

基于 CART 模型的鄱阳湖草滩苔草分布与水位波动要素关系*

于文琪¹, 戴雪^{2,3}, 杨颖¹, 万荣荣^{2,3}, 蒲阳¹, 姚鑫^{1**}

(1: 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(3: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 水位波动对鄱阳湖草滩湿地的形成与分布至关重要, 但不同要素对湿地植物的具体影响不尽相同. 本研究以湿地优势植被苔草群落为研究对象, 通过环湖区样带设置和植被调查得到较大尺度上的苔草分布数据, 以不同水文站水文数据结合湖区 DEM 插值得出各样点水位波动要素数据: 年内最大水位差 R , 年内淹没出露频次 F , 年平均水位 M , 最长淹没的出露日期 D , 年内总出露时间 T , 用 CART 模型进行分析. 结果表明: 1) 影响鄱阳湖区草滩湿地苔草群落分布的最直接的水位波动要素为 T 和 R ; 2) 年内总出露时间大于 84 天 ($T \geq 4.619$), 年极差水位大于 11.3 m ($R \geq 10.41$) 时, 苔草群落的综合分布情况最佳. 进一步探讨认为: 其他水位波动要素未能被 CART 模型选为分类依据, 可能是因为彼此之间存在相关性; 高程决定植被分布, 实际上是多种水位波动要素综合影响的结果, 精度要求不高时, 可以用高程替代水位波动各要素进行简略分析. 本研究相关结论可以为鄱阳湖控湖工程今后的运行, 提供一定的参考, 以维持草滩湿地生态系统的稳定, 更好地实现其生态价值.

关键词: 水位波动; 要素; 草滩湿地; 鄱阳湖; 苔草

The relationship between water-level fluctuation factors and the distribution of *Carex* in floodplain grassland around Poyang Lake

YU Wenqi¹, DAI Xue^{2,3}, YANG Ying¹, WAN Rongrong^{2,3}, PU Yang¹ & YAO Xin^{1**}

(1: Department of Geography, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, P.R.China)

(2: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(3: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

Abstract: Water-level fluctuations are very important to the formation and distribution of the floodplain grassland around Lake Poyang, and different factors of water-level fluctuations (aspects of water regime) have different effects on wetland plant species. In this study, we used CART model to analyze the relationship between the distribution of *Carex* and five water-level fluctuations factors (annual water level range, R ; annual frequency, F ; annual mean water level, M ; date of emergency after the longest inundation, D ; annual total dewatered time, T), with plant data from sampling around Poyang Lake and water regime data offered by local hydrology bureau. The results showed that: 1) the main influence factors of the distribution of *Carex* were T and R ; 2) the optimum condition to *Carex* community should be described as $T \geq 4.619$ and $R \geq 10.41$, which means annual total dewatered time more than 84 days and annual water level range larger than 11.3 meters. Further discussion indicated that we can use dimension reduction methods in analyzing the effects of water level fluctuations on wetland vegetation in Poyang Lake, because of the inner correlation between the above mentioned five factors. Meanwhile, previously extensive application of elevation in this field is mainly due to the comprehensive influence of different water level fluctuation factors, and only should be used in conditions with low accuracy requirement. This study provided quantitative evidence that water-level fluctuation factors drive the distribution of *Carex*, and may as-

* 国家自然科学基金面上项目(41571107)、国家自然科学基金青年基金项目(41301035)和南京信息工程大学省级大创项目(201610300100)联合资助. 2018-02-25 收稿; 2018-05-08 收修改稿. 于文琪(1996 ~), 女, 硕士研究生; E-mail: vip@yuwenqi.cn.

** 通信作者; E-mail: yaixin@nuist.edu.cn.

sist in making decision regarding the dam management, for the purpose of maintaining the floodplain grassland ecosystem, as well as realizing its ecological value.

Keywords: Water-level fluctuations; factors; grassland; Poyang Lake; *Carex*

水是湿地生态系统存在的物理基础,水文过程的变化主导着湿地其他相关过程,制约着湿地生态系统的一切生命现象^[1]. 对于季节性涨落水的湖泊而言,水位波动(water-level fluctuation)对洲滩湿地生态系统的结构和功能起着决定性的作用^[2-3];高水位的淹没使湿地原有优势物种大量死亡,当水位消退后,多种物种得到了萌发、生长的空间,木本植物生命周期较长,在短暂的退水期间不易建群,容易为偏向 r -选择的草本物种取代,从而形成大面积草滩^[4-5]. 受长江顶托和五河(赣江、抚河、信江、饶河、修河)来水的影响,鄱阳湖区呈现出丰水期和枯水期周期性交替的独特水文节律,属于典型的季节性涨落水湖泊,湖区草滩湿地年内峰值可达 2200 km²,优势植被苔草、荻等群落构成草滩的主体,仅苔草为优势种的群落即覆盖了整个草滩面积的 70% 左右^[6].

目前湖区多数的相关研究工作主要是通过高程和水位的相对关系来讨论水文条件对鄱阳湖湿地植被的影响:洲滩湿地群落从高到底大致分为狗牙根群落、芦苇南荻群落、苔草群落、藨草群落,沉水植被群落等^[7-8];分布于三角洲和天然岸堤的芦苇南荻群落拥有相对最高的生物量,湖水水体外围分布的苔草、藨草生物量适中,湖心的沉水植被生物量相对较低^[9]. 不同年份枯水—丰水变化带来了高程水位关系的改变,枯水期湿生植被会提前萌发,沉水植被则提前休眠,草滩以耐中生—湿生植被占优势;而丰水期会导致苔草、藨草等群落的完全淹没,湿生植物受高水位胁迫,多采取休眠或耐受的生存策略来渡过不利时期,湖泊湿地以沉水型植被为主^[10].

尽管如此,水位波动是一个复杂的过程,其对植被的影响应不仅仅体现在水深(高程—水位关系),而应该同时包括水位差、出露日期、持续时间、频率等要素^[11],这一观点已逐渐成为生态水文领域的共识^[12-13],例如,较大的水位差会使得植物种的相对生长速率减小^[11],最近一次淹没的出露日期是影响植被组成的关键变量^[14],鄱阳湖区 TM 影像展示的湿地春季苔草的面积及分布,与当年 30 天周期的水位波动显著相关,同时受到生长季持续淹没达 20 天和往年退水期间长期出露的波动事件的影响^[15];基于鄱阳湖国家级自然保护区(吴城)植被群落分布图的分析则表明,不同植被群落对于波动要素的响应各异,以水深和淹没频率的敏感程度从高到低,分别为苔草—藨草群落、苔草—藨草群落、藨草—苔草群落、苔草群落^[16]. 但这些研究多数从宏观着眼,在群落内部结构层面涉及不多,同时,水位要素之间缺乏综合的考量. 因此,本文以遍布湖区的样带设置,和详细的样方调查为基础,结合湖区多站点的水文资料,插值获得样方对应点的水文数据,并结合湖区 DEM 反演成波动要素,深入精确分析优势植被苔草与多项水位波动要素之间的关系,为湖区湿地保护和水利设施的影响评价、运行提供借鉴.

1 数据来源及研究方法

1.1 数据来源

1.1.1 植被数据 以鄱阳湖湖区为采样范围,从上游至下游,设置 10 个样带,样带的选择兼顾空间地理位置分布的均匀性和交通的可达性. 各样带从采样期(2013 年 4 月初)的水陆交界处,尽量垂直延伸到草滩的其他边界,包括山丘等陆上边界或另一处水体. 然后依据 GPS 数值跨度大致均匀设置 10 样点,并记录样点 GPS 定位数据. 各样带和样点在湖区的分布如图 1 所示. 每个样点,用 1 m×1 m 的样方尺随机取样 3 次,记录植被的种类、高度、株数、盖度等指标,苔草的重要值 $I = (\text{相对多度} + \text{相对频度} + \text{相对盖度}) / 3$ ^[17]. 剔除异常值后,共计 97 个样点有有效数据.

1.1.2 水文数据 以鄱阳湖流域 7 个主要水文站点(都昌站、湖口站、星子站、棠荫站、康山站、吴城—赣江站和吴城—修水站)的 2012 年^[11,14]日水位数据为基准,结合样点的 GPS 定位数据,用 IDW 插值法得出各样点当年每一天的日水位数据. 在此基础上,利用湖区 DEM 图,得出各样点的水位波动要素数据. 包括:年内最大水位差(水位波幅) R ,年内淹没出露频次 F ,年平均水位 M ,最长淹没(即夏季涨水期)的出露日期 D ,年内总出露时间 T .

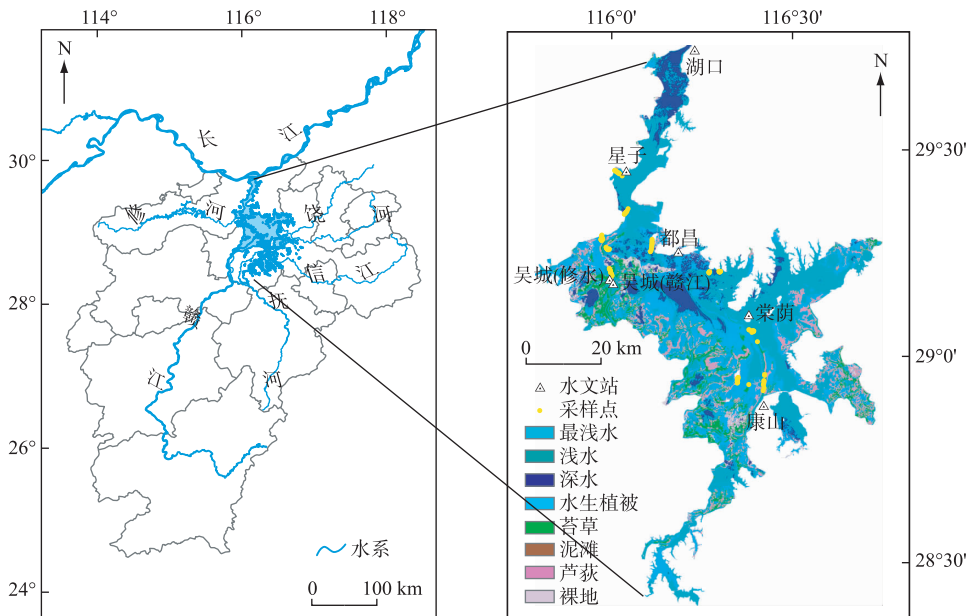


图1 样带及样点的分布
Fig.1 Distribution of sampling sites

1.2 研究方法

分类与回归树算法 (Classification and Regression Tree, 简称 CART) 由 Breiman 等于 1984 年提出, 基本原理是对响应变量采用递归划分, 利用循环二分形成二叉树形式的决策树结构, 将数据空间按预测变量划分为尽可能同质的类别, 从主节点中逐次生成一系列等级结构的左节点和右节点, 每个节点处列出了落在该部分的响应变量的均值 ($MEAN$)、方差 (SD) 及样本数 (N) 和预测变量类型和划分阈值^[18]. CART 树的详细生成步骤包括树的生长、树的剪枝和最终检验, 剪枝采用最小代价复杂度剪枝法, 验证采用 K 折交叉验证法^[19].

本研究中, 模型的响应变量唯一, 需要根据植被的初始指标构建综合变量, 以此反映样方内苔草的综合分布情况, 令 $Y = \sqrt{N} \cdot i$, 其中, N 为样方内苔草的株数, i 为该样方内苔草的重要值, 指标的构建旨在两个维度对群落进行区分: 1) 群落的单一/混合状况, 区分变量重要值 i ; 2) 群落疏密状况, 区分变量 N . 预测变量则选择上述年内最大水位差 R , 年内淹没出露频次 F , 年平均水位 M , 最长淹没的出露日期 D , 年内总出露时间 T 共 5 类指标.

2 研究结果

利用 R 语言编程软件, 将预测变量水位波动因子 ($X_1 \sim X_5$) 与响应变量苔草 Y 值 (剔除不含苔草的样点) 输入 CART 模型中, 得到 X -Val 交叉验证相对误差和模型复杂度参数 CP (cost complexity) 的关系如图 2 所示. 从图中可以得知, 交叉验证的最小误差为 0.100 ($0.937/10 \approx 0.100$), 此时, CART 模型最优, 即当 $CP = 0.089$ 时 CART 树的层次结果精度最高且复杂性最小. 因此 CP 值的选取应该设置为 0.089, 即保留 CART 树的前两个层次而对其余子树进行修剪.

依据以上结果, 对 CART 树进行剪枝, 得到的树如图 3 所示: CART 树深度为 3, 共 5 个节点, 其中终节点 3 个 (方框), 从根节点到子节点的每一条路径代表一种影响苔草生物量分布的水位波动条件. 各节点框内包含分类后样本响应变量的平均值 ($MEAN$)、均方误差 (MSE)、样本总量 (N) 和误分样本数 (E). 如 $N/E = 11/3$, 该类共有 11 个样本, 其中 3 个为误分样点, 分类精度即为 $(11-3)/11 = 72.7\%$. 各节点之间的变量为模

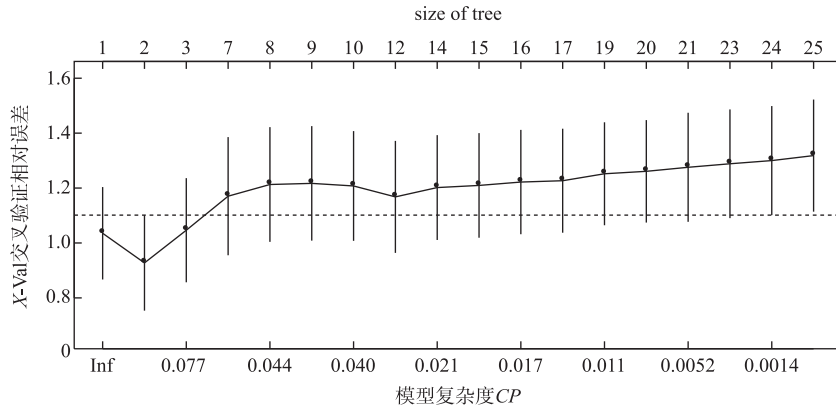


图 2 CART 树的代价复杂度和交叉验证相对误差

Fig.2 The cost complexity and X-Val relative error of the final CART tree

型所提取出的主要影响预测变量,相应的分割值(<或 \geq)为这些预测变量的分类阈值.

根节点以 2012 年总出露时间 T 为分类条件,其中不超过 20% 的样点被分到左侧终节点,剩余样本 (80.4%) 被分到右侧中间节点中. 中间节点以年极差水位 R 为分类条件,小于 10.41 的样点 (82.2%) 被分到生物量适中的左侧终节点中,其余样点 (17.8%) 被分到生物量最好的右侧终节点.

此结果表明,CART 模型输入的水位波动因子有两个占主导地位,分别是总出露时间 T 和年极差水位 R . 总出露时间对研究区苔草生物量的分布变化影响最大,当 $T < 4.619$ 时,将所得分类条件的阈值(标准化后数据)还原为原始数据,即为前一年总出露时间 < 84 天时,研究区内苔草 Y 值总体处于偏小的状况,平均 Y 值只有 3.133,苔草的生长并不旺盛. 当 $T \geq 4.619$ 时,对次年春苔草生物量的分布变化有主要影响的是年极差水位 R ,即第二重要的水位波动因子. 当 $R < 10.41$ (年极差水位大于 11.3 m) 时,研究区内苔草处于适生性强的环境中,平均 Y 值总体达到最高,为 7.086. 当 $R < 10.41$ (年极差水位小于 11.3 m) 时,生物量处于一个适度的中间值,均值为 5.128.

年内淹没出露频次 F 、年平均水位 M 、最长淹没的出露日期 D 这 3 项因子未能在分类中发挥其主导作用.

3 讨论

3.1 其他水位波动要素在分类中未能体现的原因分析

尽管如此,这些要素在分类中作用未能体现,并不一定意味着其对于苔草生长影响甚微,而也有可能是基于鄱阳湖特定的地理水文特征导致的不同水位波动因素之间存在内在关联所致. 为了验证这一假设,对所有样方采用了排序分析,初步的 DCA 分析显示,前 4 个轴的最大值 4.095,适用单峰模型 CCA 分析,结果如下:

从图中可以看出:1) 这些水位波动要素间确实有内在的关联,水位极差 R 与平均水位 M 作用倾向于相反,年内淹没出露频次 F 、最长淹没的出露日期 D 、总出露时间 T 则倾向于相同;2) R 和 T 构成的二维空间能比较直观但粗略地对这五项因素起到降维的作用. 简单的相关分析的结论也支持这一点: R 与 M 呈极显著负相关,相关系数为 -0.901; T 与 F 、 D 亦分别呈极显著相关,相关系数为 0.340 和 0.368 (表 1). 其中, R 和 M 是水文研究的常用指标,其空间上的负相关关系在鄱阳湖区相关研究中得到了很多的侧面佐证,如鄱阳湖区丰水期上下游水位差较小,而枯水期上下游水位差较大^[20],年水位差(丰枯之差)因而在下游地区则更加突出;水位枢纽工程对水位波动的平缓作用,在下游湖区得到了更好的体现^[21].

因此,尽管 CART 模型的分类中仅仅用到了 T 和 R 两项水位波动要素,其主要原因可能在于本研究中水位波动要素之间有着显著相关性,与多种水位要素影响植被的生长与分布的普遍结论^[11-13]并不冲突. 同

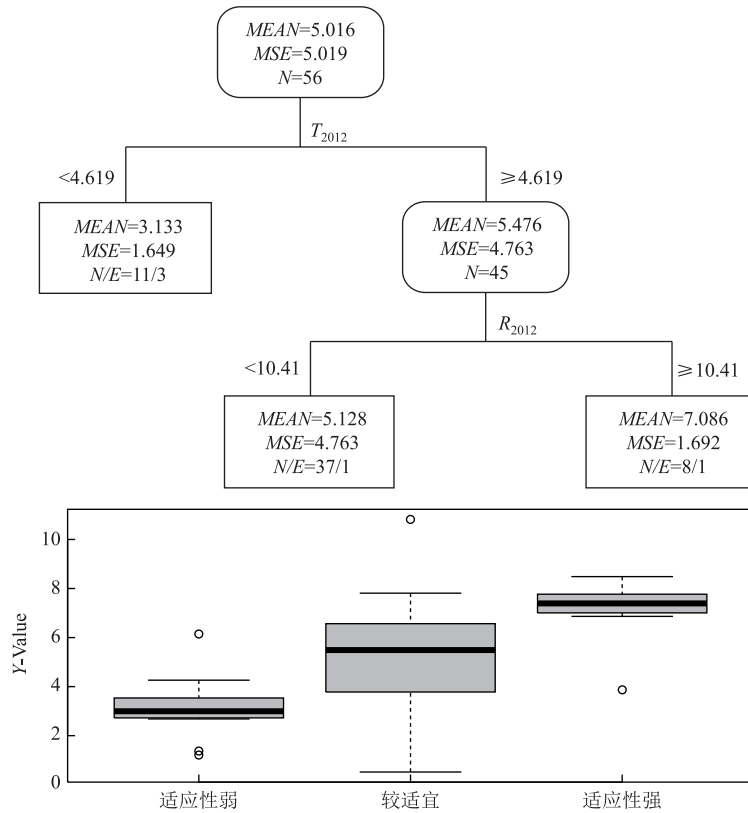


图 3 2013 年鄱阳湖春季苔草水位波动影响因子的 CART 模型

Fig.3 The CART model of water-level fluctuation factors affecting spring *Carex* in Poyang Lake in 2013

时,其他研究者在研究鄱阳湖区湿地植被时,虽然采用的水位波动指标与此处 CART 模型的结论略有出入,例如采用水位波动频次和平均水深^[6],从此处的分析可以看出,在代表水位波动多种要素综合影响的降维的角度(图 4),与 CART 模型的研究结果在根本上是一致的.这个结果也意味着:今后对于鄱阳湖区草滩湿地的植被生态研究而言,可以充分运用降维的思路,适当简化所需考虑的水位波动因素.

表 1 水位波动各要素及与高程间相关分析

Tab.1 Correlation analysis between water-level fluctuation factors and elevation

	<i>M</i>	<i>R</i>	<i>F</i>	<i>D</i>	<i>T</i>	<i>H</i>
<i>M</i>	1	-0.901 **	-0.060	0.007	-0.160	0.231 *
<i>R</i>		1	0.168	0.095	0.305 *	-0.091
<i>F</i>			1	0.282 **	0.340 **	0.397 **
<i>D</i>				1	0.368 **	0.243 *
<i>T</i>					1	0.870 **
<i>H</i>						1

** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关.

3.2 高程作用的分析

早期的研究认为,鄱阳湖区植被分布可以用高程来很好的区分^[7].但高程实际上属于间接因素,高程通过影响水位波动要素的变化,最终影响植被的分布.且鄱阳湖区本身的高程落差较大,如图 5 所示:

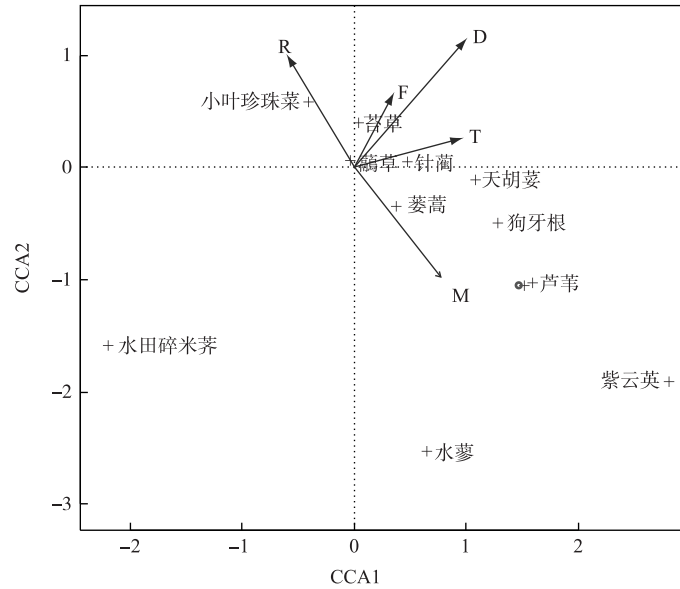


图 4 鄱阳湖区物种分布与水位波动要素关系的 CCA 分析
Fig.4 CCA analysis of relationship between plant species distribution and water-level fluctuation factors in Poyang Lake

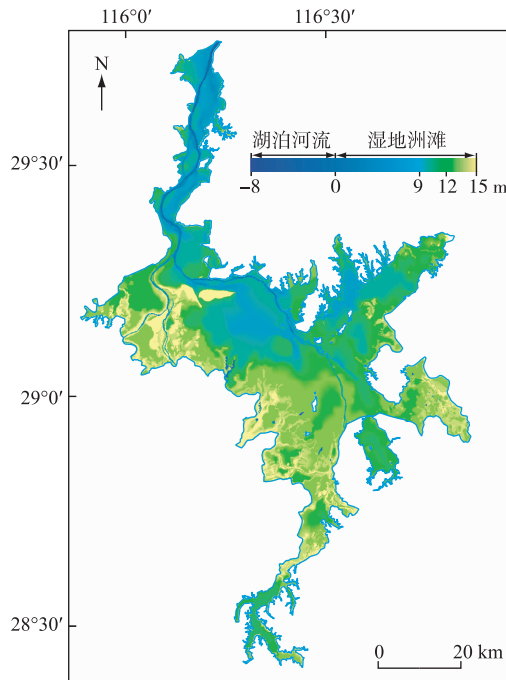


图 5 鄱阳湖区上下游高程对比
Fig.5 Elevation comparison of upper and lower reaches of Poyang Lake

较大的高程差,加上河道的落差,极易产生高程和水文条件之间的不同步变化,直接分析高程对植被

的影响不够精确。这是比较容易理解的:同样的高程,处在湖区上下游位置不同时,对应的日水位是不一样的,一般而言,上游的日水位要高于下游,所以,苔草群落相对于水面的高度为上游<中游<下游,这种高度差实际上意味着各种水位波动要素的不同。

尽管如此,在不能够精确分解水位波动要素的情况下,高程有其特定的综合性优势。高程在与上述五类水位波动要素的相关分析中,水位波动要素是如上所述分为两类,内部皆是极显著相关,且彼此关联较少(除了 R 与 T 之间显著相关)。而高程却与四类水位要素呈显著或极显著相关,分别为平均水位 M 显著相关,相关系数0.231;淹没出露频次 F 极显著相关,相关系数0.397;最长淹没的出露日期 D 呈显著相关,相关系数0.243;年内总出露时间 T 极显著相关,相关系数0.870。可以看出,高程虽然作为间接因素,但它可能引起的水位波动要素的变化是全方面的,其中受它影响最大的是年内总淹没/出露时间。

3.3 出露时间和水位极差的意义探讨

从模型分类的结果来看,当年内总出露时间大于84天,即约3个月,苔草长势较好。这实际上意味着对于苔草这种 r -选择物种而言,一年一次的淹没是必要的,但在这一点得到保证的基础上,该物种更倾向于有足够的出露时间以保证生活史周期的完成,对比洞庭湖区短尖苔草浅度淹没(0、15、30 cm)培养结果表明,4个月的生长期左右生物量达到极大值,其中快速生长期约3个月(实际水文环境中,涨水速度很快,理想的浅度淹没很难长期维持,苔草的生长更多归为出露条件下完成)^[22],表明3个月的适宜出露时间可能存在一定生理基础。

在年极差水位大于11.3 m的情况下,苔草的长势会更好,如前文所述,由于鄱阳湖独特的地理水文特征,这种极大水位差往往出现在平均水位比较低的地方,即 R 与 M 空间上呈显著负相关, $R>11.3$ m大致对应 $M<14$ m。然而对比周云凯等关于鄱阳湖苔草景观面积的多年变化的遥感分析,高水位极差的年份(1999年)苔草景观面积并不突出,而低平均水位的年份(2006年)苔草景观面积较广^[23];从呼吸量模拟计算分析的苔草生长状况结果也显示低水位极差更适宜苔草生长^[24]。尽管如此,从物种竞争的角度,基于断面采样的研究表明,淹没的抑制作用对藨草突出,而对苔草影响相对较小^[25]。综合分析认为:单纯的低水位,意味着草滩的大面积出露,旱化倾向,刚出露期草本的大量繁殖,但苔草未必能取得竞争优势,即存在生理最适点和生态最适点的偏差;低水位配合高的水位极差,意味着必不可少的深度淹没期的存在,有助于苔草在保证生长的同时,能取得对藨草等同是鄱阳湖湿地优势种的物种的竞争优势。加之目前遥感影像的解译精度并不能有效区分苔草、藨草、碎米茅等群落^[23,26],苔草景观实则是这些群落的综合,因而未必能有效体现这种竞争导致的此消彼长。

这些分类上的数据倾向也可以为鄱阳湖区水利枢纽运行提供一定的参考,鄱阳湖湿地是国际知名的候鸟栖息地和鱼类产卵场,而苔草又是湿地的优势种,在水利枢纽运行后,如何保证苔草的生长将是维持鄱阳湖湿地生态系统的重点和难点。就此处的模型分类结果来看,最直接的结论是,应当保证最广大面积的苔草分布区的出露时间在3个月以上,且年内水位极差维持在11.3 m以上的较高水平(对应年内平均水位维持在14 m以下)。对比邓志民等关于鄱阳湖调控方案优选的结论“建议苔草生长期9—11月间,星子站最高水位保持在15 m,最低水位维持在11 m”^[24],考虑到出露期与全年相比,水位、水位极差都相对较低,结论之间也有一定的相通之处。尽管如此,这仍然只是一个理论上的初步结论,后续工作需要与湖区水文、地理研究相结合,最终在如何调控水位乃至流量方面,及调控的具体月份,以及苔草最广大面积分布区的范围确定等方面,形成更翔实和具有可操作性的参考建议。

4 结论

从CART模型的分析结果来看,影响鄱阳湖区草滩湿地苔草群落分布的最直接的水位波动要素为总出露时间 T 和年极差水位 R ,其他波动要素的作用在分类中虽未显示,但进一步的分析表明,这种缺失可能是鄱阳湖独特的自然地理特征导致水位波动要素之间存在显著相关所致。因为存在这种关联,我们可以将鄱阳湖相关的多种水位波动要素适当降维,以简化正常的研究思路。传统的认为高程决定植被分布,实际上是多种水位波动要素综合影响的结果。在精度要求不高时,可以用高程替代水位波动各要素,进行简略分析;深入的研究仍应从具体的各要素层面展开。未来鄱阳湖的控湖环境下,建议保证目前最广大分布面积的苔

草生长区(苔草群落主要分布区)至少3个月以上的年出露时间和至少11.3 m以上的极差水位(对应年内平均水位维持在14 m以下),以维持现有苔草分布面积,稳定草滩湿地生态系统,防止生态退化,使草滩湿地继续为湖区乃至环湖生态经济区提供其独特的生态价值。

5 参考文献

- [1] Chen YY, Lv XG. The research direction of wetland function and wetland science. *Wetland Science*, 2003, **1**(1): 7-11. [陈宜瑜, 吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向. *湿地科学*, 2003, **1**(1): 7-11.]
- [2] Wantzen K, Machado F, Voss M *et al.* Floodpulse-induced isotopic changes in fish of the Pantanal wetland, Brazil. *Aquatic Sciences*, 2002, **64**: 239-251.
- [3] Wilcox DA, Meeker JE, Hudson PL *et al.* Hydrologic variability and the application of index of biotic integrity metrics to wetlands: a Great Lakes evaluation. *Wetlands*, 2002, **22**(3): 588-615.
- [4] Keddy PA, Reznicek AA. Great lakes vegetation dynamics: The role of fluctuating water levels and buried seeds. *Journal Great lake Research*, 1986, **12**(1): 25-36.
- [5] Yao X, Yang GS, Wan RR *et al.* The influence of water level change on the river and lake wetland vegetation. *J Lake Sci*, 2014, **26**(6): 813-821. DOI:10.18307/2014.0601. [姚鑫, 杨桂山, 万荣荣等. 水位变化对河流、湖泊湿地植被的影响. *湖泊科学*, 2014, **26**(6): 813-821.]
- [6] Jie EL, Li XJ, Liu SY. Analysis of the dynamic change of Lake Poyang wetland and its cause of formation. *Acta Agri Universitatis Jiangxiensis*, 2007, **29**(3): 500-503. [揭二龙, 李小军, 刘士余. 鄱阳湖湿地动态变化及其成因分析. *江西农业大学学报*, 2007, **29**(3): 500-503.]
- [7] Hu ZP, Ge G, Liu CL *et al.* The structure of plant ecosystem in Lake Poyang wetland and the influence of water level on it. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2010, **19**(6): 597-605. [胡振鹏, 葛刚, 刘成林等. 鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水位对其影响研究. *长江流域资源与环境*, 2010, **19**(6): 597-605.]
- [8] Wang X, Xu L, Wan R *et al.* Characters of soil properties in the wetland of Lake Poyang, China in relation to the distribution pattern of plants. *Wetlands*, 2014, **34**: 829-839.
- [9] Wu GP, Ye C, Liu YB. Spatial distribution of wetland vegetation biomass in Lake Poyang nature reserve. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(2): 361-369. [吴桂平, 叶春, 刘元波. 鄱阳湖自然保护区湿地植被生物量空间分布规律. *生态学报*, 2015, **35**(2): 361-369.]
- [10] Zhang M, Ni LY, Xu J *et al.* The annual dynamic characteristics of plant community response to water level change in Lake Poyang grassland. *Res Environ Sci*, 2013, **26**(10): 1057-1063. [张萌, 倪乐意, 徐军等. 鄱阳湖草滩湿地植物群落响应水位变化的周年动态特征分析. *环境科学研究*, 2013, **26**(10): 1057-1063.]
- [11] Casanova MT, Brock MA. How do depth, duration and frequency of flooding influence the establishment of wetland plant communities? *Plant Ecology*, 2000, **147**(2): 237-250.
- [12] Coops H, Beklioglu M, Crisman TL. The role of water-level fluctuations in shallow lake ecosystems-workshop conclusions. *Hydrobiologia*, 2003, **506-509**(1): 23-27.
- [13] Leira M, Cantonati M. Effects of water-level fluctuations on lakes: an annotated bibliography Ecological Effects of Water-Level Fluctuations in Lakes. *Hydrobiologia*, 2008, **613**(1): 171-184.
- [14] Toner M, Keddy PA. River hydrology and riparian wetlands: A predictive model for ecological assembly. *Ecological Applications*, 1997, **7**(1): 236-246.
- [15] Dai X, Wan R, Yang G *et al.* Responses of wetland vegetation in Lake Poyang, China to water-level fluctuations. *Hydrobiologia*, 2016, **773**(1): 1-13.
- [16] Zhang LL, Yin JX, Jiang YZ *et al.* Relationship between wetland vegetation community and hydrological situation in Lake Poyang nature reserve. *Adv Water Sci*, 2012, **23**(6): 768-775. [张丽丽, 殷峻暹, 蒋云钟等. 鄱阳湖自然保护区湿地植被群落与水文情势关系. *水科学进展*, 2012, **23**(6): 768-775.]
- [17] Li L, Huang ZL, Zhang HZ *et al.* Spatial heterogeneity of species diversity in *Quercus Variabilis* community in Shaanxi Province. *J of Forest and Enviro*, 2006, **26**(1): 63-68. [李林, 黄忠良, 张海忠等. 陕西省栓皮栎群落物种多样性的空间异质性. *福建林学院学报*, 2006, **26**(1): 63-68.]
- [18] Liu Y, Lv YH, Zheng HF *et al.* Influence of climatic factors on NDVI variation in Loess Hilly and gully region of Northern

- Shaanxi Province using regression tree model. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21**(5): 1153-1158. [刘洋, 吕一河, 郑海峰等. 用回归树模型分析陕北黄土丘陵沟壑区气候因子对 NDVI 变异的影响. *应用生态学报*, 2010, **21**(5): 1153-1158.]
- [19] Huang J, Huang HJ, Huang MH *et al.* Prediction decision tree model of sea fog along Guangdong coast. *J of Appl Meteor Sci*, 2011, **22**(1): 107-114. [黄健, 黄辉军, 黄敏辉等. 广东沿岸海雾决策树预报模型. *应用气象学报*, 2011, **22**(1): 107-114.]
- [20] Qi SH, Gong J, Shu WB *et al.* Remote sensing study of submerged area, water depth and storage capacity in Lake Poyang. *Yangtze River*, 2010, **41**(9): 35-38. [齐述华, 龚俊, 舒晚波等. 鄱阳湖淹没范围、水深和库容的遥感研究. *人民长江*, 2010, **41**(9): 35-38.]
- [21] Wang P, Lai GY, Huang XL. Simulation of influence of Lake Poyang water level project on lake water level change. *J Lake Sci*, 2014, **26**(1): 29-36. DOI:10.18307/2014.0104. [王鹏, 赖格英, 黄小兰. 鄱阳湖水位枢纽工程对湖泊水位变化影响的模拟. *湖泊科学*, 2014, **26**(1): 29-36.]
- [22] Li YF, Chen XS, Xiang WH. Growth and reproduction of *Pteridophyta* response to water level variation with different elevation. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(7): 1959-1966. [李亚芳, 陈心胜, 项文化. 不同高程短尖苔草对水位变化的生长及繁殖响应. *生态学报*, 2016, **36**(7): 1959-1966.]
- [23] Zhou YK, Bai XL, Ning LX. Landscape changes and hydrological responses of *Carex* in Lake Poyang Wetland. *J Lake Sci*, 2017, **29**(4): 870-879. DOI:10.18307/2017.0410. [周云凯, 白秀玲, 宁立新. 鄱阳湖湿地苔草(*Carex*)景观变化及其水文响应. *湖泊科学*, 2017, **29**(4): 870-879.]
- [24] Deng ZM, Zhang X, Luo W. Response of *Carex* in Lake Poyang wetland to water level change. *J of Basic Sci and Engi*, 2014, **22**(5): 865-875. [邓志民, 张翔, 罗蔚. 鄱阳湖湿地苔草对水位变化的响应. *应用基础与工程科学学报*, 2014, **22**(5): 865-875.]
- [25] Markus P, Daniel P, Eckart W. Water level fluctuations and dynamics of amphibious plants at Lake Constance; Long-term study and simulation. *Perspect Plant Ecol*, 2007, **8**: 179-196.
- [26] You HL, Xu LG, Liu GL *et al.* Change trend of wetland landscape types in Lake Poyang and its response to water level fluctuation. *Chinese J of Ecol*, 2016, **35**(9): 2487-2493. [游海林, 徐力刚, 刘桂林等. 鄱阳湖湿地景观类型变化趋势及其对水位变动的响应. *生态学杂志*, 2016, **35**(9): 2487-2493.]