

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期
Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM _{2.5} 质量浓度演变及驱动因子分析	蔡子颖,郝国,韩素芹,唐颖潇,杨旭,樊文雁,姚青,邱晓滨(1129)
天津市PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及来源分析	肖致美,徐虹,高璟,蔡子颖,毕温凯,李鹏,杨宁,邓小文,戴运峰(1140)
基于随机森林模型的武汉市城区大气PM _{2.5} 来源解析	张志豪,陈楠,祝波,陶卉婷,成海容(1151)
华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析	任秀龙,胡伟,吴春苗,胡偲豪,高娜娜,张崇崇,岳亮,王金喜,樊景森,牛红亚(1159)
“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征	吴安南,黄小娟,何仁江,李金建,叶林麟,吴涛,肖智丹,刘子锐,王跃思,张小玲,张军科(1170)
郑州市典型污染过程PM ₁₀ 中重金属浓度、来源及健康风险评估	翟诗婷,王申博,张栋,赵孝因,杨洁茹,刘洋,陈红阳,张瑞芹(1180)
长江经济带PM _{2.5} 空间异质性和驱动因素的地理探测	王丽丽,刘笑杰,李丁,孙颖琦(1190)
长三角地区PM _{2.5} 浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应	周丽霞,吴涛,蒋国俊,张建珍,濮励杰,徐飞,解雪峰(1201)
“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析	朱媛媛,王晓斐,汪巍,刀语,王帅,陈善荣(1212)
基于小波变换的山西省PM _{2.5} 污染特征及影响因素	张可可,胡冬梅,闫雨龙,彭林,段小琳,尹浩,王凯,邓萌杰(1226)
中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估	赵楠,卢毅敏(1235)
湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别	刘妍妍,杨雷峰,谢丹平,泽仁央宗,黄志烟,杨俊,赵鹏,韩静磊,贾文超,袁自冰(1246)
山东半岛近地面O ₃ 浓度时空变化及潜在源区解析	李乐,刘旻霞,肖仕锐,王思远,米佳乐(1256)
COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析	刘新军,王淑娟,刘程,范莉茹,付翠轻,齐堃,宿文康(1268)
淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析	王帅,王秀艳,杨文,王雨燕,白瑾丰,程颖(1277)
淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较	秦涛,徐勃,王信梧,李丽明,杨文,王晓丽,耿春梅(1286)
四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单	钱骏,韩丽,陈军辉,王斌,姜涛,徐晨曦,李英杰,王成辉,王波(1296)
餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征	李源速,吴爱华,童梦雪,栾胜基,李骞(1307)
堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构	于奥园,邢礼军,孙兴滨,仇天雷,王旭明,高敏(1315)
城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路	李廷昆,冯银厂,毕晓辉,张裕芬,吴建会(1323)
黄河干流水质评价与时空变化分析	刘彦龙,郑易安(1332)
典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例	王超,叶秋,贾伯阳,何文战,党超军,黄焱,杜浪(1346)
三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响	黄伟,张研,罗晓佼,张磊(1356)
派河及其支流溶解性有机质分子组成特征	詹亚,尹浩,冯景伟,冯艾荣,胡艳云,张刘,郑刘根(1365)
粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素	崔新月,莫武秋,廖建波(1375)
骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评价	龚润强,赵华璋,高占欣,胡冠九,卜元卿,张圣虎,邱慧(1384)
宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估	李富娟,高礼,李凌云,郑兰香,陶红,杨桂钦(1394)
百年以来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应	龚雄虎,赵中华,丁琪琪,张路,姚书春,薛滨(1404)
长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异	胡愈忻,张静,黄杰,段春建,李天翠,刘威,王英才,胡圣(1414)
河套平原灌溉间隙期乌梁素海水体细菌群落结构特征	史玉娇,李文宝,张博尧,姚国旺,史小红(1424)
不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响	舒旺,王鹏,丁明军,张华,黄高翔,聂明华(1434)
鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征	刘淑丽,简敏菲,邹龙,胡启武(1447)
微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响	陶辉,戚怡婷,于多,杨兰,顾颖,厉彦辉(1455)
乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律	刘禹,史小红,张生,郝若男,孙标,赵胜男(1463)
老化前后微塑料对富里酸的吸附	宋亚丽,俞娅,郝磊,汪华,朱文芳(1472)
天津市滨海河流N、O ₃ 扩散通量及控制因子	汤梦瑶,胡晓康,王洪伟,王云仓,常素云,王松庆,钟继承(1481)
铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响	陈鑫童,郝庆菊,熊艳芳,胡剑,江长胜(1492)
降雨径流污染风险等级识别与优化方法	齐小天,张质明,赵鑫,胡文翰,刘迪(1500)
基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析	江杉杉,王臻宇,高权,杨愿愿,高方舟,胡佩,应光国(1512)
聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(Ⅲ)的选择性吸附效果与机制	赵文金,张顺,安晓强,兰华春,刘会娟,曲久辉(1521)
F/M对活性污泥微生物生态网络的影响	张冰,孙展翔,文湘华(1529)
城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例	刘书准,王德伟,施泽明,唐亮,章凤英,廖程,李晓雨,徐文斌(1535)
基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估	王蕊,陈楠,张二喜(1546)
湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转化特征及污染评价	张龙,宋波,黄凤艳,肖乃川,顿梦杰(1558)
生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应	杨士,刘祖文,龙培,毕永顺,林苑,左华伟(1567)
溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤	闵涛,罗彤,陈丽丽,茹思博,李俊华(1577)
铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制	连斌,吴骥子,赵科理,叶正钱,袁峰(1584)
不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异	刘畅,徐应明,黄青青,陶雪莹,王林,孙约兵,赵立杰(1596)
镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性	任超,任成仲,王浩,朱利文,李竞天,杜倩倩,李萍(1606)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响	刘坤和,薛玉琴,竹兰萍,徐飞,朱志豪,张拓,张富斌(1620)
蚯蚓/钾锰改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响	苏倩倩,李莲芳,朱昌雄,叶婧,刘雪,耿兵,田云龙,黄晓雅(1630)
DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响	罗洋,孙丽,刘方,任军,郭金梅,闫修民(1641)
地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响	胡志娥,肖谋良,王双,童瑶瑶,鲁顺保,陈剑平,葛体达(1649)
增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响	王兴,钟泽坤,朱玉帆,王佳懿,杨改河,任成杰,韩新辉(1657)
秸秆还田、地膜覆盖及施氮对冬小麦田N ₂ O和N ₂ 排放的影响	彭毅,李惠通,张少维,阳婷,王筱斐,周春菊,王林权(1668)
基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤氮挥发的影响	赵政鑫,王晓云,田雅洁,王锐,赵青,蔡焕杰(1678)
施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析	冉继伟,肖琼,黄敏,蔡岸冬,张文菊(1688)

典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析：以重庆市清水溪为例

王超¹, 叶秋², 贾伯阳², 何文战^{2*}, 党超军², 黄焱², 杜浪²

(1. 中国长江三峡集团有限公司博士后科研工作站, 北京 100038; 2. 长江生态环保集团有限公司, 武汉 430062)

摘要: 城市地表水水环境问题严重制约城市的进一步发展和市民对美好生活的向往, 因此广受社会各方关注. 由于地形特殊, 与平原城市相比, 山地城市地表水水环境特征及污染问题有其自身特点. 在 2019 年 8 月和 10 月两次通过采集位于重庆市主城区典型山地城市河流——清水溪干支流地表水和干流河底沉积物, 并监测地表水、沉积物样品中碳、氮和磷等营养元素以及其它基本理化指标. 结果表明, 现阶段清水溪地表水属劣 V 类, 在综合污染指数评价体系中属严重污染级别. 在所有水质指标中, NH_4^+ 和 TP 超标最为严重. 清水溪地表水水质呈现出支流优于干流、降雨期优于非降雨期的时空分布特征. 污染源、尾水/支流汇入和河流自净能力共同决定了营养元素在清水溪干流地表水中的空间分布规律. 源头污水直排和中下游的污水溢流等点源污染是清水溪干流地表水最主要的污染源, 面源污染对水质的影响有限, 河底沉积物在河流处于不同的水量条件下会发生营养元素“汇”与“源”间的相互转化, 体现出内源污染的复杂性. 支流/污水处理站尾水汇入的稀释作用, 以及由于山地河流地表水中高 DO 导致其较高的自净能力, 使得干流地表水水质向下游有逐步改善的趋势. 综上所述, 建议通过在重点区域市政管网的布设减少点源污染的输入, 对污水处理站提标改造为河流提供更低营养元素浓度的水源, 在 DO 较低河段进行河道清淤等多种方式, 对清水溪进行水环境综合整治.

关键词: 山地城市河流; 地表水; 营养元素; 空间分布; 点源污染; 面源污染

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1346-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202106209

Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing

WANG Chao¹, YE Qiu², JIA Bo-yang², HE Wen-zhan^{2*}, DANG Chao-jun², HUANG Yi², DU Lang²

(1. Post-Doctoral Scientific Research Workstation, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. Yangtze Ecology and Environment Co., Ltd., Wuhan 430062, China)

Abstract: Surface water pollution seriously restricts the development of the city and results in the citizens yearning for a better life. Mountainous cities have their own characteristics in surface water environment and pollution compared with those of plain cities due to their unique topography. In August and October 2019, surface water and sediments were collected in a typical river (Qingshuixi River) in the main urban area of Chongqing. These samples were analyzed for nutrients such as carbon, nitrogen, and phosphorus as well as other basic physicochemical indicators. The results showed that the surface water of the Qingshuixi River was inferior to Category V at present, and it was also at a serious pollution level according to the comprehensive pollution index evaluation system. Among all the water quality indices, NH_4^+ and TP showed the most serious pollution. The tributaries of the Qingshuixi River exhibited higher surface water quality than that of the main stream, and the water quality during the rainfall season was better than that during the non-rainy season. Pollution sources, tailwater/tributary inflow, and river self-purification capacity determined the spatial distribution of nutrients in the surface water of the mainstream of the Qingshuixi River. Point sources such as the direct discharge of source sewage and pollution overflow in the middle and lower reaches were the most important sources of surface water pollution in the mainstream of the Qingshuixi River. Non-point source pollution had a limited impact on water quality. The “sink” or “source” role transformation of river sediments would occur under different water volume conditions in the river, reflecting the complexity of endogenous pollution. Surface water quality of the main stream showed a gradual improvement tendency along the downstream due to the dilution of the tail water/tributary inflow and the increased self-purification capability of the surface water in the mountainous rivers due to the increased DO content. To summarize, this study suggests that the water environment of the Qingshuixi River should be improved in comprehensive ways, which might be reducing the input of point source pollution by the deployment of the municipal pipe network in key areas, upgrading the sewage treatment plants to decrease pollutant concentrations or fluxes or channel dredging at the reaches with low DO content, etc.

Key words: mountainous urban river; surface water; nutrients; spatial distribution; point source pollution; non-point source pollution

城市化过程增加了城市人口密度,也提升了城市居民生活水平,同时促使更多的碳、氮和磷等营养元素输入到城市流域,而河流地表水是这些营养元素输出城市流域的主要路径之一^[1]. 因此,城市化势必会加重城市流域地表水的营养元素负荷,使城市流域地表水环境恶化. 我国处于高速城市化阶段,全国各区域城市流域中有相当比例的地表水处于 V 类和劣 V 类,甚至存在黑臭水体^[2~4]. 地表水环

境问题已成为制约我国城市建设、经济发展的重要因素之一.

了解营养元素在城市流域地表水中的时空分布规律以及主要影响因素,是有效治理地表水环境问

收稿日期: 2021-06-25; 修订日期: 2021-08-16

作者简介: 王超(1987~),男,博士,主要研究方向为元素地球化学循环, E-mail: wangchao241221@163.com

* 通信作者, E-mail: he_wenzhan@ctg.com.cn

题的基础^[2,5]. 城市流域地表水中营养元素的分布规律主要受污染源类型和空间分布的影响, 其中生活源等点源污染被认为是最主要的影响因素^[6,7]. 在全国大部分城市流域, 地表水流经市政设施不完善和人口稠密区域时, 水体营养元素浓度会达到峰值^[4], 有研究表明地表水水质与建设面积占比密切相关^[8]. 随降雨-径流过程进入地表水的城市面源污染^[9], 会造成营养元素浓度从上游向下游递增^[10]. 在部分城市流域地表水中的营养元素浓度与河底沉积物营养元素含量呈现一致的空间分布规律^[11], 累积于河底沉积物中营养元素的内源释放^[12], 也是影响城市流域地表水水质空间分布的重要因素之一. 此外, 营养元素浓度较低的支流或其它水源汇入的稀释作用, 以及生物化学作用所致的河流自净^[13,14], 均会造成营养元素浓度出现从上游向下游递减的趋势. 受上述众多因素影响, 城市流域地表水中营养元素的时空分布规律十分复杂.

现有研究多集中于平原城市, 对山地城市的营养元素时空分布规律的研究较少. 受山地地形影响, 山地地表水具有河流比降大, 流速快, 降雨-径流过程陡涨陡落, 基流小等水文特性^[15], 而水文特征一定程度上决定了地表水中营养元素的时空分布规律. 因此, 与平原城市相比, 山地城市地表水中营养元素的时空分布规律有其自身特点. 清水溪流经重庆市主城区沙坪坝区, 位于三峡库区库尾, 是长江的二级支流, 属典型的城市山地流域. 重庆市是我国西部重要的重工业城市, 清水溪流经了沙坪坝核心区, 是重庆主城区发展最早和人口最为稠密的区域之一, 有学者研究表明清水溪是重庆主城区污染最为严重的河流之一^[3,16]. 清水溪的水环境问题不但影响了城市居民的健康生活, 也对三峡库区水质构成严重威胁. 本研究通过对典型山地城市流域地表水和河底沉积物中碳、氮和磷等营养元素的监测与分析, 结合流域内污水直排/溢流口和污水处理站尾水排放情况的调查, 揭示典型山地城市流域地表水营养元素的时空分布规律及主要影响因素, 以为山地城市流域地表水环境综合治理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

清水溪发源于重庆歌乐山, 南北贯穿沙坪坝区, 在磁器口附近汇入嘉陵江, 属于长江流域二级支流. 流域面积 36.5 km^2 , 干流全长 15.88 km , 主河道平均坡降 26.6‰ ^[16]. 流域属亚热带湿润气候, 多年平均气温为 $17.8 \sim 18.6^\circ\text{C}$, 多年平均降水量在 $1085.1 \sim 1141.8 \text{ mm}$, 约 70% 的降雨集中于 5~9 月^[17]. 流

域内共设置 4 座污水处理站, 处理规模在 $2500 \sim 3500 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间, 全年基本满负荷运行, 其尾水总排放量约占清水溪径流量的四分之一. 污水处理站设计出水水质为一级 B 标, 但实际监测出水水质优于设计标准. 3 座污水处理站分别布设于芭蕉沟、紫金沟和石梯沟这 3 条主要支流, 另外一座布设于干流上游. 沿河存在较大型的污水溢流口共计 10 处, 其中干流有 4 处(图 1).

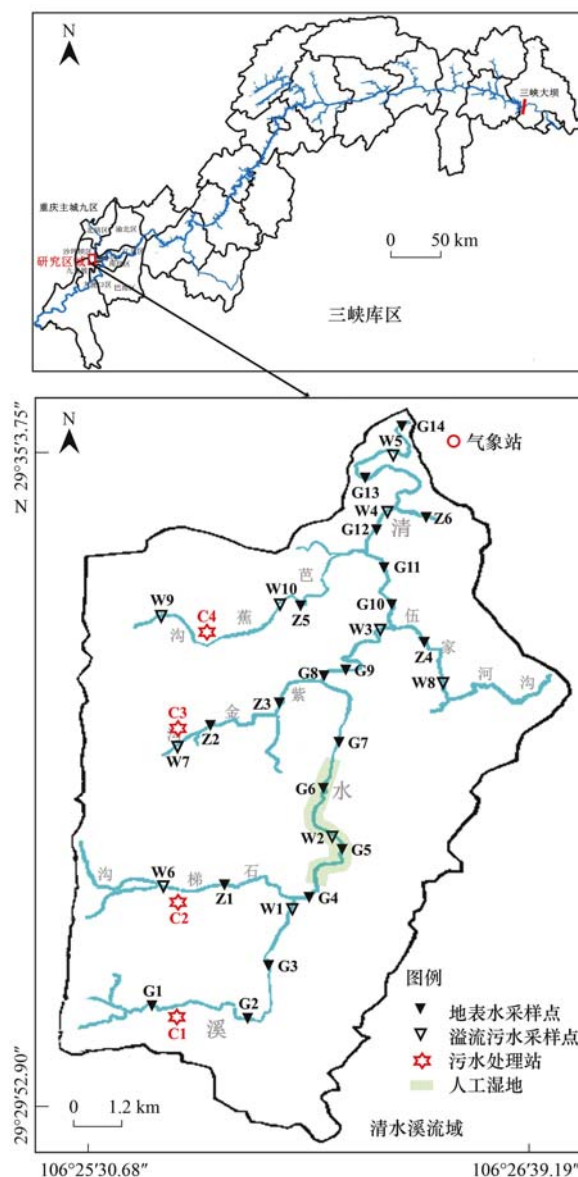


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Locations of sampling sites in the study area

1.2 样品采集与分析

分别在 2019 年的 8 月 31 日和 10 月 20 日进行了野外采样. 其中, 8 月 31 日降雨量仅 2.2 mm , 前期 20 d 内没有降雨; 10 月 20 日降雨量为 17.9 mm , 前期 20 d 内累积有 138.4 mm 降雨(气象数据源于流域内的沙坪坝气象站). 清水溪基流较小, 流量易受降雨-径流影响. 因此, 10 月第二次采样时河

流流量明显大于8月第一次采样过程.

第一次采样时,同时采集清水溪地表水和底泥样品.其中干流地表水样品14个,干流底泥样品14个,支流地表水样品6个(图1);由于底泥元素组分较为

稳定,第二次仅在相同点位采集干支流地表水样共计20个.两次采样过程中同步采集了4座污水处理站尾水和10处污水溢流口的水样(表1).采集样品全程冰袋保存,当日送回实验室进行后续分析.

表1 溢流污水和污水处理站尾水基本理化性质¹⁾

Table 1 Basic physical and chemical properties of overflow sewage and sewage treatment plants tail water									
水样	月份	编号	$\rho(\text{COD})$ /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{NH}_4^+)$ /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{SS})$ /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{TP})$ /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{TN})$ /mg·L ⁻¹	DO /mg·L ⁻¹	$P_{\text{地}}$
溢流污水	8	W1	44	22.1	448	1.58	24.9	2.08	5.5
		W2	31	21	70	2.17	23.7	3.92	5.9
		W3	81	18.4	24	1.34	26	6.24	5.4
		W4	102	17.6	28	1.78	28.3	5.76	5.7
		W5	20	6.94	15	1.18	10.7	6.67	2.9
		W6	11	0.11	11	0.57	9.14	8.28	1.3
		W7	82	18.8	29	2.57	24.2	2.52	6.2
		W8	66	18.7	25	1.7	24.6	4.21	5.4
		W9	144	27.6	102	3.38	28.6	2.6	8.8
		W10	97	18.1	23	1.52	25.1	5.54	5.6
	10	W1	84	21.6	33	2.07	27.7	2.46	6.2
		W2	39	15.4	10	1.69	18.8	3.76	4.6
		W3	10	3.21	284	0.53	8.22	5.88	1.6
		W4	192	30.7	115	2.66	32.5	5.24	9.4
		W5	206	26.2	8	2.67	30.3	5.58	8.8
		W6	18	4.54	11	0.48	9.75	8.76	2.0
		W7	11	1.9	12	0.2	7.03	4.32	0.9
		W8	70	19	35	2.01	23	4.06	5.8
		W9	24	6.65	12	0.55	23.8	4.81	2.2
		W10	26	6.39	12	0.72	10.1	5.15	2.3
污水处理站尾水	8	C1	19	0.27	8.1	0.94	11.3	—	1.3 [*]
		C2	18	0.24	8.2	0.43	5.7	—	0.7 [*]
		C3	17	0.25	7.1	0.54	6.3	—	0.8 [*]
		C4	14	0.27	7.2	0.6	12	—	0.9 [*]
	10	C1	16.8	0.31	6.83	0.7	16	—	1.0 [*]
		C2	11	0.3	6.71	0.48	18	—	0.7 [*]
		C3	10	0.32	7.54	0.43	15	—	0.7 [*]
		C4	8.8	0.44	7.49	0.46	17	—	0.7 [*]

1) $P_{\text{地}}$ 的表述见 1.3 节, * 表示 $P_{\text{地}}$ 由 COD、 NH_4^+ 和 TP 这 3 种水质指标计算而得

水样 pH 和溶解氧(DO)在野外采集时利用便携式多参数水质分析仪测得.水样中的化学需氧量(COD)测定采用重铬酸盐法(HJ 828-2017),氨氮(NH_4^+)测定采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535-2009),总磷(TP)测定采用钼酸铵分光光度法(GB/T 11893-1989),总氮(TN)测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636-2012),悬浮物(SS)测定采用重量法(GB/T 11901-1989).底泥样品中的有机质(TOC)测定采用低温外热重铬酸钾氧化-比色法测定(NY/T 1121.6-2006),TP 测定采用碱熔-钼锑抗分光光度法(HJ/T 632-2011),TN 测定采用凯氏法(HJ 717-2014).

1.3 数据处理

$$P_{\text{地}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{c_{\text{Bi}}}$$

式中, $P_{\text{地}}$ 为地表水综合污染指数,是一种利用多种

水质指标对地表水环境质量进行综合评价的指数^[18]; c_i 为第 i 种水质指标实测浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; c_{Bi} 为第 i 种水质指标评价标准值, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 本研究以清水溪目标水质——Ⅳ类地表水为标准, $\rho(\text{COD})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 、 $\rho(\text{TP})$ 和 DO 限值分别为 30、1.5、0.3 和 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 评价等级体系参考白冬锐等^[11] 的研究, 共分清洁/安全($P_{\text{地}} < 0.2$)、尚清洁/警戒线($0.2 \leq P_{\text{地}} < 0.4$)、轻度污染($0.4 \leq P_{\text{地}} < 0.7$)、中度污染($0.7 \leq P_{\text{地}} < 1.0$)、重污染($1.0 \leq P_{\text{地}} < 2.0$)和严重污染($P_{\text{地}} \geq 2.0$)6 个级别.

$$P_{\text{N}} = \left\{ \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S_{\text{Bi}}} \right)^2 + \frac{1}{2} \left[\max \left(\frac{S_i}{S_{\text{Bi}}} \right) \right] \right\}^{0.5}$$

式中, P_{N} 为河底沉积物内梅罗污染指数,是一种利用多种沉积物元素含量对沉积物污染程度进行综合评价的指数; S_i 为第 i 种营养元素实测浓度,

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; S_{Bi} 为第 i 种营养元素评价标准值, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 本研究参考加拿大安大略省环境和能源部 (1992 年) 制定的环境质量评价指南标准中安全级的营养水平^[19], 沉积物 $\omega(\text{TOC})$ 、 $\omega(\text{TN})$ 和 $\omega(\text{TP})$ 限值分别为 10、5.5 和 $6.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 评价等级参考土壤环境监测技术规范 (HJ/T 166-2004), 共分清洁/安全 ($P_{\text{N}} \leq 0.7$)、尚清洁/警戒线 ($0.7 < P_{\text{N}} \leq 1.0$)、轻度污染 ($1.0 < P_{\text{N}} \leq 2.0$)、中度污染 ($2.0 < P_{\text{N}} \leq 3.0$) 和重污染 ($P_{\text{N}} > 3.0$) 5 个级别.

采用 SPSS 19 和 CANOCO 5.0 数据处理软件, 利用 Pearson 相关性分析和冗余分析 (RDA) 判断水样中各种水质指标与采样点地理环境、底泥营养元素含量间的相关关系^[20].

2 结果与讨论

2.1 地表水污染程度

清水溪地表水水质现状如表 2 所示, 总体而言清水溪支流水质显著优于干流, 受前期降雨影响流量较高的 10 月水质显著优于处于伏旱期流量较小的 8 月. 所有水质指标中, NH_4^+ 和 TP 超标最为严重, 8 月和 10 月干流 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 平均值分别为 $10.74\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.87\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 是 V 类水质标准限值的 5.37 倍和 2.44 倍. 8 月和 10 月干流 $\rho(\text{TP})$ 平均值分别为 $1.54\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.58\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 是 V 类水质标准限值的 3.85 倍和 1.45 倍. 两次采样中, 几乎所有干流点位水样 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 和 $\rho(\text{TP})$ 均处于劣 V 类, 而除干流上中游少数点位外, 大部分点位水样 $\rho(\text{COD})$ 和 DO 优于 IV 类水质标准限值 (图 2). 清水溪各支流水质情况较为良好, 除 8 月 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 和 $\rho(\text{TP})$ 外, 支流 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 、 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{COD})$ 和 DO 均

值优于 IV 类水质标准限值 (图 2). 利用综合指数法对清水溪水质进行综合评价, 8 月干支流地表水综合污染指数均值分别为 3.66 和 2.03, 均属于严重污染 (≥ 2.0), 10 月干支流地表水综合污染指数均值分别为 1.96 和 1.17, 均属于重度污染 ($1.0 \leq P_{\text{地}} < 2.0$). 两次采样中, 无论干支流, 几乎所有点位均处于综合指数评价体系中的重度污染和严重污染级别, 说明清水溪地表水污染问题突出.

张占梅等^[3]的研究对重庆市主城区多条河流的水质评价发现, 清水溪处于劣 V 类水, 是重庆市主城区污染最为严重的河流之一, 与本研究的结果一致. NH_4^+ 是超标最突出的营养元素, 也与文献^[3]的研究结果一致, 反映了清水溪地表水主要受生活源影响. 8 月清水溪部分点位地表水 NH_4^+ 和 TP 远超“轻度黑臭”标准 [$\rho(\text{TP}) \geq 0.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+) \geq 8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$], 由于清水溪河流比降大, 河段多处有跌水, 水体中 DO 远高于平原城市^[2], 使得清水溪地表水在维持高 NH_4^+ 和 TP 的情况下没有出现黑臭现象, 体现了山地城市的河流水环境特质.

河底沉积物中的营养元素含量是对城市河流历史污染情况的综合反映^[14]. 本研究中, 清水溪干流河底沉积物中的 TOC、TN 和 TP 远超加拿大安大略省环境和能源部 (1992 年) 制定的环境质量评价指南标准中安全级的营养水平^[19]. 清水溪河底沉积物的 TN 和 TP 高于 10 年前宋厚燃等^[21]对附近同属嘉陵江支流梁滩河的研究, TN 与近些年刘欢等^[22]对梁滩河的研究结果相近. 清水溪干流河底沉积物内梅罗指数在 3.08 ~ 19.00 之间, 均值为 7.77, 全部点位均处于评价体系的重污染级别 ($P_{\text{N}} > 3$), 也是该体系污染程度的最高级. 清水溪河底沉积物的污

表 2 地表水和沉积物基本理化性质¹⁾

Table 2 Basic physical and chemical properties of surface water and sediments

月份	地表水					
	pH		T/℃		$\rho(\text{SS})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	
	干流	支流	干流	支流	干流	支流
8	7.45 ± 0.36a	7.46 ± 0.36a	25.64 ± 1.29a	25.12 ± 0.82a	14.07 ± 7.15a	9.83 ± 3.02a
10	7.33 ± 0.58a	7.63 ± 0.71a	21.71 ± 2.68b	21.23 ± 1.65b	11.00 ± 5.28a	7.50 ± 1.26a
月份	$\rho(\text{TN})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		$\rho(\text{COD})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		$\rho(\text{NH}_4^+)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	
	干流	支流	干流	支流	干流	支流
8	14.99 ± 6.81a	5.53 ± 2.74a	24.36 ± 11.65a	12.33 ± 7.56a	10.74 ± 7.34a	2.02 ± 2.16a
10	11.25 ± 2.12a	6.49 ± 2.37a	28.29 ± 10.52a	13.50 ± 5.19a	4.87 ± 1.92b	1.35 ± 1.87a
月份	$\rho(\text{TP})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		$P_{\text{地}}$	
	干流	支流	干流	支流	干流	支流
8	1.54 ± 0.70a	0.56 ± 0.36a	4.71 ± 2.16a	5.32 ± 2.10a	3.66 ± 1.79a	2.03 ± 1.02a
10	0.58 ± 0.20b	0.31 ± 0.20a	5.14 ± 2.32a	6.92 ± 2.37a	1.96 ± 0.63b	1.17 ± 0.52a
沉积物						
$\omega(\text{TOC})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		$\omega(\text{TN})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TP})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		C/N	N/P
75.24 ± 59.24		3.76 ± 1.81	2.04 ± 1.05		21.98 ± 22.73	2.34 ± 1.54
						P_{N}
						7.77 ± 4.02

1) 数据以平均值 ± 标准差表示, 其中干流地表水和沉积物 $n = 14$, 支流水质 $n = 6$; 不同小写字母表示不同采样月份地表水间具有显著差异; 黑体字表示干支流地表水间具有显著差异

染程度远高于长江中下游南京、苏州等城市河流^[11,23]. C/N 均值为 21.98, 远大于 10; N/P 均值为 2.34, 远小于 16, 均说明沉积物中的有机质、磷主要

源于外源输入^[24,25].

2.2 地表水营养元素的空间分布规律

如图 2 所示, 除 COD 的 G9 点位外, 两次采样中

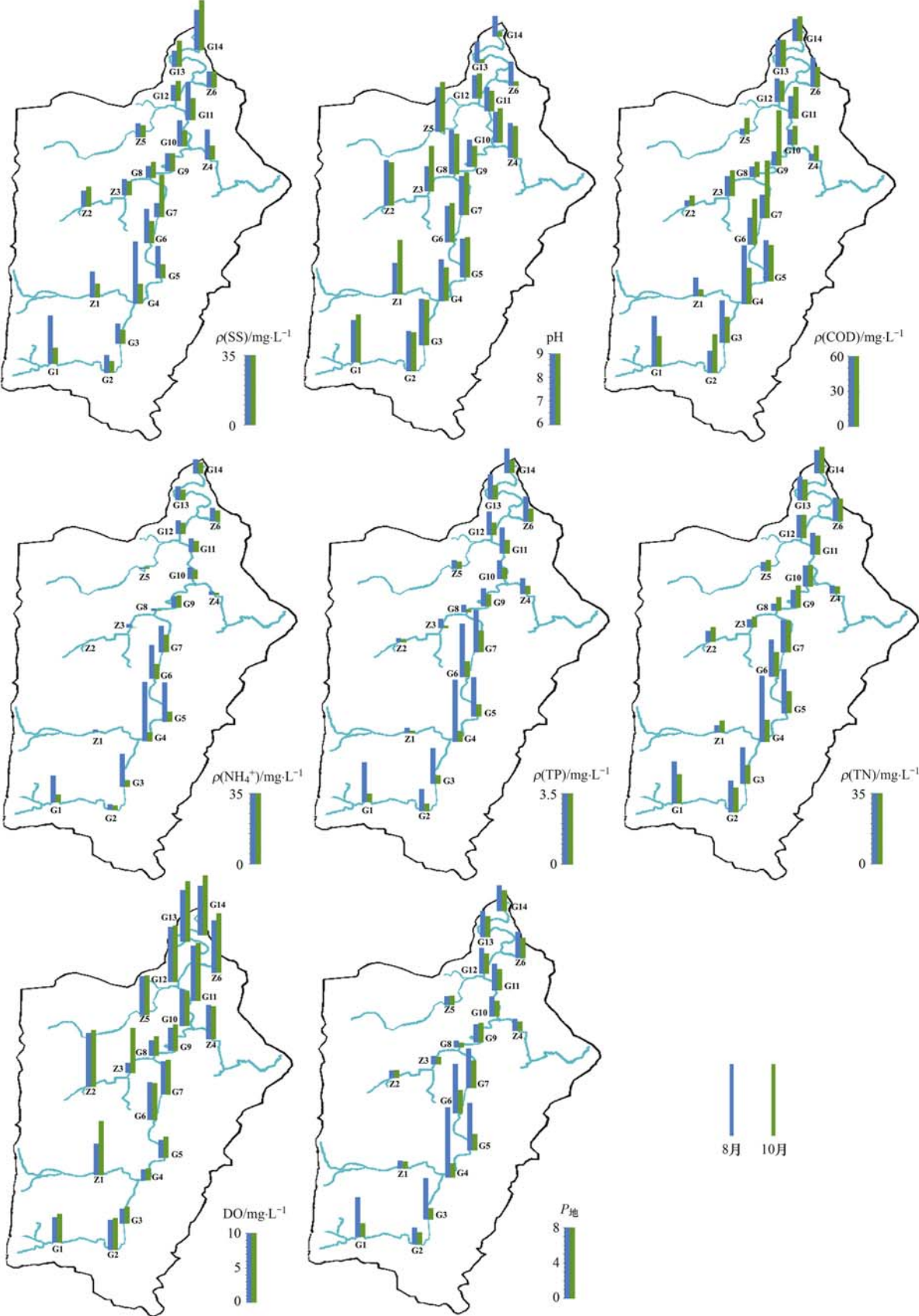


图 2 地表水中各种水质指标的时空分布

Fig. 2 Spatial and temporal distribution of various water quality indices in surface water

地表水 NH_4^+ 、TP、COD 和 DO 这 4 种主要水质指标沿程的变化趋势基本一致, 8 月 NH_4^+ 等营养元素呈现先减少再增加, 然后再减小并在下游趋于平稳; 10 月 NH_4^+ 等营养元素变化趋势与 8 月类似, 只是中游峰值由 G4 移至 G7 点位。 NH_4^+ 是计算综合污染指数 $P_{\text{地}}$ 超标最为严重的指标, $P_{\text{地}}$ 的变化趋势也与 NH_4^+ 变化规律类似。沉积物中 TOC、TN、TP 和 P_{N} 也有与地表水中 NH_4^+ 较为一致的空间变化规律(图 3)。

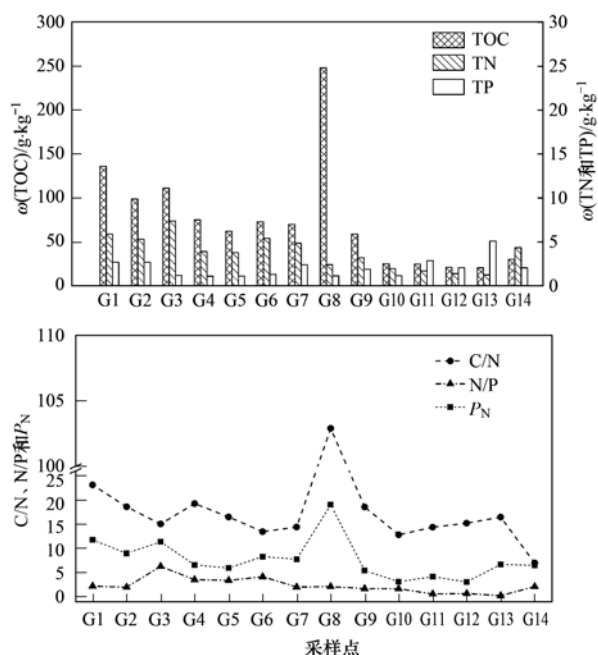


图 3 沉积物中各种营养元素的时空分布

Fig. 3 Spatial and temporal distribution of various nutrients in sediments

利用 RDA 分析影响本研究区域地表水质空间分布的主要地理因子, 如图 4 所示, 8 月清水溪流域中支流/尾水汇入 ($n = 14$, $F = 3.9$, $P < 0.05$)、入河口距离 ($n = 14$, $F = 4.6$, $P < 0.05$) 和污水溢流 ($n = 14$, $F = 3.5$, $P < 0.05$) 均对干流地表水水质空间变异有显著贡献; 10 月清水溪流域中到入河口距离 ($n = 14$, $F = 7.0$, $P < 0.01$) 和支流/尾水汇入 ($n = 14$, $F = 6.4$, $P < 0.05$) 是干流地表水水质空间变异的主要影响因子。

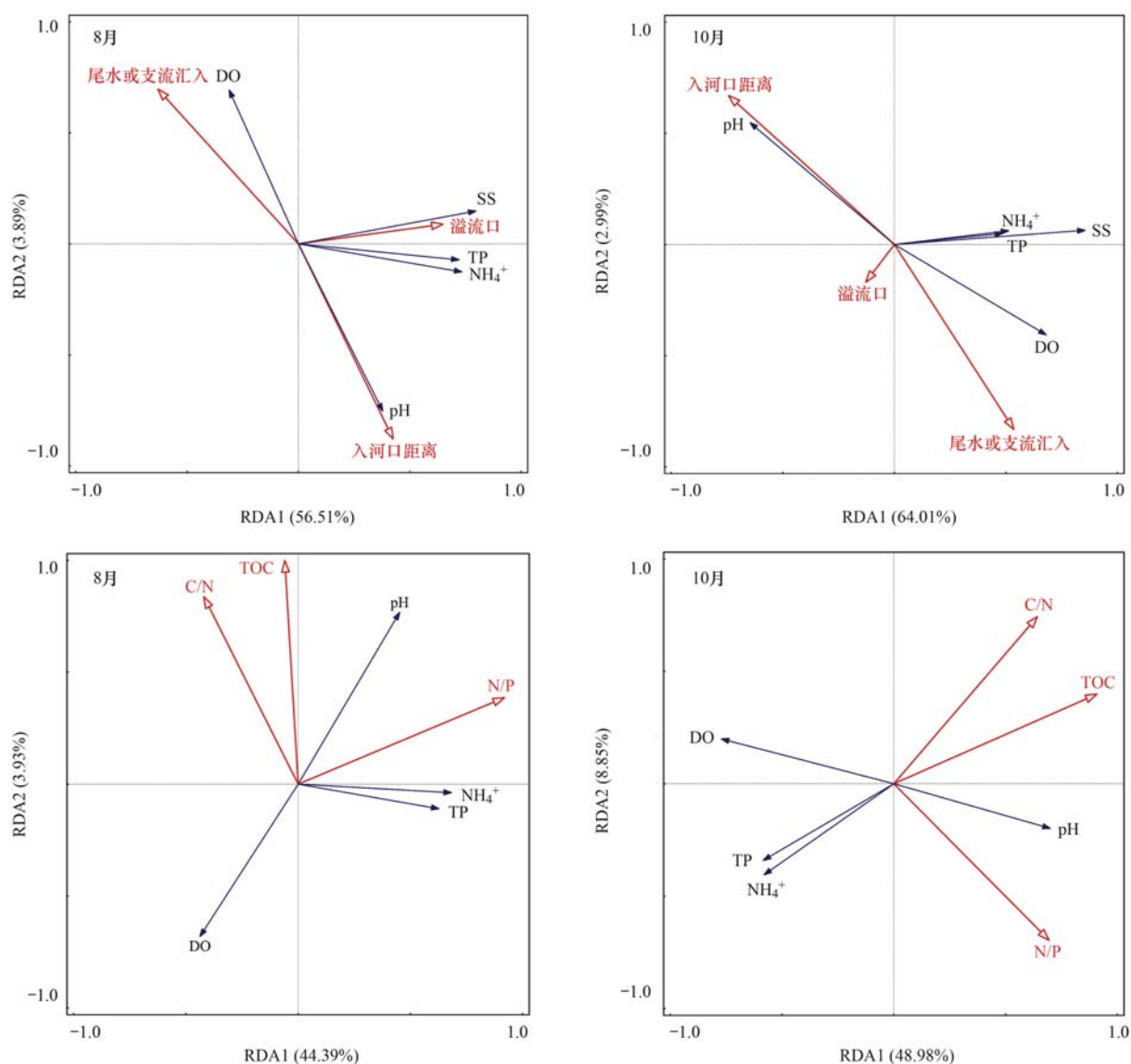
低浓度营养元素水源汇入所致的稀释作用是干流地表水水质从上游向下游的逐步改善的主要原因。清水溪干流上游和主要支流均布设有污水处理站, 采样期排放尾水 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 等营养元素优于其一级 B 的设计标准, 也低于地表水营养元素浓度现状(表 1)。由于污水处理站尾水汇入, G2 点位地表水 NH_4^+ 等营养元素较 G1 有明显降低, 尾水的稀释作用也是支流地表水污染程度低的主要原因。G8 是 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 等营养元素最低的点位, 也是紫金沟支流

汇入干流的稀释作用所致, 该支流上坐落着流域内最大的污水处理站。有研究表明尾水会对河流生态系统造成一定的负面影响^[26,27], 但在污染严重的清水溪, 尾水也起到了一定改善水质的作用。

采样点与入河口距离不但反映了地表水迁移中不同水源汇入对营养元素的稀释效应, 也体现了营养元素在随地表水迁移中的降解过程。如图 2 所示, 地表水 pH 值从上游到入河口逐步减小, pH 值与入河口距离显著正相关 ($P < 0.01$), 是因为地表水中的大分子的有机物降解为小分子的有机酸所致。有机质分解会降低地表水中的 DO, 但本研究中的地表水 DO 上游到入河口存在上升趋势。由于本研究山地流域, 河床比降大, 干流存在多处跌水, 流动过程对地表水 DO 有较为良好的补充, 提高了地表水的自净能力。

如图 4 所示, 溢流口与 $P_{\text{地}}$ 、SS 和 TN 正相关, 说明污水溢流是 8 月干流地表水的重要污染源。8 月 G4 是所有营养元素浓度最高的点位, 10 月 G4 点位地表水 NH_4^+ 等营养元素也较上游监测点位有一定程度地升高。在 G4 附近发现有污水溢流口, 污水溢流应是造成该点位营养元素浓度高的主要原因。在相关性分析中, 溢流口与 NH_4^+ 等营养元素也存在较高的正相关关系, 但不显著(表 3), 应该是因为其它因子对溢流口因子形成了干扰。此外, 干流源头歌乐山片区缺乏市政污水收集、处理设施, 是污水汇入最为严重的河段, 但由于点位 G1 距源头溢流口较远, 数据分析中并未把 G1 作为溢流口影响点位, 也是水质与溢流口相关性较差的原因之一。

如图 4 所示, 10 月水质与溢流口间不存在相关关系(表 3), 说明本研究中污水溢流不是影响中小雨时段水质空间分布的主因。有研究表明^[28], 降水过程中雨水会进入混流制市政管网, 对滞留管道内的营养元素形成冲刷, 造成更多、更高浓度的污水溢流。本研究中 10 月采样时降雨较小, 对污水溢流的影响有限, 且采样前期有长期持续的降雨过程, 前期降雨冲刷会减少管网中营养元素的累积量。此外, 河流流量增加, 也加强了污水汇入对水质空间分布的干扰。除污水溢流这样的点源污染外, 面源污染对 10 月干流地表水质造成一定的影响, 10 月地表水中的 SS 与入河口距离存在显著负相关 ($P < 0.01$), 说明随干流地表水向下游流动, 地面悬浮物随降雨-地表径流汇入干流地表水。但面源污染对地表水中营养元素的贡献有限, 10 月地表水中的各种营养元素并没有出现向下游逐渐增加的趋势, 董雯等在对西安城市河流的研究中也发现城市面源污染对地表水的污染贡献较小^[29]。



蓝线为目标因子,红线为影响因子;“入河口距离”表示各采样点的水样游动至河口所需距离,通过 Google Earth 测得;“支流/尾水汇入”表示由于支流/尾水汇入所引起干流各采样点流量的改变,各采样点数据采用河流基流累加各污水处理站尾水排放量后的流量;“溢流口”表示各溢流污水的污染程度,附近有溢流口的采样点取值为超标最为严重的 $\rho(\text{NH}_4^+)$,无则取值为 0

图 4 地表水水质指标与地理因子和沉积物组成的冗余分析

Fig. 4 RDA on the effects of geography and sediment compositions on surface water quality

利用 RDA 分析影响本研究区域地表水质空间分布的主要河底沉积物因子,如图 4 所示,河底沉积物中 N/P ($n=14$, 8 月: $F=7.4$, $P<0.01$; 10 月: $F=3.9$, $P<0.05$) 和 TOC ($n=14$, 10 月: $F=8.6$, $P<0.01$) 干流地表水水质空间变异有显著贡献. 清水溪的主要污染源是位于河流上游的生活源污染,所以水体与沉积物中的碳、氮元素均有向下游递减的趋势(图 2 和 3). 入河口处受嘉陵江顶托的原因^[30],清水溪干流入河口处沉积物中有较高的 $\omega(\text{TP})$,因此清水溪干流沉积物 TOC 和 N/P 向下游递减(图 3). 由于跌水补氧作用,地表水 DO 有向下游增大的趋势,但在河底沉积物 N/P 和 TOC 较高的点位, DO 也会出现明显的低值. 河底沉积物 N/P

和 TOC 高,意味着河底沉积物和附近地表水体中的微生物含量较高^[31]. 地表水 DO 与河底沉积物 N/P 和 TOC 呈显著负相关,反映出河底沉积物中微生物活动对地表水 DO 的消耗.

河底沉积物中滞留的营养元素在一定情况下能够成为地表水的内在污染源. 学者们认为在河流系统中营养元素^[11] 和有机污染物^[32] 等在地表水与沉积物间有着稳定的固液分配系数(质量之比),就是说当地表水水量较小时,内源释放能够维持地表水中较高的营养元素/有机污染物浓度. 本研究中,8 月地表水水量小、水力停留时间长,这一时期地表水与沉积物的水土比低,接触时间更久,有利于内源营养元素的释放^[11],相关性分析中 8 月地表水 COD

和 TN 与河底沉积物中的 TOC 显著正相关. 10 月采样时, 前期降雨增加地表水水量、流速, 地表水与沉积物的水土比升高, 接触时间更短, 沉积物对地表水的作用减弱. 10 月地表水中的 NH_4^+ 和 TP 与河底沉积物中的 TOC 呈显著负相关, 应该是由于河底沉积物中微生物对这些营养元素的吸收/降解作用所致^[13,27]. 很多研究表明沉积物中磷等营养元素与地表水间的“汇源关系”, 会随地表水营养元素变化而相互转化; 在地表水营养元素浓度低时, 沉积物为污

染源; 地表水营养元素浓度高时, 沉积物为污染汇^[33], 而在本研究中这种转化与之截然相反. 以往研究对象更多的是大型水库和湖泊, 营养元素在地表水-沉积物间的迁移更多地遵循吸附-解吸规律^[34]. 在本研究的小型城市河流中, 由于地表水量相对较小, 微生物对营养元素在地表水-沉积物间的迁移过程产生了更为重要的影响. 有学者认为磷等营养元素在地表水-沉积物间的滞留及再释放与藻类等微生物的生命周期息息相关^[35].

表 3 地表水水质与地理因子和沉积物组成的相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation of surface water quality with geography and sediment compositions									
8 月									
地表水	入河口距离	污水溢流口	尾水/支流汇入	河底沉积物					
				TOC	TN	TP	C/N	N/P	P_N
pH	0.865 **	0.160	-0.831 **	0.784 **	0.666 **	-0.507	0.536 *	0.700 **	0.558 *
COD	0.557 *	0.344	-0.682 **	0.585 *	0.475	-0.108	0.347	0.502	0.569 *
NH_4^+	0.424	0.461	-0.553 *	0.398	0.421	-0.355	0.118	0.614 *	0.360
SS	0.208	0.320	-0.398	0.243	0.204	-0.199	0.056	0.214	0.197
TP	0.420	0.265	-0.583 *	0.441	0.487	-0.194	0.064	0.520	0.464
TN	0.573 *	0.434	-0.697 **	0.537 *	0.487	-0.212	0.239	0.514	0.484
DO	-0.734 **	-0.167	0.668 **	-0.644 *	-0.513	0.589 *	-0.554 *	-0.666 *	-0.376
T	0.390	0.390	-0.376	0.292	0.219	-0.367	0.297	0.302	0.125
$P_{\text{地}}$	0.384	0.402	-0.537 *	0.383	0.422	-0.253	0.063	0.553 *	0.392
10 月									
地表水	入河口距离	污水溢流口	尾水/支流汇入	河底沉积物					
				TOC	TN	TP	C/N	N/P	P_N
pH	0.847 **	0.001	-0.792 **	0.589 *	0.587 *	-0.553 *	0.253	0.577 *	0.463
COD	0.276	-0.180	-0.302	-0.174	0.331	0.032	-0.363	0.108	-0.201
NH_4^+	-0.327	0.083	0.199	-0.689 **	-0.033	0.153	-0.673 **	-0.122	-0.642 *
SS	-0.593 *	-0.174	0.406	-0.335	-0.015	0.236	-0.258	-0.211	-0.183
TP	-0.338	0.008	0.198	-0.665 **	-0.057	0.274	-0.631 *	-0.172	-0.589 *
TN	0.163	-0.049	-0.296	-0.317	0.400	0.201	-0.576 *	-0.071	-0.280
DO	-0.778 **	-0.042	0.702 **	-0.620 *	-0.505	0.654 *	-0.350	-0.678 **	-0.480
T	-0.603 *	-0.288	0.619 *	-0.085	-0.497	0.145	0.216	-0.517	-0.071
$P_{\text{地}}$	-0.459	0.011	0.330	-0.759 **	-0.139	0.368	-0.688 **	-0.305	-0.673 **

1) $n = 14$; * 表示显著相关性 $P < 0.05$; ** 表示显著相关性 $P < 0.01$

2.3 城市地表水水质改善举措的建议

增加河流基流量是提高清水溪地表水水质的重要手段. 清水溪作为雨源型河流, 在非降雨期水量较小是该地表水水质较差的重要原因之一. 如上所述, 虽然现有污水处理站尾水排放标准较低, 但尾水对河流水源的补充也一定程度改善了清水溪水质, 特别是在支流. 因此, 通过对污水处理站进行提标改造, 降低尾水营养元素浓度, 是改善清水溪等城市河流的重要举措.

针对性地减小流域内主要外源营养元素输入, 确保治理手段的经济有效. 生活源等点源污染是清水溪地表水的主要污染源, 通过对河流源头缺乏市政设施的区域进行补充, 以及如 W1 溢流口等对上下游地表水水质造成重大影响的溢流口进行针对性整改, 经济有效地减少主要污染源输入. 本研究中降

雨给地表水补充的水量大于带来的污染负荷, 起到了净化水质的作用. 建议在城市中增加海绵设施, 将雨水收集入地下水, 通过地下水补充河流地表水.

需要更为科学地论证河道清淤对水质的改善作用. 现阶段内源污染并不是清水溪地表水水质不佳的主要原因, 清淤对水质的改善作用有限. 营养元素在地表水-沉积物间的迁移过程极为复杂, 例如在本研究中, 虽然河底沉积物各营养元素均严重超标, 但在一定情况下仍能吸收地表水中的营养元素, 沉积物能够对地表水营养元素浓度突变起到缓冲作用. 因此, 河道清淤应该在 G4 和 G8 等地表水 DO 较低的少数河段谨慎实施.

3 结论

(1) 清水溪支流地表水水质优于干流, 流量较

大的降雨期水质优于流量较小的非降雨期. 清水溪干流水质污染严重,在两次采样中均属劣V类,在地表水综合污染指数评价体系中属严重污染级别,其中 NH_4^+ 和TP超标最为严重.受长期外源污染输入影响,清水溪干流河底沉积物也受到了严重污染,在内梅罗污染指数评价体系中属重污染级别,其中TOC超标最为严重.

(2)污染源、尾水/支流汇入和河流自净能力共同影响了营养元素在清水溪干流地表水中的空间分布规律.清水溪干流中的 NH_4^+ 等营养元素主要源于河流源头的污水直排、中下游的污染溢流等点源污染.面源污染在降雨期对地表水中的营养元素有一定影响.河底沉积物会根据地表水流量在“汇”和“源”间相互转化.此外,尾水/支流汇入所造成的稀释作用和山地河流较强的自净能力,共同导致干流中的营养元素浓度向下游逐步减少.

(3)河流水量不足是清水溪地表水污染严重的主要因素之一.通过对现有污水处理站的提标改造、海绵城市建设等,增加河流水量,特别是基流量,增加河流的水环境容量.大量的营养元素输入是清水溪地表水污染严重的根本原因.通过新建、改造市政管网等措施,减少点源污染输入;并在内源污染对水质有严重影响的河段,进行河道清淤工程.

参考文献:

- [1] Nixon S W, Fulweiler R W. Ecological footprints and shadows in an urban estuary, Narragansett Bay, RI (USA) [J]. *Regional Environmental Change*, 2012, **12**(2): 381-394.
- [2] 王话翔, 初晓冶, 陈莹, 等. 特大城市地表水环境溶解氧时空分布特征探究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2020, (6): 154-163.
Wang H X, Chu X Y, Chen Y, *et al.* A study on temporal and spatial distribution characteristics of dissolved oxygen in surface water of megacities[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2020, (6): 154-163.
- [3] 张占梅, 李媛莉, 石瑞琦, 等. 重庆市主城区八条河流水质综合评价[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2020, **39**(1): 109-114.
Zhang Z M, Li Y L, Shi R Q, *et al.* Comprehensive assessment of water quality of eight rivers in Chongqing main urban area[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2020, **39**(1): 109-114.
- [4] 毕见霖, 王立硕, 王馨慧, 等. 非常规水源补给城市河流富营养化时空变化规律及风险研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1703-1709.
Bi J L, Wang L S, Wang X H, *et al.* Temporal and spatial variations of eutrophication and its risks in the urban rivers with unconventional water sources[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(6): 1703-1709.
- [5] 李典宝, 张玮, 王丽卿, 等. 2013年上海市河流秋季水质空间分布特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, **31**(1): 50-58.
Li D B, Zhang W, Wang L Q, *et al.* Characteristics of spatial distribution of water quality in rivers of Shanghai in autumn 2013 [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, **31**(1): 50-58.
- [6] 胡明, 刘心远, 严玉林, 等. 不同入河排水口降雨径流污染特征识别[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(1): 164-173.
Hu M, Liu X Y, Yan Y L, *et al.* Recognition of rainfall runoff pollution characteristics of different river drainage outlets [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(1): 164-173.
- [7] 田亮, 熊诗涛. 城市黑臭水体污染源分析及整治[J]. *人民黄河*, 2020, **42**(S2): 116-117, 120.
- [8] Ding J, Jiang Y, Liu Q, *et al.* Influences of the land use pattern on water quality in low-order streams of the Dongjiang River basin, China: a multi-scale analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **551-552**: 205-216.
- [9] 王军霞, 罗彬, 陈敏敏, 等. 城市面源污染特征及排放负荷研究——以内江市为例[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(1): 151-156.
Wang J X, Luo B, Chen M M, *et al.* Study on the characteristics of urban non-point source pollution and its discharge load: a case study for Neijiang, Sichuan province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(1): 151-156.
- [10] 樊卫国, 敖亮, 张晟. 山地城市小流域污染状况和对策研究——以重庆市巴南区花溪河为例[J]. *安徽农业科学*, 2020, **48**(6): 55-58, 63.
Fan W G, Ao L, Zhang S. Study on pollution status and countermeasures of small watersheds in mountainous cities—Taking Huaxi River in Banan district of Chongqing as an example [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, **48**(6): 55-58, 63.
- [11] 白冬锐, 张涛, 陈坦, 等. 苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1403-1415.
Bai D R, Zhang T, Chen T, *et al.* Distribution characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus bearing pollutants in the ancient town rivers of Suzhou [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1403-1415.
- [12] 梁佳文, 阳涛, 韩雪, 等. 城市河道底泥疏浚适宜深度初步研究——以伊通河为例[J]. *环境生态学*, 2020, **2**(11): 81-90.
Liang J W, Yang T, Han X, *et al.* Preliminary research on the appropriate depth of sediment dredging in urban river—Case study on Yitong River [J]. *Environmental Ecology*, 2020, **2**(11): 81-90.
- [13] Kelly V J. Influence of reservoirs on solute transport: a regional-scale approach [J]. *Hydrological Processes*, 2001, **15**(7): 1227-1249.
- [14] 何月, 顾新跃, 曹金象, 等. 不同实验规模下底栖藻垫的磷含量变化及其形态组成[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, **20**(3): 523-528.
He Y, Gu X Y, Cao J X, *et al.* Variation of phosphorus content and composition of benthic algae mat in the mesocosms experiment [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2014, **20**(3): 523-528.
- [15] Engman E T. Rainfall-runoff characteristics for a mountainous watershed in the Northeast United States [J]. *Hydrology Research*, 1981, **12**(4-5): 247-264.
- [16] 何太蓉, 刘存东, 李贤良. 重庆市清水溪底泥中镉污染的潜在生态风险评价[J]. *中国环境监测*, 2009, **25**(5): 99-102.
He T R, Liu C D, Li X L. Pollution of heavy metals-cadmium in the sediments from Qingshui Stream and its potential ecological risk assessment [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, **25**(5): 99-102.
- [17] 杜运领. 重庆清水溪综合治理研究[D]. 杭州: 浙江大学,

- 2014.
- Du Y L. Study of Qingshuixi River comprehensive control in Chongqing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [18] 彭文启, 张祥伟. 现代水环境质量评价理论与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [19] Calmano W, Ahlf W, Förstner U. Sediments and toxic substances-environmental effects and ecotoxicity[M]. Berlin: Springer, 1996.
- [20] Wang C, Fang F, Yuan Z Y, *et al.* Spatial variations of soil phosphorus forms and the risks of phosphorus release in the water-level fluctuation zone in a tributary of the Three Gorges Reservoir[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **699**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134124.
- [21] 宋厚燃, 马利民, 闵真真. 梁滩河沉积物中氮磷垂直分布研究[J]. *环境污染与防治*, 2012, **34**(6): 42-45, 50.
- Song H R, Ma L M, Min Z Z. Study on the vertical distribution of nitrogen and phosphorus in the sediments of Liangtanhe River[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2012, **34**(6): 42-45, 50.
- [22] 刘欢, 孔维苇, 王晓锋, 等. 重庆梁滩河表层沉积物氮形态时空特征及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(6): 332-341.
- Liu H, Kong W W, Wang X F, *et al.* Temporal and spatial characteristics and influencing factors of nitrogen morphology in surface sediments of Liangtan River, Chongqing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(6): 332-341.
- [23] 马天海, 孙娟. 城市河流表层沉积物碱性磷酸酶分布及其成因探讨[J]. *青海环境*, 2018, **28**(4): 170-172, 202.
- [24] Giblin A E, Hopkinson C S, Tucker J. Benthic metabolism and nutrient cycling in Boston Harbor, Massachusetts[J]. *Estuaries*, 1997, **20**(2): 346-364.
- [25] Zhang Z B, Lv Y F, Zhang W, *et al.* Phosphorus, organic matter and nitrogen distribution characteristics of the surface sediments in Nansi Lake, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(9): 5669-5675.
- [26] 刘全忠, 彭柯, 苏振华, 等. 城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 256-266.
- Liu Q Z, Peng K, Su Z H, *et al.* Analysis on the spatial variability mechanism of the characteristic water quality factors of urban river channel reclaimed water[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 256-266.
- [27] 邱莹, 靳燕, 苏振华, 等. 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[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2287-2295.
- Qiu Y, Jin Y, Su Z H, *et al.* Analysis of the spatial changes in bacterial communities in urban reclaimed water channel sediments: a case study of the North Canal River[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2287-2295.
- [28] 赵磊, 杨逢乐, 王俊松, 等. 合流制排水系统降雨径流污染物的特性及来源[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(8): 1561-1570.
- Zhao L, Yang F L, Wang J S, *et al.* Characterization of storm-water pollutant sources in a combined sewer network[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(8): 1561-1570.
- [29] 董雯, 李怀恩, 李家科, 等. 城市重污染河流水质特征分析——以皂河为例[J]. *水力发电学报*, 2012, **31**(4): 72-77.
- Dong W, Li H E, Li J K, *et al.* Analysis on water quality of severely polluted urban river, Zaohe River as an example[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, **31**(4): 72-77.
- [30] Holbach A, Wang L J, Chen H, *et al.* Water mass interaction in the confluence zone of the Daning River and the Yangtze River—a driving force for algal growth in the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(10): 7027-7037.
- [31] Wang C, Guo J S, Zhang W, *et al.* Drying-rewetting changes soil phosphorus status and enzymatically hydrolysable organic phosphorus fractions in the water-level fluctuation zone of Three Gorges reservoir[J]. *CATENA*, 2021, **204**, doi: 10.1016/j.catena.2021.105416.
- [32] 蓝家程, 孙玉川, 肖时珍. 多环芳烃在岩溶地下河表层沉积物-水相的分配[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4081-4087.
- Lan J C, Sun Y C, Xiao S Z. Water-sediment partition of polycyclic aromatic hydrocarbons in karst underground river[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4081-4087.
- [33] 孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 等. 三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1107-1113.
- Sun W B, Du B, Zhao X L, *et al.* Fractions and adsorption characteristics of phosphorus on sediments and soils in water level fluctuating zone of the Pengxi River, a tributary of the Three Gorges reservoir[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1107-1113.
- [34] Wang Y, Shen Z Y, Niu J F, *et al.* Adsorption of phosphorus on sediments from the Three-Gorges Reservoir (China) and the relation with sediment compositions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **162**(1): 92-98.
- [35] Yao Y, Wang P F, Wang C, *et al.* Assessment of mobilization of labile phosphorus and iron across sediment-water interface in a shallow lake (Hongze) based on *in situ* high-resolution measurement[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 873-882.

CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM _{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i> (1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i> (1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i> (1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM ₁ Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i> (1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM _{2.5} in the Yangtze River Economic Belt	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i> (1190)
Spatial Heterogeneity of PM _{2.5} Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i> (1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2+26" Cities	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} in Shanxi Province Based on Wavelet Transform	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China	ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i> (1246)
Temporal and Spatial Variation in O ₃ Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i> (1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i> (1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i> (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i> (1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i> (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i> (1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i> (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i> (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i> (1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i> (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i> (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i> (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i> (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i> (1512)
Selective Adsorption of Au(Ⅲ) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shun, AN Xiao-qi, <i>et al.</i> (1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i> (1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i> (1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i> (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i> (1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(Ⅱ) and As(Ⅲ)	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i> (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i> (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i> (1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i> (1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i> (1688)