

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3  
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM<sub>2.5</sub> 分布格局演变及其影响因素 ..... 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)

中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析 ..... 方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)

阳泉市秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 化学组分及来源分析 ..... 王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)

泰安市夏季 PM<sub>2.5</sub> 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源 ..... 衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)

黄山秋季大气颗粒物理化特性 ..... 卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)

北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性 ..... 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)

淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征 ..... 王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)

鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)

浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数 ..... 滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)

基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征 ..... 王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)

薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征 ..... 牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘杰, 甄莹莹, 祁士华 (1107)

精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法 ..... 叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)

2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估 ..... 施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)

中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势 ..... 庞莉莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)

京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单 ..... 韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)

在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测 ..... 王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵奎乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)

参数选取对畜禽养殖业大气气排放的影响: 以长三角地区为例 ..... 张琪, 黄凌, 殷可佳, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)

乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析 ..... 吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)

长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征 ..... 李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)

伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素 ..... 刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹翔, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)

城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因 ..... 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)

基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例 ..... 王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)

黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素 ..... 梁晓文, 邵田田, 王涛 (1217)

人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析 ..... 温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)

滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响 ..... 张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)

太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997 ~ 2017 年) ..... 杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)

汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系 ..... 薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)

盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价 ..... 王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 吴向阳 (1265)

三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量 ..... 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)

化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响 ..... 罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)

利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放 ..... 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)

茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性 ..... 范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)

3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性 ..... 王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)

新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附 ..... 徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)

三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险 ..... 方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)

固城湖及出入河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估 ..... 阚可聪, 谷孝涛, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)

衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 ..... 张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)

北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估 ..... 张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)

基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性 ..... 马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)

PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性 ..... 王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)

中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化 ..... 付昆明, 杨宗玥, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)

抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响 ..... 代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 沈根祥, 胡双庆 (1401)

多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验 ..... 张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志诚, 曹思雨 (1409)

剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响 ..... 邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)

硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响 ..... 何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)

工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析 ..... 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)

耕地土壤重金属健康风险空间分布特征 ..... 姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)

黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析 ..... 赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)

不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响 ..... 李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)

红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征 ..... 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)

有机肥与无机肥配施对潮土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)

冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系 ..... 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)

钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响 ..... 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)

桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应 ..... 方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)

外源亚精胺对 As<sup>5+</sup> 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响 ..... 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩甘, 刘玉荣, 胡红青 (1505)

《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)

# 伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素

刘松韬<sup>1</sup>, 张东<sup>1\*</sup>, 李玉红<sup>1</sup>, 杨锦媚<sup>1</sup>, 邹霜<sup>1</sup>, 王永涛<sup>1</sup>, 黄兴宇<sup>1</sup>, 张忠义<sup>2</sup>, 杨伟<sup>1</sup>, 贾保军<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454000; 2. 东华理工大学江西省大气污染成因与控制重点实验室, 南昌 330013)

**摘要:** 伊洛河是黄河中游南岸重要支流, 由伊河和洛河在洛阳偃师汇合而成. 流域上游矿产资源开采活动较多, 下游城镇密集, 工农业活动分布广泛. 为探究不同类型人为活动对伊洛河流域河水水化学组成的影响, 分别在丰水期(8月)和平水期(12月)采集伊洛河流域干流和支流河水样品, 借助水体氢氧同位素组成和阴阳离子组成的时空分布特征, 阐明水体来源以及水化学组成控制因素, 说明人为活动的影响途径和方式. 结果表明: ① 洛河干流水丰水期和平水期  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  均值分别为  $-56‰$  和  $-7.9‰$  以及  $-55‰$  和  $-8.1‰$ , 伊河干流水丰水期和平水期  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  均值分别为  $-49‰$  和  $-6.9‰$  以及  $-53‰$  和  $-7.8‰$ , 丰水期和平水期河水主要接受当地大气降水补给; ② 洛河及伊河干流水水化学类型均为  $HCO_3^-$ - $SO_4^{2-}$ -Ca-Mg 型, 丰水期干流水  $Ca^{2+}$  和  $HCO_3^-$  当量浓度占比低于平水期, 而丰水期  $SO_4^{2-}$  当量浓度占比则高于平水期, 显示丰水期较多硫酸盐输入; ③ 碳酸和硫酸参与流域内碳酸盐岩和硅酸盐岩风化过程, 洛河流域碳酸盐岩风化较明显, 伊河流域硅酸盐岩风化较明显; ④ 伊洛河流域人为输入影响表现在上游河水水化学组成受到金属矿产采选活动影响, 下游河水水化学组成受工业废水和城镇生活污水的影响; ⑤ 伊洛河流域上游和下游两种不同类型人为活动是河水硫酸盐硫同位素组成空间上变化的重要原因, 上游河水硫酸盐硫同位素组成偏负, 证实来自硫化物矿物氧化过程产生的硫酸盐贡献较大, 进而间接证实硫酸参与岩石化学风化过程. 下游河水硫酸盐硫同位素值偏正, 与工业废水和城镇生活污水有关.

**关键词:** 伊洛河流域; 水化学组成; 时空变化特征; 控制因素; 人为输入

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1184-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908116

## Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin

LIU Song-tao<sup>1</sup>, ZHANG Dong<sup>1\*</sup>, LI Yu-hong<sup>1</sup>, YANG Jin-mei<sup>1</sup>, ZOU Shuang<sup>1</sup>, WANG Yong-tao<sup>1</sup>, HUANG Xing-yu<sup>1</sup>, ZHANG Zhong-yi<sup>2</sup>, YANG Wei<sup>1</sup>, JIA Bao-jun<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Jiangxi Province Key Laboratory of the Causes and Control of Atmospheric Pollution, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** An important tributary in the middle stream of the Yellow River, the Yiluo River consists of the Luohe River and Yihe River, which converge at Yanshi City. Mining activities were widely distributed in the upstream of the Yiluo River Basin (YRB), while residential areas concentrated in the downstream were coupled with extensively industrial and agricultural activities. To illustrate the influences of variable anthropogenic activities on the hydro-chemical composition of river water of the YRB, water samples from the main stream and tributaries were collected in the flood season (August) and normal season (December), respectively. The hydrogen and oxygen isotope values coupled with cation and anion content were analyzed. Temporal and spatial variations of hydrogen and oxygen isotopes and ion content were utilized to elucidate the sources and factors controlling the hydro-chemical composition of the river water, and to illustrate the pathways of human effects. The results demonstrated that: ① Average hydrogen and oxygen isotope values ( $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ ) of Luo River water were  $-56‰$  and  $-7.9‰$ , and  $-55‰$  and  $-8.1‰$  in the flood season and normal season, respectively. Mean  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values of Yi River water were  $-49‰$  and  $-6.9‰$ , and  $-53‰$  and  $-7.8‰$  in the flood season and normal season, respectively. These temporal variations indicated that river water was mainly recharged by local atmospheric precipitation. ② The dominant water hydro-chemical type was  $HCO_3^-$ - $SO_4^{2-}$ -Ca-Mg in the main stream of the YRB, and the ratios of  $Ca^{2+}$  and  $HCO_3^-$  molar equivalent concentrations in the flood season were lower than those in the normal season, while the ratios of  $SO_4^{2-}$  molar equivalent concentrations were higher than those in the normal season, indicating more sulfate dissolved in the river water in the flood season. ③ Carbonic acid and sulfuric acid simultaneously reacted with carbonate and silicate rocks, and in the Luo River more carbonate rocks were weathered, while in the Yi River more silicate rocks were weathered. ④ Human effects on river water were mainly concentrated in the upstream where wastewater input was derived from mining activities, while in the downstream pollution of the river was due to industrial wastewater and sewage input. ⑤ Spatial variations of sulfate sulfur isotope values were mostly due to differences between anthropogenic activities in the upstream and downstream of the Yiluo River. Negative sulfur isotope values in the upstream river water confirmed dissolved sulfate from sulfide mineral oxidation, which also indirectly verified the rock chemical weathering by sulfuric acid in this area. Positive sulfur isotope values in downstream river water were connected with industrial wastewater and sewage.

**Key words:** Yiluo River Basin; hydro-chemical compositions; temporal and spatial variations; controlling factors; anthropogenic input

收稿日期: 2019-08-13; 修订日期: 2019-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41573095, 41661144042)

作者简介: 刘松韬(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: reeborandme@qq.com

\* 通信作者, E-mail: zhangdong@hpu.edu.cn

河流是大陆向海洋进行物质输送和能量交换的重要通道,一方面河流输送的物质组成能够反映流域风化信息及人为输入信息<sup>[1]</sup>,另一方面河流输送的物质影响海洋离子浓度水平以及稳定同位素组成<sup>[2]</sup>,因此研究河流水化学组成有助于人们理解表生关键带物质循环过程以及人类活动对其干扰程度<sup>[3]</sup>.我国河流水化学研究工作始于20世纪60年代<sup>[4]</sup>,硅酸盐岩、碳酸盐岩以及蒸发盐岩化学风化是表生关键带主要水-岩相互作用类型,这些岩石化学过程导致大量物质从陆地搬运至海洋<sup>[5]</sup>.Gaillardet等<sup>[6]</sup>系统总结全球60条大河化学资料,推算得出每年全球岩石风化输入海洋物质通量为21.3亿t,其中硅酸盐岩、碳酸盐岩以及蒸发盐岩输出通量占比分别为26%、59%和15%.我国主要大江大河流域也开展大量化学风化研究,如黄河流域<sup>[7-14]</sup>、长江流域<sup>[15-23]</sup>、珠江流域<sup>[24-26]</sup>、西南三江以及雅鲁藏布江流域<sup>[27-30]</sup>、东北松花江流域<sup>[31]</sup>以及西北诸河<sup>[32-34]</sup>等.过去河流体系化学风化研究主要集中在碳酸参与碳酸盐岩与硅酸盐岩化学风化<sup>[6,21]</sup>,忽视人为活动产生的硫酸以及硝酸等参与上述岩石风化过程<sup>[35,36]</sup>.人类活动排放硫酸主要由含硫矿物开采活动引起,如金属硫化物矿物<sup>[37]</sup>以及煤中黄铁矿<sup>[5,37,38]</sup>等,而硝酸则主要由农业化学肥料集中施用引起<sup>[35,36,38]</sup>,如长江流域人为酸输入导致化学风化增加40%,同时流入海洋离子通量也增加30%<sup>[35]</sup>.目前对于人为酸参与岩石化学风化过程的研究不是很多,准确判定人为酸来源十分困难,需要结合元素浓度及稳定同位素比值来进行准确识别<sup>[35,37]</sup>.

硫酸盐硫同位素可以准确区分硫化物矿物氧化产生的硫酸盐以及工农业和生活污水来源的硫酸盐<sup>[37]</sup>,因此借助硫酸盐硫同位素,可以准确判别硫化物矿物氧化过程,进而为下一步说明硫酸参与岩石化学风化过程提供可靠理论依据.伊洛河是黄河小浪底水库下游南岸重要支流,伊洛河流域境内金属矿产资源丰富<sup>[39,40]</sup>,矿山开采以及洗选活动在上游分布较多,而下游城镇集中分布,工业和农业活动对伊洛河水质造成严重影响<sup>[41]</sup>.伊洛河流域人为活动空间差异性,为人们借助硫酸盐硫同位素判别硫化物矿物氧化过程提供理想场所,同时结合流域水化学时空分布特征,研究流域人为酸对河流体系水化学组成的影响.本文研究目标包括:①伊洛河流域水化学组成时空变化特征;②伊洛河流域人为酸输入对河流水化学组成的影响.

## 1 材料与方法

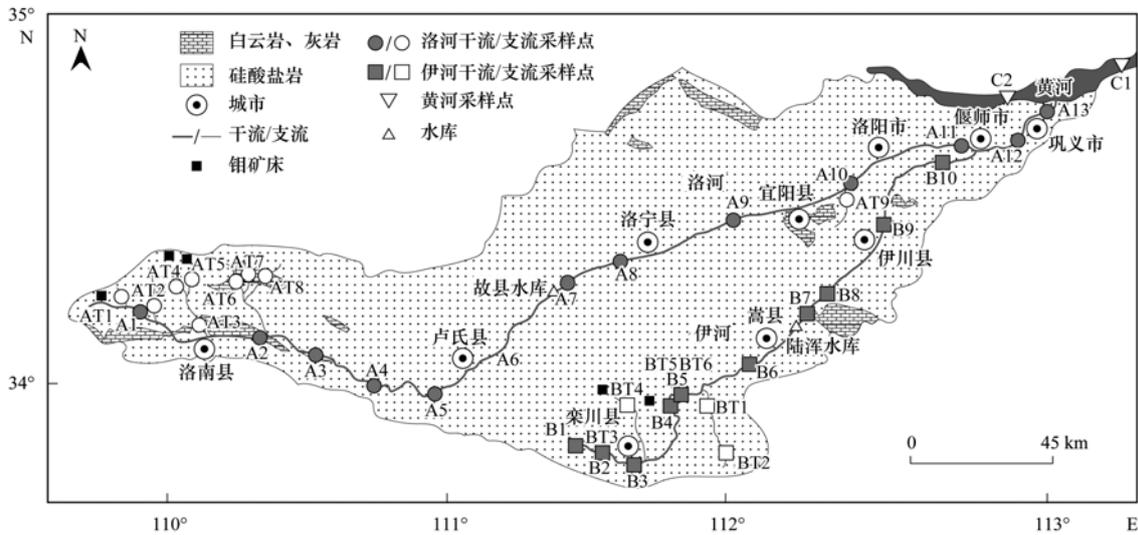
### 1.1 研究区概况

伊洛河流域位于东经109°43'~113°10'和北纬33°39'~34°54'之间,是黄河中游小浪底水库下游南岸最大支流,由洛河和伊河在河南偃师汇合组成.洛河发源于陕西省蓝田县灞源乡,全长446.9 km,流域面积18 881 km<sup>2</sup>,于巩义市注入黄河<sup>[42]</sup>,年径流量为13.99亿m<sup>3</sup>(黄河网, <http://www.yrcc.gov.cn/other/hhgb/>).伊河发源于河南省栾川县陶湾乡,在偃师市杨村注入洛河,全长265 km,流域面积6 041 km<sup>2</sup>,流域多年平均年径流量为12.96亿m<sup>3</sup><sup>[43]</sup>.伊洛河流域属于暖温带大陆性季风气候,多年平均气温为13℃,平均降雨量850 mm左右,降水集中在6~9月<sup>[37]</sup>.伊洛河流域处于秦岭构造体系的东段与新华夏系的复合部位,洛河长水以上及伊河潭头以上的高山峡谷区主要分布太古界片麻岩、片岩,元右界流纹斑岩、英安岩,震旦系结晶灰岩、寒武系灰岩、页岩,以及古生界、中生界的花岗岩,在伊川、大安等地还分布有第四纪初期的玄武岩,洛阳龙门镇以下的黄土丘陵区主要为第四系黄土和冲积粉细砂及壤土等.伊洛河流域上游山区自然资源丰富,广泛分布了金矿及钼矿<sup>[39,40,44]</sup>,下游城镇分布集中,工业和农业活动频繁<sup>[41]</sup>.

### 1.2 样品采集与分析

2017年8月和2018年12月分别采集丰水期和平水期样品,丰水期采集干流及支流样品32个,同期采集入黄河口上游500 m和下游1 km黄河河水样品2个.平水期采集干流及支流样品36个,同期采集入黄河口上游以及下游河水样品2个(图1).现场测定温度、总溶解性固体质量浓度(TDS)和pH值(SX731,上海三信仪表厂),分辨率分别为0.1℃、1 mg·L<sup>-1</sup>和0.01.用于测定阴离子和阳离子的样品在现场用滤头(天津津腾,0.22 μm, PES)过滤后置于50 mL聚丙烯离心管(Thermo Scientific Nunc),阳离子样品加入1滴优级浓硝酸保存(pH < 2),阴离子不加任何保护剂,置于冷藏箱(4℃)保存.用于测定水体溶解性无机碳浓度(DIC)样品现场过滤后置于100 mL塑料瓶内,置于冷藏箱保存.用于测定水体氢氧同位素样品现场过滤后加入2 mL色谱瓶内密封保存,不加任何化学试剂.

样品DIC浓度采用滴定法(0.025 mol·L<sup>-1</sup>盐酸),阴阳离子浓度采用离子色谱仪(ICS3000, Dionex)测定,方法的精密度均优于±5%<sup>[45]</sup>,水体氢氧同位素采用同位素分析仪(L2130-i, Picarro公司)测定,δD和δ<sup>18</sup>O测试精度分别优于1‰和0.2‰,



矿床位置引自文献[41]  
图1 伊洛河流域地质简图及采样点分布示意

Fig. 1 Geological map and sampling sites in the Yiluo River Basin

采用国际标准 VSMOM 以及国家标准 GBW04401-GBW04404 校准仪器和样品. 样品 DIC 含量以及水体氢氧同位素测试在河南理工大学完成, 水体阴阳离子浓度测试在东华理工大学江西省大气污染成因与控制重点实验室完成.

1.3 质量控制

电荷质量平衡法常用于检测河流水化学分析结果的可靠性<sup>[1]</sup>, 其中阳离子当量浓度( $TZ^+ = 2Ca^{2+} + 2Mg^{2+} + Na^+ + K^+$ )与阴离子当量浓度( $TZ^- = 2SO_4^{2-} + HCO_3^- + NO_3^- + Cl^-$ )之间进行计算, 得出标准无机离子平衡常数[ $NICB = (TZ^+ - TZ^-) / TZ^+ \times 100\%$ ]. 如果 NICB 值小于 5%, 则说明水中可溶性阴离子和阳离子达到平衡, 水质分析结果可靠<sup>[21,25]</sup>.

2 结果与分析

2.1 研究区河水 pH 值和 TDS 质量浓度组成特征

伊洛河流域河水丰水期以及平水期河水水化学组成如表 1 所示. 洛河河水丰水期和平水期 pH 值以及 TDS 质量浓度均值分别为 8.67 和 8.49 以及  $320 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $429 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 伊河河水丰水期和平水期 pH 值以及 TDS 质量浓度均值分别为 8.16 和 8.35 以及  $361 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $472 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 丰水期黄河河水 C1 (洛河入黄河下游 1 000 m) 和 C2 (洛河入黄河上游 500 m) 的 pH 值以及 TDS 质量浓度值分别为 8.02 和 8.47 以及  $665 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $681 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平水期黄河河水 C1 和 C2 的 pH 值和 TDS 质量

表 1 伊洛河流域水化学组成

Table 1 Hydro-chemical compositions of water in the Yiluo River Basin

时期	河流	统计值	pH	TDS /mg·L <sup>-1</sup>	浓度/mmol·L <sup>-1</sup>							TZ <sup>+</sup> /meq·L <sup>-1</sup>	TZ <sup>-</sup> /meq·L <sup>-1</sup>	NICB /%	δD /‰	δ <sup>18</sup> O /‰	
					Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>						HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
丰水期	洛河	最小值	7.28	127	0.69	0.29	0.09	0.03	0.05	0.16	0.01	0.93	2.10	2.29	-23	-62	-9.0
		最大值	9.30	539	2.83	1.70	2.83	0.19	2.10	3.27	0.31	3.71	9.55	9.73	4	-50	-6.7
		平均值	8.67	320	1.28	0.91	0.77	0.09	0.47	1.20	0.11	2.55	5.23	5.53	-57	-8.1	
	伊河	最小值	7.40	64	0.30	0.07	0.07	0.03	0.02	0.17	0.00	0.32	0.83	0.68	-35	-64	-9.1
		最大值	8.63	576	2.79	1.15	4.35	0.16	2.33	2.80	0.36	4.90	10.17	10.17	17	-42	-4.9
		平均值	8.16	361	1.56	0.69	1.33	0.10	0.75	1.35	0.14	2.80	5.93	5.97	-52	-7.3	
黄河	C1	8.02	665	1.27	1.28	5.49	0.14	3.74	1.94	0.07	3.37	10.73	11.07	-4	-58	-7.8	
	C2	8.47	681	1.23	1.26	5.52	0.13	3.69	1.96	0.16	3.93	10.65	11.70	-10	-59	-7.9	
平水期	洛河	最小值	7.90	179	0.76	0.37	0.07	0.01	0.05	0.14	0.09	1.77	2.38	2.34	-3	-61	-9.2
		最大值	8.91	728	3.22	1.63	2.25	0.16	2.04	2.75	0.43	4.07	10.55	10.14	18	-51	-7.2
		平均值	8.49	429	1.72	0.97	0.76	0.08	0.49	0.95	0.24	3.15	6.24	5.82	-57	-8.4	
	伊河	最小值	7.69	68	0.31	0.08	0.10	0.03	0.03	0.06	0.05	0.58	0.92	0.86	-4	-63	-9.4
		最大值	8.90	703	2.97	1.19	2.73	0.23	2.17	2.38	0.65	5.81	9.74	9.37	24	-47	-6.7
		平均值	8.34	472	1.90	0.80	1.29	0.10	0.62	1.12	0.27	3.22	6.78	6.40	-54	-8.0	
黄河	C1	8.55	669	2.44	1.19	2.20	0.15	2.03	1.39	0.41	4.17	9.62	9.44	2	-51	-7.2	
	C2	8.15	579	1.58	1.07	3.21	0.11	1.89	1.35	0.19	3.39	8.18	8.18	0	-64	-9.1	

浓度值分别为 8.55 和 8.15 以及  $699 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $579 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

## 2.2 研究区河水水化学组成特征

洛河河水丰水期和平水期总阴离子和阳离子当量浓度( $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ )均值分别为 5.53 和 5.23 以及 5.82 和 6.24, 伊河河水丰水期和平水期总阴离子和阳离子当量浓度( $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ )均值分别为 5.97 和 5.93 以及 6.40 和 6.78. 黄河河水丰水期采样点 C1 和 C2 的总阴离子和阳离子当量浓度( $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ )分别为 11.07 和 10.73 以及 11.70 和 10.65, 平水期 C1 和 C2 的总阴离子和阳离子当量浓度( $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ )则为 9.44 和 9.62 以及 8.18 和 8.18.

洛河及伊河干流河水水化学类型均为  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{SO}_4^{2-}$ -Ca-Mg 型[图 2(a)], 洛河干流丰水期和平水期  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  当量浓度占比均值分别为 46% 和 35% 以及 54% 和 32%,  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  当量浓度占比均值分别为 50% 和 37% 以及 59% 和 27%. 伊河干流丰水期和平水期  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  当量浓度占比均值分别为 56% 和 24% 以及 57% 和 25%,  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  当量浓度占比均值分别为 44% 和 40% 以及 56% 和 29%.

洛河支流河水水化学类型均为  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{SO}_4^{2-}$ -Ca-Mg 型[图 2(b)], 伊河支流河水水化学类型为  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{SO}_4^{2-}$ -Ca-Na + K 型[图 2(b)], 洛河支流丰水期和平水期  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  当量浓度占比均值分别为 54% 和 36% 以及 57% 和 33%,  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  当量浓度占比均值分别为 52% 和 43% 以及 59% 和 34%. 伊河支流丰水期和平水期  $\text{Ca}^{2+}$  和  $[\text{Na}^+ + \text{K}^+]$  当量浓度占比均值分别为 53% 和 27% 以及 55% 和 24%,  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  当量浓度占比均值分别为 47% 和 44% 以及 47% 和 42%.

黄河丰水期河水水化学类型为  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{SO}_4^{2-}$ -Na 型, 平水期为  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{SO}_4^{2-}$ -Ca 型.

## 2.3 研究区河水氢氧同位素组成特征

洛河流域河水丰水期和平水期  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  均值分别为  $-57\text{‰}$  和  $-8.1\text{‰}$  以及  $-57\text{‰}$  和  $-8.4\text{‰}$ , 伊河流域河水丰水期和平水期  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  均值分别为  $-52\text{‰}$  和  $-7.3\text{‰}$  以及  $-54\text{‰}$  和  $-8.0\text{‰}$ , 黄河河水丰水期  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值分别为  $-58\text{‰}$  和  $-7.8\text{‰}$  以及  $-59\text{‰}$  和  $-7.9\text{‰}$ , 平水期为  $-51\text{‰}$  和  $-7.2\text{‰}$  以及  $-64\text{‰}$  和  $-9.1\text{‰}$ .

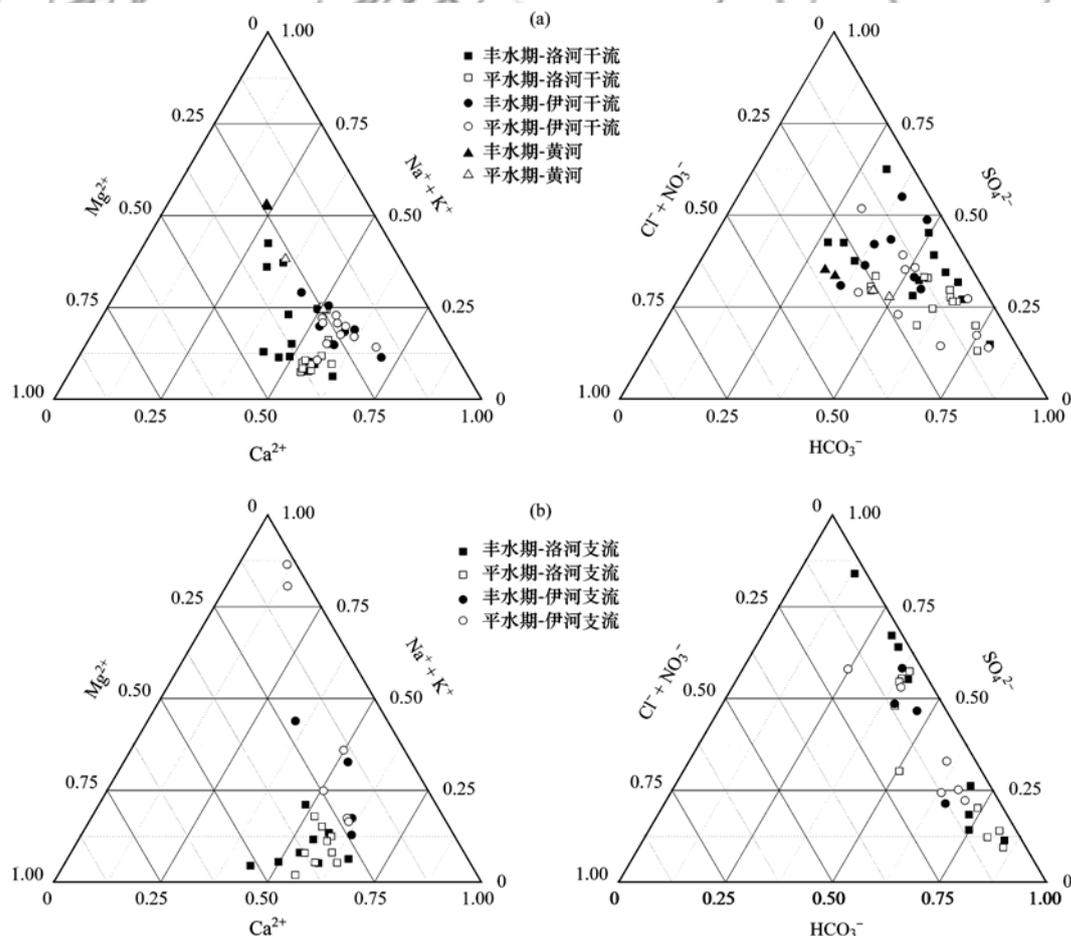


图 2 研究区河水水化学组成 Piper 三角图

Fig. 2 Piper diagram of hydrochemical composition in the study area

### 3 讨论

#### 3.1 研究区河水 pH 值和 TDS 质量浓度时空变化特征

研究区河水 pH 值和 TDS 质量浓度的时空变化如图 3 所示,其中丰水期和平水期洛河河水 pH 值均呈现中游低,上游和下游高的特点,丰水期变化范围更大[图 3(a)];丰水期和平水期伊河河水 pH 值呈现上游低,往下游逐渐增加的趋势,平水期河水

pH 值略高于丰水期[图 3(b)].洛河和伊河河水丰水期和平水期 TDS 质量浓度变化趋势基本一致,均呈现上游先增高后降低,到下游逐渐增高的趋势,这与流域人为活动的空间分布一致,因为上游金属矿产开采活动频繁,下游城镇集中.平水期河水 TDS 质量浓度普遍高于丰水期河水 TDS 质量浓度[图 3(c)]和[图 3(d)],说明丰水期河水溶解组分含量受雨水稀释作用影响,与附近沁河研究结果一致<sup>[46]</sup>.

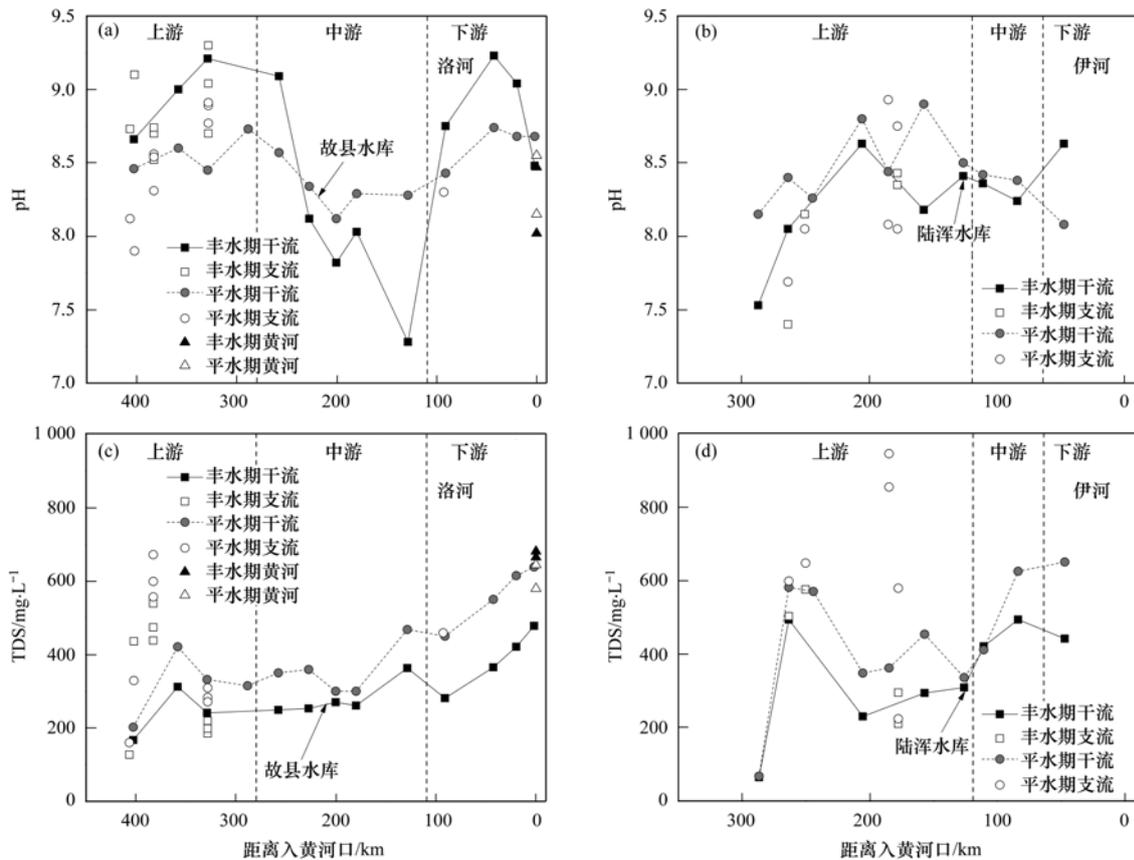


图 3 研究区河水 pH 值和 TDS 质量浓度空间和时间变化特征

Fig. 3 Spatial and temporal variations of pH values and TDS content of river water

#### 3.2 研究区河水离子浓度时空变化特征

研究区河水主要阳离子和阴离子浓度时空变化如图 4 和图 5 所示,洛河和伊河流域河水主要阳离子浓度的空间变化趋势与 TDS 质量浓度基本一致,均呈现出上游先增高,后降低,到下游逐渐增高的趋势.除钾离子(K<sup>+</sup>)外,洛河和伊河河水溶解性钠离子(Na<sup>+</sup>)、镁离子(Mg<sup>2+</sup>)和钙离子(Ca<sup>2+</sup>)浓度在平水期含量较高[图 4(c)~4(h)],显示丰水期雨水稀释作用影响.

研究区洛河和伊河河水溶解性氯离子(Cl<sup>-</sup>)和硫酸根离子(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)浓度变化与 TDS 质量浓度变化基本一致[图 5(a)~5(d)],但是溶解性硝酸根(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)和碳酸氢根(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)离子浓度空间分布比较复杂,但

丰水期河水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度均较平水期低[图 5(e)~5(h)],其中丰水期(8月)河水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度低可能与雨水稀释作用有关,下游河水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度升高与农业和生活污水输入有关<sup>[47]</sup>.平水期(12月)河水 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度升高可能与人为直接输入以及地下水混入有关,同时丰水期(8月)河水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 易被微生物利用,如藻类光合作用<sup>[48]</sup>,导致其浓度降低.

#### 3.3 研究区河水的来源

水体氢氧同位素(δD 和 δ<sup>18</sup>O)可以准确判断河水来源<sup>[49]</sup>,同时借助氘盈余值( $d_{\text{excess}} = \delta D - 8 \times \delta^{18}\text{O}$ )判断水体蒸发作用强弱<sup>[50]</sup>.由图 6 可以看出,研究区河水基本位于郑州大气降水直线与重庆大气降水直线之间<sup>[51]</sup>,说明洛河和伊河河水主要受来自

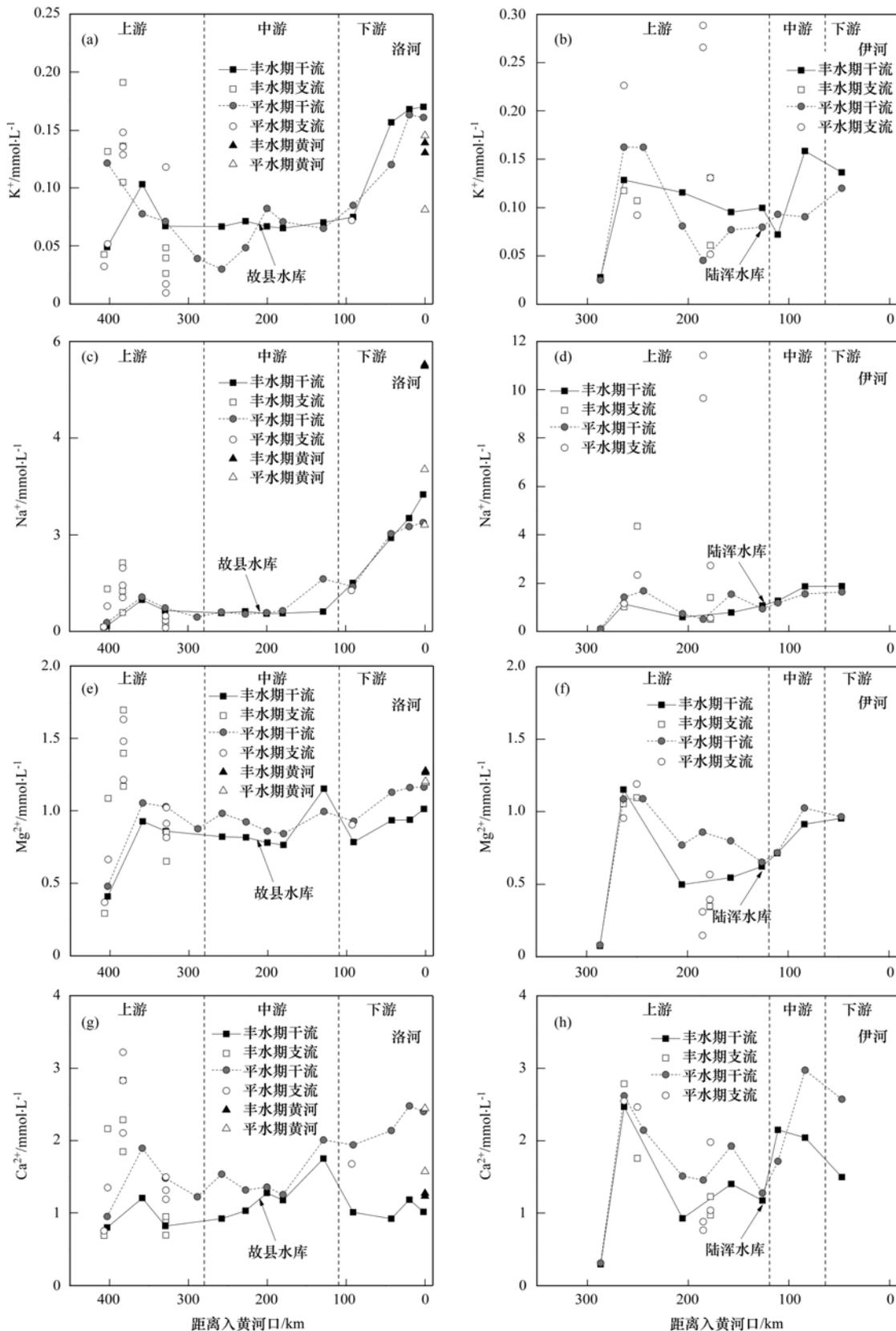


图 4 研究区河水阳离子浓度空间和时间变化特征

Fig. 4 Spatial and temporal variations of cation content of river water

西南和东南方向大气降水补给,位于大气降水线右下方的河水经历蒸发作用过程,如洛河下游 A11、A12 和 A13[图 6(a)]以及伊河下游 B7、B9 和 B10 等河水[图 6(b)],这与下游河水作为城市景观河,

河水流动变缓,蒸发作用变强有关。

洛河以及伊河上游河水  $d$ -excess 值较高,显示大气降水直接输入河水或通过地下水补给河水,水体未经历明显蒸发过程,下游河水  $d$ -excess 值降低,

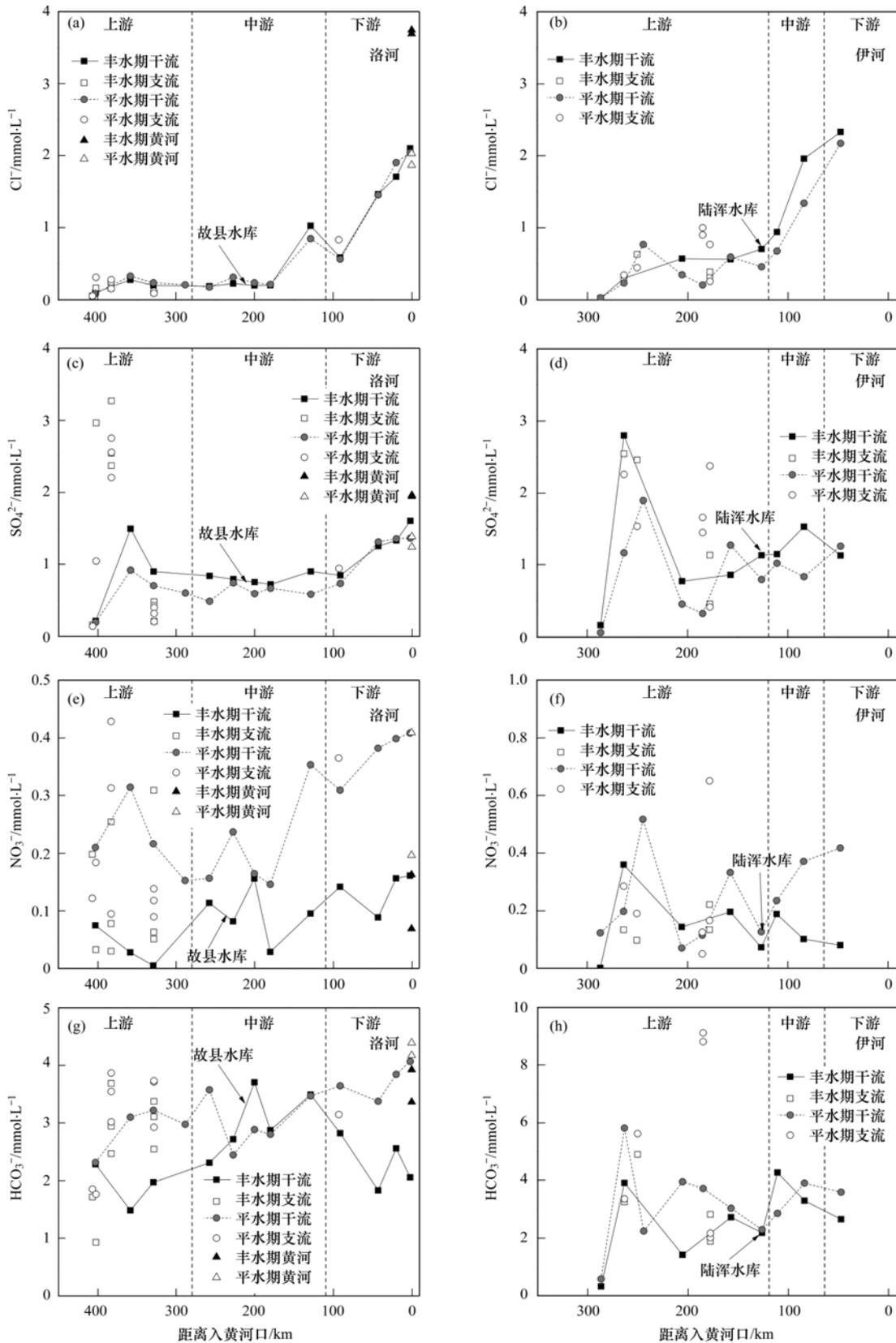


图 5 研究区河水阴离子浓度空间和时间变化特征

Fig. 5 Spatial and temporal variations of anion content of river water

与河水经历蒸发过程有关[图 6(c)和图 6(d)]. 洛河中游河水  $d$ -excess 值略有升高[图 6(c)], 显示地下水补给过程, 在伊河上游也存在这一现象[图 6(d)], 这与洛河与伊河上游位于山区, 崇山峻岭的

地形有利于河流沿途接受地下水的补给. 整体而言, 平水期洛河与伊河河水  $d$ -excess 值较丰水期高, 除与丰水期温度高有利于水体蒸发过程外, 还与平水期河水接受地下水补给以及冬季降雪补给有关.

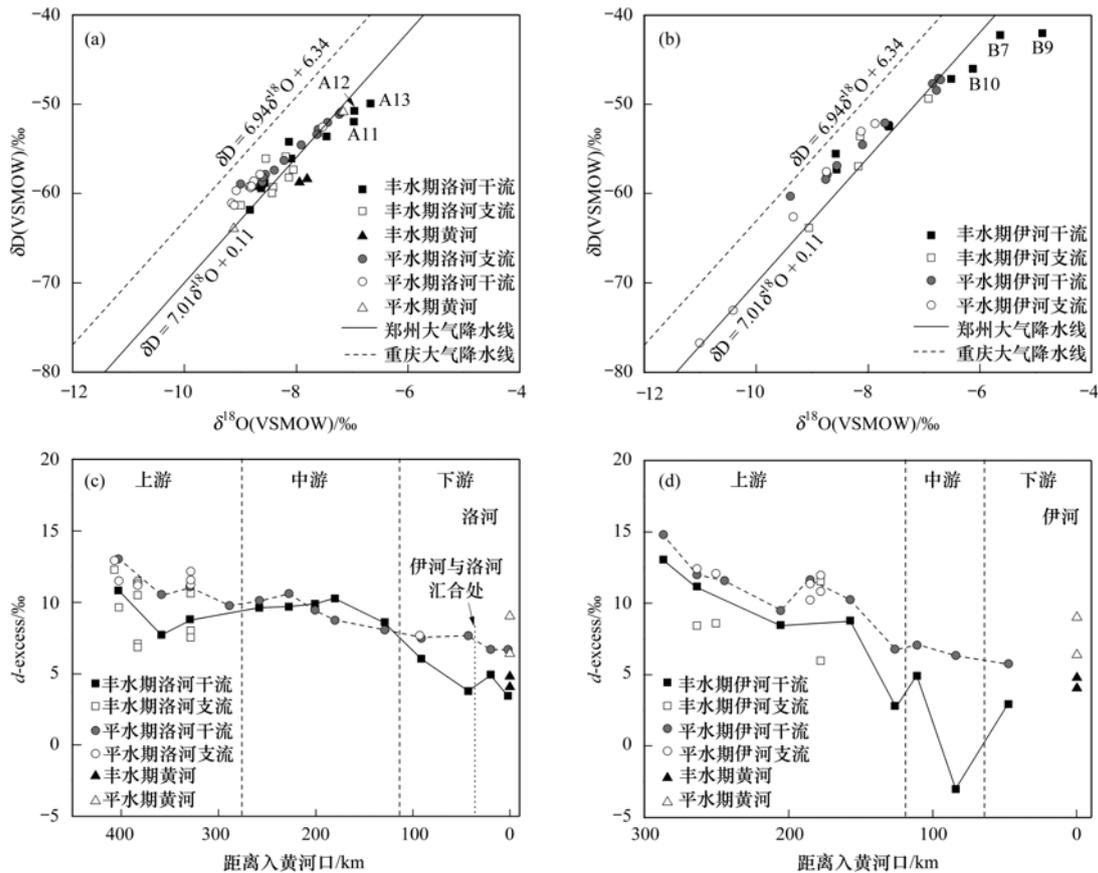


图 6 研究区河水氢氧同位素组成以及氘盈余值时空变化

Fig. 6 Hydrogen and oxygen isotope values and spatial and temporal variations of  $d_{\text{excess}}$  values of river water

### 3.4 研究区河水溶解性组分来源

大气降水、岩石化学风化以及人为输入是控制河水溶解性组分的重要来源<sup>[52, 53]</sup>. 早期 Gibbs 借助  $\text{Cl}^- / [\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-]$  质量浓度比值来说明河流溶解组分来源的受控因素<sup>[54]</sup>, 如图 7 所示, 岩石风化、大气降水以及蒸发浓缩作用控制着全球河流溶解性离子质量浓度, 但是这一判断缺少对人为输入物质的考量. 研究区洛河和伊河大部分河水离子组成靠近岩石化学风化范围, 说明区内硅酸盐岩以及碳酸盐岩化学风化是控制河水离子组成的重要因素. 黄

河河水受上游来水影响, 靠近右上角, 显示河水经历蒸发浓缩过程或者溶解大量蒸发盐岩, 结合前人研究, 黄河流经黄土高原后, 河水 TDS 质量浓度急剧升高, 显示甘肃和宁夏地区含盐岩地层以及黄土中蒸发盐岩溶解的影响<sup>[7, 55]</sup>. 值得指出的是洛河以及伊河下游受生活污水以及工农业废水影响后, 河水在 Gibbs 图中开始靠近蒸发浓缩一端, 在 3.3 节中也指出这部分水体  $d_{\text{excess}}$  值降低, 显示蒸发作用过程, 但是如同黄河河水一样, 还应该考虑人为输入盐分的影响, 因为人为输入盐分的结果也会使 TDS

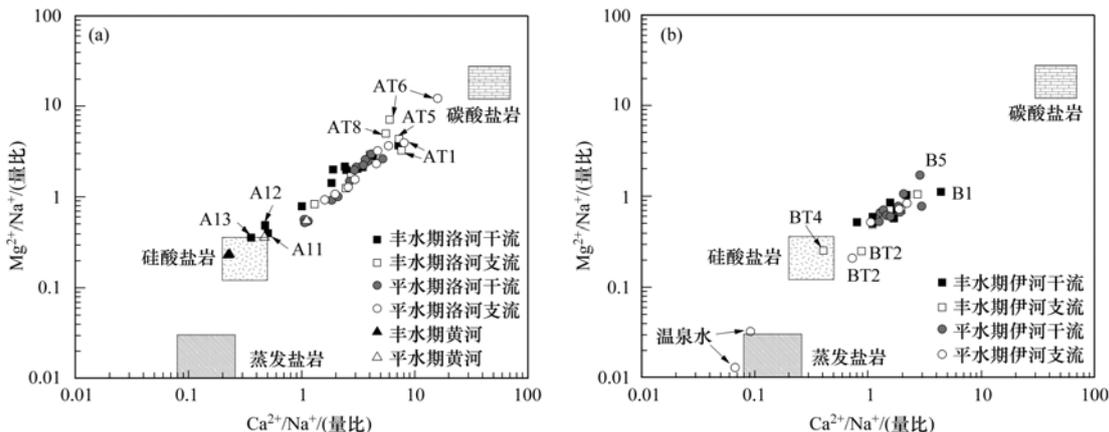


图 7 研究区河水  $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$  与  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  (量比) 关系

Fig. 7 Relationship of  $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$  vs.  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  (molar ratio) in the river water

质量浓度升高,同时  $Cl^-/[Cl^- + HCO_3^-]$  质量浓度比值也升高(图 8).

### 3.4.1 岩石化学风化过程

自然界中蒸发盐岩化学风化速率最快,碳酸盐岩的风化速率大约是硅酸盐岩的 12 倍<sup>[56, 57]</sup>,即使在硅酸盐岩为主的地区,流域碳酸盐岩化学风化可以贡献较多溶解性离子,如九华山花岗岩小流域中,5%的碳酸盐岩贡献 13.5%的可溶性离子<sup>[58]</sup>.

来自硅酸盐岩风化产生的  $Ca^{2+}/Na^+$  和  $Mg^{2+}/Na^+$  量比值分别为  $0.35 \pm 0.15$  和  $0.24 \pm 0.12$ ,碳酸盐岩风化产生的  $Ca^{2+}/Na^+$  和  $Mg^{2+}/Na^+$  量比值分别为  $50 \pm 20$  和  $20 \pm 8$ ,蒸发盐岩风化产生的  $Ca^{2+}/Na^+$  和  $Mg^{2+}/Na^+$  量比值分别为  $0.17 \pm 0.09$  和  $0.02 \pm 0.01$ <sup>[18, 6]</sup>. 研究区河水溶解性组分主要分布在碳酸盐岩和硅酸盐岩风化范围之间(图 7),洛河干

流丰水期和平水期的  $Ca^{2+}/Na^+$  和  $Mg^{2+}/Na^+$  量比值均值分别为 2.42 和 1.68 以及 2.79 和 1.69,伊河干流丰水期和平水期的  $Ca^{2+}/Na^+$  和  $Mg^{2+}/Na^+$  量比值均值分别为 1.83 和 0.73 以及 1.86 和 0.80,显示洛河流域碳酸盐岩风化贡献大. 值得指出的是图 7 中靠近硅酸盐岩一端的几个洛河河水样品(A11、A12 和 A13)以及伊河河水样品(BT4 和 BT2),虽然靠近硅酸盐岩一端,但是这些河水位于洛河下游以及伊河上游受人为活动影响较大的区域,实际上硅酸盐岩风化控制作用并不明显,而人为输入影响较大,这一点已经被硫酸盐硫同位素以及溶解性重金属研究中得到证实<sup>[37]</sup>,所以在应用  $Ca^{2+}/Na^+$  和  $Mg^{2+}/Na^+$  量比值关系图来判断岩石风化类型时需要注意人为活动输入对河水水化学的影响.

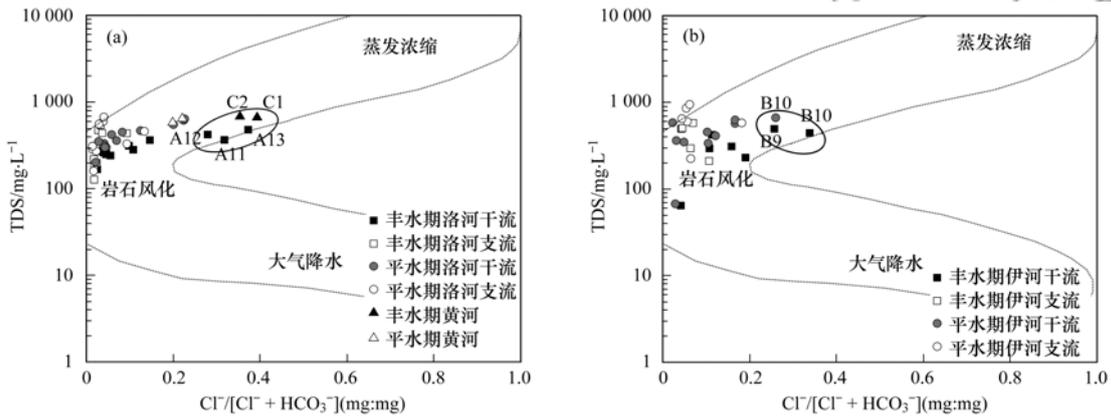
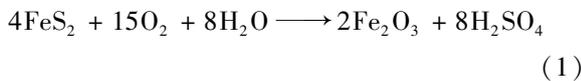


图 8 研究区河水水化学组成 Gibbs 图

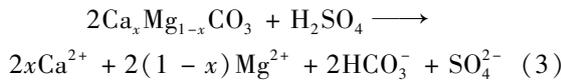
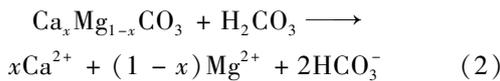
Fig. 8 Diagrammatic representation of processes controlling the hydro-chemical composition of river water

### 3.4.2 人为酸参与岩石化学风化过程

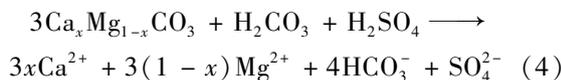
研究区产生的人为酸主要来源于金属硫化物矿床开采过程产生的硫酸<sup>[37]</sup>,其产生机制如下:



研究区内碳酸和硫酸参与碳酸盐岩反应方程式如下:



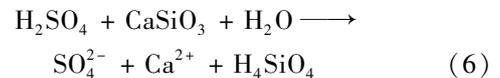
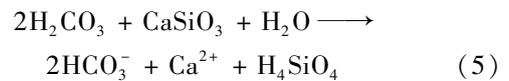
碳酸与硫酸共同参与碳酸盐岩反应方程式如下:



$[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/[HCO_3^-]$  和  $[SO_4^{2-}]/[HCO_3^-]$  当量比值关系常用来说明硫酸参与岩石化学风化的程度<sup>[26]</sup>. 仅碳酸参与碳酸盐岩溶解时  $[Ca^{2+} +$

$Mg^{2+}]/[HCO_3^-]$  的当量比值为 1, 但是不产生  $SO_4^{2-}$ , 因此  $[SO_4^{2-}]/[HCO_3^-]$  的当量比值为 0. 如果仅硫酸参与碳酸盐岩溶解时,  $[SO_4^{2-}]/[HCO_3^-]$  的当量比值为 1,  $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/[HCO_3^-]$  的当量比值为 2. 如果硫酸与碳酸二者共同参与碳酸盐岩溶解时  $[SO_4^{2-}]/[HCO_3^-]$  的当量比值为 0.5,  $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/[HCO_3^-]$  的当量比值为 1.5.

但是研究区广泛存在硅酸盐岩,碳酸和硫酸参与硅酸盐岩反应方程式如下:



碳酸参与硅酸盐岩反应不产生  $SO_4^{2-}$ , 产生的  $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/[HCO_3^-]$  当量比值为 1, 但是硫酸参与硅酸盐岩反应则产生  $SO_4^{2-}$ , 并且产生更多的  $Ca^{2+}$  和  $Mg^{2+}$ .

如图 9 所示,洛河干流丰水期和平水期  $[Ca^{2+}$

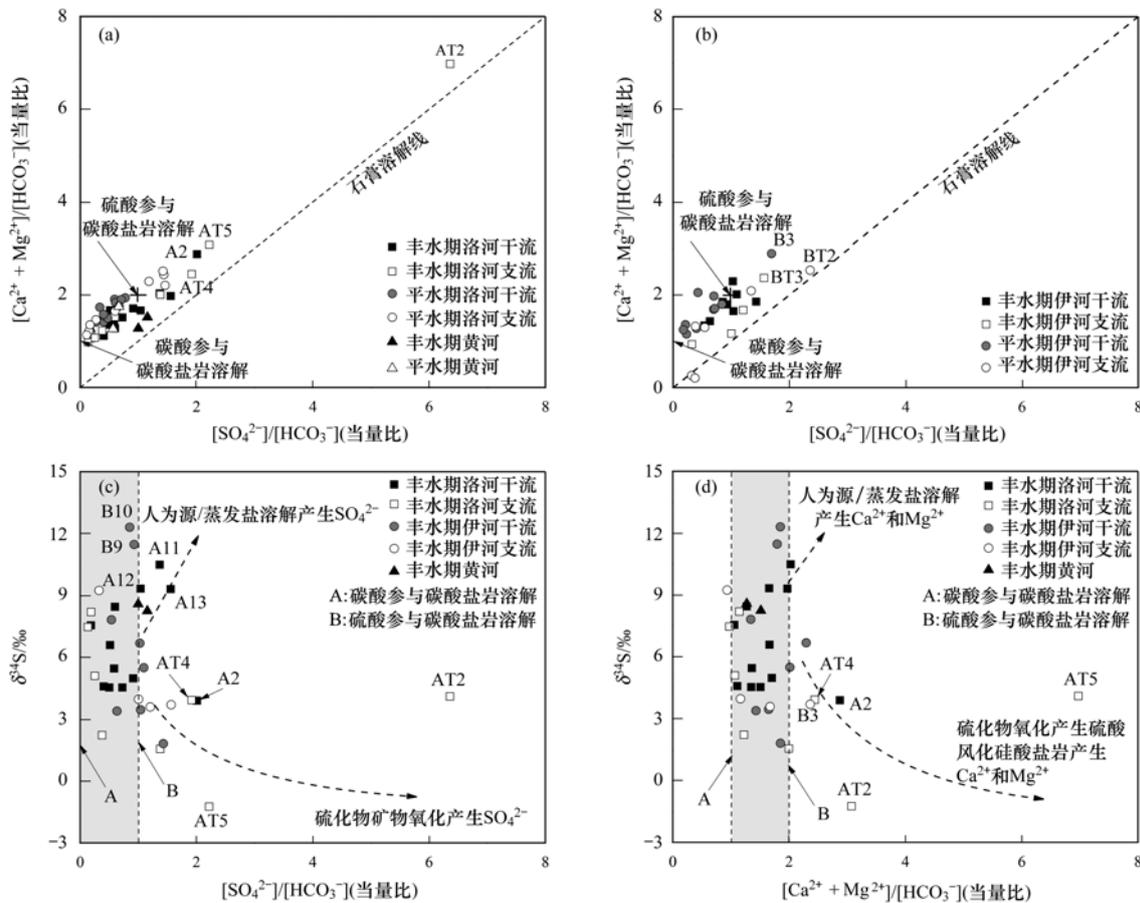


图9 研究区河水  $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/[HCO_3^-]$  和  $[SO_4^{2-}]/[HCO_3^-]$  (当量比值) 以及硫酸盐硫同位素值关系

Fig. 9 Relations between ion equivalent concentration ratios and sulfur isotope values of water samples in the river water

$[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/[HCO_3^-]$  和  $[SO_4^{2-}]/[HCO_3^-]$  当量比值均值分别为 1.63 和 0.87 以及 1.64 和 0.48, 伊河干流丰水期和平水期  $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/[HCO_3^-]$  和  $[SO_4^{2-}]/[HCO_3^-]$  当量比值均值分别为 1.78 和 0.94 以及 1.71 和 0.61, 说明丰水期河水硫酸参与岩石风化比例较高。

前期研究工作表明研究区金属硫化物矿物开采活动是导致上游河水硫酸盐浓度升高的重要原因<sup>[37]</sup>, 图 9(c) 和图 9(d) 中阴影部分代表碳酸和硫酸参与碳酸盐岩化学风化的范围, 结合河水硫酸盐硫同位素组成, 发现超出部分主要受两种作用控制: 一是人为源(工业废水、生活污水等)以及石膏溶解产生  $[SO_4^{2-}]$  和  $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]$ , 这些来源产生的硫酸盐具有较高的硫同位素值, 如丰水期洛河 A11、A12 和 A13 以及伊河下游河水 B9 和 B10; 二是硫化物矿物氧化产生的硫酸参与硅酸盐岩风化带来的  $[SO_4^{2-}]$  和  $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]$ , 这些来源产生的硫酸盐具有较低的硫同位素值, 如丰水期洛河河水 A2、AT4 和 AT5 以及丰水期伊河河水 B3. 研究区广布硅酸盐岩, 石膏岩层出露少, 丰水期研究区下游河水  $[SO_4^{2-}]$  和  $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]$  离子浓度升高, 主要与人

为源, 如工业废水和生活污水等有关, 而上游河水  $[SO_4^{2-}]$  和  $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]$  离子浓度升高, 与这些河水收纳金属矿采选废水, 进而风化硅酸盐岩有关. 洛河支流 AT2 在丰水期  $HCO_3^-$  浓度仅为  $0.93 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 低于丰水期洛河河水  $HCO_3^-$  浓度均值 ( $2.55 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) (表 1), pH 为 9.10, 稳定碳同位素值 ( $\delta^{13}C_{DIC} = -4.86\text{‰}$ , 未发表数据), 可能与藻类光合作用吸收富集  $^{12}C$  的  $HCO_3^-$  离子有关<sup>[48]</sup>.

### 3.4.3 人为输入

结合水体氢氧同位素组成, 水体蒸发作用主要发生在研究区下游(图 6), 虽然蒸发作用可以导致河水溶解性离子浓度升高(图 8), 但是人为输入是导致河水 TDS 质量浓度以及主要离子浓度在空间上呈现两个高值区(图 3~5)的重要原因. 结合人为活动分布特点, 上游高值区多与金属矿产采选活动有关, 下游高值区多与工农业以及生活污水有关.

结合 3.4.2 节的内容以及前期硫酸盐硫同位素和河水溶解性重金属含量特征研究结果<sup>[37]</sup>, 上游河水硫酸盐来源多与上游金属矿产采选有关, 下游河水硫酸盐来源与下游工业和生活污水输入有关. 硝酸盐常常作为人为输入典型指标来说明人为输入对

河流水化学影响过程,其中  $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$  与  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$  (量比值)常用来指示人为活动输入对河水硝酸盐组成的影响<sup>[1]</sup>. 研究区内河水多落在  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$  量比值 0~1 及  $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$  量比值 0~0.5 的范围内(图 10),这些河水受岩石化学风化作用、城市生活污水、蒸发盐岩溶解作用以及农业面源输入作用共同控制,但是农业面源污染输入影响不大. 部分水体的  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$  量比值超过 1,这些水体多集中在下游,与

工业废水输入有关,同时部分水体  $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$  量比值超过 0.5,这些水体多集中在上游,如伊河 B1 以及洛河 A1 以及 AT1 等,这些地区人为活动极少,可能与雨水输入带来  $\text{NO}_3^-$  有关,因为该地区远离海洋,雨水带来的  $\text{Na}^+$  也较少. 研究区河水硝酸盐的来源还需要进一步借助稳定氮和氧同位素来识别,从而明确人为输入对研究区内的河水硝酸盐组成的影响过程.

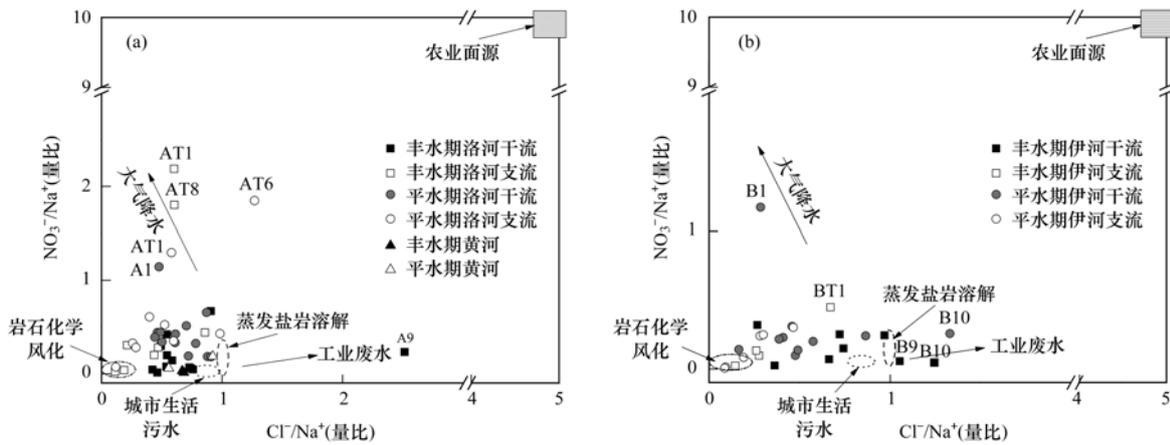


图 10 研究区河水  $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$  量比值关系

Fig. 10  $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$  (molar ratio) in the river water

#### 4 结论

(1) 伊洛河流域河水 pH 呈现弱碱性,丰水期河水 TDS 质量浓度均低于平水期河水 TDS 质量浓度,显示雨季雨水稀释作用. 河水 TDS 质量浓度在空间上表现为上游先增高后降低,到下游逐渐增高的趋势,与上游金属硫化物矿物开采活动排放废水以及下游工业废水和城镇生活污水输入有关.

(2) 干流水体水化学类型均为  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{SO}_4$ -Ca-Mg 型,硅酸盐岩和碳酸盐岩化学风化是河水  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  离子主要来源,其中金属硫化物矿物采选产生的硫酸以及碳酸共同参与区内碳酸盐岩和硅酸盐岩化学风化过程.

(3) 结合  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  和  $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$  量比值关系判别流域河水岩石化学风化类型时需注意过多人为输入会导致水体岩石风化类型朝向蒸发盐岩溶解方向,同时借助  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^-]$  和  $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{HCO}_3^-]$  当量比值关系阐明碳酸和硫酸参与岩石化学风化过程时,需要注意人为活动输入过多  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  也会导致朝向石膏溶解方向,而非区内真正石膏溶解所致. 原因与硫酸风化硅酸盐岩产生  $\text{SO}_4^{2-}$  以及  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$ ,工业废水和城镇污水直接输入  $\text{SO}_4^{2-}$  以及  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  有关,这两种不同的原因可以借助硫酸盐硫同位素区分开来.

#### 参考文献:

- [1] 何姜毅,张东,赵志琦. 黄河流域河水水化学组成的时间和空间变化特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1390-1401. He J Y, Zhang D, Zhao Z Q. Spatial and temporal variations in hydrochemical composition of river water in Yellow River Basin, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(5): 1390-1401.
- [2] Burke A, Present T M, Paris G, et al. Sulfur isotopes in rivers: Insights into global weathering budgets, pyrite oxidation, and the modern sulfur cycle[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 496: 168-177.
- [3] 刘丛强,汪福顺,王雨春,等. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(4): 384-396. Liu C Q, Wang F S, Wang Y C, et al. Responses of aquatic environment to river damming—from the geochemical view [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(4): 384-396.
- [4] 乐嘉祥,王德春. 中国河流水化学特征[J]. 地理学报, 1963, 29(1): 1-13.
- [5] 刘丛强,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.
- [6] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and  $\text{CO}_2$  consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. Chemical Geology, 1999, 159(1-4): 3-30.
- [7] Chen J S, Wang F Y, Meybeck M, et al. Spatial and temporal analysis of water chemistry records (1958-2000) in the Huanghe (Yellow River) basin[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005,

- 19(3): GB3016.
- [ 8 ] Ding T P, Gao J F, Tian S H, *et al.* Chemical and isotopic characters of the water and suspended particulate materials in the Yellow River and their geological and environmental implications [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2016, **90**(1): 285-351.
- [ 9 ] Gou L F, Jin Z D, Pogge von Strandmann P A E, *et al.* Li isotopes in the middle Yellow River; seasonal variability, sources and fractionation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, **248**: 88-108.
- [10] Li S L, Xia X H, Zhou B, *et al.* Chemical balance of the Yellow River source region, the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau: insights about critical zone reactivity[J]. *Applied Geochemistry*, 2018, **90**: 1-12.
- [11] Wu L L, Huh Y, Qin J H, *et al.* Chemical weathering in the Upper Huang He (Yellow River) draining the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, **69**(22): 5279-5294.
- [12] Zhang J, Huang W W, Létolle R, *et al.* Major element chemistry of the Huanghe (Yellow River), China - weathering processes and chemical fluxes[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, **168**(1-4): 173-203.
- [13] Zhang Q Q, Jin Z D, Zhang F, *et al.* Seasonal variation in river water chemistry of the middle reaches of the Yellow River and its controlling factors [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, **156**: 101-113.
- [14] 寇永朝, 华琨, 李洲, 等. 泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3142-3149.
- Kou Y C, Hua K, Li Z, *et al.* Major ionic features and their possible controls in the surface water and groundwater of the Jinghe River[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3142-3149.
- [15] Chen J S, Wang F Y, Xia X H, *et al.* Major element chemistry of the Changjiang (Yangtze River) [J]. *Chemical Geology*, 2002, **187**(3-4): 231-255.
- [16] Li X Q, Gan Y Q, Zhou A G, *et al.* Relationship between water discharge and sulfate sources of the Yangtze River inferred from seasonal variations of sulfur and oxygen isotopic compositions [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, **153**: 30-39.
- [17] Qin J H, Huh Y, Edmond J M, *et al.* Chemical and physical weathering in the Min Jiang, a headwater tributary of the Yangtze River[J]. *Chemical Geology*, 2006, **227**(1-2): 53-69.
- [18] Wu W H, Yang J D, Xu S J, *et al.* Geochemistry of the headwaters of the Yangtze River, Tongtian He and Jinsha Jiang: Silicate weathering and CO<sub>2</sub> consumption [J]. *Applied Geochemistry*, 2008, **23**(12): 3712-3727.
- [19] Li S L, Chetelat B, Yue F J, *et al.* Chemical weathering processes in the Yalong River draining the eastern Tibetan Plateau, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, **88**: 74-84.
- [20] 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.
- [21] Han G L, Liu C Q. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China[J]. *Chemical Geology*, 2004, **204**(1-2): 1-21.
- [22] Chetelat B, Liu C Q, Zhao Z Q, *et al.* Geochemistry of the dissolved load of the Changjiang Basin rivers: anthropogenic impacts and chemical weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, **72**(17): 4254-4277.
- [23] 吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1565-1572.
- Lü J M, An Y L, Wu Q X, *et al.* Hydrochemical characteristics and sources of Qingshuijiang River Basin at wet season in Guizhou Province [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1565-1572.
- [24] Cai W J, Guo X H, Chen C T A, *et al.* A comparative overview of weathering intensity and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> flux in the world's major rivers with emphasis on the Changjiang, Huanghe, Zhujiang (Pearl) and Mississippi Rivers [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, **28**(12): 1538-1549.
- [25] Xu Z F, Liu C Q. Chemical weathering in the upper reaches of Xijiang River draining the Yunnan-Guizhou Plateau, Southwest China[J]. *Chemical Geology*, 2007, **239**(1-2): 83-95.
- [26] 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 source 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.
- [27] 陶正华, 赵志琦, 张东, 等. 西南三江(金沙江、澜沧江和怒江)流域化学风化过程[J]. *生态学杂志*, 2015, **34**(8): 2297-2308.
- Tao Z H, Zhao Z Q, Zhang D, *et al.* Chemical weathering in the three rivers (Jingshajiang, Lancangjiang, and Nujiang) watershed, Southwest China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(8): 2297-2308.
- [28] Noh H, Huh Y, Qin J H, *et al.* Chemical weathering in the Three Rivers region of Eastern Tibet [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, **73**(7): 1857-1877.
- [29] 刘旭, 张东, 高爽, 等. 青藏高原小流域化学风化过程及其 CO<sub>2</sub> 消耗通量: 以尼洋河为例[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(3): 688-696.
- Liu X, Zhang D, Gao S, *et al.* Chemical weathering and CO<sub>2</sub> consumption flux in Tibetan Plateau: a case of Niyang River catchment [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(3): 688-696.
- [30] 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.
- [31] 刘宝剑, 赵志琦, 李思亮, 等. 寒温带流域硅酸盐岩的风化特征——以嫩江为例[J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(4): 1006-1016.
- Liu B J, Zhao Z Q, Li S L, *et al.* Characteristics of silicate rock weathering in cold temperate zone: a case study of Nenjiang River, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(4): 1006-1016.
- [32] Li X Q, Gan Y Q, Zhou A G, *et al.* Hydrological controls on the sources of dissolved sulfate in the Heihe River, a large inland river in the arid northwestern China, inferred from S and O isotopes [J]. *Applied Geochemistry*, 2013, **35**: 99-109.
- [33] Xiao J, Jin Z D, Ding H, *et al.* Geochemistry and solute sources of surface waters of the Tarim River Basin in the extreme arid region, NW Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth*

- Sciences, 2012, **54-55**: 162-173.
- [34] Xiao J, Jin Z D, Wang J, *et al.* Major ion chemistry, weathering process and water quality of natural waters in the Bosten Lake catchment in an extreme arid region, NW China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(7): 3697-3708.
- [35] Li C, Ji H B. Chemical weathering and the role of sulfuric and nitric acids in carbonate weathering: isotopes ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{34}\text{S}$ , and  $^{18}\text{O}$ ) and chemical constraints [J]. *Journal of Geophysical Research; Biogeosciences*, 2016, **121**(5): 1288-1305.
- [36] Brunet F, Potot C, Probst A, *et al.* Stable carbon isotope evidence for nitrogenous fertilizer impact on carbonate weathering in a small agricultural watershed [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2011, **25**(19): 2682-2690.
- [37] 张东, 杨锦媚, 黄兴宇, 等. 基于硫酸盐硫同位素的伊洛河流域河水溶解性重金属来源 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(6): 2549-2559.  
Zhang D, Yang J M, Huang X Y, *et al.* Sources of dissolved heavy metals in river water of the Yiluo River basin based on sulfur isotope of sulfate [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(6): 2549-2559.
- [38] Guo J H, Wang F S, Vogt R D, *et al.* Anthropogenically enhanced chemical weathering and carbon evasion in the Yangtze Basin [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 11941.
- [39] 段士刚, 薛春纪, 刘国印, 等. 河南栾川地区铅锌矿床地质和硫同位素地球化学 [J]. *地质前缘*, 2010, **17**(2): 375-384.  
Duan S G, Xue C J, Liu G Y, *et al.* Geology and sulfur isotope geochemistry of lead-zinc deposits in Luanchuan district, Henan Province, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, **17**(2): 375-384.
- [40] 黄典豪, 王义昌, 聂凤军, 等. 黄龙铺碳酸岩脉型铅(钨)矿床的硫、碳、氧同位素组成及成矿物质来源 [J]. *地质学报*, 1984, **58**(3): 252-264.  
Huang D H, Wang Y C, Nie F J, *et al.* Isotopic composition of sulfur, carbon and oxygen and source material of the Huanglongpu carbonatite vein-type of molybdenum (lead) deposits [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1984, **58**(3): 252-264.
- [41] 张世坤, 程卫习, 徐晓琳, 等. 伊洛河水污染现状成因分析及防治对策 [J]. *人民黄河*, 2014, **36**(7): 76-79.  
Zhang S K, Cheng W X, Xu X L, *et al.* Analysis of water pollution causes and prevention and control measures in Yiluo River [J]. *Yellow River*, 2014, **36**(7): 76-79.
- [42] 万晔, 刘勇, 史正涛. 河南黄河-洛河地区地貌结构与特征 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2010, **46**(1): 40-47.  
Wan Y, Liu Y, Shi Z T. Structure and characteristics of geomorphology in the area between Huanghe River and Luohe River in Henan province [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2010, **46**(1): 40-47.
- [43] 郭卫宁, 赵文举. 伊洛河径流变化特征分析 [J]. *河南水利与南水北调*, 2015, (21): 61-62.
- [44] 李俊建, 何玉良, 付超, 等. 豫西 Au-Mo-W-Pb-Zn-Ag-Fe-铝土矿-石墨成矿带主要地质成矿特征及潜力分析 [J]. *地质学报*, 2016, **90**(7): 1504-1524.  
Li J J, He Y L, Fu C, *et al.* Metallogenic characteristics and potential analysis of the Yuxi Au-Mo-W-Pb-Zn-Ag-Fe-bauxite-graphite metallogenic belt in western Henan [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, **90**(7): 1504-1524.
- [45] Jiang Y J. The contribution of human activities to dissolved inorganic carbon fluxes in a karst underground river system: evidence from major elements and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  in Nandong, Southwest China [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2013, **152**: 1-11.
- [46] 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.
- [47] Qin Y, Zhang D, Wang F S. Using nitrogen and oxygen isotopes to access sources and transformations of nitrogen in the Qinhe Basin, North China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(1): 738-748.
- [48] 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.
- [49] 范百龄, 张东, 陶正华, 等. 黄河水氢、氧同位素组成特征及其气候变化响应 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(5): 1906-1914.  
Fan B L, Zhang D, Tao Z H, *et al.* Compositions of hydrogen and oxygen isotope values of Yellow River water and the response to climate change [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(5): 1906-1914.
- [50] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [51] 刘进达, 赵迎昌, 刘恩凯, 等. 中国大气降水稳定同位素时空分布规律探讨 [J]. *勘察科学技术*, 1997, (3): 34-39.  
Liu J D, Zhao Y C, Liu E K, *et al.* Discussion on the stable isotope time-space distribution law of China atmospheric precipitation [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1997, (3): 34-39.
- [52] Lehn G O, Jacobson A D, Douglas T, *et al.* Constraining seasonal active layer dynamics and chemical weathering reactions occurring in North Slope Alaskan watersheds with major ion and isotope ( $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{44/40}\text{Ca}$ , and  $\delta^{44/42}\text{Ca}$ ) measurements [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, **217**: 399-420.
- [53] Zieliński M, Dopieralska J, Belka Z, *et al.* The strontium isotope budget of the Warta River (Poland): between silicate and carbonate weathering, and anthropogenic pressure [J]. *Applied Geochemistry*, 2017, **81**: 1-11.
- [54] Feth J H, Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry: evaporation-crystallization process [J]. *Science*, 1971, **172**(3985): 870-872.
- [55] 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.
- [56] Meybeck M. Global occurrence of major elements in rivers [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, **5**: 207-223.
- [57] 解晨曦, 高全洲, 陶贞. 流域化学风化与河流水化学研究综述与展望 [J]. *热带地理*, 2012, **32**(4): 331-337, 356.  
Xie C J, Gao Q Z, Tao Z. Review and perspectives of the study on chemical weathering and hydrochemistry in river basin [J]. *Tropical Geography*, 2012, **32**(4): 331-337, 356.
- [58] Sun M Z, Wu W H, Ji X, *et al.* Silicate weathering rate and its controlling factors: A study from small granitic watersheds in the Jiuhua Mountains [J]. *Chemical Geology*, 2019, **504**: 253-266.

## CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors .....	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer .....	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM <sub>2.5</sub> During Autumn and Winter in Yangquan City .....	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM <sub>2.5</sub> from Taian City During the Summer .....	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan .....	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration .....	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo .....	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City .....	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province .....	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process .....	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning .....	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park .....	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017 .....	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China .....	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China .....	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles .....	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta .....	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring .....	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions .....	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin .....	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization .....	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province .....	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau .....	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir .....	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature .....	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu .....	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China .....	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System .....	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area .....	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland .....	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies .....	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution .....	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials .....	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics .....	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir .....	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers .....	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake .....	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water .....	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX .....	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR) .....	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor .....	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure .....	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy .....	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance .....	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge .....	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City .....	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil .....	Ji Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta .....	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria .....	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China .....	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N <sub>2</sub> O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain .....	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors .....	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite .....	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils .....	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As <sup>5+</sup> Stress .....	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)