

DOI: 10.20103/j.stxb.202404170847

岳恩馨, 刘意, 李相虎, 赵华琼, 叶许春. 鄱阳湖洪泛系统水文连通性演变特征及对湿地植被生长的影响. 生态学报, 2025, 45(4): 1938-1949.

Yue E X, Liu Y, Li X H, Zhao H Q, Ye X C. Evolution characteristics of hydrological connectivity in floodplain system of Poyang Lake and its impact on wetland vegetation growth. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1938-1949.

鄱阳湖洪泛系统水文连通性演变特征及对湿地植被生长的影响

岳恩馨¹, 刘意¹, 李相虎², 赵华琼³, 叶许春^{1,*}

¹ 西南大学地理科学学院, 重庆 400715

² 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008

³ 重庆市松树桥中学校, 重庆 401147

摘要: 水文连通性是影响洪泛区水文过程及生态系统结构和功能的关键要素, 对湿地植被的生长与分布尤为重要。基于 ESTARFM (Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model) 模型重构了 2000—2022 年鄱阳湖洪泛系统高时空分辨率水体指数 NDWI (Normalized Difference Water Index) (8d, 30m) 和增强型植被指数 EVI (Enhanced Vegetation Index) (16 d, 30 m) 数据集, 并结合地统计水文连通性函数, 系统研究了鄱阳湖区多维水文连通性的演变特征及其对湿地植被生长的影响规律。结果表明: 1) 鄱阳湖区不同水文期内东西和南北方向的水文连通性随距离增加均呈现高度动态变化特征, 水文连通性函数曲线的变化速率为: 枯水期 > 退水期 > 涨水期 > 丰水期; 2) 研究时段内, 鄱阳湖北水文连通性明显高于东西水文连通性, 但就不同区域而言, 主湖区和南矶保护区的主导连通性随时间发生变化, 碟形湖区及鄱阳湖保护区以南北水文连通性为主导; 不同区域东西水文连通性呈现较为一致的波动下降趋势, 南北水文连通性演变趋势差异较大; 3) 鄱阳湖湿地植被 EVI 与水文连通性之间呈现显著的负相关关系, 其中, 主湖区植被 EVI 主要受东西水文连通性控制, 碟形湖区及鄱阳湖保护区植被 EVI 受东西和南北水文连通性的共同作用, 南矶保护区植被 EVI 更多的受南北水文连通性影响。加强变化环境下水文连通性对湿地生态系统“结构-过程-功能”的影响规律研究, 对促进湖泊系统水资源管理和湿地生态保护至关重要。

关键词: 水文连通性; 长时间序列; 鄱阳湖; 湿地植被

Evolution characteristics of hydrological connectivity in floodplain system of Poyang Lake and its impact on wetland vegetation growth

YUE Enxin¹, LIU Yi¹, LI Xianghu², ZHAO Huaqiong³, YE Xuchun^{1,*}

¹ School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

² State Key Laboratory of Lake Science and Environment / Nanjing Institute of Geography and Limnology, Nanjing 210008, China

³ Chongqing Songshuqiao Middle School, Chongqing 401147, China

Abstract: Hydrological connectivity is a key factor affecting hydrological processes and the ecosystem structure and function in the floodplain areas, and is particularly crucial for the growth and distribution of wetland vegetation. This study utilizes high spatiotemporal resolution NDWI (Normalized Difference Water Index) (8d, 30m) and EVI (Enhanced Vegetation Index) (16 d, 30 m) datasets, reconstructed using the ESTARFM model (Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model), to analyze the Poyang Lake floodplain system from 2000 to 2022. By combining these datasets with geostatistical connectivity functions and applying correlation analysis, we systematically investigated the evolution

基金项目: 国家自然科学基金 (42071028); 国家重点研发计划 (2022YFC3204102); 重庆市研究生科研创新项目 (CYS240145)

收稿日期: 2024-04-17; **网络出版日期:** 2024-11-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yxch2500@163.com

characteristics of multidimensional hydrological connectivity and its impact on wetland vegetation growth. The results revealed several important discoveries: 1) Poyang Lake's hydrological connectivity varies significantly with increasing distance across different hydrological periods, displaying dynamic changes in both the east-west (E-W) and north-south (N-S) directions. The rate of change in hydrological connectivity function follows this pattern: dry period>recession period>rising period>flood period. In other words, low hydrological connectivity can be observed during the dry period, intermediate hydrological connectivity tends to occur during the rising and recession period, while high hydrological connectivity is found during the flood period. 2) During the study period, the N-S hydrological connectivity of the Poyang Lake was notably higher than the E-W hydrological connectivity. However, this dominance varied across different regions. For instance, in the main lake region and the Nanji Wetland National Nature Reserve, the dominant hydrological connectivity shifted over time. Conversely, the dish-shaped lake region and the Poyang Lake National Nature Reserve consistently exhibited N-S hydrological connectivity dominance. What's more, although the E-W hydrological connectivity showed a consistent downward trend, the N-S hydrological connectivity exhibited substantial variability over time in different regions. 3) Significantly negative correlation was observed between wetland vegetation EVI and hydrological connectivity in the Poyang Lake floodplain. At the interannual scale, the wetland vegetation EVI in the main lake region is predominantly influenced by the E-W hydrological connectivity, while the vegetation EVI in the dish-shaped lake region and the Poyang Lake National Nature Reserve is jointly affected by both the E-W and N-S hydrological connectivity. The vegetation EVI in the Nanji Wetland National Nature Reserve is more affected by the N-S hydrological connectivity. Strengthening research on the impact of hydrological connectivity on the "structure-process-function" of wetland ecosystems under the changing environment is vital for promoting water resource management and wetland ecological protection in lake systems.

Key Words: hydrological connectivity; time series data; Poyang Lake; wetland vegetation

水文连通是洪泛区重要的水文特征,对湿地植被生长状况和生境格局具有重要影响^[1]。由于研究关注的重点、目标和尺度等的不同,水文连通的概念没有统一的标准。目前,一般认为水文连通是指以水为媒介的物质、能量及生物在水文循环各要素内或各要素之间的传输转移过程^[2-3]。水文连通性通过改变水文水动力过程影响生态系统,其路径一是直接改变生境面积、植被格局和生物迁移繁殖特征,二是通过改变水质和沉积物特征而作用于生物的生长发育及其体内污染物累积转化过程^[4]。作为连接河湖水体间物质、能量及信息传递与交换的关键纽带,水文连通性对水环境、水生态和生境状况具有联动与触发反馈作用,已成为诸多领域的研究热点^[5]。

鄱阳湖是我国最大的淡水湖泊,也是长江中下游最具代表性的洪泛系统,不仅在蓄水、防洪、水资源利用等方面具有重要作用,而且提供了完整而独特的洪泛湿地生态系统。水文连通性是表征湿地格局和功能稳定性的重要指标,对维持整个生态系统稳定性与效益综合性至关重要^[6-7],量化方法有原位监测、水文模型、连通性函数和图论等^[8]。近年来有关研究表明,变化环境下湿地水文连通性显著下降,导致湿地功能出现了不同程度的退化,内部能量流动和养分循环出现扰乱^[6,9]。鄱阳湖区不同水文控制模式下的湿地植被生长差异显著^[10],水文节律变化对不同水管控模式子湖的水生植被更新与恢复的影响程度也不一样^[11]。此外,水文连通状况及改变程度上影响了鄱阳湖碟形湖及湖汊湿地植物群落和候鸟栖息地的分布特征^[12]。这些研究着眼于从物理的水文控制角度分析不同区域水文连通性差异及其影响,但缺乏从不同维度的角度研究水文连通性变化的生态环境效应。最近,基于鄱阳湖洪泛系统水文水动力特征,Li 等^[13]综合考虑水文连通性与生态环境指标之间的耦联关系,引入水文连通函数重新定义了水文连通性的概念及其意义。Tan 等^[14]在此基础上进一步构建了洪泛区有效水文连通性指数,提升了对洪泛区水文连通及其生态环境服务功能的认识。然而,还有研究揭示了多尺度水文连通对湿地生态系统的重要性^[15]。因此,进一步从不同时空尺度上探求多维水文连通性的长期演变特征及对洪泛湿地生态系统的影响,有助于对湖泊湿地生态环境评估与健康维护的科

学认识。

鄱阳湖洪泛区水文节律独特、景观组成复杂、生境条件多样,在长江经济带绿色发展和长江大保护等国家战略逐步实施的背景下,有关湖区水文连通性的长期演变及其对湿地生态系统“结构-过程-功能”关系的影响研究仍需要加强。此外,鄱阳湖洪泛系统下垫面空间异质程度高,基于水文模拟或者遥感数据获取洪泛区水文要素的时空分布格局可能存在精准度不够、空间分辨率低和时间不连续等局限性^[16—17],如何提高水文要素监测的时空分辨率和准确性是湿地生态水文研究一直以来面临的挑战。为此,本研究采用多源遥感数据和时空融合技术构建鄱阳湖区连续的高时空分辨率淹水动态和植被覆盖数据,聚焦鄱阳湖洪泛系统多维水文连通性的变化特征及其对湿地植被生长的影响,以期为维护鄱阳湖水生态安全、促进湖泊湿地资源的保护和修复提供重要的科学依据。

1 研究区概况

鄱阳湖位于江西省北部(28°24'N—29°46'N, 115°49'E—116°46'E),承纳赣江、抚河、信江、饶河、修河五大江河(简称“五河”)来水补给,经调蓄后由湖口注入长江(图1),是一个过水性、吞吐型、季节性的通江湖泊。鄱阳湖水位涨落受五河及长江来水的双重影响,季节性波动显著,年内水位落差最大可达10 m以上,具有明显的洪泛特征。丰水期时,湖泊水位高涨,湖面宽阔,水域面积可超过3000 km²;枯水期时,湖泊水位下降,洲滩出露,湖水归槽,水域面积常萎缩到不足500 km²,呈现出“洪水一片,枯水一线”的独特自然地理特征。

鄱阳湖湖盆地势平坦,整体上自东向西、由南向北倾斜,微地形复杂,形成了丰富的异质性生境。在洪、枯季节湖泊剧烈的水位波动下,鄱阳湖区形成了约3000 km²的季节性洪泛湿地生态系统,其上发育了众多大小

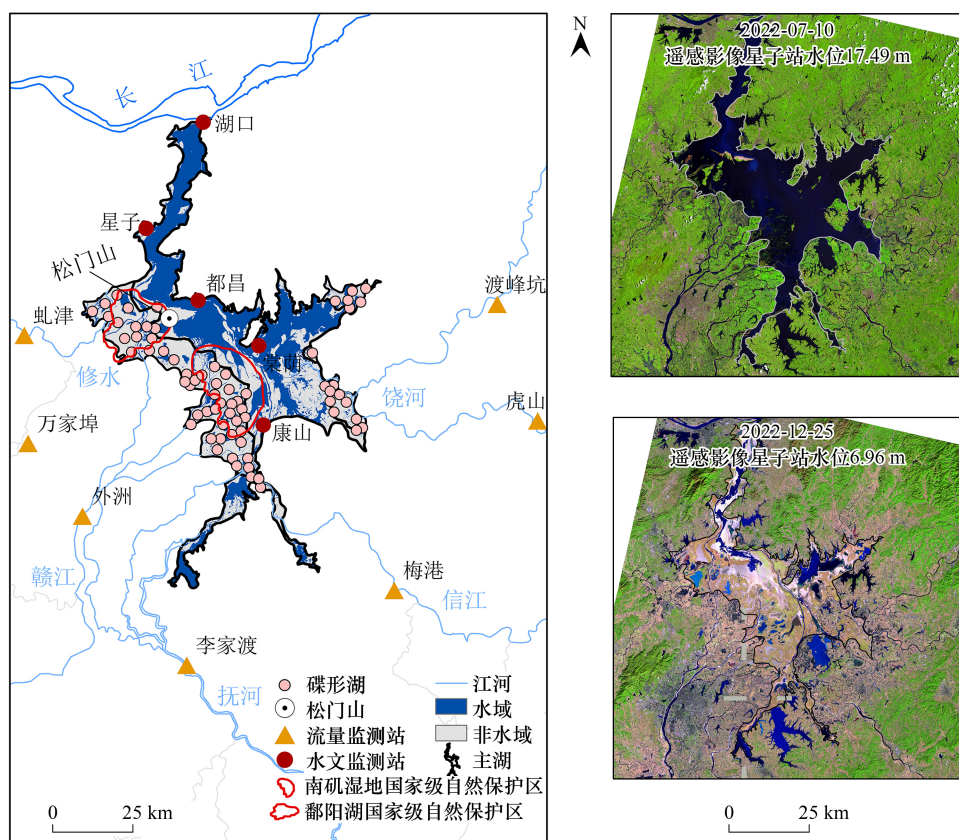


图1 鄱阳湖洪泛系统水系构成

Fig.1 Hydrological composition of the Poyang Lake floodplain system

不一的碟形洼地(碟形湖)(图 1)。碟形湖与主湖区通江水体之间表现为高水位相通、中水位相关、低水位分离的水文特征。基于水文特性和湖盆地形的差异,本文将鄱阳湖洪泛系统分成两部分:一部分是集中在赣江及其支流入湖三角洲上的碟形湖区,另一部分则为狭长、承载主流的主湖区。

独特地形结构和水文特征孕育了鄱阳湖洪泛湿地丰富的景观类型和生物多样性,使其成为东亚-澳大利亚候鸟迁徙路线上重要的水鸟越冬地。为了实现对鄱阳湖重点湿地生态功能区的有效保护,鄱阳湖区建立了较为完善的自然保护地体系,其中包括鄱阳湖国家级自然保护区和南矶湿地国家级自然保护区等 2 处国家级自然保护区。

2 数据和方法

2.1 研究数据

本研究所使用的遥感数据包括 2000—2022 年 Landsat(包括 TM、ETM+、OLI)系列卫星多光谱遥感影像(<http://glovis.usgs.gov>),以及 NASA Terra 平台上 MODIS 地表反射率数据集(MOD09A1)和陆地产品中的植被指数产品(MOD13Q1)(<https://search.earthdata.nasa.gov/search>)(表 1)。其中,Landsat 数据空间分辨率为 30 m,时间分辨率为 16 d,每年共 23 景影像。由于云覆盖的影响,大大降低了 Landsat 数据的可用性,在研究期间,直接获得 324 幅可用的 Landsat 影像。MOD09A1 数据集是 MODIS 数据 500 m 地表反射率每 8 天的合成产品,共有 13 个数据层,一年共 46 景影像,研究时段内,共获得 MOD09A1 影像 1012 幅,使用数据中的波段 2 和 4。MOD13Q1 数据集是采用 Sinusoidal 投影方式的 3 级网格陆地植被数据产品,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,共有 12 个数据层,一年共 23 景影像,研究时段内,共获得 MOD13Q1 影像 495 幅,使用数据中的 EVI 波段。获取使用的所有遥感影像数据质量较好,在使用之前,所有 Landsat 数据均在 ENVI 平台进行标准化的数据预处理,包括辐射定标、大气校正以及 Landsat7 ETM SLC-OFF 数据产品的条带处理等,MODIS 数据均利用 MRT(MODIS Reprojection Tool)工具进行投影变换、格式转换和重采样,并对 MOD13Q1 数据中的 EVI 波段在 MATLAB 平台进行滤波处理等。

表 1 研究所用遥感影像数据
Table 1 Remote sensing images used in this study

数据类型 Data type	传感器类型 Sensor type	时空分辨率 Spatiotemporal resolution	年内影像数 Number of annual images	行号/列号 Row/Column number	获得影像数 Number of images obtained
陆地卫星 Landsat	TM/ETM+/OLI	16 d, 30 m	23	121/40	324
地表反射率产品 (MOD09A1) Surface reflectance product	TERRA	8 d, 500 m	46	28/06	1012
植被指数产品 (MOD13Q1) Vegetation index product	TERRA	16 d, 250 m	23	28/06	495

MOD09A1:中等分辨率地表反射率 Moderate resolution imaging spectroradiometer surface reflectance; MOD13Q1:中等分辨率植被指数 Moderate resolution imaging spectroradiometer vegetation index;TM:专题制图仪 Thematic mapper;ETM+:增强型专题制图仪 Enhanced thematic mapper plus; OLI:陆地成像仪 Operational land imager

2.2 研究方法

2.2.1 水体和植被提取方法

采用单一的水体指数法提取湖泊水域面积。水体指数法是将水体反射强的波段和反射弱的波段通过比值运算构建的指数,并结合一定的阈值来提取水体信息。NDWI(Normalized Difference Water Index)是最常用的水体指数,计算公式如下:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

(1)

式中,NIR 和 Green 分别表示遥感影像中近红外和绿波段的反射率值。

由于水体阈值随影像变化而变化,考虑到地物灰度差异,本研究采用 NDWI 直方图人机交互的分析方式,最终确定水体提取阈值为 0。Ye 等^[18]的研究结果表明,针对随机选取的一期遥感数据,基于该阈值提取的鄱阳湖水域范围与人工目视解译结果相比,其总体分类精度大于 98%,Kappa 系数大于 0.95。

鄱阳湖区植被覆盖度高,季节变化明显,为客观地反映流域植被生长变化情况,本研究选用增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)反映植被生长变化相关信息^[10, 19]。EVI 是一种优化植被指数,旨在通过减少来自大气和土壤噪音的双重影响来增强高生物量地区的植被信号,从而稳定地反应所测地区植被的真实生长和覆盖状况。其计算公式如下:

$$EVI = 2.5 \left(\frac{NIR - Red}{NIR + 6Red - 7.5Blue + 1} \right) \quad (2)$$

式中, NIR、Red 和 Blue 分别表示遥感影像中近红外、红和蓝波段的反射率值。

与基于 NDWI 的水体分类一样,为了准确的区分植被与非植被,研究中利用像元直方图对研究区年均 EVI 数据进行图像分割,以 EVI 大于 0.1 作为植被提取的阈值。因此后续时间序列分析中将剔除 $EVI \leq 0.1$ 的其他水体、泥滩像元后进行湿地植被覆盖变化研究。

2.2.2 ESTARFM 模型

由于云雾或水气的遮挡,极大地降低了 Landsat 光学遥感数据的可用性,采用相应 MODIS 数据进行数据融合和插补。基于前期工作基础,本研究采用 ESTARFM(Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model)模型^[20]开展鄱阳湖区高时空分辨率遥感数据的融合重构工作。ESTARFM 是一种基于移动窗口的数据融合方法,考虑了从相似光谱的相邻像素获取的辅助信息及这些像素的权重,从而增强了在异质性区域的融合精度,具体原理可见相关参考文献。

前人研究中,Ye 等^[18]、Wu 等^[21]采用 ESTARFM 模型构建了 2000—2020 年鄱阳湖区连续的高时空分辨率 NDWI(8 d, 30 m),并据此分析了鄱阳湖洪泛系统淹水动态的时空异质性特征和水位-面积迟滞关系演变。以此数据为基础,本研究进一步采用 ESTARFM 模型将鄱阳湖区高时空分辨率 NDWI(8 d, 30 m)数据序列延长至 2022 年;与此同时,重新构建了 2000—2022 年间连续完整的 EVI(16 d, 30 m)数据序列。

2.2.3 水文连通性函数

水文连通的量化方法繁多,量化洪泛区水文连通性不仅需要考虑水文连通性的科学意义,而且应更好地保留水文连通的动态变化信息^[22]。本研究基于 Trigg 等^[22]提出的地统计连通性函数,李云良等^[23]集成的连通性评价工具(Connectivity Assessment Tool 1.0, CAST 1.0)估算鄱阳湖水文连通性。该方法基于创建的水体和非水体二值化遥感数据,计算任何方向($D8$)、不同距离上,多个点位区域(n)的水文连通性(Pr)超过阈值(z_c)的概率值(即水文连通函数:Connectivity Function, CF),计算公式如下^[24]:

$$CF(n; z_c) = Pr \left\{ \prod_{j=1}^n I(u_j; z_c) = 1 \right\} \quad (3)$$

式中, $I(u_j; z_c)$ 代表变量 $Z(u_j)$ 在位置 u_j 处超过阈值 z_c 的指示因子,定义为如果 $Z(u_j) > z_c$, $I(u_j; z_c) = 1$, 否则, $I(u_j; z_c) = 0$; $\prod$ 表示乘积算子。

水文连通性函数可以表示为在某个方向上若干个点连接在一起的概率,研究区的内部异质性越强,其空间熵值越大,因此随着点数的增加连通性函数会快速递减为零^[23]。该函数揭示了空间上的水体在指定方向距离上的连通程度,其应用原则及计算过程可参见以上相关文献。本研究基于 2000—2022 年鄱阳湖洪泛系统连续的高时空分辨率 NDWI(8d, 30m)数据集,分别估算得到鄱阳湖不同区域东西和南北方向的水文连通性函数值。

2.2.4 STL 分解法

STL(Seasonal and Trend decomposition using Loess)是一种非常通用和稳健强硬的分解时间序列的方法,其中 Loess 是一种估算非线性关系的方法,由 Cleveland 等^[25]于 1990 年提出。STL 分解法通过 Loess 平滑可

以将时间序列数据 Y_t 分解为趋势项 (T_t)、季节项 (S_t) 和残差 (R_t), Y_t 可用各分项之和表示:

$$Y_t = T_t + S_t + R_t \quad (4)$$

3 结果

3.1 鄱阳湖水文连通基本规律

图 2 显示了鄱阳湖涨水期(每年 3—5 月)、丰水期(每年 6—8 月)、退水期(每年 9—11 月)和枯水期(每年 12 月—翌年 2 月)的东西和南北方向水文连通性函数曲线的变化特征。由图 2 可知,不同水文期内两个方向的水文连通性在距离尺度(x 轴)上呈现高度动态变化特征,并随时间推移函数曲线的变化速率(减小速率)有所不同。总体上,水文连通性函数曲线的减小速率在枯水期最快,涨水期和退水期中等,丰水期最慢,反映鄱阳湖水体在枯水期水文连通性较差,而在丰水期水文连通性较好。水文连通性曲线还显示,不同方向的水文连通性变化特征也存在一定差异。同一水文时期,南北方向水文连通性函数曲线的变化速率明显较东西方向的变化速率更缓(图 2)。进一步统计最大连通距离(最大连通距离即水文连通性函数曲线达到 0 时的距离)也发现,鄱阳湖不同水文状况下主要水流运动为南北方向,地表水流路径在南北方向的联系比东西方向的联系更为显著。

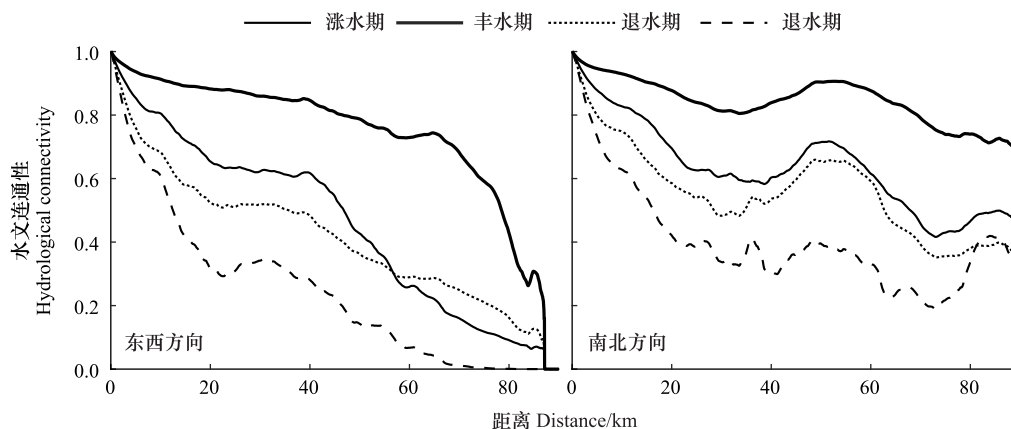


图 2 鄱阳湖多年平均水文连通性函数曲线

Fig.2 Annual average hydrological connectivity function in the Poyang Lake

水文连通性函数曲线可以描述鄱阳湖水文连通性的高低,而水文连通性 CF 值能更清晰的识别年际水文连通变化趋势,识别各个时期的水文连通状况。就多年平均而言,鄱阳湖枯水期平均水文连通性 CF 值为 0.313,涨水期和退水期 CF 值分别为 0.533 和 0.470,而丰水期 CF 值高达 0.778。图 3 进一步显示了鄱阳湖洪泛系统不同区域水文连通性的年际变化过程。就湖泊整体而言,2000 年来鄱阳湖水文连通性表现出明显的波动性,变化区间在 0.294—0.788 之间,最小值和最大值相差 2 倍以上。其中,水文连通性在 2011 年最低、2002 年最高。2020 年长江流域降水偏丰,夏季发生了流域性特大洪水,鄱阳湖区更是洪水异常、水位高涨,该年湖泊水文连通性好,南北水文连通性达到 0.680,东西连通性为 0.518。另外,2022 年鄱阳湖整体偏旱,在夏秋季节发生了“汛期反枯”现象,导致该年枯水期提前,水文连通性变差,南北水文连通性为 0.555,东西连通性仅为 0.356。从鄱阳湖水文连通性年际变化观察到南北方向水文连通性 CF 值明显高于东西水文连通性 CF 值,表明南北水文连通性是鄱阳湖的主导水文连通性。

鄱阳湖不同区域水文连通性年际变化呈现较大差异。鄱阳湖主湖区水文连通性变化区间在 0.472—0.788 之间,碟形湖区水文连通性变化区间在 0.049—0.237 之间,鄱阳湖保护区水文连通性变化区间在 0.152—0.546 之间,南矶保护区水文连通性变化区间在 0.231—0.733 之间(图 3)。不同区域的水文连通性年际变化同鄱阳湖整体趋势一样,都表现出明显的年际波动,但各区域的主导连通性变化特征不同。主湖区在 2000—

2008 年间,东西连通性是主导水文连通性,而在 2009—2022 年间主导水文连通性则转变为南北连通性。碟形湖区表现出和整个鄱阳湖区一样的主导连通性特征,不同之处在于碟形湖区东西连通性和南北连通性差值较小。鄱阳湖保护区与南矶保护区,呈现出不同的主导连通性特征,前者同整个湖区一样,南北水文连通性高于东西水文连通性;而后者在 2000—2009 年、2013—2015 年、2017—2019 年和 2021 年间,东西连通性是主导水文连通性,其余时间段里则是南北连通性是主导水文连通性。

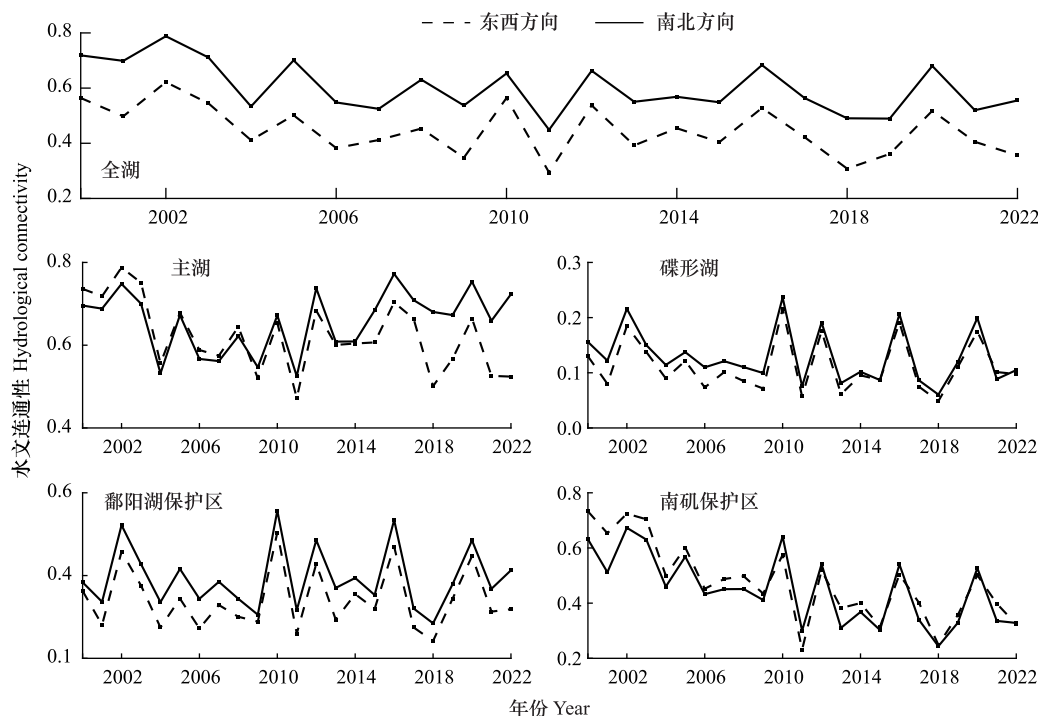


图 3 鄱阳湖水文连通性年际变化

Fig.3 Interannual variation of hydrological connectivity in the Poyang Lake

3.2 长时序水文连通性的趋势及季节性

由图 4 可知,鄱阳湖洪泛系统水文连通性时间序列表现出明显的年内波动,即季节性,并且该季节性特征在较长时间范围内呈现一定的年际波动趋势。趋势项变化表明,自 2002 年来鄱阳湖洪泛系统整体水文连通性呈现波动下降趋势,其中,东西方向上,2008 年、2012 年、2014 年、2016 年和 2019 年出现拐点,南北方向上,2007 年、2009 年、2014 年、2016 年和 2019 年出现拐点。

鄱阳湖不同区域的水文连通性演变特征存在差异性(图 5)。主湖区东西连通性与整个湖区大致保持一致,呈现微弱的波动下降趋势,而南北连通性变化趋势差别明显。具体而言,主湖区东西连通性在 2008 年、2011 年和 2014 年出现拐点;南北连通性在 2007 年、2012 年、2014 年、2016 年和 2019 年出现拐点,并自 2007 年以来呈现波动上升趋势。碟形湖区东西连通性自 2003 年以来呈波动下降趋势,而南北连通性自 2000 年来呈现稳定的下降趋势,与主湖区表现出截然不同的现象。鄱阳湖保护区自 2000 年来东西连通性演变趋势与碟形湖区保持一致;而南北连通性呈现“W”型波动特征,其在 2000—2010 年呈现下降趋势,但在 2011 年之后呈现明显的上升、下降和上升交替变化特征。南矶保护区水文连通性的整体演变特征更接近于碟形湖区,只是其下降趋势中波动性略微突出。

3.3 湿地植被 EVI 的变化特征

鄱阳湖湿地植被集中分布在碟形湖区域,EVI 年均值空间变化范围为 0.100—0.601(图 6)。其中,EVI 较高的区域主要分布在鄱阳湖保护区,低值大多集中在主湖区片状水域边缘。湿地植被的生长过程受植被本身的物候特性和湖区水文节律变化的影响。鄱阳湖湿地植被 EVI 年内变化呈现出双峰型特征,分别在上半年

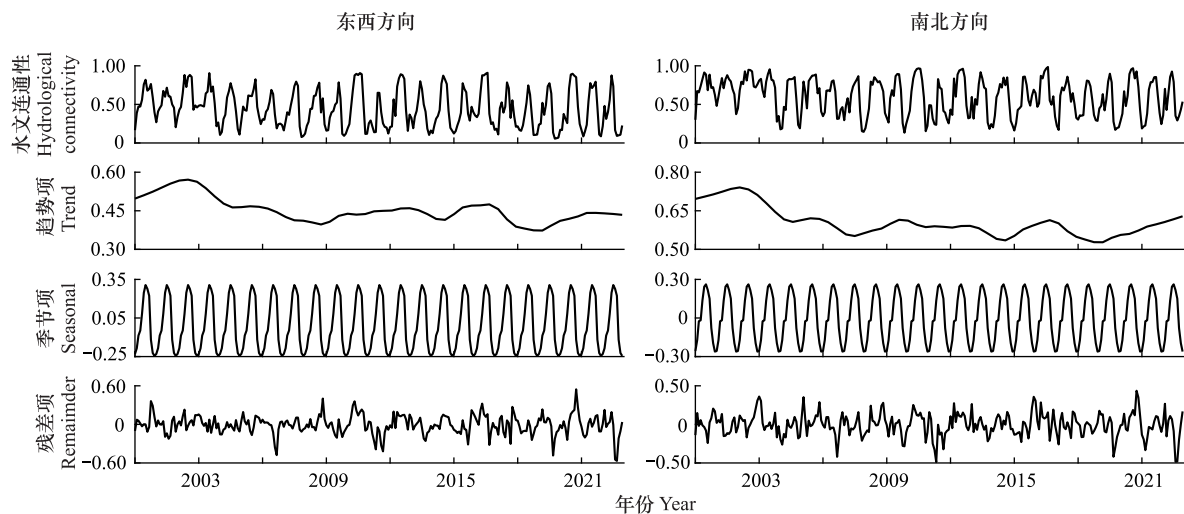


图 4 鄱阳湖水文连通性的原始序列,趋势,季节及残差

Fig.4 Original sequence, trend, season and remainder of hydrological connectivity in the Poyang Lake

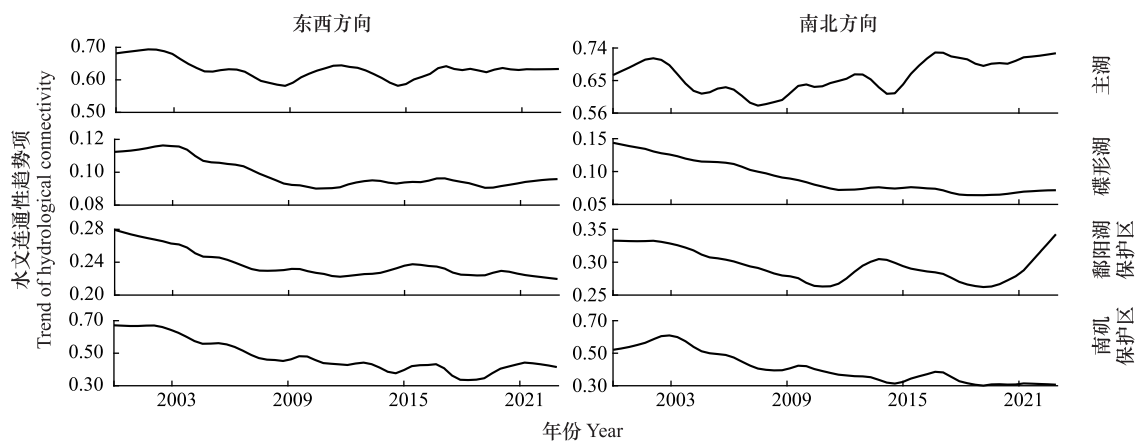


图 5 鄱阳湖不同区域水文连通性时间序列趋势对比

Fig.5 Comparison of time series trends of hydrological connectivity in different regions of the Poyang Lake

4 月份和下半年 9 月份各出现一个峰值,峰值大小为 0.397 和 0.362(图 6)。就不同时段来看,EVI 随水位的涨落呈现规律变化,每年 3—5 月完成第一阶段植被的生长,随后汛期来临,EVI 降低;到了 9 月退水阶段,湿地植被进入第二个生长季,接着水位持续下降,EVI 回落至较低水平。就不同湖区而言,湿地植被 EVI 年内变化特征存在一致性和差异性(图 6)。总体上,湿地植被 EVI 均值在春季最大,其次是秋季和夏季,冬季最小。前三个季度里,鄱阳湖保护区 EVI 均值明显大于其他区域,碟形湖区 EVI 均值也大于主湖区;冬季,南矶保护区 EVI 均值最大,主湖区 EVI 略大于碟形湖区。

结合不同区域湿地植被 EVI 时间序列趋势对比可知,2000 年以来,整个湖区、主湖区、碟形湖区和鄱阳湖保护区植被 EVI 保持总体同步的波动上升趋势(图 7),并以 2008 年为界,大体存在两个上升阶段。南矶保护区植被 EVI 的变化过程略有不同,2008 年以前趋势波动更加剧烈,后一阶段的波动上升趋势相对平缓。

3.4 湿地植被 EVI 对水文连通性的响应

相关性分析表明,年际尺度上,鄱阳湖湿地植被 EVI 与东西和南北方向水文连通性 CF 值之间均呈现显著的负相关关系($P < 0.05$),但就不同区域而言,不同方向的水文连通性与植被 EVI 之间的关系存在一定差异(图 8)。在主湖区,湿地植被 EVI 主要受东西水文连通性控制,南北水文连通性的影响十分微弱。整个碟形湖区及鄱阳湖保护区的湿地植被 EVI 变化,明显受东西和南北水文连通性的共同影响,两者几乎具有同等重

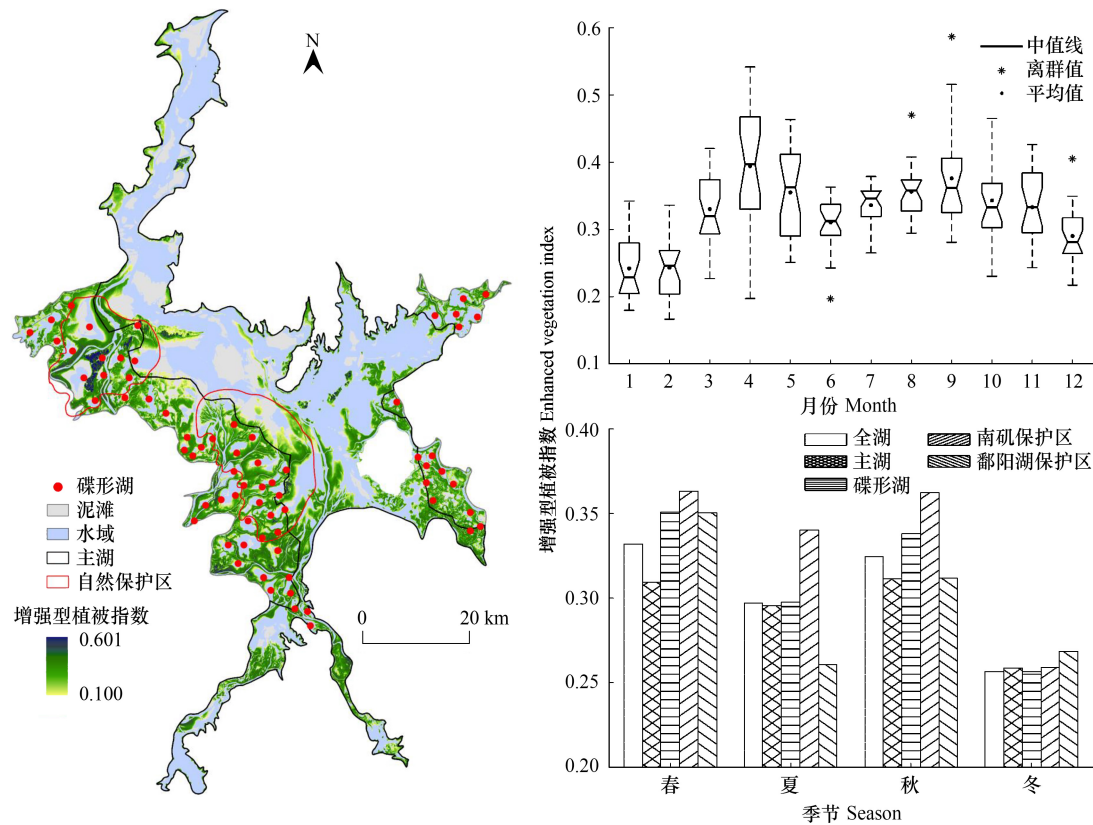


图 6 鄱阳湖湿地植被 EVI 时空变化

Fig.6 Spatiotemporal changes of EVI in the Poyang Lake wetland

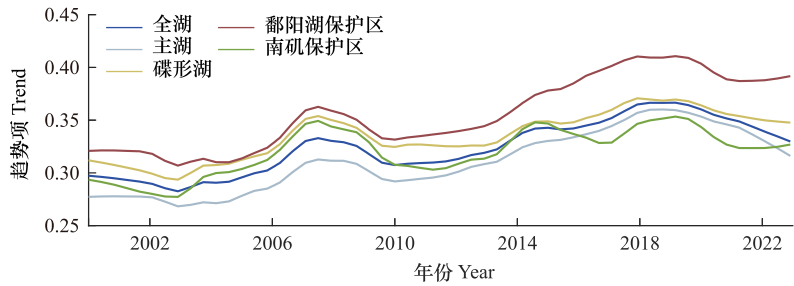


图 7 鄱阳湖不同区域 EVI 序列趋势对比

Fig.7 Comparison of trends of EVI in different regions of the Poyang Lake

要的作用。相比而言,南矶保护区湿地植被 EVI 变化更多的受到南北水文连通性的影响,东西水文连通性的影响相对较弱。

图 9 进一步显示了月尺度上鄱阳湖湿地植被 EVI 与水文连通性 CF 值之间的相关关系。整体上,两者之间以负相关关系为主,其中 3—5 月和 8—11 月的负相关系数偏大,且负相关关系大多达到显著性水平 ($P < 0.05$); 2 月和 7 月的相关系数偏小,湿地植被 EVI 与 CF 之间的相关程度极弱,其余月份里湿地植被 EVI 与 CF 主要表现为低度相关。从不同区域来看,主湖区湿地植被 EVI 在 3、10 月份明显受东西水文连通性的影响。尽管碟形湖区湿地植被 EVI 受东西和南北水文连通性的影响均较突出,但部分月份里的主导连通性影响不同,其中 3、12 月份,湿地植被 EVI 主要受南北水文连通性影响,而 6 月份则受东西水文连通性控制。两个自然保护区内湿地植被 EVI 与两个方向水文连通性的关系,与整个碟形湖区相似。

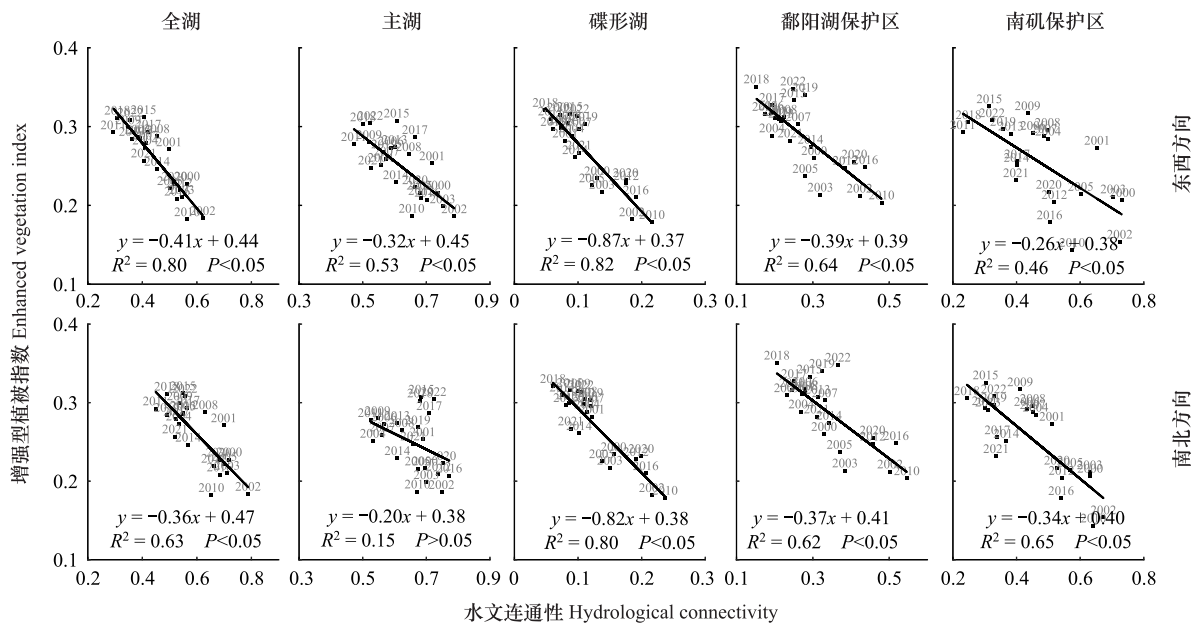


图8 鄱阳湖年均 EVI 与水文连通性 CF 值的拟合关系

Fig.8 Fitting relationship between annual EVI and CF in the Poyang Lake

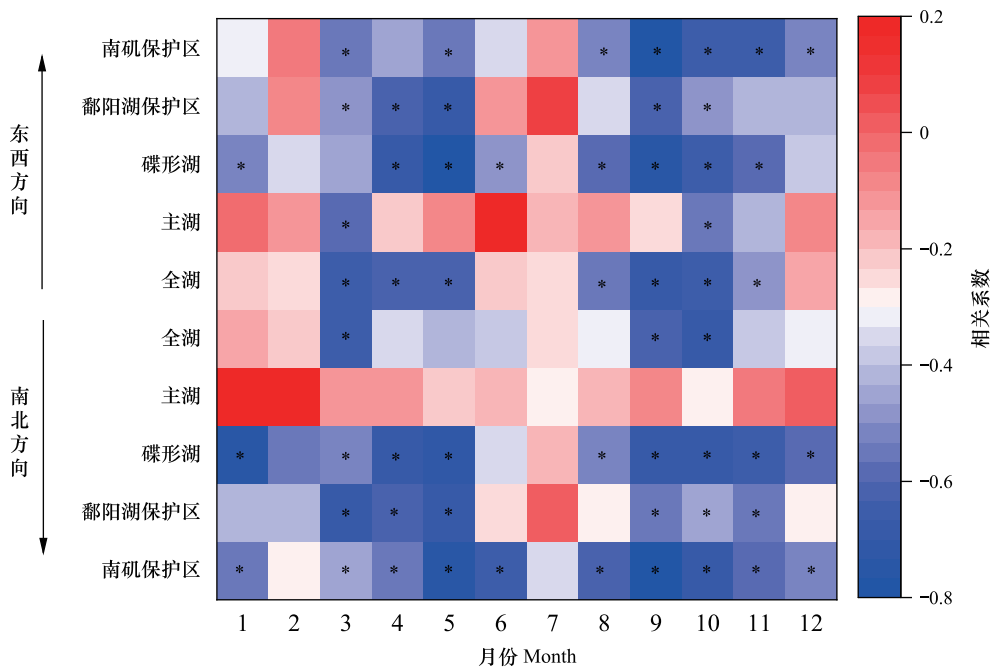


图9 鄱阳湖湿地植被 EVI 与 CF 月度相关关系

Fig.9 Correlation between EVI and CF in the Poyang Lake wetland

* 表示通过 0.05 显著性检验

4 讨论

鄱阳湖不同时期不同方向的水文连通性大小及其变化,不仅与流域和长江来水多少有关,而且受系统内部的下垫面空间格局制约。鄱阳湖洪泛系统广泛发育的碟形湖地貌景观,进一步加剧了湖区下垫面的空间异质性特征,导致不同方向水文连通性的差异。枯水期鄱阳湖水位较低,洲滩大部分出露,淹没水体的空间分布

异质性强,连通性差;丰水期水位升高,主湖区和碟形湖区连成一片,水域空间分布连续,连通性好^[23]。刘星根等^[26]也研究表明湖泊水位对水文连通性具有控制作用。鄱阳湖不同区域水文连通性演变特征与不同区域对流域来水和长江干流的天然水力联系差异有关,同时受洪泛区部分子湖建造水利设施等人类活动引起的水文连通性改变的影响。鄱阳湖与长江干流的水文交互使长江来水对主湖区水位变化相较于流域来水具有明显的控制作用^[18,27]。与此相反,碟形湖区位于主湖区外围上游区域,区内众多子湖都建有水闸控制,形成与主湖区的人为阻隔,其水文连通性变化主要受流域来水和水闸管控的影响^[18,28]。近年来,鄱阳湖区采砂活动造成湖泊南北水力梯度增加,出流能力增强^[29-30],在很大程度上是导致主湖区水体淹没动态南北联系加强,南北水文连通性呈增加趋势的主要原因。然而,以干旱为主要特征的鄱阳湖区水文极端变化,引起碟形湖区部分子湖水文变化的人为管控更加突出,从而降低了碟形湖区的南北连通性^[31-32]。鄱阳湖保护区中存在多个与主湖保持自由连通的子湖,主湖区的水文变化对该区域有一定程度的影响,导致南北连通性呈波动起伏变化。南矶保护区位置较高,大多子湖受到人为阻隔,其水文连通性变化与碟形湖区整体情况较为一致。

在较大尺度上,湿地植被的景观结构很大程度上受水文连通的影响^[33-34]。鄱阳湖丰富的湿地植被景观格局主要来自于湖盆内部复杂的小地形和微地貌,特别是数量众多的碟形湖,为各种水生植物和越冬水鸟提供了优越的环境条件^[28]。湖泊水文连通变化影响洪泛洲滩的出露时间,一方面控制着湿地植被的生长时间,导致植被 EVI 呈现显著差异^[19],较高的 CF 值表明湖区连通的水体越多,洲滩被广泛淹没,不利于湿地植被生长。另一方面,湖泊水文连通变化引起淹没水体的空间分布异质性,造成不同水文连通性的碟形湖湿地植被 EVI 呈现不同的变化趋势和空间格局^[34]。这与史林鹭等^[10]研究发现不同水文控制模式对湿地植被 EVI 具有不同影响一致。本研究进一步深入分析了不同方向水文连通性变化对不同湖区植被生长的影响。由于鄱阳湖由南向北的整体主流方向,不同水文期南北方向的水文连通性较好且变化稳定(图 2),因此南北水文连通性变化对洪泛滩地出露面积的影响较小,而东西水文连通性的影响相对突出,这也是鄱阳湖整体及主湖区湿地植被 EVI 主要受东西水文连通性控制的根本原因。相对而言,碟形湖区地形相对封闭,同时存在与主湖自由连通和人为闸控的子湖,区内淹水面积的大小一方面受湖泊南北水文连通性变化的制约,另一方面受碟形湖之间或碟形湖与主湖之间侧向水力联系(即东西水文连通性)的作用,因此两个方向水文连通性对湿地植被 EVI 的变化均有较大影响。

基于不同时空尺度水文连通性变化及对湿地植被 EVI 的影响研究有助于理解湿地生态系统“结构-过程-功能”关系,有利于湖泊湿地生态环境评估与健康维护的科学认识。需要指出的是,本研究仅量化了地表水文连通性,缺乏对闸坝等水利工程增加水文连通性计算的复杂性讨论,同时未考虑地下连通性在湿地生态过程中的重要作用。湿地植被的生长格局还受到土壤、水动力条件、营养物质、气温和降水等因素的制约^[19,35]。植被生长对水文连通性变化的响应可能存在滞后效应,湿地植被 EVI 与 CF 之间也可能存在其他更为复杂的非线性相关,但是本文在阐述这两者之间的响应规律时并未加以考虑。今后研究中可对此进行改进并展开深入探究。此外,近年来,长江中下游地区频繁出现水位异常现象,洪涝或水文干旱事件频发,极大地影响了湿地生态系统植被的生长和分布^[36]。因此,加强对极端水文事件,特别是极端干旱过程中的水文连通性变化、以及由此导致的湿地植被群落分布和生物多样性变化研究十分必要。

5 结论

研究表明,不同水文期鄱阳湖东西和南北方向的水文连通性在距离尺度上均呈现高度动态变化,其中,枯水期水文连通性函数曲线的变化速率最快,丰水期最慢。同一水文期不同方向的水文连通性函数曲线的变化速率也存在一定差异,南北方向相较于东西方向更缓慢。此外,鄱阳湖不同区域水文连通性年际变化差异显著,不同时期表现出不同的主导连通性特征。在演变趋势上,不同区域东西水文连通性呈现波动下降趋势,而南北水文连通性演变趋势差异较大。总体上,鄱阳湖湿地植被 EVI 呈长期的波动上升趋势。湿地植被 EVI 与水文连通性 CF 之间存在显著的负相关关系,但不同区域的湿地植被 EVI 受东西、南北方向水文连通性控制

的方式存在差异。通过分析鄱阳湖洪泛系统多维水文连通性的长期演变特征,揭示了不同时空尺度上水文连通性与植被 EVI 之间的复杂关系,为湖泊湿地生态环境管理提供了重要参考。

参考文献 (References):

- [1] 崔保山,蔡燕子,谢浩,宁中华,华妍妍. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势. 北京师范大学学报:自然科学版, 2016, 52(6): 738-746.
- [2] Pringle C M. Hydrologic connectivity and the management of biological reserves: a global perspective. *Ecological Applications*, 2001, 11(4): 981-998.
- [3] Pringle C. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? *Hydrological Processes*, 2003, 17(13): 2685-2689.
- [4] 刘丹,王烜,李春晖,蔡宴朋,刘强. 水文连通性对湖泊生态环境影响的研究进展. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7): 1702-1715.
- [5] 杨素,万荣荣,李冰. 太湖流域水文连通性:现状、研究进展与未来挑战. 湖泊科学, 2022, 34(4): 1055-1074.
- [6] 张梦嫒,吴秀芹. 近 20 年白洋淀湿地水文连通性及空间形态演变. 生态学报, 2018, 38(12): 4205-4213.
- [7] 汤子同,李兴丽,刘华兵,李谦维,高俊琴. 新疆科克苏湿地植被生物量时空分布特征及与水文连通的关系. 生态学报, 2024, 44(7): 3038-3048.
- [8] 高常军,高晓翠,贾朋. 水文连通性研究进展. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3): 586-594.
- [9] 闫欣,牛振国. 白洋淀流域湿地连通性研究. 生态学报, 2019, 39(24): 9200-9210.
- [10] 史林鹭,贾亦飞,左奥杰,马童慧,雷佳琳,雷光春,文力. 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. 生物多样性, 2018, 26(8): 828-837.
- [11] 王欢,陈文波,何蕾,李海峰. 鄱阳湖不同水文连通性子湖水生植被覆盖度对年际水位变化的响应. 应用生态学报, 2022, 33(1): 191-200.
- [12] 熊丽黎,刘建新,李宽意,闵翔,吴召仕,郭玉银,王仕刚,邓燕青,欧阳千林. 近 60 年鄱阳湖东部湖湾水文连通变化及其对湿地植物与候鸟的影响. 湖泊科学, 2023, 35(1): 313-325.
- [13] Li Y L, Tan Z Q, Zhang Q, Liu X G, Chen J, Yao J. Refining the concept of hydrological connectivity for large floodplain systems: framework and implications for eco-environmental assessments. *Water Research*, 2021, 195: 117005.
- [14] Tan Z Q, Li Y L, Zhang Q, Liu X G, Song Y Y, Xue C Y, Lu J Z. Assessing effective hydrological connectivity for floodplains with a framework integrating habitat suitability and sediment suspension behavior. *Water Research*, 2021, 201: 117253.
- [15] 解成杰,谢浩,刘泽正,宁中华,于淑玲,王青,于海玲,崔保山. 水文连通对湿地生物的影响. 环境生态学, 2020, 2(1): 26-34.
- [16] Li Y L, Zhang Q, Yao J, Werner A D, Li X H. Hydrodynamic and hydrological modeling of the Poyang Lake catchment system in China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(3): 607-616.
- [17] Tan Z Q, Li Y L, Xu X L, Yao J, Zhang Q. Mapping inundation dynamics in a heterogeneous floodplain: insights from integrating observations and modeling approach. *Journal of Hydrology*, 2019, 572: 148-159.
- [18] Ye X C, Wu J, Li X H, Li Y L, Zhang Q, Xu C Y. Multi-source remote sensing data and image fusion technology reveal significant spatiotemporal heterogeneity of inundation dynamics in a typical large floodplain lake system. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2023, 50: 101541.
- [19] 叶春,刘元波,赵晓松,吴桂平. 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, 2013, 22(6): 705-712.
- [20] Zhu X L, Chen J, Gao F, Chen X H, Masek J G. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(11): 2610-2623.
- [21] Wu J, Zhang Q, Li Y L, Xu C Y, Ye X C. Spatial-temporal variations of stage-area hysteretic relationships in large heterogeneous lake - floodplain systems. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129507.
- [22] Trigg M A, Michaelides K, Neal J C, Bates P D. Surface water connectivity dynamics of a large scale extreme flood. *Journal of Hydrology*, 2013, 505: 138-149.
- [23] 李云良. 鄱阳湖洪泛系统地表-地下水文水动力过程与模拟. 北京: 科学出版社, 2022: 150-185.
- [24] Journel A G, Kyriakidis P C, Mao S G. Correcting the smoothing effect of estimators: a spectral postprocessor. *Mathematical Geology*, 2000, 32(7): 787-813.
- [25] Cleveland R B, Cleveland W S, McRae J E, Terpenning I. STL: a seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*, 1990, 6(1): 3-33.
- [26] 刘星根,段夕跃,虞慧. 鄱阳湖典型洪泛区水位-水面积、水位-水文连通性的非线性特征. 中国农村水利水电, 2021, 8: 81-89.
- [27] Zhang Q, Ye X C, Werner A D, Li Y L, Yao J, Li X H, Xu C Y. An investigation of enhanced recessions in Poyang Lake: comparison of Yangtze River and local catchment impacts. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 425-434.
- [28] 胡振鹏,张祖芳,刘以珍,纪伟涛,葛刚. 碟形湖在鄱阳湖湿地生态系统的作用和意义. 江西水利科技, 2015, 41(5): 317-323.
- [29] Lai X J, Shankman D, Huber C, Yesou H, Huang Q, Jiang J H. Sand mining and increasing Poyang Lake's discharge ability: a reassessment of causes for lake decline in China. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 1698-1706.
- [30] Ye X C, Liu F H, Zhang Z X, Xu C Y. Quantifying the impact of compounding influencing factors to the water level decline of China's largest freshwater lake. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2020, 146(6): 05020006.
- [31] Liu X G, Zhang Q, Li Y L, Tan Z Q, Werner A D. Satellite image-based investigation of the seasonal variations in the hydrological connectivity of a large floodplain (Poyang Lake, China). *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124810.
- [32] 张奇,薛晨阳,夏军. 鄱阳湖极端干旱的影响、成因与对策. 中国科学院院刊, 2023, 38(12): 1894-1902.
- [33] 刘佳凯. 黄河三角洲滨海湿地水文连通及其对植被结构的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [34] 史林鹭. 水文连通性对鄱阳湖湿地植被生长动态的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [35] 钱奎梅,刘霞,段明,陈宇炜. 鄱阳湖蓝藻分布及其影响因素分析. 中国环境科学, 2016, 36(1): 261-267.
- [36] 徐力刚,谢永宏,王晓龙. 长江中游通江湖泊洪泛湿地生态环境问题与研究展望. 中国科学基金, 2022, 36(3): 406-411.