

水华蓝藻复苏的研究进展与水华预测

孔繁翔, 曹焕生, 谭 啸

(湖泊与环境国家重点实验室, 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

摘要:综合分析了当前国内外水华复苏的研究进展, 确定了水华蓝藻复苏的定义, 介绍了研究蓝藻复苏的方法, 以及蓝藻复苏对水体中蓝藻种群生物量以及当年蓝藻水华形成的贡献, 探索了驱动水华蓝藻复苏的环境因子。结合太湖的研究成果, 阐述了研究水华蓝藻复苏在进行水华预测中的重要作用, 并展望了未来研究的重点。

关键词:蓝藻; 水华; 复苏; 水华预测

中图分类号: Q948; X17

文献标识码: A

文章编号: 1674-6732(2010)-01-0001-04

Development of Research on Recruitment of Bloom-forming Cyanobacteria and Blooms Forecast

KONG Fan-xiang, CAO Huan-sheng, TAN Xiao

(State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China)

ABSTRACT: The development of the research on recruitment of bloom-forming cyanobacteria at home and abroad was reviewed. The definition for and the approach to bloom-forming cyanobacteria recruitment were identified together with its contribution to pelagic cyanobacteria biomass and annual water blooms formation. The environmental factors that drive the recruitment process were examined. The role of cyanobacteria recruitment in blooms forecast was highlighted based on the studies carried out in Taihu Lake and the focus areas for future study was predicted.

KEY WORDS: cyanobacteria; water blooms; recruitment; blooms forecast

随着湖泊富营养化问题的加剧, 很多湖泊中的蓝藻成为浮游植物优势种, 并形成水华。这些蓝藻包括群体生长的微囊藻 (*Microcystis*) 以及丝状体的鱼腥藻 (*Anabaena*)、束丝藻 (*Aphanizomenon*)、颤藻 (*Planktothrix*) 等, 有些蓝藻会产生藻毒素, 对饮用水源造成严重危害。目前, 人们对于蓝藻水华形成机理还处在深入探索阶段。孔繁翔和高光总结并提出蓝藻生长与水华形成过程的四阶段理论假说: 蓝藻秋季下沉到底泥表面越冬, 春季复苏, 生物量累积和优势确立, 并在适当的水文气象条件下上浮聚集形成水华, 每个过程的主导生态因子各不相同^[1]。其中, 越冬后的藻类在春季复苏是水体中藻类生长的起点, 为蓝藻生长提供种源。模拟实验显示, 如果不考虑底泥微囊藻的贡献, 夏季的微囊藻水华会减少 50%^[2]。因此, 对蓝藻越冬和复苏基本规律的认识是预测蓝藻水华的必要前提。

1 蓝藻复苏的定义

一般而言, 底泥表面的蓝藻复苏是指在环境条件适合时, 越冬蓝藻恢复生长并向水柱迁移的过程; 而水体中越冬蓝藻的复苏主要是指悬浮蓝藻恢复生长的过程。由于有相当一部分的蓝藻下沉后群体分解, 越冬的蓝藻的形态与夏季水华时的形态有所区别^[3]。部分丝状类蓝藻如鱼腥藻会形成休眠体“厚壁孢子”, 而群体微囊藻没有专门的休眠形态, 以营养体形式进行休眠。就微囊藻而言, 它的秋季下沉主要是其在温度降低时细胞内糖类物质增加 (增大细胞密度) 和伪空胞破裂的结果。如果要重新回到水柱中, 微囊藻在来年温度升高时需要恢复生长、降低细胞密度并重新获得浮力。正因

收稿日期: 2009-12-21

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2007BAC26B01); 国家自然科学基金项目 (40671068)

作者简介: 孔繁翔 (1957—), 男, 研究员, 博士, 从事湖泊生物与生态研究工作。

如此, REYNOLDS 等认为来年生长并上移的微囊藻群体不是原来秋季下沉的群体, 而是在环境条件有利时恢复生长后重新形成的群体^[4]。其中生长的恢复包括活动代谢活性恢复并获得浮力。这个定义含有定性和定量两方面的要求, 定性部分是蓝藻要恢复代谢活性并获得浮力, 定量部分是从底泥向水柱迁移的数量, 亦即从底泥复苏的蓝藻对水体蓝藻生物量的贡献。

2 湖泊中蓝藻复苏的研究方法

几乎所有的蓝藻复苏研究都是利用藻类捕捉器来完成的。世界上第一个藻类捕捉器是由 REYNOLDS 设计并在加拿大 Guelph 湖研究中投入应用^[5,6]。该捕捉器由一个黑色的聚氯乙烯圆筒(高 16.5 cm, 直径 8.0 cm)和上面插着的倒扣漏斗组成。虽然这种设计能够收集从底泥表面向上迁移的蓝藻, 却不能避免从侧面来的藻类“污染”(水平迁移)和浮游动物的牧食。HANSSON 设计的藻类捕捉器主要是一个装满过滤湖水的玻璃罐, 罐盖中间穿过一个漏斗, 漏斗上覆盖一层 300 μm 孔径的尼龙网以去除浮游动物^[7]。该捕捉器倒置安装在一个铝合金架子上。虽然该捕捉器能够成功去除大部分的浮游动物, 但是仍然不能排除水平方向迁入的“污染”。BRUNBERG 改进的捕捉器是一个透明的塑料材料做成的圆筒形罐子(20 L), 其底部开口, 四周的壁上也有两个口, 上面覆盖一层 40 μm 孔径的筛网以允许罐内外的湖水交换^[8]。这种捕捉器在很大程度上能够同时去除侧面的“污染”和浮游动物的牧食, 但是缺点有两个, 首先, 不能完全去除藻类的“污染”, 这是因为此阶段微囊藻单细胞的大小在 3 ~ 7 μm , 所以依然能够穿过 40 μm 孔径的筛网; 此外, 如果该捕捉器安放在底泥表面时间过长, 罐内的环境条件就会与罐外有较大的变化, 特别是氧化还原电位和溶解氧。复苏研究的方法就是把这样的捕捉器安放在底泥表面, 向上迁移的蓝藻会主动进入捕捉器中, 相隔一定时间收集这些捕捉器就能够监测复苏的蓝藻数量。

3 蓝藻从底泥的复苏对水柱生物量的贡献

从底泥复苏的蓝藻种源对水柱中的蓝藻生物量以及最终形成水华具有两方面的作用: 一是作为水柱中蓝藻初始生长的种源, 复苏的蓝藻可以高达水柱中最大生物量的 40%。在 Erken 湖进行的复

苏研究得到了类似的结果, 复苏的蓝藻要占到透光层蓝藻生物量的 50%^[9,10]。Guelph 湖中的水华束丝藻(*Aphzizomenon flos - aquae*)有着更高的复苏量, 可以达到最大生物量的 62%^[6]。这些研究结果支持以前提出的假设: 浮游蓝藻种群主要是由底泥中的蓝藻通过复苏进入到水柱中。另一方面, 也有研究者认为底泥中复苏的蓝藻只构成浮游生物量的很小一部分(相对于浮游的最大生物现存量)。如果底泥蓝藻的复苏早于水柱中浮游蓝藻的生长, 那么不管复苏量如何小, 它对于水柱生物量的贡献都是很大的, 因为这些迁移到水柱的蓝藻可以在水柱中具有更好的生长条件从而能够更快生长、积累生物量和形成优势。此外, 浅水湖泊比深水湖泊具有更高的蓝藻复苏量, 而湖泊的浅水区域的复苏量比深水区域高, 浅水湖区的蓝藻复苏可能受到底泥再悬浮作用或者生物扰动的促进^[8,11]。

4 驱动蓝藻复苏的环境因子

较早的蓝藻复苏研究主要集中在野外复苏现象和数量的变化观测, 近年来, 实验室模拟研究也逐步展开。实验室模拟研究主要是利用野外采集的底泥样品在实验室控制条件下培养, 观察蓝藻复苏的环境条件要求。当然, 没有一个单一的因子可以独立驱动蓝藻的复苏, 但是在蓝藻复苏的某一阶段起主导作用的环境因子可能不同。在多数条件下, 蓝藻复苏极有可能是这些环境因子联合作用的结果。

4.1 营养盐

STÅHL 在瑞典的 Krankesjön 湖中进行的围隔实验表明, 在溶解氮质量浓度为 0.498 mg/L 和总磷质量浓度为 0.134 mg/L 时微囊藻的复苏量达到最大值^[12]。在该实验中最重要的是促进微囊藻复苏的环境因子与浮游植物细胞生长所要求的一样, 即较高的营养盐浓度和较低的氮磷比。

4.2 温度和光照

一般而言, 蓝藻复苏最合适的温度条件也就是蓝藻细胞生长所需的起始温度, 并因物种而异。在瑞典的 Limmaren 湖中, 鱼腥藻的最大复苏率出现在湖水温度达到 18 ~ 21 $^{\circ}\text{C}$ 的七月底和八月初。对于蓝藻的复苏, 光照并不是一个绝对必要的驱动条件, 特别是对于束丝藻而言^[11]。REYNOLDS 等在 Mendota 湖蓝藻复苏的研究中发现, 当光照达到水体底层时新生长的微囊藻群体开始向上迁移^[13]。

另外,无论是在野外还是在实验室控制条件下,胶刺藻(*Gloeotrichia*)的复苏受较高温度和光照的促进^[10]。在法国的 Grangent 水库,底泥的铜绿微囊藻酯酶的活性随着春季温度的升高而逐渐增加,在夏季达到最大值。这种活性的恢复使得底泥中的蓝藻重新进入水柱中,同时又导致底泥中蓝藻生物量的下降^[14]。利用从野外采集的底泥样品,李阔宇等发现微囊藻的生长始于 15 °C 和 30 $\mu\text{Em}^{-1}\text{s}^{-1}$ 的光照条件下,并向水柱迁移,最适生长温度是 20 °C^[15]。

4.3 溶解氧

水华束丝藻复苏起始的环境因子与微囊藻、鞘丝藻和束球藻不同,该藻的复苏受到有氧条件的促进^[16]。但若没有微囊藻、鞘丝藻和束球藻在温跃层以下复苏时,束丝藻则从底泥表面向水柱中迁移。这说明有一个与热成层有关的因子在起作用,促进束丝藻从水下层到透光层的迁移^[6]。BARBIERO 和 KANN 也观察到了水华束丝藻的复苏出现在较浅的有氧环境和较多光照的底泥表面^[17]。

4.4 生物扰动和再悬浮

微囊藻复苏被认为是一种主动过程,即底泥表面的微囊藻在有利的环境条件下开始生长,恢复代谢并降低藻细胞的密度,增大浮力而主动离开底泥表面。但是 VERSPAGEN 等发现,在水华形成以前,微囊藻的净浮力并没有改变,复苏并不像是一个由细胞内部浮力调节的主动过程^[18]。相反,他们发现附着在微囊藻群体上的底泥颗粒对于底泥群体的密度有重要的作用,所以微囊藻的复苏更像一个由再悬浮或者生物扰动引起的被动过程。所以,浅水湖区相比深水湖区具有更高的复苏量,这一点已被近年来的研究证明^[2]。RENGEFORS 等也发现扰动和光照是影响蓝藻复苏的最重要的因子^[19]。

5 太湖水华蓝藻复苏与预测的研究进展

陶益和 CAO 等在室内以及野外利用自行设计的藻类捕捉器测定蓝藻复苏期间的色素含量,并进行原位复苏模拟实验,发现底泥蓝藻复苏的量与温度变化密切相关^[20,21]。在水体温度达到 14 °C 时蓝藻开始进入水柱中,在环境温度升至 18 ~ 20 °C 之间时大量进入水中,并发现“有效积温”与蓝藻复苏的量密切相关,即蓝藻复苏的量与高于蓝藻正常生理代谢的起始温度(在室内模拟实验中为

14 °C,在野外原位观测中为 8 °C)的积累温度值(有效积温)相关性极高。谭啸等采用逐步升温的方法培养梅梁湾冬季泥样,发现泥样中蓝藻的复苏温度(12.5 °C 以上)略高于绿藻和硅藻的复苏温度(9 °C),但是复苏后蓝藻具有较高的比生长速率,有利于蓝藻确立优势进而形成水华^[22]。正因为 2007 年为近 25 年来的一个暖冬年份,1—4 月太湖水体温度平均高于常年近 207 °C,为藻类生长并形成水华最终导致供水危机提供了条件。

水华蓝藻复苏的研究也为水华的长尺度预测提供了依据。根据近 3 年的野外观测,分析了冬季底泥表面藻蓝素含量的空间分布特点与来年首次发生蓝藻水华的湖区之间的关联,发现太湖水华蓝藻的种源可能来自上一年水华蓝藻的沉降。例如:在 2007 年,由于当年蓝藻水华规模十分严重,持续到 2008 年 1 月初,南太湖湖州水域仍然漂浮有大量的蓝藻水华,直到 1 月中旬的严冬来临和产生降雪,南太湖水体中的蓝藻群体才基本消失。根据全湖底泥表面水华蓝藻种源的时空分布格局,并综合考虑当年气候特征,不同湖区的营养水平,引江济太对营养盐输移和水动力的影响等气候、水文因素,研究人员预测在 2008 年将会在上一年蓝藻的主要越冬地——南太湖首先形成蓝藻水华,并且首次发生水华的时间不会早于 2007 年。2008 年对太湖蓝藻水华的野外监测与分析结果表明,实际情况与预测结果基本吻合。蓝藻水华确实首先出现在太湖西南湖区。当年最早发现蓝藻水华在 4 月 10 日,比 2007 年最早发现蓝藻水华的 3 月 28 日推迟了近半个月。

6 研究展望

目前对于蓝藻复苏的研究几乎全部集中于从底泥到水柱的数量迁移过程,由于形态发生了变化,对于复苏过程中水华蓝藻微囊藻的定性定量检测还须利用分子生物学技术来甄别,要判断是底泥中的越冬蓝藻还是水柱中的蓝藻首先开始恢复活性,究竟哪些环境因子真正对蓝藻的复苏有影响还有待于实验室模拟和野外实验的进一步确定。目前,太湖水体营养盐水平仍然居高不下,常常会形成较严重的蓝藻水华,因此研究太湖水华蓝藻复苏,对预测蓝藻水华并及时采取措施,减缓蓝藻水华的生态灾害具有理论和实际应用意义。

[参考文献]

- [1] 孔繁翔, 高光. 大型浅水湖泊的蓝藻水华形成机理研究的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589-595.
- [2] VERSPAGEN J M H, SNELDER E O F M, VISSER P M, et al. Benthic - pelagic coupling in the population dynamics of the harmful cyanobacterium *Microcystis* [J]. *Freshwater Biology*, 2005, 50(5): 854-867.
- [3] FALLON R D, BROCK T D. Planktonic blue - green algae; production, sedimentation, and decomposition in Lake Mendota, Wisconsin[J]. *Limnology and Oceanography*, 1980, 25(1): 72-88.
- [4] REYNOLDS C S, WISEMAN S W. Sinking loss of phytoplankton in closed limnetic systems [J]. *Journal of Plankton Research*, 1982, 4(3): 489-522.
- [5] REYNOLDS C S. Interrelation of photosynthetic behavior and buoyancy regulation in a natural population of a blue - green alga[J]. *Freshwater Biology*, 2006, 5(4): 323-338.
- [6] TRIMBEE A M, HARRIS G P. Phytoplankton population dynamics of a small reservoir: use of sedimentation traps to quantify the loss of diatoms and recruitment of summer bloom - forming blue - green algae [J]. *Journal of Plankton Research*, 1984, 6(5): 897-918.
- [7] HANSSON L A, RUDSTAM L G, JOHNSON T B, et al. Patterns in algal recruitment from sediment to water in a dimictic, eutrophic lake[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1994, 51(2): 2825-2833.
- [8] BRUNBERG A K, BLOMQUIST P. Recruitment of *Microcystis* from lake sediments; the importance of littoral inocula [J]. *Journal of Phycology*, 2003, 39(1): 58-63.
- [9] BERBIERO R P. A contribution to the life history of the planktonic cyanophyte *Gloeotrichia echinulata* [J]. *Archiv Für Hydrobiologie*, 1993, 127(1): 87-100.
- [10] FORSELL L, PETTERSON K. On the annual migration of the cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* in Lake Erken, Sweden, and its influence on the pelagic population [J]. *Marine and Freshwater Research*, 1995, 46(1): 287-293.
- [11] KARLSSON E I, BRUNBERG A K. The importance of shallow sediments in the recruitment of *Anabaena* and *Aphanizomenon* (cyanophyceae) [J]. *Journal of Phycology*, 2004, 40(5): 831-836.
- [12] STÅHL D A, HANSSON L A, GYLISTRÖM M. Recruitment of resting stages may induce blooms of *Microcystis* at low N:P ratios [J]. *Journal of Plankton Research*, 2003, 25(9): 1099-1106.
- [13] REYNOLDS C S, JAWORKI G H M, CMIECH H A, et al. On the annual cycle of the blue - green alga *Microcystis aeruginosa* Kütz. Emend. Elenkin [M] // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series. London: B - Biological Sciences*, 1981: 419-477.
- [14] LATOUR D, SABIDO O, SALENCON M J, et al. Dynamics and metabolic activity of the benthic cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* in the Grangent Reservoir (France) [J]. *Journal of Plankton Research*, 2004, 26(7): 719-726.
- [15] 李阔宇, 宋立荣, 万能. 底泥中微囊藻复苏和生长特性的研究 [J]. *水生生物学报*, 2004, 28(2): 113-118.
- [16] LYNCH M, SHAPIRO J. Predation, Enrichment and phytoplankton community structure [J]. *Limnology and Oceanography*, 1981, 26(1): 86-102.
- [17] BARBIERO R P, KANN J. The importance of benthic recruitment to the population development of *Aphanizomenon flos - aquae* and internal loading in a shallow lake [J]. *Journal of Plankton Research*, 1994, 16(11): 1581-1588.
- [18] VERSPAGEN J M H, SNELDER E O F M, VISSER P M, et al. Recruitment of benthic *Microcystis* (cyanophyceae) to the water column: internal buoyancy changes or resuspension [J]. *Journal of Phycology*, 2004, 40(2): 260-270.
- [19] RENGEFORS K, GUSTAFSSON S, STÅHL D A. Factors regulating the recruitment of cyanobacterial and eukaryotic phytoplankton from littoral and profundal sediments [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2004, 36(3): 213-226.
- [20] 陶益, 孔繁翔, 曹焕生, 等. 太湖底泥水华蓝藻复苏的模拟研究 [J]. *湖泊科学*, 2005, 17(3): 231-236.
- [21] CAO H S, TAO Y, KONG F X, et al. Relationship between temperature and cyanobacterial recruitment from sediments in laboratory and field studies [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2008, 23(3): 405-412.
- [22] 谭啸, 孔繁翔, 于洋, 等. 升温过程对藻类复苏和群落演替的影响 [J]. *中国环境科学*, 2009, 29(6): 578-582.

本刊已加入中国学术期刊网络出版总库、中国学术期刊综合评价数据库、万方数据 - 数字化期刊群和中国科技期刊数据库。凡被本刊录用的稿件将同时通过因特网进行网络出版或提供信息服务, 稿件一经刊用将一次性支付作者著作权使用报酬, 如作者不同意将自己的文章被以上期刊数据库收录, 请在来稿中声明, 本刊将作适当处理。