

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[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 67-79.  
ZHENG F, LI F R, GAN Y Q, et al. The impact of extreme climatic events on hydrological connectivity of Dongting Lake[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 67-79. (in Chinese)

# 极端气候事件对洞庭湖水文连通性变化的影响

郑芳<sup>1,2</sup>, 李芳然<sup>1,2</sup>, 甘义群<sup>3</sup>, 邵东岳<sup>1,2</sup>, 张茵<sup>1,2</sup>, 曹美晨<sup>1,2</sup>, 段天宇<sup>4</sup>

(1. 河北省水利科学研究院, 石家庄 050057; 2. 河北水科工程技术服务有限公司, 石家庄 050057;  
3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430078; 4. 河北省水利规划设计研究院有限公司, 石家庄 050051)

**摘要:**为揭示洞庭湖近十几年水文连通性的变化特征并对其未来变化进行预测,研究极端气候事件在洞庭湖水文连通性变化中作出的贡献,使用水文连通性指数法、ETCCDI 极端气候指数、Hurst 指数以及数理统计分析方法进行研究。研究表明:洞庭湖水文连通性整体呈现夏季>秋季>春季>冬季的特征,夏季、秋季、春季和冬季的整体连通性指数均值分别为 0.95、0.88、0.81 和 0.63,且洞庭湖的水文连通性在近 30 年比较稳定;经持续性预测发现洞庭湖水文连通性 Hurst 指数均大于 0.5,表示其在没有人类活动干扰的情况下会在未来呈延续下降的趋势;洞庭湖水文连通性指数随着水位增加逐渐增加且增速逐渐放缓,水位增加对其具有正向影响的边际递减效应;极端降水事件对洞庭湖水文连通性具有较为明显的正向影响,而极端气温事件对洞庭湖水文连通性影响作用较小。研究结果有助于充分认识洞庭湖水资源演变规律,对保障洞庭湖流域水资源安全具有重要的理论和现实意义。

**关键词:**洞庭湖;水文连通性;极端气候事件;持续性预估

**中图分类号:** TV213.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0009

工业革命至今,温室气体排放增加,大气中温室气体浓度随之增高,全球气候变暖已形成共识<sup>[1]</sup>。全球气候变暖是世界各国重点关注的环境问题,国际政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告指出,2010—2019 年全球温室气体排放平均每年增加了 1.3%,如果温室气体排放量增速趋势继续增加,到 21 世纪末期年均温度升高将到达 3.2 °C,这将引发社会风险和气候环境相关风险<sup>[2]</sup>。相较于平均气候状况,极端气候概率更小并且其对生态水文环境、人类生活和经济社会破坏性更强<sup>[3-4]</sup>。生态水文环境对极端气候事件的响应相较于平均气候状态也更为明显<sup>[5-7]</sup>。

长江中游作为我国湖泊密集的地区,具有调蓄洪水、保护生物多样性和涵养水源等作用<sup>[8-9]</sup>。洞庭湖流域位于长江中游,作为水文调节蓄洪区对维护区域生态安全具有重要作用<sup>[10-11]</sup>。洞庭湖流域是长江流域在气候变化中反应最为显著的区域<sup>[12]</sup>。湖泊

在极端气候事件影响下还会发生水位下降,干旱期延长的情况<sup>[13]</sup>。在气候变化下洞庭湖流域生态水文过程的改变仍存在高度的不确定性<sup>[14]</sup>。洞庭湖流域属于湿地环境<sup>[15-16]</sup>。在湿地环境中,水作为物质的载体在循环和能量转换过程中发挥着重要作用<sup>[17]</sup>。在气候变暖、降水增加、土地利用方式转变等不同的外界环境因素下湿地生态水文过程会发生不同程度的变化<sup>[18]</sup>。在影响湿地生态系统的外界环境因素中,气候变化是最主要的原因之一。湿地生态水文系统对气候变化具有一定的缓冲作用,但随着全球气候变暖加剧,湿地生态水文系统对气候变化响应能力降低,湿地生态系统对气候变化的缓冲作用减弱<sup>[19]</sup>。

水文连通性可以表达生态过程在不同景观单元之间的顺利程度<sup>[20]</sup>。水文连通性是水文循环要素内或不同要素之间,以水为媒介的物质、能量和生物体的传输过程<sup>[21]</sup>,它可以反映流域水文生态过程,准确评价水文连通性具有重要的意义<sup>[22-24]</sup>。现有的水

收稿日期: 2023-08-14 修回日期: 2023-12-01 网络出版时间: 2024-01-23

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240122.0906.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977175)

作者简介: 郑芳(1994—),女,河北石家庄人,博士,主要从事地下水科学与工程研究。E-mail: [zhengfang07@cug.edu.cn](mailto:zhengfang07@cug.edu.cn)

通信作者: 甘义群(1977—),男,安徽太湖人,教授,主要从事水文地质与环境地质研究。E-mail: [yiqungan@cug.edu.cn](mailto:yiqungan@cug.edu.cn)

文连通性研究方法主要有实地观测法、泥沙示踪法、模型模拟法、图论法和水文连通性指数法等。连通性及相关的概念在相关研究中有很长的历史,在地学中连通性的定义为“物质或能量在两个景观组分之间或者在整个系统中间的转移”。在水文学中,研究尺度的大小以及对连通性认识的差异都会给连通性带来不同的理解。水文连通性在研究者中间并没有达成共识,研究者通常根据研究目标对连通性的解释和度量有不同的见解。大多数的研究者将连通性视为工具,淡化了连通性的具体定义,根据自己的需要用连通性来解决具体的问题。有学者<sup>[25]</sup>利用水文连通性网络指数方法(network index, NI)对我国延河流域的水文连通性进行了计算和评估。有学者<sup>[26]</sup>利用遥感手段和地理统计学的相关方法对我国鄱阳湖流域水文连通性进行了评估,并对其时空变化进行了分析。近年来,水文连通性的研究越来越受到大家关注,但是大多数研究集中在对水文连通性相关概念的探讨,对水文连通性的影响因素方面没有深入研究。洞庭湖是长江最重要的通江调蓄湖泊之一,它受到了江湖关系演变和人类活动等的影响<sup>[27]</sup>。近几十年来,气候变化和人类活动的影响使洞庭湖流域的湖泊水系的水文连通性产生了显著变化。但是现在关于气候变化对区域水文连通性影响的相关研究还较少。

我国现在强调把生态水文环境保护放在第一位<sup>[28-29]</sup>,评估洞庭湖流域极端气候事件的发生对区域水文环境的影响对保护区域生态水文环境稳定具有重要意义。现有研究多为计算区域水文连通性,关于极端气候变化对其影响鲜有研究。本文定量研究洞庭湖在近十几年水文连通性的变化特征并对其进行预测,分析极端气候事件对洞庭湖水文连通性的影响,这将有利于我们充分认识洞庭湖水体演变规律,对保障洞庭湖流域水资源安全具有重要的理论和现实意义。

## 1 研究区概况

洞庭湖是我国第二大淡水湖泊,属于长江中下游的大型通江湖泊,具有调节江河径流、沟通航运和改善生态环境等重要作用<sup>[30-31]</sup>。近几十年来,受气候变化和人类活动影响的洞庭湖流域湖泊水系的水文连通性产生了显著变化,洞庭湖湖区河流和湖泊湿地萎缩明显,水体分割加剧水环境和水生态的恶化趋势。研究洞庭湖的水文连通性有助于定

量理解复杂水系地区水文变化情况。洞庭湖的湖体是由东洞庭湖、西洞庭湖与南洞庭组成的,属于吞吐型湖泊,北面的松滋、太平、藕池和调弦分别由长江中游进入湖泊。进入洞庭湖的水沙经过湖泊的调蓄之后,在城陵矶汇入长江,构成一个江河湖泊关系网。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

JRC Monthly Water History, v1.4 数据集是根据 Landsat 遥感数据提取的包含 1984—2021 年地表水位置和时间分布图,并提供了关于这些水面的范围和变化的统计数据。数据使用了陆地卫星 5 号、7 号和 8 号获得的场景所生成,并使用专家系统将每个像素分别分类为水类或者非水类,最后将结果整理成月度历史以进行变化检测。“月历史”集合包含逐月的水检测的整个历史。每张图像包含波段描述见表 1。

表 1 JRC Monthly Water History, v1.4 数据集波段  
Tab. 1 JRC Monthly Water History, v1.4 data set band

| 名称    | 数据类型 | 时间尺度 | 值 | 描述  |
|-------|------|------|---|-----|
|       |      |      | 0 | 无数据 |
| 数据集波段 | 整数   | 月尺度  | 1 | 非水体 |
|       |      |      | 2 | 水体  |

国家气象科学数据共享服务平台 (<http://data.cma.cn>) 发布并整合了中国 1951 年以来超过 800 个地面气象观测站点数据,选取基本位于洞庭湖流域范围的气象数据站点 1980—2019 年的数据进行相关分析研究,应用的数据包括站点日尺度的气温、降水,基于这些数据计算并分析洞庭湖流域极端气候指数。文中的极端气候指标使用该气象数据应用 RCLimDex 软件计算得到。

### 2.2 分析方法

主要采用水文连通性指数法、Hurst 指数、Pearson 相关性分析和主成分分析。

整体连通性指数( $I_c$ )和潜在连通性指数( $P_c$ )被推荐为 CS22 执行的连通性分析类型的最佳指数<sup>[32]</sup>,与其他可用指数相比进行了有关特征改进<sup>[32]</sup>。水文连通性指数法相比其他现有指数表现出更好的性能,特别适合于景观保护规划和变化监测应用。 $I_c$  和  $P_c$  的范围均为 0~1,并且随着连通性的改善而

增加。

$I_{IC}$  计算公式为

$$I_{IC} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2} \quad (1)$$

式中:  $n$  为景观中节点总数;  $a_i$  和  $a_j$  为节点  $i$  和  $j$  的属性;  $nl_{ij}$  为斑块  $i$  和  $j$  之间最短路径(拓扑距离)上的链路数;  $A_L$  为最大景观属性。

$P_C$  计算公式为

$$P_C = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j p_{ij}^*}{A_L^2} \quad (2)$$

式中:  $p_{ij}^*$  是斑块  $i$  和  $j$  之间所有路径的最大乘积概率。其他符号意义同上。

$I_{IC}$  和  $P_C$  相比其他现有指数表现出更好的性能<sup>[33]</sup>, 采用  $I_{IC}$  和  $P_C$  对洞庭湖的水文连通性进行分析, 并可以通过 Conefor 软件进行计算。Conefor 软件可以量化栖息地区和景观连通性维护或改善环节的重要性, 并评估栖息地和土地利用变化对连通性的影响。它被认为是保护和景观规划的决策支持工具, 通过识别和优先考虑生态连通性的关键地点。

持续性预估采用 Hurst 指数法, Hurst 指数是有偏的随机游走。Hurst 指数体现了时间序列的自相关性, 尤其反映了序列中隐藏的长期趋势, 能够很好地描述水文的长期变化能力。这一指数与趋势的关系(假设  $H$  为 Hurst 指数)如下:  $H=0.5$ , 表示时间序列可以用随机游走(布朗运动)来描述;  $0 < H < 0.5$ , 表示记忆的转弱(反持续性), 即均值回复过程;  $0.5 < H < 1$ , 表示记忆增强(持续性), 即暗示长期记忆的时间序列。

Pearson 相关性分析可以表明变量间的相关程度, 相关系数  $r$  的取值范围为  $[-1, 1]$ ,  $r$  越大表明变量间的相关程度越强。相关性分析方法研究能够较好研究洞庭湖极端气候事件与水文连通性的相关程度。

主成分分析通过正交变换将一组可能存在相关性的变量转换为一组线性不相关的变量, 主成分就是转换后的这组变量。本文通过主成分分析方法研究洞庭湖极端气候事件与水文连通性的一致性, 分析不同极端气候事件对洞庭湖水文连通性影响的大小。

### 3 结果与分析

#### 3.1 洞庭湖水文连通性及其变化特征

##### 3.1.1 洞庭湖水文连通性提取

Landsat 影像受云层厚度、天气状况等因素影响, 选取云量低于 10% 的 Landsat 影像以提高水体提取精确度。云量低于 10% 的 Landsat 影像数据共包含 14 年洞庭湖春季水体影像数据, 19 年洞庭湖夏季水体影像数据, 16 年洞庭湖秋季水体影像数据, 14 年洞庭湖冬季水体影像数据, 共下载影像 63 幅, 应用 JRC Monthly Water History, v1.4 数据集提取洞庭湖不同季节水体遥感影像, 具体提取年份统计见表 2。

表 2 洞庭湖不同季节水体提取年份统计

Tab. 2 Statistical table of water body extraction years in different seasons of Dongting Lake

| 年份   | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 |
|------|----|----|----|----|
| 1993 |    |    | √  |    |
| 1994 |    | √  | √  |    |
| 1996 |    |    | √  |    |
| 1999 |    |    |    | √  |
| 2000 | √  | √  | √  | √  |
| 2001 | √  | √  |    |    |
| 2002 |    | √  |    |    |
| 2003 | √  | √  | √  | √  |
| 2004 | √  | √  | √  | √  |
| 2006 |    | √  |    | √  |
| 2007 | √  | √  |    | √  |
| 2008 | √  | √  | √  | √  |
| 2009 | √  | √  | √  | √  |
| 2010 |    | √  |    | √  |
| 2011 | √  |    |    |    |
| 2013 | √  | √  | √  | √  |
| 2014 |    | √  | √  |    |
| 2015 | √  | √  | √  |    |
| 2016 | √  | √  | √  | √  |
| 2017 |    | √  | √  | √  |
| 2018 |    | √  | √  |    |
| 2019 | √  | √  | √  | √  |
| 2020 | √  |    |    | √  |
| 2021 | √  | √  | √  |    |
| 总计/年 | 14 | 19 | 16 | 14 |

每个季节各选取 4 年展示提取的洞庭湖水体结果, 见图 1。

洞庭湖遥感水体影像数据提取是进行水文连通



性计算的数据基础。水文连通性计算通过 Conefor 软件完成, Conefor 软件基于 ArcGIS 运行, 可以根

据提取的水体数据进行  $I_{IC}$  和  $P_C$  的计算。

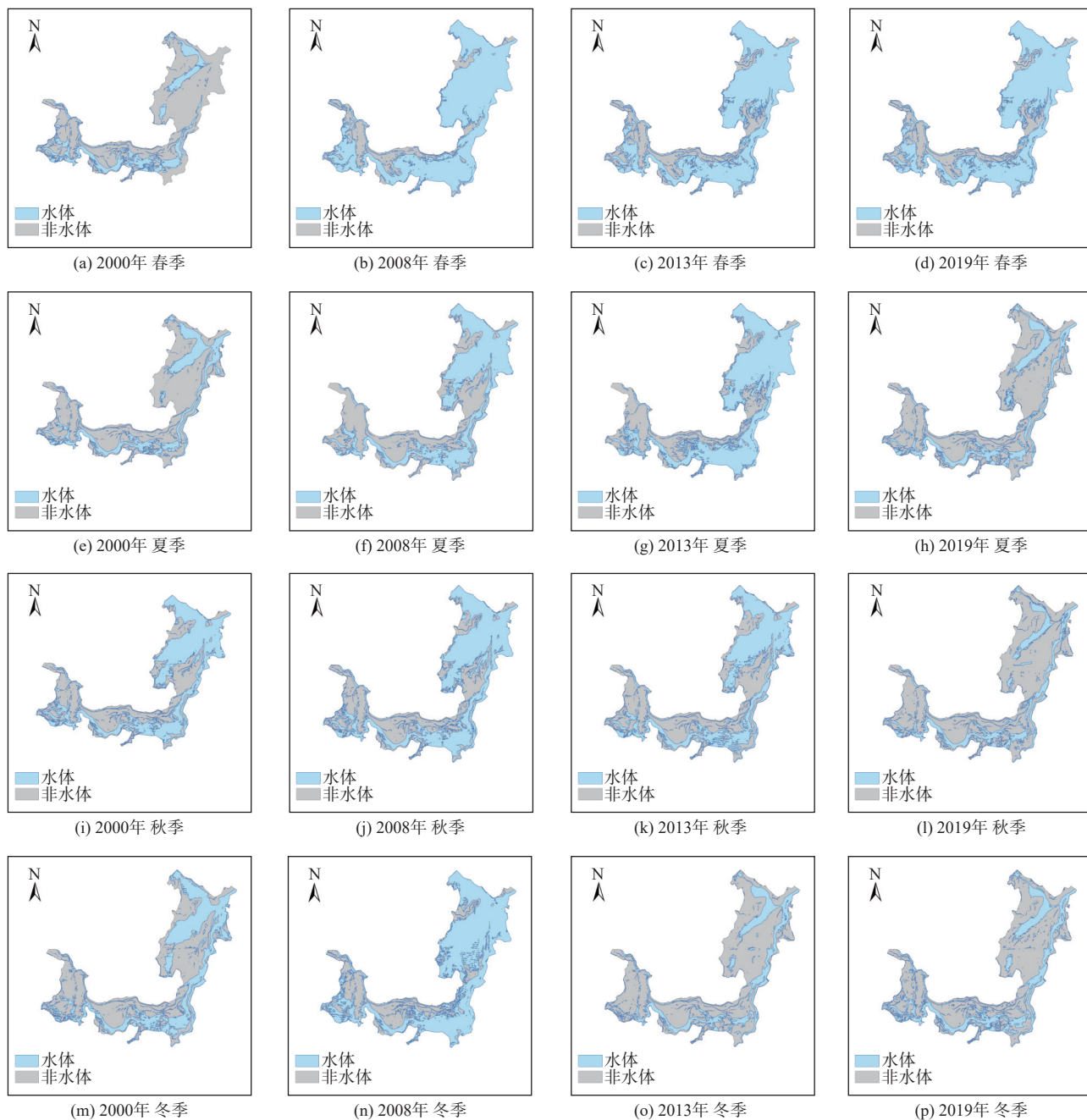


图 1 洞庭湖水体提取结果

Fig. 1 Water body extraction results for Dongting Lake

以 2000 年春季水体遥感影像提取面积为基准, 以 1 表示, 对洞庭湖 1993—2021 年不同季节所有提取水体遥感影像面积进行计算, 可以得到不同年份及季节的洞庭湖水体遥感影像面积, 对其进行分析, 结果见图 2。可知在洞庭湖近几十年来水体遥感影像面积基本呈现出夏季(均值 276%)>秋季(均值 223%)>春季(均值 161%)>冬季(均值 101%)的特征。

### 3.1.2 洞庭湖水文连通性变化特征

洞庭湖  $I_{IC}$  和  $P_C$  的特征分析结果见图 3。

洞庭湖春季 14 年的  $I_{IC}$  均值为 0.81, 最高值出现在 2003 年, 为 0.98, 最低值出现在 2000 年, 为 0.49;  $P_C$  均值为 0.86, 最高值出现在 2003 年, 为 0.99, 最低值出现在 2000 年, 为 0.56。方差可以衡量一组数据的离散程度, 描述了统计数据与均值的偏离程度, 春季洞庭湖的  $I_{IC}$  方差为 0.17,  $P_C$  方差为 0.16, 说明洞庭湖春季的  $I_{IC}$  和  $P_C$  差距较小, 总体较为稳定。

洞庭湖夏季 19 年的数据显示  $I_{IC}$  均值为 0.95,

最高值出现在 2000 年,为 0.98,最低值出现在 2021 年,为 0.78;  $P_c$  均值为 0.98,最高值出现在 2002 年,为 0.99,最低值出现在 2021 年,为 0.80。

夏季洞庭湖的  $I_{IC}$  方差为 0.05,  $P_c$  方差为 0.04,洞庭湖夏季的  $I_{IC}$  和  $P_c$  差距较小,总体表现稳定。

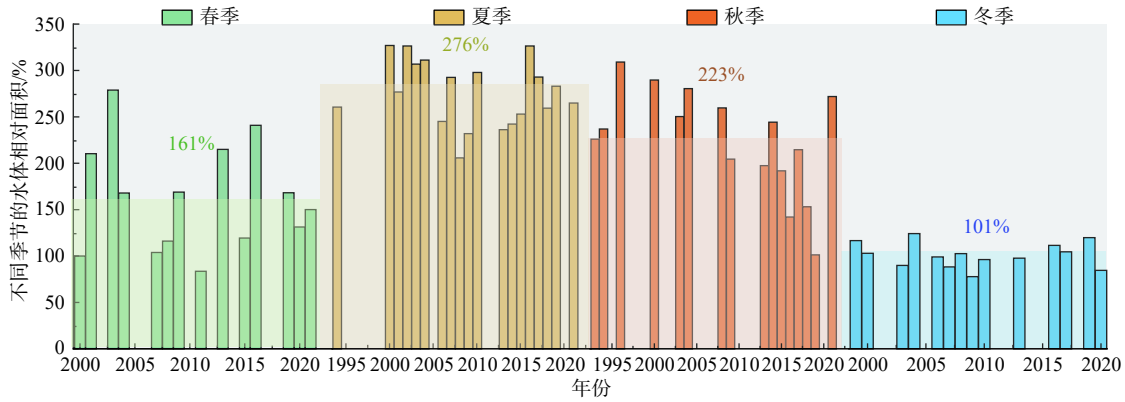


图 2 洞庭湖 1993—2021 年不同季节水体相对面积直方图

Fig. 2 Histogram of relative areas in different seasons of water bodies in Dongting Lake from 1993 to 2021

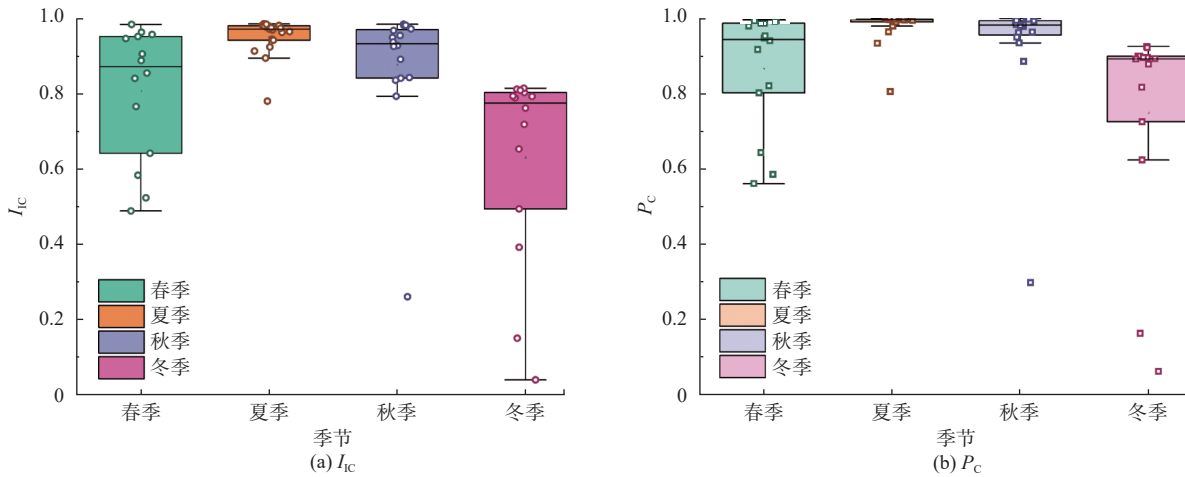


图 3 洞庭湖不同季节  $I_{IC}$  和  $P_c$  的散点间距及箱线图

Fig. 3 Scatter spacing and boxplots of  $I_{IC}$  and  $P_c$  for different seasons in Dongting Lake

洞庭湖秋季 16 年的  $I_{IC}$  均值为 0.88,最高值出现在 1996 年,为 0.98,最低值出现在 2019 年,为 0.26;  $P_c$  均值为 0.93,最高值出现在 1996 年,为 0.99,最低值出现在 2019 年,为 0.30。秋季洞庭湖的  $I_{IC}$  方差为 0.18,  $P_c$  方差为 0.17,洞庭湖春季的  $I_{IC}$  和  $P_c$  差距较小,总体较稳定。

洞庭湖冬季在统计的 14 年间  $I_{IC}$  均值为 0.63,最高值出现在 2004 年,为 0.81,最低值出现在 2020 年,为 0.04;  $P_c$  均值为 0.75,最高值出现在 2004 年,为 0.92,最低值出现在 2020 年,为 0.06。春季洞庭湖的  $I_{IC}$  方差为 0.26,  $P_c$  方差为 0.28,洞庭湖春季的  $I_{IC}$  和  $P_c$  差距较小,总体较为稳定。

洞庭湖  $I_{IC}$  均值呈现出夏季>秋季>春季>冬季的特征:最低值出现在冬季,为 0.04;最高值出现在夏季,为 0.98。夏季为洞庭湖  $I_{IC}$  总体偏差最小的季

节。洞庭湖  $P_c$  均值表现出夏季>秋季>春季>冬季的特征:最低值出现在冬季,为 0.06;最高值出现在秋季,为 0.99。夏季为洞庭湖  $P_c$  总体偏差最小的季节。

### 3.1.3 洞庭湖不同季节水文连通性变化趋势

对洞庭湖水文连通性进行不同季节的时间趋势分析。其中洞庭湖  $I_{IC}$  和  $P_c$  在 1993—2021 年的时间趋势分析见图 4。在洞庭湖每个季节的  $I_{IC}$  均通过了 0.05 显著性水平检验,且都呈现出下降趋势。其中:洞庭湖春季下降趋势为-0.006/a,下降趋势明显;洞庭湖夏季  $I_{IC}$  下降趋势为-0.003/a,下降趋势较为明显;洞庭湖秋季  $I_{IC}$  下降趋势为-0.008/a,下降趋势比较明显;洞庭湖冬季  $I_{IC}$  下降趋势为-0.024/a,下降趋势明显。

在洞庭湖,各个季节  $P_c$  都通过了 0.05 显著性水平检验,均处于下降趋势。其中:洞庭湖春季  $P_c$

下降趋势为 $-0.007/a$ ,下降趋势较为明显;洞庭湖夏季  $P_C$ 下降趋势为 $-0.003/a$ ,下降趋势较为明显;洞庭

湖秋季  $P_C$ 下降趋势为 $-0.005/a$ ,下降趋势明显;洞庭湖冬季  $P_C$ 下降趋势为 $-0.027/a$ ,下降趋势明显。

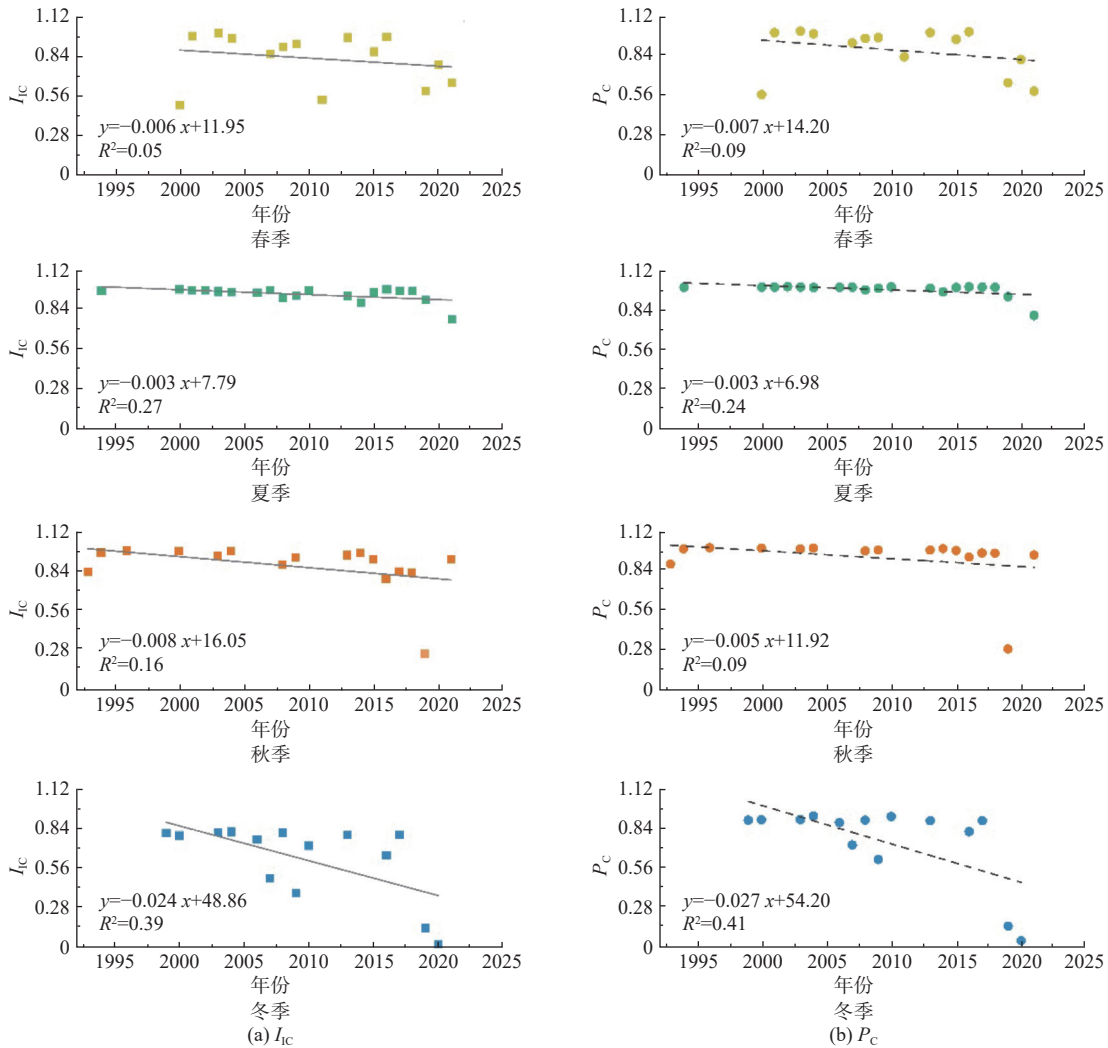


图 4 洞庭湖不同季节  $I_C$  和  $P_C$  的年度变化趋势

Fig. 4 Interannual trends of hydrologic connectivity indices  $I_C$  and  $P_C$  in Dongting Lake in different seasons

### 3.1.4 洞庭湖水文连通性持续性预估

基于 R/S 算法对不同季节的洞庭湖  $I_C$  和  $P_C$  进

行 Hurst 指数计算,以对洞庭湖水文连通性的未来变化趋势进行持续性预估,得到的结果见表 3。

表 3 洞庭湖  $I_C$  与  $P_C$  的 Hurst 指数

Tab. 3 Hurst index of Dongting Lake hydrological connectivity index  $I_C$  and potential hydrological connectivity index  $P_C$

| 指标      | 季节    |       |       |       |       |       |       |       |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         | 春季    |       | 夏季    |       | 秋季    |       | 冬季    |       |
|         | $I_C$ | $P_C$ | $I_C$ | $P_C$ | $I_C$ | $P_C$ | $I_C$ | $P_C$ |
| Hurst指数 | 0.89  | 0.90  | 0.93  | 0.72  | 0.89  | 0.88  | 0.75  | 0.73  |

结果表明不同季节的洞庭湖所有  $I_C$  和  $P_C$  的 Hurst 指数均大于 0.5,说明洞庭湖的水文连通性在没有人活动干扰情况下会在未来延续过去的趋势变化,即洞庭湖  $I_C$  和  $P_C$  在未来会继续下降。

## 3.2 洞庭湖水文连通性影响因素

### 3.2.1 洞庭湖水文连通性与水位关系

为了深入分析洞庭湖  $I_C$  和  $P_C$  与水位的关系,

将洞庭湖水文连通性指数和潜在水文连通性指数分别与水位数据进行拟合,本次分析采用城陵矶水文站的数据进行研究。洞庭湖  $I_C$ 、 $P_C$  与水位的拟合结果见图 5。

$I_C$  与水位拟合采用 ExpDec3 模型,拟合结果  $R^2$  达到 0.68,拟合效果良好。洞庭湖  $I_C$  集中在 0.9~1.0,水位在 20~30 m 均匀分布。随着水位的增

加,洞庭湖水文连通性指数也逐渐增加,且洞庭湖水文连通性指数随水位增加的速度逐渐放缓,具有

边际递减效应。水位增加对洞庭湖水文连通性指数具有正向影响。

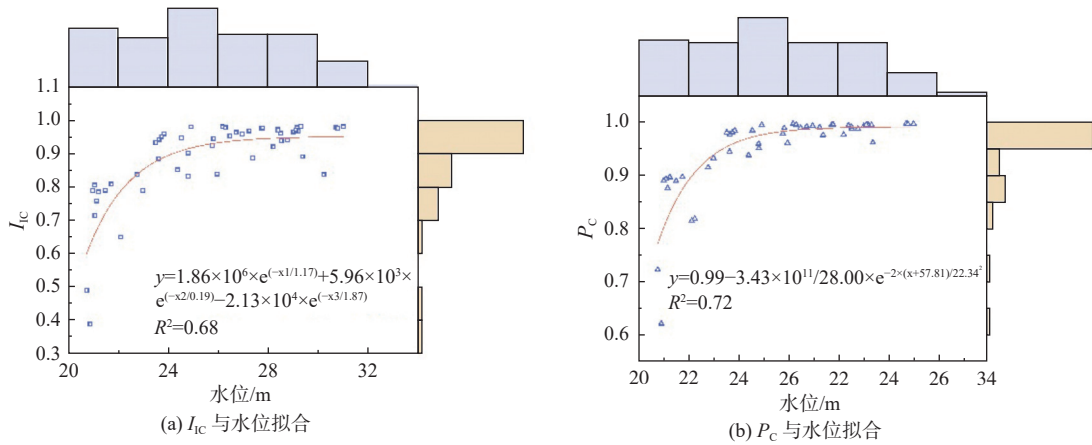


图5 洞庭湖  $I_{IC}$  和  $P_C$  与水位的拟合结果

Fig. 5 Fitting results of  $I_{IC}$  and  $P_C$  and water level of Dongting Lake

洞庭湖  $P_C$  与水位的拟合采用 Gauss 模型,拟合效果良好,  $R^2$  为 0.72。洞庭湖  $P_C$  集中在 0.9~1.0, 水位在 20~30 m 均匀分布。随着水位的增加,洞庭湖潜在水文连通性指数也逐渐增加,且洞庭湖潜在水文连通性指数随水位增加的速度逐渐放缓,这与洞庭湖水文连通性指数与水位的拟合结果相似,具有边际递减效应,说明水位增加对洞庭湖潜在水文连通性指数也具有正向影响。

### 3.2.2 极端气候事件对洞庭湖水文连通性的影响

洞庭湖流域极端降水指数与  $I_{IC}$ 、 $P_C$  的相关性分析结果见图 6(a)。结果显示:洞庭湖  $I_{IC}$  与极端降水指数普遍为正相关关系;  $P_C$  除了与 CDD(持续干燥指数)为负相关关系外,与其余极端降水指数均为正相关关系。其中洞庭湖  $I_{IC}$  与  $R_{10\text{mm}}$ (中雨日数)通过了 0.01 显著性水平检验,相关系数达到 0.58,存在极强的正相关关系,洞庭湖  $I_{IC}$  与 PREPTOT(雨日降水总量)、 $R_{20\text{mm}}$ (大雨日数)和  $R_{25\text{mm}}$ (暴雨日数)通过了 0.05 显著性水平检验,存在很强的正相关关系。洞庭湖  $P_C$  与 PREPTOT、 $R_{10\text{mm}}$ 、 $R_{20\text{mm}}$  和  $R_{25\text{mm}}$  均通过了 0.05 显著性水平检验,存在显著的正相关关系。

洞庭湖流域极端气温指数与  $I_{IC}$ 、 $P_C$  的相关性分析结果见图 6(b)。结果显示洞庭湖  $I_{IC}$  与极端气温指数 TXx(日最高气温极高值)、TXn(日最高气温极低值)、TNx(日最低气温极高值)、FD<sub>0</sub>(霜冻日数)、ID<sub>0</sub>(冰冻日数)、TR20(热夜日数)、TX<sub>10p</sub>(冷昼日数)、TN<sub>10p</sub>(冷夜日数)、TX<sub>90p</sub>(暖昼日数)、

TN<sub>90p</sub>(暖夜日数)、DTR(气温日较差)为负相关关系,与 TNn(日最低气温极低值)、SU25(夏季日数)、WSDI(暖持续日数)、CSDI(冷持续日数)、GSL(生长季长度)为正相关关系。其中  $I_{IC}$  与 GSL 通过了 0.05 显著性水平检验,相关系数为 0.45,洞庭湖  $I_{IC}$  与除 GSL 外其他极端气温指数相关关系均不明显。

洞庭湖  $P_C$  与 TXx、TXn、TNx、FD<sub>0</sub>、TN<sub>10p</sub>、TX<sub>90p</sub>、DTR 为负相关关系,与 TNn、ID<sub>0</sub>、SU25、TR20、TX<sub>10p</sub>、TN<sub>90p</sub>、WSDI、CSDI、GSL 为正相关关系。洞庭湖  $P_C$  与极端气温指数均没有通过显著性水平检验,说明其相关关系不明显。

由此可以知道极端降水事件相较于极端气温事件对洞庭湖的水文连通性影响更明显,且极端降水事件对洞庭湖的水文连通性具有正相关关系。

为了探究洞庭湖  $I_{IC}$  和  $P_C$  对极端气候事件的响应,进行洞庭湖水文连通性与极端气候指数的主成分分析。洞庭湖  $I_{IC}$ 、 $P_C$  与极端气候指数的主成分分析结果见表 4。  $I_{IC}$  与极端气候指数的分析结果表明第一主成分的方差贡献率达到 30.82%,极端降水指数 PREPTOT(雨日降水总量)、RX<sub>1day</sub>(单日最大降水量)、RX<sub>5day</sub>(连续 5 日最大降水量)、SDII(年均雨日降水强度)、 $R_{10\text{mm}}$ (中雨日数)、 $R_{20\text{mm}}$ (大雨日数)、 $R_{25\text{mm}}$ (暴雨日数)、 $R_{95p}$ (强降水量)、 $R_{99p}$ (极强降水量)、极端气温指数 GSL(生长季长度)都是第一主成分的高载荷值,这表明洞庭湖  $I_{IC}$  与这些指数具有一致性。







表4 洞庭湖  $I_{IC}$ 、 $P_C$  与极端气候指数的因子载荷与累计方差Tab. 4 Factor loadings and cumulative variance of  $I_{IC}$ ,  $P_C$  and extreme climate indices for Dongting Lake

| 类型       | 指标                  | $I_{IC}$ 主成分 |       |        | $P_C$ 主成分 |       |       |
|----------|---------------------|--------------|-------|--------|-----------|-------|-------|
|          |                     | 1            | 2     | 3      | 1         | 2     | 3     |
| 水文连通性指数  |                     | 0.48         | -0.01 | -0.014 | 0.42      | 0.14  | 0.20  |
| 极端降水持续指数 | CDD                 | -0.27        | -0.08 | -0.212 | -0.28     | -0.08 | -0.19 |
|          | CWD                 | 0.48         | -0.30 | 0.110  | 0.47      | -0.31 | 0.10  |
|          | PRCPTOT             | 0.94         | -0.05 | 0.080  | 0.94      | -0.06 | 0.07  |
| 极端降水强度指数 | $RX_{1\text{ day}}$ | 0.77         | 0.25  | 0.070  | 0.78      | 0.23  | 0.04  |
|          | $RX_{5\text{ day}}$ | 0.75         | 0.16  | -0.007 | 0.75      | 0.14  | -0.04 |
|          | SD II               | 0.78         | 0.27  | 0.370  | 0.79      | 0.26  | 0.34  |
| 极端降水绝对指数 | $R_{10\text{ mm}}$  | 0.80         | -0.13 | 0.080  | 0.80      | -0.13 | 0.09  |
|          | $R_{20\text{ mm}}$  | 0.90         | 0.02  | 0.130  | 0.90      | 0.01  | 0.13  |
|          | $R_{25\text{ mm}}$  | 0.92         | 0.04  | 0.200  | 0.92      | 0.03  | 0.20  |
| 极端降水相对指数 | $R_{95P}$           | 0.95         | 0.12  | 0.170  | 0.95      | 0.11  | 0.15  |
|          | $R_{99P}$           | 0.87         | 0.10  | 0.160  | 0.88      | 0.08  | 0.14  |
| 极端气温极值指数 | TXx                 | -0.29        | 0.57  | 0.360  | -0.27     | 0.58  | 0.34  |
|          | TXn                 | 0.23         | 0.43  | -0.670 | 0.23      | 0.41  | -0.70 |
|          | TNx                 | -0.30        | 0.70  | 0.330  | -0.28     | 0.70  | 0.32  |
|          | TNn                 | 0.07         | 0.65  | -0.410 | 0.073     | 0.65  | -0.42 |
| 极端气温绝对指数 | FD0                 | -0.45        | -0.61 | 0.480  | -0.45     | -0.6  | 0.50  |
|          | ID0                 | -0.29        | -0.36 | 0.540  | -0.29     | -0.35 | 0.57  |
|          | SU25                | -0.43        | 0.38  | 0.330  | -0.43     | 0.4   | 0.35  |
|          | TR20                | -0.29        | 0.48  | 0.100  | -0.28     | 0.49  | 0.11  |
| 极端气温相对指数 | $TX_{10P}$          | 0.21         | -0.78 | 0.230  | 0.20      | -0.79 | 0.22  |
|          | $TN_{10P}$          | 0.072        | -0.83 | 0.280  | 0.06      | -0.84 | 0.27  |
|          | $TX_{90P}$          | -0.36        | 0.53  | 0.700  | -0.34     | 0.54  | 0.68  |
|          | $TN_{90P}$          | -0.04        | 0.78  | 0.380  | -0.02     | 0.78  | 0.37  |
| 极端气温其他指数 | WSDI                | 0.13         | 0.34  | 0.750  | 0.14      | 0.34  | 0.74  |
|          | CSDI                | 0.14         | -0.48 | 0.380  | 0.14      | -0.47 | 0.38  |
|          | DTR                 | -0.31        | 0.01  | 0.380  | -0.31     | 0.02  | 0.37  |
|          | GSL                 | 0.62         | 0.17  | -0.140 | 0.62      | 0.17  | -0.13 |
| 贡献率/%    |                     | 30.82        | 18.39 | 12.29  | 30.62     | 18.45 | 12.40 |
| 累计贡献率/%  |                     | 30.82        | 49.21 | 61.50  | 30.62     | 49.07 | 61.46 |

$P_C$  与极端气候指数的分析结果表明第一主成分的方差贡献率达到 30.62%, 极端降水指数 PREPTOT(雨日降水总量)、 $RX_{1\text{ day}}$ (单日最大降水量)、 $RX_{5\text{ day}}$ (连续 5 日最大降水量)、SDII(年均雨日降水强度)、 $R_{10\text{ mm}}$ (中雨日数)、 $R_{20\text{ mm}}$ (大雨日数)、 $R_{25\text{ mm}}$ (暴雨日数)、 $R_{95P}$ (强降水量)、 $R_{99P}$ (极强降水量)、极端气温指数 GSL(生长季长度)都是第一主成分的高载荷值, 这表明洞庭湖  $P_C$  与这些指数具有

一致性。

#### 4 结论与展望

本研究着力于在宏观角度分析气候变化对洞庭湖水文连通性的改变, 研究结果具体如下: 通过对近几十年洞庭湖水文连通性的分析可知洞庭湖水文连通性整体呈现出夏季( $I_{IC}$  均值为 0.95) > 秋季( $I_{IC}$  均值为 0.88) > 春季( $I_{IC}$  均值为 0.81) > 冬季

( $I_{IC}$  均值为 0.63) 的特征。从水体提取遥感影像可以看出洞庭湖水系网络呈现出“四口”分流之间联系少, 松澧、沅澧、湘资之间连接并不是很紧密。研究发现洞庭湖流域春季和秋季的水文连通性指数呈现上升趋势, 三峡蓄水和长江来水会对此有影响, 从宏观气候变化角度, 洞庭湖流域春季和秋季降雨量, 尤其是秋季降雨量较大, 对洞庭湖有直接的水分输入, 可以增加洞庭湖的水位, 也就导致洞庭湖水文连通性的增加。经过持续性预测发现洞庭湖水文连通性指数的 Hurst 指数均大于 0.5, 表明在未来会延续过去的变化趋势, 所以在没有人类影响下洞庭湖的水文连通性会有微弱的下降趋势。这一发现对保障洞庭湖流域水资源安全具有重要的理论和现实意义。本研究仅从宏观角度分析极端气候事件对洞庭湖水文连通性的影响, 缺乏对三峡大坝和长江上游来水的定量影响分析。

洞庭湖  $I_{IC}$  与极端降水指数均为正相关关系, 洞庭湖  $P_C$  与极端降水指数普遍为正相关关系, 说明极端降水指数对洞庭湖  $I_{IC}$  和  $P_C$  具有正向影响, 而极端气温事件对洞庭湖水文连通性影响作用较小。 $I_{IC}$  与极端气候指数的分析结果表明第一主成分的方差贡献率达到 30.82%,  $P_C$  与极端气候指数的分析结果表明第一主成分的方差贡献率达到 30.62%, 由主成分分析可知洞庭湖水文连通性对极端降水指数的响应具有较高的一致性, 极端降水事件对洞庭湖水文连通性具有较为明显的影响, 极端气温事件对洞庭湖水文连通性的影响比较低。暴雨事件可通过直接的水分输入对湖泊河流的水位会产生影响, 而极端高温或地温只能间接通过水分的蒸散发对湖泊河流的水位产生一定影响。与本研究结果极端降水事件对洞庭湖水文连通性具有较大的正向影响理论一致, 从定量角度证明了这一观点。经过进一步探究极端气候事件与洞庭湖水文连通性的一致性发现洞庭湖  $I_{IC}$  和洞庭湖  $P_C$  与大部分极端降水指数具有一致性, 极端气温指数中只有 GSL 与洞庭湖水文连通性具有较高一致性, 说明洞庭湖  $I_{IC}$  和  $P_C$  对极端降水事件具有明显响应, 而洞庭湖  $I_{IC}$  和洞庭湖  $P_C$  对极端气温事件的响应不明显。极端降水事件可以分为极端暴雨事件和极端干旱事件, 都是水分在流域内的直接输入或输出, 对地表水会产生较为明显的影响, 地表水的直接输入或输出对水文连通性具有不可忽视的影响。极端气温事件

一般通过温度改变使地面的蒸散发产生变化, 属于对地表水的间接影响。本研究定量说明了洞庭湖水文连通性对极端降水事件的响应明显高于对极端气温事件的响应。

由于时间及数据获取等各方面条件的限制, 相关研究还不够深入。受气候变化和人类活动的影响, 洞庭湖流域湖泊水系的水文连通性在近几年来产生了显著变化, 洞庭湖湖区河流和湖泊湿地萎缩明显<sup>[34]</sup>, 水体分割加剧了水环境和水生态的恶化趋势。洞庭湖是吞吐型湖泊, 区内河湖水系众多, 水网较为复杂<sup>[35]</sup>。当地水利工程的运行对长江中下游水文节律产生了一定影响, 洞庭湖区域是受长江干流水情影响相对较大的地区, 洲滩面积露出时间的改变和水文连通性的变化是江湖关系变化最显著的表现之一<sup>[36-37]</sup>。当地水利工程的运行属于人类活动对洞庭湖水文连通性的影响, 本研究仅涉及气候变化对洞庭湖水文连通性的影响, 未来可以从定量角度深入研究人类活动对洞庭湖水文连通性产生何种影响。

#### 参考文献:

- [1] 郭玉静, 李春晖, 刘绿柳. 气候变化对水资源影响预估常用指标[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(4): 496-502. DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2020.081.
- [2] 汤维祺, 吴力波. IPCC AR6 报告解读: 气候治理政策的新视角及对我国的启示[J]. *气候变化研究进展*, 2023, 19(2): 151-159. DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2022.245.
- [3] 黄浩, 张勃, 黄涛, 等. 近30 a甘肃省河东地区极端气温指数时空变化特征及趋势预测[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(2): 319-328. DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2020.02.05.
- [4] 周佰铨, 翟盘茂. 未来的极端天气气候与水文事件预估及其应对[J]. *气象*, 2023, 49(3): 257-266. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.022301.
- [5] AHSAN S, BHAT M S, ALAM A, et al. Evaluating the impact of climate change on extreme temperature and precipitation events over the Kashmir Himalaya[J]. *Climate Dynamics*, 2022, 58: 1651-1669. DOI: 10.1007/s00382-021-05984-6.
- [6] RAHIMI M, MOHAMMADIAN N, VANASHI A R, et al. Trends in indices of extreme temperature and precipitation in Iran over the period 1960-2014[J].

- Open Journal of Ecology*, 2018, 8(7): 396-415. DOI: 10.4236/oje.2018.87024.
- [7] 游庆龙, 康世昌, 李剑东, 等. 青藏高原气候变化若干前沿科学问题[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(3): 885-901. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0029.
- [8] 赵贵章, 董锐, 王赫生, 等. 近30年鄱阳湖与洞庭湖水文变化与归因[J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2020, 18(5): 74-83. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0094.
- [9] 王学雷, 蔡晓斌, 杨超, 等. 长江中游河湖湿地系统演变与生态修复[J]. *中国科学基金*, 2022, 36(3): 398-405. DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2022.03.006.
- [10] QI S Y, CHEN S D, LONG X R, et al. Quantitative contribution of climate change and anthropological activities to vegetation carbon storage in the Dongting Lake basin in the last two decades[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(1): 845-868. DOI: 10.1016/j.asr.2022.07.068.
- [11] 杨炳辉, 施勇, 栾震宇, 等. 洞庭湖区超标洪水数值模拟研究[J]. *水利水运工程学报*, 2023, 1(2): 34-42. DOI: 10.12170/20211029002.
- [12] 邹磊, 夏军, 张印. 长江中下游极端降水时空演变特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(5): 1264-1274. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202105023.
- [13] 叶许春, 吴娟, 李相虎. 鄱阳湖水位变化的复合驱动机制[J]. *地理科学*, 2022, 42(2): 352-361. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2022.02.017.
- [14] TAN J, YU D, LI Q, et al. Spatial relationship between land-use/land-cover change and land surface temperature in the Dongting Lake area, China[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1-9. DOI: 10.1038/s41598-020-66168-6.
- [15] 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[J]. *中国科学基金*, 2022, 36(3): 406-411. DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2022.03.008.
- [16] 肖焯, 黄志刚, 肖菡曦, 等. 不同水位时期东洞庭湖湿地土壤微生物生物量碳氮和酶活性变化[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2958-2966. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202108.036.
- [17] 康满萍, 赵成章, 白雪. 苏干湖湿地土壤全盐含量空间异质性及影响因素[J]. *生态学报*, 2021, 41(6): 2282-2291. DOI: 10.5846/stxb202004060813.
- [18] 王毓芳, 赵成章, 曾红霞, 等. 疏勒河中游湿地景观时空演变及其影响因素[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(1): 282-291. DOI: 10.13866/j.azr.2022.01.27.
- [19] 贺怡, 王雪宏, 杨继松, 等. 湿地水文连通影响因素及生态效应研究进展[J]. *生态科学*, 2021, 40(6): 218-224. DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2021.06.027.
- [20] 孙博闻, 陈巍, 李娜, 等. 生态补水下白洋淀湿地水文连通特性研究[J]. *水利水电技术 (中英文)*, 2022, 53(3): 134-144. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.03.013.
- [21] 董志远, 陈琳琳, 陈莉, 等. 基于环境 DNA 宏条形码技术的黄河三角洲典型潮沟系统鱼类多样性及其对水文连通性响应的研究[J]. *生物多样性*, 2023, 31(7): 100-114. DOI: 10.17520/biods.2023073.
- [22] 杨素. 太湖流域水文连通性现状、研究进展与未来挑战[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(4): 1055-1074. DOI: 10.18307/2022.0402.
- [23] LIU Y Y, ZHANG H J, ZENG P, et al. Linking hydraulic geometry, land use, and stream water quality in the Taihu basin, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(484): 1-17. DOI: 10.1007/s10661-021-09270-0.
- [24] 门宝辉, 刘菁莘. 联系数-图论耦合的城市河网水系连通性评价[J]. *水力发电学报*, 2023, 42(1): 65-76. DOI: 10.11660/slfdb.20230107.
- [25] ZHAO L, LIU Y, LUO Y. Assessing hydrological connectivity mitigated by reservoirs, vegetation cover, and climate in Yan River watershed on the Loess Plateau, China: The network approach[J]. *Water*, 2020, 12(6): 1742. DOI: 10.3390/w12061742.
- [26] LIU X G, ZHANG Q, LI Y L, et al. Satellite image-based investigation of the seasonal variations in the hydrological connectivity of a large floodplain (Poyang Lake, China)[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124810. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124810.
- [27] 李贺, 王书航, 车霏霏, 等. 巢湖、洞庭湖、鄱阳湖沉积物重金属污染及来源的 Meta 分析[J]. *中国环境科学*, 2022, 43(2): 831-842. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20221115.001.
- [28] 郑子彦, 吕美霞, 马柱国. 黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(1): 61-72. DOI: 10.16418/j.issn.1000-

- 3045.20191230002.
- [29] 杜高奇, 李自强, 赵勇, 等. 基于 RSEI 的黄河流域生态环境质量监测与驱动因素分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(12): 81-93. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2022.12.009](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2022.12.009).
- [30] 王静, 尹令实. 微塑料及卤代有机污染物在洞庭湖的赋存研究进展[J]. *环境监控与预警*, 2022, 14(3): 35-42. DOI: [10.3969/j.issn.1674-6732.2022.03.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-6732.2022.03.006).
- [31] 尚坤钰, 姜明, 林鹏程, 等. 江湖阻隔对长江中下游湖泊鱼类群落分类多样性的影响[J]. *水生生物学报*, 2023, 47(1): 133-146. DOI: [10.7541/2022.2021.0300](https://doi.org/10.7541/2022.2021.0300).
- [32] PASCUAL-HORTAL L, SAURA S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation[J]. *Landscape Ecology*, 2006, 21: 959-967. DOI: [10.1007/s10980-006-0013-z](https://doi.org/10.1007/s10980-006-0013-z).
- [33] SAURA S, ESTREGUIL C, MOUTON C, et al. Network analysis to assess landscape connectivity trends: application to European forests (1990 – 2000)[J]. *Ecological Indicators*, 2011, 11(2): 407-416. DOI: [10.1016/j.ecolind.2010.06.011](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.06.011).
- [34] 黄草, 陈叶华, 李志威, 等. 洞庭湖区水系格局及连通性优化[J]. *水科学进展*, 2019, 30(5): 661-672. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2019.05.006](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2019.05.006).
- [35] 杜冰雪, 徐力刚, 蒋名亮, 等. 2000—2014年洞庭湖区植物面积变化及其与湖泊水位的关系[J]. *湿地科学*, 2020, 18(1): 20-27. DOI: [10.13248/j.cnki.wetlandsci.2020.01.003](https://doi.org/10.13248/j.cnki.wetlandsci.2020.01.003).
- [36] 李沛, 黄生志, 李大鹏, 等. 三峡水库防洪作用与鄱阳湖流域洪灾分析[J]. *西安理工大学学报*, 2020, 36(4): 486-493,501. DOI: [10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.04.007](https://doi.org/10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.04.007).
- [37] 李秀明, 程瑞梅, 孙戈, 等. 三峡水库蓄水前、后澎溪河食鱼水鸟对越冬栖息地利用的变化[J]. *湿地科学*, 2022, 20(5): 636-645. DOI: [10.13248/j.cnki.wetlandsci.2022.05.005](https://doi.org/10.13248/j.cnki.wetlandsci.2022.05.005).

## The impact of extreme climatic events on hydrological connectivity of Dongting Lake

ZHENG Fang<sup>1,2</sup>, LI Fangran<sup>1,2</sup>, GAN Yiqun<sup>3</sup>, SHAO Dongyue<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Yin<sup>1,2</sup>, CAO Meichen<sup>1,2</sup>, DUAN Tianyu<sup>4</sup>

(1. Hebei Institute of Water Science, Shijiazhuang 050057, China; 2. Hebei Water Science and Technology Co. Ltd. Shijiazhuang 050057, China; 3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China; 4. Hebei Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** The Dongting Lake basin is the region of the middle reaches of the Yangtze River that provides ecosystem regulation functions. The hydrological connectivity of the Dongting Lake basin experienced profound and complex changes as a result of climate change and human activities. China emphasizes that ecohydrological environmental protection should be put in the first place, and assessing the impact of the occurrence of extreme climatic events on the regional hydrological environment would be of great significance in protecting the stability of the regional ecohydrological environment. Previous study quantitatively characterizes and predicts the changes in the hydrological connectivity of Dongting Lake in the last decades. It is beneficial for us to fully understand the water resources evolution of Dongting Lake, to ensure the security of water resources which has a significant theoretical and practical meaning in the Dongting Lake basin.

The hydrological connectivity index was applied to characterize the changes in the hydrological connectivity and to study the contribution of extreme climatic events. This study was carried out using the hydrological connectivity index method, ETCCDI extreme climate index, Hurst index, and mathematical and statistical analysis methods.

The results showed that the hydrological connectivity index presented the characteristics of summer > autumn > spring > winter. From the remote sensing images extracted from the water body, it could be seen that the Dongting Lake hydrological network was characterized by inhomogeneity. It is found that the hydrological connectivity of Dongting Lake would continue to change excessively in the future according to the persistence prediction. Dongting



Lake  $I_{IC}$  and  $P_C$  had an obvious response to extreme precipitation events, while Dongting Lake  $I_{IC}$  and  $P_C$  did not significantly respond to extreme climate events.

These results indicated that the hydrological connectivity of Dongting Lake was relatively stable in the last three decades. Without the interference of human activities, the hydrological connectivity of Dongting Lake would continue the decreasing trend in the future. The hydrological connectivity index gradually increased with the increase of water level and the growth rate gradually slowed down, and the increase of water level had a positive influence on it with a decreasing marginal effect. Extreme precipitation events had a more obvious positive effect on the hydrological connectivity, while extreme temperature events had a smaller effect on the hydrological connectivity. This could be because heavy rainfall events may affect lake and river levels through direct water inputs, whereas extreme high or low temperatures may only indirectly affect lake and river levels through the evapotranspiration of water.

**Key words:** Dongting Lake; hydrological connectivity; extreme climate event; persistence prediction



摄影|曲帅超