

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

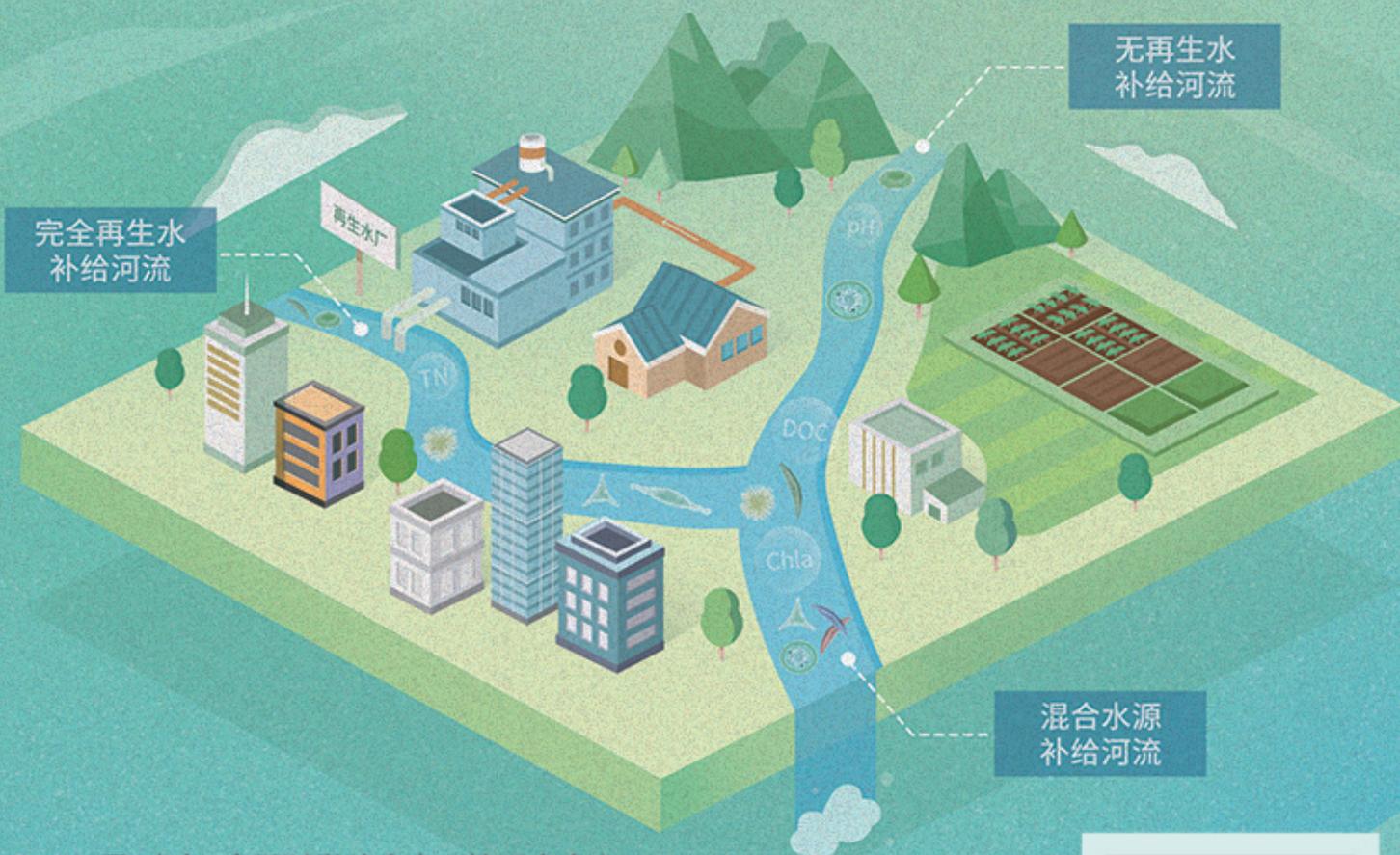
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM<sub>2.5</sub> 时空演变格局及其影响因素 ..... 张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华(5333)

中原城市群 PM<sub>2.5</sub> 浓度驱动因子联动效应及非线性影响 ..... 周志衡, 周廷刚, 秦宁(5344)

长株潭城市群 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度时空分布特征及影响因素分析 ..... 刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅(5354)

张掖市城区大气细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 的化学组成及来源解析 ..... 潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民(5367)

2018~2019年冬季天津和青岛 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征与健康风险评估 ..... 赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳(5376)

青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析 ..... 孔令冬, 祁建华, 张旭(5387)

2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势 ..... 赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳(5399)

海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征 ..... 谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅(5407)

基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别 ..... 杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰(5421)

郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵(5429)

兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽(5442)

地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估 ..... 刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧(5453)

缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征 ..... 李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟(5464)

废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测 ..... 严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏(5470)

长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送 ..... 刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱军, 冉祥滨(5478)

澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析 ..... 郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤(5491)

小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系 ..... 肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨(5499)

磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化 ..... 张坤锋, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青(5509)

疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估 ..... 樊月婷, 昌盛, 张坤锋, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青(5522)

北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估 ..... 昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤锋, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星(5534)

平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因 ..... 孙龙, 刘廷奎, 段利民, 张文瑞, 郑国峰(5547)

三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响 ..... 张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博(5560)

不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环 ..... 刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨(5571)

2011~2019年鄱阳湖水水质演化特征及主要污染因子解析 ..... 谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟(5585)

乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评估 ..... 杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇(5598)

生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制 ..... 苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元(5608)

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 ..... 侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中(5616)

锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用 ..... 高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰(5627)

KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除 ..... 徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁(5635)

改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI) 的吸附机制 ..... 练建军, 邹洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平(5647)

桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI) ..... 刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢颖辉, 鄢俊彬, 李娜(5657)

镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb<sup>2+</sup> 和 Zn<sup>2+</sup> 的去除 ..... 吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江(5667)

钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析 ..... 程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰(5676)

上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评估 ..... 李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏(5687)

重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析 ..... 马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵(5698)

典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析 ..... 官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富(5710)

基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析 ..... 张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌(5718)

香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估 ..... 陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚(5728)

地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例 ..... 刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波(5742)

新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估 ..... 杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖(5751)

肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果 ..... 伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒(5761)

微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累 ..... 杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 唯福庆, 赵鹏(5769)

产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制 ..... 姬明飞, 吴雪姣, 李晚哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩辉(5778)

硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制 ..... 高羽, 刘雨辰, 郭晓芳, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远(5789)

巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响 ..... 王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强(5798)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性 ..... 竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌(5808)

添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响 ..... 赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣(5819)

基于 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性 ..... 朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠(5832)

“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析 ..... 杨柏, 秦广鹏, 郭钦(5840)

长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测 ..... 杨旭, 刘贤赵(5850)

基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析 ..... 张涛, 郑钧文, 孙煜琛, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛(5861)

《环境科学》第43卷(2022年)总目录 ..... (5873)

《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)

# 磨刀门水道输水水库群饮用水源水质的时空变化

张坤锋<sup>1,2</sup>, 昌盛<sup>1\*</sup>, 张琦<sup>2</sup>, 王恩瑞<sup>1</sup>, 谢琼<sup>1</sup>, 张茉莉<sup>1</sup>, 樊月婷<sup>1</sup>, 杨光<sup>1</sup>, 付青<sup>1\*</sup>

(1. 中国环境科学研究院, 国家环境保护饮用水源地保护重点实验室, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012; 2. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 饮用水源水质保护是保障饮用水安全供应的重要环节, 分析饮用水源水质及时空变化可为水源地水质提升方案的制定提供重要基础. 因此, 本研究结合我国《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 和加拿大环境水质指数部长理事会 (CCME-WQI) 对粤港澳大湾区磨刀门水道及受其供水的杨寮水库、乾务水库、竹银水库、竹仙洞水库和大镜山水库群丰水期及枯水期 10 种常规水质指标进行评价, 探讨水质的时空分布特征并进行江库连动和库库连通供水模式下水质相关性分析. 结果表明, 珠海市磨刀门水道和 5 个水库水质中氨氮 ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、总磷 (TP)、总氮 (TN) 和氯化物这 4 个指标均不同程度地超过了 III 类水质标准限值, 最大值分别为 2.22、0.28、5.38 和 1 620  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 受到咸潮上溯和地表径流等影响, 水质指标表现出明显的时空差异 ( $P < 0.05$ ). CCME-WQI 值表明, 珠海磨刀门水道输水水库群水质质量总体一般, 空间上水质质量优劣排序为: 杨寮水库 (93.21) > 竹仙洞水库 (84.71) > 竹银水库 (82.57) > 乾务水库 (77.62) > 大镜山水库 (68.35) > 磨刀门水道 (63.40). 水质相关性分析表明大镜山水库和竹银水库水质情况受到了磨刀门水道的影响, 是改善水源水质的主要治理对象.

**关键词:** 珠海市; 饮用水源水质; 时空变化; 水质指数; 水质相关性

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5509-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201074

## Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources

ZHANG Kun-feng<sup>1,2</sup>, CHANG Sheng<sup>1\*</sup>, ZHANG Qi<sup>2</sup>, WANG En-rui<sup>1</sup>, XIE Qiong<sup>1</sup>, ZHANG Mo-li<sup>1</sup>, FAN Yue-ting<sup>1</sup>, YANG Guang<sup>1</sup>, FU Qing<sup>1\*</sup>

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Drinking Water Source Protection, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** The protection of drinking water source water quality is an important link to ensure the safe supply of drinking water, and analysis of the spatiotemporal changes in drinking water source water quality can provide an important basis for the formulation of water source water quality improvement plans. Therefore, this study combined China's surface water environmental quality standards (GB 3838-2002) and Canadian Council of Ministers of Environmental Water Quality Index (CCME-WQI) on the Modaomen Waterway in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and the Yangliao Reservoir, Qianwu Reservoir, Zhuyin Reservoir, Zhuxiandong Reservoir, and Dajingshan Reservoir, which are supplied by it. Ten conventional water quality indicators during the flood and dry periods were evaluated, the spatiotemporal distribution characteristics of water quality were discussed, and the water quality in the water supply mode of river-reservoir linkage and reservoir-reservoir connection was carried out. The results showed that four water quality indexes, including ammonia nitrogen ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), and chloride, exceeded Class III water quality standards of Modaomen Waterway and the five reservoirs in Zhuhai; the maximum values were 2.22, 0.28, 5.38, and 1 620  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively. Affected by salt tides and surface runoff, the spatiotemporal differences in water quality indicators were significant ( $P < 0.05$ ). The CCME-WQI value showed that the water quality of the Modaomen Waterway water delivery reservoir group in Zhuhai was fair, and Yangliao Reservoir (93.21) > Zhuxiandong Reservoir (84.71) > Zhuyin Reservoir (82.57) > Qianwu Reservoir (77.62) > Dajingshan Reservoir (68.35) > Modaomen Waterway (63.40). The correlation analysis of water quality showed that the water quality of Dajingshan Reservoir and Zhuyin Reservoir was mainly affected by Modaomen Waterway, and they were the main control objects to improve water quality.

**Key words:** Zhuhai; drinking water source quality; spatiotemporal variation; water quality index; water quality correlation

保障饮水安全已经成为世界共识并受到公众及相关部门的重视, 饮用水源地水质保护是保障饮水安全的重要环节<sup>[1,2]</sup>. 珠海市过境河流主要为西江的出海水道, 包括磨刀门水道、鸡啼门水道、虎跳门水道和前山水道, 其中磨刀门水道及输水水库群是粤港澳大湾区珠海市和澳门特别行政区的重要供水水源. 磨刀门水道设有广昌、平岗、竹洲头和新黄杨这 4 座取水泵站, 沿线大镜山、杨寮、南屏和竹仙洞等水库位于磨刀门水道左岸, 即珠海主城区东部, 总有效库容约 2 800 万  $\text{m}^3$ ; 西部地区主要有竹

银、乾务、木头冲和龙井等水库, 总有效库容约 7 800 万  $\text{m}^3$ . 有研究表明, 珠海市磨刀门水道和受其供水的杨寮水库、乾务水库、竹银水库、竹仙洞水库和大镜山水库水源长期受“咸潮、排涝、突发性水源污染”等三大问题困扰, 存在因总磷、总氮、氨

收稿日期: 2022-01-09; 修订日期: 2022-03-31

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC3200804-02); 生态环境部饮用水水源及重大工程项目区环境监管项目 (2110302)

作者简介: 张坤锋 (1995 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向饮用水源安全保障与水污染控制, E-mail: Zhangkf1995@163.com

\* 通信作者, E-mail: changsheng83@163.com; fuqing@caes.org.cn

氮、氯化物和重金属等不达标导致水源水质超标的风险<sup>[3,4]</sup>,为适应珠江口特殊的自然地理条件,珠海城市供水水源现已形成“江库连动、库库连通”模式,该模式由多座主力取水泵站和主调蓄水库以及原水管道连接组成,不仅可保证咸潮期间淡水资源的供应,还增强了水体的自净和调蓄能力,有利于提高水生生物多样性和生态系统稳定性,从而促进水质稳定改善.

当前,关于珠海市饮用水源地水质的研究主要集中在河流型饮用水源水体的咸潮问题<sup>[5-7]</sup>和水库型水源水体的富营养化问题<sup>[8,9]</sup>.然而,关于珠海市磨刀门水道输水水库群水源水质的时空变化及相关性的研究还未见报道.因此,迫切需要统筹考虑“江库连动、库库连通”供水格局下磨刀门水道输水水库群水源水质指标的时空变化及其互通影响.对于水源水质的评估,传统的方法依赖于对所有变量参数的评估,这些变量单独或通过交互作用对水质质量条件作出贡献<sup>[10]</sup>.这种分析需要对饮用水科学有全面的了解才能理解,并且可能无法提供对饮用水源质量的综合测量<sup>[11]</sup>.相比之下,加拿大环境部长理事会推出的 CCME-WQI 法评价结果简明易懂且更贴近真实水质情况<sup>[12]</sup>,评价指标和标准选择灵活更有利于提升公众对水质评价信息的理解,当前已在世界范围内水环境评价中得到广泛应用<sup>[13-15]</sup>.例如王珅等<sup>[12]</sup>采用 CCME-WQI 法对鳌江水质进行评价,发现该方法更利于属地生态环境部门对水资源分类管理,具有巨大的应用价值,而用此对水库群及水源水质开展水质综合评估的较少.

本研究于 2019 年丰水期和枯水期对珠海市主要饮用水源中的磨刀门水道及受其供水的杨寮水库、竹银水库、大镜山水库、竹仙洞水库和乾务水库水体连续采集和监测.本研究通过对上述水体水质参数的分析,阐释其时空变化规律,找出磨刀门水道及 5 个水库的关键污染指标,采用 CCME-WQI 法对珠海市主要饮用水源水质质量进行精准评价,并对磨刀门水道与受其供水的水库水质之间的影响进行了探究.本研究首次对“江库连动、库库连通”型饮用水源地时空变化及水质指标影响的相关性进行分析,以期为我国河流及水库型水源地的水质和水环境保护及科学管理调度提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

珠海市(113°03'E ~ 114°19'E, 21°48'N ~ 22°27'N)是珠三角南端的重要城市,也是粤港澳大湾区的重要节点城市.珠海市过境水资源较丰富,但

时空分布不均且水源长期受“咸潮、排涝和突发水源污染”等三大问题困扰.西江在珠海市斗门区北部分为磨刀门水道、螺洲溪、荷麻溪、涝涝溪和涝涝西溪等 5 个支流入境,进而分汇为磨刀门、鸡啼门和虎跳门等 3 支干流,由北向南纵贯全境,分口注入南海.目前珠海市在用的 9 个饮用水源水库大都属于中小型水库,集水面积较小造成自然集水能力差不能满足供水需求,其来水主要依赖于西江磨刀门水道上的广昌泵站、平岗泵站和竹洲头泵站调水入库进行补充<sup>[16]</sup>,形成了典型的“江水为主、江库连动、库库连通”的供水网络格局(图 1).

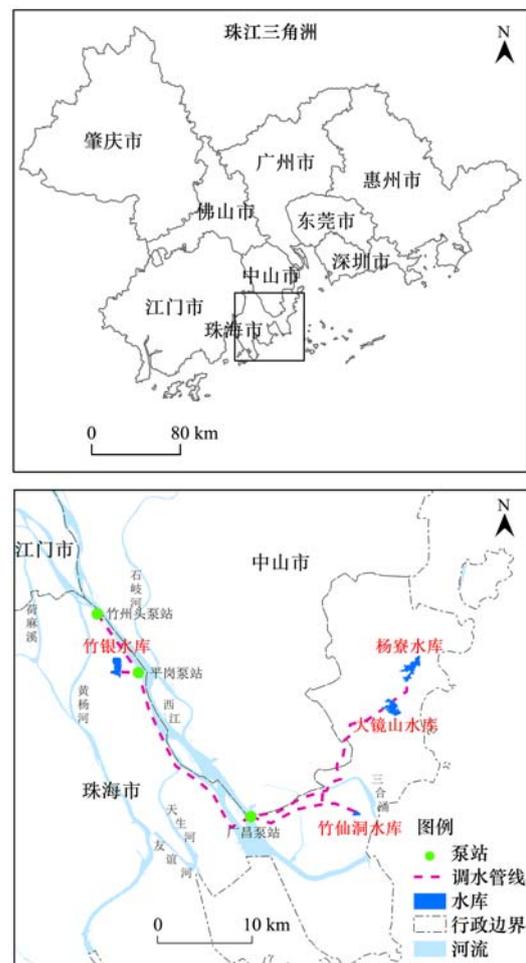


图 1 珠海市磨刀门水道及供水水库分布

Fig. 1 Distribution of Modaomen Waterway and water supply reservoirs in Zhuhai

### 1.2 水样采集

本研究在分析珠海市区“江库连动、库库连通”的全域饮用水源供给网络的基础上,选择了覆盖全面且具有代表性的磨刀门水道和受其供水的 5 个水库作为水源水质研究对象.本研究在平面点位选取时参考了《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91-2002)<sup>[17]</sup>并依据水库集水面积大小、连通水库的进出水位置和污染源位置等因素选取了代表性强、覆

覆盖面全、能够代表该水库水质特征且满足研究需要的共计 40 个点位. 其中包括磨刀门水道 13 个(MDM1 ~ MDM13), 其中 MDM1、MDM4 和 MDM10 点位分别为竹洲头泵站、平岗泵站和广昌泵站 3 个泵站取水口(表 1), 杨寮水库 9 个(YL1 ~ YL9)、乾务水库 6 个(QW1 ~ QW6)、大镜山水库 5 个(DJS1 ~ DJS5)、竹仙洞水库 3 个(ZXD1 ~ ZXD3)和竹银水库 4 个(ZY1

~ ZY4)(图 2), 水库详细信息见表 1. 采样于 2019 年 8 月(丰水期)和 10 月(枯水期)分 2 次进行, 用 500 mL 塑料瓶收集表层 0.5 m 深水样并带回实验室测定水质指标. 同时, 根据水库不同点位分布及季节水深和水文特征, 对 5 个水库的部分点位采集了中层和底层水样, 以了解相关指标不同水深的分布特征. 相关水质指标及其测定方法见表 2.

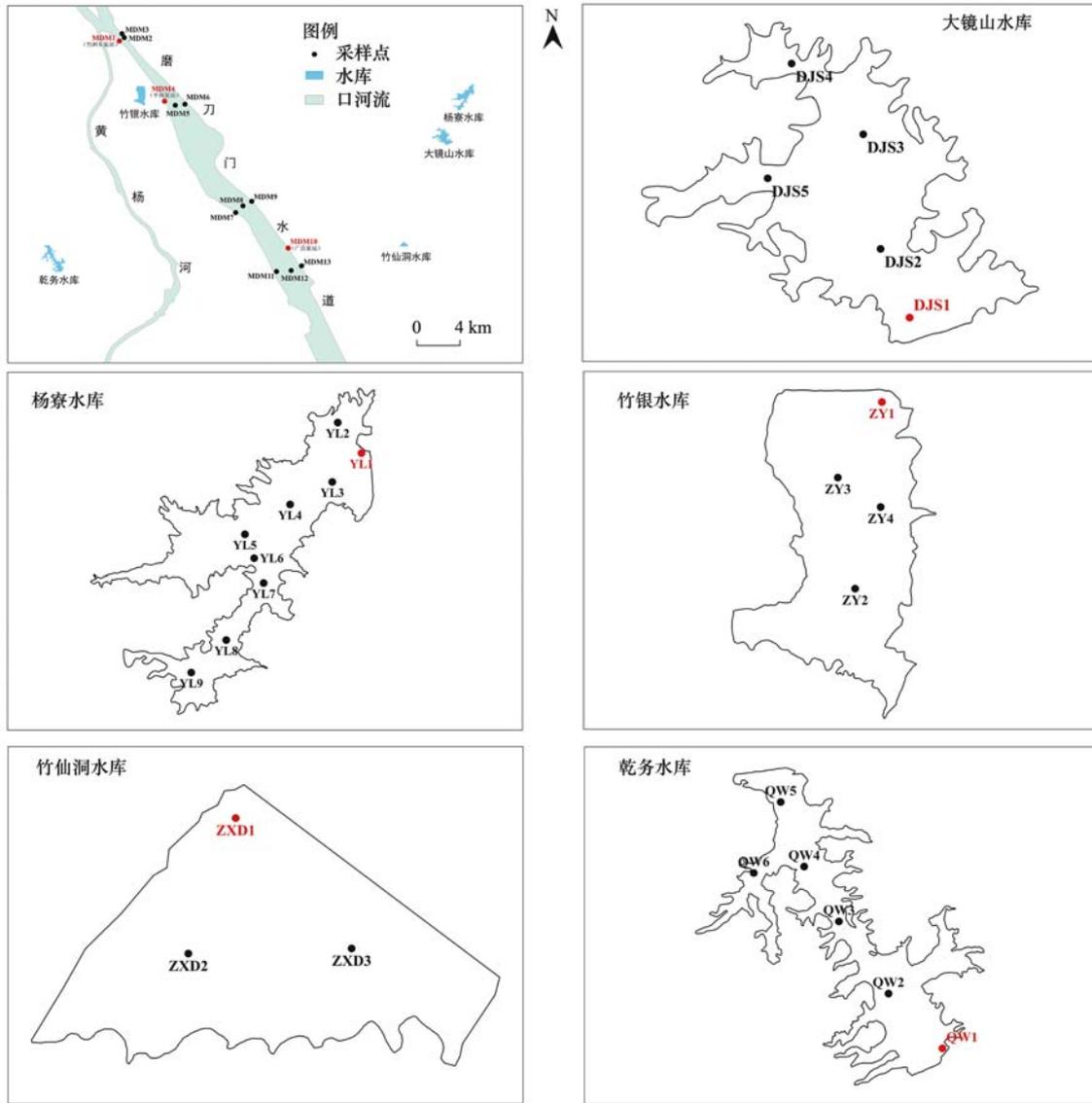


图 2 珠海市磨刀门水道及 5 个水库采样点

Fig. 2 Map of the sampling locations for Modaomen Waterway and five reservoirs in Zhuhai

表 1 磨刀门水道泵站及 5 个水库水文信息

Table 1 Hydrological information of Modaomen Waterway pumping station and five reservoirs

水体类别	区划	水库名称	集雨面积/km <sup>2</sup>	总库容/万 m <sup>3</sup>
水库	香洲区	大镜山水库	7.00	1 160
	香洲区	竹仙洞水库	2.813	281
	高新区	杨寮水库	9.28	1 508
	斗门区	乾务水库	9.75	1 388
	斗门区	竹银水库	2.99	4 018
水体类别	区域	泵站名称	现状规模/m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	规划规模/m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>
泵站(磨刀门水道)	中区	广昌泵站	100	230
	西区	竹洲头泵站	80	300
	西区	平岗泵站	124	300

表 2 地表水Ⅲ类参数及简称、单位、标准值及测定方法<sup>1)</sup>

Table 2 Parameters and abbreviations, units, standard values for Surface Water Class III, and determination methods

参数	符号	单位	Ⅲ水质标准	方法
水温	WT	℃	—	GB 13195-91
酸碱度	pH	—	6~9	GB 6920-86
溶解氧	DO	mg·L <sup>-1</sup>	5	GB 11913-89
高锰酸盐指数	—	mg·L <sup>-1</sup>	6	GB 11892-89
五日生化需氧量	BOD <sub>5</sub>	mg·L <sup>-1</sup>	4	GB 7488-87
氨氮	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	mg·L <sup>-1</sup>	1	GB 7479-87
总氮	TN	mg·L <sup>-1</sup>	1	GB 11894-89
总磷	TP	mg·L <sup>-1</sup>	0.05	GB 11893-89
粪大肠杆菌	<i>E. coli</i>	cells·L <sup>-1</sup>	10 000	文献[25]
氯化物(以氯计)	Cl	mg·L <sup>-1</sup>	250	GB 11896-89
硝酸盐(以氮计)	N	mg·L <sup>-1</sup>	10	GB 7480-87

1) “—”表示无对应简称或标准中无相关参数

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 CCME-WQI 水质指数

本研究采用加拿大环境部长理事会水质指数(CCME-WQI)对水质质量进行分析。CCME-WQI因其灵活的适用性而被广泛应用于许多国家<sup>[18-20]</sup>。实践中可根据特定条件和当地问题,与该指数一起使用的特定变量、目标和时间段可能因地区而异<sup>[21]</sup>。值得注意的是,它可以很容易地从定性和定量的角度评估整体水质是否符合指定的水质目标,并且它提供了水质状态类别的明确指示。为了探索珠海市饮用水源的水质,采用了CCME-WQI和中国地表水环境质量标准(GB 3838-2002)中Ⅲ级标准<sup>[22]</sup>。表2展示了Ⅲ类水质参数标准和所采用的详细水质指数的检测方法,并参考了文献[23,24]。

CCME-WQI的计算方法中包含3个元素:范围( $F_1$ )、频率( $F_2$ )和振幅( $F_3$ ),其定义和计算公式如下。

范围( $F_1$ ):表示测量不符合目标的水参数的数目,并表示这些数目占所测量的选定参数总数的百分比,因此表示在评价期间至少有1次不符合其各自标准的选定变量的百分比,具体公式如下:

$$F_1 = 100(p/N) \quad (1)$$

式中, $p$ 为超标水质参数的个数, $N$ 为水质监测项目总数。

频率( $F_2$ ):用于测量水质目标未达到的频率,表示不达到目标(即未通过测试)的个别测试(测量)的百分比,具体见公式(2):

$$F_2 = 100(q/M) \quad (2)$$

式中, $M$ 为水质监测数据总数, $q$ 为归一化参数,即各监测项目超标倍数加和与水质监测数据总数之比。

振幅( $F_3$ ):振幅又称幅度,测量有多少目标被超过,因此表示失败的测试值不满足他们的目标(标准值)的数量,计算 $F_3$ 有以下3个步骤。

①检出浓度大于(如果标准为下限,小于下限时)目标浓度的次数称为“excursion”,当测试值不能超过目标值时:

$$\text{excursion} = (C_i/C_{si}) - 1 \quad (3)$$

对于测试值不能低于目标的情况:

$$\text{excursion} = (C_{si}/C_i) - 1 \quad (4)$$

式中, $C_{si}$ 为评价标准, $C_i$ 为指标超标值。

②单个测试不符合要求的总数计算如下:

$$\text{nse} = M^{-1} \cdot \sum \text{excursion} \quad (5)$$

③振幅 $F_3$ 然后由一个渐近函数计算,该函数将目标距离(nse)的归一化和缩放为0~100之间的值。

$$F_3 = \text{nse}/(0.01\text{nse} + 0.01) \quad (6)$$

CCME-WQI的最终计算公式为:

$$\text{CCME WQI} = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \quad (7)$$

由公式(1)~(7)生成一个0~100之间的值,数值接近0表示水质很差,接近100表示水质优良。进一步简化为以下类别或等级之一,优秀:95~100;良好:80~95;一般:65~79;边缘:45~64和较差:0~44。

#### 1.3.2 Spearman 相关系数分析

利用SPSS 20.0软件采用Spearman相关性系数法依据主要水质指标对磨刀门水道及受其供水的5个水库之间的相关性进行分析,探究珠海市“江库连动,库库连通”的供水格局下,水库和水道不同类型饮用水源地水质指标之间的相关性,最后使用R语言(3.5.2版本)Heatmap包出图<sup>[26]</sup>。

2 结果与讨论

2.1 磨刀门水道及受其供水水库水质

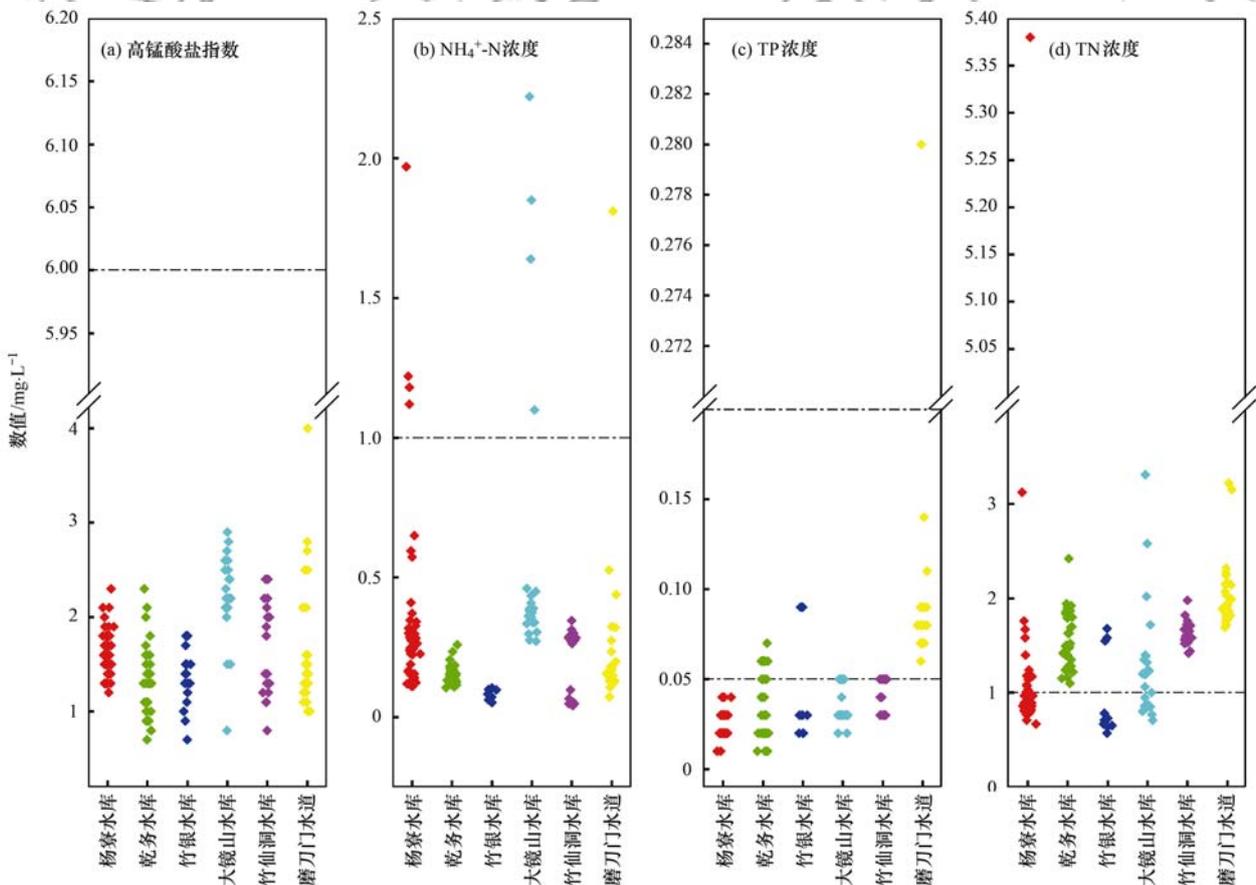
本研究中,磨刀门水道及受其供水的 5 个水库丰枯两季水体高锰酸盐指数、五日生化需氧量 (BOD<sub>5</sub>)、大肠杆菌 (*E. coli*)、硝酸盐浓度(以 N 计,下同)、溶解氧浓度 (DO) 和 pH 值均符合 GB 3838-2002 中Ⅲ类水质指标<sup>[22]</sup>(表 3 和图 3). 与此同时,氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总磷 (TP)、总氮 (TN) 和氯化物(以 Cl 计,下同)浓度在磨刀门水道及受其供水的水库中不同程度地超过了Ⅲ类水质标准,4 个水质指标浓度最大值分别为 2.22、0.28、5.38 和 1 620 mg·L<sup>-1</sup>(图 3 和图 4). 值得注意的是,TN 浓度在磨

刀门水道(包括 3 个泵站)及受其供水的乾务水库和竹仙洞水库水体均处于超标水平<sup>[22]</sup>[图 3(d)],其浓度平均值分别为 2.05、1.61 和 1.62 mg·L<sup>-1</sup>; TP 在磨刀门水道偶尔超标,其浓度最大值为 0.28 mg·L<sup>-1</sup>,平均值为 0.09 mg·L<sup>-1</sup>[图 4(c)]. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 在杨寮水库和大镜山水库的某些点位出现超标情况,其浓度最大值分别为 1.97 mg·L<sup>-1</sup>(丰水期 YL4)和 2.22 mg·L<sup>-1</sup>(枯水期 DJS1)[图 3(b)]. 因此可知 TN 和 TP 是珠海市主要饮用水源磨刀门水道及受其供水水库水体中的关键指标. 同样,以往对珠海市磨刀门水道及受其供水水库水质研究发现,TN 和 TP 较为频繁超过Ⅲ类水水质标准,是珠海市磨刀门及受其供水水库的关键污染指标<sup>[16,27]</sup>. 值得注意的是,受到枯水期入海河

表 3 不同水期 pH、溶解氧(DO)、水温(WT)、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)和大肠杆菌(*E. coli*)的变化

Table 3 Variation in pH, dissolved oxygen (DO), water temperature (WT), biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>), and *Escherichia coli* (*E. coli*) in different water periods

水质参数	丰水期				枯水期			
	最大值	最小值	中位数	平均值	最大值	最小值	中位数	平均值
WT/°C	33.9	24.9	29.76	30.94	30.40	26.5	28.12	28.76
pH(无量纲)	8.91	7.02	8.01	8.21	8.6	3.19	7.23	7.55
DO/mg·L <sup>-1</sup>	9.10	5.0	6.87	6.98	9.35	5.64	7.27	7.43
BOD <sub>5</sub> /mg·L <sup>-1</sup>	4.00	1.6	2.55	2.73	3.7	1.1	1.5	1.86
<i>E. coli</i> /cells·L <sup>-1</sup>	1 900	130	979.50	984.75	1 900	31	805.5	927.65



图中虚线表示Ⅲ类水质标准值

图 3 基于文献[21]对磨刀门水道和 5 个水库水质参数分类

Fig. 3 Classification of water quality parameter of the Modaomen Waterway and five reservoirs based on reference [21]

口潮汐动力等水文因素造成的咸潮上溯的影响,在以往的研究中氯化物也是磨刀门水道主要的超标指标的结果与本研究一致<sup>[5,28,29]</sup>.

## 2.2 磨刀门水道主要指标时空分布差异

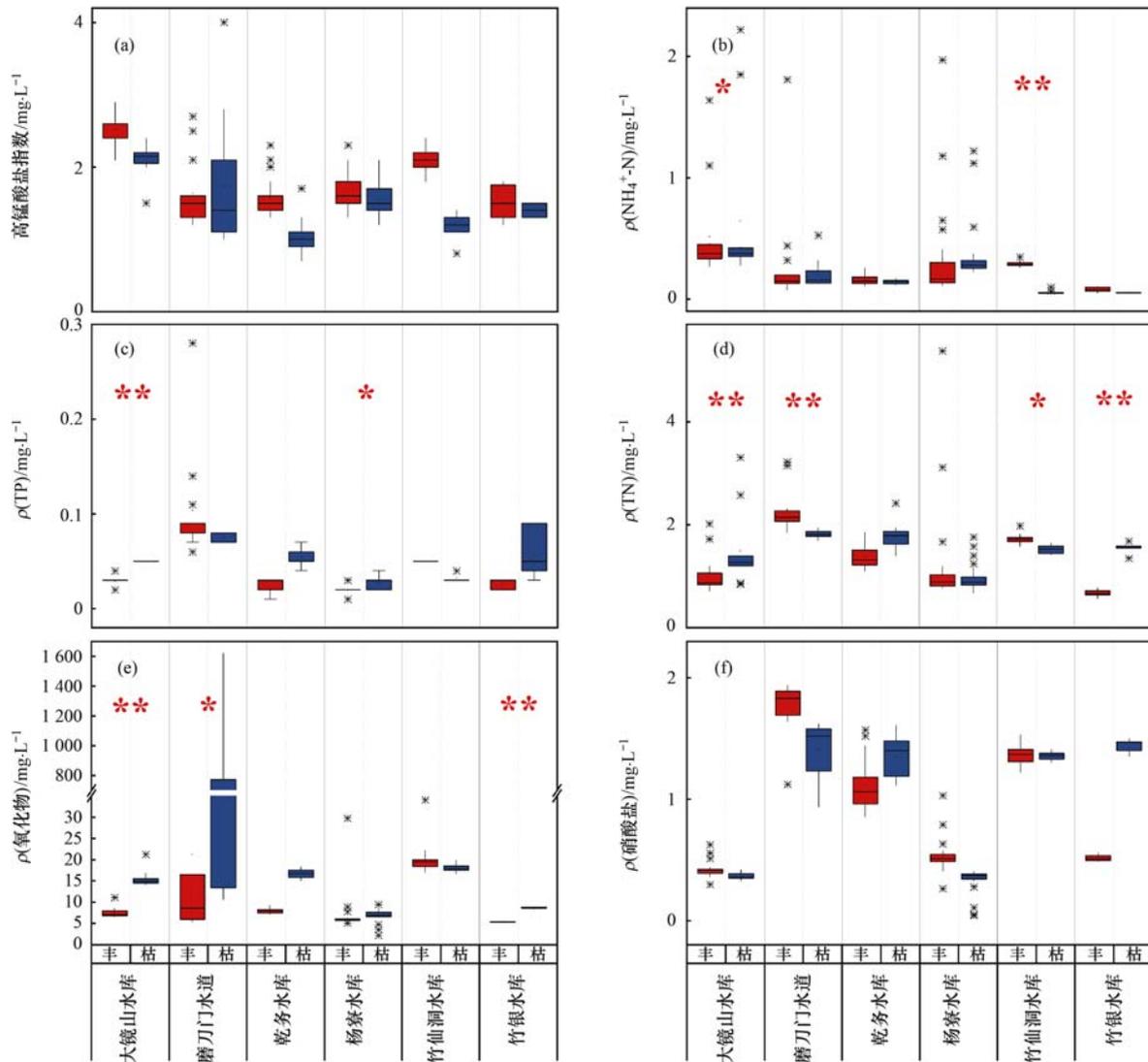
对磨刀门水道及受其供水水库水质的关键指标的时空分布进行分析.对 TN 来讲,磨刀门水道丰水期  $\rho(\text{TN})$  范围为  $1.99 \sim 3.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $2.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;枯水期  $\rho(\text{TN})$  范围为  $1.69 \sim 1.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $1.82 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .季节上,磨刀门水道丰水期 TN 浓度显著高于枯水期 [ $F = 15.85, P < 0.01$ ,图 4(d)];空间上,丰水期 MDM4 和 MDM6 点位 TN 浓度偏高,由图 2 可知这 2 个点位均平岗泵站附近,枯水期各采样点间差异较小.总体来看,磨刀门水道 TN 均超过地表水水质 III 类标准限值<sup>[22]</sup>.对于氯化物来讲,季节上,丰水期氯化物浓度范围为  $5.36 \sim 90.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $21.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,显著低于枯水期(浓度范围为  $10.60 \sim 1620.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值  $439.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) [ $F = 6.28, P < 0.05$ ,图 4(e)].从空间变化来看,越靠近下游的采样点(即越靠近入海口),氯化物浓度越高,最大浓度达到  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以上[图 4(e)],这与已有研究中关于珠江三角洲地区入海口枯水期受到咸潮上溯问题的影响而造成氯化物超标的结论一致<sup>[30,31]</sup>,且多发生于枯水期和干旱期<sup>[32]</sup>.通过查阅相关研究可知,磨刀门水道因人为挖沙使河床变深,使口内河床逆坡趋陡、纳潮蓄咸容积扩大,潮差变大和潮汐作用增强,以致咸潮进一步向里深入而不利于口内底层所蓄咸水的外排.另一方面,围垦滩涂导致自然湿地退化使得口门向海延伸,过去磨刀门水道枯水期天然的“蓄淡抑咸”功能遭到破坏<sup>[29]</sup>.同样地,许多研究表明长江入海口也会受到咸潮上溯的影响而造成氯化物浓度超标<sup>[33,34]</sup>.对于  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,丰水期  $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$  范围为  $0.13 \sim 1.81 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $0.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;枯水期  $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$  范围为  $0.13 \sim 0.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图 4(b)], $\text{NH}_4^+-\text{N}$  在两个水期没有显著性差异 ( $P > 0.05$ ).从空间变化来看,丰水期 MDM6 点位浓度 ( $1.81 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 明显高于其他采样点(平均值  $0.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),说明该点可能受到了汇入河流水质的影响.其次为丰水期 MDM4 点位 ( $0.44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 和枯水期 MDM12 点位 ( $0.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 浓度较高.对 TP 来讲,丰水期  $\rho(\text{TP})$  范围为  $0.07 \sim 0.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;枯水期浓度范围为  $0.07 \sim 0.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $0.075 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图 4(c)].季节上,TP 浓度在丰水期与枯水期没有显著性差异 ( $P > 0.05$ );从空间变化来看,MDM4 ( $0.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )、MDM6 ( $0.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )

和 MDM10 ( $0.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 即平岗泵站和广昌泵站丰水期 TP 浓度较高,其中 MDM10 点位 TP 浓度超过地表水 III 类标准限值.空间分布上,从竹洲头泵站 (MDM1) 至平岗泵站 (MDM4) 到广昌泵站 (MDM10), $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TP 和氯化物呈增加趋势.通过参考磨刀门水道水质历史数据可知<sup>[26]</sup>,磨刀门水道水体历史监测数据和本研究的结果均表明,磨刀门水道及取水泵站各点位丰水期 TN 和 TP 两指标浓度均高于枯水期,这表明磨刀门水道主要受地表径流影响大,面源污染及上游来水为水质超标的主要原因,这与以往的关于三峡水库、小清河入海口和南水北调中线干渠等水体相关指标较高的原因一致,非点源污染和地表径流是主要的负荷来源<sup>[35~37]</sup>;而枯水期氯化物浓度较丰水期高,表明磨刀门水道水质受咸潮影响明显.这也说明,珠海磨刀门水道(取水泵站)的水质受到上游来水和咸潮影响双重压力,易导致水质不能稳定达标,尤其广昌泵站 (MDM10) 取水水质 TP ( $0.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 超标风险较大.

## 2.3 水库主要指标时空分布差异

竹仙洞水库丰水期  $\rho(\text{TN})$  范围为  $1.67 \sim 1.72 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $1.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;枯水期  $\rho(\text{TN})$  范围为  $1.52 \sim 1.56 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $1.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;由此可知竹仙洞水库丰枯两季 TN 浓度均超过地表水 III 类标准[图 3(d)],且丰水期浓度显著高于枯水期 [ $F = 31.35, P < 0.05$ ,图 4(d)] 达到了 V 类水标准<sup>[22]</sup>.丰水期氯化物浓度范围为  $18.4 \sim 19.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $18.83 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;枯水期氯化物浓度范围为  $17.8 \sim 19.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $18.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图 4(e)].丰枯两季氯化物浓度没有显著性差异 ( $P > 0.05$ );从时间变化来看,除 ZXD3 点位枯水期氯化物浓度高于丰水期,其他样品均为丰水期高于枯水期.丰水期  $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$  范围为  $0.273 \sim 0.284 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $0.278 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;枯水期, $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$  范围为  $0.048 \sim 0.066 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $0.054 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,丰水期浓度显著高于枯水期 [ $F = 1069, P < 0.01$ ,图 4(b)].丰水期  $\rho(\text{TP})$  平均值为  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;枯水期  $\rho(\text{TP})$  范围为  $0.03 \sim 0.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $0.033 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图 4(c)],丰水期和枯水期浓度没有显著性差异 ( $P > 0.05$ ).

大镜山水库丰水期  $\rho(\text{TN})$  范围为  $0.71 \sim 0.85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $0.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;枯水期  $\rho(\text{TN})$  范围为  $1.23 \sim 1.39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为  $1.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .季节上,枯水期浓度显著高于丰水期 [ $F = 201, P < 0.01$ ,图 4(d)],枯水期达到了 V 类水质<sup>[22]</sup>.丰水期氯化物浓度范围为  $6.57 \sim 7.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为



\*\* 表示在 0.01 水平差异性显著, \* 表示在 0.05 水平差异性显著; 丰: 丰水期, 枯: 枯水期

图 4 珠海市磨刀门水道和 5 个水库水质不同水期的变化

Fig. 4 Variation in water quality in Modaomen Waterway and five reservoirs in Zhuhai in different water periods

6.91  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 枯水期氯化物浓度范围为 14.3 ~ 17.4  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为 15.66  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 枯水期氯化物浓度显著高于丰水期 [ $F = 252, P < 0.01$ , 图 4 (e)], 这与枯水期大镜山水库受到磨刀门水道的调水补库有关. 丰水期  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度范围为 0.271 ~ 0.339  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为 0.32  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 枯水期  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度范围为 0.362 ~ 0.439  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为 0.40  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 枯水期浓度显著高于丰水期 [ $F = 8.39, P < 0.05$ , 图 4 (b)], 均满足 III 类地表水标准. 同时研究发现丰水期底层水体中  $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$  的最大值为 1.64  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (DJS1), 枯水期底层水中  $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$  最大值为 2.22  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (DJS1) [图 4 (b)], 说明枯水期水体中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的浓度可能会受到底泥释放的影响, 从而使越靠近水底的水体浓度越高. 丰水期  $\rho(\text{TP})$  范围为 0.02 ~ 0.03  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均

值为 0.028  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 枯水期,  $\rho(\text{TP})$  均为 0.05  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 枯水期显著高于丰水期 [ $F = 121, P < 0.01$ , 图 4 (c)].

杨寮水库丰水期  $\rho(\text{TN})$  范围为 0.78 ~ 5.38  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为 1.35  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 枯水期  $\rho(\text{TN})$  为 0.67 ~ 1.24  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为 0.92  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  [图 4 (d)]. 从空间分布来看, 丰水期 YL4 点位 TN (5.38  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 明显高于其他采样点 ( $< 1.1 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 枯水期 9 个采样点 TN 浓度变化较小; 季节上, 丰枯两季 TN 浓度无显著性差异 ( $P > 0.05$ ). 丰水期氯化物浓度范围为 5.72 ~ 29.7  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为 8.55  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 枯水期氯化物浓度范围为 2.18 ~ 9.08  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为 6.59  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  [图 4 (e)], 从时间变化来看, 丰水期与枯水期氯化物浓度无显著性差异 ( $P > 0.05$ ). YL4 点位 (29.7  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 氯化物浓度高于其他 8 个采样点 ( $< 6.2 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). 丰水期

$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$  范围为  $0.11 \sim 0.649 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为  $0.203 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 枯水期  $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$  范围为  $0.226 \sim 0.347 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为  $0.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  [图 4(b)],  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度在丰枯两季无显著性差异 ( $P > 0.05$ ) 且均满足 III 类水质标准 [图 3(b)]. 同样, 底层水样中  $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$  在丰水期和枯水期最大值分别为  $1.97 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (YL4) 和  $1.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (YL3). 丰水期  $\rho(\text{TP})$  范围为  $\text{ND} \sim 0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为  $0.014 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 枯水期  $\rho(\text{TP})$  范围为  $0.02 \sim 0.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为  $0.029 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 所有点位 TP 浓度均达到了国家 III 类水质标准, 枯水期 TP 浓度显著高于丰水期 [ $F = 7.56, P < 0.05$ , 图 4(c)].

竹银水库丰水期  $\rho(\text{TN})$  范围为  $0.57 \sim 0.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为  $0.66 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 枯水期  $\rho(\text{TN})$  范围为  $1.55 \sim 1.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为  $1.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 枯水期 TN 浓度显著高于丰水期 [ $F = 321, P < 0.01$ , 图 4(d)] 且枯水期 TN 浓度超过了 III 类水质标准 [图 3(d)]. 丰水期氯化物浓度范围为  $5.26 \sim 5.57 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为  $5.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 枯水期氯化物浓度范围为  $8.78 \sim 8.93 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为  $8.85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 由此可知枯水期由于咸潮上溯的原因, 造成氯化物浓度显著高于丰水期 [ $F = 1808, P < 0.01$ , 图 4(e)]. 丰水期  $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$  范围为  $0.052 \sim 0.099 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为  $0.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 枯水期  $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$  范围为  $\text{ND} \sim 0.061 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为  $0.056 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  [图 4(b)], 丰水期  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度略高于枯水期 ( $P > 0.05$ ), 但均达到 III 类地表水标准 [图 3(b)]. 丰水期  $\rho(\text{TP})$  范围为  $0.02 \sim 0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为  $0.028 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 枯水期  $\rho(\text{TP})$  范围为  $0.02 \sim 0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为  $0.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  [图 4(c)], 季节上两个水期 TP 检出浓度没有显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 枯水期 TP 超过 III 类地表水标准 (湖库).

## 2.4 CCME-WQI 水质分析

根据《中国地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 中 III 类水质指标标准并采用 CCME-WQI 评价方法对珠海磨刀门水道及受其供水的 5 个水库水质情况分析 (图 5). 由 CCME-WQI 数据分析表明, 10% 采样点水质质量为优秀、30% 采样点水质质量为良好和 60% 采样点水质质量一般或处于边缘, 表明磨刀门水道输水水库群水质质量总体一般 (图 5).

从空间分布看, 可发现杨寮水库是唯一拥有优秀水质点位的水库 (YL2、YL3、YL5 和 YL8), 其

CCME-WQI 平均值最大 (93.21), 总体水质质量好. 这得益于其较好的水质指标 (图 3 和图 4). 然而, 相比之下磨刀门水道水质指数平均值最低 (63.40), 水质指标一般, 这是因为很多水质指标的较高值均出现在磨刀门水道采样点 (图 4), 如氯化物、TN 和 TP 等超过了 III 类水质标准 (图 3). 这可能是由于大量的非点源污染物、更强的降水及上游来水和地表径流向磨刀门水道输送的增加引起的, 这些因素在以往关于流域地表水水质污染研究中得到了证实<sup>[13,35]</sup>. 另外, 枯水期咸潮上溯等水文因素的影响造成氯化物超标也对此有巨大贡献. 同时笔者观察到, 3 个取水泵站水质质量排序为: 竹洲头泵站 (68.73) > 平岗泵站 (65.86) > 广昌泵站 (57.74). 由此可知, 3 个泵站的水质随着流向越来越差, 即越靠近入海口总体水质越差 (图 1), 这主要是由于受到氯化物超标的影响, 与本研究结果一致. 总体来讲, 磨刀门水道输水水库群水质优劣排序为: 杨寮水库 (93.21) > 竹仙洞水库 (84.71) > 竹银水库 (82.57) > 乾务水库 (77.62) > 磨刀门水道 (63.40). 从水源类型上, 5 个水库型饮用水源 CCME-WQI 值范围为 66.41 (DJS1) ~ 100 (YL3、YL5 和 YL8) (图 5), 平均值为 82.61; 高于磨刀门河流型饮用水源 (63.40). 赵腊梅等<sup>[38]</sup> 对汾河水库及其上游河段分析同样发现水库型水源水质优于河流型水源水质. Xiang 等<sup>[13]</sup> 对三峡水库及其 38 个支流水质的研究发现, 水库型水体水质优于支流河流型水体.

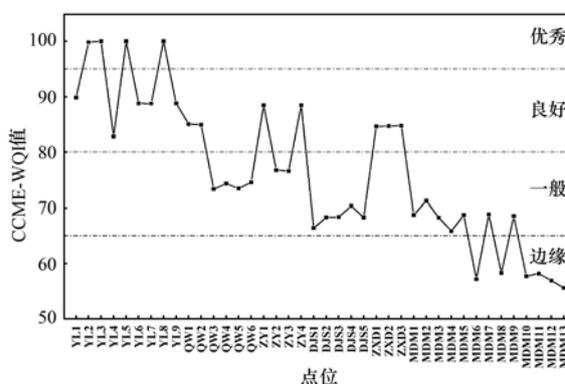


图 5 珠海磨刀门水道及 5 个水库 CCME-WQI 值

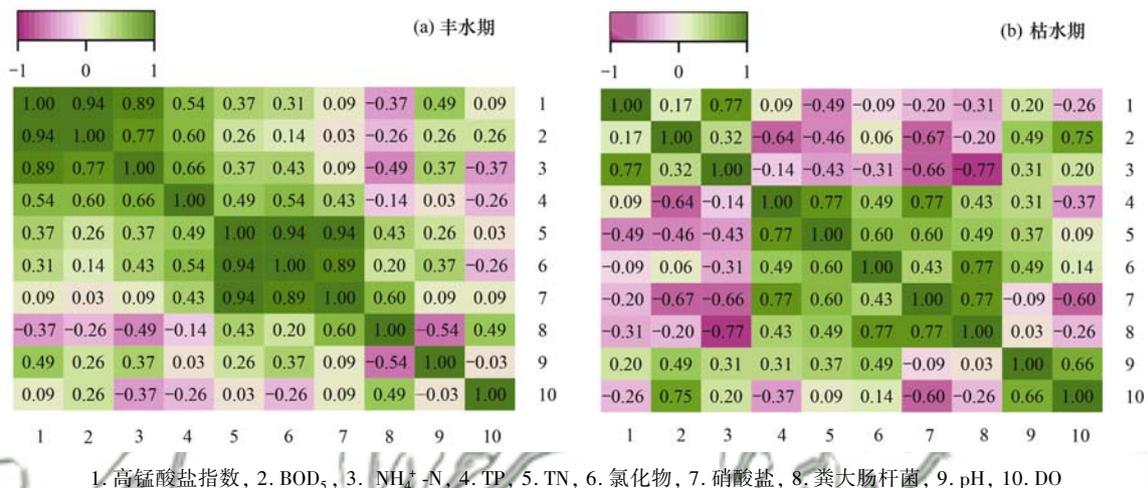
Fig. 5 CCME-WQI values in the Modaomen Waterway and five reservoirs in Zhuhai

## 2.5 磨刀门水道输水水库群水质相关性分析

为探究磨刀门水道输水水库群组成的江库连动的供水网水质之间的相互影响, 本研究对磨刀门水道输水水库群所检测的 10 种主要水质指标: 高锰酸盐指数、TP、TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、pH、DO、氯化物、硝酸盐、 $\text{BOD}_5$  和 *E. coli* 利用 Spearman 相关系数法进行

相关性分析(图6).由图6(a)可知,在丰水期,珠海磨刀门水道输水水库群中的关键指标中, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与 $\text{BOD}_5$ 、高锰酸盐指数、TP有显著正相关性( $r = 0.77, P < 0.05$ ;  $r = 0.89, P < 0.05$ ;  $r = 0.66, P < 0.05$ );TP与 $\text{BOD}_5$ 有显著的正相关关系( $r = 0.60, P < 0.05$ );TN与氯化物和硝酸盐呈现强烈的相关关系,相关系数均为0.94( $P < 0.05$ ),说明TN与硝酸盐具有同源性,这可能是由于丰水期降雨量充沛导致上游来水及地表径流的增加,从而使周边农田

种植施用的化肥农药和畜禽养殖产生的粪便等人类活动产生的污染物,通过地表径流的方式等面源污染负荷增加所导致<sup>[39]</sup>,本文2.4节指出,水库型饮用水源地水质质量优于磨刀门水道,由此证明丰水期由于面源和地表径流的汇入导致磨刀门水道污染水平较高,由于此期“江库连动、库库连通”的供水网络之间的水源互通较少(远低于枯水期),加之水库型饮用水源水力停留时间更长,有利于浮游动植物的积累,水体自净能力增加<sup>[40]</sup>.



1. 高锰酸盐指数, 2.  $\text{BOD}_5$ , 3.  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ , 4. TP, 5. TN, 6. 氯化物, 7. 硝酸盐, 8. 粪大肠杆菌, 9. pH, 10. DO

图6 珠海市磨刀门水道和5个水库水质相关性热图

Fig. 6 Heatmap of correlation of the water quality of the Modaomen Waterway and five reservoirs in Zhuhai

由图6(b)可知,在枯水期, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与高锰酸盐指数有显著正相关性( $r = 0.77, P < 0.05$ );TP与TN和硝酸盐有显著相关关系( $r = 0.77, P < 0.01$ );与此同时,本研究发现枯水期主要指标氯化物与TN、TP和 $E. coli$ 呈显著正相关关系( $r = 0.49, P < 0.05$ ;  $r = 0.60, P < 0.01$ ;  $r = 0.77, P < 0.05$ ).在2.3节的研究已经发现,大镜山水库TN、TP和氯化物在枯水期浓度均显著高于丰水期 $[P < 0.01, \text{图} 4(c)、4(d) \text{和} 4(e)]$ ,这表明枯水期磨刀门水道泵站对大镜山水库型水源地进行补水,导致了大镜山水库水质超标,表明磨刀门水道与大镜山水库的江库连动型供水网在水质上会产生影响.而相比之下,杨寮水库TN浓度的两个季节没有显著性差异( $P > 0.05$ ),这可能是由于枯水期由磨刀门水道向杨寮水库供水的过程中先经过了有一定自净能力的大镜山水库<sup>[27]</sup>,得到了一定的稀释而降低了污染水平.以往关于洪泽湖和太湖的相关研究也发现,入湖河流水质会对湖内水质产生影响,同时湖内的动植物及微生物群落可以利用氮磷等污染物作为营养盐从而降低其污染水平<sup>[41,42]</sup>.与大镜山水库类似,本研究发现竹银水库的TN和氯化物枯水期浓度显著高于枯水期 $[P < 0.01, \text{图} 4(c) \text{和} \text{图} 4(e)]$ ,且竹银水库TN平均浓度( $1.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )高于大镜山水库

( $1.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),这可能是由于竹银水库处于磨刀门水道下游(图1),导致TN浓度在下游汇集所致.

## 2.6 磨刀门水道对水库群水质的影响

磨刀门水道上的竹洲头泵站(MDM1)和平岗泵站(MDM4)是竹银水库供水的主要来源.为了研究“江库连动、库库连通”的供水模式下磨刀门水道对竹银水库水质的影响,本研究收集了地方环境保护部门2011~2020年竹银水库和竹洲头泵站及平岗泵站 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN、TP和高锰酸盐指数水质监测数据(图7).由图7可以看出,竹银水库水质与磨刀门水道上的竹洲头泵站和平岗泵站水质具有高度的相关性.计算可知,竹银水库与竹洲头泵站和平岗泵站的高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN和TP这4项水质指标相关性系数均为0.80.由此可知,竹银水库多个水质指标均受到了磨刀门水道泵站水质的影响.

东部的大镜山水库和竹仙洞水库主要供水来源为广昌泵站、平岗泵站和竹洲头泵站,当泵站不能取到合格的水量时,竹银水库也可向东部库群供水.东部竹仙洞水库和大镜山水库与广昌泵站、平岗泵站和竹洲头泵站2011~2020年这10a的水质对比情况见图8.从中可以看出,竹仙洞水库和大镜山水库与广昌泵站、平岗泵站和竹洲头泵站的水质具有高度的相关性.同时,本文也计算了竹仙洞水库和大

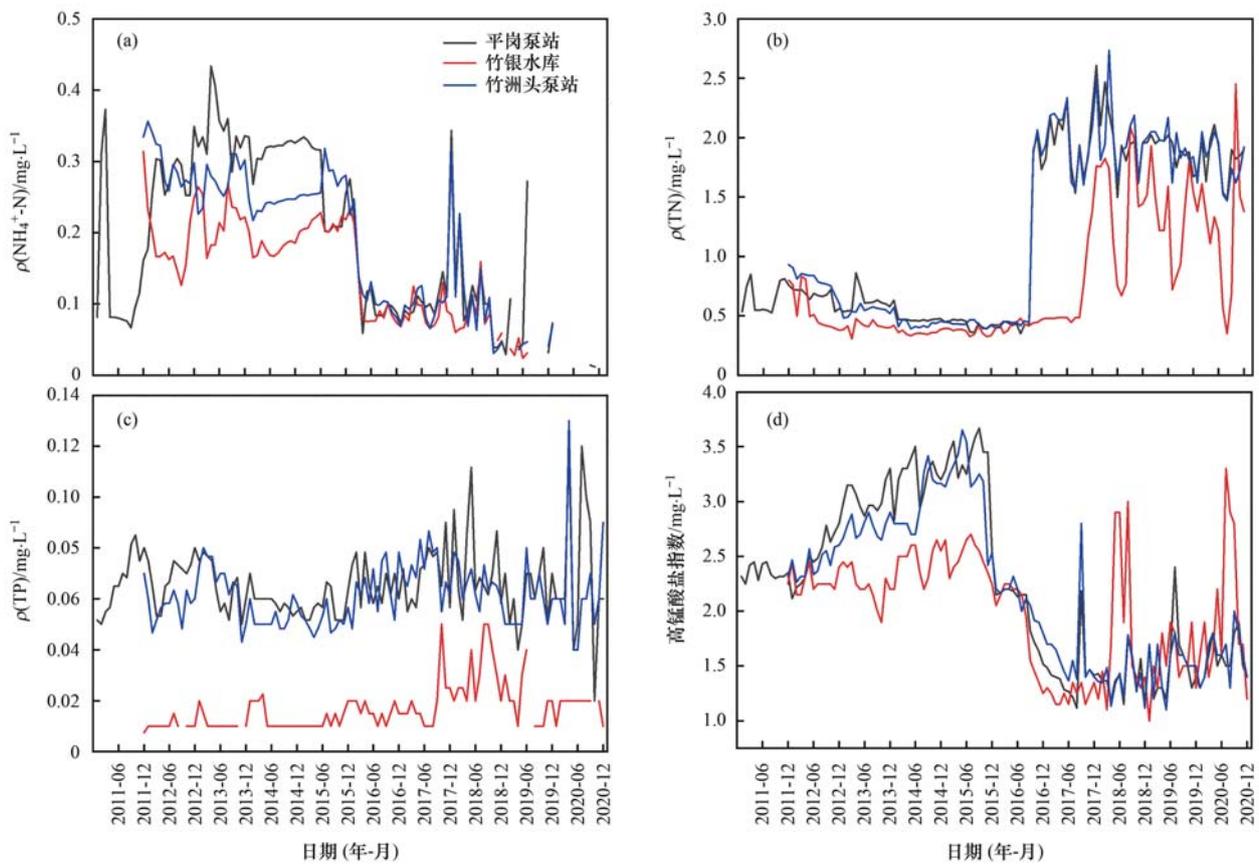


图 7 2011 ~ 2020 年间竹银水库、竹洲头泵站和平岗泵站水质参数情况

Fig. 7 Water quality parameters of Zhuyin Reservoir, Zhuzhoutou pumping station, and Pinggang pumping station from 2011 to 2020

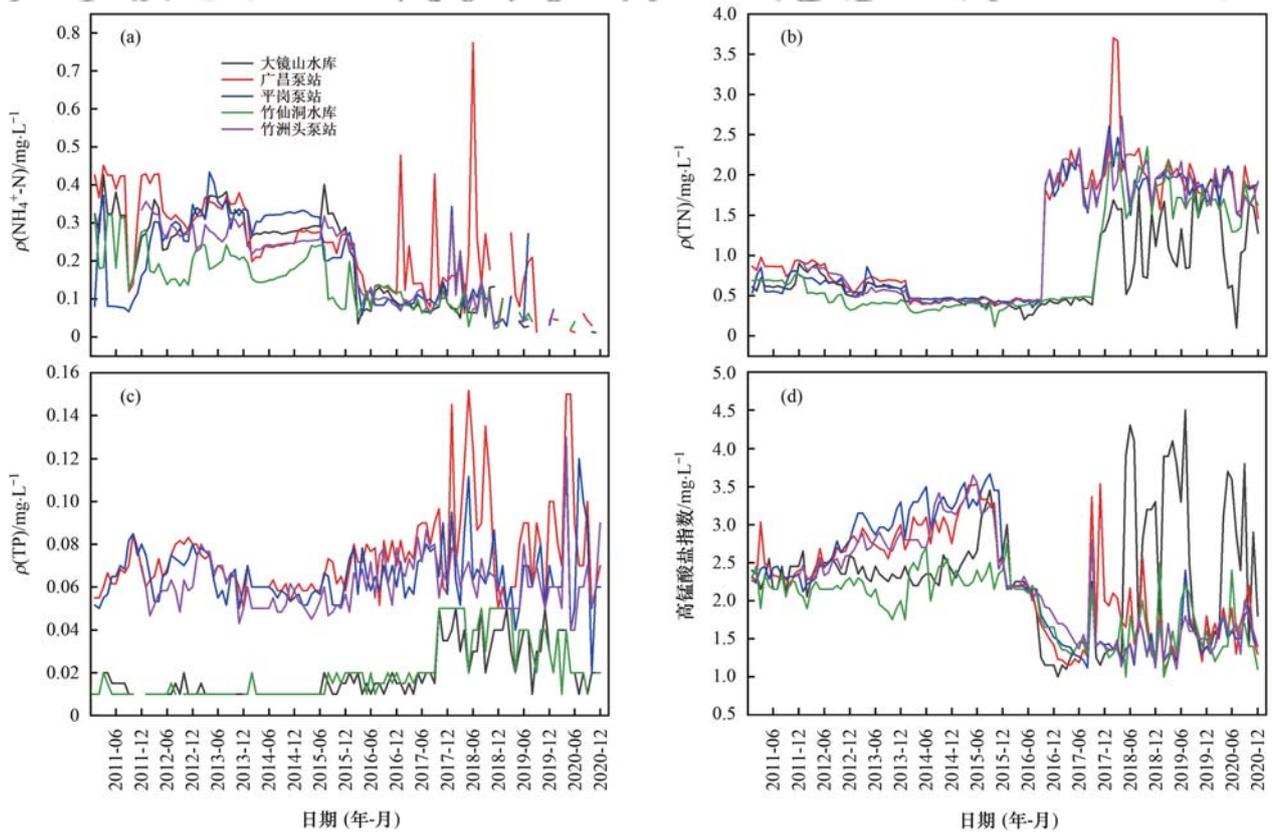


图 8 2011 ~ 2020 年间大镜山水库与广昌泵站、竹洲头泵站和平岗泵站水质参数情况

Fig. 8 Water quality parameters of Dajingshan Reservoir, Guangchang pumping station, Zhuzhoutou pumping station, and Pinggang pumping station from 2011 to 2020

镜山水库与竹洲头泵站、平岗泵站的高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 这 4 项水质相关性(表 4)。由表 4 可知,竹仙洞水库与竹洲头泵站、平岗泵站和广昌泵站的相关系数在 0.66~0.69 之间,相关性较强;大镜山水库与竹洲头泵站、平岗泵站和广昌泵站的相关系数均在 0.85 以上,相关性高于竹仙洞水库。从各项水质指标来看,竹仙洞水库和大镜山水库 TN 和 TP 浓度低于泵站,而其他指标则较为接近,表明 TN 和 TP 自净能力较强,其他指标自净能力较差。

表 4 珠海市水源地主要泵站与水库水质相关系数

Table 4 Water quality correlation coefficient between main pumping stations and reservoir of drinking sources in Zhuhai

相关系数	竹洲头泵站	平岗泵站	广昌泵站
竹仙洞水库	0.66	0.67	0.69
大镜山水库	0.85	0.86	0.86

### 3 结论

(1)磨刀门水道输水水库群 10 个常规水质指标中氨氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、总磷(TP)、总氮(TN)和氯化物这 4 个指标均不同程度超过了我国《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)Ⅲ类水质标准。4 个指标的最大值分别为 2.22、0.28、5.38 和 1620  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(2)磨刀门水道输水水库群超标指标具有显著的时空分布差异,主要受到枯水期咸潮上溯及非点源和地表径流的影响。

(3)CCME-WQI 值显示,磨刀门水质质量总体一般。空间上水质质量优劣排序为:杨寮水库>竹仙洞水库>竹银水库>乾务水库>大镜山水库>磨刀门水道。水源类型优劣排序为:水库型>河流型。受到咸潮上溯的主要影响磨刀门水道越靠近入海口水质越差。

(4)根据不同类型水源地主要水质指标相关性和近 10 年磨刀门水道泵站与水库群常规监测水质指标的对比分析可知,磨刀门水道对竹银水库和大镜山水库水质影响较大,主要受到磨刀门水道枯水期咸潮上溯和丰水期上游来水及地表径流的影响。

#### 参考文献:

[1] 张坤锋,付青,涂响,等. 武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5836-5847.  
Zhang K F, Fu Q, Tu X, et al. Pollution characteristics and risk assessment of typical POPs in typical drinking water sources in Wuhan[J]. Environmental Science, 2021, 42(12): 5836-5847.

[2] 张坤锋,昌盛,涂响,等. 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[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 878-886.

Zhang K F, Chang S, Tu X, et al. Pollution characteristics and risk assessment of DBPs in typical drinking water sources in Wuhan under the COVID-19 pandemic [J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 878-886.

[3] 陈文龙,邹华志,董延军. 磨刀门水道咸潮上溯动力特性分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 713-723.  
Chen W L, Zou H Z, Dong Y J. Hydrodynamic of saltwater intrusion in the Modaomen waterway [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 713-723.

[4] 欧素英. 珠江三角洲咸潮活动的空间差异性分析[J]. 地理科学, 2009, 29(1): 89-92.  
Ou S Y. Spatial difference about activity of saline water intrusion in the Pearl (Zhujiang) River delta [J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(1): 89-92.

[5] 高时友,陈子燊. 珠江口磨刀门水道枯季咸潮上溯与盐度输运机理分析[J]. 海洋通报, 2016, 35(6): 625-631.  
Gao S Y, Chen Z S. Analysis on salinity transport mechanism for the Modaomen waterway of Pearl River in the dry season [J]. Marine Science Bulletin, 2016, 35(6): 625-631.

[6] 陈水森,方立刚,李宏丽,等. 珠江口咸潮入侵分析与经验模型——以磨刀门水道为例[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 751-755.  
Chen S S, Fang L G, Li H L, et al. Saltwater intrusion analysis and experiential model for Pearl River estuary, South China: a case study in Modaomen watercourse [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 751-755.

[7] 任杰,刘宏坤,贾良文,等. 磨刀门水道盐度混合层化机制[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 715-720.  
Ren J, Liu H K, Jia L W, et al. Research on salinity mixing and stratification mechanisms at the Modaomen channel [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 715-720.

[8] 胡培,邱静. 水动力影响下的调水水库营养物质变化规律研究——以珠海市大镜山水库为例[J]. 中国农村水利水电, 2015, (9): 58-61.  
Hu P, Qiu J. Research on the nutrients change of pumped storage reservoir under hydrodynamics: a case study of Dajingshan reservoir in Zhuhai City [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015, (9): 58-61.

[9] 刘格辛,吴孟李,尹娟,等. 西江调水对珠海市供水水库富营养化的影响及其管理对策[J]. 生态科学, 2013, 32(4): 494-499.  
Liu G X, Wu M L, Yin J, et al. Influence of pumping water from Xijiang River on eutrophication of water supply reservoirs and its management strategy in Zhuhai City [J]. Ecological Science, 2013, 32(4): 494-499.

[10] Chang E E, Chiang P C, Chao S H, et al. Development and implementation of source water quality standards in Taiwan, ROC [J]. Chemosphere, 1999, 39(8): 1317-1332.

[11] De Rosemond S, Duro D C, Dubé M. Comparative analysis of regional water quality in Canada using the water quality index [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 156(1-4): 223-240.

[12] 王坤,黄晶,冯孙林,等. CCME WQI 在入海河流(鳌江)感潮河段水质评价中的应用[J]. 中国环境监测, 2019, 35(4): 93-99.  
Wang S, Huang J, Feng S L, et al. Application of CCME WQI in water quality assessment of seagoing rivers (the Aojiang River) in China [J]. Environmental Monitoring in China, 2019, 35(4): 93-99.

[13] Xiang R, Wang L J, Li H, et al. Water quality variation in tributaries of the Three Gorges Reservoir from 2000 to 2015 [J].

- Water Research, 2021, **195**, doi: 10.1016/j.watres.2021.116993.
- [14] Choi B, Choi S S. Integrated hydraulic modelling, water quality modelling and habitat assessment for sustainable water management; a case study of the anyang-cheon stream, Korea [J]. Sustainability, 2021, **13**(8), doi: 10.3390/su13084330.
- [15] Lumb A, Sharma T C, Bibeault J F, *et al.* A comparative study of USA and Canadian water quality index models [J]. Water Quality, Exposure and Health, 2011, **3**(3-4): 203-216.
- [16] 谢飞. 珠海供水水库富营养化现状与浮游植物群落特征 [D]. 广州: 暨南大学, 2014.
- [17] HJ/T 91-2002, 地表水和污水监测技术规范[S].
- [18] Boyacioglu H. Utilization of the water quality index method as a classification tool [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **167**(1-4): 115-124.
- [19] Bilgin A. Evaluation of surface water quality by using Canadian council of ministers of the environment water quality index (CCME WQI) method and discriminant analysis method; a case study Coruh River basin [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, **190**(9), doi: 10.1007/s10661-018-6927-5.
- [20] Zhao Y M, Qin Y W, Zhang L, *et al.* Water quality analysis for the Three Gorges Reservoir, China, from 2010 to 2013 [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(17), doi: 10.1007/s12665-016-5954-1.
- [21] Hurley T, Sadiq R, Mazumder A. Adaptation and evaluation of the Canadian council of ministers of the environment water quality index (CCME WQI) for use as an effective tool to characterize drinking source water quality [J]. Water Research, 2012, **46**(11): 3544-3552.
- [22] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [23] Dede O T, Telet I T, Aral M M. The use of water quality index models for the evaluation of surface water quality: a case study for Kirmir Basin, Ankara, Turkey [J]. Water Quality, Exposure and Health, 2013, **5**(1): 41-56.
- [24] 李琦, 张秋英, 张依章, 等. 河流型湖泊水质指标现状与成因分析——以东平湖为例 [J]. 环境科学学报, 2022, **42**(8): 304-313.
- Li Q, Zhang Q Y, Zhang Y Z, *et al.* Status and cause analysis of water quality indexes in river-type lake: A case study of Dongping Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(8): 304-313.
- [25] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [26] Zhang B, Qin S, Guan X Y, *et al.* Distribution of antibiotic resistance genes in karst river and its ecological risk [J]. Water Research, 2021, **203**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117507.
- [27] 谢琼, 付青, 昌盛, 等. 珠海市江库连通条件下饮用水源水质分布特征及水资源调配措施 [J]. 环境工程技术学报, 2022, **12**(4): 1075-1085.
- Xie Q, Fu Q, Chang S, *et al.* Water quality distribution characteristics and water resources allocation measures of river-reservoir connected drinking water sources in Zhuhai City [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, **12**(4): 1075-1085.
- [28] 胡溪. 珠江口磨刀门水道咸潮入侵数值模拟研究 [D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [29] 李春初. 珠江河口咸潮问题之我见 [J]. 热带地理, 2013, **33**(4): 496-499.
- Li C C. My opinion on salt tide in the Pearl River estuary [J]. Tropical Geography, 2013, **33**(4): 496-499.
- [30] 张敏, 陈钰祥, 罗军, 等. 珠江河口枯季咸潮上溯特征与机制分析 [J]. 海洋预报, 2021, **38**(5): 8-16.
- Zhang M, Chen Y X, Luo J, *et al.* Analysis on the characteristics and mechanism of saltwater intrusion in the dry season in the Pearl River estuary [J]. Marine Forecasts, 2021, **38**(5): 8-16.
- [31] 邹华志, 杨芳, 张亮亮. 河床下切对磨刀门水道咸潮上溯的影响 [J]. 水电能源科学, 2019, **37**(6): 36-39.
- Zou H Z, Yang F, Zhang L L. Effect of riverbed degradation on saltwater intrusion in the Modaomen River channel [J]. Water Resources and Power, 2019, **37**(6): 36-39.
- [32] Chen X, Zong Y. Major impacts of sea-level rise on agriculture in the Yangtze Delta Area around Shanghai [J]. Applied Geography, 1999, **19**(1): 69-84.
- [33] Li L, Zhu J R, Wu H, *et al.* A numerical study on water diversion ratio of the Changjiang (Yangtze) estuary in dry season [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, **28**(3): 700-712.
- [34] Chen B R, Zhu J R, Fu L H. Formation mechanism of freshwater zone around the Meimao Sandbank in the Changjiang estuary [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, **28**(6): 1329-1339.
- [35] 范新风, 韩美, 王磊, 等. 小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析 [J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1619-1628.
- Fan X F, Han M, Wang L, *et al.* Analysis of water quality change and its driving factors of the Xiaoqing River estuary in recent ten years [J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1619-1628.
- [36] Xiang R, Wang L J, Li H, *et al.* Temporal and spatial variation in water quality in the Three Gorges Reservoir from 1998 to 2018 [J]. Science of the Total Environment, 2021, **768**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144866.
- [37] 王超, 辛小康, 王树磊, 等. 长距离人工输水渠道水质时空演变规律研究——以南水北调中线总干渠为例 [J]. 环境科学学报, 2022, **42**(2): 184-194.
- Wang C, Xin X K, Wang S L, *et al.* Study on spatiotemporal change of water quality in long distance artificial water conveyance channels; a case study of the main channel of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(2): 184-194.
- [38] 赵腊梅, 齐朔风. CCME WQI 在汾河水库及上游河段水质评价中的应用 [J]. 中国农村水利水电, 2021, (2): 58-61.
- Zhao L M, Qi S F. Application of CCME WQI in water quality assessment of Fenhe Reservoir and upstream reach in China [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021, (2): 58-61.
- [39] Huang Z L, Han L Y, Zeng L X, *et al.* Effects of land use patterns on stream water quality: a case study of a small-scale watershed in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(4): 3943-3955.
- [40] 王振方, 张玮, 杨丽, 等. 异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系 [J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2249-2257.
- Wang Z F, Zhang W, Yang L, *et al.* Characteristics of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in different regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2249-2257.
- [41] 吴天浩, 刘劲松, 邓建明, 等. 大型过水性湖泊——洪泽湖浮游植物群落结构及其水质生物评价 [J]. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 440-448.
- Wu T H, Liu J S, Deng J M, *et al.* Community structure of

phytoplankton and bioassessment of water quality in a large water-carrying lake, Lake Hongze [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(2): 440-448.

[42] 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 等. 太湖 2007-2016 十年水环境演变及“以渔改水”策略探讨[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(2):

305-318.

Gu X H, Zeng Q F, Mao Z G, *et al.* Water environment change over the period 2007-2016 and the strategy of fishery improve the water quality of Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(2): 305-318.

## 《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站([www.hjkx.ac.cn](http://www.hjkx.ac.cn))进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102;E-mail:[hjkx@rcees.ac.cn](mailto:hjkx@rcees.ac.cn);网址:[www.hjkx.ac.cn](http://www.hjkx.ac.cn)

## CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM <sub>2.5</sub> and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM <sub>2.5</sub> Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM <sub>2.5</sub> Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO <sub>2</sub> Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)