

白洋淀浮游植物群落结构与水质评价*

王 瑜^{1,2}, 刘录三^{1**}, 舒俭民¹, 刘存歧², 朱延忠¹, 田志富²

(1: 中国环境科学研究院, 北京 100012)

(2: 河北大学生命科学学院, 保定 071002)

摘 要: 为掌握白洋淀浮游植物的群落结构及水质状况, 对白洋淀 8 个典型采样点进行了采样调查, 共发现浮游植物 133 种(属), 群落组成以绿藻、硅藻和蓝藻为主; 春季以绿藻和硅藻为优势门类, 小球藻、尖尾蓝隐藻、不定微囊藻为优势种(属), 浮游植物的密度在 $496 \times 10^4 - 6256 \times 10^4$ cells/L 之间, 平均密度为 2384×10^4 cells/L; 夏季以绿藻和蓝藻为优势门类, 小球藻、粗状细鞘丝藻、肾形藻为优势种(属), 浮游植物的密度在 $318 \times 10^4 - 4630 \times 10^4$ cells/L 之间, 平均密度为 1785×10^4 cells/L, 与 2005 年以来对白洋淀进行的 2 次浮游植物生态调查结果比较表明, 浮游植物密度出现显著上升. 应用修正卡尔森营养状态指数法和优势种评价法对白洋淀的营养状态进行评价, 结果显示白洋淀多数水体处于富营养状态.

关键词: 白洋淀; 浮游植物; 群落结构; 水质评价

Community structure of phytoplankton and the water quality assessment in Lake Baiyangdian

WANG Yu^{1,2}, LIU Lusan¹, SHU Jianmin¹, LIU Cunqi², ZHU Yanzhong¹ & TIAN Zhifu²

(1: *Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P. R. China*)

(2: *College of Life Science, Hebei University, Baoding 071002, P. R. China*)

Abstract: To study the community structure of phytoplankton and assess the water quality in Lake Baiyangdian, an investigation has been conducted at eight typical sampling sites. This investigation showed that among the total 133 species identified, Chlorophyta, Cyanophyta, and Bacillariophyta were dominant in the phytoplankton community. In spring, Chlorophyta and Bacillariophyta were the dominant phylum, and *Chlorella* sp., *Chroomonas acuta* Uterm. and *Microcystis incerta* Lemm. were the dominant species. The density of the phytoplankton ranged from 496×10^4 to 6256×10^4 cells/L with an average of 2384×10^4 cells/L. In summer, Chlorophyta and Cyanophyta were the dominant phylum, and *Chlorella* sp., *Leptolyngbya valderiana* Anagn. and *Nephrocytium agardhianum* Nageli. were the dominant species. The density of the phytoplankton ranged from 318×10^4 to 4630×10^4 cells/L with an average of 1785×10^4 cells/L. According to the comparison between this investigation and the previous two ecological investigations since 2005, the abundance of the phytoplankton has increased significantly. The index of Carlson nutritional status and the dominant genus assessment revealed that the majority water was eutrophic in the Lake Baiyangdian.

Keywords: Lake Baiyangdian; phytoplankton; community structure; water quality assessment

作为水生生态系统的重要组成部分, 浮游植物种类繁多, 分布广泛, 它们通过参与湖泊物质循环和能量流动, 共同维持着生态系统的结构功能, 并且对湖泊污染及净化起着指示作用^[1-3]. 近年来, 在湖泊水质监测中, 将浮游植物数量、群落特征结合水质化学检测作为环境评价指标的方法得到了广泛应用^[4-5]. 其中修正卡尔森营养指数法和优势种评价法被广泛应用于湖泊、水库富营养化状态的评价中^[6-8].

白洋淀地处华北平原东部, 是海河流域最大的淡水湖泊, 也是华北地区最大的内陆浅水湖泊, 水质肥

* 国家环保公益性行业科研专项(2008467041)和国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07209-008, 2009ZX07528-002)联合资助. 2010-06-11 收稿; 2010-11-22 收修改稿. 王瑜, 男, 1985 年生, 硕士研究生; E-mail: wangyucraes@163.com.

** 通讯作者; E-mail: liuls@caes.org.cn.

美,生物繁茂,历史上有“华北明珠”之称.然而,由于白洋淀区内人口密度大,工业废水、生活污水随地表径流直接进入湖中,上游补给水量减少,水位下降,生态系统比较脆弱,对污染的自净能力逐渐降低,导致湖水质量逐年恶化,湖泊富营养化程度日益严重^[9].为系统了解白洋淀浮游植物的种类组成与空间分布概况,揭示白洋淀富营养化程度,本文对白洋淀进行综合生态系统调查,对不同样点环境因子状况及浮游植物群落结构进行详细调查,进一步分析白洋淀浮游植物的种类组成、密度、出现率以及优势种等,探讨白洋淀浮游植物群落变化的原因,为实现白洋淀富营养化的治理与调控提供必要的理论及数据支持,对实现环境压力下的浅水湖泊生态系统评估与诊断、提出切实可行的富营养化防治调控对策、保护生物多样性等具有广泛的应用前景和学术价值.

1 材料与方法

1.1 调查样点及采样方法

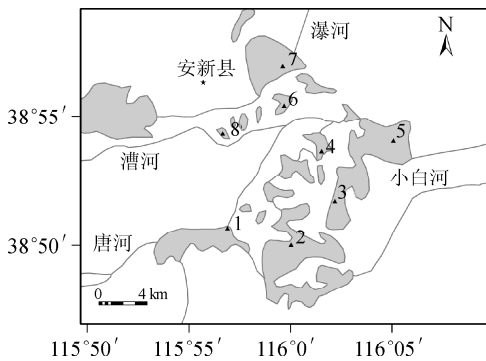


图1 白洋淀采样点分布(1 端村,2 采蒲台,3 圈头,4 光淀,5 枣林庄,6 王家寨,7 烧车淀,8 南刘庄)

Fig. 1 Sampling sites of Lake Baiyangdian

2009年4月上旬(春季)和6月中旬(夏季)对代表白洋淀湿地环境总体特征的8个采样点(38°49'–38°57'N, 115°56'–116°06'E)(图1)的浮游植物及相关环境因子进行采样分析.使用改良北原式有机玻璃采水器采集水样1L,水深在3m以内、水团混合良好的水体,只采表层(0.5m)水样1L;水深3–10m的水体,分别取表底两层水样各500ml进行混合.样品用鲁哥试剂固定,另加1%体积的福尔马林液保存.浮游植物样品的处理、分析方法以及水质分析方法均参照《湖泊生态系统观测方法》^[10].

1.2 数据处理和分析

浮游植物样品在实验室中进行沉淀、浓缩及镜检计数.使用SPSS及PRIMER V6软件^[11]进行数据分析,生态指标主要包括浮游植物物种数、密度、香农-威纳指数(H')、丰富度指数(d)、均匀度指数(J').

2 结果与讨论

2.1 浮游植物群落组成与生物多样性

两次调查共鉴定出浮游植物8门133种(属).其中春季8门78种(属),群落组成以绿藻、硅藻和蓝藻为主,其中绿藻门最多,为33种(属),占藻类总种数的42.3%;硅藻门15种(属),占藻类总种数的19.2%;蓝藻门11种,占藻类总种数的14.1%;裸藻门7种,占藻类总种数的9.0%;甲藻门2种,占藻类总种数的2.6%;黄藻门2种,占藻类总种数的2.6%;隐藻门5种,占藻类总种数的6.4%;金藻门3种,占藻类总种数的3.8%.夏季共鉴定到浮游植物8门109种(属),浮游植物群落组成以绿藻、蓝藻和裸藻为主,其中绿藻门最多,为57种(属),占藻类总种数的52.3%;蓝藻门21种,占藻类总种数的19.3%;裸藻门15种,占藻类总种数的13.8%;硅藻门6种(属),占藻类总种数的5.5%;甲藻门3种,占藻类总种数的2.8%;黄藻门2种,占藻类总种数的1.8%;隐藻门4种,占藻类总种数的3.7%;金藻门1种,占藻类总种数的0.9%(图2).春季白洋淀优势种为绿藻门的小球藻(*Chlorella* sp.),出现频度为100%,亚优势种为隐藻门的尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta* Uterm.)和蓝藻门的不定微囊藻(*Microcystis incerta* Lemm.),出现频度分别为87.5%和100%.夏季白洋淀优势种有绿藻门的小球藻,出现频度为100%,亚优势种为蓝藻门的粗状细鞘丝藻(*Lep-
tolynghya valderiana* Anagn.)和绿藻门的肾形藻(*Nephrocytium agardhianum* Nageli.),出现频度分别为70%和88%.

白洋淀春季浮游植物的 H' 为1.43–2.82,平均值为2.09. d 为2.15–3.89,平均值为2.88.5号样点 H' 最低,为1.43, d 为2.15,1号样点 H' 最高,为2.82, d 为3.89.可见, H' 与 d 的空间分布趋势较为一致.浮游植

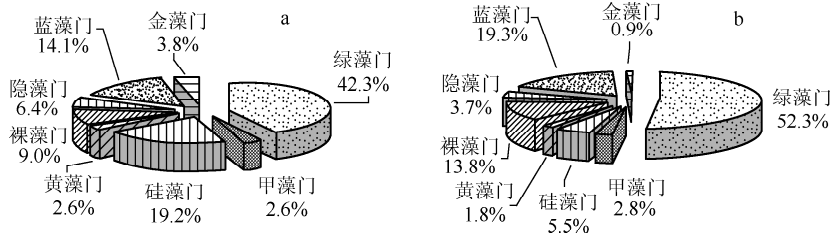


图2 调查区春(a)、夏(b)季浮游植物主要类群组成百分比
Fig. 2 Percentage composition of taxonomy of phytoplankton in research area in spring (a) and summer (b)

物的 J' 为 0.44 - 0.80, 平均值为 0.62 (图 3a). 夏季浮游植物的 H' 为 1.42 - 3.29, 平均值为 2.50. d 为 2.05 - 5.78, 平均值为 4.11, 5 号样点 H' 最低 (1.42) 且 d 为 2.05, 8 号样点 H' 最高 (3.29) 且 d 为 5.78. H' 与 d 的空间分布趋势较为一致. 浮游植物的 J' 为 0.51 - 0.82, 平均值为 0.68 (图 3b). 白洋淀夏季浮游植物的种类比春季多, 但无明显的优势类群, 群落组成以蓝绿藻为主, 且靠近居民区或靠近网箱养鱼区、畜禽养殖区等受人类活动影响大的采样点浮游植物种类较多, 位于淀区出水口、静水蓄积区的采样点种类较少, 这与以往对白洋淀浮游植物研究的结果一致^[12].

2.2 浮游植物密度

白洋淀浮游植物数量在春夏两季差异明显. 春季浮游植物的密度范围在 $496 \times 10^4 - 6256 \times 10^4$ cells/L 之间, 平均密度为 2384×10^4 cells/L, 不同样点间密度变化较大, 其中 5 号与 7 号样点浮游植物细胞密度较大, 1 号、8 号样点较小. 夏季浮游植物的密度范围在 $318 \times 10^4 - 4630 \times 10^4$ cells/L 之间, 平均密度为 1785×10^4 cells/L (图 4), 不同样点间密度变化较大, 其中 4 号与 6 号样点浮游植物密度较大, 5 号、7 号样点较小. 浮游植物密度与优势种通常可以反映水体富营养化程度. 蓝藻作为耐污性比较强的种类, 它的生物量急剧增加并最终成为优势类群是水体富营养化的重要表征之一, 即蓝藻细胞密度越高, 水体富营养化程度越严重^[13]. 此次调查发现蓝藻和绿藻成为浮游植物群落主要类群, 这是由于工业废水和生活污水进入白洋淀后, 水体中有机物质含量升高^[14], 富营养化严重, 因此造成水中耐污种类增加, 数量也占有优势.

为了从总体上认识白洋淀浮游植物群落变化情况, 将白洋淀 2005 年以来的 3 次浮游植物调查资料进行对比 (表 1), 从种类数组成、密度大小、优势种方面分析白洋淀浮游植物近年来的动态变化. 其中 2005 - 2006 年调查资料为白洋淀 8 个调查样点春、夏季的平均数据^[12], 2009 年资料为此次白洋淀 8 个调查样点春、夏季的平均数据.

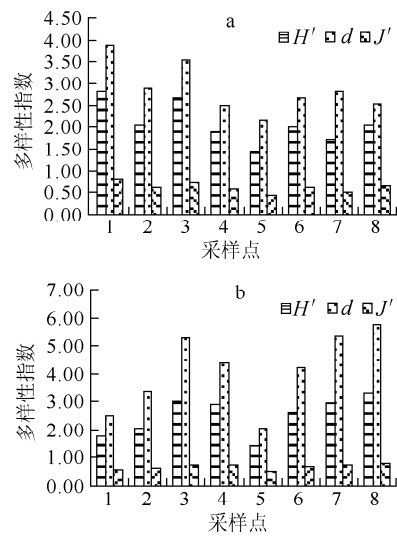


图3 白洋淀春(a)、夏季(b)不同采样点浮游植物生物多样性指数
Fig. 3 Diversity indices of phytoplankton community of sampling sites of Baiyangdian in spring (a) and summer (b)

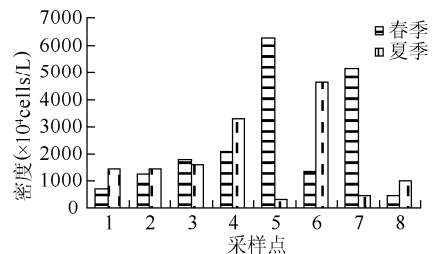


图4 白洋淀不同采样点春、夏季浮游植物密度比较
Fig. 4 The comparison of phytoplankton density of Lake Baiyangdian in spring and summer

表 1 白洋淀浮游植物密度及优势种变化

Tab. 1 The variations of phytoplankton cell densities and dominant species

年份	种数 (种)	密度 ($\times 10^4$ cells/L)	优势 类群	种数 (种)	百分比 (%)	优势 类群	种数 (种)	百分比 (%)
2005	152	664.4	绿藻门	80	52.6	蓝藻门	28	18.4
2006	155	518.2	绿藻门	81	52.3	蓝藻门	29	18.7
2009	133	2084.6	绿藻门	65	48.9	蓝藻门	22	16.5

从表 1 可以看出,白洋淀近几年来浮游植物密度及优势种的变化情况,以 2005 年为参考点,2006 年浮游植物春、夏季平均密度下降 0.22 倍;2009 年浮游植物春、夏季平均密度上升 2.14 倍.在这三次调查中,优势门类均以绿藻和蓝藻为主.藻类各门类年变化趋势各不相同,浮游植物种类数呈下降趋势,浮游植物密度呈上升趋势.在此次调查中,浮游植物密度出现显著的上升,这是因为白洋淀水体营养盐负荷发生改变,采样时间处于藻类的一个生长繁殖期,随着温度的不断升高,光照作用的增强,水体环境越来越适合浮游植物的增长,促进了浮游植物数量的增加.通常来说,中营养型湖泊中常以甲藻、隐藻、硅藻类占优势,富营养型湖泊则常以绿藻、蓝藻类占优势^[15].由此判断,绿藻门的小球藻属、蓝藻门的不动微囊藻成为优势种,表明了白洋淀水体已成为富营养型水体,且有机质含量有逐年增加的趋势.

2.3 浮游植物与环境因子的关系

对调查区域的 8 个样点的化学需氧量(COD)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl. a)、pH、溶解氧(DO)、透明度(SD)、水温(T)9 个环境参数进行调查. Pearson 相关分析结果表明,春季浮游植物细胞密度与环境因子的相关性不显著,夏季浮游植物细胞密度受 DO($r=0.813, P=0.014$)、Chl. a($r=0.818, P=0.024$)和 TP($r=0.833, P=0.010$)的影响较大,且呈正相关(表 2).影响白洋淀春季浮游植物空间分布的最佳环境因子组合还难以确定,而 DO、Chl. a 和 TP 浓度可能是影响白洋淀夏季浮游植物空间分布的重要因子.这主要是因为夏季通常是富营养型湖泊发生水华的时期,在圈头和烧车淀两个采样点,由于养殖业和种植业发达,水体营养盐浓度较高、藻类生长繁盛、溶解氧含量较低,浮游植物细胞密度偏高;而在枣林庄和端村两个采样点,由于水面开阔、离污染源较远,因而水质较好,浮游植物密度偏低.

白洋淀浮游植物细胞密度的季节性差异比较明显,主要影响因素可能是水温.环境因子对不同湖泊浮游植物群落结构和种类数量的影响存在差别,宋晓兰等^[16]对太湖和五里河浮游植物群落结构研究证实,风浪和富营养化水平是其生长的限制条件;Jeppesen 等^[17]指出湖泊中滤食性鱼类的放养密度是与浮游植物种类和数量相关性较为密切的因子.但由于浮游植物生长繁殖与其它多种因素(水体稳定性、气候、湖泊面积、湖泊深度、水生植物群落结构和密度)有关^[18-25],其它未知的理化、生物因子也可能通过一定方式直接或间接影响到浮游植物数量.因此很难对浮游植物数量与上述因素之间的作用方式进行“量-效”关系分析.建议在今后的研究中,加强对湖泊形态、气候特征、周边环境状况的调查,结合室内模拟试验,探索浮游植物数量变化的影响因子.

2.4 白洋淀水体富营养化程度评价

对富营养化程度的评价常以水体 Chl. a、SD、浮游植物优势种等作为最主要的指标.本文采用修正卡尔森营养状态指数法(TSIM)^[26]和优势种评价法对白洋淀的营养状态进行评价.其中 TSIM 能够较详细地描述水体营养状况变化,还可以进一步提高水质监测与评价质量.其方法是根据水体 SD、Chl. a、TP 浓度间的相互关系,采用 0-100 的一系列数字对湖泊营养状态分级,指数在 30 以下为贫营养,30-50 为中营养,50-100 为富营养.在同一营养状态下,指数值越高,其营养状态越重.

表2 白洋淀春、夏季浮游植物密度和环境因子的相关分析
 Tab.2 Correlation analysis between the density of Phytoplankton and environmental variables of Lake Baiyangdian in spring and summer

季节		<i>T</i>	DO	COD	COD _{Mn}	pH	TN	TP	Chl. a	SD	密度
春季	<i>T</i>	1									
	DO	0.024	1								
	COD	0.760 *	-0.454	1							
	COD _{Mn}	0.867 **	-0.285	0.948 **	1						
	pH	0.458	0.753 *	0.022	0.108	1					
	TN	0.274	-0.476	0.566	0.602	-0.249	1				
	TP	0.286	-0.428	0.550	0.600	-0.207	0.998 **	1			
	Chl. a	0.627	0.513	0.442	0.492	0.851 **	0.057	0.089	1		
	SD	-0.069	-0.212	-0.264	-0.220	-0.439	-0.382	-0.399	-0.687	1	
	密度	0.644	-0.132	0.651	0.543	0.308	-0.223	-0.241	0.512	-0.067	1
	夏季	<i>T</i>	1								
DO		-0.321	1								
COD		-0.617	0.295	1							
COD _{Mn}		0.087	0.518	0.100	1						
pH		0.241	0.329	-0.070	0.484	1					
TN		-0.814 *	0.472	0.555	0.455	0.107	1				
TP		-0.522	0.930 **	0.424	0.423	0.267	0.645	1			
Chl. a		-0.454	0.930 **	0.337	0.669	0.313	0.687	0.982 **	1		
SD		0.339	-0.089	-0.342	-0.556	-0.364	-0.724 *	-0.318	-0.622	1	
密度		-0.245	0.813 *	-0.011	0.498	0.630	0.505	0.833 *	0.818 *	-0.357	1

* 表示显著相关, $P < 0.05$, ** 表示极显著相关, $P < 0.01$

$$TSIM(\text{Chl. a}) = 10 \times (2.46 + \ln \text{Chl. a} / \ln 2.5)$$

$$TSIM(\text{TP}) = 10 \times [2.46 + (6.71 + 1.15 \times \ln \text{TP}) / \ln 2.5]$$

$$TSIM(\text{SD}) = 10 \times [2.46 + (3.69 - 1.53 \times \ln \text{SD}) / \ln 2.5]$$

式中, *Chl. a* 为叶绿素 a 的含量; *SD* 为透明度; *TP* 为总磷含量. *TSIM*(*Chl. a*)、*TSIM*(*TP*)、*TSIM*(*SD*) 分别为 77.00、47.60、69.24, 表明白洋淀水质处于中富营养级水平. 而根据优势种评价法, 在调查中观察到的浮游植物优势种既有富营养型指示种, 如小球藻, 也有重富营养型指示种, 如不定微囊藻、尖尾蓝隐藻, 其中以富营养型指示种占优势. 综合以上两种评价方法, 可以看出白洋淀的营养程度处于富营养化水平. 这与沈会涛等^[27]研究表明白洋淀多数水体处于富营养化状态的结果一致, 且本研究表明富营养化程度有加重的趋势.

3 结论

深入了解白洋淀浮游植物种类组成、数量特征及分布特征等情况, 对实现环境压力下的浅水湖泊生态系统评估与诊断、提出切实可行的富营养化防治调控对策、保护生物多样性等具有广泛的应用前景和学术价值.

(1) 两次调查共观测到浮游植物 8 门 133 种(属), 夏季浮游植物的种类比春季多, 优势类群发生了一定变化. 其中春季采集浮游植物 8 门 78 种(属), 夏季采集浮游植物 8 门 109 种(属), 蓝藻、绿藻和硅藻成为

优势种,白洋淀春、夏季浮游植物平均密度为 2084.6×10^4 cells/L. 与近几年来白洋淀综合生态调查结果比较,白洋淀浮游植物在种类组成上发生了明显变化,且密度有逐年升高的趋势。

(2) 利用浮游植物与水质化学检测的各项指标,采用修正卡尔森营养指数法和优势种评价法,从不同角度对白洋淀水质进行综合评价是更加符合实际情况的水质评价方法. 本文结合上述两种水质评价法,评价了白洋淀水质状况,结果显示:白洋淀水体处于富营养化水平,并有向重富营养化过渡的趋势。

4 参考文献

- [1] 汪官余. 宝圣湖浮游植物与若干生态因子相互关系的研究[学位论文]. 重庆:西南大学,2006.
- [2] 雷 欢,梁银铨,朱爱民等. 三峡水库童庄河浮游植物及其与水质的关系. 湖泊科学,2010,22(2):195-200.
- [3] 王 瑜,刘录三,方玉东. 生物操纵方法调控湖泊富营养化研究进展. 自然科学进展,2009,19(12):1296-1301.
- [4] 刘 宇,沈建忠. 藻类生物学评价在水质监测中的应用. 水利渔业,2007,(4):5-7.
- [5] 张 婷,李德亮,许宝红. 西洞庭湖区养殖水体浮游植物调查与水质评价. 水生态学杂志,2009,2(5):12-18.
- [6] 任 黎,董增川,李少华. 玄武湖浮游植物及水体富营养化研究. 水电能源科学,2008,26(4):31-32.
- [7] 曹 明,蔡庆华,刘瑞秋. 三峡水库及香溪河库湾理化特征的比较研究. 水生生物学报,2006,30(1):20-25.
- [8] 黄小波,洪剑明,杜桂森. 北京市汉石桥湿地浮游植物调查与水质评价. 湖南农业科学,2009,(4):133-135.
- [9] 翟光恒,李亚峰. 白洋淀水环境变化分析. 水科学与工程,2007,(5):45-46.
- [10] 陈伟明,黄祥飞,周万平. 湖泊生态系统观测方法. 北京:中国环境科学出版社,2005.
- [11] Clarke KR, Warwick RM. Change in marine communities; an approach to statistical analysis and interpretation. *Natural Environmental Research Council*, 1994: 24-36.
- [12] 沈会涛. 白洋淀浮游植物的群落生态学研究[学位论文]. 保定:河北大学,2007.
- [13] 王朝晖,林秋奇,胡 韧等. 广东省水库的蓝藻污染状况与水质评价. 热带亚热带植物学报,2004,12(2):117-123.
- [14] 李英华,崔保山,杨志峰. 白洋淀水文特征变化对湿地生态环境的影响. 自然资源学报,2004,19(1):62-68.
- [15] 庞清江,李白英. 东平湖水体富营养化评价. 水资源保护,2003,19(5):42-44.
- [16] 宋晓兰,刘正文,潘宏凯等. 太湖梅梁湾与五里湖浮游植物群落的比较. 湖泊科学,2007,19(6):643-651.
- [17] Jeppesen E, Sndergaard M, Sortkjar O *et al.* Interactions between phytoplankton, zooplankton and fish in a shallow, hypertrophic lake: A study of phytoplankton collapses in Lake Sbygard, Denmark. *Hydrobiologia*, 1990, 191: 149-164.
- [18] 赵孟绪,韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析. 生态学报,2005,25(7):1554-1561.
- [19] Arhonditsis GB, Winder M, Brett MT *et al.* Patterns and mechanisms of phytoplankton variability in Lake Washington (USA). *Water Research*, 2004,38(18): 4013-4027.
- [20] Gaedke U. The size distribution of plankton biomass in a large lake and its seasonal variability. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37(6): 1202-1220.
- [21] Na EH, Park SS. A hydrodynamic and water quality modeling study of spatial and temporal patterns of phytoplankton growth in a stratified lake with buoyant incoming flow. *Ecological Modeling*, 2006, 199(3): 298-314.
- [22] 肖 溪,楼莉萍,李 华. 沉水植物化感作用控藻能力评述. 应用生态学报,2009,20(3):705-712.
- [23] 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):589-595.
- [24] 刘春光,金相灿,孙 凌等. 城市小型人工湖围隔中生源要素和藻类的时空分布. 环境科学学报,2004,24(6): 1039-1045.
- [25] 马寨璞,赵建华,康现江. 白洋淀水循环特点及其对生态环境的影响. 海洋与湖沼,2007,38(5):405-410.
- [26] 章宗涉. 水生高等植物-浮游植物关系和湖泊营养状态. 湖泊科学,1998,10(4):83-86.
- [27] 沈会涛,刘存岐. 白洋淀浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析. 湖泊科学,2008,20(1):773-779.