2012-12-25 DOI: 10.3724/SP.J.1145.2012.00889 http://www.cibj.com/
应用与环境生物学报 *Chin J Appl Environ Biol* 2012, **18**(6): 889~896

巢湖东湖区入湖河流的水生植被群落结构和区系特征及其与环境因子的关系*

祝国荣[1] 倪乐意[1] 方 涛[1] 过龙根[1] 张 萌[1,2**]
([1]中国科学院水生生物研究所 武汉 430070)
([2]江西省环境保护科学研究院 南昌 330029)

摘 要 采用野外调查方法结合典范对应分析(CCA),研究了巢湖东部湖区的入湖河道水生植被的群落结构特征和区系特征及其与环境因子的相关性. 结果表明:共发现常见水生植物物种63种,隶属于28科54属,其中沉水植物4种,漂浮植物3种,浮叶植物2种,挺水植物10种,湿生植物44种. 区系分析发现该区域的水生植被呈现隐域性和热带向北温带过渡的亚热带特征,植物种属主要以世界分布属和北温带分布属为主,其次是泛热带分布属,分别占总数的35.19%、31.48%和12.96%;这54属水生植物的地理分布区类型共有中国种子植物所占的15个分布区类型中的10个,而缺少5个地理分布区类型. 入侵种空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)分布广泛,河道呈现一定程度的堵塞状态;沉水植物物种则趋于单一化和分布面积狭小,尤其在水体污染严重的区域(如:双桥河流域和小柘皋河下游)几近衰退. CCA分析表明巢湖东部湖区入湖河道水生植物的空间分布主要受水体理化指标影响,而非水深的影响. 总之,巢湖东部湖区入湖河道水质污染加重,水生植物群落结构极不合理、地理成分复杂程度偏低且具有明显的隐域性,沿河村镇的污水处理以及保护与恢复水生植物尤其沉水植物类群迫在眉睫. 图2 表4 参35

关键词 入湖河流;水生植物;区系分析;典范对应分析;巢湖东部湖区
CLC X173 : Q948.885.1+3

Community Structure and Floristic Compositions of Aquatic Plant Communities in the Inflowing Rivers of East Chaohu Lake and Their Relationships to Environmental Factors*

ZHU Guorong[1], NI Leyi[1], FANG Tao[1], GUO Longen[1] & ZHANG Meng[1,2**]
([1]*Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences*, Wuhan 430072, China)
([2]*Jiangxi Academy of Environmental Sciences*, Nanchang 330029, China)

Abstract Community structure and floristic compositions of aquatic plant communities in the inflowing rivers of East Chaohu Lake was surveyed, and their relationships with environmental factors were analyzed with canonical correspondence analysis (CCA). The results showed that there were 63 species, affiliating to 54 genera in 28 families, found in the inflowing rivers of East Chaohu Lake, including 4 submersed species, 3 floating specie, 2 floating-leaved species, 10 emergent macrophytes and 44 hygrophytes. Flora analysis revealed intrazonal feature and subtropical transition feature from tropical to Northern (N) temperate zone, with prevailing cosmopolitan, N temperate and pantropic genera components (35.19%, 31.48% and 12.96%, respectively). The 54 genera of aquatic plants could be categorized into 10 areal-types. In addition, *Alternanthera philoxeroides*, an exotic species, growing fast and profusely, filled the river channels. In contrast, submersed macrophytes significantly declined in both species diversity and their distributions, especially in heavily polluted areas, such as the Double-Bridge River and the downstream of Xiaozhegao River. CCA analysis showed that the community structures were mainly affected by physicochemical factors rather than the water-levels. In conclusion, the inflowing rivers of East Chaohu Lake were heavily polluted, the community structure of aquatic plants was degraded, and their endemic genera were declining owning to

收稿日期:2011-10-10 接受日期:2011-12-02
*国家重大科技专项(Nos. 2012ZX07105004, 2008ZX07106-2)和国家水体污染控制与治理科技重大专项(No. 2012ZX07101-002-001)资助
Supported by the State Key Scientific Research Programs of China (Nos. 2012ZX07105004, 2008ZX07106-2) and the National Water Pollution Control and Management Technology Major Project of China (No. 2012ZX07101-002-001)
**通讯作者 Corresponding author (E-mail: tomdeshiye@126.com)

increasing pollution. Fig 2, Tab 4, Ref 35

Keywords inflowing river; aquatic macrophytes; flora analysis; CCA; East Chaohu Lake

CLC X173 : Q948.885.1+3

巢湖是中国的第五大淡水湖泊，位于安徽省境内，属长江下游左岸水系，水域面积820 km^2，流域面积13 310 km^2[1]. 湖水依赖地表径流和湖面降水补给，入湖河流有33条，出湖河流仅有裕溪河与长江相连. 近年来，随着巢湖流域经济快速发展，特别是工业化进程的提高，流域内工业污水、农业生产的面源污染、人们的生活污水，湖泊资源的开发利用以及水资源保护相对不足，导致巢湖湖泊水体富营养化、蓝藻水华大规模暴发、流域内入湖河流水质状况日趋下降以及流域水生态系统快速退化等一系列生态问题[2].

河流是陆地生态系统和湖泊生态系统之间进行物质交换的通道，入湖河道的水质直接影响到湖泊的富营养化程度[3~4]. 研究表明，入湖河流是巢湖污染的主要来源，巢湖76.9%的总氮和68.5%的总磷是通过入湖河道进入巢湖水体的[5]. 水生植物，作为水生态系统的重要组成部分和主要的初级生产者之一，对生态系统物质、能量的循环和传递起调控作用，同时具有净化水质、吸收营养盐、拦截外来污染物和保护生物多样性等多重重要的生态功能[6~7]，此外，水生植物的地理分布区类型能具体反映植物进化和变异的情况[8~10]. 因而调查研究巢湖入湖河道水生植被的分布现状和其地理分布区类型既可直观地反映出河流的受污染程度，为河流污染的治理提供第一手资料，也有利于探讨其分布、起源和演化规律，从而为其水生植物资源有效保护和可持续利用提供科学依据. 目前对巢湖入湖河道的研究多集中在西半湖流域（属省会城市合肥辖区）[11~12]，很少研究东部湖区流域，而此流域（属巢湖市辖区）的水体也日益富营养化，其入湖河流水体污染现象也不断加剧[13]. 本文重点报道了巢湖东部湖区入湖河道水生植被的群落结构特征和地理分布区类型及其与环境因子的相关性研究，以期为该区域水体开发与治理提供科学依据.

1 方 法

1.1 巢湖东部湖区入湖河道采样点设置

本研究根据巢湖东部入湖河道水体污染状况，共设水生植物采样点6个. 其中双桥河流域4个，小柘皋河流域2个（表1）.

1.2 样品采集与处理

2008年4月中旬在安徽巢湖流域东湖区入湖河道设置6个样点，每个样点3个样方（沿岸带挺水植被：1 m×1 m；沉

表1 入湖河流样点分布

Table 1 Sampling points of the inflowing rivers

样点 Sampling point	地名 Place name	地理定位 GPS
1	双桥河柴油机厂 Double-bridge River Diesel Engine Plant	N31° 36′ 56.6″, E117° 51′ 06.7″
2	水泥厂附近（桥下） Near the cement plant (under the bridge)	N31° 36′ 50.5″, E117° 49′ 50.7″
3	水泥厂排污口 Cement factory outlet	N31° 36′ 58.6″, E117° 49′ 44.5″
4	双桥河上游100 m 100 m to Double-bridge River upstream	N31° 36′ 14.7″, E117° 49′ 47.3″
5	小柘皋河河道 River course of Xiaozhegao River	N31° 37′ 17.4″, E117° 48′ 09.1″
6	小柘皋河距河口100 m 100 m to estuary of Xiaozhegao River	N31° 37′ 01.6″, E117° 47′ 57.5″

表2 各样点各生活型的优势水生植物物种

Table 2 Dominant species of aquatic plants with different life forms in each sampling site

样点 Sampling site	沉水植物 Submersed macrophytes	漂浮和浮水植物 Floating/-leaved plant	挺水植物 Emergent plant	湿生植物 Hygrophyte
1	无 None	空心莲子草 *Alternanthera philoxeroides*	芦苇 *Phlagmites commmunis*	猪秧秧、荠、窄叶野豌豆、鹅观草 *Galium aparine* var. *tenerum*, *Capsella bursa-pastoris*, *Vicia angustifolia* ex Reichard, *Roegneria kamoji*
2	菹草 *Potamogeton crispus*	空心莲子草 *A. philoxeroides*	芦苇、菰 *P. commmunis*, *Zizania latifolia*	窄叶野豌豆、鹅观草、酸模 *V. angustifolia* ex Reichard, *R. kamoji*, *Rumex japonicus* L.
3	无 None	无 None	无 None	窄叶野豌豆、酸模、小苜蓿、油菜 *V. angustifolia* ex Reichard, *R. japonicus* L., *Medicago minima*, *Brassica campestris*
4	菹草 *P. crispus*	空心莲子草 *A. philoxeroides*	石龙芮、菰 *Ranunculus sceleratus*, *Z. latifolia*	酸模、油菜 *R. japonicus* L., *B. campestris*
5	菹草 *P. crispus*	无 None	稗、石龙芮、罔草 *Echinochloa crusgali*, *R. sceleratus*, *Beckmannia syzigachne*	窄叶野豌豆、野燕麦、泽漆、野胡萝卜 *V. angustifolia* ex Reichard, *Avena fatua*, *Euphorbia helioscopia*, *Daucus catota*
6	菹草 *P. crispus*	浮萍 *Lemna minor*	水蓼 *Polygonum hydropiper*	无 None

水植物：0.2 m^2），用样方法采集标本. 真性水生植物按Cook的水生植物概念[14]鉴别种类，其他岸边湿生植物主要按照刁正俗等的方法[15]，然后按样方称取各种类的鲜重. 沉水植物采样工具为镰式采草器.

与此同时，在各采样点测定河流水深（Depth）、水温（WT）、溶氧（DO）、透明度（SD）和电导率（COND），并采集水样两份，一份用于测定悬浮物浓度（SS），另外一份用试剂固定后带回实验室测定水样中表征水质状态的理化指标：氨氮（NH_4^+）、总氮（TN）、总磷（TP）、生物需氧量（BOD_5）和化学需氧量（包括COD_{Mn}和COD_{Cr}）[16].

1.3 数据分析

水生植物和环境因子的数据利用CANOCO4.5软件包进行典范对应分析（CCA分析）排序，排序结果用物种–环境因子关系的双序图表示. 在环境因子特征变量构成的空间上，对环境变量和水生植物物种间关系排序作图，实现了水生植物与环境因子间的对应排序. 在由主轴1和主轴2构成的平面中，箭头表征了环境因子在平面上的相对位置，向量长短代表其在主轴中的作用，箭头所处象限表示环境因子与排序轴间相关性的正负. 对主要水生植物种类的密度在主轴上排序，则可反映水生植物与环境因子之间的对应关系.

2 结 果

2.1 巢湖流域东湖区入湖河道水生植被现状及其分布区类型

根据形态特征和生态习性，真性水生植物的生活型可分为挺水植物、浮叶植物、漂浮植物和沉水植物四类[17].

研究结果表明：安徽巢湖流域东湖区入湖河道水生植被，共有28科54属，共计63种，其中沉水植物4种，漂浮植物3种，浮叶植物2种，挺水植物10种，湿生植物44种（附表1）. 沉水植物优势物种为菹草（*Potamogeton crispus*），浮叶植物以空心莲子草（*Alternanthera philoxeroides*）为常见种，挺水植物优势种为芦苇（*Phlagmites commmunis*）、菰（*Zizania latifolia*）和石龙芮（*Ranunculus sceleratus*），湿生植物以猪秧秧（*Galium aparine* var. *tenerum*）、窄叶野豌豆（*Vicia angustifolia* ex Reichard）、野胡萝卜（*Daucus catota*）和羊蹄（*Rumex japonicus*）为该生活型中的优势物种（表2）.

沉水植物主要分布于小柘皋河，尤其优势种菹草几乎布满全河道（宽度约4 m），其盖度为90%以上，现存量约为7 kg m^{-2}. 湿生植物物种丰富度较高，其中入侵种空心莲子草分布广泛，河道呈现一定程度的堵塞状态. 在双桥河流域水生植被较为繁茂的区域位于水泥厂附近的流域，而水泥厂排污口水体中植被稀少（图1）.

由于目前种子植物种级水平的区系地理成分分析还受到研究水平的很大限制，而属比科更能具体反映植物进化和变异的情况，在区系分析上也更能体现一个地区区系的特征[8~9]. 因此本文在属级水平上进行了巢湖东部湖区入湖河道水生植物的地理分布区成分分析. 根据吴征镒对中国种子植物属的分布区的划分标准[10]，巢湖东部湖区入湖河道水生植物54属的分布区类型包括中国种子植物所占的15个分布区类型中的10个，缺少5个地理分布区类型（表3）.

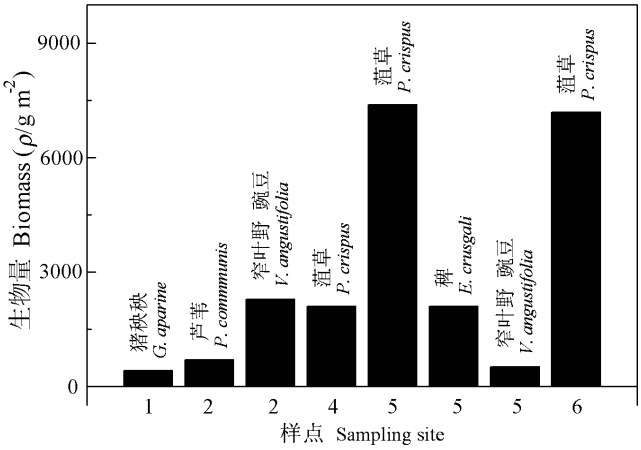

图1 各样点优势物种的生物量

Fig. 1 The biomass of dominant species in each sampling site

表3 巢湖东湖区入湖河流水生植物属的分布区类型

Table 3 Areal-types of genera of aquatic plants in the inflowing rivers of East Chaohu Lake

编号 No.	属的分布区类型 Areal-type	属数 Number of genera	占总属数比例 Percentage in total genera (*P*/%)
1	世界分布 Cosmopolitan	19	35.19
2	泛热带分布 Pantropic	7	12.96
3	热带亚洲至热带美洲间断分布 Trop. Asia & Trop. Amer. disjuncted	1	1.85
4	旧世界热带分布 Old World Tropic	2	3.70
5	热带亚洲至热带大洋洲分布 Trop. Asia to Trop. Australasia	0	0.00
6	热带亚洲至热带非洲分布 Trop. Asia to Trop. Africa	0	0.00
7	热带亚洲分布 Trop. Asia	0	0.00
8	北温带分布 North Temperate	17	31.48
9	东亚和北美洲间断分布 E. Asia & N. Amer. disjuncted	2	3.70
10	旧世界温带分布 Old World Temperate	3	5.56
11	温带亚洲分布 Temp. Asia	1	1.85
12	地中海、西亚至中亚分布 Mediterranea, W. Asia to C. Asia	1	1.85
13	中亚分布 C. Asia	0	0.00
14	东亚分布 E. Asia	1	1.85
15	中国特有分布 Endemic to China	0	0.00
	合计 Total	54	100.00

表4 典范对应分析前四排序轴的统计

Table 4 The first four axes of Canonical Correspondence Analysis (CCA)

轴 Axes	1	2	3	4
特征值 Eigenvalue	0.533	0.262	0.212	0.201
物种–环境相互关系 Species - environment correlation	1.000	1.000	1.000	1.000
物种数据的变量累积百分比 Cumulative percentage variance of species data (*P*/%)	40.7	60.7	77.0	92.3
物种–环境相关关系的变量累积百分比 Cumulative percentage variance of species - environment relation (*P*/%)	40.7	60.7	77.0	92.3

在各类属的地理成分中，世界分布19属，占总属数的35.19%，包括芦苇属（*Phragmites*）、马唐属（*Digitaria*）、蓼属（*Polygonum*）、酸模属（*Rumex*）、眼子菜属（*Potamogeton*）、金鱼藻属（*Ceratophyllum*）、浮萍属（*Lemna*）、狐尾藻属（*Myriophyllum*）、毛茛属（*Ranunculus*）、碎米荠属（*Cardamine*）、莎草属（*Cyperu*）、水莎草属（*Juncellus*）、藨草属（*Scirpus*）、飞蓬属（*Erigeron*）、苍耳属（*Xanthium*）、灯心草属（*Juncus*）、车前属（*Plantago*）、悬钩子属（*Rubus*）和拉拉藤属（*Galium*）.

热带分布（表3，2~7项）有10属，占总属数的18.52%. 其中泛热带分布属数量最大，为7属，包括狗牙根属（*Cynodon*）、䅟属（*Eleusine*）、棒头草属（*Polypogon*）、莲子草属（*Alternanthera*）、沼菊属（*Enydra*）、鳢肠属（*Eclipta*）和大戟属（*Euphorbia*）；热带亚洲和热带美洲间断分布类型仅有1属，为凤眼莲属（*Eichhornia*）；旧世界分布属有2属，为水鳖属（*Hydrocharis*）和乌蔹莓属（Cayratia）；而其他热带分布（表3，5~7项）则无属分布.

温带分布（表3，8~13项）有25属，占总属数的46.30%. 其中北温带分布属数量最大，为17属，包括看麦娘属（*Alopecurus*）、燕麦属（*Avena*）、罔草属（*Beckmannia*）、芸苔属（*Brassica*）、蒲公英属（*Taraxacum*）、荠属（*Capsella*）、蒿属（*Artemisia*）、苦苣菜属（*Sonchus*）、蓟属（*Cirsium*）、蔷薇属（*Rosa*）、婆婆纳属（*Veronica*）、木贼属（*Equisetum*）、胡萝卜属（*Daucus*）、葎草属（*Humulus*）、野豌豆属（*Vicia*）、稗属（*Ecltinochloa*）、葱属（*Allium*）；其次是旧世界温带分布有3属，为鹅观草属（*Roegneria*）、苜蓿属（*Medicago*）和菱属（*Trapa*）；东亚和北美洲间断分布有2属，为菰属（*Zizania*）和莲属（*Nelumbo*）；温带亚洲分布、地中海、西亚至中亚分布和东亚分布均仅有1属，分别为附地菜属（Trigonotis）、小麦属（*Triticum*）和黄鹌菜属（Youngia）；而中亚分布区类型则无属分布.

中国特有分布无属分布（表3）.

2.2 水生植物物种–环境因子间的关系

典范对应分析（CCA）发现，调查样点的水生植物物种–环境因子间的关系如下：前4个排序轴的特征值分别为0.533、0.262、0.212和0.201，水生植物种类与环境因子4 个排序轴的相关系数均为1.000，且特征值和优势种群与环境因子的相关系数都通过蒙特卡罗（Monte Carlo）检验，*P*值小于0.05，说明排序效果理想（表4）.

图2中的轴1主要反映水体营养负荷和污染程度的情况，而轴2主要反映水下光照情况和水体中还原性物质丰度情况，水深对两轴的贡献很小. 由图2可知：菹草（*P. crispus*）、金鱼藻（*Ceratophyllum demersum*）、菱（*Trapa bispinosa*）和水苦荬（*Veronica undulata*）以及竹叶眼子菜（*P. malaianus*）、凤

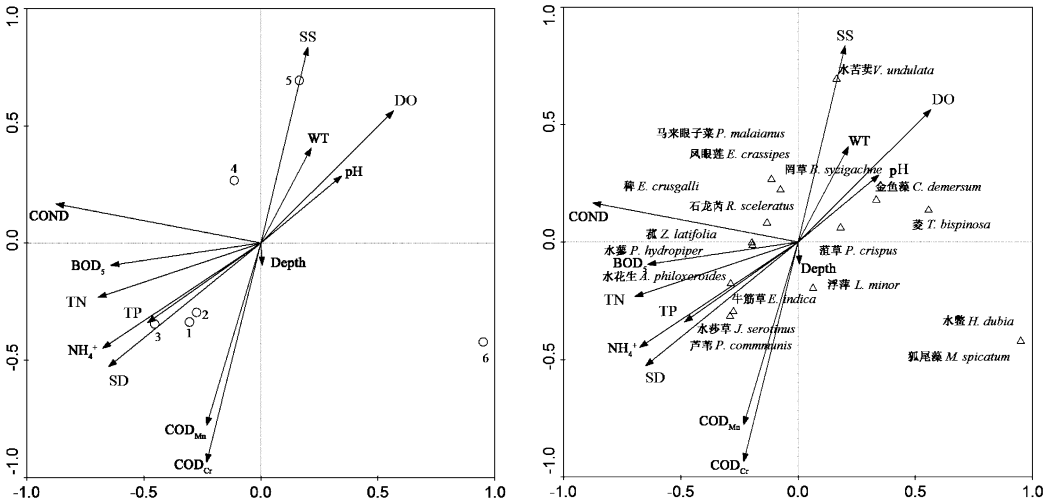

图2 样点–环境因子间（a）以及各样点的水生植物物种–环境因子间（b）的典范对应分析（CCA）排序图

Fig. 2 The CCA ordination diagrams of sampling sites - environmental factors (a) and aquatic plants species - environmental factors (b)

眼莲（*Eichhornia crassipes*）和罔草（*Beckmannia syzigachne*）分布在第一、二象限，与水物理指标（溶氧水平、悬浮物浓度、酸碱度以及水温）呈较为密切的正相关关系，与水化学指标（氨氮、TN、TP、反映水质污染情况的BOD_5和反映还原性物质水平的化学需氧量）和水下光照情况呈较为密切的负相关关系，与水深相关性不明显；空心莲子草、水莎草（*Juncellus serotinus*）、芦苇、菰和水蓼（*Polygonum hydropiper*）以及石龙芮和稗（*Echinochloa crusgali*）分布于第二、三象限，与水化学指标和水体电导率呈较密切的正相关关系，与水物理指标（溶氧水平、悬浮物浓度、酸碱度以及水温）呈较为密切的负相关关系，与水深等相关性很弱；水鳖（*Hydrocharis dubia*）、狐尾藻（*Myriophyllum spicatum*）和浮萍（*Lemna minor*）分布于第四象限，与SS呈较为密切的负相关关系，与其他物理指标和水化指标相关性较弱.

3 讨论

本研究将真性水生植物按Cook的水生植物概念[14]，其他岸边湿生植物主要按照刁正俗等的方法[15]鉴别植物种类，研究发现巢湖东部湖区入湖河道双桥河和小柘皋河流域的湿生植物物种丰富度较高，挺水植物其次，沉水植物和漂浮-浮叶植物则很低. 与2006年同样的枯水期（6月份）双桥河流域的水生植物群落种类[18]相比，植物种类，尤其不耐污植物种和本地物种大量较少，如：水芹（*Oenanthe javanica*）、茭白（*Z. latifolia*）、荇菜（*Nymphoides peltatum*）、禺毛茛（*Ranunculus cantoniensis*）、大茨藻（*Najas marina*）等，优势种也由荇菜群丛+空心莲子草群丛等转变成单一的空心莲子草群丛. 王研等在2010年枯水期（2月）对小柘皋河流域的水生植物植物调查中，仅发现5种水生植物，隶属5科5属，以耐污的金鱼藻和菹草为优势种[19]，与本研究结果相比其物种多样性急剧减小，耐污种取代非耐污种. 以上研究结果表明，随着时间的推移，双桥河和小柘皋河流域的水生植被的物种数量逐渐减少，多样性降低，优势种由耐污种为主，这在一定程度上说明了该流域的水质在不断恶化，从而引发植被衰退.

根据吴征镒对中国种子植物属分布区类型的划分标准[10]，陈明林等总结发现安徽省水生植物总属65个的分布区类型可以划分为11个地理分布区[20]，而本研究发现巢湖东湖区入湖河道常见水生植物54属的分布区类型划分为10个地理分布区. 但无论是安徽省还是巢湖东部湖区入湖河流流域的水生植物种属的分布区类型均是以世界分布属最多，且均未发现中国特有种，这一方面表明该流域植物区系与全球植物区系有着紧密而广泛的联系，另一方面也说明了该流域水生植物区系明显的隐域性. 此外，本研究发现北温带分布属较泛热带分布属多，而安徽省水生植物属的分布区类型则反之，这可能主要是由两次研究区域的差异和时间所造成的，但也表明巢湖东湖区入湖河道水生植物是以温带性质为主，兼有热带属性，更确切地讲，该区域的植被呈热带向北温带过渡的亚热带特征. 总体而言，本流域水生植物区系组成成分复杂程度偏低，多样性水平不高.

水生植物基本完全依赖于水环境，其生长分布受水体理化性质影响，尤其营养[21~25]. 本研究通过典范对应分析（CCA）分析也发现巢湖东部湖区入湖河道水体的水体营养负荷和污染程度（如：BOD_5、COD_{Mn}）与水生植物的分布和生长密切相关，但二者均与水深相关甚少，这可能与入湖河道在枯水期水体较浅有关（0.5~1.29 m，大多见底）. 王研等在2010年不同季节对小柘皋河流域水生植物调查中也发现水生植物多样性与水质及水位存在一定的相关性，水位升高、水体污染严重会影响水生植物的生长并降低其多样性[19]. 富营养水体是引发沉水植物物种单一生物量降低等衰退现象的主要原因之一[22, 26~27]. 与其他研究[18~19]相比，随着近几年来巢湖东部湖区入湖河道水质的污染加重，该流域的沉水植被物种趋于单一化和分布面积缩小化. 而本研究也发现这种现象：在双桥河水体污染严重的流域，沉水植物几近衰退，仅在入湖河口地带才出现中等耐污种菹草的分布. 与此同时，我们发现湿生植物入侵种空心莲子草则广泛分布大量生长，使得双桥河道呈现一定程度的堵塞状态. 这一方面说明了双桥河水体的高营养已对水生植被造成严重影响，另一方面，为我们保护本地物种和生态稳定，防止入侵种的泛滥敲响了警钟.

总体而言，巢湖东部湖区入湖河道水质仍不断恶化[4, 18]；该流域的水生植物群落结构并不理想，而其地理成分复杂程度也偏低且具有明显的隐域性，因而这些现有的水生植物不仅不能有效地发挥其净化水质、吸收营养盐、拦截外来污染物和保护生物多样性等环境生态功能，还在维持水生植物本身的生态平衡存在隐患.

为了恢复和保护入湖河道水生植物尤其沉水植物，以达到改善巢湖入湖河道水质，进而维持巢湖整个湖泊水质的目的，根据入湖河道污水水质和水量均不稳定的动态变化特征，水生植物在水体生态修复和去除氮磷等的作用特征[28~31]以及植被修复的物种选择原则（生态适应性广，耐污性强；良好的水质净化能力；繁殖栽培简单；具有一定的经济或实用价值；优先考虑乡土物种；特定区域要考虑景观及审美价值）等[18~19]，特提出以下建议：

（1）首先治理双桥河. 双桥河是巢湖全湖入湖河道中污染严重的河道，此流域主要是工业点源污染和城市污染控制，且受有机污染比较显著[4]. 首先是将工厂污水集中处理后再排入河道，降低点源污染[32]；其次是定期收割回收泛滥生长的入侵种空心莲子草以疏浚河道，并达到保护本地物种，

防止入侵种泛滥的目的；而后是在该河道进行植被恢复. 由于该河道流速较慢，全年的透明度良好，对沉水植物生长影响较小，故植被修复以更有利于去污和植物恢复的复合系统展开[33]. 在清除了大量空心莲子草的水域，种植耐污且具有较强吸附有机污染物的挺水植物和沉水植物，如：茭白+水芹+芦苇挺水植物群丛，菹草+金鱼藻沉水植物群丛等[18, 34]非入侵种，既能防止入侵种泛滥，改良水质，也能优化水生植物群落结构并增强其稳定性.

（2）尽管与双桥河水质相比，小柘皋河水质较好，但近年来也在逐渐恶化，多年平均水质在Ⅴ类和劣Ⅴ类之间，直接威胁到巢湖水体特别巢湖东湖区饮用水源地的安全[19]，因而修复小柘皋河水体、缓解小柘皋河对巢湖水体的影响也势在必行. 首先是小柘皋河下游河道的疏浚. 疏挖深度的确定应综合考虑清除内源性污染、控制巨型水生植物的生长以及有利于生态恢复等问题[35]，从而达到减轻内源污染物含量并改善河道水流状态的效果；其次是加强城市污水和农业废水的处理力度[31]，以减少外源污染来源，为之后合理种植的水生植物的生存提供较好的环境条件；而后是植被恢复. 因该河道上游水流流速过快导致水力停留时间过短，无土壤不适宜栽培植物，且存在生活污水支流等因素的影响，故选择受生活和农业污染极小的中下游进行植被修复. 因而从景观植物和耐污植物中较具有一定的抗水力冲击负荷能力的物种开始，如：漂浮植物凤眼莲、浮水植物水芹以及沉水植物狐尾藻 [28]，进而是不耐污种的阶段性种植，以增加河道水生植物种类的多样性和生态系统的稳定性，最终来实现巢湖湖泊水生植物多样性的增加和建立起巢湖稳定的生态系统的目的.

（3）加强巢湖东部湖区入湖河道流域水生植物的合理种植和管理[18, 31]. 将优势植物选出后，将它们按不同的顺序、不同的生物量构建几种组合用于污水处理，得出净化效果较好和生长稳定的组合，用于巢湖东部湖区入湖河道的植被恢复工程；及时收割水生植物，将吸附在植物体内的营养物质及时转移出入湖河道；优势水生植物枯萎、腐败后的残体要及时清理出系统，以免造成二次污染；根据修复过程中河道水质和水文变化状况以及水生植物生长状态[31]，及时地增减植物种类和比例.

致谢 感谢曹特师兄在样品采集分析中给予帮助以及对本文修改给予建议.

References

1 Tu QY (屠清瑛), Gu DX (顾丁锡), Yi CQ (尹澄清). The Study on Chaohu Lake's Eutrophication. Hefei: Chinese Scientific and Technical University Press (合肥: 中国科技大学出版社), 1990. 1~100

2 He KL (何开丽). Study of eutrophication control in Chao Lake. *Environ Prot* (环境保护), 2002 (4): 22~24

3 Xie P (谢平). Reading about the Histories of Cyanobacteria, Eutrophication and Geological Evolution in Lake Chaohu. Beijing: Science Press (北京: 科学出版社), 2009. 62~63

4 Wang SH (王书航), Jiang X (姜霞), Jin XC (金相灿). Classification and pollution characteristic analysis for inflow rivers of Chaohu Lake. *Chin J Environ Sci* (环境科学), 2011, **32** (10): 2834~2839

5 安徽省规划编制领导小组. 巢湖流域综合防治规划（2001-2015）. 2001

6 Gao JS (高吉尚), Ye C (叶春), Du J (杜鹃), Meng YF (孟裕芳), Yan ZS (闫自申). Study of removing ability of macrophytes to N, P in run off. *China Environ Sci* (中国环境科学), 1997, **17** (3): 247~251

7 Yang QX (杨清心). Ecological functions of aquatic vegetation in East Taihu Lake and its reasonable regulation. *J Lake Sci* (湖泊科学), 1998, **10** (1): 67~72

8 Yan CH (阎传海). Plant Geography. Beijing: Science Press (北京: 科学出版社), 2001. 18~40

9 Wang HS (王荷生). Floristic Geography of North China. Beijing: Science Press (北京: 科学出版社), 1997. 22~52

10 Wu ZY (吴征镒). The areal-types of Chinese genera of seed plants. *Acta Bot Yunnan* (云南植物研究), 1991, Suppl (IV): 1~139

11 Wang CG (王成贵), Cao Y (曹勇), Wang HB (汪海波). Analysis of eutrophication in the west part of Chaohu Lake. *J Anhui Agric Sci* (安徽农业科学), 2005, **33** (8): 1475~1476

12 Shang GP (尚广萍), Xu ZY (徐振宇), Li YC (李玉成), Zou AH (邹爱红). Analysis on the causes and variation tendency of eutrophication in west Chaohu lake, China. *J Biol* (生物学杂志), 2010, **27** (5): 56~60

13 Liu W (刘伟). Eutrophication tendency and its prevention and control strategy in the east part of Chao Lake. *J Chaohu Coll* (巢湖学院学报), 2008, **10** (3): 100~103

14 Cook CDK. Aquatic Plant Book. The Hague, the netherland: SPB Academic Publishing, 1990

15 Diao ZS (刁正俗). Aquatic Weeds in China. Chongqing: Chongqing Publishing Press (重庆: 重庆出版社), 1990

16 State Environmental Protection Administration of China (国家环保总局). Water and Wastewater Monitoring Analysis Methods. Beijing: Environmental Science Press of China (北京: 中国环境科学出版社), 1998

17 Mitchell DS. Aquatic Vegetation and Its Use and Control. UNESCO, Paris, 1974. 14

18 Zheng W (郑伟). An ecological study of wetland plants of the Shuangqiao stream near the lake Chaohu [Master dissertation: [Master Degree Dissertation]. Hefei: Hefei University of Technology (合肥: 合

肥工业大学), 2007

19 Wang Y (王研), Huang YL (黄亚丽), Zhu CX (朱昌雄). Survey and diversity analysis of aquatic plants in Xiaozhegao River of Chaohu Lake. *Mod Agric* (现代化农业), 2011, **3**: 32~34

20 Chen ML (陈明林), Liu LL (刘玲玲), Zhang XP (张小平). Investigation and conservation of resources of aquatic higher plants in Anhui. *J Anqing Normal Coll Nat Sci* (安庆师范学院学报自然科学版), 2004, **10** (2): 99~101

21 Jupp BP, Spence DHN. Limitation on macrophytes in an eutrophic lake, Loch Leven. *J Ecol*, 1977, **65**: 175~186

22 Zhang M (张萌), Ni LY (倪乐意), Cao T (曹特), Fang T (方涛), Xiong DW (熊道文), Zhou GJ (周广杰), Zhu GR (祝国荣), Xu J (徐军), Guo LG (过龙根). Impact of aquatic environmental factors on distribution pattern of aquatic macrophytes in upper reaches of Taihu Lake watershed. *Environ Sci Tech* (环境科学与技术), 2010, **33** (3): 171~178

23 Ren YQ (任艳芹), Chen KN (陈开宁). Status of submerged macrophytes and its relationship with environmental factors in Lake Chaohu, 2010. *J Lake Sci* (湖泊科学), 2010, **23** (3): 409~416

24 Xu GY (余国营), Liu YD (刘永定), Qiu CQ (丘昌强), Xu XQ (徐小清). Macrophyte succession in Dianchi Lake and relations with the environment. *J Lake Sci* (湖泊科学), 2000, **12** (1): 73~80

25 Chen SQ (陈书琴), Xu QJ (许秋瑾), Li FS (李法松), Liu J (刘俊) Influence of environmental factors on the distribution and growth of aquatic macrophytes. *J Biol* (生物学杂志), 2008, **25** (2): 11~15

26 Arts GHP. Deterioration of atlantic soft water macrophyte communities by acidification, eutrophication and alkalinisation. *Aquat Bot*, 2002, **73**: 373~393

27 Scheffer M, Hosper SH, Meijer ML, Moss B, Jeppesen E. Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends Ecol Evol,* 1993, **8**: 275~279

28 Huang L (黄亮), Li DF (黎道丰), Cai QH (蔡庆华), Tang T (唐涛). Purification efficiency of several macrophytes on polluted inflow rivers of Dianchi Lake. *Ecol & Environ* (生态环境), 2008, **17** (4): 1385~1389

29 Liu CG (刘春光), Wang CS (王春生), Li H (李贺), Zhao LJ (赵乐军), Li GL (李国良), Sun HW (孙红文), Zhuang YY(庄源益). Removal efficiency for nitrogen and phosphorus in eutrophic waterbody by macrophytes. *J Agro-Environ Sci* (农业环境科学学报), 2006 (S2): 635~638

30 Li MC (李明传). The domestic and overseas research development in ecological restoration of water environment. *Chin Water Resour* (中国水利), 2007, **11**: 25~27

31 Zhang M (张萌), Cao T (曹特), Guo LG (过龙根), Ni LY (倪乐意), Xie P (谢平). Restoration of constructed hydrophytes community in East Lake of Wuhan and experimental study on water quality improvement. *Environ Sci Tech* (环境科学与技术), 2010, **33** (6): 154~159

32 Qiao YH (乔玉辉). 污染生态学. Beijing: Chemical Industry Press (北京: 化学工业出版社), 2008. 175~181

33 Liu CH (刘春常), Xia HP (夏汉平), Jian SG (简曙光), Ren H (任海), Zhang QM (张倩媚), Zhang TP (张太平), Lu SM (陆少鸣). Sewage treatment in constructed wetland of multiplayer plants configuration. *Ecol & Environ* (生态环境), 2006, **15** (2): 229~233

34 He F (贺峰), Wu ZB (吴振斌). Application of aquatic Plants in sewage treatment and water quality improvement. *Chin Bull Bot* (植物学通报), 2003, **20** (6): 641~647

35 He WX (何文学), Li CQ (李茶青). On sediment dredging and aquatic environment restoration. *J Environ Manag Coll Chin* (中国环境管理干部学院学报), 2006, **16** (l): 70~73

附表1 巢湖东湖区入湖河流的水生植被目录

Attached table 1 Aquatic plants in the inflowing rivers of East Chaohu Lake

种类数 Species number	种类名称 Species name	频度 Frequency
	一、禾本科 Gramineae	
	(1) 菰属 *Zizania*	
1	菰 *Zizania latifolia*	
	(2) 芦苇属 *Phragmites*	
2	芦苇 *Phlagmites commmunis*	--
	(3) 狗牙根属 *Cynodon*	
3	狗牙根 *Cynodon dactylon*	---
	(4) 稗属 *Echinochloa*	
4	稗 *Echinochloa crusgali*	
	(5) 马唐属 *Digitana*	
5	马唐 *Digitana sanguinalis*	-
	(6) 穇属 *Eleusine*	
6	牛筋草 *Eleusine indica*	-
	(7) 看麦娘属 *Alopecurus*	
7	看麦娘 *Alopecurus aequalis*	
	(8) 小麦属 *Triticum*	
8	小麦 *Triticum aestivum*	-
	(9) 棒头草属 *Polypogon*	
9	棒头草 *Polypogon fugax* Nees ex Steud.	
	(10) 鹅观草属 *Roegneria*	
10	鹅观草 *Roegneria kamoji*	
	(11) 燕麦属 *Avena*	
11	野燕麦 *Avena fatua*	--
	(12) 茵草属 *Beckmannia*	
12	茵草 *Beckmannia syzigachne*	--
	二、蓼科 Polygonaceae	
	(13) 蓼属 *Polygonum*	
13	水蓼 *Polygonum hydropiper*	-
14	扛板归 *Polygonum perfoliatum*	
	(14) 酸模属 *Rumex*	
15	羊蹄酸模 *Rumex japonicus* L.	--
	三、苋科 Amaranthaceae	
	(15) 莲子草属 *Alternanthera*	
16	空心莲子草 *Alternanthera philoxeroides*	---
	四、眼子菜科 Potamogetonaceae	

	(16) 眼子菜属 *Potamogeton*	
17	竹叶眼子菜 *Potamogeton malaianus*	
18	菹草 *Potamogeton crispus*	--
	五、水鳖科 Hydrocharitaceae	
	(17) 水鳖属 *Hydrocharis*	
19	水鳖 *Hydrocharis dubia*	
	六、金鱼藻科 Ceratophyllaceae	
	(18) 金鱼藻属 *Ceratophyllum*	
20	金鱼藻 *Ceratophyllum demersum*	
	七、浮萍科 Lemnaceae	
	(19) 浮萍属 *Lemna*	
21	浮萍 *Lemna minor*	-
	八、睡莲科 Nymphaeaceae	
	(20) 莲属 *Nelumbo*	
22	莲 *Nelumbo mucifera*	
	九、雨久花科 Pontederiaceae	
	(21) 凤眼蓝属 *Eichhornia*	
23	凤眼莲 *Eichhornia crassipes*	
	十、小二仙草科 Haloragidaceae	
	(22) 狐尾藻属 *Myriophyllum*	
24	狐尾藻 *Myriophyllum spicatum*	
	十一、毛茛科 Ranunculaceae	
	(23) 毛茛属 *Ranunculus*	
25	石龙芮 *Ranunculus sceleratus*	--
26	茴茴蒜 *Ranunculus chinensis*	
	十二、十字花科 Brassicaceae	
	(24) 碎米荠属 *Cardamine*	
27	碎米荠 *Cardamine flexuosa*	
	(25) 荠属 *Capsella*	
28	荠 *Capsella bursa-pastoris*	-
	(26) 芸苔属 *Brassica*	
29	油菜 *Brassica campestris*	--
	十三、莎草科 Cyperaceae	
	(27) 莎草属 *Cyperu*	
30	香附子 *Cyperus rotundus*	--
	(28) 水莎草属 *Juncellus*	
31	水莎草 *Juncellus serotinus*	
	(29) 藨草属 *Scirpus*	
32	藨草 *Scirpus planiculmis*	
	十四、菊科 Compositae	
	(30) 蒲公英属 *Taraxacum*	
33	蒲公英 *Taraxacum officnala*	
	(31) 沼菊属 *Enydra*	
34	沼菊 *Enydra fluctuans*	
	(32) 飞蓬属 *Erigeron*	
35	飞蓬 *Erigeron annuus*	-
36	小飞蓬 *Erigeron canadensis*	--
37	一年蓬 *Erigeron annuus*	--
	(33) 蒿属 *Artemisia*	
38	猪毛蒿 *Artemisia scoparia*	
39	艾蒿 *Artemisia argyi*	-
	(34) 黄鹌菜属 *Youngia*	
40	黄鹌菜 *Youngia japonica*	
	(35) 苍耳属 *Xanthium*	
41	苍耳 *Xanthium sibiricum*	-
	(36) 鳢肠属 *Eclipta*	
42	鳢肠 *Eclipta prostrata*	
	(37) 苦苣菜属 *Sonchus*	
43	续断菊 *Sonchtus asper*	-
	(38) 蓟属 *Cirsium*	
44	刺儿菜 *Cirsium setosum*	
45	大蓟 *Cirsium japonicum*	-
	十五、灯心草科 Juncaceae	
	(39) 灯心草属 *Juncus*	
46	灯心草 *Juncus effusus*	
	十六、车前科 Plantaginaceae	
	(40) 车前属 *Plantago*	
47	车前 *Plantago asiatica*	
	十七、蔷薇科 Rosaceae	
	(41) 悬钩子属 *Rubus*	
48	悬钩子 *Rubus corchorifolius*	
	(42) 蔷薇属 *Rosa*	
49	野蔷薇 *Rosa multiflora*	
50	刺蔷薇 *Rosa acicularis*	
	十八、玄参科 Scrophulariaceae	
	(43) 婆婆纳属 *Veronica*	
51	水苦荬 *Veronica undulata*	
52	阿拉伯婆婆纳 *Veronica persica*	
	十九、木贼科 Equisetaceae	
	(44) 木贼属 *Equisetum*	
53	问荆 *Equisetum hyemale* L.	
	二十、大戟科 Euphorbiaceae	
	(45) 大戟属 *Euphorbia*	
54	泽漆 *Euphorbia helioscopia*	--
	二十一、茜草科 Rubiaceae	
	(46) 拉拉藤属 *Galium*	
55	猪秧秧 *Galium aparine* var. *tenerum*	---
	二十二、伞形科 Umbelliferae	
	(47) 胡萝卜属 *Daucus*	
56	野胡萝卜 *Daucus catota*	--
	二十三、桑科 Moraceae	
	(48) 葎草属 *Humulus*	
57	葎草 *Humulus scandens*	
	二十四、豆科 Leguminosae	
	(49) 野豌豆属 *Vicia*	
58	窄叶野豌豆 *Vicia angustifolia* ex Reichard	---
	(50) 苜蓿属 *Medicago*	
59	小苜蓿 *Medicago minima*	
	二十五、百合科 Liliaceae	
	(51) 葱属 *Allium*	
60	野葱 *Allium chrysanthum*	-
	二十六、紫草科 Boraginaceae	
	(52) 附地菜属 *Trigonotis*	
61	附地菜 *Trigonotis peduncularis*	-
	二十七、葡萄科 Vitaceae	
	(53) 乌蔹莓属 *Cayratia*	
62	乌蔹莓 *Cayratia japonica*	
	二十八、菱科 Trapaceae	
	(54) 菱属 *Trapa*	
63	菱 *Trapa bispinosa*	

频度：空白表示偶见，“-”表示较常见，“--”表示常见，“---”表示极为常见
None in the column of Frequency stands for rare, “-” relatively common, “--” common, “---” very common