



再谈基于环境同位素的 流域水循环研究

宋献方：电话 010-64889849

手机：13911622701

E-mail: songxf@igsnr.ac.cn



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences



热烈祝贺
国际水文科学协会（IAHS）中国委员会
同位素水文学委员会
成立！！！！



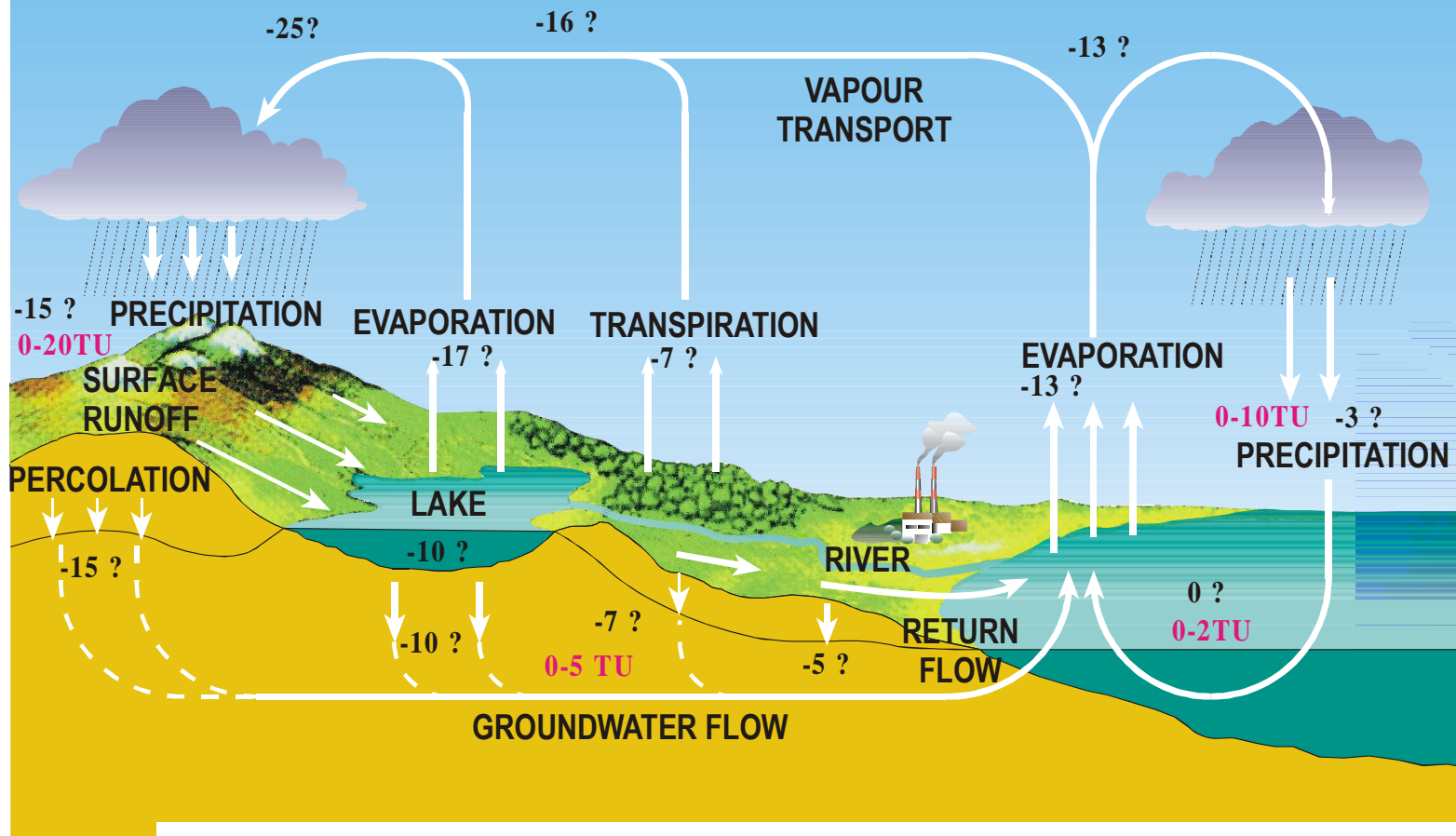
提 纲

- ✦ 我国应用同位素研究水问题回顾
- ✦ 水循环要素环境同位素研究
- ✦ 水循环过程的环境同位素研究



水循环过程中产生的同位素分馏

Isotopes in the Water Cycle



Example: oxygen-18 and tritium in the water cycle

我国应用同位素研究水问题回顾



◆ 研究对象：先天上-后地下-再地表，单要素-多要素-多过程，多学科交叉

◆ 采样测试：人工-自动，地面-卫星，质谱仪-激光，点-面-流域-区域-全球，多同位素

◆ 研究内容：单要素-过程，离散-系统，水相关领域交叉（生态环境广泛领域）

◆ 研究队伍：科研院所-大学-企业

大气降水稳定同位素

- 尽管其含量小，却在非常敏感地响应环境的变化，并记载着水循环演化的历史信息
- 同位素的分馏作用贯穿于水循环各个环节

三个影响降水同位素的组分的过程

➤发生在海洋—大气界面上的蒸发过程

- ✓海洋表面温度 SST
- ✓湿度
- ✓风场

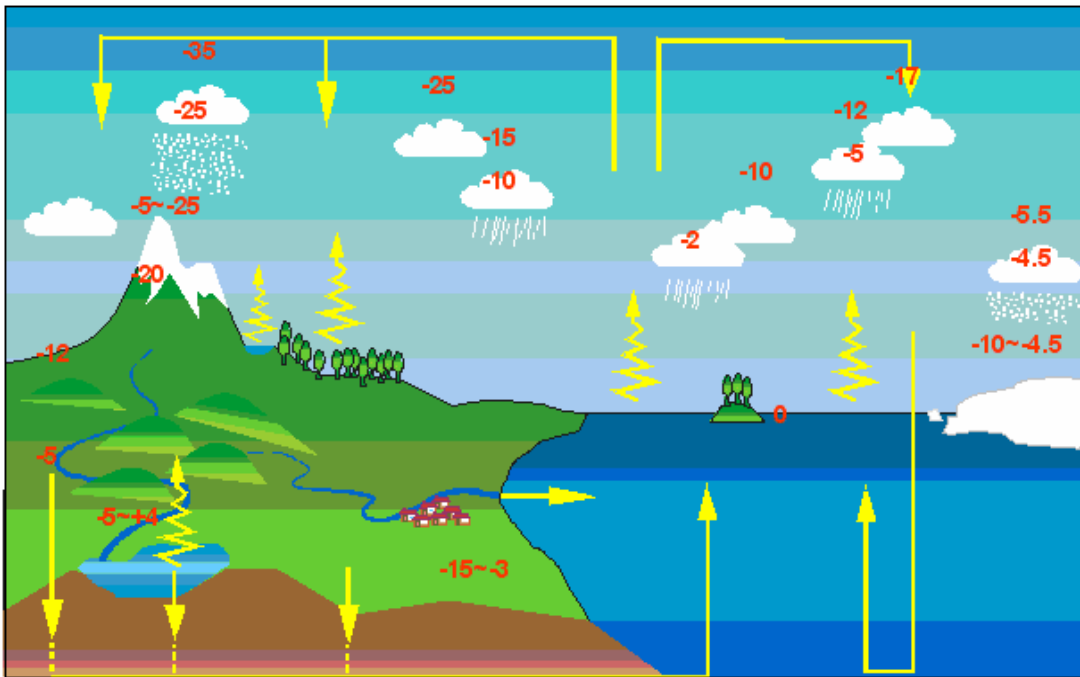
➤水汽传输中的大气环流过程

- ✓季风、ENSO等大规模海天事件

➤局地降水过程

- ✓与水汽源地的距离
- ✓温度、降水量
- ✓雨滴在云下蒸发
- ✓下垫面水汽的再循环

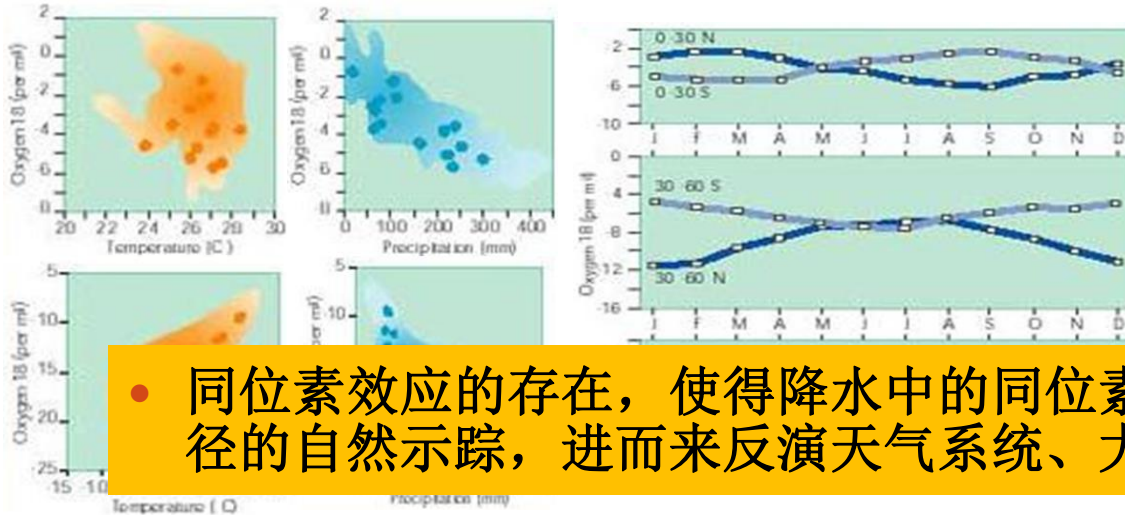
(如土壤、开放水体蒸发水汽混入)



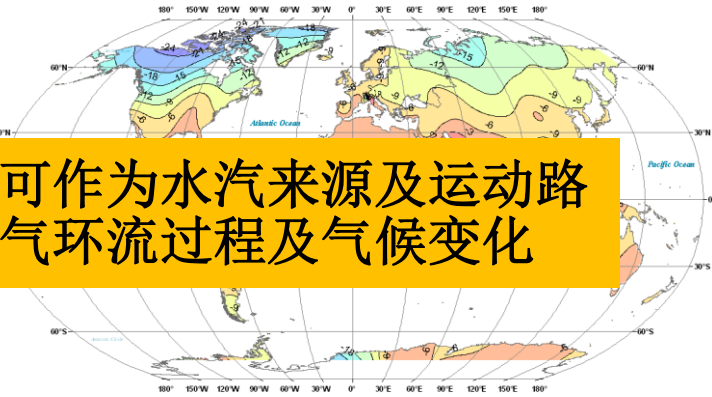
环境同位素分馏作用示意 (IAEA/WMO,2010)

大气降水稳定同位素

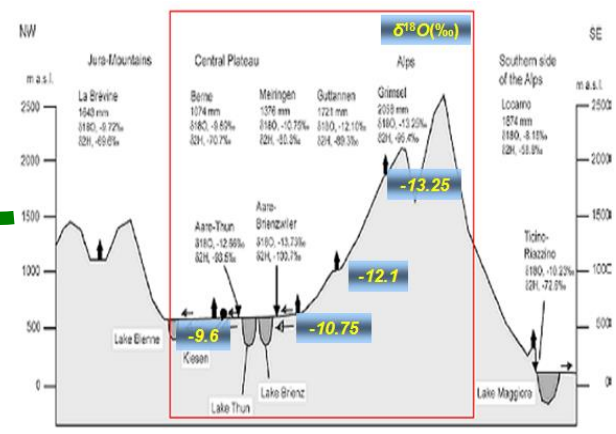
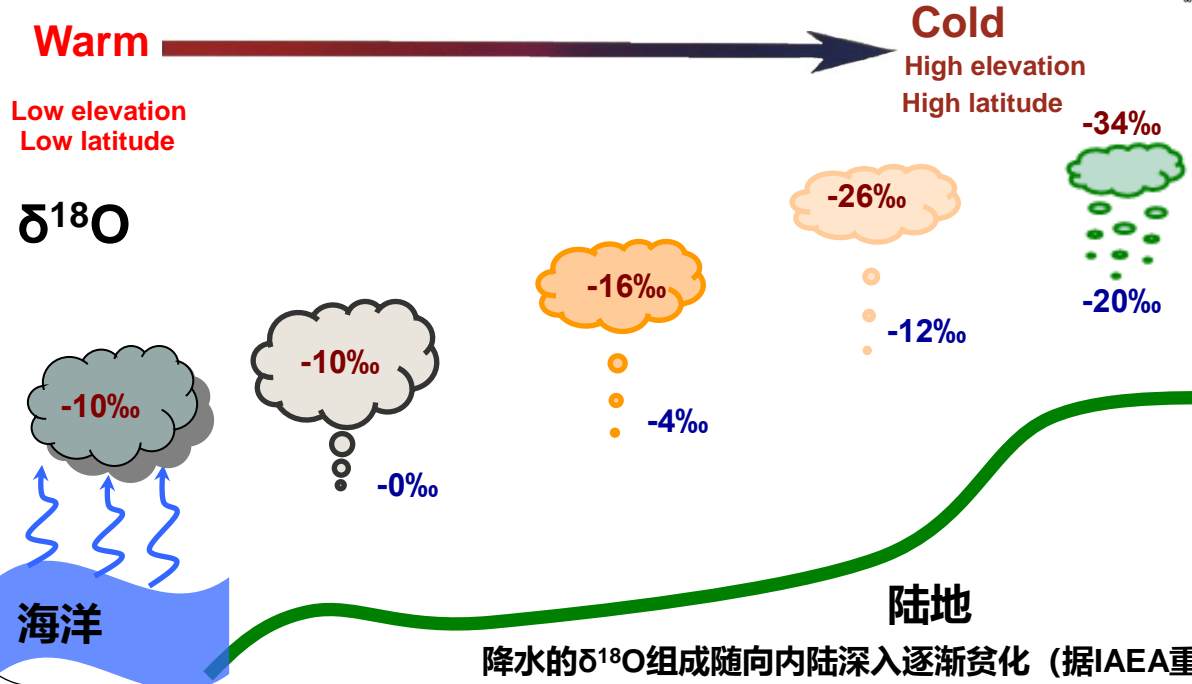
- 同位素效应—同位素与气候变量及地理因子的相关关系



温度效应	纬度效应
降水量效应	高程效应
季节效应	大陆效应



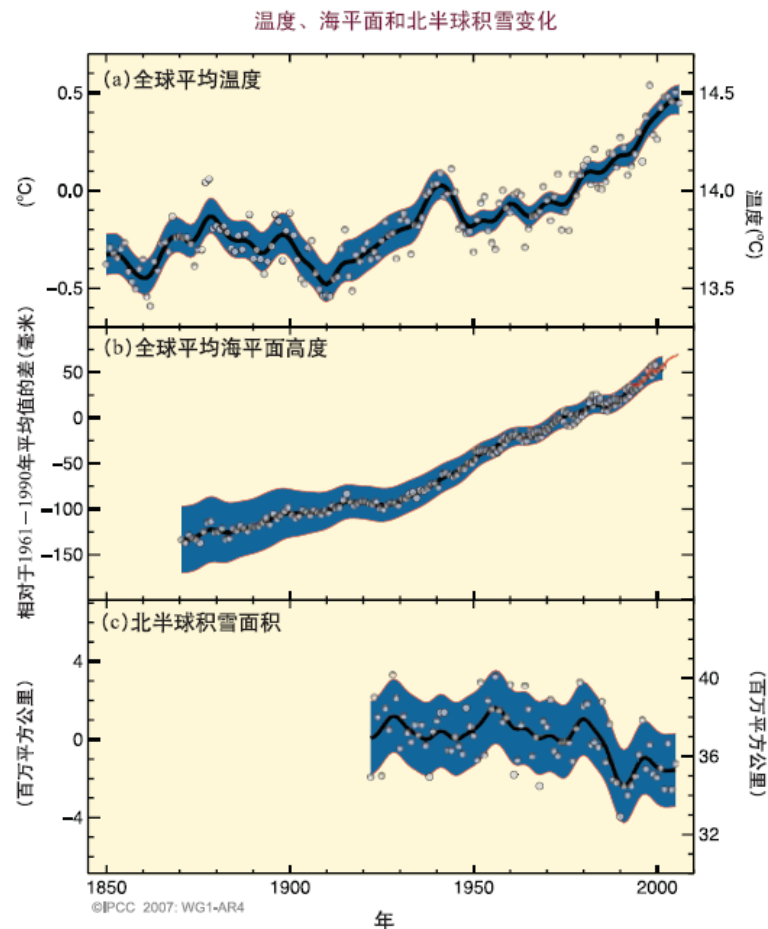
(Liu et al., 2011)



(Schürch et al., 2003)

大气降水稳定同位素

- 气候变化的研究通常是借助温度、湿度、温室气体、冰川和海冰等器测资料实现的
- 涉及的时期长且空间范围大，器测记录只能提供有限的视角
- 同位素与气候变量存在着密切的相关关系
- 利用古沉积物（如冰芯、石笋、树木年轮等）中蕴含的历史气候信息进行定量恢复，是从时间和空间上扩大相关气候过程研究的重要手段
- 使GCM模拟更接近实际观测的途径
- 对当前不同时空尺度下的降水同位素与气候变量关系的掌握，过去气候情况的了解，和对未来气候变化预测的关键



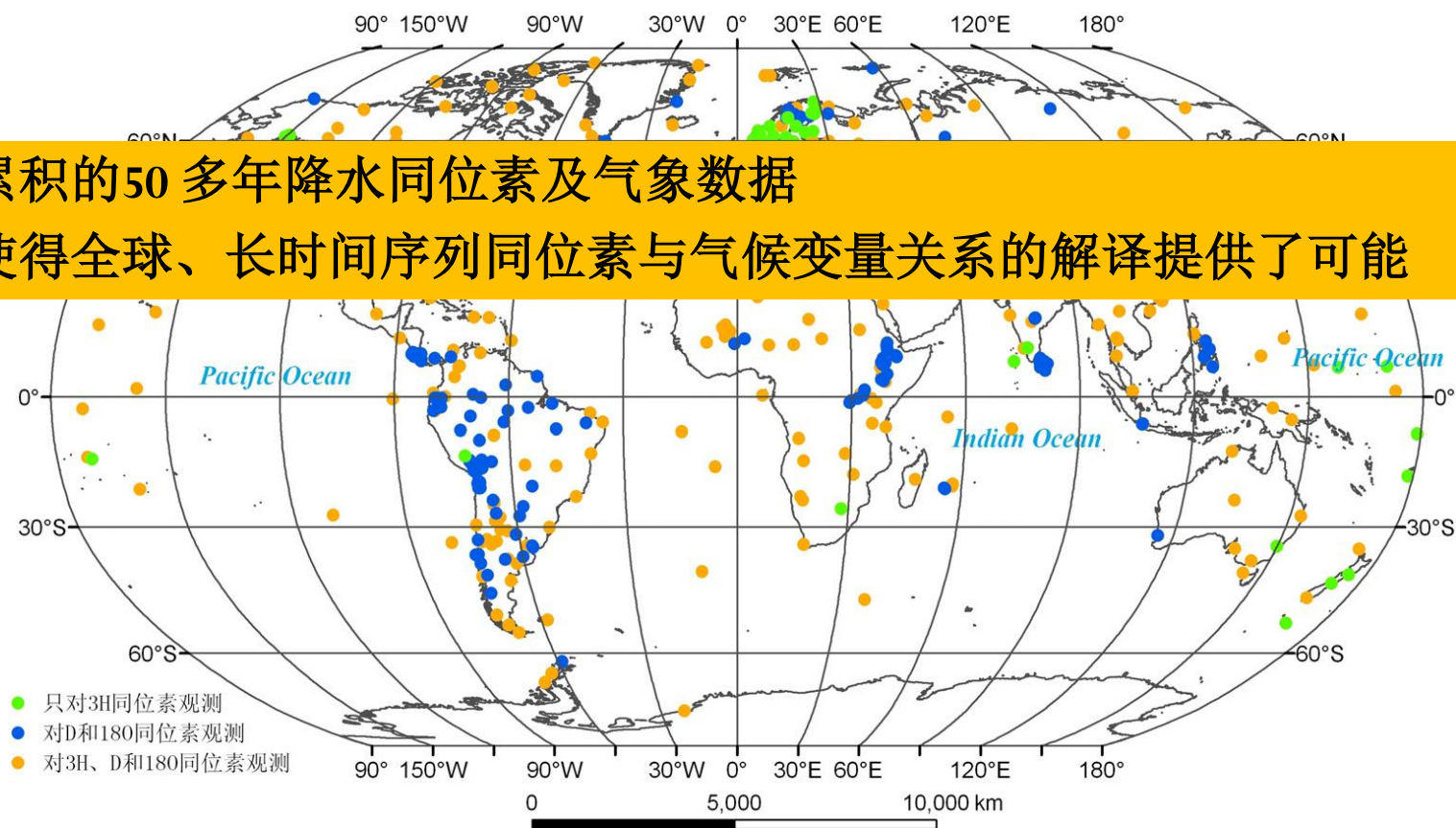
(IPCC AR4, 2007)

大气降水稳定同位素

全球尺度上的已开展的降水同位素与气候变量关系研究

- 全球大气降水同位素观测网络 (IAEA/WMO, 1961)
- GNIP- **G**lobal **N**etwork of **I**sotopes in **P**recipitation
- 起步最早、最系统地观测降水D和 ^{18}O

- 累积的50多年降水同位素及气象数据
- 使得全球、长时间序列同位素与气候变量关系的解译提供了可能



GNIP 站点分布 (1961~2011)

大气降水稳定同位素

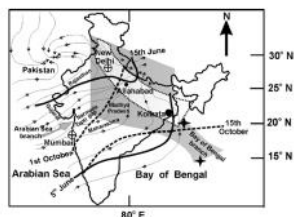
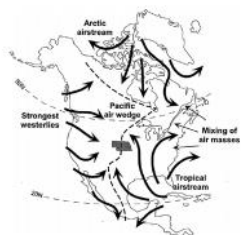
区域尺度上的降水同位素与气候变量关系研究

降水同位素国家网络

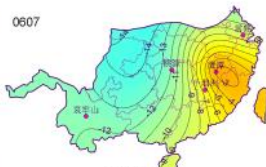
国家	网络名称	降水站点数	河流站点数	地下水站点数	成立时间
奥地利	ANIP	55	17		1972
美国	USNIP	81			
瑞士	NISOT	11	7	3	1992
法国	BDISO	82	162	1229	
加拿大	CNIP	33			1997
中国	CHNIP	31			2004

- Harvey and Welker (2000) US Great Plains
- Saikat et al. (2006) 印度季风对水汽来源的影响
- Liu et al. (2008, 2009, 2010a) 中国

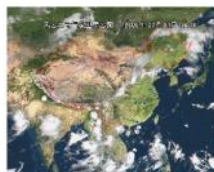
- ✓ 西北干旱区局地再循环水汽对同位素影响
- ✓ 示踪东部季风区雨带的移动
- ✓ 台风/热带风暴的登陆地点、影响范围



台风路径



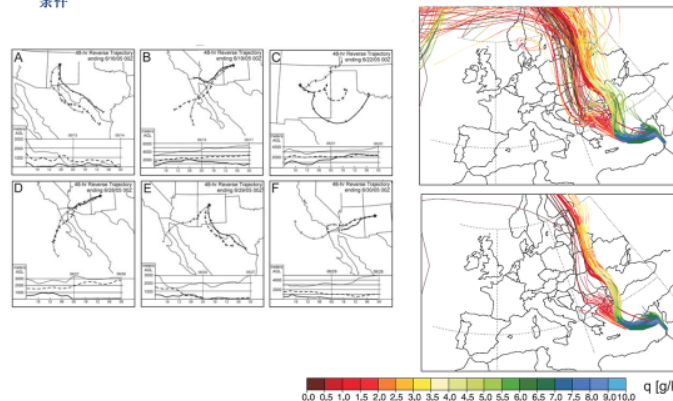
$\delta^2\text{H}$ 的空间分布



卫星云图

局地单站点次降水同位素与气候变量关系研究

- Strong et al. (2007) 采用高时间分辨率（每天1-3次采样），诊断了美国西南部水汽传输路径
- Pfahli & Wernli (2008) 采用8小时间隔水汽同位素数据，重建了地中海以色列地区水汽蒸发过程条件



大气降水稳定同位素

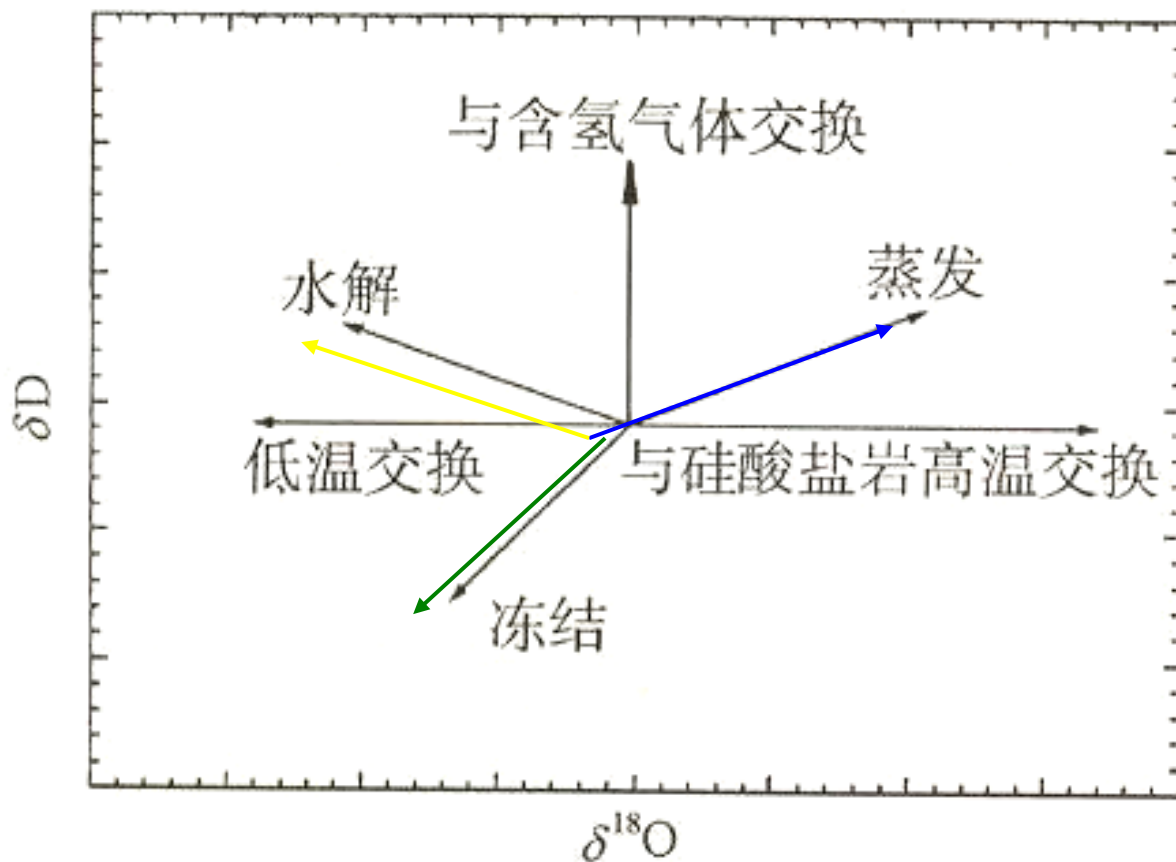
- 自1960s全球范围对降水同位素系统连续观测以来，迄今已有近50年数据的累积
- 时间尺度上可与如温度和降水量等气候变量的波动相比
- 对全球、长时间序列尺度降水同位素与气候变量关系的解译，识别二者在不同时域及频域上的相关关系，可为气候变化提供依据
- 月尺度降水中同位素丰度的变化，体现的是水汽从源地蒸发—环流输送—产生降水，一系列相变过程中，分馏作用综合结果
- 区域尺度降水同位素与气候变量关系的解译，可以探清控制区域内降水同位素变化的主要气候因子、以及大气环流状况
- 对局地站点、单场降水事件的观测及其中同位素含量差异的分析可以获取比年尺度或月尺度降水同位素更多潜在的降水天气控制信息，如环流模式和结构等

扩展：水汽、动物迁移、侦破案件等

不同的水分过程产生的同位素分馏过程

在自然条件下，
水分发生同位素
分馏的主要过程

蒸发和凝结

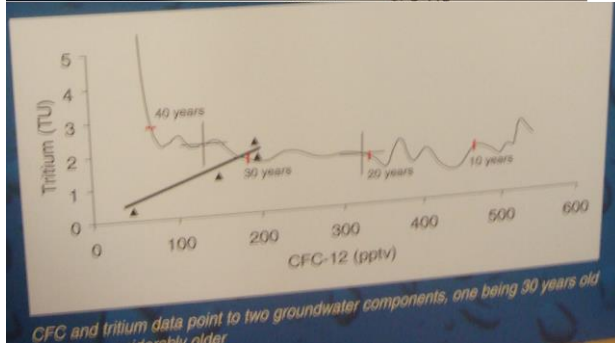
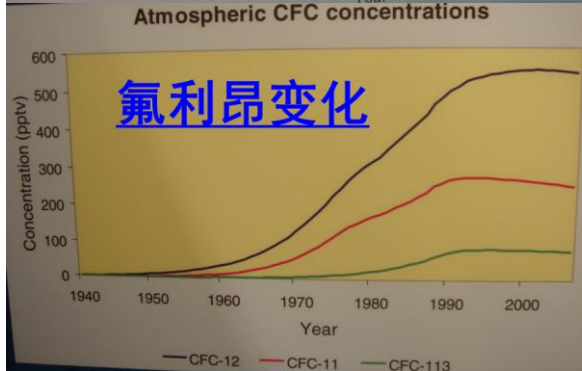
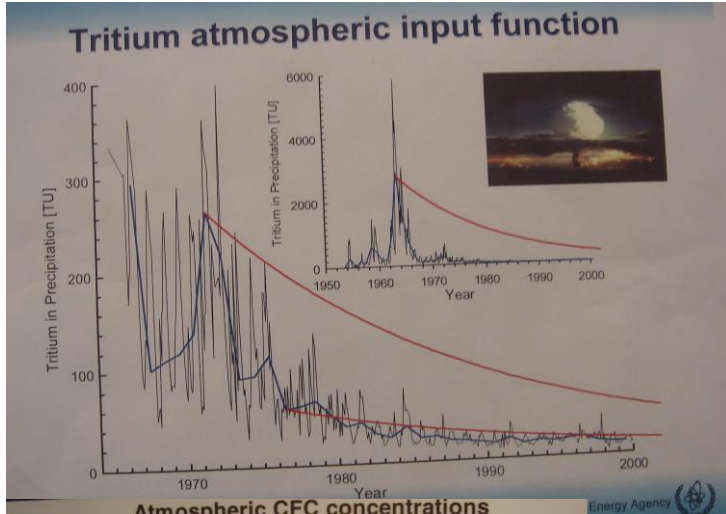
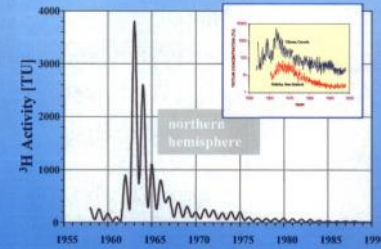


物相改变和交换反应时水的氢氧同位素
组成变化

非稳定同位素

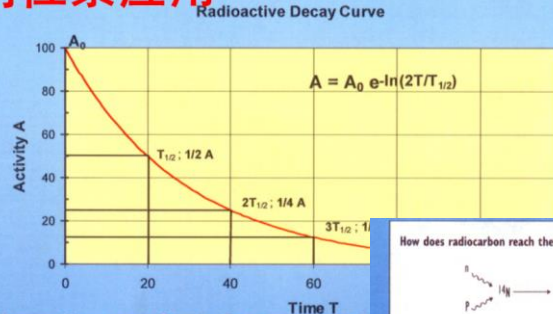
氚的分析应用

- Radioactive hydrogen isotope with half-life of 4500 days (12.32 y)
- Produced mainly by atmospheric H-bomb tests (plus natural cosmic radiation), distributed worldwide in the hydrologic cycle as part of water molecule
- Age dating of groundwater

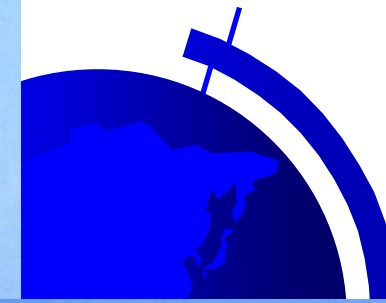
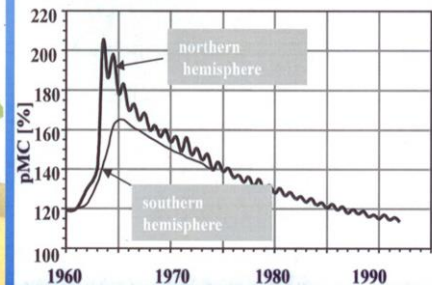
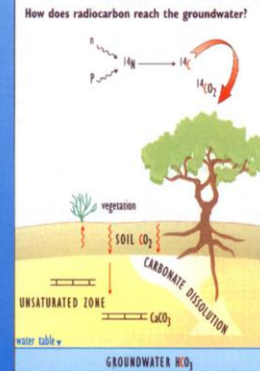


¹⁴C Age determination

碳同位素应用



- Radioactive carbon isotope with a half-life of 5730 years
- Produced by natural cosmic radiation (and nuclear tests) and transferred into the hydrologic cycle as part of bicarbonate
- Decay process in groundwater



不同深度、不同时间土壤水同位素变化

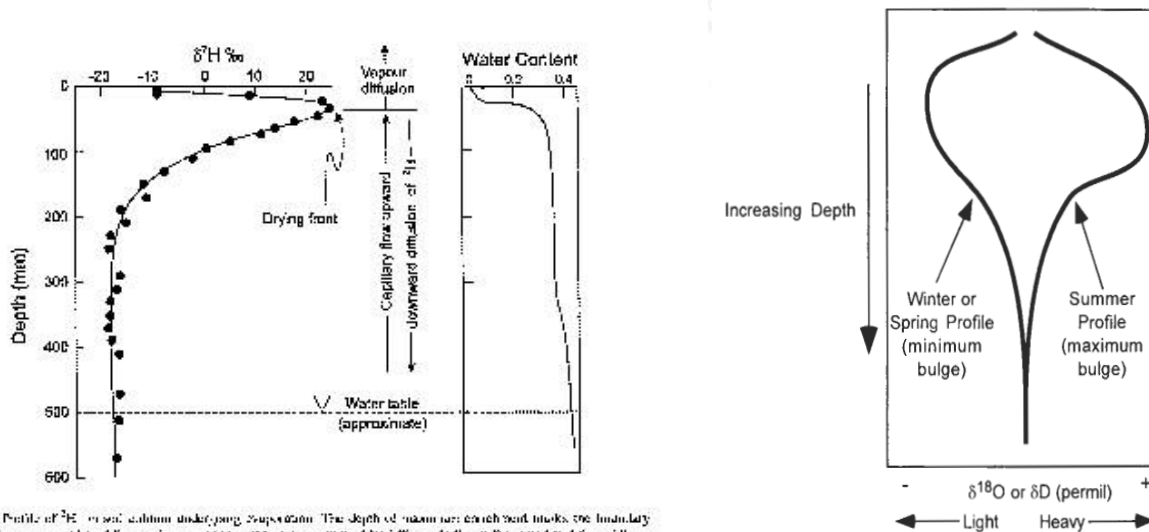


Fig. 4-12 Profile of $\delta^2\text{H}$ in soil columns under long-term evaporation. The depth of maximum enrichment marks the boundary between a lower zone of liquid flow and an upper zone of capillary movement by diffusion to the surface produced from the same source.

大气降水、土壤水、地下水转换关系

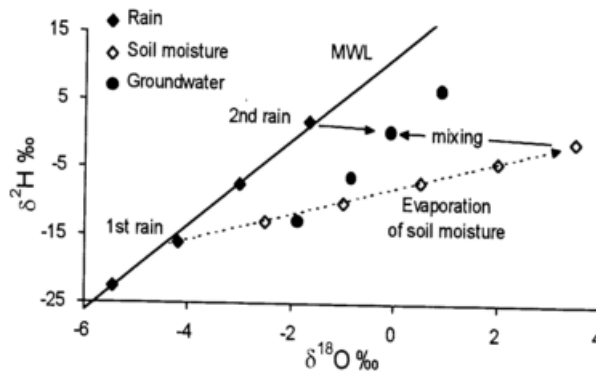


Fig. 4-13 Mixing of evaporated soil water and infiltrating rain in a soil profile. Significant rainfall events will displace the evaporated soil residues below the influence of evaporation.



环境同位素技术在水循环研究中的应用

- 研究区域大气循环，回答水蒸气的来源问题
- 研究河流流量过程曲线，区分基流和洪峰流量，及其比例关系
- 判明地下水补给源并推算补给量
- 研究流域水循环机理
- 判明污染源及污染途径
- 研究古水文，古气候，古地理
- 通过地下水年龄的测定，研究地下水循环系统及探讨了地下水资源的可再生性问题
-

Research Themes

- Groundwater Management
- Surface Water
- Groundwater-surface water interactions
- Increasingly inter-sectoral themes (aquifer mgmt, river basin mgmt, CZM etc.)
- Others (geothermal, dam safety etc.)
- *Transboundary waters (e.g. aquifers, river basins, lakes etc.)*
- Coastal aquifers,
- Managing aquifer recharge,
- Groundwater dependent ecosystems (e.g. wetlands)
- Climate Change Adaptation



CHINA ISOTOPE——CHINA ISOTOPE IN WATER

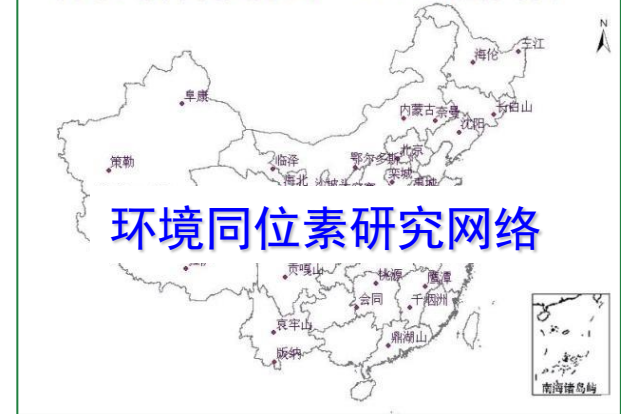
- ◆ CHNIP
- ◆ CHNIR
- ◆ CHMIBA
- ◆ ISOTPE IN Some BASINS



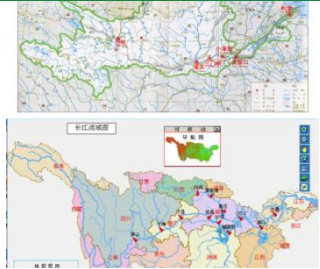
野外水循环观测网络

- 形成了多要素、多过程、多尺度的流域水循环实验观测网络
- 研发了地下水位简易电测仪、便携式地下水¹⁴C提取器、便携式氮氧同位素过滤吸附装置、泥沙全自动在线监测装置等一批新仪器、新装置

中国大气降水同位素网络 (CHNIP) 站点分布图

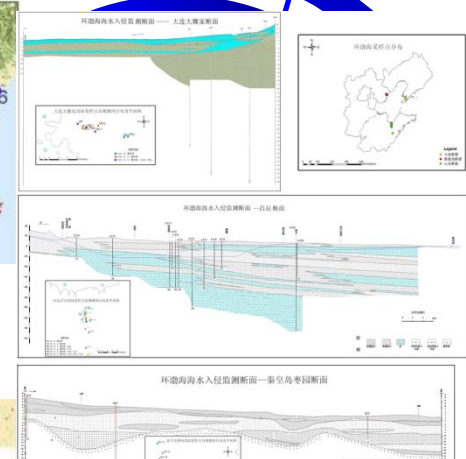
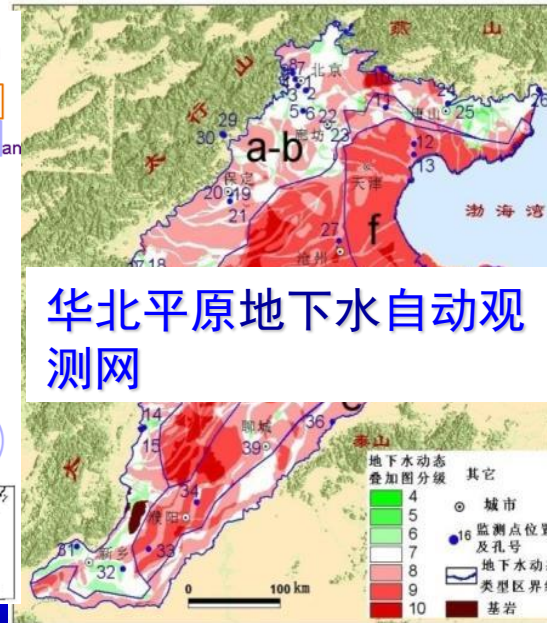


环境同位素研究网络



大江大河同位素网络

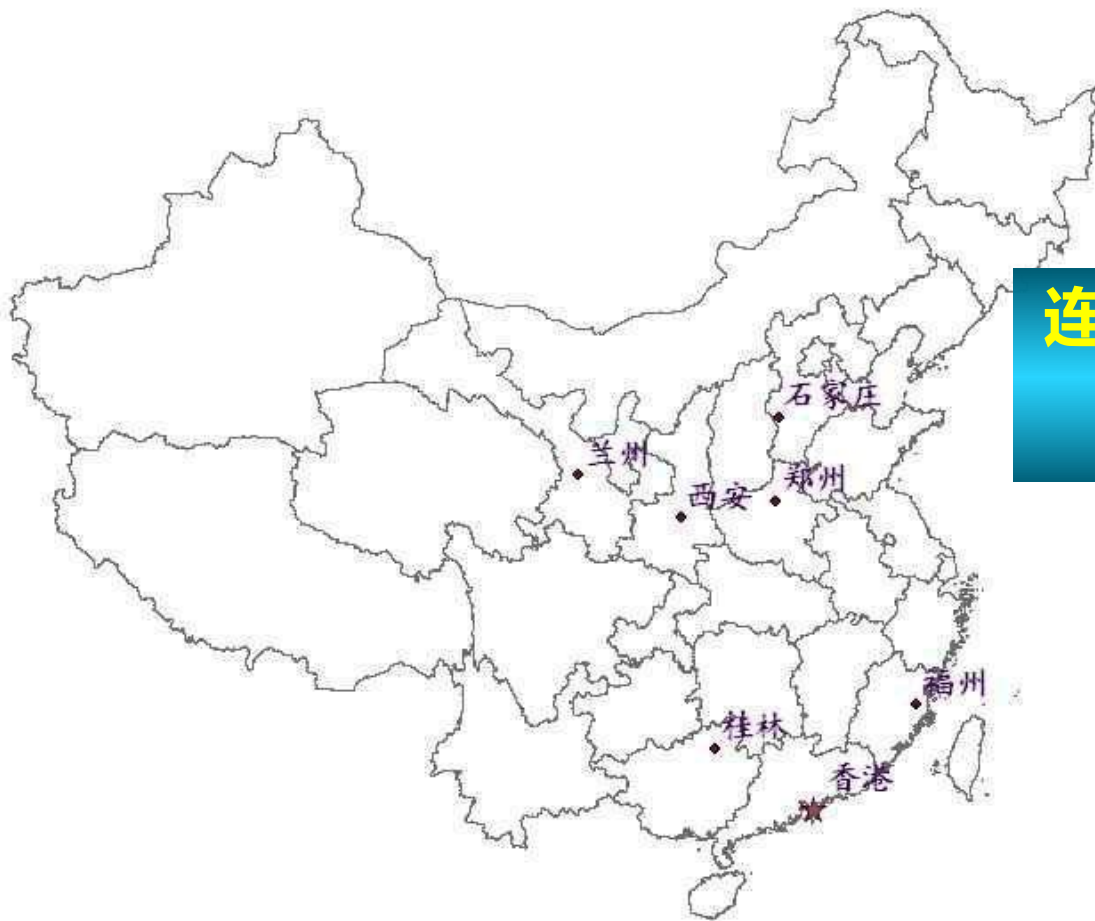
重点流域水循环实验基地



环渤海环境监测系统 (海水入侵)

我国在GNIP的发展历史

85年



连续的、长时间序列
资料匮乏



各生态系统的气候变化规律、气候效应及预测未来气候变化

CHNIP - Chinese Network of Isotopes in Precipitation

中国生态系统研究网络(CERN)



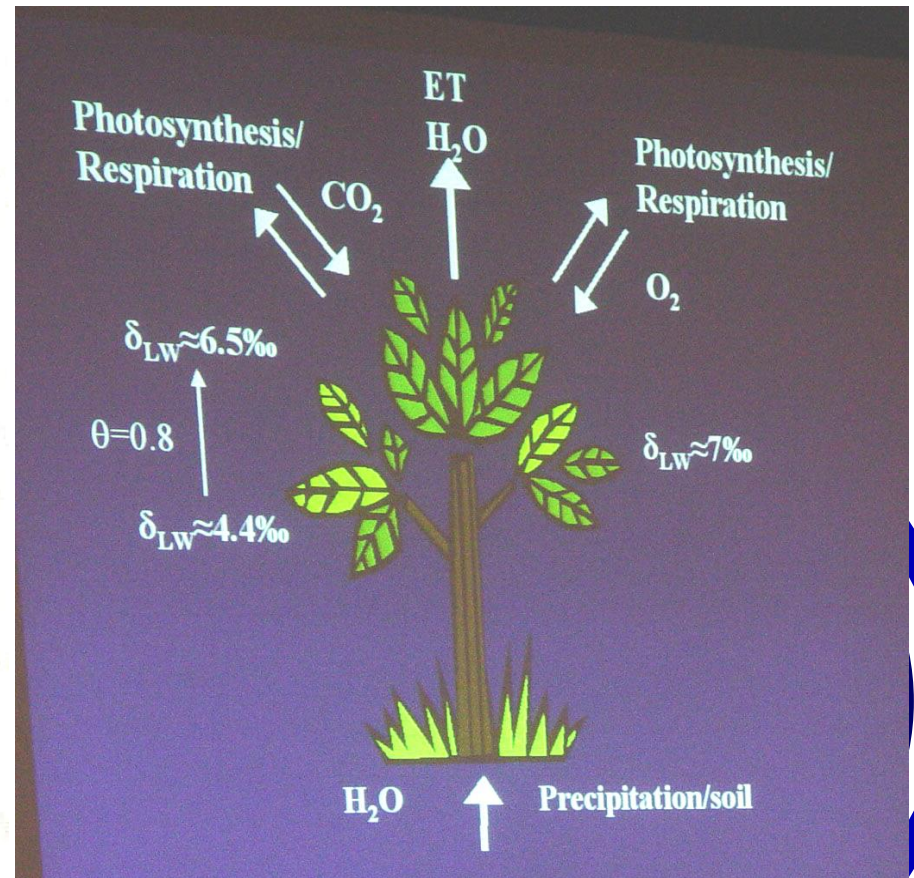
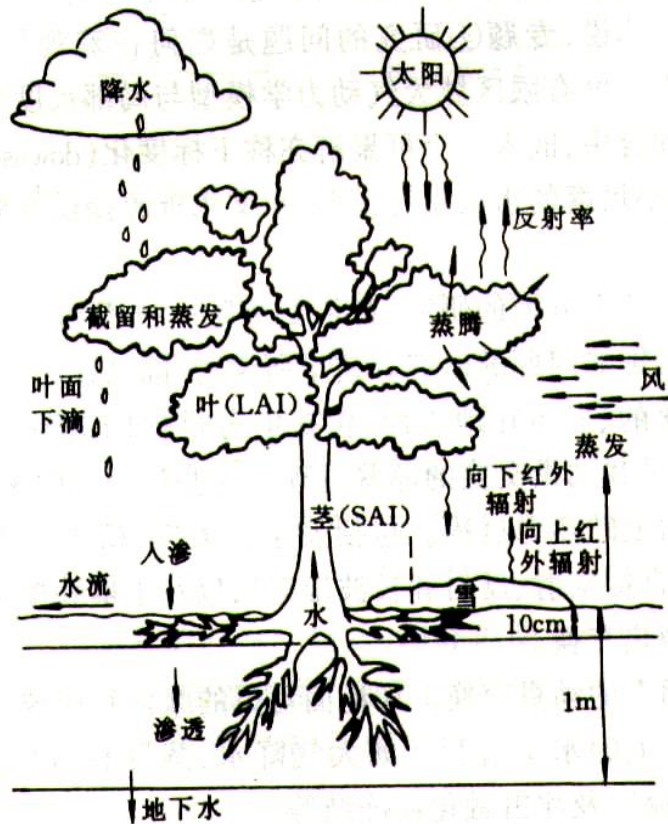
施、仪器设备和生活设施



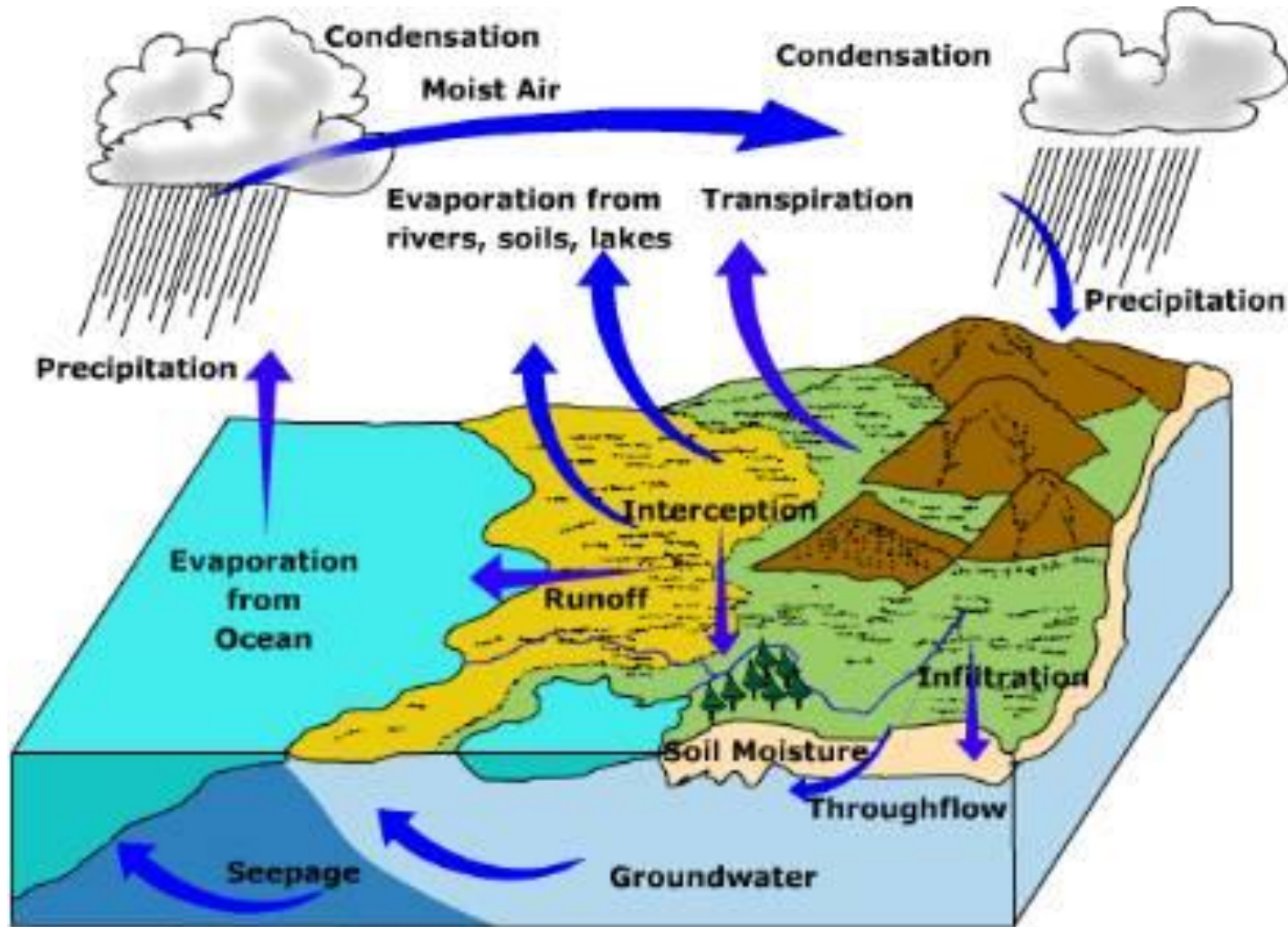
图研究网络(CERN)的骨干成员,也是与美国长K)和英国环境变化网络(ECN)齐名的世界三大



研究大气—植物—土壤界面水分及物质传输规律 (CHM I B A 的建立)

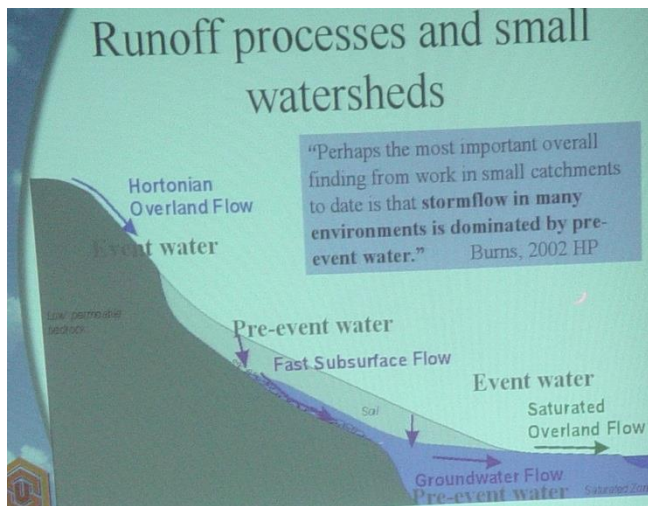


研究不同自然地理条件、生态系统下的“大气降水—地表水—土壤水—地下水”转换模式

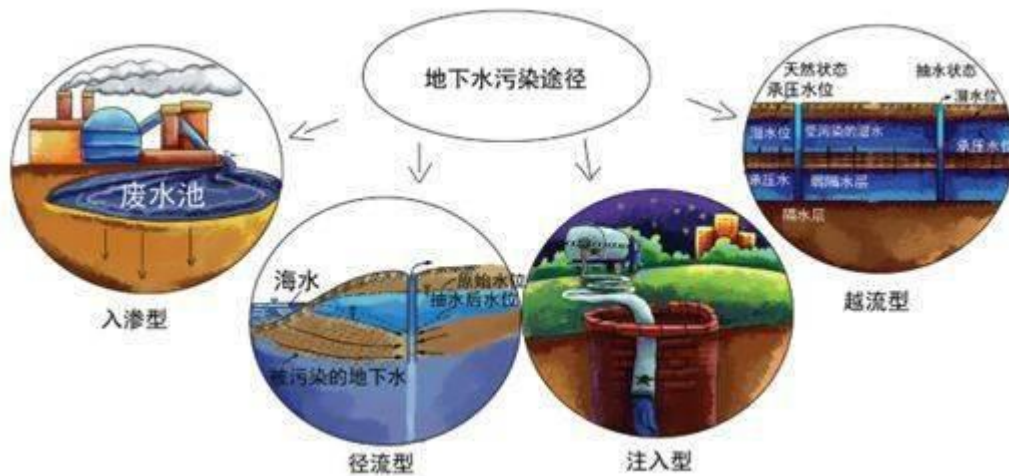
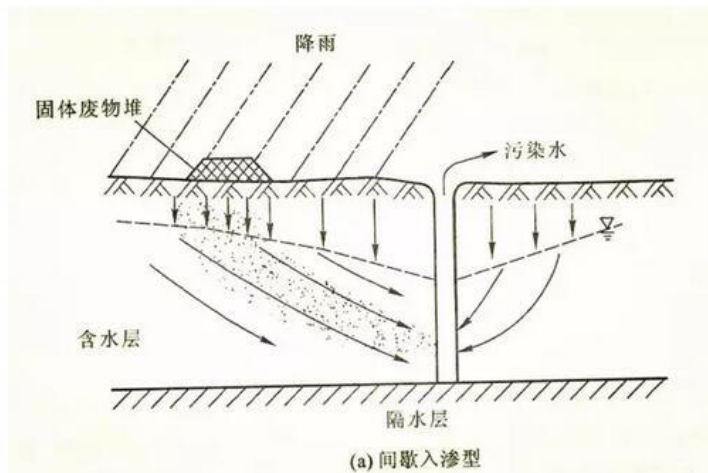
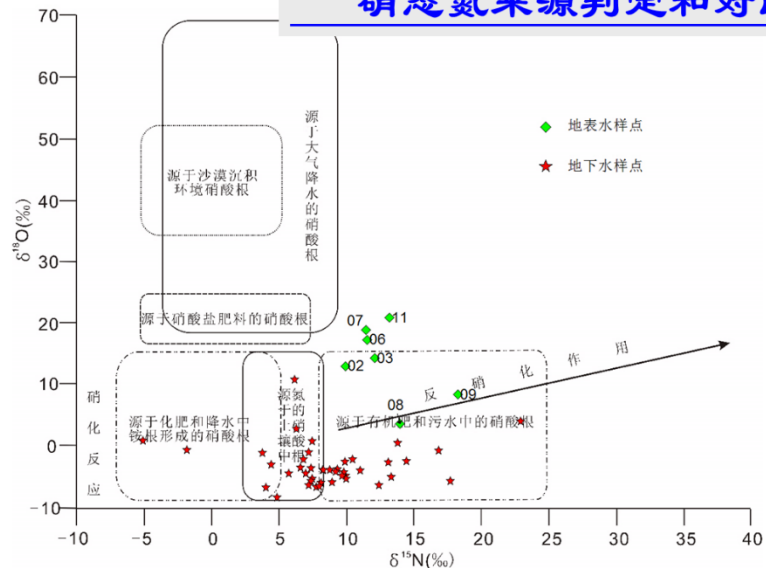


判别水资源的污染源及污染途径

◆ 同位素示踪

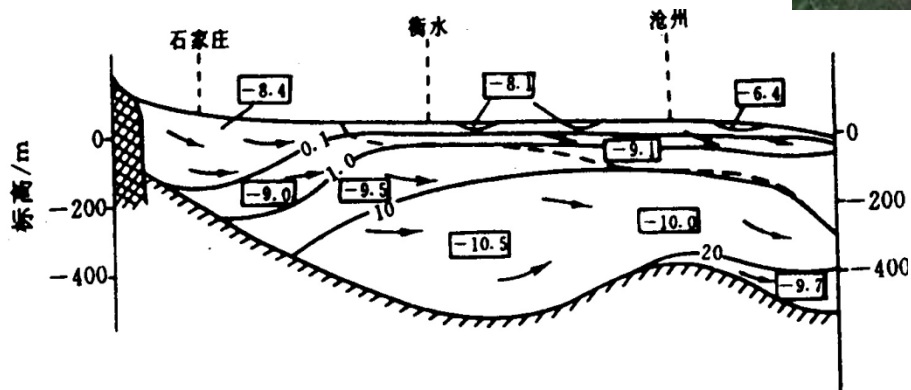


北京平原区地表水和地下水 硝态氮来源判定和对比



探讨水资源安全问题

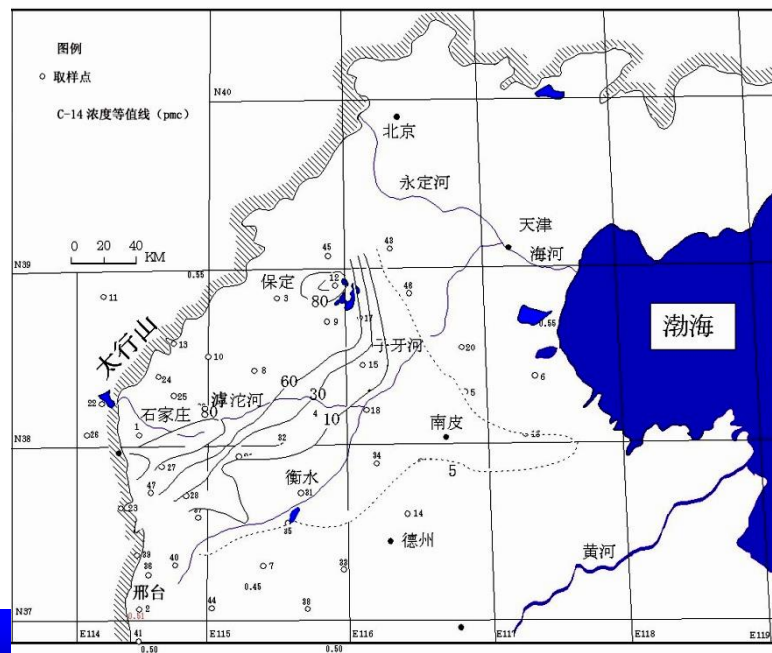
水体年龄 (Residence Time) 水资源的可再生性



1. 地下水年龄 (ka)
2. 平均 $\delta^{18}O$ 值
3. 地下水流向
4. 咸淡水界面

华北平原地下水年龄分布剖面^①

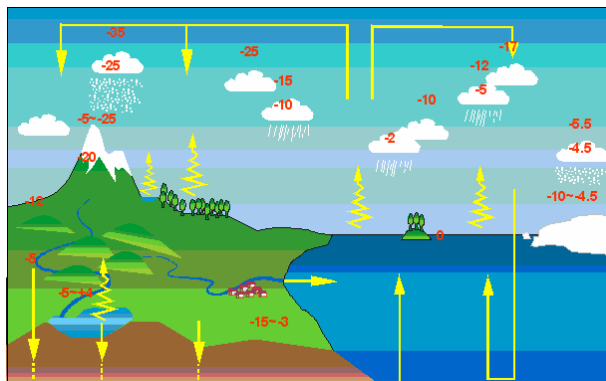
Distribution section of groundwater age in North China plain.



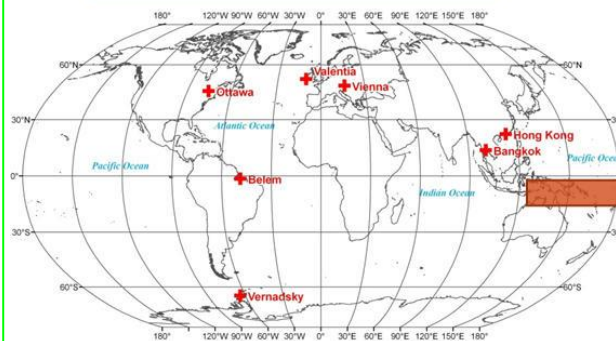
降水同位素数据是研究水循环、气候变化等重要信息

三个时空尺度：

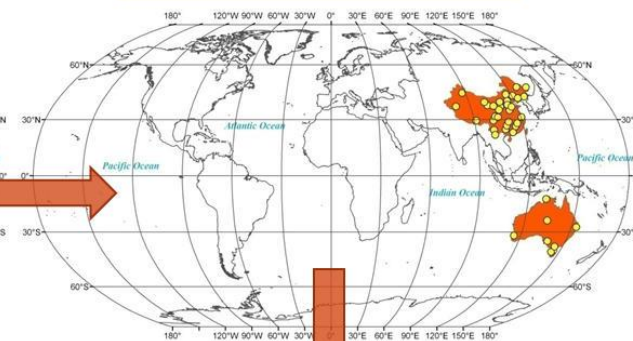
全球尺度—长时间
区域尺度—月
点尺度—一次



全球、长时间尺度

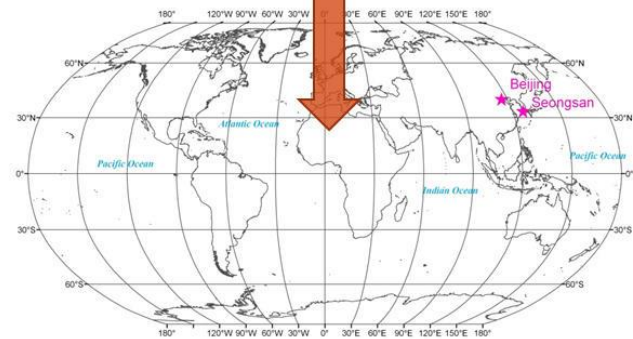


区域、月降水尺度



- 不同时空尺度
- 对降水稳定同位素与气候变量关系进行解译
- 为水循环及气候变化的相关研究提供基础和依据

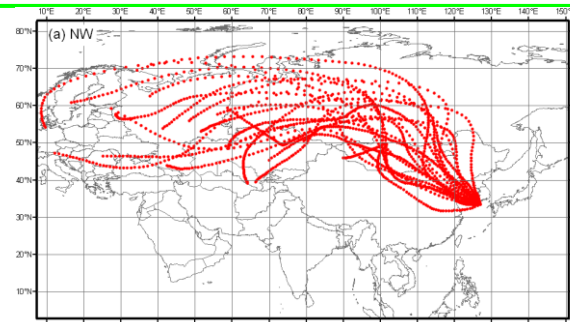
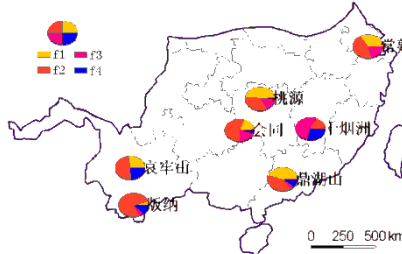
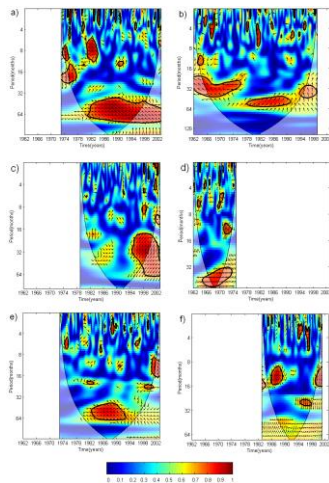
局地单站点、次降水尺度



大气降水中的同位素信息敏感地响应环境的变化，记载着水循环演化的历史信息

大气降水的环境同位素系统研究

- ◆ 首次利用同位素与气候变量在不同时域和频域上的小波相关系数，验证并揭示了气候变化的事实及同位素对大规模海天事件的响应
- ◆ 成功示踪和反演了中国夏季三条主要水汽通道，定量估算了不同的降水水汽来源比例
- ◆ 应用HYSPLIT模型推算并对比了亚洲季风区典型大陆站点和岛屿站点降水水汽来源和运动路径
- ◆ 应用多元非线性逐步回归的方法，建立了降水同位素与各气候变量的关系模型，为实现缺少观测资料地区降水同位素的定量拟合和估算提供了可能



站点	回归方程	R ² (Adjusted)
锦州	$\delta^{18}\text{O} = -0.970 - 0.086\text{RH}$	0.194
天津	$\delta^{18}\text{O} = 9.365 - 0.582\text{RH} + 0.522\text{T} - 0.012\text{T}^2 - 0.02\text{P} + 0.004\text{RH}^2$	0.624
烟台	$\delta^{18}\text{O} = -4.838 + (4.14 \times 10^{-5})\text{S}^2 - 0.067\text{RH}$	0.182
石家庄	$\delta^{18}\text{O} = -5.430 + 0.524\text{T} - 0.014\text{T}^2 - 0.066\text{S} - 0.024\text{P} - (3.75 \times 10^{-5})\text{P}^2$	0.333
郑州	$\delta^{18}\text{O} = -27.17 + 9.63\log\text{S} + 0.4.9\text{W}\text{s}^2$	0.268
西安	$\delta^{18}\text{O} = -0.056 - 0.001\text{RH}^2$	0.169

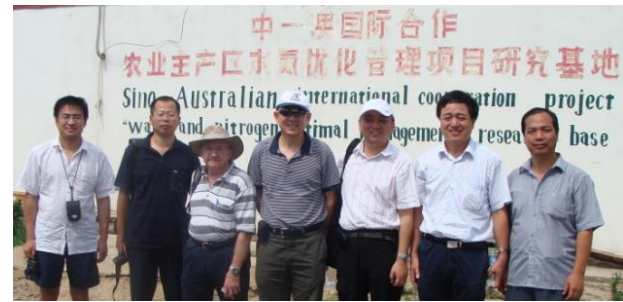
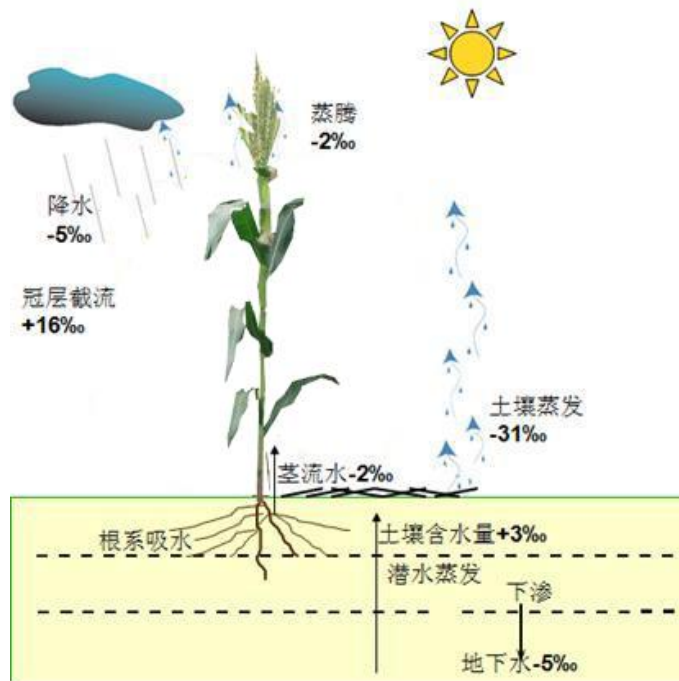
已发表SCI论文6篇等

J. Geophys. Res.,

Climate Research Chin. Sci. Bul J. Geogr. Sci.,

农田SPAC系统的环境同位素研究

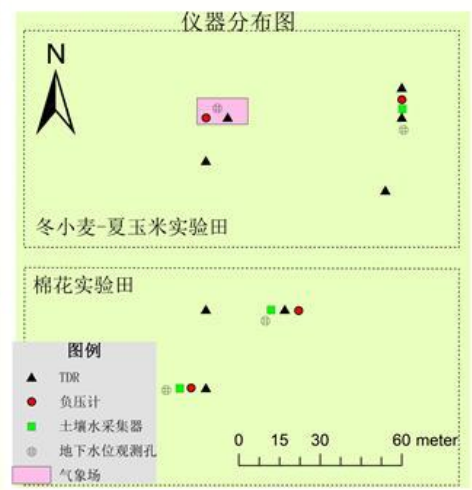
揭示农作物耗水机制，为提高水分利用效率提供科学依据



野外实验观测与采样

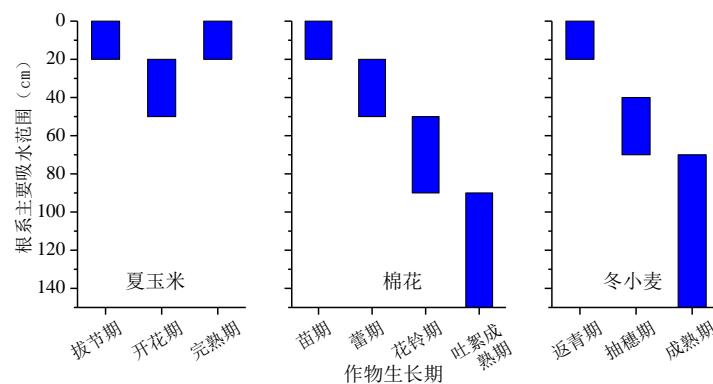
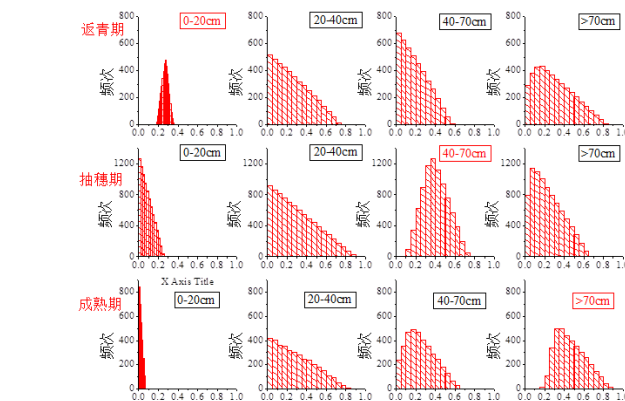
氢氧稳定同位素在土壤-植物-大气系统的降水、入渗、蒸发蒸腾过程中发生着规律性的传递和分馏作用

研究方法



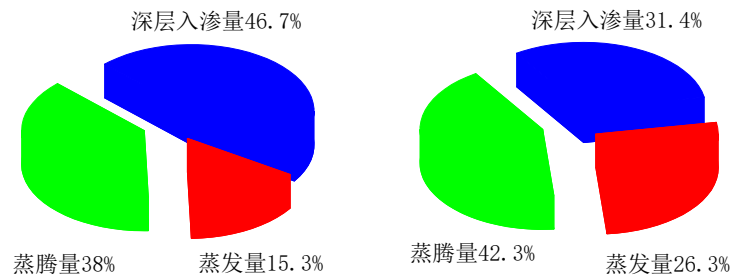
农田SPAC系统的环境同位素研究

- ◆ 阐明了晋南主要农作物夏玉米、棉花和冬小麦在不同生长期的根系吸水来源变化
- ◆ 根据水量平衡和同位素质量守恒方法分割了灌溉条件下的农田蒸散发量，求得深层入渗量，评估灌溉水的利用率
- ◆ 利用Hydrus-1d模型对夏玉米、棉花和冬小麦生长期的水循环通量进行了计算

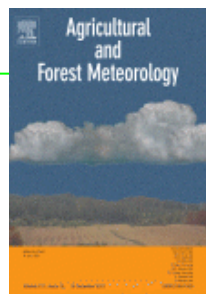


2008年8月11日夏玉米灌溉（漫灌）

2009年3月15日冬小麦灌溉（喷灌）

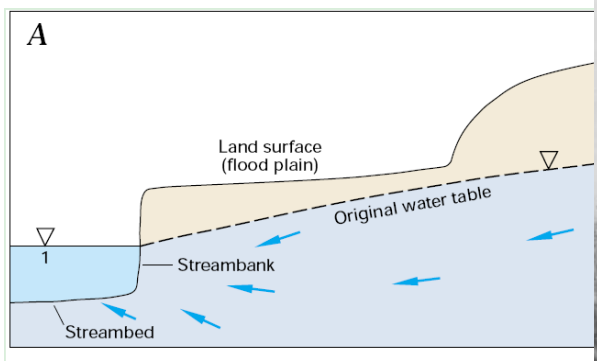


已发表SCI论文5篇等



重点区域流域尺度的“四水转换”同位素示踪研究

松花江流域大规模农业开发区地表水与地下水相互作用机理

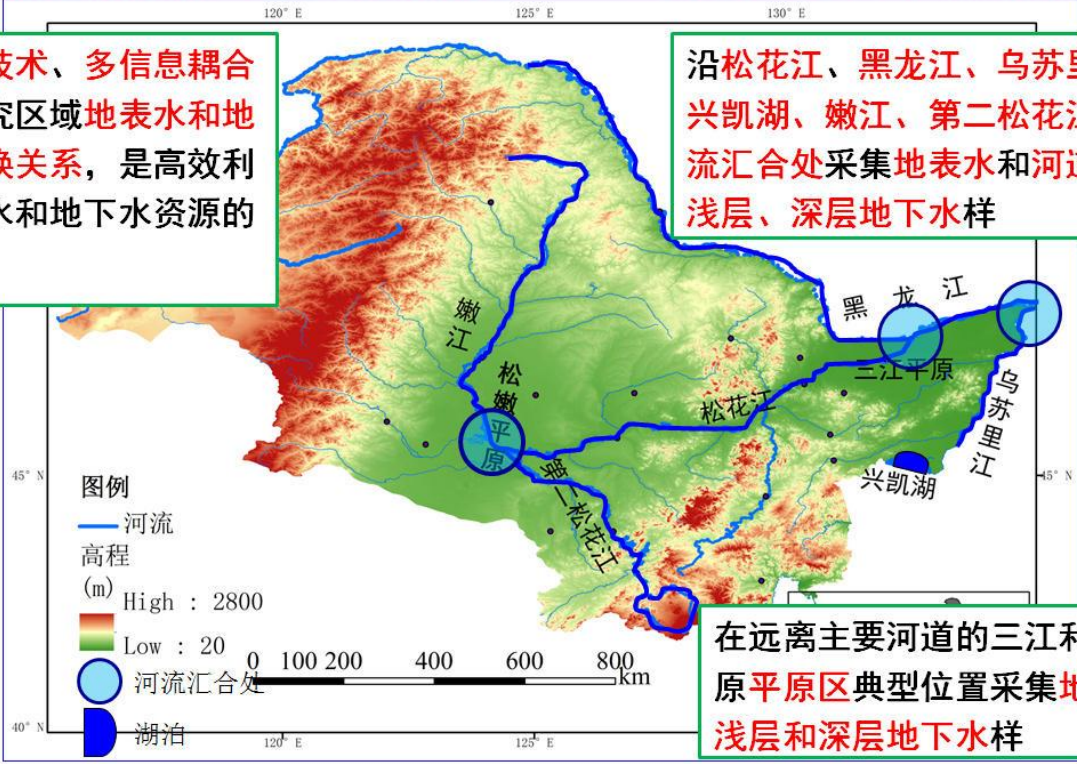


多信息耦合的“三水示踪研究”——地表水与地下水转换关系

人类活动影响下（河流开发、农业等经济用水、超采地下水等），不同区域的“降水-生物水-地表水-土壤水-地下水”的转化与水资源的形成关系变化规律

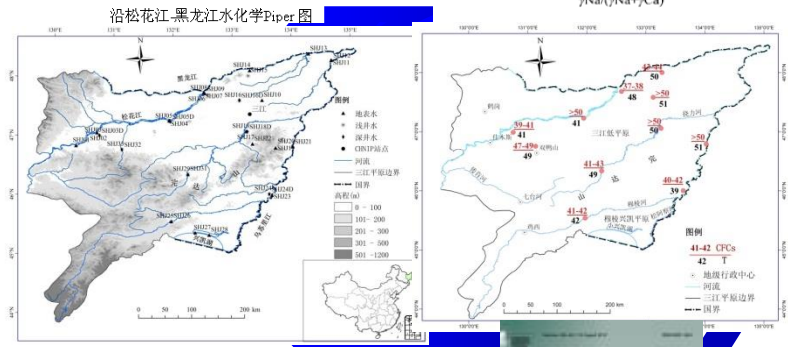
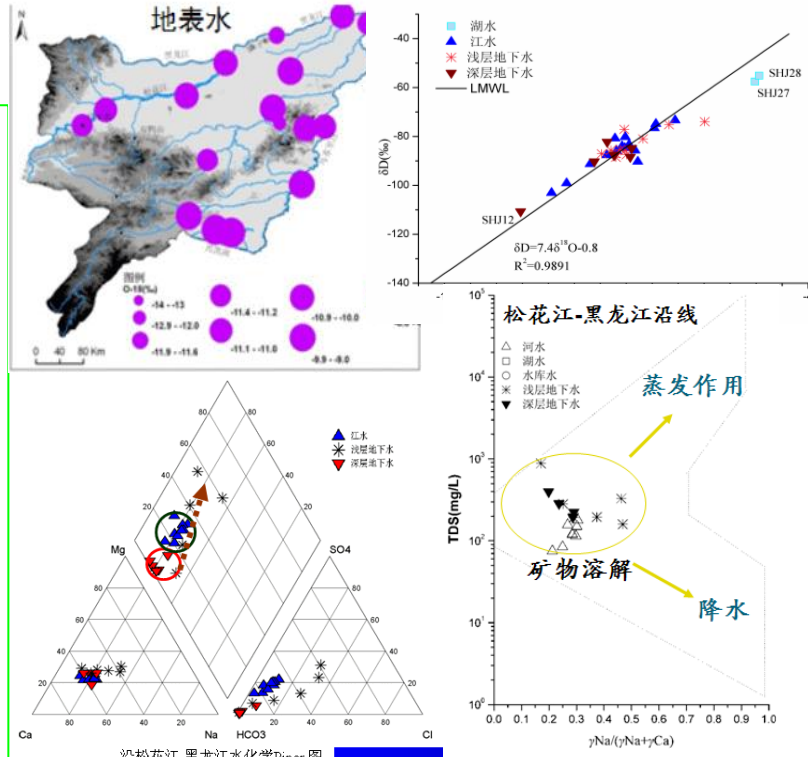
利用新技术、多信息耦合方法研究区域地表水和地下水转换关系，是高效利用地表水和地下水资源的基础

沿松花江、黑龙江、乌苏里江、兴凯湖、嫩江、第二松花江及河流汇合处采集地表水和河道周围浅层、深层地下水样

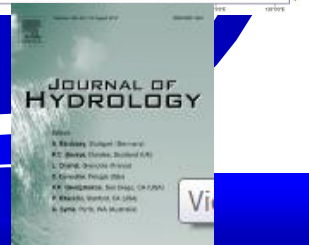


在远离主要河道的三江和松嫩平原平原区典型位置采集地表水、浅层和深层地下水样

- ◆ 揭示了沿河、湖周围的浅层地下水与地表水联系密切
 - ◆ 运用二端元模型，结合氧稳定同位素 δO^{18} 值定量估算了地表水和地下水相互转换关系，浅层地下水对江水的补给比例占到50%以上
 - ◆ 运用氚同位素和氟利昂 (CFCs) 估算的浅层地下水年龄约在40年左右，更新时间快
- 水资源潜力很大，需要加大地表水与地下水联合使用力度

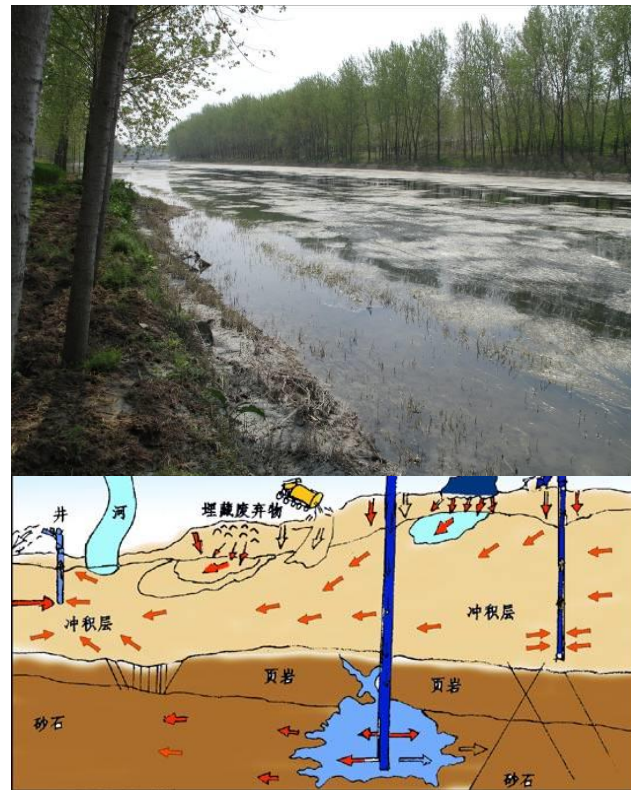
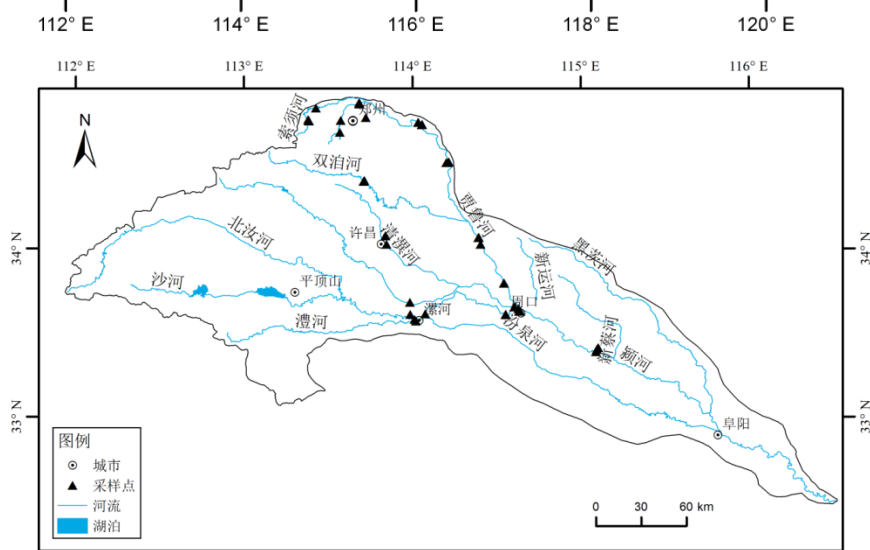
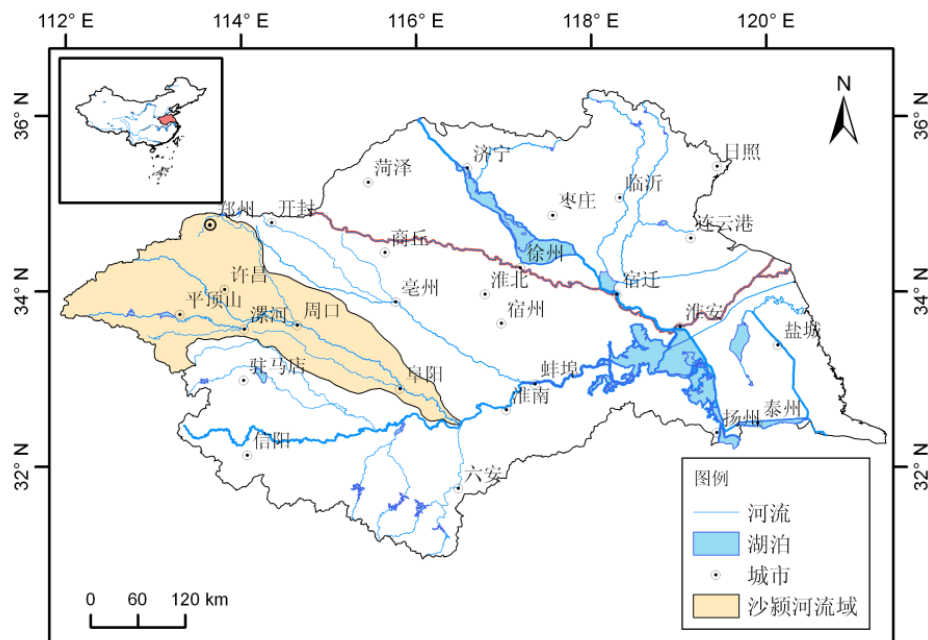


已发表SCI
论文3篇等



重点区域流域尺度的“四水转换”同位素示踪研究

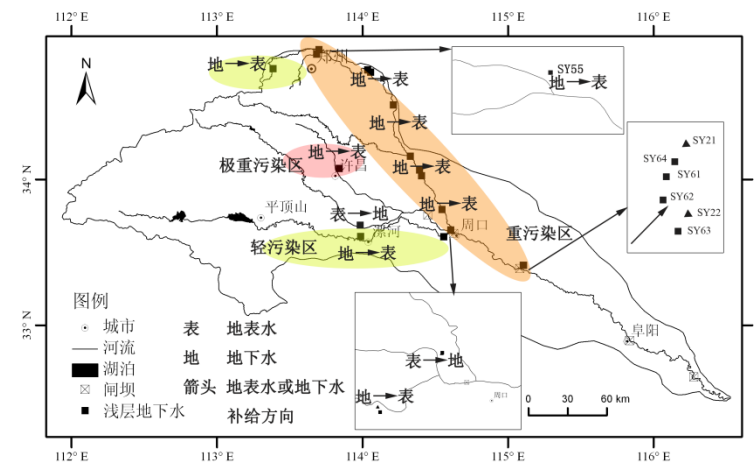
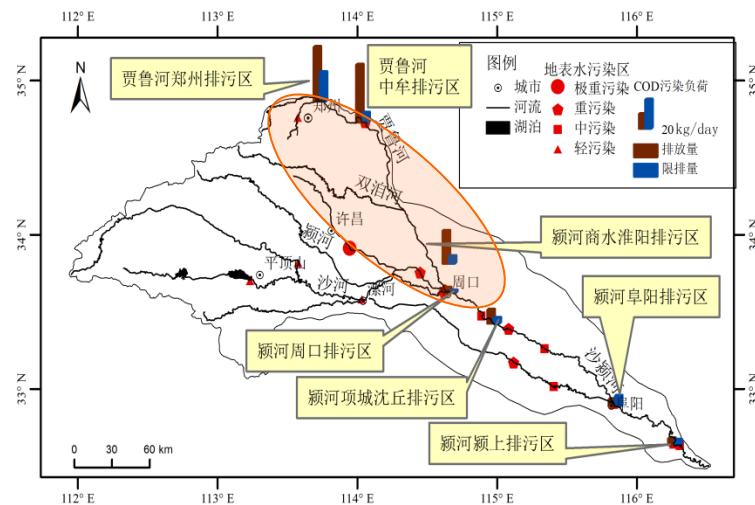
沙颍河流域污染河道的地表水与地下水相互作用机理研究



- 淮河是我国污染最严重的河流
- 研究污染河流的地表水与地下水的相互转化规律
- 为水污染治理开发利用提供科学的决策依据

重点区域流域尺度的“四水转换”同位素示踪研究

- ◆ 查明了地表水与地下水的相互作用关系，提出了河道附近污染的地下水也是河流的新污染源
- ◆ 运用多种环境示踪剂研究地表水与地下水之间的水力和水量关系，是研究淮河流域不同水体交换的一种新的方法
- ◆ 基于多元统计方法，首次提出了沙颍河流域地表水污染分区（极重、重度、中度、轻度四级）



已发表SCI论文6篇等

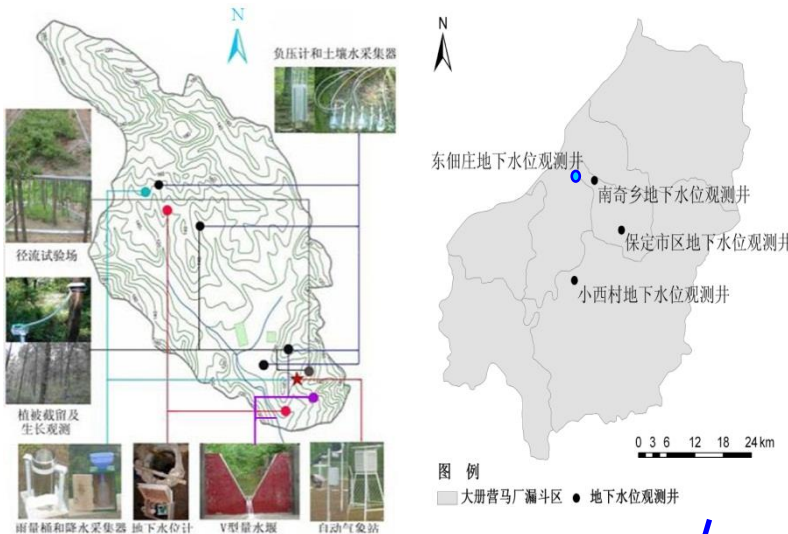
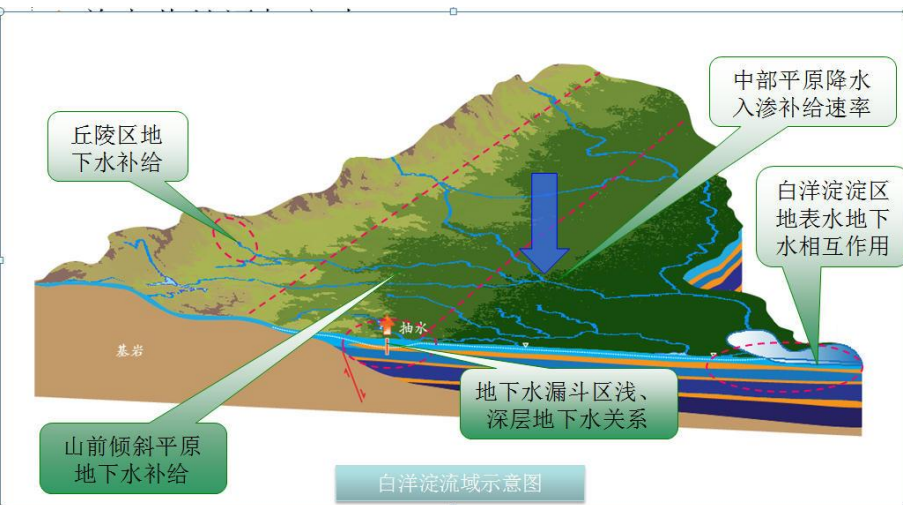
ENVIRONMENTAL EARTH SCIENCES

Hydrol. Earth Syst. Sci

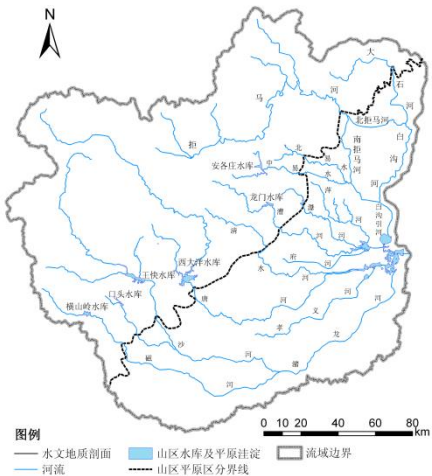


重点区域流域尺度的“四水转换”同位素示踪研究

人类活动影响下的白洋淀流域浅层地下水循环机理



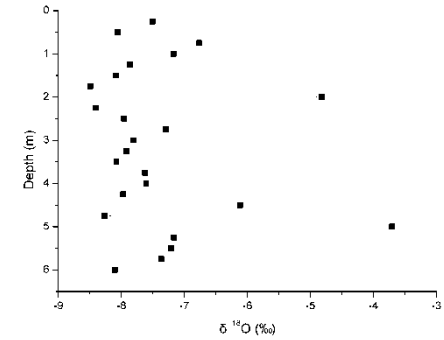
- ◆ 山区地下水补给机理
- ◆ 地下水漏斗区浅层地下水与下伏承压水水量交换关系
- ◆ 白洋淀水与浅层地下水相互作用



重点区域流域尺度的“四水转换”同位素示踪研究

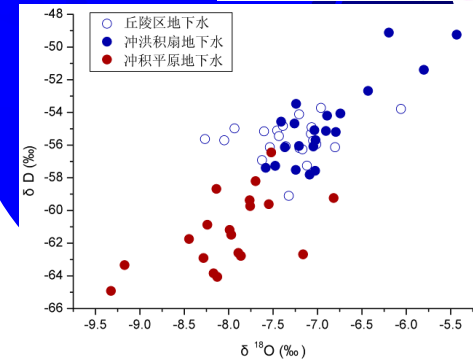
- ◆ 基于在山区实验流域的详细的水文过程观测和分析，估算了降水入渗对地下水的补给系数为**0.26-0.43**
- ◆ 首次运用干河床非饱和带土壤水的氯离子平衡法（**CMB**），得到白洋淀流域平原区多年平均降水入渗补给速率为 **3.8 ± 0.6 mm/y (2.1-7.1)**，并提出了恢复历史降水入渗补给速率的新方法
- ◆ 将**FCM、LDA** 和 **Paired t test** 等数学方法与同位素和水化学分析方法相结合，阐明了浅层地下水漏斗激发深层地下水越流补给、白洋淀水与地下水相互作用关系改变

年份	实测降水量(mm/yr)	林区有效降水量(mm/yr)	加权平均降水量(mm/yr)	实际蒸散发量(mm/yr)	出口流量(mm/yr)	降水补给地下水量(mm/yr)	降水入渗补给系数
2005	467.6	386.4	433	247	0	186	0.40
2006	358.3	290.7	330	236	0	94	0.26
2007	603.9	506.2	563	303	0	260	0.43
2008	564.0	471.9	525	334	0	191	0.34

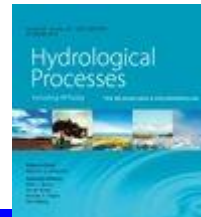


编号	地点	更新速率(%)	地貌单元
B02	万亩林	15.0	山前倾斜平原
B194	西高里村	14.0	
B17	坨台村	11.0	
B09	基地大院	10.0	
B15	南易河庄	10.0	
B16	北东村	10.0	
B27	新乐县五里铺	10.0	
B13	凤凰台村	9.5	
B05	杨树沟	9.0	
B10	梁格庄	9.0	
B74	高岭村	7.5	中部冲积平原
B11	凤凰台村	7.0	
B72	曲阳县大盖村	6.0	
B81	董庄村	5.5	
B42	孙村乡南孙村	4.5	
B28	二十里铺	4.0	
B41	银定庄	4.0	
B75	沈家坯村	4.0	

$$\bar{R} = \frac{\bar{P} \cdot \bar{Cl}_p}{\bar{Cl}_{sw}}$$



已发表SCI论文6篇等



ENVIRONMENTAL EARTH SCIENCES

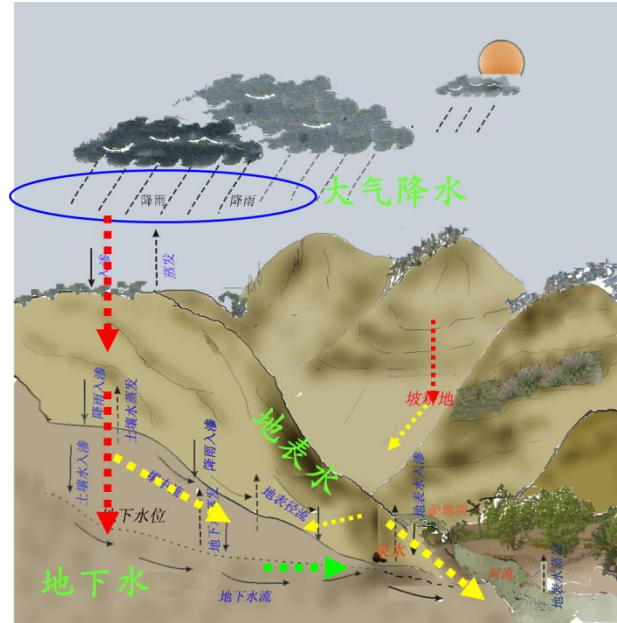
黄土高原产流及地下水补给机制

黄土高原丘陵沟壑区产流变化与浅层地下水补给机制

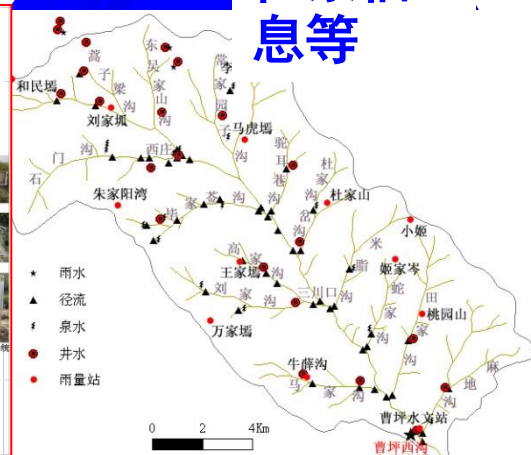
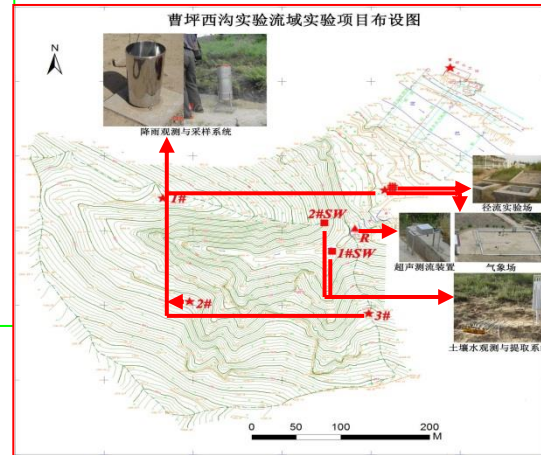
黄土高原丘陵沟壑区地下水补给机制长期争议？

从流域层面

- ◆ 确定地下水补给源的时空变化和主要补给模式
- ◆ 划分地下水的补给比例和主要补给区域
- ◆ 确定流域地下水的更新能力

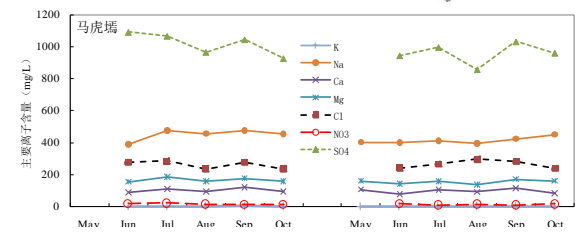
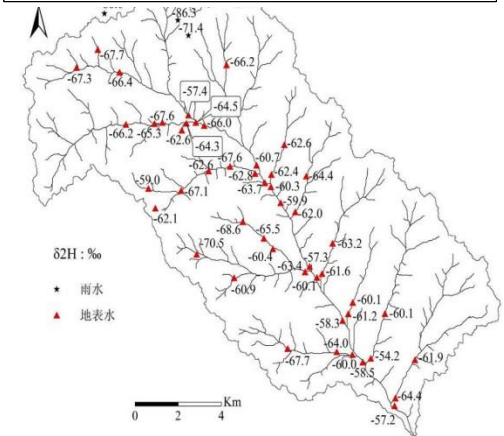
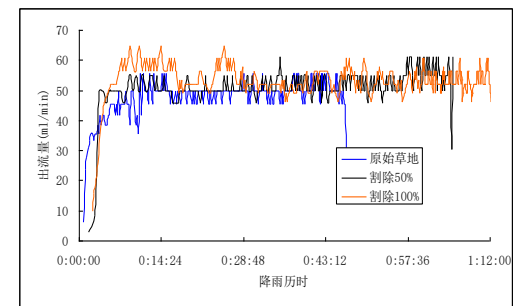


环境同位素信息等



黄土高原产流及地下水补给机制

- ◆ 从流域层面上提出了黄土高原丘陵沟壑区浅层地下水的六种主要补给模式
- ◆ 采用基于氘盈余的氢氧同位素质量守恒方程，判断了地下水的补给源并估算了补给比例
- ◆ 半定量地评估了淤地坝对地下水补给的影响
- ◆ 评估了流域的地下水更新能力并进行了分区



$$\underline{X_{s0}} + X_i = \underline{X_{s1}}$$

$$\delta^2\text{H}_{\text{sw0}} * X_{s0} + \delta^2\text{H}_p * X_i = \delta^2\text{H}_{\text{sw1}} * \underline{X_{s1}}$$

$$\underline{X_{s1}}$$

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{sw0}} * X_{s0} + \delta^{18}\text{O}_p * X_i = \delta^{18}\text{O}_s * \underline{X_{s1}}$$

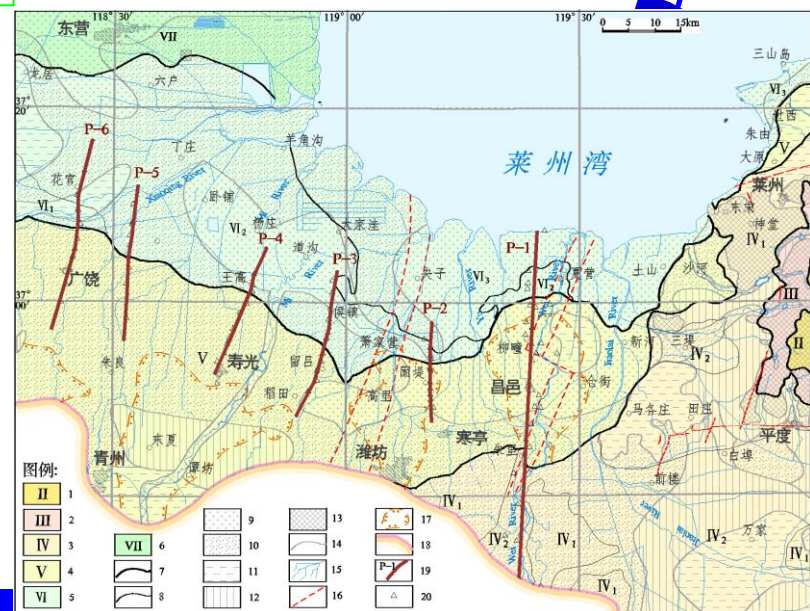
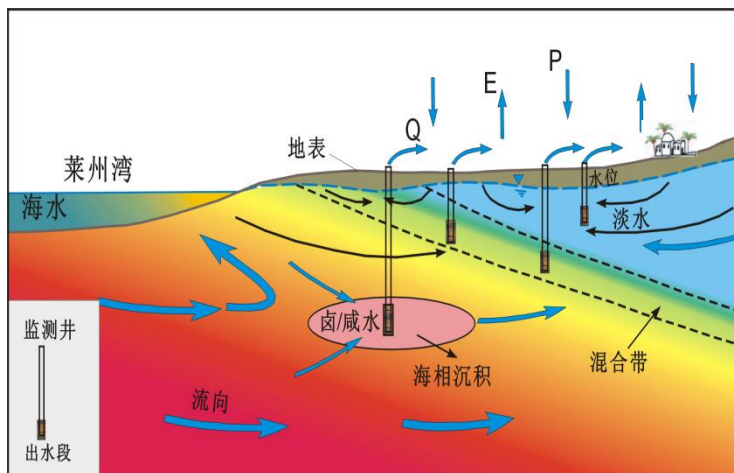
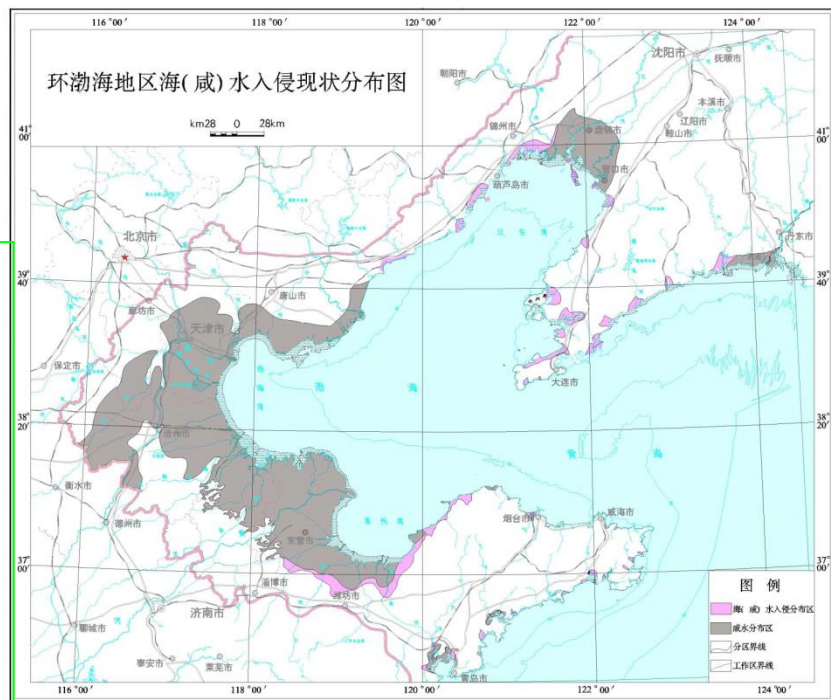
$$w1 * \underline{X_{s1}}$$

已发表SCI论文2篇等

环渤海海水入侵机制

关注的热点

- ◆ 准确界定咸淡水界面的空间位置
- ◆ 揭示卤/咸水入侵过程中的水文地球化学作用
- ◆ 揭示水循环过程中降水—河水—地下水—海水之间的相互作用



环渤海海水入侵机制

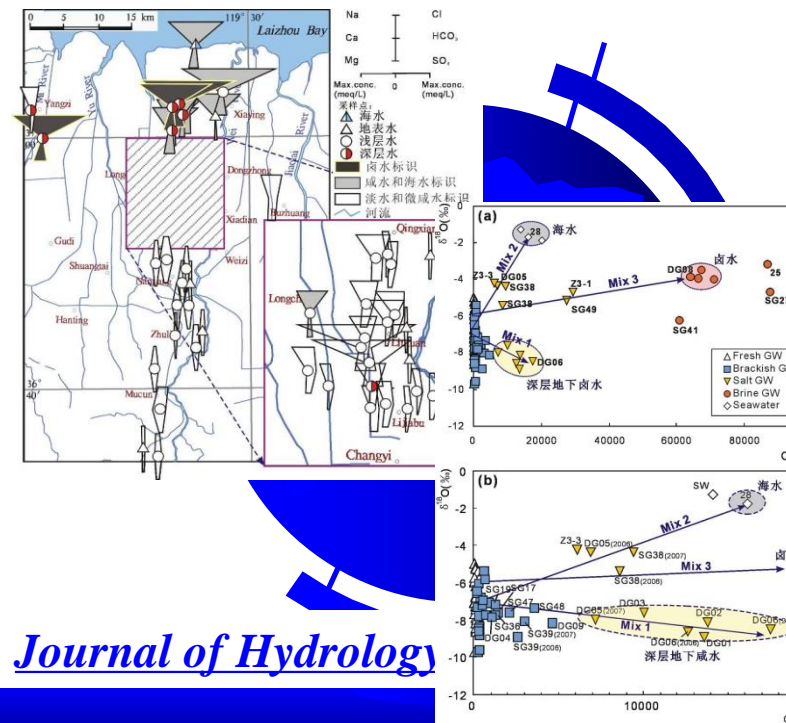
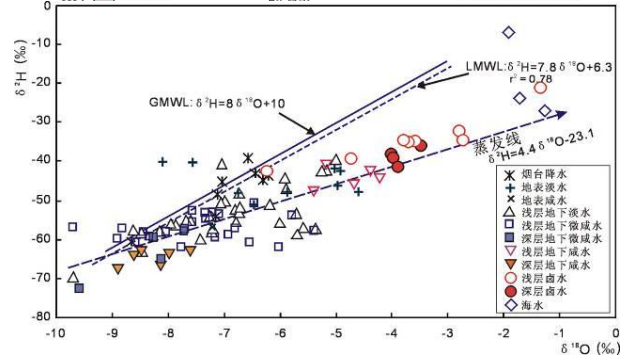
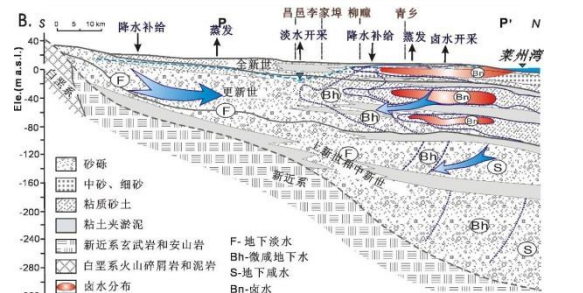
- ◆ 通过地下水监测、多元示踪、数值模拟等手段：准确界定了咸淡水界面的空间位置
- ◆ 首次利用 ^{14}C 计算莱州湾南岸含水层中不同地下水体的年龄
- ◆ 揭示了不同地下水体来源、补给条件及混合作用，特别是古卤水入侵淡水含水层的机制
- ◆ 利用水文地球化学模拟，定量揭示了不同水体之间相互转换过程及物质迁移演化机制

已发表SCI论文4篇等

Applied Geochemistry

Hydrological Processes

Journal of Hydrology



谢谢

