

洞庭湖封闭河口区与湖心区的基本生态特征 ——以六门闸至小西湖样带为例

陈心胜, 谢永宏^①, 李峰, 侯志勇 (中国科学院亚热带农业生态研究所 洞庭湖湿地国际研究中心, 湖南长沙 410125)

摘要: 通过对洞庭湖六门闸至小西湖样带的调查, 研究了封闭河口区和湖心区水体、土壤和植物等基本生态特征及其相关关系。结果表明, 河口区水流缓慢, 透明度低, 而湖心区水流速度较高, 透明度也高; 河口区水体具有较高的营养水平和电导率, 而湖心区水体营养水平和电导率相对较低; 湖心区土壤有机质和氮含量较高, 而河口区有机质和氮含量相对较低; 河口区不适合水生植物的生长繁殖, 而湖心区是植物生长繁殖的主要生境。相关分析结果表明, 河口区和湖心区生物、土壤和水文特征之间存在相互作用, 透明度与水流速度之间在 $\alpha = 0.05$ 水平上相关显著, 物种丰富度、生物量和多样性指数分别与水流速度和透明度在 $\alpha = 0.01$ 水平上相关显著, 与土壤全氮含量之间在 $\alpha = 0.05$ 水平上相关显著, 水流速度是调控生态特征变化的关键因子。

关键词: 河口区; 湖心区; 生态特征; 洞庭湖

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4831(2010)05-0502-06

Comparison Between Enclosed Estuary and Centre of Dongting Lake in Basic Ecological Characteristics — A Case Study of Sampling Belt From Liuren Gate to Xiaoxi Lake CHEN Xin-sheng, XIE Yong-hong, LI Feng, HOU Zhi-yong (International Wetland Research Center in Dongting Lake/Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract Basic ecological characteristics including water body, soil and plants as well as their correlations in an enclosed estuary and centre of Dongting Lake were systematically studied by field investigation of the sampling belt from Liuren Gate to Xiaoxi Lake. Results indicate that in the enclosed estuary the flow was slow and the water was low in transparency, whereas in the centre of the lake, just the contrary, the water in the enclosed estuary was higher in nutritional level and conductivity than the water in the centre; the soil in the centre was higher in organic matter and nitrogen content than the soil in the enclosed estuary, and the enclosed estuary was not fit for aquatic plants to survive in while the centre was the main habitat of aquatic plants. Further correlation analysis shows that mutual effects and interactions existed between the two zones in biological, soil and hydraulic characteristics. Transparency was significantly correlated with water flow velocity ($\alpha = 0.05$). Species richness, biomass, and biodiversity were significantly correlated with water flow velocity and transparency, respectively ($\alpha = 0.01$), and with soil total N ($\alpha = 0.05$). Water flow velocity was the key factor in regulating ecological characteristics.

Key words estuary, central lake, ecological characteristic, Dongting Lake

湿地是一种多类型、多层次的复杂的生态系统, 也是水文、气候、基底沉积物、地形和生物过程相互作用的环境复合体^[1-2]。一个典型的湖泊生态系统(如洞庭湖)至少可划分为3类子系统: 河口、沿岸带和湖心区生态系统, 子系统间因水文过程的紧密联系而连接成一个完整的湖泊湿地生态系统^[3]。各子系统因水文条件的不同而具有截然不同的物理、化学、生物学等基本生态特征, 因而具有不同的物质循环、能量流动等生态功能特征。目前, 我国关于湖泊湿地生态系统的研究大多是在湖泊湿地生态系统或子系统的某个方面的层次上进行的^[4-12]。

根据河口和湖心区的连通性关系, 可以将河口分为开放河口和封闭河口2类。开放河口指与湖泊保持自然联系的河流入湖口, 而封闭河口指通过修建大坝、水闸等切断与湖泊自然联系的河流入湖口。近年来, 由于防洪、经济发展等的需要, 许多河流的入湖口因建立水闸而形成了封闭性河口。河口封闭后, 河口到湖心的水文、土壤和生物等基本生态特征

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-YW-435-02, KZCX1-YW-08-01-02); 国家自然科学基金 (30770362)

收稿日期: 2009-11-22

① 通讯联系人 E-mail: yonghongxi@163.com

可能会产生变化。有关开放河口与湖心区基本生态特征的研究已有报道^[13], 而有关封闭河口与湖心区基本生态特征及其联系的研究还比较缺乏。因此, 笔者以相对封闭河口为对象, 研究其与湖心区的水文、土壤和生物学特征变化规律及其相互联系, 阐明河口封闭对湖泊湿地系统基本生态特征产生的影响, 为湖泊湿地的管理和利用等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洞庭湖区(北纬 28°30′~30°20′, 东经 111°40′~113°10′)位于长江中游荆江段南岸, 分为东洞庭湖、横岭湖、南洞庭湖和西洞庭湖, 天然湖泊面积约 2 625 km², 为我国第 2 大淡水湖。该区处于中亚热带向北亚热带过渡的地带, 气候温暖湿润, 年平均气温 16.4~17.0℃, 年无霜期 260~280 d, 年平均降水量 1 200~1 550 mm, 年平均湿度 80%。洞庭湖水系组成复杂, 来水包括长江“四口”(调弦、松滋、太平、藕池, 其中调弦口已于 1958 年堵塞)和湖南“四水”(湘江、资江、沅江、澧水), 大部分与湘江构成航道, 直下城陵矶。



图 1 洞庭湖水系及采样点分布

Fig 1 Water system and distribution of sampling sites in Dongting Lake

1.2 研究方法

1.2.1 取样调查

在对长江“四口”和湖南“四水”大量实地考察基础上, 以较小程度的水系干扰为原则, 选取调弦河进湖口六门闸至东洞庭小西湖为采样带, 总长度约 11 km。采样带起始点为调弦河进湖口 1 km 处, 随后每间隔 1 或 2 km 设置 1 个采样点, 采用连续密集采样法确立样点, 从河口开始编号, 共有 8 个样点

(图 1)。六门闸为 1958 年调弦口堵塞时在调弦河入湖口所建, 在长江来水不大时一般都处于关闭状态。同时, 六门闸与小西湖间仅有 1 条航道相通(中间有条小岔口), 因此, 其水文条件表现为由湖心区向河口区流动而进行相关的物理、化学和生物学运动过程。该条件对于研究封闭河口与湖心区的关系具有典型性和代表性。

调查于 2008 年 5 月进行, 此时为洪水来临前植物、土壤微生物生长活跃时期, 同时, 不同环境要素间的互动过程可能也是最为强烈的时期^[13]。根据研究目标按照直线取样法进行野外调查。调查方法如下: 在调查线路上每隔 1 或 2 km 设置 1 个 1 m × 1 m 样方, 用特制铁锹(0.5 m × 0.5 m)将样方内所有物种夹起, 随后测量记录各物种高度、个体数、鲜质量等指标^[14]。为保证测量的准确性, 测量植物鲜质量前甩干水分。同时, 利用采泥器采集表层底泥, 每个样方采集 2 个土样, 用封口袋封好后备用; 采用 2.5 L 采水器分 0~30、90~110、150~200 cm 3 层采集水样, 装入干净塑料瓶, 尽快运至实验室, 于 -20℃ 超低温冰箱中保存备用。用于有机质、全氮、全磷、全钾测定的土样风干后过 0.25 mm 孔径筛, 混匀后用自封袋封好, 于 4℃ 低温冰箱中保存。

1.2.2 水体理化指标的测定

水体流速测定采用便携式流速仪, 且均在水深 50 cm 处进行; 水温测定以采集水样时采水器在采集位置停留 3 min 后的读数为准; 水深测定采用竹杆直插法; 透明度测定采用黑白瓶法^[13]; 电导率和 pH 值测定采用便携式多功能水质分析仪(HI 9820 型便携式多参数水质测定仪, 意大利 HANNA); 水体总磷、氨氮、硝态氮测定采用便携式多功能水质分析仪(ET 99722 型多用途微电脑 COD 快速测定仪, 德国 LOVIBOND 公司)^[13]; 总氮测定采用消煮-半微量蒸馏法^{[15]123-125}。

1.2.3 土壤理化指标的测定

有机质测定采用重铬酸钾-外加热法; 土壤全氮测定采用开氏半微量定氮法; 全磷测定采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法^{[15]154-156}。

1.2.4 生物指标的计算

生物量为 1 m² 的植物鲜质量。物种丰富度为样方(1 m × 1 m)中物种数。多样性指数采用 Shannon-Wiener 指数, 即 α-多样性指数表示, 相关计算公式为:

$$H_i = - \sum P_i \ln P_i \quad (1)$$

式(1)中, H_i 为物种多样性指数; P_i 为物种 i 的重要值, %。重要值 = (相对高度 + 相对盖度 + 相对密

度) / 3 相对高度 = (样方内某物种平均高度 / 样方内所有物种平均高度之和) × 100%, 相对盖度 = (样方内某物种平均盖度 / 样方内所有物种平均盖度之和) × 100%, 相对密度 = (样方内某物种平均密度 / 样方内所有物种平均密度之和) × 100%。

1.2.5 统计分析

各样点水文特征值为上、中、下 3 层的平均值。采用统计软件 SPSS 10.0 进行数据处理。采用 Duncan 检验进行多重比较, 显著性水平设为 0.05, 选择 Pearson 相关系数进行双变量相关分析。

2 结果与分析

2.1 六门闸至小西湖样带水体理化特征

该样带水温在上、中、下 3 层变化不明显, 为 (20 ± 2) °C。除水深外, 其他水体理化特征均呈现明显的规律性变化 (表 1)。该样带水流速度相对较小, 为 0.05~0.21 m·s⁻¹, 总的变化趋势是从 1 号样点到 8 号样点逐渐增大, 最大值为最小值的 4.2 倍。透明度变化比较大, 范围为 38.0~65.0 cm, 总的变化趋势与水流速度相似, 从 1 号样点到 8 号样点逐渐增大。水深变化范围为 1.73~2.81 m, 总的趋势是从 1 号样点到 4 号样点逐渐增加, 随后保持在与 1 号样点相近的水平波动。总之, 除水深变化

规律不明显外, 该样带水流速度和透明度均呈明显变化规律, 表现为河口区水流缓慢, 透明度低, 而湖心区水流速度较高, 透明度也高。

总体上看, 各样点间除 pH 差异较小外, 其他水体化学特征指标均存在很大差异 (表 1)。水体 pH 呈碱性, 变化范围为 7.30~7.48。硝态氮变化范围为 0.15~1.44 mg·L⁻¹, 从 1 号样点到 8 号样点表现为先急剧下降, 然后平缓下降, 最后有所升高的变化趋势。氨氮变化范围为 0.11~2.40 mg·L⁻¹, 从 1 号样点到 8 号样点表现为: 1~2 号样点急剧下降, 2~6 号样点平缓下降, 最后缓慢升高的变化趋势。总氮变化范围为 1.11~4.98 mg·L⁻¹, 从 1 号样点到 8 号样点的变化规律与硝态氮类似, 1~4 号样点急剧下降, 随后在一个范围内波动。总磷变化范围为 0.04~0.18 mg·L⁻¹, 从 1 号样点到 8 号样点表现为: 1~3 号样点急剧下降, 随后维持在一个相对稳定的水平。电导率 σ 变化范围为 280.7~530.3 μS·cm⁻¹, 变化规律与硝态氮相似, 1~3 号样点急剧下降, 随后处于相对稳定状态, 到 8 号样点又有所升高。总之, 该样带水化学特征变化较大, 河口区具有较高的营养水平和电导率, 而湖心区营养水平和电导率相对较低。

表 1 六门闸至小西湖样带各样点水体理化特征

Table 1 Physical and chemical properties of the waterbodies in the sampling sites from Liumen Gate to Xiaoxi Lake

样点	pH	流速 / (m·s ⁻¹)	透明度 / cm	水深 / m	ρ/(mg·L ⁻¹)				电导率 σ / (μS·cm ⁻¹)
					硝态氮	氨氮	总氮	总磷	
1	7.34	0.05	38.0	1.95	1.44 ± 0.15 a	2.40 ± 0.14 a	4.98 ± 0.26 a	0.18 ± 0.04 a	530.3 a
2	7.45	0.07	39.0	1.98	1.23 ± 0.08 b	0.46 ± 0.22 b	2.65 ± 0.25 b	0.08 ± 0.03 b	468.4 b
3	7.44	0.10	40.0	2.24	0.45 ± 0.20 c	0.34 ± 0.21 bc	1.66 ± 0.23 c	0.06 ± 0.01 bc	307.4 c
4	7.44	0.12	38.5	2.81	0.23 ± 0.02 d	0.26 ± 0.15 cd	1.16 ± 0.09 d	0.05 ± 0.01 c	313.5 c
5	7.48	0.18	41.0	1.73	0.20 ± 0.03 d	0.20 ± 0.08 cd	1.20 ± 0.11 d	0.05 ± 0.01 c	280.7 c
6	7.39	0.19	41.5	2.17	0.15 ± 0.01 d	0.11 ± 0.06 d	1.11 ± 0.06 d	0.05 ± 0.01 c	297.4 c
7	7.30	0.17	52.0	1.82	0.44 ± 0.08 c	0.22 ± 0.08 cd	1.22 ± 0.06 d	0.05 ± 0.00 c	296.0 c
8	7.38	0.21	65.0	2.20	0.36 ± 0.03 c	0.28 ± 0.10 c	1.20 ± 0.31 d	0.04 ± 0.02 c	320.6 c

同一列英文小写字母不同表示样点间某指标差异显著 (α = 0.05)。

2.2 六门闸至小西湖样带土壤理化特征

除 pH 外, 土壤其他理化特征指标均有较大变化 (表 2)。土壤 pH 呈碱性, 变化范围为 7.63~8.03 总体呈小幅波动。土壤有机质变化范围为 14.60~28.58 mg·kg⁻¹, 最大值在 2 号样点, 最小值在 3 号样点, 总体趋势为从堤岸至湖心有机质含量逐渐提高。全氮含量变化范围为 0.71~2.04 mg·kg⁻¹, 最大值在 8 号样点, 最小值在 3 号样点,

从堤岸至湖心全氮含量总体变化趋势与有机质含量相似, 逐渐升高。全磷含量变化范围为 0.81~2.11 mg·kg⁻¹, 最大值在 6 号样点, 最小值在 3 号样点, 从堤岸至湖心全磷含量无明显规律性变化。总之, 该样带土壤理化特征变化较大, 总趋势是湖心区土壤具有较高的有机质和氮含量, 而河口区有机质和氮含量相对较低。

表 2 六门闸至小西湖样带各样点土壤理化性质和植物群落特征

Table 2 Soil physical and chemical properties and plant community characteristics in the sampling sites from Liun Gate to Xiaoxi Lake

样点	pH	$w / (m g \cdot k g^{-1})$			丰富度 / m^{-2}	生物量 / $(k g \cdot m^{-2})$	多样性指数
		有机质	全氮	全磷			
1	7.83±0.01	19.87±0.40 d	0.92±0.02 f	1.13±0.09 ab	0	0	0
2	7.67±0.05	28.58±0.19 a	1.67±0.01 b	1.18±0.03 a	0	0	0
3	8.03±0.02	14.60±0.47 e	0.71±0.01 g	0.81±0.01 d	0	0	0
4	7.71±0.06	22.10±0.46 c	1.24±0.03 e	0.98±0.02 c	0	0	0
5	7.85±0.02	19.61±0.31 d	1.36±0.03 d	1.04±0.03 bc	4	0.05	0.22
6	7.69±0.02	25.21±0.37 b	1.75±0.04 b	2.11±0.01 a	2	0.10	0.13
7	7.68±0.01	22.33±0.36 c	1.56±0.04 c	1.14±0.02 ab	3	0.16	0.28
8	7.63±0.01	28.10±0.16 a	2.04±0.08 a	0.84±0.10 d	7	0.24	0.44

同一列英文小写字母不同表示样点间某指标差异显著 ($\alpha = 0.05$)。

2.3 六门闸至小西湖样带各样点植物群落特征

在 8 个采样点共发现 8 种植物,包括:湿生植物 1 种, 草 (*Phalaris arundinacea*); 自由漂浮植物 2 种, 满江红 (*Azolla imbricata*) 和喜旱莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*); 浮叶根生植物 1 种, 茶菱 (*Trapella sinensis*); 沉水植物 4 种, 菹草 (*Potamogeton crispus*)、篳齿眼子菜 (*Potamogeton pectinatus*)、金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*) 和小茨藻 (*Najas minor*); 分属 7 科 7 属。同时发现,该样带河口区高等水生植物较少,仅在 1 号样点附近发现茶菱,且只有 1 株,其他 7 种植物均在湖心区发现 (5~8 号样点及其附近)。从 8 个采样点来看,在河口区未发现较大面积的植物群落分布,越靠近湖心区,植物种类越丰富,群落面积越大。由表 2 可知,8 个采样点物种丰富度变化较大,为 0~7,其中 1~4 号样点均为 0,5~8 号样点分别为 4,2,3,7,说明湖心区植物种类比河口区丰富。生物量变化幅度均为 0~0.24

$kg \cdot m^{-2}$,其中 1~4 号样点生物量为 0,5~7 号样点分别为 0.05,0.10,0.16,0.24 $kg \cdot m^{-2}$,呈明显的直线上升趋势。多样性分析结果表明,多样性指数与物种丰富度具有类似的变化趋势,其中最高值出现在 8 号样点,为 0.44。总体来看,该样带水生植物种类并不丰富,群落结构相对简单;河口区不适合水生植物的生存发展,而湖心区是植物生长繁殖的主要生境。

2.4 六门闸至小西湖样带水体与土壤理化特征间的相关关系

各水文化学特征间的相关分析结果 (表 3) 表明,水体硝态氮、氨氮、总氮、总磷含量及电导率间均呈显著正相关,但这 5 个指标与水体 pH 之间的相关性均不显著,说明水体中各营养组分间关系密切。电导率与 4 种营养组分之间呈显著正相关关系,说明这 4 种营养组分均对离子浓度有显著影响,最终影响电导率的变化。

表 3 六门闸至小西湖样带水体理化特征与土壤理化特征之间的相关系数

Table 3 Correlation between water and soil properties in the sampling belt from Liun Gate to Xiaoxi Lake

指标	水硝态氮	水氨氮	水总氮	水总磷	电导率	水 pH	流速	透明度	水深	土 pH	有机质	土全氮
水氨氮	0.80*											
水总氮	0.92**	0.96**										
水总磷	0.83*	0.99**	0.98**									
电导率	0.98**	0.84*	0.94**	0.87*								
水 pH	-0.21	-0.37	-0.26	-0.35	-0.18							
流速	-0.82*	-0.67	-0.79	-0.71	-0.80	-0.08						
透明度	-0.29	-0.28	-0.37	-0.38	-0.33	-0.42	0.67					
水深	-0.30	-0.19	-0.25	-0.21	-0.18	0.23	-0.07	-0.10				
土 pH	0.05	0.22	0.21	0.20	-0.03	0.33	-0.38	-0.48	-0.08			
有机质	0.10	-0.21	-0.12	-0.18	0.16	-0.11	0.28	0.44	0.01	-0.92**		
土全氮	-0.26	-0.46	-0.43	-0.46	-0.22	-0.14	0.65	0.65	-0.11	-0.88**	0.90*	
土全磷	-0.14	-0.09	-0.07	0.00	-0.05	-0.17	0.23	-0.24	-0.10	-0.32	0.31	0.33

* 显著性水平为 0.05 ** 显著性水平为 0.01 *** 显著性水平为 0.001

水文化学特征与物理特征之间的相关分析结果(表 3)表明,透明度与水流速度之间在 $\alpha = 0.05$ 水平上相关显著。在流速较低或静止水体中,高营养物质浓度,尤其是氮、磷给藻类的大量繁殖提供了充足的营养,从而造成水体富营养化,导致水体透明度急剧下降^[16]。实际调查发现,从堤岸到湖心水体富营养化程度逐步减轻,与此同时,水体透明度也从 38.0 cm 增大到 65.0 cm。由于水流速度在稀释营养物质、冲刷表层悬浮物质方面起着很大作用^[17],因此,这一结果也说明较高的水流速度是湖心区水质条件得到改善的重要原因。在河口区,由于六门闸经常是关闭的,因此湖外进水较少,水文相关特征的改变更多地依靠湖心区来水。可见,由于河口区大量排放生活污水,而湖心区来水速度又缓慢,使得污水得不到及时稀释,这可能是导致该样带河口区水质条件差的主要原因。同时发现,水体与土壤理化特征间相关不显著,但土壤 pH 与土壤有机质、土壤全氮间在 $\alpha = 0.01$ 水平上相关显著(表 3)。事实上,土壤有机质是土壤肥力的重要组成部分,因为有机物腐烂分解能快速地使营养物质及相关的副产物进入土壤,从而对土壤营养的维持起支撑作用^[18]。与此同时,在淹水条件下,有机质的厌氧分解会产生大量的酸性中间产物,如乳酸等,从而使土壤酸化^[19]。

总之,在流速较低情况下,水流速度是水体营养物质浓度、透明度的关键调控因子。同时,土壤有机质含量与土壤 pH 和土壤养分(如氮)含量密切相关。

2.5 六门闸至小西湖样带植物群落特征与水文、土壤理化特征间的相关关系

植物群落特征与水文、土壤特征的相关分析结果(表 4)表明,物种丰富度、生物量和多样性指数与水体化学特征间无显著相关性,但分别与水流速度和透明度在 $\alpha = 0.01$ 水平上呈显著正相关。如前所述,水流速度与透明度之间也存在正相关关系,而透明度高低直接决定了可供沉水植物用于光合作用的光照强弱。以往的研究表明,虽然沉水植物的光补偿点和光饱和点都比较低,但光照强弱是影响沉水植物生长、生存和分布的最重要的限制因子^[20-21]。浅水湖泊富营养化导致沉水植物退化或消失的最重要原因就是富营养化导致水体透明度很低,造成沉水植物无法生长繁殖^[16,22]。与此同时,沉水植物具有非常强的沉降作用,即通过减缓水流速度而使颗粒物沉于基底^[23]。植物全身都有吸收营养的作用和功能,由于沉水植物叶也分布在水体中,能吸收

水中的大量营养。因此,大量沉水植物分布的区域不仅水流速度降低,水体透明度增加,而且水体营养物质大大减少,水质得到改善。

由表 4 可知,物种丰富度、生物量和多样性指数与土壤全氮含量之间在 $\alpha = 0.05$ 水平上呈显著正相关,说明土壤全氮也是该样带植物生长的限制因子。实际调查发现,底泥中并无大量有机质沉积,因此土壤依然比较贫瘠。沉水植物的大量繁殖也是改善土壤环境的重要生态过程,这是因为沉水植物死亡后其残体沉积于土壤中,对土壤营养组分起到重要的补充作用。由于洞庭湖存在急剧水位变化,土壤中沉积的有机质是有限的;其原因是洪水可将生物残体带走,而在干旱时充足的氧气可加速有机质的分解^[24]。因此,水位变化比较大的区域难以累积较多的有机质。

表 4 六门闸至小西湖样带植物群落特征与水文、土壤理化特征间的相关系数

Table 4 Correlations of plant community characteristics with water and soil properties in the sampling belt from Liun Gate to Xiaoxi Lake

指标	丰富度	生物量	多样性指数
水硝态氮	-0.46	-0.41	-0.45
水氨氮	-0.36	-0.35	-0.37
水总氮	-0.47	-0.45	-0.48
水总磷	-0.44	-0.42	-0.45
电导率	-0.47	-0.43	-0.48
水 pH	-0.16	-0.49	-0.32
流速	0.84**	0.81**	0.84**
透明度	0.87**	0.95**	0.91**
水深	-0.28	-0.18	-0.31
土 pH	-0.40	-0.56	-0.45
有机质	0.38	0.48	0.38
土全氮	0.77*	0.78	0.72*
土全磷	-0.10	0.05	-0.10

* 显著性水平为 0.05 ** 显著性水平为 0.01。

3 结论

(1)水流速度是影响河口区至湖心区水体理化特征和生物学特征变化的关键环境因子。六门闸至小西湖样带的水文特点是流速低,在此情况下,水流速度是水体营养物质浓度、透明度的关键调控因子,而透明度又是决定水生植物能否生存的关键因子。

(2)湖心区良好的水文和土壤环境适合沉水植物生存和发展,而河口区不适合沉水植物生长。湖心区适当的水流速度有利于沉水植物的生长繁殖,较高的透明度为沉水植物的光合作用提供了必要的光照条件,而较高的土壤有机质和养分含量则为沉

水植物的快速生长提供了较多的营养元素。封闭河口区因过低的水流速度而不能及时稀释外界环境带入的营养物质, 导致水体营养大量累积, 形成水体富营养化状态, 而透明度降低使沉水植物生长繁殖缺乏最基本的光照条件。

(3)河口区和湖心区生物、土壤和水文特征存在相互作用和相互影响, 而水文特征如流速是其相互联系的关键因素。在水流速度较低情况下, 流速是水体营养物质浓度、透明度的关键调控因子; 物种丰富度、生物量和多样性指数与水流速度和透明度之间在 $\alpha = 0.01$ 水平上呈显著正相关, 而与土壤全氮含量之间在 $\alpha = 0.05$ 水平上呈显著正相关。

参考文献:

- [1] GOSSELINK JG, TURNER R E. The Role of Hydrology in Freshwater Wetland Ecosystem [C] // GOOD R E, WIGHAM D, SIMPSON R L. Freshwater Wetland—Ecological Processes and Management Potential. New York: Academic Press, 1978: 63–78.
- [2] 刘厚田. 湿地生态环境 [J]. 生态学杂志, 1996, 15(1): 75–78.
- [3] 汪朝辉, 王克林, 贺曲夫. 洞庭湖湿地生态系统评估 [J]. 国土与自然资源研究, 2003(2): 49–51.
- [4] 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 [J]. 武汉大学学报: 自然科学版, 1996, 42(2): 213–218.
- [5] 邱东茹, 吴振斌. 富营养化浅水湖泊沉水水生植被的衰退与恢复 [J]. 湖泊科学, 1997, 9(1): 82–88.
- [6] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖梅梁湾沿岸带水体生物学与光学特性 [J]. 生态学报, 2005, 25(3): 456–460.
- [7] 洪天求, 潘国林, 刘路, 等. 巢湖十五里河口湿地植被动态变化研究 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2007, 30(1): 68–72.
- [8] 李萌玺, 胡耀辉, 王云华, 等. 云南星云湖大街河口湖滨湿地修复及净化效果 [J]. 湖泊科学, 2007, 19(3): 283–288.
- [9] 裴国凤, 刘国祥, 胡征宇. 东湖沿岸带底栖藻类群落的时空变化 [J]. 水生生物学报, 2007, 31(6): 836–842.
- [10] 裴国凤, 刘国祥, 胡征宇. 云南高原湖泊沿岸带底栖藻类群落的分布 [J]. 武汉植物学研究, 2008, 26(4): 373–378.
- [11] 袁龙义, 杨朝东, 费永俊, 等. 湖北长湖湿地湖岸带植物多样性研究 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(35): 15596–15599, 15611.
- [12] 李如忠, 丁丰. 巢湖主要入湖河口湿地植被生态学特征分析——以派河和十五里河为例 [J]. 安徽建筑工业学院学报: 自然科学版, 2009, 17(1): 80–84.
- [13] 谢永宏, 李峰, 侯志勇, 等. 澧水河口区与目平湖心区的基本生态特征 [J]. 生态科学, 2008, 27(6): 439–445.
- [14] 李峰, 谢永宏, 杨刚, 等. 白洋淀水生植被初步调查 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1597–1603.
- [15] 土壤理化分析与剖面描述 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [16] PHILLIPS G L, EMERSON D, MOSS B. A Mechanism to Account for Macrophyte Decline in Progressively Eutrophicated Freshwaters [J]. Aquatic Botany, 1978, 4(2): 103–126.
- [17] ROBERTSON A I, BUNN S E, BOON P I *et al*. Sources Sinks and Transformations of Organic Carbon in Australian Floodplain Rivers [J]. Marine Freshwater Research, 1999, 50: 813–829.
- [18] 黎成厚. 根据土壤质地、有机质含量及 pH 值评估土壤肥力的探讨 [J]. 耕作与栽培, 1991(3): 38–40.
- [19] 关松, 龚森. 土壤有机质分解与转化的驱动因素 [J]. 安徽农业科学, 2006, 34(10): 2203–2206.
- [20] SCHEFFER M, VAN DEN BERG M, BREUKEL AAR A, *et al*. Vegetated Areas with Clear Water in Turbid Shallow Lakes [J]. Aquatic Botany, 1994, 49(2/3): 193–196.
- [21] XIE Y H, LUO W B, REN B, *et al*. Morphological and Physiological Response to Sediment Type and Light Availability in Roots of the Submerged Plant *Myriophyllum spicatum* [J]. Annals of Botany, 2007, 100(7): 1517–1523.
- [22] 朱广伟. 太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系 [J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(5): 439–445.
- [23] BARKO J W, GUNNISON D, CARPENTER S R. Sediment Interactions with Submersed Macrophyte Growth and Community Dynamics [J]. Aquatic Botany, 1991, 41(1/2/3): 41–65.
- [24] 白军红, 邓伟, 张玉霞. 莫莫格湿地土壤氮磷空间分布规律研究 [J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 79–81.

作者简介: 陈心胜 (1979—), 男, 河南商丘人, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为湿地生态。E-mail: xscher@isa.ac.cn