

洪泽湖微囊藻属演替模式及预警研究

刘伟, 郝达平* (江苏省水文水资源勘测局淮安分局, 江苏淮安 223005)

摘要 微囊藻属是淡水湖泊常见的水华优势蓝藻种,也是洪泽湖夏秋季节常见的优势蓝藻,所引发的水华会使湖水变混浊,透明度下降;藻类腐败产生难闻的腥臭味,释放微囊藻毒素,影响水质安全。依据2011—2016年洪泽湖11个监测站点的监测资料,分析了洪泽湖微囊藻属组成及时空变化规律。结果表明,洪泽湖共检出微囊藻属4种,其中惠氏微囊藻、铜绿微囊藻出现频率较高且优势度较大,种群密度在夏秋季节明显高于冬春季节;在空间分布上,成子湖区域、蒋坝等闸湾区域明显高于其他区域。最后提出了洪泽湖微囊藻属不同演替模式、不同分布规律全湖泊预警应急措施,为保障南水北调东线工程水质及饮用水安全、防控湖泊水华发生提供借鉴。

关键词 微囊藻;演替模式;预警;洪泽湖

中图分类号 X524 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)16-0078-03

Study on the Succession Pattern and Early Warning of *Microcystis* in Hongze Lake

LIU Wei, HAO Da-ping* (Huai'an Hydrographic and Water Resources Exploration Bureau of Jiangsu, Huai'an, Jiangsu 223005)

Abstract *Microcystis* is a common blooms of freshwater lakes, and is also a common advantage of cyanobacteria in the summer and autumn of Hongze Lake. *Microcystis* blooms will make the water become turbid, transparency decreased. And algae corruption will produce unpleasant stench and release microcystins which will affect water quality safety. The study analyzed the composition and time and spatial variation of *Microcystis* in Hongze Lake according to the monitoring data of 11 monitoring sites from 2011 to 2016. A total of 4 species of *Microcystis* were detected in Hongze Lake. Among them, *Microcystis wesenbergii* and *Microcystis aeruginosa* were higher frequency and had higher dominance. In the time distribution, the cell density of *Microcystis* was significantly higher in summer and autumn than in winter and spring. In the spatial distribution, Chengzi Lake area and Jiangba area were significantly higher than other areas. The emergency measures of the whole lake for different succession patterns and different distribution laws of *Microcystis* in Hongze Lake were put forward. The study can provide a reference for the protection of water quality and drinking water safety in the east route of the South-to-North Water Diversion Project, and also can provide reference for the prevention and control of lake water bloom.

Key words *Microcystis*; Succession pattern; Early warning; Hongze Lake

洪泽湖是淮河流域最大的湖泊型水库,是中国第四大淡水湖,地处苏北平原中部西侧,位于淮河中、下游结合部,是淮河河床的一个组成部分,地理位置在118°10'~118°52' E, 33°06'~33°40' N。近年来,随着工农业生产的发展及人口的增长,生产及生活废污水排放量日益增加,加之围垦、养殖、泥沙淤积等原因,洪泽湖湖区环境负荷迅速增加,污染日益加重,湖泊富营养化加剧,局部水域多次出现微囊藻集聚现象。

微囊藻属植物团块由许多小群体构成,群体呈球形、椭圆形或者不规则形。发生水华的微囊藻多数具有气泡,可自由漂浮于水中或附生于水中其他基物上,根据外界环境的条件上浮或者下沉^[1]。发生水华的中后期,大量聚集于水体表层的微囊藻细胞在强光及高温环境下大量死亡腐烂,释放出难闻气味,同时许多藻种会分泌微囊藻毒素等有毒物质,影响水质安全^[2]。微囊藻属是洪泽湖夏秋季节的优势蓝藻藻种^[3-4],分析其在洪泽湖的种类组成及季节演替规律,对于判断洪泽湖是否可能发生水华甚至恶性暴发,以及确保南水北调东线工程水质安全和苏北地区供水安全、生态安全具有重要意义。

1 监测点位与监测方法

1.1 监测点位 洪泽湖湖域面积大,各区域水质存在差异,根据地理位置及水文、水力和湖岸、出入湖河道特性等因素,将洪泽湖分为3个区:北区(N区,即成子湖区域)、东区(E

区)、西区(W区)。在北区设立韩桥、宿迁北、高湖、成子湖4个站点,东区设立西顺河、淮安北、淮安西和蒋坝4个站点,西区设立宿迁南、临淮、溧河洼3个站点,共计11个站点,站点位置见图1。

1.2 采样监测时间及频次 洪泽湖各个站点监测时间为2011年3月至2016年10月,每月采样监测1次,共采样68次。采样时间为每月10日前后,采样均在白天进行。

1.3 监测方法

1.3.1 样品制备 浮游藻类的采集、固定、沉淀和浓缩等均按照《水库渔业资源调查规范》(SL167—2014)中有关浮游植物调查部分进行。具体为用有机玻璃采水器采集混合水样1.0 L于样品瓶中,用鲁格试剂固定后,带回实验室。在实验室将玻璃瓶中水样静置沉淀24 h后,用虹吸管抽掉上清液后转移至50 mL量筒中静置12~24 h后,用注射器将上清液吸出,量筒中沉淀部分留10~15 mL,摇匀后移至具塞带刻度的比色管中备测。

1.3.2 藻类计数与鉴定 浮游藻类的监测包括藻细胞密度测定和浮游藻类种属类别鉴定识别。藻细胞密度采用血球计数板镜检计数法测定,浮游藻类种属类别鉴定识别采用镜检对照图谱分类识别法。藻类分类是对藻体生活环境、显微形态特征、超微结构、繁殖方式等分类学特征进行综合分析,从而进行判定^[5]。

2 微囊属组成及时空变化规律

2.1 藻类组成 2011年3月至2016年10月,洪泽湖共检出浮游藻类8门117属245种(包括变种),各门藻类种属数依次为绿藻门(Chlorophyta)52属106种,硅藻门(Bacillario-

作者简介 刘伟(1990—),男,江苏盱眙人,助理工程师,从事水环境及水生态研究。*通讯作者,高级工程师,从事水资源、水环境及水生态研究。

收稿日期 2017-04-12

phyta)24 属 56 种,蓝藻门(Cyanophyta)18 属 35 种,裸藻门(Euglenophyta)7 属 30 种,隐藻门(Cryptophyta)2 属 3 种,黄藻门(Xanthophyta)4 属 4 种,甲藻门(Pyrrophyta)3 属 4 种,金藻门(Charophyta)7 属 7 种。蓝藻(14.3%)成为继绿藻(43.3%)和硅藻(22.9%)之后构成洪泽湖水体的又一主要优势藻种(图2)。

洪泽湖检出微囊藻属共计4种,主要由不定微囊藻(*Microcystis incerta* Lemm.)、铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa* Kütz.)、水华微囊藻[*Microcystis flos-aquae* (Wittr.) Kirchn.]、惠氏微囊藻(*Microcystis wesenbergii*)等组成,占检出蓝藻的比重达到11.4%。其中惠氏微囊藻、铜绿微囊藻出现频率较高且优势度较大。

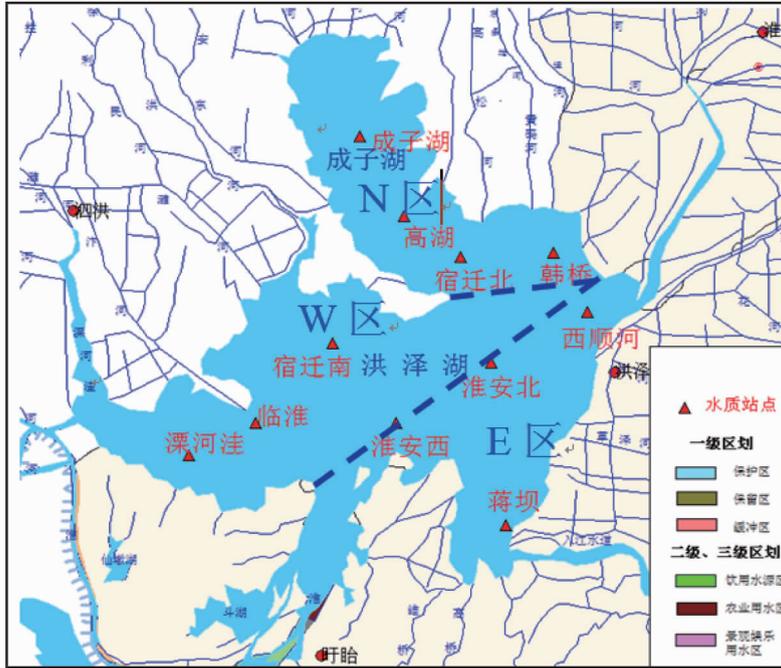


图1 洪泽湖监测站点位置示意

Fig.1 Location of monitoring site in Hongze Lake

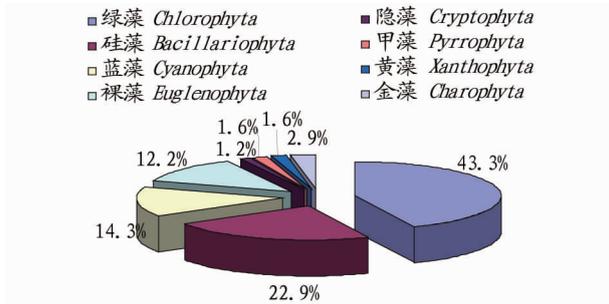


图2 洪泽湖浮游藻类种群构成

Fig.2 Population composition of planktonic algae in Hongze Lake

2.2 微囊藻属密度变化

2.2.1 年季变化。由于蓝藻密度的增大主要集中在夏秋季节,根据洪泽湖蓝藻细胞密度的上升规律,选取2011—2016年7—10月微囊藻属密度均值进行对比,结果见图3。由图3可知,2011—2013年洪泽湖各个站点总藻细胞密度整体水平在0~591.6×10⁴个/L,平均值的整体水平在155.6×10⁴~296.9×10⁴个/L,2014—2016年洪泽湖各个站点总藻细胞密度整体水平为0~975.2×10⁴个/L,平均值的整体水平在7.5×10⁴~258.9×10⁴个/L。相比2011—2013年,2014—2016年洪泽湖各个站点微囊藻属藻细胞密度整体呈降低趋势,这可能与调水有关。

2.2.2 季节演替。从图4可见,洪泽湖微囊藻属呈现明显

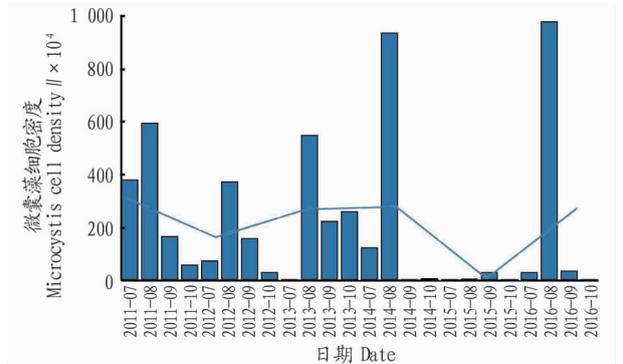


图3 2011—2016年洪泽湖微囊藻属年际变化情况

Fig.3 Interannual variation of *Microcystis* in Hongze Lake during 2011—2016

的季节性变化,除2015年外,其余年份的微囊藻细胞密度较大值均出现在每年夏季和秋季,冬季和春季微囊藻属细胞密度较小。微囊藻细胞密度整体变化范围为0~975.2×10⁴个/L,最大值出现在2016年8月。2011—2016年7—10月微囊藻细胞密度占当年总藻细胞密度的比值分别为97.7%、88.7%、96.0%、98.5%、98.7%和99.8%,平均值达到96.6%,藻细胞密度较高的月份集中在7—10月。这一时间段洪泽湖的平均水温达到26℃以上,适宜微囊藻属生长,温度不构成洪泽湖藻类生长的限制性因子,但在其他季节水温较低,温度对藻类生长的影响显著,因而在冬春季节微囊

藻的生长受到了温度的限制。洪泽湖氮、磷浓度较大,夏秋季节的水温条件适宜藻类的生长,因此从整体上来看洪泽湖微囊藻种群演替模式表现出种群密度在夏秋季节明显高于冬春季节的特点。

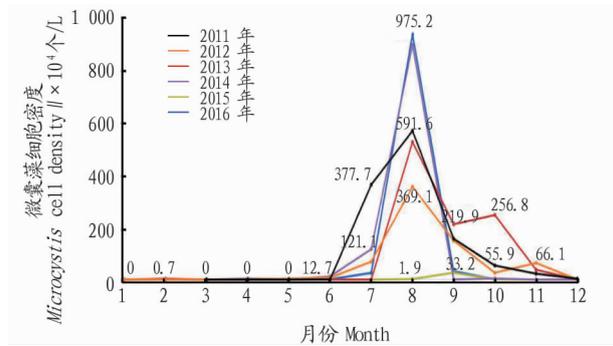


图4 2011—2016年洪泽湖微囊藻属季度变化情况

Fig. 4 Quarterly variation of *Microcystis* in Hongze Lake during 2011–2016

2.3 微囊藻属空间分布 微囊藻属集中出现在夏秋季节,洪泽湖各个监测站点中,除了临淮、溧河洼和淮安西外,其余站点的微囊藻细胞密度较高值出现频率均较高,且细胞密度较大。从上须来看,检出微囊藻细胞密度较大值出现在韩桥、成子湖、淮安北和蒋坝站点,检出密度分别为 2.411×10^4 、 2.040×10^4 、 2.565×10^4 、 2.030×10^4 个/L。从中位数点来看,最大值出现在韩桥站点,达到 1.885×10^4 个/L,其次为淮安北、西顺河、蒋坝等站点。

从空间分布来看,N区微囊藻属细胞密度在 $0 \sim 2.411 \times 10^4$ 个/L,W区微囊藻属细胞密度在 $0 \sim 1215 \times 10^4$ 个/L,E

区微囊藻属细胞密度在 $0 \sim 2.565 \times 10^4$ 个/L。其中,N区和E区高于均值以上的月份较多,微囊藻细胞密度高于W区,微囊藻细胞密度较高值集中在N区和E区。洪泽湖微囊藻细胞密度均值区域分布情况从大到小依次为E区、N区、W区。

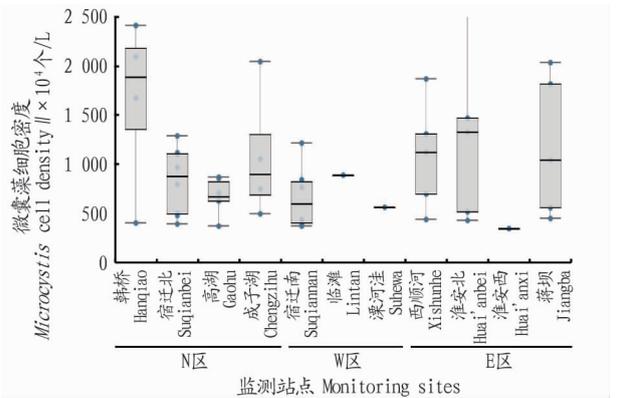


图5 洪泽湖各站点微囊藻细胞变化规律

Fig. 5 Changes of *Microcystis aeruginosa* cells at every site of Hongze Lake

3 洪泽湖微囊藻属的暴发式增长预警机制

3.1 预警方案 微囊藻属是水体水华的主要常见藻属,其暴发性的繁殖乃至水华可以引起明显的水色变化,透明度下降,并且藻类腐败产生难闻的腥臭味,影响水质安全,造成水体生态系统失衡。藻细胞密度是衡量水华发生与否、发生程度的最直接指标,但不同水域藻细胞个体体积、富集方式均存在较大差异,用藻细胞密度直接判断水华尚未形成统一标准。结合目前研究所得藻细胞密度对水华风险判别的经验值,将水华风险评估等级及参考值列举于表1。

表1 洪泽湖水华风险评估等级及参考值

Table 1 Risk assessment level of algal bloom and reference value in Hongze Lake

预警模式 Early-warning model	藻类种群构成 Algal population structure	营养化状况 Nutrition status	水文气象条件 Hydrological and meteorological conditions	评价 Evaluate
初级预警 Primary warning	藻细胞密度 $100 \times 10^4 \sim 500 \times 10^4$ 个/L,优势种群为水华常见种	水体营养水平为中富营养,总磷含量 ≥ 0.05 mg/L,总氮含量 ≥ 1.00 mg/L	气温 25°C 以上,水温 $18 \sim 28^\circ\text{C}$, 低风速 (< 3.0 m/s),持续强光照 (> 2000 lx),无降雨及缓流速	水华可能发生
中级预警 Intermediate warning	藻细胞密度 $500 \times 10^4 \sim 1000 \times 10^4$ 个/L,优势种群为水华常见种	水体营养水平为中富营养以上,总磷含量 ≥ 0.05 mg/L,总氮含量 ≥ 1.00 mg/L	气温 25°C 以上,水温 $18 \sim 28^\circ\text{C}$, 低风速 (< 3.0 m/s),持续强光照 (> 2000 lx),无降雨以及缓流速	水华发生可能性较高
强预警 Strong warning	藻细胞密度 1000×10^4 个/L 以上,优势种群为水华常见种	水体营养水平为中富营养以上,总磷含量 ≥ 0.05 mg/L,总氮含量 ≥ 1.00 mg/L	气温 25°C 以上,水温 $18 \sim 28^\circ\text{C}$, 低风速 (< 3.0 m/s),持续强光照 (> 2000 lx),无降雨以及缓流速	水华发生可能性极高

3.2 预警措施

(1) 洪泽湖水体水质在氮、磷参评的情况下所有站点基本在IV以上,水体中氮、磷含量较高,营养水平为中富营养以上。磷元素是洪泽湖蓝藻生长的主要驱动因子之一^[3-4],同时氮、磷质量比也是藻类“经验分子式”中判断水体营养元素是否更适合藻类生长的重要指标^[6],应对洪泽湖全时段进行氮、磷营养盐的重点监测。

(2) 根据洪泽湖微囊藻属的季节演替模式,微囊藻属在夏秋季节成为洪泽湖水体的优势藻属,细胞密度较高。夏秋

季节,随着气温升高,发生水华的可能性将会很大程度的增加。其中7—10月为微囊藻属集中繁殖暴发时期,在该时段应启动强预警模式。

(3) 根据监测,洪泽湖11个站点中,韩桥、成子湖、蒋坝、溧河洼等在不同程度上都出现过轻度的蓝藻水华,夏秋季节蓝藻细胞密度超过 1000×10^4 个/L的频率较高,且优势种群为微囊藻属。根据预警模式,应对溧河洼、成子湖等湖湾以及三河闸—蒋坝区域进行重点监测预警。

(下转第125页)

表 2 正交试验结果

Table 2 Orthogonal experimental results

试验号 No.	A(酶解时间 Enzymolysis time//h)	B(酶添加量 Enzyme addition amounts //%)	C(酶解 pH Enzymolysis pH)	D(酶解温度 Enzymolysis temperature//℃)	薯蓣皂素得率 Yield of diosgenin %
1	1(24)	1(4)	1(5.0)	1(45)	0.412 8
2	1	2(8)	2(6.0)	2(50)	0.439 2
3	1	3(10)	3(7.0)	3(55)	0.353 2
4	2(48)	1	2	3	0.401 6
5	2	2	3	1	0.446 6
6	2	3	1	2	0.428 4
7	3(72)	1	3	2	0.420 2
8	3	2	1	3	0.386 0
9	3	3	2	1	0.397 6
k_1	0.401 7	0.411 5	0.409 1	0.419 0	
k_2	0.425 5	0.423 9	0.412 8	0.429 3	
k_3	0.401 3	0.393 1	0.407 0	0.380 3	
R	0.024 2	0.030 8	0.006 1	0.049 0	

2.3 各种薯蓣皂素提取方法的比较 超声波辅助酶法提取薯蓣皂素的得率(0.630 9%)高于直接复合酶水解法(0.524 9%)约 25%。超声波的辐射压强产生的强烈击碎效应,使黄姜中部分皂苷的结合状态发生改变,断裂了纤维素和淀粉与皂苷的连接,使部分被包裹的糖苷键裸露出来,酶解反应更容易进行,水解更充分^[18],另外,超声破碎技术将黄姜的细胞壁击碎,提高了水解效率,从而该方法的得率与直接酸水解的得率接近。但超声波辅助酶解技术比全料酸水解的得率(0.677 0%)略低,可能是前者有部分疏水皂苷没有提取到,或由于酶的专一性,部分糖苷键尚未完全水解,需要应用质谱或核磁技术进行确定,进一步筛选和开发特异性酶品种或其他转化技术,是今后的研究方向。

3 结论

该研究利用纤维素酶和蜗牛酶组成的复配酶制备薯蓣皂素,建立了薯蓣皂素的液相色谱检测方法,分离柱为 WondaSil C18(5 μm , 4.6 mm \times 150 mm)柱,流动相为乙腈-水(80:20),紫外检测波长为 203 nm。该方法精密度良好,样品测定稳定性好,回收率高。提出了超声辅助复配酶解法的清洁生产技术,在复配酶解工艺中,酶解温度对皂素得率的影响最大,最佳酶水解条件是酶解时间为 48 h,酶添加量为物料的 8%,酶解 pH 为 6.0,水解温度为 50 $^{\circ}\text{C}$,薯蓣皂素的得率为 0.524 9%。采用超声破碎辅助复配酶解法提取薯蓣皂素,比直接酶解法得率提高了 25%,接近酸解法的得率,应用潜力大。

参考文献

[1] 中科院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京:人民卫生出版

社,1985:51-119.

- [2] 张佳佳,李会,李恒,等. 高效转化黄姜皂苷为薯蓣皂苷元菌株的筛选及转化条件优化[J]. 生物工程学报,2013,29(6):848-852.
- [3] 张裕卿,王东青. 利用生物技术协同提取薯蓣皂素[J]. 精细与专用化学品,2005,13(1):7-10.
- [4] DONG Y S, TENG H, QI S S, et al. Pathways and kinetics analysis of bio-transformation of *Dioscorea zingiberensis* by *Aspergillus oryzae* [J]. Bioc-chemical engineering journal, 2010, 52(2/3):123-130.
- [5] ZHU Y L, HUANG W, NI J R. A promising clean process for production of diosgenin from *Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright [J]. Journal of cleaner production, 2010, 18(3):242-247.
- [6] 陈合,李庆娟,舒国伟,等. 黄姜皂素提取工艺研究[J]. 天然产物研究与开发,2007,19(5):866-868.
- [7] 董悦生,齐珊珊,刘琳,等. 米曲霉直接转化盾叶薯蓣生产薯蓣皂苷元[J]. 过程工程学报,2009,9(5):993-998.
- [8] 谢彩侠,高山林,朱丹妮,等. 盾叶薯蓣中薯蓣皂元不同提取方法的比较[J]. 植物资源与环境学报,2005,14(1):23-25.
- [9] 王亚南,邓惠芳,富瑶瑶,等. 3 种黄姜薯蓣皂苷定向转化为皂素方法的比较[J]. 大连工业大学学报,2009,28(2):94-97.
- [10] 周新勇,宋曙辉,罗晖,等. 反相高效液相色谱法测定紫山药中薯蓣皂苷的含量[J]. 食品工业科技,2011,32(7):420-422.
- [11] 韩秋敏,李登超,黄亚东,等. 淮山药薯蓣皂苷的测定方法研究[J]. 食品工业科技,2011,32(12):494-496.
- [12] 李文君,王成章,张水晶,等. 多元复合酶降解黄姜薯蓣皂苷元的工艺研究[J]. 生物质化学工程,2014(4):23-27.
- [13] 唐俊,葛海涛,张云霞,等. 纤维素酶辅助提取盾叶薯蓣中薯蓣皂苷的工艺优化研究[J]. 中国医药科学,2012,2(1):27-29.
- [14] 闫美屹. 生物法制备薯蓣皂素的清洁生产工艺[D]. 北京:北京化工大学,2015.
- [15] 杨转萍. 黄姜中薯蓣皂苷的提取纯化及酶解工艺研究[D]. 西安:陕西科技大学,2011.
- [16] 袁久刚,王平,郭雨宁,等. 蜗牛酶在棉织物生物精练中的应用[J]. 食品与生物技术学报,2014,33(6):657-661.
- [17] 郭秀洁. 盾叶薯蓣中皂苷、薯蓣皂苷元的制备及其副产物综合利用研究[D]. 大连:大连工业大学,2010.
- [18] 胡娅梅. 黄姜中总皂苷的提取方法研究[D]. 湘潭:湖南科技大学,2012.

(上接第 80 页)

参考文献

- [1] 胡鸿钧,李尧英,魏印心,等. 中国淡水藻类[M]. 上海:上海科学技术出版社,1980:61-68.
- [2] 胡鸿钧. 水华蓝藻生物学[M]. 北京:科学出版社,2011:10-15.
- [3] 任颖. 南水北调东线调蓄湖泊浮游藻类群落特征与环境驱动因子[D]. 济南:山东大学,2016.

- [4] 田昌. 洪泽湖浮游植物种群结构变化的水环境驱动因子分析[D]. 济南:山东大学,2015.
- [5] 郝达平,鞠伟,刘伟,等. 湖泊浮游藻类监测技术研究及应用[J]. 江苏水利,2013(12):40-42.
- [6] 秦伯强,王小冬,汤祥明,等. 太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机——原因与对策[J]. 地球科学进展,2007,22(9):896-906.