

鄱阳湖流域水系格局与连通性变化分析

李加林^{1,2,3}, 杨佳铭^{1,2}, 刘永超^{1,2}, 曹罗丹^{1,2}, 周 驰^{1,2}

(1. 宁波大学浙江省陆海国土空间利用与治理协同创新中心; 2. 宁波大学地理科学与遥感技术学院;
3. 宁波大学东海研究院)

摘要:基于高精度水面数据集,结合水系数量特征、结构特征及连通性指标,对 1995—2021 年鄱阳湖流域丰水期与枯水期的水系格局与连通性变化进行了定量分析。结果表明:鄱阳湖流域的丰水期与枯水期水系的干流总长度基本不变,支流均存在较低等级河流向较高等级河流演变的现象;2021 年不同水文时期的Ⅰ级河流长度相较于 1995 年表现出相反的变化特征,丰水期Ⅰ级河流长度整体增长率达 7.81%,枯水期Ⅰ级河流长度的减小率达 5.83%;鄱阳湖流域丰水期的水系格局趋于复杂化,水系数量与结构特征指标总体呈增加趋势,水面率、河网密度、河网复杂度和河网发育系数的增长率均达到 5.50%以上,枯水期水系发育程度基本不变但河湖总面积逐渐减少;鄱阳湖流域丰水期水系的节点数和河链数总体上均呈增加态势(增长率超 8.50%),枯水期水系的节点数和河链数整体保持稳定,两水文时期水系连通性基本不变,均呈现出良好的连通状态。

关键词:水系格局;水系连通性;丰水期;枯水期;鄱阳湖流域

Analysis of water system pattern and connectivity change in the Poyang Lake Basin//Li Jialin^{1,2,3}, Yang Jiaming^{1,2}, Liu Yongchao^{1,2}, Cao Luodan^{1,2}, Zhou Chi^{1,2} (1. Zhejiang Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research, Ningbo University; 2. School of Geography and Remote Sensing, Ningbo University; 3. Donghai Institute, Ningbo University)

Abstract: Based on a high-precision water surface dataset, combined with water system quantitative characteristics, structural characteristics and connectivity indicators, a quantitative analysis was conducted on the changes in water system pattern and connectivity during the flood season and dry season of the Poyang Lake Basin from 1995 to 2021. The results indicate that the total length of the main rivers in the Poyang Lake Basin remains largely unchanged during both the flood and dry seasons. However, there is a phenomenon where lower-grade rivers evolve into higher-grade rivers in the tributaries. The length of Grade I rivers in different hydrological periods in 2021 showed opposite characteristics compared to 1995. The overall increase rate of Grade I river length during the flood season reached 7.81%, while the decrease rate during the dry season reached 5.83%. The water system pattern of the Poyang Lake Basin during the flood season has become more complex, with overall increases in the number of water systems and structural characteristics. The growth rates of water surface ratio, river network density, river network complexity, and river network development coefficient all exceeded 5.5%. During the dry season, the development level of water systems remained largely unchanged, but the total area of rivers and lakes gradually decreased. During the flood season, the number of nodes and river chains in the river system generally increased (growth rate exceeded 8.50%), while during the dry season, the number of nodes and river chains remained stable overall. The water system connectivity remained basically unchanged during both hydrological periods, showing good connectivity.

Key words: water system pattern; water system connectivity; flood season; dry season; the Poyang Lake Basin

由河流、湖泊等水体组成的水系网络是流域水循环以及物质能量流动的重要载体^[1],河湖水系的连通性作为流域水系的基本属性,对其生态环境、物质输送和能量循环等具有重要作用。2021 年,为实现在水域生态系统的整体保护和系统修复,《重点

流域水生态环境保护“十四五”规划》提出了水环境、水资源、水生态“三水统筹”的水生态环境保护框架思路^[2-3]。对于“三水统筹”治理过程中面临的水资源时空分布不均、水通道阻隔等问题,仍需深入挖掘水域系统内支流-干流等不同单元跨域统筹的

理论^[4],探究其水系结构与水通道连通性的现状。

针对水系形态结构,Horton^[5]于1945年提出河流级序分级系统,并通过分支比、河长比、流域面积比等^[6]定量参数揭示了河流系统分级结构特征。此后,河流分级系统经Strahler^[7]修正广泛应用于河流结构研究,并形成以河网密度、河频率、水面率等^[8-10]表征河流水系数量特征、以河流发育系数、河网结构稳定度、河网复杂度等^[11]表征河流水系结构特征的指标体系。目前广泛应用的水系连通的研究方法有图论与景观生态学法^[12-13]、连通性函数法^[14-15]、复杂网络分析法^[16]等。在景观生态学中,连通性概念最早由Merriam^[17]于1984年提出,将河流水系视为一种景观结构,通过景观要素之间的通达程度反映水系连通性。图论法则将水系简化为由点和线组成的平面图,利用连接矩阵和图的性质分析水系特征及数量关系^[9]。将图论与景观生态学方法结合,景观连通度概念和图论的计算原理对水系连通度进行评价,发展出了水系连通环度(α)、节点连接率(β)和水系连通度(γ)等^[13]经典指标。例如,李进宝等^[18]基于景观生态网络连接度概念,采用 β 、 γ 评价了新疆克里雅河流域的水系结构连通性;徐晨凯等^[19]则采用 α 、 γ 定量评估了桐乡市水系的连通性演变规律。

鄱阳湖流域位于长江下游,其年均汇入长江的水量约占长江下游干流径流量的16.7%,具有独特的水文节律、复杂的景观结构及多样的生境类型,长期面临频发的水旱灾害威胁^[20],其水文生态系统的健康状况关系到长江下游地区的生态安全格局及社会经济可持续发展。然而,受全球气候变化和水资源开发等人类活动的影响,1995年以来长江中游的江湖关系持续调整,鄱阳湖流域的河网水系结构及其水文节律发生了显著改变,流域极端水文事件频发^[21],生态功能发生了一定退化^[22]。在此背景下,研究鄱阳湖流域水系格局与连通性的长期演变具有重要意义。

目前围绕鄱阳湖开展水系格局与连通性的研究较多^[23-25],但是针对鄱阳湖流域丰水期与枯水期水系格局与连通性的定量化研究较少。并且,现有水系提取方法大多存在数据时效性差、空间分辨率不足、缺少动态过程刻画等问题,尤其缺乏基于多时序遥感数据、区分不同水文背景下水系结构的研究。因此,本文基于高精度水面数据集,结合水系数量特征、结构特征及连通性指标,探究1995—2021年不同水文时期鄱阳湖流域水系格局与连通性变化,以期揭示鄱阳湖流域水系结构与连通性的长期演变规律。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

鄱阳湖位于长江中下游南岸、江西省北部,是我国第一大淡水湖^[24]。鄱阳湖流域边界与江西省行政边界基本重合(图1),在江西省境内的流域面积占全省面积的94.1%。鄱阳湖流域东西南三面环山,内侧丘陵起伏,中北部则多为平原,由此形成一个向北开口的盆地^[26]。流域内水系分布密集,以赣江、抚河、信江、饶河、修水五大河流为主,五河从东、西、南汇入鄱阳湖,经调蓄后由湖口注入长江,形成一个以鄱阳湖为中心的环形水系。鄱阳湖流域属中亚热带湿润季风气候区,年平均气温为17.5℃,流域年平均降水量为1638 mm^[27],春夏两季贡献了全年的大部分降水量,年际间降水量也较为悬殊,旱涝灾害频繁。

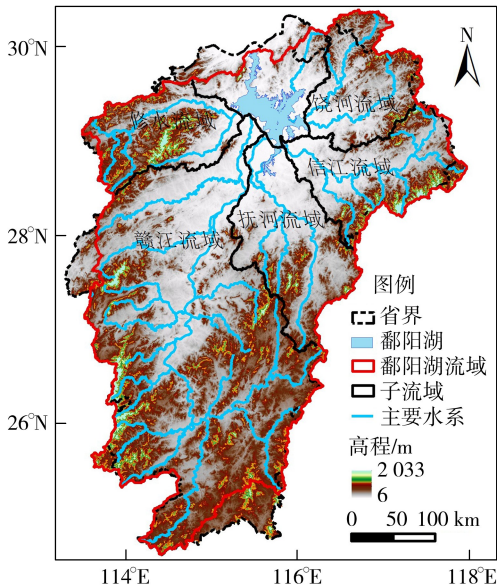


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

本文的鄱阳湖边界、鄱阳湖流域边界来源于地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn>),高程数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。用于计算鄱阳湖流域水系格局特征的水体数据来源于Pekel等^[28]发布的持续更新的30m分辨率高精度水面数据集,该数据基于Landsat5、Landsat7和Landsat8提供的无云高清遥感影像卫星,采用监督机器学习方法提取全球高清地表水影像,水面识别准确率均超过99.5%,可以满足本文的水系分析要求。相比传统DEM或静态水系图,Pekel等^[28]提出的水面数据集利用多源、多时相遥感影像,结合水体淹没频率统计,突破了单一时

间点水系提取的局限,适合于分析水系结构动态变化。本文选取水面数据集集中的“Yearly History”水体识别数据,该数据基于每年各月份的无云遥感影像数据,计算出各像元所对应的水体淹没频率,将一年中每个月份持续被水体覆盖的像元定义为永久水体(permanent water),而年内出现间断性水体覆盖的像元则归类为季节性水体(seasonal water)。基于此,本文对数据名称重新定义,将永久性水体与季节性水体空间并集范围定义为丰水期水体,永久性水体定义为枯水期水体,季节性水体仍为季节性水体。

2 研究方法

2.1 河网提取与分级

从数据集中选取 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2021 年 6 期数据,采用目视检验等方法将数据矢量化。在此基础上,借鉴景观生态学中河流廊道连通性的分析方法^[29],将河网水系概化为节点、河链。河网分级则采用 Horton-Strahler 分级方法^[6],将直接发源于河源的小河流定义为 I 级河流,两条同级的河流汇合时,形成的河流级别比原来高一级;如果两条不同级的河流汇合,则新形成的河流的级别为两条河流中较高的级别。由于流域水系的提取主要为了计算连通性指标,因此本文的水系分布图只绘制连通水系,不考虑孤立的湖泊与湿地。

2.2 水系格局与连通性评价指标体系

参考水系格局与连通性指标的相关研究成果^[9,12,30],从水系数量特征、水系结构特征和水系连通性 3 个方面构建水系格局与连通性评价指标体系(图 2),进而识别并定量描述 1995—2021 年鄱阳湖流域主要水系格局及连通性变化特征。

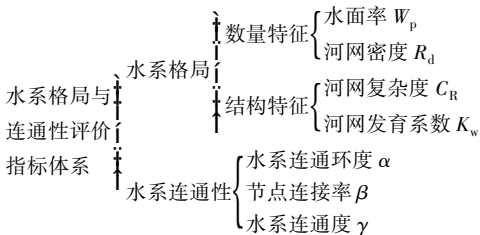


图 2 水系格局与连通性评价指标体系

Fig. 2 Evaluation indicator system for water system pattern and connectivity

水系格局与连通性评价指标体系中,水面率反映水系的调蓄能力;河网密度反映河流长度发育与分布疏密的程度;河网复杂度反映河网的发育程度,值越大说明水系越发达;河网发育系数反映各级支流的发育程度,值越小表示水系越趋近区域主干化;水系连通环度反映节点物质能量交换水平;节点连

接率反映水系中各个节点与其他节点连接的难易程度;水系连通度反映河网的连接程度。指标的计算公式为:

$$W_p = A_w/A \times 100\% \quad (1)$$

$$R_d = L/A \quad (2)$$

$$C_R = N_0 L/L_m \quad (3)$$

$$K_w = L_l/L_m \quad (4)$$

$$\alpha = (l - v + 1)/(2v - 5) \quad (5)$$

$$\beta = l/v \quad (6)$$

$$\gamma = l/3(v - 2) \quad (7)$$

式中: L 为河流总长度; A 为流域总面积; A_w 为河流总面积; N_0 为河流等级数; L_l 为支流总长度; L_m 为干流总长度; l 为河链数; v 为节点数。

3 结果与分析

3.1 鄱阳湖流域水系分布

图 3 为不同年份鄱阳湖流域丰水期的水系分布。由图 3 可见,鄱阳湖流域丰水期的水系格局基本不变,但各等级的水系数量发生了较为明显的变化,河网结构逐渐趋向复杂化,2005 年之后流域水系数量的变化幅度进一步加剧。I 级、Ⅲ级河流表现出尤为突出的变化特征,1995—2021 年 I 级河流总长度由 3 643.52 km 增加至 3 928.12 km,Ⅲ级河流总长度由 1 164.95 km 增加至 1 360.02 km。Ⅱ级河流总长度则由 2 901.19 km 减少至 2 877.86 km,而干流(Ⅳ级河流)的变化较小,总长度基本维持在 577.39 km。1995—2005 年鄱阳湖流域内的河网节点(约为 178 个)和河流数量(约为 337 条)相对较少,水系空间构型在此阶段未出现显著重构。但 2005 年后,鄱阳湖流域的节点数和河流数均呈现出显著上升趋势,主要体现在 I 级、Ⅲ级河流数量的持续扩张。值得注意的是,Ⅱ级河流数量呈先增后减的动态特征,这是由于 I 级支流数量逐渐增加,达到一定数量后,相同的 I 级河流在空间上汇合形成Ⅱ级河流,使Ⅱ级河流数量增加;随后新增的Ⅱ级河流又汇合形成Ⅲ级河流,使Ⅱ级河流数量减少。例如,2010 年饶河流域存在Ⅱ级河流合并为Ⅲ级河流的现象;2015 年赣江流域出现新增的 I 级支流合并为Ⅱ级河流的现象,Ⅱ级河流的数量与长度随之增加,表明流域水系网络存在主干化趋势。

图 4 为不同年份鄱阳湖流域枯水期的水系分布。由图 4 可见,鄱阳湖流域内地表径流持续减少导致的支流退化或河道断流使水系拓扑结构显著改变,水系等级结构发生系统性重构。基于 Horton-Strahler 分级法,流域水系等级数由丰水期的 4 级降至枯水期的 3 级。1995—2021 年 I 级河流总长度

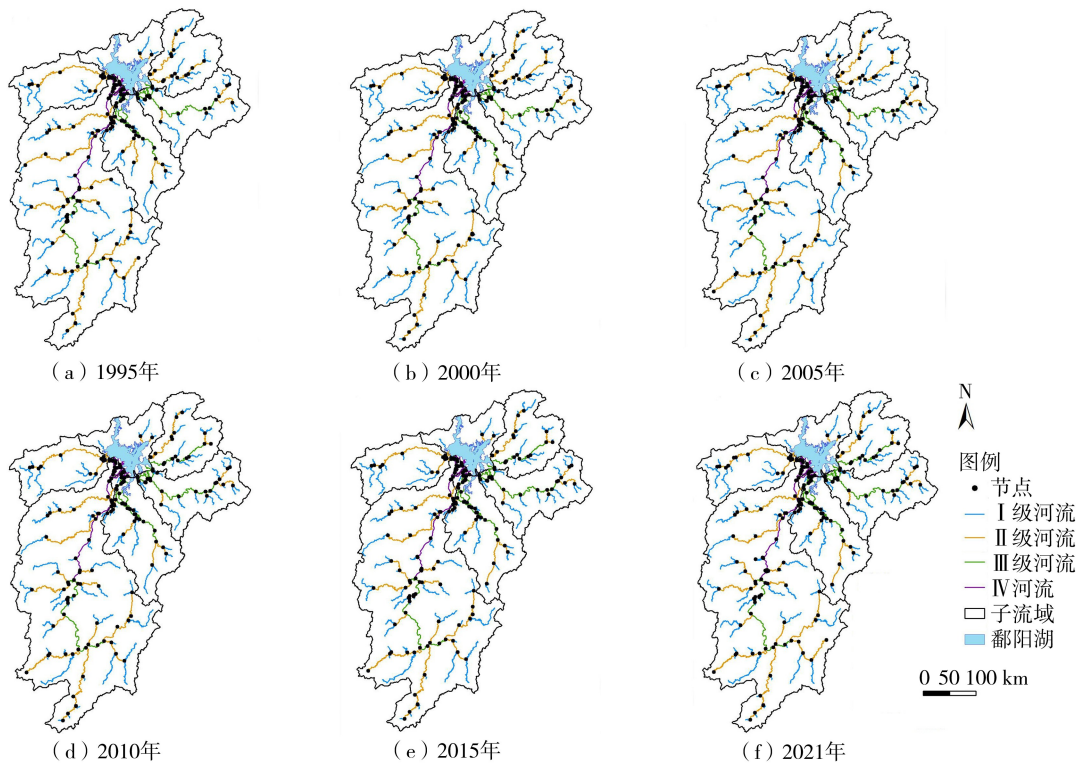


图 3 不同年份鄱阳湖流域丰水期的水系分布

Fig. 3 Water system distribution of the Poyang Lake Basin during abundant water period in different years

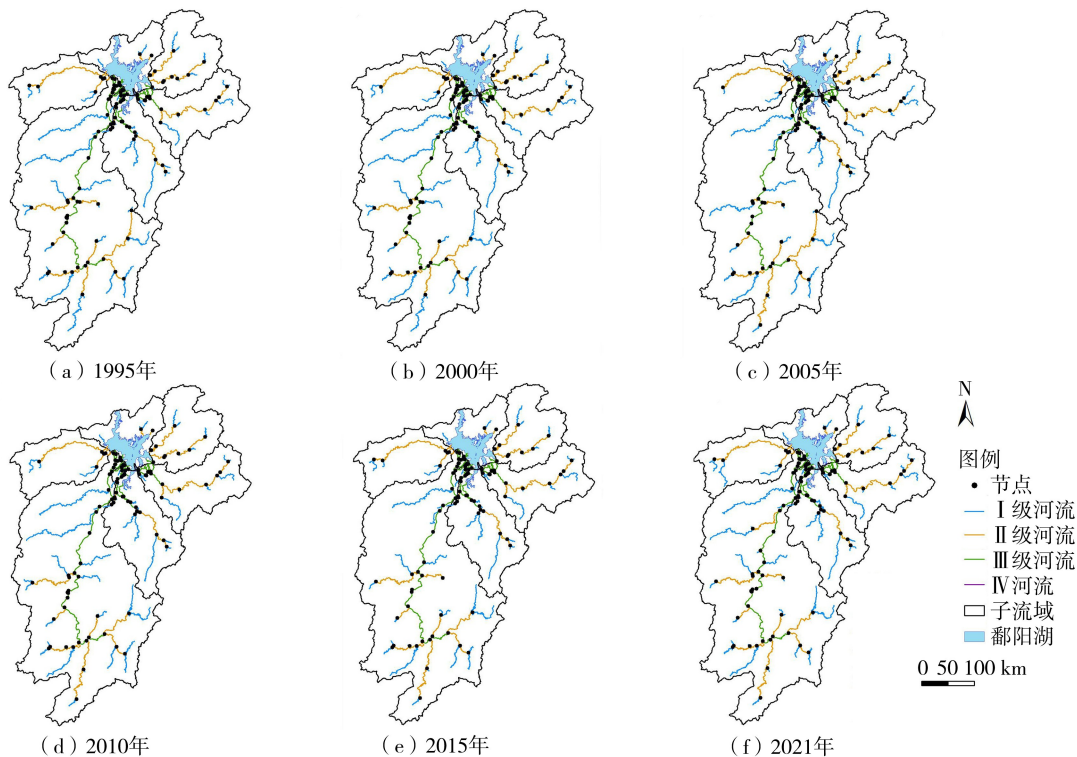


图 4 不同年份鄱阳湖流域枯水期的水系分布

Fig. 4 Water system distribution of the Poyang Lake Basin during dry water period in different years

由 2554.72 km 减少至 2405.77 km, II 级河流总长度由 1899.44 km 增加至 2034.98 km, 而 III 级河流总长度基本维持在 5773.56 km。河网水系分布的密集程度相较于丰水期明显下降, 节点数与河链数也呈现逐年减少的趋势, 均减少 35% 以上, 反映了

枯水期的水系网络简化现象。相较于丰水期, 各年枯水期的节点数与河链数的波动变化更多受到降雨、气温等自然条件的影响, 呈现不规则的变化特征。

图 5 为不同水文时期鄱阳湖流域各级河流的河

链长度,从数量特征上反映了 1995—2021 年鄱阳湖流域各级河链的长度变化情况,可见各级河链的长度占比随着等级的上升而下降,主干河流长度占比小,支流长度占比大。丰水期主干河流长度约占 6.97%,枯水期主干河流长度约占 23.07%。1995—2021 年鄱阳湖流域干流(丰水期Ⅳ级河链和枯水期Ⅲ级河链)的总长度保持不变,而两水文时期Ⅰ级河链的总长度变化趋势与流域水面率的变化趋势大致相同,这是由于年降水量显著影响着支流发育状况。研究期间,鄱阳湖流域水网结构重构过程中部分水系等级由低等级转化为更高一级,因此丰水期的Ⅱ级河链总长度先减少后增加,Ⅲ级河链的总长度则先增加后稳定不变。总的来看,1995—2021 年鄱阳湖流域水系网络呈现复杂化趋势。

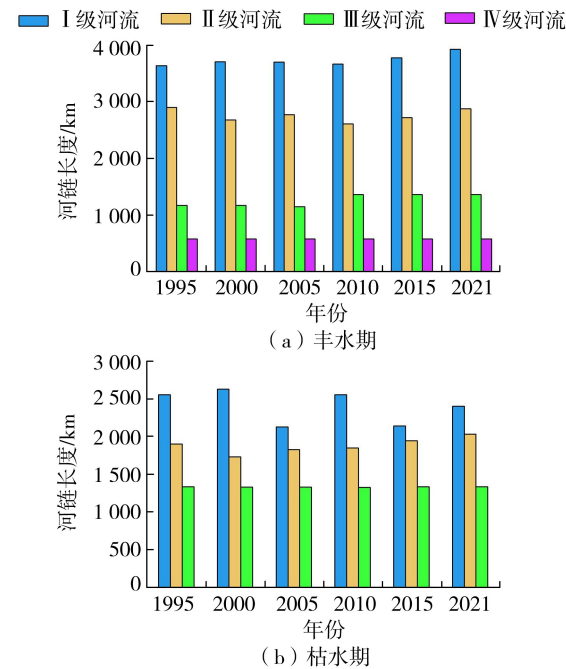


图 5 不同水文时期鄱阳湖流域各级河流的河链长度
Fig. 5 River chain length of different levels of the Poyang Lake Basin in different hydrology periods

3.2 鄱阳湖流域水系数量与结构特征

分别计算 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2021 年鄱阳湖流域丰水期水体、枯水期水体以及季节性水体的水面率,结果如图 6 所示。由图 6 可见,1995—2021 年鄱阳湖流域丰水期的水面率在整体上呈增加趋势(增长率约为 12.93%),但个别年份仍出现水面率下降的情况,这可能与气候变化及三峡工程运行有关。季节性水体的水面率呈增加趋势,增长率高达 30.03%,占同年丰水期水体水面率的比例也由 47.25% 增加至 54.41%。而枯水期水体的水面率却呈现下降趋势(下降率约为 2.4%),在一定程度上表明鄱阳湖流域枯水期干旱化态势呈现加剧特征。郑思齐等^[31]的研究表明随

着时间尺度的增加,鄱阳湖地区干旱事件总体表现为持续时间减小、间隔时间延长且严重程度加剧,与本文的研究结论一致。

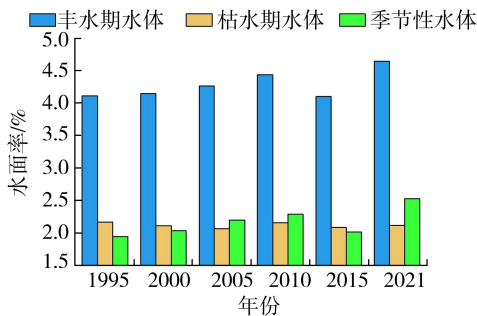


图 6 不同年份鄱阳湖流域水面率的变化
Fig. 6 Changes in water surface rate of the Poyang Lake Basin in different years

分别计算各子流域不同年份的水面率,结果如图 7 所示。丰水期水面率从大到小的顺序为:抚河流域、修水流域、信江流域、饶河流域和赣江流域。其中,抚河流域的水面率(4.36%) 远超其他子流域,饶河、赣江流域的水面率则大致处于 1.6% ~ 2.1% 的范围。从时间特征上看,各子流域的水面率雷达折线图呈不规则六边形分布,反映出各子流域丰水期水体面积变化具有极强的波动性,但整体上呈增大趋势,其中信江流域、赣江流域水面率的增大

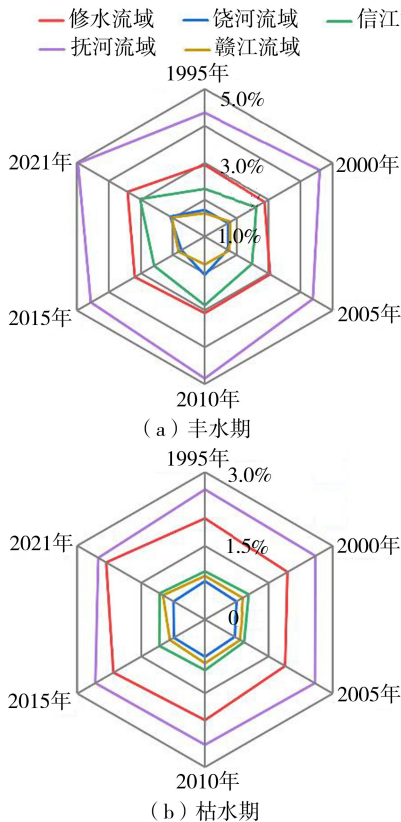


图 7 不同水文时期各子流域的水面率变化
Fig. 7 Changes in water surface rates of sub-basins in different hydrology periods

率较高,分别为 32.36%、24.01%。枯水期各子流域水面率的大小排序基本不变,但呈现明显的分层现象。抚河流域、修水流域处于同一水平,水面率在 1.8%~2.7%的范围;信江流域、饶河流域与赣江流域情况相近,水面率均低于 1.1%。1995—2005 年,各子流域水面率呈现不同程度的减小趋势,其中饶河流域、修水流域的减小率为 8.38%以上;2005 年后,除了饶河流域、抚河流域外,其他子流域水面率表现出一定的增大趋势,最为突出的则是修水流域(22.94%)和赣江流域(19.43%)。对比丰水期与枯水期的水面率,信江流域、饶河流域的水面率同年春季变幅最大,最高甚至可达 64.79%,展示出极强的降雨依赖型水文特征。

表 1 为不同水文时期鄱阳湖流域的水系格局指标。由表 1 可见,受鄱阳湖流域水系总长度、节点数及河链数变化的影响,1995—2021 年鄱阳湖流域丰水期的河网密度、河网复杂度和河网发育系数均呈现出先减小后增大的变化趋势。1995—2005 年,河网密度由 5.11%下降至 5.06%,河网复杂度由 57.41 下降至 56.86,河网发育系数由 13.35 下降至 13.22;2005—2021 年,河网密度由 5.06%增加至 5.39%,河网复杂度由 56.86 增加至 60.57,河网发育系数由 13.22 增加至 14.14。整体上,河网密度、河网复杂度、河网发育系数的增长率分别为 5.51%、1.74%、2.14%,这表明随着流域水系的演变,河流网络分布表现得更为密集、复杂化。但是,尽管 I 级支流发育使河网呈现复杂化、分散化,低级

河流向高级河流的演化过程仍蕴含着主干化的长期演化趋势。而相较于丰水期的阶段性变化特征,枯水期的河网密度、河网复杂度和河网发育系数呈现出不规则的变化规律。2005 年与 2015 年河网密度、河网复杂度和河网发育系数出现明显的低值,其他年份的值分别在 3.51%、12.85、3.28 以上,这可能与赣江下游支流季节性断流使连通性河链长度减少有关。由此看来,鄱阳湖流域枯水期的水系结构基本稳定,但在气候异常年份会出现一定的退化。

3.3 鄱阳湖流域水系连通性指标

表 2 为不同水文时期鄱阳湖流域的水系连通性指标。由表 2 可见,1995—2021 年鄱阳湖流域丰水期水系的节点数、河链数总体呈增加趋势,节点数由 180 逐渐增加至 197,河链数从 342 增加至 372,两者的增加率分别为 9.44%和 8.77%,期间 2010—2021 年增加得更为明显;水系连通环度、节点连接率和水系连通度变化程度很小,基本处于稳定状态。1995—2021 年鄱阳湖流域枯水期水系的节点数和河链数则呈现出一定的减少趋势。1995—2015 年,节点数由 113 逐渐减少至 107,河链数从 221 减少至 216,两者的减少率分别为 5.31%和 2.26%,期间 1995—2000 年减少得更为明显,2021 年节点数和河链数的增加则与该年春季性降雨增多有关;水系连通环度、节点连接率和水系连通度呈现复杂的无规律波动变化,但整体上变化程度很小,处于相对稳定的状态。邓晓军^[32]的研究表明水系连通环度、节点连接率和水系连通度的取值范围分别为 0~1、0~1、0~3,指标值越大表明水系连通程度越高,河网越复杂。本文 3 项指标取值均处于中上水平,表明鄱阳湖流域水系的节点物质能量交换水平、节点间连接性及河网的连接度均达到一般水平,水系整体呈现出较好的连接状态,丰水期与枯水期的水系结构连通性总体表现良好。

4 讨 论

4.1 鄱阳湖流域水系格局变化

在较长时间尺度上,河湖水系的结构演变主要

表 1 不同水文时期鄱阳湖流域的水系格局指标

Table 1 Water system pattern indicators of the Poyang Lake Basin in different hydrology periods

年份	丰水期			枯水期		
	$R_d/\%$	C_R	K_w	$R_d/\%$	C_R	K_w
1995	5.11	57.41	13.35	3.57	13.00	3.33
2000	5.02	56.41	13.10	3.51	12.85	3.28
2005	5.06	56.86	13.22	3.26	11.94	2.98
2010	5.07	56.89	13.22	3.53	12.98	3.33
2015	5.21	58.44	13.61	3.34	12.19	3.06
2021	5.39	60.57	14.14	3.56	13.00	3.33

表 2 不同水文时期鄱阳湖流域的水系连通性指标

Table 2 Water system connectivity indicators of the Poyang Lake Basin in different hydrology periods

年份	丰水期					枯水期				
	v	l	α	β	γ	v	l	α	β	γ
1995	180	342	0.459	1.900	0.640	113	221	0.493	1.956	0.664
2000	178	336	0.453	1.888	0.636	110	214	0.488	1.945	0.660
2005	178	337	0.456	1.893	0.638	109	215	0.502	1.972	0.670
2010	181	343	0.457	1.895	0.639	109	214	0.498	1.963	0.667
2015	190	360	0.456	1.895	0.638	107	216	0.526	2.019	0.686
2021	197	372	0.452	1.888	0.636	112	221	0.502	1.973	0.670

受地质构造和气候变化等自然营力的影响;而在短时间尺度上,随着社会经济发展、水资源调配以及城市化建设等发展需要,水利工程建设、围垦、河道填埋等人类活动也越来越深刻地影响着河湖水系的格局及连通性。从地质构造上看,鄱阳湖流域东西南三面环山,中部地势低洼平坦,因此形成了“五河入湖、湖水汇江”的水系分布格局。在此条件下,流域极端降水快速为河流与湖泊补给,短期内的大量来水则通过各支流汇入鄱阳湖。若逢长江流域处于丰水期,长江来水的顶托作用则会进一步阻碍湖水外泄^[33],抬高鄱阳湖水位,从而使流域内的五河水系水位抬升。枯水期流域降水量减少,同处枯水期的长江来水量也减少,使得流域内河流湖泊水位降低,部分细小支流干涸,河网密度与河网复杂度等发生改变。不同水文时期的气候与水文状况造成鄱阳湖流域丰水期与枯水期差异明显的水系分布状况。从人类活动层面来看,江西省为了抵御特大水旱灾害不断加大水利建设力度,推进一系列水系整治工程,增加了水系的长度和河网密度;人为修建的水库、闸堤以及河流改道等也深刻改变了流域的水系格局。例如,赣鄱地区在1998年特大洪涝灾害后,启动以堤防加固为核心的防洪体系构建工程,着重对主干支流及鄱阳湖区域实施堤防系统的重点强化工程,并且进行新河道的开挖以及河网水系的清淤整治工作。总之,自然因素及人类活动均对鄱阳湖水系网络格局的形成、分布和变化发挥了重要作用。

4.2 鄱阳湖流域水面率变化

鄱阳湖流域丰水期水体的水面率整体呈增加趋势,但仍有个别年份水面率减少;枯水期水体的水面率与总长度逐渐减少,有干旱程度逐渐加重的趋势。鄱阳湖流域是长江流域水文气候特征最明显的流域之一,其水体面积的变化受到降水的强烈影响,因此不同年份的降水情况增加了水面率变化的随机性,并且极端的降水还可能导致洪涝灾害的发生。对于丰水期,自2003年三峡大坝工程运行以来,需在5—6月腾空库容以防洪,下泄流量比天然状况增加 $3\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 左右^[34];鄱阳湖的洪水期为4—9月,若汛期降水量峰值正好处于5—6月,就可能表现为丰水期水体水面率增加的现象。对于枯水期,同样受气候变化、三峡工程运行、采砂等因素的影响,鄱阳湖在水位、流量方面出现显著变化,使枯水期提前且延长、枯水位降低^[35],进而影响了鄱阳湖流域水体的水面率。Liu等^[36]的研究表明,随着1994年三峡大坝工程的动工建设,鄱阳湖的水位在2006年发生突变,使得长江下游河流湖泊年平均水位下降。另外,2001年开始的大规模采砂使鄱阳湖出水通道更

宽、更深,也是近年鄱阳湖枯水期水位下降、连续出现极低水位的原因之一。

4.3 鄱阳湖流域水系连通性变化

本文的水系连通性指标更加侧重于对水系拓扑结构的衡量,能反映河流交汇情况对结构连通性的影响。而鄱阳湖流域的节点数和河链数虽存在一定程度的变化,但这种变化并未严重影响河流的拓扑格局,因此结构连通性也并未发生较大改变。这说明本文的连通性指标体系具有一定的局限性,不能直观反映水利建设工程对连通性的影响程度,后续可借鉴洞庭湖水系连通性的相关研究^[12,37],考虑水系连通工程、规划工程对水系连通性变化的影响。

5 结 论

a. 1995—2021年鄱阳湖流域丰水期的水系变化较为明显,除干流(Ⅳ级河流)外,Ⅱ、Ⅲ等级河流的长度都有所增加(增长率分别为7.81%、16.75%),Ⅱ级河流长度轻微减少(减少率为0.80%)。枯水期的水系相较丰水期水系呈现出网络简化现象,但研究期间其干流(Ⅲ级)总长基本维持不变,Ⅰ级河流长度呈减少态势(减少率为5.83%);Ⅱ级河流长度则有一定程度增加(增长率为7.14%)。

b. 水系数量与结构特征上,鄱阳湖流域丰水期的水面率增加,河网密度、河网复杂度及河网发育系数整体呈现上升态势,鄱阳湖流域水系趋于高密集化、结构复杂化特征,尤以流域北部部分支流的扩张为典型表征。而枯水期的河网密度、河网复杂度和河网发育系数总体保持稳定,但水面率却呈现减小态势。

c. 鄱阳湖流域丰水期水系节点数和河链数先减少后增加,总体上两者均呈增加态势,增长率为8.5%以上;枯水期水系的节点数和河链数整体保持稳定。两个水文时期内的水系连通环度、水系连通度和节点连接率均呈现出相对稳定的状态,水系整体处于良好的结构连通状态。

参考文献:

[1] 徐志成,唐贤琪,王敏,等. 全国水资源分区尺度水系连通性评价[J]. 长江科学院院报,2024,41(10):40-47. (Xu Zhicheng, Tang Xianqi, Wang Min, et al. Evaluation of river system connectivity on scales of water resource zones in China[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(10):40-47. (in Chinese))

[2] 张静. 自贡市釜溪河“三水统筹”流域治理的案例研究[D]. 成都:电子科技大学,2023.

[3] 顾向一,徐茹娟. 长江经济带水生态环境治理区域协同

- 立法的检视及完善途径[J]. 水利经济,2024,42(2):14-19. (Gu Xiangyi, Xu Ruxian. Review and improvement path of regional collaborative legislation of water ecological environment governance in Yangtze River Economic Belt [J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(2):14-19. (in Chinese))
- [4] 李加林,田鹏,刘永超,等.水资源、水环境、水生态统筹治理研究进展[J]. 宁波大学学报(理工版),2024,37(4):22-30. (Li Jialin,Tian Peng, Liu Yongchao, et al. Research progress on the overall management of water resources, water environment and water ecology [J]. Journal of Ningbo University (NSEE),2024,37(4):22-30. (in Chinese))
- [5] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. GSA Bulletin,1945,56(3):275-370.
- [6] 关昊哲,冶运涛,顾晶晶,等. 西南高山峡谷流域河网结构特征研究:以金沙江流域为例[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版),1-11. (2025-02-25) [2025-04-30]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1117.TV.20250225.0939.007>. (Guan Haozhe,Ye Yuntao,Gu Jingjing, et al. Characterization of river network structure in southwestern alpine canyon watersheds-a case study of Jinsha River Basin [J/OL]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),1-11. (2025-02-25) [2025-04-30]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1117.TV.20250225.0939.007>. (in Chinese))
- [7] Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union,1957,38(6):913-920.
- [8] 史书汇,王晓云,李发文. 淮河流域皖西大别山区地形因子与水系结构关联性分析[J]. 水资源保护,2024,40(1):117-126. (Shi Shuhui, Wang Xiaoyun, Li Fawen. Analysis of correlation between watershed topographic factors and river system structure in Dabie Mountains in western Anhui Province of the Huaihe River Basin[J]. Water Resources Protection,2024,40(1):117-126. (in Chinese))
- [9] 王宗志,张安齐,王坤,等.等高截水工程实施后东海县河网区水系格局及连通性变化定量分析[J]. 水资源保护,2025,41(3):31-38. (Wang Zongzhi, Zhang Anqi, Wang Kun, et al. Quantitative analysis of water system pattern and connectivity changes in river network area after implementation of contour interception project in Donghai County[J]. Water Resources Protection,2025,41(3):31-38. (in Chinese))
- [10] 杨柳,刘子怡,冯畅,等.城市化背景下河流水系变化规律及其关系研究[J]. 城市建筑,2024,21(9):80-85. (Yang Liu, Liu Ziyi, Feng Chang, et al. Study on the change of river system and its relationship under the background of urbanization [J]. Urbanism and Architecture,2024,21(9):80-85. (in Chinese))
- [11] 韩龙飞,许有鹏,杨柳,等.近50年长三角地区水系时空变化及其驱动机制[J]. 地理学报,2015,70(5):819-827. (Han Longfei, Xu Youpeng, Yang Liu, et al. Temporal and spatial change of stream structure in Yangtze River Delta and its driving forces during 1960s-2010s [J]. Acta Geographica Sinica,2015,70(5):819-827. (in Chinese))
- [12] 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. (Huang Cao, Chen Yehua, Li Zhiwei, et al. Optimization of water system pattern and connectivity in the Dongting Lake area [J]. Advances in Water Science,2019,30(5):661-672. (in Chinese))
- [13] Fu Chun, Deng Junpeng, Ouyang Huanrui, et al. Evaluation and optimization of urban hydrological connectivity based on graph theory: a case study in Chengdu, China [J]. Ecological Informatics,2024,82:102749.
- [14] 胡尊乐,汪姗,费国松.基于分形几何理论的河湖结构连通性评价方法[J]. 水利水电科技进展,2016,36(6):24-28. (Hu Zunle, Wang Shan, Fei Guosong. Evaluation method of structural connectivity for rivers and lakes based on theory of fractal geometry[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(6):24-28. (in Chinese))
- [15] 王延贵,陈吟,陈康.水系连通性的指标体系及其应用[J]. 水利学报,2020,51(9):1080-1088. (Wang Yangui, Chen Yin, Chen Kang. Index system of water system connectivity and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(9):1080-1088. (in Chinese))
- [16] 李发文,赵宇瑶.基于点-面两层结构的复杂网络方法评估海河流域水网连通性[J]. 水资源与水工程学报,2023,34(6):16-26. (Li Fawen,Zhao Yuyao. Evaluation of water network connectivity using complex network method based on node-subbasin double layer structure [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2023,34(6):16-26. (in Chinese))
- [17] Merriam G. Connectivity: a fundamental ecological characteristic of landscape pattern [C]//Proceedings of the 1st International Seminar on Methodology in Landscape Ecological Research and Planning. Roskilde: Roskilde University,1984:5-15.
- [18] 李进宝,何学敏,黄鹏程,等.克里雅河流域水系结构及连通性特征[J]. 中国水土保持科学,2025,23(3):232-240. (Li Jinbao, He Xuemin, Huang Pengcheng, et al. Characterization of water system structure and connectivity in the Kriya River Basin [J]. Science of Soil and Water Conservation,2025,23(3):232-240. (in Chinese))
- [19] 徐晨凯,王珂,黄璐.基于多源遥感的桐乡市水系格局演变研究[J]. 浙江农林大学学报,2024,41(2):419-

428. (Xu Chenkai, Wang Ke, Huang Lu. Water pattern changes of Tongxiang City based on multi-source remote sensing data [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024,41(2):419-428. (in Chinese))
- [20] 傅静,胡振鹏,李国文. 鄱阳湖流域水旱灾害对气候变化的响应[J]. 水利水电技术(中英文),2025,56(11):21-31. (Fu Jing, Hu Zhenpeng, Li Guowen. Response of flood and drought disasters to climate change in Poyang Lake Basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025,56(11):21-31. (in Chinese))
- [21] 张奇,薛晨阳,夏军. 鄱阳湖极端干旱的影响、成因与对策[J]. 中国科学院院刊,2023,38(12):1894-1902. (Zhang Qi, Xue Chenyang, Xia Jun. Impacts, contributing factors and countermeasures of extreme droughts in Poyang Lake[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2023,38(12):1894-1902. (in Chinese))
- [22] Su Xiaolei, Zeng Bo, Huang Wenjun, et al. Effects of the Three Gorges Dam on preupland and preriparian drawdown zones vegetation in the upper watershed of the Yangtze River, P. R. China[J]. Ecological Engineering, 2012, 44: 123-127.
- [23] 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[J]. 长江流域资源与环境,2022,31(12):2718-2728. (Zeng Bingru, Li Yunliang, Tan Zhiqiang. Influential factors and environmental effects of hydrological connectivity in the Poyang Lake catchment [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(12):2718-2728. (in Chinese))
- [24] 岳恩馨,刘意,李相虎,等. 鄱阳湖洪泛系统水文连通性演变特征及对湿地植被生长的影响[J]. 生态学报,2025,45(4):1938-1949. (Yue Enxin, Liu Yi, Li Xianghu, et al. Evolution characteristics of hydrological connectivity in floodplain system of Poyang Lake and its impact on wetland vegetation growth[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(4):1938-1949. (in Chinese))
- [25] 曾冰茹,李云良,谭志强. 基于连通性指数(IC)的近30年鄱阳湖流域水系结构与水文连通演变评估[J]. 湖泊科学,2023,35(5):1796-1807. (Zeng Bingru, Li Yunliang, Tan Zhiqiang. Assessment on the evolution of river structure characteristics and hydrological connectivity in Lake Poyang Basin based on index of connectivity (IC) during the past 30 years[J]. Journal of Lake Sciences, 2023,35(5):1796-1807. (in Chinese))
- [26] 唐国华. 鄱阳湖湿地演变、保护及管理研究[D]. 南昌:南昌大学,2017.
- [27] Liu Zihao, Lu Jianzhong, Huang Jianwu, et al. Projection of reference crop evapotranspiration under future climate change in Poyang Lake watershed, China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2021,26(1):05020042.
- [28] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes [J]. Nature, 2016, 540 (7633) : 418-422.
- [29] 王云才. 上海市城市景观生态网络连接度评价[J]. 地理研究, 2009, 28 (2) : 284-292. (Wang Yuncai. The connectivity evaluation of Shanghai urban landscape eco-network[J]. Geographical Research, 2009, 28 (2) : 284-292. (in Chinese))
- [30] 卡米力江·阿布都热衣木. 城市化水平下喀什地区水系连通指标影响评估[J]. 水利技术监督, 2024 (7) : 137-140. (Kamiljan Abdurayim. Assessment of the impact of urbanization level on water system connectivity indicators[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2024(7):137-140. (in Chinese))
- [31] 郑思齐,陈媛媛,吴艳红,等. 基于水域面积的鄱阳湖区干旱特征及气象-水文干旱传播过程研究[J]. 地球信息科学学报,2025,27(4):1011-1023. (Zheng Siqi, Chen Yuanyuan, Wu Yanhong, et al. Characterizing drought and meteorological-hydrological propagation in Poyang Lake using satellite-observed water extent[J]. Journal of Geo-information Science, 2025, 27 (4) : 1011-1023. (in Chinese))
- [32] 邓晓军. 太湖平原水系格局与连通变化及其对河网调蓄与自净功能的影响研究[D]. 南京:南京大学,2015.
- [33] 姚仕明,范达福,栾华龙,等. 鄱阳湖近年极端洪枯情势分析及应对策略[J]. 长江科学院院报,2024,41(12):171-179. (Yao Shiming, Fan Dafu, Luan Hualong, et al. Recent extreme flood and drought hydrological situation in Poyang Lake and countermeasures [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41 (12) : 171-179. (in Chinese))
- [34] 彭也茹. 水量变化下洞庭湖生态水位及水情研究[D]. 长沙:湖南大学,2013.
- [35] 宋继鹏,龚磊强,王晓龙,等. 三峡工程建设运行前后鄱阳湖水文情势变化与生态环境演变特征:回顾与展望[J]. 湖泊科学,2025,37(3):716-733. (Song Jipeng, Gong Lei qiang, Wang Xiaolong, et al. Changes in hydrological conditions and ecological environment in Lake Poyang before and after the construction and operation of the Three Gorges Project:retrospect and prospect[J]. Journal of Lake Sciences,2025,37(3):716-733. (in Chinese))
- [36] Liu Yuanbo, Wu Guiping, Zhao Xiaosong. Recent declines in China's largest freshwater lake: trend or regime shift? [J]. Environmental Research Letters, 2013, 8 (1) : 014010.
- [37] 李凯轩,李志威,胡旭跃,等. 洞庭湖区水系连通工程指标体系与评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (6) : 6-10. (Li Kaixuan, Li Zhiwei, Hu Xuyue, et al. An index system and evaluation method for water network connection projects in Dongting Lake area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (6) : 6-10. (in Chinese))

(收稿日期:2025-05-13 编辑:王芳)