DOI: 10.5846/stxb201606211215

鲁蕾,吴亦潇,张维昊.城市小型湖泊浮游植物群落结构特征及演替规律——以武汉沙湖为例.生态学报,2017,37(18):5993-6004. Lu L, Wu Y X, Zhang W H.Distribution and succession pattern of phytoplankton communities in a small urban lake, Sand Lake in Wuhan City, China. Acta Ecologica Sinica,2017,37(18):5993-6004.

城市小型湖泊浮游植物群落结构特征及演替规律

——以武汉沙湖为例

鲁 蕾1,吴亦潇1,张维吴1,2,*

1 武汉大学资源与环境科学学院,武汉 430072 2 水资源安全保障湖北省协同创新中心,武汉 430072

摘要:城市小型湖泊具有对环境变化的高敏感性,其浮游植物群落特征和演替规律对湖泊生态系统的监测与管理有重要意义。 本研究于 2015 年 3—12 月,对武汉市沙湖进行了生态和水质监测,共鉴定出藻类 10 门 312 种,绿藻、硅藻和蓝藻种类数占优。 为探究富营养化城市小型湖泊浮游植物群落时空异质性及其演替驱动力,选取了 4 个多样性指数(Shannon-Wiener 指数、 Simpson 指数、Pielou 均匀度指数和 Whittaker 指数),并进行了多样性指数与环境因子的相关性分析、主成分分析和聚类分析, 计算了优势种在监测时段的 3 个种间联结性指数和校正 X²检验系数。结果表明,夏秋季节浮游植物群落处于演替的稳定状态,环境因子驱动作用明显,其中离子浓度的影响大于温度的影响,钠、镁离子浓度为主要影响因素;蓝藻门和绿藻门优势种联 结性较高,硅藻门优势种内部联结性较高而与其他门类相关性较低,从季节上看,夏秋季节的优势种种间联结性较高,春冬季优势种与其他时段优势种相关性低,可能为群落在冬春季不稳定的原因。

关键词:城市湖泊;浮游植物;优势种;α多样性;常量离子;种间联结性

Distribution and succession pattern of phytoplankton communities in a small urban lake, Sand Lake in Wuhan City, China

LU Lei¹, WU Yixiao¹, ZHANG Weihao^{1,2,*}

1 School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2 Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resource Security, Wuhan 430072, China

Abstract: Small urban lakes are highly sensitive to changes in their environment and are closely associated with the surrounding urban systems. The distribution and succession pattern of phytoplankton can significantly influence the entire ecosystem in a small urban lake. From March to December 2015, phytoplankton and water quality were monitored in Sand Lake, Wuhan city, China. In total, 312 species were detected representing 10 phyla, with Chlorophyta, Bacillariophyta, and Cyanophyta being the major phyla represented. Biodiversity indices were calculated using the methods of Shannon-Wiener, Simpson, Pielou, and Whittaker. The biodiversity indices and environmental factors were subjected to correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis. Three interspecific association indices and the calibrated coefficients of χ^2 test were calculated. The results showed that the phytoplankton reached a stable state in summer and autumn, during which the environmental factors were the main influence; the effect of constant ion concentration was greater than that of temperature, particularly those of sodium and magnesium. Analysis of the data for the dominant species showed that Chlorophyta and Cyanophyta were significantly correlated, whereas Bacillariophyta showed no significant correlation

基金项目:国家自然科学基金(41331174);江西省水利厅重大科技项目(KT201412);水利部科技推广项目(TG1520)

收稿日期:2016-06-21; 网络出版日期:2017-04-25

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangwh@ whu.edu.cn

with other phyla. A significant correlation occurred between summer and autumn dominant species, while dominant species in winter and spring showed no significant correlation with those in other seasons, which could be attributed to the low stability of the phytoplankton during this period.

Key Words: urban lake; phytoplankton; dominant species; α diversity; constant ion; inter-specific association

近年来,城市湖泊成为各界关注的热点之一。其中,城市小型湖泊由于其具有易受城市生态系统干扰的特性,受到了广泛关注。研究者发现人类通过农业和气候对湖泊造成持续干扰,会使浮游植物群落受到明显影响^[1];同时,研究表明浮游植物群落的初级生产力变化与水体生态系统的稳定性有相互影响的关系^[2,3]。因此,城市小型湖泊浮游植物群落结构特征和演替规律的研究对于其生态保护有重要的意义。

在小型湖泊中易发生多种污染,小型湖泊浮游动植物群落对有机污染物的抗性与群落结构有明显的相关 性,均呈现出季节性变化的特点^[4],群落中的物种变化可能比表观水体性质参数如叶绿素浓度、总磷要更敏 感^[5]。目前对于氮磷营养盐与浮游植物群落相关性的研究较多^[6],但是湖泊水体成分较为复杂,除氮磷外, 浮游植物群落结构变化与水体中的其他组分存在一定关系,Tilman^[7]等认为常量和微量金属元素在一些情 况下会成为浮游植物生长的限制因素;Holopainen^[8]等研究发现矿地废水流入造成阳离子浓度显著升高的浅 水湖泊中,浮游植物群落生物量达到了对照无污染湖泊的两倍。因此对于水体中的常量离子对浮游植物群落 的影响应该给予关注。

目前,富营养化是城市小型湖泊面临的主要环境问题。在富营养化湖泊中,营养盐不再是限制因素,浮游 动植物群落结构和群落内种间关系成为群落变化的原因^[9]。优势种和优势类群很大程度上可以成为湖泊水 质的评判标准^[10],并具有一定的时序变化性^[11]。目前研究者普遍进行的是群落物种表观数量关系研 究^[12-13],优势种种间关联研究缺乏。而优势种作为群落结构的指示,其种间关联对群落演替具有潜在的驱动 作用,并有较高的研究价值。

综上所述,本研究以沙湖为例,研究了典型富营养化城市小型湖泊浮游植物群落的时空异质性,并从环境因素和优势种更替两个方面探究浮游植物群落的演替规律。其中,环境因子通过参与复杂的生化反应影响群落的演替过程(即群落演替外驱动力),而优势种更替则直接影响群落的演替方向(即群落演替内驱动力)。

1 实验方法

1.1 采样点设置

采样区域为生态功能处于退化状态的城市小型湖 泊——沙湖,位于武汉市武昌东北部,水域面积 3.197km²,于2013年完成一期公园建设,通过人工挖掘 的楚河与东湖连通。设置的采样点见图1。

采样点坐标见表 1。采样点分布的湖区存在明显 差异,5 号采样点为码头;3、4 号采样点位于挺水植物生 长区边缘;1、2、6 号采样点邻近公园,其中 1 号点邻近 公园道路,2 号点邻近公园树林,6 号点邻近公园草坡。

1.2 群落样品采集和水质参数测定

由于武汉 1、2 月多雨雪天气,水温偏低,表层浮游 植物群落采集困难,因此设计的浮游植物群落采集时间 为 2015 年 3—12 月,样品采集使用 1L 有机玻璃采水 器,采集表层 0.5m 处水样,使用鲁哥氏液进行固定浓缩



图 1 研究区采样点设置 Fig.1 Sample location of area under study

(3)

(4)

(5)

(9)

后,于高倍显微镜下使用0.1mL计数框分类计数。

常量阳离子监测时间段为 2015 年 5—12 月。阳离子浓度测定使用 EP-600 便携式离子色谱仪,阳离子保 护柱:Thermo scientific Dionex IonPac[™] CG12A RFIC[™] Guard 4×50 mm,阳离子交换柱:Thermo scientific Dionex IonPac[™] CG12A RFIC[™] Analytical 4×250 mm,流动相:18mmol/L 甲烷磺酸。

		表	E1 采样点位			
		Table 1 Coo	rdinates of sample	location		
采样点 Sample site	1	2	3	4	5	6
经度 Longitude/(°E)	114.320	114.329	114.339	114.335	114.327	114.319
纬度 Altitude/(°N)	30.570	30.573	30.574	30.567	30.565	30.562

1.3 多样性指数计算

4 个多样性指数,分别为 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 均匀度指数^[14]和 Whittaker 指数^[15]。 计算公式如下:

$H = -\sum_{i=1}^{s} P_i ln P_i$	 (1)
$P_i = n_i / N$	(2)

Simpson 指数:

Pielou 均匀度指数:

Shannon-Wiener 指数:

Whittaker 指数:

式中, *S*为每月采样出现的物种总数, *A*为每月各采样点的平均物种数, *P_i*为第*i*种的相对重要值, *n_i*为采样 点第*i*种物种的个体数, *N*为采样点各物种的总个体数。*H*值范围大于等于 3 为清洁; 2—3 为轻度污染; 1—2 为中度污染; 小于 1 为重污染^[16]。 *J*值范围 0—1 时, *J*值大体现种间个体分布均匀, 污染程度增加 *J*值 减小^[17]。

 $D = 1 - \sum_{i=1}^{s} P_i^2$ $J = H/\ln S$ $\beta = S/A - 1$

1.4 优势种与种间联结性计算

优势种使用优势度进行判断^{17]},种间联结性选取了3个联结性指数,Ochiai 指数、Dice 指数和 Jaccard 指数,以及校正 X²检验系数^[19]进行描述。

 $Y = f_i(n_i/N) \tag{6}$

$$OI = \frac{a}{\sqrt{(a+b)}} \sqrt{(a+c)}$$
(7)

优势度:

$$DI = \frac{2a}{2a+b+c} \tag{8}$$

Jaccard 指数:

Ochiai 指数:

$$= \frac{n \left[|ad - bc| - 0.5n \right]^2}{(a + b) (c + d) (a + c) (b + d)}$$
(10)

校正 X^2 检验系数:

式中,
$$f_i$$
为物种 i 的出现频率; a 为两种物种均出现的采样月数, $b \ c$ 为只有其中一种物种出现的采样月数, d 为两种物种均未出现的采样月数, n 为采样总月数。取 $Y \ge 0.02$ 为优势种^[17]。当 $ad > bc$ 时为正联结, 当 $ad < bc$ 时为正联结, 当 ad

1.5 数据分析

数据分析使用软件 Matlab2014a,聚类分析使用 K-均值法^[19]进行计算。数据绘图使用 Originlab 8.5。

2 结果

2.1 浮游植物群落时空异质性

2.1.1 群落结构变化规律

沙湖浮游植物群落的物种组成和相对丰度均表现出明显的季节性。

从群落物种组成来看(图 2),2015 年 3—12 月,绿藻门(Chlorophyta)和硅藻门(Bacillariopgyta)物种数超 过沙湖的浮游植物群落总体的 70%;其中,春季硅藻门物种数超过总体的 30%,夏秋季绿藻门物种数超过总 体的 50%;蓝藻门(Cyanophyta)物种数占比范围为 7%—14%,5—7 月以及 11—12 月蓝藻门物种数占比超过 10%;裸藻门(Euglenophyta)物种数占比(3%—9%)呈现波形变化,5 月达最小值,8 月、12 月达到最大值;黄藻 门(Xanthophyta)物种数占比(3%—6%)4 月达最小值,8 月达最大值,其他各月占比稳定。

由群落相对丰度变化可知(图3),2015年3—12月绿藻门占比均超过总丰度的50%;蓝藻门(1%—20%) 和硅藻门(9%—30%)生物量比例呈波形变化,最大值分别出现在8月和4月,最小值分别出现在3月和6 月;裸藻门占比大幅增加出现在4月和9—10月,黄藻门占比大幅增加出现在5—8月;甲藻门(Dinophyta)在 3月、金藻门(Crysophyceae)在12月比重明显增大。隐藻门(Cryptophyta)、定鞭藻门(Haptophyta)和红藻门 (Rhodophyta)物种数和相对丰度占群落比例均非常小,为稀有种或偶见种。



sampling months in Sand Lake

Fig.3 Relative abundance of phytoplankton in o months in Sand Lake

2.1.2 群落演替规律

 $(1)\alpha$ 和 β 多样性时间异质性

β多样性指数为 Whittaker 指数;其值降低说明生境异质性增加^[17]。由图 4(a)可知,β多样性分布有明显季节性。沙湖各采样点浮游植物群落的异质性在 7—9月最高,此时间段,采样点内的物种数较多而采样点间的物种差异最大,群落处于物种更新缓慢的稳定状态;3—7月群落异质性逐渐增强,表明此时段沙湖整体浮游植物群落在向稳定状态演替;9—12月群落异质性逐渐下降,表明此时段浮游植物群落开始向不稳定状态演替;12月浮游植物群落分布为监测时段最均匀的月份(Whittaker 指数达最大值),说明此时沙湖各采样点的共有物种明显减少,整体物种更新速率加快。

 α 多样性指数分别为 Shannon-Wiener 指数 H、Simpson 指数 D 和 Pielou 均匀度指数 J;其中,H 值和 J 值反

5997







映水体受污染的状态, H 值与丰富度的关系最密切, D 值和 J 值对均匀度的敏感性较高^[14]。由图 4(b)可知, α 多样性呈现明显波形变化规律。总体来说, 监测时段 内 H 值均集中在 1—2 之间, J 值大都集中在 0.3—0.4 之间, 说明水体保持在中度污染状态; 3、6、12 月 J 值低 于 0.3 说明此时水体处于重污染状态。 α 多样性分布 规律 β 多样性基本一致, 7—9 月沙湖的平均 α 多样性 指数最高, 说明此时各采样点群落物种丰富度和均匀度 均达到稳定状态; 3—7 月为 α 多样性增加段, 9—12 月 为 α 多样性下降段, 总的来说, 3—12 月沙湖浮游植物 群落的演替规律为由不稳定向稳定再向不稳定群落发 展的过程。





(2) 浮游植物群落空间异质性

分别以 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数为每月每采样点的 *x*,*y*,*z* 坐标进行聚类分析(图 5),最优得到 4 类,各类中心信息见表 2。

			Table	2 Centers	of α diversity clusters			
中心点	类别	坐	标 Coordinat	tes	中心点类别	坐	标 Coordinat	es
Center J	points of clusters	x	у	z	Center points of clusters	x	у	z
类别1	cluster1	1.353	0.915	0.327	类别 3 cluster3	1.479	0.941	0.344
类别 2	cluster2	1.215	0.876	0.301	类别 4 cluster4	0.927	0.748	0.236

表 2 α 多样性指数聚类中心信息

由表 2 可知,4 类的综合 α 多样性排序为:3>1>2>4。对监测时段各采样点 α 多样性根据聚类进行分类 可知(表 3),沙湖群落存在明显的时空异质性。从空间分布来看,2 号点 α 多样性最高,群落状态最稳定;1、3 号点以及 4、6 号点差异不大,其群落演替状态较接近;5 号点 α 多样性最低,群落受到扰动最大;总体来看,沙 湖的浮游植物群落空间异质性表现为湖泊中段群落较两侧稳定,同一侧湖岸的两端群落演替状态相似,湖泊 中人类频繁活动区域群落多样性最低。

18 期

	Table 3	Cluster results of a	e diversity of phyto	plankton in Sand	l Lake	
日//\ Marala			采样点	Sample site		
月份 Month ——	1	2	3	4	5	6
3	2	3	2	2	4	4
4	2	3	2	2	2	2
5	1	3	2	2	1	2
6	4	2	2	2	1	2
7	1	1	1	1	1	3
8	3	3	3	1	1	3
9	1	3	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1
11	1	2	1	2	2	1
12	1	1	r	2	<u>h</u>	4

表 3 沙湖浮游植物群落 α 多样性聚类结果

2.2 浮游植物群落演替外驱动力

2.2.1 环境因子监测结果

本研究考虑的环境因子包括温度、钠、钾、镁、钙的阳离子浓度,除温度外环境因子测定时间为 5—12 月。 由图 6 可知,水质参数结果分布呈明显季节性,总体上为 3—7 月逐渐增大,9—12 月逐渐减小,8 月出现夏季 最低值。钙离子浓度明显高于其他 3 种离子,9 月各离子浓度达到最大值,7 月温度达到最大值,4—10 月表 层水温度高于 20℃,12 月水温低于 10℃。







2.2.2 外驱动力分析

(1)多样性与环境因子相关性分析

由表4可知,Whittaker 指数与钾、钙离子浓度和温度有极强负相关关系,说明当其浓度增大或温度增加, 各采样点间的异质性增强。Shannon-Wiener 指数与镁离子浓度和温度有强相关关系,与钠离子浓度有极强相 关关系;Simpson 指数与钠离子浓度有强相关关系,与镁离子浓度有极强相关关系;Pielou 均匀度指数与钠、镁 离子浓度有强相关关系。相关性分析结果说明,环境因子对浮游植物群落状态有明显的影响,其中常量离子 浓度对群落演替有比温度更强的影响力,钠、镁离子浓度是α多样性的主要影响因素,温度主要影响群落物 种丰富度,钾、钙离子浓度主要影响沙湖浮游植物群落β多样性。

	Table 4 Correlation	ı analysis r	esults of bio	diversity ind	exes and w	ater quality	y factors		
相关系数 R	Pielou 均匀 度指数	Simpson 指数	Shannon- Wiener 指数	Whittaker 指数	钠离子 Na	钾离子 K	镁离子 Mg	钙离子 Ca	温度 Temperature
Pielou 均匀度指数	1	_	_	_	_	_	_	_	-
Simpson 指数	0.882	1	—	—	—	—	—	—	-
Shannon-Wiener 指数	0.796	0.913	1	—	—	—	—	—	-
Whittaker 指数	-0.319	-0.475	-0.729	1	—	—	—	—	(-)
钠离子 Na	0.663	0.771	0.811	-0.785	1	—	_	—	
钾离子 K	0.176	0.357	0.585	-0.932	0.718	1	_		-
镁离子 Mg	0.781	0.819	0.744	-0.555	0.943	0.471	1		y -
钙离子 Ca	0.376	0.470	0.599	-0.885	0.878	0.882	0.744	1	-
温度 Temp.	0.085	0.379	0.640	-0.893	0.579	0.907	0.302	0.681	1

表 4 多样性指数与水质因子相关性分析结果 4 Correlation analysis results of biodiversity indexes and water quality fac

(2) 主成分分析

主成分分析考虑的因素包括 α 多样性指数与环境 因子。得到的主成分中,主成分 1、主成分 2 和主成分 3 分别能够解释 60.01%、24.44% 和 11.28%(累积 95.73%)的数据量(表 5)。根据监测数据对应 3 个主 成分空间的变换值进行聚类,最优可得 3 类结果,对 3 类结果进行整理见表 6,主成分分析聚类结果见图 7。

主成分分析是从原本存在相关性的各成分中提取 出同样个数的完全线性无关的主成分进行分析的过程。 由表5可知,主成分1综合性较强;主成分2多样性指 数为主要因子;主成分3镁离子浓度、温度为主要因子。

由表6类别中心可知,类别3主成分1为主要因 素,该类点α多样性和环境因子数值均较高;类别2处 于3个成分的负象限,说明该类点α多样性和环境因子 数值均较低;类别1主成分1和2为主要因素,主成分1 为负象限,说明该类点的α多样性较高而离子浓度等环 境因子数值较低。由表6分可知,对各采样点位来说,6





主成分3对应的数值为原数值减去最小值,以使点均落在z轴正向;蓝色点为类别1,绿色点为类别2,红色点为类别3

月均为2类,7—10月均为3类,此时段内群落状态明显受到环境因子的驱动,表现为两者分布趋势一致;5、 11、12月大多数采样点为1类,说明此时段内,除了环境因子的影响外,可能存在其他作用较强的影响因素。 结合表6和表3的聚类结果可知,夏秋季节群落状态较稳定,环境因子有明显的驱动性,冬春季节群落处于演 替状态,环境因子的驱动力减弱,内驱动力可能为主要作用因素。

			表:	5 主成分系统	数			
			Table 5 Facto	ors of princip	al component			
主成分 Principal component	Shannon- Wiener 指数	Simpson 指数	Pielou 均匀 度指数	钠离子 Na	钾离子 K	镁离子 Mg	钙离子 Ca	温度 Temperature
主成分 1 PC1	0.364	0.329	0.298	0.416	0.347	0.375	0.375	0.309
主成分 2 PC2	0.349	0.450	0.511	-0.138	-0.399	0.00806	-0.340	-0.347
主成分 3 PC3	-0.328	-0.171	0.00974	0.344	-0.273	0.577	0.202	-0.545

	Tab	le 6 Results of p	rincipal component	analysis cluster		
日化 Manth			采样点	Sample site		
月10 Month	1	2	3	4	5	6
5	1	1	1	2	1	1
6	2	2	2	2	2	2
7	3	3	3	3	3	3
8	3	3	3	3	3	3
9	3	3	3	3	3	3
10	3	3	3	3	3	3
11	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	2

表 6 主成分分析聚类结果

每一类中心为:类别1(-1.642,1.154,0.227),类别2(-2.384,-1.847,-0.678),类别3(1.889,-0.154,0.0745)

2.3 浮游植物群落演替内驱动力

2.3.1 优势种变化规律

每月的优势种由优势度确定,3—12月出现的优势种共40种(表7)。其中绿藻门21种,硅藻门10种,蓝 藻门4种,黄藻门和裸藻门各2种,金藻门和甲藻门各1种。由表7可知,每月的优势种数量呈现先增多再减 少的规律,最大值为9月,达到17种,最小为3月,有5种;其他各月基本上呈现出季节上的稳定性;监测时段 主要优势种有5个,为S9、S10、S17、S23、S33,主要优势种集中在春季和夏季,且均为绿藻。

	Table / Total results of do	minant species in different monitoring months in Sand Lake	
编号	中文种名	学名	出现时间
Species number	Species name in Chinese	Species name in Latin	Appearance time
S1	卷曲鱼腥藻	Anabaena circinalis Rab.	6,7
S2	针形纤维藻	Ankistrodesmus acicularis (A. Braun) Korschikoff	4
S3	卷曲纤维藻	Ankistrodesmus convolutus Corda	9
S4	四棘鼓藻	Arthrodesmus convergens Ehrenberg ex Ralfs	9—11
S5	英克斯四棘鼓藻	Arthrodesmus incus (Breb.) Hassall ex Ralfs	10,11
S6	查氏四棘藻	Attheya Zachariasi J.Brun.	12
S7	拟气球藻	Botrydiopsis arhiza Borzi	5
S8	艾氏衣藻	Chlamydomonas Ehrenbergii Gorosch.	12
S9	椭圆小球藻*	Chlorella ellipsoidea Gerneck	3—12
S10	蛋白核小球藻*	Chlorella pyrenoidosa Chick	3-8,10-12
S11	土生绿球藻	Chlorococcum humicola (Nag.) Rabenhorst	11
S12	华美色金藻	Chromulina elegans Doflein	12
\$13	网状空星藻	Coelastrum reticulatum (Dang.)	9
S14	囊形柄裸藻	Colacium vesiculosum Ehrenberg	4,10
S15	双眼鼓藻	Cosmarium bioculatum Brebisson	9,12
S16	模糊鼓藻	Cosmarium obsoletum (Hantzsch) Reinsch	11
S17	美丽鼓藻*	Cosmocladium pulchellum Breb.	6—8,10
S18	湖北小环藻	Cyclotella hubeiana Chen & Zhu	3-5,8,10,11
S19	具盖小环藻	Cyclotella operculata (A.g.)	9
S20	星芒小环藻	Cyclotella stelligera Cl. et Grun.	9
S21	贪食拟裸藻	Euglenopsis vorax Klebs.	9
S22	绿脆杆藻	Fragilaria virescens Ralfs	8
S23	褶皱双胞藻*	Geminella crenulatocollis Prescott	3,6,10-12
S24	月状蹄形藻	Kirchneriella lunaris (Kirchner)	9

表 7 监测时段沙湖各月优势种汇总信息

Table 7	Total mognite of	dominant	amoning in	difforemt	maniforming	monthsin	Cond Lak
rable /	FOLME FESTILS OF	dominant :	species in	amerent	monitoring	monuns m	Sand Lake
			~				

http://www.ecologica.cn

编号 Species number	中文种名 Species name in Chinese	学名 Species name in Latin	出现时间 Appearance time
S25	肥壮蹄形藻	Kirchneriella obesa (W. West) Schmidle	9
S26	模糊直链藻	Melosira ambigua (Grun.)	12
S27	颗粒直链藻	Melosira granulata (Ehr.) Ralfs	4,9
S28	意大利直链藻	Melosira italica (Ehr.) Kutzing	4
S29	远距直链藻	Melosira listans (Ehr.)	9
S30	变异直链藻	Melosira varians Agardh	9
S31	马氏平裂藻	Merismopedia marssonii Lemm.	5—11
S32	细小平裂藻	Merismopedia minima G. Beck	5,7-11
S33	集球藻*	Palmellococcus miniatus (Kutz.) Chodat	7,8
S34	二角多甲藻	Peridinium bipes Stein	3
S35	月牙藻	Selenastrum bibraianum Reinsch	6,10,11
S36	小形月牙藻	Selenastrum minutum (Nag.) Collinus	10,11
S37	光角星鼓藻	Staurastrum muticum (Breb.) Ralfs	7,10
S38	锥形刺叉星鼓藻	Staurodesmus subulatus (Kutz.) Croasdale	5,7
S39	三角四角藻	Tetraedron trigonum (Nag.) Hansgirg	9,10
S40	普通黄丝藻	Tribonema vulgare Pasch.	9

*:主要优势种

2.3.2 内驱动力分析

优势种每月分布的联结性计算结果见表 8。Ochiai、Dice、Jaccard 指数确定的完全相关的物种分别为 S4 和 S3、S20 和 S19、S21 和 S19、S21 和 S20、S25 和 S24、S30 和 S29;这 6 对物种同时作为优势种出现的时间为 9 月,且其优势度均在 0.02-0.04 中间,不是主要优势种。Jaccard 指数强相关的物种分别为 S9 和 S10,S32 和 S31;Dice 指数强相关的物种有 5 对,分别为 S9 和 S10,S32 和 S31,以及 S27 和 S28、S33 和 S31、S39 和 S40; Ochiai 指数强相关的物种有 8 对,分别为 S9 和 S10,S32 和 S31、S27 和 S28、S33 和 S31、S39 和 S40,以及 S33 和 S32、S11 和 S9、S29 和 S27。

Table 8 Half	matrixes results of a	ssociation indexe	es of the dominant sp	pecies in Sand Lak	e from March to De	ecember
联结性指数 Correlation coefficients	0—0.2	0.2—0.4	0.4—0.6	0.6—0.8	0.8—1.0	1
落合系数 Ochiai	28.72%	46.54%	19.23%	3.72%	1.02%	0.77%
戴斯系数 Dice	33.72%	47.82%	14.10%	2.95%	0.64%	0.77%
杰卡德相似系数 Jaccard	70.00%	25.26%	2.82%	0.90%	0.26%	0.77%

表 8 监测时段优势种各联结性指数半矩阵分析结果

校正 X²检验结果见表 9。X²检验结果中显著正联结的物种有 6 对,分别为 S22 和 S19、S28 和 S27、S29 和 S27、S30 和 S27、S33 和 S31、S40 和 S39;极显著正联结的物种有 7 对,分别为 S4 和 S3、S20 和 S19、S21 和 S19、S21 和 S20、S25 和 S24、S30 和 S29 以及 S32 和 S31;不相关的结果中,S9 的与编号在其后的优势种不相关,2 对不相关的物种分别为 S26 和 S22、S39 和 S35。

主の

				A+1+	
Table 9 H	Half matrixes calibrated coe	fficients results of χ^2 test	to the dominant specie	es in Sand Lake from Ma	arch to December
联结性 Coefficient results	正,显著 Positive, significant	正,极显著 Positive, highly significant	正,不显著 Positive, nonsignificant	负,不显著 Negative, nonsignificant	不相关 Uncorrelated
χ^2	0.77%	0.90%	70.38%	23.72%	4.23%

些测时段优势种校正 v^2 检验坐矩阵分析结果

种间联结性测定值本身有一定的生态学意义,在一定程度上衡量了物种的相互关系和物种对环境综合因 子反应的差异^[18];X²检验能比较准确度量种对的关联显著程度^[20]。3个种间联结性指数结果略有不同, Jaccard、Dice 指数得到的信息量小于 Ochiai 指数。优势种种间联结性表现为同属相关性较强,包括三个指数 均为强相关的 2 种小球藻和 2 种平裂藻,以及 Ochiai 和 Dice 指数强相关的直链藻,不同属也存在强相关的现 象,包括三角四角藻和普通黄丝藻、绿球藻和椭圆小球藻;绿藻门和蓝藻门优势种显著相关,包括集球藻和 2 种平裂藻;硅藻门和其他藻类相关性均较低,表现为同属的高相关性。X²检验结果和联结性指数计算结果基 本一致,但 X²检验结果出现不相关的物种,包括模糊直链藻和绿脆杆藻、三角四角藻和月牙藻,其中,X²检验 中椭圆小球藻与其他物种相关性均较低。

总体来说,9月群落处于监测时段最稳定状态,4月和9月优势种相关性较高,夏季和秋季优势种相关性 较高,该结果与表6和表3结果一致,说明群落物种结构的强关联性对夏秋季节沙湖浮游植物群落演替的稳 定状态有一定贡献;5和11月优势种仅2种(S31,S32)与7、8月优势种S33有强相关性,其他优势种表现为 月内优势种极强相关性(S9和S10)和不与其他时段优势种相关的情况,12月优势种和其他优势种相关性也 普遍较低,出现的是耐低温的物种;该结果与表6结果一致,说明5、11、12月浮游植物群落演替主要由群落内 物种构成变化驱动。

3 讨论和结论

3.1 城市小型湖泊浮游植物群落时空分布异质性

沙湖的浮游植物群落结构与分布存在明显的时空变化规律。沙湖是典型的富营养化湖泊,主要优势类群 为绿藻-硅藻-蓝藻(累积物种数占比超过 80%),研究者普遍认为优势类群的占比可以用于指示湖泊的污染状 态^[10],硅藻的物种数占比从春季(约 30%)到夏季(低于 20%)有明显下降,说明沙湖受污染程度从夏季开始 加深;蓝藻、裸藻物种数占比在夏秋季达到最大值,表明沙湖在夏秋季处于富营养化加剧的状态。整个监测时 段中,7—9月浮游植物群落整体α多样性最高,β多样性最低(图 4),群落处于演替的稳定阶段,该时段的群 落表现为耐污种占主要(表 7),各采样点在该时段群落多样性差异不大。α多样性较低的 3—7月和 9—12 月,多样性分布存在明显空间差异(表 3),5号点码头的多样性总体来说最小,表明人为扰动对小型湖泊生物 多样性有明显的影响;刘春光^[21]等认为水生植物能够通过多种机制影响湖泊生态系统,3、4号点为人工种植 挺水、沉水植物的水域边缘带,由采样点间对比发现,挺水、沉水植物对小型湖泊浮游植物群落的影响较小;6 月各点生物多样性均明显下降,而1号点多样性下降最明显,由1、2、6号采样点对比结果可知,小型湖泊的浮 游植物群落的稳定性与湖滨带的环境有相关关系。

3.2 浮游植物群落演替外驱动力

外驱动力主要作用因子为钠、镁离子浓度,温度为辅助作用因子,外驱动力主要作用时段为夏秋季节。由 主成分分析结果可知,6—10月 α多样性与环境因子变化规律一致,该时段内浮游植物群落主要驱动力为外 驱动力,可能原因为多样性较高的 7—9月浮游植物群落处于较稳定状态,物种替换减缓,以物种更新为主的 内驱动力减小,环境因子的驱动作用相对增大;多样性较低的 6月浮游植物群落处于较敏感状态,加之水体整 体营养水平在该时段较低^[22],环境因子成为群落更新生长的限制因素。通过浮游植物群落多样性和环境因 子的相关性分析可知,钠、镁离子浓度与群落 α多样性有强相关性,主要原因可能为镁离子是藻类的叶绿素 的组成元素之一且与叶绿体基粒堆垛直接相关,能够对叶绿体荧光产率和光合作用原初过程造成影响^[23],该 结果与其他研究结果类似^[24]。本研究发现温度与浮游藻类群落的 Shannon-Wiener 指数有强相关性,但与 Simpson 指数相关性较低,与 Pielou 均匀度指数基本无相关性,与大中型湖泊水库研究结果^[25,26]有明显差异, 表明大中型湖泊与小型湖泊浮游植物群落演替外驱动力因素存在差异,温度影响降低可能由于小型湖泊层间 温度和湖区温度差异化不明显。Whittaker 指数与 Shannon-Wiener 指数和其他环境因子均有强负相关关系, 说明较高的生境内多样性与较高的常量离子浓度有利于浮游植物群落维持演替的稳定状态。

3.3 浮游植物群落演替内驱动力

浮游植物优势种种类及其数量对浮游植物群落结构的稳定性有重要影响,优势种种类数越多且优势度越 小,则群落结构越复杂、稳定^[26],沙湖每月优势种数量变化表明其群落演替规律为由不稳定到稳定再逐步向 不稳定变化的过程。从优势种分类来看,硅藻和蓝绿藻对环境因素的响应存在明显差异^[27]。蓝藻大量生长 的时间段为夏季和冬季,既有相对生物量的增加,也有种类数的明显增加;夏季爆发可能由于该季节水体状态 更适宜蓝藻生长^[28],冬季爆发可能由于 2015 年 11 月降雨量增大,出现适宜蓝藻生长的面源输入^[29]。硅藻大 量生长的时间为春季和秋季,Sarmento^[30]等通过对于浅水湖泊的研究发现,外源输入减少水位降低时,硅藻生 物量得到明显增加;硅藻夏季种类数比重变化稳定,但是生物量比重明显下降,硅藻与蓝藻占总密度百分比为 极显著负相关^[31]。硅藻和蓝藻优势种的负关联性可能是 5、11 月浮游植物群落结构演替与夏秋季不同的主 要驱动因素。甲藻的生物量最大值出现在 3 月,达到 6%,胡韧^[32]等研究发现,在温度不是主要的限制因素 时,春季甲藻的生物量较高,与硅藻门和绿藻门构成优势类群;12 月湖水温度低于 10℃,优势种以金藻门为 主,其特点为耐低温性,其与其他优势种几乎无种间关联,可能为冬季群落演替的主要驱动力。

参考文献(References):

- Lemma B. Ecological changes in two ethiopian lakes caused by contrasting human intervention. Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters, 2003, 33(1): 44-53.
- [2] Mukankomeje R, Plisnier P D, Descy J P, Massaut L. Lake muzahi, rwanda: limnological features and phytoplankton production. Hydrobiologia, 1993, 257(2): 107-120.
- [3] Sommer U, Sommer F. Cladocerans versus copepods: The cause of contrasting top-down controls on freshwater and marine phytoplankton. Oecologia, 2006, 147(2): 183-194.
- [4] Willis K J, Van den Brink P J, Green J D. Seasonal variation in plankton community responses of mesocosms dosed with pentachlorophenol. Ecotoxicology, 2004, 13(7): 707-720.
- [5] Huszar V L M, Silva L H S, Domingos P, Marinho M, Melo S. Phytoplankton species composition is more sensitive than OECD criteria to the trophic status of three Brazilian tropical lakes. Hydrobiologia, 1998, 369: 59-71.
- [6] 谭香,夏小玲,程晓莉,张全发.丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数.环境科学,2011,32(10):2875-2882.
- [7] Tilman D, Kilham S S, Kilham P. Phytoplankton community ecology: the role of limiting nutrients. Annual Review of Ecology and Systematics, 1982, 13(1): 349-372.
- [8] Holopainen I J, Holopainen A L, Hämäläinen H, Rahkola-Sorsa M, Tkatcheva V, Viljanen M. Effects of mining industry waste waters on a shallow lake ecosystem in karelia, north-west russia. Hydrobiologia, 2003, 506(1/3): 111-119.
- [9] Mataloni G, Tesolín G, Sacullo F, Tell G. Factors regulating summer phytoplankton in a highly eutrophic antarctic lake. Hydrobiologia, 2000, 432 (1/3): 65-72.
- [10] 庞科,姚锦仙,王昊,刘松涛,李翀,吕植.额尔古纳河流域秋季浮游植物群落结构特征.生态学报,2011,31(12):3391-3398.
- [11] 田永强, 俞超超, 王磊, 黄邦钦. 福建九龙江北溪浮游植物群落分布特征及其影响因子. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2559-2565.
- [12] 王丽卿,施荣,季高华,范志锋,程婧蕾. 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.
- [13] 王静雅, 汪志聪, 李翀, 叶少文, 连玉喜, 刘家寿, 张堂林, 李钟杰. 三峡水库坝前水域浮游植物群落时空动态研究. 水生态学杂志, 2015, 39(5): 877-884.
- [14] 许晴, 张放, 许中旗, 贾彦龙, 尤建民. Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数若干特征的分析及"稀释效应". 草业科学, 2011, 28(4): 527-531.
- [15] 周洪华, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河下游绿洲——荒漠过渡带植物多样性特征及优势种群分布格局. 中国沙漠, 2009, 29(4): 688-696.
- [16] 刘文盈,张秋良,高润宏,铁牛,崔琥.盐沼湿地浮游植物多样性与环境关系研究.内蒙古林业科技,2012,38(1):5-7,22-22.
- [17] 郝媛媛, 孙国钧, 张立勋, 龚雪平, 许莎莎, 刘慧明, 张芬. 黑河流域浮游植物群落特征与环境因子的关系. 湖泊科学, 2014, 26(1): 121-130.
- [18] 徐敏,高翔,吕光辉,傅德平,杨晓东.克拉玛依典型植物群落种间关联分析.新疆农业科学,2010,47(5):1041-1046.
- [19] 周世兵,徐振源,唐旭清.新的k-均值算法最佳聚类数确定方法.计算机工程与应用,2010,46(16):27-31.
- [20] 陈家长, 孟顺龙, 尤洋, 胡庚东, 瞿建宏, 吴伟, 范立民, 马晓燕. 太湖五里湖浮游植物群落结构特征分析. 生态环境学报, 2009, 18 (4): 1358-1367.

http://www.ecologica.cn

- [21] 刘春光,邱金泉,王雯,庄源益.富营养化湖泊治理中的生物操纵理论.农业环境科学学报,2004,23(1):198-201.
- [22] Li H M, Tang H J, Shi X Y, Zhang C S, Wang X L. Increased nutrient loads from the Changjiang (Yangtze) River have led to increased Harmful Algal Blooms. Harmful Algae, 2014, 39: 92-101.
- [23] 孙谷畴. 镁离子对柱孢鱼腥藻(Anabaena cylindrica)类囊体膜吸收光谱和荧光光谱的影响. 植物生理学报, 1983, 9(4): 339-345.
- [24] 刘文盈,铁牛,张秋良,高润宏.藻类在盐沼湿地分布的关键限制因子研究.内蒙古林业科技, 2012, 38(4): 16-18, 26-26.
- [25] 邓文丽,刘均平,王晓星,杜桂森,洪剑明.北京野鸭湖浮游植物群落结构与水质关系研究. 湿地科学, 2013, 11(1): 27-34.
- [26] 裴国霞, 郭琦, 魏乐, 李汗青. 金海水库浮游植物调查及群落结构研究. 水生态学杂志, 2014, 35(2): 68-73.
- [27] 王宇飞,赵秀兰,何丙辉,黄琪.汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析.环境科学,2015,36(3):922-927.
- [28] 郑吴柯, 刘宪斌, 赵兴贵, 陈曦. 于桥水库浮游植物群落特征. 中国环境监测, 2015, 31(1): 35-40.
- [29] Rakko A, Laugaste R, Ott I. Algal blooms in estonian small lakes // Evangelista V, Barsanti L, Frassanito A M, Passarelli V, Gualtieri P, eds Algal Toxins: Nature, Occurrence, Effect and Detection. Netherlands: Springer, 2008: 211-220.
- [30] Sarmento H, Isumbisho M, Descy J P. Phytoplankton ecology of Lake Kivu (Eastern Africa). Journal of Plankton Research, 2006, 28(9): 815-829.
- [31] 李娣,李旭文,牛志春,王霞,师伟,于红霞.太湖浮游植物群落结构及其与水质指标间的关系. <u>生态环境</u>学报, 2014, 23(11): 1814-1820.
- [32] 胡韧, 雷腊梅, 韩博平. 南亚热带大型贫营养水库浮游植物群落结构与季节变化——以新丰江水库为例. 生态学报, 2008, 28(10): 4652-4664.