

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

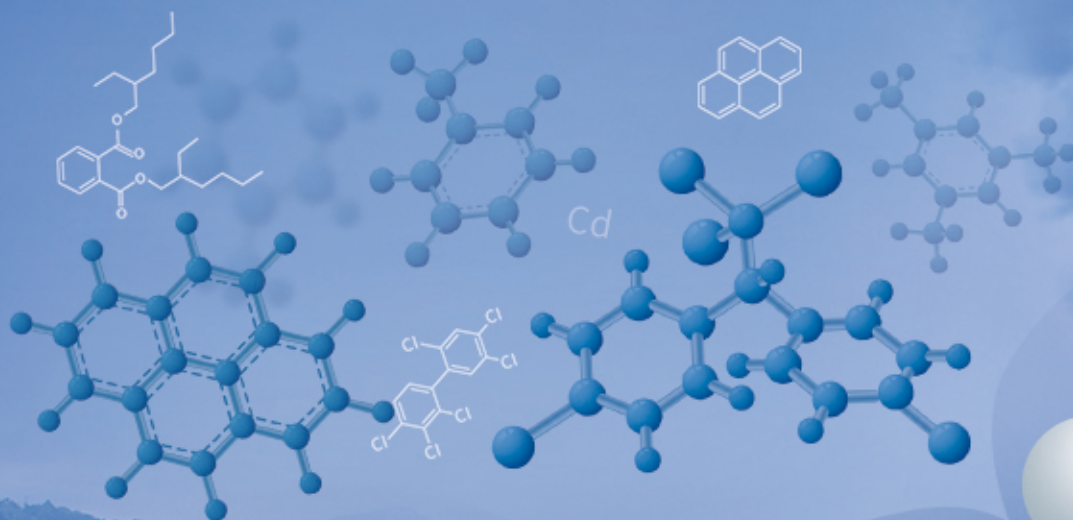
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

PAEs

OCPs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期
Vol.42 No.10

目次

PM _{2.5} 化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用	蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)
汾渭平原 PM _{2.5} 空间分布的地形效应	黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)
华中地区冬季灰霾天气下 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例	李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)
华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性	黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)
成都市春季 O ₃ 污染特征及关键前体物识别	韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)
基于边界观测的长三角某工业区 O ₃ 来源特征	黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)
廊坊开发区 8~9 月 O ₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析	张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)
广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响	曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)
厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应	徐超, 吴水平, 刘怡靖, 钟雪芬 (4650)
北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响	吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖若, 朱晓娟 (4660)
两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响	朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)
燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律	杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)
长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响	王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)
土地利用对太湖入湖河道营养盐的影响	连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)
基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征	梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡恒, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)
三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价	任丙南, 耿静 (4717)
升金湖水体优先污染物筛选与风险评价	龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)
天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素	杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)
华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素	张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)
快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)
盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析	王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)
基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度	周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)
硼酸和磷酸对 PMS/Co ²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制	万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 文刚 (4789)
磁性生物炭负载 α-MnO ₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚	李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)
紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制	张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)
铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性	王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)
低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制	李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)
我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价	耿源濂, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝晓, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)
不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较	杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)
部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳	秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)
同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能	周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)
多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用	赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)
柴达木盆地表土重金属污染与来源分析	陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)
快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险	李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)
广西都安县典型水田土壤地球化学特征及影响因素	刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)
炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害	邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)
海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险	杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)
环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索	苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)
银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估	张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)
施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响	李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)
我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析	吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)
青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)
松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构	王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)
不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征	南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)
稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应	罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)
铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析	曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)
有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响	周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)
水稻产量、稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对长期大气 CO ₂ 浓度升高的响应	于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)
原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响	闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)
中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因素	李宇, 周德成, 闫章美 (5037)
室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展	张万众, 张彭义 (5046)
《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)	

盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析

王建¹, 张华兵¹, 许君利¹, 彭俊^{2*}

(1. 盐城师范学院苏北农业农村现代化研究院, 盐城 224007; 2. 滁州学院地理信息与旅游学院, 滁州 239000)

摘要: 地表水资源是东部沿海地区经济发展的基础之一, 在高强度的人类活动影响下, 广泛面临着水质异常及污染等问题. 在调查采样的基础上, 以区域地质为背景, 通过 Gibbs 图、Piper 三线图、离子当量和摩尔比关系, 利用数理统计, 探讨盐城地区地表水的化学组成特征及控制因素. 结果表明: ①研究区地表水 pH 值偏低及 TDS 偏高, 前者可能受人类活动排放的酸性有机污染物及土壤中厌氧生物分解形成的酸类物质的控制, 后者呈显著地西低东高, 北低南高的趋势. ②溶质中阳离子以 Na^+ 为主, 阴离子以 HCO_3^- 和 Cl^- 为主, 水化学组成整体呈 $\text{HCO}_3^--(\text{Ca} + \text{Na})$ 型为主, 但次类型在不同区域存在显著差异. ③因研究区淤积层主要以黏土、亚黏土和砂岩为主, 地表水中可溶性物质主要来源于碳酸化作用引起的钠长石为主的硅酸盐岩碎屑物分解, 并辅以碳酸化作用导致的碳酸岩分解. 其中滩涂湿地扩张区还因地势低洼, 地下水位浅, 溶质显著地受蒸发-浓缩作用的影响, 并伴有蒸发盐岩风化补给. ④不同区域的地表水虽然受到人类活动的影响存在一定差异, 但影响作用显著. 特别是在废黄河区和滩涂湿地扩张区, 水质不仅显著受到农业生产的影响, 还受区域以化工为主的产业废水排放的作用.

关键词: 地表水; 水化学特征; 离子来源; 控制因素; 盐城地区

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-4772-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202102129

Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area

WANG Jian¹, ZHANG Hua-bing¹, XU Jun-li¹, PENG Jun^{2*}

(1. North Jiangsu Research Institute of Agricultural and Rural Modernization, Yancheng Teachers University, Yancheng 224007, China; 2. School of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

Abstract: Surface water resources are crucial to economic development in China's eastern coastal areas. Under the influence of intense human activities, problems such as abnormal water quality and pollution are very prominent. Here, the chemical composition of surface waters and their controlling factors were analyzed in the Yancheng area. The results showed that: ① The surface water pH is low and the concentrations of total dissolved solids (TDS) are high in the study area. pH is likely controlled by the acidic organic pollutants discharged by human activities as well as acidic substances formed by anaerobic decomposition in soils. TDS data showed low values in the west and high values in the east, and low values in north and high south of the study region. ② Cation content was dominated by Na^+ , anions were dominated by HCO_3^- and Cl^- , and, overall, hydrochemical composition was controlled by $\text{HCO}_3^--(\text{Ca} + \text{Na})$, although there was significant variability between the different regions. ③ Because the silt layer in the region is mainly composed of clay, subclay, and sandstone, the soluble matter in surface water is mainly derived from the decomposition of Na-feldspar in silicate debris via carbonation, supplemented by carbonation. Due to the low-lying terrain and high groundwater level in the tidal flat area, solutes are significantly affected by evaporation-driven concentration alongside evaporite weathering replenishment. ④ Although the surface waters in different regions were found to be affected by human activities to varying degrees, the impact was always strong. In particular, in areas of tidal wetland expansion, water quality is not only affected by urban sewage and agricultural irrigation but also industrial wastewater discharge.

Key words: surface water; hydrochemical characteristics; ion provenance; controlling factors; Yancheng area

因水文、地球化学和生物过程之间的相互作用, 进入河道/湖泊中的溶质经历了多重演化, 为此, 地表水体化学组成蕴含了流域内水-岩相互作用、污染和地壳表层成分的一些关键信息^[1,2]. 而水体组成演化过程中, 受径流来源、岩性、气候、植被和人类活动等作用, 大量的溶质可能发生积聚, 影响区域环境变迁^[3]. 对生态环境研究者和水资源管理者而言, 河流化学组成衍生的水质问题, 都是必须思考的一个基本要素, 因为它对环境保护及水资源开发利用具有十分重要意义^[4,5]. 在区域地质及人类活动的背景下, 对于沿海地区水质的研究, 多集中于工农业生产过程中的污染作用^[6]、地表水与地下水的转化、湿地沼泽化及盐碱化过程中水体化学组成的演变等^[7], 且从不同角度强调和揭示了水质在绿色

生态经济发展过程中的功能与作用.

位于海陆交界、咸淡水交汇地带的盐城地区, 受地下水较浅及高蒸发的影响, 地表水体咸化问题十分突出, 混盐水体(含盐量 $500 \sim 30\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)分布广泛^[6,8], 这不仅影响区域生态系统的动态分布状况^[9], 也在一定程度上抑制了区域水资源的综合利用. 同时, 地区大量的生活污水、工业与农业废水也可能显著改变地表水水质状况^[10]. 目前, 盐城水质的研究多局限于湿地保护区内生态演化受水盐

收稿日期: 2021-02-20; 修订日期: 2021-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471060); 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室开放基金项目(SKLC-OP-2020-7)

作者简介: 王建(1979~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水资源与环境, E-mail: wjshuigong@lzb.ac.cn

* 通信作者, E-mail: junpengdl@163.com

的影响^[11]及区域地下水质状况^[12,13]等. 针对此区域的地表水质组成及成因控制的研究鲜有报道. 本文以实测资料为基础, 围绕淮河流域下游河网交错, 即相对独立又存在水力联系的特点, 开展地表淡咸水过渡区的盐城地表水水化学空间差异性研究, 揭示水质的主要影响因素, 以期为区域湿地保护及绿色经济发展提供参考.

1 研究区概况

盐城位于江、河(黄河、淮河)、海(黄海)等交互作用下发育的淤积平原上, 平均海拔不足 5 m, 地势平坦低洼, 水域和湿地面积分别占总面积的 12.1% 和 26.8%. 历史时期受气候变化的影响, 多次发生海进海退, 淡咸水演进变化. 近千年来, 因黄河袭夺淮河水道的影响, 陆域水系发生多次变迁, 现属于淮河流域, 并在通榆运河的联通下, 南北水道相连. 因与长江水系相通, 且位于淮河下游, 所以, 地表水补给显著受上游径流通量的影响, 多年平均地表径流量达 $29.57 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[14]. 淮河和黄河流域中上游第四纪黄土、黏土及秦岭、大别山等火山岩风化物广泛分布, 受历史上淮河水系与黄河水系共同作用, 导致盐城地区形成黏土、亚黏土及砂岩等为主

的巨厚淤积层^[13].

该区位于亚热带季风气候区与温带季风气候区过渡带上, 多年平均气温为 13.7 ~ 14.8℃, 年降水量为 900 ~ 1 100 mm, 与蒸发量基本相当^[15]. 独特的自然地理环境及社会发展, 导致盐城地区历史上旱、涝、盐渍化及水质异常等环境灾害频发.

2 材料与方法

2.1 样品采集与测试

针对盐城地区临海湿地分布广泛, 且以通榆河为主导的河网相通特点, 结合人口与产业分布状况, 于 2016 年 7 月 ~ 2016 年 8 月对全市的滩涂湿地扩张区(东台市和大丰区)、老市区(亭湖区和盐都区)、农业区(建湖县、阜阳县和射阳县)和废黄河区(滨海县和响水县)地表水进行空间采样, 共收集样品 152 个(图 1). 取样采用 500 mL 聚乙烯瓶进行, 密封后进行避光低温保存. 利用上海雷磁 DDS-307A 型电导率仪测定总溶解性固体含量(TDS), PHSJ-3F 型 pH 计测定 pH. 阳离子(Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+})和阴离子(F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^-)均在中国科学院冰冻圈国家重点实验室进行分析, 分别采用 Dinx-600 和 ICS-1500 型离子色谱仪测定. 当离

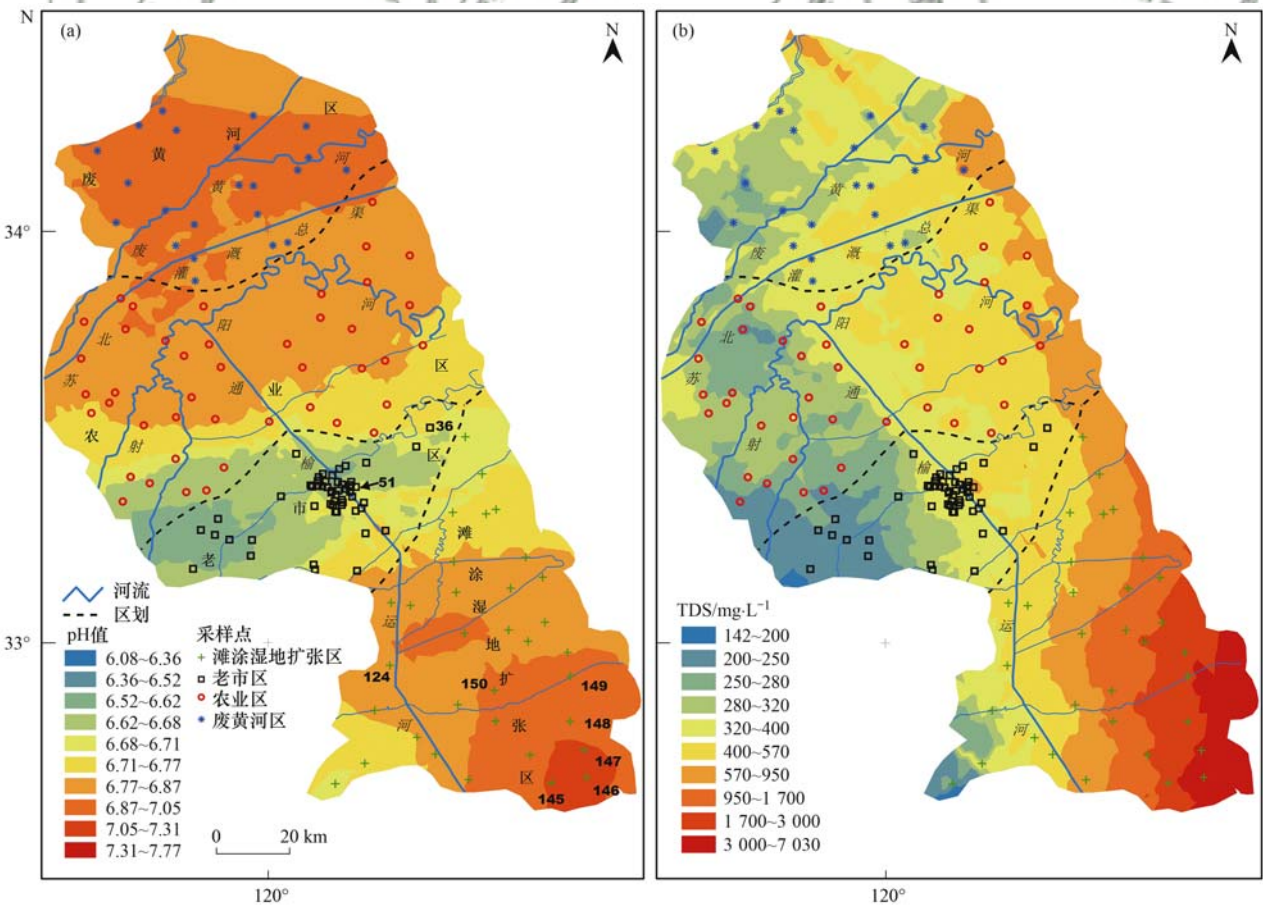


图 1 地表水的采样点位置及 pH 值和 TDS 的空间差异状况

Fig. 1 Locations of the sampling points and the spatial difference between pH and TDS of surface waters

子浓度超过仪器测量上限时,采用体积法稀释后再进行测定.整体上,离子浓度测量的误差一般控制在1%以内.另外,采用雷磁 ZD-2 型自动点位滴定仪对 HCO_3^- 进行滴定,当水样 pH 高于 8.2 时,以 $\text{CO}_3^{2-} = 2 \times \text{HCO}_3^-$ 的浓度比例换算.

2.2 数据分析方法

对各区域地表水化学参数进行统计分析,借助 Arcgis10.4.1 软件,通过克里金插值分析研究区 pH 值和 TDS 空间差异.利用 Origin 2018 绘制 Gibbs 图、Pipper 三线图、离子当量关系和摩尔比关系,分析各区域水体中主要无机离子的来源及控制因素.进一步借助主成分分析法探讨离子的来源及其人类活动的影响.

3 结果与讨论

3.1 地表水的化学组成特征

盐城地区地表水 pH 值在 6.08 ~ 9.60 之间,平均为 6.79(表 1),整体呈弱酸性,显著区别于上游洪泽湖^[16]、南北两侧的长江^[17]和黄河流域^[18]以水

岩交互作用为主导的弱碱性水体.它的空间差异也非常显著,南侧受长江水系与海退作用、北侧受淮河及苏北灌溉总渠大量来水的影响,pH 值较中部盐城老市区和建湖县显著地偏大[图 1(a)].水体中 TDS 在 $142 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (滨海县五汛镇)和 $7\,030 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (东台市三仓镇)之间,平均为 $576.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 1(b)],显著高于长江流域($205.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[19]和黄河流域的平均值($453 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[18].区域内 pH 值偏低及 TDS 偏高的现象,可能是因盐城地势低洼,排水不畅,地下水水位较浅,厌氧生物水解酸化^[20]及人类污水排放所致;另一方面 TDS 值还呈现出西低东高,北低南高的趋势,前者是由于滩涂湿地扩展区的海水渗侵作用或滩涂不断形成,海退作用遗留咸化的海水及其蒸发残留物对近海陆域地表水的影响^[12],后者可能是淮河上游水量补给,稀释和降低废黄河区地表水中可溶性离子浓度所致.根据生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006),TDS 超标率达 9.87%,主要集中在盐城东南部的滩涂湿地扩张区.

表 1 不同区域地表水的化学组成特征¹⁾

Table 1 Chemical composition parameter of surface waters in different regions

区域	指标	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	HCO_3^-	TDS	pH
老市区 ($n=54$)	平均值	3.28	0.14	0.52	0.62	0.00	1.62	0.09	0.03	3.36	401.28	6.67
	最大值	42.79	0.47	4.87	1.46	0.01	32.26	0.55	0.15	26.60	4 690.00	9.60
	最小值	0.68	0.04	0.14	0.27	0.00	0.34	0.04	0.00	0.79	177.00	6.08
农业区 ($n=43$)	平均值	2.42	0.15	0.49	0.78	0.00	1.21	0.08	0.04	3.21	330.67	6.79
	最大值	7.90	0.35	1.07	1.15	0.00	4.21	0.15	0.33	6.50	796.00	7.26
	最小值	0.78	0.06	0.25	0.45	0.00	0.32	0.04	0.00	1.87	152.00	6.40
废黄河区 ($n=22$)	平均值	4.71	0.16	0.88	0.91	0.00	2.46	0.14	0.04	4.27	514.18	6.91
	最大值	49.45	0.57	5.55	1.45	0.00	24.85	1.41	0.12	14.39	3 410.00	7.31
	最小值	0.54	0.07	0.24	0.55	0.00	0.27	0.03	0.00	1.66	142.00	6.48
滩涂湿地 扩张区 ($n=33$)	平均值	11.34	0.37	1.33	0.87	0.00	8.48	0.24	0.06	5.42	1 223.00	6.89
	最大值	67.06	1.34	5.12	1.57	0.00	76.00	1.51	0.31	12.63	7 030.00	7.77
	最小值	0.73	0.15	0.27	0.48	0.00	0.08	0.03	0.00	2.30	219.00	6.45
盐城地区 ($n=152$)	平均值	5.00	0.19	0.74	0.76	0.00	3.12	0.13	0.04	3.90	576.04	6.79
	最大值	67.06	1.34	5.55	1.57	0.01	76.00	1.51	0.33	26.60	7 030.00	9.60
	最小值	0.54	0.04	0.14	0.27	0.00	0.08	0.03	0.00	0.79	142.00	6.08

1) TDS 单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 无量纲,其余为 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$

水体中阳离子的总浓度在 $0.73 \sim 75.52 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,平均为 $6.70 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,较世界各大河的平均值 $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 严重偏高^[21].其中 K^+ 浓度最小,为 $0.19 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,仅占总阳离子的 2.90%;其次为 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} ,分别为 $0.74 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.76 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,占 11.08% 和 11.36%; Na^+ 在研究区地表水中居绝对支配地位,平均为 $5.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,占 74.67%(图 2).阴离子中 HCO_3^- 浓度最大,平均为 $3.90 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,占 54.22%;其次为 Cl^- ,为 $3.12 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,占 43.46%;而 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的浓度分别为 $0.13 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.04 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,仅占 1.80%

和 0.57%.整体上,水化学组成整体呈 $\text{HCO}_3^--(\text{Ca} + \text{Na})$ 型为主,其中老市区、农业区及废黄河区的阳、阴离子的浓度大小顺序均遵循: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 和 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$,区别于滩涂湿地扩张区的顺序: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ 和 $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$.因长江径流,尤其是黄海沿岸洋流携带的泥沙淤积,导致滩涂湿地扩张区的面积逐渐增加,海退过程中残留土壤中的海盐及较高的地下水位引起的沼泽化、盐渍化均可能促使地表富集大量可溶性盐^[12,22],严重影响区域地表水体的化学组成,尤其是盐城东南部的采样点 145 ~ 150

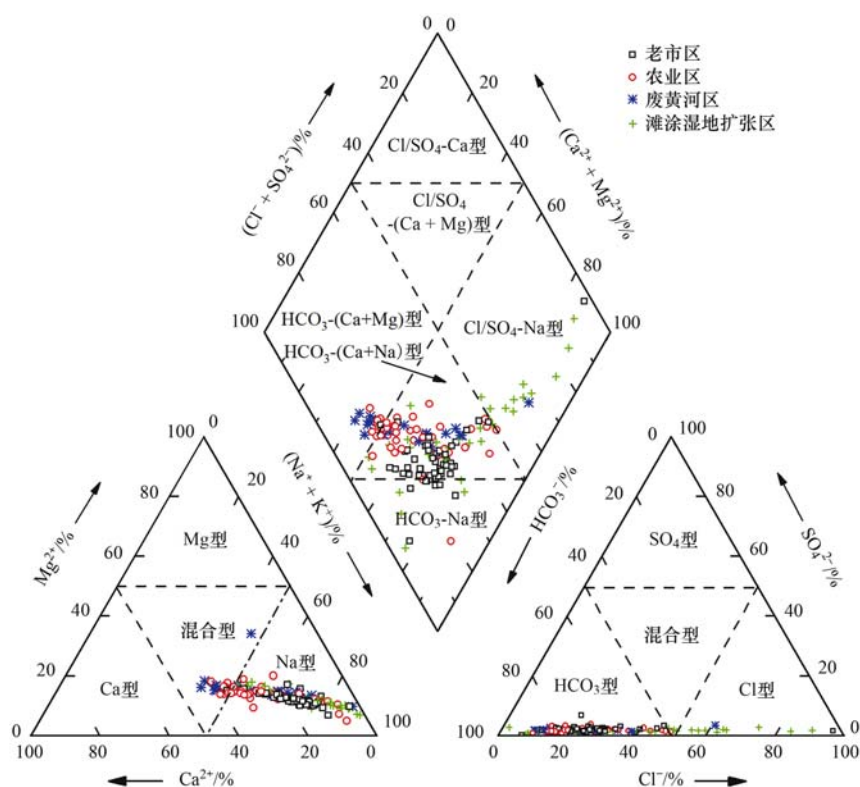


图2 盐城地区不同区域水体的水化学 Piper 图

Fig. 2 Piper diagram for the chemical composition in the Yancheng area

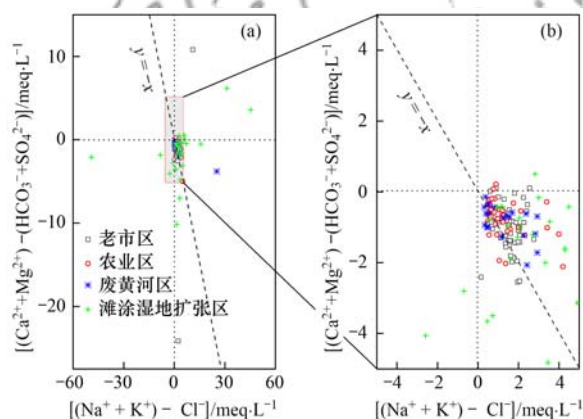
区域.

3.2 溶质来源及控制因素分析

3.2.1 溶质来源

离子交换过程中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 的量(离子当量,下同)对应于碱长花岗岩碳酸化风化或白云石,方解石和石膏等盐岩风化之外,其他来源的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 量; $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-$ 的量对应氯盐溶解产生 Na^+ 和 K^+ 之外的量,当二者之间的斜率接近于 -1 (即 $y = -x$) 时,表明水体中交换吸附反应是阳离子浓度变化的主要控制因素^[23]. 盐城地区地表水体的 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 与 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-$ 之间无良好的相关性,尤其是滩涂湿地扩展区(图3),表明区域地表水体化学组成演化过程中,阳离子交换作用较弱,离子浓度变化主要受不同补给源的混合控制. 同时,图3(b)的右下象限内 $[(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-] > 0$, $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) < 0$ 分布了区域大部分水样,说明 Na^+ 和 K^+ 在 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 上富集,可能是研究区蒸发浓缩作用较强,偏高的离子浓度,一定程度上抑制了碳酸盐岩的溶解;而黏土和亚黏土中富含钠钾长石的硅酸盐岩碎屑物,受浅层地下水和产汇流缓慢的地表水影响,风化补给显著.

将地表不同水体中的可溶性离子划分为蒸发-浓缩,岩石风化和大气降水作用3类端元的补给,一

图3 盐城地区地表水的离子交换过程中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 与 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-$ 的关系Fig. 3 Relationships between $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ and $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-$ in the ion-exchange process of surface waters in the Yancheng area

般是通过 Gibbs 图进行^[24, 25]. 当溶质中 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 或 $\text{Na}^+/(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比率接近 1, 且 $\text{TDS} \approx 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 偏低时,反映了大气降水补给为主的情形,散点分布于图4的右下角;当 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 或 $\text{Na}^+/(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比率小于 0.5, 且 TDS 介于 $70 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,通常反映了水岩交互作用/化学侵蚀与风化的影响,占据图中心区偏左侧位置. 当 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 或 $\text{Na}^+/(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比率逼近 1, 且 TDS 明显较大,则通常反映蒸发较降水

严重偏强,水体中溶质呈蒸发结晶/浓缩的现象,土壤易发生盐碱化,散点分布于图的右上角^[24].

盐城地区多年平均降水量为 1000 ~ 1 100 mm,基本与蒸发量相当^[11],导致区域大气降水影响基本可以忽略(图 4). 老市区、农业区及废黄河区的采样点多位于岩石风化作用带,这是因为历史时期古长江、古淮河、古黄河及古沂沭河带来大量的陆相碎屑物构成了盐城地区巨厚的松散沉积层,经多次海侵海退作用,富集了大量的 Na 盐和 Ca 盐^[12],在地势平坦低洼,河网众多,产汇流缓慢的情境下,矿物质的水解与碳酸化作用充分所致,也是导致区域地表水中 HCO_3^- 居支配地位的重要原因[式(1) ~ (2)]. 滩涂湿地扩张区除了岩石风化作用外,还显著地受到蒸发-浓缩作用的影响[图 4(b)],这应该与研究区水域及水利设施用地 4 817 km²,占总面积的 28.45%,蒸发作用强烈,且低洼区的沼泽化、盐渍化作用严重等因素有关.

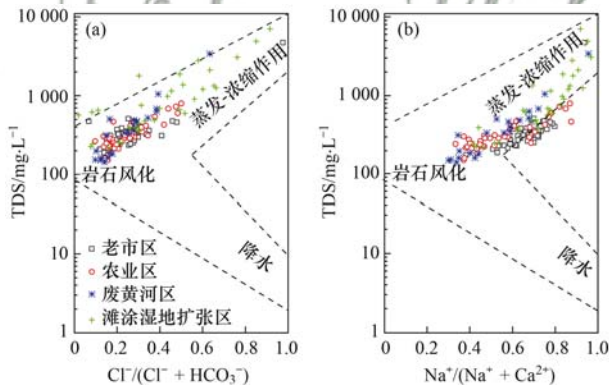
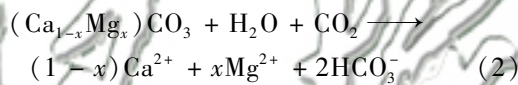
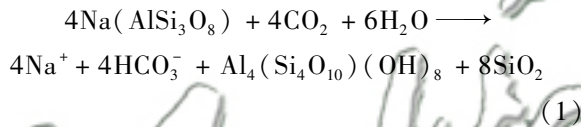


图 4 盐城地区不同区域地表水体的 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs diagram of surface waters in different regions in the Yancheng area

3.2.2 侵蚀模式

因岩石风化是控制区域地表水体水质的重要过程之一,利用 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 与 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 之间的量比关系确定不同类型盐岩风化对研究区的影响^[18, 26]. 盐城地区地表水化学组成主要受硅酸盐岩风化控制[图 5(a)],与上游淮河支流沙颍河类似^[26]. 淮河流域中上游分布大量第四纪黄土、黏土及秦岭南侧、大别山北侧火山岩风化物,经历史时期淮河水系与黄河水系共同作用,随径流迁移后,导致淮河平原淤积大量黏土、亚黏土及砂岩等,其中的长石碎屑经碳酸化作用[式(1)和式

(3)],不仅导致研究区化学侵蚀以硅酸盐侵蚀为主,还引起 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 HCO_3^- 占比严重偏大, Na^+/Cl^- 和 $\text{HCO}_3^-/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 的量比平均达 1.60 和 2.59,后者显著高于碳酸盐分布广泛的长江流域(1.88)^[19]和黄土发育的黄河流域(1.33)^[18]的比值,说明区域碳酸化作用十分强烈.

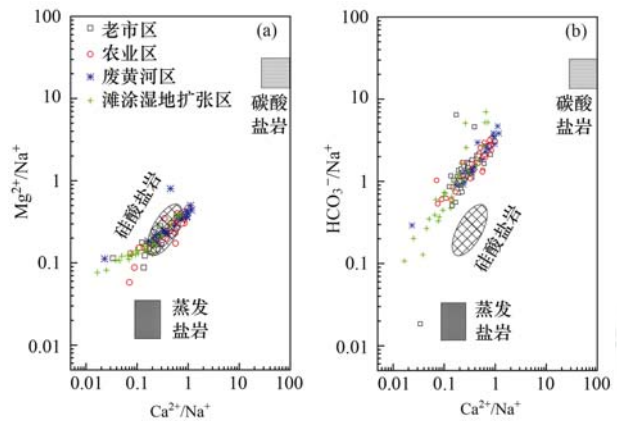
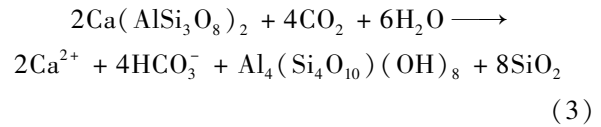


图 5 盐城不同区域地表水中岩石风化类型控制

Fig. 5 Controls on rock weathering types in surface waters in different regions of the Yancheng area

事实上,老市区、农业区及废黄河区还伴有显著的碳酸盐岩侵蚀[图 5(b)],这是因为区域淤积层中,不仅含有长石矿物,还存在碳酸盐矿物(方解石和白云石等). 另外,滩涂湿地扩张区除伴有碳酸盐岩风化外,还伴有蒸发盐岩风化[图 5(a)],这应该与区域受蒸发-浓缩作用的原因一致.

进一步,剔除显著的离散点(老市区的采样点 36 和 51,滩涂湿地扩张区的采样点 124、148 和 149)后,盐城地区地表水中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 HCO_3^- 和 $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 之间均存在显著的正相关关系,综合考虑淤积层以黏土、亚黏土和砂岩为主,中上游 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要源于碳酸盐岩风化^[26],且 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^-)$ 和 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 的比值平均分别为 0.77 和 0.72,散点位于 $y=x$ 的右下方[图 6(a)和 6(b)],即 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 偏小,说明研究区钙/镁长石分布较少或侵蚀作用微弱[式(3)], Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要源于碳酸盐岩风化[式(2)]. 当碳酸盐岩碳酸化时, $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 和 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 的比值分别为 0 和 1; 当碳酸盐岩硫酸化时, $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 和 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 的比值分别为 1 和 2^[18]. 盐城地区不同区域水体中 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 和 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 的平均比值分别介于 0.05 ~ 0.08 和 0.82 ~ 1.00 之

间(图7),说明研究区碳酸盐以碳酸化分解为主[式(2)],上游平顶山、登封等含煤田开采及其他人类活动排放的硫化物对碳酸盐岩风化也具有一定的辅助作用[式(4)~(5)],但除了滩涂湿地扩张区的个别点外,影响相对较弱。事实上,研究区 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 的量也不能被 $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$ 平衡,二者比率平均为 1.64,远大于 1,散点位于 $y=x$ 的左上方[图 6(c) 和 6(d)],说明区域存在显著的硅酸盐

岩中钠/钾长石的风化[式(1)],且 Na^+/K^+ 的平均值为 25.69,所以,区域硅酸盐风化应该以钠长石为主,这与淮河上游最大支流沙颍河流域基本一致^[26]。

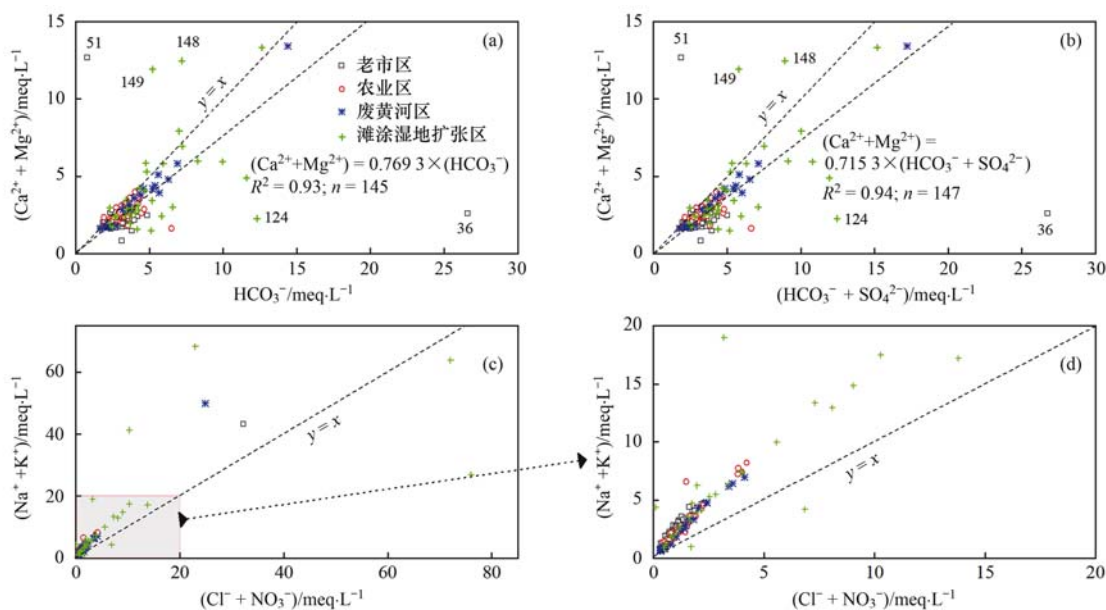
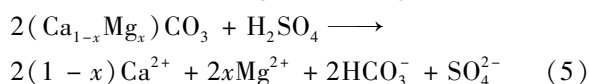
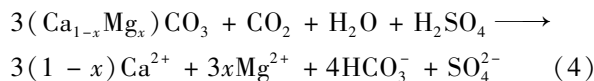


图 6 盐城地区地表水中主要离子的量对比

Fig. 6 Comparison of the main ion equivalents in surface waters in the Yancheng area

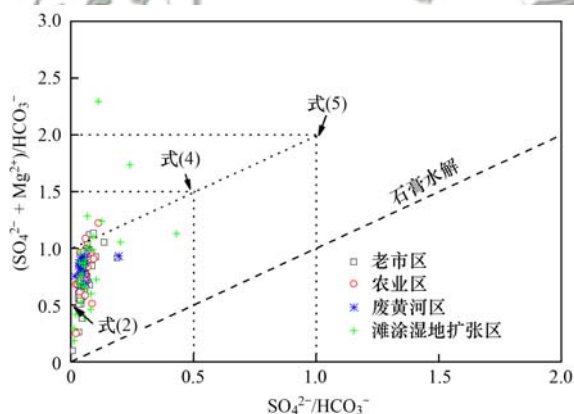


图 7 盐城地表水中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 的比值关系

Fig. 7 Relationships between the ratio of $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ and $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ in surface waters in the Yancheng area

3.3 人类活动的影响

人类活动对溶质影响的途径主要有生活污水、大气干湿沉降、农业活动和工业废水排放等,一般以后二者为主,主要表现在水体中 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 等溶质浓度的变化^[27, 28],但 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 还可能显著地受盐岩的水化学侵蚀影响,因

此,常用 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 与 Cl^-/Na^+ 的比值关系来确定污染物的来源^[25, 29]。近年来,污水处理能力的提高和环保意识的提高,盐城的老城区、农业区及废黄河区地表水体中无机盐虽然主要受岩石风化的影响,但受人类活动的影响仍十分显著,其中老市区和农业区,地表水显著地受生活污水及灌溉废水的影响(图8),而废黄河区和滩涂湿地扩张区的地表水

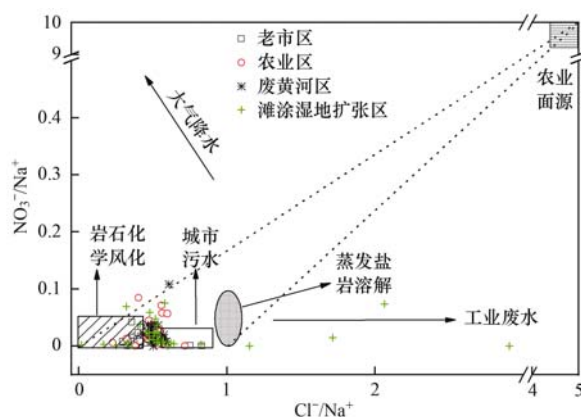


图 8 不同区域水体中 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 与 Cl^-/Na^+ 的关系

Fig. 8 Relationships between $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ and Cl^-/Na^+ in the surface waters of different regions

不仅受到农业灌溉的影响,还因区域以煤化工、钨钼和水泥等为重点产业,经济高速发展的同时,工业废水排放影响较为突出。

事实上,影响地表水体化学组成的物质,不仅限于无机盐离子浓度的变化,还受农业生产过程中的有机磷、有机氯,工业废水中酚类、醛类,生活污水中碳水化合物、蛋白质等物质影响,这些物质分解产生的酸类溶解物,不仅可以改变水体的酸碱程度,还可以促进水岩反应^[30,31]。为此,利用主成分分析法(最大四次方值法旋转),进一步探讨包含 pH 和主要无机离子在内的不同区域地表水组成的控制因素,分别获取 3 个主成分(EOF),方差累积贡献率在 76.60%~86.71%(表 2),基本解释了水体中可溶性物质的绝大部分信息。

盐城地区及各区域的地表水中,EOF1 解释方差贡献率在 41.99%~59.39% 之间,依据 Gibbs 图分析,应表征的是自然状况下源于岩石风化部分的溶质。对于人口约 800 人·km⁻²的老市区,EOF2a 表征人类活动的影响,对污水排放代表性离子 NO₃⁻ 具有较大荷载外,还对 pH(区域平均值为 6.67)荷载,说明生活生产排放的碳水化合物、蛋白质等有机物,分解形成的酸可以有效地促进区域地表水酸化^[20,32]; EOF3a 解释方差贡献率为 10.44%,主要荷载 HCO₃⁻,可能是人类活动排放 CO₂ 等大气污染物沉降影响地表水质^[18]。农业区的 EOF2b 解释方差贡献率为 18.73%,对 Na⁺、SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 具有较大荷载外,对区域第二和第三产业荷载显著,应是人类

工业活动及日常生活排放的酸性物质作用,并引起以钠长石为主的硅酸盐岩分解而影响地表水质;而 EOF3b 对 Ca²⁺ 和 pH 值有较大荷载时,对第一产业也具有显著荷载,推测是农作物生长过程中吸收大量水分,引起溶质浓缩后, Ca²⁺ 发生沉淀,同时,农作物腐殖质厌氧分解过程中形成的有机酸^[30,31],导致水体向酸性发展。废黄河区 EOF2c 解释方差贡献率达 19.03%,在 NO₃⁻ 和 Ca²⁺ 有较大荷载,并对第二产业荷载显著,但对 HCO₃⁻ 荷载较弱,应该是区域大量分布的化工产业酸性废水排放,促进了区域钙长石分解反应的进行; EOF3c 仅在 pH 值和第一产业方面荷载,推测可能类似农业区的 EOF3b,土壤中厌氧生物分解有机质形成的酸类物质影响水体的酸度。滩涂湿地扩张区, EOF2d 对 Cl⁻ 和 NO₃⁻ 荷载显著,并对第二产业具有较强荷载,应与废黄河区 EOF2c 类似,受区域煤化工、钨钼和水泥等重点产业布局有关;而表征 pH 值和第一产业的 EOF3d,成因也应与废黄河区的 EOF3c 的成因一致。

整个区域上, EOF2 表征了 NO₃⁻ 为代表的人类活动污染物排放,解释方差贡献率 13.51%,并在 Ca²⁺ 和 HCO₃⁻ 方面具有一定荷载,说明盐城地区人类活动对地表水水质影响较为显著,并促进碳酸盐岩的溶解;但荷载 pH 的 EOF3,解释方差贡献率为 9.66%,对主要无机盐离子荷载并不显著,可能是上述人类活动排放的酸性有机污染物或土壤中厌氧生物分解有机质形成的酸类物质所致。

表 2 盐城不同区域水化学主成分分析¹⁾

Table 2 Principal component analysis of water chemistry in different regions of Yancheng area

类别	老市区			农业区			废黄河区			滩涂湿地扩张区			盐城地区		
	EOF1a	EOF2a	EOF3a	EOF1b	EOF2b	EOF3b	EOF1c	EOF2c	EOF3c	EOF1d	EOF2d	EOF3d	EOF1	EOF2	EOF3
第一产业	—	—	—	-0.13	-0.08	0.77	0.30	-0.25	0.84	0.14	-0.05	0.91	—	—	—
第二产业	—	—	—	0.01	0.82	0.37	-0.04	0.88	0.19	-0.23	0.79	0.37	—	—	—
第三产业	—	—	—	0.01	0.81	0.29	-0.10	0.02	0.47	-0.32	0.29	0.13	—	—	—
Na ⁺	0.97	-0.10	-0.03	0.45	0.62	0.16	0.97	-0.07	0.03	0.89	0.01	-0.36	0.96	-0.06	-0.05
K ⁺	0.91	0.22	0.16	0.95	-0.24	-0.02	0.94	0.17	-0.09	0.95	0.04	-0.24	0.93	0.05	-0.05
Mg ²⁺	0.98	-0.12	-0.05	0.95	0.06	-0.25	0.99	-0.02	0.04	0.94	0.02	-0.30	0.95	0.00	0.00
Ca ²⁺	0.86	0.12	0.02	0.00	-0.05	-0.86	0.31	0.76	-0.22	0.85	-0.15	0.07	0.67	0.35	0.08
Cl ⁻	0.96	-0.12	-0.05	0.96	-0.13	-0.07	0.97	-0.05	0.03	0.69	0.55	0.21	0.87	-0.16	0.10
SO ₄ ²⁻	0.94	-0.08	-0.07	0.64	0.51	0.13	0.96	-0.14	0.04	0.83	0.36	0.11	0.91	-0.12	0.09
NO ₃ ⁻	0.12	0.79	0.20	0.32	-0.50	0.19	-0.14	0.85	-0.29	-0.40	-0.84	0.07	-0.02	0.91	-0.09
HCO ₃ ⁻	-0.03	0.08	0.98	0.67	-0.18	0.38	0.97	0.15	-0.03	0.74	-0.19	0.38	0.51	0.46	0.14
pH	0.22	-0.78	0.12	0.37	0.24	-0.64	0.31	-0.32	-0.81	0.34	0.22	-0.68	0.30	-0.04	0.94
方差贡献率/%	59.39	16.03	10.44	41.99	18.73	15.88	54.67	19.03	13.01	54.33	15.74	14.17	57.30	13.51	9.66

1) 老市区地表水采样过程中,因河网及地下排污管道密集,未考虑行政区划,因此,多数样品没有对应产业值;第一产业对应的值为采样点位于乡镇的单位面积上产业值,计算时采用的单位为万元·km⁻²,第二和第三产业类似处理计算;“—”表示文章中没有相关数据

4 结论

(1) 盐城地区地表水 pH 偏低及 TDS 偏高,后者

呈显著的西低东高,北低南高的趋势。阳离子以 Na⁺ 为主,阴离子以 HCO₃⁻ 和 Cl⁻ 为主,水化学组成整体呈 HCO₃⁻-(Ca+Na) 型为主,但辅助类型在不同区域

存在显著差异。

(2) 因研究区淤积层主要以黏土、亚黏土和砂岩为主, 地表水中可溶性物质主要来源于碳酸化作用引起的钠长石为主的硅酸盐岩碎屑物分解补给, 并辅以碳酸化作用导致的碳酸盐岩分解补给。其中滩涂扩张区还因地势低洼, 地下水位偏高, 显著地受蒸发-浓缩作用影响, 伴有蒸发盐岩风化补给。

(3) 不同区域的地表水虽然受到人类活动的影响存在一定差异, 但影响显著, 特别是废黄河区和滩涂湿地扩张区, 不仅受到农业灌溉的影响, 还受工业废水排放的作用, 促进盐岩的溶解。而人类活动排放的酸性有机污染物及土壤中厌氧生物分解有机质形成的酸类物质严重影响地表水的 pH 值, 引起区域水体整体呈弱酸性, 尤其是在人口密集的老市区, 显著区别于南北两侧的长江、黄河水体及淮河中上游的弱碱性水体。为此, 建议区域经济发展的同时, 不仅要完善工业布局, 减少废水排放, 还要科学发展绿色现代农业, 同时, 加强工业废水及生活污水处理能力。

参考文献:

- [1] White A F, Blum A E. Effects of climate on chemical weathering in watersheds [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, **59**(9): 1729-1747.
- [2] Zhu B Q, Yang X P, Rioual P, *et al.* Hydrogeochemistry of three watersheds (the Erlqis, Zhungarer and Yili) in northern Xinjiang, NW China [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(8): 1535-1548.
- [3] 郑涛, 焦团理, 胡波, 等. 涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 766-775.
Zheng T, Jiao T L, Hu B, *et al.* Hydrochemical characteristics and origin of groundwater in the central Guohe river basin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 766-775.
- [4] Papazotos P, Vasileiou E, Perraki M. Elevated groundwater concentrations of arsenic and chromium in ultramafic environments controlled by seawater intrusion, the nitrogen cycle, and anthropogenic activities: the case of the Gerania Mountains, NE Peloponnese, Greece [J]. *Applied Geochemistry*, 2020, **121**, doi: 10.1016/j.apgeochem.2020.104697.
- [5] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [6] 郑剑锋, 李付宽, 孙力平. 滨海地区混盐水体富营养化因子识别与分析——以天津市清浄湖为例[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(3): 785-791.
Zheng J F, Li F K, Sun L P. Identification of eutrophication-controlling factors in mesohaline waters of coastal region: a case study on Qingjing Lake of Tianjin City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(3): 785-791.
- [7] Bekele E, Zhang Y H, Donn M, *et al.* Inferring groundwater dynamics in a coastal aquifer near wastewater infiltration ponds and shallow wetlands (Kwinana, Western Australia) using combined hydrochemical, isotopic and statistical approaches [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **568**: 1055-1070.
- [8] 李军, 刘丛强, 岳甫均, 等. 天津地区地表水咸化的水化学证据[J]. *环境化学*, 2010, **29**(2): 285-289.
- [9] Li J, Liu C Q, Yue F J, *et al.* Hydrochemical evidence of surface water salinization process in the Tianjin coastal plain, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2010, **29**(2): 285-289.
- [9] 侯明行, 刘红玉, 张华兵, 等. 地形因子对盐城滨海湿地景观分布与演变的影响[J]. *生态学报*, 2013, **33**(12): 3765-3773.
Hou M H, Liu H Y, Zhang H B, *et al.* Influences of topographic features on the distribution and evolution of landscape in the coastal wetland of Yancheng [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(12): 3765-3773.
- [10] 陈继艺, 何志江. 北海银滩滨海旅游度假区海域环境质量分析[J]. *环境与可持续发展*, 2015, (4): 167-169.
Chen J Y, He Z J. Environmental quality analysis of coastalrecreational at Beihai silver beach [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2015, (4): 167-169.
- [11] 张华兵, 甄艳, 李玉凤, 等. 江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区土壤盐度空间分异特征[J]. *湿地科学*, 2018, **16**(2): 152-158.
Zhang H B, Zhen Y, Li Y F, *et al.* Spatial heterogeneity of soil salinity in Jiangsu Yancheng wetland national nature reserve rare birds [J]. *Wetland Science*, 2018, **16**(2): 152-158.
- [12] 张岩, 付昌昌, 毛磊, 等. 江苏盐城地区地下水水化学特征及形成机理[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, **26**(4): 598-605.
Zhang Y, Fu C C, Mao L, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of the groundwater in Yancheng, Jiangsu province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(4): 598-605.
- [13] 卞锦宇, 方瑞. 盐城市地下水水质控制因素分析[J]. *水文地质工程地质*, 2003, (5): 56-60.
Bian J Y, Fang R. Analysis of controlling factors of groundwater quality in Yancheng area [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2003, (5): 56-60.
- [14] 顾锋. 盐城市水资源状况及其问题[J]. *水文*, 2003, **23**(2): 53-55.
Gu F. Water resources status and issues in Yancheng city [J]. *Hydrology*, 2003, **23**(2): 53-55.
- [15] 张华兵, 甄艳, 张云峰. 1997 年以来 4 个时期盐城互花米草盐沼的格局及变化[J]. *湿地科学*, 2018, **16**(5): 582-586.
Zhang H B, Zhen Y, Zhang Y F. Changes and patterns of *Spartina alterniflora* salt marshes in Yancheng for 4 periods since 1997 [J]. *Wetland Science*, 2018, **16**(5): 582-586.
- [16] 李为, 都雪, 林明利, 等. 基于 PCA 和 SOM 网络的洪泽湖水水质时空变化特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, **22**(12): 1593-1601.
Li W, Du X, Lin M L, *et al.* Spatial-temporal variation characteristics of water quality in Hongze lake based on PCA and SOM [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, **22**(12): 1593-1601.
- [17] Chetelat B, Liu C Q, Zhao Z Q, *et al.* Geochemistry of the dissolved load of the Changjiang Basin rivers: anthropogenic impacts and chemical weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, **72**(17): 4254-4277.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 刘智斌, 刘秀红, 周桐, 等. 温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4141-4149.
- Liu Z B, Liu X H, Zhou T, *et al.* Effect of temperature on performance and microbial community structure of anaerobic biofilter-treated domestic wastewater[J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4141-4149.
- [21] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, *et al.* Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. Chemical Geology, 1999, **159**(1-4): 3-30.
- [22] 安郁辉, 陈彬, 张欣, 等. 近 70 年来南黄海中部泥质沉积物源的变化及其与东亚季风强度变化的响应关系[J]. 中国海洋大学学报, 2020, **50**(12): 98-106.
- An Y H, Chen B, Zhang X, *et al.* Temporal change in sediment provenance in the central mud areas of the South Yellow Sea over the past 70 years and its respond to that of the intensity of the East Asian monsoon [J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, **50**(12): 98-106.
- [23] Dedzo M G, Tsozué D, Mimba M E, *et al.* Importance of rocks and their weathering products on groundwater quality in central-east Cameroon[J]. Hydrology, 2017, **4**(2), doi: 10.3390/hydrology4020023.
- [24] Singh V B, Ramanathan A L. Hydrogeochemistry of the Chhota Shigri glacier meltwater, Chandra basin, Himachal Pradesh, India: solute acquisition processes, dissolved load and chemical weathering rates[J]. Environmental Earth Science, 2017, **76**(5), doi: 10.1007/s12665-017-6465-4.
- [25] 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.
- [26] 吴洋洋, 刘运涛, 张东, 等. 沙颍河流域人为输入对水体水化学组成的影响[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(2): 427-441.
- Wu Y Y, Liu Y T, Zhang D, *et al.* Effects of anthropogenic inputs on hydrochemical compositions of water in the Shaying River Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40**(2): 427-441.
- [27] 徐森, 李思亮, 钟君, 等. 赤水河流域水化学特征与岩石风化机制[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(3): 667-678.
- Xu S, Li S L, Zhong J, *et al.* Hydrochemical characteristics and chemical weathering processes in Chishui River basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(3): 667-678.
- [28] 张东, 黄兴宇, 李成杰. 自然与人为控制下河流水化学组成演变过程[J]. 干旱区资源与环境, 2012, **26**(12): 75-80.
- Zhang D, Huang X Y, Li C J. Natural and anthropogenic factors controlling river water hydrochemical evolution [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, **26**(12): 75-80.
- [29] 李甜甜, 季宏兵, 江用彬, 等. 赣江上游河流水化学的影响因素及 DIC 来源[J]. 地理学报, 2007, **62**(7): 764-775.
- Li T T, Ji H B, Jiang Y B, *et al.* Hydro-geochemistry and the sources of DIC in the upriver tributaries of the Ganjiang River [J]. Acta Geographica Sinica, 2007, **62**(7): 764-775.
- [30] Shtober-Zisu N, Wittenberg L. Long-term effects of wildfire on rock weathering and soil stoniness in the Mediterranean landscapes[J]. Science of the Total Environment, 2021, **762**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143125.
- [31] 杨健, 李福春, 胡若愚. 沙芬西芽孢杆菌 HR-2 菌株对粗面岩的风化作用[J]. 南京大学学报(自然科学), 2018, **54**(5): 1024-1033.
- Yang J, Li F C, Hu R Y. Experiments on effects of *Bacillus safensis* strain HR-2 on trachyte weathering [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2018, **54**(5): 1024-1033.
- [32] Gurumurthy G P, Balakrishna K, Riotte J, *et al.* Controls on intense silicate weathering in a tropical river, southwestern India [J]. Chemical Geology, 2012, **300-301**: 61-69.

CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i> (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i> (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i> (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i> (4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i> (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i> (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i> (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i> (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i> (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i> (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i> (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i> (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System: Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i> (4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i> (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i> (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i> (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i> (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i> (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i> (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i> (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i> (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i> (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i> (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i> (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i> (4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i> (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvio-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i> (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i> (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i> (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i> (5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i> (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i> (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)