

冬季巢湖西半湖的富营养化及污染状况研究 ——基于浮游藻类的多样性分析

李梦¹, 刘桂建², 吴蕾², 刘荣琼², 汪家权¹

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009;
2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026)

摘要:通过网格采样法对冬季巢湖西半湖浮游藻类进行科学采集,运用多种方法对浮游藻类的叶绿素含量、个体数量以及群落结构进行了测试、分析与鉴定,补充了巢湖水体中浮游藻类的多样性资料,系统研究了浮游藻类的分布特征。结果表明,浮游藻类叶绿素含量与藻密度呈正相关,两者分布都呈现由河流入湖口和湖中岛屿附近水体向周边降低的变化趋势。浮游藻类群落以蓝藻门为优势门,优势属主要包括微囊藻属、裸藻属、小球藻属、直链藻属和鱼腥藻属。结合多种生物评价方法,如叶绿素含量评价、特征性藻类污染指数评价和藻类群落的多样性指标(Margalef 丰度指数、Shannon Weaver 多样性指数、Lloyd Ghelardi 均匀度指数和优势度指数)评价,对冬季巢湖西半湖的富营养化和污染状况进行了评估。结果表明,巢湖西半湖水体冬季总体处于中度营养和轻度污染的状态,河流入湖口湖区和湖中岛屿附近水体的富营养化和污染程度较高。

关键词:巢湖西半湖;冬季;浮游藻类;多样性;富营养化;污染

中图分类号:X17 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2015.02.009

引用格式: Li Meng, Liu Guijian, Wu Lei, et al. Eutrophication and water quality characteristics of Western Chaohu Lake in winter via planktonic alga diversity analysis[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015,45(2):150-158.

李梦,刘桂建,吴蕾,等. 冬季巢湖西半湖的富营养化及污染状况研究:基于浮游藻类的多样性分析[J]. 中国科学技术大学学报,2015,45(2):150-158.

Eutrophication and water quality characteristics of Western Chaohu Lake in winter via planktonic alga diversity analysis

LI Meng¹, LIU Guijian², WU Lei², LIU Rongqiong², WANG Jiaquan¹

(1. School of Resource and Environment Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Grid sampling method was employed to collect the planktonic alga from western half of Chaohu Lake in winter. The individuals, chlorophyll content and community structure of planktonic alga were determined and identified. The results show that positive correlation is observed between chlorophyll contents and alga density. Both chlorophyll contents and alga density decrease gradually from the estuaries

收稿日期:2014-10-03;修回日期:2014-11-21

基金项目:安徽省教育厅重大研究项目(KJ2013ZD07),安徽省环保科研项目(2013-005)资助。

作者简介:李梦,女,1989年生,硕士生。研究方向:环境科学。E-mail: lm11111112000@126.com

通讯作者:刘桂建,教授。E-mail: lgj@ustc.edu.cn

to other parts of the lake, and this tendency is also found in the vicinity of Gushan island, one of the islands in the lake. The predominant phylum is Cyanophyta, and the dominant species include *Microcystis*, *Euglena*, *Chlorella*, *Melosira* and *Anabaena*. Moreover, the contamination status and the degree of eutrophication in the lake were evaluated by using various biological assessment methods including chlorophyll content, index of chlorophyll contents, index of special planktonic alga, and diversity indexes (Shannon-weaver, evenness, abundance and dominance). The results indicate that the western half lake is moderately nutritional and lightly contaminated, and that an elevated degree of eutrophication and contamination is observed in the estuaries of the lake and the vicinity of the island.

Key words: Western Chaohu Lake; winter; phytoplankton; diversity; eutrophication; contamination characteristics

0 引言

湖泊营养化问题一直是国内外广泛关注的热点问题^[1-3]. 巢湖是安徽省重要的供给水源地之一, 但其长期受到南淝河和十五里河等河流的工业和农业污水的排入影响^[4], 导致水体的污染较为严重, 并可能长期威胁着巢湖流域人民的饮食健康. 过去许多研究者^[5-7]根据 N 和 P 等营养元素、重金属和有机污染物的含量及其与气象条件的关系, 对巢湖的富营养化和污染来源进行了深入的讨论. 近来, 有些学者利用某些藻类对营养物和污染物的极为敏感性来判断水体的富营养化和污染程度, 而这些特征性的藻类常作为水体营养化和污染的生物指示剂^[8-9]. 还有些学者^[10-14]通过比较水华发生时期浮游藻类的生物量、叶绿素含量和群落结构, 并结合水质和气象条件综合分析, 初步判断水质富营养化和污染状况. 如孟小丽等^[14]对巢湖春夏季的浮游藻类的季节性变化进行了研究, 并分析了富营养化对藻类的影响. 研究表明^[15], 西半湖富营养化情况和污染情况比东半湖更严重. 对于巢湖西半湖冬季浮游藻类多样性分布的研究还鲜有报道. 此外, 季节和气候变化也可能是浮游藻类种类和数量变化的原因之一. 研究发现冬季由于水温较低, 导致生物体代谢速度较慢且生长受到抑制, 浮游藻类的个体数量处于较低水平^[13], 种类也与春、夏等生长旺盛时期不同^[16]. 因此, 本次研究主要针对巢湖西半湖区冬季湖中浮游藻类群落结构进行分析, 补充了巢湖水体中浮游藻类多样性资料, 并利用特征性污染藻类和多样性指标等多种分析方法综合判定巢湖西半湖水体的富营养化状态和污染状况, 以期通过调整群落结构、控制污染性藻类的生长、控制富营养化和污染较重区域的水体水质恶化等方法来控制水质恶化的进一

步研究提出一些科学的理论依据.

1 采样与方法

1.1 采样点的布置

本次研究于 2014 年 1 月 5~6 日对巢湖西半湖区进行浮游藻类的采样和水质参数的现场测定, 根据巢湖主要河流入湖口、湖区标志点采用网格布点法对巢湖西半湖布置了 20 个采样点. 其中主要河流入湖口采样点有 1, 2, 4, 7, 8, 11, 19 号采样点, 分别为塘西河、派河、杭埠河、十五里河、南淝河、白石天河和兆河入湖口湖区; 岛屿附近采样点有 3 号(孤山西)和 5 号(孤山); 湖区标志采样点有 9 号(湖心)、10 号(湖滨)、13 号(中庙)、20 号(花塘); 6 号、12 号、14~18 号采样点都为补充设置的湖区采样点. 具体的采样点分布与位置如图 1 及表 1 所示.

1.2 浮游藻类的采集

本次浮游藻类定性样品的采集过程是使用 25 号浮游植物网在巢湖水体水面至水面下 0.5 m 进行 3~5 min 来回拖动, 对水体中的浮游藻类进行捞取并进行鲁戈氏液(40 g I₂ 溶解于含 60 g KI 的 1 000 mL 水溶液中制成)固定后装入样品瓶中. 浮游藻类定量样品的采集过程是用有机玻璃采水器在水面下 0.5 m 处采取 1 L 的水样后加入 10~15 mL 鲁戈氏液固定后装入样品瓶中. 回实验室后将样品瓶中水样摇匀, 静止 24 h 后, 去上清液浓缩, 用上清液洗涤瓶壁几次后的洗涤液并剩余沉淀物转入 30 mL 容量瓶进行定容混匀后, 置于容量为 0.1 mL 的浮游植物计数框内在 10×40 倍光学显微镜下进行辨种计数, 可以得到浮游藻类的种类和个体数量. 浮游藻类的采样和分类的方法参考《中国淡水藻类——系统、分类及生态》^[17]等.

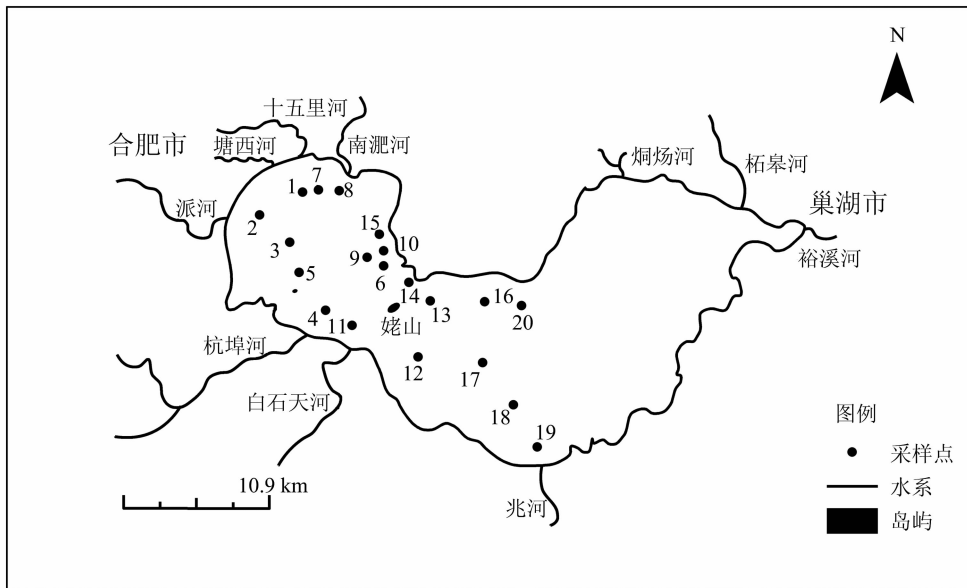


图 1 巢湖西半湖采样点分布图

Fig. 1 Map of the sampling sites in Western Chaohu Lake, China

表 1 巢湖西半湖采样点位置与采样日期表

Tab. 1 The sampling locations and sampling dates in Western Chaohu Lake

序号	纬度	经度	采样日期
1	31°40.452'	117°21.646'	6
2	31°39.718'	117°19.150'	6
3	31°37.923'	117°21.087'	6
4	31°34.206'	117°22.399'	6
5	31°36.289'	117°21.331'	6
6	31°35.8824'	117°25.839'	5
7	31°40.522'	117°22.293'	6
8	31°40.537'	117°23.546'	6
9	31°36.632'	117°25.236'	5
10	31°36.900'	117°26.195'	5
11	31°33.262'	117°23.952'	6
12	31°31.026'	117°26.631'	6
13	31°34.222'	117°28.358'	5
14	31°35.118'	117°27.565'	5
15	31°38.013'	117°25.892'	5
16	31°33.771'	117°31.431'	5
17	31°30.557'	117°30.111'	6
18	31°28.803'	117°31.975'	6
19	31°27.103'	117°34.245'	6
20	31°33.317'	117°34.087'	5

1.3 水质参数的测定和评价方法

现场用多参数水质检测仪 (YSI-EXO2) 测定水面下至 0.5 m 深处水温、pH、溶解氧、藻密度和叶绿素含量等指标参数。

浮游藻类多样性指标参数是从多种角度综合反映浮游藻类群落结构的结构组成和生存状态的参数, 主要包括 Margalef 丰度指数、Shannon Weaver 多样性指数、Lloyd Ghelardi 均匀度指数和优势度指数, 其参数值可以反映湖泊生态系统的状况, 间接反映水体富营养化和污染水平, 是现在比较常用的研究水生生物群落和评价水质状况的指标之一。浮游藻类多数种类如蓝藻门 (Cyanophyta) 和绿藻门 (Chlorophyta) 藻类可以以体内叶绿素进行光合作用, 故常用浮游藻类体内的叶绿素含量作为评价指标来评价浮游藻类的生存状态, 进一步反映水体的富营养化和污染状况。在水体富营养化的判定方面, 美国环保局曾对水体中的叶绿素含量进行分级从而判定水体营养类型^[18]。之后, 日本的研究者^[18]进行了修正, 在叶绿素含量的前提下提出了新的营养状态指数 TSI_m ($TSI_m = 10(2.46 + \ln Chl_a / \ln 2.5)$) 作为判别因子, 并划定了判定标准。在污染程度的判定方面, Palmer 等^[18]对污染水体中的浮游藻类进行研究, 发现适宜污染水体的生活、能耐受污染的 20 属污染特征藻类, 如组囊藻属 (*Anacystis*)、纤维藻属 (*Ankistrodesmus*)、衣藻属 (*Chlamydomonas*)、小球藻属 (*Chlorella*)、新月藻属 (*Closterium*)、小环藻属 (*Cyclotella*)、裸藻属 (*Euglena*)、异极藻属 (*Gomphanoma*)、鳞孔藻属 (*Lepocinclis*)、直链藻属 (*Melosira*)、微囊藻属 (*Microcystis*)、舟形藻属 (*Navicula*)、菱形藻属 (*Nitzschia*)、颤藻属

(*Oscillatoria*)、实球藻属(*Pandorina*)、席藻属(*Phormidium*)、扁裸藻属(*Phacus*)、栅藻属(*Scenedesmus*)、毛枝藻属(*Stigeoclonium*)、针杆藻属(*Synedra Ehr.*)等藻类,根据这些藻类的耐受性给予它们不同的污染指数值,然后根据出现的藻类的种类计算总的污染指数,判定水体环境的污染状况。

故基于上述研究,本次冬季巢湖西半湖区水体富营养化和污染评价采用群落多样性指标评价法(Margalef 丰度指数、Shannon Weaver 多样性指数模式、Lloyd Ghelardi 均匀度指数和优势度指数),特征污染藻类指数法和叶绿素含量和修正营养状态指数评价法。

2 结果与分析

2.1 水质参数的变化

2.1.1 水质参数测定结果

巢湖西半湖冬季水体温度较低,约 $5\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$;pH值均大于7,略碱性;溶解氧含量在 $12.24\sim 14.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,处于较高水平.由图2(a)和(b)可知,各采样点叶绿素的浓度在 $1.61\sim 20.94\text{ }\mu\text{g/L}$,孤山西采样点($21.5\text{ }\mu\text{g/L}$)>孤山($20.37\text{ }\mu\text{g/L}$)和塘西河采样点($20.94\text{ }\mu\text{g/L}$)>杭埠河($17.53\text{ }\mu\text{g/L}$)>其他河流入湖口采样点($8.05\sim 14.03\text{ }\mu\text{g/L}$)>其他标志点和补充采样点($1.61\sim 14.09\text{ }\mu\text{g/L}$);藻密度的变化范围是 $57\times 10^4\sim 217\times 10^4$ 个/L,孤山采样点(217×10^4 个/L)>孤山西采样点(213×10^4 个/L)和湖滨采样点(203×10^4 个/L)>塘西河(189×10^4 个/L)和

十五里河采样点(183×10^4 个/L)>其他河流入湖口采样点($101\times 10^4\sim 124\times 10^4$ 个/L)>其他标志点和补充采样点($58\times 10^4\sim 127\times 10^4$ 个/L).因此,叶绿素和藻密度在各采样点的变化均呈现西半湖区由西北向东南方向降低,由河流入湖口和湖中岛屿附近水体向其他湖区水体降低的变化趋势。

2.1.2 水质参数之间的相关性

本次研究运用SPSS19.0软件对巢湖西半湖20个采样点的水质参数进行了Pearson相关性分析,并对相关性分析结果的显著性在95%的置信区间进行了双侧检验,结果如表2所示.巢湖西半湖冬季的各水质参数之间存在良好的相关性,其中浮游藻类的藻密度和叶绿素含量之间呈正相关关系,两者都与水体温度呈负相关关系,与pH和溶解氧呈正相关关系。

表2 巢湖西半湖水水质参数之间相关关系

Tab.2 The relationship between water quality parameters in Western Chaohu Lake

相关性数值	藻密度	叶绿素含量
藻密度	—	0.864**
叶绿素含量	0.864**	—
水体温度	-0.494*	-0.601**
pH	0.670**	0.765**
溶解氧	0.686**	0.735**

注: $n=20$,**为在 $p<0.01$ 水平(双侧)上显著相关,*为在 $p<0.05$ 水平(双侧)上显著相关。

2.2 浮游藻类的组成、数量和多样性

2.2.1 藻类的种类和组成

根据鉴定,巢湖西半湖区浮游藻类共计7门23

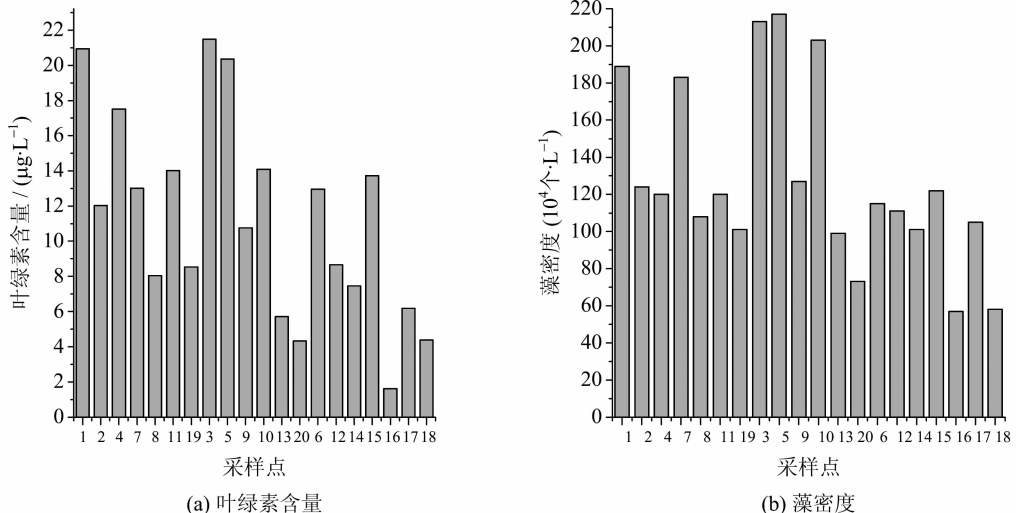


图2 巢湖西半湖各采样点叶绿素和藻密度变化图

Fig.2 Map of the chlorophyll and the density of algae at each sampling site in Western Chaohu Lake

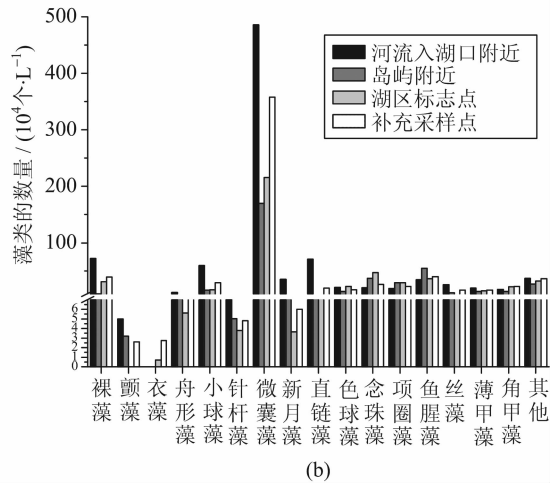
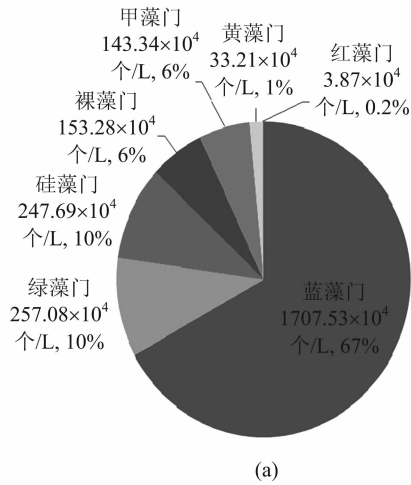


图 3 巢湖西半湖浮游藻类分门属数量统计图

Fig. 3 The statistics of the number of phytoplankton genus in Western Chaohu Lake

属 61 种(表 3),其中蓝藻门的种类最多,为 7 属 23 种,占 38%,其次为绿藻门(5 属 12 种,占 20%)和硅藻门(6 属 12 种,占 20%),相对较少的是裸藻门(1 属 5 种,占 8%)、甲藻门(2 属 4 种,占 6%)、黄藻门(1 属 4 种,占 6%)和红藻门(1 属 1 种,占 2%)。

表 3 巢湖西半湖主要浮游藻类种类组成表

Tab. 3 The species composition of phytoplankton in Western Chaohu Lake

门	属	种	占总种数比例/%
蓝藻门 Cyanophyta	7	23	38
裸藻门 Euglenophyta	1	5	8
黄藻门 Xanthophyta	1	4	6
硅藻门 Bacillariophyta	5	12	20
绿藻门 Chlorophyta	6	12	20
红藻门 Rhodophyta	1	1	2
甲藻门 Pyrrophyta	2	4	6
合计	23	61	100

2. 2. 2 各种类的数量分布

本次研究分别以门为单位对西半湖浮游藻类总体和以属为单位对各采样点的冬季浮游藻类进行了个体数量的统计,结果如图 3 所示. 数量最多的藻门为蓝藻门(67%),是优势藻门,其次为绿藻门(10%)和硅藻门(10%),较少的藻门是裸藻门(6%)、甲藻门(6%)、黄藻门(1%)和红藻门(0.2%)。不同采样点的浮游藻类组成有所差异,微囊藻属(蓝藻门)在整个湖区数量远远超过其他藻属,是绝对优势藻属,其在河流入湖口附近的数量远高于其他湖区,岛屿附近的微囊藻属数量最少;裸藻属(裸藻门)、小球藻属(绿藻门)、直链藻属(硅藻门)和鱼腥藻属(蓝藻

门)数量较大,也可判断为优势藻属,其他藻属数量较少或在湖区水体中分布不均;适宜在污染水体中生活的污染特征性藻类如裸藻属(裸藻门)、颤藻属(蓝藻门)、衣藻属(绿藻门)、舟形藻属(硅藻门)、小球藻属(绿藻门)、微囊藻属(蓝藻门)、新月藻属(绿藻门)和直链藻属(硅藻门)藻类^[18]的数量分布基本符合河流入湖口附近>岛屿附近和湖区补充采样点>湖区标志点的规律。

2. 2. 3 多样性指标变化

如图 4 所示,巢湖西半湖冬季各采样点的 Shannon Weaver 多样性指数为 2.02~3.26,最高

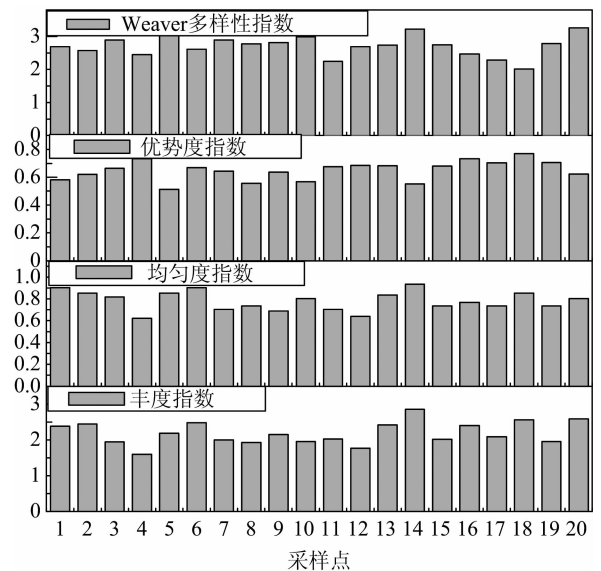


图 4 巢湖西半湖浮游藻类多种指标变化图
Fig. 4 Diversity indexes of phytoplankton in Western Chaohu Lake

值出现在 20 号花塘采样点, 18 号湖区采样点的多样性指数最低, 根据多样性指数大于 3 为清洁环境、2~3 为轻度污染的判别标准可以判断西半湖总体为轻度污染, 湖区标志点和补充采样点中个别为清洁环境. 各采样点 Margalef 丰度值为 1.59~2.85, 14 号湖区采样点的丰度值最高, 最低值为 4 号杭埠河入湖口采样点. Lloyd Ghelardi 均匀度为 0.6~0.9, 1 号塘西河入湖口和 6 号湖心偏东南采样点的均匀度值均大于 0.9, 而 4 号杭埠河入湖口采样点和 12 号湖区西南采样点小于 0.7, 说明藻类群落结构层次明显, 优势种群的优势度比较平均, 集中在 0.5~0.8 之间. 在此特别说明的是本次研究参与计算的优势种属为微囊藻属、裸藻属和鱼腥藻属.

2.3 富营养化状态和污染程度

由表 4 可知, 巢湖西半湖冬季各采样点测得的叶绿素含量差别较大, 根据美国环保局划定的根据叶绿素含量评价水体营养化状态的标准^[18] (小于 4 为贫营养, 4~10 为中营养, 10 以上为富营养), 巢湖西半湖岛屿附近和大多数的河流入湖口附近采样点为富营养状态, 只有南淝河和兆河入湖口附近采样点为中营养状态, 湖区标志点和补充采样点营养状

表 4 巢湖西半湖各采样点富营养化状态指数和污染指数统计表

Tab. 4 The Statistics of eutrophication status and the degree of contamination in Western Chaohu Lake

采样点性质	采样点名称	叶绿素含量 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	营养状态指数	藻类污染指数
河流入湖口附近	南淝河入湖口	8.05	47.36	14
	十五里河入湖口	13.01	52.60	13
	塘西河入湖口	20.94	57.79	21
	派河入湖口	12.04	51.75	18
	杭埠河入湖口	17.53	55.85	15
	白石天河入湖口	14.03	53.42	16
岛屿附近	兆河入湖口	8.54	48.00	15
	孤山	20.37	57.49	21
湖区标志点	孤山西	21.5	58.08	14
	湖心	10.75	50.51	16
	湖滨	14.09	53.47	13
	中庙	5.72	43.63	19
	花塘	4.33	40.59	14
	湖心偏东南	12.96	52.55	21
补充采样点	湖区西南	8.66	48.15	13
	14 号湖区	7.46	46.53	20
	15 号湖区	13.73	53.18	12
	16 号湖区	1.61	29.79	18
	17 号湖区	6.19	44.49	13
	18 号湖区	4.38	40.71	19

态多为富营养和中营养, 只有 16 号湖区采样点为贫营养状态. 各采样点修正后的营养状态指数在 29.79~57.79 之间, 根据指数值小于 37 为贫营养、38~53 为中营养、大于 54 为富营养的判别标准, 可以知道岛屿附近和塘西河、杭埠河入湖口附近为富营养, 其余河流入湖口、湖区标志点和补充采样点均为中营养状态, 16 号湖区采样点为贫营养状态. 巢湖西半湖各采样点的藻类污染指数在 12~21 之间, 根据污染指数小于 15 为轻污染、15~19 为中污染、20 以上为重污染的判别标准, 河流入湖口附近、岛屿附近和补充采样点附近湖区都存在个别采样点重度和中度污染的情况, 其余采样点为轻度污染.

3 讨论

浮游藻类作为湖泊水体中重要的生命体, 其生活史受到水体中各项水质条件如温度、pH、溶解氧、营养盐和污染物浓度的影响, 其生长过程也会给水体带来一定的反作用. 巢湖西半湖冬季水体呈略碱性的状态, 有研究表明^[10], 碱性水体有利于沉积物中 N、P 等营养盐释放进入水体, 加重湖泊营养化的程度, 从而为蓝藻生长和大规模爆发提供了基础条件, 同时藻类生长和光合作用会反作用于水体的 pH, 在富营养化水体中, 随着藻类生长的旺盛, 水体的 pH 值也会显著增高. 藻类的生存和生长与水体中的溶解氧也有着密切的关系, 光合作用释放氧气增加溶解氧的含量, 呼吸作用和死亡分解又会消耗水体中的溶解氧. 巢湖西半湖冬季水体温度较低, 水生动植物多进入休眠期, 呼吸作用消耗的溶解氧减少; 死亡藻体分解已近尾期, 消耗溶解氧量也减少; 而部分新生和悬浮的越冬藻团在阳光的照射下进行光合作用产生氧气, 导致水体中的溶解氧含量本底值较高. 由上所述, 故本次研究发现巢湖西半湖冬季的浮游藻类和湖区温度、pH 和溶解氧等水质条件之间存在良好的相关性, 浮游藻类的藻密度和叶绿素含量之间呈正相关关系, 两者都与水体中 pH 和溶解氧呈正相关关系, 水温和溶解氧含量呈负相关关系, 这与缪灿等^[10]和夏爽等^[19]的研究是一致的. 而藻密度和叶绿素含量与水温呈负相关关系的可能原因是湖体中藻类的本底值较高, 而各采样点的水温差别较小.

巢湖西半湖冬季浮游藻类中优势门为蓝藻门, 其次为绿藻门和硅藻门. 有研究表明^[20], 在湖体富营养化和受到污染的环境下, 蓝藻门相对于其他藻

门藻类在吸收和利用无机碳以及对 N、P 等营养物质具有亲和力方面更具优势,而巢湖西半湖存在较多的 N、P 等营养物质,呈现明显的富营养化现象,这是导致巢湖西半湖蓝藻门藻类本底值较高的原因之一。除此之外,巢湖西半湖冬季浮游藻类蓝藻门的数量较大可能还与采样时湖区风浪较大,翻动水体导致底层水体和底泥中的大量越冬藻团进入上层水体有关。巢湖西半湖绿藻门的浮游藻类数量较大可能也是由于水体中存在较多营养物质和富营养化,绿藻门藻类可利用体内叶绿素吸收营养物质进行光合作用,从而导致生长旺盛,本底值较大。这与舒俭民等^[21]的研究一致,他们发现在中-富营养型和富营养型湖泊中,常见的藻类群落类型有绿藻-蓝藻型或绿藻-蓝藻-硅藻型。硅藻门的浮游藻类数量较多可能是受到冬季水体温度较低的影响,这与沈军等^[22]的研究是一致的。部分研究发现^[14,16],到了春夏季,随着水温逐渐升高,可进行光合作用的蓝藻和绿藻的生物量和密度迅速增长,在浮游藻类的群落结构中的比例快速增大,尤其是蓝藻会占据绝对优势地位,硅藻门所占比例会进一步下降。在优势种属方面,西半湖冬季浮游藻类绝对优势属是微囊藻属,优势属还有裸藻属、小球藻属、直链藻属和鱼腥藻属,这与缪灿等^[10]和杨丽标等^[12]对巢湖春夏季水华产生和爆发期的湖区浮游藻类优势种属的研究是一致的。

巢湖西半湖主要依靠地表径流补给,主要入湖河流包括南淝河、十五里河、派河、杭埠河、白石天河、兆河等。这些河流也可能是 N、P 等营养物质和污染物的主要输入通道。王书航等^[15]按不同的污染程度、是否河流入湖口和地理位置将巢湖西半湖自西向东分为重度污染区(南淝河、十五里河和塘西河入湖区)、中度污染区(湖心、中庙、杭埠河和派河入湖区)和轻度污染区(兆河入湖口),同时研究发现叶绿素、营养化程度随区域污染程度降低而降低,冬季巢湖的水质受营养盐和酸碱度的影响较大。李强等^[4]和郑志侠等^[6]研究发现,巢湖西半湖区沉积物中的营养盐和重金属含量也呈现西半湖河流入湖口向湖心处降低的趋势。另外,湖区中心的岛屿也可能受到人为活动的影响,因此将河流入湖口、岛屿附近与其他湖区进行分别研究,更能准确地体现巢湖西半湖冬季的富营养化和污染状况。本次研究将湖区分为河流入湖口附近、岛屿附近、湖区标志区和其他补充采样区,根据区域的不同对藻类的数量、特征藻类的

分布、富营养化和污染状况进行了研究,发现冬季绝对优势种属微囊藻属集中分布于河流入湖口附近,其他湖区分布较少;冬季污染特征性藻类的分布和特征指数判定结果符合河流入湖口附近>岛屿附近和湖区补充采样点>湖区标志点的规律;多样性指数判定结果和叶绿素含量判定结果也说明了冬季河流入湖口和岛屿附近的富营养化和污染状况劣于其他湖区。这些研究结果和前面所述的研究成果相一致,说明了巢湖西半湖冬季的富营养化和污染状态也是存在由河流入湖口和岛屿处向湖心处递减的规律,这与前面所述的藻类分布规律一致,也说明了冬季藻类的分布与水体中 N、P 等营养成分和污染物浓度密切相关。

水生生物的生存和繁衍与水体环境密切相关,其群落的组成、结构与多样性可以反映水生生态系统和水质的状况。本次研究采用的 3 种评价方法是根据上述的原理从浮游植物群落角度评价和判定水体的富营养化和污染状况,但 3 种评价方法多样性研究角度不同。多样性指标参数评价是从研究巢湖西半湖浮游藻类的组成、结构入手,分析不同藻门、藻属在该群落结构组成中的比重以及数量分布;叶绿素含量评价是分析含有叶绿素可进行光合作用的以蓝藻门和绿藻门为代表的浮游藻类的生存情况,其中蓝藻门是水体富营养化的直接反映者;污染指数评价是研究适宜在污染水体中生存,具有污染耐受性和污染特征值、能够反映水体污染状况的 20 属污染特征性藻类在巢湖西半湖水体中的数量和分布变化来揭示水体中的污染状况。三者的评价体系与标准不同,判定结果彼此之间大体相同、部分存在不同在所难免,与直接通过测试营养和污染物质含量评价的结果存在差异,还需要更进一步的研究。这 3 种评价方法是从生物群落角度评价水体富营养化和污染的常用方法,可作为参考的判断方法丰富水体富营养化和污染状况的评价方法体系。

4 结论

巢湖西半湖冬季浮游藻类叶绿素含量和藻密度之间呈正相关关系,在各采样点中的变化均呈现西半湖区由西北向东南方向、由河流入湖口和湖中岛屿附近水体向其他湖区水体降低的变化趋势,两者都与水体温度呈负相关,与 pH 和溶解氧呈正相关。

巢湖西半湖冬季浮游藻类共计 7 门 23 属 61 种,其中蓝藻门、裸藻门、硅藻门、绿藻门藻类居多,

黄藻门、红藻门、甲藻门藻类较少。优势种属主要有微囊藻属、裸藻属、小球藻属、直链藻属和鱼腥藻属。污染特征性藻类在河流入湖口附近和岛屿附近的分布数量大于其他部分湖区,非污染特征性藻类分布较为均匀。

巢湖西半湖冬季的浮游藻类群落特征为结构丰富、层次明显。由于人为活动的干扰和影响,西半湖冬季水体的富营养化状况总体处于中度营养和轻度污染状态,河流入湖口湖区和湖中岛屿附近水体的富营养化和污染程度高于其他湖区水体。

参考文献(References)

- [1] Chen Shuiyong, Wu Zhenming, Yu Weibo, et al. Formation, harmfulness, prevention, control and treatment of waters eutrophication[J]. Environmental Sciences & Technology, 1999, 2:11-152.
陈水勇,吴振明,俞伟波,等. 水体富营养化的形成、危害和防治[J]. 环境科学与技术, 1999, 2:11-152.
- [2] Ansari A A, Gill S S, Lanza G R, et al. Eutrophication: Causes, Consequences and Control [M]. New York: Springer, 2010:144.
- [3] Hu Z, Guo L, Liu T, et al. Uniformisation of phytoplankton chlorophyll a and macrophyte biomass to characterise the potential trophic state of shallow lakes [J]. Ecological Indicators, 2014, 37:1 - 9.
- [4] Li Qiang, Huo Shouliang, Wang Xiaowei, et al. Distribution and correlation of nutrients and particle size in surface sediments of Lake Chaohu and its inflow rivers [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2013, 3(2):147-155.
李强,霍守亮,王晓伟,等. 巢湖及其入湖河流表层沉积物营养盐和粒度的分布及其关系研究[J]. 环境工程技术学报, 2013, 3(2):147-155.
- [5] Sun Feiyue, Chen Yunfeng, Gao Liangmin. Study on the releasing regularity of nitrogen from sediment in Chao Lake [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2012, 14:200-201.
孙飞跃,陈云峰,高良敏. 巢湖底泥中氮释放规律研究[J]. 现代农业科技, 2012, 14:200-201.
- [6] Zheng Zhixia, Pan Chengrong, Ding Fan. Distribution and environmental pollution assessment of heavy metals in surface sediments of Chaohu Lake, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(1):161-165.
郑志侠,潘成荣,丁凡. 巢湖表层沉积物中重金属的分布及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 161-165.
- [7] Li Guolian, Liu Guijian, Jiang Mengmeng, et al. Partition characteristics and correlation of heavy metal between sediment and surface water from Chaohu Lake [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2011, 41(1):9-15.
李国莲,刘桂建,姜萌萌,等. 巢湖表层沉积物与上覆水体中重金属分配特征及其相关性研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2011, 41(1):9-15.
- [8] Smoot J C, Donald E L, Michella L, et al. Periphyton growth on submerged artificial substrate as a predictor of phytoplankton response to nutrient enrichment[J]. Journal of Microbiological Methods, 1998, 32:11-19.
- [9] Roman A D, Ekelund N G A. The use of epiphyton and epilithon data as a base for calculating ecological indices in monitoring of eutrophication in lakes in central Sweden[J]. The Science of the Total Environment, 2000, 248: 63-70.
- [10] Miao Can, Li Kun, Yu Guanjun. Analysis of phytoplankton chlorophyll-a concentration in summer and autumn in Chaohu Lake and the impact factors of cyanobacterial blooms[J]. Journal of Biology, 2011, 28(2):54-57.
缪灿,李堃,余冠军. 巢湖夏、秋季浮游植物叶绿素 a 及蓝藻水华影响因素分析[J]. 生物学杂志, 2011, 28(2): 54-57.
- [11] Li Kun, Xiao Pu. Temporal and spatial distribution of chlorophyll a concentration and its relationships with TN, TP concentrations in lake Chaohu[J]. Journal of Biology, 2011, 28(1):53-56.
李堃,肖莆. 巢湖叶绿素 a 浓度的时空分布及其与氮、磷浓度关系[J]. 生物学杂志, 2011, 28(1):53-56.
- [12] Yang Libiao, Han Xiaoyong, Sun Pu, et al. Canonical correspondence analysis of algae community and its environmental factors in the Lake Chaohu, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(5): 952-958.
杨丽标,韩小勇,孙璞,等. 巢湖藻类组成与环境因子典范对应分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 952-958.
- [13] Yang Dongfang, Chen Shengtao, Hu Jun, et al. Magnitude order of the effect of light, water temperature and nutrients on phytoplankton growth [J]. Marine Environmental Science, 2007, 26(3): 203-205.
杨东方,陈生涛,胡均,等. 光照、水温和营养盐对浮游植物生长重要影响大小的顺序[J]. 海洋环境科学. 2007, 26(3):203-205.
- [14] Meng Xiaoli, Deng Daogui, Zhang Sai, et al. Variations of phytoplankton in Chaohu Lake in spring and summer seasons [J]. Ecological Science, 2011, 20(2):189-194.
孟小丽,邓道贵,张赛,等. 巢湖春夏季节浮游植物的动

- 态变化[J]. 生态科学, 2011, 20(2): 189-194.
- [15] Wang Shuhang, Jiang Xia, Jin Xiangcan. Spatial-temporal variations of aquatic environmental factors and their influences to algal blooming in Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(6): 873-880.
王书航, 姜霞, 金相灿. 巢湖水环境因子的时空变化及对水华发生的影响[J]. 湖泊科学, 2011, 23(6): 873-880.
- [16] Feng Yanan, Xie Qiaoxiong, Yao Junjie, et al. Phytoplankton community structure and water quality evaluation in Luodian section of Longtan reservoir[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 14: 170-173.
冯亚楠, 谢巧雄, 姚俊杰, 等. 龙滩水库罗甸段浮游藻类群落结构与水质评价[J]. 广东农业科学, 2013, 14: 170-173.
- [17] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 302.
- [18] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京: 农业出版社, 1991: 12-170.
- [19] Xia Shuang, Zhang Qi, LIU Guoxiang, et al. Ecological influences of phytoplankton community in an experimental man-made lake[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2013, 37(4): 640-647.
夏爽, 张琪, 刘国祥, 等. 人工试验湖泊浮游藻类群落的生态学研究[J]. 水生生物学报, 2013, 37(4): 640-647.
- [20] He Kediao. Changes of environmental factors and phytoplankton distribution in the center of Yangzong Lake of Yunnan province[J]. Environmental Science Survey, 2010, 29(3): 36-38.
贺克雕. 云南省阳宗海湖心浮游藻类分布与环境因子的变化[J]. 环境科学导刊, 2010, 29(3): 36-38.
- [21] Shu Jianmin, Yang Rongjin, Meng Wei, et al. Study on effects of the air disaster on phytoplankton of wetland [J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(2): 100-103.
舒俭民, 杨荣金, 孟伟, 等. 空难对湿地浮游植物的影响[J]. 环境科学研究, 2006, 19(2): 100-103.
- [22] Shen Jun, Xu Renxin, Zhou Zhongze, et al. Study on winter phytoplankton diversity of Shengjin lake, Anhui [J]. Journal of Biology, 2009, 26(3): 16-18.
沈军, 许仁鑫, 周忠泽, 等. 安徽升金湖冬季浮游藻类多样性初步研究[J]. 杂志, 2009, 26(3): 16-18.

(上接第 122 页)

- [18] Wang L, Ge L, Rufford T E, et al. A comparison study of catalytic oxidation and acid oxidation to prepare carbon nanotubes for filling with Ru nanoparticles [J]. Carbon, 2011, 49(6): 2 022-2 032.
- [19] Mawhinney D B, Naumenko V, Kuznetsova A, et al. Infrared spectral evidence for the etching of carbon nanotubes; Ozone oxidation at 298 K [J]. Journal of the American Chemical Society, 2000, 122(10): 2 383-2 384.
- [20] Schmit K H, Wells M J M. Preferential adsorption of fluorescing fulvic and humic acid components on activated carbon using flow field-flow fractionation analysis [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2002, 4(1): 75-84.
- [21] Wu F C, Bai Y C, Mu Y S, et al. Fluorescence quenching of fulvic acids by fullerene in water [J]. Environmental Pollution, 2013, 172: 100-107.
- [22] Qu X, Alvarez P J J, Li Q. Impact of sunlight and humic acid on the deposition kinetics of aqueous fullerene nanoparticles (nC₆₀) [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(24): 13 455-13 462.
- [23] Wang L F, Wang L L, Ye X D, et al. Coagulation kinetics of humic aggregates in mono- and di-valent electrolyte solutions [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(10): 5 042-5 049.
- [24] Ross P D, Subramanian S. Thermodynamics of protein association reactions: Forces contributing to stability [J]. Biochemistry, 1981, 20(11): 3 096-3 102.
- [25] De M, You C C, Srivastava S, et al. Biomimetic interactions of proteins with functionalized nanoparticles: A thermodynamic study [J]. Journal of the American Chemical Society, 2007, 129(35): 10 747-10 753.
- [26] Lindman S, Lynch I, Thulin E, et al. Systematic investigation of the thermodynamics of HSA adsorption to N-iso-propylacrylamide/N-tert-butylacrylamide copolymer nanoparticles. Effects of particle size and hydrophobicity [J]. Nano Letters, 2007, 7(4): 914-920.