

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5

第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁吴璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓿(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布

黄丽¹, 张心昱^{1,2*}, 袁国富^{1,2}, 朱治林^{1,2}, 唐新斋¹, 孙晓敏^{1,2*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190)

摘要: 选择中国生态系统研究网络(CERN)和国家生态系统观测研究网络(CNERN)中的33个陆地生态站水化学监测数据, 分析了2010~2015年我国典型陆地生态系统地下水、静止地表水和流动地表水水化学离子特征及空间分布。结果表明, 水中主要阴离子质量浓度为: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-}$, 以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主, 在地下水、静止地表水、流动地表水中 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 之和分别约占阴离子总量的71.7%、75.3%和74.9%; 阳离子以 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主, 两者之和分别约占阳离子总量的69.7%、64.8%和68.9%。不同生态区域水体离子浓度和离子比例差异较大, 水化学类型有地带性差异, 即西北干旱半干旱区、东部黄淮海平原区生态系统地下水水化学类型以 $\text{Na-Mg-SO}_4\text{-Cl}$ 型为主, 且水体矿化度较高; 亚热带红壤丘陵区地下水水化学类型以 $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$ 型为主, 地表水以 $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ 型为主; 南亚热带丘陵赤红壤区地下水水化学类型以 $\text{Na-Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ 型为主; 其它生态系统水化学类型以 Ca-HCO_3 型和 Ca-Mg-HCO_3 为主。地下水、静止地表水和流动地表水的水化学类型年际间无明显变化。

关键词: 典型陆地生态系统; 地下水; 静止地表水; 流动地表水; 水化学类型; 主要离子

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2086-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809040

Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China

HUANG Li¹, ZHANG Xin-yu^{1,2*}, YUAN Guo-fu^{1,2}, ZHU Zhi-lin^{1,2}, TANG Xin-zhai¹, SUN Xiao-min^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The water chemistry data monitored during 2010-2015 by 33 terrestrial ecological stations from the Chinese Ecosystem Research Network (CERN) and the National Ecosystem Research Network of China (CNERN) were used to characterize ion concentrations and their spatial variability in underground water, still surface water, and flowing surface water from typical terrestrial ecosystems. The results showed the presence of mass-based concentrations of major anions, including $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-}$. Among them, HCO_3^- and SO_4^{2-} were dominant, and their sums accounted for 71.7%, 75.3%, and 74.9% of the total anions in underground water, still surface water, and flowing surface water, respectively. Cations were mainly Ca^{2+} and Na^+ , and their sums accounted for 69.7%, 64.8%, and 68.9% of the total cations in underground water, still surface water, and flowing surface water, respectively. The ion concentration and ion ratio in the underground water, still surface water, and flowing surface water differed largely among the studied regions. The hydrochemical type varied regionally, e. g., $\text{Na-Mg-SO}_4\text{-Cl}$ type, usually with high content of salinity, was found in the underground water of ecological systems in the Northwest arid and semiarid areas and in the East Huanghuaihai Plain; $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$ type in underground water and $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ type in surface water were found in hilly areas with subtropical red soil; $\text{Na-Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ type was present in underground water of south hilly areas with subtropical latosolic red soil; and Ca-HCO_3 and Ca-Mg-HCO_3 types were found in other ecological systems. Hydrochemical types had low inter-annual variation for both underground water and surface water.

Key words: typical terrestrial ecosystem; underground water; still surface water; flowing surface water; hydrochemistry type; major ion

天然水体中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 这8种离子总量约占天然水溶质总量的95%~99%^[1], 是水质监测的重要指标, 也是水化学特征研究的主要离子。目前对水化学特征的研究主要是在某一流域或地区的地下水、湖泊和河流开展, 水体中主要离子成分常用来分析流域水化学控制因素、物质来源、分布特征及演变规律等^[2-8]。对长江^[9]、黄河^[10]、尼洋河^[11]、沁河^[12,13]、拉萨河^[14]、大溶江^[15]、呼伦湖^[16]、疏勒河^[17]等不同流域水化学离子含量进行分析, 认为

水体离子组成主要受风化作用、蒸发-结晶、侵蚀、大气降水、人类活动等因素的影响, 且离子间存在一定的关系。研究水体化学离子特征对于正确理解河流流域内地表水和地下水的补给关系、水离子组成和来源具有重要意义^[17-19]。

水质监测对水环境保护、水污染控制以及维护

收稿日期: 2018-09-05; 修订日期: 2018-11-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0503801)

作者简介: 黄丽(1986~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境化学分析, E-mail: huangli@igsrr.ac.cn

* 通信作者, E-mail: zhangxy@igsrr.ac.cn; sunxm@igsrr.ac.cn

水环境健康方面的环境管理、环境科学研究提供数据和资料。水环境是陆地生态系统主要的环境因子，是影响陆地生态系统结构和功能的重要因素^[20]。中国生态系统研究网络(CERN)和国家生态系统观测研究网络(CNERN)开展水环境的生态观测，已有对不同生态系统的水质特征如 pH、矿化度^[21]、硝态氮^[22,23]、总氮^[24]、总磷^[25]等的分析研究，然而尚未开展典型生态系统水化学特征的分析。

本研究利用 CERN 和 CNERN 中的 33 个陆地生态站 2010~2015 年地下水、静止地表水、流动地表水水质 8 种离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^-)、pH 及矿化度的监测数据，

分析其水的化学类型及在我国的空间分布特征，以期对未来水体水化学特征变化趋势分析和监测提供依据和建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究利用 33 个生态站监测数据，包括农田生态系统 13 个，森林生态系统 10 个，荒漠生态系统 7 个，草地生态系统 2 个，湿地生态系统 1 个，其中地下水统计 31 个生态系统、静止地表水统计 17 个生态系统、流动地表水统计 29 个生态系统，各生态站的基本信息见表 1。

表 1 我国典型陆地生态系统生态站基本情况^[25,26]

Table 1 Distribution of typical ecosystem ecological stations in China								
生态区类型	生态站	代码	生态系统类型	经纬度	主要土壤类型	年降雨量/mm	地貌类型	水类型 ¹⁾ (数据个数)
中温带亚湿润地区	三江	SJM	湿地	133°31'E, 47°35'N	草甸沼泽土	600	三江平原沼泽湿地	DX(42) JB(10) LB(11)
	长白山	CBF	森林	128°28'E, 42°24'N	暗棕壤	600~900	长白山脉	DX(12) LB(8)
	海伦	HLA	农田	126°38'E, 47°26'N	黑土	500~600	松嫩平原	LB(11)
	沈阳	SYA	农田	123°22'E, 41°31'N	潮棕壤	650~700	辽河平原	DX(18) JB(21) LB(24)
中温带半干旱地区	奈曼	NMD	荒漠	120°42'E, 42°55'N	风沙土	365	蒙古高原与东北平原西部过渡区	DX(16) LB(5)
	内蒙古	NMG	草地	116°42'E, 43°38'N	暗栗钙土	350	锡林郭勒草原	DX(16) LB(17)
	鄂尔多斯	ESD	荒漠	110°11'E, 39°29'N	风沙土	358	鄂尔多斯高原毛乌素沙地	DX(6) LB(5)
	安塞	ASA	农田	109°19'E, 36°51'N	黄绵土	500	黄土高原黄土丘陵沟壑区	DX(36) LB(47)
暖温带亚湿润地区	北京	BJF	森林	115°26'E, 39°58'N	山地棕壤	650	太行山脉小五台山余脉	DX(23) LB(6)
	荣城	LCA	农田	114°41'E, 37°53'N	潮褐土	537	黄淮海平原	DX(12)
	禹城	YCA	农田	116°34'E, 36°49'N	潮土-盐化潮土	582	黄淮海平原	DX(53) LB(33)
	商丘	SQA	农田	115°34'E, 34°35'N	潮土	708	黄淮海平原	DX(8) LB(3)
	长武	CWA	农田	107°40'E, 35°12'N	黑垆土	580	黄土高原沟壑区	DX(33) JB(55) LB(9)
北亚热带湿润地区	常熟	CSA	农田	120°42'E, 31°33'N	水稻土	1 316	长江三角洲腹地	DX(19) JB(12) LB(21)
	桃源	TYA	农田	111°27'E, 28°55'N	红壤	1 440	亚热带红壤丘陵	DX(7) JB(9) LB(23)
中亚热带湿润地区	神农架	SNF	森林	110°18'E, 31°28'N	棕壤	1 306~1 722	秦巴山地	DX(12) JB(44) LB(19)
	盐亭	YGA	农田	105°27'E, 31°16'N	石灰性紫色土	826	四川盆地丘陵区	DX(118) JB(69) LB(69)
	会同	HTF	森林	109°30'E, 26°48'N	山地黄壤	1 200~1 400	湘西南丘陵	DX(23) JB(5) LB(6)
	茂县	MXF	森林	103°54'E, 31°42'N	褐土、棕壤	825	高山峡谷	DX(11) LB(13)
	贡嘎	GGF	森林	101°59'E, 29°34'N	棕色针叶林土	1 758~2 175	青藏高原东缘, 冰川地貌, 高山深谷	DX(6) LB(39)
南亚热带湿润地区	环江	HJA	农田	108°19'E, 24°43'N	棕色石灰土	1 389	喀斯特峰丛洼地	DX(8) JB(10) LB(20)
	鹤山	HSF	森林	112°54'E, 22°41'N	赤红壤	1 700	南亚热带丘陵	DX(5) JB(7) LB(3)
热带湿润地区	哀牢山	ALF	森林	101°01'E, 24°32'N	暗黄棕壤	1 931	云贵高原亚热带山地	DX(5)
	西双版纳	BNF	森林	101°16'E, 21°55'N	红壤	1 557	河谷平坝, 丘陵	DX(13) JB(12) LB(49)
中温带干旱地区	沙坡头	SPD	荒漠	104°57'E, 37°27'N	风沙土	186	干旱沙漠	DX(2) LB(6)
	民勤	MQD	荒漠	102°59'E, 38°34'N	风沙土	114	阿拉善高原半荒漠	DX(16)
	临泽	LZD	荒漠	100°07'E, 39°21'N	风沙土	117	黑河流域中游走廊平原	DX(9) JB(9) LB(7)
	阜康	FKD	荒漠	87°45'E, 44°30'N	风沙土	164	荒漠绿洲	DX(20) JB(5) LB(2)
青藏高原温带半干旱地区	海北	HBG	草地	101°19'E, 37°37'N	草毡土	426~860	青藏高原山间滩地	DX(16) JB(13) LB(5)
青藏高原温带湿润、亚湿润地区	林芝	LZF	森林	94°42'E, 29°39'N	棕壤	1 134	喜马拉雅山脉和念青唐古拉山脉交汇	JB(2) LB(34)
青藏高原温带半干旱地区	拉萨	LSA	农田	91°20'E, 29°40'N	潮土	425	喜马拉雅山脉北侧, 拉萨河中游河谷平原	DX(7) LB(4)
暖温带干旱地区	阿克苏	AKA	农田	80°51'E, 40°37'N	盐化潮土	45.7	平原荒漠—绿洲区	DX(7) JB(18) LB(16)
	策勒	CLD	荒漠	80°43'E, 37°00'N	风沙土	37	塔克拉玛干沙漠南缘策勒绿洲	DX(20) JB(7)

1) DX 表示地下水, JB 表示静止地表水, LB 表示流动地表水

1.2 研究方法

各典型陆地生态系统依据文献[20, 27]布置采样点, 统一监测方法, 参照规范中的国标方法进行样品分析. 每个生态站对该地区所在的典型陆地生态系统的流动地表水、静止地表水、地下水进行定位监测, 每年干湿季节至少采集 2 次样品, 分析指标包括 pH、矿化度及 8 种主要离子等.

为保证水质监测数据质量, 对数据进行准确性检验, 其中包括阴阳离子电荷平衡法, 质量法与加和法与矿化度比对, 以及电导率校核分析[27]. 通过以上检验, 剔除监测异常值, 进行数据质量控制.

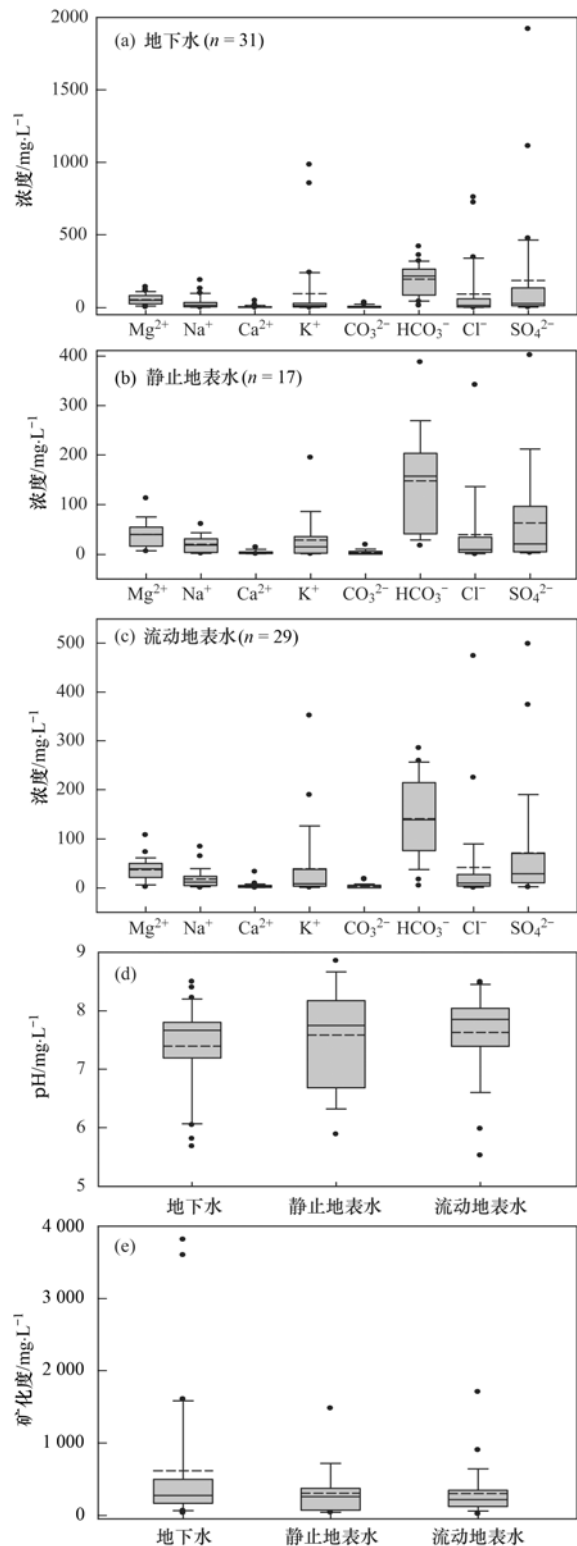
利用 Sigmaplot 10.0 绘制离子浓度箱式图、矿化度柱形图及离子浓度关系图, 利用 GW_Chart 绘制 Piper 三线图. Piper 图以 3 组主要的阳离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$) 和阴离子 (Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 $\text{HCO}_3^{-} + \text{CO}_3^{2-}$) 的每升毫克当量的百分数来表示, 认为主要离子总和的毫克当量百分数大于 25% 的离子为主要离子, 参与水化学类型分类[17]. 分类表达方式: 离子按浓度高低排序, 阳离子在前, 阴离子在后. 各生态站的水化学类型以 2010 ~ 2015 年水 8 种离子平均数值计算, 此外, 选择水质监测频率较高的生态站, 对其水化学类型的年际变化进行分析.

2 结果与讨论

2.1 水化学组成分析

水体中离子质量浓度平均值分析表明, 水中主要阴离子浓度为 $\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-} > \text{CO}_3^{2-}$, 以 HCO_3^{-} 和 SO_4^{2-} 为主, 在地下水、静止地表水、流动地表水中两者之和分别约占阴离子总量的 71.7%、75.3% 和 74.9%; 地下水阳离子浓度为 $\text{Na}^{+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+}$, 以 Na^{+} 和 Ca^{2+} 为主, 两者之和约占阳离子总量的 69.7%; 静止地表水阳离子浓度为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+}$, 以 Na^{+} 和 Ca^{2+} 为主, 两者之和约占阳离子总量的 64.8%; 流动地表水阳离子浓度为 $\text{Na}^{+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+}$, 也以 Na^{+} 和 Ca^{2+} 为主, 两者之和约占阳离子总量的 68.9%. 而从整体中值上看, 水化学组成的阳离子则均以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主, 阴离子仍为 HCO_3^{-} 和 SO_4^{2-} 为主, 即大多数的生态系统中水化学离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^{-} 、 SO_4^{2-} 占的比例较高[图 1(a) ~ (c)].

各生态站地下水、静止地表水和流动地表水 pH 变化范围分别为 5.68 ~ 8.49、5.89 ~ 8.85 和 5.53 ~ 8.49, pH 平均值分别为 7.39、7.58 和 7.63, 三者之间差异不显著[图 1(d)]. 静止地表水和流动地表水矿化度含量均值分别为 304 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 315



图中虚线段为平均值, 箱图中实线段为中位数, 箱体上方和下方的黑点表示极端值, n 为生态站个数

图 1 8 种离子浓度、pH 及矿化度的箱式图

Fig. 1 Box plots showing variations of eight-ions, pH, and salinity

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而地下水矿化度均值为 620 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 高于地表水[图 1(e)].

从图 2 中可知, 位于西北部干旱半干旱地区和黄淮海平原地区的水体矿化度普遍高于南部地区, 且以地下水矿化度的变化最为明显, 地下水矿化度

值变化主要受流域地质条件产生的蒸发作用影响^[16],西北部干旱地区的生态站 AKA、FKD 和 CLD 地下水矿化度均大于 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而位于南部湿润地区的生态站 HSF、HTF、TYA 等水体矿化度较低。

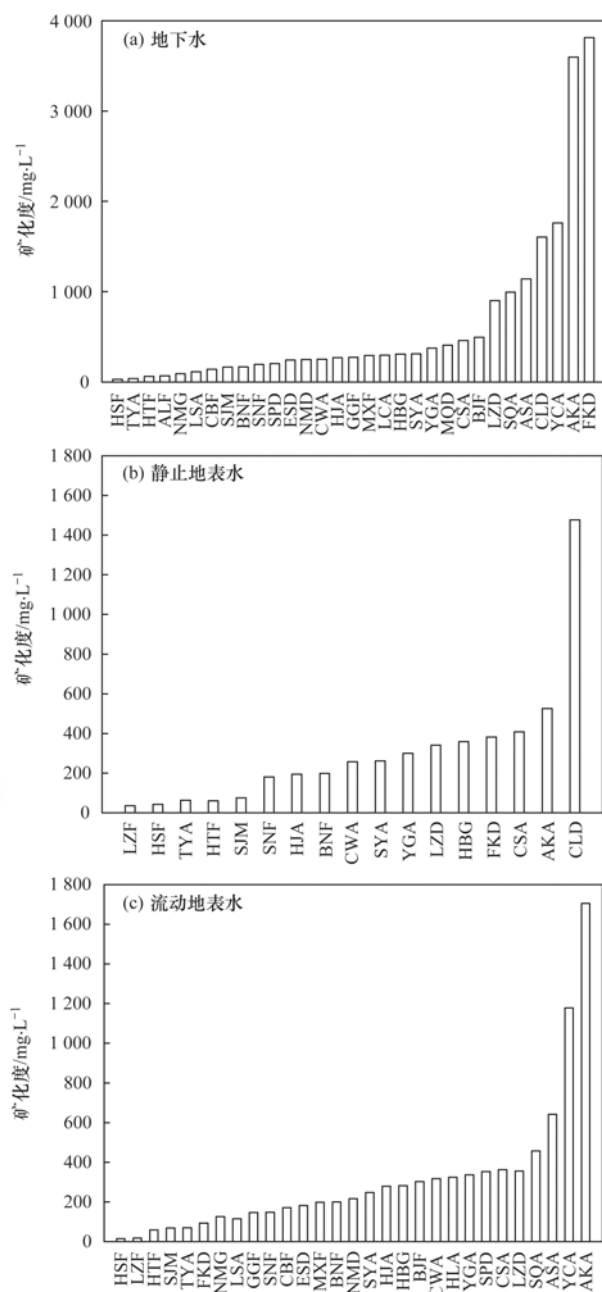


图2 各生态站地下水、静止地表水和流动地表水的矿化度

Fig. 2 Salinity of underground water, still surface water, and flowing surface water at each eco-station

2.2 水化学类型

Piper 三线图可以反映水体离子的组成情况,由图 3(a)可知,大多数生态系统的地下水水化学类型以 Ca-HCO_3 型为主,其次为 Ca-Mg-HCO_3 型,两者占生态站总数的 64.5%。少数生态系统,如生态站 LCA、YCA、SQA 都位于黄淮海平原,地下水阳离子均以 Mg^{2+} 为主,LCA 水化学类型为 Mg-Ca-

HCO_3 型,YCA 和 SQA 均为 $\text{Mg-Na-SO}_4\text{-Cl}$ 型;位于西北干旱生态系统的 CLD、AKA 和 FKD,阳离子均以 Na^+ 为主,阴离子以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主,CLD 水化学类型为 Na-Mg-Cl-SO_4 型,AKA 为 $\text{Na-SO}_4\text{-Cl}$ 型,FKD 为 $\text{Na-Mg-SO}_4\text{-Cl}$ 型;ASA 半干旱生态系统水化学类型为 $\text{Mg-Na-SO}_4\text{-HCO}_3$ 型,TYA 亚热带红壤丘陵生态系统水化学类型为 $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$ 型,HSF 亚热带丘陵生态系统水化学类型为 $\text{Na-Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ 型。

静止地表水化学类型以 Ca-HCO_3 型为主,其次为 Ca-Mg-HCO_3 型[图 3(b)],占生态站总数的 70.6%。少数生态系统,如西北干旱生态系统的 CLD、AKA 和 FKD,水化学类型较为复杂,无显著的主导离子,水化学类型分别为 Na-Ca-Mg-Cl-SO_4 、 $\text{Na-Mg-Ca-SO}_4\text{-Cl}$ 和 $\text{Na-Mg-Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$,与之相近的 LZD 干旱生态系统,水化学类型为 $\text{Mg-Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ 。

流动地表水化学类型也以 Ca-HCO_3 型为主,其次为 Ca-Mg-HCO_3 型[图 3(c)],占生态站总数的 55.2%。少数生态系统,阳离子以 Na^+ 为主,如西北干旱区 AKA (Na-Cl-SO_4 型)、ASA ($\text{Na-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3$ 型),黄淮海平原生态系统的 YCA ($\text{Na-Mg-SO}_4\text{-Cl}$ 型)、SQA ($\text{Na-Ca-SO}_4\text{-Cl}$ 型),长白山森林生态系统 CBF (Na-Ca-HCO_3 型),林芝森林生态系统 LZF (Na-Mg-HCO_3 型),黄土高原沟壑生态系统 CWA (Na-Mg-Ca-HCO_3 型);贡嘎森林生态系统 GGF 水体阴离子以 SO_4^{2-} 为主,水化学类型为 $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$ 型;而在 HSF 亚热带丘陵生态系统,有较高的 K^+ 和 Cl^- 含量,水化学类型为 Ca-K-Cl-HCO_3 型。

地下水的水化学特征是在长期的地质历史发展过程中,经多种地球化学作用而形成的,受气候、水文、地质、地貌条件及人类活动等多种因素的影响^[28],地下水的水化学类型受当地岩石类型的影响比较大^[6]。唐克旺等^[28]于 2006 年对我国地下水进行分析,发现我国地下水以重碳酸盐型为主,这与本研究的结果一致。

Gibbs^[29]曾指出控制地表水水化学的 3 种主要机制:大气降水、流域岩石主导及蒸发-结晶过程。在 60 年代初,乐嘉祥等^[30]首次对我国河流水化学性质的空间变化规律进行了分析,研究发现我国广大地区常以重碳酸盐类钙组型为主,在西北内陆地区河水常以硫酸盐类钠组型为主,历经近 50 余年,本研究结果与其结果相同,河流水化学特征主要受碳酸盐岩的风化和蒸发岩(水溶性矿物沉淀)的影响^[31]。

从图3中可知,在大多数生态系统中,地下水、静止地表水和流动地表水水化学类型相似,如

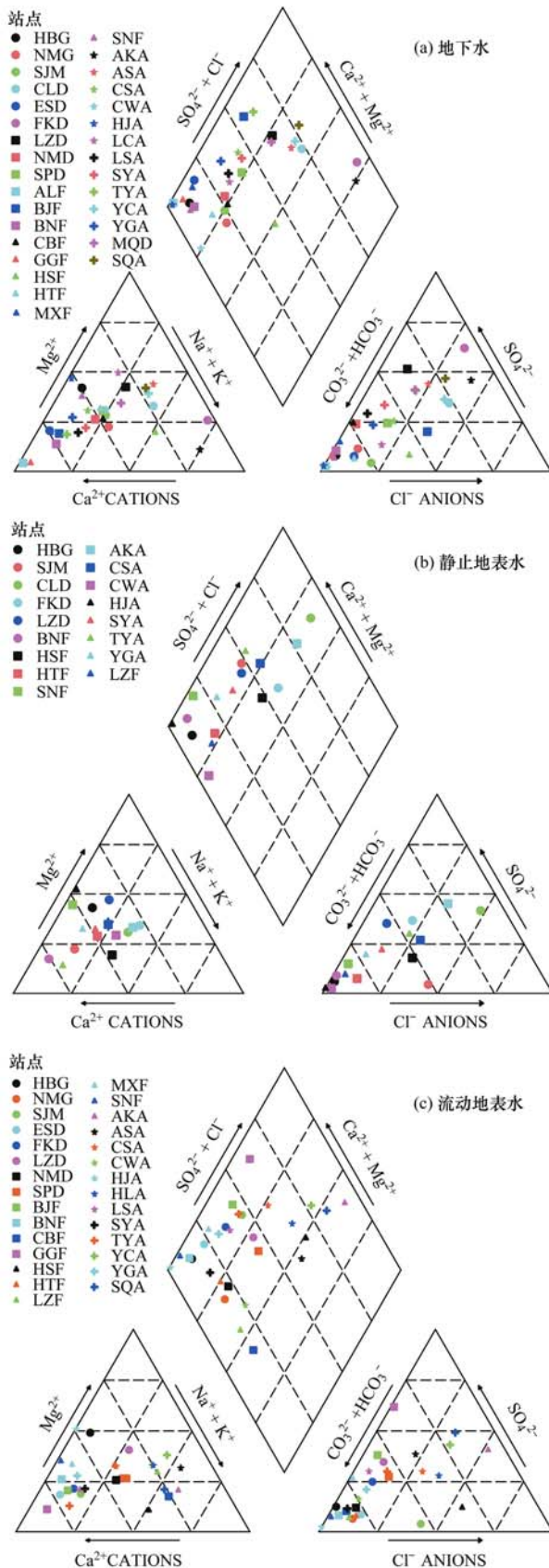


图3 地下水、静止地表水和流动地表水的 Piper 三线图

Fig. 3 Piper diagrams of underground water, still surface water, and flowing surface water

HBG、HTF、SNF、YGA 等,均为 Ca-Mg-HCO_3 型,在 AKA、LZD、CWA、CSA、SJM 等,3 类水体的主要阴阳离子相同,可见这些地区地下水与地表水关系较为密切,可能有着补排关系.少数生态系统中的水化学类型存在差异,在 FKD,地下水为 $\text{Na-Mg-SO}_4\text{-Cl}$ 型,静止地表水 $\text{Na-Mg-Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ 型,流动地表水为 Ca-HCO_3 型,该地区为典型的荒漠-绿洲生态系统,流动地表水监测的三工河水源主要依赖高山冰川和积雪融水^[32],从地下水-静止地表水-流动地表水, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 逐渐取代 Na^+ 和 SO_4^{2-} ,成为流动地表水中的主要离子,表明水的补给来源也在影响着水化学特征.

2.3 水化学的年际变化

为比较生态系统年际间水体化学差异,以部分生态站为代表,绘制 2010~2015 年年际离子组成变化的 Piper 三线图,从图 4(a) 中可知,生态站 YGA 和 SJM 2010~2015 年间地下水主要阳离子为 Ca^{2+} ,主要阴离子为 HCO_3^- ,水化学类型分别以 $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ 型和 Ca-Mg-HCO_3 型为主,年间偶然出现 Na^+ 、 Cl^- 的毫克当量百分数大于 25%,但并未影响其主导离子;在 YCA,地下水阳离子以 Na^+ 和 Mg^{2+} 为主,阴离子以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主,虽然后期 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的比例有所上升,但主导离子并未改变;在 LZD,地下水水化学类型以 $\text{Mg-Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$ 型为主,变化不大.

从图 4(b) 可知, YGA 和 SNF 6 年间静止地表水水化学类型以 Ca-Mg-HCO_3 型为主, CWA 以 Ca-Mg-Na-HCO_3 型为主,在 AKA,主要的阴阳离子也未发生变化,阳离子以 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 为主,阴离子以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主.从图 4(c) 可知,6 年间 SYA 流动地表水水化学类型均为 Ca-HCO_3 型, GGF 均为 $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$ 型, YGA 和 BNF 的水化学类型也以 Ca-HCO_3 型为主,其次是 Ca-Mg-HCO_3 型.

各生态系统年际间水化学类型稳定,说明水体中主要离子成分比例稳定.可见,不论是农田、森林、荒漠还是湿地生态系统,在较短的时间内,人为因素(如农业生产活动等)并未明显影响其主要的水化学类型,水化学成分主要受到当地岩层、土壤类型、气候等自然因素的影响.

2.4 离子主要来源分析

Ca^{2+} 和 HCO_3^- 是水中的主要离子,地下水 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 相关系数为 0.75,而静止地表水和流动地表水分别为 0.33 和 0.34, CLD 的静止地表水、AKA 的流动地表水为图 5(a) 中的极端点,剔除该两点,相关系数可分别达到 0.74 和 0.62.从图 5(a) 可以看出,大多数点分布在 1:1 等线的上

侧,说明 Ca^{2+} 不足以平衡 HCO_3^- , 还有其他阳离子. Ca^{2+} 、 HCO_3^- 主要受控于流域岩性^[15,19], HCO_3^- 主要来自碳酸盐矿物的溶解, Ca^{2+} 除碳酸盐岩外,也可能来自石膏岩、硅酸盐岩等风化,以碳

酸盐岩占主要优势.
 Na^+ 与 Cl^- 在地下水、静止地表水、流动地表

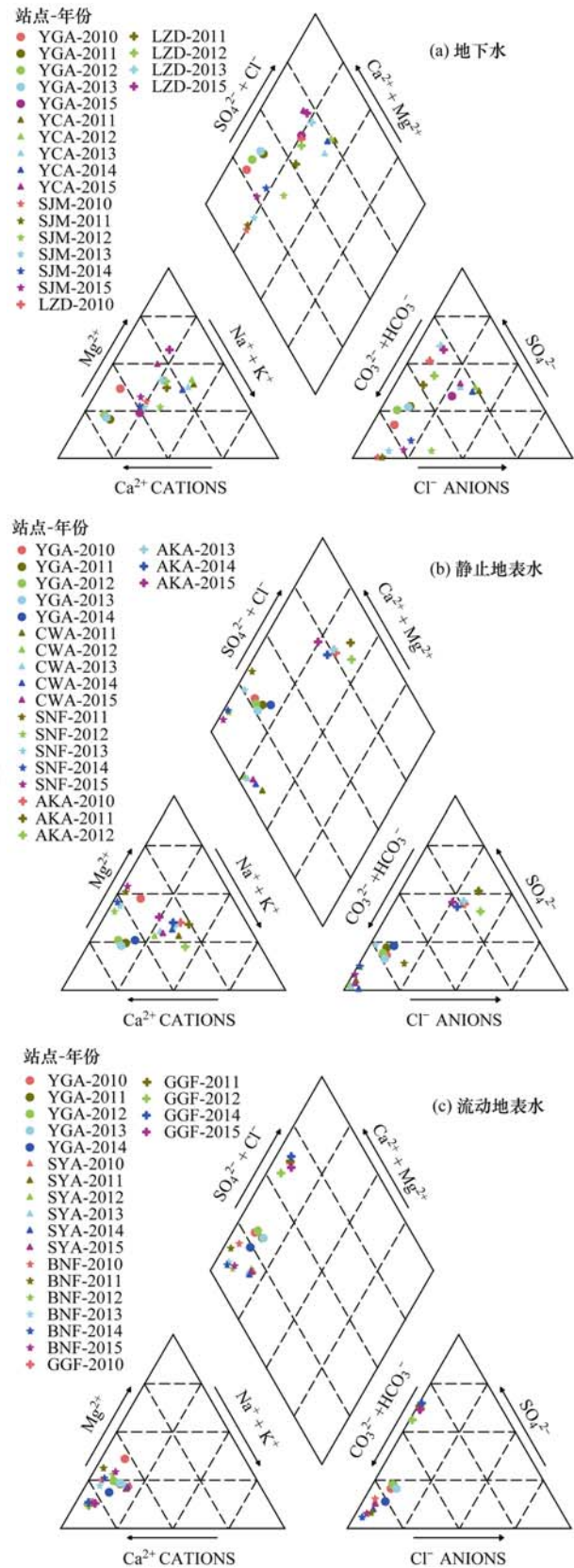
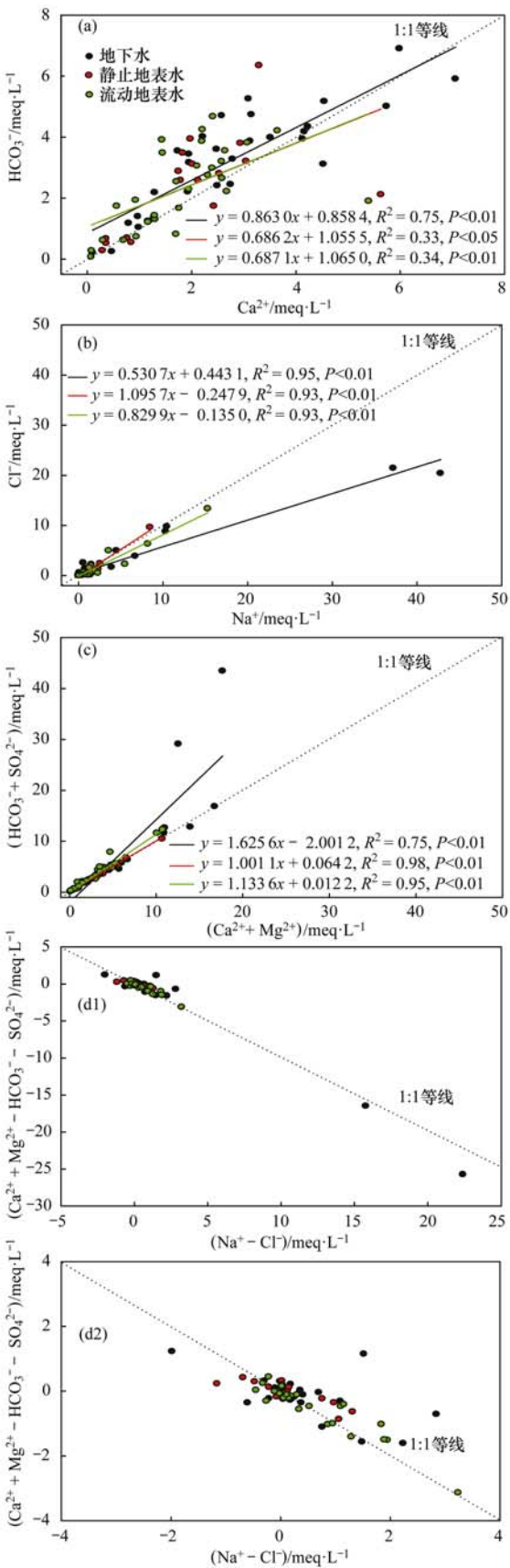


图4 2010~2015年部分生态站水Piper三线图

Fig. 4 Piper diagrams of some eco-stations from 2010 to 2015



(d2)为(d1)去除右下方两点后的放大图

图5 水离子毫克当量浓度关系

Fig. 5 Correlation among major ions in water

水相关系数分别为 0.95、0.93 和 0.93 [图 5(b)], 表明 Na^+ 与 Cl^- 有相似的来源, 从图 5(b) 可以看出, 大多数点分布于 1:1 等线附近或下侧, 说明 $[\text{Na}^+] \geq [\text{Cl}^-]$. 各类水 Na^+/Cl^- 平均值都大于海水比值 ($\text{Na}^+/\text{Cl}^- = 0.86$)^[33], 说明生态站受大气降水的影响较小, Na^+ 主要来源于盐岩和硅酸盐岩风化^[11,14], 也是 Cl^- 的主要来源.

($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) 与 ($\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$) 相关性良好, 地下水、静止地表水、流动地表水的相关系数分别为 0.75、0.98 和 0.95, 地下水去除 FKD 和 AKA 这两个极端点, 相关系数可达 0.98. 从图 5(c) 可见, 大多数点均分布在 1:1 等线附近, 水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 由 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 来平衡, 其来源主要为硫酸和碳酸盐岩共同参与的风化过程或是蒸发岩、石膏溶解^[12].

为分析各生态系统地下水、地表水的阳离子交换情况, 水中 ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$) 与 ($\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$) 的浓度关系如图 5(d1) 和 5(d2) 所示, 靠近原点位置的点表征受离子交换作用影响较小, 若水系统中碳酸盐岩溶解作用连续发生且发生离子交换, 则点分布靠近 1:1 等线^[7]. 从中可见, 大多数点分布均靠近 1:1 等线, 有部分点分布在原点附近, 且不论在地下水、静止地表水和流动地表水都呈明显的负相关, 可见在自然水域中多出的 Na^+ 应是来自与 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 的交换^[5,33].

我国幅员辽阔, 各生态系统间环境差异较大, 气候因子、地质地貌均为水化学的控制因素. 因各地的流域岩性、土壤类型、降水量、蒸发量的不同, 自然因素的差异强烈影响着水化学特征. 受流域的地质岩性控制, 水中各主要离子的含量在地区上的分布和矿化度一样, 具有同一分布趋势, 矿化度由东南沿海向西北内陆递增, 水化学类型由重碳酸盐类过渡为硫酸盐、氯化物类, 阳离子中 Na^+ 也逐渐超过 Ca^{2+} 含量而成为主要成分^[30].

3 结论

(1) 2010~2015 年中国典型陆地生态系统水质监测数据分析表明, 在地下水、静止地表水和流动地表水中, 阳离子以 Ca^{2+} 为主, 阴离子以 HCO_3^- 为主, 多数生态系统水体阳离子中 Mg^{2+} 所占比例仅次于 Ca^{2+} . 6 年间典型生态系统水化学类型基本稳定. 位于西北干旱半干旱地区和黄淮海平原地区的水体矿化度较高, 离子通常以 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 为主; 南部湿润地区的水体矿化度较低, 离子通常以 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 为主. 水体中离子主要来源于当地岩石风化、蒸发岩溶解及一些离子间的交换

作用, 主要受自然因素影响.

(2) 地下水、静止地表水和流动地表水的水化学类型在同一地区大多相似. 因地理位置、气候条件、地质地貌等的差异, 水化学类型具有明显的地带性分布特征; 西北干旱半干旱生态系统、东部黄淮海平原生态系统地下水水化学类型以 $\text{Na-Mg-SO}_4\text{-Cl}$ 型为主; 亚热带红壤丘陵区地下水水化学类型以 $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$ 型为主, 地表水以 $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ 型为主; 南亚热带丘陵赤红壤区地下水水化学类型以 $\text{Na-Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ 型为主, 地表水中 K^+ 比例增加; 其它生态系统水化学类型以 Ca-HCO_3 型和 Ca-Mg-HCO_3 型为主.

致谢: 感谢 CERN 和 CNERN 各个生态站对样品的采集和分析工作, 感谢 CERN 综合研究中心和水分研究中心提供数据.

参考文献:

- [1] 陈静生, 陶澎, 邓宝山, 等. 水环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987. 45-46.
- [2] Gao Z Y, Lin Z J, Niu F J, *et al.* Hydrochemistry and controlling mechanism of lakes in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Engineering Corridor, China[J]. *Geomorphology*, 2017, **297**: 159-169.
- [3] Kim J H, Kim K H, Thao N T, *et al.* Hydrochemical assessment of freshening saline groundwater using multiple end-members mixing modeling: A study of Red River delta aquifer, Vietnam [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, **549**: 703-714.
- [4] Beyer M, Jackson B, Daughney C, *et al.* Use of hydrochemistry as a standalone and complementary groundwater age tracer[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **543**: 127-144.
- [5] Yidana S M, Bawoyobie P, Sakyi P, *et al.* Evolutionary analysis of groundwater flow: application of multivariate statistical analysis to hydrochemical data in the Densu Basin, Ghana[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2018, **138**: 167-176.
- [6] 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.
- [7] 姜体胜, 曲辞晓, 王明玉, 等. 北京平谷平原区浅层地下水化学特征及成因分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, **31**(11): 122-127.
Jiang T S, Qu C Q, Wang M Y, *et al.* Hydrochemical characteristics of shallow groundwater and origin in the Pinggu plain, Beijing [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, **31**(11): 122-127.
- [8] 章光新, 邓伟, 何岩, 等. 中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J]. *水科学进展*, 2006, **17**(1): 20-28.
Zhang G X, Deng W, He Y, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution laws of groundwater in Songnen Plain, northeast China[J]. *Advances in Water Science*, 2006, **17**(1): 20-28.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 等. 沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5428-5439.
Liu J T, Cai W T, Cao Y T, *et al.* Hydrochemical characteristics of groundwater and the origin in Alluvial-proluvial fan of Qinhe river [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5428-5439.
- [14] 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.
- [15] 孙平安, 于爽, 莫付珍, 等. 不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 123-131.
Sun P A, Yu S, Mo F Z, *et al.* Hydrochemical characteristics and influencing factors in different geological background: a case study in Darongjiang and Lingqu basin, Guangxi, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 123-131.
- [16] 韩知明, 贾克力, 孙标, 等. 呼伦湖流域地表水与地下水离子组成特征及来源分析[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(4): 744-751.
Han Z M, Jia K L, Sun B, *et al.* Component characteristics and sources of ions in surface water and groundwater of Hulun Lake Basin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(4): 744-751.
- [17] 周嘉欣, 丁永建, 曾国雄, 等. 疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3315-3324.
Zhou J X, Ding Y J, Zeng G X, *et al.* Major ion chemistry of surface water in the upper reach of Shule river basin and the possible controls [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3315-3324.
- [18] 蒲焘, 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.
- [19] 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.
- [20] 中国生态系统研究网络科学委员会. 陆地生态系统水环境观测规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [21] 张心昱, 孙晓敏, 袁国富, 等. 中国生态系统研究网络水体 pH 和矿化度监测数据初步分析[J]. *地球科学进展*, 2009, **24**(9): 1042-1050.
Zhang X Y, Sun X M, Yuan G F, *et al.* Primary analysis of water pH and salinity monitoring data on Chinese Ecosystem Research Network (CERN) [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, **24**(9): 1042-1050.
- [22] 徐志伟, 张心昱, 孙晓敏, 等. 2004~2009 年我国典型陆地生态系统地下水硝态氮评价[J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 2827-2833.
Xu Z W, Zhang X Y, Sun X M, *et al.* Assessment of shallow groundwater nitrate concentrations in typical terrestrial ecosystems of Chinese Ecosystem Research Network (CERN) during 2004-2009 [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(10): 2827-2833.
- [23] Zhang X Y, Xu Z W, Sun X M, *et al.* Nitrate in shallow groundwater in typical agricultural and forest ecosystems in China, 2004-2010 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(5): 1007-1014.
- [24] Xu Z W, Zhang X Y, Xie J, *et al.* Total nitrogen concentrations in surface water of typical agro-and forest ecosystems in China, 2004-2009 [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(3): e92850.
- [25] Xie J, Zhang X Y, Xu Z W, *et al.* Total phosphorus concentrations in surface water of typical agro-and forest ecosystems in China, 2004-2010 [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, **8**(4): 561-569.
- [26] 袁国富, 张心昱, 唐新斋, 等. 陆地生态系统水环境观测质量保证与质量控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [27] 施建平, 杨林章. 陆地生态系统土壤观测质量保证与质量控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [28] 唐克旺, 侯杰, 唐蕴. 中国地下水质量评价(I)——平原区地下水水化学特征[J]. *水资源保护*, 2006, **22**(2): 1-5.
Tang K W, Hou J, Tang Y. Assessment of groundwater quality in China: I. Hydrochemical characteristics of groundwater in plain area [J]. *Water Resources Protection*, 2006, **22**(2): 1-5.
- [29] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [30] 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.
- [31] Hu M H, Stallard R F, Edmond J M. Major ion chemistry of some large Chinese rivers [J]. *Nature*, 1982, **298**(5): 550-553.
- [32] 徐利岗, 周宏飞, 潘锋, 等. 三工河流域山地—绿洲—荒漠系统降水空间变异性研究[J]. *地理学报*, 2016, **71**(5): 731-742.
Xu L G, Zhou H F, Pan F, *et al.* Spatial variability of precipitation for mountain-oasis-desert system in the Sangong River Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(5): 731-742.
- [33] Zhu B Q, Yang X P, Rioual P, *et al.* Hydrogeochemistry of three watersheds (the Erlqis, Zhungarar and Yili) in northern Xinjiang, NW China [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(8): 1535-1548.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)