

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)

不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)

不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧楠, 胡建林 (635)

2006~2021年夏半年上海臭氧浓度特征及其大环流背景分析郑庆锋, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)

基于大气成分观测网的山西省近地面O₃体积分数分布特征李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)

伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)

运城市四季VOCs特征、来源及臭氧形成敏感物种阴世杰, 刘新罡, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)

郑州市冬夏季污染过程中大气VOCs污染特征、来源解析及活性分析赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晓, 张瑞芹 (689)

郑州市PM_{2.5}中有机酸的污染特征、来源解析及二次生成李子涵, 董喆, 尚璐琪, 孔梓涵, 李晓, 张瑞芹 (700)

中国三大城市群PM_{2.5}浓度非线性变化分析吴舒祺, 顾杨阳, 张天岳, 赵文吉 (709)

基于LEAP模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)

碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)

考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)

我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)

不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州水质的影响谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)

深圳市2015~2021年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)

河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)

北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)

店埠河流域地表水-地下水化学特征及其成因分析郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)

张家口地区枯水期地下水化学特征及其成因机制分析金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)

黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)

制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法彭安萍, 高虎, 张新波 (844)

水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)

富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)

壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中Cd²⁺的吸附机制姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)

硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)

磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)

广东省高分辨率温室气体排放清单及特征卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志烟, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)

辽河口“退塘还湿”修复区生态系统CO₂交换及其环境调控刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)

生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤N₂O和CH₄排放的影响胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)

生物炭改良盐碱地研究与应用进展魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董辰辰, 孙红文 (940)

免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta分析徐芝萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)

黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例李月, 罗红芬 (961)

不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)

Ca改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制张超, 翟付杰, 单保庆 (983)

秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)

我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险杨炳彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)

广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)

基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析潘泳兴, 陈盟, 王楠楠 (1026)

基于Monte-Carlo模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)

基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)

基于APCS-MLR和PMF模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)

PE-Cd复合污染土壤中Cd释放迁移特征及机制王迪, 徐绍辉, 邵明艳, 林青 (1069)

氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓琦, 蒋建东 (1080)

昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)

钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)

氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙淇, 田欣, 赵科理 (1107)

关键生育期施加外源灌溉水对水稻镉吸收转运的影响周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曾鹏, 辜峰峰, 廖柏寒 (1118)

外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)

稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)

根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)

高密度聚乙烯微塑料与氯嘧磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)

微塑料的人体富集及毒性机制研究进展包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)

机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)

微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)

水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)

基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

《环境科学》征订启事(825) 《环境科学》征稿简则(836) 信息(897, 1106, 1149)

深圳市 2015~2021 年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应

韦必颖¹, 成建梅^{1*}, 苏晓煜², 程天舜³

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430078; 2. 广东省深圳生态环境监测中心站, 深圳 518049; 3. 广东省深圳市水务规划设计院, 深圳 518001)

摘要: 雨源型城市河流水容量偏小, 缺乏动态补充水源, 易受污染. 基于深圳市 2015~2021 年全市(不含深汕)9 大流域的 21 个水质指标数据和逐日降雨数据, 利用单因子指数评价、综合污染指数、层次聚类分析和 Pearson 相关分析等方法, 研究深圳市河流水质时空分布特征及特征污染物对降雨的响应关系. 结果表明: ① 2015 年全区大部分断面水质都是劣 V 类水, 2018 年 10 月后河流水质总体得到大幅度改善, 与 2018 年深圳市开展治水专项活动背景一致, 到 2021 年约 62% 的断面水质达 I~III 类水标准; ② 深圳市(不含深汕)西部人口稠密地区的水质污染较东部更严重, 河口和支流下游水质污染较上游更严重; ③ 深圳市坪山河、龙岗河、茅洲河和深圳河的水质受降雨的影响显著; ④ 深圳市河流的主要特征污染指标是 DO、COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TP、高锰酸盐指数、石油类和阴离子表面活性剂; 对于坪山河和龙岗河, 降雨使 TP 和 NH₄⁺-N 指标浓度升高; 对于茅洲河, 降雨使 TP 和 COD 指标浓度升高; 对于深圳河, 降雨使 COD、TP 和 NH₄⁺-N 指标浓度升高. 以上结果能够揭示深圳市雨源型河流水质时空变化情况及其对降雨事件引发的非点源污染的响应关系, 为深圳市打造更高品质水环境提供科学参考.

关键词: 水质评价; 雨源型河流; 降雨; 时空分布; 深圳市

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-0780-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202303052

Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall

WEI Bi-ying¹, CHENG Jian-mei^{1*}, SU Xiao-yu², CHENG Tian-shun³

(1. School of Environment Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China; 2. Shenzhen Environment Monitoring Centre, Shenzhen 518049, China; 3. Shenzhen Water Planning & Design Institute Co., Ltd., Shenzhen 518001, China)

Abstract: Rain-source urban rivers have the characteristics of small water capacity, lack of dynamic water supply, and being easily polluted. This study analyzed the spatial and temporal distribution characteristics of river water quality and the response of characteristic pollutants to rainfall based on daily rainfall data and 21 water quality indicators of nine major river basins in Shenzhen (excluding Shenzhen-Shantou) from 2015 to 2021 by using the single-factor assessment method, comprehensive pollution index method, hierarchical cluster analysis, and Pearson correlation. The results showed that: ① in 2015, the water quality of most sections in the whole region was inferior Class V water. After October 2018, the overall water quality of rivers was greatly improved, which was consistent with the background of Shenzhen's special water control activities in 2018. By 2021, the water quality of approximately 62% of sections reached Class I-III water standards. ② The water pollution in the densely populated western part of Shenzhen was more serious than that in the eastern part, and the water pollution in the lower reaches of the estuaries and tributaries was more serious than that in the upper reaches. ③ The water quality of the Pingshan River, Guanlan River, Longgang River, and Maozhou River was significantly affected by rainfall. ④ The main characteristic pollution indexes of the Shenzhen River were DO, permanganate index, COD, BOD₅, NH₄⁺-N, TP, petroleum, and anionic surfactant. For the Pingshan River and Longgang River, rainfall increased the concentrations of TP and NH₄⁺-N. For the Maozhou River, rainfall increased the concentrations of TP and COD. For the Shenzhen River, rainfall increased the concentrations of COD, TP, and NH₄⁺-N. The above results reveal the spatio-temporal variation in rain-source river water quality in Shenzhen and its response to non-point source pollution caused by rainfall events and provide a scientific reference for building a higher quality water environment in Shenzhen.

Key words: water quality assessment; rain-source rivers; rainfall; temporal and spatial distribution; Shenzhen

1980 年深圳成立经济特区以来, 社会经济取得了举世瞩目的成就, 由一个边陲小镇发展为一座现代化国际化创新型城市, 创造了世界城市发展史上的奇迹^[1]. 但是随着经济的飞速发展, 快速发展工业化, 生活污水和工业废水的排放量不断提高, 城市污染负荷远远超出本地水环境承载力, 水环境治理压力巨大^[2-4]. 而深圳市虽处在我国水资源丰富的珠江三角洲地区, 且降水丰沛(多年年平均降水约 1 837 mm), 但受地形条件限制, 境内无较大河流, 只有小河小溪, 水资源主要依靠境外东江引入^[5]. 并且大多数

河流属于城市雨源型河流, 具有雨季是河, 旱季成沟, 水环境容量偏小^[6], 缺乏动态补充水源的特点, 易受到人类的活动和降雨的强烈干扰, 导致流域水资源短缺和水体污染严重^[7,8]. 降雨通常被认为是除人为因素干扰外导致污染物流入水体的自然因素和先决条件, 从狭义上讲, 非点源污染往往是由降雨径流

收稿日期: 2023-03-06; 修订日期: 2023-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1911205, 42172278)

作者简介: 韦必颖(1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境质量监测与评价, E-mail: wwwby7@163.com

* 通信作者, E-mail: jmcheng@cug.edu.cn

导致的污染过程^[9,10]。王子鸣等^[11]研究发现白洋淀雨季各个水质指标与土地利用的相关性低于非雨季,陈焰等^[12]研究发现北京市新风河流域不同降雨强度下的降雨量与水质浓度呈显著的二次函数关系,水质变化取决于降雨起稀释作用或冲刷作用。因此利用科学的方法评价河流水质状况及降雨对水质产生的影响,对于明确未来水质目标和拟定治理路径具有重要指导意义。

近年来,有学者对深圳市水质现状开展了相关研究。苏晓煜等^[13]采用综合污染指数法分析深圳市近 40 年主要 5 条河流的高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和 COD 数据,分析深圳市河流水质污染程度与经济增长的关系;张贤君等^[14]分析了观澜河流域 2017 年 11 月至 2020 年 5 月的 DO 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 指标变化,分析了水体黑臭的原因;张敏等^[15]分析了龙岗河和坪山河流域 2008~2014 年的 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 的污染情况及空间分布特征;毕业亮等^[16]选取 2018 年龙岗河的 12 个监测点位,采用单因子评价法、综合污染指数法和主成分分析法对龙岗河水质进行综合评价。以上的研究成果可以看出,目前对深圳市的主要 5 条河流的水质评价研究比较深入,并获得了科学的数据。但是前人的研究大多集中在深圳市主要 5 条河流的水质状况评价方面以及人口、经济对水质的影响,缺乏深圳市全市河流的水质时空变化分析及降雨对水质的影响研究。

为了更加全面深入地了解深圳市所有河流的水质状况及降雨对水质的影响,从大量的监测数据中识别重要的污染因素及水质时空分布特征。本文以 2015~2021 年深圳市(不含深汕)九大流域所有河流的 21 项监测指标逐月水质数据为基础,结合 2017~2020 年坪山河、龙岗河、茅洲河和深圳河的日水质数据和日降雨数据,分析识别降雨对河流水质的影响关系,并探讨污染的主要成因,以期改善深圳市水生态环境质量,实现水资源、水环境和水生态“三水”统筹管理提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

深圳市位于珠江口伶仃洋以东,北与东莞和惠州相接,南临香港特别行政区,东靠大鹏半岛与大亚湾相连。深圳市下辖 9 个行政区(福田区、罗湖区、南山区、盐田区、宝安区、龙岗区、坪山区、龙华区、光明区)、1 个新区(大鹏新区)和 2 个特别区(深汕特别合作区、前海经济特区)。深圳市地处北回归线以南,属于亚热带海洋性季风气候,长夏冬短,雨量充沛,阳光充足。年平均气温为 22.4°C ,最高气温为

38.7°C ,最低气温为 6°C ^[17]。年日照时数为 1 933.8 h,年总辐射量 $5\,225\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,年平均相对湿度为 77%。多年平均年降雨量为 1 966.5 mm,每年 4~9 月为雨季,降雨量占年降雨量的 84%。深圳市有独立河流 98 条(内陆河流 8 条,直接入海河流 90 条),一级支流 105 条,二、三级支流 107 条。深圳市河流长度变化程度大,平均长度不足 4 km,河流水系分布基本特点是小河众多,大河稀少,且径流流路短,呈明显的雨源型河流特征。深圳市地理位置及河流水系见图 1。

深圳市流域面积大于 100 km^2 的流域有茅洲河流域、珠江口流域、观澜河流域、深圳河流域、深圳湾流域、龙岗河流域、坪山河流域、大鹏湾流域和大亚湾流域这 9 大流域。深圳市集雨面积大于 1 km^2 的河流合计 310 条,河流长度为 999.9 km。深圳市流域分区见图 1。

1.2 数据来源

水质数据来源于深圳生态环境监测中心站,本文收集 2015~2021 年逐月水质数据和 2017~2020 年的逐日水质数据。2015~2021 年逐月水质数据每年的检测断面数量如表 1 所示,覆盖深圳市全境九大流域(图 1),便于进行水质时空变化分析。水质评价指标为《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中除水温、总氮和粪大肠菌群以外的 21 项指标,即:pH、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD_5)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、总磷(TP)、铜(Cu)、锌(Zn)、氟化物、硒(Se)、砷(As)、汞(Hg)、镉(Cd)、六价铬、铅(Pb)、氰化物、挥发酚、石油类、阴离子表面活性剂和硫化物。

降雨数据来源于深圳市水务局,本文收集了坪山雨量站、龙岗雨量站、光明雨量站和布吉雨量站自动监测的 2017~2020 年降雨量日数据,雨量站分布如图 1 所示。

1.3 数据处理与分析方法

1.3.1 数据统计方法

本研究使用 Excel 软件进行原始数据的整理,水质数据层次聚类分析和水质与降雨的相关分析均在 Origin2022 中进行。水质时空分布图利用 ArcGIS 10.7 绘制。

1.3.2 水质评价方法

单因子水质指数法是我国地表水环境质量标准中指定的水质评价方法,将监测所得的 21 项水质指标数据与标准进行对比分类,在所有的参评水质中,如有某一项指标超标,则所属断面不符合相应的水质标准,选择评价结果最差的水质类别作为最终评价结果^[18,19]。

综合水质指数(WQI)法是一种将多种水质指标

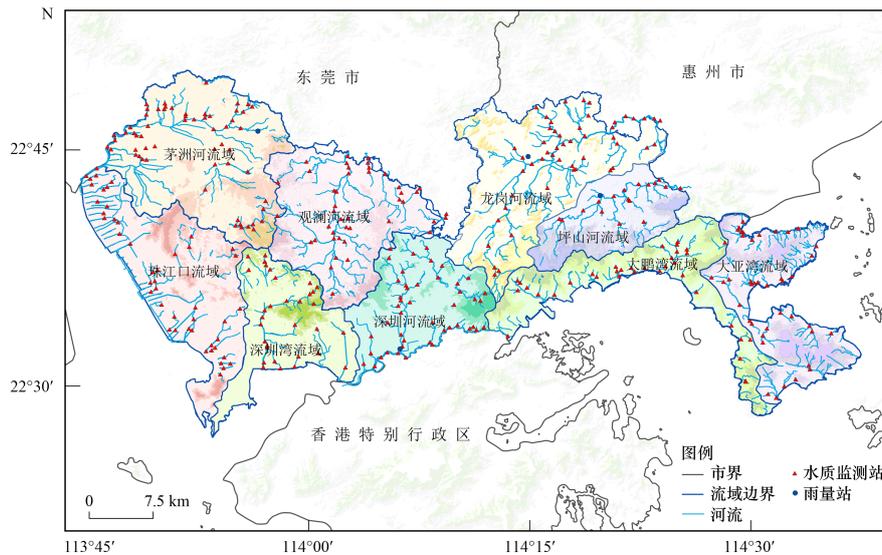


图1 深圳市河流水系示意

Fig. 1 Map of Shenzhen river system

表1 2015年~2021年河流水质监测断面数量
Table 1 Number of river water quality monitoring sections from 2015 to 2021

年份	河流断面数	年份	河流断面数
2015	68	2019	334
2016	207	2020	401
2017	209	2021	386
2018	223		

转化为单一指标来描述水质整体状况的数值方法,被广泛应用于世界各地各种河流、湖泊和水库的水质评价^[20-22]. 本文采用Huang等^[23]提出的新型综合水质指数法(WQI-DET). WQI-DET是根据中国《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中I(优)、II(良)、III(中等)、IV(差)和V(差)这5个水质等级对现有WQI方法进行的改编. 与原始指数从0~100相比, WQI-DET在 $-\infty$ (水质极差)至100(水质极好)之间的范围更广,从而可以清楚地区分水水质条件极差和极差^[23,24]. WQI-DET的计算方法如下:

$$WQI - DET_i^j = 100 - \max\left(0, \frac{c_{ij} - c_i^I}{c_i^V - c_i^I}\right) \times 100$$

$$WQI - DET^j = \min(WQI - DET_1^j, \dots, WQI - DET_n^j)$$

式中, $WQI - DET_i^j$ 为水样 j 的变量 i 的水质, c_{ij} 为水样 j 的变量 i 的浓度, c_i^I 和 c_i^V 为第 I 类和第 V 类变量 i 的浓度, $WQI - DET^j$ 为水样 j 的水质. WQI-DET 的取值范围为 $-\infty \sim 100$, 数值越大代表水质越好.

1.3.3 层次聚类分析

聚类分析(CA)是根据对象距离远近或相似性大小进行分类的多元统计方法^[25]. 本文采用的层次聚类分析(HCA)是应用最广泛的聚类方法,该法以逐

次聚合的方式将距离最近或者最相似的对象聚成一个类簇,直至最后聚成一类^[26]. 在河流水质评价中,通常基于监测时间和监测点的地理位置进行层次聚类分析^[27],如苏州古城区水体污染时空分析^[28]、黄河干流水质评价与时空变化分析^[29]等. 本文采用的计算方法是欧氏距离平方和离差平方法.

2 结果与分析

2.1 单因子评价结果

采用单因子评价法对深圳市河流各个监测断面的水质逐月数据进行评价,评价指标为:pH、DO、高锰酸盐指数、COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TP、Cu、Zn、Pb、Se、As、Hg、Cd、六价铬、氟化物、氰化物、挥发酚、石油类、阴离子表面活性剂和硫化物. 从2015~2021年深圳市河流断面月均水质类别比例变化情况可知(图2). I~III类水质断面比例稳步上升,从2015年的10.01%升至2021年10月62.25%,上升了52.24个百分点. 劣V类水质断面比例持续下降,2015年80.97%断面水质为劣V类,水质污染最为严重;2016年监测断面增多,79.8%的断面水质为劣V类;2017年78.43%的断面水质为劣V类;2018年66.08%的断面水质为劣V类,7%为V类;2019年38.8%的断面水质为劣V类;2020年15.02%的断面水质为劣V类,水质状况显著改善;2021年仅6%的断面水质为劣V类,水质状况整体良好,说明深圳市在“十三五”期间河流水污染防治工作促进了地表水环境质量的改善.

表2统计了深圳市2015~2021年所有水质监测站点的逐月水质样本共13367个. 根据2002年中华人民共和国生态环境部发布的地表水标准,III类地

表水标准以下的水体不能作为集中饮用水源,因此使用Ⅲ类地表水标准作为单个指标浓度限值^[30]。由深圳市水质指标统计表得出,DO、高锰酸盐指数、COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TP、石油类和阴离子表面活性剂的平均浓度均高于Ⅲ类地表水标准,其中表征有机物污染的DO、高锰酸钾指数、COD和BOD₅指标^[31]污染超标率在25.6%~38.8%范围内;表征水体富营养化程度^[32,33]的NH₄⁺-N、TP指标污染超标率分别为51.09%和53%;表征化学污染物的石油类、阴离子表面活性剂指标^[34]污染超标率分别是29.6%和23.16%;挥发酚、氟化物、硫化物、氰化物化学污染指标平均值均符合Ⅲ类地表水标准,样本污染

超标率低于15%;所有重金属指标Pb、Cu、Zn、Se、As、Hg、Cd和六价铬平均值远低于Ⅲ类地表水标准限值,超99%的水质样本没有重金属污染问题,重金属指标整体均处于达标状态,不影响水质分级。水质指标统计数据表明深圳市河流存在严重的富营养化问题,超过一半的水质样本NH₄⁺-N和TP指标超标,河流水体主要存在有机污染和少量的化学污染问题;河流中重金属指标浓度较低,对人类健康的影响较小,归因于重金属主要来自工业废水^[35],而近10年来深圳进行产业转型,关闭了大量线路板、蚀刻和酸洗等企业,严管其余相关产业的污水排放^[36]。

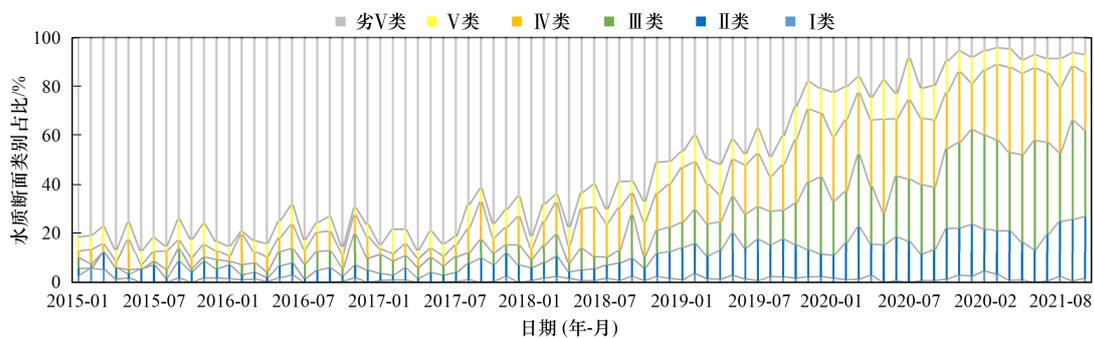


图2 深圳市2015~2021年月均水质断面类别占比

Fig. 2 Proportion of monthly mean water quality in Shenzhen from 2015 to 2021

表2 深圳市河流水质指标统计¹⁾

Table 2 Statistics of river water quality indexes in Shenzhen

项目	平均值	标准差	最大值	超标率	Ⅲ类水质标准
pH	7.39	0.47	11.23		6~9
DO	4.94*	2.53	26.1	37.45	>5
高锰酸盐指数	6.28*	6.25	100	25.6	6
COD	29.5*	40.19	75	36.2	20
BOD ₅	8.61*	15.77	270.2	38.8	4
NH ₄ ⁺ -N	5.33*	9.47	97.2	51.9	1
TP	0.77*	1.71	49.7	53	0.2
石油类	0.22*	0.83	20.81	29.6	0.05
阴离子表面活性剂	0.33*	0.94	44.4	23.16	0.2
挥发酚	0.004 5	0.022	1.48	14.58	0.005
氟化物	0.53	0.81	37.33	7.6	1
氰化物	0.003 6	0.025	1.92	0.13	0.2
硫化物	0.063 3	0.39	12	4.11	0.2
Pb	0.002 2	0.006	0.19	0.11	0.05
Cu	0.019	0.091	5.22	0.012	1
Zn	0.042	0.14	9.3	0.19	1
Se	0.000 7	0.001 2	0.04	0.17	0.01
As	0.002 2	0.008	0.54	0.18	0.05
Hg	0.000 026	0.000 08	0.003	0.08	0.001
Cd	0.000 2	0.000 8	0.05	0.34	0.005
六价铬	0.002 6	0.005	0.322	0.08	0.05

1) pH无量纲,超标率单位为%,其余数值的单位为mg·L⁻¹,*表示超标

2.2 WQI-DET综合评价结果

选取单因子评价法得出的深圳市河流污染特征

指标:DO、高锰酸盐指数、COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TP、石油类和阴离子表面活性剂作为数值评价指标,采

用新型水质指数(WQI-DET)对2015~2021年河流的水质进行评价. 计算的年均WQI-DET指数分布如图3所示,深圳市河流水质污染集中在西部的茅洲河流域、珠江口流域、观澜河流域、深圳湾流域和中部的龙岗河流域,东部流域河流水质较好,总体水质均处于好转状态. 2015~2017年,全市大约89%的水质断面WQI-DET指数值小于40,水质类别为IV类水及以

下. 其中,茅洲河流域、观澜河流域的所有水质断面和珠江口流域97%的水质断面WQI-DET指数值小于0,属于劣V类黑恶臭水体,水质污染及其严重. 2018年之后深圳市水质总体得到改善,WQI-DET指数值小于0的水质断面数量明显减少. 到2021年,全市74%的水质断面WQI-DET指数值大于40,水质类别为III类水及以上,全市50%以上的水质断面WQI-

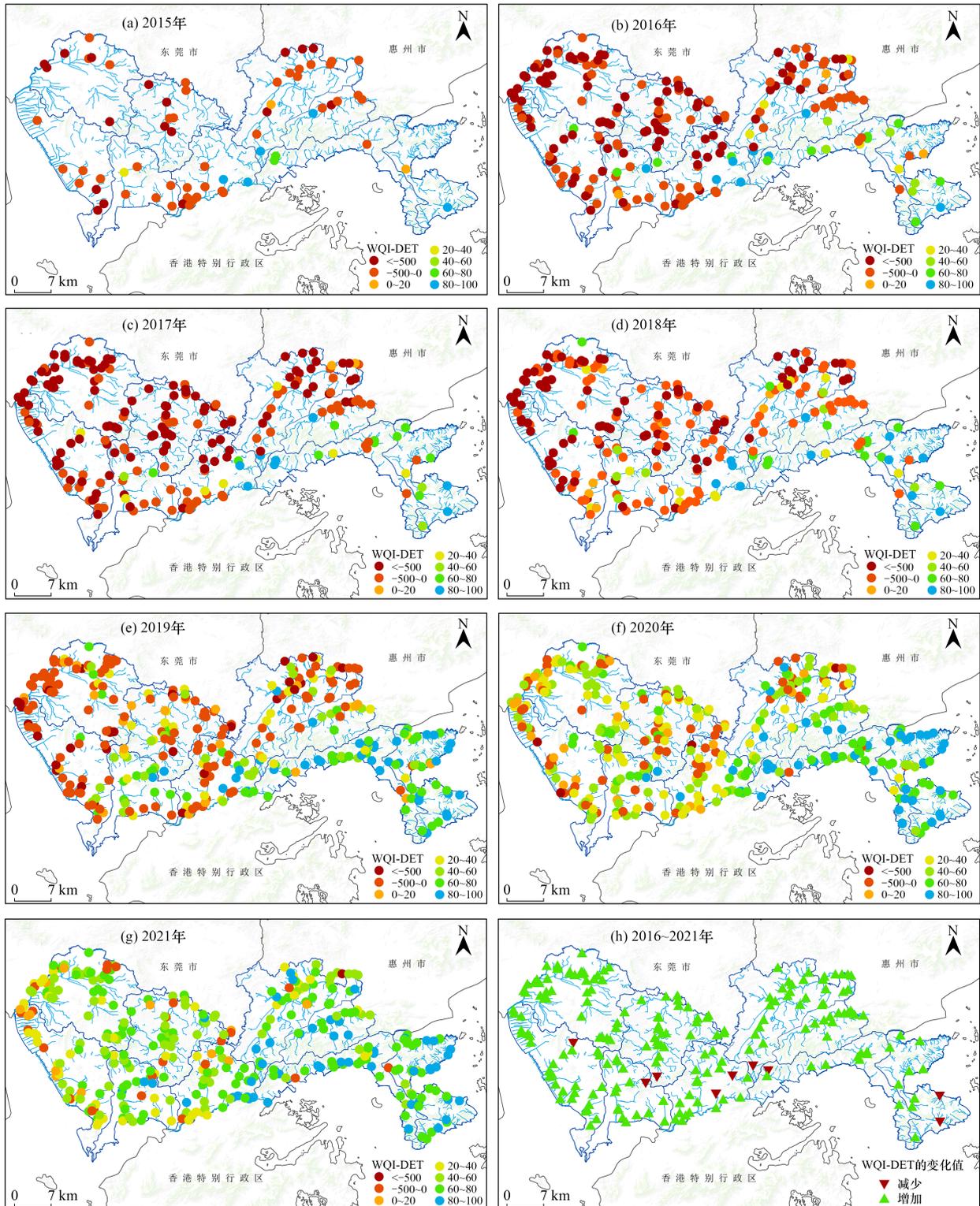


图3 深圳市2015~2021年监测站点水质指数

Fig. 3 Water quality index map of monitoring stations in Shenzhen from 2015 to 2021

DET 指数值大于 60, 水质等级达到 I、II 类水, WQI-DET 指数值小于 0 的黑恶臭水质断面大部分在河流河口和支流下游. 由于 2015 年水质监测站较少, 使用 2016 年的年均 WQI-DET 水质指数为背景值, 计算 2016~2021 年各个站点的水质变化情况. 只有个别站点 WQI-DET 水质指数小幅度波动变小, 绝大多数水质监测断面的 WQI-DET 水质指数数值增大, 水质明

显好转. 根据《深圳市治水提升计划(2015~2020 年)》的 5 a 治水目标(表 3), 深圳市提出“治水十策”和“十大行动”, 严格控制污染物排放、完善污水处理布局和排水管网、实施雨污分流等措施提升水环境质量. 从总体上看, 到 2021 年 9 大流域全面实现了 5 a 治水目标, 茅洲河的水质达 1992 年以来最好水平, 深圳市河流水环境治理取得了明显成效.

表 3 深圳市 2015~2020 年治水提质 5 a 工作目标

Table 3 Five-year objectives of water control and quality improvement in Shenzhen from 2015 to 2020

流域名称	工作目标	流域名称	工作目标
深圳河湾流域	深圳河达地表水 V 类	珠江口水系	河道达地表水 V 类
茅洲河流域	达地表水 V 类	大鹏湾水系	河道达地表水 V 类
观澜河流域	达地表水 IV 类	大亚湾水系	河道达地表水 V 类
龙岗河流域	达地表水 IV 类	坪山河流域	达地表水 IV 类

为了进一步追溯深圳市河流污染来源, 本文利用 ArcGIS 反距离权重插值法计算未知区域的 WQI-DET 指数^[37]. 由于 2015 年的监测站点较少, 覆盖区域

不够全面, 因此仅计算 2016~2021 年年均 WQI-DET 指数, 获得所有河流年均 WQI-DET 指数的分布情况(图 4). 2019 年是深圳市水污染治理决战年, 西部污

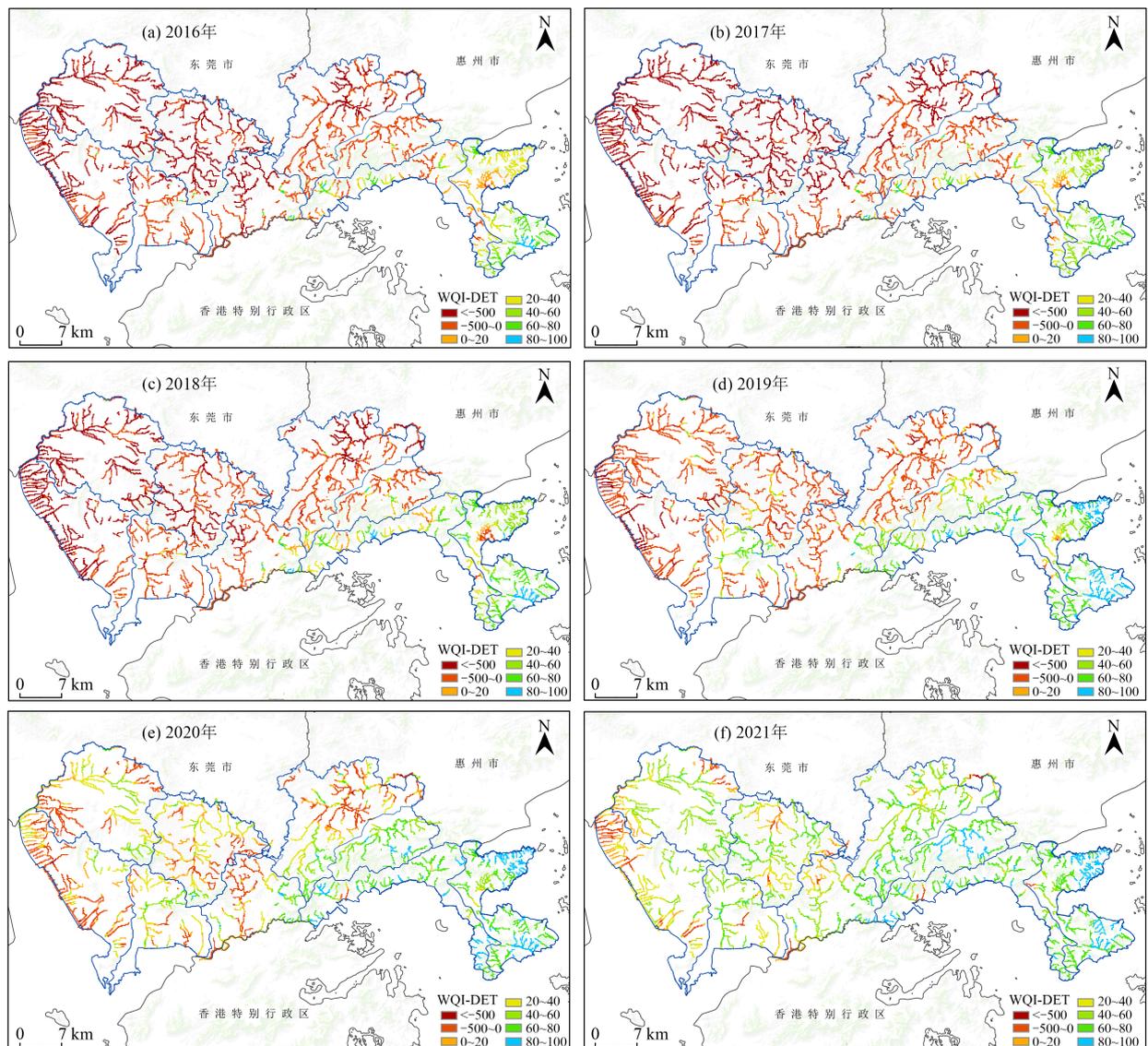


图 4 深圳市 2016~2021 年水质指数分布

Fig. 4 Water quality index distribution map of Shenzhen from 2016 to 2021

染严重的茅洲河流域、珠江口流域、深圳湾流域和观澜河流域水质在2019年得到明显改善. 2021年, 九大流域干流下游河口水质较上游差, 污染较为严重. 除此之外, 水质污染主要集中在茅洲河上游最大的支流新陂头河; 观澜河流域一级支流油松河和观澜街道辖区内观澜河河段和木古河; 深圳湾流域沙头坑河; 深圳河流域塘径水、水径水和山厦河; 珠江口水系的新圳河、双界河、福永河和沙井街道辖区内的排水渠(道生围涌、衙边涌、后亭排洪渠、步涌排洪渠、德丰围涌、石围涌、沙涌、和二涌). 以上污染严重河段分别位于南园街道、新湖街道、龙华街道、观澜街道、沙头街道、布吉街道、新安街道、福永街道以及沙井街道. 这些街道人口稠密, 市政设施较为落后. 受污染河道河流承担了城区的排水任务, 河流的主要污染源是居民生活污水、降雨冲刷、汽修、餐饮、农贸市场和垃圾转运站等场所形成的生活污染^[38,39].

2.3 水质时空分异性规律

本文分别求出21项水质监测指标(pH、DO、高锰酸盐指数、COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TP、Cu、Zn、Pb、Se、As、Hg、Cd、六价铬、氟化物、氰化物、挥发酚、石油类、阴离子表面活性剂和硫化物)月平均值和流域平均值, 分别进行时空尺度上的层次聚类分析. 聚类分析要求数据符合正态分布, 需要在分析之前进

行K-S非参数检验. 结果显示, 月平均数据组的TP、高锰酸钾、As、Cd、石油类、粪大肠杆菌数不服从正态分布, 进行自然对数转换后, 各监测指标均能够以95%或更高的可信度服从正态分布; 流域平均数据组各指标均以95%或更高的可信度服从正态分布, 为了消除变量单位量纲的影响, 同时需要对数据进行标准化处理(均值为0, 方差为1).

时间尺度聚类分析与判别分析结果表明: 全年可分为3个时段(图5), 时段I(5~11月)、时段II(2月和12月)和时段III(1月、3月和4月). 深圳市年内各月降雨分布差距大, 4~9月属于雨季, 时段II(2月和12月)属于非雨季, 水体污染程度与其他时期不同, 并且由于深圳市河流属于雨源型河流, 初步判断深圳河流水质存在雨季和非雨季的差别, 降雨会对水质产生一定影响.

空间尺度聚类分析与判别分析结果表明, 深圳全市可分为3个区域(图5), 大鹏湾流域、大亚湾流域和坪山河流域为流域I, 均处在深圳东部地区; 龙岗河流域、深圳河流域和深圳湾流域为流域II, 处于深圳的中部地区; 观澜河流域、茅洲河流域和珠江口流域为流域III, 处于深圳市中西部人口稠密地区. 水体污染程度由重到轻依次为流域III、流域II和流域I. 符合新型综合水质指数法(WQI-DET)绘制的水质空间分布规律.

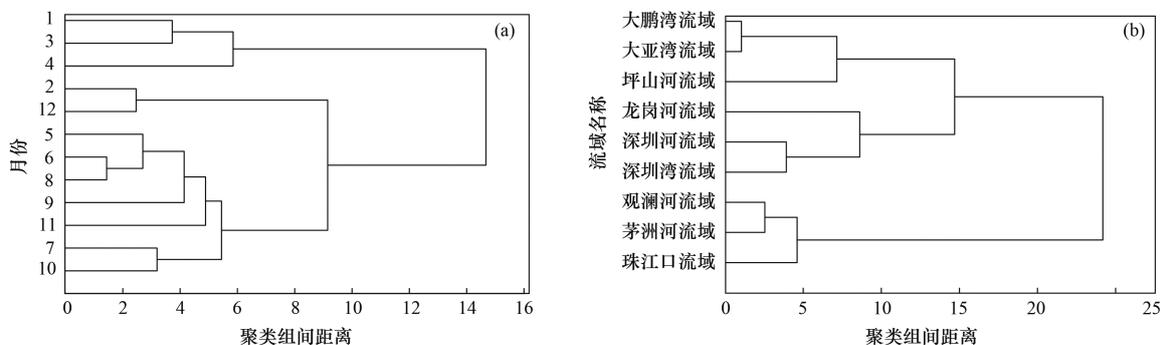


图5 时间和空间尺度层次聚类分析结果

Fig. 5 Time and spatial scale hierarchical clustering analysis results

3 降雨对河流水质的影响

3.1 水质随降雨变化趋势

为进一步识别深圳市水质的时间变化特征, 探究深圳市河流水质随降雨的变化趋势, 本文收集了深圳市坪山河坪山雨量站、龙岗河龙岗雨量站、茅洲河光明雨量站和深圳河布吉河口雨量站自动监测的降雨量日数据. 并将日降雨数据与深圳市坪山河上洋水站、龙岗河吓陂水站、茅洲河燕川水站、深圳河布吉河口自动监测的水质日数据进行匹配, 其中深圳河布吉河口的水质站点和雨量站点为同一个站

点, 其他雨量站均位于水质站点上游10 km内, 符合精度要求. 坪山河、龙岗河、茅洲河和深圳河的平均WQI-DET指数如表4所示, 4条河流在发生降雨事件时的平均WQI-DET指数均低于不发生降雨事件时的平均WQI-DET指数, 表明研究期内出现的降雨对坪山河、龙岗河、茅洲河和深圳河的水质有较为明显的影响, 发生降雨事件时河流水质更差.

坪山河、龙岗河、茅洲河和深圳河的水质与降雨变化趋势如图6所示. 坪山河在2017年7月18日, WQI-DET指数在研究期内最低(-551), 同天的降雨量是51.8 mm, 降雨量等级属于暴雨; 2018年2月, 坪

表 4 深圳市河流平均 WQI-DET 指数

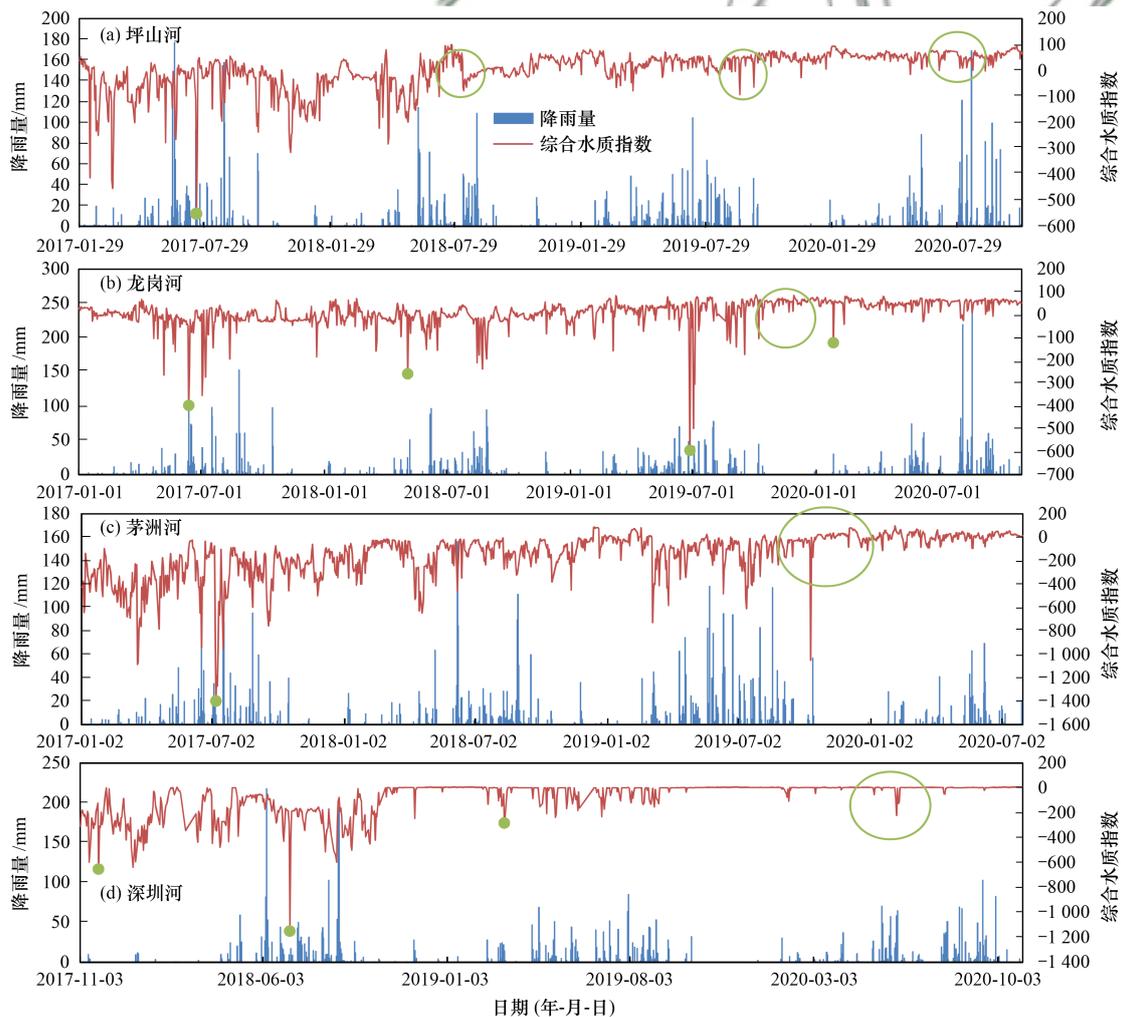
Table 4 Average WQI-DET index of rivers in Shenzhen

河流名称	河流平均 WQI-DET 指数	
	发生降雨事件	不发生降雨事件
坪山河	-1.92	7.33
龙岗河	-1.75	17.57
茅洲河	-173.37	-127.13
深圳河	-88.27	-65.72

山河的降雨量较少, WQI-DET 指数呈上升趋势, 水质得到改善, 从劣 V 类水提升到 IV 类水; 2018 年、2019 年和 2020 年监测的日降雨量较 2017 年大, WQI-DET 指数随降雨波动, 2018 年 7 月、2019 年 8 月和 2020 年 8 月均能明显看出雨天水质较晴天更差, 但 WQI-DET 指数大于 2017 年同期。龙岗河的水质受降雨影响较为明显, 2017 年 6 月 13 日的综合水质年度最低 (-397), 同日降雨量是 102.7 mm, 降雨量等级属于大暴雨; 2018 年 5 月 4 日 WQI-DET 指数年度最低 (-285), 同日降雨量是 24.7 mm, 属于中雨; 2019 年 7

月 3 日 WQI-DET 指数年度最低 (-594), 同日降雨量是 41.3 mm, 降雨量等级属于大雨; 2020 年 1 月 26 日 WQI-DET 指数年度最低 (-123), 同日降雨量是 30mm, 降雨量等级属于大雨, 河流水质在降雨事件发生时均发生明显的下降; 晴天时候水质得到明显提升, 例如在 2019 年 11 月日降雨为 0 时, 水质等级从劣 V 类提升到 III 类水。

茅洲河的综合水质在 4 条河流中最差, 大部分时间都为劣 V 类水, 水质受降雨的影响较大。2017 年 7 月 7 日的综合水质年度最低 (-1400), 同日降雨量是 8.2 mm, 降雨量等级属于小雨; 2018 年、2019 年和 2020 年降雨量比 2017 年明显增多, 降雨量为 0 时, 水质明显得到改善, 例如 2019 年 11 月, 水质从雨天的劣 V 类水提升到 IV 类水。深圳河 2017 年、2018 年和 2019 年水随降雨波动变化较大。2017 年 11 月 13 日 WQI-DET 指数年度最低 (-597), 同时降雨量是 4.6 mm, 降雨量等级属于小雨; 2018 年 7 月 4 日 WQI-DET 指数年度最低 (-1150), 同日降雨量为 25 mm, 属于



绿色圆圈为重点分析标记

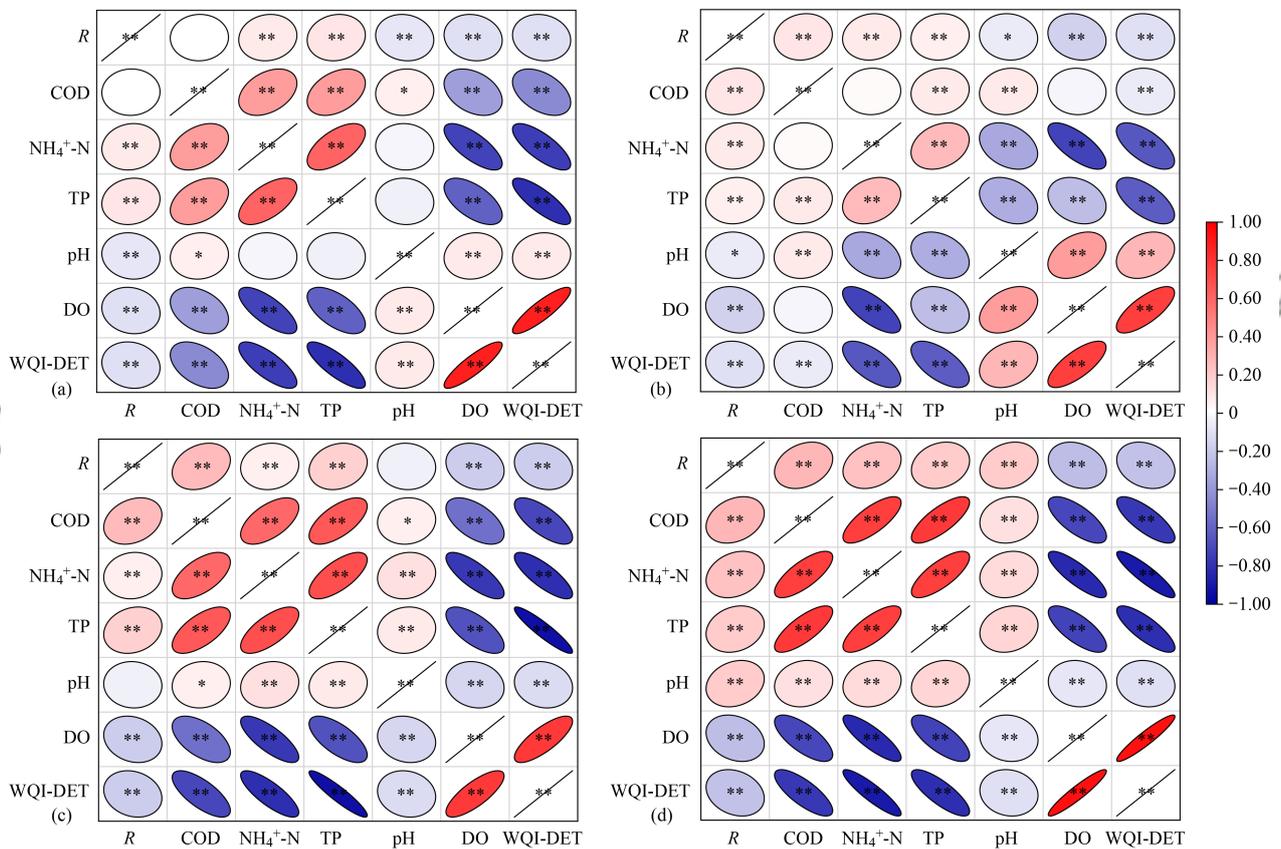
图 6 深圳市 4 条河流降雨量与水质变化趋势

Fig. 6 Variation trend of rainfall and water quality of four rivers in Shenzhen

中雨~大雨;2019年3月10日,WQI-DET指数年度最低(-282),同日降雨量是14 mm,降雨量等级属于中雨;2020年6月7日WQI-DET指数年度最低(-220),同日降雨量为58.1 mm,属于暴雨.降雨量为0时水质得到明显提升,例如2019年12月,水质从雨天的劣V类水提升到V类水.从水质对降雨的响应关系来看,降雨在陆面水文循环过程中对深圳市河流水质具有突出贡献.降雨具有冲刷作用,把累积在陆地上的污染物冲刷到就近的河道中,增加水体负担,使河流污染严重^[40].但在2020年以后,4条河流WQI-DET指数折线图受降雨影响较之前明显降低,振幅明显变小,其主要原因是深圳市推进修复原有的污水管网工程进度,采取扩建新型管网、完善排水管网和提高雨污分流率等措施^[41-43].

3.2 降雨量与主要水质指标相关性分析

为进一步明确降雨与河流水质断面水质指标的相关关系,探究水质变化的关键污染因子,选取COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、pH和DO这5项主要指标与降雨量做相关性分析(图7)^[44].总体来看,4条河流的WQI-DET与降雨量呈负相关;坪山河降雨量与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP呈正相关,与pH和DO呈负相关,WQI-DET与COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP呈显著负相关;龙岗河降雨量与COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP呈正相关,与DO和pH呈负相关,WQI-DET与TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著负相关;茅洲河降雨量与COD和TP呈正相关,与DO呈负相关,WQI-DET与TP、COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著负相关;深圳河降雨量与COD、pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP呈正相关,与DO呈负相关,WQI-DET与TP、COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著负相关.



(a)坪山河,(b)龙岗河,(c)茅洲河,(d)深圳河;R表示降雨量;色柱为相关性系数的线性映射;*表示 $P \leq 0.05$,**表示 $P \leq 0.01$

图7 深圳市4条河流主要指标与降雨量相关性热力

Fig. 7 Heat maps of correlation between main indexes and rainfall of four rivers in Shenzhen

WQI-DET数值越小表明水质越差,与WQI-DET呈显著负相关的水质指标是水体污染的主要污染源.各水质指标与降雨的相关性分析结果,揭示了降雨对水体水质的影响机制.坪山河、茅洲河和深圳河的主要污染指标均是TP、COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$;龙岗河的主要污染指标是TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$.对于坪山河和龙岗河,降雨使TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 指标浓度升高;对

于茅洲河,降雨使TP和COD指标浓度升高;对于深圳河,降雨使COD、TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 指标浓度升高.这是由于雨水冲刷携带大量污染物通过地表径流等方式进入河流,并且沿河截污管道存在雨季溢流,增加了河流污染物浓度^[45].因此,深圳市可依据降雨带来的特征污染物,追踪定位面源污染来源,加快实施雨污分流措施,加强雨污分流管网的建设与

维护,完善截流与调蓄基础设施,以提升河流水质。

4 结论

(1)2015~2021年,随着水污染防治力度的提升,深圳市河流水环境质量持续改善。其中2015~2017年全市大约89%的水质断面的水质类别为Ⅳ类水及以下,2018年以后水质得到明显改善,到2021年仅剩6%的断面水质为劣Ⅴ类,水质状况整体良好。

(2)深圳市(不含深汕)西部的水质污染较东部更严重,九大流域中茅洲河流域、珠江口流域和观澜河流域的水质污染程度最重,其次是龙岗河流域、深圳河流域和深圳湾流域,水质污染程度最轻的是东部的坪山河流域、大亚湾流域和大鹏湾流域,2021年,水质污染主要集中在人口稠密的街道、河流河口和支流下游。

(3)从水质对降雨的响应关系来看,坪山河、龙岗河、茅洲河和深圳河的水质受降雨的影响显著,在2020年以后,由于深圳市采取完善排水管网、提高雨污分流率等措施,河流受降雨影响较之前明显降低,河流面源污染得到初步控制。

(4)深圳市河流的主要特征污染指标是DO、高锰酸盐指数、COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TP、石油类和阴离子表面活性剂。河流主要存在富营养化的问题,水体污染主要来自生活污染,存在少量化学污染。对于坪山河和龙岗河,降雨使TP和NH₄⁺-N指标浓度升高;对于茅洲河,降雨使TP和COD指标浓度升高;对于深圳河,降雨使COD、TP和NH₄⁺-N指标浓度升高。通过对污染物的追踪,能够更加精准地治理河流面源污染问题,帮助进一步提升河流水质。

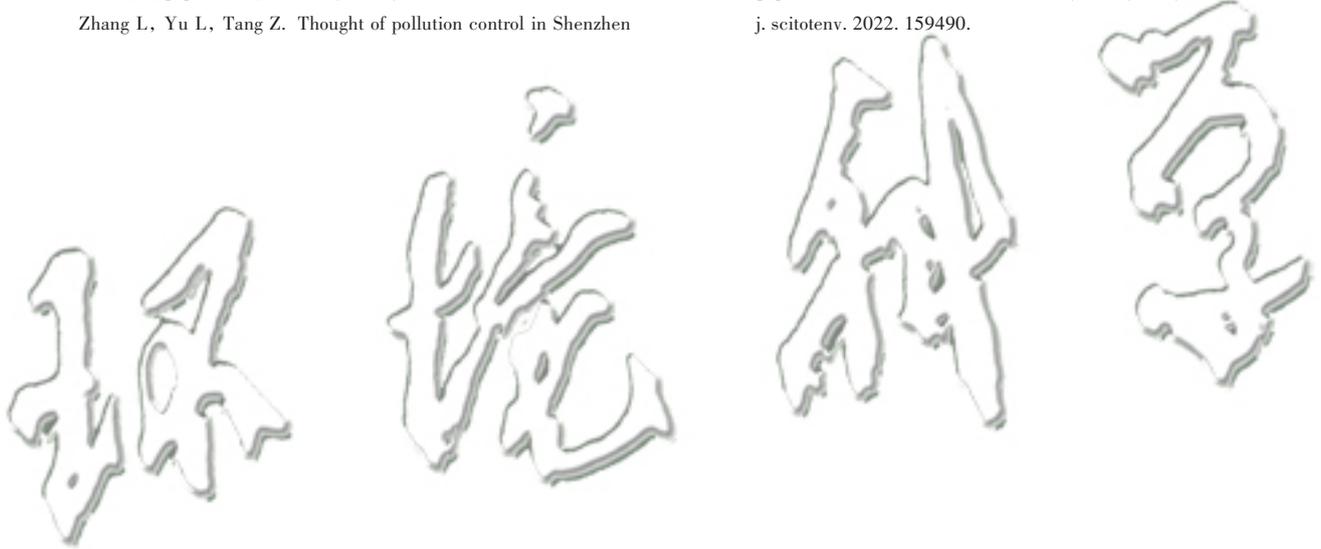
参考文献:

- [1] 卫诗韵,付东洋,刘大召,等. 改革开放40年深圳海岸线变化的遥感监测[J]. 热带地理, 2023, 43(5): 986-1004.
Wei S Y, Fu D Y, Liu D Z, et al. Remote sensing monitoring of Shenzhen coastline changes over the past 40 years[J]. Tropical Geography, 2023, 43(5): 986-1004.
- [2] 嵇晓燕,侯欢欢,王姗姗,等. 近年全国地表水水质变化特征[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4419-4429.
Ji X Y, Hou H H, Wang S S, et al. Variation characteristics of surface water quality in China in recent years[J]. Environmental Science, 2022, 43(10): 4419-4429.
- [3] Lin T, Yu H Q, Wang Q, et al. Surface water quality assessment based on the integrated water quality Index in the Maozhou River basin, Guangdong, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(10), doi: 10.1007/s12665-021-09670-y.
- [4] Dong W X, Zhang Y J, Zhang L P, et al. What will the water quality of the Yangtze River be in the future?[J]. Science of the Total Environment, 2023, 857, doi: 10.1016/j.scitotenv. 2022. 159714.
- [5] 彭盛华,尹魁浩,梁永贤,等. 深圳市河流水污染治理与雨洪利用研究[J]. 环境工程技术学报, 2011, 1(6): 495-504.

- Peng S H, Yin K H, Liang Y X, et al. Study on river water pollution control and storm water utilization in Shenzhen [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2011, 1(6): 495-504.
- [6] 王健,黄奕龙,杜朋辉,等. 基于河道生态补水的市政污水APO/M工艺及应用[J]. 中国给水排水, 2023, 39(4): 101-107.
Wang J, Huang Y L, Du P H, et al. APO/M process and its application in municipal sewage treatment based on river ecological replenishment [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(4): 101-107.
- [7] 李晋,辛克刚,王磊,等. 基于MIKE11的城市雨源型河流再生水补水方案研究[J]. 给水排水, 2020, 56(S1): 681-686.
Li J, Xin K G, Wang L, et al. Research on the scheme of reclaimed water supplement for urban ephemeral river based by MIKE11 [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(S1): 681-686.
- [8] 王谦,王秋茹,王秀荷,等. 城市雨源型河流生态补水治理案例研究[J]. 给水排水, 2017, 43(10): 47-53.
Wang Q, Wang Q R, Wang X H, et al. Case study on ecological water compensation and regulation of urban rain-source ephemeral river [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(10): 47-53.
- [9] Putro B, Kjeldsen T R, Hutchins M G, et al. An empirical investigation of climate and land-use effects on water quantity and quality in two urbanising catchments in the southern United Kingdom [J]. Science of the Total Environment, 2016, 548-549: 164-172.
- [10] 连心桥,朱广伟,杨文斌,等. 强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4970-4980.
Lian X Q, Zhu G W, Yang W B, et al. Effect of heavy rainfall on nitrogen and phosphorus concentrations in rivers at river-net plain [J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 4970-4980.
- [11] 王子铭,杨丽虎,宋献方. 雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应[J]. 环境科学, 2023, 44(7): 3820-3834.
Wang Z M, Yang L H, Song X F. Spatial-temporal variation of water quality and its response to precipitation and land use in Baiyangdian Lake in the early stage of the construction of Xiong'an New Area [J]. Environmental Science, 2023, 44(7): 3820-3834.
- [12] 陈焰,夏瑞,曾思栋,等. 城市河流水体污染变化特征及其对降雨的响应关系:以新凤河流域为例[J]. 中国农村水利水电, 2022, (11): 153-158, 164.
Chen Y, Xia R, Zeng S D, et al. Variation characteristics of water pollution and its response to rainfall in urban rivers: a case study of Xinfeng River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022, (11): 153-158, 164.
- [13] 苏晓煜,王裕东,熊向隰,等. 深圳市40年河流水质变化及影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(S1): 259-263.
Su X Y, Wang Y D, Xiong X Y, et al. Study on the variation and influence factors on river water quality in Shenzhen over the last forty years [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(S1): 259-263.
- [14] 张贤君,张文强,李思敏. 观澜河流域(龙华区段)水质改善工程及其治理成效[J]. 环境工程学报, 2021, 15(8): 2810-2820.
Zhang X J, Zhang W Q, Li S M. Effectiveness of engineering measures for water quality improvement in Guanlan River Basin (Longhua section) [J]. Chinese Journal of Environmental

- Engineering, 2021, **15**(8): 2810-2820.
- [15] 张敏, 解莹, 彭文启, 等. 龙岗河坪山河水质时空状况分析[J]. 中国水利, 2020, (22): 21-23.
Zhang M, Xie Y, Peng W Q, *et al.* Analysis of spatial-temporal status of the water quality in the Longgang River and the Pingshan River[J]. China Water Resources, 2020, (22): 21-23.
- [16] 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 等. 雨源型城市河流水污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 782-794.
Bi Y L, Wang H C, Xia B, *et al.* Pollution characterization and comprehensive water quality assessment of rain-source river: A case study of the Longgang River in Shenzhen[J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 782-794.
- [17] Zhang Y S, Wu L, Deng L C, *et al.* Retrieval of water quality parameters from hyperspectral images using a hybrid feedback deep factorization machine model[J]. Water Research, 2021, **204**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117618.
- [18] 李晓玉, 韩榛, 邵光艺, 等. 基于多元分析的北京市通州区主要河流水质时空变化[J]. 环境化学, 2022, **41**(9): 2896-2907.
Li X Y, Han S, Shao G Y, *et al.* Multiple analyses on time-temporal change of water quality in major rivers of Tongzhou, Beijing[J]. Environmental Chemistry, 2022, **41**(9): 2896-2907.
- [19] 汪心雯, 刘子琦, 郭琼琼, 等. 贵州黄洲河流域水质时空分布特征及污染源解析[J]. 环境工程, 2021, **39**(9): 69-75.
Wang X W, Liu Z Q, Guo Q Q, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics and pollution source evaluation of water quality in the Huangzhouhe River Basin, Guizhou[J]. Environmental Engineering, 2021, **39**(9): 69-75.
- [20] 陈金月, 陈水森, 付娆, 等. 广东省水质现状及驱动因素[J]. 生态学报, 2022, **42**(19): 7921-7931.
Chen J Y, Chen S S, Fu R, *et al.* Analysis of water quality status and driving factors in Guangdong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(19): 7921-7931.
- [21] Jo C D, Kwon H G. Temporal and spatial evaluation of the effect of river environment changes caused by climate change on water quality[J]. Environmental Technology & Innovation, 2023, **30**, doi: 10.1016/j.eti.2023.103066.
- [22] Syeed M M M, Hossain S, Karim R, *et al.* Surface water quality profiling using the water quality index, pollution index and statistical methods: A critical review[J]. Environmental and Sustainability Indicators, 2023, **18**, doi: 10.1016/j.indic.2023.100247.
- [23] Huang J C, Zhang Y J, Arhonditsis G B, *et al.* How successful are the restoration efforts of China's lakes and reservoirs? [J]. Environment International, 2019, **123**: 96-103.
- [24] Wang X P, Liu X J, Wang L Q, *et al.* A holistic assessment of spatiotemporal variation, driving factors, and risks influencing river water quality in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2022, **851**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157942.
- [25] Wu Z S, Cai Y J, Zhang L, *et al.* Spatial and temporal heterogeneities in water quality and their potential drivers in Lake Poyang (China) from 2009 to 2015[J]. Limnologia, 2018, **69**: 115-124.
- [26] 郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 等. 2017-2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析[J]. 环境科学, 2023, **44**(8): 4279-4291.
Guo C C, Lei K, Li X G, *et al.* Spatiotemporal variation characteristics of main pollutant fluxes in the Yangtze River basin from 2017 to 2020[J]. Environmental Science, 2023, **44**(8): 4279-4291.
- [27] Xu H S, Xu Z X, Wu W, *et al.* Assessment and spatiotemporal variation analysis of water quality in the Zhangweinan River basin, China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, **13**: 1641-1652.
- [28] 李义禄, 张玉虎, 贾海峰, 等. 苏州古城区水体污染时空分异特征及污染源解析[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(4): 1032-1044.
Li Y L, Zhang Y H, Jia H F, *et al.* Spatio-temporal characteristics and source identification of water pollutants in ancient town of Suzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(4): 1032-1044.
- [29] 刘彦龙, 郑易安. 黄河干流水质评价与时空变化分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1332-1345.
Liu Y L, Zheng Y A. Water quality assessment and spatial-temporal variation analysis in Yellow River basin [J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1332-1345.
- [30] Tian Y Q, Wen Z G, Cheng M L, *et al.* Evaluating the water quality characteristics and tracing the pollutant sources in the Yellow River Basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2022, **846**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157389.
- [31] 谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 等. 2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(12): 5585-5597.
Xie H Y, Hu M, Ji X Y, *et al.* Water quality evolution characteristics and pollution factor analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019[J]. Environmental Science, 2022, **43**(12): 5585-5597.
- [32] Wang B B, Wang Y Y, Wang S L. Improved water pollution index for determining spatiotemporal water quality dynamics: Case study in the Erdao Songhua River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2021, **129**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107931.
- [33] 程兵芬, 张远, 夏瑞, 等. 汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4211-4221.
Cheng B F, Zhang Y, Xia R, *et al.* Temporal and spatial variations in water quality of Hanjiang river and its influencing factors in recent years[J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4211-4221.
- [34] 张宇航, 渠晓东, 彭文启, 等. 北京市河流生态系统健康评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(10): 5478-5489.
Zhang Y H, Qu X D, Peng W Q, *et al.* Health assessment of the stream ecosystem in Beijing, China[J]. Environmental Science, 2023, **44**(10): 5478-5489.
- [35] 李军, 李旭, 李开明, 等. 黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2023, **44**(5): 2562-2573.
Li J, Li X, Li K M, *et al.* Spatial distribution characteristics and source analysis of heavy metals in urban river surface sediments from the Lanzhou reach of the Yellow River [J]. Environmental Science, 2023, **44**(5): 2562-2573.
- [36] 黄洋漫, 陈晓宏. 粤港澳大湾区水生态状态演变及驱动机制研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2023, **62**(2): 93-103.
Huang Y M, Chen X H. The evolution of water ecological state and driving mechanism in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2023, **62**(2): 93-103.
- [37] Bushero D M, Angello Z A, Behailu B M. Evaluation of hydrochemistry and identification of pollution hotspots of little Akaki river using integrated water quality index and GIS [J].

- Environmental Challenges, 2022, **8**, doi: 10.1016/j. envc. 2022. 100587.
- [38] 毕业亮, 宿辉, 刘洋, 等. 龙岗河氨氮生态风险及水生态功能评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2020, (10): 100-105.
Bi Y L, Su H, Liu Y, *et al.* An assessment of ammonia nitrogen ecological risk and water ecological function in Longgang river[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020, (10): 100-105.
- [39] 李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 等. 三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1839-1846.
Li M L, Jia M D, Sun T C, *et al.* Spatiotemporal change and source apportionment of non-point source nitrogen and phosphorus pollution loads in the Three Gorges Reservoir area [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1839-1846.
- [40] 黄诚, 黄廷林, 李扬, 等. 金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1380-1390.
Huang C, Huang T L, Li Y, *et al.* Temporal and spatial evolution of storm runoff and water quality assessment in Jinpen reservoir[J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1380-1390.
- [41] 张亮, 俞露, 汤钟. 基于“厂-网-河-城”全要素的深圳河流域治理思路[J]. 中国给水排水, 2020, **36**(20): 81-85.
Zhang L, Yu L, Tang Z. Thought of pollution control in Shenzhen River basin based on the whole factor of "plant, network, river and city"[J]. China Water & Wastewater, 2020, **36**(20): 81-85.
- [42] 邵宇航, 楼少华, 唐颖栋, 等. 深圳茅洲河流域暗涵雨污分流改造实践[J]. 中国给水排水, 2021, **37**(6): 122-127.
Shao Y H, Lou S H, Tang Y D, *et al.* Practice of stormwater and sewage diversion reformation at culverts in Maozhou River basin of Shenzhen [J]. China Water & Wastewater, 2021, **37** (6) : 122-127.
- [43] 全晓辉, 汪银龙, 刘晓宁, 等. 深圳河水体污染特征分析及整治措施[J]. 中国给水排水, 2020, **36**(7): 52-59.
Tong X H, Wang Y L, Liu X N, *et al.* Pollution characteristics analysis and control measures of Shenzhen River[J]. China Water & Wastewater, 2020, **36**(7): 52-59.
- [44] 杨传玺, 薛岩, 高畅, 等. 2002~2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析[J]. 环境科学, 2023, **44**(5): 2502-2517.
Yang C X, Xue Y, Gao C, *et al.* Analysis of change and driving factors of river environmental quality in China from 2002 to 2020 [J]. Environmental Science, 2023, **44**(5): 2502-2517.
- [45] Bui L T, Pham H T H. Linking hydrological, hydraulic and water quality models for river water environmental capacity assessment [J]. Science of the Total Environment, 2023, **857**, doi: 10.1016/j. scitotenv. 2022. 159490.



CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i>	(617)
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang	(626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i>	(635)
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i>	(645)
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i>	(655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i>	(668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i>	(678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM _{2.5} in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i>	(700)
Nonlinear Variations in PM _{2.5} Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i>	(709)
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i>	(721)
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i>	(732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i>	(744)
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang	(755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i>	(768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i>	(780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i>	(792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i>	(802)
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong	(813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i>	(826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i>	(837)
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo	(844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i>	(854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i>	(862)
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i>	(873)
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i>	(885)
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i>	(898)
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i>	(909)
Ecosystem CO ₂ Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i>	(920)
Effects of Biochar Application Two Years Later on N ₂ O and CH ₄ Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i>	(929)
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i>	(940)
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i>	(952)
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province: Taking Puding County as an Example	LI Yue, LUO Hong-fen	(961)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i>	(974)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing	(983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i>	(992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i>	(1004)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	(1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong	(1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i>	(1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i>	(1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i>	(1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i>	(1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i>	(1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i>	(1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i>	(1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i>	(1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i>	(1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i>	(1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i>	(1141)
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i>	(1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i>	(1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i>	(1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i>	(1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i>	(1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang	(1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li	(1222)