

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征	秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 PM _{2.5} 时空变化分析	刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制	黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征	邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成	李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征	王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征	王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征	李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响	斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N ₂ O 间接排放特征	田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 N ₂ O 浓度、释放通量与排放系数	王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例	彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ ¹⁸ O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例	吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析	刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响	廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价	张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律	郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南麓湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响	周心劝, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化	王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析	江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响	王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱胞藻 (<i>Cylindropermopsis raciborskii</i>) 的分布特征及影响因素分析	雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸	尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果	兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能	顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性	刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应	王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制	王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程	刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响	高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的优化及其微生物的群落变迁	付昆明, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性	陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能	路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险	吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险	李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型神渣场土壤 As 污染特征及生态风险评价	刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系	辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响	李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响	柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响	马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系	乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解	刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO ₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征	唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价	许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力	刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年) 总目录	(5740)
《环境科学》征订启事 (5343) 《环境科学》征稿简则 (5439) 信息 (5595, 5619, 5638)	

广东省水库拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 的分布特征及影响因子分析

雷敏婷¹, 彭亮^{1,2}, 韩博平^{1,2}, 雷腊梅^{1,2*}

(1. 暨南大学水生生物研究中心, 广州 510632; 2. 广东省水库蓝藻水华防治中心, 广州 510632)

摘要: 拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 是热带亚热带地区的特征性蓝藻, 具潜在的产毒能力, 近年来因其向全球温带地区扩展而备受关注. 本研究以广东省 20 座不同营养类型水库的历史数据 (2010 年的春季、夏季和冬季) 为基础, 重点考察拟柱孢藻在广东省水库的发生和分布状况. 调查期间共发现 19 座水库存在拟柱孢藻, 其种群生物量在 $0.0001 \sim 39.740 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 占浮游植物的 $0.02\% \sim 97.07\%$. 拟柱孢藻具明显的空间及季节分布特征, 粤西地区的出现率 (77.78%) 高于珠江三角洲地区 (66.67%) 和粤北地区 (33.33%), 冬季的检出率 (85%) 高于夏季 (70%) 和春季 (40%), 分析表明水温是决定拟柱孢藻空间及季节变化的关键因素. 拟柱孢藻在不同营养状态的水库之间出现率差异明显, 富营养型水库的检出率 (81.48%) 显著高于中富营养型水库 (66.67%) 和贫中营养型水库 (33.33%), 冗余分析 (RDA) 结果表明拟柱孢藻生物量与总氮 (TN)、营养状态指数 (TSI) 呈正相关, 与可溶性无机氮 (DIN)、可溶性活性磷 (SRP) 及透明度 (SD) 呈负相关, 推测高氮、低磷、低透明度的环境条件有利于拟柱孢藻形成优势.

关键词: 拟柱孢藻; 广东省; 水库; 分布; 环境因子

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5523-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201805104

Distribution and Factors Affecting *Cylindrospermopsis raciborskii* in Guangdong Reservoirs

LEI Min-ting¹, PENG Liang^{1,2}, HAN Bo-ping^{1,2}, LEI La-mei^{1,2*}

(1. Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Guangdong Center for Control and Prevention of Reservoir Cyanobacterial Blooms, Guangzhou 510632, China)

Abstract: *Cylindrospermopsis raciborskii* originating from tropical and subtropical regions is potentially toxic and attracts much attention due to its extension to the global temperate zone in recent years. Based on historical data of 20 reservoirs with different trophic levels (dry season, wet season, and transitional season of 2010), this study focuses on the analysis of the occurrence and distribution of *C. raciborskii* in the Guangdong Province. Based on the results, *C. raciborskii* was found in 19 of the 20 reservoirs and its biomass ranges from $0.0001 \sim 39.740 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and accounts for $0.02\% \sim 97.07\%$ of the total phytoplankton biomass. Both a notable spatial and seasonal distribution of *C. raciborskii* were observed. Its occurrence is higher in the western coastal area (77.78%) than in the Zhujiang Delta (66.67%) and northern coastal area (33.33%) and is relatively lower in the dry season (40%) compared with the rainy season (70%) and transition season (85%). The trophic level has a significant effect on the presence of *C. raciborskii*, which is notably higher in eutrophic reservoirs (81.48%) than in mesotrophic reservoirs (66.67%) and oligotrophic reservoirs (33.33%). The redundancy analysis shows that *C. raciborskii* biomass is positively correlated with total nitrogen (TN) and the trophic state index (TSI) and negatively correlated with dissolved inorganic nitrogen (DIN), soluble reactive phosphorus (SRP), and the secchi depth (SD). Thus, *C. raciborskii* in Guangdong reservoirs may be promoted by environmental factors such as high nitrogen contents, low phosphorus concentration, and transparency.

Key words: *Cylindrospermopsis raciborskii*; Guangdong Province; reservoir; distribution; environmental factor

淡水入侵蓝藻——拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 自首次在印度爪哇岛发现以来备受关注, 该藻可产生多种毒素, 对水生生物和人类的健康都有巨大的威胁^[1]. 拟柱孢藻最初被认为是热带亚热带特征性种类, 近年来发现该藻已入侵至温带地区且出现的频率显著增高^[2], 有研究表明拟柱孢藻具有较强的生理生态可塑性, 有利于其在扩散过程中与本地种竞争获得生长优势^[3]. 拟柱孢藻对光照和温度均有较宽的适应范围^[1], 此外, 拟柱孢藻

对营养盐具有灵活的利用策略^[1~3], 可高效地吸收和贮存水体中的磷以适应低磷环境, 在低氮的环境中可利用异形胞固定大气中的氮^[4].

随着人类活动的加剧及经济的快速发展, 我国

收稿日期: 2018-05-11; 修订日期: 2018-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31770507); 广东省水利科技项目 (2016-29)

作者简介: 雷敏婷 (1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水域生态学, E-mail: 1533901256@qq.com

* 通信作者, E-mail: tleilam@jnu.edu.cn

淡水水体富营养化问题日益严重,导致有害蓝藻水华频繁发生,其中微囊藻被认为是分布最广、危害最严重的水华蓝藻^[5].调查发现安徽、浙江、江苏、湖北、广东等多个地区的水体发生过微囊藻水华,其中在江苏太湖暴发过震惊中外的“水危机”事件,对该地区工农业生产和人民生活影响严重^[5~7].长期以来国内对产毒蓝藻的研究主要集中在微囊藻,对其它产毒蓝藻的研究极为匮乏^[8].近年来,拟柱孢藻在我国热带亚热带地区如广东、台湾和福建等水体中频繁出现甚至形成水华^[9~11],调查发现拟柱孢藻在广东省东莞市 25 座水库中出现率高达 74.42%,其中在塘坑边水库中为绝对优势种,占浮游植物的比例达 90% 以上^[9].在广东镇海水库,拟柱孢藻常年占据绝对优势,对浮游植物生物量贡献率达 93% 以上,分析发现高温、低磷及低的光可获得性有利于拟柱孢藻维持竞争优势^[11].在台湾,拟柱孢藻从枯水期到平水期均占优势,尤其在枯水期,其生物量占总浮游植物比例高达 90%,分析表明该藻在高温、低透明度、低 DIN、弱碱性的环境条件中更易形成优势^[10].此外,拟柱孢藻在我国温带地区如北京、江苏、湖北、云南、山东等地区的水体中也均有发现^[8,12],在湖北和云南的水体中为非优势种^[11],在江苏横山水库,拟柱孢藻在夏季的生物量明显高于微囊藻并占绝对优势^[13].广东省地处我国南亚热带地区,水库水资源丰富,但随着经济的发展,该地区大部分水库水体富营养化问题突出,调查显示拟柱孢藻在该省多个水库中均有不同程度的分布,该藻已经逐渐取代微囊藻成为危害该地区水库供水安全的首要蓝藻^[9].为分析拟柱孢藻在该地区快速扩张并形成水华的原因,本研究以广东省 20 座不同营养类型水库的历史数据(2010 年的春季、夏季和冬季)为基础,重点考察拟柱孢藻在广东省水库的发生和分布状况,探讨主要环境因子对拟柱孢藻种群动态的影响,以期广东省拟柱孢藻水华的预防及水质管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样点的布设与样品采集

根据水库地理位置(图 1)和营养类型的差别,在广东省全省范围内选取粤北地区、珠江三角洲和粤西地区的 20 座水库作为调查对象(表 1),于 2010 年的 3~4 月、7~8 月和 11~12 月进行 3 次野外采样,分别代表春季、夏季和冬季,每个水库只设定 1 个采样点,于水库库中区距表层水体 0.5 m

处使用有机玻璃采水器采集 2 L 水样,1 L 用于理化因子测定,1 L 用于浮游植物的定量分析,浮游植物定量样品当场加 10 mL 鲁哥试剂和 3 mL 福尔马林固定,浮游植物定性样品用 25 号浮游生物网(64 μm)于水体的水平和垂直方向上多次拖网,并当场加福尔马林固定,最终浓度为 4%.

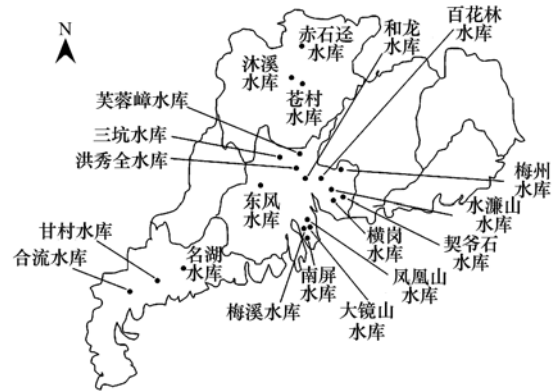


图 1 广东省 20 座水库的具体位置

Fig. 1 Location of twenty reservoirs in the Guangdong Province

1.2 理化因子的测定

YSI-多参数水质检测仪现场测定水温和 pH; 赛氏盘(Secchi Disk)测定透明度(SD); 总氮(TN)、总磷(TP)、亚硝态氮(NO_2^- -N)、硝态氮(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)及可溶性活性磷(SRP)浓度按照国家水质标准 GB 3838-200 测定^[14],可溶性无机氮(DIN)浓度为 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度的总和,叶绿素 a 浓度采用反复冻融法测定^[15];参照广东省水库的经验公式计算营养状态指数(TSI)^[16], $30 < \text{TSI} < 40$ 为贫中营养型, $40 < \text{TSI} < 50$ 为中富营养型, $\text{TSI} > 50$ 为富营养型.

1.3 浮游植物分析

浮游植物定量样品静置 48 h 后,用管口包裹着两层筛绢(孔径为 20 μm)的虹吸管小心吸去上清液,直至将水样浓缩至 50~100 mL,分析时取均匀样品 0.1 mL 注入浮游植物计数框中.参照文献[17],在显微镜(OLYMPUS BX-51)下进行浮游植物的种类鉴定和计数,计数 3 次,当 3 次误差小于 10% 时以平均值表示细胞丰度.浮游植物生物量的计算方法参照文献[18],由浮游植物近似几何体积直接换算,分析过程中将生物量在总生物量中所占百分比大于 10% 的物种定为优势种.

1.4 数据分析

采用单因素方差分析(One-Way ANOVA, LSD)比较理化因子、拟柱孢藻和微囊藻生物量季节间的差异.采用 Canoco 软件对浮游植物生物量数据进

行去趋势对应分析(DCA),在所得的各特征值发现4个排序轴中梯度最大值为2.441,选择冗余分析(RDA)分析浮游植物与环境因子之间的关系,分析前对物种数据进行筛选,用于排序的物种在样本的

出现频率 $\geq 50\%$,且至少在5个样点的相对生物量 $\geq 10\%$ (拟柱孢藻和微囊藻除外),物种和环境矩阵除pH值外都进行 $\lg(x+1)$ 转换.作图在Sigmaplot 12.5和Photoshop CS6软件中完成.

表1 广东省20座水库的主要特征参数及采样时间

Table 1 Main characteristics and sampling times of twenty reservoirs in the Guangdong Province

所在地区	水库名称	库容 /m ³	集雨面积 /km ²	平均水深 /m	采样时间(年-月-日)		
					春季	夏季	冬季
粤北	沐溪水库	1.09 × 10 ⁷	16.5	14.3	2010-03-05	2010-07-08	2010-11-19
粤北	苍村水库	6.10 × 10 ⁷	93.8	44.4	2010-03-05	2010-07-08	2010-11-19
粤北	赤石迳水库	1.16 × 10 ⁷	14.1	22.6	2010-03-06	2010-07-09	2010-11-20
珠江三角洲	梅溪水库	1.73 × 10 ⁶	1.7	4.4	2010-03-11	2010-07-22	2010-12-22
珠江三角洲	南屏水库	5.74 × 10 ⁶	2.4	13.8	2010-03-11	2010-07-21	2010-12-22
珠江三角洲	大镜山水库	1.05 × 10 ⁷	6.0	7.6	2010-03-11	2010-07-21	2010-12-21
珠江三角洲	凤凰山水库	1.51 × 10 ⁷	9.3	12.8	2010-03-11	2010-07-20	2010-12-21
珠江三角洲	东风水库	1.02 × 10 ⁷	10.9	6.7	2010-03-17	2010-07-07	2010-12-02
珠江三角洲	百花林水库	8.56 × 10 ⁶	17.4	12.3	2010-03-18	2010-07-19	2010-12-28
珠江三角洲	和龙水库	1.82 × 10 ⁷	24.0	12.7	2010-03-18	2010-07-22	2010-12-22
珠江三角洲	契爷石水库	1.00 × 10 ⁷	17.6	7.3	2010-03-20	2010-08-03	2010-12-04
珠江三角洲	横岗水库	2.12 × 10 ⁷	4.3	8.1	2010-03-20	2010-08-04	2010-12-04
珠江三角洲	水濂山水库	9.70 × 10 ⁶	12.2	8.9	2010-03-21	2010-08-04	2010-12-05
珠江三角洲	三坑水库	2.38 × 10 ⁷	19.7	8.7	2010-04-07	2010-07-30	2010-12-10
珠江三角洲	洪秀全水库	4.00 × 10 ⁶	21.0	4.7	2010-04-09	2010-07-30	2010-12-23
珠江三角洲	芙蓉嶂水库	2.21 × 10 ⁷	22.6	12.4	2010-04-09	2010-07-30	2010-12-10
珠江三角洲	梅州水库	7.86 × 10 ⁷	133.0	18.5	2010-04-12	2010-07-30	2010-11-24
粤西	名湖水库	2.25 × 10 ⁶	0.7	9.1	2010-04-15	2010-08-10	2010-12-29
粤西	合流水库	5.00 × 10 ⁶	8.3	5.1	2010-04-16	2010-08-11	2010-12-30
粤西	甘村水库	5.00 × 10 ⁶	13.0	4.1	2010-04-16	2010-08-11	2010-12-30

2 结果与分析

2.1 水库理化特征

在调查期间,苍村、赤石迳、梅州、芙蓉嶂、梅溪等5座水库的TSI在31.68~34.46之间,属于贫中营养型水库;和龙、契爷石、水濂山、大镜山、凤凰山、名湖等6座水库的TSI在40.05~49.80之间,属于中富营养型水库;沐溪、百花林、三坑、洪秀全、东风、横岗、南屏、合流、甘村等9座水库的TSI在51.50~63.43之间,属于富营养型水库.不同营养类型水库的主要理化指标如表2~4所示.水温季节变化明显($P < 0.01$),夏季(28.8~33.9℃)显著高于春季(16.0~24.2℃)和冬季(16.50~23.3℃).夏季pH值较高(7.16~10.16),呈弱碱性,春季(7.01~9.65)和冬季(6.80~10.11)稍低,大部分水库仍呈弱碱性.贫中营养型水库的SD较高,3个时期的平均值均在2 m以上;中富营养型水库的SD在0.5~1.7 m之间,富营养型水库的SD较低,3个时期的平均值均低于1 m.贫中营养型水库的TN浓度在0.330~

1.772 mg·L⁻¹之间,中富营养型水库的TN浓度在0.456~2.550 mg·L⁻¹之间,富营养型水库的TN浓度在0.373~5.114 mg·L⁻¹之间,均无明显的季节变化($P > 0.05$).贫中营养型水库的TP浓度在0.003~0.023 mg·L⁻¹之间,中富营养型水库的TP浓度在0.005~0.048 mg·L⁻¹之间,富营养型水库的TP浓度在0.012~0.257 mg·L⁻¹之间,除了洪秀全水库和东风水库较高外(平均值高于0.01 mg·L⁻¹),其余水库均较低,季节间差异较小($P > 0.05$).

表2 贫中营养型水库的主要理化指标

Table 2 Physical and chemical variables of oligotrophic

理化因子	reservoirs in three seasons		
	春季	夏季	冬季
水温/℃	18.24 ± 1.072	31.13 ± 0.475	20.087 ± 1.872
SD/m	2.01 ± 0.369	2.40 ± 0.618	2.77 ± 0.531
pH	7.361 ± 0.323	7.409 ± 0.242	8.083 ± 0.747
TN/mg·L ⁻¹	0.746 ± 0.267	0.849 ± 0.562	0.722 ± 0.430
TP/mg·L ⁻¹	0.010 ± 0.003	0.006 ± 0.004	0.012 ± 0.008
DIN/mg·L ⁻¹	0.485 ± 0.171	0.682 ± 0.598	0.545 ± 0.375
SRP/μg·L ⁻¹	3.663 ± 2.390	2.922 ± 0.828	1.168 ± 0.606
TSI	29.28 ± 1.973	33.96 ± 0.713	35.98 ± 1.484

表3 中富营养型水库的主要理化指标

Table 3 Physical and chemical variables of mesotrophic reservoirs in three seasons

理化因子	春季	夏季	冬季
水温/℃	19.32 ± 2.236	31.79 ± 0.592	19.76 ± 2.471
SD/m	1.20 ± 0.287	1.15 ± 0.406	1.08 ± 0.315
pH	8.694 ± 0.650	8.336 ± 0.866	9.387 ± 0.668
TN/mg·L ⁻¹	1.521 ± 0.795	1.131 ± 0.466	1.318 ± 0.773
TP/mg·L ⁻¹	0.027 ± 0.012	0.020 ± 0.012	0.023 ± 0.011
DIN/mg·L ⁻¹	0.938 ± 0.552	0.614 ± 0.316	0.787 ± 0.469
SRP/μg·L ⁻¹	1.831 ± 0.724	6.925 ± 3.729	1.112 ± 0.893
TSI	35.23 ± 5.033	49.17 ± 6.555	53.37 ± 6.034

表4 富营养型水库的主要理化指标

Table 4 Physical and chemical variables of eutrophic reservoirs in three seasons

理化因子	春季	夏季	冬季
水温/℃	20.44 ± 2.070	31.71 ± 1.615	19.24 ± 2.4738
SD/m	0.824 ± 0.276	0.659 ± 0.174	0.617 ± 0.126
pH	8.882 ± 0.947	8.527 ± 0.670	9.257 ± 0.924
TN/mg·L ⁻¹	2.232 ± 1.193	1.577 ± 0.907	1.941 ± 1.154
TP/mg·L ⁻¹	0.082 ± 0.072	0.046 ± 0.029	0.058 ± 0.035
DIN/mg·L ⁻¹	1.027 ± 0.849	0.964 ± 0.633	0.666 ± 0.413
SRP/μg·L ⁻¹	8.771 ± 13.968	11.530 ± 6.181	2.528 ± 1.384
TSI	46.56 ± 9.490	52.67 ± 8.320	56.68 ± 9.574

2.2 拟柱孢藻发生的概率及季节变化

调查期间共采集样本 60 个, 其中 40 个样本检出存在拟柱孢藻, 检出率为 66.67%。仅在苍村水库中未检测到该藻。拟柱孢藻的发生具明显的季节特征, 冬季的检出率(85%) 高于夏季(70%) 和春季(40%)。从空间分布上看, 粤西沿海地区水库拟柱孢藻出现率最高, 达 77.78%, 珠江三角洲地区次之, 为 66.67%, 粤北地区最低, 仅为 33.33%。从水库的营养状况分析, 拟柱孢藻在不同营养类型的水库中出现率差异明显, 贫中营养型水库最低, 只有 33.33%, 其种群生物量季节变化不明显($P >$

0.05), 全年都很低(图 2), 在 0.000 1 ~ 0.006 mg·L⁻¹ 之间, 占浮游植物总生物量的 0.07% ~ 4.22%; 拟柱孢藻在中富营养型水库出现率为 66.67%, 其中在大镜山水库的夏季和冬季、凤凰山水库冬季中为绝对优势种, 其种群生物量分别为 3.004、6.594 和 6.202 mg·L⁻¹, 分别占浮游植物总生物量的 68.18%、55.11% 和 48.03%, 在凤凰山水库的夏季也占一定的优势, 其种群生物量为 1.017 mg·L⁻¹, 占浮游植物的 29.78%, 在和龙、契谷石、水濂山及名湖等 4 座水库中为非优势藻类, 其种群生物量在 0.000 1 ~ 0.776 mg·L⁻¹ 之间, 占浮游植物总生物量的 0.01% ~ 3.05% (图 3), 方差分析结果显示, 6 座中富营养型水库在春季拟柱孢藻生物量及相对生物量显著低于冬季($P < 0.05$); 拟柱孢藻在富营养型水库中出现率最高, 达 81.48%, 其中在甘村水库的春季、百花林水库及三坑水库夏季和冬季占绝对优势, 其种群生物量在 5.821 ~ 39.740 mg·L⁻¹ 之间, 占浮游植物总生物量的 51.06% ~ 97.07%, 在沐溪、洪秀全、东风、横岗、南屏及甘村等 6 座水库中拟柱孢藻生物量较低, 在 0.000 6 ~ 0.616 mg·L⁻¹ 之间, 占浮游植物总生物量的 0.02% ~ 5.43% (图 4), 除了甘村水库和东风水库, 春季拟柱孢藻生物量及相对生物量显著低于夏季和冬季($P < 0.05$)。

与拟柱孢藻相比, 全球发生和分布范围最广的水华蓝藻——微囊藻出现率较低, 仅在 28 个样品中出现, 为 46.67%, 冬季的检出率(21.67%) 高于夏季(16.00%) 和春季(13.33%), 微囊藻在富营养型水库和中富营养型水库中出现率差异较小, 分别为 51.85% 和 50%, 在贫中营养型水库中则较低, 仅为 33.33%, 其种群生物量在不同营养类型水库中全年较低(图 5), 季节变化不明显($P >$

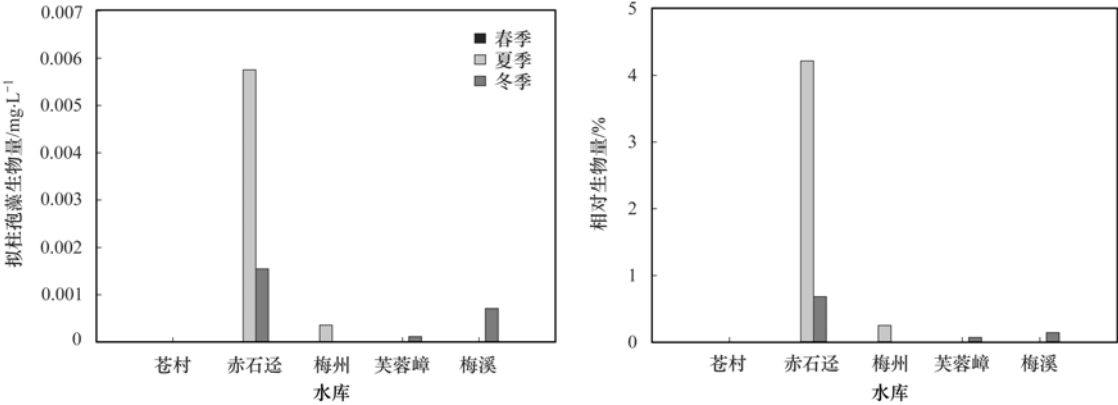


图2 贫中营养型水库拟柱孢藻生物量及相对生物量的季节变化

Fig. 2 Seasonal changes of *Cylindrospermopsis raciborskii* biomass and their contributions to the total phytoplankton biomass in oligotrophic reservoirs

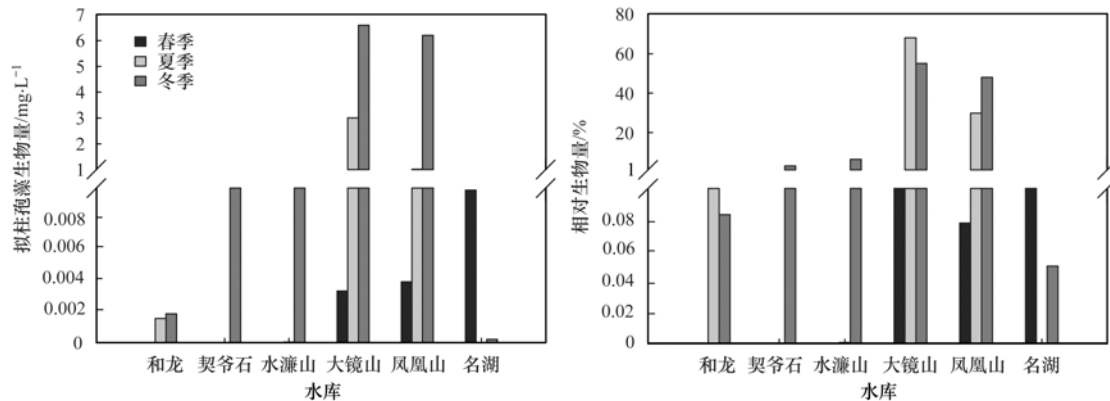


图3 中富营养型水库拟柱孢藻生物量及相对生物量的季节变化

Fig. 3 Seasonal changes of *Cylindrospermopsis raciborskii* biomass and their contributions to the total phytoplankton biomass in mesotrophic reservoirs

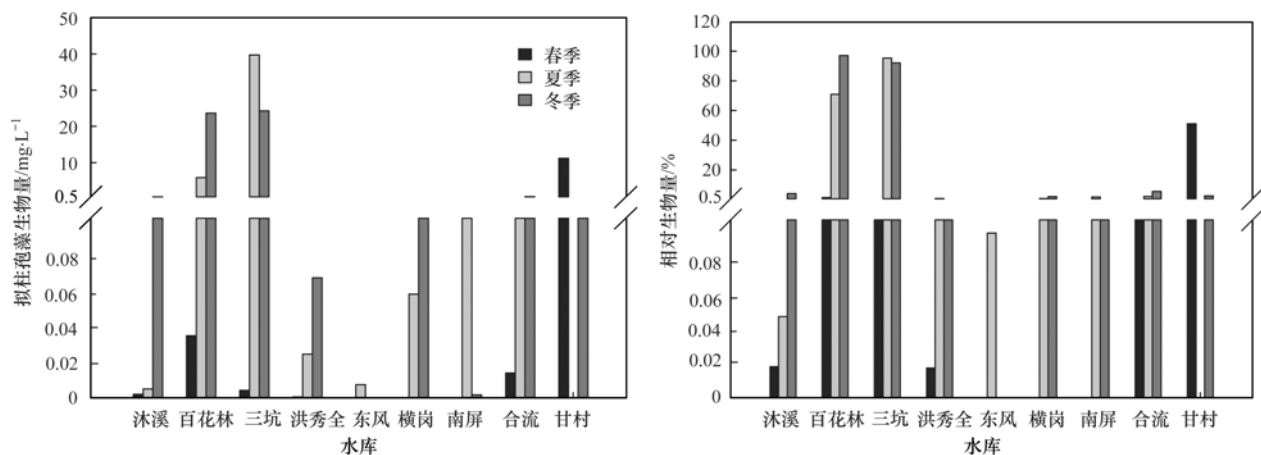


图4 富营养型水库拟柱孢藻生物量及相对生物量的季节变化

Fig. 4 Seasonal changes of *Cylindrospermopsis raciborskii* biomass and their contributions to the total phytoplankton biomass in eutrophic reservoirs

0.05), 该藻仅在梅州水库的夏季及名湖水库冬季为优势种类, 生物量分别为 $0.018 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.053 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占浮游植物总生物量的 12.49% 和 21.36%, 其余水库微囊藻生物量在 $0.0001 \sim 0.555 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 占浮游植物总生物量比例的 0.001%

~3.21% (图6)。

进一步方差分析结果表明: 贫中营养型水库中拟柱孢藻与微囊藻生物量及相对生物量皆无显著性差异 ($P > 0.05$); 中富营养型水库中拟柱孢藻生物

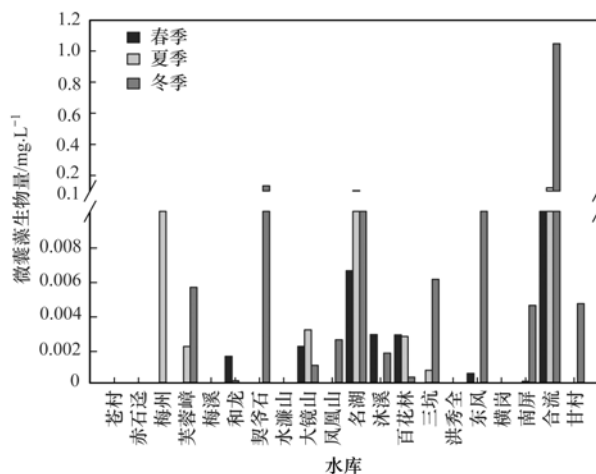


图5 微囊藻生物量的季节变化

Fig. 5 Seasonal changes of *Microcystis* biomass in twenty reservoirs

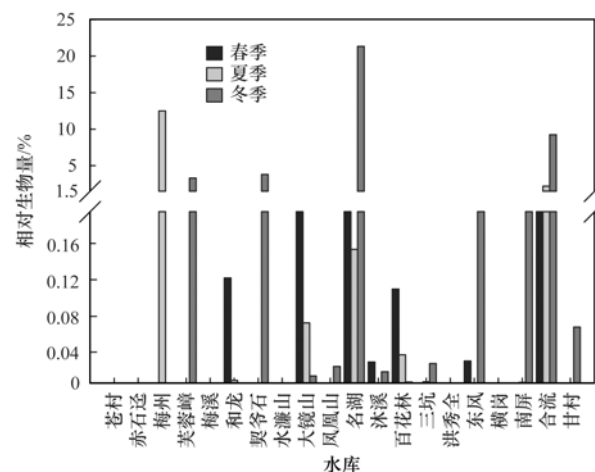


图6 微囊藻相对生物量的季节变化

Fig. 6 Contribution of *Microcystis* biomass to the total phytoplankton biomass in three seasons

量显著高于微囊藻 ($P < 0.05$), 而相对生物量无显著性差异 ($P > 0.05$); 富营养型水库中拟柱孢藻生物量及相对生物量皆显著高于微囊藻 ($P < 0.05$).

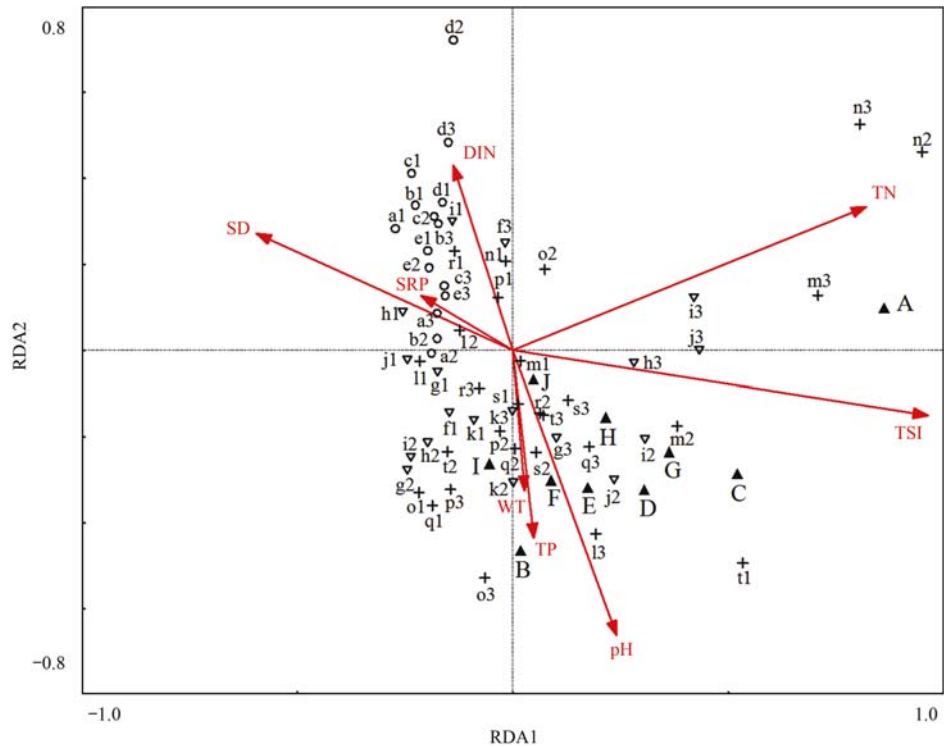
2.3 拟柱孢藻的生物量与环境因子的相关性分析

拟柱孢藻、微囊藻及其余主要浮游植物的生物量与各环境因子进行 RDA, 结果见表 5 和图 7. 在排序图中, 轴 1 和轴 2 的特征值分别为 0.373 和 0.094, 种类和环境相关性为 0.925 和 0.613, 表明排序轴可较好地反映浮游植物优势种和环境因子之间的关系. 由图 7 可以看出, 贫中营养型样点与中富营养型、富营养型样点具有比较明显的分割, 但在季节上的分割不明显. 与各个优势种(属)相比,

微囊藻在排序空间内的变化量较小, 而拟柱孢藻在排序空间内的变化量最大, 主要分布于中富营养型及富营养型水库的夏季和冬季, 其种群生物量与 TN 及 TSI 呈明显的正相关关系, 与 DIN、SRP 及 SD 呈明显负相关关系.

表 5 RDA 前两轴的统计特征

Table 5 Statistics characteristics of the first two axes of RDA		
统计指标	轴 1	轴 2
特征值	0.373	0.094
生物环境因子相关性	0.925	0.613
生物多样性累计值	37.3	46.7
生物环境因子相关性累计值	73.0	91.3



“○”、“▽”及“+”表示样点, a~e 分别表示苍村、赤石迳、梅州、芙蓉嶂、梅溪等 5 座贫中营养型水库, f~k 分别表示和龙、契爷石、水濂山、大镜山、凤凰山、名湖等 6 座中富营养型水库, l~t 分别表示沐溪、百花林、三坑、洪秀全、东风、横岗、南屏、合流、甘村等 9 座富营养型水库, 1~3 分别代表春季、夏季、冬季; “▲”表示 RDA 排序分析中的浮游植物种(属), A: 拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*), B: 假鱼腥藻 (*Pseudanabaena* sp.), C: 泽丝藻 (*Limnithrix* sp.), D: 蓝纤维藻 (*Dactylococcopsis* sp.), E: 衣藻 (*Chlamydomonas* sp.), F: 小球藻 (*Chlorella vulgaris*), G: 小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*), H: 颗粒直链藻 (*Melosira granulata*), I: 二角多甲藻 (*Peridinium bipes*), J: 微囊藻 (*Microcystis* sp.)

图 7 主要浮游植物与环境因子的 RDA 排序

Fig. 7 RDA ordination map of the main phytoplankton and environmental factors

3 讨论

本研究发现拟柱孢藻在广东省水库分布广泛, 出现率达 66.67%, 这与 Lei 等^[9]对广东省东莞市 25 座水库调查的结果相似. 虽然在澳大利亚、斯里兰卡等热带地区多座水库的调查中也发现拟柱孢藻

出现率在 60% 以上^[19,20], 但将本研究结果与这些水库的同季节的研究结果相比较, 发现拟柱孢藻对总浮游植物生物量的贡献率普遍高于本研究中的水库, 而在德国、波兰的水体的调查中发现拟柱孢藻出现率均低于 50%, 其相对生物量也明显低于本次调查的水库^[21,22]. 已有研究表明, 拟柱孢藻更易在

富营养化程度较高的水体中发生^[23]。本研究发现该藻在贫中营养型水库中出现率只有 33.33%, 且无作为优势种的记录, 而在中富营养型水库和富营养型水库中出现率分别高达 66.67% 和 81.48%, 在大镜山、凤凰山、甘村、百花林及三坑这 5 座水库中可占绝对优势, 相对生物量达 48% 以上, RDA 结果表明拟柱孢藻生物量与 TSI 呈明显的正相关, 说明拟柱孢藻优势的形成需要一定的营养水平支持。微囊藻作为全球广泛发生的水华优势种一直备受关注, 本研究发现 20 座水库微囊藻出现率及生物量一直处于较低的水平, 有研究发现微囊藻只能在高营养盐、高光照强度、低捕食压力的条件形成水华, 而拟柱孢藻在低营养盐、低光照强度、高捕食压力的情况下仍可占据优势^[23,24], 戴景峻等^[25]的研究发现以磷为限制性底物时, 从镇海水库分离出的拟柱孢藻 N8 藻株的半饱和常数比微囊藻低, 说明在低磷条件下, 该藻比微囊藻更具生长优势, 方差分析结果显示, 中富营养型水库与富营养型水库中拟柱孢藻生物量皆显著高于微囊藻 ($P < 0.05$), 推测广东省水库中拟柱孢藻相对于微囊藻具备更强的竞争力。

温度被认为是决定拟柱孢藻种群动态最重要的环境因素^[2]。研究表明拟柱孢藻生长发育的最适温度在 25 ~ 35℃ 之间^[22]。本研究发现拟柱孢藻在粤西地区出现率明显高于在温度相对较低的粤北地区, 虽然在粤北地区的沐溪水库中 3 个时期均检测到该藻, 但其生物量一直较低, 推测水温的升高是导致拟柱孢藻在广东省水库快速扩张的重要因素。在春季, 20 座水库水温均在 25℃ 以下, 拟柱孢藻在大部分水库并不占优势, 仅在水温接近该藻最适宜生长的温度范围的甘村水库中为优势种。在夏季, 20 座水库水温在 28.8 ~ 33.9℃ 之间, 显著高于春季的水温 ($P < 0.01$), 且在该藻最适宜生长的温度范围内, 这样的温度条件明显有利于拟柱孢藻的快速生长, 该藻生物量在浮游植物中所占的比例普遍比春季高, 这与拟柱孢藻喜高温环境的生长特性相符^[2], 从镇海水库分离出的 N8 藻株的比生长速率与温度成正比, 并在温度高达 28℃ 时具最适生长速率^[26]。在冬季, 20 座水库水体温度在 16.5 ~ 23.3℃ 之间, 明显低于夏季 ($P < 0.05$), 但拟柱孢藻在大部分水库中的生物量高于夏季, 且在该时期的出现率最高, 这可能是由于该藻种群在夏季已经形成一定的数量, 以及其对低温的耐受能力较强^[1,2], 即使在低温条件下也可继续生长, Bonilla

等^[27]的研究也发现该藻生物量在温度低至 11.2℃ 时可占浮游植物总生物量的 95%。由此推测, 拟柱孢藻对较宽温度范围的适应性可能是其在南亚热带地区形成优势的基础。

氮磷比可代表营养盐对浮游藻类生长的限制水平。当 TN/TP 小于 13 时, 氮为限制因子; 大于 20 时, 磷为限制因子^[28]。本次调查除了甘村水库的夏季、东风水库的冬季及沐溪水库的春季、夏季、冬季外, 其他样点都高于 20, 说明所调查水库大多受到磷限制。研究表明拟柱孢藻通常在高氮低磷的水体中达到较高生物量^[8], RDA 结果表明拟柱孢藻生物量与 TN 成明显的正相关, 与 SRP 成明显的负相关, 说明其对磷具有较高的吸收和储存能力, 在磷限制性水体中仍可生长并获得竞争优势^[10,11]。Kinnear^[29]的研究发现只要有充足的溶解性氮源供应, 拟柱孢藻在低磷的环境下生长速率更快; Burford 等^[30]的研究发现拟柱孢藻可在磷浓度低于检测限的水体中占据优势; 从镇海水库分离出的拟柱孢藻 N8 在磷浓度低至 0.02 mg·L⁻¹ 时仍能维持较长时间的生长, 说明该藻对低磷有较强的适应性^[25]。有研究发现拟柱孢藻在低 DIN 的水体中仍能存在并占优势, 本研究发现其种群生物量与 DIN 成明显的负相关, 推测该藻对氮源具有灵活的利用机制^[4], 以应对氮源在环境中的变化。此外, RDA 结果表明拟柱孢藻生物量与透明度呈明显的负相关, 推测该藻可忍受高度的光限制, 在低光照条件下也可增殖, 这种高耐阴性使其可在自我遮荫前形成一定的数量, 在透明度不高的水体具有优势^[10]。尽管有不少研究发现高 pH 有利于拟柱孢藻优势的形成^[20,22], 但由于本研究的水库 pH 值大部分呈弱碱性, 无明显的季节变化, 因此基本上可以排除其作为拟柱孢藻的发生及季节变化的驱动因子。综上所述, 拟柱孢藻易在低透明度、高总氮、低 DIN、低 SRP 的环境条件中形成优势。因此, 降低水体中总氮浓度可抑制拟柱孢藻优势的形成, 有利于控制拟柱孢藻水华发生。

4 结论

(1) 拟柱孢藻在广东省水库分布广泛, 并具有明显的空间和季节特征, 水温是决定拟柱孢藻空间及季节变化的关键因素。

(2) 拟柱孢藻的生物量与水体富营养化程度显著正相关, 高氮、低磷、低透明度的环境条件有利于拟柱孢藻形成优势。

参考文献:

- [1] Padisák J. *Cylindrospermopsis raciborskii* (Woloszynska) Seenayya et Subba Raju, an expanding, highly adaptive cyanobacterium: worldwide distribution and review of its ecology [J]. Archiv Für Hydrobiologie Supplementband Monographische Beitrage, 1997, **107**(4): 563-593.
- [2] Briand J F, Le Boulanger C, Humbert J F, et al. *Cylindrospermopsis raciborskii* (cyanobacteria) invasion at mid-latitudes: selection, wide physiological tolerance, orglobalwarming? [J]. Journal of Phycology, 2004, **40**(2): 231-238.
- [3] Kenesi G, Shafik H M, Kovács A W, et al. Effect of nitrogen forms on growth, cell composition and N₂ fixation of *Cylindrospermopsis raciborskii* in phosphorus-limited chemostat cultures [J]. Hydrobiologia, 2009, **623**(1): 191-202.
- [4] 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.
- [5] 谢平. 蓝藻水华及其次生危害[J]. 水生生态学杂志, 2015, **36**(4): 1-13.
- Xie P. Cyanobacterial blooms and their secondary harms [J]. Journal of Hydroecology, 2015, **36**(4): 1-13.
- [6] 郑小红, 肖琳, 任晶, 等. 玄武湖微囊藻水华暴发及衰退期细菌群落变化分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2956-2962.
- Zheng X H, Xiao L, Ren J, et al. Variation of bacterial community composition in the outbreak and decline of *Microcystis* spp. bloom in Lake Xuanwu [J]. Environmental Science, 2008, **29**(10): 2956-2962.
- [7] 朱梦圆, 朱广伟, 王永平. 太湖蓝藻水华衰亡对沉积物氮、磷释放的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 409-415.
- Zhu M Y, Zhu G W, Wang Y P. Influence of scum of algal bloom on the release of N and P from sediments of Lake Taihu [J]. Environmental Science, 2011, **32**(2): 409-415.
- [8] 雷腊梅, 雷敏婷, 赵莉, 等. 入侵蓝藻——拟柱胞藻的分布特征及生理生态研究进展[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(3): 531-537.
- Lei L M, Lei M T, Zhao L, et al. Review of the distribution and ecophysiology of an invasive cyanobacterial species, *Cylindrospermopsis raciborskii* [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(3): 531-537.
- [9] Lei L M, Peng L, Huang X H, et al. Occurrence and dominance of *Cylindrospermopsis raciborskii* and dissolved cylindrospermopsin in urban reservoirs used for drinking water supply, South China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, **186**(5): 3079-3090.
- [10] Yamamoto Y, Shiah F K. Factors related to the dominance of *Cylindrospermopsis raciborskii* (cyanobacteria) in a shallow pond in northern Taiwan [J]. Journal of Phycology, 2012, **48**(4): 984-991.
- [11] 赵莉, 雷腊梅, 彭亮, 等. 广东省镇海水库拟柱胞藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 的季节动态及驱动因子分析 [J]. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 193-199.
- Zhao L, Lei L M, Peng L, et al. Seasonal dynamic and driving factors of *Cylindrospermopsis raciborskii* in Zhenhai Reservoir, Guangdong Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(1): 193-199.
- [12] Xie J L, Yu G L, Xu X D, et al. The morphological and molecular detection for the presence of toxic *Cylindrospermopsis* (Nostocales, Cyanobacteria) in Beijing city, China [J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2018, **36**(2): 263-272.
- [13] 吴东浩, 徐兆安, 王玉, 等. 横山水库浮游植物群落结构季节性变化特征 [J]. 水生生态学杂志, 2012, **33**(4): 54-57.
- Wu D H, Xu Z A, Wang Y, et al. Seasonal variation of phytoplankton community structure in Hengshan Reservoir [J]. Journal of Hydroecology, 2012, **33**(4): 54-57.
- [14] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准 [S].
- GB 3838-2002, Environmental quality standards for surface water [S].
- [15] 林少君, 贺立静, 黄沛生, 等. 浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进 [J]. 生态科学, 2005, **24**(1): 9-11.
- Lin S J, He L J, Huang P S, et al. Comparison and improvement on the extraction method for chlorophyll a in phytoplankton [J]. Ecology Science, 2005, **24**(1): 9-11.
- [16] 林秋奇, 胡韧, 段舜山, 等. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物响应 [J]. 生态学报, 2003, **23**(6): 1101-1108.
- Lin Q Q, Hu R, Duan S S, et al. Reservoir trophic states and the response of plankton in Guangdong Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, **23**(6): 1101-1108.
- [17] 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.
- [18] Hillebrand H, Dürselen C D, Kirschtel D, et al. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae [J]. Journal of Phycology, 1999, **35**(2): 403-424.
- [19] McGregor G B, Fabbro L D. Dominance of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Nostocales, Cyanoprokaryota) in Queensland tropical and subtropical reservoirs: Implications for monitoring and management [J]. Lakes and Reservoirs: Research and Management, 2000, **5**(3): 195-205.
- [20] Yatigammana S K, Perera M B U. Distribution of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria) in Sri Lanka [J]. Ceylon Journal of Science, 2017, **46**(3): 65-80.
- [21] Stüken A, Rucker J, Endrulat T, et al. Distribution of three alien cyanobacterial species (Nostocales) in northeast Germany: *Cylindrospermopsis raciborskii*, *Anabaena bergii* and *Aphanizomenon aphanizomenoides* [J]. Phycologia, 2006, **45**(6): 696-703.
- [22] Kokociński M, Soininen J. Environmental factors related to the occurrence of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Nostocales, Cyanophyta) at the north-eastern limit of its geographical range [J]. European Journal of Phycology, 2012, **47**(1): 12-21.
- [23] Branco C W C, Senna P A C. Factors influencing the development of *Cylindrospermopsis raciborskii* and *Microcystis aeruginosa* in the Paranoá Reservoir, Brasília, Brazil [J]. Algological Studies, 1994, **75**(6): 85-96.
- [24] Soares M C S, de A. Rocha M I, Marinho M M, et al. Changes in species composition during annual cyanobacterial dominance in a tropical reservoir: physical factors, nutrients and grazing effects [J]. Aquatic Microbial Ecology, 2009, **57**: 137-149.
- [25] 戴景峻, 彭亮, 于婷, 等. 镇海水库拟柱胞藻的分离鉴定和氮磷对其生长的影响 [J]. 水生生物学报, 2015, **39**(3):

- 533-539.
- Dai J J, Peng L, Yu T, *et al.* The effects of phosphorus and nitrogen on the growth of *Cylindrospermopsis raciborskii* N8 isolated from the Zhenhai Reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(3): 533-539.
- [26] 于婷, 戴景峻, 雷腊梅, 等. 温度、光照强度及硝酸盐对拟柱胞藻(*Cylindrospermopsis raciborskii* N8)生长的影响[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(3): 441-446.
- Yu T, Dai J J, Lei L M, *et al.* Effects of temperature, irradiance and nitrate on the growth of *Cylindrospermopsis raciborskii* N8 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(3): 441-446.
- [27] Bonilla S, Aubriot L, Soares M C S, *et al.* What drives the distribution of the bloom-forming cyanobacteria *Planktothrix agardhii* and *Cylindrospermopsis raciborskii*? [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, **79**(3): 594-607.
- [28] Smith V H. Nutrient dependence of primary productivity in lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 1979, **24**(6): 1051-1064.
- [29] Kinnear S. *Cylindrospermopsis*: a decade of progress on bioaccumulation research [J]. *Marine Drugs*, 2010, **8**(3): 542-564.
- [30] Burford M A, O'Donohue M J. A comparison of phytoplankton community assemblages in artificially and naturally mixed subtropical water reservoirs [J]. *Freshwater Biology*, 2006, **51**(5): 973-982.

环境科学

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta	 HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer	 SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City	 WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir	 ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding	 YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City	 WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region	 LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field	 BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region	 QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios	 TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)