

后三峡工程时代的鄱阳湖湿地植被生产力演变^{*}

戴 雪^{1,2}, 杨桂山^{3,4,5}, 万荣荣^{3,4,5**}, 李彦彦⁶

(1: 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

(2: 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

(3: 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)

(4: 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

(5: 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

(6: 江苏省第二师范学院城市与资源环境学院, 南京 210013)

摘要: 三峡运行以来, 气候变化与人类活动共同驱动了鄱阳湖水文情势的急剧变化, 并对其湿地植被产生了显著影响, 但当前研究尚未系统量化鄱阳湖湿地植被在此条件下的演变规律与趋势。因此, 本研究以增强型植被指数 EVI (enhanced vegetation index) 的时段最高值作为表征湿地植被生产力的代用指标, 定量揭示了后三峡工程时代鄱阳湖湿地植被生产力的气候态特征及其变化, 包括变化的量级、显著性及阶段性。结果表明: (1) 2000—2020 年, 鄱阳湖湿地植被 EVI 最高值在全年及春、秋两季分别为 0.37、0.30 和 0.33, 入湖河流三角洲及碟形洼地边滩是其生产力中心; 春季 EVI 最高值在此区域高于秋季, 而在湖心区低于秋季。(2) 三峡运行后的湿地植被生产力变化在全年及春、秋两季均有极大空间异质性, 在湖心深泓线附近显著增加, 而在入湖河流三角洲及湿地边缘下降。春季 EVI 增长区域面积占比极大 (84.2%), 而秋季增长区面积占比较小 (71.2%), 即有较大面积区域 EVI 在秋季下降 (38.8%)。(3) 三峡运行后, 鄱阳湖湿地植被生产力中心经历了原位增长、空间扩张以及湖心向转移 3 个阶段, 最终完成了由支流三角洲向湖心区的转移。从总体来看, 鄱阳湖湿地植被生产力在全年及春、秋季均呈增长趋势, 增速分别为 0.0035、0.0049 和 0.0028 EVI/a。本研究量化了后三峡工程时代的鄱阳湖湿地植被生产力变化, 为该区域进一步的综合管理提供了数据支撑。

关键词: 后三峡工程时代; 鄱阳湖; 湿地植被生产力; 变化趋势; 显著性; 湖心向迁移

Vegetation productivity of the Lake Poyang Wetland in the post Three Gorges Dam era^{*}

Dai Xue^{1,2}, Yang Guishan^{3,4,5}, Wan Rongrong^{3,4,5**} & Li Yanyan⁶

(1: State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P.R. China)

(2: College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

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

(4: College of Nanjing, University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)

(5: College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(6: Country School of Urban, Resources and Environment, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 210013, P.R.China)

Abstract: Since the operation of the Three Gorges Dam (TGD), the superposition of human activities and climate change has dramatically changed hydrological regimes of the Lake Poyang. These changes significantly affected the structure and function of the surrounding wetland ecosystems. However, vegetation variations in the Lake Poyang Wetland under this changing condition has not

* 2022-06-30 收稿; 2022-07-30 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (U2240219, 42071146, 41901114) 和江西省青年人才培养项目 (20204BCJL23040) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: rrwan@niglas.ac.cn。

yet been systematically quantified. Hence, this study took the maximum EVI (enhanced vegetation index) as a proxy index to characterize vegetation productivity of the Lake Poyang Wetland, aiming to quantitatively reveal its changes in the post TGD era. The results show that: (1) During 2000 to 2020, the regional averaged maximum EVI of the wetland was 0.37, 0.30 and 0.33 in the whole year, spring, and autumn, respectively. River deltas of the lake tributaries and the dished depressions in the wetland were generally with higher EVI values compared to other areas, thus regarding as high productivity center of the wetland. In springs, the maximum EVI in the productivity center was higher than that in autumn, whereas it was lower than that in autumn in other areas with low EVI values such as the center of the lake. (2) Changes of vegetation productivity had great spatial heterogeneity for all the periods including the whole year, springs, and autumns. The maximum EVI values increased significantly in the central of the wetland (surrounding the thalweg), while the maximum EVI values decreased in river deltas of lake tributaries and wetland edge. The areas with increasing EVI values in spring accounted for about 84.2% of the whole wetland, while the area with increasing EVI in autumn accounted merely 71.2% of the wetland. That is, there was still a large proportion of the wetland with decreasing EVI in autumn (38.8%). (3) After TGD, the high productivity center of the wetland experienced three stages: in-situ growth, spatial expansion and towards lake center transfer, thus moved from river deltas to lake center areas. Overall, the maximum EVIs of the wetland showed an increasing trend, with a rate of 0.0035, 0.0049, and 0.0028 EVI/year for the annual, spring and autumn, respectively. The findings systematically quantified vegetation productivity changes of the Lake Poyang Wetland in the post TGD era. It also provided a scientific basis for proposing water resource management strategies to maintain the stability of wetland ecosystem.

Keywords: Post TGD era; Lake Poyang; wetland vegetation productivity; tendency; significance; towards lake center migration

三峡工程自2003年蓄水运行以来,为我国长江中下游地区发挥了巨大的防洪、发电、航运、水资源供给以及景观美学等经济、社会和生态效益^[1-3]。尤其在应对2020年长江流域高频次大洪水过程中,三峡工程通过科学调度,有效减轻了下游地区的防洪压力,为维护我国长江经济带安全提供了重要保障^[4-5]。与此同时,三峡工程汛末蓄水导致的坝下干流流量减少、清水下泄引发的干流河道冲刷等也引发了近年来长江干流汛末水位的急剧降低,进而改变了长江中游两大通江湖泊——洞庭湖与鄱阳湖和长江干流的水文水动力交互^[6-7],使两湖秋季泄流因长江顶托作用减弱而加速,进而引发两湖退水期提前、枯水期延长以及低枯水位频现等一系列水问题^[8-10]。此外,两湖自身流域的降水量减少与地表径流变化^[11-12],以及围垦、采砂等人类活动导致的湖盆地形变化也对两湖近年来的季节性干旱有突出贡献^[8,13],而此严峻的季节性干旱也因威胁到两湖关键生态系统服务而受到广泛关注^[14]。

鄱阳湖湿地是我国面积最大的淡水湖泊湿地,也是我国首批被列入《世界重要湿地名录》(www.ramsar.org/pdf/sitelist.pdf)的湿地^[15-16]。其干湿交替的洲滩发育了面积广阔的湿地植被,不仅为鱼类、两栖类等生命形式提供了重要栖息地,也为白鹤、白枕鹤、东方白鹤等珍稀候鸟的迁徙提供了重要中转站与繁殖地^[17-18];同时发挥着巨大的净化水质、涵养水源、调蓄洪水、保持水土及维持生物多样性等生态系统服务功能^[19]。受近年来鄱阳湖退水加快、枯水期提前以及低枯水位频现影响,鄱阳湖湿地植被也随生态水文过程的改变发生了显著变化^[20-21]。如2010年鄱阳湖国家级自然保护区监测年报与2014年第二次鄱阳湖科考结果均发现,鄱阳湖高位滩地出现了中生植物入侵现象,形成了以狗牙根、牛鞭草等为优势种的草甸;同时,以苔草群落为代表的沼泽植被面积不断增加,而水陆交界区水生植被的分布则逐渐萎缩,并引发白鹅等珍禽大规模在草洲觅食现象^[17,22-23]。进入2015年以来,受主湖区夏季及初秋水位偏高影响,鄱阳湖湿地浅水区开始萎缩,但入侵高滩的中生植物依然存在,因此进一步压缩越冬候鸟栖息地,使2016年后多次出现白鹤、白枕鹤等从保护区扩散至整个湖区甚至外围稻田、藕塘觅食的情况^[18]。总体而言,上述研究从不同角度揭示了鄱阳湖湿地近年来高滩植被退化、湿生植被面积扩展、沉水植被生境收缩以及裸露泥滩增多的变化趋势,为认识后三峡工程时代的鄱阳湖湿地植被变化做出了突出贡献^[22-23]。但目前研究仍未从全局角度系统量化鄱阳湖湿地植被在后三峡工程时代的变化量级,也未明确上述变化的显著性、阶段性及空间差异等特征,因此也缺乏对后三峡工程时代鄱阳湖湿地植被发生的变化是否可逆的判断,限制了新时期鄱阳湖湿地科学保护策略的制定。

以遥感手段测算的增强型植被指数EVI可在较大的空间范围获得对湿地植被瞬时特征的高频、连续观测,且大量研究已证实了其与植物光合速率、生物量及碳存量等生理生态参数的密切联系^[10,24]。因此,本研

究即以时段最大 EVI 指数作为表征湿地植被特定时段生产力的代用指标,并基于 2000—2020 近 20 年的 MODIS 植被指数时间序列影像系统量化鄱阳湖湿地植被生产力的变化,包括定量揭示其在后三峡工程时代的气候态特征、变化趋势及显著性,以及上述变化的阶段性与空间差异。研究结果将全面揭示鄱阳湖湿地植被生产力在后三峡工程时代的演变特征,为鄱阳湖湿地的恢复、保护与管理工作提供理论与数据支持。

1 数据与方法

1.1 研究区介绍

鄱阳湖湿地($28^{\circ}22' \sim 29^{\circ}45'N$, $115^{\circ}47' \sim 116^{\circ}45'E$)位于江西省北部、长江中下游南岸,其上游承接赣江、抚河、信江、饶河、修水“五河”来水,经湖泊调蓄后由北部湖口注入长江(图 1)^[24-25]。受季风气候及复杂水系结构影响,鄱阳湖水情年内变化剧烈,呈现“洪水一片、枯水一线”的独特景观,并在面积广阔的干湿交替带形成了我国最大的洪泛型湖泊湿地^[12,21]。受水位波动主导的生境异质性影响,鄱阳湖湿地在景观格局上呈现浅水、草滩、泥滩多类型复合特征。其中,构成草滩的各典型植物群落建群种明显,且群落外貌相对整齐,分别占据特定的水分生态位空间,形成了由水及陆的明显带状分布特征。其中,以灰化薹草(*Carex cinerascens*)、虉草(*Phalaris arundinacea*)为建群种的苔草-虉草群落主要分布在 12~15 m 的高程区间,以南荻(*Miscanthus sacchariflorus*)、芦苇(*Phragmites australis*)为建群种的南荻-芦苇群落主要分布在 15~17 m 的高程区间。

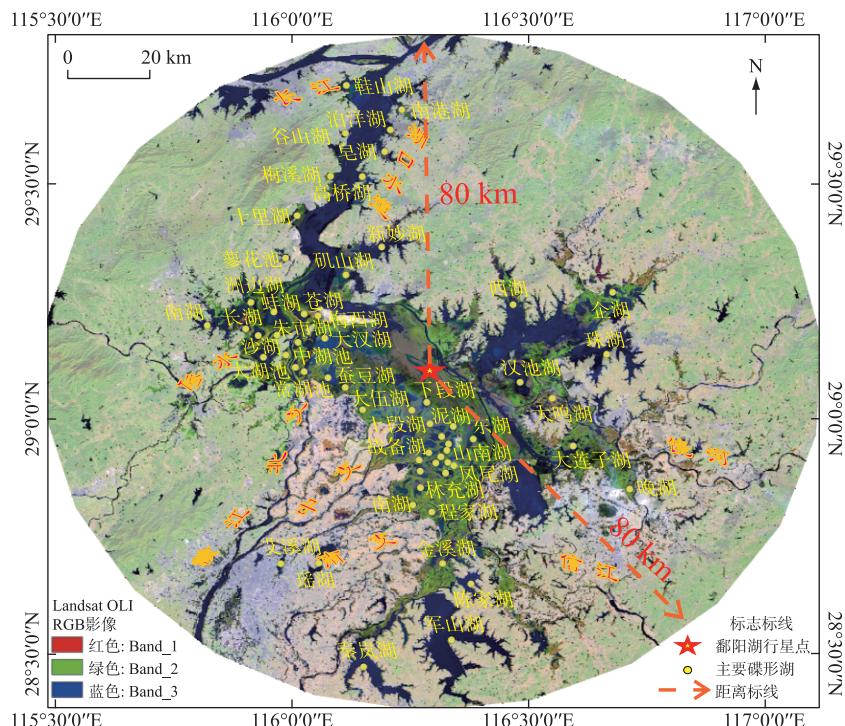


图 1 鄱阳湖湿地概况(背景图为 Landsat 8 影像 6、5、2 波段的假彩色合成影像,其中水体显示为蓝色、湿地植被显示为青绿色、泥滩或裸地显示为沙褐色)

Fig.1 The Lake Poyang Wetland (The background image is a false color composition of the Landsat 8 image with the band 6, band 5, and band 2 to red, green, and blue, respectively. Water surface, wetland vegetation, mudflat and bare land are shown in blue, turquoise, and sandy brown, respectively)

本研究以鄱阳湖行星点为中心($29^{\circ}06'N$, $116^{\circ}18'E$),划定其周围半径80 km的缓冲区为研究边界,并以年淹水历时大于零的水情变量掩膜提取此边界内的湿地区域作为研究区,实现了将鄱阳湖周边所有类型湿地均纳入研究的目的,包括鄱阳湖湿地主体、所有入湖河流边滩湿地及碟形湖。

1.2 数据与方法

本研究以时段EVI指数最大值作为表征湿地植被生产力的代用指标,量化鄱阳湖湿地植被生产力在三峡运行后的变化趋势、显著性、阶段性及空间差异。EVI受温度、降水、土壤理化性质、太阳辐射等多因子影响,是综合反映植被生长态势的重要遥感指标^[26]。许多研究已证实了其与植物生物量、绿度、生产力等生理生态参数的显著相关性,并将其广泛用于植被生物量、碳存量及生产力等的遥感反演^[27-28]。根据累积存量法原理^[29],本研究以湿地植被时段EVI最高值表征其特定时段内的生产力水平,即湿地植被特定时间内累积的生物量或碳存量;研究数据源于MODIS影像(MOD13Q1 V6.1 product与MYD13Q1 V6.1 product),因合并了Terra与Aqua两星数据,此EVI时间序列影像的重返周期达8天、空间分辨率为250 m^[29]。

具体计算过程中,首先分别从全年、春季及秋季3个时间尺度计算了研究区2000—2020年EVI指数最大值的多年平均状况,以反映鄱阳湖湿地植被生产力在此期间的气候态特征。然后,采用以时间变量为自变量的标准回归系数揭示各像元EVI时段最大值在近20年来变化速率,并以回归系数的显著性量化此变化趋势的显著性。标准回归系数^[30]是指剔除因变量(此处为各时段EVI指数最高值)和自变量(此处为时间变量,即年份)尺度效应后的回归系数。标准回归系数的绝对值直接反映了自变量对因变量的影响程度,即EVI指数时段最大值随年份的变化;绝对值越大,指示的变化速率越大;反之,绝对值越小,则指示变化速率越小。标准回归系数的正或负值代表自变量对因变量的影响方向,即EVI指数最大值随时间的增加或减小。此外,在对历年EVI高值区的空间迁移情况进行表征时,本研究借用了空间分析中的辅助线法,用于对比不同影像中EVI高值区域的偏移。

2 结论

2.1 鄱阳湖湿地植被生产力的多年平均特征

以EVI时段最大值作为表征湿地植被特定时段生产力的代用指标,量化评估鄱阳湖湿地植被生产力的多年平均状况,结果如图2所示。

由图2A可见,鄱阳湖湿地年最大EVI指数的多年均值为0.37,75%的区域年最大EVI值在0.19~0.53范围内波动;且湿地植被生产力的高值区多年来主要集中在入湖河流三角洲以及蚌湖等碟形洼地边滩,而在湖泊中心的深泓线两侧湿地植被生产力较低。与全年整体情况类似,春季湿地植被EVI最大值也在入湖河流三角洲及碟形洼地边滩较高,而在湖心深泓线两侧较低;但从数值上看,春季湿地植被最大EVI的多年均值仅为0.30,低于年EVI最大值,75%的区域春季EVI最大值在0.15~0.45的范围内波动,亦低于全年EVI波动水平(图2B)。对比春季情况发现,秋季的鄱阳湖湿地植被EVI最大值在生产力高值区(即入湖河流三角洲)略低于春季,但在低值区(即湖泊中泓线两侧)远高于春季(图2C)。因此,鄱阳湖湿地秋季EVI最大值的区域均值较春季偏高约0.33,且75%的湿地区域秋季最大EVI在0.17~0.48范围内波动,亦高于春季EVI最大值的波动范围。由此可见,鄱阳湖湿地植被的春季生产力中心在入湖河流三角洲及碟形洼地边滩,在湖心区等其他区域生产力较低;与此不同的是,秋季鄱阳湖湿地植被生产力在靠近水域的稀疏草滩乃至湖心深泓线附近也有较高水平;此为鄱阳湖湿地春、秋两季植被生产力空间分布特征的最大差异。

2.2 后三峡工程时代的鄱阳湖湿地植被生产力变化

对2000—2020年以EVI指数时段最大值表征的湿地植被生产力变化进行趋势分析,以揭示鄱阳湖湿地植被生产力在后三峡工程时代的变化,结果如图3所示。

就整个湿地的平均变化速率而言,鄱阳湖全年及春、秋两季的EVI指数最大值变化速率均为正值,即均呈增长趋势,增长速率分别为0.0035、0.0049以及0.0028 EVI/a。然而,鄱阳湖湿地植被生产力在后三峡工程时代的变化表现出显著的空间异质性。如图3A与3B显示,近20年来,鄱阳湖年EVI指数最大值在靠近水域及深泓线的区域显著增长($P<0.001$),增长区域面积约4279 km²,占整个研究区总面积的74.7%;且此增长的速率较高,达到约0.006 EVI/a,75%的增长区域增速在0.003~0.011 EVI/a的范围内波动。与此相反

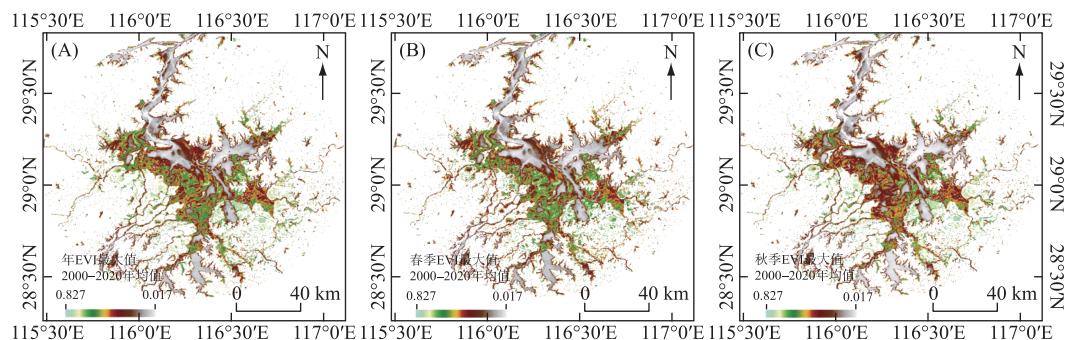


图 2 2000—2020 年鄱阳湖多年平均时段 EVI 最大值空间分布特征：

(A) 年最大 EVI 多年均值; (B) 春季最大 EVI 多年均值; (C) 秋季最大 EVI 多年均值

Fig.2 Multi-year averaged maximum EVI of the Poyang Lake Wetland from 2000 to 2020

- (A) Multi-year averaged yearly maximum EVI; (B) Multi-year averaged maximum EVI in spring;
 (C) Multi-year averaged maximum EVI in autumn

的是,在鄱阳湖湿地的原生产力中心,即入湖河流三角洲及湿地边缘,湿地植被年 EVI 指数最大值反而在近 20 年间呈减小趋势,减小区域面积约 1601 km^2 ,占整个研究区总面积的 25.3%。但此减小趋势并不显著 ($P>0.05$),且变化速率较低,仅为 -0.0025 EVI/a ,75% 的减小区域变化速率为 $-0.0062\sim-0.0010 \text{ EVI/a}$ 。

与年 EVI 指数最大值变化趋势类似,鄱阳湖湿地春、秋两季的 EVI 指数最大值也在湖泊湿地中心(深泓线两侧及靠近水域的湿地边滩)呈显著增长趋势,而在入湖河流三角洲及湿地外围呈弱减小趋势。从具体数值来看,春季 EVI 指数最大值的增长速率(0.006 EVI/a)略高于秋季(0.005 EVI/a),而秋季 EVI 最大值的减小速率(-0.003 EVI/a)略高于春季(-0.002 EVI/a)。在变化面积上,春、秋季表现出较大差异:其中,春季 EVI 最大值的增加区域约占湿地总面积的 84.2%,而秋季的增加面积远小于春季,仅为 71.2%。也就是说,秋季 EVI 指数最大值的减小区域面积占比也较高,约达到整个湿地总面积的 38.8%。综上所述,对比春、秋季变化发现,秋季的鄱阳湖湿地植被生产力在更多的湿地边缘区域表现出下降趋势。

2.3 后三峡工程时代鄱阳湖湿地植被生产力空间分布格局的迁移转化

为揭示后三峡工程时代鄱阳湖湿地植被生产力的迁移转化过程,本研究进一步比较了 2000—2020 年研究区历年最大 EVI 指数空间分布图,发现了其在后三峡工程时代经历的明显三阶段变化。由于篇幅限制,此处仅于附图 I 中提供了各变化阶段历年最大 EVI 指数空间分布图,并合并了相似年份(如 2014 和 2015 年),以全面展示近年来鄱阳湖湿地植被生产力演变的阶段性特征。

如附图 I 所示,2000—2003 年为三峡运行前的自然状态阶段,此时段的湿地植被特征是生产力总体偏低,且生产力高值区主要分布在第一标志线与第二标志线之间,即靠近湿地边缘的西侧、西南侧入湖河流三角洲及碟形洼地边滩部分。三峡运行初期,即 2004—2008 年,是湿地植被生产力发生变化的第一演变阶段,为原位增长阶段,此时段的鄱阳湖湿地植被生产力较三峡运行前主要表现为原位增长,即湿地植被空间分布位置未发生明显位移(仍在第一、第二标志线间,仅从第二标志线少量外延),但湿地植被生产力普遍增加。此后的 2009—2015 年,为三峡运行后湿地植被生产力变化的第二演变阶段,即全面增长阶段,该时期鄱阳湖湿地植被生产力普遍增加,且湿地植被生产力高值区全面扩展。在附图 I 中,此时段(2009—2015 年)的鄱阳湖湿地植被生产力中心明显扩展到了第二与第三标志线之间,实现了整个鄱阳湖湿地植被生产力的全面增长。然而,在此之后的 2016—2020 年,鄱阳湖湿地进入了与此差异显著的植被生产力第三演变阶段,即生产力中心向湖心的转移阶段。此阶段的变化特征为第二、三标志线间的湿地植被生产力明显高于三峡运行前的湿地植被生产力中心(第一、二标志线区间),且原生产力中心湿地植被年最大 EVI 指数有降低趋势。由此可见,进入 2016—2020 年后,鄱阳湖湿地植被生产力高值区已转移至湖心区域,入湖河流三角洲不再是主要的湿地植被生产力高值区,甚至略有下降。

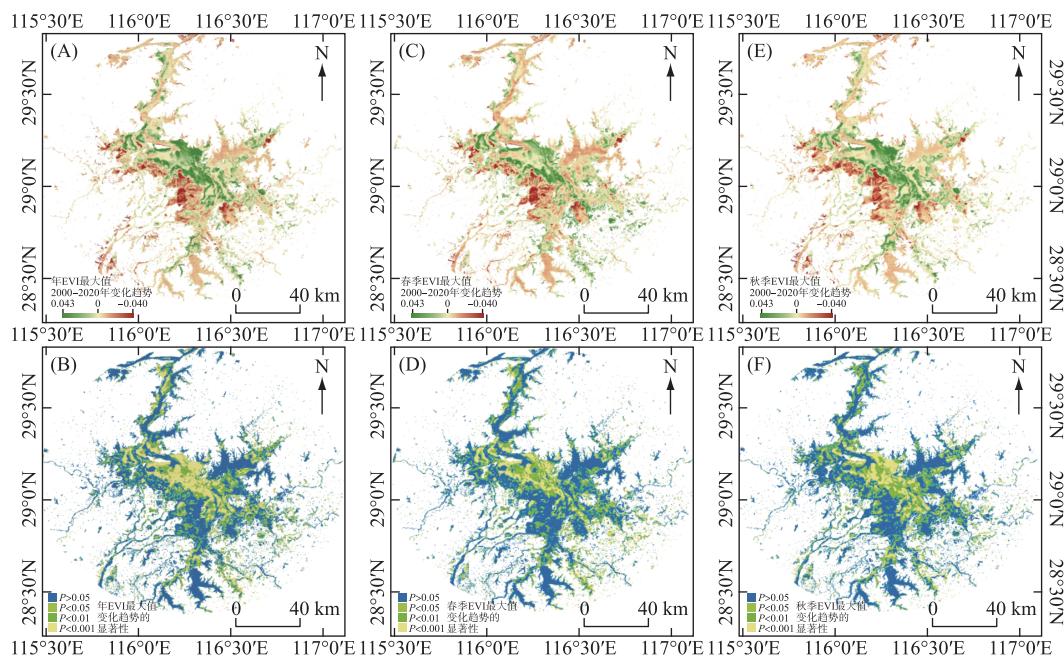


图3 2000—2020年鄱阳湖湿地 EVI 最大值变化速率及显著性：
(A)与(B)年最大EVI变化速率及显著性;(C)与(D)春季最大EVI变化速率及显著性;
(E)与(F)秋季最大EVI变化速率及显著性

Fig.3 Changing rate and significance of the maximum EVIs in the Lake Poyang Wetland from 2000 to 2020:

- (A) and (B) Changing rate and significance of the annual maximum EVI;
- (C) and (D) Changing rate and significance of the maximum EVI in spring;
- (E) and (F) Changing rate and significance of the maximum EVI in autumn

3 讨论

一般情况下,湿地植被生产力除随水位波动发生显著变化外,还受气温、降水、太阳辐射、土壤理化性质以及大气CO₂浓度等多环境因子共同影响^[31]。在当前气候变化背景下,众多研究已系统探讨了CO₂施肥效应、升温等气候变化因子对陆域生态系统植被生产力的影响^[32],以及N沉降、土地利用变化等人类活动因子对其的叠加作用^[33],并得出全球大部分生态系统因CO₂施肥效应、N沉降增加以及温度升高出现植被生产力增加、绿度提高以及物候期延长、物候节点提前等现象^[34-35]。虽然上述全局变量也会在鄱阳湖湿地植被生产力变化中发挥一定作用,但不会是目前三峡运行后鄱阳湖湿地植被生产力变化的主要原因。因为以时段EVI最大值表征的湿地植被生产力近年来在鄱阳湖的变化趋势出现了显著的空间差异,即在湖心深泓线附近显著增加,而在入湖河流三角洲及湿地边缘呈下降趋势。而上述气温、大气CO₂浓度、N沉降等全局变量在整个鄱阳湖湿地范围内的差距均较小,不会导致湿地植被生产力变化出现如此大的空间差异^[1,7,36]。由此可见,三峡运行后鄱阳湖湿地发生的显著水情变化才是近20年间鄱阳湖湿地植被生产力发生显著变化的主要因素。

就近年来鄱阳湖湿地深泓线附近的植被生产力增加而言,相关研究认为其主要取决于鄱阳湖秋冬季的偏枯水情。因为三峡汛末蓄水导致了鄱阳湖近年来退水加速、枯水期提前,低位洲滩出露时间提前,因此洲滩植物可以提前萌发;而随之延长的出露时间也为低位滩地的湿地植物提供了更长的生长时间,促进了其生产力的提高;此外,较低的枯水期水位也使更多的低位洲滩在秋冬季出露,使得苔草等沼泽植物可以在此建群,促进了该区域湿地植被生产力的提高^[10,36-38]。也有相关研究在两湖湿地发现其各典型植被群落空间

分布高程的下移^[23,36],侧面证明了本研究揭示的鄱阳湖湿地植被生产力在后三峡工程时代随着低枯水情的加剧在湖心区的增加。

就三角洲边滩及湖泊边缘的湿地植被生产力降低而言,其发生原因可能有两个:(1)三峡运行后鄱阳湖湿地秋冬季的偏枯水位可能使生长在高滩的湿生植物在生长季后期面临加剧的干旱胁迫,进而导致其分布明显破碎化,且植株明显矮化,进而造成其湿地植被生产力的降低^[38];(2)在高滩地被强化的秋冬季偏枯水情可能引发该区域植被类型的演替,由生产力较低的旱生植物群落的入侵造成其植被生产力的降低。有实地调查发现,鄱阳湖湿地高于15 m的洲滩发生了显著的旱生植物入侵情况,形成了以狗牙根(*Cynodon dactylon*)、牛鞭草(*Hemarthria sibirical*)等为优势种的草甸,其生产力远低于南荻、芦苇等湿生植物群落,因此,中生乃至旱生植物的入侵也可能导致了鄱阳湖湿地高滩植被生产力的降低^[39,40]。

后三峡工程时代鄱阳湖湿地植被生产力中心的迁移是上述两种驱动力共同作用的结果,即随着鄱阳湖湿地植被生产力在原生产力中心(入湖河流三角洲)的减小以及在湖心区(深泓线附近)的增加,鄱阳湖湿地历时20年、经历3个阶段(原位增长阶段、全面扩展阶段以及湖心向转移阶段)进入后三峡工程时代,完成了湿地植被生产力中心从入湖河流三角洲边滩向湖心区的转移,形成了湖心区深泓线附近湿地植被生产力较高而入湖河流三角洲湿地植被生产力较低的新常态。

4 结论

本研究针对后三峡工程时代鄱阳湖水文情势变化驱动的湿地植被变化,以时段最大EVI指数作为表征湿地植被生产力的代用指标,以MODIS植被指数时序影像分析了其2000—2020近20年间的湿地植被生产力气候态特征、变化趋势及显著性,并揭示了其在后三峡工程时代湿地植被生产力中心的迁移及其阶段性,研究结果系统量化了三峡运行以来的鄱阳湖湿地植被生产力变化。得到的主要结论如下:

1) 2000—2020年间,鄱阳湖湿地植被EVI最高值在全年以及春、秋两季的区域平均值分别为0.37、0.30与0.33;入湖河流三角洲及碟形洼地边滩是其高值区,即湿地植被生产力中心。在季节差异方面,春季EVI最大值在入湖河流三角洲及碟形洼地边滩等生产力高值区略高于秋季,但秋季EVI最大值在湖心区等生产力低值区远高于春季,因此秋季的鄱阳湖湿地植被生产力区域平均值要高于春季。

2) 近20年间鄱阳湖湿地植被生产力的变化在全年及春、秋两季均具有相似的特征,即具有极大的空间异质性。具体来说,鄱阳湖湿地植被生产力在中心水域及深泓线附近显著增长,而在入湖河流三角洲及湿地边缘则有弱下降。在季节差异方面,春季EVI最高值的增长区域面积占比极大(84.2%),而秋季增长区域占比略小(71.2%),仍有较大比例的EVI最高值在秋季下降(38.8%)。

3) 三峡运行以后,鄱阳湖湿地植被生产力中心经历了原位增长、空间扩展及湖心向转移三个演变阶段,完成了由入湖河流三角洲向湖心区的转移,并在整体上呈增长趋势,全年及春、秋季增速分别为0.0035、0.0049及0.0028 EVI/a。

本研究系统量化了后三峡工程时代鄱阳湖湿地植被生产力的变化,为提出维持其湿地植被系统结构与功能稳定的水资源管理策略提供了科学依据。

5 附录

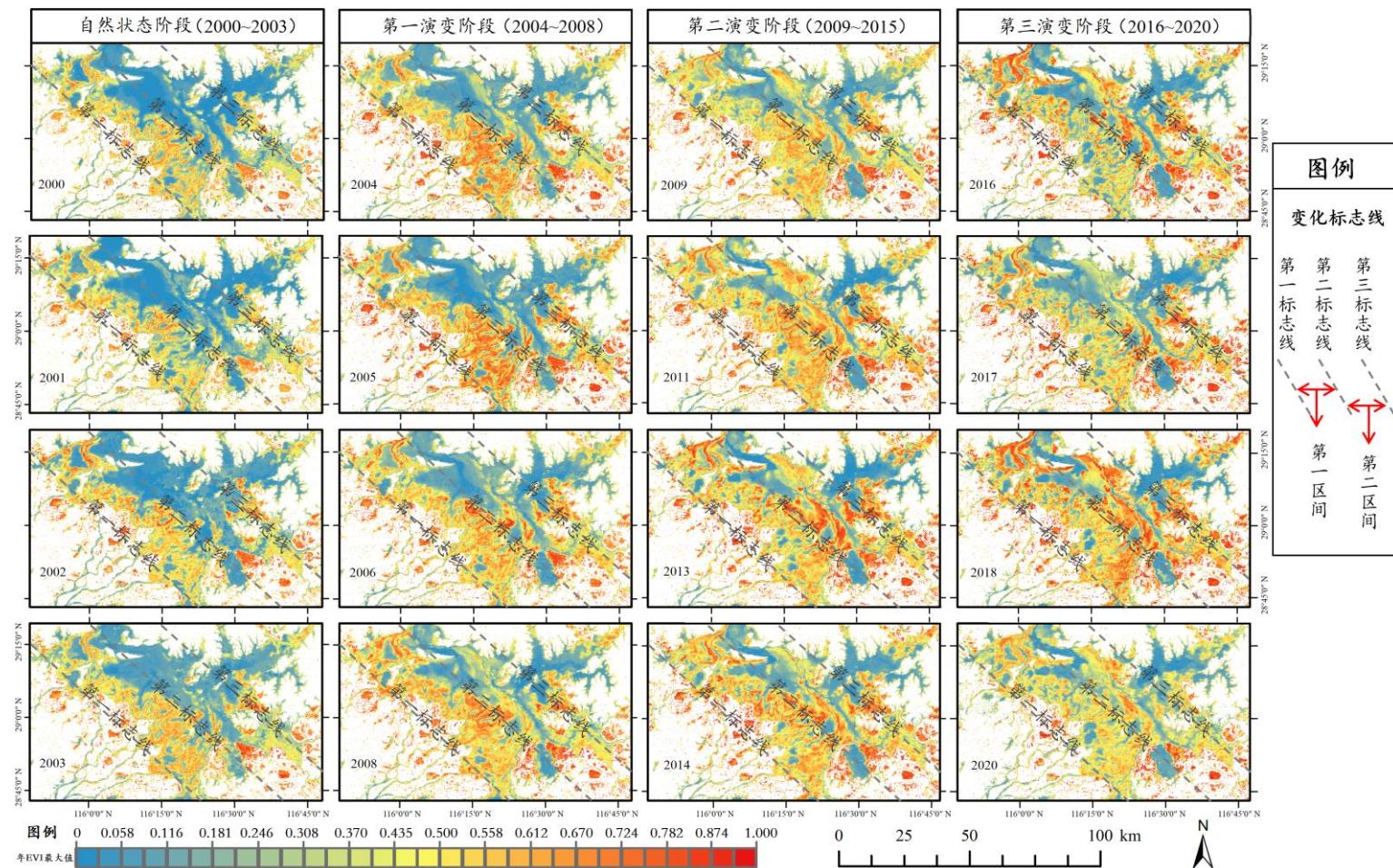
附图I见电子版(DOI: 10.18307/2023.0215)。

6 参考文献

- [1] Stanley EH. Taking a broader view of Three Gorges Dam. *National Science Review*, 2022, 9(6): nwac032. DOI: 10.1093/nsr/nwac032.
- [2] Dai HC. Summary of scientific and technological innovation and comprehensive benefit of Three Gorges project. *Hydropower and Pumped Storage*, 2019, 5(2): 1-7. [戴会超. 三峡工程科技创新与综合效益综述. 水电与抽水蓄能, 2019, 5(2): 1-7.]
- [3] 中华人民共和国水利部. 长江流域防洪规划. 2008. http://www.gov.cn/zhengce/content/2008-07/29/content_3035.htm.
- [4] Wang LS, Peng ZR, Ma X et al. Multiscale gravity measurements to characterize 2020 flood events and their spatio-temporal evolution in Yangtze River of China. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 127176. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127176.
- [5] Chen T, Song CQ, Zhan PF et al. Remote sensing estimation of the flood storage capacity of basin-scale lakes and reservoirs at high spatial

- and temporal resolutions. *Science of the Total Environment*, 2022, **807**: 150772. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150772.
- [6] Dai X, Yu ZB, Yang GS *et al*. Investigation of inner-basin variation: Impact of large reservoirs on water regimes of downstream water bodies. *Hydrological Processes*, 2021, **35**(5) : e14241. DOI: 10.1002/hyp.14241.
- [7] Zhang ZX, Chen X, Xu CY *et al*. Examining the influence of river-lake interaction on the drought and water resources in the Poyang Lake Basin. *Journal of Hydrology*, 2015, **522**: 510-521. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.008.
- [8] Gao JH, Jia JJ, Kettner AJ *et al*. Changes in water and sediment exchange between the Changjiang River and Poyang Lake under natural and anthropogenic conditions, China. *Science of the Total Environment*, 2014, **481**: 542-553. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.087.
- [9] Chen J, Finlayson BL, Wei TY *et al*. Changes in monthly flows in the Yangtze River, China—With special reference to the Three Gorges Dam. *Journal of Hydrology*, 2016, **536**: 293-301. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.03.008.
- [10] Dai X, Yu ZB, Yang GS *et al*. Role of flooding patterns in the biomass production of vegetation in a typical herbaceous wetland, Poyang Lake wetland, China. *Frontiers in Plant Science*, 2020, **11**: 521358. DOI: 10.3389/fpls.2020.521358.
- [11] Li XH, Hu Q, Wang R *et al*. Influences of the timing of extreme precipitation on floods in Poyang Lake, China. *Hydrology Research*, 2021, **52**(1) : 26-42. DOI: 10.2166/nh.2021.078.
- [12] Wu GP, Liu YB. Capturing variations in inundation with satellite remote sensing in a morphologically complex, large lake. *Journal of Hydrology*, 2015, **523**: 14-23. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.048.
- [13] Lai XJ, Jiang JH, Yang GS *et al*. Should the Three Gorges Dam be blamed for the extremely low water levels in the middle-Lower Yangtze River? *Hydrological Processes*, 2014, **28**(1) : 150-160. DOI: 10.1002/hyp.10077.
- [14] Yang GS, Zhang Q, Wan RR *et al*. Lake hydrology, water quality and ecology impacts of altered river-lake interactions: Advances in research on the middle Yangtze River. *Hydrology Research*, 2016, **47**(S1) : 1-7. DOI: 10.2166/nh.2016.003.
- [15] Hu ZP, Lin YR. Analysis of evolution process and driving factors for aquatic vegetations of Poyang Lake in 30 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(8) : 1947-1955. [胡振鹏, 林玉茹. 鄱阳湖水生植被 30 年演变及其驱动因素分析. 长江流域资源与环境, 2019, 28(8) : 1947-1955.]
- [16] Cui P, Xia SX, Liu GH *et al*. Population dynamics of wintering waterbirds in Poyang Lake. *Sichuan Journal of Zoology*, 2013, **32**(2) : 292-296. [崔鹏, 夏少霞, 刘观华等. 鄱阳湖越冬水鸟种群变化动态. 四川动物, 2013, 32(2) : 292-296.]
- [17] Jia YF, Jiao SW, Zhang YM *et al*. Diet shift and its impact on foraging behavior of Siberian crane (*Grus leucogeranus*) in Poyang Lake. *PLoS One*, 2013, **8**(6) : e65843. DOI: 10.1371/journal.pone.0065843.
- [18] Jia Q, Wang X, Zhang Y *et al*. Drivers of waterbird communities and their declines on Yangtze River floodplain lakes. *Biological Conservation*, 2018, **218**: 240-246. DOI: 10.1016/j.biocon.2017.12.029.
- [19] 世界自然基金会. 长江生命力报告 2020. 2020. <http://www.wwfchina.org/content/press/publication/2020/WWF>.
- [20] 胡春宏, 阮本清, 张双虎. 长江与洞庭湖鄱阳湖关系演变及其调控. 北京: 科学出版社, 2017.
- [21] Li K, Liu XJ, Zhou Y *et al*. Temporal and spatial changes in macrozoobenthos diversity in Poyang Lake Basin, China. *Ecology and Evolution*, 2019, **9**(11) : 6353-6365. DOI: 10.1002/ece3.5207.
- [22] Hu ZP, Ge G, Liu CL *et al*. Structure of Poyang Lake wetland plants ecosystem and influence of lake water level for the structure. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 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位对其影响研究. 长江流域资源与环境, 2010, 19(6) : 597-605.]
- [23] Wan RR, Dai X, Shankman D. Vegetation response to hydrological changes in Poyang Lake, China. *Wetlands*, 2019, **39**(1) : 99-112. DOI: 10.1007/s13157-018-1046-1.
- [24] 万荣荣, 戴雪, 王鹏. 鄱阳湖湿地时空格局演变及其水文响应机制. 南京: 东南大学出版社, 2020.
- [25] Fang HW, Han D, He GJ *et al*. Flood management selections for the Yangtze River midstream after the Three Gorges Project operation. *Journal of Hydrology*, 2012, **432/433**: 1-11. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.01.042.
- [26] Hird JN, McDermid GJ. Noise reduction of NDVI time series: An empirical comparison of selected techniques. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(1) : 248-258. DOI: 10.1016/j.rse.2008.09.003.
- [27] Buffam I, Turner MG, Desai AR *et al*. Integrating aquatic and terrestrial components to construct a complete carbon budget for a north temperate lake district. *Global Change Biology*, 2011, **17**(2) : 1193-1211. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02313.x.
- [28] Caplan JS, Hager RN, Megonigal JP *et al*. Global change accelerates carbon assimilation by a wetland ecosystem engineer. *Environmental Research Letters*, 2015, **10**(11) : 115006. DOI: 10.1088/1748-9326/10/11/115006.
- [29] Dai X, Yang GS, Liu DS *et al*. Vegetation carbon sequestration mapping in herbaceous wetlands by using a MODIS EVI time-series data set: A case in Poyang Lake wetland, China. *Remote Sensing*, 2020, **12**(18) : 3000. DOI: 10.3390/rs12183000.
- [30] Jin HY, Chen XH, Wang YM *et al*. Spatio-temporal distribution of NDVI and its influencing factors in China. *Journal of Hydrology*, 2021, **603**: 127129. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127129.
- [31] Piao SL, Wang XH, Park T *et al*. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, **1**(1) : 14-27. DOI: 10.1038/s43017-019-0001-x.

- [32] Piao SL, Liu Z, Wang T *et al.* Weakening temperature control on the interannual variations of spring carbon uptake across northern lands. *Nature Climate Change*, 2017, **7**(5) : 359-363. DOI: 10.1038/nclimate3277.
- [33] Lloyd J, Farquhar GD. Effects of rising temperatures and [CO₂] on the physiology of tropical forest trees. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2008, **363**(1498) : 1811-1817. DOI: 10.1098/rstb.2007.0032.
- [34] Wang T, Liu D, Piao SL *et al.* Emerging negative impact of warming on summer carbon uptake in northern ecosystems. *Nature Communications*, 2018, **9** : 5391. DOI: 10.1038/s41467-018-07813-7.
- [35] Wang SH, Zhang YG, Ju WM *et al.* Recent global decline of CO₂ fertilization effects on vegetation photosynthesis. *Science*, 2020, **370**(6522) : 1295-1300. DOI: 10.1126/science.abb7772.
- [36] Tan ZQ, Tao H, Jiang JH *et al.* Influences of climate extremes on NDVI (normalized difference vegetation index) in the Poyang Lake Basin, China. *Wetlands*, 2015, **35**(6) : 1033-1042. DOI: 10.1007/s13157-015-0692-9.
- [37] Lou YJ, Pan YW, Gao CY *et al.* Response of plant height, species richness and aboveground biomass to flooding gradient along vegetation zones in floodplain wetlands, northeast China. *PLoS One*, 2016, **11**(4) : e0153972. DOI: 10.1371/journal.pone.0153972.
- [38] 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.
- [39] Hu ZP. The habitat characteristics of white cranes to live through the winter in Poyang Lake and the reaction for water level changing in the lake. *Jiangxi Science*, 2012, **30**(1) : 30-35, 120. DOI: 10.13990/j.issn1001-3679.2012.01.030. [胡振鹏. 白鹤在鄱阳湖越冬生境特性及其对湖水位变化的响应. 江西科学, 2012, **30**(1) : 30-35, 120.]
- [40] Wu GP, Ye C, Liu YB. Spatial distribution of wetland vegetation biomass in the Poyang Lake National Nature Reserve, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(2) : 361-369. [吴桂平, 叶春, 刘元波. 鄱阳湖自然保护区湿地植被生物量空间分布规律. 生态学报, 2015, **35**(2) : 361-369.]



附图 I 2000~2020 年鄱阳湖湿地年 EVI 最大值变化的阶段性

Attached Fig. I | Stages of changes in the annual maximum EVI of the Poyang Lake Wetland during 2000 to 2020