

太湖大型水生植物分布特征及其对湖泊营养盐的影响

雷泽湘^{1,2}, 徐德兰³, 顾继光², 刘正文^{2,4}

(1.仲恺农业技术学院环境科学与工程系, 广东 广州 510225; 2.暨南大学水生生物研究所, 广东 广州 510632; 3.徐州工程学院环境工程系, 江苏 徐州 221008; 4.中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

摘要:运用野外调查方法,于2004年5月和9月,对太湖32个点的水生植物进行了环湖调查,发现沉水植物主要有:马来眼子菜(*Potamogeton malaianus*)、微齿眼子菜(*Potamogeton maackianus*)、伊乐藻(*Elodea nuttallii*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、苦草(*Vallisneria spiralis*)、穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)等;浮叶植物主要有:荇菜(*Nymphoides peltatum*)、金银莲花(*Nymphoides indica*)和野菱(*Trapa quadrispinosa*)等;进一步分析了大型水生植物对太湖湖水和沉积物的营养盐的影响。结果表明,太湖大型水生植物生长与分布对其水体中N、P营养盐有显著影响。有草区上覆水中TP含量(5月、9月分别为0.067、0.050 mg·L⁻¹)和沉积物中TP含量(5月为0.399 mg·g⁻¹)显著低于无草区(水体分别为0.133、0.129 mg·L⁻¹;沉积物为0.513 mg·g⁻¹);有草区沉积物中的氮(0.010 mg·g⁻¹)和有机质(分别为7.402、6.502 mg·g⁻¹)要高于对照(氮0.007 mg·g⁻¹;有机质5月、9月分别为5.755、5.455 mg·g⁻¹)。方差分析结果差异显著,表明太湖大型水生植物对富营养化湖水和沉积物营养盐具有一定的调控作用。

关键词:太湖;水生植物;营养盐;氮、磷;沉积物

中图分类号:X173 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)02-0698-07

Distribution Characteristics of Aquatic Macrophytes and Their Effects on the Nutrients of Water and Sediment in Taihu Lake

LEI Ze-xiang^{1,2}, XU De-lan³, GU Ji-guang², LIU Zheng-wen^{2,4}

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Technology, Guangzhou 510225, China; 2. Institute of Hydrobiology of Jinan University, Guangzhou 510632, China; 3. Department of Environmental Engineering, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221008, China; 4. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The distribution and growth of submerged and floating macrophytes in Taihu Lake were investigated in May and September 2004, and the concentrations of nutrients and organic matter in the areas with macrophytes were analyzed, using the area without macrophytes as the control. Results showed that the dominant species of submerged macrophytes were *Potamogeton maackianus*, *Potamogeton malaianus*, *Elodea nuttallii*, *Myriophyllum spicatum*, *Ceratophyllum demersum* and *Vallisneria spiralis*; and the dominant species of floating-leaved macrophytes were *Nymphoides peltatum*, *Nymphoides indica* and *Trapa quadrispinosa*. The total phosphorus (TP) concentration in the water column and sediment with macrophytes were lower than that the control. The mean TP in the water column in the area with macrophytes was 0.067 mg·L⁻¹ and 0.050 mg·L⁻¹ in May and September, respectively; while that in the control was 0.133 mg·L⁻¹ and 0.129 mg·L⁻¹ in May and September, respectively. The mean TP in the sediments with macrophytes was 0.399 mg·g⁻¹ in May; and the control was 0.513 mg·g⁻¹ in May. However, TN and organic matter concentrations in the sediments at the area with macrophytes were higher than the control. The mean concentration of organic matter in the area with macrophytes was 7.402 mg·g⁻¹ and 6.502 mg·g⁻¹ in May and September, and the control was 5.755 mg·g⁻¹ and 5.455 mg·g⁻¹ in May and September, respectively. As for TN, the mean values were 0.01 mg·g⁻¹ and 0.007 mg·g⁻¹ in May in the two areas. Based on ANOVA, a significant difference between the two areas was found, indicating that the growth of macrophytes could control nutrients in water column and sediments in eutrophic Taihu Lake.

Keywords: Taihu Lake; aquatic macrophyte; nutrient; N; P; sediment

收稿日期:2007-06-08

基金项目:中国科学院知识创新重大项目(KZCX1-SW-12);国家863计划项目(2002AA601011)

作者简介:雷泽湘(1965—),男,博士,副教授,主要从事生态环境方面的研究。E-mail:lei-1965@163.com

大型水生植物是湖泊生态系统的重要组成成分,常常被视为湖泊环境变化的指示物^[1-6,11],在维持湖泊生态系统结构和功能方面起到十分重要的作用。目前,关于太湖水生植物虽有不少研究^[7-10],但多集中于水生植物资源的调查、引种栽培等方面,而关于太湖的水生植被的生长分布与湖泊营养盐浓度关系的研究尚未见报道。为了进一步认识浅水湖泊水生植被生长分布与水体营养元素之间的关系,本文对太湖沉水和浮叶植物的生长分布状况进行了调查,并分析了大型水生植物对太湖水体营养元素的影响,进一步探讨了太湖大型水生植物对湖泊生态的影响,这有助于进一步认识大型水生植物在湖泊生态系统中的作用与功能,为水生植被的管理和湖泊生态系统的恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样点设置

根据历史上太湖水生植被的调查资料^[8,10,12],于 2004 年 5 月和 9 月,分别对太湖进行了两次环湖采样。调查共设 32 个采样点(图 1),用全球定位仪(GPS)定位布设样点。

1.2 采样方法

根据 GPS 确定采样点后开始采样。首先,用塑料瓶进行水样的采集,将采集的水样放在野外便携式冰箱中保存;然后,用带网铁框进行大型水生植物的采集,采样时依据每个采样点的植物盖度和多样性,各设立 5~10 个样方(0.5 m × 0.4 m),采样时将框内植物连根拔起→分类→称重→取平均值;最后,用柱状采

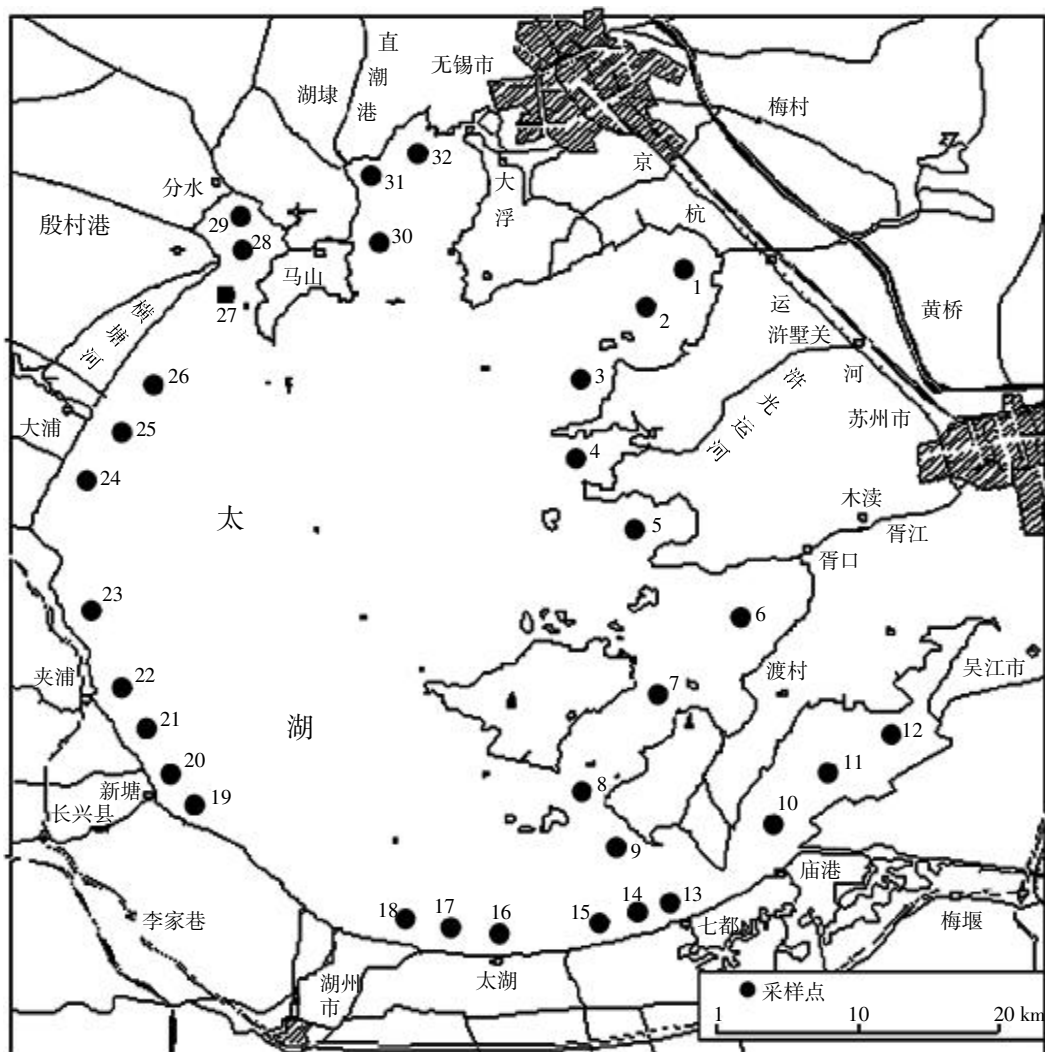


图 1 太湖采样点分布图

Figure 1 Sampling locations in Taihu Lake

样器采集沉积物,自上而下(厚度为 3、3、5、5 cm)分层,再装入塑料袋中放入便携式冷箱中带回实验室分析。

1.3 分析方法

水样指标为总氮(TN)、溶解氮(TDN)、硝态氮(NO_3^- -N)、亚硝态氮(NO_2^- -N)、氨氮(NH_4^+ -N)、总磷(TP)、溶解磷(TDP)和溶解性正磷酸盐(PO_4^{3-} -P),测定方法均见《水和废水监测分析方法》^[13]。

沉积物样品自然风干后,经研钵磨细过 100 目筛待用。(1)总磷(TP)分析采用 ICP-AES 原子发射光谱测定。(2)有机质(OM)含量分析是采用对 Tam 等^[14](2000)稍作改进的方法,将风干、过筛后的沉积物在马弗炉中加热到 550℃燃烧,然后通过烧失量计算出有机质含量。(3)总氮(TN)采用凯氏法分析测定^[15]。

2 结果与分析

2.1 太湖沉水和浮叶植被分布特征

2004 年 5 和 9 月的两次环湖采样结果(表 1)显示,西太湖大部分水域(3、4、17~32 共 18 个样点)无水生植物生长(植物盖度<5%,设为“对照区”),只有从贡湖(样点 1)到湖州的太湖镇(样点 16)其间的共 14 个样点(1、2、5~16)有水生植物的分布(简称“有草区”,下同)。不同季节水生植物的生长和分布状况有一定差异:5 月主要以沉水植物微齿眼子菜、伊乐藻、马来眼子菜、狐尾藻、金鱼藻、苦草、黑藻和菹草为主,按样方中出现频度排列为:马来眼子菜>伊乐藻>苦草>黑藻>微齿眼子菜>金鱼藻>狐尾藻>荇菜>菹草>

野菱;9 月则以沉水植物微齿眼子菜、马来眼子菜、金鱼藻、苦草、黑藻和浮叶植物荇菜、金银莲花和野菱为主,按样方中出现频度排列为:马来眼子菜>苦草>黑藻>微齿眼子菜>金鱼藻>荇菜>金银莲花>狐尾藻>伊乐藻>野菱>菹草。5 月生长旺盛的伊乐藻、狐尾藻和菹草在 9 月已衰落,其中菹草已经完成生活史进入休眠期;至 9 月时浮叶植物发展较快,以荇菜和金银莲花的分布样点和生物量增加最多。

2.2 太湖湖水和沉积物 N、P 营养盐特征

2004 年两次对太湖水体(32 个样点)的 N、P 等营养盐指标进行了测定,其湖水 N、P 营养盐整体特征(表 2)表明太湖总体营养程度高,5 月时湖水富营养化已很严重,其 TN、TDN、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、TP 和 TDP 的均值分别达到 4.668、4.059、0.129、1.560、0.104 和 0.042 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,都高于 9 月,仅 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P 两项指标低于 9 月。按照太湖富营养化评分与分级标准^[16],5 月的太湖湖水处于重富营养状态,9 月时则处于富营养状态。

表 3 为太湖沉积物 N、P 营养盐和有机质整体特征。总体来看,太湖沉积物的营养程度要比水体的营养程度低,沉积物中 TN 与 TP 的差异亦比水体的要小得多。沉积物最表层(0~3 cm)TP1 和有机质 1 的含量要高于下层(3~6 cm)TP2 和有机质 2 的含量,5 月份与 9 月份的结果相同。说明沉积物最表层的营养盐含量最高。

2.3 水生植物的分布对太湖湖水 N、P 营养盐的影响

从太湖沉水和浮叶植被分布现状可知,2004 年

表 1 太湖各采样点沉水和浮叶植物的分布

Table 1 Distribution of submerged macrophytes and floating-leaved macrophytes in Taihu Lake

样点	微齿眼子菜 <i>P. macckianus</i>	伊乐藻 <i>E. nuttallii</i>	马来眼子菜 <i>P. malaianus</i>	狐尾藻 <i>M. spicatum</i>	金鱼藻 <i>C. demersum</i>	苦草 <i>V. natans</i>	黑藻 <i>H. verticillata</i>	菹草 <i>P. crispus</i>	野菱 <i>T. quadrispinosa</i>	荇菜 <i>N. peltatum</i>	金银莲花 <i>N. indica</i>
1	√, +	√		√	√, +	√	√, +	√			
2	√, +	√		√, +	√		+				
5	+	√	√, +	+		√, +	√				
6	√		√, +	√			√			+	
7			√, +			√, +	√, +			+	
8			+			√, +			√, +	√, +	
9	√, +	√	√, +	√	√, +	√, +	√, +	√	√, +	√, +	
10	√	√, +	+	√, +	√, +	√, +	√, +	√			
11	√, +	√, +	√, +	√, +	√, +	√, +	√, +				
12	√, +	√, +		√	√, +	√, +	√, +	√	√	√	
13	+		√, +	√	+	√, +	√, +		+	+	+
14		√	√, +		+	√, +				+	+
15			√, +								+
16			√, +								

注:√为 5 月, + 为 9 月。

表 2 太湖湖水 N、P 营养盐整体特征(32 个采样点)($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)Table 2 Characteristics of N and P in water environment of Taihu Lake($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

项目	5 月			9 月		
	均值	变幅	标准误	均值	变幅	标准误
TN	4.668	11.586(0.760~12.346)	0.525	2.773	4.823(1.057~5.880)	0.264
TDN	4.059	10.246(0.728~10.974)	0.454	1.695	4.365(0.507~4.872)	0.182
$\text{NO}_2^{-}\text{-N}$	0.129	0.517(0.002~0.519)	0.029	0.072	0.355(0.001~0.356)	0.020
$\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	1.560	2.557(0.116~2.673)	0.143	0.690	1.454(0.113~1.567)	0.088
$\text{NH}_4^{+}\text{-N}$	0.189	1.161(0.003~1.164)	0.042	0.533	2.658(0.142~2.800)	0.103
TP	0.104	0.212(0.037~0.249)	0.009	0.094	0.278(0.026~0.304)	0.012
TDP	0.042	0.111(0.009~0.120)	0.005	0.031	0.078(0.009~0.087)	0.003
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	0.009	0.094(0.000~0.094)	0.003	0.012	0.055(0.000~0.055)	0.002

表 3 太湖沉积物 TN、TP 和有机质整体特征(32 个采样点)($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)Table 3 Characteristics of TN, TP and OM in sediment environment of Taihu Lake($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

项目	5 月			9 月		
	均值	变幅	标准误	均值	变幅	标准误
TN	0.846	2.693(0.262~2.955)	0.141			
表层 TP	0.460	1.069(0.042~1.111)	0.052	0.566	1.295(0.415~1.710)	0.050
表层 OM	6.523	10.573(2.248~12.821)	0.423	6.041	6.703(3.039~9.742)	0.341
次表层 TP	0.425	0.922(0.027~0.949)	0.040	0.533	0.545(0.307~0.852)	0.028
次表层 OM	6.378	8.096(2.628~10.724)	0.326	6.224	6.120(3.515~9.635)	0.339

注:表层为沉积物最上部分 0~3 cm,次表层为沉积物 3~6 cm。

两次从太湖采集的沉水和浮叶植物的优势种略有差异。通过对应比较分析(表 4,表 5),可以看出有水生植物分布水域中 N、P 水平都与无植物水域存在一定程度的差异, t 检验结果显示大多数因子间的差异是极显著或显著的。这一结果说明水生植物的分布对水环境中 N、P 因子存在较强的影响作用。

不同季节水生植物对水环境的影响不同。在 5 月,水生植物分布水域的 TN、TDN、 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 、TP、TDP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等 N、P 因子指标都明显低于无水生植物区域,除 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 一项指标外,其他指标间的差异都达到显著或极显著,说明水生植物对富营养化湖水中的 N、P 有明显的影响;同样,在 9 月水生植物分布水域的 TN、TDN、 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 、TP、TDP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等 N、P 因子指标都要明显低于无水生植物水域,但水生植物分布水域的 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 较 5 月有较大幅度的上升,说明水生植物对 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 的影响较小,富营养化水体水生植物对水质的影响试验亦表明水生植物对 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 的吸收效果较差^[17],但亦有相反的例子^[18]。

2.4 水生植被对太湖沉积物 N、P 营养盐及有机质含量的影响

表 6 比较了太湖有草区(1,2,5~16 样点,下同)

和对照(3,4,17~32 样点,下同)沉积物 N、P 营养盐和有机质整体特征,从两表中可知有草区沉积物中 TN、有机质含量和变幅明显高于对照,而有草区沉积物的最表层(0~3 cm)TP1 与次表层(3~6 cm)TP2 的含量均低于对照。这与水环境的特征有一定差异。磷是湖泊中重要的限制性营养因子,普遍认为大型水生植物通过根从底质吸收个体生长所需要的磷^[19],说明水生植物的存在有助于吸收沉积物中的磷。有草区沉积物磷含量为 5 月低于 9 月,这主要是由于 5 月是植物生长旺盛期,水生植物生长对磷元素需求量较大,从而使部分磷元素通过植物根系吸收进入植物体内。而 9 至 10 月份一般为多数水生植物生长高峰期,植物生物量达到最大值,植物的生理活性开始减弱,植物代谢残体也开始增加,从而也增加沉积物有机质及磷含量。且湖泊根际微生物也因时间发生相应变化,如春季微生物数目较少,夏季微生物数目有所增加,秋季微生物数目达到最高,冬季微生物数目又有所下降^[20],从而形成湖泊 9 月份沉积物磷含量高于 5 月份。对照沉积物 TP 含量的动态变化特征与有草区基本相同。

有草区沉积物有机质含量的变化与 TP 的变化不同,有草区沉积物中有机质含量为 5 月份高于 9 月

表 4 水生植物分布水域与对照区(无植物分布水域)N、P 营养盐特征比较 (mg·L⁻¹)(2004–05)

Table 4 Characteristic comparison of N and P in water between the macrophytes areas and the non-macrophytes areas

指标	有草区			对照区			t 检验	
		均值	变幅	标准误	均值	变幅	标准误	
全太湖	TN	2.297	3.580(0.760~4.340)	0.305	6.512	9.017(3.329~12.346)	0.612	-5.598
	NO ₂ ⁻ -N	0.023	0.214(0.002~0.216)	0.014	0.211	0.505(0.014~0.519)	0.041	-3.866
	NO ₃ ⁻ -N	1.011	2.170(0.120~2.290)	0.189	1.987	1.86(0.972~2.832)	0.133	4.191
	NH ₄ ⁺ -N	0.096	0.189(0.003~0.192)	0.012	0.262	1.138(0.026~1.164)	0.069	2.080
	TP	0.067	0.120(0.040~0.160)	0.007	0.133	0.184(0.065~0.249)	0.011	-4.534
	PO ₄ ³⁻ -P	0.005	0.018(0.000~0.018)	0.002	0.012	0.094(0.000~0.094)	0.005	-1.121
微齿眼子菜 <i>P. macckianus</i>	TN	2.141	2.802(1.150~.952)	0.639	6.512	9.017(3.329~12.346)	0.612	3.236
	NO ₂ ⁻ -N	0.059	0.214(0.002~0.216)	0.053	0.211	0.505(0.014~0.519)	0.041	1.659
	NO ₃ ⁻ -N	0.766	1.055(0.234~1.289)	0.244	1.987	1.86(0.972~2.832)	0.133	3.991
	NH ₄ ⁺ -N	0.077	0.160(0.003~0.163)	0.033	0.262	1.138(0.026~1.164)	0.069	-1.225
	TP	0.049	0.046(0.037~0.083)	0.012	0.133	0.184(0.065~0.249)	0.011	3.384
	PO ₄ ³⁻ -P	0.002	0.005(0.000~0.005)	0.001	0.012	0.094(0.000~0.094)	0.005	-0.897
伊乐藻 <i>E. nuttallii</i>	TN	1.004	0.58(0.760~1.340)	0.122	6.512	9.017(3.329~12.346)	0.612	4.161
	NO ₂ ⁻ -N	0.004	0.004(0.002~0.006)	0.001	0.211	0.505(0.014~0.519)	0.041	2.333
	NO ₃ ⁻ -N	0.222	0.359(0.116~0.475)	0.085	1.987	1.86(0.972~2.832)	0.133	6.091
	NH ₄ ⁺ -N	0.087	0.050(0.066~0.116)	0.011	0.262	1.138(0.026~1.164)	0.069	1.169
	TP	0.055	0.028(0.037~0.065)	0.007	0.133	0.184(0.065~0.249)	0.011	-3.150
	PO ₄ ³⁻ -P	0.010	0.016(0.002~0.018)	0.004	0.012	0.094(0.000~0.094)	0.005	0.144
马来眼子菜 <i>P. malaianus</i>	TN	3.245	2.279(2.063~4.342)	0.436	6.512	9.017(3.329~12.346)	0.612	2.722
	NO ₂ ⁻ -N	0.012	0.016(0.004~0.020)	0.003	0.211	0.505(0.014~0.519)	0.041	-2.504
	NO ₃ ⁻ -N	1.682	1.427(0.866~2.293)	0.304	1.987	1.86(0.972~2.832)	0.133	0.158
	NH ₄ ⁺ -N	0.108	0.137(0.055~0.192)	0.023	0.262	1.138(0.026~1.164)	0.069	-1.145
	TP	0.087	0.102(0.055~0.157)	0.018	0.133	0.184(0.065~0.249)	0.011	-1.969
	PO ₄ ³⁻ -P	0.004	0.010(0.002~0.012)	0.002	0.012	0.094(0.000~0.094)	0.005	-0.790
狐尾藻 <i>M. Spicatum</i>	TN	1.324	1.302(0.760~2.063)	0.386	6.512	9.017(3.329~12.346)	0.612	-3.375
	NO ₂ ⁻ -N	0.006	0.010(0.002~0.012)	0.003	0.211	0.505(0.014~0.519)	0.041	1.990
	NO ₃ ⁻ -N	0.409	0.750(0.116~0.866)	0.232	1.987	1.86(0.972~2.832)	0.133	-4.608
	NH ₄ ⁺ -N	0.086	0.013(0.079~0.092)	0.004	0.262	1.138(0.026~1.164)	0.069	1.015
	TP	0.052	0.028(0.037~0.065)	0.008	0.133	0.184(0.065~0.249)	0.011	-2.833
	PO ₄ ³⁻ -P	0.008	0.018(0.000~0.018)	0.005	0.012	0.094(0.000~0.094)	0.005	-0.291
金鱼藻 <i>C. demersum</i>	TN	2.017	3.192(0.760~3.952)	0.982	6.512	9.017(3.329~12.346)	0.612	2.864
	NO ₂ ⁻ -N	0.076	0.212(0.004~0.216)	0.070	0.211	0.505(0.014~0.519)	0.041	1.279
	NO ₃ ⁻ -N	0.627	1.173(0.116~1.289)	0.347	1.987	1.86(0.972~2.832)	0.133	3.839
	NH ₄ ⁺ -N	0.105	0.097(0.066~0.163)	0.030	0.262	1.138(0.026~1.164)	0.069	0.903
	TP	0.062	0.046(0.037~0.083)	0.013	0.133	0.184(0.065~0.249)	0.011	2.489
	PO ₄ ³⁻ -P	0.007	0.018(0.000~0.018)	0.006	0.012	0.094(0.000~0.094)	0.005	0.369

注: *P<0.05, **P<0. 01

份。造成这一现象主要原因是由于水生植物在水体中分解较慢。有研究表明,太湖浮叶植物和沉水植物的腐烂分解过程基本完成需要 1 a 以上^[21],从而形成 9 月份有机质含量低于 5 月份的主要原因。同时,外源有机质输入也是造成沉积物表层偏高的原因。而有草区沉积物底部对有机质的富集效应强,这是有机质淀积的结果。对照沉积物有机质含量的动态变化特征与有草区亦相同。

李文朝^[22]对东太湖水生植物的研究表明,东太

湖沉积物中总氮含量与总有机碳含量间呈密切的线性正相关关系,表层沉积物中总氮和总有机碳含量都与水生植物的现存量有较为显著的正相关。说明氮和有机碳主要经过水生植物的生物沉积途径进入沉积物,水生植物能够将湖水中的氮传输到底泥中;同时,大型水生植物生命过程中代谢作用也是有机质富集一个重要因素^[23, 24]。虽然提高了有草区沉积物中氮与有机质的含量,但有助于降低太湖湖水中的氮和有机碳含量。

表 5 水生植物分布水域与对照区(无植物分布水域)N、P 营养盐特征比较($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)(2004–09)

Table 5 Characteristic comparison of N and P in water between the macrophytes areas and the non-macrophytes areas

指标	有草区			对照区			<i>t</i> 检验		
		均值	变幅	标准误	均值	变幅	标准误	<i>t</i>	<i>P</i>
全太湖	TN	1.993	4.820(1.060~5.880)	0.329	3.380	3.577(2.018~5.595)	0.320	-2.904	0.007**
	NO ₂ ⁻ -N	0.027	0.287(0.001~0.288)	0.019	0.106	0.353(0.003~0.356)	0.029	-2.102	0.044*
	NO ₃ ⁻ -N	0.359	1.454(0.113~1.567)	0.097	0.948	1.381(0.122~1.503)	0.099	-4.065	0.000**
	NH ₄ ⁺ -N	0.311	0.163(0.215~0.378)	0.015	0.706	2.658(0.142~2.800)	0.173	-1.995	0.055
	TP	0.050	0.061(0.026~0.087)	0.005	0.129	0.252(0.052~0.304)	0.016	4.228	0.000**
	PO ₄ ³⁻ -P	0.007	0.014(0.000~0.014)	0.001	0.016	0.055(0.000~0.055)	0.004	-1.895	0.068
荇菜 <i>N. peltatum</i>	TN	1.255	0.410(1.057~1.467)	0.078	3.380	3.577(2.018~5.595)	0.320	3.431	0.003**
	NO ₂ ⁻ -N	0.004	0.008(0.002~0.010)	0.002	0.106	0.353(0.003~0.356)	0.029	1.818	0.083
	NO ₃ ⁻ -N	0.186	0.235(0.113~0.348)	0.042	0.948	1.381(0.122~1.503)	0.099	3.954	0.001**
	NH ₄ ⁺ -N	0.291	0.163(0.215~0.378)	0.031	0.706	2.658(0.142~2.800)	0.173	1.240	0.229
	TP	0.047	0.061(0.026~0.087)	0.011	0.129	0.252(0.052~0.304)	0.016	2.631	0.016*
	PO ₄ ³⁻ -P	0.006	0.010(0.000~0.010)	0.002	0.016	0.055(0.000~0.055)	0.004	1.413	0.172
马来眼子菜 <i>P. malaianus</i>	TN	1.386	1.371(1.057~2.428)	0.137	3.380	3.577(2.018~5.595)	0.320	4.267	0.000**
	NO ₂ ⁻ -N	0.004	0.009(0.001~0.01)	0.001	0.106	0.353(0.003~0.356)	0.029	2.477	0.020*
	NO ₃ ⁻ -N	0.273	0.641(0.113~0.754)	0.070	0.948	1.381(0.122~1.503)	0.099	4.507	0.000**
	NH ₄ ⁺ -N	0.320	0.152(0.226~0.378)	0.021	0.706	2.658(0.142~2.800)	0.173	-1.555	0.133
	TP	0.049	0.061(0.026~0.087)	0.007	0.129	0.252(0.052~0.304)	0.016	3.425	0.002**
	PO ₄ ³⁻ -P	0.006	0.010(0.000~0.010)	0.001	0.016	0.055(0.0004~0.055)	0.004	1.850	0.076
微齿眼子菜 <i>P. macckianus</i>	TN	3.076	4.823(1.057~5.880)	1.045	3.380	3.577(2.018~5.595)	0.320	0.368	0.717
	NO ₂ ⁻ -N	0.081	0.286(0.002~0.288)	0.069	0.106	0.353(0.003~0.356)	0.029	0.366	0.718
	NO ₃ ⁻ -N	0.540	1.445(0.122~1.567)	0.346	0.948	1.381(0.122~1.503)	0.099	1.566	0.133
	NH ₄ ⁺ -N	0.301	0.137(0.236~0.373)	0.031	0.706	2.658(0.142~2.800)	0.173	1.081	0.293
	TP	0.063	0.052(0.035~0.087)	0.014	0.129	0.252(0.052~0.304)	0.016	-1.892	0.073
	PO ₄ ³⁻ -P	0.010	0.008(0.006~0.014)	0.002	0.016	0.055(0.000~0.055)	0.004	0.717	0.482
金鱼藻 <i>C. demersum</i>	TN	2.011	2.282(1.057~3.339)	0.359	3.380	3.577(2.018~5.595)	0.320	-2.293	0.032*
	NO ₂ ⁻ -N	0.058	0.286(0.002~0.288)	0.046	0.106	0.353(0.003~0.356)	0.029	-0.840	0.410
	NO ₃ ⁻ -N	0.446	1.454(0.113~1.567)	0.227	0.948	1.381(0.122~1.503)	0.099	-2.340	0.029*
	NH ₄ ⁺ -N	0.295	0.147(0.226~0.373)	0.023	0.706	2.658(0.142~2.800)	0.173	1.348	0.192
	TP	0.059	0.052(0.035~0.087)	0.009	0.129	0.252(0.052~0.304)	0.016	2.452	0.023*
	PO ₄ ³⁻ -P	0.010	0.008(0.006~0.014)	0.001	0.016	0.055(0.000~0.055)	0.004	0.932	0.362
苦草 <i>V. natans</i>	TN	1.710	1.397(1.354~2.751)	0.237	3.380	3.577(2.018~5.595)	0.320	-2.888	0.009**
	NO ₂ ⁻ -N	0.010	0.026(0.001~0.027)	0.004	0.106	0.353(0.003~0.356)	0.029	-1.875	0.074
	NO ₃ ⁻ -N	0.220	0.225(0.113~0.338)	0.036	0.948	1.381(0.122~1.503)	0.099	-4.143	0.000**
	NH ₄ ⁺ -N	0.292	0.152(0.226~0.378)	0.023	0.706	2.658(0.142~2.800)	0.173	-1.356	0.189
	TP	0.043	0.026(0.026~0.052)	0.004	0.129	0.252(0.052~0.304)	0.016	3.046	0.006**
	PO ₄ ³⁻ -P	0.008	0.012(0.000~0.012)	0.002	0.016	0.055(0.000~0.055)	0.004	-1.222	0.235

表 6 太湖沉积物 TN、TP 和有机质特征

Table 6 Characteristics of N, P and OM in sediment environment of Taihu Lake

项目	均值				变幅				标准误			
	5 月		9 月		5 月		9 月		5 月		9 月	
	有草区	对照	有草区	对照	有草区	对照	有草区	对照	有草区	对照	有草区	对照
TN	0.010	0.007			0.269	0.106			0.002	0.001		
表层 TP	0.399	0.513	0.576	0.553	1.069	0.769	1.295	0.259	0.090	0.058	0.089	0.021
表层有机质	7.402	5.755	6.502	5.455	7.900	6.891	6.489	5.408	0.627	0.516	0.472	0.452
次表层 TP	0.338	0.513	0.491	0.589	0.601	0.771	0.437	0.438	0.045	0.060	0.035	0.043
次表层有机质	6.638	6.118	6.576	5.767	6.790	5.746	6.120	3.055	0.474	0.454	0.531	0.342

注:表层为沉积物最上部分 0~3 cm,次表层为沉积物 3~6 cm。

3 小结

(1)大型水生植物对太湖中 N、P 营养盐有显著影响。有草区的沉积物上的氮和有机质要高于对照,因为水生植物同化的氮和有机碳主要经过生物沉积途径进入沉积物。水生植物由此将湖水中的氮和有机碳传输到底泥中,使其进入地球生物化学循环,虽然提高了有草区沉积物中氮与有机质的含量,但这对于降低湖水中的氮和有机碳含量,防止水体富营养化有积极意义。

(2)太湖有草区水体和沉积物中 TP 含量均较对照湖水和沉积物中的 TP 含量显著降低,而湖水和沉积物中这些消失的 P 则可能被水生植物有效地吸附和吸收。由此可见,在富营养化湖泊中,大型水生植物的生长可以起到控制水体和沉积物营养元素的作用,因此适度恢复水生植被是解决湖泊富营养化问题的有效途径之一。

参考文献:

- [1] Ali M M, Hamad A, Springuel I V, et al. Environmental factors affecting submerged macrophyte communities in regulated waterbodies in Egypt[J]. *Arch Hydrobiol*, 1995, 133: 107-128.
- [2] Khedr A H A, El-Demerdash M A. Distribution of aquatic plants in relation to environmental factors in the Nile Delta[J]. *Aquat Bot*, 1997, 56: 75-86.
- [3] Bini L M, Thomaz S M, Murphy K J, et al. Aquatic macrophyte distribution in relation to water and sediment conditions in the Itaipu Reservoir, Brazil[J]. *Hydrobiologia*, 1999, 415: 147-154.
- [4] 葛继稳,蔡庆华,李建军,等. 梁子湖水生植被 1955-2001 年间的演替[J].北京林业大学学报,2004, 26(1): 14-20.
- [5] Ducrotot J P. Indications of change in the marine flora of the North Sea in the 1990s[J]. *Mar Pollut Bull*, 1999, 38: 646-654.
- [6] Pokorny J J, Kvet J, Pondok. Functioning of the plant component in densely stocked fishponds[J]. *Bull Ecol*, 1990, 21: 44-48.
- [7] 中国科学院南京地理所. 太湖综合调查报告[M]. 北京: 科学出版社, 1965. 1-84.
- [8] 鲍建平,缪为民,李劫夫,等. 太湖水生维管束植物及其合理开发利用的调查研究[J].大连水产学院学报,1991, 6(1): 13-20.
- [9] 张圣照,王国祥,濮培民,等. 东太湖水生植被及其沼泽化趋势[J].植物资源与环境,1999, 8(2): 1-6.
- [10] 谷孝鸿,张圣照,白秀玲,等. 东太湖水生植物群落结构的演变及其沼泽化[J].生态学报,2005, 25(7): 1541-1548.
- [11] 马 凯,蔡庆华,谢志才,等. 沉水植物分布格局对湖泊水环境 N、P 因子影响[J]. 水生生物学报,2003, 27(3): 232-237.
- [12] 孙顺才,黄猗平.太湖[M]. 北京:海洋出版社,1993.23-89.
- [13] 国家环境保护局,水与废水监测分析方法编委会编.水与废水监测分析方法[M].(第四版),北京:中国环境科学出版社,2002.
- [14] Tam N F Y, Wong Y S. Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps[J]. *J Environmental Pollution*, 2000, 110: 195-205.
- [15] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M](第二版). 北京:中国环境科学出版社,1990.102-122.
- [16] 杨桂山,王德建,等.太湖流域经济发展水环境水灾害[M].北京:科学出版社,2003: 99-118.
- [17] 雷泽湘,谢贻发,徐德兰,等. 大型水生植物对富营养化湖水净化效果的试验研究[J]. 安徽农业科学,2006, 34(3): 553-554.
- [18] 刘春光,王春生,李 贺,等.几种大型水生植物对富营养水体中氮和磷的去除效果[J]. 农业环境科学学报,2006, 25(增刊): 635-638.
- [19] Carpenter S R, Lodge D M. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes[J]. *Aquat Bot*, 1986, 26: 341-370.
- [20] Moore B C, Lafer J E, Funk W H. Influence of aquatic macrophytes on phosphorus and sediment porewater chemistry in a freshwater wetland[J]. *Aquat Bot*, 1994, 49: 137-148.
- [21] 李文朝,陈开宁,吴庆龙,等.东太湖水生植物生物物质腐烂分解实验[J]. 湖泊科学,2001, 13(4): 331-336.
- [22] 李文朝.东太湖沉积物中氮的积累与水生植物沉积[J].中国环境科学,1997, 17(5): 418-421.
- [23] Wilson S D, Keddy P A. Plant zonation on a shoreline gradient: physiological response curves of component species[J]. *J Ecol*, 1985, 73: 851-860.
- [24] Smits A J M, Laan P, Their R H, et al. Root aerenchyma, oxygen leakage patterns and alcoholic fermentation ability of the roots of some nymphaeid and isoetid macrophytes in relation to the sediment type of their habitat[J]. *Aquat Bot*, 1990, 38: 3-17.