J. Lake Sci.(湖泊科学),2015,**27**(6):1020-1026
DOI 10.18307/2015.0605
© 2015 by *Journal of Lake Sciences*

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*

李　旭[1],李　峰[1],谢永宏[1**],邓武军[2],曾　静[1],侯志勇[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:湖南省水利厅,长沙 410007)

摘　要: 近年来,受全球变化及高强度人类活动的影响,洞庭湖湿地群落分布带不断下移,引发了人们对其湿地服务功能下降的担忧. 以洞庭湖北洲子洲滩为例,采用野外样带调查和室内分析相结合的方法,对洞庭湖湿地荻-苔草群落交错带植被和环境特征进行研究,以期揭示荻-苔草群落交错带动态变化和影响其变化的关键环境因子. 结果表明:土壤含水量随高程增加呈逐渐降低的趋势,土壤总碳、总氮、总磷含量和 pH 值在样带间差异显著,但土壤电导率和总钾含量在样带间无显著差异. 各样带物种丰富度和香农指数随高程增加整体上呈先降低再增加的趋势. 荻生物量随高程增加呈逐渐增加的趋势,而苔草生物量呈先增加后减少的趋势. 典型相关分析表明,土壤含水量与二者生物量及群落丰富度、多样性间具有很好的相关性,表明土壤含水量是调控该群落交错带植被动态变化的关键环境因子.
关键词: 群落交错带;多样性指数;土壤含水量;洞庭湖;北洲子洲滩

Vegetation dynamics of *Triarrhena sacchariflora* and *Carex* sp. community ecotone and determining factors in Lake Dongting: A case study in the Beizhouzi lake-shore

LI Xu[1], LI Feng[1], XIE Yonghong[1], DENG Wujun[2], ZENG Jing[1], HOU Zhiyong[1], CHEN Xinsheng[1] & DENG Zhengmiao[1]
(1: *Institute of Subtropical Agriculture, Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Lake Dongting Station for Wetland Ecosystem Observation and Research, Chinese Academy of Sciences, Changsha* 410125, *P. R. China*)
(2: *The Department of Water Resources of Hunan Province, Changsha* 410007, *P. R. China*)

Abstract: In recent years, the vegetation distribution decreased significantly in Lake Dongting due to global change and intensive human disturbance, and has induced significant concerning about the decrement of service functions. In order to reveal the vegetation dynamics and its dominant influencing factors of *Triarrhena sacchariflora* and *Carex* sp. community ecotone, we took Beizhouzi lake-shore as an example, and investigated the vegetation characteristics and soil environmental characteristics in the ecotone of *T. sacchariflora* and *Carex* sp. community in the Lake Dongting based on belt sampling method and indoor measurement. The results showed that: soil moisture decreased significantly along with increment of elevation. Total carbon, total nitrogen, total phosphorus and pH had significant difference between these belts, while conductivity and total potassium displayed similar patterns. Vegetation species richness and diversity index decreased firstly and then increased along with elevation. Biomass of *T. sacchariflora* increased significantly along with elevation, while biomass of *Carex* sp. community exhibited increase firstly, followed by decrease with elevation. Canonical correlation analysis showed that soil moisture was significantly correlated with both biomass accumulation of *T. sacchariflora* and *Carex* sp., and vegetation species richness and diversity, indicating that soil moisture is the key dominant factor influencing vegetation dynamics in this ecotone.

---

* 国家科技基础性工作专项项目(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. 2014-08-11 收稿;2015-02-12 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.

Keywords: Ecotone; diversity index; soil moisture; Lake Dongting; Beizhouzi lake-shore

洞庭湖为我国第二大淡水湖,是长江中游最为典型的通江湖泊,具有调节江河径流、净化水质、沟通航运、维护生物多样性和改善生态环境等多种生态服务功能[1]. 洞庭湖湿地以草本植被为主,从空间格局上呈现明显的与高程对应的带状分布特点,群落间存在多种生态过渡带,如荻-苔草群落交错带、藨草-苔草群落交错带等[2-3],其中以荻-苔草群落交错带最为明显. 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[4-5],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、荻面积不断扩大,杨树挤占荻(芦苇)空间,荻(芦苇)挤占苔草空间,苔草挤占泥滩地和水域[6],进而引发人们对其湿地服务功能下降的担忧.

群落交错带一般具有一组确定的空间与时间特征,其相互作用多处于两个或两个以上景观成分的边际之间. 群落交错带作为相邻生态系统的过渡带,具有生境异质性高、环境敏感性强等特点,是植被演变的先锋地带,因而受到广泛关注. 群落交错带的研究已成为人们进行早期生态预警以及生态管理理论探讨和实践的核心问题[7].

群落交错带作为物种种间竞争最激烈的区域,能较好地体现群落演替及物种更替的一般规律. 植被的演替就伴随着交错带的时空转移,而群落交错带时空的转移可能指示其周围环境的变化[8]. 在不同系统中,影响群落交错带动态变化的关键因子存在明显差异,受到纬度、海拔、地形、地貌、坡度、坡向及人为干扰等综合因素的影响[9-11]. 如在宁夏盐池四儿滩湿地和美国德州中部海岸带,影响群落交错带位移的关键因子分别是降雨量和雪鹅放养[10,12]. 也有研究认为其它立地环境条件,如土壤养分、氧化还原电位等因子的作用也很重要[13-16]. Smith 等研究表明,火烧和水位增加对于佛罗里达州滨海湿地红树林-沼泽交错带的时空转移有重要影响[8]. 但这些研究大多注重于某区域生物学特性、环境演变特征及边缘效应等,有关湿地生态系统群落交错带植被变化过程及变化机理的认识仍显不足. 本文主要以洞庭湖荻-苔草群落交错带为对象,研究不同高程梯度下其土壤环境因子及植被特征的变化规律,并揭示影响植被动态变化的关键环境因子,以期为正确认识洞庭湖典型群落交错带的动态变化,以及湿地植被资源的保护利用提供理论依据.

1 研究区域及方法

1.1 研究区概况

北洲子农场位于湖南省益阳市大通湖东岸,属亚热带季风气候,春夏冷暖气流交替频繁,夏、秋季晴热少雨,秋寒偏早,年平均气温为 16.4 ~ 17.0℃,无霜期为 260 ~ 280 d,年平均降水量为 1250 ~ 1450 mm,年平均湿度为 80%. 北洲子农场洲滩(29°09′ ~ 29°10′N,112°45′ ~ 112°47′E)位于东洞庭湖防洪大堤下,洪水季节(5－10 月)洲滩全部淹没,枯水季节(11 月—次年 4 月)露出,此时水面距堤岸约 8 km,出露地面与地平线形成约 8°的缓坡,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. 洲滩上分布的主要天然优势种群为荻(*Triarrhena sacchariflora*)、芦苇(*Phragmites australis*)、苔草(*Carex* sp.)和藨草(*Phalaris arundinacea*),且随水位高程增加呈现出明显的带状分布,其分布规律为藨草→苔草→荻(芦苇). 由于受地形阻断的限制(人为开沟),藨草和苔草群落交错带几乎已消失,而荻和苔草群落的交错带由于地形的优势,交错分布区域较大,植被带状变化较为缓慢. 因此,北洲子洲滩面积较为宽广的缓坡地形使其成为群落交错带研究的代表性区域. 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. 洪水来临前,大部分植物已完成生活史,而洪水后,如果温度适宜,许多植物如苔草又可迅速萌发生长,并成为多种冬候鸟的主要食物来源. 荻由于所处位置较高,大部分不能被洪水完全淹没,通常于 12 月至次年 1 月被收割用于造纸. 该区域主要土壤类型为潮土.

1.2 样品采集

2013 年 4 月初进行野外调查,此时洞庭湖还处于枯水季节,植物群落处于生长旺期. 采用样带法对样地进行布设和取样. 在荻和苔草群落交错带平行于水面每隔 100 m 设置 1 条样带,从距水面 0.5 km 处开始,设

为样带1,其它以此类推,共6条样带.在每条样带上,每间隔50 m设置1个1 m×1 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.共调查36个样方.调查记录样方内物种种类、数量、株高、盖度和生物量,然后在样方内(1 m×1 m)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.采样过程中用GPS对每个样点准确定位.

1.3 分析方法

土样带回实验室后,仔细去除新鲜土样中的可见植物残体及土壤动物,风干,过筛(10、60和100目),并彻底混匀.土壤含水量用烘干法测定;土壤有机质采用重铬酸钾-外加热法测定;土壤全氮用催化剂-浓硫酸消煮,连续流动测定仪测定;土壤全磷用氢氧化钠碱熔,钼锑抗比色法测定;土壤全钾用氢氧化钠碱熔,原子吸收分光光度计测定;土壤pH用水浸(水土比为2.5∶1)后用pH计测定[17].

植被地上生物量采用收获鲜重法,物种丰富度表示样方中物种的种数,物种多样性采用香农-威纳(Shannon-Wiener)多样性指数(H'),其计算公式为:

$$H' = -\sum_{i=1}^{S}(P_i \cdot \lg P_i) \tag{1}$$

式中,S为物种数,P_i表示第i种的相对密度、相对高度和相对盖度之和的平均值.

1.4 统计分析

植被群落特征和土壤理化性质的相关关系采用典型相关分析法进行.选取植被群落特征为第一类典型变量,包括物种丰富度、Shannon-Wiener指数、获生物量和苔草生物量;选取土壤理化性质为第二类典型变量,包括土壤含水量、电导率、pH值、总碳、总氮、总磷和总钾.多重比较采用Duncan检验,显著水平为0.05.数据处理采用统计软件SAS 8.0和Excel 2010完成.

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

2.1.1 土壤物理性质 北洲子洲滩土壤含水量在不同样带间存在显著差异($P<0.05$),随高程增加,土壤含水量呈逐渐减少的趋势,其中样带1土壤含水量最高(44%),样带6最低(33%).土壤pH值在各样带间变化范围为6.8~7.9,其中以样带2最高,样带4最低.土壤电导率在样带间无显著差异($P>0.05$),变化范围为79.67~111.83 μS/cm,其中以样带1最高,样带6最低(图1).

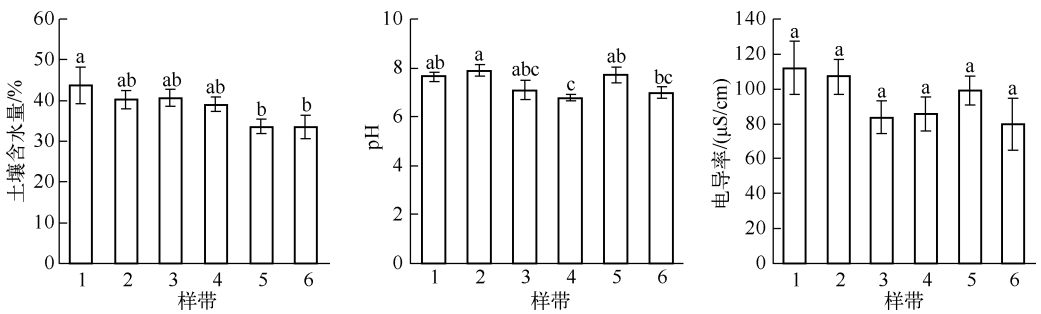


图1 北洲子洲滩不同样带间土壤物理性质(不同字母表示样带间差异显著,下同)

Fig. 1 Soil physical characteristics of different belts in the Beizhouzi lake-shore

2.1.2 土壤化学性质 北洲子洲滩土壤总碳和总氮含量在样带间存在显著差异($P<0.05$),但二者在样带间的变化都在一定范围内波动,总碳含量变化范围为2.33%~4.47%,总氮含量变化范围为0.19%~0.34%.总碳和总氮含量的变化规律基本同步,反映土壤碳、氮间存在显著相关性.土壤总磷含量变化范围为0.33‰~0.41‰,各样带间呈显著差异($P<0.05$),以样带4含量最高,样带2含量最低.总钾含量变化范围为4.66%~4.98%,各样带间差异不显著($P>0.05$)(表1).从整体上看,土壤化学性质在样带间无显著变化规律,处于小范围波动状态.

表 1 北洲子洲滩不同样带间土壤化学特征

Tab. 1 Soil chemistry characteristics of different belts in the Beizhouzi lake-shore

样带	总碳/%	总氮/%	总磷/‰	总钾/%
1	4.01 ± 1.25^{ab}	0.33 ± 0.09^{ab}	0.36 ± 0.01^{bc}	4.66 ± 0.15^{a}
2	2.33 ± 0.14^{b}	0.19 ± 0.01^{c}	0.33 ± 0.01^{c}	4.96 ± 0.23^{a}
3	3.48 ± 0.22^{ab}	0.27 ± 0.01^{ab}	0.38 ± 0.01^{ab}	4.94 ± 0.20^{a}
4	4.47 ± 0.56^{a}	0.34 ± 0.04^{a}	0.41 ± 0.01^{a}	4.85 ± 0.14^{a}
5	2.80 ± 0.33^{ab}	0.22 ± 0.03^{bc}	0.36 ± 0.01^{bc}	4.82 ± 0.08^{a}
6	3.69 ± 0.23^{ab}	0.30 ± 0.01^{ab}	0.39 ± 0.01^{ab}	4.98 ± 0.10^{a}

2.2 植物群落特征

2.2.1 *物种组成*　样方调查中共发现高等植物 17 种,隶属于 10 科 17 属,其中禾本科(Gramineae)5 种,菊科(Compositae)3 种,蓼科(Polygonaceae)2 种,其他科属仅有 1 种. 其中以一年生植物为主,占比高达 64.7%. 出现频度最高的物种为荻和猪殃殃(*Galium aparine*),其频度均达 100%. 苔草(*Carex* sp.)、繁缕(*Stellaria media*)和黄鹌菜(*Youngia japonica*)的频度也达 88% 以上. 其他物种如益母草(*Leonurus artemisia*)、早熟禾(*Poa annua*)、水蓼(*Polygonum hydropiper*)、齿果酸模(*Rumex dentatus*)、石龙芮(*Ranunculus sceleratus*)和水田碎米荠(*Cardamine lyrata*)等的频度都低于 10%.

2.2.2 *物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数*　各样带间物种丰富度有显著差异($P < 0.05$,图 2a),整体呈现先降低后增加的趋势. 其中以样带 6 物种丰富度最高(10.33)、样带 2 最低(4.67). Shannon-Wiener 指数的变化趋势与物种丰富度相似,也整体呈现先降低后增加的趋势,样带 6 最高、样带 2 最低.

2.2.3 *生物量*　荻和苔草生物量随高程变化趋势不同. 荻生物量随高程增加呈不断增加的趋势,而苔草生物量则呈先增加后降低的趋势. 荻生物量以样带 2 最低(0.34 kg/m^2)、样带 6 最高(1.60 kg/m^2). 而苔草生物量以样带 4 最高(1.04 kg/m^2)、样带 6 最低(0.06 kg/m^2)(图 2b).

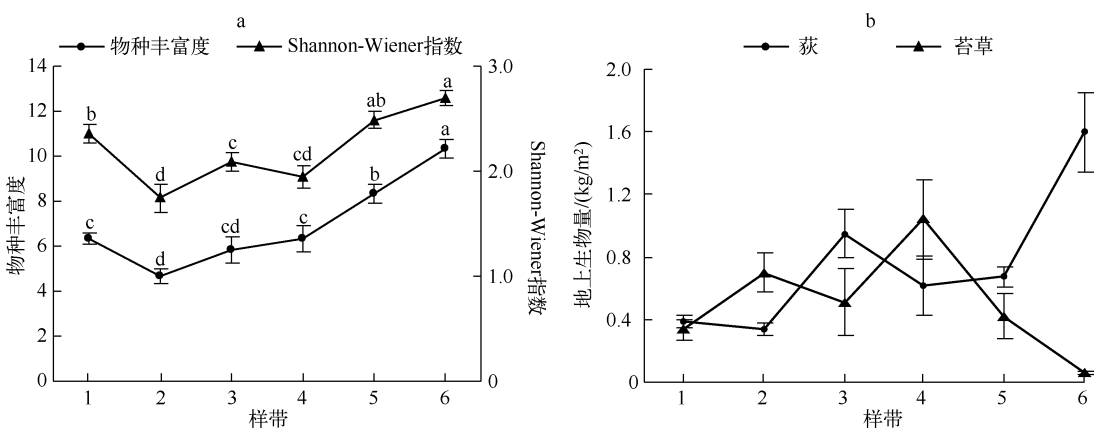


图 2 北洲子洲滩不同样带间物种丰富度、Shannon-Wiener 指数(a)和地上生物量(鲜重)(b)

Fig. 2 Species richness, Shannon-Wiener index(a) and above ground biomass (fresh)(b) of different belts in the Beizhouzi lake-shore

2.3 典型相关分析

典型相关分析结果(表 2)表明:前 3 对典型变量的特征值分别为 2.578、0.479 和 0.310,三者累计贡献率达 94.1%,其中第 1 对典型变量的贡献率达 72.0%,且第 1 对典型相关系数(0.849)的检验达到显著水平($P < 0.05$),因此主要对第 1 对典型变量进行分析. 从原始变量与典型变量间的载荷矩阵可以看出,物种丰富度的载荷量最大,其次为 Shannon-Wiener 指数,分别为 0.767 和 0.536,显示植被群落特征指标的第一类典型变量主要由群落物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数所决定. 土壤理化性质特征第 1 对典型变量以土壤含水量和电导率的载荷最大,分别为 0.742 和 0.411,由载荷系数可见反映土壤特征的第 1 对典型变量由土

壤含水量和电导率所决定. 因植被群落特征第 1 对典型变量中物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数与土壤理化性质特征第 1 对典型变量中土壤含水量的系数符号相反,表明前两者与后者间具有负相关关系,意味着随着土壤含水量的增加,物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数随之减少,这与本文的结论基本一致.

表 2 典型相关分析结果

Tab. 2 Results of canonical correlation analysis

原始变量	植被群落特征典型变量			原始变量	土壤理化性质特征典型变量		
	1	2	3		1	2	3
物种丰富度	-0.767	0.162	0.155	土壤含水量	0.742	-0.016	0.165
Shannon-Wiener 指数	-0.536	0.128	0.262	总磷	-0.065	0.464	0.180
荻生物量	-0.315	0.050	0.414	总钾	-0.052	-0.123	-0.140
苔草生物量	0.366	0.457	-0.174	pH 值	0.067	-0.070	-0.263
				电导率	0.411	0.201	-0.137
				总氮	0.028	0.281	-0.045
				总碳	0.074	0.283	-0.095
特征值	2.578	0.479	0.310	特征值	2.578	0.479	0.310
累计贡献率	0.720	0.854	0.941	累计贡献率	0.720	0.854	0.941
典型相关系数	0.849*	0.569	0.487	典型相关系数	0.849*	0.569	0.487

* 表示显著相关,$P<0.05$.

植被群落特征指标与土壤含水量的回归分析结果表明:荻地上生物量与土壤含水量间存在显著负相关($R^2=0.4169$),即随着土壤含水量降低而呈增加趋势,而苔草鲜重与土壤含水量存在明显的二项式函数关系($R^2=0.7039$),即随着土壤含水量的增加呈先增加后降低的趋势(图 3). 土壤含水量与物种丰富度、Shannon-Wiener指数均存在显著负相关($R^2=0.6518$、$R^2=0.3251$),即随着土壤含水量的增加呈降低的趋势.

3 讨论

土壤是一个复杂的四维综合体,其理化性质的变化受多种因素的影响,如成土母质、植被、微生物作用及人为耕作活动等. 在洞庭湖湿地生态系统中,洪水的时空变化和泥沙淤积强度直接影响着土壤理化性质的变化,如土壤含水量、土壤颗粒组成和土壤营养元素含量等. 在本研究区域内由于水位与地形(小坡度)的综合作用,距离湖面越近土壤含水量越高,随着高程的缓慢增加和距离湖面越远,土壤含水量也在逐渐减少. 地形的影响也使得降水容易往低地势的地方聚集,导致土壤含水量增加. 因此,在不同样带间土壤含水量存在明显差异. 由于土壤成土母质的影响,土壤电导率、总钾在样带间无显著差异,且都在适度的范围内波动. 土壤 pH 值虽然在样带间存在显著差异,但其值整体上变化不大,基本不会对植物生长产生影响,这可能是微地形的差异造成的. 土壤总碳、总氮和总磷含量在样带间存在显著差异,其变化的趋势也基本一致,说明三者来源的一致性. 土壤总碳的积累主要由有机残体归还量与不同类型碳的矿化速率间的平衡决定[18]. 交错带生境异质性和环境敏感性使得三者在各样带间的平衡在快速转换,从而造成样带间的显著差异和总体上的波动变化趋势. 总之,交错带土壤环境受到水文情势波动和成土母质的影响,整体上呈现波动状态,但也形成样带间土壤水分的梯度变化.

交错带的形成及其动态变化的实质就是物种与外界环境长期相互作用的结果,由环境强度、物种生物学特征及物种相互作用等共同决定[19-20]. 影响洞庭湖湿地植被群落特征的关键因子是水位和高程[21]. 本研究发现,除样带 1 外,物种丰富度和多样性水平均随植物分布高程的增加而增加,这可能是由于交错带内部物种对环境因子(水淹)耐受力及与群落建群种种间竞争共同作用的结果[15,22-23]. 不同植物对水分胁迫的生存策略亦有不同. 群落交错带中更多的一年生植物则是通过生活史策略来适应洪水胁迫. 土壤含水量越高其氧含量越少,土壤氧化还原电位逐渐减低,植物面临缺氧的状况,造成植物根部的生长压力,而某些植物因不具备适应这种环境变化的能力(即在缺氧条件下生存的结构与特征)而死亡[24]. 因此在低地势的区域,

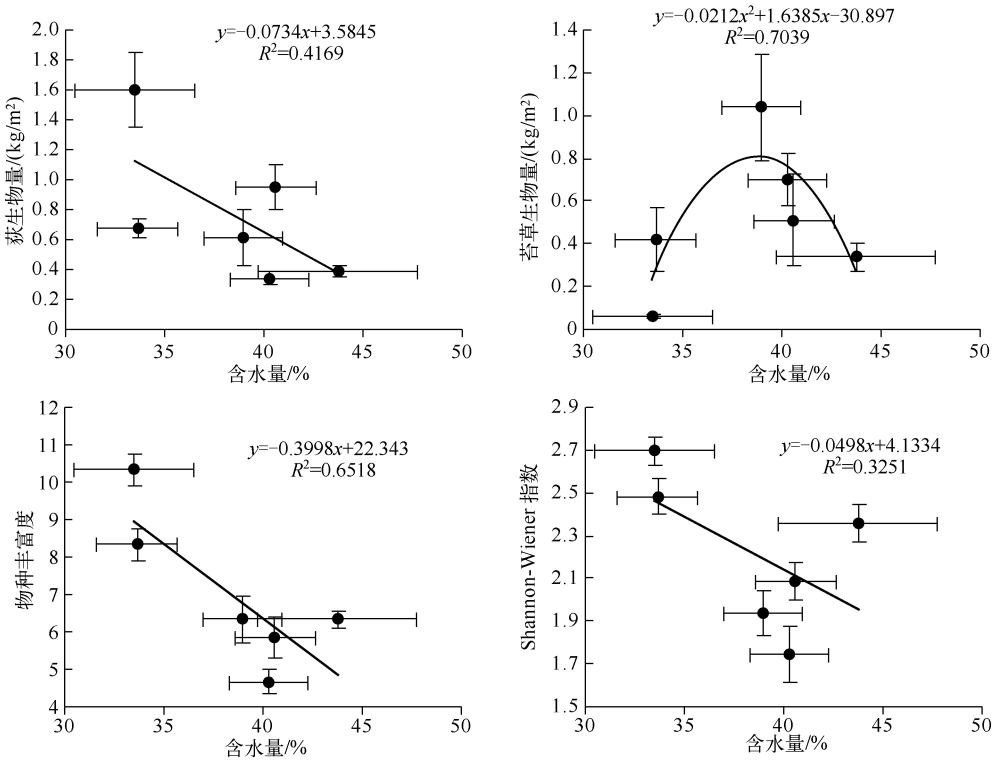


图 3 植被特征与土壤含水量的回归分析

Fig. 3 Regression analysis of vegetation characteristics and soil moisture

水分胁迫的压力较大,物种数较少,而随着高程的增加,水分胁迫的压力减少,物种数也随之增加. 此外,种间关系也可能是影响交错带物种丰富度和多样性变化的一个重要因素. 苔草的盖度较高,达到 95% 以上,从而导致其立地环境中的光照强度减少,不利于其他植物的萌发和生长,而荻的盖度较苔草低,因此,随着荻越来越占优势,其物种数逐渐增加,丰富度和多样性指数也增加. 另一方面苔草的根层比较密且浅,主要集中在 0 ~ 10 cm 土层,这种密集的根系也不利于其他植物的定居和生长[25].

在本研究中,苔草生物量随土壤含水量的增加呈现倒"U"形变化,说明土壤含水量过高和过低明显抑制苔草的生长,这与其他研究结果类似[26]. 与其他样带相比,样带 1 靠近水域边缘,苔草受洪水干扰严重,淹水时间相对较长,且生长时间相对较短,导致植物生长和分布受到一定程度的抑制,因而其生物量较低;样带 6 中的苔草生物量较低,可能是由于该样带距水域较远,是苔草分布的最高程,容易导致供水不足,同样限制了苔草的生长. 苔草在适宜的土壤含水量时长势最好,生物量积累多. 但是不同植物对淹水的耐受程度不同,有研究表明在一定的水分范围内,荻耐干旱的能力要强于苔草,但耐水淹的能力明显弱于苔草[27],因此,在本研究中荻生物量随水分含量的减少而增加.

典范分析也表明,土壤含水量的变化在洞庭湖荻与苔草群落交错带的形成和动态变化中起着重要的作用,过高或者过低的土壤含水量都将不利于交错带生物量的积累与多样性的维持. 三峡工程运行以来,洞庭湖年平均水位持续下降,低位洲滩出露时间都有不同程度的增加,导致洞庭湖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[28]. 因此,维持东洞庭湖湿地年均生态水位 24.29 m 和湿地面积的长期稳定[29],并进行适度的人为控制,对实现洞庭湖湿地生态功能尤为重要. 尤其对于苔草而言,维持这一重要功能性物种(鸟类的食物来源和鱼类产卵场)的生长优势,需控制好适当的水分条件,防止荻群落的过度扩张和入侵,如在合适区域内修筑矮堤,适度提高洞庭湖冬季水位,维持苔草生长的最适水分条件,减少荻群落扩张的立地环境.

4 参考文献

[1] Dai SB, Yang SL, Zhu J. The role of Lake Dongting in regulating the sediment budget of the Yangtze River. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2005, **9**: 692-698.

[2] 谢永宏,陈心胜. 三峡工程对洞庭湖湿地植被演替的影响. 农业现代化研究,2008,**29**(6):684-687.

[3] 李 峰,侯志勇,陈心胜等. 洞庭湖湿地植被组成及区系成分分析. 农业现代化研究,2010,**31**(3):347-351.

[4] 袁 敏,李忠武,谢更新等. 三峡工程调节作用对洞庭湖水面面积(2000－2010 年)的影响. 湖泊科学,2014,**26**(1):37-45. DOI 10.18307/2014.0105.

[5] 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. DOI 10.18307/2012.0202.

[6] 谢永宏,黄 群,王晓龙. 长江保护与发展报告 2011. 武汉:长江出版社,2011:144-168.

[7] 马世骏. 现代生态学透视. 北京:科学出版社,1990:43-45.

[8] Smith TJ, Ann MF, Ginger TR *et al*. Dynamics of mangrove-marsh ecotones in subtropical coastal wetlands: fire, sea-level rise, and water levels. *Fire Ecology*, 2013, **9**(1): 66-77.

[9] Janssens IA, Freibauer A, Ciais P *et al*. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO_2 emissions. *Science*, 2003, **300**(5625): 1538-1542.

[10] Miller DL, Smeins FE, Webb JW *et al*. Mid-Texas, coastal marsh vegetation pattern and dynamics as influenced by environmental stress and snow goose herbivory. *Wetlands*, 2005, **25**(3): 648-658.

[11] 朱芬萌,安树青,关保华等. 生态交错带及其研究进展. 生态学报,2007,**27**(7):3032-3042.

[12] 王 晓,张克斌,程中秋等. 半干旱区湿地植被群落结构与交错带的变化分析. 水土保持通报,2012,**32**(2):100-104.

[13] Norman SP, Taylor AH. Pine forest expansion along a forest-meadow ecotone in northeastern California, USA. *Forest Ecology and Management*, 2005, **215**: 51-68.

[14] Köchy M, Wilson SD. Variation in nitrogen deposition and available soil nitrogen in a forest-grassland ecotone in Canada. *Landscape Ecology*, 2005, **20**: 191-202.

[15] Wasson K, Woolfolk A. Salt marsh-upland ecotones in central California: vulnerability to invasions and anthropogenic stressors. *Wetlands*, 2011, **31**: 389-402.

[16] 李 扬,王冬梅,信忠保等. 漓江水陆交错带植被与土壤空间分异规律. 农业工程学报,2013,**29**(6):121-128.

[17] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京:中国标准出版社,1996.

[18] Xiao HL. Climate change in relation to soil organic matter. *Soil and Environmental Sciences*, 1999, **8**(4): 300-304.

[19] Toogood SE, Joyce CB, Waite S. Response of floodplain grassland plant communities to altered water regimes. *Plant Ecology*, 2008, **197**: 285-298.

[20] Harper KA, Danby RK, De Fields DL *et al*. Tree spatial pattern within the forest-tundra ecotone: a comparison of sites across Canada. *Canada Journal of Forest Research*, 2011, **41**: 479-489.

[21] Chen XS, Li X, Xie YH *et al*. Combined influence of hydrological gradient and edaphicfactors on the distribution of macrophyte communitiesin Lake Dongting wetlands, China. *Wetlands Ecology and Management*, 2015,**23**:481-490.

[22] 牟长城,韩士杰,罗菊春等. 长白山森林/沼泽生态交错带群落和环境梯度分析. 应用生态学报,2001,**12**(1):1-7.

[23] Peters DPC, Gosz JR, Pockman WT *et al*. Integrating patch and boundary dynamics to understand and predict biotic transitions at multiple scales. *Landscape Ecology*, 2006, **21**:19-33.

[24] Pezeshki SR. Wetland plant response to soil flooding. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, **46**: 299-312.

[25] Chen XS, Deng ZM, Xie YH *et al*. Demography of *Carex brevicuspis* (Cyperaceae) rhizome populations: a wetland sedge that produces both elongated and shortened rhizomes. *Nordic Journal of Botany*, 2014, **32**: 251-256.

[26] 胡佳宇,谢永宏,李 峰等. 东洞庭湖丁字堤苔草群落特征及其影响因子. 应用生态学报,2014,**25**(3):745-751.

[27] Li F, Qin XY, Xie YH *et al*. Physiological mechanisms for plant distribution pattern: responses to flooding and drought in three wetland plants from Lake Dongting. *Liminology*, 2013, **14**:71-76.

[28] 唐 玥,谢永宏,李 峰等. 1989－2011 年东洞庭湖草洲出露面积变化及其与水位响应的关系. 应用生态学报,2013,**22**(11):1484-1492.

[29] 梁 婕,彭也茹,郭生练等. 基于水文变异的东洞庭湖湿地生态水位研究. 湖泊科学,2013,**25**(3):330-334. DOI 10.18307/2013.0303.