

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.7

第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)
基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟	谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)
郑州市 PM _{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析	杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)
能见度与 PM _{2.5} 浓度关系及其分布特征	王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)
基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征	白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)
太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源	李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)
办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征	王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)
南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征	张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)
黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征	张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)
基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析	王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)
李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响	徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)
水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价	王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)
银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价	田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)
人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例	谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)
漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析	唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)
三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析	付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)
降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响	翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)
绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征	童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)
微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析	刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)
钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性	张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)
基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用	唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)
N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水	于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)
Cu ²⁺ 对以 NO ₃ ⁻ 为电子受体反硝化过程的影响	买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)
CANON 中试反应器启动及性能优化	孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)
好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响	徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)
有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响	刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)
不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响	吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)
ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性	张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)
在线 NaClO 反洗对倒置 A ² O-MBR 系统微生物群落的影响	王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)
基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价	袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)
北京市清水与再生水协同利用优化模型	张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)
N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除	柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)
北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存	周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)
贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险	杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)
紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征	程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)
四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响	陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)
热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归	李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)
鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响	武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)
宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制	王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)
石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)
磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度	湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)
会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较	贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)
湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析	蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)
改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)
重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应	韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)
不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异	彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)
添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N ₂ O 排放影响	孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)
渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)
不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征	鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)
西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征	廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)
生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响	李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)
《环境科学》征订启事 (3194)	《环境科学》征稿简则 (3222)
信息 (3256, 3284, 3323)	

黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征

张荷惠子¹, 于坤霞^{1*}, 李占斌^{1,2}, 李鹏^{1,3}, 赵宾华¹, 柯浩成¹, 蒋凯鑫¹

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 3. 旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710048)

摘要: 研究黄土丘陵沟壑区不同水体间同位素特征及水体转化关系, 可以更好了解黄土丘陵沟壑区水循环特征, 为评价区域环境、气候、生态建设和水资源形成机制提供依据。通过野外采集 2017 年整年生态建设治理条件良好的非园沟研究区降水、河水及浅层地下水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 日及月平均数据及相关气象资料, 运用稳定同位素技术, 分析了不同水体中稳定氢氧同位素的组成关系、影响因子及时空变化, 结合二端元混合模型揭示了研究区不同水体中稳定同位素间转化特征。结果显示: 河水氘盈余参数在观测期间内呈现出随海拔升高而增大的趋势, 河水 $\delta^{18}O$ 值随着距河源距离的增大而富集, 随着高度的递增而降低; 气温、风速、相对湿度和降水量对大气降水氢氧同位素值均影响显著; 河水在非汛期表现为降水和浅层地下水补给河水, 比例分别为 46% 和 54%, 在汛期为河水和降水补给浅层地下水, 比例分别为 60% 和 40%。表明研究区“降水-河水-浅层地下水”间具有良好转化关系, 生态建设措施的实施对小流域不同水体转化产生了一定影响。通过以上结果可为流域水资源开发保护及流域生态水文过程研究提供帮助, 为建立黄土丘陵沟壑区流域水循环模型提供依据。

关键词: 同位素; 转化比例; 氘盈余; 降水; 非园沟

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3030-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811014

Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau

ZHANG He-hui-zi¹, YU Kun-xia^{1*}, LI Zhan-bin^{1,2}, LI Peng^{1,3}, ZHAO Bin-hua¹, KE Hao-cheng¹, JIANG Kai-xin¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulic in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on Loess Plateau, Yangling 712100, China; 3. Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048, China)

Abstract: Studying the isotope characteristics and water body transformation relationships among different water bodies in the hilly and gully region of the Loess Plateau can provide a theoretical foundation for evaluating regional climate, ecology, and water resources. In this study, daily and monthly averaged δD and $\delta^{18}O$ in precipitation, river water, and shallow groundwater were measured in 2017 in the Jiuyuanguou watershed, which has a good ecological condition. The compositional relationship between the stable hydrogen and oxygen isotopes in difference water bodies was explored, the influence factors and spatio-temporal variation of $\delta^{18}O$ in precipitation and river water were analyzed, and the stable isotope conversion ratios between different water bodies in the study area were calculated using the two-terminal mixed model. The main conclusions of the study are as follows: the d -excess of river water showed an increasing trend with elevation during the observation period; the $\delta^{18}O$ of river water was enriched with increasing distance from the river source and decreased with increasing altitude; temperature, wind speed, and relative humidity had significant effects on the hydrogen and oxygen isotopes of precipitation; precipitation and shallow groundwater replenish the river during the non-flood period, the proportions of which were 46% and 54%, respectively; and during the flood season, the shallow groundwater is replenished by river water and precipitation, the proportions were 60% and 40%, respectively. These results indicate that there is a good conversion relationship between “precipitation-river-shallow groundwater” in the study area. The implementation of soil and water conservation measures has had some influence on the conversion of different water bodies in small watersheds. The results provide a basis for the establishment of water cycle models for hilly and gully regions of the Loess Plateau.

Key words: isotopes; conversion ratio; d -excess; precipitation; Jiuyuanguou

黄土高原丘陵沟壑区地处我国半湿润向干旱荒漠的过渡地带, 生态环境脆弱、气候干旱少雨且水土流失严重。作为独特的汇水单元, 其水文循环特征对区域水资源的赋存形式和分布特征起着重要作用, 并且随着近年来大面积的生态建设措施(如退耕还草、淤地坝及水库建设)的实施, 研究区下垫面情况已经发生了显著变化^[1]。

环境同位素技术作为当前研究流域水文工作的

有效工具, 能够反映来自不同水汽来源地的水体在水汽输送过程中产生的不同程度的同位素分馏作用, 并对外界环境变化做出灵敏响应^[2]。故可以通

收稿日期: 2018-11-02; 修订日期: 2019-02-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402407); 国家自然科学基金项目(51779204); 陕西省技术创新引导专项(2017CGZH-HJ-06)

作者简介: 张荷惠子(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持与生态水文方面, E-mail: zhanghehuizi@qq.com

* 通信作者, E-mail: yukunxia@126.com

过研究水体的氢、氧同位素组成变化来示踪水体的来源、影响因子以及不同水体间的相互转化关系^[3]。目前不同水体中氢氧稳定同位素因水汽来源及蒸发分馏所导致的差异性得到重视,被广泛应用于不同水体示踪研究中^[4,5],如肖可等^[6]研究了藏南干旱地区湖泊及地热水体的 ^{18}O 变化特征,陈新明等^[7]分析了长江干流江水受大陆及高程效应等因素的影响及其氢氧同位素和氡盈余参数的空间变化规律,董国强等^[8]研究了那曲流域降水、河水及湖水稳定同位素的时空分布特征,姚天次等^[9]在岳麓山周边地区研究了降水、地表水、浅层土壤水及浅层地下水间的混合交换作用,分析了 $\delta^{18}\text{O} \sim \delta\text{D}$ 值与不同水体混合交换过程的关系。可见,环境同位素技术在研究水体特征、影响因素及补给转化关系中具有重要的作用。

目前同位素技术的研究主要集中在水体同位素特征及转化关系中,总结发现对于流域水循环分析多集中于单一水体研究,缺乏对参与水循环的多种水体整体宏观分析。黄土高原近年来大面积的生态治理活动对流域生态水文影响已经初见端倪,区域水资源循环特征随之会产生相应变化。韭园沟流域作为早期进行生态建设治理的代表型小流域,分析其不同水体氢氧稳定同位素组成及转化特征有助于建立黄土丘陵沟壑区生态水循环模式,是评价当地生态建设情况及水资源形成机制的首要工作。因此,本文以韭园沟为研究对象,通过实地采集降水、河水及浅层地下水等参与水循环过程的水体样品,分别对其 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 组成及氡盈余特征开展研究,分析其影响因子及时间空间变化,阐述各水体间补给转化关系,确定韭园沟流域水体同位素水文特征及其循环规律,以期为黄土丘陵沟壑区及其它水分限制地区的水资源开发利用、生态环境保护流域水量科学调度及水资源合理配置及利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

韭园沟流域内采样点位置分布如图1所示。韭园沟流域属黄土高原黄土丘陵沟壑区第一副区,是无定河中游一分支流域,位于E 110°16′~110°26′,N 37°32′~37°38′。流域面积 70.7 km²,主沟长 18 km,流域海拔 820~1 180 m。地处黄土高原,为典型的黄土沟壑丘陵地貌,具有干旱区明显地貌特征:沟道繁多且综合交叉,导致整体地形破碎,沟间地占全流域面积约 56.6%,沟谷地占全流域面积 43.4%。流域内大部分坡面由厚度 30~120 mm 的黄绵土全面覆盖,基岩在河槽及沟道底部部分地方

有出露,由浅灰绿色的砂岩和页岩组成。韭园沟流域属温带半干旱大陆性气候,多年平均气温 9.3℃,年最低与最高气温分别为 -27℃ 和 39℃,平均日温差为 29℃,日照时数为 2 615 h,无霜期 150~190 d。据统计,多年平均降水量为 475.1 mm,降水年际变化大,年内分配极不均匀,汛期内 7、8、9 月降水量占年降水量的 64.4%,且多以暴雨形式出现,一次暴雨产沙量往往占年产沙量的 59.91% 以上。为了探索无定河第一支沟水土流失综合治理模式,大力发展经济,必须减少入黄泥沙产量。自 1953 年被选择为水土保持实验点以来,韭园沟正式开始进行生态治理工作,主要包括建设水平梯田,建设骨干淤地坝,大力推广水力充填筑坝技术等措施。到 2009 年完成治理度高达 75.1%,生态建设治理程度良好,治理面积 5 310 hm²。截止 1997 年,坝密度是 3.72 座·km⁻²,建坝(库)、拦泥库容、总库容和已淤地分别 263 座、2 947.5 万 m³、2 200.7 万 m³ 和 282 hm²,流域林草面积迅速增加,乔木林、灌木林、经济林和人工种草面积分别为 113.46、309.45、516.03 和 451.45 hm²^[10]。

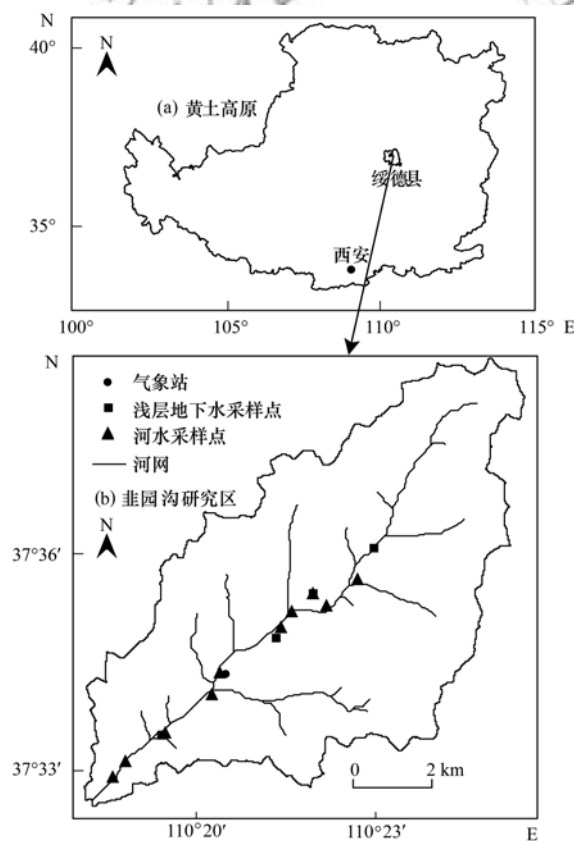


图1 研究区地理位置及采样点分布示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

1.2 样品采集

1.2.1 气象数据

本研究诸如气温、降水量及降水发生时间的气

象数据主要来源于韭园沟流域中部布设的小型自动气象站 (HOBO U30 NRC USA), 频率设置为 $5 \text{ min} \cdot \text{次}^{-1}$.

1.2.2 样品采集

本研究水样样品采集时间为 2017 年 1 ~ 12 月, 采集的样品类型有降水、河水、浅层地下水. 降水的采样频次为次降水, 河水、浅层地下水的平均采样周期为 15 d. 河水采样点分布在韭园沟主河道两侧, 浅层地下水采样点为沿主河道附近的浅井中. 采集河水及浅层地下水水样时先用原水将取样瓶及样品瓶润洗 3 次, 为了防止蒸发分馏作用的影响, 采集水样时将取样瓶伸入水面以下 30 cm 处, 再迅速装入 30 mL 的样品瓶中, 不留气泡, 用 parafilm 封口膜塑封, 贴好标签, 放入便携式冰箱内低温保存, 直至带回实验室上机测试. 所有样品测试均取 3 次重复, 最终取平均值.

1.3 数据分析

采集的降水、河水及浅层地下水的同位素测定工作在西安理工大学同位素分析实验室进行, 使用 LGR DLT-100 液态水同位素分析仪测定水样的氢氧同位素, 精度分别达到 0.5‰ 和 0.15‰ , 两者均满足测量精度要求, 测定结果遵从张自超等^[11]对氢氧稳定同位素分析结果的有效位数规则. 测得的样品中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素的含量为 V-SMOW (维也纳标准平均海水) 的千分差, 表示为 δ :

$$\delta = \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{V-SMOW}}}{R_{\text{V-SMOW}}} \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中, R_{sample} 为水样中 D/H 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比率; $R_{\text{V-SMOW}}$ 为 VSMOW 标准水样 D/H 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比率. 实验标样为美国 LGR 公司生产的标样 #2c、#4c 和 #5c, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 参考值分别为 $(-123.7 \pm 0.5)\text{‰}$ 和 $(-16.24 \pm 0.15)\text{‰}$; $(-51.6 \pm 0.5)\text{‰}$ 和 $(-7.94 \pm 0.15)\text{‰}$; $(-9.2 \pm 0.5)\text{‰}$ 和 $(-2.69 \pm 0.15)\text{‰}$.

其中降水中稳定氢氧同位素比率的加权平均值为:

$$\delta = \sum P_i \delta_i / \sum P_i \quad (2)$$

式中, δ 为加权平均值; P_i 为降水量; δ_i 为其相应的稳定同位素值.

由不同水源地水体稳定氢氧同位素的对比, 结合二端元混合模型^[12], 推断水体的水分来源地. 通过质量平衡方程和浓度平衡方程可推导出二端元混合模型如下:

$$Q_s = Q_g + Q_p \quad (3)$$

$$Q_s \cdot C_s = Q_g \cdot C_g + Q_p \cdot C_p \quad (4)$$

通过公式(3)、(4)得到以下公式:

$$\frac{Q_p}{Q_s} = \frac{C_g - C_s}{C_g - C_p} \quad (5)$$

$$\frac{Q_s}{Q_g} = \frac{C_p - C_g}{C_p - C_s} \quad (6)$$

式中, Q_s 为河水量; Q_g 为浅层地下水量; Q_p 为降水量; C_g 为浅层地下水中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素均值; C_s 为河水中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素均值; C_p 为降水量的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素均值.

实验数据统计分析采用 Excel 完成, 显著性分析由 SPSS 21.0 完成, 所有图表均运用 Origin 2018 完成.

2 结果与讨论

2.1 大气降水氢氧稳定同位素动态变化

2.1.1 大气降水 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系及时间变化

将韭园沟研究区 2017 年整年降水的雨量加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值进行一元线性回归分析, 发现研究区降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 呈一元线性关系, 回归方程为 $\delta\text{D} = 6.70 \delta^{18}\text{O} + 0.96$ ($R^2 = 0.94$, $P < 0.01$). 对比分析国际原子能委员会提出的全球大气降水线 $\delta\text{D} = 8.17 \delta^{18}\text{O} + 10.57$ ^[13], 郑淑蕙等^[14]提出的全国大气降水线 $\delta\text{D} = 7.9 \delta^{18}\text{O} + 8.2$ ($R^2 = 0.98$), 以及贺强等^[15]利用 GNIP 数据建立的黄土高原大气降水线方程 $\delta\text{D} = 7.0 \delta^{18}\text{O} + 0.36$ ($R^2 = 0.92$), 将以上不同尺度的降水线方程绘制在图 2.

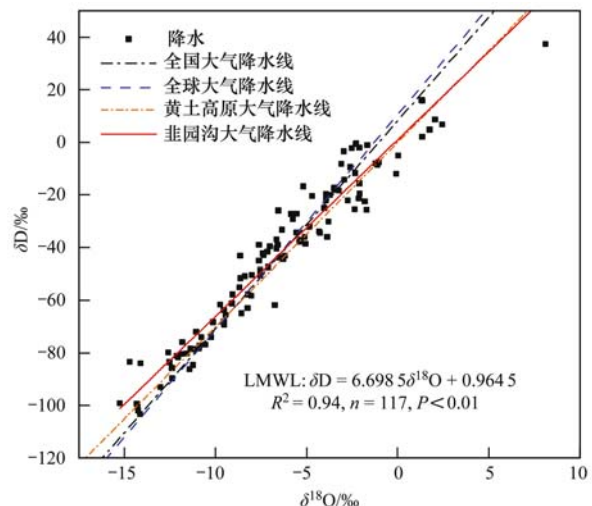


图 2 韭园沟研究区全年大气降水线及其比较

Fig. 2 Comparison of precipitation line in Jiuyuangou research area, the Loess Plateau, China and the global

由于世界范围内局部地区气候环境差异性, $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 在各局地显示出不同的相关关系, 形成相应的局地大气降水线 LMWL, 斜率表示稳定同位素 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的分馏速率关系, 截距表示 D 值相对平衡状态时的偏离程度^[16]. 韭园沟研究区的大气

降水线斜率和截距均低于全球、全国,并且与我国黄土高原的大气降水线非常接近。这主要是由于来自不同水源地水汽在形成频繁且量大的降水过程中,结合不平衡的二次蒸发^[17]构成了一种特殊动力分馏条件下的云团形成过程,使得在到达地面以前产生重同位素富集,从而降水线斜率与截距偏低,同时黄土高原的干旱大陆性季风气候对研究区内大气降水同位素产生了显著的影响。

利用 2017 年整年内韭园沟研究区采集的降水氢氧稳定同位素数据对该年内降水同位素随时间变化过程进行研究。如图 3 所示。整体上看, δD 和 $\delta^{18}O$ 均表现出汛期(6~9 月)均值高,分别为 $(-30.57 \pm 6.26)\text{‰}$ 和 $(-5.34 \pm 1.02)\text{‰}$; 非汛期(10~次年 5 月)均值低,分别为 $(-60.44 \pm 4.08)\text{‰}$ 和 $(-8.88 \pm 0.75)\text{‰}$ 的变化特点。且 δD 和 $\delta^{18}O$ 这两个随时间变化的量在变化过程中保持一定的相对关系,这说明两者在水汽蒸发凝结下落中变化过程和受影响原因类似。研究区内大气降水 δD 的变化范围为 $-100.6\text{‰} \sim 24.16\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 的变化范围为 $-14.28\text{‰} \sim 4.97\text{‰}$, 各月份之间的大气降水同位素值存在较大的波动, δD 和 $\delta^{18}O$ 的变差系数范围为 $-1.32 \sim -0.07$ 和 $-1.38 \sim -0.10$, 表现为汛期 > 非汛期,这可能是由于受到汛期降水水汽来源和路径分歧的影响。黄土高原全年大气降水水汽主要源自两大水汽源地:即西风带输送的大西洋海源水汽以及极地北冰洋地区水汽源地^[18]。两条水汽来源不仅分别代表了海源和陆源不同性质的水汽,也代表了汛期非汛期不同的水汽来源。

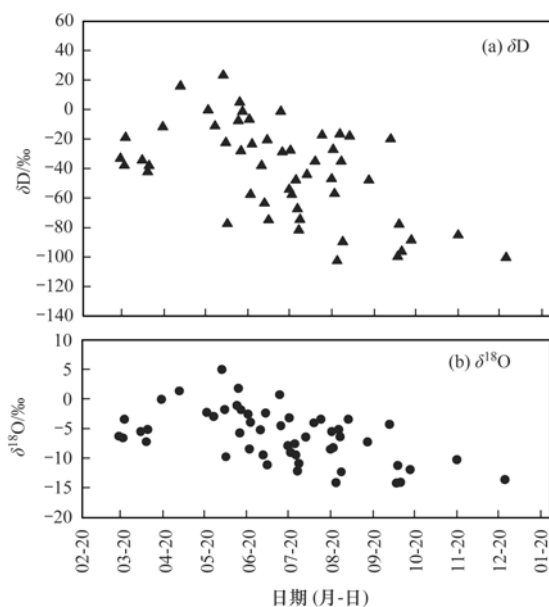


图 3 2017 年韭园沟研究区内大气降水同位素变化过程

Fig. 3 Variation of precipitation isotopes in the Jiuyuanguou research area in 2017

其中汛期水汽输送通道更加复杂,主要包括以下 3 条:①沿西风带纬向输入的西北水汽通道;②沿低纬度的孟加拉湾以东北-亚季风水汽通道的西南走向的 S 型自南边界经向输入,翻越青藏高原,再沿四川盆地北侧到达西北地区的南亚季风水汽通道;③自西太平洋经东南部的东亚季风水汽通道^[19]。汛期,向内陆运移进程当中不同水汽来源地的低纬度水汽在输送过程中大大贫化,不停被冷却形成降水的同时又不停地凝结着新的水汽,发生不同程度的二次蒸发过程使局地蒸发的陆源水汽给以补充,使得汛期各场降水稳定氢氧同位素值偏差值较大,最终表现为年内降水同位素变幅汛期大于非汛期。

2.1.2 大气降水的同位素效应

在黄土丘陵沟壑区,降水稳定同位素的变化特征与形成降水时的天气物理过程密切相关,且 $\delta^{18}O$ 更易受外部环境变化影响^[20]。为研究降水 $\delta^{18}O$ 与各气象要素的关系,利用公式(2)对 2017 年整年研究区内大气降水 $\delta^{18}O$ 值进行日雨量加权平均计算,将得到的 $\delta^{18}O$ 每日雨量加权平均值与日平均气温(T)、降水量(P_i)、风速(WS)和相对湿度(RH)做相关性分析,依各气象因子变化过程如图 4 所示。

结果发现,在韭园沟研究区中大气降水的 $\delta^{18}O$ 与平均气温(T)、风速(WS)、相对湿度(RH)各个气象因子均存在良好相关性,且相关性均通过了 0.01 置信水平上的显著性检验。具体为:大气降水的 $\delta^{18}O$ 与平均气温呈显著正相关,与风速呈显著正相关,与相对湿度呈显著负相关,说明研究区存在较好地温度效应、风速效应以及湿度效应。通过比较 3 个关系式发现, $\delta^{18}O$ 与平均气温以及相对湿度之间相关性最大,风速次之,这表明研究区降水 $\delta^{18}O$ 受温度、相对湿度和风速影响较为明显。出现此现象的原因是研究区地处黄土高原,随着空气相对湿度增加蒸发强度减弱,故降水 $\delta^{18}O$ 值随着相对湿度增大而降低;降水时云层底部发生二次蒸发过程,随着温度升高云下二次蒸发强度增大故而降水 $\delta^{18}O$ 值增大;风速大,有利于降水中水分子的扩散,加快了水滴同周围局地蒸发的陆源水汽同位素交换过程,故随着风速升高降水 $\delta^{18}O$ 值增大^[21]。 $\delta^{18}O$ 与降水量之间通过了 0.05 置信水平上的显著性检验,但是两者之间相关性较低,不及平均气温、风速、相对湿度效应显著,故研究区大气降水 $\delta^{18}O$ 表现出弱降水量效应。这可能是由于降水量和二次蒸发过程具有一定的对应性,在降水初期,蒸发过程对降水影响显著,降水中同位素富集,随着降水过程的进行,雨滴所经受的二次蒸发过程逐渐减弱^[22],但

在本研究观测期间并非是二次蒸发强度的决定性因素. 由于降水样品只采集了一年, 因此结果具有一定的局限性, 仅代表观测期内的研究结果, 今后还需长期观测, 以便进一步研究.

综合考虑以上各个气象因子对研究区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 影响, 将平均气温(T)、降水量(P_i)、风速

(WS)和相对湿度(RH)各气象因子与 $\delta^{18}\text{O}$ 做多元回归线性分析.

表1为多元线性回归的方差分析表, 当统计量 $F=7.855$ 时, $P=0.000<0.01$, 说明回归方程通过了显著检验(F 检验), 表明建立的多元回归模型具有统计学意义.

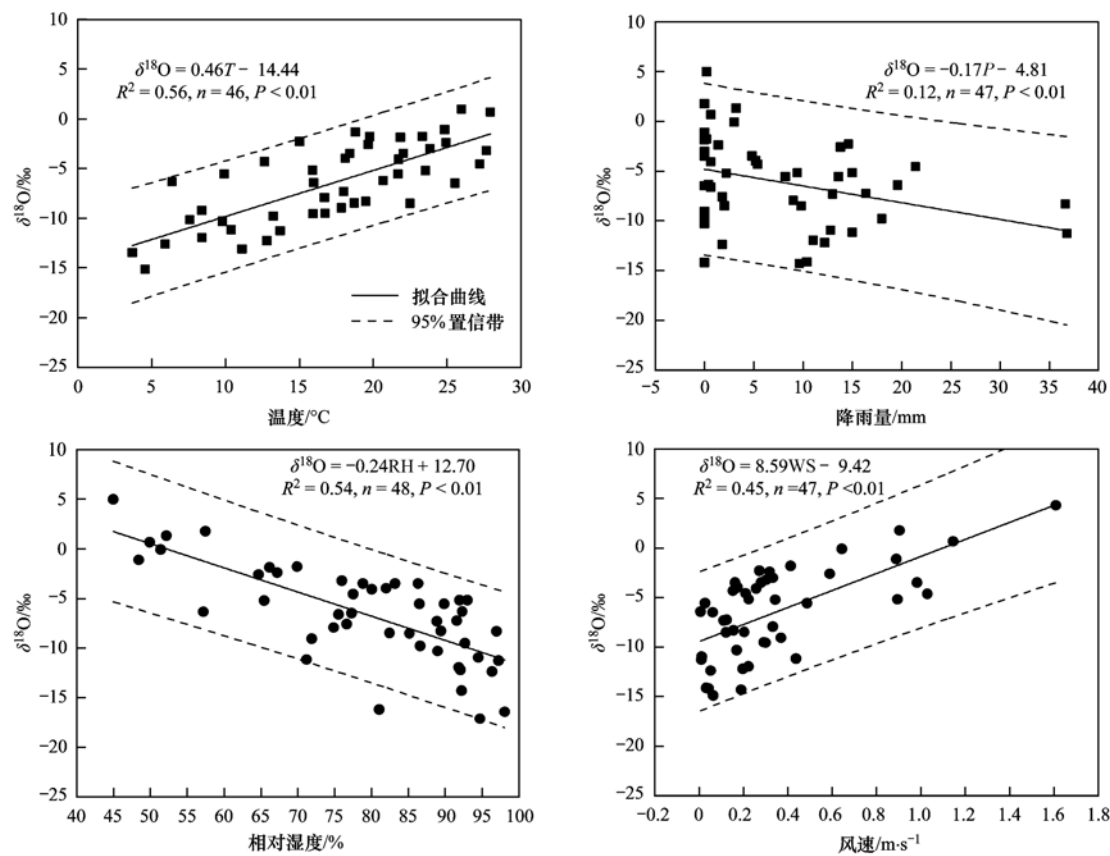


图4 韭园沟研究区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与各气象因子关系

Fig. 4 Relationship between precipitation $\delta^{18}\text{O}$ and meteorological factors in the Jiuyuangou research area

表1 方差分析

Table 1 Analysis of variance					
项目	平方和	自由度	均方	F	P
回归	16 142. 134	4. 000	4 035. 533	7. 855	0. 000
残差	19 009. 872	37. 000	513. 780	—	—
总计	35 152. 006	41. 000	—	—	—

从表2中可得到多元线性回归分析后各变量回归系数估计值、标准误差、 t 检验值以及 P 值信息.

在显著性水平0.05的情形下, 各个自变量对 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响显著, 效果理想.

表2 回归系数及显著性检验

Table 2 Regression coefficients and test of significance				
系数	系数估计值	标准误差	t	P
常量	-69. 215	24. 380	-2. 839	0. 006
T	1. 759	0. 656	2. 681	0. 011
RH	-0. 133	0. 057	-2. 34	0. 035
WS	37. 168	13. 038	2. 851	0. 007
P_i	-0. 245	0. 115	-2. 12	0. 043

得到如下多元线性回归方程:

$$\delta^{18}\text{O} = 1.759T - 0.245P_i + 37.168\text{WS} - 0.133\text{RH} - 69.215$$

$$(R^2 = 0.69)$$

多元线性回归分析中的相关性相较于对各个因素单独分析来说有一定提高,说明研究区大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 并不是单纯由单因素控制,而是研究区各个气象因子,如平均气温(T)、降水量(P_i)、风速(WS)和相对湿度(RH)共同作用的结果。

2.1.3 大气降水氘盈余变化特征

大气降水氘盈余值是研究大气降水过程及受影响因素的重要参数,能够反映降水来源、水汽运移规律、以及蒸发降水过程中的分馏规律^[23]。与大气降水同位素相同,氘盈余参数同样受到水汽输送过程的相对湿度、风速、降水量以及温度影响。Dansgaard^[24]定义了大气降水氘盈余参数公式为 $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$,该参数主要用来表示水汽蒸发过程中由于同位素动力分馏而偏离平衡分馏的程度。图5为韭园沟研究区2017年日平均氘盈余参数随时间变化的趋势。非汛期(10月~次年5月),平均值为 $(10.52 \pm 1.99)\text{‰}$,汛期(6~9月)平均值为 $(8.37 \pm 1.42)\text{‰}$,表现为非汛期大于汛期。汛期,来自低纬度的孟加拉湾及太平洋的季风带来了大量的海洋水汽^[25],空气相对湿度大,降水中稳定同位素偏负, d 值偏小;非汛期,降水主要来自陆源水汽,空气相对湿度小,降水中稳定同位素值偏正, d 值偏大。年内平均值为 8.82‰ ,略小于全球大气降水氘盈余参数平均值(10‰)。氘盈余参数变化范围是 $-9.24\text{‰} \sim 24.62\text{‰}$,年内波动剧烈,这反映了韭园沟研究区降水水汽来源区以及输送路径的复杂性,以及降水同位素受多重因素影响的结果。

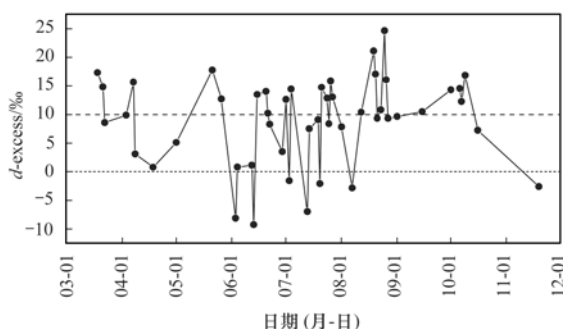


图5 2017年韭园沟研究区大气降水氘盈余年内变化过程

Fig. 5 Variation of precipitation d -excess in the Jiuyuangou research area in 2017

2.2 河水及浅层地下水氢氧稳定同位素动态变化

2.2.1 河水、浅层地下水同位素 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系线

利用2017年整年内韭园沟研究区采集的河水及浅层地下水样品氢氧稳定同位素数据,对河水及

浅层地下水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 进行一元线性回归分析。如图6所示,河水和浅层地下水的氢氧同位素之间都表现出显著相关。其中也给出了研究区内大气降水方程线,其斜率和截距均大于该地区河水及浅层地下水线,降水同位素点大多位于河水和浅层地下水线左上方,河水氢氧同位素点平均分布于浅层地下水线两侧,斜率和截距小于浅层地下水。这是由于三水体间具有紧密联系,河水和浅层地下水受到更为强烈的蒸发作用影响而导致的,并且降水是河水、浅层地下水的主要补给来源^[26]。

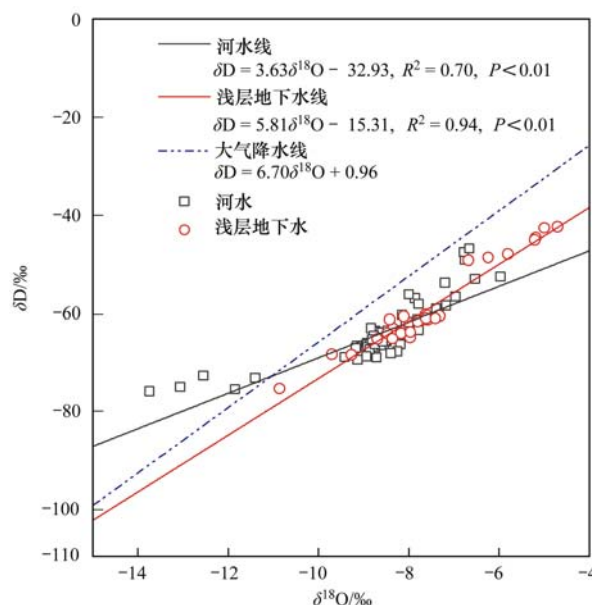


图6 韭园沟研究区河水、浅层地下水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

Fig. 6 Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ of river water and shallow groundwater in the Jiuyuangou research area

2.2.2 河水 $\delta^{18}\text{O}$ 、氘盈余空间分布特征

为了消除河水同位素时间尺度的影响,利用2017年韭园沟研究区10个采样点河水同位素年平均值数据,建立了河水同位素特征与空间因子函数关系,分析年内河水稳定同位素的空间分布特征,结果如图7~9所示。结果表明,研究区河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随海拔高度的增加而降低,两者具有良好的相关关系,并通过了0.01置信水平上的显著性检验。高程效应的本质是同位素温度效应或气温高度效应,数值上用垂直递减率表示,即同位素气温变化率和气温高度梯度的函数^[27]。相关性方程为 $\delta^{18}\text{O} = -0.0035H - 4.8799$ ($R^2 = 0.53$, $P < 0.01$),故韭园沟研究区在观测期间内河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的垂直递减率为 $0.35\text{‰} \cdot (100\text{ m})^{-1}$,即海拔高度增加1米, $\delta^{18}\text{O}$ 值减少 0.0035‰ ,此结果与文蓉等^[28]在喜马拉雅山地区观测到的河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的垂直递减率范围 $0.11 \sim 0.36\text{‰} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ 是一致的,大于全球降水 $\delta^{18}\text{O}$ 垂直递减率 $0.28\text{‰} \cdot (100\text{ m})^{-1}$,说明河水 $\delta^{18}\text{O}$

存在良好的高程效应. 同位素高程效应可以表征出一定水汽来源特征^[29], 高程效应越显著, 河水与降水水汽来源地越相近; 高程效应越微弱, 则表现出河水与降水水汽来源的差异性. 韭园沟河水具有良好的 $\delta^{18}\text{O}$ 高程效应, 说明研究区河水和降水大多来自同一水汽来源地, 即研究区河水很大程度上受到降水补给的影响.

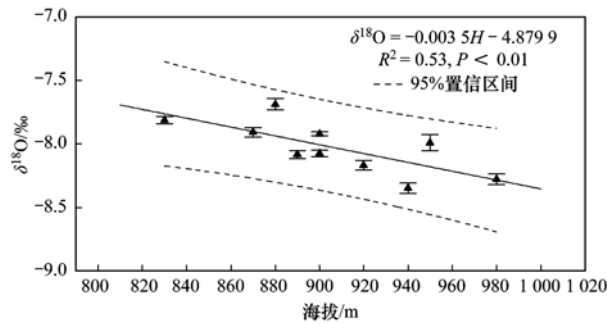


图 7 韭园沟研究区河水 $\delta^{18}\text{O}$ 与海拔相关关系
Fig. 7 Relationship between altitude and $\delta^{18}\text{O}$ of river water in the Jiuyuanguo research area

由于河水同位素存在一定的高程效应, 故河水中氡盈余参数的空间变化也会呈现一个复杂的变化过程. 流域河水氡盈余在观测期间内表现为随高度升高而增大的趋势, 通过了 0.01 置信水平上的显著性检验, 但两者相关性较低. 氡盈余随海拔升高的规律在安第斯山和南极等地也有发现^[30].

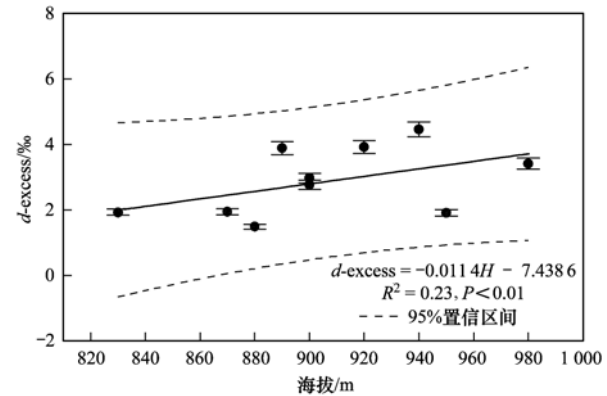


图 8 韭园沟研究区河水氡盈余与海拔相关关系
Fig. 8 Relationship between altitude and $d\text{-excess}$ of river water in the Jiuyuanguo research area

选取河源为起点, 绘制图 9 韭园沟研究区河水 $\delta^{18}\text{O}$ 、氡盈余距河源距离的变化特征, 可以看出: 在沿程变化上, 河水氡盈余参数值除河口位置外, 均表现出随着距河源距离的增大逐渐降低; 河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 总体随着距河源距离的增大而富集, 说明河水沿河源至河口流动过程中蒸发效应逐渐增强. 但是在流域不同位置个别点水体 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在突变情况, 在距河源 1 165 m 处的 2 号点 $\delta^{18}\text{O}$ 值突增, 显示其可能经历强烈蒸发过程, 主要是因为该点位于沟道

180°拐弯处且位置较低, 不宜与其他水体交换, 造成沟道中水的聚集形成富集重同位素的“老水”. 距河源 5 091 m 处的 7 号点略有降低, 调查发现该点位于距离主沟道较远的高架桥下, 且其位置较高, 故未能受到主沟道河水良好补给, 导致其 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏低.

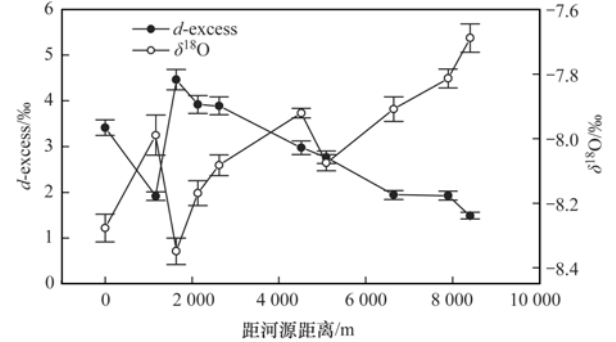


图 9 韭园沟研究区河水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $d\text{-excess}$ 的空间分布
Fig. 9 Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ and $d\text{-excess}$ of river water in the Jiuyuanguo research area

2.3 流域不同水体间联系

研究区不同水体间时刻都在进行着相互补给与交换, 降水落到地面后一部分通过坡面漫流直接汇入河流, 另一部分在山坡沟壑入渗, 补给浅层地下水, 下渗的浅层地下水在下层岩石表面汇流并通过裂隙口与河水相互转化, 补给地表径流, 形成良好的流域水循环过程^[31]. 降水作为流域水循环过程中水体的主要来源, 由于水汽来源、输送路径、气候变化及下垫面情况不同, 其氢氧同位素产生不同程度的蒸发分馏作用, 表现出不同的氢氧同位素特征, 造成参与水循环过程的其他不同水体氢氧同位素特征值的差异性^[32]. 通过对比不同水体间同位素组成, 可以探究不同水体间的转化补给关系.

考虑到汛期(6~9月)和非汛期(10~次年5月)降水分布对水体转化比例的影响, 对研究区观测期内水体转化规律进行汛期、非汛期分别分析. 利用汛期非汛期各水体 $\delta^{18}\text{O}$ 均值结合公式(5)、(6)计算韭园沟在观测期间内降水、河水和浅层地下水的相互转化比例, 如表 3 所示.

表 3 韭园沟研究区非汛期和汛期不同水体转化比例			
Table 3 Conversion ratio between different water bodies during the non-flood season and the flood season in the Jiuyuanguo research area			
季节	不同水体	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	转化比例/%
非汛期	河水	-8.98	100
	降水	-10.41	46
	浅层地下水	-7.78	54
汛期	河水	-8.34	60
	降水	-6.12	40
	浅层地下水	-7.45	100

从计算结果来看,在非汛期,韭园沟研究区表现为降水和浅层地下水补给河水,补给比例分别为46%和54%;在汛期,表现为河水和降水补给浅层地下水,补给比例分别为60%和40%。考虑到韭园沟流域自上个世纪五十年代开始大力开展生态治理保护工作,到2009年完成治理度已经高达75.1%,随着诸如淤地坝、水库和退耕还林还草等生态建设措施的实施,流域生态水文循环过程发生显著改变^[33]。在非汛期,降水量偏少,生态活动增加了地表植被覆盖度,降低了降水补给河水的传输速度,故而非汛期河水受降水的补给比例偏少需要更多浅层地下水联合补给;在汛期,降水量大,韭园沟大面积的生态建设植被有效拦截降水,增加地面积水进而产生更多降水入渗量,有效补给浅层地下水,同时多项生态建设措施(水库、淤地坝)实施能够有效拦截河水,增加河水入渗浅层地下水量。综上所述,韭园沟研究区“降水-河水-浅层地下水”间具有良好转化关系,生态建设措施的实施对小流域不同水体转化产生了一定影响。

3 结论

(1)韭园沟研究区大气降水线为 $\delta D = 6.70 \delta^{18}O + 0.96$ ($R^2 = 0.94$, $P < 0.01$),河水线方程是 $\delta D = 3.63 \delta^{18}O - 32.93$ ($R^2 = 0.70$, $P < 0.01$),浅层地下水线方程是 $\delta D = 5.81 \delta^{18}O - 15.31$ ($R^2 = 0.94$, $P < 0.01$)。河水点落在了LMWL线右下角并且平均分布浅层地下水线两侧,说明研究区河水受到降水的良好补给,和浅层地下水联系密切并受到更为强烈的蒸发作用。

(2)研究区大气降水的 $\delta^{18}O$ 值受到气温、风速、相对湿度及降水量共同影响,多元线性回归分析结果为 $\delta^{18}O = 1.759T - 0.245 P_i + 37.168WS - 0.133 \cdot RH - 69.215$ ($R^2 = 0.69$, $P < 0.01$);河水 $\delta^{18}O$ 表现为随着距河源距离的增大而富集,随着海拔高度的递增而降低,后者相关性方程为 $\delta^{18}O = -0.0035H - 4.8799$ ($R^2 = 0.53$, $P < 0.01$)。

(3)通过二端元混合模型分析韭园沟降水、河水及浅层地下水氢氧同位素特征,明确三者在非汛期的补给关系为降水和浅层地下水补给河水,补给比例分别为46%和54%;在汛期为河水和降水补给浅层地下水,补给比例分别为60%和40%。说明韭园沟研究区降水-河水-浅层地下水全年间具有良好转化关系,生态建设措施的实施对小流域不同水体转化产生了一定影响。

参考文献:

[1] 常恩浩,李鹏,张铁钢,等. 旱季雨季对黄土丘陵退耕区植

被根系分布及水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 129-138.

Chang E H, Li P, Zhang T G, *et al.* Root systems distribution and water use pattern of vegetation from Abandoned Croplands during dry and wet season in Loess Hilly Region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(24): 129-138.

[2] 吴华武,李小雁,赵国琴,等. 青海湖流域降水和河水中 $\delta^{18}O$ 和 δD 变化特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1552-1564.

Wu H W, Li X Y, Zhao G Q, *et al.* The Variation Characteristics of $\delta^{18}O$ and δD in precipitation and River Water, Qinghai Lake Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(9): 1552-1564.

[3] 李广,章新平,张立峰,等. 长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2094-2101.

Li G, Zhang X P, Zhang L F, *et al.* Stable isotope characteristics in different water bodies in Changsha and implications for the water cycle [J]. Environmental Science, 2015, 36(6): 2094-2101.

[4] 郝玥,余新晓,邓文平,等. 北京西山大气降水中D和 ^{18}O 组成变化及水汽来源[J]. 自然资源学报, 2016, 31(7): 1211-1221.

Hao Y, Yu X X, Deng W P, *et al.* The variations of hydrogen and oxygen compositions and moisture sources in the precipitation in western mountain areas of Beijing [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(7): 1211-1221.

[5] 刘忠方,田立德,姚檀栋,等. 雅鲁藏布江流域河水中氧稳定同位素的时空变化[J]. 冰川冻土, 2008, 30(1): 20-27.

Liu Z F, Tian L D, Yao T D, *et al.* The temporal and spatial variations of $\delta^{18}O$ in river water of the Yarlung Zangbo River Basin [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(1): 20-27.

[6] 肖可,沈立成,王鹏. 藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 2952-2958.

Xiao K, Shen L C, Wang P. Hydrogen and oxygen isotopes of lake water and geothermal spring water in arid area of South Tibet [J]. Environmental Science, 2014, 35(8): 2952-2958.

[7] 陈新明,甘义群,刘运德,等. 长江干流水体氢氧同位素空间分布特征[J]. 地质科技情报, 2011, 30(5): 110-114.

Chen X M, Gan Y Q, Liu Y D, *et al.* Spatial distribution characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in the mainstream of Yangtze River [J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(5): 110-114.

[8] 董国强,翁白莎,严登华,等. 怒江源区那曲流域夏季降水与河水稳定同位素特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2018, (7): 15-20, 24.

Dong G Q, Weng B S, Yan D H, *et al.* Variation characteristics of stable isotopes in summer precipitation and river water in Naqu River Basin, Tibetan Plateau [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018, (7): 15-20, 24.

[9] 姚天次,章新平,李广,等. 湘江流域岳麓山周边地区不同水体中氢氧稳定同位素特征及相互关系[J]. 自然资源学报, 2016, 31(7): 1198-1210.

Yao T C, Zhang X P, Li G, *et al.* Characteristics of the stable isotopes in different water bodies and their relationships in surrounding areas of Yuelu Mountain in the Xiangjiang River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(7): 1198-1210.

[10] 高海东. 黄土高原丘陵沟壑区沟道治理工程的生态水文效应

- 研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2013. 19-23.
- Gao H D. Hydro-ecological impact of the gully erosion control works in Loess Hilly-gully Region [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2013. 19-23.
- [11] 张自超, 丁梯平. 关于同位素地质测试数据的数据处理及结果表示[J]. 岩矿测试, 2000, **19**(1): 77-79.
- Zhang Z C, Ding T P. Data processing and expression for analytical results in isotope geology [J]. Rock and Mineral Analysis, 2000, **19**(1): 77-79.
- [12] 陈建生, 赵洪波, 詹沛成. 赤水林区旱季雾水对地表径流的水量贡献[J]. 水科学进展, 2016, **27**(3): 377-384.
- Chen J S, Zhao H B, Zhan L C. Water contribution of fog drip to surface runoff in Chishui forest region during the dry season [J]. Advances in Water Science, 2016, **27**(3): 377-384.
- [13] Froehlich K, Yurtsever Y. Isotope techniques for water resources in arid and semiarid regions [A]. In: Proceedings of the Vienna Symposium on Application of Tracers in Arid Zone Hydrology [C]. Vienna: IAHS, 1995, **232**: 3-12.
- [14] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, **28**(13): 801-806.
- [15] 贺强, 孙从建, 吴丽娜, 等. 基于GNIP的黄土高原区大气降水同位素特征研究[J]. 水文, 2018, **38**(1): 58-66.
- He Q, Sun C J, Wu L N, *et al.* Study on isotopic characteristics of atmospheric precipitation in Loess Plateau Based on GNIP [J]. Journal of China Hydrology, 2018, **38**(1): 58-66.
- [16] 黄一民. 洞庭湖流域水循环中稳定同位素的变化特征及其影响机制研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2013. 34-51.
- Huang Y M. Study of variable characteristics of stable water isotope composition in water cycle and its influence mechanism in the Dongting Lake Basin [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2013. 34-51.
- [17] 王永森, 董四方, 陈益钟. 基于温度与湿度的大气降水同位素特征影响因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2013, (6): 12-15.
- Wang Y S, Dong S F, Chen Y Z. Research on the precipitation isotope effect factor based on temperature and humidity [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013, (6): 12-15.
- [18] 李小飞, 张明军, 李亚举, 等. 西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 711-719.
- Li X F, Zhang M J, Li Y J, *et al.* Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and moisture transports over the arid region in Northwest China [J]. Environmental Science, 2012, **33**(3): 711-719.
- [19] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 中国东部季风区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J]. 科学通报, 2009, **54**(22): 3521-3531.
- Liu J R, Song X F, Yuan G F, *et al.* Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Eastern Monsoon China and the water vapor sources [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, **55**(2): 200-211.
- [20] 郭小燕, 冯起, 李宗省, 等. 敦煌盆地降水稳定同位素特征及水汽来源[J]. 中国沙漠, 2015, **35**(3): 715-723.
- Guo X Y, Feng Q, Li Z X, *et al.* Variation of stable isotopes and moisture sources in precipitation at the Dunhuang Basin in Northwest China [J]. Journal of Desert Research, 2015, **35**(3): 715-723.
- [21] 庞洪喜, 何元庆, 张忠林. 季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与高空风速关系[J]. 科学通报, 2004, **49**(9): 905-908.
- Pang H X, He Y Q, Zhang Z L. Positive correlation between $\delta^{18}\text{O}$ in monsoon precipitation and atmospheric wind speed [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, **49**(9): 938-941.
- [22] 桂娟, 李宗省, 冯起, 等. 古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 149-156.
- Gui J, Li Z X, Feng Q, *et al.* Space-time characteristics and environmental significance of the stable isotopes in precipitation in the Gulang River Basin [J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 149-156.
- [23] Merlivat L, Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium - oxygen 18 relationship for precipitation [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1979, **84**(C8): 5029-5033.
- [24] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. Tellus, 1964, **16**(4): 436-468.
- [25] 章新平, 田立德, 刘晶森, 等. 沿三条水汽输送路径的降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征[J]. 地理科学, 2005, **25**(2): 190-196.
- Zhang X P, Tian L D, Liu J M, *et al.* Variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation along three vapor transport paths [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, **25**(2): 190-196.
- [26] 王贺, 李占斌, 马波, 等. 黄土高原丘陵沟壑区流域不同水体氢氧同位素特征——以纸坊沟流域为例[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(4): 85-90, 135.
- Wang H, Li Z B, Ma B, *et al.* Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in different waters of the loess hilly and gully region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(4): 85-90, 135.
- [27] 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.
- [28] 文蓉, 田立德, 翁永标, 等. 喜马拉雅山南坡降水与河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 高程效应[J]. 科学通报, 2012, **57**(12): 1053-1059.
- Wen R, Tian L D, Weng Y B, *et al.* The altitude effect of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and river water in the Southern Himalayas [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, **57**(14): 1693-1698.
- [29] Holdsworth G, Roy Krouse H. Altitudinal variation of the stable isotopes of snow in regions of high relief [J]. Journal of Glaciology, 2002, **48**(160): 31-41.
- [30] Gonfiantini R, Roche M A, Olivry J C, *et al.* The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains [J]. Chemical Geology, 2001, **181**(1-4): 147-167.
- [31] 孙芳强, 尹立河, 马洪云, 等. 三工河流域氢氧同位素特征及其水循环意义[J]. 人民黄河, 2016, **38**(12): 106-109.
- Sun F Q, Yin L H, Ma H Y, *et al.* Features of hydrogen and oxygen isotopes and their indication of hydrological cycle in Sangong River Basin of Xinjiang [J]. Yellow River, 2016, **38**(12): 106-109.
- [32] 李小飞, 张明军, 马潜, 等. 我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 2924-2931.
- Li X F, Zhang M J, Ma Q, *et al.* Characteristics of stable isotopes in precipitation over northeast china and its water vapor sources [J]. Environmental Science, 2012, **33**(9): 2924-2931.
- [33] 赵宾华, 李占斌, 李鹏, 等. 黄土区生态建设对流域不同水体转化影响[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(23): 179-187.
- Zhao B H, Li Z B, Li P, *et al.* Effects of ecological construction on transformation of different water bodies in typical watershed on Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, **33**(23): 179-187.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)