

淀山湖不同季节营养盐含量与藻类群落的相互关系*

张亚克¹, 梁霞^{1**}, 何池全¹, 黎彬², 方焰星¹, 张绚璇¹, 詹跃武¹

(1: 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444)

(2: 上海市青浦区环境保护局, 上海 201700)

摘要: 于2009年1月至12月对淀山湖浮游藻类生物量及水体中N、P营养元素含量进行连续监测, 并利用典范对应分析(CCA)对浮游藻类种类分布与环境营养因子间的相关性进行研究. 结果表明: 淀山湖全年藻类生物量呈现两次大规模增长时期, 分别为春季的4月份(以绿藻为主)和初秋的8月份(以蓝藻为主), 其中春季藻类群落最大生物量(39.68 mg/m³)明显高于秋季(29.86 mg/m³); 不同季节藻类生物量与水体氮、磷营养物质含量间具有一定的相互影响关系, 冬季(11-1月)以硅藻和绿藻为优势种群的藻类群落, 其生物量与水体总磷含量呈显著相关性, 夏季(5-8月)蓝绿藻种群占优势时, 藻类群落生物量则与水体氨氮浓度变化显著相关, 然而在春季(2-3月)及秋季(9-10月)藻类的两次大规模增长时期, 水体N、P含量的增加却并不能明显促进藻类生长, 总磷与硝态氮之间存在一定的交互作用.

关键词: 氮; 磷; 浮游藻类; 群落; 淀山湖

Interrelationships between algal community and nutrient concentrations in different seasons in Lake Dianshan

ZHANG Yake¹, LIANG Xia¹, HE Chiquan¹, LI Bin², FANG Yanxing¹, ZHANG Xunxuan¹ & ZHAN Yuewu¹

(1: *School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200044, P. R. China*)

(2: *Qingpu District in Shanghai Environmental Protection Agency, Shanghai 201700, P. R. China*)

Abstract: The phytoplankton biomass and concentrations of N and P in Lake Dianshan were investigated from January to December, 2009, and relationship between phytoplankton distribution and nutritional factors was correlated by Canonical Correspondence Analysis. The results showed that there were two biomass peaks of phytoplankton within a year in Lake Dianshan. The one peak was in spring (March and April), and the other in autumn (August). The biomass of phytoplankton in spring (39.68 mg/m³) was higher than that in autumn (29.86 mg/m³). There were significant relationships between the nutrient concentrations and algae biomass in different seasons. The growth of phytoplankton was limited by phosphorus when the bacillariophyta and chlorophyta were dominant in Lake Dianshan from November to January. However, the growth of phytoplankton was limited by ammonium when the cyanophyta and chlorophyta were dominant in the lake from May to August. The higher nitrogen and phosphorus concentrations cannot significantly accelerate the growth of phytoplankton during the two outbreak periods of February-March and September-October, because there were interacted effects between nitrate and phosphorus.

Keywords: Nitrogen; phosphorus; phytoplankton; community; Lake Dianshan

淀山湖(31°04'–31°12'N, 120°53'–121°01'E)位于江苏、浙江和上海三地交界处, 面积62 km², 主要接受太湖流域上游来水, 出水经黄浦江流入长江口至东海^[1], 是上海市最大的淡水湖泊, 也是上海市重要的饮用水供水水源和水产品养殖基地, 其水质条件对于上海周边饮水安全及水产养殖具有重要意义^[2]. 淀山湖水体功能定位是Ⅱ类, 但是近年来淀山湖整体水质状况呈逐年下降趋势, 2001–2007年淀山湖的水质均未达到Ⅱ类水质标准, 一般为Ⅳ–Ⅴ类, 部分湖区劣于Ⅴ类^[3]. 与此同时, 近年来浮游藻类和原生动物种类数量及

* 上海大学创新基金项目(NO. A. 10-0111-08-006)和国家自然科学基金项目(40771203, 40871243)联合资助. 2010-11-30 收稿; 2011-03-01 收修改稿. 张亚克, 男, 1986年生, 硕士研究生; E-mail: yakai2046@163.com.

** 通讯作者; E-mail: asituya@shu.edu.cn.

群落密度的改变也显示出了淀山湖由中度富营养化向重度富营养化状态转变的趋势^[1,4],而这种转变将可能对该水源地的水质安全及湖泊生态系统的完整性产生严重影响。

淀山湖浮游藻类具有明显的季节演替特征^[5].与其它富营养化湖泊一样,这种季节性演替除了受到温度等环境因素影响外,浮游藻类与N、P等营养物质之间的相互作用也是导致演替形成的重要原因^[6].然而,目前有关淀山湖不同季节藻类群落结构与营养物质间相互影响的研究报导相对较少,且缺乏长期连续的原位监测数据.因此,本研究拟在对淀山湖全年藻类群落特征以及水质参数进行连续监测的基础上,运用典范对应分析^[7-9](Canonical Correspondence Analysis, CCA),研究不同季节淀山湖藻类群落结构与N、P营养物质间的相互作用关系,以期对淀山湖富营养化防治对策及综合治理提供理论支持与决策依据。

1 材料与方法

1.1 水样采集与分析

于2009年1月至12月,对淀山湖水质进行了连续监测.选择每月中旬的同一时间,在淀山湖四号航标(31°06'28"N, 120°57'38"E)处采集表层水样.每次采集水样后当天即进行总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)、硝态氮(NO₃-N)、总磷(TP)和叶绿素a(Chl. a)等参数的测定.水样采集及测定方法参照《湖泊富营养化调查规范》^[10]和《水和废水监测分析方法》^[11].

1.2 数据处理方法

采用Canoco for Windows 4.5软件对藻类物种、营养因子和不同季节藻类种群密度进行典范对应排序(CCA)分析^[12-13],CCA是一种非线性多元直接梯度分析方法,它将对应分析与多元回归分析相结合,每一步计算结果都与环境因子进行回归,因而可用于研究生物种类与环境因子间的相互关系^[14-16].

藻类种类矩阵经过lg(x+1)转换后按康奈尔(Cornell)数据文件格式录入成spe文件;环境矩阵TN、TP、NH₃-N、NO₃-N都进行lg(x+1)转换,然后录入成.env文件^[17-18].应用软件CANOCO 4.5进行运算,生成数据文件.sol后,排序结果用营养因子-不同季节藻类种群密度、营养因子-藻类群落关系的双序图表示.根据排序图中藻类群落间的位置关系、藻类群落与营养因子间的位置关系,群落与排序轴间的相关性大小,定量分析影响淀山湖浮游藻类群落增长以及不同季节藻类大规模增长的主要环境营养因子。

2 结果与分析

2.1 淀山湖 Chl. a、TN、TP 的年变化情况

对淀山湖进行了全年水质监测(图1和图2),并利用Chl. a含量表征水体中的浮游藻类生物量大小.淀山湖浮游藻类生物量在全年出现了两次峰值,分别为春季的4月和秋季的8月份,且春季藻类大规模增长时

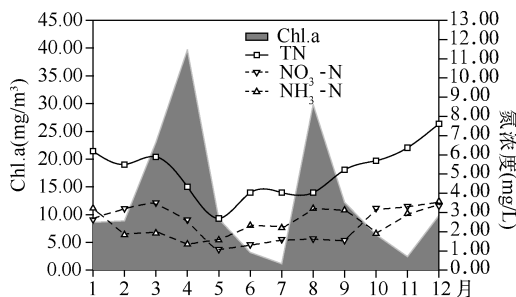


图1 淀山湖 Chl. a、TN、NO₃-N 以及 NH₃-N 浓度的全年变化情况

Fig. 1 The month variation of chlorophyll-a, TN, NO₃-N and NH₃-N in Lake Dianshan

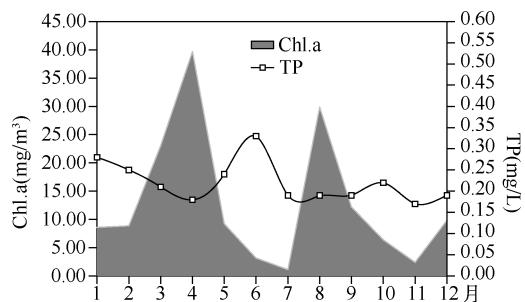


图2 淀山湖 Chl. a 以及 TP 浓度的全年变化情况

Fig. 2 The month variation of chlorophyll-a and TP in Lake Dianshan

的叶绿素含量(39.68 mg/m^3)明显高于秋季(29.86 mg/m^3),这一现象与已有研究报导相一致^[3,19].李小平等^[20]对2008-2009年的淀山湖藻类调查中共鉴定藻类8门,49属,99种,其中蓝藻,绿藻,硅藻是淀山湖藻类的优势种群,其生物量值占浮游藻类年平均总生物量的86.5%.程曦等^[6]通过对浮游藻类群落的长期连续监测数据进行分析后发现,淀山湖浮游藻类群落演替主要表现为春季硅藻、绿藻,夏秋季蓝藻以及冬季硅藻为主的特点,其中在春、秋两季,绿藻和蓝藻分别出现大规模增长,从而形成了两个生物量的峰值.在本研究中,水体N、P物质含量随着上述藻类演替过程而发生变化,其中营养物质消耗出现在春季绿藻大规模增加时期,此时水体N、P浓度分别达到全年最低值(0.24 和 0.18 mg/L).至夏秋季蓝藻占优势时,水体中TN含量出现一定的下降.

2.2 不同季节藻类增长与营养因子间 CCA 排序效果分析

运用典范对应分析可以对浮游藻类群落组成与环境营养因子之间的相互关系进行研究^[21].为确定淀山湖不同季节藻类增长与环境因子间的相关性,将不同月份藻类种群密度与水体N、P浓度值进行CCA分析(图3).在CCA排序图中,环境因子用带有箭头的线段表示,向量长短代表了其在主轴中的作用,箭头所处象限表示环境因子与排序轴之间相关性的正负^[22].根据全年藻类种群密度在CCA排序图中的位置及4个营养影响因子所指箭头的方向,可将淀山湖全年藻类增长划分为3种类型(图3).类型I在排序图的上部,包括1、11和12月,属于冬季时期;类型II在排序图右侧,包括5、6、8月,属于夏季;类型III在排序图的下方,包括2-4月以及7、9和10月,分别属于春、秋两季.由图4可知,类型I所指示的冬季藻类增长在很大程度上受到水体TP和TN浓度的共同影响,其中藻类种群密度与水体TP浓度之间表现出明显的正相关性,因此,此时水体中较高的TP浓度可明显促进浮游藻类增长.类型II所指示的夏季藻类种群密度增加主要受到水体TP和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的共同影响,其中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 表现出更为明显的藻类生长相关性.类型III所指示的春、秋两季,恰好也是淀山湖全年浮游藻类出现大规模增长的两个时期,此时水体TP浓度下降,浮游藻类种群密度增加更多地表现出与水体N含量,尤其是与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度之间的相互作用关系.

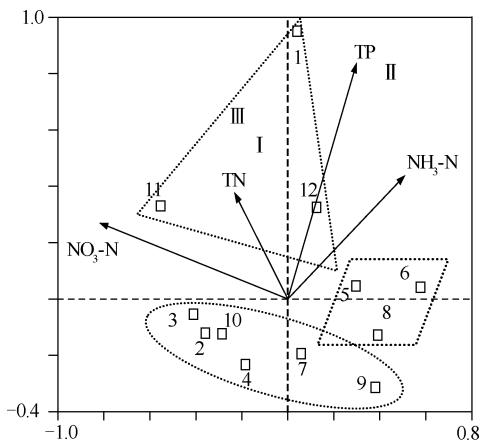


图3 淀山湖N、P浓度与不同季节浮游藻类种群密度的CCA二维排序图(图中数字代表全年不同月份)

Fig. 3 CCA biplot of N、P and algae assemblage density in different seasons in Lake Dianshan

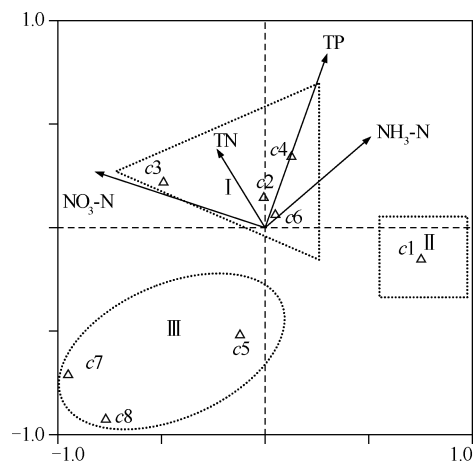


图4 淀山湖环境营养因子与浮游藻类种群密度的CCA二维排序图(c1:蓝藻门, c2:绿藻门, c3:硅藻门, c4:裸藻门, c5:隐藻门, c6:甲藻门, c7:金藻门, c8:黄藻门)

Fig. 4 CCA biplot of nutritional factors and dominant species in Lake Dianshan

2.3 不同藻类群落密度增长与营养因子间 CCA 排序效果分析

根据PGE模型所描述的藻类演替过程,以及程曦等^[6]对于淀山湖氮磷营养物20年间的变化及藻类增

长响应过程的研究报道可知,不同季节水体营养物质浓度与藻类群落之间的相互作用是导致淀山湖浮游藻类出现季节演替的重要原因,因此,本文参考程曦和李小平等^[6,20]关于淀山湖不同优势藻类季节性演替的研究,对淀山湖浮游藻类优势种群与营养因子间相关性进行分析,以确定淀山湖浮游藻类季节演替与营养因子间的相互作用关系。

据 8 种不同门类藻类在 CCA 排序图中的位置及 TN、TP、NH₃-N 以及 NO₃-N 4 个营养因子的箭头所指方向,可划分为 3 个类型:类型 I 包括硅藻门、绿藻门、甲藻门和裸藻门;类型 II 包括蓝藻门;类型 III 包括金藻门、隐藻门和黄藻门(图 4)。其中,如前文所述,蓝藻,绿藻,硅藻是淀山湖浮游藻类群落中的的优势种群。在类型 I 中,水体 N、P 浓度共同作用于淀山湖绿藻和硅藻种群,其中绿藻种群表现出与 TP 浓度间的明显正相关性,而硅藻则更多的表现出与 NO₃-N 之间的相关性。类型 II 中的主要环境影响因子为 NH₃-N,表明蓝藻的增长主要受到水体中 NH₃-N 浓度的影响。类型 III 中主要包括一些数量相对较少的藻类种群,水体中 N、P 浓度变化对这些藻类种群的影响并不是很明显。

2.4 CCA 排序种群-因子间相关性系数分析

在 CCA 排序图中,物种轴和环境因子轴之间的相关系数分别为 0.8919 和 0.7533,两个物种轴间的相关系数为 -0.0800,两个环境轴间的相关系数小于 0.0001(表 1),表明排序轴与环境因子间线性结合的过程较好地反映了物种与环境因子之间的关系,排序的结果是可靠的,排序效果理想。

表 1 淀山湖主要环境营养因子与 CCA 排序轴间的相关系数分析

Tab. 1 Correlation coefficients of four nutritional factors with the first two axes of CCA

	SP1	SP2	EN1	EN2
SP1	1.0000			
SP2	-0.0800	1.0000		
EN1	0.8919	<0.0001	1.0000	
EN2	<0.0001	0.7533	<0.0001	1.0000
NO ₃ -N	-0.7260***	0.2020	-0.8140***	0.2682
NH ₃ -N	0.4509*	0.3276	0.5055*	0.4349
TP	0.2654	0.6278**	0.2976	0.8334***
TN	-0.2046	0.2815	-0.2294	0.3737

*表示 $P < 0.10$, **表示 $P < 0.05$, ***表示 $P < 0.001$, SP1:物种排序轴 1, SP2:物种排序轴 2, EN1:环境因子排序轴 1, EN2:环境因子排序轴 2。

此外,在 CCA 分析中,前 2 个排序轴的特征值分别为 0.207、0.132,前 2 个排序轴与不同藻类种群密度之间的相关系数为 0.886 和 0.778,分别解释了 33.33% 和 12.27% 的藻类种群变化,对应 58.30% 和 21.50% 的藻类种群与营养物质影响因子之间的关系;4 个排序轴共解释了 57.20% 的藻类群落变化和 94.70% 的藻类种群与藻类营养因子的关系(表 2),所选的 4 个环境营养因子中 TP、NO₃-N、NH₃-N 对藻类种群的变化均表现出显著影响。

表 2 淀山湖浮游藻类种群密度变化与环境营养因子间的 CCA 排序结果

Tab. 2 CCA results of algae species and nutritional factors in Lake Dianshan

排序轴	特征值	种群-环境因子间的相关系数	种群密度变化累积百分比(%)	种群与环境因子关系变化累积百分比(%)	典范特征值总和
排序轴 1	0.207	0.886	33.33	58.30	0.180
排序轴 2	0.132	0.778	45.60	79.80	
排序轴 3	0.094	0.675	53.40	93.30	
排序轴 4	0.074	0.603	57.20	94.70	

在本研究所分析的 4 个环境因子中,与第一排序轴相关性最大的分别是 NO₃-N (-0.7260) 和 NH₃-N(0.4509),而 TP(0.6278)表现出与第二排序轴的最大正相关性(表 1)。此外,结合图 4、图 5 可知,沿第一排序轴从左至右,NO₃-N 的浓度逐渐减少而 NH₃-N 浓度逐渐增加,NO₃-N 浓度与硅藻种群密度变化间存在显著正相关性,而 NH₃-N 表现出与蓝藻的正相关;TP 和 TN 浓度均沿第二排序轴自下而上逐渐增加,其中 TP 浓度与绿藻种群密度变化之间表现出显著正相关。因此,由上述分析可知,对淀山湖浮游藻类群落格局产生影响的环境营养因子依次为 NO₃-N > TP > NH₃-N > TN。

3 讨论

淀山湖浮游藻类的大规模增长与水体 N、P 浓度变化间表现出一定的相互作用关系,而这种作用关系恰与 Sommer 等提出的浮游生物生态群落模型(Plankton Ecology Group model, PEG-model)中所描述的藻类群落演替过程相类似^[23]。近年来,浮游藻类的 PEG 演替模式已在众多研究中被发现并得以证实^[24-28]。所谓浮游藻类 PEG 演替模式,即由于营养竞争关系,浮游藻类的全年演替过程可分为 4 个阶段:首先,由于冬季充足的营养源与有限的光照条件,使得硅藻成为该时期浮游藻类群落中的优势种类,然而随着草食性鱼类以及浮游动物对硅藻的摄食,导致藻类与摄食生物之间出现了一个群落生物量上的动态平衡,因此在冬末初春季节,浮游藻类生物量可基本维持在一定的变化范围之内。随着环境温度上升,至春夏季节,绿藻大量出现,此时浮游藻类群落的生长主要表现为磷营养限制。随着磷素被大量消耗以及随后的绿藻死亡,硅藻又逐步成为优势种群。然而,此时整个浮游藻类生物量基本保持在较低的水平。随后出现的硅(Si)限制以及环境温度的变化,使得固氮蓝藻成为夏秋季节浮游藻类群落中的优势种类,此时水体主要表现出一定的氮营养限制。随着冬季环境温度的下降,以及有效光照条件的减少,硅藻逐步成为浮游藻类群落中的优势种类。

淀山湖藻类的群落演替规律^[5]为春季以硅藻和绿藻为主,夏秋季为绿藻和蓝藻,冬季以硅藻为主。从浮游藻类优势种群演替与氮、磷相互关系角度亦可以对淀山湖一年当中出现两次藻类生物量高峰加以解释。冬季氮磷营养随水体悬浮颗粒物的积累,水体中 N、P 浓度较高^[29-31],但由于气温较低,导致冬季这两种藻类并没有出现大量增长;春季(2-4月)气候转暖,水体中 TP、TN 含量较高,这给硅藻、绿藻增长提供了有利条件,且不同藻类群落密度与营养因子间 CCA 排序效果分析表明 TP 对绿藻增长具有明显的促进作用,因此导致在春季 4 月份时藻类生物量达到峰值;夏季(5-8月)水体中优势种逐渐转为以蓝藻为主,由于前期藻类大规模增长,营养物间的竞争导致其消亡,氮、磷得以释放,水体中氮、磷含量有微量上升,特别是氮含量的上升给蓝藻增长提供了有利条件,CCA 排序效果分析表明蓝藻的增长与水体中 NH₃-N 浓度具有显著的相互关系,因此 6 月份开始蓝藻迅速增长,在 8 月份藻类的生物量达到另外一个峰值;进入 10 月份气温降低藻类出现又一次消退,进入冬季藻类转变为硅藻为主,但未出现大量增长,使氮、磷在冬季得以积累,为来年春季藻类的增长做了前期准备。

致谢:感谢上海市环境科学研究院的陈小华,东华大学的吴雪峰以及青浦淀山湖渔政站在采样过程给予的帮助和支持。

4 参考文献

- [1] 张鼎国,杨再福. 淀山湖生态环境的演变与对策. 水利渔业, 2006, 26(1): 61-63.
- [2] 施 玮, 吴和岩, 赵耐青等. 淀山湖水质富营养化和微囊藻毒素污染水平. 环境科学, 2005, 26(5): 55-61.
- [3] 郑晓红, 汪 琴. 淀山湖水质状况及富营养化评价. 环境监测管理与技术, 2009, 21(2): 69-70.
- [4] 郑小燕, 王丽卿. 淀山湖原生动物种类组成及数量变动. 生态学杂志, 2009, 28(1): 51-57.
- [5] 王丽卿, 施 荣, 季高华等. 淀山湖浮游植物群落特征及其演替规律. 生物多样性, 2011, 19(1): 48-56.
- [6] 程 曦, 李小平. 淀山湖氮磷营养物 20 年变化及其藻类增长响应. 湖泊科学, 2008, 20(4): 409-419.
- [7] Guisan A, Weiss SB, Weiss AD. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, 1999, 143: 107-122.
- [8] 陶 冶, 王 丹, 刘 彤等. 天山北部拟南芥生存群落特征及其与环境的关系. 生物多样性, 2009, 17(1): 51-61.
- [9] Penczak T, Godinho F, Agostinho AA. Verification of the dualism ordering method by the canonical correspondence analysis: fish community samples. *Limnologia*, 2002, 32: 14-20.
- [10] 金相灿, 屠清瑛主编. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 275-285.
- [11] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会编. 水和废水监测方法(第 4 版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] Ter Braak CJF. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 1986, 67: 1167-1179.

- [13] Hoy CW, Grewal PS, Lawrence JL *et al.* Canonical correspondence analysis demonstrates unique soil conditions for entomopathogenic nematode species compared with other free-living nematode species. *Biological Control*, 2008, **46**: 371-379.
- [14] 栾青杉, 孙 军, 宋书群等. 长江口夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析. *植物生态学报*, 2007, **31**(3): 445-450.
- [15] 沈会涛, 刘存歧. 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.
- [16] Hejermanova-Neerkova P, Hejerman M. A canonical correspondence analysis (CCA) of the vegetation- environment relationships in Sudanese savannah, Senegal. *South African Journal of Botany*, 2006, **72**: 256-26.
- [17] 胡 韧, 熊江霞, 韩博平. 具有短水力滞留的小型富营养化水库浮游植物群落结构与动态. *生态环境*, 2008, **17**(4): 1319-1326.
- [18] 郑敬刚, 董东平, 赵登海等. 贺兰山西坡植被群落特征及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2008, **28**(9): 4559-4566.
- [19] 由文辉. 淀山湖着生藻类群落结构与数量特征. *环境科学*, 1999, **20**: 59-62.
- [20] 李小平, 陈漫漫. 淀山湖藻类水华早期预防研究与应用. 上海: 上海市环境科学研究院, 2009: 6-14.
- [21] 刘 勇. 长江口大型底栖动物生态学研究及日本刺沙蚕生物能量学研究. 青岛: 中国海洋大学, 2009: 16-28.
- [22] 冯 云, 马克明, 张育新等. 辽东栎林不同层植物沿海拔梯度分布的 DCCA 分析. *植物生态学报*, 2008, **32**(3): 568-573.
- [23] Sommer U, Gliwicz ZM, Lampert W *et al.* The PEG-model of seasonal succession of plank tonic events in fresh waters. *Archiv für Hydrobiologie*, 1986, **106**(4): 433-471.
- [24] Rolland A, Bertrand F, Maumy M *et al.* Assessing phytoplankton structure and spatio-temporal dynamics in a freshwater ecosystem using a powerful multiway statistical analysis. *Water Research*, 2009, **43**(13): 3155-3168.
- [25] Alvarez-Cobelas M, Baltanas A, Velasco JL *et al.* Zooplankton dynamics during autumn circulation in a small, wind-sheltered, Mediterranean lake. *Marine and Freshwater Research*, 2006, **57**(4): 441-452.
- [26] Matveev VF, Matveeva LK. Seasonal succession and long-term stability of a pelagic community in a productive reservoir. *Marine and Freshwater Research*, 2005, **56**(8): 1137-1149.
- [27] Gasiunaite ZR, Razinkovas A. Temporal and spatial patterns of crustacean zooplankton dynamics in a transitional lagoon ecosystem. *Hydrobiologia*, 2004, **51**(1-3): 139-149.
- [28] Anneville O, Ginot V, Druart JC *et al.* Long-term study (1974-1998) of seasonal changes in the phytoplankton in Lake Geneva: a multi-table approach. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(10): 993-1007.
- [29] 林建伟, 朱志良, 赵建夫等. 负载硝酸盐有机改性沸石抑制底泥氮磷释放的效果及机制研究. *环境科学*, 2008, **29**(2): 356-361.
- [30] 李 君. 杭州市运河水系氮磷污染及底泥磷释放水动力学研究. 杭州: 浙江大学, 2006: 2-14.
- [31] Haggard BE, Soerens TS. Sediment phosphorus release at a small impoundment on the Illinois River, Arkansas and Oklahoma, USA. *Ecological Engineering*, 2006, **28**: 280-287.