

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



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM _{2.5} 长期变化影响因素	南洋, 张倩倩, 张碧辉 (499)
我国PCDD/Fs网格化大气排放清单	陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民 (510)
成都平原PM _{2.5} 中碳质组分时空分布特征与来源	史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东 (520)
南京江北新区冬季PM _{2.5} 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析	邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红 (529)
南京北郊四季PM _{2.5} 中有机物的污染特征及来源解析	李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军 (537)
长三角背景点夏季大气PM _{2.5} 中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析	薛国艳, 王格慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健 (554)
2017年秋季长春市PM _{2.5} 中多环芳烃的污染来源及健康风险评价	张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟 (564)
京津冀及周边区域PM _{2.5} 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析	朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军 (574)
河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析	齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹 (587)
河南省气溶胶光学特性的时空变化特征	张瑞芳, 于兴娜 (600)
黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM _{2.5} 中水溶性有机气溶胶	黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊 (609)
南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素	杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬 (620)
连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势	乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月 (630)
挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较	羌宁, 史天哲, 缪海超 (638)
西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析	丁铖, 于兴娜, 侯思宇 (647)
4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的生物多样性及群落结构	沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明 (656)
辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析	金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧 (665)
国六柴油发动机DPF再生时VOCs排放特性	钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能 (674)
南小河流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义	郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思吟 (682)
乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价	余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云 (691)
温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系	朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新 (702)
新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化	宣文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆 (713)
环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估	宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春 (728)
洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化	刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞 (734)
西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析	杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李兢, 徐会宁 (743)
透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响	张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田 (750)
微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B	朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠 (756)
锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除	周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏 (763)
载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能	宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章 (773)
复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能	孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董磊 (784)
磁性硅藻土负载纳米过氧化钙对水中磷酸盐吸附	徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇 (792)
污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应	汤宁, 李如忠, 王丰庆, 何瑞亮, 刘超 (801)
生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析	赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红 (809)
磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能	于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军 (815)
四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响	阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品 (823)
异养硝化细菌Pseudomonas aeruginosa YL的脱氮过程及N ₂ O产生特性	杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖 (831)
包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (839)
包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用	周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉 (849)
厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响	张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅 (856)
除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺	李冬, 刘博, 王文琪, 张杰 (867)
桂西南地区地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价	王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 虎瑞, 宋波 (876)
青藏高原表土重金属污染评价与来源解析	杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军 (886)
黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析	莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德 (895)
管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响	宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕊, 李秧秧 (905)
生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响	周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖 (914)
水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制	余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章 (922)
接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制	刘猷, 王磊, 曹湛波, 段灏 (932)
基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较	胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双 (941)
超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素	陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠 (952)
青菜中镉的吸收和累积对硒的响应规律	余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉 (962)
两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制	卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇 (970)
可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤	贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢 (979)
我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析	穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣凤, 李花粉 (986)
畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系	蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国 (997)
4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性	朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来 (1005)
《环境科学》征订启事(553)	
《环境科学》征稿简则(655)	
信息(664, 755, 885)	

南小河沟流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义

郭亚文¹, 田富强², 胡宏昌², 刘亚平^{1,3*}, 赵思晗²

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 3. 首都师范大学城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048)

摘要: 南小河沟流域为典型的黄土高原沟壑区, 本文分析了该流域地表水和地下水的氢氧稳定同位素和水化学特征, 揭示了地表水与地下水之间的相互关系。结果表明, 大气降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值呈现春夏高, 秋冬低, 的季节变化特征。水库水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值的季节性变化规律呈现夏秋高、冬春低的特征。地下水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值季节性变化规律相对不显著。流域内地表水和地下水水化学类型主要为 $Na \cdot Mg-HCO_3$ 型。地表水和地下水电导率的季节性变化规律均呈现冬季高、夏季低的特点。当地大气降水和深层地下水可能是南小河沟流域内地表水(水库水、沟道水)和泉水的主要补给来源。流域内的常流泉可能主要由深层地下水补给, 而季节泉, 例如, 董庄沟和杨家沟的源头泉则可能是由深层地下水和当地大气降水共同补给。

关键词: 氢、氧稳定同位素; 水化学; 电导率; 地表水和地下水; 黄土高原沟壑区

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0682-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201905184

Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin

GUO Ya-wen¹, TIAN Fu-qiang², HU Hong-chang², LIU Ya-ping^{1,3*}, ZHAO Si-han²

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Base of the State Key Laboratory of Urban Environmental Processes and Digital Modeling, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: The Nanxiaohegou basin is a typical watershed in the gully region of the Loess Plateau, China. The stable isotopes of hydrogen and oxygen and the hydrochemistry of the surface water and groundwater in the region were characterized in this study. The interaction between the surface water and groundwater in the region was demonstrated based on stable isotopes and hydrochemical methods. Results show that the δD and $\delta^{18}O$ values of precipitation change according to the seasons with high values in spring and summer and low values in autumn and winter. The δD and $\delta^{18}O$ values of the reservoir water are higher in summer and autumn, while they are lower in the winter and spring. The seasonal variation of δD and $\delta^{18}O$ in groundwater is not significant. The surface water and groundwater in the watershed mainly belong to $Na \cdot Mg-HCO_3$ -type water. The hydraulic conductivity of surface water and groundwater is characterized by high values in winter and low values in summer. Results on stable isotopes and hydrochemistry indicate that local precipitation and deep groundwater may be the main recharge sources of surface water (reservoir water, channel water) and spring water in the Nanxiaohegou basin. The perennial spring in the basin may be mainly replenished by deep groundwater, while seasonal springs are replenished by deep groundwater and local precipitation, such as the springs of Dongzhuanggou and Yangjiagou sub-basins. This study provides a greater understanding of the hydrological processes in the gully region of the Loess Plateau.

Key words: hydrogen and oxygen stable isotopes; hydrochemistry; electric conductivity; surface water and groundwater; gully region of the Loess Plateau

黄土高原沟壑区地形复杂, 地理条件恶劣, 水资源先天不足且分布不均, 水土流失、土地沙化等问题依然严峻, 生态环境十分脆弱。南小河沟流域为典型黄土高原沟壑区, 位于黄土高原董志塬腹地的西边缘, 董志塬区是黄河中上游多粗沙地区, 是黄河泥沙的主要发源地, 也是我国水土流失最严重的地区。经过政府 50 多年的持续防治, 生态环境逐渐改善, 水土流失等问题逐渐减轻, 但防治任务依然艰巨^[1,2]。研究黄土高原沟壑区的水文过程对理解当地的水循环过程和保护生态环境具有重要的指示意义。

利用水化学和稳定同位素技术是研究地表水与地下水相互关系的一种有效示踪方法。稳定同位素

D 和 ^{18}O 是水体的组成部分, 是一种理想的天然示踪剂, 不同来源的水体在水循环系统中具有不同的同位素组成特征^[3]。大量研究表明, 研究水体的氢、氧同位素变化特征及其影响因素, 可探究水体的补给来源和不同水体之间的相互转化关系等。如胡勇博等^[4]探讨了南京、溧阳、宜兴和东山这 4 个站点局

收稿日期: 2019-05-23; 修订日期: 2019-09-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC04027, 2016YFA0601603); 北京市优秀人才培养项目 (2017000020124G013); 首都师范大学青年燕京学者培育对象项目

作者简介: 郭亚文 (1992 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境水文过程, E-mail: yawen.guo@qq.com

* 通信作者, E-mail: y.liu@cnu.edu.cn

地蒸发和水汽源地对降水稳定同位素组分的影响;Wang 等^[5]利用氢氧稳定同位素对羊圈沟流域的植物用水模式进行了示踪分析;Xiang 等^[6]利用稳定同位素方法揭示出黄土高原长武塬地区地下水的补给机制以活塞流为主.地表水和地下水等天然水体中的水化学特征可对同位素示踪结果进行补充,在某种程度上可以反映大气降水、流域岩性、土地利用和人类活动等因素对流域水循环过程的影响,记录着水体的形成和运移历史^[7~9].例如,Liu 等^[10]利用水化学和同位素相结合的方法辨析了山区平原过渡带地下水的补给来源及其特征.张兵等^[11]利用水化学和稳定同位素相结合的方法研究了第二松花江地表水和地下水的相互关系,并计算了相互转换比例.

本文的主要研究目的是基于水化学和同位素方法,分析南小河沟流域大气降水、地表水和地下水的水化学和同位素含量的时空分布特征及其影响因素,揭示南小河沟流域地表水与地下水的相互关系,以期为研究区的生态环境保护和水资源评价提供参考.

1 研究区概况

南小河沟流域地处甘肃省庆阳市后官寨乡境内,是泾河的支流——蒲河左岸的一条支沟,位于东经 $107^{\circ}30' \sim 107^{\circ}37'$,北纬 $35^{\circ}41' \sim 35^{\circ}44'$,流域面积 38.93 km^2 ,是黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站 1951 年选定作为黄土高原沟壑区的典型小流域^[12].该流域属半干旱大陆性气候,冬春干旱少雨,夏秋雨量适中.南小河沟 40 余年年均降水量 519 mm ,降水年际变化大,年内分配不均匀,其中 6~9 月降水量占全年总降水量的 67.3%,年均气温 9.3°C ^[13].

流域内地质构造比较单一,地面表层几乎被黄土所覆盖.主要有 3 种地貌类型:塬面、沟坡和沟谷.塬面占流域总面积的 57%,塬面宽广平坦,土地肥沃,是村镇农业生产基地.沟坡占 15.7%,是塬面和沟谷之间的缓坡带,大部分已经形成坡式梯田.沟谷占 27.3%,在坡面以下,通常主沟成 U 形、支沟为 V 字形,水力侵蚀为主的水土流失类型^[14].流域的水文特点是暴雨集中、洪水过程陡涨陡落,流速大,汇流快,峰顶尖,历时短.土壤侵蚀主要类型是水蚀和重力侵蚀^[15].1954 年,西峰水保站为研究水土保持综合治理情况,设置杨家沟(面积 0.87 km^2)为治理沟,将原生态环境下的董庄沟(面积 1.15 km^2)设置为对比沟.治理后的杨家沟土地利用类型以林地为主,董庄沟以草地为主,杨家沟的单位面积径流量明显小于董庄沟^[16].

2 材料与方法

水样采集:本研究从 2014 年 5 月至 2015 年 12 月对南小河沟流域大气降水(P1~P9)、水库水(Re1)、沟道水(Ru1~Ru2)、泉水(S1~S7)和井水(W1)进行采集(图 1).其中,大气降水在 9 个采样点,共采集到 694 个样品.雨水的采集频次是场次降雨即采样,考虑到较小场次的降雨不能产生有效的地下水入渗补给和地表产流,因此本研究对于场次降雨量小于 3 mm 的降雨忽略不计;雪水的采集频次是场次降雪即采样.沟道水的采集频次是每次产流时进行采集.由于采样期间降雨产流次数较少,另外,样品运输的过程中有少部分样品破损,所以共采集到 6 个沟道水样品.水库水每月采集两次,共采集 18 个样品.泉水每月采集两次,共采集 160 个样品,其中由于大部分时间没有泉水出露,杨家沟上游 S6 处只采集到 3 个样品.井水主要是从 1 口深层井中取水,每月采集两次,由于采样期间没有找到合适的协助人员,所以共采集了 6 个样品.具体的采样地点,采样时间和采样个数详见表 1.

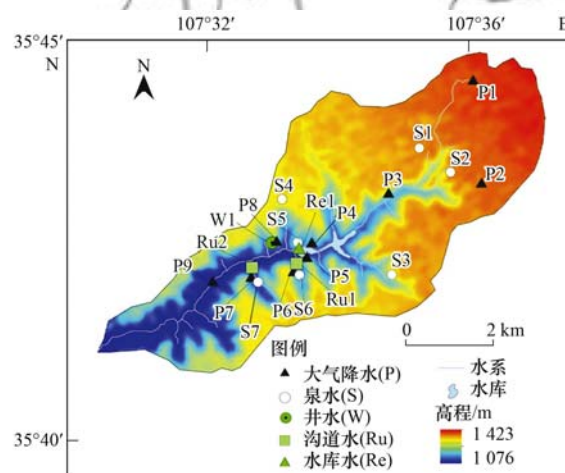


图 1 南小河沟流域水样采集点位置分布示意

Fig. 1 Map of water sampling points in Nanxiaohogou basin

数据来源和室内分析:2014 年 5~9 月的降雨量数据为当地实测数据.2014 年气温、湿度以及其他月份的降水量等气象数据和 2015 年的气象数据从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)中获得.选择的是西峰台站($E107^{\circ}38'$, $N35^{\circ}44'$),距离南小河沟流域约 10 km .在实验室对所有的水样进行了电导率测定,采用台式电导率仪(DDS-307,上海仪电科学仪器股份有限公司,中国),误差 $\pm 1.0\% \text{ FS}$.对 2014 年 5 月在 Ru1、Re1、W1 和 S5 采集到的 4 个样品进行了主要水化学成分分析.其中阳离子(K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+})采用电感耦合等离子体光谱仪

(ICP-OES, Perkin-Elmer Optima 5300DV, USA) 进行分析. 阴离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^-) 采用离子色谱仪 (ICS-2100, Dionex, USA) 进行分析. HCO_3^- 采用硫酸滴定法进行分析. 所有水样进行了阴阳离子平衡验证, 保证可信的误差范围在 $\pm 5\%$ 以内.

氢氧同位素值采用液态水同位素分析仪 (L2130-I, Picarro, USA) 进行测定. 测定结果以相对于维也纳平均海洋水标准 (VSMOW) 千分差的形式表示, 即 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$.

$$\delta = \left(\frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{VSMOW}}}{R_{\text{VSMOW}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中, R_{sample} 为水样中 D/H 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值, R_{VSMOW} 为维也纳平均海洋水标准样品的 D/H 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的

比值. 每个样品测试 6 次, 取后 3 次平均值, 并对样品测试结果进行校准. 本实验标样为中国地质科学院水文地质环境地质研究所生产的标样 GBWO 4458、GBWO 4459、GBWO 4460 和 GBWO 4461, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的参考值分别为 $(-0.15 \pm 0.07)\text{‰}$ 和 $(-1.7 \pm 0.4)\text{‰}$ 、 $(-8.61 \pm 0.08)\text{‰}$ 和 $(-63.4 \pm 0.6)\text{‰}$ 、 $(-19.13 \pm 0.07)\text{‰}$ 和 $(-144.0 \pm 0.8)\text{‰}$ 及 $(-55.73 \pm 0.08)\text{‰}$ 和 $(-433.3 \pm 0.9)\text{‰}$. δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测试精度分别是 $\pm 0.1\text{‰}$ 和 $\pm 1\text{‰}$.

降水中氢氧稳定同位素的加权平均值为:

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

式中, $\delta(w)$ 为加权平均值, P_i 为降雨量, δ_i 为其相应的同位素值.

表 1 南小河沟流域大气降水、地表水和地下水的样品采集数

Table 1 Samples of precipitation, surface water, and groundwater in the Nanxiaohogou basin

采集类型	采集地点/个	采集数/个	采集日期(年-月)	采集频次
大气降水(P)	9	694	2014-08 ~ 2015-12	场次降水
水库水(Re)	1	18	2014-05 ~ 2015-12	每月两次
沟道水(Ru)	2	6	2014-05 ~ 2015-12	场次产流
泉水(S)	7	160	2014-06 ~ 2015-12	每月两次
井水(W)	1	6	2014-05 ~ 2014-08, 2015-02 ~ 2015-03	每月两次

3 结果与讨论

3.1 地表水和地下水的氢氧稳定同位素特征

3.1.1 大气降水的氢氧稳定同位素特征

南小河沟流域大气降水的波动范围较大, 2014 年 8 月至 2015 年 12 月大气降水 δD 值的变化范围是 $-107\text{‰} \sim 30\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围是 $-21.5\text{‰} \sim 3.8\text{‰}$. 其中春季 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围分别为 $-107\text{‰} \sim 30\text{‰}$ 和 $-15.6\text{‰} \sim 2.8\text{‰}$, 夏季 $-84\text{‰} \sim 28\text{‰}$ 和 $-11.8\text{‰} \sim 3.8\text{‰}$, 秋季 $-162\text{‰} \sim -9\text{‰}$ 和 $-21.5\text{‰} \sim -2.0\text{‰}$, 冬季 $-80\text{‰} \sim -2\text{‰}$ 和 $-12.2\text{‰} \sim -1.3\text{‰}$. 由于 2014 年的大气降水水样只采集了半年, 因此, 本文主要分析了 2015 年大气降水的季节变化特征, 每个季节大气降水的同位素值平均值和变化范围详见表 2. 总体上, 南小河沟流域的大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现春季和夏季较为富集、秋季和冬季较为贫乏的季节性变化规律, 这与贺强等^[17]和陈粉丽等^[18]研究黄土高原地区降水同位素特征的结果相一致. 冬季水汽主要受西风带的输送, 来源于高纬度水汽源区^[19, 20], 水汽在运输过程中不断贫化, 再加上冬季气温低, 蒸发少, 沿途的水汽补充也比较少, 所以稳定同位素值较低. 夏季水汽来源较为复杂, 受中纬度水汽源区的西风带输送、南亚季风和东亚季风的影响, 虽然水汽在运移过程中不断降低, 但汇入了不少的局地蒸发水汽, 同时夏

季受到高温影响, 使降水过程中的水滴蒸发强烈, 导致较为贫化的水汽被蒸发, 剩余水滴中的稳定同位素值偏高, 所以导致夏季降水的稳定同位素值偏高. 除季节变化外, 研究区大气降水氢氧同位素还表现出较显著的雨量效应, 例如较长降雨历时和较大的降水事件(2014 年 9 月 10 ~ 17 日, 累计降雨量 $80 \sim 125.7 \text{ mm}$) 使大气降水的 δ 值显著降低, 大气降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $-55\text{‰} \sim -162\text{‰}$ 和 $-8.4\text{‰} \sim -21.5\text{‰}$.

通过分析采样期间 9 个采样点的大气降水稳定同位素数据, 得出南小河沟流域的当地大气降水线 (LMWL) 为 $\delta\text{D} = 7.43 \times \delta^{18}\text{O} + 10.33$ ($R^2 = 0.94$) (图 2), 这与周边其他黄土高原的地区相比, 如长武塬区(距离研究区大约 60 km)^[21]、西安(距离研究区大约 200 km)^[22]、银川(距离研究区大约 330 km)^[18]、韭园沟流域(距离研究区大约 360 km)^[23]等地, 具有相似的大气降水线特征(表 3). 其中长武塬区与研究区同为黄土高原沟壑区, 都属于泾河流域, 且气候特征相似, 距离较近, 长武塬区的大气降水线与研究区的大气降水线表现出更为相似的特征. 南小河沟流域当地大气降水线斜率要小于全球大气降水线^[24]和中国大气降水线^[25]的斜率, 这可能是由于南小河沟流域位于干旱半干旱地区, 深居内陆, 在水汽到来的过程中由于 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比 D/H 的动力分馏作用强, 使研究区水汽 ^{18}O 比 D 含量更加贫

表 2 2015 年南小河沟流域的大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值的季节变化特征

Table 2 Seasonal characteristics of precipitation δD and $\delta^{18}O$ values in Nanxiaohogou basin

季节	降水量/mm	气温/℃	$\delta^{18}O/‰$			$\delta D/‰$		
			算数平均	加权平均	变化范围	算数平均	加权平均	变化范围
春(3~5月)	136.1	11.2	-5.8	-6.1	-15.6~2.8	-32	-35	-107~30
夏(6~8月)	194.3	20.7	-6.3	-5.7	-11.6~3.8	-40	-36	-80~28
秋(9~11月)	179.5	10.2	-7.2	-7.0	-12.1~-2.0	-42	-41	-77~-9
冬(12月)	16.8	-1.8	-9.2	-10.6	-12.2~-9.2	-63	-66	-78~-54

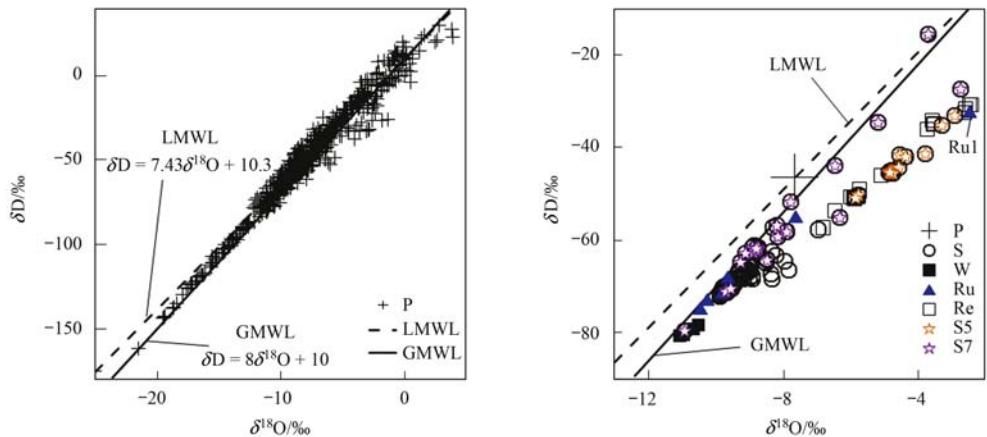


图 2 南小河沟流域大气降水、地表水和地下水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值

Fig. 2 Plot of δD and $\delta^{18}O$ values in precipitation, surface water, and groundwater in Nanxiaohogou basin

表 3 南小河沟流域及周边地区的大气降水线

Table 3 Local meteoric water line of Nanxiaohogou basin and surrounding areas

地区	经纬度	年份	大气降水线	文献
全球		1961	$\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$	[24]
中国		1980	$\delta D = 7.9 \times \delta^{18}O + 8.2$	[25]
南小河沟	107.34°E, 35.42°N	2015	$\delta D = 7.43 \times \delta^{18}O + 10.33$	本研究
韭园沟	110.35°E, 37.59°N	2017	$\delta D = 6.70 \times \delta^{18}O + 0.96$	[23]
长武塬	107.68°E, 35.24°N	2005	$\delta D = 7.44 \times \delta^{18}O + 1.69$	[21]
西安	108.93°E, 34.18°N	1985~1992	$\delta D = 7.49 \times \delta^{18}O + 6.13$	[22]
银川	106.22°E, 38.43°N	1988~1992	$\delta D = 7.22 \times \delta^{18}O + 5.50$	[18]

化,导致降水线斜率偏低^[26,27]。

3.1.2 地表水的氢氧稳定同位素特征

如图 2 所示,2014 年 5 月至 2015 年 12 月,南小河沟流域水库水(Re) δD 值的变化范围是 $-57‰ \sim -31‰$, $\delta^{18}O$ 的变化范围是 $-6.8‰ \sim -2.4‰$, 水库水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值变化范围在大气降水的变化范围之内,但是呈现出较明显的蒸发分馏特征。此外,较大的降雨事件对水库水的同位素值影响较为显著,例如 2014 年 9 月水库水的 δ 值明显降低(图 3),可能是由于该月的降雨量为 219.3 mm,远大于研究区 9 月的多年的平均降雨量 71.9 mm,同时 2014 年 9 月大气降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值($-46‰$ 和 $-13.7‰$)相对于 2014 年 8 月($-95‰$ 和 $-7.4‰$)明显降低 49‰ 和 6.3‰,从而导致 2014 年 9 月水库水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值也较 2014 年 8 月显著下降。受 2014 年秋季降水的影响,2014 年秋和 2015 年春水

库水的同位素值相对较低,2015 年夏同位素值有所升高。尽管 2015 年秋大气降水的同位素值相对有所减小,但是水库水的同位素仍然保持较大值,这可能是由于秋季气温较高,水库水受蒸发分馏作用影响,使重同位素相对富集^[28]。总的来说,水库水的同位素季节变化特征主要受较大降水事件和蒸发的共同影响,呈现夏秋季较高、春冬较低的趋势。

2014 年 5 月和 2015 年 4 月分别在杨家沟采集到沟道水(Ru1)1 次,2014 年 7~9 月期间在董庄沟采集到的沟道水(Ru2)4 次。沟道水的稳定同位素值位于大气降水范围内,受降水同位素值的影响,呈现较大的时间变异性(图 3)。 δD 值的变化范围是 $-75‰ \sim -32‰$,平均值 $-62‰$; $\delta^{18}O$ 的变化范围是 $-10.5‰ \sim -2.5‰$,平均值 $-8.4‰$ 。其中,2015 年 4 月 1 日在杨家沟采集到的沟道水呈现明显的氧漂移特征,野外观测发现水样采集时沟道水量很小,可

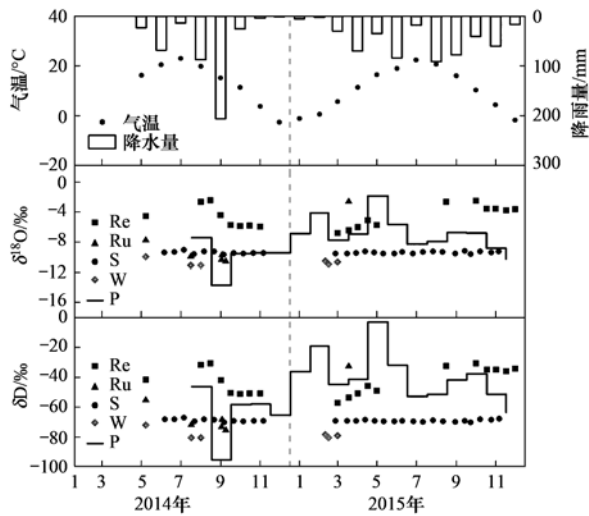


图3 南小河流域大气降水(P)、水库水(Re)、沟道水(Ru)、泉水(S)和井水(W)的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值月平均变化趋势

Fig. 3 Monthly mean values of $\delta^{18}\text{O}$ and δD values in precipitation, reservoir, runoff, spring, and well water in Nanxiaohogou basin

能沟道里的水体主要是由前期产流水滞留于此,明显受到了蒸发的影响造成的。

3.1.3 地下水氢氧稳定同位素特征

井水 δD 的变化范围 $-81\text{‰} \sim -72\text{‰}$,平均值 -79‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围 $-11.1\text{‰} \sim -10.0\text{‰}$,平均值 -10.7‰ 。由于井水采集自一口深层井中,据当地居民介绍,井深约100 m,所以井水可用于代表滞留时间较长的地下水。泉水 δD 的变化范围 $-80\text{‰} \sim -16\text{‰}$,平均值 -67‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围 $-11.0\text{‰} \sim -2.8\text{‰}$,平均值 -9.2‰ 。其中,S1~S4位于流域的上游,属于常流泉,表现出与井水相似的特征,同位素值落在大气降水线的左下角(图2),并且没有明

显的季节变化特征(图4)。

S5位于水库坝体旁,其同位素值呈现较明显的蒸发分馏特征,并且随着水库水的变化而变化,推测S5可能主要是由水库水渗漏补给。S6和S7分别位于杨家沟和董庄沟上游沟道水的源头处。由于杨家沟的出流量较小,因此只在2015年4~6月采集到3次水样。通过图4可以看出,3次采样时间S6处的同位素值与S7处的同位素值相似。S7的同位素值在2015年4月和2015年9~11月期间有较显著的波动,这可能是由于大气降水和蒸发共同作用的结果。总的来说,S7呈现出秋季同位素值偏高的特点,不过由于S6处的采样次数较少,未能捕捉到显著的季节变化特征。

3.2 地表水和地下水的水化学特征

3.2.1 电导率特征

电导率(EC)是水化学成分的重要指标,它综合反映了水中含盐量的多少。通常来说,离子浓度越高,EC值越大,因此EC值可以间接反映水分子在流域水循环中的相对径流路径和滞留时间^[29]。研究区大气降水的EC值呈现冬季明显高于夏季的规律(图5),例如,2014年11月至2015年2月EC值明显升高。这主要是因为冬季为取暖季节,且气压高气温低,容易形成静风现象,不利于污染物扩散,所产生的离子浓度总量会比较高,而夏季降水较多,会对大气中的污染物产生净化和稀释作用^[30, 31]。

地表水(水库水和沟道水)和地下水(井水和泉水)的EC值季节性变化规律和大气降水的大致相似,即冬季高、夏季低,主要是由于夏季的降水要多

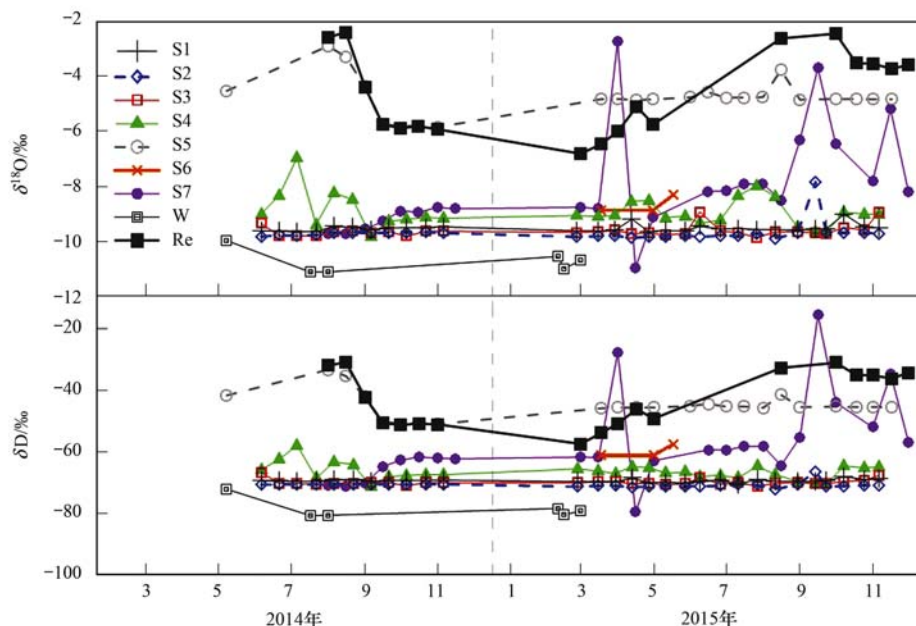


图4 南小河流域地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值月平均变化趋势

Fig. 4 Monthly mean $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of groundwater in Nanxiaohogou basin

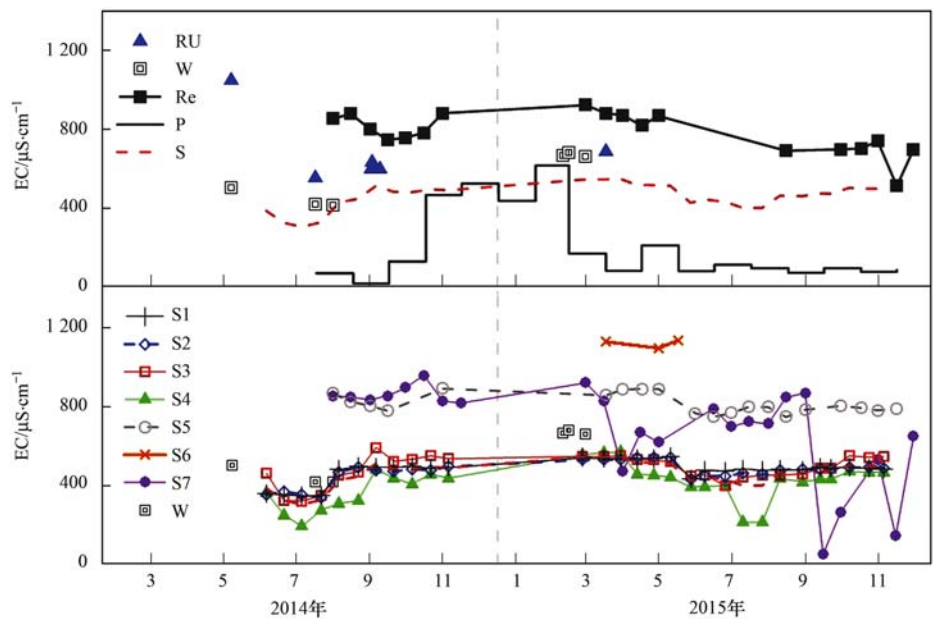


图 5 南小河沟流域大气降水、地表水和地下水电导率的月平均变化趋势

Fig. 5 Monthly mean electric conductivity of precipitation, surface water, and groundwater in Nanxiaohegou basin

于冬季,使得夏季含电导率较低的降水对其他水体起到一定的稀释作用^[32]. 水库水的 EC 平均值要高于沟道水和地下水,可能是因为水库水受蒸发的影响导致电导率比较高^[33,34]. 水库坝体附近采集的泉水(S5)的电导率值呈现出与水库水大致相似的特征,再次说明该处的泉水主要是由水库水渗漏补给.

地下水(泉水和井水)的 EC 平均值要大于大气降水,这可能是由于水岩交互作用,导致地下水中的离子浓度升高,使电导率升高. 其中,泉水 S1~S4 与井水的电导率值相近,并且都没有显著的季节变化特征,泉水 S1~S4 处的同位素特征,说明 S1~S4 可能主要是由深层地下水出露形成. S6(杨家沟)的 EC 值明显较高,这将在后文中进行讨论. S7(董庄沟)的 EC 值稍大于井水的电导率值,但是在 2015 年 4 月和 2015 年 9~11 月, S7 的 EC 值却呈现较大的波动,并且呈现明显降低的趋势.

3.2.2 主要离子含量特征

2015 年 4 月在 Re1、S5、Ru1 和 W1 这 4 处研究区采样并进行水化学测试,结果如表 4 所示, 4 个水样中阳离子含量的排序为: $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$. 其中, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 占有所有阳离子的毫克当量百分数是 52.4%~65.4%, Mg^{2+} 是 30.4%~32.9%,

Ca^{2+} 是 4.2%~14.7%. HCO_3^- 是 4 个采样点处最主要的阴离子,占有所有阴离子的毫克当量百分数是 68.7%~77.0%. Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 占有所有阴离子的毫克当量百分数是 4.6%~17.4%、6.0%~16.8%和 0.2%~4.4%. 总体上,研究区水体的水化学类型为 $\text{Na}\cdot\text{Mg}\text{-HCO}_3$ 型.

Re1 和 S5 表现出相似的特征,均为 Cl^- 离子含量相对 SO_4^{2-} 高,而 Ru1 和 W1 处则 SO_4^{2-} 离子含量相对较高. 再次表明 S5 主要是由水库水渗漏补给. 虽然 Ru1 和 W1 具有相似的水化学特征,但是 Ru1 中主要离子的含量明显大于 W1,这可能是由于沟道水更容易受到蒸发浓缩作用的影响,这与前文中同位素的分析结果相一致.

Gibbs 图可以判断地表水或地下水中化学组分的主要来源,即大气降水、岩石风化和蒸发浓缩作用^[35~37]. 研究区地表水和地下水样点落在岩石风化作用为主的影响范围之内,并往蒸发作用的影响范围偏移,说明南小河沟流域水体的水化学成分主要受岩石风化作用和蒸发浓缩作用的共同影响(图 6). 但是,沟道水 Ru1 的 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值较大,超出了岩石风化和蒸发浓缩作用的影响范围,说明 Ru1 除受岩石风化和蒸发浓缩作用的影响外,可

表 4 南小河沟流域地表水和地下水的主要离子浓度

Table 4 Main ion concentration of surface and groundwater in Nanxiaohegou basin

采样点	主要离子浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$						
	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	K^+	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}
Ru1	233.9	56.9	13.1	0.9	587.4	68.4	113.0
Re1	122.3	37.4	27.6	15.6	494.5	69.5	32.4
S5	123.2	34.4	22.5	1.1	457.5	51.0	41.3
W1	90.6	29.9	22.3	1.0	333.1	11.5	52.8

12.9

能还受其他地球化学因素或者人为因素的影响。 Na^+ 和 Cl^- 的浓度比值 $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 可以表示水体 Na^+ 的富集程度^[38], 也可以识别干旱半干旱地区的盐化机制, Na^+ 和 Cl^- 主要来源于岩盐溶解, $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 值约等于 1, 若比值大于 1, 则有可能受到硅酸盐风化作用的影响^[39]. 如图 7, 样品皆位于 $y=x$ 直线上方, 表明南小沟流域地表水和地下水可能受硅酸盐风化作用的影响较大.

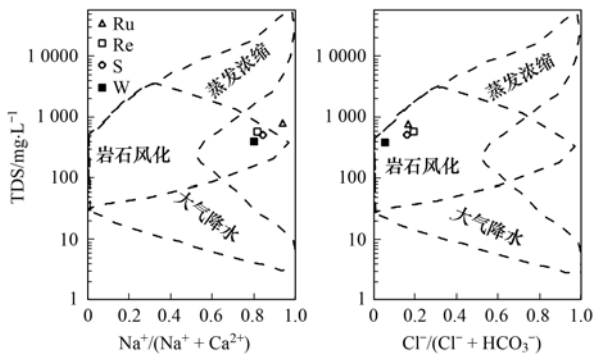


图 6 南小沟流域地表水和地下水 Gibbs 图

Fig. 6 Gibbs diagram of surface water and groundwater in Nanxiaohogou basin

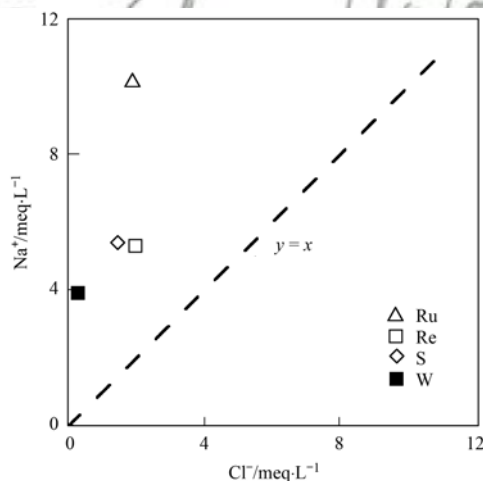


图 7 南小沟流域地表水和地下水中 Na^+ 和 Cl^- 比值

Fig. 7 Diagram of Na^+ vs. Cl^- ratio of surface water and groundwater in Nanxiaohogou basin

3.3 地表水和地下水的相互关系

南小沟流域水库水的氢氧同位素关系方程式为: $\delta\text{D} = 6.12 \times \delta^{18}\text{O} - 14.18$ ($R^2 = 0.98$), 泉水的氢氧同位素关系方程式为: $\delta\text{D} = 7.62 \times \delta^{18}\text{O} + 3.12$ ($R^2 = 0.93$), 井水的氢氧同位素关系方程式为: $\delta\text{D} = 7.23 \times \delta^{18}\text{O} - 1.08$ ($R^2 = 0.93$). 总的来说, 南小沟流域地表水和地下水采样点都落在当地大气降水线附近, 说明大气降水是南小沟流域地表水和地下水的补给来源(图 2). 水库水、泉水和井水的氢氧同位素关系方程与当地大气降水线的斜率和截距相似, 但水库水的斜率和截距要小于泉水和井水, 表明

水库水受二次蒸发影响, 发生了同位素不平衡分馏.

杨家沟 S6 和董庄沟 S7 是 1954 年设置的对比沟, 对董庄沟进行植被自然恢复措施, 形成天然的草地生态系统, 对杨家沟进行人工植树造林措施, 形成人工的森林生态系统. 通过对比分析杨家沟和董庄沟大气降水、沟道水和泉水的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 EC 值之间的关系(图 8), 可以看出沟道水的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 EC 值主要位于深层地下水(井水)和大气降水之间, 说明深层地下水和大气降水可能是沟道水的主要补给来源. 但是在降水较多的丰水季节, 董庄沟上游的泉水 S7 明显受到降水事件的影响. 例如 2015 年 4 月 15 日和 2015 年 9 月 15 日, S7 处的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值突然增大, 但增大范围落于雨水同位素值的变幅范围内, 而 EC 值却突然降低, 这两天也没有降雨事件发生, 这种现象可能主要是由于 S7 处泉水在出露上升过程中混合了大量代表近期降雨信息的土壤水, 因此表现出与降雨的同位素和 EC 值相似的特征. 而杨家沟泉水 S6 处的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值落在大气降水范围内, 但是 EC 值却明显较高. 大量的统计资料表明, 水溶液的电导率与总溶解固体之间有较好的相关性^[28], S6 处较高的 EC 值可能是溶滤作用造成的.

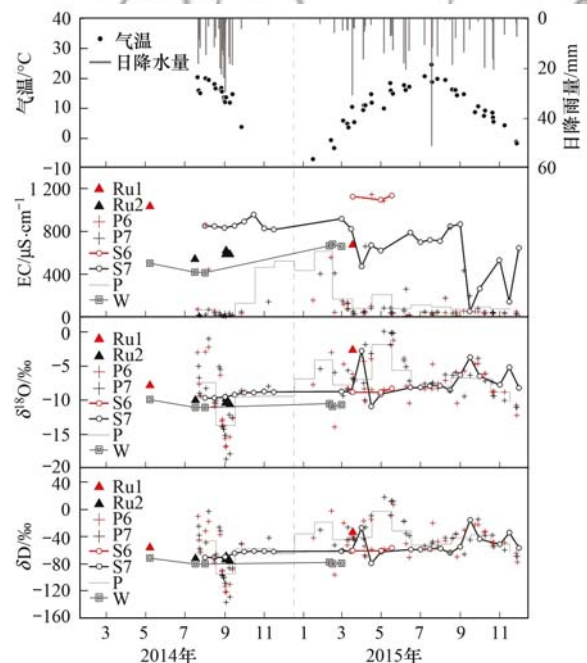


图 8 杨家沟和董庄沟大气降水、沟道水和泉水的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 EC 值

Fig. 8 The δD , $\delta^{18}\text{O}$, and EC values in precipitation, runoff, and spring water in Yangjiagou and Dongzhuangou subbasin

4 结论

(1) 南小沟流域的当地大气降水线为 $\delta\text{D} = 7.43 \times \delta^{18}\text{O} + 10.33$ ($R^2 = 0.94$). 大气降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值表现出较显著的降雨量效应, 呈现春、夏富

集,秋、冬季较为贫化的季节性特征. 水库水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值主要受蒸发和较大降雨事件的影响, 呈现夏、秋高, 冬、春低季节性特征. 地下水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值相对平稳, 无显著季节性变化.

(2) 南小河口流域地表水和地下水的主要水化学类型为 $Na \cdot Mg-HCO_3$ 型, 主要受岩石风化和蒸发浓缩作用影响. 大气降水的 EC 值呈现冬季明显高于夏季的特点, 地表水(水库水和沟道水)和地下水(井水和泉水)的 EC 值季节性变化规律与大气降水相似, 也呈现冬季高、夏季低的特点.

(3) 南小河口流域地表水和地下水之间水力联系紧密, 当地大气降水和深层地下水是南小河口流域内地表水(水库水、沟道水)和泉水的主要补给来源. 同位素和水化学结果进一步表明, 常流泉 S1 ~ S4 可能主要由深层地下水补给, 董庄沟源头泉 S7 在枯水季节表现出与深层地下水相似的同位素和水化学特征, 但是在丰水季节, 表现出明显的大气降雨特征.

致谢: 在此感谢黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站的邢天佑工程师和郜文旺工程师在野外考察和采样过程中给予的帮助.

参考文献:

- [1] 杨阳, 朱元骏, 安韶山. 黄土高原生态水文过程研究进展[J]. 生态学报, 2018, **38**(11): 4052-4063.
Yang Y, Zhu Y J, An S S. Review on ecohydrological processes in Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(11): 4052-4063.
- [2] 闫焕智. 黄土高原董志塬区固沟保塬生态建设探究[J]. 甘肃农业, 2018, (19): 8-11.
- [3] 顾慰祖, 庞忠和, 王全九, 等. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Gu W Z, Pang Z H, Wang Q J, et al. Isotope hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [4] 胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 等. 水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 573-581.
Hu Y B, Xiao W, Qian Y F, et al. Effects of water vapor source and local evaporation on the stable hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation[J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 573-581.
- [5] Wang J, Fu B J, Lu N, et al. Water use characteristics of native and exotic shrub species in the semi-arid Loess Plateau using an isotope technique[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, **276**: 55-63.
- [6] Xiang W, Si B C, Biswas A, et al. Quantifying dual recharge mechanisms in deep unsaturated zone of Chinese Loess Plateau using stable isotopes[J]. Geoderma, 2019, **337**: 773-781.
- [7] Markich S J, Brown P L. Relative importance of natural and anthropogenic influences on the fresh surface water chemistry of the Hawkesbury-Nepean River, south-eastern Australia[J]. Science of the Total Environment, 1998, **217**(3): 201-230.
- [8] 寇永朝, 华琨, 李洲, 等. 泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3142-3149.
Kou Y C, Hua K, Li Z, et al. Major ionic features and their possible controls in the surface water and groundwater of the Jinghe River[J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3142-3149.
- [9] Xiao J, Wang L Q, Deng L, et al. Characteristics, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 2004-2012.
- [10] Liu Y P, Yamanaka T. Tracing groundwater recharge sources in a mountain-plain transitional area using stable isotopes and hydrochemistry[J]. Journal of Hydrology, 2012, **464-465**: 116-126.
- [11] 张兵, 宋献方, 张应华, 等. 第二松花江流域地表水与地下水相互关系[J]. 水科学进展, 2014, **25**(3): 336-347.
Zhang B, Song X F, Zhang Y H, et al. Relationship between surface water and groundwater in the second Songhua River basin[J]. Advances in Water Science, 2014, **25**(3): 336-347.
- [12] 夏露, 宋孝玉, 符娜, 等. 黄土高原沟壑区绿水对土地利用和气候变化的响应研究-以南小河口流域为例[J]. 水利学报, 2017, **48**(6): 678-688.
Xia L, Song X Y, Fu N, et al. Impacts of land use change and climate variation on green water in the Loess Plateau Gully Region—A case study of Nanxiaohegou basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, **48**(6): 678-688.
- [13] 乔勇虎, 郭东静, 陈锡云. 泾河南小河口流域自然降雨特性[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(5): 133-138, 144.
Qiao Y H, Guo D J, Chen X Y. Characteristics of natural rainfall of Nanxiaohegou basin in Jinghe River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(5): 133-138, 144.
- [14] 许小梅, 王鸿斌, 赵嘉莹, 等. 2004-2016 年南小河口流域土壤侵蚀动态变化[J]. 中国水土保持, 2019, (2): 53-55.
Xu X M, Wang H B, Zhao J Y, et al. Dynamic variation of soil erosion of Nanxiaohegou small watershed during 2004-2016[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019, (2): 53-55.
- [15] 张志萍, 陈智汉, 王志雄. 黄土高原沟壑区典型流域水土流失监测发展历程及对策[J]. 中国水土保持科学, 2011, **9**(4): 41-45.
Zhang Z P, Chen Z H, Wang Z X. Development and countermeasures of soil erosion monitoring on typical watersheds of hilly gullied area in Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, **9**(4): 41-45.
- [16] 卞玉敏, 吕海深, 赵盼盼. 南小河口土地利用变化对水文过程的影响[J]. 人民黄河, 2015, **37**(9): 88-91.
Bian Y M, Lyu H S, Zhao P P. Hydrological process responses to land use change in Nanxiaohegou[J]. Yellow River, 2015, **37**(9): 88-91.
- [17] 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.
- [18] 陈粉丽, 张明军, 马潜, 等. 兰州及其周边区域大气降水 $\delta^{18}O$ 特征及其水汽来源[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3755-3763.
Chen F L, Zhang M J, Ma Q, et al. Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation and water vapor sources in Lanzhou City and its surrounding area[J]. Environmental Science, 2013, **34**(10): 3755-3763.
- [19] 李小飞, 张明军, 李亚举, 等. 西北干旱区降水中 $\delta^{18}O$ 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 $\delta^{18}O$ in

- precipitation and moisture transports over the arid region in northwest China [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(3): 711-719.
- [20] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J]. *地理学报*, 2008, **63**(1): 12-22.
Liu J R, Song X F, Yuan G F, *et al.* Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over northwest China and its water vapor sources [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, **63**(1): 12-22.
- [21] 王锐, 刘文兆, 宋献方. 长武塬区大气降水中氢氧同位素特征分析[J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(3): 56-59.
Wang R, Liu W Z, Song X F. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation on Changwu Tableland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, **22**(3): 56-59.
- [22] 王兴, 李王成. 南京与西安地区降水同位素的氘盈余和水汽压分析[J]. *安徽农学通报*, 2018, **24**(21): 126-129.
Wang X, Li W C. Analysis of the influence factors of precipitation isotopes in Nanjing and Xi'an based on deuterium surplus and water vapor pressure [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2018, **24**(21): 126-129.
- [23] 张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 3030-3038.
Zhang H H Z, Yu K X, Li Z B, *et al.* Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in different water bodies in hilly and gully regions of the Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3030-3038.
- [24] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [25] 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.
- [26] 高宗军, 于晨, 田禹, 等. 中国大陆大气降水线斜率分区及其水汽来源研究[J]. *地下水*, 2017, **39**(6): 149-152, 177.
Gao Z J, Yu C, Tian Y, *et al.* Slope zoning of atmospheric precipitation line and its water vapor source in mainland China [J]. *Ground Water*, 2017, **39**(6): 149-152, 177.
- [27] 钱会, 马致远, 李培月. 水文地球化学[M]. (第二版). 北京: 地质出版社, 2012.
Qian H, Ma Z Y, Li P Y. *Hydrogeochemistry* (2nd ed.) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012.
- [28] Song X F, Liu X C, Xia J, *et al.* A study of interaction between surface water and groundwater using environmental isotope in Huaisha River basin [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, **49**(12): 1299-1310.
- [29] 于静洁, 宋献方, 刘相超, 等. 基于 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 及水化学的永定河流域地下水循环特征解析[J]. *自然资源学报*, 2007, **22**(3): 415-423.
Yu J J, Song X F, Liu X C, *et al.* A study of groundwater cycle in Yongding River Basin by using δD , $\delta^{18}\text{O}$ and hydrochemical data [J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, **22**(3): 415-423.
- [30] 申彬你, 张六一, 杨复沫. 三峡库区腹地降水 pH 值和电导率特征[J]. *云南地理环境研究*, 2017, **29**(4): 24-32.
Shen B N, Zhang L Y, Yang F M. Characteristics of pH value and conductivity of precipitation in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2017, **29**(4): 24-32.
- [31] 李宗杰, 宋玲玲, 田青. 武威市降水 pH 值和电导率对沙尘天气的指示意义[J]. *中国沙漠*, 2017, **37**(3): 546-553.
Li Z J, Song L L, Tian Q. The pH and electric conductivity of precipitation and their Indicative significance of sand-dust weather in Wuwei, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2017, **37**(3): 546-553.
- [32] Peng T R, Lu W C, Chen K Y, *et al.* Groundwater-recharge connectivity between a hills-and-plains' area of western Taiwan using water isotopes and electrical conductivity [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, **517**: 226-235.
- [33] 袁静, 张富, 李怀有, 等. 南小河沟流域不同措施处理下的水土流失规律[J]. *水土保持通报*, 2014, **34**(3): 39-43.
Yuan J, Zhang F, Li H Y, *et al.* Law of soil and water loss under different measures in south Xiaohogou Watershed [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, **34**(3): 39-43.
- [34] 刘晓燕, 刘斌, 杨胜天. 黄土高原沟壑区产沙驱动力及减沙潜力分析[J]. *人民黄河*, 2014, **36**(5): 1-3.
Liu X Y, Liu B, Yang S T. Driving force of sediment production and potential of sediment reduction in the Gullied Rolling Loess Area [J]. *Yellow River*, 2014, **36**(5): 1-3.
- [35] 孙一博, 刘朋飞, 王文科, 等. 渭河流域地下水的水化学特征及形成机制[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, **14**(2): 152-158.
Sun Y B, Liu P F, Wang W K, *et al.* Chemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Wei River Basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, **14**(2): 152-158.
- [36] 金犇, 谭红兵, 张玉东, 等. 黄土高原典型山地-沟壑区地下水水化学特征及成因-以六盘山地区为例[J]. *水文*, 2017, **37**(2): 89-96.
Jin B, Tan H B, Zhang Y D, *et al.* Hydrochemical property and origin of groundwater in hilly-gully Areas of Loess Plateau [J]. *Journal of China Hydrology*, 2017, **37**(2): 89-96.
- [37] 范广群, 张德忠, 张建明, 等. 银川平原水体氢氧同位素及主要水化学参数特征[J]. *干旱区研究*, 2018, **35**(5): 1040-1049.
Fan G Q, Zhang D Z, Zhang J M, *et al.* Hydrogen and oxygen isotopes and hydrochemical parameters of water samples from the Yinchuan Plain [J]. *Arid Zone Research*, 2018, **35**(5): 1040-1049.
- [38] 章光新, 邓伟, 何岩, 等. 中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J]. *水科学进展*, 2006, **17**(1): 20-28.
Zhang G X, Deng W, He Y, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution laws of groundwater in Songnen Plain, northeast China [J]. *Advances in Water Science*, 2006, **17**(1): 20-28.
- [39] Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads [J]. *American Journal of Science*, 1987, **287**(5): 401-428.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, <i>et al.</i> (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, <i>et al.</i> (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, <i>et al.</i> (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, <i>et al.</i> (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, <i>et al.</i> (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, <i>et al.</i> (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, <i>et al.</i> (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, <i>et al.</i> (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, <i>et al.</i> (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, <i>et al.</i> (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, <i>et al.</i> (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, <i>et al.</i> (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, <i>et al.</i> (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, <i>et al.</i> (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, <i>et al.</i> (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, <i>et al.</i> (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, <i>et al.</i> (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, <i>et al.</i> (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, <i>et al.</i> (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i> (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, <i>et al.</i> (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, <i>et al.</i> (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-yang, LIU Hong-fei, <i>et al.</i> (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, <i>et al.</i> (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, <i>et al.</i> (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, <i>et al.</i> (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, <i>et al.</i> (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, <i>et al.</i> (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, <i>et al.</i> (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, <i>et al.</i> (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, <i>et al.</i> (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, <i>et al.</i> (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, <i>et al.</i> (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, <i>et al.</i> (1005)