

江苏省6个典型湖泊水生植物分布及其与环境因子的关系

夏莹霏^{1,2}, 胡晓东¹, 徐季雄¹, 韩庚宝³, 翁松干¹, 吴沛沛¹, 周睿⁴

(1.江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017;

2.河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;

3.江苏省常州市金坛区水利局指前水利管理服务站, 江苏 常州 213022;

4.中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:针对近30年来江苏省湖泊富营养化问题较为严重的现状,2016年4-5月(春季)和7-9月(夏季)进行了6个典型湖泊(白马湖、宝应湖、高邮湖、邵伯湖、长荡湖、溧湖)水生植物的野外分布情况调查,计算其优势度,判定典型湖泊的水生植物优势种。结果表明,江苏省6个典型湖泊常见水生植物19科、29种,呈现明显的季节及地域差异,主要优势种为芦苇(*Phragmites australis*)、茭草(*Zizania latifolia*)、菹草(*Potamogeton crispus*)、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、荇菜(*Nymphaeoides peltata*)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)及野菱(*Trapa natans*),生活型主要以挺水植物为主。综合营养指数法评价结果显示,6个典型湖泊均属于富营养化湖泊;其中长荡湖和溧湖为中度富营养水平,白马湖、宝应湖、高邮湖、邵伯湖均达到轻度富营养化水平。结合环境因子相关性和冗余分析(RDA),认为总氮(TN)、五日生化需氧量(BOD₅)是影响江苏省湖泊优势水生植物生长分布最主要的环境因子。

关键词:典型湖泊;水生植物;环境因子;冗余分析

中图分类号:Q142 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2020)03-0069-08

水生植物是水体中的初级生产者,依据其不同的生活习性主要分为挺水植物、沉水植物、漂浮植物以及浮叶植物四类(苏胜齐,2001)。水生植物种类繁多,植物类型在分布上也存在一定的地域差别,而不同的水生植物在吸收营养盐、改善水质、降低湖泊富营养化程度也具有不同的作用。国内外对于水生植物改善水体质量开展了大量研究(葛滢等,1999; Soltan et al,2003;张超兰等,2009);考虑到不同环境下水生植物分布状态的区别,不同类型水生植物的分布对水质有一定的指示作用(Miller et al,2006;刘勇丽等,2017)。挺水植物对污染物的耐受能力最强,研究报道较多的有 空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、芦苇(*Phragmites australis*)和香蒲(*Typha orientalis*)等(何于丹等,1996;何俊等,2008);而沉水植物正好相反,对于污染物最

为敏感(张文辉等,2004),如苦草(*Vallisneria spiralis*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、竹叶眼子菜(*Potamogeton malaianus*)等沉水植物就常多分布于中度污染的河流水域中(于海璐等,2013)。因此,在河流湖泊污染情况加剧时,水域中沉水植物会逐渐被挺水植物及浮叶植物所替代,这与目前太湖的研究结果一致(朱广伟,2008)。

近年来,对单一湖泊或河道支流水生植物分布及演替规律的研究成为热点(Pinguet et al,2012)。李中强(2012)和郝孟曦等(2015)分别对湖北省斧头湖、长湖水生植物多样性及群落演替进行研究;简敏菲等(2015)分析了乐安河自上游至下游及入鄱阳湖区域内湿地植物群落分布与环境因子;对于某一区域水生植物分布情况及其环境因子联系的研究逐渐成为热点(孔祥虹等,2015;郭葳等,2016)。江苏省位于我国东部沿海的中心地带,其淡水湖泊分布较为集中,全省湖泊面积超过6 000 km²。随着工业化、城市化和养殖业的飞速发展,用水量和排污量相应增加,使得境内湖泊污染加剧,生态问题也变得日益严重(范成新,2005;吴爱平等,2005)。

目前,江苏省湖泊水质恶化、生态环境退化等一系列问题,已经严重影响到湖区经济社会的健康发展和生产生活的供水安全,也影响到国家对整个太

收稿日期:2018-02-08

基金项目:江苏省创新能力提升项目(BM2016031);水利部示范项目(SF-201816);江苏省水利科技项目(2015034,2016028);江苏省科技厅创新能力建设计划(BM 2018028);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX17_0136)。

作者简介:夏莹霏,1994年生,女,硕士研究生,研究方向为湖泊水生态修复。E-mail:xia.yingfei@qq.com

通信作者:胡晓东。E-mail:huxiaodong1979@sohu.com

湖流域环境治理目标的实现。因此,开展江苏省湖泊水生植物多样性调查的工作迫在眉睫。本项目特别针对江苏省6个具有代表性的淡水湖泊进行水生植物分布情况调查,摸清水生植物的生长、分布以及水质状况,运用冗余分析(RDA)探究水生植物分布与环境因子之间的关系,以期江苏省富营养湖泊水生植物生态恢复提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域及样点布置

江苏省是我国淡水湖泊分布集中的省份之一,境内水网密布、湖泊众多,有太湖、洪泽湖、高邮湖、骆马湖、白马湖、石臼湖、微山湖等大中型湖泊,本次调查区域(116°18′~121°57′E,30°45′~35°20′N)面积共10.26万km²。根据2005年江苏省人民政府公布的《江苏省湖泊保护名录》,境内共有大小湖泊(湖荡)137个,约为6260km²,湖泊率为6%,位居全国之首,总库容为127.6亿m³。全省按湖泊面积大小分类,1km²以下的占43%,1~10km²的占44%,10~50km²的占4%,50~100km²的占2%,100~500km²的占4%,500~1000km²的占1%,1000km²以上的占2%。

参考《江苏省省管湖泊保护规划》,本文选取江苏省内长江以北的泻湖型湖泊(白马湖、宝应湖、高邮湖、邵伯湖)以及长江以南的河迹洼地型湖泊(溇湖和长荡湖)为研究对象(图1)。从湖泊面积上看,高邮湖是全国第六大淡水湖、江苏省第三大淡水湖,面积为574.9km²,而邵伯湖和宝应湖属于中小型湖泊,面积仅为63.2km²和38.7km²。因此,充分考虑湖泊的地理位置、面积大小、水文环境和理化性质等多重因素,选取了这6个湖泊作为典型湖泊来研究江苏省水生植物的现状,包括多样性及群落演替的变化特征,相关信息见表1。

1.2 水生植物采样方法和测定

2016年4-5月(春季)以及7-9月(夏季)分别在白马湖、宝应湖、高邮湖、邵伯湖、溇湖和长荡湖各采样点进行两次水生植物现场采样。对沉水、浮叶植物采集时,使用长度为1m的PVC管方框,选取1m×1m的空间范围,用采样夹(0.25m²)将水草连根带泥全部夹取洗净,除去枯枝烂叶及杂物,现场鉴别种类,分类称量植物鲜重;对挺水植物进行采集时,同样方法选定1m×1m的空间范围,记录群落特征并齐根收割后称取鲜重。每个采样点上随机采集2~3次,记录时均换算成每平方米生物量。

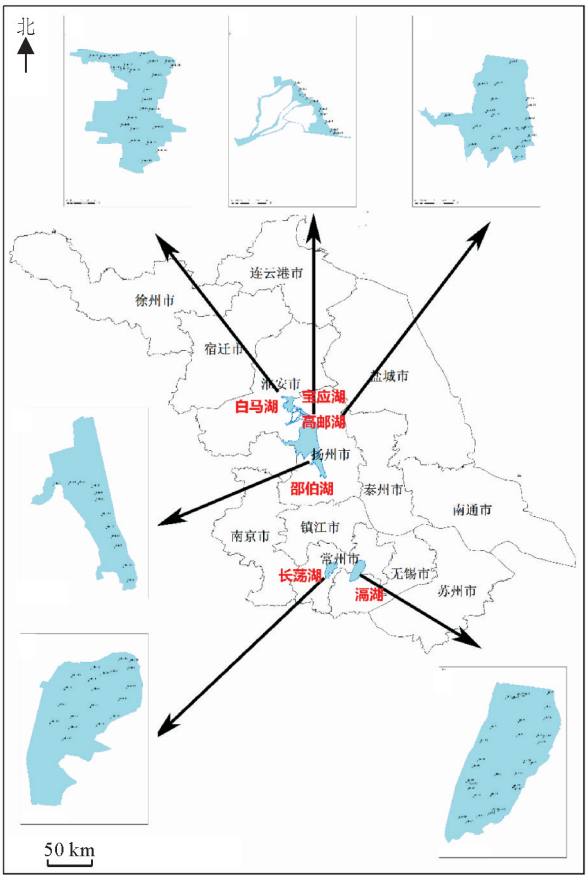


图1 江苏省调查湖泊分布及采样点
Fig.1 Distribution of the lakes surveyed in Jiangsu Province and sample site locations

表1 调查湖泊位置和面积

Tab.1 Location and area of the surveyed lakes			
湖泊	地理位置	面积/ km ²	样点 数/个
白马湖	119°02′~119°12′E,33°09′~33°19′N	110.2	24
宝应湖	119°05′~119°24′E,33°01′~33°16′N	38.7	10
高邮湖	119°06′~119°25′E,32°30′~33°05′N	574.9	21
邵伯湖	119°22′~119°28′E,32°30′~33°45′N	63.2	12
溇湖	119°75′~119°90′E,31°49′~31°69′N	178.9	18
长荡湖	119°51′~119°62′E,31°56′~31°67′N	120.7	20

1.3 水质理化性质测定与分析

使用 YSI 多参数水质监测仪现场测定 pH、DO,不能现场测定的理化数据,通过采样瓶采集水样带回实验室分析。水样中的营养盐指标分析按照《水和废水监测分析方法》及中华人民共和国国家标准进行测定。

1.4 湖泊营养程度评价方法

本文评价湖泊营养程度采用综合营养指数法(TLI),其计算公式如下(金相灿,1995;王明翠等,2002):

$$TLI(Chl-a)=10(2.5+1.086\ln Chl-a)$$

$$TLI(TP)=10(9.436+1.624\ln TP)$$
$$TLI(TN)=10(5.453+1.694\ln TN)$$
$$TLI(SD)=10(5.118-1.94\ln SD)$$
$$TLI(\Sigma)=W(Chl-a)\times TLI(Chl-a)+W(TP)\times TLI(TP)+W(TN)\times TLI(TN)+W(SD)\times TLI(SD)$$

式中:W(Chl-a)、W(TP)、W(TN)和 W(SD)分别为 0.3260、0.2300、0.2192 和 0.2246。最后评价方法采用 0~100 的一系列连续数字对湖泊营养状态进行分级。TLI(Σ)<30 为贫营养;30≤TLI(Σ)≤50 为中营养;50<TLI(Σ)≤60 为轻度富营养;60<TLI(Σ)≤70 为中度富营养;TLI(Σ)>70 为重富营养。

1.5 水生植物优势度

优势度采用重要值的计算方法(戈峰,2008):相对频度=该种的频度/所有物种频度之和,相对盖度=该种的盖度/所有物种盖度之和,相对生物量=该种的生物量/群落中所有种生物量之和;其中频度和盖度的计算方法参照《植物群落清查的主要内容、方法和技术规范》(方精云等,2009)。

1.6 数据分析

采用 SPSS 22.0 进行相关性分析,物种与环境

因子关系分析采用 CANOCO 4.5 软件包标准程序进行。物种数据处理前对平均优势度小于 0.05 的物种进行了剔除,选取 14 种水生植物进行优势度与环境因子之间的去趋势对应分析(DCA)和冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

2.1 水生植物多样性

2016 年对 6 个湖泊的水生植物生活型调查结果(表 2)发现,白马湖水生高等植物 15 科、19 种,主要分布于湖区的中部和南部地区,包括菹草群落、茭草群落和芦苇群落;宝应湖水生高等植物 13 科、16 种,水生高等植物的种类数、生物量及盖度数据显示,湖区挺水植物较多,漂浮和浮叶种类贫乏,水生高等植物主要分布在湖区靠近沿岸及围网的区域;高邮湖 13 科、18 种,主要分布在东部沿岸区,其他区域和湖心区数量较少;溧湖水生高等植物 13 科、15 种,主要分布在南部和沿岸区域;邵泊湖水生高等植物 9 科、12 种,要分布在北部沿岸区,湖区挺水植物种类较多,漂浮、浮叶种贫乏,群落结构简单;长荡湖水生高等植物 11 科、15 种,主要分布在沿岸区,湖心区数量较少。

表 2 调查湖泊的水生植物生活型统计
Tab.2 Aquatic plants in the surveyed lakes

生活型		白马湖		宝应湖		高邮湖		溧湖		邵伯湖		长荡湖	
		5月	7月	5月	7月	4月	9月	4月	8月	4月	9月	4月	8月
挺水植物	科	6	4	5	4	4	3	4	3	3	3	3	3
	占总科数/%	40.00	26.67	38.46	30.77	30.77	23.08	30.77	23.08	33.33	33.33	27.27	27.27
	种	8	6	7	5	6	5	5	5	5	4	4	4
	占总种数/%	42.11	31.58	43.75	31.25	33.33	27.78	33.33	33.33	41.67	33.33	26.67	26.67
浮叶植物	科	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2
	占总科数/%	13.33	13.33	15.38	15.38	15.38	15.38	7.69	7.69	11.11	11.11	18.18	18.18
	种	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2
	占总种数/%	10.53	10.53	12.50	12.50	11.11	11.11	6.67	6.67	8.33	8.33	13.33	13.33
漂浮植物	科	2	3	2	3	2	1	2	2	1	1	1	0
	占总科数/%	13.33	20.00	15.38	23.08	15.38	7.69	15.38	15.38	11.11	11.11	9.09	0.00
	种	2	3	2	3	2	1	2	2	1	1	1	0
	占总种数/%	10.53	15.79	12.50	18.75	11.11	5.56	13.33	13.33	8.33	8.33	6.67	0.00
沉水植物	科	5	3	2	1	4	2	2	1	2	0	5	4
	占总科数/%	33.33	20.00	15.38	7.69	30.77	15.38	15.38	7.69	22.22	0.00	45.45	36.36
	种	6	4	2	1	5	2	2	1	3	0	6	4
	占总种数/%	31.58	21.05	12.50	6.25	27.78	11.11	13.33	6.67	25.00	0.00	40.00	26.67

2.2 水生植物分布特征

本次调查发现,江苏省 6 个典型湖泊的主要优势种为芦苇、茭草、菹草、穗状狐尾藻、空心莲子草、野菱、荇菜,生活型主要以挺水植物为主;其中,白马湖 5 月的主要优势种为菹草、茭草、狭叶香蒲、芦苇,7 月的主要优势种为芦苇茭草、空心莲子草、野菱;

宝应湖 5 月水生植物主要优势种为菹草和空心莲子草,7 月的主要优势种为狭叶香蒲和空心莲子草;高邮湖 4 月的水生植物优势种为菹草,9 月的主要优势种为野菱和荇菜;溧湖 4 月的水生植物主要优势种为芦苇和茭草,8 月的主要优势种仅有芦苇,茭草的优势度下降;邵泊湖 4 月水生植物的主要优势种

为菹草,9月的主要优势种变为野菱、空心莲子草、茭草、荇菜和芦苇;4月的长荡湖水生植物主要优势种为荇菜和芦苇,8月调查发现,优势水生植物新增野菱,荇菜和芦苇的优势情况正好相反(表3)。

表3 调查湖泊水生植物主要种类组成及优势度

Tab.3 Species composition and corresponding importance values of aquatic plant in the surveyed lakes

主要种类	白马湖		宝应湖		高邮湖		溇湖		邵伯湖		长荡湖	
	5月	7月	5月	7月	4月	9月	4月	8月	4月	9月	4月	8月
菹草	0.311	-	0.602	-	0.739	-	0.036	-	0.722	-	0.029	-
茭草	0.157	0.168	0.080	0.036	0.027	0.074	0.175	0.077	0.044	0.129	0.040	0.055
芦苇	0.103	0.169	0.024	-	0.026	0.078	0.596	0.775	0.061	0.096	0.130	0.505
狭叶香蒲	0.096	0.044	0.018	-	0.013	-	0.025	-	-	-	0.015	-
空心莲子草	0.074	0.155	0.087	0.222	0.025	0.077	0.011	0.029	0.029	0.193	0.020	0.043
野菱	0.063	0.133	0.021	0.014	0.026	0.301	-	-	0.032	0.322	0.018	0.124
莲	0.039	-	0.007	0.235	-	-	0.032	-	-	-	-	-
稗	0.034	0.050	0.078	0.074	-	-	-	-	0.011	0.063	-	0.024
水鳖	0.025	0.026	0.020	0.065	0.011	0.013	0.023	0.019	-	-	-	-
水盾草	0.021	0.013	0.006	-	0.014	-	-	-	-	-	0.022	0.009
金鱼藻	0.017	-	-	-	0.007	-	-	-	0.012	-	0.035	0.031
荇菜	0.015	0.015	0.014	0.021	0.031	0.279	0.051	-	0.048	0.135	0.623	0.140
苦草	0.012	0.025	-	0.014	-	-	-	-	-	-	-	-
浮萍	0.012	0.016	0.030	0.009	0.006	-	-	-	0.011	-	0.015	-
盒子草	0.011	-	0.013	-	-	-	-	0.017	-	-	-	-
水葱	0.008	-	-	-	0.006	-	-	-	-	-	-	-
穗状狐尾藻	0.002	0.020	-	-	0.014	0.076	0.025	-	-	-	0.007	0.032
龙须眼子菜	-	-	-	-	0.037	-	-	-	0.015	-	-	-
双穗雀稗	-	-	-	-	0.018	0.016	-	0.021	-	-	-	-
紫萍	-	-	-	-	-	-	0.026	-	-	-	-	-
莎草	-	-	-	-	-	-	-	-	0.016	-	-	-
轮叶黑藻	-	0.014	-	-	-	0.064	-	-	-	-	0.026	-
伊乐藻	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.019	-
凤眼莲	-	-	-	-	-	-	-	0.034	-	-	-	-
槐叶萍	-	0.023	-	0.009	-	-	-	0.019	-	0.063	-	-
竹叶眼子菜	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.037
黄花水龙	-	-	-	-	-	-	-	0.009	-	-	-	-
香菇草	-	-	-	0.008	-	-	-	-	-	-	-	-
芡实	-	-	-	-	-	0.021	-	-	-	-	-	-

注:“-”代表该物种在该湖调查期未出现。
Note: “-”represents the species has not been identified in this investigation.

2.3 环境因子变化特征

对比研究区域6个湖泊水体的主要理化指标发现,总体均显碱性,pH的年均值7.96~8.10,变化浮动不大;溶解氧(DO)均值均在7 mg/L以上,达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)的Ⅰ类水标准;高锰酸盐指数(COD_{Mn})年均值为3.53~5.31 mg/L,总体水质达到Ⅱ~Ⅲ类;其中,宝应湖、溇湖及长荡湖COD_{Mn}较其它湖偏高,属于Ⅲ类水标准;五日生化需氧量(BOD₅)指标差别不大,在1.52~3.99 mg/L,属于Ⅱ~Ⅲ类水体;氨氮(NH₃-N)指标均在0.5 mg/L以下;其中,溇湖的总氮和总磷指标均为最高值,分别为2.48 mg/L和0.13 mg/L,其

次为长荡湖,分别为2.40 mg/L和0.09 mg/L。从监测结果可以看出,总氮、总磷是溇湖、长荡湖、白马湖的主要超标项目。本次调查6个典型湖泊环境因子指标的均值和变化范围详见表4。
综合营养指数法计算结果表明,本次调查江苏省的6个湖泊均属于富营养化湖泊;其中,溇湖和长荡湖属于中度富营养,综合营养指数分别为63.82和62.24;此外,白马湖、宝应湖、高邮湖、邵伯湖均达到轻度富营养化水平,其中高邮湖、邵伯湖更接近中度富营养水平(图2)。调查的所有湖泊均存在富营养化现象,可见湖泊富营养化问题是危害江苏省湖泊健康的主要问题之一(秦伯强,2002)。

表 4 调查湖泊的环境因子指标

Tab.4 Environmental factors of the surveyed lakes

湖名	指标	pH	DO/ mg · L ⁻¹	COD _{Mn} / mg · L ⁻¹	BOD ₅ / mg · L ⁻¹	NH ₃ -N/ mg · L ⁻¹	TN/ mg · L ⁻¹	TP/ mg · L ⁻¹
白马湖	均值	7.96	8.46	5.18	1.83	0.31	1.45	0.08
	范围	7.38~9.53	5.00~11.7	3.20~8.20	0.60~5.10	0.05~2.48	0.52~5.28	0.02~0.29
宝应湖	均值	8.10	8.49	5.18	1.90	0.21	1.27	0.06
	范围	7.68~9.60	5.10~11.40	3.50~7.90	0.50~5.20	0.06~1.74	0.48~4.51	0.02~0.14
高邮湖	均值	8.01	8.69	4.06	1.52	0.14	1.02	0.07
	范围	7.53~8.55	6.00~11.60	2.30~5.50	0.50~5.00	0.05~0.82	0.37~2.45	0.03~0.13
溧湖	均值	8.01	7.34	5.21	3.76	0.34	2.48	0.13
	范围	7.33~8.70	5.22~10.70	2.20~7.80	1.20~5.90	0.04~1.06	1.55~3.78	0.04~0.35
邵伯湖	均值	8.09	8.49	3.53	1.69	0.13	1.07	0.07
	范围	7.29~8.40	6.30~10.80	2.10~4.80	0.70~2.80	0.06~0.29	0.60~1.69	0.04~0.10
长荡湖	均值	8.03	7.02	5.31	3.99	0.40	2.40	0.09
	范围	7.67~8.56	5.65~8.73	3.70~6.50	2.60~5.20	0.10~1.36	1.77~3.47	0.05~0.16

2.4 优势水生植物分布与环境因子的关系

2.4.1 环境因子及其与 TLI 指数的相关性 SPSS 相关分析结果表明,各环境因子之间均存在一定的相关性(表 5)。DO 与 COD_{Mn}、NH₃-N 呈极显著负相关($P<0.01$);COD_{Mn}与 NH₃-N、TP 均呈显著正相关($P<0.05$),与 TN 呈极显著正相关($P<0.01$);BOD₅与 TP 呈显著正相关($P<0.05$),与 TN 呈极显著正相关($P<0.01$);NH₃-N 与 TN 呈显著正相关($P<0.05$),TP 与 TN 呈极显著正相关($P<0.01$);综合营养指数 TLI 与 TP、TN 均呈显著正相关($P<0.05$),与 BOD₅ 呈极显著正相关($P<0.01$)。

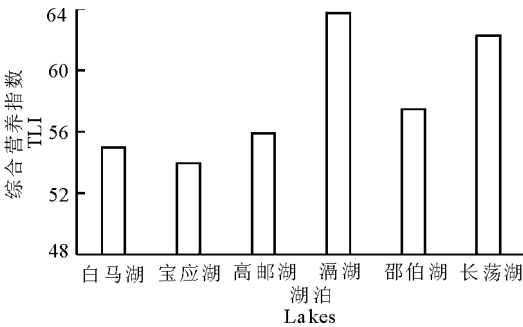


图 2 调查湖泊综合营养指数比较

Fig.2 TLI values of the surveyed lakes

表 5 水环境因子之间的相关性分析

Tab.5 Correlation matrix of water environmental factors

指标	pH	DO	COD _{Mn}	BOD ₅	NH ₃ -N	TP	TN	TLI
pH	1.00							
DO	0.41	1.00						
COD _{Mn}	0.07	-0.86 **	1.00					
BOD ₅	0.27	-0.58	0.81	1.00				
NH ₃ -N	-0.23	-0.96 **	0.88 *	0.65	1.00			
TP	-0.06	-0.76	0.87 *	0.84 *	0.73	1.00		
TN	0.13	-0.78	0.94 **	0.93 **	0.83 *	0.93 **	1.00	
TLI	0.43	-0.42	0.76	0.96 **	0.49	0.83 *	0.89 *	1.00

注: * 表示相关性在 0.05 显著(双尾); ** 表示相关性在 0.01 极显著(双尾)。

Note: * denotes a significant correlation($P<0.05$,two-tailed test) ; ** denotes a highly significant correlation($P<0.01$, two-tailed test).

2.4.2 水生植物优势度与环境因子的相关性 由于水生植物物种数据 DCA 分析中环境梯度长度(lengths of gradient)最大值为 1.814<3,因此选择 RDA 排序分析。结果显示,4 个排序轴对物种和环境因子关系的累积方差为 100%,其中轴 1 和轴 2 共解释物种与环境因子之间累计方差为 88.2%,说明水生植物组成与环境因子之间的关系基本可以用排序结果解释(表 6)。

表 6 优势度与环境因子的相关系数

Tab.6 Correlation coefficients of species and environmental factors

指标	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4	总方差
特征值	0.726	0.142	0.106	0.010	1.000
物种-环境相关性	0.999	1.000	0.979	0.881	
物种数据累计百分比	72.6	86.8	97.4	98.4	
物种-环境关系累计百分比	73.8	88.2	99.0	100	
所有特征值之和					1.000
所有典范特征值之和					0.984

RDA 分析表明,芦苇与 TN、TP、BOD₅ 均呈显著正相关,与 DO 呈显著负相关;菹草和野菱与 DO 呈显著正相关,与 COD_{Mn}、BOD₅、NH₃-N、TN、TP 均呈显著负相关,其中菹草还与 pH 呈负相关;荇菜、金鱼藻、穗状狐尾藻、浮萍与 pH、BOD₅ 呈极显著正相关,与 DO 呈显著负相关,其中浮萍与 NH₃-N 呈显著负相关;挺水植物茭草、莲均与 NH₃-N、COD_{Mn}、TN、TP 呈显著正相关。图 3 中箭头的长度代表该种影响因子所占的比重,因此从总体影响程度来看,除 pH 外,其余环境因子影响程度均较大,且 TN、BOD₅ 是影响江苏省水生植物优势度最主要的环境因子(图 3)。

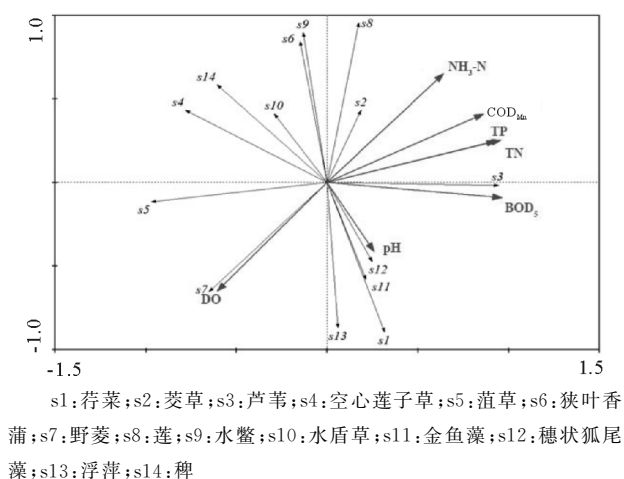


图3 水生植物与环境因子 RDA 分析

s1: *Nymphoides peltata*; s2: *Zizania latifolia*; s3: *Phragmites australis*; s4: *Alternanthera philoxeroides*; s5: *Potamogeton crispus*; s6: *Typha angustifolia*; s7: *Trapa natans*; s8: *Nelumbo nucifera*; s9: *Hydrocharis dubia*; s10: *Cabomba caroliniana*; s11: *Ceratophyllum demersum*; s12: *Myriophyllum spicatum*; s13: *Lemna minor*; s14: *Echinochloa crusgalli*

Fig.3 RDA ordination diagram of plant species and environmental variables

3 讨论

3.1 江苏省典型湖泊水生植物现状

本次调查发现,江苏省 6 个典型湖泊的主要水生植物种类共有 19 科、29 种,其中主要优势种为芦苇、茭草、菹草、穗状狐尾藻、荇菜、空心莲子草、野菱,且呈现明显的季节性。春季,调查湖泊的水生植物优势种主要为菹草群落;夏季以后,菹草群落逐渐被荇菜、野菱等水生植物群落替代,这主要取决于菹草本身的生活习性;另一方面,由于夏季雨水较多,导致水体透明度较低,而菹草此时可能在水下,加之

缺少光照以及高 pH 的环境,不能有效进行氮磷代谢而衰败死亡(Exford, 1981; 金送笛, 1994)。已有的研究表明,温度、水深、pH、TN、TP 等环境因子均对水生植物的生长和分布产生重要影响(施娴等, 2013; Dalton et al, 2015)。总体来看,此次江苏省 6 个典型湖泊水生植物的生物型以挺水植物为主,主要分布于湖岸区域,沉水、浮叶、漂浮植物种类偏少,这可能由于这些湖泊的水产养殖业发达,渔船航行可能会威胁到湖心区域沉水、浮叶、漂浮植物的生长(Grillas, 1990; 刘清学等, 2011; Zuidam, 2015)。从地理位置看,长荡湖、溇湖位于江苏省偏南部,宝应湖、白马湖、高邮湖、邵伯湖位于江苏省偏北部,南北水质存在一定程度的差别,且南部水质状况明显比北部差,而水生植物调查对比发现,长荡湖和溇湖的水生植物组成、分布情况都较为相似,而偏北部的 4 个湖泊也很相似;这也印证了前面的观点,因为湖泊的水文状况、水体理化性质也因此类似,导致水生植物分布、组成以及优势种呈现相似的结果(Alahuhta, 2015)。

3.2 水生植物与环境因子的关系

从 RDA 分析结果看,环境因子对江苏省优势水生植物的生长分布影响均较大,且 TN、BOD₅ 是影响江苏省优势水生植物生长分布最主要的环境因子,其中 TN 对水生植物的分布与其生境有直接的关系,由此推断,水体的理化性质也会对植物分布造成一定程度的影响(沈亚强等, 2011);但随着水体污染的持续恶化,会导致水生植物的种类数逐渐下降,最后可能仅有耐污种能够存活。因此,水环境治理迫在眉睫(马凯, 2003; 金相灿, 2007)。本次研究表明,生态修复的备选物种要考虑水生植物自身的生长特性,分季节种植并考虑按时收割管理。

3.3 水生植物生态修复工程的物种选择

目前,基于水生植物的指示物种法已经在评价湖泊或河流营养状况中表现出其有效性,但仍不存在一个完整的体系,也不能够广泛用于各种其它流域(简敏菲等, 2015);这可能需要考虑不同地区的气候及水文特征存在很大的区别。因此,一味采取别的地区水生植物进行水生态修复,可能达不到预期的修复效果。建议在今后的湖泊生态修复中,应充分考虑当地水生植物的分布及组成情况,并结合其环境影响因素进行分析,选择适合当地环境特点、适应性且存活率高的优势水生植物作为生态修复工程物种。

参考文献

- 陈庆诚译,Exford D 著,1981. 植物群落生态学教程[M]. 北京:人民教育出版社:113-183.
- 范成新,羊向东,史龙新,等,2005. 江苏省湖泊富营养化特征、成因及解决途径[J]. 长江流域资源与环境, 14(2): 218-223.
- 方精云,王襄平,沈泽昊,等,2009. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. 生物多样性, 17(6): 533-548.
- 戈峰,2008. 现代生态学(第 2 版) [M]. 北京: 科学出版社: 340-343.
- 葛滢,王晓月,常杰,1999. 不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究[J]. 环境科学学报, 17(3): 690-692.
- 郭葳,龚旭昇,邓绪伟,等,2016. 汉江中下游水生植物群落及演替[J]. 植物学报, 51(6): 782-789.
- 郝孟曦,杨磊,孔祥虹,等,2015. 湖北长湖水生植物多样性及群落演替[J]. 湖泊科学, 27(1): 94-102.
- 何俊,谷孝鸿,刘国锋,2008. 东太湖水生植物及其与环境的相互作用[J]. 湖泊科学, 20(6): 790-795.
- 简敏菲,徐鹏飞,余厚平,等,2015. 乐安河-鄱阳湖湿地植物群落分布及其环境影响因子[J]. 环境科学研究, 28(3): 408-417.
- 金送笛,李永函,陶永明,1994. 有效碳对菹草光合作用及吸收氮磷的影响[J]. 大连水产学院学报, 9(12): 6-11.
- 金相灿,1995. 中国湖泊环境[M]. 北京: 海洋出版社: 44-47.
- 金相灿,颜昌宙,许秋瑾,2007. 太湖北岸湖滨带观测场水生植物群落特征及其影响因素分析[J]. 湖泊科学, 19(2): 151-157.
- 孔祥虹,肖兰兰,苏豪杰,等,2015. 长江下游湖泊水生植物现状及与水环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 27(3): 385-391.
- 李中强,任慧,郝梦曦,等,2012. 斧头湖水生植物多样性及群落演替研究[J]. 水生生物学报, 36(6): 1018-1026.
- 刘清学,霍守亮,咎逢宇,等,2011. 安徽省湖泊富营养化现状调查与评价[J]. 安徽农业科学, 39(8): 4626-4629.
- 刘勇丽,刘录三,汪星,等,2017. 水生植物在河流健康评价中的应用研究进展[J]. 生态科学, 36(3): 207-215.
- 马凯,蔡庆华,谢志才,等,2003. 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, 27(3): 232-236.
- 秦伯强,2002. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 14(3): 193-202.
- 沈亚强,张晓可,赵伟华,2011. 黄河干流河岸带植物群落特征及其影响因子分析[J]. 水生生物学报, 35(5): 51-66.
- 施炯,陈开宁,黄蔚等,2013. 不同温度培养下荇菜(*Nymphaeoides peltata*)生长与光合作用特征[J]. 湖泊科学, 25(4): 545-550.
- 苏胜齐,2001. 环境对菹草生长和繁殖的影响及菹草对富营养化水体净化能力的研究[D]. 重庆: 西南农业大学: 35-50.
- 王明翠,刘雪芹,张建辉,2002. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 18(5): 47-49.
- 吴爱平,吴世凯,倪乐意,2005. 长江中游浅水湖泊水生植物氮磷含量与水柱营养的关系[J]. 水生生物学报, 29(4): 406-412.
- 于丹,康辉,陈宜瑜,1996. 湖湾效应对长江中游湖泊水生植被多样性的影响[J]. 生态学报, 16(5): 476-483.
- 于海瀚,韩玉芹,王力功,等,2013. 指示水质的植物[J]. 森林与人类, (10): 68-71.
- 张超兰,陈秀娟,韦必帽,等,2009. 沉水、挺水培养水生植物去除污水中氮磷的效果研究[J]. 西南农业学报, 22(3): 786-790.
- 张文辉,卢涛,马克平,等,2004. 岷江上游干旱河谷植物群落分布的环境与空间因素分析[J]. 生态学报, 24(3): 552-559.
- 朱广伟,2008. 太湖富营养化现状及原因分析[J]. 湖泊科学, 20(1): 21-26.
- Alahuhta J, 2015. Geographic patterns of lake macrophyte communities and species richness at regional scale[J]. Journal of Vegetation Science, 26: 564-575.
- Dalton R L, Boutin C, Pick F R, 2015. Nutrients override atrazine effects on riparian and aquatic plant community structure in a North American agricultural catchment [J]. Freshwater Biol, 60: 1292-1307.
- Grillas P, 1990. Distribution of submerged macrophytes in the Camargue in relation to environmental factors[J]. Journal of Vegetation Science, 1(3): 393-402.
- Miller S J, Wardrop D H, Mahaney W M, et al, 2006. A plant-based index of biological integrity (IBI) for headwater wetlands in central Pennsylvania[J]. Ecological Indicators, 6(2): 290-312.
- Pinguet Y L, Liancourt P, Gross N, Straile D, 2012. Indirect facilitation promotes macrophyte survival and growth in freshwater ecosystems threatened by eutrophication[J]. Journal Ecology, 100: 530-538.
- Soltan M, Rashed M N, 2003. Laboratory study on the survival of water hyacinth under several condition of heavy metal concentrations [J]. Advances In Environmental Research, 11(7): 321-334.
- Zuidam B G, Peeters E T, 2015. Wave forces limit the establishment of submerged macrophytes in large shallow lakes[J]. Limnology and Oceanography, 60: 1536-1549.

Distribution of Aquatic Plants in Six Typical Lakes of Jiangsu Province
and Its Relationship with Environmental Factors

XIA Ying-fei^{1,2}, HU Xiao-dong¹, XU Ji-xiong¹, HAN Geng-bao³,
WENG Song-gan¹, WU Pei-pei¹, ZHOU Rui⁴

- (1.Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017,P.R.China;
2.Environment College of Hohai University, Nanjing 210098,P.R.China;
3.Zhiqian Water Conservancy Management Service Station of Jintan District,
Changzhou 213022,P.R.China;
4.Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute
Co., Ltd, Wuhan 430010,P.R.China)

Abstract: Aquatic plants are primary producers in water bodies and play an important role in lake ecosystems. Jiangsu province, located in the central area of the east coast of China, has numerous freshwater lakes and eutrophication has become more serious over the past 30 years. However, knowledge of the effects of environmental change on the growth of aquatic plants is incomplete. We investigated the distribution of aquatic plants in six typical lakes (Baima, Baoying, Gaoyou, Shaobo, Changdang and Gehu) of Jiangsu Province during April – May (spring) and July – September (summer) of 2016. The dominant species, diversity and community succession of the aquatic plants were analyzed and relationships between aquatic plant distribution and environmental variables was studied using redundancy analysis (RDA). The aim was to provide basic data for the remediation of eutrophic lakes in Jiangsu Province. Across the six lakes, a total of 29 plant species from 19 families were observed, dominated by *Phragmites australis*, *Zizania latifolia*, *Potamogeton crispus*, *Myriophyllum spicatum*, *Nymphoides peltata*, *Alternanthera philoxeroides* and *Trapa natan*. The distribution of aquatic plants varied seasonally and spatially. The plant community was dominated by *Potamogeton crispus* in spring and by *Nymphoides peltata* and *Trapa natan* in summer. The species composition and distribution of the aquatic plants was similar in the two southern lakes (Changdang Lake and Gehu Lake) and the four northern lakes also presented similar plant community characteristics. The primary plant type was the emergent plants, primarily distributed along shorelines. The comprehensive trophic status index shows that Changdang Lake and Gehu Lake were mesotrophic and Baima Lake, Baoying Lake, Gaoyou Lake and Shaobo Lake were slightly eutrophic. Water quality in the southern region was significantly worse than in the northern region. Redundancy analysis and correlation analysis showed that total nitrogen and BOD₅ were the most important environmental factors affecting the distribution of dominant aquatic plants in Jiangsu province. We recommend that the distribution and composition of aquatic plants be considered during the ecological restoration of lakes.

Key words: typical lakes; aquatic plants; environmental factors; redundancy analysis