

乌梁素海春季浮游植物群落结构特征分析

李建茹¹, 李畅游^{1*}, 张 生¹, 李 兴², 史小红¹, 裴国霞¹

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古师范大学内蒙古节水农业工程研究中心, 呼和浩特 010022)

摘 要:寒区湿地经过冬季冰封期后, 春季浮游植物群落结构特征对湿地生态环境质量有一定的指示性作用。对乌梁素海 2012 年 5 月浮游植物群落调查分析的结果表明, 乌梁素海春季浮游植物共有 7 门 59 属 96 种, 其中绿藻种类最多为 29 属 54 种, 占 56.25%, 其次为硅藻 11 属 18 种, 占 18.75%; 湖区优势种为湖生束球藻、色球藻、卵囊藻、四尾栅藻、小球藻、胶网藻以及梅尼小环藻; 浮游植物平均密度为 $8.895 \times 10^7 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 且空间分布极不均匀, 变异系数为 0.94, Shannon-Wiener 指数为 1.34~2.66, Pielou 指数为 0.30~0.52。结合浮游植物密度、优势种及多样性指数等结果, 乌梁素海属于绿藻-蓝藻-硅藻型, 且水体已处于富营养化状态。聚类和多维尺度分析显示: 春季乌梁素海浮游植物群落可分为进水流型群落、南部深度净化型群落、北部沿岸静水型群落及中部滞留型群落。

关键词: 乌梁素海; 浮游植物群落; 聚类分析; 多维尺度分析

中图分类号: X171.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)06-1201-09 doi:10.11654/jaes.2013.06.017

Structural Characteristics of Phytoplankton Community in the Spring in Wuliangsuhai Lake, China

LI Jian-ru¹, LI Chang-you^{1*}, ZHANG Sheng¹, LI Xing², SHI Xiao-hong¹, PEI Guo-xia¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Engineering Research Center for Water-saving Agriculture, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: After the period of frozen in the winter, the community structure of phytoplankton in spring may indicate the environment quality of wetlands to some extent in the cold region. The community structure of phytoplankton in Wuliangsuhai in May of 2012 was analyzed. The results showed that there were 59 genera, 7 phyla and 96 species of phytoplankton with dominated chlorophyta including 54 species of 29 genera accounting for 56.25% of the whole phytoplankton at Wuliangsuhai. We also found 11 genera and 18 species of bacillariophyta accounting for 18.75% of phytoplankton. The dominant species were *Gomphosphaeria lacustris*, *Chroococcus*, *Oocystis*, *Scenedesmus quadricauda*, *Chlorella vulgaris*, *Dictyosphaerium pulchellum*, *Cyclotella meneghiniana*. The average density of phytoplankton was $8.895 \times 10^7 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$. The phytoplankton abundance was unevenly spatially-distributed with a variation coefficient of 0.94. The phytoplankton Shannon index was 1.34 to 2.66 and Pielou index varied from 0.30 to 0.52. Based on the information about the abundance of phytoplankton, the index of dominant species, and the index of diversity suggests that Wuliangsuhai has been eutrophicated dominated with *Cyanophyta*, *Chlorophyta* and *Bacillariophyta*. Clustering and multi-dimensional scaling analysis showed that phytoplankton community could be classified as the influent community in the north, deep purification community in the south, hydrostatic community in the north along the coast, retention community in the central part of the lake in spring.

Keywords: Wuliangsuhai Lake; phytoplankton community; cluster analysis; multi-scaling analysis

收稿日期: 2012-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51069009, 51069007, 51169017, 51169011, 51269016, 51269017); 内蒙古自然科学基金项目(2012MS0621); 内蒙古自治区重大科技项目(20091408); 内蒙古自治区水利厅重点支持项目(20080105); 国际科技合作项目(2011DFA90710)

作者简介: 李建茹(1986—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 博士研究生, 主要从事水域生态学与水环境保护方面研究。E-mail: lijianru0415@163.com

* 通信作者: 李畅游 E-mail: nndlichangyou@163.com

浮游植物是水域生态系统中主要的初级生产者,也是生态系统中能量流动和物质循环的重要组成部分,对维持水域生态系统平衡起着极其重要的作用^[1]。不同水域生态系统,因其水域的地理位置、功能结构以及营养状态的不同,其浮游植物群落结构也存在着较大的差异^[2-3]。浮游植物群落结构主要受外在驱动(如水温、光照强度及水动力条件等)及内在驱动(如营养盐负荷、捕食压力及竞争等)的影响^[4-5]。研究浮游植物群落结构对了解生态系统功能有着重要的意义,它影响着生态系统的过程,功能以及稳定性,同时也是生态系统状态改变的直接反映。

乌梁素海是中国八大淡水湖之一,也是地球同一纬度最大的湿地,2002年正式列为国际重要湿地名录,对内蒙古西部干旱区的生态环境平衡和维持生物多样性等方面具有重要作用。它位于我国内蒙古巴彦淖尔市乌拉特前期境内,其地理坐标介于北纬 $40^{\circ}36' \sim 41^{\circ}03'$,东经 $108^{\circ}43' \sim 108^{\circ}57'$,现有水域面积为 285.38 km^2 ,其中芦苇面积为 118.97 km^2 ,明水面积为 111.13 km^2 ,明水区 85.7 km^2 为沉水植物密集区,湖水深度多数在 $0.5 \sim 2.5 \text{ m}$ 之间,蓄水量 $2.5 \sim 3.0$ 亿 m^3 ,湖泊流域降雨少,蒸发大,气温变化剧烈,四季更替明显,其补水来源的90%经总排干沟汇入乌梁素海后,从西山咀河口排入黄河(图1)。近年来,由于富含大量氮磷的农业退水、工业废水和生活污水排入乌梁素海,致使湖内泥沙淤积,植被退化,动物栖息地丧失,浮游生物逐年减少,生态功能严重退化^[6]。2008年5月,乌梁素海曾出现面积达 $5.33 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 以上、持续近5个月的“黄苔”,使核心区域水面被覆盖,水体严重污染^[7]。本文对乌梁素海浮游植物种类组成、细胞密度以及多样性等方面展开研究,为乌梁素海富营养化的治理及抑制“水华”暴发提供数据支持。

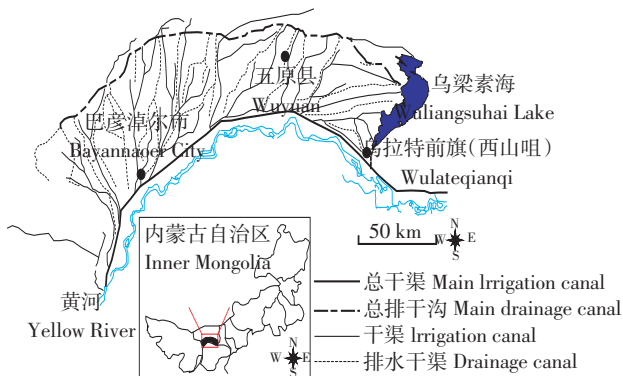


图1 内蒙古乌梁素海流域图

Figure 1 Basin of Wuliangsuhai Lake in Inner Mongolia

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

本研究采用全球定位系统定位,共布置10个浮游植物采样点,其中北部小海子区域芦苇密集,水深不足 50 cm ,采样船不能到达,故没有设置采样点(图2)。于2012年5月下旬对乌梁素海总体环境特征的10个采样点进行分析。参照《湖泊生态调查观测与分析》^[8],水深 3 m 以内水团混合良好的水体,只采表层以下 0.5 m 处样品;水深 $3 \sim 10 \text{ m}$ 的水体,需分别取表底两层水样各 500 mL 进行混合。根据乌梁素海多数水深小于 3 m 的实际情况,只需采表层以下 0.5 m 处样品。浮游植物定性样品用25号浮游生物网划“ ∞ ”形捞取,经1%福尔马林溶液保存,用于种类鉴定和分析。浮游植物定量样品用采水器采集 1 L 水样后加入鲁哥试剂固定,另加1%的福尔马林液保存。将采集的浮游植物样品带回实验室后经静止、沉降和浓缩至 30 mL 后,随机取

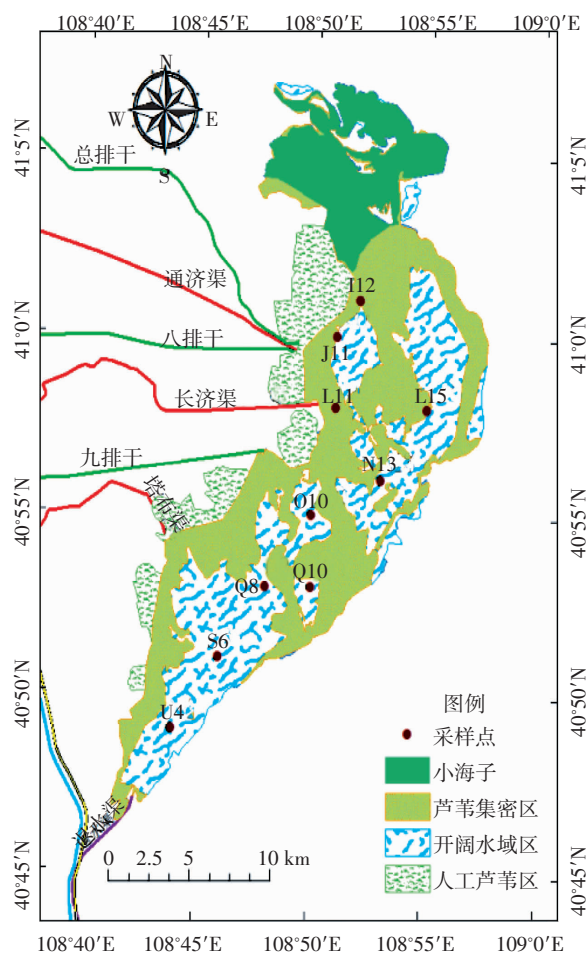


图2 乌梁素海浮游植物采样点位图

Figure 2 Sampling sites of phytoplankton in Wuliangsuhai Lake

0.1 mL 浓缩样品置于显微镜下进行种类及细胞密度鉴定。浮游植物种类鉴定参照《中国淡水藻类——系统、分类及生态》^[9]及《淡水微型生物图谱》^[10]等。

1.2 数据处理

1.2.1 浮游植物群落特征参数

(1) 多样性指数

Shannon-Wiener 指数: $H' = -\sum_{i=1}^N P_i \ln P_i$

(2) 均匀度

Pielou 指数: $J = H'/\ln S$

(3) 优势种确定: $Y = n_i/N \times f_i$

式中: $P_i = n_i/N$; P_i 为第 i 种藻类的细胞数与样品中所有藻类总细胞数的比值; n_i 为第 i 种藻类的细胞数; N 为所有藻类总细胞数; S 为样品中藻类种类数; f_i 为第 i 种藻类在各站出现频率。

本文将优势度 $Y > 0.02$ 的藻类定为优势种^[11]。

1.2.2 浮游植物空间分析

本文采用 ArcGIS9.3 统计模块作为空间分析工具,以克里克插值方法进行区域插值计算,对浮游植物种类数、密度、多样性指数及均匀度等进行空间分布趋势的模拟。

1.2.3 多元统计分析

采用聚类分析(Cluster Analysis)和多维尺度分析(Multidimensional Scaling, MDS)两种多元统计方法。聚类分析选择组间连接方法,以欧式距离为分类依据。多维尺度分析以浮游植物的 Bray-Curtis 相似系数 S_B 为基础,其计算公式如下:

$$S_B = 1 \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^S |X_{ij} - X_{ik}|}{\sum_{i=1}^S (X_{ij} + X_{ik})} \right]$$

式中: X_{ij} 是第 i 物种在第 j 个样方中的数量经变换后的数值; X_{ik} 是第 i 物种在第 k 个样方中数量经变换后的数值^[12]。

本文以乌梁素海 10 个采样点为矩阵样本,以各样点浮游植物物种和各物种细胞密度为矩阵变量,建立原始数据矩阵,为平衡优势种和稀有种对整个群落权重的影响,对原始矩阵进行 4 次开方后^[13]计算,建立相似矩阵,在此基础上进行聚类 and MDS 二维空间分析。MDS 分析结果采用应力系数值来检验,通常认为 $stress \geq 0.2$, 近似程度为差; $stress \geq 0.1$, 为满意; $stress \geq 0.05$, 为好; $stress \geq 0.025$, 为很好; 理想状态为 $stress=0$, 为完全匹配^[14]。聚类分析采用 SAS9.0 软件,

多维尺度分析采用 SPSS13.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 乌梁素海浮游植物种类组成

本次共鉴定浮游植物 7 门 59 属 96 种,隶属于蓝藻门(Cyanophyta)、绿藻门(Chlorophyta)、硅藻门(Bacillariophyta)、隐藻门(Cryptophyta)、裸藻门(Euglenophyta)、甲藻门(Pyrrophyta)和金藻门(Chrysophyta)。其中绿藻门种类最多,为 29 属 54 种,占总种数 56.25%; 其次是硅藻门 11 属 18 种,占总种数 18.75%; 蓝藻门 9 属 14 种,占总种数 14.58%; 裸藻门 4 属 4 种、隐藻门 3 属 3 种、金藻门 2 属 2 种、甲藻门 1 属 1 种,裸藻门、隐藻门、金藻门以及甲藻门总的种类共占总种数 10.42%。

各采样点浮游植物种类介于 27~69 种,平均种类数为 42 种,变异系数为 0.28。从图 3 可以看出,种类

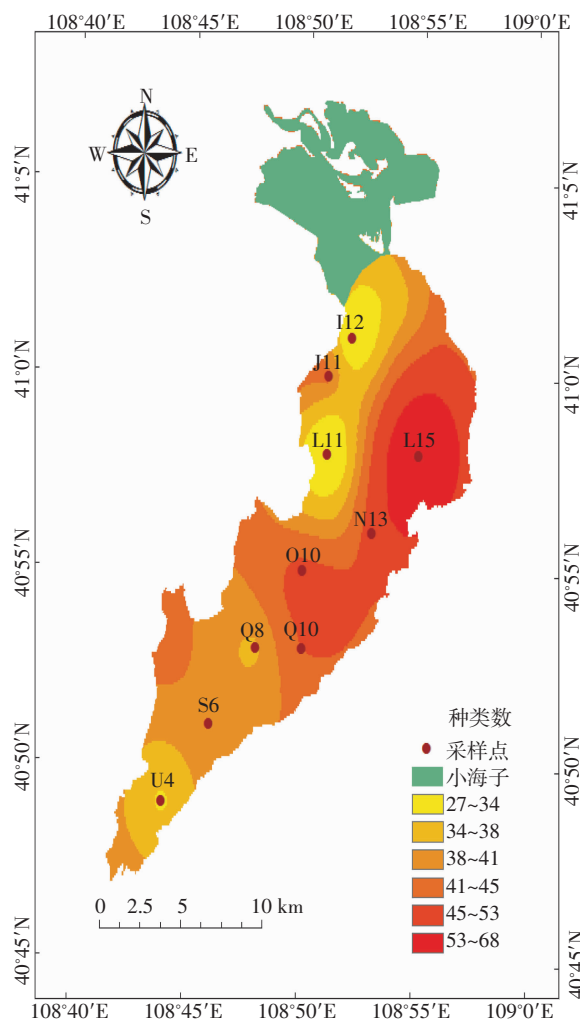


图3 乌梁素海各采样点浮游植物种类数的空间分布
Figure 3 Spatial distribution of phytoplankton species in Wuliangsu Lake

数的空间分布为沿湖东岸区域明显高于靠近入湖口的西岸区域,其中东岸区域 L15 的种类数最多,为 69 种,西岸区域的总排干入湖区 L11 的种类数最少,为 27 种。种类数的空间差异主要与湖区排污口有关,沿湖西岸主要分布有总排干、八排干以及九排干,总排干的退水是湖区主要的补水来源,因此靠近总排干的水质污染最严重,种类也较少。研究各采样点浮游植物种类发现,蓝藻、绿藻及硅藻在各样点均有出现,其中蓝藻在 N13 点种类数最多为 10 种,L11 最少,仅为 4 种;绿藻在 L15 的种类最多为 43 种,J11 的最少为 12 种;硅藻在 J11 点种类最多为 18 种,L11 最少为 3 种;裸藻在除 L11、S6 未出现,其他点均出现;隐藻在 I12、N13、Q8、Q10、U4 未出现;金藻在 I12、L11、Q8、Q10、U4 未出现。

2.2 乌梁素海浮游植物密度与生物量的空间分布

乌梁素海浮游植物细胞密度介于 $0.503 \times 10^7 \sim 28.739 \times 10^7 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均细胞密度为 $8.895 \times 10^7 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 变异系数为 0.94 (图 4)。浮游植物细胞密度在水平方向分布极不均匀,且具有明显的规律性。沿河道细胞密度的空间分布为入湖口向出水口逐渐增加的趋势,河道以外出现两个高值区,分别位于东北区域

L15 采样点和西南区域 O10 采样点,其中细胞密度最高的 L15 点达到了 $28.739 \times 10^7 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$; 其次为 O10 点,细胞密度为 $15.567 \times 10^7 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$; 全湖的低值区位于总排干入口区域 I12、J11 及 L11, 其中 J11 点的细胞密度最低,为 $0.503 \times 10^7 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$; Q10、S6、U4 的细胞密度较为接近。利用细胞密度评价水质标准,细胞密度 $\leq 1.0 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 为贫营养; $\leq (10 \sim 40) \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 为中营养; $\leq (81 \sim 99) \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 为富营养; $\geq 100 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 为极富营养^[5]。乌梁素海的平均密度为 $88.954 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 介于 $(81 \sim 99) \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,由此可知水体已经处于富营养化状态,其中两个高值区域均达到了极富营养化状态。乌梁素海浮游植物生物量介于 $1.397 \sim 45.394 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均生物量为 $21.332 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 变异系数为 0.67 (图 5)。浮游植物生物量的水平分布与细胞密度分布具有相似性,位于总排干入口区域 I12、J11 及 L11 的生物量较低,平均值为 $2.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 高值区 L15 的生物量为 $45.394 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其次为 N13、O10, 分别为 28.639 、 $33.240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.3 浮游植物多样性及均匀度分析

物种多样性指数是一个群落或生境中种的数目和多寡。本次调查中乌梁素海春季浮游植物 Shan-

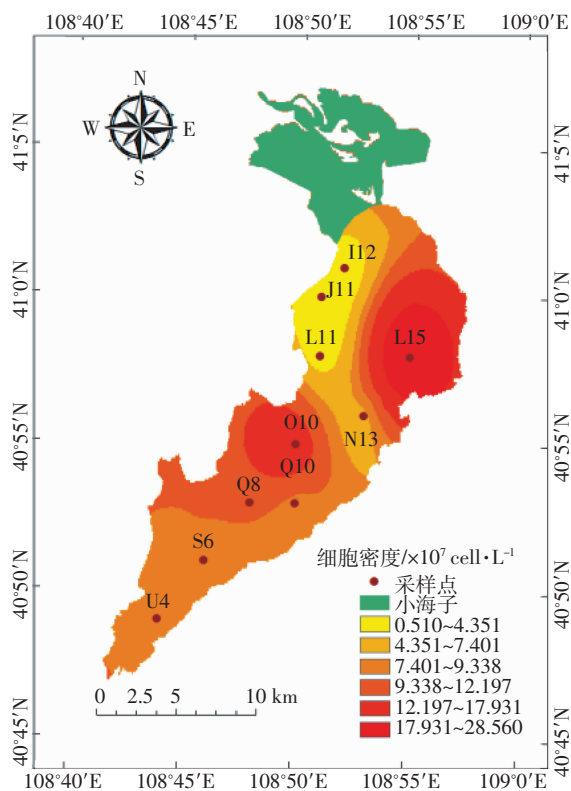


图4 乌梁素海各采样点浮游植物密度的空间分布
Figure 4 Spatial distribution of phytoplankton density in Wuliangsuhai Lake

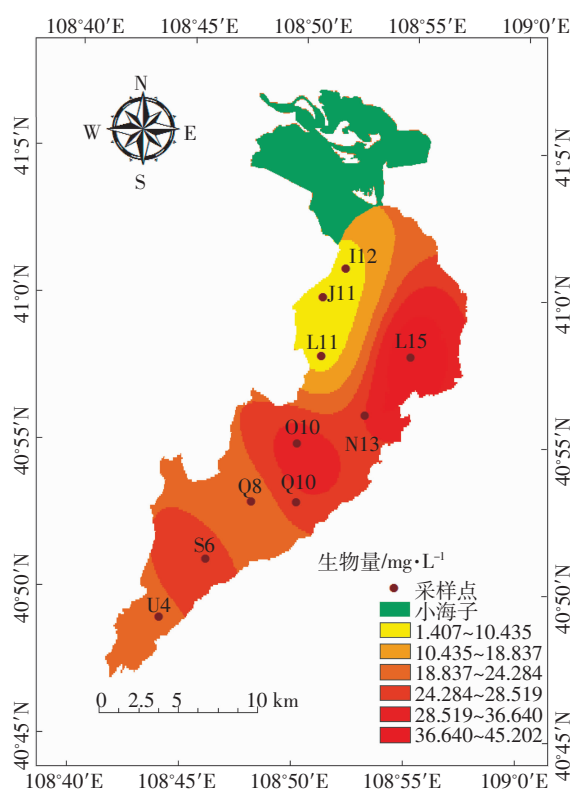


图5 乌梁素海各采样点浮游植物生物量的空间分布
Figure 5 Spatial distribution of phytoplankton biomass in Wuliangsuhai Lake

non-Wiener 多样性指数介于 1.34~2.66 之间,平均值 2.15,变异系数 0.19。从图 6 可以看出,多样性指数呈东北向西南递减的趋势,其中:最高值出现在东北部的 L15 区域,为 2.66;其次为靠近湖中部的 N13、L11、Q10 区域,分别为 2.59、2.51、2.39;最低值出现在出水口的 U4 区域,为 1.34。一般来说, H 越大表示其群落结构越复杂,稳定性越大,水质越好。 $0 < H \leq 1$ 表示重度污染; $1 < H \leq 3$ 表示中度污染,其中 1~2 为 α 中污染,2~3 为 β 中污染; $H > 3$ 为轻度污染^[8]。故春季乌梁素海水质属中度污染水平。

物种均匀度是一个群落或生境中全部种的个体数的分配情况,它反映了种属组成的均匀程度。本次调查结果表明,春季浮游植物的均匀度介于 0.30~0.52 之间,平均值为 0.46,变异系数 0.17。从图 7 可以看出,均匀度指数也基本呈东北向西南递减的趋势,与多样性指数空间分布大体上一致,其中除靠近湖中部 O10 区域和靠近出水口 U4 均匀度偏低,分别为 0.35、0.30,其余各采样点区域的均匀度比较接近。

2.4 浮游植物优势种分析

乌梁素海春季浮游植物优势种见表 1,全湖的优势种有蓝藻门的湖生束球藻 (*Gomphosphaeria lacus-*

tris)、色球藻 (*Chroococcus*);绿藻门的卵囊藻 (*Oocystis*)、四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricauda*)、小球藻 (*Chlorella vulgaris*)、美丽胶网藻 (*Dictyosphaerium pulchellum*) 以及硅藻门的梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*),其中蓝藻门的色球藻 (*Chroococcus*) 优势度最高,为 0.15。其次是绿藻门的小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 和蓝藻门的湖生束球藻 (*Gomphosphaeria lacustris*),分别为 0.11 和 0.10。可见春末季节的乌梁素海属于绿藻-蓝藻-硅藻型。

2.5 浮游植物群落特征指标相关性分析

对研究区 10 个采样点的浮游植物细胞密度、种类数、生物量、叶绿素、多样性指数以及均匀度 5 个群落表征指标进行 Pearson 相关性分析(表 2)。结果表明,春季乌梁素海浮游植物的细胞密度与种类数呈极显著正相关,相关系数为 0.836;生物量与细胞密度及种类数呈极显著正相关,相关系数分别为 0.885、0.805;叶绿素与浮游植物细胞密度及生物量相关性不显著;浮游植物多样性指数与均匀度的相关性为极显著正相关,相关系数为 0.888。

2.6 浮游植物聚类分析

根据乌梁素海春季各采样点浮游植物物种组成

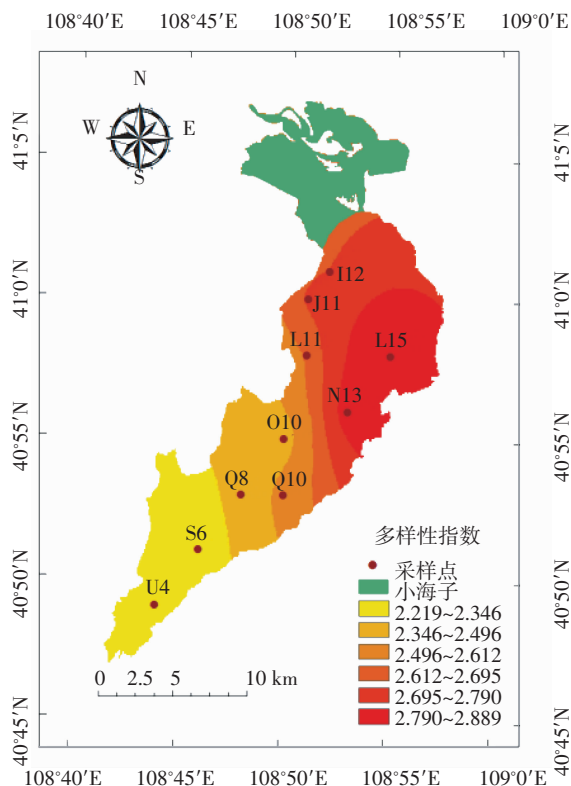


图 6 乌梁素海各采样点浮游植物多样指数的空间分布

Figure 6 Spatial distribution of Shannon index(H) of phytoplankton in Wuliangsuhai Lake

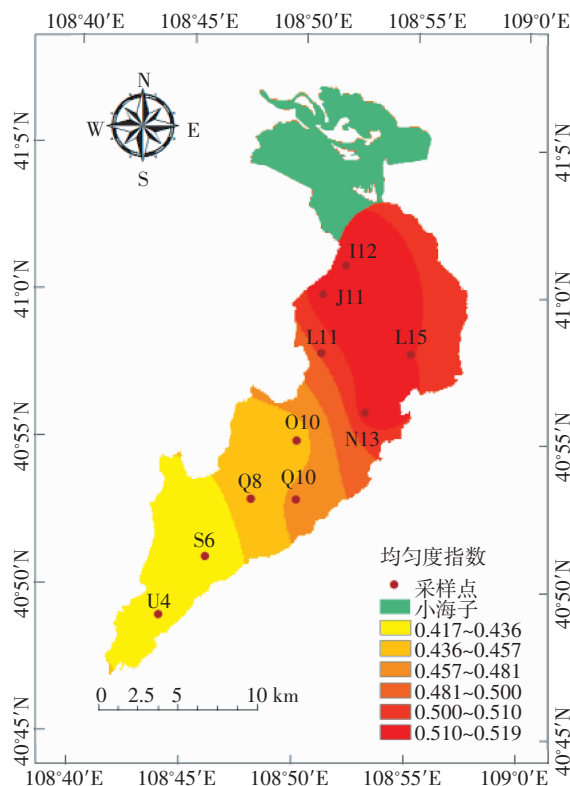


图 7 乌梁素海各采样点浮游植物均匀度指数的空间分布

Figure 7 Spatial distribution of Pielou index(J) of phytoplankton in Wuliangsuhai Lake

表 1 乌梁素海浮游植物优势种名录

Table 1 Dominated species of phytoplankton in Wuliangsuhai Lake

门类 Phylum	优势种 Dominant species	密度范围/ $\times 10^7 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ Range of density	出现率/% Appearance frequency	优势度(>0.02) Dominant index
蓝藻门 <i>Cyanophyta</i>	湖生束球藻 <i>Gomphosphaeria lacustris</i>	0~4.025	60	0.10
	色球藻 <i>Chroococcus</i>	0~4.025	60	0.15
绿藻门 <i>Chlorophyta</i>	卵囊藻 <i>Oocystis</i>	0.003~1.600	100	0.06
	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>	0.003~2.69	100	0.07
	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	0.043~2.415	100	0.11
	美丽胶网藻 <i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	0~1.489	60	0.05
硅藻门 <i>Bacillariophyta</i>	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	0.012~1.396	100	0.04

表 2 乌梁素海浮游植物特征指标相关性矩阵

Table 2 Correlation of characteristic index of phytoplankton in Wuliangsuhai Lake

	细胞密度 (Cell density)	种类数 (Species composition)	生物量 (Biomass)	叶绿素含量 (Chlorophyll content)	多样性指数 (Diversity index)	均匀度 (Pielou index)
细胞密度(Cell density)	1	0.836**	0.885**	0.603	0.062	-0.319
种类数(Number of species)		1	0.805**	0.725*	0.475	0.032
生物量(Biomass)			1	0.310	0.037	-0.377
叶绿素含量(Chlorophyll content)				1	0.619	0.392
多样性指数(Diversity index)					1	0.888**
均匀度(Pielou index)						1

注:* 表示显著相关 $P<0.05$; ** 表示极显著相关 $P<0.01$ 。

及各物种的细胞密度进行聚类分析(图 8),结果表明乌梁素海水体可大体分为四个类群,且这四个类群特点突出,类间距较大。第一类群包括 I12、L11、J11 采样点,位于乌梁素海的入湖口区域,此区域的特点是水流速度大,多泥沙,浮游植物密度低;第二类群包括 N13、Q8、Q10、S6、U4 采样点,除 N13 采样点是靠近湖中部,其余采样点均位于乌梁素海南部区域,此区域特点是水草密度高,水流缓慢;第三类群是 L15 采样点,位于乌梁素海东北区域,该区域水草密度适中,水流基本处于静止状态,浮游植物密度最大,多样性指数最高,这可能与该区域的水流条件以及水生植物的

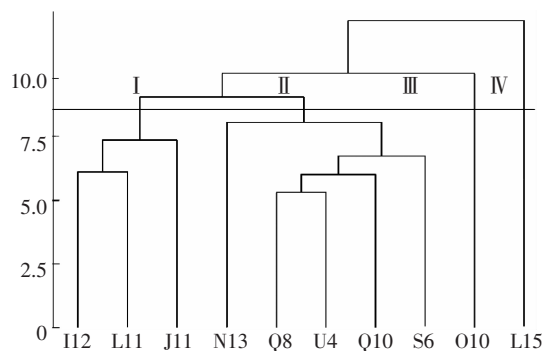


图 8 乌梁素海浮游植物群落聚类树状图

Figure 8 Assemblage of phytoplankton in Wuliangsuhai Lake

种类及密度有很大关系;第四类群 O10 采样点,位于乌梁素海湖中部,该区域由于挺水植物的阻隔,形成滞留区,流速缓慢,加之该区域位于九排干的入口区,不定期的汇入上游的工业废水,生活污水及农田退水,这可能是造成此期间该区域浮游植物密度大,多样性值数低的直接原因。

2.7 浮游植物多维尺度分析

乌梁素海春末浮游植物群落结构的多维分析(图 9)结果显示:在二维空间中 I12、J11、L11 相对密集,说明 3 个采样点区域的浮游植物群落特征相似,可归为一类;Q8、Q10、S6、U4、N13 采样点相对接近,可归为一类;L15、O10 相对分散,且距离较远,各归为一类。图 10 为湖区 5 月各采样点的流速,其中东北区域 L15 采样点水流最为缓慢,为 $0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且位于二维空间第一维度的左侧,而水流流速相对大的西北区 I12、J11、L11(平均 $0.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)位于第一维度的最右侧,由此可认为第一维度是乌梁素海水环境水动力梯度的表征;乌梁素海西南区域 O10 采样点,水生植物相对较少,位于二维空间的下方,而相对水草密集的南部区域 Q10、U4 等采样点位于二维空间的上方,由此可认为第二维度是水生植物密度变化的表征。

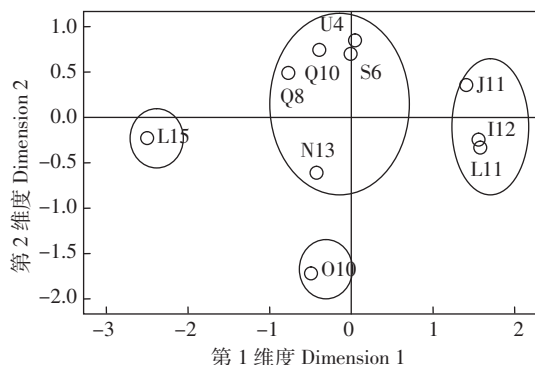


图 9 乌梁素海浮游植物群落多维分析

Figure 9 Multi-analysis of phytoplankton community in Wuliangsu Lake

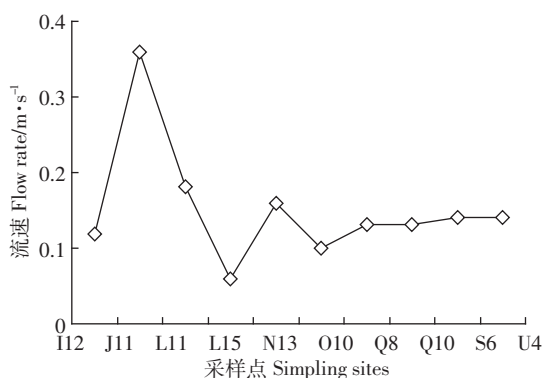


图 10 乌梁素海各采样点流速

Figure 10 Flow velocity of sampling sites of Wuliangsu Lake

3 讨论

3.1 乌梁素海春季浮游植物群落特征

乌梁素海属于富营养化程度较高的寒区湿地湖泊,浮游植物的种类组成及数量也具有相应的特点。将本次调查结果与 2004 年的历史资料进行对比^[15],发现 2004 年春季浮游植物生物量为 $56.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,本次调查生物量为 $45.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,生物量下降了 19.55%;浮游植物在优势类群方面有明显的差别,2004 年春季优势类群为绿藻门的衣藻、栅列藻、硅藻门的小环藻、蓝藻门的微型蓝藻、裸藻、隐藻以及金藻门的单鞭金藻,而本次调查中优势类群集中在蓝藻门、绿藻门以及硅藻门,浮游植物群落结构总体呈现绿藻-蓝藻-硅藻型,且蓝藻及绿藻的优势度较高。造成这一现象的原因可能与两次春季的不同采样时间以及水体营养盐负荷不同有关。北方寒区湖泊,每年 11 月气温下降水体开始结冰,直到翌年 3 月气温回升冰体开始融化,5 月气温逐渐升高,光照作用增强,有利于绿藻和蓝藻的生长^[16],所以绿、蓝、硅藻成为主要的优势类群,而裸藻及金藻的一般最适温度要低,加之每年 5

月正是河套灌区春浇时期^[17],此时会有携带大量氮磷的农田退水排入乌梁素海,水体有机物质含量升高,富营养化严重,造成蓝藻等耐污性较强的种类大量繁殖。生物量下降可能是由于 2004 年春季个体较大的裸藻和隐藻数量较多所致。利用指示种评价水质情况可知^[18],蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*),普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)以及湖生束球藻(*Cyclotella meneghiniana*)更适合于富营养型(α -ms)型水体,而梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)以及椭圆卵囊藻(*Oocystis elliptica*)和波吉卵囊藻(*Oocystis borgei*)适合于富营养型(β - α -ms)型水体,胶网藻(*Dicetyosphaerium ehrenbergianum*)以及四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)是中营养型(β -ms)水体的指示种,从这些优势种指示情况可知乌梁素海水体已处于富营养化水平。

研究该湿地浮游植物群落发现,湖区水质污染较为严重的入湖口 I12、J11 和 L11 区域的浮游植物数量相对较少,笔者认为这与湿地该处的水动力条件以及水生植物分布等有直接关系。本次调查发现入湖口的水流流速相对较大,平均为 $0.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其他区域水流平缓,有研究表明,水体在不受营养盐的胁迫,水体流速成为影响浮游植物数量水平分布的直接因素^[19]。该入湖区多分布有穗花狐尾藻等沉水植物,研究发现^[20],水生植物与浮游植物竞争资源的同时还会通过释放化感物质抑制浮游植物的生长繁殖,尤其是具有较高活性穗花狐尾藻、金鱼藻等沉水植物^[21],且穗花狐尾藻与其他沉水植物相比,具有较高的光合作用速率,在湖区水体表面形成厚密冠层,阻止光的透射,同时该处水体夹杂大量泥沙,透明度低,也减少了光照投射量,从而抑制浮游植物的生长繁殖。以上原因可能是导致该区域浮游植物数量较少的主要因素。

浮游植物生物量(Biomass)与叶绿素含量(Chlorophyll)均是浮游植物现存量的表征。研究表明,浮游植物生物量与叶绿素含量可能呈线性相关、非线性相关或不相关^[22]。本次研究春季浮游植物生物量与叶绿素之间的关系,发现两者相关性微弱,这主要与该水体的理化因子例如光照、温度、营养盐、浮游植物种类组成以及藻体自身生长状态等多种因素有关,所以建议在今后的研究中,加强对浮游植物生物量的监测,同时结合叶绿素含量等指标,全面的了解水体中浮游植物的群落结构与功能,为水体富营养化程度的评价以及渔业生产等提供科学依据。

3.2 乌梁素海春季浮游植物群落的多元分析

聚类分析是将个体按照相似程度划分类别,使同类别间的同质性最大,类别和类别之间的异质性最大,从而分析各个类别的主要特征及影响因素,近年来被广泛应用于生态领域。南海西北部陆架区海域浮游植物群落分为粤西近岸海区、琼东南近岸海区和外海海区三大群落^[23]。新疆乌伦古湖春、秋季浮游植物群落聚类分析认为,水动力影响下水文状况的不同是导致群落间差异的主要影响因子^[24]。本研究中,乌梁素海属于有入水口和出水口的系过性湖,水流流速主要受总排干排入水量的影响,同时湖区各种水生植物相间分布,且分布面积无规律,使得湖区呈现水流多样化和生境复杂化。图8中,I12、L11、J11聚为一类,处于入湖口,水流大,挺水植物密集,水面时有水生植物覆盖;N13、Q8、Q10、S6、U4聚为一类,处于湖区下游,水流缓,挺水植物稀少,开阔水域,水面无植物覆盖,水下植物密集;L15聚为一类,处于湖区东部,水流基本静止,水体交换能力差,挺水植物密度适中,水面时有植物覆盖;O10聚为一类,处于湖中部,且为九排干排污口,水体滞留时间长,挺水植物密集,水面无植物覆盖,水下植物稀少。故将浮游植物群落分为西部进水流型群落、南部深度净化型群落、北部沿岸静水型群落及中部滞留型群落。这四大群落受水体流速,水生植物分布等的差异,其群落特征明显,基本反映了乌梁素海湿地水体的生态特征。

多维尺度分析(Multidimensional Scaling, MDS)是将一组个体间的相似系数经过MDS转换成空间构图,直观反映个体间的相似程度,并揭示影响个体间相似性或差异性的未知变量-因子-潜在维度^[25]。一般采用应力系数(*Stress*)值作为MDS空间构形图的拟合指标。本研究中,应力系数(*Stress*)值为0.08,表明MDS空间构图能够反映乌梁素海春季浮游植物群落结构的相似性。MDS多维分析与聚类分析结果基本一致,并从二维的角度验证了聚类分析的结论。有研究表明^[26],MDS多维分析能较好地再现群落之间的真实关系,表达它们之间连续稳定的梯度变化,从而揭示一定的生态规律。图9中,I12、J11、L11相对密集,Q8、Q10、S6、U4相对密集,反映了这些区域的浮游植物群落具有较高的相似性,同时空间构图的两个维度轴也反映出湖泊水动力和水生植物分布的梯度变化。

4 结论

本次共鉴定浮游植物7门59属96种,以绿藻门

种类最多,占总数的56.25%;硅藻门及蓝藻门,占总数的33.33%。浮游植物种类数的水平分布呈现东岸区域高于靠近入湖口的西岸区域,尤其是入湖口的种类数偏低,这主要与区域的水质污染有关。浮游植物密度的水平差异较大,最高密度为 $28.739 \times 10^7 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$,最低密度为 $0.503 \times 10^7 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$,主要受湖泊水流的影响,顺河道水流方向为入湖口向出水口呈逐渐增加的趋势,河道以外水流平缓,其密度最高。

分析春季浮游植物优势种显示,优势类群分属于蓝藻、绿藻和硅藻,其中蓝、绿藻的优势度较高,群落结构呈绿藻-蓝藻-硅藻型。结合浮游植物细胞密度、优势种以及多样性指数等结果,春季乌梁素海已处于富营养化状态。

聚类分析与MDS多维尺度分析的结果基本一致,均将春季湖区浮游植物分为四大群落,且这四大群落的主要影响因素为水体流速多样性及水生植物分布的差异性,同时MDS空间构图的两个维度再现了群落之间的关系以及群落受湖泊水动力及水生植物分布等生境梯度变化的生态规律。

参考文献:

- [1] Chen Bao-hong, Xu Zhu-hua, Zhou Qiu-lin, et al. Long-term changes of phytoplankton community in Xiagu waters of Xiamen, China[J]. *Acta Oceanol Sin*, 2010, 29(6): 104-114.
- [2] Yin Da-cong, Zheng Ling-ling, Song Li-rong. Spatio-temporal distribution of phytoplankton in the Danjiangkou Reservoir, a water source area for the South-to-North Water Diversion Project (Middle Route), China [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, 29(3): 531-540.
- [3] 李秋华, 何伟添, 陈 稼, 等. 澳门湿地浮游植物群落特征[J]. 植物生态学报, 2009, 33(4): 689-697.
LI Qiu-hua, HE Wei-tian, CHEN Chuan, et al. Characteristics of the phytoplankton community in wetlands of Macao[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(4): 689-697.
- [4] 李秋华, 商立海, 李广辉, 等. 万峰湖浮游植物群落的时空分布[J]. 生态学报, 2011, 30(5): 1031-1038.
LI Qiu-hua, SHANG Li-hai, LI Guang-hui, et al. Temporal and spatial characteristics of phytoplankton community in Wanfeng Reservoir [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(5): 1031-1038.
- [5] Pacheco J P, Iglesias C, Meerhoff M, et al. Phytoplankton community structure in five subtropical shallow lakes with different trophic status (Uruguay): A morphology-based approach[J]. *Hydrobiologia*, 2010, 646: 187-197.
- [6] 任春涛, 李畅游, 全占军, 等. 基于GIS的乌梁素海水体富营养化状况的模糊模式识别[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 68-74.
REN Chun-tao, LI Chang-you, QUAN Zhan-jun, et al. Fuzzy pattern recognition to water trophic grade in Wuliangsu Lake base on GIS[J].

- Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(3):68-74.
- [7] 李 兴, 勾芒芒. 内蒙古乌梁素海“黄苔”暴发初探及防治对策[J]. 环境工程, 2010, 28(6):28-30.
LI Xing, GOU Mang-mang. Analysis of factors of algal bloom of Wuliangsuhai lake in Inner Mongolia[J]. *Environment Engineering*, 2010, 28(6):28-30.
- [8] 黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999:27-105.
HUANG Xiang-fei, CHEN Wei-min, CAI Qi-ming. Lake ecosystem investigation and analysis [M]. Beijing: China Standards Press, 1999: 27-105.
- [9] 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.
HU Hong-jun, WEI Yin-xin. The freshwater algae of China: Systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [10] 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.
ZHOU Feng-xia, CHEN Jian-hong. The map of freshwater microbiology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [11] Lampitt RS, Wishner KF, Turley CM, et al. Marine snow studies in the northeast Atlantic: Distribution, composition and roles as a food source for migrating plankton[J]. *Marine Biology*, 1993, 116:689-702.
- [12] Bray R, Curtis T. An ordination of the upland forest communities of southern wisconsin[J]. *Ecology Monogr*, 1957, 27:325-349.
- [13] Clarke R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure[J]. *Australian Journal of Ecology*, 1993, 18(1):117-143.
- [14] Khalaf A, Kochzius M. Changes on trophic community structure of shore fishes at an industrial site in the gulf of Aqaba, redsea[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 239(2):87-99.
- [15] 李畅游, 武国正, 李卫平, 等. 乌梁素海浮游植物调查与营养状况评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊):283-287.
LI Chang-you, WU Guo-zheng, LI Wei-ping, et al. Phytoplankton and nutritional levels in Lake Wuliangsuhai [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl):283-287.
- [16] 谭 香, 夏小玲, 程晓莉, 等. 丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数[J]. 环境科学, 2011, 32(10):2875-2882.
TAN Xiang, XIA Xiao-ling, CHENG Xiao-li, et al. Temporal and spatial pattern of phytoplankton community and its biodiversity indices in the Danjiangkou reservoir[J]. *Environment Science*, 2011, 32(10):2875-2882.
- [17] 杨志岩, 李畅游, 张 生, 等. 内蒙古乌梁素海叶绿素 a 浓度时空分布及其与氮、磷浓度关系[J]. 湖泊科学, 2009, 21(3):429-433.
YANG Zhi-yan, LI Chang-you, ZHANG Sheng, et al. Temporal and spatial distribution of chlorophyll-a concentration and the relationships with TN, TP concentrations in Lake Ulansuhai, Inner Mongolia[J]. *J Lake Sci*, 2009, 21(3):429-433.
- [18] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(2):87-91.
KUANG Qi-jun, MA Pei-ming, HU Zheng-yu, et al. Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(2):87-91.
- [19] 林秋奇, 胡 韧, 韩博平, 等. 流溪河水库水动力学对营养盐和浮游植物分布的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(11):2278-2284.
LIN Qiu-qi, HU Ren, HAN Bo-ping, et al. Effect of hydrodynamics on nutrient and phytoplankton distribution in Liuxihe Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11):2278-2284.
- [20] 肖 溪, 楼莉萍, 李 华, 等. 沉水植物化感作用控藻能力评述[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3):705-712.
XIAO Xi, LOU Li-ping, LI Hua, et al. Algal control ability of allelopathically active submerged macrophytes: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology Mar*, 2009, 20(3):705-712.
- [21] Sabine H, Gross E M. Can allelopathically active submerged macrophytes stabilize clear water states in shallow lakes[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2008, 9:422-432.
- [22] 杜胜蓝, 黄岁樑, 臧常娟, 等. 浮游植物现存量表征指标间相关性研究: 叶绿素 a 与生物量[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(1):40-44.
DU Sheng-lan, HUANG Sui-liang, ZANG Chang-juan, et al. Correlation research between the indicators of phytoplankton standing stock: chlorophyll a and biomass[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2011, 22(1):40-44.
- [23] 林 强, 尹健强, 黄良民, 等. 2007 年春季南海西北部陆架区海域浮游植物的群落结构[J]. 台湾海峡, 2011, 30(4):559-569.
LIN Qiang, YIN Jian-qiang, HUANG Liang-min, et al. Phytoplankton community structure in waters of continental shelf in the northwestern South China Sea in spring, 2007[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2011, 30(4):559-569.
- [24] 李 喆, 姜作发, 马 波, 等. 新疆乌伦古湖春、秋季浮游植物群落结构的聚类 and 多维分析[J]. 中国水产科学, 2008, 15(6):984-991.
LI Zhe, JIANG Zuo-fa, MA Bo, et al. Cluster analysis and multidimensional scaling analysis in spring and autumn of phytoplankton community structure of Ulungur Lake, Xinjiang[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, 15(6):984-991.
- [25] 林震岩. 多变量分析: SPSS 的操作与应用[M]. 北京: 北京大学出版社. 2007:387-430.
LIN Zhen-yan. Multivariate analysis: SPSS operation and application[M]. Beijing: Beijing University Press, 2007:387-430.
- [26] 覃雪波, 刘曼红, 黄璞玮, 等. 寒区湿地春、夏浮游植物群落划分——以三江平原安邦河湿地为例[J]. 湖泊科学, 2008, 20(4):529-537.
QIN Xue-bo, LIU Man-hong, HUANG Pu-yi, et al. Classification of phytoplankton community in spring and summer in wetland of cold regions: A case study of Anbanghe wetland, Sanjiang Plain, China[J]. *J Lake Sci*, 2008, 20(4):529-537.