DOI:10.15928/j.1674-3075.2020.02.006

太湖滨岸带浮游动物群落结构特征与环境因子的典范对应分析

温超男[1,2],黄 蔚[2],陈开宁[2,3],韦 众[1],吴 涛[4]

(1.安徽农业大学,安徽 合肥 230036;
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,江苏 南京 210008;
3.江苏高校水处理技术与材料协同创新中心,江苏 苏州 215009;
4.天津市水利科学研究院,天津 300061)

摘要:探讨浮游动物群落结构与环境因子的关系,为太湖水质监测提供方法,为富营养化治理与水生态修复提供理论支持。2016年8月进行了太湖水质状况及浮游动物群落调查,利用物种多样性指数和物种丰富度指数分析了太湖浮游动物群落结构特征,在此基础上,采用典范对应分析(CCA)探讨太湖浮游动物群落结构特征与环境因子的相互关系。结果表明,太湖不同湖区湖滨带水体水质总体评价为劣Ⅴ类,总氮、总磷均值分别为(2.06±0.13) mg/L、(0.22±0.02) mg/L,叶绿素a平均含量为(65.35±9.09) mg/L。本次调查共检出浮游动物29种,其中桡足类5种,枝角类8种,轮虫16种;太湖浮游动物密度均值为(100±11)个/L,其中竺山湾浮游动物密度最高,为(273±54)个/L,胥口湾密度最低,仅为(31±6)个/L;太湖浮游动物生物量均值为(4.45±0.99) mg/L,生物量最高的是竺山湾,为(17.70±6.48) mg/L,胥口湾浮游动物生物量最低,为(1.03±0.23) mg/L。相关性分析表明,浮游动物各表征指标均与叶绿素a含量呈现显著正相关性。典范对应分析结果表明,浮游动物分布主要与溶解性总氮、总磷、透明度、溶解氧及pH值显著相关。

关键词:浮游动物;群落结构;环境因子;典范对应分析;太湖

中图分类号:Q145 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2020)02-0036-09

浮游动物是湖泊生态系统食物链及生物生产力的基本环节,一方面作为捕食者调控着浮游植物、原生动物和细菌的数量,另一方面可作为一些鱼类优良的食物来源(杨宇峰和黄祥飞,1992),是食物网中生产者和消费者之间的桥梁,起着“承上启下”的作用,是水生态系统的关键组成部分(刘恩生等,2005;杨丽丽等,2011;杨宇峰和黄祥飞,1992;Radke et al,2010)。研究发现浮游动物易受理化因子的影响,如舒婷婷等(2012)研究发现玄武湖水体中pH值、总悬浮物和总溶解性氮是影响夏季轮虫水平分布的重要因子;李娟等(2014)对梅梁湾、贡湖湾的研究也表明温度、叶绿素和营养盐水平是影响浮游甲壳动物群落结构的主要限制因子。此外,利用浮游动物群落结构的综合指标可以评价水质及其变化趋势(陈光荣等,2008;Chen等,2012),如李强等(2015)采用浮游动物生物多样性指数及指示生物类型对淀山湖水质进行初步评价,其评价结果与理化指标分析结果基本一致。

太湖横跨江浙两省,是我国第3大淡水湖泊,平均水深约2 m(金相灿,1995),属于典型的浅水湖泊,具有换水周期长、出入湖河道数量多等特点(李娣等,2014)。已有很多学者对太湖典型湖湾如梅梁湾、贡湖湾、胥口湾等的浮游动物结构特征做了相关研究(李娟等,2014;王颖等,2014;杨桂军等,2008),本文在前人研究基础上,以太湖各湖区为研究对象,在分析太湖不同湖区水质现状及浮游动物分布特征的基础上,探讨浮游动物与环境因子的关系,以期为太湖利用浮游动物进行水质监测提供方法,为太湖富营养化治理与水生态修复提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 采样时间及采样点位

由于太湖湖泊面积大,敞水区生境相似,环境异质性低,无法准确捕捉到太湖浮游动物的分布特征,因此,本文将太湖按照自然形成的湖湾划分为7个湖区,于2016年8月进行调查。本次调查共设置41个断面,130个样点,断面垂直湖岸线布设。其中西太湖5个断面,15个样点;竺山湾5个断面,15个

收稿日期:2019-05-24

基金项目:国家自然科学基金项目(41877544、51409166);南京科技计划项目(2017sb310016);国家水专项(2018ZX07208008)。

作者简介:温超男,1993年生,女,硕士,主要研究方向为水域生态学。E-mail: wencn542968@163.com

通信作者:韦众。E-mail: wz6565@ahau.aed.cn

样点；梅梁湾 6 个断面，16 个样点；贡湖湾 9 个断面，27 个样点；胥口湾 8 个断面，29 个样点；东太湖 5 个断面，17 个样点；南太湖 3 个断面，11 个样点（图 1）。采样点定位采用 Gamin 公司生产的 GPSL2 型全球定位系统。

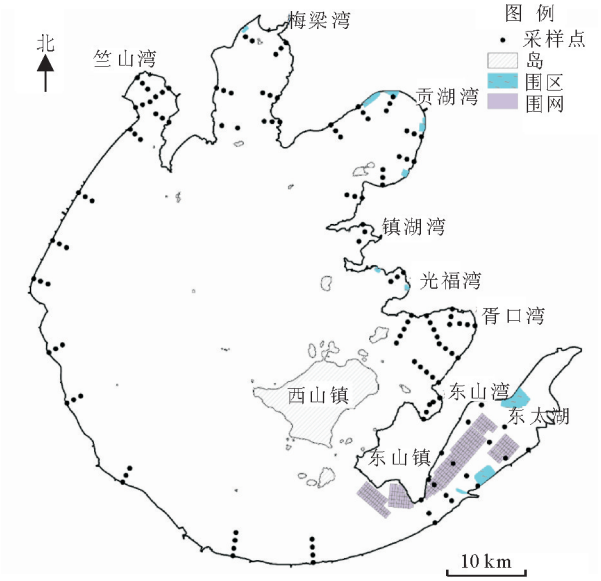


图 1　太湖采样点设置

Fig.1　Location of the sampling sites in Taihu Lake

1.2　样品采集

1.2.1　*水质*　现场使用多参数水质分析仪（Hash，DS5X）测定 pH 值、水温（T）、溶解氧（DO）和氧化还原电位（ORP）等；透明度（SD）用塞式透明度盘测定；水深（D）用水深测度仪测定。水样用采水器采集水下 50 cm 及湖底以上 50 cm 处水样，混匀取 1 L，密封立即运回实验室分析测定总氮（TN）、总磷（TP）、溶解性总氮（TDN）、溶解性总磷（TDP）、氨氮（NH_4^+）、磷酸盐（PO_4^{3-}）以及叶绿素 a（Chl.a）等指标，样品保存及测定方法均参考《水和废水监测方法（第四版）》（国家环境保护总局，2002）。

1.2.2　*浮游动物*　浮游动物定量样品用采水器采集水下 0.5 m 和湖底以上 0.5 m 处各 5 L，经 25 号浮游生物网（网孔直径 0.064 mm）过滤浓缩后，加入 7%甲醛固定定容至 30 mL，带回实验室在光学显微镜下进行鉴定、计数，其中轮虫和无节幼虫计数时，取摇匀的浓缩样品 1 mL，放入 1 mL 计数框内，全片计数。每个样品计数 3 片，求出平均值。枝角类和桡足类计数时，取摇匀的浓缩样品 5 mL，置于 5 mL计数框内，在 20 倍显微镜下进行全片计数，然后计算其生物量。浮游动物种类鉴定参照《中国淡水轮虫志》（王家楫，1961）、《中国动物志淡水枝角类》（蒋燮治和堵南山，1979）和《中国动物志淡水桡足类》（中国科学院中国动物志委员会 1999）。

1.3　数据分析

1.3.1　*浮游动物密度*　浮游动物密度计算公式为：

$$N=V_W\times n/V$$

式中：N 为大型浮游动物的密度；V_W 为 1 L 水样浓缩后的样品体积（mL）；n 为计数所得浮游动物的个体数；V 为计数框体积（mL）。

1.3.2　*浮游动物生物量*　大型浮游动物生物量的计算中，枝角类的生物量根据体长-体重回归方程换算（赵文，2005），桡足类根据外形的几何形状换算为生物量（陈雪梅，1981）；轮虫生物量根据其平均湿重进行换算（赵文，2005）。

1.3.3　Shannon-Wiener 多样性指数　多样性指数公式为：

$$H'=-\sum_{i=1}^{S}(N_i/N)\log_2(N_i/N)$$

式中：H' 为生物多样性指数；N 为样品中各种生物的总体个数；S 为所有样品中的生物种属总数；N_i 为样品中某种生物的总体个数。

1.3.4　Margalef 丰富度指数　Margalef 丰富度指数公式为：

$$D=(S-1)/\ln N$$

式中：D 为物种丰富度指数；S 为浮游动物种类数；N 为浮游动物个体总数。

1.3.5　*典范对应分析*　在对数据进行 Canoco for Windows 预分析时显示，4 个特征轴梯度最大值为 3.4，说明该数据更适合单峰模型进行排序，因此选择使用典范对应分析。CCA 分析包括环境因子和物种数据两个矩阵；为使环境数据符合正态分布，在数据分析前对除 pH 以外的数据进行 $\log10(x+1)$ 转换（Muylaert et al，2000；Flores & Barone，1998）；物种矩阵中，入选的物种需在各样方中出现的频率≥5%或该物种在一个样方的相对密度≥1%（Lopes et al，2005；Muylaert et al，2000），同时，物种矩阵在分析前需进行 $\log10(x+1)$ 转换。

1.4　数据处理

采用使用 SPSS 20 和 Origin 9 软件对数据进行统计和制图，使用 Canoco for Windows 4.5 对浮游动物物种数据与环境因子数据进行典范对应分析。

2 结果

2.1 环境因子

太湖不同湖区pH值平均为8.67，整体呈弱碱性；溶解氧浓度平均为6.39 mg/L，透明度在49 cm左右，其中胥口湾透明度水平最高，竺山湾透明度最差，均值仅为26 cm左右，同时竺山湾的浊度仅次于梅梁湾，其含量达到了59.52 NTU(表1)。

太湖水质总体评价为劣Ⅴ类。总氮变化范围为0.59～7.95 mg/L，均值为(2.13±0.13) mg/L，其中竺山湾总氮均值最高为(4.17±0.35) mg/L，其次是梅梁湾和贡湖湾，胥口湾含量最低，仅为(1.01±0.09)mg/L；总磷含量变化在0.02～0.92 mg/L，均值为(0.23±0.02)mg/L，总磷污染最为严重的湖区与总氮一致，其含量达到了(0.58±0.05) mg/L，污染程度最低的湖区是胥口湾，其浓度为(0.05±0.01) mg/L；不同湖区湖滨带叶绿素含量平均为(64.31±6.86) mg/L，同样，藻类暴发最为严重的区域仍然在竺山湾，其浓度达到了(147.86±27.22) μg/L，水草覆盖度最高的胥口湾含量最低，其含量仅为(7.16±1.24)μg/L，致使不同湖区藻类分布差异的主要原因是风生流以及各区域营养盐水平差异导致。

2.2 浮游动物种类组成数量分布

2.2.1 *浮游动物种类* 本次调查共检出29种浮游动物，其中轮虫种类数最多，为16种，占55%；枝角类8种，占28%；桡足类5种，占17%(表2)。浮游动物优势种种类有：中华窄腹剑水蚤(*Limnoithona sinensis*)、长额象鼻溞(*Bosmina longirostris*)、多刺裸腹溞(*Moina macrocopa*)、萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)、针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)。

表1 太湖不同湖湾水体理化因子(平均值±标准误)特征

Tab.1 Physical and chemical factors (mean±S.E.) of the different areas of Taihu Lake

	总氮/ mg·L^{-1}	总磷/ mg·L^{-1}	叶绿素/ μg·L^{-1}	透明度/ cm	浊度/ NTU	溶氧/ mg·L^{-1}	pH
西太湖	1.19±0.15	0.14±0.02	22.52±6.90	47±5.24	25.46±1.22	6.72±0.51	8.77±0.11
竺山湾	4.17±0.35	0.58±0.05	147.86±27.22	26±1.77	59.52±4.64	3.63±0.33	8.09±0.09
梅梁湾	2.72±0.38	0.36±0.05	111.58±20.56	27±3.53	65.40±7.54	5.74±0.42	8.66±0.10
贡湖湾	2.10±0.15	0.18±0.02	72.90±10.00	33±1.76	55.26±7.55	8.70±0.50	8.50±0.07
胥口湾	1.01±0.09	0.05±0.01	7.16±1.24	103±9.47	31.25±5.22	5.83±0.28	8.45±0.05
东太湖	1.11±0.10	0.08±0.01	17.47±5.37	71±8.81	19.98±2.29	5.76±0.06	8.56±0.04
南太湖	1.32±0.14	0.12±0.01	23.87±6.37	51±2.95	22.64±2.47	5.78±0.08	8.73±0.06

表2 太湖浮游动物种类

Tab.2 Zooplankton species composition in Taihu Lake

桡足类 Copepoda	晶莹仙达溞 *Sididae crystallina*	方形臂尾轮虫 *Brachionus quadridentatus*
温剑水蚤 *Thermocyclops* sp.	角突网纹溞 *Ceriodaphnia cornuta*	螺形龟甲轮虫 *Keratella cochlearis*
中剑水蚤 *Mesocyclops* sp.	多刺裸腹溞 *Moina macrocopa*	矩形龟甲轮虫 *Keratella quadrata*
中华窄腹剑水蚤 *Limnoithona sinensis*	矩形尖额溞 *Alona rectangula*	曲腿龟甲轮虫 *Keratella valga*
汤匙华哲水蚤 *Sinocalanus dorrii*	**轮虫 Rotifera**	**长三肢轮虫 Filinia longiseta**
无节幼体 Nauplius	萼花臂尾轮虫 *Brachionus calyciflorus*	针簇多肢轮虫 *Polyarthra trigla*
枝角类 Cladocera	裂足臂尾轮虫 *Brachionus diversicornis*	异尾轮虫 *Trichocerca* sp.
蚤状溞 *Daphnia pulex*	剪形臂尾轮虫 *Brachionus farficula*	聚花轮虫 *Conochilus* sp.
长额象鼻溞 *Bosmina longirostris*	镰状臂尾轮虫 *Brachionus falcatus*	大肚须足轮虫 *Euchlanis dilatata*
长肢秀体溞 *Diaphanosoma leuchtenbergianum*	蒲达臂围轮虫 *Brachionus budapestiensis*	月形腔轮虫 *Lecane luna*
短尾秀体溞 *Diaphanosoma brachyurum*	卜氏晶囊轮虫 *Asplanchna brightwelli*	

2.2.2 *浮游动物密度、生物量* 调查显示，太湖浮游动物密度均值为(100±11)个/L，其中密度分布最高的湖区是竺山湾，其均值为(237±54)个/L，其次是贡湖湾、梅梁湾，密度分布最低的是胥口湾，其均值为(31±6)个/L；太湖各湖区浮游动物数量差异性检验显示，竺山湾与其他各湖区浮游动物数量均有显著性差异($P<0.05$)，贡湖湾与胥口湾浮游动物数量差异性也呈显著水平($P<0.05$)，其他湖区之间浮游动物数量差异性不显著($P>0.05$)。

浮游动物生物量均值为(4.45±0.99)mg/L，其中浮游动物生物量分布最大的是竺山湾，其均值为(17.70±6.48) mg/L，生物量分布最小的是胥口湾，其均值为(1.03±0.23)mg/L(图2)。太湖各湖区浮游动物生物量除竺山湾与其他湖湾均有显著性差异外($P<0.05$)，其他湖区之间差异性不显著($P>0.05$)。

不同湖区浮游动物数量结构也不尽相同(图3)。竺山湾、梅梁湾、胥口湾和南太湖主要是枝角类占优势，分别占比 62%、50%、81%和 60%；贡湖湾是轮虫占主要优势，为 52%；东太湖枝角类和轮虫分别占 42%和 34%；西太湖浮游动物组成中桡足类占 40%，枝角类占 48%。

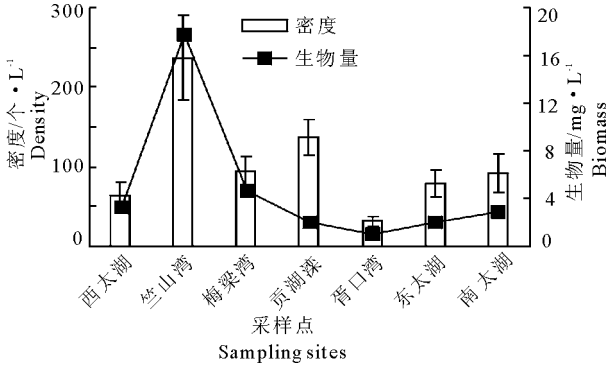


图 2　太湖浮游动物密度及生物量

Fig.2　Zooplankton density and biomass in the different areas of Taihu Lake

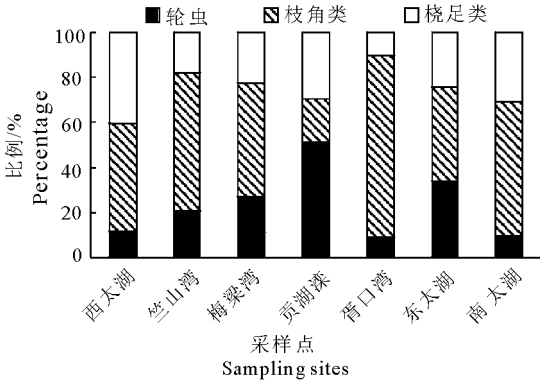


图 3　太湖浮游动物密度百分比

Fig.3　Composition (%) of zooplankton density in the different areas of Taihu Lake

2.2.3　群落多样性指数和丰富度指数　太湖各湖区浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 和 Margalef 丰富度指数 D 调查结果如表 3 所示。

表 3　太湖浮游动物丰富度指数及多样性指数

Tab.3　Shannon-Wiener richness and Margalef diversity indices of zooplankton in the different areas of Taihu Lake

	D	范围	H'	范围
西太湖	1.52	0.46～2.65	1.20	0.35～2.01
竺山湾	1.67	1.21～2.33	1.48	1.07～1.95
梅梁湾	1.86	1.11～2.70	1.53	0.95～2.04
贡湖湾	2.16	1.25～3.29	1.78	1.13～2.19
胥口湾	1.43	0.48～2.33	1.22	0.38～1.91
东太湖	1.71	0.72～2.46	1.41	0.56～1.92
南太湖	1.31	0.84～1.61	1.28	0.76～1.69

Margalef 丰富度指数的变化范围为 0.46～3.29，均值为 1.72±0.05，贡湖湾的平均丰富度指数最大，为 2.16±0.12，南太湖的平均丰富度指数最小，其均值为 1.31±0.10。Shannon-Wiener 多样性指数变化范围为 0.35～2.19，均值为 1.45±0.04，其中多样性指数最高的湖区是贡湖湾，最低的是西太湖，其均值分别为 1.78±0.007 和 1.20±0.14。

2.3　浮游动物与环境因子的相关性

太湖不同湖区浮游动物各表征指标与水环境因子进行相关性分析结果如下(表 4)，下表数据为相关系数。浮游动物生物量与总氮、总磷和叶绿素 a 呈显著正相关，与透明度和溶氧呈显著负相关，而与 pH 值、浊度相关性不显著；浮游动物密度和浮游动物种类数均与总氮、总磷、叶绿素 a 和浊度呈显著正相关，与透明度呈显著负相关；而与 pH 值、溶氧相关性不显著。

表 4　浮游动物与非生物环境因子的相关性

Tab.4　Correlation of zooplankton and abiotic environmental factors

	总氮	总磷	透明度	pH	溶氧	叶绿素	浊度
浮游动物生物量	0.38*	0.47*	−0.23*	−0.08	−0.19*	0.30*	0.14
浮游动物密度	0.41*	0.49*	−0.34*	0.01	−0.11	0.35*	0.26*
浮游动物种类数	0.27*	0.30*	−0.34*	0.03	0.06	0.22*	0.19*

* $P<0.05$

2.4　样方分布与环境因子 CCA 分析

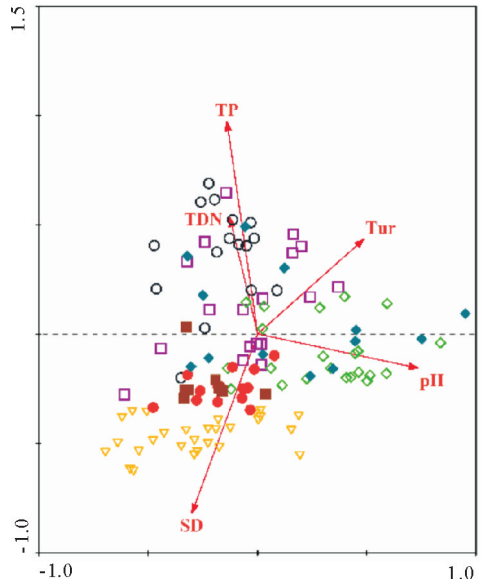
本次调查共有 120 个采样点入选环境数据矩阵，通过与 13 个环境因子的分析，筛选出总磷、溶解性总氮、透明度、浊度和 pH 值五项对样方分布具有显著影响的环境因子制作样方-环境二维排序图(图4)。由图 4 可知，各湖湾排序结果与自然湖湾分布状态拟合度较好。从第一排序轴上看，贡湖湾各样方分布与 pH 值有显著的相关性，由于贡湖湾水体呈现明显的偏碱性，所以 pH 值是影响贡湖湾样方分布的主要环境因子；从第二排序轴上看，梅梁湾和竺山湾与总磷和溶解性总氮呈显著正相关，有部分点位与透明度呈负相关，主要是由于梅梁湾和竺山湾经常蓝藻暴发，致使水体浑浊；南太湖和东太湖与总磷、溶解性总氮呈负相关，在排序图上的位置基本一致，说明南太湖与东太湖的环境因子特征差异小；胥口湾由于水生植被覆盖率高，各样方在二位排序图上的分布主要受透明度的影响；西太湖各样方在二位排序图上的分布比较分散。

2.5　浮游动物群落与环境因子 CCA 分析

本次调查共有 19 种浮游动物入选物种矩阵，通过与 13 个环境因子的分析，筛选出总磷、溶解性总

氮、透明度、浊度和pH值5项与浮游动物物密度显著相关的环境因子制作物种-环境二维排序图(图5)。

排序图中,前2个排序轴的特征值分别为0.130和0.099,共解释了浮游动物14.6%的群落变化和85.4%的环境变率。2个环境排序轴的相关系数为0,2个物种排序轴的相关系数为0.0784,近似垂直,说明排序轴与环境因子间线性结合的程度能较好地反映了物种与环境之间的关系,排序结果是可信的(Ter Braak,1986)。由图5可知,第一排序轴与pH值及浊度呈显著正相关,第二排序轴与总磷和溶解性总氮呈显著正相关,与透明度呈显著负相关。



注:□:竺山湾 ▯:梅梁湾 ◇:贡湖湾◆:西太湖 ●:东太湖 ■:南太湖 ▽:胥口湾

图4　太湖各样方与环境关系的CCA排序图

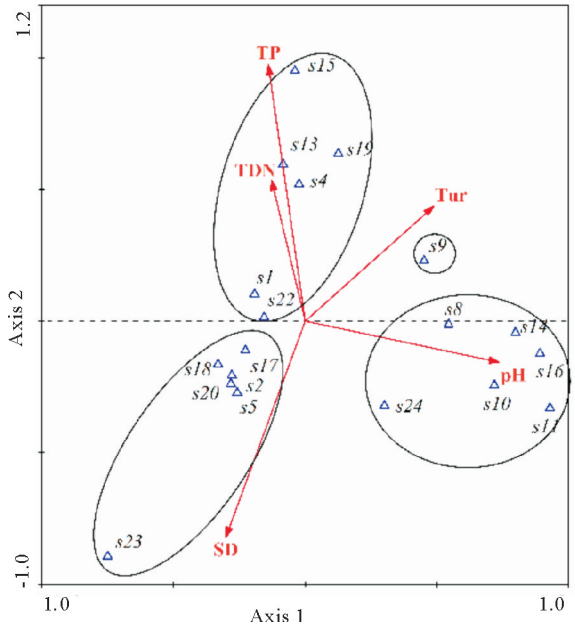
Fig.4　CCA ordination of sampling stations and environmental factors in Taihu Lake

浮游动物物种与环境因子排序图表明:pH值是影响螺形龟甲轮虫、针簇多肢轮虫、长三肢轮虫、异尾轮虫、大肚须足轮虫和无节幼体分布的主要环境因子;水体浊度是影响曲腿龟甲轮虫的重要环境因子;萼花臂尾轮虫、剪形臂尾轮虫、卜氏晶囊轮虫、月形腔轮虫、蚤状溞和温剑水蚤的分布与较高的总磷、溶解性总氮水平呈正相关,说明该组浮游动物适宜生活在营养程度较高的水体中;裂足臂尾轮虫、镰状臂尾轮虫、长额象鼻溞、长肢秀体溞、多刺裸腹溞和汤匙华哲水蚤与水体透明度相关性较强。

3　讨论

3.1　水质分析

太湖总氮、总磷和叶绿素a均值分别为(2.13±0.13) mg/L、(0.23±0.02) mg/L和(64.31±6.86) mg/L,总体属于劣Ⅴ类水平。竺山湾水体富营养化最为严重,可能是由于该湾口狭窄,水体交换周期较长,自净能力弱,基本处于半封闭状态,加之周围工厂、养殖场的污染和旅游休闲区域人类活动的影响,致使竺山湾水体富营养程度加重;其次污染程度较严重的是梅梁湾和贡湖湾,这两个湾口也是太湖典型的夏季易暴发蓝藻水华的湖湾;胥口湾是太湖水体富营养化程度最低的湖区,主要是由于该湖区水草生长茂盛,水生植物群落结构完整;东太湖虽位于太湖的下游,上游来水较为清洁,但是该湖区围网众多,人类活动强度大,人为干扰严重,致使该湖区水质状况劣于胥口湾;湖岸线广阔,易受风浪影响的南太湖和西太湖水体各理化指标差异性小,水质状况次于东太湖。上述结果与李一平等(2005)对太湖水质空间分布特点的研究结果基本一致。



s1:萼花臂尾轮虫 *Brachionus calycif=lorus* *s2*:裂足臂尾轮虫 *Brachionus diversicornis* *s4*:剪形臂尾轮虫 *Brachionus farficula* *s5*:镰状臂尾轮虫 *Brachionus falcatus* *s8*:螺形龟甲轮虫 *Keratella cochlearis* *s9*:曲腿龟甲轮虫 *Keratella valga* *s10*:针簇多肢轮虫 *Polyarthra trigla* *s11*:长三肢轮虫 *Filinia longiseta* *s13*:卜氏晶囊轮虫 *Asplanchna brightwelli* *s14*:异尾轮虫 *Trichocerca* sp. *s15*:月形腔轮虫 *Lecane luna* *s16*:大肚须足轮虫 *Euehlalns dilatata* *s17*:长额象鼻溞 *Bosmina longirostris* *s18*:长肢秀体溞 *Diaphanosoma leuchtenbergianum* *s19*:蚤状溞 *Daphnia pulex* *s20*:多刺裸腹溞 *Moina macrocopa* *s22*:温剑水蚤 *Thermocyclops* sp. *s23*:汤匙华哲水蚤 *Sinocalanus dorrii* *s24*:无节幼体 Nauplius

图5　太湖浮游动物主要种属与环境因子CCA排序

Fig.5　CCA ordination of the primary zooplankton genus and environmental factors in Taihu Lake

3.2　浮游动物种类

本次调查共检出浮游动物 29 种，其中轮虫 16 种，枝角类 8 种，桡足类 5 种。此次调查结果与以往有关太湖浮游动物的调查研究相比，轮虫种类有所下降（白国栋，1962；秦伯强，2004；杨桂军等，2008），大型甲壳动物种类基本保持稳定（蒋燮治，1955；鲍建平和陈辉，1983）。

针对太湖轮虫种类变化，1951 年白国栋等（1962）在太湖共发现轮虫 51 种，1995 年秦伯强等（2004）的调查显示轮虫种类数下降到 39 种，2003－2004 年杨桂军等（2008）在梅梁湾发现轮虫 20 种，2008 年杨桂军等在河口区发现轮虫 23 种，在梅梁湾仅发现 15 种（杨桂军等，2008；Yang et al，2012；Yang et al，2009，王颖等，2014），本研究共检出轮虫 16 种。

对于太湖大型甲壳动物种类调查，蒋燮治等（1955）在 1951－1952 年对太湖的调查中发现枝角类 30 种及 1 变种，1981 年鲍建平等（1983）在太湖发现浮游甲壳动物 39 种，2003－2004 年，太湖浮游甲壳动物为 17 种（Yang et al，2012；Yang et al，2009），2006－2007 年，太湖发现浮游甲壳动物 16 种（Yang et al，2009），2012－2012 年共发现浮游甲壳动物 13 种（王颖等，2014）。此次调查共检出大型甲壳动物 13 种。

本次调查结果表明太湖浮游动物种类较之前学者的调查结果有所下降，可能是由于以下原因造成的，首先近几年来太湖处于富营养状态，而长期的富营养化水体导致浮游动物种类数不断减少，种类多样性逐渐降低；其次 8 月是太湖“三宝”之一的梅鲚讯，鲚对浮游动物的摄食作用显著，导致该阶段浮游动物种类和数量偏少。

3.3　浮游动物与水质的相关性

相关性分析结构表明，浮游动物的密度、生物量和种类均与水体叶绿素 a 浓度呈显著正相关，说明浮游植物是浮游动物重要的食物来源，此结果与王颖等（2014）对太湖浮游甲壳动物与叶绿素的相关性研究的结果一致，但本次调查中透明度与叶绿素 a 浓度呈显著负相关（$r=-0.42$，$P<0.05$），而王颖等（2014）的相关性分析中虽然浮游甲壳动物与透明度呈负相关但差异性并不显著，这可能与本次调查时间在 8 月份有关，夏季水体透明度主要受蓝藻水华暴发的影响，因此浮游动物密度、生物量和种类数均与透明度呈显著负相关，表明透明度越低叶绿素水平越高，可供浮游动物食用的浮游植物越多。同时浮游植物的生长需要营养，其中氮、磷最为重要，这两种营养元素往往决定着浮游植物产量的高低，也就间接决定着浮游动物数量的多寡（袁雅琴等，2017）。本次调查中浮游动物密度和生物量均与总氮、总磷呈显著正相关，说明丰富的营养盐为可为浮游植物的生长提供充足的养分基础，进而间接的增加了浮游动物的密度与生物量。

3.4　浮游动物密度与生物量分布特征

太湖不同湖湾由于自然风貌与人类活动差异导致浮游动物在地理分布上呈现一定的区域性，其中竺山湾的浮游动物平均密度最大，其次是贡湖湾、梅梁湾，胥口湾的浮游动物密度最低。

竺山湾浮游动物平均密度最大，可能是由于竺山湾丰富的氮、磷营养盐为浮游植物的生长繁殖提供丰富的营养基础，导致夏秋季节水体易暴发蓝藻水华，因此该湖湾叶绿素 a 浓度也最高（147.86 μg/L），虽然蓝藻不能被浮游动物直接牧食，但蓝藻死后产生的大量有机碎屑以及滋生的大量细菌和原生动物可作为浮游动物的食物（王颖等，2014），因此竺山湾的浮游动物的密度最高。梅梁湾、贡湖湾水体富营养化程度仅次于竺山湾，且叶绿素 a 含量与竺山湾差异不显著，因而梅梁湾和贡湖湾浮游动物密度仅低于竺山湾，但贡湖湾浮游动物密度主要以个体较小的轮虫占优势（52%），因此贡湖湾浮游动物生物量低于梅梁湾。

水生植物丰富的胥口湾浮游动物密度最低可能是以下原因造成的。首先，水生植物可对水体中的氮、磷进行吸收利用（Engelhardt & Ritchie，2001），同时水生植物可通过降低对底泥的扰动（Ogilvie & Mitchell，2010）从而降低沉积物向水体中释放氮磷，间接抑制浮游植物的生长（王颖等，2014），因此，胥口湾的叶绿素 a 含量仅为 7.16 mg/L；其次，水生植物的生长使得胥口湾的浊度仅有 31.25 NTU，说明水体中的悬浮颗粒物含量很低，远低于竺山湾、梅梁湾和贡湖湾；虽然水生植物为胥口湾的浮游动物提供天然庇护所，但由于浮游动物受牧食的限制，其密度和生物量全湖最低。

西太湖浮游动物密度仅高于胥口湾，可能是由于西太湖湖岸线广阔平缓，更易受风浪影响使沉积物再悬浮，促进沉积物中氮、磷的释放，为浮游植物生长提供充足的养分，因此西太湖的叶绿素 a 浓度高于胥口湾；同时由于风浪扰动，西太湖水体透明度下降，浮游动物的摄食效率下降，导致其密度较低。由于西太湖浮游动物群落组成以体型较大的桡足类

和枝角类占优势，虽然其密度较低（63个/L），但生物量（3.22 mg/L）却高于南太湖（2.87 mg/L）和东太湖（1.98 mg/L）。

3.5 排序轴对物种分化的解释

CCA排序较好地解释了物种与环境之间的内在联系，同时通过排序手段研究物种分布与生态环境的关系，能够揭示它们在不同环境因子（非生物的和生物的）上的生态分化现象（栾青杉等，2007）。由图5可以看出裂足臂尾轮虫、镰状臂尾轮虫、长额象鼻溞、长肢秀体溞和多刺裸腹溞在排序图中的位置比较近，表明它们的生态适应性较为相似，如排序图中位置较近的裂足臂尾轮虫和镰状臂尾轮虫均为东太湖的优势种，其平均密度分别为3.19个/L和4.33个/L，但这两个物种在与东太湖水质有显著差异的竺山湾密度同步降低，分别为1.11个/L和1.82个/L；而同属臂尾轮虫属的剪形臂尾轮虫相较裂足臂尾轮虫、镰状臂尾轮虫在排序图上的位置较远，同时剪形臂尾轮虫在排序图上的分布与营养盐水平呈显著正相关，是典型的污染指示种，其在富营养化程度最高的竺山湾的密度达到6.47个/L，但其在水质状况较好的胥口湾的平均密度只有0.21个/L，该物种在太湖不同湖区的分布状况与裂足臂尾轮虫和镰状臂尾轮虫有明显差异，说明剪形臂尾轮虫相比其他两种对环境资源的依赖不同。根据pH值的不同侯磊等（2011）将轮虫分为碱水性种类、兼性种类和酸水性种类，此外宋玉珍等（1997）研究表明，在pH值7.0以上的微碱性或碱性水体中轮虫种类减少，但每种的数量较多，本次调查中螺形龟甲轮虫、针簇多肢轮虫、长三肢轮虫、异尾轮虫、大肚须足轮虫和无节幼体与pH值的相关性较强，说明它们在太湖各湖区的分布主要受水体酸碱度的影响。萼花臂尾轮虫、剪形臂尾轮虫和蚤状溞多被认为是富营养水体的指示物种（沈振华等，2016；周晓梅，2010；王凤娟等，2006），本次调查中，萼花臂尾轮虫、剪形臂尾轮虫、卜氏晶囊轮虫、月形腔轮虫、蚤状溞和温剑水蚤的分布与营养盐水平呈显著正相关，该结果与陈光荣等（2008）等对惠州西湖的研究结果相一致。沈振华等（2016）认为曲腿龟甲轮虫也是污染指示种之一，本次调查结果显示，曲腿龟甲轮虫的分布主要与水体浊度有关，这可能是由于该季节水体营养盐浓度较高使水体浮游植物数量增多，进而表现为水体浊度增加。本研究通过对物种与环境的CCA排序可以更加直观的展现出物种的所适生境，以及影响不同物种分布的主要的环境变量。

参考文献

白国栋，1962. 五里湖1951年湖泊学调查-4：浮游动物[J]. 水生生物学集刊，2：93-100.

鲍建平，陈辉，1983. 太湖的浮游动物[J]. 淡水渔业，(6)：33-38.

陈光荣，钟萍，张修峰，等，2008. 惠州西湖浮游动物及其与水质的关系[J]. 湖泊科学，20(3)：351-56.

陈雪梅，1981. 淡水桡足类生物量的测算[J]. 水生生物学报，(3)：397-408.

国家环境保护总局，2002. 水和废水监测分析方法（第4版）[M]. 北京：中国环境科学出版社.

侯磊，王庆，杨宇峰，2011. 珠江广州河段轮虫群落结构特征与水质生态学评价[J]. 暨南大学学报（自然科学与医学版），32(3)：311-18.

蒋燮治，1955. 五里湖的枝角类[J]. 水生生物学报，(2)：97-114.

蒋燮治，堵南山，1979. 中国动物志，节肢动物门，甲壳纲，淡水枝角类[M]. 北京：科学出版社.

金相灿，1995. 中国湖泊环境[M]北京：海洋出版社.

李娣，李旭文，牛志春，等，2014. 太湖浮游动物群落结构调查[J]. 安徽农业科学，42(29)：10173-74.

李娟，温周瑞，李庚辰，等，2014. 太湖梅梁湾和贡湖湾浮游甲壳动物群落结构及其与环境因子的相互关系[J]. 长江流域资源与环境，23(Z1)：81-90.

李强，田华，姜民，等，2015. 淀山湖浮游动物群落结构特征及其影响因子[J]. 水生态学杂志，36(4)：69-77.

李一平，严莹，韩广毅，2005. 太湖水质时空相关性分析[J]. 河海大学学报：自然科学版，33(5)：505-08.

刘恩生，吴林坤，曹萍，等，2005. 太湖鱼类渔获量和优势种年龄组成的变化规律及下行效应分析[J]. 安徽农业大学学报，32(4)：471-77.

栾青杉，孙军，宋书群，2007. 长江口夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 植物生态学报，31(3)：445-50.

秦伯强，2004. 太湖水环境演化过程与机理[M]北京：科学出版社.

沈振华，杨建忠，徐雪英，等，2016. 太湖控藻围隔内浮游动物的群落结构特征及水质评价[J]. 贵州农业科学，44(10)：144-48.

舒婷婷，孙颖，李静，等，2012. 玄武湖轮虫夏季水平分布及其与环境因子的关系[J]. 长江流域资源与环境，21(S1)：40-45.

宋玉珍，马正学，1997. 黄河兰州段浮游动物调查[J]. 甘肃科学学报，9(3)：78-81.

王凤娟，胡子全，汤洁，2006. 用浮游动物评价巢湖东湖区的水质和营养类型[J]，生态科学，25(6)：550-53.

王家楫，1961. 中国淡水轮虫志[M]. 北京：科学出版社.

王颖，杨桂军，秦伯强，等，2014. 太湖不同生态类型湖区浮游

甲壳动物群落结构季节变化比较[J].湖泊科学，26(5)：743－50.

杨桂军，秦伯强，高光，等，2008. 太湖不同湖区轮虫群落结构季节变化的比较研究[J].环境科学，29(10)：2963－69.

杨丽丽，周小玉，刘其根，等，2011. 新疆乌伦古湖浮游甲壳动物的季节演替及与环境因子的关系[J].生态学报，31：4468－76.

杨宇峰，黄祥飞，1992. 鲢鳙对浮游甲壳动物群落结构的影响[J].湖泊科学，4(3)：78－86.

袁雅琴，周春丽，高海燕，等，2017. 太湖典型入湖河流莲花荡浮游动物群落的季节演替及其环境指示意义初步研究[J].动物学杂志，52(5)：812－23.

赵文，2005. 水生生物学[M].北京：中国农业出版社.

中国科学院中国动物志委员会，1999. 中国动物志，节肢动物门 甲壳纲 淡水桡足类[M]. 北京：科学出版社.

周晓梅，2010. 滴水湖及其外围水体浮游动物群落结构比较研究[D].上海：上海师范大学.

Lijing Chen，Qiao Liu，Ziran Peng，et al. 2012. Rotifer community structure and assessment of water quality in Yangcheng Lake[J].Chinese Journal of Oceanology and Limnology，30(1)：47－58.

K A M Engelhardt，M E Ritchie，2001. Effects of macrophyte species richness on wetland ecosystem functioning and services[J].Nature，411(6838)：687－9.

Luigi Naselli Flores，Rossella Barone，1998. Phytoplankton dynamics in two reservoirs with different trophic state (Lake Rosamarina and Lake Arancio，Sicily，Italy)[J]. Hydrobiologia，369－370：163－78.

Lopes Maria Rosélia Marques，Carlos E. De M. Bicudo，M. Carla Ferragut，2005. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir，southeast Brazil[J].Hydrobiologia，542(1)：235－47.

K Muylaert，K Sabbe，W Vyverman，2000. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde，Belgium)[J].Estuarine Coastal & Shelf Science，50(5)：673－87.

Ogilvie Brett G.，Stuart F. Mitchell，2010. Does sediment resuspension have persistent effects on phytoplankton Experimental studies in three shallow lakes[J]. Freshwater Biology，40(1)：51－63.

Radke J. Robert，Kahl Uwe，2010. Effects of a filter-feeding fish[silver carp，Hypophthalmichthys molitrix (Val.)] on phyto-and zooplankton in a mesotrophic reservoir：results from an enclosure experiment[J].Freshwater Biology，47(12)：2337－44.

Ter Braak Cajo J. F. ，1986. Canonical correspondence analysis：A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis[J].Ecology，67(5)：1167－79.

Yang G.，Zhong C.，Pan H.，2009. Comparative studies on seasonal variations of metacrustaceans in waters with different eutrophic states in Lake Taihu[J]. Environmental Monitoring and Assessment，150：445－53.

Yang GJ，BQ Qin，XM Tang，2012. Characterization of crustaceans communities in waters with different eutrophic states in a large，shallow，eutrophic freshwater lake (Lake Taihu，China)[J]. Fresenius Enviromental Bulletin，21(3)：534－42.

（责任编辑　张俊友　郑金秀）

Canonical Correspondence Analysis Between Zooplankton Community Structure and Environmental Factors in the Littoral Zone of Taihu Lake

WEN Chao-nan[1,2], HUANG Wei[2], CHEN Kai-ning[2,3], WEI Zhong[1], WU Tao[4]

(1.Anhui Agricultural University, Hefei 230036, 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;
3.Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology & Material, Suzhou 215009, P.R.China;
4.Tianjin Hydraulic Research Institute, Tianjin 300061, P.R.China)

Abstract: Taihu Lake is one of the five largest freshwater lakes in China. Eutrophication in Taihu Lake has become increasingly serious since the late 1970s and early 1980s, and this problem is now receiving increased attention. Zooplankton are sensitive to pollution, and the community structure and distribution of zooplankton vary with nutritional status. In this paper, we investigated the zooplankton community structure and water quality status at 130 sites in seven areas of Taihu Lake in August 2016. The relationship between zooplankton community structure and environmental factors was studied using canonical correspondence analysis (CCA). The study aimed to provide theoretical support for eutrophication control and ecological restoration in Taihu Lake. The zooplankton community structure was characterized by zooplankton species composition, density, biomass, species diversity index and species richness index. Water quality parameters including pH, water temperature (T), dissolved oxygen (DO), Secchi disk depth (SD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), ammonia nitrogen (NH_4^+), phosphate (PO_4^{3-}), and chlorophyll a (Chl-a) were used to evaluate the eutrophication degree of Taihu Lake. The overall water quality in riparian zones of the different areas of Taihu Lake was inferior to Class V. The average values of TN and TP were (2.06±0.13) mg/L and (0.22±0.02) mg/L respectively, and the average content of Chl-a was (65.35±9.09) mg/L. A total of 29 zooplankton species were observed in the survey, including 5 species of copepods, 8 species of cladocera, and 16 species of rotifers. The mean density of zooplankton in Taihu Lake was (100±11) ind/L, with the maximum density of (273±54) ind/L in Zhushan Bay and the minimum density of (31±6) ind/L in Xukou Bay. The mean biomass of zooplankton in Taihu Lake was (4.45±0.99) mg/L, with the highest density of (17.70±6.48) mg/L in Zhushan Bay, and the lowest density of (1.03±0.23) mg/L in Xukou Bay. Correlation analysis shows that zooplankton characterization indices all had significant positive correlation with Chl-a. The results of CCA show that the community structure of zooplankton was significantly related to dissolved TN, TP, SD, DO and pH.

Keywords: zooplankton; community structure; environmental factors; canonical correspondence analysis; Taihu Lake