

太湖浮游植物与营养盐相互关系

周 涛, 李正魁*

(南京大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210046)

摘要:为研究太湖浮游植物与营养盐的相互关系,于2010年3月至2011年2月对太湖竺山湾和贡湖湾这两个具有不同植物群落特征的湖区进行了监测分析。结果表明,贡湖湾浮游植物含量四季递减,竺山湾则在夏季达到最大值,具有在夏季暴发严重水华的特征。这两个湖区的营养盐具有不同的季节变化特征:竺山湾总磷(TP)以及颗粒磷(PP)在夏季达到最大值,贡湖湾则在冬季达到最大值,竺山湾的磷含量高于贡湖湾,两个湖区PP在TP中均占有很大比例且溶解性有机磷(DOP)均在冬季达到最大值,夏季达到最小值;竺山湾氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量远高于贡湖湾,硝氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)的四季变化幅度和贡湖湾相差不大,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 却有明显差异,并且在竺山湾,相对于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 能被浮游植物利用至更低浓度。两个湖区磷和浮游植物变化的对比表明,在藻型区浮游植物的生长与底泥磷的释放存在相互促进的机制,并且浮游植物生长消亡过程中存在磷的内循环机制,这两种机制使得水华得以维持甚至加重,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与微囊藻的变化表明,太湖微囊藻优先及主要利用的很可能是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。综合分析认为,治理太湖水华需要同时控制氮磷输入并考虑降低太湖磷含量。

关键词:太湖;浮游植物;微囊藻;氮;磷

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)02-0327-06 doi:10.11654/jaes.2013.02.017

The Relationship Between Phytoplankton and Nutrients of Lake Taihu, China

ZHOU Tao, LI Zheng-kui*

(State Key Laboratory of Pollutant Control and Resources Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

Abstract: In order to study the relationship between phytoplankton and nutrients in lake Taihu, field monitoring and analysis were conducted in Zhushan Bay and Gonghu Bay, two regions with different phytocommunities, from March 2010 to February 2011. The phytoplankton number of Gonghu bay showed seasonal decrease, while that of Zhushan Bay where summer serious bloom occurred reached the maximum in summer. Both the total phosphorus (TP) and particulate phosphorus (PP) concentration reached the maximum in summer in Zhushan Bay while winter in Gonghu Bay. In general, the concentrations of phosphorus in Zhushan Bay were higher than those in Gonghu Bay. In the two bays, a high proportion of PP in TP both occurred and dissolved organic phosphorus (DOP) reached the maximum in winter while minimum in summer. Ammonium ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) concentration in Zhushan Bay was much higher than that in Gonghu Bay. The seasonal variation of nitrate ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) concentration between the two Bays didn't show large difference while it was not this case in $\text{NH}_4^+\text{-N}$. In Zhushan Bay, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ could be utilized by phytoplankton to lower concentration than $\text{NO}_3^-\text{-N}$. The variations of phosphorus concentration and phytoplankton number indicated that in algae-dominated regions, mutual promotion existed between the release of sediment phosphorus to overlying water and the increase of phytoplankton number, maintaining even aggravating the bloom. The variations of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration and microcystis number indicated that the microcystis of lake Taihu probably utilized $\text{NH}_4^+\text{-N}$ preferentially and mainly. Based on these results, a dual management of N and P inputs are needed to control the bloom of lake Taihu and phosphorus concentration reduction also should be taken in consideration.

Keywords: Lake Taihu; phytoplankton; microcystis; nitrogen; phosphorus

收稿日期:2012-09-10

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2010056);江苏省环保厅项目(201108);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-006, 2013ZX07101014)

作者简介:周 涛(1988—),男,江苏苏州人,在读硕士,主要研究方向为湖泊富营养化。E-mail: ztdly166@163.com

* 通信作者:李正魁 E-mail: zhkuili@nju.edu.cn

太湖是我国第三大淡水湖泊,近三十年来,随着大量含高浓度营养盐的废水排入到水体中,太湖呈现高度的富营养化,伴随而来的是严重蓝藻水华的暴发,2007年的蓝藻水华引发无锡市民饮用水危机的事件更是引起了全世界的关注。

太湖的蓝藻水华主要集中在中部以及西北部湖区,而东部湖区的植物则以大型植物为主^[1],所以在太湖不同的湖区具有不同的植物群落特征。以往对太湖浮游植物与营养盐关系的研究主要集中在蓝藻水华严重的湖区^[2-4],而缺少不同湖区的对比研究。本文拟对比竺山湾与贡湖湾这两个具有不同植物群落特征的湖区的浮游植物以及营养盐的季节变化,旨在阐明太湖浮游植物与营养盐的增消以及相互作用关系。

1 材料与方法

1.1 水样的采集与处理

如图1所示,在太湖的竺山湾和贡湖湾各布设一个采样点位,分别是Z(31°27'32"N,120°01'41"E)和G(31°24'14"N,120°20'08"E),自2010年3月至2011年2月每个月末进行一次采样,采集水面以下0.2 m和水底以上0.2 m处的表底等体积混合水样,采集后立即运回实验室进行各项指标的测定。

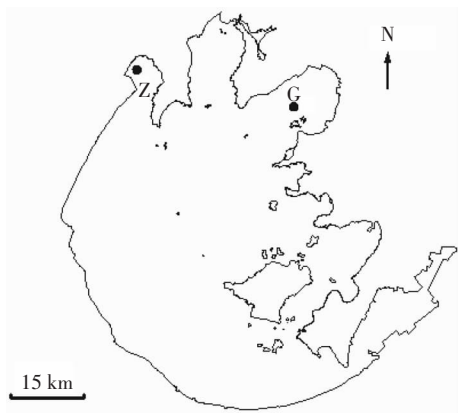


图1 采样点位置

Figure 1 Sampling sites

1.2 浮游植物的测定

取1 L水样,加入10 mL鲁哥试剂固定,48 h后利用显微镜在放大400倍的视野下进行浮游植物种类鉴定及计数。计数采用计数框行格法,浮游植物种类鉴定参照《淡水微型生物图谱》^[5]以及《中国淡水藻类:系统、分类及生态》^[6]。

1.3 营养盐的测定

原水样用于总磷(TP)的测定,水样经孔径为

0.45 μm 的醋酸纤维滤膜过滤后,测定以下指标:硝氮(NO_3^--N)、氨氮(NH_4^+-N)、溶解性磷(DP)、可溶性活性磷(SRP)。TP以及溶解性磷(DP)采用过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法测定, NO_3^--N 采用紫外分光光度法测定, NH_4^+-N 采用纳氏试剂分光光度法测定,SRP采用钼蓝分光光度法测定^[7]。颗粒磷(PP)=TP-DP,溶解性有机磷(DOP)=DP-SRP。

2 结果与分析

2.1 浮游植物和微囊藻的季节变化

从图2可以看到,贡湖湾浮游植物含量四季递减,最大值出现在春季,为46 $\text{cells} \cdot \mu\text{L}^{-1}$,年平均值为30 $\text{cells} \cdot \mu\text{L}^{-1}$,微囊藻也基本呈现这样一种变化,年平均值为20 $\text{cells} \cdot \mu\text{L}^{-1}$;而竺山湾浮游植物和微囊藻则在夏季达到最大值,分别为127 $\text{cells} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ 与110 $\text{cells} \cdot \mu\text{L}^{-1}$,具有在夏季发生严重水华的特征,浮游植物全年平均值为61 $\text{cells} \cdot \mu\text{L}^{-1}$,为贡湖湾的两倍。全年,特别是在夏季,两个湖区的浮游植物都以微囊藻为主,分别占浮游植物总量的82%(贡湖湾)与87%(竺山湾)。四季浮游植物和微囊藻含量贡湖湾基本均小于竺山湾,夏季更加明显。

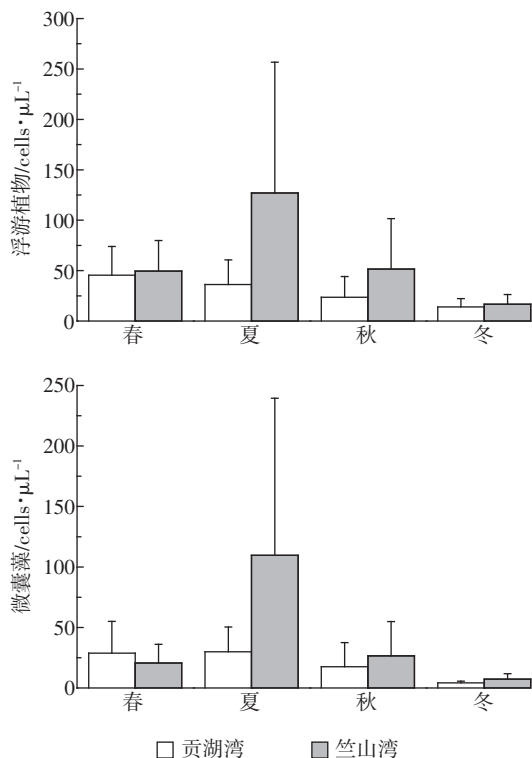


图2 浮游植物和微囊藻季节变化

Figure 2 Seasonal variation of phytoplankton and microcystis number

2.2 磷的季节变化

从图3可以看出,贡湖湾TP最大值出现在冬季,为 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,全年平均为 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而竺山湾TP最大值出现在夏季,为 $0.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,全年平均为 $0.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,远大于贡湖湾;两个湖区PP的变化特征与TP类似,年平均值分别为 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (贡湖湾)与 $0.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (竺山湾),DP含量均低于PP,SRP的含量最低,竺山湾的DP远大于贡湖湾。除了在春季,贡湖湾的PP含量略高于竺山湾之外,全年各种类型的磷,竺山湾均远高于贡湖湾,竺山湾的TP、PP和SRP均在夏季微囊藻暴发时达到最大值,并且,PP在TP中占了很大的比重,贡湖湾全年PP都占到TP的60%以上,竺山湾除了在春季略低(21%),其余季节都在60%以上,夏季更是达到79%。两个湖区DOP均在冬季达到最大值,夏季达到最小值,在冬季,贡湖湾、竺山湾的DOP在DP中所占比例分别达到77%、87%,而在夏季仅为12%、30%。

在冬季达到最大值,夏季达到最小值,在冬季,贡湖湾、竺山湾的DOP在DP中所占比例分别达到77%、87%,而在夏季仅为12%、30%。

2.3 氮的季节变化

从图4可以看到,贡湖湾 NH_4^+-N 春夏秋三季基本维持不变,冬季有所上升,全年平均值为 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而竺山湾 NH_4^+-N 远高于贡湖湾,全年平均值为 $1.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,为贡湖湾的5倍。竺山湾 NH_4^+-N 变化呈现出这样一种特征:在夏秋季浮游植物生物量较高时浓度较低,而在春冬季浮游植物生物量较低时浓度较高,并且两个湖区 NO_3^--N 的变化也呈现这样的特征,两个湖区 NO_3^--N 含量均高于 NH_4^+-N ,年平均值分别为 $1.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (贡湖湾)与 $2.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (竺山湾)。若将夏秋蓝藻暴发季节看作一个整体,从春季至夏秋季贡

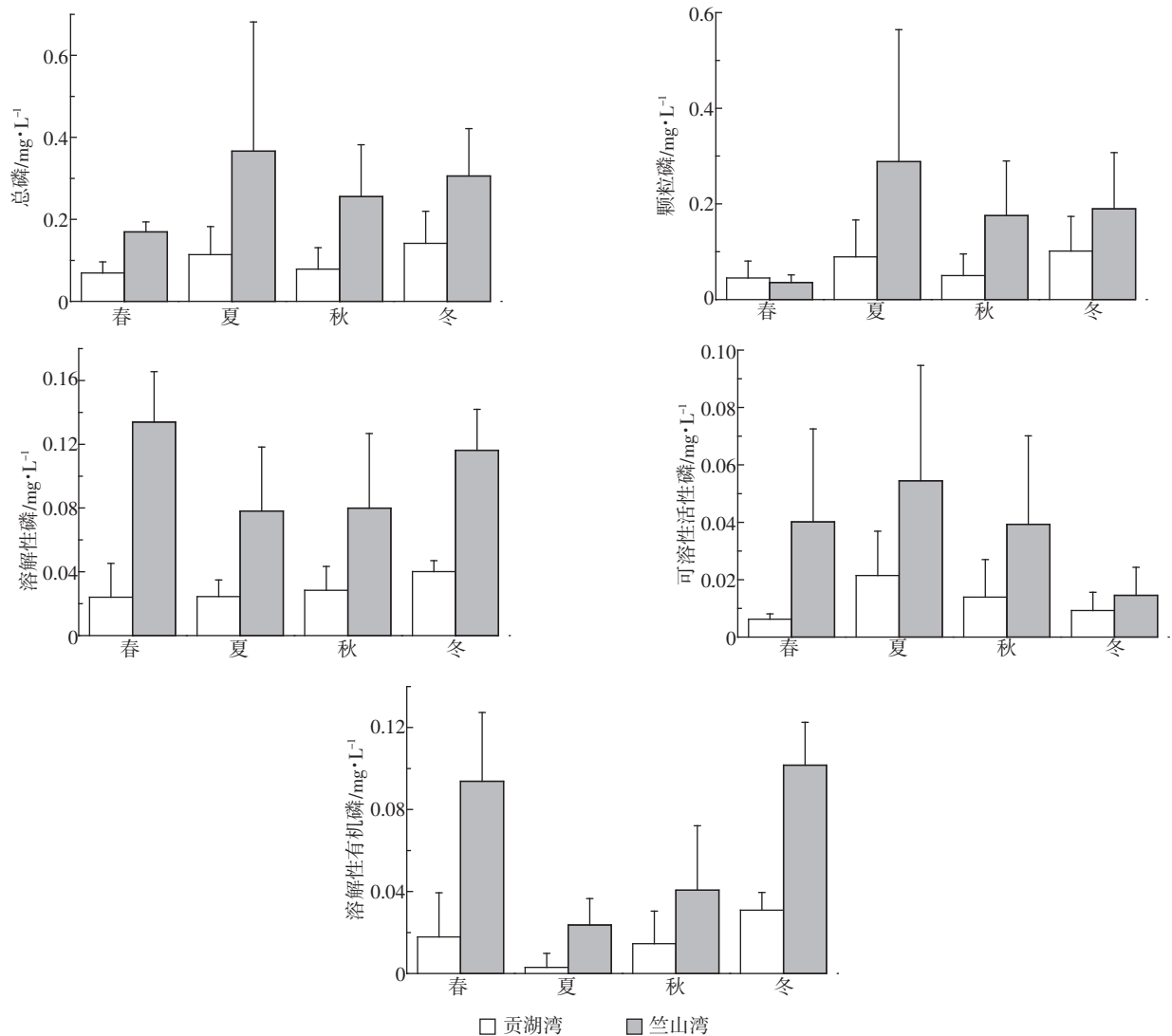


图3 磷季节变化图

Figure 3 Seasonal variation of phosphorus concentration

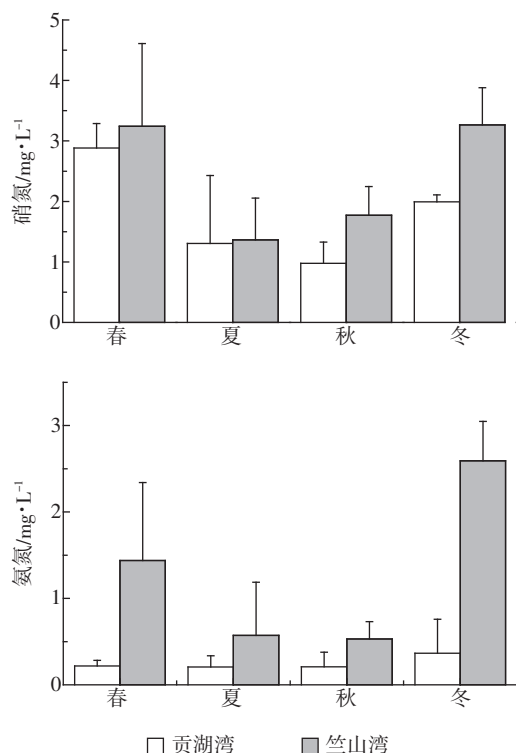


图4 氮季节变化图

Figure 4 Seasonal variation of nitrogen concentration

湖湾 NO_3^- -N 下降了 60%、 NH_4^+ -N 下降了 5%，竺山湾则分别是 52%、62%；从夏秋季至冬季贡湖湾 NO_3^- -N 上升了 75%、 NH_4^+ -N 上升了 76%，竺山湾则分别是 108%、370%。

3 讨论

贡湖湾和竺山湾浮游植物含量差异明显，竺山湾浮游植物含量远大于贡湖湾且具有在夏季暴发严重水华的特征(图2)，这是由于太湖西北部是以浮游植物为主的藻型湖区，而东部基本上是以大型沉水植物为主的草型湖区^[1]。因此，贡湖湾、竺山湾代表的是两个具有不同植物群落特征的湖区，虽然贡湖湾被认为是藻-草过渡区，但藻主要集中在贡湖湾的北部，南部以大型沉水植物为主^[8]，从采样点位置(图1)可以看出，本研究所布采样点代表的是草型湖区，所以本文实质上是草型湖区和藻型湖区的对比。

3.1 太湖浮游植物与磷的关系

相关性分析表明，微囊藻含量和 TP($r=0.617$, $P<0.001$)以及 PP($r=0.657$, $P<0.001$)具有很好的正相关性。先前的研究表明，微囊藻具有强大的储磷能力^[9]，所以水体中的 DP(溶解性磷)可被微囊藻快速吸收转化成 PP，一部分用于生长，更大的一部分储存起来，用于

微囊藻几代的生长，因而可能导致两个湖区的 TP 均主要由 PP 构成。同时，微囊藻的这种行为降低了水中的磷浓度，从而促进底泥中内源性磷的释放^[10]。

微囊藻被证明是具有浮力调控能力的一种浮游植物^[11]，这种能力可使其浮于水面，比沉水植物更好地接受光照，光合作用较强，使水体 pH 维持在较高的水平，因而能更好地促进底泥中内源性磷的释放^[10]。此外，沉水植物主要靠根系直接吸收底泥中的磷，而浮游植物与水充分接触且具有较大的比表面积，相对于沉水植物能更快吸收水体中的磷，增大了底泥中内源性磷的释放频率。由此可见，当水生态系统的植物群落特征不同时，底泥中磷释放的特点也会不同。作为藻型区的竺山湾在夏季蓝藻暴发时期由于水体浮游植物含量很高，底泥磷的释放总量应该比草型区的贡湖湾更多，促进浮游植物的生长，而在秋冬寒冷时期消亡的浮游植物所携带的磷又会通过细胞裂解^[12]、矿化^[13]等途径重新回到水体中，这可能是竺山湾磷含量高于贡湖湾的原因之一。从 DOP 的变化也可以看出，冬季竺山湾的 DOP 含量远高于贡湖湾(图3)，说明藻裂解释放的 DOP 量竺山湾远高于贡湖湾。另外，贡湖湾底泥中的磷含量较竺山湾低^[14]，不容易与水体形成较大的磷浓度差，释放推动力较小，更加减少了底泥中磷的释放量。

通过 DOP 的变化可以知道，冬季浮游植物的死亡释放了较多有机磷，这部分有机磷有些可能被矿化^[14]转变成无机磷，有些可能仍旧以有机磷的形式存在。由于蓝藻能够通过代谢产生碱性磷酸酶而利用有机磷^[15]，这些磷为来年藻类的萌发提供了直接营养条件，到夏季水华暴发时在浮游植物的吸收作用下降至最低，秋冬季节蓝藻逐渐消亡，DOP 又开始回升，因而这部分磷在这浮游植物生长消亡的过程中形成了一种内循环，使水华得以持续。四季 DOP 在 DP 中所占比例不同可能是由于在冬季浮游植物大量死亡，而矿化细菌又活力低下，不能高效地将有机磷转化成无机磷，因此 DOP 在 DP 中的比例很高；在夏季情况正好相反，浮游植物分泌大量的碱性磷酸酶将有机磷转化成无机磷，细菌的矿化作用也较强，因而使得 DOP 在 DP 中的比例达到最低点。

通过两个湖区的对比可以知道，在浮游植物生物量较高的湖区，底泥中的内源性磷能更快更多地释放到水体中促进浮游植物的生长，而浮游植物生物量增加又能促进内源性磷的释放，即这是一个相互促进的过程，可能正因为如此，太湖水华严重的湖区才呈现

出在春冬季节浮游植物生物量低时磷限制、而夏秋季节浮游植物生物量较高时趋向于氮限制的特征^[16]。此外,浮游植物生长消亡过程中磷的内循环使得水华得以持续,所以一旦发生水华,这种“相互促进作用”以及“内循环”就会使得水华得以维持甚至加重,而未发生水华的湖区如果没有大量外来营养盐的输入只能倾向于维持现状。

3.2 太湖浮游植物与氮的关系

在藻型湖区,由于夏季浮游植物生物量很高(图2),夜晚浮游植物呼吸作用会消耗大量氧气,使水体溶解氧大幅降低,这将促进底泥中 NH_4^+-N 的释放^[17];而在秋冬寒冷时期,大量浮游植物消亡成为可被氨化细菌利用的有机氮,通过氨化作用,这些有机氮就转化成大量 NH_4^+-N 。这可能是竺山湾 NH_4^+-N 含量高于贡湖湾的原因之一。

监测结果显示,从春季至夏秋蓝藻暴发季节,贡湖湾 NO_3^--N 下降了60%, NH_4^+-N 下降了5%,竺山湾则分别是52%、62%;从夏秋季至冬季贡湖湾 NO_3^--N 上升了75%, NH_4^+-N 上升了76%,竺山湾则分别是108%、370%。两个湖区相比可以发现, NO_3^--N 的升降幅度相差不大,而 NH_4^+-N 却有明显差别:竺山湾 NH_4^+-N 在蓝藻暴发以后有明显降低,在冬季蓝藻消亡以后又有明显上升,并且 NH_4^+-N 的升降百分比要高于 NO_3^--N ,这说明太湖浮游植物优先利用的氮种类很可能是 NH_4^+-N 。前人的研究也证实浮游植物更喜欢利用还原态的氮源,因为利用这些氮源消耗的能量更少^[18-20]。此外, NH_4^+-N 在藻型湖区具有很高的再生速率^[20],太湖每年的 NH_4^+-N 再生量是外源性N输入量的400%^[16],夏秋季节蓝藻暴发时 NH_4^+-N 的吸收速率大于或接近再生速率^[20],而在春冬季节浮游植物生物量较低的情况下,再生速率就可能大于吸收速率,这可能是使得竺山湾的 NH_4^+-N 有更大幅度升降的原因。当然,就下降的幅度来讲,从春季至夏秋季,竺山湾 NO_3^--N ($1.67\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的降低量要高于 NH_4^+-N ($0.89\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。相关性分析也表明相对于 NH_4^+-N ($r=-0.030$), NO_3^--N ($r=-0.200$)浓度与微囊藻含量呈现出更好的负相关性,有些研究也发现太湖 NO_3^--N 和叶绿素a呈显著负相关,而与 NH_4^+-N 没有明显的相关性^[2],但这并不能说明太湖微囊藻主要利用的氮种类是 NO_3^--N ,因为:其一、竺山湾夏季 NO_3^--N 只降低至 $1.36\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在秋季没有继续降低反而有所回升;竺山湾春季 NH_4^+-N 只有 $1.44\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与夏季 NO_3^--N 浓度相当,却能继续被微囊藻利用降至夏季的 0.57

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在秋季还比夏季略有降低,而且在冬季浮游植物含量降低之后,竺山湾 NH_4^+-N 的回升量远大于 NO_3^--N 。其二、在太湖水华严重的湖区, NH_4^+-N 具有很高的再生速率^[16],这些再生的 NH_4^+-N 能继续被浮游植物利用^[20],而且通过河道^[11]以及降水^[16]输入太湖的 NH_4^+-N 量要高于 NO_3^--N 。可能正是这种内源性和外源性的补充使得 NH_4^+-N 和微囊藻的负相关性不如 NO_3^--N ,所以降低的 $0.89\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 远不能代表微囊藻的 NH_4^+-N 吸收量,并且杨柳等^[22]的研究证实在太湖藻型湖区, NH_4^+-N 的吸收速率远高于 NO_3^--N ,是其十几至几十倍。虽然太湖中的主要氮种类是 NO_3^--N ^[4],但微囊藻优先及主要利用的很可能是 NH_4^+-N ,鉴于此,在氮方面更应该注意控制太湖 NH_4^+-N 的输入。

3.3 太湖营养控制策略

Xu等^[4]研究认为,治理太湖蓝藻水华需要同时控制氮磷;太湖微囊藻是非固氮藻,Conley等^[23]认为对于以非固氮型藻类为优势藻种的水华,需要同时控制氮磷的输入。从以上分析可以知道,太湖藻型区存在的浮游植物的生长与底泥磷的释放的相互促进机制以及浮游植物生长消亡过程中存在的磷的内循环机制使得太湖水华得以持续,而在氮方面,太湖微囊藻优先及主要利用的很可能是 NH_4^+-N ,在氮磷的共同作用下,水华持续发生。综合本文以及他人的研究,我们认为,治理太湖水华需要同时控制氮磷的输入。此外,由于磷存在内循环并与磷释放与浮游植物生长存在相互促进机制,不仅要控制磷输入,而且要考虑降低太湖的磷含量。

4 结论

(1)在太湖藻型区,浮游植物的生长与底泥磷的释放存在相互促进的机制,并且浮游植物生长消亡过程中存在磷的内循环机制,这两种机制使得水华得以维持甚至加重。

(2)太湖微囊藻优先及主要利用的氮种类很可能是 NH_4^+-N 。

(3)治理太湖水华需要同时控制氮磷的输入,并且应该考虑降低太湖磷含量。

参考文献:

- [1] Qin B Q, Xu P Z, Wu Q L, et al. Environmental issues of Lake Taihu, China[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 581: 3-14.
- [2] Chen Y W, Fan C X, Teubner K, et al. Changes of nutrients and phytoplankton chlorophyll-a in a large shallowlake, Taihu, China: An 8-year investigation[J]. *Hydrobiologia*, 2003, 506-509: 273-279.

- [3] Liu X, Lu X H, Chen Y W. The effects of temperature and nutrient ratios on *Microcystis* blooms in Lake Taihu, China: An 11-year investigation [J]. *Harmful Algae*, 2011, 10:337–343.
- [4] 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(1):420–432.
- [5] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物图谱[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- ZHOU Feng-xia, CHEN Jian-hong. Freshwater microbial atlas [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [6] 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.
- HU Hong-jun, WEI Yin-xin. Freshwater algae in China: System, classification and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [7] 国家环境保护总局. 水和废水的监测分析方法[M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration of China. Monitoring and analysis methods of water and wastewater[M]. 4th edition. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2002.
- [8] Bai X L, Ding S M, Fan C X, et al. Organic phosphorus species in surface sediments of a large, shallow, eutrophic lake, Lake Taihu, China[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157:2507–2513.
- [9] Sommer U. Comparison between steady state and nonsteady state competition: experiments with natural phytoplankton[J]. *Limnology and Oceanography*, 1985, 30:335–346.
- [10] Bostrom B, Andersen J M, Fleischer S, et al. Exchange of phosphorus across the sediment–water interface[J]. *Hydrobiologia*, 1988, 170:229–244.
- [11] Serizawa H, Amemiya T, Rossberg A G, et al. Computer simulations of seasonal outbreak and diurnal vertical migration of cyanobacteria[J]. *Limnology*, 2008, 9:185–194.
- [12] Gobler C J, Hutchin D A, Fisher N S, et al. Release and bioavailability of C, N, P, Se, and Fe following viral lysis of a marine chrysophyte[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(7):1492–1504.
- [13] Reitzel K, Ahlgren J, Brabandere H D, et al. Degradation rates of organic phosphorus in lake sediment[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 82:15–28.
- [14] Trolle D, Zhu G W, David M, et al. The influence of water quality and sediment geochemistry on the horizontal and vertical distribution of phosphorus and nitrogen in sediments of a large, shallow lake[J]. *Hydrobiologia*, 2009, 627:31–44.
- [15] Shi X L, Qian S Q, Kong F X, et al. Differences in growth and alkaline phosphatase activity between *Microcystis aeruginosa* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to media with different organic phosphorus[J]. *Journal of Limnology*, 2011, 70(1):21–25.
- [16] Paerl H W, Xu H, McCarthy M J, et al. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): The need for a dual nutrient (N & P) management strategy[J]. *Water Research*, 2011, 45:1973–1983.
- [17] 朱梦圆, 朱广伟, 王永平. 太湖蓝藻水华衰亡对沉积物氮、磷释放的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(2):409–415.
- ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, WANG Yong-ping. Influence of scum of algal bloom on the release of N and P from sediments of Lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(2):409–415.
- [18] Varela D E, Harrison P J. Seasonal variability in nitrogenous nutrition of phytoplankton assemblages in the northeastern subarctic Pacific Ocean[J]. *Deep-Sea Research II*, 1999, 46:2505–2538.
- [19] Flores E, Herrero A. Nitrogen assimilation and nitrogen control in cyanobacteria[J]. *Biochemical Society Transactions*, 2005, 33(1):164–167.
- [20] McCarthy M J, Lavrentyev P J, Yang L Y, et al. Nitrogen dynamics and microbial food web structure during a summer cyanobacterial bloom in a subtropical, shallow, well-mixed, eutrophic lake (Lake Taihu, China) [J]. *Hydrobiologia*, 2007, 581:195–207.
- [21] Bronk D A, Glibert P M, Malone T C, et al. Inorganic and organic nitrogen cycling in Chesapeake Bay: Autotrophic versus heterotrophic processes and relationships to carbon flux[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1998, 15:177–189.
- [22] 杨柳, 章铭, 刘正文. 太湖春季浮游植物群落对不同形态氮的吸收[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4):605–611.
- YANG Liu, ZHANG Ming, LIU Zheng-wen. Uptake of various forms of nitrogen by phytoplankton community in spring in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(4):605–611.
- [23] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus[J]. *Science*, 2009, 323:1014–1015.