

太湖不同湖区夏季蓝藻生长的营养盐限制研究

许海,秦伯强,朱广伟* (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)

摘要: 采集太湖 6 个湖区水样,利用营养盐添加,现场培养实验研究了水华蓝藻在不同湖区水体中生长的氮、磷限制情况和蓝藻的生长潜力.结果表明,梅梁湾水体只有氮、磷同时添加才对蓝藻生物量具有显著的促进作用,表明该湖区水华蓝藻的生长不仅存在磷限制,而且存在明显的氮限制.在太湖西部河口区、竺山湾和贡湖湾,蓝藻对单独的氮添加没有反应,而单独磷添加和氮磷同时添加对蓝藻生长具有同样的促进作用,表明磷是这些区域藻类生长的主要限制因子.东太湖水体不论氮磷单独还是同时添加对蓝藻生长均没有促进作用,表明存在氮磷以外的限制因子.氮磷供应充足的情况下,梅梁湾和西部河口区水体培养的蓝藻生长速率最高,表明这两个水域蓝藻的生长潜力最大,氮磷输入极易刺激蓝藻大量增殖,这在一定程度上解释了为什么蓝藻水华在这两个区域更为严重.蓝藻在贡湖湾和胥口水体中生长速率较低,在东太湖水体中的生长速率最低,因此这些水域的蓝藻增殖潜力较低.

关键词: 太湖; 浮游植物; 营养盐限制; 生长潜力; 生物实验

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2012)12-2230-07

Nutrient limitation of cyanobacterial growth in different regions of Lake Taihu in summer. XU Hai, QIN Bo-qiang, ZHU Guang-wei* (State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China). *China Environmental Science*, 2012,32(12): 2230~2236

Abstract: An in situ nutrient enrichment bioassay was conducted using surface lake water collected from six stations of Lake Taihu. The objective of the study was to investigate nutrient limitation of growth of phytoplankton, much of which was dominated by cyanobacteria, in different areas of the lake. The results showed that in Meiliang Bay (station 3), phytoplankton biomass (Chl *a*) increased significantly with combined addition of nitrogen (N) and phosphorus (P), with no significant effect from individual additions of N or P separately, suggesting that nutrient limitation of these two nutrients may be tightly coupled. In the river transition zone in the western area of the lake (station 10), and in Zhushan Bay (station 16) and Gonghu Bay (station 13[#]), chl *a* in the N alone addition treatments did not increase significantly compared to the initial chl *a*, but P addition treatments (both +P and +NP) led to significantly higher chl *a* concentrations than the control, reflecting N-replete and P-deficient biomass in these three areas. In the eastern part of the lake (station 24), additions of N and P individually and together did not stimulate growth compared with the control, suggesting factors other than N and P may limit phytoplankton growth. Under conditions where N and P produced cells that were replete in these nutrients, phytoplankton growth rates in Meiliang Bay and the estuary zone in the western bank were highest (0.3d^{-1}), suggesting growth potential is largest in these two zones. This may help to explain why there are severe cyanobacterial blooms in these zones. Phytoplankton growth rates were lower (0.11d^{-1} and 0.15d^{-1} , respectively) under nutrient replete conditions in Gonghu Bay and Xukou Bay, and losses occurred with nutrient additions in the eastern part of the lake, suggesting phytoplankton growth potential is low in these zones.

Key words: Lake Taihu; cyanobacteria; nutrient limitation; growth potential; bioassay

蓝藻水华暴发是湖泊富营养化的典型特征.世界范围内日益增加的蓝藻水华严重威胁了湖区居民的引用水安全和湖泊生态系统的可持续发展.人为活动引起的营养盐富集是蓝藻水华发生的主要原因,其中氮和磷是最受关注的营养元素^[1].氮和磷是藻类生长的主要物质基础^[2],其在

水体中存在的水平和形态直接控制着藻类种群

收稿日期: 2012-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41003043,41171368,40825004); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-010); 青年启动基金(Y1SL011025)

* 责任作者, 研究员, gwzhu@niglas.ac.cn

结构、更替、生物量和生产力等^[3-4]。多年来氮磷营养盐对藻类生长的调控作用一直是人们研究的热点^[5-7]。目前,搞清楚在蓝藻频发的湖泊生态系统中,哪一种营养元素控制着蓝藻的大量增殖和水华形成是水科学研究者和管理者面临的中心问题。回答这一问题对于制定合理的营养管理策略来减轻这种严重的水质问题具有重要的指导意义。

环境中氮、磷营养盐的比例,如 Redfield 比^[8]常用于判断环境中 N、P 元素对浮游植物生长是否限制,但该做法忽略了环境中氮、磷营养盐的再生速率及浮游植物细胞对氮、磷营养盐的储存等问题^[9]。因此仅用环境中氮、磷营养盐的比例进行判断往往不能反映真实情况,而必需用生物实验的方法进行评估。现场营养盐加富实验具有可操作性强和实验条件更接近自然状况的特点,是探讨浮游植物对营养盐增加反应的一个直接方法,因此被越来越多的学者所采用^[10-11]。

太湖位于长江中下游地区,是我国第三大淡水湖,具有供水、渔业、航运、防洪、娱乐等重要功能,对于该区社会稳定和经济发展具有重要作用。近年来,随着流域工农业迅速发展,受人为活动影响较大,水体富营养化日益严重。从 20 世纪 80 年代后期,太湖北部的梅梁湾开始频繁暴发蓝藻水华^[12],现在几乎每年夏天均有蓝藻水华暴发。2007 年 5 月 28 日至 6 月 3 日,太湖的贡湖湾水厂发生了严重的水危机事件^[13],引起社会各界的广泛关注。在对太湖水体富营养化研究中得到的结论是光和磷是主要的限制性因素^[14],氮不是太湖的限制因子^[15]。上述结论主要是湖泊生态调查的结果,即对大水体的理化、生物指标进行监测得到数据,而用生物实验的方法研究太湖浮游植物生长的限制因子鲜见报道。

本研究利用现场营养盐加富实验研究太湖不同湖区蓝藻生长的营养限制因子,以期对太湖水体富营养化和蓝藻水华的治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究湖区选择

在 8 月份太湖蓝藻水华暴发期间,选择太湖

具有代表性的 6 个采样点,代表不同湖区,如图 1。其中 3[#]点位于梅梁湾,是太湖典型的藻型湖区;13[#]点位于贡湖湾,是 2007 年发生水危机的湖区;16[#]点位于竺山湾,10[#]点位于太湖西部大浦口附近,这两个站点是水污染比较严重的水域;27[#]点位于胥口湾,24[#]点位于东太湖,这两个站点主要以大型水生植物为优势,较少发生蓝藻水华,是典型的草型湖区。

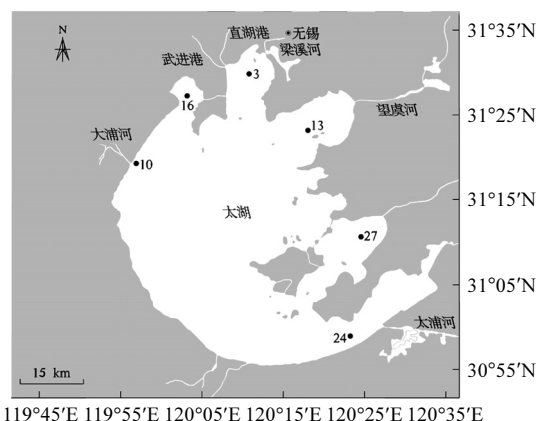


图 1 实验采样点位示意

Fig.1 Sampling stations in Lake Taihu

1.2 现场培养方法

采集设定点位表层湖水,带回实验室后水样经 0.5 μm 滤膜预过滤,去除水体原有的浮游植物,剩余水样用于营养盐,金属离子和叶绿素分析。然后用 23[#]浮游植物网捞取梅梁湾水华蓝藻,经去离子水反复洗涤后,等量添加到不同站位的滤后水体中,保证不同点位水样起始浮游植物种群和生物量相同。水体分装到盐酸浸泡洗净的 1L 无色透明的聚乙烯塑料培养瓶中,添加营养盐后,将培养瓶放置于自制的不锈钢框架中,直接漂浮于太湖站栈桥顶端的表层湖水中,进行现场培养,使其能够接受自然光照,维持自然水温,并处于自然风浪扰动状态,培养框架上罩一层中性遮阳网,防止光抑制。实验共设 4 种处理:对照(不添加营养盐;加 NO_3^- -N;加 PO_4^{3-} -P;加 NO_3^- -N 和 PO_4^{3-} -P。其中 NO_3^- (KNO_3) 的添加量为 2mg N/L, PO_4^{3-} ($\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 的添加量为 0.2mg P/L。每个处理设置 3 个平行。为减少“瓶壁效应”,尽量减少

培养时间和取样量,本研究培养 2d 后就取样过滤,进行叶绿素 a 分析.

1.3 分析方法

1.3.1 氮磷营养盐测定 总氮(TN)及总可溶态氮(TDN)经碱性过硫酸钾消解后用紫外分光光度法测定,总磷(TP)及总可溶态磷(TDP)经硫酸钾消解后用钼锑抗比色法测定,溶解性反应磷(SRP)用钼锑抗比色法测定,氨氮(NH₄-N)用纳氏试剂比色法测定,硝态氮(NO₃-N)用紫外分光光度法测定,亚硝氮(NO₂-N)用 a-盐酸萘胺分光光度法测定.具体分析方法参照文献[16].

1.3.2 金属元素测定 水样经 0.45μm 玻璃纤维滤膜过滤,溶解态金属元素铁、铜、锌、锰的含量采用美国 IL-PLASMA2000 型电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)测定.

1.3.3 浮游植物分析 浮游植物种类鉴定用 OLMPUS C41 型普通显微镜在 400 倍下进行,参照文献[17];浮游植物生物量以叶绿素 a 表示,测定方法为:样品经 GF/F 玻璃纤维滤膜过滤后,-20℃下放置过夜,然后经热酒精提取后,采用分光光度法测定^[18].

1.3.4 比增长率的计算 比生长速率计算公式:

$$\mu = \ln(X_2/X_1) / (T_2 - T_1)$$

式中:X₂ 为某一时间间隔终结时的藻类现存量;X₁ 为某一时间间隔开始时的藻类现存量;T₂-T₁ 为某一时间间隔.

2 结果与分析

2.1 不同湖区水体营养盐及叶绿素 a 分布特征

太湖水体营养盐的空间异质性很大,整体上呈现西北部高,东南部低的趋势,如表 1 所示.西北部湖区 10[#]点和竺山湾 16[#]点水体污染相对严重,各种形态氮磷的浓度均较高.梅梁湾 3[#]点 TN、TP 浓度很高,分别达 2.12mg/L 和 0.126mg/L,但 DIN 和 SRP 浓度却很低,分别为 0.25mg/L 和 0.003mg/L.贡湖湾 13[#]点 DIN 浓度比 3[#]点高,达 0.66mg/L.胥口湾 27[#]点和东太湖 24[#]点水质相对较好,TP 浓度均处于富营养水平以下,但 27[#]点氮浓度较高,TDN 浓度为 1.15mg/L 各采样点的 DIN/SRP 质量比在 46~265:1 之间.

实验同时测定了水体部分微量金属元素的浓度,3[#]点和 10[#]点的 Fe 和 Zn 浓度相对较高.所有站点 Cu 和 Mn 均低于检测限.

太湖浮游植物生物量在空间分布上也存在很大差异,3[#]点和 10[#]点蓝藻水华较为严重,Chl a 浓度分别达 141μg/L 和 123μg/L,其次是 16[#]点和 13[#]点,分别为 83μg/L 和 69μg/L.27[#]点和 24[#]点是水草区,没有蓝藻水华发生,浮游植物生物量很低,27[#]点 Chl a 仅为 5μg/L,24[#]点甚至检测不到 Chl a.

表 1 实验样点水化学和生物参数

Tab.1 Chemical and biological parameters for the experimental stations

参数	样点					
	3 [#]	13 [#]	10 [#]	16 [#]	24 [#]	27 [#]
TN (mg/L)	2.12	2.21	3.12	2.64	0.76	1.23
TDN(mg/L)	0.82	1.27	2.14	1.99	0.62	1.15
NO ₃ -N (mg/L)	0.10	0.57	0.95	0.74	0.21	0.47
NH ₄ -N(mg/L)	0.13	0.08	0.15	0.19	0.06	0.05
NO ₂ -N (mg/L)	0.02	0.009	0.11	0.13	0.006	0.007
DIN (mg/L)	0.25	0.66	1.21	1.06	0.28	0.53
TP (mg/L)	0.126	0.050	0.127	0.133	0.012	0.019
TDP (mg/L)	0.024	0.014	0.033	0.045	0.005	0.006
SRP (mg/L)	0.003	0.005	0.013	0.023	0.003	0.002
DIN/SRP	83	132	93	46	93	265
Chl a (μg/L)	141	69	123	83	0	5
Fe (mg/L)	0.012		0.013	0.007	-	0.007
Cu (mg/L)	-		-	-	-	-
Zn (mg/L)	0.009		0.004	0.009	0.005	0.004
Mn (mg/L)	-		-	-	-	-

注:-表示低于检测限;13[#]点金属元素值缺失

2.2 水华蓝藻在不同湖区水体中对氮磷添加的生长响应

浮游植物网捞取的蓝藻经显微镜观察鉴定,主要为水华微囊藻,铜绿微囊藻和惠式微囊藻.水华蓝藻在不同湖区的水体中进行营养富集,原位培养.添加营养盐后各水体蓝藻生物量(以 Chl a 表示)的反应如图 2 所示.与对照组相比,3[#]点+N 组和+P 组对蓝藻生长均没有促进作用,而+NP 组 Chl a 浓度显著高于对照,显然蓝藻生长受到 N、P 的共同限制.13[#]点、10[#]点、16[#]点和 27[#]点+N 组与对照组相比 Chl a 浓度没有显著差异,而+P 组和+NP 组对蓝藻生长呈现出相同的促进作用,

说明这些水域不存在氮的限制,P 是主要的限制因子.24[#]点各处理组均不能促进蓝藻生长,表明存在 N、P 以外的限制因子.

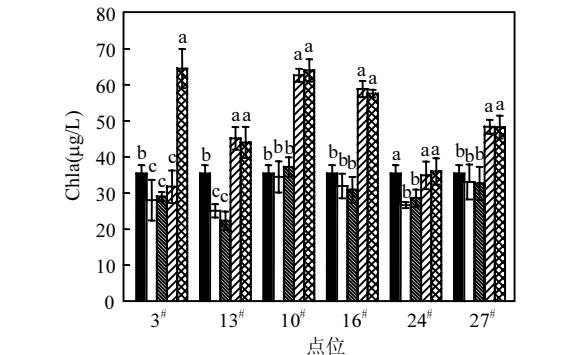


图2 现场培养 2d 各点位蓝藻生物量(Chl a)对营养盐添加的响应

Fig.2 Responses of phytoplankton biomass (Chl a) to nutrient enrichment after 2 d of in situ incubation at the experimental sites (stations 3, 13, 10, 16, 24, 27)
不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上有显著性差异($a > b > c > d$)
■ 初始 □ 对照 ▨ +N ▩ +P ▤ +NP

氮磷同时供应时,蓝藻在不同点位水体中的生长速率如图3所示,可以发现氮磷供应充足条件下各点往水体中蓝藻的生长速率并不相同.3[#]点和 10[#]点蓝藻生长速率最高,达 $0.30d^{-1}$,16[#]点其次生长速率为 $0.24d^{-1}$.13[#]点和 27[#]点生长速率较低,分别为 $0.11d^{-1}$ 和 $0.15d^{-1}$,24[#]点蓝藻不能生长,生长速率为负.

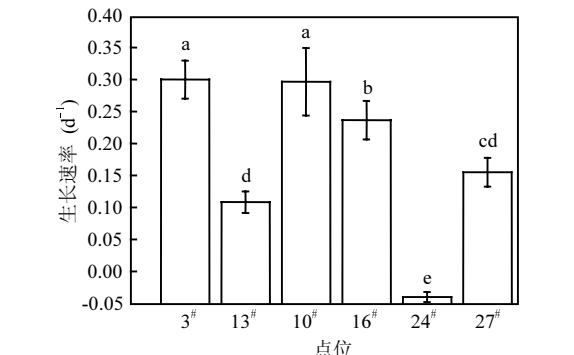


图3 氮磷充足条件下不同点位蓝藻生长速率
Fig.3 Growth rate of phytoplankton under nutrient (N and P) replete conditions in lake water collected from different experimental stations (3,13,10,16,24 and 27)
不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上有显著性差异($a > b > c > d$)

3 讨论

3.1 太湖浮游植物的营养盐限制

水体中的营养元素是浮游植物生长的物质基础.根据“最低因子定律”,浮游植物的生长受水体中占相对需求量最少的营养元素所限制,如在水体中添加这种元素,浮游植物生长就会迅速增加,这一营养元素即为限制因子.现场营养盐加富生物实验已经成为广泛应用的判断浮游植物营养限制的实验方法^[19-20].

营养加富实验结果显示,除 24[#]点外,不同点位蓝藻生长对营养盐添加均具有强烈的响应(图2),表明太湖不同湖区均存在营养盐限制情况,但限制因子不同.3[#]点蓝藻只对同时添加氮磷的处理具有响应,表明梅梁湾蓝藻生长不仅受到磷的限制,而且受到氮的限制.这与梅梁湾无机氮浓度较低相关(表1).梅梁湾夏季蓝藻水华严重,叶绿素浓度较高(表1),高的蓝藻生物量吸收了大量的营养盐,使无机氮浓度降低到最低值.有研究表明梅梁湾夏季水体反硝化作用强烈,也使大量氮从水体损失^[21]. Xie等^[22]通过武汉东湖围隔实验表明,夏季蓝藻大量繁殖会迅速吸收水体的无机氮,但会诱发底泥磷的释放.因此对于内源负荷较重的梅梁湾,蓝藻大量繁殖时期更易于受到氮的限制.作者前期利用营养加富实验研究了太湖梅梁湾营养盐限制的季节变化,结果也表明梅梁湾夏秋季受到氮磷的共同限制,而且氮是第一限制因子,但秋冬季主要受磷的限制^[23].本次实验与前期实验的区别在于对水体进行了预过滤,可能会去除了大量颗粒态易降解营养物,导致磷循环速率下降,因此使水体磷浓度不足以促进蓝藻生长.贡湖湾由于蓝藻水华发生的情况比梅梁湾轻,水体氮浓度相对较高(无机氮浓度为 $0.66mg/L$),因此蓝藻只对磷添加有反应,磷是主要的限制因子.10[#]点和 16[#]点靠近入湖河口,污染较为严重,尤其是氮浓度较高(表1),因此蓝藻只受到磷限制.东太湖和胥口湾是典型的水草区,水质清澈,透明度较高,很少发现蓝藻水华,通过接种自然的水华蓝藻,发现胥口湾水体也呈现出氮充足,磷限制的情况.有趣的是东太湖水体所有氮磷添加组,浮游植物

均不能生长,表明该区域还有其他限制因子存在,因此氮磷供应不是蓝藻大量发生的充分条件。

浮游植物生长是受氮限制还是磷限制也可以粗略地通过水体中的氮、磷比来判断.Redfield 提出,满足浮游植物对营养物质生理需求的氮、磷原子比为 16:1(质量比 7:1)^[8].氮磷质量比高于 7:1 可能会出现磷限制,低于 7:1 会出现氮限制^[24].太湖梅梁湾的 DIN/SRP 比为 46:1(表 1),根据 Redfield 值,磷是浮游植物生长的限制因子,但是生物实验的结果表明氮也是限制因子.因此利用氮磷比判断限制因子时应结合水体营养盐的绝对浓度,当氮或磷低于浮游植物最低生理需求时,氮磷比将失去意义。

一般来说,在海水中氮是主要的限制因子,而在淡水中磷是主要的限制因子^[25-26].但 Hecky 和 Kilham 在总结大量的实验数据和野外观察结果后认为:把磷看作是淡水湖泊中浮游植物生长的限制因子,而把氮看作是海洋生态系统中浮游植物的限制性营养元素的结论仍然存较大的争议^[27].很多研究显示一些淡水湖泊,氮也是限制因子^[28-29].Maberly 等^[30]报道欧洲 30 个湖泊中 63%被氮与磷共同限制,而只有 24%的湖泊被磷单独限制.其他的一些研究也表明,氮限制和氮与磷的共同限制比以前认为的还要普遍^[31-32].本研究表明,在太湖这样的大型浅水湖泊,同样会在某些区域存在氮限制的情况。

3.2 太湖蓝藻生长潜力的空间差异

太湖蓝藻水华状况存在很大的空间差异性.通常湖心区蓝藻数量较少,而梅梁湾内的蓝藻数量最多^[33].马荣华等^[34]通过多源卫星遥感影像分析表明:2000 年以前,太湖蓝藻水华主要出现在梅梁湾、竺山湾,以及竺山湾和梅梁湾相连的水域,梅梁湾发生频率远高于竺山湾,西太湖沿岸也时有发生.分析其原因,一方面可能是由于梅梁湾、竺山湾和西部水域的水环境条件适宜蓝藻生长,蓝藻在这些区域大量繁殖,形成水华.另一方面也可能是太湖夏季盛行东南风,驱动蓝藻漂移进入梅梁湾和竺山湾,并大量聚集.本实验结果表明,在氮磷供应充足的情况下,3[#]点和 10[#]点蓝藻生长速率最快,竺山湾 16[#]点其次(图 3),说明这些

水域蓝藻的生长潜力较大,营养盐的供给会极大的刺激该区域的蓝藻增殖,这从一定程度上说明了梅梁湾、竺山湾和西部水域为何蓝藻水华比较严重。

2005 年以来,贡湖湾也时有蓝藻水华发生,2007 年贡湖湾蓝藻水华发生的频率明显增加^[34].但在一周 2 次对太湖北部监测点进行巡测时经常发现梅梁湾、竺山湾和太湖西部沿岸堆积大量生长状态很好的蓝藻,而贡湖湾经常出现大量黄藻.生物实验结果也显示贡湖湾 13[#]点蓝藻生长潜力较低.因此推测贡湖湾水环境并不适宜蓝藻增殖,湾内蓝藻的堆积很可能是受水文与气象条件的影响^[35]。

东太湖和胥口湾水草生长茂盛,水体清澈,过去对于东太湖没有发生蓝藻水华的解释主要是水体营养盐水平低,限制浮游植物的生长.生物实验结果显示,即使氮磷供应充足,水体对蓝藻的生长潜力也很低.因此必须寻求氮磷以外的限制因子.通过对水体几种金属元素的分析发现,生长潜力高的 3[#]点和 10[#]点,水体铁浓度相对较高,而浮游植物不能生长的 24[#]点,水体铁浓度低于检测限.铁是浮游植物生长的必需元素,直接参与硝酸盐、亚硝酸盐的吸收,硫酸盐的还原,氮气的固定和叶绿素的合成^[36].Kudo 等^[37]测定了氮的还原(NRA)在铁限制条件下受影响的程度,结果在铁限制的细胞中氮的还原速率只有铁充足细胞的 10%.蓝藻是需铁量最多的浮游植物^[38],对铁缺乏的反应最为敏感^[39].推测 24[#]点的蓝藻不能生长,很可能是缺铁的原因.也有研究发现沉水植物对蓝藻有显著的抑制作用^[40].具体的原因还需要进一步的实验验证。

4 结语

太湖蓝藻生长存在营养盐限制情况,不同湖区限制因子不同.蓝藻水华暴发频繁的梅梁湾不仅受到磷限制,同时受到明显的氮限制;河口区受到外源营养补充,主要表现为磷限制;东太湖除氮磷限制外,还受到其它因子限制.不同湖区的蓝藻生长潜力也存在差异,水华严重的梅梁湾和大浦口蓝藻生长潜力最大,这从一定程度上解释了这

两个区域蓝藻生物量较高的原因.但贡湖湾,胥口湾和东太湖的蓝藻增殖潜力较低.

参考文献:

- [1] 许 海,朱广伟,秦伯强,等.氮磷比对水华蓝藻优势形成的影响 [J]. 中国环境科学, 2011,31(10):1676-1683.
- [2] Valiela I. Producers and processes involved in primary production [J]. Marine Ecological Processes, Second Edition. New York: Springer-Verlag, 1995:33-35.
- [3] 陈菊芳,徐 宁,王朝晖,等.大亚湾拟菱形藻(*Pseudo-nitzschia spp.*)种群的季节变化与环境因子的关系 [J]. 环境科学学报, 2002,22(6):744-748.
- [4] 徐 宁,陈菊芳,王朝晖,等.广东大亚湾藻类水华的动力学分析 II. 藻类水华与营养元素的关系研究 [J]. 环境科学学报, 2001,21(4):400-404.
- [5] Falkowski P G, Barber R T, Smetacek V. Biogeochemical control and feedbacks on ocean primary production [J]. Science, 1998, 281:200-206.
- [6] Thingstad T F, Krom M C, Mantoura R F, et al. Nature of phosphorus limitation in the ultraoligotrophic eastern mediterranean [J]. Marine Ecology Progress Series, 1995,117: 299-306.
- [7] Thingstad T F, Zweifel U L, Rassoulzadegan F P. Limitation of heterotrophic bacteria and phytoplankton in the northwest Mediterranean [J]. Limnology and Oceanography, 1998,43(1): 88-94.
- [8] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment [J]. American Scientist, 1958,46:205-222.
- [9] Piehler M F, Twomey L J, Hall N S, et al. Impacts of inorganic nutrient enrichment on phytoplankton community structure and function in Pamlico Sound. Estuarine [J]. Coastal and Shelf Science, 2004,61:197-209.
- [10] Bernhard A E, Peele E R. Nitrogen limitation of phytoplankton in a shallow embayment in northern Puget Sound [J]. Estuaries, 1997,20(4):759-769.
- [11] Hutchins D A, Bruland K W. Iron-limited diatom growth and Si :N uptake ratios in a coastal upwelling regime [J]. Nature, 1998,393(6685):561-564.
- [12] Chen Y W, Fan C X, Tcubner K , et al. Changes of nutrients and phytoplankton chlorophyll-a in a large shallow lake, Taihu, China: an 8-year investigation [J]. Hydrobiologia, 2003,506-509:273-279.
- [13] 中国科学院南京地理与湖泊研究所.太湖梅梁湾年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议 [J]. 湖泊科学, 2007 19(4):357-358.
- [14] Dokulil M, Chen W, Cai Q. Anthropogenic impacts to large lakes in China : the Tai Hu example [J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 2000,3:81-94.
- [15] 杨龙元.太湖优势蓝藻生长和代谢过程中的营养盐动力学研究. [M]. 北京:科学出版社, 2004:209-217.
- [16] Eston A D, Clesceri L S, Greenberg A E. Standard methods for the examination of water and wastewater [M] . 19th edition. Washington, 1995.
- [17] 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类:系统、分类及生态 [M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [18] Papista E, Acs E, Boeddi B. Chlorophyll-a determination with ethanol - a critical test [J]. Hydrobiologia, 2002,485:191-198.
- [19] Aldridge F J, Philips E J, Schelske C L. The use of nutrient enrichment bioassays to test for spatial and temporal distribution of limiting factors affecting phytoplankton dynamics in Lake Okeechobee, Florida [J]. Archiv für Hydrobiologie-Beiheft Ergebnisse der Limnologie, 1995,45:177-190.
- [20] Thompson P A, Hosja W. Nutrient limitation of phytoplankton in the upper Swan River estuary, Western Australia [J]. Marine and Freshwater Research, 1996,47:659-667.
- [21] McCarthy M J, Lavrentyev P L, Yang L, et al. Nitrogen dynamics relative to microbial food web structure in a subtropical, shallow, well-mixed, eutrophic lake (Taihu Lake, China) [J]. Hydrobiologia, 2007, 581:195-207.
- [22] Xie L Q, Xie P, Tang H J. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by *Microcystis* blooms – an enclosure experiment in a hyper-eutrophic, subtropical Chinese lake [J]. Environmental Pollution, 2003, 122:391-399.
- [23] Xu H, Paerl H W, Qin B Q, et al. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China [J]. Limnology and Oceanography, 2010,55:420-432.
- [24] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范 [M]. 2 版.北京:中国环境科学出版社, 1990.
- [25] Esler J J, Marzolf E R, Goldman C R. Phosphorus and nitrogen limitation of phytoplankton growth in freswaters of North America: A review and critique of experimental enrichments [J]. Canadian journal of fisheries and aquatic sciences, 1990,47: 1468-1477.
- [26] Dodds W K, Strausss E A, Lehmann R. Nutrient dilution an removal bioassays to estimate phytoplankton response to nutrient control [J]. Archiv für Hydrobiologie, 1993,128:467-481.
- [27] Hecky R E, Killham P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effects of enrichment [J]. Limnology and Oceanography, 1988,33:796-822.
- [28] Temponeras M, Kristiansen J, Moustaka-Gouni E. Seasonal variation in phytoplankton composition and physical-chemical features of the shallow Lake Doirani, Macedonia, Greece [J].

- Hydrobiologia, 2000,424:109-122.
- [29] Nalewajko C, Murphy T P. Effects of temperature and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in Lake Biwa, Japan: an experimental approach [J]. *Limnology*, 2001,2:45-48.
- [30] Maberly S C, King L, Dent M M, et al. Nutrient limitation of phytoplankton and periphyton growth in upland lakes [J]. *Freshwater Biology*, 2002,47:2136-2152.
- [31] Elser J J, Marzolf E R, Goldman C R. Phosphorus and nitrogen limitation of phytoplankton growth in the freshwaters of North America: a review and critique of experimental enrichment [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1990,47: 1468-1477.
- [32] Dzialowske A R, Wang S H, Lim N C, et al. Nutrient limitation of phytoplankton growth in central plains reservoirs, USA [J]. *Journal of Plankton Research*, 2005,27(6):587-595.
- [33] 胡维平,秦伯强,逢 勇,等.太湖水动力学过程与环境效应[M]. 北京:科学出版社, 2004:107-160.
- [34] 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 [J]. *湖泊科学*, 2008,20(6):687-694.
- [35] 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.
- [36] Hudson R J M, Morel F M M. Iron transport in marine phytoplankton: Kinetics of cellular and medium coordination reactions [J]. *Limnology and Oceanography*, 1990,35:1002-1020.
- [37] Kudo I, Miyamoto M, Noiri Y, et al. Combined effects of temperature and iron on the growth and physiology of the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum* (Bacillariophyceae) [J]. *Journal of Phycology*, 2000,36:1096-1102.
- [38] Brand L E. Minimum iron requirements of marine phytoplankton and the implications for the biogeochemical control of new production [J]. *Limnology and Oceanography*, 1991,36:1756-1771.
- [39] Parparova R, Yacobi Y Z. Chelatable iron in the sub-tropical Lake Kinneret: its seasonal variation and impact on carbon uptake by natural algal assemblages and monoalgal cultures [J]. *Aquatic science*, 1998,60:157-168.
- [40] Jasser I. The influence of macrophytes on a phytoplankton community in experimental condition [J]. *Hydrobiologia*, 1995, 306:21-32.

作者简介: 许 海(1978-),男,安徽蚌埠人,博士,主要从事湖泊富营养化和蓝藻水华发生机制及湖泊水文水动力过程的生态效应方面的研究,发表论文 16 篇。

揭示气候与人类健康关系

联合国世界卫生组织(WHO)和世界气象组织(WMO)日前联合绘制了一份揭示气候与人类健康关系的地图集,以帮助人们根据天气情况对可能暴发的疾病进行早期预警.地图集显示,当沙尘暴袭击某地时,当地的脑膜炎感染人数会随之上升,而连绵的阴雨则会助长登革热的暴发.

虽然有关气候与健康关系的研究并不少见,但用图像的方式呈现这些概念和数据将有助于提高各国政府对全球变暖和气候变化的应对能力.

根据地图集,自 2005 年以来,每当撒哈拉沙漠以南的非洲地区迎来旱季时,感染脑膜炎的人数就会上升.脑膜炎是一种由细菌和微生物传播的疾病,近 10 年来已经夺走了当地约 2.5 万人的生命.而从 1998 年开始,在热带和亚热带地区的暴雨季节中,登革热的感染率明显增加,平均每年有 1.5 万人因此丧生.

地图集预测,到 2050 年,密集的热浪袭击地球的几率将上升 4~10 倍,最易受此影响的人群是老年人和农村人口,尤其是在非洲、中东和亚洲这些人口迅速增长的地区.

世界卫生组织总干事陈冯富珍表示:“包括疟疾、登革热和脑膜炎在内的疾病都属于气候敏感型疾病,诸如降雨、湿度和气温等气候因素都可能通过直接影响寄生虫或蚊子等寄生虫的携带者,而影响疾病的传播和暴发.

陈冯富珍说,这本地图集提供的数据可以帮助人们更好地管理动物的栖息地和生态系统,从而实现改善人类健康的目标,因为目前 80% 的人类传染性疾病来自动物.

摘自《中国环境报》

2012-11-26