J. Lake Sci.(湖泊科学),2025,**37**(6):1910-1917
DOI 10.18307/2025.0612

太湖藻类群落结构改变对藻源性磷浓度的影响*

杨　喆[1**],朱冰川[1],张军毅[2],戴玺铭[1],张虎军[1],许燕娟[1],宋　挺[1],庄　严[1]
(1:江苏省无锡环境监测中心,无锡 214125)
(2:江南大学环境与生态学院,无锡 214266)

摘　要: 为定量评估太湖藻源性磷浓度以及藻类群落结构对其影响,更好地了解藻类生消与湖泊内源磷循环之间的关系,本文基于2021－2023年太湖藻类、水质监测资料和实验分析,测算了太湖藻源性磷浓度及其占总磷的比例。结果表明,2021－2023年期间,太湖总藻密度年均值由6.3×10^7 cells/L降至4.4×10^7 cells/L,微囊藻密度占比由79.8%降至35.6%,隐藻、绿藻、硅藻的密度及占比则显著上升,藻类群落结构明显改变;同期的总磷浓度在0.053~0.062 mg/L之间波动,颗粒态总磷平均占比为60.4%,其中藻源性颗粒态磷(藻源性磷)占颗粒态总磷、总磷的比例分别为49.4%、29.6%,表明藻源性磷是颗粒态磷的重要组成部分。从藻类群落组成对藻源性磷的贡献来看,太湖的藻源性磷主要来源于蓝藻、硅藻、绿藻。2021－2022年,蓝藻门对藻源性磷的贡献率在65%以上,随着蓝藻密度在2023年迅速下降,其贡献的藻源性磷占比也明显减少,硅藻门的藻源性磷占比则由23.9%上升至56.1%。2023年的总藻、蓝藻密度相比2021年明显下降,但由于硅藻、绿藻等门类的占比有所上升,它们提供的藻源性磷增量补偿了蓝藻藻源性磷减量,最终导致全湖总藻源性磷不降反升。尽管硅藻等门类的藻类密度增量不及蓝藻密度减量,但其更大的细胞体积带来更高的单体磷含量,因而对藻源性磷补偿效应较为显著。
关键词: 太湖;总磷;藻类;群落结构;藻源性磷;影响

Influence and analysis of the shift of algae community structure on algae-derived phosphorus concentration of Lake Taihu*

Yang Zhe[1**], Zhu Bingchuan[1], Zhang Junyi[2], Dai Ximing[1], Zhang Hujun[1], Xu Yanjuan[1], Song Ting[1] & Zhuang Yan[1]
(1: *Jiangsu Wuxi Environmental Monitoring Center*, *Wuxi* 214125, *P. R. China*)
(2: *School of Environment and Ecology*, *Jiangnan University*, *Wuxi* 214266, *P. R. China*)

Abstract: To quantitatively evaluate the concentration of algae-derived phosphorus in Lake Taihu and the influence of the algal community structure on it and to better understand the relationship between algal evolution and the internal phosphorus cycle of the lake, this study calculated the concentration of total algae-derived phosphorus in Lake Taihu and its proportion to total phosphorus in the lake based on the monitoring data and investigation data of algae and water quality of Lake Taihu from 2021 to 2023. The results showed that from 2021 to 2023, the total algal density of Lake Taihu decreased from 6.3 × 10^7 cells/L to 4.4 × 10^7 cells/L (annual average value), the proportion of *Microcystis* decreased from 79.8% to 35.6%. On the other hand, the density and proportion of cryptophyta, chlorophyta and bacillariophyta increased significantly, and the whole lake's algal community changed significantly. During the same period, the total phosphorus concentration in the Lake Taihu fluctuated from 0.053 mg/L to 0.062 mg/L. The average proportion of particulate total phosphorus was 60.4%, of which the proportion of algae-derived phosphorus in particulate total phosphorus and total phosphorus was 49.4% and 29.6%, respectively, indicating that algae-derived phosphorus is an important component of particulate phosphorus. According to the further subdivision of the algal community structure, it is found that the algae-derived phosphorus in Lake Taihu is mainly contributed by three categories, including cyanophyta, bacillariophyta

* 2025-01-24收稿;2025-03-25收修改稿。
江苏省生态环境监测科研基金项目(2302)资助。
** 通信作者;E-mail:08300136@163.com。

and chlorophyta. From 2021 to 2022, the contribution rates of cyanophyta to algae-derived phosphorus were 66.5% and 65.7%, respectively. With the rapid decrease in cyanophyta density in 2023, their contribution and proportion of algae-derived phosphorus also significantly decreased, while the contribution and proportion of algae-derived phosphorus from bacillariophyta increased from 23.9% to 56.1%. The total algae and cyanophyta density in 2023 had significantly decreased compared to 2021, but due to the increase in the proportion of bacillariophyta, chlorophyta and other categories, the increase in algae-derived phosphorus provided by them compensated for the decrease in cyanophyta algae-derived phosphorus, ultimately leading to an increase in the total algae-derived phosphorus in the entire lake instead of a decrease. Although the increase in algal density of bacillariophyta and other categories is not as significant as the decrease in cyanophyta density, they have larger cell volume and higher monomeric phosphorus content, thus exhibiting a more significant compensatory effect on algal-derived phosphorus.

Keywords: Lake Taihu; total phosphorus; algae; community structure; algal-derived phosphorus; influence

太湖作为我国的第三大淡水湖以及整个太湖流域的水生态系统核心,其富营养化问题一直受到社会各界的广泛关注[1-4]。作为大型浅水湖泊,太湖的磷波动问题对其地表水磷浓度控制与达标造成挑战[5-10]。经过一系列的治理,近年来太湖水质得到了总体改善,但控磷降磷仍然是太湖治理中十分重要的议题[11-16]。

研究表明,外源性磷污染与内源性磷污染两大因素共同引起太湖湖体的磷污染[17-20]。其中,外源输入性磷仍是太湖磷污染最重要的来源[5]。外源输入性磷是由上游入湖河道输入水体中的磷负荷所致,尽管近些年针对外源输入性磷的削减力度不断加强,但入湖磷通量仍然处于净增长状态[1]。内源性磷污染主要由湖体内部物理化学生物性循环产生,主要包括底泥释放性磷、生物类颗粒态磷(主要为藻源性颗粒态磷,即藻源性磷)两大类[6,17]。其中,底泥释放性磷是由湖体自然气候、化学环境改变以及湖底微生物、浮游植物的代谢活动综合作用导致底泥中的结合态磷逐步转化为可溶性磷释放进入水体,使水体磷浓度增加[20-22]。浮游植物作为一种生物组织,其细胞体可视为生物来源的颗粒态磷[23]。通常,在富营养化的水体中藻类生物量较高,其对颗粒态磷乃至总磷的贡献不能忽略,尤其是当藻类聚集、水华暴发时可导致部分监测点位总磷的异常波动[5]。已有研究明确了藻源性磷对湖体总磷贡献的重要性[1,5],但缺乏定量评估太湖藻源性磷浓度及其占湖体总磷比例的报道,更未见有关藻类群落结构变化对藻源性磷浓度影响的系统研究。

本研究聚焦太湖全湖区,基于2021－2023年太湖全湖区国控点位的藻类监测结果,结合水质监测数据,探究太湖藻密度下降、藻类群落结构演替对藻源性磷浓度及其占湖体总磷比例的影响,分析测算了藻源性磷在湖体总磷中所占的比例,以揭示藻类密度和群落结构变化对太湖总磷的动态影响,为进一步了解太湖湖体总磷波动提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文采用的太湖水生态、水质数据来源于2021－2023年江苏省无锡环境监测中心重点湖库例行监测的历史资料,其中太湖全湖20个国控监测点位分布见图1。监测频次为每月1次,样品采集依据《地表水环境质量监测技术规范》(HJ 91.2－2022)相关规定开展,使用有机玻璃采水器在水面下0.5 m处采集水样,水样装入棕色细口玻璃瓶,随后样品放置在加冰袋的保温箱内,于2 h内送回实验室进行分析。

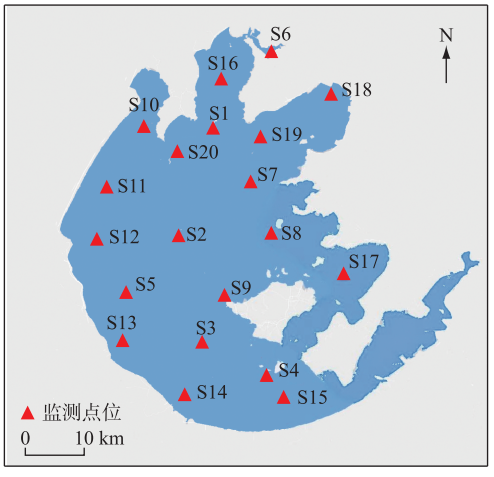

图1 太湖监测点位分布

Fig. 1 Distribution of monitoring sites in Lake Taihu

1.2 实验室分析

浮游植物样品的前处理及固定依据《淡水浮游藻类监测技术规范》(DB 32/T 4005－2020),藻类密度、藻种鉴定及群落结构分析采用AH-20S藻类人工智能分析仪(宏众百德,中国)进行分析;溶解态磷、总磷浓度依据《水质总磷的测定钼酸铵分光光度法》(GB

11893－1989)采用 TU-1900 紫外可见分光光度计(普析通用,中国)进行测定。

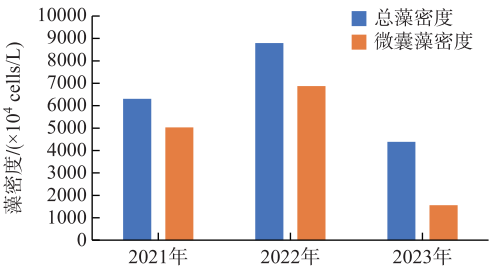

图 2 2021－2023 年太湖
总藻密度、微囊藻密度变化情况

Fig. 2 Density changes of total algae and *Microcystis* in Lake Taihu during 2021－2023

表 1 2021－2023 年太湖
全湖藻类群落结构年际变化情况

Tab. 1 Interannual changes of algal community structure in Lake Taihu during 2021-2023

门类	藻密度/(×10⁴ cells/L)		
	2021 年	2022 年	2023 年
隐藻门	60	122	167
蓝藻门	6038	8383	3499
绿藻门	61	87	268
硅藻门	142	199	438
甲藻门	1	1	2
裸藻门	1	1	2
金藻门	0	1	10
黄藻门	0	0	0
轮藻门	0	1	2
合计	6305	8793	4388

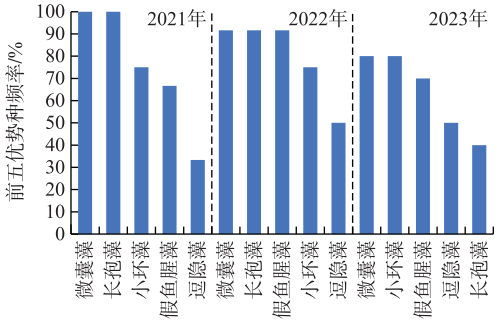

图 3 2021－2023 年太湖藻类群落结构年际变化

Fig. 3 Interannual changes of algal community structure in Lake Taihu during 2021-2023

2 结果与讨论

2.1 太湖藻情变化情况

2021－2023 年,太湖全湖平均总藻密度和蓝藻水华风险种微囊藻密度均呈波动性变化趋势(图 2)。其中,总藻密度由 2021 年的 6.3×10^7 cells/L 降至 2023 年的 4.4×10^7 cells/L,微囊藻密度由 2021 年的 5.0×10^7 cells/L 降至 2023 年的 1.6×10^7 cells/L,总藻和微囊藻密度降幅分别达到 30.4%、68.9%。同时,全湖最大水华面积也由 2021 年的 894 km^2 下降至 2023 年的 234 km^2。

2021－2023 年太湖全湖区藻类群落结构年际变化情况见表 1,2021 年以来太湖藻类群落结构发生明显变化。2023 年蓝藻门密度和占比相较前两年均显著下降;隐藻、绿藻、硅藻门密度和占比则持续上升,其中隐藻、绿藻、硅藻门密度相比 2021 年分别上升了 177.1%、337.0% 和 208.1%,占比相比 2021 年分别上升了 298.1%、527.9% 和 342.7%,占比增幅更为明显。

2021－2023 年,太湖藻类优势属主要为微囊藻、假鱼腥藻、长孢藻、小环藻、逗隐藻(图 3),涵盖蓝藻、硅藻、隐藻 3 个门类。蓝藻门的微囊藻和长孢藻优势度出现下降态势,进入前 5 优势属的频率由 2021 年的 100% 分别降至 2023 年的 80% 和 40%,尤其是长孢藻,其优势度由 2021 年的第 2 位降至 2023 年的第 5 位;另一方面,硅藻门的小环藻优势度则呈上升态势,其优势度由 2021 年的第 3 位升至 2023 年的第 2 位。水华优势类群蓝藻的密度和优势度下降,硅藻、隐藻门类的密度及占比持续上升。

2.2 近年湖体总磷波动趋势

2021－2023 年太湖总磷浓度的监测数据表明,全湖总磷浓度年度均值在 0.053～0.062 mg/L 范围内波动,总磷月度数据呈显著的季节性波动,其中年度最高值基本都出现在 7 月之后的夏、秋季节,而太湖藻类密度峰值往往也出现在相同时段内,表明太湖总磷高位波动与藻密度峰值具有较好的时间重叠性,两者具有显著同步性(图 4)。

太湖总磷主要由溶解态总磷和颗粒态总磷两部分组成[24-26]。2021－2023 年全湖磷形态分析结果表明(图 5),溶解态总磷年均值较为稳定,基本在 0.022 mg/L 上下,其占总磷的比例变化不大,波动区间为 36.9%～44.3%;颗粒态总磷的浓度呈波动性下降态势,波动区间为 0.029～0.037 mg/L,占总磷的比例平均在 60% 以上,表明太湖中的磷形态以颗粒态为主。

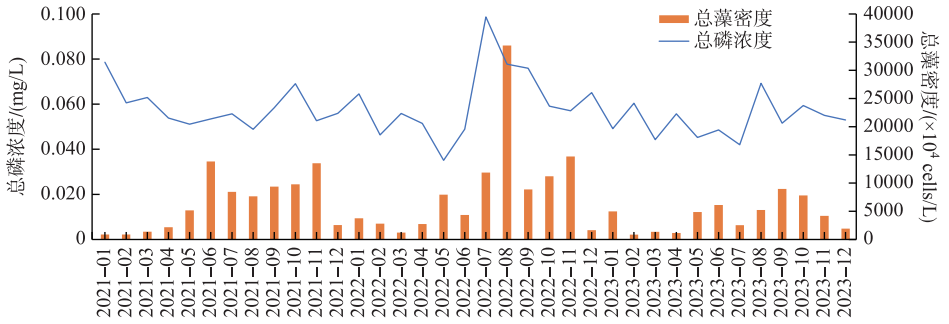

图 4 2021－2023 年太湖总磷浓度、总藻密度月际变化

Fig. 4 Monthly variation of total phosphorus concentration and algal density in Lake Taihu during 2021-2023

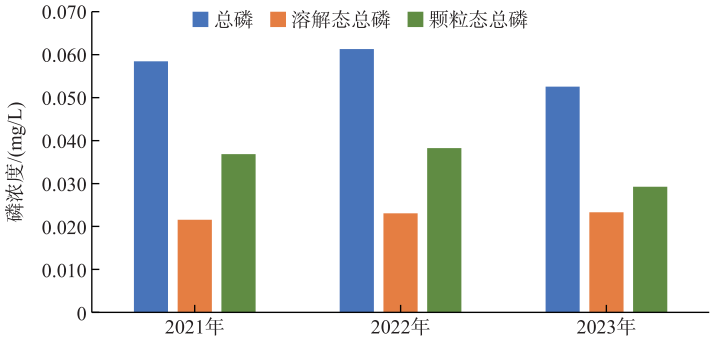

图 5 2021－2023 年太湖不同形态磷浓度的年际变化

Fig. 5 Interannual concentration variation of different forms phosphorus in Lake Taihu during 2021-2023

2.3 藻源性磷对太湖总磷的贡献

已知太湖中颗粒态磷对总磷具有最大贡献,湖体中的颗粒态总磷又可分为藻源性颗粒态磷(简称藻源性磷,下同)、非藻源性颗粒态磷两部分[27]。基于团队先前研究中对太湖微囊藻细胞平均磷含量的测算结果(1.4×10^{-10} mg/cell)以及 2021－2023 年太湖藻类群落结构监测数据,结合太湖其他已鉴定出的藻种细胞参数对太湖总藻源性磷浓度进行估算[28]。由表 2 可知,2021－2023 年湖体藻源性磷浓度在 0.014～0.021 mg/L 之间,占总磷的比例在 23.3%～34.1%之间,其中藻源性磷占颗粒态总磷的比例在 36.9%～56.5%之间,均值为 49.4%,结果表明,藻源性磷是湖体总磷,尤其是颗粒态磷的重要组成部分。2022 年以来,太湖藻密度明显下降,藻源性磷浓度也随之降低,由 2022 年的 0.021 mg/L 降至 2023 年的 0.017 mg/L,降幅为 19.0%;其中,微囊藻藻源性磷浓度由 2022 年的 0.009 mg/L 降至 2023 年的 0.002 mg/L,对藻源性磷的贡献

表 2 2021－2023 年太湖藻源性磷含量及占比年际情况

Tab. 2 Content and proportion of algae-derived phosphorus in Lake Taihu during 2021-2023

时间	藻源性磷/(mg/L)	总磷/(mg/L)	藻源性磷占总磷的比例/%	颗粒态总磷/(mg/L)	藻源性磷占颗粒态总磷的比例/%	微囊藻藻源性磷/(mg/L)	微囊藻藻源性磷占总藻源性磷的比例/%
2021 年	0.014	0.058	23.3	0.037	36.9	0.007	49.3
2022 年	0.021	0.062	34.1	0.038	54.7	0.009	30.7
2023 年	0.017	0.053	31.5	0.029	56.5	0.002	12.9

率也从 2022 年的 30.7% 下降至 2023 年的 12.9%。

2.4 太湖藻类群落结构改变对湖体藻源性磷和总磷的影响

尽管 2023 年全湖总藻密度为近 3 年的最低水平(图 2),但藻源性磷浓度却高于 2021 年。针对这一现象,对 2021－2023 年全湖的藻源性磷按照藻类群落结构进行分门类统计。结果表明(图 6),太湖的藻门源性磷贡献主要来自蓝藻、硅藻、绿藻门,其中 2021 年、2022 年蓝藻门是藻源性磷贡献的优势类群,占当年总藻源性磷的比例分别为 66.5%、65.7%。然而,从 2023 年起,蓝藻门贡献的藻源性磷浓度及占比迅速下降,分别由 2021 年的 0.009 mg/L、66.5% 降至 2023 年的 0.005 mg/L、28.2%;硅藻门贡献的藻源性磷及占比则明显上升,分别由 2021 年的 0.003 mg/L、23.9% 升至 2023 年的 0.009 mg/L、56.1%。

因此,尽管 2023 年的蓝藻密度、藻源性磷浓度相比 2021 年均明显下降,分别由 6.0×10^7 cells/L、0.009 mg/L 降至 3.5×10^7 cells/L、0.005 mg/L(表 3),但其他门类(如硅藻、隐藻、绿藻门等)的密度相比 2021 年均有所上升,它们贡献的藻源性磷浓度也由 2021 年的 0.005 mg/L 上升至 2023 年的 0.012 mg/L,即其他门藻类贡献的藻源性磷增量为 0.007 mg/L(其中,仅硅藻就贡献了 0.006 mg/L 的藻源性磷增量),从而补偿了蓝藻藻源性磷的减量(0.004 mg/L),最终导致湖体藻源性磷不降反升。

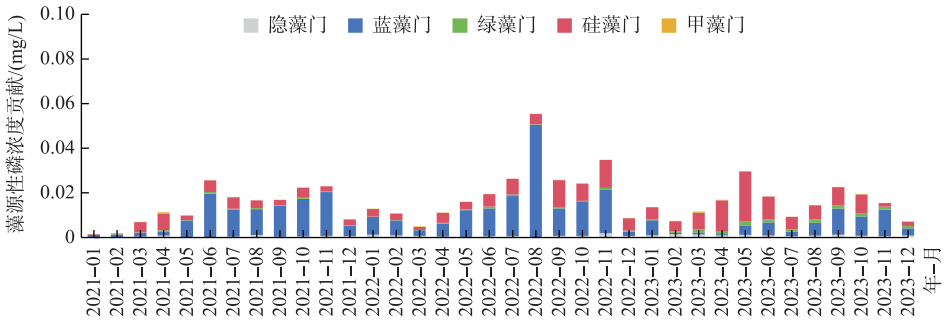

图 6 2021－2023 年太湖不同门类藻类藻源性磷贡献量月际变化情况

Fig. 6 Monthly variation of algae-derived phosphorus contribution of various algae in Lake Taihu during 2021-2023

上述结果表明,2021－2023 年期间,尽管其他几个门类的藻密度增量远低于蓝藻密度减量,但其对藻源性磷的补偿量却较为显著,这与不同门类藻类的细胞体积差异巨大有关,这种差异直接导致生物量不同[29-30]。如图 7 所示,太湖中的硅藻、隐藻、绿藻等门类常见藻种相比蓝藻具有更大的细胞体积、更高的单体生物量以及磷浓度。由表 3 可知,2023 年的全湖硅藻占比为 10.0%,但贡献了 56.1% 的藻源性磷,这与硅藻细胞平均生物量显著大于蓝藻有关。

综上,一方面,近年来太湖总藻密度,尤其是蓝藻密度显著下降;另一方面,伴随着藻类群落结构的变化,硅藻、隐藻等门类的密度及占比持续上升。这些藻类相较蓝藻具有更大的细胞生物量,其密度上升也进一步增加了藻源性磷贡献量,从而补偿了蓝藻藻源性磷的减量,最终导致湖体总藻源性磷并未呈现与藻密度相同强度的降幅。鉴于藻源性磷对湖体颗粒态磷乃至总磷的显著贡献,在进一步加强太湖藻情监测和预警能力的同时,建议更加重视太湖浮游植物群落结构和藻类形态的监测记录,尤其是对硅藻、甲藻、隐藻等细胞生物量较大且密度持续增加的藻类予以重点关注,以不断积累相关数据,更准确地分析藻密度、群落结构演替对藻源性磷的影响,从而更好地建立太湖藻情－总磷波动分析和预警体系。

3 结论

1) 2021－2023 年太湖全湖藻密度显著下降,藻类群落结构发生改变,总藻和微囊藻密度降幅分别达到 30.4%、68.9%,硅藻、隐藻、绿藻等门类密度和占比明显上升。

2) 2021－2023 年太湖总磷浓度在 0.053~0.062 mg/L 范围波动,磷形态以颗粒态磷为主,占总磷的比例在 60.4% 以上。

表 3 2021 年与 2023 年太湖藻类群落结构及藻源性磷贡献年际变化情况

Tab. 3 Interannual changes of algal community structure and algae-derived phosphorus contribution in Lake Taihu in 2021 and 2023

门类	2021 年		2023 年			
	藻密度/($\times10^4$ cells/L)	藻源性磷/(mg/L)	藻密度/($\times10^4$ cells/L)	藻源性磷/(mg/L)	藻密度占比/%	藻源性磷贡献占比/%
隐藻门	60	0.000	167	0.001	3.8	6.2
蓝藻门	6038	0.009	3499	0.005	79.7	28.2
绿藻门	61	0.000	268	0.001	6.1	7.5
硅藻门	142	0.003	438	0.009	10.0	56.1
甲藻门	1	0.000	2	0.000	0.1	0.9
裸藻门	1	0.000	2	0.000	0.1	0.0
金藻门	0	0.000	10	0.000	0.2	0.0
黄藻门	0	0.000	0	0.000	0.0	0.0
轮藻门	0	0.000	2	0.000	0.0	0.0
合计	6305	0.014	4388	0.017		

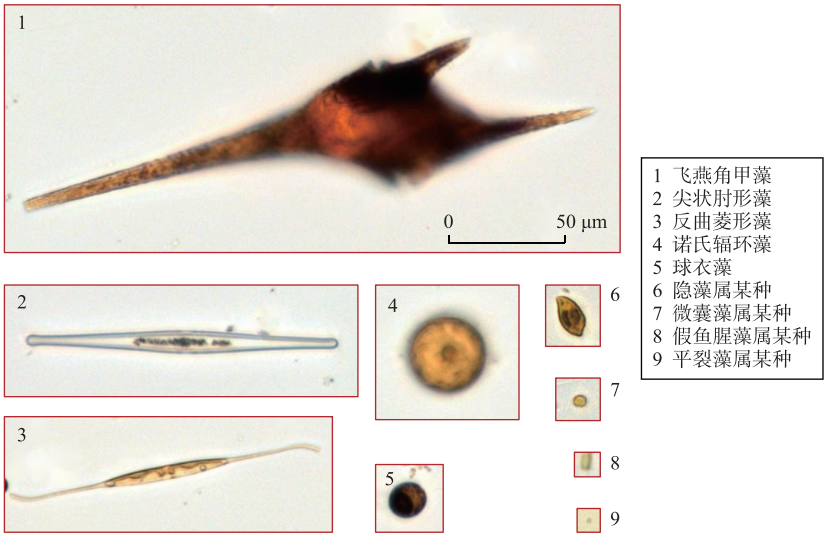

图 7 太湖部分藻类显微照片

Fig. 7 Microscopic images of some algae in Lake Taihu

3)太湖中藻源性磷是颗粒态磷的重要组成部分,2021－2023 年湖体藻源性磷占总磷的比例在 23.3%～34.1%范围内波动,藻源性磷占颗粒态总磷的比例在 36.9%～56.5%范围内波动,其中藻源性磷占颗粒态总磷、总磷的平均比例分别为 49.4%、29.6%。

4) 随着太湖藻类群落结构发生显著改变,硅藻门、隐藻门等藻类密度及占比上升,其较大的细胞生物量相比蓝藻具有更大的单体磷含量,从而对蓝藻密度下降引起的藻源性磷减少产生补偿效应。

4 参考文献

[1] Cai M, Qian X, Wang YY *et al*. Phosphorus cycle and its influencing factors in different areas of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5): 1493-1504. DOI: 10.18307/2022.0507. [蔡梅, 钱旭, 王元元等. 太湖入、出湖湖区磷的特征及其影响因素分析. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1493-1504.]

[2] Kong FX, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**

(3):589-595.[孔繁翔,高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. 生态学报,2005,25(3):589-595.]

[3] Wu P, Qin BQ, Yu G *et al*. Effects of economic development on wastewater discharge and influent total phosphorus load in the upstream of Lake Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2015, **27**(6):1107-1114. DOI:10.18307/2015.0616.[吴攀,秦伯强,于革等. 太湖上游流域经济发展对废水排放及入湖总磷的影响. 湖泊科学,2015,27(6):1107-1114.]

[4] Zhang YL, Liu XH, Qin BQ *et al*. Aquatic vegetation in response to increased eutrophication and degraded light climate in Eastern Lake Taihu: Implications for lake ecological restoration. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 23867. DOI:10.1038/srep23867.

[5] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al*. Fluctuation of phosphorus concentration in Lake Taihu in the past 70 years and futurecontrol strategy. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4):957-973. DOI:10.18307/2021.0401.[朱广伟,秦伯强,张运林等. 近70年来太湖水体磷浓度变化特征及未来控制策略. 湖泊科学,2021,33(4):957-973.]

[6] Mao XW, Dai QZ, Wu HY *et al*. Calculation and analysis of total phosphorus pollution load based on mass balance in Lake Taihu since 2007. *J Lake Sci*, 2023, **35**(5):1594-1603. DOI:10.18307/2023.0520.[毛新伟,代倩子,吴浩云等. 2007年以来太湖总磷污染负荷质量平衡计算与分析. 湖泊科学,2023,35(5):1594-1603.]

[7] Dai XL, Qian PQ, Ye L *et al*. Changes in nitrogen and phosphorus concentrations in Lake Taihu, 1985-2015. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5):935-943. DOI:10.18307/2016.0502.[戴秀丽,钱佩琪,叶凉等. 太湖水体氮、磷浓度演变趋势(1985－2015年). 湖泊科学,2016,28(5):935-943.]

[8] Liu JY, Jiang CL, Geng H. Water quality spatiotemporal variation and cause analysis of Wuxi water area of Taihu Lake from 2010 to 2020. *Water Resources and Power*, 2023, **41**(7):49-53.[刘佳玥,姜翠玲,耿慧. 2010－2020年太湖无锡水域水质时空变化及原因分析. 水电能源科学,2023,41(7):49-53.]

[9] Qin BQ, Zhou J, Elser JJ *et al*. Water depth underpins the relative roles and fates of nitrogen and phosphorus in lakes. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(6):3191-3198. DOI:10.1021/acs.est.9b05858.

[10] Sondergaard M, Jensen PJ, Jeppesen E. Retention and internal loading of phosphorus in shallow, eutrophic lakes. *The Scientific World Journal*, 2001, **1**(2):676350. DOI:10.1100/tsw.2001.72.

[11] Qin BQ, Paerl HW, Brookes JD *et al*. Why Lake Taihu continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10 years (2007-2017) efforts. *Science Bulletin*, 2019, **64**(6):354-356. DOI:10.1016/j.scib.2019.02.008.

[12] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al*. Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-*a* concentrations in northern region of Lake Taihu, China, 2005-2017. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2):279-295. DOI:10.18307/2018.0201.[朱广伟,秦伯强,张运林等. 2005－2017年北部太湖水体叶绿素 *a* 和营养盐变化及影响因素. 湖泊科学,2018,30(2):279-295.]

[13] Wang H, Chen HX, Xu ZA *et al*. Variation trend of total phosphorus and its controlling factors in Lake Taihu, 2010-2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4):919-929. DOI:10.18307/2019.0421.[王华,陈华鑫,徐兆安等. 2010－2017年太湖总磷浓度变化趋势分析及成因探讨. 湖泊科学,2019,31(4):919-929.]

[14] Zhu GW, Zou W, Guo CX *et al*. Long-term variations of phosphorus concentration and capacity in Lake Taihu, 2005-2018: Implications for future phosphorus reduction target management. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1):21-35. DOI:10.18307/2020.0103.[朱广伟,邹伟,国超旋等. 太湖水体磷浓度与赋存量长期变化(2005－2018年)及其对未来磷控制目标管理的启示. 湖泊科学,2020,32(1):21-35.]

[15] Zhu GW, Shi K, Li W *et al*. Seasonal forecast method of cyanobacterial bloom intensity in eutrophic Lake Taihu, China. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5):1421-1431. DOI:10.18307/2020.0504.[朱广伟,施坤,李未等. 太湖蓝藻水华的年度情势预测方法探讨. 湖泊科学,2020,32(5):1421-1431.]

[16] Yuan HZ, Chen PY, Liu EF *et al*. Terrestrial sources regulate the endogenous phosphorus load in Taihu Lake, China after exogenous controls: Evidence from a representative lake watershed. *Journal of Environmental Management*, 2023, **340**: 118016. DOI:10.1016/j.jenvman.2023.118016.

[17] Liu H, Zhu W, Hou H *et al*. Fick diffusion release flux study of dissolved total phosphorus at the sediment-water interface of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2024, **36**(6):1732-1742. DOI:10.18307/2024.0621.[刘环,朱伟,侯豪等. 太湖底泥—水界面总溶解态磷的Fick扩散释放通量研究. 湖泊科学,2024,36(6):1732-1742.]

[18] Yin HB, Zhang M, Yin P *et al*. Characterization of internal phosphorus loading in the sediment of a large eutrophic lake (Lake Taihu, China). *Water Research*, 2022, **225**: 119125. DOI:10.1016/j.watres.2022.119125.

[19] Zhai SH, Zhou Y, Cheng YH *et al*. Calculation of total phosphorus loads from rivers around Lake Taihu and analysis of total phosphorus fluctuation in the lake in 2015-2016. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1):48-57. DOI:10.18307/2020.0105.[翟淑华,周娅,程媛华等. 2015－2016年环太湖河道进出湖总磷负荷量计算及太湖总磷波动分析. 湖泊科学,2020,32(1):48-57.]

[20] Wu HY, Jia GH, Xu B *et al*. Analysis of variation and driving factors of total phosphorus in Lake Taihu, 1980-2020. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4):974-991. DOI:10.18307/2021.0402.[吴浩云,贾更华,徐彬等. 1980年以来太湖总磷变化特征及其驱动因子分析. 湖泊科学,2021,33(4):974-991.]

[21] Xu H, Paerl HW, Qin B *et al*. Determining critical nutrient thresholds needed to control harmful cyanobacterial blooms in eutrophic Lake

Taihu, China. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(2): 1051-1059. DOI: 10.1021/es503744q.

[22] Wang FF, Qu JH, Hu YS. Spatio-temporal characteristics and correlation of phosphate, pH and alkaline phosphatase on water-sediment interface of Lake Taihu. *Eco Environ Sci*, 2012, **21**(5): 907-912. [王福芳, 屈建航, 胡元森. 太湖水-沉积物界面磷、pH 及碱性磷酸酶的时空特征及相关性. 生态环境学报, 2012, **21**(5): 907- 912.]

[23] Yi WL, Jin XC, Chu ZS *et al*. Effect of different P mass concentrations on growth and P-in-cell of *Microcystis aeruginosa*. *Res Environ Sci*, 2004, **Z1**: 4. [易文利, 金相灿, 储昭升等. 不同质量浓度的磷对铜绿微囊藻生长及细胞内磷的影响. 环境科学研究, 2004, **Z1**: 4.]

[24] Wang Qi, Jiang X, Jin XC *et al*. Distribution of phosphorus and bio-available phosphorus forms and their relationship in the sediments from different regions of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2006, **18**(2): 120-126. DOI: 10.18307/2006.0204. [王琦, 姜霞, 金相灿等. 太湖不同营养水平湖区沉积物磷形态与生物可利用磷的分布及相互关系. 湖泊科学, 2006, **18**(2): 120-126.]

[25] Huang QH, Wang L, Wang ZJ. Advance in the study on phosphorus speciation, transformation and its potential ecological effects in Chinese lakes. *J Lake Sci*, 2006, **18**(3): 199-206. DOI: 10.18307/2006.0302. [黄清辉, 王磊, 王子健. 中国湖泊水域中磷形态转化及其潜在生态效应研究动态. 湖泊科学, 2006, **18**(3): 199-206.]

[26] Feng S, Qin BQ, Gao G. The relationships between phosphorus-transmuting bacteria and phosphorus forms in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2008, **20**(4): 428-436. DOI: 10.18307/2008.0404. [冯胜, 秦伯强, 高光. 太湖磷转化细菌与水体磷形态关系. 湖泊科学, 2008, **20**(4): 428-436.]

[27] Jin ZX, Liao P, Jaisi DP *et al*. Suspended phosphorus sustains algal blooms in a dissolved phosphorus-depleted lake. *Water Research*, 2023, **241**: 120134. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120134.

[28] Yang Z, Zhu BC, Zhang JY *et al*. Study on the contribution of algae-derived phosphorus to total phosphorus in Wuxi watershed of the Lake Taihu. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2025, **17**(1): 51-55. [杨喆, 朱冰川, 张军毅等. 太湖无锡水域中藻源性磷对水体总磷贡献的研究. 环境监控与预警, 2025, **17**(1): 51-55.]

[29] Olenina I, Hajdu S, Edler L *et al*. Biovolumes and size-classes of phytoplankton in the Baltic Sea. Helsinki: Baltic Marine Environment Protection Commission, 2006: 23-142.

[30] Sun J, Liu DY, Qian SB. Study on phytoplankton biomass I. phytoplankton measurement biomass from cell volume or plasma volume. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, **21**(2): 75-85. [孙军, 刘冬艳, 钱树本. 浮游植物生物量研究: I. 浮游植物生物量细胞体积转化法. 海洋学报, 1999, **21**(2): 75-85.]