

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期

Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素 李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)

新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM_{2.5} 的影响 逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)

基于网格的长三角 PM_{2.5} 分布影响因素及交互效应 黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)

ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用 李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)

中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析 赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 丁志健, 王格慧 (3127)

四川盆地 PM_{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)

河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用 邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)

九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应 黄亚玲, 黄金良 (3156)

滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性 袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)

白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析 张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)

镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价 原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)

洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险 刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)

苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价 白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)

武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价 朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)

升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析 崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝沈, 高祥 (3223)

青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析 寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)

三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析 何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)

哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子 路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)

湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应 居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)

补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征 赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海淼, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)

蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征 李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)

长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)

长江下游居民区降水地表径流的污染特征 郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)

潮河流域降雨径流事件污染物输出特征 包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)

不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响 单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)

基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估 秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)

蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性 李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸥 (3348)

污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布 王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)

基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因 杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)

石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析 唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)

一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水 吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)

外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能 唐义, 马邕文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)

臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响 吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)

间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷 张玉君, 李冬, 王敬鑫, 张富国, 张杰 (3405)

提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响 古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)

低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析 钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)

矿渣改性剂对城市污泥重金属稳定化 张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)

2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氨排放的影响 王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)

麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氨挥发排放的影响 韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)

水肥管理对热带地区双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)

耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径 杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)

铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响 赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)

农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价 陈莹, 刘汉焱, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)

亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例 刘旭, 王训, 王定勇 (3507)

深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征 林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)

同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选 周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)

两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复 袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)

青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征 刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)

成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析 刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)

土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异 席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)

《环境科学》征订启事(3315) 《环境科学》征稿简则(3357) 信息(3391, 3441, 3564)

升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析

崔玉环¹, 王杰^{2*}, 刘友存³, 郝泷¹, 高祥¹

(1. 安徽农业大学理学院, 合肥 230036; 2. 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230039; 3. 江西理工大学资源与环境工程学院, 赣州 341000)

摘要:以升金湖河湖交汇区为研究区,测试不同类型水体水化学组成和氢氧同位素值,分析其季节变化特征,探究地表-地下水中化学离子来源,最后估算混合水源对地下水中化学离子的贡献量。结果表明:①研究区地表-地下水主要离子浓度均高于大气降水,理化参数呈现季节变化特征;②地表水以 Ca-HCO₃ 类型水为主,且在夏季占比明显高于其他季节,而地下水以 Ca-HCO₃ 和 Ca-SO₄ 类型水为主,占比分别为 46% 和 27%,且季节差别不显著;③地表-地下水中 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 主要来自于碳酸盐岩的溶解,且有碳酸和硫酸参与了碳酸盐矿物溶解的过程,Na⁺ 和 Cl⁻ 除来源于大气降水外,还来源于当地农业施肥和粪便污水;④水源混合也是地下水化学离子的一个重要来源,其对 Cl⁻ 的贡献率平均达到 28%,且呈现季节变化趋势。

关键词:升金湖;水化学特征;氢氧稳定同位素;离子成因;河湖交汇区

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3223-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202012016

Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface

CUI Yu-huan¹, WANG Jie^{2*}, LIU You-cun³, HAO Shuang¹, GAO Xiang¹

(1. School of Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. College of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230039, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The interface between Shengjin Lake and Yangtze River was selected as the study area. The water chemical composition and hydrogen and oxygen isotope values of different types of water bodies were tested, and their seasonal variation characteristics were analyzed to explore the sources of chemical ions in the surface and groundwater. Finally, the contribution of mixed water sources to chemical ions in groundwater was estimated. The results show the following ① The concentration of chemical ions in the surface and groundwater of the study area is higher than that of atmospheric precipitation, and the physical and chemical parameters exhibit seasonal variation. ② Surface water mainly belongs to the Ca-HCO₃ type, but the proportion of the Ca-SO₄ type in summer is significantly lower than that in other seasons; Groundwater primarily belongs to Ca-HCO₃ and Ca-SO₄ types, with proportions of 46% and 27%, respectively, and the seasonal difference is not significant. ③ Ca²⁺ and Mg²⁺ in the surface and groundwater mainly come from the dissolution of carbonate rocks, carbonic acid and sulfate ions participate in the dissolving process of carbonate minerals. Na⁺ and Cl⁻ are partly derived from atmospheric precipitation and partly sourced from agricultural fertilization and manure sewage. ④ Mixed water sources is also an important source of chemical ions in groundwater, with the average contribution 28% to Cl⁻, showing a seasonal trend.

Key words: Shengjin Lake; water chemistry characteristics; hydrogen and oxygen stable isotopes; ion origin; meeting place of lake and river

河湖交汇区是河水、湖水与地下水相互作用的关键区域^[1,2]。在河湖季节性水文情势影响下,携带不同浓度化学离子和营养盐的河水、湖水与地下水交互作用,不仅对河湖交汇区水分传输起着关键的调节作用^[3],也直接参与了其物理和生物地球化学循环过程,对维系河湖系统物质流和能量流起着关键作用^[4]。而受水力设施的影响^[5],河湖之间的自然水力联系状态发生改变^[6,7],进而改变了河湖以及地下水体的流向、化学物质和养分的传输过程,及水体的生物地球化学功能^[8,9]。因此,了解河湖交汇区地表-地下水的水化学特征及形成因素,对水环境保护、水资源开发和水利设施合理运作具有重要意义。

流域地表-地下水水化学组成受岩石风化、径流的补排过程、赋存条件和人类活动等因素的影响^[10-12]。利用不同水体的水化学参数数据,通过水化学统计图解等方法,可以揭示地表-地下水水化学离子的来源与转换规律^[13]。周嘉欣等^[14]和张艳等^[15]通过水化学统计图解方法分析了疏勒河上游流域和阆中市思依镇地表水和地下水的主要离子特征及其控制因素。李军等^[16]运用水化学统计图解和

收稿日期: 2020-12-02; 修订日期: 2020-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401022, 41861002, 41801332); 安徽高校自然科学基金项目(KJ2019A0045)

作者简介: 崔玉环(1983~),女,博士,讲师,主要研究方向为水资源与水环境, E-mail: cuiyh@ahau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: wangjie@ahau.edu.cn

统计分析等方法分析了会仙岩溶湿地不同水文周期地下水的水化学特征,并深入探讨了自然因素和人为因素对主要化学离子的影响.刘鑫等^[17]分析了汾河浅层地下水水化学特征,并通过氢氧同位素特征分析了地下水的来源,最后评价了地下水水质状况.因此,通过水化学统计图解的方法可以揭示地表-地下水主要的水化学类型、定性分析其控制因素和化学离子来源^[18,19].上述分析考虑了岩石风化、人类活动对流域地表-地下水水化学组成的贡献,而在河湖交汇区,地表-地下水水力联系极为复杂,混合水源(大气降水、长江、河水和湖泊等)对其水化学成分组成的影响难以忽略,需要加以考虑.

本文以长江中下游升金湖河湖交汇区为研究区,自2015年3月至2016年7月采集该地区的大气降水、长江水、湖水、河水和地下水水样,室内测定不同水体的氢氧同位素和水化学参数,分析其季节变化特征,进而探究该区域地表-地下水中主要离子来源,并估算混合水源对地下水中主要离子的贡献量,以期为生态环境保护与治理提供理论指导.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

升金湖河湖交汇区位于安徽省池州市境内,北

邻长江干流,南接升金湖湖区,升金湖与长江通过黄湓河相连,但其水系之间的连通性受到位于黄湓河上的黄湓闸控制.黄湓河每年5~8月为丰水期,平均水位12.5 m(吴淞高程),11月至次年4月为枯水期,平均水位8.9 m,其他时期为平水期,平均水位11.3 m.研究区年平均降水量约1600 mm,且受亚热带季风影响,主要集中在夏季,约占50%.

每年4月和5月涨水期,黄湓闸开始关闸聚水,升金湖水位逐渐上升,到6~8月丰水期,长江水位高于湖水位时,防止长江水倒灌,黄湓闸关闭,9~10月退水期升金湖水位回落,但仍然高于长江水位,直至11月至次年3月的枯水期,升金湖水位远高于长江水位,黄湓闸开始向长江放水,湖水位逐渐回落^[20,21].因此,黄湓闸的运作方式,直接控制着升金湖水位和面积的季节波动,影响河湖之间水量与水质的交换,进而影响河湖交汇区地表水与地下水之间水量的补排和水质的转换.

结合升金湖河湖交汇区地形特点,共布设7个地表水采样点、3个地下水采样点和1个降水取样点(图1).其中S1、S2和S3为湖水采样点,Cj1和Cj2为长江水采样点,H1和H2分别为黄湓闸两侧黄湓河近长江段和近湖泊段河水采样点,D1、D2和D3为井水采样点,P为降水取样点.

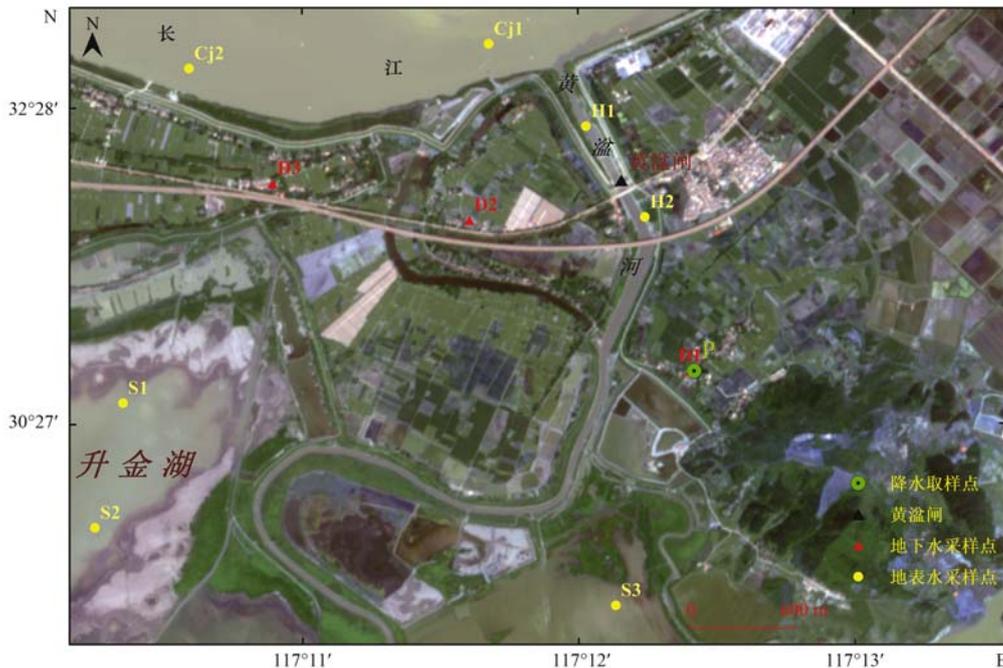


图1 研究区及采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the study area

1.2 水样采集与成分测定

本研究在2015年3月至2016年7月期间分6次对长江水、升金湖湖水、黄湓闸两侧河水和地下水进行调查采样,共采集长江水样和河水样各12个,

湖水样和地下水样各18个,并按月采集该区域的大气降水样,共16个.长江水样、河水样和湖水样均采集于流速较大的地方,距岸边距离大于2 m. D1和D2为饮用水井, D3为灌溉水井,均为井深4~5 m

的浅层潜水井,在地下水采集时用小型抽水泵抽取水井底部水体,以减少水深差异对同位素值的影响. 采样时利用 GPS 定位,将采集的水样先用 0.45 μm 玻璃纤维滤膜过滤,然后用经水样冲洗处理过的聚乙烯瓶分装,用于水化学参数测定,样品测试前放置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 的冰箱中冷藏保存,并于一周内完成水样分析. 另外用经水样冲洗的 2 mL 棕色小口玻璃瓶分装水样,放置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 的冰箱中冷藏保存,用于后期测定水体氢氧同位素值.

主要测定的水化学指标包括:水温、pH 值、溶解氧、矿化度、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^{-} 、 Cl^{-} 和 NO_3^{-} 离子等. 其中水温、pH 值和溶解氧等参数利用美国哈希水质仪 (DS5 系列) 现场测定; HCO_3^{-} 离子浓度用盐酸滴定法测定,每个样品重复滴定 2~3 次,平均误差 <5%. 其余指标在各采样点采集 500 mL 水样后带回实验室测定,阳离子 (K^{+} 、 Na^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 NH_4^{+}) 用戴安 ICS1500 离子色谱仪分析,阴离子 (SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 、 F^{-} 和 Cl^{-}) 用万通 MIC 离子色谱仪分析,阴阳离子电荷平衡之差 <5%.

氢氧同位素室内测试在中国农业科学院环境稳定同位素实验室完成,采用 TC-EA 高温裂解,制备出 H_2 和 CO 之后再行同位素的测定,采用维也纳平均海水 (VSMOW) 为标准样, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测定精度分别达到 $\pm 0.2\text{‰}$ 和 $\pm 0.01\text{‰}$.

1.3 同位素混合模型

贝叶斯混合模型可以用来识别多个源并计算它们对混合物的贡献^[22,23],该模型基于狄利克雷分布,在贝叶斯框架下构建了一个逻辑先验分布. 本研究利用贝叶斯混合模型 (MixSIAR 版本 3.1.10)^[24] 来量化研究区地下水不同补给来源的贡献比率. 模型可表示为:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^k P_k (S_{jk} + C_{jk}) + \varepsilon_{jk} \quad (1)$$

$$S_{jk} \sim N(\mu_{jk}, \omega_{jk}^2)$$

$$C_{jk} \sim N(\lambda_{jk}, \tau_{jk}^2)$$

$$\varepsilon_{jk} \sim N(0, \sigma_j^2)$$

式中, X_{ij} 为混合物 i 同位素 j 的 δ 值,其中 $i=1,2,3, \dots, N$; $j=1,2,3, \dots, J$. P_k 为来源 k 的比率,需要被模型估计; S_{jk} 为来源 k 同位素 j 的 δ 值,服从均值为 μ_{jk} , 方差为 ω_{jk}^2 的正态分布; C_{jk} 为来源 k 同位素 j 的分馏系数,服从均值为 λ_{jk} , 方差为 τ_{jk}^2 的正态分布; ε_{jk} 为残余误差,表示其他各个混合物间无法量化的方差,其均值为 0, 标准差为 σ_j .

1.4 混合水源对水化学参数的贡献

地表和地下水中的水化学参数 (Cl^{-} 等) 受补给

水源混合和存储环境化学离子输入的综合影响,其中补给水源对水化学参数浓度的贡献可用下式计算:

$$C_j = C_{j1} \times x_1 + C_{j2} \times x_2 + \dots + C_{jn} \times x_n \quad (2)$$

式中, C_j 为地表或地下水中第 j 个化学参数浓度的模拟值, $C_{j1} \sim C_{jn}$ 为第 1 到第 n 个补给水源的第 j 个化学参数浓度, $x_1 \sim x_n$ 为第 1 到第 n 个补给水源的贡献率.

2 结果与分析

2.1 地表-地下水理化参数空间特征

研究区地表-地下水体的主要理化参数实测值如表 1 所示. 不同水体的 pH、COND 和 TDS 理化参数存在较大偏差,其离子组成具有明显的时空特征,其中河水、湖水和长江水等地表水的 pH 值介于 7.2~9.2 之间,偏碱性,且湖水 > 河水 > 长江水,地下水的 pH 值介于 6.1~7.7 之间,偏中酸性,降水的 pH 值介于 4.2~5.6 之间,呈酸性;溶解性总固体 TDS 在地表水中介于 88~354 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,且长江水 > 河水 > 湖水,在地下水中介于 210~618 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,在降水中介于 10~77 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,说明水体与可溶解矿物接触时间越长,其 TDS 越高^[25]; 电导率 COND 在地表水中介于 135~920 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间,且长江水 > 河水 > 湖水,在地下水中介于 314~821 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间,在降水中介于 17~96 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间.

大气降水中 K^{+} 、 Na^{+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 和 Cl^{-} 质量浓度均值分别为 0.82、0.13、3.72、0.67 和 0.44 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在其他水体中离子质量浓度均高于大气降水,且地下水显著大于长江水、河水和湖水等地表水,说明除大气降水外,地表和地下水中化学离子还有其它的输入来源.

2.2 地表-地下水水化学类型季节特征

根据研究区地表-地下水在不同采样期的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 HCO_3^{-} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^{-} 等离子质量浓度绘制的 Piper 三线图可以看出 (图 2),地表水中主要阳离子均为 Ca^{2+} ,占全部阳离子的 59%~87%, Na^{+} 质量浓度在春秋两季明显高于夏冬季,占全部阳离子的 1%~27%, K^{+} 和 Mg^{2+} 季节波动相对较小,分别占全部阳离子 8.5% 和 7.7%. 地表水中主要阴离子均为 HCO_3^{-} 和 SO_4^{2-} ,两者占全部阴离子的 81%~95%, Cl^{-} 质量浓度在春秋两季明显高于夏冬季,占全部阴离子的 4%~17%, NO_3^{-} 季节波动相对较小,占全部阴离子 0.1%~3.9%.

地下水中主要阳离子均为 Ca^{2+} ,占全部阳离子的 66%~84%, Na^{+} 质量浓度在夏季明显低于其他季

表 1 不同水体基本理化性质、稳定同位素和水化学离子统计特征

Table 1 Analytical results of physical and chemical parameters, isotopes, and chemistry of water samples

类型	项目	Na ⁺ /mg·L ⁻¹	K ⁺ /mg·L ⁻¹	Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	F ⁻ /mg·L ⁻¹	Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	TDS /mg·L ⁻¹	COND /μS·cm ⁻¹	pH	δ ¹⁸ O /‰	δD /‰
长江水	平均值	7.43	4.64	37.24	3.74	0.63	8.57	24.29	37.03	1.20	254	413	7.59	-8.40	-51.09
	最大值	13.56	7.98	48.53	4.85	0.78	14.57	38.57	43.84	2.21	354	920	8.29	-5.68	-29.93
	最小值	2.13	2.11	27.96	1.70	0.41	3.33	13.18	29.82	0.01	115	174	7.20	-11.13	-76.26
	标准偏差	4.03	1.86	6.32	1.22	0.12	4.80	8.68	5.01	0.69	76	242	0.34	1.59	13.80
河水	平均值	4.64	3.51	34.37	3.73	0.56	5.26	17.33	34.86	0.91	179	331	7.74	-7.56	-44.14
	最大值	12.20	4.96	50.81	4.83	0.69	13.77	37.02	47.00	1.98	256	773	8.81	-6.14	-31.72
	最小值	0.77	1.08	26.72	1.64	0.23	2.04	7.95	21.50	0.08	102	154	7.40	-10.88	-71.76
	标准偏差	3.54	1.24	7.24	1.13	0.14	3.94	8.92	6.66	0.59	52	196	0.47	1.32	11.16
湖水	平均值	2.52	3.82	33.20	3.42	0.56	3.36	10.64	29.24	0.70	131	250	8.19	-6.83	-39.48
	最大值	5.80	10.46	50.10	5.48	0.74	6.06	22.44	42.60	1.39	199	526	9.20	-4.61	-20.75
	最小值	0.00	0.00	23.38	2.31	0.35	1.74	7.21	19.72	0.06	88	135	7.60	-8.78	-54.77
	标准偏差	1.58	2.69	8.68	0.94	0.14	1.48	3.86	7.27	0.42	34	116	0.50	1.13	9.01
地下水	平均值	11.59	5.10	64.52	4.85	0.45	16.92	36.16	62.68	10.96	410	578	7.11	-8.10	-45.53
	最大值	15.67	11.84	114.13	7.24	0.65	22.52	42.56	108.17	22.39	618	821	7.70	-7.18	-34.78
	最小值	6.41	1.60	31.61	1.70	0.30	12.36	25.50	31.60	2.55	210	314	6.10	-9.21	-57.06
	标准偏差	3.06	2.75	22.02	1.69	0.11	3.03	5.53	17.41	6.54	112	147	0.45	0.55	5.82
降水	平均值	0.13	0.82	2.59	0.17	0.46	0.44	3.72	1.50	0.67	26	37	4.67	-11.41	-71.33
	最大值	0.77	2.27	5.01	0.42	1.01	1.18	7.63	9.14	1.28	77	96	5.60	-10.08	-58.94
	最小值	0.00	0.00	1.32	0.00	0.00	0.21	2.06	0.00	0.26	10	17	4.19	-13.12	-85.22
	标准偏差	0.26	0.87	1.07	0.14	0.35	0.29	1.60	2.97	0.29	21	25	0.42	1.11	9.10

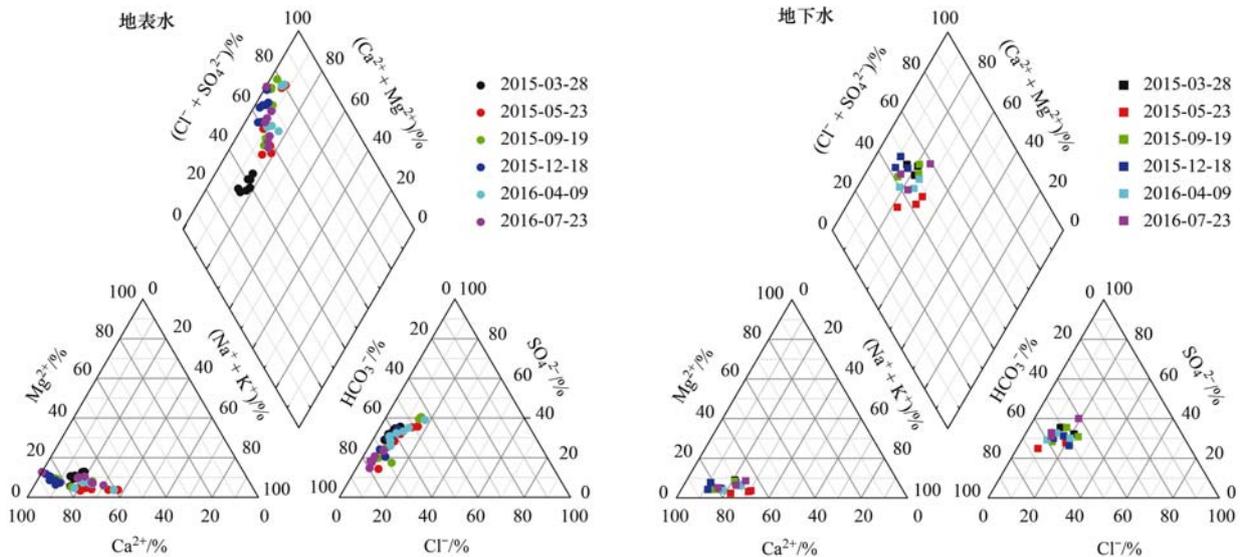


图 2 不同采样期地表、地下水体的 Piper 三线图

Fig. 2 Piper three-line map of water bodies in different periods

节,占全部阳离子的7%~27%,K⁺在夏季明显高于其他季节,占全部阳离子的2%~15%,Mg²⁺季节波动相对较小,占全部阳离子的6%。地下水中主要阴离子为HCO₃⁻和SO₄²⁻,两者占全部阴离子的62%~84%,其他离子质量浓度季节波动相对较小。

研究区水体受碳酸盐岩和石膏溶解作用的影响较大,其水化学类型主要为Ca-HCO₃-SO₄类型。其中,地表水中Ca-HCO₃类型水在夏季占比最高,约74%,且湖水>河水>长江水,在其他季节占比有所下降;而Ca-SO₄类型水在夏季占比明显低于其他

季节,夏季约为18%,其他季节约为30%。其原因在于,夏季高强度降水增加了地表径流量,导致大量碳酸盐岩被冲刷溶解,故地表水以Ca-HCO₃类型水为主,随着后期径流减缓,水中溶解的过多Ca²⁺和HCO₃⁻生成CaCO₃沉淀析出,引起Ca-HCO₃类型水占比下降。而地下水中Ca-HCO₃和Ca-SO₄类型水分别占比46%和27%,其他类型占27%左右,季节差别不显著,其原因在于地下水具有相对较高的易溶性Na⁺和Cl⁻,且由于采样点位于平原区,水力坡度低,水体运移缓慢,大量的碳酸盐岩和石膏溶

解导致地下水矿化度明显升高。

3 讨论

3.1 矿物溶解输入

地表-地下水体的溶解离子主要来源有大气输入(干湿、沉降)、岩石和矿物的风化作用以及人为活动输入,包括工业和农业活动等输入^[26]。根据水中的离子比例差异可以了解各种离子来自于哪种矿物溶解及其水化学演化过程^[27,28]。

Na^+ 和 K^+ 一般来源于大气降水、硅酸盐矿物溶解以及蒸发盐矿物溶解^[29], 而 Na^+/Cl^- 与 Cl^- 之间的毫克当量浓度比可反映水中 Na^+ 和 Cl^- 的来源。当 Na^+/Cl^- 接近于 1 时, 表明在未受人类活动作用影响下, Na^+ 和 Cl^- 主要来源于岩盐溶解。图 3(a) 表明研究区的大部分地表、地下水样点 $\text{Na}^+/\text{Cl}^- > 1$, 说明除了发生岩盐溶解之外, Na^+ 和 Cl^- 还有人类活动等其他输入。

$(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 HCO_3^- 之间的毫克当量浓度比值可以确定 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的来源, 当其比值为 1 时, 表明地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要源于方解石、白云石和石膏等的溶解, 当其比值 > 1 时, 主要来源于碳酸盐岩溶解, 当其比值 < 1 时, 主要来源于硅酸盐和蒸发岩的溶解^[30]。图 3(b) 显示河湖交汇区地表-

地下水样点均分布于 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) : \text{HCO}_3^- = 1:1$ 线上方且远离平衡线, 表明地表-地下水中的钙镁离子主要来自碳酸盐岩的溶解, 且还有碳酸、硫酸和硝酸等其他离子参与碳酸盐岩溶解。

$(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^-)$ 与 $(\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-)$ 的毫克当量浓度比值可进一步分析碳酸、硫酸参与地表水和地下水碳酸盐岩溶解情况, 当比值为 2 时, 硫酸参与碳酸盐矿物溶解过程; 当比值为 1 时, 碳酸参与碳酸盐矿物溶解过程^[29]。由图 3(c) 可看出, 河湖交汇区地表水 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^-)$ 与 $(\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-)$ 比值拟合斜率为 1.3, 介于 1 和 2 之间且分布较为集中, 说明地表水中碳酸参与碳酸盐矿物溶解过程多于硫酸, 而地下水拟合斜率为 2.3 且样点分布离散, 说明碳酸、硫酸参与了碳酸盐矿物溶解过程, 且硫酸多于碳酸。

$[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})]$ 与 $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 的毫克当量浓度关系可判断地下水是否发生了阳离子交换作用^[30], 若比值 < 0 时, 表明水中吸附有 Na^+ 的岩土被水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 置换, 使水体中 Na^+ 增加而 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 减小, 发生阳离子交换反应。图 3(d) 显示, 河湖交汇区地表水位于 1:1 线附近及以上, 说明阳离子吸附交替作用不显著, 而地下水位于 1:1 线之下且偏离较远, 说明地下水受

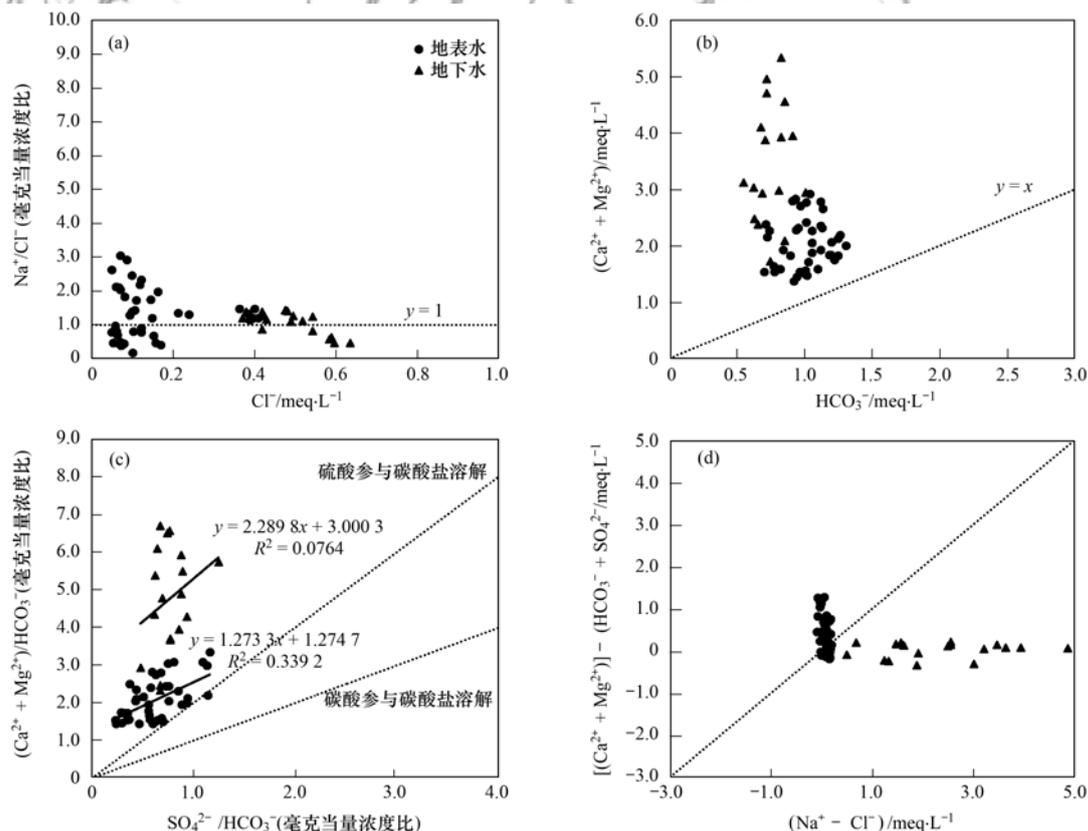


图 3 不同水体离子比例关系

Fig. 3 Diagram of ion ratios in different waters in the study area

阳离子交换作用显著。

3.2 水源混合输入

在河湖季节性水文情势或洪水过程的影响下,研究区地表-地下水转换频繁多变,地下水在水量上受降水,长江水和湖水等混合水源的共同补给,且水质上受补给水源、人类活动和岩层矿物溶解的共同影响.因此,可以通过定量分析地下水各补给水源的贡献比率,进而计算出混合水源对地下水化学参数的贡献量。

氢氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 关系被证明是一种可靠的水体来源分析手段^[31,32].研究区地表水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD

的关系点[图4(a)]基本均落在降水线 LMWL 之下,拟合所得地表水蒸发线为 $\delta\text{D} = 8.03 \delta^{18}\text{O} + 16.02$,斜率和截距均小于降水线,这说明本地区地表水在受到大气降水补给时发生了明显的蒸发分馏,黄湓河近长江段河水与长江相连,H1 点同位素特征与长江相近,而黄湓河近湖段河水与升金湖相连,H2 点同位素特征与湖泊相近.而地下水蒸发线为 $\delta\text{D} = 10.52 \delta^{18}\text{O} + 39.65$ [图4(b)],斜率和截距均大于降水线和地表水蒸发线,说明地下水在受到大气降水补给时蒸发分馏过程明显,且 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 同位素数值和地表水接近,说明受到了地表水的补给^[33].

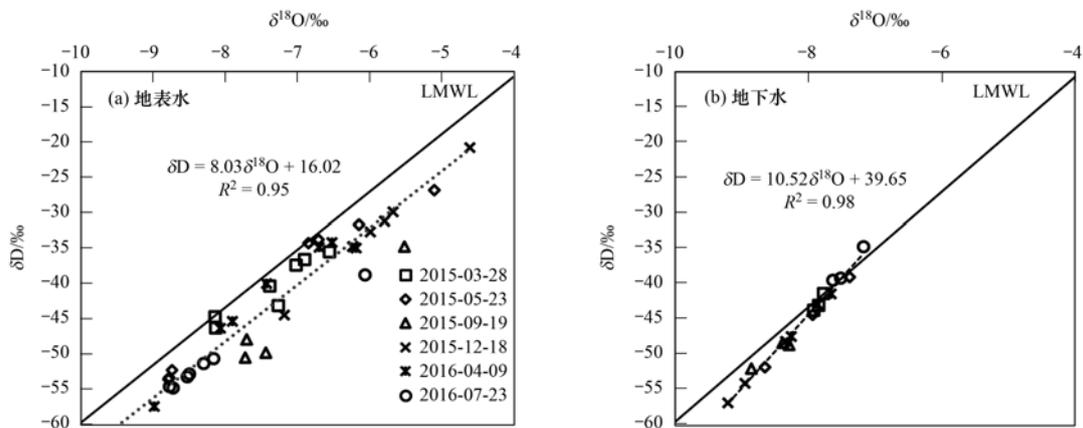


图4 地表水和地下水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

Fig. 4 Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ in surface water and groundwater

基于上述分析,研究区地下水主要补给源有大气降水、长江水和湖水,根据 MixSIAR 模型计算不同采样期各补给水源对地下水的补给比率,结果见表2.大气降水、长江水和湖水对地下水的补给比率分别为

11%、40%和49%,且具有明显的季节变化趋势,长江水在3、5和7月补给比率较高,平均达到51%,其他季节补给比率较低,而湖水则刚好相反,这与控水闸运作下,长江与湖泊水位差异有关^[20,34].

表2 不同水源对地下水的补给率/%

Table 2 Recharge rate of different water sources to groundwater/%

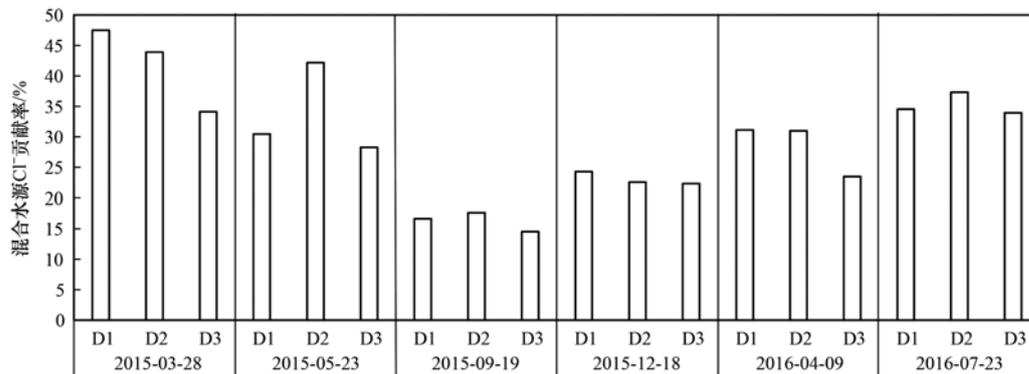
项目	2015-03-28			2015-05-23			2015-09-19			2015-12-18			2016-04-09			2016-07-23		
	D1	D2	D3															
湖水	22	20	16	70	14	48	71	84	81	53	55	60	58	37	52	43	46	55
长江水	76	78	83	25	78	44	5	3	3	31	28	31	31	46	36	35	40	37
降水	2	2	1	5	8	8	24	13	16	16	17	9	11	17	12	22	14	8

Cl^- 在水环境中相对稳定,可能来源有生活污水、工业废水等人为污染源,仅通过不同水体相互转换、混合改变其浓度,因此,可用公式(2)计算不同采样期混合水源对地下水中 Cl^- 质量浓度的贡献率(图5).从图5可以看出,混合水源对地下水中 Cl^- 的贡献率呈现季节变化趋势,在3、5和7月贡献率较高,平均达到35%,其他月份贡献率较低,只占20%左右,从表1和表2也可以看出,高 Cl^- 质量浓度的长江水($8.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)在3、5和7月对地下水的贡献比达50%以上,导致混合水源对地下水中 Cl^- 贡献率较高,而其他月份湖水对地下水的贡献

比率最高,达60%以上,由于湖水的 Cl^- 质量浓度相对较低($3.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),导致混合水源对地下水中 Cl^- 贡献率较低,由此说明水源混合也是地下水化学离子的一个重要来源。

3.3 人为污染输入

人为活动产物对地表-地下水化学参数的影响以农业活动和工业活动最为显著. $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 与 Cl^- 浓度的关系可以用来判断水体 NO_3^- 的来源^[35].一般来说:低 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 值和高 Cl^- 浓度的水样表示 NO_3^- 来源主要是工业和生活污水/粪肥,高 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 值和低 Cl^- 浓度表示 NO_3^- 主要来源于农用

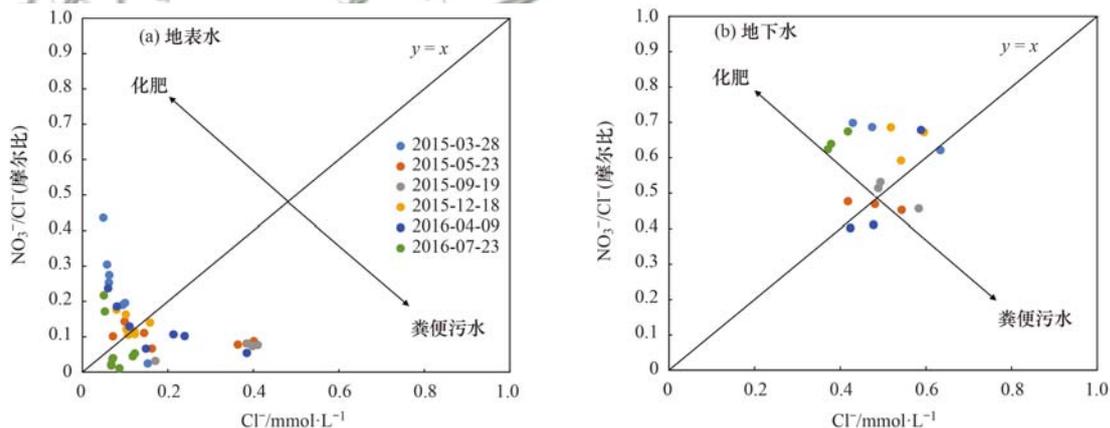
图5 混合水源对地下水中 Cl^- 的贡献率Fig. 5 Contribution rate of mixed water sources to Cl^- in groundwater

化肥^[36,37].

由图 6 中 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 与 Cl^- 浓度的关系可知, 2015 年 3 月地表水具有较高的 Cl^- 浓度(均值: $0.28 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 和较低的 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 值(均值: 0.07), 表明工业废水和生活粪便污水是主要氮污染源; 2015 年的 5 月及 9 月和 2016 年 4 月地表水具有较低的 Cl^- 浓度(均值: $0.09 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 和较高的 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 值(均值: 0.21), 表明农用化肥是主要氮污染源, 这可能与周边农业施肥有关; 2016 年 7 月地表水表现出较低的 Cl^- 浓度和 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 值, 人为污染影响不明显, 这与夏季高强度降水的稀释有关. 同为春季, 2015 年 3 月和 2016 年 4 月的人为污染输入表现出较大差异, 主要跟降水量

有关; 2015 年 3 月降水量仅有 18.5 mm , 导致地表水流动性变差, 污染物积累, 表现出较高的 Cl^- 浓度值, 反硝化作用使得 NO_3^- 浓度降低^[38], 而 2016 年 4 月降水量达到 334.5 mm , 对地表污染物的冲刷、稀释作用明显.

而在不同月份, 地下水均具有较高的 Cl^- 浓度(均值: $0.49 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 和较高的 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 比值(0.57), 表明 NO_3^- 的来源有化学肥料和生活粪便污水. 另外, NO_3^- 和 Cl^- 浓度的相关性分析也表明 NO_3^- 和 Cl^- 在地表水中 ($R=0.75, P<0.01, n=42$) 和地下水中 ($R=0.69, P<0.05, n=18$) 中呈显著相关, 说明生活粪便污水对研究区地表水、地下水的影响较大.

图6 地表水、地下水中 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 与 Cl^- 浓度关系Fig. 6 Relationship between $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ and Cl^- molar concentration in surface water and groundwater

4 结论

(1) 地表水偏碱性, 地下水偏中酸性, 降水呈酸性, TDS 与 COND 表现为地下水 > 长江水 > 河水 > 湖水 > 降水; 地表-地下水体中主要离子质量浓度均高于大气降水, 且地下水 > 长江水 > 河水 > 湖水, 具有一定的季节差异.

(2) 地表水在夏季以 $\text{Ca}\text{-HCO}_3$ 类型水为主, 约

74%, 在其他季节占比有所下降; 地下水中 $\text{Ca}\text{-HCO}_3$ 和 $\text{Ca}\text{-SO}_4$ 类型水分别占比 46% 和 27%, 且季节差别不显著.

(3) 地表-地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来自于碳酸盐岩的溶解, 且水中碳酸、硫酸参与了碳酸盐矿物溶解的过程; 除大气降水外, Na^+ 和 Cl^- 明显受到人为污染输入的影响.

(4) 大气降水、长江水和湖水等混合水源对地

下水中 Cl^- 的贡献率呈季节变化趋势,在 3、5 和 7 月贡献率较高,均值达到 35%,其他月份贡献率较低,水源混合也是地下水化学离子的一个重要来源。

参考文献:

- [1] Boano F, Harvey J W, Marion A, *et al.* Hyporheic flow and transport processes: mechanisms, models, and biogeochemical implications[J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, **52**(4): 603-679.
- [2] Cardenas M B. Hyporheic zone hydrologic science: a historical account of its emergence and a prospectus[J]. *Water Resources Research*, 2015, **51**(5): 3601-3616.
- [3] Wood P J, Hannah D M, Sadler J P. Hydroecology and ecohydrology: past, present and future[M]. Hoboken: Wiley, 2007.
- [4] Lallias-Tacon S, Liébault F, Piégay H. Use of airborne LiDAR and historical aerial photos for characterising the history of braided river floodplain morphology and vegetation responses[J]. *CATENA*, 2017, **149**: 742-759.
- [5] Gandy C J, Smith J W N, Jarvis A P. Attenuation of mining-derived pollutants in the hyporheic zone: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **373**(2-3): 435-446.
- [6] Graham P W, Andersen M S, McCabe M F, *et al.* To what extent do long-duration high-volume dam releases influence river-aquifer interactions? A case study in New South Wales, Australia [J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, **23**(2): 319-334.
- [7] Yellen B and Boutt D F. Hydropeaking induces losses from a river reach: observations at multiple spatial scales [J]. *Hydrological Processes*, 2015, **29**(15): 3261-3275.
- [8] Herzog S P, Higgins C P, McCray J E. Engineered streambeds for induced hyporheic flow: enhanced removal of nutrients, pathogens, and metals from urban streams [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2016, **142**(1), doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001012.
- [9] Siergieiev D, Widerlund A, Ingri J, *et al.* Flow regulation effects on the hydrogeochemistry of the hyporheic zone in boreal rivers [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **499**: 424-436.
- [10] 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 等. 西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比: 以重庆市青木关、老龙洞为例[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3365-3374.
Zhan Z J, Chen F, Yang P H, *et al.* Comparison on the hydrogeochemical characteristics of typical karst groundwater system in southwest China, a case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3365-3374.
- [11] Smith D N I, Ortega-Camacho D, Acosta-González G, *et al.* A multi-approach assessment of land use effects on groundwater quality in a karstic aquifer[J]. *Heliyon*, 2020, **6**(5), doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03970.
- [12] Sheibani S, Ataie-Ashtiani B, Safaie A, *et al.* Influence of lakebed sediment deposit on the interaction of hypersaline lake and groundwater: a simplified case of lake Urmia, Iran [J]. *Journal of hydrology*, 2020, **588**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125110.
- [13] 霍俊伊, 于爽, 张清华, 等. 湘西峒河流域水化学特征及无机碳通量计算[J]. *水文地质工程地质*, 2019, **46**(4): 64-72.
Huo J Y, Yu S, Zhang Q H, *et al.* Hydrochemical characteristics and estimation of the dissolved inorganic carbon flux in the Donghe river basin of western Hunan [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, **46**(4): 64-72.
- [14] 周嘉欣, 丁永建, 曾国雄, 等. 疏勒河上游地表水水化学主要离子特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3315-3324.
Zhou J X, Ding Y J, Zeng G X, *et al.* Major ion chemistry of surface water in the upper reach of Shule river basin and the possible controls [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3315-3324.
- [15] 张艳, 吴勇, 杨军, 等. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3230-3237.
Zhang Y, Wu Y, Yang J, *et al.* Hydrochemical characteristic and reasoning analysis in Siyi town, Langzhong city [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3230-3237.
- [16] 李军, 邹胜章, 赵一, 等. 会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1750-1760.
Li J, Zou S Z, Zhao Y, *et al.* Major ionic characteristics and factors of karst groundwater at Huixian karst wetland, China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1750-1760.
- [17] 刘鑫, 向伟, 司炳成. 汾河流域浅层地下水水化学和氧氢稳定同位素特征及其指示意义[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1739-1749.
Liu X, Xiang W, Si B C. Hydrochemical and isotopic characteristics in the shallow groundwater of the Fenhe river basin and indicative significance [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1739-1749.
- [18] Lu S S, Chen J F, Zheng X Q, *et al.* Hydrogeochemical characteristics of karst groundwater in Jinci spring area, north China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2020, **35**(3), doi: 10.1007/s13146-020-00602-8.
- [19] Ming X X, Groves C, Wu X Y, *et al.* Nitrate migration and transformations in groundwater quantified by dual nitrate isotopes and hydrochemistry in a karst World Heritage site[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **735**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138907.
- [20] 崔玉环, 王杰. 控水闸对通江湖泊水位及面积变化的影响分析——以升金湖为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, **29**(4): 47-52.
Cui Y H, Wang J. Influence of the sluice on water level and area of Yangtze river-connected lakes: a case study in Shengjin Lake [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, **29**(4): 47-52.
- [21] 王行行, 王杰, 崔玉环. 基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1207-1216.
Wang H H, Wang J, Cui Y H. Remote sensing monitoring on spatial differentiation of suspended sediment concentration in a river-lake system based on Sentinel-2 MSI imaging: a case for Shengjin lake and connected Yangtze river section in Anhui province [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1207-1216.
- [22] Parnell A C, Inger R, Bearhop S, *et al.* Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation[J]. *PLoS One*, 2010, **5**(3), doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0009672.
- [23] Wang J, Lu N, Fu B J. Inter-comparison of stable isotope mixing models for determining plant water source partitioning [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **666**: 685-693.
- [24] Stock B, Semmens B, Ward E, *et al.* MixSIAR: Bayesian mixing models in R [EB/OL]. <https://CRAN.R-project.org/package=MixSIAR>, 2020-12-02.
- [25] 蒲焘, 何元庆, 朱国锋, 等. 丽江盆地地表-地下水的化学特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 48-54.
Pu T, He Y Q, Zhu G F, *et al.* Geochemistry of surface and

- ground water in the Lijiang basin, northwest Yunnan [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(1): 48-54.
- [26] El Alfy M, Lashin A, Al-Arifi N, *et al.* Groundwater characteristics and pollution assessment using integrated hydrochemical investigations GIS and multivariate geostatistical techniques in arid areas [J]. *Water Resources Management*, 2015, **29**(15): 5593-5612.
- [27] 张振国, 何江涛, 王磊, 等. 衡水地区深层地下水水化学特征及其演化过程[J]. *现代地质*, 2018, **32**(3): 565-573.
Zhang Z G, He J T, Wang L, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution processes of deep groundwater in Hengshui area[J]. *Geoscience*, 2018, **32**(3): 565-573.
- [28] 李政葵, 夏蔓宏, 董少刚, 等. 洛阳盆地浅层地下水水化学特征及其演化特征分析[J]. *地球与环境*, 2019, **47**(1): 57-63.
Li Z K, Xia M H, Dong S G, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution characteristics of shallow groundwater in the Luoyang basin [J]. *Earth and Environment*, 2019, **47**(1): 57-63.
- [29] 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 等. 沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5428-5439.
Liu J T, Cai W T, Cao Y T, *et al.* Hydrochemical characteristics of groundwater and the origin in alluvial-proluvial fan of Qinhe river [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5428-5439.
- [30] 黄望望, 姜春露, 陈星, 等. 淮南新集矿区主要充水含水层水化学特征及成因[J]. *地球与环境*, 2020, **48**(4): 432-442.
Huang W W, Jiang C L, Chen X, *et al.* Chemical characteristics and genesis of deep groundwater in the Xinji mining area [J]. *Earth and Environment*, 2020, **48**(4): 432-442.
- [31] 李云良, 姚静, 谭志强, 等. 洪泛湿地系统地表水与地下水转化研究进展综述[J]. *水文*, 2019, **39**(2): 14-21.
Li Y L, Yao J, Tan Z Q, *et al.* Advances in surface water-groundwater interactions in floodplain wetlands [J]. *Water*, 2019, **39**(2): 14-21.
- [32] 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.
- [33] 陈建生, 彭靖, 詹沪成, 等. 鄱阳湖流域河水、湖水及地下水同位素特征分析[J]. *水资源保护*, 2015, **31**(4): 1-7.
Chen J S, Peng J, Zhan L C, *et al.* Analysis of isotopes characteristics of river water, lake water and groundwater in Poyang lake basin [J]. *Water Resources Protection*, 2015, **31**(4): 1-7.
- [34] Javadzadeh H, Ataie-Ashtiani B, Hosseini S M, *et al.* Interaction of lake-groundwater levels using cross-correlation analysis: a case study of lake Urmia basin, Iran [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **729**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138822.
- [35] 金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 等. 基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1696-1705.
Jin Z F, Hu J, Wu A J, *et al.* Identify the nitrate sources in different land use areas based on multiple Isotopes [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1696-1705.
- [36] Yang L P, Han J P, Xue J L, *et al.* Nitrate source apportionment in a subtropical watershed using Bayesian model [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **463-464**: 340-347.
- [37] Gibrilla A, Fianko J R, Ganyaglo S, *et al.* Nitrate contamination and source apportionment in surface and groundwater in Ghana using dual isotopes (^{15}N and $^{18}\text{O}-\text{NO}_3$) and a Bayesian isotope mixing model [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2020, **233**, doi: 10.1016/j.jconhyd.2020.103658.
- [38] Cui G Y, Li X D, Yang M D, *et al.* Insight into the mechanisms of denitrification and sulfate reduction coexistence in cascade reservoirs of the Jialing river: evidence from a multi-isotope approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **749**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141682.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)