太湖流域 2012 年枯水期浮游生物群落结构特征*

杜明勇^{1,2}, 于 洋², 阳 振², 陈非洲², 张 民², 芮 琪¹, 孔繁翔^{2**}

(1: 南京农业大学生命科学学院, 南京 210095)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘 要: 在野外调查的基础上, 利用物种多样性指数及典范对应分析(CCA), 于 2012 年研究太湖流域枯水期浮游动植物群落结构特征。共鉴定出浮游植物 139 种, 分属 7 门 71 属。太湖中蓝藻门密度占总密度的 95.8%, 为太湖浮游植物的优势种群。铜绿微囊藻占总密度的 86.7%, 为太湖的绝对优势种。太湖流域水系中蓝藻门、硅藻门和绿藻门的密度之和占总密度的 92.2%, 成为太湖流域水系中的优势种群。其中硅藻门中的小环藻、蓝藻门中的惠氏微囊藻为优势种(属), 密度分别达到 17.4%、10.3%; 鉴定出浮游动物 27 种, 主要为枝角类的象鼻溞、网纹溞和桡足类的哲水蚤、剑水蚤。太湖中浮游动物生物量为 265.1 $\mu\text{g/L}$, 枝角类的象鼻溞和网纹溞分别占总生物量的 48.7% 和 5.1%; 桡足类的哲水蚤和剑水蚤分别占总生物量的 15.9% 和 22.5%。太湖流域水系中浮游动物生物量只有 21.8 $\mu\text{g/L}$, 主要为枝角类的象鼻溞、桡足类的哲水蚤和剑水蚤。物种多样性指数分析显示, 太湖浮游植物的多样性最高, 其次为宜溧水系, 然后依次为运河水系、出湖水系、苕溪水系; 而浮游动物的多样性则是太湖最高, 其次为苕溪水系, 然后依次为宜溧水系、出湖水系、运河水系。CCA 分析表明, 浮游植物群落与硝态氮、总氮、总磷呈显著相关, 而浮游动物分布主要与硝态氮、溶解氧、温度呈显著相关。浮游动植物优势种群之间存在显著相关性。秀体溞、基合溞和温剑水蚤与硅藻呈显著正相关; 蓝藻与象鼻溞、网纹溞、汤匙哲水蚤等相关性显著。

关键词: 太湖流域; 浮游植物; 浮游动物; 群落结构; 多样性指数; 典范对应分析; 枯水期

Characteristics of community structure of plankton in the Lake Taihu basin during the dry season of 2012

DU Mingyong^{1,2}, YU Yang², YANG Zhen², CHEN Feizhou², ZHANG Min², RUI Qi¹ & KONG Fanxiang²

(1: College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, P. R. China)

(2: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

Abstract: A detailed field survey of zooplankton and phytoplankton was conducted in the Lake Taihu basin during the 2012 dry season. Community structure of zooplankton and phytoplankton, and their relationships with environmental factors were studied by species diversity index and canonical correspondence analysis(CCA). Totally 139 species of phytoplankton from 7 phyla and 71 genera have been identified. In Lake Taihu, Cyanophyta was the dominant population, accounted for 95.8% of the density of phytoplankton. Notably the density of *Microcystis aeruginosa*, the predominant species, was 86.7% of the density of phytoplankton. In the river systems discharging into Lake Taihu, 92.2% density of the phytoplankton belonging to Cyanophyta, Bacillariophyta and Chlorophyta, which constructed the dominant populations. *Cyclotella* sp. and *Microcystis wesenbergii* were the dominant species, accounted for 17.4% and 10.3% of the numbers of phytoplankton, respectively. Twenty-seven species of zooplankton have also been identified, including Cladocera(mainly *Bosmina* sp. and *Ceriodaphnia* sp.) and Copepoda(mainly *Sinocalanus dorrii* and *Limnithona sinensis*). In Lake Taihu, the biomass of zooplankton was 265.1 $\mu\text{g/L}$, *Bosmina* sp., *Ceriodaphnia* sp., *Sinocalanus dorrii* and *Limnithona sinensis* accounted for 48.7%, 5.1%, 15.9% and 22.5% of the total biomass, respectively; while

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07506-001)和中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”战略发展规划项目联合资助。2013-10-23 收稿;2014-02-18 收修修改稿。杜明勇(1989~),男,硕士研究生;E-mail: dmy19890208@163.com.

** 通信作者;E-mail: fxxkong@niglas.ac.cn.

in river systems discharging into Lake Taihu, the biomass of zooplankton was only 21.8 $\mu\text{g/L}$. *Bosmina* sp., *Sinocalanus dorrii* and *Limnithona sinensis* were the dominant species. Diversity index showed that Lake Taihu have the highest phytoplankton biodiversity, followed by the Yili River system, the Yunhe River system, the Chuhu River system and the Shaoxi River system successively. The highest zooplankton diversity was also found in Lake Taihu, followed by the Shaoxi River system, and then the Yili River system, the Chuhu River system and the Yunhe River system. CCA analysis showed that phytoplankton community was significantly associated with nitrate, total nitrogen and total phosphorus while the distribution of zooplankton was related significantly to nitrate, dissolved oxygen and temperature. There was a significant correlation between phytoplankton and zooplankton. Bacillariophyta was significant positively related to *Diaphanosoma* sp., *Bosminopsis* sp. and *Mesocyclops* sp.. Cyanophyta was significantly associated with *Bosmina* sp., *Ceriodaphnia* sp. and *Sinocalanus dorrii*.

Keywords: Lake Taihu basin; phytoplankton; zooplankton; community structure; diversity index; canonical correspondence analysis; dry season

在水生态系统中,浮游植物和浮游动物是食物链的重要组成成分,它们相互影响、共同存在.浮游植物生活在食物链的最底层,是水生态系统中的初级生产者,同时也是水生态系统能量流动和物质循环的基础,对维持水生态系统健康具有重要作用^[1].通常,浮游植物生活周期短,对环境变化非常敏感,其随营养水平、盐度等环境条件的不同,在形态、结构和种群组成上存在较大差异^[2-4].因而浮游植物群落结构能较好地反映水体环境状况.浮游动物是食物链中另一个重要环节,它对各种环境因子的变化非常敏感,其种类分布和数量变化与水环境状况(如温度、pH、溶解氧等)密切相关.浮游动物除直接摄食浮游植物外,也是一些鱼类的重要饵料.因此浮游动物在生态系统的结构和功能中起着重要的调控作用^[5].近年来浮游生物优势种群特征及其演替规律受到广泛关注^[6-7].

太湖流域是全国河道密度最大的地区,交通便利、工业发达,在我国社会经济发展中占有重要地位.近年来随着工业化、城市化进程的加快,大量污染物排入河流,进入湖泊,致使水体严重污染,其生物群落的结构及功能亦发生显著变化^[8-11].关于太湖水生态系统不同的生物门类对水体富营养化响应的机理目前已经开展了大量的研究^[12-13],但同时选择太湖及其流域水系,来开展浮游生物群落特征方面的研究鲜有报道.特别是太湖流域进入枯水期后,水位和流量持续走低,水体扩散能力减弱,这将增大河网各水系和湖体水生环境的差异,从而影响浮游动、植物群落结构的组成及分布.本文于2012年11月对太湖及其流域水系的浮游动、植物进行调查,分析了浮游动植物群落结构、空间差异及其与环境因子之间的关系,以期对太湖流域富营养化控制与水生态系统恢复提供基础数据和生态学依据.

1 材料与方法

1.1 采样点的布设

本研究共设采样点107个,其中太湖湖体20个(TH1~TH20),运河水系29个(YH1~YH29),苕溪水系13个(SX1~SX13),宜溧水系11个(YL1~YL11)及出湖水系34个(CH1~CH34),具体采样点如图1.

1.2 样品采集与处理

2012年枯水期(11月)对太湖流域进行采样,采用YSI6600 V2型多参数水质监测仪(美国)现场测定水体的pH、水温(Temp)、溶解氧(DO)、电导率(EC)、浊度(Tur)等水质指标.采集的水样用于分析总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)、亚硝态氮(NO_2^--N)、生物可利用态磷($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)、化学需氧量(COD_{Mn})、溶解性有机碳(DOC),其测定参照《湖泊富营养化调查规范》^[14]进行.

浮游植物采集与室内分析^[13-15]:用采水器采集上、中、下3层水样,混合后取1000 ml水样,立即加入鲁哥试剂固定(终浓度1%),自然沉降48 h后,利用虹吸法吸去上清液,并浓缩定容到25 ml,摇匀后取0.1 ml放入计数框内,在显微镜下鉴定浮游植物种类并计数,计数3片,取平均值.计数方法为目镜行格法,一般随机计数2个垂直行格(行格大小为0.49 mm $\times$ 25 mm),对于生物量较大而不便使用行格法的样品采取视野计数法,一般计数30~50个视野,使得细胞数在300以上.由于浮游植物的比重接近于1,故可直接由浮游植物的密度换算成生物量(湿重),即生物量为浮游植物的密度乘以各自的平均体积,单位为mg/L.单细胞的浮游植物生物量主要根据浮游植物个体形状测量而得.浮游植物鉴定主要参照文献

图1 太湖流域采样点位分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Lake Taihu basin

[16-17] 进行。

浮游动物样品的采集与室内分析^[18-19]:用5 L的采水器采集不同深度的水样共10 L,经25#浮游生物网过滤后,装入50 ml的方形塑料瓶中,立即加入4%的甲醛,摇匀后带回实验室,在显微镜下进行分类和计数。种群密度很高时,用小样的方法抽样计数:把采集的50 ml样品充分摇匀后用宽口吸管吸取5 ml,注入大型浮游动物计数框中,计数3片,取其平均值,然后乘以稀释倍数即是单位体积的数量。浮游动物鉴定主要参照文献[20-21]进行。

1.3 数据分析

1.3.1 物种多样性分析 采用 Shannon-Wiener(H)、Simpson(D)、Pielou(E)3种生物多样性指数描述群落内物种多样性^[22]。计算公式分别为:

$$H = -\sum P_i \ln P_i; D = 1 / \sum P_i^2; E = (\sum P_i \ln P_i) / \ln S \quad (1)$$

式中, S 为物种数, N_i 为第*i*种的个体数, N 为所有种的个体数之和, $P_i = N_i / N$ 。

1.3.2 典范对应分析 典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)是基于对应分析发展而来的一种排序方法,将对应分析与多元分析相结合,每一步计算均与环境因子进行回归,能直接揭示生物组成数据与环境参数间的关系,因此目前已被广泛应用于湖泊生物与环境因子的相关性分析中^[23-26]。本分析中环境因子除pH外,数据分析前进行 $\lg(x+1)$ 转换使数据符合正态分布。对于冗余环境因子,通过手动选择若干个影响显著($P < 0.05$ 且与其他显著变量间的膨胀因子 < 10)的因子进行分析^[13-28]。物种数据矩阵为主要种的生物量。为了捕捉到最大的物种种群变化特征,本文用于排序的物种满足下面两个条件之一即可:该物种的生物量贡献 $\geq 0.1\%$ 或者在各点出现频率 $\geq 5\%$ ^[29-31],生物数据在软件分析前经过 $\lg(x+1)$ 转化。分析过程采用Canoco 4.5软件实现。

浮游动、植物间的相关性采用SPSS 20.0软件进行分析,分布作图采用ArcGIS 9.3软件实现。

2 结果与讨论

2.1 太湖流域浮游植物群落结构特征与分布、多样性分析及其与环境因子的关系

2.1.1 太湖流域浮游植物群落结构特征分布 本研究共鉴定浮游植物7门71属139种,隶属于蓝藻门14属19种;绿藻门28属56种;硅藻门19属45种;隐藻门2属4种;裸藻门3属8种;甲藻门3属5种;金藻门2属2种.这与2010年邓建明等^[13]鉴定的结果相吻合,其在太湖流域平水期和丰水期共鉴定出7门72属.本研究中发现绿藻门种类最多,占总数的40.3%,其次为硅藻门,占总数的32.4%,然后依次为蓝藻门占13.7%,裸藻门占5.8%,甲藻门占3.6%,隐藻门占2.8%,而金藻门种类最少,仅占1.4%.鉴定出太湖水体中浮游植物5门89种,隶属于蓝藻门12种、绿藻门36种、硅藻门34种、隐藻门4种、裸藻门3种;太湖流域水系水体中共鉴定出浮游植物7门135种,蓝藻门18种、绿藻门53种、硅藻门45种、隐藻门4种、裸藻门8种、金藻门2种、甲藻门5种.与太湖水体相比,流域水系水体中绿藻门、硅藻门浮游植物藻类分别增加了17、11种,其他门类的种类数也有增加.流域内浮游植物种类的变化,表明流域水体中水质状况差异较大.

通过各点位浮游植物组成分析发现,太湖中蓝藻门细胞密度占总密度的95.7%,为太湖水体浮游植物的优势种群.而硅藻门、绿藻门、隐藻门及裸藻门密度仅占总密度的4.2%.铜绿微囊藻密度占总密度的86.7%,为太湖水体的绝对优势种(表1).隐藻门中的卵形隐藻、嗜蚀隐藻,绿藻门中的小球藻、衣藻,硅藻门中的小环藻、舟形藻及蓝藻门中的伪鱼腥藻为全湖分布种.

太湖流域水系中浮游植物与太湖相比,优势种群及种类组成上有明显差异.太湖流域水系中蓝藻门、硅藻门和绿藻门细胞密度分别占总密度的39.4%、37.7%和15.1%,3门密度之和占总密度的92.2%,成为太湖流域水系中的优势种群.其中硅藻门中的小环藻、蓝藻门的惠氏微囊藻为优势种,细胞密度分别达到17.4%、10.3%.蓝藻门的铜绿微囊藻、不整齐蓝纤维藻、伪鱼腥藻,硅藻门的小环藻、远距直链藻、舟形藻、尖针杆藻、菱形藻,隐藻门的卵形隐藻、嗜蚀隐藻、吻状隐藻,绿藻门的小球藻、四尾栅藻,裸藻门的裸藻,出现频率均超过了50%,广泛存在于太湖流域水系中.甲藻门和金藻门的出现频率均低于10%,仅存在于个别水体中.与太湖相比,流域水系中硅藻门、绿藻门、隐藻门细胞密度所占比例分别增加了35.1%、14.3%、6.5%,而蓝藻细胞密度比例降低56.3%.

表1 太湖流域浮游植物优势种
Tab.1 Dominant phytoplankton species in the Lake Taihu basin

太湖	细胞密度 占比/%	出入湖河网	细胞密度 占比/%
蓝藻门 Cyanophyta	95.7	蓝藻门 Cyanophyta	39.4
铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i>	86.7	惠氏微囊藻	10.3
惠氏微囊藻 <i>Microcystis wesenbergii</i>	3.8	铜绿微囊藻	7.6
伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaena mucicola</i>	3.1	微小平裂藻 <i>Merismopedia tenuissima</i>	5.9
		绿藻门 Chlorophyta	15.1
		小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	3.1
		硅藻门 Bacillariophyta	37.7
		小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	17.4
		远距直链藻 <i>Melosira distans</i>	7.9
		直链藻 <i>Melosira</i> sp.	6.9

太湖中蓝藻门、绿藻门、硅藻门、隐藻门、裸藻门生物量分别为295.1、10.1、49.2、21.1、1.6 mg/L,总生物量为377.1 mg/L.其中蓝藻门和硅藻门的生物量较高,分别占浮游植物总生物量的78.3%和13.1%.流域水系中蓝藻门、绿藻门、硅藻门、隐藻门、裸藻门、金藻门、甲藻门的生物量分别为76.7、74.0、321.8、174.2、28.3、5.1、4.0 mg/L,总生物量为684.3 mg/L.其中硅藻门和隐藻门的生物量较高,分别占浮游植物总生物量的47.1%和25.5%.与太湖水体相比,流域水系中硅藻门和隐藻门浮游植物生物量显著增加,分别增加34.0%和19.8%,而蓝藻门的生物量急剧下降,下降了67.1%.

图2 太湖流域浮游植物种类分布
Fig. 2 The distribution of phytoplankton species in the Lake Taihu basin

太湖流域面积广阔,各水系间异质性明显,因此其浮游植物种类分布也呈现出明显的空间差异性(图2)。从浮游植物种类数的分布来看,宜溧水系浮游植物分布均匀且种类数丰富,平均每个点位种类数达到31.5种。这可能与该水系高营养盐水平及较大的空间异质性有关。苕溪水系平均每个点位种类数只有17.2种,呈现出多样性低的特点。太湖平均每个点位类数只有22.9种,这可能与太湖水体环境相对稳定有关。各水系浮游植物种类数排序为:宜溧水系>出湖水系>运河水系>太湖>苕溪水系(图3a)。

各水系中浮游植物生物量差异明显,宜溧河水系生物量高达19.9 mg/L,主要为个体较大的硅藻和隐藻。太湖中生物量高达18.9 mg/L,主要为蓝藻,其中有2个点位超过57.0 mg/L。生物量最低的为苕溪水系,只有3.5 mg/L。各水系浮游植物生物量排序为:宜溧水系>太湖>出湖水系>运河水系>苕溪水系(图3b)。

图3 太湖和各水系浮游植物种类(a)和生物量(b)

Fig. 3 The species(a) and biomass(b) of phytoplankton in the Lake Taihu and its river systems

2.1.2 太湖流域浮游植物多样性分析 通过 Shannon-Wiener、Simpson、Pielou 3 种多样性指数分析可见,太湖流域各点位浮游植物多样性差异明显。在调查的107个点位中,60%的点位 Shannon-Wiener 指数低于0.5,超过50%的点位 Simpson 和 Pielou 指数低于0.1(图4),浮游植物多样性较低可能与太湖流域大部分点位污染严重有关。仅有部分上游或远离城市区域的点位多样性较高,但多样性较高的点位仍不足10%。

图4 浮游植物多样性指数频率分布

Fig. 4 The distribution of diversity index frequency of phytoplankton

在各水系中,浮游植物生物多样性差异显著.太湖生物多样性最高,Shannon-Wiener 指数为1.12,Simpson 和 Pielou 指数也分别高达0.46,0.35,说明太湖水质适合浮游植物的生存.苕溪水系生物多样性最低,Shannon-Wiener 指数只有0.18, Simpson 和 Pielou 指数分别只有0.07 和0.06,这可能与该水系水体营养盐水平较低及空间异质性低有关.各水系生物多样性排序为:太湖>宜溧水系>运河水系>出湖水系>苕溪水系(图5).

2.1.3 太湖流域浮游植物与其环境因子的关系 根据排序设定的物种要求,共筛选出87种浮游植物(表2)进入生物矩阵.对于13项环境因子,通过分析筛选出硝态氮、总氮、总磷、pH、溶解氧和浊度6项环境因子进入环境因子矩阵.

前两个排序轴的特征值分别为0.238和0.128,解释了浮游植物12.8%的群落变化和61.1%的环境变率.图6为利用Canoco 4.5软件对107个采样点的6项显著相关的环境因子及87种浮游植物生物量进行的CCA排序结果.结果表明 NO_3^- -N、TN和TP是影响该区浮游植物群落变化的重要因子,其中 NO_3^- -N与第一排序轴呈显著正相关,是最为重要的影响变量.TN、TP、pH、DO等与第二排序轴呈显著相关,也是影响浮游植物群落变化的重要因子,其中DO和pH与第二排序轴呈显著负相关,其他均呈显著正相关.浮游植物与环境因子关系显著,铜绿微囊藻、伪鱼腥藻和舟形藻与 NO_3^- -N显著相关.绿藻门优势种受TN、TP影响较大.硅藻门中的小环藻、直链藻与TN相关性显著.本研究与相关研究结果一致^[13,24,32],如邓建明等^[13]研究发现营养盐对太湖流域水系中藻类的影响显著;刘霞等^[32]研究表明,太湖浮游硅藻的生长分布主要受营养盐等环境因子的影响;路娜等^[24]研究巢湖流域发现浊度和硝态氮的变化影响了浮游植物群落的变化.

2.2 太湖流域浮游动物群落结构特征与分布、多样性分析及其与环境因子的关系

2.2.1 太湖流域浮游动物群落结构特征分布 本研究共鉴定出浮游动物27种,以枝角类和桡足类居多,其中枝角类优势种为象鼻溞和网纹溞,其它种类包括裸腹溞、秀体溞、低额溞、仙达溞、尖额溞、盘肠溞等;桡足类优势种为汤匙华

图5 太湖和各水系浮游植物多样性指数

Fig. 5 Diversity index of phytoplankton in Lake Taihu and its river systems

图6 浮游植物主要属种与环境因子排序图

Fig. 6 CCA ordination of phytoplankton biomass and environmental factors

溞,其它种类包括裸腹溞、秀体溞、低额溞、仙达溞、尖额溞、盘肠溞等;桡足类优势种为汤匙华

哲水蚤、许水蚤和中华窄腹剑水蚤,其它种类包括中剑水蚤、温剑水蚤、剑水蚤等.

太湖中浮游动物密度为 87.6 ind./L,枝角类和桡足类密度分别为 36.2 和 51.4 ind./L. 枝角类的象鼻溞和网纹溞密度分别为 25.1 和 7.9 ind./L,占总密度的 28.7% 和 9.1%;桡足类的哲水蚤和剑水蚤密度分别为 9.6 和 28.8 ind./L,占总密度的 10.9% 和 32.9%. 相比太湖,太湖流域水系中浮游动物密度显著下降,只有 11.3 ind./L,枝角类和桡足类密度分别为 2.4 和 8.9 ind./L. 枝角类的象鼻溞密度为 1.0 ind./L,占总密度的 8.8%;桡足类的剑水蚤密度为 4.8 ind./L,占总密度的 42.5%.

太湖中浮游动物生物量为 265.1 $\mu\text{g/L}$,枝角类和桡足类生物量分别为 159.1 和 106.0 $\mu\text{g/L}$. 枝角类的象鼻溞和网纹溞生物量分别为 129.2 和 13.4 $\mu\text{g/L}$,占总生物量的 48.7% 和 5.1%;桡足类的哲水蚤和剑水蚤生物量分别为 42.3 和 59.6 $\mu\text{g/L}$,占总生物量的 15.9% 和 22.5%. 太湖流域水系中的生物量只有 21.8 $\mu\text{g/L}$,枝角类和桡足类生物量分别为 11.9 和 9.9 $\mu\text{g/L}$. 枝角类的象鼻溞生物量为 4.9 $\mu\text{g/L}$,占总生物量的 22.5%;桡足类的哲水蚤和剑水蚤生物量分别为 2.7 和 6.6 $\mu\text{g/L}$,占总生物量的 12.4% 和 30.3%.

表 2 87 种太湖流域浮游植物名录
Tab. 2 87 species of phytoplankton in the Lake Taihu basin

蓝藻门	23 四足十字藻	46 颗粒直链藻螺旋变形	70 箱形桥弯藻
1 铜绿微囊藻	24 直角十字藻	47 直链藻	71 小桥弯藻
2 惠氏微囊藻	25 十字藻	48 远距直链藻	72 微细异极藻
3 伪鱼腥藻	26 短刺四星藻	49 小环藻	73 窄异极藻
4 不整齐蓝纤维藻	27 月牙藻	50 极小冠盘藻	74 缢缩异极藻
5 柔细束丝藻	28 游丝藻	51 圆筛藻	75 尖辐节藻
6 细小隐球藻	29 胶网藻	52 肘状针杆藻	76 双菱藻
7 微小平裂藻	30 集星藻	53 针杆藻	隐藻门
8 阿氏浮丝藻	31 微小四角藻	54 尖针杆藻	77 卵形隐藻
9 卷曲鱼腥藻	32 三角四角藻	55 放射针杆藻变种	78 嗜蚀隐藻
10 微小色球藻	33 拟菱形弓形藻	56 近缘针杆藻	79 吻状隐藻
绿藻门	34 弓形藻	57 钝脆杆藻	80 尖尾蓝隐藻
11 四尾栅藻	35 蹄形藻	58 克洛脆杆藻	裸藻门
12 双尾栅藻	36 短棘盘星藻	59 脆杆藻	81 尾裸藻
13 多刺栅藻	37 二角盘星藻纤细变种	60 舟形藻	82 裸藻
14 双对栅藻	38 单角盘星藻具孔变种	61 椭圆舟形藻	83 尖尾裸藻
15 二形栅藻	39 细新月藻	62 短小舟形藻	84 扁裸藻
16 斜生栅藻	40 波吉卵囊藻	63 喙头舟形藻	85 囊裸藻
17 针形纤维藻	41 鼓藻	64 短小曲壳藻	金藻门
18 镰形纤维藻	42 绿柄球藻	65 扁圆卵形藻	86 圆筒锥囊藻
19 狭形纤维藻	硅藻门	66 菱形藻	甲藻门
20 小球藻	43 变异直链藻	67 长菱形藻	87 薄甲藻
21 衣藻	44 颗粒直链藻	68 尖布纹藻	
22 四角十字藻	45 颗粒直链藻最窄变种	69 膨胀桥弯藻	

浮游动物在太湖流域分布呈现出明显的空间差异性. 从浮游动物密度分布来看(图 7),太湖浮游动物密度远远高于流域水系中的密度,达到 87.6 ind./L. 出湖水系和宜溧水系浮游动物密度分别为 15.9 和 15.1 ind./L. 运河水系浮游动物密度最低,仅为 4.8 ind./L,这可能与运河运输、水体扰动大有关. 各水系中浮游动物生物量与浮游动物密度情况类似,太湖最高,为 265.1 $\mu\text{g/L}$,依次为宜溧水系(33.1 $\mu\text{g/L}$)、苕溪水系(26.8 $\mu\text{g/L}$)、出湖水系(26.1 $\mu\text{g/L}$)和运河水系(9.8 $\mu\text{g/L}$)(图 8).

2.2.2 太湖流域浮游动物多样性分析 通过 Shannon-Wiener、Simpson、Pielou 多样性指数分析可知在调查的 107 个点位中,25% 的点位中浮游动物 Shannon-Wiener 指数低于 0.5,10% 的点位 Simpson 和 Pielou 指数低于 0.1(图 9),这可能与太湖流域内部分点位污染严重有关. 在各水系中,浮游动物多样

图7 太湖流域浮游动物密度分布

Fig.7 The distribution of zooplankton density in Lake Taihu basin

性比浮游植物高,且分布均一. Shannon-Wiener 指数中宜溧水系、苕溪水系、出湖水系及太湖均超过 1, 而运河水系也有 0.97; 各水系浮游动物的 Simpson 指数差异较小;太湖的 Pielou 指数最高,为0.74, 运河水系的最低,为 0.48 (表 3).

2.2.3 太湖流域浮游动物与其环境因子的关系 根据排序设定的物种要求,筛选出 22 种浮游动物(表 4) 进入生物矩阵. 对于 13 项环境因子,通过分析筛选出 TN、DO、NO₃⁻-N、Temp 4 项与浮游动物生物量显著相关的环境因子进入环境因子矩阵.

图8 太湖和各水系浮游动物生物量

Fig.8 Zooplankton biomass in the Lake Taihu and its river systems

图9 浮游动物多样性频率分布

Fig.9 The distribution of diversity index frequency of zooplankton

表3 太湖和各水系浮游动物平均多样性指数

Tab. 3 Average diversity index of zooplankton in the Lake Taihu and its river systems

多样性指数	太湖	宜溧水系	苕溪水系	运河水系	出湖水系
Shannon-Wiener	1.44	1.13	1.23	0.97	1.06
Simpson	0.68	0.56	0.62	0.52	0.54
Pielou	0.74	0.58	0.63	0.48	0.55

表4 22种太湖流域浮游动物名录

Tab. 4 22 zooplankton species in the Lake Taihu basin

枝角类	4 秀体蚤	8 低额蚤	桡足类	15 中剑水蚤	19 剑水蚤
1 象鼻蚤	5 基合蚤	9 仙达蚤	12 汤匙华哲水蚤	16 温剑水蚤	20 剑水蚤幼体
2 网纹蚤	6 尖额蚤	10 蚤	13 许水蚤	17 小剑水蚤	21 哲水蚤幼体
3 裸腹蚤	7 盘肠蚤	11 船卵蚤	14 中华窄腹剑水蚤	18 真剑水蚤	22 无节幼体

图10 浮游动物主要种属与环境因子排序
Fig. 10 CCA ordination of zooplankton biomass and environmental factors

前两个排序轴的特征值分别为 0.139 和 0.079,共解释了浮游动物 10.7% 的群落变化和 69.7% 的环境变率. 图 10 为筛选的 22 种浮游动物与 4 项显著相关的环境因子的 CCA 排序结果,结果表明: NO_3^- -N、TN、Temp 和 DO 是影响该区浮游动物群落变化的重要因子. NO_3^- -N、TN 和 Temp 与第一排序轴呈显著相关,是最为重要的影响因素,其中 NO_3^- -N 与第一排序轴呈正相关,其他均呈负相关. DO 与第二排序轴呈显著负相关,也是影响浮游动物群落变化的重要因子. 浮游动物与环境因子相关性显著,盘肠蚤、网纹蚤、中华窄腹剑水蚤等与 NO_3^- -N 相关性显著. 而秀体蚤、温剑水蚤受水温影响显著. 本研究与相关研究结果吻合^[33-34],陈光荣等^[25, 33]认为水温是影响浮游动物水平分布的重要因素,它影响浮游动物生长、发育、数量变化和群落组成;而象鼻蚤、汤匙华哲水蚤与溶解氧呈显著相关,吴利等^[34]研究武湖发现,水温、营养盐、DO 与浮游动物群落相关性较强.

2.3 浮游植物与浮游动物之间的关系

浮游植物和浮游动物是水生生态系统中食物链的重要组成部分,它们相互影响、关系密切. 通过 Pearson 相关性分析了浮游植物与主要浮游动物在生物量上的关系(表

5),结果表明:蓝藻与多种浮游动物显著相关,如象鼻蚤、网纹蚤、盘肠蚤、汤匙华哲水蚤和许水蚤等,最高相关性达到 0.639 ($P < 0.01$). 一方面,这可能与网纹蚤、汤匙华哲水蚤等浮游动物对太湖蓝藻群体的高耐受性有关,Hanazato^[35]等也发现了高生物量群体微囊藻和高生物量浮游甲壳动物(如象鼻蚤、网纹蚤等)的共存现象;另一方面,某些浮游动物还能够直接摄食蓝藻或者间接利用蓝藻碎屑. Kluijver 等^[36]通过 C-13 同位素标记,发现蓝藻可以作为浮游动物的碳源,同时 Hanazato 等^[37-39]研究表明,枝角类浮游动物能够利用分解的微囊藻作为食物,为其生长和繁殖提供能量. 秀体蚤、基合蚤和温剑水蚤与硅藻呈显著正相关,相关系数分别为 0.401、0.902 和 0.657 ($P < 0.01$). 这可能与浮游动物能摄食小型硅藻有关,Vanni 等^[40]曾报道过春季硅藻容易受到 *Daphnia* 和 *Cyclopoid copepods* 的摄食.

表5 浮游植物与浮游动物间的相关系数

Tab.5 The correlation coefficients between phytoplankton and zooplankton

浮游动物	蓝藻门	绿藻门	硅藻门	隐藻门	裸藻门	金藻门	甲藻门
象鼻溞	0.407 **	-0.067	-0.049	-0.073	-0.094	-0.062	-0.071
网纹溞	0.639 **	-0.063	-0.054	-0.071	-0.090	-0.047	-0.053
裸腹溞	0.035	-0.019	-0.026	-0.022	-0.015	-0.034	-0.018
秀体溞	0.083	0.331 **	0.401 **	0.177	0.282 **	-0.059	0.034
基合溞	-0.046	-0.007	0.902 **	-0.010	0.017	0.093	0.068
盘肠溞	0.538 **	-0.010	0.045	-0.037	-0.039	-0.039	-0.017
其他枝角类	-0.084	0.007	0.043	-0.010	-0.006	-0.019	-0.037
汤匙华哲水蚤	0.542 **	-0.066	-0.098	-0.088	-0.133	-0.049	-0.078
许水蚤	0.250 **	-0.052	-0.091	-0.077	-0.101	-0.049	-0.052
中华窄腹剑水蚤	-0.071	0.034	0.160	-0.013	-0.070	0.066	-0.002
温剑水蚤	-0.086	0.079	0.657 **	-0.024	0.062	-0.011	0.078
其他桡足类	0.162	-0.052	-0.058	-0.047	-0.082	-0.035	-0.042

** 表示在0.01水平(双侧)上显著相关.

3 结论

1) 鉴定出浮游植物139种,分属7门71属.太湖水体中,蓝藻门中的铜绿微囊藻细胞密度占总密度的86.7%,已成为太湖水体的绝对优势种;流域水系中,硅藻门中的小环藻、蓝藻门中的惠氏微囊藻细胞密度分别占总密度的17.4%、10.3%,成为优势种.浮游动物鉴定出27种,主要为枝角类的象鼻溞、网纹溞和桡足类的哲水蚤、剑水蚤.太湖水体中,枝角类的象鼻溞和网纹溞生物量分别占总生物量的48.7%和5.1%;桡足类的哲水蚤和剑水蚤生物量分别占总生物量的15.9%和22.5%.流域水系中,主要为枝角类的象鼻溞、桡足类的哲水蚤和剑水蚤,生物量分别占总生物量的22.5%、12.4%和30.3%.

2) 各水系中浮游动植物的生物多样性差别甚大.浮游植物多样性上:太湖湖体最高,其次为宜溧水系,然后依次为运河水系、出湖水系、苕溪水系.浮游动物多样性上:太湖湖体最高,其次为苕溪水系,然后依次为宜溧水系、出湖水系、运河水系.

3) 游动植物群落结构与环境因子相关性显著,浮游植物与硝态氮、总氮、总磷呈显著相关;而浮游动物主要与硝态氮、温度和溶解氧呈显著相关.

4) 浮游动、植物优势种之间存在显著相关性.秀体溞、基合溞和温剑水蚤与硅藻门呈显著正相关;蓝藻门与象鼻溞、网纹溞、汤匙华哲水蚤等相关性显著.

致谢:余丽、杨文斌、李胜男、刘世明、覃宝利、魏利军、周建等协助样品采集及预处理,特此致谢!

4 参考文献

- [1] Lepistö L, Holopainen AL, Vuoristo H. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the ecological status of Finnish boreal lakes. *Limnologia*, 2004, **34**(3):236-248.
- [2] Marchetto A, Padedda BM, Marinani M *et al.* A numerical index for evaluating phytoplankton response to changes in nutrient levels in deep Mediterranean reservoirs. *Journal of Limnology*, 2009, **68**(1):106-121.
- [3] Crossetti L, Bicudo C. Phytoplankton as a monitoring tool in a tropical urban shallow reservoir (Garcas Pond): the assemblage index application. *Hydrobiologia*, 2008, **610**(1):161-173.
- [4] 杨柳,章铭,刘正文.太湖春季浮游植物群落对不同形态氮的吸收.湖泊科学,2011, **23**(4):605-611.
- [5] 洪松,陈静生.中国河流水生生物群落结构特征探讨.水生生物学报,2002, **26**(3):295-305.
- [6] 吴生才,陈伟民.太湖浮游植物生物量的周期性变化.中国环境科学,2004, **24**(2):151-154.
- [7] 钟春妮,杨桂军,高映海等.太湖贡湖湾大型浮游动物群落结构的季节变化.水生生态学杂志,2012, **33**(1):47-52.
- [8] 孔繁翔,胡维平,范成新等.太湖流域水污染控制与生态修复的研究与战略思考.湖泊科学,2006, **18**(3):193-198.
- [9] 刘兆德,虞孝感,王志宪.太湖流域水环境污染现状与治理的新建议.自然资源学报,2003, **18**(4):467-474.
- [10] 高永年,高俊峰.太湖流域水生态功能分区.地理研究,2010, **29**(1):111-117.

- [11] 李娟英, 曹宏宇, 崔 昱等. 太湖流域主要水系水环境特征分析与富营养化评价. 水生态学杂志, 2012, **33**(4): 7-13.
- [12] 吴召仕, 蔡永久, 陈宇炜等. 太湖流域主要河流大型底栖动物群落结构及水质生物学评价. 湖泊科学, 2011, **23**(5): 686-694.
- [13] 邓建明, 徐彩平, 陈宇炜等. 太湖流域主要河道浮游植物类群对比研究. 资源科学, 2011, **33**(2): 210-216.
- [14] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [15] 李庆南, 张 远, 孟 伟等. 辽河太子河水系的浮游植物种类多样性研究. 大连海洋大学学报, 2011, **26**(4): 322-327.
- [16] 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.
- [17] 章宗涉, 黄群飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [18] 王站付, 吴 波, 王全喜等. 西太湖流域浮游动物群落结构及分布调查研究. 安全与环境学报, 2012, **12**(6): 150-156.
- [19] 姜 英, 姚锦仙, 庞 科等. 额尔古纳河流域秋季浮游动物群落结构特征. 北京大学学报: 自然科学版, 2010, **46**(6): 12-18.
- [20] 沈嘉端. 中国动物志·淡水桡足类. 北京: 科学出版社, 1979.
- [21] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志·淡水枝角类. 北京: 科学出版社, 1979.
- [22] 马克平. 生物多样性的测定方法 I: α 多样性的测度方法(上). 生物多样性, 1994, **2**(3): 162-168.
- [23] Luciana SC, David MM. Hydrodynamics-driven plankton community in a shallow lake. *Aquatic Ecology*, 2009, **43**(1): 73-84.
- [24] 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环境因子的关系. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 950-956.
- [25] 陈光荣, 钟 萍, 张修峰等. 惠州西湖浮游动物及其与水质的关系. 湖泊科学, 2008, **20**(3): 351-356.
- [26] 申恒伦, 蔡庆华, 邵美玲等. 三峡水库香溪河流域梯级水库浮游植物群落结构特征. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 197-205.
- [27] 董旭辉, 羊向东, 刘恩峰等. 冗余分析(RDA)在简化湖泊沉积指标体系中的应用——以太白湖为例. 地理研究, 2007, **26**(3): 477-484.
- [28] Cajo JF, Braak T. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 1986, **67**(5): 1167-1179.
- [29] Lopes M, Bicudo C, Ferragut M. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil. *Hydrobiologia*, 2005, **542**(1): 235-247.
- [30] Muylaert K, Aabbe K, Vyverman W. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, **50**(5): 673-687.
- [31] 邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪. 沙湖浮游动物与水环境因子关系的多元分析. 生态学杂志, 2012, **31**(4): 896-901.
- [32] 刘 霞, 陆晓华, 陈宇炜. 太湖浮游硅藻时空演化与环境因子的关系. 环境科学学报, 2012, **34**(4): 821-827.
- [33] Dussart B, Fernando C, Matsumura T *et al.* A review of systematic, distribution and ecology of tropical freshwater zooplankton. *Hydrobiologia*, 1984, **113**(6): 77-91.
- [34] 吴 利, 冯伟松, 张堂林等. 春、秋季武湖浮游动物群落特征及其与环境因子的关系. 水生态学杂志, 2011, **32**(2): 31-37.
- [35] Hanazato T. Interrelations between *Microcystis* and cladocera in the highly eutrophic lake Kasumigaura, Japan. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie*, 1991, **76**(1): 21-36.
- [36] Kluijver A, Yu JL, Liu ZW *et al.* Cyanobacteria as a carbon source for zooplankton in eutrophic Lake Taihu, China, measured by ^{13}C labeling and fatty acid biomarkers. *Limnology and Oceanography*, 2012, **57**(4): 1245-1254.
- [37] Hanazato T, Yasuno M. Evaluation of *Microcystis* as food for zooplankton in a eutrophic lake. *Hydrobiologia*, 1987, **144**(3): 251-259.
- [38] Chen FZ, Xie P. The effects of fresh and decomposed *Microcystis aeruginosa* on cladocerans from a subtropic Chinese lake. *Journal of Freshwater Ecology*, 2003, **18**(1): 97-104.
- [39] Chen FZ, Dai X, Liu ZW *et al.* Microcystins derived from lysing *Microcystis* cells do not cause negative effects on crustacean zooplankton in Lake Taihu, China. *Aquatic Ecology*, 2013, **47**(4): 379-387.
- [40] Vanni M, Temte J. Seasonal patterns of grazing and nutrient limitation of phytoplankton in a eutrophic lake. *Limnology and Oceanography*, 1990, **35**(3): 697-709.