

东洞庭湖浮游藻类优势种群对主要水环境因子的生态适应性*

Ecological Suitability of Phytoplankton Dominant Species to Key Water Environmental Factors in East Dongting Lake

张琦¹,傅园园¹,黄河仙²,罗岳平²,陈贝贝²,胡树林²,刘应迪^{1**}

ZHANG Qi¹, FU Yuanyuan¹, HUANG Hexian², LUO Yueping², CHEN Beibei², HU Shulin², LIU Yingdi¹

(1. 湖南师范大学生命科学学院, 湖南长沙 410081; 2. 湖南省环境监测中心站, 湖南长沙 410001)

(1. College of Life Science, Hunan Normal University, Changsha, Hunan, 410081, China; 2. Hunan Province Environmental Monitoring Central Station, Changsha, Hunan, 410001, China)

摘要:【目的】研究东洞庭湖浮游藻类优势种群对主要水环境因子的生态适应性,为东洞庭湖水生态系统保护、健康评估及生物监测提供科学依据。【方法】根据物种综合数量指标(重要值 IV)筛选优势种表征浮游藻类群落结构,通过因子分析法(Factor analysis)从 18 项水质参数中提取出主要水环境因子,运用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)研究优势种群与主要水环境因子的关系。【结果】从优势种与环境因子的关系来看,水温与溶解氧是影响尖针杆藻(*Synedra acus* var.)的主要因子;变异直链藻(*Melosira varians*)、凸出舟形藻(*Mavicola prptracta*)是水体有机污染的良好指示种;草鞋形波缘藻(*Cymatopleura solea*)喜高浓度的氨氮;细小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)对阴离子表面活性剂敏感,而双头辐节藻(*Stauroneis anceps*)对阴离子表面活性剂表现出高耐受性;肘状针杆藻(*Synedra ulna*)对环境条件的要求较其它藻类有一定的特殊性;大多数浮游藻类喜弱碱性的水体环境。相较于以往研究,电导率并不是影响东洞庭湖藻类群落结构的主要水环境因子。【结论】东洞庭湖不同的浮游藻类优势种群对环境因子有其特定的生态适应性。

关键词:浮游藻类 水环境因子 冗余分析(RDA) 生态适应性 东洞庭湖

中图分类号:Q948.11 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2016)02-0144-06

Abstract:【Objective】This research focused on the ecological suitability of phytoplankton dominant species to key water environmental factors.【Methods】According to the importance value (IV), which covers the density, biomass and frequency, dominant species were screened to characterize phytoplankton community structure.

Key water environmental parameters were screened from 18 water environmental parameters by factor analysis. Redundancy analysis (RDA) was applied to analyze the relationship between the dominant species and key water environmental factors.【Results】The main features of the relationship between dominant species and water environmental factors were as follows:

收稿日期:2016-01-21

修回日期:2016-03-10

作者简介:张琦(1992-),女,硕士研究生,主要从事水环境生态学。

* 湖南省生态学重点学科建设项目(0713),湖南省生物发育工程及新产品研发协同创新中心项目(20134486)和湖南省环保科技资金 2014 年项目资助。

** 通讯作者:刘应迪(1958-),男,研究员,主要从事植物学及生态学的教学和研究,E-mail:lyd_Q00007@sina.com。

Water temperature (WT) and dissolved oxygen (DO) were the key factors influencing *Synedra acus* var. *Melosira varians* and *Mavicola prptracta* may serve as nice indicators of organic pollution. *Cymatopleura solea* was fit for high concentration of ammonia nitrogen (NH₃-N). *Merismopedia tenuissima* was sensitive to anionic surface active agents (a-SAA), however, *Stauroneis anceps* showed higher tolerance to this factor. *Synedra ulna* was more special in the needs of environmental conditions compared with other phytoplankton. Most dominant species favored slight alkalinity. Though usually being an important influence factor for phytoplankton community structure the conductivity was not a dominant influencer on the phytoplankton community structure in East Dongting Lake. **【Conclusion】**Different phytoplankton dominant species showed their specific ecological suitability to the environmental factors in East Dongting Lake.

Key words: phytoplankton, water environmental factors, redundancy analysis (RDA), ecological suitability, East Dongting Lake

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20160512.005

0 引言

【研究意义】浮游藻类作为水生态系统初级生产的重要贡献者,是整个水生态系统物质循环和能量流动的基础,水生态系统健康与否的重要生物指示,及预测水环境发展趋势的重要依据^[1-2]。从生态学观点来看,水环境因子直接影响藻类植物的种群或群落结构特征^[3];另一方面,藻类植物的个体、种群或群落的变化,可以客观反映出水体质量的变化规律^[4]。东洞庭湖国家级自然保护区(28°59′~29°38′N,112°43′~113°15′E)作为中国首批加入“国际重要湿地公约”的自然湿地,位于长江中游荆江段南岸、洞庭湖东北部,地处湖南省东北部,全区总面积 190 km²,属吞吐型季节性湖泊。湖区属北亚热带湿润季风气候,具有四季分明、热量丰富、降水充沛等特点^[5]。东洞庭湖作为洞庭湖湖泊群中最大、保存最完好的主体湖盆,其水域面积占洞庭湖湖区总面积的 55%,是整个洞庭湖水最终汇入长江的聚集水域,其健康程度不仅反映洞庭湖区生态环境质量,并可能直接影响长江中游荆江段水质。**【前人研究进展】**浮游藻类对环境变量的响应问题已引起世界范围内的研究和关注,Ngupula 等^[6]在 2005—2007 年间对坦桑尼亚的维多利亚湖进行浮游藻类与理化参数间关系的研究,得出湖泊营养化状态通过影响浮游植物的优势种从而影响其物种组成。Zhou 等^[7]对受金属污染水体的生物监测进行研究,生物监测可应用于水体的金属污染、生物降解、毒性预测及毒理学等过程。**【本研究切入点】**迄今为止,国内对东洞庭湖浮游藻类与水环境因子关系的研究极为缺乏。**【拟解决的关键问题】**本文于 2013 年和 2014 年对东洞庭湖浮游藻类群落开展生态学调查,运用因子分析(Factor analysis, SPSS Statistics 19.0)和冗余分析(Redundancy analysis, RDA, 广西科学 2016 年 4 月 第 23 卷第 2 期

Canoco 4.5),探讨东洞庭湖浮游藻类优势种群与水环境因子的关系,以期东洞庭湖水生态系统保护、健康评估及生物监测提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与处理

野外调查工作在 2013 年 9 月和 11 月、2014 年 3 月和 6 月进行,根据国家环保部东洞庭湖国控断面设置 8 个采样点(图 1)。用有机玻璃采水器采集表层至 1.5 m 深度的水样 1.0 L 于样品瓶中,用 4%~5% 甲醛溶液现场固定,带回实验室静置 48 h,使其充分沉淀,然后缓慢吸去上清液,浓缩至 50 mL,保存



S1:荆江口,S2:洞庭湖出口,S3:城陵矶,S4:岳阳楼,S5:扁山,S6:扁山外,S7:八仙桥,S8:鹿角

S1:Jingjiang River mouth,S2:Dongting Lake outlet,S3:Chenglingji,S4:Yueyang tower,S5:Biانشan,S6:Outside Bianshan,S7:Baxian bridge,S8:Lujiao

图 1 东洞庭湖采样点分布示意图

Fig.1 Locations of sampling sites in East Dongting Lake

供镜检。吸取 0.1 mL 处理后的样品,使用浮游植物计数框进行藻类镜检鉴定,每管样品共重复计数 10 次,取其平均值^[8]。种类鉴定主要根据《中国淡水藻类:系统、分类及生态》^[8]、《淡水微型生物图谱》^[9]等。同期采集水样供理化指标的测定分析。

1.2 水样理化指标的测定

测定水环境指标共 18 项,水温(WT)和溶解氧(DO)用溶解氧仪(HANNA HI-9143)现场测定;pH 值用 pH 仪(HANNA HI-8424)现场测定;电导率(Cond)用电导率仪(HANNA HI-8733)现场测定。在实验室参照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[10]的相关规定及规范,采用纳氏试剂分光光度法测定氨氮(NH₃-N),快速消解分光光度法测定化学需氧量(COD);钼酸铵分光光度法测定总磷(TP);酸性法测高锰酸盐指数(COD_{Mn})。参照《水质分析方法与技术》^[11]对挥发酚(Vol-P)、氟化物(Fluoride)、阴离子表面活性剂(a-SAA)、汞(Hg)、铅(Pb)、硒(Se)、铜(Cu)、镉(Cd)、锌(Zn)、石油类进行测定。

1.3 数据分析

物种重要值 $IV = (\text{物种相对密度} + \text{物种相对显著度} + \text{物种相对频度}) / 3$ 。

采用 SPSS Statistics 19.0 软件对 18 项环境因子进行因子分析(Factor analysis),每因子有 32 个变量(含 4 个时间段 8 个采样点的数据),根据特征值大于 1 的原则确定主成分,采用方差最大旋转方法^[12]选取主要水环境因子。按照浮游藻类物种(包含 32 个对应值)至少在 2 个样点重要值大于等于 4,同时该种在不同时期出现的频率大于等于 12.5%^[13-14]的原则筛选优势种群。运用 Canoco for windows 4.5 软件对浮游藻类物种数据进行去趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)^[15]验证 RDA 分析的适合性。RDA 分析结果用物种-环境因子关系的排序图表示,图中水环境因子用带有箭头的线段表示,向量长短显示其在主轴中的作用;物种箭头之间夹角的余弦值、环境变量箭头之间夹角的余弦值、物种箭头与环境变量箭头之间夹角的余弦值分别表示对应的相关性,夹角越小,则说明相关性越高。如果箭头同向,表示正相关;反向,表示负相关;夹角接近直角,表示相关性很小^[16]。

2 结果与分析

2.1 浮游藻类物种组成及优势种群

调查期间共鉴定浮游藻类 8 门 65 属 159 种(含变种及变型),其中硅藻门占 48.43%,共计 26 属 77 种;绿藻门占 30.19%,共计 21 属 48 种;蓝藻门 7 属

14 种,占 8.81%;裸藻门 5 属 10 种,占比 6.29%;黄藻门 1 属 4 种,甲藻门 3 属 3 种,隐藻门 1 属 2 种,金藻门 1 属 1 种,分别占 2.52%、1.89%、1.26%、0.63%。经物种筛选,最终纳入 RDA 排序的浮游藻类优势种如下:肘状针杆藻 *Synedra ulna* (A1)、粗壮双菱藻华彩变种 *Surirella robusta* var. *splendida* (A2)、绿色裸藻 *Euglena viridis* (A3)、尖针杆藻 *Synedra acus* var. (A4)、美丽星杆藻 *Asterionella formosa* (A5)、凸出舟形藻 *Mavivula prpracta* (A6)、尖布纹藻 *Gyrosigma acuminatum* (A7)、变异直链藻 *Melosira varians* (A8)、颗粒直链藻 *Melosira granulata* (A9)、双头辐节藻 *Stauroneis anceps* (B1)、草鞋形波缘藻 *Cymatopleura solea* (B2)、扁圆卵形藻 *Cocconeis placentula* (B3)、窗格平板藻 *Tabellaria fenestrata* (B4)、膨胀桥弯藻 *Cymbella tumida* (B5)、啮蚀隐藻 *Cryptomonas erosa* (B6)、梭形裸藻 *Euglena acus* (B7)、龙骨栅藻 *Scenedesmus carinatus* (B8)、丛球韦斯藻 *Westella botryoides* (B9)、河生集星藻 *Actinnastrum fluviatile* (C1)、小型黄丝藻 *Tribonema minus* (C2)、卵形隐藻 *Cryptomonas ovata* (C3)、微小多甲藻 *Puridinium pusillum* (C4)、颗粒直链藻极狭变种 *Melosira granulata* var. *angustissima* (C5)、拟丝状黄丝藻 *Tribonema ulothrichoides* (C6)、卵形双菱藻 *Surirella ovata* (C7)、缢缩异极藻头状变种 *Gomphonema constrictum* var. *capitata* (C8)、长梭囊裸藻 *Trachelomonas nadsoni* (C9)、短小舟形藻 *Navicula exigua* (D1)、细小平裂藻 *Merismopedia tenuissima* (D2)、圆柱鱼腥藻 *Anabaena cylindrica* (D3),共计 30 种。

2.2 浮游藻类优势种与环境因子的 RDA 分析

经因子分析,最终提取的主要水环境因子有 WT、a-SAA、DO、NH₃-N、Fluoride、COD_{Mn}、Vol-P、COD、pH 值、Cond、Hg,共 11 种。DCA 分析的 log 文件显示,4 个排序轴的梯度长度最大值为 3.939,说明适合基于线性数据模型的冗余分析(Redundancy analysis, RDA)。RDA 分析的 log 文件显示,物种的 2 个排序轴之间近似垂直,其相关系数为 -0.0054,环境因子的 2 个排序轴之间的相关系数为 0,经蒙特卡罗(Monte Carlo)显著性检验,所有排序轴均达到显著性水平($P < 0.05$),表明排序结果可靠^[17]。

由图 2 可以看出,物种-环境因子 RDA 排序图呈现以下特点:(1)DO 和 WT 呈极强的负相关。尖针杆藻(A4)、美丽星杆藻(A5)及草鞋形波缘藻(B2)与 DO 正相关,而与 WT 负相关,它们可能是喜低温种

类;而处于第3象限的大多数浮游藻类,如拟丝状黄丝藻(C6)、卵形双菱藻(C7)、短小舟形藻(D1)、长梭囊裸藻(C9)、卵形隐藻(C3)、龙骨栅藻(B8)等与WT具有极强的正相关性,它们可能是喜高温种类。(2)COD_{Mn}、COD是表征水体有机污染程度的综合指标,尖布纹藻(A7)、窗格平板藻(B4)、膨胀桥弯藻(B5)、变异直链藻(A8)与COD_{Mn}呈较强的正相关性,凸出舟形藻(A6)、颗粒直链藻极狭变种(C5)与COD有较好的正相关性,说明这些种类对有机污染具有较好的指示作用。(3)双头辐节藻(B1)与a-SAA具有极强的正相关性,而其它浮游藻类与a-SAA的正相关性较弱或呈现负相关,其中细小平裂藻(D2)与a-SAA呈现极强的负相关。(4)在整个RDA排序图中,大多数浮游藻类优势种与pH值这一环境变量呈正相关。(5)绿藻门3个优势种,蓝藻门2个优势种,以及甲藻门1个优势种分布相对集中,大部分处于第3象限,表明它们大多具有喜高温的生态习性;硅藻门17个优势种,裸藻门3个优势种,隐藻门2个优势种,黄藻门2个优势种分布较为分散。(6)存在物种射线与环境变量射线接近重合的现象,如草鞋形波缘藻(B2)与NH₃-N,龙骨栅藻(B8)与Fluoride,微小多甲藻(C4)与Vol-P及Hg,此外还有扁圆卵形藻(B3)和缢缩异极藻头状变种(C8)与Cond,这些种类与相应环境因子之间呈现出显著正相关,是否意味着真实的环境-生物关联,还有待进一步观察。

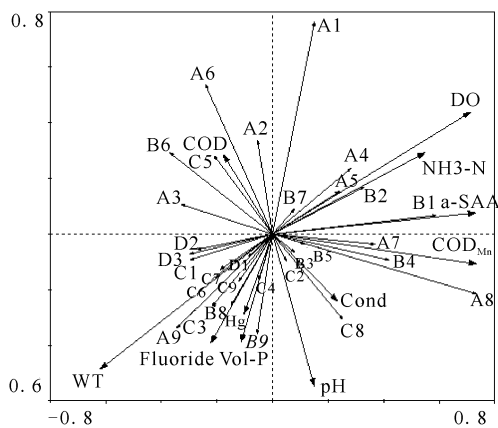


图2 东洞庭湖主要水环境因子与浮游藻类优势种的RDA排序图

Fig. 2 RDA ordination diagram of key water environmental factors and dominant species of phytoplankton in East Dongting Lake

3 讨论

湖泊理化因子的变动对浮游植物群落起着重要

的调控作用,可致浮游植物群落结构的改变^[18],因此寻找影响水域生态系统结构的关键因子,以及探究这些因子是如何影响浮游藻类群落,对于湖泊水环境监测和管理具有重要的科学意义。

RDA排序图可以较好地解释物种与环境因子的关系,反映不同物种在生态习性上的异同^[16]。细小平裂藻、圆柱鱼腥藻、河生集星藻在图2中的位置极为接近,表明它们在生态适应性上较为相似。而同一科属的浮游藻类中,同为直链藻属(*Melosira*)的变异直链藻、颗粒直链藻及其变种颗粒直链藻极狭变种,以及同为舟形藻属(*Navicula*)的凸出舟形藻、短小舟形藻,在该图中位置相距较远,表现出对环境资源的不同依赖,这表明即使同一科属的浮游藻类对环境的要求也可能存在一定的差异。值得注意的是,肘状针杆藻在排序图中的位置与其他所有优势种都保持着相对较远的距离,说明其在生态适应性上对环境条件的要求较其他藻类有一定的特殊性。洞庭湖重金属污染问题已被广泛关注,调查期间的5项重金属的单项指标均未超过Ⅱ类水质量标准。而在以往报道中,本次调查的绝对优势种之一肘状针杆藻属于水体受重金属锌污染的指示种类^[19],但本次调查的数据并未支持这一观点。RDA排序图中仅有的2种蓝藻圆柱鱼腥藻、细小平裂藻同水温有较好的正相关,这与蓝藻易在高水温处生长的习性相吻合^[20]。缢缩异极藻头状变种和扁圆卵形藻与电导率呈极强的正相关性,这支持了电导率是影响硅藻生长的重要环境因子^[21]。而随着藻类生物监测技术的不断发展,重金属及有机毒物对浮游藻类毒性效应的研究在持续推进,龙骨栅藻与氟化物,微小多甲藻与挥发酚、汞所呈现的极强正相关,或将为该领域提供新的思路。尖针杆藻与WT呈极强的负相关性,而与DO呈较强的正相关性,这支持了尖针杆藻易在低温、高溶氧的水体中形成优势种群的生活习性^[22]。细小平裂藻与a-SAA呈现极强的负相关,对这一污染因子表现了突出敏感性,而双头辐节藻的物种射线与a-SAA的环境变量射线接近重合,表明其对这一污染因子耐受的临界值较高,这两种浮游藻类的特殊性或将使其成为a-SAA污染研究方面具有针对性的实验物种。

东洞庭湖水环境整体呈偏弱碱性,各样点pH值为6.77~8.04,年均7.66。图2中,大多数浮游藻类优势种与pH值呈正相关,表明喜好弱碱性的水体环境,这与刘春光等^[23]的研究结果基本一致,许海等^[24]也得出与之相近的结论,藻类适合在中性到偏碱性的水体中生活。需注意的是,由于藻类对pH值

变化较为敏感,即使较小的 pH 值变化也会对浮游藻类群落产生剧烈影响,东洞庭湖湖区周边市工矿业发达,需严防工矿污染加重酸雨,否则将对东洞庭湖水质及浮游藻类群落造成破坏。变异直链藻、凸出舟形藻这类多存在于污染水体的浮游藻类,在本文中分别倾向于高的 COD_{Mn} 和 COD ,说明其具有较强的耐污性,是良好的有机污染指示物种。草鞋形波缘藻与 NH_3-N 具有极强的正相关性,倾向于高浓度的 NH_3-N ,然而,任何藻类对营养盐浓度都有其特定的适应范围,当超过其浓度阈时将会对藻类产生毒害作用^[25],因此对水体氨氮、总磷等营养盐的控制将有利于湖区水生态系统的稳定。

Flores 等^[26]对 Arancio 湖的研究表明,电导率(Cond)对浮游藻类群落结构影响最大。陆欣鑫等^[27]的研究也支持 Cond 是影响藻类群落结构的主要水环境因子,但本研究的结果并未支持这一观点。RDA 分析的 log 文件显示,Cond 与排序轴第一轴的相关系数仅 0.2055。这是因为调查期间东洞庭湖 Cond 整体较为稳定,各季度之间无显著差异($P = 0.71 > 0.05$)。水中无机酸、碱或盐的浓度增加,会导致 Cond 的增加,但东洞庭湖水体 pH 值较为稳定,其描述性统计分析显示 pH 值空间变异系数仅 3.13%,因此在自然条件下水体 Cond 不会出现明显波动,但是,如果人为扰动使湖水中携带的溶解离子含量急剧升高,会对浮游藻类群落产生剧烈影响。

4 结论

2013 年及 2014 年的生态学调查,共筛选出 30 种浮游藻类优势种群,提取出 11 项主要水环境因子。不同的浮游藻类优势种表现出特定的生态适应性,水温与溶解氧是影响尖杆针藻的主要因子;变异直链藻、凸出舟形藻是水体有机污染的良好指示种;草鞋形波缘藻倾向高浓度的氨氮;细小平裂藻对阴离子表面活性剂敏感,而双头辐节藻对其表现出高耐受性;肘状针杆藻对环境条件的要求较其他藻类有一定的特殊性;大多数浮游藻类喜弱碱性的水体环境。相较于以往研究,电导率并不是影响东洞庭湖藻类群落的主要水环境因子。

参考文献:

[1] SIDIK M J, NABI M R U, HOQUE M A. Distribution of phytoplankton community in relation to environmental parameters in cage culture area of Sepanggar Bay, Sabah, Malaysia[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 80(2): 251-260.

[2] 潘继征,熊飞,李文朝,等.抚仙湖浮游植物群落结构、分

布及其影响因子[J].生态学报,2009,10(29):5376-5385.

PANG J Z, XIONG F, LI W C, et al. Structure, distribution and its impact factors of phytoplankton community in Fuxian Lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 10(29): 5376-5385.

[3] KIPLAGATAT K, LOTHAR K, FRANCIS M M. Temporal changes in phytoplankton structure and composition and the Turkwel Corge Reservoir[J]. Hydrobiologia, 1998, 368: 41-59.

[4] THOMNTON K W, KIMMEL B L, PAYNE F E. Reservoir Limnology: Ecological Perspectives [M]. New York: Wiley Interscience Publication, 1990: 386-389.

[5] 窦鸿身,姜加虎.洞庭湖[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2000:1-127.

DOU H S, JIANG J H. Dongting Lake[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2000: 1-127.

[6] NGUPULA G W, MBONDE A S E, EZEKIEL C N. Spatial and temporal patterns of phytoplankton abundance and composition in three ecological zones in the Tanzanian waters of Lake Victoria[J]. African Journal of Aquatic Science, 2011, 36(2): 197-206.

[7] ZHOU Q F, ZHANG J B, FU J J, et al. Biomonitoring: An appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem [J]. Analytica Chimica Acta, 2008, 606: 135-150.

[8] 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,2006:23-915.

HU H J, WEI Y X. The Freshwater Algae of China-Systematics, Taxonomy and Ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006: 23-915.

[9] 周凤霞,陈剑虹.淡水微型生物图谱[M].北京:化学工业出版社,2005:35-192.

ZHOU F X, CHEN J H. Freshwater Maps of Microbiological[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 35-192.

[10] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法:第四版[M].北京:中国环境科学出版社,2002:88-104.

State Environmental Protection Administration of China. Water and Exhausted Water Monitoring Analysis Method: The Fourth Edition[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 88-104.

[11] 时红,孙新忠,范建华,等.水质分析方法与技术[M].北京:地震出版社,2001:14-268.

SHI H, SUN X Z, FAN J H, et al. Water Quality Analysis Method and Technology[M]. Beijing: Seismological Press, 2001: 14-268.

[12] LIU C W, LIN K H, KUO Y M. Application of factor

- analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 313(13): 77-89.
- [13] LOPES M R M, BICUDO C E M, FERRAGUT M C. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil[J]. *Hydrobiologia*, 2005, 542(1): 235-247.
- [14] MUYLAERT K, SABBE K, VYVERMAN W. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuan (Schelde, Belgium) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 50(5): 673-687.
- [15] BORCARD D, LEGENDRE P, DRAPEAU P. Partialling out the spatial component of ecological variation [J]. *Ecology*, 1992, 73: 1045-1055.
- [16] LEPX J, SMILAUERS P. *Multivariate Analysis of Ecological Data Using Canoco* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 25-210.
- [17] TER BREAK C J F, PRENTICE I C. A theory of gradient analysis [J]. *Advances in Ecological Research*, 1998, 18: 277-315.
- [18] KALIN M, CAO Y, SMITH M. Development of the phytoplankton community in a pit-lake in relation to water quality changes [J]. *Water Research*, 2011, 35(13): 3215-3225.
- [19] 冯天翼, 宋超, 陈家长. 水生藻类的环境指示作用[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(32): 257-265.
FENG T Y, SONG C, CHEN J Z. Environmental indication function of aquatic algae[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(32): 257-265.
- [20] DOKULIL M T, TEUBNER K. Cyanobacterial dominance in lakes[J]. *Hydrobiologia*, 2000, 438 (1/2/3): 1-12.
- [21] SOININEN J. Determinants of benthic diatom community structure in boreal streams: The role of environment and spatial factors at different scales[J]. *International Review of Hydrobiology*, 2004, 89: 139-150.
- [22] 罗小勇, 秦洪超, 黄永红. 尖针杆藻营养成分分析[J]. *城镇供水*, 2011, 6: 65-66.
LUO X Y, QIN H C, HUANG Y H. The nutrition ingredient analysis to the *Synedra acus* var [J]. *City and Town Water Supply*, 2011, 6: 65-66.
- [23] 刘春光, 金相灿, 孙凌, 等. pH 值对淡水藻类生长和种类变化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 32(1): 294-298.
LIU C G, JIN X C, SUN L, et al. Effects of pH on growth and species changes of algae in freshwater[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 32(1): 294-298.
- [24] 许海, 刘兆普, 袁兰, 等. pH 对几种淡水藻类生长的影响[J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(1): 33-36.
XU H, LIU Z P, YUAN L, et al. Effect of pH on growth of several freshwater algae[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(1): 33-36.
- [25] STEINBERG C E W, HARTMANN H M. Planktonic bloom-forming cyanobacteria and the eutrophication of lakes and rivers[J]. *Freshwater Biology*, 1988, 20(2): 279-287.
- [26] FLORES L N, BARONE R. Phytoplankton dynamics in two reservoir with different trophic state (Lake Kosamarina and Lake Arancio, Sicily, Italy) [J]. *Hydrobiologia*, 1998, 369: 163-178.
- [27] 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文. 呼兰河湿地夏、秋两季浮游植物功能分组演替及其驱动因子[J]. *生态学报*, 2014, 5(34): 1264-1273.
LU X X, LIU Y, FAN Y W. Relationships between environmental variables and seasonal succession in phytoplankton functional groups in the Hulan River Wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 5(34): 1264-1273.

(责任编辑: 竺利波)