

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)
西安市PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹,史兴民 (3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪,王飞,孙业乐 (3022)
南京北郊秋季PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)
临安夏季霾和清洁天气PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)
盘锦市秋冬季节PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)
太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源	叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)
杭州地区大气CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)
典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征	景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)
地级市域工业VOCs排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例	胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)
青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价	郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)
轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究	黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇,卢新卫 (3126)
三峡库区主要河流秋季pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)
Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制	康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法	仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求	李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)
基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响	张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)
基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)
纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)
PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)
塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾,王文昌,李倩 (3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹,李玉友,裴梦富 (3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)
《环境科学》征订启事(3141)	
《环境科学》征稿简则(3202)	
信息(3229, 3433, 3451)	

泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素

寇永朝, 华琨, 李洲, 李志*

(西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘要: 为研究泾河支流(黑河流域)的水化学特征及其控制因素, 2014~2015 年先后采集枯水期及汛期地表水和地下水的水样 242 个, 综合运用 Piper 三线图、相关性分析和 Gibbs 图等方法, 分析了黑河流域水化学特征, 并探讨了黑河流域的水化学演化规律. 结果表明, 研究区水体均呈弱碱性, 2014 年枯水期地表水和地下水阳离子以 Na^+ 为主, 分别约占阳离子总量的 56% 和 58%; 阴离子以 SO_4^{2-} 为主, 分别约占地表水和地下水阴离子总量的 33% 和 39%; 其它 3 个时期主要地表水和地下水组成阴阳离子均以 HCO_3^- 和 Na^+ 为主, 约占阴离子和阳离子总量的 44%~46% 和 42%~56%. 枯水期地表水 TDS 在上中游波动较大, 汛期地表水和地下水的 TDS 由上游到下游沿河道逐渐增加. 由枯水期到汛期, 地表水的水化学类型由 Na-Mg-Cl-SO_4 型转变为 Ca-Mg-HCO_3 型, 地下水由 Mg-Cl-SO_4 型转变为 Ca-Na-HCO_3 型. 水化学样品点大部分分布在 Gibbs 图左中上部, 说明流域水化学离子形成主要受岩石风化和蒸发-浓缩作用的影响, 而人类活动对水化学的影响在枯水期较汛期更显著.

关键词: 水化学; 离子来源; 相关性分析; 地表水; 地下水

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3142-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201710202

Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River

KOU Yong-chao, HUA Kun, LI Zhou, LI Zhi*

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To study the hydrochemical characteristics of tributaries of the Jinghe River (Heihe River Basin) and their controlling factors, from 2014 to 2015, 242 samples of surface water and groundwater were collected during the dry and flood seasons from the Jinghe River. After determining the main water chemical ion content by comprehensively using correlation analysis, Piper three-line graphs, and Gibbs graph, the spatiotemporal changes in the hydrochemical characteristics of the Heihe River Basin were analyzed. The results showed that all the water samples in the study area were weakly alkaline. In the dry season of 2014, the cations in the surface water and groundwater were mostly Na^+ , accounting for 56% and 58% of the total cations, respectively. The anions were mainly SO_4^{2-} , accounting for 33% and 39% of the total anions, respectively. In the other three periods, the main cation and anion components were HCO_3^- and Na^+ , accounting for 44%-46% and 42%-56% of the corresponding totals, respectively. In the dry season, the TDS of surface water and groundwater gradually increases along the river from upstream to downstream. From the dry season to the flood season, the hydrochemical types of the surface water changed from Na-Mg-Cl-SO_4 to Ca-Mg-HCO_3 and of the groundwater from Mg-Cl-SO_4 to Ca-Na-HCO_3 . Most of the water chemistry samples were distributed in the middle and upper parts of the Gibbs diagram, indicating that the formation of hydrated chemical ions in the basin was mainly affected by rock weathering and evaporation-enrichment. However, the effects of human activities on water chemistry were more significant in the dry season than in the flood season.

Key words: hydro-chemistry; ion sources; correlation analysis; surface water; groundwater

河流的化学成分是水在循环过程中与周围环境相互作用的结果, 在水体的相互转化和运移过程中, 主要受控于地层岩性^[1]、地质地貌^[2]、海水入侵^[3]、人为作用^[4]等因素, 溶解物质伴随这些过程同步转化^[5], 因此分析水体的化学演化规律, 不仅能识别水体化学的控制因素, 更能科学有效地指导水资源的合理分配.

近年来随经济快速发展, 黄土高原的流域水资源供需矛盾日益严重, 对生态环境和社会经济的可持续发展造成巨大压力. 同时, 水化学成分已经成为影响人类生存和社会发展的重大问题而受到普遍

关注^[6]. 尽管水化学特征主要受自然地理环境影响, 但对地表水和地下水的高强度开发是近年水质演变的一个重要因素^[7]. 然而, 目前多数针对黄土高原流域尺度的研究都关注水量^[8,9], 对水质的分析较少. 少数研究分析了窟野河和渭河等流域的水化学特征, 但多为单次采样, 很难表征流域尺度水化学特征的时空变化, 不利于全面分析其水质特征和

收稿日期: 2017-10-25; 修订日期: 2017-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179161); 中央高校基本科研业务费专项(2452015105)

作者简介: 寇永朝(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境变化水文效应, E-mail: chao3096@126.com

* 通信作者, E-mail: lizhibox@126.com

管理水资源.

鉴于此, 2014~2015 年分别在枯水期和汛期采集地表水和地下水, 分析黑河流域不同水体的水化学组成, 阐明流域水化学特征和水化学形成原因, 以期为黄土高原流域水资源保护提供理论依据.

1 研究区概况

黑河流域是泾河一级支流(图 1), 位于黄土高原中南部, 全长 168 km, 流域面积 1 506 km², 流域高差较大, 地势特征西高东低, 海拔 911~2 459 m, 呈东西走向, 形状狭长. 属暖温带半湿润大陆性季风

气候, 多年平均降水量 555.7 mm, 年平均气温 9.4℃^[10]. 降水集中在 7~9 月, 降水量占全年的 55% 以上. 地貌属于典型的黄土高原沟壑区, 沟壑在基岩下深切, 塬面被沟壑分割开, 沟壑区由于暴雨、陡峭的地形, 较低的植被覆盖率导致严重的土壤侵蚀率. 水文地质自上而下分别是马兰黄土、离石黄土和午城黄土. 土壤主要是黑垆土和黄膳土, 地下水埋深 40~80 m^[11]. 研究区为典型的雨养农业区, 耕地、草地和林地是该区的主要土地利用方式, 分别占流域面积的 58%、36% 和 5%^[10, 12].

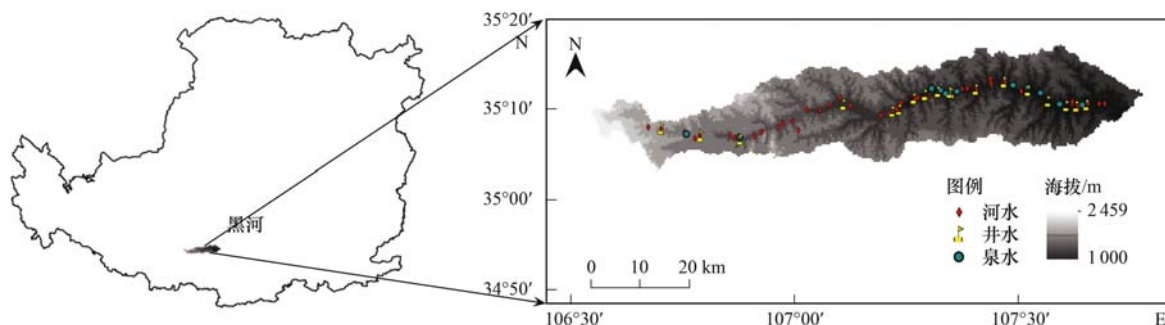


图 1 黑河流域采样点分布示意

Fig. 1 Sampling points in the Heihe River Basin

2 材料与方法

2.1 样品采集与测试

为综合考虑枯水期和汛期的差异, 样品采集选择每年 6 月(枯水期)和 9 月(汛期)各采集一次. 2014~2015 年共采集 4 次, 具体而言, 2014 年 6 月采集水样 51 个、2014 年 9 月采集水样 45 个、2015 年 6 月采集水样 88 个、2015 年 9 月水样 58 个. 水样包含地表水(河水)和地下水(泉水和井水). 采用便携式多参数仪(SG78-FK-CN, 梅特勒-托利多仪器上海有限公司)现场测定水样 pH、电导率(EC)和总溶解固体(TDS). 样品瓶提前清洗干净并干燥, 采集水样时, 将取样瓶用水样至少清洗 3 次. 取地表水时, 在水域中央采集, 将取样器浸入水面以下后打开盖子, 采集水面以下水样; 取地下水时, 让泵运转足够时间以抽出新鲜的地下水后收集; 采集泉水时, 先将取样瓶冲洗 3 次, 然后慢慢将水样充满取样瓶; 取样后, 确保样品瓶中不含气泡盖上盖子后用封口膜将瓶口封紧以使水样不外漏. 采集水样装入 150 mL 聚乙烯瓶中, 置于温度 0~4℃保存^[13].

使用美国 ThermoFisher Scientific 生产的电感耦合等离子发射光谱仪(ICAP-6300)测定阳离子(Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺), 检测限为 1 μg·L⁻¹; 采

用美国 ThermoFisher Scientific 生产的离子色谱仪(ICS-1100)测定阴离子(Cl⁻、SO₄²⁻和 NO₃⁻), 检测限为 1 mg·L⁻¹, 阴阳离子的测定误差一般低于 0.1%. 水样中 HCO₃⁻ + CO₃²⁻ 的含量采用离子平衡法计算得出^[14, 15].

2.2 数据分析方法

基于测定的水化学组成, 分析离子组成的总体特征及其时空变化, 探讨岩性对水体的主离子组成特征和变化的影响, 辨别其控制端元^[16]. 一般地, 在阴离子组成三角图中, 流经碳酸盐岩地区的河流以 HCO₃⁻ 为主导, 因此数据点均落在 HCO₃⁻ 组分一端; 流经蒸发盐岩地区的河流 Cl⁻ + SO₄²⁻ 含量较高, 其组分点落在 Cl⁻ + SO₄²⁻ 线上, 远离 HCO₃⁻ 一端. 在阳离子组成的三角图上, 主要受碳酸盐岩影响的河流, 其组分点会落在 Ca²⁺ + Mg²⁺ 线上, 靠近 Ca²⁺ 端元; 蒸发盐矿物风化产物则应偏向 Na⁺ + K⁺ 端元, 并依此划分水体的水化学类型. 分析水化学离子的相关性, 研究离子间的关系, 找出导致水体中某种或某几种离子异常增加或减少的因素, 揭示水体相似或相异性、来源的一致性和差异性^[17, 18].

利用 Gibbs 半对数坐标图了解流域水化学类型的特征及形成作用, 纵坐标为对数坐标, 表示河水中

溶解性离子 TDS 的总量;横坐标为普通坐标,用 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或者 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 的比值表示. Gibbs 图能直观反映河水主要组分趋于“降水控制类型”、“岩石风化类型”或“蒸发-浓缩类型”,定性地判断区域大气降水、岩石和蒸发浓缩作用等对水化学的影响^[19].

3 结果与分析

3.1 离子组成的时空变化

黑河流域水体 2014 ~ 2015 年主要离子组成特征见表 1. 地表水和地下水 pH 的均值分别为 8.6 和 7.7,均呈弱碱性. 枯水期和汛期的 TDS 均值,地表水分别为 $257.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $317.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,地下水为 $289.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $414.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在时间变化上,2014 年枯水期地表水和地下水阳离子含量为 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$,以 Na^+ 为主,分别约占地表水和地下水阳离子总量的 56% 和 58%;阴离子,地表水为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$,地下水为 $\text{SO}_4^{2-} >$

$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$,以 SO_4^{2-} 为主,分别约占地表水和地下水阴离子总量的 33% 和 39%. 2014 年汛期、2015 年枯水期及汛期地表水地下水阳离子大小均为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$,以 Na^+ 为主,约占阳离子总量的 42% ~ 56%,阴离子大小均为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$,以 HCO_3^- 为主,约占阴离子总量的 44% ~ 46%.

空间变化上,绘制黑河地表水、地下水从上游到下游沿流程的 TDS 变化图(图 2),从中可以看出,2014 年和 2015 年地表水枯水期在上游增加到一个峰值后下降,到中下游后 TDS 随河道延长缓慢增加;汛期地表水 TDS 总体由上游到下游缓慢增加[图 2(a)]. 分析地下水,2014 年和 2015 年枯水期 TDS 变化与相应时期地表水的变化不同,表现为由上游到下游整体随着河道增加,表明在枯水期地表水和地下水之间联系不密切. 汛期地下水整体变化与相应地表水类似[图 2(b)]. 也从侧面说明流域地表水地下水交换比较频繁^[20].

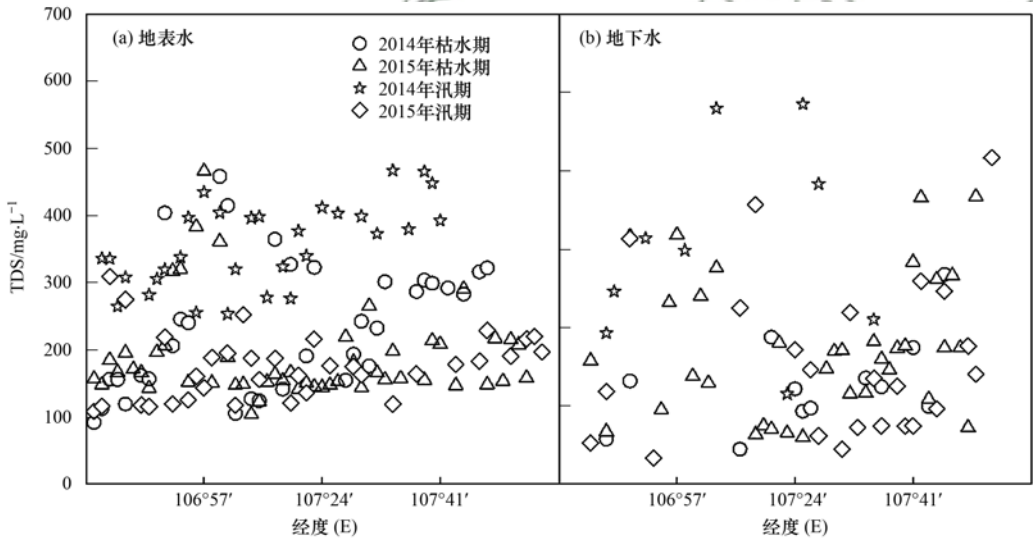


图 2 2014、2015 年地表水/地下水 TDS 在枯水期/汛期的空间变化

Fig. 2 Spatial variation of surface water and groundwater TDS during the dry and flood seasons in 2014 and 2015

表 1 黑河流域地表水/地下水水化学参数统计

Table 1 Statistics of surface water/groundwater hydrochemical parameters in the Heihe River Basin

时期	项目	pH	TDS /mg·L ⁻¹	主要离子浓度/mg·L ⁻¹						
				SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
枯水期	平均值	8.5/7.6	257.3/289.4	79.9/66.8	20.6/25.4	80.5/96.3	33.8/41.3	28.0/35.2	67.2/78.8	2.5/1.7
	标准差	0.2/0.2	128.8/88	50.5/38.2	15.5/17.7	64.9/61.0	22.1/22.2	9.0/12.4	39.1/32.6	1.9/1.2
汛期	平均值	8.6/7.7	317.4/414.7	104.9/124.3	19.0/30.5	321.8/287.0	47.4/52.8	28.6/34.3	62.5/82.6	2.7/2.1
	标准差	0.2/0.2	107.1/175.3	41.0/70.3	13.2/26.7	64.3/81.7	36.9/30.4	8.0/12.8	42.1/39.3	2.6/2.1

3.2 地表水地下水的相互作用

流域枯水期及汛期地下水主要阴阳离子浓度普遍高于地表水,印证了水体与可溶性矿物接触时间

越长,其 TDS 越高的规律^[21]. 如图 3 所示,枯水期地表水与地下水的离子浓度差别较小,汛期则差别相对较大,这也进一步说明了汛期由于降水增多,径

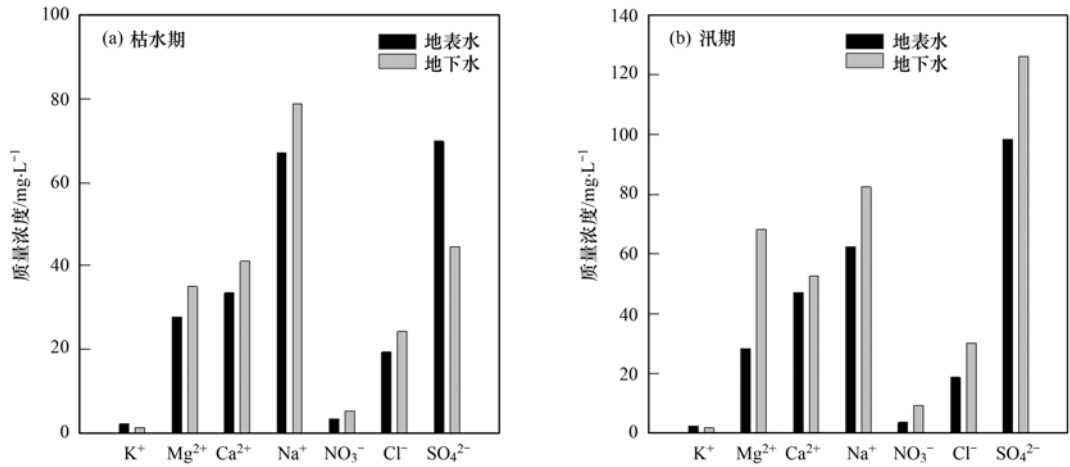


图3 泾河支流地表水-地下水主要离子含量比较

Fig. 3 Comparison of the main ionic contents of surface water and groundwater in the Jinghe River tributaries

流量增大对地表水水化学特征有较大的影响. 总体而言, 枯水期和汛期地表水都受地下水的补给, 但枯水期补给量小于汛期, 因此所补给地表水离子浓度也较小.

3.3 离子组成的类型和来源

3.3.1 离子组成特征

图4为地表水和地下水主要离子的Piper三线图. 枯水期阳离子, 地表水和地下水的离子分布相对分散, 表明地表水地下水联系不密切. Na^+ 和 Mg^{2+} 是地表水和地下水的主控离子. 阴离子, 地表水和地下水的离子分布特征与阳离子相似, 主控离子为 SO_4^{2-} 和 Cl^- . 地表水的水化学类型为 Na-Mg-Cl-SO_4 型, 而地下水的水化学类型为 Mg-Cl-SO_4 型.

汛期地表水和地下水的水化学离子分布在菱形区域接近 $\text{Na} + \text{K}$ 和 Mg 线, 分布较为集中, 说明离子来源较为一致, 联系相对密切. 阳离子, 地表水的主控离子 Na^+ 和 Mg^{2+} ; 地下水的主控离子为 Na^+ 和 Ca^{2+} . 阴离子, HCO_3^- 为其主控离子, 也表明这些水样的离子来源一致, 可能源于方解石 (CaCO_3) 或白云石 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 等碳酸盐的溶解. 地表水和地下水的水化学类型分别为 Ca-Mg-HCO_3 型和 Ca-Na-HCO_3 型.

比较汛期, 枯水期地表水的阳离子中 Na^+ 含量升高, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量基本稳定; 地下水中 Na^+ 、 Ca^{2+} 含量下降, Mg^{2+} 含量较为稳定; 阴离子方面, 地表水和地下水的 HCO_3^- 含量均上升, Cl^- 下降而 SO_4^{2-} 保持相对稳定.

3.3.2 离子的来源

对地表水和地下水的离子含量做相关分析, 结果见表2. 流域地层中, 常见的矿物盐为硅酸盐、

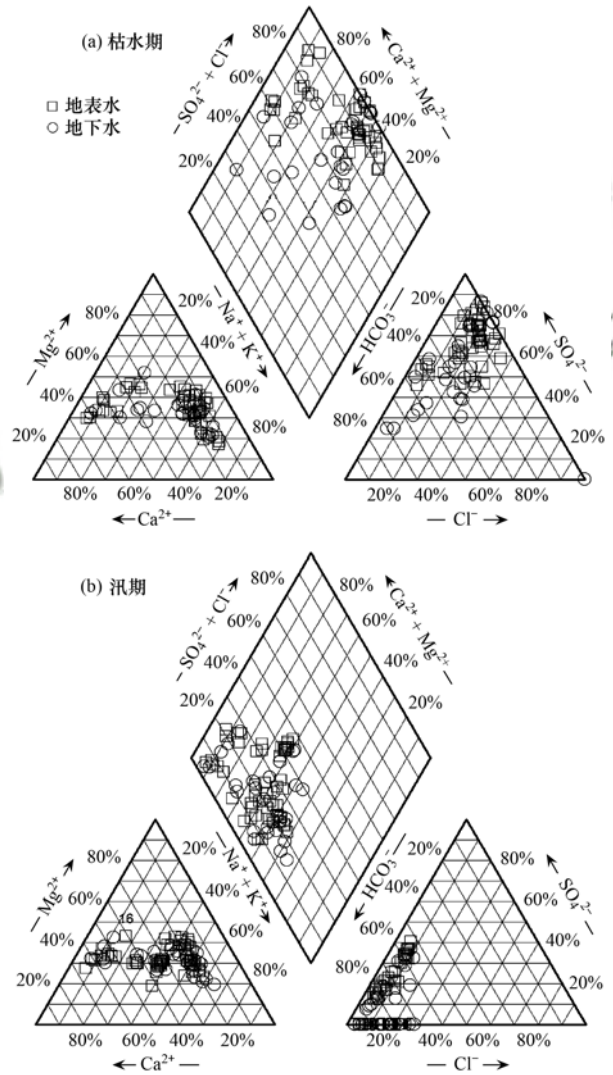


图4 黑河流域水样Piper图

Fig. 4 Piper diagram for the Heihe River Basin

碳酸岩盐. 蒸发岩盐对地下水的水化学组分同样具有重要影响. 枯水期地表水(表2)总溶解性固体

TDS 除与 NO_3^- 呈负相关外,与其他各离子都呈现不同程度的正相关. 离子间, Na^+ 和 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 、 Na^+ 和 HCO_3^- 显著相关,据此表明枯水期地表水中的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 主要来自石膏、高镁方解石、钠长石的溶解,其中 HCO_3^- 来自方解石的溶解;汛期, Na^+ + K^+ 和 HCO_3^- 、 Ca^{2+} + Mg^{2+} 和 HCO_3^- 显著相关,表明地表水中的离子主要来自白云石、钠长石的溶解^[20].

枯水期地下水(表 2)总溶解性固体 TDS 除与 Mg^{2+} 呈负相关外,与各离子都呈不同程度的正相关. 离子间, Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 、 K^+ 和 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 显著相关,据此推断 Ca^{2+} 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 来自石膏,白云石以及地表水溶滤作用;汛期地下水 Na^+

和 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 、 K^+ 和 HCO_3^- 显著相关,与同时期地表水离子相关性类似,表明地下水中的离子主要来自白云石及地表水的溶滤作用.

汛期地表水地下水的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的相关性都大于对应枯水期时的相关性,表明在汛期岩盐溶解的速率大于枯水期. 其中地表水 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的相关性小于 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 的相关性,表明地表水中溶解的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 HCO_3^- 主要来自白云石的溶解,其次是方解石;枯水期地下水 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的相关性略大于 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 的相关性,而汛期地下水 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的相关性远大于 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 的相关性(在相似条件下,白云石的初始溶解速率只有方解石的 1/3 ~ 1/60),地下水体中 Ca^{2+} 含量大于 Mg^{2+} 的含量还因为地表水的溶滤作用^[22].

表 2 枯水期/汛期地表水地下水水化学参数相关系数分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis of dry season and flood season groundwater chemical parameters

枯水期 地表水/地下水	TDS	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-
TDS	1/1								
K^+	0.21*/0.757**	1/1							
Na^+	0.86**/0.37*	0.11/0.30*	1/1						
Ca^{2+}	0.61**/0.76**	0.42**/0.61**	0.26*/-0.20	1/1					
Mg^{2+}	0.28**/-0.28	-0.78**/-0.75**	0.33*/-0.13	-0.13/-0.33*	1/1				
Cl^-	0.51**/0.61**	-0.48**/0.27	0.50**/-0.12	-0.07/0.66**	0.72**/0.09	1/1			
SO_4^{2-}	0.86**/0.73**	0.42**/0.66**	0.68**/0.27	0.69**/0.63**	-0.02/-0.31*	0.21/0.34*	1/1		
HCO_3^-	0.63**/0.58**	0.02/0.19	0.69**/0.37*	0.34**/0.29**	0.44**/0.28	0.28**/0.49**	0.49**/0.37*	1/1	
NO_3^-	-0.11/0.02	0.40**/0.13	-0.22*/-0.10	0.07/-0.04	-0.42**/-0.28	-0.28**/-0.21	-0.40**/-0.47**	-0.259*/-0.36*	1/1
汛期 地表水/地下水	TDS	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-
TDS	1/1								
K^+	0.75**/0.83**	1/1							
Na^+	0.72**/0.62**	0.75**/0.55**	1/1						
Ca^{2+}	0.70**/0.65**	0.52**/0.71*	0.50**/0.10	1/1					
Mg^{2+}	0.74**/0.04	0.54**/0.08	0.72**/-0.38*	0.92**/0.45**	1/1				
Cl^-	0.29*/0.14	-0.18/0.39*	-0.05/0.25	-0.12/0.36*	-0.07/0.02	1/1			
SO_4^{2-}	0.67**/0.65**	0.42**/0.50**	0.30*/0.25	0.38**/0.47**	0.33**/0.18	-0.44**/0.34*	1/1		
HCO_3^-	0.78**/0.74**	0.75**/0.85**	0.92**/0.65**	0.56**/0.56**	0.72**/0.01	-0.05/0.44**	0.44**/0.34*	1/1	
NO_3^-	0.28*/0.69**	0.01/0.39*	-0.16/0.34*	-0.12/0.26	-0.14/-0.13	-0.23/0.01	-0.08/0.08	-0.14/0.32*	1/1

1) ** 表示在 0.01 水平上线性相关, * 表示在 0.05 水平上线性相关

3.4 水化学类型的形成作用

将地表水数据绘于 Gibbs 图中(图 5). 枯水期,大部分水样的水化学组成分布在 Gibbs 图内,另有部分水样在 Gibbs 图外,说明河水水化学组分受到一定程度的人为干扰. 大多数水样的 TDS 含量在 100 ~ 1 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,落在 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或者 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值范围内,部分受岩石风化作用的影响,都在 TDS 低值区;部分由于蒸发作用,离子含量较高,位于 TDS 的高值区. 总体来

看,岩石风化作用对水化学离子组成的影响更为显著. 地表水 Cl/Na 值平均为 0.3,远低于世界平均海水比值($\text{Cl}/\text{Na} = 1.15$),表明大气环流所携带的海盐在枯水期对黑河流域水离子组分贡献非常小^[23].

汛期(图 5),多数水样的水化学参数都落在 Gibbs 图内,表明汛期的径流及降水增多降低了人类活动的影响程度. 落在 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或者 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值范围内的水化学参数,处于中上部,属于岩石风化和蒸发-浓缩共同作用的结

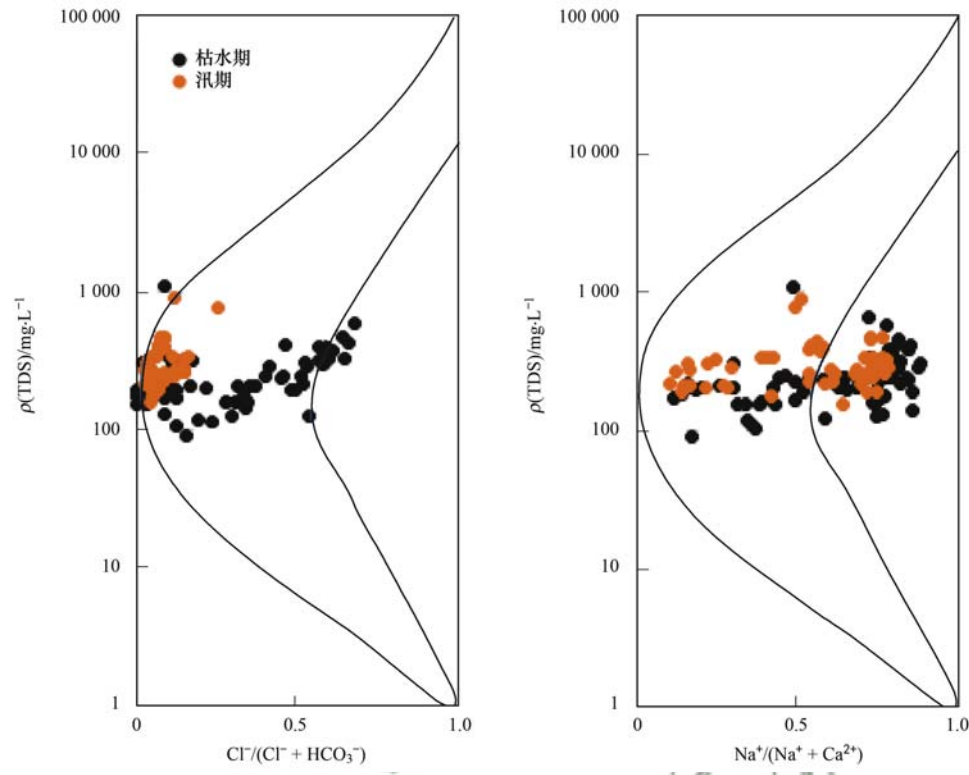


图5 枯水期/汛期 Gibbs 图
Fig. 5 Gibbs charts for the dry season and the flood season

果；总体上落在岩石风化区的数据较多,所以岩石风化对水化学离子参数组成影响更为显著. 汛期地表水的 Cl/Na 值平均为 0.3, 大气环流所携带的海盐对流域水离子组分的贡献与枯水期类似.

4 讨论

4.1 人类活动对水化学特征的影响

泾河支流水样的 TDS 整体高于中国其它大的河流以及全球河流平均水平^[24]. 其离子主要来源于岩石风化,而大气输入和人为输入占少部分. 虽然人类活动对直接增加离子含量的作用很小,但是能够直接改变地表水流量进而影响离子含量. 例如, 1958 ~ 2000 年黄土高原流域 TDS 有增加的趋势,这个变化趋势与径流量的减少相一致^[25]. 该区的一些人类活动可能会导致流域地表水地下水的离子浓度有一定的变化.

一般而言,河流从上游到下游随着蒸发作用的持续,地表水的 TDS 会增大^[26]. 但枯水期 TDS 在上游增加达到峰值,中下游后地表水主离子浓度变化相对平缓,主要原因是上游有煤矿厂,洗煤对地表水造成一定程度的污染. 但由上游到下游,中下游径流量不断增大以及蒸发量增大,两者相互作用,导致中下游浓度随着河道的延长基本变化幅度不大. 表

明黑河流域虽然受到一定程度人为活动的影响,但是总体上较为稳定. 汛期地表水 TDS 随着河道运移轻微增加,整体变化不大,表明在汛期水体的抗干扰较枯水期增强. 地下水,枯水期和汛期变化由上游到下游沿河道略微增加,整体变化不明显,而出现在枯水期地表水上游人为干扰的情况在同时期地下水并没有出现,表明此段地表水地下水联系不密切,且人类活动对地下水的影响较小.

4.2 水岩作用对水化学组成特征的影响

水体中元素来源主要包括: 物质的溶解沉淀、大气干湿沉降、生物作用以及人为物质输入等^[27]. 在研究区内由于水岩相互作用以及蒸发浓缩作用使得水中离子变化多样,水体化学类型也随之变化. 图 3 可以看出,枯水期靠近硫酸岩盐溶解端,汛期靠近碳酸岩盐溶解端,显现明显,表明水岩作用程度高. 枯水期到汛期,地表水地下水离子组成变化大,地表水水化学类型由 Na-Mg-Cl-SO_4 型转变为 Ca-Mg-HCO_3 型,地下水由 Mg-Cl-SO_4 型转变为 Ca-Na-HCO_3 型,是由于枯水期径流量及降水量减少,地表水被稀释作用影响较小,同时受到人为活动如生活污水和放养牲畜的影响较大,其中汛期,地表水和地下水的主控阳离子均为 Ca^{2+} ,阴离子均为 HCO_3^- ,这与黄河干流主控阳离子为 Ca^{2+} ,阴离子为 HCO_3^-

一致^[28]。汛期径流量和降水的增加稀释了人为因素对水体造成的影响。

4.3 季节性差异对水化学特征的影响

本研究区降雨量集中,且具有明显的季节性差异,枯水期地表水离子主要来源于石膏、高镁方解石、钠长石以及人为活动的影响;汛期主要来自高镁方解石、钠长石的溶解,枯水期的离子来源较汛期更为多样,原因为汛期地表径流及降雨量的增加对地表水起到了一定的稀释作用^[29, 30]。Gibbs 图中,控制河水水化学组成的主导因素为岩石风化作用;但由于流域处于西北干旱地区,蒸发作用也对该区的水化学特征起到了重要的作用。流域不同时期(枯水期、汛期)的水化学组成的差异受降雨量、地表径流和蒸发量的主导作用,人为活动也对其有一定影响,尤其是枯水期人类活动的影响相对增大。

5 结论

(1)黑河流域地表水地下水 pH 值均值分别为 8.6、7.7,整个流域水均呈弱碱性。4 个时期优势阳离子均为 Na^+ ,占阳离子总量范围在 42%~56%;2014 年枯水期优势阴离子为 SO_4^{2-} ,占阴离子总量范围为 33%~39%,其他时期均为 HCO_3^- ,占比范围为 44%~46%。地表水 TDS 均值 $287.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,地下水均值为 $352 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均为低矿化度水。

(2)地表水地下水主离子在年内变化较大,地表水的水化学类型由枯水期 Na-Mg-Cl- SO_4 型转变到汛期的 Ca-Mg- HCO_3 型,地下水由 Mg-Cl- SO_4 型转变为 Ca-Na- HCO_3 型。

(3)枯水期地表水中的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 主要来自石膏、高镁方解石、钠长石的溶解,其中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 来自方解石的溶解,汛期地表水中的离子主要来自高镁方解石、钠长石的溶解。而两个时期地下水主要来自石膏、白云石及地表水的溶滤作用。

(4)黑河流域地表水总体受岩石风化和蒸发-浓缩作用的影响,大气环流携带的降水对其影响较小,人为活动也对其有一定影响,尤其是枯水期人类活动的影响相对增大。

参考文献:

- [1] Wang W K, Duan L, Yang X T, *et al.* Shallow groundwater hydro-chemical evolution and simulation with special focus on Guanzhong basin, China [J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2013, **12**(7): 1447-1455.
- [2] 荆秀艳,王文科,张福存,等. 银北平原浅层地下水的水化学特征及成因分析[J]. *人民黄河*, 2012, **34**(1): 65-68, 71.
- [3] Moussa A B, Zouari K, Marc V. Hydrochemical and isotope evidence of groundwater salinization processes on the coastal plain of hammamet-nabeul, North-eastern Tunisia [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2011, **36**(5-6): 167-178.
- [4] 沈照理,朱宛华,钟佐桑. 水文地球化学基础[M]. 北京:地质出版社,1993. 110-130.
- [5] 蒲焱,何元庆,朱国锋,等. 丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 48-54. Pu T, He Y Q, Zhu G F, *et al.* Geochemistry of surface and ground water in the Lijiang Basin, Northwest Yunnan [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(1): 48-54.
- [6] Thomas J, Joseph S, Thirivikramji K P, *et al.* Seasonal variation in major ion chemistry of a tropical mountain river, the southern Western Ghats, Kerala, India [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(5): 2333-2351.
- [7] 刘蔚,王涛,高晓清,等. 黑河流域水体化学特征及其演变规律[J]. *中国沙漠*, 2004, **24**(6): 755-762. Liu W, Wang T, Gao X Q, *et al.* Distribution and evolution of water chemical characteristics in Heihe river basin [J]. *Journal of Desert Research*, 2004, **24**(6): 755-762.
- [8] Li Z, Lin X Q, Coles A E, *et al.* Catchment-scale surface water-groundwater connectivity on China's loess plateau [J]. *CATENA*, 2017, **152**: 268-276.
- [9] 刘文杰,苏永中,杨荣,等. 民勤地下水水化学特征和矿化度的时空变化[J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 2911-2917. Liu W J, Su Y Z, Yang R, *et al.* Hydrochemical characteristics and spatial-temporal variation of mineralization for the groundwater in Minqin Oasis [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(10): 2911-2917.
- [10] 李志,刘文兆,郑粉莉. 基于 CA-Markov 模型的黄土塬区黑河流域土地利用变化[J]. *农业工程学报*, 2010, **26**(1): 346-352. Li Z, Liu W Z, Zheng F L. Land use change in Heihe catchment on loess tableland based on CA-Markov model [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, **26**(1): 346-352.
- [11] 程立平,刘文兆. 黄土塬区几种典型土地利用类型的土壤水稳定同位素特征[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(3): 651-658. Cheng L P, Liu W Z. Characteristics of stable isotopes in soil water under several typical land use patterns on Loess Tableland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(3): 651-658.
- [12] 李志,刘文兆,王秋贤. 黄土塬区不同地形部位和土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(6): 1303-1308. Li Z, Liu W Z, Wang Q X. Effects of land use type and slope position on soil physical properties in loess tableland area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(6): 1303-1308.
- [13] 哈希公司. 水质分析实用手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2010. 12-15.
- [14] Mitamura O, Seike Y, Kondo K, *et al.* First investigation of

- ultraoligotrophic alpine lake puma yumco in the pre-himalayas, China[J]. *Limnology*, 2003, **4**(3): 167-175.
- [15] 陈静生, 陶澍, 邓宝山, 等. 水环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987. 48-60.
- [16] 唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 等. 锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 131-142.
- Tang X W, Wu J K, Xue L Y, *et al.* Major ion chemistry of surface water in the Xilin river basin and the possible controls[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 131-142.
- [17] 胡春华, 童乐, 万齐远, 等. 环鄱阳湖浅层地下水水化学特征的时空变化[J]. *环境化学*, 2013, **32**(6): 974-979.
- Hu C H, Tong L, Wan Q Y, *et al.* Spatial and temporal variation of shallow groundwater chemical characteristics around Poyang Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(6): 974-979.
- [18] 孙斌. 多元统计方法在鄂尔多斯白垩系盆地都思免河地下水系统水化学空间分布规律研究中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [19] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [20] 张涛, 蔡五田, 李颖智, 等. 尼洋河流域水化学特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4537-4545.
- Zhang T, Cai W T, Li Y Z, *et al.* Major ionic features and their possible controls in the Water of the Niyang River Basin[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4537-4545.
- [21] 朱秉启, 杨小平. 塔克拉玛干沙漠天然水体的化学特征及其成因[J]. *科学通报*, 2007, **52**(13): 1561-1566.
- Zhu B Q, Yang X P. The ion chemistry of surface and ground waters in the Taklimakan Desert of Tarim Basin, western China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(15): 2123-2129.
- [22] 文泽伟, 汝旋, 谢彬彬, 等. 龙江-柳江-西江流域的水化学特征及其成因分析[J]. *环境化学*, 2016, **35**(9): 1853-1864.
- Wen Z W, Ru X, Xie B B, *et al.* Characteristics and sources analysis of hydrochemistry in the Longjiang-Liujiang-Xijiang watershed[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(9): 1853-1864.
- [23] 王鹏, 尚英男, 沈立成, 等. 青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 874-881.
- Wang P, Shang Y N, Shen L C, *et al.* Characteristics and evolution of hydrochemical compositions of freshwater lake in Tibetan Plateau[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 874-881.
- [24] Xiao J, Zhang F, Jin Z D. Spatial characteristics and controlling factors of chemical weathering of loess in the dry season in the middle loess plateau, China[J]. *Hydrological Processes*, 2016, **30**(25): 4855-4869.
- [25] 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.
- [26] 郭巧玲, 熊新芝, 姜景瑞. 窟野河流域地表水-地下水的水化学特征[J]. *环境化学*, 2016, **35**(7): 1372-1380.
- Guo Q L, Xiong X Z, Jiang J R. Hydrochemical characteristics of surface and ground water in the Kuye river basin[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(7): 1372-1380.
- [27] Verma S, Mukherjee A, Choudhury R, *et al.* Brahmaputra river basin groundwater: solute distribution, chemical evolution and arsenic occurrences in different geomorphic settings[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2015, **4**: 131-153.
- [28] 陈静生, 王飞越, 何大伟. 黄河水质地球化学[J]. *地学前缘*, 2006, **13**(1): 58-73.
- Chen J S, Wang F Y, He D W. Geochemistry of water quality of the Yellow River basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, **13**(1): 58-73.
- [29] Gibbs R J. Water chemistry of the Amazon river[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1972, **36**(9): 1061-1066.
- [30] Gordeev V V, Sidorov I S. Concentrations of major elements and their outflow into the Laptev sea by the Lena river[J]. *Marine Chemistry*, 1993, **43**(1-4): 33-45.

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i>	(3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min	(3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le	(3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i>	(3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i>	(3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i>	(3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun	(3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i>	(3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i>	(3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i>	(3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i>	(3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can	(3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i>	(3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun	(3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i>	(3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei	(3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue	(3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i>	(3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i>	(3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i>	(3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i>	(3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i>	(3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i>	(3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i>	(3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i>	(3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i>	(3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i>	(3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i>	(3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i>	(3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i>	(3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i>	(3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i>	(3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang	(3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i>	(3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping	(3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i>	(3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i>	(3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i>	(3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i>	(3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i>	(3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i>	(3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i>	(3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i>	(3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i>	(3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i>	(3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i>	(3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i>	(3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian	(3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu	(3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i>	(3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i>	(3460)