巢湖市水源地铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 藻团粒径时空分布规律*

范帆¹, 李文朝², 柯凡²

(1: 苏州科技学院, 苏州 215009)

(2: 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: 于 2011 年 4—8 月按月对巢湖市水源保护湖区不同水深及不同区位的铜绿微囊藻藻团粒径进行抽样调查, 利用统计分析方法, 归纳了巢湖水源保护湖区铜绿微囊藻藻团粒径的时空分布规律. 湖区铜绿微囊藻藻团出现在 4 月中旬至 5 月中旬之间, S1 与 S2 点位表层的藻团粒径与中、底层的均存在显著差异. 粒径小于 200 μm 的藻团在各水深的分布都比较均匀, 没有明显的趋向性; 粒径在 200 ~ 800 μm 范围内的藻团更易集中在湖水表层; 粒径超过 800 μm 的藻团更易集中在湖水底层. 各月份外湖区 S2 点位藻团粒径水平平均高于内湖湾 S1 点位. 由于易受短时气象条件的影响, 藻团粒径按月时间尺度变化的规律性不强. 藻团形状在整个空间分布上没有显著差异性, 但随着季节变化, 逐渐由狭长形向规则形变化. 藻团粒径的分布范围表明, 大型仿生式蓝藻清除设备的过滤筛网对水源湖区铜绿微囊藻藻团的理论过滤效率为 99.81%.

关键词: 铜绿微囊藻; 藻团粒径; 形状因子; 分布; 巢湖

Spatio-temporal distribution of *Microcystis aeruginosa* colony diameters in the water source region of Chaohu City

FAN Fan¹, LI Wenchao² & KE Fan²

(1: Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, P. R. China)

(2: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

Abstract: An investigation of *Microcystis aeruginosa* colony diameters in different water depths and locations was carried out monthly in the protection zone of water source region of Chaohu City from April to August, 2011. The spatio-temporal distribution characteristics of the colony diameter were summarized using statistical analysis. The *M. aeruginosa* colony appeared between mid-April and mid-May, there was significant difference between the surface layer and lower-middle layers on colony diameters at both sampling sites of S1 and S2. Colonies with diameters less than 200 μm distributed vertically homogeneously in the water column, colonies with diameters between 200 μm and 800 μm tended to gather in the water surface, and colonies with diameters greater than 800 μm were apt to aggregate in the bottom layer. The level of colony diameter of outer sampling site (S2) was higher than that of inner sampling site (S1) in each month. Because the colony diameters were easily affected by the short-term meteorological condition, the variance of colony diameters didn't show conspicuously regular monthly. There was no significant difference in the spatial distribution of colony shape, while it shifted gradually from elongated to regular with seasons changing. The distribution range of colony diameters indicated that, in theory, 99.81% of the total *M. aeruginosa* colonies can be filtered by the large bionic equipment for clearing cyanobacteria.

Keywords: *Microcystis aeruginosa*; colony diameter; shape factor; distribution; Lake Chaohu

巢湖位于安徽省中部, 是我国第五大淡水湖, 湖泊面积约 780 km^2 , 平均水深 4.5 m. 巢湖不仅是安徽省重要的渔业基地和航运通道, 也是巢湖市及周边地区重要的饮用水水源地. 自 1970s 以来, 巢湖富营养化程

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目 (2008ZX07103-005-03) 资助. 2012-05-24 收稿; 2012-10-19 收修稿. 范帆, 男, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: fanfanszen@163.com.

度日益加剧,夏、秋季蓝藻水华肆虐,严重影响了当地工业生产用水以及城市居民供水^[1].

大部分可以形成水华的蓝藻种群易在水体中聚集成藻团,以藻团形式存在的蓝藻占据了整个种群的大部分比例.清除蓝藻藻团可以有效减少水华蓝藻的总生物量,从而降低蓝藻水华的危害程度甚至预防水华的暴发.根据蓝藻上述特性成功研制的大型仿生式水面蓝藻清除设备,能汲取 5 cm 富含蓝藻水层,通过高密度超低孔径筛网对湖水中蓝藻进行藻水分离,对肉眼可见蓝藻分离率达 100%,处理流量可达 1000 m³/h.铜绿微囊藻是巢湖水华蓝藻主要优势种群之一,由于其在水体中分布范围广、持续周期长^[2]以及产藻毒素的特性^[3],危害性远高于其他藻类.因此,本文着重考察巢湖水源地铜绿微囊藻藻团粒径季节性发育及分布状况,为设备对铜绿微囊藻藻团的过滤效率研究提供科学的理论依据.

1 材料与方法

1.1 湖区简介

巢湖市水源保护湖区位于巢湖东北角(30°34'31"~31°36'45"N,117°47'8"~117°50'54"E),西至龟山,东至裕溪河口.整个湖区是一个西宽东窄的湖湾,面积大约 10 km²,平均水深 2.7 m,西部湖界横断面长约 2.5 km.湖区西部水面开阔,与外湖湖水交换频繁,湖东呈“Y”型岔口,岔口北段为封闭水湾,内有一个小型码头,供渔政船停靠,水深较大,最深处达 5 m 左右,南段为裕溪河口.建于河口上的巢湖闸是调节巢湖水量的关键性水利工程,闸门未开时,水源湖区呈半封闭状态.水源地南岸多丘陵,北岸地势较为平坦.巢湖水源保护湖区是整个巢湖目前唯一的水源地,湖区内设有巢湖市第一和第二自来水管厂的取水口.该水源地不仅为巢湖市居民提供饮用水水源,同时也为周边企业生产用水以及居民生活用水提供水源,因此水源地水质的优劣对巢湖市的经济与民生有着重大影响.

1.2 采样点设置

图1 巢湖市水源保护湖区地理区位及采样点位置

Fig. 1 Location of water protection zone of Chaohu City and sampling sites

在水源湖区设置 2 个采样点(图 1),采样点 S1(31°35'31"N,117°51'7"E)位于内湖湾内,平均水深约为 4.5 m.采样点 S2(31°35'59"N,117°45'36"E)位于湖区西部大湖面上,平均水深约为 3.4 m.由于南岸丘陵、湖岸大坝以及河口大桥等建筑物的阻隔,内湖湾受风浪的扰动较小,特别是南岸丘陵对西至西南风风力有明显的削弱作用,相比开阔湖面,前者受到的水力扰动明显低于后者.

1.3 水样采集与处理

2011 年 4—8 月,每月中旬分别在 S1、S2 点位采集表层(S1:水下 0.5 m,S2:水下 0.5 m)、中层(S1:水下 2.0 m,S2:水下 1.5 m)和底层(S1:水下 4.0 m,S2:水下 3.0 m)水样.

用有机玻璃采水器(容量 2.5 L)在每个深度取样多次,倒入大桶(容量 10 L)中混合搅匀,再用采样瓶采集 1 L 水样,目的是尽量减小因采样不均导致的系统误差.在水样采集后现场加入 15 ml 鲁哥试剂固定,用作后续的藻团计数以及粒径测量.用 Kestrel 4500 型便携式气象仪测量采样时的瞬时风速,用采水器自带的温度计测量水温.

1.4 样品分析与数据采集

经鲁哥试剂固定后的 1 L 水样在实验室静置 24 h 后浓缩至 30 ml,转入定量瓶待测.用于藻团计数与粒径测量的仪器为 Nikon Ts100 型光学倒置显微镜,显微镜摄像头为 DS-Fi1 型.

首先进行铜绿微囊藻的鉴别和藻团计数,藻种的鉴别参照文献[4-5],藻团的计数参照文献[6].

通过该显微镜自带测量软件(NIS-Elements D,图 2)在一定放大倍数(40~200 倍)下对各样品中铜绿微

囊藻藻团粒径进行测量. 测量工作开始之前, 先用测微台尺定标各个放大倍数下像素对应的实际长度. 每次测量样品时, 将定量瓶充分摇匀, 从中央部分吸取 0.1 ml 样品于 0.1 ml 计数框内, 随机测量出现在视野中的藻团 100 个. 在手动测量每个藻团的二维投影面积(S)和拟合椭圆的长短轴(A 轴、 B 轴)后, 软件会自动生成等圆直径(d)和长短轴比(A 轴/ B 轴), 在后文中前者简称为粒径, 后者的倒数简称为形状因子.

形状因子(shape factor)是图像分析以及显微镜检中用来数值化描述颗粒形状的无量纲量, 常用来表示微粒形状与理想形状(如圆形、球形、等多边形)之间的差异, 与颗粒大小无关^[7]. 椭圆轴比(axial ratio of an ellipse)是常用的形状因子之一, 被大多数图像分析系统所采用, 其值为拟合椭圆的短长轴比, 比值范围为 0~1, 比值越接近 0 颗粒越狭长, 越接近 1 颗粒越规则、越接近理想形状. 计算该量时, 对轴的定义有两种: 一为颗粒二维投影轮廓的最长轴与最短轴, 两轴不一定垂直; 二为与颗粒二维投影面积相差最小的理想椭圆的长短轴, 两轴相互垂直^[8], 本实验中对藻团形状因子的测量采用的是后者.

采样期间各月份的每日气象数据资料由巢湖气象监测台站(58326)提供. 由于 5 月份内湖湾进行航道疏浚, 考虑到扰动底泥及水层对实验结果的影响, 未采集 S1 的水样. 同时因为在 4 月份水样中没有观测到铜绿微囊藻藻团, 因此实际只测量了 5 月份 S2 点位, 6、7、8 月份 S1 和 S2 点位的藻团参数.

图 2 显微镜测量软件工作界面

Fig. 2 Working interface of the measurement software

1.5 实验数据分析

用 SPSS 17.0 统计分析软件分别对各月份 S1、S2 点位 3 个水深的藻团粒径和形状因子进行单因素方差分析(One-way ANOVA, $\alpha=0.05$), 比较水源湖区不同水深藻团粒径和形状因子的分布差异. 分别对各月份 S1、S2 点位的藻团粒径总样本及形状因子总样本(将 3 个不同水深的样本混合)进行独立样本 t 检验, 比较水源湖区各月份下内湖湾与外湖区藻团粒径和形状因子的分布差异.

2 结果与分析

2.1 铜绿微囊藻藻团粒径的统计描述

铜绿微囊藻藻团之间的大小差异很大, 小到只有若干个单藻构成, 大到肉眼可见. 粒径变化范围为 20.54~1620.28 μm , 大部分粒径分布在 30~300 μm 范围内, 占样本总数的 96.25%, 粒径小于 30 μm 的藻团占样本总数的 0.19%, 粒径大于 400 μm 的藻团占样本总数的 3.56%. 由图 3、4 可以看出, S1、S2 各月份下不同水深的藻团粒径样本分布均呈正偏态. 对各水深粒径样本分布正态性进行单样本 K-S 检验的结果显示 P 值均小于 0.05, 即粒径样本不服从正态分布.

2.2 不同水深藻团粒径分布的统计分析

对 7 组不同水深粒径样本进行单因素方差分析的结果显示, 6 月份 S1 ($df=2297, P<0.05$)、8 月份 S1 ($df=2297, P<0.01$)、5 月份 S2 ($df=2305, P<0.01$) 和 6 月份 S2 ($df=2297, P<0.01$) 不同水深的藻团粒径

图3 6—8月 S1 点位不同水深的铜绿微囊藻藻团粒径分布

Fig.3 Distribution of *M. aeruginosa* colony diameter in different depths at S1 site from June to August

图4 5—8月 S2 点位不同水深的铜绿微囊藻藻团粒径分布

Fig.4 Distribution of *M. aeruginosa* colony diameter in different depths at S2 site from May to August

分布差异显著.对7组不同水深的藻团粒径样本进行多重比较(最小显著差数,LSD)的结果显示,在上述出现显著分布差异的月份及采样点,表层与中层、表层与底层的粒径分布差异显著高于中层与底层,因此水源湖区藻团粒径在水柱中的分布差异主要来自表层与中、底层的差异.

不同粒径水平的铜绿微囊藻藻团在不同水深的分布存在差异,3组不同粒径水平的藻团在不同水深的比例分布(图5)表明,粒径小于200 μm的藻团在各水深的分布都比较均匀,在整个水柱中的分布没有明显的趋向性.粒径大于200 μm的藻团在表层水中的分布比例明显高于中、底层,说明粒径较大的藻团易于在水柱表层聚集.同时也发现,在7、8月S2采样点,无论是粒径小的藻团还是粒径较大的藻团,在各水深的分布都比较均匀.

2.3 不同湖区藻团粒径分布的统计分析

分别对6、7、8月S1和S2采样点整个水柱的粒径样本(将3个水深的藻团粒径样本混合,作为采样点的月粒径样本)进行独立样本*t*检验,检验结果(表1)显示:两个采样点的藻团粒径分布存在显著差异,各月份下S2的藻团粒径均值均大于S1.两个采样点藻团粒径随月份的变化趋势基本一致,6月份藻团粒径均值明显高于其他月份.

粒径处于100~200 μm区间的藻团占总样本比例最高,为44.6%,大于400 μm的藻团占总样本比例最低,为4%,上述两个区间的藻团粒径在S1和S2的分布比例大致相当,分别为21.3%和23.3%,1.7%和2.3%.两个采样点粒径分布差异主要来自小于100 μm和200~400 μm两个区间的藻团,前者在S1和S2的比例分别为21.2%和11.9%,后者比例分别为5.9%和12.5%(图6).

表1 各月份下S1、S2藻团粒径样本的独立*t*检验显著性及均值比较*

Tab.1 Significance of independent <i>t</i> -test and comparison of mean values between colony diameter samples at S1 and S2 sites in each month		采样点	5月	6月	7月	8月
粒径/μm	S1	—	—	195.8139	106.3039	114.6498
粒径/μm	S2	—	127.3384	249.4594	138.4981	145.1884
<i>P</i>		—	—	<0.001	<0.001	<0.001

* 显著性水平 α=0.05.

2.4 藻团形状因子的统计分析

藻团形状因子最小值为0.14,最大值为1.00,形状因子在0~0.50、0.51~0.80、0.81~1.00范围内的藻团占总样本比例分别为14.00%、54.63%和31.37%.对各组不同水深藻团形状因子的方差分析以及各月份下S1与S2采样点间形状因子的*t*检验结果表明,湖区藻团形状在空间分布上没有显著差异.但形状因子均值随月份的增加逐渐增大,S1点6~8月均值分别为0.6479、0.7400、0.7559,S2点5~8月份均值分别为0.6439、0.6572、0.7094和0.7422.

2.5 铜绿微囊藻藻团计数

在最早观测到藻团的5月份,S2水柱表、中、底层藻团数量分别为1545、1077、1114个/L.6月份S1的藻

图5 3组不同粒径范围的铜绿微囊藻藻团在不同水深的比例分布
Fig.5 Ratio distribution of *M. aeruginosa* colonies in three ranges in different water depths

图6 铜绿微囊藻藻团各粒径区间占6—8月份粒径总样本的比例及分别在S1和S2的比例

Fig. 6 Ratios of each diameter interval against the June-to-August diameter sample and their respective ratios at S1 and S2 sites

迁移,因此在4月份较难观测到铜绿微囊藻藻团。

水源湖区铜绿微囊藻藻团粒径在水柱中分布的差异性主要来自表层与中、底层的差异,而中层与底层之间的差异并不显著。表层的藻团粒径通常较大,不仅因为表层光照充足,利于藻团细胞的光合作用,还因为粒径大的藻团更容易克服紊流对藻团的裹挟力,从而使其能停留在水体表层^[14]。水源湖区粒径大于200 μm 的藻团在表层的比例明显高于中、底层,因此可以将200 μm 理解为导致水柱中藻团粒径分布存在显著差异的较大藻团的粒径下限。也有研究表明粒径大于120 μm 的藻团较易集中在表层^[15],两个结论的差异可能来自对藻团粒径定义的不同。Wallace等通过模型模拟,认为粒径达到400 μm 的铜绿微囊藻藻团使自己变得足够重后沉入水底,从而能接触到泥水界面^[14]。Rabouille等通过模型模拟分析后也认为粒径大于600 μm 的藻团更容易停留在深层。当大藻团沉入湖底时,由于底层缺少光照和水温较低,减缓了藻团细胞对糖原的消耗,从而延迟了藻团向表层的回迁^[16]。尽管如此,长时间停留在底层也会为藻团提供一些其他优势,比如能使藻团接触到更多从沉积物中释放出来的营养物质^[14,16]。本实验中,在各月份下2个采样点的表层和中层均未观测到粒径超过800 μm 的藻团,这些超大粒径藻团全都出现在底层。因此,水源湖区不同粒径范围的铜绿微囊藻藻团在各水深分布的一般规律是:粒径小于200 μm 的藻团在各水深的分布都比较均匀,没有明显的趋向性;粒径在200~800 μm 范围内的藻团更易集中在湖水表层;粒径超过800 μm 的藻团更易集中在湖水底层。

大量研究表明风对藻类在水体中的分布有着极其重要的影响。George等认为当风速大于3.7 m/s时,紊流会代替层流,导致水柱中藻类趋于均匀性分布^[17]。Webster通过构建模型从理论上将该临界值缩小为2~3 m/s^[18]。Cao等通过在太湖的野外观测,得出的实际临界值为3.1 m/s^[19]。湖区铜绿微囊藻藻团在水柱中的分布对风速的响应十分敏感,在7月份S1、S2点位,8月份S2点位采样时测得的瞬时风速分别为3.6、5.3和4.6 m/s,此时风浪扰动对藻团在水柱中分布的影响已经远大于藻团自身的垂直迁移运动,因此,上述月份和采样点的藻团粒径和数量在整个水柱中的分布都趋向均匀。

6月份采样前5 d(6月8—12日)湖区平均气温为26.5℃,平均风速为2.7 m/s,温度较高、风速较小的天气是导致6月份水样的藻团粒径相比5月份有显著增加的一个重要因素。从野外观测和实验模拟都证实风浪的扰动会造成粒径较大的微囊藻藻团破裂^[20-21],湖区藻团粒径总体水平在6月份之后显著下降与风浪的扰动密切相关,这也说明藻团粒径的变化易受短时气象条件的影响。O'Brien等通过实验模拟发现,在经历不同强度扰动后铜绿微囊藻藻团存在一个最大稳定粒径,大小在220~420 μm 之间,大于该粒径的藻团易在

团数量略高于S2,自7月份后,S2的藻团数量开始明显高于S1,两个采样点水柱中藻团的平均数量分别为2515、5137个/L,这一差距在8月份进一步扩大,两个采样点藻团的平均数量分别为4060、10183个/L。

3 讨论

湖水中的微囊藻藻团不仅来自水体中微囊藻细胞的分裂增殖,同时也来自底泥中过冬藻团的补充^[9]。当沉积在湖底的微囊藻藻团接收到足够阳光时,细胞开始进行不产氧光合作用并生成气囊,使得藻团能够漂浮^[10]。水温升高也是促进微囊藻气囊生成的重要条件,当水温超过20℃时,处在黑暗环境下的非漂浮藻团能迅速重新获得浮力^[11]。水源湖区4月份的平均气温为 17.2 ± 0.9 ℃,采样水温为15.3℃,低水温既不利于湖水中微囊藻的分裂繁殖^[12-13],也不利于过冬藻团从底泥向湖水中

扰动中破裂^[21]. 在本实验中,大部分藻团粒径分布在 300 μm 以内,占粒径总样本的 91.17%,粒径在 300 ~ 400 μm 的藻团占总样本的 5.27%,而大于 400 μm 的藻团仅占总样本的 3.56%,属于小概率事件,因此可以认为水源湖区铜绿微囊藻藻团最大稳定粒径在 300 ~ 400 μm 范围内. 外湖区的藻团粒径均值在各月份下均高于内湖湾,说明风浪扰动在显著降低湖区水体中藻团粒径总体水平的同时,也会对一定范围内藻团粒径的发育有促进作用,该范围的上限即为最大稳定粒径. 这种促进作用可能是因扰动导致的水体中营养盐浓度、光照条件等环境因子变化协同作用的效果,对此机理的探讨需更深入的研究.

狭长形藻团其表面积与体积的比率较大,有利于藻团对光的吸收^[10],这样有助于处于复苏阶段的铜绿微囊藻提高自身对光的利用效率. 而在夏季,过高强度的光照反而会抑制微囊藻的生长,此时较规则形藻团可以减少受光面积. 此外,对称形状的藻类在下沉时所受阻力明显大于非对称形状藻类^[22],在风浪扰动频繁的夏季,规则形状有利于增加藻团的漂浮能力. 以上假设可能是引起湖区藻团形状变化的原因,但对此现象的解释还需要结合更多生物以及非生物因素的影响.

大型仿生式水面蓝藻清除设备其筛网的平均孔径为 30 μm ,仅从藻团粒径大小的角度考虑,该设备对铜绿微囊藻藻团的理论过滤效率达到 99.81%. 但本文所定义的藻团粒径是对藻团实际大小的一个近似表征,当藻团近似球形时,粒径值与藻团实际大小吻合程度较高,而当藻团呈不规则形态时,上述方法的表征效果较差. 这种差别会影响对筛网实际过滤效率的评估,比如两个等二维投影面积且等圆直径大于 30 μm 的藻团,一个为理想球形,一个为狭长形,后者在通过筛网表面时可能会穿过网眼. 尽管如此,筛网对藻团分离的实际效率仍然保持在一个相当高的水平.

研究藻团粒径分布不仅可以为相关工程应用提供科学的理论支撑,同时也在一些理论研究领域发挥重要作用,比如:在构建模拟微囊藻垂直迁移模型时需要准确的藻团粒径分布数据来支撑^[21]. 尽管与用藻细胞数量来表征微囊藻藻团大小的方法^[23]相比,本实验中所使用的图像测量技术更快速、更直观,但这种广泛应用于材料学领域的微粒粒径测量方法应用到微囊藻藻团粒径测量上,仍然存在很大的局限性. 因为有的微囊藻藻团呈枝权状,在水样中不同的悬浮姿态在显微镜视野下对应有不同的二维轮廓,并且在不同的焦距下所观测到的轮廓也不同,因此给实际测量带来相当大的难度. 日臻完善的显微三维测量技术有望解决上述问题,同时精确可靠的图像自动识别分析系统也期待在藻类识别和测量领域得到进一步发展^[24].

4 结论

- 1) 巢湖水源湖区铜绿微囊藻藻团最早出现于 4 月中旬至 5 月中旬之间. 藻团粒径分布范围为 20.54 ~ 1620.28 μm ,其中大部分粒径分布在 30 ~ 300 μm 范围内,占总群体的 96.25%.
- 2) 湖区铜绿微囊藻藻团粒径在各水深的分布差异主要来自表层与中、底层差异. 粒径小于 200 μm 的藻团在各水深的分布都比较均匀,没有明显的趋向性;粒径在 200 ~ 800 μm 范围内的藻团更易集中在湖水表层;粒径大于 800 μm 的藻团更易集中在湖水底层. 外湖区藻团数量及藻团粒径较内湖湾均具有明显优势,两者粒径分布差异主要来自小于 100 μm 和 200 ~ 400 μm 区间段.
- 3) 风浪的扰动不仅对藻团有破坏作用,使藻团粒径整体水平显著降低,而且使藻团粒径以及数量在整个水柱中的分布趋于均匀. 湖区藻团最大稳定粒径在 300 ~ 400 μm 之间.
- 4) 铜绿微囊藻藻团形状在空间分布上没有显著差异. 但随季节变化,藻团形状逐渐从狭长形向规则形演变.
- 5) 大型仿生式蓝藻清除设备对湖区铜绿微囊藻藻团的理论过滤效率可达 99.81%.

5 参考文献

- [1] 殷福才,张之源. 巢湖富营养化研究进展. 湖泊科学,2003,15(4):277-283.
- [2] 闫海,潘纲,张明明. 微囊藻毒素研究进展. 生态学报,2002,22(11):1968-1975.
- [3] Deng DG, Xie P, Zhou Q et al. Studies on temporal and spatial variations of phytoplankton in Lake Chaohu. Plant Biology, 2007, 49(4): 409-418.
- [4] 黎尚豪,毕列爵. 中国淡水藻志. 北京:科学出版社,1998.
- [5] Doers MP, Parker DL. Properties of *Microcystis aeruginosa* and *M. flos-aquae* (Cyanophyta) in culture: taxonomic impli-

- cations. *Journal of Phycology*, 1988, **24**(4):502-508.
- [6] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法:第4版. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [7] Friel JJ, Grande JC, Hetzner D *et al.* Practical guide to image analysis. Ohio: ASM International, 2000.
- [8] Nafe R, Schlote W. Methods for shape analysis of two-dimensional closed contours—a biologically important, but widely neglected field in histopathology. *Electronic Journal of Pathology and Histology*, 2002, 8.2: 022-02.
- [9] Tsujimura S, Tsukada H, Nakahara H *et al.* Seasonal variations of *Microcystis* populations in sediments of Lake Biwa, Japan. *Hydrobiologia*, 2000, **434**(1/2/3):183-192.
- [10] Naselli-Flores L, Barone R. Steady-state assemblages in a Mediterranean hypertrophic reservoir. The role of *Microcystis* ecomorphological variability in maintaining an apparent equilibrium. *Hydrobiologia*, 2003, **502**(1/2/3):133-143.
- [11] Thomas RH, Walsby AE. The effect of temperature on recovery of buoyancy by *Microcystis*. *Microbiology*, 1986, **132**(6): 1665-1672.
- [12] 孔繁翔,高 光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. 生态学报,2005,**25**(3):589-594.
- [13] 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):63-70.
- [14] Wallace BB, Bailey MC, Hamilton DP *et al.* Simulation of vertical position of buoyancy regulating *Microcystis aeruginosa* in a shallow eutrophic lake. *Aquatic Sciences*, 2000, **62**(4):320-333.
- [15] Wu X, Kong FX. Effects of light and wind speed on the vertical distribution of *Microcystis aeruginosa* colonies of different sizes during a summer bloom. *International Review of Hydrobiology*, 2009,**94**(3):258-266.
- [16] Rabouille S, Salencon MJ. Functional analysis of *Microcystis* vertical migration: a dynamic model as a prospecting tool. II. Influence of mixing, thermal stratification and colony diameter on biomass production. *Aquatic Microbial Ecology*, 2005,**39**(1): 281-292.
- [17] George DG, Edwards RW. The effect of wind on the distribution of chlorophyll *a* and crustacean plankton in a shallow eutrophic reservoir. *Journal of Applied Ecology*, 1976,**13**(3):667-690.
- [18] Webster IT. Effect of wind on the distribution of phytoplankton cells in lakes revisited. *Limnology and Oceanography*, 1994,**39**(2):365-373.
- [19] Cao HS, Kong FX, Luo LC *et al.* Effects of wind and wind-induced waves on vertical phytoplankton distribution and surface blooms of *Microcystis aeruginosa* in Lake Taihu. *Journal of Freshwater Ecology*, 2006,**21**(2):231-238.
- [20] Roberts RD, Zohary T. *Microcystis aeruginosa* and underwater light attenuation in a hypertrophic lake (Hartbeespoort Dam, South Africa). *Journal of Ecology*, 1984,**72**(3):1001-1017.
- [21] O'Brien KR, Meyer DL, Waite AM *et al.* Disaggregation of *Microcystis aeruginosa* colonies under turbulent mixing: laboratory experiments in a grid-stirred tank. *Hydrobiologia*, 2004,**519**(1/2/3):143-152.
- [22] Padišák Judit, Soróczki-Pintér éva, Reznér Z. Sinking properties of some phytoplankton shapes and the relation of form resistance to morphological diversity of plankton—an experimental study. *Hydrobiologia*, 2003,**171**:243-257.
- [23] Cao H, Zhou Y. Variation in colony size of *Microcystis aeruginosa* in a eutrophic lake during recruitment and bloom formation. *Journal of Freshwater Ecology*, 2010,**25**(3):331-335.
- [24] Walker RF, Kumagai M. Image analysis as a tool for quantitative phycology: a computational approach to cyanobacterial taxa identification. *Limnology*, 2000,**1**(2):107-115.