

基于最优尺度的水文连通性遥感计算方法——以长江中下游平原水文连通性变化为例

陆羽仪^{1,2}, 罗秋琪³, 冯炼⁴, 蔡晓斌¹, 陈怡君^{1,2}

1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 环境与灾害监测评估湖北省重点实验室, 武汉 430077;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 南方科技大学 环境科学与工程学院, 深圳 518055;

4. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079

摘要: 水文连通性的变化对水生生态系统的结构与功能、生物多样性的维持以及与水资源相关的人类生产与生活活动均有极其深远的影响。与此同时, 人类筑堤建坝、围垦造田等对自然水系的改造, 使得众多平原湖区的水文连通性发生了显著变化。因此, 探索科学有效的水文连通性量化方法, 分析其变化过程及其潜在的生态环境影响具有重要意义。基于地统计学的连通度函数可有效表征水文连通性及其变化过程, 但其计算结果会随统计窗口和方向变化而改变, 无法获得客观可对比的水文连通性值。本研究基于遥感的水体提取结果提出了最优尺度下的连接频率方法, 综合考虑不同区域的水体尺度特征, 以最优尺度为基准计算多个区域的水文连通性时序变化过程, 实现了跨区域的水文连通性变化对比分析。研究对1984年—2021年7个不同时期长江中下游平原的水文连通性进行测算, 结果显示鄱阳湖、洞庭湖、汉江流域及长江下游干流平原区的水文连通性呈先降后升的趋势, 而太湖流域和长江中游干流平原区的水文连通性变化则主要表现为平稳下降过程。研究时段内不同区域的变化过程也反映出了各自特有的自然环境和人为活动过程及其对水文连通性的潜在影响。此外, 通过与景观生态学两种连通性指数计算结果对比, 表明该方法兼具了斑块间连通性及斑块内连通性的表征能力, 具有独特的应用价值。

关键词: 最优尺度, 水文连通性, 地统计学, 遥感, 长江中下游平原

中图分类号: TP7/P2

引用格式: 陆羽仪, 罗秋琪, 冯炼, 蔡晓斌, 陈怡君. 2026. 基于最优尺度的水文连通性遥感计算方法——以长江中下游平原水文连通性变化为例. 遥感学报, 30(5): 1450–1463

Lu Y Y, Luo Q Q, Feng L, Cai X B and Chen Y J. 2026. Remote sensing method for hydrological connectivity at optimal scale: A case study of connectivity changes in the middle and lower Yangtze River Plain. National Remote Sensing Bulletin, 30(5): 1450–1463 [DOI: 10.11834/jrs.20265019]

1 引言

水文连通性, 一般指河流、湖泊与其洪泛区或其他水体之间的相互作用程度, 是衡量水体水文过程及其生态调节能力的重要指标 (Trigg 等, 2013)。良好的水文连通性能够改善河流和湖泊的水质 (Li 等, 2024b), 促进湿地等重要生态单元的形成 (Leibowitz 等, 2023), 并有助于维持区域内的生物多样性 (Wu 等, 2023)。近年来, 受气

候变化和人类活动的共同作用, 全球地表水文连通性发生显著变化, 河流的自由流通度被削弱, 围湖造田、造陆等过程造成湖泊面积严重萎缩 (Grill 等, 2019; Pekel 等, 2016), 对水生生态系统及区域经济可持续发展均产生深远影响。因此, 亟需构建能全面、准确量化评估水文连通性的技术方法体系。

现有研究中常用的水文连通性计算方法主要有3类: (1) 水文参数统计方法, 基于多种水文统

收稿日期: 2025-01-10; 预印本: 2025-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42171381, U22A20567); 湖北省科技创新基地平台计划(编号:2025CSA050)

第一作者简介: 陆羽仪, 研究方向为湿地环境及水资源遥感。E-mail: luyuyi23@mails.ucas.edu.cn

通信作者简介: 蔡晓斌, 研究方向为湿地与水资源遥感。E-mail: xbc@whigg.ac.cn

计参数计算水文连通性 (Lehner和Grill, 2013; 杨素等, 2022), 相关研究者通过河流流量、水库库容等水文统计数据设计了综合连通性状态指数 (CSI), 并绘制了全球河流连通度图 (Grill等, 2019)。然而, 此类方法受限于水文统计数据获取、更新困难、共享难度大等问题 (刘沐岍等, 2024), 难以对大尺度范围内水体的连通性进行动态评估, 影响了该方法的广泛应用。(2) 基于遥感的景观指数方法, 即用现有的景观生态学指数来解释连通性。如Spanowicz和Jaeger通过对比景观生态学中两个连通性相关的指数 Connectance Index (CONNECT) 和 Effective Mesh Size (m_{eff}), 并探讨了斑块内连通性与斑块间连通性的概念 (Spanowicz和Jaeger, 2019)。此后, Yang等 (2024) 则结合景观生态学和图论方法, 评估了太湖吴江区湖泊湿地的水文连通性。虽然景观指数可在一定程度上解释水文连通性, 但难以全面表征多维度的水文连通性变化过程。(3) 基于遥感的统计学方法, 该方法通过连通度函数 CF (Connectivity Function) 来评估水文连通性及其变化。Trigg等 (2013) 首次利用CF评价了极端洪水事件影响下曼谷水文连通性的变化过程; 随后, Tan等 (2019) 将其应用于鄱阳湖及其子湖连通性的研究; Liu等 (2020) 则用其分析了长江干流影响下的鄱阳湖洪泛区水文连通性季节性变化 (Xue等, 2024)。

由于CF方法在计算过程中整合了斑块内和斑块间的连通性特征, 可有效表征水文连通性, 因而得到广泛应用。然而, 该方法的计算结果表现为不同尺度下单一搜索方向上系列连通度值构成的多条曲线, 难以对不同区域的水文连通性差异进行对比, 且同一区域不同时段连通性的变化幅度也无法直接量化。鉴于此, 我们提出了一种最优尺度下的连接频率方法 F_{con} (Connection Frequency) 来计算水文连通性, 通过确定最优计算尺度并考虑研究区内所有方向而非单一方向上水体的连接频率, 以弥补现有地统计方法的不足。

长江中下游平原作为全国地表水分布最集中的区域之一, 也承载了中国近四分之一的人口, 是中国重要的生态和经济单元 (Xie等, 2017)。与此同时, 该区域经历了干旱 (向大亨等, 2024)、水土流失以及筑坝修闸、大面积围垦 (Hou等, 2020)、城市开发等扰动过程, 其水体连通性被逐

渐破坏, 同时引发了湖泊水质恶化 (Xu等, 2021)、湿地退化 (Li等, 2024a; Zhang等, 2020) 等一系列生态安全问题, 被认为是目前全球最脆弱的淡水生态区之一 (Wang等, 2014)。因此, 我们使用 F_{con} 方法计算了1984年以来长江中下游平原湖区水文连通性的时序变化过程, 量化了长江中下游各平原区连通性的差异性变化规律, 以期为区域的生态保护与修复提供科学支撑。

2 数据与研究方法

2.1 研究区域

长江中下游平原 ($27^{\circ}02'54''\text{N}$ — $32^{\circ}36'24''\text{N}$, $111^{\circ}12'08''\text{E}$ — $121^{\circ}43'22''\text{E}$), 一般指长江中游平均海拔低于50 m的江汉平原、洞庭湖平原及鄱阳湖平原和其下游平均海拔低于30 m的皖中平原、长江三角洲等河湖冲积平原区 (Wang等, 2014), 总面积约14000 km², 约占长江中下游流域面积的17.2%。该区域水系发达, 遍布湖泊、池塘及水库, 拥有中国约54%的淡水资源, 是中国重要的农作物产区 (Wang等, 2021), 其稻米产量约占全国的51%, 淡水养殖产量约占全国的57%。为了有效解析不同平原区连通性的差异性变化规律, 研究区域根据长江流域各子流域边界进一步划分为6个子区: 洞庭湖流域、鄱阳湖流域、汉江流域、长江中游干流区、长江下游干流区、太湖流域 (贾艳艳等, 2020)。

2.2 研究数据

研究通过GEE (Google Earth Engine) 获得的JRC Monthly Water History (MWH) 数据集对长江中下游平原的水体范围进行提取。该数据集是Pekel等 (2016) 基于1984年—2021年期间获取的Landsat 5、7和8的470多万张影像, 使用专家系统进行逐像素分类得到的近40年全球水体月尺度分布结果, 空间分辨率为30 m。研究将MWH数据集月尺度水体分布结果进行分类整理后用于长江中下游平原水文连通性的动态监测 (Pekel等, 2016)。

2.3 最优尺度下的连接频率方法

目前, 常用于计算水文连通性的方法是基于遥感数据的地统计学CF方法。常规的CF方法通过计算特定方向上任意两个相隔指定距离的水体像

元之间相互连接的概率, 并沿计算连通函数值来评估水文连通性。其结果为指定方向各个尺度上的概率计算结果形成的一条随距离变化的曲线(图3(b)、(d))。具体公式如下:

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

式中, $I(u_j; Z_c)$ 用来表示事件 u_j 在条件 Z_c 下是否

发生, 如果 $I(u_j; Z_c) = 1$, 则表示在条件 Z_c 下事件 u_j 发生, 反之则不发生; Π 是乘积算子, Pr 是概率符号, $Pr\left(\prod_{j=1}^n I(u_j; Z_c) = 1\right)$ 则表示所有 n 个事件 u_j 在条件 Z_c 下都发生的概率; 因此, 连接函数 $P_{CF}(n; Z_c)$ 在任意给定距离处的值表示在该距离沿特定方向上相连点的占比。

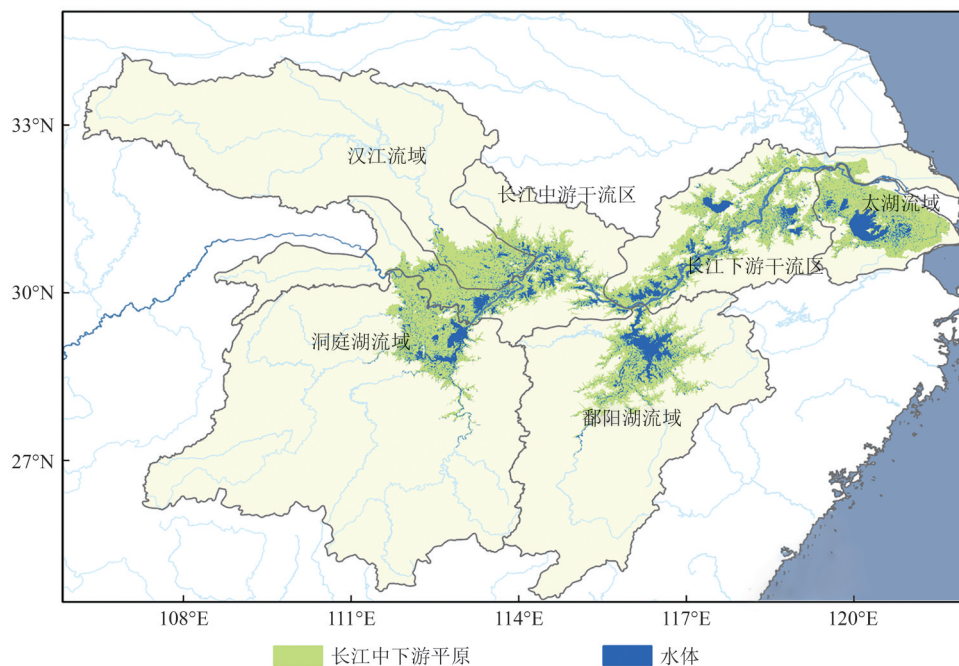


图1 研究区域长江中下游平原

Fig. 1 Study area: middle and lower Yangtze River Plain

然而, 常规的CF方法繁杂的计算结果, 用水平、垂直两个方向既难以综合表征形态复杂的水体结构, 又增加了连通度计算结果的复杂性, 尤其难以对比不同区域水体连通性的差异。此外, 该方法计算出的多条曲线也难以直观地判断特定水体连通性的增减过程。因此, 本研究设计的 F_{con} 方法, 在遴选区域内水体最合适计算尺度的基础上, 考虑所有方向上的连通性, 将常规CF方法中曲线形式的计算结果优化为单一连通度值(图3(e)), 确保了水文连通性计算结果在不同区域及不同时序之间的可比性。

为了解决常规CF方法跨尺度计算无法直接对比的问题, 研究设计了最优尺度下的连接频率方法 F_{con} 对水文连通性进行计算。考虑到不同计算尺度下连接频率计算结果会随之发生变化, 因此, 研究中对比遴选出了长江中下游平原区水文连通性评价的最优尺度, 随后在该尺度下计算了整个

研究区及其6个子区7个时期的水文连通性结果。具体处理流程如下所示:

(1) 时序数据规整: 从MWH数据集中提取长江中下游平原的地表水体分布, 为保证研究区边缘的所有像素都能完成 F_{con} 方法对水文连通性的计算, 在提取的水体分布范围基础上, 向外扩展了500 m的缓冲区。此外, 考虑到有关观测数据的时序数量特征, 我们将1984—2021年分为7个时期: 1984—1999; 2000—2003; 2004—2007; 2008—2011; 2012—2015; 2016—2019; 2020—2021。进一步汇总了7个时期内多年各月的MWH数据, 逐像元计算特定时期内该月份的水体淹没频率, 再求取各月均值以解决不同月份观测次数不均的问题。当某像元在特定时期内的淹没频率大于或等于25%时, 则将该像元视为会影响区域水文连通性变化的常规水体像元, 反之则会将其定义为非水体像元。最终, 求得7个时期的地表水体分布结果。

(2) 最优尺度选择：最优尺度指的是特定分辨率下最准确反映研究区水文连通性变化的计算尺度。研究中使用的最优尺度是针对 30 m 分辨率的水体数据的连通性计算结果获得的。不同分辨率观测条件下水文连通性在特定条件下可能产生较大差异。根据 F_{con} 方法的计算结果可知，水文连通性会随计算尺度的不断扩大而逐渐减小（图 2），其中计算尺度决定了 F_{con} 的计算窗口大小，与计算

数据集的空间分辨率有关，研究中单个像元对应空间分辨率为 30 m。为确定连通性变化计算的最优尺度，获取连通性计算值相对稳定的计算尺度，首先在不同的计算尺度下计算水文连通性值，并分析连通性值随计算尺度的变化斜率，再进一步计算该斜率的变化率（即变化曲线的二阶导数）；然后，选择斜率变化率首次低于其平均斜率变化的 5% 时将对应的尺度定义为最优尺度。

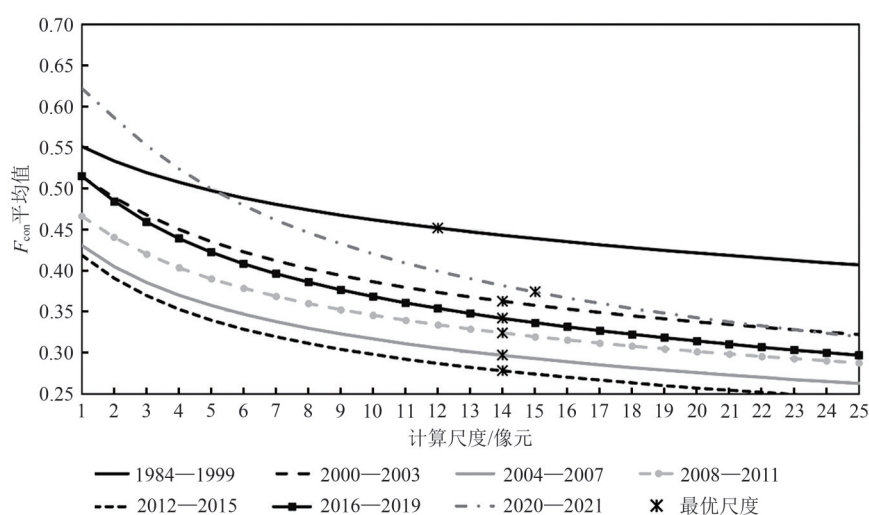


图 2 不同时期不同计算尺度下 F_{con} 的平均值的变化图(以汉江流域平原区为例)

Fig. 2 The changes of the average value of F_{con} in different periods and different calculation scales (Taking the Hanjiang River Basin Plain Region as an example)

(3) 连接频率计算：计算每个水体像元在最优计算尺度内与其他水体像元之间连接的频率，并以此作为该像元的水文连通性计算值（图 3 (c)）。所有非水体像元的水文连通性值定为 0。 F_{con} 具体公式如下：

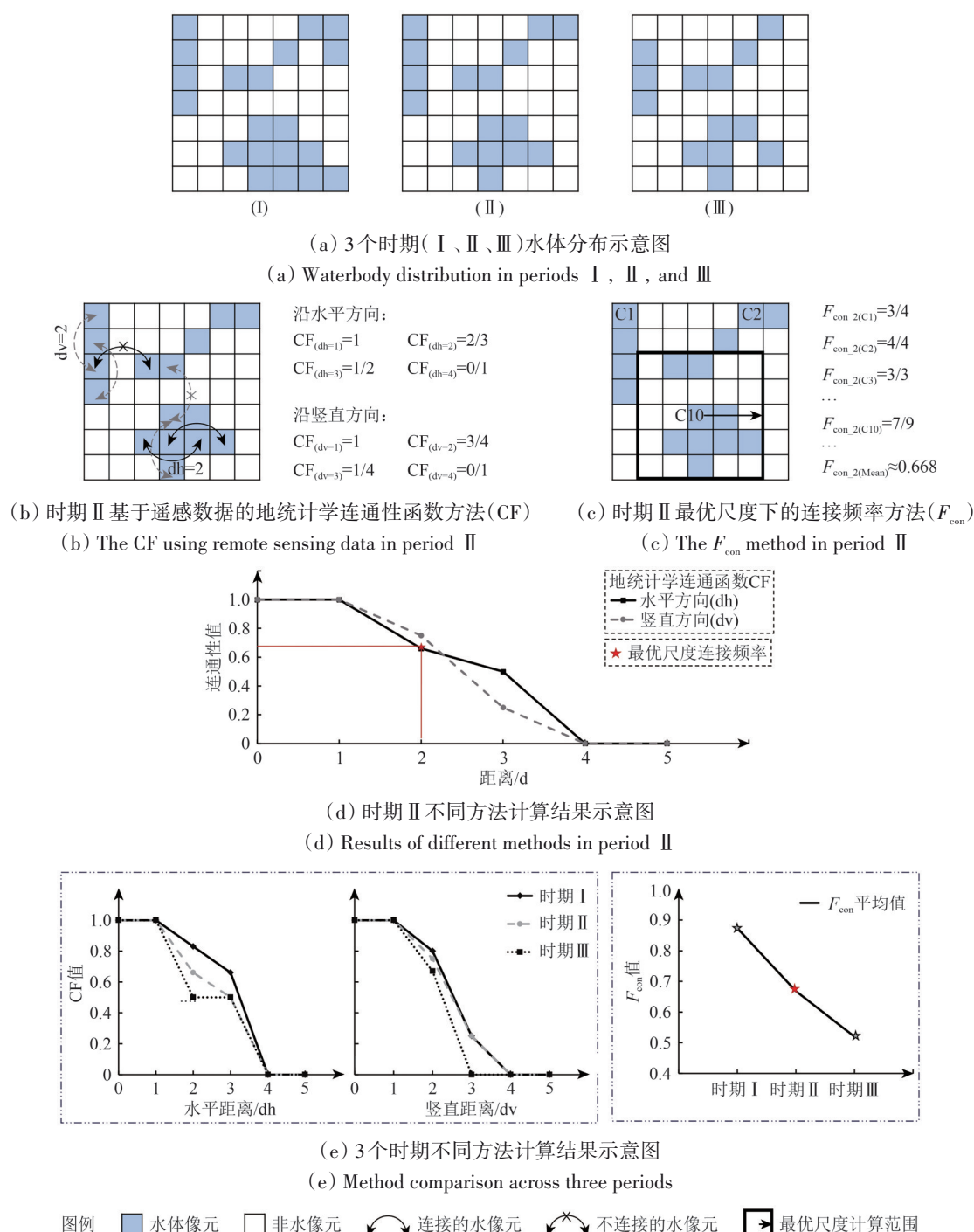
$$F_{con_d} = \frac{N_{wc}}{N_w} \quad (2)$$

式中， F_{con_d} 是对于任意一个水体像元的连接频率，计算结果介于 0—1，并以该像元为中心形成最优尺度 d 的计算窗口， N_{wc} 为计算窗口内与中心水体像元连接的水体像元数， N_w 为计算窗口内水像元的总数。计算时为确保不同时期之间计算结果的可对比性，将所有时期 N_w 统一为 7 个时期内至少一次出现为水体的像元总数，即研究时间段内丰水期最大水体范围的像元总数。

(4) 趋势分析：为分析不同时期水文连通性的长时间序列变化特征，采用一元线性回归方法，并使用最小二乘法求解回归线的斜率 (slope) 分析其趋势，最后应用 t 检验表示结果的显著性，

$p < 0.05$ 时则认为趋势显著，否则趋势不显著。

以上两种不同方法示意图如下图 3 所示，其中，图 3 (a) 为示例区在假定的 3 个不同时期水体像元的分布图；图 3 (b) 为示例区第 II 时期在 4 个尺度下水平和垂直两个方向上 CF 水文连通性的计算过程，其连通度结果在图 3 (d) 中以变化曲线标出；图 3 (c) 则展示了同一区域在第 II 时期计算 F_{con} 水文连通性的过程，其最优尺度为 2，因此以 2 为窗口计算该区域内各像元的连通性值并取其均值，得出水文连通性值，在图 3 (d) 中以红星表示；图 3 (e) 为两种不同方法评估的 3 个时期水文连通性结果对比。从图 3 (e) 图中可以看出 CF 方法分别表示为水平、竖直方向上不同距离水文连通性的变化，3 个时期的连通性结果需要用两个方向共计六条曲线来表征，无法直观地看出水文连通性的时序变化过程；而 F_{con} 方法则通过最优尺度的计算测定，从而直观地显示出水文连通性随时间的降低过程，并量化 3 个时段连通性值的降低程度，总体连通度值由 0.9 下降至 0.45。

图3 CF方法与 F_{con} 方法对比示例Fig. 3 Comparison of CF and F_{con}

3 结果与分析

3.1 长江中下游平原 F_{con} 计算的最优尺度

通过时序数据规整得到7个时期长江中下游平原6个子区的地表水体分布结果,具体的水体面积统计结果见表1。在此基础上计算得到长江中下游平原区的连通性评价最优尺度。

使用 F_{con} 方法遴选的最优尺度,需要在获取长江中下游平原所有子区的整体连通性特征的同时,提供一致的计算标准。因此,需要统计六个子区7个时期的42个连通性计算结果(表2)。根据最优尺度的判定标准,可知其最优尺度分布在10到16个像元之间,其中38%的结果表明在14个像元(约420 m)时达到最优,因此将其作为研究中统一的计算尺度。

表1 7个时期长江中下游平原湖区六个子区水体面积

Table 1 Water body area of six sub-regions in the Lake Zones of the middle and lower Yangtze River Plain during seven periods

区域	时期						
	1984—1999	2000—2003	2004—2007	2008—2011	2012—2015	2016—2019	2020—2021
鄱阳湖流域	6043.5549	5751.8928	5044.9752	5066.1153	5149.062	5610.8718	5735.8008
洞庭湖流域	4877.6814	4736.4129	4385.2041	4063.5405	4156.0704	4314.2148	4802.7807
太湖流域	5096.2194	5672.2473	5693.4756	5565.0438	5316.7986	5406.2406	5292.8865
汉江流域	1199.4075	1151.8461	998.5131	1062.1143	975.861	1178.7192	1386.009
长江中游干流区	5950.3914	5841.1242	5528.4705	5603.4594	5327.1891	5608.5939	5812.182
长江下游干流区	7497.4617	6804.9549	6553.818	6590.8152	6567.8166	7413.0192	7661.9637

表2 6个子区7个时期连通度变化的最优尺度表(像元个数)(黑体*代表该时期特定区域的最优尺度值)

Table 2 Optimal scales for changes across six regions and seven periods (The unit is the number of pixels, and Heiti* represents the optimal scale value in a specific area at that time)

区域	时期						
	1984—1999	2000—2003	2004—2007	2008—2011	2012—2015	2016—2019	2020—2021
鄱阳湖流域	10	10	10	10	10	10	10
洞庭湖流域	10	10	10	10	10	12	14*
太湖流域	14*	14*	14*	12	14*	14*	14*
汉江流域	12	14*	14*	14*	14*	14*	15
长江中游干流区	12	12	12	12	12	14*	14*
长江下游干流区	16	12	12	12	12	14*	14*

注:黑体*代表该时期特定区域的最优尺度值。

3.2 长江中下游平原连通性变化过程

基于上述方法及最优尺度,计算得出长江中下游平原在7个时期的水文连通性,并得到以下水文连通性变化趋势(图4)。如图4 I、II所示,1984年—2021年间长江中下游平原水文连通性波动范围介于55%—70%,不显著变化的面积占比83%,变化幅度较小,整体较为稳定;具体而言,水文连通性表现出先下降再回升的趋势,1984年—1999年为最高值70%,随后在1984年—1999年到2012年—2015年持续下降,并在2012年—2015年时达到最低值58%,在最后两个时间段连通性有所回升但始终未达到最初的连通性水平。

通过对7个时期水文连通性结果逐像素的时序回归分析,并使用*t*值显著性分析筛选出连通性显著变化区域(图4 III),结果表明不同区域水文连通性呈现出差异化的变化趋势。尽管大部分区域保持了水文连通性的稳定状态,但仍有17%的水体区域表现出显著的增减变化。水文连通性表现出上升的地区主要有位于长江下游干流区的石臼湖周边、汉江流域的部分平原区以及太湖流域的

杭嘉湖区和湖西区。而连通性下降的区域则集中在鄱阳湖流域、洞庭湖流域、长江中游干流区及下游干流区的大部分平原地区,其中鄱阳湖和洞庭湖的洲滩区是连通性下降最为显著的区域。

在鄱阳湖流域、洞庭湖流域、长江下游干流区以及汉江流域的平原区(图5(a)、(c)),水文连通性在7个时期内的变化幅度较大,整体呈现出先降后升的趋势,连通性在1984年—1999年到2012年—2015年之间的两个时期内持续下降,在2012年—2015年达到最低值,随后明显回升。尽管如此,所有区域的水文连通性显著减小的面积明显多于显著增加的面积,表明其水文连通性总体上仍然以下降为主,且后期水文连通性水平总体低于初期(1984年—1999年)状态。从不同区域看,长江下游干流区、鄱阳湖及洞庭湖流域水文连通性整体水平较高,最低值均保持在55%以上;而与其他区域不同,汉江流域平原区的水文连通性显著低于其他区域,水文连通性最大值仅45%左右,最低值接近25%,表明由于境内超大型水体较为缺乏,整体水文连通性相对较低。

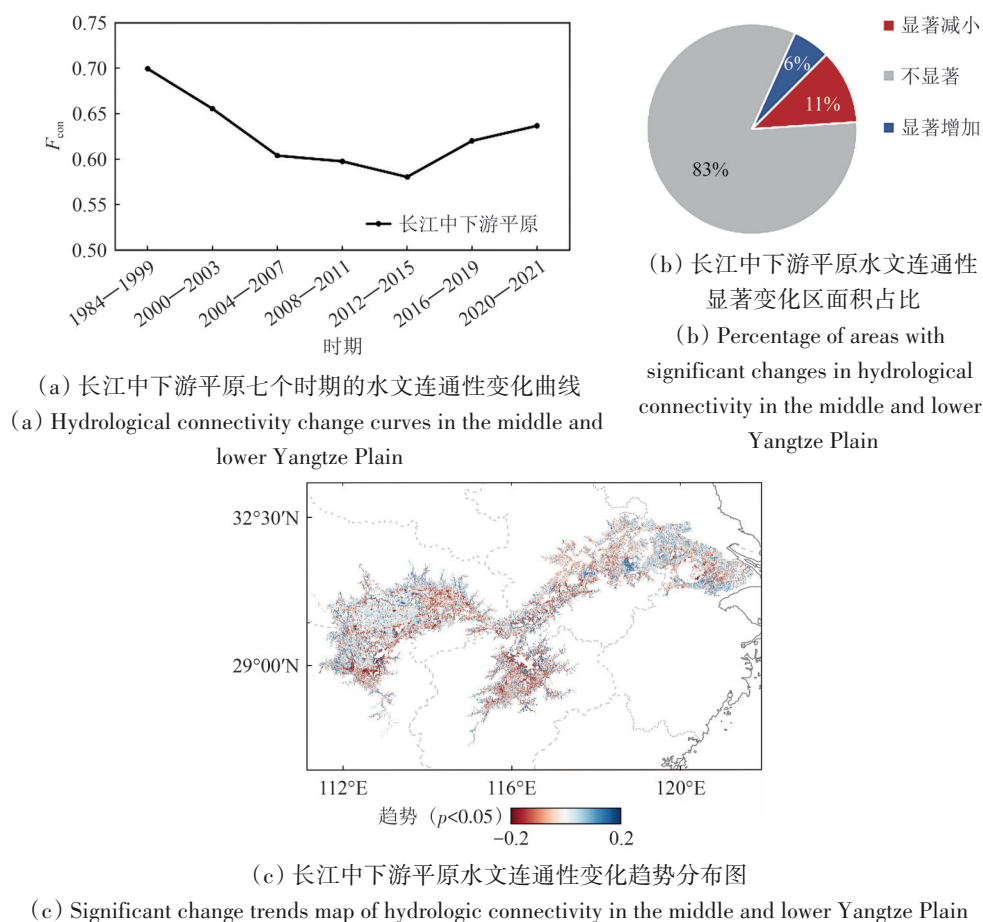
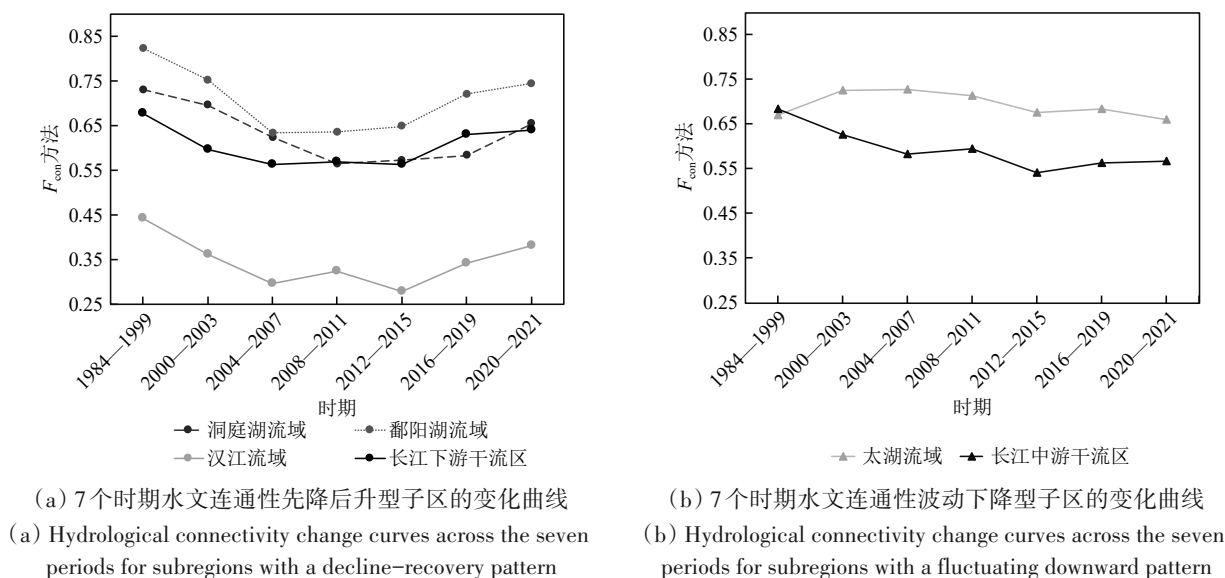


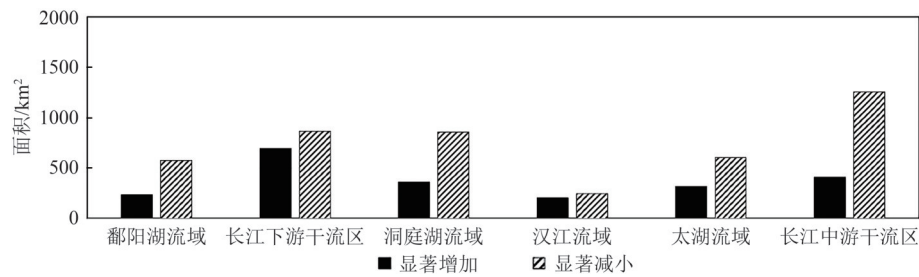
图4 长江中下游平原水文连通性变化

Fig. 4 Hydrological connectivity in the middle and lower Yangtze River Plain

对于太湖流域而言(图5(b)、(c)),水文连通性在前期略有升高,随后逐渐下降,整体变化相对较为平稳。而对于长江中游干流平原区,其水文连通性整体呈平稳下降趋势,尽管部分时期

存在小幅回升,但后期连通性明显低于初期。在整个研究时期内,两个区域水文连通性显著减小区域的面积仍明显多于显著增加区域的面积,表明两个区域的水文连通性总体呈下降趋势。





(c) 6个子区水文连通性显著增减变化区面积统计结果

(c) Statistical results of areas with significant increases and decreases in hydrological connectivity in six subregions

图5 6个子区水文连通性值变化

Fig. 5 Changes in Hydrological connectivity Across Six Regions

4 讨论

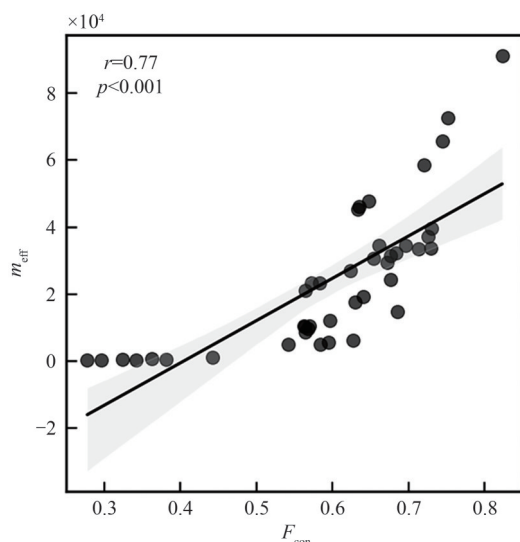
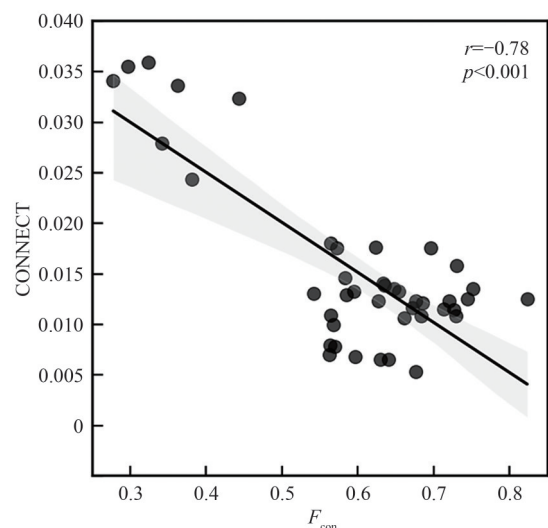
4.1 F_{con} 方法与景观指数法对连通性的表征差异

最优尺度下的连接频率方法为研究区水文连通性计算提供了一种新的途径。该方法通过评估不同水体斑块之间的连接频率，既考虑了局部变化特征，也考虑了区域整体变化特征，从而使不同区域、不同时间段的水文连通性具有可比性。

水体的连通性主要涉及斑块间连通性和斑块内连通性两个方面。斑块间连通性通常被定义为物质在不同离散斑块之间迁移的能力，而斑块内连通性则指的是物质在单个斑块内部的流通能力 (Tischendorf 和 Fahrig, 2000)。如果只关注斑块间的连通性，可能会导致对整体连通性的错误估计 (Spanowicz 和 Jaeger, 2019)。例如，在一个斑块完全覆盖整个研究区域的情况下，连通性可能会被错

误地计算为零。为了更全面地评估斑块连通性，同时考虑斑块间和斑块内的连通性显得尤为重要。 F_{con} 方法考虑了不同水体斑块之间的连接，还考虑了中心像元与其周围像元的连通性，从而同时评估了斑块间和斑块内的连通性，展现了本文方法的优势。

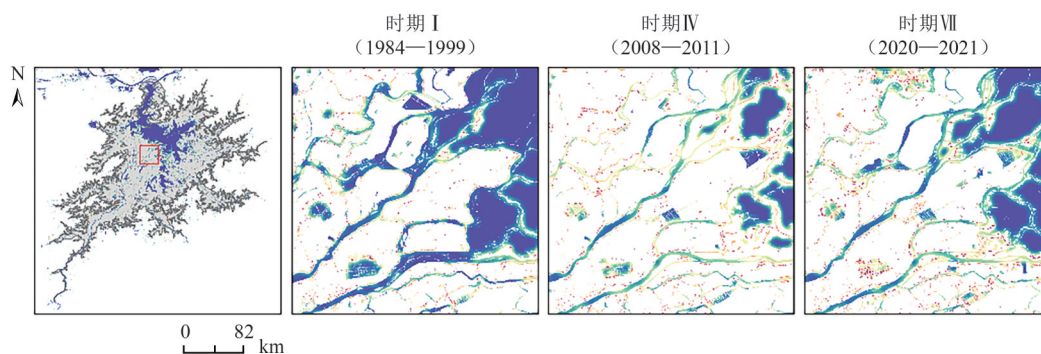
CONNECT 函数是常应用于斑块间连通性计算的景观格局指数，赵凌栋等人应用 CONNECT 等多种指数计算了高邮湖湿地的生态水文连通性 (赵凌栋 等, 2019)。而 m_{eff} 则被认为是用于计算斑块内连通性的函数，如 Roch 等人通过使用该函数探索了加拿大草原的破碎程度 (Roch 和 Jaeger, 2014)。长江中下游平原区 F_{con} 方法计算结果与同期 CONNECT 和 m_{eff} 计算结果的相关性如图 6 所示，结果显示 F_{con} 与两种表征连通性的景观指数之间均表现出了显著的相关性，进一步证明了 F_{con} 方法对斑块间及斑块内连通性均有较好的表征作用。

(a) F_{con} 与景观格局指数 m_{eff} 的相关性(a) Correlation between F_{con} and the landscape pattern indices m_{eff} (b) F_{con} 与景观格局指数 CONNECT 的相关性(b) Correlation between F_{con} and the landscape pattern indices CONNECT图6 F_{con} 与景观格局指数的相关性Fig. 6 Correlation between F_{con} and the landscape pattern indices

4.2 长江中下游不同平原区水文连通性变化及其形成机制浅析

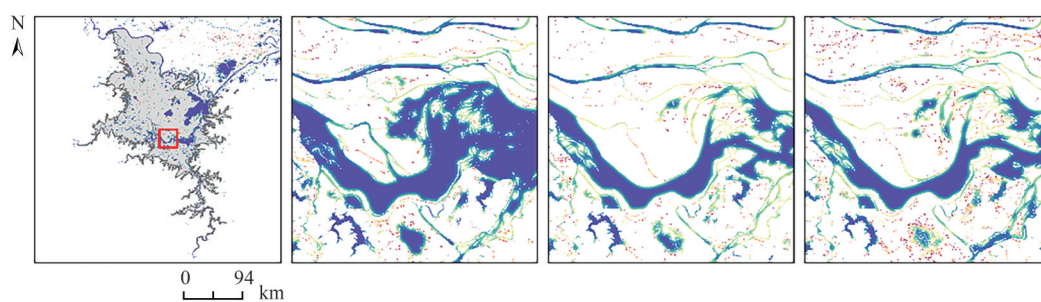
作为研究示范区,长江中下游平原区内不同区域的水文连通性变化趋势亦呈现出显著差异,

相关的连通性变化过程(图7),从侧面也反映了研究时段内各区域内特有的自然环境及人为活动过程及其对水文连通性的潜在影响。



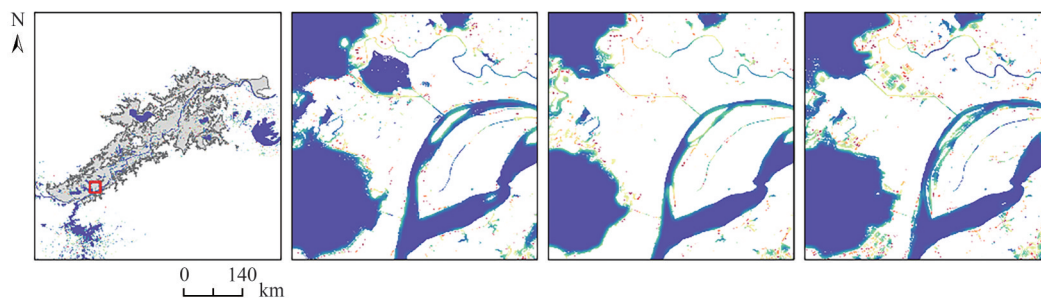
(a) 鄱阳湖流域平原区

(a) The plain region within the Poyang Lake Basin



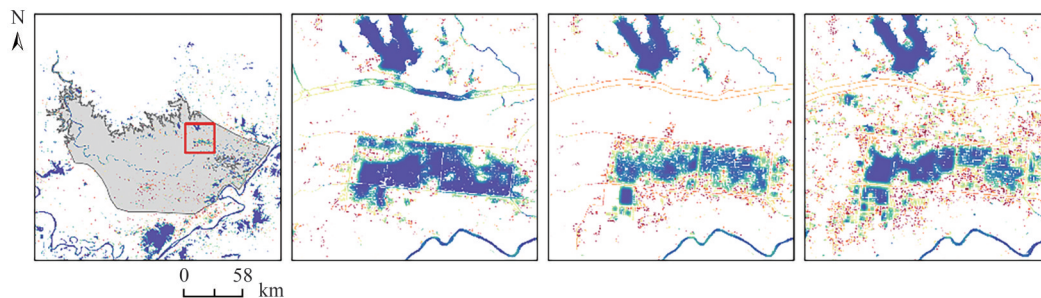
(b) 洞庭湖流域平原区

(b) The plain region within the Dongting Lake Basin



(c) 长江下游干流流域平原区

(c) The plain region within the lower Yangtze River mainstream



(d) 汉江流域平原区

(d) The plain region within the Hanjiang River

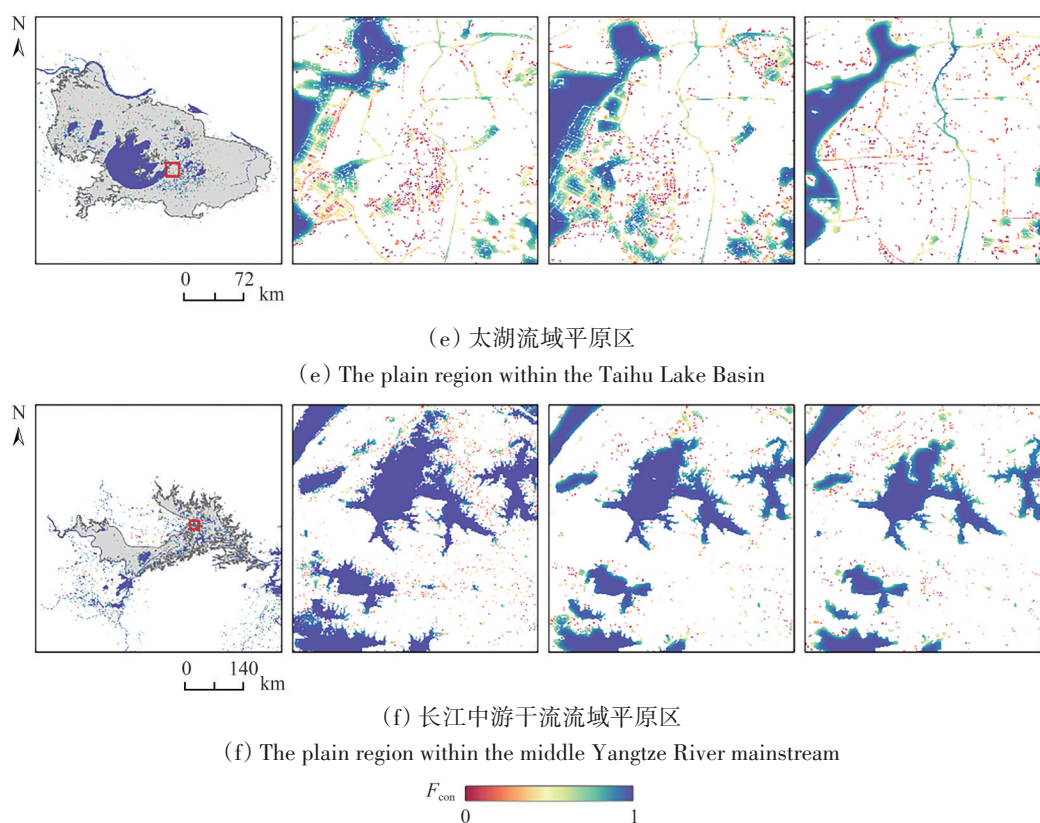


图7 3个不同时期6个子区局部水文连通性变化图

Fig. 7 Changes in Local Hydrological connectivity Across Three Different Periods and Six Major Regions

6个子区中鄱阳湖流域平原区是水文连通性下降最明显的区域，其主湖区及周边连通性下降主要源于近年来鄱阳湖区水域面积的缩小。研究表明，自2000年以来，该区域整体平均水域面积持续波动下降，尤其在2000年—2011年间，平均水域面积从1618 km²下降到了1274 km²（蒋飞燕，2023）。与鄱阳湖相连的长江下游干流区同样是连通性下降的主要区域，其中龙感湖及其周边湖泊的连通性下降最为明显，应与其区域内长期的围垸造田、围湖筑堤过程相关，导致大量水体转变为其他地物（孙荣，2012）。对于洞庭湖流域，不同湖区的水文连通性出现差异性变化。研究显示，受泥沙淤积等因素影响，南洞庭湖水域面积发生了明显的缩减，在1986年—2022年间共减少了191.42 km²（白宽宽等，2024），水体之间的联系被削弱，造成水文连通性逐年下降。此外，该区域农业和建设用地的持续扩张也是其水文连通性下降的重要原因（Hou等，2020）。相对而言，洞庭湖区水文连通性上升的部分主要出现在南洞庭湖与东洞庭湖的连接水域，可能与洞庭湖入沙减少及该水域的严重采砂活动有关，根据《中国泥

沙公报》数据显示，自三峡工程建成运行以来，洞庭湖的输沙状况逐渐由淤积转向冲淤平衡（余姝辰等，2019），甚至出现冲刷现象。同时由于非法过度采砂（唐晖等，2023）导致的河道变宽、变深等现象，都增强了水域之间的水文连通性。与洞庭湖流域平原区类似，汉江流域不同区域水文连通性呈现一定的空间异质性。其水文连通性下降区域主要集中在武汉城市圈周边地区。相对而言，水文连通性上升的区域则主要为汉江中下游区域。该区域的汉江中下游梯级开发工程及2014年正式投入使用的“引江济汉”工程可能在其中起到了关键作用，该工程通过从长江引水，补充因南水北调中线调水而减少的水量，以满足汉江中下游在灌溉、航运和生态用水方面的需求（王婷婷等，2008）。尤其在枯水年份枯水时段工程的补水效果显著（刘兆孝等，2022），有效增强了汉江中下游的水动力条件，改善了汉江下游的水质，同时也促进了区域水文连通性的增加。另外，长江下游干流区水文连通性虽然整体上仍然以下降趋势为主，但其石臼湖周边的水文连通性表现出显著的上升趋势，尤其在安徽省当涂县河

段最为明显。这一变化可能与该区域自2003年以来逐步推广的生态养殖“当涂模式”有关。该模式通过实施以“种草、投螺、稀放、配养、调水”为核心理念的水产养殖方法,在兼顾生态环境保护的同时发展水产养殖产业,使当涂县河蟹养殖面积由2000年前后的约1万亩扩大至目前的约2万亩(张兆扬, 2025),一定程度上扩大了该区域的水面积,同时强化了水体交换的过程,促进了石臼湖及其周边区域水文连通性的提升。

长江中游干流区平原整体上水文连通性呈平稳下降趋势,这一变化趋势可能与自20世纪90年代以来武汉城市群的快速扩张有关(李荣, 2022; Xie等, 2017)。武汉市周边城市扩张过程中水体面积减少并改变了原有河湖水系结构,从而导致该区域水文连通性显著下降。与此同时,太湖流域则表现出了明显的区域差异。东太湖区部分区域水文连通性有所下降,而杭嘉湖区和湖西区则在一定范围内表现出连通性的上升。东太湖区部分区域的水文连通性下降可能与水域面积的减少及人口增加导致的基础设施建设增加有关(刘焱焱等, 2020),后者在一定程度上阻断了河流与湖泊之间的自然水力联系,从而引发该区域水文连通性下降。相对而言,杭嘉湖区和湖西区的连通性上升,应与该区域水产养殖面积的持续增加直接相关(张紫滢, 2022)。此外,1991年起开始实施的“治太骨干工程”改变了太湖与其周边水体的联系,蓄水大堤和引排、泄洪通道等工程建设可能促进了相关区域的连通性上升,而跨省调水工程的建设可能使湖区水量减少,造成部分区域连通性下降。

5 结 论

针对常规水文连通性计算方法的不足,研究提出了基于最优尺度下连接频率的水文连通性计算方法 F_{con} 。以长江中下游平原为典型示范区,利用 F_{con} 方法量化评估了其中6个典型区域1984年—2021年的水文连通性的变化过程。结果表明,研究设计的 F_{con} 方法,在综合考虑不同区域水体分布的尺度特征基础上,以最优尺度为基准量化了多个区域水文连通性时序变化过程,实现了跨区域的水文连通性变化的对比分析。长江中下游平原长时序的水体面积统计值变化并不显著,然而其连通性却表现出了显著差异。连通性变化结果表

明,其内6个子区各自的水文连通性变化趋势存在显著的区域差异,鄱阳湖、洞庭湖、汉江流域及长江下游干流平原区水文连通性总体呈出前期下降、后期回升的变化特征,但不同区域水文连通性升降的驱动因素存在差异。太湖流域和长江中游干流平原区则表现出持续下降的趋势。这种差异反映了水文连通性可能受多种因素影响,尤其是在特定时期内的生态和管理措施可能对连通性的变化产生重要影响。

F_{con} 方法在分析水体连通性时,避免了CF方法需要用多尺度曲线来表达连通度,且连通方向维度上过度简化的问题。取而代之,采用最优尺度下任意方向维度上计算的单个 F_{con} 值,表达形式更为简单直观,而连通性的方向代表性更好。然而, F_{con} 方法虽然克服了CF方法的一些问题,但依然无法完全摆脱遥感水文连通性计算受数据自身分辨率限制而形成的固有尺度问题。当使用的遥感数据分辨率或观测尺度发生变化时,会对特定水体水文连通性的计算结果造成直接影响。未来研究需要通过跨尺度多分辨率的 F_{con} 计算,解析遥感观测尺度对其水文连通性计算的量化影响规律。与此同时,水文连通性的变化会深刻影响水环境及水生生物的变化迁移过程(刘丹等, 2019; 谢晖等, 2022)。结合变化场景下同步的生态监测数据,量化分析水文连通性变化影响下水生态系统组分结构的变化过程,是未来相关研究中一个更为广阔的潜在研究领域。

参考文献(References)

- Bai K K, Li Z W, Zhang P, Wang Z A, Zhao W G and Lu H Y. 2024. Shoreline evolution of natural lakes in Lake Dongting area based on multi-source remote sensing interpretation. *Journal of Lake Sciences*, 36(5): 1537-1549 (白宽宽, 李志威, 张鹏, 王在艾, 赵文刚, 鲁瀚友. 2024. 基于多源遥感解译的洞庭湖区自然湖岸线演变过程研究. *湖泊科学*, 36(5): 1537-1549) [DOI: 10.18307/2024.0543]
- Grill G, Lehner B, Thieme M, Geenen B, Tickner D, Antonelli F, Babu S, Borrelli P, Cheng L, Crochetiere H, Ehalt Macedo H, Filgueiras R, Goichot M, Higgins J, Hogan Z, Lip B, McClain M E, Meng J, Mulligan M, Nilsson C, Olden J D, Opperman J J, Petry P, Reidy Liermann C, Sáenz L, Salinas-Rodríguez S, Schelle P, Schmitt R J P, Snider J, Tan F, Tockner K, Valdujo P H, Van Soesbergen A and Zarfl C. 2019. Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature*, 569(7755): 215-221 [DOI: 10.1038/s41586-019-1111-9]
- Hou X J, Feng L, Tang J, Song X P, Liu J G, Zhang Y L, Wang J J, Xu Y, Dai Y H, Zheng Y, Zheng C M and Bryan B A. 2020. Anthro-

- genic transformation of Yangtze Plain freshwater lakes: patterns, drivers and impacts. *Remote Sensing of Environment*, 248: 111998 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111998]
- Jia Y Y, Tang X L, Tang F L, Yang Y and Ma K. 2020. Research on human activity intensity and its impact on wetland landscape pattern in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 29(4): 950-963 (贾艳艳, 唐晓岚, 唐芳林, 杨阳, 马坤. 2020. 长江中下游流域人类活动强度及其对湿地景观格局影响研究. *长江流域资源与环境*, 29(4): 950-963) [DOI: 10.11870/cjlyzyhj202004016]
- Jiang F Y. 2023. Long Time Series Analysis of Poyang Lake Water Area Changes Based on Remote Sensing Data. *Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology* (蒋飞燕. 2023. 基于长时序遥感数据的鄱阳湖水域变化分析. 赣州: 江西理工大学) [DOI: 10.27176/d.cnki.gnfyc.2023.000980]
- Lehner B and Grill G. 2013. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrological Processes*, 27(15): 2171-2186 [DOI: 10.1002/hyp.9740]
- Leibowitz S G, Hill R A, Creed I F, Compton J E, Golden H E, Weber M H, Rains M C, Jones C E, Lee E H, Christensen J R, Bellmore R A and Lane C R. 2023. National hydrologic connectivity classification links wetlands with stream water quality. *Nature Water*, 1(4): 370-380 [DOI: 10.1038/s44221-023-00057-w]
- Li B, Wan R R, Yang G S, Yang S, Dong L F, Cui J L and Zhang T. 2024a. Centennial loss of lake wetlands in the Yangtze Plain, China: impacts of land use changes accompanied by hydrological connectivity loss. *Water Research*, 256: 121578 [DOI: 10.1016/j.watres.2024.121578]
- Li L, Knapp J L A, Lintern A, Ng G H C, Perdrial J, Sullivan P L and Zhi W. 2024b. River water quality shaped by land-river connectivity in a changing climate. *Nature Climate Change*, 14(3): 225-237 [DOI: 10.1038/s41558-023-01923-x]
- Liu D, Wang X, Li C H, Cai Y P and Liu Q. 2019. Eco-environmental effects of hydrological connectivity on lakes: a review. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 28(7): 1702-1715 (刘丹, 王烜, 李春晖, 蔡宴朋, 刘强. 2019. 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*, 28(7): 1702-1715) [DOI: 10.11870/cjlyzyhj201907020]
- Liu S Q, Liu K, Zeng F X and Song C Q. 2024. Study progress in the river hydrologic remote sensing technique and its application on the Tibetan Plateau. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(10): 2427-2447 (刘沐妍, 刘凯, 曾繁轩, 宋春桥. 2024. 河流水文遥感及其在青藏高原应用研究进展. *遥感学报*, 28(10): 2427-2447) [DOI: 10.11834/jrs.20243464]
- Liu X G, Zhang Q, Li Y L, Tan Z Q and Werner A D. 2020. Satellite image-based investigation of the seasonal variations in the hydrological connectivity of a large floodplain (Poyang Lake, China). *Journal of Hydrology*, 585: 124810 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124810]
- Liu Y Y, Tian T, Zeng P, Zhang X Y and Che Y. 2020. Surface water change characteristics of Taihu Lake from 1984-2018 based on Google Earth Engine. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31(9): 3163-3172 (刘垚垚, 田恬, 曾鹏, 张新雨, 车越. 2020. 基于 Google Earth Engine 平台的 1984—2018 年太湖水域变化特征. *应用生态学报*, 31(9): 3163-3172) [DOI: 10.13287/j.1001-9332.202009.011]
- Liu Z X, Yao W Y and Liu Y Y. 2022. Eco-environment impacts of the river diversion project from the Yangtze River to the Han River and protective measures. *China Water Resources*, (18): 54-56 (刘兆孝, 姚宛艳, 刘扬扬. 2022. 引江补汉工程生态环境影响及保护对策. *中国水利*, (18): 54-56) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2022.18.021]
- Pekel J F, Cottam A, Gorelick N and Belward A S. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633): 418-422 [DOI: 10.1038/nature20584]
- Roch L and Jaeger J A G. 2014. Monitoring an ecosystem at risk: what is the degree of grassland fragmentation in the Canadian Prairies? *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(4): 2505-2534 [DOI: 10.1007/s10661-013-3557-9]
- Spanowicz A G and Jaeger J A G. 2019. Measuring landscape connectivity: on the importance of within-patch connectivity. *Landscape Ecology*, 34(10): 2261-2278 [DOI: 10.1007/s10980-019-00881-0]
- Sun R. 2012. Evolution driving force analysis and ecological protection strategies for Longganhu Lake. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 33(4): 412-416 (孙荣. 2012. 龙感湖演变驱动力分析及生态保护策略. *华侨大学学报(自然科学版)*, 33(4): 412-416) [DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.2012.04.0412]
- Tan Z Q, Wang X L, Chen B, Liu X G and Zhang Q. 2019. Surface water connectivity of seasonal isolated lakes in a dynamic lake-floodplain system. *Journal of Hydrology*, 579: 124154 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124154]
- Tang H, Zou J, Yin X H, Yu S C, He Q H, Zhao D, Zou C and Luo J Q. 2023. River and lake sand mining in the Dongting Lake area: supervision based on high-resolution remote sensing images and typical case analysis. *Remote Sensing for Natural Resources*, 35(3): 302-309 (唐晖, 邹娟, 尹向红, 余姝辰, 贺秋华, 赵动, 邹聪, 罗建强. 2023. 基于高分遥感的洞庭湖区河湖采砂监管及典型案例. *自然资源遥感*, 35(3): 302-309) [DOI: 10.6046/zrzyyg.2023075]
- Tischendorf L and Fahrig L. 2000. How should we measure landscape connectivity? *Landscape Ecology*, 15(7): 633-641 [DOI: 10.1023/A:1008177324187]
- Trigg M A, Michaelides K, Neal J C and Bates P D. 2013. Surface water connectivity dynamics of a large scale extreme flood. *Journal of Hydrology*, 505: 138-149 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.035]
- Wang J D, Sheng Y W and Tong T S D. 2014. Monitoring decadal lake dynamics across the Yangtze Basin downstream of Three Gorges Dam. *Remote Sensing of Environment*, 152: 251-269 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.06.004]
- Wang T T, Zhang W S, Peng H, Zhu Q Y and Zhang B. 2008. Effect of the water transfer project from Yangtze River to Hanjiang River on the eco-environment of the middle and lower reaches of Hanjiang River. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 6(1): 70-72 (王婷婷, 张万顺, 彭虹, 朱齐艳, 张斌. 2008. 引江济汉工程对汉江中下游生态环境影响. *南水北调与水利科技*, 6(1): 70-72) [DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2008.01.022]

- Wang W G, Liu G S, Wei J, Chen Z F, Ding Y M and Zheng J Z. 2021. The climatic effects of irrigation over the middle and lower reaches of the Yangtze River, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 308-309: 108550 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2021.108550]
- Wu J Y, He Y J, Jiang X D, Zhao Y J, Cui Y D and Wang H Z. 2023. Assessing ecosystem health of floodplain lakes using an Integrated Bioassessment Index. *Ecological Indicators*, 154: 110644 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110644]
- Xiang D H, Jiang Y, Chen Z and Li Z. 2024. Spatial-temporal characteristics of historical drought in the middle and lower reaches of Yangtze River based on standardized precipitation index and vegetation health index. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 41(3): 153-159, 165 (向大享, 姜莹, 陈喆, 李喆. 2024. 基于SPI和VHI的长江中下游地区干旱时空特征分析. *长江科学院院报*, 41(3): 153-159, 165) [DOI: 10.11988/ckyyb.20230196]
- Xie C, Huang X, Mu H Q and Yin W. 2017. Impacts of land-use changes on the lakes across the Yangtze floodplain in China. *Environmental Science and Technology*, 51(7): 3669-3677 [DOI: 10.1021/acs.est.6b04260]
- Xie H, Dong J W, Li Y F, Shang M Q and Lai X J. 2022. Hydrological connectivity in multi-pond systems and its impact on phosphorus transport: research progress and perspectives. *Advances in Water Science*, 33(5): 848-858 (谢晖, 董建玮, 李玉凤, 商美琪, 赖锡军. 2022. 多水塘系统水文连通及其对磷输移影响研究进展. *水科学进展*, 33(5): 848-858) [DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.05.014]
- Xu Y, Feng L, Hou X J, Wang J J and Tang J. 2021. Four-decade dynamics of the water color in 61 large lakes on the Yangtze Plain and the impacts of reclaimed aquaculture zones. *Science of the Total Environment*, 781: 146688 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146688]
- Xue C Y, Zhang Q, Jia Y X, Tang H W and Zhang H M. 2024. Attribution of hydrological droughts in large river-connected lakes: insights from an explainable machine learning model. *Science of the Total Environment*, 952: 175999 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175999]
- Yang S, Wan R R and Li B. 2022. Hydrological connectivity research in Lake Taihu Basin: status, progress and future challenges. *Journal of Lake Sciences*, 34(4): 1055-1074 (杨素, 万荣荣, 李冰. 2022. 太湖流域水文连通性: 现状、研究进展与未来挑战. *湖泊科学*, 34(4): 1055-1074) [DOI: 10.18307/2022.0402]
- Yang S, Wan R R, Yang G S and Li B. 2024. A novel framework to assess the hydrological connectivity of lake wetlands in plain river networks with dense hydraulic facilities: comparing natural and disturbed states over a century. *Journal of Hydrology*, 630: 130787 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.130787]
- Yu S C, Yu D Q, Wang L C, Li C A, He Q H and Xiang F F. 2019. Remote sensing study of Dongting lake beach changes before and after operation of Three Gorges Reservoir. *Earth Science*, 44(12): 4275-4283 (余姝辰, 余德清, 王伦澈, 李长安, 贺秋华, 向菲菲. 2019. 三峡水库运行前后洞庭湖洲滩面积变化遥感认识. *地球科学*, 44(12): 4275-4283) [DOI: 10.3799/dqkx.2019.182]
- Zhang L, Pan B Z, Jiang X M, Wang H Z, Lu Y J, Lu Y and Li R H. 2020. Responses of the macroinvertebrate taxonomic distinctness indices of lake fauna to human disturbances in the middle and lower reaches of the Yangtze river. *Ecological Indicators*, 110: 105952 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105952]
- Zhang Z Y. 2022. Landscape Pattern Evolution in Hangjiahu Plain. Hangzhou: Hangzhou Normal University (张紫滢. 2022. 杭嘉湖平原地区景观格局演变研究. 杭州: 杭州师范大学) [DOI: 10.27076/d.cnki.ghzsc.2022.000217]
- Zhang Z Y. 2025. Analysis of the Current Situation, Problems and Countermeasures of the Development of River Crab Industry in Dangtu County. *Special Wild Economic Animal and Plant Research*, 47(06): 225-230 (张兆扬. 2025. 当涂县河蟹产业发展现状、问题及对策分析. *特产研究*, 47(06): 225-230) [DOI: 10.16720/j.cnki.tcyj.2025.319]
- Zhao L D, Che D, Zhang J, Zhao J Y, Peng W Q and Han H L. 2019. Eco-hydrological connectivity analysis of Gaoyou Lake wetland based on landscape indices. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 50(1): 126-133 (赵凌栋, 车丁, 张晶, 赵进勇, 彭文启, 韩会玲. 2019. 基于景观指数的高邮湖湿地生态水文连通性分析. *水利水电技术*, 50(1): 126-133) [DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2019.01.017]

Remote sensing method for hydrological connectivity at optimal scale : A case study of connectivity changes in the middle and lower Yangtze River Plain

LU Yuyi^{1,2}, LUO Qiuqi³, FENG Lian⁴, CAI Xiaobin¹, CHEN Yijun^{1,2}

1. Hubei Provincial Key Laboratory of Environment and Disaster Monitoring and Assessment, Institute of Precision Measurement Science and Technology Innovation, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

3. School of Environmental Sciences and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055;

4. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan 430079

Abstract: Hydrological connectivity is generally defined as the extent of interaction among rivers, lakes, their floodplains, or other water

bodies. Changes in hydrological connectivity profoundly affect the structure and function of aquatic ecosystems, the maintenance of biodiversity, and water-related human production and livelihood activities. Human interventions, such as dam, levee construction, and land reclamation, have significantly altered connectivity in many floodplain lake regions. Therefore, exploring scientific and effective methods for quantifying hydrological connectivity, analyzing its dynamic changes, and assessing its potential ecological and environmental effects is of considerable significance.

The Connectivity Function (CF) effectively characterizes hydrological connectivity and its dynamic changes. However, connectivity values calculated using this method vary with the statistical window and the connecting direction, leading to incomparable results. Building on this method, our study proposes a connection frequency method at optimal scales (F_{con}) based on remote sensing-derived surface water extraction results. This method comprehensively considers the scale characteristics of water bodies in different regions and calculates temporal changes in hydrological connectivity by using the optimal scale as a baseline. In contrast with existing CF methods, this approach considers connection frequency in all directions within the study area rather than only a single direction, addressing their limitations. This approach enables comparative analyses of hydrological connectivity changes across multiple regions. Comparisons with connectivity indices from landscape ecology have demonstrated that this method effectively represents inter-patch and intra-patch connectivity. The proposed approach has unique application value, offering a robust tool for analyzing hydrological connectivity changes across different regions.

As one of the regions with the highest concentration of surface water in China, the Middle and Lower Yangtze River Plain is a critical ecological and economic area. In recent decades, the connectivity of water bodies in this region has been progressively disrupted, triggering a series of ecological security issues, such as lake water quality deterioration and wetland degradation. On the basis of the F_{con} method, we employed monthly water history data from seven different periods between 1984 and 2021 to calculate the connectivity of water bodies in the six subregions of the Middle and Lower Yangtze River Plain, aiming to provide scientific support for regional ecological conservation and restoration.

Results indicate that hydrological connectivity in the plains of Poyang Lake Basin, Dongting Lake Basin, Hanjiang River Basin and the Lower Yangtze River Mainstream, experienced significant changes, generally exhibiting a trend of initial decline followed by recovery. For Poyang Lake, Dongting Lake and the Low Reaches of Yangtze River Mainstream plains, hydrological connectivity maintained at relatively high levels, but despite the partial recovery observed in the later periods, all three regions exhibited an overall decline compared with the initial period. By contrast, the Hanjiang River Basin Plain showed substantially lower hydrological connectivity than the other regions and exhibited a generally weaker degree of hydrological linkage. The Taihu Lake Basin and the Middle Reaches of Yangtze River demonstrated a persistent decline in hydrological connectivity, with minor fluctuations, resulting in an overall downward trend during the study period. These differences suggest that hydrological connectivity may be influenced by various factors, particularly ecological and management measures during specific periods, which can exert significant effects on connectivity dynamics.

Key words: optimal scale, hydrological connectivity, geostatistical analysis, remote sensing, the Middle and Lower Yangtze River Plain

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42171381, U22A20567); Hubei Provincial Science and Technology Innovation Base and Platform Program (No. 2025CSA050)