

洞庭湖湿地植被长期格局变化(1987—2016年)及其对水文过程的响应*

周 静^{1,2}, 万荣荣^{1,3**}, 吴兴华⁴, 张 宇⁴

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国自然资源经济研究院, 北京 101149)

(3: 中国科学院大学, 北京 100049)

(4: 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038)

摘 要: 基于长序列遥感影像数据、水位日观测数据以及高精度湖盆地形数据, 通过提取洞庭湖 1987—2016 年湿地植被信息, 并构建表征水位波动的多周期水情变量, 采用逐步回归分析法识别影响洞庭湖湿地植被分布格局的关键水情变量并建立其与植被面积的响应关系。结果表明: 1) 1987—2016 年, 洞庭湖湿地典型植被面积在全湖尺度上呈增加趋势, 尤其是林地面积, 占比由 1.77% 上升为 7.24%。湿地植被格局演变上, 东洞庭湖呈现芦苇群落挤占苔草群落空间, 并推动湿地植被整体向湖心扩张的趋势。2) 影响东洞庭湖苔草和芦苇分布最关键的水情变量是丰水期水位。苔草对丰水期水情存在非线性阈值响应, 丰水期平均水位维持在 29 m 左右, 最适宜苔草生长; 对于芦苇, 丰水期偏枯的水情条件对其生长发育起到促进作用。涨水期和退水期水文过程是影响东洞庭湖湿地植被分布的次为重要的水情因子。涨水期、退水期水位偏低的水情条件对芦苇分布面积的扩张起促进作用。

关键词: 湖泊洲滩湿地; 典型植被景观带; 时空格局; 水文响应; 洞庭湖

Patterns of long-term distribution of typical wetland vegetation (1987–2016) and its response to hydrological processes in Lake Dongting*

ZHOU Jing^{1,2}, WAN Rongrong^{1,3**}, WU Xinghua⁴ & ZHANG Yu⁴

(1: Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(2: Chinese Academy of Natural Resources Economics, Beijing 101149, P.R.China)

(3: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(4: China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, P.R.China)

Abstract: In this paper, based on the remote sensing image data, the hydrological data from 1987 to 2016, and the high-resolution topographic data, we extracted the wetland vegetation information of the Lake Dongting and constructed the multi-cycle water level fluctuation measurement. On this basis, stepwise regression method and polynomial fitting were used to estimate the key hydrological variables and to quantify the effects of hydrological process on the two typical wetland vegetation. The main conclusions as follows: 1) From 1987 to 2016, the area of the whole vegetation had a significant increasing trend in the whole wetland, especially the *Populus euramevicana* community. And in East Lake Dongting, the *Phragmites australis* community occupied the space of *Carex brevicuspis* community, which promoted the whole beach to the center of the lake. 2) Water level fluctuation in flood season was the determinant towards the distribution of *Carex brevicuspis* and *Phragmites australis*. There was a non-linear response of water regime to the area of *Carex brevicuspis*. When the average water level was about 29 m during flood season, it will be most suitable for the growth of *Carex brevicuspis*. For the *Phragmites australis* community, low flow in flood season was more favorable for its growth and

* 2020-01-16 收稿; 2020-04-01 收修改稿。

中国科学院重点部署项目 (KFZD-SW-318) 和中国长江三峡集团有限公司项目 (201903144) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: rrw@niglas.ac.cn.

development. Water level fluctuation during rising and retreating season were the secondary important regime factor influencing the distribution of wetland vegetation in East Lake Dongting. Lower water level in the two season can facilitate the distribution of *Phragmites australis*.

Keywords: Lake wetland; typical vegetation zones; spatio-temporal pattern; hydrological response; Lake Dongting

在《世界自然保护大纲》中,湿地与森林、海洋一起并称为全球三大生态系统^[1],是地球上水陆相互作用形成的特殊自然综合体、成为各种能流、物流和信息流的交换场所. 而湿地植被作为湿地生态系统三大组成要素之一^[2],是主要的物质能量供应者,也是各种鱼类、鸟类和哺乳动物的觅食地. 湿地植被属性的变化意味着其他生物体生境的改变^[3-4],是湿地退化和演替最直接的指示物. 而水文条件是影响湿地植物物种多样性、群落稳定性以及群落分布和演替的关键因子^[5-6]. 大量研究表明,湿地植被类型与水位、淹水深度、淹没持续时间以及洪水频率等水情因子有关^[7-10]. 一般而言,水位是决定植物分布的主导因素,其波动影响湿地洲滩土壤的含水量,直接导致洲滩植被面积和空间分布的改变,不同水深梯度下洲滩植物群落类型和生境有显著差异. 淹水的时空特征是湿地植被演替的重要决定因素,群落的差异分布是淹水条件差异及植被对土壤洪旱耐受力差异造成的,通常呈现明显的带状分布,是淹水持续时间及频率等水文过程共同作用下植物演替阶段的一种动态表现^[11-13].

洞庭湖是我国第二大淡水湖,地处长江中游荆江南岸,是承纳湘、资、沅、澧四水、吞吐长江的兼具蓄、泄功能的洪道型湖泊^[14],素有“长江之肾”的美誉. 洞庭湖受亚洲季风与江湖交互作用的复合影响,形成了较稳定的枯—涨—丰—退的季节性水位波动模式^[15-16],近 35 年,洞庭湖年内水位变幅为 6.6~15.4 m. 作为长江流域典型通江湖泊,洞庭湖水文情势复杂,其湿地植被也处于不断的演化之中^[17-19]. 目前,洞庭湖湿地典型植被—水文的响应关系备受关注. 有研究显示,近二十年来,东洞庭湖湿地植被的面积在持续扩张、植被覆盖最小高程逐渐下降,并且三峡水库运行之后,这 2 种趋势在加快,这与洞庭湖水情条件的改变存在紧密联系^[20]. Hu 等^[21]利用多时相遥感影像,探讨水情变化对东洞庭湖植被分布的影响,并分析三峡运行前后的差异. 唐玥等^[22]通过遥感解译获得 1989 年以来东洞庭湖草洲出露面积的变化情况,发现低位洲滩草洲面积增加最快,而水位下降导致的洲滩出露时间变化是这一现象的主要原因. Deng 等使用多源遥感数据,分析洞庭湖植被与淹没频率的关系,得出了不同植被群落在淹没频率梯度上的分布差异. 除此之外,目前更多的研究偏向于机理方面:从形态学、解剖学、胁迫生理学等角度分析典型植物生长、分布的差异以及水情响应特征. 相关学者通过设计一系列析因实验,控制不同的水位或水深条件来观察洞庭湖湿地典型植物的相对生长率、生物累积与分配、根系特征、茎根比、茎直径、分支数以及总 N/P 含量等,进而探索湿地植被生长与分布对水情因子的响应^[24-27]. 有学者分析洞庭湖湿地植被分布差异、格局变化的生物学机制,研究显示一方面湿地植被在不同水位下体内的可溶性糖、淀粉等多项生理指标存在差异性,这些差异可用来反映植物对洪水的忍耐力以及淹水后的恢复力,进而在一定程度上决定了湿地植被的分布^[28-29]. 另一方面湿地植物还存在种内种间关系变化、繁殖对策等多种内在调控机制,如分布在低位洲滩的短尖藎草,其芽数、分株数等克隆繁殖特征会随水位降低而减少,从而影响植物生长^[30-31]. 目前关于洞庭湖的研究多集中在东洞庭湖,全湖尺度上的研究相对欠缺. 此外,洞庭湖湿地植被水文过程的响应研究中,关于影响湿地植被变化的水情变量的周期性、波动性细节分析不足. 本文考虑到水文响应的滞后性,构建了枯、涨、丰、退以及水位最大值、最小值、平均值等多周期多层次的水情变量,在当前洞庭湖湿地植被水文响应研究中有十分重要的意义.

本文基于长序列遥感影像数据、水位日观测数据以及高精度湖盆地形数据,通过提取洞庭湖 1987—2016 年湿地植被信息,构建表征水位波动的多周期水情变量,阐明洞庭湖湿地典型植被的空间格局及多年变化趋势,并识别影响洞庭湖湿地植被分布格局的关键水情变量并建立其与植被面积的响应关系,分析水情对洞庭湖湿地植被格局的作用机制,以期对三峡水库调度管理、洞庭湖水资源利用及生态环境保护提供科学依据.

1 数据与方法

1.1 区域概况

洞庭湖(28°30′~30°20′N, 111°40′~113°10′E)位于湖南省东北部,地处长江下荆江南岸,是我国第二大

淡水湖泊(图 1). 本文的研究区涉及的范围为洞庭湖湿地保护区规划界限以内的区域,总面积约 2587 km². 湖区可分为东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖 3 个不同的湖区,其地理概况介绍见表 1^[32].

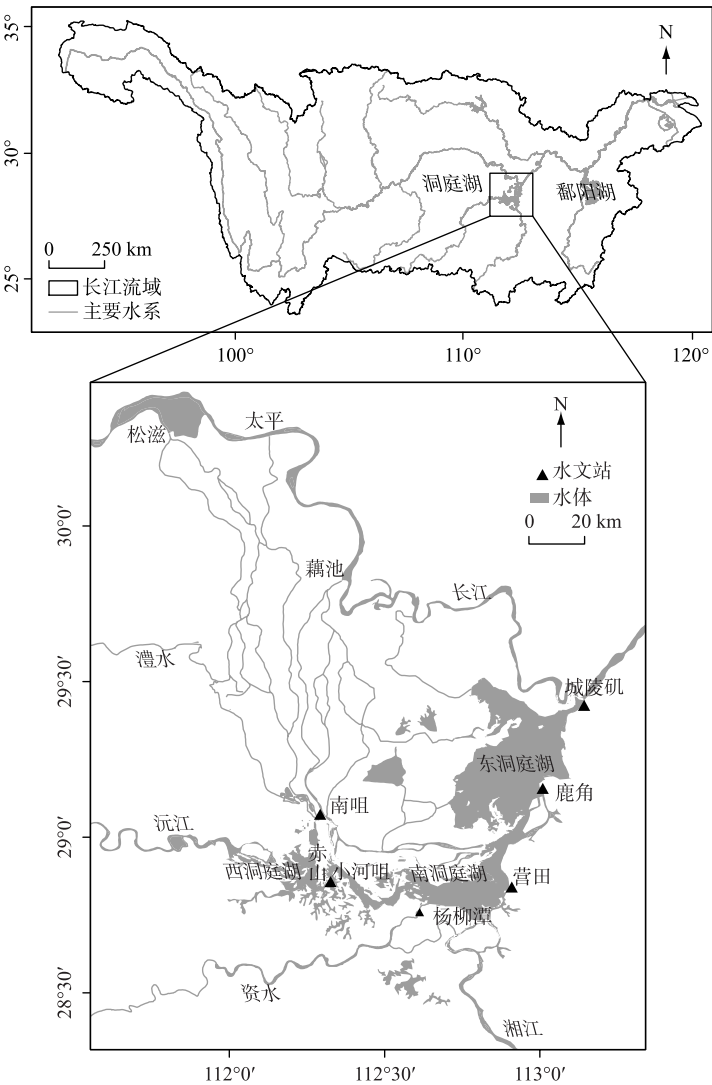


图 1 洞庭湖地理位置及水系分布

Fig.1 Geographical locations and river system distribution of Lake Dongting

表 1 洞庭湖不同湖区概况介绍

Tab.1 Overview of the different lake regions

湖区	位置概述	子湖	湖底高程	代表性水文站
东洞庭湖	洞庭湖下游之东北隅	水域较完整	23~30 m	城陵矶、鹿角
南洞庭湖	赤山以东,至湘江的长带状水域	万子湖、横岭湖、东南湖、团林湖、荷叶湖	25~32.5 m	杨柳潭、营田
西洞庭湖	赤山以西,淤积最严重的湖区	目平湖、大连湖、沅江和澧水入湖洪道	28~30 m	南咀、小河咀

洞庭湖受季节性波动的流域和长江来水双重影响,年内水位波动巨大,呈现出“涨水为湖,退水为洲”的动态景观,年内洪汛期可持续 3~4 个月. 4 月开始涨水,6—8 月为丰水期阶段,水位达到最大值,9 月中旬开

始退水,12月至次年3月水位维持在较低水平^[16]. 多年平均水位达25 m,年内水位变幅约12.5 m. 在季节性淹水的长期作用下,洞庭湖湿地呈现出浅水、草滩、泥滩多类型复合特征,土壤水分含量存在差异,洲滩上发育了丰富的湿地植被资源,且各典型植被群落按地势高低形成不规则的条带状或环状分布,不同植物占据特定的生态位空间^[33].

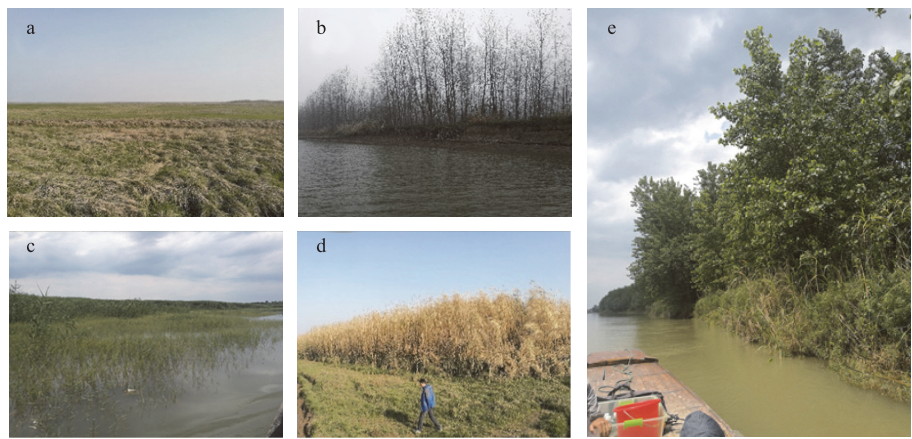


图 2 1987—2016 年洞庭湖洲滩典型植被(a:苔草;b 和 e:杨树;c 和 d:芦苇)
Fig.2 Representative vegetation of the Lake Dongting during 1987–2016
(a: *Carex brevicuspis*; b and e: *Populus euramevicana*; c and d: *Phragmites australis*)

表 2 影像类型及成像时间					
Tab.2 The time of Landsat images					
年份	日期及城陵矶水位情况				影像类型
	日期	水位/m	日期	水位/m	
1987	12 月 31 日	20.29	12 月 6 日	22.55	TM
1991	11 月 8 日	23.33	11 月 15 日	22.58	TM
1993	12 月 31 日	21.41	12 月 6 日	23.45	TM
1995	12 月 5 日	21.28	12 月 28 日	20.25	TM
1999	12 月 24 日	21.04	12 月 15 日	21.55	ETM+
2001	12 月 29 日	20.77	1 月 5 日	20.35	TM
2004	12 月 5 日	22.47	12 月 12 日	21.91	ETM+
2008	12 月 8 日	22.63	12 月 31 日	20.65	TM
2010	12 月 22 日	22.63	11 月 27 日	21.12	ETM+
2014	12 月 17 日	21.64	12 月 8 日	23.66	ETM+
2016	11 月 28 日	22.15	12 月 5 日	21.59	ETM+

1.2 数据来源

- 1) 遥感数据:本文选取 1987—2016 年间无云条件下的 Landsat TM/ETM+(空间分辨率 30 m) 遥感影像数据 11 期,共 22 景. 数据来源于 USGS(<http://earthexplorer.usgs.gov/>),影像轨道编号和采集具体时间见表 2. 考虑到秋冬季洞庭湖洲滩基本全部出露,且芦苇(荻)开始枯萎收割,在影像上与苔草易于区分,同时这一时期处于植被生长末期,植被生长波动较小,可保证湿地植被的年际可比性,因此影像采集时间全部在 10—12 月份之间.
- 2) 野外实测数据:于 2017 年 12 月和 2018 年 11 月对洞庭湖区的植被分布、结构等状况进行野外实地调查. 调查地点涉及东洞庭湖、西洞庭湖、南洞庭湖保护区内湿地洲滩共 8 处,并用手持 GPS 导航定位详细记录各湿地类型的地理坐标、群落名称,共获取坐标信息近 130 个. 未能实地上岸定位的洲滩,通过拍照并在地图上详细标记,作为遥感影像解译提取的样本点.
- 3) 水文数据:来自洞庭湖代表水文站城陵矶、鹿角、营田、杨柳潭、南咀、小河咀 1987—2016 年长序列日尺度水位观测资料(水位采用吴淞高程基准),来源于《长江流域水文资料》. 其中,城陵矶、鹿角站的平均水位用于代表东洞庭湖的整体水情,营田、杨柳潭和南咀、小河咀站平均水位分别代表南洞庭湖和西洞庭湖的水文情况.
- 4) 地形数据:1995 年 1:10000 洞庭湖湖盆数字高程模型.

1.3 遥感影像解译

提取湿地景观信息前需对遥感影像进行一系列处理,主要包括辐射定标和大气校正、几何精校正、光谱

增强、最佳波段选择、影像镶嵌与裁剪等工作. 本文以上处理过程基于 ENVI 5.1 平台实现. 另外, 由于 Landsat-7 ETM+机载扫描行校正器故障导致 2003 年以后获取的影像存在条带丢失, 通过 ENVI 的 Landsat_gapfill 条带修复补丁进行修复^[34]. 在目视解译和实地调查数据的基础上, 将洞庭湖湿地景观分为 5 类, 包括水域、泥滩、苔草滩地、芦苇滩地(洞庭湖区芦荻混生, 为方便表述, 文章统一用芦苇滩地(群落)代替)和林地滩地. 本文利用 CART 决策树算法进行影像分类提取湿地植被信息, 实际操作基于 ENVI 软件中的 CART 扩展工具.

CART 算法提出到目前已有 30 多年历史, 被公认为是一种非线性、非参数的数据挖掘与分类的预测算法, 预测模型精确可靠. 其原理是通过由输入变量和输出变量构成的训练样本数据集进行循环二分构建二叉树并展开分类. 在决策树生长时, 以 Gini 系数的减少量为测度指标选取使 Gini 系数减少量最大的属性为最佳分组变量对训练样本集进行分组, 建立二叉决策树, 其数学定义如下:

$$G(t) = 1 - \sum_{j=1}^k P^2(j|t) \quad (1)$$

式中, $G(t)$ 为基尼系数, t 为节点, k 为输出变量的类别个数, $P(j|t)$ 是节点中样本输出变量取 j 的归一化概率. 假设用特征属性 M 将样本数据集 N 分为两组, 这时的基尼系数为:

$$G(t) = \frac{N_1}{N} G(t_1) + \frac{N_2}{N} G(t_2) \quad (2)$$

因此, 分组后的基尼系数比原来的减少量为:

$$\Delta G(t) = G(t) - \left[\frac{N_1}{N} G(t_1) + \frac{N_2}{N} G(t_2) \right] \quad (3)$$

式中, $G(t)$ 和 N 分别为分组前输出变量的 Gini 系数和样本量, $G(t_1)$ 、 N_1 和 $G(t_2)$ 、 N_2 分别为分组后右子树的基尼系数和样本量以及左子树的基尼系数和样本量. 当使两组输出变量值的异质性总和最小, 即分组后样本类别变量尽量趋于相同类别值, 纯度最大时, 分组变量达到最佳分割点.

分类完成后利用 ENVI 中的混淆矩阵对影像进行精度评价. 后期处理基于 ArcGIS 10.2 平台进行计算, 最终得到湿地植被面积及分布信息(图 3).

1.4 洞庭湖湿地植被分布高程统计

在湿地环境中, 淹水深度、淹水历时、淹水频率及土壤理化性质等的差异, 会对湿地植物的生长繁殖、群落分布产生影响, 因此湿地植被沿高程梯度占据特定的生态位空间. 高斯假说(Gause's Hypothesis)认为, 在生态学研究, 不同物种由于存在竞争其生长、繁殖最适环境范围总是相互分离^[35]. 在最适范围以下或以上, 物种所表现出的生理生态特征指标都会随之下降. 本文基于高斯假说理念, 分析苔草和芦苇 2 个湿地典型植被的高程分布特征, 由于林地群落主要是人为栽种, 故不进行高斯拟合. 本文首先对洞庭湖地形数据以 0.5 m 为步长设置高程梯度, 从 19~33 m 共 28 个梯度; 然后, 基于得到的植被类型数据, 分湖区分别统计每个高程区间 2 种湿地典型植被群落的分布面积. 最后, 对统计数据进行正态性检验, 若满足条件, 则得到洞庭湖湿地植被群落面积沿高程梯度的分布特征.

1.5 洞庭湖湿地水文过程的表征

洞庭湖水位呈现涨、丰、退、枯的周期性季节波动, 水文情势的转变直接影响洞庭湖湿地植被的生物量、健康状况及空间分布等. 观测日期之前的枯水期、涨水期、丰水期以及退水期水位序列作为对湿地植被生态过程与景观格局特征有潜在生态意义的水位波动周期. 为了更全面量化水位波动对植被的影响细节, 因此采用波动周期内的水位平均值、最高值、最低值以及水位变幅 4 个指标来刻画水位过程. 另外, 统计大于不同水位梯度的淹水持续时间, 来反映植被的淹水条件, 不同湖区由于地势差异, 故分湖区考虑其水位梯度, 东洞庭湖统计水位大于 22、24、26、28 m 4 个梯度的持续时间, 南洞庭湖统计大于 25、27、29、31 m 的水位持续时间, 西洞庭湖统计水位大于 28、29、31、33 m 的持续时间, 各湖区分别定义了 20 个水情因子, 如表 3. 以上水情指标基于城陵矶、鹿角、杨柳潭、营田、南咀、小河咀水文站的逐日径流数据来进行计算.

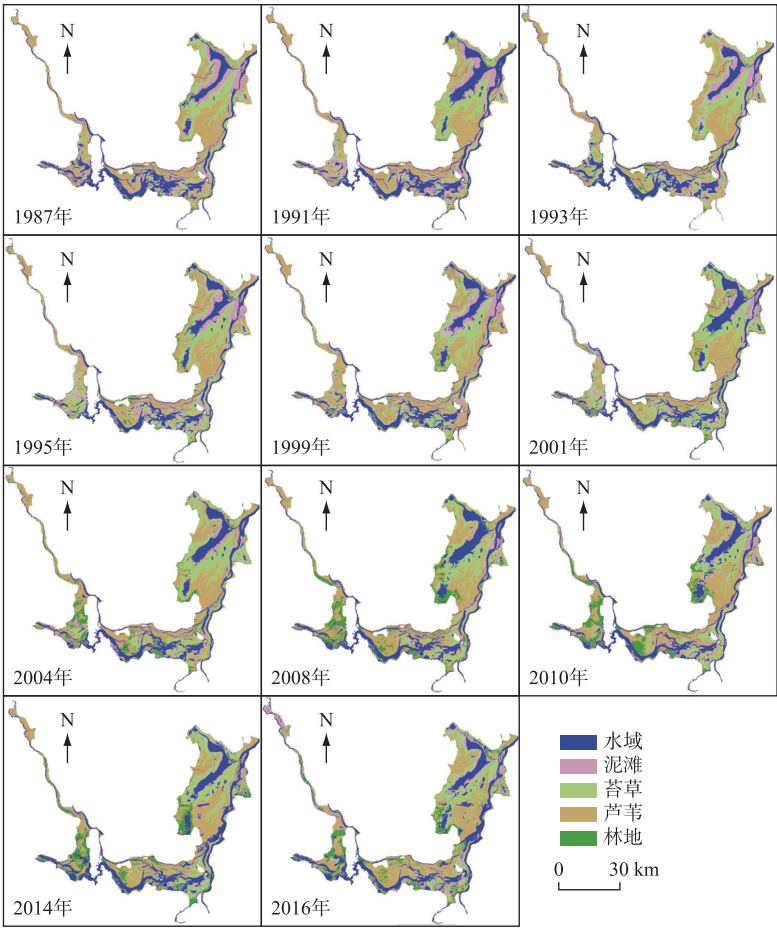


图 3 1987—2016 年洞庭湖湿地分类结果
Fig.3 Classification of the Lake Dongting wetland during 1987–2016

表 3 描述水位过程的水情因子
Tab.3 Water regime factors reflecting water level fluctuation

水文要素	水情因子	因子变量
枯水期水位波动	平均水位、最高水位、最低水位、水位变幅	Dmean、Dmax、Dmin、Df
涨水期水位波动	平均水位、最高水位、最低水位、水位变幅	Rmean、Rmax、Rmin、Rf
丰水期水位波动	平均水位、最高水位、最低水位、水位变幅	Fmean、Fmax、Fmin、Ff
退水期水位波动	平均水位、最高水位、最低水位、水位变幅	Tmean、Tmax、Tmin、Tf
东洞庭湖水位历时天数	≥22、24、22、28 m 水位持续时间	Dur_22、Dur_24、Dur_26、Dur_28
南洞庭湖水位历时天数	≥25、27、29、31 m 水位持续时间	Dur_25、Dur_27、Dur_29、Dur_31
西洞庭湖水位历时天数	≥28、29、31、33 m 水位持续时间	Dur_28、Dur_29、Dur_31、Dur_33

2 结果与讨论

2.1 典型湿地植被面积变化趋势

近 30 年洞庭湖湿地植被面积的多年平均值为 1669 km², 湿地植被分布总体上呈现增加趋势 ($R^2 =$

0.55),但 2004 年开始湿地典型植被总面积有所下降(图 4),这一现象可能与当年秋季湖泊水位较高有关.

1987—2016 年间在南洞庭湖和西洞庭湖,苔草群落面积呈现先增加后减少并在 2004 年以后趋于稳定,西洞庭湖其面积下降趋势更为明显,苔草群落面积基本维持在 20 km² 以内(图 5a). 图 5b 为洞庭湖各湖区芦苇群落分布面积统计:1987—2016 年间,东洞庭湖芦苇群落分布面积较稳定,多年平均值为 434.27 km²;西洞庭湖芦苇群落分布面积有弱减少趋势,2000 年前后,其芦苇群落面积分别为 216.30、184.97 km²;而南洞庭湖其面积呈现微弱的上升,1987—1999、2001—2016 年面积分别为 304.86 和 315.67 km². 总体上各湖区芦苇景观面积在进入 2000 年后趋于稳定. 近 30 年,洞庭湖各湖区林地面积快速增加,尤其是 2001 年以后,在 2008—2016 年间,林地扩张趋于稳定. 整个湖区,林地面积由 1987 年的 45 km² 上升到 2016 年 313 km²,面积比例由 1.77% 上升为 7.24%,林地面积增加主要发生在地势较高的湖岸大堤附近,包括东洞庭湖的澧湖附近,南洞庭湖湘江、资水入湖三角洲、万子湖北胜洲,西洞庭湖王塔洲、牛屎洲、大连湖和目平湖洲滩. 林地面积增加最快的区域为西洞庭湖,2016 年该湖区林地面积占比达 13.73% (图 5c).

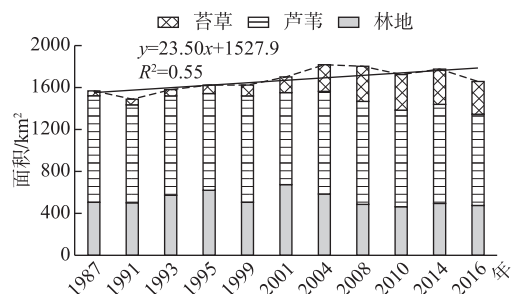


图 4 1987—2016 年洞庭湖湿地植被总面积变化趋势

Fig.4 The total area of vegetation of the Lake Dongting during 1987–2016

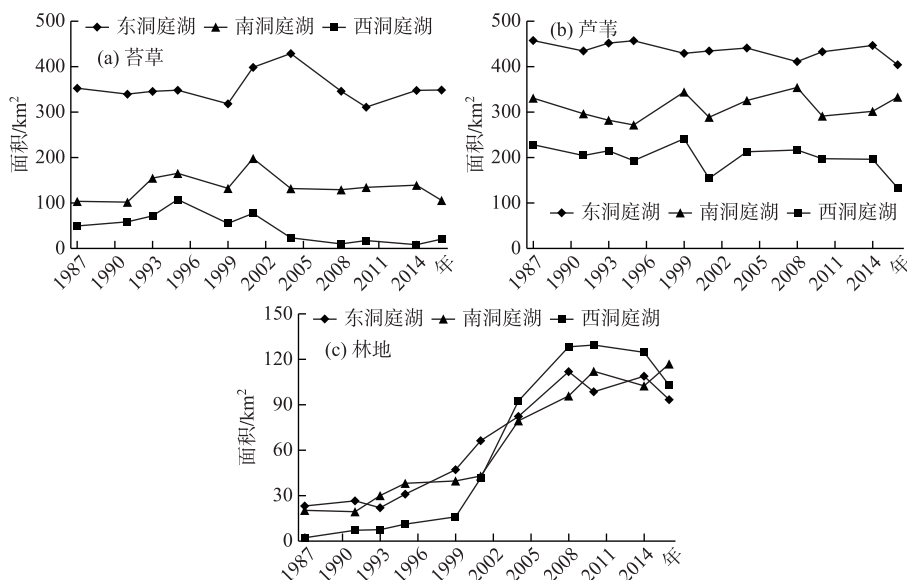


图 5 1987—2016 年洞庭湖各典型植被面积统计

Fig.5 Area variation of typical vegetation types in Lake Dongting from 1987–2016

2.2 典型湿地植被分布高程变化

基于各湖区苔草和芦苇 2 种群落在特定高程梯度上的面积统计结果,分别计算 1987—2016 年间 2 种典型植被群落在最适高程范围内各高程梯度上的年际变化. 由图 6 可以明显看出,东洞庭湖苔草群落最适分布范围有下移的趋势. 苔草在高程 24.66 m 左右达到最大分布面积,根据近 30 年 22.5、23、24、25、25.5 m 高程上其面积的变化,发现 22.5、24 和 23 m 高程上,群落相对丰度均显著增加,而 25 和 25.5 m 高程上苔草群落面积有所下降,表明该群落最适生长范围有向湖心扩张的趋势. 在南洞庭湖,植被分布下限迁移这一现象并不明显,主要原因是该湖区地势较高,且河道曲折、洲滩遍布,苔草通常仅在湖岸有少量狭长分布,因此其

高程变化趋势不明显. 西洞庭湖, 各高程梯度上苔草群落面积均显著下降, 无法说明该湖区苔草群落最适高程分布范围发生变化, 除湖区地势因素外, 另一原因是西洞庭湖近 30 年来苔草群落分布面积显著下降.

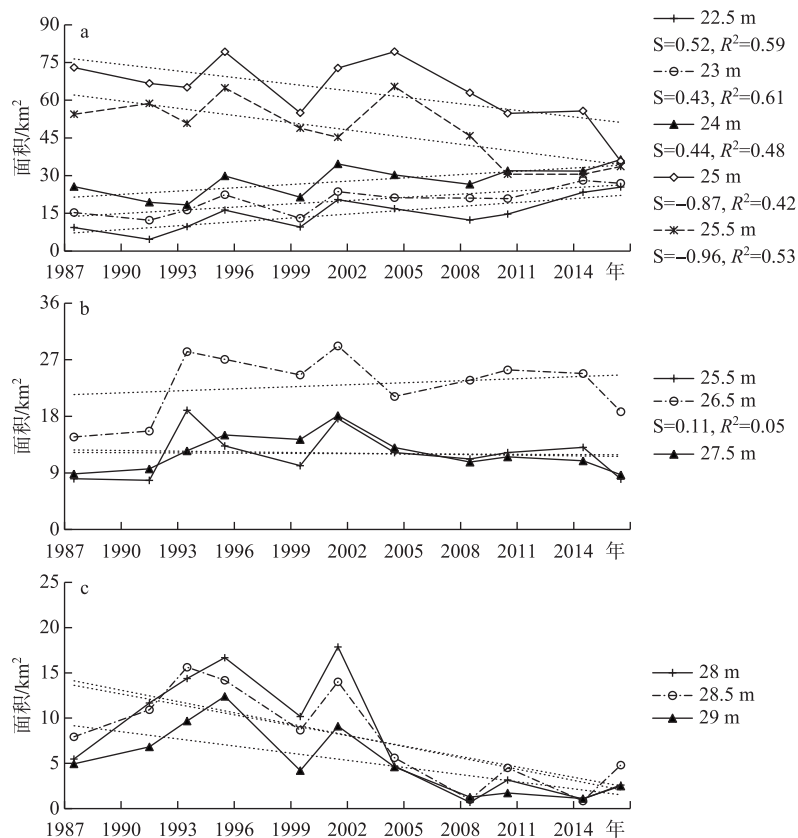


图 6 1987—2016 年洞庭湖不同湖区苔草各高程的面积变化 (a: 东洞庭湖; b: 南洞庭湖; c: 西洞庭湖)

Fig.6 Area variation of *Carex brevicuspis* in different height during 1987–2016

(a: east Lake Dongting; b: south Lake Dongting; c: west Lake Dongting)

图 7 为近 30 年芦苇群落在最适高程范围内各高程梯度上面积的年际变化, 东洞庭湖芦苇群落分布的多年最适高程范围在 24.26~27.91 m 之间, 芦苇群落在 26 m 左右达到最大分布面积. 在东洞庭湖芦苇总体面积微弱减少的条件下, 23、24、25 m 高程上其分布相对丰度仍有所增加, 表明东洞庭湖芦苇景观带分布最适高程范围呈下降趋势 (图 7a). 南洞庭湖芦苇群落分布的多年最适高程范围为 25.22~28.57 m. 南洞庭湖芦苇群落在 26、27、28 m 高程上其面积分布均有所增加, 表明南洞庭湖芦苇群落最适高程分布范围无显著迁移趋势 (图 7b). 同样, 西洞庭湖芦苇群落最适分布范围变化不明显 (图 7c).

综合近 30 年洞庭湖湿地植被总面积及苔草群落、芦苇群落、林地群落的分布面积变化趋势可以发现, 20 世纪末, 由于各典型植被分布面积变化并不显著, 而 2000 年以后, 林地人为大面积扩张, 即使挤占了草洲的分布空间, 湖区植被的总面积仍呈现增加趋势. 洞庭湖典型植被高程分布范围迁移在不同湖区存在较大差异, 东洞庭湖趋势最明显, 可能与湖区地形差异及近年气候变化、水利工程等导致湖区水情变化的空间差异有关^[36]. 此外, 洞庭湖水情偏枯^[16], 洲滩提前出露, 淹没历时减少, 进而导致植被带向下推移, 而南洞庭湖与西洞庭湖地势本身较高, 加上受人为干扰较大, 因此湖区典型植被分布高程范围无明显变化.

2.3 洞庭湖湿地植被空间格局与水情的响应关系

通过 Spearman 相关系数法, 计算洞庭湖各湖区湿地植被面积与相关水情因子间的相关性, 结果显示东洞庭湖苔草群落和芦苇群落分布面积与水位波动变量间的相关性较大, 而南洞庭湖与西洞庭湖湿地植被面

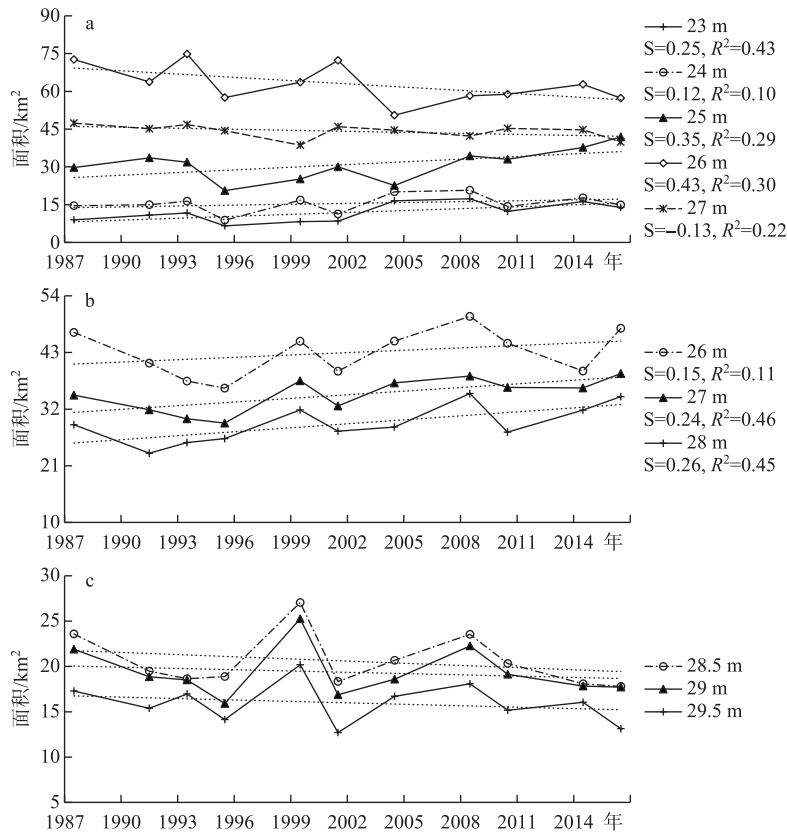


图 7 1987—2016 年洞庭湖不同湖区芦苇各高程的面积变化(a: 东洞庭湖;b: 南洞庭湖;c: 西洞庭湖)

Fig.7 Area variation of *Phragmites australis* in different height during 1987–2016

(a: east Lake Dongting; b: south Lake Dongting; c: west Lake Dongting)

积与水位波动因子间的相关性不显著, 原因可能是人类活动的干扰超出了湖泊水位波动对湿地植被分布的影响. 为进一步揭示东洞庭湖湿地植被对水情变化的响应关系, 增加了 6 期影像数据 (1989、1996、2003、2005、2006、2013 年), 进行湿地植被解译.

东洞庭湖各年份植被面积提取结果可以看出, 1987—2016 年间东洞庭湖湿地典型植被总面积有增加, 其中苔草群落面积呈减少趋势, 而芦苇群落处于扩张趋势, 这一结论与 Hu 等^[21]关于洞庭湖湿地植被变化趋势的研究结果一致 (表 4). 东洞庭湖苔草群落分布缩小的情况下, 植被总面积在增加, 是芦苇群落不断扩张并挤占苔草生长空间导致的. 李旭等的研究表明, 土壤含水量随高程增加而减少, 而洞庭湖荻-苔草群落的丰富度、多样性与土壤含水量有较好的相关性, 苔草生物量表现出随高程的增加先增加后减少的趋势, 荻生物量则呈增加趋势^[37]. 因此结合三峡运行以来, 洞庭湖水情偏枯的现象, 可进一步分析是洲滩出露时间延长, 滩地旱化导致了湿地植被由湿生植被向芦苇类旱地景观植被演替. 另外, 可以看出植被面积与当年水位情况密切相关. 例如, 2008 年汛期较长, 退水期平均水位仍有 26 m, 植物淹水时间过长影响其长势, 植被总面积仅约 757 km². 而 2006 年、2013 年则是典型枯水年, 洲滩出露时间延长, 植被面积总体较高, 且由于土壤湿度降低, 湿生植被生长会受到一定影响, 面积下降, 2006 年苔草面积仅为 299.31 km².

采用逐步回归分析法构建水情因子与东洞庭湖湿地植被面积之间的定量关系, 揭示湿地植被分布随水位波动的变化规律. 依据逐步回归分析法, 分别构建湿地典型植被苔草和芦苇群落面积与多周期水情因子的回归模型, 见表 5. 结果显示, CA2 与水情因子有更好的拟合效果 ($R^2=0.70$), 东洞庭湖芦苇面积受水位波动的影响更显著. 通过逐步回归识别影响湿地芦苇群落分布面积的关键水情因子有 F_{\max} 、 T_{mean} 、 R_{mean} , 回

表 4 1987—2016 年东洞庭湖植被面积统计(km²)
Tab.4 Statistics of vegetation area in the east Lake Dongting during 1987–2016

植被类型	1987 年	1989 年	1991 年	1993 年	1995 年	1996 年	1999 年	2001 年	2003 年
苔草	352.63	398.38	339.48	345.55	348.03	355.66	318.17	398.46	383.91
芦苇	457.35	418.14	434.15	451.14	457.00	409.49	429.29	434.13	476.98
总计	809.98	816.51	773.63	796.70	805.03	765.15	747.45	832.59	860.88
植被类型	2004 年	2005 年	2006 年	2008 年	2010 年	2013 年	2014 年	2016 年	
苔草	429.02	378.46	299.31	346.18	311.04	301.73	347.85	348.65	
芦苇	440.70	471.78	514.21	410.85	432.58	504.08	446.45	403.99	
总计	869.72	850.24	813.52	757.03	743.62	805.81	794.30	752.64	

归模型均显示芦苇群落面积与丰水期最大水位、退水期平均水位及涨水期平均水位均为负相关关系. 可见丰水季节与涨水季节偏枯的水情对芦苇群落的发育生长有促进作用. 芦苇生长对水分的需求较小, 只要土壤保持湿润即可, 但汛期水位过高会不利于其生长, 因此适度的土壤湿润有利于芦苇生长, 而长期淹水则会起到反向作用. 影响苔草群落面积分布的关键水情因子为大于 26 m 水位持续时间以及丰水期的平均水位, 但拟合效果稍差. Dur_26 对苔草生长为促进作用, 而丰水期平均水位则对其分布起到抑制作用. 前面研究结果显示该湖区苔草分布的最适高程范围在 23~26 m 之间, 水位大于 26 m 的持续时间对湿生植被的生长发育有促进作用, 但东洞庭湖丰水期平均水位达 29.17 m, 因此当汛期水位过高超过某一阈值时, 将不利于湿生植被的二次生长.

表 5 东洞庭湖植被面积与关键水情因子回归模型汇总
Tab.5 Multiple stepwise regression for the relationship between vegetation area of east Lake Dongting and key WLF variables

回归模型		关键水情因子
CA1	CA1=584.37+1.16 Dur_26-14.13 Fmean ($R^2=0.33$)	Dur_26、Fmean
CA2	CA2=1244.16-7.41 Fmax -12.32 Tmean-23.24 Rmean ($R^2=0.70$)	Fmax、Tmean、Rmean

为进一步分析影响洞庭湖湿地植被分布的水位阈值, 分别对 CA1、CA2 与通过逐步回归识别的关键水情因子进行多项式拟合, 结果如图 8、图 9. 可以看出, 苔草群落面积分布与 Dur_26 为线性关系, 随着水位大于 26 m 淹水历时的增加, 苔草面积呈增加趋势 ($P<0.05$); 而苔草面积与丰水期平均水位的多项式拟合结果显示, 当 Fmean 在 29 m 左右, 其分布面积维持在较高水平, 当丰水期平均水位大于 30 m, 东洞庭湖湿地苔草群落面积将出现下降. 图 9 为芦苇群落与关键水情变量的多项式拟合结果, 可知芦苇分布面积与丰水期最大水位以及退水期平均水位呈线性关系, 且 Tmean 影响较弱, 剔除左上角的 2 个点, 可以看出随着退水期平

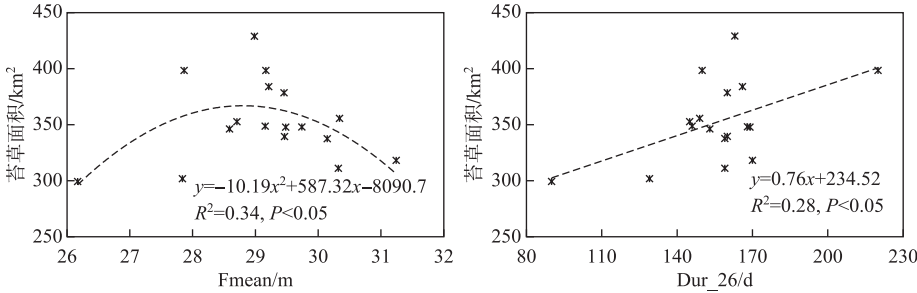


图 8 苔草群落面积与关键水情因子的关系
Fig.8 Relationship between *Carex brevicuspis* community area and key WLF variables

均水位的变动,芦苇群落的面积基本处于小幅度波动,维持在 350 km²左右. 而涨水期平均水位对东洞庭湖芦苇群落的面积有一个较明显的阈值,即当 Rmean 达到 27 m 以后,其分布面积将呈减少趋势. 反之,芦苇群落的生长将不会太受到影响,且涨水期水位的适度偏高,对芦苇群落的分布扩张有一定的促进作用.

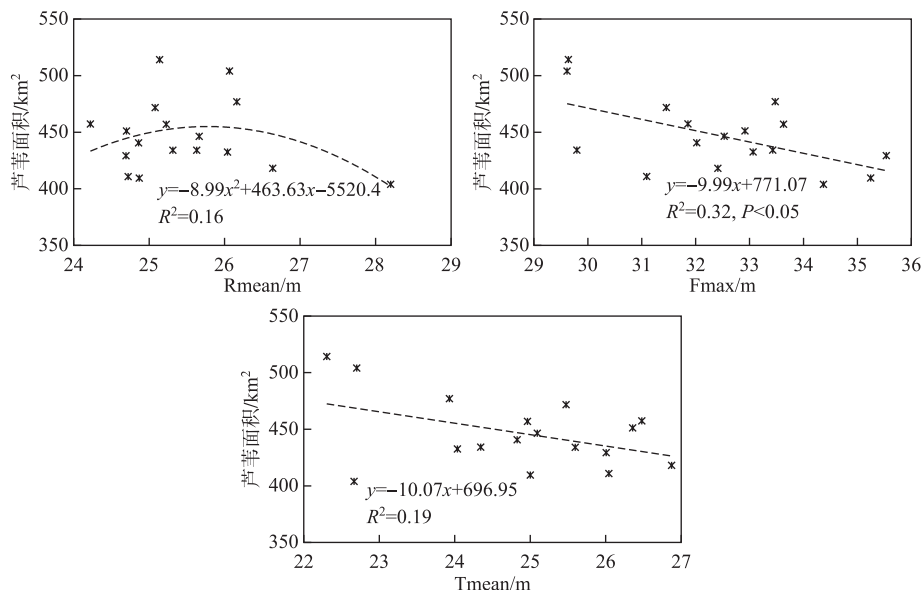


图 9 芦苇群落面积与关键水情因子的关系

Fig.9 Relationship between *Phragmites australis* community area and key WLF variables

3 结论

1) 近 30 年,洞庭湖湿地典型洲滩植被面积在全湖尺度上呈稳定增加趋势,其中最为显著的是林地分布的快速增加. 湿地格局演变上,东洞庭湖呈现芦苇群落挤占苔草群落空间,并推动湿地植被整体向湖心扩张的趋势;而南洞庭湖与西洞庭湖其最适高程分布范围与高程下限均无显著变化,可能与该湖区地形特点关系较大.

2) 丰水期、涨水期和退水期水情是影响东洞庭湖湿地典型植被带面积的关键水情变量,南洞庭湖、西洞庭湖湿地分布格局的水文响应关系不明显.

3) 东洞庭湖湿地格局的水文响应关系表现为:①影响东洞庭湖苔草和芦苇分布最关键的水情变量是丰水期水位. 苔草对丰水期水情存在非线性阈值响应,丰水期平均水位维持在 29 m 左右,最适宜苔草生长;对于芦苇,丰水期偏枯的水情条件对其生长发育起到促进作用. 2 种典型植被对丰水期水情因子的响应方式存在差异,苔草对丰水期平均水位敏感,芦苇对丰水期最大水位更为敏感. ②涨水期和退水期水文过程是影响东洞庭湖湿地植被分布的次为重要的水情因子. 涨水期、退水期水位偏低的水情条件对芦苇分布面积的扩张起促进作用.

4 参考文献

- [1] Lu XG, Liu HY eds. Wetland ecosystem conservation and management. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. [吕宪国, 刘红玉. 湿地生态系统保护与管理. 北京: 化学工业出版社, 2004.]
- [2] Cui BS, Yang ZF eds. Wetlands. Beijing: Beijing Normal University Press, 2006. [崔保山, 杨志峰. 湿地学. 北京: 北京师范大学出版社, 2006.]
- [3] Dai X. Measuring changes in water level fluctuations and the associated effect on the distribution of typical beach wetland vegetation zones in Poyang Lake [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy

- of Sciences, 2015. [戴雪. 鄱阳湖水位波动变化及其对洲滩湿地典型植被景观带空间分布的影响[学位论文]. 南京:中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2015.]
- [4] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Research*, 1997, **35**(5): 11-17.
- [5] Boar RR. Responses of a fringing *Cyperus papyrus*, L. swamp to changes in water level. *Aquatic Botany*, 2006, **84**(2): 85-92.
- [6] Zhang GX. The effects of changes in hydrological regimes and salinity on wetland vegetation: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(13): 4254-4260. [章光新. 水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究综述. 生态学报, 2012, **32**(13): 4254-4260.]
- [7] Robertson JJ, Fletcher TD, Danger A *et al.* Identifying critical inundation thresholds to maintain vegetation cover in storm-water treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 2018, **116**: 80-86. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.02.031
- [8] Hu YX, Huang JL, Du Y, *et al.* Monitoring wetland vegetation pattern response to water-level change resulting from the Three Gorges Project in the two largest freshwater lakes of China. *Ecological Engineering*, 2015, **74**: 274-285.
- [9] Hebb AJ, Mortsch LD, Deadman PJ *et al.* Modeling wetland vegetation community response to water-level change at Long Point, Ontario. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, **39**(2): 191-200.
- [10] Todd MJ, Muneepeerakul R, Pumo D *et al.* Hydrological drivers of wetland vegetation community distribution within Everglades National Park, Florida. *Advances in Water Resources*, 2010, **33**(10): 1279-1289.
- [11] Gregory SV, Swanson FJ, McKee WA *et al.* An ecosystem perspective of riparian zones. *Bioscience*, 1991, **41**(8): 540-551.
- [12] Trebino HJ, Chaneton EJ, León RJC. Flooding, topography, and successional age as determinants of species diversity in old-field vegetation. *Canadian Journal of Botany*, 1996, **74**(4): 582-588. DOI: 10.1139/b96-074.
- [13] Li X, Song BB, Li F *et al.* Population distribution patterns and growing status of *Triarrhena lutarioriparia* along a gentle elevation gradient of Lake Dongting wetlands. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 1039-1046. DOI: 10.18307/2016.0514. [李旭, 宋冰冰, 李峰等. 洞庭湖不同水位高程下南荻种群分布格局及生长动态. 湖泊科学, 2016, **28**(5): 1039-1046.]
- [14] Wan RR, Yang GS, Wang XL *et al.* Progress of research on the relationship between the Yangtze River and its connected lakes in the middle reaches. *J Lake Sci*, 2014, **26**(1): 1-8. DOI: 10.18307/2014.0101. [万荣荣, 杨桂山, 王晓龙等. 长江中游通江湖泊江湖关系研究进展. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 1-8.]
- [15] He Z, Wan RR, Dai X *et al.* Characteristics of the changing seasonal water regime in Lake Dongting and their response to the change of river-lake water exchange in recent 30 years. *J Lake Sci*, 2015, **27**(6): 991-996. DOI: 10.18307/2015.0601. [何征, 万荣荣, 戴雪等. 近 30 年洞庭湖季节性水情变化及其对江湖水量交换变化的响应. 湖泊科学, 2015, **27**(6): 991-996.]
- [16] Dai X, He Z, Wan RR *et al.* Variation of seasonal water-level fluctuations in river-connected lakes in the middle reaches of Yangtze River in the recent three decades. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(1): 118-125. [戴雪, 何征, 万荣荣等. 近 35 a 长江中游大型通江湖泊季节性水情变化规律研究. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(1): 118-125.]
- [17] Yang L, Xie BG, Qin JX *et al.* Changes in Dongting Lake wetland landscape pattern related to pre- and post-construction of the Three Gorges dam. *Journal of Natural Resources*, 2013, **28**(12): 2068-2080. [杨利, 谢炳庚, 秦建新等. 三峡建坝前后洞庭湖区湿地景观格局变化. 自然资源学报, 2013, **28**(12): 2068-2080.]
- [18] Lei X, Yang B, Jiang WG *et al.* Vegetation pattern changes and their influencing factors in the East Dongting Lake wetland. *Geographical Research*, 2012, **31**(3): 461-470. [雷璇, 杨波, 蒋卫国等. 东洞庭湖湿地植被格局变化及其影响因素. 地理研究, 2012, **31**(3): 461-470.]
- [19] Xie YH, Chen XS. Effects of three-gorge project on succession of wetland vegetation in Dongting Lake. *Research of Agricultural Modernization*, 2008, **29**(6): 684-687. [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.]
- [20] Xie YH, Tang Y, Chen XS *et al.* The impact of Three Gorges Dam on the downstream eco-hydrological environment and vegetation distribution of East Dongting Lake. *Ecohydrology*, 2015, **8**(4): 738-746. DOI: 10.1002/eco.1543.
- [21] Hu JY, Xie YH, Tang Y *et al.* Changes of vegetation distribution in the east Dongting Lake after the operation of the Three Gorges dam, China. *Frontiers in Plant Science*, 2018, **9**: 582. DOI: 10.3389/fpls.2018.00582.
- [22] Tang Y, Xie YH, Li F *et al.* Area changes of emergent herbaceous wetlands in relation to water level in East Lake

- Dongting, China in 1989–2011. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(11): 3229–3236. [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, **24**(11): 3229–3236.]
- [23] Deng F, Wang XL, Cai XB *et al.* Analysis of the relationship between inundation frequency and wetland vegetation in Dongting Lake using remote sensing data. *Ecohydrology*, 2014, **7**(2): 717–726. DOI: 10.1002/eco.1393.
- [24] Li F, Xie YH, Yang GS *et al.* Interactive influence of water level, sediment heterogeneity, and plant density on the growth performance and root characteristics of *Carex brevicuspis*. *Limnologia*, 2017, **62**: 111–117.
- [25] Li F, Zhu LL, Xie YH *et al.* Fragment growth performance of the invasive submerged macrophyte *Myriophyllum spicatum* under conditions of different water depths and sediment types. *Aquatic Ecology*, 2016, **50**(4): 727–734.
- [26] Pan Y, Xie YH, Chen XS *et al.* Effects of flooding and sedimentation on the growth and physiology of two emergent macrophytes from Dongting Lake wetlands. *Aquatic Botany*, 2012, **100**: 35–40. DOI: 10.1016/j.aquabot.2012.03.008.
- [27] Gao H, Tan HZ, Xie YH *et al.* Morphological responses to different flooding regimes in *Carex brevicuspis*. *Nordic Journal of Botany*, 2016, **34**(4): 435–441. DOI: 10.1111/njb.00946.
- [28] 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. DOI: 10.1007/s10201-012-0386-4.
- [29] Qin XY, Li F, Chen XS *et al.* Growth responses and non-structural carbohydrates in three wetland macrophyte species following submergence and de-submergence. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, **35**(7): 2069–2074. DOI: 10.1007/s11738-013-1241-x.
- [30] Li F, Xie YH, Chen XS *et al.* Influence with its regulating mechanism of the Three Gorge Dam operation on plant distributing patterns in the Lake Dongting. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, **39**(6): 49–56. [李峰, 谢永宏, 陈心胜等. 三峡工程运行对洞庭湖湿地植被格局的影响及调控机制. 农业现代化研究, 2018, **39**(6): 49–56.]
- [31] Li YF, Chen XS, Xiang WH *et al.* Effects of water levels on the growth and reproductive characteristics of *Carex brevicuspis* growing on sites with different elevations. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(7): 1959–1966. [李亚芳, 陈心胜, 项文化等. 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.]
- [32] Dou HS, Jiang JH eds. Dongting Lake. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2000. [窦鸿身, 姜加虎. 洞庭湖. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000.]
- [33] Huang Q, Jiang JH, Lai XJ *et al.* Changes of landscape structure in Dongting Lake wetlands and the evaluation on impacts from operation of the Three Gorges project. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, **22**(7): 922–927. [黄群, 姜加虎, 赖锡军等. 洞庭湖湿地景观格局变化以及三峡工程蓄水对其影响. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(7): 922–927.]
- [34] Chen J, Zhu XL, Vogelmann JE *et al.* A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(4): 1053–1064. DOI: 10.1016/j.rse.2010.12.010.
- [35] Gause G. The influence of ecological factors on the size of population. *American Naturalist*, 1931, **65**: 70–76, 696.
- [36] Lai XJ, Jiang JH, Huang Q. 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. 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.]
- [37] Li X, Li F, Xie YH *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. 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.]