



第一届中国同位素水文学论坛

西藏富硼地热流体成因的 水化学和同位素证据

郭清海 刘明亮

中国地质大学（武汉）

硼 - 必要性与危害性

营养元素

硼是生命必需元素，是核糖核酸形成的必需品，其缺乏会导致人和动物运动速度减慢、注意力降低等，影响植物细胞和组织的新陈代谢



硼危害

硼含量超标可阻碍植物生长；也可引起人和动物慢性中毒，使肝、肾脏受到损害，脑和肺出现水肿

地热来源硼污染

高温水热区规模化开发利用（尤其是地热发电）后，地热废水的排放可能成为地热区附近环境中硼的主要污染源

西藏地热水中的硼

天然水中的硼

- 水圈中大部分的硼分布于海洋

- 海水中硼的平均浓度为4.6 mg/L，变化范围从0.5 mg/L到9.6 mg/L
- 淡水中硼的含量一般较低，从<0.01 mg/L至1.5 mg/L
 - ✓ 山西原平浅层地下水：0.01 mg/L - 0.43 mg/L

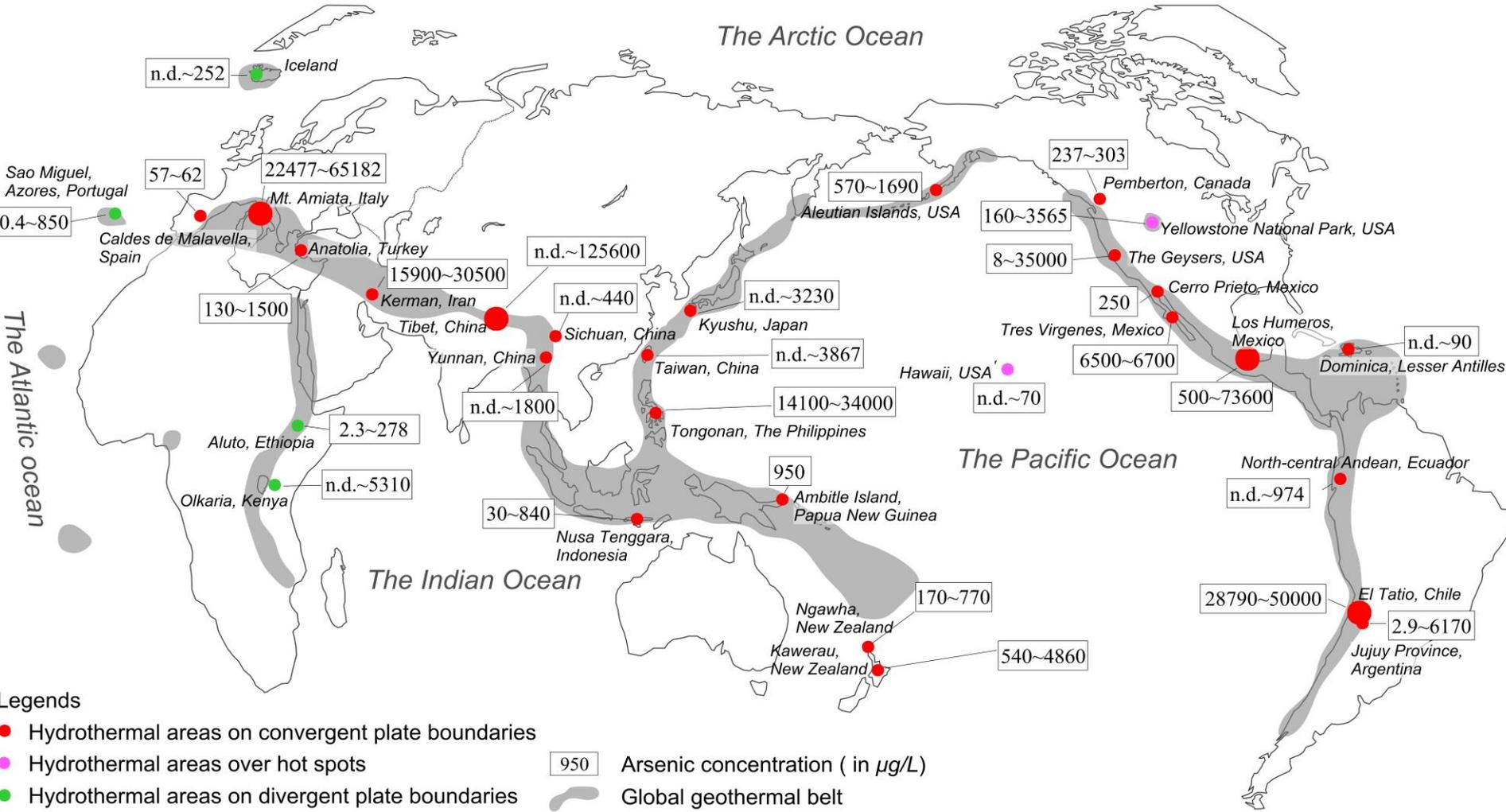
- 地热水中硼一般含量较高

- 美国黄石公园Tantalus河谷：7.6 mg/L
- 意大利Phlegraean热田：22.0 mg/L
- 阿根廷San Antonio地热区：53.8 mg/L
- 山西忻州盆地地热水：0.2 - 2.0 mg/L
- 青海共和盆地地热水：0.5 - 26 mg/L

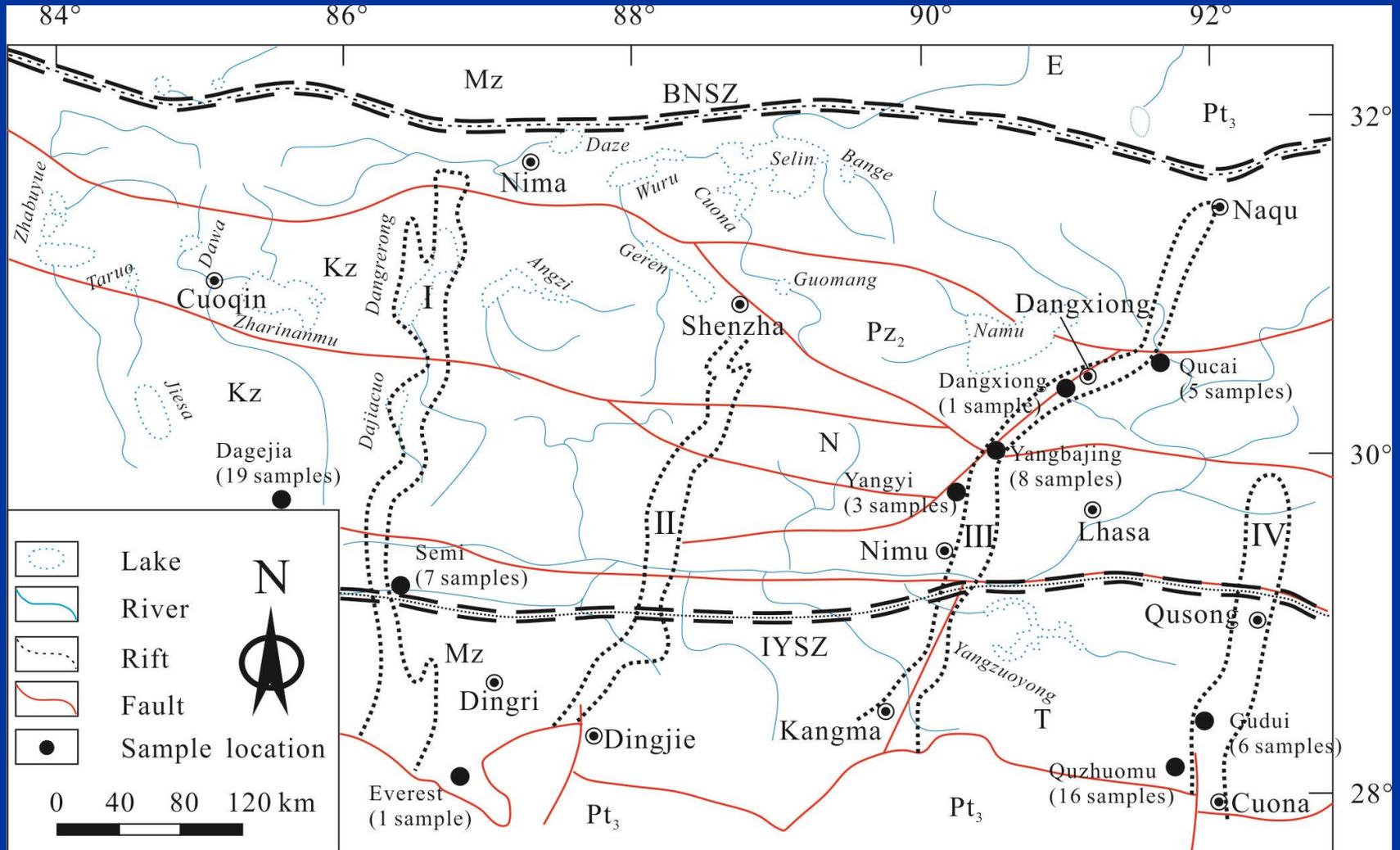
- 西藏地热水中硼含量异常高

- 本次工作：6.9 - 531 mg/L（不包括酸性热泉）

全球典型地热水中砷的分布

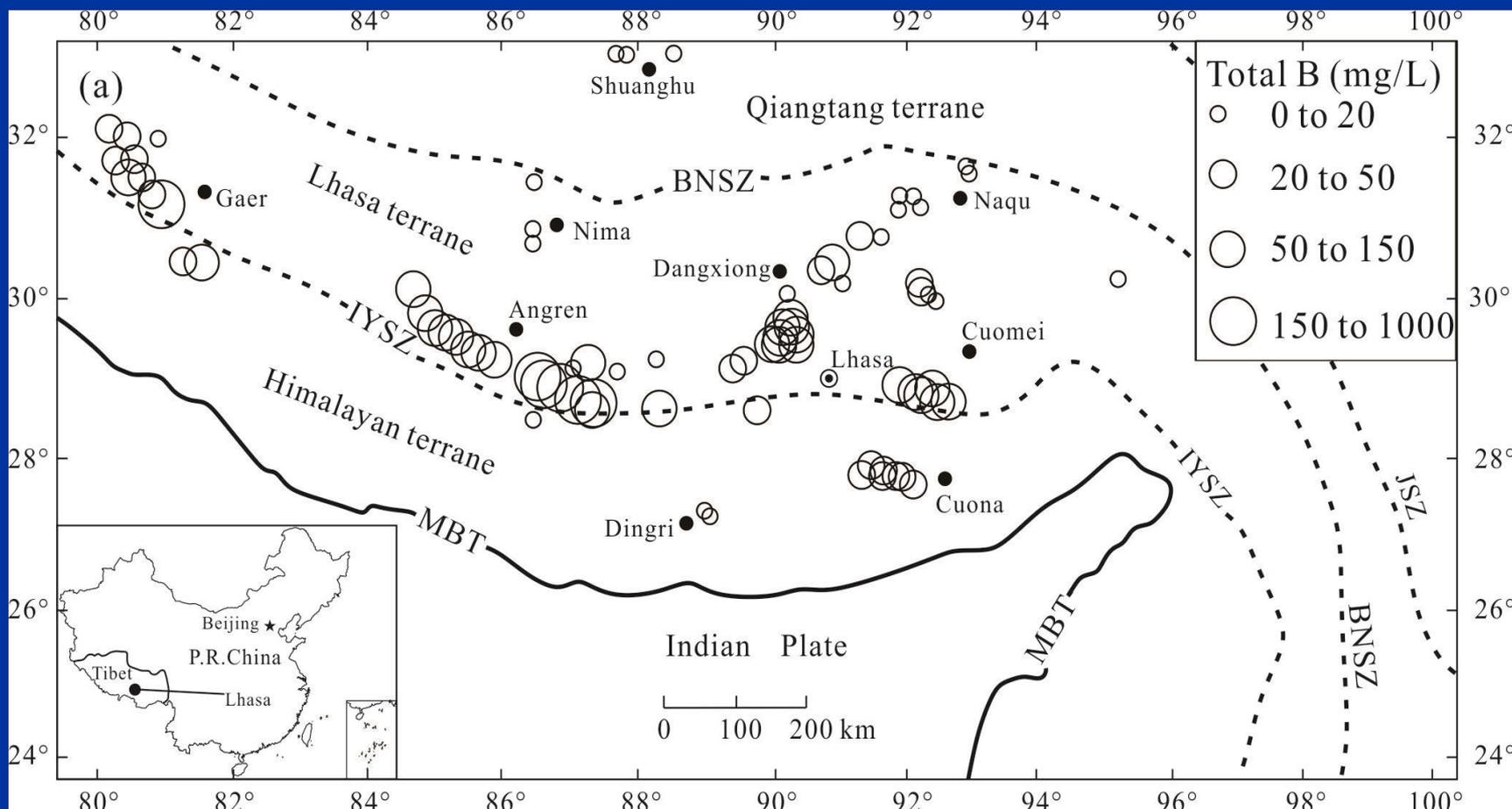


野外工作区域



搭格架、色米、羊易、羊八井、宁中、曲才、曲卓木、古堆

西藏地热水中硼的地域分布



- 异常富硼地热水均分布在拉萨-冈底斯地块
- 与雅鲁藏布江缝合带的展布趋势基本一致

西藏地热水中硼的 地球化学起源

样品采集与分析

取样及保存方法

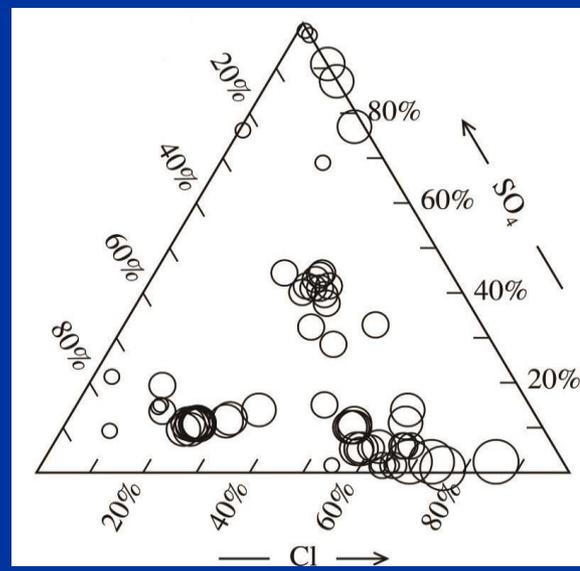
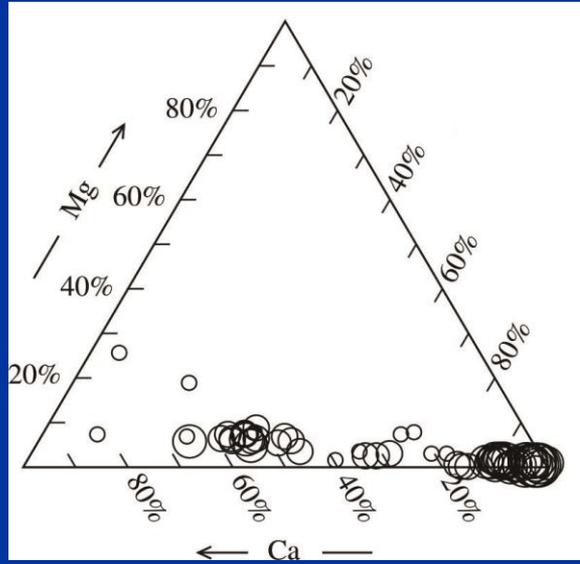
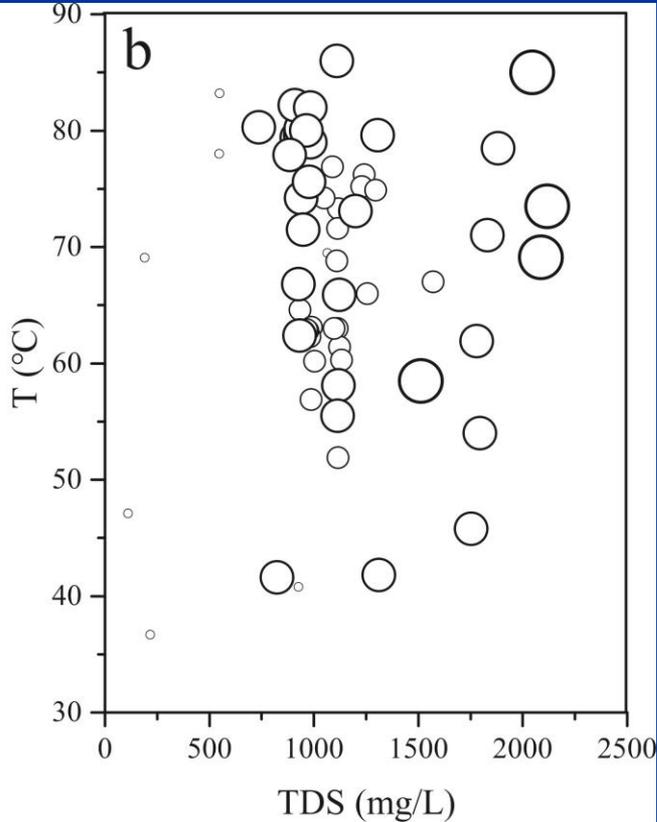
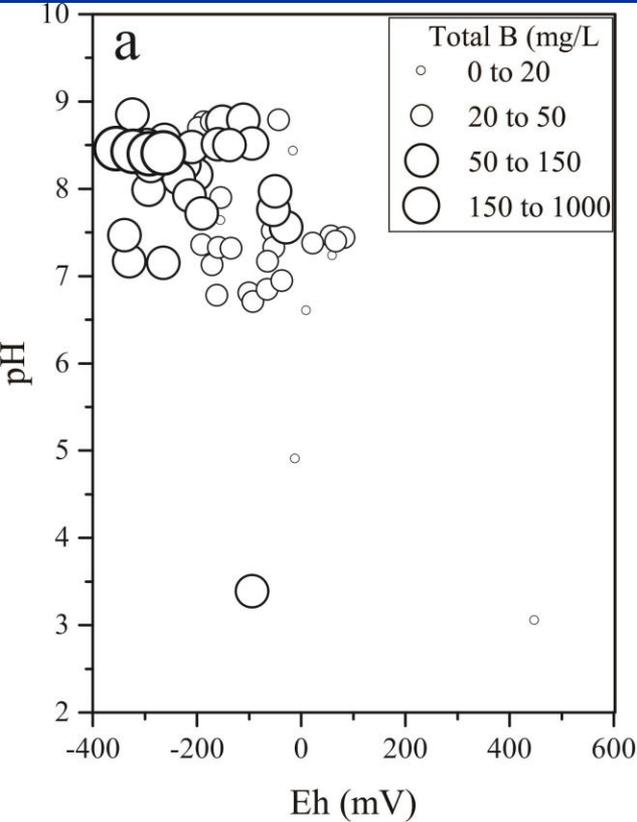
测试项目	采样容器	取样方法	现场加入试剂	保存方法
阳离子	塑料瓶, 500mL	过滤	滴加浓硝酸至 pH<1	4°C 冷藏
阴离子	塑料瓶, 500mL	过滤	无	4°C 冷藏
D、 ¹⁸ O	塑料瓶, 500mL	胶带密封	无	4°C 冷藏
¹³ C、 ¹¹ B	塑料瓶, 500mL	过滤, 胶带密封	无	4°C 冷藏
SO ₄ - ³⁴ S	塑料瓶, 5L	直接取样	BaCl ₂ 溶液沉淀剂	烘干
H ₂ S- ³⁴ S	塑料瓶, 5L	直接取样	Cd(Ac) ₂ 溶液沉淀剂	烘干

指标测试

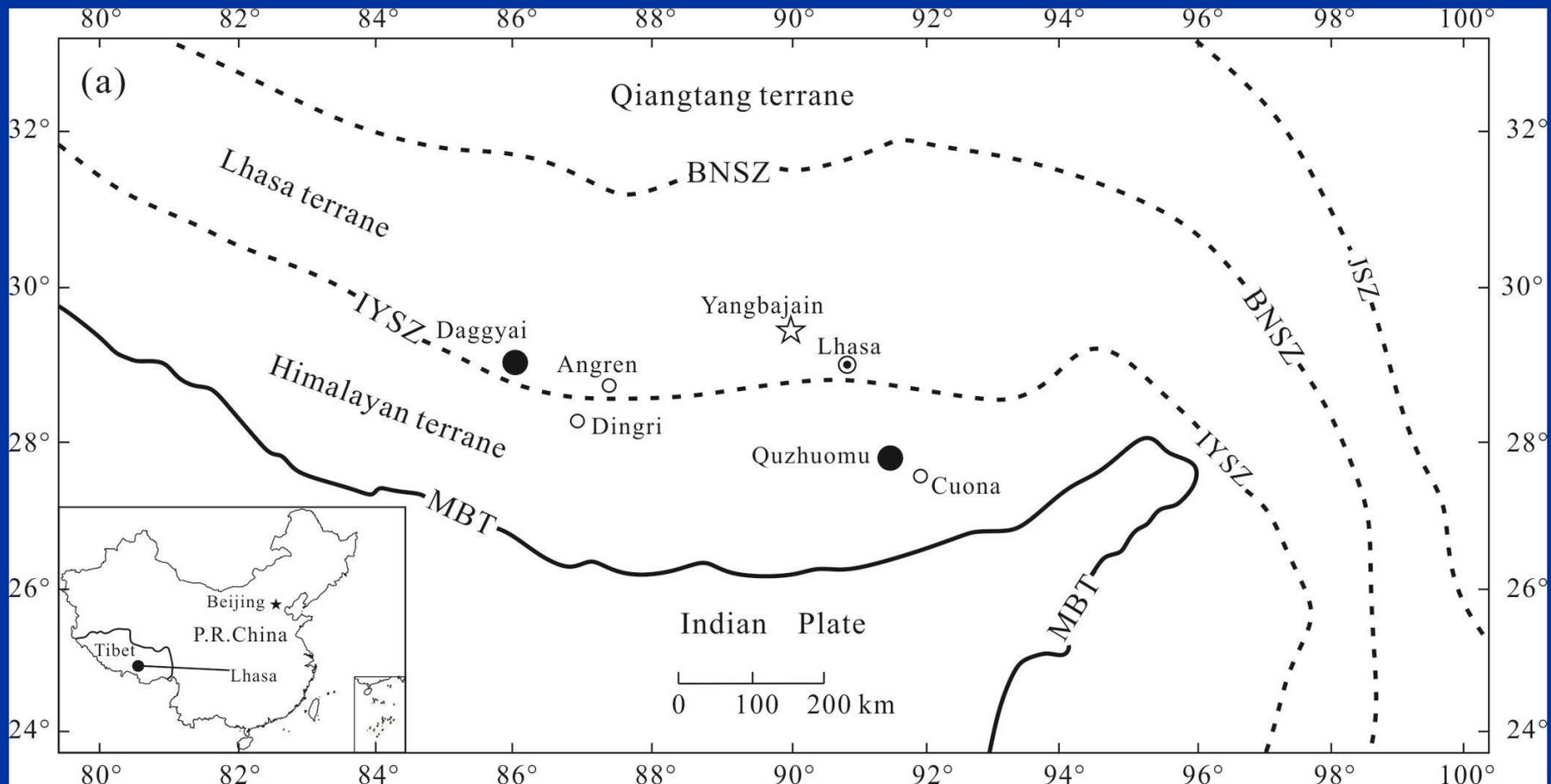
测试指标	测试仪器	测试单位
温度、pH、电导、溶解氧 (DO) 和总溶解固体 (TDS)	多参数水质分析仪	自行测试
NH ₄ ⁺ 、S ²⁻ 、Fe ²⁺	便携式比色计	自行测试
阴离子	离子色谱	中国地质大学(武汉)环境学院
阳离子	ICP-OES	中国地质大学(武汉)环境学院
微量元素	ICP-MS	中国地质大学(武汉)生环国重
D、 ¹⁸ O	质谱仪	中国地质大学(武汉)地调院
¹³ C	质谱仪	中国地质科学院桂林岩溶所
¹¹ B	HR-ICP-MS	Texas Tech University
SO ₄ - ³⁴ S	质谱仪	中国地质大学(武汉)生环国重
H ₂ S- ³⁴ S	质谱仪	中国地质大学(武汉)生环国重
氟硼络合物	氟硼酸根离子电极	自行测试
多聚硼氧配阴离子	激光拉曼光谱仪	华中科技大学分析测试中心

利于硼赋存地热水环境:

- Na-Cl及Na-HCO₃-Cl水化学类型;
- 中性-弱碱性、还原环境、高温、高TDS

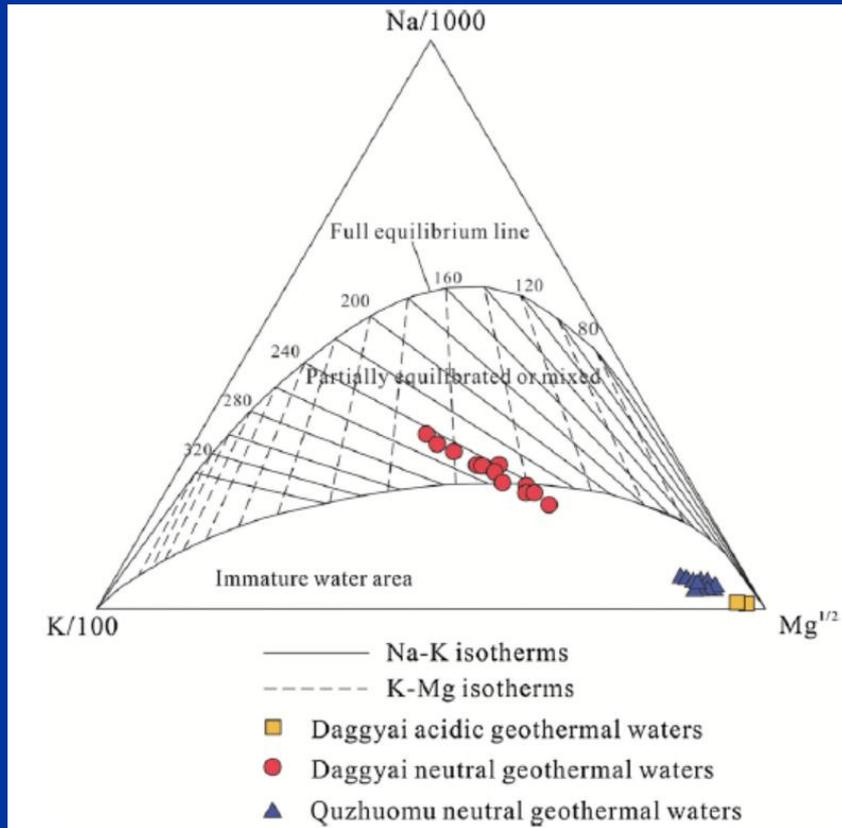


典型地热区选择



- 搭格架 酸性泉: B浓度 1.1~1.2 mg/L, $\delta^{11}\text{B}$ 值 -12.9‰;
- 中性泉: B浓度 72.5~106.9 mg/L, $\delta^{11}\text{B}$ 值 -16.4‰ ~ -12.3‰;
- 曲阜木 中性泉: B浓度 21.9~44.6 mg/L, $\delta^{11}\text{B}$ 值 -11.3‰ ~ -7.1‰

典型地热区选择



岩浆热源型：

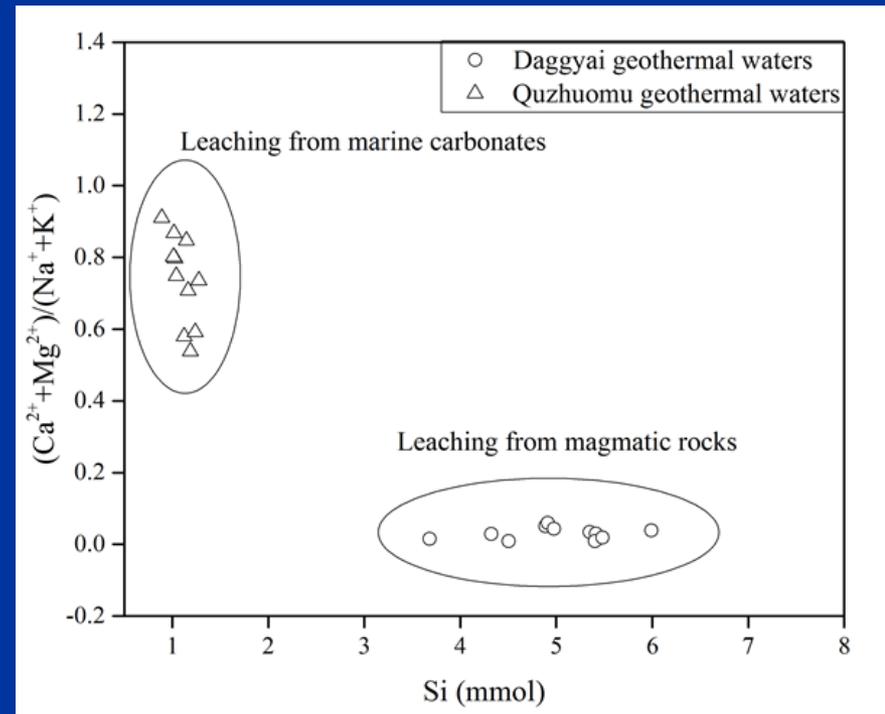
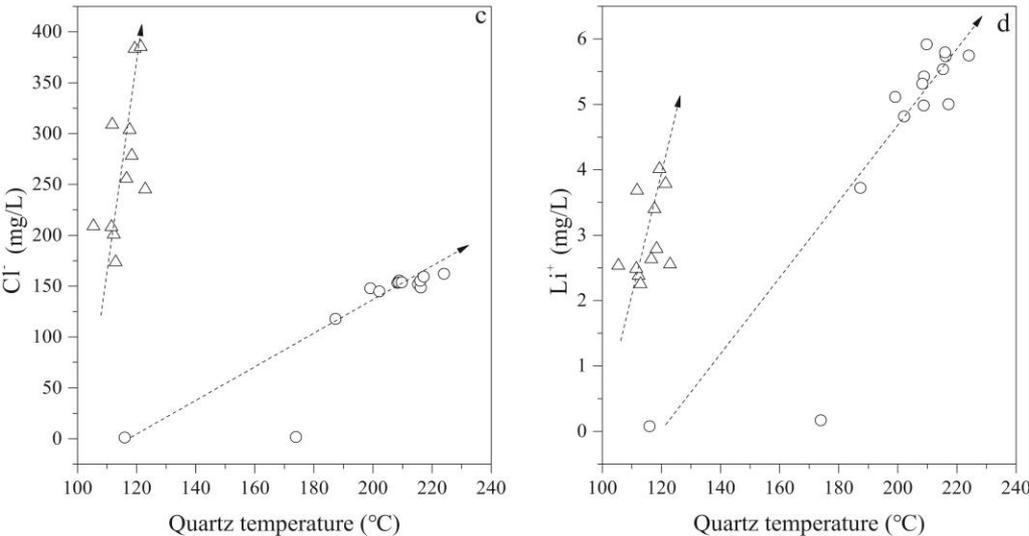
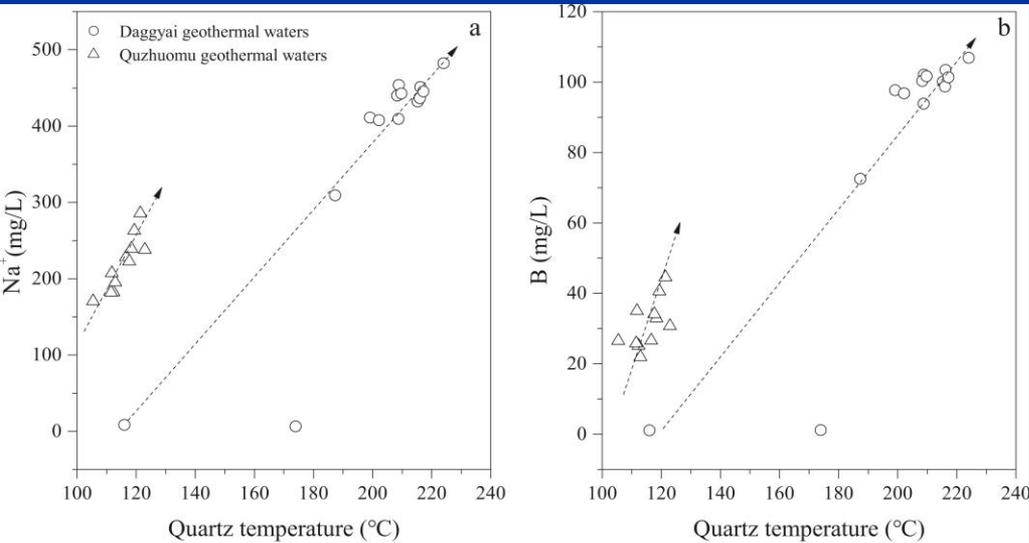
- 中性氯化钠型地热水
- 偏碱性重碳酸钠型地热水
- 酸性硫酸型地热水

非岩浆热源型

- 中性-偏碱性，水化学类型各异

- 搭格架：地表水热活动强烈、深部热储温度高、与岩浆热液活动相关元素（As、Li、Rb、Cs）含量高、存在酸性泉
- 曲阜木：地表水热活动强度相对较弱、深部热储温度较低、与岩浆热液活动相关元素（As、Li、Rb、Cs）含量低、无酸性泉

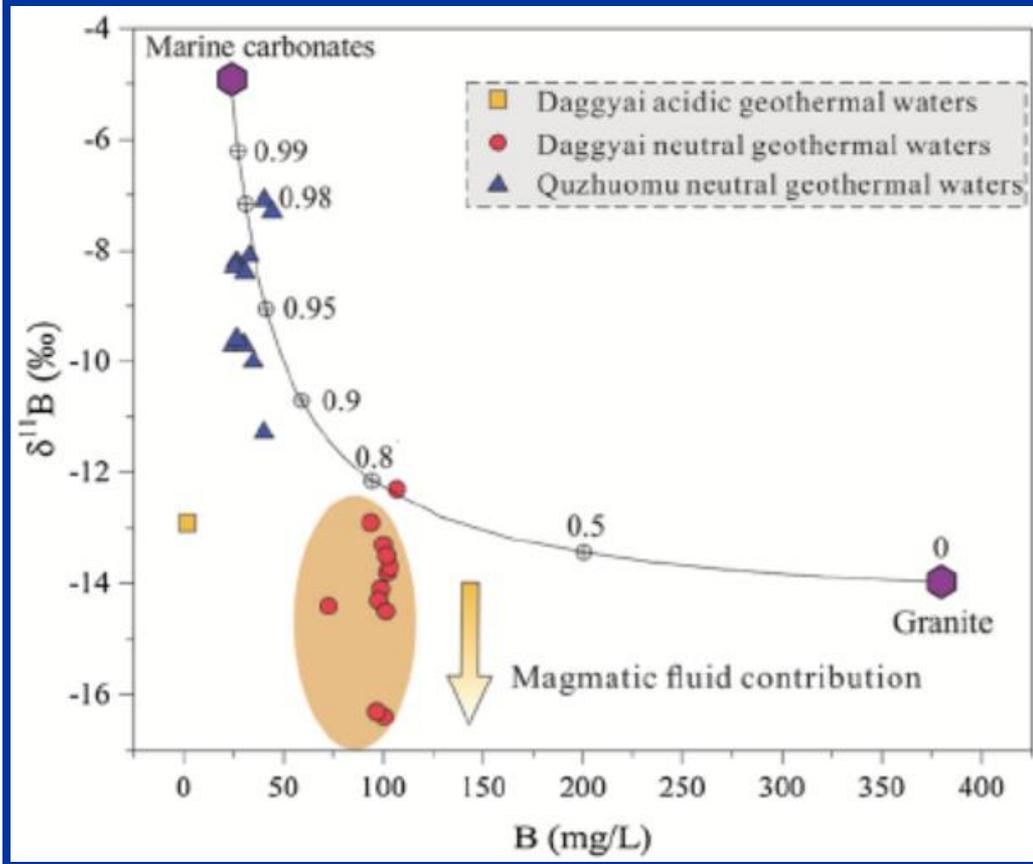
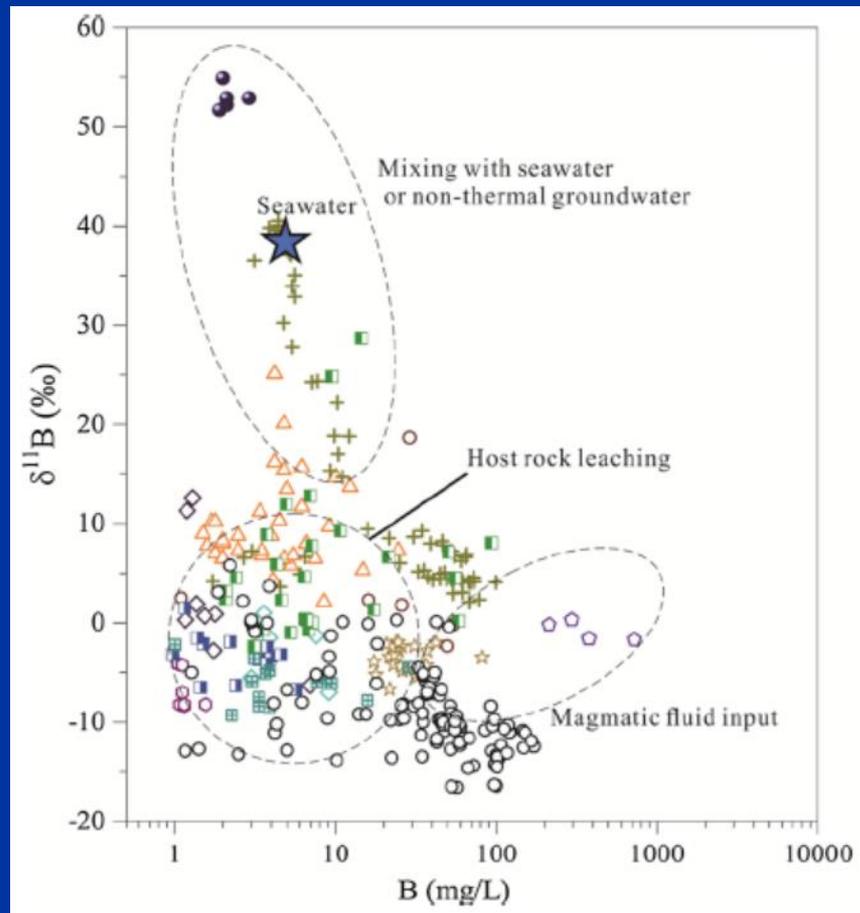
地热区热储岩性的推断及其对地热水化学特征的控制



搭格架：长英质岩石溶滤

曲阜木：碳酸盐岩溶滤

地热水同位素地球化学特征指示岩浆流体补给



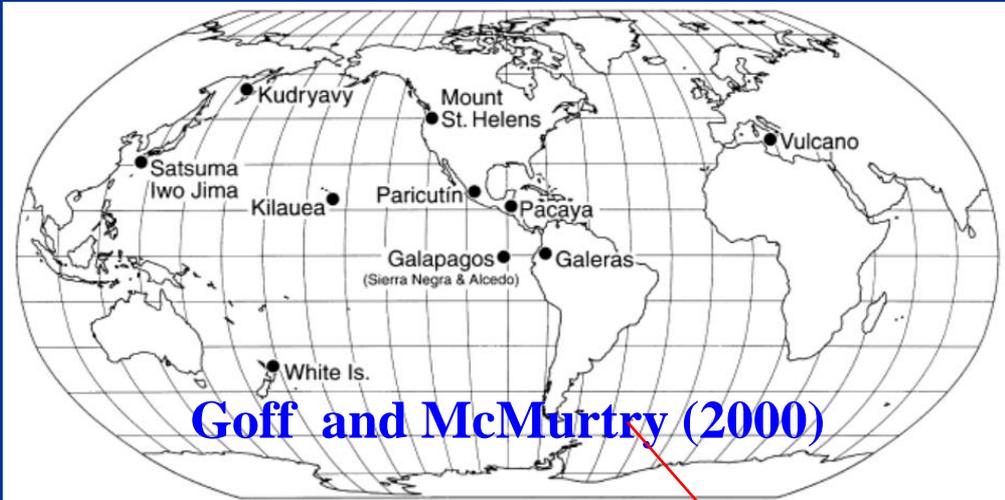
搭格架：岩浆流体的补给

曲阜木：围岩的淋滤；海相碳酸盐岩比例高达90%以上

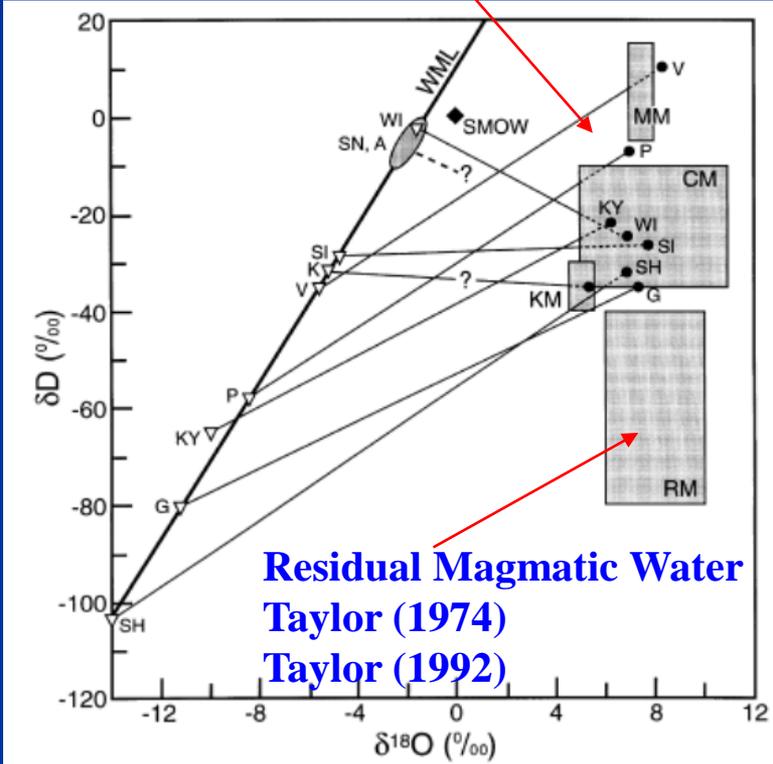
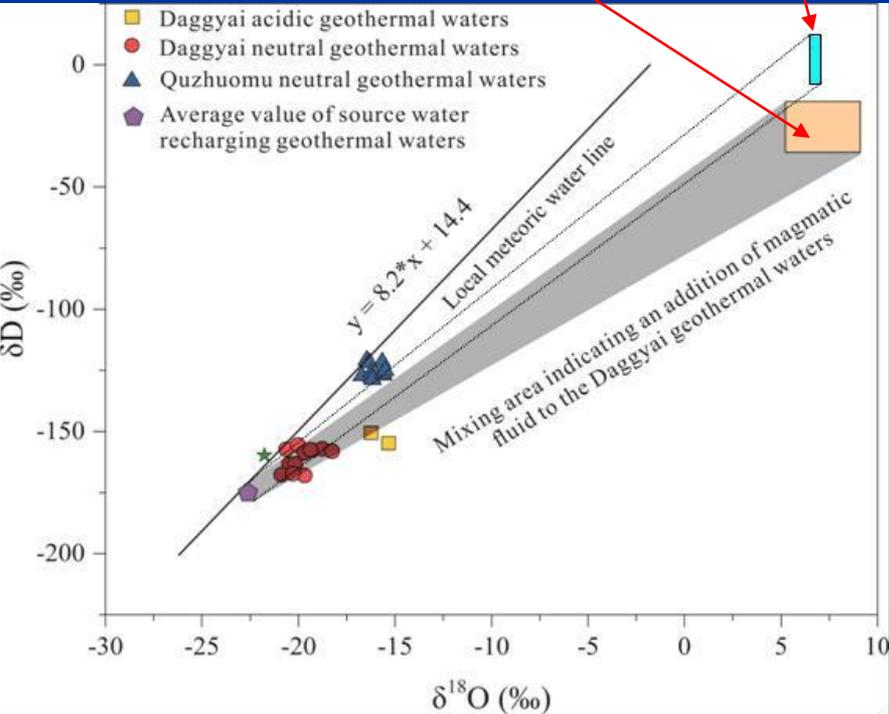
地热水同位素地球化学特征指示岩浆流体补给

Mediterranean Magmatic Water
D'Amore and Bolognesi (1994)

Andesitic Water
Giggenbach (1992)



Goff and McMurtry (2000)

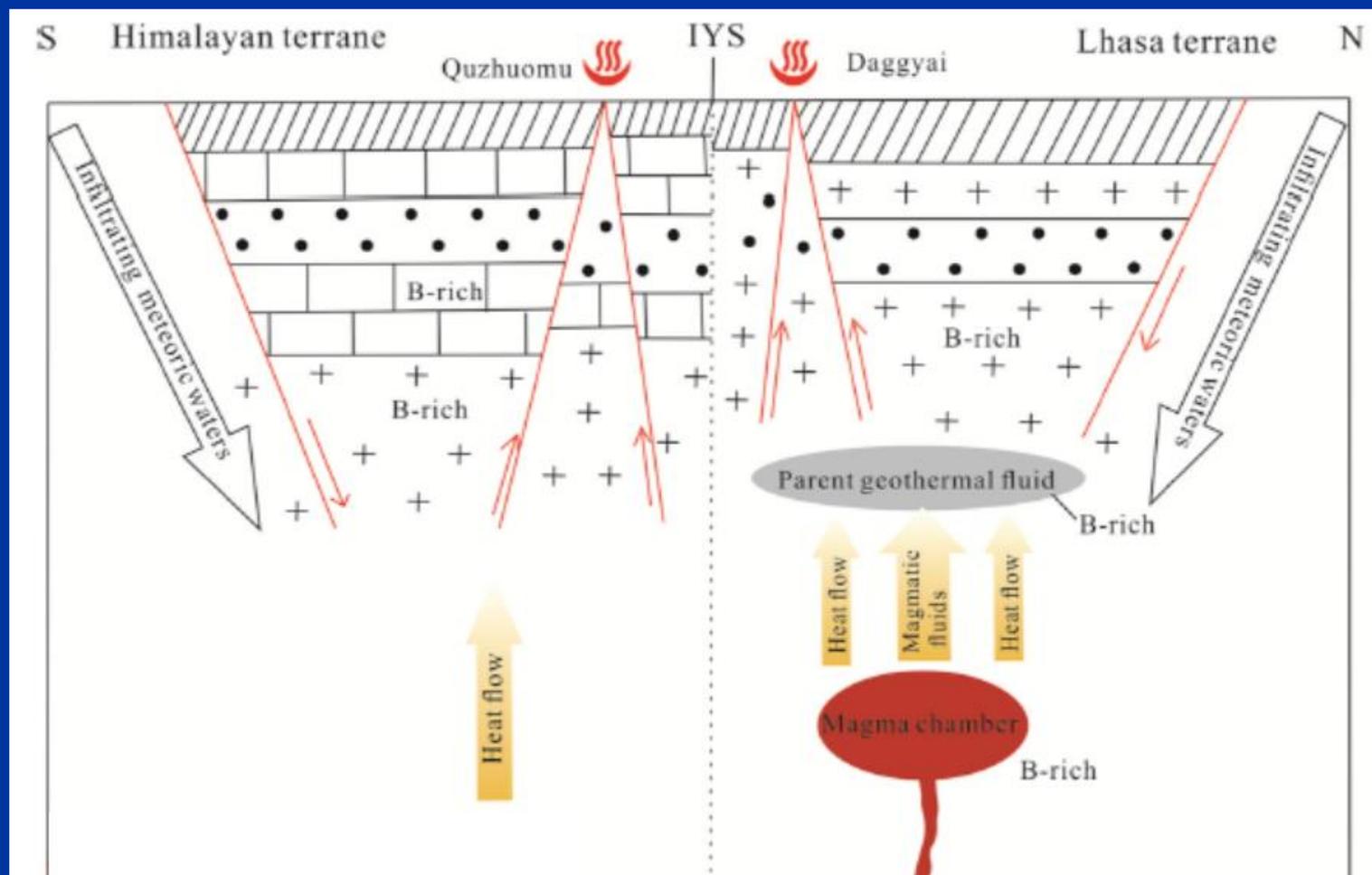


Residual Magmatic Water
Taylor (1974)
Taylor (1992)

搭格架：受到岩浆流体补给影响

曲阜木：仅受大气降水端元和围岩淋滤控制

典型地热区概念模型



- 岩浆热源地热系统（搭格架）：地壳局部重熔、岩浆水汽分离、围岩淋滤过程造成西藏地热水硼的富集；
- 非岩浆热源地热系统（曲卓木）：地热水中的硼主要来源于水-岩相互作用。

谢谢

欢迎提出宝贵意见