

Explore the Planet Earth

地球科学前沿报道

2018 · 第1辑



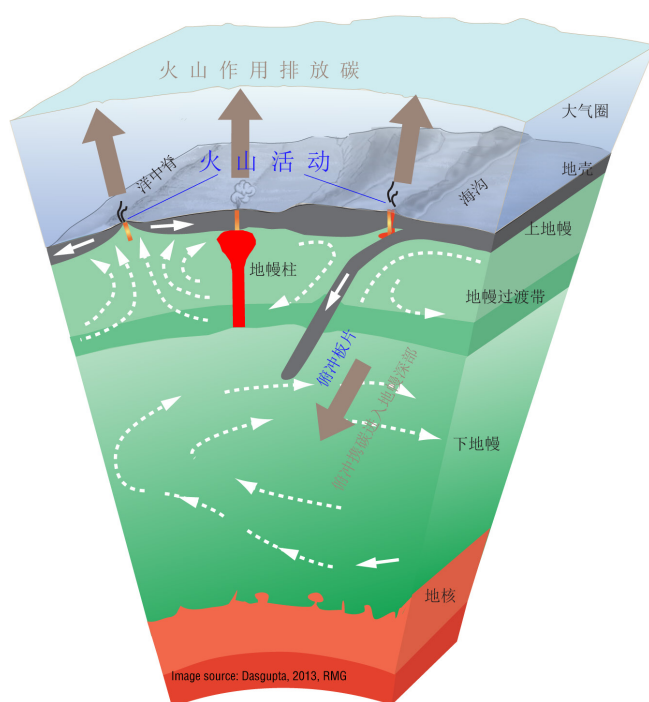
中国科学院地质与地球物理研究所
INSTITUTE OF GEOLOGY AND GEOPHYSICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院前沿科学与教育局
Bureau of Frontier Sciences and Education Chinese Academy of Sciences

地球科学前沿报道

2018 · 第 1 辑



中国科学院地质与地球物理研究所

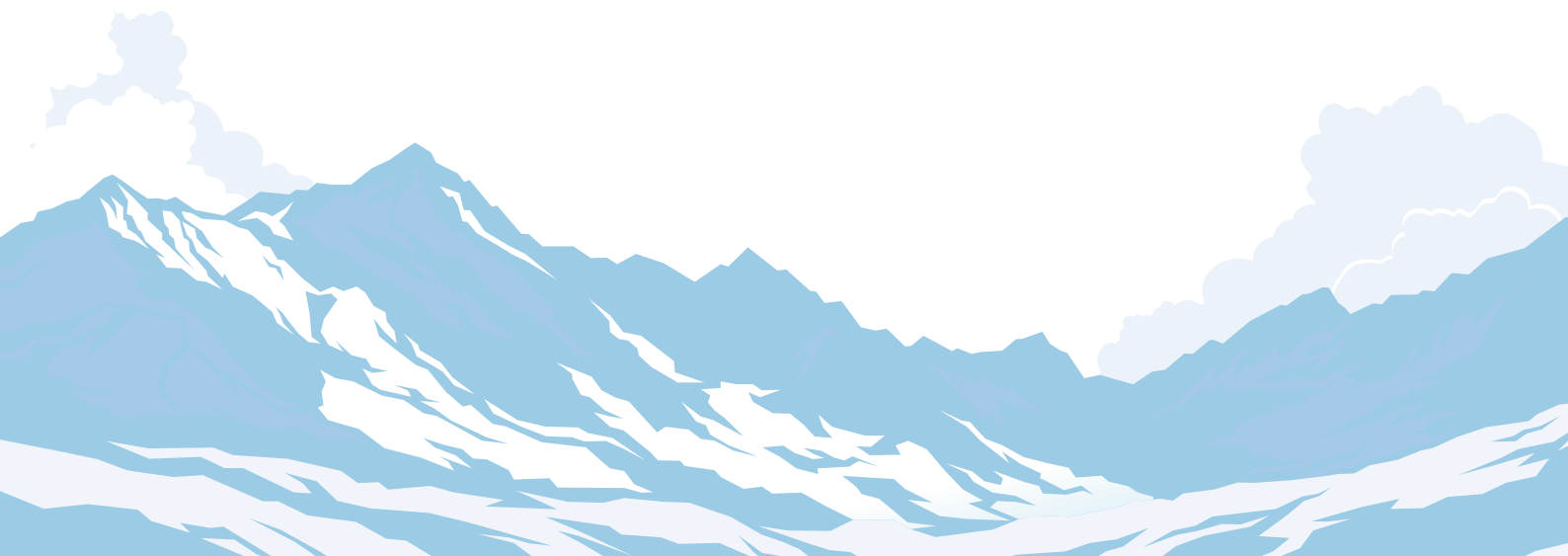
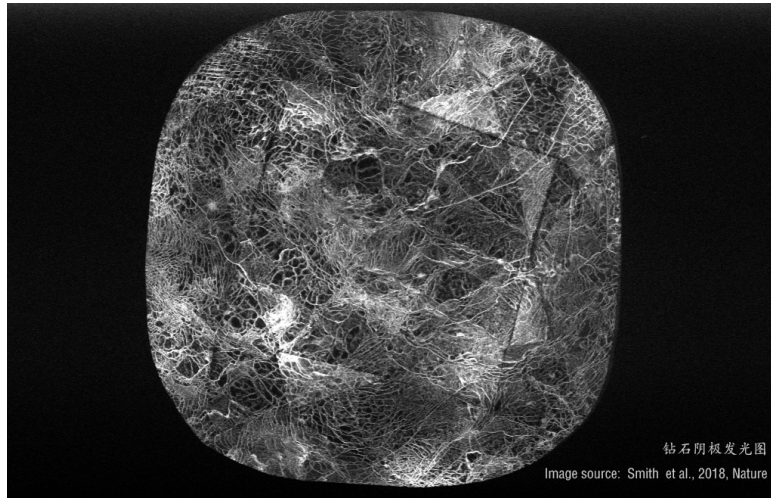
目录



1. 地球深部：组成与结构	1
Nature: 下地幔信使——超深来源的含硼天然蓝钻包裹体研究.....	2
Geology: 金刚石：你问我爱你有多深？.....	6
Nature: 花岗岩具有低的结晶温度.....	10
Nature: 熔体反应流揭示岩浆在地壳中的化学分异、冷储存和再活化机制.....	13
PNAS: 藏南印度地幔岩石圈撕裂及其指示的岩石圈强耦合.....	16
Geology: 新生代中期太平洋板块运动改变——对西北夏威夷海岭和环太平洋的意义.....	19
2. 板块俯冲	22
Geology: 无岩浆作用的俯冲起始——阿尔卑斯造山带为何缺失岩浆弧记录？.....	23
Nature Geoscience: 诱发俯冲起始的首例地质证据——对蛇绿岩研究的启示.....	26
Nature Communications: 西北太平洋地区俯冲板片含水量的控制因素.....	29
Nature: 马里亚纳俯冲带携水量估计——来自海底地震观测数据的约束.....	32
Nature Geoscience: 地幔转换带下方弱粘性层导致的俯冲板块停滞.....	35
Nature Geoscience: 平板俯冲置换大陆岩石圈地幔基底.....	37
3. 地球系统与气候变化	40
Science: 盖娅（Gaia）2.0.....	41
PNAS: 18 亿年前地球大气含氧量低.....	45

PNAS: 磁性矿物揭示中元古代湖泊氧化.....	47
PNAS: 11 亿年前光合细菌主导了海洋生态系统.....	50
Science: 古新世 - 始新世极热事件时期海洋大规模脱氧.....	53
PNAS: 人类世地球的演化路径.....	55
Nature Communications: 公元 774-775 年的强太阳活动——来自树轮 ^{14}C 的证据.....	59
Nature Geoscience: 地质过程与气候对山区生物多样性的影响.....	62
Nature Geoscience: 生物钙化作用对海洋酸化事件的响应与反馈.....	64
Geology: 火山灰静电悬浮进入电离层及其对气候的突然影响.....	67
4. 行星学	70
Nature Communications: “极光珠”的剪切阿尔芬波源 ——研究亚暴触发机制的新思路.....	71
Science: 火星生命探索——“好奇号”发现古老的火星有机物与季节性变化的甲烷.....	74
Nature Geoscience: 火星浅地表盐水氧气溶解度及其对需氧生物的启示.....	77
Science Advances: 地球和火星上的铁氧化物结核是碳酸盐和酸性水溶液 相互作用的产物.....	79
Nature Astronomy: 谷神星上的冰火山一直在活跃.....	82
Nature: 木星奇特磁场的发现暗示内部复杂的发电机效应.....	84
Science 专刊: 遨游土星内环——卡西尼号的壮丽终章.....	87
5. Never stop exploring	90
Science: 韩国最大的 Mw5.4 破坏性地震可能为诱发地震.....	91
Science: 注水井可诱发远距离地震.....	93
Geology: 岩石亚临界裂缝参数与侵蚀速率.....	95
Nature Geoscience: 下降中的内陆盆地水储量.....	97

1. 地球深部：组成与结构





Nature : 下地幔信使——超深来源的含硼天然 蓝钻包裹体研究

蓝钻是天然钻石中极为罕见和珍贵的品种，仅占开采钻石总量的0.02%。在蓝钻的结构组成中，微量的硼替代了碳元素的位置，从而形成色心，吸收

大部分超过 500 nm 的可见光，造就了蓝钻迷人的蓝色色彩。

钻石被认为是在地球深部的高温高压环境下形成的。在其晶体生长过程中，有

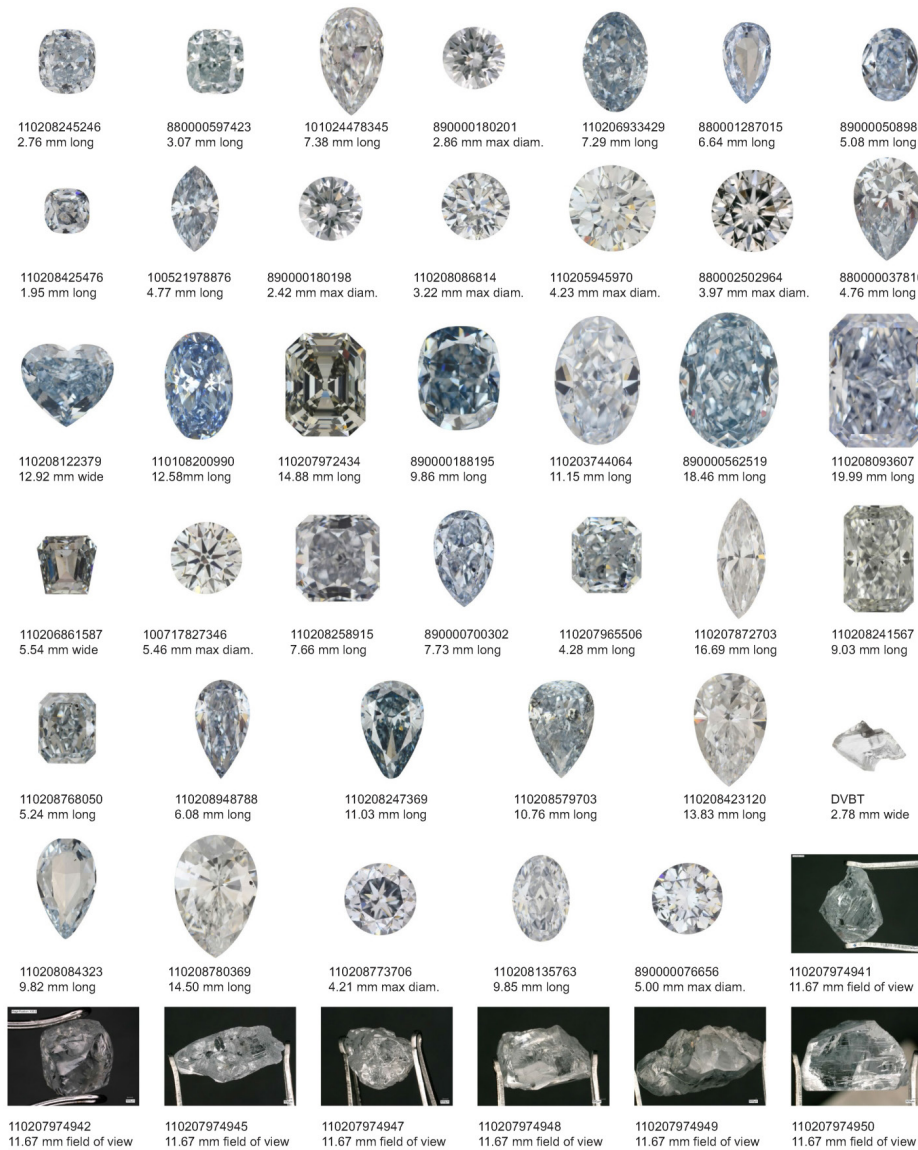


图 1 研究中挑选的部分蓝钻 (Smith et al., 2018)



Sample	Mass (carats)	Observed single- or multi-phase inclusions, interpreted as: [Ca-Pv, Ca-silicate perovskite] [Bridgmanite, Mg-silicate perovskite] [Stishovite] [CF, calcium ferrite-type phase] [Ferropericlase] [sodic majoritic garnet] †[Bridgmanite, aluminum bearing] [metallic alloy/mixture] (Mineral abbrev. in footnote)
<i>Basaltic compositional association, containing CF, Stishovite, or sodic majoritic garnet</i>		
110208245246	0.08	[Wal], [Opx + Jeffbenite + Spinel + Ilmenite], [Nepheline + Olivine + Spinel + CH ₄], [FeS + Fe-carbide + FeO]
880000597423	0.13	[Pyroxene + Spinel + Corundum + Olivine], [Coesite + trace Px + CH ₄]
101024478345	0.57	[Cpx + Opx + Jeffbenite], [Coesite], †[possible sulfide], §[small unidentified opaque], §[Calcite, in healed cracks]
890000180201	0.08	[Pyroxene + Jeffbenite], [Coesite + Kyanite]
110206933429	1.01	[Wal + Lamite], [Cpx + Jeffbenite + Spinel], [Coesite], †[possible sulfide], †[Perovskite, may be CaSiO ₃ or CaTiO ₃]
100521978876	0.13	[Wal + Lamite + Wollastonite], [Coesite]
890000180198	0.05	[Wal + Lamite], [Coesite]
880002502964	0.24	[Cpx + Jeffbenite], [Coesite], [small unidentified opaque]
880000037816	0.21	[Wal], [NaAl-pyroxene + Jeffbenite; examined with SEM-EDS], [Opx], †[possible sulfide]
<i>May associate with basaltic or peridotitic bulk compositions, not firmly categorized</i>		
110205049970	0.27	[Wal + Lamite], [Opx + Jeffbenite], †[possible sulfide]
110208086814	0.13	[Wal + Wollastonite], [Pyroxene + Jeffbenite + Spinel + Ilmenite + Olivine], [Opx + Spinel], †[possible sulfide]
100717827346	0.61	[Cpx + Opx + Spinel + Olivine] Raman clearly shows two spectrally/spatially distinct pyroxenes
110208579703	2.01	[Wal + Lamite + CH ₄], [Opx], [Unidentified opaque, magnetic + CH ₄], §[lobe of small unidentified inclusions + CH ₄ , magnetic, suspected metallic alloy]
890000188195	3.46	[Wal + Lamite + CH ₄]
890000700302	0.61	[Wal + Lamite + CH ₄ + H ₂], §[lobe of small unidentified inclusions + CH ₄ , magnetic, suspected metallic alloy]
110203744064	2.70	[Wal + CH ₄]
110208093607	24.18	[Wal + Lamite] <i>Cullinan Dream diamond, 122.52 carat rough mass</i>
890000562519	17.09	[Wal + Lamite]
110108200990	3.81	[Wal + Lamite]
110208258915	2.26	[Wal + Lamite]
110207965506	0.46	[Wal + Lamite]
110207872703	2.46	[Wal + Lamite]
110208241567	2.15	[Wal + Lamite]
110206861587	0.73	[Wal + Lamite]
110208948788	0.32	[Wal + Lamite]
110208247369	2.08	[Wal]
110207972434	10.67	[Wal]
DVBT	0.03	[Wal], §[small Fe-Ni-S inclusions, examined with SEM-EDS, in healed lobate crack]
110208423120	4.06	[Wal + Pseudowollastonite]
880001287015	0.35	[Wal + Lamite + Pseudowollastonite], [Unidentified opaque, magnetic + CH ₄ + H ₂]
890000508981	0.30	[Opx + Jeffbenite]
110208122379	6.08	[Unidentified opaque, 655 band like wüstite]
110208768050	0.42	†[possible sulfide]
110208084323	1.02	†[possible sulfide]
110208135763	1.71	[graphitic fracture rosette hides inclusion; suspected Wal or sulfide based on appearance]
110207974950	2.97	[graphitic fracture rosette hides inclusion; suspected Wal or sulfide based on appearance]
<i>Peridotitic compositional association, with fPer and/or Opx having distinctly sharp enstatite Raman spectrum and no Al-phases</i>		
110208773706	0.32	[Wal + Lamite], [Opx + CH ₄ + H ₂]
110207974945	0.78	[Wal], [Opx + Olivine + CH ₄ + H ₂ , plus weak 253+376 may be lepidocrocite γ-FeOOH], [fPer], [fPer + unidentified opaque + CH ₄], §[lobe of small unidentified inclusions + CH ₄]
110207974941	0.92	[Opx + CH ₄], [Unidentified opaque, magnetic + CH ₄ + H ₂ , suspected metallic alloy]
890000076656	0.48	[Wal + Lamite], [Opx + Olivine + CH ₄]
110207974949	2.80	[Wal + Lamite], [fPer]
110207974948	2.17	[Wal + Lamite], [fPer], §[lobe of small unidentified inclusions + CH ₄ , plus weak 253+376 may be lepidocrocite γ-FeOOH]
110208780369	5.02	[Wal + Pseudowollastonite + CH ₄], [fPer], [fPer + minor sulfate or phosphate, and sulfide phases]
110207974947	1.45	[fPer + Unidentified opaque], [graphitic fracture, inclusion nucleus not visible]
110207974942	2.31	[fPer + Unidentified opaque], §[Dolomite, in healed cracks]
110208425476	0.03	§[fPer, irregularly shaped inclusions, pervaded by healed fractures; XRD shows fPer + Olivine + nyerereite]

图2 蓝钻中的包裹体矿物组合 (Smith et al., 2018)

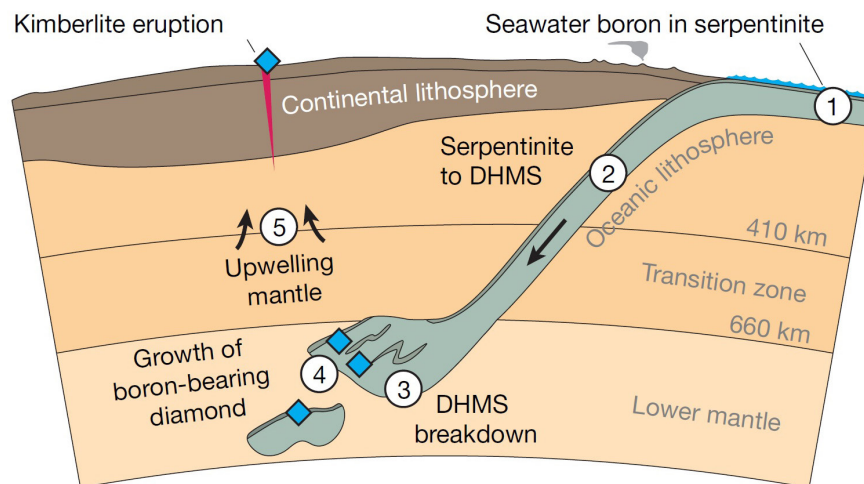


图3 IIb型钻石的形成模型 (Smith et al., 2018)



可能随机地捕获其形成环境中的部分物质，即所谓的“包裹体”。这些包裹体被封闭在钻石中，通过一系列的地质活动，跟随钻石来到地表，成为我们研究地球深部环境，了解钻石形成条件的宝贵窗口。然而，长期以来，受制于蓝钻的稀有和昂贵，极少有科学家能大量的获取蓝钻进行深入的研究，甚至从未有过有关蓝钻中深部包裹体的公开报道。

2018年8月1日，美国宝石研究所(GIA)的Evan Smith及其合作者在Nature上发文，首次报道了天然蓝钻(图1)内部包裹体的相关信息，研究结果显示天然蓝钻不但具有特殊的颜色和组成，更重要的是具有远超其它钻石的超深来源，从而为揭示下地幔的环境、壳幔物质对流和轻元素的循环等提供了重要指示。

得益于GIA在钻石分级上的领导性地位，Evan Smith及其合作者得以对两年内在GIA定级的蓝钻进行广泛地筛选，共挑出了46颗具有矿物包裹体的蓝钻，其中就包括世界上最大的浓彩蓝钻——“库里南之梦”(Cullinan Dream)。在利用拉曼光谱技术对这些钻石内的矿物包裹体进行细致分析后，史密斯等人发现，蓝钻内常见包裹体的主要矿物组合与地幔玄武岩、橄榄岩中的在深部地幔条件下形成的高压矿物组合成分极为接近，从而推测其包裹体内的矿物是相应高压矿物组合，如钙钛矿结构的硅酸钙、布里基曼石和镁铁榴石等矿物组合退变质的产物(图2)。蓝钻包裹体中独特的矿物组合与常见钻石(通常认为形成于克拉通底部约200千米范围内的)中的

包裹体具有明显的区别，指示其形成深度大于410-660千米的过渡带，甚至可能达到下地幔。为了进一步确认，史密斯等人还利用矿物包裹体内的残余压力，通过热力学手段计算了捕获条件下的压力条件，其结果也确认了这些钻石的超深来源。

硼是典型的轻元素，主要富集在地球表面，在原始地幔中的含量极低。因此，超深来源的蓝钻中硼的来源具有重要意义。Smith等人提出，硼与水在俯冲板块中的行为类似，可以进入蛇纹石化洋壳中的矿物晶格，并随着板块俯冲进入深部地幔(图3)。考虑到相当数量的蓝钻包裹体中都检测到了 $\text{CH}_4 \pm \text{H}_2$ 的流体成分，这是C-O-H流体体系(Zhang and Duan, 2009)在还原条件下的典型成分特征，蓝钻的形成与还原含水流体相之间可能具有密切的关系。含硼蓝钻的研究为轻元素在地球不同圈层之间的地球化学循环提供了重要参考。

值得注意的是，随着地球科学研究的不断深入，科学家们越来越认识到地球的不同圈层是一个有机的整体。一些传统上认为富集在地表的轻元素，逐渐被发现可能在地球深部过程中起到了重要作用，如过渡带矿物林伍德石中被发现存在大量的水(Pearson et al., 2014)，沼铁矿可能携带水进入下地幔并释放出氢气(Hu et al., 2017)，地球深部碳的总量可能远超人们关注的地表二氧化碳含量变化相关通量总和(Kelemen and Manning, 2015)等。超深来源蓝钻中包裹体的发现和进一步研究将为我们深入理解地球各圈层之间的相互作用及轻元素的循环提供重要参考。



主要参考文献

- Hu Q, Kim D Y, Liu J, et al. Dehydrogenation of goethite in Earth' s deep lower mantle[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017: 201620644. ([原文链接](#))
- Kelemen P B, Manning C E. Reevaluating carbon fluxes in subduction zones, what goes down, mostly comes up[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015: 201507889. ([原文链接](#))
- Pearson D G, Brenker F E, Nestola F, et al. Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond[J]. Nature, 2014, 507(7491): 221-224. ([原文链接](#))
- Smith E M, Shirey S B, Richardson S H et al. Blue boron-bearing diamonds from Earth' s lower mantle[J]. Nature, 2018, 560(7716): 84-87. ([原文链接](#))
- Zhang C and Duan Z. A model for C–O–H fluid in the Earth' s mantle[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, 73(7): 2089-2102. ([原文链接](#))

(撰稿：吕霖，[张驰](#)/地球与行星室)



Geology : 金刚石 : 你问我爱你有有多深?

钻石恒久远，一颗永流传，这句深入人心的广告，让钻石变得既神秘又高贵。自然界很少有矿物能够像钻石那样家喻户晓，又人见人爱。除了由于其折射率高、色散性能强等优点被作为奢侈的工艺品外，金刚石也由于其硬度高、热导性好等性能而被广泛应用于工业界。金刚石是由碳元素组成，是碳元素在高压下的同素异形体，通常认为金刚石在地幔中的稳定深度应该超过 120 公里，只能由少数来源于深部地幔的碱性岩浆（如金伯利岩、钾镁煌斑岩）携带至地表。金刚石在榴辉岩等变质岩中也有报道，表明地壳岩石曾经俯冲到深部发生超高压变质后发生折返。我国科学家在 20 世纪 80 年代就从西藏罗布莎蛇绿岩的铬铁矿中通过人工重砂方法

分选出金刚石，但一直被怀疑是选择过程中可能发生混染而未得到国际学术界的承认。随着金刚石在全球其它蛇绿岩铬铁矿中的发现，尤其在薄片上原位金刚石的发现，使得人们相信蛇绿岩中的金刚石不是由于混染造成的。除了金刚石外，其它一些超高压矿物（如柯石英）也在铬铁矿中陆续被发现和报道（Yang et al., 2007）。此外，罗布莎铬铁矿中的出溶矿物以及显微结构也表明它们曾经历 13 GPa 以上的超高压变质过程（Griffin et al., 2016）。而与这些超高压矿物相伴生的还有一些只有在超还原条件下才能形成的矿物，如碳化硅、方铁矿和自然铁等。通过与实验岩石学结果对比，科学家认为这些超高压矿物和超还原矿物可能来自 440 公里深处的上、下地幔转换

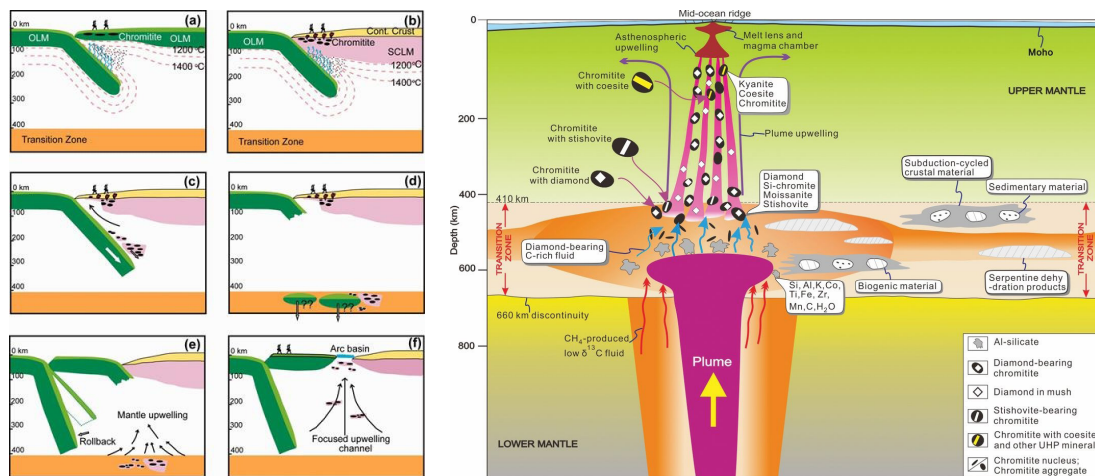


图 1 蛇绿岩型金刚石的自上而下（左）和自下而上（右）两种机制

自上而下机制认为铬铁矿在浅部形成后俯冲到地幔转换带后发生超高压变质，然后携带超高压和超还原矿物折返至地表（Griffin et al., 2016）。自下而上机制则强调铬铁矿和超高压、超还原矿物一直位于地幔转换带，是被地幔柱携带至浅部（Yang et al., 2014）

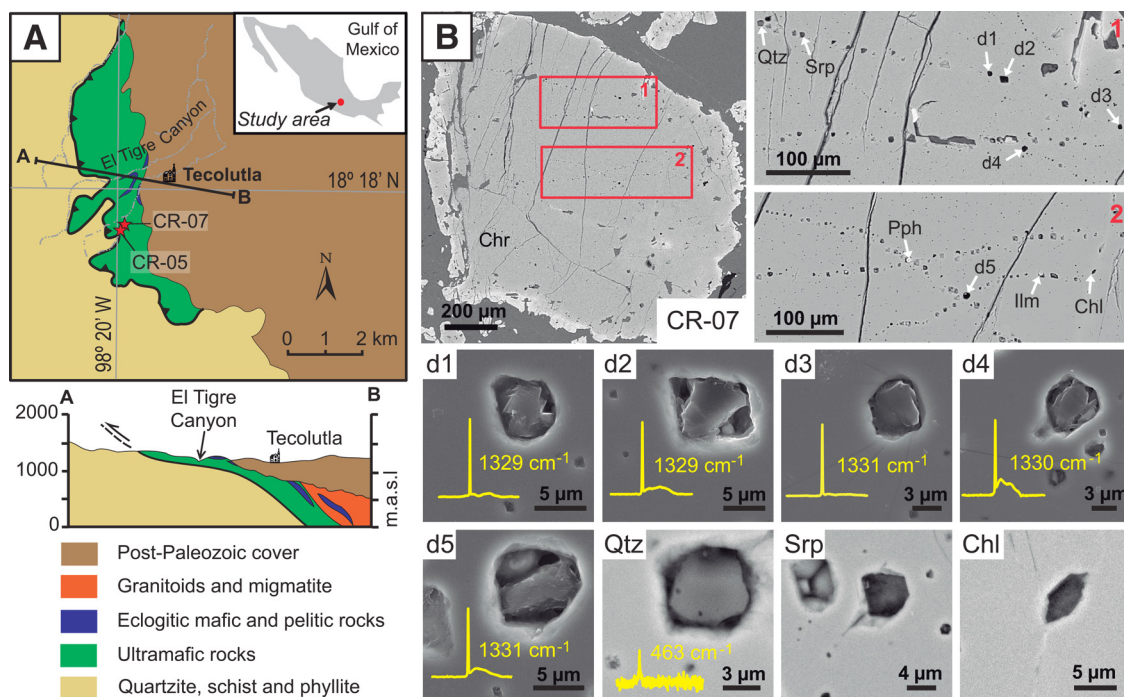


图2 墨西哥 Tehuizingo 蛇绿岩及铬铁矿的显微结构

带 (Griffin et al., 2016)。这些认识对传统的蛇绿岩成因模型提出了很大的挑战。蛇绿岩代表了残存的古大洋岩石圈，是软流圈在洋中脊发生部分熔融的产物。一般认为，软流圈地幔在洋脊下方熔融的深度通常不超过 60 公里。目前，对于这些超高压矿物如何从地幔转换带被携带至浅部后又随蛇绿岩构造就位于地表存在自上而下和自下而上两种不同的机制 (图 1)，前者强调铬铁矿在浅部形成后发生深俯冲至地幔转换带，包裹超高压和超还原矿物后又发生快速折返 (Griffin et al., 2016)，而后者则强调，来自更深处 (有可能是核幔边界) 的地幔柱上升穿过地幔转换带时，裹挟这些含有超高压和超还原矿物的铬铁矿至洋中脊下方 (Yang et al., 2014)。无论是哪种机制，如果这些超高压和超还原矿物的确被证实来自地幔转换带，那无疑极具科学意义，因为这些蛇绿岩有可能代表了来自地幔转换带

的真实样品，它们是我们了解与窥探深部地幔为数不多的窗口。

然而，对于蛇绿岩中金刚石形成的压力及其形成机制一直争议不断，尤其是已有的理论与实验研究都表明超基性在低压条件下蛇纹岩化蚀变过程中可以形成金刚石 (Simakov et al., 2018)。Farré-de-Pablo 等 (2018) 在 *Geology* 上报了蛇绿岩中金刚石可能形成于低压条件下的实例。他们对墨西哥 Tehuizingo 蛇绿岩中铬铁矿开展了详细的矿物学与地球化学研究，发现铬铁矿的化学成分明显具有边结构。铬铁矿的边部发生明显蚀变呈海绵结构，并含有大量的绿泥石和蛇纹石包裹体，而核部相对新鲜未发生蚀变，但发育有愈合的裂隙。铬铁矿的核部相对边部具有更低的 Cr# 和 Fe³⁺ 值，而核部裂隙边缘的铬铁矿成分与边部蚀变的铬铁矿类似。在核部已愈合的裂隙中，发现有原位的金刚石 (直径 1-8

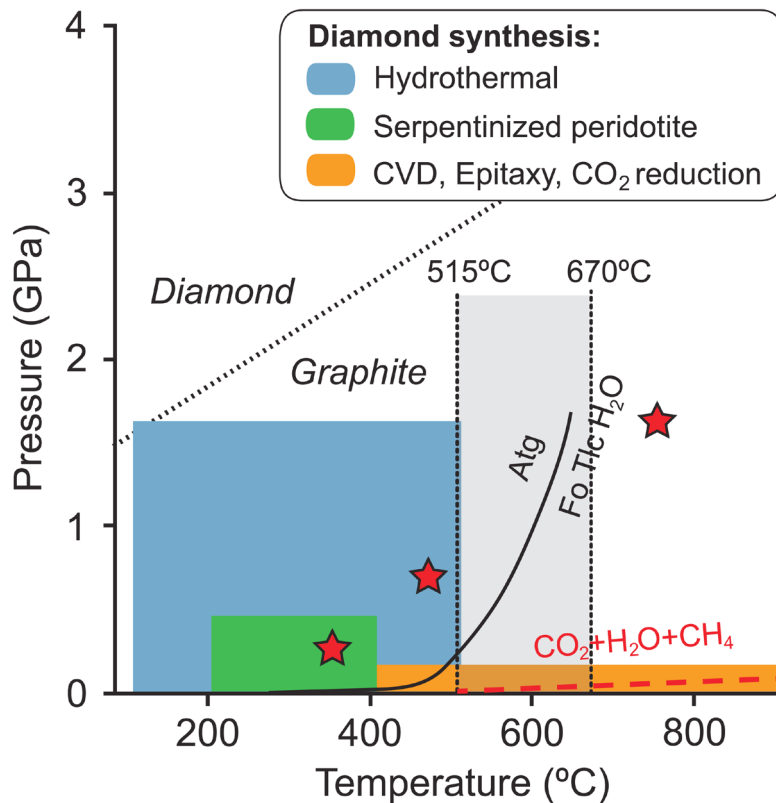


图 3 石墨与金刚石平衡转变的温压曲线

浅蓝色区域为在热液条件下合成金刚石的温压范围，橙色区域为通过化学气相沉积法合成金刚石的温压范围，绿色区域则是自然界蛇纹石化橄榄岩中金刚石形成的温压范围。三个红五角星代表了 Tehuizingo 橄榄岩遭受退变质过程中的峰期温压以及两个低温蚀变阶段

um)，同时还伴生有蛇纹石、绿泥石和石英等低温蚀变矿物（图 2）。作者利用 *Perple_X* 温压软件模拟获得核部裂隙的蚀变温度为 $670\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $515\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而蚀变边的形成温度为 $410\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $340\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。作者提出 Tehuizingo 铬铁矿中的金刚石形成于低压条件下（即石墨稳定区）橄榄岩的低温退变质过程（图 3），即蛇纹石化过程中有富 CH_4 、 H_2 的还原性流体参与，而水岩反应导致原本碳不饱和的 C-O-H 流体最终达到碳饱和，从而结晶出金刚石。

值得指出的，除了超基性低温蚀变成因外，铬铁矿中金刚石的形成还被认为可能与铬铁矿出露至地表时遭受到的闪电雷

击活动过程有关，因为 Ballhaus et al.(2017) 对玄武岩样品在 9900 伏条件下开展了放电实验，发现超高压和超还原矿物可以从瞬间温度高达 6000 K 的等离子体中沉淀出来，从而提出闪电过程可以导致在电导率较好的铬铁矿中发生瞬间高温汽化而形成超还原矿物。然而，该实验结果与实际在罗布莎铬铁矿中观察到的超高压、超还原矿物的实际情况之间还存在一定的出入，能否用来直接解释金刚石的成因还值得商榷（Griffin et al., 2018；Yang et al., 2018；Ballhaus et al., 2018a, 2018b）。很显然，金刚石的深部来源与浅部成因之间还存在很大的争议，值得未来开展更加深入的研究。



主要参考文献

- Ballhaus C, Wirth R, Fonseca R O C, et al. Ultra-high pressure and ultra-reduced minerals in ophiolites may form by lightning strikes[J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 2017, 5: 42-46. ([原文链接](#))
- Ballhaus C, Fonseca R O C, Bragagni A. Reply to Comment on “Ultra-high pressure and ultra-reduced minerals in ophiolites may form by lightning strikes” by Griffin et al., 2018: No evidence for transition zone metamorphism in the Luobusa ophiolite[J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 2018, 7:3-4. ([原文链接](#))
- Ballhaus C, Blanchard H, Fonseca R O C, et al. Reply 2 to comment on “Ultra-high pressure and ultra-reduced minerals in ophiolites may form by lightning strikes” [J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 2018, 8: 8-10. ([原文链接](#))
- Farré-de-Pablo J, Proenza J A, González-Jiménez J M, et al. A shallow origin for diamonds in ophiolitic chromitites[J]. *Geology*, 2018, 47(1): 75-78. ([原文链接](#))
- Griffin W L, Afonso J C, Belousova E A, et al. Mantle recycling: transition zone metamorphism of Tibetan ophiolitic peridotites and its tectonic implications[J]. *Journal of Petrology*, 2016, 57(4): 655-684. ([原文链接](#))
- Griffin W L, Howell D, Gonzalez-Jimenez J M, et al. Comment on “Ultra-high pressure and ultra-reduced minerals in ophiolites may form by lightning strikes” [J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 2018, 7:1-2. ([原文链接](#))
- Simakov S K. Nano- and micron-sized diamond genesis in nature: An overview[J]. *Geoscience Frontiers*, 2018, 9(6): 1849-1858. ([原文链接](#))
- Yang J S, Dobrzhinetskaya L, Bai W J, et al. Diamond- and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Geology*, 2007, 35(10): 875-878. ([原文链接](#))
- Yang J S, Robinson P T, Dilek Y. Diamonds in ophiolites[J]. *Elements*, 2014, 10(2): 127-130. ([原文链接](#))
- Yang J S, Trumbull R B, Robinson P T, et al. Comment 2 on “Ultra-high pressure and ultra-reduced minerals in ophiolites may form by lightning strikes” [J] *Geochemical Perspectives Letters*, 2018, 8:6-7. ([原文链接](#))

(撰稿：[刘传周](#) / 岩石圈室)



Nature : 花岗岩具有低的结晶温度

花岗岩是大陆地壳的重要岩石组成，也是地球区别于太阳系内其它行星的岩石学标志，由于能够反映地壳、地幔物质运动中能量和流体的传输方式与转化过程，花岗岩中蕴含了岩浆、构造、成矿、壳幔演化和大陆地壳生长等多方面信息。作为花岗岩形成中最为重要的物理条件，结晶温度是花岗岩研究一个重要而基础科学问题。目前，流行观点均认为花岗岩最低的结晶温度为 650 °C-700 °C，这一温度范围称为花岗岩湿固相线温度，

即低于此温度时花岗岩完全结晶。但是花岗岩中很多矿物记录的温度却低于 650 °C，大多数研究者将这些温度解释为变质再平衡温度或热液改造温度。北美科迪勒拉地区的内华达岩基 (Sierra Nevada Batholith) 是国际花岗岩研究最为著名的地区之一，其中位于其东部面积约 1100 km² 的晚白垩纪 Tuolumne 侵入岩套 (Tuolumne Intrusive Suite) 研究尤为详细，研究历史已逾半个世纪 (Bateman and Eaton, 1967)。Tuolumne 侵入岩套结晶时间跨度超过 1000 万年，这一

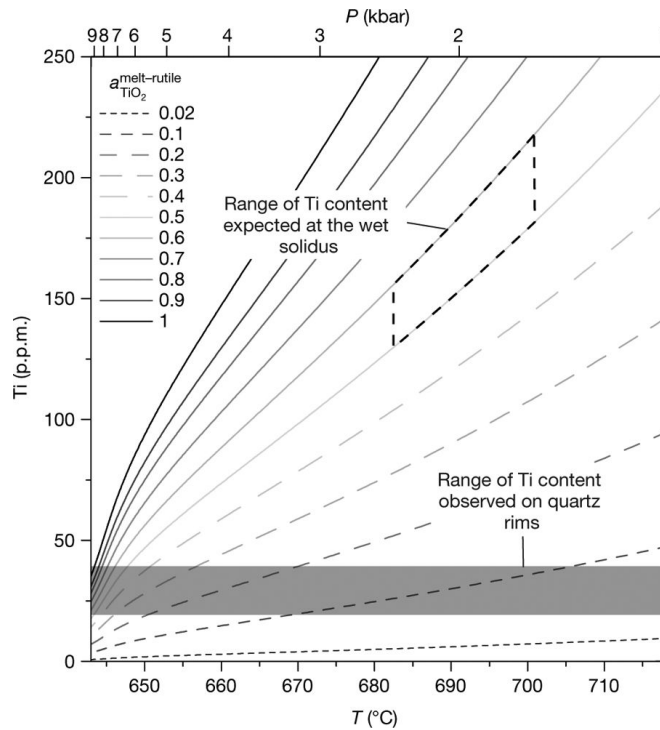


图 1 花岗岩湿固相线下预测及观察到的石英结晶温度。

曲线代表不同 TiO₂ 活度下的花岗岩固相线。如果 Tuolumne 花岗岩中石英结晶于花岗岩的固相线温度 ($a_{\text{TiO}_2}^{\text{melt-rutile}}=0.6-0.5$, 压力 $P=1.6-2.4$ kbar), 此时 Ti 含量需要达到 132-219 ppm (多边形虚线框)。实际观察到石英边部的 Ti 含量范围是 20-40 ppm (深灰色区域)。这一含量范围计算的石英晶体结晶生长的温度低于固相线温度最高可达 227°C。

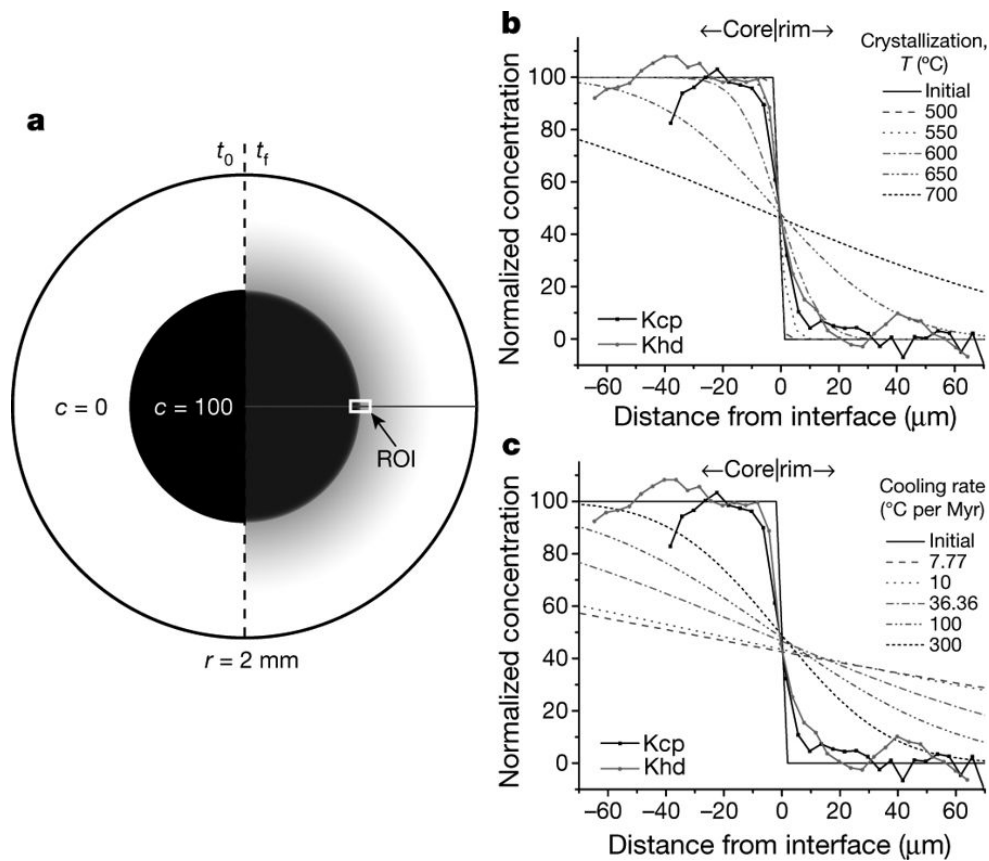


图2 石英球体中Ti含量扩散示意图(a)及理论计算Ti含量扩散与天然晶体实测剖面Ti含量比较图(b, c)。

图中假设石英球体中心扩散前的Ti含量为100 ppm, 边部为0 ppm。图b中石英中Ti扩散时岩浆冷却速率为36.36 °C Myr⁻¹, 图c显示由湿固相线温度(690-700 °C)岩浆不同冷却速率下石英中Ti含量变化, 石英Ti含量剖面显示, 即使极快速的冷却速率, 近固相线的温度也会因高温而难以保留 Tuolumne 花岗岩中实际观测到的石英Ti含量分带。

漫长的结晶进程造就的巨型侵入岩体实际上是无数小规模岩浆不断叠加侵位后形成的, 而这些侵入体中的花岗岩之前一直被认为属于“高温”花岗岩。

作为侵入岩, 花岗岩缺乏对温度灵敏的交换反应和冷却过程中再平衡的合适矿物对, 因此目前没有较好的温度计来限定花岗岩的结晶温度。花岗岩中最常用的温度计—全岩锆石饱和温度计仅能计算出富含或贫继承锆石花岗岩结晶温度的上限或下限。如 Tuolumne 侵入岩套花岗岩的锆石饱和温度计估算的温度为 736 °C-755 °C, 由于花岗岩中缺乏继承锆石, 按照锆石饱和温度计的原理, 这些花岗岩的结晶温度

应该更高。

Ti⁴⁺ 可以通过置换 Si⁴⁺ 系统地进入石英晶格, 这种置换行为强烈的依赖于温度, 因此石英中的Ti含量可以作为地质温度计使用, Wark and Watson (2006) 率先实验校正了这一温度计。这种温度计需要通过与石英共存的金红石进行校准, 即需要知道 TiO₂ 在金红石中的活度: $\alpha_{\text{TiO}_2}^{\text{melt-rutile}}$ 。但是由于花岗岩中 $\alpha_{\text{TiO}_2}^{\text{melt-rutile}}$ 难以准确确定, 以及受到压力等因素的影响, 不同学者给出的石英Ti含量温度计的校正方案存在较大差异。

2018年6月27日 Nature 杂志刊出 Ackerson et al. (2018) 的论文, 文中首次将石英中Ti温度计联合扩散模拟计算应用于



Tuolumne 侵入岩套花岗岩研究 (图 1, 图 2)。在高分辨率阴极发光成像基础上, 利用石英 Ti 温度计, 二长石温度计以及扩散模拟计算显示出绝大多数石英和长石结晶温度低于传统的湿固相线约 120 °C-230 °C, 即 Tuolumne 侵入岩套花岗岩岩浆结晶温度仅为 474 °C-561 °C。矿物记录的低温应为花岗岩结晶温度而并非变质再平衡温度或热液改造温度。

花岗岩具有低的结晶温度这一现象的潜在意义是: (1) 低的结晶温度影响岩浆累积速率, 进而影响现今岩浆体系的活动 - 间歇节律 (Coleman et al., 2016), 改变现有对于花岗岩 - 火山 - 矿产相互关系的认识, 因

为火山系统属于高温体系, 而热液斑岩矿床系统属于低温体系, 这意味着只有火山爆发的岩浆“活动”时期, 岩浆才会处于短暂的高温状态, 而持久的“间歇”时期, 滞留于岩浆房中的岩浆会长期处于大家认为的湿固相线之下的低温状态, 并规模成矿; (2) 低的结晶温度产生低的地壳热流值, 进而影响地壳的流变学性质, 由于高估了地壳热流总量, 我们对于地球早期大陆地壳生长方式的认知可能需要修正, 例如有学者就提出最早的大陆地壳可能形成于类似于现今冰岛的构造背景, 即衍生于地幔岩浆上涌形成的大洋高原环境 (Reimink et al., 2014)。

主要参考文献

- Ackerson M R, Mysen B O, Tailby N D, et al. Low-temperature crystallization of granites and the implications for crustal magmatism[J]. *Nature*, 2018, 559:94-97. ([原文链接](#))
- Bateman P C and Eaton J P. Sierra Nevada Batholith: The batholith was generated within a synclinorium[J]. *Science*, 1967, 158(3807): 1407-1417. ([原文链接](#))
- Coleman D S, Mills R D, Zimmerer M J. The pace of plutonism[J]. *Elements*, 2016, 12(2): 97-102. ([原文链接](#))
- Reimink J R, Chacko T, Stern R A, et al. Earth's earliest evolved crust generated in an Iceland-like setting[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(7): 529. ([原文链接](#))
- Wark D A and Watson E B. TitaniQ: A titanium-in-quartz geothermometer[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 152(6): 743-754. ([原文链接](#))

(撰稿: [刘小驰](#) / 岩石圈室)



Nature : 熔体反应流揭示岩浆在地壳中的化学分异、冷储存和再活化机制

岩浆在大陆地壳中的储存与化学分异是火成岩与火山学研究的重要问题。一个多世纪以来，“高熔体比例岩浆房”是支撑地壳岩浆作用研究的主体模型，模型认为，在地壳不同深度上，岩浆储库的规模随着深部岩墙或岩脉的侵入而逐渐增加，要求必须存在高熔体比例的岩浆房才能喷发出低结晶程度的岩浆（Cashman et al., 2017）。然而，地球物理观测结果表明，即使是活火山的岩浆房，其熔体比例也很低；晶体化学研究进一步证实，岩浆的长期储存过程发生在低温甚至亚固相线温度条件下。这些发现表明，高熔体比例的岩浆储存状态可能只是一个短暂的过程。但是，地质年代学证据显示地壳岩浆储库的存在时间可能很长，跨度从数十万年到数百万年不等。现有的岩浆储存与分异模型

很难解释上述相互矛盾的观测结果。

针对这一问题，伦敦帝国理工学院与布里斯托大学的学者近期在 Nature 上发表最新研究成果，他们利用数值模拟方法，研究了中基性岩浆反复侵入至中 - 下地壳时岩浆的储存与化学分异过程，同时模拟了以传导和对流方式进行的热量传递，和以密度较轻的熔体反应流（reactive melt flow）方式进行的物质传递。尽管该模型大大简化了自然系统中复杂的相演变行为，但可以有效地捕捉岩浆成分对熔融的重要影响及其与熔体比例、渗透率等参数之间复杂的非线性关系。

模拟结果显示，每一次岩浆侵入后，熔体比例会迅速下降为零，因此不存在持续的岩浆储库。尽管如此，侵入体在凝固之前已经发生了化学分异，富含不相容元

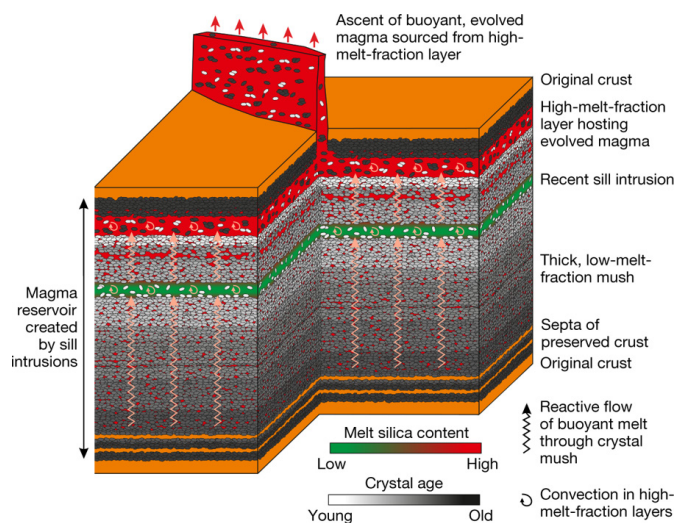


图 1 低密度熔体反应流模式揭示中 - 下地壳岩浆储库结构成因



素的演化熔体与难熔亏损的晶体分别聚集在侵入体的顶部和底部。侵入体的快速结晶特征使其滞留在侵位位置，但岩浆演化引起的成分差异会导致后期岩浆侵位深度逐渐增加，这是岩浆储库的“孵化阶段”。

当岩浆连续侵入导致熔体比例大于零时，“孵化期”结束，逐步形成岩浆储库。这个阶段熔体是连续存在的，但除了每次岩浆侵入后的一小段时间外，熔体的比例仍然很低。此时的岩浆储库由“晶粥体”（mush）构成，而不是具有高熔体比例的岩浆房。新的侵入事件发生后，低密度熔体会穿过“晶粥体”并最终聚集在储库顶部（图 1）。低密度熔体在上升过程中与“晶粥体”发生反应，一方面会使熔体成分发生演化，另一方面会逐步减弱或消除早期侵入事件中岩浆演化引起的储库成分差异，因此后期岩浆的侵位深度也将随着岩浆向上运移而减小。这是岩浆储库的“生长阶段”。

当熔体在围岩固相等温线之下集聚并形成高熔体比例（一般大于 0.7）储层时，“生长阶段”结束。该熔体富集层充满了经过化学分异的长英质岩浆，厚度可达数百米，而且这些低密度岩浆很容易脱离这一储层，从而形成较浅的侵入体或者直接喷出地表（图 1）。由于存在时间很短暂且厚度很薄，地球物理探测很难对这一储层进行成像。一旦岩浆脱离该储层，一个新的高熔体比例储层随后会以同样的机制形成，这是岩浆储库的“活跃阶段”（Cooper and Kent, 2014）。这一阶段中，高熔体比例储层形成于温度较低的岩浆储库顶部，而不是温度最高的区域。这是对熔体反应流引起岩浆成分变化的响应，而非简单地受温度控制。同时，这一储层的晶体含量大约为 10%（图 2a），这些晶体在岩浆形成之前就已经存在，因为它们很可能来自岩浆储库顶部早期形成的侵入体。

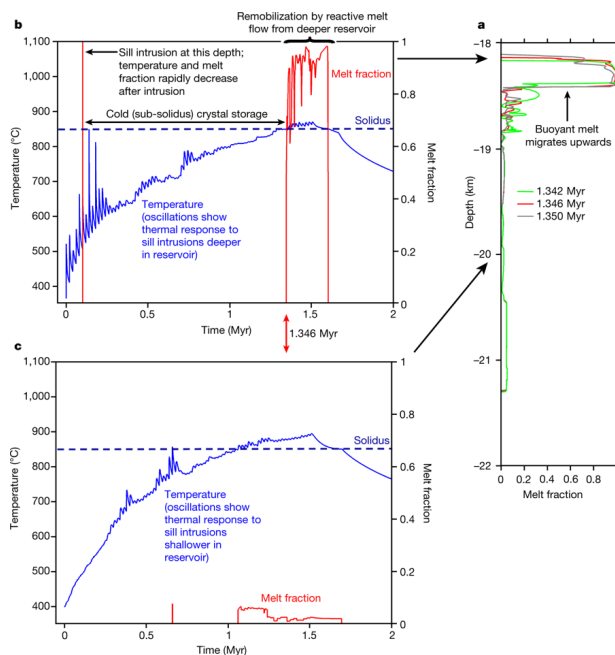


图 2 岩浆的冷储存和快速再活化机制

a. 三个不同时间熔体比例与深度关系的快照；b. 18.2 km 处温度及熔体比例与时间的关系；c. 20 km 处温度及熔体比例与时间的关系



新的侵入事件结束后，熔体反应流在温度高于围岩固相线的区域继续进行，但岩浆储库总体处于冷却的状态，这一阶段被称为“渐衰阶段”，直至“晶粥体”完全凝固。

模拟结果表明：当温度超过围岩固相线后，上升的熔体反应流会在几百年之内形成高熔体比例储层，并在其中混入了来自早期侵入体的相对古老的晶体（该模型条件下给出的结果为1~1.4 Ma）。这些外来晶体与寄主岩浆的年龄差代表早期岩浆侵位事件与晚期熔体快速聚集（以及后续喷发）之间的时间差（图2b），解释了一些年轻长英质岩浆携带古老外来晶体的地质现象（Rubin et al., 2017），反映了岩浆在地壳中的冷储存和快速活化机制（图2）。此外，熔体反应流模型揭示的岩浆储库成分差异性还有助于理解“双峰式”火山的岩浆成因，即，侵位后短时间内存在的镁铁

质岩浆与高熔体比例储层中的长英质岩浆都能够喷发，而不是中性岩浆。同时，该模型给出了已固结储库的岩浆不相容元素垂向分布模式，底部记录了“孵化期”多次侵入岩浆分异事件导致的不相容元素含量突变特征；中上部，元素含量整体平坦，但比初始值亏损，代表了熔体的抽取过程；而顶部不相容元素则相对富集，代表了“生长期”和“活跃期”熔体积累的结果，这与实际剖面观测的情况基本一致（Voshage et al., 1990）。

该文章认为，控制大陆地壳中岩浆储存、积累及化学分异的主要机制是低熔体比例岩浆储库中的熔体反应流，而非传统的高熔体比例状态下的结晶分异作用。这一认识为活火山监测、壳内岩浆房的形成以及双峰式岩浆系列成因提供了新的研究思路。

主要参考文献

- Cashman K V, Sparks R S J, Blundy J D. Vertically extensive and unstable magmatic systems: a unified view of igneous processes[J]. *Science*, 2017, 355(6331): eaag3055. ([原文链接](#))
- Cooper K M, Kent A J R. Rapid remobilization of magmatic crystals kept in cold storage[J]. *Nature*, 2014, 506(7489): 480-483. ([原文链接](#))
- Jackson M D, Blundy J, Sparks R S J. Chemical differentiation, cold storage and remobilization of magma in the Earth's crust[J]. *Nature*, 2018, 564: 405-409. ([原文链接](#))
- Rubin A E, Cooper K M, Till C B, et al. Rapid cooling and cold storage in a silicic magma reservoir recorded in individual crystals[J]. *Science*, 2017, 356(6343): 1154-1156. ([原文链接](#))
- Voshage H, Hofmann A W, Mazzucchelli M, et al. Isotopic evidence from the Ivrea Zone for a hybrid lower crust formed by magmatic underplating[J]. *Nature*, 1990, 347(6295): 731-736. ([原文链接](#))

（撰稿：赵文斌，张茂亮 / 新生代室）



PNAS : 藏南印度地幔岩石圈撕裂及其指示的岩石圈强耦合

大约 65Ma 以来, 印度板块与欧亚板块发生完全的陆陆碰撞, 印度板块俯冲于青藏高原之下, 并持续向北运动, 在持续汇聚挤压作用下, 形成了巨厚的地壳和平均海拔 5000 米的青藏高原。通过近年来大量的地质、地球化学和地球物理研究, 国内外学者取得了一系列关于高原演化的重要认识, 比如青藏高原的隆升是多期次完成的、高原中下地壳可能发育部分熔融层形成物质流动通道、高原下方岩石圈结构存在显著东西向差异等。

青藏高原的深部岩石圈结构特征可以用来约束高原的演化过程和隆升机制, 地震波因为穿透地幔深处, 携带了深部结构信息, 从而成为探测地壳和上地幔结构的最有效信号。通常有两种方法来获取必需的地震波信号: (1) 最好的办法是建立覆盖整个青藏高原的观测台网, 保证多种地震波信号覆盖整个青藏高原深部, 从而获

得可靠的高分辨率深部结构图像; (2) 或者使用某些特殊的地震波信号, 如 Pn 波(图 1)、面波等, 它们可以沿特定深度在地下传播, 通过周边台站接收就可以对高原内部深部结构形成比较均匀的信号覆盖, 但只能获得某些深度且分辨率比较受限的深部结构图像。20 世纪 90 年代前, 对青藏高原深部结构的了解主要来自第二种方法, 以及为数很少的反射地震探测, 近 30 年来虽然开展了大量流动地震观测和大地电磁观测, 但由于青藏高原地域宽广, 大部分地区尤其是自然条件极为恶劣的藏北, 仍缺乏足够的观测数据。要对整个青藏高原的岩石圈结构进行整体约束, 还主要依赖于上述第二种方法, 即使用 Pn 波、面波等可以覆盖整个高原的特殊地震波信号。而应用 Pn 波开展青藏高原深部结构成像研究存在多个关键技术问题: (1) 现有大量地震目录数据和流动观测数据的有效整合; (2)

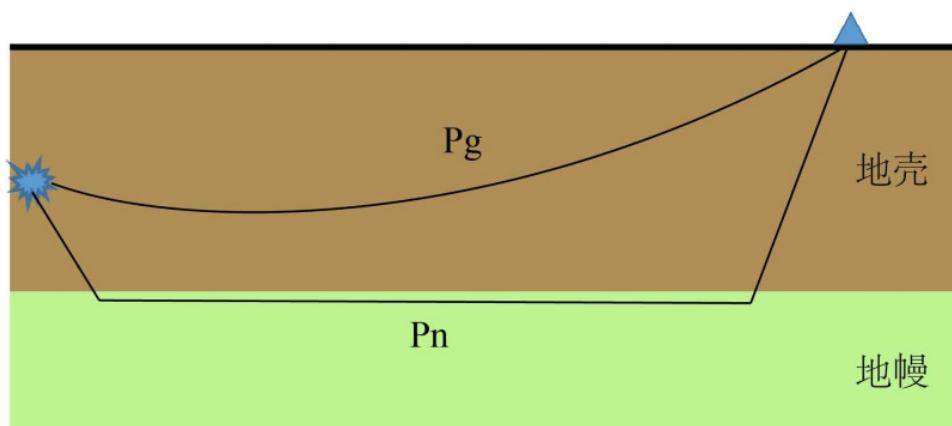


图 1 Pn 波为主要沿上地幔顶部传播的地震波, 这与壳内传播的 Pg 波不同

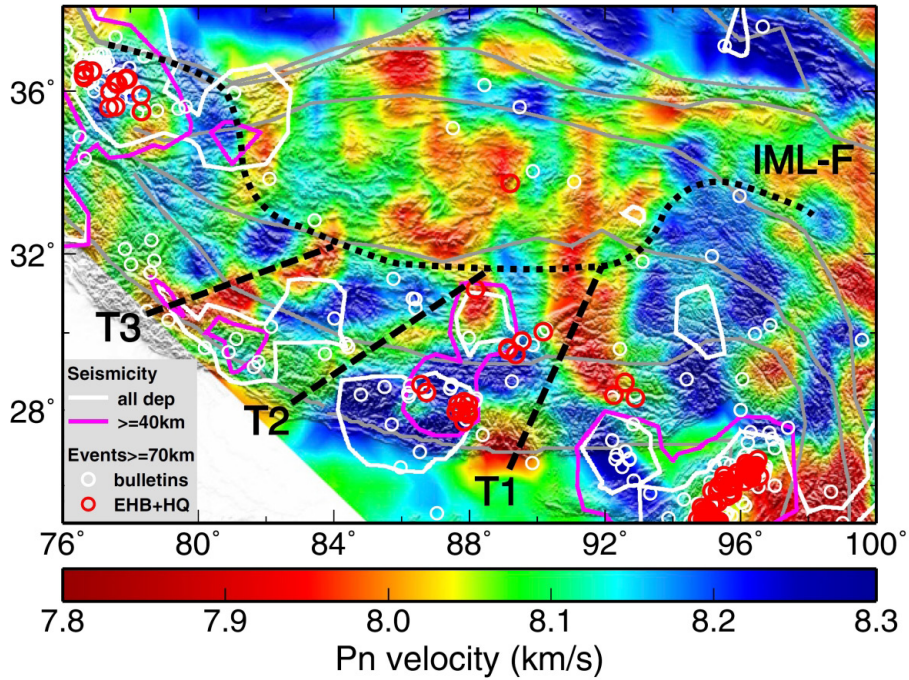


图 2 青藏高原的上地幔顶部 P 波速度图像

图中 T1、T2、T3 标明文中所发现的三处 Pn 波低速区，低速区的速度较周围低约 0.3km/s

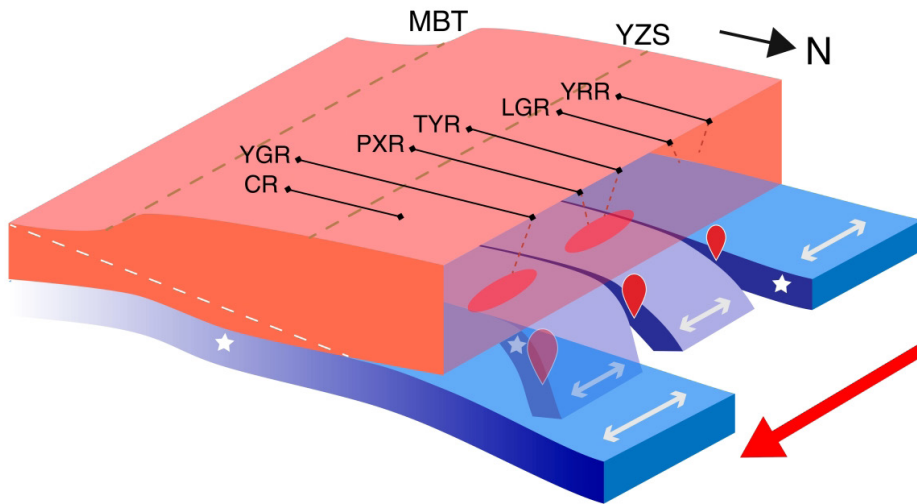


图 3 藏南印度岩石圈地幔撕裂及地壳（红色）和地幔（蓝色）耦合卡通图

白色虚线为俯冲印度地壳和上覆喜马拉雅造山增生楔及青藏高原地壳之间的边界。MBT: 主边界逆冲断裂；YZS: 雅鲁藏布江缝合带；CR: 错那裂谷；YGR: 亚东-谷露裂谷；PXR: 朋曲-申扎裂谷；TYR: 当惹雍错裂谷；LGR: 隆格尔裂谷；YRR: 亚热裂谷

Pn 波传播过程中的各向异性影响评估；(3) 地壳厚度横向变化对成像结果的影响等。

美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校 (UIUC) 的李江涛和宋晓东于 2018 年

8 月 14 日在 PNAS 上发表了青藏高原岩石圈地幔结构的最新研究成果 (Li and Song, 2018)。他们收集多个地震目录并人工拾取大量 Pn 波信号，整合成了目前青藏高原深



部结构成像最完整的 Pn 波走时数据库，在成像过程中同时考虑了 Pn 波各向异性对结果的影响，由此获得了青藏高原上地幔顶部的 P 波速度分布特征（图 2），他们的结果较前人覆盖范围更广，并具有更高的分辨率。研究显示，青藏高原南部上地幔顶部存在三条显著低速异常带，结合早前瑞利面波层析成像所获得的 S 波速度结构，他们认为三处低速异常带指示印度岩石圈地幔撕裂为不同俯冲角度和向北延伸极限的四部分：西部和东部俯冲角度小且向北延伸更远，而中部俯冲角度比较陡（图 3）。他们还试图用印度岩石圈撕裂模型来解释中新世以来的裂谷发育过程，以及现今青藏高原的中深源地震分布，并认为地壳和

地幔变形两者是强烈耦合的。

印度岩石圈板片撕裂模型最早由美国加州大学洛杉矶分校的尹安提出，用于解释青藏高原一系列南北向裂谷的形成机制（Yin,2000）。此后，依据一系列地质和地球物理观测，不同学者认为青藏高原碰撞造山带可以分为三段（侯增谦等,2006）或者两段（Xiao et al.,2007），分别提出了印度岩石圈撕裂和分段俯冲模型。我所岩石圈演化国家重点实验室田小波、陈赟、梁晓峰等近些年针对藏南地区岩石圈结构探测开展了一系列地震学研究，他们的研究结果表明藏南印度岩石圈正在撕裂和差异俯冲并对高原地表变形存在控制作用（例如：Liang et al.,2016）。

主要参考文献

- 侯增谦, 赵志丹, 高永丰, 杨志明, 江万, 2006. 印度大陆板片前缘撕裂与分段俯冲：来自冈底斯新生代火山-岩浆作用证据, 岩石学报, 22 (4), 761-774. ([原文链接](#))
- Li J, Song X. Tearing of Indian mantle lithosphere from high-resolution seismic images and its implications for lithosphere coupling in southern Tibet[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115 : 8296-8300. ([原文链接](#))
- Liang X, Chen Y, Tian X, et al. 3D imaging of subducting and fragmenting Indian continental lithosphere beneath southern and central Tibet using body-wave finite-frequency tomography[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 443: 162-175. ([原文链接](#))
- Xiao L, Wang C, Pirajno F. Is the underthrust Indian lithosphere split beneath the Tibetan Plateau?[J]. International Geology Review, 2007, 49(1): 90-98. ([原文链接](#))
- Yin A. Mode of Cenozoic east - west extension in Tibet suggesting a common origin of rifts in Asia during the Indo - Asian collision[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2000, 105(B9): 21745-21759. ([原文链接](#))

（撰稿：梁晓峰 / 岩石圈）



Geology : 新生代中期太平洋板块运动改变 —— 对西北夏威夷海岭和环太平洋的意义

在大洋板块内部有多条由火山锥构成的火山岛链。它们呈线状定向展布，年代和方向性明显，一端连着现代活火山，另一端连着距活火山愈远而时代愈老的串珠状死火山，夏威夷岛 - 皇帝海山就是典型代表（图 1）。通常认为火山链反映了岩石圈板块越过热点的移动轨迹，它记录了板块运动的方向和速率。假定地幔柱一热点位置是固定的，板块在地幔柱上方运动形成火山岛的直线排列和年龄则可以用来重建板块运动的方向和速率。

火山热点轮廓的弯曲，如最典型的夏威夷 - 皇帝弯曲构造（图 1 的 H-E Bend，以下简称“HEB”），过去被认为是板块运动发生变化的直接记录，但近期有学者发现，因太平洋下地幔流动变化而引起地幔热点位置的变化能更好地解释这一现象，热点位置变化可以用来研究过去地幔环流的模式。O'Connor 等（2015）通过夏威夷 - 皇帝弯曲附近 Musicians 海岭的地球化学研究认为，海山（岭）的形成与地幔柱活动无

关，而是由于太平洋板块变形导致的伸展环境引起，太平洋板块周边的系列俯冲事件可能触发了板块 - 地幔重组，从而形成了 HEB。长期以来，岛链的弯曲特征、年龄演进和动力学机制一直吸引着众多学者。

西北夏威夷海岭（NWHR）已积累了不少年代学数据，但上世纪七八十年代的 K-Ar 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 数据表现出了明显的离散性，而从 2006 年起则只有 12 个火山进行过 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年，并且大部分靠近 HEB 区、NWHR 的最北端。根据一系列玄武岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果，O'Connor 等（2013）推测沿着 NWHR 有两个不同的年龄演进趋势，约 15 Ma 或早至 27 Ma 时板块运动速度明显的加快。问题是，他作出一论断时并没有使用年轻于 25 Ma 的熔岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年数据。

针对这一数据缺失问题，美国威斯康星大学 B. R. Jicha 等学者对西北夏威夷海岭开展了大量高精度的年代学研究工作。从覆盖整个西北夏威夷海岭、全长 2800 km

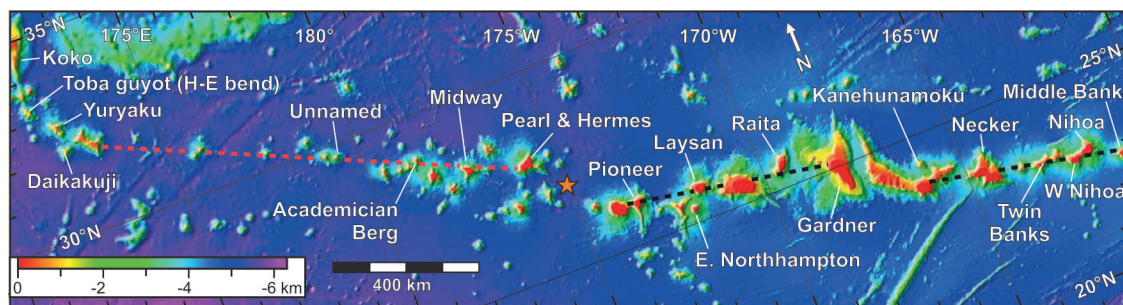


图 1 西北夏威夷海岭（NWHR）已做过测年的火山

桔色星标表示新生代中期板块运动发生改变的大致所在，Pearl 和 Hermes 环形岛礁以南的海山都属于白垩纪（Jicha et al., 2018）

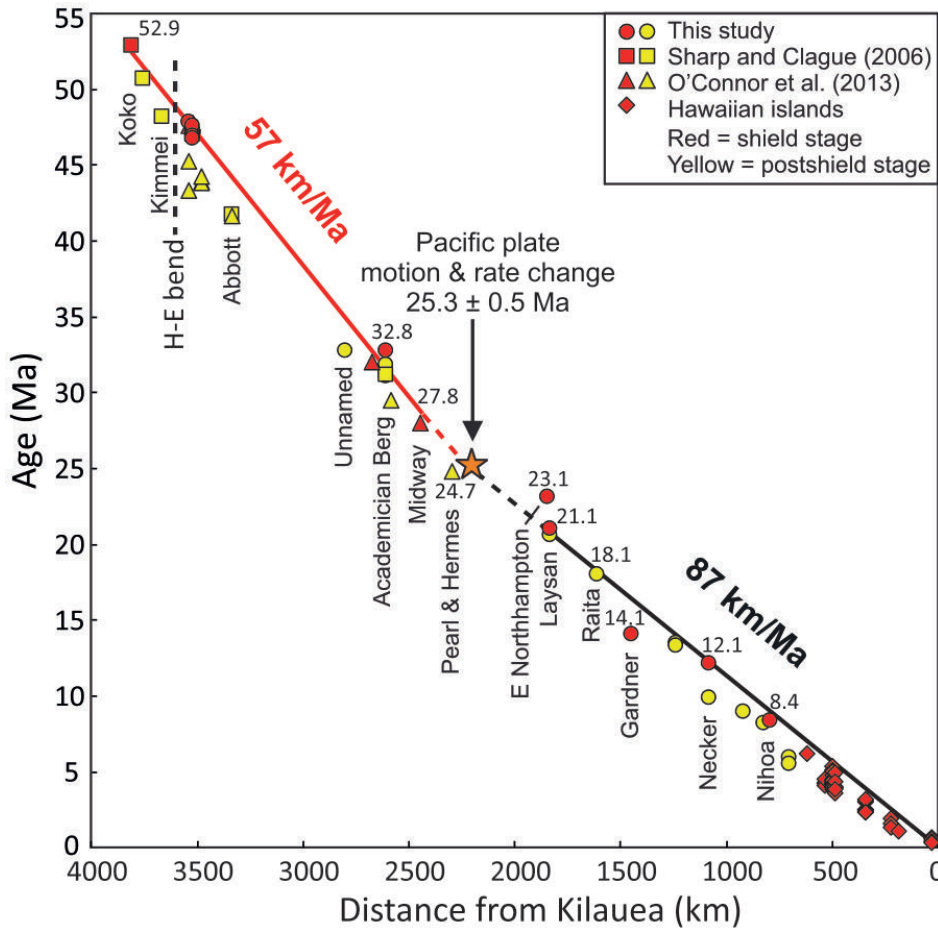


图 2 皇帝海山链南端 - 西北夏威夷海岭 - 夏威夷群岛火山取样位置相对于夏威夷基拉韦厄 (Kilauea) 火山的距离与样品 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄图

皇帝火山群南端 (53 Ma) 向东南至中途岛 (28 Ma) 构成一种年龄变化趋势 (57 km/Ma)。更年轻火山年龄 (莱桑岛到基拉韦厄岛, 21-0 Ma) 则给出了显著变大的速率 (87 km/Ma)。线性年龄回归计算仅对造盾阶段熔岩流。对有多阶段造盾火山, 仅最老的熔岩年龄用于回归计算

的 15 个火山熔岩中获得 26 个新 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果, 进一步加深了对海山年龄—距离关系的认识 (图 2)。研究成果近期发表于 Geology。

得到的主要新认识如下:

(1) 利用新的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄—距离线性关系, 结合前人研究, 评估了西北夏威夷海岭片段在太平洋板块运动中的变化, 将夏威夷 - 皇帝弯曲的时代确定为 49.4 ± 0.4 Ma。

(2) 将小于 21Ma 和 52-28 Ma 的年

龄演进速率进一步外推, 得到板块运动变化的位置 (离夏威夷基拉韦厄火山约 2235 km, 图 1 中桔色星标), 并且获得该点绝对年龄 25.3 ± 0.5 Ma。揭示了 25.3 Ma 太平洋盆地中发生一次重要的构造事件, 导致了太平洋板块北向运动和逆时针旋转。随着板块运动方向的变化, 扩张速率或板块运动速率明显从 57 km/Ma 增加至 87 km/Ma。

(3) 重新评价了环太平洋新生代中期事件和太平洋板块 25.3 Ma 转变之间的潜在



联系。作者认为约 25 Ma 板块转向的意义可能比 HEB 那次更重要，因为它可能和环太平洋许多火山和构造事件相关，并且影响了位于太平洋盆地的 4 个热点轨迹，并

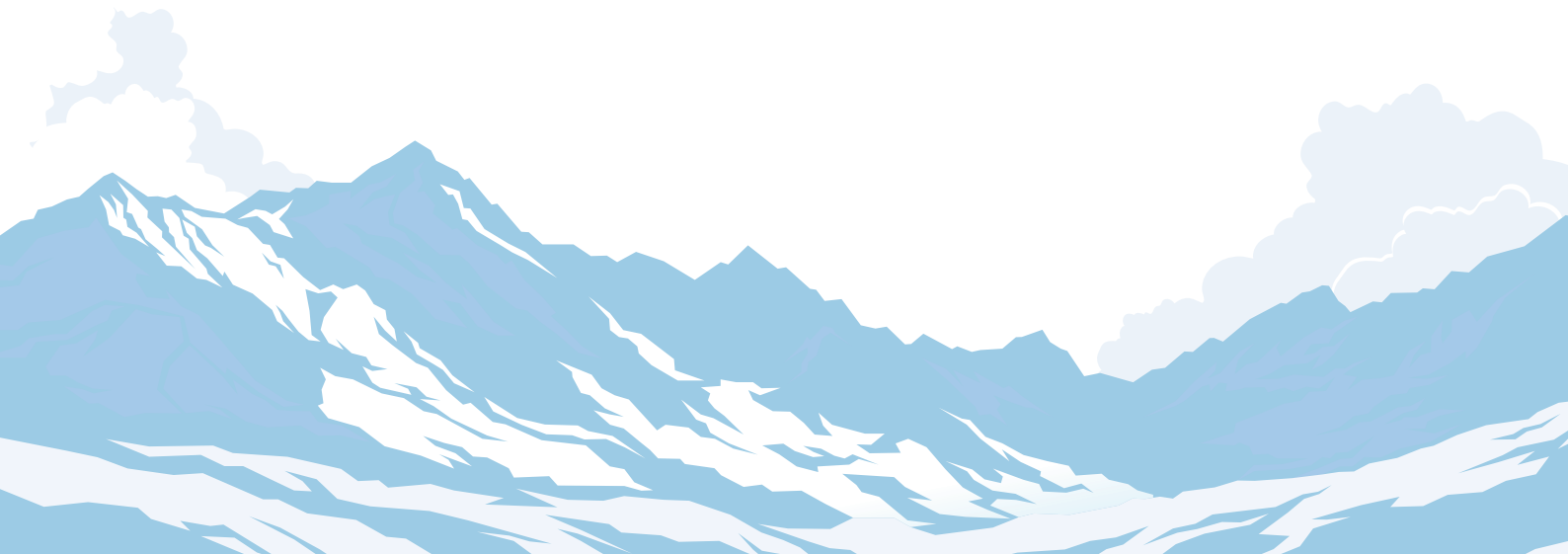
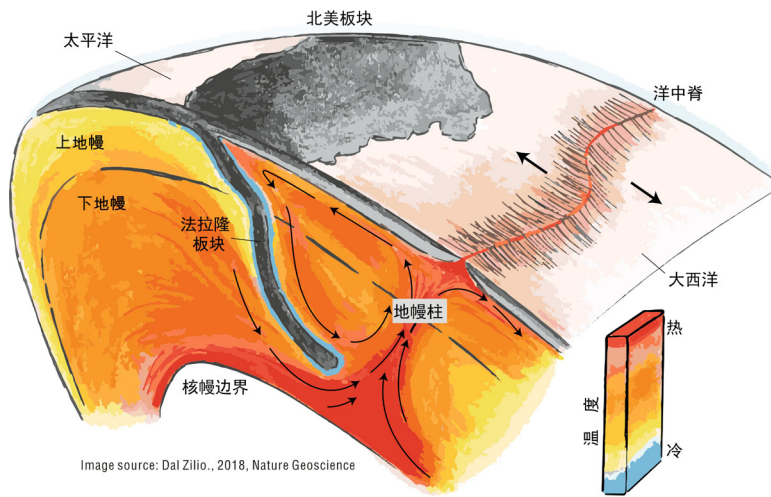
对环太平洋火山弧有重要影响。这些地质事件的关联非常重要，但具体过程和影响仍有待深入探讨。

主要参考文献

- Jicha B R, Garcia M O, Wessel P. Mid-Cenozoic Pacific plate motion change: Implications for the Northwest Hawaiian Ridge and circum-Pacific[J]. *Geology*, 2018, 46(11): 939-942. ([原文链接](#))
- O'connor J M, Hoernle K, Müller R D, et al. Deformation-related volcanism in the Pacific Ocean linked to the Hawaiian–Emperor bend[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(5): 393-397. ([原文链接](#))
- O' Connor J M, Steinberger B, Regelous M, et al. Constraints on past plate and mantle motion from new ages for the Hawaiian - Emperor Seamount Chain[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(10): 4564-4584. ([原文链接](#))
- Tarduno J, Bunge H P, Sleep N, et al. The bent Hawaiian-Emperor hotspot track: Inheriting the mantle wind[J]. *Science*, 2009, 324(5923): 50-53. ([原文链接](#))

(撰稿：[杨列坤](#) / 岩石圈室)

2. 板块俯冲





Geology : 无岩浆作用的俯冲起始——阿尔卑斯造山带为何缺失岩浆弧记录?

大洋板块的俯冲被认为是板块构造的最终驱动力，它控制着大陆碰撞、弧岩浆作用等动力学过程。但大洋板块俯冲是如何起始的？这个问题是板块构造理论迄今尚未完成的一块“拼图”。回答这个问题的难点在于观测证据的缺失。比如尽管现今最老的大洋板块扩张时间已达到 170 百万年，科学家们迄今却还未观察到从被动到活动大陆边缘转化的确凿证据 (Nikolaeva et al., 2011)。

“俯冲起始”研究一直是地球动力学的热点和前沿，但现阶段还是依赖于一些间接的证据和动力学模拟。动力学模拟表

明，由于被动大陆边缘相当稳定，不太可能产生自发的俯冲 (Leng and Gunis, 2015)。有学者推算，俯冲起始的区域应当主要发生在大洋岩石圈的薄弱带，比如转换断层或者大洋拆离断层带 (见 Stern and Gerya, 2018 综述)。特提斯俯冲带相关的蛇绿岩和 Izu-Monin-Mariana (IBM) 弧有可能保存了俯冲起始阶段的较好记录，其主要特征是上覆板块的伸展以及拉斑玄武质到玻安质岩浆作用。一旦俯冲被触发，由于大洋岩石圈的部分榴辉岩化 (低温 - 超高压变质作用) 及密度增加就能满足俯冲的正反馈条件，从而导致持续俯冲最终造成大洋的闭

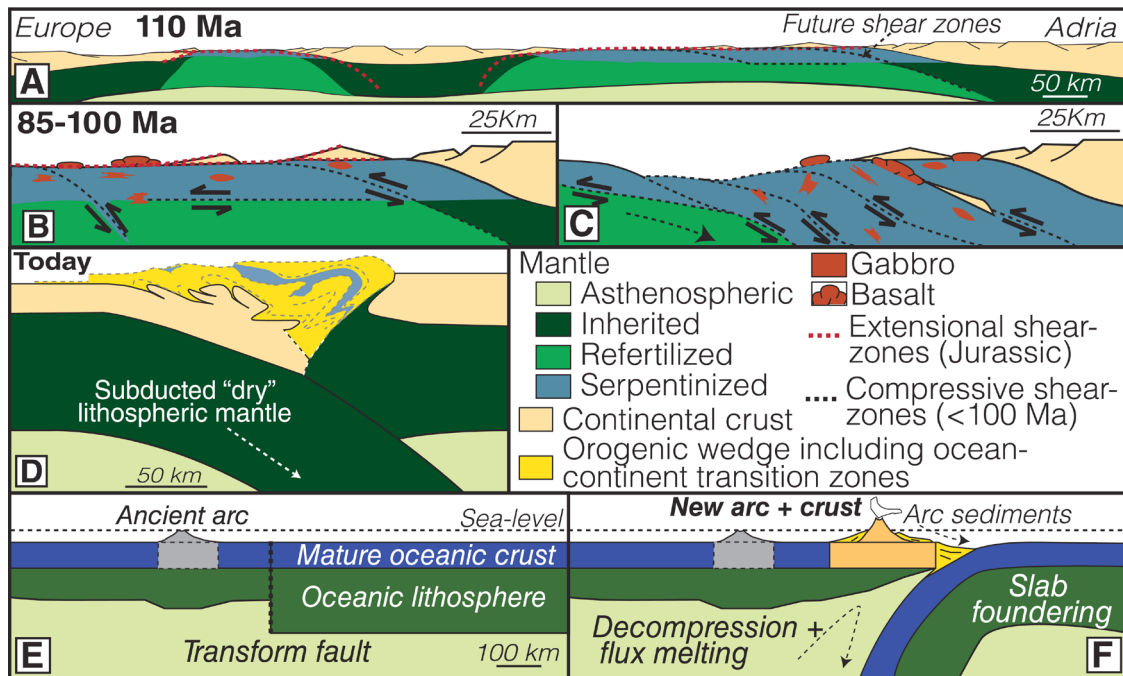


图 1 A-C. 阿尔卑斯地区无岩浆作用的俯冲过程；D. “干”岩石圈地幔俯冲导致“无岩浆作用”的盆地闭合；E-F. 典型的 Benioff 型俯冲体系演化过程 (McCarthy et al., 2018)

**Subduction initiation characteristics**

- Arc magmatism
- FAB, boninites
- Metamorphic sole
- Upper plate extension

Prograde high-pressure metamorphism

- Continental passive margin (Sesia)
- Oceanic fragments (Piemont-Liguria)

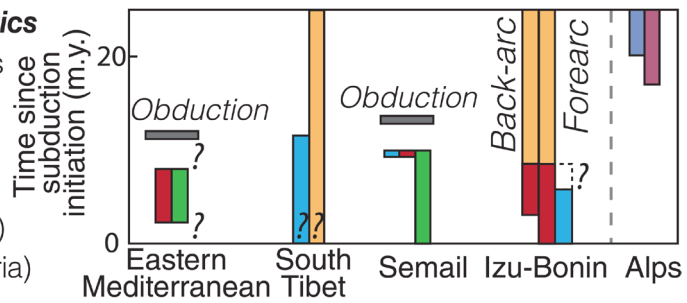


图 2 俯冲初始 25 百万年东地中海、藏南、Semail、Izu-Bonin 弧及阿尔卑斯地区岩浆记录对比 (McCarthy et al., 2018)

合。在俯冲过程中，俯冲的大洋地壳脱水可以导致上覆板块岩石圈的熔融，进而产生钙碱质岩浆作用(图 1E、图 1F)。因此(1)低温 - 超高压变质和(2)钙碱质岩浆作用被认为是与古俯冲有关的替代性证据。

然而，并非所有的造山带都存在岩浆弧的记录，比如经典的阿尔卑斯造山带就是“magma-poor”型造山带，这也被认为是为何阿尔卑斯的研究催生了地质学，却未能诞生板块构造理论的主要原因(Trumpy, 2001)。近期英国学者 Anders McCarthy 及合作者发表在 *Geology* 上的论文 (McCarthy et al., 2018)，总结了阿尔卑斯造山带地区 300 百万年以来的火成岩、沉积岩和变质年代学数据，探讨了阿尔卑斯造山带缺失岩浆作用的迷因。

McCarthy 等人的研究表明，阿尔卑斯 Piemonte-Liguria 洋俯冲体系在初始时期就没有岩浆作用(图 2)，与东地中海、藏南、Semail、Izu-Bonin 弧等典型的沟弧盆俯冲

体系截然不同。无岩浆作用的最主要原因归结为俯冲板片含水矿物的低“效率”。在阿尔卑斯地区，残留的 Piemonte-Liguria 洋记录包括有大洋沉积物、海沟沉积物、蛇纹石、稀疏分布的辉长岩及玄武岩。然而慢速俯冲(1-2cm/yr)使得软流圈地幔的热量有足够的时间导致浅部俯冲板片脱水，最后导致俯冲的“干”岩石圈地幔没有足够的脱水“效率”引起上覆板块岩石圈的熔融，因此不能产生岩浆作用。这项研究说明，钙碱质岩浆作用并非俯冲存在的必要条件。

此外地震学的研究表明，超高压变质作用也不是判别俯冲存在的必要条件(例如 Pyrenées 地区，见 Zhao et al., 2017)。因此低温 - 超高压变质和钙碱质岩浆作用是古俯冲有关的替代性证据这一认识值得商榷，或者说只能用于判别 Benioff 型俯冲的存在。可以说，关于俯冲起始的判断依然是板块构造研究的前沿难题。



主要参考文献

- Leng W, Gurnis M. Subduction initiation at relic arcs[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(17): 7014-7021. ([原文链接](#))
- McCarthy A, Chelle-Michou C, Müntener O, et al. Subduction initiation without magmatism: The case of the missing Alpine magmatic arc[J]. Geology, 2018.DOI: 10.1130/G45366.1.([原文链接](#))
- Nikolaeva K, Gerya T V, Marques F O. Numerical analysis of subduction initiation risk along the Atlantic American passive margins[J]. Geology, 2011, 39(5): 463-466. ([原文链接](#))
- Stern R J, Gerya T. Subduction initiation in nature and models: A review[J]. Tectonophysics, 2018 , 746: 173-198. ([原文链接](#))
- Trumpy R. Why plate tectonics was not invented in the Alps[J]. International Journal of Earth Sciences, 2001, 90(3): 477-483. ([原文链接](#))
- Zhao L, Xu X, Malusà M G. Seismic probing of continental subduction zones[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 145: 37-45. ([原文链接](#))

(撰稿：[赵亮](#) / 岩石圈室)



Nature Geoscience : 诱发俯冲起始的首例地质证据——对蛇绿岩研究的启示

俯冲起始是指俯冲带发育为成熟俯冲体系之前的短暂过程，它是洋盆闭合的必要条件，是威尔逊旋回必不可少的一环。研究俯冲起始对于理解岩石圈结构、板块构造驱动力以及地球演化历史均具有重要意义。然而，由于俯冲起始发生的过程极其短暂，且本身是一个破坏过程，目前我们对其成因及机制依然知之甚少。

Stern (2004) 将俯冲起始分为两类——自发俯冲起始和诱发俯冲起始。自发俯冲

起始的应力来源于板块自身的负浮力，如大洋转换断层或被动大陆边缘处由于重力不稳定引发的岩石圈坍塌；诱发俯冲起始的应力则来源于远场对先存薄弱带的作用。区分两种方式的根本标志是，从俯冲板片发生埋藏到上覆板片开始拉张的时间间隔不同：自发俯冲起始时，俯冲板片向下俯冲，上覆板片同时拉张以平衡区域应力；而诱发俯冲起始时，俯冲板片被迫下插累积到一定时间后，上覆板片才发生拉张。自发俯冲起始目前已得到较广泛的研究，

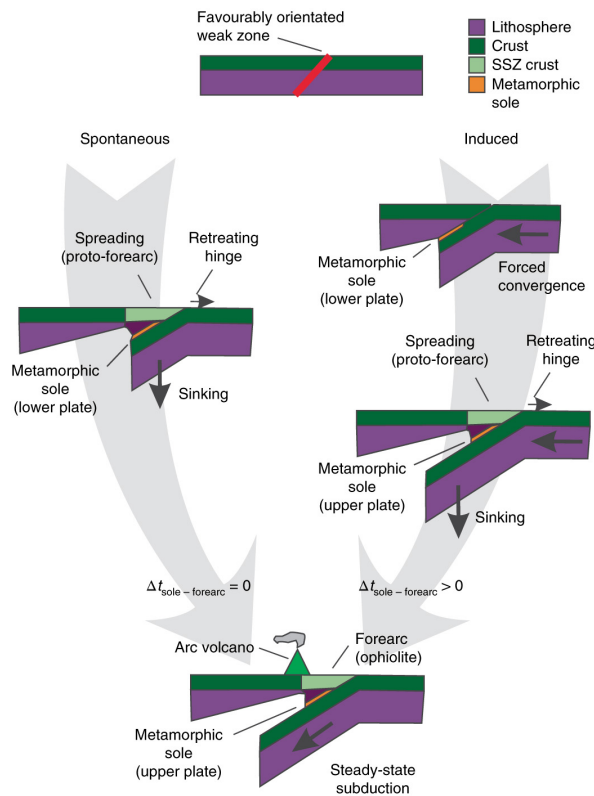


图 1 自发俯冲 VS. 诱发俯冲概念图 (Guilmette et al., 2018)

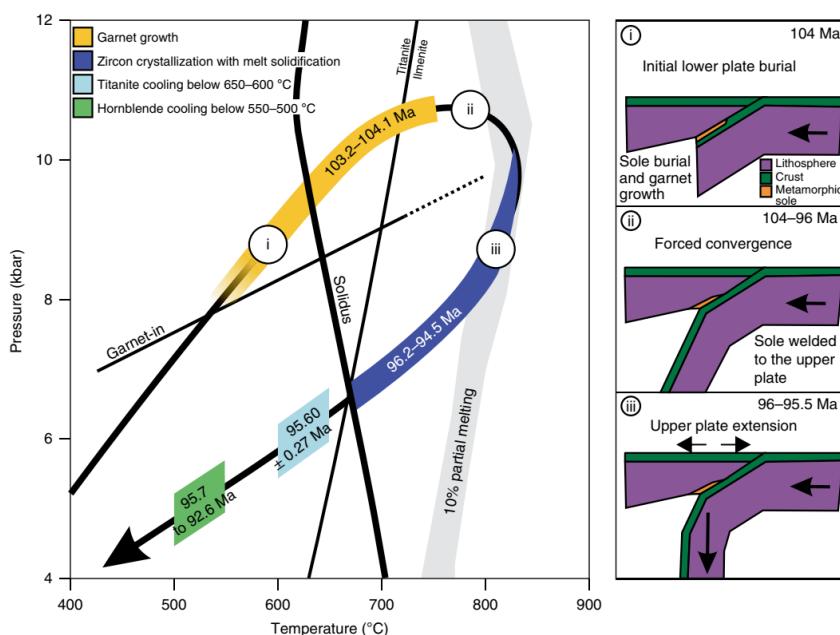


图2 Semail 蛇绿岩变质底板的 P-T-t 轨迹 (Guilmette et al., 2018)

出露于 Izu-Bonin-Marianna 俯冲带附近的基底熔岩是目前自发俯冲起始的直接地质证据 (Arculus et al., 2015)。而诱发俯冲起始虽然有数值模拟实验支持，但仍未发现地质记录。

通常认为，SSZ 蛇绿岩和变质底板 (metamorphic sole) 是俯冲早期的地质证据。SSZ 型蛇绿岩为残留的弧前大洋岩石圈，组分上类似于当今 Izu-Bonin-Marianna 弧前，形成于俯冲起始阶段，随后隆升到海平面之上；变质底板是分布在蛇绿岩之下的 ~ 10-500 m 的变质层，主要为角闪岩相或麻粒岩相的变玄武岩。前人普遍认为变质底板来源于俯冲板片的表层，是蛇绿岩就位的变质产物。在俯冲早期，俯冲界面上存在连续的两次流变学转换，当俯冲板片与上覆地幔楔流变学性质相似时，板片俯冲的阻力最大，此时俯冲板片的上部物质撕裂并焊接到上覆地幔楔底部，从而形成现今的变质底板 (Agard et al., 2016)。由

于前人的年代学数据表明蛇绿岩比变质底板通常具稍早（或相似）的年龄 (Hacker et al., 1996)，SSZ 蛇绿岩通常被认为可代表俯冲起始的地质记录。

阿曼 Semail 蛇绿岩是当今出露最好的蛇绿岩剖面之一。大量研究工作表明，Semail 蛇绿岩年龄为 96.12-95.50 Ma，变质底板角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和锆石 U-Pb 年龄为 96-95 Ma。2018 年 8 月 27 日，Nature Geoscience 在线发表了 Guilmette et al. (2018) 关于本区诱发俯冲起始的研究成果。他们对阿曼 Semail SSZ 型蛇绿岩及变质底板进行了精确的年代学研究，给出了不同的变质底板年龄。研究表明，变质底板角闪岩中石榴石具清晰的生长环带，石榴石-全岩 Lu-Hf 等时线年龄为 103.7 ± 0.7 Ma，表明石榴石在 ~ 104 Ma 就开始生长，对应变质底板的埋藏过程，即初始俯冲 (图 2)。变质底板形成 (板片埋藏) 时间比上覆板片拉张 (SSZ 型蛇绿岩形成) 早 ~ 8 Ma，说



明上覆板片拉张之前的 8 Ma 板块就已受力汇聚, 这为诱发俯冲起始提供了直接的地质学证据。

该研究对蛇绿岩的相关研究具有以下重要意义:

(1) SSZ 型蛇绿岩因与当今典型俯冲带 (例如 Izu-Bonin-Marianna) 弧前层序特征一致, 通常被认为是俯冲起始的产物, 成为我们研究俯冲起始及板块缝合的重要研究对象。而该研究表明, 俯冲过程中, 变质底板明显早于蛇绿岩形成, SSZ 蛇绿岩并不像前人认为的能代表俯冲起始!SSZ 蛇绿岩可能并不是通常认为的自发俯冲证据。

(2) 前人认为变质底板形成于俯冲早期, 稍晚于蛇绿岩形成时间 (<1-2 Ma), 并用变质底板的年龄限定蛇绿岩就位时间 (eg,

Wakabayashi and Dilek, 2003)。现在看来, 这种观点可能需要重新审视。

(3) 前人对 SSZ 蛇绿岩的成因存在两种假设, 一种观点认为 SSZ 蛇绿岩为先存的 MORB 型大洋岩石圈, 它们在俯冲带发生改造并残留下来。另一种观点认为洋内俯冲起始触发地幔上涌进而形成了 SSZ 蛇绿岩。支持第一种观点的主要证据为前人给出的变质底板年龄稍晚于蛇绿岩年龄, 而本文给出的年代学数据明显不再支持第一种假设。

俯冲起始应以何作为标志? SSZ 蛇绿岩代表什么? Guilmette et al. (2018) 揭示的年代学规律是否具有普遍意义? 希望本文为俯冲起始及蛇绿岩的相关研究带来新的讨论及思考。

主要参考文献

- Agard P, Yamato P, Soret M, et al. Plate interface rheological switches during subduction infancy: Control on slab penetration and metamorphic sole formation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 451: 208-220. ([原文链接](#))
- Arculus R J, Ishizuka O, Bogus K A, et al. A record of spontaneous subduction initiation in the Izu-Bonin-Mariana arc[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(9): 728-733. ([原文链接](#))
- Guilmette C, Smit M A, van Hinsbergen D J J, et al. Forced subduction initiation recorded in the sole and crust of the Semail Ophiolite of Oman[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11: 688-695. ([原文链接](#))
- Hacker B R, Mosenfelder J L, Gnos E. Rapid emplacement of the Oman ophiolite: Thermal and geochronologic constraints[J]. *Tectonics*, 1996, 15(6): 1230-1247. ([原文链接](#))
- Stern R J. Subduction initiation: Spontaneous and induced[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 226(3-4): 275-292. ([原文链接](#))
- Wakabayashi J, Dilek Y. What constitutes 'emplacement' of an ophiolite?: Mechanisms and relationship to subduction initiation and formation of metamorphic soles[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 218(1): 427-447. ([原文链接](#))

(撰稿: 孙宝璐, 杨建锋 / 岩石圈室)



Nature Communications : 西北太平洋地区俯冲板片含水量的控制因素

地球内部到底有多少水是近年来一个热点问题。作为地幔对流的一部分，板片俯冲可以将地表的水带到地球内部。俯冲板片的脱水可以形成岛弧岩浆，促进变质作用，降低熔融温度等；而俯冲前板片的含水量（或水合作用，hydration）则直接决定了输送到地球深部的总水量。

洋脊附近的热液循环 (hydrothermal circulation) 和蚀变 (alteration) 一直被认为是大洋板块水合程度的一阶控制因素。近年来，地震学及电磁学研究揭示出在海沟附近与板块弯曲相关的正断层可显著促进板块的水合作用 (Ranero et al., 2003) (图

1)，特别是海沟处的弯曲断层作用 (bend faulting) 极有可能切断整个地壳进入到上地幔。区分、提取弯曲断层作用对板块水合程度的贡献及大小，对于认识俯冲地区流体的释放机制、位置和作用，俯冲板块的含水量以及深部地幔水循环等都有重要意义。

针对以上弯曲断层导致的水合作用问题，日本海洋科学与技术中心 (JAMSTEC) 有针对性地选择了位于同一三联点的日本海沟和千岛海沟作为对比研究区域，以气枪阵列源为信号，利用海底地震仪和水检器等到时记录，反演获得了两个区域的 P 波、S 波速度结构。在近海沟处，两个区域

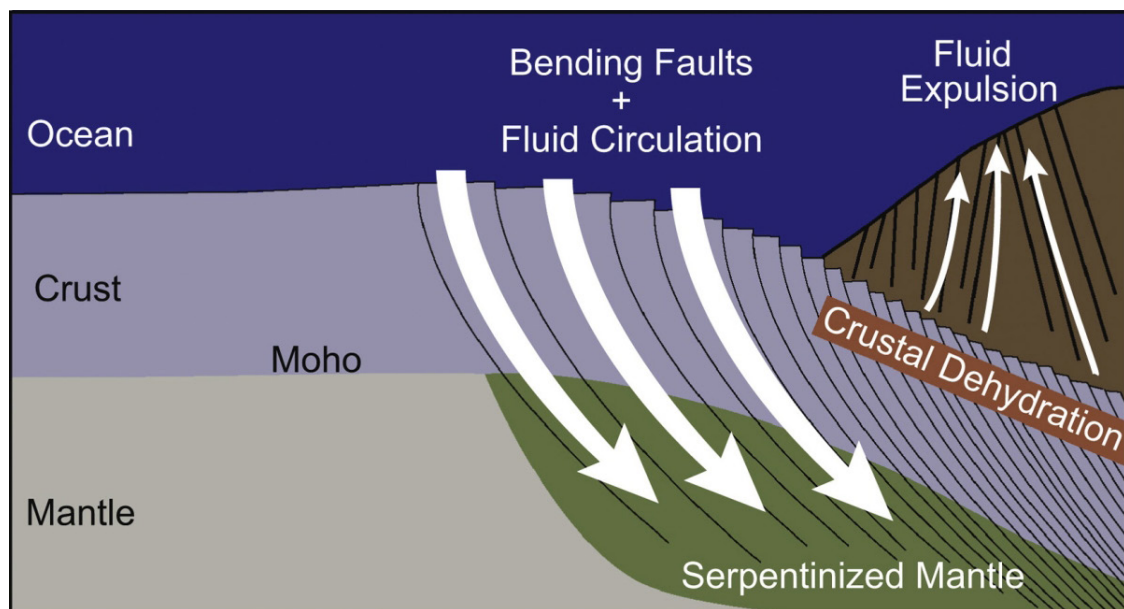


图 1 电阻率观测结果与地震波成像给出的弯曲断层结果解释图

大洋板块在抵达海沟外隆起 (outer rise) 时，拉伸作用产生弯曲断层，可直抵地幔深度，产生渗透率较高的有利于深部流体循环的断裂破坏区 (Key et al., 2012)

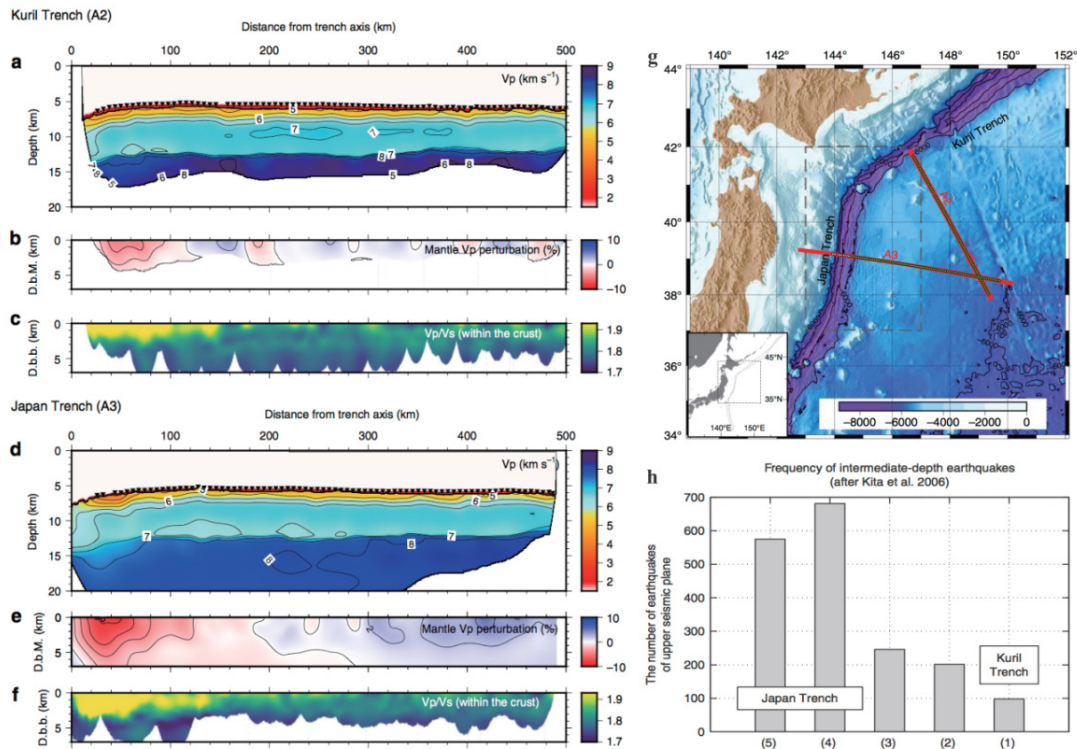


图 2 两处对比研究区域（日本海沟和千岛海沟区域）及利用可控源地震走时反演得到的速度模型 (Gou et al., 2018)

(a-c) 千岛海沟处 A2 剖面的速度成像结果，在靠近海沟处地幔 Vp 速度降低，地壳 Vp/Vs 值增加；(d-f) 日本海沟处 A3 剖面的速度结构，地幔 Vp 速度的降低及 Vp/Vs 比值增加更加显著，且在距海沟 150 km 处就开始出现，表明更多的水渗透进入到洋壳中去；(g) 对比研究区域图；(h) 中深源地震活动性对比

均呈现 P 波速度降低和 Vp/Vs 比值增加的特征；但日本海沟处的变化更加剧烈，表明日本海沟处俯冲板片的水合程度明显高于千岛海沟处，与日本海俯冲地区强烈的中-深源地震活动性吻合（图 2）。

由地震波速度结构揭示的俯冲前板片的含水程度和地震活动性揭示的俯冲后板片含水程度在两个区域的对比，表明俯冲地区弯曲断层作用产生的空间差异是导致两个区域显著差别的主导因素。文章认为现今海沟与古代扩张洋脊之间的角度 α 控制了弯曲断层的空间变化规律，是影响西北太平洋俯冲地区板片含水量的关键因素。根据角度 α 的大小可将海沟处产生的弯曲断层分为两种类型，即重新激活的深海丘

陵断层 (reactivated abyssal-hill faults) 和新产生的断层。千岛海沟处的弯曲断层主要为重新激活的深海丘陵断层 ($\alpha \approx 10^\circ$)；日本海沟处则是新老断层的组合 ($\alpha = 60^\circ - 70^\circ$)，这种组合更易促进水向板片内部的渗透，致使日本海沟处板片含水量相对较高，但这需要更加集中的拉伸应力。

该研究意味着，如果弯曲断层确实能够为水进入地幔开辟一个新通道，那么由俯冲板块带入到地球内部的水含量将会比现在的估值大得多，这必将对深部地幔结构、物质组分以及俯冲动力学过程产生重要的影响。但文章也承认，角度 α 与板片含水量之间的关系会受到海沟处地质背景的影响，例如在阿拉斯加和美国中部海



沟区域，重新激活的断层为数更多，使得板块更加富水（Shillington et al., 2015; Van Avendonk et al., 2011），这和西北太平洋地区的观测现象完全不同。事实上，板片的含水量还受其他因素的影响，例如板片的

曲率、年龄等。因此想更量化地估计俯冲板片能够输送到地球内部的水含量，还需要更深入、细致、综合的研究，希望本文能带来新的思考及讨论。

主要参考文献

- Gou F J, Kodaira S, Kaiho Y, et al. Controlling factor of incoming plate hydration at the north-western Pacific margin[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 3844. ([原文链接](#))
- Key K, Constable S, Matsuno T, et al. Electromagnetic detection of plate hydration due to bending faults at the Middle America Trench[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2012, 351: 45-53. ([原文链接](#))
- Ranero C R, Morgan J P, McIntosh K, et al. Bending-related faulting and mantle serpentinization at the Middle America trench[J]. Nature, 2003, 425(6956): 367-373. ([原文链接](#))
- Shillington D J, Bécel A, Nedimovic M N, et al. Link between plate fabric, hydration and subduction zone seismicity in Alaska[J]. Nature Geoscience, 2015, 8: 961-964. ([原文链接](#))
- Van Avendonk H J A, Holbrook W S, Lizarralde D, et al. Structure and serpentinization of the subducting Cocos plate offshore Nicaragua and Costa Rica[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2011, 12(6). ([原文链接](#))

（撰稿：韩光洁，[李娟](#)/地球与行星室）



Nature : 马里亚纳俯冲带携水量估计——来自海底地震观测数据的约束

俯冲带是地球上的巨大物质传输带。伴随着大洋板块俯冲，地表的水、流体和挥发份被携带进入地球内部。在历经一系列过程后，深部的水又随着火

山喷发回到地表的海洋和大气中，从而构成地球深部的水循环系统。

水对地球表层和深部动力过程都起着至关重要的作用。它能够促进岩浆形成，

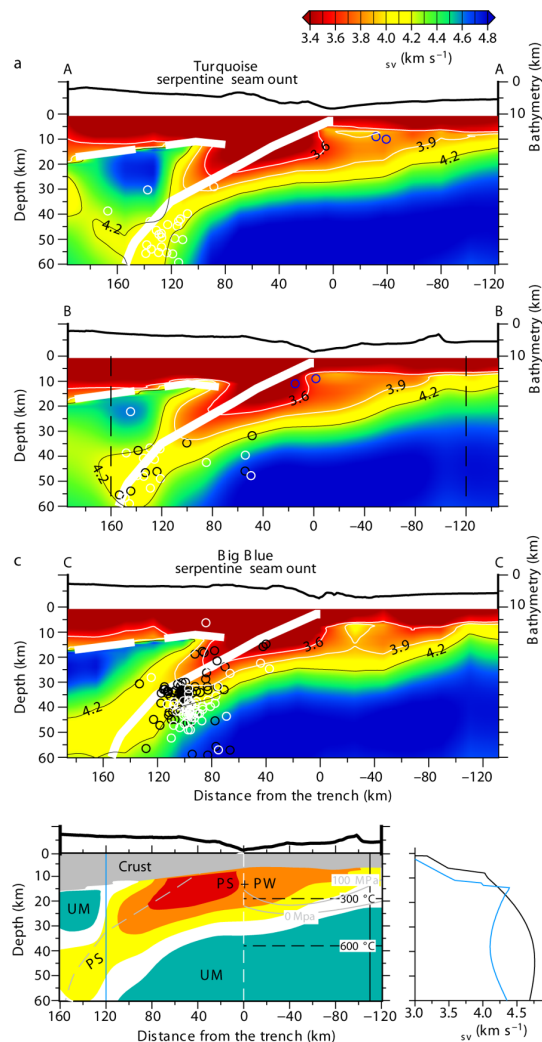


图 1 垂直极化 S 波速度 V_{sv} 剖面及解释图 (Cai et al., 2018)

a-c. 沿三条不同剖面的方位平均 V_{sv} 结构图像。白色粗虚线为弧前 Moho 面，白色粗实线为 6 km 厚的俯冲洋壳 Moho 面，圆圈为重定位的板片内部地震。d. 沿 b 剖面两条黑色虚线之间的结果解释。灰色虚线代表俯冲板上表面，垂直白色虚线表示海沟轴。垂直蓝线、黑线表示右侧 V_{sv} 纵剖面的位置。UM. 未改变的地幔 (Unaltered Mantle); PS. 部分蛇纹石化 (Partial Serpentinization); PW. 孔隙水 (Pore Water)

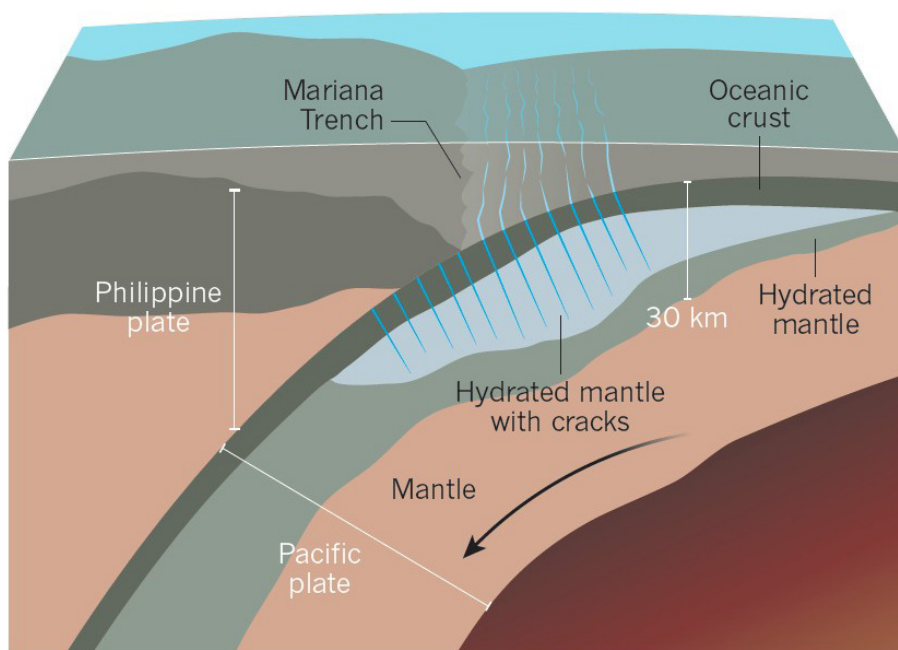


图2 马里亚纳俯冲带太平洋板片水化作用示意图 (Shillington, 2018)

在海沟附近，水化作用深达俯冲板片内部约 30 km 深度

润滑深部断裂，极大地改变地幔岩石的强度和行为。地表的海水通过裂缝或孔隙渗入到大洋岩石圈，与壳幔中的矿物发生反应形成含水矿物（例如蛇纹石），被储存于这些矿物的晶体结构中，并进一步被大洋俯冲板片带入地球深部。

最近研究显示，除洋脊附近的热液循环和蚀变之外，海沟处与板块向下俯冲相关的弯曲断层能够为水进入大洋岩石圈地幔开辟新的通道，显著增强大洋板块本身的水化作用（hydration）（Guo et al., 2018；见前沿报道《西北太平洋地区俯冲板片含水量的控制因素》）。然而对被俯冲板片带入至地球深部的水含量进行定量估计仍是一件十分困难的事。前人研究多基于主动源地震观测，其优势在于密集台阵数据对俯冲板块地壳和浅部地幔的水化程度可提供相对精确的约束，却无法约束水化作用发生的最大深度，因而无法准确估计俯冲

板块的实际水含量。另一个难点在于造成地震波速度变化的多因素性。前人研究大多将地震波速度的降低全部归因为地幔主要矿物橄榄石的蛇纹石化，而大洋岩石圈中地壳和上地幔中存在的含水裂隙同样会造成地震波速度降低。此外，大洋岩石圈地幔橄榄石定向排列可以引起地震波速度各向异性，这使由地震波速度观测约束含水量的问题变得更为复杂。

针对这一问题，美国华盛顿大学圣路易斯分校的学者基于布设在马里亚纳海沟的海底地震台阵观测，从远震记录中提取了 Rayleigh 面波频散曲线，反演获得了该区域垂直极化的 S 波速度 (V_{sv}) 结构图像，并进一步约束了俯冲板片水化作用的最大深度 (Cai et al., 2018；图 1)。该研究通过考虑裂隙随深度逐渐闭合、对地震波速的影响逐渐消失的效应，并由不同方位地震事件记录分析各向异性特征，从而区分出



不同因素对地震波速变化的影响，并最终确定研究区俯冲板片水化作用造成的 S 波低速异常最深可达板片内部约 30 km 深度，即穿过 6 km 厚的洋壳进入地幔约 24 km 深处（图 2）。观测的俯冲板片地幔中低至 4.1 km/s 的 S 波速度（图 1）大致对应约 19% 的蛇纹石化，表明含水量可达 2 wt% 左右。

基于上述估计，该研究进一步指出，马里亚纳俯冲板片所携带的水含量（ $94 \pm 17 \text{ Tg Myr}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ）远多于（约 4.3 倍）前人的估计（van Keken et al., 2011）。相比年轻的

俯冲板片，更冷更老的俯冲板片（例如马里亚纳处的太平洋板片）中含水矿物可以在更大深度上稳定存在，因而能更有效地将水带入地球深部（Rupke et al., 2004）。依据这一最新研究结果类推至全球其它古老的俯冲带地区，全球俯冲进入到地球深部的水量将远超目前所估算的地幔中水的释放量。这意味着我们或许需要重新估算全球水循环，特别是在火山弧和弧后区域的水释放量。

主要参考文献

- Cai C, Wiens D A, Shen W, et al. Water input into the Mariana subduction zone estimated from ocean-bottom seismic data[J]. *Nature*, 2018, 563(7731): 389. ([原文链接](#))
- Gou F J, Kodaira S, Kaiho Y, et al. Controlling factor of incoming plate hydration at the north-western Pacific margin[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3844. ([原文链接](#))
- Rupke L H, Morgan J P, Hort M, et al. Serpentine and the subduction zone water cycle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 223(1-2): 17-34. ([原文链接](#))
- Shillington D J. Water takes a deep dive into the Mariana Trench. *Nature*, 2018, 563(7731): 335-336. ([原文链接](#))
- van Keken P E, Hacker B R, Syracuse E M, et al. Subduction factory: 4. Depth - dependent flux of H₂O from subducting slabs worldwide[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B1). ([原文链接](#))

（撰稿：赖琦婧，[陈凌](#) / 岩石圈室）



Nature Geoscience: 地幔转换带下方弱粘性层导致的俯冲板块停滞

板块俯冲进入地幔以及在地幔中的演化过程，是威尔逊旋回的重要组成部分，也是地壳与地幔进行能量和物质交换的重要过程，研究其动力学过程，是固体地球物理学关注的重要问题。

地震层析成像是研究地球内部速度结构的有效手段，通过该方法获得的地幔高波速块体结构，通常被解读为俯冲板块，因此可以用来约束俯冲板块的形态结构。但是，目前全球观测到的俯冲板块形态存在很大差异 (Goes et al., 2017)，有些直接俯冲到下地幔甚至核幔边界 (Van der Hilst et al., 1997)，也有些停滞在地幔转换带并横向延伸 (Fukao et al., 2009) (图 1)。对于造成俯冲板块形态如此大的差异的原因，其动力学控制机制和演化过程尚未得到很好的解释。

针对部分俯冲板块在转换带上方停滞这个问题，美国科罗拉多大学的毛伟与导

师钟时杰教授，通过数值模拟实验研究，给出了一种可能的解释，研究成果近期发表在 Nature Geoscience 上。他们的动力学数值模拟计算结果表明：如果在 670km 转换带之下存在一个弱粘性的薄层，结合地球表面的板块重构历史，动力学模型可以很好地模拟板块在转换带停滞的行为 (图 2)，对于这个薄弱层，可能的形成原因是尖晶石到后尖晶石相变所引起的晶粒大小变化和超塑性所导致的。进一步的实验结果显示，俯冲板块的停滞行为只是一个过渡行为，结合了板块重构数据的全球地幔对流数值模拟结果显示，停滞在转换带之上的俯冲板块绝大多数是由近 20 ~ 30 个百万年发生的俯冲所导致的，从而推断俯冲板块从停滞到穿透到下地幔的转换时间大概是 ~ 10 个百万年尺度，为更好的理解地球内部结构演化提供了动力学约束。

该研究涉及到的一个关键点是：在动

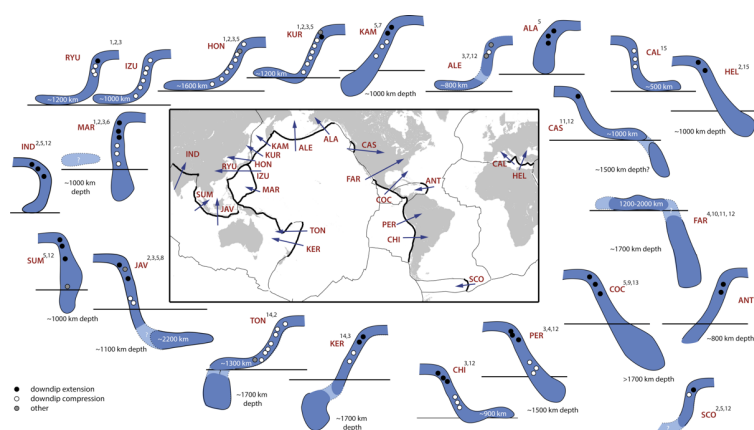


图 1 全球主要俯冲板块形态结构 (Goes et al., 2017)

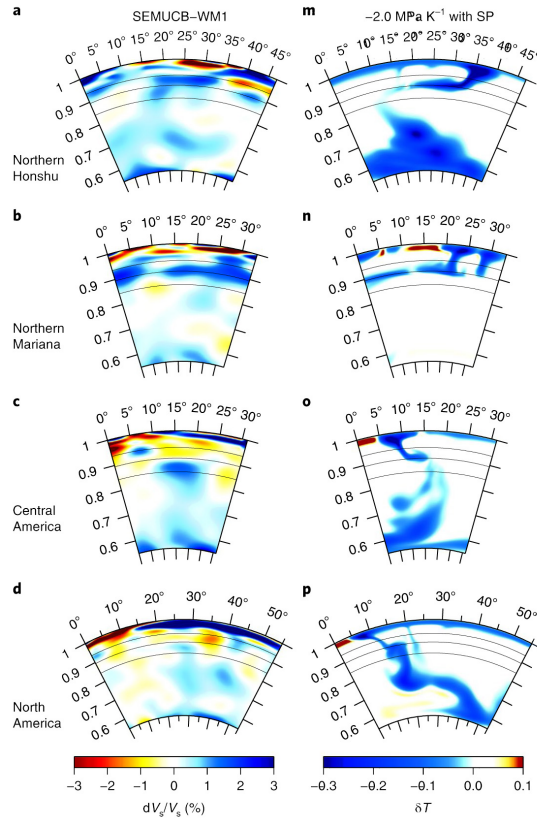


图 2 不同区域地震层析成像结果与数值模型温度场的结果对比显示，数值模拟结果可以大致符合地球不同地区俯冲板块的形态 (Mao and Zhong, 2018)

力学模型中，存在于转换带下方的薄弱层对模拟俯冲板块的停滞起到了决定性作用。

该薄弱层的存在性和物理化学性质可能是值得进一步研究的重要问题。

主要参考文献

- Fukao Y, Obayashi M, Nakakuki T, et al. Stagnant slab: a review[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2009, 37: 19-46. ([原文链接](#))
- Goes S, Agrusta R, Van Hunen J, et al. Subduction-transition zone interaction: A review[J]. Geosphere, 2017, 13(3): 644-664. ([原文链接](#))
- Mao W, Zhong S. Slab stagnation due to a reduced viscosity layer beneath the mantle transition zone[J]. Nature Geoscience, 2018:DOI: 10.1038/s41561-018-0225-2. ([原文链接](#))
- Van der Hilst R D, Widiyantoro S, Engdahl E R. Evidence for deep mantle circulation from global tomography[J]. Nature, 1997, 386(6625): 578. ([原文链接](#))

(撰稿：李杨 / 岩石圈室)



Nature Geoscience : 平板俯冲置换大陆岩石圈地幔基底

全球俯冲带之下的板片展现出多样性的俯冲角度和形态，据此可将俯冲带分为以下两种类型：马里亚纳型与秘鲁 - 智利型。前者以年老的大洋板块大角度俯冲为代表，后者则指年轻的大洋板块以低角度或平板形式俯冲的样式（见 Manea et al., 2017 综述）。

绝大部分俯冲板片都是以一定的正角度下插到周边较热的地幔之中，平板俯冲则是例外，在沉入地幔之前，它能在上覆板块之下近水平地运动数百乃至上千公里（Manea et al., 2017）。作为一种非同寻常的俯冲模式，平板俯冲仅占现今全球俯冲带的 10% 左右，主要分布于中墨西哥、秘鲁

和智利（Gutscher et al., 2000 ; Manea et al., 2017）。

平板俯冲的形成机制长期处于争论之中，一般认为是俯冲板块自身的浮力异常（如大洋高原、无震洋脊或海山链）、海沟后撤、俯冲板块与上覆板块之间的吸力或上覆板块向海沟的运动等因素的组合效应（Manea et al., 2017）。平板俯冲可以有效地将应力传递至上覆板块的内部，同时冷的俯冲板片会置换热的软流楔（asthenospheric wedge），因此它会造成：（1）上覆板块变形向内侧的迁移；（2）岛弧岩浆作用减弱或消失，即岩浆作用的间隙。这些是判断或推测平板俯冲的重要地质依据（Manea

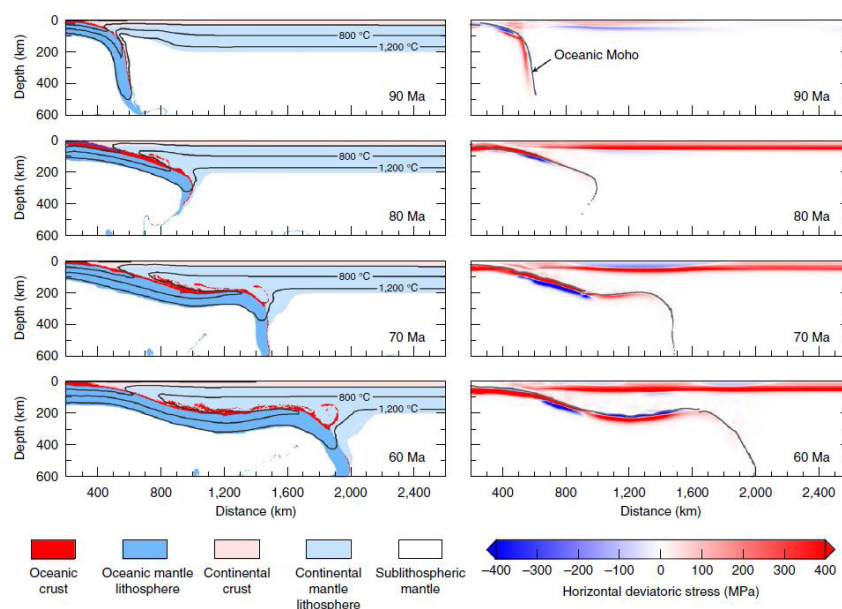


图 1 平板俯冲的演化过程 (Axen et al., 2018)

左边是成分和温度，右边是水平偏应力（挤压为正，拉伸为负）；在该模型中，上覆大陆岩石圈地幔中度亏损（密度为 3230 kg/m³），强度中等（10 倍于湿的橄榄岩）

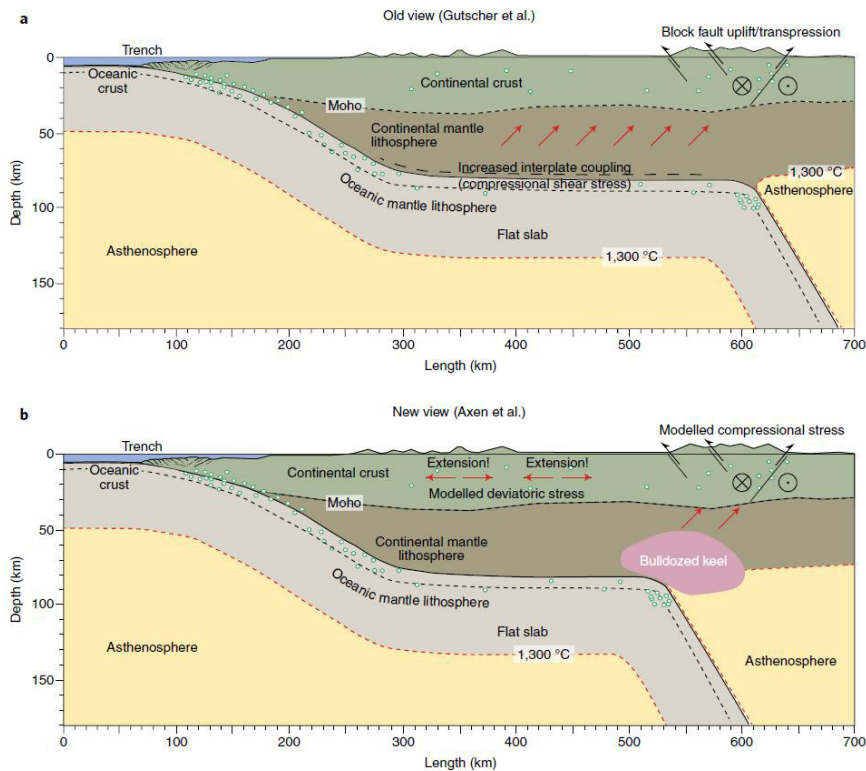


图 2 平板俯冲中更少的底部剪切、更多的铲刮 (Gutscher, 2018)

(a) Gutscher et al. (2000) 早期提出的平板俯冲模型, 认为平板推进产生的底部剪切是导致上覆板块内部挤压的原因; (b) Axen et al. (2018) 提出的新的平板俯冲模型, 认为平板俯冲铲刮上覆岩石圈基底, 形成铲刮楔, 轻的铲刮楔的移动导致了上覆板块挤压变形向陆内迁移和平板上方的拉伸。绿色圆圈代表地壳地震活动性

et al., 2017)。例如, Li and Li (2007) 提出平板俯冲导致了 250-190 Ma 华南 1300 km 宽的陆内造山。根据美国西部晚白垩 Laramide 造山运动的岩浆活动和构造变形历史, 学者们推断在 80-50 Ma 期间, Farallon 板块以平板的形式俯冲到了美国西部之下 (见 Gutscher, 2018)。针对北美大陆下方曾经可能存在的平板俯冲, 前人开展了大量的数值模拟研究 (Liu et al., 2010), 但是某些关键的观测现象, 例如存在从西到东的挤压变形但并无相应的岩浆迁移, 难以在统一框架下再现 (Gutscher, 2018)。

最近, Nature Geoscience 发表了 Axen 等人的最新研究成果, 他们利用二维热 -

力学模型探讨了 Farallon 板块以平板形式俯冲到北美大陆之下的动力学演化。模型以 Farallon 板块的陡俯冲为起始, 当轻而厚的洋壳 (the conjugate Shatsky Rise, CSR) 进入俯冲带, 俯冲板片开始变平 (图 1)。CSR 的俯冲对上覆板块产生了一个端元载荷, 导致大陆岩石圈处于挤压应力状态。随着密度大的前端板片的断离, 平板俯冲得到了进一步加强。他们发现平板俯冲能从上覆板片的底部刮掉 20-50 km 厚的大陆岩石圈地幔 (CML)。被刮下的 CML 充填了软流楔, 他们推测该过程抑制了软流楔的熔融, 最终导致岛弧岩浆作用减弱或终止。如果被刮下的物质密度轻, 它则能在俯冲板片的前端聚集, 形成一个“铲刮楔”



(bulldozed keel); 如果被刮下的物质密度大, 它则随板片下沉。

Axen 等的模型凸显了平板俯冲在铲刮大陆岩石圈底部和建造一个迁移的铲刮楔中的作用, 为 Laramide 造山运动的一些主要特征提供了解释, 包括: CSR 轨迹上方的岩浆作用没有随着平板的推进而向内迁移, 新墨西哥州东部和德克萨斯州西南部上地幔重力异常可能是古老铲刮楔的残留, 科罗拉多州西南部下方厚达 50 km 的岩石圈厚度突变可能是平板俯冲回撤后的遗迹等。根据他们的平板俯冲模型, 上覆板块内部的挤压变形是由施加在大陆边缘的端元载荷所致, 而非由俯冲板块与上覆板块之间的剪切引起 (图 2)。这是因为只有强度弱的 CML 才会被刮掉, 通过铲刮楔只有很少的应力能传递到上覆板块内部。此

外, 他们的模型还预测在轻的铲刮楔的上方存在一个水平拉张带 (图 1)。这解释了 Laramide 造山运动造成的从西到东逐渐变年轻的断块隆起, 同时也回答了为何秘鲁平板俯冲的上方发育的是活动的正断裂而非挤压变形 (Gutscher, 2018)。

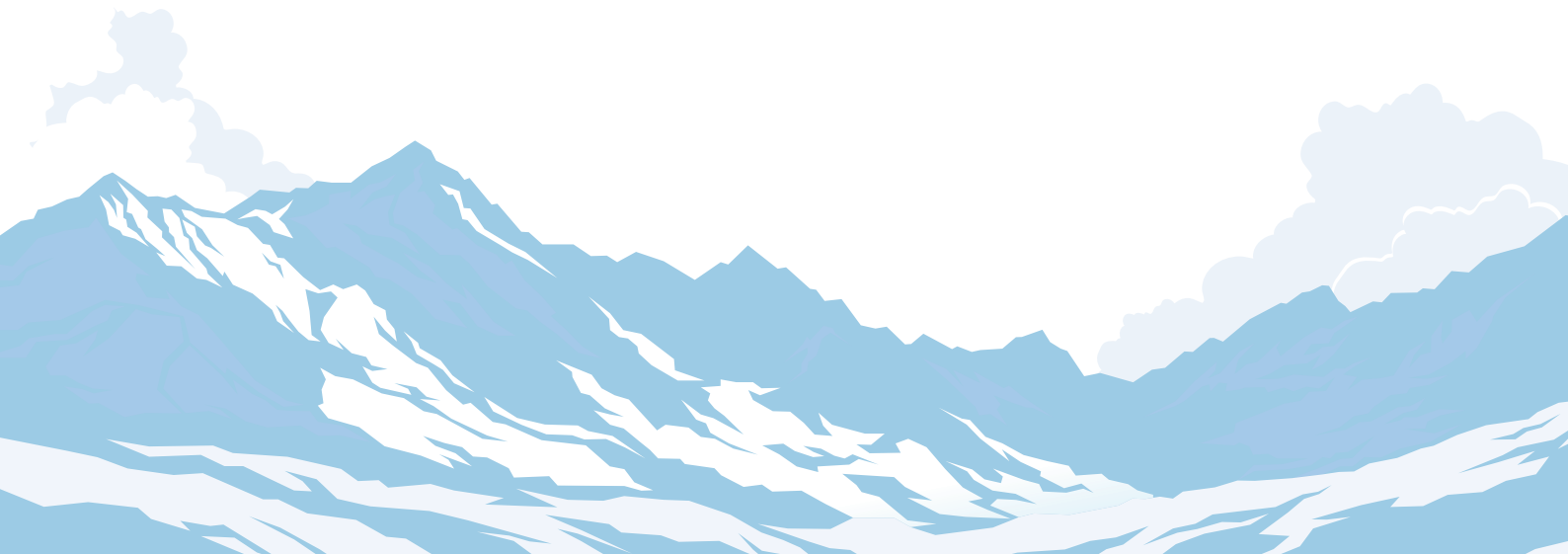
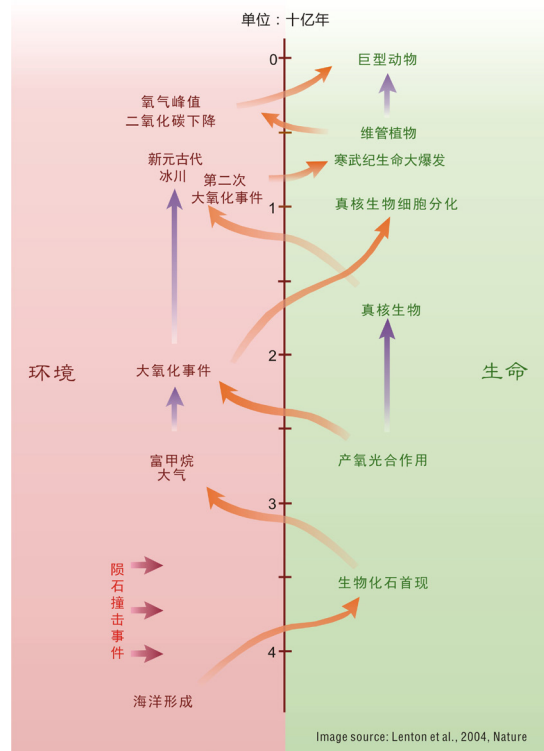
平板俯冲作为一种特殊的俯冲模式, 它通过置换上覆岩石圈的基底、充填软流楔, 可能在陆内构造变形、岩浆作用等地质过程中起着重要作用。Axen 等提出的模型为北美晚白垩 Laramide 造山运动提供了一个优雅的解释, 模型预测平板上方的区域性拉张对过去和现今的平板俯冲带可能具有更广泛的意义。现今秘鲁平板俯冲上方的活动正断已初步验证了这一预测, 但模型的普适性仍有待进一步野外应力观测和高分辨率地震探测的检验。

主要参考文献

- Axen G J, van Wijk J W, Currie C A. Basal continental mantle lithosphere displaced by flat-slab subduction[J]. Nature Geoscience, 2018. DOI: 10.1038/s41561-018-0263-9. ([原文链接](#))
- Gutscher M A, Spakman W, Bijwaard H, et al. Geodynamics of flat subduction: Seismicity and tomographic constraints from the Andean margin[J]. Tectonics, 2000, 19(5): 814-833. ([原文链接](#))
- Gutscher M A. Scraped by flat-slab subduction[J]. Nature Geoscience, 2018, 11: 890-891. ([原文链接](#))
- Li Z X, Li X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model[J]. Geology, 2007, 35(2): 179-182. ([原文链接](#))
- Liu L, Gurnis M, Seton M, et al. The role of oceanic plateau subduction in the Laramide orogeny[J]. Nature Geoscience, 2010, 3(5): 353. ([原文链接](#))
- Manea V C, Manea M, Ferrari L, et al. A review of the geodynamic evolution of flat slab subduction in Mexico, Peru, and Chile[J]. Tectonophysics, 2017, 695: 27-52. ([原文链接](#))

(撰稿: 颜智勇, [陈林](#)/岩石圈室)

3. 地球系统与气候变化





Science : 盖娅 (Gaia) 2.0

Science 杂志 9 月 14 日发表 Lenton 和 Latour 的观点文章, 认为进入人类世之后, 地球系统已从无意识自我调控的 Gaia, 转型为 (人类) 自我意识下自我调控的 Gaia 2.0。如何从 Gaia 中学习, 以创建可持续发展的地球—生命新系统 Gaia 2.0, 是我们面临的迫切课题。

一、Gaia 假说

20 世纪 60 年代末到 70 年代初, 英国独立科学家、发明家 James E. Lovelock 受美国国家航空航天局 (NASA) 之邀, 参与喷气推进实验室有关火星生命探测的研究工作。在这期间, Lovelock 注意到火星大气层主要由 CO_2 组成, 且处于化学平衡状态, 与地球大气层气体的不平衡状态完全相反, 说明火星不存在生命。受此启发, Lovelock 开始重新审视地球的生命维持系统, 并于 1972 年提出 Gaia 思想 (Lovelock, 1972)。

Gaia 是希腊神话中的大地女神, Lovelock 是在其同乡、小说家威廉·戈尔丁 (William Golding, 1983 年诺贝尔文学奖得主) 建议下, 用 Gaia 一词来命名这一假说的。此后, Lovelock 与美国生物学家琳·马古利斯 (Lynn Margulis) 合作, 明确并完善了作为超级有机体的地球理论 / 假说 (Margulis and Lovelock, 1974)。

Gaia 假说的核心思想是认为地球就像

一个超级有机体, 生物演化与环境变化相互作用, 地球生物通过反馈过程对地球气候和环境进行调控, 从而造就适合生物自身持续生存的环境。Gaia 假说强调生物在地球系统演化中起了关键的作用。

Gaia 假说提出后, 赞同和质疑之声从未中断, Lovelock 也为完善和验证假说做出了多方面努力。其中, 两个重要工作对 Gaia 假说论证起了关键作用。首先, Lovelock 与合作者通过研究海洋和大气圈的硫循环, 发现海洋浮游生物—大气凝结核—气候之间存在反馈链, 即高温将导致海洋浮游生物爆发, 使得海洋和大气中 DMS (二甲基硫) 通量增加, DMS 在大气中氧化成 SO_4 , 并形成硫酸盐气溶胶, 成为云凝结核, 从而增加云量和反照率, 导致气候变冷 (Charlson et al., 1987)。这一过程揭示了海洋生物和气候之间存在重要的负反馈机制 (CLAW 假说)。另一个工作是雏菊世界实验 (Daisyworld Experiment; 图 1)。Lovelock 与合作者及后继者设计了一系列的模型实验, 通过从简单 (单色雏菊, 双色雏菊) 到复杂 (多色雏菊) 的雏菊盖度—反照率—气候反馈过程模拟, 阐明了生物对环境的自适应和自调控过程 (Watson and Lovelock, 1983)。

事实上, 我们也已从地球演化历史中看到, 生物影响了大气圈 O_2 演化过程, 植物可以增加化学风化强度, 影响大气 CO_2 浓度, 海洋钙质生物埋藏可以形成强大的

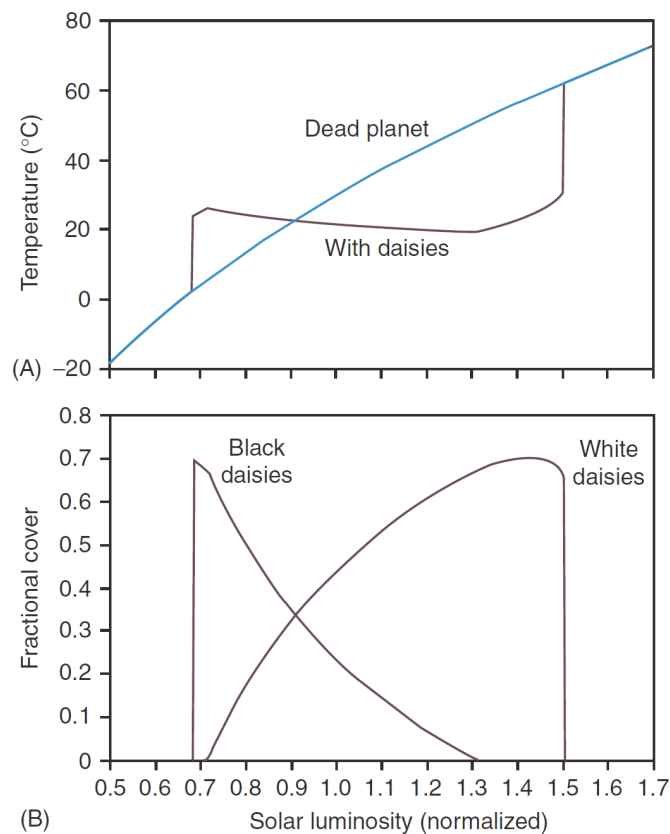


图 1 雏菊世界模型，显示黑白雏菊响应环境变化过程中的物竞天择，能够形成行星尺度的环境 - 生物自我调控机制 (Watson and Lovelock, 1983)

碳泵，植物光合作用和有机质埋藏也能影响大气 CO_2 浓度变化，这些过程都显示生物能够起到调控地球气候的作用。因此，虽然学术界对 Gaia 假说还存在争议甚至轻视，但 Gaia 假说在理解生物与地球系统关联方面无疑具有强大的解释力。我们注意到，Kump 等人在《The Earth System》一书中就花了整章篇幅来介绍 Gaia 思想和雏菊世界气候系统。

二、Gaia 2.0

在解释过去 35 亿年来行星地球 - 生命自我调控上，Gaia 假说是有效的和富有启发性的，而最近 Science 杂志发表了

Timothy M. Lenton 和 Bruno Latour 两位学者的观点文章，认为现今地球已进入“人类世”，地球 - 生命自我调控系统也出现了“转型”，从无目的、无意识状态转变为具有（人类）自我意识的状态。在这样的 Gaia 地球内部，从个人行为到全球性地球工程计划，都是有意识的选择和行动，这就使得 Gaia 进入了一个全新的状态，作者称之为“Gaia 2.0”。作者提出，考虑到人类行为的影响力和目的性，Gaia 2.0 概念可能成为促进全球可持续发展的有效认识框架。或者，我们也可以称之为理解人类世地球系统的新范式。

Lenton 和 Latour 认为，Gaia 假说为我们理解地球 - 生命系统功能和演化提供



了重要框架，这可以帮助我们从中学习如何创建地球—生命新系统 Gaia 2.0。他们提出，Gaia 有三个重要特征值得关注，分别是：自养性 (autotrophy)，网络性 (networks) 和层级性 (heterarchy)。

(1) 自养性：在 Gaia 中，营养成分会被循环利用，且循环回路呈闭合状态，使得资源得以可持续利用；

(2) 网络性：Gaia 是由微生物参与的自适应的网络构成的，微生物构成了全球生物地球化学循环的基础，保持功能冗余的生物多样性，将有助于 Gaia 形成强大的自我调节功能；

(3) 层级性：在不同空间和时间尺度上，Gaia 受完全不同的机制调控，如在构造尺度、千年尺度和十年—年际尺度上，气候变化和碳循环的过程和机制就完全不同。

而在 Gaia 2.0，我们看到的是化石能源和资源的过度利用和不可持续性开发，固体、液体和气体废弃物及有毒成分的任意排放和非循环利用，多样性冗余的缺失，全球资源—经济治理结构中面临的局地、短期收益与全球性、长期效益之间的矛盾，以及气候系统的不稳定性和面对人类活动干扰的反应脆弱性。因此，如何借鉴 Gaia 地球系统的结构功能框架，是创建地球—生命新系统 Gaia 2.0 的迫切课题。

三、讨论

如何构建可持续的地球—生命新系统 Gaia 2.0？Lenton 和 Latour 在文章中写道，“在原有 Gaia 概念和 Gaia 2.0 之间划一条线，让我们有机会重新评估我们的总体目标，以及实现它们的手段”。从 Gaia 理解

框架我们认识到，没有生物多样的、维持生命的地球系统，人类的繁荣是不可能的。Lovelock 也不断发出警告，Gaia 地球的功能在不断衰退和丧失（见《The Vanishing Face of Gaia: A Final Warning》）。

那么，在 Gaia 2.0，我们应该做什么？Lenton 和 Latour 指出，首先需要人类社会作出有自我意识的自我调控，汲取从 Gaia 获得的教训，科学家需要与政治家、社会活动家和公众合作，同时，科学机构需要在诸多领域发挥作用，包括增强对环境、生态和 Gaia 功能损伤的监测感知力，提高监测质量，改进模型等等，并对环境变化和社会反应之间的时滞进行追踪，为 Gaia 的自我调控功能增加一些（人类）自我意识的响应。

当然，Gaia 作为一个地球系统认识框架，对地球系统科学建立也具有重要启示意义。多年前我国一些科学家就对 Gaia 假说给予过充分关注，刘东生（2006）就将其称为地球系统科学中初露端倪的假说之一，今天我们也可以将 Gaia 假说看作是地球系统科学的一个重要理论支柱。而 Gaia 2.0 的提出则警示我们，在加强地球系统科学理论建设的同时，人类世面临的挑战已经在敦促我们开展地球系统科学的应用和实践建设了。如果说 Gaia 假说建立了地球生理学 (Geophysiology) 的理论，那么 Gaia 2.0 的提出则是促使我们真正开始地球工程学 (Geoengineering) 甚至是行星医学 (Planetary Medicine) 的实践了，而这一实践的目标，就是（有意识地）建设更好的能够维持可持续生存与发展的地球—生命新系统。



主要参考文献

刘东生. 走向“地球系统”的科学: 地球系统科学的学科雏形及我们的机遇. 中国科学基金, 2006,(5):266-271. ([原文链接](#))

Charlson R J, Lovelock J E, Andreae M O, et al. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate[J]. Nature, 1987, 326(6114): 655-661. ([原文链接](#))

Lenton T M, Latour B. Gaia 2.0: Could humans add some level of self-awareness to Earth' s self-regulation [J]. Science, 2018, 361(6407): 1066-1068. ([原文链接](#))

Lovelock J E. Gaia as seen through the atmosphere[J]. Atmospheric Environment, 1972, 6(8): 579-580. ([原文链接](#))

Margulis L, Lovelock J E. Biological modulation of the Earth' s atmosphere[J]. Icarus, 1974, 21(4): 471-489. ([原文链接](#))

Watson A J, Lovelock J E. Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 1983, 35(4): 284-289. ([原文链接](#))

(撰稿: [熊尚发](#) / 新生代室)



PNAS : 18 亿年前地球大气含氧量低

目前地球大气含氧量约为 21% (体积比), 但如何才能知道地球历史时期的大气含氧量以及它的演化过程? 要回答这个问题, 最简单和直接的方法当然是直接获取过去的大气样本, 但过去的大气样本难以保存, 基本限制了我们通过直接测试的方法来重建过去。不过, 还可以借助间接方法, 例如在地表化学风化过程中, 氧气的参与会导致陆地表面元素铁 (Fe)、锰 (Mn) 发生迁移, 通过对古土壤中 Fe、Mn 的迁移行为进行分析, 就可以反演历史大气含氧量 (Zbinden et al., 1988)。

美国耶鲁大学学者 Bellefroid et al. (2018) 近期在 PNAS 发表了最新成果, 他们试图通过另外一种间接的地球化学方法——碳酸盐岩中铈元素的异常, 来重建过去大气的含氧量。镧系元素铈 (Ce) 能够发挥作用主要是基于两方面的认识: (1) 大气中含氧量的高低会直接导致海水中溶解氧的变化; (2) 相对于相邻的镧系元素

(La, Pr, Nd), 海洋水体中含氧量的多少对于 Ce 的富集和亏损影响最为明显, 氧气会将水体中溶解的三价 Ce 氧化为四价 Ce, 并附着在颗粒物上沉积。海水中的这些化学行为可以被完整地记录在碳酸盐岩中 (Wallace et al., 2017; 图 1)。

Bellefroid et al. (2018) 选取加拿大西北地区 18.7 亿年前沉积的碳酸盐岩记录——Pethei 群作为研究对象。通过对其 Ce 亏损富集行为的分析, 能够大致确定当时只有浅海地区存在溶解氧气, 而深水 (>100 米) 区是没有氧气的, 这与现代海洋是完全不同的景象。由此, 论文定性推论, 大气含氧量较低是深水区缺氧的直接原因。为了做定量评估, 论文基于现代海洋学研究, 建立了海洋 Ce 的氧化模型。结果表明, 尽管在早元古代“大氧化事件”时期 (约 24 亿-21 亿年前), 地球大气含氧量可能一度达到目前水平, 但在 18.7 亿年前却降低到仅约目前大气水平

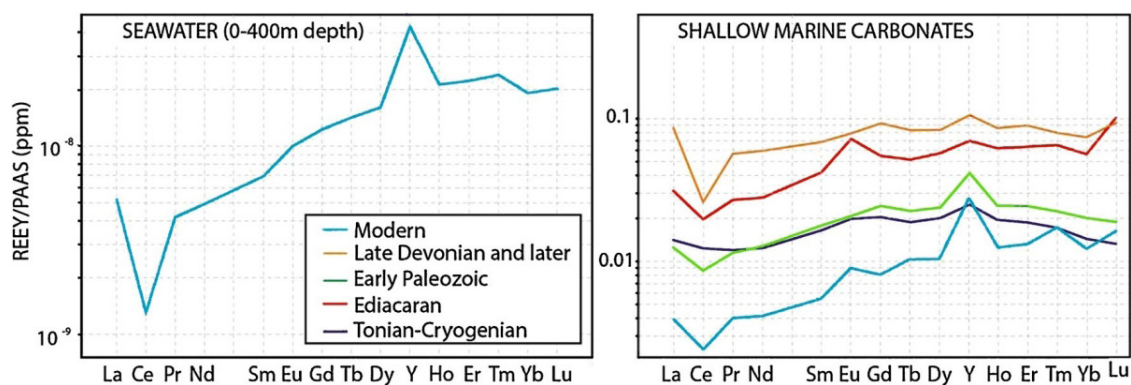


图 1 现代海洋和地质历史时期碳酸盐岩的镧系元素的分布图解 (Wallace et al., 2017)

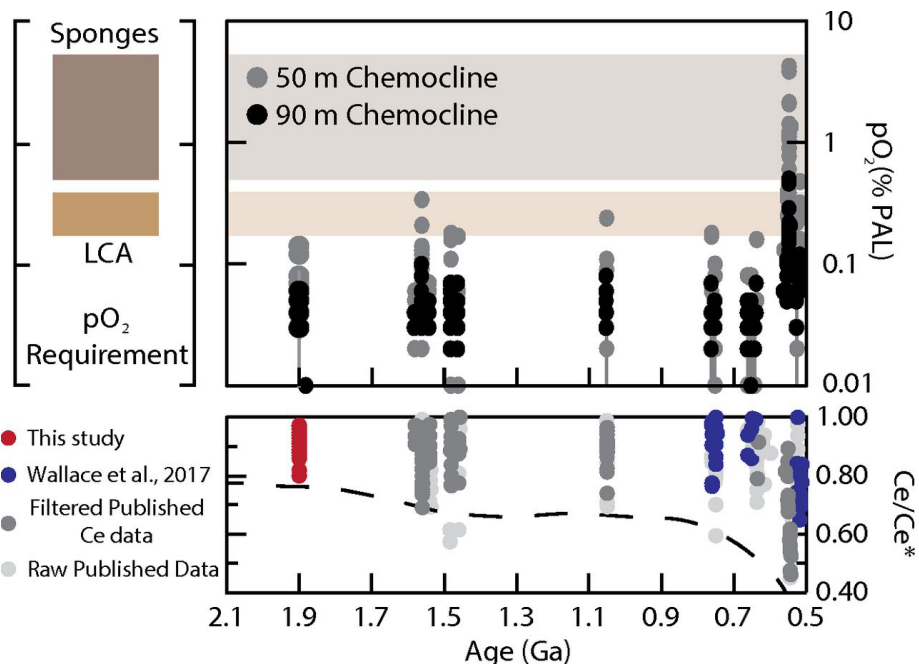


图 2 基于碳酸盐岩的 Ce 异常重构的元古代大气含氧量演化 (Bellefroid et al. 2018)

的 0.1%，低于 LCA（最近共同祖先，last common ancestor）所需要的最低含氧量（现代大气的 0.13%）（图 2）。同时，将元素 Ce 分析数据库进一步扩展，可以看到这种低含氧量大气可能维持了十亿年之久（图 2），成为影响最早复杂生物生态系统形成和早期动物演化的关键因素。另外，实验

结果证实大气含氧量在 6.35 亿年前明显提高（图 2）。

碳酸盐岩是地球历史时期分布最为连续和广泛的沉积记录，如果这种方法能够有效重构大气含氧量，将为地球大气的氧气演化绘制一个更加清晰的图景。

主要参考文献

- Bellefroid E J, Hood A S, Hoffman P F, et al. Constraints on Paleoproterozoic atmospheric oxygen levels[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018: 201806216. ([原文链接](#))
- Wallace M W, Shuster A, Greig A, et al. Oxygenation history of the Neoproterozoic to early Phanerozoic and the rise of land plants[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017, 466: 12-19. ([原文链接](#))
- Zbinden E A, Holland H D, Feakes C R, et al. The Sturgeon Falls paleosol and the composition of the atmosphere 1.1 Ga BP[J]. Precambrian Research, 1988, 42(1-2): 141-163. ([原文链接](#))

（撰稿：[冯连君](#) / 科技平台）



PNAS : 磁性矿物揭示中元古代湖泊氧化

生物演化是一条长河，为了揭示演化历程及其环境驱动因素，研究人员一方面从沉积地层里努力搜寻古生物记录，另一方面奋力开发和应用可以示踪古环境的沉积学、地球化学指标，并重建二者的相互关系。目前，我们对地球表层氧化状态及生物演化有了框架性认识(图1)(Lyons et al., 2014)，认为生物演化进程受制于大气和海洋氧化历程。例如，古元古代末期至新元古代中期(约18-8亿年)，真核生进化迟缓，可能受限于当时较低的大气氧气含量；至新元古代中后期(约8-5.4亿年)，动物终于姗姗而来，可能得益于大气氧气含量的显著增加(图1)。然而，氧气含量与生物演化的确切关系，并非如此简单，充满争论。这些争论，一定程度上源于地球化学指标示踪环境的多解性或不确定性。

目前，示踪古环境的地球化学方法层

出不穷，其中铁组分方法因其简洁、有效而得到广泛应用(Raiswell et al., 2018)。该方法基于“缺氧环境相对易于富集高活性铁、硫化环境相对易于富集黄铁矿”的原理，通过化学流程针对性提取沉积岩里不同Fe价态的矿物(如菱铁矿、铁白云石、针铁矿、赤铁矿、磁铁矿、黄铁矿等)含量，根据其相对比例及与总铁的比例关系，对氧化、缺氧铁化或硫化环境进行区分别(图2)。然而，该方法的环境判别体系存在一个过渡区域，对相关环境识别模棱两可；同时该方法的判别阈值建立自海相沉积物，对于陆相沉积物的适用性并不明确。例如，北美中元古界Nonesuch组(约11亿年)陆相地层大量产出最早的非海相真核生物化石(Strother et al., 2011)，支持“陆地氧化环境是真核生物演化辐射的摇篮”的观点，而铁组分研究却揭示该组沉积于缺氧环境(Cumming et al., 2013)，对真

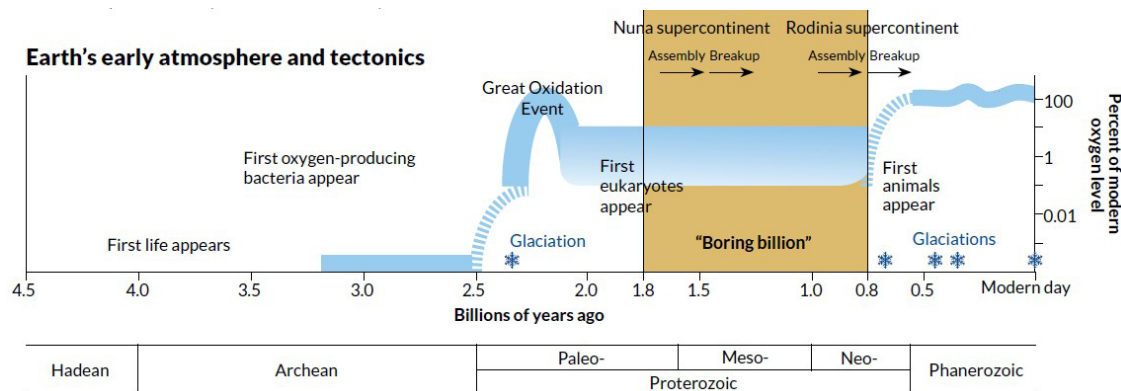


图1 地球大气氧气含量及生物演化概略图

其中18-8亿年期间，大气氧气含量较低，真核生物演化缓慢，被称为“无聊的十亿年”(图自 Science News, Lyons et al., 2014)

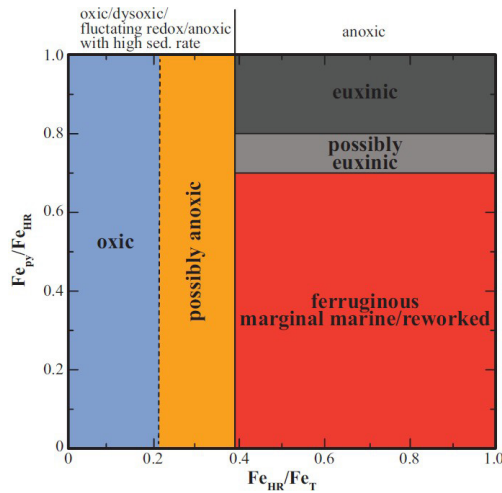


图 2 铁组分方法对氧化还原环境的判别体系 (Raiswell et al., 2018)

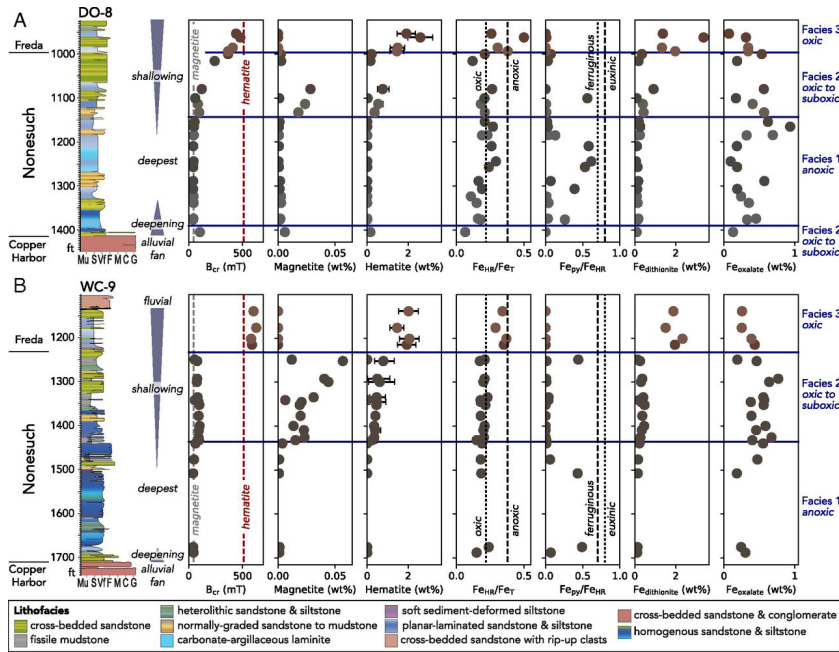


图 3 Nonesuch 组代表性钻井的磁性矿物学和铁组分地球化学剖面

自下而上，水体由深变浅，沉积环境由缺氧变氧化（修改自 Slotznick et al., 2018）

核生物与氧化环境的关系提出了挑战。

在此背景下，美国加州大学伯克利分校和斯坦福大学研究人员近期在 PNAS 发表最新成果，进一步深入探讨了中元古界 Nonesuch 组湖相地层的氧化还原环境属性及其对真核生物演化的启示 (Slotznick et al., 2018)。首先，他们基于岩芯样品建立

了铁组分地球化学剖面 (图 3)，揭示部分层段沉积环境处于氧化至缺氧过渡区域，难以精确判定。然后，他们综合沉积学、磁性矿物学、元素地球化学及显微成像技术 (图 4)，全面分析了样品里 Fe 的赋存矿物类型及其含量，发现自下至上分别为富黄铁矿 - 贫赤铁矿带、富磁铁矿 - 赤铁矿带、

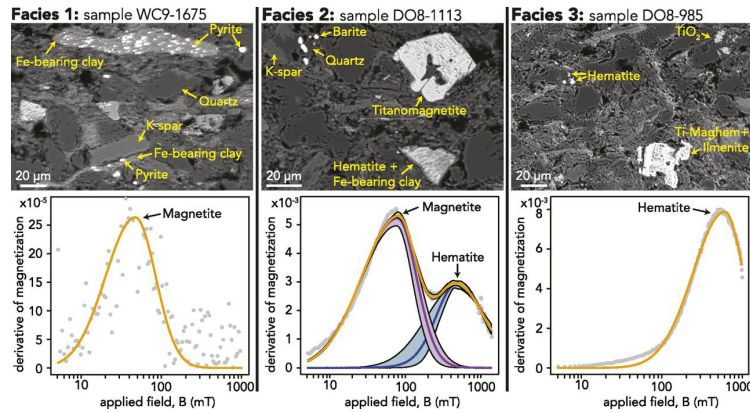


图4 Nonesuch 组各相带的典型背散射图像和矫顽力频谱，揭示不同的富铁矿物组合

相带 1 以黄铁矿和少量磁铁矿为特征，相带 2 以磁铁矿和赤铁矿为特征，相带 3 以赤铁矿为特征 (Slotznick et al., 2018)

富赤铁矿带，分别响应了缺氧、贫氧 - 氧化、氧化环境 (图 3)。因此，他们对该组陆相沉积环境的氧化还原属性进行了精确约束，揭示 11 亿年前的 Nonesuch 古湖泊为一个浅层水体氧化、中层水体贫氧、深层水体缺氧的垂向结构。其中，浅层氧化水体为该组真核生物提供了宜居的环境，促

进了其演化。

该研究一方面创新性地结合磁性矿物学和显微成像学等手段，对传统铁组分方法进行了优化与修正，具有重要的应用价值；另一方面进一步揭示了中元古代陆相氧化还原环境与真核生物演化的关系，具有重要的科学意义。

主要参考文献

- Cumming V M, Poulton S W, Rooney A D, et al. Anoxia in the terrestrial environment during the Late Mesoproterozoic[J]. *Geology*, 2013, 41(5): 583-586. ([原文链接](#))
- Lyons, T W, Reinhard, C T, Planavsky, N J, 2014. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere[J]. *Nature*, 506: 307-315. ([原文链接](#))
- Raiswell R, Hardisty D S, Lyons T W, et al. The iron paleoredox proxies: A guide to the pitfalls, problems and proper practice[J]. *American Journal of Science*, 2018, 318(5): 491-526. ([原文链接](#))
- Slotznick S P, Swanson-Hysell N L, Sperling E A. Oxygenated Mesoproterozoic lake revealed through magnetic mineralogy [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115: 12938-12943. ([原文链接](#))
- Strother P K, Battison L, Brasier M D, et al. Earth's earliest non-marine eukaryotes[J]. *Nature*, 2011, 473: 505-509. ([原文链接](#))

(撰稿：张恭境，[周锡强](#)/油气室)



PNAS : 11 亿年前光合细菌主导了海洋生态系统

初级生产者是指能够将自然界中的无机物、光等非生物能量转化为有机物和生物能量并进行传递的自养生物，如藻类。初级生产者是海洋生态系统演变的重要驱动力之一，它们的元素组成、大小、丰度等能够影响和调控海洋食物链中

物质与能量的迁移与转化，从而影响生态系统的演化 (Irwin et al., 2006)。

在地球早期的海洋中，光合细菌和真核藻类被认为是主要的初级生产者，它们为后续高等生物（如动物）的出现及繁盛奠定了基础 (Knoll et al., 2007)。化石记录

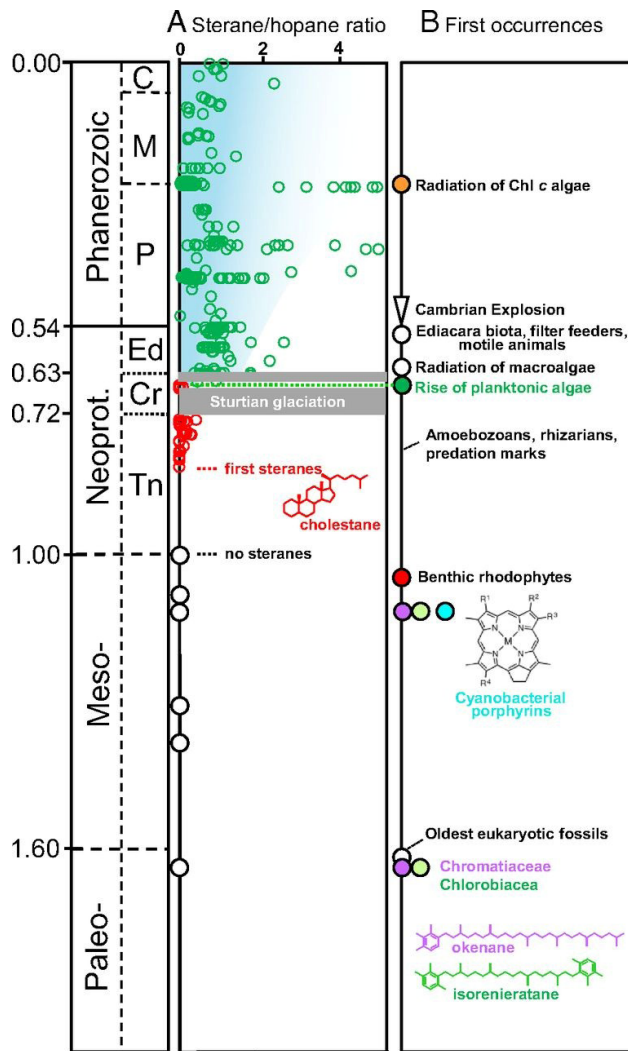


图 1 生物标记物和化石数据的年代历史 (Gueneli et al., 2018)

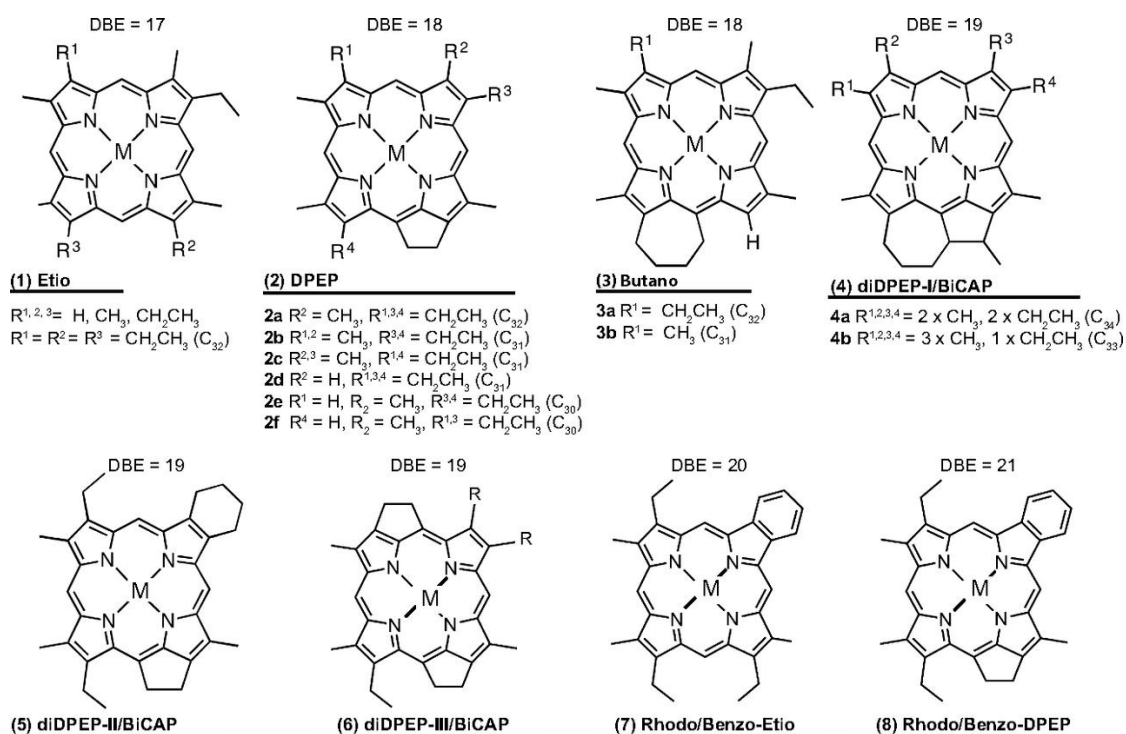


图2 卟啉的多种金属复合体结构 (Gueneli et al., 2018)

表明, 已知最古老的真核光能营养型生物的化石距今约 10.5 亿年; 6.3 ~ 5.4 亿年前的埃迪卡拉纪与 5.4 ~ 2.5 亿年前的古生代, 红藻和绿藻主导 (Knoll et al., 2007) 了海洋生态系统; 2.5 亿年前, 含叶绿素 c 的藻类 (甲藻、硅藻和颗石藻等) 是有机物质和能量的主要贡献者 (图 1)。至于 18 ~ 8 亿年前中元古代的海洋生态系统, 藻类是不是主要的初级生产者, 一直以来没有定论。

澳大利亚国立大学 Gueneli 及其合作者近期在 PNAS 发表了最新研究成果, 他们通过傅里叶变换离子回旋共振质谱法, 在 11 亿年前的黑色页岩中发现了一种卟啉 (geoporphyrins) (图 2), 并以此建立了一套测定前寒武纪细菌和真核初级生产者活性的方法。卟啉是细菌叶绿素的分子化石, 其氮同位素组成 (ϵ_{por} 值) 在很大程度上不受物理和化学环境的影响, 可以定量

反映生态系统中的主要光能营养型生物的信息, 因此是研究早期环境中初级生产者的突破口 (Higgins et al., 2011; Fulton et al., 2012)。Gueneli 等通过对卟啉的氮同位素分析发现, 当时的主要初级生产者是蓝细菌, 另外非需氧的绿硫菌和紫硫菌也参与了光合作用。然而, 地层中并没有发现真核生物来源的标记物——甾烷, 结合较低的 ϵ_{por} 同位素偏移值, 表明真核浮游藻类在当时海洋中非常稀缺, 因此排除了藻类是当时海洋主要初级生产者的可能。

该研究的发现解释了后生动物等大型生物在中元古代还没有出现的原因: 当时食物链底层主要的生产者是体型较小的光合细菌, 它们提供的物质和能量仅能维持体型较小的原生动物的生存, 而不足以支持复杂生态系统的演化。



主要参考文献

- Fulton J M, Arthur M A, Freeman K H. Black Sea nitrogen cycling and the preservation of phytoplankton $\delta^{15}\text{N}$ signals during the Holocene[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(2). ([原文链接](#))
- Gueneli N, McKenna A M, Ohkouchi N, et al. 1.1-billion-year-old porphyrins establish a marine ecosystem dominated by bacterial primary producers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018: 201803866. ([原文链接](#))
- Knoll A H, Summons R, Waldbauer J R, et al. The geological succession of primary producers in the oceans[M]// Falkowski P, Knoll A H (Eds) .Evolution of Primary Producers in the Sea. 2007. Burlington: Elsevier :133-163. ([原文链接](#))
- Irwin A J, Finkel Z V, Schofield O M E, et al. Scaling-up from nutrient physiology to the size-structure of phytoplankton communities[J]. Journal of Plankton Research, 2006, 28(5): 459-471. ([原文链接](#))

(撰稿: 刘佳, [林巍](#) / 地球与行星室)



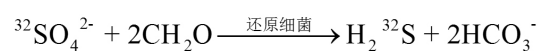
Science : 古新世 - 始新世极热事件时期海洋大规模脱氧

在古新世-始新世界线附近(~55.5 Ma), 地球表层系统曾发生过一次历时短暂(~15万年)、因巨量CO₂注入海气系统而导致的快速增温事件, 即PETM事件(McInerney and Wing, 2011)。据估算, PETM时期释放到海洋—大气系统中的CO₂总量同工业革命以来至21世纪末的人为排放的CO₂量大致相当(Dickens et al., 1995)。因此, 国际上大量学者将PETM事件视作现今人为变暖的对比实例开展研究(Zeebe and Zachos, 2013)。该事件对海洋生物产生了显著的影响, 导致底栖有孔虫发生大规模灭绝(McInerney and Wing, 2011)。有学者提出底栖有孔虫发生灭绝的一个可能原因是深海缺氧, 但由于缺乏可靠的指

标记录, 是否存在大范围的深海缺氧环境一直没有定论。

加拿大多伦多大学地球科学系 Yao et al.(2018) 近期在 Science 发表了最新成果, 他们通过对太平洋和南大西洋三个钻孔中自生重晶石矿物的硫同位素($\delta^{34}\text{S}$)分析, 发现PETM时期 $\delta^{34}\text{S}$ 记录了一个~1‰的正偏移(图1)。由于重晶石沉淀过程中并未发生明显的同位素分馏, 因此其 $\delta^{34}\text{S}$ 值主要记录了海水SO₄²⁻的同位素信号。

海水硫同位素的变化主要受控于细菌参与的硫酸盐还原作用:



由于微生物的参与, 该反应偏向于利

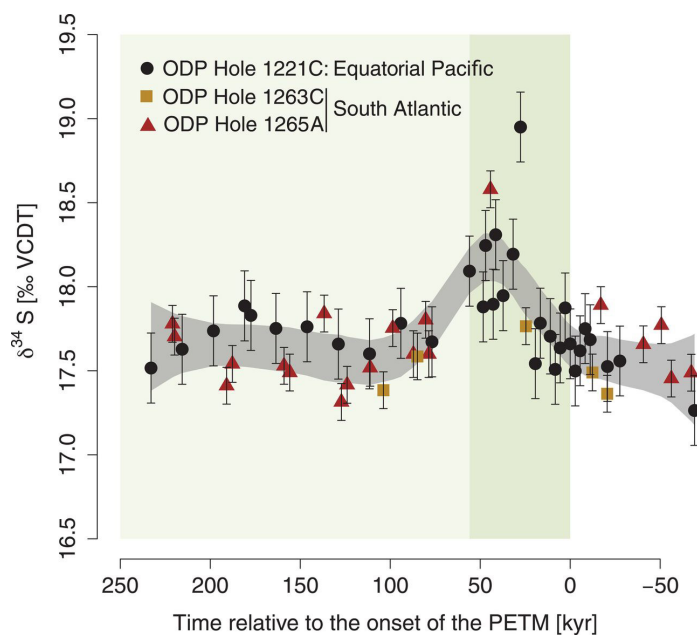


图1 海洋自生重晶石矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 演化历史 (Yao et al., 2018)



用海水中的 ^{32}S ，导致海水中溶解硫酸盐 ^{34}S 富集。简而言之，海水中由细菌参与的硫酸盐还原作用越强，海水的 $\delta^{34}\text{S}$ 越偏正。而上述还原反应得以发生的前提是低氧环境，要求海水的 O_2 浓度低于 $4 \mu\text{M}$ 。也就是说，只有当海水溶解氧浓度低于一定的水平，微生物参与的硫酸盐还原作用才会大幅度加强，促使大量富 ^{32}S 的硫酸盐还原成 H_2S 气体，最终导致海水硫酸盐 ^{34}S 富集，体现为 $\delta^{34}\text{S}$ 的正偏移。据模型估算，要使海水溶解 SO_4^{2-} 粒子 $\delta^{34}\text{S}$ 发生 $\sim 1\%$ 的正偏移，缺氧海水体积至少增加一个数量级。因此，自生重晶石矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 显著的正偏移

表明 PETM 时期中层和深层海水发生大规模的脱氧作用，同时产生大量对生物有致命效应的 H_2S 气体。

该研究发现解释了 PETM 时期海洋底栖生物灭绝的原因：中层和深层海洋大规模脱氧，导致微生物参与的硫酸盐还原作用加强，产生大量剧毒的 H_2S 。这一认识对当前全球变暖具有警示意义：在不减排的前提下，大气 CO_2 浓度的持续增加将诱发全球快速增温，导致深海脱氧，硫酸盐还原作用增强，产生大量 H_2S ，威胁深海生态系统和渔业资源，并造成重大经济损失。

主要参考文献

- Dickens G R, O'Neil J R, Rea D K, et al. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 1995, 10(6): 965-971. ([原文链接](#))
- McInerney F A, Wing S L. The Paleocene-Eocene Thermal Maximum: A perturbation of carbon cycle, climate, and biosphere with implications for the future[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2011, 39: 489-516. ([原文链接](#))
- Yao W, Paytan A, Wortmann U G. Large-scale ocean deoxygenation during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum[J]. *Science*, 2018:DOI: 10.1126/science.aar8658. ([原文链接](#))
- Zeebe R E, Zachos J C. Long-term legacy of massive carbon input to the Earth system: Anthropocene versus Eocene[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2013, 371 (2001) :DOI: 10.1098/rsta.2012.0006. ([原文链接](#))

(撰稿：陈祚伶 / 新生代室)



PNAS : 人类世地球的演化路径

2013年, IPCC第五次评估报告(AR5)论定, 地球整体全面变暖已毋庸置疑, 人为影响(尤其是大气CO₂浓度增加)极有可能是造成20世纪中叶以来全球变暖的主要原因。报告还认为, 温室气体继续排放会造成进一步变暖, 并导致气候系统所有组成部分发生变化。

2017年, 作为非正式的地质年代名称, “人类世”被国际地层委员会接受, 表明人类对地球系统的影响已经超出了全新世的自然变化范围。

2018年年初, 北美大部持续暴雪, 欧洲遭遇风暴袭击, 我国大范围低温雨雪天气。在刚刚过去的两个月里, 欧洲、亚

洲、美洲都遭遇了罕见的高温, 甚至北极圈内出现了32度以上的异常天气。7月31日, 正当北京人溽热难耐时, Nature Communications刊发论文《North China Plain threatened by deadly heatwaves due to climate change and irrigation》(Kang and Eltahir, 2018), 直接点名我国华北地区: “若温室气体未大幅减排, 到2070年至2100年, 华北平原气温将达到35°C的湿球温度阈值, 致命热浪将频繁发生。”

北半球的异常天气似乎在为IPCC的预测提供证据支持。实际上, 自1988年IPCC成立以来, 评估气候变化对人类福祉的影响一直是研究重心之一。古气候学者

表1 地球气候系统的临界要素(Lenton et al., 2008)及其控制参数、关键值、转换所需的时间尺度和影响

Tipping element	Feature of system, F (direction of change)	Control parameter(s), p	Critical value(s), $^{\dagger} p_{crit}$	Global warming ^{†*}	Transition timescale, $^{\dagger} T$	Key impacts
Arctic summer sea-ice	Areal extent (-)	Local ΔT_{air} , ocean heat transport	Unidentified [§]	+0.5–2°C	~10 yr (rapid)	Amplified warming, ecosystem change
Greenland ice sheet (GIS)	Ice volume (-)	Local ΔT_{air}	+~3°C	+1–2°C	>300 yr (slow)	Sea level +2–7 m
West Antarctic ice sheet (WAIS)	Ice volume (-)	Local ΔT_{air} , or less ΔT_{ocean}	+~5–8°C	+3–5°C	>300 yr (slow)	Sea level +5 m
Atlantic thermohaline circulation (THC)	Overtipping (-)	Freshwater input to N Atlantic	+0.1–0.5 Sv	+3–5°C	~100 yr (gradual)	Regional cooling, sea level, ITCZ shift
El Niño–Southern Oscillation (ENSO)	Amplitude (+)	Thermocline depth, sharpness in EEP	Unidentified [§]	+3–6°C	~100 yr (gradual)	Drought in SE Asia and elsewhere
Indian summer monsoon (ISM)	Rainfall (-)	Planetary albedo over India	0.5	N/A	~1 yr (rapid)	Drought, decreased carrying capacity
Sahara/Sahel and West African monsoon (WAM)	Vegetation fraction (+)	Precipitation	100 mm/yr	+3–5°C	~10 yr (rapid)	Increased carrying capacity
Amazon rainforest	Tree fraction (-)	Precipitation, dry season length	1,100 mm/yr	+3–4°C	~50 yr (gradual)	Biodiversity loss, decreased rainfall
Boreal forest	Tree fraction (-)	Local ΔT_{air}	+~7°C	+3–5°C	~50 yr (gradual)	Biome switch
Antarctic Bottom Water (AABW)*	Formation (-)	Precipitation–Evaporation	+100 mm/yr	Unclear [¶]	~100 yr (gradual)	Ocean circulation, carbon storage
Tundra*	Tree fraction (+)	Growing degree days above zero	Missing	—	~100 yr (gradual)	Amplified warming, biome switch
Permafrost*	Volume (-)	$\Delta T_{permafrost}$	Missing	—	<100 yr (gradual)	CH ₄ and CO ₂ release
Marine methane hydrates*	Hydrate volume (-)	$\Delta T_{sediment}$	Unidentified [§]	Unclear [¶]	10 ³ to 10 ⁵ yr (> T_E)	Amplified global warming
Ocean anoxia*	Ocean anoxia (+)	Phosphorus input to ocean	+~20%	Unclear [¶]	~10 ⁴ yr (> T_E)	Marine mass extinction
Arctic ozone*	Column depth (-)	Polar stratospheric cloud formation	195 K	Unclear [¶]	<1 yr (rapid)	Increased UV at surface

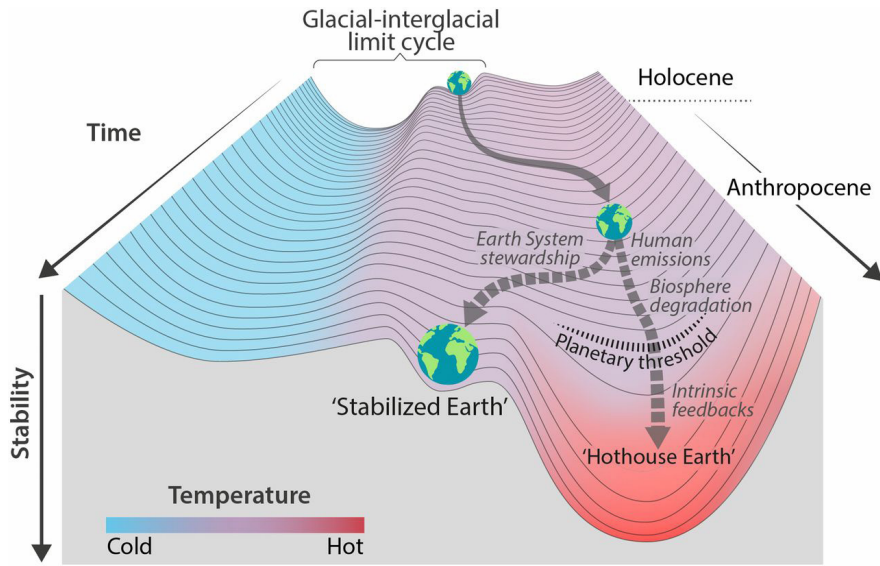


图 1 地球系统脱离冰期 - 间冰期循环后面临的稳定性模型 (Steffen et al., 2018)

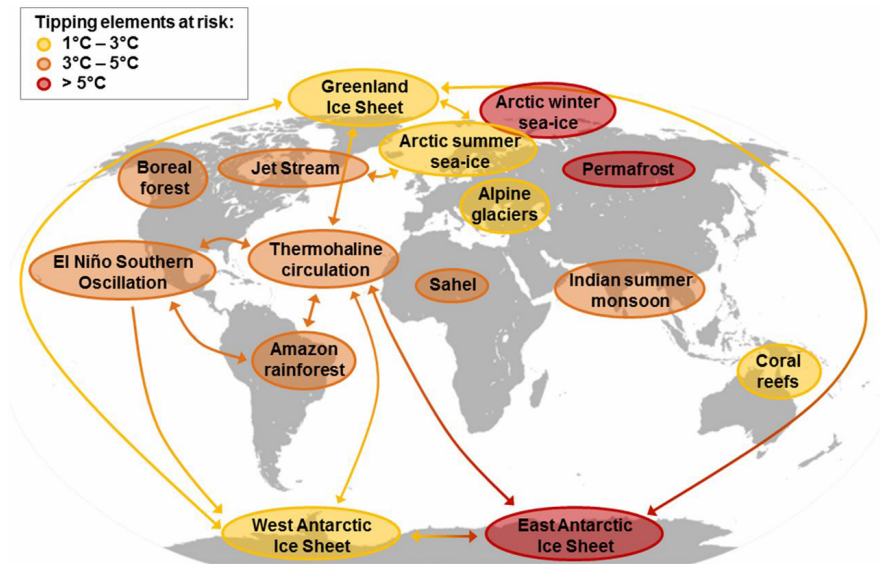


图 2 主要临界要素及其潜在的临界级联 (Steffen et al., 2018)

用“突变”来描述气候从一种稳定状态跳跃式变到另一种稳定状态，“突变”通常局限于某个次大陆尺度，但产生了半球甚至全球性影响。地球系统学者认为，“突变”可能较慢，甚至可逆，而且不一定局限于气候状态，他们倾向于用临界要素（tipping elements）和临界点（tipping point）来描述。临界要素通常要有一个与人类活动有关的

控制参数，突破临界点后要素状态发生本质变化，并对人类有重要影响。Lenton et al.(2008)指出，地球气候系统有 15 个临界要素(表 1, 后增加为 17 个), 涉及冰冻圈、生物圈和海洋—大气环流等地球系统中最为脆弱的环节。

这些临界要素的控制参数、临界点的升温幅度、转变速率以及影响各不相同。



因此，要评估人类世中地球系统的命运，不仅要深入认识地球系统不同尺度的生物地球物理化学过程，还要借助复杂性科学理论，并与社会与人文科学相融合。

2018年8月6日，瑞典学者 Will Steffen 领衔的国际团队受邀在 PNAS 的 Perspective 栏目发表论文，以古气候动力学、现代观测和复杂性科学为基础，分析了“人类世”里地球系统的可能演变轨迹。

文中认为，第四纪晚期以来的地球系统演化是研究人类世地球系统演化的背景。过去 120 万年中，受控于地球轨道和倾斜程度的缓慢变化，地球气候在冰期 - 间冰期之间交替。尽管每个旋回不完全相同，但整体演化路径一致。全新世是一个间冰期，已经持续了 10000 多年，和过去 120 万年中的间冰期长度相当，温暖程度相似。但是，在过去半个世纪，受气候系统快速发展以及人类活动影响，人类世的地球系统正快速脱离冰期 - 间冰期旋回（图 1）。当前已经比工业革命前升温 1°C ，大气 CO_2 浓度超过第四纪所有冰期旋回。有理由相信，地球系统已经通过了潜在演化路径中的三岔路口，任何微小的波动都能使地球跳出下一个冰期旋回。

对于未来的预测，之前大多假定 CO_2 累计排放与温度上升之间存在准线性关系，关注人类排放温室气体的多寡——这其实限定了未来可能路径的范围。作者分析认为，地球系统内部的生物地球物理反馈过程可能作用更大：强烈非线性的反馈过程，可能成为下个世纪地球系统演化中主导因素。大量研究已经表明，相对工业革命前升温 2°C ，可以激活许多重要临界要素，导致进一步升温，引发多米诺效应或临界级

联，造成地球系统温度失控（图 2）。作者建议将 2°C 升温作为地球系统的行星阈值，一旦越过，地球系统自身固有的生物地球物理反馈将控制系统演化，地球将最终滑入温室地球的深渊。为了区别于太阳能温室 (greenhouse)，作者特意使用了人工热源温室 (hothouse) 来描述温度失控后的地球状态。

不难发现， 2°C 升温阈值正是 2016 年签署的《巴黎气候变化协定》的主要目标：将全球平均气温比工业革命前上升幅度控制在 2°C 以内。但是，去年发表的研究表明，到 2100 年，升温低于 2°C 几乎不可能实现 (Raftery et al., 2017)。根据目前的二氧化碳排放情况，到 2050 年，大气 CO_2 含量将达到 5000 万年以来的最高水平。如果持续到 2250 年，大气 CO_2 含量及其产生的辐射强迫和地球系统响应方式都是过去 4.2 亿年中未曾有过的 (Foster et al., 2017)。

如果人类依然我行我素，那么来日无多。距今 4200-3900 年前的全新世中期，仅仅 1°C 左右的温度变化，就造成了欧亚大陆大范围的文化衰落和社会失序。如果突破 2°C 升温阈值，地球系统沿温室地球路径发展的话，后果将超出社会适应的极限——农业产量降低、物价飞腾、国家贫富分化加剧，以及更严重的生态危机。

人类社会必须在温室状态和冰期 - 间冰期旋回之间找到一种新的“企稳地球路径” (Stablized Earth Trajectory)，在比工业革命前升温 2°C 以内的条件下，竭力维持稳定。理想情形中，这个路径的气温几乎是冰期间 - 冰期循环里的最高值，却避免触发行星阈值，从而保持地球系统的稳定性。

但“企稳地球”已经激活了某些临界



要素，某些关键生物群区的非线性过程和快速变化随时可能发生，人类必须付出极大代价才能避免地球系统越过阈值，需要精心筹划以减少对地球的不利影响，有效监测、改变行为来形成反馈循环。人类社会已经采取了大量手段来形成有利于地球系统稳定的负反馈，这些手段可以分成三类：减排温室气体、提高和创造碳汇、调整地球能量平衡，其中以减排温室气体为

首选。

尽管分析存在某些不确定，作者提醒，这些变革才刚刚起步，地球系统尽管还没有越过温室地球的社会 / 政治临界点，但是企稳地球的大门可能很快就会关上。只有意识到人类是地球系统的一部分，竭尽全力去维护人类社会与地球系统的关系，才能实现企稳地球路径，避免沦入温室地球。

主要参考文献

- Foster G L, Royer D L, Lunt D J. Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years[J]. Nature communications, 2017, 8: 14845. ([原文链接](#))
- Kang S, Eltahir E A B. North China Plain threatened by deadly heatwaves due to climate change and irrigation[J]. Nature communications, 2018, 9(1): 2894. ([原文链接](#))
- Lenton T M, Held H, Kriegler E, et al. Tipping elements in the Earth's climate system[J]. Proceedings of the national Academy of Sciences, 2008, 105(6): 1786-1793. ([原文链接](#))
- Raftery A E, Zimmer A, Frierson D M W, et al. Less than 2°C warming by 2100 unlikely[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(9): 637. ([原文链接](#))
- Steffen W, Rockström J, Richardson K, et al. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, DOI: 10.1073/pnas.1810141115. ([原文链接](#))

(撰稿：[唐自华](#) / 新生代室)



Nature Communications : 公元 774-775 年的强太阳活动——来自树轮 ^{14}C 的证据

碳 14 (^{14}C) 是碳的一种具放射性的同位素，它由宇宙射线撞击空气中的氮原子所产生。地球上 ^{14}C 的多少反映了当时宇宙射线的强度。如何了解过去 ^{14}C 的变化？主要通过测量树木年轮中的 ^{14}C 丰度来实现：含有 ^{14}C 的二氧化碳通过光合作用被树木吸收，储存到当年形成的树轮后， ^{14}C 便不再与外界交换，因此当年大气的 ^{14}C 信息被树木年轮所保存，通过测量年轮每一年的 ^{14}C 变化，就可以恢复古大气中 ^{14}C 的变化，进而了解宇宙射线的强度变化。

日本科学家 Miyake et al. (2012) 曾在对日本树木年轮中 ^{14}C 丰度的测试中发现，

公元 774-775 年 ^{14}C 丰度显著增加，增加幅度达到 12‰，是正常太阳活动所引起的变化幅度的 20 倍（图 1）。此后，该现象在北半球不同区域以及新西兰的树木中均有发现（Jull et al., 2014；Güttler et al., 2015）。上述结果表明：774-775 年 ^{14}C 丰度显著增加的现象很可能是全球性的事件，揭示当时曾发生过一次强宇宙核素事件。

是什么原因导致 774-775 年强宇宙射线核素事件？就目前的认识来看，只有两种已知的现象可以导致宇宙射线强度在一年内发生如此重大的变化：一种是超新星爆发，另一种是强太阳质子事件 (large solar proton event, SPE)。如果是超新星爆发导致

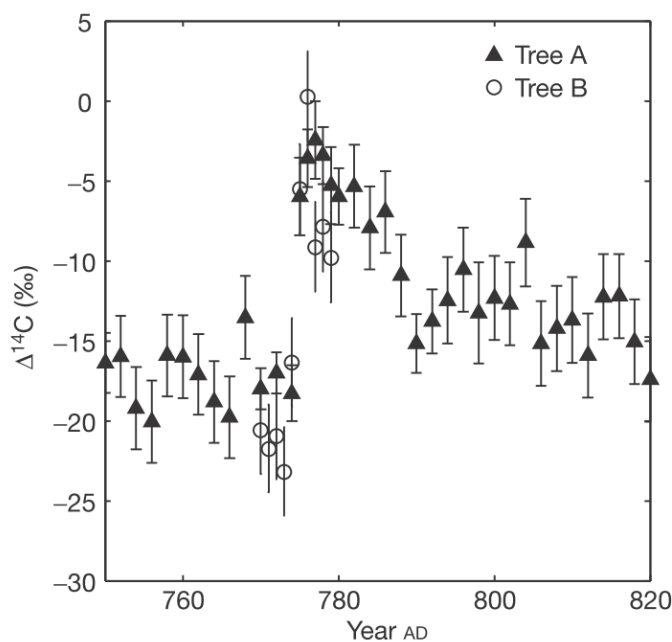


图 1 日本树木年轮中记录的 ^{14}C 在 774-775 年的异常增强现象 (Miyake et al., 2012)

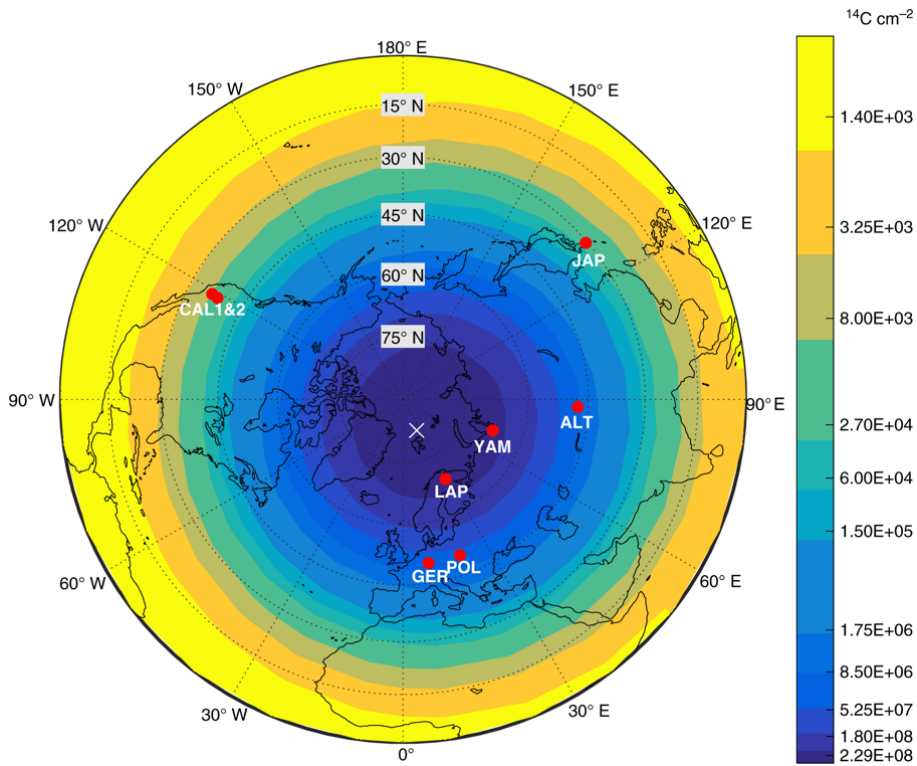


图 2 1956 年强太阳质子事件时不同纬度的 ^{14}C 产率 (Unsitalo et al., 2018)

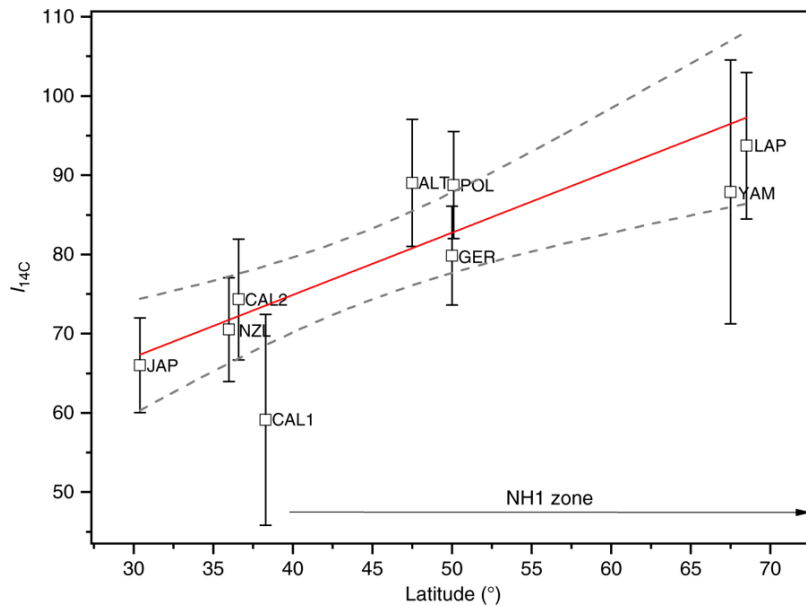


图 3 774-775 年太阳质子事件发生时, ^{14}C 强度与纬度的关系 (Unsitalo et al., 2018)

的, 那么超新星爆发所发出的强光会被肉眼观察到, 但是世界各地并没有这样的记载。那是不是强太阳质子事件导致的呢?

芬兰赫尔辛基大学芬兰自然历史博物馆 Unsitalo 的团队近期在 Nature Communications 上发表最新研究成果, 认



为强太阳质子事件可能是 774-775 年 ^{14}C 丰度显著增加的原因。他们的主要研究思路是：基于现代时期太阳质子事件所导致的 ^{14}C 纬度效应（图 2），通过重建 774-775 年 ^{14}C 与纬度的关系（图 3），来推测 ^{14}C 在 774-775 年间突增的原因。

宇宙射线核素 ^{14}C 的纬度效应是指 ^{14}C 强度在地磁高纬地区较高，在低纬地区较低，呈现较明显的纬度依赖性。原因是地球磁场会影响宇宙射线进入地球大气层，

宇宙射线更容易在极地高纬地区进入大气层，在低纬赤道地区则受到较强的地磁场屏蔽作用，从而造成纬度效应。他们首次建立了 774-775 年事件时树轮 ^{14}C 强度与纬度的关系，发现随纬度的增加， ^{14}C 强度随之增加（图 3），与现代强太阳质子事件时 ^{14}C 与纬度的关系一致（图 2），从而揭示了正是一次强太阳质子事件导致了当年的 ^{14}C 突增的现象。

主要参考文献

- Güttler D, Adolphi F, Beer J, et al. Rapid increase in cosmogenic ^{14}C in AD 775 measured in New Zealand kauri trees indicates short-lived increase in ^{14}C production spanning both hemispheres[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 411: 290-297. ([原文链接](#))
- Jull A J, Panyushkina I P, Lange T E, et al. Excursions in the ^{14}C record at AD 774-775 in tree rings from Russia and America[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(8): 3004-3010. ([原文链接](#))
- Miyake F, Nagaya K, Masuda K, et al. A signature of cosmic-ray increase in AD 774-775 from tree rings in Japan[J]. Nature, 2012, 486(7402): 240. ([原文链接](#))
- Usitalo J, Arppe L, Hackman T, et al. Solar superstorm of AD 774 recorded subannually by Arctic tree rings[J]. Nature communications, 2018, 9: 3495. ([原文链接](#))

【感谢何宏青副研究员对本文的完善】

（撰稿：[许晨曦](#) / 新生代室）



Nature Geoscience : 地质过程与气候对山区生物多样性的影响

山地是地球表面的重要特征，除南极洲以外，山地面积占地球表面的 1/10，其生物数量占陆地生物的 1/4，是全球相当一部分生物物种的起源地。造山过程改变了局地 and 区域气候，造就了多种环境单元，为外来物种的迁移生存、新物种的形成以及物种演化创造了条件。然而，我们对生物多样性的演化、分布与山地形成的关系，仍然知之甚少。

最近，瑞典哥德堡全球生物多样性中心的 Alexandre Antonelli 等在 Nature Geoscience 上发表了题为“Geological and climatic influences on mountain biodiversity”的文章，通过综合多个数据库，从全球及

区域尺度，分析了侵蚀、地形起伏、土壤和气候对陆地四足类动物地理分布的影响，认为地质与气候过程对生物多样性的演变和分布至关重要。研究发现：

(1) 年平均温度和年降水量是影响山区四足类物种丰富度的最重要因素，多数山地物种生活在温暖湿润的地方，但是不同地区有明显差异；而地形起伏、土壤类型和侵蚀是影响四足类分布的主要因素。

(2) 造山过程与生物多样性之间的关联可以分为 4 个阶段（图 1）：

第一阶段：造山运动前为单一、静态的地质景观，生物主要为残遗物种，侵蚀速率和物种形成速率均较低（图 1a）。

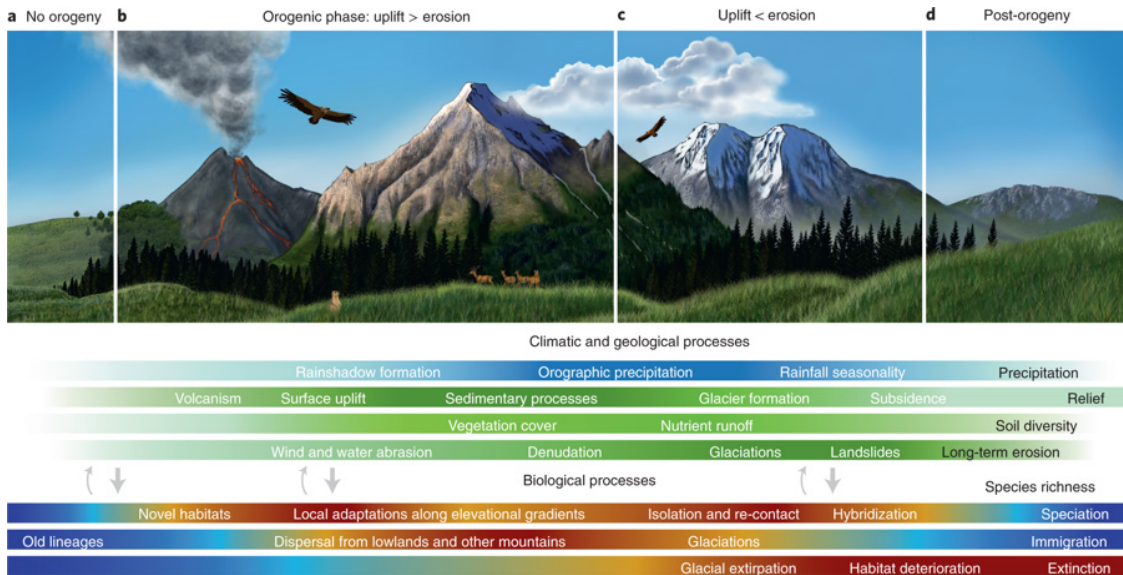


图 1 山地和生物多样性演化的关联

a-d：在造山运动的不同阶段，气候（蓝色条带）和地质（绿色条带）要素通过物种形成、迁移和灭绝（下）影响物种丰富度。条带上的暗色/暖色和浅色/冷色分别代表高值和低值。箭头方向代表气候和地质过程对物种丰富度的影响增强，但也存在生物的反作用（如植物生长在裸露岩石从而增强侵蚀作用，动物挖洞影响土壤）（Antonelli et al., 2018）



第二阶段：随着构造或火山作用，抬升速率超过侵蚀速率，地表隆升，在迎风坡形成地形雨，而背风坡成为雨影区，新的栖息地和土壤类型增多，新环境产生了新物种。当新的栖息地变大，其他物种（如鸟或蝙蝠以及它们携带的种子）从周围的低地或其他山区迁移过来，物种多样性增加（图 1b）。

第三阶段：侵蚀速率超过抬升速率，平均海拔降低，物种多样性也减少。这一过程中，侵蚀和地形变化因全球气候波动（如冰期 - 间冰期）而加剧，从而导致物种多样性的变化。冰期时，山谷和冰川隔开了曾经连成一片的物种，有些物种可能就地灭绝，有些物种则残存在避难所。间冰期时，山谷中曾经被隔离的生物再次融合，形成新的物种（图 1c）。

第四阶段：山脉抬升彻底停止，由于持续的侵蚀作用，生物栖息地消失，大量物种灭绝（图 1d）。

作者指出这些关联非常重要，但具体过程和影响仍有待探讨，可能与不同时期地表抬升、气候变化和大气环流之间的相互作用有关，同时也受山脉相对于大气环流分布的位置和朝向、物种多样化、物种辐射和避难所如何响应气候变化的影响。因此，重建山地生物多样性的时空格局和演化，需要深入研究生物圈 - 岩石圈相互作用。地球科学的新进展，如同位素古高度和热年代学技术的革新，使我们能够测定山岳形成和消亡的速率和时间，重建古高度和侵蚀速率，这些研究将为理解地质过程对生物多样性的影响提供新视角。

主要参考文献

Antonelli A, Kissling W D, Flantua S G A, et al. Geological and climatic influences on mountain biodiversity[J]. Nature Geoscience, 2018, 11(10): 718-725. ([原文链接](#))

（撰稿：[姜文英](#) / 新生代室）



Nature Geoscience : 生物钙化作用对海洋酸化事件的响应与反馈

地质证据表明，全球气候变暖可导致海洋酸化，进而对海洋生态环境产生严重影响 (图 1) (Doney et al., 2009; Honisch et al., 2012; Zeebe, 2012)。海洋酸碱性度与大陆风化、大气 CO₂、有机质、生物钙化、碳酸盐矿物等一系列要素有关，其中碳酸盐矿物的生成—溶解—埋藏作用，可以改变海水碳酸化学体系，对海水酸碱度变化进行缓冲调节。最著名的例子是古新世—始新世的快速增温事件 (PETM) 时期，海洋快速酸化期间及恢复阶段，碳酸盐补偿深度 (CCD: Carbonate Compensation

Depth) 呈现先减小、后显著增大 (超过 PETM 之前的水平) 的特征。对此，传统观点常认为碳酸盐补偿深度减小是源于对酸化进行中和，碳酸盐矿物溶解增强；而碳酸盐补偿深度显著增加并超越酸化事件前的水平，则是源于风化作用加强导致海洋碱度增加。然而，还有其它解释机制吗？

如今科学家们已经认识到，海洋碳酸盐补偿大概可以归因为两类：(1) 化学补偿，即海洋 CaCO₃ 的溶解或埋藏 (图 2)；(2) 生物补偿，即钙化作用下生物成因 CaCO₃ 的产率的增加或减小。生物可利用海水里

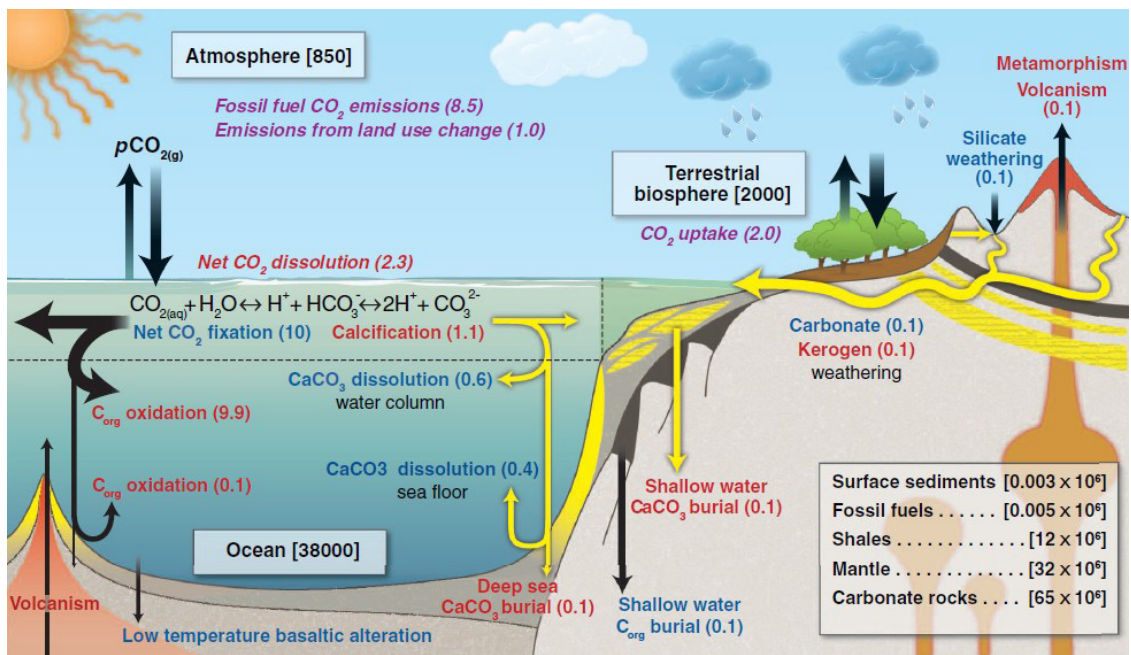


图 1 海洋碳循环及酸碱度、CaCO₃ 饱和度的影响过程示意图

红色字体表示促进海洋酸化和 / 或 CaCO₃ 饱和度降低的过程；蓝色字体表示促进海洋碱化和 / 或 CaCO₃ 饱和度增加的过程；斜体字表示人类影响因素。大气 CO₂ 含量增加，促进海水 CO₂、HCO₃⁻ 和 H⁺ 离子浓度增加，进而降低海水 pH 值。同时，随着 H⁺ 离子浓度增加，CO₃²⁻ 离子浓度将减小，进而降低 CaCO₃ 的饱和程度，促进其溶解，导致碳酸盐饱和深度和补偿深度减小 (Honisch et al., 2012)

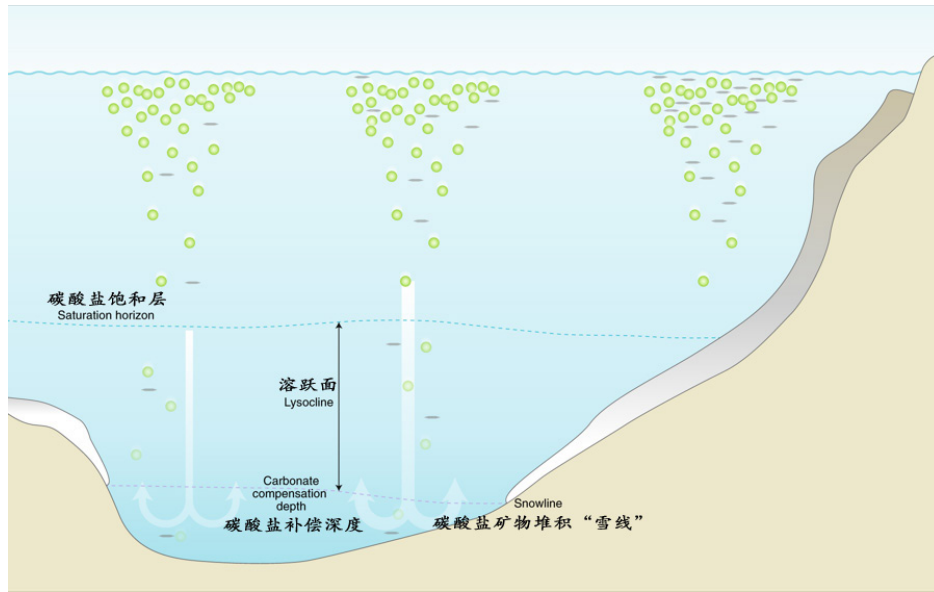


图2 海洋碳酸盐补偿作用关键界面示意图

海洋 CaCO_3 (方解石和文石) 主要来自海洋生物 (包括浮游生物、珊瑚、珊瑚藻及其它无脊椎动物等) (图修改自 Boudreau et al., 2018)

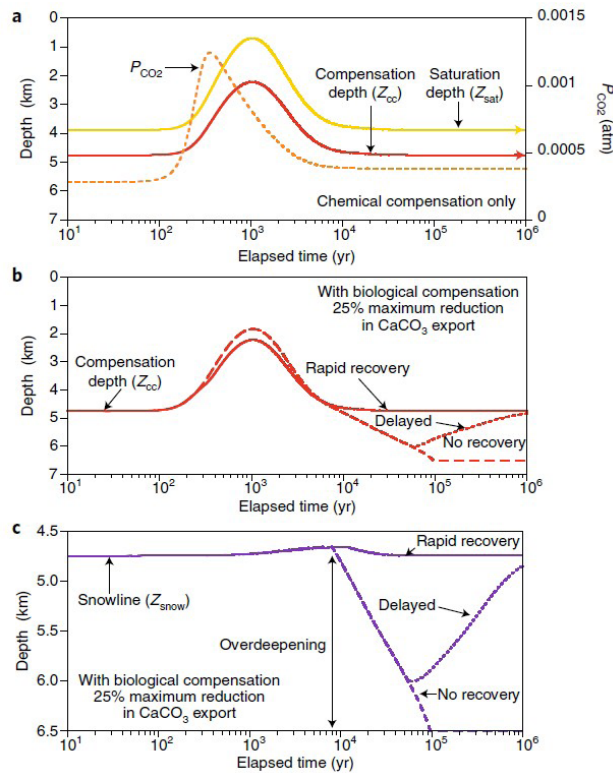


图3 基于人类活动对大气 CO_2 含量的影响模式, 海洋碳酸盐界面的演化趋势

a. $p\text{CO}_2$ 变化及海洋酸化事件过程中, 化学补偿作用下, 碳酸盐饱和深度 (Z_{sat}) 和补偿深度 (Z_{cc}) 的变化趋势。b. 海洋酸化事件过程中, 化学补偿和生物补偿共同作用, 生物钙化作用从海洋酸化中“快速恢复”、“延迟恢复”和“未恢复”模式下, 碳酸盐饱和深度 (Z_{sat}) 和补偿深度 (Z_{cc}) 的变化趋势。c. b 模式条件下, 海底 CaCO_3 堆积“雪线” (Z_{snow}) 的变化趋势 (Boudreau et al., 2018)



的 CO_3^{2-} 和 Ca^{2+} 合成 CaCO_3 壳体和骨骼，并从生理和生态等多尺度响应海水化学变化，进而影响碳酸盐饱和深度和补偿深度，形成碳酸盐生物补偿作用。短期实验和地质历史事件均已发现，全球变暖及海洋酸化与生物 CaCO_3 产率之间存在复杂的响应关系。但是，生物钙化作用到底如何进行碳酸盐补偿，并对海洋酸化过程进行响应和反馈呢？

针对上述科学问题，加拿大达尔豪斯大学 (Dalhousie University) Boudreau 教授、乌得勒支大学 (Utrecht University) Middelburg 教授及中山大学罗一鸣教授在 *Nature Geoscience* 上发表了他们的最新成果，综合分析了生物钙化作用对海洋酸化过程的响应与反馈 (Boudreau et al., 2018)。与前人不同，他们使用简单的海洋盒子模型，并参考人类活动对大气 CO_2 含量的影响模式，模拟出海洋酸化过程中，两种碳酸盐补偿机制和生物钙化作用 3 种响应模

式 (“快速恢复”、“未恢复”和 “延迟恢复”) 下，海洋碳酸盐界面的演化情况 (图 3)。

模拟结果显示，海洋酸化事件过程中，生物钙化作用 “延迟恢复” 或 “未恢复” (生物 CaCO_3 输出量一定程度下降)，可形成重要的生物碳酸盐补偿作用，促进海洋碱度在长时期内显著增加，并产生海洋 CaCO_3 堆积 “雪线” 显著加深现象 (图 3b- 图 3c)。同时，生物碳酸盐补偿模型可对古新世—始新世极热事件 (PETM, ~ 55 Ma) 及白垩纪—古新世界线绝灭事件 (~ 65 Ma) 的海洋碳酸盐体系及沉积样式进行合理解释。

全球气候变化，不只是一个无机化学反应过程的叠加，同时也是生命与环境之间响应和反馈的演化。碳酸盐生物与化学补偿机制在控制因素、时间尺度和影响效果方面有很大的差异，充分理解生物补偿机制对于理解或预测古今海洋化学变化具有重要的研究意义。

主要参考文献

- Boudreau B P, Middelburg J J, Luo Y. The role of calcification in carbonate compensation[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(12): 894-900. ([原文链接](#))
- Doney S C, Fabry V J, Feely R A, et al. Ocean acidification: the other CO_2 problem[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1: 169-192. ([原文链接](#))
- Honisch B, Ridgwell A, Schmidt D N, et al. The geological record of ocean acidification[J]. *Science*, 2012, 335(6072): 1058-1063. ([原文链接](#))
- Zeebe R E. History of seawater carbonate chemistry, atmospheric CO_2 , and ocean acidification[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2012, 40: 141-165. ([原文链接](#))

(撰稿: [周锡强](#) / 油气室)



Geology : 火山灰静电悬浮进入电离层及其对气候的突然影响

火山喷发可能对环境、气候和人类产生全球性影响，比如有一种说法，坦博拉（Tambora）火山爆发是拿破仑在滑铁卢战役中败北的原因之一。火山爆发期间产生的喷发柱由火山灰和气体组成，可以在喷发口上方数公里处抵达平流层（10-50 km），并在那里通过大气环流向全球扩散。例如 1991 年菲律宾皮纳图博火山喷发产生的火山灰云在不到一个月的时间内就环绕了地球（Oppenheimer, 2012）。注入平流层的大量含硫气体和灰尘颗粒，很大一部分在几天内消失，其余的则转化为硫酸和水的混合物，以微小颗粒的形式存在，它们在平流层的停留时间可以长达一年，

引起光学效应并散射太阳光，从而对气候产生冷却效应。

火山爆发能对地球低层大气造成深刻而长久的影响，那么它能影响中高层大气甚至电离层吗？近期，伦敦帝国理工学院地球科学与工程系研究人员 Genge 在 Geology 上发表封面文章（图 1），提出了一种火山爆发影响全球电离层的新机制——喷发柱的电荷引起火山灰的静电悬浮，导致直径 <500 nm 的火山颗粒进入电离层，并在 100 s 的时间尺度上干扰电离层。

传统观点认为，平流层的逆温效应阻碍了对流上升，因此火山喷出的火山灰不会对高层大气产生重大影响。然而，爆



图 1 Geology 第 10 期封面

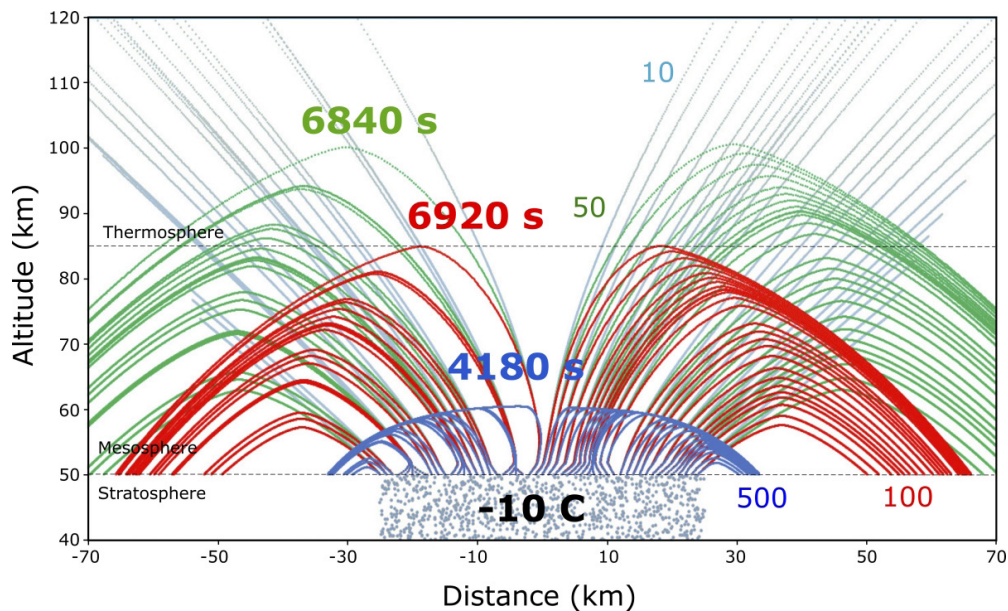


图 2 模拟的 50 km 直径的火山岩喷发柱上，直径为 100 nm (红色)、50 nm (绿色) 和 10 nm (灰色) 的火山颗粒轨迹

平流层中的灰点表示喷发柱内的点电荷，粗体字表示达到峰值高度的时间

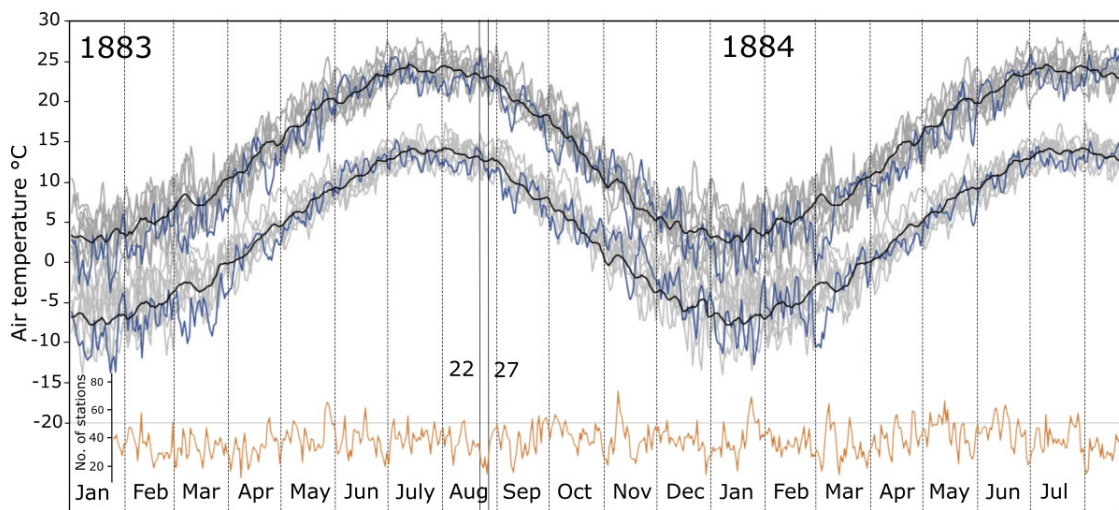


图 3 1883 年北美、欧洲、俄罗斯和澳大利亚 47 个站点测量的平均最高和最低日气温 (蓝线)

橙色曲线显示记录降水的气象站数，它在 1883 年 8 月 22-27 日之间降至最低 (间隔用实线垂直线表示)

发性火山喷发期间频繁发生的火山闪电现象表明，喷发柱带有显著的电荷 (图 1)。Lane 和 Gilbert 的观测及模型表明火山灰通常带负电，而火山气体通常带正电，灰与气体受对流和风的影响发生物理分离，从而产生大净电荷。因此，爆炸性火山喷发

可以视为一个发电机和电荷分离器，带电的火山灰颗粒与具有相同极性的净电荷的喷发物之间因为静电相互作用而产生悬浮。

颗粒的动态模拟结果如图 2 所示，直径为 50 nm、100 nm 和 500 nm 的颗粒，从喷发柱 (~ 10 库仑净电荷) 通过对流上升



到 50 km 高度后，可以在大约 2 小时内，分别达到 110 km、90 km 和 60 km 的高空。大型火山只要喷发的时间较长（如 1991 年皮纳图博火山喷发的高潮期为 9 小时），而悬浮颗粒在这段时间内保持带电，它们就有足够的时间抵达最大高度。当然，由于与大气中的正离子发生作用，火山颗粒的电荷会发生松弛，从而限制了悬浮时间。基于气体动力学理论，电荷弛豫时间约为 100-1000 s。大的爆炸性火山喷发产生的火山灰通常是硅质的，这种材质的电荷弛豫时间更为长久。

在几次火山爆发期间，科学家们都观察到了全球尺度的电离层电流扰动，扰动随喷发的量级变化而变化。虽然这种扰动可以从重力波的角度去解释，但它们也可以解释为悬浮粒子的变化结果——静电悬浮将负电荷带入电离层，从而降低大气中的正离子密度。

Genge 的研究还提出了一个非常新颖

的观点，认为火山灰的静电悬浮可能导致全球气候的短期变化。其主要机制是大气电场的显著破坏以及电离层的短响应时间可能会在超级火山喷发期间干扰云的形成，从而减少了全球的云层覆盖和降水。当电离层恢复正常时，全球云团形成受到抑制，大气中 H₂O 的含量增加，云层覆盖得到增强，导致降水增加。这一观点与通常认为由平流层气溶胶引起变化而导致的降水增加机制有显著区别。图 3 显示了 1883 年 8 月 26 日印尼喀拉喀托火山爆发后的气温数据和降水数据。从喀拉喀托火山喷发前后的降水频率来看，8 月 22 日至 8 月 27 日期间，记录降水的气象站数量最少（总共 138 个站点）。

以上研究成果为理解整个地球不同圈层的耦合提出了非常新颖的观点，并从量级上估算了地表火山活动对整个上层大气圈造成的显著影响，文中的推论需要跨学科联合以及更加详细、准确的观测来证实。

主要参考文献

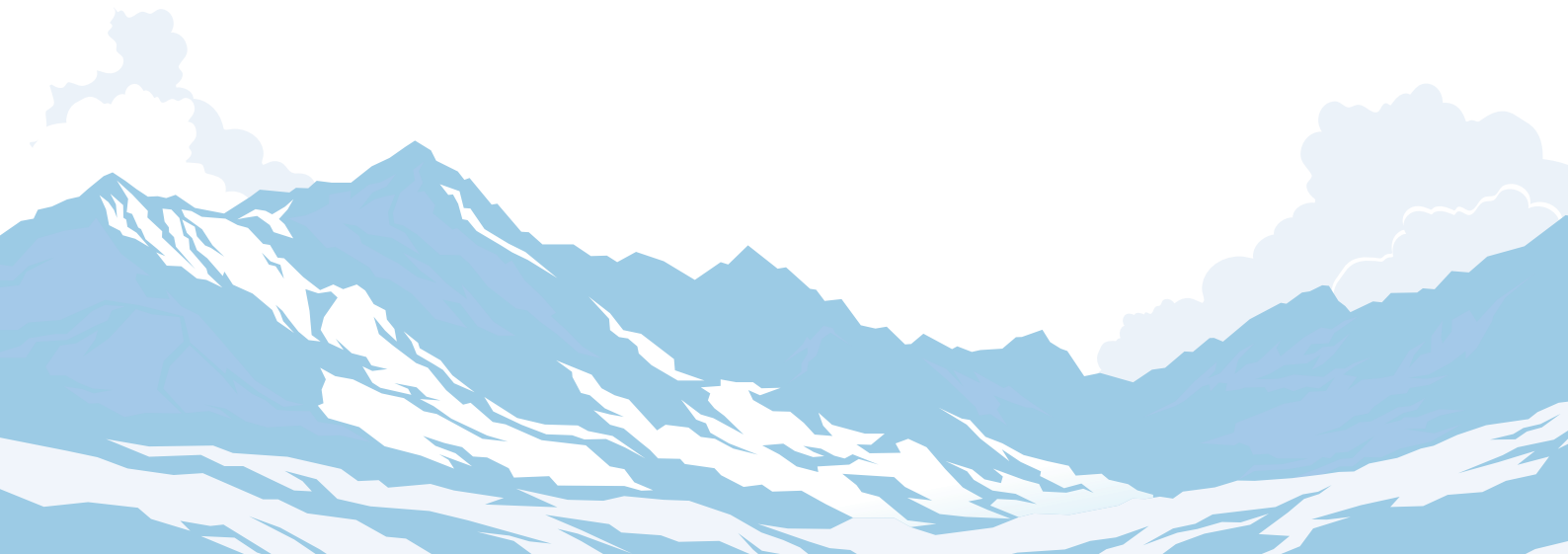
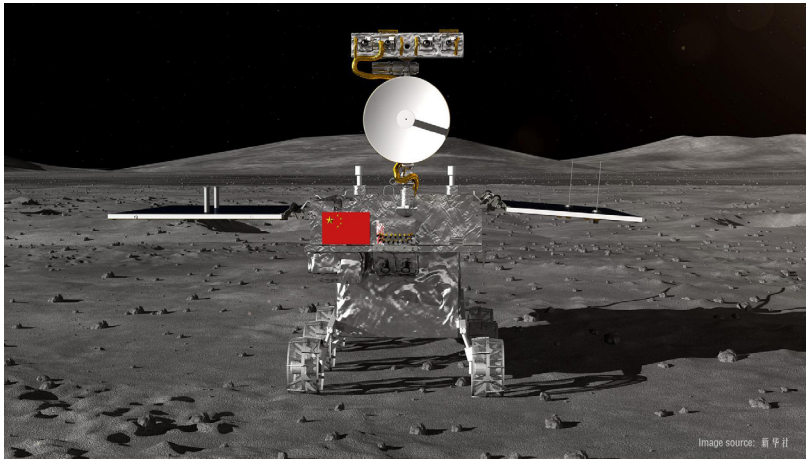
Genge M J. Electrostatic levitation of volcanic ash into the ionosphere and its abrupt effect on climate[J].

Geology, 2018, 46(10): 835-838.(DOI: [10.1130/G45092.1](https://doi.org/10.1130/G45092.1))

Oppenheimer C. Eruptions that shook the world [M]. New York: Cambridge University Press, 2011.

（撰稿：[赵必强](#) / 地球与行星室）

4. 行星学





Nature Communications : “极光珠”的剪切阿尔芬波源——研究亚暴触发机制的新思路

极光这种宏伟壮观的自然景象，颇具神秘色彩，其运动变化，像是自然界的魔术师，以天空为舞台上演一出出光的大戏，上下纵横成百上千公里。极光的形成和磁层亚暴密切相关，磁层亚暴是磁层中的磁能和粒子热能集中释放并转化为粒子动能的过程（Akasofu, 1964）。一次大的亚暴所释放的能量，相当于一次 5.5 级地震的能量。能量的释放导致地球磁层发生诸如极光增强（图 1）、同步轨道高能粒子注入、地磁脉动等一系列空间物理现象。

自从 1964 年发现磁层亚暴以来，其触发机制一直是磁层物理极具挑战性的核心问题之一，亚暴触发过程的时间在分钟尺度，而涉及的空间尺度从几十公里的中高

层大气延伸至磁尾几十个地球半径，要想在有限时间内探寻如此广阔空间区域的触发源具有相当大的难度，描述磁层亚暴过程的模型一共有六个之多，但目前为止其触发机制仍然存在较大争议（Lui, 2009）。

极区电离层中的极光点亮被认为是亚暴触发最清晰而直接的证据，超过 90% 的亚暴事件都能够在点亮的极光弧附近观测到类似珍珠状的“极光珠”，因此，极光珠被认为是亚暴触发的指示器之一。研究极光珠的精细结构及其产生机制能够为理解亚暴触发机制提供重要的参考信息。英国科学家 Kalmoni 等人近期在 Nature Communication 上发表最新研究成果，利用一种新颖的极光分析方法（state-of-the-art）



图 1 亚暴爆发过程中极光点亮伴随的“极光珠”现象（图片来源：ESA）

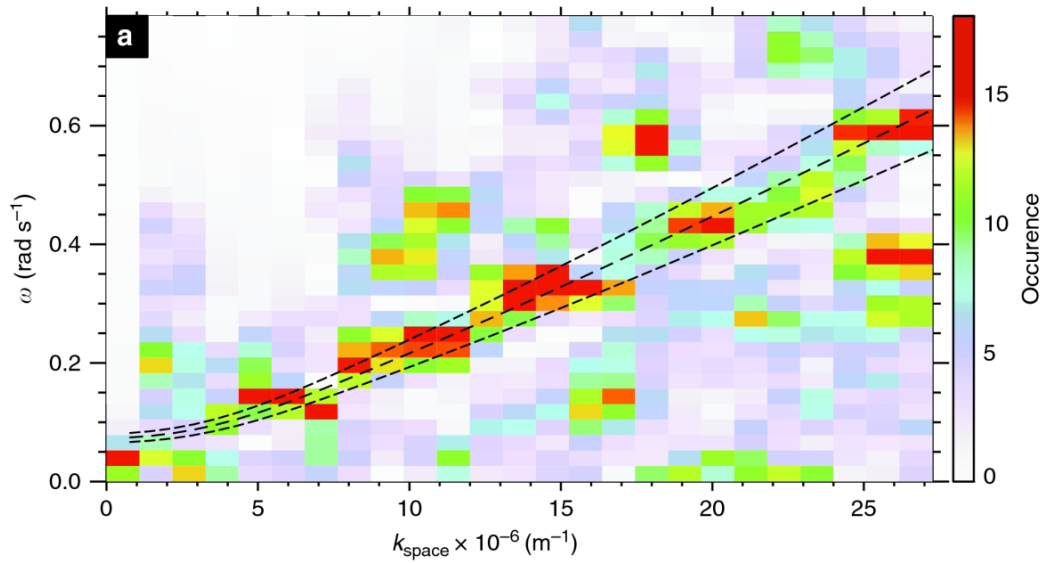


图 2 观测得到的极光色散关系和理论计算的阿尔芬波色散关系对比 (Kalmoni et al., 2018)

其中颜色代表在该波数对应频率的发生率, 三条虚线分别代表理论计算的磁尾赤道面区域平行波长为 $1.8R_E$, $1.8R_E \pm 10\%$ 的阿尔芬波色散关系曲线

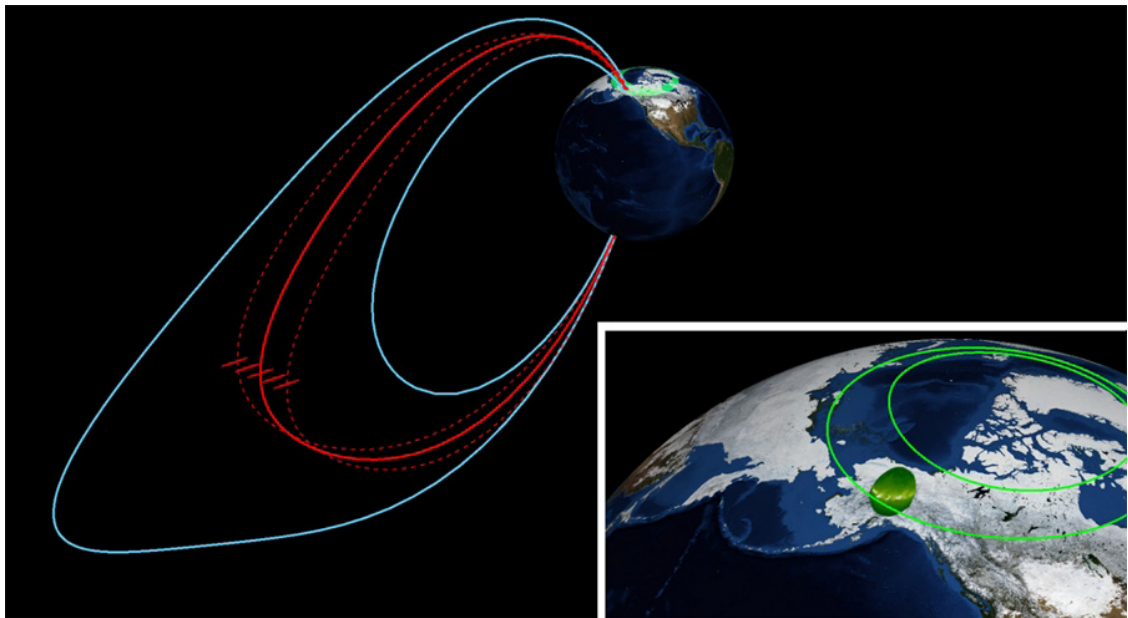


图 3 极光观测区域以及对应利用 T96 磁场模型 (Tsyganenko et al., 1995) 将该区域投影到磁尾赤道面。磁尾赤道面的等离子体片中剪切阿尔芬波携带能量传播到极区电离层激发极光珠

得到极光珠色散关系 (图 2 颜色区域), 利用 T96 磁场模型, 将极光珠区域投影到磁尾等离子体片区域, 并基于理论计算得到该区域的剪切阿尔芬波色散关系 (图 2 虚线), 两者对比显示出非常好的一致性, 由

此推断, 伴随亚暴的极光珠是由磁尾等离子体片中剪切阿尔芬波所携带的能量沿磁力线传播到极区电离层所激发 (图 3)。

文章的独特之处在于以下三点: (1) 首先通过选定极光珠这一极光结构来研究



其产生机制，而极光珠又是亚暴触发的指示器之一，把亚暴触发机制转变为对极光珠的产生机制的研究。(2) 其次，由于极光珠所对应的磁尾等离子片区域相对于整个亚暴发生过程所涉及的巨大空间尺度而言较小，因此通过将极光珠区域沿着磁力线投影到近磁尾等离子体片中并探寻其来

源，这将大大提高探寻亚暴触发机制的效率。(3) 最后，通过得到极光珠的色散关系，从时间和空间两个维度上揭示极光珠特征，发现和近磁尾等离子体片不稳定性所激发的阿尔芬波密切相关。

该研究为解决亚暴触发机制问题提供了新的思路。

主要参考文献

- Akasofu S I. The development of the auroral substorm[J]. Planetary and Space Science, 1964, 12(4): 273-282. ([原文链接](#))
- Kalmoni N M E, Rae I J, Watt C E J, et al. A diagnosis of the plasma waves responsible for the explosive energy release of substorm onset[J]. Nature communications, 2018, 9(1): 4806. ([原文链接](#))
- Lui A T Y. Comment on “Tail reconnection triggering substorm onset” [J]. Science, 2009, 324(5933): 1391-1391. ([原文链接](#))
- Tsyganenko N A. Modeling the Earth’ s magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1995, 100(A4): 5599-5612. ([原文链接](#))

(撰稿：[罗浩](#) / 地球与行星室)



Science : 火星生命探索——“好奇号”发现古老的火星有机物与季节性变化的甲烷

在太阳系，火星是与地球最相似的星球。大量的探测和研究表明，31 亿年前火星很可能存在地表水等宜居的条件和环境，甚至现代火星一些区域的地下有可能还存在微生物的活动。在未来，火星有可能被改造成另一个适宜人类居住的星球。因此，大部分火星探测任务把目标瞄准在火星的古环境、碳的线索及火星生命上。

盖尔撞击坑（Gale Crater）是火星南

北半球交界处的一个古老撞击坑，大约形成于 35 亿年前，当时火星的气候温暖、湿润，证据表明它当时可能是一个湖泊，因此 NASA 将该撞击坑选为“好奇号”火星车的着陆区。

大约 6 年前，“好奇号”火星车成功降落在盖尔撞击坑（图 1），车重 0.9 吨，大小与一辆普通的轿车相当，车上携带了 11 台 / 套科学探测仪器，包括一套火星样品分

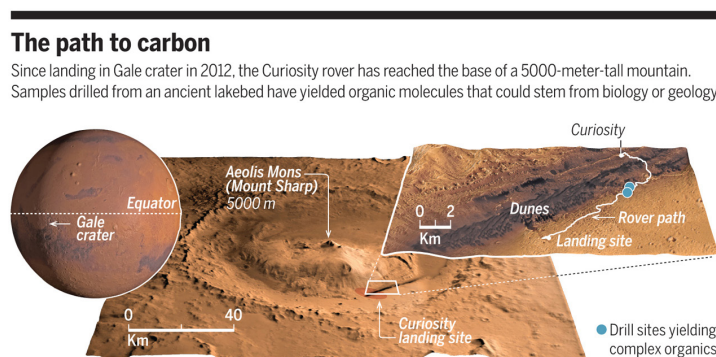


图 1 “好奇号”火星车的登陆地点，运行路径以及发现有机质的两个钻孔位置 (Voosen, 2018)



图 2 “好奇号”在 Mojave 泥岩钻孔位置发现了与干酪根相似的有机分子 (Voosen, 2018)



析系统（气相色谱、质谱、可调激光光谱等）。“好奇号”对该区进行了非常详细的岩石、矿物、有机质和挥发性组分、大气氢、碳、氧等同位素组成、氧化还原环境、湖相沉积环境、辐射环境等综合探测，试图通过研究火星的古环境寻找火星生命的痕迹。

2018年6月8日, Science 刊出4篇文章, 报道“好奇号”在火星上的两个重要新发现:

1. 发现含硫的有机质: “好奇号”在一块 35 亿年前形成的湖底泥岩上钻孔采集新鲜样品(图 2), 用炉子加热($500^{\circ}\text{C} \sim 860^{\circ}\text{C}$)使之释放出气体, 然后用气相色谱-质谱进行分析, 发现了噻吩(含硫碳环)、芳香族、脂肪族化合物以及硫代苯等有机分子(图 3)。这是人类首次在火星上发现含硫的有机质, 硫化作用有利于有机质的保存。

2. 发现甲烷浓度随季节变化的规律:

在现代火星大气中探测到甲烷, 浓度最高可达 $7.6 \pm 1.6 \text{ ppb}$, 可能代表甲烷突然释放的结果; 3 个火星年(近 6 个地球年)的甲烷浓度具有季节性变化规律, 并在夏季达到峰值(图 4)。

这两个发现进一步加强了盖尔撞击坑在远古时期的宜居性, 但距离证明火星存在生命仍有较长的一段路要走。除了生命活动之外, 一些无机过程, 包括碳质小行星和彗星的加入, 都有可能火星上形成或带来有机质。为了区分不同来源和过程产生的有机质, 一个重要途径是分析火星样品的碳同位素的组成, 特别是寻找由于生命活动产生的轻碳同位素(^{12}C)富集的证据。但即便如此, 这些也还仅是间接证据。2014 年, 中国科学院地质与地球物理研究所的科学家在一块降落在摩洛哥沙漠的火星陨石中发现了有机碳, 并测定了其碳同

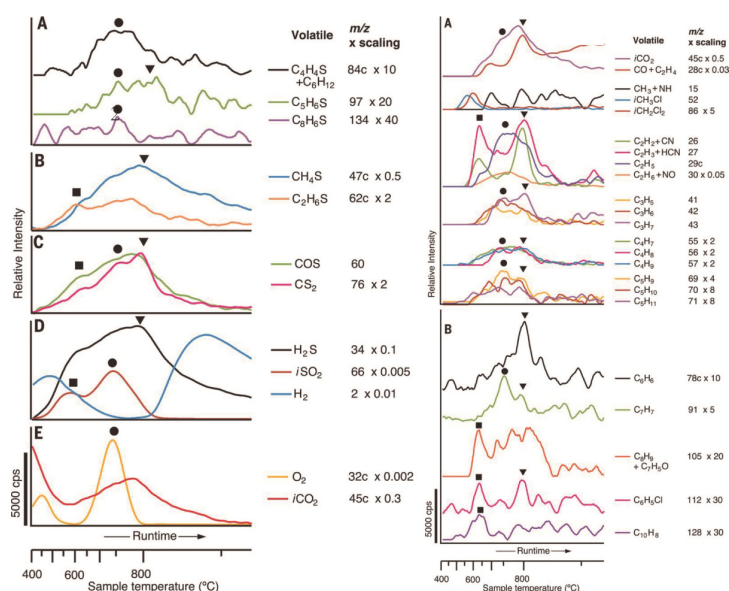


图 3 左列是 Mojave 样品中的有机硫化物 (EGA) 曲线, 显示了噻吩 (A)、硫醇和硫化物 (B 和 C)、其他挥发物 (D)、 O_2 和 CO_2 (E) 的概况, 这些曲线表明, 这些化合物在 $500^{\circ}\text{C} \sim 820^{\circ}\text{C}$ 之间达到顶峰, 这个温度范围与噻吩 ($\text{C}_4\text{H}_4\text{S}$)、2-3-甲基噻吩 ($\text{C}_5\text{H}_6\text{S}$)、苯并噻吩 ($\text{C}_8\text{H}_6\text{S}$)、甲烷硫醇 (CH_4S) 和二甲基硫 ($\text{C}_2\text{H}_6\text{S}$) 存在的温度范围一致; 在另一个钻孔位置 (Confidence Hills) 也发现相似的有机质。右列是 Mojave 样品中的脂肪族和芳香族化合物逸出气体分析 (EGA) 曲线, 显示 CO 、 CO_2 与脂肪族化合物 (A)、芳香族化合物 (B) 的概况 (Eigenbrode et al., 2018)

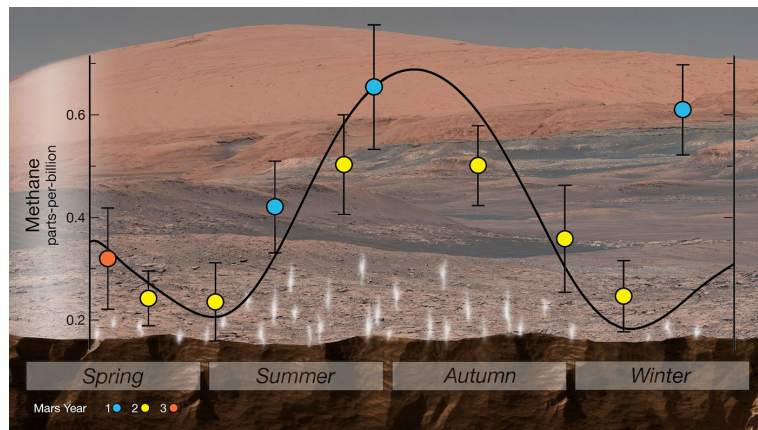


图 4 甲烷季节变化曲线

“好奇号”使用 SAM（火星样品分析仪器套件）探测盖尔撞击坑中大气甲烷的季节性变化，在观察了近 3 个火星年后，发现每年夏天甲烷达到峰值（图片来源：NASA）

位素具有富 ^{12}C 的特征，与火星生物成因一致 (Lin et al., 2014)。但是，他们同样没有完全排除这些有机碳来源于碳质小行星的可能性。

2016 年，我国启动火星探测计划，并

预期在 2020 年实施对火星环绕、着陆、巡视三位一体的联合探测。当前，我国正在论证火星的采样返回计划，与 NASA 未来火星探测的重点一样，其目标都是获得火星是否存在生命的更有力证据。

主要参考文献

- Eigenbrode J F, Summons R E, Steele A, et al. Organic matter preserved in 3-billion-year-old mudstones at Gale crater, Mars[J].*Science*,2018,360(6393): 1096-1101.DOI: 10.1126/science.aas9185. ([原文链接](#))
- Kate I L T.Organic molecules on Mars[J].*Science*,2018, 360(6393): 1068-1069. DOI: 10.1126/science.aat2662. ([原文链接](#))
- Voosen P. NASA Curiosity rover hits organic pay dirt on Mars[J].*Science*,2018, 360(6393): 1054-1055. DOI: 10.1126/science.360.6393.1054. ([原文链接](#))
- Webster C R, Mahaffy P R, Atreya S K,et al.Background levels of methane in Mars' atmosphere show strong seasonal variations[J].*Science*,2018,360(6393): 1093-1096.DOI: 10.1126/science.aaq0131. ([原文链接](#))
- Lin Y, El Goresy A, Hu S, et al. NanoSIMS analysis of organic carbon from the Tissint Martian meteorite: Evidence for the past existence of subsurface organic - bearing fluids on Mars[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2015, 49(12):2201-2218.DOI : 10.1111/maps.12389. ([原文链接](#))

(撰稿：张婷、胡森、林杨挺/地球与行星室)



Nature Geoscience : 火星浅地表盐水氧气溶解度及其对需氧生物的启示

开发火星是人类的伟大征程。火星是否存在液态水，是否有足够氧气支持生物生存，是探索火星生命的关键问题。2018年8月，意大利科学家在 *Science* 发表最新成果，揭示火星南极冰盖之下存在巨大的地下蓄水层，进一步证实火星有液态水富集区域 (Orosei et al., 2018)。然而，对于火星是否有足够可维持生物生存的氧气，此前研究略显悲观，鲜有探讨。

事实上，地球上的需氧生物在较低的氧含量下仍可存活，如微生物的有氧呼吸所需的溶解氧，其浓度下限可达 $\sim 10^{-6}$ mol/m³ (Stolper et al., 2010)，简单多细胞动物——如海绵则为 $\sim 2 \times 10^{-3}$ mol/m³ (Mills et al., 2014)。另一方面，现有证据或线索揭示：火星表层曾经存在有氧风

化作用，当前火星大气中含有微量的氧气 (VMR_{O₂} $\approx 0.145\%$)，浅地表环境存在低温液态 Mg(ClO₄)₂-Ca(ClO₄)₂-H₂O 盐水。

当火星上的盐水与微量含氧大气进行水气交换时，这些盐水的氧气溶解度如何？能否突破需氧生物的氧气需求极限？盐水氧气的时空分布如何响应火星大气环流及自转轴倾角的变化？

美国加州理工学院和哈佛大学研究人员近期在 *Nature Geoscience* 上发表了他们的最新成果，综合分析了火星浅地表环境盐水的氧气溶解度及其时空演化 (Stamenkovic et al., 2018)。

首先，他们根据火星大气温压条件及高氯酸盐-氯化物-硫酸盐盐水组分特征，开发了盐水温度-氧气溶解度热力学模型，计算出火星不同组分盐水在不同温度参数

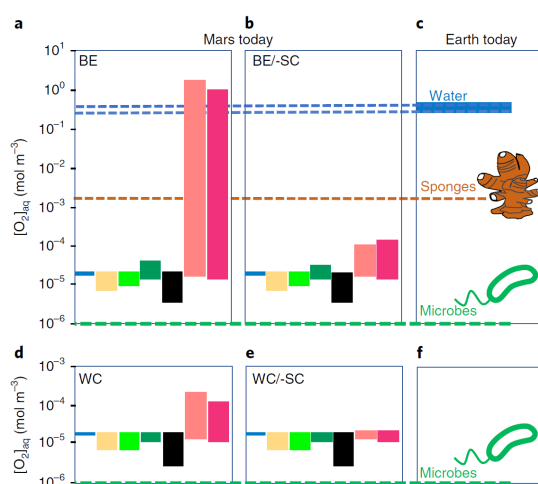


图1 火星现今大气温度 (140-300 K) 和气压 (6.1 mbar) 条件下，不同化学组分盐水的氧气溶解度分布模式 (a-b, d-e)，及其与现今地球水体含氧量、微生物和海绵需氧量的对比 (c, f)

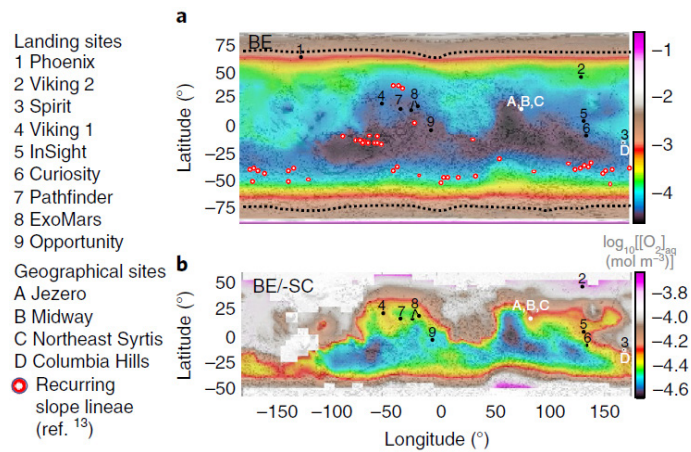


图 2 火星现今大气温压条件下，高氯酸钙盐水氧气溶解度空间分布图

(a) 过冷盐水模式下的最佳估计模型 (BE)，黑色虚线代表海绵生存所需的氧气浓度下限；(b) 非过冷盐水模式下的最佳估计模型 (BE/SC)

下的氧气溶解度分布模式 (图 1a-b、图 1d-e)，并对比了现今地球水体含氧量、生物需氧量 (图 1c、图 1f)。

随后，他们根据火星大气环流模型和盐水温度 - 氧气溶解度模型，建立了现今火星不同地区盐水氧气溶解度空间分布图 (图 2)。最后，他们进一步纳入火星自转轴倾角变化参数，用模型重建了过去 20 Ma 至未来 10 Ma 火星盐水氧气含量的时间演化

趋势。此研究相关模型计算结果显示，在最理想条件下，火星高纬度地区浅地表盐水氧气含量可以超过海绵类多细胞生物的氧气极限需求 ($2 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^3$)，可为生命创造有利的有氧环境。

该研究从盐水氧气溶解度的角度探讨了火星宜居性，并拓展了我们对其它星球氧气 - 生命演化的探索，同时其研究思路和模型构建具有重要创新和参考价值。

主要参考文献

- Mills D B, Ward L M, Jones C, et al. Oxygen requirements of the earliest animals[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111(11): 4168-4172. ([原文链接](#))
- Orosei R, Lauro S E, Pettinelli E, et al. Radar evidence of subglacial liquid water on Mars[J]. Science, 2018, 361(6401): 490-493. ([原文链接](#))
- Stolper D A, Revsbech N P, Canfield D E. Aerobic growth at nanomolar oxygen concentrations[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(44): 18755-18760. ([原文链接](#))
- Stamenkovic V, Ward L M, Mischna M, et al. O₂ solubility in Martian near-surface environments and implications for aerobic life[J]. Nature Geoscience, 2018. DOI: 10.1038/s41561-018-0243-0. ([原文链接](#))

(撰稿：周锡强 / 油气室)



Science Advances : 地球和火星上的铁氧化物结核是碳酸盐和酸性水溶液相互作用的产物

2004年,“机遇号”火星车在子午平原的Eagle撞击坑边部着陆,通过车上搭载的穆斯堡尔谱仪,发现撞击坑周围及其内部均有球状赤铁矿在表层分布,该球状赤铁矿因其形状酷似蓝莓也被称作“蓝莓状赤铁矿”。这些大小不一的球状赤铁矿随机均匀地分布在火星土壤表层与深部。此外“机遇号”还探测到该地区存在黄钾铁矾($\text{KFe}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) (Klingelhofer et al., 2004, Science)。黄钾铁矾是一种含水硫酸盐矿物,主要形成于酸性、氧化、富硫的水环境中。球状赤铁矿及与其共存的

含水硫酸盐矿物表明,该地区曾经长期有大范围的液态水存在。

铁氧化物结核在地球上多个地方均有发现,如美国的犹他州和蒙古(图1)。犹他州广泛分布下侏罗统的砂岩,上部是褪色的白色砂岩,下部是红色的未褪色砂岩,铁氧化物结核主要出现在褪色砂岩前端的上部,方解石结核则出现在未褪色砂岩底部。蒙古南部地层同样发育方解石结核、以及被铁氧化物包裹的方解石结核,分布和形态与犹他州相似。

对于地球上铁氧化物结核的形成机制,

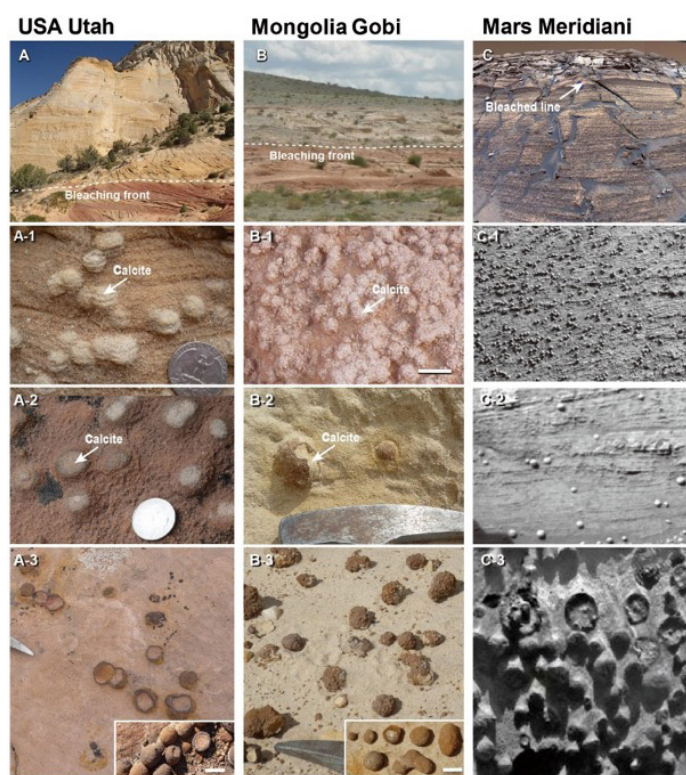


图1 美国犹他州和蒙古的碳酸盐和铁氧化物结核(a,b)和火星上的结核(c)。白色比例尺长1 cm

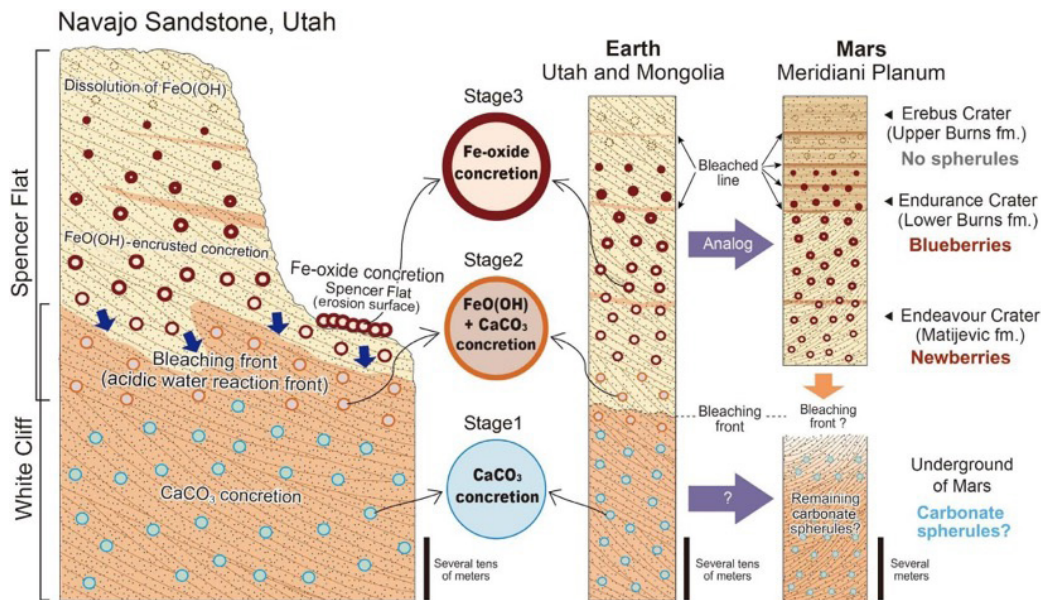


图 2 地球和火星上铁氧化物结核形成的示意图

目前主要有两种模型：(1) 氧化还原-含氧反应模型，该模型需要亚铁离子从矿物中释放出来，亚铁离子通过地下水发生迁移并伴有甲烷或其他碳氢化合物的还原反应。但这个模型不能完全解释球状铁氧化物壳状结核的形成原因。(2) 菱铁矿形成和微生物氧化模型，该模型认为球状菱铁矿结核是铁的来源，并经过微生物作用发生氧化和溶解，但表层和深部地层中都没有发现菱铁矿结核。

火星子午平原沉积层的上部富含赤铁矿和水合硫酸盐矿物，表明火星上“蓝莓状赤铁矿”的形成机制可能与犹他州和蒙古的铁氧化物结核形成相似，它们之间在产状、形态及成因上是否具有类比性呢？

近期，日本名古屋大学材料研究所的 Yoshida 等人，在 *Science Advances* 上发表了他们的研究结果。基于犹他州和蒙古的方解石和铁氧化物结核的 X 射线衍射分析 (XRD) 和方解石结核的 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 同位素数据，证实铁氧化物结核壳主要由针铁矿

($\text{FeO}(\text{OH})$) 和赤铁矿 (Fe_2O_3) 组成。分析结果还表明，方解石结核是早期成岩过程中原位生长而成的原位生长。方解石结核的 $\delta^{13}\text{C}$ 的值 (犹他州：-5.15 ~ -3.13‰，蒙古：-3.50 ~ -1.65‰) 略高于围岩基质中方解石胶结物的 $\delta^{13}\text{C}$ 的值 (犹他州：-7.44 ~ -3.36‰；蒙古：-8.21 ~ -3.79‰)，结合 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (犹他州：-12.0 ~ -5.0‰；蒙古：-11.8 ~ -10.1‰)，可推出这两个地区的结核形成于相似的环境，碳酸盐矿物中的碳主要来自地下水。

基于以上数据，他们提出了一个新的模型，认为铁氧化物结核是由富铁的酸性溶液与方解石结核之间的 PH- 缓冲反应形成。首先，风成砂岩沉积埋藏，在钙饱和的地下水中形成方解石结核。随后，富含二氧化碳的酸性地下水溶解了红色风成砂岩中的赤铁矿并活化了铁，从而使得红色砂岩层褪色。当酸性地下水遇到方解石结核时，结核被溶解，溶解方解石消耗了 H^+ ，导致溶液 PH 值增加，活化的铁逐渐沉淀在



方解石结核表面，形成 $\text{FeO}(\text{OH})$ 外壳。当孔隙被封闭或结核中的方解石完全被溶解之后，外壳的反应可能仍旧持续（图 2）。

不同于前面提到的两个模型，新模型既不涉及地下水与甲烷或碳氢化合物反应所需的还原性条件，也不涉及菱铁矿和微生物过程，而只需简单的两个条件：球形方解石结核和酸性地下水。该模型还可以用来解释铁氧化物结核具有低的铁同位素比值。

虽然火星上“蓝莓状赤铁矿”与地球表面的结核具有相似特征，但火星上的铁氧化物结核明显小于地球上的铁氧化物结

核，目前认为其大小差异可能是地球和火星的环境差异所致，如扩散系数、溶质浓度和 CO_2 溶解度，这些因素与温度、蒸发速率和大气压力有关。火星上的结核之所以小，可能是由于火星上溶质浓度较低，地下水温度较低，以及二氧化碳的溶解度较高所致。

结合火星上酸性硫酸盐流体作用的证据，该项研究表明火星在形成“蓝莓状赤铁矿”之前就存在碳酸盐结核，现今铁氧化物结核是在富二氧化碳的大气中酸性流体溶解先存的碳酸盐结核而形成的。

主要参考文献

- Yoshida H, Hasegawa H, Katsuta N, et al. Fe-oxide concretions formed by interacting carbonate and acidic waters on Earth and Mars[J]. Science Advances, 2018, 4(12): eaau0872. ([原文链接](#))
- Klingelhöfer G, Morris R V, Bernhardt B, et al. Jarosite and hematite at Meridiani Planum from Opportunity's Mössbauer spectrometer[J]. Science, 2004, 306(5702): 1740-1745. ([原文链接](#))

【致谢：感谢地星室[胡森](#)、常睿的修改和完善。】

（撰稿：[唐冬梅](#)，董志国 / 矿产室）



Nature Astronomy : 谷神星上的冰火山一直在活跃

与类地行星上喷发硅酸盐岩浆的火山作用不同，含冰天体上的冰火山喷发液态或气态的水或甲烷等。目前，在太阳系内多个天体上都已发现了冰火山活动的痕迹。对冰火山的研究有助于我们了解含冰天体的演化历史，从而更好的了解太阳系的起源和行星的演化。

2015 年，美国国家航空航天局 (NASA) 的“黎明”号探测器入轨谷神星——小行星带中的一颗矮行星，并发现了一座圆拱型山峰，这座名为阿胡纳火山 (Ahuna Mons) 的山峰被认为是一座冰火山 (图 1)。不过从那以后，谷神星上再未发现过类似构造的物体，因此该冰火山也被称作孤山 (lonely mountain)。阿胡纳火山的“孤独”必然是由谷神星上的地质运动造成的。此后多个研究小组对阿胡纳火山的生命周期进行了研究 (e.g., Ruesch et al., 2016)。他们普遍猜测冰火山比谷神星上的冰地壳要软，在重力作用下，粘性松弛会使冰火山逐渐变得扁平，并最终与

周围地形融为一体而难以分辨 (Sori et al., 2017)。

9 月 18 日，Nature Astronomy 杂志发表了由 Michael M. Sori 等人发表的研究论文《Cryovolcanic rates on Ceres revealed by topography》，他们基于这种猜测，分析了由“黎明”号拍摄的谷神星的地表图片，找到了除阿胡纳火山外可能曾是冰火山的 21 个圆拱，并分析了这些圆拱的高宽比。他们将实验室所得的冰的流变方程 (Goldsby and Kohlstedt, 2001; Durham et al., 2009) 代入到有限元数值模拟中，估算出了所有圆拱的年龄 (图 2)。他们发现在过去的约 10 亿年里，谷神星大约每 50 Myr 就有新的冰火山出现，“冰岩浆”的平均上涌速率约为 $104 \text{ m}^3/\text{yr}$ ，比地球低 5 个数量级，比火星低 3 个数量级。尽管比类地行星低了多个数量级，但是始终活跃的火山作用对谷神星的演化历史有着重要作用。

对太阳系内含冰天体的研究十分依赖于对冰的流变学和物理学性质的实验室测

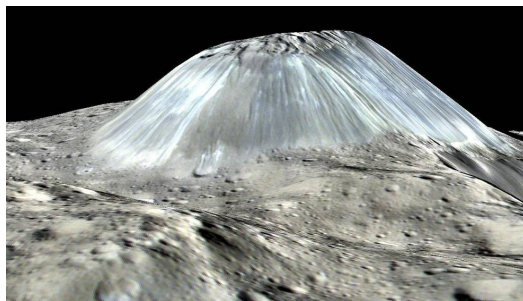


图 1 阿胡纳火山——谷神星上的“孤独之山”，垂向高度放大了 2 倍 (来源：NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA)

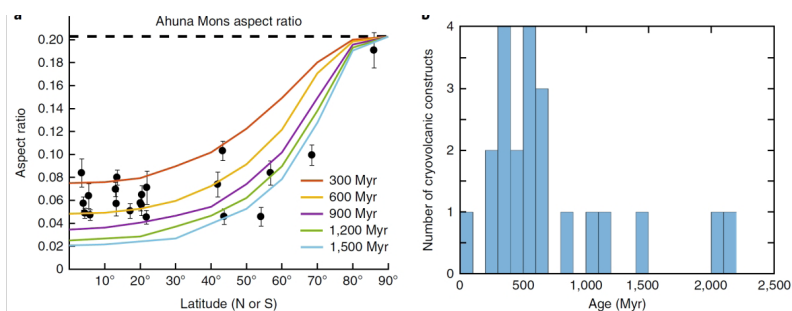


图 2 (a) 21 个圆拱的高宽比与阿胡纳火山的比较, 以及模拟不同年龄的圆拱高宽比; (b) 包括阿胡纳火山在内的 22 个圆拱的年龄分布柱状图 (Sori et al., 2018)

定。Sori 等人的文章对冰火山年龄的估算基于实验室得到的 (含岩石杂质) 冰的流变方程, 采用的是被学界广泛接受的 Durham et al. (1992) 的实验研究结果, 并将其应用在了位错蠕变 (dislocation creep) 和晶界滑移 (grain boundary sliding) 两种变形机制中。没有准确的实验室数据, 就没有准确

的基于物性的数值模拟。我所地球与行星物理实验室慕超副研究员等人的最新实验表明 (under review), 在不同的变形机制下, 岩石杂质对冰的流变的影响是不同的, 这意味着谷神星冰地壳可能含有超过 90% 的冰, 使冰火山较软这一假设更有可能。

主要参考文献

- Durham, W B, Kirby S H, Stern L A. Effects of dispersed particulates on the rheology of water ice at planetary conditions[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 1992, 97.E12: 20883-20897. ([原文链接](#))
- Durham W B, Pathare A V, Stern L A, et al. Mobility of icy sand packs, with application to Martian permafrost[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(23). DOI : 10.1029/2009GL040392 . ([原文链接](#))
- Goldsby D L, Kohlstedt D L. Superplastic deformation of ice: Experimental observations[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2001, 106(B6): 11017-11030. ([原文链接](#))
- Qi C, Stern L A, Pathare A, et al. Inhibition of grain boundary sliding in fine-grained ice by inter-granular particles: Implications for planetary ice masses. Geophysical Research Letters.2018, 45:12757-12765. ([原文链接](#))
- Ruesch O, Platz T, Schenk P, et al. Cryovolcanism on Ceres[J]. Science, 2016, 353(6303): aaf4286. ([原文链接](#))
- Sori M M, Byrne S, Bland M T, et al. The vanishing cryovolcanoes of Ceres[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(3): 1243-1250. ([原文链接](#))
- Sori M M, Sizemore H G, Byrne S, et al. Cryovolcanic rates on Ceres revealed by topography[J]. Nature Astronomy, 2018. ([原文链接](#))



Nature : 木星奇特磁场的发现暗示内部复杂的发电机效应

太阳系行星中，木星的磁场最强，其强度是地球的 10 倍以上，其控制区域（磁层）可以延伸至土星轨道。以往人们普遍认为，木星磁场像地球一样，是由内部磁场发电机产生的。但与固体地球的显著区别是，作为气态行星，木星的驱动区域位于内部边界不明显的金属氢层。

研究木星的磁场及其内部发电机工作原理有助于我们了解行星的起源与演化，然而，我们对它的内部结构及动力学过程，甚至连产生磁场的发电机效应位置等基本科学问题都不清楚。2011 年，以这个基本科学问题为探测目标，美国宇航局（NASA）发射了“朱诺号”（JUNO）木星探测器。2016 年，JUNO 进入环木星轨道，成为最

接近木星极区表面的探测卫星。卫星配备了高精度的磁场和引力场探测，用于研究木星内部结构及物质运动过程。最新的磁场观测发现，木星磁场显著区别于其它已知的行星磁场，它的内部发电机效应远比我们想象的复杂。

美国科学家 Kimberly Moore 等近期在 Nature 上发表最新研究结果，利用 JUNO 近木星空间径向磁场的水平拉普拉斯算子的二范数，并将解正则化，从给定的观测拟合中获得最平滑的内部磁场模型（图 1），首次绘制出了木星表面到 0.85 木星半径（该深度推测为金属氢层的过渡区位置）的不同深度的径向磁场分布图（图 2）。

研究发现，在木星内部，大部分磁通通过北半球的一个狭窄地带离开发电机效

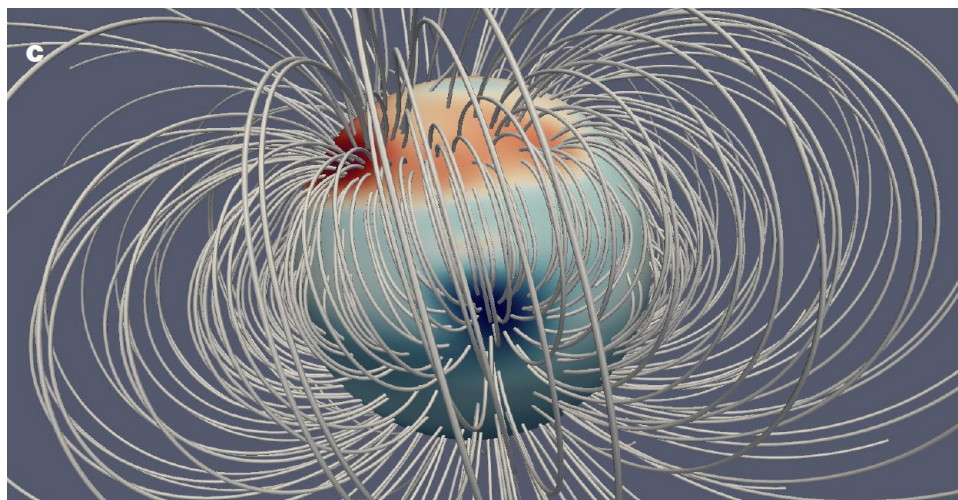


图 1 木星内部磁场模型

轮廓曲面位于 0.85 木星半径深度；红色（蓝色）表示该深度磁力线方向向外（向内）（Moore et al., 2018）（更直观的三维磁力线形态可参考这个视频）

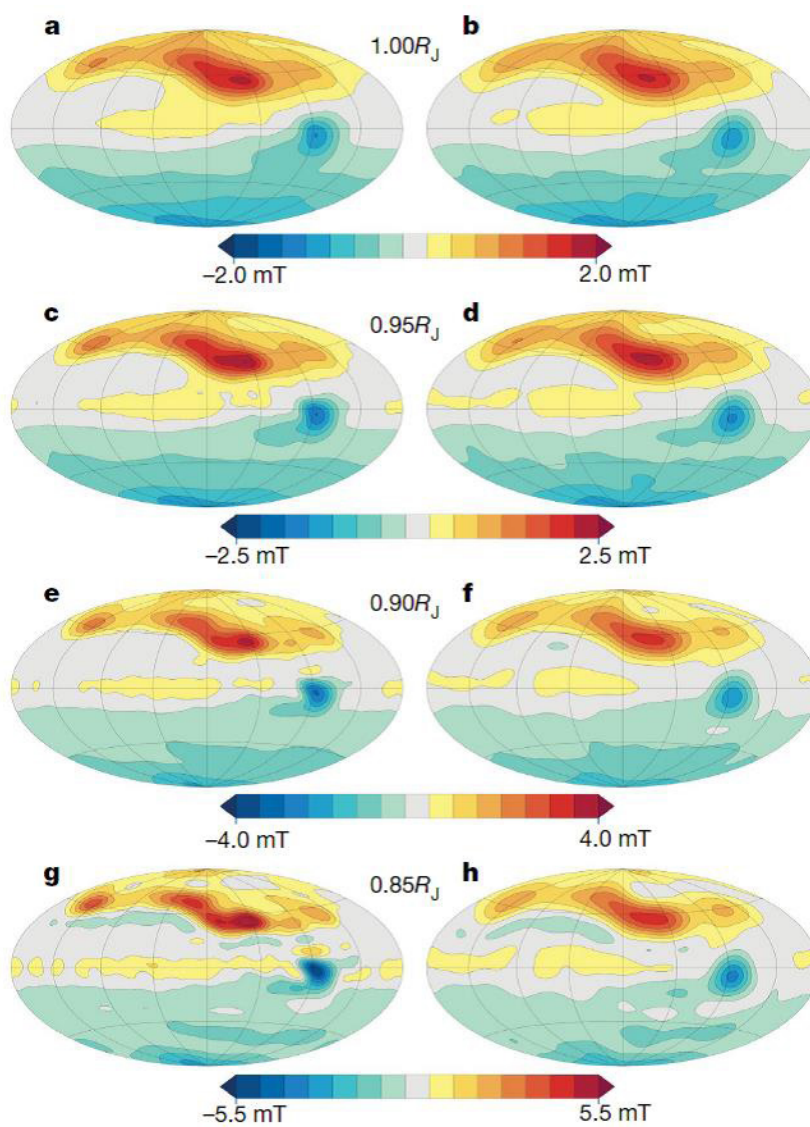


图 2 木星磁场在不同内部深度的径向分量分布图

自上往下分别为木星表面、0.95、0.90 和 0.85 木星半径深度的径向磁场图。左图为内部磁场模型 (Moore et al., 2018) 结果, 右图为当前最新的磁球谐函数模型 (Connerney et al., 2018) 的外推结果。两模型的结果均呈现类似的径向磁场分布特征, 但内部磁场模型的磁场强度稍大

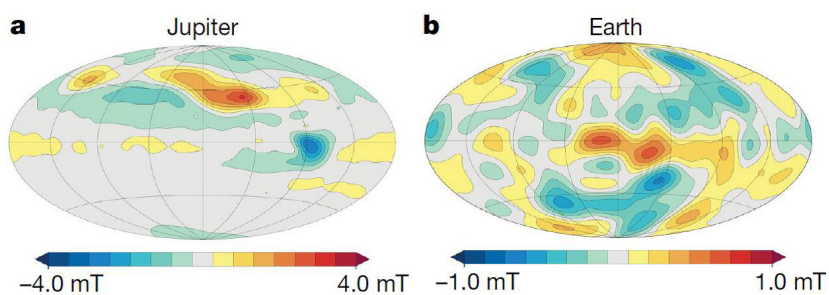


图 3 木星 (0.9 木星半径处, 左) 与地球 (核幔边界, 0.55 地球半径处, 右) 非偶极磁场径向分量分布比较 (Moore et al., 2018)



应 (dynamo) 区域, 并在赤道附近的“大蓝斑 (great blue spot)”重新进入木星, 而在其它区域磁场明显较弱。和地球磁场完全不同的是, 木星非偶极磁场几乎全部位于北半球, 其峰值大小是偶极场的近 3 倍; 而南半球主要呈现偶极磁场特征 (图 3)。现有的各种磁场发电机理论模型均不能解释观测到的磁场南北不对称现象。文章认为木星的磁场发电机明显区别于地球, 并不是发生在一个均匀的厚壳内, 由此推测, 这种奇特的行星磁场特征可能是由内部结构或相关物理参数的径向变化造成的。该发现刷新了我们对木星磁场的原有类似地球的近似偶极场的认识, 同时对我们接下来深入理解气态行星发电机理论具有重要的指导意义。

除了磁场观测以外, 从空间引力场来获取木星内部结构特征及对流发电机效应

的线索是另一个重要的途径。上海天文台孔大力研究员团队已对该方法进行了数值模拟先验研究 (Kong et al., 2016)。他们研究预测木星发电机区域内的对流运动将产生非旋转对称的空间引力场扰动, 该扰动将会在 JUNO 卫星引力场探测中得以验证。“行星空间磁场探测到的仅仅是行星内部发电机产生的极向场部分, 发电机区域内部可能存在的很强的环向分量并不能被直接观测到, 而环向分量磁场的大小取决于不同的发电机模式, 由此产生的截然不同的引力场扰动形态恰好可以通过 JUNO 飞船的空间引力场测量加以甄别。现阶段还没有获得全部的引力场数据, JUNO 计划后续的探测将得到足够的探测数据, 结合高精度磁场观测将会得到对木星内部结构和发电机理论更加全面的认识, 可能是 JUNO 下一个重大的发现”, 孔大力说。

主要参考文献

- Moore K M, Yadav R K, Kulowski L, et al. A complex dynamo inferred from the hemispheric dichotomy of Jupiter's magnetic field[J]. *Nature*, 2018, 561(7721): 76-78. ([原文链接](#))
- Kong D, Zhang K, Schubert G. Using Jupiter's gravitational field to probe the Jovian convective dynamo[J]. *Scientific reports*, 2016, 6: 23497. ([原文链接](#))
- Connerney J E P, Kotsiaros S, Oliverson R J, et al. A New Model of Jupiter's Magnetic Field From Juno's First Nine Orbits[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(6): 2590-2596. ([原文链接](#))

【感谢上海天文台孔大力研究员对本文的完善】

(撰稿: [钟俊](#) / 地球与行星室)



Science 专刊：遨游土星内环——卡西尼号的壮丽终章

启程于 1997 年，抵达于 2004 年，**启** 闭幕于 2017 年，卡西尼号飞船 (Cassini) 围绕土星探索了 12 余年。为了避免偷渡在卡西尼号上的地球细菌污染土星卫星环境，在燃料耗尽之际，卡西尼号经过一系列变轨，最终进入土星大气层坠毁。在变轨阶段，卡西尼号 22 次近距离飞掠土星，穿越了土星与其最内环 (D 环) 之间的空隙 (图 1)，这一探测阶段被誉为“壮丽终章” (“Grand Finale”)。依据“壮丽终章”阶段记录的数据，科学家们对土星磁场、内辐射带、射电辐射、大气成分、D 环与大气间物质传输等问题进行了深入研究。2018 年 10 月 5 日，Science 期刊报道了这

一系列共 6 篇全新的观测结果及研究内容。

近距离对磁场观测，有利于反演土星内部结构及动力学过程。Michele Dougherty 等人发现，土星磁赤道相对于土星赤道向北移动了约 2800 km，证实了土星磁场存在南北不对称性。并且分析出磁轴与自转轴夹角小于 0.01° ，更严格地证实了土星内部磁场的轴对称性。此外，发现在高阶磁矩 (4 至 11 阶) 中存在稳定的小尺度磁场结构，说明在土星内部半导体区域存在次级浅层发电机活动。除了内部动力学过程，对磁场的经向分量扰动的研究发现，在 D 环内边缘与土星之间存在很强的场向电流。这一场向电流连接到土星低纬电离层，其

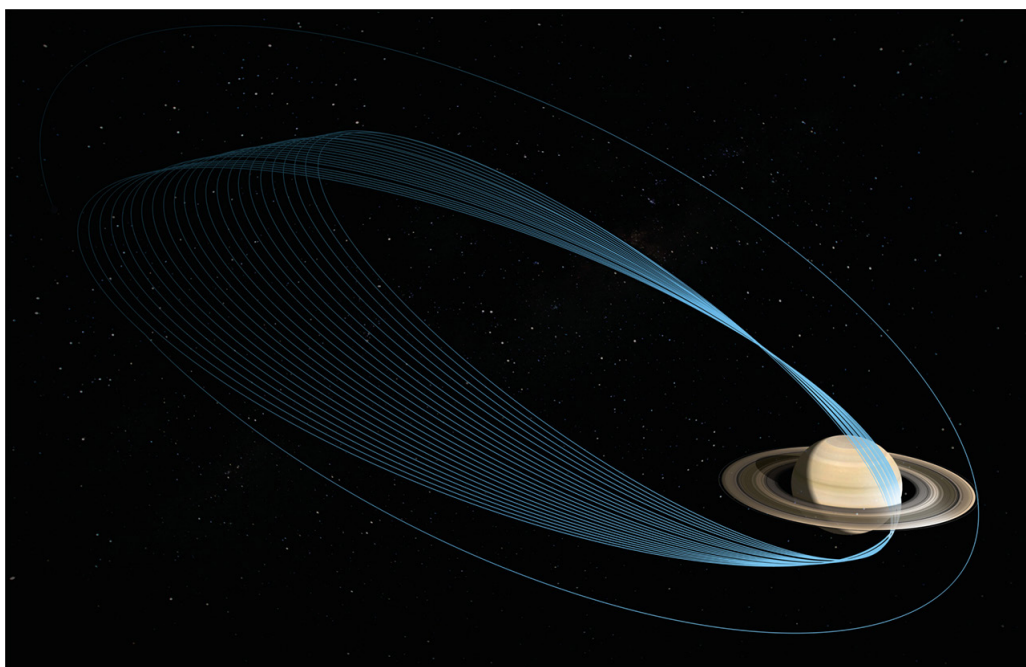


图 1 卡西尼号飞船在“壮丽终章”阶段的轨道 (蓝色曲线) 示意图

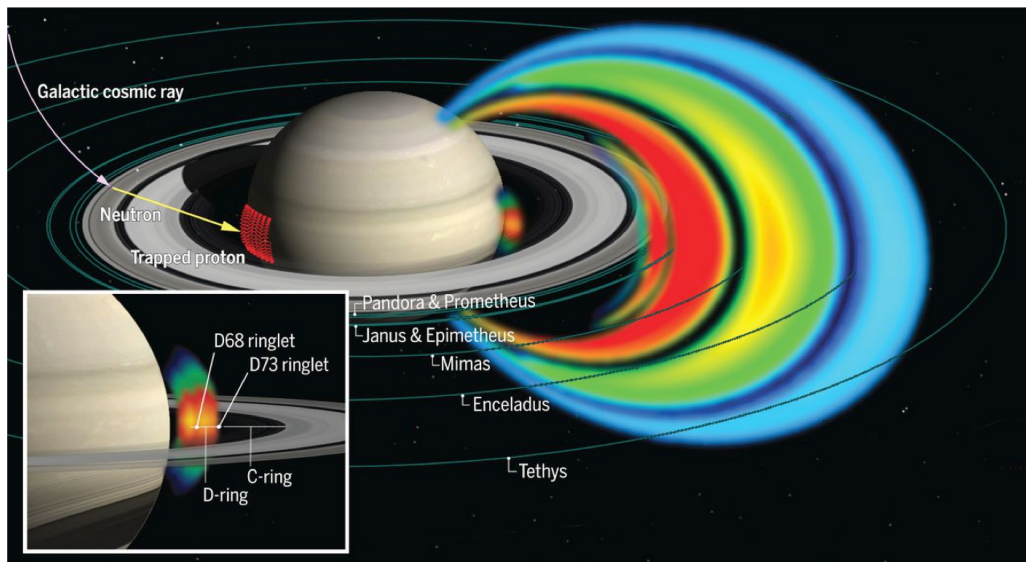


图 2 土星的质子辐射带

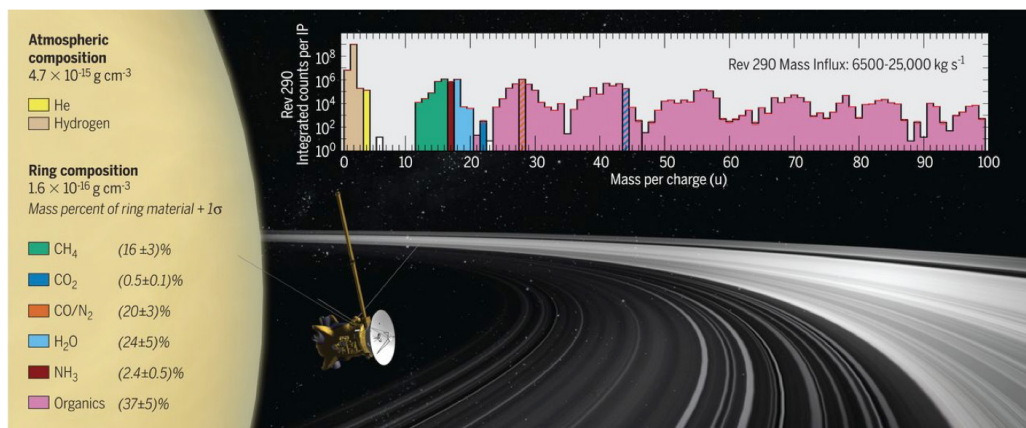


图 3 卡西尼号飞船对 D 环以内物质的质谱分析

强度与高纬极区场向电流强度相当。

低纬强场向电流说明 D 环以内存在着强烈的磁层活动，其中与航天器安全直接相关的是辐射带的变化。Elias Russos 等人在 D 环之内发现了新辐射带区域，这一新辐射带与环外辐射带相互独立（图 2）。在地球上，辐射带粒子同时受到局地加速、径向传输和损失机制的共同作用，过程复杂，研究难度大。而土星 D 环内的新辐射带提供了一个独立的环境，有助于分析辐射带的损失过程。这一区域在赤道面横跨

1.03Rs 至 1.22Rs（Rs 为土星半径），存在于土星大气外缘与 D 环外缘的 D73 小环之间的区域。此外，在 1.12Rs 处的 D68 小环将该辐射带分割成两部分。辐射带主要由宇宙线反照中子衰变过程产生的 25MeV 至 GeV 量级的相对论质子组成。土星大气、D 环以及背景尘埃使得高能质子被损耗，导致了各项异性的质子分布特征。

土星环颗粒（水冰占比 >95%）大到几米长的巨砾，小到纳米级的尘埃。微小的尘埃粒不断离开土星环进入土星大气。



Shiang-Wen Hsu 等与 Donald Mitchell 等分别用宇宙尘埃分析器 (Cosmic Dust Analyzer, CDA) 和磁层成像仪 (Magnetospheric Imaging Instrument, MIMI) 分析了大于几个纳米和 1 纳米左右的尘埃的成分与分布, 首次给出了土星环物质坠入大气的直接观测结果。分析结果显示纳米级的尘埃粒主要由硅酸盐和水冰组成。其中硅酸盐成分占了近 30%, 高于土星环中硅酸盐的比例。坠落的尘埃能够改变土星高层大气及电离层的化学成分, Jack Waite 等对大气及沉降物的成分进行了详细分析 (图 3), 发现水、甲烷、氨、一氧化碳 / 氮分子、二氧化碳等能够从 D 环坠入大气, 并对土星环的化学组成及其对大气的影 响进行了讨论。

土星和木星这两颗气态巨行星形态

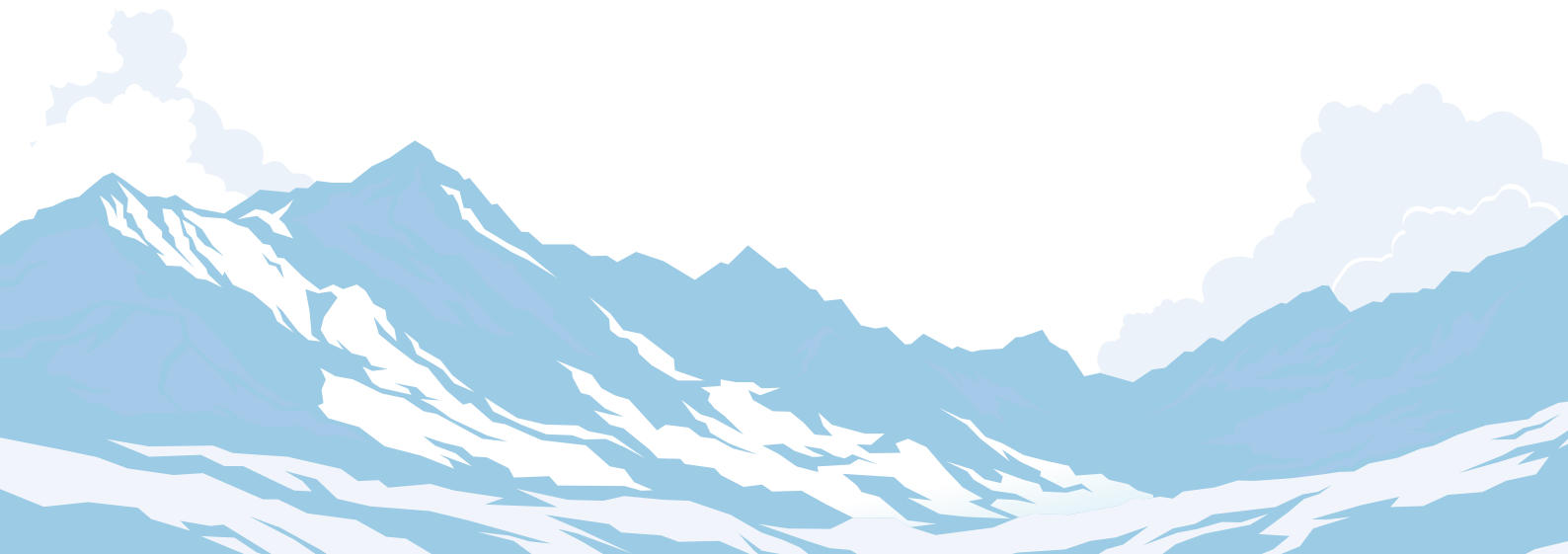
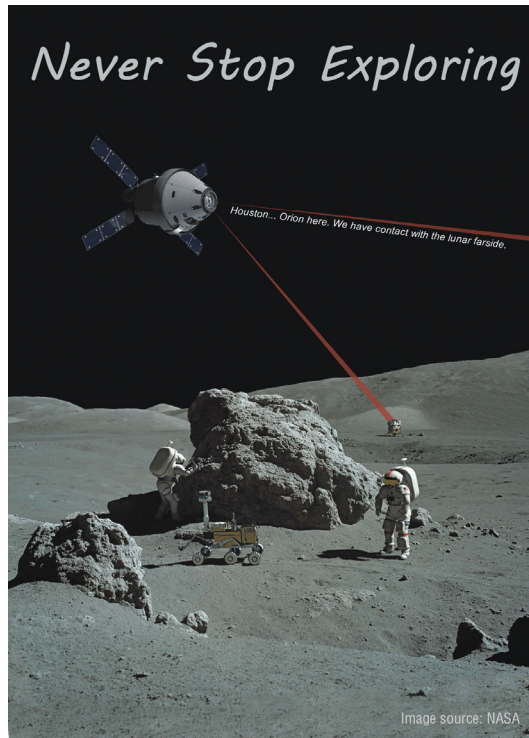
复杂, 不同结构相互耦合、相互影响。对巨行星的探测, 有助于人类拓展对星系演化的认知, 探究生命的起源, 以及寻觅潜在的系外宜居环境。美国国家航空航天局 (NASA) 发射的卡西尼 - 惠更斯号土星探测器成功地完成了探索土星及其卫星的使命, 解开了许多难题, 同时也展示了众多的未解之谜。根据中国 2016 年发布的“十三五规划”, 行星探索是我国的重点工作之一。中科院地质地球所魏勇研究员、万卫星院士与客座学者尧中华博士受 Nature Astronomy 期刊编辑邀请, 系统阐述了中国的空间探测发展脉络以及未来对巨行星的探测计划。相信中国将在未来类木行星探测领域发挥至关重要的作用。

主要参考文献

- Dougherty M K, Cao H, Khurana K K, et al. Saturn' s magnetic field revealed by the Cassini Grand Finale[J]. Science, 2018, 362(6410): eaat5434. ([原文链接](#))
- Hsu H W, Schmidt J, Kempf S, et al. In situ collection of dust grains falling from Saturn' s rings into its atmosphere[J]. Science, 2018, 362(6410): eaat3185. ([原文链接](#))
- Lamy L, Zarka P, Cecconi B, et al. The low-frequency source of Saturn' s kilometric radiation[J]. Science, 2018, 362(6410): eaat2027. ([原文链接](#))
- Mitchell D G, Perry M E, Hamilton D C, et al. Dust grains fall from Saturn' s D-ring into its equatorial upper atmosphere[J]. Science, 2018, 362(6410): eaat2236. ([原文链接](#))
- Roussos E, Kollmann P, Krupp N, et al. A radiation belt of energetic protons located between Saturn and its rings[J]. Science, 2018, 362(6410): eaat1962. ([原文链接](#))
- Waite J H, Perryman R S, Perry M E, et al. Chemical interactions between Saturn' s atmosphere and its rings[J]. Science, 2018, 362(6410): eaat2382. ([原文链接](#))

(撰稿: 郭瑞龙 / 地球与行星室)

5.Never stop exploring





Science : 韩国最大的 Mw5.4 破坏性地震 可能为诱发地震

2017年11月15日韩国浦项发生 Mw5.4 级地震，震源深度 9km，这是韩国 1905 年有仪器观测记录以来的最大破坏性地震。2018 年 6 月 1 日，Science 刊出的 2 份基于地震、大地测量学和地质资料的互补性研究报告 (Grigoli et al., 2018 ; Kim et al., 2018) 表明，该地震可能是浦项地热发电站通过将水注入 4300 多米深处获取地热发电的强化地热系统 EGS 诱发的，尽管该发电站距离测定震中有若干公里。

瑞士苏黎世地震中心的 Grigoli 等人利用区域和远场地震台记录的 15 天连续波形资料，对该地震的主震及余震序列进行检测和精定位分析，结果表明检测到的地震深度大多位于 3 ~ 7 km，其中主震和最大余震深度为 4.0 ~ 4.5 km，空间大地测量的 DInSAR 地表移位数据也支持这一估计结果；矩张量反演结果表明，主震的震源机制为具有明显非双力偶成分的复杂破裂过

程，可能由方位不同的 2 条相邻断层相继失稳发生的二次子事件构成。

韩国釜山国立大学的 Kim 等人利用发震地点北边约 10 km 地震台的连续波形记录，应用模板匹配技术对 2012 年 1 月 1 日以来近 6 年的数据进行了分析，所检测到的地震活动都发生在 EGS 的 PX1 和 PX2 注水井完工后，地震活动时序与 EGS 井注入流体量对应甚好 (图 1)；利用围绕 EGS 布设的 8 个流动地震台资料，通过精定位得到的地震震源深度为 4 ~ 6 km (图 2)，地震分布所在的两个破裂面与大地电磁探测到的低阻区较为相符，主震 (深度约为 4.5 km) 和前震发生位置紧接 PX1 井底 (图 2)。

Grigoli 等人的分析显示，地震的静态应力转移可能会增加断层的发展危险；Kim 等人的研究表明，将流体直接注入到近临界失稳应力的断层会引起比理论预期更大的地震。

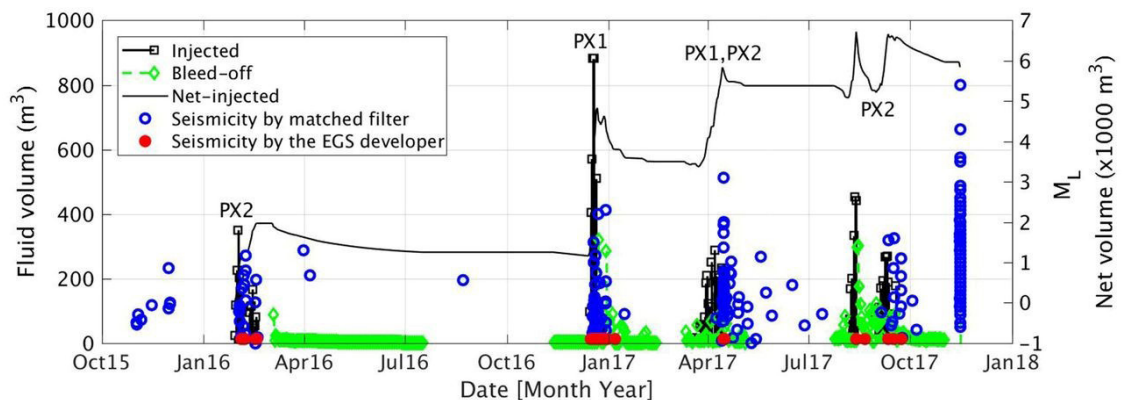


图 1 EGS 注水量与地震活动时序 (Kim et al., 2018)

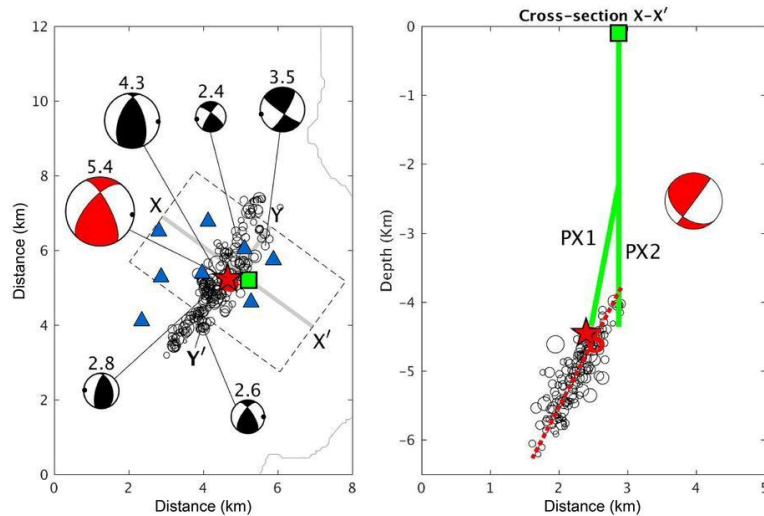


图 2 浦项 Mw5.4 地震序列的震中分布及深度剖面图 (Kim et al., 2018)

人为活动诱发地震研究是国际地震界近年来研究的大热点, 近年来美国俄克拉何马州注水开采油气资源导致诱发地震激增的现象引起了学界的极大关注, 欧洲与加拿大也有不少诱发地震的研究结果相继发表, 我国页岩气开采诱发地震活动的研

究也有报道 (Lei, et al., 2017); 对 2013 年吉林松原发生的 5.8 级前郭震群活动, 也有研究推测可能与人类活动的诱发有关 (刘俊清等, 2017); 对 2013 年湖北巴东 5.1 级地震, 新近研究表明是三峡水库水注入诱发的地震 (Huang et al., 2018)。

主要参考文献

- Grigoli F, Cesca S, Rinaldi A P, et al. The November 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea[J]. *Science*, 2018,360: 1003-1006.DOI: 10.1126/science.aat2010. ([原文链接](#))
- Huang R, Zhu L, Encarnacion J, et al. Seismic and geologic evidence of water-induced earthquakes in the Three Gorges Reservoir region of China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45: 5929–5936. ([原文链接](#))
- Kim K H, Ree J H, Kim Y, et al. Assessing whether the 2017 Mw 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event.[J]. *Science*, 2018, 360:1007-1009.DOI: 10.1126/science.aat6081. ([原文链接](#))
- Lei X, Huang D, Su J, et al. Fault reactivation and earthquakes with magnitudes of up to Mw4.7 induced by shale-gas hydraulic fracturing in Sichuan Basin, China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 7971. DOI:10.1038/s41598-017-08557-y. ([原文链接](#))
- 刘俊清, 刘财, 雷建设, 等. 2013 年前郭 Ms5.8 震群矩张量研究 [J]. *地球物理学报*, 2017,60(9): 3418-3431.DOI:10.6038/cjg20170912. ([原文链接](#))

(撰稿: [陈棋福](#) / 地球与行星室)



Science : 注水井可诱发远距离地震

人工诱发地震是科学家、政府和社会公众广泛关注的重要议题。人们早就知道，水库蓄水、地下采矿、从地下注入、抽采流体或气体，都能够诱发地震。特别是向地下注入流体诱发地震（这里面包括水力压裂，泡沫压裂，污水回灌等），已成为一个研究焦点，因为新的钻井和开采技术需要通过注入法，从地层中取出更多的石油和天然气。Science 曾刊发过美国地质调查局 Ellsworth (2013) 的一篇文章，专门就注水诱发地震展开讨论。传统理论大都认为，由于流体注入，断层附近岩石孔隙中的流体压力增加，导致断层更易滑动（直接的流体压力扩散效应），或流体注入 / 抽采导致断层所受的上覆岩层压力发生变化（无直接的水力联系）（图 1），进而诱发地震。

2018 年 8 月 31 日，加州大学圣克鲁兹分校地球和行星科学教授 Emily Brodsky 等

在 Science 发表研究论文，认为独立的注水井可诱发约 10 公里外的地震，与向底层基岩注水相比，向沉积岩注水，水会对周围的岩石产生压强并产生弹性应力，从而对远处断层施加压力，正是这种“孔隙弹性耦合”，影响了岩石将流体应力传递到固体岩基中的能力，从而产生强度更大、距离更远的地震。

论文提出了两种模式：第一种向基岩注入流体，发现诱发地震更倾向于发生在注入井周围，呈密集地震群，在远离注入井的地方，地震数量急剧下降。第二种向沉积岩注入流体，发现诱发的地震数量随着与注入井距离的增大而逐渐下降，呈幂指数关系，并且可能在距离注入井较远处（大于 10 公里）发生地震。

第一种模式的机制是因为注入使岩石孔隙中的流体压力增加，导致断层更易滑动，与沉积岩相比，结晶基底的岩石更硬

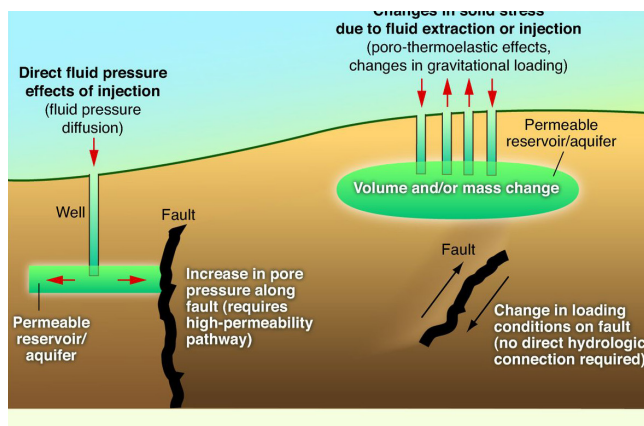


图 1 诱发地震的机制示意图 (Ellsworth, 2013)

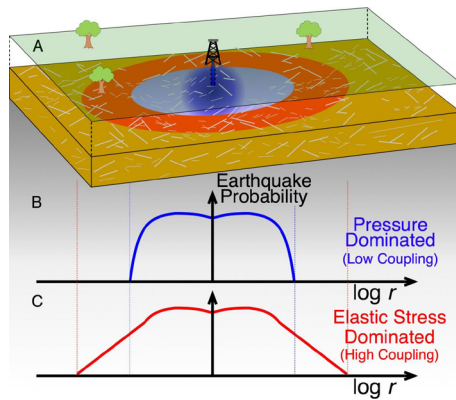


图 2 诱发地震与离井距离间的函数关系

蓝色和红色区域分别表示注入基岩（蓝色）和上覆沉积层（红色）后诱发地震活动的空间范围大小，灰线代表断层网络

并且具有较低的孔隙度，因此孔隙压的增大仅限于井周围的孤立区域，与总应力场的耦合程度较低。而第二种模式是另一种机制，即“孔隙弹性耦合”，通过注水对周围的岩石产生压强，使岩石产生弹性应变，即孔隙弹性，从而可以在水不进入断层的情况下，对远处断层施加压力，影响范围更广（图2）。

自2010年以来，美国俄克拉荷马州的地震数量激增，每年的地震数量甚至已经超过加利福尼亚州的地震总数。因为无法隔离出单个注水井来进行研究，本研究并

没有采用俄克拉荷马州的数据，但他们的发现有助于解释在该地区的人工诱发地震活动范围的广泛性。

该发现意味着水力压裂、废水处置、地热开采等方案都需要重新审视并进行必要的修改，关键难题是确定注水井周边诱发地震的空间范围。但文章也认为，“这项研究结果并不意味着向基岩注水就绝对安全，因为注水的过程中仍可能遇到基岩中的断层，从而进一步引发更大规模的地震。但是这种可能性相对较小，因为基岩中的诱发地震空间范围更小一些。”

主要参考文献

Ellsworth W L. Injection-induced earthquakes[J]. Science, 2013, 341(6142): 1225-942. ([原文链接](#))

Goebel T H W, Brodsky E E. The spatial footprint of injection wells in a global compilation of induced earthquake sequences[J]. Science, 2018, 361(6405): 899-904. ([原文链接](#))

【致谢：感谢王一博研究员、崔振东副研究员对完善本文的帮助】

（撰稿：张艳，杨秋野 / 地球与行星室）



Geology : 岩石亚临界裂缝参数与侵蚀速率

岩体风化对地貌演化、石质文物长期保护以及岩石工程的长期稳定性等有着重要的影响，是地质地貌学、建筑学、工程地质学、矿物学、土壤学和岩石力学等各领域的重要研究内容。利用宇成核素 Be 测量岩体风化速率是目前一种相对成熟的有效方法，但因其测量的是长时间尺度的地表侵蚀速率，对于短时间尺度的地表侵蚀速率变化不敏感，导致无法准确预测岩体的未来风化速率 (Perron, 2017)。越来越多的研究认为，岩石亚临界裂缝的敏感性是驱动和限制岩石侵蚀的主要因素，即岩石亚临界裂缝控制着岩石的物理损伤累积，从而控制岩石的侵蚀速率

(图 1)。

近期，美国北卡罗纳大学学者 M. C. Eppes 等在 Geology 上发表了最新研究成果，对该理论进行了验证，并第一次获取了可直接测试的数据。他们利用在弗吉尼亚州（美国）蓝岭山脉北部山脊处采取的岩样，进行 Be 衍生侵蚀速率、抗压强度 Q_c 、裂缝特征和 3 个亚临界裂缝参数（亚临界裂缝指数 n 、查尔斯定律速度常数 A 和断裂韧度 K_{IC} ）的测定。通过统计分析发现，3 个亚临界裂缝参数与岩石的侵蚀速率之间具有很好的拟合关系，相反，岩石的抗压强度与侵蚀速率之间并没有明显的相关性，从而推断亚临界裂缝参数与侵蚀速率密切

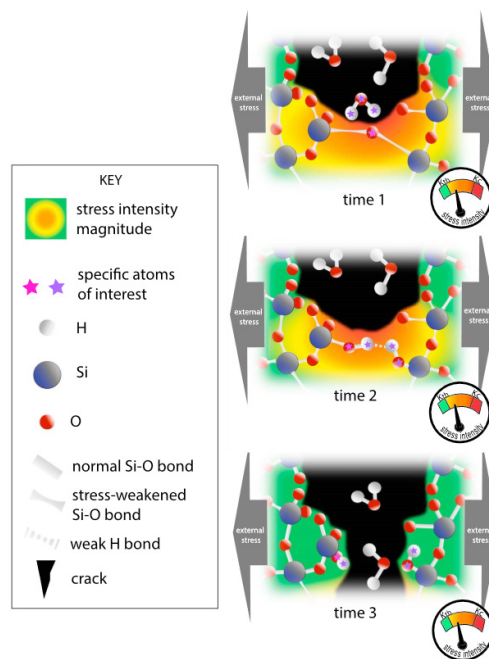


图 1 亚临界裂隙扩展概念图 (Eppes and Keanini, 2017)

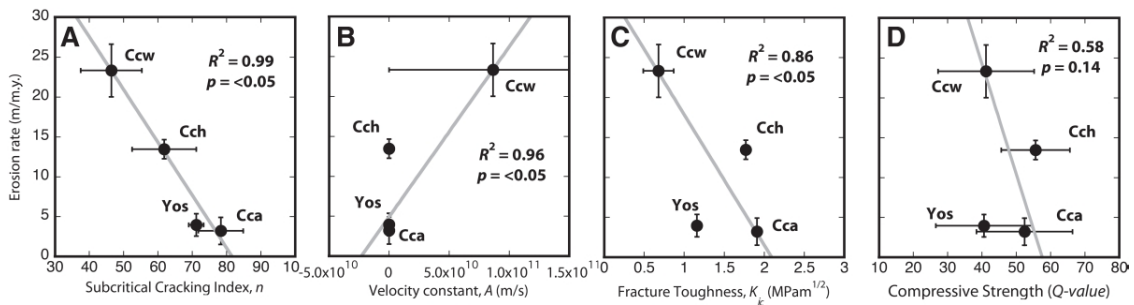


图 2 亚临界裂缝参数 n 、 K_{IC} 、 A 和岩石抗压强度 Q 与侵蚀速率的关系 (Eppes et al., 2018)

相关。

露头数据和岩样来自雪兰多国家公园 (SNP) 山脊线上的 20 个自然露头, 露头具有相似的气候、构造和地貌历史, 可以避免这些变量因素对整体侵蚀速率和亚临界裂缝的复杂影响。研究过程如下: (1) 首先进行宇成核素 Be 的同位素测量, 估算岩体的风化侵蚀速率, 得到平均风化侵蚀速率; (2) 进行斯密特锤试验, 得到每种岩样的单轴抗压强度 Q , 并进行双扭转试验, 利用试验数据计算出应力强度因子 K_I 、亚临界裂缝的扩展速度 V 和断裂韧度 K_{IC} , 利用 K_I 和 V 值画出 K_V 曲线, 进行幂指函数拟合, 通过公式推导得到 n 和 A 这两个相关参数值; (3) 运用加权最小二乘回归的

方法, 分析 Q 、 n 、 A 、 K_{IC} 和岩体风化速率之间的关系 (图 2)。

分析结果表明: 较低的 n 值、 K_{IC} 值和较高的 A 值均导致亚临界裂缝的快速扩展, 且与较高的侵蚀速率相关, 而 Q 与侵蚀速率无关; n 值与裂缝尖端直接断裂的速率密切相关, 因此可以推断 n 值与侵蚀速率最具相关性; 相比之下, 可能更受单个样品的特性的影响, Q 、 K_{IC} 和 A 在岩体裂缝的扩展中只起到部分作用。因此, n 的测量值可能比其他参数更能代表历史中所有风化裂缝的变化。

如果这种方法能有效预测岩体风化速率, 将对地质灾害的预测及地貌演化提供更加准确的数据支持。

主要参考文献

- Eppes M C, Keanini R. Mechanical weathering and rock erosion by climate - dependent subcritical cracking[J]. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(2): 470-508. ([原文链接](#))
- Eppes M C, Hancock G S, Chen X, et al. Rates of subcritical cracking and long-term rock erosion[J]. *Geology*, 2018, 46(11): 951-954. ([原文链接](#))
- Perron J T. Climate and the pace of erosional landscape evolution[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 561-591. ([原文链接](#))

(撰稿: 李丽慧, 崔振东 / 页岩气室)



Nature Geoscience : 下降中的内陆盆地水储量

内陆盆地是指与海洋不直接相连的盆地，它们约占全球面积的 1/5，全球干旱区面积的 1/2。在内陆盆地，由于河流分布相对有限，湖水与地下水均扮演着重要的角色，水资源为生产和生活所必需，并与内陆生态的发展演变密切相关。在当前全球变暖和人类活动的影响下，对水资源储量变化进行评估显得尤为重要。

在部分内陆盆地，已有文献表明水资源储量在近几十年存在下降趋势，但一直未见有全球性的评估。Nature Geoscience 最近发表了美国堪萨斯州立大学 Jida Wang 与南京地理所宋春桥等的研究成果，他们基于 Grace 重力卫星数据，结合光学遥感、多源测高卫星资料及水文模型，定量估算全球不同区域内陆盆地的地表水、土壤水与地下水储量变化情况。

研究表明：全球内流区的水储量

在 21 世纪初正以惊人的速率下降。2002-2016 年期间，全球内陆盆地水储量每年减少 106.3 Gt（约 1000 亿立方米），损失速度约相当于每年干涸掉一个青海湖或 25 个太湖的水量。内陆盆地减少的水量不会消失，它主要以水汽的形式重新参与水循环，并可能会引起海平面的变化。近年来，全球海平面上升速率达 3.4 mm/年（Cazenave et al., 2014）。过去 14 年，内陆盆地减少的水如果全部进入海洋，会造成海平面上升约 4 mm，其贡献相当于全球冰川（不计算格陵兰和南极）融水的一半。而且，内陆盆地与外流盆地相比，它的水储量变化对气候系统的年际指数（如 ENSO）变化不敏感（如 ENSO）并不敏感。相反，它有显著的十年际演化趋势，这很可能与近些年的人类活动有关，比如大规模的人类灌溉和地下水开采等，致使陆地水分大量外流。

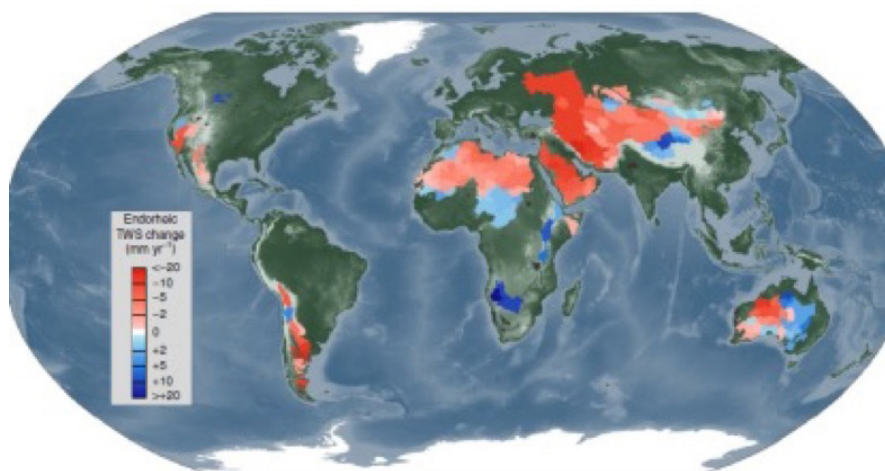


图 1 全球内陆盆地水储量变化



该全球评估结果进一步显示,我国所处的欧亚大陆是内陆盆地水储量下降最大的区域(图1)。作者通过构建水文模型,将水储量变化进一步细分为地表水、土壤水和地下水的变化。在欧亚大陆,水储量减少依次体现在地表水、土壤水和地下水上,其中地表水储量下降是地下水储量下降的近2倍。里海和咸海等内陆海/湖的水位下降是地表水储量下降的主要原因。相比之下,青藏高原的内陆盆地,则由于降水量的增加和冰川的融化,使其水储量有所增加。

需要加以关注的是, Wang et al. (2018) 应用 Grace 卫星数据研究全球/区域尺度的水储量问题成为由技术进步而推动水文

学研究的典型案例之一,也是近年来的研究热点, Nature、Science、PNAS 等刊物均有大量相关报道 (Rodell et al., 2009; Famiglietti et al., 2015; Scanlon et al., 2018)。此外,近期广为传播的由苏黎世联邦理工大学 Kinzerbath Wolfgang (中国政府友谊奖获得者) 所作的“华北平原的地下水漏斗可以在卫星上看到”,亦是基于 Grace 卫星数据的结果。中国科学院测量与地球物理研究所与法国空间局/大地测量研究中心等单位合作,还基于 Grace 卫星数据,指出华北地区(包括北京、天津、河北和山西)每年损耗约 83 ± 11 亿吨地下水 (Feng et al., 2013), 地下水超采现象异常显著。

主要参考文献

- Cazenave A, Dieng H B, Meyssignac B, et al. The rate of sea-level rise[J]. Nature Climate Change, 2014, 4(5): 358. ([原文链接](#))
- Famiglietti J S, Cazenave A, Eicker A, et al. Satellites provide the big picture[J]. Science, 2015, 349(6249): 684-685. ([原文链接](#))
- Feng W, Zhong M, Lemoine J M, et al. Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements[J]. Water Resources Research, 2013, 49(4): 2110-2118. ([原文链接](#))
- Rodell M, Velicogna I, Famiglietti J S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India[J]. Nature, 2009, 460(7258): 999-1002. ([原文链接](#))
- Scanlon B R, Zhang Z, Save H, et al. Global models underestimate large decadal declining and rising water storage trends relative to GRACE satellite data[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115 (6). ([原文链接](#))
- Wang J, Song C, Reager J T, et al. Recent global decline in endorheic basin water storages[J]. Nature geoscience, 2018, 11(12): 926-932. ([原文链接](#))

(撰稿: [孔彦龙](#) / 页岩气室)