

文章编号: 1001-8166(2008)11-1115-09

湖泊蓝藻水华生态灾害形成机理及防治的基础研究^{*}

吴庆龙¹, 谢平², 杨柳燕³, 高光¹, 刘正文¹, 潘纲⁴, 朱本占⁵

(1 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, 江苏 南京 210008;

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, 湖北 武汉 430072

3 南京大学, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210092

4 中国科学院生态环境研究中心, 环境水质学国家重点实验室, 北京 100085

5. 中国科学院生态环境研究中心, 环境化学与生态毒理学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 湖泊具有供水、渔业、旅游、维持区域生态系统平衡等功能, 是支撑我国经济和社会发展的
重要资源之一。但是近 30 年来, 湖泊富营养化所导致的蓝藻水华频繁暴发, 生态灾害事件频发, 严
重影响湖泊功能的发挥, 制约区域经济可持续发展。针对国家在保障区域水安全和生态安全、保
护人民健康及建设和谐社会等方面的重大需求, 国家重点基础研究发展计划项目“湖泊蓝藻水华
生态灾害形成机理及防治的基础研究”于 2008 年 7 月正式立项。项目拟解决的关键科学问题包
括: ①湖泊蓝藻水华主要衍生污染物的形成机理、迁移转化规律和毒理效应; ②蓝藻水华导致湖泊
生态系统结构变化和退化的机理; ③蓝藻水华生态灾害评估及调控机理。针对上述科学问题,
项目以蓝藻水华污染物的产生、湖泊生态系统结构与功能的响应以及生态灾害的评估与调控为研
究主线, 重点开展以下几个方面的研究: ①蓝藻水华衍生污染物的产生及其环境过程; ②蓝藻水华
衍生污染物的毒理效应与生态和健康风险; ③蓝藻水华导致湖泊生态系统结构变化与退化的
关键过程和机制; ④蓝藻水华灾害治理和调控的技术原理和途径。项目的实施和完成将为我国
湖泊蓝藻水华生态灾害的预防与控制提供理论和技术原理支撑。

关键词: 湖泊; 蓝藻水华; 生态灾害; 调控

中图分类号: X524 文献标志码: A

1 引言

湖泊蓝藻水华是指湖泊水体中的蓝藻快速大量繁殖形成肉眼可见的蓝藻群体或者导致水体颜色发生变化的一种现象, 严重时可在水面漂浮积聚形成绿色的藻席甚至藻浆^[1]。蓝藻水华的发生根源于湖泊富集了过多的氮、磷等营养物质, 是湖泊富营养化的一种表现形式^[1]。生态灾害是指在一些因素的干扰下由于生态系统平衡改变所带来的各种始料未及的现象和突发事件, 如生态系统破坏、生物多样

性散失、财产损失、人员伤亡和社会安定失稳等。生态灾害的发生根源于生态系统结构和功能的突变^[2,3]。由中国科学院南京地理与湖泊研究所牵头, 中国科学院生态环境研究中心、中国科学院水生生物研究所和南京大学等单位联合申请的国家重点基础研究发展计划项目“湖泊蓝藻水华生态灾害形成机理及防治的基础研究”于 2008 年 7 月正式立项。

项目针对国家在保障区域水安全和生态安全、保护人民健康等方面的重大需求, 以蓝藻水华污染

^{*} 收稿日期: 2008-08-21 修回日期: 2008-09-18

^{*} 基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目“湖泊蓝藻水华生态灾害形成机理及防治的基础研究”(编号: 2008CB418100)资助。

作者简介: 吴庆龙(1967-), 男, 江苏南京人, 研究员, 项目首席科学家, 主要从事微生物生态学、淡水生态学和恢复生态学等研究。

E-mail: qw@niglas.ac.cn

物的产生、湖泊生态系统结构与功能的响应以及生态灾害的评估与调控为研究主线,围绕蓝藻水华形成后的积聚、分解等主要过程和阶段,研究蓝藻水华衍生污染物的产生和归趋、主要污染物质的毒理效应及水质安全、蓝藻水华影响湖泊生态系统结构和功能的关键过程和途径。在此基础上,研究防治蓝藻水华生态灾害的新技术原理,建立我国湖泊蓝藻水华生态灾害的评估方法和指标体系,并提出相应的管理和调控对策,为保障我国湖泊供水、资源和生态安全提供重要的理论和技术原理支撑。同时,开拓居国际前沿的、由有害生物异常增殖引发的湖泊灾害生态学研究领域,丰富关键功能群、生态系统恢复力和生态系统灾变等方面的基础理论。

2 立项的依据

2.1 国家需求

我国是一个湖泊众多的国家,湖泊不仅具有供水、调蓄洪水、调节气候、渔业、旅游等功能,还在维持区域生态系统平衡和保育生物多样性等方面发挥重要作用,是支撑我国经济和社会发展的重要资源之一。然而,最近的几十年,由于湖泊生态系统受损、水质下降,已严重削弱了湖泊生态系统的服务功能,特别是极大地威胁到饮用水的安全供应。湖泊富营养化所导致的蓝藻水华是湖泊生态系统受损的主要表征之一,我国是世界上蓝藻水华暴发最严重、分布最广泛且水华蓝藻种类最多的国家之一。如太湖、滇池和巢湖均有大面积、高频率的蓝藻水华发生,在一些水华堆积区,蓝藻浓度已超过 10^{10} 个细胞/L。蓝藻水华还会造成水体的“二次污染”,如蓝藻在生长和衰亡过程中所分泌的异味化合物或毒素等可严重影响饮用水及水产品的品质,造成严重的经济损失,还会引起水生和一些陆生动物中毒,并可能危及人类健康。藻类堆积后腐烂分解还可导致局部水域水质的严重恶化,危及供水安全。如 2007 年 5 月底因蓝藻水华暴发导致无锡市主要自来水厂停产,严重干扰居民的生产和生活,影响社会稳定,引起国内外的极大关注,对生态文明与和谐社会建设产生重大不利影响。蓝藻水华暴发也会导致湖泊的渔业及旅游等功能的下降,严重时甚至导致整个系统生态功能和服务价值的丧失,而生态系统的正常结构和功能一旦被破坏并失去平衡,将很难在短时间内恢复。显然,蓝藻水华在湖泊中的频繁暴发已经成为一种“生态灾害”。需要强调的是,我国蓝藻水华生态灾害最严重的湖泊流域多是经济发达、人

口密集的地区,灾害的发生不仅严重制约了区域经济的可持续发展,同时也对人们的健康和社会的稳定产生了极大威胁,控制肆虐的蓝藻水华危害、保障区域水安全和生态安全已成为国家的重大需求。

目前针对蓝藻水华的研究主要聚焦于其发生机理,而对其产生生态灾害的机理尚不清楚,对预防策略的理解也相对薄弱。美国众多从事海洋环境研究的学者在 1997 年和 2001 年分别向美国国会提交了“有害藻类水华的预防、控制及减缓办法”的报告,2001 年的报告内容主要包括:检测和描述水华藻类的种类及其毒素;监控和预警有害藻类水华;预防有害藻类水华并减缓其灾害;有害藻类水华的社会经济冲击及其相关教育等方面。此外,对“预防”概念的理解进行了调整,将预防有害藻类水华并减缓其灾害合并统一。而 1997 年的报告中所指的“预防”是在有害藻类水华发生前所采取的减少其影响程度和范围的环境管理办法,而非水华发生后的控制或灾害减缓措施。了解有害藻类水华产生灾害的机理是预防其对经济、公众安全和水生态系统产生负面影响的基础。我国对湖泊有害藻类水华的预防及其灾害减缓的研究非常薄弱,尚未建立相关的理论和技术体系。而且迄今为止,无论国内还是国外,均很少在湖泊生态系统水平上研究蓝藻水华导致的生态灾害,对其中基本科学问题的认识也不够清楚。由于基础研究的薄弱,以往对湖泊蓝藻水华的预防和灾害减缓所采取的措施往往针对性不强,效果也比较差。因此亟待了解蓝藻水华生态灾害的形成机理,揭示生态系统发生灾变的动力学机制,探明防治蓝藻水华灾害的技术原理,探索蓝藻水华灾害防治的策略和新的技术途径,建立灾害评估与评价的方法与体系,为防治蓝藻水华灾害提供急需的理论和

2.2 科学意义

研究湖泊生态系统中重要生态过程不仅可以揭示蓝藻水华引发灾害的机理,也是湖泊科学发展的自身需求。随着生态学从个体生态学向种群生态学、群落生态学、系统生态学的发展,科学界已经认识到生态系统是一个以生物为主体,由生物和非生物组成的多要素、多层次的复杂系统,它们通过系统内的各种过程和相互作用相联系,并不断与外界环境进行物质、能量、信息等方面的交换,促进系统的演化,体现出系统的各种功能。因此,研究蓝藻水华等重要因子驱动下湖泊生态系统中的主要过程、相互作用及其对湖泊的关键生物、湖泊资源和生态环

境等的影响机制, 将成为湖泊科学研究的前沿领域之一^[1]。上述研究工作的展开和深入不仅对全面认识湖泊生态系统的运行机制、发展湖泊生态系统的调控理论具有很好的促进作用, 而且对推动湖泊科学和淡水环境科学的进一步发展具有重要的意义。由于生态系统中生态过程及其相互作用的复杂性, 多学科的交叉和应用将成为揭示复杂过程的必然选择。本项目研究不仅涉及到社会经济学、湖泊生态学、生物群落学、种群生态学、地理信息系统、灾害学和数学模拟等宏观科学, 而且要利用生物化学、分析化学、分子生物学、微生物学、毒理学和基因组学等来研究和解释蓝藻水华污染物质的发生、循环特征及其对湖泊生态系统的影响机制等, 这种多学科的交叉也将极大地丰富湖泊科学研究的内容, 同时必将推动其它各学科自身的发展。

湖泊生态系统中的某一功能群在一定条件下可能会对整个生态系统的结构和过程起到决定性作用, 并因此成为关键功能群^[1-3]。如“清水态”浅水湖泊中的大型水生高等植物, 寡营养型深水湖泊中的大型植食性滤食浮游动物等。关键功能群对生态系统的驱动作用与过程是生态学基础理论的研究热点, 对这一问题的认识不仅是了解生态系统灾变和进行生态系统过程预测的关键, 也是保护和恢复生态系统的核心理论支撑。在蓝藻水华频发的湖泊生态系统中, 水华蓝藻作为关键功能群, 是湖泊主要生态过程的驱动因子。本项目以蓝藻水华驱动下湖泊生态系统结构和功能灾变的过程为核心内容和途径, 揭示蓝藻水华的致灾机理, 在评价致灾效应的基础上, 提出蓝藻水华灾害的防治对策, 研究不仅能够揭示蓝藻水华生态灾害发生的过程与机理, 以及相应的物质循环的特征, 开拓居于国际前沿的、由有害生物异常增殖引发的湖泊灾害生态学研究新领域, 还可以为湖泊生态系统的保护与恢复提供科学依据。同时, 相关研究结果也将丰富关键功能群、生态系统恢复力和生态系统灾变等方面的生态学理论, 促进我国湖泊科学、环境科学、灾害学和生态科学等学科的发展。

3 国内外研究现状和发展趋势

生态系统格局的变化 (Regime shift) 及其资源、环境和灾害效应是国际生态学和环境科学研究的重点, 也是全球变化的重要研究内容^[3]。水华暴发及其衍生出来的污染物质对水生生态系统的结构和功能产生了巨大影响, 并可能引起整个系统格局的变化,

从而可能导致一系列环境或者灾害事件的发生。国际上对于水华引起的生态灾害主要集中在海洋赤潮发生后的生态环境效应研究, 并提出了有害藻类水华的预防、控制及减缓办法与对策^[4]; 在内陆水体如湖泊等的蓝藻水华生态灾害研究主要关注藻毒素的产生及其对人类健康的潜在影响^[5], 缺乏较为系统的灾害效应及其预防和控制策略研究。我国的水华研究首先关注的也是海洋赤潮的研究, 并在 21 世纪初启动了国家重点基础研究发展规划项目“我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治”, 其中也重点研究了有害赤潮对关键生物种、重要资源种和海洋生态系统结构与功能的影响, 以及降低赤潮发生强度和频率的生态调控原理, 从而为进一步了解赤潮危害机理、评估赤潮危害、减轻赤潮灾害提供了科学依据。湖泊蓝藻水华的研究则主要关注了蓝藻水华的发生机理, 并在 2002 年启动了国家重点基础研究发展规划项目“湖泊富营养化过程与蓝藻水华暴发机理研究”, 虽然在其中涉及了湖泊富营养化的灾害研究, 但是重点关注的是蓝藻毒素的发生机理。显然, 目前对湖泊蓝藻水华生态灾害发生机理及其灾害效应的认识不够系统和深入, 因此缺乏有效的应对蓝藻水华生态灾害的对策, 尤其体现在以下几个方面:

(1) 对水华蓝藻的藻毒素研究较多, 对其它衍生污染物的形成及其对水质安全的威胁等灾害效应认识不足。水华蓝藻能大量产生一系列毒性很强的天然毒素从而危及人类健康^[5]。我国湖泊中有毒蓝藻水华大量发生, 渔产品中的微囊藻毒素 (Microcystis MC) 含量普遍较高甚至很高, 其对人类健康的潜在威胁不容忽视^[6]。但目前有关太湖水产品中的 MC 污染仅见零星报道^[7], 蓝藻死亡分解过程中所产生的 MC 在水生动物体内的累积及食用风险急需评估^[7,8]。

对水华蓝藻的藻毒素研究较多, 对其它衍生污染物质很不清楚, 因而在我国关于藻源性异味物质的系统研究还十分缺乏, 如对我国水体异味物质的种类、分布、藻类来源, 产异味藻的生理生态特性等方面的系统研究几乎是空白^[9]。目前, 在产异味藻株特异性、异味物质产生的生理生态机制、异味物质在水生态系统中的迁移、转化和归趋等方面均亟待进行全面、系统和深入的研究^[10]。蓝藻水华暴发后期, 大量藻类细胞衰亡并沉入水底, 继而在水-泥界面分解而释放出大量蓝藻毒素、异味物质及其它有毒有害物质。蓝藻在特定水域堆积、腐烂和分解, 并

形成“污水团”，一旦扩散到饮用水源地，将可能引发饮用水危机。因此，研究毒素、异味物质等在水—泥界面和水—气界面的迁移转化规律和在湖泊中的归趋，弄清水华蓝藻在潜在风险区的堆积、腐烂分解和“污水团”形成过程，对于蓝藻成灾机理的阐明具有重要意义。

在蓝藻水华衍生污染物质的毒理学分析方面，藻毒素的毒理学研究较多，已有的研究表明微囊藻毒素具有肝毒性、促癌作用、肾毒性和肠毒性^[5]。但是，在蓝藻水华消亡过程中，除了产生藻毒素以外，还会产生一些其它有害物质，如甲硫醇、甲硫醚、亚硝酸盐和硝胺等，对这些物质的致毒过程和机理，特别是它们的联合毒性效应缺乏基本认识。绝大部分环境污染物不只通过一种机制发挥作用，而是通过几种机制联合产生生物效应，蓝藻水华消亡过程中还会产生一些复合性环境污染物，使生物种或生态系统暴露于多种化合物的综合影响下，环境污染物风险评价中安全阈值的确定已不仅局限于传统的毒理学研究参数指标，而是更多关注于环境污染物低剂量长期暴露下，生物机体在细胞水平、分子水平上的可观测变化，及污染物长期暴露对整个生态环境中生物种群的影响^[11]，只有这样才能有效地对环境污染物做出风险评估。将传统毒理学研究方法与日益发展的分子生物学技术相结合，将宏观生态毒理的研究方法和微观的分子手段相结合，针对蓝藻水华消亡过程中有害物质种类和浓度以及不同功能水体的生态保护要求，系统地研究代谢型化学产物和环境生物之间相互作用的过程及其机理，不但能够建立适合我国国情的水华成灾的生态安全阈值指标体系，而且有望建立蓝藻水华消亡过程中适合不同功能区的水质安全指标体系。

(2) 绝大多数研究侧重于生源要素对蓝藻水华形成的影响，缺乏了解蓝藻水华暴发后对生源要素循环过程的影响及其生态环境效应。多年来，大量的研究工作着眼于营养盐等生源要素对蓝藻水华的产生和发展过程的影响，却少有研究探索蓝藻水华暴发对湖泊水体 C、N、P 等生源要素循环的反作用，而这种反作用可能对蓝藻水华的多次暴发和灾害形成有极为重要的影响。事实上，蓝藻水华不仅会影响水体营养盐的循环、矿化速率和再生通量，还会改变其生物地球化学循环方式和途径。有研究指出，水华暴发期间，水体胶体有机碳的浓度显著增高，并对水体中胶体态磷的浓度及其形态产生影响^[12]；富营养湖泊中蓝藻水华的暴发会改变水体 pH 值，从

而导致沉积物中内源磷释放量的急剧增加^[13]；蓝藻水华等有机体的死亡分解及伴随的营养物质的再生还可能对水华的暴发程度和周期产生重要影响^[14-18]；浅水湖泊的蓝藻水华暴发与死亡生物残体有机质的分解及营养盐的再生之间可能存在内在关联，这种关联可能导致藻型湖泊生态系统具有更强的自稳定性^[19]。湖泊沉积物作为湖泊生态系统的重要组成部分，接纳并蓄积了大量 C、N、P 等生源要素^[1]，蓝藻水华暴发后，湖泊水体和水土界面的环境会发生重大变化，因此完全有可能影响到沉积物中生源要素的循环过程，并对水体的营养循环产生重大影响。很显然，水华暴发后对生源要素循环过程的反作用是蓝藻水华成灾对生态系统产生破坏的基本过程，是蓝藻水华暴发后引发生态灾害的前提，对这一过程开展研究将为深入认识蓝藻水华灾害并提出防治措施提供科学依据。

(3) 生物群落结构突变是生态系统灾变的核心，对蓝藻水华驱动下湖泊生物群落结构变化过程和机理认识不足。随着富营养化的加剧，浅水湖泊逐步形成以浮游藻类为优势的生态系统，其中往往又以蓝藻为优势藻类，引发蓝藻水华。蓝藻成为该类湖泊生态系统的关键功能群，驱动着整个生态系统的结构和过程。而这种以蓝藻为优势的湖泊生态系统十分稳定，在相当长的时期内不会发生格局变化，从而形成生态灾害。浅水湖泊的主要生物类群包括微生物分解者；以浮游植物、水生高等植物和附生藻类为主的初级生产者；以浮游动物、底栖动物为主的初级消费者和以鱼类为主的次级消费者等。目前关于蓝藻水华对湖泊其他水生生物的影响研究主要集中在单因子的生理或生态胁迫方面，而各种影响是相互联系的，目前还无法解释蓝藻水华胁迫下湖泊生物群落结构灾变的关键过程与机理。需要重点研究的关键过程包括在水华驱动下：①湖泊中的微食物网结构与功能的响应^[20]；②初级生产者如何发生变化^[21-22]；③藻类牧食者的结构及其对浮游藻类的牧食能力的变化^[23-27]；④底栖与水生层境之间的以营养关系为核心的耦合作用发生哪些变化^[28-30]；⑤鱼类结构和湖泊渔业变化的过程与机理^[31]；⑥蓝藻水华所携带的物质和能量有多少以及如何食物网中流传。

(4) 防治蓝藻水华生态灾害急需新的技术原理支撑，应急和长效技术相结合是开展探索的主要趋势。由于湖泊营养负荷在相对较长的一段时间内不会显著减少，且即使在理想的流域生态条件下，湖泊

也不断承受着来自陆地和人类的强烈扰动。因此,从长效治理蓝藻水华的角度出发,需要构建一个具有较高系统稳定性的良性湖泊生态系统,这种稳定性依赖于系统结构的完整性和丰富的生物多样性,表现在:对外来营养负荷的冲击有较强的缓冲能力和自动恢复能力;具有良好的营养盐输出能力;较高的污染自净能力;合理的食物网结构;可以抑制蓝藻水华发生。而现状是湖泊中蓝藻水华不断暴发;水柱中营养盐浓度很高并不断维持蓝藻水华的发生;水质差,难以为恢复良性湖泊生态系统提供最基本的条件。因此必须在了解不同存量蓝藻水华对湖泊生态系统的结构和功能影响机理的基础上,结合原有蓝藻水华治理技术原理,针对蓝藻水华暴发的不同过程和湖泊环境的时空特点,以内源营养盐的控制为研究主线,探索新的技术途径以便大面积、低成本、快速、生态安全地去除蓝藻水华^[32-34];迅速减少水柱中的氮磷等营养盐浓度;显著降低蓝藻水华衍生污染物的浓度;提高水体透明度、改善水质,从而为湖泊生态修复和良性湖泊生态系统的构建提供基本条件,最终构建一个具有较高系统稳定性的良性湖泊生态系统,达到改善水质、恢复生态和防治蓝藻水华的目标。而由大面积、低成本、快速、生态安全去除蓝藻水华到生态环境改善和最终构建良性湖泊生态系统,其中的诸多科学问题和技术原理尚不清楚,亟待开展研究,最终为蓝藻水华的治理探索新的技术途径。

(5) 对蓝藻水华生态灾害缺乏科学的评估和有效的预防与调控对策。随着蓝藻水华在全球范围内暴发次数的增加和空间范围的扩大,蓝藻水华造成的生态灾害已引起越来越广泛的关注。在我国,蓝藻水华已经成为严重的环境灾害,对区域社会经济的发展 and 人类健康已形成严重威胁。目前对蓝藻水华造成的生态灾害虽有了不同程度的关注,但还没有形成一个科学、系统、全面的指标和方法体系,也缺乏评价系统,而对蓝藻水华生态灾害给出科学全面的分析和评估是预防其对经济、公众安全和对生态环境产生负面影响的基础,是形成科学、长效的防治对策的前提之一。蓝藻水华在其孕育、产生、发展和消亡过程中均能产生不同程度、多个方面的生态灾害,并随时空条件而变化,这些特点对人们正确认识蓝藻水华生态灾害并开展防灾减灾工作造成了困难。目前在蓝藻水华生态灾害的评估方面可能存在 3 个主要问题:一是对成灾具体过程的了解尚不全面,没有建立起观测数据与成灾机制的联系;二是没

有将各成灾环节的具体科研成果构成一个完整的量化指标体系;三是没有从生态系统健康与和谐社会建设的角度建立相应的蓝藻水华生态灾害的防治机制。

生态过程研究是生态学的前沿和核心内容,依据生态过程对生态系统的演变进行预测、预警、调控,即过程模拟与优化调控,是国际上发展最快的研究领域之一^[35-37]。针对蓝藻水华驱动下湖泊生态环境过程,采用计算机模拟技术,建立相应的生态模型,利用计算机模型整合前面研究中的各类观测数据、参数与耦合关系,并发展可用于生态调控的预测、评估、决策支持系统,从而对蓝藻水华生态灾害进行评价并提出相应的预防和调控对策。

4 拟解决的关键科学问题和主要研究内容

4.1 拟解决的关键科学问题

蓝藻水华的发生驱动着湖泊生态系统的变化,湖泊生态系统的反馈作用可能促进蓝藻水华持续及其灾害的频发,导致湖泊生态系统出现灾变,并形成以蓝藻水华为主导的稳定湖泊生态系统。本项目紧紧围绕蓝藻水华生态灾害的发生机理和相应的调控对策开展研究,拟解决以下几个关键科学问题:

(1) 湖泊蓝藻水华主要衍生污染物的形成机理、迁移转化规律和毒理效应。主要内涵包括:产生有毒有害污染物质的水华蓝藻的种类和浓度及其与有毒有害代谢产物释放的关系;污染物质产生的生物化学和分子生物学机制;污染物质的产生和变化与各种环境因子之间的关系;蓝藻水华主要衍生污染物质与其它污染物质的交互作用机制;衍生污染物质在湖泊生态系统中的归趋;衍生污染物的生态毒理和遗传毒理学效应及其作用阈值;衍生污染物质和其它污染物质的联合毒性分析等;水质安全与人类健康风险评估等。

(2) 蓝藻水华导致湖泊生态系统结构变化和功能退化的机理。水生生物是湖泊生态系统的主体,而蓝藻水华的暴发会对其它水生生物产生重要影响,并导致湖泊生态系统结构变化和功能退化,是形成生态灾害的关键。包括对浮游动物、其它浮游藻类、附着生物、底栖生物、大型水生高等植物、鱼类、异养微生物等的影响;同时,蓝藻水华还会对湖泊生态系统的其它方面产生重要影响,包括鱼类产卵场、渔业、生物多样性保育、食物网结构及其稳定性、经典食物网与微食物网的关系、营养盐的循环规律、水

土界面和水气界面的物质转换过程、蓝藻水华为主的湖泊生态系统的稳定性等。

(3) 蓝藻水华生态灾害评估及调控机理。主要内涵包括: 蓝藻水华生态灾害的关键过程; 致灾的关键因子; 蓝藻水华发生水体生态功能的划分原则和方法; 蓝藻水华生态灾害评估指标体系的建立原则; 蓝藻水华的分级体系; 蓝藻水华生态灾害的分析和分级方法; 蓝藻水华生态灾害的评估方法; 快速、低成本、大面积减少蓝藻水华存量的技术原理; 加速湖泊稳态转换的机理; 生态调控的机制; 调控技术的生态安全性; 预防与控制生态灾害的管理对策等。

4.2 主要研究内容

针对上述科学问题, 项目以蓝藻水华污染物的产生、湖泊生态系统结构与功能的响应以及生态灾害的评估与调控为研究主线, 重点开展以下几个方面的研究:

(1) 蓝藻水华衍生污染物的产生及其环境过程。重点研究太湖等湖泊蓝藻水华及其主要衍生污染物的空间分布特征及其相互关系; 水华蓝藻主要衍生污染物形成的生理生化及分子生物学机理; 水华蓝藻主要衍生污染物在水—泥界面、水—气界面的迁移转换过程、机制和归趋; 水华蓝藻主要衍生污染物在食物网中的迁移规律及其对水产品安全性的影响; 重要风险区域蓝藻的死亡、分解和主要衍生污染物的产生过程及其与污水团形成的关系。

(2) 蓝藻水华衍生污染物的毒理效应与生态和健康风险。主要研究内容包括: 蓝藻水华暴发的不同阶段产生的有毒有害物质毒性的筛选鉴别; 主要污染物的生态毒理学效应; 主要污染物的遗传毒理学效应; 有毒有害物质的健康风险分析; 基于水功能区划的水质安全评估体系。

(3) 蓝藻水华导致湖泊生态系统结构变化与功能退化的关键过程和机理。主要研究内容包括: 蓝藻水华的暴发对浅水湖泊水体中氮、磷等生源要素赋存形态、矿化模式及再生速率的影响; 蓝藻水华的暴发对湖泊水—沉积物界面生源要素循环过程的影响及反馈作用; 蓝藻水华暴发后沉积物中生源要素的赋存形态、输入和输出通量; 蓝藻水华的漂移和聚积对全湖营养盐动力学的影响; 蓝藻水华对微食物网结构的灾变作用; 蓝藻水华对非浮游初级生产者群落的影响和湖泊稳态转换机制; 蓝藻水华对主要牧食者群落及其牧食率的影响; 蓝藻水华对底栖动物以及底栖—水层营养交换关系的影响; 蓝藻水华对鱼类群落结构的影响及对渔业的致灾效应。

(4) 蓝藻水华灾害治理和调控的技术原理。主要研究内容包括: 蓝藻水华快速去除、迁移输出与营养盐沉降技术原理; 蓝藻衍生污染物加速分解与吸附技术原理; 水、沉积物环境改善与沉水植被、生态系统恢复技术原理; 生态系统结构和功能对主要控制技术措施的响应与生态安全分析; 蓝藻水华应急治理与长效稳态转换的理论基础; 蓝藻水华生态灾害评估指标和分级体系; 蓝藻水华生态灾害分析方法; 典型湖泊蓝藻水华生态灾害预警与专家决策支持系统; 蓝藻水华生态灾害的风险管理与调控策略。

4.3 研究的总体思路

本研究的关键问题是要明确蓝藻水华暴发后如何导致湖泊生态系统结构的灾变? 致灾效应如何? 如何评估? 调控的机理与对策是什么? 针对这些关键问题, 本项目拟以太湖为主要研究对象, 并选择滇池和巢湖为参考湖泊, 围绕蓝藻水华暴发后的主要过程或者阶段, 运用野外生态学、比较湖沼学和实验生态学方法, 将历史数据分析、野外调查、原位实验、模拟试验与实验室分析相结合, 比较分析不同存量蓝藻水华对湖泊生态系统结构与功能变化的驱动作用及其机理, 对这一影响将主要从 3 个方面进行研究: ①对生物群落结构的影响及其机理; ②对湖泊生源要素循环过程的影响及其生态环境效应; ③对湖泊水质的影响 (主要是藻类水华衍生污染物的发生机理、迁移转换规律及其对湖泊水质安全的影响)。在比较分析上述影响的基础上, 确定蓝藻水华引起生态灾害的关键参数和机制, 在了解相关机理的基础上探索防治蓝藻水华生态灾害的新途径, 研究蓝藻水华生态灾害评估、评价方法和预防策略, 最终为蓝藻水华灾害的预防和控制提供科学依据。总体研究思路见图 1。

5 研究目标

总体目标: 以太湖生态系统为主要研究对象, 选择巢湖和滇池为对比研究湖泊, 通过研究水华蓝藻衍生污染物的产生和归趋、主要污染物的毒理学效应及对水质安全的影响、湖泊生物群落结构对蓝藻水华暴发的响应和机理、蓝藻水华暴发对湖泊生源要素循环过程的影响及其生态环境效应, 在理论上揭示蓝藻水华暴发导致湖泊生态系统结构和功能灾变的机理, 在方法上建立我国湖泊蓝藻水华生态灾害的评估方法和指标体系, 通过研究防治蓝藻水华生态灾害的应急和长效技术原理, 探索防治湖

泊蓝藻水华生态灾害的新途径, 开拓居国际前沿的、由有害生物异常增殖引发的湖泊灾害生态学研究领域, 使我国在湖泊生态系统灾变、蓝藻水华致灾机理及灾害预防和控制等研究领域居国际前沿水平, 为我国湖泊蓝藻水华生态灾害的防治和区域水安全及生态安全保障做出贡献。

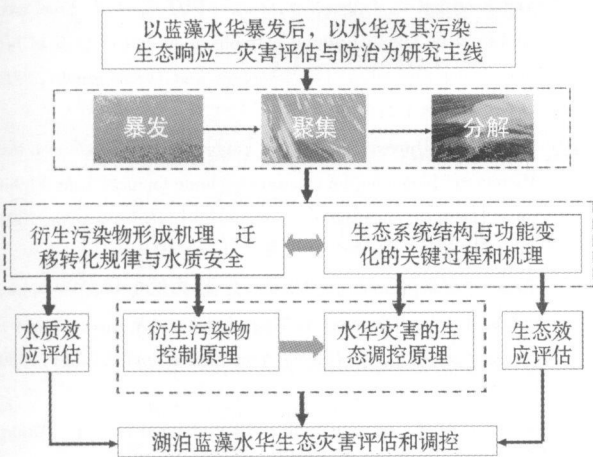


图 1 湖泊蓝藻水华生态灾害形成机理及其防治的总体研究思路

Fig 1 General scheme of studies on ecological consequences of cyanobacterial blooms in lakes and their countermeasures

五年目标: 揭示蓝藻水华的暴发导致湖泊生态系统结构与功能灾变的关键过程, 明确生态系统灾变的基本原理, 创建湖泊生态灾害的研究方法和蓝藻水华致灾评价标准及体系, 探索防治湖泊蓝藻水华生态灾害的新途径和策略, 丰富和发展湖泊科学、灾害生态学与生态学等学科理论, 为区域可持续发展提供对策。主要贡献如下:

(1) 基础理论贡献: 蓝藻水华衍生污染物质的发生机理; 蓝藻水华衍生污染物质的毒理学; 蓝藻水华引发生态系统结构变化和功能衰退的机理。

(2) 基本方法贡献: 蓝藻水华衍生污染物质的分析方法; 湖泊蓝藻水华生态灾害的评估方法。

(3) 新的技术原理与途径: 大面积、低成本、生态安全的蓝藻水华及其衍生污染物快速清除原理; 蓝藻水华生态灾害的长效稳态逆转技术原理和途径。

致谢: 本文主要依据国家重点基础研究发展计划(973)项目“湖泊蓝藻水华生态灾害形成机理及防治的基础研究”的申报书撰写, 该申报书由参与

项目申报的所有科学家共同完成。

参考文献 (References):

- [1] Home A J, Goldman C R. Limnology (2nd) [M]. New York: McGraw Hill Inc., 1994
- [2] Scheffer M, Hosper H, Meijer M L, et al. Alternative equilibria in shallow lakes [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1993, 8: 275-279
- [3] Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, et al. Catastrophic shifts in ecosystems [J]. *Nature*, 2001, 413: 591-596
- [4] Capone D G, Zehr J P, Paerl H W, et al. *Trichodesmium*, a globally significant marine cyanobacterium [J]. *Science*, 1997, 276: 1221-1229
- [5] Codd G A, Morrison L F, Metcalf J S. Cyanobacterial toxins: Risk management for health protection [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2005, 203: 264-272
- [6] Xie L, Xie P, Guo L, et al. Organ distribution and bioaccumulation of microcystins in freshwater fish at different trophic levels from the eutrophic Lake Chaohu, China [J]. *Environmental Toxicology*, 2005, 20: 293-300
- [7] Chen J, Xie P, Guo L G, et al. Tissue distributions and seasonal dynamics of the hepatotoxic microcystins-LR and-RR in a freshwater snail (*Belamya aenuginosa*) from a large shallow, eutrophic lake of the subtropical China [J]. *Environmental Pollution*, 2005, 134: 423-430
- [8] Hu Q. Chapter 5: Environmental effects on cell composition [C] // Richmond A, ed. *Handbook of Microalgal Culture*. Oxford: Blackwell Science Ltd., 2004: 83-93
- [9] Li L, Wan N, Gan N, et al. Annual dynamics and origins of the odorous compounds in the pilot experimental area of Lake Dianchi, China [J]. *Water Science and Technology*, 2007, 55: 43-50
- [10] Petersen H G, Hudey S E, Cantin I A, et al. Physiological toxicity: cell membrane damage and the release of dissolved organic carbon and geosmin by *Aphanizomenon flos-aquae* after exposure to water treatment chemicals [J]. *Water Research*, 1995, 29: 1515-1523
- [11] Valavanidis A, Vlachogianni T, Dassenakis M, et al. Molecular biomarkers of oxidative stress in aquatic organisms in relation to toxic environmental pollutants [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, 64(2): 178-189.
- [12] Solp C P, Thomson J, De Lange G J. Enhanced regeneration of phosphorus during formation of the most recent eastern Mediterranean sapropel (S1) [J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2002, 66: 1171-1184
- [13] Fan C, Zhang L, Qu W. Lake sediment resuspension and caused phosphate release—A simulation study [J]. *Journal of Environmental Science*, 2001, 13(4): 406-410
- [14] Blackburn N, Fenchel T, Mitchell J G. Microscale nutrient patches in planktonic habitats shown by chemotactic bacteria [J]. *Science*, 1998, 282: 2254-2256
- [15] Hens M, Merckx R. The role of colloidal particles in the speciation and analysis of “dissolved” phosphorus [J]. *Water Research*,

- 2002, 36: 1483-1492.
- [16] Hemdl G J. Ecology of an orphous aggregations (marine snow) in the Northern Adriatic Sea. II. Microbial density and activity in marine snow and its implication to overall pelagic processes [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1998, 48: 265-275.
- [17] Mitchell JG, Pearson L, Dillon S, et al. Natural assemblages of marine bacteria exhibiting high-speed motility and large accelerations [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, 61: 4436-4440.
- [18] Wom J, Sindergaard M. Dynamics of heterotrophic bacteria attached to *Microcystis* spp. (Cyanobacteria) [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1998, 14: 19-28.
- [19] Xie L, Xie P, Tang H, et al. The low TN:TP ratio—a cause or a result of *Microcystis* bloom? [J]. *Water Research*, 2003, 37: 2073-2080.
- [20] Wu Q L, Chen Y W, Xu K D, et al. Intra-habitat heterogeneity of the microbial food web structure under the regime of eutrophication and sediment resuspension in the large subtropical shallow Lake Taihu [J]. *Hydrobiologia*, 2007, 581: 241-254.
- [21] Yin L, Huang J, Li D, et al. Microcystin-RR uptake and its effects on the growth of submerged macrophyte *Vallisneria spiralis* (Lour.) Haraj [J]. *Environmental Toxicology*, 2005, 20(3): 308-313.
- [22] Hargeby A, Andersson G, Blindow I, et al. Trophic web structure in a shallow eutrophic lake during a dominance shift from phytoplankton to submerged macrophytes [J]. *Hydrobiologia*, 1994, 279/280: 83-90.
- [23] Chen F, Xie P. The toxicities of single-celled *Microcystis aeruginosa* PCC7820 and liberated *M. aeruginosa* to *Daphnia acinacina* in the absence and presence of the green alga *Scenedesmus obliquus* [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2004, 19: 539-545.
- [24] Fenião-filho A S, Fileto C, Lopes N P, et al. Effects of essential fatty acids and N and P-limited algae on the growth rate of tropical cladocerans [J]. *Freshwater Biology*, 2003, 48: 759-767.
- [25] Gilbert J J. Susceptibility of planktonic rotifers to a toxic strain of *Anabaena flos-aquae* [J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, 39: 1286-1297.
- [26] Guo N, Xie P. Development of tolerance against toxic *Microcystis aeruginosa* in three cladocerans and the ecological implications [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143: 513-518.
- [27] Lrling M. *Daphnia* growth on microcystin-producing and microcystin-free *Microcystis aeruginosa* in different mixtures with green alga *Scenedesmus obliquus* [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48: 2214-2220.
- [28] Lenke A M, Lenke M J, Benke A C. Importance of detrital attached bacteria and organic matter to littoral microcrustacean growth and reproduction [J]. *Limnology and Oceanography*, 2007, 52: 2164-2176.
- [29] Vadeboncoeur Y, Jeppesen E, Zanden M J V, et al. From green land to green lakes: Cultural eutrophication and the loss of benthic pathways in lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(4): 1408-1418.
- [30] White S H, Duivenvoorden L J, Fabbro L D. Impacts of a toxic *Microcystis* bloom on the macroinvertebrate fauna of Lake Elphinstone, central Queensland, Australia [J]. *Hydrobiologia*, 2005, 548: 117-126.
- [31] Tammi J, Lappalainen A, Mannio J, et al. Effects of eutrophication on fish and fisheries in Finnish lakes: A survey based on random sampling [J]. *Fishery Management and Ecology*, 1999, 6: 173-186.
- [32] Anderson D M. Turning back the harmful red tide [J]. *Nature*, 1997, 388: 513-514.
- [33] Pan G, Zhang M, Chen H, et al. Removal of cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils: I. Equilibrium and kinetic screening on the flocculation of *Microcystis aeruginosa* using commercially available clays and minerals [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141: 195-200.
- [34] Pan G, Zou H, Chen H, et al. Removal of harmful cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils: II. Factors affecting the removal efficiency and an in situ field experiment using dithionite-modified local soils [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141: 206-212.
- [35] Chen Q, Mynett A E, Minns A W. Application of cellular automata to modeling competitive growth of two underwater species *C. aspera* and *P. pectinatus* in Lake Veluwe [J]. *Ecological Modelling*, 2002, 147: 253-265.
- [36] Giusti E, Marsili-Hubelli S. An integrated model for the Orbetello lagoon ecosystem [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 196: 379-394.
- [37] Hu W P, Jrgensen S E, Zhang F B. A vertical-compressed three-dimensional ecological model in Lake Taihu, China [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190: 367-398.

Ecological Consequences of Cyanobacterial Blooms in Lakes and Their Countermeasures

WU Qinglong¹, XIE Ping², YANG Liyan³, GAO Guang¹,
LIU Zhengwen¹, PAN Gang⁴, ZHU Benzhan⁵

(1 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 3 State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, College of Environmental Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210092, China; 4 State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 5 State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, Research Center for Eco-environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract In the recent 30 years, cyanobacterial blooming has occurred frequently in lakes of the Yangtze river basin, especially in Lake Taihu, Chaohu, and Dianchi, which has severely affected the functioning of these lake ecosystems. Cyanobacterial blooming in lakes has certainly become a major challenge to the sustainable development of regional economy in China, which needs urgent solutions. Although the environmental problems generated by cyanobacterial blooming has got more and more attention, the mechanism of ecological catastrophe driven by the blooming is unclear until now. Most studies have been focusing on the occurrence of cyanobacterial blooms in the last decades. The current project aims to reveal the mechanism of ecological catastrophe induced from cyanobacterial blooms and to find practical means to control the negative impacts. Three key questions will be addressed in this project, which include: ① development, environmental process, fate, and toxicological effects of pollutants derived from cyanobacterial blooms; ② regime shift and functional change of lake ecosystems induced by cyanobacterial blooms; ③ evaluation and control mechanism of ecological catastrophe caused by the blooms. Lake Taihu, Chaohu, and Dianchi will be chosen for a comprehensive and comparative study. The project will focus on the pollution mechanisms of cyanobacterial blooms, subsequent response of lake ecosystems, and thus the corresponding means reducing these negative impacts. Major research contents include the formation, environmental process, and fate of derivate pollutants from cyanobacterial blooms, eco-toxicological effect of major pollutants and safety of water quality, key process and change of lake ecosystems in response to cyanobacterial blooming. Based on these studies, new methods and principles for reducing the negative impacts will be studied and promoted. This study will finally have implications for ensuring the safety of regional ecology and sustainable development of regional economy. This study may also have contributions to the knowledge about ecology of keynote species, ecological resilience and catastrophic ecology.

Key words Lake, Cyanobacterial blooms, Ecological consequences, Countermeasures