J. Lake Sci.(湖泊科学), 2009, **21**(3): 314-328
http://www.jlakes.org. E-mail: jlakes@niglas.ac.cn
©2009 by *Journal of Lake Sciences*

太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践*

孔繁翔, 马荣华, 高俊峰, 吴晓东
(中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘　要: 综述了蓝藻水华预防、预测预警的重要意义及其理论与技术体系. 基于作者所提出的将蓝藻水华形成分为休眠、复苏、生长和上浮聚集形成水华的"四阶段理论", 以及太湖蓝藻越冬、春季复苏和水华形成的时空规律, 提出了太湖蓝藻水华的预防理念. 综述了国内外蓝藻水华形成与预测研究进展, 阐述了蓝藻水华形成关键过程的主导生态因子及其阈值: 确定了水华蓝藻越冬的空间分布与生命特征, 利用室内模拟实验和野外原位观测与捕捉, 得到了蓝藻春季复苏的室内和野外温度阈值分别为 14℃和 9℃, 发现了蓝藻复苏量与有效生理积温呈正相关的基本规律; 初步揭示了水华蓝藻生长竞争优势形成的生物学与生态学机理以及光利用策略, 利用细胞分裂频率法测定了夏季太湖水华蓝藻的原位生长速率为 0.2–0.4; 确定了在不同水文气象条件下, 水华蓝藻在水体中垂直分布和在不同湖区之间输移的基本格局, 发现藻类在水体中各层间百分含量的变异系数随着风浪的增大而减小, 进一步证明了蓝藻水华形成是在适当水文气象要素驱动下, 已经成为优势种群的水华蓝藻在湖体中空间位置的改变而引起的. 建立了太湖蓝藻水华预测模型和工作流程, 在 2007 年和 2008 年在太湖实施了未来 3d 的蓝藻水华预测预警, 预测分析了 2008 年全年太湖蓝藻水华情势. 对预测结果的回顾性评估与分析表明, 目前已有的理论研究结果和预测工作流程可以对太湖蓝藻水华发生概率、发生地点和强度进行预测, 预测准确率达到 60%–80%. 此外, 还提出了未来蓝藻水华预测的研究方向.
关键词: 太湖; 蓝藻; 水华预测; 水华预防

The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu

KONG Fanxiang, MA Ronghua, GAO Junfeng & WU Xiaodong
(*State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008, *P.R.China*)

Abstract: The present article described the importance of prevention, forecast and warning of cyanobacteria bloom. The recent progresses of formation and forecast of cyanobacteria bloom were reviewed. Based on the theory of "four phases of cyanobacteria bloom development" and the temporal and spatial distribution of cyanobacteria overwintering, recruitment and bloom formation in Lake Taihu, the processes of cyanobacteria blooms and the dominant ecological factors during their development phases were studied. Field observations and laboratory simulating studies were performed to investigate horizontal distribution and life characteristics during the overwintering period. The threshold temperature for the recruitment of cyanobacteria was about 9℃ in the field research. It was found that there was a positive relationship between effective accumulated temperatures and recruitment biomass of cyanobacteria. By the methods of frequency of dividing cells, the calculation of the growth rates *in situ* showed that the growth rates of *Microcystis* were from 0.2 to 0.4. The dynamics of vertical distribution of cyanobacteria in the transport process between different lake areas were investigated under different meteorological conditions, and the results supported the viewpoint that bloom formation is a shift in the vertical positioning of the cyanobacteria biomass which previously distributed through the water column, since the coefficients of variation of the vertical cyanobacteria distribution at different depths were negatively related to wind speeds. On the basis of the establishment of key factors and their thresholds of bloom formation, the bloom forecast model and flow chart of

* 国家科技支撑计划项目(2007BAC26B01)和国家自然科学基金(40671068)联合资助. 2008–12–31收稿; 2009–02–18收修改稿. 孔繁翔, 男, 1957年生, 博士, 研究员; E-mail: fxkong@niglas.ac.cn.

cyanobacteria bloom forecast and warning were established. The bloom forecasts in 2007, 2008 and analysis of bloom trends of 2008 were implemented. The retrospective assessment of the forecast showed that it is possible to forecast the probability, location and extent of cyanobacteria bloom. The future research directions were also suggested.

Keywords: Lake Taihu; cyaonbacteria; bloom forecast; bloom prevention

1 蓝藻水华预防、预测预警的意义

湖泊富营养化和蓝藻水华发生是目前全世界共同面临的重大环境问题之一. 在太湖和许多富营养化湖泊, 夏季发生的蓝藻水华漂浮在水面, 堆积在岸边, 并在高温下分解, 形成恶臭. 如果水华在水源地取水口附近大量集聚就有可能引起水源地的水质恶化, 危及供水安全.

蓝藻水华具有重大危害, 但目前还缺少有效的治理手段. 虽然有很多物理、化学和生物技术可以直接沉降或杀死形成水华的蓝藻细胞, 或直接捞取大量聚集的蓝藻, 避免蓝藻对水质的影响, 但其所花费的人力物力十分巨大, 且很难完全控制蓝藻水华对水质产生的影响. 此外, 直接杀死蓝藻的处理方法很容易因蓝藻细胞的破碎从而将胞内藻毒素及代谢产物释放到水中, 促进其降解, 形成异味物质, 反而增加了从水体中去除这些化学物质的难度. 因此, 水华的治理应该首先削减湖泊营养盐, 从根本上阻断蓝藻水华生长的营养物质来源.

就太湖而言, 全湖的平均氮磷含量近期一直居高不下, 蓝藻水华发生已经成为常态, 其污染问题难以在短期内得到根本解决. 因为即使在外源输入减少后, 在相当长一段时间内, 长期积累在湖泊底泥中的内源营养盐仍然足以支撑水华蓝藻的生长, 很难杜绝蓝藻水华的发生. 因此在采用各种方法治理蓝藻水华的同时, 必须认识蓝藻水华形成的基本规律, 发展敏感湖区, 尤其是水源地和重点景观湖区蓝藻水华发生的预测预报技术, 提高环境管理部门的决策能力, 并及时采取应急措施. 以供水为例, 如果能提前数小时预测到蓝藻水华将在取水口聚集降解, 就有足够时间, 及时采取包括水源水的调度和制水工艺的改进与强化等措施, 减少蓝藻水华带来的生态危害和健康风险, 避免发生供水危机, 保障供水安全.

2 蓝藻水华形成机制的研究

2.1 蓝藻水华形成的“四阶段理论”及其实践意义

水华发生时往往表现为水面或岸边突然出现大量的蓝藻, 给人感觉是生物量的突然增加, 是一种“暴发”现象. 根据长期的观测, 发现在大多数情况下, 在特定湖区内, 这种突然“暴发”的“水华”是在适宜的气象与水文条件下, 该湖区内亦已存在的、悬浮于水体中的藻类群体再加上其他湖区的水华蓝藻, 随着风和湖流的驱动, 漂移到该湖区聚集上浮至水面, 并为人们肉眼所见的过程, 即蓝藻水华是由于特定的气象与水文条件导致已成为优势种群的蓝藻群体在湖泊水体中水平和垂直位置的改变而“瞬时”形成的, 并不完全是本地的藻类在短时间内连续的快速生长, 生物量突然暴发所致. 因此, 蓝藻水华的出现, 表观现象上是瞬时的“暴发”, 但其本质却是藻类生物量在水体中逐渐增加的一个可以预测的过程. 作者在探索蓝藻水华形成机理方面, 提出了蓝藻生长与水华形成经历了越冬休眠、春季复苏、生长和集聚上浮并形成水华四阶段的理论[1], 认为在不同的阶段, 藻类的生理特性不同, 影响其发展的主导生态因子也不同. 该理论的提出, 改变了以前在蓝藻水华形成机理探索中对导致蓝藻水华形成的众多物理、化学和生物等因子进行逐个研究的状况, 比较清晰地阐述了蓝藻水华形成的几个关键性阶段以及导致不同阶段转换的关键因子及其阈值, 并将其作为指标, 监测其变化规律, 就有可能预测蓝藻水华的发展趋势, 为提出更有针对性的控制蓝藻水华的技术途径提供了理论依据, 也为深入研究蓝藻水华形成机理提供了一个理论框架.

基于该理论, 要有效控制夏季蓝藻水华, 就不能等到其已经形成巨大生物量, 在全湖随风到处漂移扩散后再采取措施, 到那时, 所需要付出的人力物力将会大大增加, 而应该在蓝藻越冬休眠或者春季复苏这些藻类生命过程中最薄弱的环节, 即藻类大量繁殖形成水华之前, 采取更加有针对性的措施抑制蓝藻的生长, 在藻类大量复苏生长前对其进行消减, 就有可能达到事半功倍的效果. 根据对太湖水华蓝藻

的休眠、复苏，水华的漂移、形成、沉降的时空规律的认识，就可以科学地提出预防太湖蓝藻水华发生的理念，并探索在实际应用中的技术与工程措施的可行性.

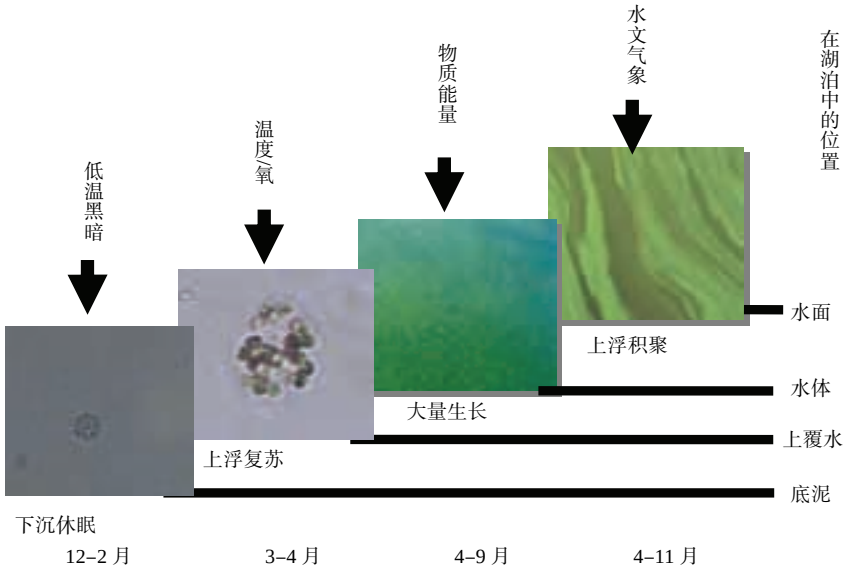


图 1 蓝藻水华形成的四阶段及其影响因子

Fig.1 Four phases and determinating factors for the development of cyanobacteria bloom

2.2 蓝藻水华形成不同阶段的关键因子及其阈值的确定

2.2.1 水华蓝藻越冬分布规律及其生理特性 阎荣等[2]和吴晓东等[3]对太湖、巢湖和玄武湖等湖泊的周年野外观测研究和室内模拟实验发现，在秋季，随着温度的降低，不同湖泊及不同湖区的水体中表征蓝藻生物量的藻蓝素浓度逐渐下降，底泥表面的藻蓝素浓度却呈上升趋势，到次年的4月达到最大值，而在夏季高温季节底泥中的藻蓝素含量较低，这些结果表明部分蓝藻在冬季会由水体下沉到底泥表面进行越冬.

利用流式细胞仪比较处于同一系统中的水华蓝藻微囊藻细胞和绿藻细胞的活性，发现在冬季湖泊底泥表面的黑暗与低温条件下，无论是叶绿素荧光还是反映细胞活性的脂酶活性，微囊藻均要高于绿藻栅列藻，说明微囊藻在劣境中生存活力较高[4]. 也有相关研究发现微囊藻经 15℃驯化后，具有获得性寒冷光照耐受性(ACLT)，与其它藻类相比较，提高了其越冬存活力[5]. 可见，微囊藻在越冬期间较其它藻更具竞争优势.

2.2.2 水华蓝藻春季复苏的生态阈值 随着春季温度上升、光照加强，在冬季下沉到湖泊底泥以及上覆水中的水华蓝藻细胞及群体开始进入水柱中，逐渐复苏生长并发展为水华. 国内外研究主要关注的是影响复苏过程生态因子的阈值及其对夏季蓝藻水华形成的贡献. Verspagen 等[6]对于底泥微囊藻复苏的模拟实验显示，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%. 正是缘于这些原因，蓝藻的复苏特别是微囊藻的复苏近年来备受关注，成为蓝藻水华形成机理的研究热点之一. 在法国 Grangent 水库底泥中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，而底泥中蓝藻生物量却显著下降[7].

微囊藻下沉到底泥表面是由于随秋季温度降低而群体解体、细胞密度增大、浮力降低的结果，所以要重新回到水柱中，蓝藻首先要降低其密度、增大其浮力. 已有的研究表明失去浮力的越冬蓝藻在 20℃能够较快地恢复浮力，而在12℃时则恢复较慢[8]. 利用从野外采集的底泥样品，李阔宇等[9]发现微囊藻的生长始于 15℃和 30μE/(m· s)的光照条件下，接着向水柱迁移，微囊藻最适的生长温度是 20℃，同时，长期处于低温和黑暗环境中的微囊藻细胞进行光合作用的光系统Ⅱ未受到严重损伤，当环境转变有利于藻类生长时，微囊藻细胞的光系统Ⅱ很快恢复活性.

陶益等[10]在室内进行控制条件下野外样品的复苏模拟实验，确定了太湖藻类复苏的温度阈值. 通过

采集太湖梅梁湾底泥及上覆水, 移到实验室, 在底泥的表面上覆盖经过 0.2μm 滤纸过滤的原位湖水, 建立了湖泊水柱模拟系统, 经 60d 光照并逐渐升温培养, 定时取样并显微观察蓝藻复苏细胞, 测定底泥和上覆水中藻蓝素含量, 并以泥样色素实验值 *Ft* 与其相应的背景值 *Fo* 的比值为 *Gf* 定量表征泥样中蓝藻的变化. 当 *Gf*=1 时, 说明泥样中藻类浓度没有发生变化; 若 *Gf*<1, 说明经过模拟培养, 泥样中藻类浓度减少, 水样中藻类浓度可能上升, 可能发生了藻类的复苏; 若 *Gf*>1, 说明底泥中藻类增加, 研究了太湖底泥中蓝藻种群的复苏规律. 结果表明, 在室内模拟条件下, 太湖底泥蓝藻复苏初始时主要以 2–8 个细胞的小群体存在, 其细胞直径为 7.2–7.8μm, 大于夏季的藻群体中单个细胞的直径(4.8–6μm), 底泥蓝藻的复苏与温度变化密切相关. 在水体温度达到 14℃时蓝藻开始少量进入水柱中, 在环境温度升至 18–20℃之间时大量进入水中, 为水华形成提供了种源.

Cao 等[11]在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, 并比较水柱和底泥中色素含量的变化. 结果表明, 藻类的复苏可能与底泥环境中的温度、光照、溶解氧、氧化还原电位密切相关. 捕捉器所覆盖的底泥中以叶绿素 a(*Chl.a*)、叶绿素 b(*Chl.b*)和藻蓝素(*PC*)分别表征总藻类、绿藻和蓝藻. 在水体温度达到 9℃时蓝藻就开始少量进入水中, 总藻类、绿藻以及蓝藻的上浮量占底泥中起始色素含量分别达到了 59.84%、76.83%和 466.98%. 藻蓝素和叶绿素含量之比一直上升表示蓝藻逐渐建立优势. 可见, 蓝藻的复苏对太湖水华的形成具有重要意义.

由于在春季自然水体中, 水温也会随着气温的波动, 在复苏温度阈值的上下波动, 为了把握蓝藻复苏的基本规律, 在总结了野外观测和室内模拟实验结果的基础上, 作者发现了“有效积温”与水华蓝藻复苏相关的规律[12], 即无论是野外观测还是室内的模拟实验, 蓝藻复苏的生物量与每天高于蓝藻生理代谢起始温度(在室内模拟实验中为 14℃, 在野外原位观测中为 9℃)以上的连续积累温度值(有效积温)相关性极高. 原位藻类复苏量和有效积温的相关性方程为:

叶绿素 a(*Chl.a*): $y=2.5919-0.01912x$, $r=-0.86$

叶绿素 b(*Chl.b*): $y=0.1665-0.0104x$, $r=-0.76$

藻蓝素(*PC*): $y=0.2414+0.0027x$, $r=0.88$

从以上方程可以看出, 随着有效积温的增加, 表征所有藻类的叶绿素 a(*Chl.a*)和绿藻的叶绿素 b(*Chl.b*)含量呈下降趋势, 而以藻蓝素(*PC*)表征的蓝藻的量却呈线性增加.

2.2.3 水华蓝藻的生长竞争优势的形成与原位生长速率 蓝藻复苏进入水体, 开始生长并逐渐成为优势种群. 关于蓝藻优势形成的原因已有很多报道, 例如蓝藻能够适应高温、低光强和紫外线; 与其他类群的藻类相比较蓝藻细胞可以过量摄取水体中的无机碳和营养物质; 在富营养化水体中, 由于磷含量的升高而引起氮磷比的下降从而有利于蓝藻生长; 蓝藻细胞形成的伪空胞, 可以上浮以选择最佳光照; 微囊藻形成胶鞘, 增大了体积, 降低了被浮游动物摄食的几率; 微囊藻能够分泌藻毒素, 可以抑制其他生物的生长, 有利于其形成优势种群.

近来研究证实[13], 与单细胞相比较, 微囊藻群体具有更加高的光合效率和对无机碳、磷的利用能力等生理特性. 微囊藻群体的抗高光强、重污染也是群体微囊藻种群优势的形成和维持的重要机制, 这是其形成水华并保持优势地位的重要前提. 储昭升等[14]的研究表明, 在氮限制性生长环境中, 微囊藻的伪空胞数量和浮力均会显著下降. 这说明富营养化湖泊中由于水体中氮含量的增加会导致微囊藻细胞合成较多的伪空胞, 从而有利于蓝藻群体的浮力调节, 使其具有更强的对表层光和无机碳的竞争力, 这可能也是水华蓝藻形成优势的机制之一.

太湖这类浅水湖泊似乎很容易形成蓝藻水华, 而这类湖泊底泥易受风浪搅动, 悬浮物大量增加, 水体浑浊, 光传输效率较差. Zhang 等[15-16]从水动力和光照的耦合作用的角度研究了太湖中微囊藻形成优势种群的机理, 发现风速为 3.1m/s 条件下, 绿藻在水体中是趋于均匀分布, 硅藻和甲藻则易于沉入下层水体, 而微囊藻可以悬浮在水表面到水下 30cm 这一深度, 因此在此种正常的风浪条件下, 微囊藻可以获得最大的光能利用, 形成最大的生长速率, 在与其它藻类类群竞争中形成优势.

关于水华蓝藻的生长速率已有的资料大多来源于实验室控制条件下的检测数据, 但在自然水体中蓝藻的实际生长速率受到很多环境因素的影响, 传统的定时定点采样测定方法无法获得藻类在湖泊水体中

实际的原位生长速率，必须找到合适的检测方法. 最近有研究对最早用于计算细菌生长速率的细胞分裂频率法(Frequency of Dividing Cells, FDC)进行了修正后，应用于微囊藻的原位生长速率的计算，并取得了较好的结果[17]. 其原理就是微囊藻是以简单的细胞二分裂方式进行繁殖，因此，根据细胞的形态可以将细胞分为单细胞、分裂期细胞和双细胞三个时期. 观测处于分裂期的细胞占总体细胞数的百分比，根据不同时间的细胞分裂频率，可以计算微囊藻的原位生长速率. 应用该方法，研究者在水华发生季节对太湖梅梁湾进行了微囊藻的原位生长速率检测. 结果表明太湖微囊藻的细胞分裂频率有显著的日变化规律，即白天高、夜晚低，其中最大的细胞分裂频率在 20%左右，最小分裂频率在 5%左右. 计算结果表明 4 个采样点的微囊藻日生长速率介于 0.19 到 0.37，其最大生长速率与日本琵琶湖的最大生长速率比较接近，且生长速率随着微囊藻的密度上升而下降，并可能与所在水体的营养盐水平相关[18].

2.2.4 *太湖水华蓝藻的垂直沉浮与水平漂移* 在富营养化湖泊中，当水华蓝藻的生物量足够大时，虽然在水体中已经成为优势种群，但是在一般情况下，这些藻类群体在垂直和水平方向上趋向于均匀分布，不会在局部湖区堆积，其危害性相对较小. 只有在适当的水文气象条件下，已经成为优势种群的水华蓝藻将会漂浮到水面，特别容易长距离快速漂移，在风和湖流的驱动下，将其他湖区的水华蓝藻大量聚集到局部湖区，对该湖区，尤其是水源地或者景观地等敏感湖区的水质产生严重威胁，这就是形成了灾害性蓝藻水华. 根据在太湖的多年野外观测，研究者确定了在不同水文气象条件下，水华蓝藻在水体中垂直分布的基本格局(图 2). 通过在太湖进行定点观测，在不同水文气象过程连续采集水样，定量检测不同水层中微囊藻生物量占整个水柱中微囊藻总量的百分比，采用不同深度藻类分布变化的变异系数这一指标来反映藻类在水柱中垂直分布的均匀程度，研究藻类的垂直分布与风速、湖流和波高的关系. 研究发现藻类在各层间百分含量的变异系数随着风浪的增大而减小. 当风速为 2.0m/s，波高 0.044m 时，总藻类、绿藻和蓝藻的垂直分布很不均匀，变异系数分别是 0.90, 0.53 和 2.89，此时大约 40%的总生物量聚集在湖面(表层 5cm)，微囊藻在太湖中形成水华；当风速为 2.5m/s，波高为 0.057m，大约有 34%的微囊藻生物量聚集在湖面；风速为 3.1m/s 且有效波高为 0.06m 时，总藻类、绿藻和蓝藻在水柱中分层百分含量的 *CV* 分别为 0.50、0.26 和 0.69，各层间的分布已经比较均匀，表面水华消失，大多数的蓝藻在水体中充分混匀或聚集在湖水底层. 可见，风浪对于水华的形成具有直接的驱动作用，当风速小于阈值 3.1m/s 时，蓝藻水华就会形成[19]. 至于营养盐因素对于太湖蓝藻水华的作用，则是由于营养盐浓度很高，促进水华蓝藻生长，形成并保持为优势种群.

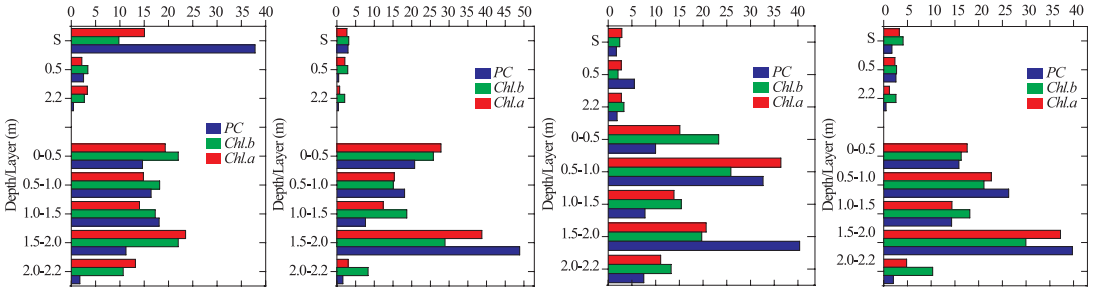


图2 不同气象水文条件下不同藻类在水体中垂直分布

Fig.2 Vertical distribution of pigment under different meterological and hydrological conditions

白晓华等[20]通过室内风箱水槽实验和野外观测，定量研究了风力对已经上浮到水面上的蓝藻水华在水平方向漂移速率的影响，建立了风速与水华漂移速度的指数和相关方程，并据此计算了在不同强度风力下水华漂移进入特定湖区的总量. 研究结果表明，在太湖梅梁湾，当风速为 0 时，藻类仍有漂移速度，

此速度为水华由高浓度到低浓度的自由扩散速度; 当该湖区风场的平均风速为 1.4m/s 时, 藻类在水体中的平均漂移速率为 0.022m/s; 风速为 1.9m/s, 漂移速率为 0.029m/s; 风速上升为 2.8m/s 时, 藻类的漂移速率达到 0.114m/s; 而当风速再加大后, 水华蓝藻群体与水体充分混和, 水平漂移的速率反而下降.

2.3 太湖蓝藻水华形成的时空规律与预防理念

太湖蓝藻水华最初在夏季出现. 随着近年来水体富营养化程度加剧, 首次发生的时间逐渐前移, 而到秋季, 蓝藻水华完全消失的时间则显著推迟. 近年来, 3–4 月逐渐成为蓝藻水华的初始出现期, 5–9 月, 为蓝藻水华的频发期, 而自 2000 年以来, 蓝藻水华发生的时间一直延续到晚秋, 甚至可以延续至次年的 1 月份(如 2008 年). 早期, 太湖北部(梅梁湾、竺山湾)是蓝藻水华的最初发生地, 也是全年蓝藻水华发生的重灾区; 2001 年以来, 南部沿岸区(浙江附近水域, 即夹浦新塘一带的沿岸水体)春季开始时有发生, 且在近几年, 逐渐成为太湖蓝藻水华的最早发生地, 集聚面积也逐年扩大, 持续时间越来越长; 2003 年以来, 蓝藻水华开始向湖心扩散, 严重时几乎覆盖整个太湖的非水生植被区; 值得注意的是, 2005 年以来, 以前很少有蓝藻水华发生的贡湖湾, 也开始有大面积蓝藻水华覆盖, 2007 年发生的频率更是显著增加[21].

根据遥感图像观测, 2007 年 3 月 28 日, 湖州水域首先发生了规模化的蓝藻水华并延续多日. 2008 年同样也是首先在南太湖水域发生了蓝藻水华(4 月 3 日).

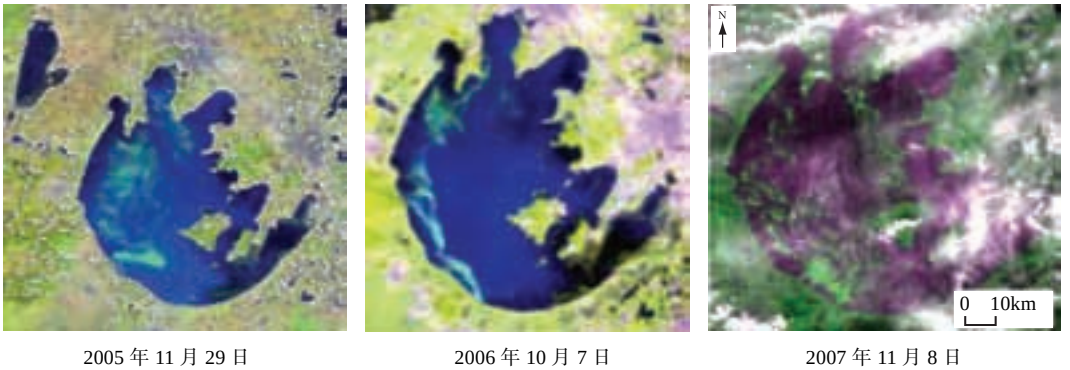
而近几年 11–12 月间, 在太湖北部的梅梁湾和贡湖的蓝藻水华逐步减少的同时, 南太湖浙江湖州水域的蓝藻水华却十分严重, 并且由于较高的太湖水位, 导致湖水倒灌, 大量蓝藻涌入内河, 对其沿岸水厂取水口的水质产生了严重威胁.



2007 年 3 月 28 日　　2007 年 4 月 18 日　　2007 年 4 月 23 日

图 3 2007 年春季南太湖蓝藻水华

Fig.3 Spring blooms of cyanobacteria of south Lake Taihu in 2007



2005 年 11 月 29 日　　2006 年 10 月 7 日　　2007 年 11 月 8 日

图 4 近年来秋、冬季南太湖蓝藻水华

Fig.4 Autumn and winter blooms of cyanobacteria of south Lake Taihu in recent years

综合分析近年来的遥感信息，并结合太湖区域的风场玫瑰图，可以初步认为不同季节的风况是太湖蓝藻水华在全湖分布格局变化的重要驱动因素，并基本勾勒出近期全太湖蓝藻水华形成的时空规律. 在秋季高频率的西北风下，夏、秋季全太湖已形成的大量蓝藻水华漂移集聚到南太湖水域，形成水华；进入冬季后，大量蓝藻水华在南太湖以及西太湖死亡下沉，在底泥表面过冬；到翌年春季，随温度上升以及光辐射加强，在去年下沉并积累在底泥表面较多的蓝藻“种源”的南太湖水域水华蓝藻最先开始复苏. 在早年间，南太湖水质相对较好，其营养盐浓度还不足以使得很早复苏的蓝藻快速生长，形成大量水华. 但是，自 2001 以来，全太湖的营养盐水平均处于较高水平，已经不是生长的限制因素，因此复苏后的水华蓝藻能够快速生长，在该水域首先形成蓝藻水华，随后在夏、秋季主导风向为东风或东南风的驱动作用下，向太湖北部漂移，进入梅梁湾后与湾内自身生长的水华蓝藻共同形成了严重的水华.

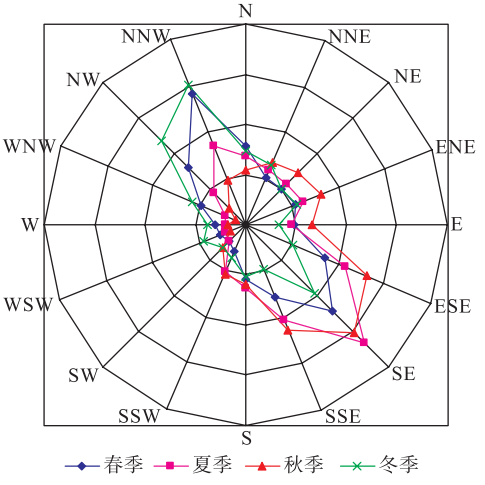


图 5 太湖地区各季节风玫瑰图

Fig.5 Wind conditions in the region of Lake Taihu

根据太湖蓝藻时空分布规律和蓝藻越冬的特点，说明太湖不同季节的风况使得在底泥表面越冬的水华蓝藻可能具有一定的区域分布特征. 因此，可以提出预防太湖蓝藻水华的理念. 从理论上可以推断，如果在春季复苏期间，采取物理或者生物等适当的技术与措施去除南太湖底泥表面水华蓝藻的部分“种源”(蓝藻水华的初始种群密度 N_0)，在同样的种群增长速率(r)条件下，就有可能在一定程度上降低 t 时的种群密度(N_t)，可以减轻夏季的蓝藻水华强度，达到预防或者减少蓝藻水华大规模发生的目的. 在历史上，太湖和巢湖流域的农民就有罱湖(河)泥和捞取“湖靛”作为农肥的习惯，在去除并充分利用了沉积在湖泊底泥中营养盐的同时，一并除去了底泥表面越冬蓝藻的细胞群体，这可能对当时控制或者延缓蓝藻水华的形成起到了一定的作用，当然这仅仅是一种现象，其科学依据还需要进一步探索. 如果能进一步确定太湖蓝藻在南太湖水域底泥表面沉降越冬的分布面积、具体位置和生物量，就可以进一步论证技术与工程措施的可行性，并指导清除蓝藻越冬种源，预防夏季蓝藻水华大规模发生的工程措施的实施.

3 太湖蓝藻水华预测与预警

3.1 国内外蓝藻水华预测预警研究进展

关于湖泊蓝藻水华预测的理论基础已有较多研究. Reynolds[22]认为在藻类数量达到一定程度后，水华会在适宜的水文气象条件下出现；Spencer 等[23]的研究表明光照条件对蓝藻浮力调节，上浮聚集、漂移乃至水华形成有着密切关系. 对太湖的研究发现，水温和总磷为梅梁湾藻类总生物量的显著相关因子[24]. 有研究表明较高的温度条件下能导致水华的发生，因此通过气象条件和营养盐的来源可以预测水华的发

生[25]. 也有研究表明可以根据水温、pH、气象条件、藻类生物量、数字模拟以及卫星影像数据来预测水华的发生[26-29]. 很多水华和赤潮事例表明, 当其他条件具备时, 若天气形势发展比较稳定, 海区风平浪静, 阳光充足并闷热, 就有可能发生水华或赤潮.

欧盟 1999 年曾经开展了蓝藻水华的检测、监测和预报的研究, 拓展了遥感技术对藻华发生的预测途径[30]. 日本科学家利用人工神经网络对 Kasumigaura 湖研究结果显示, 叶绿素 a 的浓度可以表征藻类的总生物量并可以对藻类水华进行预测[31-32]. Teles 等[33]利用时间序列的人工神经网络, 根据近年的理化和生物资料建立模型, 对 Crestuma 水库进行蓝藻丰度变化预测, 得到了很好的结果. 利用卫星遥感影像的结果, 通过多重线性回归分析, 建立了经验模型, 对台湾的 Techi 水库的硅藻数量以及硅藻水华进行预测, 其预测准确性可达到 74%[34]. 根据 1997–2001 年大亚湾澳头水域赤潮检测资料的统计分析, 发现潮汐、风向、天气情况和水温是赤潮发生的重要因子, 据此建立了多元回归方程, 并绘制了赤潮的生物变化趋势图, 可以根据现场的生物观测资料分析, 预报是否会发生赤潮[35]. 对渤海赤潮建立了三维的生态水文模型, 并利用 1982–1983 年和 1992–1993 年的资料进行校正, 结果表明富营养化是藻类生长的基本条件, 而 1998 年的异常高温则引发了藻类的暴发, 但尚未见该模型用于赤潮的预报[36], 利用模型被认为是研究及预报水华的有效手段, 采用包含磷酸盐浓度、物理条件和蓝藻最大生物量等三个相关体系的模糊逻辑模型预测水华发生时的最大生物量[37], 但由于其参数繁多且不易确定等缺点限制了其使用, 仍然处于研究阶段. 美国航天局采用卫星技术进行水华的监测, 美国海洋与气象局开发的水华暴发预测系统, 试图监测和预报墨西哥湾的赤潮, 在有赤潮的季节, 每周预报 2 次. 以下是该预测系统近期的一次预报内容.

> 佛罗里达西南: 星期四, 2006-09-14
> 从 Pinellas 到 Collier 北部已经发现有害藻类水华.
> 在 Pinellas, 今天和明天(星期五)可能会产生局部的中度影响, 星期五夜里到星期天可能会产生局部的低度影响;
> 在 Manatee 和 Sarasota, 今天和明天(星期五)可能会产生局部的高度影响, 星期五夜里到星期天可能会产生局部的中度影响;
> 在 Charlotte, Lee 北部和 Collier, 从今天到星期六可能会产生局部的中度影响, 星期天可能会产生局部的低度影响;
> Lee 南部不会受影响.
> 佛罗里达西北: 星期天, 2006-09-10 最近一个星期内无藻类水华.

从预报的内容可以看出, 目前主要是确定不同区域有无水华, 并局限在定性描述其影响程度的水平上.

至今我国还未有关于水华预测预报的专利, 世界知识产权组织, 欧洲专利局以及美国、英国、丹麦、挪威等也仍未有专门的水华预测预报的授权专利, 说明该工作仍然处于研究阶段, 在技术开发与实际应用方面还需要做很多工作. 与水华预测研究内容比较接近的专利有美国 1999 年授权了一项发明专利, 该发明实际上是一种光学水质监测系统, 根据藻类数量的变化来预测水华的发生. 另外有一项专利是根据水体的反射光来检测水体中含有藻蓝素的藻类, 澳大利亚新南威尔士大学 David Waite 教授也正在从事这方面的探索.

从国内外蓝藻水华预测预警的研究工作可以发现: 蓝藻水华是可以进行预测预警的, 目前在大洋和近海海域蓝藻水华的预测预警已经取得明显进展, 并且取得较好的预报效果; 浅水湖泊蓝藻水华发生的机制研究已有一定的进展, 具备了蓝藻水华暴发预测预警的理论基础. 因为目前相对比较成熟的气象和水文监测方法可以提供相对比较准确的蓝藻水华发生预测所需要的水文气象信息, 遥感、地理信息系统技术可以适时捕捉和分析蓝藻水华的空间分布现状, 数值模拟技术可以基于水华发生的机理和外部条件, 对未来蓝藻水华发生的空间分布进行数字化定位并作出预测.

水华预测的定量描述对于预测工作的实用性十分重要. 可以根据藻细胞浓度、叶绿素 a、透明度、

总磷和总氮 5 个参数制定出水华程度评价等级, 但是此方法仍然沿用了湖泊富营养化程度的评价方法. 而在太湖这样的富营养化湖泊, 持续高营养盐水平对水华蓝藻生长的短期波动并没有显著影响. 因此需要更加实用的和具有针对性的蓝藻水华等级分类标准. 同时, 在确定水华蓝藻的生物量后, 更需要知道的是在哪个湖区, 即蓝藻水华发生以及堆积的确切位置, 因为一般情况下, 只要湖泊处于富营养化状态, 在适当的气象和水文条件下, 蓝藻将会大量繁殖, 容易形成一定面积的水华, 且持续很长一段时间, 改变水生生态系统的群落结构; 但是, 只有那些在湖滨岸带, 在重要的景观湖区, 尤其是饮用水源地等特殊功能湖区大量集聚的灾害性蓝藻水华有可能给人们的生活与社会稳定带来威胁. 对蓝藻水华的预警, 预测其发生的位置或所在功能湖区, 从某种程度上来说, 比知道其发生量更加重要. 因此, 对太湖全湖蓝藻水华的预警应该包括从无到有的一般预测, 以及从一般湖区到敏感湖区直至形成危害的发展趋势的预警.

3.2 太湖蓝藻水华预测的技术体系

3.2.1 *太湖蓝藻水华形成过程* 对蓝藻水华的形成进行预测, 必须掌握蓝藻水华形成机理与基本规律, 确定影响蓝藻水华形成的关键要素及其阈值. 在太湖、巢湖和滇池等富营养化湖泊中, 营养盐浓度已远远超过了蓝藻生长的基本需求, 且在短时间内很难明显下降, 因此营养盐浓度在目前的高位波动, 一般不会对蓝藻的生长产生显著影响. 夏季太湖的营养盐浓度、光照强度和温度等对蓝藻生长所需要的物质与能量等环境要素方面, 在相当长的一段时间内, 几乎不是藻类生长的限制因子.

在初春, 当水温达到复苏阈值时(在太湖野外自然水体中为 9℃[10]), 水华蓝藻开始复苏、生长, 直至其生物量达到形成水华的阈值, 即细胞密度 20000cells/L, 或叶绿素 a 含量为 10μg/L, 这是水华从无到有的渐进过程, 其中涉及到蓝藻对营养盐的吸收、环境要素对蓝藻生长速率的影响、蓝藻与其他藻类群体对营养盐和光的竞争及其优势的形成、动物对蓝藻细胞的捕食以及蓝藻的死亡等复杂的生态学过程, 要对这些相关关系进行定量计算与综合考虑, 由于涉及的参数和过程比较多, 需要模型进行运行计算, 才能得到比较明确的结论. 但目前在太湖等富营养化水平较高的湖泊, 这个过程历时较短, 尤其是暖冬, 或春季温度上升较快, 积温以及营养盐浓度又比较高, 水华首次形成的时间就相对较早, 而对于滇池等地处季节温度差异不明显地域的湖泊, 这个过程更为短暂, 导致蓝藻水华形成的因素几乎常年存在. 随着温度的持续上升(一般在 4–10 月), 光照充沛, 营养盐浓度较高, 虽然会由于恶劣天气或其他环境因子的冲击, 引起水华蓝藻生物量的短时间的波动, 但是水体中水华蓝藻的生物量将会一直高于发生水华的阈值, 且在整个浮游植物群落中占据了绝对优势. 在这段时间, 其它湖区的大量水华蓝藻在合适的气象与水文因素驱动下上浮, 快速漂移到某个局部湖区, 堆积形成水华. 对于地方管理部门以及自来水厂, 更关心的是如此巨大生物量的蓝藻何时会漂移集聚到取水口或旅游区, 形成灾害性水华, 影响水质和景观, 甚至引起供水危机, 因此该时期蓝藻水华预测的需求更加迫切并能发挥更大的预警作用. 此时主要是要对蓝藻水华发生的概率、发生的水域以及发生的强度进行预测预报, 一旦水华在水源地发生大量集聚, 有可能降解发臭, 危及到水源地水质安全, 就要及时发出预警.

3.2.2 *太湖蓝藻水华形成的主要过程与参数* 水华的预测主要关注严重的表层水华的预测, 如前所述, 因为一旦水华蓝藻漂浮到水面, 就特别容易漂移集聚, 形成灾害性蓝藻水华. 而表层水华强度取决于藻类种群密度. 根据生态学基本理论, 影响特定湖区内蓝藻生物种群密度大小的参数是生长与死亡、迁入与迁出. 野外观测发现, 特定湖区内水华蓝藻的增加主要取决于外源微囊藻随着气象与水文条件的变化在水平方向漂移到该湖区的外源漂移迁入, 以及该湖区内原位的蓝藻生长速率, 两者同时导致该湖区水华蓝藻种群生物量的急剧增加. 同时, 这些增加的藻类群体在合适气象与水文条件下上浮到水面形成蓝藻水华. 因此从理论上可以认为, 在确定了初始时刻(T_0)的水华蓝藻种群密度(N_0), 再耦合未来一段时间内该湖区水文气象信息, 计算其在 t 时间内藻类的生长率、死亡率, 迁入与迁出量, 就可以得到 t 时该湖区水华蓝藻种群密度(N_t), 确定是否会形成水华并作出预测.

3.2.3 *蓝藻水华的动态模拟* 蓝藻水华动态模拟是实现蓝藻水华预测预警的重要步骤. 太阳能导致的温度、风速、风向、降雨等是湖泊内蓝藻水华发生的能量基础. 蓝藻水华的动态模拟基于蓝藻水华发生、发展、漂移扩散与堆积原理. 将湖体划分为一定数量的 200m×200m 的网格, 并给予每个网格一个唯一的

编码. 在每个网格中, 耦合藻类模型、营养物质迁移模型和水动力模型, 在初始条件和边界条件下, 采用动态环境模拟技术进行蓝藻水华的模拟. 预测分为 6 大部分:

(1) 蓝藻水华动态模拟的时间和空间尺度. 尺度的大小是指模拟时间步长和网格空间大小的密集程度. 尺度过小, 对外部输入条件的要求提高, 模拟计算量以几何级数增加, 工作量大大增加. 因此, 需要在效率和精度之间达到平衡, 在达到精度要求的前提下, 选择合适的时间和空间尺度.

(2) 蓝藻水华强度分级指标体系. 蓝藻水华对于不同湖区所造成的危害不同. 太湖作为一个物理、化学、生物、功能等在空间上具有异质性的湖泊, 需要针对不同的功能划分湖区, 并给以指标不同的权重. 描述蓝藻水华强度的指标主要指持续时间、分布范围、堆积厚度、叶绿素 a 浓度等, 根据等级体系, 划分出不同的级别, 建立指标体系.

(3) 湖泊水动力过程模拟. 3D 水动力模型可以较好地描述湖泊水力学特征, 但模拟计算工作量大, 耗时时间长; 2D 水动力模型不能精确描述浅水湖泊各层的动力特征; 准 3D 水动力模型既吸收 2D 水动力模型模拟效率高的特点, 同时也可以描述浅水湖泊水动力特征在垂线上的变化, 满足了蓝藻水华动态模拟对水动力的要求.

(4) 微囊藻的原位生长. 根据细胞分裂频率计算微囊藻在不同水文气象条件下原位生长速率, 得到相关的计算公式.

(5) 藻类迁移与扩散的生态模拟. 根据湖泊水动力条件确定蓝藻水华漂移的方向和速度, 同时根据实际观测, 取得蓝藻水华扩散的参数, 计算在每一个时间步长中蓝藻水华迁出、迁入的量, 根据网格内蓝藻水华在计算时段内的平衡方程, 得到时段末每个网格内蓝藻水华的量, 同时作为下个模拟时段的初始值进行模拟.

(6) 模型的校准与验证. 采用自动模型优化参正技术实现模型优化和参数校准. 优化方法采用遗传算法和马尔科夫模拟. 模拟的验证通过预测结果与实地监测和遥感解译的结果比对, 以及纳什效率分析实现.

3.3 太湖蓝藻水华预测预警方法与运行

要预测未来 2–3d 内太湖蓝藻水华在敏感湖区以及全湖的分布格局和发展趋势, 首先需要确定目前蓝藻水华的分布现状, 然后根据原位微囊藻生长率以及藻类生长与温度和光辐射强度相关定量模型, 并考虑在不同风向和风速条件下不同水层中蓝藻生物量及其占整个水柱中总生物量的百分比以及不同风速条件下水华蓝藻的漂移速率等重要参数, 构建蓝藻水华预测预警模型, 确定未来一段时间蓝藻水华在特定湖区将会出现的概率及其强度. 由于蓝藻水华的分布与该湖区的水文气象要素密切相关, 且目前 3d 左右的气象预报准确率相对较高, 因此对蓝藻水华的预测预警也以 24–72h 的预测预警比较合适, 随着对蓝藻水华现状监测的精度提高以及气象预报的准确性和预测模型的完善, 对蓝藻水华的预测精确度也将会大大提高.

在建立了卫星遥感影像和水面叶绿素浓度的关系模型后, 就可以直观地获得初始时刻(T_0)的蓝藻水华分布现状, 其叶绿素浓度的估算精度目前一般可以达到 70%左右, 为提高精度, 同时还需要通过水面的自动监测仪器和人工巡测, 获得更精确数据, 并将所有观测数据汇总到数据采集器中, 通过无线传输系统远距离传输到预测预警专家服务器.

预测专家在获得了现状参数, 主要是特定湖区以及外围湖区的叶绿素浓度、藻蓝素浓度、溶氧、水温和浊度, 同时根据气象预报和水文观测部门提供的未来 1–3d 的天气预报参数, 包括风速、风向、降雨和气温以及湖流与波高等水文特征, 采用动态环境模拟技术进行数值模拟. 将引起蓝藻水华发生的水文、气象和生物因素按照网格空间离散; 结合不同气象条件下太湖蓝藻水华的生长速率确定具体条件下的蓝藻生长公式, 模拟得到每个网格内蓝藻水华生长状况; 利用湖泊水动力学模型和蓝藻水华漂移通量公式, 构建蓝藻水华空间扩散模型, 实时模拟运算蓝藻水华的状态, 最终实现蓝藻水华未来趋势的预测预报, 必要时发出预警.

由于蓝藻水华预测是一项时效性很强的工作, 因此在预测过程中, 从数据采集到模型运算, 以及最后的预测报告的编制、报送与发布, 形成了一规范的工作流程, 这对预测工作的顺利进行十分重要.

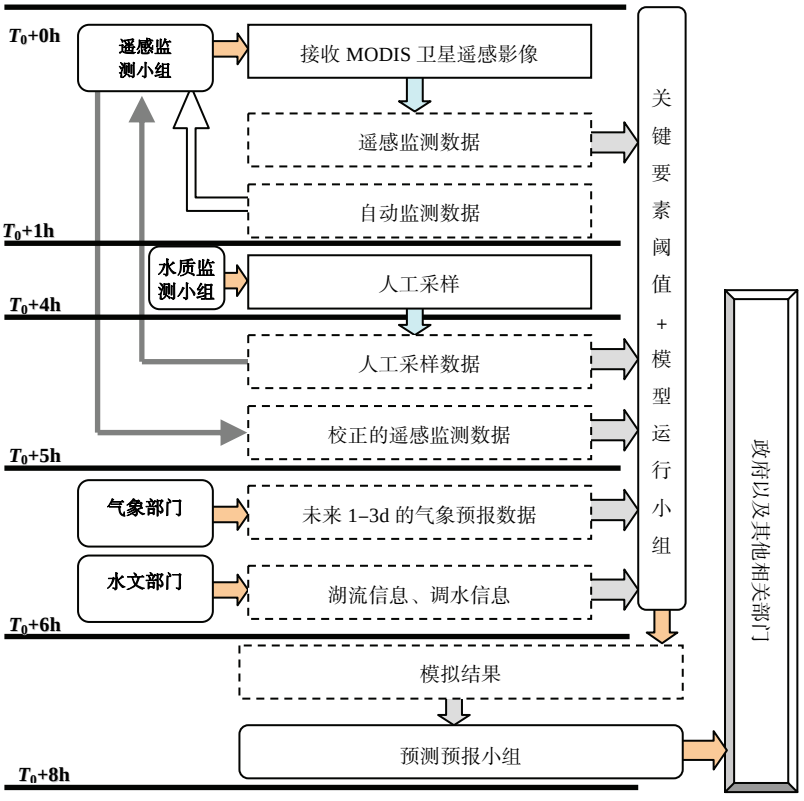


图 6 蓝藻水华预测预警工作流程图

Fig.6 Flow chart of cyanobacteria bloom forecast and warning

3.4 太湖蓝藻水华预测预警及其评估

3.4.1 太湖蓝藻水华短尺度预测及其评估 2007 年 7 月起对太湖蓝藻水华进行正式预测预报，每半周进行一次，预测内容为未来 3d 内太湖重要水源地梅梁湾、贡湖湾以及大太湖叶绿素浓度的分布格局，说明水华发生的概率及其水域. 预测预报一直延续到 2007 年 10 月 31 日，共发布 32 份太湖蓝藻水华预测报告. 2008 年 4 月 17 日至 10 月 31 日，共发布蓝藻水华预报 54 期，同样是每次预报未来 3d. 同时通过卫星遥感获得每天全湖蓝藻水华实际发生及分布情况，并做出遥感监测报告. 在一段时间后，将当时做出的未来 3d 预测报告内容与实际 3d 中每天的遥感监测报告进行比对，对蓝藻水华发生概率以及位置预测的准确程度进行回顾性评估，确定预测精度.

由于在受云层覆盖的情况下无法获得太湖湖面的有效遥感图像，因此可用于验证预测精度的实际监测报告在 2007 年为 32 份，2008 年为 43 份. 预报结果的回顾性评价见表 1 和表 2. 总的来说，2007 年和 2008 年未来 3d 的蓝藻水华发生概率预测的准确性在大太湖为 88%和 95%，在贡湖和梅梁湾为 60%–84%之间. 而在不同湖区中蓝藻水华发生具体地点的预测，在大太湖相对比较低，在贡湖湾和梅梁湾则介于 60%–84%. 这可能是由于目前用于水华预测的未来全太湖水文气象数据每天仅有一个均值，而对于近 2400 平方公里的太湖，实际上在不同湖区之间其风况却有显著差异，导致其蓝藻水华的形成情况有所不同所致.

3.4.2 2007 年太湖蓝藻水华预测结果的案例分析 2007 年 7 月 25 日和 26 日，无论是遥感图像以及人工监测在梅梁湾和贡湖湾均未见蓝藻水华. 根据当时水质情况和未来 3d 的天气预报以及湖流状况，预测小组作出了 7 月 27 日梅梁湾、贡湖北部水华发生概率为 90%的预测报告. 27 日的遥感图像显示，确实当日在

梅梁湾和贡湖湾发生了蓝藻水华.

表 1 2007 年 7–10 月太湖蓝藻水华预报回顾性评价

Tab.1 Assessment of the cyanobacteria bloom forecast model in Lake Taihu during July–Oct., 2007

湖区	评价次数(d)	概率预报正确率(%)	地点预报正确率(%)
大太湖	32	88	47
贡湖	32	84	84
梅梁湾	32	78	66

表 2 2008 年 4–10 月太湖蓝藻水华预报回顾性评价

Tab.2 Assessment of the cyanobacteria bloom forecast model in Lake Taihu during Apr.–Oct., 2008

湖区	评价次数(d)	概率预报正确率(%)	地点预报正确率(%)
大太湖	43	95	81
贡湖	43	70	74
梅梁湾	43	60	58

进一步分析发现, 2007 年 7 月 16 日至 22 日风速很低, 均在 1.0–3.3m/s 之间, 而除 21 日外, 这段时间每天均发生了蓝藻水华. 预测和监测结果从另一个角度确认了在野外观测中得到的湖面形成蓝藻水华的风速阈值. 在 8 月上旬, 由于台风过境, 因此这期间虽然水体中的叶绿素浓度大于水华形成阈值, 但是由于风力扰动较大, 水华蓝藻无法上浮到水面并快速漂移集聚到局部湖区, 因此遥感卫星几乎没有观测到太湖水面蓝藻水华的形成. 到了 9 月份, 平均风速为 1.6–2.7m/s, 且持续高温, 因此, 在低风速条件下, 蓝藻大面积上浮, 形成了蓝藻水华. 其中 9 月 6 日由于云层覆盖, 从遥感图像无法确定当时水华的分布情况. 根据人工监测数据以及未来的水文与气象预报, 预测 9 月 7 日、8 日梅梁湾口水华概率为 70%, 而贡湖湾不会发生水华. 实际监测结果表明, 梅梁湾次日发生了大面积的蓝藻水华, 而贡湖湾几乎没有蓝藻水华, 与预测完全一致.

3.4.3 2008 年蓝藻水华情势分析与预测 为了地方政府决策的需要, 除目前所开展的太湖蓝藻水华短期预测外, 还需要进行长时间尺度的蓝藻水华情势分析与预测. 在 2008 年初对未来一年太湖蓝藻水华的情势进行了分析与预测. 由于目前太湖营养盐浓度较高, 在相当长的一段时间内其浓度波动一般不会成为蓝藻水华形成的限制因素. 因此 2008 年水华情势分析与预测的主要依据是气候变化趋势、水文等环境要素的预测以及水华蓝藻的“种源”分布特征. 根据水文部门所提供的数据, 2008 年 1 月 9 日太湖就开始实施 100m^3/s 的人工调水, 太湖水位保持在 3.15–3.20m 左右, 比常年偏高 10–15cm, 这在一定程度上将有助于抑制蓝藻生长与水华形成; 气象部门认为 2008 年是拉尼娜年, 其气候特征是冷冬热夏, 春季则是以湿冷为主; 另外根据原位的观测与分析, 发现太湖水华蓝藻的种源可能是来自于去年水华沉降到底泥表面过冬的蓝藻, 而 2007 年底, 由于蓝藻水华规模十分严重, 尤其是在南太湖湖州水域, 持续到 2008 年 1 月初仍然有大量的蓝藻水华漂浮在水面, 直到 1 月中旬的严冬和降雪, 水体中的蓝藻群体才基本消失, 延续的时间比往年更长. 基于冷春, 以及年初的持续调水稀释了营养盐并推动了水体流动等多种因素的综合考虑, 预计 2008 年蓝藻水华最早发生时间不会早于 2007 年; 与近几年类似, 仍有可能在太湖西南部水域最早形成水华; 夏季的高温, 使得蓝藻水华强度有可能总体与去年持平, 持续的高温天气仍然会在西太湖和梅梁湾等湖区形成严重的蓝藻水华; 近年来秋季高温, 蓝藻水华仍会延迟消失[①].

① 咨询报告. 中国科学院专家关于 2008 年太湖蓝藻水华情势的分析预测.

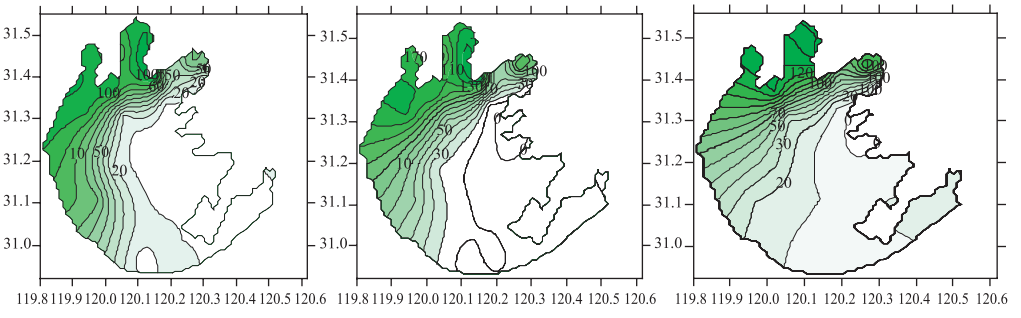
中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖蓝藻监测预警半周报

预测地点: 太湖梅梁湾、贡湖　　日期: 2007 年 7 月 26 日

	巡测点叶绿素 a 含量(μg/L)				三日温度(℃)			三日风向			三日降雨		
	0	1	2	3	27-37	28-38	28-38	东	东南	南			
梅梁湾	43.4	78.1	110.6	35.7									
贡湖湾	13.76	36.55	88.3	46.1									
预测结果	7 月 27 日至 29 日三天内 梅梁湾蓝藻水华发生概率: 90% 主要区域描述: 整个湾内易发生水华, 马山水厂周围比较严重 贡湖湾蓝藻水华发生概率: 90% 主要区域描述: 北部沿岸带区域, 特别是南泉水厂附近												

梅梁湾随后三天叶绿素 a 的浓率等值线图

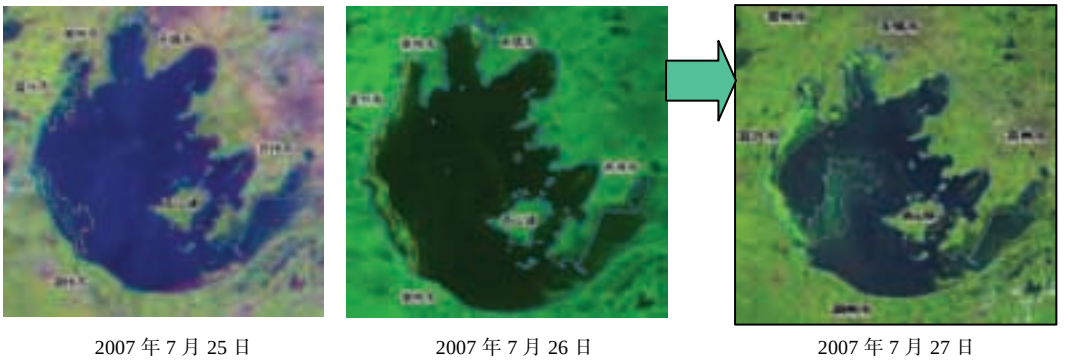
贡湖湾随后三天叶绿素 a 的浓率等值线图



整个太湖中蓝藻集中分布在太湖的西部和北太湖, 竺山湖和梅梁湾以及贡湖北部蓝藻含量高. 梅梁湾的水华会在整个湾内出现, 而 28 日至 29 日梅梁湾西岸的水域(包括马山水厂取水口在内)会被蓝藻水华完全覆盖, 小湾里水厂的取水口蓝藻则会有所减少.

贡湖蓝藻集中于北岸地区, 锡东水厂附近蓝藻与近三天类似, 但是南泉水厂取水口水域的水华会加重, 特别是由于很多蓝藻堆积于岸边且已死亡, 需警惕水质下降.

监测人: 吴晓东, 季江　　数据整理人: 吴晓东　　预报人: 孔繁翔, 吴晓东



2007 年 7 月 25 日　　2007 年 7 月 26 日　　2007 年 7 月 27 日

图 7 2007 年 7 月 25–27 日蓝藻水华预测与监测结果的比较

Fig.7 The bloom forecast and the satellite images from July 25 to 27, 2007

至2008年年底对当年太湖蓝藻水华的监测与分析结果表明, 其发生与发展的实际情况与年初预测结果基本吻合. 根据可获得的遥感信息统计数据, 2008 年最早发现蓝藻水华是在 4 月 3 日, 比 2007 年 3 月 28 日发现大面积蓝藻水华晚了近一周, 且同样首先出现在太湖西南湖区. 2008 年蓝藻水华主要分布在太湖西部沿岸和梅梁湾, 发生面积在 400km^2 以上的仅为 8 次, 与 2007 年同期相比较, 发生频次和面积均显著下降, 但是一直延续到 2008 年 12 月下旬, 在适当的气象水文条件下, 太湖仍有一定面积的蓝藻漂浮在水面.

3.5 未来蓝藻水华预测的研究方向

总体来看, 蓝藻水华形成的理论和构建的预测模型对太湖蓝藻水华的预测具有一定的实用价值. 在野外观测中发现, 水华蓝藻生长与水华形成的四个阶段彼此相互部分重叠. 在富营养化程度较高的浅水湖泊, 如太湖、巢湖和滇池, 水华蓝藻从复苏到成为优势种群所需时间越来越短, 只要有合适的水文气象条件, 就有可能在早春形成灾害性蓝藻水华. 而在水华大量形成的夏、秋两季, 其生长并形成优势和上浮漂移聚集两个阶段可以重复无数次. 也就是说, 蓝藻形成水华后, 在不利的环境压力下, 如恶劣的气象条件, 或者因大量堆积, 降解腐败后, 会大量消亡, 生物量急剧下降, 死亡细胞释放出大量的营养盐和异味物质进入水体, 种群密度急剧下降. 一旦环境有利, 水华蓝藻可以充分利用水体中的营养盐, 以其很高的增长速率快速生长并重新形成优势, 又会在适当的水文气象条件下再次形成灾害性水华. 目前需要进一步研究在富营养化湖泊中影响水华蓝藻在与其他种群竞争并成为优势种群的主导生态因子, 探索水华蓝藻对环境压力的适应性及其在不同污染水平的水体中竞争优势的形成与维持的生物学和生态学机理; 要追踪夏季水华繁盛期间以及秋、冬季水华消落期水华蓝藻的消亡与优势再现的过程; 提高卫星遥感对叶绿素、藻蓝素以及温度等指标的反演精度, 开发多源数据的同化技术, 并在获取每天不同湖区不同时段的气象数据的基础上, 进一步提高水华预测的时间与空间精度, 通过水华面积和色素浓度确定全太湖水华蓝藻的总存量; 建立预测预警的可视化平台, 确定太湖蓝藻水华等级, 为预警提供更好的工作环境; 更要进一步追踪蓝藻水华在局部湖区大量堆积后腐败降解, 恶化水质的发生与发展全过程, 确定其发生的诱导因素, 制订有效的防治与控制对策和应急措施; 根据水华蓝藻越冬分布的时空特征和前期水华发生的强度, 结合中长期的水文与气象预测, 揭示其对水华蓝藻原位生长以及输移漂浮和集聚的驱动作用, 综合考虑流域的社会、经济发展趋势和土地利用模式的改变以及营养盐入湖总量等要素, 确定环境变化以及大量堆积导致水华蓝藻降解死亡对水体中营养盐含量增加及其在不同湖区之间迁移的贡献, 对未来一个月、一个季度、一年乃至更长一段时间内太湖是否会形成蓝藻水华做出中长期预报; 通过对蓝藻水华的形成与堆积的预测, 对更加科学地确定打捞堆积的水华蓝藻的时间与地点, 减轻蓝藻水华堆积腐败降解恶化水质的危害具有实际的指导意义.

致谢: 曹焕生、张民、于洋、史小丽、季江、邢鹏、郭匿春、谭啸、曾庆飞、陈美军、季健、阳振、钱善勤等参与了文献调研、理论研究和蓝藻水华的预测预警工作, 在此一并致谢.

4 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. 生态学报, 2005, **25**(3): 589-595.

[2] 阎 荣, 孔繁翔, 韩小波. 太湖底泥表层越冬藻类群落动态的荧光分析法初步研究. 湖泊科学, 2004, **16**(2): 163-168.

[3] 吴晓东, 孔繁翔, 张晓峰等. 太湖与巢湖水华蓝藻越冬和春季复苏的比较研究. 环境科学, 2008, **29**(5): 162-167.

[4] Shi XL, Kong FX, Yu Y *et al*. Survival of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* under dark anaerobic condition. *Marine and Freshwater Research*, 2007, **58**(7): 634-639.

[5] Yang Y, Yin CT, Li WZ *et al*. α-Tocopherol is essential for acquired chill-light tolerance in the Cyanobacterium *Synechocystis* sp. Strain PCC 6803. *Journal of Bacteriology*, 2007, **190**(5): 1554-1560.

[6] Verspagen JMH, Snelder EOFM, Visser PM *et al*. Benthic-pelagic coupling in the population dynamics of the harmful cyanobacterium Microcystis. *Freshwater Biology*, 2005, **50**(5): 854-867.

[7] Latour D, Sabido O, Salencon MJ *et al*. Dynamics and metabolic activity of the benthic cyanobacterium Microcystis aeruginosa in the Grangent reservoir (France). *Journal of Plankton Research*, 2004, **26**(7): 719-726.

[8] Thomas RH, Walsby AE. The effect of temperature on recovery of buoyancy by Microcystis. *Microbilogy*, 1986, **132**(6): 1665-1672.

[9] 李阔宇, 宋立荣, 万 能. 底泥中微囊藻复苏和生长特性的研究. 水生生物学报, 2004, **28**(2): 113-118.

[10] 陶 益, 孔繁翔, 曹焕生等. 太湖底泥水华蓝藻的复苏模拟. 湖泊科学, 2005, **17**(3): 231-236.

[11] Cao HS, Kong FX, Tan JK *et al*. Recruitment of total phytoplankton, chlorophytes and cyanobacteria from lake sediments recorded by photosynthetic pigments. *International Review of Hydrobiology*, 2005, **90**(4): 345-355.

[12] Cao HS, Tao Y, Kong FX *et al*. Relationship between temperature and cyanobacterial recruitment from sediments in laboratory and field studies. *Journal of Freshwater Ecology*, 2008, **23**(3): 405-412.

[13] Wu ZX, Song LR. Physiological comparison between colonial and unicellular forms of *Microcystis Aeruginosa* Kütz. (Cyanobacteria). *Phycologia*, 2008, **47**(1): 98-104.

[14] 储昭升, 杨 波, 金相灿等. 6 株蓝藻伪空胞的临界破裂压力研究. 环境科学, 2007, **28**(2): 2695-2669.

[15] Zhang M, Kong FX, Xing P *et al*. Effects of interspecies interactions between *Microcystis aeruginosa* and *Chlorella pyrenoidosa* on their growth and physiology. *International Review of Hydrobiology*, 2007, **92**(3): 281-290.

[16] Zhang M, Kong FX, Shi XL *et al*. Differences in responses to darkness between *Microcystis aeruginosa* and *Chlorella pyrenoidosa*. *Journal of Freshwater Ecology*, 2007, **22**(1): 93-99.

[17] Tsujimura S. Application of the frequency of dividing cells technique to estimate the in situ growth rate of Microcystis (Cyanobacteria). *Freshwater Biology*, 2004, **48**(11): 2009-2024.

[18] 吴晓东, 孔繁翔. 太湖梅梁湾水华蓝藻原位生长速率的测定. 中国环境科学, 2008, **28**(6): 552-555.

[19] Cao HS, Kong FX, Luo LC *et al*. Effects of wind-induced waves on vertical photoplankton distribution and surface blooms of *Microcystis aeruginosa* in Lake Taihu. *Journal of Freshwater Ecology*, 2006, **21**(2): 231-238.

[20] 白晓华, 胡维平, 胡志新等. 2004 年夏季太湖梅梁湾席状漂浮水华风力漂移入湾量计算. 环境科学, 2005, **26**(6): 57-60.

[21] 马荣华, 孔繁翔, 段洪涛等. 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识. 湖泊科学, 2008, **20**(6): 687-694.

[22] Reynolds CS. Cyanobacteria water blooms. In: Callow JA ed. Advances in botanical research. London: Academic Press, 1987, **13**: 67-143.

[23] Spencer CN, King DL. Regulation of blue-green algal buoyancy and bloom formation by light, inorganic nitrogen, CO_2, and trophic level interactions. *Hydrobiologia*, 1987, **144**: 183-191.

[24] 陈宇炜, 秦伯强, 高锡云. 太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测. 湖泊科学, 2001, **13**(1): 63-71.

[25] Ochumba PBO, Kibaara DI. Observations on blue-green algal blooms in the open waters of lake Victoria, Kenya. *African Journal of Ecology*, 1989, **27**(1): 23-34.

[26] 马荣华, 戴锦芳. Landsat ETM 与光谱特征结合估测太湖叶绿素及悬浮质含量. 湖泊科学, 2005, **17**(2): 97-103.

[27] Hu WP, Sven EJ, Zhang FB. A vertical-compressed three-dimensional ecological model in Lake Taihu, China. *Ecological Modelling*, 2006, **190**(3-4): 367-398.

[28] Wang J. The ecological engineering of HAB: prevention, control and mitigation of harmful algal blooms. *Electronic Journal of Biology*, 2005, **1**(2): 27-30.

[29] 段洪涛, 张寿选, 张渊智. 太湖蓝藻水华遥感监测方法. 湖泊科学, 2008, **20**(2): 145-152.

[30] Cracknell AP, Newcombe SK, Black AF *et al*. The ABDMAP (Algal bloom detection, monitoring and prediction) concerted action. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22**(2-3): 205-247.

[31] Wei B, Sugiura N, Maekawa T. Use of artificial neural network in the prediction of algal blooms. *Water Research*, 2001, **35**: 2022-2028.

[32] Rechnagel F. ANNA-Artificial neural network model for predicting species abundance and succession of blue-green algae. *Hydrobiologia*, 2004, **349**: 47-57.

[33] Teles LO, Vascocelos V, Pereira E *et al*. Time series forecasting of cyanobacteria blooms in the Crestuma reservoir (Douro River, Portugal) using artificial neural networks. *Environmental Management*, 2006, **38**: 227-237.

[34] Chang KW, Shen Y, Chen PC. Predicting algal bloom in the Techi reservoir using landsat TM data. *Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**(17): 3411-3422.

[35] 林祖享, 梁舜华. 探讨运用多元回归分析预报赤潮. 海洋环境科学, 2002, **21**(3): 1-4.

[36] Wu Y, Wang Z. Numerical simulation of 1998 red tide of the Bohai sea. *International Journal of Sediment Research*, 2002, **17**: 175-185.

[37] Madis-Jaak L, Jaan L. A simple tool for the early prediction of the cyanobacteria Nodularia spumigena bloom biomass in the Gulf of Finland. *Oceanologia*, 2006, **48**(S): 213-229.