

鄱阳湖湿地苔草 (*Carex*) 景观变化及其水文响应*

周云凯^{1,2}, 白秀玲^{1,2**}, 宁立新^{1,2}

(1: 河南大学资源与环境研究所, 开封 475004)

(2: 河南大学环境与规划学院, 开封 475004)

摘要: 淡水湿地水文过程控制着湿地植被景观的形成与演变. 基于 Landsat TM/ETM⁺ 遥感影像数据, 利用决策树分类法提取鄱阳湖湿地 1992、1999、2006、2012 年 4 期景观信息, 通过景观格局指数、转移矩阵和质心迁移法对苔草景观的空间变化及其与水文过程关系进行分析. 结果表明: 研究期间, 鄱阳湖湿地秋、冬季苔草景观分布面积受到水位和退水过程的影响, 低水位年的中滩位缓慢退水与低滩位快速出露更有利于苔草景观的扩张; 苔草景观的空间格局与水位关系密切, 在低水位年份, 低位洲滩提前出露, 苔草景观分布高程较低, 部分低位光滩被苔草所侵占, 原苔草分布的部分洲滩转变为芦荻景观, 景观的破碎化程度较重, 在高水位年份, 低位洲滩长期被水体淹没, 苔草景观分布高程相对较高, 部分芦荻分布区被苔草所侵占, 而原苔草景观的部分区域转变为水体和光滩, 由于该期间苔草主要集中在湖周和入湖河口地带的高位洲滩上, 其景观破碎化程度较轻; 水位年际间的升降变化会影响苔草景观质心位置, 年均水位上升引起景观质心发生向湖岸方向推进, 而年均水位下降则会导致苔草景观质心向湖心方向转移.

关键词: 苔草景观; 景观格局; 水位变化; 响应; 鄱阳湖湿地

Landscape pattern changes of *Carex* and its response to water level in Lake Poyang Wetland

ZHOU Yunkai^{1,2}, BAI Xiuling^{1,2**} & NING Lixin^{1,2}

(1: Institute of Natural Resources and Environment, Henan University, Kaifeng 475004, P.R.China)

(2: College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, P.R.China)

Abstract: The formation and evolution of vegetation landscape are controlled by the hydrological processes in freshwater wetlands. Based on the Landsat TM/ETM⁺ remote sensing images, the landscape information on Lake Poyang Wetland in 1992, 1999, 2006 and 2012 was extracted by using decision tree classification. The spatial variation of *Carex* landscape was analyzed by means of landscape pattern index, transfer matrix and centroid shifting methods. Meanwhile, the relationship between *Carex* landscape and hydrological processes was also preliminarily discussed. Results showed that the distribution and area of *Carex* landscape in autumn were influenced by the water level and recession process of Lake Poyang Wetland during the study period, the slow recession of intermediate-elevation (14–16 m) areas and fast emersion of low-elevation (12–14 m) areas play a more important role in the formation and expansion of *Carex* landscape than the water level. The spatial pattern *Carex* landscape in Lake Poyang Wetland was closely related to the annual mean water level. In the year of low annual mean water level, the distribution elevation of *Carex* landscape is relatively low, some exposed mudflats were occupied by *Carex* landscape, and the original distribution areas of *Carex* landscape were partly replaced by *Phragmites* and *Triarrhena* landscape, the fragmentation degree of *Carex* landscape was relatively heavy. While in the year with high annual mean water level, many low bottomlands were submerged, the elevation of *Carex* distributed was relatively high. Many regions of *Phragmites* and *Triarrhena* landscape were occupied by *Carex*, while the original distribution areas of *Carex* landscape became partly mudflat or water landscape types. Affected by the rising water level, *Carex* landscape mainly shifted and centered on the high zones of estuary of input rivers and lakeshore, thus the fragmentation degree of *Carex* landscape was relatively light. In addition, water level inter-annual fluctuation will affect the centroid position of *Carex* landscape, with centroid

* 国家自然科学基金项目 (41101089, 41371450) 资助. 2016-03-18 收稿; 2016-10-14 收修改稿. 周云凯 (1980~), 男, 博士, 副教授; E-mail: ykzhou2009@126.com.

** 通信作者; E-mail: bxling@163.com.

shifting to the lakeshore during the rising water level; vice versa to the lake center during the falling water level falling.

Keywords: *Carex*; landscape pattern; water level change; response; Lake Poyang Wetland

湿地景观格局是各种生态过程在不同尺度上综合作用的结果^[1]. 其中,水文过程是淡水湿地景观格局形成与演变更为重要的控制性因素,主导了湿地植被基本的空间分布格局^[2-3]. 不同的水文过程导致土壤水分梯度变化,引起湿地植物的分布范围和群落结构出现空间差异,形成不同的植被景观类型,并在空间上表现为一定的景观格局^[4]. 在淡水湿地生态系统中,植被景观往往表现出沿水分梯度呈现较为明显的带状分布格局^[5-6]. 而水文过程年际间的变动,又会影响湿地植物群落的稳定性和物种多样性,当变动超过植物的耐受范围,则会引起植物群落发生正向或逆向演替,从而导致植被景观格局发生改变^[7-10].

鄱阳湖是我国第一大淡水湖,也是长江中游重要的通江湖泊之一. 受长江和“五河”(赣江、抚河、信江、饶河、修水)来水的双重影响,湖泊水位年内变化巨大,呈现丰水期与枯水期交替出现的独特水文节律^[11],这种节律性水位变化,使洲滩各高程带的出露—淹没过程不一,形成不同的湿地水文环境和与之相适应的植物群落带. 此外,由于水位年际间的波动性和多变性,使湿地原有水文环境遭到破坏,引起植物群落结构、分布范围及分布高程发生变化^[12]. 尤其近十几年来,受气候因素和三峡工程运行的影响,江湖关系发生显著变化^[13],导致鄱阳湖水位较常年偏低,枯水期提前、延长,植被景观的空间格局随之发生明显改变^[14]. 针对鄱阳湖湿地植被,早期更多地基于野外实地调查和遥感解译,研究鄱阳湖湿地植被类型、分布及其演化规律^[15-18],近年来,许多学者开始关注鄱阳湖湿地植被演化与水文过程之间的关系,并取得了一定的研究进展^[19-22],但研究的广度和深度还有待进一步推进. 本文基于景观生态学角度,利用遥感影像数据研究鄱阳湖湿地典型植被——苔草(*Carex*)景观的空间格局变化及其对水文变化的响应,研究结果对于进一步深入理解湿地植被景观格局演变具有一定的理论价值,同时对于鄱阳湖湿地生态环境保护也具有重要的现实意义.

1 材料与方法

1.1 研究区域

鄱阳湖湿地是我国最大的淡水湖湿地,也是世界重要湿地之一,地处江西省北部,长江中下游南岸,水域面积在夏季丰水期达到 3700 km²以上,而在秋、冬季枯水期缩减至 1000 km²以下,呈现“洪水一片、枯水一线”的独特自然景观^[20]. 水位的周期性涨落形成了大面积水陆交替的草洲、泥滩和沙滩. 在全湖尺度上,洲滩植被沿水分梯度总体呈较为明显的条带状分布格局,由湖岸向湖心方向分布的主要优势植物群落为芦苇群落(*Phragmites*)、南荻群落(*Triarrhena*)、苔草群落(*Carex*)、藨草群落(*Phalaris*)和沉水植物群落. 芦苇与南荻群落多分布于 16~18 m 高程的高位洲滩,每年 3 月前后开始萌芽,9—10 月开花,11—12 月开始枯萎;苔草与藨草群落多分布于 12~16 m 高程的中低位洲滩^[15],其中,苔草群落是鄱阳湖湿地分布最广、面积最大的植被群落类型^[23-24],分为春草和秋草,春草一般 2—5 月为萌发生长期,丰水期被湖水淹没,大量死亡或进入休眠状态,秋草则在秋季退水期洲滩出露后开始生长,一般 9—12 月为萌发生长期,次年 1—2 月枯萎^[23];藨草每年 2 月萌芽生长,至丰水期基本完成其生命周期,秋季洲滩出露后,只有少数藨草还可继续生长;沉水植物群落分布在 12 m 高程以下且长期处于淹水状态的低洼地带^[15]. 在中等尺度下,由于受微地形和水分条件的影响,各植被类型在滩地上交错出现,构成湿地群落复合体结构和水平镶嵌结构^[23].

依据星子站水位数据,1992—2012 年间鄱阳湖湿地多年月均水位最高值在 18 m 左右,明显高于苔草群落的分布高程,因此,本研究以鄱阳湖区 DEM 生成的 18 m 等高线和湖区圩堤界线为基础,提取与鄱阳湖连成一体并受鄱阳湖洪水影响的区域,作为鄱阳湖湿地范围(图 1).

1.2 数据来源与处理

研究使用的数据包括遥感数据和非遥感数据 2 种. 由于鄱阳湖水位年内变化剧烈,在高水位时,大部分洲滩植被为湖水所淹没,而低水位时,洲滩植被被露出水面,为避免水淹的干扰,在遥感影像选取时,尽量选择水位较低且苔草等植被生长较为旺盛的秋、冬季影像,该时段鄱阳湖已基本进入枯水期,苔草等植被几乎全部出露水面,且此时苔草植被正值成熟期,与其他植被影像特征差异较为明显,另外,在秋、冬季鄱阳湖区云雨较少,影像质量较高,便于进行遥感影像解译,因此,遥感数据最终选取 1992 年 11 月 28 日、1999 年 12 月

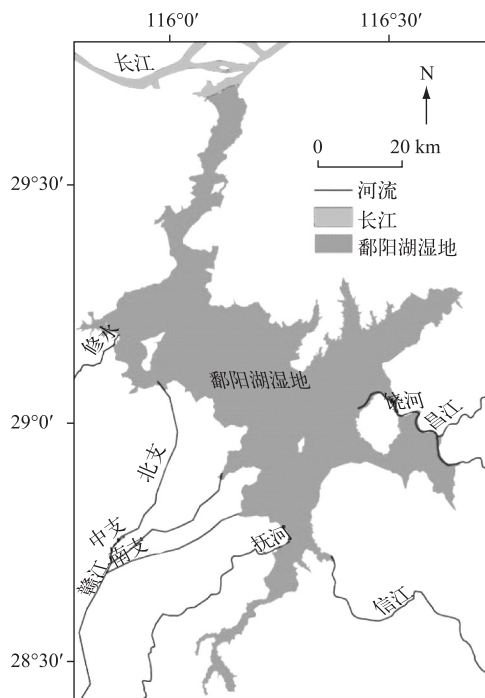


图1 鄱阳湖湿地范围

Fig.1 Location of the Lake Poyang Wetland

10日、2006年11月3日和2012年10月26日的Landsat TM/ETM⁺影像,其轨道号为121/40,空间分辨率为30 m。非遥感数据包括鄱阳湖区1:50000地形图和DEM、圩堤数据以及野外考察采集的点位数据,作为研究区域确定和景观信息提取的辅助数据;另外,还包括鄱阳湖水位数据,鄱阳湖共设有康山、吴城、都昌、星子、湖口5个基本水文站,其中星子水文站位于鄱阳湖入江水道上段左岸,能够较为全面地反映鄱阳湖在江湖作用层面以及大湖面的水情变化^[11],故选星子水文站观测水位(吴淞高程,下同)代表鄱阳湖水位。

遥感影像处理首先借助ENVI 4.7软件对遥感影像进行波段合成;以1:50000地形图作为参考图像对影像进行几何精校正;利用确定的鄱阳湖湿地范围作为掩膜对合成后影像进行裁剪;依据影像的光谱特征及计算得到的NDVI值,采用决策树分类法对秋、冬季枯水期鄱阳湖湿地遥感影像进行解译。鄱阳湖湿地景观可分为非植被景观和植被景观。非植被景观包括水体、泥滩和沙滩;植被景观主要包括沉水植物群落、中低位洲滩的苔草与藨草群落、高位洲滩的芦苇与南荻群落。其中,沉水植被没于湖中,在TM/ETM⁺遥感影像中难以与水体区分,并与水体区域叠合,故分类时未单独划分,而将其归入到水体景观中;泥滩与沙滩合并为光滩景观;苔草、南荻、芦苇等植被是鄱阳湖湿地秋、冬季最

主要的优势植被类型,呈不规则的带状或片状分布,面积较大,其他湿生植被(如藨草等)在秋、冬季分布面积较小,且常与优势群落相混杂^[18]。另外,由于TM/ETM⁺影像的分辨率为30 m,对于面积较小的植被类型难以准确解译出来。基于上述考虑,根据各景观的影像特征和植被的生长发育节律不同,本研究将鄱阳湖湿地景观分为水体景观(包括水体与沉水植物群落)、光滩景观(包括泥滩和沙滩)、苔草景观(以苔草为主,包括藨草、藜蒿在内的中低位洲滩植物群落)和芦荻景观(以芦苇与南荻为主的高位洲滩植物群落)4种类型;利用野外采集的点位数据和目视判读数据进行解译精度评价,并通过人工目视纠正错分区域,确保遥感影像解译精度达到80%以上;最终形成鄱阳湖湿地景观类型图(图2)。

1.3 研究方法

利用景观格局指数法研究苔草景观结构变化。基于斑块类型水平上选取景观类型面积、景观类型面积百分比、平均斑块面积、斑块数目、斑块密度、平均形状指数和平均分维数等指标,利用ArcGIS和FRAGSTATS 4.0软件提取各景观格局指数,从分布面积、破碎化、形状方面研究苔草景观结构变化。各指标计算方法及生态意义参考文献[25]和Fragstats用户指南。

利用转移矩阵法研究苔草景观与其他景观类型间的相互转换。通过ARCGIS空间分析模块对1992、1999、2006和2012年4期遥感影像解译图进行空间叠加分析,属性数据整理后得到1992—1999、1999—2006和2006—2012年3个时段苔草景观与其他景观类型相互转化的面积。转移矩阵的表达式^[26]为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, S 为面积, n 为转移前后景观类型数, $i, j(i, j=1, 2, \cdots, n)$ 分别为转移前、转移后的景观类型, S_{ij} 为前一期的*i*类景观转变成后一期的*j*类景观的面积。矩阵中每一行元素代表前期*i*类景观向后期各类景观的流

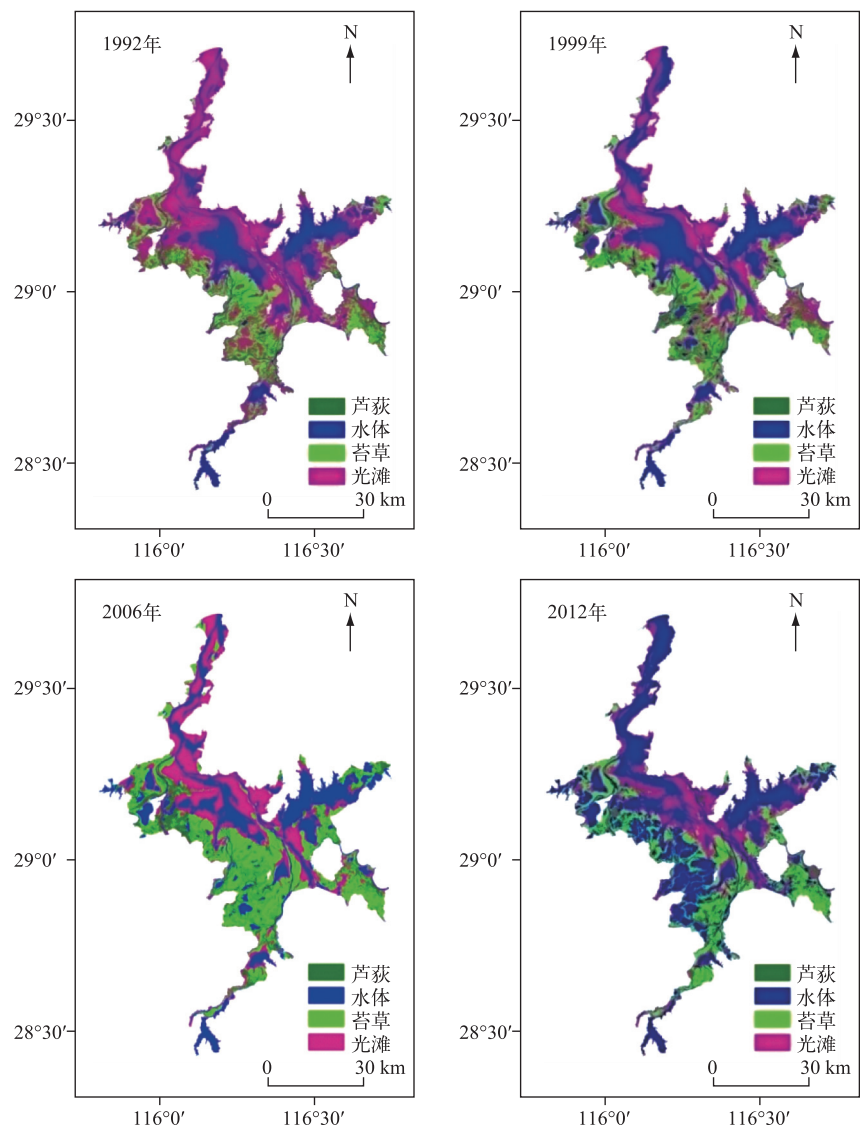


图 2 1992、1999、2006 和 2012 年鄱阳湖湿地景观类型

Fig.2 Landscape types of Lake Poyang Wetland in 1992, 1999, 2006 and 2012

出信息, 每一列元素代表后期的 j 类景观从前期的各类景观的流入信息。

利用分布质心迁移法研究苔草景观空间分布的变动情况。借助 ARCGIS 的空间分析工具生成 1992、1999、2006 和 2012 年 4 个时期苔草各斑块的分布质心, 并生成各斑块质心的经纬度, 运用公式(2) 计算得到各期苔草景观分布质心, 通过对景观分布质心的比较, 反映不同时期鄱阳湖湿地苔草景观在空间上的变化特征。质心坐标的计算公式^[27]为:

$$X = \left(\sum_{i=1}^n C_i \cdot X_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n C_i \right); Y = \left(\sum_{i=1}^n C_i \cdot Y_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n C_i \right) \quad (2)$$

式中, X 和 Y 分别为按面积加权得到的质心经度和纬度, X_i 和 Y_i 分别为苔草景观第 i 个斑块的经度和纬度, C_i 为苔草景观第 i 个斑块的面积, n 为苔草景观的斑块总数目。

2 结果与分析

2.1 苔草景观格局变化

2.1.1 苔草景观结构变化 研究期间,鄱阳湖湿地苔草景观面积经历了先逐渐增大后减小的变化过程(表1),最大分布面积为2006年的1019.7 km²,占研究区面积的33.73%,与1992年相比,苔草景观面积增加了423.22 km²,扩张近71%;2012年苔草景观面积为737.72 km²,较2006年减少了281.98 km². 斑块数、斑块密度与面积的变化趋势一致,而平均斑块面积表现为先逐渐减小后增大的趋势,这表明苔草景观的破碎化程度也经历了先增大后减小的变化过程. 从景观形状来看,4期的平均分维数和平均形状指数无明显变化趋势,基本保持稳定,说明苔草景观在自然状态下形状的不规则性变化较小.

表1 1992—2012年苔草景观格局指数
Tab.1 Changes of class-level indexes of *Carex* landscape during 1992–2012

| 年份 | 景观类型面积/ hm ² | 景观类型面积 百分比/% | 平均斑块 面积/hm ² | 斑块数目 | 斑块密度/ (个/hm ²) | 平均形状 指数 | 平均分 维数 |
|------|----------------------------|-----------------|----------------------------|------|-------------------------------|------------|-----------|
| 1992 | 59648.82 | 19.70 | 24.03 | 2482 | 0.82 | 1.408 | 1.056 |
| 1999 | 70273.00 | 23.19 | 23.00 | 3054 | 1.01 | 1.429 | 1.058 |
| 2006 | 101970.12 | 33.73 | 20.67 | 4936 | 1.63 | 1.339 | 1.055 |
| 2012 | 73771.69 | 24.39 | 32.96 | 2239 | 0.74 | 1.389 | 1.056 |

2.1.2 苔草景观转移变化 苔草景观除了面积发生变化外,其分布区域也在研究期间发生明显改变,这意味着苔草景观与其他景观类型之间进行着较为频繁的转入与转出过程. 1992—1999年间,苔草景观主要与芦荻以及光滩景观发生相互转换,而与水体间的转换极少(表2). 该阶段苔草景观转出的主要方向为芦荻景观,有114.94 km²的苔草景观转变为芦荻景观,占转出总面积的70%,转为光滩景观部分的面积占转出总面积的27.32%;而转入部分也主要来自芦荻景观,共有142.82 km²的芦荻景观转变为苔草景观,占转入量的52.96%,而光滩景观有124.85 km²转变为苔草景观,占转入量的46.30%. 在1999—2006年间,苔草景观面积进一步扩大,达到1019.70 km²,该阶段苔草景观转出方向仍以芦荻景观为主,占转出总面积的76.92%,转为光滩景观部分占转出总面积的15.67%;而转入部分则与前一阶段不同,光滩成为该阶段的主要转入景观类型,占转入总面积的57.66%,而芦荻景观的转入部分占转入总面积的28.32%,此外,也有66.17 km²的水体景观转变为苔草景观,占转入总面积的14.02%,明显高于上一阶段. 在2006—2012年间,苔草景观面积大幅减少,有506.39 km²的苔草景观转出为其他景观类型,其中有297.31 km²转变为水体景观,占转出总面积的58.71%,是该阶段的主要转出方向,其次是光滩,转移面积为126.14 km²,占24.91%;与此同时,也有部分其他景观转入为苔草景观,最主要的转入来源为芦荻景观,转入面积为155.22 km²,占转入总面积的67.17%,另外,还有29.46%来自于光滩景观,而水体景观转入部分极少,仅占转入部分的1.37%.

表2 3个时段苔草与其他景观类型之间的转移面积(km²)
Tab.2 Transfer among *Carex* and other landscape types in three different periods

| 时段 | | 芦荻 | 水体 | 光滩 | 总计 |
|------------|----|--------|--------|--------|--------|
| 1992—1999年 | 转入 | 142.82 | 2.01 | 124.85 | 269.68 |
| | 转出 | 114.94 | 4.38 | 44.86 | 164.18 |
| 1999—2006年 | 转入 | 133.66 | 66.17 | 272.18 | 472.01 |
| | 转出 | 118.61 | 11.43 | 24.16 | 154.20 |
| 2006—2012年 | 转入 | 155.22 | 3.07 | 66.12 | 224.41 |
| | 转出 | 82.94 | 297.31 | 126.14 | 506.39 |

上述分析可以看出,研究期间苔草景观与其他景观类型之间进行着频繁的相互转换,但不同时段其转移方向及转移量存在较大差异. 1992—1999和1999—2006年期间,苔草景观主要转出为芦荻景观,2006—

2012 年间则主要转出为水体景观;而 3 个时段的转入部分主要来自芦荻和光滩景观, 占总转入面积的 86% 以上。

2.1.3 苔草景观质心迁移变化 研究期间, 苔草景观分布质心均位于大湖区的西南部, 但不同时期, 分布质心的迁移方向有所不同。在 1992—1999 年间, 鄱阳湖湿地苔草景观分布质心向西北方向偏移了 739.87 m, 整体向赣江中支入湖河口形成的三角洲方向推进, 质心点高程由 1992 年的 12.94 m 略升高到 1999 年的 13.01 m; 1999—2006 年间, 苔草景观分布质心又向东偏南方向偏移了 1527.19 m, 年均偏移量 (218.17 m/a) 明显大于前一阶段 (105.70 m/a), 该时期质心点向远离湖岸方向推进, 质心点高程明显降低, 降低了 0.36 m; 而在 2006—2012 年间, 分布质心向南迁移 477.38 m, 年均偏移量 (79.56 m/a) 最小, 质心点高程升高了 0.12 m, 这一阶段分布质心略表现出向湖岸方向推进 (图 3)。

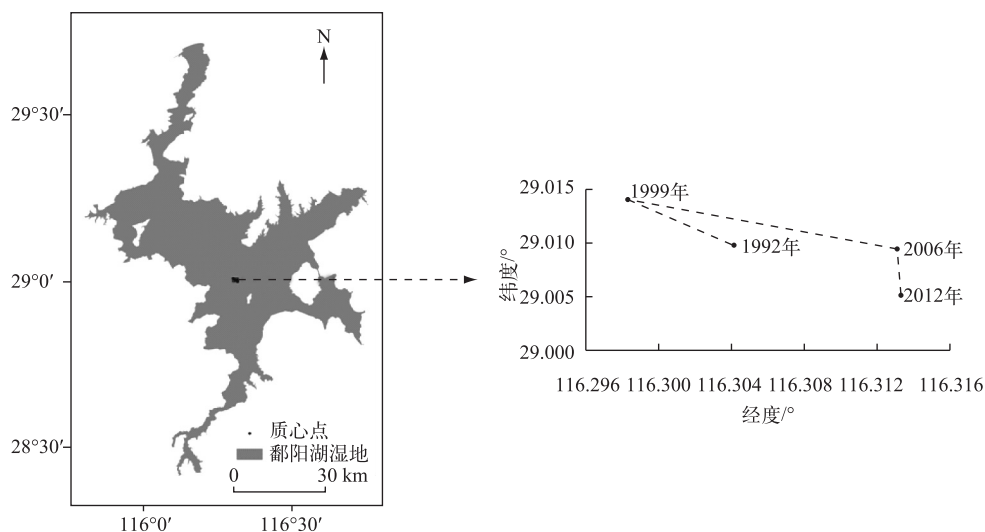


图 3 1992—2012 年苔草景观分布质心迁移变化

Fig.3 Centroids shifting of *Carex* landscape during 1992–2012

2.2 鄱阳湖水位变化

1992—2012 年间, 鄱阳湖年均水位波动频繁 (图 4), 多年平均水位为 13.20 m, 最大值出现在 1998 年, 为 15.61 m, 最小值出现在 2011 年, 为 10.96 m, 年均水位最大差值为 4.65 m。从多年变化曲线来看, 鄱阳湖年均水位整体表现出一定的下降趋势。2006 年为相对枯水年, 年均水位为 11.55 m, 低于多年平均值 1.65 m; 1999 年为相对的丰水年, 年均水位达到 14.12 m, 高于多年平均值 0.92 m; 而 1992 和 2012 年的年均水位也高于多年平均值, 分别为 13.33 和 13.74 m。

由于受入湖河流及长江径流过程的影响, 不同年份鄱阳湖水文变化过程有所差异。研究期间, 水位年内变化虽然均呈单峰模式 (图 5), 但 2006 年水位变化过程最为平缓, 最高水位为 16.72 m, 最低水位为 7.84 m, 年内变幅为 8.88 m; 而 1999 年水位变化过程最为剧烈, 最高水位达到 21.71 m, 最低水位为 7.83 m, 年内变幅达到 13.88 m, 1992 和 2012 年的水位变化过程则介于前两者之间, 年内变幅分别为 12.41 和 11.84 m。若以年内最高水位为界将鄱阳湖水文过程分为涨水和退水 2 个阶段, 则 2006 年退水时间相对提前 (6 月 21 日), 退水过程最为缓慢, 日均水位降低 0.05 m; 2012

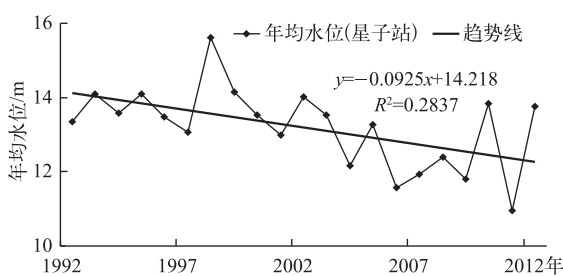


图 4 1992—2012 年鄱阳湖星子站年均水位变化

Fig.4 Annual water level change of Xingzi Station of Lake Poyang Wetland during 1992–2012

年退水时间相对滞后(8月13日),退水过程相对较快,日均水位降低0.07 m;而1999年自7月21日开始退水,退水阶段水位日均降低值最大,为0.08 m/d.

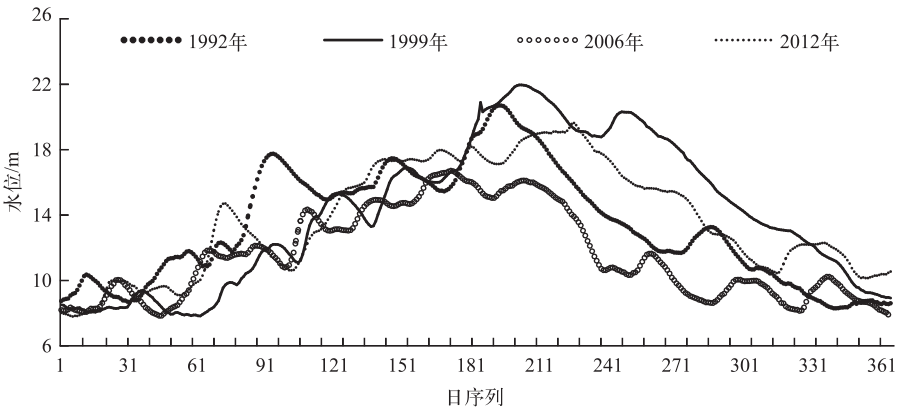


图 5 1992、1999、2006 和 2012 年鄱阳湖水位变化过程
Fig.5 Water level changes of Lake Poyang in 1992, 1999, 2006 and 2012

表 3 不同高程带苔草景观面积百分比构成

| 年份 | 面积百分比/% | | | |
|------|---------|---------|---------|-------|
| | ≤12 m | 12~14 m | 14~16 m | ≥16 m |
| 1992 | 11 | 73 | 16 | 0 |
| 1999 | 17 | 65 | 18 | 0 |
| 2006 | 24 | 62 | 14 | 0 |
| 2012 | 19 | 60 | 20 | 0 |

表 4 退水过程不同阶段经历时间
Tab.4 Duration of different stages in the process of water recession

| 年份 | 历时/d | | |
|------|-----------|-----------|-----------|
| | 最高水位→16 m | 16 m→14 m | 14 m→12 m |
| 1992 | 33 | 14 | 41 |
| 1999 | 83 | 17 | 30 |
| 2006 | 18 | 36 | 8 |
| 2012 | 26 | 29 | 18 |

的 2006 年历时最长(36 d),其次为 2012 年(29 d),而苔草分布面积最小的 1992 年历时最短(14 d);当水位由 14 m 继续下降到 12 m,2006 年历时最短(8 d),其次为 2012 年(18 d),而 1992 年历时最长(41 d). 结合 4 个年份的苔草景观面积可发现,中滩位(14~16 m 高程带)的退水历时长且低滩位(12~14 m 高程带)退水历时短,苔草景观面积则大,反之,则小. 据此可初步推测,中滩位的缓慢退水和低滩位的快速出露联合作用下的水文经历更有利于苔草的萌芽生长与扩张,形成面积较大的苔草景观;相反,中滩位的快速退水和低滩位

2.3 苔草景观对水文变化的响应

2.3.1 苔草景观分布与结构对水文变化的响应
鄱阳湖湿地苔草景观的空间分布主要受地貌及水文条件影响. 对于秋季苔草而言,地貌高程与湿地退水过程的影响更为重要. 从苔草的分布高程来看(表 3),研究的 4 个年份中,苔草均分布在 16 m 高程以下,其中 12~14 m 高程带是苔草最为主要的分布区,但不同年份各高程带上苔草面积占比不同,反映了苔草主要分布高程的变化. 在枯水年(2006 年),12 m 以下高程的苔草面积占比高于其他年份,而 14~16 m 高程的面积占比低于其他高程,说明枯水年的低水位引起苔草分布高程出现一定程度的下移.

从苔草景观分布面积来看(表 1),枯水年(2006 年)苔草面积远高于其他年份,但最小面积并未出现在丰水年(1999 年),而是出现在相对的平水年(1992 年),这说明水位仅是影响苔草景观分布的重要影响因子之一,苔草景观的分布还受到其他水文因子的影响. 通过对 4 个年份退水过程分析发现,不同年份退水过程各阶段历时差异明显(表 4),在苔草分布的主要高程区间,水位由 16 m 降到 14 m,以苔草分布面积最大的

的缓慢出露联合作用下的水文经历则会对苔草的萌发与分布产生抑制作用,这一定程度上反映退水过程对苔草景观分布具有重要影响。

与此同时,随着水位的年际间升降,苔草景观空间结构也发生相应变化。在低水位年份(2006年),鄱阳湖湿地的洲滩大面积出露,尤其在“五河”河口及湖心地带,由河流冲淤作用形成诸多大小不一的洲滩出露水面,在一定的高程带上形成了苔草适生的水文环境,苔草开始萌芽、生长,苔草空间上呈较为明显的片状分布格局,苔草斑块数目较多,而平均斑块面积较小,苔草景观的破碎化程度相对较重;而在高水位年份(1999年),由于河口与湖中部分洲滩被水体所淹没,苔草的分布区域主要集中在湖周及河口地带高程相对较高的洲滩上,苔草景观空间上呈现出条带状分布格局,苔草分布的斑块数目较少,平均斑块面积较大,景观破碎化程度相对较轻。而斑块平均形状指数与平均分维数对水位变化并不敏感,苔草斑块始终在自然状态下呈现出不规则状。

2.3.2 苔草景观转移对水文变化的响应 由于水位年际间的变动,苔草分布区域及分布高程发生改变,导致苔草景观与其他景观类型间不断进行转换。当处于相对的高水位年份(如1999、2012年),苔草分布高程有所上移,侵占先前的芦荻景观分布区,然由于湿地洲滩地貌的复杂性以及水文情势的多变性,部分原苔草生长区域形成更有利于芦荻生长的水文环境,使苔草景观被芦荻景观所取代;此外,还有部分原苔草分布的低位洲滩由于长期的水淹而不利苔草自身的生存,转变成成为光滩和水体景观;而处于相对的低水位年份(2006年),苔草的分布高程有所下移,部分光滩被苔草所侵占,原苔草分布的高位滩地则转变为芦荻景观,此外,受局地特殊的水文与地貌条件影响,也有部分芦荻景观转变为苔草景观。

2.3.3 苔草景观质心对水文变化的响应 随着苔草分布区域与分布高程的变化,苔草景观的分布质心也不断发生迁移。从景观质心迁移方向与水位变化情况可看出,苔草景观质心迁移方向与水位升降紧密相关。在水位上升时期(1992—1999、2006—2012年),苔草的主要分布区域向湖岸带和入湖河流河口区的较高滩位转移,其景观质心会发生向湖岸方向的迁移;而在水位降低时期(1999—2006年),苔草分布高程下降,湖中出露的滩地、入湖河口以及湖岸带的中低滩位被苔草侵占,其主要分布区域向湖心低位洲滩方向扩张,从而引起分布质心也随之向湖心方向迁移。

3 结语

利用1992、1999、2006和2012年4期Landsat TM/ETM⁺遥感影像数据,从景观生态学角度出发,分析了鄱阳湖湿地典型植被—苔草景观的空间变化,并对其与水文过程变化之间的关系进行初步探讨,主要得到以下结论:

1) 1992—2012年间,鄱阳湖湿地年均水位波动频繁,然整体略呈下降趋势。不同年份湿地水文变化过程差异明显,其中2006年水位变化最为平缓,退水过程最慢;而1999年水位变化最为剧烈,退水过程最快。

2) 鄱阳湖湿地秋、冬季苔草景观分布主要受地貌高程和水文过程影响。苔草景观分布在16 m高程以下,而12~14 m高程带是其最主要的分布区间;苔草景观分布面积受到水位的影响,但退水过程影响更为重要,尤其是中滩位(14~16 m高程带)与低滩位(12~14 m高程带)退水过程的联合作用对苔草景观的分布起到促进或抑制作用。

3) 苔草景观空间格局与水位密切相关,在低水位年份,苔草景观的破碎化程度较重,景观质心向湖心方向迁移;在高水位年份,其景观破碎化程度较轻,景观质心会向湖岸方向推进。

鄱阳湖湿地植被景观格局的变化受多种因素影响,虽然水文过程起到主要的控制作用,但其他因素(如泥沙冲淤、土壤环境、人为开垦、火烧、放牧等)的影响也不容忽视。目前,淡水湿地植被景观格局与水文变化关系研究虽取得一定进展,但研究的深度还十分有限,未来还需更为长期的系统观测与模拟试验才能定量地揭示两者之间的作用机理;同时,也需要加强其他因素在湿地植被景观格局变化中的作用研究,从而进一步丰富和完善湿地植被格局演变理论。

致谢:感谢中国科学院鄱阳湖湖泊湿地观测研究站在野外点位数据采集时提供的帮助;同时感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所陈宇炜研究员、孙占东、赖锡军副研究员提供的水位数据。

4 参考文献

- [1] Bai Junhong, Ouyang Hua, Yang Zhifeng *et al.* Changes in wetland landscape patterns: A review. *Progress in Geography*, 2005, **24**(4): 36-45.[白军红, 欧阳华, 杨志峰等. 湿地景观格局变化研究进展. 地理科学进展, 2005, **24**(4): 36-45.]
- [2] Huang Yilong, Fu Bojie, Chen Liding. Advances in ecohydrological process research. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(3): 580-587.[黄奕龙, 傅伯杰, 陈利顶. 生态水文过程研究进展. 生态学报, 2003, **23**(3): 580-587.]
- [3] Li Xu, Xie Yonghong, Huang Jishan *et al.* Research progresses on the formation mechanism of vegetation distribution pattern in wetland. *Wetland Science*, 2009, **7**(3): 280-288. [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.]
- [4] Cao Qing, Huang Senkai, Huang Binbin *et al.* Research advances in lakeside zone landscape pattern and hydrological process. *Pearl River*, 2014, (3): 82-86. [曹庆, 黄森开, 黄彬彬等. 水文过程对湖滨带景观格局影响研究进展. 人民珠江, 2014, (3): 82-86.]
- [5] Bornman TG, Adams JB, Bate GC. Environmental factors controlling the vegetation zonation patterns and distribution of vegetation types in the Olifants Estuary, South Africa. *South African Journal of Botany*, 2008, **74**(4): 685-695.
- [6] Huang Qun, Jiang Jiahu, Lai Xijun *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): 923-927. [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): 923-927.]
- [7] Bacon PE, Stone C, Binns DL *et al.* Relationships between water availability and *Eucalyptus camalduldenensis* growth in a riparian forest. *Journal of Hydrology*, 1993, **150**: 541-561.
- [8] Beauchamp VB, Stromberg JC. Flow regulation of the Verde River, Arizona encourages *Tamarix* recruitment but has minimal effect on *Populus* and *Salix* stand density. *Wetlands*, 2007, **27**(2): 381-389.
- [9] Yao Xin, Yang Guishan, Wan Rongrong *et al.* Impact of water level change on wetland vegetation of rivers and lakes. *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.]
- [10] Li Shengnan, Wang Genxu, Deng Wei. Research advances in wetland landscape pattern and hydrological process. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, **27**(6): 1012-1020. [李胜男, 王根绪, 邓伟. 湿地景观格局与水文过程研究进展. 生态学杂志, 2008, **27**(6): 1012-1020.]
- [11] Dai Xue, Wan Rongrong, Yang Guishan *et al.* Temporal variation of hydrological rhythm in Poyang Lake and the associated water exchange with the Changjiang River. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, **24**(12): 1488-1496. [戴雪, 万荣荣, 杨桂山等. 鄱阳湖水文节律变化及其与江湖水量交换的关系. 地理科学, 2014, **24**(12): 1488-1496.]
- [12] Yu Li, He Longhua, Zhang Qi *et al.* Landsat-TM data based study on dynamic changes of typical wetlands of Poyang Lake. *Remote Sensing Information*, 2010, (6): 48-52. [余莉, 何隆华, 张奇等. 基于 Landsat-TM 影像的鄱阳湖典型湿地动态变化研究. 遥感信息, 2010, (6): 48-52.]
- [13] Dai X, Wan RR, Yang GS. Non-stationary water-level fluctuation in China's Poyang Lake and its interactions with Yangtze River. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, **25**(3): 274-288.
- [14] Hu Zhenpeng, Ge Gang, Liu Chenglin. Cause analysis and early warning for wetland vegetation degradation in Poyang Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(3): 381-386.[胡振鹏, 葛刚, 刘成林. 鄱阳湖湿地植被退化原因分析及其预警. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(3): 381-386.]
- [15] Zhang Quanjun, Yu Xiubo, Hu Binhua. Research on the characteristics of plant communities in the Poyang Nanji Wetlands, China. *Resources Science*, 2013, **35**(1): 42-49. [张全军, 于秀波, 胡斌华. 鄱阳湖南矶湿地植物群落分布特征研究. 资源科学, 2013, **35**(1): 42-49.]
- [16] Liu Xiaoli, Ding Mingjun, Li Guicai *et al.* Research on variation of wetland plant communities along elevation gradient around Poyang Lake. *Yangtze River*, 2013, **44**(5): 82-86. [刘肖利, 丁明军, 李贵才等. 鄱阳湖湿地植物群落沿高程梯度变化特征研究. 人民长江, 2013, **44**(5): 82-86.]
- [17] Ge Gang, Zhao Anna, Zhong Yiyong *et al.* Patterns of dominant populations of plants in Islets of Poyang Lake. *Wetland*

- Science*, 2011, **9**(1): 19-25. [葛刚, 赵安娜, 钟义勇等. 鄱阳湖洲滩优势植物种群的分布格局. 湿地科学, 2011, **9**(1): 19-25.]
- [18] Wu Jiandong, Liu Guanhua, Jin Jiefeng *et al.* Structure analysis of beach vegetation in Poyang Lake in autumn. *Jiangxi Science*, 2010, **28**(4): 549-554. [吴建东, 刘观华, 金杰峰等. 鄱阳湖秋季洲滩植物种类结构分析. 江西科学, 2010, **28**(4): 549-554.]
- [19] Dai X, Wan RR, Yang GS *et al.* Responses of wetland vegetation in Poyang Lake, China to water-level fluctuations. *Hydrobiologia*, 2016, **773**: 35-47.
- [20] Liu Xuying, Guan Yanning, Guo Shan *et al.* Response on wetland vegetation distribution to hydrology regularity based on harmonic-time series analysis. *J Lake Sci*, 2016, **28**(1): 195-206. DOI: 10.18307/2016.0123. [刘旭颖, 关燕宁, 郭杉等. 基于时间序列谐波分析的鄱阳湖湿地植被分布与水位变化响应. 湖泊科学, 2016, **28**(1): 195-206.]
- [21] Zhang Meng, Ni Leyi, Xu Jun *et al.* Annual dynamics of the wetland plants community in Poyang Lake in response to water-level variation. *Research of Environmental Sciences*, 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.]
- [22] Zhang Lili, Yin Junxian, Jiang Yunzhong *et al.* Relationship between hydrological conditions and vegetation communities in Poyang Lake national nature reserve of China. *Advances in Water Science*, 2012, **23**(6): 769-776. [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): 769-776.]
- [23] Hu Zhenpeng, Ge Gang, Liu Chenglin *et al.* Structure of Lake Poyang Wetland plants ecosystem and influence of lake water level for the structure. *Research of Environmental Sciences*, 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对其影响研究. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(6): 597-605.]
- [24] Wu Qin, Yao Bo, Zhu Lili *et al.* Seasonal variation in plant biomass of *Carex Cinerascens* and its carbon fixation assessment in a typical Poyang Lake marshland. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **21**(2): 215-219. [吴琴, 尧波, 朱丽丽等. 鄱阳湖典型苔草湿地生物量季节变化及固碳功能评价. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(2): 215-219.]
- [25] Li Cong, Li Xiaowen, Zheng Yu *et al.* Evolution of wetland landscape pattern in Hengshui National Nature Reserve. *Resources Science*, 2008, **30**(10): 1571-1578. [黎聪, 李晓文, 郑钰等. 衡水湖国家级自然保护区湿地景观格局演变分析. 资源科学, 2008, **30**(10): 1571-1578.]
- [26] Qiao Weifeng, Sheng Yehua, Fang Bin *et al.* Land use change information mining in highly urbanized area based on transfer matrix: A case study of Suzhou, Jiangsu Province. *Geographical Research*, 2013, **32**(8): 1497-1507. [乔伟峰, 盛业华, 方斌等. 基于转移矩阵的高度城市化区域土地利用演变信息挖掘——以江苏省苏州市为例. 地理研究, 2013, **32**(8): 1497-1507.]
- [27] Gong Zhaoning, Zhang Yiran, Gong Huili *et al.* Evolution of wetland landscape pattern and its driving factors in Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(1): 77-88. [宫兆宁, 张翼然, 宫辉力等. 北京湿地景观格局演变特征与驱动机制分析. 地理学报, 2011, **66**(1): 77-88.]