

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勖之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勛之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
- 再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
- 基于多种新型受体模型的 $PM_{2.5}$ 来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
- 华中地区夏季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
- 淄博2021年元宵节 $PM_{2.5}$ 水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
- 浙江省大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
- 2001~2019年气象条件对江苏省 $PM_{2.5}$ 分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
- 基于神经网络和数值模型的重点区域 $PM_{2.5}$ 预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
- 2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
- 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
- 山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
- 基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
- 日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
- 泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
- 典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
- 2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
- 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
- 生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
- 不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
- 雨源型城市河流污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
- 廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
- 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
- 河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素: 以石家庄为例 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
- 青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
- 鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
- 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
- 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
- 基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)
- 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
- 铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
- 氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
- 环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
- 冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
- 不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
- 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
- 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
- 地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索: 以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
- 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)
- 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
- 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
- 不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
- 温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
- 两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
- 复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
- 产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉 (1031)
- 土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
- 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
- 中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
- 稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
- 模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
- 德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
- 陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
- 长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
- 《环境科学》征订启事(618) 信息(685, 935, 956)

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

毕业亮^{1,2}, 王华彩², 夏兵³, 姜参参², 吴伟业⁴, 李志林⁴, 李诗敏⁴, 宿辉¹, 白志辉², 徐圣君^{2*}, 庄绪亮²

(1. 河北工程大学水利水电学院, 邯郸 056038; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 深圳市北林苑景观及建筑规划设计院有限公司, 深圳 518038; 4. 深圳市环境科学研究院, 深圳 518001)

摘要: 雨源型城市河流水环境容量小, 易受污染, 识别河流水质的主要污染特征并进行科学地水质联合评价是水环境治理的重要工作。2018年, 选取典型雨源型城市河流深圳龙岗河的12个监测位点进行水质监测, 按照《地表水环境质量标准 GB 3838-2002》对22个水质指标进行分析, 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。单因子评价结果显示, 龙岗河所有位点均达到地表水V类水质标准及以上, 其中田脚水和龙西河分别达到地表水IV类和III类水质标准; 综合污染指数评价结果显示, 所有位点水质状况均为清洁或较清洁; 综合污染指数法和主成分综合得分均显示, 所有位点中龙西河、南约河和田脚水的水质最好, 梧桐山河、大康河、爱联河、丁山河和黄沙河还有较大的提升空间, 且需要着重考虑营养盐(TN、TP和 NH_4^+-N)、有机物(COD和 BOD_5)、粪大肠菌群和阴离子表面活性剂等指标。3种评价结果存在差异, 但均能从定性和定量的不同角度反映河流水质状况, 因此综合采用多种评价方法能更好地反映雨源型城市河流的水质特征。

关键词: 龙岗河; 水质评价; 单因子评价法; 综合污染指数法; 主成分分析法

中图分类号: X522; X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0782-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105119

Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen

BI Ye-liang^{1,2}, WANG Hua-cai², XIA Bing³, JIANG Can-can², WU Wei-ye⁴, LI Zhi-lin⁴, LI Shi-min⁴, SU Hui¹, BAI Zhi-hui², XU Sheng-jun^{2*}, ZHUANG Xu-liang²

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Shenzhen Beilinyuan Landscape and Architecture Planning and Design Institute Co., Ltd., Shenzhen 518038, China; 4. Shenzhen Academy of Environmental Sciences, Shenzhen 518001, China)

Abstract: Rain-source urban rivers are an important part of the urban ecosystem. Due to the small water environment capacity and the rapid development of the regional economy and society, they are vulnerable to serious pollution. The goal of this study was to identify the main pollution characteristics of river water quality and to carry out a scientific comprehensive water quality assessment. Water samples from 12 sampling locations of the Longgang River in Shenzhen, a typical rain-source urban river, were collected from January to December in 2018. According to the Environmental Quality Standard for Surface Water (GB 3838-2002), 22 water quality indicators were analyzed, and the water quality of Longgang River was comprehensively evaluated using the single-factor assessment method, comprehensive pollution index method, and principal component analysis method. The results of the single-factor assessment method showed that water quality of all sampling sites of the Longgang River met the Class V of the Environmental Quality Standard for Surface Water (GB 3838-2002), and the Tiaojiao Shui and Longxi River met the Class IV and Class III of the Environmental Quality Standard for Surface Water (GB 3838-2002), respectively. The results of the comprehensive pollution index method showed that the water quality of 12 sampling sites was clean or relatively clean. Both the results of the comprehensive pollution index and principal component comprehensive score showed that the water quality of Longxi River, Nanyue River, and Tianjiao Shui were the best among all sampling sites. There is still room for improvement in the Wutongshan River, Dakang River, Ailian River, Dingshan River, and Huangsha River, and significant consideration should be given to parameters such as nutrients (TN, TP, and NH_4^+-N), organic matter (COD and BOD_5), fecal coliform, and anionic surfactants. The three methods were a combination of qualitative and quantitative evaluation. The results of each method were not identical. Thus, it is very necessary to explore the comprehensive water quality assessment using various methods for making scientific and reasonable water pollution control strategies.

Key words: Longgang River; water quality assessment; single-factor assessment method; comprehensive pollution index method; principal component analysis method

雨源型城市河流具有源短流急、水环境容量小和生态脆弱的特点^[1], 易受到人类的强烈干扰, 致使流域水资源短缺和水体污染严重, 河流水生态系统急剧退化, 进而造成诸多环境和社会问题。

龙岗河是重要的雨源型河流, 流域位于人口高度集中的经济发达地区, 其主要用水量为工业用水和城市用水, 受水污染和需水量大影响, 此区域大部分水资源是从其他流域调来(约70%), 只有30%

由当地水资源支持^[2], 因此水污染和水资源配置一直是龙岗河流域管理的重要内容。此外, 龙岗河位于深圳市饮用水水源地的上游, 汇入东江二级支

收稿日期: 2021-05-12; 修订日期: 2021-07-29

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07206-006-05); 深圳市技术创新计划技术攻关项目(JSGG20180718115204691)

作者简介: 毕业亮(1982~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水环境控制和水生态修复, E-mail: slgcblyl@163.com

* 通信作者, E-mail: sjxu@rcees.ac.cn

流,而东江是珠江三角洲地区及香港特别行政区的主要水源,因此龙岗河水污染不仅制约本区域可持续发展,还可能威胁东江干流乃至香港的水质安全^[3]. 2000 年以来,随着深圳市龙岗区经济社会的高速发展,龙岗河受到了较大的污染,水质长期处于劣 V 类,甚至发黑发臭,是广东省跨界污染最严重的流域之一^[4]. 经过十多年的综合整治,龙岗河水质逐年好转,摘除了黑臭水体的帽子,但河道生态环境仍未得到根本性扭转,选择科学的方法评价龙岗河水质状况,对明确未来水质目标和拟定治理路径十分必要.

常用的水质评价方法主要有单因子评价法^[5,6]、综合污染指数法^[7,8]、综合水质标识指数法^[9,10]、模糊综合评判法^[5,11]、主成分分析法^[12~14]和灰色关联系数法^[15]等. 以上评价方法各有优缺点,侧重点也不同,将多种评价方法有机结合更能科学合理评价龙岗河的水质状况. 因此,本研究根据评价方法计算的难易程度、评价结果的类型(定性/定量)和是否考虑水质指标权重这 3 个方面选取单因子评价法、综合污染指数法和主成分分析法对深圳龙岗河的水质状况进行科学评价,以期为打好龙岗河治水提质攻坚战提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

龙岗河是深圳市境内的第二大河流,发源于深圳最高峰梧桐山北麓,流经深圳市龙岗区,然后流入惠州市惠阳境内,自南向北在吓陂处汇入东江二级

支流淡水河^[16],属于淡水河的上游段. 龙岗河流域面积约为364.4 km²,含一条干流(龙岗河)和 43 条支流,属东江流域淡水河水系,而东江自东向西流,从珠江口入海(图 1). 龙岗河汇入东江后,在汇入点的下游又有引水工程,作为引用水源供给深圳和香港居民用水. 因此龙岗河水质好坏直接关系到东江中上游水质状况,进而影响到东江下游和深圳地区几千万人的饮用水安全^[17].



图 1 龙岗河流域区位示意

Fig. 1 Location of Longgang River basin

1.2 样品采集

于 2018 年每个月的 12~14 日采集样品,共设有 12 个检测位点(图 2),包括龙岗河支流梧桐山河(S1)、大康河(S2)、爱联河(S3)、龙西河(S4)、南约河(S5)、丁山河(S6)、黄沙河(S7)、田坑水(S8)、田脚水(S9)及龙岗河干流的上游(S10)、中

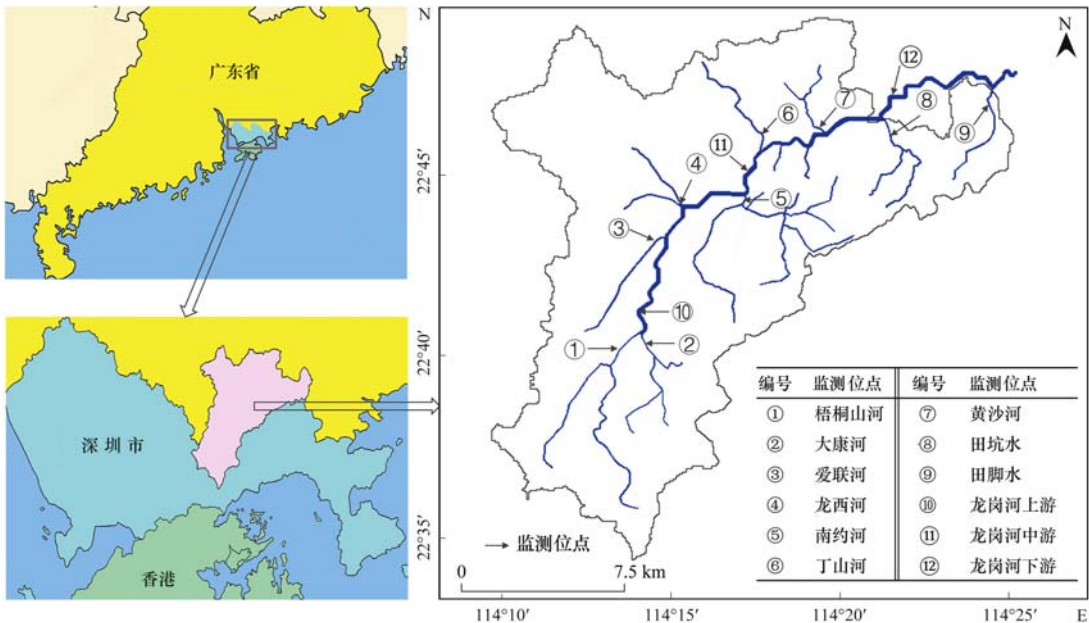


图 2 龙岗河监测位点

Fig. 2 Sampling locations of Longgang River

游(S11)和下游(S12).每个检测位点设左、中和右3条垂线,采集3条垂线表层0.5 m处混合水样1 L于塑料瓶中.

1.3 样品分析

在各采样点处用YSI多参数水质监测仪现场测定水体水温(temperature, T)、pH和溶解氧(dissolved oxygen, DO).采集的水样于4℃保存带回实验室分析其化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、高锰酸盐指数、5日生化需氧量(5-day biochemical oxygen demand, BOD_5)、总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)、氨氮(ammonia nitrogen, NH_4^+-N)、粪大肠菌群、Cu、Zn、Cd、Pb、Se、As、Hg、Cr(VI)、硫化物、氰化物、氟化物、挥发酚、石油类和阴离子表面活性剂指标的含量. COD采用重铬酸钾法(GB 11914-1989)测定,高锰酸盐指数采用高锰酸钾法(GB/T 11892-1989)测定, BOD_5 采用稀释与接种法(HJ 505-2009)测定, TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636-2012)测定, TP采用钼酸铵分光光度法(GB 11893-1989)测定, NH_4^+-N 采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535-2009)测定,粪大肠菌群采用滤膜法(HJ/T 347-2007)测定, Cu、Zn、Cd和Pb采用原子吸收分光光度法(GB 7475-87), Se采用石墨炉吸收分光光度法(GB/T 15505-1995), Cr(VI)采用二苯碳酰二肼分光光度法(GB 7467-87), As和Hg采用冷原子荧光法(HJ/T 341-2007),硫化物采用亚甲基蓝分光光度法(GB/T 16489-1996),氟化物采用氟试剂分光光度法(GB 7483-87),氰化物采用砷-巴比妥酸比色法(GB 7487-87),挥发酚采用蒸馏后4-氨基安替比林分光光度法(GB 7490-87),石油类采用红外分光光度法(GB/T 16488-1996),阴离子表面活性剂采用亚甲基蓝分光光度法(GB 7494-87).

1.4 质量控制和质量保证

所有水质化学指标分析测定时,均同步分析空白样品、质控样品和空白加标样品,加标回收率在80%~120%之间;平行双样的覆盖率占10%以上,且测量分析的相对标准偏差均保持在10%以上.粪大肠菌群分析测定时,同步进行空白实验、阳性对照和阴性对照.

1.5 数据处理和评价方法

采用IBM SPSS 19.0软件对数据进行统计分析.为了体现评价方法的一致性,本研究中单因子评价法、综合污染指数法和主成分分析法均选取22个评价指标[DO、COD、高锰酸盐指数、 BOD_5 、TN、TP、 NH_4^+-N 、粪大肠菌群、Cu、Zn、Cd、Pb、

Se、As、Hg、Cr(VI)、硫化物、氰化物、氟化物、挥发酚、石油类和阴离子表面活性剂]进行分析.

1.5.1 单因子评价法

单因子评价法采用一票否决制原则,即根据评价时段内该断面参评的指标中类别最高的一项来确定该水质类别^[18].在所有的参评水质中,如有某一项指标超标,则所属位点不符合相应的水质标准^[19].

1.5.2 综合污染指数法

综合污染指数法有多种方法^[8, 20],本研究选取等权重综合污染指数评价龙岗河各个位点的相对污染程度,即采用各水质指标的实测值与其评价标准之比,作为单项污染指数(P_i),然后通过等权重平均得到一个综合污染指数(P_j),计算公式^[21, 22]为:

$$P_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

$$P_i = C_i/S_i \quad (2)$$

式中, P_j 为 j 断面(水体)的综合污染指数; n 为参加评价的污染物项数; P_i 为第 i 项污染物的污染分指数; C_i 为第 i 项污染物的年均值; S_i 为第 i 项污染物的水质标准值,具体见《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的V类水质标准限值.综合污染指数对应的水质分级如下: $P \leq 0.25$, 清洁; $0.25 < P \leq 0.4$, 较清洁; $0.4 < P \leq 0.5$, 轻污染; $0.5 < P \leq 1$, 中污染; $1 < P$, 重污染.

1.5.3 主成分分析法

主成分分析法是通过原有变量的线性组合以及各个主成分的求解来实现变量降维^[23, 24].它的主要目的不是将那些不太重要的指标简单去掉,而是通过全面分析各项指标所携带的信息,筛选出比原始指标少,能解释大部分数据的综合性指标^[12].在分析前采用KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)检验和Bartlett球形度检验判断指标间的相关性,以确定原始变量是否适合进行主成分分析,具体评价方法的建立如下.

(1) 原始数据标准化 将原始数据进行标准化处理,以消除量纲和数量级的影响,计算公式如下^[25]:

$$Z_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j)/S_j$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p) \quad (3)$$

式中, Z_{ij} 为第 i 位点第 j 个指标的标准化值; x_{ij} 为第 i 位点第 j 个指标的实测值; $\bar{x}_j$ 为第 j 个指标的平均值; S_j 为第 j 个指标的标准差, n 为样本个数, p 为每个样本指标数,本文中 n 为12, p 为22.

(2) 相关系数矩阵 利用标准化数据矩阵计算其对应的相关系数矩阵 R ,并计算 R 的特征值与特

征向量,公式如下^[26,27]:

$$R = (r_{ij})_{p \times p} \quad (4)$$

$$r_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n Z_{ki} Z_{kj} \quad (5)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p)$$

R 的特征值 $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 对应主成分的方差,且 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$,特征值越大,其对应主成分对原始样本的权重越大. 通过每个特征根对应的特征向量($l_{g1}, l_{g2}, \dots, l_{gp}$)将标准化的指标转化为主成分,公式如下:

$$F_g = Z \times l_g \quad (g = 1, 2, \dots, p) \quad (6)$$

式中, F_1 为第 1 主成分, $\dots$, F_p 为第 p 主成分.

(3) 确定主成分个数 根据特征值大于 1 或主成分方差累计贡献率大于 85% 的原则,确定主成分个数 m .

(4) 主成分综合得分 每一个样本先求前 m 个主成分的值,然后对前 m 个主成分进行加权求和,计算公式^[28]如下:

$$F_{ig} = Z_{i1} l_{g1} + Z_{i2} l_{g2} + \dots + Z_{ip} l_{gp} \quad (7)$$

$$F_i = \sum_{g=1}^m \left(\lambda_g / \sum_{g=1}^p \lambda_g \right) F_{ig} \quad (8)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; g = 1, 2, \dots, m)$$

式中,每个主成分的权重系数 $\left(\lambda_g / \sum_{g=1}^p \lambda_g \right)$ 为该主成分的方差贡献率.

2 结果与讨论

2.1 水质因子特征

2.1.1 理化和营养盐指标

本研究测量的理化和营养盐指标包括 pH、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 TP 这 4 种(图 3),其中酸碱度(pH 值)是评价水质状况的一个综合性指标,氮和磷污染特征是水体富营养化程度和河流营养状态评价的关键指标^[29]. 龙岗河各监测位点 pH 范围为 7.21 ~ 7.93,呈弱碱性,适于水体动植物生长. 年平均 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 范围为 0.35 ~ 1.89 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,所有位点 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 均达到地表水 V 类水质标准(2.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)及以上,其中位点 S4、S9、S10 和 S11 的 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 达到地表水 III 类水质标准(1.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) (表 1). 年平均 $\rho(\text{TN})$ 范围为 0.94 ~ 1.77 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,所有位点均达到地表水 V 类水质标准(2.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)及以上,其中位点 S4 达到地表水 III 类水质标准(1.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 年平均 $\rho(\text{TP})$ 范围为 0.04 ~ 0.38 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,所有位点 $\rho(\text{TP})$ 均达到地表水 V 类水

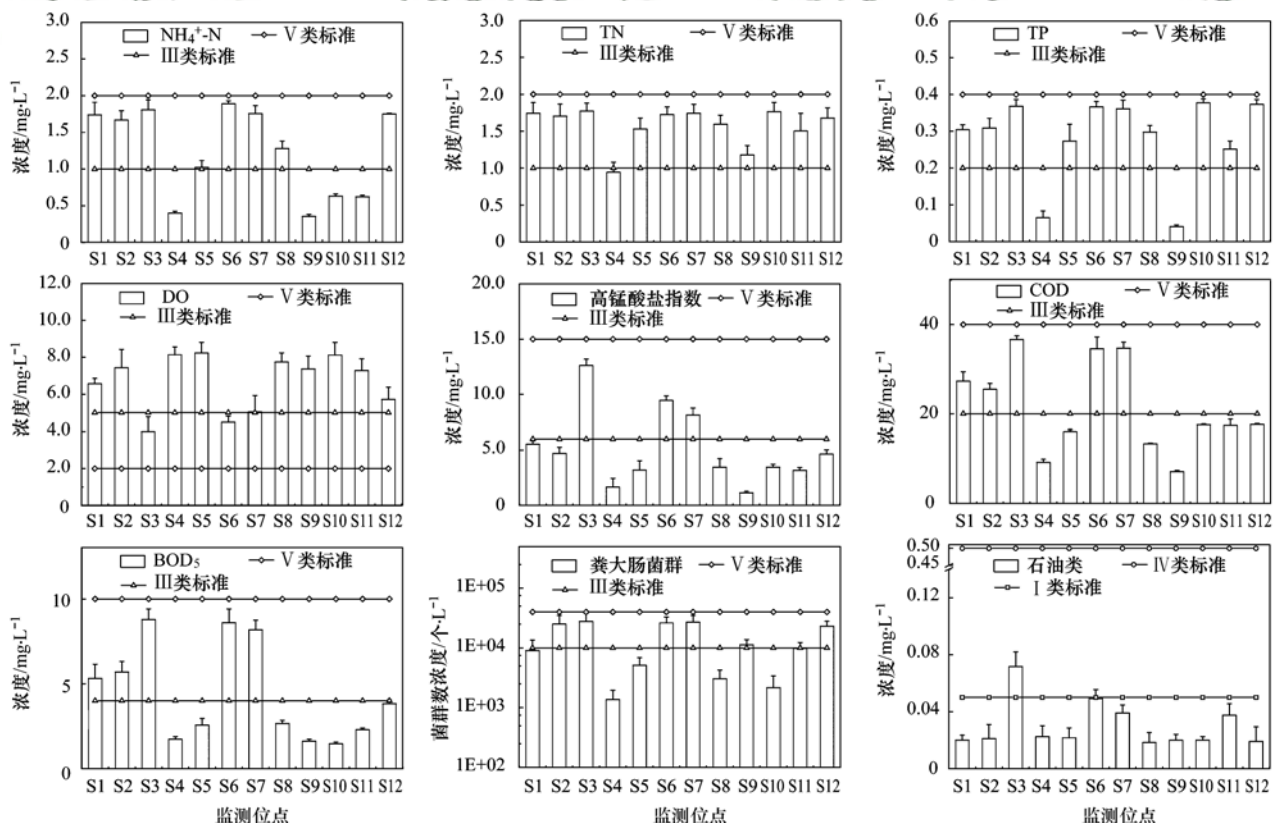


图 3 龙岗河各监测位点 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP、DO、高锰酸盐指数、COD、 BOD_5 、粪大肠菌群和石油类的年平均浓度

Fig. 3 Annual mean concentrations of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TN, TP, DO, permanganate index, COD, BOD_5 , fecal coliform, and petroleum in sampling sites of Longgang River

质标准($0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)及以上,其中位点 S4 和 S9 达到地表水Ⅲ类水质标准($0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 整体来看,所有站点水体均呈富营养态,相比其他站点,S4 和 S9 站点(龙西河和田脚水)水体中氮和磷含量较低,富营养化程度较轻,其余 10 个站点水质的富营养程度均较高,这与支流 S4 和 S9 流经区域人口密度和排污强度较低相关。

2.1.2 有机物污染和粪大肠菌群指标

有机物污染是水体污染的重要方面,本研究中表征有机物污染的指标有 DO、高锰酸盐指数、COD 和 BOD_5 (图 3),其中 DO 大小反映水体自净能力高低,并间接反映水体有机污染状况,而 COD 和 BOD_5 大小均反映水体中有机物质的多少,在一定程度上可表征水体受有机物的污染程度. 而粪大肠菌群表征水体中的微生物污染状况及其对人类健康的风险^[30]. 在本研究的龙岗河流域水体中,这些污染物主要来自于生活污染源,且深圳地区人口密度高,垃圾产生量大,大量垃圾中转站和垃圾池存在渗滤液及清洗废水进入雨水系统而排入河道情况,从而加重有机污染。

龙岗河各位点年平均 $\rho(\text{DO})$ 范围为 $3.99 \sim 8.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,全部位点均达地表水 V 类水质标准($2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),83% 的位点达到地表水Ⅲ类水质标准($5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),水体自净能力整体较好. 年平均高锰酸盐指数范围为 $1.1 \sim 12.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,所有位点

均达到地表水 V 类水质标准($15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)及以上,其中 75% 的位点达到地表水Ⅲ类水质标准($6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 年平均 $\rho(\text{COD})$ 范围为 $7.2 \sim 36.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,所有位点均达到地表水 V 类水质标准($40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)及以上,其中 58% 的位点达到地表水Ⅲ类水质标准($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 年平均 $\rho(\text{BOD}_5)$ 范围为 $1.46 \sim 8.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,所有位点均达到地表水 V 类水质标准($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)及以上,其中 58% 的位点达到地表水Ⅲ类水质标准($4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 年平均粪大肠菌群数浓度范围为 $1\,368 \sim 27\,682 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$,所有位点均达到地表水 V 类水质标准($40\,000 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$)及以上,其中 50% 的位点达到地表水Ⅲ类水质标准($10\,000 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$). 因此,龙岗河流域水质有机物污染和微生物污染水平整体达到地表水 V 类水质标准,但仍有很大提升空间,对生活污染源的治理仍需加强。

2.1.3 重金属污染指标

由于重金属的毒性、持久性和生物累积性,重金属污染会对生物产生极大的影响,其含量过高会对人类健康产生巨大的潜在风险,因此水体中重金属污染水平检测成为水污染治理的基础^[31]. 本研究共检测了 Cu、Zn、Se、Cd、Cr(VI)、Pb、As 和 Hg 等 8 种重金属含量(图 4),以此表征龙岗河流域重金属污染水平。

龙岗河各位点年平均 $\rho(\text{Cu})$ 范围为 $0.006 \sim 0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,全部位点均达地表水Ⅱ类水质标准

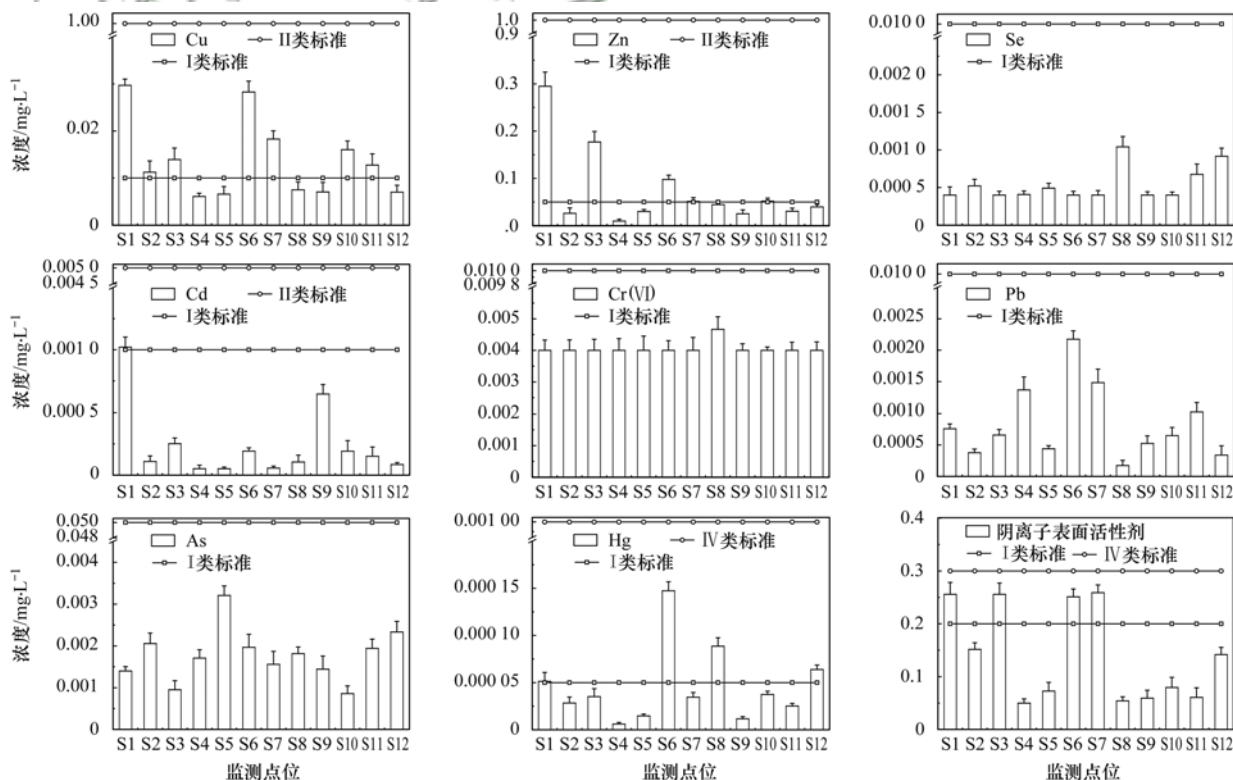


图 4 龙岗河各监测点 Cu、Zn、Se、Cd、Cr(VI)、Pb、As、Hg 和阴离子表面活性剂的年平均浓度

Fig. 4 Annual mean concentrations of Cu, Zn, Se, Cd, Cr(VI), Pb, As, Hg, and anionic surfactants in sampling sites of Longgang River

($1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 及以上, 其中 42% 的位点达到地表水 I 类水质标准($0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 年平均 $\rho(\text{Zn})$ 范围为 $0.01 \sim 0.295 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 全部位点均达地表水 II 类水质标准($1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 及以上, 其中 58% 的位点达到地表水 I 类水质标准($0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 年平均 $\rho(\text{Se})$ 范围为 $0.0004 \sim 0.0010 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 全部位点均达地表水 I 类水质标准($0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 年平均 $\rho(\text{Cd})$ 范围为 $0.00005 \sim 0.00102 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 全部位点均达地表水 I 类水质标准($0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 年平均 $\rho[\text{Cr}(\text{VI})]$ 范围为 $0.004 \sim 0.005 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 全部位点均达地表水 I 类水质标准($0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 年平均 $\rho(\text{Pb})$ 范围为 $0.00017 \sim 0.00217 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 全部位点均达地表水 I 类水质标准($0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 年平均 $\rho(\text{As})$ 范围为 $0.0009 \sim 0.0032 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 全部位点均达地表水 I 类水质标准($0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 年平均 $\rho(\text{Hg})$ 范围为 $0.00001 \sim 0.00015 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 全部位点均达地表水 IV 类水质标准($0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 及以上, 其中 67% 的位点达到地表水 I 类水质标准($0.00005 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。龙岗河流域整体水质重金属浓度较低, 归因于重金属主要来自于工业, 而深圳市产业转型, 关闭了大量线路板、蚀刻和酸洗等企业, 其余产业也均已设置标准排放口纳入在线监管, 处理达标后纳入市政污水系统进厂再处理, 因此, 人类活动对此流域水体的重金属含量干扰较小, 对人类影

响的健康风险较小。

2.1.4 其他污染指标

除了以上的营养盐、有机物污染、微生物污染和重金属污染指标, 本研究还测定了水体中硫化物、氟化物、氰化物、挥发酚、石油类和阴离子表面活性剂等化学污染物指标(图 5)。这些化学污染物主要来自于工业废水排放, 对水中生物和人体健康具有毒害作用, 是评价水质的重要指标^[32]。

龙岗河各位点年平均 ρ (硫化物) 范围为 $0.005 \sim 0.073 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 全部位点均达地表水 II 类水质标准($0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 及以上, 其中 92% 的位点达到地表水 I 类水质标准($0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 仅位点 3(爱联河) 为 II 类水质(图 5); 年平均 ρ (氟化物) 范围为 $0.13 \sim 1.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 全部位点均达地表水 IV 类水质标准($1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 及以上, 其中 83% 的位点达到地表水 I 类水质标准($1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 仅位点 6(丁山河) 和位点 7(黄沙河) 为 IV 类水质(图 5); 年平均 ρ (氰化物) 范围为 $0.002 \sim 0.009 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 全部位点均达地表水 II 类水质标准($0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 及以上, 其中 75% 的位点达到地表水 I 类水质标准($0.005 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 仅位点 1、3 和 6(梧桐山河、爱联河和丁山河) 为 II 类水质(图 5); 年平均 ρ (挥发酚) 范围为 $0.0012 \sim 0.0754 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 全部位点均达到地表水 V 类水质标准($0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 及以上, 其中 58% 的

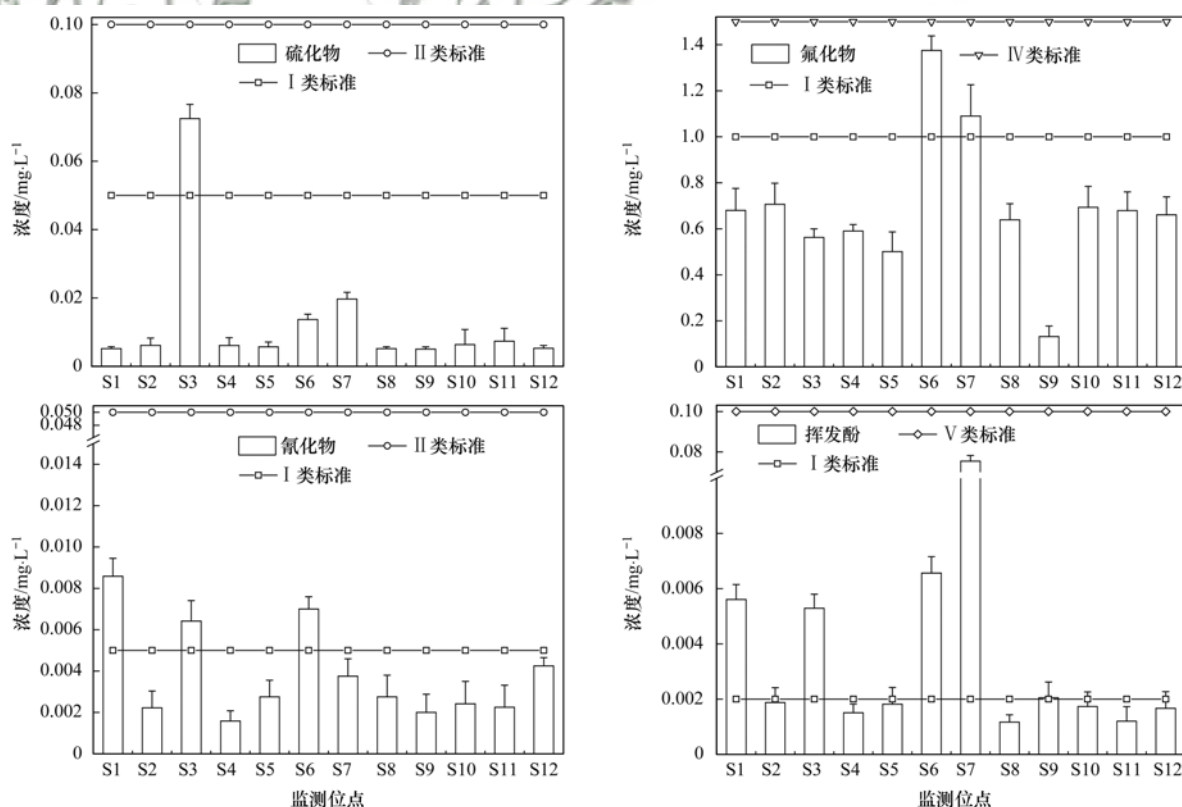


图 5 龙岗河各监测位点硫化物、氟化物、氰化物和挥发酚的年平均浓度

Fig. 5 Annual mean concentrations of sulphide, fluoride, cyanide, and volatile phenol in sampling sites of Longgang River

位点达到地表水Ⅰ类水质标准($0.002\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),站点1、3、6和7(梧桐山河、爱联河、丁山河和黄河)为Ⅴ类水质(图5).此外,年平均 ρ (石油类)范围为 $0.02\sim0.07\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,所有位点均达到地表水Ⅳ类水质标准($0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)及以上,其中92%的位点达到地表水Ⅰ类水质标准($0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),仅位点3(爱联河)为Ⅳ类水质(图3);年平均 ρ (阴离子表面活性剂)范围为 $0.05\sim0.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,全部位点均达地表水Ⅳ类水质标准($0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)及以上,其中67%的位点达到地表水Ⅰ类水质标准($0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),位点1、3、6和7(梧桐山河、爱联河、丁山河和黄河)为Ⅳ类水质(图4).因此,整体来看,龙岗河流域的梧桐山河、爱联河、丁山河和黄河水体化学污染物水平较高,水质受人类干扰较大,水体中的这些化学污染物可能来自周围工业废水的排放,且部分区域存在“散乱污”小作坊,如非正规布草清洗店,此外深圳汽车保有辆较大,存在众多洗车店,洗涤污水通过雨水篦子排放至河道,造成污染.

总体而言,本研究中龙岗河流域所有位点的所有水质指标(22个)均达到地表水Ⅴ类水质标准,与2000年前后此流域的劣Ⅴ类甚至黑臭水质相比,龙岗河整体水质已得到较大提升,可用于农业灌溉和一般景观用水.

2.2 龙岗河水质评价

2.2.1 单因子评价结果

采用单因子评价法对龙岗河各个位点的年

平均水质进行评价,在龙岗河监测的12个位点中,所有位点均达到地表水Ⅴ类水质标准及以上(表1),其中S4位点(龙西河)处于地表水Ⅲ类水质标准,S9位点(田脚水)处于地表水Ⅳ类水质标准,这表明目前龙岗河整体水质良好,相比2000年左右的劣Ⅴ类水质有了较大改善.每个位点处于地表水Ⅴ类水质标准的水质指标数目从多到少依次为:8(S7)>7(S3和S6)>4(S2和S12)>3(S1)>2(S10)>1(S5、S8和S11)>0(S4和S9)(表1),则在所有位点中,S5、S8、S11、S4和S9的水质相对更好,S7、S3和S6位点的水质相对较差,这可能与龙岗河流域相关产业布局 and 综合治理工程有关.

对于每个水质指标,处于地表水Ⅴ类水的位点数从多到少依次为:9(TN)>7(TP)>6(NH_4^+-N)>5(粪大肠菌群)>3(高锰酸盐指数、COD和 BOD_5)>1(挥发酚)(表1),表明影响水质类别的主要水质指标为营养盐(TN、TP和 NH_4^+-N),其次是粪大肠菌群、有机质(高锰酸盐指数、COD和 BOD_5)和挥发酚.对于每个水质指标,处于地表水Ⅰ类水的位点数从多到少依次为:12[Se、Cr(VI)、Pb和As]>11(石油类、Cd和硫化物)>10(氟化物)>9(氰化物)>8(阴离子表面活性剂和Hg)>7(挥发酚和Zn)>5(Cu)>4(DO)>3(COD)>2(高锰酸盐指数),表明龙岗河流域的Se、Cr(VI)、Pb、As、石油类、Cd、硫化物、氟化物和氰化物等指标很少受到人为干扰,对水质影响不大.

表1 龙岗河各位点水环境质量分级

Table 1 Type of water quality standard of each sampling location of Longgang River

项目	位点											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
DO	Ⅱ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
高锰酸盐指数	Ⅲ	Ⅲ	Ⅴ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ
COD	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
BOD_5	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ
NH_4^+-N	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅴ
TP	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅱ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅴ
TN	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅲ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ
粪大肠菌群	Ⅲ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅴ
石油类	Ⅰ	Ⅰ	Ⅳ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
Cu	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ
Zn	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ
Se	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
Cd	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
Cr(VI)	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
Pb	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
As	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
Hg	Ⅲ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅳ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅲ
阴离子表面活性剂	Ⅳ	Ⅰ	Ⅳ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
硫化物	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
氟化物	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
氰化物	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
挥发酚	Ⅳ	Ⅰ	Ⅳ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
单因子评价结果	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅲ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ

2.2.2 综合污染指数评价结果

龙岗河各位点的全年综合污染指数为 0.11 ~ 0.39(表 2),各位点的年综合污染指数从大到小依次为 0.4 > S7 > S6 > S3 > S1 > S2 > S12 > 0.25 > S8 = S10 > S11 = S5 > S9 = S4,则根据前述水质分级标准,S7、S6、S3、S1、S2 和 S12 为较清洁,S4、S5、S8、S9、S10 和 S11 为清洁,这表明龙岗河水质整体良好.

表 2 龙岗河各采样断面综合污染指数
Table 2 Comprehensive pollution index in sampling locations of Longgang River

位点	名称	全年	
		综合污染指数	污染程度
S1	梧桐山河	0.29	较清洁
S2	大康河	0.28	较清洁
S3	爱联河	0.37	较清洁
S4	龙西河	0.11	清洁
S5	南约河	0.18	清洁
S6	丁山河	0.38	较清洁
S7	黄沙河	0.39	较清洁
S8	田坑水	0.19	清洁
S9	田脚水	0.11	清洁
S10	龙岗河上游	0.19	清洁
S11	龙岗河中游	0.18	清洁
S12	龙岗河下游	0.27	较清洁

图 6 显示了综合污染指数法中龙岗河各位点各类污染物的贡献率,在各位点的所有水质指标中,TN、TP、NH₄⁺-N、COD、氟化物、阴离子表面活性剂、BOD₅、DO、粪大肠菌群、高锰酸盐指数和挥发酚的平均贡献率依次为 16.32%、13.09%、11.14%、9.73%、8.95%、8.09%、7.56%、6.50%、6.14%、5.80% 和 1.22%,其他水质指标

的平均贡献率均 < 1%,且贡献率之和 < 7%,说明 TN、TP 和 NH₄⁺-N 对龙岗河水质影响最大,其次是 COD、氟化物、阴离子表面活性剂、BOD₅、DO、粪大肠菌群、高锰酸盐指数和挥发酚,而其他水质指标的贡献率很低,对水质影响很小.

2.2.3 主成分分析评价结果

为了使每个主成分的意义更加明确,采用最大方差法进行因子旋转^[26],再进行主成分分析,且各主成分下各指标旋转后的因子载荷量的绝对值越接近于 1,该因子与此主成分的关联性越大.本研究按照特征值(λ)大于 1 的原则提取前 5 个成分进行分析,且 PC1、PC2、PC3、PC4 和 PC5 的累积贡献率达到 87.412%,也满足累积贡献率大于 85% 的提取原则,因此通过计算前 5 个主成分就能反映龙岗河的水质状况,从而减少评价指标.表 3 为旋转后提取出的前 5 个主成分的因子载荷量,其中 PC1 携带的信息最多,占 48.406%,与其相关联的因子主要有 DO、高锰酸盐指数、COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TP、TN、粪大肠菌群、Cu、Zn、氟化物、氰化物、石油类和阴离子表面活性剂,载荷绝对值范围为 0.530 ~ 0.974,反映水体的理化性质及受到的营养盐、有机物、微生物和化学物质污染;与 PC2 相关联的主要因子是 Se、As、Cd 和 Cr(VI),载荷范围为 0.610 ~ 0.769,该主成分是在 PC1 的基础上进一步反映水体受到重金属污染的影响;与 PC3、PC4 和 PC5 相关联的主要因子有 Cd、Pb 和硫化物,载荷范围为 0.631 ~ 0.673,该主成分是在 PC1 和 PC2 的基础上进一步反映水体受到的重金属和硫化物污染影响.

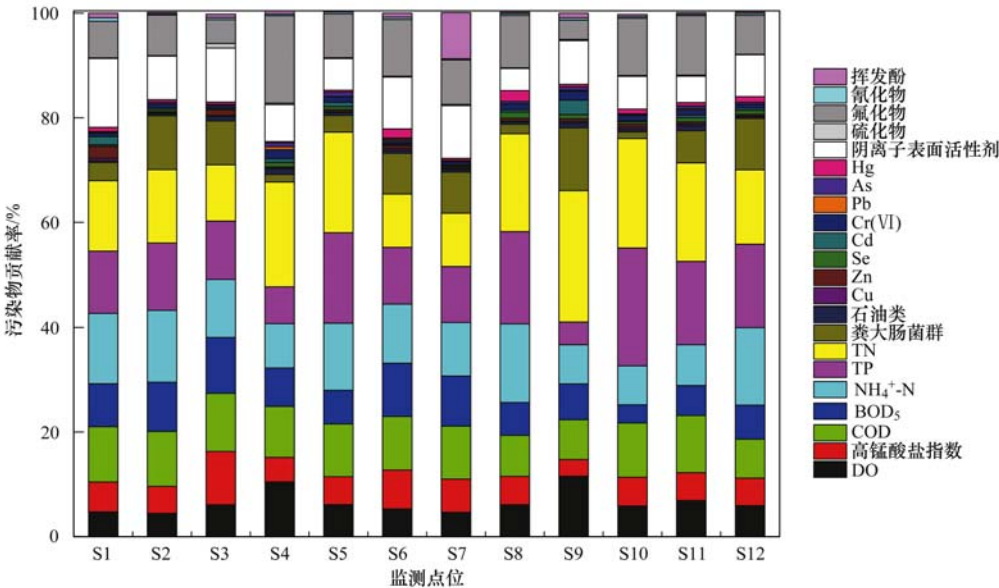


图 6 综合污染指数法中龙岗河各位点污染物的贡献率

Fig. 6 Contribution percentages of pollutants in each sampling location of Longgang River

表 3 旋转后的因子载荷量
Table 3 Rotated component matrix

项目	主成分				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
DO	-0.903	-0.020	0.167	0.146	-0.120
高锰酸盐指数	0.947	0.037	-0.131	-0.243	0.116
COD	0.974	0.024	-0.089	0.019	-0.099
BOD ₅	0.954	0.054	-0.162	-0.044	-0.024
NH ₄ ⁺ -N	0.845	0.342	0.205	-0.077	-0.221
TP	0.692	0.484	0.206	-0.085	-0.208
TN	0.713	0.338	0.327	-0.131	-0.287
粪大肠菌群	0.772	0.172	-0.321	-0.148	-0.216
Cu	0.744	-0.282	0.347	0.457	0.037
Zn	0.612	-0.456	0.590	-0.113	-0.010
氟化物	0.687	0.360	-0.119	0.579	0.120
Se	-0.289	0.769	0.340	-0.231	0.134
As	-0.266	0.510	0.072	0.225	-0.380
Cd	0.121	-0.699	0.631	0.025	-0.075
Cr(VI)	-0.224	0.547	0.409	-0.176	0.479
Pb	0.470	-0.174	-0.409	0.673	0.335
氰化物	0.809	-0.220	0.461	0.042	0.041
挥发酚	0.427	0.062	-0.420	0.217	-0.246
石油类	0.730	-0.116	-0.398	-0.312	0.344
离子表面活性剂	0.961	-0.138	0.051	0.036	-0.151
硫化物	0.610	-0.183	-0.289	-0.659	0.231
Hg	0.530	0.455	0.353	0.348	0.419
特征值	10.649	2.911	2.470	1.984	1.217
方差百分比/%	48.406	13.230	11.227	9.017	5.532
累计方差百分比/%	48.406	61.636	72.864	81.880	87.412

根据主成分得分系数矩阵等相关方程和公式得出 12 个监测位点的主成分综合得分,用于定量描述各断面的水质好坏程度,综合得分越高,水质越差^[31],结果显示,不同位点综合得分从高到低(水质状况从差到好)依次为:S6(0.676) > S7(0.475) ≈ S3(0.474) ≈ S1(0.473) > S2(0.372) > S12(0.348) > S8(0.316) > S10(0.222) > S11(0.201) > S5(0.151) > S4(0.035) > S9(0.013),则 S4 和 S9 位点的水质相对较好,而 S6、S7、S3 和 S1 位点的水质较差,需重点治理和监测。

2.3 3 种评价方法的对比

本文所用到的 3 种评价方法各有优劣,评价结果虽不完全相同,但总体趋势一致.单因子评价法简单直观,能够对龙岗河水质进行定性评价,判断各断面的水质等级,但不能对同一等级水质类别的位点进行定量的优劣排序^[33,34].综合污染指数法计算相对复杂,不仅能对各断面的水质等级进行判定,且能对水质进行定量分析和优劣排序.主成分分析法的计算比综合污染指数法更复杂,不能对各断面水质等级进行定性判定,但能对各断面水质优劣进行定量分析和排序^[35].采用的评价方法不同,各位点水质优劣排序并不完全一致.例如,根据综合污染指数法,各位点的水质优劣从坏到好依次为:S7 > S6 > S3

> S1 > S2 > S12 > 0.25 > S8 = S10 > S11 = S5 > S9 = S4(表 2);根据主成分分析法,各位点的污染程度从大到小依次为 S6 > S7 ≈ S3 ≈ S1 > S2 > S12 > S8 > S10 > S11 > S5 > S4 > S9.两种评价方法在龙岗河污染因子的筛选中也有差别,综合污染指数法得出 TN、TP、NH₄⁺-N、COD、氟化物、阴离子表面活性剂、BOD₅、DO、粪大肠菌群和高锰酸盐指数对龙岗河水质影响较大,而主成分分析法根据方差累积贡献率大小筛选出 DO、高锰酸盐指数、COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TP、TN、粪大肠菌群、Cu、Zn、氟化物、氰化物、石油类和阴离子表面活性剂等因子.这主要与因子的权重有关,综合污染指数法没有考虑因子的权重,采取均权处理的方式,而主成分分析法则根据累积方差贡献率作为因子权重进行分析,因此评价结果不完全一致^[34].虽然两种评价方法存在差异,但综合因子评价法和主成分分析法均显示:在所有位点中,S11、S4、S5 和 S9 的水质较好;S1、S3、S6 和 S7 位点的水质相对较差,还有待进一步提升;其余位点水质状况居中.这表明虽然评价方法各有不同,但评价结果的总体趋势是一致的,综合采用多种方法能更好地反映水体的水质状况与污染特征。

2.4 龙岗河水质年内变化特征

龙岗河是雨源型城市河流,流域受亚热带季风

气候影响,全年径流量波动较大,6~9月为丰水期,12月~翌年2月为枯水期.表4显示了2018年1~12月龙岗河干流各污染指标变化情况,龙岗河流域丰水期水质劣于枯水期,主要表现为污染物 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和粪大肠菌群数浓度显著升高,最高值均出现在9月,分别为 $2.28\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $50\,000\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$,丰水期呈现劣V类水质,而枯水期达Ⅳ类水质标准.这主要是由于丰水期雨水冲刷携带大量面源污染物进入河道,雨污合流以及沿河截污管存在雨季溢流,加重了水体污染.有研究表明2012年之前龙岗河枯水期水质劣于丰水期,自2012年前后污水处理工程建成并开始运行后,点源污染的截污纳管率及处理率升高,各类污染物浓度明显降低,总体污染负荷降低,丰水期面源污染物在总污染负荷中比例升高^[36],由此呈现枯水期水质优于丰水期现象.

东江干流水质优于上游支流,而支流淡水河的下游惠州段比上游龙岗段好,虽然龙岗河水质不足以大幅影响东江干流,但二者水质变化趋势基本一致,且相比枯水期,龙岗河流域丰水期径流量更大,水质更差,汇入东江流域后,对东江水质的影响增大.如2018年5~9月龙岗河水质较差时,东江惠州段的惠州与东莞交界断面也没有达到Ⅲ类水考核标准,但东江下游珠江口入海处水质达标(Ⅲ类水).龙岗河流域对珠江入海口影响较轻微,可能是东江流域有较多清洁基流注入,稀释污染物,且流域较

长,横跨多个地市,水体自净能力发挥一定作用.此外,东江右岸深圳市的污染物除了通过龙岗河和石马河汇入东江外,还有大部分通过本地入海口排出,并未全部进入东江.从水资源保护利用角度看,东江惠州段是深圳和香港饮用水水源地,龙岗河水质的好转会降低饮用水源地超标风险,保障饮水安全.

初期雨水面源污染是雨季河道水质达标的重要因素^[37],而龙岗河流域下垫面复杂,高密度建成区集中,城中村和工厂区分布较多,人口数量大,面源污染形成机制复杂;河道暗涵数量众多,地下管线存在错节混接,雨天溢流严重,初雨面源污染与河道水质关系极为复杂;河流众多,但多为雨源型河流,河道短,水环境容量低,河道水质极易受到点源及面源污染影响.针对此流域复杂的水环境特征,提出以下4点防治措施:一是要加强跨界河流联防联控,解决丁山河(S6)流域跨界污染问题;二是鉴于该流域地势坡降大、地表硬化度高以及面源污染负荷重问题,要加快实施雨污分流措施,剥离清洁基流,实现基流和雨水入河而污水入厂;三是构建初期雨水调蓄系统,将沿河截污管功能转为初期雨水传输通道,避免雨水混入污水系统后形成溢流;四是构建非供水山塘水库联合调度系统,适时进行生态补水.因此,要将初期雨水面源污染防治作为未来治水提质的重点,加强丰水期雨污分流管网的构建与维护,削减面源污染负荷,完善截流与调蓄基础设施,以提升水质.

表4 龙岗河干流各月份水质质量分级

项目	Table 4 Monthly water quality classification of the main stream of Longgang River											
	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DO	I	I	II	I	III	I	II	I	III	II	I	II
高锰酸盐指数	II	II	III	III	III	II	II	II	II	II	II	II
COD	III	III	III	V	III	I	I	III	III	I	I	III
BOD ₅	I	I	I	II	I	I	I	I	I	I	I	I
NH ₄ ⁺ -N	III	II	III	II	II	IV	II	III	劣V	II	II	II
TP	IV	V	V	V	V	IV	IV	IV	IV	III	IV	IV
粪大肠菌群	III	III	III	IV	劣V	劣V	劣V	劣V	劣V	V	III	IV
石油类	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	IV
Cu	V	V	V	I	I	V	I	I	V	I	I	I
Zn	I	II	II	I	II	I	II	I	I	I	I	I
Se	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Cd	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Cr(VI)	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Pb	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
As	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Hg	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
阴离子表面活性剂	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
硫化物	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
氟化物	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
氰化物	I	I	I	I	I	I	I	II	I	I	I	I
挥发酚	I	I	V	I	I	III	III	I	III	I	I	I
单因子评价结果	V	V	V	V	劣V	劣V	劣V	劣V	劣V	V	IV	IV

2.5 环境意义与建议

龙岗河支流 S1、S2、S3、S6 和 S7(梧桐山河、大康河、爱联河、丁山河和黄沙河)曾为重度黑臭水体,经过整治,均已消除了黑臭现状^[38]. 本研究结果显示,这 5 条支流均达到地表水 V 类水质标准,但其综合污染指数(表 2)和主成分综合得分均为最高,相对其余位点水质仍相对较差,需进一步治理提升. 单因子评价法显示这 5 条支流水质限制指标主要为营养盐(TN、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)、有机物(COD 和 BOD_5)和粪大肠菌群(表 1),综合污染指数法显示其水质主要贡献因子为营养盐(TN、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)、有机物(COD 和 BOD_5)和阴离子表面活性剂(图 6),表明下一步治理需要着重考虑降低营养盐、有机物、粪大肠菌群和阴离子表面活性剂浓度. 龙岗河的其它支流 S4、S5、S8 和 S9(龙西河、南约河、田坑水和田脚水)的水质状况均为清洁,结果显示这 4 个位点的所有指标中 TN 的贡献率最高(图 6),其余水质指标达到的水质标准均高于 TN(表 1),表明这 4 条支流整体水质相对较好, TN 为水质限制指标,后续水质提升的关键主要在于脱氮. 龙岗河各支流水质差异除受合流制污染影响外,还有底泥淤积问题,常年未清淤,造成底泥释放从而影响水质.

根据综合污染指数和主成分综合得分,龙岗河流域干流水质优于除 S4、S5、S8 和 S9(龙西河、南约河、田坑水和田脚水)4 条支流外的其余支流水质,这主要得益于各支流入口处的污染物截污措施^[36]. 单因子评价法显示干流水质限制指标主要为营养盐(TN、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)和粪大肠菌群(表 1);综合污染指数法显示,营养盐(TN、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)、COD 和氟化物为主要贡献因子(图 6),表明下一步干流治理需要着重考虑降低营养盐(TN、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)、有机物(COD)、粪大肠菌群和氟化物的浓度. 龙岗河干流上游、中游和下游的综合水质状态分别为清洁、清洁和较清洁,下游水质相对较差可能是受支流 S6 和 S7(丁山河和黄沙河)较差水质的影响,而这两支流水质与惠州市河道管理密切相关,惠州市河道考核标准低于深圳,基础设施建设滞后,污水处理标准低. 因此,在治理龙岗河干流时,需同时关注支流污染状况. 此外,在干流和支流中营养盐指标均是主要限制指标,这与此流域生活污水污染是主要污染源有关,则在进一步治理提升时要把控好生活污水的治理和排放标准.

龙岗河的水质历史变化分为 3 个阶段:2000 ~ 2005 年,经济社会快速发展,污水直接排入河道,水质逐步恶化,主要污染指标均为劣 V 类,尤以 BOD_5 、

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 超标最为严重;2006 ~ 2013 年,随着沿河截污工程的实施,原来的直排管道全部统一截入箱涵或沿河截污管,然后输送至污水处理厂,水质恶化趋势得以遏制,高锰酸盐指数、 BOD_5 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 浓度呈现逐年下降的趋势^[39];2013 ~ 2017 年,干流水质处于巩固保持阶段,各支流水质呈改善趋势. 通过 2018 年 12 个月的监测分析,笔者发现,龙岗河各位点水质均达到地表水 V 类水质标准及以上,可用作农业灌溉和一般景观用水,表明污染治理工程^[40](主要是沿河截污工程)已取得一定治理效果,但仍需要严格把控污染源,在水质巩固保持的基础上进一步治理提升.

龙岗河的污染源主要包括生活污水、工业废水和城市面源,面源污染影响较大,初期雨水污染尚未控制,存在截流系统不完善、溢流风险相对较大以及部分已实施正本清源小区发生返潮现象等问题,且龙岗河上游和下游的污水处理厂的尾水会补充进入河道,但其出水标准仍有待提高,如横岗水质净化厂,2018 年出水标准仍然在一级,对于无基流补水的龙岗河流域是水环境质量提升的重要约束条件,应尽快实施提标改造. 因此要充分考虑不同季节,不同位点水质的差异性,系统布局,统筹考虑全流域治水,构建五大系统,包括封闭的污水系统,实现主次干管贯通;开放的雨水系统,雨污分流改造,以水量控制向水质控制的截污模式转变,打造海绵城市;高效的截污系统,精准截流,收浓弃淡,形成贯通独立系统,实现近期溢流污染控制、中期面源污染控制和远期雨水资源利用的目标;全域的补水系统,将再生水补水延伸至消黑考核河道及支流,打通水库补水通道,利用好东江水补水配额;全要素的管理系统,引入“水系统工程全网络”管理理念,借助监控平台,构建新型追踪管理模式,由此实现龙岗河流域水资源的综合管理与调度,最大限度保障河道水质达标.

3 结论

(1) 龙岗河所有位点均达到地表水 V 类水质标准及以上,其中龙西河和田脚水的水质最好,龙西河为地表水 III 类水质标准,田脚水为地表水 IV 类水质标准,与原来的劣 V 类水质相比,龙岗河水质整体得以较大改善.

(2) 水质指标中 TN、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对龙岗河水质影响最大,其次是 COD、氟化物、阴离子表面活性剂、 BOD_5 、DO、粪大肠菌群和高锰酸盐指数,其他水质指标贡献率较低,表明生活污染是主要污染源.

(3) 龙岗河流域干流丰水期水质劣于枯水期, 主要是受初期雨水面源污染的影响, 完善初期雨水调蓄系统是治水提质的重点。

(4) 龙岗河不同位点的水质进一步提升需考虑的水质因子不同。梧桐山河、大康河、爱联河、丁山河和黄沙河需着重考虑营养盐 (TN、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)、有机物 (COD 和 BOD_5)、粪大肠菌群和阴离子表面活性剂等水质指标; 龙西河、南约河、田坑水和田脚水的水质提升主要在于降低 TN 浓度; 干流上游、中游和下游需要着重考虑营养盐 (TN、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)、COD、粪大肠菌群和氟化物等水质指标。

(5) 单因子评价法简单直观, 对水质进行定性评价, 而综合污染指数法和主成分分析法考虑水质指标权重并对各断面的水质优劣进行定量排序。3 种评价方法得出的评价结果不完全一致, 但均能从定性和定量的不同方面反映水质特征。根据各评价方法特点, 综合采用多种方法能更好地反映水体的水质状况与污染特征。

参考文献:

- [1] 王谦, 王秋茹, 王秀衡, 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.
- [2] Li S L, Chen X H, Singh V P, et al. Tradeoff for water resources allocation based on updated probabilistic assessment of matching degree between water demand and water availability[J]. Science of the Total Environment, 2020, 716, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134923.
- [3] 王振兴, 湛建宇, 许振成, 等. 高速都市化区域水污染系统控制技术体系研究——以东江流域深圳龙岗区为例[J]. 中国环境科学, 2013, 33(S1): 149-155.
Wang Z X, Chen J Y, Xu Z C, et al. The technological system for systematic control of water pollution in rapid urbanization region in Dongjiang river basin [J]. China Environmental Science, 2013, 33(S1): 149-155.
- [4] 刘小玲, 甘建文. 珠三角地区水环境空间分异及其优化对策研究[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(4): 1-9.
Liu X L, Gan J W. Study on the spatial differentiation and optimization strategies of the water environment in the pearl river delta region[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2015, 36(4): 1-9.
- [5] 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 等. 基于模糊综合评判法的洮河水环境质量评价[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(S1): 380-386, 392.
Yang H, Zhang G Z, Yang X N, et al. Comprehensive evaluation on water environment quality of the Tao River based on fuzzy comprehensive method [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(S1): 380-386, 392.
- [6] Liu C, He H, Tan X H, et al. Establishment and application of water quality assessment model for Jiaozhou Bay Basin [J]. Advanced Materials Research, 2012, 518-523: 1165-1170.
- [7] 王文静, 高鹏程, 李婕, 等. 丹江口水库典型入库支流水质评价与趋势分析[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 127-130.
Wang W J, Gao P C, Li J, et al. Water quality assessment and trend analysis of typical tributaries of Danjiangkou Reservoir[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 127-130.
- [8] 孙涛, 张妙仙, 李苗苗, 等. 基于对应分析法和综合污染指数法的水质评价[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(4): 185-190.
Sun T, Zhang M X, Li M M, et al. River Water quality evaluation based on correspondence analysis and comprehensive pollution index method [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(4): 185-190.
- [9] 林涛, 徐盼盼, 钱会, 等. 黄河宁夏段水质评价及其污染源分析[J]. 环境化学, 2017, 36(6): 1388-1396.
Lin T, Xu P P, Qian H, et al. Assessment of water quality and analysis of pollution source in Ningxia section of the Yellow River [J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(6): 1388-1396.
- [10] Liu X B, Li G F, Liu Z G, et al. Water pollution characteristics and assessment of Lower reaches in Haihe River Basin [J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 199-206.
- [11] 于淑玲, 李秀军, 李晓宇, 等. 小兴凯湖水质评价[J]. 湿地科学, 2013, 11(4): 466-469.
Yu S L, Li X J, Li X Y, et al. Evaluation of water quality of Xiaoxingkai Lake [J]. Wetland Science, 2013, 11(4): 466-469.
- [12] 王丽婧, 汪星, 刘录三, 等. 洞庭湖水质因子的多元分析[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 1-7.
- [13] Zhang L P, Pang J, Ke L, et al. SPSS for water pollution contribution of Tonghui River in Beijing based on principal component analysis [J]. Advanced Materials Research, 2011, 343-344: 483-489.
- [14] 解文静, 王松, 娄山崇, 等. 山东南四湖上级湖水水质变化评价 (2008-2014 年) 及成因分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 513-519.
Xie W J, Wang S, Lou S C, et al. Evaluation of temporal water quality change (2008-2014) and the cause analysis in the upper-reach lakes of Lake Nansi, Shandong Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(3): 513-519.
- [15] 王小焕, 邵景安, 王金亮, 等. 三峡库区长江干流入出库水质评价及其变化趋势[J]. 环境科学学报, 2017, 37(2): 554-565.
Wang X H, Shao J A, Wang J L, et al. Water quality assessment and its changing trends in the reservoir inflow and outflow along the Yangtze River mainstream in the Three Gorge Reservoir Area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(2): 554-565.
- [16] 李婧, 陈纯兴. 深圳市龙岗河水污染问题与治理对策分析[J]. 江苏科技信息, 2019, 36(12): 13-15.
Li J, Chen C X. Analysis on pollution problems of Longgang River and its countermeasures in Shenzhen [J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2019, 36(12): 13-15.
- [17] 曾建伟, 李庆庆, 陈慧明. 东江流域化学品使用调查及污染控制建议[J]. 广东化工, 2016, 43(13): 173-174.
Zeng J W, Li Q Q, Chen H M. A survey on chemicals use in Dongjiang River Basin and some pollution control proposals [J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(13): 173-174.
- [18] 张亚丽, 周扬, 程真, 等. 不同水质评价方法在丹江口流域水质评价中应用比较[J]. 中国环境监测, 2015, 31(3): 58-61.
Zhang Y L, Zhou Y, Cheng Z, et al. Comparison and analysis of different evaluation methods for water quality in the Danjiangkou

- Valley[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(3): 58-61.
- [19] 尹海龙, 徐祖信. 我国单因子水质评价方法改进探讨[J]. *净水技术*, 2008, **27**(2): 1-3.
- Yin H L, Xu Z X. Discussion on China's single-factor water quality assessment method[J]. *Water Purification Technology*, 2008, **27**(2): 1-3.
- [20] 朱媛媛, 田进军, 李红亮, 等. 丹江口水库水质评价及水污染特征[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(1): 139-147.
- Zhu Y Y, Tian J J, Li H L, *et al.* Water quality assessment and pollution profile identification of Danjiangkou Reservoir, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(1): 139-147.
- [21] 王燕, 刘彦斌, 赵红雪, 等. 宁夏沙湖水水质评价及水污染特征[J]. *湿地科学*, 2020, **18**(3): 362-367.
- Wang Y, Liu Y B, Zhao H X, *et al.* Water quality assessment and characteristics of water pollution of Sand Lake in Ningxia[J]. *Wetland Science*, 2020, **18**(3): 362-367.
- [22] 赵前信. 四种水环境质量评价方法在六安市水库中的应用[J]. *环境工程*, 2014, **32**(3): 113-116, 120.
- Zhao Q X. Application of four kinds of water quality evaluation method in reservoirs in Lu'an City [J]. *Environmental Engineering*, 2014, **32**(3): 113-116, 120.
- [23] Ouyang Y. Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis[J]. *Water Research*, 2005, **39**(12): 2621-2635.
- [24] Zeinalzadeh K, Rezaei E. Determining spatial and temporal changes of surface water quality using principal component analysis[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2017, **13**: 1-10.
- [25] 蔡广强, 张金松, 刘彤宙, 等. 基于主成分分析的中国南方某市水库水质评价[J]. *环境科学与技术*, 2018, **41**(S2): 88-94.
- Cai G Q, Zhang J S, Liu T Z, *et al.* Water quality evaluation of reservoirs in the south of China based on principal component analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41**(S2): 88-94.
- [26] 徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 等. 南水北调中线北京段水质状况分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1357-1365.
- Xu H S, Zhao L, Sun H S, *et al.* Water quality analysis of Beijing segment of south-to-north water diversion middle route project[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1357-1365.
- [27] 刘潇, 薛莹, 纪毓鹏, 等. 基于主成分分析法的黄河口及其邻近水域水质评价[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(10): 3187-3192.
- Liu X, Xue Y, Ji Y P, *et al.* An assessment of water quality in the Yellow River estuary and its adjacent waters based on principal component analysis[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(10): 3187-3192.
- [28] 王晓鹏. 河流水质综合评价之主成分分析方法[J]. *数理统计与管理*, 2001, **20**(4): 49-52, 28.
- Wang X P. The principal component analysis method of the water quality assessment in rivers[J]. *Application of Statistics and Management*, 2001, **20**(4): 49-52, 28.
- [29] 庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 等. 重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2446-2452.
- Qing X Y, Ren Y F, Lü Z Q, *et al.* Characteristics of total nitrogen and total phosphorus pollution and eutrophication assessment of secondary river in urban Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2446-2452.
- [30] 张麟杰, 王淦淦, 张利兰, 等. 重庆市河水中粪源微生物污染特征及源解析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(3): 1253-1260.
- Zhang L J, Wang G G, Zhang L L, *et al.* Pollution characteristics and source track of fecal microorganism in the rivers across Chongqing city[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(3): 1253-1260.
- [31] Zakir H M, Sharmin S, Akter A, *et al.* Assessment of health risk of heavy metals and water quality indices for irrigation and drinking suitability of waters: a case study of Jamalpur Sadar area, Bangladesh[J]. *Environmental Advances*, 2020, **2**, doi: 10.1016/j.envadv.2020.100005.
- [32] Liu Y, Zheng B H, Fu Q, *et al.* The selection of monitoring indicators for river water quality assessment [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, **13**: 129-139.
- [33] 孙悦, 李再兴, 张艺冉, 等. 雄安新区—白洋淀冰封期水体污染特征及水质评价[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(4): 952-963.
- Sun Y, Li Z X, Zhang Y R, *et al.* Water pollution characteristics and water quality evaluation during the freezing period in Lake Baiyangdian of Xiong'an New Area[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(4): 952-963.
- [34] 郭晶, 王丑明, 黄代中, 等. 洞庭湖水污染特征及水质评价[J]. *环境化学*, 2019, **38**(1): 152-160.
- Guo J, Wang C M, Huang D Z, *et al.* Pollution characterization and water quality assessment of Dongting Lake [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(1): 152-160.
- [35] 刘巍巍, 郭子良, 王大安, 等. 衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1361-1371.
- Liu W W, Guo Z L, Wang D A, *et al.* Spatial-temporal variation of water environment quality and pollution source analysis in Hengshui Lake [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1361-1371.
- [36] 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.
- [37] 查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 等. 太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1102-1112.
- Zha H M, Zhu M Y, Zhu G W, *et al.* Seasonal difference in water quality between lake and inflow/outflow rivers of Lake Taihu, China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1102-1112.
- [38] 谢林伸, 陈纯兴, 韩龙. 深圳市河流水质改善策略研究: 以龙岗河流域为例[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [39] 王文瑾, 黄奕龙, 陈凯. 龙岗河流域水生态系统监测与评估[J]. *中国农村水利水电*, 2014, (6): 54-56.
- Wang W J, Huang Y L, Chen K. Aquatic ecosystem monitor and assessment in Long-gang River [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014, (6): 54-56.
- [40] 林鲁生, 陈秋茹, 施文丽, 等. 龙岗河流域治理工程的社会和经济效益分析[J]. *水利水电技术*, 2012, **43**(8): 70-72, 77.
- Lin L S, Chen Q R, Shi W L, *et al.* Analysis on social and economic benefit of Longganghe River Basin Improvement Project [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2012, **43**(8): 70-72, 77.

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i> (577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo (586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li (597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i> (608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i> (619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> (629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i> (639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming (649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i> (663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i> (675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i> (686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i> (696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i> (707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i> (714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i> (723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i> (735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao (743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun (752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i> (762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i> (782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i> (826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i> (847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i> (859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong (867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i> (878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i> (887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i> (907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i> (920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i> (928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i> (936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song (946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei (957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing (965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i> (975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i> (985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i> (995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i> (1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i> (1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i> (1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i> (1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i> (1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i> (1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i> (1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i> (1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i> (1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i> (1108)