



文章栏目：流域水环境整治与修复

DOI 10.12030/j.cjee.202210031 中图分类号 X703.5 文献标识码 A

谭文明, 李惠平, 邱宇, 等. 深水型水库水质因子与藻类群落垂向演替及水华爆发机制分析[J]. 环境工程学报, 2023, 17(6): 2027-2036.
[TAN Wenming, LI Huiping, QIU Yu, et al. Insights of water quality factors and algal community vertical succession and outbreak mechanism in deep-water reservoir[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(6): 2027-2036.]

深水型水库水质因子与藻类群落垂向演替及水华爆发机制分析

谭文明¹, 李惠平¹, 邱宇², 方磊², 江梅², 黄生³, 郑震⁴, 谢丽¹, 庞维海^{1,✉}

1. 同济大学环境科学与工程学院, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 福建省金皇环保科技有限公司, 福州 350013; 3. 莆田市生态环境局, 莆田 351100; 4. 福州市环境科学研究院, 福州 350000

摘要 将莆田市东圳水库垂向划分为表层、中层、和深层, 研究其藻类群落的分布特征及其受环境因子影响的演变规律, 进而明晰“水华”爆发机制。结果表明, 水库中共检出浮游藻类 7 门 39 属, 群落结构主要以蓝藻、绿藻、硅藻和隐藻为主, 在不同季节沿水库垂向分布呈现显著差异性。表层和中层水体中优势藻类为绿藻门和蓝藻门, 受水温、光照、DO 和 TN 影响; 深层水体优势藻类为硅藻和隐藻, 主要受水温和 TN 影响。对水库中营养盐分析结果表明, 东圳水库 N/P 平均值达到 32.4, 呈典型磷限制性特征, 水库氮污染主要来自农业面源输入和内源释放。底泥中氮类物质易于在夏季分层期发生释放, 并与 DO 结合发生形态转化后输入至上层水体, 由此导致“水华”现象的发生。针对东圳水库水华防范与治理, 需严格防控点源和农业面源污染, 并建设水力扰动设施以及增设原位修复装置等措施, 全方位防控水华现象的发生。本研究通过分析东圳水库藻类功能组时空演替, 有助于确定东圳水库藻类爆发机制, 可为水库藻类治理、水环境生态保护提供参考。

关键词 深水型水库; 水体分层; 藻类群落; 垂向演替; RDA 分析; 水华

水库具有养殖、航运、灌溉、防洪和供水等多种生态功能, 是我国重要的地表水源^[1]。相比于江河, 水库流速缓慢、水面宽阔、水体较深, 库内水体更替缓慢, 各种有机物、营养盐等物质易于在库区富集, 进而引起水华季节性爆发等问题^[2]。根据平均水深可将水库湖泊分为三类: 浅水型 (<10 m)、亚深水型 (10~50 m) 和深水型水库 (>50 m)。水库环境和生态系统受水深影响显著, 其中深水型水库在夏秋季节更容易出现垂直热分层现象, 从而抑制热量、氮磷营养盐及溶解氧的纵向输移, 影响水质及藻类群落的分布^[3-4]。另外, 由于水库本底营养盐水平较高, 库底沉积物中的氮磷营养物质易于在夏季释放至水体中, 从而造成深水型水库水华现象频发。罗婧等^[5]对红枫湖沉积物磷释放通量的估算后发现, 磷在夏季的释放通量达到 6.3~8.0 t, 约占水体磷物质总量的 22%~28%。曾明正等^[6]对我国北方地区周村水库进行研究后发现, 水体分层期处于 4—11 月, 此时优势藻属由绿藻门 (45.9%) 变化为硅藻门 (58.4%); 混合期为 12 月至来年 3 月。因此, 深水型水库分层现象导致的水质因子变化是影响藻类群落演替与爆发的主要因素, 明晰水库垂向分布水质因子和藻类群落变化规律有助于防范和治理水库“藻华”现象的发生。

收稿日期: 2022-10-10; 录用日期: 2023-02-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC3200805); 福建省环保科技计划项目 (2021R015)

第一作者: 谭文明 (2000—), 男, 硕士研究生, 2130569@tongji.edu.cn; ✉通信作者: 庞维海 (1976—), 男, 博士, 助理教授, pangweihai@tongji.edu.cn

近年来,国内相关深水型水库藻类爆发问题频发,对水库生态环境造成严重影响^[7-8]。东圳水库位于莆田市,核准水位为88.1 m,总库容为 $4.35 \times 10^8 \text{ m}^3$,是典型的深水型水库。该水库对莆田市社会经济发展起着至关重要的作用^[9]。但由于该地区过去发展未严格控制污染物质排放,东圳水库氮营养盐浓度在2011—2016年曾一度保持上升趋势,库体生态系统常年受“水华”影响^[10]。原瑞芬等^[11]对东圳水库面源风险的评估表明,东圳水库仍受到较为严重的农业面源污染,且在每年5—10月为高风险期。尽管已有针对东圳水库相关治理方案的实施,但由于水库中营养盐本底浓度较高,当环境因子异常时仍有可能出现“水华”现象。先前对于东圳水库的研究主要与污染物来源及库体藻类群落特征有关^[12-13],但针对库体水热分层现象的相关研究还较欠缺,尤其缺少水质因子与藻类群落垂向演替相关研究。

本研究以2019年12月至2020年6月间东圳水库水质和藻类群落监测数据为基础,探究水库不同时期环境因子和藻类群落的垂向分布特征,通过RDA分析(redundancy analysis, RDA)明确二者之间的相互作用。根据不同季节环境因子与藻类群落垂向变化的分布热图,进一步探讨环境因子变化造成水库藻类爆发的关联机制,并提出防范水库“水华”的相关措施,以期为该水库“水华”现象的精准防控提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

根据东圳水库面积大小、形态特点及项目研究需要,结合实地考察,确定布设水环境采样点S1(118°58'37"N, 25°29'2"E)为分层采集样品点位。自水面至水底均匀分为3层,分别取采集表层(水下0.5 m)、中层(水下10 m)、深层(水下20 m)的样品。

1.2 样品采集

据《水质样品的保存和管理技术规定》(HJ493-2009)相关规范,采取瞬时水样,每层采水样3 L,装入有编码的样品袋,4℃冷藏保存带回实验室。水深、水温、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、pH现场检测记录,总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)、化学需氧量(chemical oxygen demand, COD_{Mn})等指标带回实验室监测分析。

1.3 水质参数测定

水质分析方法参照《水和废水监测分析方法》(国家环境保护总局编委会,2002)。TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636-2012)测定;TP采用钼酸铵分光光度法(GB 11893-89)测定; COD_{Mn} 采用高锰酸盐指数的测定方法(GB 11892-89)测定;叶绿素a(Chlorophyll a, Chl-a)采用丙酮法(SL 88-2012)测定。

1.4 浮游藻类鉴定及计数

取混匀水样50 mL,加入5%甲醛溶液固定保存样品,依据《中国淡水生物图谱》、《中国淡水藻志》和《中国淡水藻类—系统、分类及生态》进行藻类种类鉴定。浮游植物定量检测时,吸取0.1 mL置于0.1 mL计数框内(面积20 mm×20 mm)进行计数,在10×40倍镜下选择3~5行逐行计数。若部分点位浮游植物数量很少,则全片计数。各样品均计数2片,取平均值。藻类数量计算见式(1)。

$$N = \frac{N_0}{N_1} \times \frac{V_1}{V_0} \times P_n \quad (1)$$

式中: N 为1 L水样中浮游植物的数量,个; N_0 为计数框总格数,个; N_1 为计数过的方格数,个; V_1 为1 L水样经浓缩后的体积,mL; V_0 为计数框容积,mL; P_n 为计数的浮游植物个体数,个。

1.5 数据处理与分析

采用 CANOCO 5.0 对各项指标进行 RDA 分析,分析前利用蒙特卡罗检验排除贡献小的环境因子。采用 Origin 2017 中的数据拟合功能实现对水环境因子及藻类群落的垂向分布拟合。

2 结果与讨论

2.1 水质变化分析

如表 1 所示,东圳水库水温随季节变化较大。12月、1月和3月水温平均值分别为 (16.33 ± 0.21) °C、 (13.77 ± 0.15) °C 和 (16.97 ± 0.23) °C。此阶段属于水库混合期,水温垂向差异较小。4月—6月水温平均值分别为 (18.43 ± 2.50) °C、 (21.03 ± 5.37) °C 和 (26.60 ± 4.47) °C。此阶段属于水库分层期,水温垂向差异较大。pH 与水深呈负相关,表层水体呈弱碱性,而深层水体呈弱酸性;且分层期 pH 的降幅更为明显,6月份最为显著,表层、中层和深层 pH 分别为 8.23、6.00 和 5.73。这是由于分层期表层水体光照充足,水温较高,导致藻类数量较多、活性较强,大量藻类的光合作用改变了水体中的碳酸盐平衡,导致 pH 较高^[14];而底层水体由于温度升高、DO 较低,底部沉积物水解酸化加剧,导致深层水体 pH 远低于表层水体。溶解氧 (DO) 随深度增加不断降低,混合期 (12月—3月) DO 随水深变化较弱,分层期 (4月—6月) 受水深影响显著,呈现表层浓度高,深层浓度低的规律。此现象与高锐等^[15]对潘家口水库 DO 与温度呈正相关,且受热分层影响显著的研究结论一致。TN 和 TP 垂向差异较小, TN 在 5 月最低,平均质量浓度为 (0.21 ± 0.08) mg·L⁻¹;在 6 月最高,平均质量浓度为 (0.55 ± 0.04) mg·L⁻¹。TP 为 0.01~0.03 mg·L⁻¹,深层水体 TP 略高于表层水

表 1 东圳水库 2020 年 12 月至 2021 年 6 月期间水质参数变化特征

Table 1 Variation characteristics of water quality parameters of Dongzhen Reservoir from Dec. 2020 to Jun. 2021

垂直分布	月份	水温/ °C	pH	DO/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	TDN/ (mg·L ⁻¹)	NO ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	COD _{Mn} / (mg·L ⁻¹)	Chl-a/(Cells·L ⁻¹)
表层0.5 m	12	16.50	7.01	7.26	0.41	0.39	0.26	0.37	0.01	2.68	3.61
	1	13.60	5.32	7.88	0.30	0.26	0.27	0.03	0.01	2.63	6.97
	3	17.10	6.85	8.94	0.27	0.26	0.25	0.06	0.01	4.38	3.22
	4	20.90	7.99	9.45	0.34	0.23	0.31	0.04	0.01	3.12	7.59
	5	27.00	9.15	9.24	0.14	0.13	0.07	0.05	0.03	4.57	12.08
	6	31.30	8.23	8.4	0.52	0.38	0.44	0.03	0.01	4.62	5.82
中层10 m	12	16.40	6.96	7.1	0.47	0.36	0.23	0.31	0.02	2.87	3.00
	1	13.80	5.08	7.94	0.30	0.28	0.24	0.02	0.01	2.73	6.97
	3	17.10	6.95	8.92	0.27	0.22	0.23	0.07	0.01	4.3	1.95
	4	18.50	7.25	7.09	0.40	0.14	0.35	0.08	0.01	2.85	2.65
	5	19.50	6.80	2.57	0.20	0.18	0.17	0.09	0.02	4.06	6.62
	6	26.10	6.00	4.3	0.54	0.41	0.43	0.05	0.01	4.59	11.10
深层20 m	12	16.10	7.03	7.61	0.39	0.38	0.31	0.03	0.01	2.78	4.80
	1	13.90	5.12	7.76	0.29	0.20	0.22	0.02	0.01	2.25	7.12
	3	16.70	6.90	6.73	0.30	0.33	0.27	0.02	0.01	4.96	1.92
	4	15.90	6.82	2.81	0.47	0.25	0.45	0.14	0.02	2.85	3.42
	5	16.60	6.70	1.97	0.29	0.23	0.18	0.15	0.01	4.11	1.76
	6	22.40	5.73	4.17	0.59	0.36	0.25	0.30	0.01	4.65	6.00

体,这可能是由于厌氧条件下水库沉积物中磷物质的释放所致^[16-17]。由此可见,东圳水库TP释放浓度较低,且季节性变化不明显,水库平均N/P达到32.4(最低值为10,最高值为59),属于典型的磷限制型水库(N/P>16)^[18]。

2.2 藻类群落结构的垂向分层与季节性变化

东圳水库藻类群落结构(属水平)随深度的分布规律如图1所示。监测期内共检出浮游藻类7门39属,其中硅藻9属、蓝藻6属、绿藻16属、金藻和甲藻各2属、裸藻和隐藻各1属。水库全年浮游藻类群落结构主要以硅藻、蓝藻、绿藻和隐藻为主,且受到水深和季节变化的影响显著。硅藻和隐藻密度在1月份(混合期)深层水体达到最高;4月至6月期间,硅藻和隐藻主要集中于中层(4~10 m)水体。隐藻由于具有特殊的细胞膜和光合色素,其鞭毛可使其向水层中高营养盐浓度区域迁移以满足生长需求,因此在不同浓度营养盐环境中均能占优势^[19-20]。此外,隐藻兼具自养和异养生长功能,高有机质的水体中利于其生长^[21]。杨威等^[22]对刘桥湖研究发现,秋季湖水透明度较低、营养盐含量较高及适宜的水温,为卵形隐藻的生长提供了条件。东圳水库隐藻门类也可能以卵形隐藻为主,且具有较高生物量。而绿藻因其趋光性较强以及更适宜于较高水温,浓度在6月达到最高,主要集中于表层-中层(0~10 m)水体。何少钦等^[9]对东圳水库2019—2020年的藻类变化研究也发现,藻细胞浓度在6—8月份后相对处于较低水平。进一步对藻类属水平的垂向分布可知,在表层水体,12月和1月份尖头藻(*Raphidiopsis*)和直链藻(*Melosira*)的占比分别达到90.76%和88.26%;在3—4月,直链藻(*Melosira*)和隐藻(*Cryptophyta*)占比之和分别达到95.19%和92.6%;在5—6月,其他藻类占比显著增加,藻类多样性升高,以绿藻和蓝藻为主。中层(10 m)水体优势藻类与表层水体大致类似,但藻细胞浓度有所下降,其中针杆藻(*Synedra acus*)和曲壳藻(*Achnanthes*)占比有所升高。深层水体藻类密度和多样性进一步降低,优势藻类仍以直链藻(*Melosira*)、针杆藻(*Synedra acus*)、尖头藻(*Raphidiopsis*)、细鞘丝藻(*Lyngbya*)和隐藻(*Cryptophyta*)为主。其中在温度较低的12~1月,直链藻(*Melosira*)、尖头藻(*Raphidiopsis*)之和的占比仍达到94.70%和88.78%;3—5月份主要以直链藻为主,占比分别达到94.21%、97.66%和52.99%;而6月份则又以尖头藻(*Raphidiopsis*)为主,占比达到91.79%。在20 m深的水库水体,直链藻为优势藻类。该藻属于典型硅藻门,常作为优势藻类在我国深水库源中被检测到^[23-24]。参照优势藻类分布与水体营养盐判定^[25],东圳水库水体呈现“富营养”状态。

何少钦等^[9]对东圳水库2019—2020年的藻类变化研究也发现,藻细胞浓度在6—8月份后相对处于较低水平。进一步对藻类属水平的垂向分布可知,在表层水体,12月和1月份尖头藻(*Raphidiopsis*)和直链藻(*Melosira*)的占比分别达到90.76%和88.26%;在3—4月,直链藻(*Melosira*)和隐藻(*Cryptophyta*)占比之和分别达到95.19%和92.6%;在5—6月,其他藻类占比显著增加,藻类多样性升高,以绿藻和蓝藻为主。中层(10 m)水体优势藻类与表层水体大致类似,但藻细胞浓度有所下降,其中针杆藻(*Synedra acus*)和曲壳藻(*Achnanthes*)占比有所升高。深层水体藻类密度和多样性进一步降低,优势藻类仍以直链藻(*Melosira*)、针杆藻(*Synedra acus*)、尖头藻(*Raphidiopsis*)、细鞘丝藻(*Lyngbya*)和隐藻(*Cryptophyta*)为主。其中在温度较低的12~1月,直链藻(*Melosira*)、尖头藻(*Raphidiopsis*)之和的占比仍达到94.70%和88.78%;3—5月份主要以直链藻为主,占比分别达到94.21%、97.66%和52.99%;而6月份则又以尖头藻(*Raphidiopsis*)为主,占比达到91.79%。在20 m深的水库水体,直链藻为优势藻类。该藻属于典型硅藻门,常作为优势藻类在我国深水库源中被检测到^[23-24]。参照优势藻类分布与水体营养盐判定^[25],东圳水库水体呈现“富营养”状态。

2.3 不同深度藻类与水质因子偶联关系分析

采用RDA分析研究藻类群落与不同水质指标之间的偶联关系。图2(a)为藻类群落与环境因子的整体RDA分析结果,其中RDA1占比达到43.54%,RDA2占比达到24.18%,较好地解释了数据总差异。整体来看,水温、DO、pH、TN等水质因子对甲藻、蓝藻、绿藻和裸藻门生长具有一定

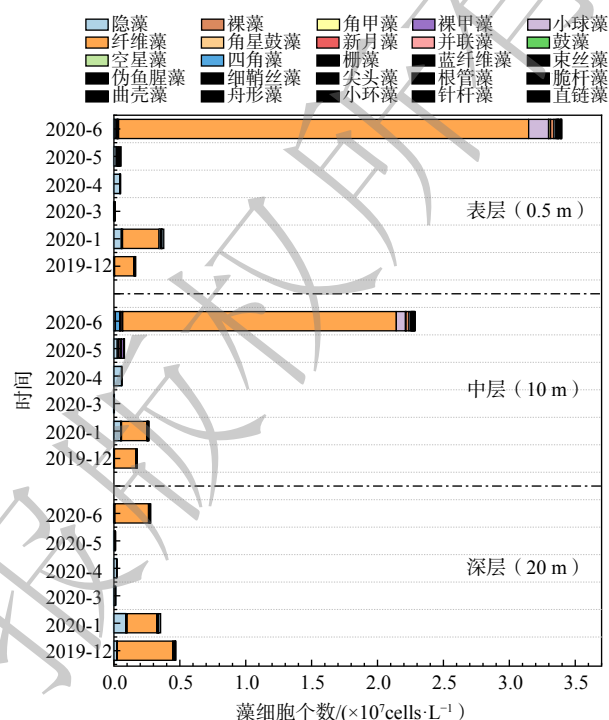


图1 东圳水库不同时期藻类群落垂向分布 (占比大于1%)

Fig. 1 Vertical distribution of algae communities in Dongzhen Reservoir at different periods (proportion > 1%)

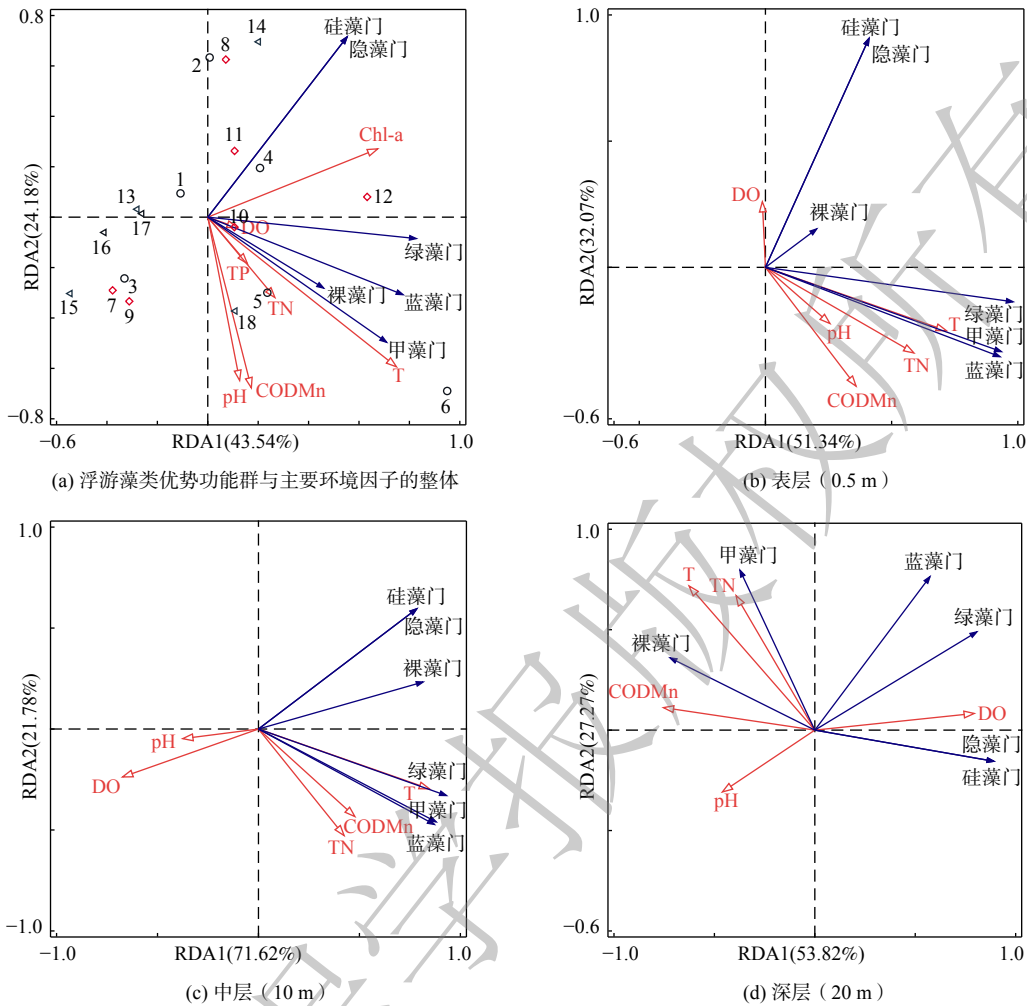


图 2 水库不同水层藻类功能群组结构与环境因子的冗余分析

Fig. 2 Redundancy analysis of algae functional group structure and environmental factors in different water layers of reservoir

促进作用，但对硅藻和隐藻门群落影响较弱。水温和 TN 对藻类群落影响显著^[26]，本研究中的绿藻、蓝藻和甲藻门也呈现相似规律，但隐藻和硅藻则与水温、pH、COD_{Mn} 和 TN 呈较弱相关性或是负相关。这主要是由于硅藻门和隐藻门的特异性导致。这与甄卓^[27]对东圳水库蓝藻群落结构及多样性研究中的 RDA 分析结果一致。在表层水体 (图 2 (b))，绿藻、蓝藻和甲藻门显著受到水温、TN、pH 和 COD_{Mn} 的影响。其中，水温是最主要因素，硅藻、隐藻和裸藻则受 DO 影响较大。在中层水体 (图 2 (c))，绿藻门与水温呈现极其显著的相关性 ($P < 0.01$)。在深层水体 (图 2 (d))，蓝藻和绿藻门与环境因子相关性较差，甲藻和裸藻与水温、TN 和 COD_{Mn} 相关性显著，隐藻和硅藻则与 DO 相关性较大。闫苗苗等^[28]也发现，表层水体藻类群落与水温、DO、pH、浊度、TP、NH₄⁺-N 和 Chl-*a* 等多种水质指标因子有关，在水深 6 m 处的藻类群落主要受到 TN、电导率和铁盐的影响。

图 3 表示不同时期水质因子与藻类群落的垂向交互影响。如图 3 (a) 所示，水库在 12 月至次年 3 月的混合期垂向温度差异较小；而 4—6 月的分层期水温垂向最大温差可达 7.9 °C。李衍庆等^[29]在对陕西李家河水库的研究中也发现类似现象。水温是影响水库水质的重要因子，温度差异导致水体分层，影响营养盐扩散，同时也影响藻类同化作用、细胞酶活性和代谢速率，进而改变藻类群落生长和分布特征^[30]。根据图 3 中不同门类藻的垂向分布变化可知，混合期硅藻门和隐藻门在深层水体的密度高于表层水体，绿藻门则呈现相反规律；在分层期，表层水体中硅藻、隐藻和绿

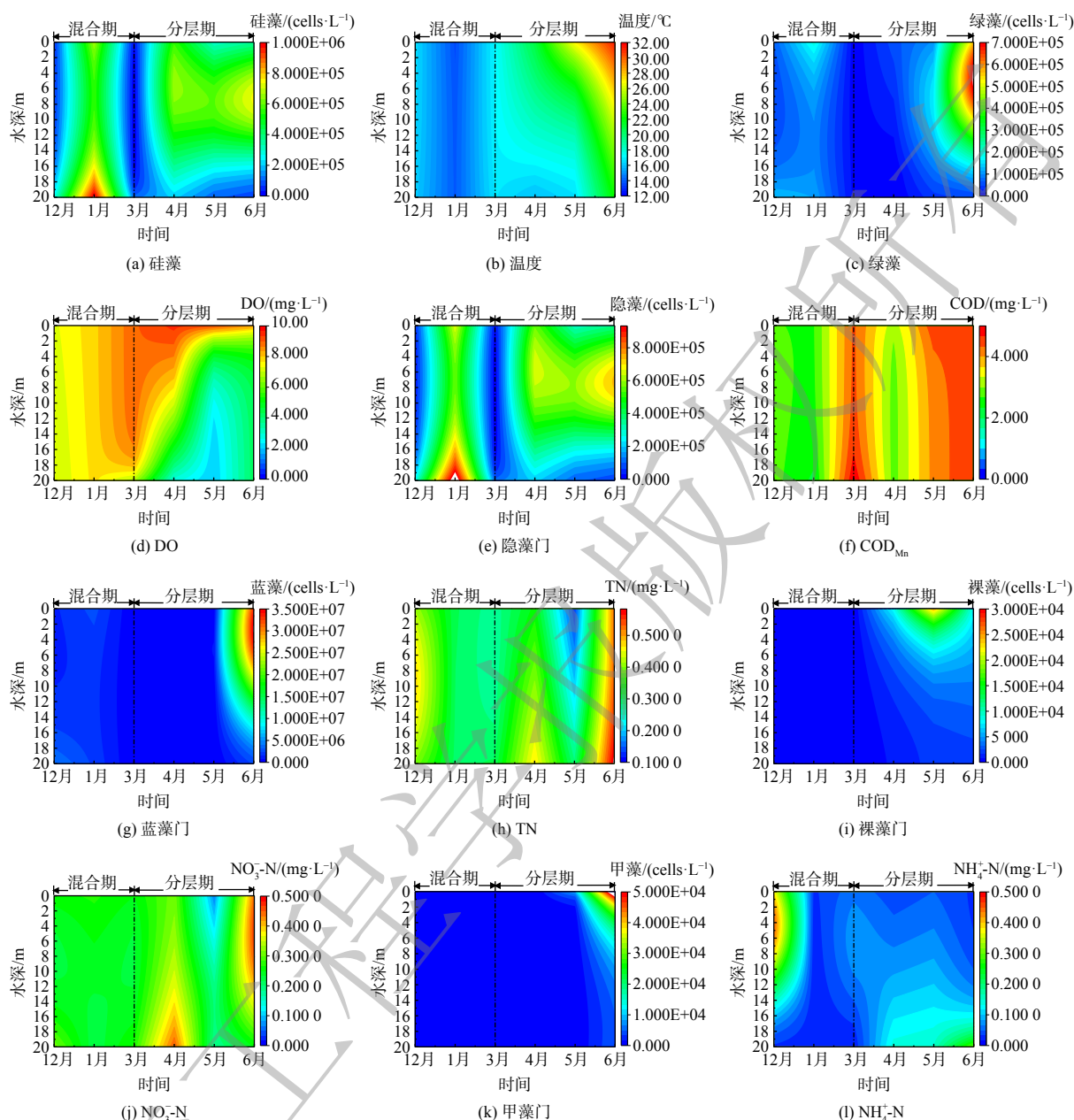


图 3 不同时期东圳水库典型水质因子与主要藻类群落的垂向分布及变化

Fig. 3 Changes of typical water quality factors and main algae communities in Dongzhen Reservoir in different periods

藻门的生物量明显高于深层水体，且与水温呈显著正相关关系。如图 3 (d) 所示，混合期 DO 同水温呈现相似规律，DO 垂向差异较小；分层期 DO 的垂向分布差异显著。尤其在 6 月份，DO 在 0~1 m 的区域较高，水深大于 1 m 的水体 DO 骤降。这主要是因为表层水体与空气接触密切，易于与外界交换补充溶解氧，而较深水域光照强度较弱，水体结构较稳定，DO 沿水体垂向混合作用较弱。硅藻、绿藻、隐藻、蓝藻和裸藻在 5—6 月达到最高，且主要分布于 2~8 m 处。如图 3 (k) 和图 3 (d) 所示，甲藻数量主要在 6 月达到最高，且主要分布于水体 0~2 m，其垂向分布与 DO 呈现一致性。

图 3 还表明，混合期 TN 受水深影响较小，而分层期 TN 随着水深增加明显升高，水库在 6 月份表层、中层和深层 TN 浓度分别达到 0.523、0.536 和 0.589 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这主要是因为分层期水库水温升高，但溶解氧的置换作用减弱，下层水体以酸性厌氧环境为主，有利于水库沉积物中氮物质的

释放,导致下层总氮浓度偏高。另外,值得注意的是,3—6月水库TN整体呈现上升趋势,但在5月份时,表层、中层和深层的TN均骤降。曾明正等^[6]在对周村水库水体季节性分层现象及其水质响应特性的研究中也发现类似现象。分析其原因是周村水库4—5月期间,浮游植物密度不断上升,TN持续下降。根据图3(f),在3月、5月和6月,COD_{Mn}整体呈现上升趋势,并在6月达到最高。但在4月份时水库COD_{Mn}骤降,混合期COD_{Mn}远低于分层期,较TN骤降提前了一个月。这可能与藻类将水体中的NO₃⁻-N转化为NH₄⁺-N才能利用有关^[31],NO₃⁻-N被吸收转化为藻细胞内部氨基酸或含碳化合物的同时,伴随部分当量化合物和骨架碳等物质的消耗^[32]。

图4表示监测期间水库中不同形态氮的转化比例。在12月份,表层、中层和深层水体NH₄⁺-N的质量浓度分别为0.37、0.31和0.03 mg·L⁻¹,明显高于其他月份,这可能与外源输入有关。在1—3月,TN不断升高;而在4—5月,TN整体下降,其中NO₃⁻-N质量浓度明显下降,NH₄⁺-N质量浓度却略有升高。NH₄⁺-N质量浓度在表层、中层和深层水体分别上升20.0%、11.1%和6.7%,NO₃⁻-N质量浓度分别下降77.4%、51.4%和60.0%。此现象与藻类生长爆发有关,5月份表层和中层水体叶绿素a质量浓度相对4月分别上升了37.2%和60.0%,深层水体叶绿素a质量浓度降低了94.3%。陈文焯等^[33]在对富营养化藻类爆发过程中不同形态氮的利用研究中发现,随着微囊藻生物量的上升,NH₄⁺-N质量浓度在前期呈现较大波动,后期缓慢上升;而NO₃⁻-N质量浓度则从一开始就呈现不断降低的规律现象。这说明藻类主要利用NO₃⁻-N,表层水体由于光照充足、DO高,NO₃⁻-N被藻类的利用率也最高。

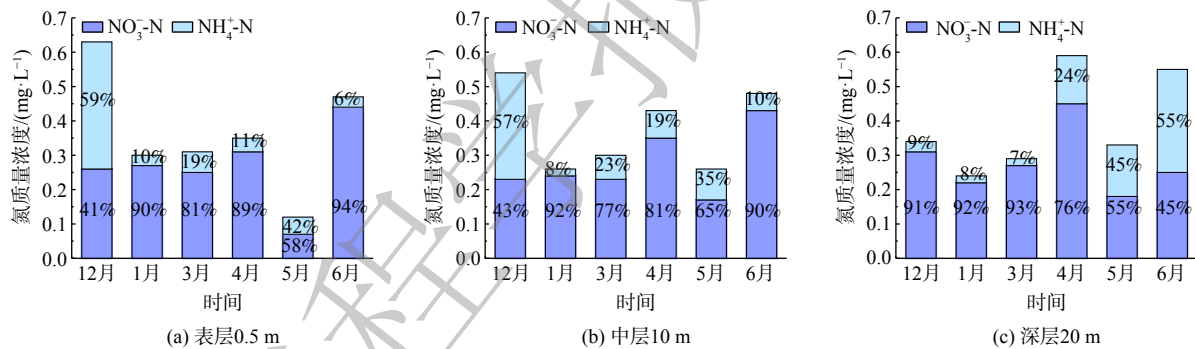


图4 东圳水库2019年12月—2020年6月不同形态氮的转化

Fig. 4 Nitrogen transformation of Dongzhen Reservoir in different periods

2.4 针对水质因子垂向分层与季节性变化的藻类防控措施

深水型水库随季节变迁具有明显的水体分层特征和水质时空差异性,影响东圳水库浮游植物群落分布的环境因子主要有光照、水温、DO、pH和氮素等。东圳水库藻类群落垂向分布及氮形态转化过程如图5所示。水库氮素污染由外源输入和内源释放为主,混合期主要为NH₄⁺-N输入过程,表层好氧环境下NH₄⁺-N转化为NO₃⁻-N,向水库底部沉积。在分层期,表层仍以外源性氮输入为主,而深层水体沉积物发生氮的内源性释放,且随着条件变化NH₄⁺-N和NO₃⁻-N形态间发生转化。如图5(a)所示,混合期优势藻类为硅藻和隐藻,且在垂向均匀分布。水温、光照等因子主要影响水体藻-菌联合体系对氨氮和硝态氮的吸收转化速率,进而影响藻类群落分布及变化规律^[34]。如图5(b)所示,分层期由于水热分层现象的发生,表层水体受光照、水温和DO等物理因素与氮、磷和COD_{Mn}等化学因素的综合影响,外源输入的NH₄⁺-N在好氧环境下发生硝化反应,转换为NO₃⁻-N,因此藻细胞质量浓度达到最高,优势藻类以趋光性较强的绿藻门和蓝藻门为主。相关研究也表明^[35],水库春季多以低温、小型且高比表面积型的绿藻、硅藻和甲藻为主;而夏季多以高温、大型或团状且低比表面积型的蓝藻、绿藻和硅藻为主。深层水体由于水温升高,但DO较

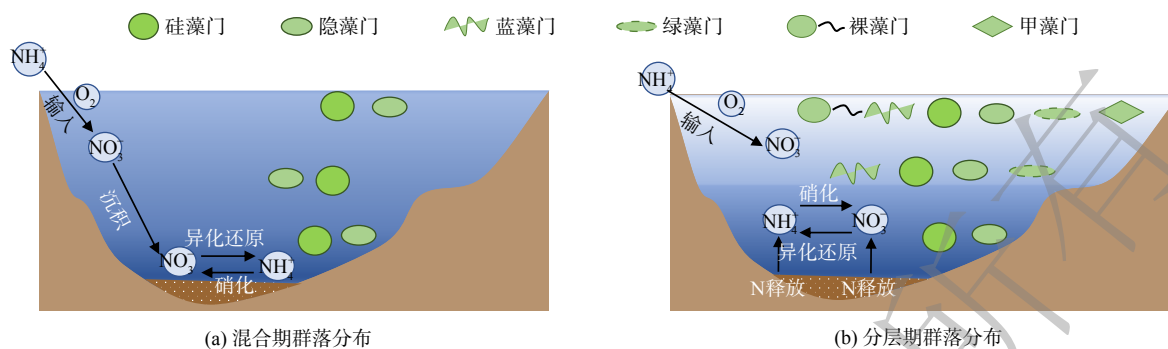


图5 东圳水库不同水深下的藻类群落分布及氮形态转化

Fig. 5 Distribution of Algae Community and Transformation of Nitrogen Species at Different Water Depths in Dongzhen Reservoir

低, 厌氧条件加剧底层沉积物水解酸化、氮磷释放, 优势藻类以硅藻和隐藻为主, 造成藻类群落演替的主要因素为氮、磷物质, 其中氮形态仍以 NO_3^- -N 为主, 但由于异化还原为铵 (dissimilatory nitrate reduction to ammonium, DNRA) 作用, NH_4^+ -N 占比升高, 此现象在深层水体最为明显。根据 2017 年对东圳水库氮磷污染源的调查结果^[36], 水库 TP、 NH_4^+ -N 和 TN 的外源性输入总量分别达到 20.54、83.25 和 135.43 t, 流域主要污染物为 NH_4^+ -N 和 TN, 其中农业面源污染贡献总氮符合达到 66.3%, 农村生活污水贡献占比达到 11.6%。相关学者对东圳水库 2018 年污染负荷的预测也发现, 由农业面源导致流域内 TP、 NH_4^+ -N 和 TN 的污染负荷分别占入库总量的 66.6%、65.4% 和 67.9%, 污染源以流域内分布的 57.33 km^2 枇杷树为主, 果园每平方千米年平均化肥施用量达 307.5 $\text{t}^{[37]}$ 。

综上所述, 东圳水库在时间上分为混合期和分层期 2 个阶段, 水库主要受到来自农业面源的氮污染, 季节变化使得水温、DO 和光照等环境因子发生变化, 导致氮的浓度和形态发生变化。尤其在夏季, 库体水温和 DO 升高、光照增强, 水库发生明显分层现象, 由外界输入至表层的外源性氮素无法沉淀到底部, 底部沉积物中的内源性氮发生释放, 为藻类提供营养条件, 属于水华风险易发期。水华治理可将水体水质因子与浮游植物生长策略相结合^[38]。针对东圳水库水华防治方案见图 6。具体措施有如下 4 点。1) 严控点源污染: 通过现场水处理站对当地农业、工业等排放的点源性高浓度污染物集中处理后再排放, 直接减少污染物向水库的直接输入。2) 降低农业面源污染输入^[39]: 通过对流入水库的水体进行前置处理可有效减轻水库水质污染, 降低入库水体浊度, 削减水库氮、磷输入量, 是水库生态系统良性发展的重要措施。边博等^[40]采用复合型前置库减少塘马水库污染物输入量时发现, 系统滞水 1 天, 入库水体氮、磷、COD 平均削减率可分别达 67.2%、68.2% 及 89.3%。3) 建设水力扰动设施: 东圳水库属于深水型水库, 夏季具有明显分层现象, 水力扰动可有效破坏库体热分层结构、改善光照条件以及抑制深层水体氮磷营养盐的释放作用, 从而改变藻类生境条件, 降低水华现象的发生风险。目前该技术在天津于桥水库、西安黑河水库和太原汾河水库等水体的水华防治工程中见到显著效果^[41-43]。4) 增设原位修复装置^[44-45]: 当发生水华时, 可通过机械除藻、黏土除藻、控造船原位打捞等技术, 实现水库水华的修复与治理。

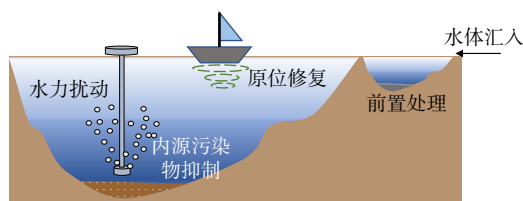


图6 东圳水库治理技术方案

Fig. 6 Technical scheme of Dongzhen Reservoir treatment

3 结论

1) 东圳水库共检出浮游藻类 7 门 39 属, 其中硅藻 9 属、蓝藻 6 属、绿藻 16 属、金藻和甲藻各

2属、裸藻和隐藻各1属。全年浮游藻类群落结构主要以硅藻、蓝藻、绿藻和隐藻为主。

2) 藻类群落垂向分布受不同水质指标影响,且呈显著差异性。表层水体藻类群落显著受水温、TN和 COD_{Mn} 影响。在中层水体,绿藻、蓝藻和甲藻门与水温和TN呈显著相关性,硅藻、隐藻和裸藻门与DO和pH值呈负相关性。在深层水体,蓝藻和绿藻门与环境因子相关性较差,甲藻和裸藻主要受水温、TN和 COD_{Mn} 的影响,DO是影响隐藻和硅藻的主要水质因子。

3) 水温、pH和溶解氧是影响氮形态转化的关键因子,进而影响藻类群落。分层期表层水体优势藻类以绿藻门和蓝藻门为主;深层水体由于厌氧条件以及水温升高等因素驱动沉积物中的氮释放及其形态转化,优势藻类以硅藻和隐藻为主。

4) 东圳水库氮磷污染物来源以农业输入为主,水华风险易发生于夏季分层期,垂向分布于0~10 m水体范围内。当地政府可通过严控点源污染、减少农业面源输入、建设水力扰动设施和增设原位修复装置等措施,全方位加强水库富营养化治理,防控东圳水库水华现象的发生。

参考文献

- [1] ZHANG H, JIA J, CHEN S, et al. Dynamics of bacterial and fungal communities during the outbreak and decline of an algal bloom in a drinking water reservoir[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(2): 361.
- [2] 卢金锁,张颖,胡亚潘.深水型水库中藻类功能群组演替及其与环境因子的关系[J].*环境工程学报*, 2014, 8(11): 4605-4611.
- [3] MIN, LIU, LEMIAN et al. Community dynamics of free-living and particle-attached bacteria following a reservoir *Microcystis* bloom. [J]. *Science of the Total Environment*, 2019.
- [4] 周川,蔚建军,付莉,等.三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系[J].*环境科学*, 2016, 37(3): 873-883.
- [5] 罗婧,陈敬安,王敬富,等.利用薄膜扩散梯度技术估算红枫湖沉积物磷释放通量[J].*矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(5): 1014-1020.
- [6] 曾明正,黄廷林,邱晓鹏,等.我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性[J].*环境科学*, 2016, 37(4): 1337-1344.
- [7] 罗桂林,田林锋.基于WQI法的宁夏湖泊藻类爆发过程水环境质量变化及溯源探究[J].*环境化学*, 2021, 40(7): 2073-2082.
- [8] 李璇,周燕平,夏琼琼,等.磷胁迫对藻类生长代谢的影响及藻类对胁迫响应机制的研究进展[J].*环境化学*, 2020, 39(8): 2074-2083.
- [9] 何少钦.莆田市东圳水库水生态环境现状分析及修复探究[J].*亚热带水土保持*, 2022, 34(1): 27-33.
- [10] 刘开国,陈武强.东圳水库流域氮源污染调查[J].*化学工程与装备*, 2018(12): 309-311.
- [11] 原瑞芬,朱锦乐,陈勇红.东圳水库保护区农业面源污染现状及风险评估[J].*农业与技术*, 2020, 40(16): 101-103.
- [12] 巫丽俊,黄晓庆,孙华.东圳水库水质模拟预测及污染物总量控制研究[J].*水生态学杂志*, 2017, 38(5): 14-20.
- [13] 郑洪萍.东圳水库浮游植物群落特征与营养状况分析[J].*化学工程与装备*, 2012(5): 193-195.
- [14] 沈青.地表水中藻类代谢对pH和含氧量影响分析[J].*环境科学与技术*, 2011, 34(S2): 261-262.
- [15] 高锐,黄岁樑,孙逸璇.潘家口水库热分层期溶解氧垂向分布及影响因素[J].*水资源与水工程学报*, 2022, 33(3): 39-49.
- [16] 夏品华,林陶,李存雄,等.贵州高原红枫湖水库季节性分层的水环境质量响应[J].*中国环境科学*, 2011, 31(9): 1477-1485.
- [17] 卢金锁,李志龙.热分层对水库水质的季节性影响——以西安黑河水库为例[J].*湖泊科学*, 2014, 26(5): 698-706.
- [18] 李付宽,郑剑锋,贾泽宇,等.海河干流天津段氮磷对藻类生长的影响及动力学分析[J].*环境工程学报*, 2017, 11(2): 959-964.
- [19] NEGRO A I, HOYOS C D, VEGA J C. Phytoplankton structure and dynamics in Lake Sanabria and Valparaiso reservoir (NW Spain)[J]. 2000, 424(1/2/3): 25-37.
- [20] ALBAY M, AK Aalan R. Factors influencing the phytoplankton steady state assemblages in a drinking-water reservoir (Ö merli reservoir, Istanbul)[J]. 2003, 502(1/2/3): 85-95.
- [21] 刘霞,陆晓华,陈宇炜.太湖北部隐藻生物量时空动态[J].*湖泊科学*, 2012, 24(1): 142-148.
- [22] 杨威,张婷婷,孙雨琛,等.淮北采煤塌陷区两个小型湖泊轮虫的群落结构特征[J].*水资源保护*, 2020, 36(1): 82-88.
- [23] 邱二生.黑河水库水质及藻类监测和水体分层研究[D].西安:西安建筑科技大学, 2010.
- [24] 魏洪祥,蒋湘辉,张涛,等.水丰水库浮游植物群落特征及水质评价[J].*生态学杂志*, 2021, 40(2): 402-411.
- [25] KUANG Q J, MING M P, YU H Z, et al. Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005.
- [26] 杨毓,卢金锁,张颖.深水型水库藻形态功能组(MBFG)的季节演替特征[J].*环境科学*, 2017, 38(1): 121-128.
- [27] 甄卓.福建省饮用水水源地水库——东圳水库蓝藻群落结构及多样性研究[D].厦门:集美大学, 2013.
- [28] 闫苗苗,陈胜男,黄廷林,等.分层型水库藻类垂向演替的水质与细菌种群调控[J].*环境科学*, 2020, 41(7): 3285-3296.
- [29] 李衍庆,黄廷林,张海涵,等.水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价[J].*环境科学*, 2020, 41(5): 2158-2165.
- [30] 方丽娟,刘德富,杨正健,等.水温对浮游植物群落结构的影响实验研究[J].*环境科学与技术*, 2014, 37(S2): 45-50.
- [31] 陈琼.氮、磷对水华发生的影响[J].*生物学通报*, 2006(5): 12-14.
- [32] BARRY, A, L, et al. Effect of nitrogen limitation on foliar antioxidants in relationship to other metabolic characteristics[J]. *Planta*, 1999, 209(2): 213-220.
- [33] 陈文煊,王志红.不同形态氮对富营养化水源藻华暴发的潜在影响[J].*给水排水*, 2008(9): 22-27.
- [34] 秦瑞阳,李永富,刘建国.盐度、光强和温度对盐生杜氏藻生长的影响及其交互作用[J].*海洋科学*, 2021, 45(11): 73-81.

- [35] 温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 等. 北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析[J/OL]. 环境科学: 1-16 2-09-13].
- [36] 林建国, 杨玉波. 东圳水库流域氮磷面源污染现状调查与分析[J]. 海峡科学, 2019(2): 6-9.
- [37] 李莉, 蔡金傍, 陈梅, 等. 东圳水库水质影响预测及对策[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(5): 47-50.
- [38] 张耀文, 李洪, 李嘉, 等. 西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2680-2687.
- [39] 吕辉, 简鸿福, 游文荪, 等. 水库型水源地保护与防治策略研究[J]. 水利规划与设计, 2022(6): 72-74.
- [40] 边博, 吴海锁, 徐志荣, 等. 复合型前置库系统去除面源主要污染物的研究[J]. 湖泊科学, 2013, 25(3): 352-358.
- [41] 马越, 黄廷林, 丛海兵, 等. 扬水曝气技术在河道型深水水库水质原位修复中的应用[J]. 给水排水, 2012, 48(4): 7-13.
- [42] 马卫星. 黑河水库水质变化规律及扬水曝气应用效果研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
- [43] 黄廷林, 朱倩, 邱晓鹏, 等. 扬水曝气技术对周村水库藻类的控制[J]. 环境工程学报, 2017, 11(4): 2255-2260.
- [44] 姚金忠, 范向军, 杨霞, 等. 三峡库区重点支流水华现状、成因及防控对策[J]. 环境工程学报, 2022, 16(6): 2041-2048.
- [45] 曹琳, 刘煌, 许国静, 等. 壳聚糖-脲改性膨润土的制备及除藻除磷性能[J]. 环境工程学报, 2021, 15(8): 2555-2562.

(责任编辑: 靳炜, 宋冀营)

Insights of water quality factors and algal community vertical succession and outbreak mechanism in deep-water reservoir

TAN Wenming¹, LI Huiping¹, QIU Yu², FANG Lei², JIANG Mei², HUANG sheng³, ZHENG Zhen⁴, XIE Li¹, PANG Weihai^{1,*}

1. The Yangtze River Water Environment Key Laboratory of the Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Fujian Jinhuang Environmental Sci-Tech Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350013; 3. Putian Municipal Ecology and Environment Bureau, Putian 351100, China; 4. Fuzhou Academy of Environmental Sciences, Fuzhou 350000, China

*Corresponding author, E-mail: pangweihai@tongji.edu.cn

Abstract The spatial succession of algae is closely related to environmental factors. In order to investigate the spatial and temporal succession of algal functional groups and habitat changes in Putian Dongzhen Reservoir, this study delineated the vertical distribution characteristics of the algal community in the reservoir and explored the evolution of its influence by environmental factors, so as to clarify the mechanism of water bloom outbreak in Dongzhen Reservoir. The results showed that 7 phyla and 39 genera of planktonic algae were detected, and the community structure was mainly composed of cyanobacteria, green algae, diatoms and cryptoalgae. The vertical distribution showed significant difference in different seasons. Chlorophyta and cyanobacteria were the dominant algae in the surface (0.5 m) and middle (10 m) water bodies, which were mainly affected by water temperature, sun light, DO and TN. The dominant algae in the deep water (20 m) were diatoms and cryptoalgae, which were mainly affected by water temperature and TN. The average value of N/P in Dongzhen reservoir was 32.4, which showed a typical phosphorus limiting characteristic. The nitrogen pollution in reservoirs mainly came from agricultural surface inputs and endogenous releases. The nitrogen in the substrate was easily released during the summer stratification period of the reservoir. After combination with DO, the morphological transformation happened and the nitrogen was imported to the upper water body, which led to the occurrence of "water bloom". In order to prevent and control water bloom in the Dongzhen Reservoir, it was necessary to strictly prevent and control point source and agricultural surface source pollution, and construct hydraulic disturbance facilities and add in-situ restoration devices to prevent and control the occurrence of water bloom. By analyzing the temporal and spatial succession of algal functional groups in Dongzhen Reservoir, this study is helpful to determine the algal outbreak mechanism in Dongzhen Reservoir, and can provide reference for reservoir algal control and water environment ecological protection.

Keywords deep water reservoir; water stratification mechanism; algal community; population vertical succession; RDA analysis; water bloom