

太湖贡湖湾水生植被分布现状(2012 年)*

赵 凯^{1,2}, 李振国^{1,3}, 魏宏农^{1,4}, 张 静¹, 马久远¹, 王国祥^{1**}

(1: 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023)

(2: 安庆师范学院资源环境学院, 安庆 246011)

(3: 湖南科技大学地理系, 湘潭 411201)

(4: 江苏省环境监测中心, 南京 210036)

摘 要: 贡湖湾是无锡和苏州两市的重要水源地, 随着近些年太湖水质的急速恶化, 贡湖湾蓝藻暴发现象日益严重, 危及饮水安全. 为提供贡湖湾水资源管理的理论依据, 于 2012 年开展贡湖湾水生植被野外调查. 对 8 个断面进行为期 5 天的调查, 结果表明: (1) 共记录贡湖湾水生植物 20 科 27 属 34 种, 单子叶植物和沉水植物分别为优势分类群和生态型; (2) 贡湖湾水生植被分布区面积占总水域面积的 45.35%, 为典型半草型湖泊; (3) 共有 8 种水生植物群落分布, 其中马来眼子菜群落分布区面积和生物量最大; (4) 贡湖湾水生植被总体表现出北部无水生植被分布, 东部生物量高、群落及物种组成复杂, 其他区域生物量小、群落组成单一. 水质恶化和插网捕鱼对贡湖湾水生植被分布现状存在影响, 过度清淤可能是造成北部水域裸露的原因. 结合贡湖湾水生植被分布现状分析结果, 建议在贡湖湾水生植被管理中要开展北部裸水区植被修复, 促进湾口区域马来眼子菜群落生长, 加强对“引江济太”工程上游来水和贡湖湾水质的监测, 并注重外来入侵植物尤其是水盾草群落的监测.

关键词: 太湖; 贡湖湾; 水生植被; 植被调查; 水资源管理

The distribution of aquatic vegetation in Gonghu Bay, Lake Taihu, 2012

ZHAO Kai^{1,2}, LI Zhenguo^{1,3}, WEI Hongnong^{1,4}, ZHANG Jing¹, MA Jiuyuan¹ & WANG Guoxiang¹

(1: College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, P. R. China)

(2: School of Resources and Environment, Anqing Normal University, Anqing 246011, P. R. China)

(3: Department of Geography, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, P. R. China)

(4: Environmental Monitoring Center of Jiangsu Province, Nanjing 210036, P. R. China)

Abstract: Gonghu Bay is an important drinking water resource area for Wuxi City and Suzhou City. With the rapid deterioration of water quality, cyanobacteria bloom has become progressively worse, which might endanger human healthy through water utilization. In order to provide a theoretical basis for managing water resources of Gonghu Bay, an aquatic vegetation survey was undertaken. Eight transects were set, and boat-based survey was performed. The results indicated: 1) There were 34 species, belonging to 27 genus and 20 families, distributed in Gonghu Bay. Monocotyledons and submerged plants were the dominant taxa and ecotypes, respectively. 2) Grass-dominated state and algal-dominated state were coexisted in Gonghu Bay, as the results of the percentage of aquatic vegetation distribution area to total area was 45.35%, while the percentage of bare water area to total area was 54.65%. 3) The aquatic vegetation in Gonghu Bay could be divided into 8 community types, and the *Potamogeton malaianus* community was the biggest in terms of distribution area and biomass. 4) Overall, the distribution pattern of aquatic vegetation in Gonghu Bay illustrated that north area was associated with bare water, east area was dominated by macrophytes, and other areas were taken by macrophytes with low coverage and biomass. The distributions of aquatic macrophytes in Gonghu Bay might have responded to the deterioration of water quality and fishing practice by trap nets. Furthermore, we also speculated that over-excavated dredging was

* 科技部国际合作重大专项项目(2010DFB33960)、国家自然科学基金项目(41173078)和江苏省太湖水环境治理专项基金项目(TH2012304)联合资助. 2014-04-08 收稿; 2014-07-18 收修修改稿. 赵凯(1984~), 男, 博士研究生; E-mail: zhaokai1911@126.com.

** 通信作者; E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn.

the reason that aquatic macrophytes disappeared in north area. The current research suggested that, in order to improve the vegetation growth, aquatic vegetation restoration projects should be carried out in the north and the bay mouth of Gonghu Bay. Meanwhile, water quality monitoring of Yangtze River-Lake Taihu water transfer project should be further strengthened. What's more, invasive plants, especially *Cabomba caroliniana*, should be effectively monitored.

Keywords: Lake Taihu; Gonghu Bay; aquatic vegetation; vegetation survey; water resources management

在太湖长期的历史演化过程中形成了众多湖湾,以贡湖湾最大,面积约 147 km². 贡湖湾湖底平坦,平均水深 2 m 左右,西北部与梅梁湾直接相连,北部通过长广溪与五里湖相通,局部有大型沉水植物生长,自净能力强,在太湖众湖区中属水质条件较好的水域^[1]. 1987—2003 年太湖贡湖湾水质指标平稳波动,氨氮缓慢上升,2005 年以后水质迅速恶化^[2]. 自 2005 年以来,贡湖湾开始有大面积蓝藻水华覆盖,2007 年以后发生水华的频率明显增加^[2-3]. 与此同时,受“引江济太”工程的影响,贡湖湾水质有较明显的改善^[4-5]. 近些年来,随着梅梁湾水环境的持续恶化,贡湖湾已成为无锡市主要水源地,同时也是苏州市的重要水源地之一^[2].

水生植被是湖泊生态系统的重要组成部分,对维护生态系统的结构和功能、改善水环境具有重要作用,在维持健康湖泊生态系统中扮演着关键角色^[6-8]. 目前的太湖水生植被呈现西部消失、东部沼泽化的分布格局^[9-10],位于西太湖东部且成为周边城市重要水源地的贡湖湾水生植被尤为重要. 然而,目前太湖仅有东太湖水生植被的系统调查^[11-12],尚无针对贡湖湾的水生植被详细调查,为数不多的全湖或西太湖的植被调查普遍存在贡湖湾样点过少且针对性不强的问题^[9-10]. 因此,针对贡湖湾水生植被进行详细调查非常必要.

1 调查方法

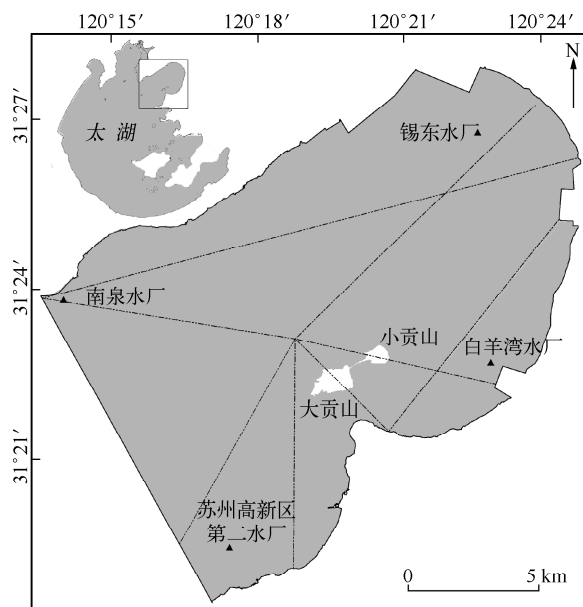


图 1 贡湖湾水生植被调查断面设置

Fig. 1 Distribution of transects in the field survey of aquatic vegetation in Gonghu Bay

调查时间为 2012 年 10 月 21 日至 25 日,范围为贡湖湾水域内所有植被. 第一天普遍踏查所有调查区域,对植被分布区域概况有大致了解后设置 8 条断面详细调查湖区水生植被(图 1),外加一条环湖样带调查沿岸水域分布的挺水植被. 最后一天在前几天调查结果的基础上围绕初步划分的群落外围用 GPS 记录航迹^[11]. 基于 2012 年 10 月 20 更新的 Google Earth 遥感影像进行可视化解译^[13],具体操作为:稻歌 V2.1 自动拼图软件下载调查区遥感影像(拼图级别 16 级,对应分辨率 2.39 m),Google Earth 软件中标出可视的水生植物群落分布区域后导入 Global Mapper 14.0 软件中转换为 shp 格式文件,再输入 ArcGIS 10.0 软件中完成图形绘制. 群落详细分布区域结合 GPS 记录的航迹和可视化解译结果共同确定.

由于调查区域内马来眼子菜群落多为斑块状分布,采用样线法调查马来眼子菜群落的盖度,具体方法为:在马来眼子菜群落内部直线行船至少 2 km,记为一条样线,估算并记录

样线单侧 50 m 内所有出现的马来眼子菜斑块的盖度、面积和 GPS 点位,每个马来眼子菜群丛至少设置 3 条样线. 为减少估算误差,所有估算工作由同一人完成.

在各典型群落中随机设置 5~10 个样方,Ekman 采样夹(1/16 m²)采集生物量(成功投掷一次记为一个样方),现场控水后称取鲜重,晒干至恒重记为干重. 沿岸挺水植被通过典型群落随机样方法调查生物量,样方大小为 1 m×1 m,数量为 5~7 个,现场环湖航迹结合遥感影像确定分布区. 马来眼子菜群落生物量调查

方法为:在马来眼子菜斑块内随机设置样方,根据单个斑块的盖度和分布区总盖度换算成该分布区马来眼子菜群落的生物量.

2 调查结果

2.1 水生植物物种组成

本次调查共记录水生植物 20 科 27 属 34 种,含分布在水生生境中的湿生植物 4 科 4 属 5 种(表 1). 其中蕨类植物 2 科 2 属 2 种,双子叶植物 8 科 8 属 9 种,单子叶植物 10 科 17 属 23 种. 单子叶植物科、属、种均占优势,分别占总科数、总属数和总种数的 50.00%、62.96% 和 67.65%. 从生态型来看,湿生植物有 5 种,占总物种数的 14.71%;挺水植物 8 种,占总物种数的 23.53%;漂浮植物 7 种,占总物种数的 20.59%;浮叶植物 3 种,占总物种数的 8.82%;沉水植物 11 种,占总物种数的 32.35%. 从物种数上来看,沉水植物所占比重最大,浮叶植物所占比重最小. 从分布范围上来看,有 6 个种广泛分布于贡湖湾所有区域,沿岸分布的物种共有 15 个. 贡山水域是水生植物集中分布区,共有 28 种植物(含 6 种广布种)在此分布,占物种总数的 82.35%.

表 1 贡湖湾水生植物物种组成
Tab. 1 Species composition of macrophytes in Gonghu Bay

类群	科	属	种名	生态型	分布区
蕨类植物	槐叶苹科	槐叶苹属	槐叶萍(<i>Salvinia natans</i>)	漂浮	贡山东
	满江红科	满江红属	满江红(<i>Azolla imbricata</i>)	漂浮	贡山东
双子叶植物	小二仙草科	狐尾藻属	穗状狐尾藻(<i>Myriophyllum spicatum</i>)	沉水	广布
	伞形科	泽芹属	泽芹(<i>Sium suave</i>)	湿生	西岸
	金鱼藻科	金鱼藻属	金鱼藻(<i>Ceratophyllum demersum</i>)	沉水	贡山东
	毛茛科	毛茛属	石龙芮(<i>Ranunculus sceleratus</i>)	湿生	贡山东
	水盾草科	水盾草属	水盾草(<i>Cabomba caroliniana</i>)	沉水	贡山东
	菱科	菱属	丘角菱(<i>Trapa japonica</i>)	浮叶	贡山东
			菱(<i>T. bispinosa</i>)	浮叶	贡山东
单子叶植物	睡菜科	荇菜属	荇菜(<i>Nymphoides peltatum</i>)	浮叶	贡山周围及东北岸
	荇科	莲子草属	空心莲子草(<i>Alternanthera philoxeroides</i>)	挺水	岸边及贡山东
	香蒲科	香蒲属	香蒲(<i>Typha orientalis</i>)	挺水	贡山东及东岸
	眼子菜科	眼子菜属	菹草(<i>Potamogeton crispus</i>)	沉水	西岸
			马来眼子菜(<i>P. malaianus</i>)	沉水	广布
			篳齿眼子菜(<i>P. pectinatus</i>)	沉水	贡山东
			微齿眼子菜(<i>P. maackianus</i>)	沉水	贡山东
			弯喙慈姑(<i>Sagittaria latifolia</i>)	挺水	贡山东
	泽泻科	慈菇属	弯喙慈姑(<i>Sagittaria latifolia</i>)	挺水	贡山东
	茨藻科	茨藻属	大茨藻(<i>Najas marina</i>)	沉水	贡山东
	水鳖科	水鳖属	水鳖(<i>Hydrocharis dubia</i>)	漂浮	贡山周围及东岸
			轮叶黑藻(<i>Hydrilla verticillata</i>)	沉水	贡山东
		伊乐藻属	伊乐藻(<i>Elodea nuttallii</i>)	沉水	贡山东
		苦草属	苦草(<i>Vallisneria spiralis</i>)	沉水	贡山东
	禾本科	芦苇属	芦苇(<i>Phragmites australis</i>)	挺水	岸边广布
			菰(<i>Zizania latifolia</i>)	挺水	贡山东及岸边广布
			长芒稗(<i>Echinochloa caudata</i>)	湿生	岸边偶见
			稗(<i>E. crusgalli</i>)	湿生	岸边偶见
			双穗雀稗(<i>Paspalum distichum</i>)	挺水	岸边偶见
	莎草科	水葱属	蔺草(<i>Schoenoplectus triqueter</i>)	挺水	贡山东
			水葱(<i>S. lacustris</i>)	挺水	贡山东
	浮萍科	浮萍属	浮萍(<i>Lemna minor</i>)	漂浮	贡山东及岸边广布
		芜萍属	芜萍(<i>Wolffia arrhiza</i>)	漂浮	西岸
		紫萍属	紫萍(<i>Spirodela polyrrhiza</i>)	漂浮	贡山东及岸边广布
	雨久花科	凤眼莲属	凤眼莲(<i>Eichhornia crassipes</i>)	漂浮	贡山东
灯心草科	灯心草属	细灯心草(<i>Juncus gracillimus</i>)	湿生	东岸	

2.2 水生植物群落组成

贡湖湾内现有水生植被分布面积 6931.87 hm², 占贡湖湾水域总面积的 45.35%。植被分布区植被总盖度为 31.85%, 在水深低于 260 cm 的水域均有分布。植被总鲜重和干重分别为 257303.30 和 36012.48 t。

所有水生植物可划分成 8 种不同群落, 群落分布状况及群落特征见表 2 和图 2.8 种水生植物群落中, 挺水植被仅芦苇群落一种, 浮叶植被仅荇菜 + 马来眼子菜群落一种, 无漂浮植被群落分布, 其余 6 种均为沉水植物群落。沉水植被分布区面积占总贡湖湾水生植被分布区面积的 98.45%, 占总水生植被生物量(鲜重)的 92.83%, 处于绝对优势地位。

马来眼子菜单优群落分布面积最广, 达 4703.02 hm², 分别占总植被面积和总水域面积的 67.85% 和 30.77%, 以马来眼子菜为优势种的群落分布区面积为 6319.30 hm², 分别占总植被面积和总水域面积的 91.16% 和 41.34%。非马来眼子菜单优群落有 7 种, 以马来眼子菜 + 穗状狐尾藻群落面积最大, 马来眼子菜 + 轮叶黑藻群落次之, 荇菜 + 马来眼子菜群落分布区面积最小。

从生物量组成来看, 马来眼子菜单优群落生物量占总生物量的百分比为 24.87% (鲜重) 和 44.26% (干重), 以马来眼子菜为优势种的群落生物量占总生物量的百分比为 71.97% (鲜重) 和 72.10% (干重)。非马来眼子菜单优群落中以轮叶黑藻 + 马来眼子菜群落鲜重最高, 轮叶黑藻 + 微齿眼子菜 + 苦草群落鲜重次之, 分别占水生植物总鲜重的 29.57% 和 18.49%, 干重则以芦苇群落最大, 轮叶黑藻 + 马来眼子菜群落次之, 分别占水生植物总干重的 18.20% 和 14.08%。

表 2 贡湖湾水生植物群落分布特征
Tab. 2 The composition of aquatic vegetation in Gonghu Bay

群落	盖度/%	面积/hm ²	鲜重/t	干重/t	分布水深/cm
马来眼子菜群落湾口北种群	0.48	157.86	93.20147	173.4029	170 ~ 220
马来眼子菜群落湾口南种群	2.54	1119.32	3492.851	4084.868	210 ~ 260
马来眼子菜群落贡山西种群	14.98	897.77	15887.29	4132.686	230 ~ 245
马来眼子菜群落贡山北种群	35.76	1566.86	39184.49	4993.568	210 ~ 230
马来眼子菜群落贡山南种群	4.51	961.20	5332.067	2553.909	200 ~ 230
马来眼子菜群落合计	16.32	4703.02	63989.91	15938.43	170 ~ 260
马来眼子菜 + 穗状狐尾藻群落	7.62	682.93	5299.451	2238.937	180 ~ 215
马来眼子菜 + 轮叶黑藻群落	83.24	535.62	39497.83	2676.505	130 ~ 140
轮叶黑藻 + 微齿眼子菜 + 苦草群落	96.38	450.25	47570.02	3084.797	150 ~ 165
轮叶黑藻 + 马来眼子菜群落	93.78	382.72	76090.65	5071.091	155 ~ 175
荇菜 + 马来眼子菜群落	48.06	15.02	300.7983	39.11956	102 ~ 200
微齿眼子菜群落	98.15	70.07	6401.541	407.6363	150 ~ 170
芦苇群落	79.86	92.24	18153.07	6555.964	0 ~ 45
合计	31.85	6931.87	257303.3	36012.48	0 ~ 260

2.3 水生植被空间分布

马来眼子菜群落分布范围广泛, 但不同区域生物量差别迥异, 根据盖度和生物量的差别可以区分为湾口北、湾口南、贡山西、贡山北和贡山南 5 种不同种群(图 2)。以贡山北种群盖度最大, 为 35.76%; 贡山西种群次之, 盖度为 14.98%; 贡山南和湾口南种群相连, 生物量相差较小, 盖度分别为 4.51% 和 2.54%; 湾口北种群位于贡湖湾和梅梁湾交界处, 盖度低至 0.48% (表 2)。马来眼子菜群落以外的其他群落盖度均较高, 且集中分布于贡山东部水域。芦苇群落仅环湖岸边分布, 总面积较小, 但生物量较高(图 2)。

根据盖度和生物量的空间分布特征, 可将贡湖湾水生植被分布情况划分为 4 个区域。Ⅰ区: 沿贡湖湾中线北部, 基本为裸露水域; Ⅱ区: 位于贡湖湾中线和望虞河航道之间部分, 为马来眼子菜斑块集中分布区, 盖度和生物量均不高; Ⅲ区: 位于望虞河航道和贡山南水域之间, 为马来眼子菜斑块分布区, 并有一定面积的穗状狐尾藻伴生, 生物量和盖度均较低; Ⅳ区: 位于贡山东部, 为水生植被集中分布区, 盖度、生物量及物种组成均较高, 尤其以苏州羊湾水厂附近水域生物量最高(图 3)。贡湖湾水生植被整体表现出Ⅰ区几无水生植

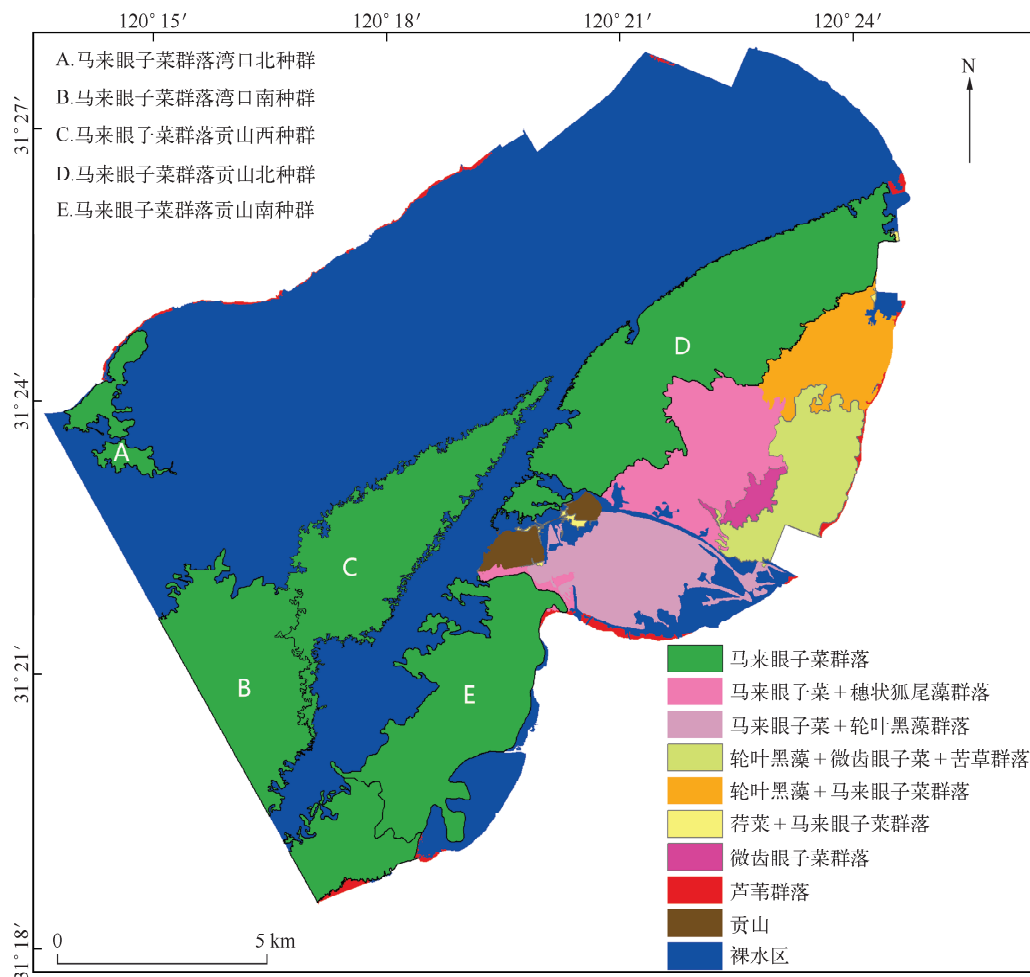


图2 贡湖湾水生植被分布

Fig. 2 The aquatic vegetation distribution of Gonghu Bay

被分布,Ⅱ区和Ⅲ区水生植被生物量较小,Ⅳ区集中分布且生物量较高的特点。

3 讨论

3.1 贡湖湾水生植被分布现状

1997 年及之前太湖全湖植被调查结果均表明贡湖湾是以沉水植物为主的草型湖泊^[14],刘伟龙等于 2002—2006 年为期 5 年的全湖植被调查结果表明,贡湖湾已不是水生植被集中分布区^[9],马荣华等根据遥感影像解译结果提出 2007 年 6 月以后贡湖湾水生植被已经几近消失,到 2009 年 10 月止,贡湖湾再无任何水生植被分布^[10]。然而,2012 年和 2013 年,位于贡湖湾内的羊湾水厂取水口持续发生水草恶性暴发事件,水草集中腐烂引起水质恶化,危及居民饮水安全。

本次调查共记录水生植物 20 科 27 属 34 种,物种数显著低于东太湖^[11-12],但高于刘伟龙等^[9]调查的西太湖水生植物物种数,可能是后者植被调查中对贡湖湾所设样点相对过少的缘故。鉴于本次调查仅为秋季单次调查,且仅限于水域生境,未对湖滨带植被展开详细踏查,因此,贡湖湾实际分布的水生植物物种数应该要高于刘伟龙等的调查结果。全部 34 种水生植物中,在贡湖湾广泛分布的物种仅 6 种,有 17 种植物(占总物种数的 50%)仅分布在贡山东侧水域中,植物物种空间分布极不均匀。优势种包括马来眼子菜、轮叶黑藻、

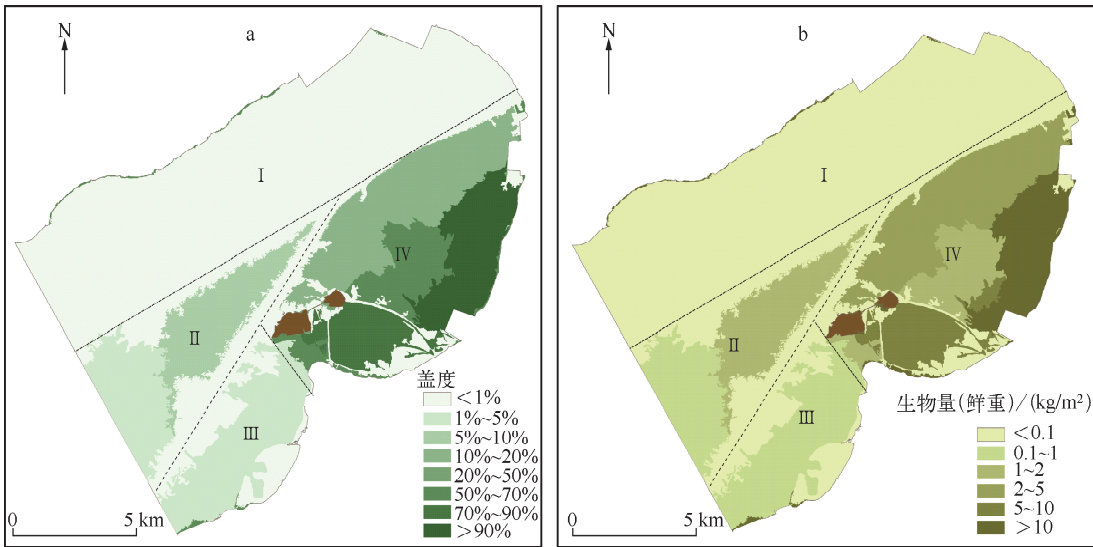


图 3 贡湖湾不同水域植被盖度(a)和生物量(b)

Fig. 3 The coverage (a) and biomass (b) of aquatic vegetation in different areas of Gonghu Bay

苦草、微齿眼子菜、穗状狐尾藻、荇菜和芦苇 7 种,其余物种均为伴生种.

贡湖湾内现有水生植物占贡湖湾水域总面积的 45.35%,属于典型的半草型湖泊,亦在部分文献中被称为草-藻过渡区^[15-16].从贡湖湾水生植被生物量空间分布来看,无论是盖度还是单位面积生物量,均表现出东部高、北部几近裸露、其他区域物种组成单一且生物量较低分布格局.水生植物集中分布在贡山东部水域,北部和西部以望虞河航道为界,南部以大贡山为界.从群落组成来看,贡山东部水域群落组成丰富,集中了所有群落类型,物种多样性也最为丰富,共有 28 种植物(占物种总数的 82.35%).

3.2 贡湖湾水生植被分布的影响因素

在自然湖泊中,水位通常是水生植物分布的主要影响因子^[17-19].本次调查对贡湖湾内 68 个点的水深进行了测定,根据这些水深数据制成贡湖湾水深分布图(图 4),可以看出北部裸水区水深并不大.因此,水深并不能解释贡湖湾北部几无水生植被分布的现象.然而,在水生植被分布区内,水生植物生物量符合水位越浅生物量越高的趋势.因此,北部水域无水生植被分布应该是由其他因素导致的.野外调查时发现,北部裸水水域底质非常坚硬,据此推测该区域无水生植被生长可能是因为该区域存在过度清淤.

贡湖湾大部分水生植被分布区均有马来眼子菜群落分布,尽管生物量在不同区域差别迥异.调查中同样发现,这个区域有大量插网分布,尤其在贡湖湾湾口南部马来眼子菜零星分布的水域,马来眼子菜群丛几乎总是伴随着插网分布.插网能够减缓风浪,改变微环境水流动力学特征,而马来眼子菜主要依靠根状

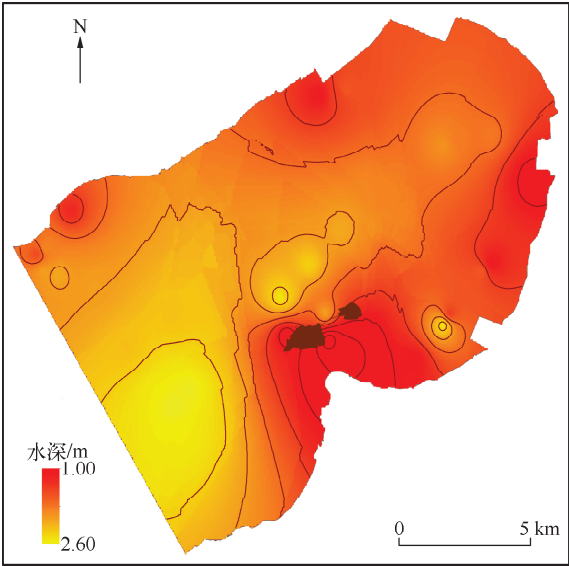


图 4 贡湖湾不同水域水深

Fig. 4 The depth of different areas in Gonghu Bay

茎、块茎繁殖,在超过 2 m 的深水环境可以通过断枝繁殖,据此推测人工插网捕鱼可能有促进马来眼子菜群落分布的作用。

从物种及群落分布情况来看,7 种建群种除芦苇分布于沿岸之外,剩余 6 种优势种中,马来眼子菜、微齿眼子菜、穗状狐尾藻均为适应水质较差环境的耐污沉水植物^[9,20-22],荇菜则为受水质影响较小的浮叶植物,这 4 种植物参与贡湖湾所有群落组成。适宜水质较好环境的轮叶黑藻和苦草仅分布在贡山东部水域,分布区面积仅占总植被分布区面积的 19.74%,且为共建种。现有研究表明,贡湖湾水质呈持续恶化的趋势^[1,9,23-24],耐污种在贡湖湾的大面积分布说明水质恶化对贡湖湾水生植被分布存在影响。

3.3 贡湖湾水生植被管理及建议

根据本次调查结果,水生植被在贡湖湾北部区域几无分布,在东部水域集中分布。太湖无水生植被分布的水域几乎总是伴随着蓝藻水华暴发^[23,25],贡湖湾北部大面积的裸水域也是 2007 年以来贡湖湾蓝藻暴发越来越严重的集中分布区^[26]。而贡山东部水域水生植物盖度均在 50% 以上,生物量亦超过 2 kg/m^2 ,水生植被生长最为旺盛的东北部近岸区水域盖度甚至高达 90% 以上,生物量也超过 10 kg/m^2 (图 3),而该区域正好位于苏州羊湾水厂取水口附近。水生植物过量生长会导致水生植物在死亡腐烂时水体溶解氧下降、释放臭味和毒素并可迅速向水体中释放营养盐和有机颗粒物^[27-29],这对羊湾水厂的饮水安全带来极大威胁。近两年尤其是夏季,苏州市相关部门多次组织人力在该区域打捞水草,因此本次调查的这部分区域水生植物生物量应该比实际值要低很多。据此,贡湖湾同时面临水草消失导致的水华暴发和水草过量生长导致水质恶化的双重危机,水生植被管理形式严峻。

然而,贡湖湾特殊的地理位置使得贡湖湾水生植被管理困难重重。一方面,贡湖湾紧邻蓝藻水华暴发发现象最为严重的梅梁湾^[23,25],另一方面,2002—2009 年“引江济太”期间,望虞河望亭水利枢纽引江入湖日均流量为 $98.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[4],这些人工增加的来水量首先注入贡湖湾中。尽管“引江济太”工程对贡湖湾水环境指标有改善效果,且能显著降低蓝藻生物量^[4,5,30],但其作为水利建设工程,人为改变了湖泊的水文循环格局,不可避免会产生一系列复杂的连锁反应,从而改变湖泊生态系统的物理结构、能量结构和生物过程。

此外,本次调查共发现 4 种外来物种,分别为空心莲子草、水盾草、伊乐藻和凤眼莲。4 种外来种分布面积均较小,空心莲子草、伊乐藻和凤眼莲均在太湖入侵多年,未发生大规模爆发性生长,因而不易对贡湖湾水生植被造成较为严重的危害。但水盾草为近些年新近入侵我国的沉水植物,在华东地区很多水体都已经造成入侵^[31-33]。

结合以上分析结果,对贡湖湾水生植被管理提出以下建议:

- 1) 注重并开展贡湖湾北部裸水区水生植被的恢复工作,通过插网降低风浪的同时,人工移植马来眼子菜断枝可能是不错的尝试;
- 2) 针对贡山东侧水域中水生植被过量生长的区域,应做好水草刈割工作,结合该区域水生植物群落组成特点,建议最佳刈割时间为水生植物开始进入旺盛生长期的 5 月上旬,收割深度以抑制生长但不造成植物死亡为目标,以防水生植物生长到水面后因夏季水温过高而大量腐烂;
- 3) 保护并促进湾口部分马来眼子菜群落的生长,以达到防止梅梁湾和大湖区蓝藻随风浪进入贡湖湾的目的,同时加强对“引江济太”工程上游来水水质的监测,并加大对贡湖湾水质的监测力度;
- 4) 加强对外来物种尤其是水盾草的监测和防治工作,发现有大片水盾草群落分布时,一定要彻底清除,以降低贡湖湾水生植物群落中外来植物入侵的风险。

4 参考文献

- [1] 范成新,季 江. 贡湖水质富营养化综合评价及初步预测. 海洋湖沼通报,1997,(3):18-24.
- [2] 唐承佳. 太湖贡湖湾水源地微囊藻毒素和含硫衍生物研究[学位论文]. 上海:华东师范大学,2010:21-34.
- [3] Chen J, Xie P, Ma Z *et al.* A systematic study on spatial and seasonal patterns of eight taste and odor compounds with relation to various biotic and abiotic parameters in Gonghu Bay of Lake Taihu, China. *Science of the Total Environment*, 2010, **409**(2):314-325.
- [4] 翟淑华,张红举,胡维平等. 引江济太调水效果评估. 中国水利,2008,(1):21-23.
- [5] 甘升伟,张红举,冯赞昀. 无锡水源地贡湖引水改善水质效果分析. 人民长江,2012, **43**(5):72-75.

- [6] Bornette G, Puijalon S. Response of aquatic plants to abiotic factors: a review. *Aquatic Sciences*, 2011, **73**(1):1-14.
- [7] Kolada A. The use of aquatic vegetation in lake assessment: testing the sensitivity of macrophyte metrics to anthropogenic pressures and water quality. *Hydrobiologia*, 2010, **656**(1):133-147.
- [8] Kreiling RM, Richardson WB, Cavanaugh JC *et al.* Summer nitrate uptake and denitrification in an upper Mississippi River backwater lake: the role of rooted aquatic vegetation. *Biogeochemistry*, 2011, **104**(1/2/3):309-324.
- [9] 刘伟龙,胡维平,陈永根等. 西太湖水生植物时空变化. 生态学报, 2007, **27**(1):159-170.
- [10] 马荣华,段洪涛,唐军武. 湖泊水环境遥感. 北京:科学出版社, 2010:419-427.
- [11] 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. 生态学报, 2005, **25**(7):1541-1548.
- [12] 张圣照,千金良. 东太湖水生植被及其沼泽化趋势. 植物资源与环境, 1999, **8**(2):1-6.
- [13] Armstrong RA. Remote sensing of submerged vegetation canopies for biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, **14**(3):621-627.
- [14] 秦伯强,胡维平,陈伟民. 太湖水环境演化过程与机理. 北京:科学出版社, 2004:388.
- [15] Bai X, Ding S, Fan C *et al.* Organic phosphorus species in surface sediments of a large, shallow, eutrophic lake, Lake Taihu, China. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(8/9):2507-2513.
- [16] 周 涛,李正魁. 太湖浮游植物与营养盐相互关系. 农业环境科学学报, 2013, **32**(2):327-332.
- [17] Deegan BM, White SD, Ganf GG. Nutrients and water level fluctuations: A study of three aquatic plants. *River Research and Applications*, 2012, **28**(3):359-368.
- [18] Paillisson JM, Marion L. Water level fluctuations for managing excessive plant biomass in shallow lakes. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(2):241-247.
- [19] Zhao D, Jiang H, Cai Y *et al.* Artificial regulation of water level and its effect on aquatic macrophyte distribution in Taihu Lake. *PLoS One*, 2012, **7**(9):e44836.
- [20] 沈亚强,王海军,刘学勤. 滇中五湖水生植物区系及沉水植物群落特征. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(Z1):111-119.
- [21] 魏 华,成水平,柴培宏等. 2009年秋季武汉大东湖北湖水系水生植物调查. 湖泊科学, 2011, **23**(3):401-408.
- [22] 徐德兰,雷泽湘,韩宝平. 大型水生植物对东太湖河湖交汇区矿质元素分布特征的影响. 生态环境学报, 2009, **18**(5):1644-1648.
- [23] 陆桂华,马 倩. 2009年太湖水域“湖泛”监测与分析. 湖泊科学, 2010, **22**(4):481-487.
- [24] 王秋娟. 太湖北部三个湖区氮污染状况及其底泥疏浚量的确定[学位论文]. 哈尔滨:东北林业大学, 2012:16-24.
- [25] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析. 湖泊科学, 2008, **20**(1):21-26.
- [26] 孔繁翔,胡维平,谷孝鸿等. 太湖梅梁湾 2007 年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议. 湖泊科学, 2007, **19**(4):357-358.
- [27] Coops H, van Nes E, van den Berg M *et al.* Promoting low-canopy macrophytes to compromise conservation and recreational navigation in a shallow lake. *Aquatic Ecology*, 2002, **36**(4):483-492.
- [28] Lembi CA. Aquatic plant management. West Lafayette: Purdue University Extension Publication, 2000:1-16.
- [29] Madsen JD, Stewart RM, Getsinger KD *et al.* Aquatic plant communities in Waneta Lake and Lamoka Lake, New York. *Northeastern Naturalist*, 2008, **15**(1):97-110.
- [30] 李大勇,王济干,董增川. 引江调水改善太湖贡湖湾的水环境效应. 水力发电学报, 2011, **30**(5):132-138.
- [31] 丁炳扬,于明坚,金孝锋等. 水盾草在中国的分布特点和入侵途径. 生物多样性, 2003, **11**(3):223-230.
- [32] 何金星,黄 成,万方浩等. 水盾草在江苏省重要湿地的入侵与分布现状. 应用与环境生物学报, 2011, **17**(2):186-190.
- [33] 侯元同,舒凤月,董士香等. 水盾草——南四湖外来水生植物新记录及其生境特点. 水生生物学报, 2012, **36**(5):1005-1008.