

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

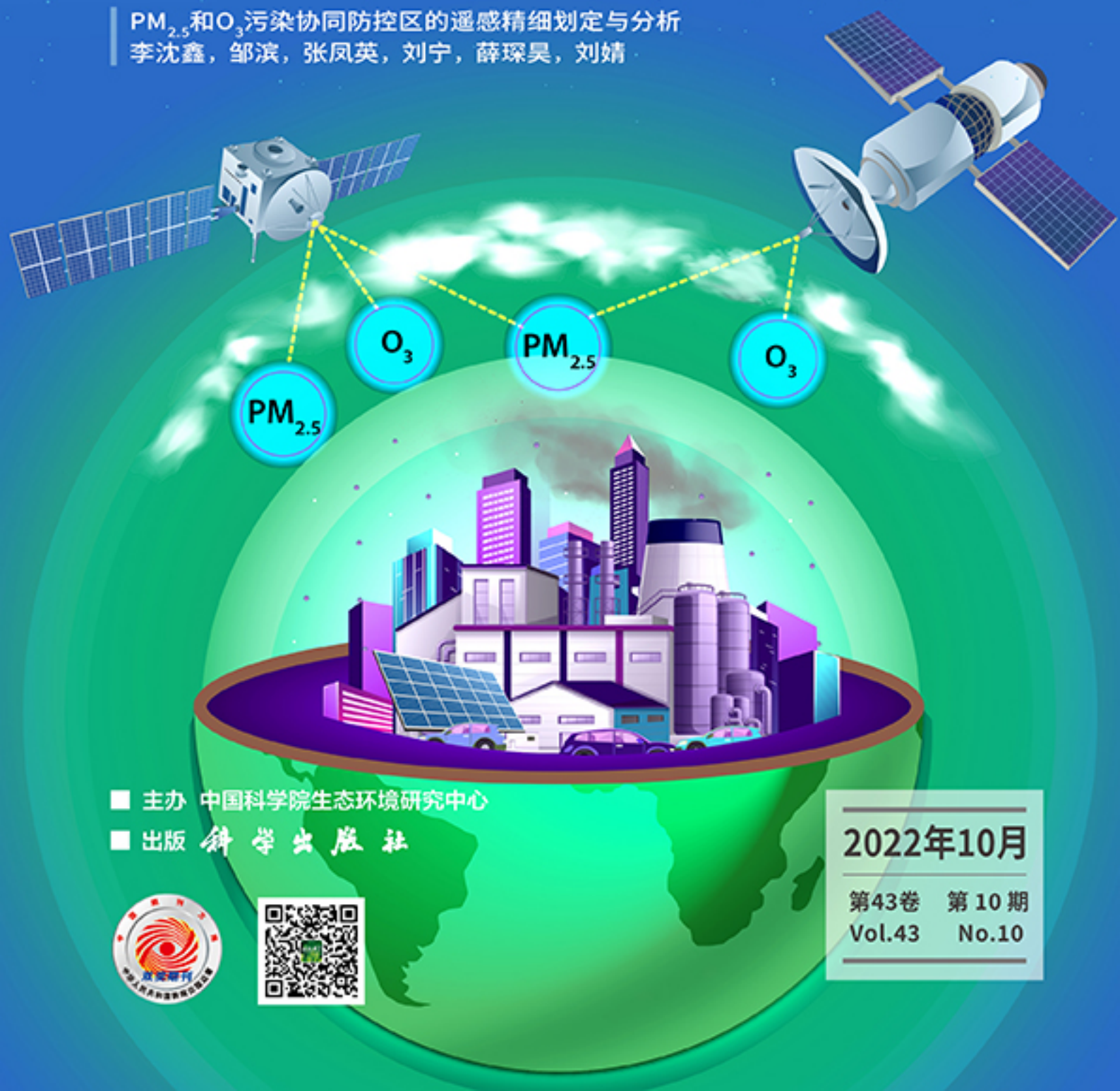
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM _{2.5} 和O ₃ 污染协同防控区的遥感精细划定与分析	李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧 (4293)
广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析	裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅 (4305)
佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用	陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英 (4316)
乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用	张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强 (4327)
结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征	邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀 (4338)
机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征	门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧 (4348)
笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征	曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏 (4357)
上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征	卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹 (4367)
浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征	方利江, 杨一群, 叶观琼 (4380)
“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图	薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东 (4392)
空间关联网络结构特征的减排效应: 基于城市群视角	郑航, 叶阿忠 (4401)
中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制	白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏 (4408)
近年全国地表水水质变化特征	嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯 (4419)
湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素	范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩 (4430)
汾河流域地表水化学同位素特征及其影响因素	赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷 (4440)
城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军 (4449)
喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析	鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英 (4459)
重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别	王雨畅, 杨平恒, 张洁茹 (4470)
蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析	欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴 (4480)
珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子	张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤峰, 谢琼, 付青 (4489)
营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响	吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮 (4502)
老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制	王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强 (4511)
沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响	晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军 (4522)
历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响: ARGs及其潜在宿主	张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如 (4536)
阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析	陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王耀耀, 张睿东 (4545)
白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估	郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵 (4556)
基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析	龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映 (4566)
燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险	车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星 (4578)
海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别	杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新 (4590)
九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价	张华兰, 于瑞莲, 王瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清 (4601)
我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状	伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立峰, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值 (4613)
甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析	陈玉玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖 (4622)
三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征	高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松 (4630)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性	李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希 (4639)
黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应	孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明 (4648)
基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响	姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂 (4658)
低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制	方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢烨桢, 黄海, 朱芸娟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷 (4669)
无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制	张剑, 孔繁艺, 卢升高 (4679)
改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制	谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松 (4687)
CaO ₂ /FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用	岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇 (4697)
早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响	黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智 (4706)
秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响	蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰 (4716)
化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响	陈凯鹏, 韦菊娟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水 (4725)
化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响	李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明 (4735)
长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征	胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 李剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保 (4745)
长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响	马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水 (4755)
土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响	崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰 (4765)
氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响	李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军 (4779)
抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响	李琳琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉 (4789)
《环境科学》征订启事 (4337) 《环境科学》征稿简则 (4407) 信息 (4521, 4705, 4800)	

汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素

赵春红^{1,2}, 申豪勇¹, 王志恒^{1*}, 梁永平¹, 赵一¹, 谢浩¹, 唐春雷¹

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116)

摘要: 汾河是山西的母亲河. 由于水资源过度开发及社会经济发展影响, 生态环境恶化. 经过一系列治理保护措施, 水质得到改善. 利用统计学、Piper 三线图和 Gibbs 模型等方法, 分析了汾河流域地表水水化学和氢氧同位素特征及其来源, 揭示了汾河流域地表水水质演化过程. 结果表明, 汾河干流地表水中主要水化学组分沿着径流路径含量逐渐增加; 汾河上游地表水水化学类型主要以 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Mg}^{2+}$ 为主, 中游和下游地表水水化学类型主要以 $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Mg}^{2+}$ 为主. 汾河流域地表水水化学组成主要受岩石风化作用和蒸发结晶作用影响, 而降雨影响较小. Na^+ 和 K^+ 主要来源于蒸发盐岩的溶解以及周边黄土中含 Na 矿物溶解, 水体中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 主要来源于碳酸盐岩的溶解, SO_4^{2-} 除来源于石膏的溶解, 还可能来源于汾河周边黄土层中硫化矿物的溶解. 干流地表水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 -62.60‰ 和 -8.42‰ , 氢氧同位素特征进一步表明其主要受蒸发作用的影响. 流域内支流及岩溶水水化学组分差异较大. 结果可为汾河流域生态修复保护及生态文明建设提供依据.

关键词: 汾河流域; 水化学; 离子来源; 氢氧同位素; 地表水

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4440-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202201103

Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors

ZHAO Chun-hong^{1,2}, SHEN Hao-yong¹, WANG Zhi-heng^{1*}, LIANG Yong-ping¹, ZHAO Yi¹, XIE Hao¹, TANG Chun-lei¹

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources/Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 2. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The Fenhe River Basin is the mother river of Shanxi Province. Due to the over-exploitation of water resources and the impact of social and economic development, the ecological environment has deteriorated. After a series of treatment and protection measures, the water quality has since been improved. Mathematical statistics, Piper diagrams, Gibbs model, hydrogen and oxygen isotopes, and other methods were used to analyze the characteristics and sources of hydrochemistry in the surface water of the Fenhe River basin, which revealed the evolution process of surface water quality of the Fenhe River basin. The results showed that the content of the main hydrochemical components in the main stream surface water of Fenhe River basin increased gradually along the runoff path. The hydrochemical types of surface water of Fenhe River basin were mainly $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Mg}^{2+}$ and $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Mg}^{2+}$. There were great differences in hydrochemical components of tributaries and karst water in the basin. There were also great differences in hydrochemical components of tributaries in the basin. The hydrochemical types of surface water of karst water were mainly $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$. The hydrochemical composition of surface water in Fenhe River basin was mainly affected by rock weathering and evaporation crystallization, whereas rainfall had little effect. Na^+ and K^+ mainly came from the dissolution of evaporated salt rocks with Na in the surrounding loess. Ca^{2+} , Mg^{2+} , and HCO_3^- mainly came from the dissolution of carbonate rocks. SO_4^{2-} may have also come from the dissolution of sulfide minerals in the loess layer around Fenhe River in addition to the dissolution of gypsum. The values of δD and $\delta^{18}\text{O}$ of Fenhe River surface water were gradually enriched from upstream to downstream. The characteristics of hydrogen and oxygen isotopes further showed that the surface water was mainly affected by evaporation. The results of this study can provide evidence for ecological restoration and protection and ecological civilization construction in the Fenhe River basin.

Key words: Fenhe River Basin; hydrochemistry; ion sources; hydrogen and oxygen isotopes; surface water

水体在径流、渗流过程中与其周围环境发生着一系列的水岩作用,在水化学特征上表现为水化学指标持续发生着一系列变化^[1,2]. 通过水体中的主要离子组分可以划分水化学类型、分析其离子来源、演化机制和影响因素等^[3~6]. 水化学结合同位素技术可以有效识别不同水体的补给来源及水质演化过程^[7~11].

汾河属黄河一级支流,为山西省最大的河流,也是山西省人民的母亲河,为当地经济和社会发展提供了不可替代的支撑性水源保障. 然而随着经济和社会的快速发展,多年来流域水资源开发

利用程度长期居高不下,造成流域水环境日趋恶化等一系列生态环境问题^[12~20],一定程度上制约了山西省经济社会的生态健康发展. 近年来,国家和山西省政府出台了一系列关于汾河流域生态修复的政策措施和工程^[21~23],汾河地表水水质正逐步改善. 为系统分析流域水污染特征和水化学演

收稿日期: 2022-01-12; 修订日期: 2022-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41902261, 41902256); 中国地质调查项目(DD20190334); 广西重点研发计划项目(2021AB29005, 2020AB22013)

作者简介: 赵春红(1986~),女,硕士,助理研究员,主要研究方向为岩溶水环境化学, E-mail: zhaochunhong@karst.ac.cn

* 通信作者, E-mail: wangzh@karst.ac.cn

变机制,为汾河流域生态综合整治提供技术支撑,本研究选取汾河流域典型断面,采集水化学和同位素样品,利用离子分析及同位素方法,探讨汾河水化学及氢氧同位素特征,分析其主要影响因素和驱动力,以期为汾河流域生态环境综合治理及汾河水环境评价提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

汾河是黄河流域第二大支流,发源于山西省宁武县管涔山,在万荣县庙前村汇入黄河,全长 716 km,流经山西 6 个地市、34 个县级城市,流域总面积 39 721 km²,约占山西省面积的四分之一,多年平均径流量 $21 \times 10^8 \text{ m}^3$ [23]。沿途汇入众多支流,其中流域面积大于 1 000 km² 的有 9 条,大于 500 km² 的支流有 16 条;支流中流域面积最大的支流为潇河,其次为文峪河、昌源河和浍河,流域面积均大于 2 000 km²。流域内自上游到下游发育有雷鸣寺、晋祠、兰村、洪山、郭庄、霍泉、龙子祠和古堆这 8 个岩溶大泉,构成汾河的重要补给源 [23,24]。汾河流域西靠吕梁山、东临太行山,地势北高南低,由北向南纵贯省境中南部,各大支流水系发源于两大山系之间,地形地貌总体上表现为南北长、东西狭,呈不规则宽带状分布在省境中部地区。地处中纬度大陆性季风带,多年平均降水量 472 mm [25]。流域内地层发育较为齐全,区域岩溶含水岩层主要为寒武-奥陶系碳酸盐岩地层。

1.2 样品采集与分析方法

为系统分析汾河流域地表水水化学及同位素特征,沿汾河干流、各主要支流进入干流前、流域典型岩溶大泉和岩溶水水井采集样品。于 2020 年 5 月枯水期采集 47 组样品(图 1),其中干流样品 31 组,支流样品 8 组,岩溶泉 4 组,岩溶井样品 4 组(其中 S2 井深 5 m, S3 井深 780 m, S4 井深 100 m, S8 井深 240 m)。因为各支流流域面积大和情况复杂,本次评价难以全面覆盖,仅以入汾口代表子流域的水化学和地质环境特征。

样品采集按照《水质 采样技术指导》(HJ 494-2009)进行取样。水化学组分由 PHS-3C pH 计、可见光光度计和离子色谱仪等测定。氢氧同位素利用稳定同位素质谱仪 MAT253 测定,氢同位素采用 Pt 水平衡法测定,氧同位素采用 CO₂-H₂O 水平衡法测定,水化学组分和氢氧同位素均由国土资源部岩溶地质资源环境监督检测中心测试。硫同位素利用气体同位素质谱仪测定,由国土资源部中南矿产资源监督检测中心测试。

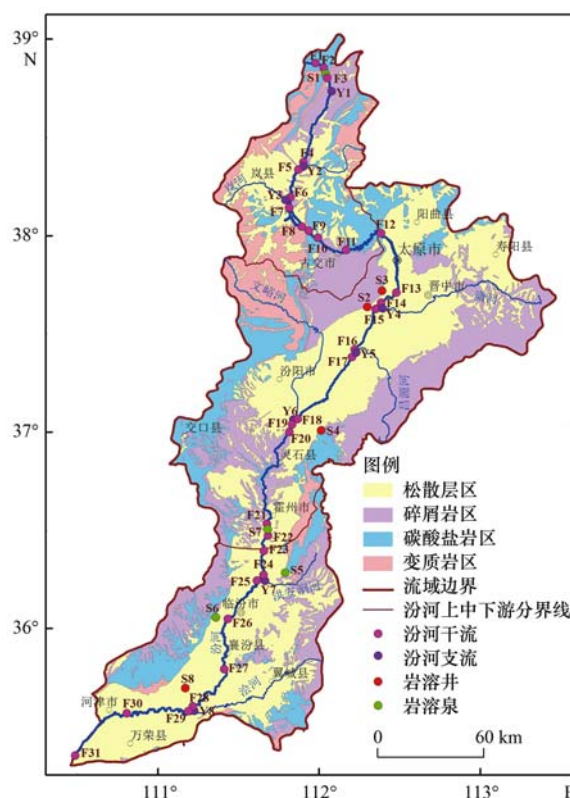


图 1 汾河流域采样点分布示意

Fig. 1 Sketch map of the Fenhe River Basin and the sampling sites

2 结果与讨论

2.1 水化学特征

统计分析汾河干流地表水主要水化学组分(表 1 和图 2),表明干流地表水整体上呈弱碱性,pH 范围为 7.41 ~ 8.10,平均值 7.76,上游 pH 明显高于中下游 pH[图 2(a)],且由于两侧支流汇入混合后,pH 降低;支流 pH 范围为 7.49 ~ 7.97,平均值为 7.72。从上游到下游,干流地表水中主要水化学组分均呈现从上游到下游逐渐增加的趋势[图 2(a) ~ 2(d)],说明沿着径流路径溶解矿物增多、河道蒸发浓缩作用加强。汾河干流溶解性总固体(TDS)范围为 214.00 ~ 966.00 mg·L⁻¹,平均值为 590.06 mg·L⁻¹,从上游到下游 TDS 逐渐增加[图 2(c)],说明地表水在径流过程中 TDS 升高主要是硫酸盐和碳酸盐岩矿物的溶解,盐岩的溶解量较小 [7]。汾河干流地表水氨氮均达到地表水 V 类水标准,这与同期汾河国考断面分析结果相一致 [26,27]。

汾河流域各主要支流 pH 大都呈弱碱性,pH 范围为 7.49 ~ 7.97(表 1)。各支流变异系数大小为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{TDS} > \text{Ca}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{pH}$,变异系数较大,说明各支流的水化学成分差异较大,反映了不同的支流其水文地球化学背景及社会经济发展和工农业布局等差异较大。岩溶

大泉排泄水是汾河流域重要的补给水源,其水化学特征与流域总体水化学特征基本一致(表1).

表 1 汾河流域主要水化学组分统计结果¹⁾

Table 1 Statistics of major ions in Fenhe River basin

水体类型	指标	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	TDS
汾河干流	最大值	8.10	161.03	64.93	13.53	104.10	250.33	146.69	548.27	966.00
	最小值	7.41	53.11	12.46	1.34	4.13	161.14	5.63	35.86	214.00
	平均值	7.76	84.56	29.96	6.93	75.96	219.81	90.02	179.63	590.06
	标准差	0.19	24.07	9.30	0.77	28.52	22.55	38.87	90.95	180.48
	变异系数	0.03	0.28	0.31	0.57	0.38	0.10	0.43	0.51	0.31
汾河支流	最大值	7.97	110.42	67.90	17.41	185.28	379.15	161.90	421.50	1 166.00
	最小值	7.49	35.74	15.19	1.45	12.65	145.34	9.58	33.79	242.00
	平均值	7.72	67.35	28.23	8.61	86.56	242.24	82.45	153.27	559.75
	标准差	0.18	24.57	17.91	6.82	67.78	72.55	60.71	128.58	317.65
	变异系数	0.02	0.36	0.63	0.79	0.78	0.30	0.74	0.84	0.57
岩溶水	最大值	8.06	294.42	72.76	5.02	86.82	261.19	85.75	822.37	1 364.00
	最小值	7.02	63.24	14.84	1.04	3.76	208.53	3.26	56.80	274.00
	平均值	7.74	135.39	37.58	2.36	28.01	235.52	27.24	304.73	658.25
	标准差	0.32	74.61	17.53	1.30	27.77	17.24	29.67	242.86	336.62
	变异系数	0.04	0.55	0.47	0.55	0.99	0.07	1.09	0.80	0.51

1) pH 无量纲,其余组分单位为mg·L⁻¹

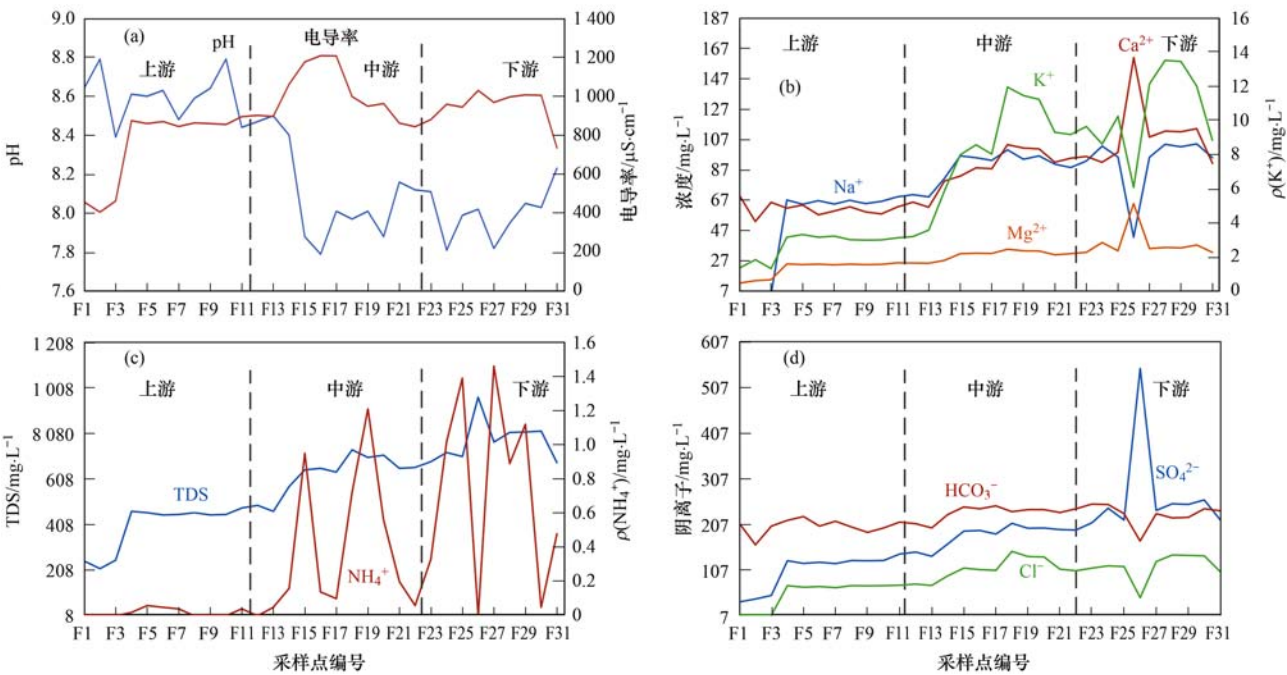


图 2 汾河干流主要离子含量变化曲线

Fig. 2 Variation in main ions contents in main stream of Fenhe River

2.2 水化学类型

Piper 三线图是研究地表水的水化学类型特征的重要工具^[3,28,29].从汾河干流 Piper 图可以看出[图 3(a)和 3(b)],汾河上游碳酸盐岩裸露山区地表水水化学类型主要以 HCO₃-Ca·Mg 和 HCO₃·SO₄-Ca·Mg 为主(F1、F2 和 F3 点),且同期无大量有效降雨和地表产流,反映了枯水期汾河水主要来源于浅层地下水基流渗出补给,这与上游地质情况一致.由于引黄水、东碾河及岚河水的汇入,汾河水中 Cl⁻和 Na⁺ 比例逐渐增多,水化学类型向 HCO₃·SO₄·Cl-

Ca·Na·Mg 型演化,这是由于汾河周边地层从碳酸盐岩地层过渡到松散岩地层,而且支流中携带了大量的泥沙造成的.汾河中游水化学类型总体上由 HCO₃·SO₄·Cl-Ca·Na·Mg 型逐步过渡为 SO₄·HCO₃·Cl-Ca·Na·Mg 型;中间由于潇河的汇入,水中 Na 离子比例增加,水化学类型由 HCO₃·SO₄·Cl-Ca·Na·Mg 型逐步过渡为 HCO₃·SO₄·Cl-Na·Ca·Mg 型.由于昌源河及文峪河的汇入,水中 HCO₃⁻ 离子比例增加,水化学类型发生变化,由于晋祠泉域、郭庄泉域和洪山泉域岩溶水对地表水的补给以及溶解的黄土层矿物的影响,导

致水中 SO_4^{2-} 比例增加. 汾河下游水化学类型主要以 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型为主. 由于汾河水的汇入, 导致水中 Cl^- 比例增加, 混合汾河水后的水化学类型为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{HCO}_3 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型.

总体上, 汾河水在径流过程中, 水中阴离子从以 HCO_3^- 为主, 逐渐过渡到以 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 为主; 优势阳离子从 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主逐步过渡到以 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 为主, Na^+ 高于 Mg^{2+} , 反映了从上游到下游, 汾河流域地形地貌由山区逐渐过渡到盆地、区域地层由碳酸盐岩地层逐步过渡到松散层等; 地表水在径流过程中一方面由于其他水流混入发生混合作用, 另一方面蒸发作用加强, 发生一系列水岩作用导致水中 Na^+ 含量增多, 钙镁矿物沉淀^[30], 以及

与流域内黄土层矿物渗入、工农业用水排放有关. 需要说明的是 F26 点周边有垃圾堆放及城市污水排放, 导致地表水化学类型为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$, 其水化学特征显著不同于其他点, 且经过一段时间的扩散混合后, 至下游断面, 地下水类型转变为 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na}$.

由汾河流域各支流的水化学类型 Piper 图可知 [图 3(c)], 上游支流阴离子以 HCO_3^- 为主, 阳离子以 Ca^{2+} 为主, 反映了上游其主要来源于浅层地下水基流渗出补给; 中下游的各支流由于平原区占比较大, Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 比例逐渐加大, 逐渐转为主要离子成分, 反映了农田灌溉用水、浅层黄土层渗滤水的混入、蒸发浓缩作用等逐渐加强以及岩溶水对

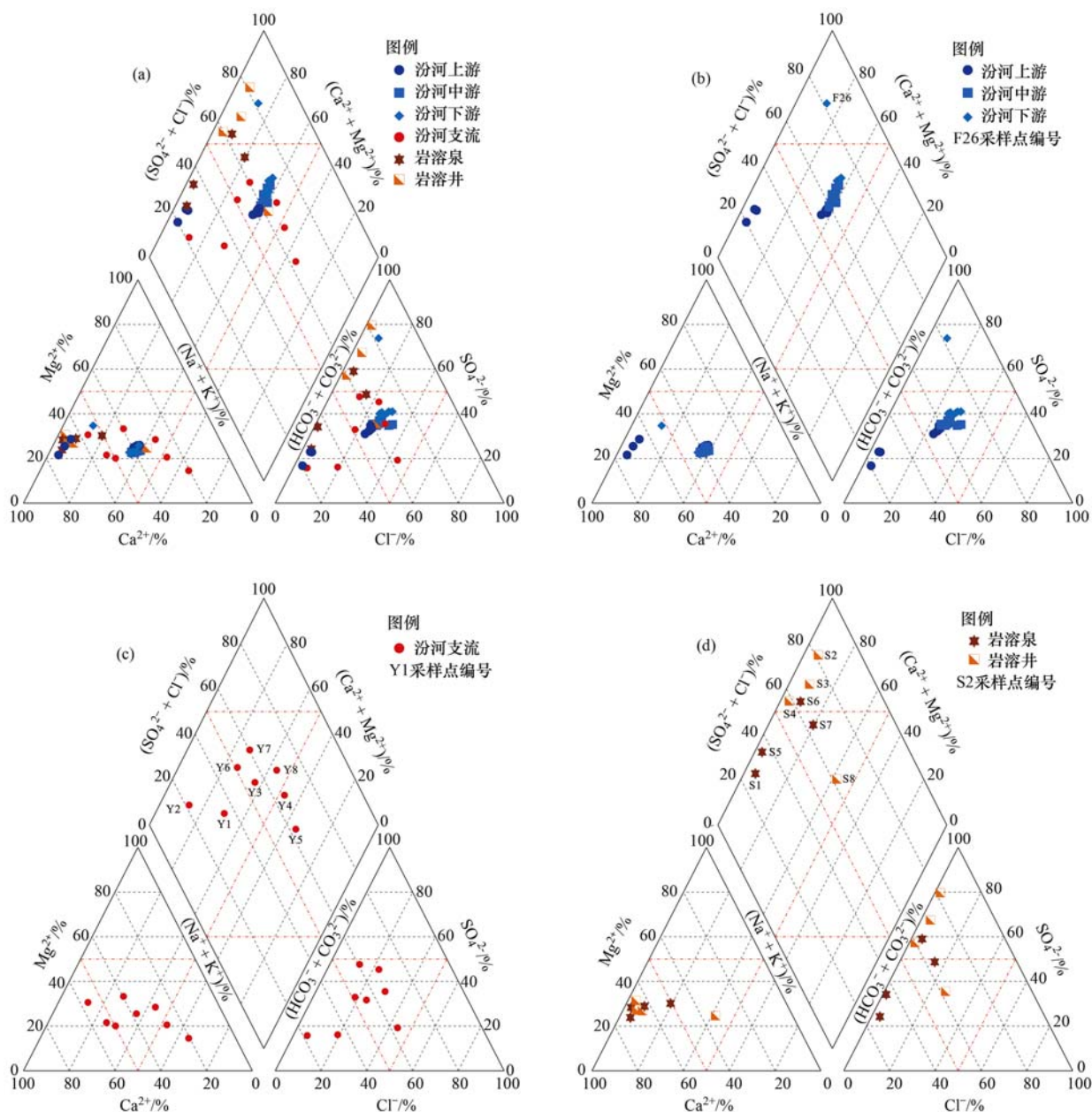


图 3 汾河流域主要离子 Piper 三线图

Fig. 3 Piper diagram showing major ion composition of the Fenhe River basin

地表水的补给等。

同期采集的 4 组典型岩溶大泉和 4 个典型岩溶井水样品 [图 3(d)], 除雷鸣寺泉地下水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型外, 其他 7 组样品中 SO_4^{2-} 含量均占较大比例, 平泉 (S2) 水化学类型为 $\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型, 其余除霍泉 (S5) 及古堆泉 (S8) 附近样点外, 其他 6 组水化学类型均为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型, 其所在泉域均为特殊的“水煤共存系统”, 岩溶水受到不同程度的污染, 水中 SO_4^{2-} 比例较大^[31,32]。

2.3 离子来源及影响因素

2.3.1 Gibbs 分析

水的水文地球化学过程研究常采用 Gibbs 图来进行^[5,33~35]。由图 4 可知, 研究区各水样点除汾河上游 3 个样点及下游 1 个样点外, 其余样点主要位于 Gibbs 图中上部分, 处于岩石风化和蒸发结晶带中间, 而且都远离大气降水带, 说明本次采集的水样主要来源于地下水和工农业弃水, 大气降水所占比例不大, 浅层地下水和岩溶大泉排泄的基流构成了枯水期汾河径流的主要部分。在沿程径流过程中, 蒸发浓缩和混合也占较大作用。汾河流域多年平均降水

量为 472.4 mm, 水面蒸发量 1 000 ~ 2 000 mm^[36], 年内 5 月为枯水期末, 降雨少, 而 5 月气温快速回升、风速较大, 蒸发旺盛, 地表水受降雨影响小而受蒸发影响大^[23], 这与 Gibbs 图中各样点分布区相一致。

汾河上游岔上水文站 (F1) 和雷鸣寺泉汾河上下游断面 (F2 和 F3) 这 3 个样点的 TDS 均值为 238 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ (当量浓度比, 下同) 在 0.04 ~ 0.06 之间, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 在 0.05 ~ 0.07 之间, 东碾河 (Y2) 点其水源主要来源于山区地下水, 地下水溶滤作用较强, 其离子来源主要受岩石风化影响。汾河地表水水样点除以上 3 个点外, 其余点 TDS 为 450 ~ 818 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 为 0.34 ~ 0.54, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 为 0.43 ~ 0.5, 在 Gibbs 图中位于岩石风化区域蒸发结晶区之前, 说明汾河地表水主要来源于以溶滤作用为主的地下水, 在地面径流过程中又受蒸发浓缩作用影响, 且愈往下游, 蒸发浓缩过程愈强。而各支流点主要受蒸发浓缩作用和岩石风化作用影响。岩溶水则多以岩石风化作用为主, 这与岩溶水排泄区接受上游地下水的补给, 且埋深较大, 蒸发浓缩作用不明显。

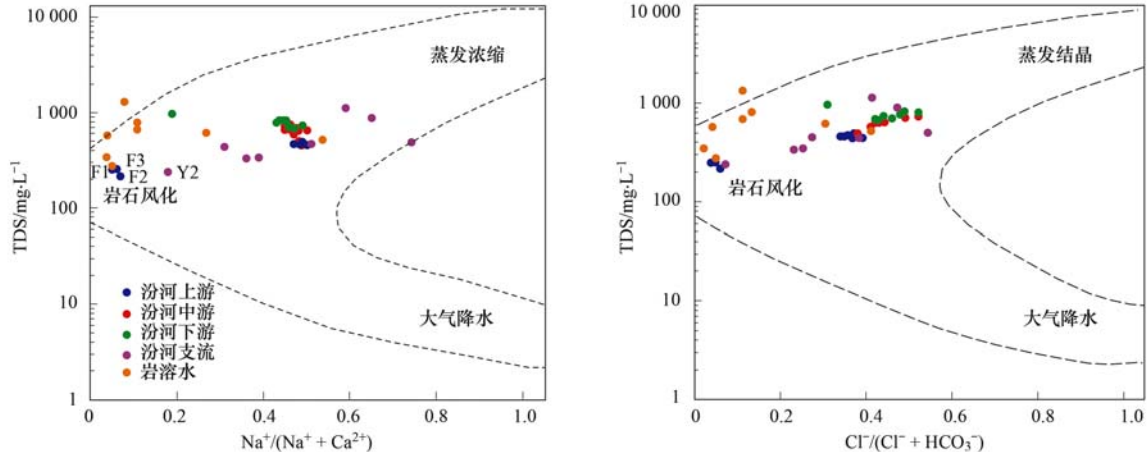


图 4 汾河流域 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs plots of the Fenhe River Basin

2.3.2 离子来源分析

枯水期汾河流量主要来源于地下水, 利用 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 的关系可以判断水中各离子是来源于蒸发盐岩、碳酸盐岩或硅酸盐岩矿物的溶解^[37,38]。汾河上游 3 个点 F1、F2、F3 及支流 Y2 以及岩溶水点主要受碳酸盐岩矿物溶解的影响, 其所处地区地层岩性以碳酸盐岩为主。F26 点受人为污染外, 其他汾河流域地表水的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 为 0.34 ~ 2.26, $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 为 0.25 ~ 1.32, 汾河流域地表水样点主要分布于蒸发盐岩和碳酸盐岩区中间 (图 5), 说明汾河地表水主要受蒸发盐岩和碳酸盐岩等矿物溶解的影响, 这与其地质背景中的碳酸盐岩、膏岩分布一致^[39]。

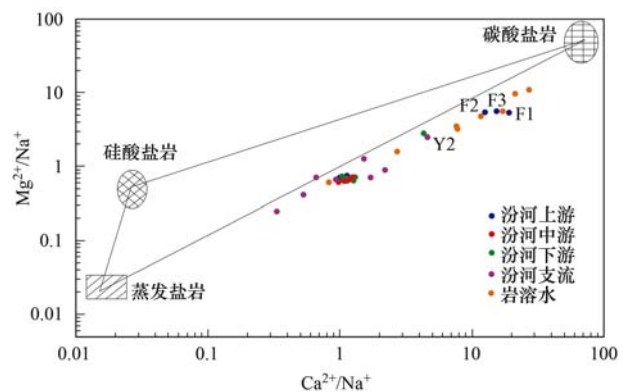


图 5 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 关系曲线

Fig. 5 Relationship of the $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ and $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$

天然水体中 Na^+ 和 K^+ 主要来源于蒸发盐岩和硅酸盐岩矿物^[40]. $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\text{Cl}^-$ 为 1 表示水体中 Na^+ 与 K^+ 主要来源于蒸发盐岩的溶解^[2,41]. 汾河流域地表水大部分样点都在 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\text{Cl}^-$ 的比值 1:1 线上(图 6), 说明汾河流域地表水 Na^+ 和 K^+ 除受蒸发盐岩溶解影响外, 还受周边黄土中的含 Na 矿物溶解的影响^[5,42]. 而汾河上游点(F1、F2、F3 和 Y2) Na^+ 和 K^+ 主要来源于蒸发盐岩的溶解(图 6). 而潇河(Y4)、昌源河(Y5)和浍河(Y8)水 Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 含量明显高于其他地表水点, 主要是由于周边工矿企业及农业污染造成的, 且此区段水土流失较为严重, 受黄土中的含 Na 矿物溶解影响也较大.

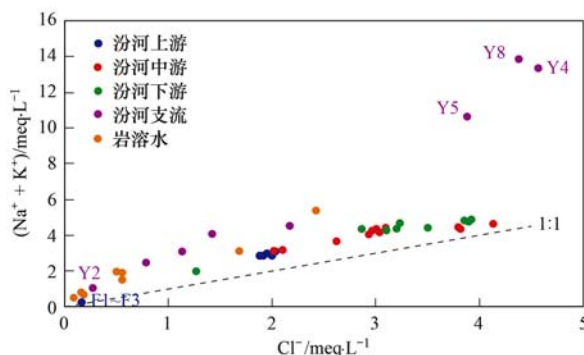


图 6 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 与 Cl^- 关系曲线

Fig. 6 Relationship of $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ and Cl^-

利用 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 与 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 可以反映水体中碳酸盐岩和蒸发盐岩(石膏)等的溶解特征^[7,43]. 若 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 为 1, 则说明水体中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐岩的溶解; 若 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 为 1, 则说明水体中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 还来源于蒸发盐岩(石膏)的溶解, SO_4^{2-} 还来源于石膏的溶解.

汾河河水样点均位于 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^- = 1:1$ 比值线以上(图 7), 说明河水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 除了来源于碳酸盐岩的溶解, 还来源于其他矿物的溶解. 如图 8 所示, 岩溶水和大部分地表水样点位于 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) = 1:1$ 比值线附近, 说明其 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 主要来源于碳酸盐岩和石膏的溶解, 其他点则位于 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) = 1:1$ 比值线以下, 结合研究区地球化学背景, 说明 SO_4^{2-} 除来源于石膏的溶解, 还可能来源于汾河周边黄土层中硫化矿物的溶解^[44,45]. 汾河上游主要地层岩性为中奥陶统含石膏的泥质白云岩, 易溶的石膏使汾河水中硫酸根离子大大增加, 汾河上下游进入临汾盆地, 河谷宽阔, 水流速度缓慢, 加之流域内为黄土丘陵地貌, 河流冲刷两岸黄土层矿物均可造成河水中水化学成分发生变化, 而支流潇河、

昌源河及浍河明显在 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) = 1:1$ 比值线以下(图 8), 说明其 SO_4^{2-} 还受到煤矿矿坑水污染^[44,46]. 泉水样点均位于 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) = 1:1$ 比值线上, 泉水中 SO_4^{2-} 主要来源于碳酸盐岩地层中石膏的溶解.

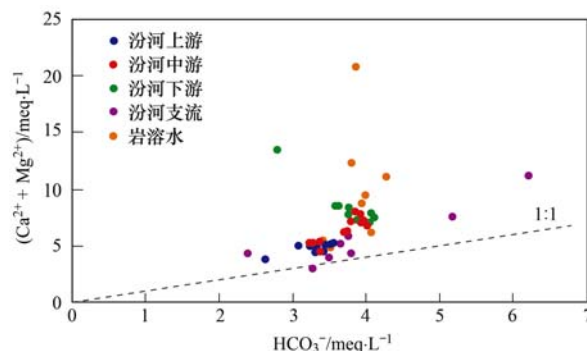


图 7 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 HCO_3^- 关系曲线

Fig. 7 Relationship of $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ and HCO_3^-

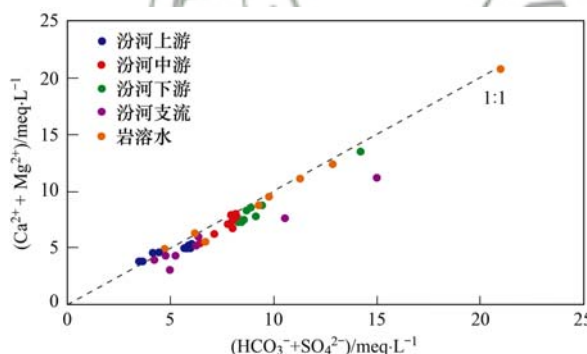


图 8 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 关系曲线

Fig. 8 Relationship of $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ and $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$

2.4 氢氧同位素特征

受污染的 F26 点其 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 -20.3‰ 和 -0.06‰ , 明显区别于其他点. 其余汾河干流地表水 δD 介于 $-75.10\text{‰} \sim -51.10\text{‰}$, 平均值为 -62.60‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 介于 $-10.81\text{‰} \sim -7.09\text{‰}$, 平均值为 -8.42‰ (图 9). 除上游 F1 点岔上水文站点和 F3 雷鸣寺泉下游点外, 其余水样点均位于当地大气降水线(LMWL)下和全球大气降水线(GWML)下^[36,47], 且远离当地大气降水线, 表明干流地表水主要受到了蒸发作用的影响, 受大气降水影响较小^[36]. 从上游到下游汾河地表水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐富集, 这是由于从上游 F1 点到下游 F31 点, 地形高差 1432 m, 下游河面较宽, 地势平缓, 地表水径流缓慢, 蒸发浓缩作用逐渐加强. 同样的, 沿汾河从上游到下游的各支流的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐富集, 蒸发浓缩作用加强. 汾河支流地表水 δD 介于 $-68.60\text{‰} \sim -27.80\text{‰}$, 平均值为 -54.98‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 介于 $-9.29\text{‰} \sim -3.85\text{‰}$, 平均值为 -7.28‰ . 支流中昌源河

(Y5)的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值最高,说明昌源河受蒸发浓缩作用更强.岩溶水 δD 介于 $-78.60\text{‰} \sim -58.20\text{‰}$,平均值为 -71.05‰ ; $\delta^{18}O$ 介于 $-10.89\text{‰} \sim -7.64\text{‰}$,平均值为 -9.72‰ .雷鸣寺泉(S1)和广胜寺泉(S5)点均位于GMWL线上,这两点均位于碳酸盐岩裸露区,主要接受降水补给.其余点均位于GMWL线的右侧,受蒸发作用影响较大.

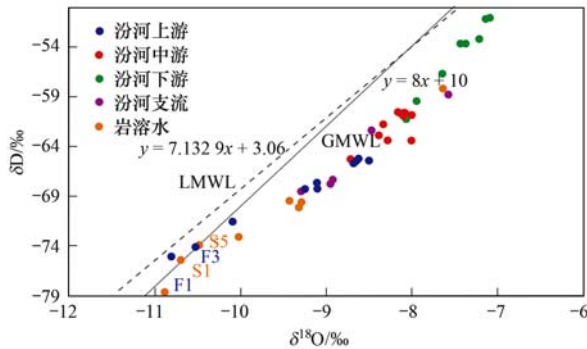


图9 水的氢氧同位素特征

Fig. 9 Plot of δD and $\delta^{18}O$ values in the Fenhe River basin

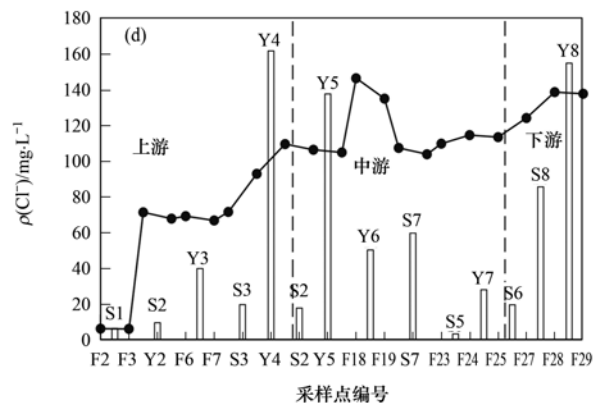
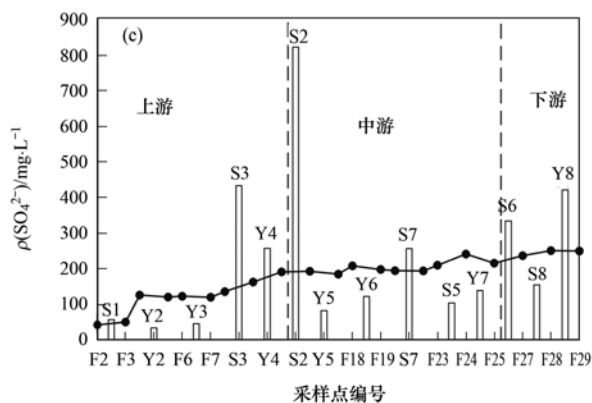
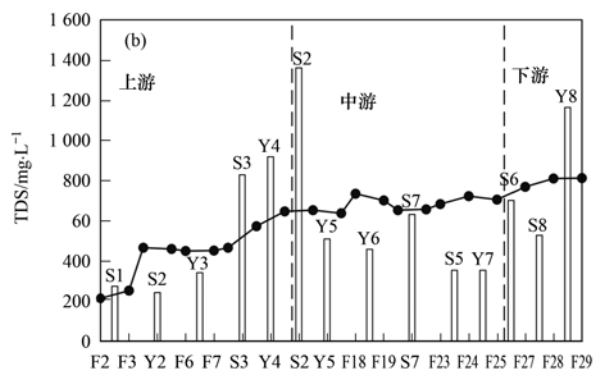
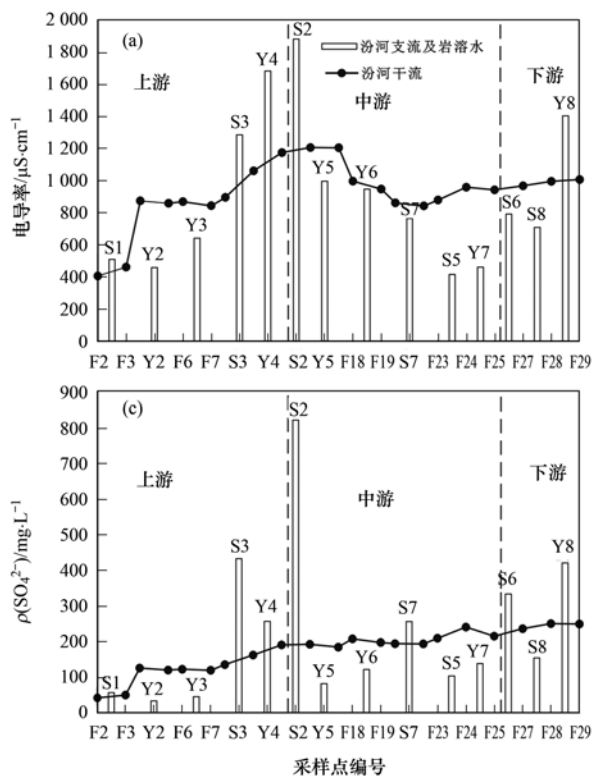


图10 汾河地表水及岩溶水主要组分关系

Fig. 10 Relationship diagram of main components of surface water and karst water in the Fenhe River basin

3 结论

(1)汾河干流地表水整体上呈弱碱性,汾河干流主要水化学组分均呈现从上游到下游逐渐增加的趋势;阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主,逐渐过渡为以 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 为主,阳离子从以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 逐步过渡到以 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 为主;支流阳离子以

2.5 支流及泉水汇入对汾河干流的影响

汾河中游各支流水化学含量最高(图10),其次是下游和上游.中游主要是由于河道清水流量减少,河水稀释能力低,而太原及临汾城市周边生活污染及工农业用水排入导致水质较差.各支流汇入干流后,均会影响干流河水的水质,大部分支流河水水化学含量低于干流的.潇河(Y4)、昌源河(Y5)和浍河(Y8)支流流域内工农业经济发达,大量灌溉用水及工业生活污水排入河流,造成河流水质较差.三支流水汇入汾河后,导致汾河电导率、TDS、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 含量升高,经弥散、混合等,离子浓度升幅小,说明干流在较大水量情况下,具有一定的纳污能力.另一方面也反映了支流流量相对较小,水动力条件较弱,水体自净能力差,水环境容量较小.岩溶水是汾河清水径流的重要组成部分,由于岩溶水(如郭庄泉S7点)的汇入,汾河水各含量有所降低,对河水水质有净化稀释作用.

Ca^{2+} 和 Na^+ 为主,阴离子以 HCO_3^- 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 为主;岩溶水阳离子以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主,阴离子以 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 为主.

(2)枯水期汾河地表水主要来源于碳酸盐岩岩溶水、浅层地下水和工矿企业废水.水化学组成主要受岩石风化作用和蒸发结晶作用影响,大气降水对其影响较小. Na^+ 和 K^+ 主要来源于蒸发盐岩的溶解以

及周边黄土中的含 Na 矿物溶解, 水体中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 主要来源于碳酸盐岩的溶解, SO_4^{2-} 除来源于石膏的溶解, 还可能来源于汾河周边黄土层中硫化矿物的溶解, 部分地区可能还来源于煤矿矿坑水。

(3) 汾河干流地表水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 -62.60‰ 和 -8.42‰ , 从上游到下游其 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐富集, 蒸发浓缩作用逐渐加强。支流昌源河受蒸发浓缩作用更强。碳酸盐岩裸露区的岩溶水点主要受降水影响, 而其余点受蒸发作用影响较大。

参考文献:

- [1] Slukovskii Z, Dauvalter V, Guzeva A, *et al.* The hydrochemistry and recent sediment geochemistry of small lakes of murmansk, Arctic zone of Russia[J]. *Water*, 2020, **12**(4), doi: 10.3390/w12041130.
- [2] 何明霞, 张兵, 夏文雪, 等. 天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 776-785.
He M X, Zhang B, Xia W X, *et al.* Hydrochemical characteristics and analysis of the Qilihai wetland, Tianjin[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 776-785.
- [3] Li Q Y, Wu J L, Shen B B, *et al.* Water chemistry and stable isotopes of different water types in Tajikistan[J]. *Environmental Processes*, 2018, **5**(S1): 127-137.
- [4] 任孝宗, 李建刚, 刘敏, 等. 浑善达克沙地东部地区天然水体的水化学组成及其控制因素[J]. *干旱区研究*, 2019, **36**(4): 791-800.
Ren X Z, Li J G, Liu M, *et al.* Hydrochemical composition of natural waters and its affecting factors in the east Hunshandak sandy land[J]. *Arid Zone Research*, 2019, **36**(4): 791-800.
- [5] 张旺, 王殿武, 雷坤, 等. 黄河中下游丰水期水化学特征及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2020, **27**(1): 380-386, 393.
Zhang W, Wang D W, Lei K, *et al.* Hydrochemical characteristics and impact factors in the middle and lower reaches of the Yellow River in the wet season[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, **27**(1): 380-386, 393.
- [6] 严宇鹏, 牛凤霞, 刘佳, 等. 雅鲁藏布江上游夏季水化学特征及来源解析[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(2): 815-825.
Yan Y P, Niu F X, Liu J, *et al.* Hydrochemical characteristics and sources of the upper Yarlung Zangbo River in summer[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(2): 815-825.
- [7] 刘重芃, 张宏鑫, 何军, 等. 浅层地下水水化学和同位素地球化学特征研究——以江汉平原西部为例[J]. *资源环境与工程*, 2020, **34**(2): 251-255.
Liu C P, Zhang H X, He J, *et al.* Study on hydrochemical and isotope geochemical characteristics of shallow groundwater[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2020, **34**(2): 251-255.
- [8] Mohanty A K, Rao V V S G. Hydrogeochemical, seawater intrusion and oxygen isotope studies on a coastal region in the Puri District of Odisha, India[J]. *Catena*, 2019, **172**: 558-571.
- [9] Li Z, Coles A E, Xiao J. Groundwater and streamflow sources in China's Loess Plateau on catchment scale[J]. *Catena*, 2019, **181**, doi: 10.1016/j.catena.2019.104075.
- [10] 赵春红, 梁永平, 卢海平, 等. 娘子关泉域岩溶水氢氧同位素特征及影响因素浅析[J]. *地质科技情报*, 2018, **37**(5): 200-205.
Zhao C H, Liang Y P, Lu H P, *et al.* Hydrogen and oxygen isotopic characteristics and influencing factors of karst water in the Niangziguan spring area[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, **37**(5): 200-205.
- [11] 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 等. 南小河沟流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 682-690.
Guo Y W, Tian F Q, Hu H C, *et al.* Characteristics and significance of stable isotopes and hydrochemistry in surface water and groundwater in Nanxiaohogou basin[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 682-690.
- [12] 贾佳瑜, 刘小芳, 赵勇钢, 等. 汾河流域下游农田土壤重金属空间分布特征与污染评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, **35**(8): 132-137.
Jia J Y, Liu X F, Zhao Y G, *et al.* Spatial distribution characteristics and assessment of heavy metal pollution in farmland soils in the lower reaches of Fenhe River basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, **35**(8): 132-137.
- [13] Wang L F, Li H, Dang J H, *et al.* Effects of urbanization on water quality and the macrobenthos community structure in the Fenhe River, Shanxi Province, China[J]. *Journal of Chemistry*, 2020, **2020**, doi: 10.1155/2020/8653486.
- [14] 杨锐婧, 冯民权, 汪银龙. 汾河下游丰水和枯水期的河流硝酸盐污染来源特征[J]. *水土保持通报*, 2019, **39**(6): 211-217.
Yang R J, Feng M Q, Wang Y L. Source characteristics of nitrate pollution in Fenhe River during high and low water periods[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, **39**(6): 211-217.
- [15] 汪银龙, 冯民权, 董向前. 汾河下游雨季硝酸盐污染源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 4033-4041.
Wang Y L, Feng M Q, Dong X Q. Analysis of nitrate pollution sources in the rainy season of the lower Fenhe River[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 4033-4041.
- [16] 吕安, 邱文, 盛若虹, 等. 汾河水质状况研究[J]. *环境科学与管理*, 2012, **37**(10): 97-101.
LV A, Qiu W, Sheng R H, *et al.* Research on water quality of Fenhe River[J]. *Environmental Science and Management*, 2012, **37**(10): 97-101.
- [17] Hua K, Xiao J, Li S J, *et al.* Analysis of hydrochemical characteristics and their controlling factors in the Fen River of China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, **52**, doi: 10.1016/j.scs.2019.101827.
- [18] Yuan G, Wang J W, Zhou J H, *et al.* A study on water quality of Fen River system in Shanxi Province [A]. In: 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering[C]. Chengdu: IEEE, 2010.
- [19] 白露. 汾河干流水质预测及自净需水量研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
Bai L. Research of water quality prediction and self-purification water demand of Fenhe River[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [20] 柴宁磐. 汾河流域河水污染的地球化学示踪[D]. 西安: 长安大学, 2021.
Chai N P. Geochemical tracer of river water pollution in the Fen River basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [21] 山西省人民代表大会常务委员会. 山西省汾河流域生态修复与保护条例[EB/OL]. http://slt.shanxi.gov.cn/zwgk/zwgkml/zcwj/201906/t20190625_3148488.html, 2017-05-15.
- [22] 山西省人民政府. 山西省人民政府关于坚决打赢汾河流域治理攻坚战的决定[EB/OL]. http://slt.shanxi.gov.cn/sldt/tbtj_358/sxrb_3069/201904/t20190417_3095539.html, 2019-04-17.
- [23] 山西省人民政府办公厅. 山西省人民政府办公厅关于印发汾河流域生态景观规划(2020-2035年)的通知[EB/OL].

- http://www.shanxi.gov.cn/sxszfxxgk/sxsrmzfzcbm/sxszfzbg/fflg_7203/bgtgfwj_7206/202004/t20200415_795232.shtml, 2020-04-10.
- [24] 山西省水利厅, 中国地质科学院岩溶地质研究所, 山西省水资源管理委员会. 山西省岩溶泉水域水资源保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [25] 唐莉, 张永波, 祝雪萍, 等. 汾河流域降水量时空分布变化对汛期的影响[J]. 水电能源科学, 2018, **36**(9): 10-13.
Tang L, Zhang Y B, Zhu X P, *et al.* Influence of spatial and temporal distribution of precipitation in Fenhe River basin on flood season[J]. Water Resources and Power, 2018, **36**(9): 10-13.
- [26] 山西省人民政府. 黄河(汾河)治理情况周报(2020年5月10日-5月16日)[EB/OL]. http://www.shanxi.gov.cn/zttj/fhzt/zlqkzb/202005/t20200520_801491.shtml, 2020-05-20.
- [27] 山西省人民政府. 黄河(汾河)治理情况周报(2020年5月17日-5月23日)[EB/OL]. http://www.shanxi.gov.cn/zttj/fhzt/zlqkzb/202005/t20200526_808451.shtml, 2020-05-26.
- [28] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1944, **25**(6): 914-928.
- [29] 李军, 邹胜章, 赵一, 等. 会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1750-1760.
Li J, Zou S Z, Zhao Y, *et al.* Major ionic characteristics and factors of karst groundwater at Huixian karst wetland, China[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1750-1760.
- [30] 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.
- [31] 梁永平, 王维泰, 赵春红, 等. 中国北方岩溶水变化特征及其环境问题[J]. 中国岩溶, 2013, **32**(1): 34-42.
Liang Y P, Wang W T, Zhao C H, *et al.* Variations of karst water and environmental problems in North China[J]. Carsologica Sinica, 2013, **32**(1): 34-42.
- [32] 梁永平, 王维泰. 中国北方岩溶水系统划分与系统特征[J]. 地球学报, 2010, **31**(6): 860-868.
Liang Y P, Wang W T. The division and characteristics of karst water systems in Northern China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, **31**(6): 860-868.
- [33] Fu C C, Li X Q, Ma J F, *et al.* A hydrochemistry and multi-isotopic study of groundwater origin and hydrochemical evolution in the middle reaches of the Kuye River basin[J]. Applied Geochemistry, 2018, **98**: 82-93.
- [34] 程中华, 邓义祥, 卓小可, 等. 京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2251-2259.
Cheng Z H, Deng Y X, Zhuo X K, *et al.* Changes in water chemistry and driving factors in the middle and lower reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal[J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2251-2259.
- [35] 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 等. 永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4202-4210.
Kong X L, Yang Y H, Cao B, *et al.* Hydrochemical characteristics and factors of surface water and groundwater in the upper Yongding River basin[J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4202-4210.
- [36] 刘鑫, 向伟, 司炳成. 汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1739-1749.
Liu X, Xiang W, Si B C. Hydrochemical and isotopic characteristics in the shallow groundwater of the Fenhe River basin and indicative significance[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1739-1749.
- [37] Thomas J, Josepha S, Thrivikramji K P. Hydrochemical variations of a tropical mountain river system in a rain shadow region of the southern western Ghats, Kerala, India[J]. Applied Geochemistry, 2015, **63**: 456-471.
- [38] 张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 等. 雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4924-4935.
Zhang H X, Wu Y, Luo W Y, *et al.* Hydrogeochemical investigations of groundwater in the Lingbei area, Leizhou Peninsula[J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4924-4935.
- [39] Hu M H, Stallard R F, Edmond J M. Major ion chemistry of some large Chinese rivers[J]. Nature, 1982, **298**(5874): 550-553.
- [40] 王建, 张华兵, 许君利, 等. 盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(10): 4772-4780.
Wang J, Zhang H B, Xu J L, *et al.* Spatial hydrochemical characteristics and controlling factors of surface water in the Yancheng area[J]. Environmental Science, 2021, **42**(10): 4772-4780.
- [41] 王君波, 朱立平, 鞠建廷, 等. 西藏纳木错东部湖水及入湖河流水化学特征初步研究[J]. 地理科学, 2009, **29**(2): 288-293.
Wang J B, Zhu L P, Ju J T, *et al.* Water chemistry of eastern Nam Lake area and inflowing rivers in Tibet[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, **29**(2): 288-293.
- [42] Yokoo Y, Nakano T, Nishikawa M, *et al.* Mineralogical variation of Sr-Nd isotopic and elemental compositions in loess and desert sand from the central Loess Plateau in China as a provenance tracer of wet and dry deposition in the northwestern Pacific[J]. Chemical Geology, 2004, **204**(1-2): 45-62.
- [43] 刘鑫, 向伟, 马小军, 等. 黄土高原中部浅层地下水化学特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(11): 5201-5209.
Liu X, Xiang W, Ma X J, *et al.* Hydrochemical characteristics and controlling factors of shallow groundwater in the Chinese Loess Plateau[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(11): 5201-5209.
- [44] 赵春红, 梁永平, 卢海平, 等. 娘子关泉域岩溶水 SO_4^{2-} 、 $\delta^{34}\text{S}$ 特征及其环境意义[J]. 中国岩溶, 2019, **38**(6): 867-875.
Zhao C H, Liang Y P, Lu H P, *et al.* Chemical characteristics and environmental significance of SO_4^{2-} and sulfur isotope in the karst watershed of the Niangziguan Spring, Shanxi Province[J]. Carsologica Sinica, 2019, **38**(6): 867-875.
- [45] 张江华, 梁永平, 王维泰, 等. 硫同位素技术在北方岩溶水资源调查中的应用实例[J]. 中国岩溶, 2009, **28**(3): 235-241.
Zhang J H, Liang Y P, Wang W T, *et al.* A practical use of ^{34}S in the investigation of karst groundwater resource in North China[J]. Carsologica Sinica, 2009, **28**(3): 235-241.
- [46] Zhou M, Li X P, Zhang M, *et al.* Water quality in a worldwide coal mining city: a scenario in water chemistry and health risks exploration[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2020, **213**, doi: 10.1016/j.gexplo.2020.106513.
- [47] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702-1703.

CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i>	(4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i>	(4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i>	(4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhai and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i>	(4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System	QIU Hao, LIU Dan-long, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i>	(4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i>	(4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong	(4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i>	(4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong	(4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i>	(4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i>	(4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i>	(4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i>	(4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru	(4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i>	(4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i>	(4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i>	(4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i>	(4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i>	(4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge: ARGs and Potential Hosts	ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i>	(4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i>	(4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i>	(4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i>	(4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils	CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i>	(4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island	YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i>	(4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i>	(4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i>	(4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i>	(4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i>	(4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i>	(4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region	SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i>	(4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i>	(4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao	(4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i>	(4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i>	(4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i>	(4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i>	(4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System	CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i>	(4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvio-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i>	(4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i>	(4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvio-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i>	(4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i>	(4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure	LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i>	(4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i>	(4789)