



第一届中国同位素水文学论坛

青海湖流域芨芨草草原包气带水分运移 同位素示踪研究

崔步礼、姜宝福、李东昇

鲁东大学资源与环境工程学院





报告提纲

一

研究背景

二

研究方案

三

结果分析

四

展望

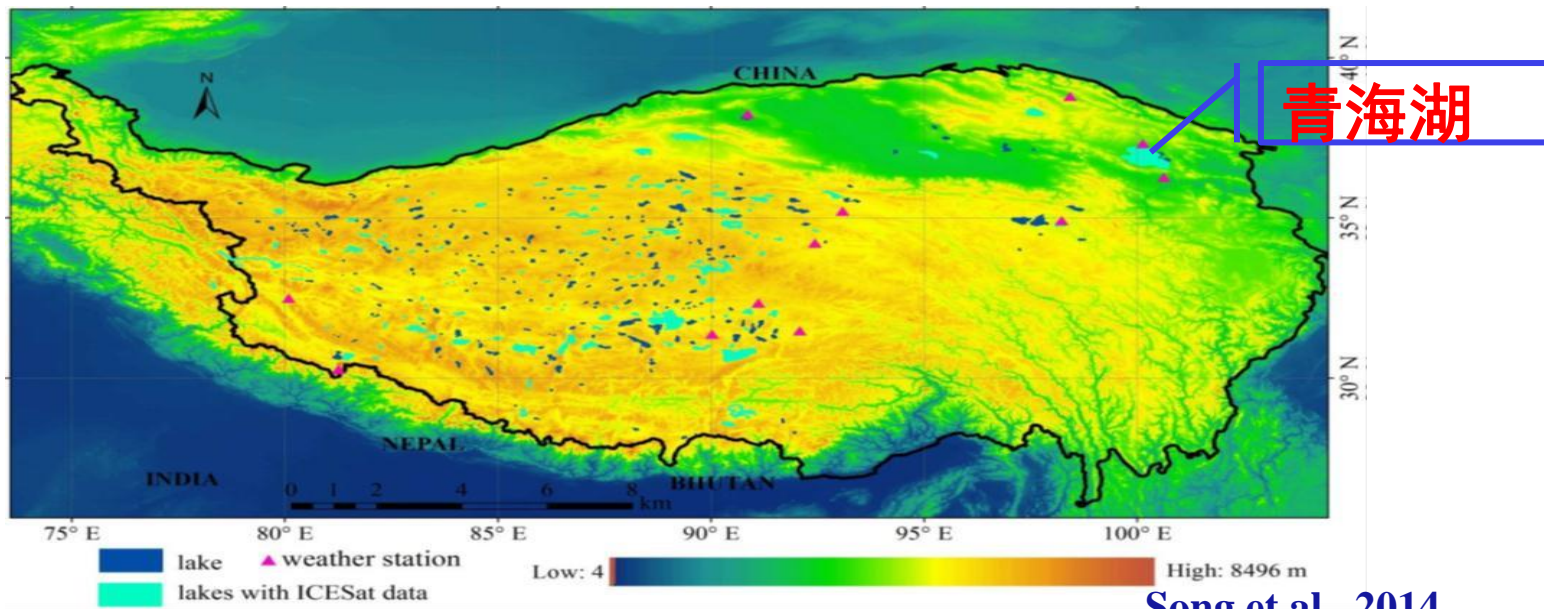
青藏高原隆升的气候与水文效应

- 高原隆升改变了高原地区的行星环流路径，使西风分为南北两支；阻碍夏季西南暖湿气流进入我国西北部，使西北地区干旱，形成沙漠；高原的热力作用，加强了冬夏季风的交替。



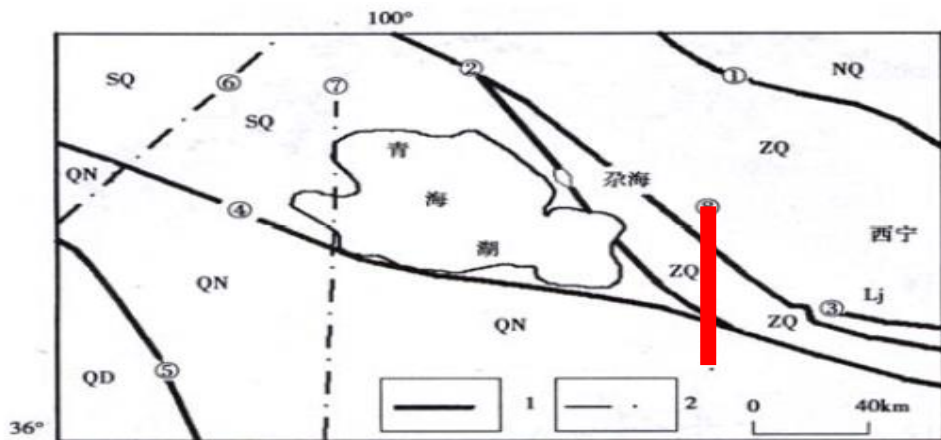
• 青藏高原隆升的气候与水文效应

- ❖ 隆升使得青藏高原成为亚洲大江大河的发源地。随着高原不断隆升，许多外流水系转变为内流水系，若干湖泊向盐湖演变。
- ❖ 青藏高原东北部的青海湖是在隆升过程中形成的一个构造断陷湖。

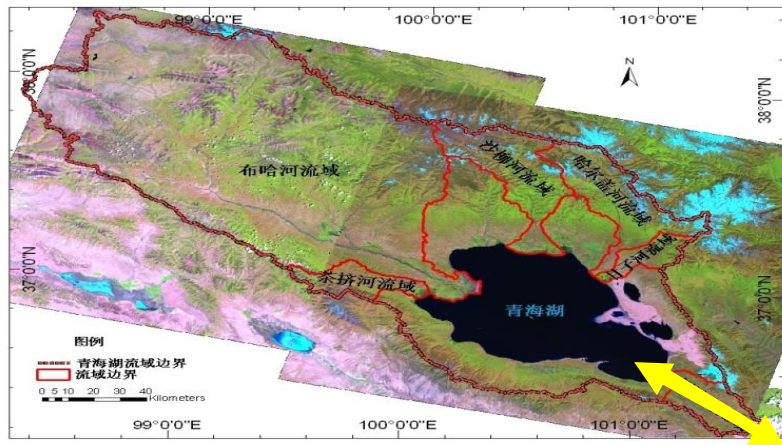


青海湖的形成

- 成湖初期（20-200万年前）是一个淡水湖泊，湖水在东南部倒淌河泄入黄河。
- 新构造运动致使湖东山体迅速隆升（上新世末），倒淌河被堵塞，迫使其由东向西流入青海湖（倒淌河的来历），青海湖变成了闭塞湖，由淡水湖逐渐演变成咸水湖。

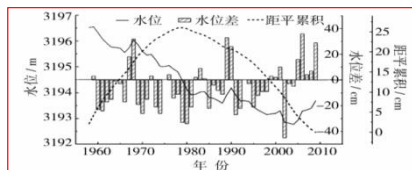


边千稻等, 2000



• 青海湖研究的必要性

- 我国最大的内陆湖和咸水湖，湖面积4318km²，流域面积29661km²
- 青藏高原东北部生态屏障，国际重要湿地和国家自然保护区
- 少数民族聚集区和草地畜牧业等社会经济发展的重点地区
- 然而，在气候变化及人类活动的影响下，青海湖流域面临严重的生态危机：



水位下降，径流减少



草地退化



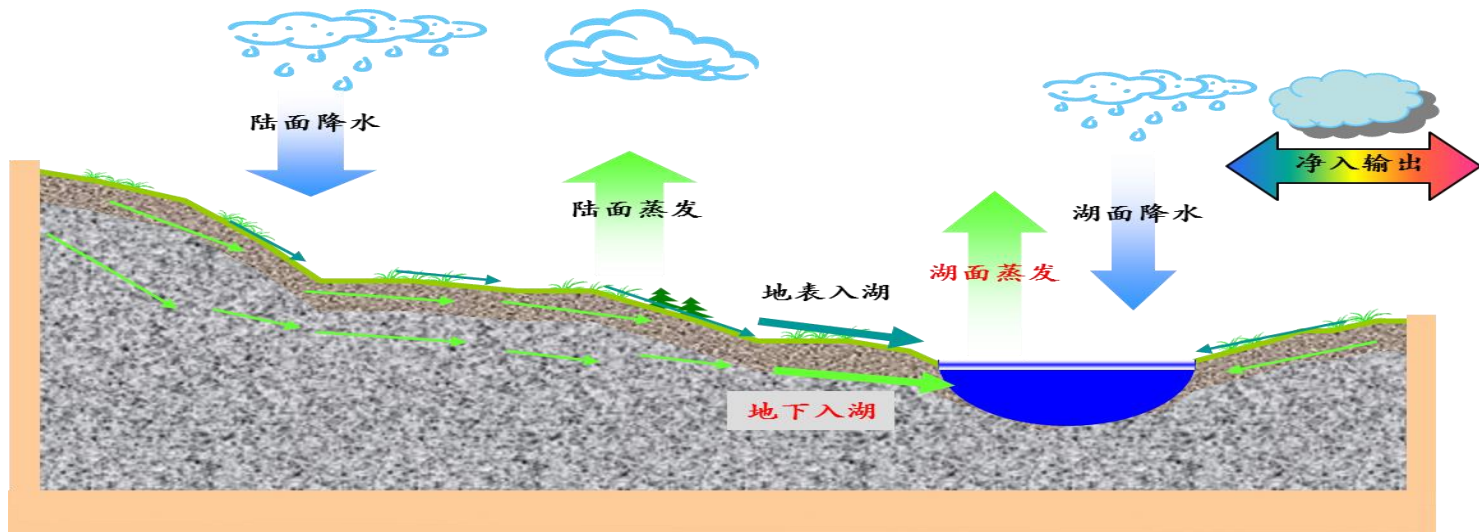
沙漠化扩张



生物多样性减少

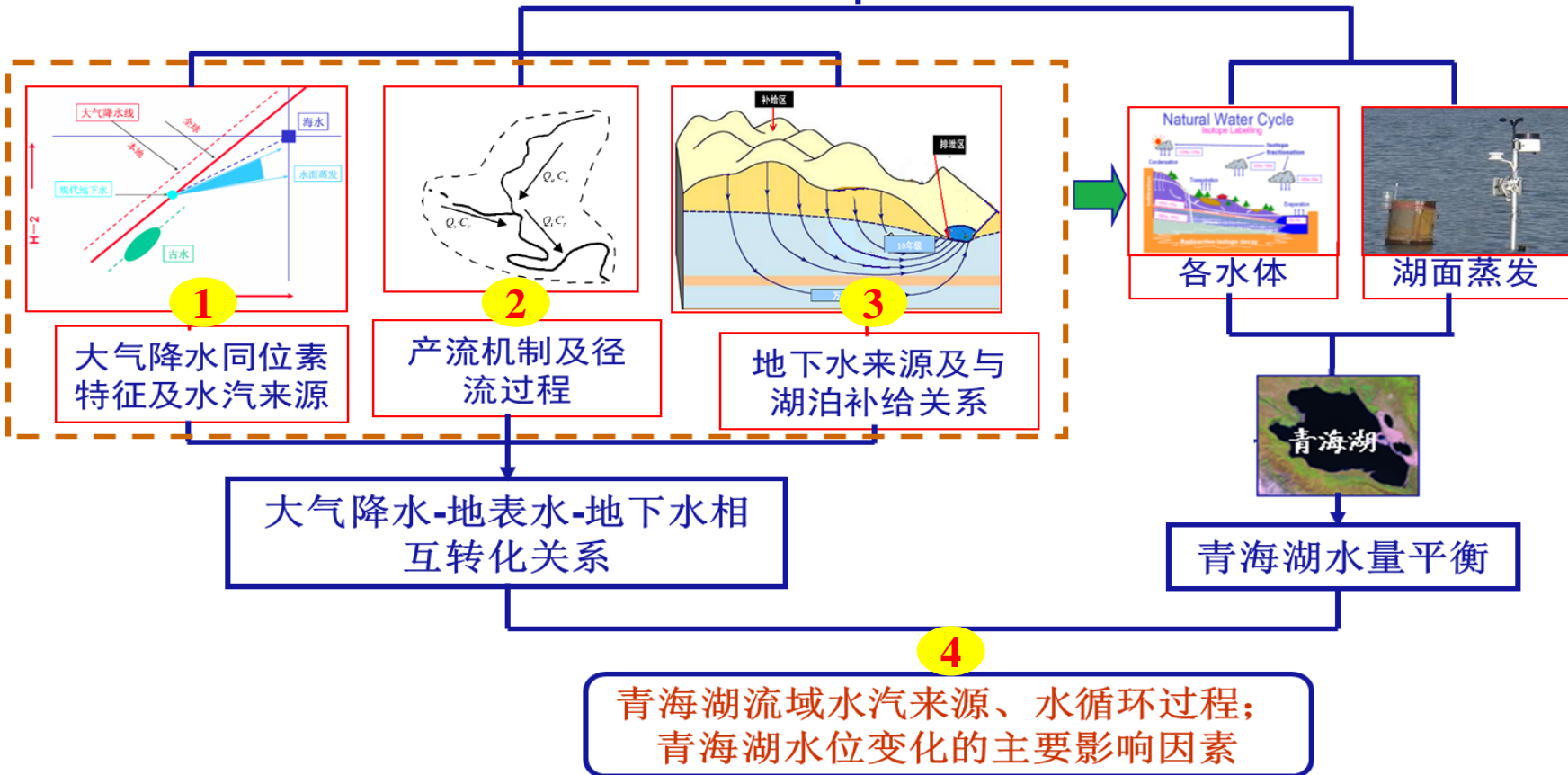
❁ 独特的地理位置以及出现的生态环境问题，引起国内外高度关注，成为国内外科学界的研究热点地区之一。

- **存在科学问题：**
- **大气降水水汽来源？**
- **地表水、地下水和湖水如何转换？**
- **各水体如何影响流域水资源和湖水位变化？**



研究思路与成果

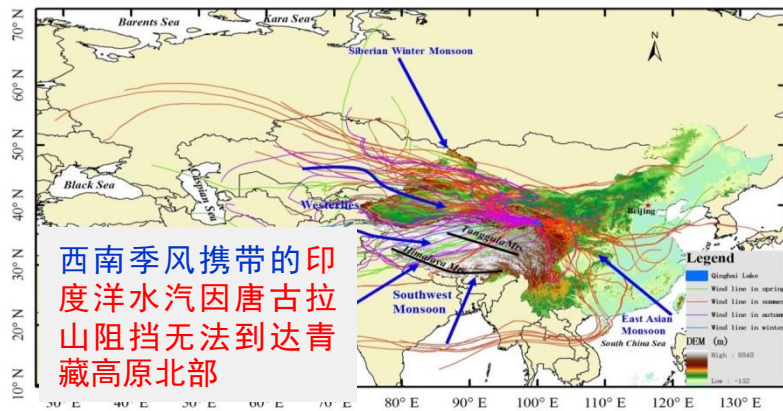
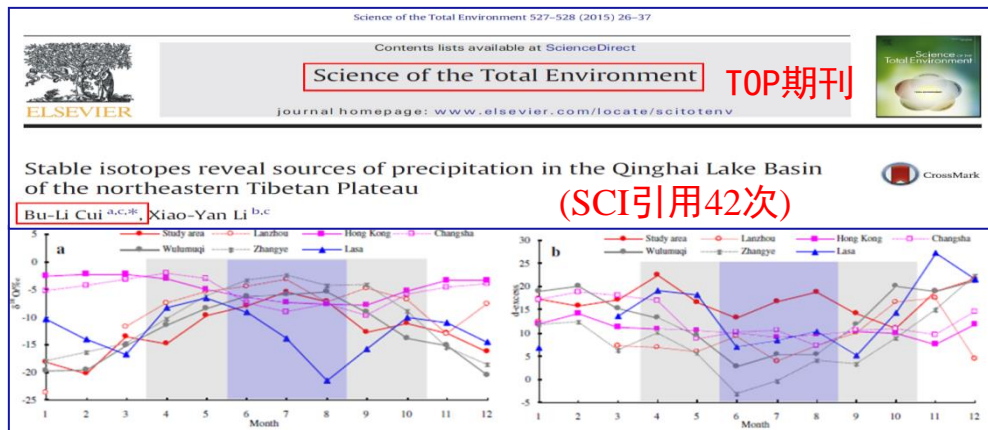
青海湖流域水循环稳定同位素示踪研究





成果1：大气降水水汽来源

首次揭示了青藏高原东北部大气降水的主要来源（东亚季风和西风环流携带水汽），计算了湖面蒸发对青海湖流域降水的贡献率(23.42%)，为区域降水水汽来源研究提供了借鉴。相关成果发表SCI论文3篇(TOP期刊2篇)。

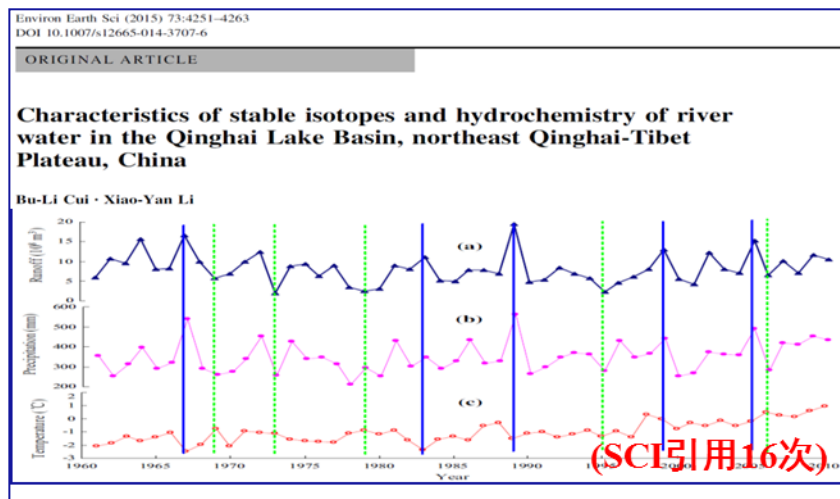
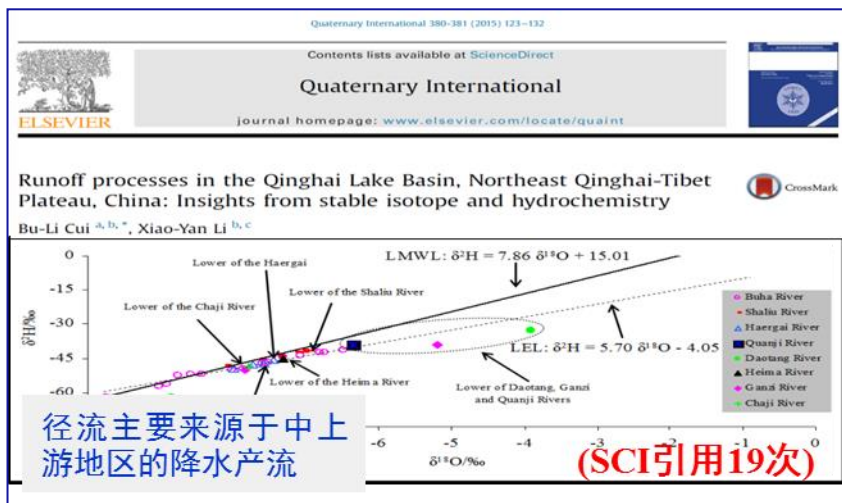


Cui & Li, 2015, STOTEN; Jiang & Cui*, 2020, WR



成果2：河川径流产汇流过程与机制

查明了碳酸盐风化强度为高寒流域河水水化学的控制因素，并揭示了河川径流的产汇流过程与机制，为寒旱区河流水文及地球化学过程提供了全新的认识。相关成果在QI、EES等期刊发表论文6篇。

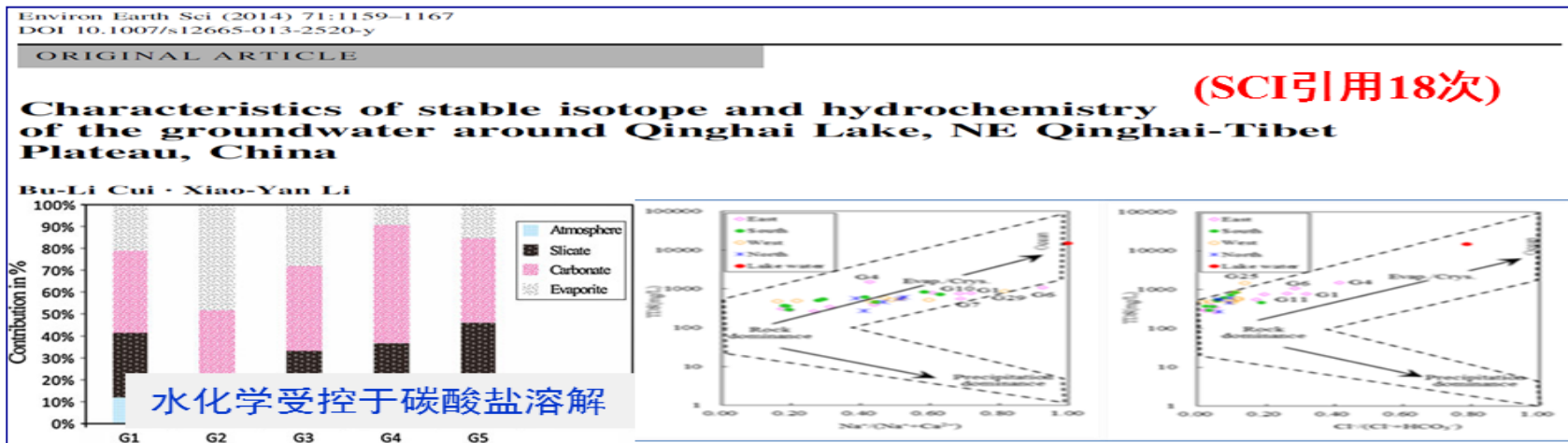


Cui & Li, 2015. QI ; Cui & Li, 2015. EES



成果3：地下水补给来源及演化

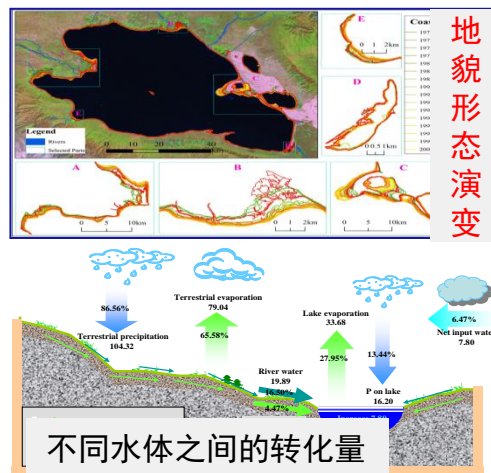
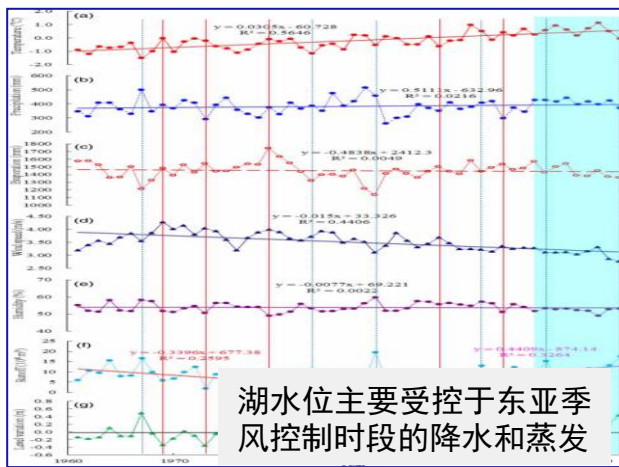
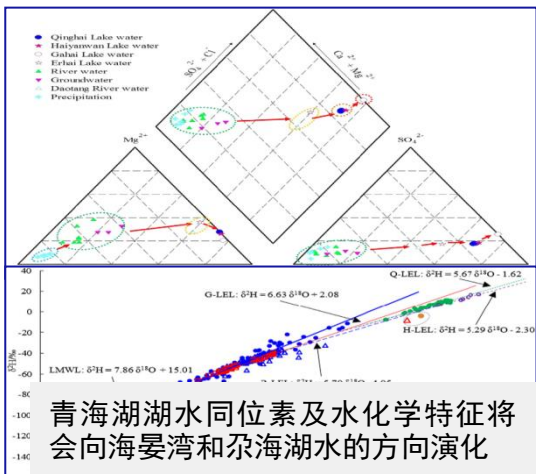
揭示了青海湖周边浅层地下水的水化学演化规律、补给来源与机制，查明了地下水中硝酸盐的主要来源（动物粪便和污水），为区域地下水资源保护与合理开发提供了数据支撑。相关成果发表SCI论文4篇。





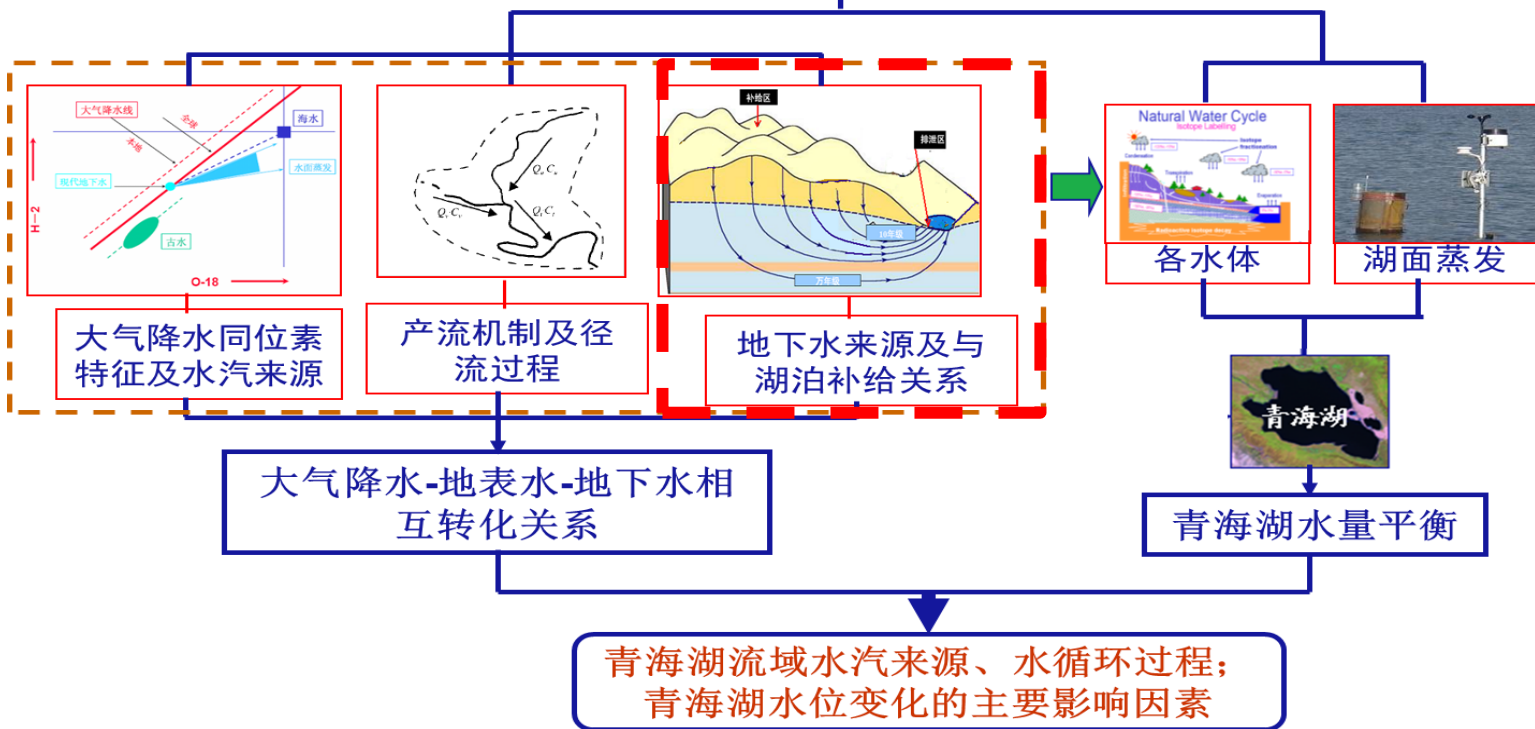
成果4：湖泊水位变化影响因素及演化趋势

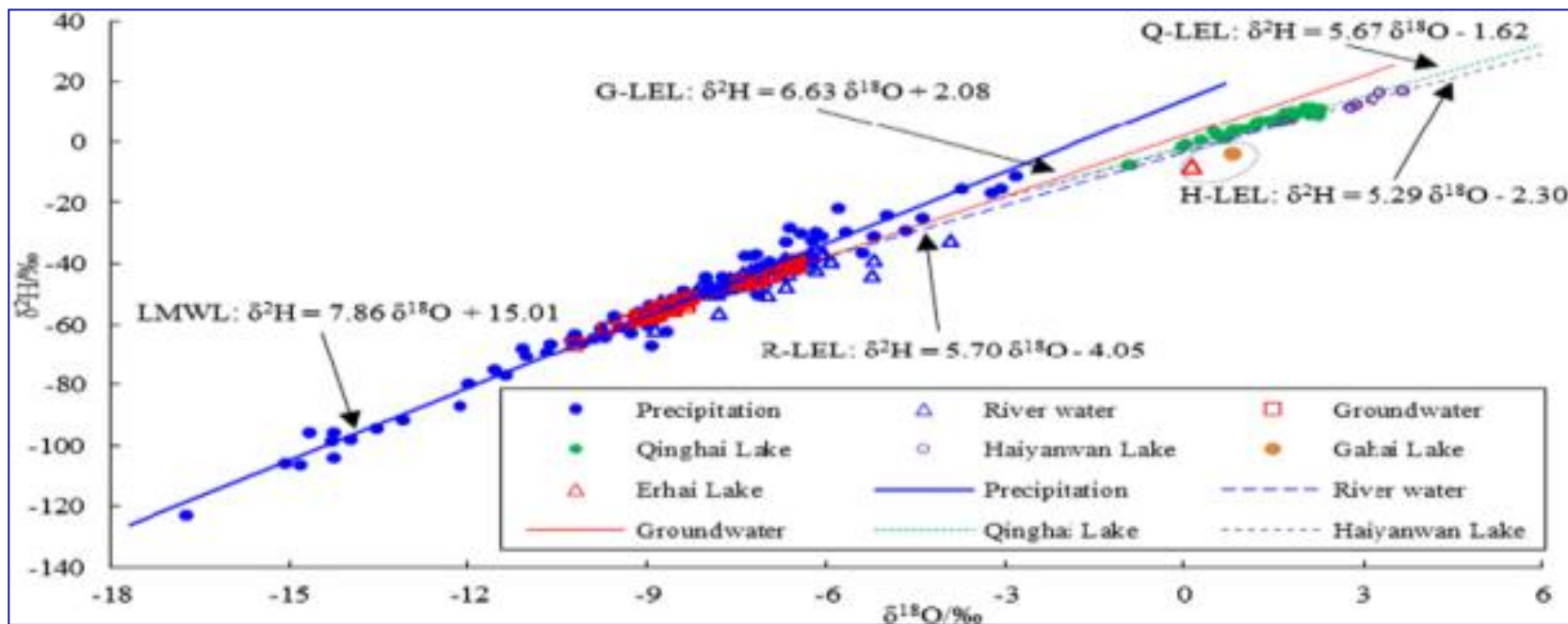
揭示了青海湖及周边小湖泊的同位素、水化学及地貌形态的演化过程和机理，计算了不同水体之间的转化量，查明了水位变化的主要影响因素及未来演化趋势，为青海湖的生态环境保护和管理提供了决策依据。相关成果发表SCI论文3篇。





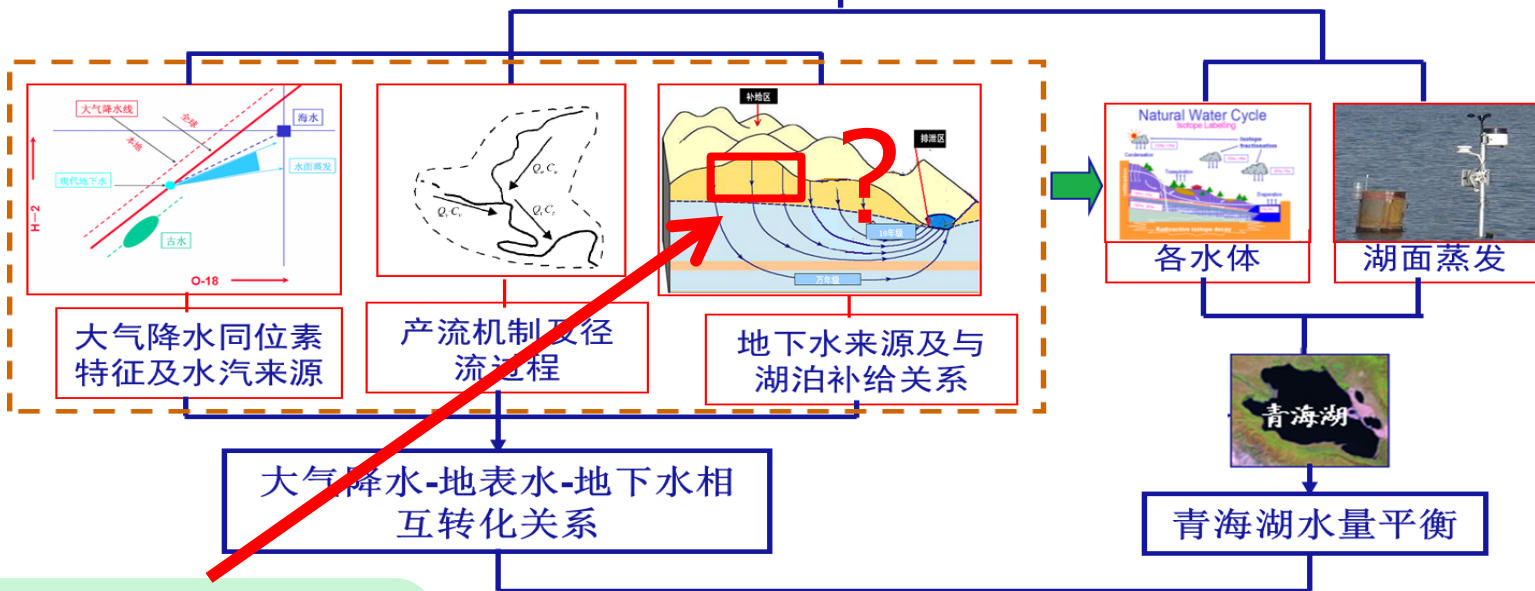
青海湖流域水循环稳定同位素示踪研究







青海湖流域水循环稳定同位素示踪研究



➤ 降水如何穿透包气带
补给地下水?

青海湖流域水汽来源、水循环过程;
青海湖水位变化的主要影响因素



包气带是地球关键带的重要部分

地球关键带

降水

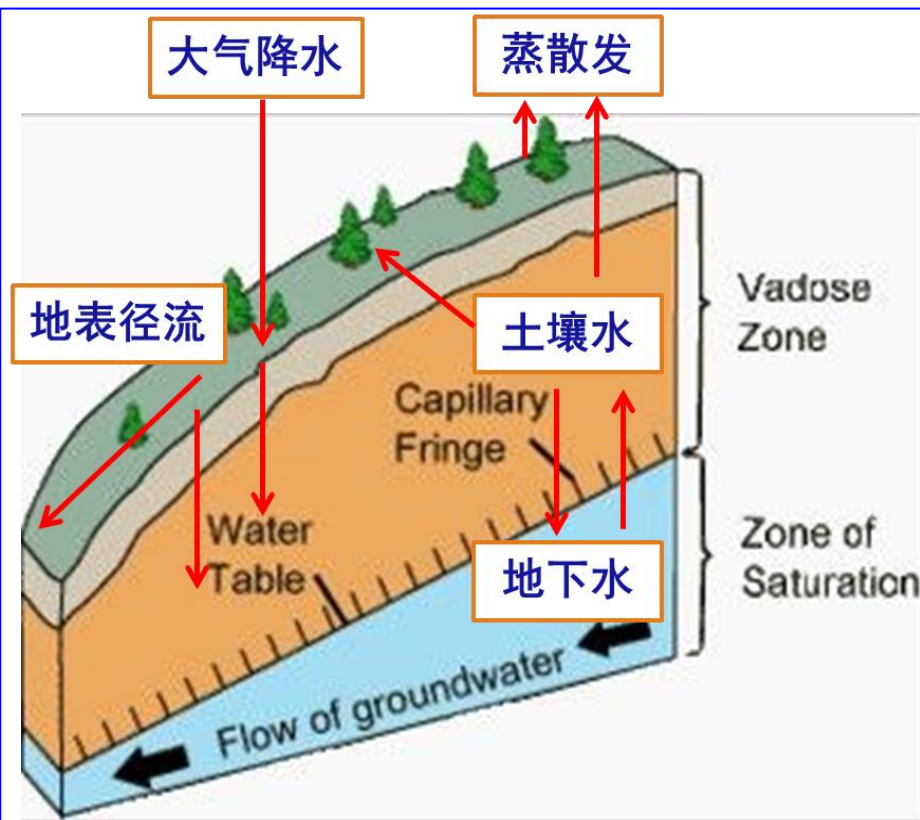
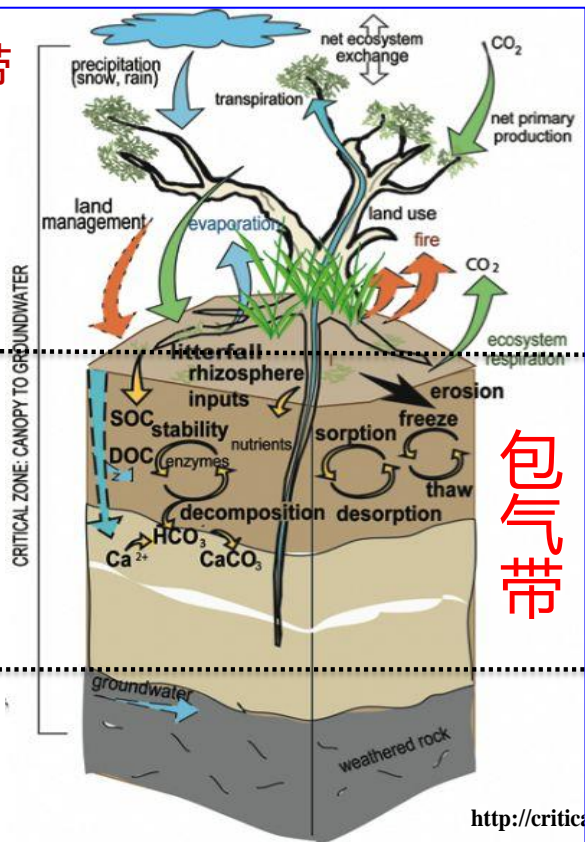
蒸散发

下渗

径流

土壤水

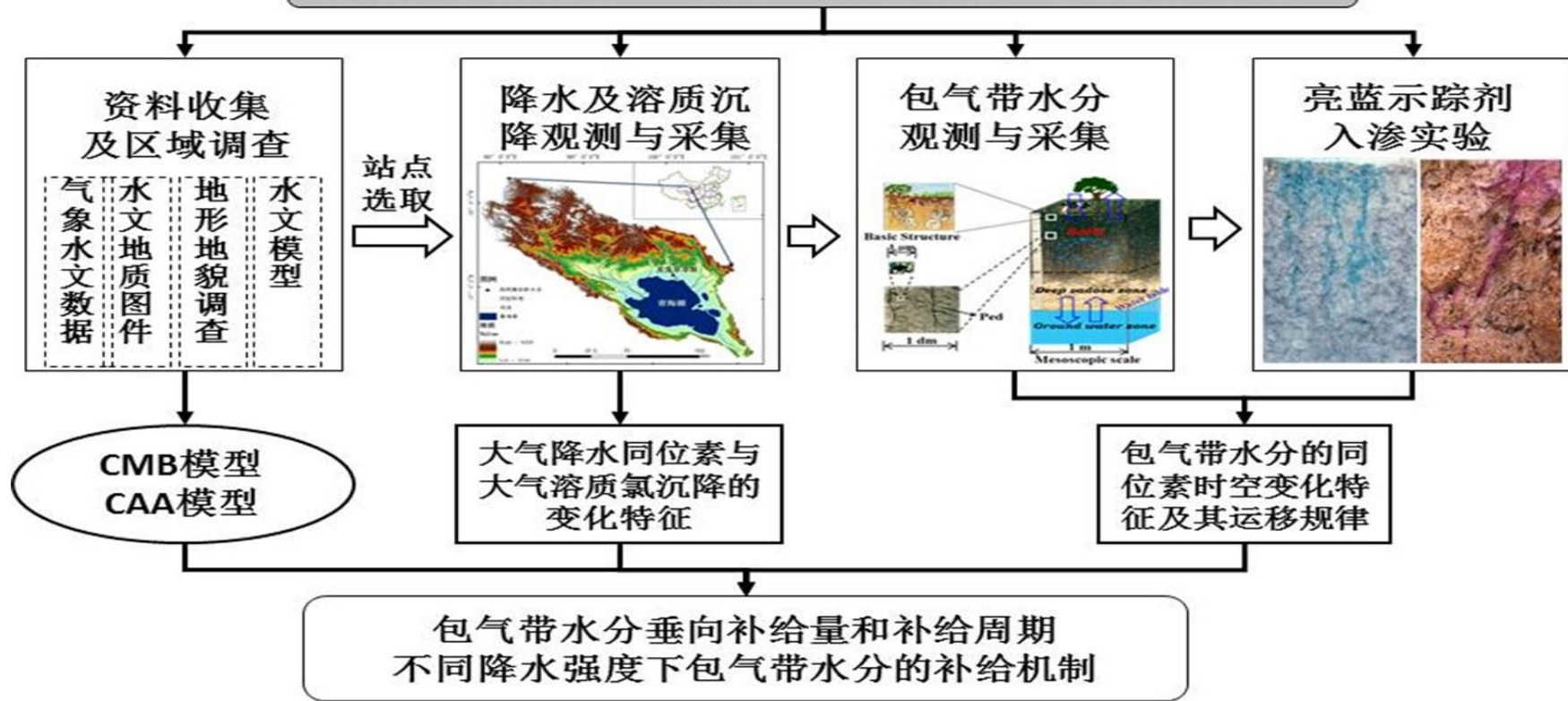
水-岩作用





研究思路

青海湖流域芨芨草草原包气带水分运移同位素示踪研究



为青海湖流域地下水补给和循环模式研究提供新的依据



报告提纲

一

研究背景

二

研究方案

三

结果分析

四

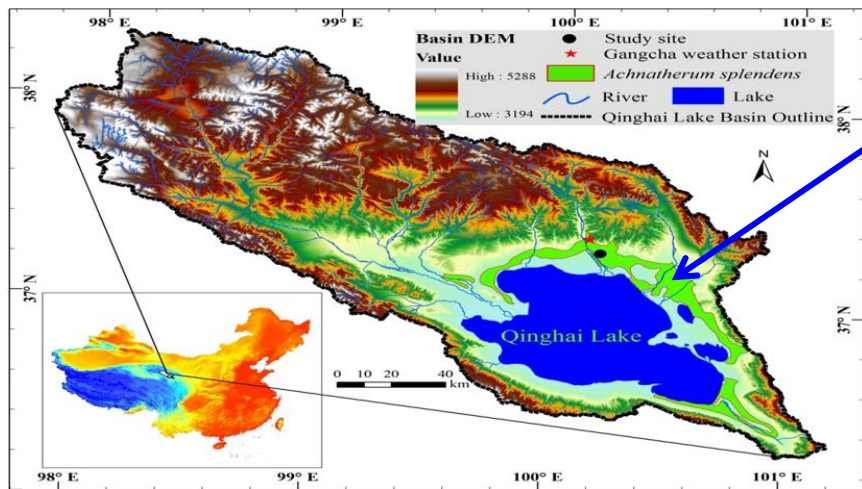
展望



1、样品采集

➤ 降水、降尘、地下水样品采集:

- 降水样品: 气象局次降水样品136个;
- 降尘样品: 每月收集一次, 12个;
- 地下水样品: 每月收集一次, 12个。



降雨收集装置

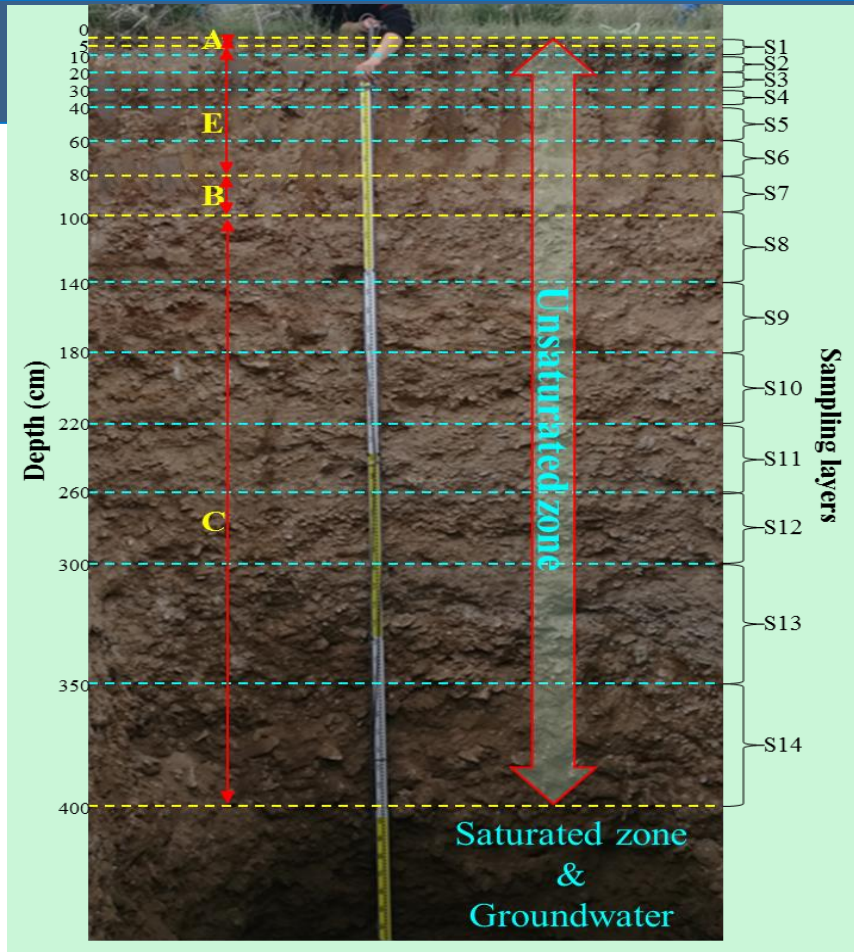


降尘收集装置



➤ 土壤剖面样品采集:

- ❑ 氚同位素样品80个;
- ❑ 包气带土壤含水量样品126个;
- ❑ 包气带土壤氯离子含量样品126个;
- ❑ 包气带土壤氢氧同位素样品126个。

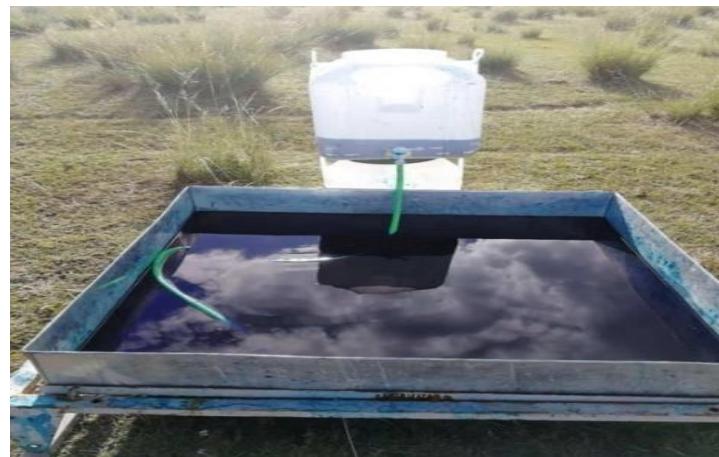


土壤剖面及土壤采样分层信息

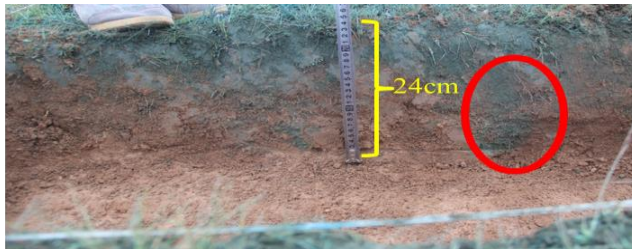


2、亮蓝入渗实验

- 斑块类型：芨芨草斑块、基质区斑块；
- 降雨量：5、10、20、30、40 mm
- 平均雨强：0.5 mm/min；
- 采样频次：降雨后24 h、7天
- 采样间隔：5 cm



降雨量(mm)	5	10	20	30	40
降雨历时 (min)	8	17	35	54	80
雨强 (mm/h)	37.5	35.29	34.29	33.33	30





3、样品测试

- **氢氧稳定同位素**：LGR液态水同位素分析仪（LWIA-30D）测定，以VSMOW作为标准， $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测试精度分别为 $\pm 0.5\text{‰}$ 和 $\pm 0.1\text{‰}$ ；
- **氯离子含量**：利用土壤浸提液提取原状土壤溶液，氯离子含量由离子色谱仪（Dionex-600）分析测得。



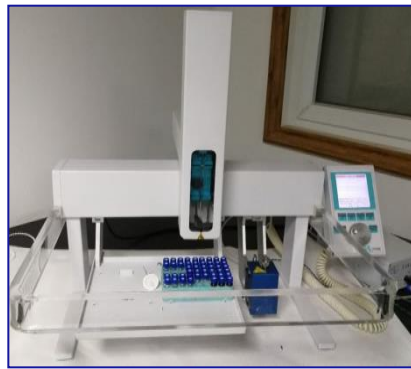
土壤氯离子



离子色谱



同位素水分抽提



同位素测定



报告提纲

一

研究背景

二

研究方案

三

结果分析

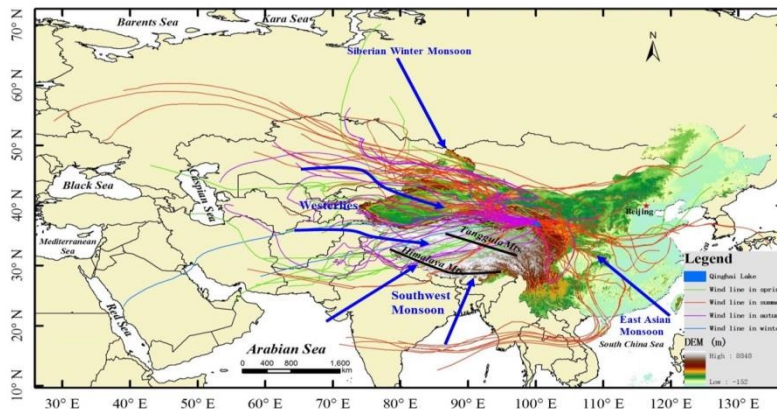
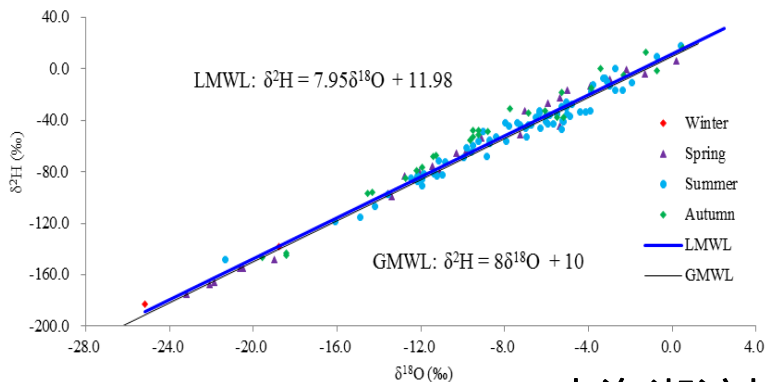
四

展望



1、大气降水同位素特征

□ 本地大气降水线LMWL



青海湖流域周边地区大气降水线

研究区	大气降水线	参考来源
天山山脉	$\delta^2\text{H} = 7.6 \delta^{18}\text{O} + 8.2$	Wang et al., 2016
青海湖流域	$\delta^2\text{H} = 7.86 \delta^{18}\text{O} + 15.01$	Cui et al., 2015
河西走廊	$\delta^2\text{H} = 7.48 \delta^{18}\text{O} + 8.01$	Guo et al., 2015
祁连山	$\delta^2\text{H} = 7.77 \delta^{18}\text{O} + 13.03$	孙从建等, 2019
拉萨	$\delta^2\text{H} = 8.08 \delta^{18}\text{O} + 12.37$	黄锦忠等, 2015
我国西部地区	$\delta^2\text{H} = 7.56 \delta^{18}\text{O} + 5.05$	黄天明等, 2008

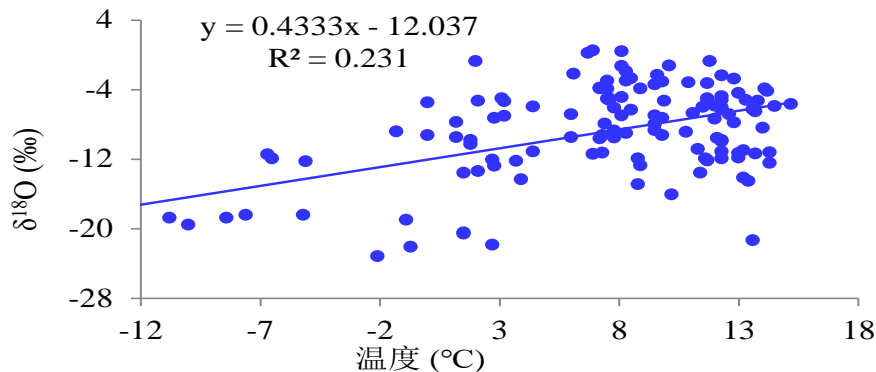


1、大气降水同位素

🌸 温度效应

- 除夏季外，各季节 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度均呈正相关，其中，春秋季节的拟合方程均显著 ($P < 0.009$)。
- 夏季降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度负相关，降水主要来源于东亚季风，季风带来了大量的湿润水气，使得 $\delta^{18}\text{O}$ 值较贫化。

时间	方程	R	显著水平
年	$\delta^{18}\text{O} = 0.433 T - 12.04$	0.481	0.001
春	$\delta^{18}\text{O} = 0.955 T - 13.13$	0.565	0.002
夏	$\delta^{18}\text{O} = -0.375 T - 3.34$	-0.216	-0.073
秋	$\delta^{18}\text{O} = 0.443 T - 10.94$	0.485	0.009
冬	$\delta^{18}\text{O} = 1.363 T - 6.29$	0.860	0.341



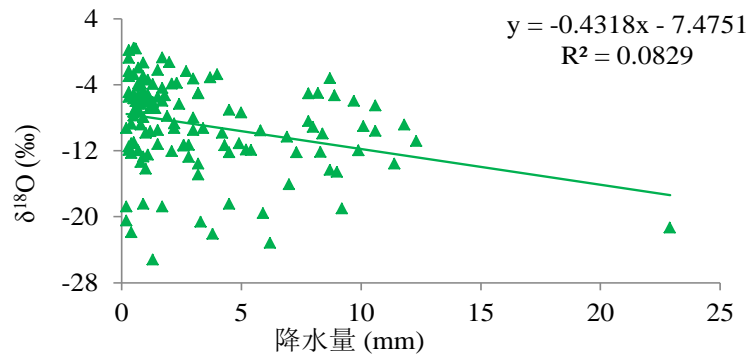


1、大气降水同位素

🌸 降水量效应

- ❑ 青海湖流域大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 随降水量增加而贫化，具有明显的**降水量效应**。
- ❑ 所有季节 $\delta^{18}\text{O}$ 值均与降水量呈负相关，其中，**夏季与秋季最为显著** ($P < 0.002$)。
- ❑ 整体而言， $\delta^{18}\text{O}$ 和降水之间的关系较为复杂，各季节存在差异性。

时间	方程	R	显著水平
年	$\delta^{18}\text{O} = -0.432 P - 7.48$	-0.288	0.001
春	$\delta^{18}\text{O} = -0.286 P - 10.15$	-0.131	0.514
夏	$\delta^{18}\text{O} = -0.479 P - 5.79$	-0.501	0.001
秋	$\delta^{18}\text{O} = -1.047 P - 5.96$	-0.550	0.002
冬	$\delta^{18}\text{O} = -1.24 P - 19.58$	-0.260	0.832





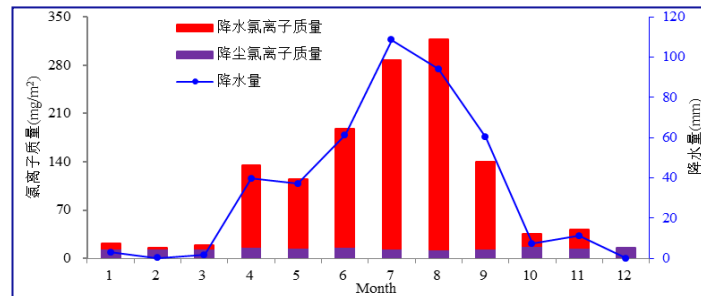
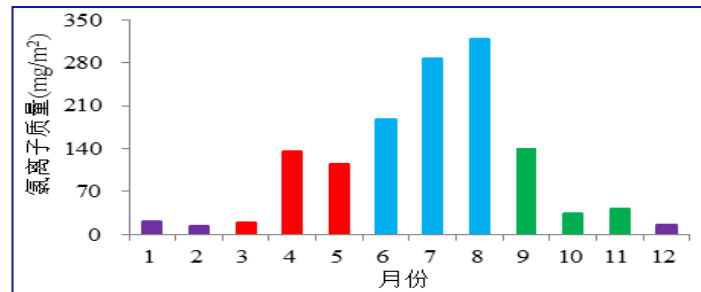
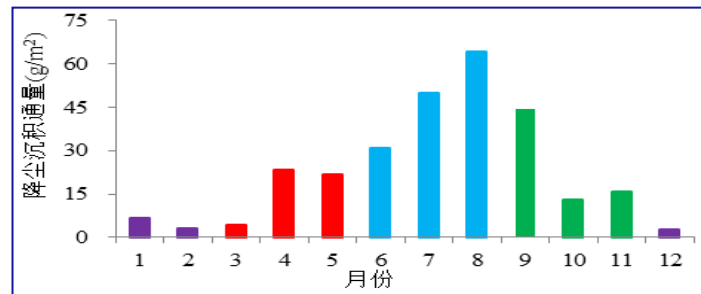
2、大气溶质氯沉降的变化特征

总溶质沉降量

- 固体物质沉降质量为 279.35 g/m^2
- 氯离子沉降质量为 1.33 g/m^2
- 季节特征：夏季>春季>秋季>冬季。

溶解性氯离子质量变化

- 降水中氯离子占总氯离子沉降量的86.5%。
- 降水中氯离子：夏季>春季>秋季>冬季。
- 降尘中氯离子：春季>秋季>夏季>冬季。

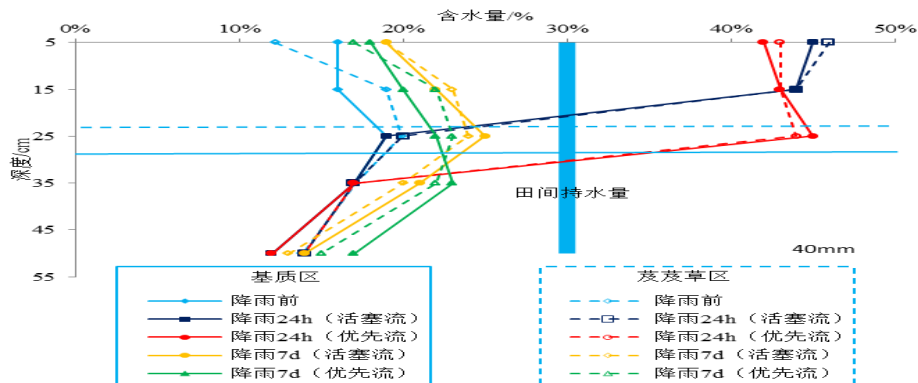




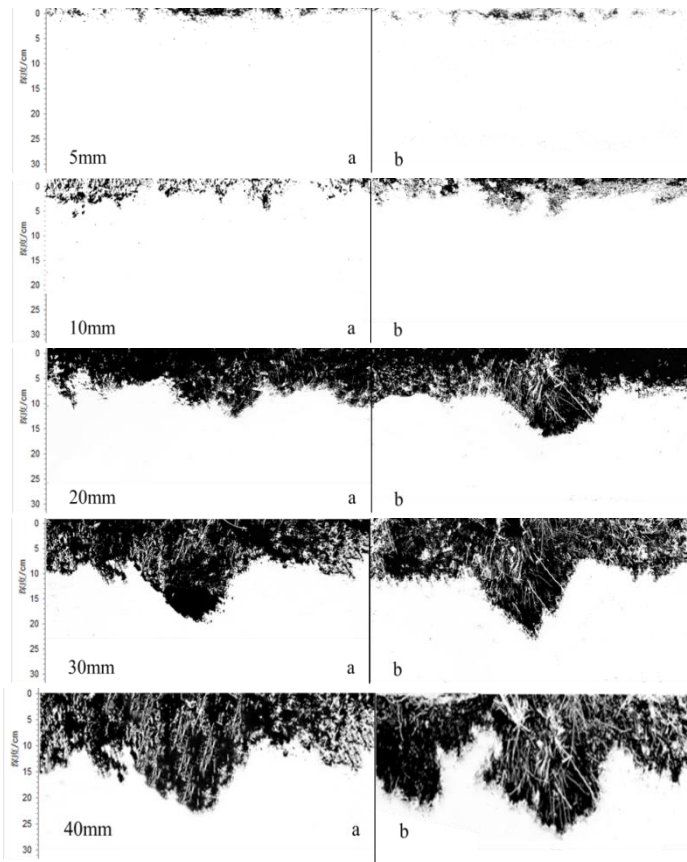
3、包气带水分时空变化特征及其运移规律

(1) 降雨模拟土壤水运移特征

- 不同降雨量土壤入渗
 - 降雨量增加，入渗深度增加，优先流明显；
 - 芨芨草斑块（根系）比基质区显著。
- 降雨后土壤含水量再分配特征（40 mm）
 - 24h→7d，表层降低、深层增加；
 - 芨芨草区域比基质区更容易产生优先流。



基质区 芨芨草区



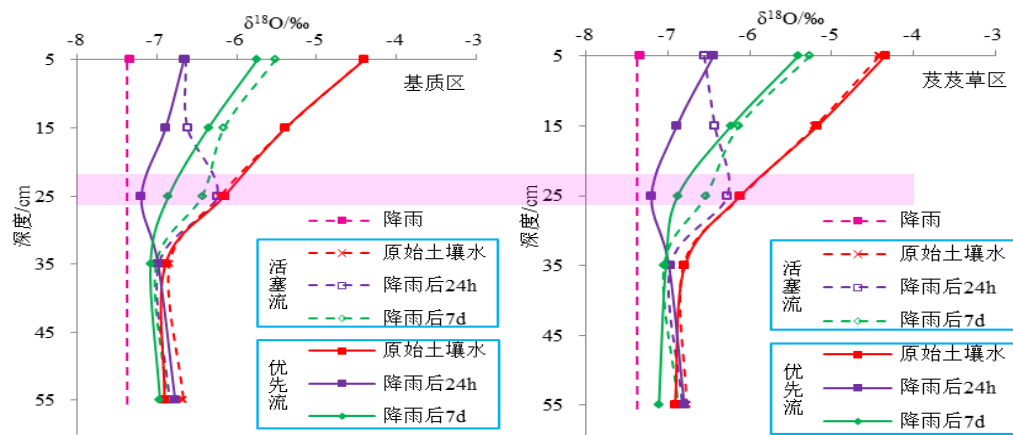


2、包气带水分时空变化特征及其运移规律

降雨后土壤水同位素特征 (40mm)

- 24 h后：优先流0~25 cm土壤水同位素较降雨前显著贫化；活塞流0~15 cm土壤水同位素较降雨前显著贫化；
- 7 d后：优先流0~25 cm、活塞流0~15 cm土壤水同位素较24 h后富集；优先流25~55 cm、活塞流25~35 cm土壤水同位素较降雨前显著贫化。

不同层位土壤水分随时间二次分配，表层土壤水受蒸发影响，同位素值富集显著。



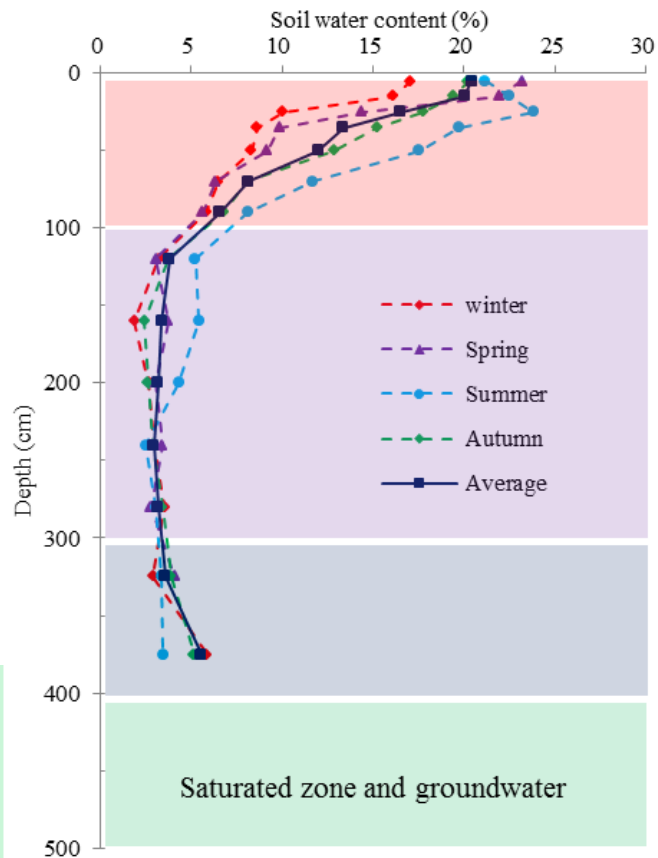


2、包气带水分时空变化特征及其运移规律

(2) 深剖面不同季节土壤水运移特征-土壤含水量

- 0~100 cm表层土壤水分较高，且由上至下含水量逐渐降低；
- 100~300 cm土壤含水量变化较小，处于较低状态；
- 300 cm以下土壤含水量受地下水影响较大，向下逐渐增加；
- 0~200 cm土壤水：夏季>秋季>春季>冬季。

表层土壤水受降水影响较大，深层土壤水受地下水影响；土壤水含水量存在季节变化特征。



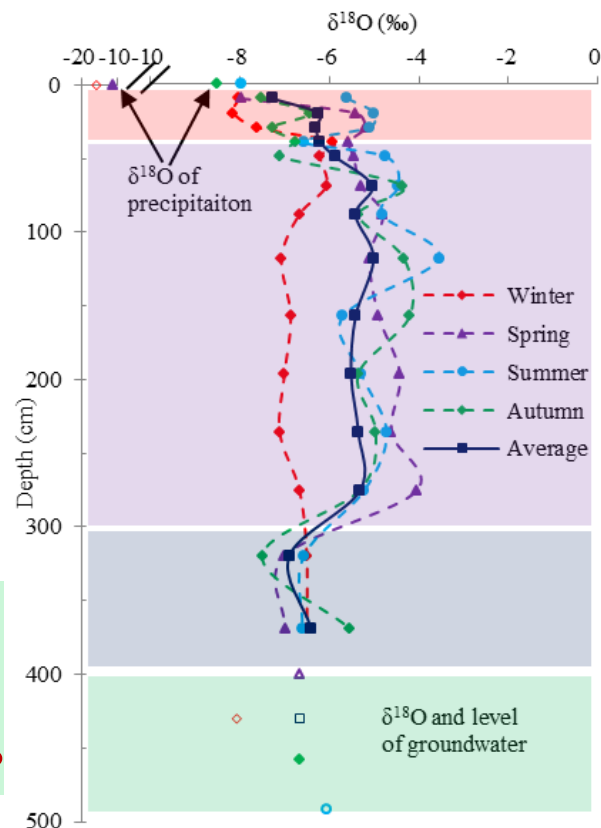


2、包气带水分时空变化特征及其运移规律

(2) 深剖面不同季节土壤水运移特征-土壤水同位素

- 0~40 cm表层土壤水受降水影响显著，土壤水同位素波动较大；40~300 cm相对稳定；300 cm以下土壤水与地下水存在水力联系；
- 2月份受季节性冻土作用，土壤水同位素较其它季节贫化；7月份降水较多，受优先流影响，不同层位土壤水同位素波动较大。

表层土壤水受降水影响，土壤水同位素变化复杂；
深层土壤水受地下水影响，土壤水同位素较为贫化。





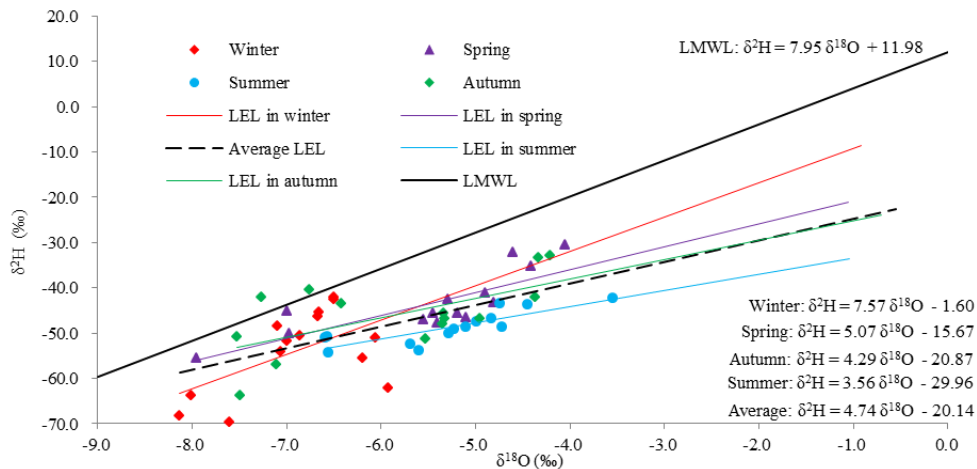
2、包气带水分时空变化特征及其运移规律

(2) 深剖面不同季节土壤水运移特征-土壤水蒸发线

- 土壤水同位素蒸发线 $\delta^2\text{H}=4.74\delta^{18}\text{O}-20.14$ ，斜率明显小于大气降水线；
- 分布在降水线的右下方，土壤水在入渗前经历蒸发。

□ 随深度增加，蒸发线斜率增加：

- ✓ 0~40cm： $\delta^2\text{H}=3.82^{18}\text{O}-31.05$ ；
- ✓ 40~100cm： $\delta^2\text{H}=4.49^{18}\text{O}-21.73$ ；
- ✓ 100~300cm： $\delta^2\text{H}=4.99^{18}\text{O}-27.15$ ；
- ✓ 300~400cm： $\delta^2\text{H}=5.37^{18}\text{O}-18.63$
- ✓ 地下水： $\delta^2\text{H}=5.50^{18}\text{O}-5.91$ 。



原因：随着深度增加土壤水蒸发分馏减弱；“较轻”的大降水事件渗透较深，“较重”的小降水事件渗透较浅。

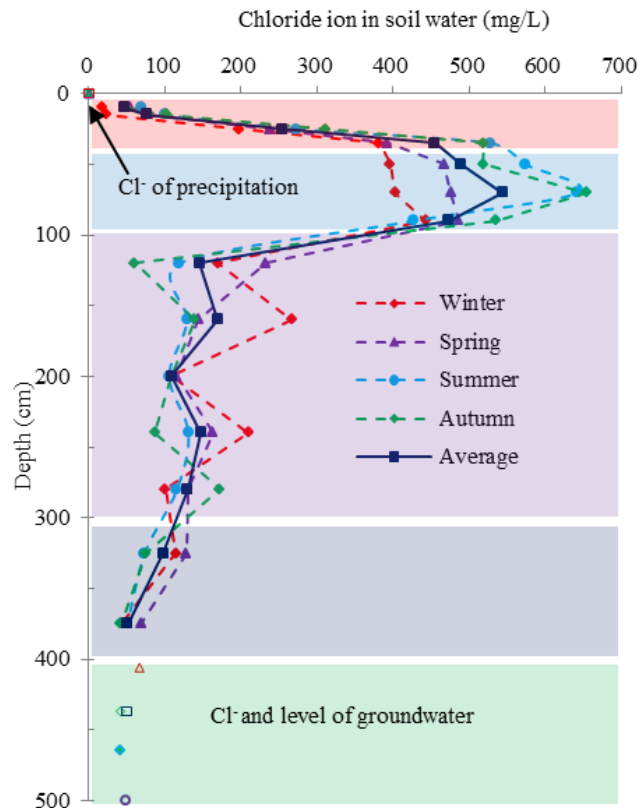


2、包气带水分时空变化特征及其运移规律

(2) 深剖面不同季节土壤水运移特征-氯离子

- ❑ 0~40 cm受降水影响，土壤水氯离子含量较低；
- ❑ 40~100 cm受根系吸水影响，氯离子含量显著增加；
- ❑ 100~300 cm氯离子变化稳定；
- ❑ 300 cm以下受地下水影响较大，向下逐渐减少。

表层氯离子含量受降水影响显著，根系层氯离子含量受植物根系吸水影响，明显富集；深部受地下水影响，含量较低。

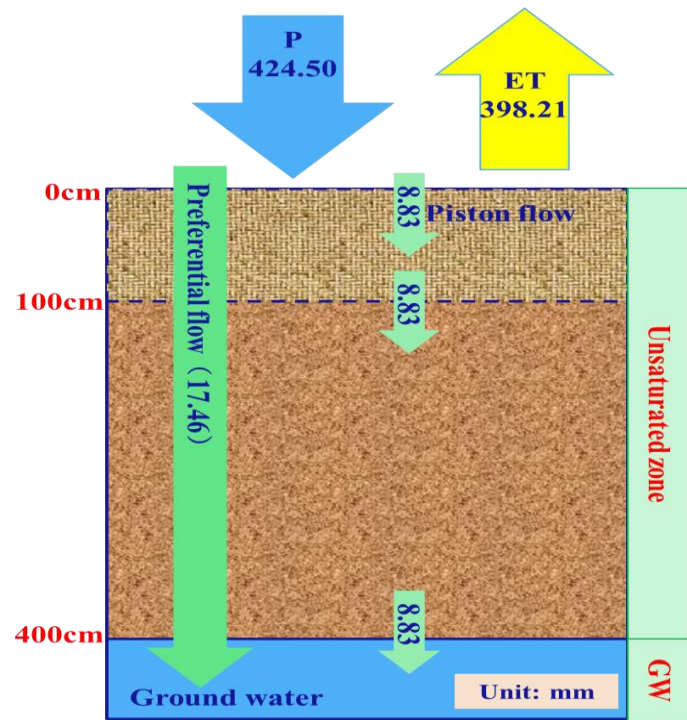




3、降水、包气带水及地下水的转化

- 降水对包气带水分的潜在入渗补给量为 **9.20 mm/a**，占本地大气降水量的**2.17%**。
- 降水对地下水的实际补给量为 **26.29 mm/a**，约占年降水量的**6.19%**。
- 优先流对地下水的补给比例占 **17.46 mm/a (66.4%)**，活塞流则为 **8.83 mm/a (33.6%)**；

优先流是该地区地下水的重要补给方式。



活塞流与优先流补给的概念模型



报告提纲

一

研究背景

二

研究方案

三

结果分析

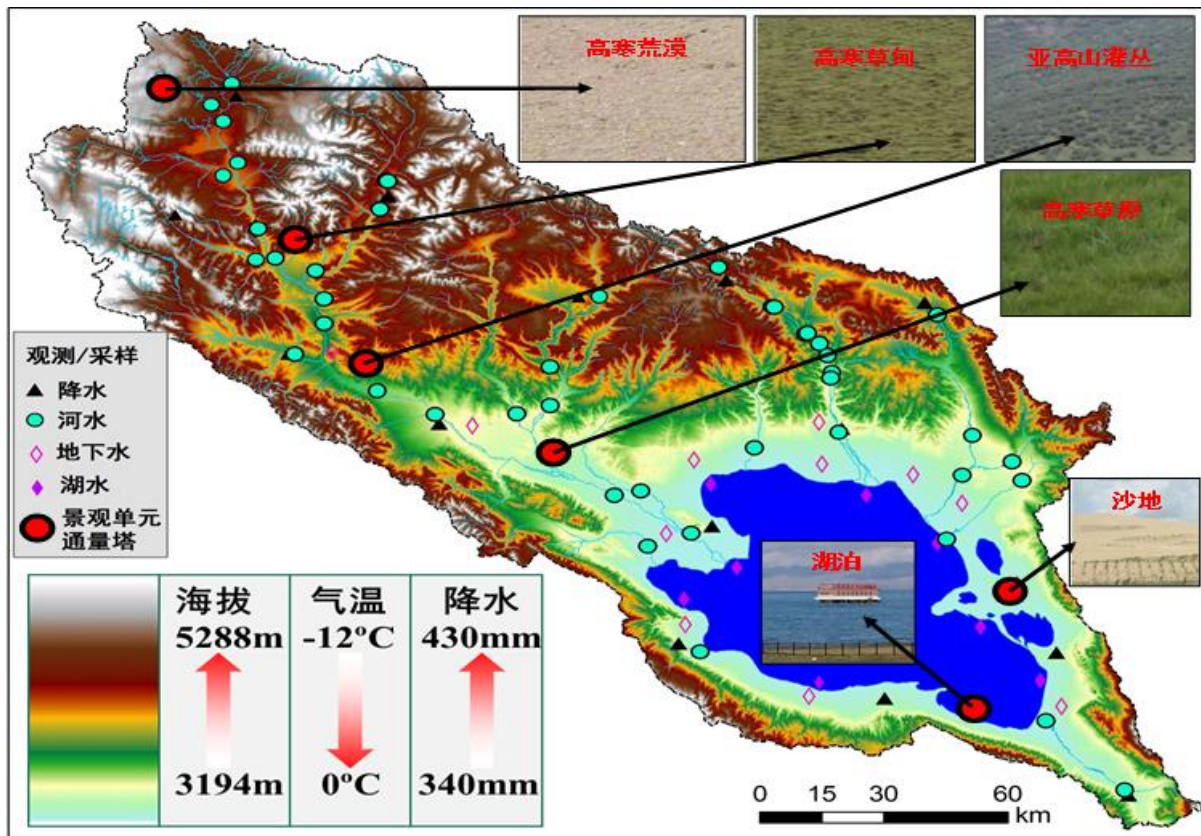
四

展望



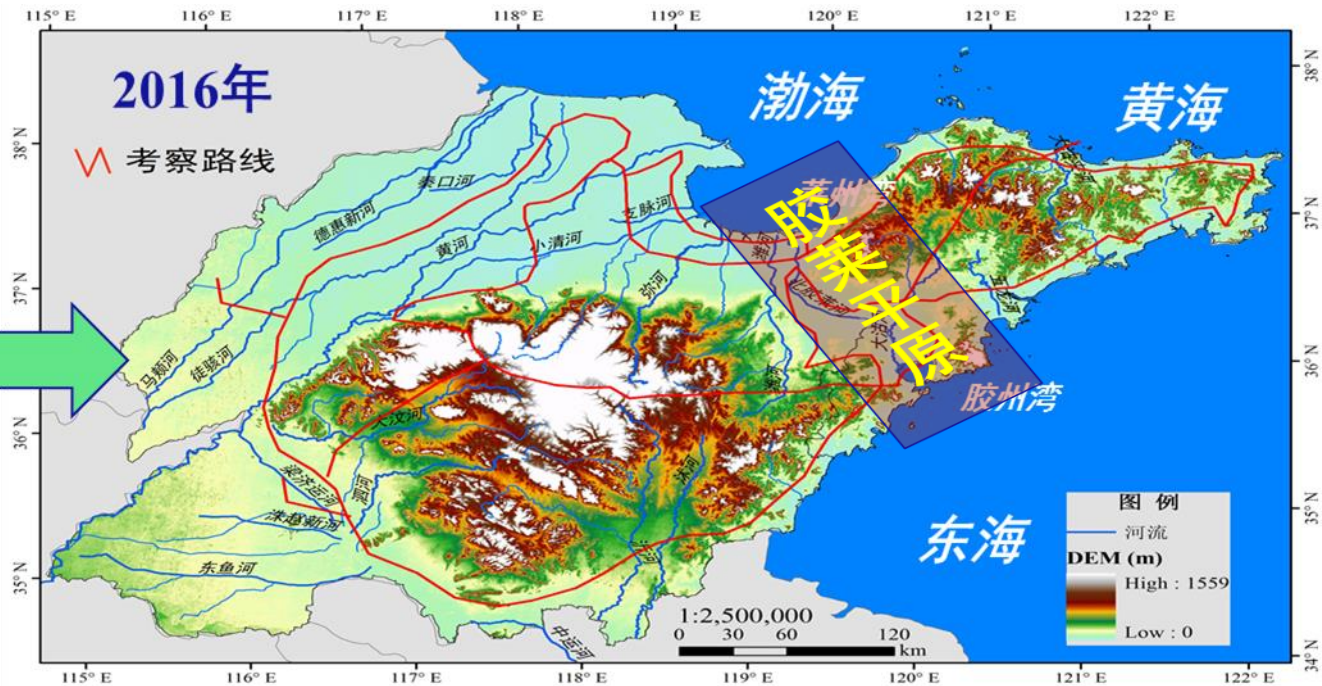
展望

在青海湖流域内开展高寒荒漠、高寒草甸、高山灌丛、沙地等景观单元或植被类型的包气带水分运移研究，完善高寒区域包气带水分运移研究。





新研究区：胶莱平原





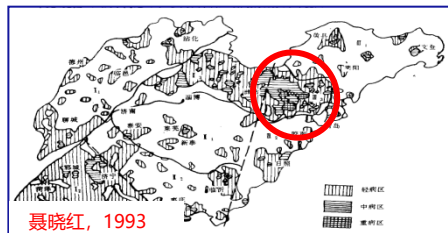
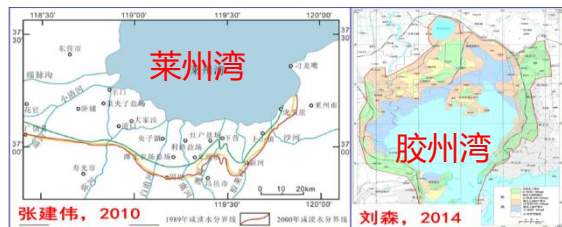
胶莱平原的重要性

- 🌸 胶莱古运河（1280-1724年）
- 🌸 两大海洋经济区过渡带
- 🌸 胶东与鲁西文化过渡带
- 🌸 山东省重要农耕区





胶莱平原生态环境问题突出

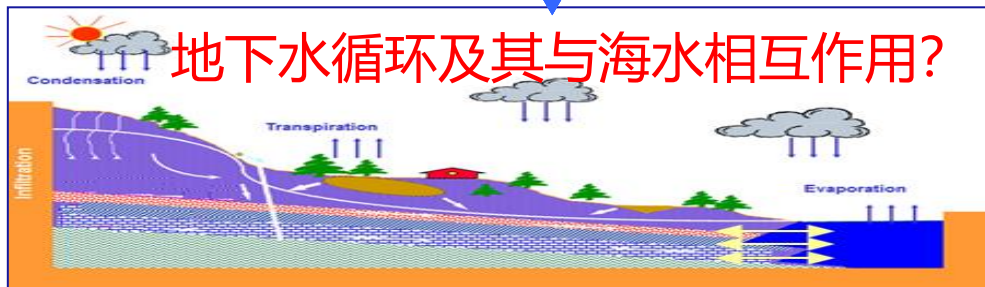


海水入侵

地面沉降

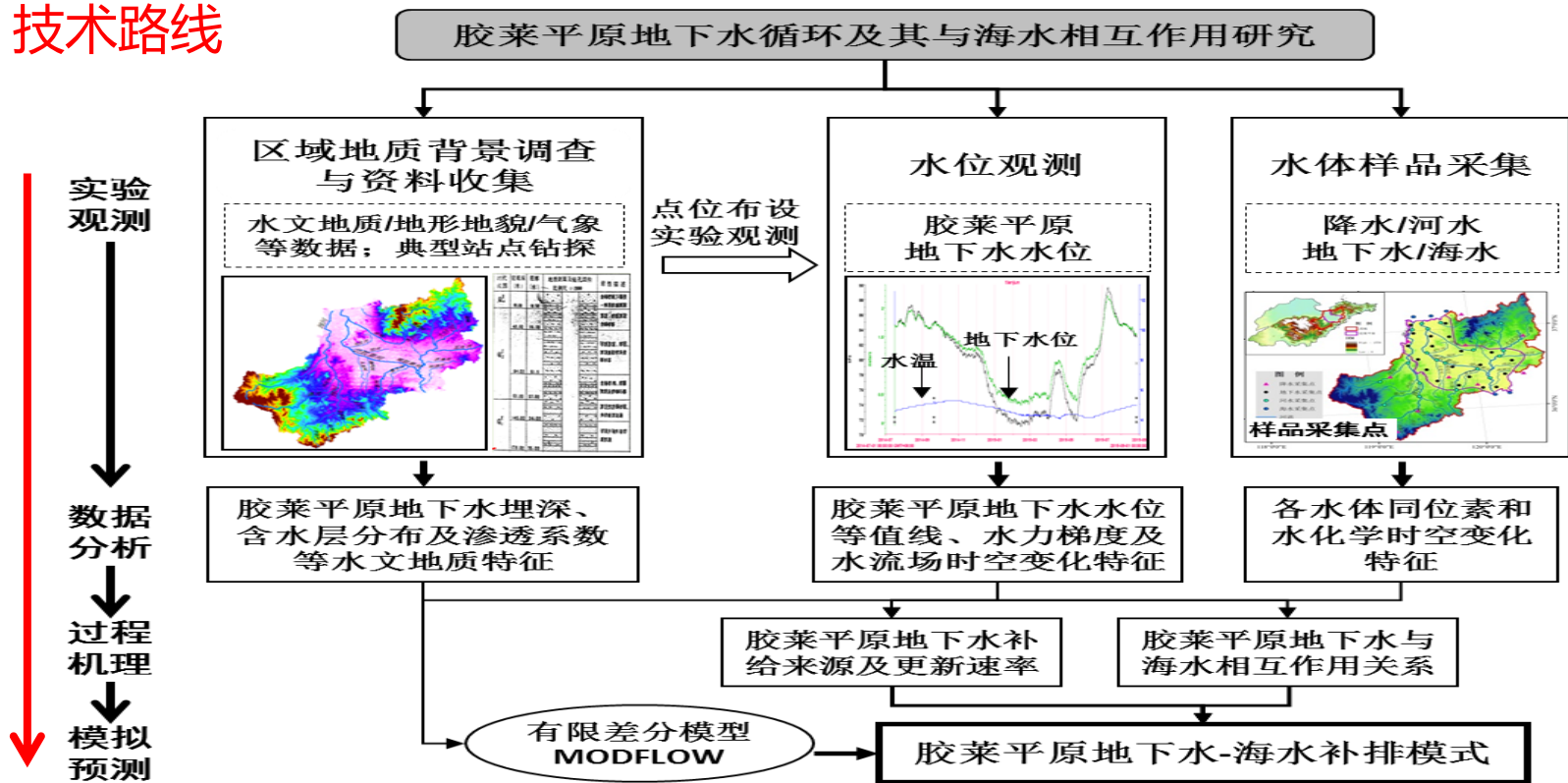
生态退化

地下水污染 (高氟)



目前针对胶莱平原地下水的相关研究局限于莱州湾、胶州湾或某一行政区范围内，缺乏从流域尺度上系统的研究。

技术路线



解决科学问题：

- (1) 胶莱平原地下水补给来源及更新速率，及与海水的相互作用规律；
- (2) 胶莱平原地下水补给循环模式及其影响因素。

敬请指正!

鲁东大学资源与环境工程学院

Baidu 百度

QQ: 330832002
微信: 18953511817
邮箱: cuibuli@163.com



第二届中国同位素水文学论坛（鲁东大学） 2021年9月烟台相聚！

