

2007年太湖五里湖浮游植物生态学特征*

孟顺龙, 陈家长**, 范立民, 胡庚东, 瞿建宏, 吴伟, 马晓燕

(中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 内陆渔业生态环境和资源重点开放实验室, 无锡 214081)

摘要: 研究了2007年太湖五里湖浮游植物的生态学特征。结果表明: 五里湖共检出浮游植物8门123种; 其中绿藻种类最多, 共57种, 占浮游植物总种数的46.3%; 硅藻次之, 共23种, 占浮游植物总种数的18.7%; 浮游植物种数以冬春季多、夏秋季少。调查期间, 浮游植物数量和生物量分别变化在 386.2×10^4 – 5581.9×10^4 cells/L和0.541–3.491 mg/L, 均以绿藻最高; 浮游植物数量的季节变化表现为夏季>春季>秋季>冬季; 且除绿藻外, 浮游植物的季节演替规律与PEG模型基本一致。相似性分析显示, 五里湖1、3、4、5月份的生境相似, 6、7、8、9、11月份的生境相似。优势度分析显示, 五里湖各个月份的浮游植物优势种都在2种以上, 优势种主要有小球藻(*Chlorella vulgaris*)、小球衣藻(*Chlamydomonas microspira*)、尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*)、铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)等14种, 优势种种数较多且优势度不高, 变化在0.02–0.78之间; 多样性和均匀度分析显示, 五里湖浮游植物多样性指数和均匀度指数分别变化在1.5–2.7和0.26–0.59之间, 多样性和均匀度都较好; 表明2007年五里湖浮游植物群落结构比较复杂、处于较完整状态。

关键词: 浮游植物; 生态学特征; 五里湖; 太湖

Eco-characteristics of phytoplankton in Lake Wuli, Lake Taihu in 2007

MENG Shunlong, CHEN Jiazhang, FAN Limin, HU Gengdong, QU Jianhong, WU Wei & MA Xiaoyan

(Key Open Laboratory of Ecological Environment and Resources of Inland Fisheries, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, P.R.China)

Abstract: This paper studied the eco-characteristics of phytoplankton in Lake Wuli, Lake Taihu in 2007. The results showed that 8 classes including 123 species have been founded in Lake Wuli. Among them, dominated Chlorophyta has 57 species, accounting for 46.3% of the total phytoplankton species, and Bacillariophyta has 23 species, taken the second place, accounting for 18.7% of the total phytoplankton species. There were much more species in winter and spring than that in summer and autumn. The quantity and biomass of phytoplankton in Lake Wuli in 2007 ranged from 386.2×10^4 to 5581.9×10^4 cells/L and 0.541 to 3.491 mg/L, respectively. Dominated class both in quantity and biomass was Chlorophyta, then was Cyanophyta, and the third was Cryptophyta. The quantity of phytoplankton in the order from large to small was: Summer>Spring>Autumn>Winter. Seasonal succession of phytoplankton was consistent with rule of PEG (Plankton Ecology Group) model except Chlorophyta. The analysis results of similarity showed that the eco-environment of Lake Wuli in January was similar to that on March, April and May, and the eco-environment in June was similar to that in July, August, September and November. The analysis result of the predominance index showed that there were 14 predominant species including *Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas microspira*, *Chroomonas acuta*, *Microcystis aeruginosa* in 2007 in Lake Wuli, and the numbers of predominant species were all more than two species in every month. Furthermore, the predominant indexes were not high, ranging from 0.02 to 0.78. The analysis results of diversity and uniformity showed that the diversity index ranged from 1.5 to 2.7 and uniformity index from 0.26 to 0.59, respectively, which meant that both diversity and uniformity of phytoplankton were good status in the lake. It could be concluded that the phytoplankton community structure in Lake Wuli was complex in the ecosystem.

* 无锡市发展改革委员会项目(2115019)资助。2008–12–31收稿; 2009–04–01收修改稿。孟顺龙, 男, 1982年生, 硕士, 实习研究员; E-mail: mengsl@ffrc.cn.

** 通讯作者; E-mail: chenjz@ffrc.cn.

Keywords: Phytoplankton; eco-characteristics; Lake Wuli; Lake Taihu

浮游植物是水生态系统中的初级生产者,是整个水生态系统中物质循环和能量流动的基础.它对水体营养状态的变化能迅速做出响应^[1].浮游植物种类组成与数量的季节变化是浮游植物群落动态的重要特征^[2].由于浮游植物的种群结构与其生活水域的水质状况密切相关,在不同营养状态的水体中,分布着不同种群结构的浮游植物,所以浮游植物的种群结构能够综合、真实地反映出水体的生态条件和营养状况.为此,调查分析特定水域浮游植物生态学特征和利用微型藻类评价、监测水质研究正逐步开展^[3-10].

五里湖是太湖北部的一个湖湾,位于120.13-120.27E, 31.28-31.35N,东西长6km,南北宽0.3-1.5km,面积约6.4km²,常年水位3.07m,平均水深1.60m.2002年全湖底泥疏浚后,平均水深已达2.10m.20世纪50-60年代,五里湖水草繁茂,湖水清澈见底^[11-13],60年代后,五里湖富营养化日益严重,成为太湖污染最严重的水域.五里湖外源污染输入量大,其作为无锡市污水的接纳湖湾,每天接纳的城市污水量约 1×10^5 t^[14].2001年该湖的水质监测结果为劣V类,COD_{Mn}、BOD₅、TN、TP、Chl.a年平均值分别为全太湖平均值的1.39、2.63、1.93、2.44、2.61倍^[15-16].目前,有关五里湖水水质理化指标的研究比较多,而有关五里湖浮游植物生态特征的研究还比较少,且时间也已久远^[17-18].

近年来,随着国家对“三河三湖”治理工程的不断深入,太湖五里湖水水质虽已有所好转,但因外源性污染难以控制,其整体情况仍不容乐观.当前,随着无锡市城市规模的不断扩大,该湖已逐渐发展成一个城市景观性湖泊.因此,五里湖水环境优劣对无锡市经济发展势必产生重要影响.为此,在当地政府的支持下,中国水产科学研究院淡水渔业研究中心会同无锡市农林局对五里湖进行了生态调查和治理.本文在2007年调查资料的基础上探讨了五里湖浮游植物的种群结构及其生态意义,以期在五里湖的生态环境评价和综合整治提供一定科学依据,同时也为五里湖的富营养化发展变化原因和趋势提供一些参考.

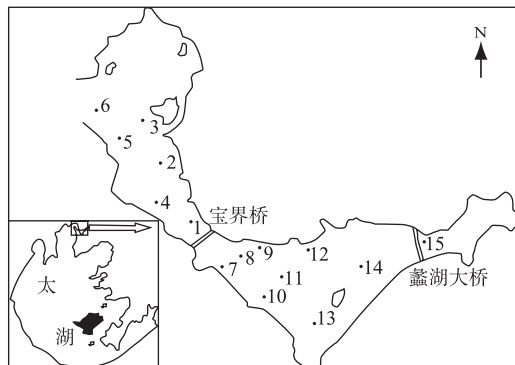


图1 五里湖浮游植物采样站位

Fig.1 Sampling stations of phytoplankton in Lake Wuli

1 材料与方法

1.1 采样点站位和采样频率

按照湖泊调查规范,在太湖五里湖均匀布设了15个采样站位(图1).于2007年共对太湖五里湖进行了9次采样;具体采样时间分别为2007年1月30日、3月27日、4月27日、5月30日、6月25日、7月26日、8月28日、9月25日、11月6日.

1.2 浮游植物采集、计数方法

定性样品用25号浮游生物网采集,在水深0.5m处以0.5m/s的速度呈“∞”型拖拉5min,带回实验室在10×40倍光学显微镜下观察分类.

定量样品用1000ml有机玻璃采水器在水深0.5m处采集水样1000ml,现场加入15ml鲁哥试剂并摇匀.带回实验室静置沉淀24h后浓缩并定容至25ml供镜

检.浮游植物的观察计数用0.1ml浮游植物计数框在10×40倍光学显微镜下进行.计数时充分摇匀浓缩液,然后立即取0.1ml样品放入计数框中,观察100个视野.对量小而个体大的种类在10×10倍下全片计数.每个样品计数两片,取其平均值做最终结果.若两片计数结果相差15%以上,则进行第三片计数,取其中个数相近的两片的平均值.最后换算成每升水样中藻类的细胞个数,即为细胞数量(cells/L).浮游植物分类参照文献[19].由于浮游植物的比重接近于1,故可以直接由浮游植物的体积换算为生物量(湿重),即生物量为浮游植物的数量乘以各自的平均体积,单位为mg/L.单细胞的生物量主要根据浮游植物个体形状测量分析.

1.3 数据分析

根据浮游植物的种类相似性指数(X , Jaccard)、Pielou均匀度指数(J , Pielou)、Mcnaughton优势度指数(Y ,

Mcnaughton index)、香农-威纳多样性指数(D , Shannon-Wiener index)对太湖五里湖浮游植物的生态学特征进行分析评价. 上述各项指数的计算公式如下:

$$X = \frac{c}{a+b-c}; D = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i; P_i = \frac{n_i}{N};$$

$$J = \frac{D}{\log_2 S}; Y = \frac{n_i}{N} f_i$$

式中, X 为相似性指数; D 为多样性指数; J 为均匀度指数; Y 为优势度指数; n_i 为站位中 i 种的个数; N 为站位中浮游植物总个数; f_i 为 i 种在各站位中出现的频率; S 为站位中浮游植物总种数; a 为站位 A 中出现的浮游植物种类数; b 为站位 B 中出现的浮游植物种类数; c 为站位 A 和站位 B 中都出现的浮游植物种类数.

2 结果分析与讨论

2.1 浮游植物种类组成、数量及生物量

2.1.1 浮游植物种类组成 2007年1-11月, 通过9次调查采样, 共鉴定出绿藻、硅藻、蓝藻、裸藻、隐藻、甲藻、黄藻、金藻8门123种(包括变种和变型). 其中绿藻种数最多, 共57种, 占浮游植物总种数的46.3%; 硅藻次之, 共23种, 占浮游植物总种数的18.7%; 蓝藻和裸藻的种类数相当, 分别为17种和16种, 占浮游植物总种数的13.8%和13.0%; 隐藻5种, 占浮游植物总种数的4.1%; 其余各门合计占浮游植物总种数的4.1%. 2007年五里湖浮游植物种类组成及其月间变化情况分别如表1和图2所示.

五里湖各月之间的浮游植物总种数变化较大(图2). 总种数的月间变化趋势与绿藻、硅藻的月间变化趋势完全一致, 呈现出: 从1月到3月种类数逐渐增加至最多, 3月份时浮游植物总种数、绿藻门种数、硅藻门种数分别为60种、35种、11种; 从3月到9月种类数逐渐减少至最少, 9月份时浮游植物总种数、绿藻门种数、硅藻门种数分别为18种、9种、1种; 从9月到11月种类数又开始逐渐回升, 11月份时浮游植物总种数、绿藻门种数、硅藻门种数分别为22种、11种、3种. 2007年, 五里湖浮游植物总种数的季节变化趋势表现为: 冬、春季节种类数多, 夏、秋季节种类数少. 而且, 各月的浮游植物种类组成与2007年全年的相似, 均以绿藻种类最多, 硅藻次之, 之后分别是蓝藻、裸藻和隐藻.

2.1.2 浮游植物数量及生物量 2007年五里湖浮游植物数量变化在 386.2×10^4 – 5581.9×10^4 cells/L 之间(图3). 从季节变化上看, 以夏季最高, 春季次之, 之后分别为秋季和冬季. 一年中浮游植物数量的最高峰和次高峰分别出现在夏季的7月和6月, 分别达 5581.9×10^4 cells/L 和 2288.0×10^4 cells/L; 之后是春季的3月, 为 1856.9×10^4 cells/L; 最低值则为冬季的1月, 仅为 386.2×10^4 cells/L. 最高值分别是次高值和最低值的2.4和14.5倍, 说明五里湖浮游植物数量月间变化大. 从浮游植物数量组成上看(表2), 2007年1月至11月均以绿藻数量最多, 占浮游植物总数量的百分比变化在46.03%–93.31%. 其他各门藻类数量随季节和月份变化大; 其中1月金藻数量仅次于绿藻的, 占浮游植物总数量的2.44%; 3月和4月隐藻数量仅次于绿藻的, 分别占浮游植物总数量的10.97%和45.21%; 5–9月蓝藻数量仅次于绿藻的, 占浮游植物总数量的百分比变化在17.96%–43.80%. 11月则又转变为隐藻数量仅次于绿藻的, 占浮游植物总数量的8.41%. 2007年五里湖各门藻类平均数量的大小顺序为: 绿藻门(64.80%)>蓝藻门(27.68%)>隐藻门(5.97%)>硅藻门(1.07%)>裸藻门(0.11%)>金藻门(0.07%)>黄藻门(0.04%)>甲藻门(0.01%).

2007年, 五里湖浮游植物生物量变化在0.541–3.491 mg/L 之间. 生物量的月间变化趋势与其数量的月间变化趋势有些相似(图3); 但也存在差异. 一年中浮游植物生物量的最高值和次高值分别出现在夏季的7月和6月, 分别达3.491 mg/L 和2.671 mg/L. 之后是秋季的9月, 为1.655 mg/L; 而在浮游植物数量上, 3、4、5、8月的均远远高于9月的, 但浮游植物生物量却是9月的高于3、4、5、8月的(图3); 这主要是由于各个月份中浮游植物细胞数量和生物量中占主导地位的种类组成存在差异; 因为生物量的高低除与细胞数量有关外, 还与细胞个体大小密切相关, 相对于3、4、5、8月而言, 9月出现的大型种类比较多, 如卵形隐藻、角甲藻等. 浮游植物生物量的最低值则出现在秋季的11月, 仅为0.541 mg/L.

表 1 2007 年五里湖浮游植物种类组成

Tab.1 Species composition of phytoplankton found in Lake Wuli in 2007

种名	种名	种名
小形平藻(<i>Pedinomonas minor</i>)	四角十字藻(<i>Crucigenia. quadrata</i>)	尖尾蓝隐藻(<i>Chroomonas acuta</i>)
小球衣藻(<i>Chl.amydomonas microsphaera</i>)	四足十字藻(<i>Crucigenia tetrapedia</i>)	杯胞藻(<i>Chroomona truncata</i>)
球衣藻 (<i>Chl.amydomonas globosa</i>)	华美十字藻(<i>Crucigenia lauterbornei</i>)	扁圆卵形藻(<i>Cocconeis plaentula</i>)
卵形衣藻(<i>Chl.amydomonas ovalis</i>)	并联藻(<i>Quadrigula chodatii</i>)	普通等片藻(<i>D.valgare</i>)
异形藻(<i>Dysmorphococcus variabilis</i>)	四刺顶棘藻(<i>Chodatella quadriseta</i>)	椭圆舟形藻(<i>Navicula schonfeldii</i>)
小球藻(<i>Chlorella vulgaris</i>)	十字顶棘藻(<i>Chodatella wratislaviensis</i>)	圆环舟形藻(<i>Navicula placenta</i>)
椭圆小球藻(<i>Chlorella ellipsoidea</i>)	环丝藻(<i>Ulothrix zonata</i>)	尖头舟形藻(<i>Navicula cuspidada</i>)
镰形纤维藻 (<i>Ankistrodesmus falcatus</i>)	单棘四星藻(<i>Tetrastrum hastiferum</i>)	隐头舟行藻(<i>Navicula cryptocephala</i>)
镰形纤维藻 奇异变种 (<i>Ankistrodesmus falcatus var. mirabilis</i>)	短刺四星藻(<i>Tetrastrum staurogeniaeforme</i>)	瞳孔舟形藻矩形变种(<i>Navicula pupula var. rectangularis</i>)
针形纤维藻(<i>Ankistrodesmus acicularis</i>)	双对栅藻(<i>Scenedesmus bijugatus</i>)	短线脆杆藻(<i>Fragilaria brevistriata</i>)
卷曲纤维藻(<i>Ankistrodesmus convolutes</i>)	齿牙栅藻(<i>Scenedesmus denticulatus</i>)	螺旋颗粒直链藻(<i>Melosira granulate var. angustissima f spiralis</i>)
狭形纤维藻(<i>Ankistrodesmus angustus</i>)	斜生栅藻(<i>Scenedesmus obliquus</i>)	湖沼圆筛藻(<i>Coscinodiscus lacustris</i>)
集球藻(<i>Palmellococcus Chodat</i>)	爪哇栅藻(<i>Scenedesmus javaensis</i>)	意大利直链藻(<i>Melosira italica</i>)
细丝藻(<i>Ulothrix tenerrima</i>)	被甲栅藻(<i>Scenedesmus armatus</i>)	近小头羽纹藻(<i>Pinnularia subcapitata</i>)
长绿梭藻(<i>Chlorogonium elongatum</i>)	四尾栅藻(<i>Scenedesmus quadricauda</i>)	楔形藻(<i>Licmophora gracilis.</i>)
弓形藻(<i>Schroederia setigera</i>)	鼻形鼓藻(<i>Cosmarium nastutum</i>)	近缘桥弯藻(<i>Cymbella affinis</i>)
硬弓形藻(<i>Schroederia robusta Korsch</i>)	圆筒锥囊藻(<i>Dinobryon cylind.ricum</i>)	钝脆杆藻(<i>Fragilaria capucina.</i>)
螺旋弓形藻(<i>Schroederia spiralis.</i>)	小型黄丝藻(<i>Tribonema bombycium</i>)	尖针杆藻(<i>Synedra acus</i>)
拟菱形弓形藻(<i>Schroederia nitzschioides</i>)	钝角绿藻(<i>Goniochloris mutica</i>)	偏凸针杆藻(<i>Synedra vaucheriae</i>)
纤细新月藻(<i>Schroederia spiralis</i>)	带多甲藻(<i>Peridinium zonatum</i>)	间断羽纹藻(<i>Pinnularia interrupta</i>)
小新月藻(<i>Closterium venus</i>)	角甲藻(<i>Ceratium hirundinella</i>)	窄异极藻延长变种(<i>Gomphonema angustatum var. producta</i>)
美丽胶网藻(<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>)	螺旋鞘丝藻(<i>Lyngbya contarata</i>)	微细异极藻(<i>G. parvulum</i>)
蹄形藻(<i>Kirchneriella sp.</i>)	小形色球藻(<i>Chroococcus minor</i>)	缢缩异极藻(<i>G. constrictum</i>)
湖生卵囊藻(<i>Oocystis. Lacustris</i>)	微小色球藻(<i>Chroococcus minutus</i>)	短小曲壳藻(<i>Achnanthes exigua</i>)
小形卵囊藻(<i>Oocystis parva</i>)	水华鱼腥藻(<i>Anabaena flos-aquae</i>)	小环藻(<i>Cyclotella</i>)
单生卵囊藻(<i>Oocystis solitaria</i>)	卷曲鱼腥藻(<i>Anabaena circinalis</i>)	光滑壶藻(<i>Urceolus gobii</i>)
月牙藻(<i>Selenastrum bibraianum</i>)	束缚色球藻(<i>Chroococcus tenax</i>)	椭圆磷孔藻(<i>Lepocinclis steinii</i>)
纤细月牙藻(<i>Selenastrum gracile</i>)	针晶蓝纤维藻 镰刀型(<i>Dactylococcopsis acicularis f. falciformis</i>)	具孔磷孔藻(<i>Lepocinclis horrida</i>)
小形月牙藻(<i>Selenastrum minutum</i>)	针状蓝纤维藻(<i>D. acicularis</i>)	平滑磷孔藻(<i>Lepocinclis teres</i>)
端尖月牙藻(<i>Selenastrum westii</i>)	顿顶螺旋藻(<i>Spirulina platensis</i>)	卵形磷孔藻卵圆变种(<i>Lepocinclis ovum var. ovata</i>)
集星藻(<i>Actinastrum Lag.</i>)	极大螺旋藻(<i>Spirulina maxima</i>)	梭形裸藻(<i>Euglena acus</i>)
纺锤藻(<i>Elakatothrix gelatinosa</i>)	污泥颤藻(<i>Oscillatoria limosa</i>)	鱼形裸藻(<i>Euglena oisciformis</i>)
盘星藻(<i>Pediastrum clathratum</i>)	美丽颤藻(<i>Oscillatoria formosa</i>)	膝曲裸藻(<i>Euglena geniculata</i>)
双射盘星藻(<i>P. biraditum Meyen</i>)	两栖颤藻(<i>Oscillatoria amphibian</i>)	尖尾裸藻(<i>Euglena oxyuris</i>)
单角盘星藻(<i>P. simplex</i>)	小颤藻(<i>Oscillatoria tenuis</i>)	敏捷扁裸藻(<i>Phacus agilis</i>)
单角盘星藻具孔变种(<i>P. duplex var. gracillimum.</i>)	铜绿微囊藻(<i>Microcystis aeruginisa</i>)	扭曲扁裸藻(<i>Phacus tortus</i>)
二角盘星藻 纤细变种 (<i>P. duplex var. gracillimum.</i>)	具缘微囊藻(<i>Microcystis marginata</i>)	三棱扁裸藻(<i>Phacus tirqueter</i>)
四角盘星藻(<i>P. tetras.</i>)	小席藻(<i>Phorimidium tenus</i>)	圆柱扁裸藻(<i>Phacus cylind.rus</i>)
韦氏藻(<i>Westella botryoides</i>)	嗜蚀隐藻(<i>Cryptomonas erosa</i>)	颤动扁裸藻(<i>Phacus oscillans</i>)
实球藻(<i>Pandorina morlzm</i>)	卵形隐藻(<i>Cryptomonas ovata</i>)	内管虫(<i>Entosiphon sulcatum</i>)
十字藻(<i>Crucigenia apiculata.</i>)	长形蓝隐藻(<i>Cryptomonas oblonga</i>)	斜沟鞭虫(<i>Colponema loxodes</i>)

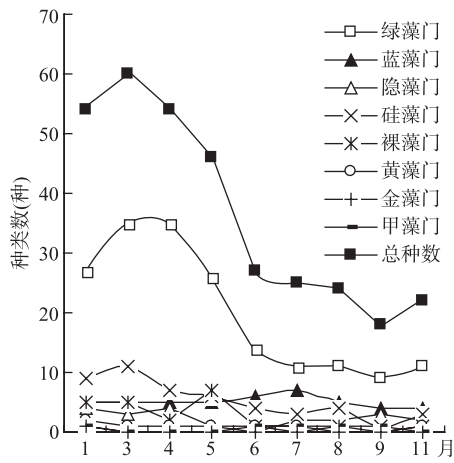


图 2 五里湖浮游植物种类组成周年变化
Fig.2 Change of phytoplankton species in Lake Wuli in one year

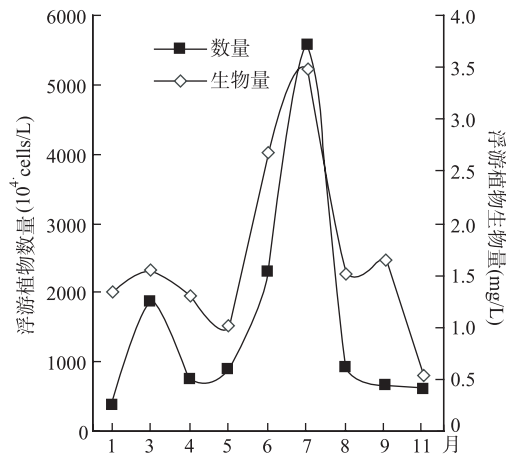


图 3 浮游植物数量和生物量周年变化
Fig.3 Quantity and biomass of phytoplankton in one year

表 2 五里湖水温、透明度及浮游植物数量

Tab.2 Quantity of phytoplankton, transparency and water temperature in Lake Wuli

	1 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	11 月	平均
水温(°C)	6.0	14.6	19.2	25.2	29.2	31.7	29.2	26.0	16.2	21.9
透明度(cm)	45.2	52.0	64.0	32.5	47.4	45.2	30.6	28.7	23.6	41.0
浮游植物数量($\times 10^4$ cells/L)										
绿藻门	360.4	1586.0	358.1	597.5	1459.0	3334.2	421.5	387.3	499.1	1000.3
蓝藻门	3.6	11.7	11.1	158.0	814.5	2241.2	401.1	186.2	18.9	427.4
隐藻门	4.4	203.7	331.6	108.9	0	4.3	46.2	79.8	50.1	92.1
硅藻门	6.8	44.0	28.6	11.9	13.7	1.3	16.2	0	26.6	16.6
裸藻门	0.7	10.6	1.3	1.4	0.4	0	0.1	0	0.2	1.6
黄藻门	0.8	0.8	2.8	0	0	0.4	0	0	0.9	0.6
金藻门	9.4	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0
甲藻门	0.1	0	0	0	0.2	0.6	0.2	0.5	0	0.2
总量	386.2	1856.9	733.4	879.7	2288.0	5581.9	915.8	655.2	595.7	1543.7

浮游植物生物量的最高值分别是次高值和最低值的 2.1 和 6.5 倍, 说明五里湖浮游植物生物量月间变化大(表 3)。浮游植物生物量组成与其数量组成(表 2, 表 3)相差较大, 这主要是由浮游植物种类组成的差异性造成的。从生物量组成的月间变化看, 1-3 月、5 月、11 月以绿藻生物量最大, 变化在 0.243-1.086mg/L, 占浮游植物总生物量的百分比变化在 44.92%-80.68%; 4 月以隐藻生物量最大, 为 0.669mg/L, 占浮游植物总生物量的 51.11%; 6-9 月以蓝藻生物量最大, 变化在 0.747-1.902mg/L, 占浮游植物总生物量的百分比变化在 45.14%-71.21%。2007 年五里湖各门藻类平均生物量的大小顺序为: 绿藻门(56.05%)>蓝藻门(24.32%)>隐藻门(11.35%)>硅藻门(4.34%)>裸藻门(2.13%)>甲藻门(1.26%)>金藻门(0.39%)>黄藻门(0.16%)。可见, 2007 年五里湖各门藻类平均生物量与平均数量的排列顺序有所差异。

表3 五里湖浮游植物生物量(mg/L(湿重))

Tab.3 Biomass (wet weight) of phytoplankton in Lake Wuli

	1月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	11月	平均
绿藻门	1.086	0.871	0.370	0.604	0.726	1.659	0.202	0.193	0.243	1.422
蓝藻门	0.002	0.006	0.008	0.081	1.902	1.769	0.885	0.747	0.149	0.617
隐藻门	0.040	0.263	0.669	0.109	0.000	0.030	0.284	0.468	0.103	0.288
硅藻门	0.071	0.162	0.223	0.076	0.021	0.003	0.112	0.014	0.036	0.110
裸藻门	0.042	0.086	0.026	0.135	0.011	0	0.012	0	0.009	0.054
黄藻门	0.006	0.004	0.014	0.010	0	0	0	0	0.001	0.004
金藻门	0.094	0	0	0	0	0	0	0	0	0.010
甲藻门	0.003	0	0	0	0.012	0.029	0.012	0.233	0.000	0.032
总量	1.346	1.548	1.309	1.014	2.671	3.491	1.507	1.655	0.541	2.537

2.2 相似性

从相似性分析结果(表4)可以看出, 2007年五里湖各月间的浮游植物相似性指数变化在0.13-0.56之间, 1、6两月之间的相似性指数最小, 8、9两月之间的相似性指数最大. 说明1、6两月的生境差异大, 而8、9两月的生境差异小. 除7、8两月之间和8、9两月之间的相似性指数大于0.5外, 其余各月间的相似性指数均在0.5以下(表4).

表4 五里湖浮游植物相似性指数

Tab.4 Similarity indexes of phytoplankton between months in Lake Wuli

	1月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	11月
1月	1	0.28	0.29	0.24	0.13	0.16	0.16	0.18	0.19
3月		1	0.37	0.26	0.13	0.16	0.17	0.16	0.17
4月			1	0.45	0.21	0.20	0.22	0.16	0.23
5月				1	0.30	0.25	0.32	0.21	0.26
6月					1	0.30	0.34	0.25	0.36
7月						1	0.53	0.48	0.38
8月							1	0.56	0.35
9月								1	0.38
11月									1

2.3 优势种、多样性和均匀度

以优势度指数 $Y > 0.02$ 定位优势种^[20-21], 则2007年1-11月9次采样共发现优势种4门14种(表5). 优势种分别为绿藻门的小球藻、小球衣藻、小形平藻、卵形衣藻、针形纤维藻、双对栅藻、硬弓形藻, 隐藻门的尖尾蓝隐藻, 蓝藻门的铜绿微囊藻、两栖颤藻、污泥颤藻、美丽颤藻, 以及硅藻门的湖沼圆筛藻、短小舟行藻. 其中以绿藻门、蓝藻门、隐藻门种类为主. 在优势种季节演替方面, 冬春季节主要优势种演替明显; 春末至秋季, 主要优势种演替不明显, 特别是在5-9月份, 基本上均以小球藻、微囊藻、颤藻为主要优势种.

2007年五里湖浮游植物多样性指数变化在1.5-2.7之间, 平均为2.1, 1月份最小, 8月份最大. 浮游植物多样性指数的季节性变化规律不明显, 整体上以春季以及夏末秋初的相对较高, 而其他季节的较低. 均匀度指数变化在0.26-0.59之间, 平均为0.42, 1月份最小, 8月份最大; 其周年变化趋势与多样性指数

非常相似(表 6).

表 5 五里湖浮游植物优势种周年变化*
Tab.5 Change of predominant species of phytoplankton in Lake Wuli

月份	优势种	月份	优势种
1月	小球藻(0.78)、小球藻(0.10)	7月	小球藻(0.58)、铜绿微囊藻(0.35)、污泥颤藻(0.03)
3月	小形平藻(0.46)、小球藻(0.30)、尖尾蓝隐藻(0.09)、卵形衣藻(0.03)、针形纤维藻(0.02)	8月	小球藻(0.39)、铜绿微囊藻(0.39)、尖尾蓝隐藻(0.04)、美丽颤藻(0.04)、污泥颤藻(0.04)、针形纤维藻(0.03)
4月	尖尾蓝隐藻(0.43)、小球藻(0.34)、双对栅藻(0.04)、湖沼圆筛藻(0.03)	9月	小球藻(0.53)、铜绿微囊藻(0.18)、污泥颤藻(0.10)、尖尾蓝隐藻(0.10)
5月	小球藻(0.47)、尖尾蓝隐藻(0.12)、铜绿微囊藻(0.12)、硬弓形藻(0.06)、针形纤维藻(0.06)	11月	小球藻(0.74)、尖尾蓝隐藻(0.07)、针形纤维藻(0.06)、短小舟行藻(0.04)
6月	小球藻(0.59)、两栖颤藻(0.26)、铜绿微囊藻(0.09)		

* ()内为优势度指数.

表 6 五里湖浮游植物多样性指数和均匀度指数
Tab.6 Diversity indexes and uniformity index of phytoplankton in Lake Wuli

指数类型	1月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	11月	平均
多样性指数	1.5	2.4	2.5	2.6	1.8	1.7	2.7	2.2	1.6	2.1
均匀度指数	0.26	0.41	0.43	0.47	0.38	0.37	0.59	0.53	0.36	0.42

3 讨论

3.1 浮游植物种类组成、数量及生物量

浮游植物是水生生态系统生物资源的基础, 作为初级生产者, 其种群变动和群落结构直接影响水生生态系统的结构和功能. 浮游植物的时空变化特征与环境因子关系密切, 生态系统中环境因子的改变直接作用于浮游植物群落结构. 因此, 其群落结构特征一定程度地反映了水体生态环境状况^[22].

在浮游植物群落的季节演替方面, Sommer等^[23]通过对大量温带中营养性湖泊浮游生物和理化因子的分析, 提出了著名的PEG(Plankton Ecology Group)模式. PEG模型中浮游植物群落的季节演替大概过程是从冬春季的隐藻和硅藻转变为夏季的绿藻, 到夏末秋初则是蓝藻占优势; 随着秋季的到来, 硅藻的重要性再次上升. 从本研究结果来看, 除绿藻门外, 其他各门藻类的演替规律与PEG模型基本一致, 从而表明PEG模式可能也适合于五里湖等富营养性湖泊.

浮游植物数量和生物量主要受水体营养盐含量、水温、光照、浮游动物摄食等因素的影响. 五里湖浮游植物数量和生物量随季节变化明显, 这与其独特的地理环境相关. 五里湖属亚热带湿润季风气候, 四季分明, 季节变化显著, 使得五里湖的水温温差较大, 从而造成浮游植物数量和生物量的季节差异. 五里湖浮游植物数量和生物量呈现出随温度升高而增加的趋势, 并在7月份达到一年中的最高值. 这主要是因为氮磷等营养盐含量比较充足的富营养湖泊, 影响浮游植物生物量和群落演替的主要是水温^[24]、光照、浮游动物摄食、水动力学特征^[25-26]等. 五里湖是富营养湖泊, 氮磷等营养盐已经不是藻类生长的重要限制性因子, 因此出现浮游植物生物量随着水温上升而上升的趋势. 同时, 7月是五里湖水温最高的季节, 非常适合喜温性蓝藻和绿藻的生长繁殖^[20]; 加之, 7月降水量大, 通过地表径流等为五里湖带来大量的外来营养物质, 因此浮游植物数量和生物量在7月达到高峰.

浮游动物摄食是影响浮游植物群落演替的另一个因素, PEG模型认为春季枝角类大型种类对浮游植

物的摄食是导致“清水期”(Clear water phase)现象出现的原因;一般认为清水期现象在深水湖泊较为明显.从本研究结果看,五里湖在春季4月份的透明度值较高(表2),浮游植物在4、5两个月的生物量呈下降趋势(图3),群落优势种类中开始出现丝状体和群体、难被摄食的铜绿微囊藻、颤藻等蓝藻门种类(表5).说明在太湖五里湖这样的浅水湖泊可能也存在由于枝角类摄食浮游植物而形成的春季“清水期”现象.

在五里湖浮游植物种类组成的研究方面,宋晓兰等^[16]在2003年10月-2004年9月的调查中发现,五里湖隐藻属全年都占优势,其各月百分比均在20%以上,2月份最高接近80%.本次调查显示:虽然隐藻门种类在全年大多数月份仍占一定比例,但其在2007年各月的优势度已经明显不如绿藻门种类的高;本次调查中绿藻门种类全年都占优势,且其在各月的数量和生物量百分比均分别在46.03%以上和11.66%以上.由此推断,五里湖可能已经从2003年10月至2004年9月的以隐藻在全年占主要优势转变为2007年的以绿藻在全年占主要优势.说明五里湖的生态环境较2003年10月至2004年9月发生了明显变化.但由于本次调查中缺少2、10和12月份的资料,而通常情况下这些月份的隐藻又是较多的,因此上述结论尚待考证.

3.2 相似性

相似性指数反映了生态环境的相似程度.种群的相似性仅与种群的物种组成相关,与物种多样性大小没有关系.相似性指数(X)的变动范围是0-1;相似性指数为0,表示两种群的种类完全不相同;为1,则表示两种群的种类完全相同.相似性等级一般划分为6级:Ⅰ级,完全不相似,相似性指数为0;Ⅱ级,极不相似,相似性指数变化在0.01-0.25之间;Ⅲ级,轻度相似,相似性指数变化在0.26-0.50之间;Ⅳ级,中度相似,相似性指数变化在0.51-0.75之间;Ⅴ级,极相似,相似性指数变化在0.76-0.99之间;Ⅵ级,完全相似,相似性指数为1^[27].无论是在相似性等级之间还是在同一相似性等级内,相似性指数(X)值越大,则种群就越相似.从2007年五里湖浮游植物相似性指数分析结果(表4)及相似性指数分级标准可知,1月与3月、4月的相似等级是Ⅲ级,为轻度相似;与其他月份的相似等级均是Ⅱ级,为极不相似.3月与4月、5月的相似等级是Ⅲ级,为轻度相似;与6-11月的相似等级均是Ⅱ级,为极不相似.4月与5月的相似等级是Ⅲ级,为轻度相似;与6-11月的相似等级均是Ⅱ级,为极不相似.5月与6、8、11月的相似等级均是Ⅲ级,为轻度相似;与7、9月的相似等级均是Ⅱ级,为极不相似.6月与7、8、11月的相似等级均是Ⅲ级,为轻度相似;与9月的相似等级是Ⅱ级,为极不相似.7月与8月的相似等级是Ⅳ级,为中度相似;与9、11月的相似等级是Ⅲ级,为轻度相似.8月与9月的相似等级是Ⅳ级,为中度相似;与11月的相似等级是Ⅲ级,为轻度相似.9月与11月的相似等级是Ⅲ级,为轻度相似.可见,五里湖1、3、4、5月的生境相似,而6、7、8、9、11月的生境相似,其中7、8、9三个月的生境最相似;但总体而言,除7、8、9三月间的相似性较好外,其他月份间的相似性均较差,显示出这些月份的生境变化较大.影响浮游植物相似性的因素包括水温、营养盐浓度等^[29],对五里湖的水质同步分析结果表明7、8、9三月的TN、TP含量差别较大(TN分别为6.17、4.67、2.30mg/L,TP分别为0.031、0.082、0.072mg/L;已在另文发表),而温度差异较小(表2),说明当前情况下,影响五里湖浮游植物相似性的主要因素可能是水温.

3.3 优势种、多样性指数和均匀度指数

优势种种类数及其数量对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^[28].本次调查显示,2007年五里湖各月份的浮游植物优势种都在2种以上,优势种种数较多且优势度不高,表明五里湖浮游植物群落结构比较复杂.不同月份间的浮游植物优势种既有交叉又有演替;小球藻在2007年全年均处于主要优势种地位,优势种演替不明显.其中7、8、9三个月均以小球藻、铜绿微囊藻和污泥颤藻为主要优势种,说明7、8、9三月具备适宜小球藻、铜绿微囊藻和污泥颤藻生长的类似环境;这与相似性分析中7、8、9三个月的生境最相似的结论很吻合.

物种多样性是衡量一定区域生物资源丰富程度的一个客观指标,用于评价群落中种类组成的稳定程度及其数量分布均匀程度和群落组织结构特征,并常作为描述群落演替方向、速度和稳定程度的指标.根据多样性指数的大小可将其分为5级(表7)^[30].群落的均匀度也是反映群落结构特征的一个重要指标.均匀度是实际多样性指数与理论上最大多样性指数的比值,是一个相对值,其数值范围在0-1,用它来评价浮游植物的多样性更为直观、清晰;能够反映出各物种个体数目分配的均匀程度.通常以均匀度大于

0.3作为浮游植物多样性较好的标准进行综合评价^[31]。一般而言,较为稳定的群落具有较高的多样性和均匀度^[32]。从2007年五里湖浮游植物多样性分析结果(表6)来看,五里湖浮游植物多样性指数变化在1.5-2.7之间,平均为2.1;除1月的多样性指数略低于III级外,其他月份的多样性指数均在III级以上。同时,浮游植物均匀度指数变化在0.26-0.59之间,平均为0.42;除1月的均匀度指数(0.26)略小于0.3外,其余各月的均匀度指数均大于0.3。可见,2007年五里湖浮游植物多样性和均匀度都较好,说明五里湖浮游植物群落信息含量较大、群落结构处于较完整的状态。

表7 生物多样性阈值的分级评价标准

Tab.7 Evaluation standard for the biodiversity threshold

评价等级	阈值	等级描述
I	<0.6	多样性差
II	0.6-1.5	多样性一般
III	1.6-2.5	多样性较好
IV	2.6-3.5	多样性丰富
V	>3.5	多样性非常丰富

4 结论

(1)2007年1-11月,五里湖共出现浮游植物8门123种;其中绿藻门种数最多,共57种,占浮游植物总种数的46.3%;硅藻门次之,共23种,占浮游植物总种数的18.7%;之后分别是蓝藻门、裸藻门、隐藻门、甲藻、黄藻和金藻,分别出现了17、16、15、2、2、1种,占浮游植物总种数的13.8%、13.0%、4.1%、1.6%、1.6%和0.8%。浮游植物种数的季节变化规律表现为:冬、春季节种类多,夏、秋季种种类少。且各月的浮游植物种类组成与2007年全年的相似。

(2)2007年五里湖浮游植物数量和生物量分别变化在 386.2×10^4 - 5581.9×10^4 cells/L和0.541-3.491mg/L之间。从季节变化上看,浮游植物数量以夏季最高,春季次之,之后分别为秋季和冬季;浮游植物数量变化受水温影响明显。由于各个月份浮游植物种类组成的差异性,导致浮游植物生物量的变化趋势与数量变化趋势不太一致。同时,除绿藻门外,五里湖浮游植物的季节演替规律与PEG模型基本一致。

(3)浮游植物相似性分析结果表明,五里湖1、3、4、5月份的生境相似,而6、7、8、9、11月份的生境相似,其中7、8、9三个月的生境最相似。同时,浮游植物优势度的分析结果显示,各个月份五里湖浮游植物优势种都在2种以上,优势种种数较多且优势度不高;而且,多样性和均匀度分析结果表明,五里湖浮游植物多样性和均匀度都较好;说明2007年五里湖浮游植物群落结构比较复杂、群落信息含量较大、群落结构处于较完整的状态。

5 参考文献

- [1] 韩博平,林旭钿,李铁.广东省大中型水库富营养化现状与防治对策研究.北京:科学出版社,2003.
- [2] 赵孟绪,雷腊梅,韩博平.亚热带水库浮游植物群落季节变化及其影响因素分析——以汤溪水库为例.热带亚热带植物学报,2005,13(5):386-392.
- [3] 沈韞芬,章宗涉,龚循矩等.微型生物监测新技术.北京:中国建筑工业出版社,1990.
- [4] 卢敬让,李德尚,周春生.山东省大中型水库浮游生物研究II.浮游植物构成及其特点.青岛海洋大学学报(自然科学版),1994,24(3):349-356.
- [5] 韩德举,吴生桂.陆水水库的浮游生物及营养类型.湖泊科学,1996,8(4):351-358.
- [6] 邹红娟,胡兴跃.黑龙滩水库浮游生物及初级生产力.水利渔业,1998,5:24-25,40.
- [7] 冯建社.白洋淀浮游植物与水质评价.江苏环境科技,1999,12(2):27-29.
- [8] Sidik MJ, Nabi MRU, Hoque MA. Distribution of phytoplankton community in relation to environmental parameters in cage culture area of Sepanggar Bay, Sabah, Malaysia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 80(2): 251-260.

- [9] Gatidou G, Thomaidis NS. Evaluation of single and joint toxic effects of two antifouling biocides, their main metabolites and copper using phytoplankton bioassays. *Aquatic Toxicology*, 2007, **85**(3): 184-191.
- [10] Sabater S, Artigas J, Duran C *et al.* Longitudinal development of chlorophyll and phytoplankton assemblages in a regulated large river (the Ebro River). *Science of the Total Environment*, 2008, **404**(1): 196-206.
- [11] 朱树屏, 杨光圻. 太湖北部湖水中几种理化性质周年变化. *海洋与湖沼*, 1959, **2**(3): 146-162.
- [12] 伍献文. 五里湖1951年湖泊学调查. *水生生物学集刊*, 1962, **1**(1): 63-113.
- [13] 李文朝, 杨清心, 周万平. 五里湖营养状况及治理对策探讨. *湖泊科学*, 1994, **6**(2): 136-143.
- [14] 陈开宁, 包先明, 史龙新等. 太湖五里湖生态重建示范工程——大型围隔试验. *湖泊科学*, 2006, **18**(2): 139-149.
- [15] 顾 岗, 陆根法. 太湖五里湖水环境综合整治的设想. *湖泊科学*, 2004, **16**(1): 56-60.
- [16] 罗清吉, 石浚哲. 五里湖淤泥现状及生态清淤. *环境监测管理和技术*, 2003, **15**(1): 27-29.
- [17] 陈开宁, 周万平, 鲍传和等. 浮游植物对湖泊水体生态重建的响应——以太湖五里湖大型围隔示范工程为例. *湖泊科学*, 2007, **19**(4): 359-366.
- [18] 宋晓兰, 刘正文, 潘宏凯等. 太湖梅梁湾与五里湖浮游植物群落的比较. *湖泊科学*, 2007, **19**(6): 643-651.
- [19] 韩茂森, 束蕴芳. *中国淡水生物图谱*. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [20] Lampitt RS, Wishner KF, Turley CM *et al.* Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: distribution, composition and roles as a food source for migrating plankton. *Marine Biology*, 1993, **116**(4): 689-702.
- [21] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈渔场的关系. *生态学杂志*, 1989, **8**(4): 13-15.
- [22] Sanna Suikkanen, Maria Laamanen, Maija Huttunen. Long-term changes in summer phytoplankton communities of the open northern Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, **71**(3-4): 580-592.
- [23] Sommer U, Gliwicz MZ, Lampert W *et al.* The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in freshwaters. *Archives of Hydrobiology*, 1986, **106**(4): 433-471.
- [24] Tilman D, Kiesling RL. Freshwater algal ecology: taxonomic tradeoffs in the temperature dependence of nutrient competitive abilities. In: Klug MJ, Reddy CA eds. *Current perspective in microbial ecology*. Proceedings of the 3rd International Symposium on Microbial Ecology, 1984.
- [25] Nogueira MG. Phytoplankton composition, dominance and abundance as indicators of environmental compartmentalization in Jurumirim Reservoir(Paranapanema River), Sao Paulo, Brazil. *Hydrobiologia*, 2000, **431**(2): 115-128.
- [26] Cleber CF, Giani A. Seasonal variation in the diversity and species richness of phytoplankton in a tropical eutrophic reservoir. *Hydrobiologia*, 2001, **445**: 165-174.
- [27] 卢双珍, 喻庆国, 曹顺伟. 云南糯扎渡自然保护区热带林群落物种多样性相似性研究. *安徽农业科学*, 2008, **36**(9): 3773-3775.
- [28] 柳丽华, 左 涛, 陈瑞盛等. 2004年秋季长江口海域浮游植物的群落结构和多样性. *海洋水产研究*, 2007, **28**(3): 112-119.
- [29] 董 婧, 李培军, 刘 悦等. 黄海北部近岸浮游植物生态特征分析. *水产科学*, 1999, **18**(5): 12-15.
- [30] 陈清潮, 黄良民, 尹建强等. 南沙群岛海区浮游动物多样性研究. 中国科学院南沙综合科学考察队. *南沙群岛及其邻近海区海洋生物多样性研究I*. 北京: 海洋出版社, 1994: 42-50.
- [31] 孙 军, 刘东艳, 白 洁等. 2001年冬季渤海的浮游植物群落结构特征. *中国海洋大学学报*, 2004, **34**(3): 403-422.
- [32] 姜作发, 唐富江, 董崇智等. 黑龙江水系主要江河浮游植物种群结构特征. *吉林农业大学学报*, 2007, **29**(1): 53-57.