

洞庭湖不同水位高程下南荻 (*Triarrhena lutarioriparia*) 种群分布格局及生长动态*

李旭¹, 宋冰冰², 李峰¹, 曾静¹, 侯志勇¹, 谢永宏^{1**}, 陈心胜¹, 邓正苗¹

(1: 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 洞庭湖湿地生态系统观测研究站, 长沙 410125)

(2: 湖南省环境监测中心, 长沙 410019)

摘要: 通过野外不同水位高程固定样地多次调查, 结合方差/均值比率法研究了不同水位高程下洞庭湖湿地南荻 (*Triarrhena lutarioriparia*) 种群分布格局及生长动态. 结果表明: (1) 低程区土壤含水量显著高于高程区; 低程区土壤颗粒组成与高程区相比有显著差异, 低程区土壤为黏砂壤土, 高程区为粉砂土; 低程区土壤总有机碳、全氮、铵态氮和 pH 值等与高程区相比无显著差异, 而其硝态氮、有效磷、全钾和速效钾含量低于高程区, 全磷含量却恰好相反. (2) 调查期间, 南荻的分布格局随着植物的生长由均匀分布逐渐变为聚集分布, 低程区聚集强度更大; (3) 南荻的生物量和高度均随时间增长而迅速增加, 且低程区的总生物量和增长量均高于高程区; 南荻的密度和基径随时间增长而增加, 之后趋于平稳, 且低程区均高于高程区. 结果分析表明, 水位高程差异引起的土壤含水量的显著变化可能是影响南荻分布格局和生长动态最重要的因素. 因此, 适度地调控水位、增加土壤水分含量可能是控制南荻群落扩张的重要措施.

关键词: 方差/均值比; 聚集强度; 土壤含水量; 洞庭湖; 南荻; 水位变化

Population distribution patterns and growing status of *Triarrhena lutarioriparia* along a gentle elevation gradient of Lake Dongting wetlands

LI Xu¹, SONG Bingbing², LI Feng¹, ZENG Jing¹, HOU Zhiyong¹, XIE Yonghong^{1**}, CHEN Xinsheng¹ & DENG Zhengmiao¹

(1: Institute of Subtropical Agriculture, Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Dongting Lake Station for Wetland Ecosystem Observation and Research, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, P.R.China)

(2: Hunan Environmental Monitoring Center, Changsha 410019, P.R.China)

Abstract: In this study, the population distribution patterns and growing status of *Triarrhena lutarioriparia* along a gentle elevation gradient were analyzed based on an investigation of the fixed quadrat plot and a method of variance to mean ratio in a typical beach of Lake Dongting wetlands. The results indicated that (1) soil moisture content was significantly higher in the low altitude areas than in the high altitude areas. Soil particle composition of low altitude areas was significantly different from that of high altitude areas. Soil pH was all alkaline. There was also no significant difference in soil total organic carbon, total nitrogen, ammonium nitrogen content and pH, while soil nitrate nitrogen content in low altitude areas was significantly lower than that in the high altitude areas. Soil total phosphorus content was significantly lower in high altitude than that in low altitude, while available phosphorus, total potassium and available potassium showed opposite patterns. (2) The population distribution patterns of *T. lutarioriparia* in both low and high altitude areas were all changed from a uniform distribution to an aggregated pattern, while the aggregation intensity was greater in the low altitude areas. (3) The biomass of *T. lutarioriparia* accumulated rapidly along with the time going, which was significantly lower in the low altitude areas than in the high areas. Density and basal diameter of *T. lutarioriparia* increased sig-

* 国家科技基础性工作专项(2013FY111800)、国家自然科学基金项目(31200271)、湖南省科技支撑计划重点项目(2014NK2009)和中国科学院知识创新工程领域前沿项目(ISACX-LYQY-QN-1208)联合资助. 2015-07-03 收稿; 2015-09-10 收修改稿. 李旭(1985~), 男, 工程师; E-mail: libr05008@139.com.

** 通信作者; E-mail: yonghongxie@163.com.

nificantly along with the time going, which were higher in the low altitude areas than in the high altitude areas. These results indicated that the soil moisture content had a significant influence on the population distribution patterns and the status of *T. lutarioriparia* growing. Therefore, moderate regulating of water level and increasing soil moisture content may be adaptive to control the invasion of *T. lutarioriparia* into the *Carex* community.

Keywords: Variance to mean ratio; aggregation intensity; soil moisture; Lake Dongting; *Triarrhena lutarioriparia*; water level change

湿地植物是湿地生态系统的重要组成部分,对于调节区域水分平衡、气候环境,提供食物原材料以及动物栖息场所等发挥着重要作用. 湿地植物组成、生长过程和生态特性受多种环境因子的影响,如水分梯度、生物竞争以及营养物质等^[1-3],湿地植物的空间分布也是对水分差异性、养分梯度等环境响应的结果^[4-5]. 湿地生态系统中水位的波动对湿地植物组成、植被生产力、生物多样性等方面具有很大的影响,同时水位的变化还对植物的形态特征和生物量积累都有显著影响,并且这种影响程度也随着时间、季节的变化而产生差异^[6-10].

洞庭湖是中国第二大淡水通江湖泊,湖泊水位受流域“四水”(湘、资、沅、澧)和长江的共同作用,多年平均年水位变幅可达 13.35 m 以上(城陵矶站),在高、低水位之间的消落带发育有大面积的洲滩,不同的洲滩植物群落沿高程梯度呈典型带状分布格局^[11]. 南荻(*Triarrhena lutarioriparia*)群落是洞庭湖洲滩湿地上面积最大,最为典型的挺水植物群落,面积可达 $9.05 \times 10^4 \text{ hm}^2$,且常与芦苇(*Phragmites australis*)混生形成优势群落,主要分布在海拔 27 m(东部)或 30 m(西部)以上受季节性洪水泛滥的高位洲滩上^[11]. 南荻群落不仅是候鸟的觅食场所和冬候鸟的主要隐蔽场所,同时也是重要的工业造纸原材料. 近年来,受全球变化及高强度人类活动的影响,尤其是三峡工程运行后,洞庭湖水位不断降低,洲滩湿地提前出露^[12-14],导致洞庭湖湿地植被呈现明显的正演替趋势,群落分布带不断下移,具体表现为杨树(*Populus deltoides*)、南荻面积不断扩大,杨树挤占南荻空间,南荻挤占苔草(*Carex* sp.),苔草挤占泥滩地和水域^[11]. 由于苔草洲滩是洞庭湖主要鱼类产卵场和冬候鸟重要觅食地和栖息场所,多年来苔草的分布面积在持续减小,这一格局的变化将对生物多样性产生重大影响,进而引发洞庭湖湿地服务功能下降. 南荻作为洞庭湖湿地的主要物种,其面积的扩张和分布带的下移直接影响苔草的分布面积,然而针对南荻扩张初期生长动态及其相关的影响因子尚不清楚. 目前国内外有关水文特征对其他湿地植物群落生长动态和形态特征的影响研究已开展了大量工作^[15-17],但针对南荻的研究很少.

本研究选取东洞庭湖国家级自然保护区小西湖区域的一块典型洲滩为实验区,通过固定样地的方法,研究了不同高程下南荻种群的分布格局和生长动态,以期加强对洞庭湖湿地植被格局及生长动态的认识,并为湿地植物资源的合理利用及洞庭湖湿地生态系统的保护提供一定的理论指导.

1 研究区域及研究方法

1.1 研究区概况

东洞庭湖国家级自然保护区小西湖位于湖南省岳阳市君山区六门闸附近,属亚热带季风气候,年平均气温 $16.4 \sim 17.0^\circ\text{C}$,无霜期 260~280 d,年平均降水量 1250~1450 mm,年平均湿度 80%. 小西湖洲滩($29^\circ 26' \sim 29^\circ 27' \text{N}$, $112^\circ 46' \sim 112^\circ 47' \text{E}$)位于东洞庭湖防洪大堤下,洪水季节(5—10月)湖滩全部淹没,枯水季节(11月至次年4月)露出,形成了以敞水带、季节性淹水带、滞水低地为主的湖泊湿地景观. 洲滩上分布的主要优势种群为南荻、苔草和芦苇,由于受微地形的影响,植被随水位高程增加呈现出明显的带状分布,由低到高其分布依次为苔草→南荻(芦苇). 洞庭湖水位的季节性变化影响该区域内植物的生长发育过程,南荻一般在2月末开始萌发露出地面,3—5月迅速生长,5—10月洪水期,南荻生长区域被洪水淹没,9—10月开花结果,11月底停止生长而逐渐枯黄,11月到次年1月被人为收割作为造纸原料.

1.2 野外调查及样品采集

分别于2013年3月2日、3月13日、3月28日和4月18日进行4次野外调查,调查期间洞庭湖的洪水尚未来临,南荻开始萌发后处于迅速生长期. 采用样带法对洲滩进行样地布设和取样,在南荻群落分布的不同高程设置两条平行于水岸线的样带,两条样带的高程差异约为 2.2 m. 在每条样带上,每间隔 50 m 固定设

置 1 个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方, 每条样带均匀设置 6 个样方, 视为每条样带的 6 个重复点, 共设置调查 12 个固定样方(图 1)。在调查记录样方时, 以样方右下角为原点, 平行于水岸线的边为 X 轴, 垂直于水岸线的边为 Y 轴, 记录样方内南荻的株数和每株南荻的相对坐标位置, 并量取株高、基径。在第一次调查时, 在样方附近用“五点取样法”采集 1 kg 左右的混合土样(0~20 cm), 将土样用塑料封口袋和铝盒装好带回实验室进行分析测定。由于要研究南荻种群的分布格局, 故不能对样方内的南荻进行采收, 南荻生物量的计算采用基径和高度数据方程拟合的方法进行, 每次调查采样时, 收割若干样方附近的南荻, 并记录其基径和高度, 之后在 85°C 烘箱内烘干至恒重。采样过程中用 GPS 对每个样点准确定位。

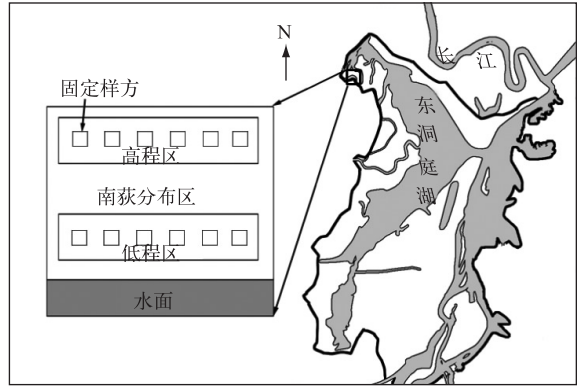


图 1 野外调查示意图

Fig.1 Sketch map of field investigation

1.3 分析方法

土样带回实验室后, 仔细除去新鲜土样中可见植物残体及土壤动物, 风干, 过筛(10目、60目和100目), 并彻底混匀。土壤含水量用烘干法; 土壤颗粒组成用激光粒度仪测定; 土壤 pH 值用水浸, 水土比为 2.5:1, 用 pH 计测定; 土壤总有机碳(TOC)采用重铬酸钾-外加热法; 土壤全氮用 CN 元素分析仪测定; 土壤铵态氮和硝态氮用 2 mol/L 的氯化钾浸提, 分别用靛酚蓝比色法和酚二磺酸比色法测定; 土壤全磷用氢氧化钠碱熔, 钼锑抗比色法测定; 土壤有效磷用 0.5 mol/L 的碳酸氢钠浸提, 钼锑抗比色法测定; 土壤全钾用氢氧化钠碱熔, 原子吸收分光光度法测定; 土壤速效钾用 1 mol/L 的乙酸铵浸提, 原子吸收分光光度法测定^[18]。根据南荻生长的特点, 其地上生物量采用基径和高度拟合方程法进行计算。

1.4 统计分析

根据固定样方调查的坐标, 利用格子法(格子大小为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$), 统计每个格子内南荻的个体数, 采用方差/均值比率法(DI)判定南荻的分布格局类型(DI < 1 时为均匀分布, DI = 1 时为随机分布, DI > 1 时为集群分布); 聚集强度可用于比较同一种群在不同时间或不同生境中聚集强度的变化, 或者比较不同种群在同一时间、同类生境中所呈现的聚集状况。不同的聚集指标的测度, 并不是度量同一种群聚集程度的不同方法, 而是从不同的角度来度量同一种群的聚集特性^[19]。种群的聚集强度采用聚集指数 CI (CI = 0 时表示随机分布, CI > 0 表示集群分布, CI < 0 表示均匀分布)、平均拥挤度 m^* (m^* 越大表示该个体受到其它个体的拥挤效应越大)、聚块性指数 PAI (PAI < 1 时为均匀分布, PAI = 1 时为随机分布, PAI > 1 时为集群分布)、Green 指数 GI (GI < 0 时为均匀分布, GI = 0 时为随机分布, GI > 0 时为聚集分布)和负二项式参数 K (K 值愈小聚集度愈大, K > 8 时种群便服从随机分布)来度量^[19]。

数据处理采用统计软件 SAS 8.0, 作图采用 Excel 2013。采用 Repeated-ANOVA 分析植物生长特征, 采用 Duncan 检验进行多重比较, 显著度水平为 0.05。采用 t-检验比较分析不同高程土壤理化性质, 显著度水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同高程土壤性质

低程区土壤含水量显著高于高程区(表 1), 其值为 27.61%, 比高程区高 14.6%。低程区土壤颗粒组成也与高程区差异显著, 低程区砂粒含量为高程区的 11.3 倍。低程区黏粒、砂粒和粉粒含量分别为 6.84%、13.96% 和 79.20%, 土壤质地为黏砂壤土; 高程区黏粒、砂粒和粉粒含量分别为 10.95%、1.23% 和 87.82%, 土壤质地为粉砂土。这可能与低程区更靠近航道, 水流对表层土壤的冲刷有关。

不同高程的土壤 pH 值均呈碱性(表 1), 且高程间无显著差异; 低程区土壤 TOC、全氮、铵态氮含量与高程区相比无显著差异, 其总的平均值分别为 13.16 g/kg、13.55 g/kg、7.60 mg/kg; 低程区土壤硝态氮含量显著

低于高程区,约为高程区的 1/5,其原因可能是高程区土壤通气条件好,处于氧化状态的时间长而有利于硝化细菌的活动;低程区土壤全磷含量显著低于高程区,分别为 0.78 和 1.23 mg/kg,而有效磷含量则相反,分别为 5.16 和 4.01 g/kg;低程区土壤全钾和速效钾含量显著低于高程区,低程区含量分别为 0.08 g/kg,高程区分别为 26.28 和 0.14 g/kg. 低程区土壤砂粒含量较高,土壤全磷和全钾含量受其影响而较高程区低,而土壤全磷在水分含量高的情况下更易溶解和释放变为有效磷.

土壤全磷和有效磷的单位弄反了,全磷为g/kg,有效磷为mg/kg

表 1 不同高程下南荻群落中土壤理化性质

Tab.1 Soil physical and chemical properties of *T. lutarioriparia* along a small-scale elevation gradient

土壤理化特征	指标	低程区	高程区
物理性质	含水量/%	27.61±0.52 *	23.58±0.31 *
	黏粒含量/%	6.84±0.17 *	10.95±0.35 *
	砂粒含量/%	13.96±1.31 *	1.23±0.19 *
	粉粒含量/%	79.20±1.20 *	87.82±0.20 *
	质地	黏砂壤土	粉砂土
化学性质	pH 值	8.10±0.16	8.06±0.16
	TOC/(g/kg)	13.79±1.32	12.54±0.86
	全氮/(g/kg)	14.2±1.2	12.9±0.7
	铵态氮/(mg/kg)	5.95±1.20	9.27±1.22
	硝态氮/(mg/kg)	1.37±0.26 *	7.49±1.59 *
	全磷/(g/kg)	0.78±0.02 *	1.23±0.03 *
	有效磷/(mg/kg)	5.16±0.41 *	4.01±0.26 *
	全钾/(g/kg)	21.87±0.33 *	26.28±0.65 *
	速效钾/(g/kg)	0.08±0.01	0.14±0.01

* 表示不同高程间呈显著差异($P<0.05$).

2.2 种群分布格局和聚集强度

方差/均值比率是一个很好的表征种群个体水平空间分布特征的指标^[19]. 方差/均值比率的 t 检验是一种用于检验种群分布格局是否偏离 Poisson 分布的方法,其根据是 Poisson 分布具有方差与均值相等的性质. 除高程中的第一次调查外,其他各调查的 DI 均大于 1,表明南荻种群的分布格局主要是聚集分布. 然而,方差/均值比率的 t 检验($DI > 1, t_{0.05}(23) = 2.096$)表明,除低程中第 4 次调查外,其他各调查聚集程度均不显著(表 2).

表 2 南荻种群的分布格局类型和聚集强度

Tab.2 Population distribution patterns and aggregation intensity of *T. lutarioriparia*

时间	分布区	方差	均值	方差/均值	t 值	格局类型	聚集强度				
							CI	m^*	PAI	GI	K
2013-03-02	高程	1.49	2.29	0.65	-0.55	均匀	-0.35	1.94	0.85	-0.02	-3.20
2013-03-13	高程	11.54	6.13	1.88	1.38	聚集	0.88	7.01	1.14	0.04	-8.85
2013-03-28	高程	8.63	6.63	1.30	0.47	聚集	0.30	6.93	1.05	0.01	-8.25
2013-04-18	高程	8.44	7.17	1.18	0.28	聚集	0.18	7.34	1.02	0.01	-8.58
2013-03-02	低程	10.65	7.38	1.44	0.70	聚集	0.44	7.82	1.06	0.02	-9.17
2013-03-13	低程	21.21	10.08	2.10	1.73	聚集	1.10	11.19	1.11	0.05	-12.74
2013-03-28	低程	22.43	10.08	2.22	1.92	聚集	1.22	11.31	1.12	0.05	-12.94
2013-04-18	低程	25.78	9.29	2.77	2.78	聚集	1.77	11.07	1.19	0.08	-13.25

南荻的 5 个不同的聚集指数都表明,除高程中的第一次调查为均匀分布外,其他各次的分布格局均为

聚集分布,但聚集程度不同.在高程区随着南荻的生长,分布格局由均匀分布变为聚集分布;在低程区随着南荻的生长,分布格局为聚集分布,但聚集强度慢慢变大(表2).

综上所述,在调查期内,南荻种群分布格局从均匀分布逐渐变为聚集分布,且聚集强度越来越大,高程差异对南荻种群分布格局有一定影响.

2.3 生物量估算

以基径、株高等易于测定的参数来估测生物量是一种易行的简便方法.通过基径(D)和株高(H)对生物量(W)的分析和模拟结果表明,三者间存在显著的相关性,其拟合方程为 $W = 0.0002(D \cdot H)^2 + 1.4771$, $R^2 = 0.9854, P < 0.001$ (图2).

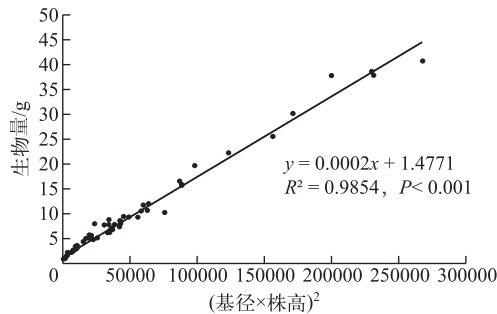


图2 南荻生物量的拟合方程

Fig.2 The biomass fitting equation of *T. lutarioriparia*

2.4 生长动态

在4个调查期内,随着时间的增长,南荻的生物量迅速增加,且低程区南荻的总生物量和增长量均高于高程区,在调查的最后两个时期均达到了显著差异($P < 0.05$;图3a).不同时期低程区南荻的高度同样显著高于高程区($P < 0.05$;图3b),低程区南荻的密度同样高于高程区,但低程区的南荻密度呈先增加后减少的趋势,最终高低程区的密度将趋向一致(图3c).低程区南荻的基径均高于高程区,且都有先减少后增加最后趋同的趋势(图3d).综上所述,不同高程下南荻生长动态存在明显差异.

3 讨论

种群分布格局的形成与物种的生物学特性密切相关,是物种与周围环境相互适应的结果.大量研究表明:自然界中大多数物种的分布格局为聚集分布,某些生活力强的种成功定居后,会不断通过有性或无性繁殖产生新个体,逐渐排斥群落中竞争力弱的个体,最终形成聚集分布^[19].南荻为多年生草本植物,主要通过根状茎不断产生新的个体,扩大种群分布范围,增加种群密度.在南荻的萌发时期,各繁殖体的生长机会均等,它们的分布格局往往表现出均匀分布,但随着南荻的不断生长,为争夺更多的资源,新生的个体不断从原有植株的根部生长出来而呈现出聚集分布的特点^[20-21].这一现象在南荻生长的低程区表现得更加明显,具体表现为南荻密度和高度均明显高于高程区,尤其是第一次调查期间.其原因可能在于本区域的南荻每年5—10月都面临洪水没顶的压力,为适应洪水环境,在洪水来临前必须具有一定高度,低程区的南荻比高程区的生长发育更早、更快.南荻分布格局呈聚集分布,有利于增加种群在群落中的竞争能力,是为了生存和延续而进行生存斗争的一种生态策略^[19].

南荻为禾本科多年生湿生草本植物,3—8月为南荻的营养生长期,9—11月为南荻的生殖生长期,南荻在3—11月完成一个生活史周期,最后南荻被收割作为造纸原料.本研究的调查期刚好是南荻萌发到营养迅速积累的营养生长期,在此期间,不同高程下南荻表现出不同的生长特征.从个体水平来看,它们在营养生长期各生长指标(高度和基径)变化明显,但不同高程下呈现明显的差异性.同一调查时期低程区的个体明显较大;从种群角度来看,整个调查期间内母株附近都伴随着幼株(分蘖株)的生长,这也导致种群的密度在不断增加,但最终种群因自疏作用,种群密度增加减缓或呈下降趋势并最终达到稳定^[20-22].

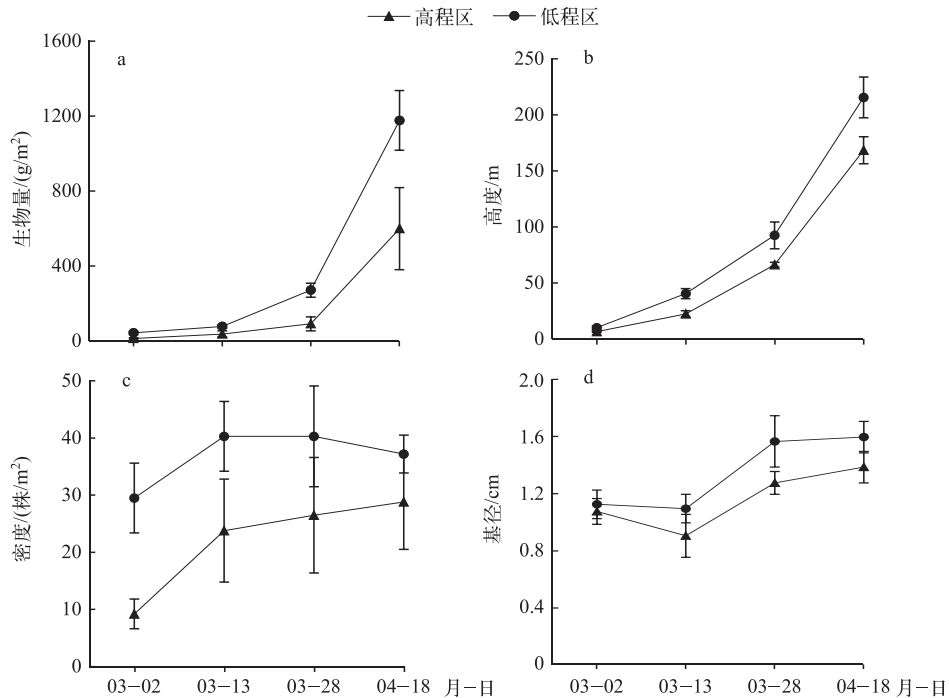


图3 南荻的生长动态

Fig.3 The growing dynamic of *T. lutarioriparia*

土壤营养元素含量对于湿地植物的生长和分布具有重要影响,但在不同的湿地中其影响力存在差异^[23]. 在本研究中,低程区土壤 TOC、全氮、铵态氮、速效钾和 pH 值等与高程区相比无显著差异,而其硝态氮、全磷、全钾含量低于高程区,有效磷含量却恰好相反. 本区域土壤来源为泥沙沉积土,土壤的营养元素含量基本一致,造成不同高程区域营养元素含量差异的原因可能是水流的冲刷以及微地貌的差异. 从南荻的生长动态来看,低程区南荻的株数、基径、高度和生物量均高于高程区,说明本研究区土壤营养元素的含量对南荻的生长效应不明显. 有研究表明,南荻在营养生长旺盛期植株体内含水量高于其他生长阶段,说明营养生长旺盛期对水分需求较大,保持此时期适当的水分供应对于南荻植株的长高和分蘖具有重要意义^[24-27]. 南荻的耐旱能力比耐淹能力强^[9],洪水来临后,南荻处于极端的淹水环境,南荻的生长反而受到限制. 由此可见,在洞庭湖湿地适度的土壤水分含量才是决定南荻生长和繁殖的关键因素,而土壤营养元素含量的作用相对较弱,这也与之前的研究结果相一致^[10,28-30].

近年来,尤其是三峡工程运行后,洞庭湖年平均水位持续下降,洲滩出露时间不断增加,导致湿地植被正向演替明显,湿地植被带不断向湖心侵移,再加上强烈的人类活动必将引起洞庭湖湿地生态功能的重大变化^[11,31]. 近 20 年来,洞庭湖湿地植被格局发生了巨大变化,草洲(主要为南荻、芦苇和苔草群落)面积增加 305.06 km²,但以苔草为绝对优势的洲滩分布面积持续减小,已由 1983 年的 768 km² 缩减为 2007 年的 499 km²^[11,13]. 由于苔草群落是洞庭湖主要鱼类产卵场和冬候鸟重要觅食地和栖息场所,其面积变小将会对洞庭湖生物多样性造成严重威胁. 因此,适度控制水分条件,对于防止南荻植被带下移和过度扩张及保护洞庭湖湿地生物多样性尤为重要. 如在合适区域内修筑矮堤,维持东洞庭湖湿地年均生态水位在 24.29 m 左右,这对于减少南荻扩张的立地环境,维持湿地面积的长期稳定至关重要.

4 参考文献

- [1] Wang Haiyang, Chen Jiakuan, Zhou Jin. Influence of water level gradient on plant growth, reproduction and biomass allocation of wetland plant species. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(3): 269-274 (in Chinese with English abstract).

- [王海洋, 陈家宽, 周进. 水位梯度对湿地植物生长、繁殖和生物量分配的影响. 植物生态学报, 1999, **23**(3): 269-274.]
- [2] Castelli RM, Chambers JC, Tausch RJ. Soil-plant relations along a soil-water gradient in great basin riparian meadows. *Wetlands*, 2000, **20**(2): 251-266.
- [3] Luo WB, Xie YH. Growth and morphological responses to water level and nutrient supply in three emergent macrophyte species. *Hydrobiologia*, 2009, **624**(1): 151-160.
- [4] Dwire KA, Kauffman JB, Baham JE. Plant species distribution in relation to water-table depth and soil redox potential in montane riparian meadows. *Wetlands*, 2006, **26**(1): 131-146.
- [5] Tan Xuejie, Zhao Xinsheng. Spatial distribution and ecological adaptability of wetland vegetation in Yellow River Delta along a water table depth gradient. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, **25**(12): 1460-1464 (in Chinese with English abstract). [谭学界, 赵欣胜. 水深梯度下湿地植被空间分布与生态适应. 生态学杂志, 2006, **25**(12): 1460-1464.]
- [6] White SD, Deegan BM, Ganf GG. The influence of water level fluctuations on the potential for convective flow in the emergent macrophytes *Typha domingensis* and *Phragmites australis*. *Aquatic Botany*, 2007, **86**: 369-376.
- [7] Deegan B, White S, Ganf G. The influence of water level fluctuations on the growth of four emergent macrophyte species. *Aquatic Botany*, 2007, **86**: 309-315.
- [8] Li F, Li YZ, Qin HY *et al.* Plant distribution can be reflected by the different growth and morphological responses to water level and shade in two emergent macrophyte seedlings in the Sanjiang Plain. *Aquatic Ecology*, 2011, **45**(1): 89-97.
- [9] Li F, Qin XY, Xie YH *et al.* Physiological mechanisms for plant distribution pattern: responses to flooding and drought in three wetland plants from Dongting Lake, China. *Limnology*, 2013, **14**(1): 71-76.
- [10] Chen XS, Li X, Xie YH *et al.* Combined influence of hydrological gradient and edaphic factors on the distribution of macrophyte communities in Dongting Lake wetlands, China. *Wetlands Ecology and Management*, 2014, **23**: 481-490. DOI: 10.1007/s11273-014-9396-9.
- [11] Xie Yonghong, Zhang Chen, Jiang Yong *et al.* eds. Evolution of ecological environments in Dongting Lake wetlands. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 2014(in Chinese). [谢永宏, 张琛, 蒋勇等. 洞庭湖湿地生态环境演变. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2014.]
- [12] Lai Xijun, Jiang Jiahu, Huang Qun. Pattern of impoundment effects and influencing mechanism of Three Gorges Project on water regime of Lake Dongting. *J Lake Sci*, 2012, **24**(2): 178-184(in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2012.0202. [赖锡军, 姜加虎, 黄群. 三峡工程蓄水对洞庭湖水情的影响格局及其作用机制. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 178-184.]
- [13] Tang Yue, Xie Yonghong, Li Feng *et al.* Spatial distribution of emergent herbaceous wetlands in the east Dongting lake during the last twenty Years based on landsat data. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, **22**(11): 1484-1492(in Chinese with English abstract). [唐玥, 谢永宏, 李峰等. 基于 Landsat 的近 20 余年东洞庭湖湿地草洲变化研究. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(11): 1484-1492.]
- [14] Yuan Min, Li Zhongwu, Xie Gengxin *et al.* Effects of the Three Gorges Project on the water surface area of Lake Dongting, 2000-2010. *J Lake Sci*, 2014, **26**(1): 37-45(in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2014.0105. [袁敏, 李忠武, 谢更新等. 三峡工程调节作用对洞庭湖水面积(2000—2010年)的影响. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 37-45. DOI: 10.18307/2014.0105.]
- [15] Coops H, van den Brink FWB, van der Velde G. Growth and morphological responses of four helophyte species in an experimental water-depth gradient. *Aquatic Botany*, 1996, **54**(1): 11-24.
- [16] Vretare V, Weisner SEB, Strand JA *et al.* Phenotypic plasticity in *Phragmites australis* a functional response to water depth. *Aquatic Botany*, 2001, **69**: 127-146.
- [17] Pagter M, Bragato C, Brix H. Tolerance and physiological responses of *Phragmites australis* to water deficit. *Aquatic Botany*, 2005, **25**(3): 520-530.
- [18] Liu Guangsong ed. Soil physical and chemical analysis & description of soil profiles. Beijing: Standards Press of China, 1996(in Chinese). [刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996.]
- [19] Wu Yuzhen, Zhang Feng. Patterns of dominant populations of wetland vegetation in Sanggan River Watershed, Shanxi. *Bulletin of Botanical Research*, 2006, **26**(6): 735-741(in Chinese with English abstract). [王玉珍, 张峰. 山西桑干河流域湿地植被优势种群分布格局研究. 植物研究, 2006, **26**(6): 735-741.]

- [20] Chen XS, Cao C, Deng ZM *et al.* Assessment of regeneration potential in the clonal macrophyte *Miscanthus sacchariflorus* (Poaceae) after burial disturbance based on bud bank size and sprouting capacity. *PLoS One*, 2015, **10**(3): e: 0120846.
- [21] Chen XS, Deng ZM, Xie YH *et al.* Belowground bud banks of four dominant macrophytes along a small-scale elevational gradient in Dongting Lake wetlands, China. *Aquatic Botany*, 2015, **122**: 9-14.
- [22] Deng ZM, Chen XS, Xie YH *et al.* Effects of size and vertical distribution of buds on sprouting and plant growth of the clonal emergent macrophyte *Miscanthus sacchariflorus* (Poaceae). *Aquatic Botany*, 2013, **104**: 121-126.
- [23] Li Xu, Xie Yonghong, Huang Jishan *et al.* Research progresses on the formation mechanism of vegetation distribution pattern in wetlands. *Wetland Science*, 2009, **7**(3): 280-288 (in Chinese with English abstract). [李旭, 谢永宏, 黄继山等. 湿地植被格局成因研究进展. *湿地科学*, 2009, **7**(3): 280-288.]
- [24] Wang Xuehong, Tong Shouzheng, Lü Xianguo. The ecological characteristics dynamic of *Phragmites australis* community in wetland of semi-arid areas—a case of Momoge Wetland. *Wetland Science*, 2008, **6**(3): 386-391 (in Chinese with English abstract). [王雪宏, 佟守正, 吕宪国. 半干旱区湿地芦苇种群生态特征动态变化研究——以莫莫格湿地为例. *湿地科学*, 2008, **6**(3): 386-391.]
- [25] Zhang Xiaoyu, Su Fangli, Wang Liye *et al.* Influence of groundwater depth on reed's budding and growth. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, **28**(3): 116-117 (in Chinese with English abstract). [张潇予, 苏芳莉, 王立业等. 地下水埋深对芦苇出苗及苗期生长发育的影响. *灌溉排水学报*, 2009, **28**(3): 116-117.]
- [26] Su Fangli, Zhang Xiaoyu, Guo Chengjiu *et al.* The response mechanism of groundwater depth and reed growth. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, **29**(6): 129-132 (in Chinese with English abstract). [苏芳莉, 张潇予, 郭成久等. 地下水埋深与芦苇生长的响应机制研究. *灌溉排水学报*, 2010, **29**(6): 129-132.]
- [27] Zhang Yufeng, Zhang Juanhong, Sun Xiaobo *et al.* Preliminary study of growth dynamics of *Phragmites australis*. Population in Yinchuan plain based on phenotypic analysis. *Ningxia Journal of Agri and Fores Sci & Tech*, 2012, **53**(7): 1-4 (in Chinese with English abstract). [张玉峰, 张娟红, 孙晓波. 基于表型分析的银川平原芦苇种群生长动态研究. *宁夏农林科技*, 2012, **53**(7): 1-4.]
- [28] Xia Guiju, He Tonghui, Zhao Yongquan *et al.* Influence of different soil types on reed growth and photosynthesis characteristics. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2014, **34**(6): 1252-1258 (in Chinese with English abstract). [夏贵菊, 何彤慧, 赵永全等. 不同土壤类型对芦苇生长及光合特征的影响. *西北植物学报*, 2014, **34**(6): 1252-1258.]
- [29] Xu Xiuli, Zhang Qi, Li Yunliang *et al.* Reed population features and relationships between feature indicators and flooding depth, groundwater depth in an islet in Poyang Lake. *Wetland Science*, 2014, **12**(6): 714-722 (in Chinese with English abstract). [许秀丽, 张奇, 李云良等. 鄱阳湖洲滩芦苇种群特征及其与淹水深度和地下水埋深的关系. *湿地科学*, 2014, **12**(6): 714-722.]
- [30] Li Xu, Li Feng, Xie Yonghong *et al.* Vegetation dynamics of *Triarrhena sacchariflora* and *Carex* sp. community ecotone and determining factors in Lake Dongting: A case study in the Beizhouzi lake-shore. *J Lake Sci*, 2015, **27**(6): 1020-1026 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2015.0605. [李旭, 李峰, 谢永宏等. 洞庭湖荻-苔草群落交错带植被动态及影响因子——以北洲子洲滩为例. *湖泊科学*, 2015, **27**(6): 1020-1026.]
- [31] Xie Yonghong, Huang Qun, Wang Xiaolong. The protection of important lake wetland in the lower reaches of Yangtze River//Yang GS, Zhu CQ, Jiang ZG eds. *Yangtze Conservation and Development Report 2011*. Wuhan: Changjiang Press, 2011: 144-168 (in Chinese). [谢永宏, 黄群, 王晓龙. 中下游地区重要湖泊湿地保护//杨桂山, 朱春全, 蒋志刚. *长江保护与发展报告 2011*. 武汉: 长江出版社, 2011: 144-168.]