

三峡水库上游长寿湖浮游藻类的季节变化特征及关键环境影响因子*

雷波¹, 刘朔孺^{1,2}, 张方辉¹, 闫苏苏², 李建辉¹, 张晟^{1**}

(1: 重庆市环境科学研究院, 重庆 401147)

(2: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要: 基于2013年3月—2014年2月的长寿湖浮游藻类以及水质的监测结果, 分析浮游藻类物种组成、密度以及多样性指数的季节动态, 利用非度量多维尺度和相似性分析检验不同季节浮游藻类群落差异, 同时利用典范对应分析法确定影响不同季节浮游藻类群落结构的关键环境因子。结果表明: 泽丝藻(*Limnotherix* sp.)、小尖头藻(*Raphidiopsis* sp.)、汉斯冠盘藻(*Stephanodiscus hantzschii*)、具尾逗隐藻(*Komma caudata*)、鞘丝藻(*Lyngbya* sp.)和马索隐藻(*Cryptomonas marssonii*)为长寿湖优势种群, 不同季节间浮游藻类群落组成结构存在较大差异。浮游藻类群落结构以春季最为简单, 夏季次之, 秋、冬季最为复杂。不同季节影响浮游藻类群落结构的环境因子差异较大, 水温和营养盐是影响浮游藻类群落结构最重要的环境因子, 光照强度、高锰酸盐指数、氧化还原电位、溶解有机碳在秋、冬季节同样成为影响浮游藻类群落结构的关键环境因子。

关键词: 长寿湖; 浮游藻类; 季节变化; 环境因子; 典范对应分析; 三峡水库

Seasonal phytoplankton dynamics and its relationship with key environmental factors in Lake Changshou, upper reaches of the Three Gorges Reservoir

LEI Bo¹, LIU Shuoru^{1,2}, ZHANG Fanghui¹, YAN Susu², LI Jianhui¹ & ZHANG Sheng^{1**}

(1: Chongqing Academe of Environmental Science, Chongqing 401147, P.R.China)

(2: Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing 400045, P.R.China)

Abstract: An investigation was conducted on the phytoplankton community structure in the Lake Changshou in March, 2013 to February, 2014 to analyze the seasonal variation of phytoplankton composition density and diversity indices. Differences in the phytoplankton composition among seasons were tested using the Non-metric Multidimensional Scaling and Analysis of Similarities, and environmental influencing factors of phytoplankton composition were identified using Canonical Correspondence Analysis. The results showed that *Limnotherix* sp., *Raphidiopsis* sp., *Stephanodiscus hantzschii*, *Komma caudate*, *Lyngbya* sp. and *Cryptomonas marssonii* were the dominant species, and phytoplankton assemblages were significantly different among seasons. The phytoplankton community was the simplest in spring, and then in summer. The most complicated community occurred in autumn and winter. Canonical correspondence analysis showed that water temperature and nutrients were the most important environmental factors affecting the phytoplankton community structure. Irradiance, permanganate index, oxidation-reduction potential, and dissolved organic carbon also were the key environmental factors affecting the phytoplankton community structure in autumn and winter.

Keywords: Lake Changshou; phytoplankton; seasonal variation; environmental factors; canonical correspondence analysis (CCA); Three Gorges Reservoir

浮游藻类是水中最主要的初级生产者, 容易采集, 物种易鉴定、具有较高的生物多样性和对不同环境有

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07104-003)和重庆市基本科研业务费计划项目(2013cste-jbky-01604)联合资助。2016-03-23 收稿; 2016-06-02 收修改稿。雷波(1978~), 男, 硕士研究生, 高级工程师; E-mail: leilibo@hotmail.com.

** 通信作者; E-mail: shengzsts@126.com.

不同敏感度等特点,常作为水体环境监测及富营养化的生物指标^[1-2].同时,又因其是鱼类、底栖动物和浮游动物的主要食物来源,直接影响其他物种的生存和繁殖,是整个生态系统,特别是水生态系统物质循环和能量流动的枢纽之一,在一定程度上决定了物质循环和能量流动的方式^[3-4].三峡水库蓄水以来,库区支流回水区段富营养化和水华问题受到很大关注^[5-6],但对于库区上游湖库水体浮游藻类的动态变化研究相对较少,且大多集中于某一特定季节或时段^[7],无法全面反映三峡库区蓄水后上游湖库浮游藻类的动态变化特征,亦难以从季节过程的角度阐释浮游藻类种群的变化特点.因此在时间尺度上对长寿湖浮游藻类群落季节演替过程进行研究,对于更清晰地认识其浮游藻类对环境因子的响应关系,阐释三峡水库上游湖库水体的富营养化及水华过程具有重要的意义.

近年来,随着湖库生态评价以及水华暴发机理研究的持续深入,关于浮游藻类群落季节演替过程及关键环境影响因子的相关报道逐渐增多,Pasztaleniec等^[8]在对波兰4个中小湖库浮游藻类研究时发现,不同湖库浮游藻类优势群落落在同一季节具有明显差异,且随着季节变化其群落结构的演替趋势也有所不同.严平川等^[9]对江汉平原22个湖泊进行生态环境状况评价时同样发现,不同湖泊藻类组成及优势种有明显的季节变化和空间差异,氮磷营养负荷、水质状况和开发利用程度的不同是导致湖泊分化的主要环境因子.为了解太湖、巢湖、滇池等湖库蓝藻水华暴发原因,大量学者对其浮游藻类群落季节变化进行研究^[10-12],证明浮游藻类季节变化特征与蓝藻水华的发生存在一定规律.因此基于湖库生态状况存在显著时空异质性,针对不同湖库进行浮游藻类季节性调查对于准确反映当地的生态状况及水华暴发风险十分必要.此外,过去对浮游藻类的季节动态研究主要集中在群落结构的空间分布上,而对具体种群不同季节的主要环境影响因子还鲜有报道.

长寿湖是三峡水库上游重要大型水库,流域面积3248 km²,位于重庆西南130 km,兼具饮用、养殖、发电、旅游、防洪功能.过去对长寿湖流域的研究集中在水体金属离子、营养盐及沉积物等方面^[13-15],关于长寿湖浮游藻类季节变化和多样性的研究还未见报道,本文旨在研究长寿湖浮游藻类群落结构和季节变化的生态学特征,分析不同季节优势种群与环境因子之间的关系,揭示影响浮游藻类群落结构特征与演替的关键环境因子,为深入理解三峡库区上游湖库水体水生态系统结构与功能提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

长寿湖(29°54'~30°04'N,107°14'~107°27'E)又称狮子滩水库,大坝位于重庆市长寿区长寿湖镇,建成于1954年,水域面积65 km²,蓄水量10×10⁸ m³,正常蓄水位347.0 m,死水位328.5 m,水力停留时间0.38 a,最大水深40 m,平均水深15 m,是龙溪河流域下游控制性水库,长寿区重要的饮用水水源地.所处流域属中亚热带湿润季风气候区,具有四季分明、气候温和、降水充沛等特点,年平均气温17.6℃,常年降水量1200 mm左右.目前,长寿湖共有龙溪河、小河、响塘村河等9条入湖河流,其中小河和龙溪河为长寿湖东西两侧的主要入湖河流.

1.2 样点采集与分析

为全面评价长寿湖浮游藻类的变化趋势,本次研究共设置7个采样点(图1),均匀分布在长寿湖的不同区域.其中大坝口和三台样点位于湖区中央;石塔坡、打鼓坪和兴龙湾样点位于湖区西北侧;观音桥和万寿样点位于湖区东侧.

从2013年3月至2014年2月逐月对所有样点进行水样与浮游植物样品采集,其中水温、电导率(COND)、pH、溶解氧(DO)、叶绿素a、溶解性有机碳(DOC)、浊度和氧化还原电位(ORP)用YSI多参水质检测仪在野外现场测定,透明度使用塞式盘在野外现场测定,高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)等水体化学指标根据国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》进行采样分析^[16].浮游藻类样品是取表层以下0.5 m处水样1000 ml,加入15 ml鲁哥试剂固定,在实验室中静置沉淀48 h后浓缩至50 ml,使用0.1 ml计数框进行鉴定计数^[17].

1.3 数据分析

根据候平均气温四季划分方法,研究区域四季变化为春季3—5月、夏季6—9月、秋季10—11月和冬季

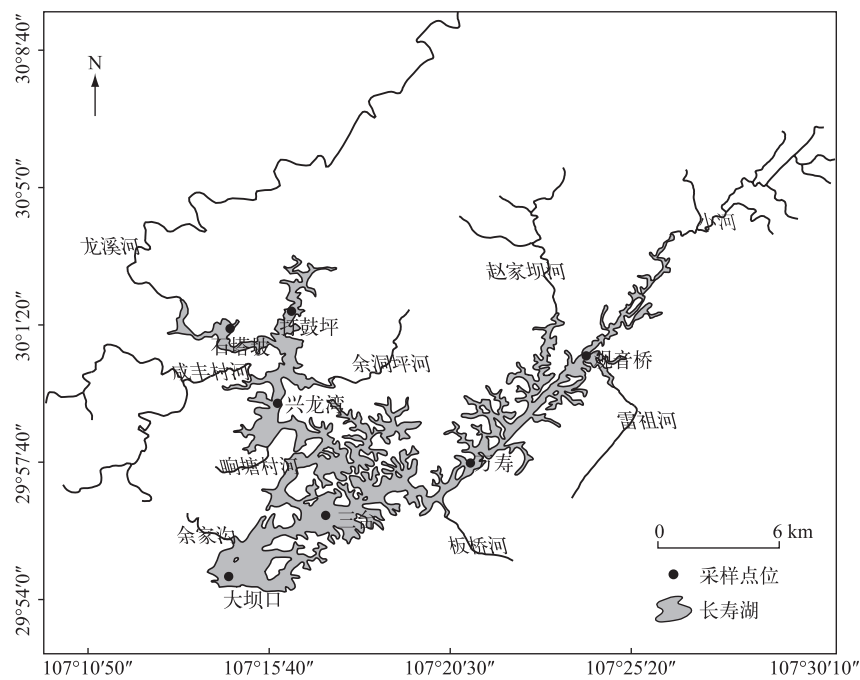


图 1 长寿湖采样点分布
Fig.1 Distribution of sampling sites in Lake Changshou

12 月至次年 2 月. 本研究选择 2013 年 3 月至 2014 年 2 月采集的 84 组数据样本进行分析,除 pH 外其余数据分析前均进行 $\lg(X+1)$ 转换及正态性检验,为了降低稀有种对分析结果的影响,把相对丰度小于 1%,出现频率少于 2 次的物种在分析前进行剔除. 方差分析在 SPSS 19.0 软件中完成,非度量多维尺度分析(NMDS)与相似性分析(ANOISM)在 Prime 6.1 软件中完成,典型对应分析在 Canoco 4.5 软件中完成.

研究中采用的生物多样性指数包括 Shannon-Wiener 指数(H')、Pielous 均匀度指数(J)和 Margalef 丰富度指数(D),其计算公式分别为:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \cdot \log_2 P_i \quad \left(P_i = \frac{N_i}{N} \right) \tag{1}$$

$$J = \frac{H'}{\log_2 S} \tag{2}$$

$$D = \frac{(S - 1)}{\ln N} \tag{3}$$

式中, S 为样品中浮游藻类总种类数, N 表示同一样品中浮游藻类总个体数, N_i 为第 i 种浮游藻类个体数.

2 结果与分析

2.1 长寿湖浮游藻类群落结构

2.1.1 物种组成 本研究共鉴定出浮游藻类 84 种,隶属 7 门、11 纲、18 目、30 科、55 属. 蓝藻门为长寿湖浮游藻类最主要组成群落,其相对丰度达 48.48%. 为明确最优种群的变化趋势,将相对丰度大于 5% 的种定为优势种,结果表明,泽丝藻、小尖头藻、汉斯冠盘藻、具尾逗隐藻、鞘丝藻和马索隐藻为长寿湖的优势种群,相对丰度分别为 23.27%、9.72%、9.54%、8.97%、5.89% 和 5.03%.

对长寿湖所有样点不同季节浮游藻类丰度分门类进行统计(图 2),可以看到,春、夏和秋季蓝藻相对丰度最高,冬季蓝藻相对丰度快速下降,硅藻相对丰度快速上升成为主要优势群落. 为确定各季节浮游藻类优

势种群,进一步分析表明(表1),其中春季浮游藻类优势种群包括泽丝藻、具尾逗隐藻、啮蚀隐藻等7种藻类;夏季浮游藻类优势种群包括小尖头藻、汉斯冠盘藻、泽丝藻等8种藻类;秋季浮游藻类优势种群包括泽丝藻、小尖头藻、汉斯冠盘藻等5种藻类;冬季优势种群是倪氏拟多甲藻、汉斯冠盘藻、具尾逗隐藻等5种藻类.各优势种的相对丰度在各季节间存在较大差异(表1).

表1 长寿湖各季节浮游藻类优势种相对丰度(%)

Tab.1 Relative abundance of phytoplankton dominant species in different seasons in Lake Changshou

物种	春季	夏季	秋季	冬季
泽丝藻 <i>Limnotherix</i> sp.	34.3	11.0	30.0	0.5
小尖头藻 <i>Raphidiopsis</i> sp.	0	19.7	12.4	0.4
鞘丝藻 <i>Lyngbya</i> sp.	5.2	6.6	6.8	0.2
平裂藻 <i>Merismopedia</i> sp.	0.2	7.3	4.0	0.1
拟柱胞藻 <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	0	6.4	1.2	0
汉斯冠盘藻 <i>Stephanodiscus hantzschii</i>	5.4	12.6	12.3	20.8
曲壳藻 <i>Achnanthes</i> sp.	5.7	0.4	2.1	0
意大利直链藻 <i>Melosira italica</i>	0.5	0	0	9.2
倪氏拟多甲藻 <i>Peridiniopsis niei</i>	0.6	0	0.2	21.1
具尾逗隐藻 <i>Komma caudata</i>	13.7	5.4	3.4	11.0
马索隐藻 <i>Cryptomonas marssonii</i>	5.4	3.9	8.3	2.7
啮蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	7.0	3.4	2.1	1.1
双对栅藻 <i>Scenedesmus bijuga</i>	0.2	0.8	1.8	8.5
未定衣藻 <i>Chlamydomonas incerta</i>	2.2	7.8	1.9	1.9

2.1.2 丰度和多样性指数 对长寿湖不同季节浮游藻类的丰度(图3)进行统计,结果表明,浮游藻类丰度由春季至冬季呈现逐渐下降趋势,单因素方差分析表明,除春、夏季无显著性差异外($P>0.05$),其余季节间浮游藻类丰度均具有显著性差异($P<0.05$).

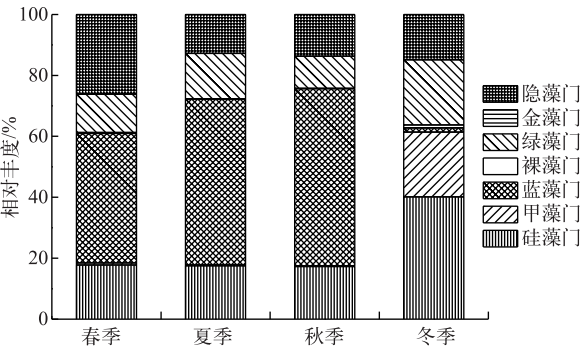


图2 长寿湖不同季节各门类浮游藻类相对丰度
Fig.2 Relative abundance of phytoplankton in different seasons of Lake Changshou

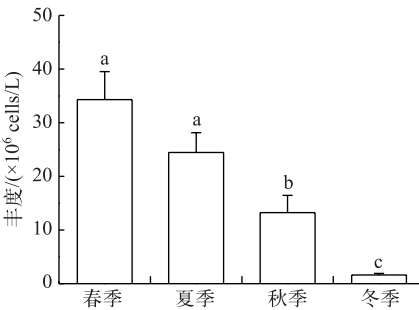


图3 长寿湖不同季节浮游藻类丰度
Fig.3 Abundance of phytoplankton in different seasons in Lake Changshou

为进一步了解长寿湖不同季节浮游藻类多样性变化状况,对浮游藻类的种类数以及多样性指数进行分析,结果表明(表2),Shannon-Wiener 多样性指数在春季与秋季间差异显著($P<0.05$);Margalef 多样性指数表现为春季与冬季差异显著($P<0.05$);Pielou 均匀度指数在春季和夏季均与秋季差异显著($P<0.05$);种类数在夏季最大,冬、秋季次之,春季最少,但无显著性差异($P>0.05$).

2.1.3 群落结构 通过 NMDS 分析(图4),可以看到春、秋和冬季采样点明显的分布在不同区域,夏季采样点则分布在春、秋季样点之间,ANOSIM 分析表明(表3),除夏、秋季两组样点浮游藻类群落无显著性差异外,

其余季节各组样点间均具有显著性差异($P=0.001$).

表 2 长寿湖不同季节浮游藻类生物多样性指数*

Tab.2 Biodiversity indices of phytoplankton in different seasons in Lake Changshou

生物多样性指数	春季	夏季	秋季	冬季
种类数	22.6±6.5 ^a	25.5±6.1 ^a	23.1±2.9 ^a	24.0±4.9 ^a
Shannon-Wiener 多样性指数	2.72±0.7 ^a	2.91±0.6 ^{ab}	3.19±0.4 ^b	3.06±0.6 ^{ab}
Margalef 多样性系数	1.27±0.4 ^a	1.48±0.4 ^{ab}	1.41±0.2 ^{ab}	1.65±0.4 ^b
Pielou 均匀度指数	0.61±0.1 ^a	0.62±0.1 ^a	0.71±0.1 ^b	0.67±0.1 ^{ab}

* 同一行上标不同字母代表差异显著.

表 3 长寿湖不同季节浮游藻类群落结构 ANOSIM 分析

Tab.3 The result of ANOSIM analysis on phytoplankton community in different seasons in Lake Changshou

季节	春季	夏季	秋季
春季	—	—	—
夏季	$R=0.380, P=0.001$	—	—
秋季	$R=0.393, P=0.001$	$R=0.043, P=0.237$	—
冬季	$R=0.692, P=0.001$	$R=0.698, P=0.001$	$R=0.623, P=0.001$

2.2 长寿湖浮游藻类丰度与环境因子关系

为了解环境因子对不同季节浮游藻类群落结构的影响情况,对浮游藻类丰度与水温、COND、pH、DO、透明度、DOC、ORP、浊度、光照强度、COD_{Mn}、TN、TP、NH₃-N、NO₃⁻-N 等 14 个环境因子进行典范对应分析(CCA).

通过相关系分析与蒙特卡罗检验,排除相关系数大于 0.8 且不具有显著影响的环境因子($P>0.05$),发现不同季节对浮游藻类群落结构影响显著的环境因子存在较大差异(图 5),春、夏、秋和冬季的关键环境因子可分别解释 46.01%、38.77%、32.30% 和 39.03% 的浮游藻类群落结构特征. 通过各环境因子箭头连线的长短可以看出,春季影响浮游藻类群落结构的主要环境因子依次为浊度、电导率、总磷和水温;夏季影响浮游藻类群落结构的主要环境因子依次为总氮、氨氮、水温和 pH;秋季影响浮游藻类群落结构的环境因子依次为水温和水面光照;冬季影响浮游藻类群落结构的主要环境因子依次为高锰酸盐指数、氧化还原电位、溶解有机碳和硝酸盐.

从藻类种群来看,泽丝藻、小尖头藻和鞘丝藻作为长寿湖蓝藻门的优势种群,在春、夏和秋季的丰度分布状况与水温呈显著正相关,具尾逗隐藻、马索隐藻、啮蚀隐藻、汉斯冠盘藻等硅、隐藻的优势种群,丰度则与水温呈显著负相关,与总磷、总氮等营养盐呈正相关. 进入冬季后,水温与营养盐对于浮游藻类种群分布影响作用逐渐减弱,这时泽丝藻、双对栅藻、小新月藻等蓝、绿藻丰度主要受到水体溶解有机碳的影响,倪氏拟多甲藻、汉斯冠盘藻、具尾逗隐藻、啮蚀隐藻等甲藻、硅藻和隐藻等丰度则主要受到化学需氧量与氧化还原电位等因子的影响.

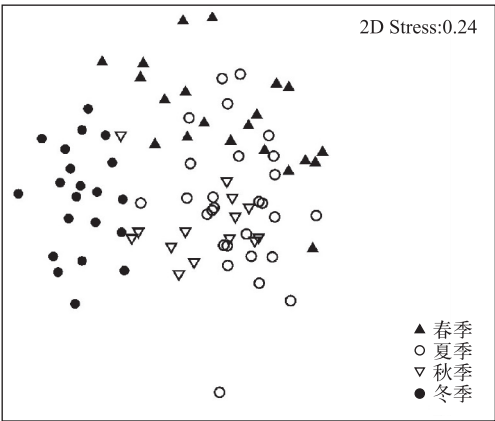


图 4 长寿湖不同季节各采样点浮游藻类非度量多维尺度分析
Fig.4 Non-metric multidimensional scaling analysis on phytoplankton in different seasons at each site of Lake Changshou

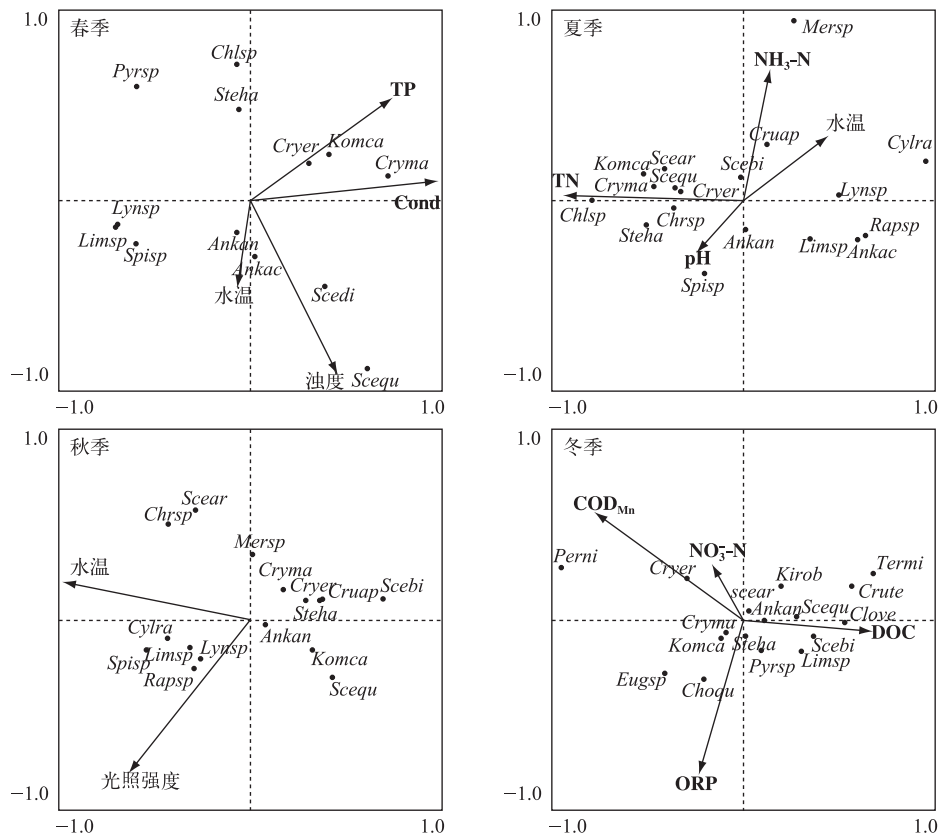


图 5 长寿湖不同季节浮游植物与环境因子的典范对应分析(物种代码见表 4)
Fig.5 Results of canonical correspondence analysis for environmental factors and phytoplankton assemblages in different seasons of Lake Changshou(codes of phytoplankton species in Table 4)

表 4 CCA 分析中浮游藻类植物种类代码
Tab.4 Codes of phytoplankton species for CCA

浮游植物	代码	浮游植物	代码
针形纤维藻 <i>Ankistrodesmus acicularis</i>	Ankac	泽丝藻 <i>Limnotherix</i> sp.	Limsp
狭形纤维藻 <i>Ankistrodesmus angustus</i>	Ankan	鞘丝藻 <i>Lyngbya</i> sp.	Lynsp
绿梭藻 <i>Chlorogonium</i> sp.	Chlsp	平裂藻 <i>Merismopedia</i> sp.	Mersp
四刺顶棘藻 <i>Chodatella quadriseta</i>	Choqu	倪氏拟多甲藻 <i>Peridiniopsis niei</i>	Perni
色球藻 <i>Chroococcus</i> sp.	Chrsp	塔胞藻 <i>Pyraminonas</i> sp.	Pyrsp
小新月藻 <i>Closterium venus</i>	Clove	小尖头藻 <i>Raphidiopsis</i> sp.	Rapsp
顶锥十字藻 <i>Crucigenia apiculata</i>	Cruap	被甲栅藻 <i>Scenedesmus armatus</i>	Seear
四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>	Crute	双对栅藻 <i>Scenedesmus bijuga</i>	Seebi
嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	Cryer	二形栅藻 <i>Scenedesmus dimorphus</i>	Scedi
马索隐藻 <i>Cryptomonas marssonii</i>	Cryma	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>	Scequ
拟柱胞藻 <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	Cylra	螺旋藻 <i>Spirulina</i> sp.	Spisp
裸藻 <i>Euglena</i> sp.	Eugsp	汉斯冠盘藻 <i>Stephanodiscus hantzschii</i>	Steha
肥状蹄形藻 <i>Kirchneriella obesa</i>	Kirob	微小四角藻 <i>Tetraëdron minimum</i>	Termi
具尾逗隐藻 <i>Komma caudata</i>	Komca		

3 讨论

3.1 长寿湖浮游藻类群落季节变化趋势及其成因

整体来看,长寿湖浮游藻类的季节演变趋势主要体现在由春、夏、秋季的蓝藻-硅藻-隐藻群落向冬季的硅藻-绿藻-甲藻群落进行转变,相比三峡库区上游的香溪河、大宁河等库湾区域^[18-19],群落结构的季节演变趋势较为简单,春、夏、秋季蓝藻为绝对优势群落,冬季硅藻密度开始上升取代蓝藻成为优势群落,这可能与长寿湖的水文条件与营养盐浓度有密切关系,目前长寿湖营养状况已处于轻度富营养化,且水文条件相比香溪河、大宁河等河流型水库更加稳定,因此春、夏、秋季等较温暖的季节蓝藻具有更强的生长优势,但不同季节间浮游藻类优势种群组成存在一定差异,表明浮游藻类种群结构特征存在一定的季节性差异,NMDS 和 ANOISM 分析同样证明了这一结论. 密度分析中可以看到长寿湖浮游藻类的密度峰值出现在春季,高达 10^7 数量级,这与长江中下游巢湖、太湖蓝藻水华通常发生在温度较高的夏季具有明显不同^[10-11],主要优势种的差异可能是造成这一结果的主要原因,反映出泽丝藻等部分藻类种群仅在特定环境中具有明显的生长竞争优势^[20].

3.2 长寿湖浮游藻类多样性指数季节变化原因

长寿湖浮游藻类多样性指数分析结果总体表现为春季最低,夏季次之,秋、冬季较高,春季由于泽丝藻单一物种的大量繁殖,群落结构极不稳定,所以多样性指数最低;夏季丰水期的到来,上游流量的快速增加以及大坝调节性放水破坏了水体的稳定性,泽丝藻等漂浮性蓝藻的生长受到干扰^[21],密度明显下降;秋、冬季伴随着气温的下降,光照减弱,浮游藻类的整体生长速率受到限制,蓝藻优势种群密度快速下降^[22],均匀度逐渐上升,汉斯冠盘藻、倪氏拟多甲藻、具尾逗隐藻等其它藻类相对丰度开始增加,从而导致群落多样性指数开始升高,群落稳定性增强. 目前,生物多样性指数仍是我国水域生态学家评价水体质量状况使用较多的方法之一,很多学者还基于某些多样性指数对水质级别进行了划分^[23-25]. 通过本研究不难发现,各项多样性指数均具有一定的季节性差异. 因此,未来在利用浮游藻类多样性指数对水域生态系统进行评价时,应充分考虑到这一点,构建季节性评价体系是很有必要的.

3.3 长寿湖浮游藻类种类与环境因子的关系

通常来讲,环境因子对浮游藻类群落结构的影响是随季节的变化而变化的^[26],本研究也证实了这一点,不同季节影响浮游藻类分布的环境因子存在较大差异,就整个湖库而言,春、夏、秋季水温均是影响浮游藻类群落结构的关键环境因子,充分反映了温度对于浮游藻类生长繁殖的重要作用,无论是三峡库区下游的太湖^[27]、巢湖^[28],还是三峡库区上游的汉丰湖等^[7],均发现温度是影响藻类群落的关键因子,但同时也应看到,本次研究中春季和夏季营养盐的影响作用明显大于水温,这可能与藻类季节物候学有一定关系,春、夏季是多数藻类的复苏生长期,这时营养盐是限制其生长的最主要环境因子,进入秋季后,大多数藻类逐渐进入死亡休眠期,温度则变成限制其生长的关键环境因子^[29]. 过去大量研究认为,蓝、绿藻最适生长温度要明显高于硅、隐藻^[30],本研究同样发现泽丝藻、小尖头藻和鞘丝藻等蓝藻分布状况与水温呈显著正相关,而具尾逗隐藻、马索隐藻、嗜蚀隐藻、汉斯冠盘藻等硅、隐藻则与水温呈显著负相关. 水体中的营养盐特别是氮、磷是藻类生长最主要的元素,一般认为,蓝、绿藻是富营养型水体的优势种^[31],太湖、巢湖、滇池等地的蓝藻水华暴发均发现与营养盐浓度呈显著正相关^[10-11, 32],但本次研究却发现,虽然总氮、总磷等营养盐因子在春、夏季是影响浮游藻类的重要环境因子,但却与蓝、绿藻群落丰度分布呈负相关,与硅、隐藻群落丰度分布呈正相关. 分析原因这可能与蓝、绿藻的营养盐竞争优势有关,虽然目前长寿湖整体处于轻度富营养化状况,营养盐已不是藻类生长的重要限制因子,但对于湖区的不同区域其营养盐浓度存在一定差别,对于营养盐浓度较低的区域,由于蓝、绿藻的竞争优势,硅、隐藻的生存空间被严重挤压,因此仅在营养盐相对丰富的区域,硅、隐藻可能才具有一定的生存空间. Pelechata 等^[33]研究发现对于富营养盐湖泊,冬季随着气温的快速下降,藻类的生长繁殖受到严重抑制,营养盐对于不同藻类种群的限制作用逐渐降低,水色、透明度等其它环境因子成为主导浮游藻类群落分布的关键因子. 对于本次研究区域长寿湖,同样发现冬季化学需氧量、氧化还原电位等环境因子取代营养盐成为影响浮游藻类的关键环境因子.

致谢:现场采样过程中得到郭洪涛、由永飞、杨春华、郑莉、敖亮的大力协助,实验样品分析中得到陈军的大

力支持,在此一并致谢.

4 参考文献

- [1] Rangel LM, Soares MCS, Paiva R *et al.* Morphology-based functional groups as effective indicators of phytoplankton dynamics in a tropical cyanobacteria-dominated transitional river-reservoir system. *Ecological Indicators*, 2016, **64**: 217-227.
- [2] Katsiapi M, Moustaka-Gouni M, Sommer U. Assessing ecological water quality of freshwaters: PhyCoI—A new phytoplankton community index. *Ecological Informatics*, 2016, **31**: 22-29.
- [3] Zhang P, Tang H, Gong Z *et al.* Phytoplankton abundance constrains planktonic energy subsidy to benthic food web. *Journal of Ecosystem & Ecography*, 2014, **4**(1): 1.
- [4] Chew LL, Chong VC, Tanaka K *et al.* Phytoplankton fuel the energy flow from zooplankton to small nekton in turbid mangrove waters. *Marine Ecology Progress Series*, 2012, **469**: 7-24.
- [5] Fu Daolin, Liu Xiaoi, Liu Guang. A discussion on monitoring the algal bloom in daning river during the recession period of the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science Survey*, 2012, **31**(1): 104-105. [傅道林, 刘晓霁, 刘广. 三峡水库退水期间大宁河“水华”监测探讨. 环境科学导刊, 2012, **31**(1): 104-105.]
- [6] Luo H, Liu D, Huang Y. Support vector regression model of chlorophyll-a during spring algal bloom in Xiangxi bay of three gorges reservoir, China. *Journal of Environmental Protection*, 2012, **3**(5): 420-425.
- [7] Wang Yufei, Zhao Xiulan, He Binghui *et al.* Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environmental factors in Hanfeng Lake. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 922-927. [王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉等. 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.]
- [8] Pasztaleniec A, Poniewozik M. Phytoplankton based assessment of the ecological status of four shallow lakes (Eastern Poland) according to water framework directive—a comparison of approaches. *Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters*, 2010, **40**(3): 251-259.
- [9] Yan Pinchuan, Wang Jun, Xiao Guiqin *et al.* Characteristics of phytoplankton community and its relationship with water environment in lakes from the Jiangnan Plain. *J Lake Sci*, 2015, **27**(2): 297-304. DOI:10.18307/2015.0214. [严平川, 王军, 肖贵清等. 江汉平原湖群藻相特征及其环境状况评价. 湖泊科学, 2015, **27**(2): 297-304.]
- [10] Deng J, Qin B, Sarvala J *et al.* Phytoplankton assemblages respond differently to climate warming and eutrophication: A case study from Pyhäjärvi and Taihu. *Journal of Great Lakes Research*, 2016, **42**(2): 386-396.
- [11] Jiang Y, He W, Liu W *et al.* The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu). *Ecological Indicators*, 2014, **40**: 58-67.
- [12] Guo Y, He F, Li A *et al.* Temporal and spatial variation of phytoplankton community and main pollution indicators in the cyanophyte enrichment area of north Dianchi lake. *Meteorological & Environmental Research*, 2013, **4**: 30-33.
- [13] Zhou Xin, Guo Haitao, Zhang Jinzhong *et al.* Simulated study on phosphorus release from sediment in Lake Changshou influenced by environmental factors. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(5): 1671-1675. [周欣, 郭海涛, 张进忠等. 环境因素对长寿湖底泥释磷影响的模拟实验研究. 环境工程学报, 2013, **7**(5): 1671-1675.]
- [14] Bai Weiyang, Zhang Cheng, Zhao Zheng *et al.* Spatial distribution characteristics of different species mercury in water body of Lake Changshou in Three Gorges Reservoir region. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2863-2869. [白薇扬, 张成, 赵铮等. 三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征. 环境科学, 2015, **36**(8): 2863-2869.]
- [15] Liang A, Wang Y, Guo H *et al.* Assessment of pollution and identification of sources of heavy metals in the sediments of Lake Changshou in a branch of the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(20): 16067-16076.
- [16] Editorial board of water and wastewater monitor the analytical method, State Environmental Protection Administration ed. Water and wastewater monitor the analytical method (4th edition). Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法 (第4版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [17] Hu Hongjun, Wei Yinxin eds. The freshwater algae of China: Systematics, Taxonomy and Ecology. Beijing: Science Press, 2006. [胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统, 分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [18] Liu L, Liu D, Johnson DM *et al.* Effects of vertical mixing on phytoplankton blooms in Xiangxi Bay of Three Gorges Reser-

- voir; Implications for management. *Water Research*, 2012, **46**(7): 2121-2130.
- [19] Zhang J, Zheng B, Liu L *et al.* Seasonal variation of phytoplankton in the Daning River and its relationships with environmental factors after impounding of the Three Gorges Reservoir: A four-year study. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, **2**: 1479-1490.
- [20] Nicklisch A. Competition between the Cyanobacterium *Limnithrix redekei* and some spring species of diatoms under P-limitation. *International Review of Hydrobiology*, 1999, **84**(3): 233-241.
- [21] Yang Zhengjian. The mechanisms of algal blooms and its operation method through water level fluctuation under the situation of the bidirectional density currents in tributaries of the Three Gorges Reservoir [Dissertation]. Wuhan: Wuhan University, 2014. [杨正健. 分层异重流背景下三峡水库典型支流水华生消机理及其调控[学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2014.]
- [22] Lv H, Yang J, Liu L *et al.* Temperature and nutrients are significant drivers of seasonal shift in phytoplankton community from a drinking water reservoir, subtropical China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(9): 5917-5928.
- [23] Yang Min, Zhang Sheng, Liu Shuru. Phytoplankton community structure and water quality assessment in Jialing River after the impoundment of Caojie Reservoir. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2480-2486. [杨敏, 张晟, 刘朔菡. 草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价. 环境科学, 2015, **36**(7): 2480-2486.]
- [24] Zhang NN, Zang SY. Characteristics of phytoplankton distribution for assessment of water quality in the Zhalong Wetland, China. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, **12**(11): 3657-3664.
- [25] Wang HW, Xing QC, Zhao CL *et al.* Investigation of phytoplankton and evaluation on water quality of Taizi River in Liaoyang area. *Advanced Materials Research*, 2014, **955**: 403-406.
- [26] Peng C, Zhang L, Zheng Y *et al.* Seasonal succession of phytoplankton in response to the variation of environmental factors in the Gaolan River, Three Gorges Reservoir, China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, **31**(4): 737-749.
- [27] Deng J, Qin B, Paerl HW *et al.* Effects of nutrients, temperature and their interactions on spring phytoplankton community succession in Lake Taihu, China. *PLoS One*, 2014, **9**(12): e113960.
- [28] Lu Na, Yin Hongbin, Deng Jiancai *et al.* Spring community structure of phytoplankton from Lake Chaohu and its relationship to environmental factors. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 950-956. DOI:10.18307/2010.0620. [路娜, 尹洪斌, 邓建才等. 巢湖流域春季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 950-956.]
- [29] Deng Jianming, Qin Boqiang. A review on studies of effects of climate change on phytoplankton in freshwater systems. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 1-10. DOI:10.18307/2015.0101. [邓建明, 秦伯强. 全球变暖对淡水湖泊浮游植物影响研究进展. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 1-10.]
- [30] Li R, Chen Q, Zhang X *et al.* Effects of temperature and macronutrients on phytoplankton communities across three largely different lakes identified by a time-space trade-off approach. *Ecological Informatics*, 2015, **29**(2): 174-181.
- [31] Zhu W, Wan L, Zhao L. Effect of nutrient level on phytoplankton community structure in different water bodies. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(1): 32-39.
- [32] Ma J, Brookes JD, Qin B *et al.* Environmental factors controlling colony formation in blooms of the cyanobacteria *Microcystis* spp. in Lake Taihu, China. *Harmful Algae*, 2014, **31**: 136-142.
- [33] Pelechata A, Pelechaty M, Pukacz A. Winter temperature and shifts in phytoplankton assemblages in a small Chara-lake. *Aquatic Botany*, 2015, **124**: 10-18.