



•研究报告•

基于MODIS EVI时间序列的鄱阳湖湿地植被覆盖和生产力的动态变化

史林鹭¹ 贾亦飞¹ 左奥杰¹ 马童慧¹ 雷佳琳¹ 雷光春^{1*} 文 力^{2*}¹ (北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083)² (澳大利亚新南威尔士州环境与遗产办公室, 悉尼 2141)

摘要: 鄱阳湖是我国最大的淡水湖, 是与长江保持自由连通的两个湖泊之一, 也是最为重要的候鸟越冬地之一, 其生境质量对全球的生物多样性保护至关重要。枯水期的鄱阳湖由众多子湖构成, 不同子湖具有不同的水文控制与管理模式, 尤其是位于长江上游的三峡大坝2006年正式运行之后, 不同水文控制模式下的子湖展现出不同的退水机制, 对退水期洲滩出露的时间与湿生植被覆盖和生产力产生了不同的影响。近年来, 遥感和生态模型在研究植被变化中应用广泛。本文以MODIS增强植被指数(enhanced vegetation index, EVI)时间序列表示地表属性, 并利用EVI时间序列模型, 建立了2000–2014年植被覆盖和生产力的时空变化趋势。在研究区内建立的网格中, 随机提取了107个斑块, 采集其每16天间隔的MODIS EVI时间序列(2000年2月至2015年4月), 将自适应Savitzky-Golay平滑算法应用于EVI时间序列分析, 提取了4个关键的植被生长指标, 即生长季开始的日期、生长季长度、生长季EVI峰值和生产力。研究结果表明: (1)具有不同水文控制模式下的湿地植被生长特征表现出显著的差异, 尤其位于自由连通子湖的植被与其他模式的子湖相比: 生长季开始的时间更晚, 生长季较短, EVI峰值较低, 并且生长季节的初级生产力较低; (2)由于水文情势的改变, 自由连通子湖2006年前后的双生长周期湿地植被的生长特征差异明显, 秋季生长季提前, 导致了生物量的过度积累, 降低了越冬雁类食源的适口性; 但位于局部水文控制子湖的湿地植被不存在这种差异。 (3)自由连通与局部水文控制的子湖对鄱阳湖越冬候鸟的保护均具有十分重要的意义, 需要保证这两种类型子湖的面积, 为越冬候鸟提供更广阔的食源; 当水文情势发生改变时, 局部的水文人为控制可在一定程度上减缓鄱阳湖水情变化对湿地植被生长带来的影响。

关键词: 长时间序列; 遥感监测; 植被变化分析; TIMESAT; 水文波动; 洪泛湿地

Dynamic change of vegetation cover and productivity of Poyang Lake wetland based on MODIS EVI time series

Linlu Shi¹, Yifei Jia¹, Aojie Zuo¹, Tonghui Ma¹, Jialin Lei¹, Guangchun Lei^{1*}, Li Wen^{2*}¹ School of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China² Science Division, Office of Environment and Heritage, Sydney, 2141, Australia

Abstract: Poyang Lake, the largest freshwater lake in China, is one of two lakes that maintain a natural hydrological link with the Yangtze River. The lake system is critical for biodiversity conservation globally, harboring large number of migratory waterbirds. During the dry season, Poyang Lake fragments in to numerous sub-lakes, and different sub-lakes have different hydrological control and management mode. However, the recent hydrological alternation, presumably caused by the operation of Three Gorge Dam (TGD), is threatening the ecological integrity of the lake system, especially as a wintering ground for waterbirds. A robust investigation of the effects of TGD on vegetation cover and productivity at this critical biodiversity hotspot is therefore timely, and could incorporate recent advances in remote sensing and ecological modelling. In this study, using MODIS EVI (enhanced vegetation index) time series, we investigated the spatiotemporal patterns of growth in the lake for the period of 2000–2014, which includes periods before (2000–2006) and

收稿日期: 2018-03-29; 接受日期: 2018-08-24

基金项目: 国家重点研发项目(2017YFC0405303)和国家自然科学基金(41471072)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: guangchun8099@gmail.com; Li.Wen@environment.nsw.gov.au

after (2007–2014) TGD was commissioned. Firstly, we extracted 107 16-day MODIS EVI time series (February 2000 to April 2015) for 10 randomly placed transects across the lake. We then applied the adaptive Savitzky-Golay smoothing algorithm to the EVI time series, and extracted four key growth metrics, namely, the starting date of growth season, growth season length, seasonal peak EVI, and productivity index. We found significant associations between the hydrological alternation and changes in vegetation seasonality. First, we found that the vegetation growth characteristics of wetlands under different hydrological control modes showed significant differences. In particular, the vegetation located in the freely connected sub-lakes had a later start of growing season, shorter growing season, lower peak EVI value, and lower primary productivity compared to sub-lakes of other modes. Second, due to the hydrological alteration, growth characteristics of sites in freely connected sub-lakes displayed two cycles per year and differed significantly before and after 2006. The advance of the autumn growing season led to excessive accumulation of biomass, which reduced the palatability of the food of migratory geese. However, this difference does not exist in the sites located in the local controlled sub-lake. Third, free connected and local controlled sub-lakes are both important for the protection of migratory birds of Poyang Lake. It is necessary to protect areas harboring both types of sub-lakes to provide a wider food source for wintering migratory birds. Local hydrology control can, to some extent, slow down the impact of much larger scale hydrological alteration on wetland vegetation growth.

Key words: time series data; remote sensing monitoring; vegetation dynamic changes; TIMESAT; hydrological alternation; floodplain lakes

洪泛湿地生态系统是地球上最具多样化以及动态性的生态系统,同时也是最受威胁的生态系统之一(Naiman et al, 1993; Dudgeon et al, 2006)。其中,围垦、建造水利设施(闸、坝)与河流改造引起的水文变化(Waal et al, 1995; Zong & Chen, 2000)影响了植被群落的生长(Barnes, 1997; Jamieson & Braatne, 2001; Egger et al, 2012),对全球河漫滩湿地生态系统的健康造成了不同程度的威胁(Rosenberg et al, 2000)。大坝的运行会使河流的水位波动幅度降低(Wen et al, 2011),导致河岸带受洪水扰动较少,河漫滩湿生植被更易受到陆生植被的侵入,降低湿地植被的物种多样性(Magilligan et al, 2003)。为预测水文状况改变后的植被生长及群落变化,多种生态模型被广泛应用在环境和水文变化影响下的植物动态研究中(Auble, 1994; Mahoney & Rood, 1998; Baptist et al, 2004)。

近年来,随着遥感技术的发展,研究者可以对地表植被进行大尺度、长时期、实时动态监测,这为定量地研究湿地植被的时空变化提供了可能(Shekede et al, 2008; Fu & Burgher, 2015)。其中,中等分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)遥感数据由于具有较高的时间分辨率,其归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)在植被动态监测中

得到了广泛的应用(李加林, 2006; Zhao et al, 2009; Sims et al, 2015)。如,叶春等(2013)利用2001–2010年的MODIS EVI数据分析了近十年来鄱阳湖退水期水文变化的背景下湿地植被生长的变化过程,结果表明EVI与植被生长变化具有较好的拟合度,洲滩每提前出露10天, EVI均值升高0.02。EVI与植物的光合作用也密切相关(Huete et al, 2002),高的EVI代表着高的光合作用积累,因此EVI能够代表植物的鲜绿程度(Tucker & Sellers, 1986)。而在长江中下游平原,湿地草洲优势植物物种为了适应季节性的干湿交替动态,具有狭窄的生长窗和较短的生活史周期(袁正科, 2008; 吴建东等, 2010),所以EVI响应曲线能够非常合理地反映季节性草洲的生长趋势(Guan et al, 2014)。与传统植被调查方法相比,长时序植被遥感监测具有周期短、覆盖范围广、不受地理条件限制、成本低和信息量大等特点,尤其是其数据序列的一致性好,使得其成为这一研究领域的核心方法(Cai & Yu, 2009)。

位于长江中游地区的鄱阳湖是中国最大的淡水湖泊湿地生态系统,夏季为丰水期,湖面连为一体,冬季为枯水期,众多子湖显露。近年来由于气候变化和人类活动的双重影响,鄱阳湖水位呈显著下降趋势,湿地生态系统正经历快速演变过程(Fang et al, 2012; Guo et al, 2012; Zhao et al, 2013)。特别是长江上游的三峡大坝2006年正式运行以来,

鄱阳湖水位下降趋势更为明显(Feng et al, 2013)。越来越多的研究者针对鄱阳湖水情变动所导致的湖区植被动态变化问题进行了探讨(周霞等, 2009; 雷声等, 2011; 张方方等, 2011), 但由于缺乏长期连续的监测数据以及样地可达性的限制, 尚未开展不同水文管理模式下的湿地植被动态的量化分析。本文利用TIMESAT模型从EVI建立的生长曲线中提取生长指标, 分析2000–2014年不同水文控制下鄱阳湖的植被覆盖和生产力变化趋势, 以期为鄱阳湖生态系统水情管理提供科学依据。

1 研究区域概况

鄱阳湖位于长江中游南岸、江西省北部, 承纳赣江、抚河、信江、饶河和修水五大水系及博阳河等支流来水, 由湖口注入长江, 是一个典型的吞吐型湖泊(图1)。每年4–9月为汛期, 湖水水位上涨, 湖面连成一片; 10月至翌年3月为枯水期, 水位逐渐下降, 洲滩湿地植被开始萌芽生长, 多个子湖出露。植物群落沿湖滩地势、水深呈现出明显环带状分布, 是典型的过水性、吞吐性、季节性湖泊湿地, 孕育了丰富的生物多样性, 已列入《湿地公约》国际重要湿地名录。同时, 鄱阳湖是东亚–澳大利西亚迁徙

路线上重要的一处水鸟越冬地, 也是我国长江中下游地区乃至东亚地区最大和最重要的候鸟越冬地。至少有14种濒危水鸟在此越冬, 且在此越冬的水鸟中有27个以上物种的种群数量超过其全球种群数量的1%, 其中, 极危物种白鹤(*Leucogeranus leucogeranus*)在此越冬的数量达到其全球种群数量的98%以上(Ji et al, 2007; 贾亦飞, 2013)。

本文以夏季鄱阳湖最高水位时的淹没范围为界, 在湖区确定了3,124 km²的研究区域(图1)。

2 研究方法

2.1 样点选择

冬季, 鄱阳湖是一个由多个子湖组成的大型通江湖泊, 不同子湖存在着不同的控制模式。本文利用ArcGIS网格分割工具将研究区域分割为107个8 km × 8 km的网格区域并提取中心点作为样点(图2)。根据水文控制模式的不同, 基于高精度的数字高程模型(digital elevation model, DEM)和实地调查, 将这些样点分为4种类型: 陆地(C0), 隔离子湖(C1), 水文局部控制子湖(C2)和水文自由连通子湖(C3)(图3), 其中C3受大湖水文波动的影响程度最大, C0没有影响。

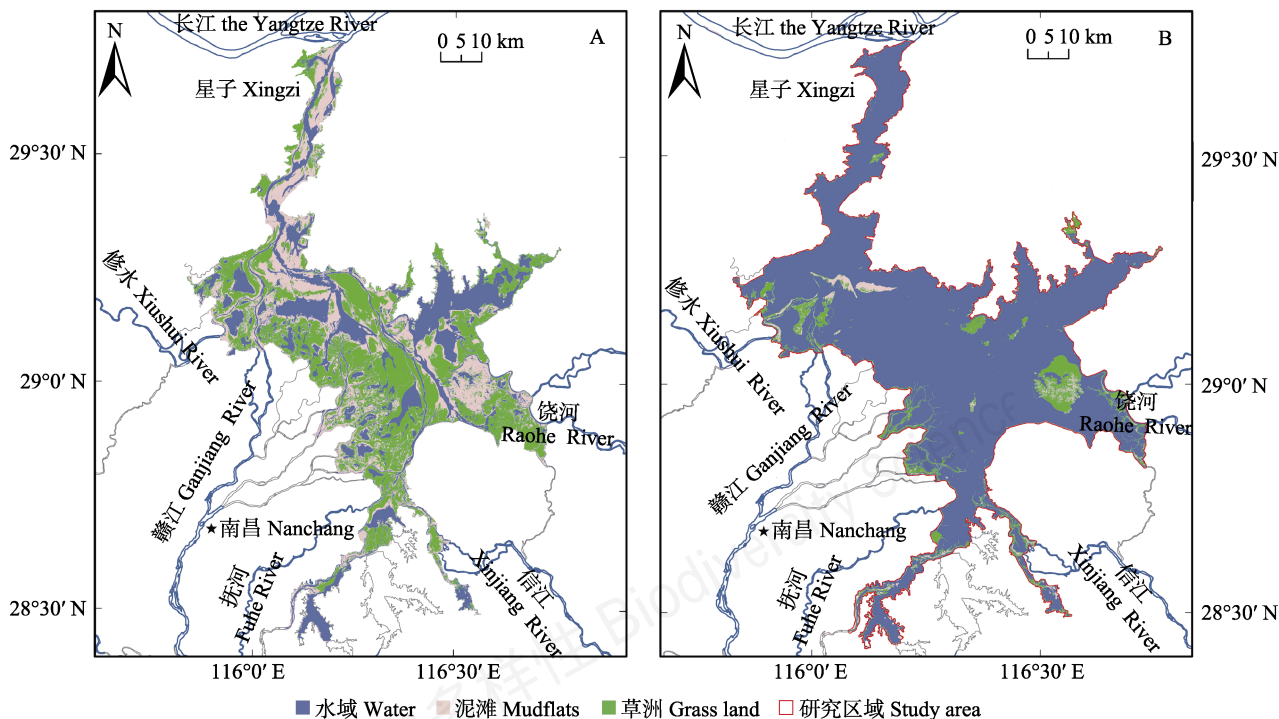


图1 鄱阳湖枯水期(A)与丰水期(B)景观分布图

Fig. 1 Wetland landscapes shift from dry season (A) to wet season (B)

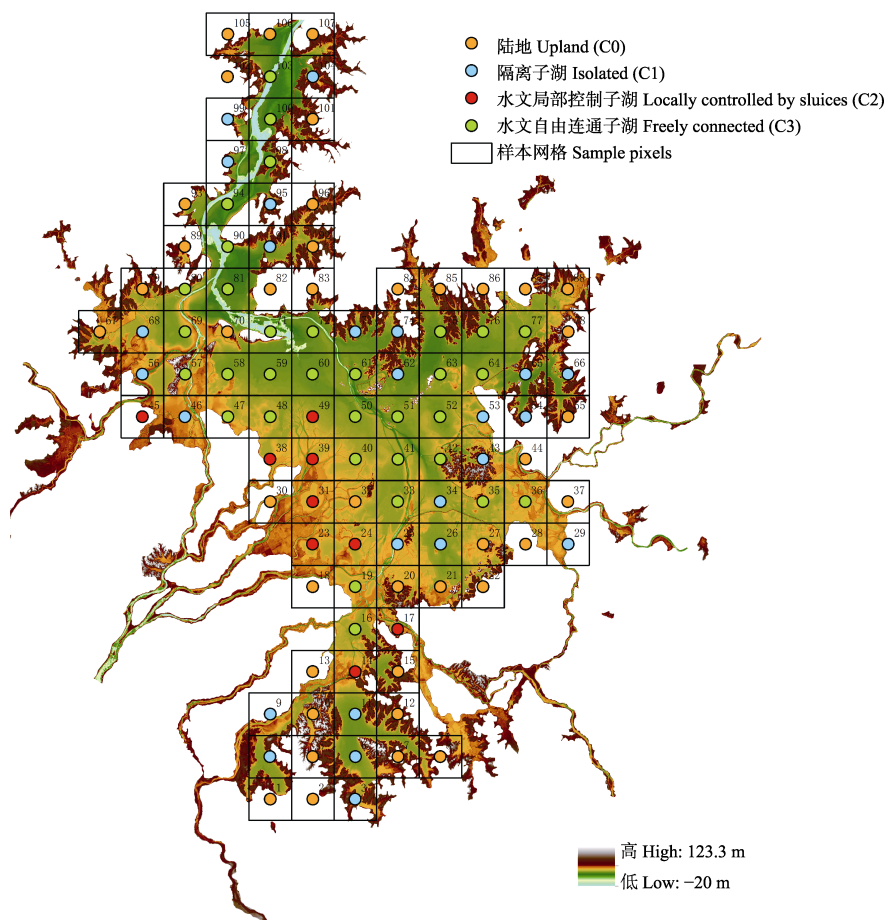


图2 4种不同水文控制模式样点分布图

Fig. 2 Distribution of four controlled types of samples

2.2 MODIS EVI时间序列

使用MODIS EVI研究在水文情势变化下鄱阳湖区域可能出现的植被变化。MODIS EVI值是运用CV-MVC (constrained view angle - maximum value composite)算法建立, 采用16天的多次地面观测产生的一个合成的植被指数。本文选用了2000–2014年的16天复合MOD13Q1 EVI图像, 来源于美国地质调查局的EROS数据中心(EROS, <http://LPDAAC.usgs.gov>)。对于EVI数据中的异常值, 利用GIS focal工具将低质量和空值用相邻图像或邻域值来调整和填充。对于每个采样点, 为了消除空间变异, 我们提取并平均了周围9个像素的EVI值。由于MODIS EVI产品从2000年2月18日开始发布, 我们使用2001–2014年对应日期EVI均值的0.75%来填补缺失的数据点(即2000年1月1日, 1月17日和2月2日), 最终的EVI数据集包括107个时间序列(样点), 每个时间跨度为15年, 每年23个观测记录共345个数据点,

然后使用TIMESAT V3.2时间序列分析软件建立植被动态生长模型, 并提取2000–2014年间每年的生长指标。在此模型中运用Savitzky-Golay平滑滤波器对序列数据进行平滑除噪, 这种基于局域多项式最小二乘法拟合的滤波方法可以在滤除数据噪声的同时, 确保信号的形状和宽度不变(Press & Teukolsky, 1990)。另外, 限定此模型的常数为 $EVI \leq 0.05$, 即当样点在高水位时被淹没, 或在退水初期植被未开始生长(光滩)时, 植被指数低于0.05, 这部分数据不参与模型的运算, 换言之, 模型只针对植被生长阶段进行运算并提取生长指标。在本研究中, 只提出和分析4个关键指标: 生长季节开始日期(SOS)(即EVI值增加20%的时间点)、生长季长度、EVI峰值以及从每个循环周期开始和结束时间之间的曲线下积分估算出的生产力代表值(<http://www.nateko.lu.se/TIMESAT/>)。本文中的生长周期被定义为EVI测量的绿化和褐变时期。拟合的周期可能在

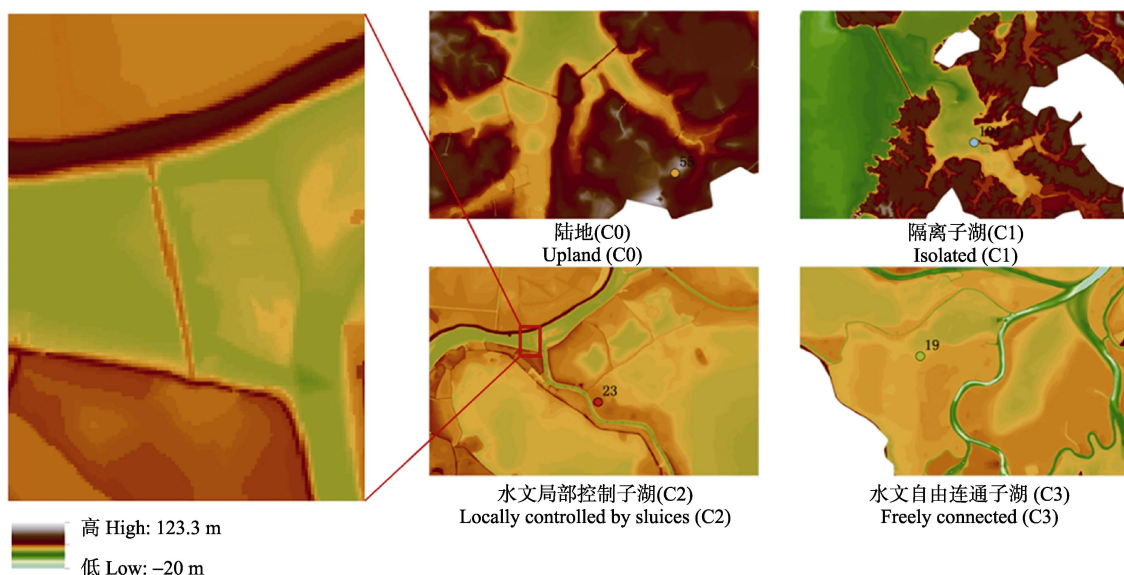


图3 4种不同水文控制模式样点示意图

Fig. 3 Four types of samples

一年中的任何时间发生, 延续一年(单生长周期), 跳过几年(在一年或多年中不发生)或一年两次(双生长周期), 主要取决于土地利用类型(如农田、森林或湿草地)和水文控制模式(即自由流动、控制或隔离)。

在所有的107个样点中, 有27个被视为无效样点, 在后续分析中被剔除。这些点包括: (1)没有获得完整生长周期的样点, 这些地点均位于永久性水域或泥滩(即有过多个时间点的EVI值低于0.05或(和)在两个连续的时间间隔内EVI值的增加率小于20%), 表明没有植被或植被稀少; (2)落在农田(例如稻田等类型)的样点, 农作物同样存在生长周期, 避免被误判为湿地自然植被纳入计算。剩余的80个样点包括陆地38个, 隔离子湖12个, 水文控制子湖10个以及自由连通子湖20个, 其中有48个样点显示出单生长周期时间序列。根据这些时间序列提取了生长指标, 并对不同水文控制类别进行了单因素方差分析。当差异显著时, 使用Hommel (1988)优化的Bonferroni法来检验不同水文类别之间的配对显著性, 并对部分类别(C2与C3)进行2006年前后的差异性检验。所有统计分析均在R 3.0.2 (R Development Core Team, 2013)软件平台中进行。

3 结果

3.1 不同水文控制类型的植被覆盖及生产力

3.1.1 陆地

从EVI时间序列中可以得出, 大部分陆地样点

的湿地植被可以明确提取出单生长季, 一般在3–7月生长季开始, 10月底至11月初停止生长, 生长季长度持续106–150 d, 拟合EVI峰值在0.4–0.8之间, 生产力代表值在1.9–4.8之间(图4A)。各生长指标在长时间序列中没有检测到明显的变化, 基本保持在一定的范围内波动。

3.1.2 隔离的子湖系统

分布于与大湖隔离的子湖中样点的植被, 其生长周期根据地理位置的不同有明显差异(图4B, 4C)。其中一些样点位于堤防高的地区, 其植被特征与陆地特征相似: 年周期明确, 没有季节趋势或变化, 并且生产力保持在较高水平, 在3.9–5.8之间(图4B)。其他样点的植被特别是位于鄱阳湖出口附近的地点, 则表现出不规则的季节性(图4C)。例如位于隔离子湖的104号样点(13.5–14 m高的堤岸将其与大湖相隔离), EVI时间序列在2006年后频繁出现2个周期, 但在2006年前并没有监测到第2个生长季; 生产力除在2006年出现了明显的峰值, 在其他年份均保持在0.9–2.2之间。

3.1.3 水文控制的子湖系统

水文控制子湖内共有10个样点, 其中7个样点的植被在年内显示出双生长周期, 另外3个显示单生长周期。对于具有双生长周期的样点的植被, 第1个生长周期在3–5月开始, 持续2–3个月; 第2个周期通常在9–11月开始, 持续2–3个月。例如: 图4D是拟合的24号点的双生长季。2006年之前显然比之后

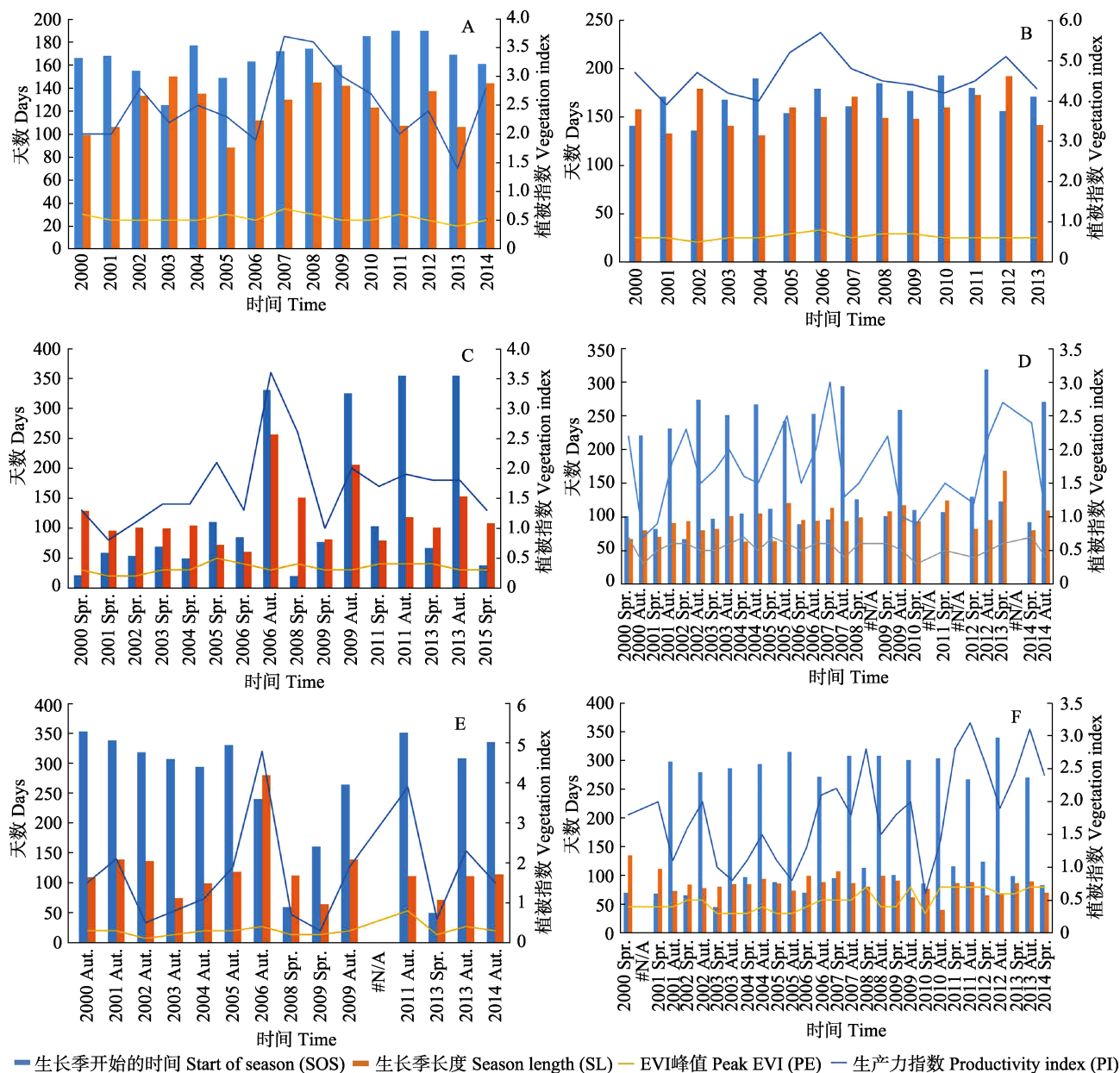


图4 典型样点植被覆盖及生产力趋势示意图。A: 陆地; B: 隔离子湖(高堤); C: 隔离子湖(湖口); D: 水文控制子湖; E: 自由连通子湖(每年1个生长周期); F: 自由连通子湖(每年2个生长周期)。

Fig. 4 Typical growth cycle for sites. A, Upland; B, Isolated (highland); C, Isolated (outlet); D, Locally controlled by sluices; E, Freely connected (one cycles per year); F, Freely connected (two cycles per year).

更加规则, 在2006年后的大部分年份第2个生长周期发生了缺失, 但生产力始终维持在0.8–3.3之间波动, 前后没有明显差异。

3.1.4 自由连接的子湖系统

对于与大湖自由连接的区域, 存在呈现1个生长周期(图4E)或2个生长周期的样点(图4F)。2006年之前, 植被的生长季开始的时间通常提前(变得更早), 从而导致了更长的生长季长度。但2006年

以后, 生长周期紊乱, 某些年份开始出现第2个生长周期, 并且没有明显的变化趋势。对于大多数每年显示2个周期的样点(图4F), 第1个周期在2006年之后表现出延后, 第2个周期可以从9月到翌年1月的任何时间开始, 这主要取决于湖泊水位下降的时间; 同时, 生产力较2006年以前也显示出增高的趋势, 并且频繁在多个年份出现峰值(例如2008年、2011年与2013年)。

3.2 不同水文控制子湖植被覆盖及生产力的差异性分析

对不同水文控制类别的植被生长指标分别进行单因素方差分析, 结果显示(图5), 从C0至C3, 生长季开始的时间逐步推后, 生长季的长度逐渐缩短, EVI峰值与生产力均呈现逐步降低的趋势。与C0和C1相比, C2和C3 SOS指标的波幅明显更加剧烈。

在所有提取的指标中, 位于自由连接系统(C3)的样点与其他系统的样点相比有显著差异: 生长季开始的时间晚, 生长季短, EVI峰值低, 并且生长季节的初级生产力较低(图5)。水位控制子湖的样点(C2)与陆地(C0)和隔离子湖(C1)样点相比, 尽管生长季开始的时间和生长季长度无显著差异(图5), 但其EVI峰值和生产力明显较低。陆地和隔离子湖样点具有相似的生长周期, 生长季开始的时间、生长季长度和生产力均没有显著差异, 但EVI峰值有显著差异(图5)。

3.3 水情转折点前后植被覆盖和生产力差异性分析

长江上游的三峡大坝2006年正式运行以来, 鄱阳湖水位下降趋势逐渐明显。研究发现鄱阳湖水域面积变化趋势在2006年发生转折(Liu et al, 2013)。本文将2006年作为鄱阳湖近年来的水情转折点, 对

2006年前后不同水文模式下子湖的植被覆盖和生产力进行了差异性分析, 结果显示(表1和表2), 位于陆地样点的生长指标在2006年前后的年份间没有显著差异: 生长季开始的时间($P = 0.35$)、生长季长度($P = 0.15$)、EVI峰值($P = 0.72$)和生产力($P = 0.22$)。位于隔离子湖的样点在2006年前后提取的各项生长指标, 除了生产力差异明显(分别为2.77与2.42, $P = 0.02$, 表1), 其他没有显著差异。位于水文控制子湖的样点分别监测到单生长周期与双生长周期, 对于呈现单生长周期样点的植被, t 检验表明, 2006年前后的指标差异不显著(表1); 而对于每年2个生长周期的样点, 除了春季生长季长度以外其他指标之间的差异都不显著(表2), 2006年之后的第1个生长周期的长度相较2006年以前大约多了10 d。位于自由连通的子湖同样监测到单生长周期和双生长周期的样点, 对于每年1个生长周期的样点, 2006年前后的生长季开始的时间和生长季长度没有显著差异(表1)。然而, 2006年之后的EVI峰值和生长季生产力都明显较高(表1)。对于大多数每年显示2个周期的样点(图4F), 大部分植被的指标在2006年前后具有显著差异(表2)。第1个周期生长季开始的时间在2006年之后明显推迟(平均开始生长的时

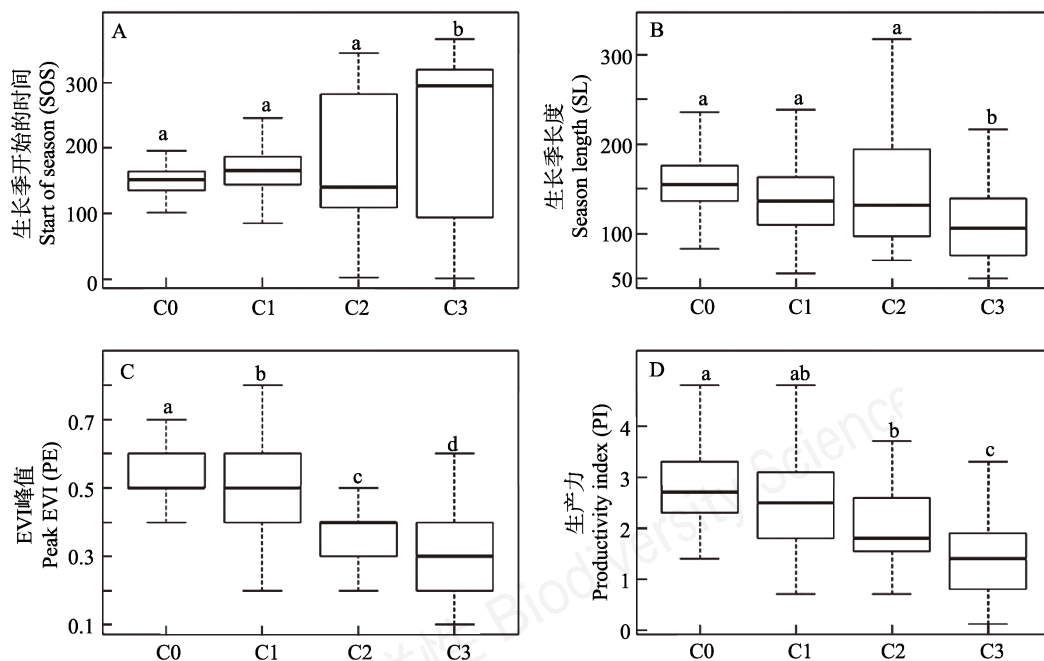


图5 单生长周期样点的生长指标差异图。图中相同小写字母代表差异不显著($P > 0.05$)。C0: 陆地; C1: 隔离子湖; C2: 水文局部控制子湖; C3: 自由连通子湖。

Fig. 5 Summary of the extracted growth metrics for sites with one annual cycle, with the same lowercase letter did not differ significantly ($P > 0.05$). C0, Upland; C1, Isolated; C2, Locally controlled by sluices; C3, Freely connected.

表1 2006年前后单生长周期生长指标差异分析(mean ± SD)
Table 1 Summary of EVI growth metrics (mean ± SD) for sites with one growing season

类型 Class	生长季开始的时间 Start of season (SOS)			生长季长度 Season length (SL)			EVI峰值 Peak EVI (PE)			生产力 Productivity index (PI)		
	2000–2006	2007–2014	P	2000–2006	2007–2014	P	2000–2006	2007–2014	P	2000–2006	2007–2014	P
陆地(C0)	152 ± 28	154 ± 25	0.35 ^{NS}	151 ± 30	161 ± 34	0.15 ^{NS}	0.55 ± 0.08	0.54 ± 0.10	0.72 ^{NS}	2.71 ± 0.72	2.95 ± 0.85	0.22 ^{NS}
隔离子湖(C1)	150 ± 40	165 ± 48	0.18 ^{NS}	134 ± 40	141 ± 38	0.20 ^{NS}	0.46 ± 0.14	0.49 ± 0.15	0.12 ^{NS}	2.42 ± 1.04	2.77 ± 1.24	0.02*
水文局局部控制子湖(C2)	157 ± 83	204 ± 112	0.20 ^{NS}	134 ± 66	163 ± 52	0.20 ^{NS}	0.40 ± 0.07	0.36 ± 0.09	0.20 ^{NS}	2.21 ± 0.79	1.92 ± 0.79	0.56 ^{NS}
自由连通子湖(C3)	325 ± 42	330 ± 38	0.62 ^{NS}	133 ± 58	127 ± 42	0.12 ^{NS}	0.25 ± 0.10	0.37 ± 0.14	< 0.001***	1.32 ± 0.93	1.90 ± 0.92	0.02*

C0, Upland; C1, Isolated; C2, Locally controlled by sluices; C3, Freely connected. *** $P < 0.001$; * $0.01 < P < 0.05$; NS, $P > 0.05$.

表2 2006年前后双生长周期生长指标差异分析(mean ± SD)
Table 2 Summary of EVI growth metrics (mean ± SD) for sites with two growing season

类型 Class	生长季 Seasons	生长季开始的时间 Start of season (SOS)			生长季长度 Season length (SL)			EVI峰值 Peak EVI (PE)			生产力 Productivity index (PI)		
		2000–2006	2007–2014	P	2000–2006	2007–2014	P	2000–2006	2007–2014	P	2000–2006	2007–2014	P
水文局局部控制子湖(C2)	春季 Spring	93 ± 15	95 ± 14	0.16 ^{NS}	82 ± 22	92 ± 18	0.02*	0.55 ± 0.13	0.53 ± 0.13	0.25 ^{NS}	1.82 ± 0.59	1.88 ± 0.77	0.33 ^{NS}
	秋季 Autumn	283 ± 59	289 ± 43	0.125 ^{NS}	88 ± 17	90 ± 19	0.17 ^{NS}	0.43 ± 0.17	0.45 ± 0.14	0.23 ^{NS}	1.43 ± 0.74	1.43 ± 0.70	0.27 ^{NS}
自由连通子湖(C3)	春季 Spring	85 ± 16	97 ± 13	< 0.001***	89 ± 31	86 ± 17	0.58 ^{NS}	0.40 ± 0.15	0.44 ± 0.14	0.23 ^{NS}	1.35 ± 0.68	1.54 ± 0.72	0.16 ^{NS}
	秋季 Autumn	314 ± 53	300 ± 26	0.046*	88 ± 18	84 ± 23	0.23 ^{NS}	0.39 ± 0.13	0.42 ± 0.16	0.012*	1.27 ± 0.61	1.39 ± 0.75	0.032*

C2, Locally controlled by sluices; C3, Freely connected. *** $P < 0.001$; * $0.01 < P < 0.05$; NS, $P > 0.05$.

间从3月26日延迟到4月7日), 但其他指标没有显著差异($P > 0.05$, 表2)。第2个周期可以从9月到翌年1月的任何时间开始, 这主要取决于湖泊水位下降的时间, 并且在2006年之后提前了14 d左右。尽管在季节长度上没有显著的差异($P = 0.23$, 表2), 但明显提高了EVI峰值($P = 0.012$, 表2)和生产力($P = 0.032$, 表2)。

4 讨论与结论

本文基于2000–2014年鄱阳湖MODIS EVI数据提取不同的水文控制模式(陆地、隔离、水文局局部控制和自由连接)的植被指数时间序列, 并计算其生长指标, 分析了其差异性。根据对不同水文类型子湖的典型样点进行的实地调查结果, 并与鄱阳湖湖盆高程分布进行拟合, 从C0至C3的高程呈逐步降低趋势, 即C0与C1大多分布于高程较高的位置, 而C2尤其是C3分布于高程较低的位置。当退水期来临时, 点位较高的水文控制类型样地最先出露, 陆生植被于一年中的第150天左右开始生长; 率先出露导致了更长的生长季长度与更高的生物量积累; 而与大湖自由连通的子湖大多处于高程最低的位置,

于一年中的第325天左右开始生长, 生长季长度最短, 导致积累的生物量也最低。结合其他学者对鄱阳湖主要湿地植被种类物候期的研究^①, 分布于C0、C1和C2类型的区域的湿地植被主要为单生长周期的芦苇(*Phragmites communis*)与南荻(*Triarrhena lutarioriparia*); 双生长周期的植被主要是茼蒿(*Artemisia selengensis*)与苔草(*Carex cinerascens*), 分布在C2与C3类型的区域, 是鄱阳湖迁飞候鸟的主要食源。所以, 位于自由连通子湖的植被生长规律与鄱阳湖迁飞候鸟到达的时段相吻合, 且为候鸟的食源植物物种, 但由于其生长时长有限, 在鄱阳湖保护区范围内需要拥有更大的自由连通子湖类型的面积以确保为迁飞候鸟提供更广阔的食物来源。

鄱阳湖是东亚–澳大利西亚迁飞区最为重要的候鸟越冬地之一, 每年平均有超过40万只水鸟在此越冬, 以植食性水鸟为主, 包括雁类、鸭类、鹤类、秧鸡类等, 其中雁类平均超过15万只, 这些雁类均以洲滩苔草为主要食物。多年来由于鄱阳湖水文过

① 中国科学院地理科学与资源研究所 (2010) 鄱阳湖水利枢纽工程对湿地与候鸟的影响及对策研究。

程的多样性和独特性,植物的生长周期和候鸟的迁入迁出和分布形成耦合关系,即秋季洲滩出露后,鄱阳湖越冬候鸟到达的时间与生长季开始的时间一致。洲滩的出露时间长短直接影响苔草的生长情况。三峡大坝运行之后,即2006年前后的长江和鄱阳湖直接水文过程的变化导致了分布于自由连通子湖的双生长周期植被的生长状况差异。正如表2结果显示,由于湿地植被生长开始的时间和土壤湿度适宜的滩地出露直接相关,与大湖自由连通的湖区在2006年后表现出明显的差异,春季生长季推迟,尤其秋季生长季提前,延长了洲滩出露时间,从而导致了生物量的过度积累,食源植物生长过高。然而由于雁类偏好在低矮鲜嫩的植物群落取食(冯多多等, 2014),这样的生长周期改变,导致雁类到达时,食源植物已生长到适口性较差的阶段,势必会使刚刚迁入的雁类食物供给不足,威胁濒危物种的种群健康;另一方面,位于受人为控制子湖的食源植物,在2006年前后水文情势发生改变的情境下却不存在这种差异,对水文胁迫表现出较强的抵抗力(Shi et al, 2017),证明局部的水文人为控制可在某种程度上减缓这种差异。

综上所述,自由连通与局部水文控制的子湖对鄱阳湖迁飞候鸟的保护均具有十分重要的意义,需要保证这两种类型子湖的面积,为越冬候鸟提供更广阔的食源;当水文情势发生改变时,局部的水文人为控制可在一定程度上减缓鄱阳湖水情变化对湿地植被生长带来的影响。

参考文献

- Auble GT (1994) Relating riparian vegetation to present and future streamflows. *Ecological Applications*, 4, 544–554.
- Baptist MJ, Penning WE, Duel H, Smits AJM, Geerling GW, Van DLGE, Van AJSL (2004) Assessment of the effects of cyclic floodplain rejuvenation on flood levels and biodiversity along the Rhine River. *River Research & Applications*, 20, 285–297.
- Barnes WJ (1997) Vegetation dynamics on the floodplain of the lower Chippewa River in Wisconsin. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 124, 189–197.
- Cai BF, Yu R (2009) Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 13, 1170–1186.
- Dudgeon D, Arthington AH, Gessner MO, Kawabata Z, Knowler DJ, Naiman RJ, Prieur-Richard AH, Soto D, Stiassny ML (2006) Freshwater biodiversity: Importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews*, 81, 163–182.
- Egger G, Politti E, Woo H, Cho KH, Park MY, Cho HJ, Benjankar R, Lee NJ, Lee HY (2012) Dynamic vegetation model as a tool for ecological impact assessments of dam operation. *Journal of Hydro-environment Research*, 6, 151–161.
- Fang HW, Han D, He GJ, Chen MH (2012) Flood management selections for the Yangtze River midstream after the Three Gorges Project operation. *Journal of Hydrology*, 432/433, 1–11.
- Feng DD, Guan L, Shi LL, Zeng Q, Liu XK, Zhang H, Lei GC (2014) Impact of autumn hydrologic regime on plants in beach and distribution of populations of wintering lesser white-fronted goose in East Dongting Lake. *Wetland Science*, 12, 491–498. (in Chinese with English abstract) [冯多多, 关蕾, 史林鹭, 曾晴, 刘向葵, 张鸿, 雷光春 (2014) 东洞庭湖秋季水文情势对洲滩植物及越冬稳定期小白额雁种群分布影响. *湿地科学*, 12, 491–498.]
- Feng L, Hu C, Chen X, Zhao X (2013) Dramatic inundation changes of China's two largest freshwater lakes linked to the Three Gorges Dam. *Environmental Science & Technology*, 47, 9628–9634.
- Fu BH, Burgher I (2015) Riparian vegetation NDVI dynamics and its relationship with climate, surface water and groundwater. *Journal of Arid Environments*, 113, 59–68.
- Guan L, Wen L, Feng D, Zhang H, Lei G (2014) Delayed flood recession in central Yangtze floodplains can cause significant food shortages for wintering geese: Results of inundation experiment. *Environmental Management*, 54, 1331–1341.
- Guo H, Hu Q, Zhang Q, Feng S (2012) Effects of the Three Gorges Dam on Yangtze River flow and river interaction with Poyang Lake, China: 2003–2008. *Journal of Hydrology*, 416, 19–27.
- Hommel G (1988) A stagewise rejective multiple test procedure based on a modified Bonferroni test. *Biometrika*, 75, 383–386.
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83, 195–213.
- Jamieson B, Braatne JH (2001) Riparian cottonwood ecosystems and regulated flows in Kootenai and Yakima sub-basins: Volume I, Kootenai River (Overview, Report and Appendices). Office of Scientific & Technical Information Technical Reports.
- Ji WT, Zeng NJ, Wang YB, Gong P, Xu B, Bao SM (2007) Analysis on the waterbirds community survey of Poyang Lake in winter. *Geographic Information Sciences*, 13, 51–64.
- Jia YF (2013) Impact of Water Level Fluctuation on Siberian Crane and Other Wintering Waterbirds in Poyang Lake.

- PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [贾亦飞 (2013) 水位波动对鄱阳湖越冬白鹤及其他水鸟的影响研究. 博士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Lei S, Zhang XP, Xu XH (2011) Analysis on changes in wetland vegetation of Poyang Lake in autumn and winter by multi-source remote sensing data monitoring. *Yangtze River*, 42(11), 60–63. (in Chinese) [雷声, 张秀平, 许小华 (2011) 鄱阳湖湿地植被秋冬季变化多源遥感监测分析. 人民长江, 42(11), 60–63.]
- Li JL (2006) Research on the seasonal dynamics of zonal vegetation in the coastal area using MODIS-NDVI/EVI—A case study of *Spartina alterniflora* marsh on the Jiangsu coast. *Marine Science Bulletin*, 25(6), 91–96. (in Chinese with English abstract) [李加林 (2006) 基于MODIS的沿海带状植被NDVI/EVI季节变化研究——以江苏沿海互花米草盐沼为例. 海洋通报, 25(6), 91–96.]
- Liu YB, Wu GP, Zhao XS (2013) Recent declines in China's largest freshwater lake: Trend or regime shift? *Environmental Research Letters*, 8, 14010–14019.
- Magilligan FJ, Nislow KH, Graber BE (2003) Scale-independent assessment of discharge reduction and riparian disconnectivity following flow regulation by dams. *Geology*, 31, 569–572.
- Mahoney JM, Rood SB (1998) Streamflow requirements for cottonwood seedling recruitment—An integrative model. *Wetlands*, 18, 634–645.
- Naiman RJ, Decamps H, Pollock M (1993) The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity. *Ecological Applications*, 3, 209–212.
- Press WH, Teukolsky SA (1990) Savitzky-Golay smoothing filters. *Computers in Physics*, 4, 669–672.
- Rosenberg DM, McCully P, Pringle CM (2000) Global-scale environmental effects of hydrological alterations: Introduction. *BioScience*, 50, 746–751.
- Shekede MD, Kusangaya S, Schmidt K (2008) Spatio-temporal variations of aquatic weeds abundance and coverage in Lake Chivero, Zimbabwe. *Physics & Chemistry of the Earth*, 33, 714–721.
- Shi LL, Wang YY, Jia YF, Lu C, Lei GC, Wen L (2017) Vegetation cover dynamics and resilience to climatic and hydrological disturbances in seasonal floodplain: The effects of hydrological connectivity. *Frontiers in Plant Science*, 8, doi: 10.3389/fpls.2017.02196.
- Sims DA, Rahman AF, Cordova VD, El-Masri BZ, Baldocchi DD, Flanagan LB, Goldstein AH, Hollinger DY, Misson L, Monson RK (2015) On the use of MODIS EVI to assess gross primary productivity of North American ecosystems. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 111, 695–702.
- Tucker CJ, Sellers PJ (1986) Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1395–1416.
- Waal LC, Large ARG, Gippel CJ, Wade PM (1995) River and floodplain rehabilitation in Western Europe: Opportunities and constraints. *Large Rivers*, 9, 679–693.
- Wen L, Rogers K, Saintilan N, Ling J (2011) The influences of climate and hydrology on population dynamics of waterbirds in the lower Murrumbidgee River floodplains in southeast Australia: Implications for environmental water management. *Ecological Modelling*, 222, 154–163.
- Wu JD, Liu GH, Jin JF, You X, Zhan HY, Jia WM, Cao R, Gao YY, Luo H, Gao X (2010) Structure analysis of beach vegetation in Poyang Lake in autumn. *Jiangxi Science*, 28, 549–554. (in Chinese with English abstract) [吴建东, 刘观华, 金杰峰, 尤鑫, 詹慧英, 贾万梅, 曹锐, 高云云, 罗浩, 高翔 (2010) 鄱阳湖秋季洲滩植物种类结构分析. 江西科学, 28, 549–554.]
- Ye C, Liu YB, Zhao XS, Wu GP (2013) Analysis of Poyang Lake wetland vegetation growth dynamics and its response to lake water level based on MODIS. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 22, 705–712. (in Chinese with English abstract) [叶春, 刘元波, 赵晓松, 吴桂平 (2013) 基于MODIS的鄱阳湖湿地植被变化及其对水位的响应研究. 长江流域资源与环境, 22, 705–712.]
- Yuan ZK (2008) *Wetland Resource and Environment in Dongting Lake*. Hunan Normal University Press, Changsha. (in Chinese) [袁正科 (2008) 洞庭湖湿地资源与环境. 湖南师范大学出版社, 长沙.]
- Zhang FF, Qi SH, Liao FQ, Zhang QM (2011) Analysis of distribution features of the emerged grassland in Poyang Lake based on remote sensing. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 20, 1361–1367. (in Chinese with English abstract) [张方方, 齐述华, 廖富强, 张起明 (2011) 鄱阳湖湿地出露草洲分布特征的遥感研究. 长江流域资源与环境, 20, 1361–1367.]
- Zhao B, Yan Y, Guo HQ, He MM, Gu YJ, Li B (2009) Monitoring rapid vegetation succession in estuarine wetland using time series MODIS-based indicators: An application in the Yangtze River Delta area. *Ecological Indicators*, 9, 346–356.
- Zhao P, Tang XY, Tang JL, Wang C (2013) Assessing water quality of Three Gorges Reservoir, China, over a five-year period from 2006 to 2011. *Water Resources Management*, 27, 4545–4558.
- Zhou X, Zhao YS, Liang WG (2009) Modeling of water level and submersion or emersion in Poyang Lake wetland. *Geographical Research*, 28, 1722–1730. (in Chinese with English abstract) [周霞, 赵英时, 梁文广 (2009) 鄱阳湖湿地水位与洲滩淹露模型构建. 地理研究, 28, 1722–1730.]
- Zong YQ, Chen XQ (2000) The 1998 flood on the Yangtze, China. *Natural Hazards*, 22, 165–184.

(责任编辑: 唐志尧 责任编辑: 闫文杰)