#### DOI: 10.5846/stxb201710231898

谷娟,秦怡,王鑫,马静宇,郭仲皓,邹乐君,沈晓华.鄱阳湖水体淹没频率变化及其湿地植被的响应.生态学报,2018,38(21): - . Gu J, Qin Y, Wang X, Ma J Y, Guo Z H, Zou L J, Shen X H.Changes in inundation frequency in Poyang Lake and the response of wetland vegetation. Acta Ecologica Sinica,2018,38(21): - .

## 鄱阳湖水体淹没频率变化及其湿地植被的响应

谷 娟,秦 怡,王 鑫,马静宇,郭仲皓,邹乐君,沈晓华\*

浙江大学地球科学学院,杭州 310025

**摘要:**基于地物波谱特征的 MODIS 混合像元分解模型,分析了 2000—2015 年退水期鄱阳湖水体淹没频率的时间变化和空间规 律,并在此基础上探讨了湿地植被的空间响应。研究结果表明:(1)鄱阳湖退水期水体的淹没频率总体呈"南低北高",同时具 有大小不一的"斑块式"空间分布特征;(2)15 年内湖水的淹没频率经历了先急剧缩减然后恢复到相对稳定的状态,并且不同 空间段的变化差异明显:北部河道的淹没频率先急剧降低后回升,中部洲滩不如北部河道段剧烈但大面积的淹没频率下降,南 部子湖泊的淹没频率则基本没变;(3) 植被丰度对淹没频率具有密切的响应关系,两者呈中间高两边低的"n"形分布,当淹没频 率为 40% 时高植被丰度的像元数最多。(4)淹没频率与植被丰度的关系指示着鄱阳湖湿生植被在空间上的积极演变。 关键词:MODIS;混合像元分解;水体淹没频率;鄱阳湖;湿地植被

# Changes in inundation frequency in Poyang Lake and the response of wetland vegetation

GU Juan, QIN Yi, WANG Xin, MA Jingyu, GUO Zhonghao, ZOU Lejun, SHEN Xiaohua\* School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310025, China

Abstract: In lake ecosystems, the timing, duration, and frequency of inundation greatly determines the wetland/aquatic ecological conditions, and influence wetland plant regeneration and species richness. Under increasing impacts from human activities and climate change, a better understanding of how hydrological changes influence wetland vegetation is required. In this study, we analyze the spatial distribution of the inundation frequency and its temporal variation during the period from 2000 to 2015 in Poyang Lake by means of MODIS image interpretations method based on mixed pixel decomposition model derived from the spectrum characteristics of ground features. The relationship between the inundation frequency and the vegetation abundance is further discussed. The main results are as follows: (1) the spatial distribution of inundation frequency in the receding period shows a decreasing trend from north to south on the whole. Areas with high inundation frequency are distributed in patches. (2) The inundation frequency of the whole lake decreased from 2000 to 2010, then recovered to a relative stable state from 2011 to 2015. In different regions of the lake, the temporal changes of inundation frequency in the last 15 years shows different trends. The inundation frequency of the northern river channel and that of the central shoal shows trends similar to that of the whole lake, except that the changes of inundation frequency in the central shoal are gentler. On the other hand, the inundation frequency of the southern sub-lake is basically unchanged. (3) The vegetation abundance closely responds to the inundation frequency of Poyang Lake. The "n" form distribution on the scatter diagram of vegetation abundance versus inundation frequency shows that there were high values in the central part and low values on both sides, and the vegetation abundance reaches a maximum when the inundation frequency equals  $\sim 40\%$ . (4) The relationship between the inundation frequency and the vegetation abundance indicates a positive spatial evolution of emergent aquatic vegetation in Poyang Lake.

基金项目:中国国家科技重大专项(2017ZX05008-001).

收稿日期:2017-10-23; 网络出版日期:2018-00-00

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shenxh@zju.edu.cn

## Key Words: pixels spectral decomposition model; MODIS; inundation frequency; wetland vegetation; Poyang Lake

在湖泊生态系统中,水文特征的变化显著推动着湿地植被的形成和变迁,进而影响鱼类和野生动物栖息 地乃至整个湖泊生态系统的质量<sup>[1-3]</sup>。其中,湖水淹没频率反应了水体淹没时间的长短和次数,被认为是影 响湿地植被生态系统的最重要的一种水文因素<sup>[4]</sup>。因此综合分析湖泊淹没范围内淹没频率的空间分布和时 间变化特征,进而揭示其对湖泊植被分布及演替的影响,对改善湖泊季节性淹没区域资源的养护和管理具有 非常重要的意义。

遥感技术在湖泊生态系统时空变化监测上具有独特的作用。MODIS 数据由于具有高时间分辨率和多光 谱特性,已被广泛运用于湖泊变化监测中。由于水体几乎吸收了近红外和中红外波段的全部能量,而植被、土 壤等对这两个波段的吸收量非常少,目前通过遥感技术提取水体大多都是基于水体的这个特性实现的<sup>[5]</sup>。 常见的 MODIS 水体提取方法主要有单波段阈值法<sup>[6-7]</sup>、水体指数模型<sup>[8-10]</sup>和混合像元分解模型<sup>[11-14]</sup>三种。其 中混合像元分解模型是对 MODIS 中混杂有陆地信息的混合像元进行分解,通过定标获得接近实际覆盖情况 的水体丰度,解析每个像元内水体的所占比例,较前两种经验方法在精确估算水域参数方面更具优势<sup>[15-16]</sup>, 对于河流和湖泊的局部细节以及小型水体的面积提取可以获得更高的精度<sup>[5,17]</sup>,更适用于水陆变化复杂情况 下的湖泊水体提取。

都阳湖作为中国第一大淡水湖,其形态与面积的季节性波动很大,丰水期的水域面积往往可达枯水期面积的四倍以上<sup>[18]</sup>,并且由于受湖底地形地貌特征影响<sup>[19]</sup>,在枯水期都阳湖被分割成了众多的子湖泊,使得枯水期与丰水期的水体表面的空间分布有较大的差异,基于水位数据的水淹过程评价精度相对洪水季节较低<sup>[20-22]</sup>,这个时期水体淹没过程的评价以及给植被带来的影响仍需要进一步研究。近年来很多学者使用遥感数据对鄱阳湖变化进行监测,但他们更注重于对湖区面积的时间序列变化或者影响因素的探讨<sup>[7,23-24]</sup>。刘元波等利用淹没频率分析了鄱阳湖近年来的空间变化和变化速率<sup>[25-26]</sup>,但尚未深入分析淹没频率对湖泊生态带来的影响。基于上述背景,本文以多时相 MODIS 遥感图像数据和混合像元分解模型为基础,分析了退水期鄱阳湖水体淹没频率的时空变化规律,并讨论了淹没频率和植被分布的关系,以期对鄱阳湖的生态环境变化影响以及周边水利工程的建设提供一些科学依据。

## 1 研究区概况与数据来源

## 1.1 研究区概况

都阳湖位于江西省北部(图1),长江中下游南岸,115°47′—116°45′E,28°22′—29°45′N,是一个十分典型 的季节性、过水性和吞吐型浅水湖泊,湖水平均深度为8.4m。鄱阳湖形似葫芦,湖盆主要由河道和洲滩组成, 以都昌和吴城间的松门山为界限,鄱阳湖可分为南北两部分:南部是宽广、较浅的主湖区,北部则为狭长、较深 的人长江河道。鄱阳湖受季风影响,水域面积变化明显,在洪水期时湖水面积可达4000余 km<sup>2</sup>,枯水期时仅 1000 多 km<sup>2</sup>。河道和洲滩在洪水期时均被淹没,退水期则广泛出露,伴有植被、泥滩以及水域等湿地景观类 型。在本研究中,根据混合像元分解模型获取的15年间鄱阳湖9月淹没面积的最大值作为研究区边界。

## 1.2 数据获取和预处理

## MODIS 数据

遥感数据来源于美国航空航天局(NASA)免费提供的 MODIS 数据产品(http://modis.gsfc.nasa.gov), MODIS 数据集包含多个数据产品,本文使用的 MODIS 产品为 1B 级数据 MOD021KM,它含有 36 个离散波段, 最高空间分辨率达 250m,且每天在不同时间过境 4 次。在本研究中利用 ENVI5.1 图像处理软件对图像进行 了辐射定标、大气校正、系统几何校正等预处理工作。考虑到 MODIS 和 Landsat 影像空间分辨率的差异,以 Landsat 影像为基准对 MODIS 影像进行了几何精校正处理,保证了 MODIS 影像 0.1 像元的几何精度。考虑到 MODIS 影像中云对混合像元分解的影响,研究中用波谱面积比值法<sup>[27]</sup>做了去云处理,经上述预处理工作后选





取了 2000 年到 2015 年的 220 期影像。由于 MODIS 数据不同波段的空间分辨率不同,研究中将所用波段全 部重采样为 250m,重采样后按湖区边界进行统一裁剪。

Landsat 数据

Landsat-8 发射于 2013 年,每16 天一景数据,分辨率为 30m,对 LC8 遥感数据进行最大似然法分类,将分 类的结果作为 MODIS 数据定标的参考值。

## 2 方法

## 2.1 水体提取

混合像元分解模型所获取的丰度反应了某一像元内相应地物类型所占的比例,其技术难点在于影像纯端 元的选取,而对于 MODIS 这类低空间分辨率影像数据通常难以获得足够的纯端元用于分解混合像元。郭峰 博士<sup>[14]</sup>在其论文中曾详细介绍了基于地物波谱特征的混合像元分解模型,该模型在进行线性混合像元分解 前,先采用最大似然法对 Landsat ETM+数据进行分类,获得参考丰度,再对 MODIS 影像进行定标,获得水体、 植被和裸地三种丰度,该方法利用相对高分辨率影像分类的结果代替了影像纯端元的选择,提取结果在水陆 交互区更具优势,更符合鄱阳湖区的实际情况。在本文中根据水体丰度在图像像素中累积分布产生的直方 图,确定了水体淹没与否的最佳阈值。对鄱阳湖的北部河道和中部洲滩地区的水体提取结果的检验表明,提 取精度达 97.45%。

## 2.2 淹没频率变化分析

淹没频率是指一个区域在一定时间内被水体淹没的次数占总淹没次数的比例<sup>[26]</sup>,在本文中,通过对水体/非水体二值影像的空间叠加运算,获得影像各像元的淹没频率。

鄱阳湖每年自4月进入雨季,湖水上涨,一般从8—9月开始水位逐渐下降,进入退水期[28],当鄱阳湖水开始

消退时湿地植被开始生长。因此湖水的涨退过程对鄱阳湖洲滩出露分布影响最显著的时段为8—11月<sup>[29]</sup>,并且 由于16周是包含植被生长节律的很大一部分而又能使植物种间竞争效应最小化的一个时间周期<sup>[4]</sup>,因此我们 选择8—11月(退水期)水体进行淹没频率分析。同时,根据鄱阳湖水面面积的变化过程和特征,以及三峡工程 建成蓄水的时间节点<sup>[30]</sup>,将2000至2015年期间鄱阳湖的水面变化分为3个时间段:2000—2005年、2006—2010 年和2011—2015年,对每个时间段分别计算8—11月的淹没频率,来分析湖区的演化特征。

2.3 淹没频率与植被分布响应

水文过程制约着湿地的生物、物理和化学过程,是 湿地植物群落形成和演变最重要的驱动因素<sup>[31]</sup>,每年 的 10 月下旬到 11 月上旬鄱阳湖洲滩湿地植被生长状 况达到最好。植被生物量可用植被分布面积和总生物 量来表示,在本研究中用混合像元分解模型获取的植被 丰度来表示像元内植被覆盖面积占比。考虑到湿地植 被的生长除了受到水体淹没的影响还受自身季节生长 节律的控制<sup>[28]</sup>,这里以 8—11 月的淹没频率代表鄱阳 湖在退水期间的淹没过程差异、选取 11 月植被丰度的 最大值代表 11 月植被生长所能达到的最旺盛状态的区 域分布,通过分析两者之间的关系来评估退水期水淹过 程对湿地植被生长的影响。

考虑到 MODIS 数据的分辨率,把整个研究区划分为 69319 个 250m×250m 的网格,按网格将淹没频率信息和植被丰度信息对应起来,通过绘制淹没频率和植被 丰度的二维散点图分析植被对淹没频率的响应关系。

数据处理流程图如图2所示:

## 3 结果与讨论

- 3.1 淹没频率变化分析
- 3.1.1 淹没频率时间变化分析

图 3 表示了 3 个时期鄱阳湖的淹没频率空间分布变化,其中蓝色越深代表着淹没频率越高,红色越深则





Fig.3 Inundation frequency of Poyang Lake during receding period from 2000 to 2015



Fig.2 The flowchart of data processing

代表着淹没频率越低。整体上从 2000—2005 年到 2006—2010 年鄱阳湖的平均淹没频率由 57.07%降到了 40.07%,然后在 2011—2015 年平均淹没频率小幅度回 升到 46.34%。从淹没频率的空间变化以看出不同的区域的淹没频率变化程度不同:北部河道段从 2000—2005 年到 2006—2010 年的过程中淹没频率明显下降,低淹没频率区显著增加,但 2011—2015 年淹没频率又 回升到较高的水平;中部洲滩段在 2000 年到 2010 年淹 没频率下降明显,2011 年到 2015 年则变化不大,15 年 间的变化程度不如北部河道段,但由于洲滩地势通常较低平坦,变化的区域更加广泛;南部的子湖泊在 2000 年 到 2015 年的淹没频率则基本无变化。

统计不同淹没频率下像元的个数,计算出不同淹没 频率的面积及其比例(表1),总体而言鄱阳湖的低淹没 频率区(淹没频率<20%)淹没面积持续增加,面积占比 由18.21%上升到22.34%再到22.56%,但增加的速度由 快变缓。中等淹没频率区(20%<淹没频率<60%)则经 历了面积先增大后减少的趋势,其中淹没频率为 20%—40%的面积最终由914.19km<sup>2</sup>降到882.53km<sup>2</sup>,而





淹没频率为40%—60%的区域面积由636.29km<sup>2</sup>升到731.83km<sup>2</sup>。高淹没频率区(淹没频率>60%)的面积变化趋势则与中等淹没频率区相反,淹没频率为60%—80%的面积占比先降低后回升,最终从16.5%略有上升到17.02%,而常年水域区(淹没频率>80%)面积虽然是先降低后回升,但15年间的面积还是由1273.05km<sup>2</sup>大幅降到了998.15km<sup>2</sup>。

淹没频率 Inundation frequency	2000—2005 年		2006—2010 年		2011—2015 年	
	面积/km <sup>2</sup> Area	比例/% Ratio	面积/km <sup>2</sup> Area	比例/% Ratio	面积/km <sup>2</sup> Area	比例/% Ratio
0—20%	787.31	18.21	966.20	22.34	975.63	22.56
20%—40%	914.19	21.14	1281.19	29.63	882.53	20.41
40%—60%	636.29	14.71	1010.76	23.37	731.83	16.92
60%—80%	713.46	16.50	471.20	10.90	736.16	17.02
80%—100%	1273.05	29.44	594.95	13.76	998.15	23.08

表 1 淹没频率变化统计表 Table 1 Statistics of the inundation frequency

淹没频率的普遍降低预示着湖泊向陆地的转变,低淹没区域的增加、高淹没区域的减少,退水期鄱阳湖的 变化既反应了近些年的气候异常,更是反应了人类活动的影响。自2003年三峡工程调节蓄水以来,长江干流 入鄱阳的水量大大减少;近年来鄱阳湖周边建立了许多人工灌溉渠道和水库,用于防洪、灌溉和供水方面;再 加上不同区域的采砂活动导致的地势差别进一步扩大,这些因素都可能是造成鄱阳湖不同区域的湖水面积衰 退不等的原因。淹没频率的变化会诱发一系列的生态环境问题:低淹没频率区域的持续增加会对越冬鸟类造 成不利的影响;洲滩显露时间的延长也会影响到湿地植被的种类数量和生长状况;高淹没频率区域的变化则 使得湿地植被呈现正向演化趋势。

## 3.1.2 淹没频率空间格局分析

图 4 显示了 2000—2015 年鄱阳湖退水期间水体的淹没频率分布,从整体淹没频率的空间分布来看,鄱阳

湖的淹没频率总体上呈"北高南低"的分布格局,这种空间分布差异是鄱阳湖发展演变的结果,也是地貌特征 的反映。鄱阳湖北部河道地区的淹没频率为60%—90%,中部因退水期间洲滩广泛出露、植被生长而淹没频 率相对较低。鄱阳湖边缘的自然小湖泊群,在丰水期时水体会越过堤坝连成一片水域,在枯水期时则因天然 堤坝与湖泊主体隔离而成为独立封闭的小湖泊<sup>[20]</sup>。在图4中表现为中部洲滩区域的淹没频率从子湖湖心往 四周逐渐降低,呈"岛屿式分布"。距离各子湖泊湖心越远,对应的高程逐渐增加,水体被淹没的频率相应下 降,在图4呈现出似伴随着大小不均的斑块式空间分布特征。此外,鄱阳湖南部一些水体区域(如军山湖、青 岚湖和金溪湖)接近永久淹没,比北部河道的淹没频率空间分布更加稳定,这是因为这些湖泊均属人为湖泊, 因此在退水期时期,它们的面积往往与季节变化关系不大。

从鄱阳湖淹没频率的空间分布格局和时间变化,可以清晰的分辨鄱阳湖湖内不同地区被水淹没的空间差 异以及变化的趋势。淹没频率的差异性分布也显示出了湖区不同地段蓄水量和湖底特征的差异,低淹没频率 区主要分布在鄱阳湖的湖岸线、松门山等高地势区域以及五河入湖河道,一半以上鄱阳湖面积淹没频率低于 60%。研究这些不同淹没频率区域的植被生长情况,探究淹没频率的变化是促进了湿地植被的发育还是导致 湿地植被丰富度的下降,有利于洲滩植被的发展和植被多样性的保护。

3.2 植被对淹没频率的响应

图 5 展示了 2000—2015 年期间平均的 11 月植被 丰度的最大值分布,和图 4 对比,植被丰度的空间形态 和淹没频率的空间形态具有较高的相似性。淹没频率 >80%的区域的植被丰度普遍偏低,平均丰度值在 27.66 以下,其中,军山湖和青岚湖的平均丰度值更是低至 11. 12,这些区域常年被水淹没,是湖泊中心区。在北部河 道段,受科里奥利力的影响,来自长江干流的泥沙淤积 在左侧,凹岸三角洲的植被丰度较高。鄱阳湖中部的低 淹没频率区(淹没频率<20%)植被丰度较高,但植被丰 度也不是和淹没频率完全呈负相关关系;中部洲滩处越 靠近岸边的湖水淹没频率就越低,植被丰度最高值的区 域却并不是分布于最靠近岸边的区域。为了更好的探 究植被与淹没频率在空间分布的联系,我们分析了植被 丰度和淹没频率的二维散点图以及两者的空间响应关 系,来探讨淹没频率对植被覆盖的影响。

图 6 为淹没频率和植被丰度的二维散点图,其中的 背景颜色代表的是相应淹没频率和植被丰度在图像中 的像素数目,红色越深代表相应的像素数目越多。图 6





中,淹没频率和植被丰度的散点图呈中间高两边低的"n"形分布:当淹没频率达 60%—70%时,植被丰度急剧 下降,意味着水体的高频淹没使植被的生长受到限制,只有部分沉水植被生长,当淹没频率>80%时,植被丰度 处于一个较低的水平。在低淹没区域,以淹没频率 20%为界,植被丰度也出现了明显的界限:当淹没频率< 20%时,植被丰度处于中等偏低水平。这主要是两个原因造成的,一方面是因为淹没频率偏低的区域多为地 势较高的滩涂裸地,不利于植被的生长;另一方面是因为最靠近岸边的湿地树林在 11 月时已经到了落叶季 节,因此植被的生长程度没有随着退水期冒出来的湿地植被群落旺盛。当淹没频率为 20%—70%时,植被丰 度整体处于一个较高的水平,意味着此区间的淹没频率有利于退水期植被的生长。并且,当淹没频率为 40% 左右时到达二维散点图"n"形的顶点,即以 16 周为植被生长周期,退水期植被最旺盛的区域位于淹没频率为 40%左右。

38 卷

为了更清楚反应植被丰度对淹没频率的响应,根据 两者的二维散点图选择四个区域进一步分析其空间特 征,分别是淹没频率0%—20%与植被丰度0—50(图7 选区1)、淹没频率20%—70%与植被丰度40—70(图7 选区 2)、淹没频率 20%—70% 与植被丰度 70—100(图 7选区3)、淹没频率70%—100%与植被丰度0—30(图 7选区4)。四个选区的空间特征分别指示着不同的植 被类型。选区1主要分布于鄱阳湖的湖岸带附近,淹没 频率和植被丰度均偏低。从前人资料可知鄱阳湖湖岸 带的绿地景观和水体景观从 1990—2010 年在逐步萎 缩,转变为建设用地和裸地<sup>[32]</sup>,选区1的空间分布有效 的支持了这一理论,并且从图 7 中可看出,北部河道的 两侧具有明显的差异。选区2主要分布于堤坝和蝶形 坑群的较高平原上,在南矶山湿地的南部尤其广泛。这 些区域主要分布着以芦苇群落为代表的半挺水植 被<sup>[2]</sup>。选区3主要分布于鄱阳湖的湿地以及湿地底部 边缘的水域,面积占研究区域的19.92%。主要分布着 以薹草群落为代表的湿生植被[20]。选区4为高淹没频 率低植被丰度覆盖的常年淹没水体,但选区4排除了蝶 形湖中蚌湖、大湖池、大汊湖和白沙湖等区域。这些区 域受到了轻度到中度的富营养,水质较差,主要是因赣 江和饶河输入的工业废水、生活污水影响所致<sup>[33]</sup>。

从散点图选取不同的感兴趣区域,将其与已知植被 类型对应起来,可以运用到 MODIS 数据识别不同的植 被类型中。也可以通过统计不同年限间的植被中感兴 趣区域所累积的背景像素数目的多少,而达到评判不同 年限间的湿地植被生长情况好坏的目的:当选定区间的 植被丰度的像素数目总和较高,则代表着当年的植被生 长状况良好,而植被生长状态不好的年份散点图中的像 素总和较低。

将图 7 和图 3 对应起来,反映出水情变动导致的湿 地植被的变化:选区 3 所代表的湿生植被在 15 年间的 面积由 343km<sup>2</sup>上升到 736km<sup>2</sup>,增加了两倍以上,其变 化率远大于相应淹没频率段的变化率。这说明了低淹 没频率区域的增加,很大的促进了湿生植被的生长。从 图 7 选区 3 看出,退水期间薹草群落的分布最为广泛, 成为鄱阳湖的优势物种。通过图 7 选区 2 结合前人资 料<sup>[2]</sup>知,芦苇群落所代表的植被数量在 2000—2010 年 下降了一半以上,南矶山湿地南边水陆交界处以芦苇为 代表的群落明显向下扩展,而底部滩地的薹草群落则迁





**Fig.6 Inundation frequency versus vegetation abundance diagram** 背景色为交点处的像素数目,红色越深代表该处像素数目越多



图 7 植被丰度对淹没频率的响应空间分布

Fig.7 Distribution of response of vegetation abundance to inundation frequency

IF:淹没频率 inundation frequency; VA: 植被丰度 vegetation abundance

入浅水区。这些结果表明:在干旱趋势条件下地势较高的半挺水植被(如:芦苇、荻等)的生物量或密度下降;

相对应的,由于底部湿生植被(如薹草属和虉属)发生了积极的植被演替,呈明显上升的趋势。

## 4 结论

本文利用 MODIS 混合像元分解技术获取鄱阳湖水体分布信息,分析了 2000—2015 年的鄱阳湖退水期的 湖水淹没频率时空变化,并讨论了淹没频率对植被丰度的响应分布,得到了以下结论:

(1)淹没频率的空间分布较好的反映了鄱阳湖在退水期湖水淹没过程的空间差异,其空间格局同高程相关,反映了不同水域被淹没的概率性高低。淹没频率的时间变化则反映出15年间鄱阳湖退水期的空间淹没范围经历了先急剧下降后回升但总体呈下降的趋势。

(2)通过将淹没频率的空间变化规律和植被丰度的空间分布规律对应起来,在淹没频率过高(>70%)或 者过低(<20%)的区域植被分布普遍偏低,植被与淹没频率呈中间高两边低的"n"形分布关系,当淹没频率为 40%时最适宜湿地植被的生长。当鄱阳湖的淹没频率普遍降低时,鄱阳湖的湿生植被呈向下扩展的积极演变 趋势。

研究认为,这项研究采用的方法在时空尺度上分析了植被覆盖面积与水体淹没过程之间的联系,所得研究结果有助于我们认识鄱阳湖在退水期的水淹过程与植被生长变化的规律,既可以作为分析鄱阳湖水淹变化 对植被分布的空间基础,也可以进一步研究植被丰度和淹没频率的关系而运用到对湿地植被类型的划分及其 长势优劣的评判,从而为鄱阳湖的资源管理以及环境变化检测提供依据。

#### 参考文献(References):

- [1] Allen Y. Landscape scale assessment of floodplain inundation frequency using Landsat Imagery. River Research and Applications, 2016, 32(7): 1609-1620.
- [2] Tan Z Q, Zhang Q, Li M F, Li Y L, Xu X L, Jiang J H. A study of the relationship between wetland vegetation communities and water regimes using a combined remote sensing and hydraulic modeling approach. Hydrology Research, 2016, 47(S1): 278-292.
- [3] Dai X, Wan R R, Yang G S, Wang X L, Xu L G. Responses of wetland vegetation in Poyang Lake, China to water-level fluctuations. Hydrobiologia, 2016, 773(1): 35-47.
- [4] Casanova M T, Brock M A. How do depth, duration and frequency of flooding influence the establishment of wetland plant communities? Plant Ecology, 2000, 147(2): 237-250.
- [5] 简兴, 张振国, 邱银国, 张伟. 基于 MODIS 数据的水体提取研究进展. 廊坊师范学院学报: 自然科学版, 2014, 14(1): 5-10.
- [6] Barton I J, Bathols J M. Monitoring floods with AVHRR. Remote Sensing of Environment, 1989, 30(1): 89-94.
- [7] Wang J D, Sheng Y W, Tong T S D. Monitoring decadal lake dynamics across the Yangtze Basin downstream of Three Gorges Dam. Remote Sensing of Environment, 2014, 152: 251-269.
- [8] McFeeters S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [9] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [10] Wu G P, Liu Y B. Downscaling surface water inundation from coarse data to fine-scale resolution: methodology and accuracy assessment. Remote Sensing, 2015, 7(12): 15989-16003.
- [11] 许菡. 遥感影像混合像元分解新方法及应用研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2013: 130-130.
- [12] Iordache M D, Bioucas-Dias J M, Plaza A. Sparse unmixing of hyperspectral data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(6): 2014-2039.
- [13] Keshava N, Mustard J F. Spectral unmixing. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(1): 44-57.
- [14] 郭峰. 基于 Bernstein 基函数的遥感影像混合像元分解研究[D]. 杭州:浙江大学, 2015: 124-124.
- [15] 王海波,马明国.基于遥感的湖泊水域动态变化监测研究进展.遥感技术与应用, 2009, 24(5):674-684. 2009, 24(5): 674-684.
- [16] 张雪红. 基于知识与规则的红树林遥感信息提取. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2011, 3(4): 341-345.
- [17] 刘晨洲,施建成,高帅,陈亮.基于改进混合像元方法的 MODIS 影像水体提取研究.遥感信息, 2010, 25(1): 84-88.
- [18] Feng L, Han X X, Hu C M, Chen X L. Four decades of wetland changes of the largest freshwater lake in China: Possible linkage to the Three Gorges Dam? Remote Sensing of Environment, 2016, 176: 43-55.

- [19] Cai X B, Ji W. Wetland hydrologic application of satellite altimetry-a case study in the Poyang Lake watershed. Progress in Natural Science, 2009, 19(12): 1781-1787.
- [20] Tan Z, Jiang J. Spatial-temporal dynamics of wetland vegetation related to water level fluctuations in Poyang Lake, China. Water, 2016, 8 (9): 397.
- [21] 蔡晓斌,陈晓玲,王学雷,甘文霞.鄱阳湖水位空间差异及其对湿地水文分析的影响.华中师范大学学报:自然科学版,2011,45(1): 139-144.
- [22] 游海林,徐力刚,刘桂林,吴永明,刘丽贞,姜加虎.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.
- [23] Feng L, Hu C M, Chen X L, Cai X B, Tian L Q, Gan W X. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010. Remote Sensing of Environment, 2012, 121: 80-92.
- [24] Sun Y Y, Huang S F, Li J R, Li X T, Ma J W, Li S Y, Wang H. Dynamic monitoring of Poyang Lake water body area using MODIS images between 2000 and 2014//Proceedings of SPIE 9808, International Conference on Intelligent Earth Observing and Applications 2015. Bellingham: SPIE, 2015.
- [25] Wu G P, Liu Y B. Mapping dynamics of inundation patterns of two largest river-connected lakes in China: a comparative study. Remote Sensing, 2016, 8(7): 560.
- [26] Wu G P, Liu Y B. Capturing variations in inundation with satellite remote sensing in a morphologically complex, large lake. Journal of Hydrology, 2015, 523: 14-23.
- [27] Guo F, Shen X H, Zou L J, Ren Y P, Qin Y, Wang X, Wu J W. Cloud detection method based on spectral area ratios in MODIS data. Canadian Journal of Remote Sensing, 2015, 41(6): 561-576.
- [28] 叶春,赵晓松,吴桂平,王晓龙,刘元波.鄱阳湖自然保护区植被生物量时空变化及水位影响.湖泊科学,2013,25(5):707-714.2013,25(5):707-714.2013,25(5):707-714.
- [29] 李梦凡, 张奇, 李云良, 姚静. 长江对鄱阳湖退水期洲滩出露特征的影响. 热带地理, 2016, 36(4): 700-709.
- [30] Deng F, Wang X L, Cai X B, Li E H, Jiang L Z, Li H, Yan R R. Analysis of the relationship between inundation frequency and wetland vegetation in Dongting Lake using remote sensing data. Ecohydrology, 2014, 7(2); 717-726.
- [31] 杨娇, 厉恩华, 蔡晓斌, 王智, 王学雷. 湿地植物对水位变化的响应研究进展. 湿地科学, 2014, 12(6): 807-813.
- [32] 谢冬明, 金国花. 鄱阳湖湖岸带景观变化. 生态学报, 2016, 36(17): 5548-5555.
- [33] Liu X, Xu M W, Zhao Z, Jiang Y, Cai Y J, Tang X L. Changes in water quality indexes such as nitrogen and phosphorus in butterfly waters of poyang lake and preliminary assessment of pollution status. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(8): 1189-1198.