

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8
第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM_{2.5}污染特征与浓度控制效果 张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)

北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)

合肥市PM_{2.5}和PM₁₀中元素组成特征及重污染成因分析 刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)

濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琬, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)

关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析 康宝荣, 刘立志, 刘焕武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)

长春秋季节细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源 吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)

中国城市扩张及空间特征变化对PM_{2.5}污染的影响 王桂林, 张炜 (3447)

不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM_{2.5}排放的影响 邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)

浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数 徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)

生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征 马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)

青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征 官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)

广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价 宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)

截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征 胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)

黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析 邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)

风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)

向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应 王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)

外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响 李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)

新疆喀什三角洲地下水SO₄²⁻化学特征及来源 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)

黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析 李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)

北京市河流秋季浮游动物群落特征分析 王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)

三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)

渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测 万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)

汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系 汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)

饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)

基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果 彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)

植被对绿色屋顶径流量和水质影响 章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)

光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制 范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)

多种材料对水中氨氮的吸附特性 焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)

不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响 常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)

3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程 刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)

铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制 韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)

缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮 杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)

连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响 薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)

FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制 马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)

ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件 董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)

全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析 张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)

不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比 刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)

异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析 杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)

Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现 高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)

高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N₂O产生特征 代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)

生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响 王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)

两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响 周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)

承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)

厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)

宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析 张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)

铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果 林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)

铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用 周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)

生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)

有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响 汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)

土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)

宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响 高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)

不同浸提剂条件下生物炭溶解性有机物的浸出规律 何晶晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)

基于成组生物毒性测试的PM_{2.5}毒性 江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)

《环境科学》征订启事(3587) 《环境科学》征稿简则(3595) 信息(3611, 3705, 3745)

新疆喀什三角洲地下水 SO_4^{2-} 化学特征及来源

魏兴^{1,2}, 周金龙^{1,2*}, 乃尉华³, 曾妍妍^{1,2}, 范薇^{1,2}, 李斌³

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水文水资源工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第二水文工程地质大队, 昌吉 831100)

摘要:“水质型”缺水问题是新疆喀什地区水资源紧缺的主要原因之一。位于喀什地区西部的喀什三角洲面积13 329 km², 73.2%面积的潜水和53.2%面积的承压水 SO_4^{2-} 浓度超过地下水质量Ⅲ类标准, 同时伴随有高 TDS、高硬度等特征。运用 δD 、 $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ 和 $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$ 同位素等手段分析地下水 SO_4^{2-} 化学特征及来源。结果表明:①区内剥蚀山区钙质粉砂岩、钙质细砂岩和石膏等盐类矿物的溶解控制了流域水化学组成, 形成了水化学类型以 SO_4 型为主的地表水和地下水。地下水化学类型演变方向为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$, 山麓斜坡冲洪积砾质平原为溶滤-径流带, 河流冲积平原为径流-累积带, 上游至下游地下水化学成分趋向盐化; ②区内地下水初始补给源主要为大气降水, 且受一定蒸发作用影响。不同水文地质单元地下水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分布特征明显, 上游至下游, 同位素值由低到富集, 受蒸发作用由弱到强; 冲积平原承压水同位素分布较离散, 受到上覆潜水混合作用影响; ③南部、北部山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水 SO_4^{2-} 来源分别为海陆交互相和陆相蒸发岩的溶滤; 河流冲积平原潜水 SO_4^{2-} 除了陆相蒸发岩溶滤来源外, 还存在化肥淋滤的污染; 承压水受蒸发岩溶滤外, 还受到潜水的混合作用和细菌还原硫酸盐作用影响。

关键词:新疆喀什三角洲; 地下水高 SO_4^{2-} ; 地下水演化; 氢氧同位素; 硫同位素

中图分类号: X142; X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3550-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201812130

Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang

WEI Xing^{1,2}, ZHOU Jin-long^{1,2*}, NAI Wei-hua³, ZENG Yan-yan^{1,2}, FAN Wei^{1,2}, LI Bin³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, China; 3. NO.2 Hydrogeological and Engineering Geological Team of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Changji 831100, China)

Abstract: Poor water quality is one of the main reasons for a shortage of water resources in the Kashi Prefecture of Xinjiang. The area of the Kashgar Delta is located in the western Kashi Prefecture and covers an area of 13329 km². Sulfate concentrations exceed the groundwater quality class III standard in 73.2% of the unconfined groundwater area and 53.2% of the confined groundwater area. In addition, the TDS content and the hardness of the water are high. The chemical characteristics and sources of groundwater sulfate were analyzed using the isotope method of δD , $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$, and $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$. The results showed that: ① The dissolution of salt minerals such as calcareous siltstone, calcareous sandstone, and gypsum in denuded mountainous areas controlled the hydrochemical compositions in the basin, and formed surface water and groundwater dominated by SO_4 . The evolution trend of groundwater chemical types was $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$. Alluvial-proluvial gravel plains on the piedmont slopes were the main dissolution-runoff zones and the fluvial plain was main runoff accumulation zone. The chemical composition of the groundwater tended towards salinization, from upstream to downstream; ② The groundwater was mainly derived from atmospheric precipitation, and was affected by evaporation. The distribution of δD and $\delta^{18}\text{O}$ in the groundwaters of different hydrogeological units was clear; from upstream to downstream, isotope values varied from low to increasingly higher, and evaporation varied from weak to strong, respectively. The distribution of isotopes in the confined groundwater in the river alluvium plain was relatively discrete, which was affected by the mixing effect of unconfined groundwater; ③ The sources of sulfate in the unconfined groundwater in the southern and northern alluvial-proluvial gravel plains on the piedmont slopes were the dissolution of marine-terrestrial and terrestrial deposit evaporates, respectively. The sources of sulfate in the unconfined groundwater in the river alluvium plain were the dissolution of terrestrial deposit evaporates and pollution from fertilizer leaching. The confined groundwater was affected by the dissolution of evaporates and the mixing effect of the unconfined groundwater and bacterial sulfate reduction.

Key words: Kashgar Delta Xinjiang; high sulfate groundwater; groundwater evolution; hydrogen and oxygen isotopes; sulfur isotope

新疆维吾尔自治区喀什三角洲地处西北内陆, 位于喀什地区与克孜勒苏柯尔克孜自治州行政区划范围内, 具有“五口通八国, 一路连欧亚”的区域优势, 是丝绸之路的交通要冲、中巴经济走廊的廊桥, 在国家区域发展和西部地区对外开放中承担着重要的战略作用。水资源是干旱区衡量经济社会

持续发展的重要指标, 喀什地区资源型缺水与水质

收稿日期: 2018-12-15; 修订日期: 2019-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41662016); 新疆自治区“十三五”重点学科建设高峰学科-水利工程学科基金项目(xjsgcgfxxk20161103)

作者简介: 魏兴(1993~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为干旱区地下水利用与保护, E-mail: 1035027480@qq.com

* 通信作者, E-mail: zjzhoujl@163.com

型缺水并存. 在水质型缺水中, 地下水 SO_4^{2-} 浓度最高达 $13\,517.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 且分布范围广, 同时伴随着高 TDS、高硬度^[1, 2]等特征. 通常, 地下水 SO_4^{2-} 主要来源有硫酸盐矿物的溶解、硫化物的氧化、大气降水、海水的溅沫和人类活动的输入等^[3~5]. 环境同位素在研究地下水循环和演化过程中应用广泛, 其中, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素记录着水体起源与循环的信息, 还可以判断水体相互关系^[6~10]; $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ 同位素因为具有不同的“指纹”特征, 可以示踪水体 SO_4^{2-} 的不同来源^[11~13].

δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素和 $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ 同位素逐渐用于识别地下水来源和水-岩相互作用过程, 以及指示人为活动对地下水硫酸盐污染的影响, 在西南贵州地区^[14, 15]、山西岩溶地区^[16]、华南岩溶地区^[17]、重庆岩溶地区^[18, 19] 和华北平原^[20] 等地区起到了较好的效果, 在中国西北地区应用的实例较少. 本文以新疆喀什三角洲为研究区, 借助上述方法及手段, 分析地下水中 SO_4^{2-} 分布特征及演化规律, 探讨 SO_4^{2-} 的来源, 以为喀什地区地下水资源利用与保护提供科学依据.

1 研究区概况

研究区位于喀什噶尔河流域中上游地区, 地处

塔里木盆地西缘, 具有北、西、南三面环山, 东面向塔里木盆地敞开的独特地形条件, 形成了典型的三角洲半封闭盆地. 地理坐标为 $75^\circ 00' 00'' \sim 76^\circ 52' 15''\text{E}$, $38^\circ 22' 05'' \sim 39^\circ 53' 54''\text{N}$, 从西向东宽度逐渐增大, 呈“三角形”展布, 总面积 $17\,545\text{ km}^2$, 其中喀什三角洲面积 $13\,329\text{ km}^2$ (图 1). 地貌可划分为构造剥蚀中低山、构造剥蚀低山丘陵、山麓斜坡冲洪积砾质平原、河流冲积平原和风积沙漠这 5 类. 喀什三角洲是喀什噶尔河流域主要经济活动区, 主要以农业生产为主. 包括喀什市、疏勒县、疏附县、英吉沙县、阿图什市、阿克陶县、乌恰县等县市. 该区属暖温带大陆性干旱气候, 多年平均气温为 11.7°C , 多年平均降水量为 52.5 mm , 多年平均水面蒸发量为 $1\,757.1\text{ mm}$.

研究区山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水区沿北、西、南山前分布, 中下游则为河流冲积平原潜水和河流冲积平原承压水区. 第四系厚度山前向平原区逐渐变厚, 变化范围为 $100 \sim 1\,000\text{ m}$. 第四系沉积规律由山前单一的卵、砾、砂石地层向下游过渡为中粗砂、砂、亚砂土、亚黏土和黏土的多层结构, 研究区多层结构承压水在 100 m 深度内有 2~3 个承压含水层, 水质较差; 100 m 深度以下有 2 个承压含水层,

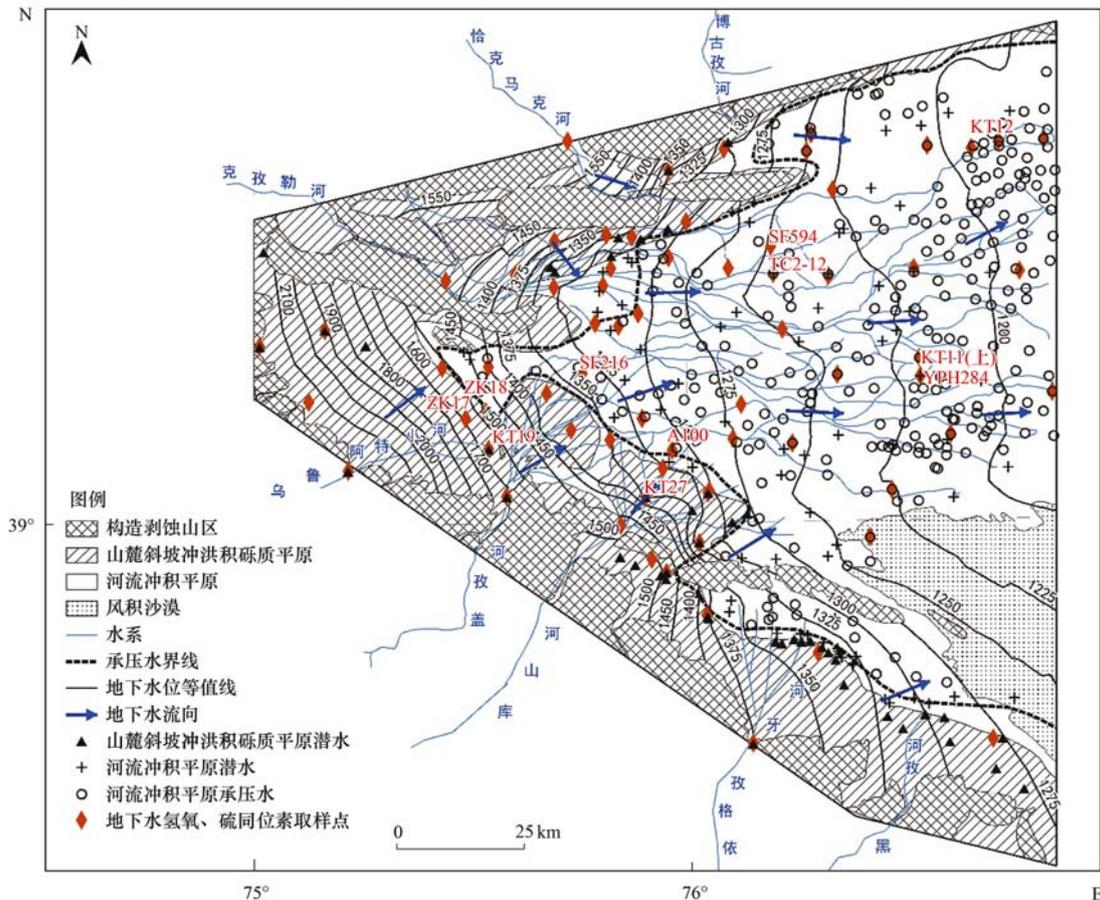


图 1 研究区地下水采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of groundwater sampling locations in the study area

水质较好。研究区受河流冲、洪积沉积规律的影响,上游至下游具有岩性颗粒逐步变细的特点。

研究区河流发源于山区,在地形控制下,河流均向平原区汇流。河水出山口后,大部分被平原灌区引用,同时平原区建有众多的机井工程,其取水深度一般小于 300 m,保障了各业用水特别是农业灌溉用水的需求。

干旱区地表水是地下水的主要补给源。研究区平原地下水主要接受河道渗漏、河床潜流、暴雨洪流入渗、地下水侧向径流、降雨入渗等补给。中下游平原区河网、渠系密布,地下水埋深较浅,同时接受河道、灌区渠系渗漏、田间入渗、水库渗漏和泉水回归入渗等补给。地下水流向与地形坡降趋势一致,总体由西向东径流。地下水排泄方式主要为人工开采,其次是泉水溢出、潜水蒸发蒸腾以及向下游的侧向流出等。

2 材料与方法

2.1 采样点分布

采样时间为 2016 年 6~11 月,为相对丰水期,也为灌溉期。按研究区水文地质单元采集井水样品,共采集地下水水化学样品 402 组,其中山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水 49 组,河流冲积平原潜水 78 组,河流冲积平原承压水 275 组;地下水 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{34}S-SO_4^{2-}$ 同位素样品 62 组,其中山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水 21 组,河流冲积平原潜水 16 组,河流冲积平原承压水 25 组,采样点分布见图 1。

2.2 样品采集与分析方法

聚乙烯塑料水样瓶用所取水样润洗 3 次,之后贴好标签密封保存。现场测定 pH 值、水温、电导率、氧化还原电位和溶解氧等指标。所有水样用 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜过滤,阳离子分析的水样加硝酸酸化至 pH < 2。

离子指标 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和 NO_3^- 等)测试由新疆地矿局第二水文工程地质大队化验室完成,其中 K^+ 和 Na^+ 测定为火焰原子吸收分光光度法、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 测定为乙二胺四乙酸二钠滴定法、 Cl^- 测定为硝酸银容量法、 SO_4^{2-} 测定为硫酸钡比浊法; HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 测定为采用酸碱滴定法、 NO_3^- 测定为紫外分光光度法。所测水样阴、阳离子相对误差小于 5%。 δD (‰) 和 $\delta^{18}O$ (‰) 测试由长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室测试完成,采用气体同位素质谱仪测试,测试精度分别为 $\pm 1‰$ 和 $\pm 0.2‰$ 。 $\delta^{34}S-SO_4^{2-}$ 测试由中国地质大学(武汉)生

物地质与环境地质国家重点实验室完成,样品预处理采用化学沉淀法将过滤后的水样加盐酸酸化至 pH < 2,使 $BaCl_2$ 完全反应生成 $BaSO_4$ 沉淀,采用 DTPA 试剂溶解再沉淀法(DDARP)进行纯化制备为纯净的 $BaSO_4$ 沉淀,纯化后的 $BaSO_4$ 与 O_2 及 V_2O_5 燃烧并转化为 SO_2 后,采用元素分析仪-同位素质谱仪(型号 DELTA V PLUS)测试,精度为 $\pm 0.2‰$ 。

3 结果与讨论

3.1 研究区地下水水化学特征与 SO_4^{2-} 分布特征

3.1.1 地下水水化学统计特征

经统计分析,研究区地下水化学类型共有 6 类(表 1),分别为 $HCO_3 \cdot SO_4$ 、 $HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Cl$ 、 $HCO_3 \cdot Cl$ 、 SO_4 、 $SO_4 \cdot Cl$ 和 Cl 型,分别占水样总数的 17.2%、4.0%、0.7%、21.4%、56.5% 和 0.2%。95% 的水样水化学类型为 $SO_4 \cdot Cl$ 、 SO_4 和 $HCO_3 \cdot SO_4$ 型,水化学类型集中为 3 类,说明控制研究区水文化学环境的因素较强,结合干旱区水文地球化学演变规律,研究区地下水化学类型演变方向为 $HCO_3 \cdot SO_4 \rightarrow SO_4 \rightarrow SO_4 \cdot Cl$ 。

在地下水化学类型演变方向上,离子浓度成倍增加,其中 SO_4^{2-} 浓度均值分别为 239.9、1 065.5 和 1 762.6 $mg \cdot L^{-1}$,较初值增大 4.4 倍和 7.3 倍; Cl^- 浓度均值分别为 63.5、226.0 和 1 288.2 $mg \cdot L^{-1}$,较初值增大 3.6 倍和 20.3 倍; TDS 均值分别为 618.2、2 035.7 和 4 751.0 $mg \cdot L^{-1}$,较初值增大 3.3 倍和 7.7 倍;总硬度均值分别为 339.9、1 069.2 和 1 586.6 $mg \cdot L^{-1}$,较初值增大 3.1 倍和 4.7 倍。研究区 $HCO_3 \cdot SO_4$ 型地下水为淡水, SO_4 型和 $SO_4 \cdot Cl$ 型地下水为高硬度微咸水或半咸水。

研究区地下水 pH 值为 7.11~8.52,呈弱碱性。地下水 SO_4^{2-} 浓度、 Cl^- 浓度、TDS、总硬度和 pH 值具有河流冲积平原潜水 > 河流冲积平原承压水 > 山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水的特征,上游至下游河流冲积平原地下水化学成分趋向盐化。

3.1.2 地下水 SO_4^{2-} 分布特征

研究区地下水阳离子中 Na^+ 占优势, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 浓度差异不大; SO_4^{2-} 为控制性阴离子,其次为 Cl^- 。相关分析得出, SO_4^{2-} 与 Cl^- 、TDS 和总硬度的相关系数分别为 0.86、0.94 和 0.98,相关性较好,表明研究区地下水 Cl^- 、TDS 和总硬度分布与 SO_4^{2-} 相似。研究区潜水 SO_4^{2-} 浓度分布特征明显[图 2(a)],南部上中游山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水 SO_4^{2-} 浓度 < 250 $mg \cdot L^{-1}$,主要沿地下水流向 SO_4^{2-} 浓度增大,至下游河流冲积平原潜水 SO_4^{2-} 浓

表 1 地下水水化学指标统计结果
Table 1 Statistical results of the hydrochemical parameters of the groundwater

指标	水化学类型	山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水($n=49$)			河流冲积平原潜水($n=78$)			河流冲积平原承压水($n=275$)			个数/ 平均值
		最大值	最小值	个数/ 平均值	最大值	最小值	个数/ 平均值	最大值	最小值	个数/ 平均值	
样品/个	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$	—	—	15	—	—	18	—	—	36	69
	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$	—	—	3	—	—	—	—	—	13	16
	$\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}$	—	—	1	—	—	—	—	—	2	3
	SO_4	—	—	6	—	—	22	—	—	58	86
	$\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$	—	—	24	—	—	37	—	—	166	227
	Cl	—	—	—	—	—	1	—	—	—	1
	合计	—	—	49	—	—	78	—	—	275	402
SO_4^{2-} /mg·L ⁻¹	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$	904.2	116.4	236.6	384.7	92.2	218.0	680.0	73.5	252.2	239.9
	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$	202.5	118.2	168.8	—	—	—	218.0	123.5	159.7	161.4
	$\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}$	101.9	101.9	101.9	—	—	—	638.7	39.7	339.2	260.1
	SO_4	890.5	440.8	614.7	2 138.5	379.7	849.8	5 559.4	178.4	1 194.0	1 065.5
	$\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$	1 239.3	128.8	572.4	13 517.9	158.6	3 480.8	9 173.6	144.5	1 551.7	1 762.6
	Cl	—	—	—	7 377.1	7 377.1	7 377.1	—	—	—	7 377.1
	统计值	1239.3	101.9	440.5	13 517.9	92.2	2 035.7	9 173.6	39.7	1 231.5	1 291.2
Cl^- /mg·L ⁻¹	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$	341.8	14.2	69.2	106.4	22.7	58.1	141.7	19.8	63.9	63.5
	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$	140.5	99.3	118.9	—	—	—	180.9	63.8	101.2	104.6
	$\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}$	104.9	104.9	104.9	—	—	—	942.8	42.5	492.7	363.4
	SO_4	142.2	74.5	110.5	477.6	69.6	193.8	1 028.3	35.4	250.2	226.0
	$\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$	822.6	90.8	379.0	17 565.2	91.9	3 583.5	6 044.6	78.0	908.1	1 288.2
	Cl	—	—	—	20 210.5	20 210.5	20 210.5	—	—	—	20 210.5
	统计值	822.6	14.2	229.8	20 210.5	22.7	2 027.0	6 044.6	19.8	617.7	843.8
TDS /mg·L ⁻¹	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$	2 955.2	291.5	635.6	877.1	280.4	568.0	1 575.6	281.8	636.0	618.2
	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$	642.5	513.2	583.1	—	—	—	726.3	426.1	549.7	556.0
	$\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}$	556.9	556.9	556.9	—	—	—	2 951.7	246.5	1 599.1	1 251.7
	SO_4	1 531.3	863.1	1 156.0	4 010.2	839.0	1 671.3	9 836.4	415.8	2 265.0	2 035.7
	$\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$	3 163.8	370.2	1 537.1	44 060.3	465.2	11 039.3	219 66.2	430.0	3 814.0	4 751.0
	Cl	—	—	—	44 130.4	44 130.4	44 130.4	—	—	—	44 130.4
	统计值	3 163.8	291.5	1 136.0	44 130.4	280.4	6 404.8	21 966.2	246.5	2 900.8	3 365.6
总硬度 /mg·L ⁻¹	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$	967.1	206.1	316.2	522.6	160.4	331.6	888.4	110.6	354.0	339.9
	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$	333.6	258.7	299.2	—	—	—	344.9	48.2	194.1	213.8
	$\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}$	212.3	212.3	212.3	—	—	—	1 303.4	209.0	756.2	574.9
	SO_4	862.2	433.2	662.4	2 140.6	401.0	899.5	5 767.3	140.8	1 175.7	1 069.2
	$\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$	1 306.2	170.9	661.0	10 619.8	158.4	3 019.4	7 021.0	65.3	1 401.1	1 586.6
	Cl	—	—	—	8 525.5	8 525.5	8 525.5	—	—	—	8 525.5
	统计值	1 306.2	170.9	524.3	10 619.8	158.4	1 871.8	7 021.0	48.2	1 154.7	1 217.0
pH	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$	8.42	7.26	7.91	8.28	7.64	8.00	8.34	7.51	8.02	7.99
	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$	7.90	7.85	7.87	—	—	—	8.52	7.78	8.13	8.08
	$\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}$	8.31	8.31	8.31	—	—	—	8.16	8.09	8.13	8.19
	SO_4	8.21	7.27	7.75	8.23	7.43	7.82	8.38	6.80	7.80	7.80
	$\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$	8.25	7.27	7.88	8.28	7.11	7.66	8.44	6.68	7.82	7.80
	Cl	—	—	—	7.23	7.23	7.23	—	—	—	7.23
	统计值	8.42	7.26	7.88	8.28	7.11	7.78	8.52	6.68	7.86	7.85

度 $>3 000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。承压水 SO_4^{2-} 浓度分布与潜水相似[图 2(b)], 承压水上游小部分区域 SO_4^{2-} 浓度 $<250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 中下游东北和沙漠西部区域承压水 SO_4^{2-} 浓度 $>3 000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

以《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017) III 类水标准为限值, 本次地下水样 SO_4^{2-} 超标率为 78.9%, 最大 SO_4^{2-} 浓度达 $13 517.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Cl^- 超标率为 49.3%, 最大 Cl^- 浓度为 $20 210.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。ArcGIS10.2 统计得出, 研究区平原 73.2% 的面积潜水 SO_4^{2-} 浓度 $>250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (超标), 40.1% 的面

积潜水 SO_4^{2-} 浓度 $>1 000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 53.2% 的面积承压水 SO_4^{2-} 浓度 $>250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (超标), 22.3% 的面积承压水 SO_4^{2-} 浓度 $>1 000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

3.2 氢氧同位素组成特征

研究区山区降水是水资源的形成区, 平原区是水资源的消耗区。研究区地下水样 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均分布在当地大气降水线 (local meteoric water line, LMWL)^[21] 附近偏右下方 (图 3), 表明其初始补给源主要为大气降水, 且受一定蒸发作用影响。

研究区不同水文地质单元地下水样 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$

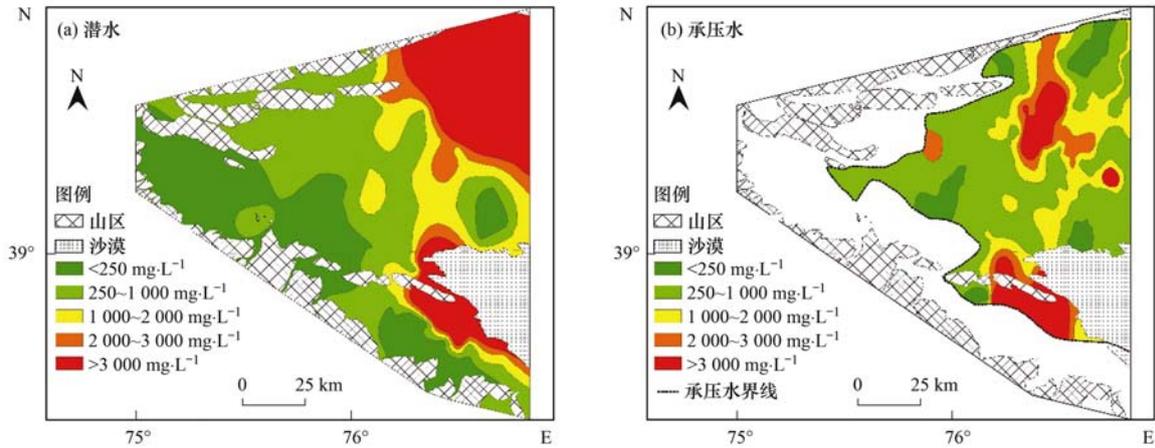
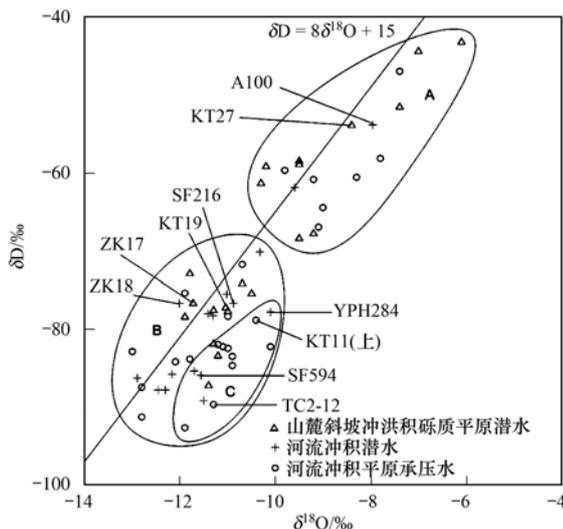
图2 研究区地下水 SO_4^{2-} 浓度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of sulfate concentrations in the groundwater of the study area

图3 研究区地下水 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系Fig. 3 Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ in the groundwater samples from the study area

分布特征较为明显,研究区上中游,地下水样同位素值较低(B区),受蒸发作用相对较弱;中下游,地下水更富集重同位素(A区),表明其在径流过程中受到更强烈的蒸发作用影响;冲积平原承压水区域,承压水样同位素值分布较离散(C区),表明承压水受到上覆潜水的混合作用影响。

研究区受河流冲、洪积沉积规律影响,山麓斜坡冲洪积砾质平原为深埋带补给径流区,该区蒸发作用弱,地下水 TDS 低,水化学作用以溶滤为主,水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型;中游河流冲积平原因地形变缓,岩性颗粒减小,向下游的径流减缓,地下水埋深变浅,蒸发作用渐加强,地下水蒸发浓缩作用使 TDS 增大,水化学类型变为 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型,至下游地下水演变为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Na}$ 型, TDS 最大达到 $44\,060.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。冲积平原承压水的混合作用是众多机井串层开采以及水文地质“天窗”、层间越

流补给所致,使研究区山麓斜坡冲洪积砾质平原与相邻河流冲积平原潜水之间以及河流冲积平原潜水与承压水都有较好的水力联系,利于地下水循环交换演化。例如:山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水 KT27 的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值(分别为 -53.8‰ 和 -8.4‰)、KT19 的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值(分别为 -77.2‰ 和 -11.0‰)、ZK17 的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值(分别为 -76.6‰ 和 -11.7‰)分别与下游河流冲积平原潜水 A100 的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值(分别为 -53.9‰ 和 -8.0‰)、SF216 的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值(分别为 -76.7‰ 和 -10.9‰)、ZK18 的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值(分别为 -76.7‰ 和 -12.0‰)相近;河流冲积平原潜水 YPH284 的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值(分别为 -77.8‰ 和 -10.1‰)、SF594 的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值(分别为 -85.9‰ 和 -11.6‰)分别与附近承压水 KT11(上)的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值(分别为 -78.9‰ 和 -10.4‰)、TC2-12 的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值(分别为 -89.7‰ 和 -11.3‰)相近,且潜水与承压水各个离子浓度相差不大。

3.3 水-岩作用模拟对地下水 SO_4^{2-} 来源的解析

研究区构造剥蚀山区新近纪(N)钙质粉砂岩、钙质细砂岩和石膏等盐类矿物的溶解控制了流域水化学组成^[22]。汇流于平原的盖孜河和库山河的水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3$ 型;恰克马克河和克孜勒河水化学类型分别为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}$ 和 SO_4 型^[23]。河水渗漏其控制性阴离子 SO_4^{2-} ,对平原区地下水化学类型影响较大。

矿物溶解饱和指数(saturation index, SI)对于揭示地下水离子来源具有指向性,SI由负值到正值,溶解能力由强到弱。利用 PHREEQC 软件计算得到的常规矿物饱和指数表明(表2),研究区方解石、白云石、石膏和岩盐的溶解能力山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水 > 河流冲积平原承压水 > 河流冲积

平原潜水, 上游至下游饱和指数趋于减小, 矿物溶解趋于饱和. 山麓斜坡冲洪积砾质平原矿物溶解是地下水离子的主要来源.

研究区石膏、岩盐总体处于溶解状态, 其中岩盐一直处于溶解状态, 这是 Cl^- 在地下水阴离子中占有次要比重的原因之一.

表 2 地下水矿物饱和指数计算

Table 2 Saturation index of major minerals in the groundwater

矿物指标	山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水 (n = 49)			河流冲积平原潜水 (n = 78)			河流冲积平原承压水 (n = 275)		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
SI(方解石)	1.08	-0.82	0.13	1.28	-0.49	0.37	1.43	-0.95	0.21
SI(白云石)	2.39	-1.75	0.27	2.85	-0.49	1.14	2.99	-2.29	0.58
SI(石膏)	-0.55	-1.99	-1.14	0.47	-1.92	-0.80	0.46	-2.33	-0.89
SI(盐岩)	-5.00	-8.26	-6.38	-2.38	-7.72	-5.67	-3.36	-7.84	-5.73

方解石和白云石饱和指数在 $-0.5 \sim 0.5$ 时, 其矿物处于溶解-沉淀平衡状态^[24]; 当饱和指数 > 0.5 时, 方解石和白云石处于饱和状态. 研究区大部分样品方解石和白云石处于平衡或者过

饱和状态(图 4), 表明地下水中只有少量的 Ca^{2+} 来自碳酸盐的溶解, 河流冲积平原潜水方解石和白云石(饱和指数均大于 -0.5) 处于沉淀析出状态.

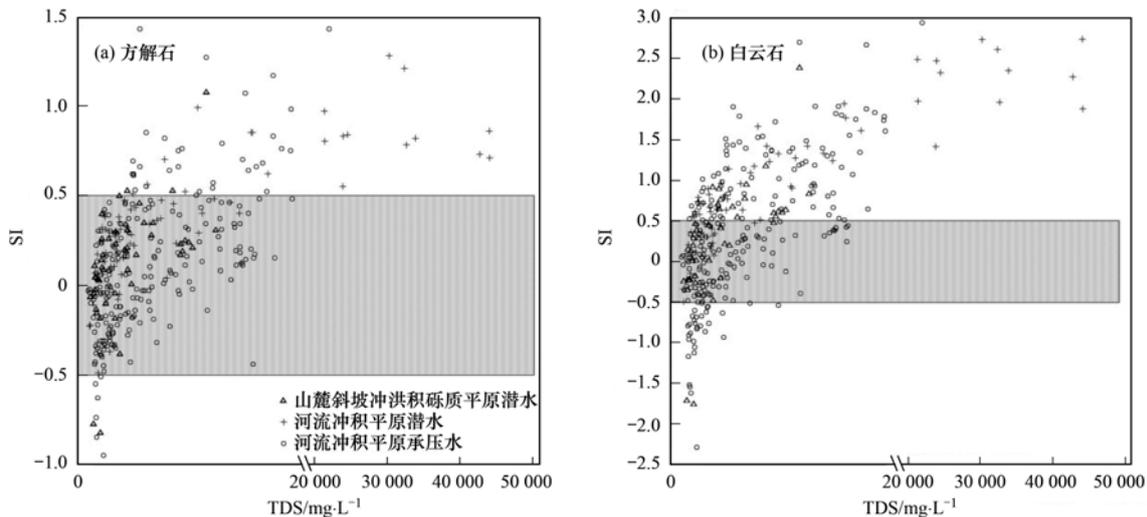


图 4 研究区地下水方解石与白云石饱和指数与 TDS 关系

Fig. 4 Plots of saturation indices with respect to calcite and dolomite minerals against total dissolved solids in the study area

研究区 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-})$ 与 SI(石膏) 存在明显的对数函数关系, $R^2 = 0.95$ (图 5), 说明石膏溶解是地下水中 SO_4^{2-} 的主要来源^[17].

$\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 与 $\gamma(\text{SO}_4^{2-})$ 的关系显示(图 6), 水样分布在石膏和芒硝溶解线周围, 表明石膏和芒硝的溶解是地下水 SO_4^{2-} 的主要来源之一^[25], 大部分水样分布在石膏-芒硝溶解线右侧, 说明地下水受到同离子效应影响或存在其它非石膏和芒硝溶解来源的 SO_4^{2-} , 使 $\text{SO}_4^{2-} > (\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$. 研究区沉积岩缺少黄铜矿和黄铁矿等硫化物矿物, 不存在硫酸盐的氧化来源^[26], 地下水在酸碱平衡和沉淀溶解平衡中都存在同离子效应, 使方解石溶解达到过饱和状态, 说明石膏的溶解通过同离子效应促进了方解石发生沉淀, 从而导致 SO_4^{2-} 不成比例的增加^[27], 化学反应式如下:

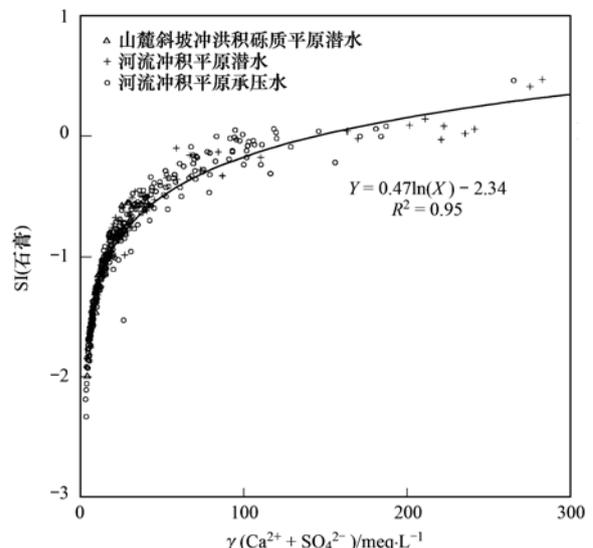
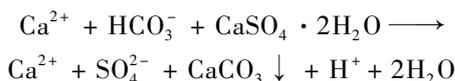


图 5 研究区地下水 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-})$ 与 SI(石膏) 关系

Fig. 5 Relationship between $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-})$ and SI(gypsum) in the groundwater samples from the study area

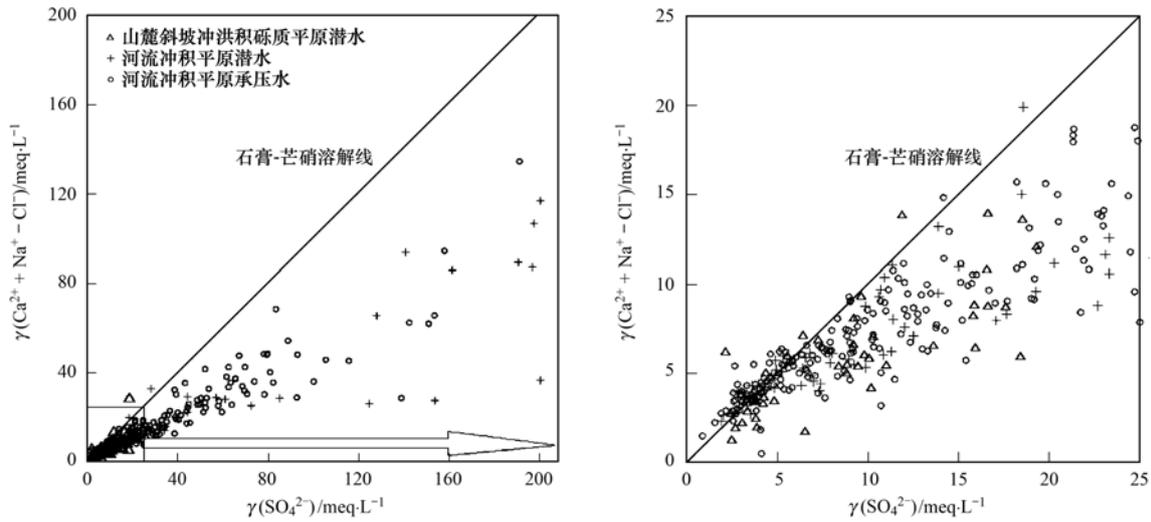


图 6 研究区地下水 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 与 $\gamma(\text{SO}_4^{2-})$ 关系

Fig. 6 Relationship between $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ and $\gamma(\text{SO}_4^{2-})$ in the groundwater samples from the study area

3.4 硫同位素对地下水 SO_4^{2-} 来源的解析

研究区地下水 $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$ 与 SO_4^{2-} 没有相关关系 (图 7), 山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水 $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$ 值的变化范围为 3.9‰ ~ 13.6‰, 平均为 9.5‰. 河流冲积平原潜水 $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$ 值的变化范围为 5.3‰ ~ 7.6‰, 平均为 6.4‰; 承压水 $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$ 值的变化范围为 3.9‰ ~ 14.0‰, 平均为 8.4‰. 根据中国新近系沉积类型和地层区划研究, 塔里木盆地西缘新近系为海陆过渡相或陆相沉积. 海相沉积蒸发岩具有较高的 $\delta^{34}\text{S}$ 值, 在 15‰ 以上; 海陆交互相蒸发岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 10‰ ~ 15‰ 之间; 陆相沉积蒸发岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值一般小于 10‰^[28]. 根据地下水 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布, 以 $\delta^{34}\text{S} = 10‰$ 为分界线, 将研究区地下水分为 I 组和 II 组.

I 组中研究区南部山麓斜坡冲洪积砾质平原上游潜水 $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$ 值为 10.0‰ ~ 13.6‰, 对应为海陆交互相蒸发岩溶滤来源的 SO_4^{2-} . A 区承压水 (KT12) 由于埋深相对较大, 还原环境较强^[29], 推测承压水受细菌还原硫酸盐 (bacterial sulfate reduction, BSR) 作用影响, 溶解的硫酸盐被分解, 这与 Hosono 等^[30] 研究在还原环境下, BSR 作用使地下水硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$ 值增大, 发生如下反应:



II 组地下水对应为陆相蒸发岩溶滤来源的 SO_4^{2-} . 该组河流冲积平原承压水区 $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$ 值随着 SO_4^{2-} 浓度的增加而增加, 这与 BSR 作用使残留的硫酸盐富含较重的同位素^[31] 相反, 说明承压水中 BSR 作用极其微弱或者不存在. B 区河流冲积平原承压水沿地下水流向, SO_4^{2-} 浓度逐渐增加, 但 $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$ 值变化不大, 说明 SO_4^{2-} 来源没有改变,

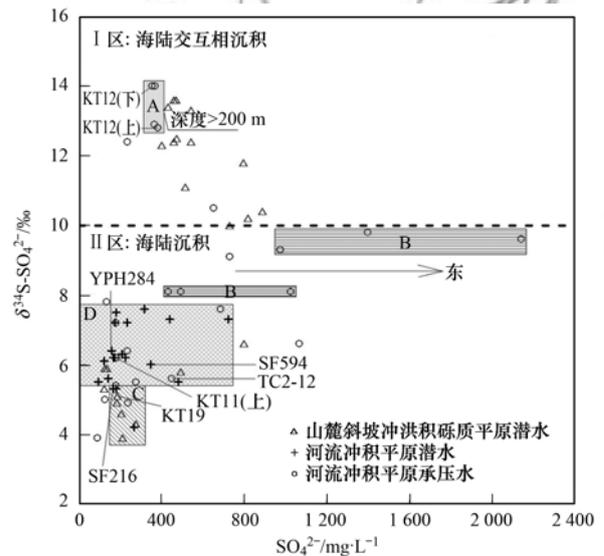


图 7 研究区地下水 $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$ 与 SO_4^{2-} 关系

Fig. 7 Relationship between $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$ and SO_4^{2-} in the groundwater samples from the study area

SO_4^{2-} 浓度的增加是沿程累积作用的结果; C 区主要为北部上游山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水, $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$ 值在 3.9‰ ~ 5.1‰ 之间, 结合前文 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素分析, 判断该区潜水 SO_4^{2-} 来源为陆相蒸发岩的溶滤. D 区主要为河流冲积平原潜水, $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$ 值在 5.3‰ ~ 7.6‰ 之间, 分布范围较小, 为单一来源特征, 但仍为陆相蒸发岩溶滤来源. 经调查, 研究区灌区存在化肥淋滤污染, 例如化肥过磷酸钙 ($\delta^{34}\text{S}$ 值约为 -5.6‰ ~ 7.7‰^[32]) 等的使用.

4 结论

(1) 新疆喀什三角洲地下水化学类型演变方向为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$. 在其演变方向上, 离子浓度成倍增加, 研究区 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型地下水为淡

水, SO_4 型和 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型地下水为高硬度、微咸水或半咸水. 地下水 SO_4 浓度、 Cl^- 浓度、TDS、总硬度和 pH 值具有河流冲积平原潜水 > 河流冲积平原承压水 > 山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水的特征, 上游至下游河流冲积平原地下水化学成分趋向盐化.

(2) 研究区地下水初始补给源主要为大气降水, 且受一定蒸发作用影响; 不同水文地质单元地下水样 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分布特征较明显, 上中游至中下游, 同位素值由低到更富集, 受蒸发作用由弱到强; 冲积平原承压水同位素分布较离散, 是承压水井开采受到上覆潜水的混合作用影响.

(3) 研究区地下水 SO_4^{2-} 主要来自石膏和芒硝的溶解, 同离子效应使地下水中 SO_4^{2-} 增加, SO_4^{2-} 成为控制性阴离子. 山麓斜坡冲洪积砾质平原为溶滤-径流带, 河流冲积平原为径流-累积带.

(4) 研究区南部、北部山麓斜坡冲洪积砾质平原潜水 SO_4^{2-} 来源分别为海陆交互相和陆相蒸发岩的溶滤; 河流冲积平原潜水 SO_4^{2-} 除了陆相蒸发岩溶滤来源外, 还存在化肥淋滤的污染; 承压水除蒸发岩溶滤外, 还受到潜水的混合作用和细菌还原硫酸盐作用影响.

参考文献:

- [1] 曾妍妍, 周殷竹, 周金龙, 等. 新疆喀什地区西部地下水质量现状评价[J]. 新疆农业大学学报, 2016, **39**(2): 167-172.
Zeng Y Y, Zhou Y Z, Zhou J L, *et al.* Assessment of groundwater quality status in western Kashgar, Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2016, **39**(2): 167-172.
- [2] 陈小兵, 周宏飞, 张学仁, 等. 新疆喀什噶尔冲积平原区地下水水化学特征[J]. 干旱区地理, 2004, **27**(1): 75-79.
Chen X B, Zhou H F, Zhang X R, *et al.* Chemical characteristics of groundwater in Kashgar Alluvial plain, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2004, **27**(1): 75-79.
- [3] Jakóbczyk-Karpierz S, Sitek S, Jakobsen R, *et al.* Geochemical and isotopic study to determine sources and processes affecting nitrate and sulphate in groundwater influenced by intensive human activity-carbonate aquifer Gliwice (southern Poland)[J]. Applied Geochemistry, 2017, **76**: 168-181.
- [4] 李瑞, 肖琼, 刘文, 等. 运用硫同位素、氮氧同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2877-2886.
Li R, Xiao Q, Liu W, *et al.* Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to trace the sources of sulfur and nitrate in Lihu Lake underground water, Guangxi, China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 2877-2886.
- [5] Huang Q B, Qin X Q, Yang Q Y, *et al.* Identification of dissolved sulfate sources and the role of sulfuric acid in carbonate weathering using $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ and $\delta^{34}\text{S}$ in karst area, northern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(1): 51.
- [6] Hao S, Li F D, Li Y H, *et al.* Stable isotope evidence for identifying the recharge mechanisms of precipitation, surface water, and groundwater in the Ebinur Lake basin[J]. Science of the Total Environment, 2019, **657**: 1041-1050.
- [7] Zhao M, Hu Y D, Zeng C, *et al.* Effects of land cover on variations in stable hydrogen and oxygen isotopes in karst groundwater: a comparative study of three karst catchments in Guizhou Province, Southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2018, **565**: 374-385.
- [8] Yang Q C, Mu H K, Wang H, *et al.* Quantitative evaluation of groundwater recharge and evaporation intensity with stable oxygen and hydrogen isotopes in a semi-arid region, Northwest China[J]. Hydrological Processes, 2018, **32**(9): 1130-1136.
- [9] 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 等. 基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2624-2631.
Kong X L, Wang S Q, Ding F, *et al.* Source of nitrate in surface water and shallow groundwater around Baiyangdian Lake area based on hydrochemical and stable isotopes[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2624-2631.
- [10] 张雅, 苏春利, 马燕华, 等. 水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2667-2674.
Zhang Y, Su C L, Ma Y H, *et al.* Indication of groundwater evolution process based on water hydrochemistry and environmental isotopes: A case study of Dongyuan drinking water source area in Ji'nan City[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2667-2674.
- [11] González-Ramón A, López-Chicano M, Gázquez F, *et al.* Isotopic and hydrochemistry spatial variation of sulfate for groundwater characterization in karstic aquifers[J]. Hydrological Processes, 2017, **31**(18): 3242-3254.
- [12] Seibert S L, Botcher M E, Florian S, *et al.* Iron sulfide formation in young and rapidly-deposited permeable sands at the land-sea transition zone[J]. Science of the Total Environment, 2019, **649**: 264-283.
- [13] Han D M, Song X F, Currell M J. Identification of anthropogenic and natural inputs of sulfate into a karstic coastal groundwater system in northeast China: evidence from major ions, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ and [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2016, **12**(11): 11331-11370.
- [14] Cao X X, Wu P, Zhou S Q, *et al.* Tracing the origin and geochemical processes of dissolved sulphate in a karst-dominated wetland catchment using stable isotope indicators[J]. Journal of Hydrology, 2018, **562**: 210-222.
- [15] 任坤, 潘晓东, 兰干江, 等. 黔中茶店桥地下河流域不同水体硫酸盐浓度特征及来源识别[J]. 地质学报, 2016, **90**(8): 1922-1932.
Ren K, Pan X D, Lan G J, *et al.* Sulfate concentrations and source identification in different water bodies of the Chadianqiao underground river basin in central Guizhou[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, **90**(8): 1922-1932.
- [16] Li X D, Liu C Q, Liu X L, *et al.* Identification of dissolved sulfate sources and the role of sulfuric acid in carbonate weathering using dual-isotopic data from the Jialing River, Southwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, **42**(3): 370-380.
- [17] 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.

- [18] Pu J B, Yuan D X, Zhang C, *et al.* Hydrogeochemistry and possible sulfate sources in karst groundwater in Chongqing, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **68** (1): 159-168.
- [19] 肖琼, 杨雷, 蒲俊兵, 等. 重庆温塘峡背斜地表水-地下水-浅层地热水中硫同位素的环境指示意义研究[J]. *地质学报*, 2016, **90**(8): 1945-1954.
Xiao Q, Yang L, Pu J B, *et al.* The environmental significance of sulfur isotope in surface water-ground water-shallow thermal water in wentang gorge anticline, Chongqing, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, **90**(8): 1945-1954.
- [20] Zhang D, Li X D, Zhao Z Q, *et al.* Using dual isotopic data to track the sources and behaviors of dissolved sulfate in the western North China Plain [J]. *Applied Geochemistry*, 2015, **52**: 43-56.
- [21] 王文祥, 王瑞久, 李文鹏, 等. 塔里木盆地河水氢氧同位素与水化学特征分析[J]. *水文地质工程地质*, 2013, **40**(4): 29-35.
Wang W X, Wang R J, Li W P, *et al.* Analysis of stable isotopes and hydrochemistry of rivers in Tarim Basin [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, **40**(4): 29-35.
- [22] 新疆维吾尔自治区国土资源厅. 新疆维吾尔自治区矿产开发简明图集[M]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区国土资源厅, 2014. 81.
- [23] 管隆垚. 基于水质约束的喀什三角洲地下水开采方案研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
Guan L Y. Study on groundwater exploitation plan in Kashgar Delta based on water quality constraint [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [24] Rouabhia A, Baali F, Fehdi C, *et al.* Hydrogeochemistry of groundwaters in a semi-arid region. El Ma El Abiod aquifer, Eastern Algeria [J]. *Arabian Journal of Geoscience*, 2011, **4**(5-6): 973-982.
- [25] 付昌昌, 张晟瑛, 张文静, 等. 西吉县第三系承压水中硫酸盐的水文地球化学特征及其来源[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, **32**(4): 187-193.
- Fu C C, Zhang S Y, Zhang W J, *et al.* Hydrochemical characteristics and sources of sulfate in Xiji tertiary confined groundwater [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, **32**(4): 187-193.
- [26] Tan H B, Ma H Z, Xiao Y K, *et al.* Characteristics of chlorine isotope distribution and analysis on sylvinitic deposit formation based on ancient salt rock in the western Tarim Basin [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, **48** (11): 1913-1920.
- [27] 马致远, 钱会. 环境同位素地下水文学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2004. 82-85.
- [28] El Tabakh M, Utha-Aroon C, Schreiber B C. Sedimentology of the cretaceous Maha sarakham evaporites in the khorat plateau of northeastern thailand [J]. *Sedimentary Geology*, 1999, **123** (1-2): 31-62.
- [29] 魏兴, 周金龙, 曾妍妍, 等. 喀什地区西部地下水重金属空间分布特征及成因分析[J]. *环境化学*, 2017, **36**(8): 1802-1811.
Wei X, Zhou J L, Zeng Y Y, *et al.* Spatial distribution and origin of heavy metals in groundwater in the western Kashgar Prefecture [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(8): 1802-1811.
- [30] Hosono T, Delinon R, Nakano T, *et al.* Evolution model of $\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in dissolved sulfate in volcanic fan aquifers from recharge to coastal zone and through the Jakarta urban area, Indonesia [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409** (13): 2541-2554.
- [31] Miao Z H, Carroll K C, Brusseau M L. Characterization and quantification of groundwater sulfate sources at a mining site in an arid climate; The Monument Valley site in Arizona, USA [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **504**: 207-215.
- [32] Li X D, Masuda H, Kusakabe M, *et al.* Degradation of groundwater quality due to anthropogenic sulfur and nitrogen contamination in the Sichuan basin, China [J]. *Geochemical Journal*, 2006, **40**(4): 309-332.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NPI	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)