

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王飞龙, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事 (522)	
《环境科学》征稿简则 (722)	
信息 (748, 899, 924)	

涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析

郑涛¹, 焦团理¹, 胡波¹, 龚建师², 侯香梦¹, 王赫生²

(1. 安徽省地质调查院(安徽省地质科学研究所), 合肥 230001; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016)

摘要: 地下水是涡河流域中部地区重要的供水水源,但普遍面临着污染及水质异常等问题。本文在调查采样的基础上,综合运用数理统计、Piper 三线图、Gibbs 图和离子比值等方法对不同深度地下水的水化学特征及其形成机制进行分析和探讨。结果表明:①研究区地下水总体为弱碱性水,不同深度地下水中的优势阴、阳离子均为 HCO_3^- 和 Na^+ 。浅层地下水的水化学类型以 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型水为主,中层和深层均以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}$ 型水为主。②基于含水层沉积环境差异及水-岩作用强度不同,地下水化学成分出现明显的垂向差异。随着深度的增加,地下水中 TDS、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 平均质量浓度均呈现先增大后减小的趋势, Ca^{2+} 平均质量浓度呈逐渐降低趋势。③地下水水化学特征的形成受水-岩相互作用、阳离子交换作用和人类活动的共同影响,以水-岩作用为主。水-岩作用以含钠硅酸盐溶解作用为主。人类活动普遍对浅层地下水影响较大,对中层和深层地下水影响较小。④区内深层地下水水质明显优于浅层和中层地下水,为避免增加地面沉降及中层微咸水向深层淡水越流的风险,建议合理布局深层地下水开采井,并合理调控取水量。

关键词: 涡河流域; 地下水; 水化学特征; 水化学成因; 形成机制

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0766-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202006037

Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin

ZHENG Tao¹, JIAO Tuan-li¹, HU Bo¹, GONG Jian-shi², HOU Xiang-meng¹, WANG He-sheng²

(1. Geological Survey of Anhui Province (Anhui Institute of Geological Sciences), Hefei 230001, China; 2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China)

Abstract: Groundwater is an important water source in the central Guohe River basin but pollution and water quality deterioration present a significant challenge. Here, 80 groups of groundwater samples were collected between June and September 2019 including 61 groups of shallow groundwater samples, 9 groups of middle groundwater samples, and 10 groups of deep groundwater samples. The hydrochemical characteristics and formation mechanisms of groundwater at these different depths were analyzed using statistical techniques, Piper triangular diagrams, Gibbs figures, and ion ratios. The following results were noted: ① Groundwater is weakly alkaline overall, and the dominant anion and cation at different depths were HCO_3^- and Na^+ . The shallow and deep groundwater mainly consist of fresh water while the middle groundwater is mainly brackish water. The hydrochemical typology of the shallow groundwater was mainly $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ and $\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Mg}$. $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}$ was found to be the dominant hydrochemical typology in the middle and deep groundwater. ② The chemical composition of the groundwater shows notable vertical variations. With depth, the mean mass concentrations of TDS, Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , and HCO_3^- first increase and then decreasing, while the mean mass concentration of Ca^{2+} gradually decreases. These vertical differences are closely related to the sedimentary environment of the aquifer and the intensity of water-rock interaction. ③ The formation of groundwater hydrochemical characteristics is influenced by water-rock interactions, cation exchange, and human activities, with water-rock interaction dominated by sodium silicate dissolution. Human activities generally have the greatest impact on the shallow groundwater. ④ The water quality of the deep groundwater is notably better than that of the shallow and middle groundwater. However, excessive exploitation of the deep groundwater resource has led to the formation of a regional groundwater funnel, enhancing the difference in middle and deep groundwater levels. To reduce the risk of ground subsidence and the contamination of the deep water with middle brackish water, deep groundwater exploitation wells should be carefully positioned and regulated.

Key words: Guohe River basin; groundwater; hydrochemical characteristics; hydrochemical origin; formation mechanism

地下水环境的变化与生态稳定和用水安全有着重要的联系^[1]。地下水化学成分是地下水环境的重要组成部分,对地下水化学特征和形成机制的研究有助于了解地下水环境的变化过程,便于科学合理地开发地下水资源^[2]。地下水化学特征受控于一系列自然因素(降水、地表水、沉积环境等)和人为因素(人为污染、地下水开采等),是地下水与环境长期作用的产物^[3]。张智雄等^[4]利用统计学、Piper 三线图和主离子比例关系等对绵阳红层地区的浅层

地下水分析,得出地下水水化学类型主要源于硅酸盐、碳酸盐和蒸发盐岩的溶解。李政葵等^[5]对洛阳盆地浅层地下水进行采样分析,利用数理统计和离子比例系数等方法得出地下水水化学成因主要为碳酸盐岩和硅酸盐岩等矿物的风化溶解,同时阳离子

收稿日期: 2020-06-04; 修订日期: 2020-07-31

基金项目: 中国地质调查局地质调查工作项目(DD20190354); 安徽省公益性地质工作项目(2016-g-3-32)

作者简介: 郑涛(1988~),男,硕士,工程师,主要研究方向为地下水环境, E-mail: ahddyzt@163.com

交换作用和人类活动对地下水水化学特征的形成也有一定影响。

涡河流域是淮河流域的一部分,包括豫东平原东部和淮北平原西部,是我国重要的粮食生产基地,地下水是涡河流域重要的工农业生产和城乡饮用水水源,地下水开发利用程度较高^[6],同时人口稠密,人类活动频繁,地下水已受到人类活动的影响^[7]。目前有关涡河流域的研究较少,且在该区域未进行地下水化学特征及其成因分析的相关研究。综合运用数理统计、Piper 三线图、Gibbs 图和离子系数比值等方法,结合水文地质条件和水文地球化学理论,对涡河流域中部地区不同深度地下水进行水化学特征和成因分析,以揭示该区地下水化学的分布特征,探讨其水文地球化学过程。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于涡河流域中部(图1),行政区划包括安徽省亳州市和河南省周口市,地理坐标为北纬 $33^{\circ}40' \sim 33^{\circ}50'$,东经 $115^{\circ}30' \sim 115^{\circ}45'$ 。地势总体平坦,自西北向东南微倾斜,坡降约 $1/7\,000$,地面标高 $35.8 \sim 39.0\text{ m}$,属典型的黄淮堆积型地貌。研究区属于暖温带半湿润季风气候区,年平均气温 14.7°C ,多年平均降雨量 804.0 mm ,多年平均蒸发量 $1\,668.8\text{ mm}$ 。地表水均属于涡河水系,包括赵王河、急三道河、宋汤河、油河、清水河和红旗一沟等,多为过境河,流向大多自西北向东南。

区域上属华北地层大区晋冀鲁豫地层区徐淮地层分区淮北地层小区,区内无基岩出露,地表被厚厚的晚新生代松散层所覆盖,厚度约 $800 \sim 1\,000\text{ m}$,区内第四纪地层厚度约 $150 \sim 160\text{ m}$,自上而下为黏性土和砂性土组成的多层韵律结构,成因类型以河流相沉积和湖相沉积为主。工作区以松散岩类孔隙水为主要工农业和城乡生活用水。彭玉怀等^[8]基于晚新生代地层及其沉积结构、孔隙水与大气降水的联系、环境同位素等特征,将淮北平原孔隙水由浅入深划分了三大流动系统。结合本次工作,三大流动系统简述如下:①浅部循环系统,处于开放状态,与大气降水联系密切,地下水位存在强烈的季节性波动。地下水年龄多小于 $5 \times 10^3\text{ a}$ 。该系统对应的浅层地下水,主要赋存于第四纪晚更新世含水层中,含水层底板埋深小于 50 m ,厚度 $10.0 \sim 35.0\text{ m}$,富水性较好,水位埋深 $2.0 \sim 4.6\text{ m}$,水位年变幅 $0.5 \sim 3.0\text{ m}$ 。②中间过渡系统,处于半封闭状态,与大气降水的联系随着深度增加逐渐减弱。地下水年龄多在 $10 \times 10^3 \sim 20 \times 10^3\text{ a}$ 之间。该系统对应的中层地下水,主

要赋存于第四纪中更新世和早更新世含水层中,含水层不连续,底板埋深 $50 \sim 150\text{ m}$,厚度 $17.5 \sim 34.0\text{ m}$,富水性贫乏。水位埋深一般小于 5 m ,仅在区内东北部和东南部由于地下水开采影响形成局部的地下水降落漏斗,水位埋深超过 10 m ,水位基本稳定。③深部滞流系统,基本上处于封闭状态,与大气降水基本上没有联系,地下水年龄超过 $20 \times 10^3\text{ a}$ 。该系统对应的深层地下水,主要赋存于新近纪中新世含水层中,含水层底板埋深 $150 \sim 480\text{ m}$,厚度 $42.4 \sim 118.5\text{ m}$,富水性中等,水位埋深大多为 $30 \sim 40\text{ m}$,已形成区域性的降落漏斗,区内东北部和东南部的漏斗中心埋深大于 60 m ,并以 $3 \sim 5\text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度下降。该区浅层与中层地下水水力联系弱,中层与深层地下水基本无水力联系。浅层地下水自西北向东南方向径流,径流缓慢;中层和深层地下水在天然状态下自西北向东南方向径流,由于人工开采地下水形成了降落漏斗,漏斗范围内地下水向漏斗中心径流。该区的水文地质剖面图见图2。

根据地下水质量标准(GB/T 14848-2017),该区浅层地下水主要以Ⅳ类水为主,占比 65.5% ,其次为Ⅴ类水,占比 31.2% ,Ⅰ类~Ⅲ类水分布较少,占比 3.3% ,这与2018年淮北平原的浅层地下水水质现状一致^[7]。中层地下水以Ⅳ类水为主,占比 66.7% ,其次为Ⅴ类水,占比 33.3% 。深层地下水均为Ⅳ类水。

1.2 研究方法

2019年6~9月采集了地下水样品80组(图1),其中浅层地下水样品61组,中层地下水样品9组,深层地下水样品10组。浅层地下水样品来自农村分散式的小型供水井、农田灌溉机井和钻孔,井深 $8 \sim 60\text{ m}$;中层地下水样品来自村镇集中式供水井和钻孔,井深 $138 \sim 150\text{ m}$;深层地下水均来自村镇集中式供水井,井深 $300 \sim 480\text{ m}$ 。每组水样使用两个聚乙烯塑料瓶采集,采样前样品瓶用水样清洗3遍。一瓶水样体积为 500 mL ,加入 $1:1$ 硝酸溶液,使其 $\text{pH} < 2$,用于测定水样中的阳离子浓度;另一瓶水样体积为 $1\,000\text{ mL}$,不作处理,用于测定水样中的阴离子浓度。水样采取后 24 h 内送往国土资源部华东矿产资源监督检测中心进行检测。 pH 值在水样采集现场使用SD150型便携式多参数水质测试仪测定; SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- 使用Dionex-2500型离子色谱仪测定; K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用ICAP 6300Duo型电感耦合等离子体光谱仪测定; HCO_3^- 采用滴定法测定。对所有样品进行了阴阳离子总量平衡与可溶性固体总量平衡的检验,结果合格率分别为 97.80% 和 97.40% 。地下水主要离子的化学

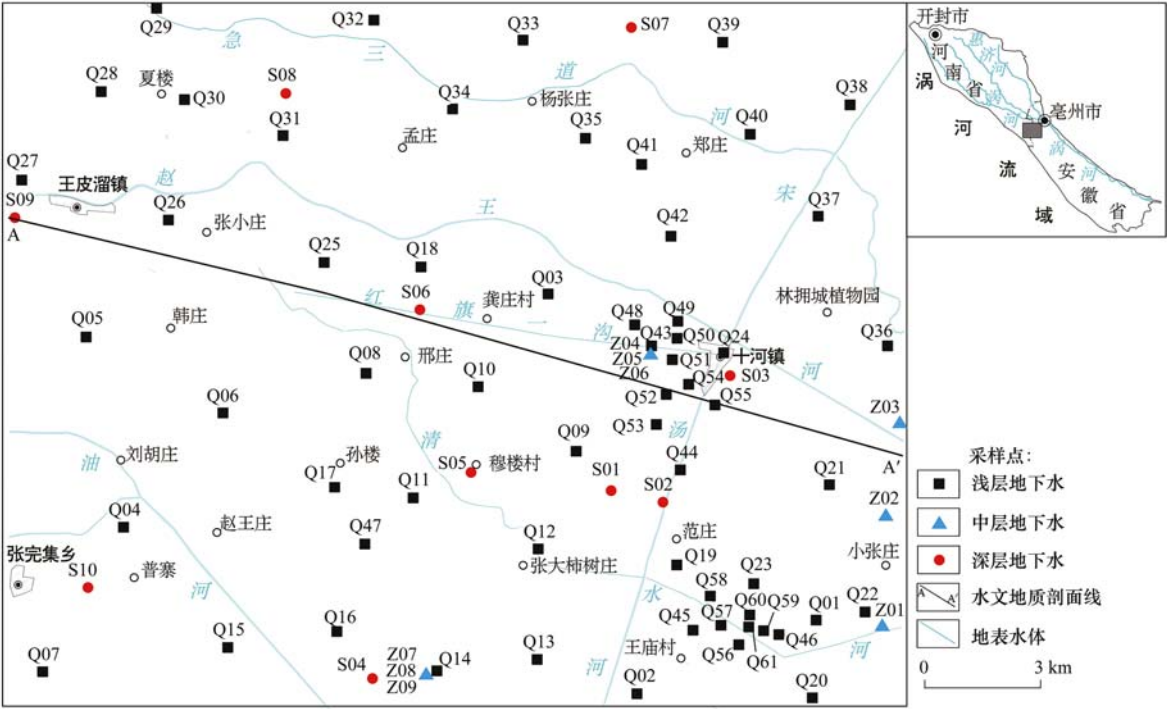


图 1 研究区采样点位置示意
Fig. 1 Location of the sampling points in the study area

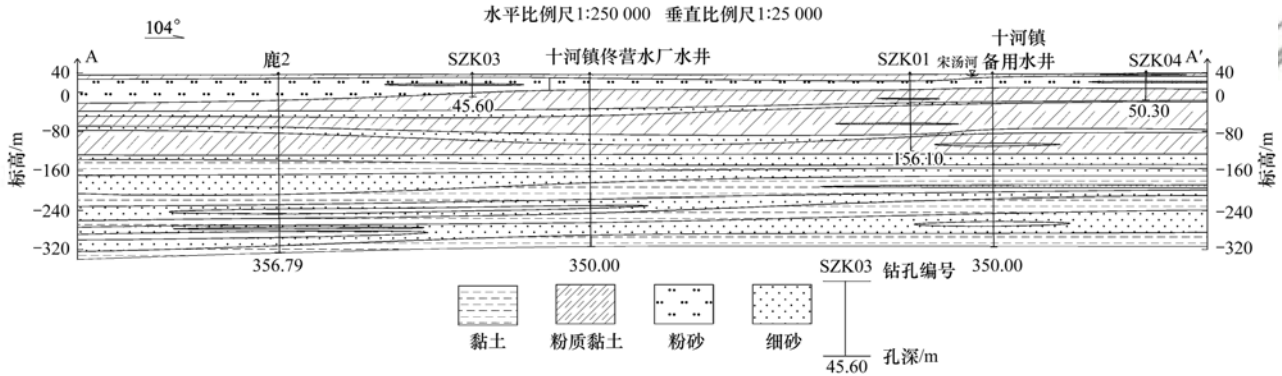


图 2 A-A'水文地质剖面
Fig. 2 A-A' hydrogeological profile

特征、离子比例系数和 Gibbs 图使用 Microsoft Excel 2007 统计和绘制,主要离子的 Piper 三线图使用 Origin 2016 软件进行绘制。

2 结果与讨论

2.1 水化学特征

2.1.1 主要指标统计特征

地下水中主要指标的质量浓度数理统计分析见图 3 和表 1。地下水均为弱碱性水。浅层地下水中微咸水占比 27.9%,淡水占比 72.1%;中层地下水中微咸水占比 88.9%,淡水占比 11.1%;深层地下水均为淡水。浅层地下水中硬水和极硬水分别占比 32.8%、50.8%,软水和微硬水分别占比 4.9% 和 11.5%;中层地下水中微硬水、硬水和极硬水的占比分别为 11.2%、44.4% 和 44.4%,无软水分布;深

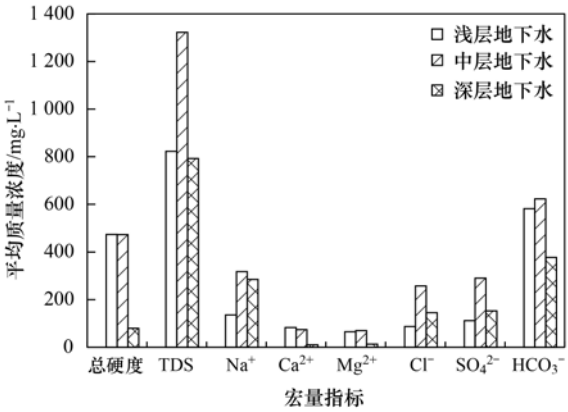


图 3 地下水中宏量指标平均质量浓度
Fig. 3 Histogram of the mean mass concentrations of macro-quantity indexes in groundwater

层地下水中均为软水。地下水中最主要的阳离子均

为 Na^+ , 最主要的阴离子均为 HCO_3^- . 地下水中各指标的质量浓度具有明显的垂向差异. 随着深度的增加, 地下水中的 TDS、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 平均质量浓度均呈现先增大后减小的趋势, pH 值有逐渐增大的趋势, Ca^{2+} 平均质量浓度有逐渐降低的趋势.

地下水中人类活动导致的输入性物质往往具有离散程度高、波动性高的特点^[9]. 浅层地下水中 K^+ 和 NO_3^- 的变异系数极大, Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 变异系数较大, 表明浅层地下水已受到人类活动的

影响. 十河镇西侧的污水处理厂周边水样点 Q43、Q48、Q49、Q50、Q51 和 Q54 的 NO_3^- 质量浓度均超标, 该区域地下水可能受该厂影响, 其它 NO_3^- 超标点位则零星分布. 来自农村分散式小型供水井中浅层地下水的 Na^+ 、 Cl^- 和 TDS 质量浓度明显高于农田灌溉井, 表明村庄中的生活污水、垃圾等对地下水造成一定影响. 中层和深层地下水的 NO_3^- 变异系数极大, 但仅水样点 Z04、Z05、Z06、S03 和 S10 中出现 NO_3^- , 可能是因为局部中层和深层地下水受到浅层地下水的补给.

表 1 主要水化学指标质量浓度统计¹⁾/mg·L⁻¹

Table 1 Mass concentration statistics of main hydrochemical indexes/mg·L ⁻¹												
类型	项目	pH	总硬度	TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
浅层地下水	均值	7.49	474	823	2.6	135.4	82.6	64.9	87.2	111.9	582	52.0
	中值	7.55	477	738	0.7	105.0	70.0	64.7	72.8	107.0	530	25.0
	标准差	0.43	193	321	9.5	105.7	48.0	24.5	64.7	57.5	208	78.0
	最大值	8.35	942	1 620	56.6	565.0	243.0	124.0	290.7	315.0	1 470	420.0
	最小值	6.14	110	289	0.3	33.6	13.5	18.5	4.3	13.2	299	0.0
	变异系数	0.06	0.41	0.39	3.65	0.78	0.58	0.38	0.74	0.51	0.36	1.50
中层地下水	均值	7.63	473	1 322	1.2	317.8	74.0	70.1	257.4	290.6	623	1.8
	中值	7.65	449	1 274	1.3	298.0	75.6	63.2	224.0	300.0	626	0.0
	标准差	0.13	97	264	0.2	55.1	20.4	12.3	106.0	63.5	62	2.6
	最大值	7.72	612	1 710	1.4	405.0	99.4	88.4	413.0	358.0	685	5.8
	最小值	7.29	287	869	0.7	242.0	32.6	50.0	78.2	148.4	473	0.0
	变异系数	0.02	0.21	0.20	0.19	0.17	0.28	0.17	0.41	0.22	0.10	1.42
深层地下水	均值	7.99	79	792	1.4	284.8	10.4	12.9	144.9	152.9	378	0.8
	中值	8.09	81	807	1.4	287.5	10.8	13.2	149.0	164.6	374	0.0
	标准差	0.56	36	139	0.2	30.8	4.3	6.1	57.3	69.2	49	1.7
	最大值	8.71	142	970	1.6	322.0	16.8	24.4	248.1	256.0	455	4.2
	最小值	7.10	26	561	1.1	230.0	4.1	3.7	55.8	38.2	302	0.0
	变异系数	0.07	0.45	0.18	0.13	0.11	0.42	0.47	0.40	0.45	0.13	2.00

1) pH 和变异系数无量纲

2.1.2 水化学类型

将不同深度的地下水绘制在 Piper 三线图中, 并可用舒卡列夫式对地下水中的化学成分进行分类^[10, 11]. 由图 4 可知, 浅层地下水化学类型共分为 10 种, $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 型 4 种主要的水化学类型占到总数的 78.7%, 占比分别为 24.6%、24.6%、16.4% 和 13.1%. 中层地下水以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Na}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na}$ 型水为主; 深层地下水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Na}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型, 占比分别为 40.0%、30.0% 和 30.0%. 浅层地下水含氯的水化学类型绝大部分出现于农村分散式小型供水井中. 不同深度地下水中弱酸根离子毫克当量百分比均显著, 浅层地下水中碱金属和碱土金属毫克当量百分比相差不大, 中层和深层地下水中的阳离子均以碱金属离子为主. 地下水化学特征在地下水径流方向上并未出现其他学者在其它流域描述的水平分带特征^[12, 13].

2.2 水化学特征成因分析

2.2.1 主要离子控制因素

天然地下水化学成分主要受大气降雨、水-岩作

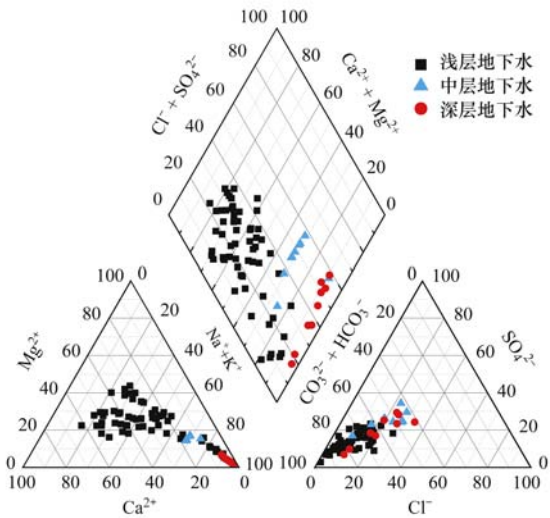


图 4 地下水水化学 Piper 三线图

Fig. 4 Piper diagram of groundwater hydrochemistry

用和蒸腾作用影响^[14],地下水在径流过程中往往伴随着方解石、白云石、石膏、硅酸盐等矿物的溶解^[15]. Gibbs 图可宏观地反映水体中主要离子的控制因素^[16-18].

如图 5 所示,阳离子质量浓度比值 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 范围为 0.20 ~ 0.98,阴离子质量浓度比值 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 范围为 0.01 ~ 0.45,大部分地

下水指向水-岩作用区域,表明水-岩相互作用主导了水文地球化学过程,从而决定地下水的水文地球化学特征. 部分水样落在蒸发-浓缩作用区域,表明部分地下水还受到了蒸发-浓缩作用的影响,但影响作用远不及水-岩相互作用. 地下水样点中无落在图形下部的水样点,表明大气降水对地下水化学组分的影响较小^[19].

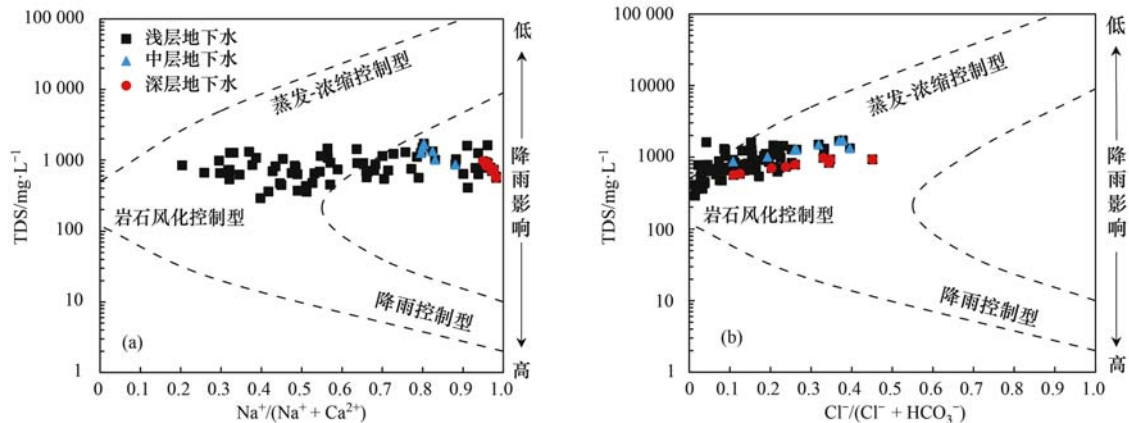


图 5 不同深度地下水 Gibbs 图

Fig. 5 Gibbs diagram of groundwater at different depths

2.2.2 主要离子风化过程

水体中各主要离子的比值关系,可以用于研究水体中主要离子的来源及水化学的演化过程^[20-22].

$(\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+) - (\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+)$ 和 $(\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+) - (\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+)$ 的量浓度关系可以定性判别研究区内不同岩石风化溶解作用对地下水溶质的影响^[23]. 从图 6 可以看出,工作区浅层地下水水样点主要分布在硅酸盐岩端元附近,只有部分水样点靠近碳酸盐岩和蒸发盐岩端元,表明浅层地下水水化学成分来源复杂,主要来源于硅酸盐岩矿物的风化溶解,部分还来自碳酸盐岩和蒸发盐岩风化溶解;中层地下水水样点则主要分布在硅酸盐岩端元,表明中层地下水水化学过程中硅酸盐岩的风化溶解明显占主导

作用,同时还可能受到蒸发盐岩矿物溶解作用的影响;深层地下水水样点则主要分布于硅酸盐岩和蒸发盐岩端元之间,且远离碳酸盐岩端元,表明深层地下水水化学过程受硅酸盐岩和蒸发盐岩矿物的风化溶解作用影响较大,而不受碳酸盐岩矿物溶解作用影响.

Na^+ 和 Cl^- 的浓度比值称为地下水的成因系数,是表征地下水中 Na^+ 富集程度的水文地球化学参数^[24]. 大气降水、硅酸盐矿物溶解和盐岩矿物溶解是水体中 Na^+ 的主要来源^[12]. 图 7(a) 中地下水大部分水样位于 Na^+ 和 Cl^- 毫克当量浓度比值为 1 的直线上方,其中浅层、中层和深层地下水中的 Na^+ 和 Cl^- 的毫克当量浓度比值分别为 4.65、2.25 和

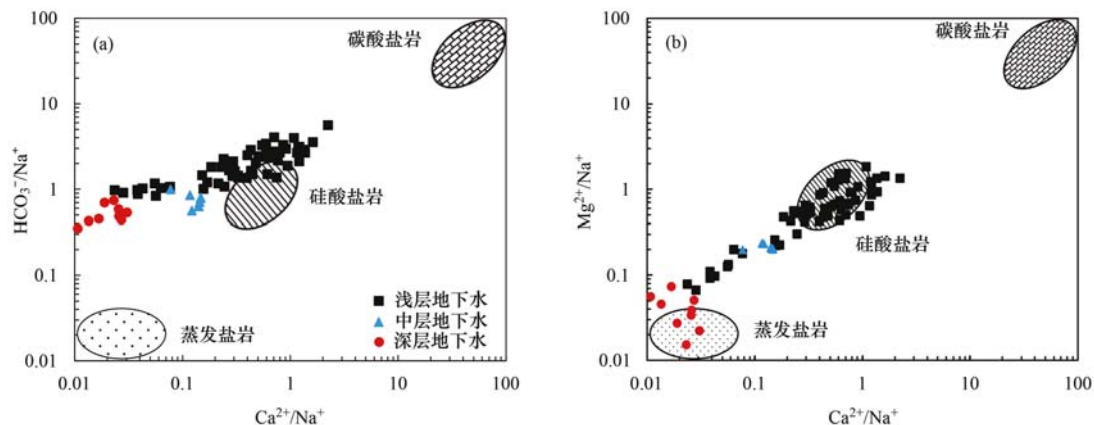
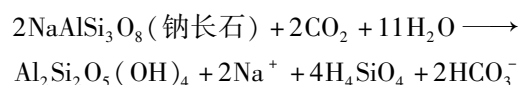


图 6 地下水中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 的关系

Fig. 6 Relationships between $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ and $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$, and $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ and $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ in groundwater

3.85, 表明地下水中 Na^+ 毫克当量浓度明显大于 Cl^- , Na^+ 除来自于盐岩矿物溶解外, 主要来源于硅酸盐岩矿物的风化溶解^[25], 或是来自于阳离子交换作用^[26]. 不同深度地下水中 HCO_3^- 和 Na^+ 均为优势阴、阳离子, 表明地下水中以硅酸盐岩溶解为主的水-岩作用始终占主导作用, Na^+ 与 HCO_3^- 主要来自于含钠硅酸盐岩矿物的风化溶解. 浅层地下水中少

数水样点的 Na^+ 和 Cl^- 比值小于 1, 可能与人为污染有关. 含钠硅酸盐矿物的溶解过程如下:



该溶解过程在研究区晚新生代地层钻孔较为常见, 长石的风化普遍清晰可见, 部分已经风化成高岭石、蒙脱石等黏土矿物.

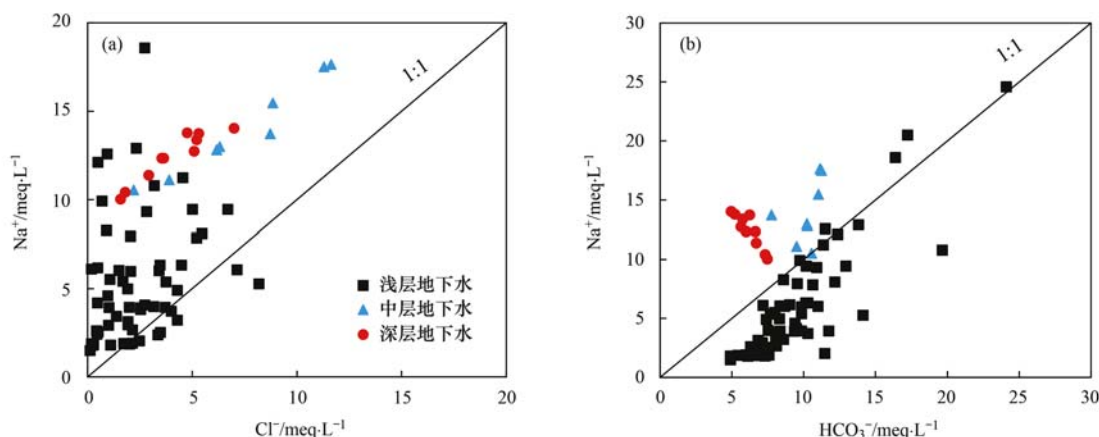


图 7 地下水中 Na^+ 与 Cl^- 、 Na^+ 与 HCO_3^- 的关系

Fig. 7 Relationships between Na^+ and Cl^- , and Na^+ and HCO_3^- in groundwater

图 7(b) 显示了不同深度地下水中 Na^+ 与 HCO_3^- 的毫克当量浓度关系, 从中可知, 浅层地下水中 Na^+ 不足以平衡 HCO_3^- , 表明 HCO_3^- 可能还来自碳酸盐岩矿物的溶解. 中层和深层地下水中 HCO_3^- 又不足以平衡 Na^+ , 表明中层和深层地下水中蒸发盐岩矿物溶解作用增强. 由浅层至中层, 地下水中 HCO_3^- 和 Na^+ 的毫克当量浓度均增大, 表明地下水中硅酸盐矿物溶解作用增强进一步释放了 HCO_3^- 和 Na^+ , 同时以石盐为代表的蒸发盐岩进一步溶解释放了更多的 Na^+ 和 Cl^- , 从而使 Cl^- 毫克当量浓度增大 [图 7(b)]. 由中层至深层, 地下水中 HCO_3^-

和 Na^+ 的毫克当量浓度均减小, 表明地下水中硅酸盐岩矿物溶解作用减弱, 而 Cl^- 毫克当量浓度减小表明含氯蒸发盐岩矿物溶解作用减弱. HCO_3^- 毫克当量浓度的降幅明显大于 Na^+ , 表明还有其他因素导致 HCO_3^- 毫克当量浓度大幅减小, 比如碳酸盐岩矿物的沉淀作用.

图 7(a) 中反映了 Na^+ 可能来源于阳离子交换吸附作用, 研究区内地层中黏性土比例较高, 有利于吸附作用的发生. 运用 $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 与 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 的毫克当量浓度关系可以很好地指示阳离子交换吸附作用^[27,28]. 图 8(a) 结

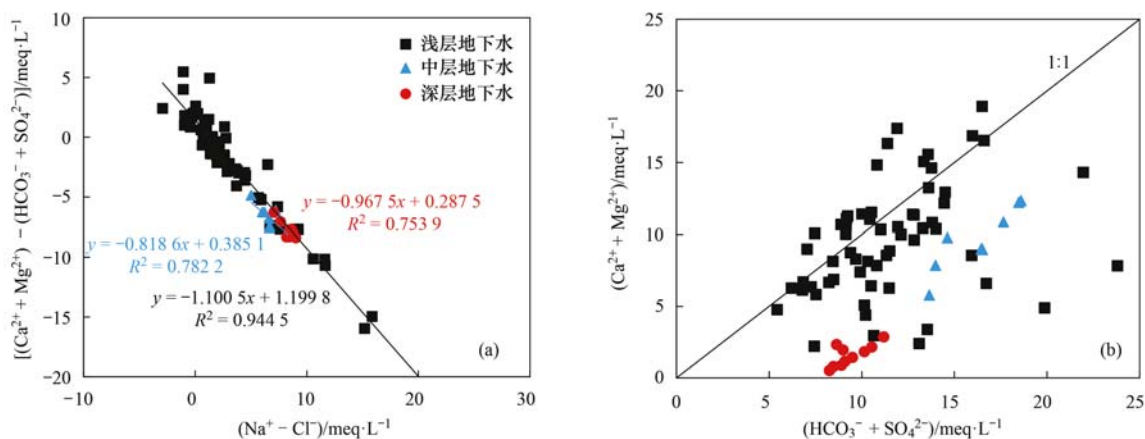
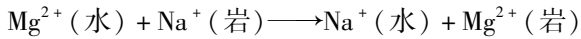
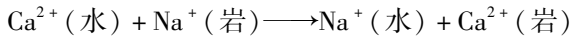


图 8 地下水中 $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 与 $[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})]$ 以及 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 的关系

Fig. 8 Relationships between $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ and $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$, and $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ and $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ in groundwater

果显示,地下水中阳离子交换作用均显著,其中浅层、中层和深层地下水水样分别分散在斜率为 -1.1 (R^2 为 0.9445)、 -0.82 (R^2 为 0.7822)和 -0.97 (R^2 为 0.7539)附近,即随着深度的增加,地下水中的阳离子交换吸附作用呈现先减弱后增强的趋势.阳离子交换反应主要包括以下典型反应方式^[29,30]:



有研究表明^[13],水体中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要是来自碳酸盐岩和蒸发盐岩, SO_4^{2-} 可能来源于蒸发盐岩的风化溶解.因此可利用 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 离子当量浓度比值来分析地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 的来源^[31,32].图8(b)中浅层地下水分布于 $1:1$ 等当量线两侧,少量水样远离 $1:1$ 等当量线两侧,表明浅层地下水中水-岩作用较为复杂,但大部分浅层地下水的 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 比值接近 1 ,表明工作区浅层地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐矿物(方解

石、白云石)以及蒸发盐矿物(石膏)的溶解.部分浅层地下水以及所有的中层和深层地下水的水样均位于 $1:1$ 等当量线下方,且大部分点均远离该线,表明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 不足以平衡 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} ,还需要大量的 Na^+ 和 K^+ 来维持离子平衡,这进一步说明地下水的水-岩相互作用以硅酸盐岩矿物溶解占主导作用,而碳酸盐岩和蒸发盐岩溶解只占次要作用.

$(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 与 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 的比例关系可用来判定碳酸盐岩和石膏溶解对地下水组分的贡献^[33,34].图9(a)可以看出,浅层地下水中大部分水样点主要位于石膏溶解线和碳酸溶解碳酸盐岩线之间,部分还靠近硫酸溶解碳酸盐岩线,表明浅层地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸对碳酸盐岩的溶解及石膏溶解,部分还来自硫酸对碳酸盐岩的溶解.中层和深层的水样点则更靠近石膏溶解线,表明随着深度增加,石膏溶解作用增强,中层和深层地下水中 Ca^{2+} 主要来源于石膏的溶解.

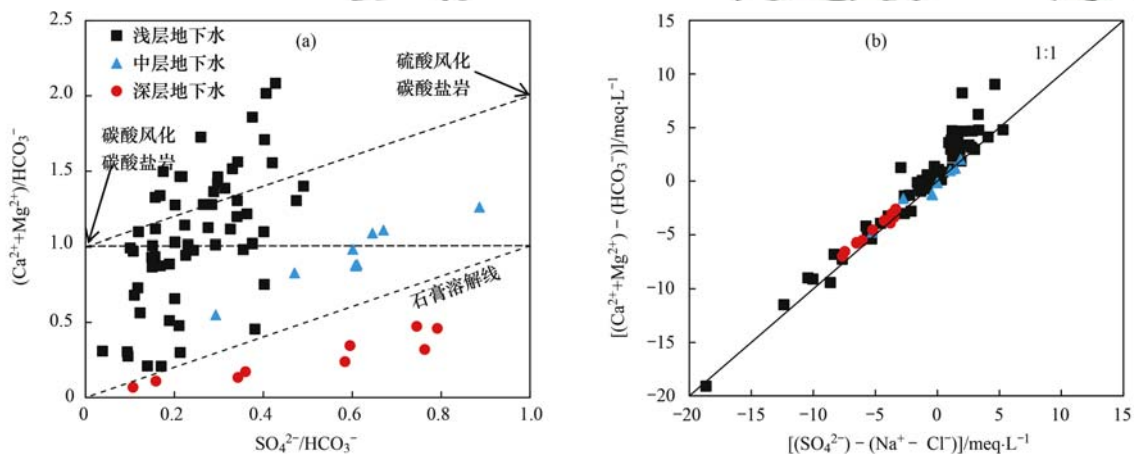


图9 地下水中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 与 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 以及 $[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - \text{HCO}_3^-]$ 与 $[(\text{SO}_4^{2-}) - (\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)]$ 的关系

Fig. 9 Relationships between $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^-)$ and $(\text{SO}_4^{2-})/(\text{HCO}_3^-)$, and $[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^-)]$ and $[(\text{SO}_4^{2-}) - (\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)]$ in groundwater

利用 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^-)$ 与 $(\text{SO}_4^{2-}) - (\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 的毫克当量比值可以判定 SO_4^{2-} 是否来源于石膏的溶解,其中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^-)$ 代表地下水中石膏溶解产生的 Ca^{2+} 浓度, $(\text{SO}_4^{2-}) - (\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 代表石膏溶解产生的 SO_4^{2-} 浓度^[35].图9(b)显示,研究区除浅层地下水部分样点偏离毫克当量比值为 $1:1$ 的直线外,其它点均在该直线附近,说明地下水中的 SO_4^{2-} 主要来自于石膏的溶解.研究区中更新世及以前地层中特别是新近纪地层中存在石膏夹层,故石膏矿物应当普遍存在^[8].

图7(b)和图8(b)显示的深层地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 毫克当量浓度的大幅降低,表明深层地下水相比于浅层和中层地下水有更大的碳酸盐

岩沉淀生成.当pH值大于 7.4 和TDS大于 $0.60 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时^[36], Ca^{2+} 与 HCO_3^- 结合生成 CaCO_3 沉淀,而且随着碱度的升高,进一步促进白云石沉淀 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 的生成^[26].区内各地层中普遍存在各类形状的钙质结核,其成分就是 CaCO_3 以及少量 MgCO_3 ^[37].

2.2.3 人类活动

在广大农村地区,农业施肥、未经处理的生活污水和垃圾会产生大量的污染物,如氯离子和硝酸盐类等,会随雨水或地表水进入浅层地下水.一般地下水受到人类活动影响时,地下水中的 Cl^-/Na^+ 和 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 的比值会较高^[38,39].通过 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 和 Cl^-/Na^+ 关系图(图10),可以看出大部分浅层地下

水样品主要位于硅酸盐风化端元,但已有部分样品靠近或处于农业污染端元,表明浅层地下水已经受到一定程度的农业污染影响. 中层地下水和深层地下水则由于其相对的封闭环境, $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 和 Cl^-/Na^+ 的比值较低,说明中层和深层地下水几乎不受人类活动形成的污染物的影响.

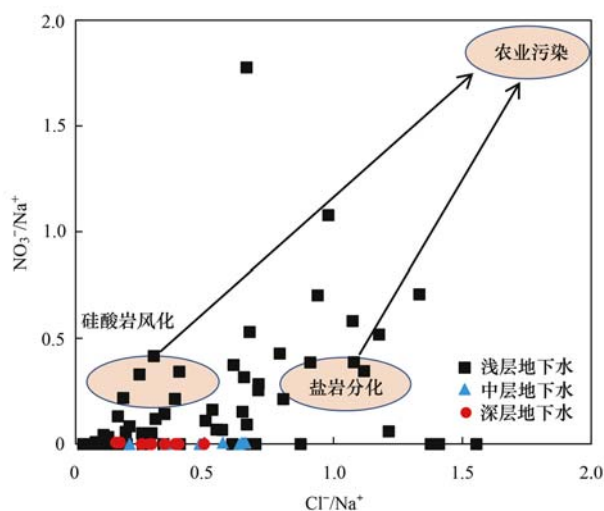


图 10 地下水中 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 与 Cl^-/Na^+ 的关系

Fig. 10 Relationship between $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ and Cl^-/Na^+ in groundwater

2.3 水化学垂向差异成因分析

与区内相似,天津平原^[40]、河北平原^[41]及黄河冲积平原^[42]也普遍存在一层咸水,即地下水的矿化度由浅至深,呈现低-高-低的变化特征. 地下水水化学垂向差异与含水层的沉积环境及后期水-岩作用有着密切的关系^[43].

2.3.1 沉积环境

结合古地理、古气候环境和水文地球化学特征,一般认为咸水有大陆盐化和滨海型海侵两种成因,或二者混合^[40]. 天津平原和河北平原东部沿海地区咸水即为海侵成因. 黄河冲积平原普遍存在着一层矿化度大于 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的咸水(厚度通常为 $50 \sim 200 \text{ m}$),一般认为是早更新世晚期干旱气候下大陆盐化作用的产物^[42]. 该时期气候干燥,蒸发浓缩作用强烈. 而新近纪晚期湿润气候期的水文过程为深层地下水提供了淡化的水环境条件^[43].

2.3.2 水-岩作用

沉积环境、含水介质及循环特征的差异使得不同深度地下水水-岩作用强度也不尽相同. 地下水均以含钠硅酸盐岩矿物的溶解为主,该过程为地下水输送了浓度占优势的 Na^+ 和 HCO_3^- . 浅层地下水还受碳酸盐岩矿物和蒸发盐岩矿物溶解作用影响,该过程为地下水输送了 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} ,同时阳离子交换作用也起着重要作用,该过程也为

地下水中输送了 Na^+ ; 与浅层地下水相比,中层地下水中硅酸盐和蒸发盐岩溶解作用增强,但碳酸盐岩溶解作用和离子交换作用减弱,使得中层地下水中的 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 浓度增加;与中层地下水相比,深层地下水中硅酸盐岩和蒸发盐岩溶解作用减弱,碳酸盐岩以沉淀作用为主,同时阳离子交换作用增强,使得地下水中各主要离子浓度减少,且 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度大幅降低.

3 结论

(1)研究区地下水为弱碱性水,占优势的阴、阳离子为 HCO_3^- 和 Na^+ ,浅层地下水的水化学类型以 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 和 $\text{HCO}_3-\text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型水为主,中层和深层均以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Na}$ 型水为主.

(2)水化学成分出现明显的垂向差异,由浅至深,TDS、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 的平均质量浓度均呈现先增大后减小的趋势, Ca^{2+} 的平均质量浓度呈现逐渐降低趋势,总硬度的平均质量浓度呈现先平稳后减小的趋势. 地下水化学特征的水平分带规律虽不明显,但部分地下水已有受人类活动影响的迹象.

(3)地下水化学特征受水-岩作用、阳离子交换作用和人类活动的共同影响,受降水和蒸发影响小,以水-岩作用为主. 水-岩作用以含钠硅酸盐岩矿物的溶解作用为主. 浅层地下水受人类活动影响较大,而中层和深层地下水几乎不受其影响.

(4)水化学垂向差异与含水层沉积环境和水-岩作用密切相关,中层地下水所赋含水层相对干燥的沉积环境以及相对较强的硅酸盐岩和蒸发盐岩溶解作用使部分主要指标质量浓度明显高于浅层和深层地下水.

(5)从 TDS、总硬度和水质评价结果来看,深层地下水水质明显优于浅层和中层地下水,目前也是区内主要的饮用水源. 但过量集中开采深层地下水,导致形成了区域性降落漏斗,使中层和深层地下水位差不断加大,增加地面沉降以及中层微咸水向深层淡水越流的风险. 当地应合理布局深层地下水开采井,并合理调控取水量.

致谢:感谢安徽省地质调查院彭玉怀教授级高工在论文修改方面的指导;感谢项目组成员赵家厚、李玉明、吴剑雄和刘中刚在野外调查和采样方面的工作.

参考文献:

- [1] 王晓艳. 陕西黑河流域地下水水化学特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4): 168-176.
Wang X Y. Hydrochemical characteristics of groundwater in Heihe River basin, Shaanxi, China [J]. Journal of Desert

- Research, 2019, **39**(4): 168-176.
- [2] 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.
- [3] 孙英, 周金龙, 魏兴, 等. 巴楚县平原区地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境化学, 2019, **38**(11): 2601-2609.
- Sun Y, Zhou J L, Wei X, *et al.* Hydrochemical characteristics and cause analysis of groundwater in the plain area of Bachu County[J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(11): 2601-2609.
- [4] 张智雄, 许模, 张强, 等. 绵阳红层地区浅层地下水水化学特征、成因及水质分析[J]. 科学技术与工程, 2018, **18**(3): 168-173.
- Zhang Z X, Xu M, Zhang Q, *et al.* Hydrogeochemistry, genesis and water quality analysis of shallow groundwater in red-bed area of the Mianyang city[J]. Science Technology and Engineering, 2018, **18**(3): 168-173.
- [5] 李政葵, 夏蔓宏, 董少刚, 等. 洛阳盆地浅层地下水化学特征及其演化特征分析[J]. 地球与环境, 2019, **42**(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, **42**(1): 57-63.
- [6] 葛亚伟, 龚建师, 叶念军, 等. 涡河流域同位素分析识别地下水补给源和地下水污染源[J]. 地质评论, 2013, **59**(S1): 1078-1080.
- [7] 陈炎. 淮北平原浅层地下水水质评价研究[J]. 地下水, 2018, **40**(6): 90-92.
- Chen Y. Evaluation of shallow groundwater quality in Huaibei Plain[J]. Ground Water, 2018, **40**(6): 90-92.
- [8] 彭玉怀, 陈伟. 安徽省淮北平原地下水环境演变调查评价报告[R]. 合肥: 安徽省地质调查院, 2010. 37-38, 124.
- [9] 程东会, 陈鸿汉, 何江涛, 等. 北京城近郊区地下水人为影响和水-岩作用指示性指标研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, **34**(5): 37-42.
- Cheng D H, Chen H H, He J T, *et al.* A study of indicators of anthropogenic influence and water-rock interaction in groundwater system in the urban region of Beijing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, **34**(5): 37-42.
- [10] 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.
- [11] 高坛光, 康世昌, 张强弓, 等. 青藏高原纳木错流域河水主要离子化学特征及来源[J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3009-3016.
- Gao T G, Kang S C, Zhang Q G, *et al.* Major ionic features and their sources in the Nam Co basin over the Tibetan Plateau[J]. Environmental Science, 2008, **29**(11): 3009-3016.
- [12] 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.
- [13] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2132-2142.
- Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* Regional evolution and control factors of karst groundwater in Liulin spring catchment[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2132-2142.
- [14] Kortatsi B K. Hydrochemical framework of groundwater in the Ankobra basin, Ghana[J]. Aquatic Geochemistry, 2007, **13**(1): 41-74.
- [15] 孙一博, 王文科, 段磊, 等. 关中盆地浅层地下水地球化学的形成演化机制[J]. 水文地质工程地质, 2014, **41**(3): 29-35.
- Sun Y B, Wang W K, Duan L, *et al.* Geochemical evolution mechanisms of shallow groundwater in Guanzhong basin, China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, **41**(3): 29-35.
- [16] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [17] 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.
- [18] 吴起鑫, 韩贵琳, 李富山, 等. 珠江源区南、北盘江丰水期水化学组成特征及来源分析[J]. 环境化学, 2015, **34**(7): 1289-1296.
- Wu Q X, Han G L, Li F S, *et al.* Characteristic and sources analysis of major ions in Nanpanjiang and Beipanjiang at the upper Pearl River during the wet season[J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(7): 1289-1296.
- [19] 雷米, 周金龙, 吴彬, 等. 新疆昌吉州东部平原区地下水水文地球化学演化分析[J]. 干旱区研究, 2020, **37**(1): 105-115.
- Lei M, Zhou J L, Wu B, *et al.* Hydrogeochemical evolution process of groundwater in the eastern plains in Changji Hui Autonomous Prefecture, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2020, **37**(1): 105-115.
- [20] 孙厚云, 毛启贵, 卫晓锋, 等. 哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J]. 中国地质, 2018, **45**(6): 1128-1141.
- Sun H Y, Mao Q G, Wei X F, *et al.* Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin[J]. Geology in China, 2018, **45**(6): 1128-1141.
- [21] 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.
- [22] Zhu B Q, Yang X P, Rioual P, *et al.* Hydrogeochemistry of three watersheds (the Ertqis, Zhungarar and Yili) in northern Xinjiang, NW China[J]. Applied Geochemistry, 2011, **26**(8): 1535-1548.
- [23] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, *et al.* Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. Chemical Geology, 1999, **159**(1-4): 3-30.
- [24] 丁贞玉, 马金珠, 何建华, 等. 腾格里沙漠西南缘地下水水化学形成特征及演化[J]. 干旱区地理, 2009, **32**(16): 948-957.
- Ding Z Y, Ma J Z, He J H, *et al.* Geochemical evolution of groundwater in the southwest of Tengger Desert, NW of China[J]. Arid Land Geography, 2009, **32**(16): 948-957.

- [25] 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.
- [26] 崔佳琪, 李仙岳, 史海滨, 等. 河套灌区地下水化学演变特征及形成机制[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4011-4020.
Cui J Q, Li X Y, Shi H B, *et al.* Chemical evolution and formation mechanism of groundwater in Hetao irrigation area [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4011-4020.
- [27] Xiao J, Jin Z D, Zhang F. Geochemical controls on fluoride concentrations in natural waters from the middle Loess Plateau, China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, **159**: 252-261.
- [28] 张涛, 何锦, 李敬杰, 等. 蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 4981-4990.
Zhang T, He J, Li J J, *et al.* Major ionic features and possible controls in the groundwater in the Hamatong River basin [J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 4981-4990.
- [29] 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 & Engineering Geology, 2014, **41**(1): 25-33, 73.
- [30] 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.
- [31] 顾慰祖, 林曾平, 费光灿, 等. 环境同位素硫在大同南寒武-奥陶系地下水资源研究中的应用[J]. 水科学进展, 2000, **11**(1): 14-20.
Gu W Z, Lin Z P, Fei G C, *et al.* The use of environmental sulphur isotopes in the study of the cambrian-ordovician aquifer system in the south of Datong [J]. Advances in Water Science, 2000, **11**(1): 14-20.
- [32] Li C C, Gao X B, Wang Y X. Hydrogeochemistry of high-fluoride groundwater at Yuncheng Basin, northern China [J]. Science of the Total Environment, 2015, **508**: 155-165.
- [33] 王攀, 靳孟贵, 路东臣. 河南省永城市浅层地下水化学特征及形成机制[J]. 地球科学, 2020, **45**(6): 2232-2244.
Wang P, Jin M G, Lu D C. Hydrogeochemistry characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in Yongcheng City, Henan Province [J]. Earth Science, 2020, **45**(6): 2232-2244.
- [34] 文泽伟, 汝旋, 谢彬彬, 等. 龙江-柳江-西江流域的水化学特征及其成因分析[J]. 环境化学, 2016, **35**(9): 1853-1864.
Wen Z W, Ru X, Xie B B, *et al.* Characteristics and sources analysis of hydrochemistry in the Longjiang-Liujiang-Xijiang watershed [J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(9): 1853-1864.
- [35] 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 等. 新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4042-4051.
Wei X, Zhou J L, Nai W H, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the Kashgar delta area in Xinjiang [J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 4042-4051.
- [36] 李彬. 节水改造后盐渍化灌区农田盐盐环境变化与预测研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
Li B. Change and forecast of farmland water-salt environment after water saving reform implemented for salinity region [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012.
- [37] 马丽, 张民. 砂姜黑土的发生过程与成土特征[J]. 土壤通报, 1993, **24**(1): 1-4.
- [38] Fan B L, Zhao Z Q, Tao F X, *et al.* Characteristics of carbonate, evaporite and silicate weathering in Huanghe River basin: A comparison among the upstream, midstream and downstream [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, **96**: 17-26.
- [39] 张涛, 王明国, 张智印, 等. 然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4003-4010.
Zhang T, Wang M G, Zhang Z Y, *et al.* Hydrochemical characteristics and possible controls of the surface water in Ranwu Lake basin [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4003-4010.
- [40] 王家兵. 华北平原深层淡水在开采条件下接受上覆咸水越流补给——以天津平原为例[J]. 水文地质工程地质, 2002, **29**(6): 35-37.
Wang J B. Leakage recharge from pores saline groundwater to deep fresh groundwater on the condition of pumping in Huabei Plain—a case of Tianjing Plain [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002, **29**(6): 35-37.
- [41] 周炼, 刘存富, 王佩仪. 河北平原第四系咸水同位素组成[J]. 水文地质工程地质, 1998, (3): 4-8.
Zhou L, Liu C F, Wang P Y. Isotopic composition of saline water in quaternary aquifers of HeBei plain [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1998, (3): 4-8.
- [42] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995. 109-111.
- [43] 张宗祜, 施德鸿, 任福弘, 等. 论华北平原第四系地下水系统之演化[J]. 中国科学(D辑), 1997, **27**(2): 168-173.
Zhang Z H, Shi D H, Ren F H, *et al.* Evolution of quaternary groundwater system in North China Plain [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 1997, **40**(3): 276-283.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)