

# 长江中下游地区湖泊中蓝藻及其与氮磷浓度的关系

吴世凯<sup>1,2</sup>, 谢平<sup>2</sup>, 倪乐意<sup>2</sup>, 王松波<sup>2</sup>, 徐军<sup>2</sup>, 陈步丹<sup>1,3</sup>

(1. 广州中国科学院先进技术研究所 广东省膜材料与膜分离重点实验室, 广州 511458;

2. 中国科学院水生生物研究所 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072;

3. 湘潭大学化工学院, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:** 根据对长江中下游地区 30 个浅水湖泊的调查, 分析了蓝藻的群落结构特征及其与环境中氮磷浓度的关系。研究显示蓝藻生物量生长季节比非生长季节高很多, 生长季节最大值出现在三角湖 (5.719 mg/L), 最小值出现在天鹅洲 (0.001 mg/L)。半通江湖泊蓝藻生物量高于其他类型湖泊; 生长季节, 蓝藻生物量占浮游植物总生物量比例在半通江湖泊和城郊湖泊均大于 40%, 而在通江湖泊和城市湖泊均不到 20%; 半通江湖泊最大, 之后依次为城郊湖泊、通江湖泊和城市湖泊。氮磷比无论生长季节还是非生长季节在大部分湖泊均低于 40。对蓝藻优势类群与氮磷浓度进行 Pearson 相关性分析结果显示, 在生长季节仅集胞藻属 (*Synechocystis*) 与总磷极显著正相关 ( $P < 0.01$ ); 在非生长季节, 集胞藻属与氨氮、亚硝酸盐氮、总磷极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与硝酸盐氮显著相关 ( $P < 0.05$ ), 蓝纤维藻属 (*Dactylococcopsis*) 与氨氮、亚硝酸盐氮、总磷极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。

**关键词:** 长江中下游; 浅水湖泊; 蓝藻; 氮; 磷

**中图分类号:** Q178, X171 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2014)03-0019-07

长江中下游地区是我国湖泊最为集中、人类活动与湖泊关系最为密切的地区, 我国的 5 大淡水湖有 4 个分布于此, 1 km<sup>2</sup> 以上的湖泊 651 个, 多数湖泊水深小于 10 m, 平均水深仅 2 m 左右 (王苏民等, 1998; 杨达源等, 2000)。目前长江中下游地区湖泊面临的最主要的问题之一是富营养化和蓝藻水华暴发 (秦伯强, 2002; 秦伯强等, 2013; 赵生才, 2004)。蓝藻是全球分布最为广泛的一类藻, 长期的进化使它们产生了一系列的生理、形态和生态上的变化 (Paerl HW et al, 2001); 水体富营养化的加剧, 促进了蓝藻水华暴发; 蓝藻水华不仅影响水体景观和释放异味, 还严重威胁着人类健康。

近年来, 很多学者对湖泊中蓝藻与环境因子的关系做了大量研究 (Hudnell H K, 2008; 孔繁翔等, 2005)。有学者对长江中下游湖泊的调查研究显示: 鄱阳湖蓝藻在春秋季节占优势, 藻类群落的分布主要受总磷、硝氮、氨氮的影响 (陈格君等, 2013); 太湖梅梁湾蓝藻水华暴发不仅受到磷限制, 同时受到明显的氮限制 (许海等, 2012); 巢湖水华蓝藻常年在藻类中占优势, 并且温度是其最为显著的影响因

子 (姜霞等, 2010); 武汉市浅水湖泊中氮磷比对于蓝藻的影响很小, 不是限制性因子 (吕晋等, 2008)。但是关于长江中下游地区蓝藻水华发生的区域性研究仍不多见, 因此对该地区蓝藻的分布与组成及与氮磷浓度的关系进行研究显得非常重要。本文以长江中下游地区的 30 个浅水湖泊为研究对象, 于 2003 年和 2004 年通过调查各湖泊蓝藻生物量和水体的营养状况特征, 探讨两者之间的关系, 为该区域湖泊蓝藻水华的研究提供参考, 以利于长江中下游地区富营养化的防治及生态环境的保护。

## 1 材料与方法

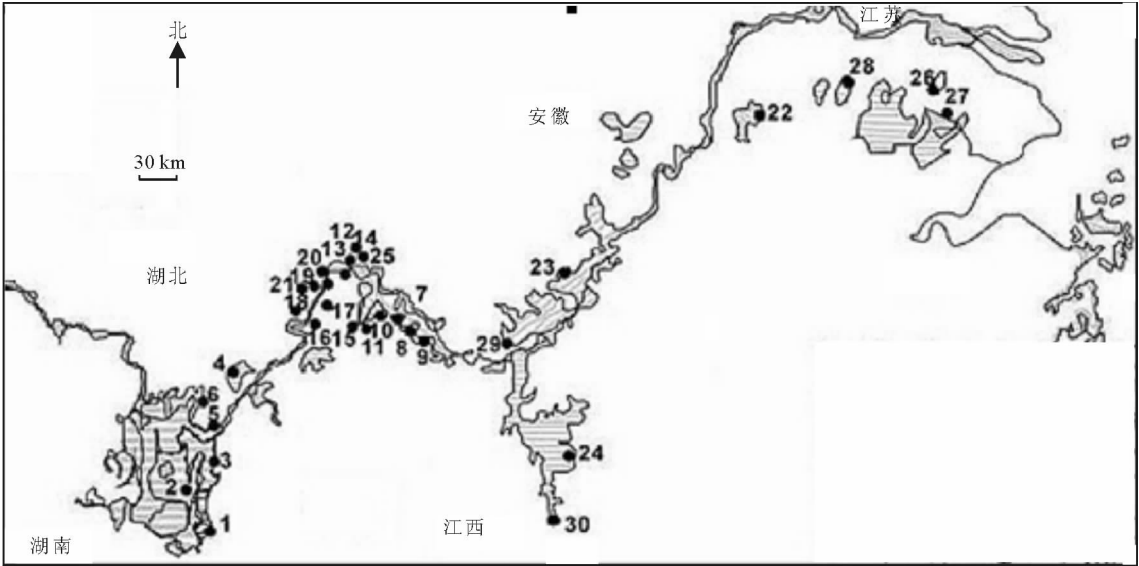
### 1.1 研究区域与点位

研究的 30 个湖泊位于长江中下游 5 省 (图 1), 大部分湖泊是富营养和超富营养状态 (吴世凯等, 2005)。2003、2004 年, 根据环境异质性和湖泊面积进行布点, 每个湖泊设 2~10 个采样点不等。调查时间相对地分为旺盛生长季节 (7~9 月) 和非旺盛生长季节 (2~5 月), 分别简称为“生长季节”和“非生长季节”。样点均采样 2 次, 各点位置用 GPS 定位系统记录, 使 2 次采样位置保持一致。为研究蓝藻在调查湖泊的分布情况以及不同类型湖泊对其生长的影响, 本调查将湖泊类型分为 4 类: 通江湖泊 (全年与长江相通), 半通江湖泊 (季节性和长江相通), 城市湖泊 (市内湖泊, 不通江) 和城郊湖泊 (位于市郊, 不通江)。

收稿日期: 2014-01-15

**基金项目:** 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室开放课题 (2012FB12); 粤港关键领域重点突破项目 (2012A090200001)。

**作者简介:** 吴世凯, 1978 年生, 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为水生态修复。E-mail: shikaiwu@gmail.com



1. 南洞庭湖, 2. 西洞庭湖, 3. 东洞庭湖, 4. 洪湖, 5. 老江河, 6. 天鹅洲, 7. 花马湖, 8. 红星湖, 9. 三里七湖, 10. 桥墩湖, 11. 保安湖, 12. 七湖, 13. 陶家大湖, 14. 涨渡湖, 15. 牛山湖, 16. 青菱湖, 17. 南湖, 18. 后官湖, 19. 龙阳湖, 20. 墨水湖, 21. 三角湖, 22. 石臼湖, 23. 武昌湖, 24. 鄱阳湖, 25. 倒水河, 26. 阳澄湖, 27. 淀山湖, 28. 溇湖, 29. 龙感湖, 30. 军山湖

图1 研究湖泊的分布

1. South Dongting Lake, 2. West Dongting Lake, 3. East Dongting Lake, 4. Hong Lake, 5. Laojianghe Lake, 6. Tian'ezhou Lake, 7. Huama Lake, 8. Hongxing Lake, 9. Sanliqi Lake, 10. Qiaodun Lake, 11. Bao'an Lake, 12. Qi Lake, 13. Taojiada Lake, 14. Zhangdu Lake, 15. Niushan Lake, 16. Qingling Lake, 17. Nan Lake, 18. Houguan Lake, 19. Longyang Lake, 20. Moshui Lake, 21. Sanjiao Lake, 22. Shijiu Lake, 23. Wuchang Lake, 24. Poyang Lake, 25. Daoshui Lake, 26. Yangcheng Lake, 27. Dianshan Lake, 28. Gehu Lake, 29. Longgan Lake, 30. Junshan Lake

Fig. 1 Geographic location of the surveyed lakes

1.2 样品的采集与测定

水样取自表层(0~1 m)、中层(水深每增加1 m,增加1个采样)和底层水样的混合样。取0.5~1 L水样经0.45 μm微孔滤膜过滤,用于测定氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝酸盐氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和亚硝酸盐氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N);取1 L水样用于测定总氮(TN)、总磷(TP);取1.5 L水样,立即加15 mL 1% Lugol液固定,作为浮游植物定量样品。同时采用25号生物网捞取浮游植物固定后作为定性样品。水样采集后置低温避光保存。如果水样较脏,先用孔径为0.7 μm的Whatman GF/C滤膜过滤后再用0.45 μm的混合纤维树脂滤膜过滤。

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N样品在8 h以内测定,其他样品均在24 h内测定。浮游植物种类的研究参考《淡水浮游生物研究方法》(章宗涉和黄祥飞,1991),水质分析方法参考《水和废水检测分析方法(第四版)》(国家环境保护总局,2002)和《湖泊富营养化调查规范》(金相灿,1990)。

1.3 蓝藻生物量的分析

浮游植物定量样品在筒形分液漏斗中沉淀48 h后,吸掉上清液,浓缩至30 mL,并加数滴福尔马林

保存。计数前将浓缩的30 mL样品充分摇匀,取0.1 mL于计数框内,在10×40倍视野下进行计数,每个样本重复计数2次,每次计数视野数为200~500个。对群体或丝状蓝藻来说,首先用超声波细胞粉碎仪将蓝藻群体打散成单个细胞,然后再计数。用细胞体积法推算浮游植物的生物量(Hillebrand et al,1999);浮游植物的鉴定主要参照《中国淡水藻志》(朱浩然,1991)。对于多个点的浮游植物数据采用取平均值处理。

1.4 统计分析

采用SPSS 21对数据进行Pearson相关分析,以P<0.05为差异有统计学意义。按照Forsberg和Ryding(1980)提出的TN:TP比的标准,判断各采样点蓝藻生长限制性因素。

2 结果与分析

2.1 湖泊的氮磷浓度特征

湖泊氮磷浓度测定结果见表1。通江湖泊中洞庭湖总氮浓度变化不大;鄱阳湖总氮浓度较高,平均为1.21 mg/L,但硝态氮浓度较洞庭湖低,平均0.45 mg/L;同时,洞庭湖、鄱阳湖氨氮、总磷浓度均

表1 30个湖泊的氮磷平均浓度 mg/L

Tab.1 Mean concentration of nitrogen and phosphorus for the 30 surveyed lakes

| 湖泊类型  | 湖泊   | 序号 | TN   | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | TP   |
|-------|------|----|------|-------------------------------------------------------------|------------------------------|------|
| 通江湖泊  | 南洞庭  | 1  | 0.65 | 0.40                                                        | 0.01                         | 0.02 |
|       | 西洞庭  | 2  | 0.74 | 0.61                                                        | 0.03                         | 0.10 |
|       | 东洞庭  | 3  | 0.90 | 0.86                                                        | 0.14                         | 0.05 |
|       | 鄱阳湖  | 24 | 1.21 | 0.45                                                        | 0.19                         | 0.02 |
| 半通江湖泊 | 洪湖   | 4  | 1.69 | 0.39                                                        | 0.09                         | 0.08 |
|       | 老江河  | 5  | 1.07 | 0.79                                                        | 0.18                         | 0.08 |
|       | 天鹅洲  | 6  | -    | -                                                           | 0.14                         | 0.02 |
|       | 石臼湖  | 22 | 0.69 | 0.20                                                        | 0.49                         | 0.07 |
|       | 阳澄湖  | 26 | 0.63 | 0.43                                                        | 0.13                         | 0.09 |
|       | 淀山湖  | 27 | -    | -                                                           | 0.76                         | 0.25 |
|       | 龙感湖  | 29 | 0.52 | 0.40                                                        | 0.10                         | 0.03 |
| 城市湖泊  | 军山湖  | 30 | 0.62 | 0.13                                                        | 0.02                         | 0.05 |
|       | 红星湖  | 8  | 3.39 | 1.91                                                        | 0.14                         | 0.25 |
|       | 三里七湖 | 9  | 2.57 | 1.46                                                        | 0.42                         | 0.18 |
|       | 南湖   | 17 | 3.83 | 1.59                                                        | 0.51                         | 0.33 |
|       | 后官湖  | 18 | 0.99 | 0.23                                                        | 0.10                         | 0.06 |
|       | 龙阳湖  | 19 | 8.67 | 1.54                                                        | 3.19                         | 0.96 |
|       | 墨水湖  | 20 | 5.26 | 1.53                                                        | 2.06                         | 1.45 |
| 城郊湖泊  | 三角湖  | 21 | 8.23 | 2.76                                                        | 3.73                         | 0.33 |
|       | 花马湖  | 7  | 1.20 | 0.31                                                        | 0.17                         | 0.06 |
|       | 桥墩湖  | 10 | 0.59 | 0.25                                                        | 0.08                         | 0.04 |
|       | 保安湖  | 11 | 0.92 | 0.29                                                        | 0.16                         | 0.09 |
|       | 七湖   | 12 | 1.31 | 0.43                                                        | 0.20                         | 0.08 |
|       | 陶家大湖 | 13 | 0.79 | 0.33                                                        | 0.38                         | 0.07 |
|       | 涨渡湖  | 14 | 1.00 | 0.39                                                        | 0.08                         | 0.05 |
|       | 牛山湖  | 15 | 0.66 | 0.24                                                        | 0.15                         | 0.04 |
|       | 青菱湖  | 16 | 2.51 | 0.46                                                        | 0.43                         | 0.23 |
|       | 武昌湖  | 23 | 0.48 | 0.19                                                        | 0.14                         | 0.06 |
|       | 倒水河  | 25 | 0.85 | 0.52                                                        | 0.07                         | 0.07 |
|       | 渦湖   | 28 | 1.22 | 0.59                                                        | 0.41                         | 0.25 |

较低。半通江湖泊中以洪湖总氮浓度最高,达1.69 mg/L;老江河硝态氮浓度最高,0.79 mg/L;淀山湖的氨氮与总磷浓度均较高。城市湖泊中,各湖泊总氮、硝态氮浓度差异较大,其中以龙阳湖 TN 浓度最高,其次为三角湖,并且三角湖硝态氮、氨氮浓度均为城市湖泊中最高;总磷以墨水湖浓度为最高。城郊湖泊中,以青菱湖的总氮、氨氮浓度最高,硝态氮、总磷以渦湖最高。从整体上看,氮磷浓度变化程度可表述为:城市湖泊 > 城郊湖泊 > 半通江湖泊 > 通江湖泊;龙阳湖、三角湖的氮、磷浓度属各湖泊中较高值。

2.2 蓝藻的种类组成及其生物量

调查期间共采集到蓝藻门9属种,各湖泊蓝藻种类及生物量所占比例见表2。其中以东洞庭湖、天鹅湖蓝藻种类数较少,以南湖、三角湖、青菱湖蓝藻种类较多。生长季节陶家大湖颤藻属生物量为

99.8%,所占比最高;非生长季节天鹅洲蓝纤维藻属生物量为99.2%,所占比最高。生长季节微囊藻属所占蓝藻生物量比例,在通江和半通江湖泊较非生长季节高。城市和城郊湖泊中,微囊藻属所占比例较小。螺旋藻属广泛分布于4种类型湖泊,在生长季节中,除武昌湖外,其在蓝藻中所占比例均高于非生长季节。平裂藻属主要在城市湖泊和城郊湖泊中占优势,且生长季节占蓝藻门比例均大于非生长季节。隐球藻属比例在通江湖泊和城市湖泊为非生长季节高于生长季节(表2)。

蓝藻在4种类型湖泊中的生物量见图2。除鄱阳湖、龙感湖和墨水湖外,生长季节蓝藻生物量普遍高于非生长季节;蓝藻生物量最高值出现在三角湖,5.719 mg/L;最低值出现在天鹅洲,0.001 mg/L。蓝藻在半通江湖泊中的生物量也高于其他类型湖泊的生物量。各类型湖泊蓝藻生物量大小依次为:半通江湖泊 > 城市湖泊 > 城郊湖泊 > 通江湖泊。

2.3 蓝藻与氮磷浓度分析

2.3.1 蓝藻与氮磷比的关系 不论是生长季节还是非生长季节,所研究湖泊氮磷比均较低,大部分低于40(图3)。

80%的采样点处于富营养和超富营养状态(吴世凯,2005)。33%的采样点属于磷限制(TN:TP > 17),36%的采样点属于氮磷共同限制(17 > TN:TP > 10),31%的采样点属于氮限制(TN:TP < 10)。非生长季节,大部分湖泊的蓝藻在总浮游植物中的比例不到12%。生长季节,蓝藻所占比例升高。绝大多数半通江湖泊和城郊湖泊蓝藻在总浮游植物中的比例都大于40%,大部分通江湖泊蓝藻在总浮游植物中的比例在20%左右,而大部分城市湖泊蓝藻在总浮游植物中的比例不到15%。

2.3.2 蓝藻与氮磷浓度相关性分析 生长季节和非生长季节蓝藻主要种属与湖泊氮磷浓度的 Pearson 相关分析结果见表3。在生长季节,仅集胞藻属与总磷极显著正相关(P < 0.01),其他藻属与氮磷浓度相关关系不明显。在非生长季节,集胞藻属除与TN无相关关系外,与氨氮、亚硝酸盐氮、总磷极显著正相关(P < 0.01),与硝酸盐氮显著相关(P < 0.05);蓝纤维藻属与氨氮、亚硝酸盐氮、总磷极显著正相关(P < 0.01)。

3 讨论

蓝藻总生物量由各个属的不同生长优势特征所决定,并且受多重环境因子影响,因而蓝藻生物量最

表2 30个湖泊主要蓝藻种类及其生物量在蓝藻中所占比例

| Tab.2 Main species of cyanobacteria and their biomass contributions to cyanobacteria in the 30 surveyed lakes |    |      |                                                                              |                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 湖泊类型                                                                                                          | 序号 | 湖泊   | 生长季节/<br>%                                                                   | 非生长季节/<br>%                                                                                            |
| 通江湖                                                                                                           | 1  | 南洞庭湖 | <i>Oscillatoria</i> 94.7                                                     | <i>Oscillatoria</i> 36.3; <i>Aphanocapsa</i> 62.5                                                      |
|                                                                                                               | 2  | 西洞庭湖 | <i>Oscillatoria</i> 23.5; <i>Microcystis</i> 58.2                            | <i>Aphanocapsa</i> 91.3                                                                                |
|                                                                                                               | 3  | 东洞庭湖 | <i>Microcystis</i> 91.3                                                      | <i>Microcystis</i> 86.7                                                                                |
|                                                                                                               | 24 | 鄱阳湖  | <i>Microcystis</i> 59.2; <i>Anabaena</i> 38.5                                | <i>Anabaena</i> 98.9                                                                                   |
| 半通江湖                                                                                                          | 4  | 洪湖   | <i>Microcystis</i> 84.2                                                      | <i>Microcystis</i> 39.4; <i>Aphanocapsa</i> 55.8                                                       |
|                                                                                                               | 5  | 老江河  | <i>Oscillatoria</i> 96.5                                                     | <i>Dactylococcopsis</i> 4.2; <i>Oscillatoria</i> 92.4                                                  |
|                                                                                                               | 6  | 天鹅洲  | <i>Synechocystis</i> 98.2                                                    | <i>Dactylococcopsis</i> 99.2                                                                           |
|                                                                                                               | 22 | 石臼湖  | <i>Microcystis</i> 92.4                                                      | <i>Microcystis</i> 91.2; <i>Aphanocapsa</i> 7.9                                                        |
|                                                                                                               | 26 | 阳澄湖  | <i>Anabaena</i> 21.8; <i>Oscillatoria</i> 46.0                               | <i>Microcystis</i> 13.9; <i>Anabaena</i> 64.8                                                          |
|                                                                                                               | 27 | 淀山湖  | <i>Microcystis</i> 80.4                                                      | <i>Dactylococcopsis</i> 13.8; <i>Microcystis</i> 7.6; <i>Anabaena</i> 78.6                             |
|                                                                                                               | 29 | 龙感湖  | <i>Oscillatoria</i> 84.4                                                     | <i>Pseudanabaena</i> 13.1; <i>Oscillatoria</i> 79.7                                                    |
|                                                                                                               | 30 | 军山湖  | <i>Microcystis</i> 92.2                                                      | <i>Microcystis</i> 82.8; <i>Aphanocapsa</i> 16.1                                                       |
| 城市湖泊                                                                                                          | 8  | 红星湖  | <i>Merismopedia</i> 81.5; <i>Microcystis</i> 7.3                             | <i>Dactylococcopsis</i> 75.8; <i>Synechocystis</i> 18.9; <i>Merismopedia</i> 5.34                      |
|                                                                                                               | 9  | 三里七湖 | <i>Dactylococcopsis</i> 9.9; <i>Merismopedia</i> 90.1                        | <i>Dactylococcopsis</i> 75.8; <i>Merismopedia</i> 3.6                                                  |
|                                                                                                               | 17 | 南湖   | <i>Oscillatoria</i> 41.9; <i>Spirulina</i> 39.71; <i>Microcystis</i> 10.6    | <i>Dactylococcopsis</i> 66.2; <i>Synechocystis</i> 14.0; <i>Merismopedia</i> 19.6                      |
|                                                                                                               | 18 | 后官湖  | <i>Microcystis</i> 12.7; <i>Aphanocapsa</i> 31.6; <i>Merismopedia</i> 36.5   | <i>Microcystis</i> 93.4; <i>Aphanocapsa</i> 4.4                                                        |
|                                                                                                               | 19 | 龙阳湖  | <i>Microcystis</i> 78.7; <i>Merismopedia</i> 14.0                            | <i>Dactylococcopsis</i> 92.6; <i>Synechocystis</i> 5.4                                                 |
|                                                                                                               | 20 | 墨水湖  | <i>Microcystis</i> 52.5; <i>Synechocystis</i> 15.5; <i>Merismopedia</i> 14.9 | <i>Dactylococcopsis</i> 49.4; <i>Synechocystis</i> 50.4                                                |
|                                                                                                               | 21 | 三角湖  | <i>Microcystis</i> 14.5; <i>Oscillatoria</i> 35.3; <i>Spirulina</i> 49.3     | <i>Dactylococcopsis</i> 28.2; <i>Microcystis</i> 51.5; <i>Synechocystis</i> 16.4                       |
| 城郊湖泊                                                                                                          | 7  | 花马湖  | <i>Oscillatoria</i> 99.2                                                     | <i>Anabaena</i> 35.7; <i>Dactylococcopsis</i> 15.2; <i>Synechocystis</i> 20.9; <i>Aphanocapsa</i> 28.2 |
|                                                                                                               | 10 | 桥墩湖  | <i>Microcystis</i> 83.4; <i>Aphanocapsa</i> 9.8                              | <i>Microcystis</i> 92.5; <i>Synechocystis</i> 4.2                                                      |
|                                                                                                               | 11 | 保安湖  | <i>Pseudanabaena</i> 14.7; <i>Oscillatoria</i> 78.9                          | <i>Microcystis</i> 15.4; <i>Aphanocapsa</i> 74.1                                                       |
|                                                                                                               | 12 | 七湖   | <i>Oscillatoria</i> 92.3                                                     | <i>Dactylococcopsis</i> 13.5; <i>Microcystis</i> 86.1                                                  |
|                                                                                                               | 13 | 陶家大湖 | <i>Oscillatoria</i> 99.8                                                     | <i>Dactylococcopsis</i> 76; <i>Microcystis</i> 24                                                      |
|                                                                                                               | 14 | 涨渡湖  | <i>Dactylococcopsis</i> 24.9; <i>Synechocystis</i> 68.9                      | <i>Pseudanabaena</i> 86.1; <i>Merismopedia</i> 9.2                                                     |
|                                                                                                               | 15 | 牛山湖  | <i>Microcystis</i> 95.9                                                      | <i>Microcystis</i> 98.1; <i>Synechocystis</i> 1.3                                                      |
|                                                                                                               | 16 | 青菱湖  | <i>Dactylococcopsis</i> 12.7; <i>Microcystis</i> 57.9; <i>Anabaena</i> 16.6  | <i>Pseudanabaena</i> 50.6, <i>Dactylococcopsis</i> 32.0; <i>Aphanocapsa</i> 8.5                        |
|                                                                                                               | 23 | 武昌湖  | <i>Pseudanabaena</i> 82.0; <i>Microcystis</i> 8.5; <i>Oscillatoria</i> 8.6   | <i>Anabaena</i> 11.6; <i>Oscillatoria</i> 85.7                                                         |
|                                                                                                               | 25 | 倒水湖  | <i>Microcystis</i> 94.0                                                      | <i>Dactylococcopsis</i> 5.9; <i>Microcystis</i> 94.1                                                   |
|                                                                                                               | 28 | 涸湖   | <i>Microcystis</i> 53.0; <i>Oscillatoria</i> 43.3                            | <i>Anabaena</i> ,93.6; <i>Dactylococcopsis</i> 6.3                                                     |

注:蓝纤维藻属(*Dactylococcopsis*),微囊藻属(*Microcystis*),集胞藻属(*Synechocystis*),平裂藻属(*Merismopedia*),颤藻属(*Oscillatoria*),念珠藻属(*Nostoc*),色球藻属(*Chroococcus*),隐球藻属(*Aphanocapsa*),粘球藻属(*Gloeocapsa*),假鱼腥藻属(*Pseudanabaena*)螺旋藻属(*Spirulina*),鱼腥藻属(*Anabeana*),双尖藻属(*Hammatoidaea*),项圈藻属(*Anabaenopsis*),立方藻属(*Eucapsis*)。

高的湖泊出现在污染较重的城市湖泊类型中。同时也有很多污染严重的城市湖泊蓝藻生物量却很低,有研究显示超富营养湖泊蓝藻生长不占优势(Canfield D E et al, 1989; Carmen Rojo, 1998; 王小东等,2011)。因此,各类型湖泊的蓝藻群落特征存在较大差异。

生长季节较非生长季节温度高,更适合蓝藻的

生长(马健荣,2013)。大部分湖泊生长季节蓝藻总生物量高于非生长季节,但鄱阳湖蓝藻生物量非生长季节较高。由于鄱阳湖非生长季节蓝藻主要是鱼腥藻,说明鱼腥藻属可能更适宜于非生长季节(2-5月)的环境;同时从花马湖、阳澄湖、涸湖的鱼腥藻属在蓝藻门中更具优势也支持此观点,这可能与河口的特殊生态环境(如水流速度)有关;另外,河口

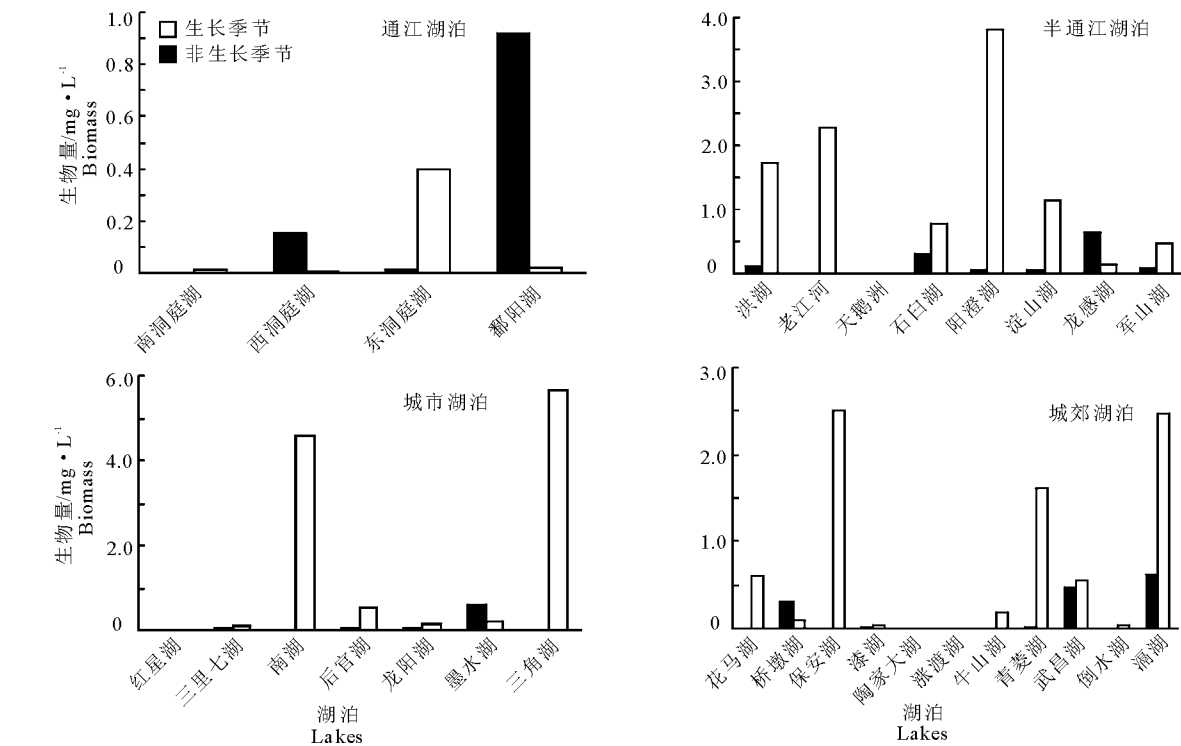


图 2 4 种类型湖泊中蓝藻的生物量

Fig. 2 Biomass of Cyanobacteria in the four types of lakes in growth season and non-growth season

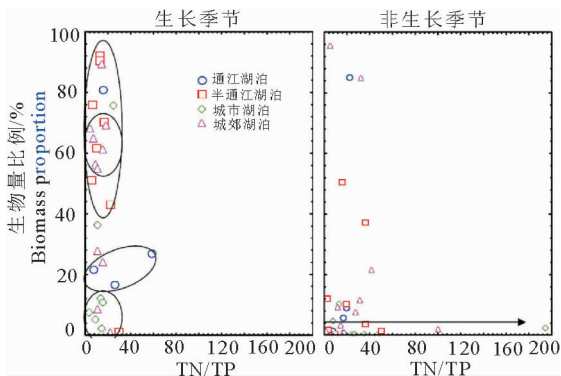


图 3 蓝藻在浮游植物中的  
生物量百分比与氮磷比的关系

Fig.3 Relationship of contribution of cyanobacteria to  
phytoplankton biomass and N/P ratio in four types of lakes

丰富的营养盐,特别是磷酸盐和氨氮也可能是一个重要因素(刘霞等,2012)。较低的氮磷比有利于蓝藻占优势(Smith V H,1983),而且本研究发现蓝藻在生长季节的半通江湖泊和城郊湖泊中优势更明显,说明蓝藻在这 2 种类型湖泊中较易形成优势种群。

微囊藻属在非生长季节的蓝藻生物量中所占比例较低,说明微囊藻属喜好较高的温度。我国发生水华的蓝藻共 26 种,其中微囊藻属 10 种;有大量野外观察表明,微囊藻水华往往发生在夏季,另有研究认为当水温为 26℃ 时,最适宜于微囊藻的聚集、上浮而形成水华(Hua J B et al,1994)。微囊藻属多出现在水体流动性较强的半通江湖泊中,说明在水体

表 3 蓝藻主要种属生物量与湖泊氮磷浓度的 Pearson 相关系数

Tab.3 Pearson correlation coefficients of biomass of main cyanobacterial genus with the  
concentration of nitrogen and phosphorus in the surveyed lakes

| 生物量   | 生长季节  |                                 |                                 |                                 |                | 非生长季节  |                                 |                                 |                                 |                |
|-------|-------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------|--------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------|
|       | TN    | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | TP             | TN     | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | TP             |
| 蓝纤维藻属 | 0.033 | 0.011                           | -0.092                          | 0.023                           | 0.296          | 0.280  | <b>0.598**</b>                  | <b>0.867**</b>                  | 0.219                           | <b>0.591**</b> |
| 微囊藻属  | 0.007 | 0.055                           | 0.000                           | 0.071                           | -0.001         | 0.409  | 0.109                           | 0.180                           | 0.154                           | -0.149         |
| 集胞藻属  | 0.094 | 0.033                           | -0.026                          | 0.320                           | <b>0.588**</b> | 0.256  | <b>0.830**</b>                  | <b>0.855**</b>                  | <b>0.470*</b>                   | <b>0.559**</b> |
| 平裂藻属  | 0.209 | 0.186                           | 0.292                           | 0.182                           | 0.083          | -0.158 | 0.142                           | -0.123                          | -0.318                          | 0.331          |
| 颤藻属   | 0.295 | 0.227                           | 0.279                           | 0.359                           | 0.153          | -0.352 | -0.357                          | -0.674                          | -0.328                          | -0.243         |

注: \* 表示显著相关,  $P < 0.05$ ; \*\* 表示极显著相关,  $P < 0.01$ 。  
Note: \* means significant correlation ( $P < 0.05$ ), \*\* means extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ).

流动性较强、环境温度较高的湖泊中,微囊藻属较易发生水华。Landers (1982) 认为氮源通常比磷源释放慢,固态氮源一般以氨氮的形式释放出来,这种机制给微囊藻的充分生长提供了一种缓慢却是很稳定的氮源补充。可利用氨氮的增加同样刺激了微囊藻伪空胞的生长(Walsby AE et al,1974;Spencer CN et al,1985)。相关分析显示微囊藻与氮磷无显著相关,说明微囊藻的暴发可能与氮磷浓度关系不明显。颤藻(*Oscillatoria*)和螺旋藻(*Spirulina*)在生长季节4种类型湖泊中都有增长。颤藻在城郊湖泊中占优势,可能是因为合适的水温和较高的透明度,有报道认为颤藻可以在富含氮源的湖泊沉积物中垂直迁移,所以在氮限制湖泊中也可以看到(Jaap RJ et al,1986)。蓝纤维藻属、集胞藻属也是富营养水体常见属,在非生长季节均与氨氮、亚硝酸盐氮、总磷正相关,说明在富营养问题严重的长江流域湖泊,在较低的温度下,氨氮、总磷对蓝纤维藻属和集胞藻属有显著影响。而集胞藻属在生长季节与也与总磷成正相关,说明总磷是影响其生长的重要因素。平裂藻属(*Merismopedia*)在城市湖泊和城郊湖泊占优势,说明它们喜好较高的温度和营养,这与城市湖泊和城郊湖泊接纳大量污水而常常处于富营养和超富营养状态有关(吴世凯,2005)。类似的现象也出现在美国的 Üzmit 湾,每年平裂藻的生长出现峰值是在春末,因为该时段有较高的营养和温度(William Cet al,1989)。

综上所述,4种类型湖泊的蓝藻群落特征存在较大差异,2-5月可能更适宜于鱼腥藻属生长,尤其是在鄱阳湖、涪湖等湖泊;同时,蓝藻在生长季节的半通江湖泊和城郊湖泊较易形成优势,其中微囊藻属的暴发与氮磷浓度不显著相关。影响蓝藻种类因素复杂,如水动力学、TOC等,研究中可解释变量不高,有必要继续深入系统研究。

#### 参考文献

陈格君,周文斌,李美婷,等.2013.鄱阳湖氮磷营养盐对浮游植物群落影响研究[J].中国农村水利水电,(3):48-52,61.

国家环境保护总局,《水和废水监测分析方法》编委会.2002.水和废水监测分析方法:第四版[M].北京:中国环境科学出版社.

金相灿.1990.湖泊富营养化调查规范:第二版[M].北京:中国环境科学出版社.

姜霞,王书航,钟立香,等.2010.巢湖藻类生物量季节性变化特征[J].环境科学,(9):2056-2062.

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

刘霞,陆晓华,陈宇炜.2012.太湖浮游硅藻时空演化与环境因子的关系[J].环境科学学报,(4):821-827.

吕晋,郭红娟,马学礼,等.2008.武汉市湖泊蓝藻分布影响因素分析[J].生态环境,(2):515-519.

马健荣,邓建明,秦伯强,等.2013.湖泊蓝藻水华发生机理研究进展[J].生态学报,(10):3020-3030.

秦伯强.2002.长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J].湖泊科学,(3):193-202.

秦伯强,高光,朱广伟,等.2013.湖泊富营养化及其生态系统响应[J].科学通报,(10):855-864.

王苏民,窦鸿身.1998.中国湖泊志[M].北京:科学出版社.

王小冬,秦伯强,高光,朱广伟,刘兴国.2011.无机氮磷添加对太湖来源浮游植物和附着生物生物量的影响[J].生态学杂志,30(10):2257-2261.

吴世凯,谢平,王松波,等.2005.长江中下游地区浅水湖泊群中无机氮和TN/TP变化的模式及生物调控机制[J].中国科学:D辑:地球科学,(S2):111-120.

许海,秦伯强,朱广伟.2012.太湖不同湖区夏季蓝藻生长的营养盐限制研究[J].中国环境科学,(12):2230-2236.

杨达源,李徐生,张振克.2000.长江中下游湖泊的成因与演化[J].湖泊科学,2000,(3):226-232.

章宗涉,黄祥飞.1991.淡水浮游生物研究方法[M].北京:科学出版社.

朱浩然.1991.中国淡水藻志:第二卷:色球藻纲[M].北京:科学出版社.

赵生才.2004.我国湖泊富营养化的发生机制与控制对策[J].地球科学进展,(1):138-140.

Canfield D E, E Philips, C M Duarte. 1989. Factors influencing the abundance of blue-green algae in Florida lakes [J]. Can J Fish Aquat Sci, 46: 1232-1237.

Carmen Rojo. 1998. Differential attributes of phytoplankton across the trophic gradient: a conceptual landscape with gaps[J]. Hydrobiologia, 369/370: 1-9.

Forsberg C, Ryding S O. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste receiving lakes [J]. Archiv fur Hydrobiologie, 89: 189-207.

Hua J B, Zong Z X. 1994. Experimental research on formation of algae bloom in Yanghe reservoir [J]. Universitatis Pekinensis (Acta Scientiarum Naturalium), 30:476-484.

Hillebrand H, Durselen C D, Kirschtel D, et al. 1999. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae [J]. J Phycol, 35:403-424.

Hudnell H K. 2008. Cyanobacterial Harmful Algal Blooms: State of the Science and Research Needs [J]. Berlin: Springer Press, 619:1-949.

Landers DH. 1982. Effects of naturally senescing aquatic macro-

- phytes on nutrient chemistry and chlorophyll a of surrounding waters[J]. *Limnol Oceanogr*, 27: 428–439.
- Jaap RJ, Moshe S. 1986. Nitrogen limitation in natural populations of cyanobacteria (*Spirulina* and *Oscillatoria* spp.) and its effect on macromolecular synthesis [J]. *Appl Environ Microbiol*, 52(2):340–344.
- Paerl HW, Fulton RS III, Moisaner PH, et al. 2001. Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria [J]. *Sci World J*, 1:76–113.
- Smith V H. 1983. Low Nitrogen to Phosphorus Ratios Favor Dominance by Blue-Green Algae in Lake Phytoplankton [J]. *Science*, 221(4611):669–671.
- Spencer CN, King DL. 1985. Interactions between light,  $\text{NH}_4^+$ , and  $\text{CO}_2$  in buoyancy regulation of *Anabaena flos-aquae* (Cyanophyceae) [J]. *J Phycol*, 21:194–199.
- Walsby AE, Klemer AR. 1974. The role of gas vacuoles in microstratification of a population of *Oscillatoria agardhii* var. *isothrix* in Deming Lake, Minnesota [J]. *Arch Hydrobiol*, 74: 375–392.
- William C, Dennison, Gregory J, et al. 1989. Effect of “Brown Tide” Shading on Eelgrass (*Zostera marina* L) Distributions [J]. *Coastal and Estuarine Studies*, 35: 675–692.
- Wu SK, Xie P, Liang GD, Wang SB, Liang XM. 2006. Environmental and biological factors influencing microcystin in the middle and lower reaches of the Yangtze River area [J]. *Freshwater biology*, 51: 2309–2319.

(责任编辑 张俊友)

## Cyanobacteria Genus and its Relationship with Nitrogen and Phosphorus Concentration in Lakes along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

WU Shi-kai<sup>1,2</sup>, XIE Ping<sup>2</sup>, NI Le-yi<sup>2</sup>, WANG Song-bo<sup>2</sup>, XU jun<sup>2</sup>, CHEN Bu-dan<sup>1,3</sup>

- (1. Guangdong Key Laboratory of Membrane Materials and Membrane Separation, Guangzhou Institute of Advanced Technology Chinese Academy of Science, Guangzhou, 511458, P. R. China;
2. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology of China, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P. R. China;
3. College of Chemical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, P. R. China)

**Abstract:** According to the investigation on the thirty shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River, the community structure characteristics of cyanobacteria in these lakes and its relationship with the concentration of nitrogen and phosphorus were analyzed. The results showed that the biomass of cyanobacteria in growth season was higher than non-growth season, with the maximum value (5.719 mg/L) in Sanjiao Lake and the minimum value (0.001 mg/L) in Tian'ezhou. The biomass of Cyanobacteria in lakes half-connected with river was significantly higher than other types of lakes. In half-connected lakes and suburban lakes, the biomass accounted for more than 40% of the total phytoplankton biomass during growth season, while which was less than 20% in connected and urban lakes, with the order of lakes from high to low as follows: half-connected lakes, suburban lakes, connected lakes and urban lakes. The N/P ratio in most of the lakes was lower than 40 both in growth season and non-growth season. Pearson correlation analysis of cyanobacteria dominant groups and concentration of nitrogen and phosphorus showed that only *Synechocystis* presented significantly positive correlation with total phosphorus ( $P < 0.01$ ) in growth season, while in non-growth season, *Synechocystis* and *Dactylococcopsis* both presented significantly positive correlation with ammonia nitrogen, nitrite nitrogen and total phosphorus ( $P < 0.01$ ), furthermore, *Synechocystis* also had positive correlation with nitrate nitrogen ( $P < 0.05$ ).

**Key words:** the middle and lower reaches of the Yangtze River; Shallow lakes; Cyanobacteria; Nitrogen; phosphorus