

## 巢湖沉水植物现状(2010年)及其与环境因子的关系\*

任艳芹<sup>1,2</sup>, 陈开宁<sup>1\*\*</sup>

(1: 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)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 在对巢湖2010年沉水植物和环境因子调查的基础上, 分析了巢湖沉水植物群落特征、分布规律, 应用冗余分析探讨了沉水植物与环境因子之间的关系。结果表明, 现场观测到的沉水植物共计4科5属6种, 全湖生物量约为8077.8t, 分布面积仅占巢湖总面积的1.54%, 其中马来眼子菜(*Potamogeton malaianus* Miq.)分布面积占沉水植物分布总面积的90.7%, 是巢湖沉水植物中绝对优势种。金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* Linn.)、穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* Linn.)和轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata* (Linn. f.) Royle)等沉水植物稀少, 已濒临消失。Monte Carlo测试检验的结果表明, 水体总磷、正磷酸盐、化学需氧量、透明度和水深等与沉水植物群落分布的相关性极显著, 但是水体总氮的影响并没有达到显著水平, 说明巢湖流域沉水植物的群落分布受磷的限制要大于氮。检验结果还表明底泥的总氮和总磷与沉水植物的分布没有很好的相关性, 而底泥总有机碳的影响达到了极显著水平。

**关键词:** 巢湖; 沉水植物; 环境因子; 冗余分析

## Status of submerged macrophytes and its relationship with environmental factors in Lake Chaohu, 2010

REN Yanqin<sup>1,2</sup> & CHEN Kaining<sup>1</sup>

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

(2: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

**Abstract:** Based on the investigation of submerged macrophytes and its relational environmental factors in June, 2010, Lake Chaohu, this paper analyzed the characteristics of submerged macrophyte community and distribution, discussed the relationship between submerged macrophytes and environmental factors with redundancy analysis. The results showed that there were 6 submerged macrophyte species in 5 families, 4 genera. Total biomass of submerged macrophytes was about 8077.8t and their total distribution area was just 1.54% of the whole lake area. *Potamogeton malaianus* was the dominant species, which occupied 90.7% of the total distribution area of submerged macrophytes. *Ceratophyllum demersum* Linn., *Myriophyllum spicatum* Linn. and *Hydrilla verticillata* (Linn. f.) Royle appeared rarely and had been at the verge of extinction. Monte Carlo test results showed that the correlation between TP,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ , COD, SD, depth of water and the distribution of submerged macrophyte community was significant, however, TN had no significant effect, which suggesting that the distribution of submerged macrophyte community was more limited by P than N. The results also showed that the correlation between TN and TP of sediment and the distribution of submerged macrophyte community were not significant, while the influence of sediment TOC on the distribution of submerged macrophyte community was significant.

**Keywords:** Lake Chaohu; submerged macrophytes; environmental factors; redundancy analysis

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2008ZX07103-005-4)和江苏省科技计划社会发展项目(BE2009603)联合资助。2010-08-27收稿;2010-09-30收修修改稿。任艳芹,女,1984年生,硕士研究生;E-mail: ren\_yanqin@126.com.

\*\* 通讯作者;E-mail: knchen@niglas.ac.cn.

巢湖(31°25'28"–31°43'28"N、117°16'46"–117°16'54"E)位于合肥市南郊,东西长 61.70km,南北最大宽度为 20.80km,平均宽度为 15.1km,最窄处约 7.5km。水位 12.0m 时(吴淞冻结基面,下同),湖面面积约 780km<sup>2</sup>,湖岸周长约 155.70km。湖底浅平,西高东低,湖底高程一般在 5–6m 之间,最低 4.61m<sup>[1]</sup>。1980s 以来,伴随着工业化进程加快、城镇人口增加和化肥的大量使用,巢湖承纳的污水不断增加,不断积聚的污染负荷超出了巢湖的承载能力,湖泊生态功能退化,富营养化水平长期居高不下,大规模蓝藻水华不时暴发,危及饮水安全。巢湖水污染防治工作得到了国家高度重视,“九五”以来,巢湖历经多次大规模治污行动,先后累计投入 54 亿元,一批重点治污项目相继建成,污染物排放强度趋缓。但巢湖的污染治理欠账较多,目前还尚未从根本上有效遏制巢湖水质恶化和湖泊富营养化问题。随着流域经济社会的进一步发展,巢湖面临着更大的污染压力,治理巢湖已到了刻不容缓的地步。

恢复水生植物尤其是沉水植物是重要的治理措施,国内已有不少关于各地湖泊和地区水生植物现状调查及演替分析和巢湖水污染及富营养化现象的研究<sup>[2–12]</sup>。但目前为止,对巢湖流域沉水植物分布及其与周边环境的相互关系的详细研究还未见报道。本研究对巢湖湖区内沉水植物种类、分布、生物量、环境要素进行了调查,并利用冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)方法,将巢湖沉水植物的分布特征与环境因子同时表现在一个低维的空间中,这种排序方法的排序轴包含了样点信息和环境因子信息,因而具有精度高,能结合环境因子等诸多优点,并且可以直观地反映出环境因子与采样点之间的关系,初步揭示环境因子对沉水植物时空分布的影响,评估不同水域的沉水植物恢复潜力,为巢湖今后合理利用沉水植物资源,充分发挥沉水植物的净化作用改善水质,以及为巢湖湿地植物的重建与生态系统的恢复提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 样品采集与处理

考虑到巢湖沉水植物分布面积和生物量已大为减少,并向岸边萎缩和分布的不均匀性,2010 年 6 月,主要采用环湖随机采样调查沉水植物的方法,用面积 0.4m × 0.5m 的带网采草器采样,每点 2–3 次,按沉水植物种类分别称取湿重,计算生物量。同时调查沉水植物群落的分布面积、盖度和密度,方法是先用手持式 GPS 定位,记录不同群丛类型边界的坐标,再用 1:50000 地形图填图,绘制植被分布图。目测估算可见植物的盖度。密度( $D$ ) = 每个样方内某种群的个体数目(株)/样方面积(m<sup>2</sup>)。按照《湖泊富营养化调查规范》<sup>[13]</sup>测定水体和底泥理化参数。

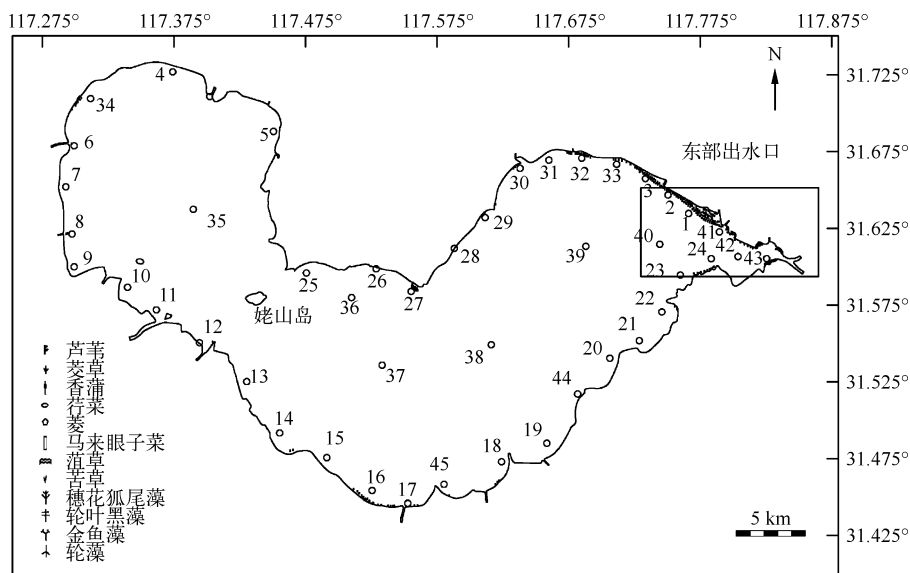


图 1 巢湖采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling stations in Lake Chaohu

1.2 数据分析

选择巢湖水域 45 个采样点(图 1)测得的主要水质和底质指标作为可分析的数据来源. 对数据进行标准化处理,建立沉水植物和环境指标数据库. 其中沉水植物数据,选择至少在 2 个采样点出现而且在每个采样点盖度大于 5% 的属种. 经过以上处理,原始数据库包括 33 个采样点,1 种沉水植物,18 个环境因子.

RDA 分析主要按照以下步骤进行:(1) 由除趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)得出属种的单峰响应值(梯度长度  $SD$ ). 当  $SD < 3$  时,即可进行 RDA 分析.(2) 环境变量的重要值按其单独解释属种数据的方差值的大小排序,其解释的显著性由 Monte Carlo 测试来检验.

上述的 DCA、RDA 排序和 Monte Carlo 检验均在 Ter Braak 编制的 CANOCO 4.5 软件包中实现.

2 研究结果

表 1 2010 年 6 月巢湖东半湖和西半湖主要水质和底质指标

Tab. 1 Main parameters of water and sediment of east and west of Lake Chaohu on June, 2010

	指标	东半湖	西半湖
水质指标	总氮(mg/L)	3.407 ± 2.031	4.068 ± 2.811
	总磷(mg/L)	0.152 ± 0.121	0.242 ± 0.388
	正磷酸盐(mg/L)	0.008 ± 0.009	0.031 ± 0.054
	铵态氮(mg/L)	0.244 ± 0.067	0.450 ± 0.374
	硝态氮(mg/L)	0.676 ± 0.272	0.750 ± 0.200
	亚硝态氮(mg/L)	0.038 ± 0.040	0.089 ± 0.093
	溶解氧(mg/L)	7.13 ± 1.69	5.95 ± 1.00
底质指标	含水率(%)	31.359 ± 7.909	32.144 ± 4.805
	容重(g/cm <sup>3</sup> )	1.291 ± 0.191	1.262 ± 0.099
	底泥总氮(mg/kg)	0.605 ± 0.358	0.788 ± 0.390
	底泥总磷(mg/kg)	0.202 ± 0.092	0.304 ± 0.146
	总有机碳(%)	1.788 ± 1.391	2.003 ± 0.791

2.1 巢湖水质和底质状况

目前巢湖已被人为的划分为东半湖和西半湖,由于各湖区的污染源和污染程度以及渔业操作水平和集水区内土地利用方式的不同,两个湖区的水质和底质状况也不同. 从“七五”国家攻关课题研究巢湖时提出的“巢湖水营养状态的评价标准”<sup>[14]</sup>看,西半湖和东半湖的总氮含量在 3-4.6mg/L(表 1),均属极度富营养化状况,富营养水平在 80-90 之间,西半湖和东半湖的总磷含量在 0.11-0.25mg/L 之间(表 1),属重富营养化状况,富营养水平在 70-80 之间,西半湖遭到的水污染比东半湖严重. 底泥的主要参数指标也表明西半湖的污染较东半湖严重.

2.2 巢湖沉水植物的种类组成

2010 年 6 月,全面调查巢湖的沉水植物,共采集到沉水植物 6 种,分别隶属于 4 科 5 属,分别为:马来眼子菜(*Potamogeton malaianus* Miq.)、菹草(*Potamogeton crispus* Linn.)、穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* Linn.)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* Linn.)、轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*(Linn. f.) Royle)和亚洲苦草(*Vallisneria asiatica* Miki). 除眼子菜属有两个种外,其余各属均只有一种. 由于环湖堤坝修建,巢湖挺水植物分布稀少,浮叶植物也仅在一些小湖湾内出现,沉水植物是目前巢湖大型水生植物的主要生活型,其中马来眼子菜是沉水植物群落中的优势种,其他种类如菹草、狐尾藻、黑藻等只是巢湖东南岸边的偶见种(图 2).

2.3 巢湖沉水植物面积与分布

目前,巢湖沉水植物的面积极小,约为全湖面积的 1.54%. 湖心地带几乎无沉水植物分布,东西两半湖的沉水植物分布极不平衡. 西半湖有少量分布,东半湖是沉水植被主要分布湖区,但此湖区的沉水植被也仅限于沿岸带(水深约 0-1.5m)分布. 马来眼子菜是巢湖沉水植物的优势种,在其生长区域伴有少量浮叶植物生长,如菱(*Trapa japonica* Fler.)和荇菜(*Nymphoides peltata*(Gmel.) O. Kuntze),外围有较大面积的挺水植物出现,如芦苇(*Phragmites communis* Trinius)、香蒲(*Typha orientalis* Presl)和茭草(*Zizania latifolia*(Griseb.) Stapf)等. 其余沉水植物如菹草、苦草、穗花狐尾藻、金鱼藻和黑藻仅有零星分布. 主要沉水植物的分布面积见表 2.

2.4 DCA 分析结果

通过样点在 DCA 双轴图上的分布,可以揭示影响沉水植物分布的潜在环境变量. 原始沉水植物数据的 DCA 分析中,实验样点排列的  $SD$  为 0.568,适合选择线性模型,可用 RDA 方法分析沉水植物和环境之间的关系.

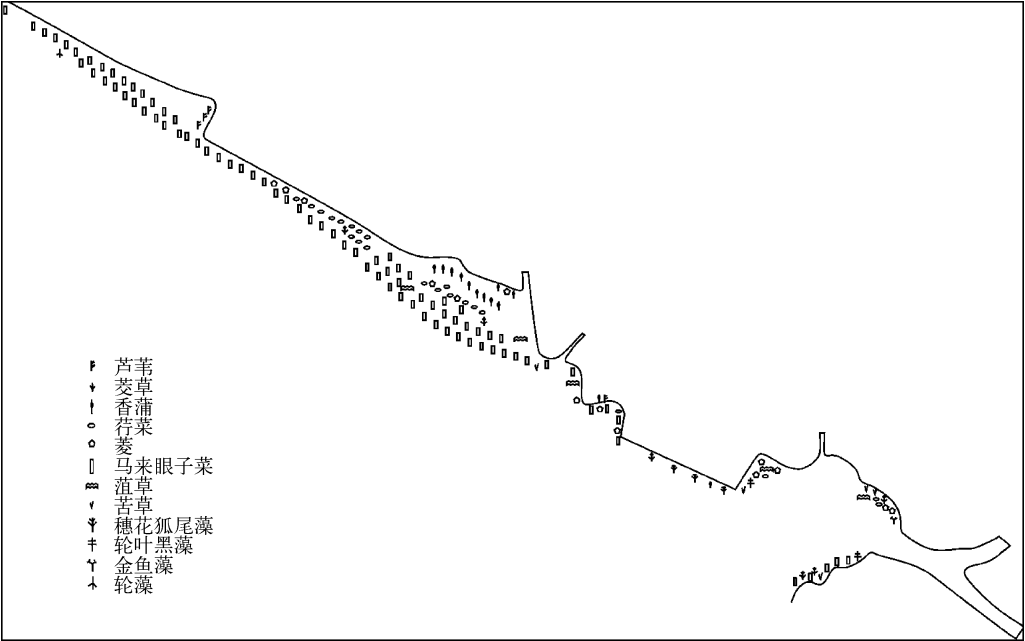


图2 巢湖东部出水口水生植物分布

Fig.2 Distribution of aquatic macrophytes in eastern outlet of Lake Chaohu

表2 巢湖主要沉水植物群丛的分布面积和生物量(鲜重)

Tab.2 Area and biomass (wet weight) of the main submerged macrophyte communities in Lake Chaohu

沉水植物	盖度(%)	密度 (株/m <sup>2</sup> )	面积 (km <sup>2</sup> )	单位面积生物 量(g/m <sup>2</sup> )	群丛生物量 (t)	占植被总面积 百分比(%)	占总生物量 百分比(%)
马来眼子菜	23	10.5	10.90	735.3	8014.8	90.7	99.22
金鱼藻	1	5.0	0.60	50.0	30.0	5.0	0.37
穗花狐尾藻	1	5.0	0.40	75.0	30.0	3.3	0.37
黑藻	5	15.0	0.12	25.0	3.0	1.0	0.04
合计	30	35.5	12.02	885.3	8077.8	100.0	100.00

2.5 RDA 分析结果

第一、二轴的特征值分别为 0.689 和 0.072,共解释了属种数据累计方差的 76.1%,其中第一轴的特征值明显高于第二轴(图3),表明有沉水植物的样点分布主要由第一轴的环境因子所解释,第二轴反映的环境因子的意义不明显,同时反映了沉水植物的属种主要受第一轴的控制. 分析采样点与环境变量的相关性可知:第一轴可以清楚地把各采样点分成富营养和极富营养两部分,沿着第一轴从左到右形成营养梯度逐渐偏高的趋势. 样点分布的排序反映了第一轴所代表的巢湖水域营养梯度的变化,其中第一轴左侧水体 TN、TP 浓度以及 COD 和 Chl. a 含量普遍偏低,而 SD 较好,表明代表区域水质较好,是沉水植物样点的集中分布区;从理化数据上分析,也可得出相应的结论. 而第一轴的右侧水体 TN 和 TP 以及 Chl. a 和 COD 都较高,主要集中在实验布设的采样点 17 以及 30-33,其所在位置位于湖湾或受污严重的入湖河流的入湖口附近,受污水排放的影响,其监测的水质相对较差,所以生长沉水植物的分布样点也较少.

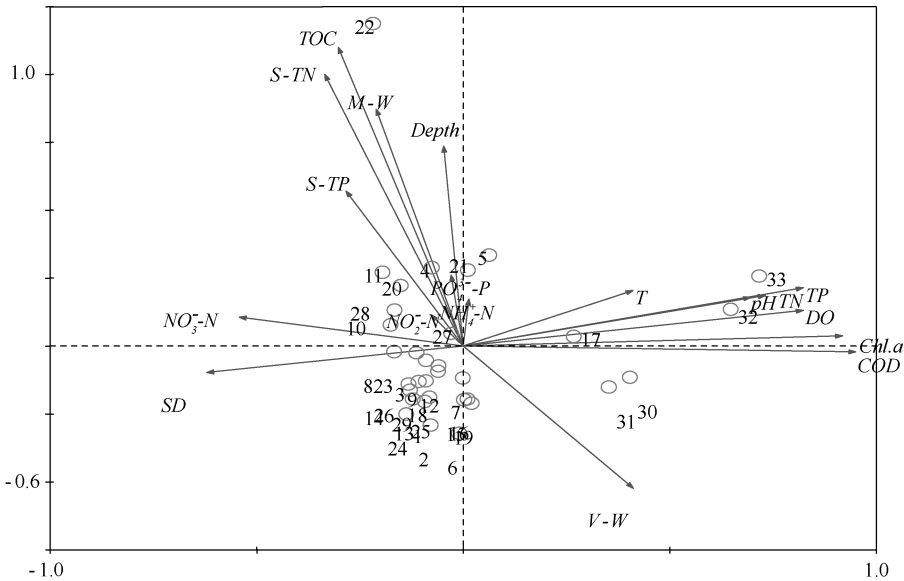


图 3 RDA 分析结果(样点与环境变量双轴图)

Fig. 3 Results of Redundancy analysis (sites and environment variables)

(1-33 表示样点及对应的生态信息,其中 1-3,14-33 代表东半湖区采样点的生态信息,4-13 代表西半湖区采样点的生态信息;S-TN:底泥总氮,S-TP:底泥总磷,TOC:底泥总有机碳,M-W:含水率,V-W:容重,Depth:水深, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ :正磷酸盐, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ :铵态氮, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ :亚硝态氮, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ :硝态氮,SD:透明度,T:温度,TN:水体总氮,TP:水体总磷,DO:溶解氧,Chl. a:叶绿素 a,COD:化学需氧量)

2.6 显著性检验

在 RDA 中,环境变量被限定为轴的线性组合,在某个轴上的重要性则由环境变量与轴的相关系数来衡量. Monte Carlo 检验测得的显著值表明(表 3),在巢湖的各采集点中,水体 TP, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、COD、SD 和底泥 TOC 是与沉水植物分布相关的主要环境因子( $F=9.70,6.72,47.10,6.44,9.19$ ),其次是水深( $F=5.09$ ),而其他环境因子与沉水植物分布的关系并不显著,说明依赖其他环境变量,不能独立解释沉水植物的群落分布.

3 讨论

3.1 沉水植物衰退与水体富营养化的关系

1950s 以前,巢湖曾是水质良好、生物多样性丰富的大型浅水湖泊. 1960s 初巢湖建闸,湖泊与长江水体交换能力大大减弱,吞吐功能丧失,最终演变成人工调节的半封闭水体. 由于水利工程建设改变了原湖泊生态环境,加上汇水区经济、社会的快速发展,致使湖泊水质日趋恶化. 到 1980s,巢湖的水质已超出国家地面水环境Ⅲ类标准(GB3838-88),TN、TP 及 COD 已分别达到 1.68、0.127、4.16mg/L. 时至 1990s,湖泊富营养化进一步加剧,甚至出现全湖水质超 V 类的严重状况,TN、TP 浓度分别达 2.94、0.264mg/L<sup>[15]</sup>. 巢湖富营养化程

表 3 RDA 分析中环境变量的显著性检验  
Tab. 3 The importance of each variable and the significance test in RDA

环境因子	<i>F</i>	<i>P</i>
TP	9.70	0.002
COD	47.10	0.002
TOC	9.19	0.002
SD	6.44	0.002
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	6.72	0.002
Depth	5.09	0.004
$\text{NO}_2^-\text{-N}$	1.04	0.284
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	1.46	0.196
M-W	2.32	0.088
S-TP	1.24	0.236
S-TN	1.72	0.166
V-W	1.25	0.274
T	1.53	0.162
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	1.84	0.140
TN	1.74	0.158
pH	1.55	0.154
DO	1.66	0.142
Chl. a	1.66	0.172

度的加剧,使藻类过量繁殖,水体透明度下降,水生植物的种类和数量均呈下降趋势。

水生植物生长基本完全依赖于水环境,对水质的变化比较敏感。温度、光照、透明度、氮及磷浓度、pH 值等水体理化环境对水生植物尤其是沉水植物的影响的相关研究比较多<sup>[16-17]</sup>。

水温是主要的水体物理指标,水中可溶性气体的溶解度、某些盐类的溶解度和稳定性、水的 pH 值以及微生物活动情况,均会受到温度的影响<sup>[13]</sup>。但是本研究中 Monte Carlo 测试检验水温对沉水植物分布的影响并没有达到显著水平( $P=0.162>0.05$ ),主要原因是未进行温度梯度对沉水植物生长影响的研究,所得到的数据均为同季节内的。

光照对水生高等植物的存活率和生长有重要影响。藻型富营养化湖泊较低的透明度是制约沉水植物幼苗成活及生长的主要因子<sup>[18]</sup>。许多具有较高光补偿点的沉水植物在一些湖区绝迹或者遭到破坏<sup>[19]</sup>。本实验分析结果与此类似,证明了透明度是影响沉水植物分布的主要环境因子,其次是水深。陈中义<sup>[20]</sup>等研究表明,梁子湖水深/透明度为 5.26 时,绝大部分水草的生长就会受到威胁。相比较而言,巢湖水深/透明度平均值仅为 3.62,但是沉水植物以及其他生活型水草也不多见,这可能和巢湖的底质或拖网捕鱼有关。

水生植物的正常生长应该有适宜的氮、磷浓度范围,过高过低都会影响其生长和分布。吴爱平等<sup>[21]</sup>研究表明,沉水植物主要分布在中-富营养湖泊中,其生长与水柱营养含量的关系较密切。TN/TP 为 25 时,苦草的生长状态最好,苦草生物量的增长率最大,附着生物尤其是附着藻类的生长状态最差,对苦草生长的不利影响最小<sup>[22]</sup>。本研究中,水体 TP 和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  对沉水植物生长分布的影响均达到了极显著水平( $P<0.01$ ),但 TN 的影响并不显著( $P=0.158$ ) (表 3),说明巢湖流域沉水植物的分布受磷的限制要大于氮。巢湖东半湖和西半湖 TN/TP 的平均值分别为 22.4 和 16.8,这也可能是苦草在巢湖分布极少的一个原因。

湖水 pH 值对沉水植物的生长也有明显影响<sup>[19]</sup>,湖水 pH 值偏碱,以及在某些时期藻类的生长高峰期耗去大量的碳源,会导致一些植物种消亡,耐碱性水体植物成为许多湖区的优势种,使湖泊水生植物种单一化。巢湖几乎每年都形成以铜绿微囊藻为主的“水华”,犹如水面上流动的绿漆,涉及巢湖水域面积之半,被风吹到沿岸水域后,有时会形成数公分厚的“水华层”<sup>[13]</sup>。肖月娥等<sup>[23]</sup>研究表明马来眼子菜在夏季高 pH 值条件下具有较高的光合速率,成为太湖沉水植物的优势种群,这也可能是马来眼子菜在巢湖成为单一优势种的原因之一,但是本研究中, Monte Carlo 测试检验表明水体 pH 的影响并没有达到显著水平( $P=0.154$ ),这与肖月娥等的结果有出入。马来眼子菜作为巢湖沉水植被的单一优势种的现状可能还会继续存在。整个湖区沉水植被多样性的恢复还面临一定的困难,相对而言,东半湖区比西半湖区较容易实现水生植物多样性的恢复。

水下光照、温度、pH 对沉水植物的光合作用也具有重要的影响<sup>[24]</sup>。在一定温度条件下,菹草的净产氧量与一定范围的光照强度呈直线相关,菹草的光补偿点随温度的上升而上升;高 pH 下碳源缺乏对菹草的光合作用影响较大,高 pH 与强光照的协同作用严重影响菹草的光合作用<sup>[25]</sup>。菹草随着水体 pH 值不断上升光合速率急剧下降,这可能是造成菹草夏季衰亡的重要原因<sup>[23]</sup>。在本次的调查中,有 50% 以上的样点 pH 值在 9-10 之间,平均水温为 28-30℃,菹草已经几乎完全衰败死亡了,在这之前,可能也有大量的菹草生长,现在零星可见的几株只是当时的残余个体。

上述是富营养化水平不利于沉水植物生长的方面,在这些不利因素的综合影响下,沉水植物的种类和数量逐渐减少,生态位压缩,从湖心向沿岸浅水处退缩直至消失。

### 3.2 沉水植物与底质的关系

除水中营养外,底泥中营养物质是根生水生植物的重要营养源<sup>[26-29]</sup>。长期生态调查研究资料显示,富营养化湖泊沉水植物的衰退,底泥的理化性质起着重要作用<sup>[30-31]</sup>。风力自然因素和划船等人为因素引起的扰动,会影响湖泊底泥中营养物质的吸收和释放,进而影响水生植物尤其是沉水植物的生长和分布。

有机质和营养盐含量较高、流动性大、稳定性差的淤泥不利于沉水植物的定植,植物成活率较低;氮、磷含量较高的淤泥比生泥较利于沉水植物的生长,沉水植物具有较高的相对生长速率,但过于肥沃的底泥会对水生植物的生长产生抑制作用<sup>[32]</sup>。陈开宁等<sup>[28]</sup>通过模拟试验,研究了太湖五里湖三种基质类型沙石、生土和湖泥对苦草、马来眼子菜、金鱼藻和轮叶黑藻生长的影响。结果表明,湖泥较适合这 4 种沉水植物生长;苦草和马来眼子菜对相对贫瘠的生土有较强的适应性,而金鱼藻和轮叶黑藻不适宜在生土中生长;生长在

沙石上的4种沉水植物的生物量和株高最低,其中金鱼藻和轮叶黑藻于试验期间死亡。

在本次调查中,有1/3采样点没有任何水草生长。西半湖区无水草分布的样点的TN、TP含量比较高,分别高达1.68和0.54mg/L。而东半湖采样点的TN和TP含量则相对较低,部分区域为硬底或沙石,无泥也无草,有的样点TN和TP仅分别为0.25和0.09mg/L,较为贫瘠的底泥不利于沉水植物的扎根发芽,就算是对较贫瘠的底泥有较强适应性的水生植物生存了下来,其分布也不是很广,如几种分布于东半湖岸的马来眼子菜,还有零星分布的苦草、金鱼藻和狐尾藻等。但是, Monte Carlo 测试检验的结果并没有表明底泥的TN和TP与沉水植物的分布有很好的相关性( $P$ 分别为0.166和0.236),这两个指标可能是通过影响其他环境因子间接影响沉水植物的生长和分布的;而底泥TOC的影响达到了极显著水平( $P=0.002$ )。

### 3.3 沉水植物衰退与人类活动之间的关系

巢湖原是过水性河流型浅水湖泊,自1960年东口门建闸后,变为人工控制湖容积和水位的半封闭性水域。上游来沙来水被截留,下游江水倒灌受阻挡,冬季水位维持过高,使湖岸露滩面积缩小,早春晒滩机会丧失,限制了高等水生植物生长和发展<sup>[33]</sup>。

大量的农药、化肥使用增加了巢湖营养元素的积累。巢湖沿湖四周均是农田,是安徽省的主要商品粮生产基地。流域内化肥、农药施用量逐年增加,平均化肥施用量已由1950s的7.5kg/hm<sup>2</sup>上升到1990s的1200kg/hm<sup>2</sup><sup>[34]</sup>。农村面源污染加剧了巢湖的富营养化,进而影响水生植物的生长和发育,并导致水生植物特别是沉水植物的衰退和消失。

据长期生活在当地的渔民反映,拉网式捕鱼也大大的影响了沉水植被的生长和分布。拉网主要对水生植物尤其是沉水植物的种子和幼苗具有破坏作用,年复一年,大多数沉水植物很难扎根生长,种子也逐渐减少甚至消失,沉水植被的分布区域也急剧地减小。建议在治理巢湖中,应考虑适当修复湖底基质或恢复周围的沼泽和湿地;加大力度控制在禁渔期的偷捕行为以及拉网式的捕鱼形式,为沉水植物提供更多的栖息地,进而实现其净化水质的功能。

致谢:中国科学院南京地理与湖泊研究所黄蔚、柏祥参加了野外调查工作,胡红云帮助完成分析测定工作,特此一并致谢!

## 4 参考文献

- [1] 邓英春,曾昭慈,陈昌新.巢湖水环境问题的探讨.水系污染与保护,1997,2:47-52.
- [2] 吴振斌,陈德强,邱东茹等.武汉东湖水生植被现状调查及群落演替分析.重庆环境科学,2003,25(8):54-58.
- [3] 王伟,陆健健.上海地区湿地水生维管束植物及其区系特征.湿地科学,2004,2(3):171-175.
- [4] 李文朝,杨清心.乌伦古湖水生植被研究.海洋与湖沼,1993,24(1):100-108.
- [5] 陈学年,郭玉娟.广东肇庆星湖仙女湖区水生植被的演替.湖泊科学,2005,17(4):334-339.
- [6] 王卫民,杨干荣,樊启学等.梁子湖水生植被.华中农业大学学报,1994,13(3):281-290.
- [7] 吴中华,于丹,涂芒辉等.汉江水生植物多样性研究.水生生物学报,2002,26(4):348-356.
- [8] 陈明林,刘玲玲,张小平.安徽省水生植物资源的调查与分析.安庆师范学院学报(自然科学版),2004,10(2):99-101.
- [9] 张圣照.洪泽湖水生植被.湖泊科学,1992,4(1):63-70.
- [10] 潘国林,洪天求,郑伟等.巢湖十五里河口湿地植物群落多样性分析.合肥工业大学学报(自然科学版),2007,30(10):1237-1249.
- [11] 彭映辉,简永兴,王建波等.湖北省五大湖泊水生植物多样性的比较研究.水生生物学报,2004,28(5):464-470.
- [12] 由文辉.淀山湖水生维管束植物群落研究.湖泊科学,1994,6(4):317-324.
- [13] 金相灿,屠清琰.湖泊富营养化调查规范(第二版).北京:中国环境科学出版社,1990.
- [14] 张之源,王培华,张崇岱.巢湖营养化状况评价及水质恢复探讨.环境科学研究,1999,5(12):45-48.
- [15] 李如忠.巢湖水环境生态修复探讨.合肥工业大学学报(社会科学版),2002,16(5):130-133.
- [16] 陈淑琴,徐秋瑾,李法松等.环境因素对湖泊高等水生植物生长及分布的影响.生物学杂志,2008,25(2):11-15.
- [17] 苏胜齐,姚维志.沉水植物与环境关系评述.农业环境保护,2002,21(6):570-573.
- [18] 张圣照,王国祥,濮培民.太湖藻型富营养化对水生高等植物的影响及植被的恢复.植物资源与环境,1998,7(4):52-57.

- [19] 任 南, 严国安, 马剑敏等. 环境因子对东湖几种沉水植物生理的影响研究. 武汉大学学报(自然科学版), 1996, **42**(2): 213-218.
- [20] 陈中义, 雷泽湘, 周 进等. 梁子湖 6 种沉水植物种群数量和生物量周年动态. 水生生物学报, 2000, **24**(6): 582-588.
- [21] 吴爱平, 吴世凯, 倪乐意. 长江中游浅水湖泊水生植物氮磷含量与水柱营养的关系. 水生生物学报, 2005, **29**(4): 406-412.
- [22] 文明章, 郑有飞, 吴荣军. 富营养水体中总氮与总磷比对苦草生长的影响. 生态学杂志, 2008, **27**(3): 414-417.
- [23] 肖月娥, 陈开宁, 戴新宾等. 太湖两种大型沉水植物无机碳利用效率差异及其机理. 植物生态学报, 2007, **31**(3): 490-496.
- [24] 苏睿丽, 李 伟. 沉水植物光合作用的特点与研究进展. 植物学通报, 2005, **22**(增刊): 128-138.
- [25] 金送笛, 李永函, 王永利. 几种生态因子对菹草光合作用的影响. 水生生物学报, 1991, **15**(4): 295-302.
- [26] Barko JW, Smart RM. Sediment-based nutrition of submersed macrophytes. *Aquatic Botany*, 1981, **10**: 339-352.
- [27] Barko JW, Gunnison D, Carpenter SR. Sediment interactions with submerged macrophyte growth and community dynamics. *Aquatic Botany*, 1991, **41**: 41-65.
- [28] 陈开宁, 陈小峰, 陈伟民等. 不同基质对四种沉水植物生长的影响. 应用生态学报, 2006, **17**(8): 1511-1516.
- [29] Chambers PA, Kalff J. The influence of sediment composition and irradiance on the growth and morphology of *Myriophyllum spicatum* L. *Aquatic Botany*, 1985, **22**: 253-263.
- [30] 刘 俊, 陈 红. 星云湖水生态系统变迁及富营养化的变化分析. 云南环境科学, 2000, **19**(2): 42-44.
- [31] NI Le-yi. Stress of fertile sediment on the growth of submerged macrophytes in eutrophic waters. *Acta Hydrobiologica Science*, 2001, **25**(4): 400-405.
- [32] 叶 春, 于海婵, 宋祥甫等. 底泥对沉水植物生长和群落结构的影响. 环境科学研究, 2008, **21**(5): 178-183.
- [33] 耿治平. 巢湖生态环境变化及趋势预测. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2005, **13**(1): 59-63.
- [34] 张文林. 巢湖流域水环境问题与可持续发展战略. 水利科技与经济, 2005, **11**(9): 516-518.