

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*

唐 玥^{1,2} 谢永宏^{1**} 李 峰¹ 陈心胜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中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 基于多时相的 Landsat MSS/TM/ETM⁺ 遥感影像数据, 采用决策树分类法提取 1989—2011 年共 49 景东洞庭湖不同水位条件下的草洲出露面积, 结合 1985—2011 年城陵矶日水位数据及数字高程模型, 分析草洲时空变化特征并阐明其变化趋势. 结果表明: 研究区出露草洲面积受水位影响显著, 两者呈极显著的线性关系 ($R^2=0.875, P<0.001$), 出露草洲面积随水位的升高而逐渐减小, 且水位越高, 对草洲出露面积的影响越小. 草洲出露面积随水位呈现规律性变化, 1—7 月, 水位上升, 草洲面积减少; 7—12 月, 水位下降, 草洲出露面积增加. 1989—2011 年, 草洲出露面积持续增加, 新增草洲主要由泥滩地转化而来; 草洲扩张是各高程段草洲面积共同增加的结果, 低位洲滩 (黄海高程 22~25 m) 草洲面积的快速增加是湿地草洲扩张的主导部分. 各高程水位变化是研究期间东洞庭湖草洲出露面积变化的主要原因.

关键词 东洞庭湖 遥感 水文 草洲

文章编号 1001-9332(2013)11-3229-08 中图分类号 X143 文献标识码 A

Area changes of emergent herbaceous wetlands in relation to water level in East Dongting Lake, China in 1989–2011. TANG Yue^{1,2}, XIE Yong-hong¹, LI Feng¹, CHEN Xin-sheng¹ (¹Dongting Lake Station for Wetland Ecosystem Observation and Research/Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region/Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, 24(11): 3229–3236.

Abstract: Based on multi-temporal Landsat MSS/TM/ETM⁺ images, and by using decision tree method, this paper extracted the areas of emergent herbaceous wetlands with different water levels in 1989–2011 in the East Dongting Lake, China. The change characteristics and change trends of the emergent herbaceous wetlands areas were investigated based on the DEM data and the daily water level data from the Chenglingji Hydrological Station. The area of the emergent herbaceous wetlands was significantly affected water level ($R^2=0.875, P<0.001$), presenting a significant linear relationship between the two. Moreover, the emergent herbaceous wetlands area decreased with increasing water level. The higher the water level, the smaller the effects of the water level on the emergent area were. The emergent area changed regularly with water level. In January–July, water level increased, and the emergent area decreased; in July–December, it was opposite. In 1989–2011, the areas of emergent herbaceous wetlands had a continual increase. The newly emergent herbaceous wetlands area was mainly transformed from mudflat. The emergent herbaceous wetlands expansion was the co-effects of the increase of the emergent herbaceous wetlands areas at different elevations, and the rapid expansion of the emergent herbaceous wetlands in low bottomland (22–25 m of Yellow Sea elevation) played the most important role in the expansion. The change of water level at different elevations was the dominant cause for the changes of emergent herbaceous wetlands areas in the East Dongting Lake in the past 20 years.

Key words: East Dongting Lake; remote sensing; hydrology; emergent herbaceous wetland.

* 国家重大基础研究发展计划项目(2012CB417005)和国家自然科学基金项目(31170342)资助.

** 通讯作者. E-mail: yonghongxie@163.com

2013-03-11 收稿, 2013-08-28 接受.

湿地植被是湿地生态系统中最重要的重要组成部分,对湿地生态系统的稳定具有关键作用.水文过程是影响湿地植被发展演化的决定性因子,水位波动、淹水周期和淹水频率等水文过程对湿地植被类型、分布与生产力具有明显的调控作用,进而影响湿地生态系统的结构和功能,如候鸟栖息地、生物多样性、物质循环过程等^[1].因此,研究草洲的时空变化特征及其与水文变化的关系对于理解整个湿地生态系统的结构功能及其演化具有重要意义.此外,随着遥感技术的发展,越来越多的学者利用多源遥感数据对湿地植被进行动态监测,探讨其景观变化特征及发展趋势^[2-6].如黄进良^[7]、Kent 和 Mast^[8]利用不同时相的遥感影像获取不同湿地类型的分布特征,分别描述了洞庭湖湿地演替的基本趋势及美国 California 州 San Dieguito 泻湖湿地变化;谢冬明等^[9]分析了不同水位和相似水位条件下鄱阳湖湿地景观的变化.以往的研究主要集中于湿地景观变化^[10-14]或不同水文水沙条件下景观的直接变化^[15-17],但将二者结合起来并探讨相关变化机理的研究较少.本文以东洞庭湖为研究对象,利用城陵矶水文站的长期观测数据,结合 Landsat MSS/TM/ETM⁺影像,探讨东洞庭湖出露草洲(为湖区所有湿地植被的习惯性称呼)面积的变化特征及其与周期性水文变化过程的关系,旨在揭示洞庭湖湿地植被分布变化趋势,并为相关植被保护政策的制定提供指导.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

东洞庭湖湿地(28°28'—29°35' N, 112°19'—113°05' E)(图1)属亚热带湿润气候,日照充足,雨量充沛,年均气温 17 °C,年降水量 1200~1300 mm,年无霜期 285 d^[18].湖区生物资源丰富,有植物 170 科 637 属 1428 种,是我国湿地多样性最丰富的地区之一,是候鸟在东洞庭湖的主要栖息地^[19].东洞庭湖湿地是洞庭湖东、南、西 3 个湖泊中保留最完整的湖泊^[20],是洞庭湖的主体部分,约占洞庭湖面积的一半,具有丰富的湿地资源^[21]和典型的周期性水文过程.东洞庭湖水位周期性变化规律较稳定,呈现“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 月水位开始上升,6—8 月达最高峰,9 月下降,12 月至次年 3 月为最低值.东洞庭湖区承纳湘、资、沅、澧四水,经城陵矶流入长江,对长江水量具有巨大的调节作用.在“四水”及周期性水

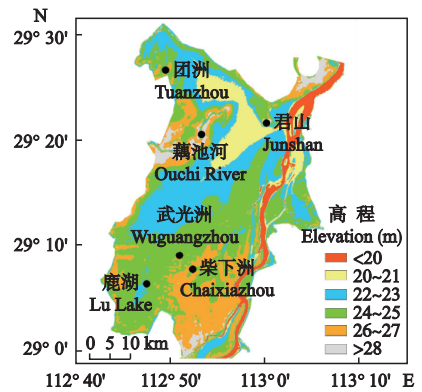


图1 东洞庭湖地理位置示意图

Fig. 1 Sketch map of the location of the East Dongting Lake.

文波动的影响下,植被呈现镶嵌分布、带状分布和环状分布的复杂特征^[22].

1.2 数据来源

1.2.1 Landsat MSS/TM/ETM⁺遥感影像数据及数字高程模型 选取 1989—2011 年晴空无云条件下的 Landsat MSS/TM/ETM⁺遥感影像数据共 49 景(表 1),为确保数据准确性,每个月份至少保证有 2 期影像.地形数据为长江水利委员会 1995 年实测的 1:10000 洞庭湖湖盆数字高程模型(DEM),其中,赤山湖总圩垸部分被剔除,根据地理坐标截取东洞庭湖部分.

1.2.2 水文数据 本文以城陵矶水文站日水位数据代表东洞庭湖的水位变化.考虑到遥感数据为 1989—2011 年以及水位和植被生长之间可能存在的时滞性,选择 1985—2011 年的水位数据代表东洞庭湖湿地水位变化情况.城陵矶位于东洞庭湖北端、长江与洞庭湖的交汇处,是洞庭湖水沙再度进入长江的唯一出口.东洞庭湖地势平缓,在水文学研究中通常采用城陵矶代表东洞庭湖的水位变化情况.

1.3 草洲出露面积提取方法

本文采用决策树分类法提取不同时间的草洲面积,以 TM/ETM⁺遥感影像的波段 4 和波段 7 以及归一化植被指数(NDVI)建立决策树模型.以 2011 年为例,具体建模如下:利用长江水利委员会 1995 年实测的 1:10000 洞庭湖湖盆数字高程模型做掩膜,从每景图像中提取东洞庭湖范围;通过目视解译选取 387 个训练样本(每类不少于 100 个),同时结合波普曲线确定不同湿地类型的特征波段阈值,综合 NDVI 值初步建立决策树逻辑关系;然后利用中国科学院洞庭湖湿地生态系统观测研究站 2011 年野外调查资料(共 325 个样点)校正 2011 年 2 月 24 日决策树各节点阈值,最终确定决策树模型.对于冬季

获取的遥感影像,由于此时芦苇基本被收割完毕,湖草也已枯萎,通过对已知芦苇场及湖草区域训练样本的多次提取,确定 $NDVI \geq 0.3$ 且 $band4 > 57$ 的区域为草洲。训练样本提取过程中,水域和泥滩地(湿润土壤)在波段 4 最明显,颜色由黑至浅灰,可分离植被;波段 7 对于岩石的辨识度极好,进一步分离出呈灰色至白色的泥滩地,黑色为水体;剩余部分除波段 4 呈黑色的水域外还可能包括新近零星生长过植被的裸地,其显示为湿润土壤,利用 NDVI 值和波段 4 区分水体和湿润土壤,之后根据洞庭湖湿地站植被调查资料确定未分类点的类型。其他年份根据其 2011 年的波普曲线的细微差异做出微调。其中,2003 年以后的 TM/ETM⁺ 有条带问题,通过 ENVI 的 Landsat_gapfill 条带修复补丁进行修复。分类完成后利用 ENVI 中的混淆矩阵对影像进行精度评价。后期处理以 ArcGIS 10.0 为平台计算,最终得到各期影像草洲面积(表 1)。

1.4 草洲年际变化特征提取方法

东洞庭湖水位的季节性涨落变化形成了相对稳

定的草洲分布景观,但近年来,由于芦苇、杨树等大面积种植、三峡工程运行、荆江裁湾等因素造成洞庭湖三口四水来水来沙量等水沙条件发生变化。为说明 1989—2011 年草洲变化特征,本文以枯水期草洲覆盖区域全部出露的遥感影像为准(据洞庭湖湿地站近年野外调查资料显示,在 22 m 水位以下,草洲基本全部显现。故选择城陵矶日水位在 22 m 以下的遥感影像代表不同时期草洲实际覆盖面积),选取成像日期分别为 1989-01-26、1995-12-05、2001-12-29、2005-01-06、2011-02-24 的遥感影像,与 DEM 数字高程模型合并计算,分析不同高程段草洲出露面积及分布变化情况。

2 结果与分析

2.1 草洲出露面积随水位变化的总体特征

对不同时间草洲出露面积与对应城陵矶水位进行回归分析表明:东洞庭湖草洲出露面积与城陵矶日水位呈极显著线性关系 ($R^2 = 0.875, P < 0.001$), 随水位升高,草洲出露面积逐渐减小(图 2)。草洲出

表 1 Landsat 影像成像日期、草洲出露面积及对应城陵矶水位

Table 1 Date information for TM image, the area of emergent herbaceous wetlands and water level data from the Chenglingji hydrological station

序号 No.	日期 Date	影像类型 Image type	水位 Water level (m)	草洲面积 Area (m ²)	序号 No.	日期 Date	影像类型 Image type	水位 Water level (m)	草洲面积 Area (m ²)
1	1989-01-26	Landat4-5 TM	21.44	577.36	26	2005-04-28	Landsat7 ETM	22.95	866.91
2	1993-10-12	Landat4-5 TM	27.85	218.61	27	2005-06-15	Landsat7 ETM	29.82	208.27
3	1995-12-05	Landat4-5 TM	21.49	670.98	28	2005-07-17	Landsat7 ETM	29.67	230.62
4	1996-06-14	Landat4-5 TM	29.46	210.68	29	2005-08-02	Landsat7 ETM	29.28	252.41
5	1996-10-04	Landat4-5 TM	26.24	391.70	30	2005-09-11	Landat4-5 TM	30.54	125.20
6	1999-12-24	Landsat7 ETM	21.25	773.49	31	2005-12-08	Landsat7 ETM	21.93	784.91
7	2000-10-07	Landsat7 ETM	29.52	152.59	32	2006-01-09	Landsat7 ETM	20.72	744.83
8	2001-03-08	Landat4-5 TM	21.49	817.31	33	2006-05-17	Landsat7 ETM	27.63	374.50
9	2001-04-09	Landat4-5 TM	22.96	812.14	34	2006-09-22	Landsat7 ETM	23.56	873.95
10	2001-05-03	Landsat7 ETM	26.23	630.43	35	2006-11-01	Landat4-5 TM	23.79	873.78
11	2001-09-24	Landsat7 ETM	28.07	313.47	36	2007-04-18	Landsat7 ETM	21.55	945.58
12	2001-11-11	Landsat7 ETM	25.90	632.76	37	2007-08-08	Landsat7 ETM	32.08	125.92
13	2001-12-29	Landsat7 ETM	20.98	640.31	38	2007-11-28	Landsat7 ETM	21.48	833.80
14	2002-07-09	Landsat7 ETM	31.63	85.48	39	2007-12-14	Landsat7 ETM	20.74	828.04
15	2002-10-13	Landsat7 ETM	24.69	732.00	40	2008-02-16	Landsat7 ETM	20.88	859.59
16	2003-05-25	Landsat7 ETM	29.73	193.15	41	2008-03-03	Landsat7 ETM	20.86	918.52
17	2003-07-28	Landsat7 ETM	31.12	101.25	42	2008-10-13	Landsat7 ETM	25.95	458.21
18	2003-10-16	Landsat7 ETM	27.48	349.18	43	2008-11-14	Landsat7 ETM	29.36	170.74
19	2003-11-01	Landsat7 ETM	22.56	743.22	4	2009-08-21	Landat4-5 TM	29.91	319.24
20	2003-12-19	Landsat7 ETM	21.14	825.17	45	2009-09-06	Landat4-5 TM	28.70	344.59
21	2004-06-28	Landsat7 ETM	29.93	241.06	46	2011-02-24	Landsat7 ETM	21.66	882.41
22	2004-10-02	Landsat7 ETM	27.40	343.60	47	2011-07-02	Landsat7 ETM	29.21	201.34
23	2004-12-05	Landsat7 ETM	22.68	738.12	48	2011-08-19	Landsat7 ETM	27.43	442.55
24	2005-01-06	Landsat7 ETM	21.18	839.56	49	2011-11-23	Landsat7 ETM	23.01	846.71
25	2005-04-12	Landsat7 ETM	23.40	893.74					

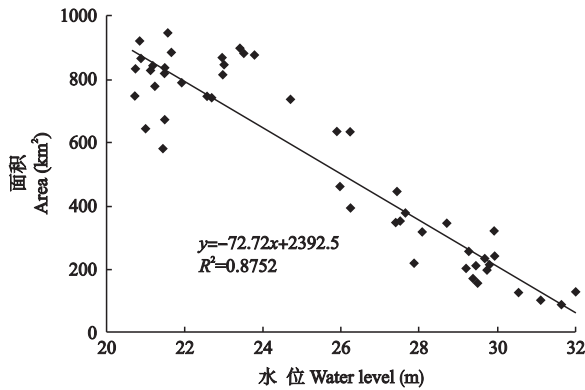


图2 草洲出露面积与水位的关系

Fig. 2 Relationship between area of emergent herbaceous wetlands and water level.

露的最大面积为 945.58 km² (2007 年 4 月 18 日), 最小面积为 85.48 km² (2002 年 7 月 9 日). 当水位小于 22 m 时, 草洲出露面积最大值 (2007 年 11 月 28 日) 和最小值 (1989 年 1 月 28 日) 之间的差距达 386.22 km²; 随着水位的逐渐升高, 相近高程的草洲面积差异值随之逐渐缩小, 当水位大于 28 m 时, 草洲出露面积差值仅 15.77 km². 水位越高, 其对草洲出露面积变化的影响越小; 低水位下, 草洲出露面积更多受其他因素的影响, 如植被的生物学特性、植被生长季节的变化等^[23].

2.2 草洲分布的季节变化

2.2.1 草洲出露面积及对应水位的季节变化

1985—2011 年, 草洲月平均出露面积基本随洞庭湖月平均水位的升高而减少 (图 3), 12 月至次年 4 月, 草洲出露面积最大, 7 月最小. 1—2 月, 水位上升, 草洲出露面积增加, 3—4 月, 随着水位上升, 草洲出露面积相对稳定, 这是因为 2 月中下旬开始, 草

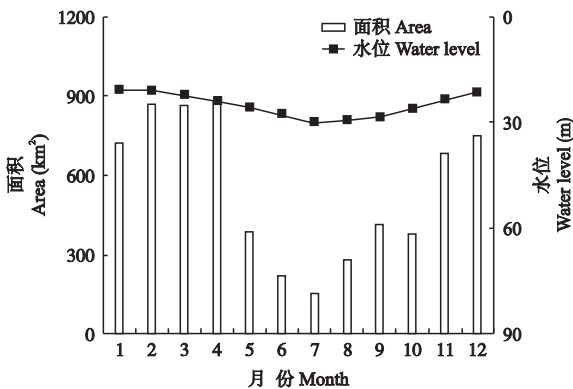


图3 城陵矶月平均水位及洞庭湖草洲平均出露面积的月变化

Fig. 3 Monthly changes of average water level at the Chenglingji hydrological station and the average area of emergent herbaceous wetlands.

甸返青 (本文影像为 2.14 和 2.24), 3—5 月上旬完成营养生长期^[24], 草洲增加的面积与水位上升淹没的面积基本平衡; 4—5 月, 水位上升, 草洲出露面积却迅速减少, 根据姜家虎和黄群^[25] 研究发现, 1998 年洞庭湖高程范围为 24 ~ 25 m 的湿地面积达 802 km², 约占洞庭湖总面积的四分之一, 说明洞庭湖湿地在此高程范围内地势平缓, 4—5 月水位变化对草洲出露面积的影响增强; 此后, 草洲出露面积随水位降低而增加, 10 月水位升高, 草洲出露面积减少. 2006 年 9 月 22 日的极低水位 (23.56 m) 拉低了草洲平均出露面积 (多年平均水位大于 28 m), 根据线性关系所计算的草洲出露面积 (324.03 km²) 更接近实际值. 总之, 1—7 月, 水位上升, 草洲出露面积减少; 7—12 月, 水位下降, 草洲出露面积增加, 地形及植被生长周期对草洲出露面积的影响在 2—5 月尤其显著.

2.2.2 草洲分布区域的季节变化 利用 ArcGIS 中的地图代数模块计算现有影像不同月份东洞庭湖草洲可能的全部覆盖区域 (图 4). 通过分析草洲区域随季节的变化特征发现: 从 5 月开始, 水位逐渐上升, 草洲沿飘尾洲-四、五、六港子-武光洲-柴下洲一线及沿湖岸靠近藕池河方向逐渐萎缩; 草洲出露面积最小时, 仅在藕池河沿岸、柴下洲以南合兴洲西部以及君山东北、上泥滩、七洲有草洲出露; 10 月开始, 水位降低, 洲滩出露, 至次年 4 月草洲大面积出露. 11、12、1 月出露洲滩中泥滩地明显增多, 可以认为, 此时草洲出露面积减少的原因之一是泥滩地 (鹿湖东南部、飘尾洲及君山附近) 的增加所致.

2.3 草洲分布的年际变化

2.3.1 草洲分布区域的总体变化 由图 5 可以看出, 1989—2011 年, 草洲出露面积整体扩张显著, 新增草洲主要由泥滩地转化而来, 在湿地敞水区沿岸或沿湖内洲滩呈近似环状分布, 同时武光洲芦苇场的开发导致草洲区域增加; 东洞庭湖湿地西南部附近, 少部分草洲转化为泥滩地或水域. 根据洞庭湖洲滩演替序列及湿地植被的分布及演替模式^[23, 26], 1989—2011 年, 洞庭湖草洲的增加可由植被的洲滩演替系列得到解释. 高俊峰等^[27] 研究发现, 东洞庭湖的淤积区主要集中在北部, 冲刷区主要集中在东洞庭湖南部, 这与本文所述草洲变化基本一致, 说明泥沙淤积是草洲分布变化的原因之一. 另一方面, 彭佩钦等^[28]、邹邵林等^[29] 认为, 20 世纪 70 年代直至三峡工程建成后 10 年, 东洞庭湖湿地各月水位不断降低, 洲滩出露面积总体上逐渐增加. 因此, 泥沙滩

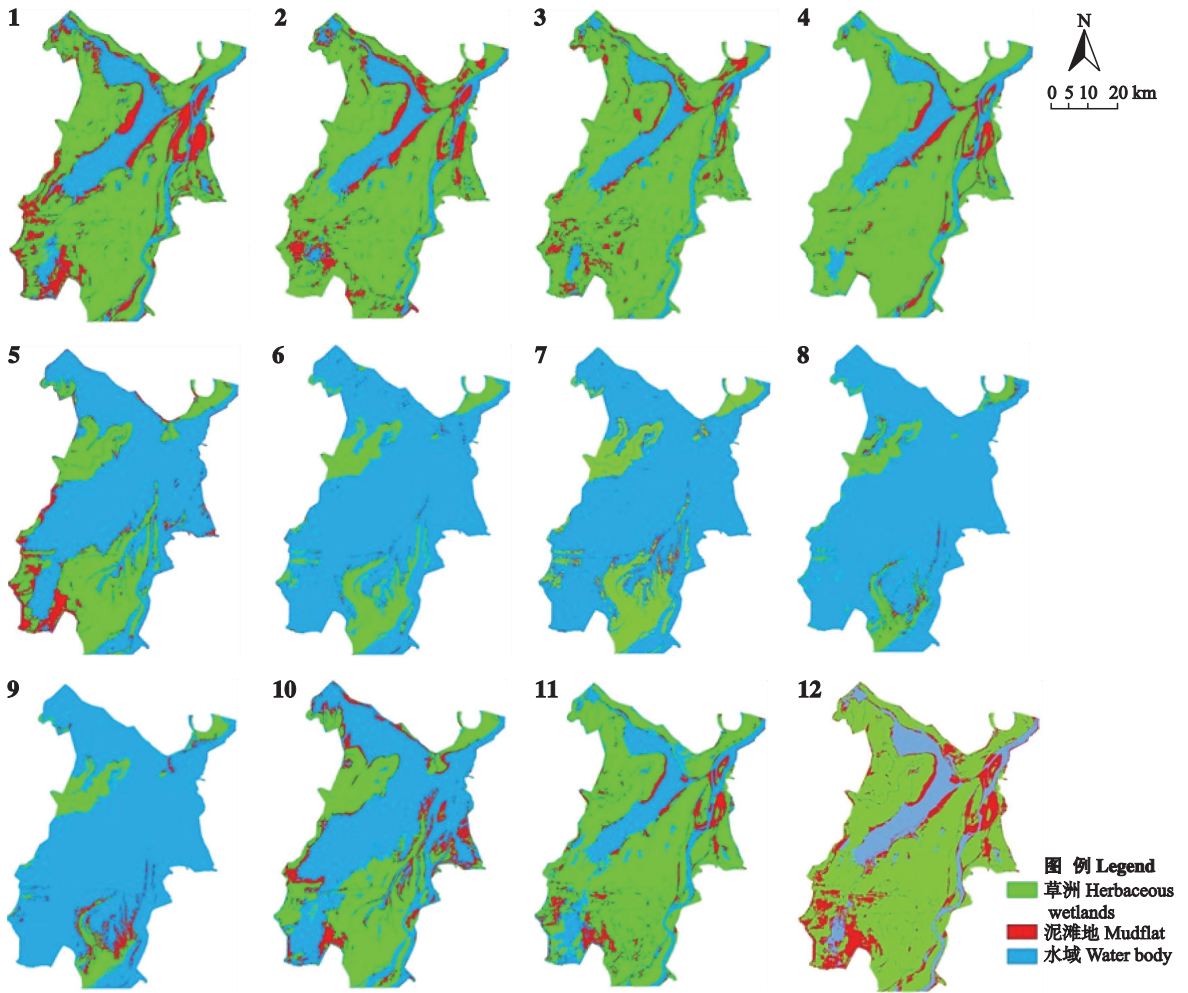


图 4 不同月份出露草洲的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of emergent herbaceous wetlands in different months.

图中数字代表月份 Number in the figure meant month.

地出露时间的增加可能加快了草洲出露面积的扩张.

2.3.2 草洲在不同高程段的面积变化 由于湿地水位的周期性变化规律对草洲分布区域的限制,研究不

同高程上草洲分布情况的变化可更明确地阐述草洲对水文条件变化的响应. 本文将 5 期解译结果与东洞庭湖湿地 DEM 高程模型合并, 计算不同高程段内草洲面积变化特征. 由图6可以看出: 1989—2011 年,

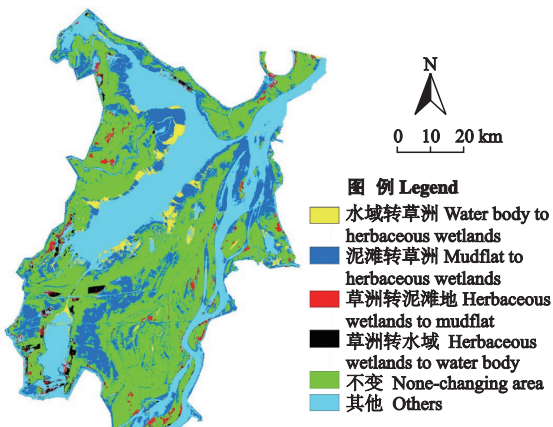


图 5 1989—2011 年草洲的空间变化

Fig.5 Spatial variation of herbaceous wetlands from 1989 to 2011.

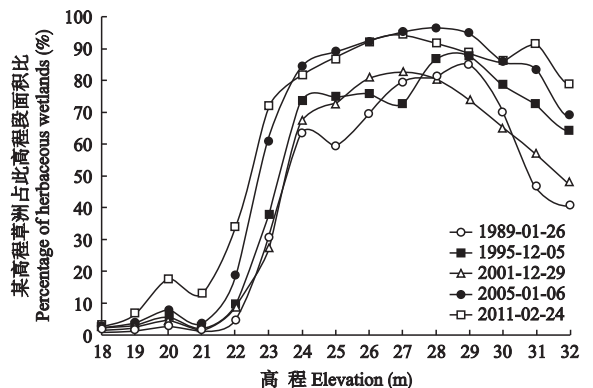


图 6 一定高程段草洲面积占此高程段总面积百分比

Fig.6 Percentage of area of herbaceous wetlands to total wetland area in different elevations.

表 2 不同高程段草洲占草洲总面积比

Table 2 Area of herbaceous wetlands and its percentage in different altitudes

高程 Elevation (m)	1989		1995		2001		2005		2011	
	面积 Area (m ²)	百分比 Percentage	面积 Area (m ²)	百分比 Percentage	面积 Area (m ²)	百分比 Percentage	面积 Area (m ²)	百分比 Percentage	面积 Area (m ²)	百分比 Percentage
20~21	2.77	0.5	3.84	0.6	2.83	0.4	5.74	0.7	17.81	2.0
22~23	63.81	11.1	85.41	12.7	65.85	10.3	142.85	17.0	187.70	21.3
24~25	306.93	53.2	369.28	55.1	349.00	54.5	431.92	51.5	420.17	47.7
26~27	167.97	29.1	172.87	25.8	187.66	29.3	215.31	25.7	214.71	24.4
≥28	35.04	6.1	37.50	5.6	33.59	5.3	41.53	5.0	39.53	4.5
合计 Total	577.09	100	670.32	100	639.88	100	838.79	100	881.55	100

各高程段草洲出露面积总体呈增加趋势. 当高程大于 21 m 时, 草洲在相应高程段所占湿地面积的比例迅速增加, 至 24 m 增速放缓, 高程 24~28 m, 草洲所占比例逐渐稳定, 说明 24 m 以上为东洞庭湖湿地草洲植被的主要分布高程, 这与黄进良^[7]的研究结果相符. 高程 21~23 m, 草洲在湿地相应高程段所占比例迅速增加, 2011 年, 23 m 高程段的草洲面积已从 1989 年的 20% 增至 70% 以上; 高程大于 24 m 时, 2001 年以后, 24~31 m 高程段湿地中草洲比例均大于 80% 且较为稳定, 2001 年之前呈波动变化, 24~29 m 草洲所占比例随高程增加而波动上升, 29 m 以上高程所占比例随高程增加而减小. 2001 年以后, 草洲优势分布高程的边界从 24 m 逐渐向 23 m 转移. 可见, 东洞庭湖草洲增加是各高程段草洲面积共同增加的结果, 较低位洲滩(指黄海高程 20~23 m^[29])草洲面积的快速扩张是东洞庭湖湿地草洲面积增加的主要原因.

草洲面积所占不同高程段湿地面积的比例只能说明在单位面积下草洲的最适宜生长高程, 还需要进一步解释草洲在东洞庭湖湿地的实际分布情况. 通过计算不同高程段草洲占草洲总面积比例(表 2)可以看出, 1989—2011 年, 东洞庭湖湿地草洲面积总体呈不断增加趋势, 总增加面积为 304.46 km². 草洲出露面积分布最高的高程为 24~25 m, 约占草洲出露总面积的一半, 其次为 26~27 m 和 22~23 m. 1989—2011 年, 24 m 高程以上, 草洲面积呈增加趋势, 但单位面积湿地的草洲年增加率减小; 24 m 高程以下, 草洲出露面积呈增加趋势, 同时, 单位面积湿地的草洲年增加率逐渐加大; 22~23 m 和 24~25 m 是草洲出露面积增加最多的高程段, 占总增加面积的 77.9%. 22~23 m 高程段草洲出露面积占总面积的比例从 1989 年的 11.1% 增加到 2011 年的 21.3%, 实际面积增加 123.89 km², 约占草洲总增加

面积的 40.7%. 1998 年湖盆地形研究结果表明, 24~25 m 高程所对应的草洲面积最大, 其次为 22~23 m 高程^[25], 这意味着如果水位在此高程范围发生巨大变化, 将会导致植被格局的巨大变化. 有研究发现, 尽管三峡工程运行后泥沙淤积大幅下降, 甚至达到了泥沙输入输出的平衡, 对湖盆的改造作用有限, 但与 1981—1998 年及 1999—2002 年相比, 三峡工程运行后(2003—2008 年)的水位发生大幅下降, 导致 22 m 高程以上洲滩的出露时间都有不同程度的增加, 以低位洲滩尤为显著^[30]. 也就是说, 水位变化引起的洲滩出露时间增加可能是近年来草洲出露面积持续增加的重要原因^[26,28-30]. 综上, 1989 年后, 低位洲滩草洲出露面积的增加并保持较高的增长速率均说明草洲向较低位洲滩的扩张是草洲分布变化的主要原因.

3 结 论

研究期间, 东洞庭湖草洲出露面积与水位呈极显著的线性关系; 水位对草洲出露面积的影响随高程增加而减小; 低水位时, 明显受植被生长周期影响, 草洲出露面积在植物生长旺期的 4 月达最大值, 尽管此时水位呈小幅上升趋势. 年内, 草洲出露面积随水位变化呈规律性变化: 1—7 月, 水位上升, 草洲面积减少, 7 月达最低值; 7—12 月, 水位下降, 草洲出露面积增加.

1989—2011 年, 草洲整体扩张显著, 新增草洲主要由泥滩地转化而来, 在敞水区沿岸或沿湖内洲滩呈近似环状分布. 分高程段面积变化分析表明, 草洲出露面积分布最高的高程为 24~25 m, 约占草洲总面积的一半; 草洲主要分布高程的边界从 24 m 下移至 23 m; 22~23 m 高程段草洲面积增加最快, 2011 年比 1989 年增加近 2 倍. 东洞庭湖湿地草洲面积的扩张是各高程段草洲出露面积稳步增加及低

位洲滩较低部分草洲加速扩张共同作用的结果,这与三峡工程运行以来 22 m 高程以上洲滩(尤其是低位洲滩)出露时间都有不同程度的增加是一致的。考虑湖盆地形分布特征以及洞庭湖水沙平衡特征的综合影响,可以认为,水位下降和泥沙淤积可能是研究期间东洞庭湖草洲出露面积持续增加的主要原因。

参考文献

- [1] Wang L-Y (王灵艳). Study on Characters of Beach Vegetation and Its Succession in Dongting Lake Area. Master Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2009 (in Chinese)
- [2] Chen S (陈 爽). Landscape pattern changes of wetland in Liaohe on RS and GIS. *Environment Monitoring in China* (中国环境监测), 2011, **27**(3): 4-8 (in Chinese)
- [3] Wu T (吴 涛), Zhao D-Z (赵冬至), Kang J-C (康建成). Research advance on ecological health of delta wetland landscape based on remote sensing technology. *Marine Environmental Science* (海洋环境科学), 2010 (3): 451-456 (in Chinese)
- [4] Munyati C. Wetland change detection on the Kafue Flats, Zambia, by classification of a multi-temporal remote sensing image data set. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, **21**: 1787-1806
- [5] Johnston R, Barson M. Remote sensing of Australian wetlands: An evaluation of Landsat TM data for inventory and classification. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 1993, **44**: 235-252
- [6] Rebelo LM, Finlayson M, Nagabhatla N. Remote sensing and GIS for wetland inventory, mapping and change analysis. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**: 2144-2153
- [7] Huang J-L (黄进良). The area change and succession of Dongtinghu wetland. *Geographical Research* (地理研究), 1999, **18**(3): 297-304 (in Chinese)
- [8] Kent BJ, Mast JN. Wetland change analysis of San Dieguito Lagoon, California, USA: 1928-1994. *Wetlands*, 2005, **93**: 780-787
- [9] Xie D-M (谢冬明), Zheng P (郑 鹏), Deng H-B (邓红兵), et al. Landscape responses to changes in water levels at Poyang Lake wetlands. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(5): 1269-1276 (in Chinese)
- [10] Wang X-L (王宪礼), Hu Y-M (胡远满), Bu R-C (布仁仓). Analysis of wetland landscape changes in Liaohe Delta. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 1996(3): 69-74 (in Chinese)
- [11] Yuan Z-K (袁正科), Li X-Z (李星照), Tian D-L (田大伦), et al. Wetland landscape fragmentation and bio-diversity protection of Dongting Lake. *Journal of Central South University of Forestry & Technology* (中南林业学院学报), 2006(1): 109-116 (in Chinese)
- [12] Bai J-H (白军红), Ouyang H (欧阳华), Cui B-S (崔保山), et al. Changes in landscape pattern of alpine wetlands on the Zoige Plateau in the past four decades. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(5): 2245-2252 (in Chinese)
- [13] Huang LB, Bai JH, Yan DH, et al. Changes of wetland landscape patterns in Dadu River catchment from 1985 to 2000, China. *Frontiers of Earth Sciences*, 2012, **6**: 237-249
- [14] Huang L-B (黄来斌), Bai J-H (白军红), Yan D-H (严登华), et al. Changes of wetland landscape in the Yalong River catchment. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2012, **21**(suppl. 1): 140-147 (in Chinese)
- [15] Wang L-Y (王灵艳), Zheng J-M (郑景明), Luo J-C (罗菊春), et al. Study on succession of wetland vegetation in Dongting Lake area. *Environmental Protection* (环境保护), 2009(8): 47-49 (in Chinese)
- [16] Li X (李 欣), Liu Y-G (刘云国), Wu L-X (吴立勋), et al. Dynamical analysis of landscape of Dongting Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2002, **11**(6): 543-548 (in Chinese)
- [17] Xu Y-B (徐怡波), Lai X-J (赖锡军), Zhou C-G (周春国). Study on remote sensing monitoring of wetland vegetation in East Dongting Lake using ENVISAT ASAR data. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2010, **19**(4): 452-459 (in Chinese)
- [18] Huang Q-Y (黄清云). Study on the Stability of Ecology Service Function for East Dongting Lake. Master Thesis. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007 (in Chinese)
- [19] Xiong J-X (熊建新), Wu N-F (吴南飞). Analysis on spatial structural integrity of wetland landscape in the East Dongting Lake. *Environmental Science and Management* (环境科学与管理), 2008, **33**(4): 30-33 (in Chinese)
- [20] Xiong J-X (熊建新), Chen D-L (陈端吕), Dong M-H (董明辉). Complexity analysis and flood-control strategies of land-lake ecotone in East Dongting Lake Region. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2008(14): 6023-6024 (in Chinese)
- [21] Peng D-C (彭德纯), Yuan Z-K (袁正科), Liao Q-F (廖起风), et al. Vegetation in lakes and bogs of Dongting Lake District. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 1986, **5**(2): 28-32 (in Chinese)
- [22] Yao M (姚 敏), Yuan S-B (袁穗波), Yuan Z-K (袁正科), et al. Study on the ecological characteristics and distribution law of natural vegetation of the wetland of the Dongting Lake. *Hunan Forestry Science & Technology* (湖南林业科技), 2005(5): 33-34 (in Chinese)
- [23] Li X (李 旭), Xie Y-H (谢永宏), Huang J-S (黄继山), et al. Research progresses on the formation mechanism of vegetation distribution pattern in wetlands. *Wetland Science* (湿地科学), 2009, **7**(3):

- 280–288 (in Chinese)
- [24] Li Q (李倩), Zeng G-M (曾光明), Huang G-H (黄国和), *et al.* Effects of Three-Gorge Project on hydraulic gradient and vegetation growth in Dongting Lake wetland. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2005(1): 12–15 (in Chinese)
- [25] Jiang J-H (姜加虎), Huang Q (黄群). Analysis of the lake basin change and the rushing silting features in the past decades of Dongting Lake. *Journal of Lake Sciences* (湖泊科学), 2004, **16**(3): 209–214 (in Chinese)
- [26] Xie Y-H (谢永宏), Chen X-S (陈心胜). Effects of Three-Gorge Project on succession of wetland vegetation in Dongting Lake. *Research of Agricultural Modernization* (农业现代化研究), 2008, **29**(6): 684–687 (in Chinese)
- [27] Gao J-F (高俊峰), Zhang C (张琛), Jiang J-H (姜加虎), *et al.* Changes in sediment deposition and erosion and their spatial distribution in the Dongting Lake. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2001, **56**(3): 269–277 (in Chinese)
- [28] Peng P-Q (彭佩钦), Tong C-L (童成立), Qiu S-J (仇少君). Variations of flooded days and areas of beach wetlands in Dongting Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2007, **16**(5): 685–689 (in Chinese)
- [29] Zou S-L (邹邵林), Liu X-Q (刘晓清), Liu X-P (刘新平), *et al.* The impact of Three-Gorge Project on the length of emergence period of Dongting Lake Beach. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2000, **9**(2): 254–259 (in Chinese)
- [30] Xie Y-H (谢永宏), Huang Q (黄群), Wang X-L (王晓龙). The protection of important lake wetland in the lower reaches of Yangtze River// Yang G-S (杨桂山), Zhu C-Q (朱春全), Jiang Z-G (蒋志刚), eds. *Yangtze Conservation and Development Report 2011*. Wuhan: Changjiang Press, 2011: 144–168 (in Chinese)

作者简介 唐玥,女,1986年生,硕士研究生.主要从事湿地景观研究. E-mail: tangyue-ty@163.com

责任编辑 杨弘
