

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

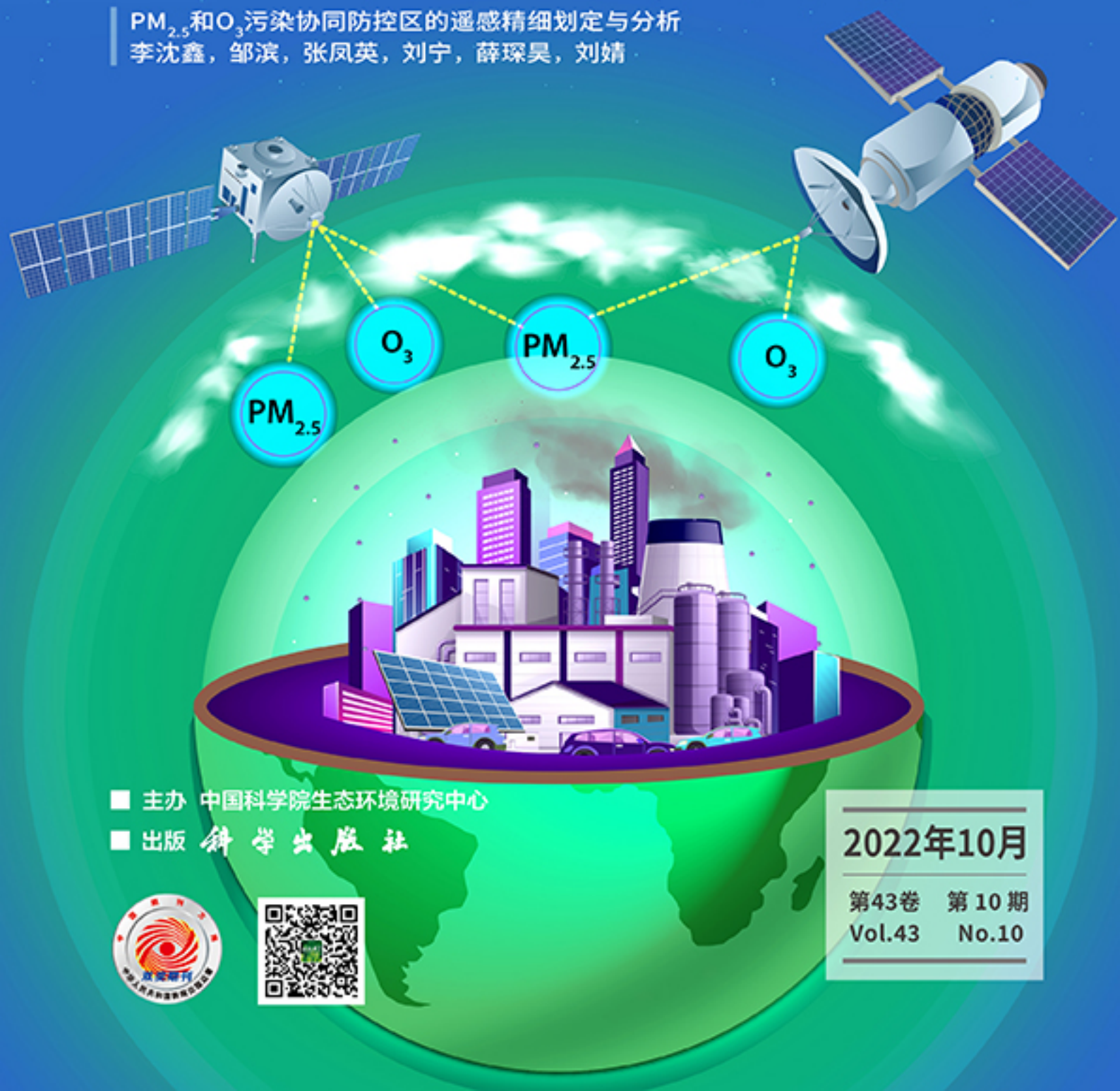
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM _{2.5} 和O ₃ 污染协同防控区的遥感精细划定与分析	李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧 (4293)
广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析	裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅 (4305)
佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用	陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英 (4316)
乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用	张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强 (4327)
结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征	邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀 (4338)
机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征	门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧 (4348)
笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征	曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏 (4357)
上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征	卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹 (4367)
浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征	方利江, 杨一群, 叶观琼 (4380)
“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图	薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东 (4392)
空间关联网络结构特征的减排效应: 基于城市群视角	郑航, 叶阿忠 (4401)
中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制	白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏 (4408)
近年全国地表水水质变化特征	嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯 (4419)
湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素	范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩 (4430)
汾河流域地表水化学同位素特征及其影响因素	赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷 (4440)
城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军 (4449)
喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析	鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英 (4459)
重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别	王雨畅, 杨平恒, 张洁茹 (4470)
蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析	欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴 (4480)
珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子	张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤峰, 谢琼, 付青 (4489)
营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响	吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮 (4502)
老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制	王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强 (4511)
沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响	晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军 (4522)
历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响: ARGs及其潜在宿主	张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如 (4536)
阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析	陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王耀耀, 张睿东 (4545)
白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估	郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵 (4556)
基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析	龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映 (4566)
燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险	车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星 (4578)
海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别	杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新 (4590)
九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价	张华兰, 于瑞莲, 王瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清 (4601)
我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状	伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立峰, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值 (4613)
甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析	陈玉玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖 (4622)
三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征	高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松 (4630)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性	李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希 (4639)
黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应	孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明 (4648)
基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响	姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂 (4658)
低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制	方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢烨桢, 黄海, 朱芸娟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷 (4669)
无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制	张剑, 孔繁艺, 卢升高 (4679)
改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制	谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松 (4687)
CaO ₂ /FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用	岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇 (4697)
早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响	黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智 (4706)
秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响	蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰 (4716)
化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响	陈凯鹏, 韦菊娟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水 (4725)
化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响	李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明 (4735)
长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征	胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 李剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保 (4745)
长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响	马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水 (4755)
土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响	崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰 (4765)
氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响	李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军 (4779)
抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响	李琳琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉 (4789)
《环境科学》征订启事 (4337) 《环境科学》征稿简则 (4407) 信息 (4521, 4705, 4800)	

珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子

张茉莉¹, 王恩瑞¹, 昌盛^{1*}, 王山军¹, 金德才², 樊月婷¹, 张坤锋^{1,3}, 谢琼¹, 付青^{1*}

(1. 中国环境科学研究院国家环境保护饮用水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. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 磨刀门水道是珠江水系的主要出海口,也是粤港澳大湾区珠海和澳门等多个城市的重要水源地。于2021年丰、枯两季(8月和10月)对珠海市磨刀门水道13个采样点的水质和受其供水的4个饮用水水源水库群21个采样点水质状况和浮游植物开展了调查,并探究了相关驱动机制。4个水库浮游植物群落结构的解析结果显示,浮游植物共有8门73属150种,种类和相对丰度均以蓝藻、绿藻和硅藻为主,其中大镜山水库(DJS)和杨寮水库(YL)蓝藻在丰、枯两季的相对丰度均超过90%,竹仙洞(ZXD)和竹银水库(ZY)的蓝藻、绿藻和硅藻在不同时期分别占优,且分布较均衡。Shanno-Wiener指数(H')、Pielous均匀度指数(J')和Margalef丰富度指数(D')说明竹银水库的浮游植物生物多样性最丰富,指示水体最优,竹仙洞水库次之,大镜山水库是4个水库中浮游植物多样性最少的水库。PCoA分析表明大镜山水库和杨寮水库浮游植物群落结构具有相似性($P > 0.05$),且该2个水库和竹仙洞水库、竹银水库均具有显著差异性($P < 0.05$)。冗余分析(RDA)结果显示,硝酸盐氮(NO_3^-)、总溶解性有机碳(TOC)、总磷(TP)、氯化物(Cl^-)和氨氮(NH_4^+-N)是影响浮游植物群落分布的主要环境因子。研究结果揭示了4个水库浮游植物群落受磨刀门水道输水带来的营养盐外源影响较大,提示应着重改善磨刀门水道水质,以达到改善和预防水库水体富营养化,确保饮用水水源安全的目的。

关键词: 磨刀门水道; 水源水库群; 浮游植物; 环境因子; 冗余分析(RDA)

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4489-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112285

Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai

ZHANG Mo-li¹, WANG En-rui¹, CHANG Sheng^{1*}, WANG Shan-jun¹, JIN De-cai², FAN Yue-ting¹, ZHANG Kun-feng^{1,3}, XIE Qiong¹, FU Qing^{1*}

(1. National 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. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Modaomen Waterway is the main outlet of the Pear River system and an important water source for Zhuhai and Macao. The water quality of 13 sampling sites in Modaomen Waterway, phytoplankton, and environmental factors were investigated at 21 sampling sites in 4 drinking water source groups, which transport water from Modaomen Waterway and connect with each other, in August and October of 2021. A total of 73 genera of phytoplankton in eight phyla were identified, with a total of 150 species, most of them belonging to *Cyanophyta*, *Chlorophyta*, and *Bacillariophyta*. The relative abundance of *Cyanophyta* was higher than 90% in the DJS and YL reservoirs during flood and dry seasons; *Cyanophyta*, *Chlorophyta*, and *Bacillariophyta* were dominant phyla during different seasons; and their distribution was balanced in the ZXD and ZY reservoirs. The Shannon-Wiener index, Pielous uniformity index, and Margalef richness index showed that the ZY reservoir had the most abundant biodiversity, which indicated the best water quality, followed by the ZXD and YL reservoirs. Conversely, the DJS was the least diverse reservoir for phytoplankton. The PCoA analysis indicated significant differences in plankton structures in ZXD and ZY with the other two reservoirs ($P < 0.05$), respectively. Redundancy analysis (RDA) showed that the main environmental factors affecting the distribution of the phytoplankton community were NO_3^- , TOC, TP, Cl^- , and NH_4^+-N . These results indicated that the phytoplankton community of the four reservoirs were greatly affected by the nutrient salt caused by water transport, which suggested that the water quality of Modaomen Waterway should be improved to increase reservoir water nutrition to ensure the safety of drinking water sources.

Key words: Modaomen Waterway; drinking water reservoirs; phytoplankton; environmental factors; redundancy analysis (RDA)

浮游植物是水环境中的初级生产者和食物链的基础,它们分布广泛,在生态系统的能量流动和物质循环中发挥着重要作用^[1]。浮游植物群落与河流和湖泊的水环境因子之间会互相影响,由于浮游植物体积小、结构简单及对生境变化敏感,因此其群落结构的变化可以在一定程度上反映环境因素的变化^[2,3],对

环境条件的变化具有指示作用,同时环境条件的改变

收稿日期: 2021-12-28; 修订日期: 2022-02-08

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

作者简介: 张茉莉(1988~),女,高级工程师,主要研究方向为湖水水华风险防控, E-mail: wickerfly@126.com

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

也直接或间接地影响到浮游植物的群落结构^[4]。

有研究表明,水温、光照、营养盐和高锰酸盐指数是水体中浮游藻类的主要影响因子^[5-8],如郑丙辉等^[7]的研究发现氮磷营养盐是大宁河水华敏感期的浮游植物的主要影响因子,马沛明等^[8]的研究发现水力停留时间和温度对浙江汤浦水库的藻类间演变和水华暴发起到主导作用。然而,已有研究主要集中在单个湖泊或河道^[7,8],对于多个水库群,尤其是河道输水、库间调水的连通型水库群之间浮游植物群落结构和环境驱动因子的研究却鲜见报道。由于水库受河水输入影响,容易导入大量的营养盐,同时也因输水引发水库水动力的改变^[9],库区生境稳定性被打破,造成底层藻类上浮。谢飞^[10]曾对珠海市 18 座中营养水平以上的水库进行富营养化和浮游植物群落特征的研究,对比调水型和非调水型

水库的营养状态水平,结果表明调水型水库的富营养化水平显著高于非调水型水库,说明持续调水对水库的富营养化状态有直接影响。因此,研究连通型调水水库群的浮游植物群落结构和环境因子的相关性、探究输水河道营养盐对水库浮游植物群落结构的影响具有重要意义。

珠海市位于珠江口西岸,濒临南海,地处北纬 21°48′~22°27′、东经 113°03′~114°19′之间,珠海市各水库通过管网、泵站与河流相连,形成了有特色的江库连通的调水水库系统^[11],而在咸潮时期,由于靠近出海口,近旁水道无法取水时,自来水厂会在水库直接取水,且水库为规避咸潮提前蓄水,决定了珠海的供水系统为多取水点和多水库连调的水源特点(图 1)^[12],形成了江河输水、江库连通和库库连通的独特布局。

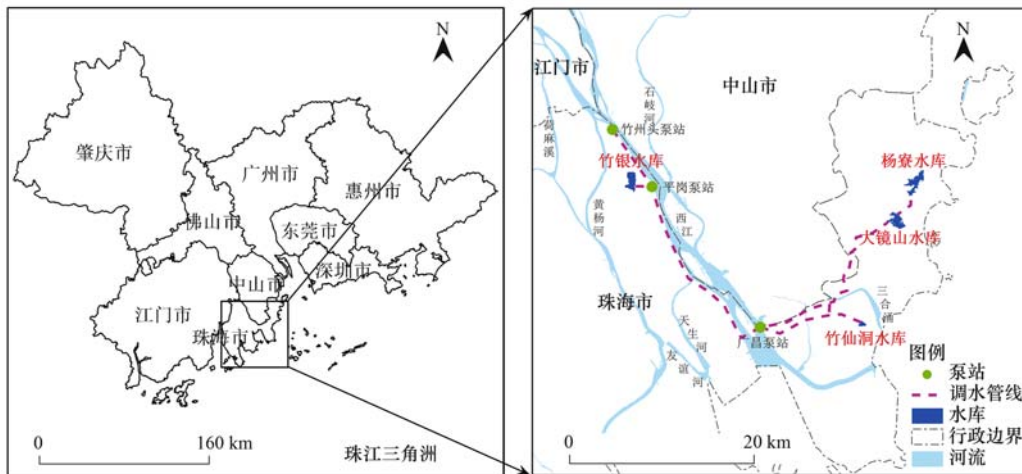


图 1 输水路径示意

Fig. 1 Water diversion route

珠海市饮用水源也是澳门的主要供水水源,其水质保障和饮水安全直接关乎粤港澳大湾区的社会稳定。本文选择珠海市 4 座连通型水库(大镜山水库、杨寮水库、竹仙洞水库和竹银水库)和输水河道磨刀门水道作为研究对象,其中磨刀门水道是珠海及澳门的重要水源地,枯水期咸潮入侵有威胁当地供水安全的风险^[13],4 座水库为珠海市的骨干水源水库群,主要承担储蓄河水和调配供水的任务,虽然通过水量调度加大枯水期西江下游来水量,对于抑制磨刀门水道的咸潮上溯效果显著^[14,15],但另一方面将河流的营养物质引入水库,增加了水库富营养化的风险^[16]。本研究分析了丰、枯两季的浮游植物分布特征和水环境质量,探讨了浮游植物群落特征和环境驱动因子的关系,以期对珠海市在水源水质安全保障和水环境管理提供基础资料和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

珠海市在用的集中式饮用水水源地中,大镜山水库(DJS)、杨寮水库(YL)、竹仙洞水库(ZXD)和竹银水库(ZY)属于从磨刀门水道取水的中部城区供水系统,且相互连通、库间调水(图 1)。其调水方式为:丰水期(4~9 月)抽取西江磨刀门水道原水进入大镜山、竹仙洞和竹银水库,杨寮水库水源由大镜山水库经正坑、坑尾两个小型水库调入。枯水期(10 月~次年 3 月,调水主要集中于 10~12 月)通过从磨刀门水道抢淡,输往最近的竹银水库,再经竹银水库调水至竹仙洞和大镜山水库。4 个水库的基本情况见表 1。

由表 1 可见,4 个水库集雨面积小、水库自产水远远无法满足供水需求。水库水力停留时间较短,

属于不稳定湖泊,或介于湖泊与河流之间、或类似于河流,库内生境并不稳定.

采样时间为 2021 年 8 月和 10 月,共布设 24 个采样点(图 2),在大镜山水库设置 5 个采样点(DJS1 ~ DJS5),杨寮水库设置 9 个采样点(YL1 ~ YL9),

竹仙洞水库设置 3 个采样点(ZXD1 ~ ZXD3),竹银水库设置 4 个采样点(ZY1 ~ ZY4). 各采样点充分覆盖 4 个水库水体,代表性强,并覆盖了地方监测部门选定的日常监测点位,其中 DJS1、YL1、ZXD1 和 ZY1 分别为饮用水水源取水口.

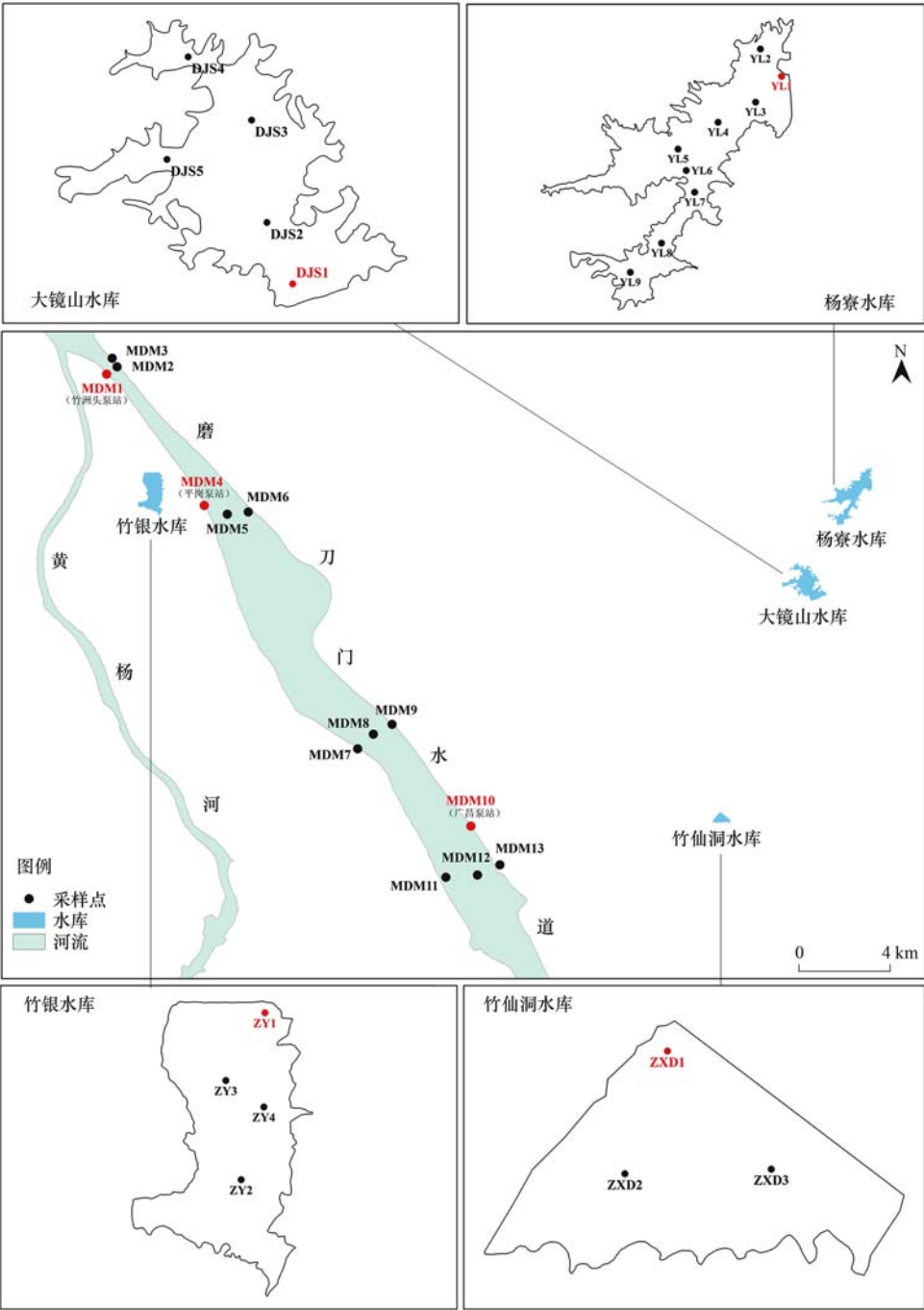


图 2 采样点分布示意

Fig. 2 Distributions of sampling sites

1.2 样品采集与处理

环境因子共 12 项,包括水温(WT)、酸碱度(pH)、透明度(SD)、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数、氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸盐(NO₃⁻)、总磷(TP)、总氮(TN)、叶绿素 a(Chl-a)、氯化物(Cl⁻)和总有机

碳(TOC). 样品分析方法参照文献[17].

浮游植物定性样品使用 25 号(64 μm)浮游生物网在水面成“∞”状巡回拖动 3 ~ 5 次,然后打开浮游生物网的旋塞,让网内浓缩水样流入 50 mL 圆形广口瓶中,用 1% ~ 1.5% 样品体积的鲁哥氏液摇

匀固定. 使用光学显微镜鉴定拍照, 鉴定方法参考文献[18]. 定量样品使用采水器与水深 0.5 m 处采集

1 L 水样, 加入 10 mL 鲁哥氏液摇匀固定, 带回实验室静置 48 h 后浓缩至 50 mL, 然后镜检计数.

表 1 各水库基本情况¹⁾

Table 1 Basic information of reservoirs

水库	水库类型	集雨面积/km ²	库容/万 m ³	水力停留时间/d	水体类型
DJS	中型	5.96	1 160	326.8	营养型
YL	中型	9.13	1 510	111.6	过渡型
ZXD	小型	2.81	281	6.8	过流型
ZY	中型	2.99	4 018	93.9	过渡型

1) 水体类型划分方法: 水力停留时间 < 20 d, 属过流型(类似河流); 20 d ≤ 水力停留时间 ≤ 300 d, 属过渡型(介于河流与湖泊之间); 水力停留时间 > 300 d, 属营养型(类似湖泊)^[12]

1.3 数据处理

本文应用 Origin 2018 和 Excel 2016 软件对数据进行统计、作图和分析; 使用 ArcGIS 软件对水库采样点分布进行绘制. 采用 Canoco5.0 软件对物种数据和除 WT、pH、DO 和 SD 之外的环境数据进行 lg(*x* + 1) 标准化处理, 去趋势分析(DCA) 得出浮游植物丰、枯两季的第一轴长分别为 1.6 与 1.4, 长度梯度均小于 4, 因此都选用冗余分析(redundancy analysis, RDA) 分析^[19,20]. 单因素方差分析(ANOVA) 和非参数检验分析采用 SPSS26.0 完成. 主坐标分析(PCoA) 和相似性分析(ANOSIM) 用 R 语言.

浮游植物群落特征指标采用 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 物种丰富度指数、Pielou 均匀度指数、优势度、生物丰度和种类数比例进行分析^[21]. RDA 分析中物种数据经过筛选, 本文用于排序的物种均为 4 个水库的优势种. 各指数的计算公式如下.

Shannon-Wiener 多样性指数(*H'*):

$$H' = - \sum (n_i/N) \cdot \ln(n_i/N) \quad (1)$$

Margalef 物种丰富度指数(*D*):

$$D = (S - 1) \ln N \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数(*J*):

$$J = H' / \ln S \quad (3)$$

优势度(*Y*):

$$Y = (n_i/N) \cdot f_i \quad (4)$$

式中, *n_i* 为第 *i* 个物种的个体总数, *N* 为样品的总个体数, *S* 为样品的种类总数, *f_i* 为样本个体的出现率, *Y* > 0.02 的物种认定为优势种.

2 结果与分析

2.1 环境因子

4 个水库各采样点的环境因子及相关性分析如表 2 和表 3 所示. 监测结果显示, 两季各水库的温度变化不大, 在 28.215 ~ 32.267℃ 之间, pH 值总体为

中性偏碱, 在 7.239 ~ 8.831 之间, 溶解氧均达到 II 类水标准, 根据 TLI 分级标准, 这 4 个水库处于中营养状态. 高锰酸盐指数、TP、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻、Cl⁻ 和 TOC 数据均满足正态分布, 对各指标做 *T* 检验齐性分析, 方差显示齐的指标进行 ANOVA 分析, 方差不齐的指标进行非参数检验分析.

丰水期, 大镜山水库与磨刀门水道的 NH₄⁺-N 浓度水平相当, 竹仙洞水库与磨刀门水道的 TN、NH₄⁺-N 和 TOC 浓度水平相当, 杨寮、竹银水库和磨刀门水道的 NH₄⁺-N 和高锰酸盐指数较为接近, 而各水库与磨刀门水道的 TP、NO₃⁻ 和 Cl⁻ 浓度均表现出显著差异(*P* < 0.05 或 *P* < 0.01); 各水库间除了杨寮和竹银水库的环境因子较为接近, 其他水库 NO₃⁻ 浓度表现出极为显著的差异(*P* < 0.01).

枯水期, 大镜山水库与磨刀门水道的 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻ 和 TOC 浓度较为接近, 杨寮水库和磨刀门水道的高锰酸盐指数较为接近, 竹仙洞水库和磨刀门水道的高锰酸盐指数和 NO₃⁻ 浓度较为接近, 竹银水库和磨刀门水道除 Cl⁻ 之外的其余主要环境因子浓度均较为接近, 而各水库和磨刀门水道的 Cl⁻ 浓度均表现出显著差异(*P* < 0.05 或 *P* < 0.01), 且磨刀门水道的 Cl⁻ 浓度远高于 4 个水库; 各水库之间除了竹仙洞和竹银水库的环境因子较为接近, 其他水库相互之间的 TN、NH₄⁺-N 和 TOC 浓度均表现出显著差异(*P* < 0.05 或 *P* < 0.01).

总体来看, 在丰水期, 经过水库一段时间的滞留, 各水库库内水环境状况逐渐趋于稳定, 不仅表现出与原水较为明显的差异, 也呈现出一定的库间差异, 其中杨寮水库尤为明显, 虽然其来水源自大镜山水库输水, 但由于途经 2 座其他水库, 且水力停留时间不同, 杨寮水库和大镜山水库的环境因子依然差异较大. 在枯水期, 磨刀门水道主要向竹银水库输水, 竹银水库向其他水库输水, 因此, 竹银水库的环境因子和磨刀门水道最为接近; 因咸潮上溯, 磨刀门水道枯水期 Cl⁻ 浓度剧增, 但 4 个水库的 Cl⁻ 浓度

表 2 各水库和磨刀门水道的水体理化因子均值¹⁾

Table 2 Mean value of water physical and chemical parameters in reservoirs and Modaomen waterway

时期	项目	WT	pH	DO	高锰酸盐指数	TP	TN
丰水期	DJS	30.400 ± 0.445	8.831 ± 0.164	5.857 ± 0.429	2.440 ± 0.083	0.028 ± 0.002	0.794 ± 0.023
	YL	30.581 ± 0.372	8.004 ± 0.093	5.289 ± 0.191	1.600 ± 0.061	0.022 ± 0.001	1.351 ± 0.476
	ZXD	31.333 ± 0.387	8.703 ± 0.085	7.648 ± 0.358	2.167 ± 0.119	0.050 ± 0.000	1.700 ± 0.012
	ZY	32.267 ± 0.109	8.570 ± 0.011	7.668 ± 0.152	1.500 ± 0.106	0.028 ± 0.002	0.658 ± 0.038
	MDM	30.862 ± 0.203	7.878 ± 0.093	6.647 ± 0.103	1.631 ± 0.130	0.104 ± 0.015	2.288 ± 0.111
枯水期	DJS	28.215 ± 0.181	7.404 ± 0.403	7.591 ± 0.335	2.225 ± 0.059	0.050 ± 0.000	1.323 ± 0.084
	YL	28.811 ± 0.119	7.239 ± 0.184	7.063 ± 0.169	1.488 ± 0.090	0.028 ± 0.002	0.915 ± 0.051
	ZXD	29.144 ± 0.211	7.693 ± 0.024	7.150 ± 0.099	1.300 ± 0.047	0.033 ± 0.003	1.537 ± 0.010
	ZY	29.568 ± 0.248	7.613 ± 0.006	6.883 ± 0.031	1.425 ± 0.041	0.075 ± 0.013	1.590 ± 0.027
	MDM	29.308 ± 0.126	7.795 ± 0.087	7.174 ± 0.188	1.746 ± 0.236	0.075 ± 0.001	1.820 ± 0.020
时期	项目	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻	Chl-a	Cl ⁻	TOC	TLI
丰水期	DJS	0.319 ± 0.013	0.392 ± 0.009	26.620 ± 4.817	6.906 ± 0.086	3.000 ± 0.049	47.701
	YL	0.203 ± 0.055	0.515 ± 0.019	8.478 ± 0.871	8.550 ± 2.493	2.378 ± 0.162	40.122
	ZXD	0.278 ± 0.003	1.327 ± 0.018	22.833 ± 0.930	18.833 ± 0.354	1.600 ± 0.047	47.963
	ZY	0.074 ± 0.008	0.502 ± 0.005	4.398 ± 0.134	5.345 ± 0.065	1.175 ± 0.143	37.931
	MDM	0.308 ± 0.123	1.752 ± 0.058	17.940 ± 9.659	21.195 ± 7.091	1.890 ± 0.155	—
枯水期	DJS	0.387 ± 0.011	0.349 ± 0.004	47.450 ± 0.388	15.225 ± 0.397	4.040 ± 0.078	53.182
	YL	0.284 ± 0.013	0.331 ± 0.035	18.700 ± 1.796	6.568 ± 0.577	2.600 ± 0.108	43.248
	ZXD	0.054 ± 0.005	1.353 ± 0.024	7.723 ± 0.962	18.700 ± 0.478	1.467 ± 0.072	41.752
	ZY	0.062 ± 0.000	1.418 ± 0.015	5.818 ± 0.346	8.863 ± 0.034	1.600 ± 0.035	45.289
	MDM	0.203 ± 0.031	1.402 ± 0.061	7.740 ± 2.300	439.023 ± 159.977	1.770 ± 0.068	—

1) WT 单位为℃, pH 和 TLI 无量纲,其余单位为mg·L⁻¹

表 3 各水库和磨刀门水道重点环境因子差异性¹⁾

Table 3 Differences in mainly environmental factors in reservoirs and Modaomen Waterway

时期	项目	高锰酸盐指数	TP	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	TOC
丰水期	DJS × YL	**	**	—	—	**	—	*
	DJS × ZXD	—	—	—	—	**	*	**
	DJS × ZY	**	**	—	*	*	—	**
	YL × ZXD	*	*	—	—	**	*	*
	YL × ZY	—	—	—	—	—	—	**
	ZXD × ZY	*	*	—	*	**	*	—
	DJS × MDM	**	**	*	—	**	**	**
	YL × MDM	—	**	*	—	**	**	*
	ZXD × MDM	*	*	—	—	*	*	—
	ZY × MDM	—	*	*	—	**	**	*
枯水期	DJS × YL	**	**	*	*	—	**	**
	DJS × ZXD	**	—	*	**	**	*	*
	DJS × ZY	**	*	*	**	**	**	**
	YL × ZXD	—	—	**	**	**	**	*
	YL × ZY	—	**	**	**	**	*	*
	ZXD × ZY	—	*	—	—	—	**	—
	DJS × MDM	**	**	—	—	—	**	—
	YL × MDM	—	**	**	*	**	**	**
	ZXD × MDM	—	**	*	**	—	**	**
	ZY × MDM	—	—	—	—	—	**	—

1) * 表示 P < 0.05, ** 表示 P < 0.01, “—” 表示 P > 0.0

却与磨刀门水道表现出显著差异,且与丰水期浓度相差不大,分析认为,这是由于水库库内自身具有水环境调节功能,另一方面,磨刀门水道高咸水集中在下游地区,而枯水期以抢淡为主,水库水质主要受上游平岗泵站调水影响。

2.2 浮游植物群落结构

2.2.1 浮游植物组成

丰、枯两季4个水库共检测出8门73属150种浮游植物,绿藻、硅藻、蓝藻和甲藻这4个门类占比重较大.其中丰水期检测出8门62属118种,绿藻

门的种类最为丰富,为 59 种,占总藻种数的 50.0%,其次是蓝藻门 18 种和硅藻门 17 种,分别占 15.2% 和 14.4%; 枯水期检测出 8 门 61 属 104 种,绿藻门 61 种,占总藻种数的 58.6%,其次为硅藻门 16 种和

蓝藻门 14 种,分别占 15.3% 和 13.4%.

对比丰枯两季浮游植物的种类数占比(图 3),可以发现 4 个水库的浮游植物种类占比趋于相似,主要以绿藻和蓝藻为主.

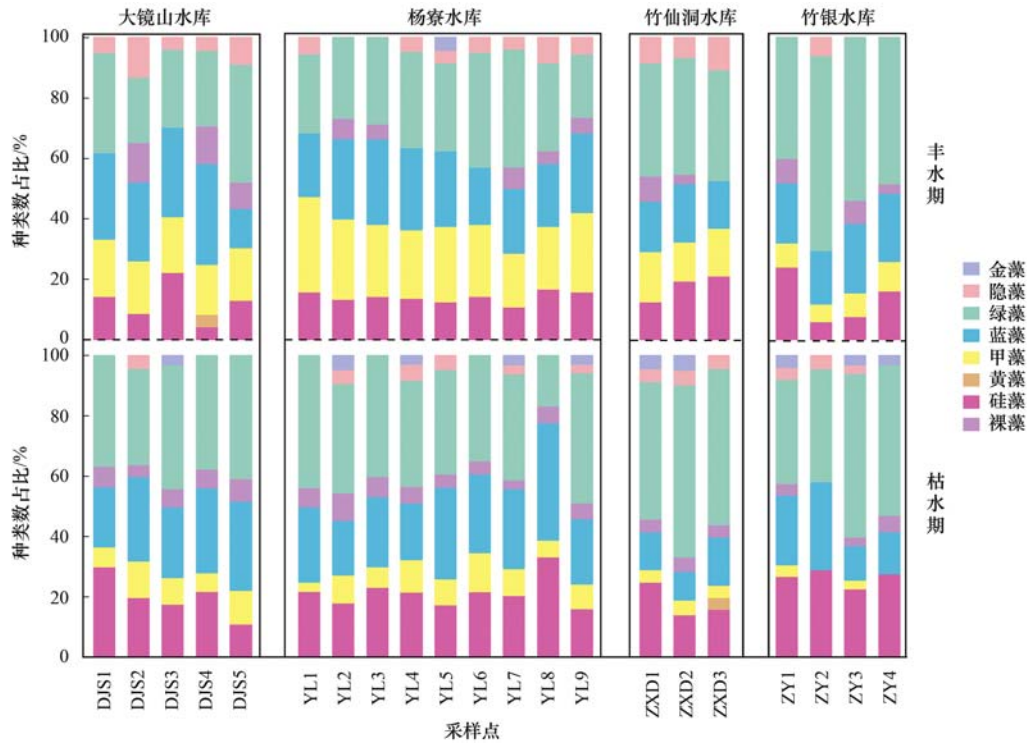


图 3 各水库浮游植物种类数占比

Fig. 3 Composition of phytoplankton species in reservoirs

2.2.2 浮游植物丰度和空间分布

丰水期,大镜山和杨寮水库的浮游植物丰度占比极为相似,蓝藻门均占绝对优势,竹仙洞以蓝藻门为主,其次为隐藻门,竹银水库以绿藻门主,其次为蓝藻门和硅藻门; 枯水期,大镜山水库以蓝藻门为主,杨寮水库以蓝藻门为主,硅藻门和绿藻门次之,竹仙洞水库以绿藻门为主,其次为硅藻门和黄藻门,竹银水库以绿藻门为主,其次为硅藻门(图 4).

从浮游植物细胞丰度的空间分布来看(图 5),4 个水库浮游植物细胞丰度出现显著差异,大镜山和杨寮水库的浮游植物细胞密度显著高于竹仙洞和竹银水库,可见换水更为频繁的竹仙洞和竹银水库,水体中浮游植物各种类丰度占比更均衡,且因水力扰动大,浮游植物细胞丰度也偏低.

2.2.3 浮游植物优势种

4 个水库浮游植物优势种共 6 门 22 种,主要为蓝藻门、绿藻门、硅藻门和隐藻门. 其中大镜山和杨寮水库较为相似,共有优势种为蓝藻门拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis* sp.),其优势度为 0.89 ~ 0.96,此外大镜山水库的特有优势种为蓝藻门尖头藻(*Raphidiopsis* sp.). 竹仙洞和竹银水库较为相似,优势种多为蓝藻门、绿藻门和硅藻门,另外隐藻门、

甲藻门和金藻门也为占优门类,竹仙洞水库蓝藻门伪鱼腥藻(*Pseudoanabaena* sp.) 优势度最大,为 0.84,竹银水库优势度最大的是硅藻门的小环藻(*Cyclotella* sp.),为 0.39. 由表 4 中可见,竹仙洞和竹银水库的优势种分布较大镜山和杨寮水库更为丰富.

2.2.4 浮游植物多样性分析

为探究 4 个水库的库内浮游植物多样性,使用 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数对 4 个水库丰、枯两季进行 α 多样性分析(图 6). 结果显示,丰水期,从多样性和均匀度指标表征上来看,大镜山和杨寮水库都处于重污染型,竹仙洞水库为重污染向 α -中污染过渡型,或重污染向 α -中污染、 β -中污染过渡型,而竹银水库则处于 β -中污染或无污染的清洁水体状态,从丰富度指数看,所有水库均处于 α -中污染水体,可见丰水期水质最好的是竹银水库,基本为中污染或无污染,其次为竹仙洞水库,基本处于中污染状态,而大镜山和杨寮水库水质差于竹仙洞和竹银水库,处于重污染或中污染状态. 枯水期,从多样性和均匀度指标表征上来看,大镜山处于重污染型,杨寮水库处于重污染向中污染过渡型,竹仙洞和竹银水库为

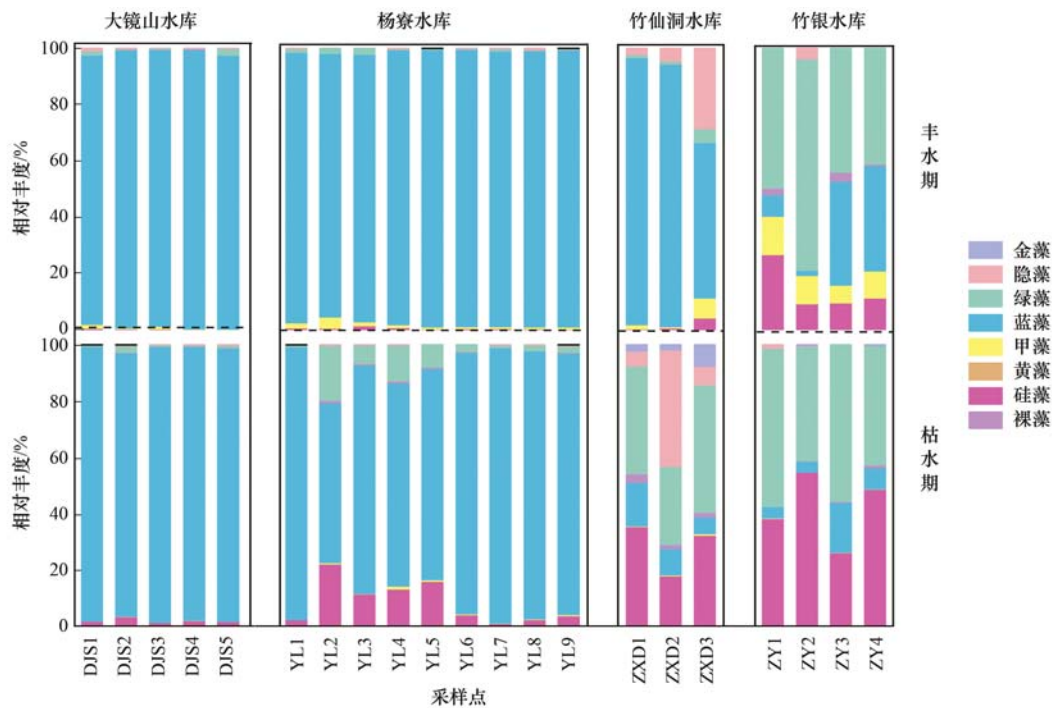


图 4 水库浮游植物相对丰度
Fig. 4 Relative abundance of plankton in reservoirs

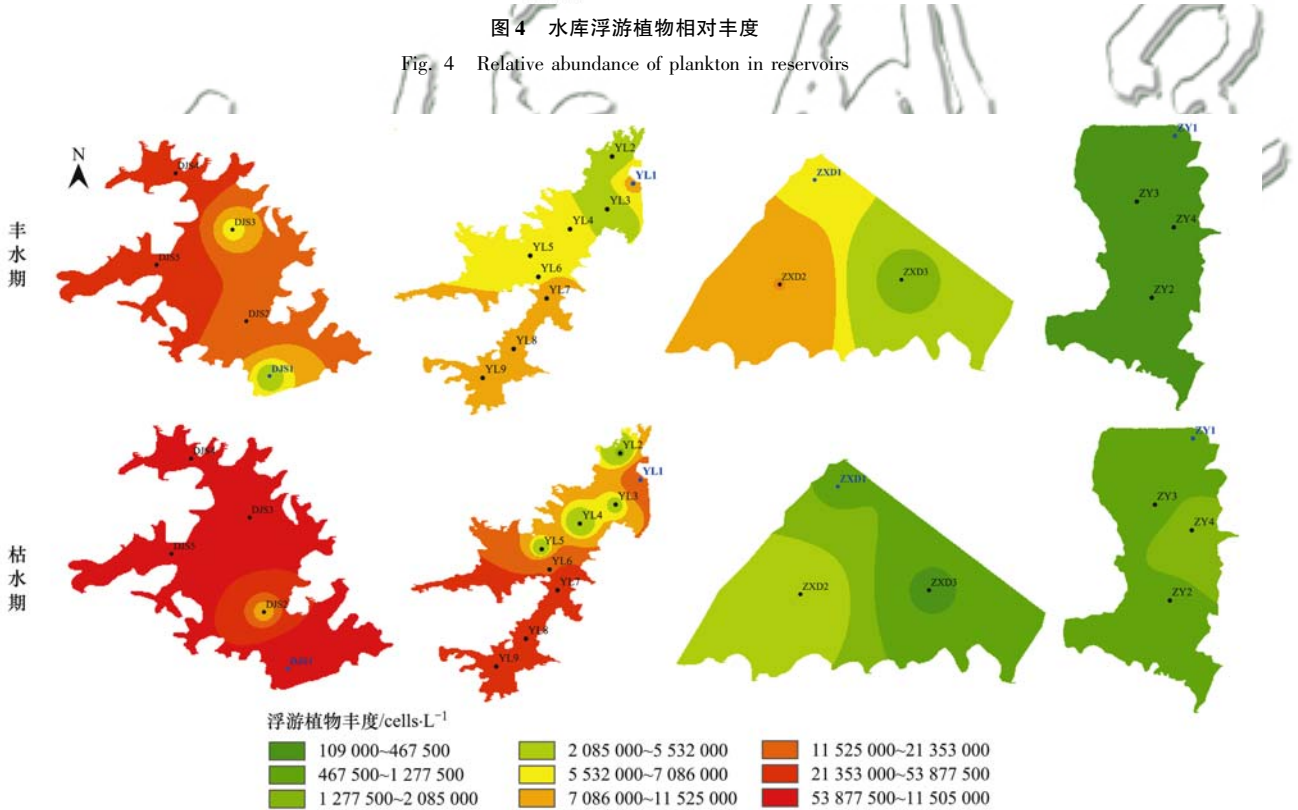


图 5 水库浮游植物丰度空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of phytoplankton abundance in reservoirs

β -中污染向清洁水体过渡型,从丰富度指数看,除了竹仙洞为重污染型,其他 3 个水库均为中污染型. 简言之,竹银水库的浮游植物多样性最丰富,指示水体最优,竹仙洞水库次之,杨寮水库再次之,而 4 个水库中大镜山水库浮游植物多样性最差.

为了解 4 个水库浮游植物群落结构的库间差异,PCoA 分析(图 7)结果显示第一主成分(PCoA1)

和第二主成分(PCoA2)的差异解释率在丰、枯两季分别为 41.79%、21.72% 和 47.01%、19.72%,前两轴在丰枯两季可以分别解释 4 个水库所有差异的 63.51% 和 66.73%,说明 PCoA 能够较好地反映 4 个水库浮游植物群落的 β 多样性. 从降维后的样方分布可见,大镜山和杨寮水库在丰、枯两季均有部分点位距离较近,且都分别与竹仙洞和竹银水库距

离较远,竹仙洞和竹银水库两者之间在丰、枯两季 距离都比较远.

表 4 不同水库浮游植物优势种及优势度¹⁾

Table 4 Dominant species and dominance index of plankton in different lakes			DJS		YL		ZXD		ZY	
门	编码	优势种	A	B	A	B	A	B	A	B
蓝藻门	z1	拟柱孢藻(<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>)	0.95	0.95	0.96	0.89	—	0.07	0.02	—
	z2	尖头藻(<i>Raphidiopsis</i> sp.)	0.02	—	—	—	0.08	—	—	—
	z3	伪鱼腥藻(<i>Pseudoanabaena</i> sp.)	—	—	—	—	0.84	—	0.03	—
	z4	鱼腥藻(<i>Anabaena</i> sp.)	—	—	—	—	—	—	0.06	—
	z5	二分双色藻(<i>Cyanobium distomicola</i>)	—	—	—	—	—	—	0.05	—
	z6	微囊藻(<i>Microcystis</i> sp.)	—	—	—	—	—	—	—	0.05
绿藻门	z7	空星藻(<i>Coelastrum</i> sp.)	—	—	—	—	—	0.02	—	0.15
	z8	衣藻(<i>Chlamydomonas</i> sp.)	—	—	—	—	—	0.06	—	0.04
	z9	十字藻(<i>Crucigenia</i> sp.)	—	—	—	—	—	0.02	0.09	0.03
	z10	小球藻(<i>Chlorella vulgaris</i>)	—	—	—	—	—	0.05	—	—
	z11	栅藻(<i>Scenedesmus</i> sp.)	—	—	—	—	—	0.06	—	0.03
	z12	鼓藻(<i>Cosmarium</i> sp.)	—	—	—	—	—	—	0.03	—
	z13	卵囊藻(<i>Oocystis</i> sp.)	—	—	—	—	—	—	0.02	—
	z14	四角藻(<i>Tetraedron</i> sp.)	—	—	—	—	—	—	0.03	—
	z15	空球藻(<i>Eudorina elegans</i>)	—	—	—	—	—	—	—	0.11
	z16	直链藻(<i>Melosira</i> sp.)	—	—	—	—	—	0.06	—	0.02
硅藻门	z17	小环藻(<i>Cyclotella</i> sp.)	—	—	—	0.02	—	0.14	0.11	0.39
	z18	针杆藻(<i>Synedra</i> sp.)	—	—	—	—	—	0.03	—	—
隐藻门	z19	隐藻(<i>Cryptomonas</i> sp.)	—	—	—	—	0.05	0.13	0.07	—
	z20	蓝隐藻(<i>Chroomonas</i> sp.)	—	—	—	—	—	0.05	—	—
甲藻门	z21	多甲藻(<i>Peridinium</i> sp.)	—	—	—	—	—	—	0.09	—
金藻门	z22	金杯藻(<i>Kephyrion pascheri</i>)	—	—	—	—	—	0.02	—	—

1) A 表示丰水期, B 表示枯水期; “—” 表示非优势种

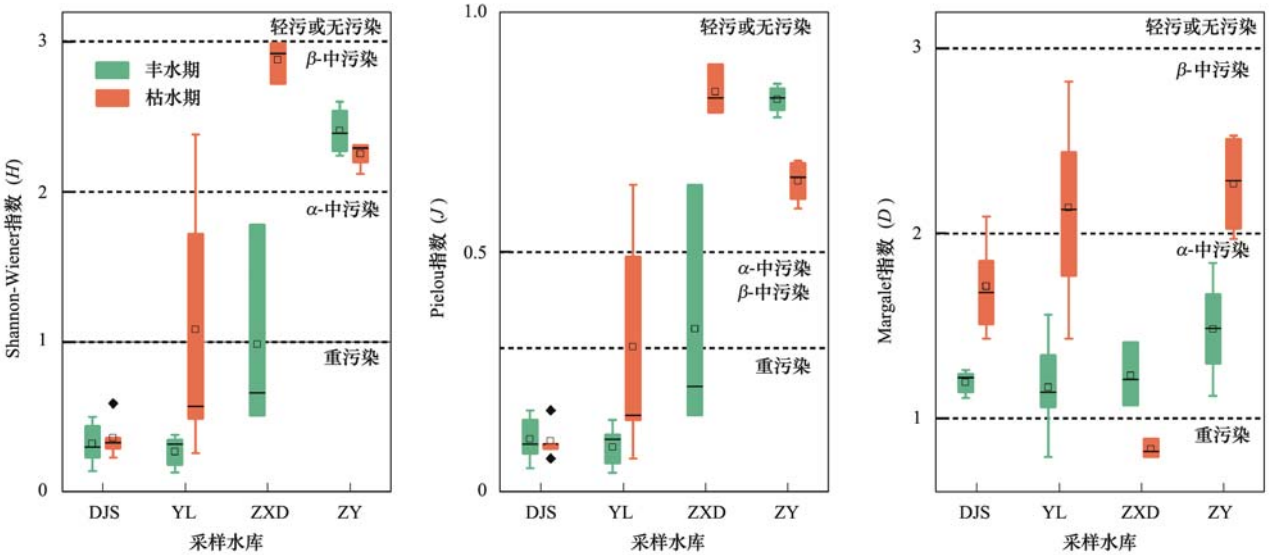


图 6 各水库浮游植物生物多样性指数

Fig. 6 Biodiversity index of phytoplankton in reservoirs

为进一步验证水库间浮游植物群落的差异显著性,对各水库浮游植物物种数据采用基于 Bray-Curtis 距离的 ANOSIM 分析方法. 结果表明,无论丰、枯两季,大镜山和杨寮水库的差异性均不显著 ($P>0.05$),而大镜山和杨寮水库分别与竹仙洞和竹银水库两两之间存在显著差异 ($P<0.05$). 这说明大镜山和杨寮水库之间的调水使库内浮游植物群

落结构趋于接近,而竹仙洞和竹银水库则呈现出各自不同的浮游植物群落特征(表 5).

2.3 浮游植物与环境因子间的关系

分别对 4 个水库丰枯两季的浮游植物优势种和环境因子进行 RDA 分析,结果如图 8 所示. 丰水期,第一轴与第二轴分别能解释 29.22% 和 19.55% 的浮游植物群落差异,大镜山和杨寮水库样方聚集于

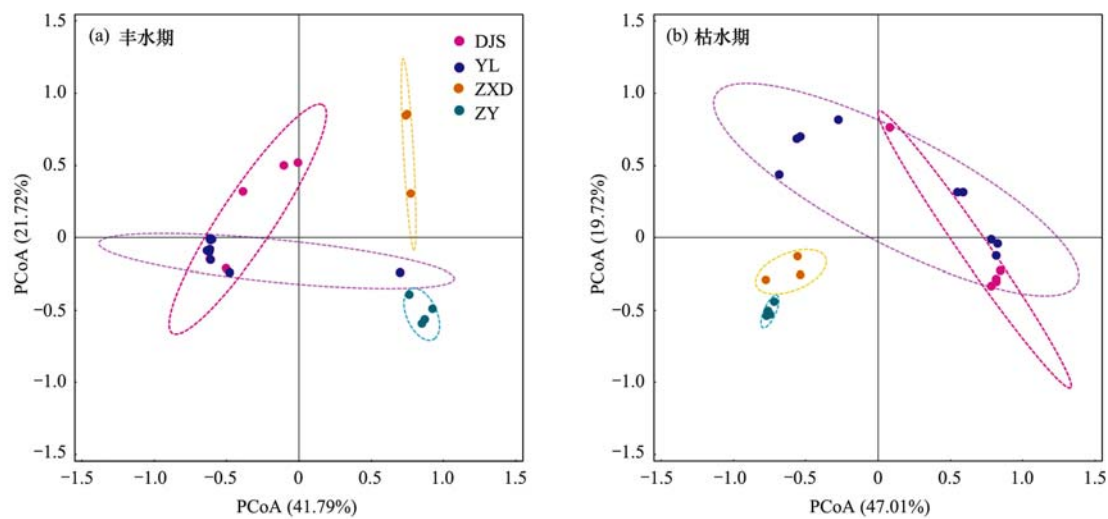
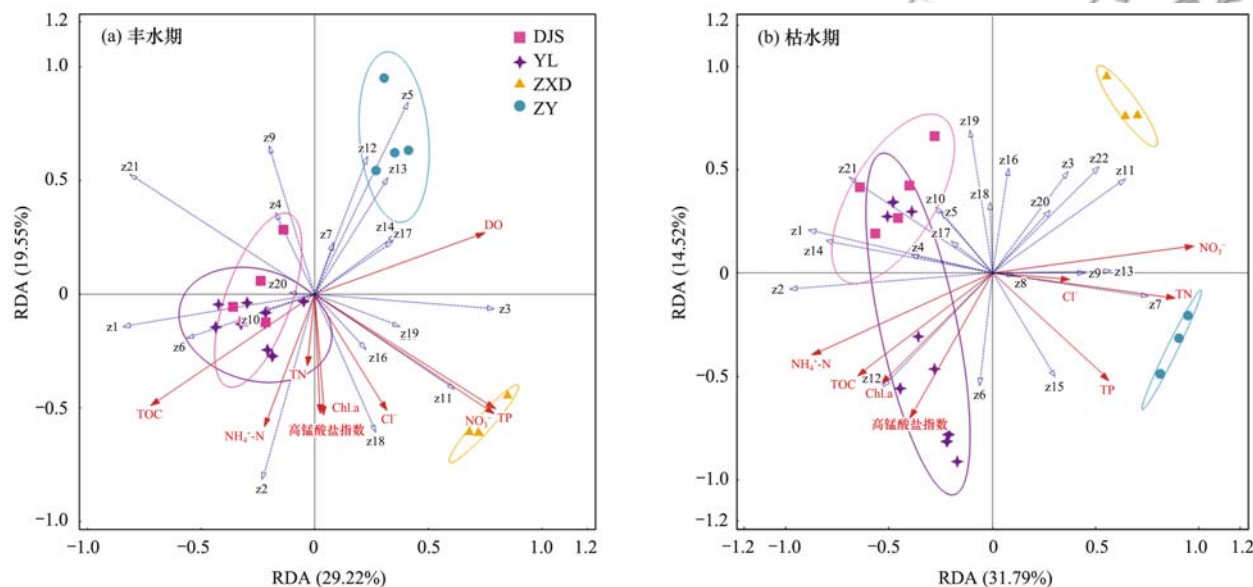


图 7 水库浮游植物群落 PCoA 分析
Fig. 7 PCoA of phytoplankton in reservoirs



蓝色箭头表示物种,编码 z1 ~ z22 对应的物种名见表 4; 红色箭头表示环境因子; 点状图形表示不同水库的样方分布

图 8 浮游植物群落与环境因子的 RDA 分析

Fig. 8 RDA plot of plankton community and environmental factors

表 5 浮游植物群落 Bray-Curtis 距离的 ANOSIM 检验

Table 5 ANOSIM test of phytoplankton community
based on Bray-Curtis distance

项目	丰水期		枯水期	
	R	P	R	P
DJS × YL	0.268	0.052	0.225	0.053
DJS × ZXD	1	0.015	1	0.019
DJS × ZY	1	0.011	1	0.008
YL × ZXD	0.938	0.006	0.595	0.009
YL × ZY	0.927	0.004	0.641	0.006
ZXD × ZY	0.944	0.031	0.667	0.029

第二、三象限,与 TOC 靠近,而竹仙洞样方主要聚集于第四象限,与 NO_3^- 和 TP 靠近,竹银水库样方距离环境因子较远; 枯水期,第一轴与第二轴分别能解释 31.79% 和 14.51% 的浮游植物群落差异,竹仙

洞和大镜山水库样方分别聚集于第一、二象限,且与环境因子较远,杨寮水库样方聚集于第二、三象限,与 TOC、高锰酸盐指数、Chl-a 和 NH_4^+-N 靠近,竹银水库样方聚集于第四象限,与 NO_3^- 、TN 和 Cl^- 靠近。

通过蒙特卡洛置换检验(表 6),可以看出丰水期 NO_3^- 、TOC 和 TP 与浮游植物群落特征具有显著相关性($P < 0.05$),且在第一序轴 NO_3^- 和 TP 呈正相关,TOC 呈负相关,在第二序轴所有环境因子都呈负相关; 枯水期 NO_3^- 、高锰酸盐指数、 Cl^- 和 NH_4^+-N 与浮游植物群落特征具有显著相关性($P < 0.05$),且在第一序轴 NO_3^- 和 Cl^- 呈正相关,高锰酸盐指数和 NH_4^+-N 呈负相关,在第二序轴除 NO_3^- 呈

正相关外,其余环境因子都呈负相关.

表 6 各环境因子与浮游植物群落的相关性¹⁾

Table 6 Correlations of each environmental factor and phytoplankton communities

环境因子	丰水期		枯水期	
	Pseudo-F	P	Pseudo-F	P
NO ₃ ⁻	5.1	0.002 **	7.9	0.002 **
TOC	4.9	0.002 **	2.9	0.008 **
TP	2.2	0.006 **	1.5	0.128
Cl ⁻	1.1	0.442	2	0.028 *
NH ₄ ⁺ -N	1.2	0.244	1.8	0.038 *
高锰酸盐指数	0.8	0.602	0.7	0.77
TN	0.7	0.74	0.6	0.794
Chl-a	0.3	0.972	0.5	0.902

1) * 表示 $P < 0.05$, 有显著相关性, ** 表示 $P < 0.01$, 有极其显著的相关性

3 讨论

3.1 河库和库间调水特征对浮游植物群落结构的影响

有研究表明,对于亚热带地区来说,水动力学特征是影响浮游植物群落结构的重要因素^[22]. 本文分析显示,大镜山和杨寮水库浮游植物均以蓝藻为主,而竹仙洞和竹银水库表现为蓝藻、绿藻和硅藻共同占优的特征,这与已有研究对珠三角西江水系浮游生物调查结果类似^[10,11],其水力停留时间的差异性为主要原因. 水力停留时间是集中反映水体动力学变化过程的重要指标,也是反映平流损失率的重要参数^[23],一般认为只有当水力停留时间超过 14 d 时^[24],平流损失率低于浮游植物生长率,才有利于浮游植物的逐渐积累. 水力停留时间也是影响蓝藻生长的关键因素之一^[25,26],这是因为调水水库中,水体稳定性往往受到水力扰动较大,尤其是具有漂浮机制的蓝藻,调水带来的扰动对分布在水体中层的绿藻和硅藻影响较小. 水力停留时间长则意味着水库具有相对稳定的环境,大镜山水库为营养型水库(326.8 d),换水周期较长加之珠海终年水温较高,有利于蓝藻的稳定生长,而蓝藻门在大量增长时会分泌他感物质^[27,28],改变周围 pH 及浊度,进而抑制其他藻类的生长^[29]. 黄洪波^[30]指出水力停留时间是影响大镜山水库浮游植物生物丰度的关键因子,本文的研究结果也证实了这点. 杨寮水库为过渡型水库(111.6 d),竹仙洞水库为过流型水库(6.8 d),邹红菊^[11]发现水力停留时间长的杨寮水库蓝藻优势极高,而水力停留时间短的竹仙洞水库则为蓝藻、绿藻和硅藻共同占优,与本研究的结果一致,这主要是因为竹仙洞水库水力停留时间仅有不到 7 d,水体一般不分层,水体混合性好,不利于在稳定分层水体中占优势的蓝藻生存^[31,32]. 竹银水库属于过渡

型水库(93.9 d),一般认为大于 100 d 的水力停留时间有利于水体分层,竹银水库的库内水体相对混合性较好. 郭川等^[33]对竹银水库的健康评价认为,竹银水库以蓝藻、硅藻和绿藻为优势类群,其水华警报预警为低风险. 本文的研究结果也揭示了水力停留时间较长的湖泊型水库中蓝藻多为主要优势类群,而类似于河流或介于河流与湖泊之间的水库浮游植物群落结构更加趋于多种类群共同占优.

4 个水库的浮游植物群落相似性及差异性分析表明,大镜山和杨寮水库群落特征较为相似,且分别与竹仙洞和竹银水库存在两两之间的显著差异. 这主要是因为杨寮水库的水源来自大镜山水库输水,且换水周期长,受外源输入扰动的影响不大,因此杨寮水库表现出与大镜山水库较为接近的类群特征. 大镜山水库、竹仙洞水库和竹银水库则分别从磨刀门水道输水,磨刀门水道上下游水质差别较大,加之输水路线不同,导致理化因子存在显著差异(表 3),竹仙洞和竹银水库各自换水周期较短,且在枯水期通过竹仙洞水库抢淡输水,外源输入扰动频繁,因此水流动力造成的生境异质性是水库之间浮游群落差异性的主要原因.

3.2 各水库水质生物学评价

分析各水库理化性质,以总磷作为评价因子,大镜山水库、杨寮水库和竹仙洞水库均为Ⅲ类水质,而竹银水库为Ⅲ~Ⅳ类水质;以总氮作为评价因子,大镜山水库和杨寮水库(由于有异常点,取均值评价)为Ⅲ~Ⅳ类水质,竹仙洞水库为Ⅳ~Ⅴ类水质,竹银水库为Ⅲ~Ⅴ类水质(图 9). 如以其他水质指标评价,4 个水库的水质均达到地表水水环境质量Ⅲ类或Ⅱ类水质标准. 对比水质生物学评价结果(图 6),多样性指数和均匀度指数与理化因子(除 TP 和 TN 外)指示的水质状况表现一致,这说明用多样性指数和均匀度指数表征水质更加科学.

氮磷指标表明的各水库水质状况与生物学水质评价表现出不一致的指示,这是因为一方面各水库的氮盐和磷盐超标主要由于磨刀门水道的输水(输水点分别为 MDM1、MDM4 和 MDM10),输水带来的水力扰动影响库内生境的变化,尤其是竹仙洞水库受到频繁的水力扰动,导致优势种变化较快. 另一方面营养盐对浮游植物的影响主要集中在氮磷的限制上^[34],有研究表明营养盐水平的变化会导致浮游植物群落组成的改变^[35],在一些水体中氮是影响浮游植物生长的限制因子^[36,37],在另外一些水体中磷为限制因子^[1,2],当 ρ (总磷)超过 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,蓝藻的生长很大程度上受物理因子的影响,蓝藻的生长速度更易受水体稳定性影响^[38],所有水库的

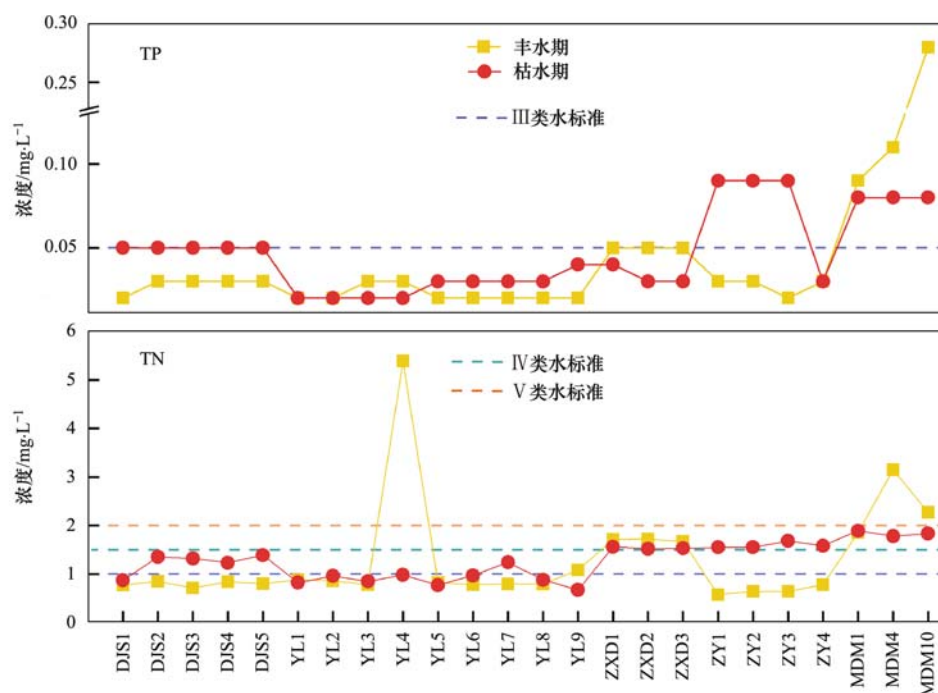


图9 磨刀门水道输水点和各水库的总氮和总磷浓度

Fig. 9 Total nitrogen and phosphorus content of water point and each reservoir

ρ (总磷)均超过 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这意味着总磷对蓝藻生长的关系不占主导, 而蓝藻生长又涉及到是否抑制其他浮游植物的生长, 因此磷盐的超标并未引发库内浮游植物的多样性变化。当 ρ (无机氮盐) 超过 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 浮游植物生长将不受氮浓度的限制^[32, 39], 各水库中 ρ (无机氮盐) 均超过 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 因此氮盐的大量输入虽导致水体水质类别恶化, 却无法限制浮游植物的多样性繁殖。

3.3 浮游植物与环境因子的关系

有研究表明, 浮游植物群落分布受水体水文条件、物理和化学等诸多因素的影响^[40~44]。RDA 分析显示, 大镜山水库和杨寮水库丰枯两季浮游植物主要优势种均为蓝藻门的拟柱孢藻, 其分布与 TOC 都呈现出显著正相关 ($P < 0.01$), 这是因为 TOC 代表水体中有机质 (DOM) 的含量, DOM 通过吸收紫外光从而对浮游植物光合作用产生影响^[45], 不断消耗的碳酸盐导致水体中碳氮比降低, 而拟柱孢藻具有固氮能力, 在氮利用上被认为是广幅种^[46], 高浓度的氮环境拟柱孢藻比其他蓝藻生长更快, 具有较强的竞争优势^[47]。丰水期, 竹仙洞的浮游植物分布与 NO_3^- 和 TP 都呈现出显著正相关 ($P < 0.01$), 这是因为优势种伪鱼腥藻对磷含量有较宽的适应性^[48, 49], 竹仙洞水库的浮游植物在枯水期主要受水力扰动影响, 与水库中环境因子相关性不强。丰水期, 竹银水库的浮游植物与环境因子相关性不强, 枯水期优势种主要为绿藻门和硅藻门, 浮游植物群落分布与 NO_3^- 和 Cl^- 呈显著正相关, 与 TP 呈正相关,

Zhang 等^[50] 的研究也表明高氮磷比环境下更适合绿藻的繁殖。陈悦^[51] 对硅藻门的小环藻属研究表明 TP 是影响硅藻增长速度的重要指标。竹银水库枯水期抢淡调水是造成营养盐输入的主要因素。

4 结论

(1) 丰枯两季, 珠海市大镜山水库、杨寮水库、竹仙洞水库和竹银水库群共检测出浮游植物 8 门 73 属 150 种, 以绿藻、蓝藻和硅藻为主。4 个水库种类分布较为趋近, 优势种分布大镜山水库和杨寮水库较为相似, 竹仙洞和竹银水库与前两者各不相同。

(2) 影响 4 个水库浮游植物多样性的主要因素为磨刀门水道输水带来的水力扰动和水库水力停留时间。大镜山水库水力停留时间最长, 浮游植物多样性最差, 竹仙洞水库水力停留时间最短, 浮游植物优势种分布最广。

(3) 水质生物学评价表明, 大镜山水库丰枯两季均处于重污染状态; 杨寮水库丰水期处于重污染状态, 枯水期处于重污染状态; 竹仙洞丰水期处于中污染状态, 枯水期处于寡污-清洁状态; 竹银水库丰枯两季均处于寡污-清洁状态。

(4) 影响 4 个水库浮游植物群落结构的环境因子为 NO_3^- 、TOC、TP、 Cl^- 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。营养盐主要来自磨刀门水道输水带来的外源输入, 改善磨刀门水道水质是提升 4 个水库水质的关键举措。

参考文献:

[1] Manickam N, Bhavan P S, Santhanam P, et al. Phytoplankton

- biodiversity in the two perennial lakes of Coimbatore, Tamil Nadu, India[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(1): 81-89.
- [2] Cui L, Lu X X, Dong Y L, *et al.* Relationship between phytoplankton community succession and environmental parameters in Qinhuangdao coastal areas, China: a region with recurrent brown tide outbreaks [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **159**: 85-93.
- [3] Pérez J R, Loureiro S, Menezes S, *et al.* Assessment of water quality in the Alqueva Reservoir (Portugal) using bioassays[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2010, **17**(3): 688-702.
- [4] Liu C Q, Liu L S, Shen H T. Seasonal variations of phytoplankton community structure in relation to physico-chemical factors in Lake Baiyangdian, China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, **2**: 1622-1631.
- [5] 胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 等. 巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 4925-4937.
- Hu M Q, Zhang Y C, Ma R H, *et al.* Spatial and temporal dynamics of floating algal blooms in lake Chaohu in 2016 and their environmental drivers[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 4925-4937.
- [6] 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 等. 湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 603-613.
- Yu M L, Hong G X, Xu H, *et al.* Effects of cyanobacterial blooms in eutrophic lakes on water quality of connected rivers [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 603-613.
- [7] 郑丙辉, 张佳磊, 王丽婧, 等. 大宁河水华敏感期浮游植物与环境因子关系[J]. *环境科学*, 2011, **32**(3): 641-648.
- Zheng B H, Zhang J L, Wang L J, *et al.* Exploration of relationships between phytoplankton and related environmental factors in the Daning river during sensitive period of algal blooms [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(3): 641-648.
- [8] 马沛明, 施练东, 张俊芳, 等. 浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4560-4569.
- Ma P M, Shi L D, Zhang J F, *et al.* Succession of phytoplankton assemblages and its influencing factors in Tangpu reservoir, Zhejiang province[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4560-4569.
- [9] 王立明, 林超, 刘德文. 水动力学条件下潘家口水库富营养化的控制[J]. *水资源保护*, 2009, **25**(4): 8-11.
- Wang L M, Lin C, Liu D W. Study on eutrophication control of Panjiakou reservoir under hydrodynamic conditions [J]. *Water Resources Protection*, 2009, **25**(4): 8-11.
- [10] 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.
- [11] 邹红菊. 珠海市三座调水水库浮游植物群落动态与藻类水华预警研究[D]. 广州: 暨南大学, 2010.
- [12] 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.
- [13] 涂新军, 吴海鹏, 陈晓宏, 等. 滨海地区基于避咸蓄淡模式的供水安全临界流量研究——以粤港澳大湾区珠海供水为例[J]. *湖泊科学*, 2022, **34**(1): 194-206.
- Tu X J, Wu H O, Chen X H, *et al.* Critical streamflow for water supply safety based on the withdrawal avoiding saltwater model in coastal areas——taking the water supply for Zhuhai and Macao in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area as a case [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(1): 194-206.
- [14] 刘智森. 骨干水库调度破解珠江五大水问题[J]. *人民珠江*, 2007, **28**(1): 44-47.
- Liu Z S. United deployment of the key reservoirs solved the five major water problems in the Pearl River Basin [J]. *Pearl River*, 2007, **28**(1): 44-47.
- [15] 刘斌, 刘丽诗, 吴炜, 等. 基于取淡与流量控制的压咸调度方案研究[J]. *水文*, 2013, **33**(4): 84-86, 74.
- Liu B, Liu L S, Wu W, *et al.* Pearl river water diversion research based on drinking water supply target and flow control [J]. *Journal of China Hydrology*, 2013, **33**(4): 84-86, 74.
- [16] 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.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [18] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [19] Liu X, Lu X H, Chen Y W, *et al.* The effects of temperature and nutrient ratios on *Microcystis* blooms in Lake Taihu, China: an 11-year investigation [J]. *Harmful Algae*, 2011, **10**(3): 337-343.
- [20] Lv H, Yang J, Liu L M, *et al.* Temperature and nutrients are significant drivers of seasonal shift in phytoplankton community from a drinking water reservoir, subtropical China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(9): 5917-5928.
- [21] 孟睿, 何连生, 过龙根, 等. 长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2588-2596.
- Meng R, He L S, Guo L G, *et al.* Canonical correspondence analysis between phytoplankton community and environmental factors in macrophytic lakes of the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2588-2596.
- [22] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? [J]. *Hydrobiologia*, 1998, **369**: 11-26.
- [23] Straskraba M. Retention time as a key variable of reservoir limnology [A]. In: Tundisi J G, Straskraba M (Eds.). *Theoretical Reservoir Ecology and its Applications* [M]. Sao Carlos: International Institute of Ecology, Brazilian Academy of Sciences, Backhuys Publishers, 1999.
- [24] Kawara O, Yura E, Fujii S, *et al.* A study on the role of hydraulic retention time in eutrophication of the Asahi River Dam reservoir [J]. *Water Science & Technology*, 1998, **37**(2): 245-252.
- [25] 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.

- [26] Monsen N E, Cloern J E, Lucas L V, *et al.* A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales[J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, **47**(5): 1545-1553.
- [27] 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.
- [28] 宗梅, 郑西强, 王翔宇. 巢湖万年埠沿岸浮游植物与环境因子关系[J]. *安徽农业科学*, 2016, **44**(27): 102-105.
Zong M, Zheng X Q, Wang X Y. The relationship between phytoplankton and related environmental factors in the littoral zone of wannianbu, Chaohu Lake [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, **44**(27): 102-105.
- [29] 王丽卿, 许莉, 卢子园, 等. 淀山湖浮游植物数量消长及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 2868-2874.
Wang L Q, Xu L, Lu Z Y, *et al.* Dynamic of phytoplankton abundance and the relationship with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(10): 2868-2874.
- [30] 黄洪波. 调水水库的富营养化特征研究[J]. *广东化工*, 2011, **38**(2): 99-100, 121.
Huang H B. Study of eutrophication of two pumped storage reservoirs[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2011, **38**(2): 99-100, 121.
- [31] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428.
- [32] Hodgson D A. The ecology of cyanobacteria: their diversity in time and space, Edited by B. A. Whitton and M. Potts[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2002, **28**(3): 383-384.
- [33] 郭川, 代晓炫, 饶伟民, 等. 珠海市竹银水库健康评价研究[J]. *广东水利水电*, 2021, (3): 12-17.
Guo C, Dai X X, Rao W M, *et al.* Study on the health assessment of the Zhuyin reservoir in Zhuhai [J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2021, (3): 12-17.
- [34] Schindler D W. Evolution of phosphorus limitation in lakes: Natural mechanisms compensate for deficiencies of nitrogen and carbon in eutrophied lakes[J]. *Science*, 1997, **195**(4275): 260-262.
- [35] Hallegraeff G M. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase[J]. *Phycologia*, 1993, **32**(2): 79-99.
- [36] Temponeras M, Kristiansen J, Moustaka-Gouni M. Seasonal variation in phytoplankton composition and physical-chemical features of the shallow Lake Doirani, Macedonia, Greece[J]. *Hydrobiologia*, 2000, **424**(1-3): 109-122.
- [37] Nalewajko C, Murphy T P. Effects of temperature, and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in Lake Biwa, Japan: an experimental approach[J]. *Limnology*, 2001, **2**(1): 45-48.
- [38] Steinberg C E W, Hartmann H M. Planktonic bloom-forming cyanobacteria and the eutrophication of lakes and rivers[J]. *Freshwater Biology*, 1988, **20**(2): 279-287.
- [39] 邹红菊, 胡韧, 韩博平. 鹤地水库浮游植物群落的结构与动态[J]. *热带亚热带植物学报*, 2010, **18**(2): 196-202.
Zou H J, Hu R, Han B P. Structure and dynamics of phytoplankton community in Hedi reservoir, south China[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2010, **18**(2): 196-202.
- [40] Berge T, Daugbjerg N, Andersen B B, *et al.* Effect of lowered pH on marine phytoplankton growth rates[J]. *Marine Ecology Progress*, 2010, **416**: 79-91.
- [41] Jiang Y J, He W, Liu W X, *et al.* The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu)[J]. *Ecological Indicators*, 2014, **40**: 58-67.
- [42] Kasprzak P, Lathrop R C, Carpenter S R. Influence of different sized *Daphnia* species on chlorophyll concentration and summer phytoplankton community structure in eutrophic Wisconsin lakes [J]. *Journal of Plankton Research*, 1999, **21**(11): 2161-2174.
- [43] Rao K, Zhang X, Wang M, *et al.* The relative importance of environmental factors in predicting phytoplankton shifting and cyanobacteria abundance in regulated shallow lakes [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **286**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117555.
- [44] Zhao C S, Pan X, Yang S T, *et al.* Principal hydrology and water quality factors driving the development of plankton communities in a pilot city of China[J]. *Ecohydrology*, 2020, **13**(4), doi: 10.1002/eco.2207.
- [45] 白英臣. 天然溶解有机质和环境污染物的相互作用——以铜、汞离子和卡马西平为例[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2007.
- [46] Moisaner P H, Cheshire L A, Braddy J, *et al.* Facultative diazotrophy increases *cylindrospermopsis raciborskii* competitiveness under fluctuating nitrogen availability[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, **79**(3): 800-811.
- [47] Ammar M, Comte K, Tran T D C, *et al.* Initial growth phases of two bloom-forming cyanobacteria (*Cylindrospermopsis raciborskii* and *Planktothrix agardhii*) in monocultures and mixed cultures depending on light and nutrient conditions [J]. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 2014, **50**(3): 231-240.
- [48] Tian C, Pei H Y, Hu W R, *et al.* Variation of cyanobacteria with different environmental conditions in Nansi Lake, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(8): 1394-1402.
- [49] Gao J S, Zhu J, Wang M W, *et al.* Dominance and growth factors of *Pseudanabaena* sp. in drinking water source reservoirs, southern China[J]. *Sustainability*, 2018, **10**(11), doi: 10.3390/su10113936.
- [50] Zhang H H, Zong R R, He H Y, *et al.* Biogeographic distribution patterns of algal community in different urban lakes in China: insights into the dynamics and co-existence[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **100**: 216-227.
- [51] 陈悦. 深圳福田红树林区浮游植物生态特征及主要环境因子对孟氏小环藻胞外多糖的影响[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.

CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i> (4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i> (4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhai and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i> (4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System	QIU Hao, LIU Dan-long, WU Yang-zhou, <i>et al.</i> (4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i> (4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i> (4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong (4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i> (4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong (4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i> (4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i> (4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i> (4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i> (4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru (4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i> (4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i> (4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i> (4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge: ARGs and Potential Hosts	ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i> (4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i> (4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i> (4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils	CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i> (4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island	YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i> (4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i> (4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i> (4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i> (4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i> (4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region	SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i> (4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i> (4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao (4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i> (4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i> (4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i> (4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i> (4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System	CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i> (4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvio-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i> (4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i> (4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvio-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i> (4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i> (4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure	LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i> (4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i> (4789)