

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征 秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)

基于 LUR 模型的中国 PM_{2.5} 时空变化分析 刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)

长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制 黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)

春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析 杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)

成都双流夏秋季环境中 VOCs 污染特征 邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)

佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成 李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)

四川省人为源大气污染物排放清单及特征 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)

炼焦工序颗粒物排放特征 王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)

小流域大气氮干湿沉降特征 王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)

流域氮素主要输出途径及变化特征 李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)

生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响 斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)

长江上游农业源溪流雨季中 N₂O 间接排放特征 田琳琳, 王正, 朱波 (5391)

不同氮污染特征河流 NO₃⁻ 浓度、释放通量与排放系数 王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)

多种同位素手段的硝酸盐污染源解析, 以会仙湿地为例 彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)

典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ¹⁸O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例 吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)

沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)

2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响 廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)

周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)

三峡库区沉积物中镍污染特征评价 张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)

四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律 郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)

大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响 周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)

模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)

典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化 王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)

4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析 江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)

微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响 王木兰, 姜玥璐 (5514)

广东省水库拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 的分布特征及影响因子分析 雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)

磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸 尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)

臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果 兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)

水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能 顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)

“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性 刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)

静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应 王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)

多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制 王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)

主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程 刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)

不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响 高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)

主流厌氧氨氧化工艺的运行优化及其微生物的群落变迁 付昆明, 付冀, 李慧, 姜姍, 仇付国, 曹秀芹 (5596)

厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性 陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)

低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)

复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险 吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)

不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)

某大型神渣场地土壤 As 污染特征及生态风险评价 刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)

亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系 辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)

岩溶区典型灌丛植物根系从枝菌根真菌群落结构解析 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)

模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响 李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)

添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响 柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)

长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响 马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)

黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系 乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)

生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解 刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)

CO₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征 唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)

基于层次分析法的医疗废物处置技术评价 许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)

中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力 刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)

《环境科学》第 39 卷(2018 年) 总目录 (5740)

《环境科学》征订启事 (5343) 《环境科学》征稿简则 (5439) 信息 (5595, 5619, 5638)

沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析

刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071051)

摘要: 为研究河南省济源市沁河冲洪积扇地下水水化学特征及其成因, 2016 年 10 月采集水样共计 60 组, 其中地下水水样 51 组, 地表水水样 9 组. 运用数理统计、舒卡列夫分类、Piper 三线图、Schoeller 图、Gibbs 图和离子比值等方法, 分析了研究区内地下水和地表水水化学类型分布特征, 讨论了地下水和地表水水化学演化过程的主要控制因素. 结果表明: ①研究区地表水和地下水中主要阴阳离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- , 地表水和地下水的补给来源密切相关; ②地下水水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主; 地表水水化学类型以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主; ③地下水和地表水主要离子的形成主要受碳酸盐矿物风化溶解作用、离子交换作用和蒸发作用共同影响, 硫酸、碳酸参与了碳酸盐矿物的风化溶解过程.

关键词: 沁河; 冲洪积扇; 水化学类型; Piper 三线图; Gibbs 图; 离子比值; 成因分析

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5428-12 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201803156

Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River

LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, CAI Yue-mei, BIAN Chao, LÜ Yong-gao, CHEN Yuan-ming

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, China)

Abstract: To study the hydrochemical characteristics of groundwater and the factors controlling the alluvial-proluvial fan of the Qinhe River, 60 samples were collected including 9 surface water samples and 51 groundwater samples. The distribution characteristics of the hydrochemistry and major controlling factors of hydrochemical evolution processes of surface water and groundwater in the study area were analyzed by using mathematical statistics, the Schakerev classification, Piper diagrams, Schoeller diagrams, Gibbs plots, and ion ratios. The results show that: ① the major anions and cations of surface water and groundwater in the study area are Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , and HCO_3^- . The recharge sources of surface water and groundwater are closely related; ② the major hydrochemical types of the groundwater are $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$, and $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$, while the major hydrochemical type of surface water is $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$; and ③ the major ions of surface water and groundwater are affected by carbonate mineral weathering and dissolution, ion exchange, and evaporation. Sulfuric acid and carbonic acid were involved in carbonate mineral weathering and dissolution.

Key words: Qinhe River; alluvial-proluvial fan; hydrochemical type; piper diagram; Gibbs plot; ion ratio; origin analysis

山前冲洪积扇区, 地下水径流条件好, 水质好, 常常为城市集中供水水源区^[1]、农业集中种植区、工矿企业等人类集中活动的良好选址地. 了解地下水的水化学特征及形成作用, 对地下水资源保护和可持续开发利用具有重要意义^[2~4]. 郭高轩等^[5]通过对北京潮白河冲洪积扇不同深度地下水采样分析, 指出该区地下水水化学具有分层分带特征, 在中下游人类活动强烈区域, 浅层地下水水质略差. 郇环等^[6]通过对永定河冲洪积扇采样分析和反向水文地球化学模拟, 指出扇区不同深度、不同区域的地下水与岩石介质发生的水岩相互作用程度不同. 马志伟等^[7]和崔健等^[8]分别对浑河冲洪积扇浅层地下水进行了污染评价及水质影响因素分析.

地下水和地表水中水化学组分的形成与其补给、径流和排泄条件、赋存条件、周边环境等多种因素有关, 充分利用水化学资料可以揭示地下水和

地表水的形成及循环规律^[9]. 唐玺雯等^[10]和周嘉欣等^[11]利用 Gibbs 图、Piper 三线图等方法分析了锡林河流域和疏勒河流域地表水和地下水的主要离子比例特征及其控制因素. 张艳等^[12]运用统计学、Piper 三线图、Gibbs 图、相关性分析、主要离子比例关系和平衡分析等方法分析了阆中市思依镇地下水地表水的水化学特征及其成因.

近年来, 沁河冲洪积扇区域经济发展迅猛, 在山前冲洪积扇顶部区域形成能源、化工、冶金等工业生产体系, 已对扇区地表水和地下水的水化学特征造成了不同程度的影响. 王翠榆等^[13]利用多元统计分析分析了沁河流域上游水体污染物的时空分异特

收稿日期: 2018-03-22; 修订日期: 2018-06-13

基金项目: 中国地质调查项目(DD20160310)

作者简介: 刘江涛(1987~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水文地质环境地质, E-mail: 471894992@qq.com

征,并识别了潜在污染源类型.秦勇等^[14]利用 Piper 三线图、主要离子比值关系、同位素技术分析了解沁河流域河水水化学组成的时空分布特征及成因分析.张东等^[15]利用 Piper 三线图、主要例子比值关系、同位素技术研究了沁河流域硫酸参与碳酸盐矿物化学风化过程.

本文在对沁河冲洪积扇地表水和第四系孔隙水含水层采样的基础上,利用其水化学资料,分析区域水化学类型及其形成的主要控制因素,不仅有助于了解区域地下水循环过程,也可为区域水资源评价、合理开发利用提供科学依据.

1 研究区概况

沁河发源于山西省沁源县霍山南麓二郎神沟,由西北向东南流经河南省的济源、沁阳市等县市,于武陟南汇入黄河.沁河冲洪积扇位于太行山南麓,面积约为 500 km² 以上.沁河冲洪积扇区属于暖温带大陆季风性气候,年平均降水量为 632.03 mm,年平均蒸发量为 1 810.2 mm.冲洪积扇地形由西北向东南倾斜.历史上,沁河有新老两期冲洪积扇.古沁河在克井盆地东部河口村附近向西流,与古蟒河汇集后,形成沁河古冲洪积扇,扇轴东西向延展,即由济源市指向留村;后改道,经河口水库向南径流,由五龙口流出山区,形成较新的冲洪积扇,扇轴由西北向东南延展,面积约为 500 km²,新冲洪积扇叠置于老冲洪积扇上^[16].

沁河流域在山区主要出露有寒武系石灰岩、奥陶系石灰岩和泥灰岩、二叠系砂岩和三叠系泥岩砂岩^[17,18],山前平原区以第四系冲洪积相地层为主.山前冲洪积扇区地下水补给来源主要有大气降水、河水入渗、灌溉入渗、山前侧向径流补给等,地下水排泄方式以人工开采为主.

沁阳市坐落于沁河冲洪积扇东部,村镇零星分布于冲洪积扇区,研究区内土地利用类型以农业用地为主.工矿企业污染源主要集中于以焦柳线为主的重工业污染源条带,涉及的产业类型包括电力、钢铁、有色、焦化、化工、建材等,污染源排放形式主要为废气和废水,大气污染物以 SO₂ 为主^[19];农牧业污染源主要分布于冲洪积扇区,包括使用化肥、农药造成的面源污染和以养殖小区(户)为主的点源污染.研究区内地表水污染源主要有工业废水,生活污水和农业污水,其中,以工业废水为主.

本研究区内,由沁河冲洪积扇第四系全新统和上更新统的卵砾石层、砂层构成含水层,粉土、粉质

黏土构成相对隔水层,隔水层不连续,冲洪积扇卵砾石层、砂层富水性好,是地下水的主要开采层.研究区内农业开采井及农户自备井的深度一般为 20~60 m,地下水类型为潜水或微承压水;城镇生活及工业用水井的深度一般为 70~150 m,个别农村集中供水井的深度大于 200 m,地下水类型为承压水.本文中,将井深小于 60 m 的水井点划分为浅层地下水点;将井深大于 60 m 的水井点划分为深层地下水点.

研究区内主要的地表水有沁河、逍遥石河、丹河、蟒河及蟒河下游的白墙水库.

2 样品采集与测试

2.1 样品采集

2016 年 10 月,在研究区内共采集水样 60 组,水样类型包括地下水和地表水,地下水水样均来自饮用水井或农用井,地下水类型为潜水或承压水;地表水水样来自区内的主要河流或水库(图 1).

样品瓶清洗干净并干燥待用.取样时用水样清洗样品瓶 3 次,再装入水样,盖瓶盖后用封口膜封紧.1 L 聚乙烯瓶装入水样,用于 Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 和 TDS 的分析;500 mL 硝酸酸化后的聚乙烯瓶装入水样,用于 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 的测定.将样品放入冷藏运输箱,并且尽快送到实验室进行测试.样品采集及运输过程,均加入空白样(去离子水)、平行样等指控样品来控制采集及运输过程中数据质量.

2.2 样品测试

所采水样委托谱尼测试公司对 28 项无机指标进行了测试.其中, K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 的测试方法为电感耦合等离子体发射光谱法,测试仪器为美国 Agilent 公司生产的 725-ES 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES), K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 的检出限分别为 0.020、0.005、0.011、0.013 mg·L⁻¹; Cl⁻、SO₄²⁻ 的测试方法为离子色谱法,测试仪器为美国戴安公司生产的 ICS-1100 离子色谱仪, Cl⁻、SO₄²⁻ 的检出限分别为 0.02 mg·L⁻¹、0.09 mg·L⁻¹; HCO₃⁻ 的测试方法为酸碱指示剂滴定法;溶解性总固体的测试方法为称量法;总硬度(以 CaCO₃ 计)的测试方法为乙二胺四乙酸二钠滴定法.

3 结果与讨论

3.1 水化学特征

3.1.1 水化学组成特征

各水样的化学参数统计表见表 1.

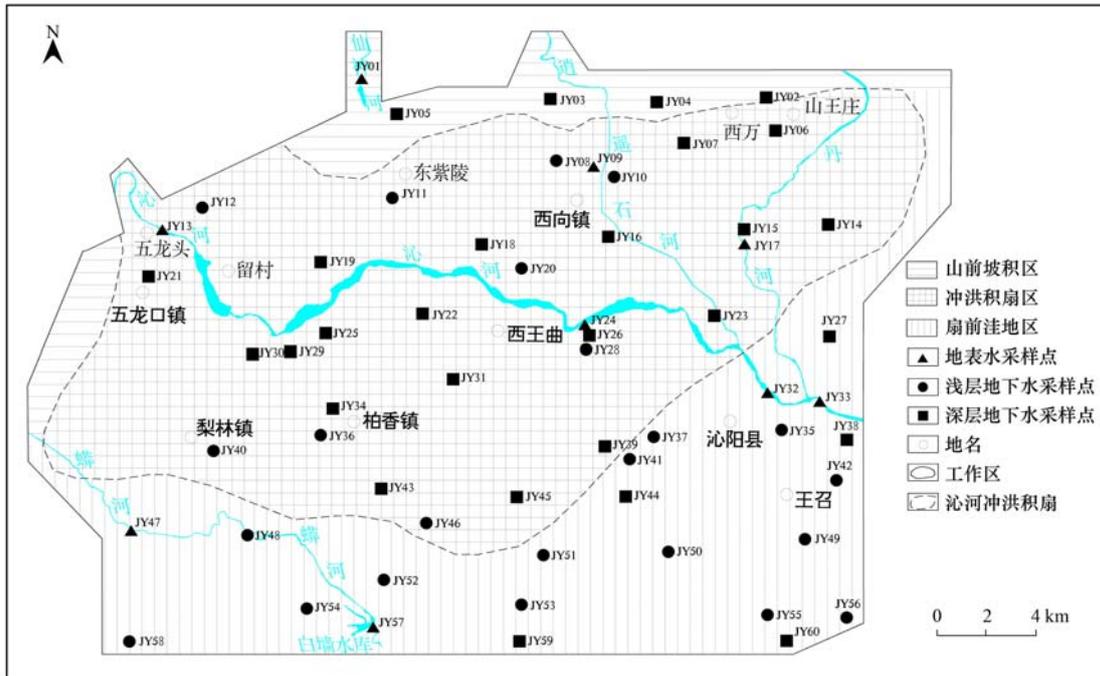


图 1 沁河冲洪积扇地貌类型及采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling points and topographical type of the alluvial - proluvial fan of the Qinhe River

表 1 主要离子质量浓度统计/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Statistics of major ions in water/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

类型	项目	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	TDS
浅层地下水	均值	0.85	115.91	152.48	110.55	138.07	428.99	484.48	1 461.78
	中值	0.82	55.30	140.00	59.00	105.00	177.00	502.00	1 100.00
	标准差	0.55	147.34	73.32	113.01	128.45	591.12	125.36	1 050.29
	最小值	0.18	13.50	80.90	16.90	28.90	74.60	296.00	650.00
	最大值	2.14	621.00	443.00	486.00	511.00	2 630.00	732.00	4 720.00
深层地下水	均值	1.35	35.93	77.80	37.69	35.66	103.62	341.00	615.14
	中值	1.44	30.50	63.70	32.25	16.70	82.55	345.00	535.50
	标准差	0.35	24.76	28.05	14.27	64.29	73.02	45.90	216.60
	最小值	0.85	7.11	53.30	23.00	3.84	6.99	246.00	401.00
	最大值	2.44	114.00	161.00	80.30	324.00	348.00	449.00	1 290.00
地表水	均值	3.42	41.94	105.88	34.47	63.92	186.56	267.89	729.00
	中值	2.55	34.10	97.30	31.40	42.10	167.00	267.00	677.00
	标准差	1.79	24.88	23.35	8.66	52.67	40.41	28.76	185.55
	最小值	1.93	5.49	82.10	25.70	9.58	152.00	225.00	553.00
	最大值	6.60	78.60	160.00	54.20	153.00	259.00	317.00	1 150.00
总计	均值	1.49	67.49	110.64	65.14	79.16	240.78	385.03	956.77
	中值	1.23	36.25	98.75	38.75	38.50	152.00	348.50	729.00
	标准差	1.17	99.73	60.30	78.55	103.47	395.15	117.49	774.72
	最小值	0.18	5.49	53.30	16.90	3.84	6.99	225.00	401.00
	最大值	6.60	621.00	443.00	486.00	511.00	2 630.00	732.00	4 720.00

通过对常规水化学参数分析,在沁河冲洪积扇区地表水和地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 含量较高,除了位于扇间洼地的浅层地下水点 JY35 和 JY55 的主要阴离子浓度关系为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$,位于冲洪积扇前缘和扇间洼地的浅层地下水

点 JY41、JY049、JY50 和 JY55 的主要阳离子浓度关系为 $\text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$;区内地下水和地表水中主要阴离子浓度关系均为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$,主要阳离子浓度关系均为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$.河水、浅层地下水和深层地下水中主要阴

离子浓度关系相似, 说明其补给来源密切相关.

通过 Schoeller 图可以分析水样中主要离子的浓度变化和水化学变化趋势^[20, 21]. 图 2 中每条折线代表一个样品, 同一种水化学类型的样品折线基本平行, 且随着地下水流动水化学组分浓度由相对低点向相对高点运移^[22]. 本次所采集的 60 组样品的曲线变化趋势基本一致, 说明研究区内地表水和地下水的补给来源密切相关. 位于冲洪积扇顶部的深层地下水点 JY21 受人类生活活动影响, 地下水中 Cl^- 浓度较高; 位于冲洪积扇顶部的浅层地下水点 JY10、JY12 和深层地下水点 JY02、JY03、JY04、JY05 受工矿企业活动影响, 地下水中 SO_4^{2-} 浓度较高(图 2).

3.1.2 水化学类型特征

(1) 浅层地下水

沁河冲洪积扇区浅层地下水水化学类型以 HCO_3-Ca 型、 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主, 扇前洼地地下水化学类型以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 型为主. 其中, HCO_3-Ca 型水分布于沁河冲洪积扇顶部区域沁河出山口西南; $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水分布于沁河冲洪积扇中部太行山南麓山前、沁河中上游两岸及蟒河中游至白墙水库两岸区域, 在蟒河中游局部, 受人类活动和地表水水质影响, 地下水化学类型呈现 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型; $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水分布于沁河冲洪积扇顶部、中部的沁河两岸及太行山南麓山前区域; 在焦克路两侧工业园区集中区, 受工业活动的影响, 地下水化学类型呈 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型, 其他局部区域地下水化学类型呈 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 型; $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 型水主要分布于沁河冲洪积扇扇前洼地, 局部区域地下水呈 $\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 型、 $\text{SO}_4-\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 型(图 3).

(2) 深层地下水水化学类型分布

沁河冲洪积扇区深层地下水水化学类型以 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主. $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水分布于整个研究区内; 受工业活动的影响, $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水分布于太行山前焦克路两侧及丹河出山口东岸; 在五龙口镇, 受人类活动影响, 局部区域分布有 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水(图 3).

(3) 地表水水化学类型分布

沁河冲洪积扇区地表水水化学类型以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主. 受人类活动影响, 在蟒河中游

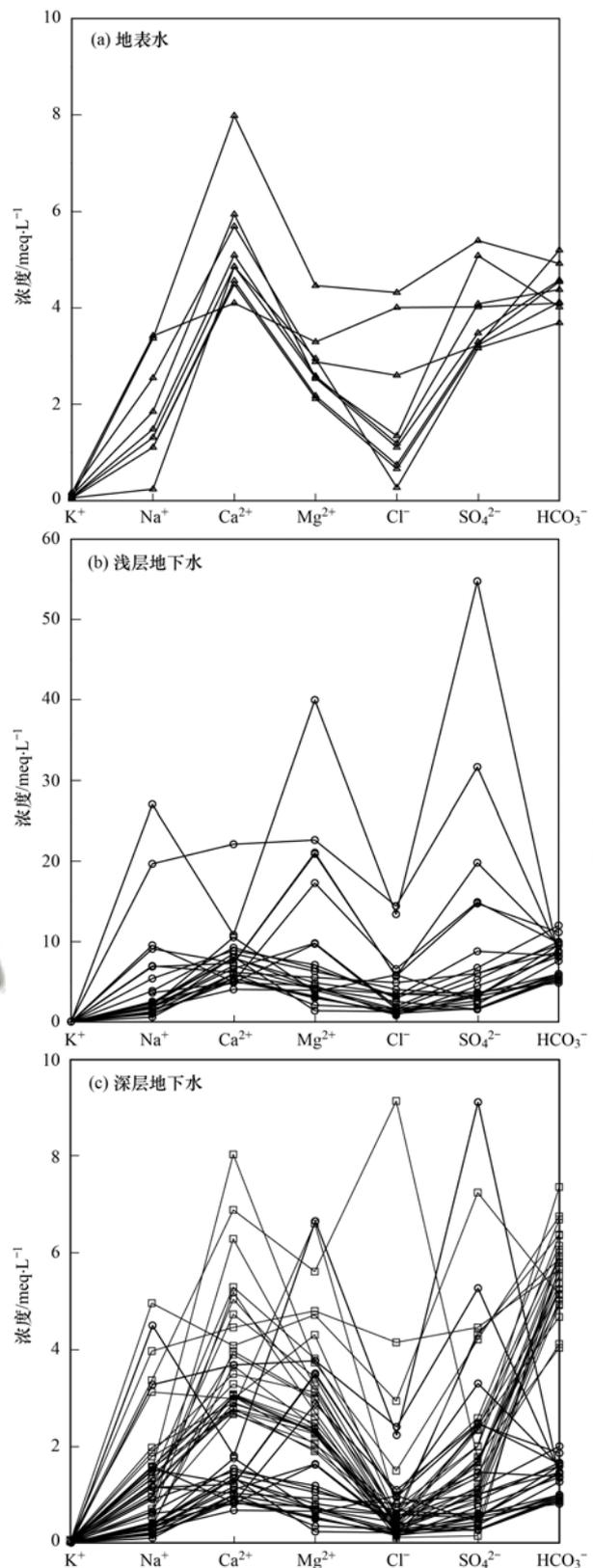


图 2 沁河冲洪积扇区地表水和地下水主要离子 Schoeller 图
Fig. 2 Schoeller diagrams showing variations of the concentrations of major ions in surface water and groundwater within the alluvial-proluvial fan of the Qinhe River

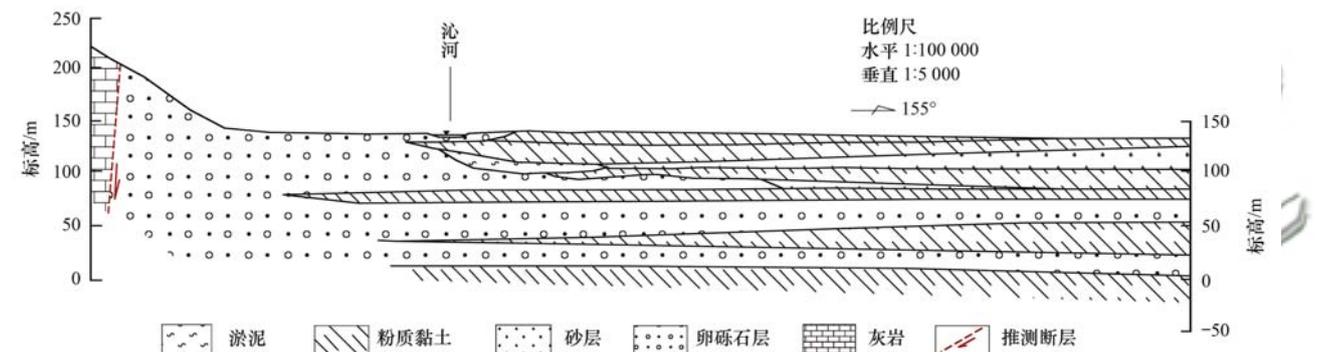
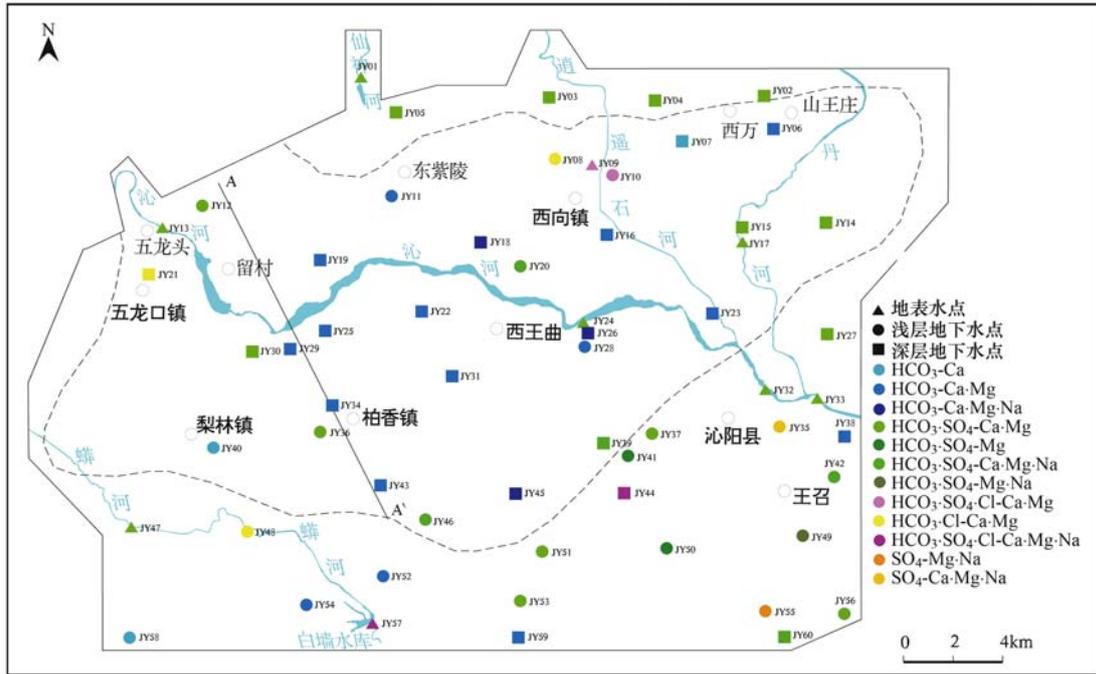


图3 沁河冲洪积扇地下水及地表水水化学类型分布及水文地质剖面
 Fig. 3 Distribution diagram of the hydrochemical types of shallow groundwater within the alluvial-proluvial fan of the Qinhe River and hydro geological section

至白墙水库段, 地表水水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na}$ 型(图3)。

3.1.3 水化学演化特征

通过 Piper 三线图可以了解地下水水化学的主要离子组成及演化特征^[23-25]。

由图4可知, 研究区内的主要地表水水化学类型分布较集中, 阳离子类型以 Ca^{2+} 为主, 阴离子类型以 HCO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 为主。从冲洪积扇顶部至前缘, 阳离子由 Ca^{2+} 逐渐向 Mg^{2+} 和 Na^+ 变化, 阴离子由 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 逐渐向 Cl^- 变化, 水化学类型由 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型逐渐向 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na}$ 型演化。

沁河冲洪积扇浅层地下水水化学类型分布较分散, 阳离子类型以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主, 阴离子类型以 HCO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 为主。从冲洪积扇顶部至前缘, 阳离子由 Ca^{2+} 逐渐向 Mg^{2+} 和 Mg^{2+} 、 Na^+ 变化, 阴

离子由 HCO_3^{2-} 逐渐向 SO_4^{2-} 变化; 水化学类型由 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Ca}$ 型向 $\text{SO}_4 \cdot \text{Mg}$ 型和 $\text{SO}_4 \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na}$ 型演化。

沁河冲洪积扇深层地下水水化学类型分布较集中, 阳离子类型以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主, 阴离子类型以 HCO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 为主。从冲洪积扇顶部至前缘, 阳离子由 Ca^{2+} 逐渐向 Mg^{2+} 、 Na^+ 变化, 阴离子由 HCO_3^{2-} 逐渐向 HCO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 变化; 水化学类型由 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Ca}$ 型向 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型演化。

3.2 水化学类型成因分析

3.2.1 主要离子来源分析

Gibbs 图是利用水中阳离子质量浓度比值 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和阴离子质量浓度比值 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 与溶解性总固体含量(TDS)的关系, 宏观地反映水中主要离子的控制因素的一种分析方法, 一般将主要的控制因素分为蒸发和结晶作用、

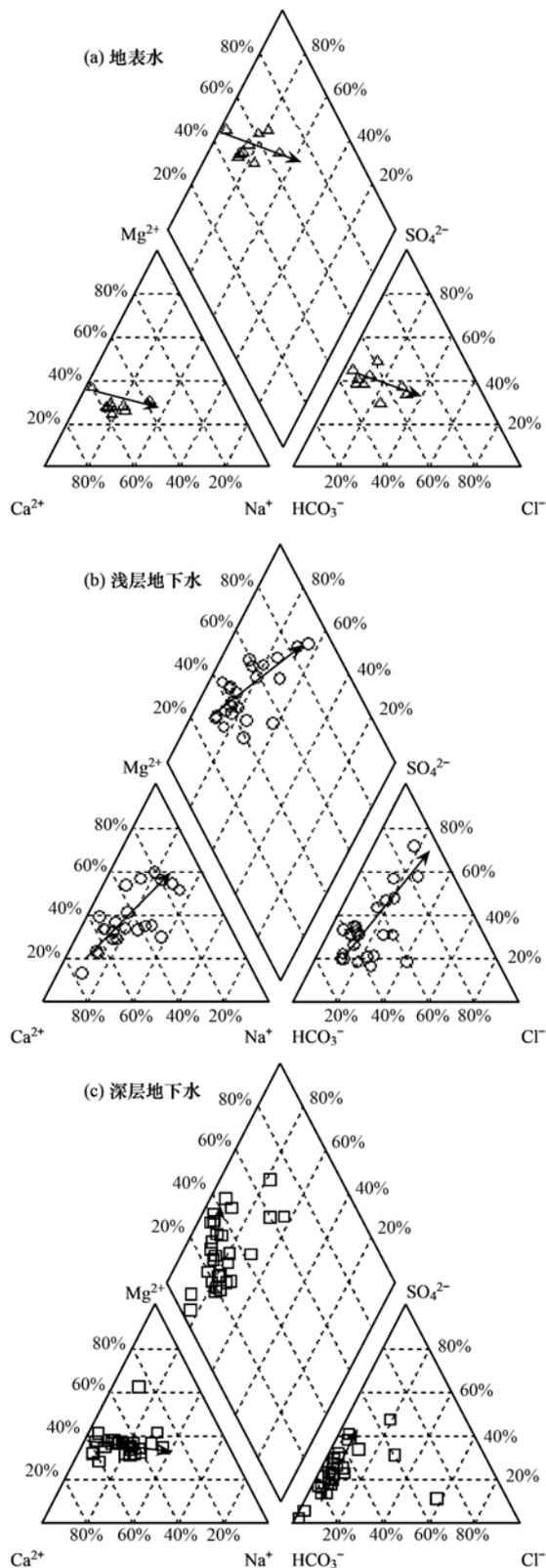


图4 沁河冲洪积扇地下水和地表水 Piper 三线图

Fig. 4 Piper diagrams of groundwater and surface water within the alluvial-proluvial fan of the Qinhe River

岩石风化作用、降水作用3种^[26~29].

本研究区内浅层地下水 TDS 范围为 650 ~

4 720 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 阳离子质量浓度比值 $\text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca})$ 范围为 0.1 ~ 0.7, 阴离子质量浓度比值 $\text{Cl}/(\text{Cl} + \text{HCO}_3)$ 范围为 0.05 ~ 0.5, 浅层地下水点分布于岩石风化作用控制区, 并在蒸发、结晶作用影响下向 Gibbs 图右上区域(海水点位)移动; 深层地下水 TDS 范围为 401 ~ 1 290 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 阳离子质量浓度比值范围为 0.08 ~ 0.6, 阴离子质量浓度比值范围为 0.01 ~ 0.5, 深层地下水点主要分布于岩石风化作用控制区, 水点 JY21 阴离子质量浓度比值分布于蒸发、结晶作用区, 这是由于受到人类活动影响 Cl^- 浓度升高; 地表水 TDS 范围为 553 ~ 1 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 阳离子质量浓度比值范围为 0.05 ~ 0.49, 阴离子质量浓度比值范围为 0.04 ~ 0.36, 地表水点主要分布于岩石风化作用控制区(图 5). 因此, 研究区内地下水和地表水的主要离子组成是受岩石风化作用控制, 而浅层地下水在蒸发和结晶作用的影响下逐步咸化.

3.2.2 主要风化过程及水化学演化过程

为了进一步分析沁河冲洪积扇地下水和地表水主要离子来源及水化学演化过程, 应用水体中各种离子比值关系分析其水文地质化学过程^[30~32].

从沁河冲洪积扇区水点的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 及 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 关系可知(图 6), 地下水和地表水主要阳离子浓度比值(摩尔分数)主要分布于硅酸盐矿物和碳酸盐矿物溶解之间, 说明沁河冲洪积扇上大部分地下水和地表水与硅酸盐矿物和碳酸盐矿物溶解有关, 但并不排除蒸发盐矿物溶解对地下水和地表水组分的贡献^[33,34].

水体中的 Na^+ 、 K^+ 主要来源于大气降水、硅酸盐矿物和蒸发盐矿物溶解. 海水中 Na^+ 和 Cl^- 毫克当量浓度比值约为 0.86, 大气降水的 Na^+ 和 Cl^- 毫克当量浓度比值与海水相似^[35]. 在未受人类活动作用影响下, 岩盐溶解是地下水中 Na^+ 和 Cl^- 的主要来源, 毫克当量浓度比值关系一般在 1 左右. 沁河冲洪积扇上地表水和浅层地下水中 Na^+ 与 Cl^- 的毫克当量浓度比值基本等于 1, 而深层地下水中 Na^+ 与 Cl^- 的毫克当量浓度比值远远大于 1(图 7), 说明研究区内地表水和浅层地下水 Na^+ 主要来源于大气降水和岩盐溶解, 深层地下水中 Na^+ 除了大气降水和岩盐溶解还有其他来源. 水体中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ 的毫克当量浓度关系可以表征水样受离子交换作用影响的大小, 研究区内深层地下水水点在图 8 中靠近于 1:1 线, 且位于右下方, 说明深层地下水主要离子已经受到离

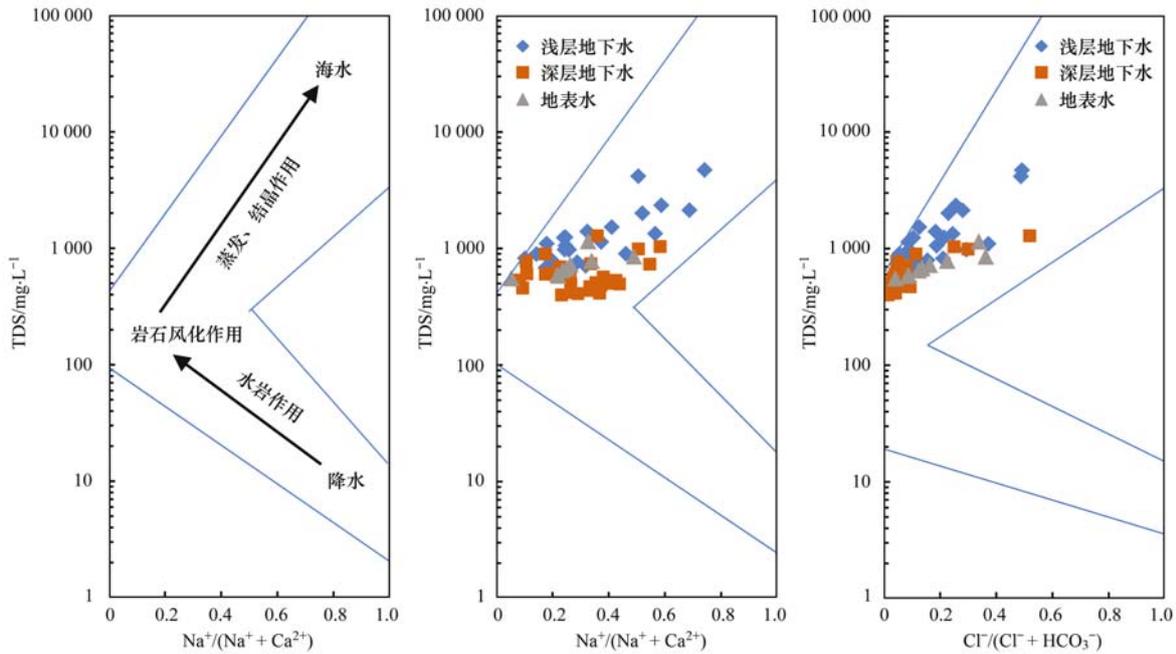


图 5 沁河冲洪积扇地下水和地表水 Gibbs 图

Fig. 5 Gibbs plots of groundwater and surface water within the alluvial-proluvial fan of the Qinhe River

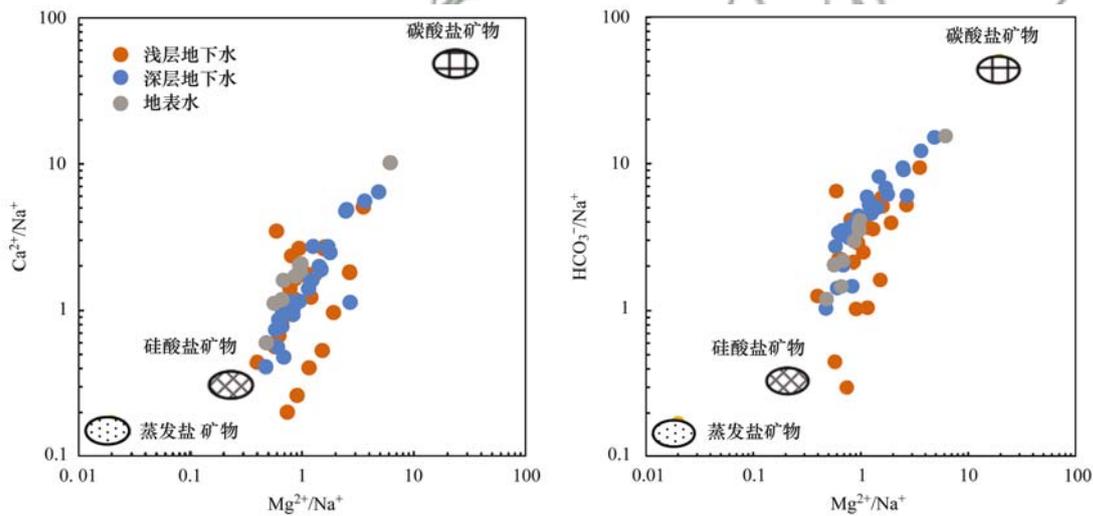


图 6 沁河冲洪积扇地下水和地表水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 HCO_3^- 摩尔浓度比值

Fig. 6 Plots of the molar concentration ratios of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , and HCO_3^- in groundwater and surface water within the alluvial-proluvial fan of the Qinhe River

子交换作用影响。

水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 的毫克当量浓度比值可以反映地下水碳酸岩盐溶解的特征，沁河冲积扇地表水和浅层地下水 ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) 和 HCO_3^- 毫克当量浓度比值大于 1，深层地下水的比值分布于 ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)/ $\text{HCO}_3^- = 1$ 左右，且大部分大于 1，说明沁河冲洪积扇地表水和地下水 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 离子主要来源于碳酸盐矿物溶解(图 9)。由于地表水和浅层地下水 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度大于 HCO_3^- 浓度，说明还有其他离子参与碳酸盐岩溶解

过程。自然界中参与碳酸盐矿物溶解过程的媒介主要包括碳酸、硫酸和硝酸等，碳酸主要来源于大气 CO_2 和土壤 CO_2 等^[36]，硫酸主要来源于酸雨和硫化物矿物氧化，硝酸主要来源于酸雨和铵化合物氧化等^[37,38]。

考虑 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 参与地表水和地下水碳酸盐岩溶解过程， CO_3^{2-} 的来源主要有 CO_2 的溶解和碳酸盐岩的溶解； SO_4^{2-} 的来源主要有酸雨、硫化物矿物氧化和石膏的溶解。硫酸参与碳酸盐矿物溶解过程产物中 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 毫克当量浓度比值为 1，

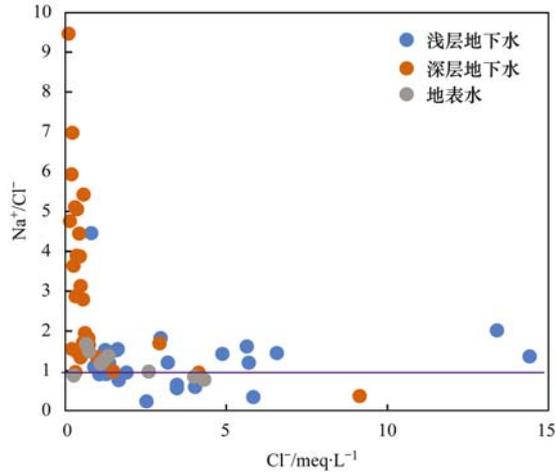


图7 沁河冲洪积扇地表水和地下水中 Na^+/Cl^- 与 Cl^- 的关系

Fig. 7 Plots of the relationship between Na^+/Cl^- and Cl^- in groundwater and surface water within the alluvial-proluvial fan of the Qinhe River

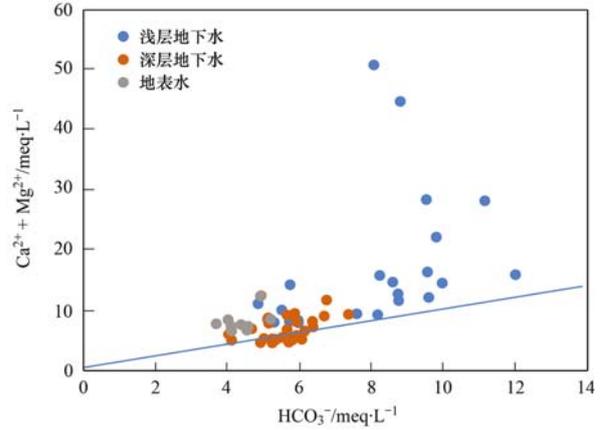


图9 沁河冲洪积扇地表水和地下水中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的关系

Fig. 9 Plots of the relationship between $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ and HCO_3^- in groundwater and surface water within the alluvial-proluvial fan of the Qinhe River

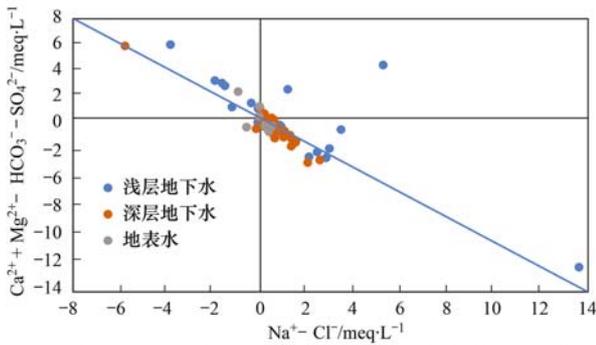


图8 沁河冲洪积扇地表水和地下水中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ 的关系

Fig. 8 Plots of the relationship between $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$ and $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ in groundwater and surface water within the alluvial-proluvial fan of the Qinhe River

$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 和 HCO_3^- 毫克当量浓度比值为 2。沁河冲洪积扇地表水和浅层地下水靠近硫酸参与碳酸盐矿物溶解端且远离石膏溶解线，而深层地下水更靠近碳酸参与碳酸盐矿物溶解端且远离石膏溶解线，说明硫酸广泛参与研究区内地表水和浅层地下水碳酸盐矿物溶解过程(图 10)，硫酸可能来源于硫化矿物的氧化和大气沉降，也可能来源于化工、煤焦、金属冶炼等工矿企业排污的人类活动影响^[39]。

碳酸盐矿物溶解过程反应方程式如下：

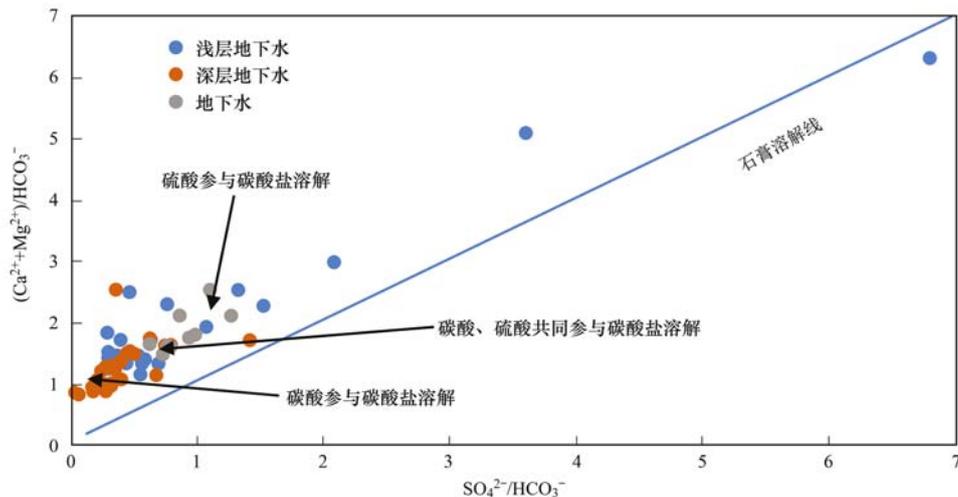
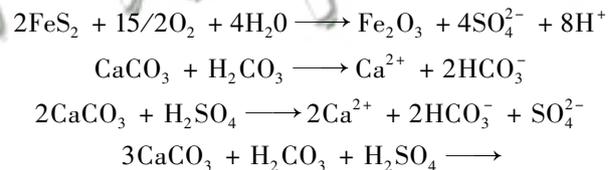
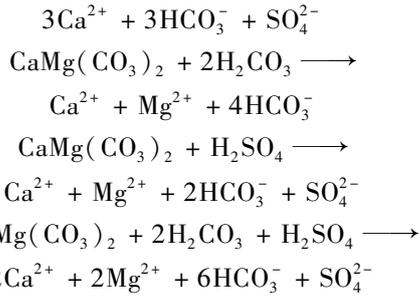


图10 沁河冲洪积扇地表水和地下水中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 与 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 的关系

Fig. 10 Plots of the relationship between $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ and $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ in groundwater and surface water within the alluvial-proluvial fan of the Qinhe River



考虑 SO_4^{2-} 参与地表水和地下水碳酸盐矿物溶解过程, 浅层地下水中主要阳离子 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 的毫

克当量浓度与主要阴离子 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 的毫克当量浓度平衡, 线性相关性可达 0.936; 地表水中主要阳离子 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 的毫克当量浓度与主要阴离子 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 的毫克当量浓度基本平衡, 线性相关性为 0.7097; 而深层地下水中主要阳离子 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 的毫克当量浓度与主要阴离子 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 的毫克当量浓度不平衡, 线性相关性为 0.445 (图 11)。由此可知, 在深层地下水和地表水中, 除了岩盐溶解作用还有其他作用在影响水中主要离子成分。

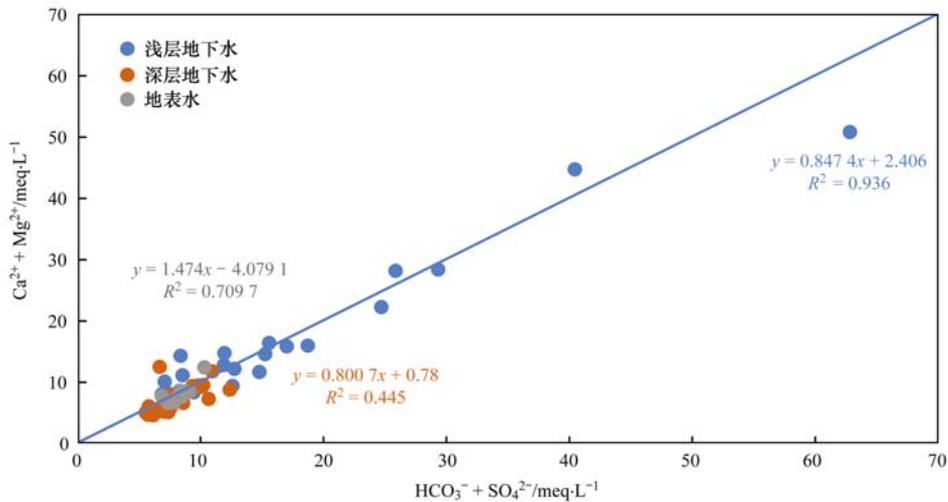


图 11 沁河冲洪积扇地表水和地下水中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 的关系

Fig. 11 Plots of the relationship between $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ and $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ in groundwater and surface water within the alluvial-proluvial fan of the Qinhe River

前文中讨论过, 研究区内深层地下水中存在强烈的离子交换作用. 因此, 在主要阳离子和主要阴离子毫克当量浓度平衡中考虑 Na^+ 和 Cl^- 的浓度后, 深层地下水中主要阳离子 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+$ 与主要阴离子 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$ 的毫克当量浓度平衡, 线性相关性可达 0.960; 地表水中主要阳离子 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+$ 与主要阴离子 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$ 的毫克当量浓度平衡, 线性相关性为 0.9085; 浅层地下水中主要阳离子 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+$ 与主要阴离子 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$ 的毫克当量浓度平衡, 线性相关性为 0.989 (图 12). 因此, 研究区内地表水和深层地下水除了碳酸盐矿物溶解作用还存在离子交换作用. 对比水中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 关系和水中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$ 关系可知, 研究区内碳酸盐矿物溶解作用是控制浅层地下水主要离子组分的主要因素; 离子交换作用是控制深层地下水主要离子组分的主要因素; 地表水主要离子组分主要受碳酸盐矿物溶解作用和离子交换作用共同控制, 其中, 以

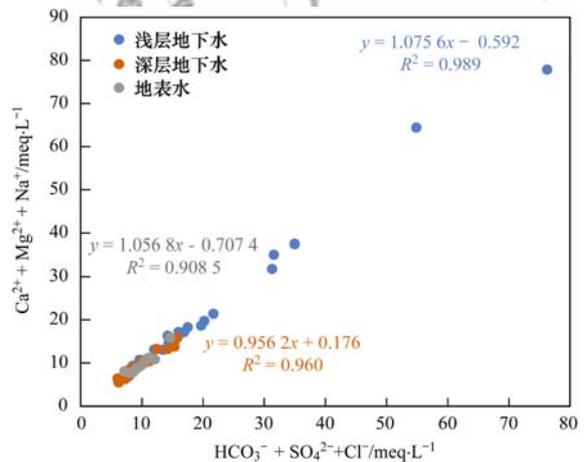


图 12 沁河冲洪积扇地表水和地下水中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+)$ 与 $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$ 的关系

Fig. 12 Plots of the relationship between $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+)$ and $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$ in groundwater and surface water within the alluvial-proluvial fan of the Qinhe River

碳酸盐矿物溶解作用为主。

4 结论

(1) 沁河冲洪积扇区地表水和地下水中 Ca^{2+} 、

Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 浓度较高, 地表水和地下水的补给来源密切相关; 浅层地下水水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主, 扇前洼地地下水化学类型以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Mg}\cdot\text{Na}$ 型为主; 深层地下水水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主; 地表水水化学类型以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主。

(2) 沁河冲洪积扇浅层地下水主要离子组分主要受硫酸参与碳酸盐矿物溶解过程的岩石风化溶解作用和蒸发作用共同影响, 且硫酸参与碳酸盐矿物溶解过程的岩石风化溶解作用是主要因素; 深层地下水主要离子组分主要受碳酸参与碳酸盐矿物溶解过程的岩石风化溶解作用和离子交换作用共同影响, 且离子交换作用是主要因素; 地表水主要离子组分主要受硫酸、碳酸共同参与碳酸盐矿物溶解过程的岩石风化溶解作用、离子交换作用和蒸发作用共同控制, 且碳酸盐矿物溶解作用是主要因素。

参考文献:

- [1] 段磊, 王文科, 曹玉清, 等. 天山北麓中段地下水水化学特征及其形成作用[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 21(9): 29-34.
Duan L, Wang W K, Cao Y Q, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanics of groundwater in the middle of northern slope of Tianshan Mountains[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 21(9): 29-34.
- [2] 王晓曦, 王文科, 王周锋, 等. 滦河下游河水及沿岸地下水水化学特征及其形成作用[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1): 25-33, 73.
Wang X X, Wang W K, Wang Z F, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of river water and groundwater along the downstream Luanhe River, northeastern China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, 41(1): 25-33, 73.
- [3] 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 H, Li P Y. Hydrogeochemistry (2nd ed.) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012.
- [4] 沈照理, 王焰新. 水-岩相互作用研究的回顾与展望[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(2): 127-133.
Shen Z L, Wang Y X. Review and outlook of water-rock interaction studies [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(2): 127-133.
- [5] 郭高轩, 侯泉林, 许亮, 等. 北京潮白河冲洪积扇地下水水化学的分层分带特征[J]. 地球学报, 2014, 35(2): 204-210.
Guo G X, Hou Q L, Xu L, *et al.* Delamination and zoning characteristics of quaternary groundwater in Chaobai alluvial-proluvial fan, Beijing, based on hydrochemical analysis [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(2): 204-210.
- [6] 郇环, 王金生, 翟远征, 等. 北京平原区永定河冲洪积扇地下水水化学特征与演化规律[J]. 地球学报, 2011, 32(3): 357-366.
Huan H, Wang J S, Zhai Y Z, *et al.* Chemical characteristics and evolution of groundwater in the Yongding River alluvial fan of Beijing Plain [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(3): 357-366.
- [7] 马志伟, 都基众, 崔健, 等. 浑河冲洪积扇地浅层地下水污染评价[J]. 东北水利水电, 2011, 29(9): 18-21.
Ma Z W, Du J Z, Cui J, *et al.* Pollution evaluation on shallow groundwater for alluvial and diluvial fan of Hun River [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2011, 29(9): 18-21.
- [8] 崔健, 都集众, 马宏伟, 等. 基于因子分析的浑河冲洪积扇地浅层地下水水质影响因素辨析[J]. 中国农村水利水电, 2011, (7): 45-48, 51.
- [9] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 当代水文地质学发展趋势与对策[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(1): 51-56.
Zhang R Q, Liang X, Jin M G, *et al.* The trends in contemporary hydrogeology [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(1): 51-56.
- [10] 唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 等. 锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 131-142.
Tang X W, Wu J K, Xue L Y, *et al.* Major ion chemistry of surface water in the Xilin River Basin and the possible controls [J]. Environmental Science, 2014, 35(1): 131-142.
- [11] 周嘉欣, 丁永建, 曾国雄, 等. 疏勒河上游地表水水化学主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.
- [12] 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.
- [13] 王翠榆, 杨永辉, 周丰, 等. 沁河流域水体污染物时空分异特征及潜在污染源识别[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2267-2278.
Wang C Y, Yang Y H, Zhou F, *et al.* Spatio-temporal characteristics and source identification of water pollutants in river Qinhe Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(9): 2267-2278.
- [14] 秦勇, 张东, 赵志琦. 沁河流域水化学组成的空间和时间变化特征[J]. 生态学杂志, 2016, 35(6): 1516-1524.
Qin Y, Zhang D, Zhao Z Q. Spatial and temporal variations of hydrochemical compositions of river water in Qinhe Basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(6): 1516-1524.
- [15] 张东, 秦勇, 赵志琦. 我国北方小流域硫酸参与碳酸盐矿物化学风化过程研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3568-3578.
Zhang D, Qin Y, Zhao Z Q. Chemical weathering of carbonate rocks by sulfuric acid on small basin in North China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(11): 3568-3578.
- [16] 唐金荣, 刘光尧. 沁河冲洪积扇同位素测速试验研究[J]. 勘察科学技术, 1991, (2): 6-9.
- [17] 张江华, 梁永平, 王维泰, 等. 硫同位素技术在北方岩溶水

- 资源调查中的应用实例[J]. 中国岩溶, 2009, **28**(3): 235-241.
- Zhang J H, Liang Y P, Wang W T, *et al.* A practical use of ^{34}S in the investigation of karst groundwater resource in North China [J]. *Carsologica Sinica*, 2009, **28**(3): 235-241.
- [18] 张东, 杨伟, 赵建立. 氮同位素控制下黄河及其主要支流硝酸盐来源分析[J]. 生态与农村环境学报, 2012, **28**(6): 622-627.
- Zhang D, Yang W, Zhao J L. Tracing nitrate sources of the Yellow River and its tributaries with nitrogen isotope[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, **28**(6): 622-627.
- [19] 马诗院, 李艳. 济源市铅锌冶炼业二氧化硫污染状况与防治对策[J]. 商丘师范学院学报, 2011, **27**(12): 94-98.
- Ma S Y, Li Y. The status of lead and zinc smelting industry SO_2 pollution in Jiyuan City and countermeasures [J]. *Journal of Shangqiu Teachers College*, 2011, **27**(12): 94-98.
- [20] 姜体胜, 曲辞晓, 王明玉, 等. 北京平谷平原区浅层地下水化学特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, **31**(11): 122-127.
- Jiang T S, Qu C X, Wang M Y, *et al.* Hydrochemical characteristics of shallow groundwater and the origin in the Pinggu Plain, Beijing [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, **31**(11): 122-127.
- [21] El Maghraby M M. Hydrogeochemical characterization of groundwater aquifer in Al-Madinah Al-Munawarah City, Saudi Arabia[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, **8**(6): 4191-4206.
- [22] Sarikhani R, Dehnavi A G, Ahmadnejad Z, *et al.* Hydrochemical characteristics and groundwater quality assessment in Bushehr Province, SW Iran [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(7): 6265-6281.
- [23] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1779-1787.
- Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* Major ionic features and their controlling factors in the upper-middle reaches of Wujiang River [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1779-1787.
- [24] 孙平安, 于爽, 莫付珍, 等. 不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 123-131.
- Sun P A, Yu S, Mo F Z, *et al.* Hydrochemical characteristics and influencing factors in different geological background: a case study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 123-131.
- [25] 韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 等. 额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1345-1352.
- Wei H, Wu J K, Shen Y P, *et al.* Hydrochemical characteristics of snow meltwater and river water during snow-melting period in the headwaters of the Ertis River, Xinjiang [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1345-1352.
- [26] 赵江涛, 周金龙, 梁川, 等. 新疆焉耆盆地平原区地下水演化的主要水文地球化学过程分析[J]. 环境化学, 2017, **36**(6): 1397-1406.
- Zhao J T, Zhou J L, Liang C, *et al.* Hydrogeochemical process of evolution of groundwater in plain area of Yanqi, Xinjiang [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(6): 1397-1406.
- [27] 阿不都沙拉木·加拉力丁, 王欣, 师芸宏. 吐鲁番市地表水水化学特征变化分析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(8): 2481-2486.
- Abdissalam J, Wang X, Shi Y H. Variation analysis of the chemical characteristics of surface water in Turpan City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(8): 2481-2486.
- [28] 何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 等. 贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3798-3805.
- He X L, Wu Y H, Zhou J, *et al.* Hydro-chemical characteristics and quality assessment of surface water in Gongga Mountain Region [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3798-3805.
- [29] 张清华, 孙平安, 何师意, 等. 西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1065-1075.
- Zhang Q H, Sun P A, He S Y, *et al.* Fate and origin of major ions in river water in the Lhasa River Basin, Tibet [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1065-1075.
- [30] Xing L N, Guo H M, Zhan Y H. Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the North China Plain [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, **70-71**: 250-264.
- [31] Zhu B Q, Yang X P, Rioual P, *et al.* Hydrogeochemistry of three watersheds (the Erlqis, Zhungarar and Yili) in northern Xinjiang, NW China [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(8): 1535-1548.
- [32] 马燕华, 苏春利, 刘伟江, 等. 水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用[J]. 环境科学, 2016, **37**(12): 4690-4699.
- Ma Y H, Su C L, Liu W J, *et al.* Identification of sulfate sources in the groundwater system of Zaozhuang: evidences from isotopic and hydrochemical characteristics [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4690-4699.
- [33] 吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应[J]. 环境科学, 2016, **37**(12): 4671-4679.
- Lü J M, An Y L, Wu Q X, *et al.* Rock weathering characteristics and the atmospheric carbon sink in the chemical weathering processes of Qingshuijiang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4671-4679.
- [34] 杜文越, 何若雪, 何师意, 等. 桂江上游水化学特征变化及离子来源分析——以桂林断面为例[J]. 中国岩溶, 2017, **36**(2): 207-214.
- Du W Y, He R X, He S Y, *et al.* Variation of hydrochemical characteristics and the ion source in the upstream of Guijiang River: a case study in Guilin section [J]. *Carsologica Sinica*, 2017, **36**(2): 207-214.
- [35] 张涛, 蔡五田, 李颖智, 等. 尼洋河流域水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4537-4545.
- Zhang T, Cai W T, Li Y Z, *et al.* Major ionic features and their possible controls in the water of the Niyang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4537-4545.
- [36] Karim A, Veizer J. Weathering processes in the Indus River Basin: implications from riverine carbon, sulfur, oxygen, and strontium isotopes [J]. *Chemical Geology*, 2000, **170**(1-4): 153-177.
- [37] 付善明, 周永章, 高全洲, 等. 金属硫化物矿山环境地球化学研究述评[J]. 地球与环境, 2006, **34**(3): 23-29.

- Fu S M, Zhou Y Z, Gao Q Z, *et al.* Environmental geochemistry of metallic sulfide mines-A review[J]. *Earth and Environment*, 2006, **34**(3): 23-29.
- [38] 刘从强, 蒋颖魁, 陶发祥, 等. 西南喀斯特流域碳酸盐岩的硫酸侵蚀与碳循环[J]. *地球化学*, 2008, **37**(4): 404-414.
- Liu C Q, Jiang Y K, Tao F X, *et al.* Chemical weathering of carbonate rocks by sulfuric acid and the carbon cycling in Southwest China[J]. *Geochimica*, 2008, **37**(4): 404-414.
- [39] 马秀平, 井维鑫, 王茜, 等. 丹河水系表层沉积物重金属污染及生态风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(6): 1180-1186.
- Ma X P, Jing W X, Wang Q, *et al.* Heavy metal pollution in the surface sediment of Dan River and its ecological risk assessment [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(6): 1180-1186.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjcx.ac.cn)进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用 (1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:
 期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.
 图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.
 会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.
 学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.
 报告: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.
 专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.
11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjcx@reecs.ac.cn; 网址: www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

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