

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期
Vol.42 No.5

目次

北京冬季 PM _{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析	徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)
北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析	尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)
北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析	廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)
青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比	孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)
太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价	黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)
西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价	范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)
超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征	胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)
合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析	姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)
郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响	董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳葆, 张瑞芹 (2179)
2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析	钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)
天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征	张喆, 王建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)
基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法	杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)
太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化	李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)
松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析	丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)
会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价	朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)
京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素	程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)
次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响	罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)
碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋	任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)
冰封状态下里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异	李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)
城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析: 以京津冀北运河为例	邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰茗, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)
太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素	赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)
三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系	陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)
铁硫改性生物炭去除水中的磷	桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)
钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析	罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)
BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附	王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)
Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能	高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)
可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A	张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)
铁钛共掺杂氧化铝诱导表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物	张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)
硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制	屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)
电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制	曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)
缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制	李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)
反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响	吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)
基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺	薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)
活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响	马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)
6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制	凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)
中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素	李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)
不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征	刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)
青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例	何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)
基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价	胡梦琨, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)
长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响	夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)
川南山区土壤与农作物重金属特征及成因	韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)
宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价	杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)
重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性	庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾宪, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)
典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响	张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱捍华, 朱奇宏 (2512)
油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响	蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)
土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响	徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)
渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落	程森, 路平, 冯启言 (2541)
3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响	李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)
污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨	陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)
《环境科学》征订启事 (2439) 《环境科学》征稿简则 (2479) 信息 (2152, 2231, 2286)	

京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素

程中华¹, 邓义祥², 卓小可¹, 代丹², 于涛^{1*}

(1. 扬州大学环境科学与工程学院, 扬州 225127; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要: 为揭示京杭大运河天然水化学特征及人为活动的影响, 于 2019~2020 年采集徐州至嘉兴段主要城市站点河水测试, 同时收集苏锡常段 1959~1962 年和 1975~1977 年的水化学数据与沿线主要城市近年的社会经济数据, 在此基础上进行了分析. 结果表明, 研究区水化学类型主要受流域碳酸盐岩风化作用, 但 $K^+ + Na^+$ 当量浓度占总阳离子高达 40.39%, 高于一般地表水, 说明运河天然水化学已受到人为因素的显著影响. 空间上, 运河主要离子质量浓度、总硬度和总碱度从徐州站向下游总体上具有减小的趋势, 但在无锡和苏州站各参数显著升高; 分析苏锡常段 60 年来的水化学变化发现, 其 Na^+ 和 SO_4^{2-} 分别升高了约 16 倍和 12 倍, 总溶解固体(TDS)也升高了近 3 倍, 同时苏锡常段河水目前 $(Ca^{2+} + Mg^{2+})/HCO_3^-$ 比值普遍大于 1, 显著高于 1959~1962 年, 反映了人类活动影响的结果. 结合运河流域社会经济发展情况的分析显示, 人为活动排放的硫氧化物加速了流域碳酸盐岩的风化, 这是导致这一变化的主要因素. 进一步统计分析表明, 城市生活污水和工业废水的排放等是造成大运河天然水化学盐渍化的主要驱动因素. 本研究可为协调城市发展和保护大运河流域水生态环境提供科学基础.

关键词: 京杭大运河; 天然水化学; 总溶解固体(TDS); 驱动因素; 人为影响

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2251-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009018

Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal

CHENG Zhong-hua¹, DENG Yi-xiang², ZHUO Xiao-ke¹, DAI Dan², YU Tao^{1*}

(1. College of Environmental Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: To reveal the Beijing-Hangzhou Grand Canal natural water chemistry characteristics and the influence of human activities, river samples from Xuzhou to Jiaxing were collected in 2019-2020. Simultaneously, the water chemistry data of the canal from 1959 to 1962 and 1975 to 1977 in the Suzhou, Wuxi, and Changzhou sections and the recent social and economic data of the major cities along the canal were collected and analyzed. The results showed that the type of hydrochemistry in the study area was mainly influenced by the weathering of carbonate rocks in the basin, but $K^+ + Na^+$ accounted for 40.39% of the cation equivalent concentration, which was higher than that in ordinary surface water, thereby indicating that the natural hydrochemistry of the canal had been significantly affected by human factors. Spatially, the major ion mass concentrations, total hardness, and total alkalinity of the Grand Canal from Xuzhou station to the downstream area tended to decrease overall, but the parameters at Wuxi and Suzhou stations increased significantly. It was found that Na^+ and SO_4^{2-} were increased by approximately 16 and 12 times and total dissolved solids was increased by nearly 3 times by analyzing the 60 years of water chemistry of the Suzhou, Wuxi, and Changzhou sections. The current $(Ca^{2+} + Mg^{2+})/HCO_3^-$ ratio in the Suzhou, Wuxi, and Changzhou sections is generally greater than 1, which is significantly higher than that from 1959 to 1962, thereby reflecting the results of human activities. According to the analysis of the social and economic development of the Grand Canal, this change was the result of the accelerated weathering of carbonate rocks in the basin caused by the sulfur oxides discharged by human activities. Further statistical analysis showed that urban domestic sewage and industrial wastewater discharge were the main driving factors causing chemical salinization of natural water in the Grand Canal. This study can provide a scientific basis for coordinating urban development and protecting the water ecological environment of the Grand Canal Basin.

Key words: Beijing-Hangzhou Grand Canal; hydrochemistry; total dissolved solids(TDS); driving factors; human influence

河流是水圈中较活跃的部分, 不仅为人类生产生活提供水源, 还接纳人类活动产生的废物. 河水的化学性质和溶质成分不仅与流域自然条件(岩石、土壤与生物和气候等)有关, 还受到人类活动的显著影响, 尤其在现代人类活动影响加剧的情况下, 使河水的水质组分发生了明显的变化. 对河流水化学的研究一方面可以揭示水体主要离子的来源, 反映流域地质地理和岩石风化等自然因素的变化, 另一方面可以反映土地利用变化和大气沉降输入等人为

活动的影响^[1]. 国外对河流水化学的研究最早起源于 Gibbs 对亚马逊流域的系统研究, 提出了河流水化学的演化模式^[2]. 随后对于河流水化学的特征分析引起各国学者的重视, 但基本集中在探究岩石风

收稿日期: 2020-09-02; 修订日期: 2020-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871079); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07301-003)

作者简介: 程中华(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境化学, E-mail: MX120190513@yzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: yutao0325@sina.com

化的影响,较少关注人类活动影响下的河流水化学变化情况.随着社会经济的迅速发展,人类活动对水体水质产生的影响越来越显著^[3,4].因此,加强对人类活动影响下的河流的水化学变化特征的研究成为迫切任务,如 Meybeck^[5]较系统阐述了在“人类世”背景下,人为活动对河流系统产生的影响及河流水质演变特征.陈静生等^[6]是国内较早开展人为活动与水化学变化关系研究的学者,他们将长江、黄河和松花江三大水系水质变化趋势与流域社会经济发展状况进行了系统地探究,发现燃煤使用、氮肥施用、造纸废水排放及农业灌溉等都在不同程度上成为河流水质变化的影响因素.此外,人为活动使硫化物排放增加并导致流域碳酸盐风化的情况也是影响河流水化学变化的一个重要因素,如张东等^[7]对沁河流域的研究表明,人为活动产生的大气酸沉降加速了流域碳酸盐岩风化,并且使产生的 CO_2 净释放量显著升高.近年来,全球地表水体盐渍化问题日益突出^[8],水体盐度升高不仅对管道和其他基础设施产生腐蚀作用,还对饮用水产生影响,从而对人体健康造成潜在的危害^[9,10].

京杭大运河是我国重要的历史文化遗产,是工业革命之前世界上最大的土木工程,被联合国教科文组织列为世界遗产^[11].大运河不仅是中国古代经济文化的重要廊道,也是长江下游地区近代民族工业交流与合作的渠道,至今仍在使用的.之前对于大运河的水环境研究基本都局限于运河的某个城市范围^[12,13],而且主要关注水质污染情况,对于流域尺度上的天然水化学研究尚未见报道,流域工业、农业发展和城镇化过程对流域层面上的水化学影响也缺乏研究.随着城市化和工业化进程的加快,影响河流水环境的关键因素也已经发生了变化.京杭大运河作为典型的流经众多城市的河流,在经过城市化导致的土地利用和地表径流变化后,以及处在人为排放导致的酸沉降背景下,受到的影响更为显著.本研究针对京杭大运河中下游段天然水化学的时空变化及其主要影响因素进行探讨,揭示不同城市河段水环境的空间差异性,同时分析对比人为影响更显著的苏锡常段河水主要离子成分在高度城市化背景下的变化特征,以期对流域水环境评估、水资源保护及协调城市发展和水生态保护提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

京杭大运河曾是中国历史上重要的南北水路交通要道,也是重要的经济文化带.大运河北起北京(涿郡),南至杭州(余杭),全长约1 800 km,途经四

省二市,贯通钱塘江、长江、淮河、黄河和海河五大水系,是世界上里程最长、空间跨越最大和最古老的人工运河.本研究以运河中下游的徐州至嘉兴段为重点,主要关注运河沿程各主要站点天然水化学特征及变化情况(图1).除嘉兴站以外,研究区均位于江苏省内.江苏属于温带向亚热带的过渡性区域,以淮河为界,以北为温带季风气候,以南为亚热带季风气候;年均降雨量 800 ~ 1 100 mm,年降水量和暴雨的时空分布很不均匀,呈南高北低的分布趋势.研究区处于我国东部沿海中心,地处“长三角”经济带,是重要的交通纽带,人为活动对自然环境的影响显著.京杭大运河徐州至扬州段为研究区内主要的农业区,种植的粮食作物以水稻为主,其中徐州是江苏省唯一的煤炭产地,也是重要的化工和建材基地.下游段人口密集且工业发达,尤其是苏州、无锡和常州地区,它们都位于中国十大工业城市之列,是工业制造业较为集中的区域.

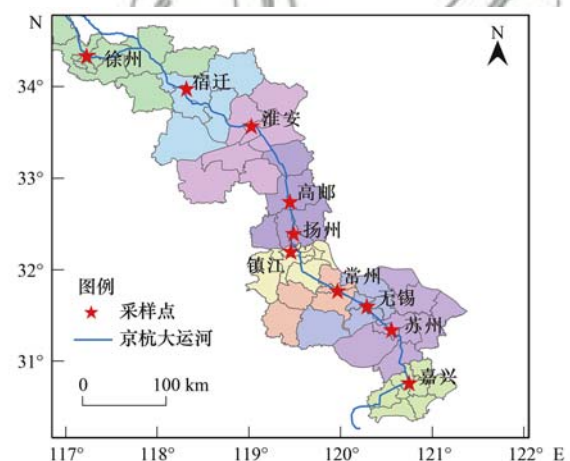


图1 京杭大运河中下游主要城市采样站点

Fig. 1 Sampling sites in major cities in the middle and lower reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal

1.2 数据来源和处理

为了对比分析京杭大运河天然水化学长期变化情况和驱动因素,从长江流域水文资料^[14]中收集了苏州、无锡和常州所有的历史水化学数据(1959 ~ 1962年和1975 ~ 1977年).研究区目前水化学数据(2019 ~ 2020年)分别于2019年6月、10月和2020年6月3次现场采样测试获取,其均值作为目前水化学的状况.采样站点见图1.所有水样在冷藏保存后送至实验室,经0.45 μm 的醋酸纤维微孔滤膜过滤后做水化学分析测试.基本水质参数如pH和电导率等使用哈希水质分析仪(HQ30d)在现场采样时测试获得.本研究使用的相关社会经济数据如人口、GDP、土地使用情况和 SO_2 排放量等,均收集自流域内各省或市的统计年鉴(2017 ~ 2018年),大气

中SO₂质量浓度收集自各城市的环境统计年鉴或环境质量公报(2014~2019年)。

天然水化学测试项目为主要离子(K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻和HCO₃⁻)、总硬度和总碱度。其中K⁺、Na⁺、Ca²⁺和Mg²⁺采用原子吸收分光光度计测定(AA240FS/GTA120),Cl⁻采用硝酸银滴定法(GB 11896-89)测定,SO₄²⁻采用铬酸钡分光光度法(HJ/T 342-2007)测定,HCO₃⁻采用酸碱指示剂滴定法测定^[15]。总溶解固体(total dissolved solids,TDS)是上述主要离子的加和。总硬度和总碱度分别采用EDTA滴定法(GB 7477-87)和酸碱指示剂滴定法^[15]测定。为保证测试质量,每一个样品均做一个平行样,并有重复测试,相对标准差均控制在20%以内。

本研究运用SPSS 25.0软件对数据进行均值、标准差和主成分分析等统计计算和分析。在正态检验的基础上选择Pearson相关分析检测变量之间的相关性,显著性水平选择0.05。采用Origin 8.5进行绘图,运用Arcgis 10.4进行京杭大运河采样点的绘制。

2 结果与讨论

2.1 大运河天然水化学统计特征

京杭大运河目前水化学基本特征(2019~2020年)如表1所示。河水的pH均值为7.60(范围7.14~8.10),为弱碱性,pH值总体变化不大,沿程变异系数为3.94%;但河水电导率变化范围较大,为

304~978 μS·cm⁻¹,平均值534 μS·cm⁻¹。大运河平均总硬度176.56 mg·L⁻¹(范围98.10~314.91 mg·L⁻¹),属于软-中硬水,其中较高硬度主要分布在徐州-宿迁段。研究区河水总阳离子当量浓度TZ⁺变化范围为2.81~10.79 meq·L⁻¹,平均值(5.99 meq·L⁻¹)远高于世界河水平均值(1.25 meq·L⁻¹)^[16];河水总阴离子当量浓度TZ⁻变化范围为3.15~10.82 meq·L⁻¹,平均值为5.64 meq·L⁻¹,阴阳离子当量基本平衡。

和国内外一些河流或河流城市段的水化学相比,京杭大运河TDS属于较高水平,但低于城市人口密集的莱茵河和伊洛河(表2)。TDS均值为405.37 mg·L⁻¹,变化范围为228.69~745.50 mg·L⁻¹,其质量浓度高于松花江和长江,略低于黄河和莱茵河,高于世界河水平均值(283 mg·L⁻¹)^[17]。值得注意的是,大运河中下游段K⁺+Na⁺当量浓度占总阳离子约40.39%,远高于其他城市河流,如泰晤士河^[19]、伊洛河^[24]、金华江^[25]和赣江^[26](表2),说明大运河面临更为显著的盐渍化趋势。黄河水体也具有较高的K⁺+Na⁺当量浓度,一方面是由于黄河流域上游蒸发盐岩的风化的贡献^[27],另一方面是由于黄河流域中上游干旱区农业灌溉退水带入大量钾钠离子^[28];而京杭大运河中下游段处在长江中下游地区,主要受碳酸盐岩的风化作用影响,同时没有盐碱地灌溉退水的影响,因此其高比例K⁺+Na⁺说明强烈的人为因素是其盐渍化的主要影响因素。

表1 京杭大运河主要站点天然水化学特征¹⁾

Table 1 Hydro-chemical compositions of major sites in the Beijing-Hangzhou Grand Canal

点位	pH	EC /μS·cm ⁻¹	质量浓度/mg·L ⁻¹							总碱度 /mg·L ⁻¹	总硬度 /mg·L ⁻¹
			TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻		
徐州	7.75	978	745.50	10.05	99.58	66.34	34.59	129.64	125.46	229.84	314.91
宿迁	7.91	609	478.03	8.47	43.37	64.48	21.94	76.90	62.48	200.39	250.65
淮安	7.64	426	308.39	3.94	28.10	43.08	13.52	36.27	32.49	150.98	162.76
高邮	8.10	306	256.80	2.92	13.89	45.90	11.42	32.97	20.99	128.71	168.37
扬州	7.69	417	277.76	4.73	29.59	34.12	12.94	38.50	41.99	115.90	141.14
镇江	7.81	304	238.52	3.18	14.34	37.66	10.48	32.08	14.50	126.27	139.74
常州	7.19	331	228.69	3.10	17.99	29.53	5.68	26.73	25.19	120.48	98.10
无锡	7.50	858	674.03	8.44	132.11	55.02	13.08	236.80	69.38	159.21	184.78
苏州	7.14	766	590.36	10.07	105.29	64.18	13.69	172.27	84.87	140.00	198.00
嘉兴	7.31	342	255.55	5.66	36.51	32.33	7.55	44.54	26.49	102.48	107.11
最小值	7.14	304	228.69	2.92	13.89	29.53	5.68	26.73	14.50	102.48	98.10
最大值	8.10	978	745.50	10.07	132.11	66.34	34.59	236.80	125.46	229.84	314.91
均值	7.60	534	405.37	6.06	52.08	47.26	14.49	82.67	50.38	125.06	176.56
标准差	0.30	239	188.85	2.77	41.15	13.52	7.86	69.09	33.29	49.83	62.45

1)总硬度和总碱度以CaCO₃计

2.2 大运河天然水化学时空变化特征

研究区河水主要离子浓度和其他水化学性质的空间变化(徐州-嘉兴)如图2所示。总体上,从

中游徐州站到下游段主要离子质量浓度有逐渐减小的趋势,但在无锡和苏州站都迅速升高。总硬度、总碱度和TDS与离子的质量浓度沿程变化趋

势基本上是一致的,即从徐州向下游呈降低趋势,但至无锡和苏州段又显著升高(图2).其中总硬度变化范围 98.10 ~ 314.91 mg·L⁻¹,硬度最大的是徐州站,最小的是常州站(表1).大运河水化学

空间变化的另一个显著特点是,扬州至镇江段大多数离子质量浓度和电导率都显著降低,这是由于该段京杭大运河流经长江发生了强烈的混合稀释作用.

表2 京杭大运河与国内外一些河流或城市段主要离子浓度对比¹⁾

河流	离子浓度/mg·L ⁻¹							
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	TDS
京杭大运河	6.06	52.08	47.26	14.49	82.67	50.38	152.43	405.37
莱茵河 ^[18]	6.40	91.00	80.50	11.40	74.00	173.00	158.00	594.30
泰晤士河 ^[19]	9.40	39.00	124.00	5.60	73.30	52.60	—	—
长江 ^[20]	8.20 *		34.10	7.60	11.70	2.90	133.80	198.30
黄河 ^[21]	3.04	56.99	64.08	26.16	105.84	64.22	218.01	538.34
珠江 ^[22]	7.69 *		31.64	6.50	12.02	2.45	124.00	184.30
松花江 ^[23]	15.63 *		16.14	4.96	8.14	7.34	88.21	140.42
伊洛河 ^[24]	3.61	23.86	64.60	20.22	20.68	110.88	178.73	422.58
金华江(城区段) ^[25]	4.22	8.97	22.04	2.66	40.03	24.06	71.60	173.58
赣江(南昌段) ^[26]	2.81	5.61	14.30	2.30	11.30	7.77	37.00	81.09

1) *表示 K⁺ 和 Na⁺ 浓度之和,—表示未测定

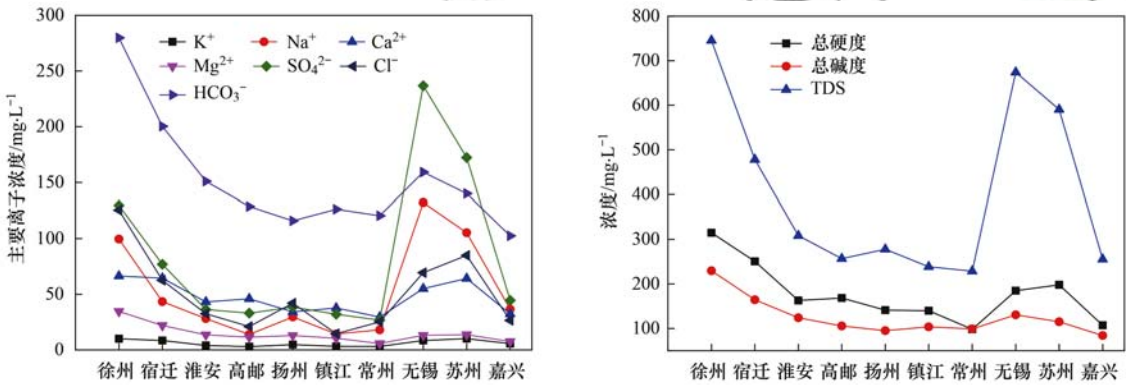


图2 研究区河水水化学基本特征空间变化趋势

Fig. 2 Spatial variations in the basic characteristics of the river hydrochemical composition in the study area

影响河流水化学空间变化的一个重要因素是人类活动,如河水中 TDS 变化与土地利用和人类活动程度密切相关^[29]. 本研究中徐州、无锡和苏州段较高的 TDS 与该段人为活动强度具有一致性,其中徐州段是研究区内矿产开采活动较强的区域^[30],而无锡和苏州人口密度高,生活污水和工业废水排放量大,对区段内地表水水化学产生显著影响^[31]. 此外,京杭大运河徐州至扬州段属于中等城市化水平,镇江至嘉兴段达到高水平城市化程度,而无锡和苏州段是京杭大运河沿线中城市化程度最高的区段^[32],这也和 TDS 的高值站点相一致.

根据收集到的研究区现有的历史数据,本研究分析了大运河苏锡常段的水化学历史变化.结果显示,京杭大运河苏锡常段主要离子和 TDS 在过去近 60 年中都显著升高(图3).例如,苏锡常段除 HCO₃⁻ 以外,所有主要离子和 TDS 都呈显著增加趋势($P < 0.01$),呈现出明显的盐渍化趋势.阳离子质量浓度升高最大的为 K⁺ + Na⁺ (主要为 Na⁺),阴离子升高最大的为

SO₄²⁻,分别升高了 16 和 12 倍,质量浓度升高较小的离子为 HCO₃⁻,也升高了 1.17 倍,而 TDS 较 60 年前升高了近 3 倍.各离子平均增加速率有所不同,其中 K⁺ + Na⁺ 平均升速为 1.44 mg·(L·a)⁻¹,Ca²⁺ 为 0.3 mg·(L·a)⁻¹,Mg²⁺ 为 0.05 mg·(L·a)⁻¹,Cl⁻ 为 0.86 mg·(L·a)⁻¹,SO₄²⁻ 为 2.22 mg·(L·a)⁻¹,HCO₃⁻ 为 0.34 mg·(L·a)⁻¹,TDS 为 5.21 mg·(L·a)⁻¹. 河流的盐渍化不仅对地表水质和水生态系统产生影响,包括促使重金属与其他污染物的扩散和生物多样性丧失等^[33],而且对输水管线和设施产生腐蚀等破坏作用;此外,水体盐渍化对饮用水安全也会产生明显的影响^[9,10]. 因此,大运河水质的盐渍化趋势所带来的水环境等问题需要给予重点关注.

2.3 天然水化学成因分析

Gibbs 通过对世界地表水水化学成分的研究,最早将地表水天然水化学成因的控制因素总结为大气降水、岩石风化和蒸发/结晶这 3 个主要作用,其

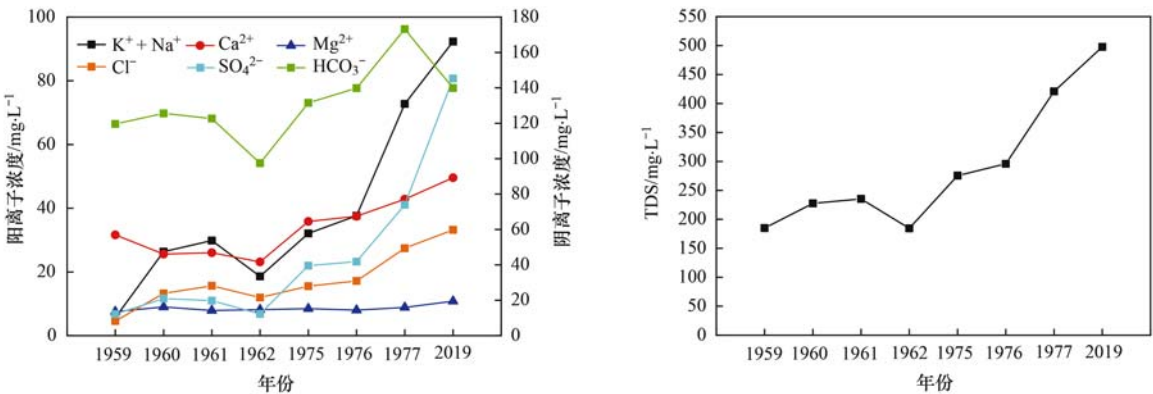


图3 苏锡常段主要离子和 TDS 历史变化

Fig. 3 Historical changes in major ions and TDS in the Suzhou, Wuxi, and Changzhou sections

Gibbs 图能够很好地定性说明水化学形成的自然控制因素^[2]. 京杭大运河目前水化学(2019 ~ 2020 年)均落在岩石风化区,但部分样品的 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 质量浓度比值大于 0.5 (图 4),这是受生活污

水和工业废水排放的影响,使水体 Na^+ 相对升高(表 1),导致这些样点在 Gibbs 图中向蒸发浓缩区域偏移,类似于干旱地区的河水,这也是水体盐渍化的表现形式之一.

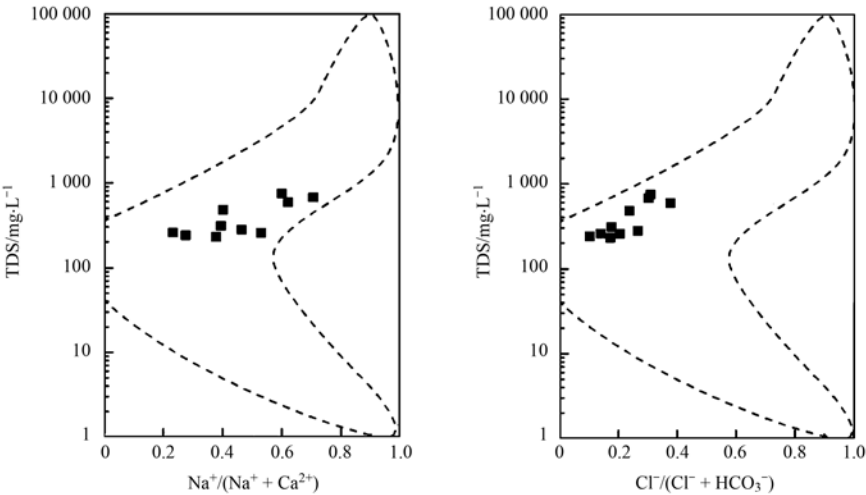


图4 研究区河水 Gibbs 分布模式

Fig. 4 Gibbs model of river water in the study area

Piper 图可以直观反映河流水体主要离子组成特征,并能辨别其控制端元^[34]. 大运河阳离子中, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 当量浓度均值分别为 0.16、2.26、2.36 和 1.21 meq·L⁻¹, Ca^{2+} 是优势阳离子,占阳离子总量的 39.45%,其次是 Na^+ (占 37.80%),而 K^+ 最低(占 2.59%);但在徐州、无锡和苏州段, Na^+ 成为优势阳离子,这种与地表淡水水体水化学相异常的情况反映了人类活动对水体的影响. 主要阴离子中, HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 当量浓度均值分别为 2.5、1.72 和 1.42 meq·L⁻¹,其中 HCO_3^- 占阴离子总量的 44.30%, SO_4^{2-} 和 Cl^- 分别占 30.54% 和 25.16%, HCO_3^- 为优势阴离子. 总体上,京杭大运河中下游段的水化学类型为重碳酸盐钙型水即 Ca-HCO_3 型(图 5),是受碳酸盐岩石风化作用

控制的地表水水化学类型.

分析水体中镁钙比变化可以进一步揭示碳酸盐的类型. 在碳酸盐岩风化溶解作用中方解石和白云石平衡溶解时,溶液中的 $\text{Mg}^{2+} / \text{Ca}^{2+} = 0.5$,如果纯白云石达到溶解平衡时 $\text{Mg}^{2+} / \text{Ca}^{2+} = 1$,而纯方解石达到溶解平衡时 $\text{Mg}^{2+} / \text{Ca}^{2+} = 0$ ^[35]. 京杭大运河中下游段 $\text{Mg}^{2+} / \text{Ca}^{2+}$ 为 0.49,说明溶解组分的主要来源以方解石和白云石的混合溶蚀产物为主(图 6).

在自然条件下(无人影响),流域碳酸盐岩风化溶解只受大气 CO_2 的侵蚀作用,此时水体 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / \text{HCO}_3^-$ 当量比接近 1. 当 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / \text{HCO}_3^-$ 当量比大于 1 时,说明有 CO_2 以外的酸性物质参与了流域碳酸盐侵蚀作用. 京杭大运河中下游段除常州外其他河段 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / \text{HCO}_3^-$ 当量比

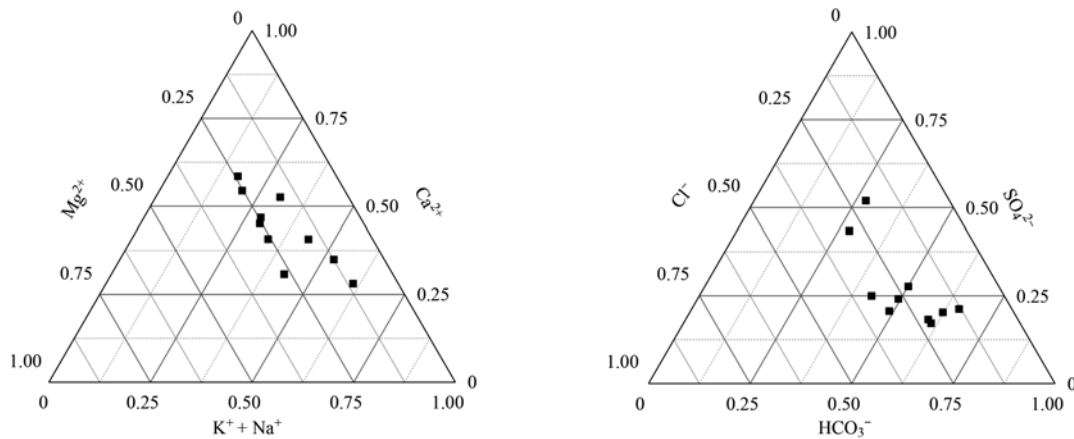
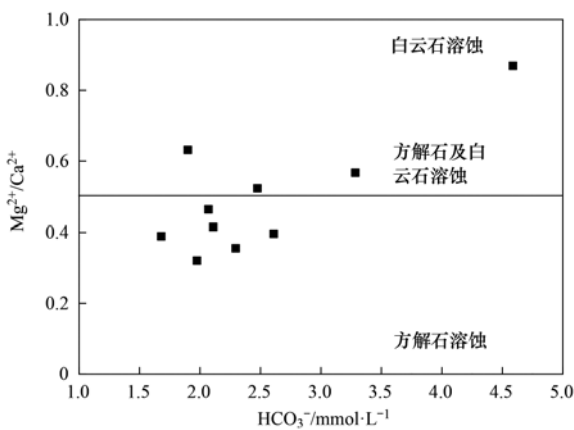


图5 2019~2020年研究区主要站点阴阳离子水化学组分

Fig. 5 Hydrochemical compositions of anions and cations at the main sites in the study area in 2019-2020

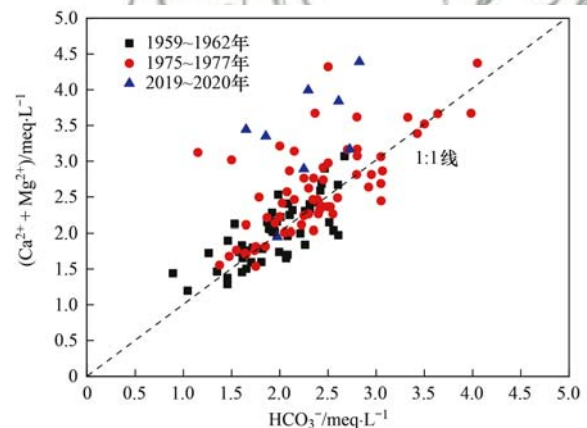
图6 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的变化关系Fig. 6 Variations in $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ vs. HCO_3^-

均大于1,说明运河水体明显受到人为排放酸性物质的影响.对主要离子水化学分析发现,运河水体的($\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$)与($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)有显著的相关性($R=0.81, P<0.01$),且($\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$)/($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)当量比值均近似为1,说明大气中硫氧化物广泛参与了流域碳酸盐岩的化学风化过程.以无锡和苏州地区为例,与1980年相比,该地区降雨pH均值下降了1.9个pH单位^[36],说明了人为排放的硫化物已对加速区域岩石风化产生了显著影响并直接影响到地表水水化学变化.

2.4 大运河天然水化学人为影响分析

基于以上分析,对运河苏锡常段1959年以来的($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)相对 HCO_3^- 变化做了进一步分析(图7).结果发现,在人为影响较小的1959~1962年,河水中($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)与 HCO_3^- 比均匀分布于1:1两侧,可以认为河水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于大气 CO_2 的溶蚀,很少受人为酸沉降的影响;1975~1977年比值已明显向>1:1线一侧偏移,体现人为酸性物质输入的影响;而目前(2019~2020年数据)该比值全部分布于>1:1线一侧,说明强烈

人为活动对大运河天然水化学性质产生了明显的改变,无锡和苏州段总硬度和TDS的显著升高(图2)很好地说明了人口密集区的城市活动对河水天然水化学的影响.大运河水化学不同年份的变化过程和流域社会经济发展趋势基本一致.

图7 苏锡常段河水($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)- HCO_3^- 不同年份的对比Fig. 7 ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) vs. HCO_3^- at different times in the Suzhou, Wuxi, and Changzhou sections

由于受到强烈人为因素的影响,京杭大运河中下游的徐州、无锡和苏州段均出现河水 Na^+ 质量浓度大于 Ca^{2+} 且 Cl^- 和 SO_4^{2-} 相对较高的现象,这和一般地表水水化学特征相矛盾.在天然水体中, Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 一般来自蒸发岩的风化,受人为活动的影响比其他离子更敏感^[37].京杭大运河中下游段是一个典型的例子,如徐州 Na^+ 质量浓度高与当地矿产开采有关,无锡和苏州则与生活污水和工业废水的排放量高有关^[31,38].目前,京杭大运河中下游段 Cl^-/Na^+ 摩尔比均值为0.73,接近污水中的 Cl^-/Na^+ 摩尔比值0.6^[37],而明显小于农业活动输入水的 Cl^-/Na^+ 摩尔比值(5)^[37].这说明了生活和工业废水排放是影响京杭大运河中下游段 Cl^- 和 Na^+ 变化的主要原因,而农业活动影响相对较小.

为进一步探讨人为活动对京杭大运河天然水化学的影响,以运河各城市段河水中的主要离子和各城市主要社会经济发展指标(人口、GDP、城市化率和土地利用等)为变量进行了主成分(PCA)分析,各变量和得到的3个主成分见表3.入选主成分的原则是其特征值大于1,3个主成分的累积方差贡献率达到93.72%,说明了目前大运河水化学的成因.其中第一主成分中各主要离子载荷值较大,代表决定水化学的一般自然因素;第二主成分中高载荷变量是GDP、人口密度和城市化率,说明水化学的人为影响因素;第三主成分中只有绿化覆盖率为高载荷,说明土地利用方式也是流域水化学形成的主

表3 京杭大运河中下游段河水主要离子主成分分析
Table 3 Principal component analysis of major ions in the middle-lower reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal

变量	主成分		
	1	2	3
K ⁺	0.940	0.251	-0.113
Na ⁺	0.777	0.588	-0.011
Ca ²⁺	0.931	0.083	0.116
Mg ²⁺	0.858	-0.382	0.295
HCO ₃ ⁻	0.846	-0.318	0.343
SO ₄ ²⁻	0.685	0.674	0.014
Cl ⁻	0.952	0.111	0.176
GDP	0.344	0.850	-0.056
人口密度	0.053	0.974	-0.019
城市化率	-0.139	0.962	0.144
绿化覆盖率	0.189	0.047	0.969
耕地面积	0.567	-0.737	0.266

导因素之一,如绿地通过吸收和滞留等对陆地上的离子有截留作用^[39].

考虑到SO₄²⁻和Cl⁻对人类活动较敏感^[37],且SO₄²⁻和Cl⁻沿程变异系数也最大,以这两种离子的变化结合社会经济发展情况来进一步说明人为活动对水化学的影响.统计大运河流域主要城市2014~2019年大气中平均SO₂质量浓度和对应城市段河水中SO₄²⁻质量浓度发现,总体上徐州至常州段大气SO₂质量浓度与水体SO₄²⁻变化趋势基本一致(图8),但无锡和苏州段大气SO₂质量浓度相对低,而水中SO₄²⁻相对高,是近年来发达城市对硫化物排放的严格控制^[40]和这两市工业废水排放量较高的结果^[31,38],至下游嘉兴段大气SO₂和水体中SO₄²⁻又表现出较好的一致性.

自然条件下地表水Cl⁻主要来自于蒸发岩的风化和大气降雨,但大运河流域的自然地理情况和前面Gibbs图分析说明蒸发岩的风化作用对运河水体Cl⁻的贡献基本可以忽略;同时运河流域降水量自北向南是逐渐增加的,而运河水体Cl⁻自北向南总体是降低趋势(无锡和苏州段升高,图2),所以降雨也不是运河水体Cl⁻变化的驱动因素.对运河流域各城市人口和效应城市段水体Cl⁻的相关分析显示,两者呈显著正相关($R=0.81, P<0.01$,图8),说明人口因素或生活污水排放是引起水体Cl⁻变化的决定因素.

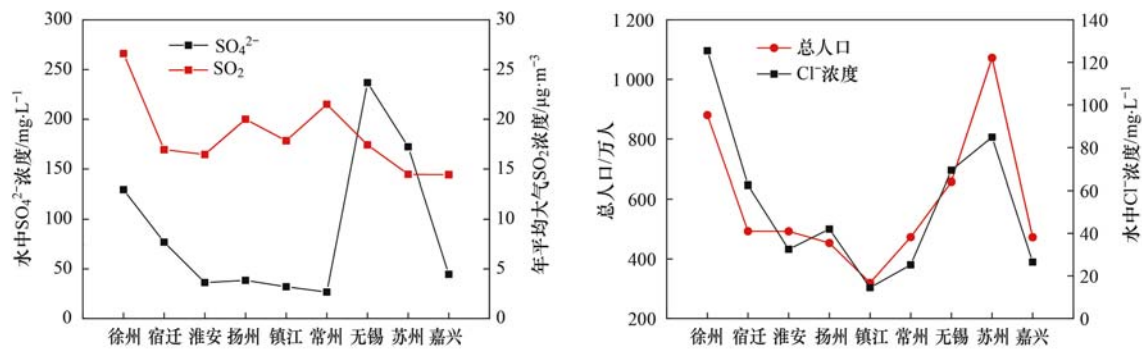


图8 大运河沿线主要城市水体中SO₄²⁻和Cl⁻与各市年均大气SO₂和人口的变化趋势
Fig. 8 Trends of SO₄²⁻ and Cl⁻ in the water bodies of the major cities along the Grand Canal and the average annual atmospheric SO₂ and population in each city

3 结论

(1)京杭大运河中下游段天然水化学主要受碳酸盐岩风化作用,水化学类型为Ca-HCO₃型;由于人为活动的影响,目前河水K⁺+Na⁺当量浓度占阳离子高达约40.39%,明显高于一般的地表淡水水体.

(2)大运河水体(Ca²⁺+Mg²⁺)/HCO₃⁻比值在

过去60年来有显著升高趋势,从1959~1962年的1:1左右到目前普遍大于1:1;分析显示,流域人为排放的酸性气体加速了碳酸盐岩的风化,是导致这一变化的根本因素.

(3)大运河主要离子浓度、总硬度和总碱度从徐州站向下游段有逐渐减小的趋势,但在无锡和苏州站都迅速升高;在过去的60年中,苏锡常段Na⁺和SO₄²⁻分别升高了约16倍和12倍,TDS也升高了

近3倍,大运河水质已出现明显的盐渍化趋势。

(4)大运河水体水化学特征的变化与流域各地的人口发展和经济发展趋势有高度的一致性。协调城市发展和水环境保护是大运河流域经济文化发展需要关注的内容。

参考文献:

- [1] Meybeck M. Global occurrence of major elements in rivers[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, **5**: 207-223.
- [2] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [3] Chen M, Qin X S, Zeng G M, *et al.* Impacts of human activity modes and climate on heavy metal "spread" in groundwater are biased[J]. *Chemosphere*, 2016, **152**: 439-445.
- [4] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Global anthropogenic phosphorus loads to freshwater and associated grey water footprints and water pollution levels: a high-resolution global study[J]. *Water Resources Research*, 2018, **54**(1): 345-358.
- [5] Meybeck M. Riverine quality at the anthropocene: propositions for global space and time analysis, illustrated by the Seine River[J]. *Aquatic Sciences*, 2002, **64**(4): 376-393.
- [6] 陈静生, 夏星辉, 张利田, 等. 长江、黄河、松花江60-80年代水质变化趋势与社会经济发展的关系[J]. *环境科学学报*, 1999, **19**(5): 500-505.
- Chen J S, Xia X H, Zhang L T, *et al.* Relationship between water quality changes in the Yangtze, Yellow and Songhua rivers and the economic development in the river basins[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, **19**(5): 500-505.
- [7] 张东, 秦勇, 赵志琦. 我国北方小流域硫酸参与碳酸盐矿物化学风化过程研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(11): 3568-3578.
- Zhang D, Qin Y, Zhao Z Q. Chemical weathering of carbonate rocks by sulfuric acid on small basin in North China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3568-3578.
- [8] Cañedo-Argüelles M, Kefford B J, Piscart C, *et al.* Salinisation of rivers: An urgent ecological issue [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **173**: 157-167.
- [9] Stets E G, Lee C J, Lytle D A, *et al.* Increasing chloride in rivers of the conterminous U. S. and linkages to potential corrosivity and lead action level exceedances in drinking water[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **613-614**: 1498-1509.
- [10] Li P Y, He X D, Guo W Y. Spatial groundwater quality and potential health risks due to nitrate ingestion through drinking water: a case study in Yan'an City on the Loess Plateau of northwest China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2019, **25**(1-2): 11-31.
- [11] Cai J D, Peng J. Introduction of Beijing-Hangzhou Grand Canal and analysis of its heritage values [J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2019, **26**: 2-7.
- [12] Zhuang W, Liu Y X, Chen Q, *et al.* A new index for assessing heavy metal contamination in sediments of the Beijing-Hangzhou Grand Canal (Zaozhuang Segment): a case study[J]. *Ecological Indicators*, 2016, **69**: 252-260.
- [13] Lu Y, Xu X L, Li T, *et al.* The use of a brine shrimp (*Artemia salina*) bioassay to assess the water quality in Hangzhou section of Beijing-Hangzhou Grand Canal[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, **88**(3): 472-476.
- [14] 中华人民共和国水利部. 中华人民共和国水文年鉴-长江流域水文资料[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1959-1977.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版, 2002. 120-123.
- [16] Meybeck M. Pathways of major elements from land to oceans through rivers [A]. In: Martin J M, Burton J D, Eisma D (Eds.). *River Inputs to Ocean Systems*[M]. New York: United Nations Press, 1981. 18-30.
- [17] Han G L, Liu C Q. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China[J]. *Chemical Geology*, 2003, **204**(1-2): 1-21.
- [18] Van Der Weijden C H, Middelburg J J. Hydrogeochemistry of the River Rhine: Long term and seasonal variability, elemental budgets, base levels and pollution[J]. *Water Research*, 1989, **23**(10): 1247-1266.
- [19] Neal C, Neal M, Hill L, *et al.* The water quality of the River Thame in the Thames Basin of south/south-eastern England[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **360**(1-3): 254-271.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Zhang S R, Lu X X, Higgitt D L, *et al.* Water chemistry of the Zhujiang (Pearl River): natural processes and anthropogenic influences[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, **112**(F1), doi: 10.1029/2006JF000493.
- [23] Cao Y J, Tang C Y, Song X F, *et al.* Major ion chemistry, chemical weathering and CO₂ consumption in the Songhua River Basin, northeast China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(11): 7505-7516.
- [24] 刘松韬, 张东, 李玉红, 等. 伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1184-1196.
- Liu S T, Zhang D, Li Y H, *et al.* Water sources and factors controlling hydro-chemical compositions in the Yiluo River Basin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1184-1196.
- [25] 闻欣然, 王天阳, 李凤全, 等. 金华江城区段河流水化学变化及其控制因素[J]. *地球与环境*, 2018, **46**(2): 146-155.
- Wen X R, Wang T Y, Li F Q, *et al.* Changes in river water chemistry of the urban section of Jinhu River and its controlling factors[J]. *Earth and Environment*, 2018, **46**(2): 146-155.
- [26] 李燕, 王鹏, 陈波, 等. 赣江南昌段水化学特征及城区影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, **27**(2): 386-394.
- Li Y, Wang P, Chen B, *et al.* Chemical feature in the Nanchang section of Ganjiang River and the influence of urban [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(2): 386-394.
- [27] Zhang Q Q, Jin Z D, Zhang F, *et al.* Seasonal variation in river water chemistry of the middle reaches of the Yellow River and its controlling factors [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, **156**: 101-113.
- [28] 陈静生, 李荷碧, 夏星辉, 等. 近30年来黄河水质变化趋势及原因分析[J]. *环境化学*, 2000, **19**(2): 97-102.
- Chen J S, Li H B, Xia X H, *et al.* A study on water-quality trend in the yellow river system from 1960's to 1990's [J]. *Environmental Chemistry*, 2000, **19**(2): 97-102.
- [29] 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.
- [30] Chen Y, Tan K, Yan S Y, *et al.* Monitoring land surface displacement over Xuzhou (China) in 2015-2018 through PCA-Based correction applied to SAR interferometry [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(12), doi: 10.3390/rs11121494.
- [31] 代丹, 张远, 于涛, 等. 太湖流域污水排放对湖水天然水化学的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(10): 3121-3130.
- Dai D, Zhang Y, Yu T, *et al.* Impact of sewage discharge on the water chemistry of Lake Taihu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(10): 3121-3130.
- [32] Li J T, Zhang H F, Sun Z F. Spatiotemporal variations of land urbanization and socioeconomic benefits in a typical sample zone: a case study of the Beijing-Hangzhou Grand Canal [J]. *Applied Geography*, 2020, **117**, doi: 10.1016/j.apgeog.2020.102187.
- [33] Stets D G, Sprague L A, Oelsner G P, *et al.* Landscape drivers of dynamic change in water quality of U. S. rivers [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(7): 4336-4343.
- [34] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1944, **25**(6): 914-928.
- [35] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1779-1787.
- Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* Major ionic features and their controlling factors in the upper-middle reaches of Wujiang River [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1779-1787.
- [36] Yu T, Xu Q J, He C D, *et al.* Long-Term trends in acid neutralizing capacity under increasing acidic deposition: A special example of eutrophic Taihu Lake, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(23): 12660-12668.
- [37] 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.
- [38] Yu T, Zhang Y, Wu F C, *et al.* Six-decade change in water chemistry of large freshwater Lake Taihu, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(16): 9093-9101.
- [39] 郭美丽, 臧剑甬. 甜土植物根部的钠离子应对策略研究进展 [J]. *植物生理学报*, 2011, **47**(11): 1025-1032.
- Guo M L, Zang J Y. Current progress of Na⁺ coping strategies in the roots of glycophytic plants [J]. *Plant Physiology Journal*, 2011, **47**(11): 1025-1032.
- [40] 张欢, 成金华, 冯银, 等. 特大型城市生态文明建设评价指标体系及应用——以武汉市为例 [J]. *生态学报*, 2015, **35**(2): 547-556.
- Zhang H, Cheng J H, Feng Y, *et al.* An evaluation index system for ecological civilization construction in megacities and its research applications: the case of Wuhan City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(2): 547-556.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PENG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)