

鄱阳湖洪泛系统水文干旱对水文连通性的影响*

岳恩馨¹, 赵林¹, 钱品瑜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: 洪泛湖泊水文干旱及其对水文连通性的影响对当地水资源管理和湿地生态保护至关重要。基于 ESTARFM (Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model) 模型重构的鄱阳湖区 2000—2023 年高时空分辨率淹水数据集, 采用标准化淹水面积指数定量表征鄱阳湖洪泛系统水文干旱, 并结合地统计水文连通性函数, 研究分析了鄱阳湖区水文干旱和水文连通性演变特征; 在此基础上, 采用 STL (Seasonal and Trend decomposition using Loess) 时间序列分解及多元线性函数拟合法, 明确了水文连通性对水文干旱变化的响应规律。研究表明, 鄱阳湖区水文干旱的年内和年际变化较为复杂, 干旱事件的发生频率较高, 且整体上呈现旱情增加趋势。鄱阳湖区南北水文连通性强于东西水文连通性, 近年来湖区水文连通性呈现出波动下降趋势, 与湖区水文干旱强度变化有关。定量分析发现, 随着水文干旱程度的增强, 鄱阳湖区水文连通性呈现下降趋势。其中, 东西方向上, 鄱阳湖区轻旱、中旱、重旱、极旱较无旱情境下年均水文连通性分别降低 45.2%、50.0%、54.6%和 70.7%; 南北方向上, 年均水文连通性分别降低 32.1%、35.6%、39.0%和 50.7%。鄱阳湖区水文干旱引起的水文连通性变化将对湿地植被的生长分布产生重要影响, 研究结果为极端水情下的湖泊生态系统管理实践提供依据。

关键词: 洪泛系统; 水文干旱; 水文连通性; 数据融合; 鄱阳湖

Impact of hydrological drought on hydrological connectivity in the Lake Poyangfloodplain system*

Yue Enxin¹, Zhao Lin¹, Qian Pinyu¹, Liu Yi¹, Li Xianghu², Zhao Huaqiong³ & Ye Xuchun^{1,**}

(1: School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Lake Science and Environment /Nanjing Institute of Geography and Limnology, Nanjing 210008, P.R.China)

(3: Chongqing Songshuqiao Middle School, Chongqing 401147, P.R.China)

Abstract: Scientific research into hydrological drought in lake-floodplains and its impact on hydrological connectivity is of great significance for the management of local water resources and the protection of wetland ecosystems. The present study utilized the ESTARFM model (Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model) to reconstruct high spatiotemporal resolution inundation datasets from 2000 to 2023. The resulting datasets were then employed to quantitatively characterize hydrological drought and hydrological connectivity in Poyang Lake. To this end, the standardized inundation area index and the geostatistical hydrological connectivity function were utilized to analyse the evolution characteristics of the aforementioned phenomena. On this basis, the response of hydrological connectivity to hydrological drought was further clarified by employing the methods of STL (Seasonal and Trend Decomposition using Loess) time series decomposition and multivariate linear fitting function. The findings indicated that the hydrological drought in Lake Poyang exhibited both annual and interannual variations, characterized by a high frequency of occurrence and an escalating drought trend. The hydrological connectivity in the north-south direction of the Lake Poyang is stronger than that in the east-west

* 2024-11-22 收稿; 2025-04-17 收修改稿。

国家自然科学基金项目(42071028), 国家重点研发计划(2022YFC3204102)和重庆市雏鹰计划项目(CY240227)联合资助。

** 通讯作者; E-mail: yxch2500@163.com。

direction. In recent years, the hydrological connectivity of Lake Poyang has exhibited a fluctuating downward trend, which is associated with variations in the intensity of hydrological drought. Subsequent quantitative analysis revealed that with an increase in the degree of hydrological drought, hydrological connectivity in Lake Poyang demonstrated a downward trend. In the east-west direction, the annual average hydrological connectivity of light drought, medium drought, severe drought and extreme drought in the Lake Poyang can decrease by 45.2%, 50.0%, 54.6% and 70.7%, respectively, compared to a no drought scenario. In a similar fashion, in the north-south direction, the annual average hydrological connectivity can decrease by 32.1%, 35.6%, 39.0% and 50.7%, respectively. The alterations to hydrological connectivity occasioned by hydrological drought in the Lake Poyang area will have further consequences for the growth and distribution of wetland vegetation. The results of this study provide a scientific basis for the management of lake ecosystems under extreme water conditions.

Keywords: lake-floodplain system; hydrological drought; hydrological connectivity; data fusion; Lake Poyang

干旱是指在一定时期内, 由于近地表区域水资源不平衡或供需不平衡而引起的水资源短缺现象^[1]。水文干旱作为干旱的一种类型, 通常表现为河流径流、水库或湖泊蓄水量以及地下水位较正常年份偏低, 主要特征是特定时期内区域水量的减少^[2]。大型洪泛湖泊下垫面空间异质程度高、系统开放性强, 水域变化程度和频率时空差异大。对全湖而言不同站点水位的代表性不一样, 基于传统站点水文监测数据计算的标准化水位指数在反映湖泊干旱状况时存在较大不确定性。另一方面, 大型洪泛湖泊系统中湖泊水体、洪泛区以及入湖河流之间存在复杂的水交换机制, 导致湖泊水位和淹水面积、蓄水量之间存在明显的水文迟滞现象, 不利于采用水位数据反映湖泊整体的水情状况^[3-4]。相比于湖泊水位数据, 水体淹没面积是湖泊形态特征的重要参数, 与湖泊水位和水量变化密切相关, 是客观反映洪泛湖泊水域覆盖和干旱状况的重要指标。

河流、湖泊的洪泛区通常视为一种特殊的湿地类型, 具有水文调节、水质净化、养分保留、野生动植物栖息和碳储存等多种重要的生态系统服务功能^[5-6]。水文连通性是洪泛湿地重要的水文特征, 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, 对湿地植被生长状况和生境格局具有重要影响, 是湿地格局和功能稳定性的重要指标, 也是近年来生态水文学研究的热点^[7-9]。水文连通性不仅受区域气候条件和水文状况的影响, 而且还受到下垫面地形条件, 土壤湿度和人类活动等的影响^[10-13]。研究表明, 气候变化可以直接影响水文连通性^[14], 干旱造成湖泊水域分散, 使部分水域呈现孤立的状态, 从而减少水文连通的持续时间和频率^[15]。极端干旱事件作用于河湖连通条件, 可改变河湖关系并削弱河湖水文连通^[16]。另外, 干旱事件的规模和强度也会对水文连通性造成影响, 长时间的干旱会导致河流水文连通性中断和降低, 抑制溶解物质的输移^[17-18], 进而导致一系列湿地生态问题^[9]。受气候变化和人类活动等综合因素的影响, 近年来全球范围内的干旱事件频发, 已经对地表水文水资源情势和生态系统安全造成了重要影响及威胁^[19]。水体的水文连通性在其季节波动节律的基础上, 与区域水文干旱之间存在怎样的量化关系, 不同程度旱情对其变化作用如何, 尚不清楚。加强变化环境下干旱对地表水体水文连通性的影响研究, 对提高区域水土资源配置效率、改善水文生态环境、保障生态安全等具有重要的现实意义。

鄱阳湖是长江中下游最具代表性的洪泛湖泊系统, 也是长江经济带绿色发展维护稳定和稳定区域水资源和水生态安全的重要结点。近年来, 鄱阳湖区水文干旱事件频发, 对区域水文和生态环境造成了重大不利影响^[20-21]。极端干旱事件引起鄱阳湖水体萎缩、洪泛区地下水位大幅度下降以及地下水流速加快^[19], 导致水文连通性发生变化^[3], 造成湿地植被生长呈现不同的变化趋势和空间格局^[22]。然而, 长期以来, 受洪泛区生态、水文实地监测困难、传统数值模拟精度有限^[23-24]、以及长时间连续高时空分辨率遥感数据构建困难^[25-27]等挑战, 有关鄱阳湖区生态水文的精细定量研究还很不足。为此, 本文以鄱阳湖为研究对象, 充分考虑洪泛系统水文动态高度时空异质性特征, 基于多源遥感影像和图像融合技术构建的长时间高时空分辨率湖泊淹水数据, 开展鄱阳湖洪泛系统水文干旱与水文连通性变化特征的定量研究, 深入分析和探讨水文连通性变化的影响要素, 特别是水文干旱与水文连通性之间的量化关系以及不同程度干旱对水文连通性的影响, 以期增强湖泊抗旱能力、提高湖泊生态系统的管理实践提供依据。

1. 研究数据和方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖是我国第一大淡水湖, 位于长江中下游南岸, 承纳赣江、抚河、信江、饶河和修水五大江河(以下简称“五河”)来水, 经调蓄后由北部湖口注入长江(图 1)。作为与长江自然相连的开放水体, 鄱阳湖的水文状况受到五河及长江来水的双重影响, 湖泊水位年内落差可达 10 m 以上, 使其成为一个复杂的江-河-湖复合生态系统。每年丰水期, 鄱阳湖水域面积可超过 3000 km², 而在枯水期, 湖泊水域面积常萎缩到不足 500 km², 从而呈现“洪水一片, 枯水一线”的特有景观。另外,

在丰、枯季节剧烈的水位波动下，鄱阳湖区形成了约 3000 km² 的季节性洪泛湿地生态系统，是东亚-澳大利西亚候鸟迁徙路线上重要的中转站，也是我国长江中下游地区最大和最重要的候鸟越冬地。鄱阳湖洪泛湿地内部还发育了众多大小不一的季节性子湖（碟形湖），其与主湖通江水体之间的水文连通性表现为高水位相通、中水位相关、低水位分离的水文特征。

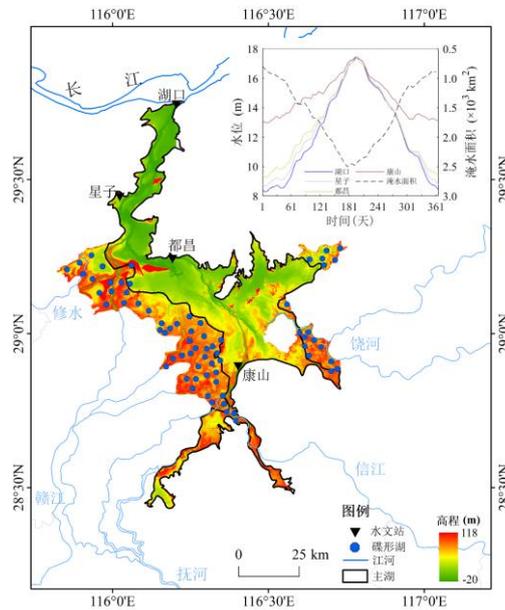


图 1 研究区概况

Fig.1 Schematic diagram of the study area

1.2 研究数据

本研究所使用的遥感数据包括 2000—2023 年 Landsat (包括 TM、ETM+、OLI) 系列卫星遥感影像 (<http://glovis.usgs.gov>) 和 NASA Terra 平台上 MODIS 地表反射率数据集 (MOD09A1) (<https://search.earthdata.nasa.gov>)。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 333 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 1058 幅，使用数据中的波段 2 和 4。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、格式转换和重采样等。图 2 显示了本研究中使用的所有 Landsat 和 MODIS 数据的时间分布。除遥感数据外，研究还获取了 2000—2023 年鄱阳湖湖口、星子、都昌和康山 4 个水文站的实测逐日水位数据 (中国江西省水文局)。

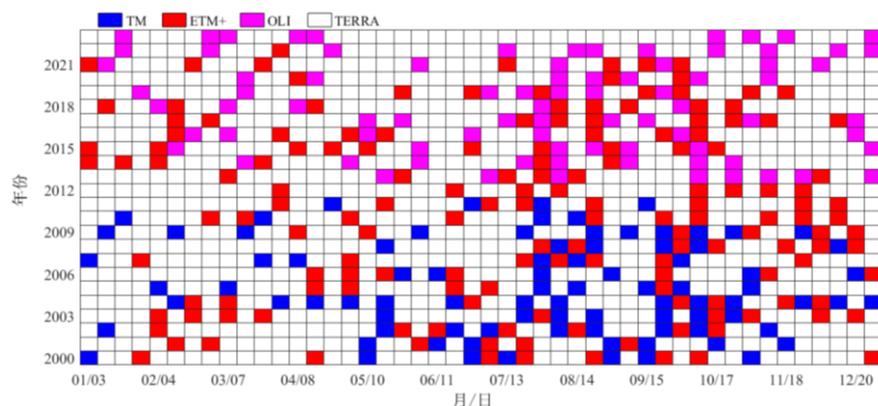


图 2 研究获得 Landsat 和 MOD09A1 数据时间分布

Fig.2 Temporal distribution of Landsat and MOD09A1 data acquired in this study

1.3 研究方法

1.3.1 基于 ESTARFM 模型的鄱阳湖淹水数据序列构建

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：

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (1)$$

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。

考虑水体阈值随影像变化而变化及地物灰度差异等因素，采用研究区年均 NDWI 分布直方图波谷处对应值 0 作为鄱阳湖水体的提取阈值。前人的部分研究，也表明采用 NDWI 阈值为 0 时能较好地提取鄱阳湖水体^[28]。通过对不同水文期随机选取的高质量 Landsat 遥感数据分析，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，其总体分类精度系数可达 90%。此外，本研究还利用李昕悦等^[29]构建的鄱阳湖全天候水位-面积逐日数据集进行了精度验证，通过对样本数据对应日期的淹水面积数据构建混淆矩阵，计算其总体分类精度的平均值为 86.94%，Kappa 系数的平均值为 0.71。

构建高时空分辨率淹水数据集是定量评价洪泛区水文干旱和水文连通性的前提。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，可采用相应 MODIS 数据进行数据融合和插补。当前，遥感数据的时空信息融合方法很多，不同方法背后的机理和适用性各有差异^[30]。基于前期工作基础，本研究采用 ESTARFM (Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model) 模型^[26]开展鄱阳湖区高时空分辨率遥感数据的融合重构工作，该模型的具体原理可见相关参考文献。前人研究表明，ESTARFM 算法在鄱阳湖湿地的融合预测效果方面具有较好的适用性^[27, 30]。Ye 等^[31]、Wu 等^[27]曾采用 ESTARFM 模型构建了 2000—2020 年鄱阳湖区连续的高时空分辨率 NDWI (8d, 30m)，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，本研究利用 ESTARFM 模型将鄱阳湖区高时空分辨率 NDWI (8d, 30m) 数据序列延长至 2023 年，并对融合的 NDWI 与 Landsat NDWI 进行精度验证，结果表明，这两者的线性拟合优度介于 0.629—0.910 之间，平均相对误差为 6.3%，融合数据可以用于计算鄱阳湖水文干旱指数和水文连通性。

1.3.2 基于淹水面积的洪泛湖泊水文干旱指数

标准化水文干旱指数被广泛用于识别和表征水文干旱，并可以对水文干旱严重程度进行一致性区域比较^[32]。McKee 等^[33]首次提出了标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI) 来定量描述气象干旱，由于其计算简单和具有多时间尺度特征，可以满足各种气象干旱的评估需求。理论上，SPI 是一种基于长序列的概率分析统计方法，采取相同的阈值识别干旱在年内不同时段的发生情况，其值是在该时间序列同一时期平均水平上相对缺水的反映。该指数具有较好的理论基础，在其之后发展出来的众多气象、水文干旱指标，如标准化降水蒸发指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)^[34]、帕默尔水文干旱指数 (Palmer Hydrological Drought Index, PHDI)^[35]、标准化径流指数 (Standardized Runoff Index, SRI)^[36]等，均采用了类似的计算理论。

本研究同样通过类似的方式将 SPI 原理应用于淹水面积的标准化指数计算，并据此提出标准化淹水面积指数 (Standardized Inundation Area Index, SIAI) 用于定量表征鄱阳湖洪泛系统的水文干旱，其具体计算步骤可参考 SPI。需要指出的是，当利用 SPI 原理采用其他水文要素定量分析区域水文干旱时，应选择最合适的概率分布函数进行标准化计算^[37]。本研究选取 Gamma、Normal、Weibull、Lognormal 和 Logistic 5 个概率分布函数，拟合检验鄱阳湖月度淹水面积数据的概率分布，并采用 Kolmogorov Smirnov (K-S) 检验^[38]评价拟合优度。经验分布函数 (Empirical Distribution Function, ECDF (X)) 与在给定概率分布下累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF (X)) 的最大垂直差值 (即 D 统计量) 计算如下：

$$D = \max(\max_i \left| CDF(x_i) - \frac{r-1}{n}, \frac{r}{n} - CDF(x_i) \right|) \quad (2)$$

式中， r 是观测值 i 的升序排列。 D 值越小，说明水文序列对概率分布的拟合越好。如果水文序列来自给定的累积分布函数，则 D 值收敛于 0。本研究中，24 年的月度淹水面积数据对应的 0.05 显著性水平 D 临界值为 0.08014 ($n = 288$, $1 - \alpha = 95\%$)。

对湖泊淹水面积进行了 5 种概率分布函数的拟合测试 (图 3)，得到 K-S 检验 D 统计量分别为 0.068、0.080、0.073、0.074 和 0.073。由此可知，5 种概率分布函数总体上对鄱阳湖淹水面积均拟合较好，相对而言 Gamma 函数的拟合效果最佳。因此本研究选取最合适的 Gamma 概率分布函数来计算鄱阳湖洪泛系统的 SIAI 指数。基于湖泊淹水面积计算的 SIAI 与 SPI 具有相同的干旱分类：轻度干旱 ($-1 < SIAI \leq -0.5$)、中度干旱 ($-1.5 < SIAI \leq -1$)、重度干旱 ($-2 < SIAI \leq -1.5$) 以及极端干旱 ($SIAI \leq -2$)。

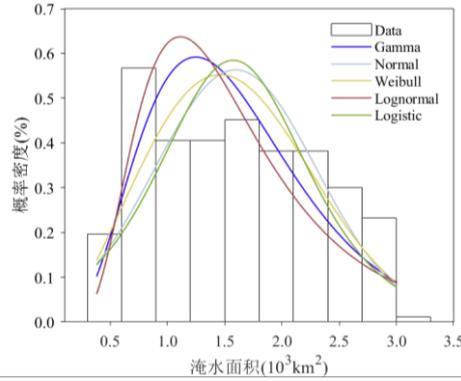


图3 鄱阳湖月度淹水面积概率分布函数

Fig.3 Probability distribution functions of monthly inundation area of the Poyang Lake

1.3.3 水文连通性定量计算

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^[39]。本研究基于 Trigg 等^[39]提出的地统计连通性函数, Tan 等^[40]、李云良等^[41]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 (1 是水体, 0 是非水体), 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^[42]:

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

式中, $I(u_j; z_c)$ 代表水文变量 $Z(u_j)$ 在位置 u_j 处超过阈值 z_c 的指示因子, 本文中 $Z(u_j)$ 具体指淹水状态 (水体为 1, 非水体为 0), 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。

CF 值是定量反映水体水文连通状态的有效参数, 介于 0 和 1 之间, 该值越大, 表明水体水文连通性越好, 反之则表明水体水文连通性越差。研究中, 基于构建的 2000—2023 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洪泛系统东西、南北、东北-西南和西北-东南方向的水文连通性函数值。

1.3.4 水文连通性时间序列分解及函数拟合

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^[43]于 1990 年提出。研究中, 采用 STL 分解法将鄱阳湖洪泛系统水文连通性时间序列数据 Y_t 分解为趋势项 (T_t)、季节项 (S_t) 和残差 (R_t):

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

水文干旱是湖泊或流域水量减少的重要表现, 直接影响着地表水体的分布和运动特征, 是导致水文连通性变化的重要因素。假设实际过程中, 水文连通性变化具有明显的季节波动特征, 并受到湖泊干旱程度和人类活动等因素的影响, 则以上各分解项可被视为不同影响因素的量化指标。研究中分别使用表征洪泛湖泊水文干旱程度的 SIAI 指数、反映自然节律下水体季节波动特征的水位数据对月度水文连通性 CF 值进行拟合, 重点分析天然状态下水文干旱对水文连通性的影响。研究中使用多元线性回归模型对月度 CF 值进行拟合, 拟合函数计算公式如下:

$$y = ax_1 + bx_2 + c \quad (5)$$

式中, y 为因变量, 研究中表示 CF 值; x_1 、 x_2 为自变量, 分别表示 SIAI 指数和水位; a 、 b 为各自变量系数; c 为误差项。

2. 结果分析

2.1 基于湖泊淹水面积的鄱阳湖洪泛系统水文干旱变化特征

基于湖泊淹水面积, 分别计算了 1 个月和 12 个月尺度的水文干旱指数。图 4 所示 2000—2023 年间鄱阳湖区水文干旱呈现较大的年内和年际波动特征, 整体上呈现旱情增加趋势。研究时段内, 鄱阳湖区干旱事件发生频率较高, 尤其是 2004—2011 年间进入了一段长时干旱期, 并且水文干旱等级呈现升高趋势。2011 年 4、5 月份 SIAI 值均小于 -3.0, 呈极端干旱状态, 年度 SIAI 小于 -2.0, 为近二十多年来最为严重的极端干旱年份。2012 年之后湖泊水文干旱整体有所减轻, 但在 2022、

2023 年均出现了年内极端干旱情况，年内旱情程度甚至超过 2011 年，但其年度 SIAI 分别为-0.86 和-1.75，仅为轻旱和重旱。

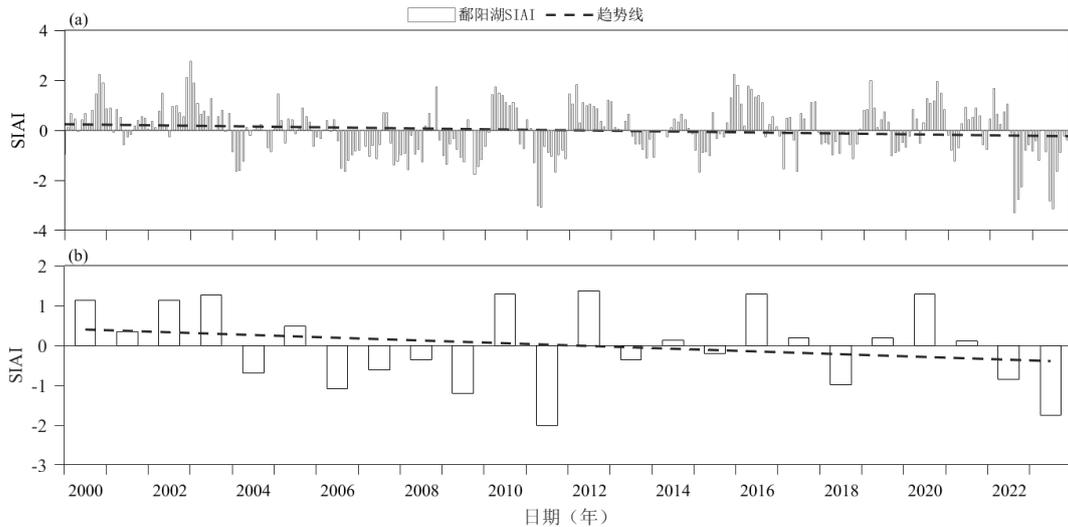


图 4 鄱阳湖标准化淹水面积指数，(a) 月度变化，(b) 年际变化

Fig. 4 Calculated Standardized Inundation Area Index of the Poyang Lake, (a) monthly variation, (b) annual variation

根据计算得到的月度 SIAI，统计得到鄱阳湖区水文干旱累计次数的年内和年际分布特征（图 5）。结果表明，2000—2023 年鄱阳湖区共发生了 93 个月次的水文干旱。从月度分布来看，鄱阳湖水文干旱在年内分配具有较大的复杂性，一年中任何月份都可能发生不同程度的水文干旱（图 5a）。水文干旱发生次数最多的月份是 1 月、3 月、11 月和 12 月，发生次数最少的是 7、8 月。轻旱每月都有发生；中旱主要发生在 1、3、11 和 12 月；重旱以 2、3、8 和 9 月最多；极旱主要发生在 4—10 月间，各月均记录到一次极端干旱事件。

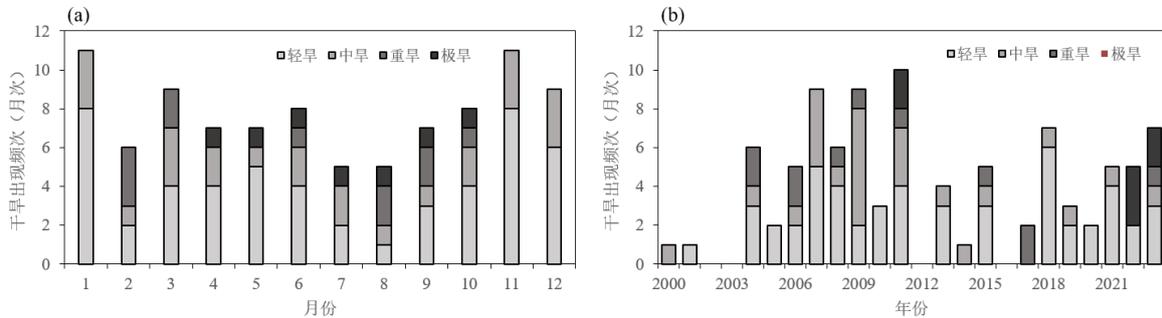


图 5 鄱阳湖水文干旱事件累积时间，(a) 月度分布，(b) 年际分布

Fig.5 Cumulative times of hydrological drought in the Poyang Lake, (a) monthly distribution, (b) annual distribution

近 24 年来，除了 2002、2003、2012 和 2016 年，绝大多数年份鄱阳湖区都经历了不同程度的水文干旱（图 5b）。鄱阳湖历年共经历中度及以上水文干旱 42 个月，其中中旱 24 个月，重旱 11 个月，极旱 7 个月。2011 年水文干旱最为严重，全年有 10 个月出现不同程度的干旱，其中极旱 2 个月，重旱 1 个月，中旱 3 个月。2007 年和 2009 年的旱情也较为严重，全年共有 9 个月出现不同程度的水文干旱，但以轻、中度干旱为主，未发生极端干旱。此外，2018 年和 2023 年水文干旱的发生时间也高达 7 个月之多，而且 2023 年还发生了 2 个月的极端干旱。2022 年长江流域遭遇了特大干旱事件，鄱阳湖经历了 3 个月的极端干旱。

2.2 鄱阳湖洪泛系统水文连通性变化特征

图 6 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、南北、东北-西南和西北-东南方向水文连通性函数曲线的变化特征。由图可知，不同水文期内四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，水文连通性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。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变化速率明显较东西方向的变化速率更缓，西北-东南方向水文连通性变化速率明显较东北-西南方向的变化速率更缓。就最大连通距离（即水文连通性函数曲线达到 0 时的距离）来看，不同水时期

内鄱阳湖区的主要水流流动方向均为南北方向，其余三个方向的水力联系相对较弱。总体上，东西和东北-西南方向水文连通性函数曲线变化较为相似，南北和西北-东南方向的变化较为相似。考虑到鄱阳湖主湖与碟形湖的横向连通状况由以及湖泊南向北的整体流向，后文的研究中主要从东西和南北两个方向分析鄱阳湖水文连通性的变化及其影响要素。

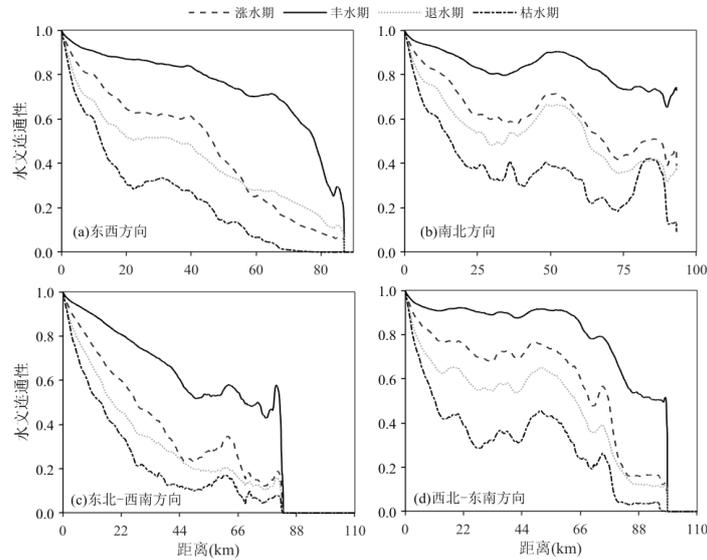


图 6 鄱阳湖多年平均水文连通性函数曲线

Fig.6 Annual average hydrological connectivity function in the Poyang Lake

就多年平均而言，鄱阳湖枯水期平均水文连通性 CF 值为 0.308，涨水期和退水期 CF 值分别为 0.529 和 0.470，而丰水期 CF 值高达 0.766（图 7）。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 0.282—0.788 之间。其中，2011 年整体水文连通性最差，而 2002 年最好。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。2022 年鄱阳湖整体偏旱，年内出现了 3 个月次的极端旱情，水文连通性较差，南北水文连通性为 0.555，东西连通性仅为 0.356。2023 年鄱阳湖总体水位持续走低，枯水期明显提前，该年度东西连通性和南北连通性差异最大，东西连通性也是近年来最低（ $CF=0.282$ ）。从鄱阳湖区南北方向水文连通性 CF 值明显高于东西水文连通性 CF 值，进一步表明南北水文连通性是鄱阳湖的主导水文连通性。

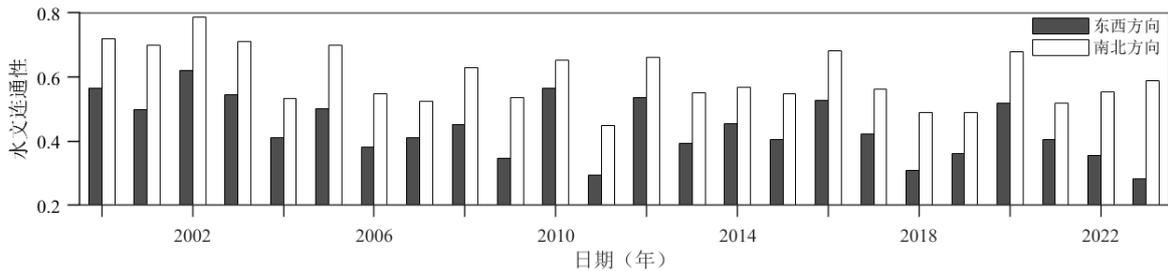


图 7 鄱阳湖水文连通性年际变化

Fig.7 Annual variation of hydrological connectivity in the Poyang Lake

2.3 鄱阳湖洪泛系统水文连通性影响要素解析与拟合分析

水文连通性易受气候条件、水文和人类活动等因素的影响^[14]。使用 STL 方法分别对鄱阳湖洪泛系统东西和南北方向水文连通性时间序列数据进行分解，得到各方向的趋势项、季节项和残余项（图 8）。趋势项结果表明，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。从季节项看，鄱阳湖水文连通性时间序列表现出明显的季节波动，并且年内呈现明显的单峰特征。为验证 STL 分解结果中趋势项和季节项与水文干旱程度和水位的关系，分别在月尺度上分析趋势项与 SIAI 指数，以及季节项与星子站水位的相关性。结果显示，东西方向上，趋势项与鄱阳湖 SIAI 指数的相关系数为 0.364，两者之间存在相关性；季节项与星子站水位的相关系数为 0.823，两者间存在较强的相关性。南北方向上，趋势项与 SIAI 指数的相关系数为 0.251，两者之间存在较弱的相关性；季节项与星子站水位的相关系数为 0.826，两者间存在较强的相关性。从影响因素方面来说，鄱阳湖区水文连通性的季节性主要受长江流域季风气候下的流域来水和长江来水共同作用，这是一种自然节律，也

是水文连通性的主要波动特征；在此基础上，其趋势变化则受干旱程度的长期影响，而人类活动等其他因素进一步加剧了水文连通性的波动和不稳定性。以上分析的所有相关系数均通过了显著性检验 ($\alpha = 0.05$)，说明可以用鄱阳湖 SIAI 指数和星子站水位数据来拟合该区域水文连通性变化特征。

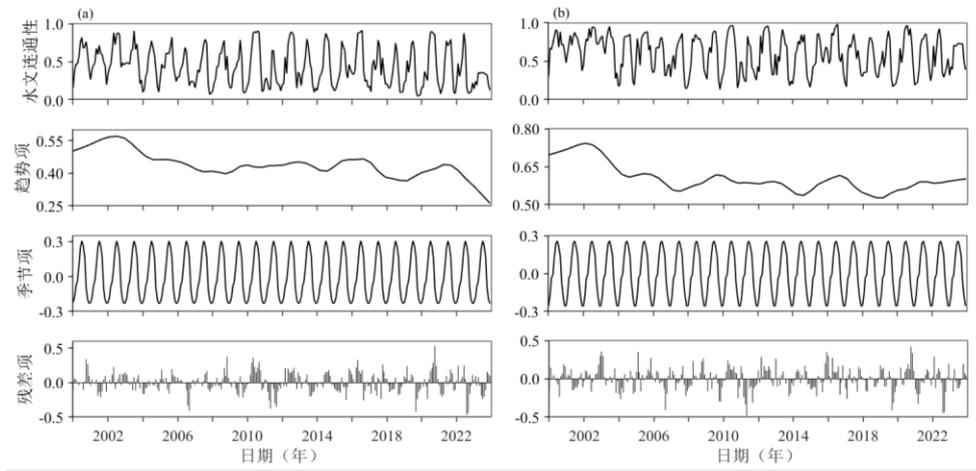


图 8 鄱阳湖水文连通性的原始序列，趋势，季节及残差，(a) 东西方向，(b) 南北方向
Fig.8 Original sequence, trend, season and residual of hydrological connectivity in the Poyang Lake,
(a) East-West direction, (b) North-South direction

根据月度 SIAI 指数和星子站月度水位分别对鄱阳湖洪泛系统东西和南北方向水文连通性进行拟合，并使用 R^2 进行拟合度检验，获得相关拟合系数如表 1 所示，拟合结果显示东西和南北方向的 R^2 分别为 0.890、0.780，RMSE 分别为 0.080、0.110。就拟合系数来看，水文干旱指数对湖泊东西方向水文连通性的影响略强于南北方向水文连通性，但两者差异细微；湖泊水位的季节性变化对东西方向水文连通性的影响明显强于南北方向水文连通性。对比研究时段内月尺度湖泊东西和南北方向水文连通性 CF 值的拟合值与计算值变化曲线可知（图 9），拟合结果能较好地重现湖泊水文连通性的时间变化特征，部分时段可能受其他因素的影响存在较大拟合误差。

表 1 鄱阳湖水文连通性拟合系数

Tab.1 The fitting coefficient of hydrological connectivity in the Lake Poyang

方向	系数			R^2	RMSE
	a	b	c		
东西方向	0.039	0.064	-0.364	0.890	0.080
南北方向	0.038	0.057	-0.125	0.780	0.110

注：拟合函数通过了 $\alpha = 0.05$ 的拟合度检验

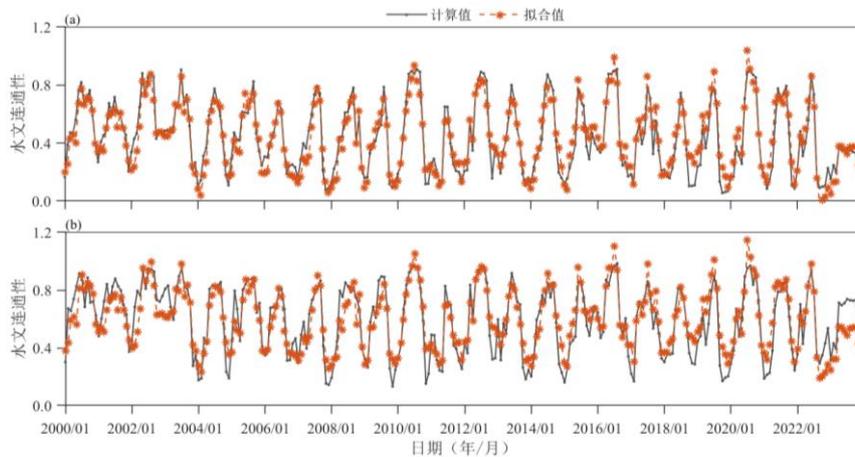


图 9 鄱阳湖水文连通性拟合结果，(a) 东西方向，(b) 南北方向

Fig.9 The fitting results of hydrological connectivity in the Poyang Lake, (a) East-West direction, (b) North-South direction

2.4 不同旱情下的鄱阳湖洪泛系统水文连通性

基于月度 SIAI 指数和月度水位数据, 结合拟合的多元线性函数对不同方向不同水文干旱旱情等级下的天然状态下水文连通性 CF 值进行拟合, 拟合结果的平均值如表 2 所示。总体上, 年内各月份随着水文干旱程度的增强, 水文连通性 CF 值逐渐减小。在年内某些月份水文干旱旱情等级达到极旱时, 东西水文连通性可降至很低 (CF 值接近于 0), 表明整个鄱阳湖洪泛系统水域覆盖在东西方向上几乎处于干涸孤立状态, 水体连通性受阻。与此相对, 在发生极端水文干旱的月份里, 鄱阳湖南北方向仍然能够保持相对较高的水文连通性, 其受旱情影响相对较弱。就年际平均情况而言, 东西方向无旱情境下平均 CF 值为 0.524, 轻旱、中旱、重旱、极旱情境下平均 CF 值分别为 0.287、0.262、0.238、0.154, 较无旱情境下水文连通性分别降低 45.2%、50.0%、54.6%和 70.7%。南北方向无旱情境下平均 CF 值为 0.677, 轻旱、中旱、重旱、极旱情境下平均 CF 值分别为 0.460、0.436、0.413、0.333, 较无旱情境下水文连通性分别降低 32.1%、35.6%、39.0%和 50.7%。由于南北方向水文连通性是鄱阳湖主导连通性, 且水文干旱程度对南北方向连通性的影响较小, 因此即便在同一旱情等级下, 南北方向 CF 值也普遍高于东西方向 CF 值。

表 2 不同旱情等级下水文连通性拟合结果的平均值

Tab.2 The average fitting results of hydrological connectivity for different drought levels

方向	旱情等级	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
东西方向	无旱	0.28	0.28	0.41	0.48	0.62	0.74	0.78	0.70	0.65	0.51	0.43	0.27
	轻旱	0.12	0.13	0.31	0.36	0.39	0.55	0.61	0.53	0.39	0.27	0.21	0.16
	中旱	0.12	0.13	0.19	0.27	0.39	0.52	0.59	0.45	0.32	0.25	0.13	0.10
	重旱	*	0.08	0.16	*	*	0.47	*	0.36	0.29	0.18	*	*
	极旱	*	*	*	0.10	0.13	0.35	0.33	0.16	0.00	0.01	*	*
南北方向	无旱	0.45	0.45	0.58	0.64	0.76	0.87	0.91	0.84	0.79	0.67	0.59	0.44
	轻旱	0.31	0.32	0.48	0.53	0.54	0.83	0.75	0.68	0.55	0.45	0.39	0.34
	中旱	0.31	0.32	0.37	0.44	0.48	0.80	0.73	0.61	0.49	0.42	0.32	0.29
	重旱	*	0.27	0.35	*	*	0.76	*	0.53	0.46	0.36	*	*
	极旱	*	*	*	0.29	0.31	0.51	0.49	0.33	0.19	0.20	*	*

注: *表示当月无该等级的干旱发生

实际上, 随着水文干旱程度的增强, 鄱阳湖真实状态下的水文连通体也逐渐缩小。结合典型年份鄱阳湖区最大水文连通体的空间分布图可知(图 10), 不同旱情等级下, 鄱阳湖洪泛系统水文连通体的空间变化主要发生在主湖区。在无旱情境下, 鄱阳湖最大连通体面积可占整个湖区面积的一半左右, 如 2020 年的占比达到了 47.4%。相较于无旱情境下, 轻旱、中旱、重旱、极旱情境下最大连通体面积分别可降低 20.4% (2022 年)、28.6% (2018 年)、36.3% (2023 年) 和 55.2% (2011 年)。尤其是极早年份里, 最大连通体面积与全湖面积的比例降至 21.2% (2011 年), 该年的最大连通体面积相较于无旱年份 (2020 年) 而言, 减少幅度最大。

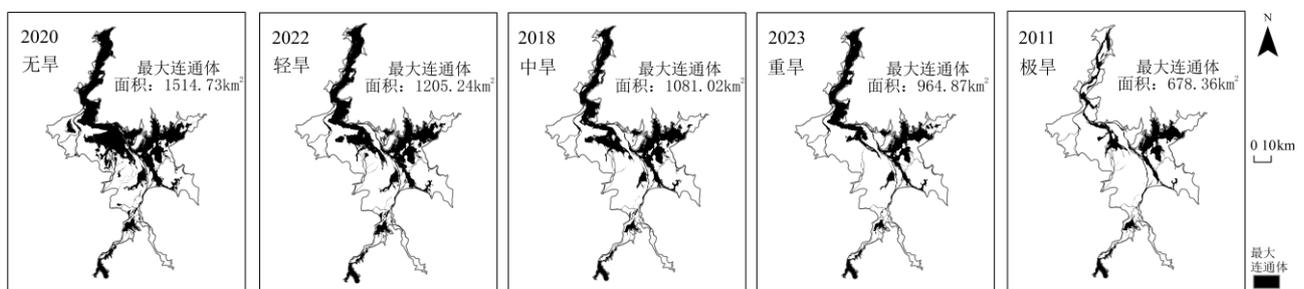


图 10 典型年份鄱阳湖区最大连通体空间分布

Fig.10 The maximum spatial distribution of hydrological linkages in the Lake Poyangin typical years

3. 讨论

鄱阳湖是长江中下游典型的洪泛湖泊系统, 由于枯水期鄱阳湖洪泛滩地上存在众多的碟形子湖, 使得枯水期与丰水期的

地表水体空间分布存在较大差异^[24, 44]。Ye 等^[31]和 Wu 等^[27]的研究指出鄱阳湖主湖区和碟形湖区淹水面积呈现不一致的年内波动特征和相反的年际变化趋势。这些研究表明,对全湖而言不同湖区的站点观测水位代表性不一样,基于传统站点观测水位计算的标准化指数在定量描述鄱阳湖洪泛系统水文干旱时存在较大的不确定性。相比而言,本研究提出的基于淹水面积的标准化水文干旱指数(SIAI)具有更好的科学性和适用性,能够很好的反映和捕捉鄱阳湖区水文干旱事件的变化过程。2022年鄱阳湖区发生了典型的“汛期反枯”事件,计算的8、9、10月份的SIAI值分别为-3.29、-2.77和-2.27,8月份的枯水情势为近二十多年来最为严重的月份;2023年鄱阳湖区枯水事件相较2022年明显提前,该年6、7月份的SIAI值分别为-2.83和-3.15,湖区星子站水位在7月20日退至11.99米,为1951年有记录以来同期最低水位。

鄱阳湖区水文干旱在年内和年际变化上具有一定的复杂性,长江或流域来水的异常减少都可能造成湖区干旱,整体上,湖区干旱发生频率较高。水文干旱特别是极端干旱的频繁出现会引起湖区水文连通性降低,增大水域空间差异。另外,鄱阳湖水文连通性大小及其变化与流域和长江来水多少有关,并且受系统内部的下垫面空间格局制约。本研究结合STL法将水文连通性CF值分解得到的趋势项和季节项,从水文干旱程度及水位季节波动方面进行了解析。结果表明,鄱阳湖水文连通性的季节性波动特征是由湖泊水位波动的季节节律所决定,而水文连通性呈现波动下降趋势则与湖区水文干旱强度变化有关。近20年来,受气候变化影响,长江中上游及鄱阳湖流域五河入湖河流来水减少,导致鄱阳湖区旱情严重^[45-46]。三峡工程的建成运行对鄱阳湖拉空作用明显,导致鄱阳湖水文节律和水量平衡关系发生调整,加剧了湖泊旱情^[47-48]。此外,鄱阳湖区下垫面状况也发生了显著变化,众多子湖闸控行为、以及采砂活动等人类影响^[49-50],导致水文连通不畅,使得湖泊旱情进一步恶化。受此影响,湖区枯水期提前、枯水期延长、枯水期水位下降快、“汛期反枯”等干旱化现象频繁出现^[51],很大程度上引起湖泊洪泛系统水文连通性呈现波动下降趋势。由于鄱阳湖区下垫面空间异质性显著,导致不同方向水文连通性存在差异。鄱阳湖湖水整体由南向北流动,南北湖区水力联系十分紧密,南北水文连通性普遍较好。湖泊东西水文连通性则更多反映主湖区与洪泛区之间的侧向水力联系。洪泛区内众多子湖建有水闸管控,形成与主湖区的人为阻隔^[52-53],在一定程度上降低了湖泊东西方向水文连通性。考虑到南北方向水文连通性是鄱阳湖主导连通性,且水文干旱程度对南北连通性的影响较小,因此在同种程度的水文干旱事件影响下,天然状态下的南北水文连通性普遍高于东西连通性。

鄱阳湖洪泛系统水文情势具有高度的时空差异,洪泛情势的变化也会对适应和依赖于自然洪水状态的湖泊洪泛生态系统造成影响。基于多源遥感影像和图像融合技术构建长时间高时空分辨率水文数据,对实现湖泊洪泛生态系统的精细定量研究提供数据支撑。然而,本文的研究方法存在一定的不确定性和计算误差,如拟合分析中没有很好考虑人类活动等的影响,而是将其整体归入误差当中;对遥感影像的水体精确分类和面积提取、融合模型的精度限制以及长时间序列数据的鲁棒性等,这些都需要在后续的研究中不断完善和提高。水文干旱导致鄱阳湖洪泛系统水量减少、水域萎缩,不仅会加剧鄱阳湖水生生态环境的恶化^[54-55],还可能对越冬水鸟的栖息生境造成威胁^[56-57]。与此同时,极端干旱的频繁出现也会引起洪泛区水文连通性降低,导致洪泛洲滩与湖泊的联系受损,进而影响湿地植被的生长分布以及生态系统稳定性^[58]。基于水文干旱、水文连通性及湿地植被三者间的影响研究有利于湖泊湿地生态环境评估与健康维护的科学认识。近年来,受气候变化和人类活动等多重因素叠加影响,鄱阳湖洪泛系统正处于不断的动态调整之中,势必会导致湖泊水沙平衡、水环境以及湿地生态效应等诸多问题愈加突出。随着长江经济带绿色发展和长江大保护等国家战略的逐步实施,加强对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。

4. 结论

本研究构建了基于淹水面积的标准化水文干旱指数,并结合地统计水文连通性函数,定量分析了鄱阳湖区水文干旱对水文连通性的影响。研究发现,鄱阳湖洪泛系统水文干旱在年内和年际变化上具有一定的复杂性,整体发生频率较高,且呈现旱情增加趋势。鄱阳湖区南北水文连通性为主导水文连通性,东西方向的水文连通性相对较弱。鄱阳湖水文连通性的季节性特征与水位波动密切相关,而其长期下降趋势则是与湖区水文干旱强度变化有关。进一步研究分析鄱阳湖区水文连通性对水文干旱的响应规律发现,随着水文干旱程度的增强,水文连通性呈现下降趋势,同时湖区最大连通体面积也逐渐缩小,其中东西方向水文连通性受水文干旱影响更为突出。在无旱情境下,东西方向年均CF值为0.524,而在轻旱、中旱、重旱、极旱情境下年均CF值较无旱情境分别降低45.2%、50.0%、54.6%和70.7%。南北方向上,无旱情境下年均CF值为0.677,轻旱、中旱、重旱、极旱情境下年均CF值较无旱情境分别降低32.1%、35.6%、39.0%和50.7%。

5 参考文献

- [1] Redmond KT. The depiction of drought: a commentary. *American Meteorological Society*, 2002, 83(8): 1143-1147. DOI: 10.1175/1520-0477-83.8.1143.
- [2] 赵丽, 冯宝平, 张书花. 国内外干旱及干旱指标研究进展. *江苏农业科学*, 2012, 40(8): 345-348
- [3] Liu XG, Duan XY, Yu H. Nonlinear characteristics of water level-inundated area and water level-hydrological connectivity in typical floodplain area of Poyang Lake. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(8): 81-89. [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.]
- [4] Zhang Q, Werner AD. Hysteretic relationships in inundation dynamics for a large lake-floodplain system. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 160-171. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.04.068.
- [5] Robinson SJ, Souter NJ, Bean NG *et al.* Statistical description of wetland hydrological connectivity to the River Murray in South Australia under both natural and regulated conditions. *Journal of Hydrology*, 2015, 531: 929-939. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.10.006.
- [6] Li YL, Zhang Q, Liu XG *et al.* The role of a seasonal lake groups in the complex Poyang Lake-floodplain system (China): insights into hydrological behaviors. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 124055. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124055.
- [7] Yang S, Wan RR, Li B. Hydrological connectivity research in Lake Taihu Basin: status, process and future challenges. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(4): 1055-1074. DOI: 10.18307/2022.0402. [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.]
- [8] Shi LL, Jia YF, Zuo AJ *et al.* Dynamic change of vegetation cover and productivity of Poyang Lake wetland based on MODIS EVI time series. *Biodiversity Science*, 2018, 26(8): 828-837. DOI: 10.17520/biods.2018089. [史林鹭, 贾亦飞, 左奥杰等. 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.]
- [9] Cui BS, Cai YZ, Xie T *et al.* Ecological effects of wetland hydrological connectivity: problems and prospects. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2016, 52(6): 738-746. DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2016.06.011. [崔保山, 蔡燕子, 谢滔等. 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.]
- [10] Li YL, Tan ZQ, Zhang Q *et al.* Refining the concept of hydrological connectivity for large floodplain systems: framework and implications for eco-environmental assessments. *Water Research*, 2021, 195: 117005. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117005.
- [11] Zeng BR, Li YL, Tan ZQ. Influential factors and environmental effects of hydrological connectivity in the Poyang Lake catchment. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(12): 2718-2728. [曾冰茹, 李云良, 谭志强. 鄱阳湖流域水文连通性的影响因素和环境效应. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(12): 2718-2728.]
- [12] Zheng F, Li FR, Gan YQ *et al.* The impact of extreme climatic events on hydrological connectivity of Dongting Lake. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(1): 67-79. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0009. [郑芳, 李芳然, 甘义群等. 极端气候事件对洞庭湖水文连通性变化的影响. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(1): 67-79.]
- [13] Detty JM, McGuire KJ. Topographic controls on shallow groundwater dynamics: implications of hydrologic connectivity between hillslopes and riparian zones in a till mantled catchment. *Hydrological Processes*, 2010, 24(16): 2222-2236. DOI: 10.1002/hyp.7656.
- [14] Liu CX, Chen YN, Huang WJ *et al.* Climate warming positively affects hydrological connectivity of typical inland river in arid Central Asia. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2024, 7(1): 250. DOI: 10.1038/s41612-024-00800-4.
- [15] Spence C, Ali G, Oswald CJ *et al.* An application of the T-TEL assessment method to evaluate connectivity in a Lake-Dominated Watershed after drought. *Journal of the American Water Resources Association*, 2019, 55(2): 318-333. DOI: 10.1111/1752-1688.12702.
- [16] Wang DY, Han JC, Li R *et al.* Nutritional characteristics in the waterbody of Lake Dongting area nutrient condition and associated improvement measures under the extreme drought in 2022. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(6): 1970-1980. DOI: 10.18307/2023.0624. [王丹阳, 韩锦诚, 黎睿等. 2022 年极端干旱下洞庭湖区水体营养状态变化及改善对策. *湖泊科学*, 2023, 35(6): 1970-1980.]
- [17] Blaurock K, Beudert B, Gilfedder BS *et al.* Low hydrological connectivity after summer drought inhibits DOC export in a forested headwater catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(9): 5133-5151. DOI: 10.5194/hess-25-5133-2021.
- [18] Raymond PA, Saiers JE, Sobczak WV. Hydrological and biogeochemical controls on watershed dissolved organic matter transport: pulse-shunt concept. *Ecology*, 2016, 97(1): 5-16. DOI: 10.1890/14-1684.1.
- [19] Cao SJ, Li YL, Chan J *et al.* Influence of extreme drought in 2022 on groundwater hydrological regime in the Poyang Lake floodplain area. *China Environmental Science*, 2023, 43(12): 6601-6610. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230927.006. [曹思佳, 李云良, 陈静等. 2022 年鄱阳湖极端干旱对洪泛区地下水文情势的影响. *中国环境科学*, 2023, 43(12): 6601-6610.]

- [20] Shen YY, Cheng JX, Xu LG *et al.* Characteristics of zooplankton community structure in Poyang Lake and their influencing factors under extreme hydrological drought. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(24): 10399-10412. DOI: 10.20103/j.stxb.202306161291. [沈玉莹, 程俊翔, 徐力刚等. 极端水文干旱下鄱阳湖浮游动物群落结构特征及其影响因素. *生态学报*, 2023, 43(24): 10399-10412.]
- [21] Ye C, Wu GP, Zhao XS *et al.* Responses of wetland vegetation to droughts and its impact factors in Poyang Lake National Nature Reserve. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(2): 253-259. [叶春, 吴桂平, 赵晓松等. 鄱阳湖国家级自然保护区湿地植被的干旱响应及影响因素. *湖泊科学*, 2014, 26(2): 253-259.]
- [22] 史林鹭. 水文连通性对鄱阳湖湿地植被生长动态的影响[学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [23] Li YL, Zhang Q, Yao J *et al.* Hydrodynamic and hydrological modeling of the Poyang Lake catchment system in China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(3): 607-616. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000835.
- [24] Tan ZQ, Li YL, Xu XL *et al.* Mapping inundation dynamics in a heterogeneous floodplain: insights from integrating observations and modeling approach. *Journal of Hydrology*, 2019, 572: 148-159. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.02.039.
- [25] 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.
- [26] Zhu XL, Chen J, Gao F *et al.* An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(11): 2610-2623. DOI: 10.1016/j.rse.2010.05.032.
- [27] Wu J, Zhang Q, Li YL *et al.* Spatial-temporal variations of stage-area hysteretic relationships in large heterogeneous lake-floodplain systems. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129507. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129507.
- [28] Ji MF, Tang J, Gao XJ *et al.* Analysis of spatiotemporal changes and driving factors of Poyang Lake Area based on Google Earth Engine. *Journal of China Hydrology*, 2021, 41(6): 40-47. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210008. [姬梦飞, 汤军, 高贤君等. 基于 Google Earth Engine 的鄱阳湖面积时空变化及驱动因素分析. *水文*, 2021, 41(6): 40-47.]
- [29] Li XY, Xie T, Ma RH. Daily water level-area dataset in Lake Poyang under all-weather(2014-2023). *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(2): 689-704. DOI: 10.18307/2025.0247. [李昕悦, 谢涛, 马荣华. 鄱阳湖全天候水位-面积逐日数据集(2014-2023年). *湖泊科学*, 2025, 37(2): 689-704.]
- [30] Luo JH, Yan Y, Xiao F, *et al.* Comparing the applicability of five typical spatio-temporal information fusion algorithms based on remote sensing data in vegetation index reconstruction of wetland areas. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2024, 36(2): 60-69. DOI: 10.6046/zrzyyg.2023032. [罗佳欢, 严翼, 肖飞等. 五种典型遥感时空信息融合算法在湿地区域植被指数重建中的适用性比较. *自然资源遥感*, 2024, 36(2): 60-69.]
- [31] Ye XC, Wu J, Li XH *et al.* 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. DOI: 10.1016/j.ejrh.2023.101541.
- [32] Mishra AK, Singh VP. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 2010, 391: 202-216. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.
- [33] Mckee BT, Nolan J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *The Eighth Conference on Applied Climatology*, 1993: 179-184.
- [34] Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
- [35] Alley WM. The palmer drought severity index as a measure of hydrological drought. *Journal of the American Water Resources Association*, 1985, 21(1): 105-114. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1985.tb05357.x.
- [36] Shukal S, Wood AW. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2): 226-236. DOI: 10.1029/2007GL032487.
- [37] Vicente-Serrano SM, López-Moreno JI, Beguería S *et al.* Accurate computation of a streamflow drought index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 17(2): 318-332. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433.
- [38] Siegel S, Castellan NJ. Nonparametric statistics for the behavioral sciences[M]. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [39] Trigg MA, Michaelides K, Neal JC *et al.* Surface water connectivity dynamics of a large scale extreme flood. *Journal of Hydrology*, 2013, 505: 138-149. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.035.
- [40] Tan ZQ, Li YL, Zhang Q *et al.* Assessing effective hydrological connectivity for floodplains with a framework integrating habitat suitability and sediment suspension behavior. *Water Research*, 2021, 201: 117253. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117253.
- [41] 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.

- [42] Journel AG, Kyriakidis PC, Mao SG. Correcting the smoothing effect of estimators: a spectral postprocessor. *Mathematical Geology*, 2000, 32(7): 787-813. DOI: 10.1023/A:1007544406740.
- [43] Cleveland RB, Cleveland WS, McRae JE *et al.* STL: a seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*, 1990, 6(1): 3-33.
- [44] You HL, Xu LG, Liu GL *et al.* Change of wetland landscape at Poyang Lake and its response to water level fluctuation. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(9): 2487-2493. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201609.015. [游海林, 徐力刚, 刘桂林等. 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.]
- [45] Zhang Q, Xue CY, Xia J. Impacts, contributing factors and countermeasures of extreme droughts in Poyang Lake. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(12): 1894-1902. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230813005. [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.]
- [46] Liu Y, Wu G. Hydroclimatological influences on recently increased droughts in China's largest freshwater lake. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(1): 93-107. DOI: 10.5194/hess-20-93-2016.
- [47] Guo H, Hu Q, Zhang Q *et al.* Effects of the Three Gorges Dam on Yangtze River flow and river interaction with Poyang Lake, China: 2003–2008. *Journal of Hydrology*, 2012, 416-417: 19-27. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.11.027.
- [48] Zhang Q, Li L, Wang YG *et al.* Has the Three-Gorges Dam made the Poyang Lake wetlands wetter and drier? *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L20402. DOI: 10.1029/2012GL053431.
- [49] Lai XJ, Shankman D, Huber C *et al.* 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. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.058.
- [50] Wu GF, Leeuw JD, Skidmore AK *et al.* Concurrent monitoring of vessels and water turbidity enhances the strength of evidence in remotely sensed dredging impact assessment. *Water Research*, 2007, 41(15): 3271-3280. DOI: 10.1016/j.watres.2007.05.018.
- [51] Qi SH, Zhang XX, Jiang F *et al.* Research on the causes for hydrological drought trend in Poyang Lake. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1): 168-178. [齐述华, 张秀秀, 江丰等. 鄱阳湖水文干旱化发生的机制研究. 自然资源学报, 2019, 34(1): 168-178.]
- [52] 胡振鹏, 张祖芳, 刘以珍等. 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.
- [53] Chen MH, He Y, Zhou ZH *et al.* Analysis of measured water levels in different water bodies of Poyang Lake. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2024: 1-6. [陈明华, 何彧, 周子豪等. 鄱阳湖不同水域实测水位分析. 水利水电快报, 2024: 1-6.]
- [54] Dai X, Wan RR, Yang GS *et al.* Responses of wetland vegetation in Poyang Lake, China to water-level fluctuations. *Hydrobiologia*, 2016, 773(1): 35-47. DOI: 10.1007/s10750-016-2677-y.
- [55] Liu JT, Wen CY, Han L *et al.* Study on the response characteristics of nitrogen and phosphorus to water level change of Poyang Lake during 2012-2017. *Environmental Pollution & Control*, 2020, 42(10): 1274-1279. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.10.017. [刘聚涛, 温春云, 韩柳等. 2012-2017年鄱阳湖水位变化与氮磷响应特征研究. 环境污染与防治, 2020, 42(10): 1274-1279.]
- [56] Zhang XC, Qin HM, Jin BS *et al.* Distribution in winter buds of submerged macrophyte and their contribution for herbivorous waterfowl in a shallow dish lake of Poyang Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6589-6596. DOI: 10.5846/stxb201310242563. [张笑辰, 秦海明, 金斌松等. 鄱阳湖浅碟湖泊沉水植物冬芽的分布及对植食水鸟的食物贡献. 生态学报, 2014, 34(22): 6589-6596.]
- [57] Liu XB, Han Z, Wang SY *et al.* A research thinking of Poyang Lake wetland from the perspective of Yangtze River protection. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2021, 19(2): 201-209. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20190212. [刘晓波, 韩祯, 王世岩等. 长江大保护视角下鄱阳湖湿地保护的研究思考. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(2): 201-209.]
- [58] Xu LG, Xie YH, Wang XL. Ecological environment problems and research prospect of flood wetlands of Yangtze River-connected Lake in the middle reaches of Yangtze River. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, 36(3): 406-411. DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2022.03.008. [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.]