

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征	秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 PM _{2.5} 时空变化分析	刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制	黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征	邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成	李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征	王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征	王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征	李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响	斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N ₂ O 间接排放特征	田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 N ₂ O 浓度、释放通量与排放系数	王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例	彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ ¹⁸ O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例	吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析	刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响	廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价	张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律	郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响	周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化	王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析	江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响	王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱胞藻 (<i>Cylindrocapsa raciborskii</i>) 的分布特征及影响因子分析	雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸	尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果	兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能	顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性	刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应	王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制	王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程	刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响	高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的优化及其微生物的群落变迁	付昆明, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性	陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能	路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险	吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险	李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型神渣场土壤 As 污染特征及生态风险评价	刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系	辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响	李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响	柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响	马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系	乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解	刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO ₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征	唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价	许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力	刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年)总目录	(5740)
《环境科学》征订启事(5343) 《环境科学》征稿简则(5439) 信息(5595, 5619, 5638)	

典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 时空分布特征:以重庆市中梁山岩溶槽谷为例

吴韦, 蒋勇军*, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄

(西南大学地理科学学院, 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 为了揭示岩溶槽谷区土壤水氢氧同位素的时空分布特征, 以重庆市北碚区中梁山为研究基地, 于2017年5月和2017年9月收集降水及3种不同土地利用方式(耕地、草地和林地)不同深度的土壤水, 利用稳定同位素技术研究不同土地利用方式下0~15 cm、15~45 cm土壤剖面的土壤水氢氧同位素时空变化特征。结果表明:①土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的平均值分别为 $-50.0‰ \pm 33.6‰$ 和 $-7.9‰ \pm 4.3‰$, 其值均在大气降水线(LMWL)周围, 说明降水是该区土壤水的主要补给来源;②土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 具有明显的季节变化, 5月(土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的平均值 $-19.4‰ \pm 6.8‰$ 和 $-4.1‰ \pm 1.0‰$)>9月(土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的平均值 $-82.2‰ \pm 14.0‰$ 和 $-11.9‰ \pm 2.2‰$);③土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 在不同土地利用方式下没有表现出明显差异;④土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 随土壤深度呈梯度变化, 5月耕地、草地和林地土壤水稳定同位素以垂直递减趋势为主, 9月耕地和林地以递增趋势为主, 草地以递减的趋势为主。

关键词: 岩溶槽谷区; 土壤水; 氢氧同位素; 不同土地利用方式; 时空变化

中图分类号: X144; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5418-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201803145

Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountain, Chongqing City

WU Wei, JIANG Yong-jun*, JIA Ya-nan, PENG Xue-yi, DUAN Shi-hui, LIU Jiu-chan, WANG Zheng-xiong

(Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In this study, we analyzed the stable hydrogen and oxygen isotopes of precipitation and three different land use patterns (cultivated land, grass land, and forest land) at 0-15 cm and 15-45 cm in a karst ridge-trough area (Zhongliang Mountain, Beibei District, Chongqing) in May 2017 and September 2017 to investigate the spatial and temporal variation of stable isotopes in different soil profiles using the isotope tracer technique. The results show that: ① The average values of the soil water δD and $\delta^{18}O$ are $-50.0‰ \pm 33.6‰$ and $-7.9‰ \pm 4.3‰$, respectively, and all plot around the local meteoric water line (LMWL), indicating that precipitation is the main source of the soil water supply in this area. ② The seasonal variations of δD and $\delta^{18}O$ of the soil water are significant in different months of the rainy season, May ($-19.4‰ \pm 6.8‰$ and $-4.1‰ \pm 1.0‰$) > September ($-82.2‰ \pm 14.0‰$ and $-11.9‰ \pm 2.2‰$). ③ However, there is no significant difference in the soil water δD and $\delta^{18}O$ under different land use patterns. ④ The soil water δD and $\delta^{18}O$ change with soil depth gradients, which decrease along the depth in vertical direction for all types of soil land use in May but mainly increase/decrease in the cultivated land and woodland/grassland in September, respectively.

Key words: karst ridge-trough area; soil water; hydrogen and oxygen isotopes; different land use patterns; temporal and spatial variation

土壤水是土壤圈生命物质循环的重要载体以及作为水文循环中的“水库”对生态系统至关重要^[1]。土壤水是土壤内部化学、生物和物理过程不可缺少的介质, 同时也是植物吸收水分的重要来源, 对土壤肥力、土壤温度和通气状况产生重要的影响, 进而影响植物的产量和品质; 生态平衡会因土壤水分移动过程产生动态变化^[2,3]。西南岩溶地区生态环境脆弱, 薄且不连续的土壤和表层岩溶裂隙构成了双重孔隙介质引起土壤地表漏失, 养分地下流失^[4], 土壤保水能力差^[5], 且降水的时空分布不均匀, 导致该区地表水与地下水之间强烈的相互作用, 使得土壤水分特征比非岩溶区更难解释^[6,7]。

土壤水受多种环境因素影响, 如降水, 蒸发, 植被, 地形和土壤性质^[8~11]。但在岩溶区, 土壤和渗透性基岩空间分布不均匀, 导致水文过程更加复杂^[6,12,13]。因此探明岩溶区土壤水的时空分布特征对于了解土壤水的动态变化规律至关重要。

岩溶槽谷是岩溶区基本景观单位, 特别是在川东平行岭谷地区, 三叠系灰岩常出露于背斜轴部或

收稿日期: 2018-03-21; 修订日期: 2018-05-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502306); 国家自然科学基金项目(41472321)

作者简介: 吴韦(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶学与环境变化, E-mail: 892885160@qq.com

* 通信作者, E-mail: jiangyj@swu.edu.cn

两翼发育形成槽状岩溶谷地^[14]。槽谷内通常具有岩溶裂隙发育、土壤和渗透性基岩空间分布不均匀、地下水位低等特点。传统的物理方法和水文观测法,如水文和水文化学方法,不足以研究非均质岩溶地区的水文特征^[15-17]。传统方法也不能用于追踪非饱和区复杂流动条件下的水文模式。稳定的同位素方法能够收集不同土壤条件下的渗透、蒸发和蒸腾的信息^[7,15,18,19]。自 20 世纪 80 年代以来,稳定的同位素,如氘(D)和氧-18(^{18}O)已成为研究土壤水,溪流和泉水季节动态的有力工具。在岩溶地区,目前使用稳定同位素法研究土壤水主要集中在岩溶洼地、山坡以及岩溶小流域等区域。Chen 等^[20]在广西环江县岩溶洼地地区研究发现浅层土壤水全年受降水补给,水流速度快,土壤水停留时间短;深层土壤水与之相反,即补给类型属于季节性补给,水流速度慢,土壤水的停留时间超过一年。Liu 等^[21]在贵州茂兰国家级自然保护区研究岩溶草坡土壤水分运动特征,发现垂直渗透是山坡土壤水的主要流动方式。Yang 等^[22]在广西环江县的一个灌木坡上研究土壤水 δD 的空间分布特征,发现土壤水 δD 具有较弱的空间依赖性,且随机变化。Hu 等^[7]在广西环江县内研究岩溶小流域中土壤水和表层岩溶水的季节性补给和平均停留时间,发现地下水和地表水主要补给发生在雨季,土壤水比地表岩溶泉有更长的平均停留时间。对于岩溶洼地类似的岩溶槽谷区研究较匮乏,岩溶槽谷区具有土壤层较厚、地形相对平坦,人口分布相对密集等特点。选取重庆市北碚区中梁山岩溶槽谷区为研究区,该区因地下水位低,槽上库存的水资源已不能满足居民生活、灌溉用水,水资源供需矛盾日益突出,研究槽上土壤水分特征有重要作用。于 2017 年 5 月 13 日和 2017 年 9 月 16 日选择 10 个样本点监测土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$,借此探究岩溶槽谷区不同土地利用方式下土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的时空分布特征,通过发现土壤水运动规律,以期揭示岩溶槽谷区土壤水分状况提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

观音峡背斜龙凤槽谷区位于重庆市北碚区境内,属于川东平行岭谷华蓥山帚状褶皱东南沿部分,属于中亚热带湿润季风气候,具有春早、夏长、秋短、冬迟的特点,年均温度 $18^{\circ}C$,年均降水量

1 000 mm 左右。背斜轴向为 NNE 走向,核部的碳酸盐岩被两侧的非可溶岩地层包围,背斜核部发育有东、西两个 NNE 走向的溶蚀槽谷,形成“一山三岭两槽”的“笔架”式地形,海拔高程 480 ~ 700 m。观音峡背斜北、南部分别被嘉陵江、长江切割,嘉陵江以南海拔逐渐升高,至中梁镇附近,为整个研究区(图 1),面积 38 km^2 。核部为 T_{ij} 地层,向两翼地层逐渐过渡为 T_{ij} 、 T_{2l} 及 T_{3xj} 。背斜西翼陡东翼缓,轴面东倾。因此,溶蚀形成的东槽较宽西槽较窄,本研究样本点均分布于较宽的东槽。研究区土壤发育的地质背景是三叠纪嘉陵江组的岩溶角砾岩白云质灰岩,土层厚薄不均。土地利用类型主要是:耕地、草地、林地。

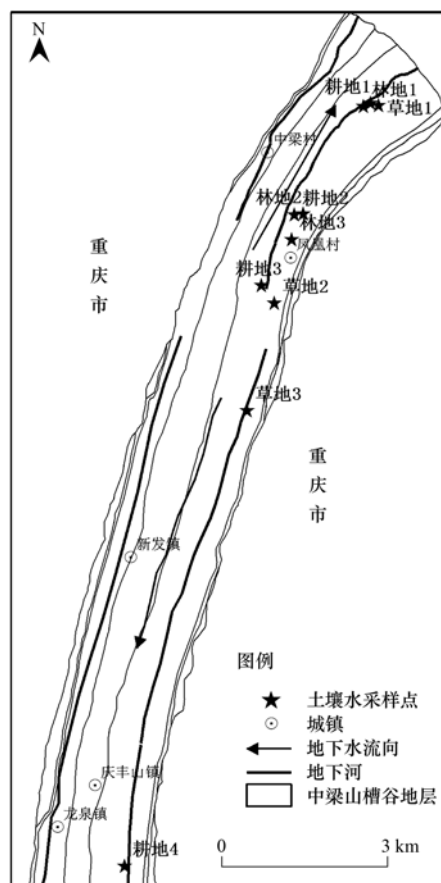


图 1 样地位置示意

Fig. 1 Map showing the location of the study plots

1.2 研究方法

1.2.1 样地及样品

在中梁山岩溶槽谷选择典型的土地利用方式(耕地、草地和林地)。于 2017 年 5 月和 2017 年 9 月在研究区内随机选取 4 个耕地、3 个草地和 3 个林地,共 10 个标准样地,用于采集不同土壤深度的土壤水样品。

1.2.2 样品的收集与室内分析

大气降水:降水样品收集使用长沙湘蓝科学仪器股份有限公司生产的 APS-3A 型降水降尘自动采样器,测量精度下限为 0.1 mm,开始降水时滑板会自动打开,雨后 5 min 内会自动关闭,降水会自动保存在 3~5℃ 的冰箱中,每隔 8 d 收集一次,但尽量每场雨后收集一次降水样品,于样品瓶上标明时间、地点,用 Parafilm 封口膜密封,放置在车载低温保鲜冰包中带回实验室,放置在冰箱中冷藏(4℃)至分析.降水量用天津气象仪器厂有限公司生产的 DAVIS Vantage Pro2 型自动气象监测站进行实时监测,精度为 15 min 记录一次数据,雨量检测下限为 0.2 mm.仪器均安装在凤凰村村委会楼顶,每月取样后对仪器进行清扫并及时除去动物排泄物和枯枝落叶等.在这项研究中,收集和测定了 20 个降水样本,5、6 月收集的降水样本数量占整个样本数量的 70%.

土壤水:在研究区内 3 种典型土地利用方式下(耕地、草地和林地)各随机选择样本点挖出一个约 50 cm 深的土壤剖面,安装简易的接收土壤水的装置(图 2),该装置由 1 000 cm² 正方形聚乙烯托盘,1 L 聚乙烯瓶,连接托盘和瓶子的导管以及取样管组成.将托盘水平地插入到挖掘的土壤坑侧壁中,以拦截来自上部完整土柱的水流.被拦截的水通过重力进入瓶子.取样管从瓶底延伸到表面.挖掘后的土壤被回填到土坑中,并在安装完成后压实.分别安装在每个土壤剖面的 0~15 cm、15~45 cm 土壤深度处,收集土壤水,并将其装在 10 mL 的棕色漩口瓶中,用 Parafilm 封口膜密封,放置在冰箱中冷藏(4℃)至分析.简易装置收集的土壤水只能当托盘上方的土壤饱和时才能收集.

所有土壤水样在中国地质科学院岩溶地质研究所动力学重点实验室完成,分析仪器采用离轴整合积分腔光谱输出技术(OA2ICOS)的液态水稳定同位素分析仪(LWIA-24-d, Los Gatos Research, USA).根据以下等式,相对于维也纳平均海洋水标准(V-SMOW),常规 δ 符号计算同位素浓度:

$$\delta(\text{‰}) = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{v-smow}} - 1)] \times 10^3 \quad (1)$$

式中, R_{sample} 为样品的同位素比率, $R_{\text{v-smow}}$ 为标准物质的同位素比率. $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 测试结果均以 V-SMOW 标准给出, $\delta^{18}\text{O}$ 的精度为 $\pm 0.2\text{‰}$; δD 的精度为 $\pm 0.6\text{‰}$.

1.2.3 数据分析

土壤水和降水稳定同位素数据统计描述分析在

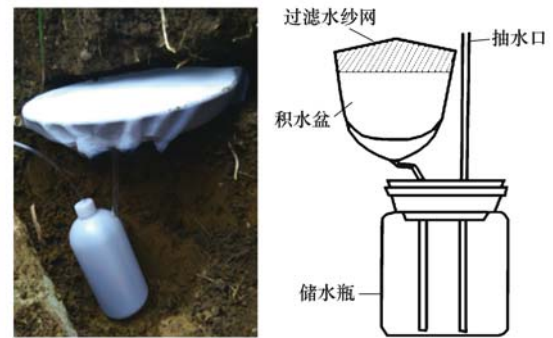


图 2 实验装置示意

Fig. 2 Soil water collecting device

SPSS 24.0 和 Excel 2010 中完成,对不同土地利用方式下、不同土壤深度土壤水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 进行方差分析,统计分析水平为 $P > 0.05$. 土壤水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 线性拟合分析、作图和降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的时间变化特征分析在 Origin 9.0 中完成.

2 结果与分析

2.1 降水稳定同位素特征

因研究区地理环境差异、水汽输送的距离、以及研究区气象要素的变化使降水的氢氧同位素组成和线性关系显示出较大的变化^[23]. 各研究区降水线的斜率和截距相较于 Yurtsever 等^[24] 修正 Craig^[25] ($\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$) 的全球降水线 (GMWL) ($\delta\text{D} = 8.17 \delta^{18}\text{O} + 10.56$) 有不同程度的偏差,这反映水汽来源及之后的混合、蒸发和凝结的不平衡程度.重庆市中梁山岩溶槽谷区气象站安装于 2017 年 4 月底,至 2017 年 9 月底共收集 20 个降水样本.降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 组成变化较大,分别为 $-101.2\text{‰} \sim -12.4\text{‰}$ 和 $-15.0\text{‰} \sim -1.2\text{‰}$. 降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 最大值出现在 5 月,最小值在 9 月.此外,大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在明显的月份变化,雨季前期(5~6 月)氧同位素明显富集偏正,平均值为 $-6.7\text{‰} \pm 3.3\text{‰}$,雨季后期(7~9 月)降水氧同位素有明显的下降趋势,平均值为 $-12.7\text{‰} \pm 2.9\text{‰}$. 因 5~6 月降水主要来自于本地蒸发和西风带来的来源于内陆的大陆气团,因此大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正,7~9 月水汽主要来源于印度洋的阿拉伯海与孟加拉湾沿岸以及西太平洋的南海,这两个区域的水汽在输送至重庆市北碚区的过程中经过不断地“淋洗”,气团中所剩水汽的 $\delta^{18}\text{O}$ 降低,从而导致降水中的稳定同位素值偏负^[26].

根据测得的中梁山岩溶槽谷区 2017 年 5~9 月降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值,计算出该地的大气降水线

(LMWL) 为: $\delta D = 7.58 \delta^{18}O + 11.46$ ($R^2 = 0.98$, $n = 20$), 见图 3, 相较于我国西南地区的大气降水线 ($\delta D = 7.96 \delta^{18}O + 9.52$)^[27] 而言, 中梁山大气降水线的斜率和截距与其相似, 但与本区域他人研究相比: 北碚区 ($\delta D = 8.19 \delta^{18}O + 17.39$)^[28]、($\delta D = 8.82 \delta^{18}O + 18.97$)^[29], 其斜率和截距明显偏小. 可能是降水样品在 2017 年 5~9 月集中收集, 在此期间大气温度高, 降水受蒸发作用影响明显, 引起降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 二次蒸发分馏, 且未收集一个完整水文年的降水数据, 引起该区大气降水线的斜率较低, 截距随斜率而减小, 因而本研究建立的大气降水线与本区他人建立的大气降水线有差异.

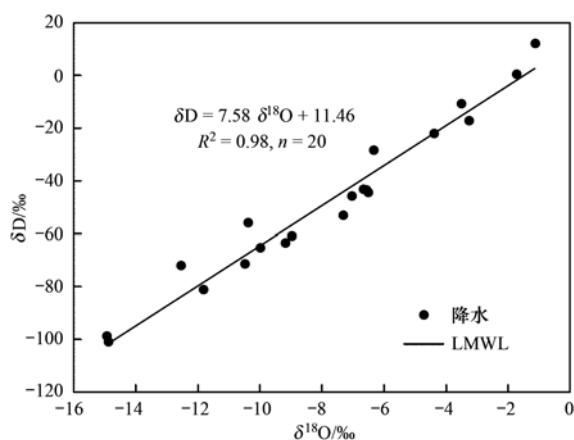


图 3 中梁山大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 线性关系

Fig. 3 Linear relationship between δD and $\delta^{18}O$ of atmospheric precipitation in Zhongliang Mountain

2.2 中梁山岩溶槽谷区土壤水稳定同位素总体特征

对岩溶槽谷区 3 种不同土地利用方式 (耕地、草地和林地) 下 39 个 (因 9 月耕地 4 中 0~15 cm 土壤水的 δD 未测出, 所以样品个数为 39) 土壤水样的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值进行综合分析得到其线性关系: $\delta D = 7.72 \delta^{18}O + 11.32$ ($R^2 = 0.98$, $n = 39$), 土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化范围分别是: $-106.8‰ \sim -8.4‰$ 和 $-15.1‰ \sim -2.2‰$; 平均值分别为: $-50.0‰ \pm 33.6‰$ 和 $-7.9‰ \pm 4.3‰$. 与降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 范围 ($-101.2‰ \sim 12.4‰$ 和 $-15.0‰ \sim -1.2‰$) 相比, 土壤水氢氧同位素的最小值小于降水氢氧同位素的最小值, 说明该降水事件在进入土壤水之前, 土壤中还保留该降水事件之前的水分, 并与之混合^[30], 这部分土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 在不同降水事件、蒸发、下渗和混合等影响因素下变得复杂^[18]. 土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 分布在该区大气降水线周围 (图 4).

2.2.1 土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 不同月份变化特征

如图 5 所示, 5 月土壤水氢氧同位素线性关系

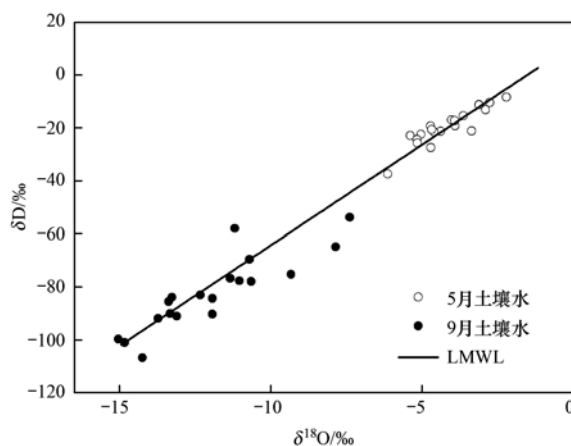


图 4 土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 与大气降水线的关系

Fig. 4 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ in soil water and the local meteoric water line

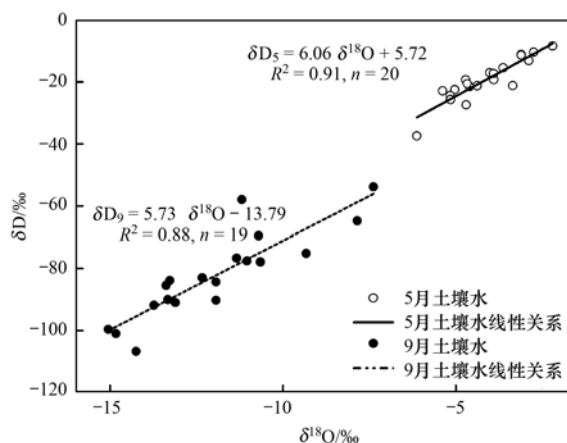


图 5 岩溶槽谷区 5 月、9 月土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 线性关系

Fig. 5 Linear relationship between δD and $\delta^{18}O$ in soil water in karst troughs in May and September

为: $\delta D_5 = 6.06 \delta^{18}O + 5.72$ ($R^2 = 0.91$, $n = 20$), 土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化范围分别是: $-37.4‰ \sim -8.4‰$ 和 $-6.1‰ \sim -2.2‰$, 平均值分别为: $-19.4‰ \pm 6.8‰$ 和 $-4.1‰ \pm 1.0‰$; 9 月: $\delta D_9 = 5.73 \delta^{18}O - 13.79$ ($R^2 = 0.88$, $n = 19$), 土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化范围分别是: $-106.8‰ \sim -53.9‰$ 和 $-15.1‰ \sim -7.4‰$; 平均值分别为: $-82.2‰ \pm 14.0‰$ 和 $-11.9‰ \pm 2.2‰$. 5 月土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 线性方程的斜率和截距均大于 9 月, 说明 9 月土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的分馏效率大于 5 月. 可能是由于: 5 月 (169.4 mm) 降水量小于 9 月 (187.6 mm), 说明 9 月空气中可能富集水汽分子略高于 5 月, 5 月大气月平均温度 ($20.45^\circ C$) 低于 9 月月平均温度 ($21.49^\circ C$), 综上, 由于 9 月大气温度高和空气中富集更多的水汽分子会促进降水的分馏^[31], 因此可能影响土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值; 从 5 月和 9 月土壤

水同位素的标准偏差也可以推断出 9 月土壤水稳定同位素分馏效应大. 对土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 进行方差分析, 发现土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 呈现与降水相同的变化趋势, 5 月偏重, 9 月偏轻.

2.2.2 土壤水稳定同位素水平分布特征

δD 与 $\delta^{18}O$ 相比更易受到外界温度、地形、下垫面等的影响^[32], 因此选择 $\delta^{18}O$ 研究土壤水同位素特征. 岩溶区虽然土壤生境复杂多变, 但是相同的土地利用方式下, 土壤水分的氢氧同位素组成可能无显著差异^[33]. 中梁山岩溶槽谷区 0~15 cm、15~45 cm 土壤水 $\delta^{18}O$ 水平分布如图 6 所示, 3 种不同土地

利用方式下 0~15 cm 处土壤水 $\delta^{18}O$ 值波动较大, 由表 1 可知 5 月变幅为 -3.2‰ (-5.4‰~-2.2‰), 9 月变幅为 -7.2‰ (-15.1‰~-7.9‰). 土壤水 $\delta^{18}O$ 平均值: 耕地 1 为 7.1‰、耕地 2 为 -8.1‰、耕地 3 为 -10.1‰、耕地 4 为 -7.4‰、草地 1 为 -6.1‰、草地 2 为 -8.4‰、草地 3 为 -8.5‰、林地 1 为 -7.1‰、林地 2 为 -9.0‰、林地 3 为 -7.2‰. 15~45 cm 处土壤水 $\delta^{18}O$ 与浅层相比则变幅较小相对稳定, 5 月变幅为 -2.2‰, 9 月变幅为 -6.4‰. 经单因素方差分析各样地之间土壤水 $\delta^{18}O$ 并无显著差异.

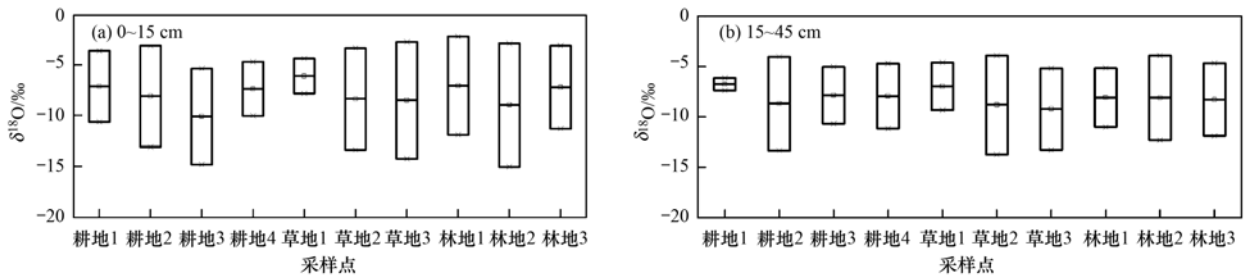


图 6 2017 年 5 月和 9 月不同土地利用方式下土壤水 $\delta^{18}O$ 值箱线图

Fig. 6 Soil water $\delta^{18}O$ box plots for different land use patterns in May and September 2017

表 1 不同土地利用方式下 0~15 cm 和 15~45 cm 处土壤水 $\delta^{18}O$ 最大值、最小值、平均值和变幅

Table 1 Maximum, minimum, average, and variation of the soil water $\delta^{18}O$ at 0-15 cm and 15-45 cm for different land use patterns

月份	土层深度/cm	项目	土壤水 $\delta^{18}O$ /‰		
			耕地	草地	林地
5	0~15	最大值	-3.1	-2.8	-2.2
		最小值	-5.4	-4.4	-3.1
		平均值	-4.2 ± 1.0	-3.5 ± 0.8	-2.7 ± 0.5
		变幅	-2.3	-1.6	-0.9
	15~45	最大值	-4.0	-3.9	-3.9
		最小值	-6.1	-5.2	-5.2
		平均值	-5.0 ± 0.9	-4.6 ± 0.6	-4.6 ± 0.6
		变幅	-2.1	-1.3	-1.2
9	0~15	最大值	-10.1	-7.9	-11.3
		最小值	-14.8	-14.3	-15.1
		平均值	-12.2 ± 2.2	-11.8 ± 3.5	-12.8 ± 2.0
		变幅	-4.8	-6.4	-3.7
	15~45	最大值	-7.4	-9.3	-11.0
		最小值	-13.3	-13.7	-12.3
		平均值	-10.7 ± 2.5	-12.1 ± 2.4	-11.8 ± 0.7
		变幅	-6.0	-4.4	-1.3

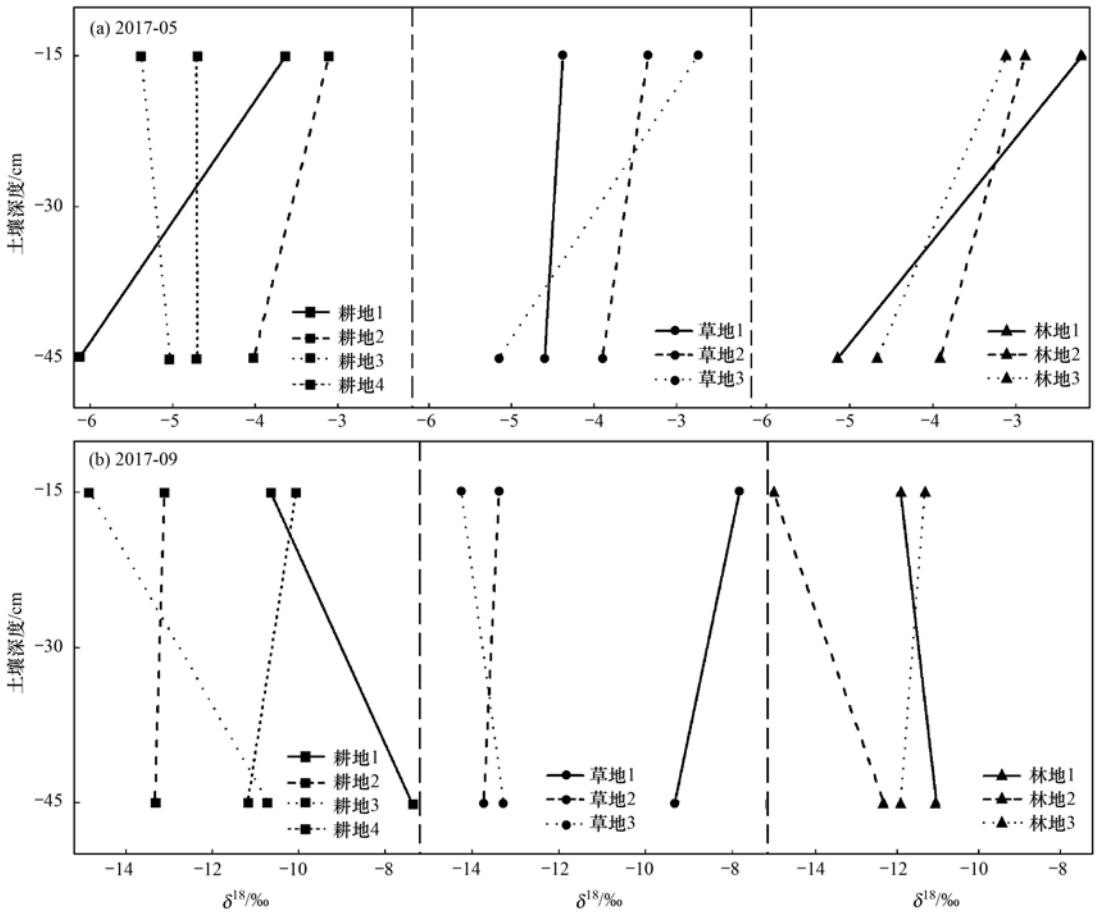
2.2.3 土壤水稳定同位素垂直剖面特征

2017 年的 5 月和 9 月土壤水 $\delta^{18}O$ 的垂直剖面如图 7 所示, 林地和草地 0~15 cm 处土壤水 $\delta^{18}O$ 值变化幅度大于 15~45 cm 处土壤水 $\delta^{18}O$ 值, 这是因为表层更易受到外界环境的影响. 据研究发现, 0~15 cm 处受全年降水补给, 而深层土壤是以季节性补给为主^[20], 同理因为蒸发始于大气界面, 逐渐向

下运动, 表层的土壤水 $\delta^{18}O$ 更易受蒸发作用的影响^[34]. 耕地不同于林地和草地, 在人类农业活动的扰动下改变土壤孔隙结构, 降水通过农作物根系、虫洞等快速下渗, 使土壤水 $\delta^{18}O$ 上下层并无明显规律, 但总体上耕地土壤水 $\delta^{18}O$ 剖面呈现 5 月垂直递减, 9 月垂直递增的趋势. 综上, 5 月土壤水 $\delta^{18}O$ 呈现递减的垂直变化趋势, 并且在 15~45 cm 处草地

和林地土壤水 $\delta^{18}O$ 值趋于一致，其中草地 1、草地 2 和草地 3 土壤水 $\delta^{18}O$ 值从 0 ~ 15 cm 的 -4.4‰、-3.4‰、-2.8‰ 减少到 15 ~ 45 cm 的 -4.6‰、-3.9‰、-5.2‰，林地 1、2、3 由 -2.2‰、-2.9‰、-3.1‰ 减少至 -5.6‰、-3.9‰、-4.7‰；9 月耕地和林地土壤水 $\delta^{18}O$ 值呈现随土壤深度增加的趋势，草地以递减的趋势为主，耕地整体递增了 1.5‰，林地整体递增 1.0‰，草地整体减

少 -0.3‰。对相同或不同月份相同土地利用方式、不同土地利用方式以及不同层次的土壤水 $\delta^{18}O$ 值在 SPSS 24.0 进行显著性检验，统计分析水平为 $P > 0.05$ ，说明这些数据之间无显著性差异。但其中 5 月和 9 月耕地土壤水 $\delta^{18}O$ 值的统计分析水平为 $P \approx 0.06$ ，说明该数据之间的差异比其它土地利用方式之间大，因采集土壤水的深度较浅，农作翻地对耕地的扰动大。



(a) 2017 年 5 月土壤水 $\delta^{18}O$, (b) 2017 年 9 月土壤水 $\delta^{18}O$

图 7 不同土地利用方式下土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值垂向变化特征

Fig. 7 Vertical variation of the δD and $\delta^{18}O$ values of soil water for different land use patterns

3 讨论

3.1 降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 与降水量之间的关系

据研究表明，季风区降水氢氧同位素与降水量表现出反向相关的降水量效应^[35~37]。我国西南地区季风气候显著，水汽输送至本区域过程中水汽中 D 和 ^{18}O 的重同位素不断损耗^[38]，导致降水中的氢氧同位素偏负，在收集的 20 次降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的最小值分别是 -101.2‰ 和 -15.0‰，对应的降水量是 50 mm，并不是研究期间最大降水量。将降水

的 δD 和 $\delta^{18}O$ 与降水量进行线性回归分析和显著性检验得到以下的公式：

$$\delta D = -0.59P + 14.67$$
$$(R^2 = 0.18, n = 19, P > 0.05) \quad (2)$$

$$\delta^{18}O = -0.13P + 13.24$$
$$(R^2 = 0.11, n = 19, P > 0.05) \quad (3)$$

式中， P 为降水量，单位为 mm。因气象站损坏，收集的 20 场降水中 2017 年 8 月 29 日的降水量无数据，所以公式中的 n 为 19。式(2)和(3)中的 R^2 值分别为 0.18 和 0.11，降水量与降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值的

线性关系中都未表现出“降水量效应”,也未通过显著性差异检验。因为实验收集的是次降水,更易受到如大气稳定性、湿度等气象因素的影响^[39],与李廷勇等^[39]的研究不太一样,其结论为有较弱的“降水量效应”。可能是因为在中梁山收集的降水样本在寄送的过程中存在不同程度的影响,某些降水氢氧同位素数据丢失;本研究选择的时段短,李廷勇等^[39]收集了3 a的降水样本,更具有代表性。

3.2 土壤水与大气降水稳定同位素关系

据研究,中国西南地区主要受印度洋和太平洋上季风影响^[40],但是水汽从海洋输送到内陆的距离远近不同,在水汽输送的过程中也会遇到许多不确定因素,如地形、局部小气候等^[23],不同区域的大气降水线的斜率和截距相对于全球降水线有不同程度的偏差。根据收集的20场降水建立本研究区的大气降水线(LMWL): $\delta D = 7.58 \delta^{18}O + 11.46$ ($R^2 = 0.98$, $n = 20$),与本区他人研究有所不同^[30,31],但研究区土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 还是分布在该区大气降水线周围(图4),土壤 δD 和 $\delta^{18}O$ 值的变化趋势与降水类似,降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 与土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间存在很强的线性关系($R^2 = 0.98$),加之研究区地下水埋藏深,说明大气降水是该地区土壤水的主要补给来源,但土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 线性关系的斜率略大于降水($\delta D = 7.58 \delta^{18}O + 11.46$)的斜率,造成此现象的原因可能是:降水渗透到土壤中,不同土地利用方式下有不同程度的植被覆盖度,减少土壤水蒸发分馏损失,而降水主要在雨季高温时期收集,增加了其分馏损失的几率。也可能由于使用简易装置收集土壤水的方法,简易装置只能在托盘上方的土壤饱和时收集渗滤液,因此,一旦托盘上的土壤完全或部分饱和,特别是优先流动将更容易滴入托盘,水滴入托盘后,托盘上方的空隙会阻断土壤毛细管在蒸发作用下传输土壤水至土壤表层,减少蒸发分馏损失。综上,说明在此阶段土壤水与降水相比,蒸发分馏作用小,相对稳定。

3.3 土壤水稳定同位素时空分布特征

3.3.1 土壤水稳定同位素时间变化特征

土壤水的稳定同位素不仅存在明显的季节变化特征,在不同的月份也会有很大的变化^[21]。本研究区5月土壤水稳定同位素值偏正于9月,与西南地区许多学者的研究一致^[33,41];但就5月和9月土壤水稳定同位素和降水稳定同位素均值进行比较与张小娟等^[30]在元阳梯田的研究相反。本研究区5月和9月土壤水稳定同位素平均值与降水 δD 和 $\delta^{18}O$

的平均值 -48.3‰ 和 -7.9‰ 相比,5月土壤水稳定同位素组成相对丰富,9月偏负。降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值比5月土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值更负,可能由于测定的土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值是当前降水事件与已经通过蒸发改变的现有土壤水的混合水,这些土壤水也可能源于不同的时间和空间,而在理想的状态下降水量大大超过了前期的土壤水分时,土壤水分的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值可能与入土降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值相同,但在这些样点上未观察到这种可能性;本区该研究阶段不存在温度效应和降水量效应($P > 0.05$),因此高温期降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 并不一定高于土壤水稳定同位素值。据前人研究发现在雨季来临前冬春季北碚区降水的氢氧同位素值偏正于雨季^[42],5月土壤水中可能保留前期降水稳定同位素值的痕迹。还可能是由于土壤水样品是按月采集,降水进入土壤中的收集装置会放置一段时间,对土壤水样有一定的影响。9月土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 平均值比降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 平均值更负,因降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 取5~9月平均值,且9月大气降水稳定同位素值明显降低(图6),从而影响土壤水中的稳定同位素值。而9月土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 与采样前的降水 δD 和 $\delta^{18}O$ (-101.2‰ 和 -14.9‰)比较,与5月类似即降水稳定同位素更负。

3.3.2 土壤水稳定同位素空间分布特征

在西南地区Yang等^[22]利用半方差法和高斯模型对灌木坡土壤水 δD 的空间分布特征进行了详细的研究,发现土壤水 δD 水平分布无显著差异,具有较弱的空间依赖性,与当地降水 δD 关系密切。邢丹等^[33]研究黔西北石漠化桑园土壤水稳定同位素时空分布特征发现其空间分布无显著差异。本研究区土壤水稳定同位素的分布特征也无显著差异,但也有一定的特征。

水平方向上,0~15 cm处土壤水 $\delta^{18}O$ 值波动较大,15~45 cm处土壤水 $\delta^{18}O$ 与浅层相比变幅小且相对稳定。2017年5月,3种不同土地利用方式下0~15 cm和15~45 cm这两个层次的土壤水 $\delta^{18}O$ 偏正于9月对应层次土壤水 $\delta^{18}O$ 值,9月份土壤水 $\delta^{18}O$ 成为研究期间最小值。主要原因可能是由于降水 $\delta^{18}O$ 季节变化所致,9月降水 $\delta^{18}O$ 月平均值 -12.9‰ 比5月降水 $\delta^{18}O$ 月平均值 -6.4‰ 偏负(图8)。因为大气降水是该区土壤水主要的补给来源,降水的稳定同位素值在某种程度上影响土壤水稳定同位素值。由表1可知在0~15 cm和15~45 cm土壤深度上,林地土壤水 $\delta^{18}O$ 波动最小,草地次之,耕地波动幅度稍大。可能是不同植被类型蒸腾作用决定其需

水量,影响其下伏土壤水分入渗方式.林地植被覆盖度大,冠层在阻挡降水补给的同时,林下温度较低会减少林下蒸发,与草地和耕地相比受人类活动影响小,外界条件相对一致.经研究发现林地样地间土质相对一致,砂粒和黏粒所占比例相似(未发表数据).草地的植被覆盖度居于林地和耕地之间,受外界降水补给和蒸发影响相对较大,所以土壤水稳定同位素值也有一定的波动.耕地受人类农事活动扰动大,各样本点受不同程度的扰动导致土壤空隙增大,更易受外界环境条件影响,如蒸发作用和降水作用.

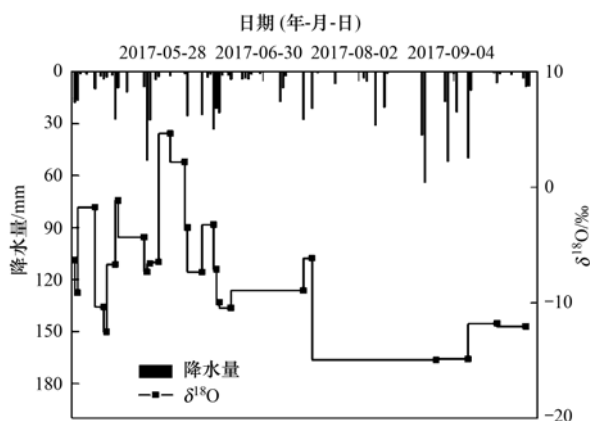


图8 降水量和降水 $\delta^{18}O$ 分布

Fig. 8 Amount of precipitation and precipitation $\delta^{18}O$ distribution map

垂直方向上,与Yang等^[22]的研究基本一致,5月土壤水稳定同位素呈垂直递减趋势,9月以垂直递增为主.蒸发的净效应是在土壤表面附近富集重同位素.5月3种土地利用方式基本显示了上部0~15 cm土壤水分 $\delta^{18}O$ 的增加,表明蒸发发生.因为蒸发始于土壤大气界面,逐渐向下运动,表层的土壤水 $\delta^{18}O$ 值比深层 $\delta^{18}O$ 值更为偏正^[34].然而,这些浓缩趋势可能由于几个过程的结果而发生,包括蒸发、降水的同位素组成的变化和新旧水的混合.虽然蒸发得到广泛认可,但笔者认为,降水量输入和混合中同位素组成的变化也是控制这些地点土壤水分同位素组成的重要因素.实际上,由于降水,已经证实上层土壤中存在偏负的稳同位素^[34,43].水从土壤向大气的扩散不断地被频繁的降水补给中断,土壤上层水分的连续混合将会导致这些值偏负.9月取样前经历了连续的降水事件,从而导致耕地和林地浅层(0~15 cm)土壤水 $\delta^{18}O$ 偏负,草地表层土壤水 $\delta^{18}O$ 偏正可能是植被覆盖度小,温度升高快促进蒸发所致.

4 结论

(1)中梁山岩溶槽谷区2017年5~9月大气降水线(LMWL)方程: $\delta D = 7.58 \delta^{18}O + 11.46$ ($R^2 = 0.98$, $n = 20$),斜率小于全球降水线,截距略高,说明在此期间当地大气降水线受本地小气候影响大.

(2)3种不同土地利用方式(耕地、草地和林地)下,土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化范围为: $-106.8‰ \sim -8.4‰$ 和 $-15.1‰ \sim -2.2‰$,土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 分布在大气降水线周围.

(3)3种不同土地利用方式(耕地、草地和林地)下,5月土壤水氢氧同位素线性关系: $\delta D_5 = 6.06 \delta^{18}O + 5.72$ ($R^2 = 0.91$, $n = 20$),9月: $\delta D_9 = 5.73 \delta^{18}O - 13.79$ ($R^2 = 0.88$, $n = 19$);5月土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 方程的斜率和截距大于9月,说明9月土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的分馏效应略大于5月.土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 呈现与降水有相同的变化,5月偏重,9月偏轻.

(4)岩溶槽谷区0~15 cm处土壤水 $\delta^{18}O$ 值波动较大,15~45 cm处土壤水 $\delta^{18}O$ 与浅层相比则变幅较小相对稳定.林地土壤水 $\delta^{18}O$ 波动最小,草地次之,耕地波动幅度稍大.经单因素方差分析各样地之间土壤水 $\delta^{18}O$ 并无显著差异.

(5)土壤水稳定同位素随土壤深度呈梯度变化,5月耕地、草地和林地土壤水稳定同位素均以垂直递减为主,9月耕地和林地以垂直递增趋势为主,草地以递减的趋势为主.蒸发的净效应是在土壤表面附近富集重同位素,导致表层的土壤水 $\delta^{18}O$ 值比深层 $\delta^{18}O$ 值更为偏正.由于降水,水从土壤向大气的扩散不断地被频繁的降水补给中断,土壤上层水分的连续混合将会导致这些值偏负.

参考文献:

- [1] Yang Y G, Fu B J. Soil water migration in the unsaturated zone of semiarid region in China from isotope evidence[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, **21**(3): 1757-1767.
- [2] Koeniger P, Gaj M, Beyer M, et al. Review on soil water isotope-based groundwater recharge estimations[J]. Hydrological Processes, 2016, **30**(16): 2817-2834.
- [3] Busari M A, Salako F K, Tuniz C, et al. Estimation of soil water evaporative loss after tillage operation using the stable isotope technique[J]. International Agrophysics, 2013, **27**(3): 257-264.
- [4] 袁道先. 全球岩溶生态系统对比: 科学目标和执行计划[J]. 地球科学进展, 2001, **16**(4): 461-466.
Yuan D X. World correlation of karst ecosystem: objectives and implementation plan[J]. Advance in Earth Sciences, 2001, **16**

- (4): 461-466.
- [5] 陈洪松, 王克林. 西南喀斯特山区土壤水分研究[J]. 农业现代化研究, 2008, **29**(6): 734-738.
- Chen H S, Wang K L. Soil water research in karst mountain areas of southwest China [J]. Research of Agricultural Modernization, 2008, **29**(6): 734-738.
- [6] Ries F, Lange J, Schmidt S, *et al.* Recharge estimation and soil moisture dynamics in a Mediterranean, semi-arid karst region [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, **19**(3): 1439-1456.
- [7] Hu K, Chen H S, Nie Y P, *et al.* Seasonal recharge and mean residence times of soil and epikarst water in a small karst catchment of southwest China[J]. Scientific Reports, 2015, **5**: 10215.
- [8] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas [J]. Journal of Hydrology, 1998, **210**(1-4): 259-281.
- [9] Lee K S, Kim J M, Lee D R, *et al.* Analysis of water movement through an unsaturated soil zone in Jeju Island, Korea using stable oxygen and hydrogen isotopes[J]. Journal of Hydrology, 2007, **345**(3-4): 199-211.
- [10] Mueller M H, Weingartner R, Alewell C. Importance of vegetation, topography and flow paths for water transit times of base flow in alpine headwater catchments [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, **17**(4): 1661-1679.
- [11] Mueller M H, Alaoui A, Kuells C, *et al.* Tracking water pathways in steep hillslopes by $\delta^{18}\text{O}$ depth profiles of soil water [J]. Journal of Hydrology, 2014, **519**: 340-352.
- [12] Chen H S, Zhang W, Wang K L, *et al.* Soil moisture dynamics under different land uses on karst hillslope in northwest Guangxi, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, **61**(6): 1105-1111.
- [13] Yang J, Nie Y P, Chen H S, *et al.* Hydraulic properties of karst fractures filled with soils and regolith materials; implication for their ecohydrological functions[J]. Geoderma, 2016, **276**: 93-101.
- [14] 袁道先. 岩溶学词典[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- Yuan D X. Glossary of karstology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988.
- [15] Song X F, Wang S Q, Xiao G Q, *et al.* A study of soil water movement combining soil water potential with stable isotopes at two sites of shallow groundwater areas in the North China Plain [J]. Hydrological Processes, 2009, **23**(9): 1376-1388.
- [16] White W B. Karst hydrology: recent developments and open questions[J]. Engineering Geology, 2002, **65**(2-3): 85-105.
- [17] Williams P W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review[J]. International Journal of Speleology, 2008, **37**(1): 1-10.
- [18] Gazis C, Feng X H. A stable isotope study of soil water: evidence for mixing and preferential flow paths[J]. Geoderma, 2004, **119**(1-2): 97-111.
- [19] Robertson J A, Gazis C A. An oxygen isotope study of seasonal trends in soil water fluxes at two sites along a climate gradient in Washington state (USA) [J]. Journal of Hydrology, 2006, **328**(1-2): 375-387.
- [20] Chen H S, Hu K, Nie Y P, *et al.* Analysis of soil water movement inside a footslope and a depression in a karst catchment, Southwest China [J]. Scientific Reports, 2017, **7**: 2544.
- [21] Liu W, Wang S J, Luo W J, *et al.* Characteristics of soil water movement in a grass slope in a karst peak-cluster region, China [J]. Hydrological Processes, 2017, **31**(6): 1331-1348.
- [22] Yang J, Chen H S, Nie Y P, *et al.* Spatial variability of shallow soil moisture and its stable isotope values on a karst hillslope[J]. Geoderma, 2016, **264**: 61-70.
- [23] 吴华武, 章新平, 关华德, 等. 不同水汽来源对湖南长沙地区降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响[J]. 自然资源学报, 2012, **27**(8): 1404-1414.
- Wu H W, Zhang X P, Guan H D, *et al.* Influences of different moisture sources on δD and $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in Changsha, Hunan Province [J]. Journal of Natural Resources, 2012, **27**(8): 1404-1414.
- [24] Yurtsever Y, Gat J R. Atmospheric waters [A]. In: Gat JR, Gonfiantini R (Eds.). Stable Isotope Hydrology. Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle [C]. Vienna: IAEA, 1981. 103-142.
- [25] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [26] 胡茵. 重庆市北碚区大气降水中的氢氧同位素特征和水汽来源分析[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- Hu H. The characteristics of the hydrogen and oxygen isotope in precipitation in Chongqing and the analysis of moisture sources [D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [27] 张洪平, 刘恩凯, 王东升, 等. 中国大气降水稳定同位素组成及影响因素 [A]. 见: 中国地质科学院水文地质工程地质研究所文集(7) [C]. 北京: 中国地质学会, 1991. 10.
- [28] 胡茵, 王建力. 重庆市 2013 年 10-12 月大气降水中氢氧同位素特征及水汽来源分析[J]. 中国岩溶, 2015, **34**(3): 247-253.
- Hu H, Wang J L. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation from October to December 2013 in Chongqing and analysis of moisture sources [J]. Carsologica Sinica, 2015, **34**(3): 247-253.
- [29] 刘梦娇, 王勇, 张耀华, 等. 中国西南季风区不同水体稳定同位素特征分析——以重庆市北碚区为例[J]. 中国岩溶, 2015, **34**(5): 486-494.
- Liu M J, Wang Y, Zhang Y H, *et al.* Variation characteristics of stable isotopes in different water bodies in Southwestern China monsoon area—a case study of Beibei District, Chongqing [J]. Carsologica Sinica, 2015, **34**(5): 486-494.
- [30] 张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 等. 元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2102-2108.
- Zhang X J, Song W F, Wu J K, *et al.* Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of soil water in the water source area of Yuanyang Terrace [J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 2102-2108.
- [31] 黄一民, 章新平, 唐方雨, 等. 长沙大气降水中稳定同位素变化及过量氘指示水汽来源[J]. 自然资源学报, 2013, **28**(11): 1945-1954.
- Huang Y M, Zhang X P, Tang F Y, *et al.* Variations of precipitation stable isotope and vapor origins revealed by deuterium excess in Changsha [J]. Journal of Natural Resources, 2013, **28**(11): 1945-1954.

- [32] 邢星, 陈辉, 朱建佳, 等. 柴达木盆地诺木洪地区 5 种优势荒漠植物水分来源[J]. 生态学报, 2014, **34**(21): 6277-6286.
Xing X, Chen H, Zhu J J, *et al.* Water sources of five dominant desert plant species in Nuomuhong area of Qaidam Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(21): 6277-6286.
- [33] 邢丹, 肖玖军, 王晓红, 等. 黔西北石漠化桑园土壤水稳定同位素的时空变化特征[J]. 西南农业学报, 2017, **30**(3): 639-644.
Xing D, Xiao J J, Wang X H, *et al.* Spatial and temporal variation characteristics of stable isotopes in soil water of stony desertification Mulberry Field in Northwestern Guizhou[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, **30**(3): 639-644.
- [34] Hsieh J C C, Chadwick O A, Kelly E F, *et al.* Oxygen isotopic composition of soil water: quantifying evaporation and transpiration[J]. *Geoderma*, 1998, **82**(1-3): 269-293.
- [35] 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. 水科学进展, 2006, **17**(5): 738-747.
Zhang Y H, Wu Y Q, Wen X H, *et al.* Application of environmental isotopes in water cycle[J]. *Advances in Water Science*, 2006, **17**(5): 738-747.
- [36] Yamanaka T, Tsujimura M, Oyunbaatar D, *et al.* Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for the atmospheric water cycle[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, **333**(1): 21-34.
- [37] Rietti-Shati M, Yam R, Karlen W, *et al.* Stable isotope composition of tropical high-altitude fresh-waters on Mt. Kenya, Equatorial East Africa[J]. *Chemical Geology*, 2000, **166**(3-4): 341-350.
- [38] 黄天明, 聂中青, 袁利娟. 西部降水氢氧稳定同位素温度及地理效应[J]. 干旱区资源与环境, 2008, **22**(8): 76-81.
Huang T M, Nie Z Q, Yuan L J. Temperature and geographical effects of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in west of China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, **22**(8): 76-81.
- [39] 李廷勇, 李红春, 沈川洲, 等. 2006~2008 年重庆大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 特征初步分析[J]. 水科学进展, 2010, **21**(6): 757-764.
Li T Y, Li H C, Shen C Z, *et al.* Study on the δD and $\delta^{18}O$ characteristics of meteoric precipitation during 2006-2008 in Chongqing, China[J]. *Advances in Water Science*, 2010, **21**(6): 757-764.
- [40] 柳艳菊, 丁一汇, 赵南. 1998 年南海季风爆发时期中尺度对流系统的研究: I 中尺度对流系统发生发展的大尺度条件[J]. 气象学报, 2005, **63**(4): 431-442.
Liu Y J, Ding Y H, Zhao N, *et al.* A study on the meso-scale convective systems during summer monsoon onset over the south China sea in 1998: I analysis of large-scale fields for occurrence and development of meso-scale convective systems[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, **63**(4): 431-442.
- [41] 刘伟, 王世杰, 罗维均, 等. 贵州荔波喀斯特与非喀斯特地区土壤水运移的对比研究[J]. 地球与环境, 2011, **39**(2): 137-149.
Liu W, Wang S J, Luo W J, *et al.* Comparative research on soil water movement between karst and non-karst plots in Libo County of Guizhou Province, China[J]. *Earth and Environment*, 2011, **39**(2): 137-149.
- [42] 刘梦娇. 重庆市北碚区不同水体稳定同位素特征及其气候指示意义[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
Liu M J. Variation characteristics of stable isotopes in different water bodies and its implication for climate in Chongqing China[D]. Chongqing: Southwest University, 2016.
- [43] Wan H, Liu W G. An isotope study ($\delta^{18}O$ and δD) of water movements on the Loess Plateau of China in arid and semiarid climates[J]. *Ecological Engineering*, 2016, **93**: 226-233.

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta	 HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer	 SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City	 WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir	 ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding	 YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City	 WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region	 LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field	 BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region	 QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios	 TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)