

融合水系结构与闸坝动态调控的水系连通性 新指标构建

顾 莉^{1,2}, 蔡 尚¹, 褚克坚^{1,2}, 董越洋¹, 华祖林^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对目前常用水系连通性指标难以同步呈现水系结构改变和闸坝动态调控共同影响的问题,在对常用指标局限性分析的基础上,提出了融合水系结构和闸坝动态调控双重影响的水系连通性新指标——闸化节点率和闸化连通度,通过案例分析解析了新指标的优势,并应用于解析秦淮河流域 20 世纪 60 年代(1960s)、2009 年和 2016 年 3 个典型时期丰、平、枯水期的水系连通性时空演变特征。结果表明:闸化节点率和闸化连通度克服了目前常用指标的不足,不仅能够反映水系结构改变导致的连通性差异,还能捕捉闸坝开启频率变化的动态影响;1960—2016 年秦淮河流域水系连通性在水系结构简化和闸坝大量建设等综合作用下整体呈显著下降趋势,但丰、平、枯水期的下降幅度有所差异,丰水期由于闸坝开启频率的增大削弱了闸坝数量上升对水系连通性的负面影响而下降幅度最小,而枯水期较低的闸坝开启频率使得闸坝数量上升的负面影响凸显而下降幅度最大;流域内 17 个子流域的水系连通性演变具有显著的异质性,南京老城区、江宁区 and 句容市的中心发展地带是水系连通性下降显著区域,主要是受城市化、闸坝数量和开启频率等多重因素影响所致,但是主导因素有所差异。

关键词:水系连通性;水系结构;闸坝调控;开启频率;秦淮河流域

中图分类号:TV66

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2025)05-0231-07

New indicators construction of river system connectivity integrating river system structure and dynamic control of dams//GU Li^{1,2}, CAI Shang¹, CHU Kejian^{1,2}, DONG Yueyang¹, HUA Zulin^{1,2} (1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Aiming at the problem that the current commonly used indicators of river system connectivity can hardly present the co-influence of river system structure change and dynamic dam regulation simultaneously, a new indicator of the connectivity of the river system (gated node ratio and gated connectivity) which integrates the dual influence of the river system structure and dynamic dam regulation was proposed on the basis of analyzing the limitations of the commonly used indicators. The advantages of the new indicator are analyzed through case analysis, and the new indicator were applied to the analysis of the spatiotemporal evolution characteristics of the river system connectivity in the Qhuai River Basin during three typical periods of wet, normal, and dry seasons in the 1960s, 2009 and 2016. The results show that the sluice-node ratio and sluice connectivity overcome the shortcomings of the current commonly used indicators, and can not only reflect the differences caused by the changes in the river system structure, but also capture the dynamic impact of the changes in the frequency of sluice gate opening. The connectivity of the river system in the Qinhuai River Basin from the 1960 to 2016 has shown a significant downward under the combined effect of river structural simplification and the massive construction of sluice dams, but the decline varies in wet, normal, and dry seasons. The decline was smallest in flood season because the increase in the frequency of gate opening mitigated the negative impact of rising gate numbers on the connectivity of the river system. In contrast, the lower frequency of gate opening in dry season highlighted the negative impact of increasing gate numbers, leading to the greatest decrease. The evolution of hydrological connectivity in the 17 sub-basins within the basin

基金项目:江苏省碳达峰碳中和科技创新专项项目(BT2024012);江苏省水利科技项目(2022034);国家自然科学基金联合基金项目(U2040209)

作者简介:顾莉(1981—),女,教授,博士,主要从事水生态修复、水环境模型和生态水力学研究。E-mail: guliqc@hhu.edu.cn

通信作者:华祖林(1965—),男,教授,博士,主要从事流域水环境模拟、水生态修复和生态水力学研究。E-mail: zulinhua@hhu.edu.cn

shows significant heterogeneity. The old urban area of Nanjing, Jiangning District and the central development zones of Juren City are significant areas of reduction in hydrological connectivity, mainly due to multiple factors such as urbanization, dam quantity, and opening frequency, but the dominant factors vary.

Key words: river system connectivity; river system structure; dam regulation; opening frequency; the Qinhuai River Basin

水系连通性是评估河流生态系统结构和功能的关键因素^[1-7],连通性常常因闸坝等水利设施的建设而显著退化,导致河网破碎化,不仅会阻碍鱼类等水生生物的迁徙、觅食和繁殖,还会影响水文情势、物质输移和行洪功能,对河流生态系统健康构成严重威胁^[8-13]。在评估水系连通性时,水系结构的改变、闸坝的数量以及开启频率变化都会对连通性产生重要的影响^[14-15]。节点率和水系连通度等指标是目前常见的可以体现水系结构变化影响的水系连通性评价指标^[16-17],Zhang 等^[18]利用水系连通度分析了汝南县流域的水系连通特征,韩龙飞等^[19]选取节点率、水系连通度评价了秦淮河中下游河流水系连通性的变化。这些指标可以很好地体现不同时期水系结构变化对连通性的影响,但是忽略了闸坝的阻隔效应。徐光来等^[20]考虑了闸坝影响,将闸坝等同于河道汇合点或边界点,概化为单一节点数纳入节点总数来分析水流通畅度。但是,水文动态变化下闸坝不同开启频率对连通性的影响存在显著差异^[21],将闸坝概化为单一节点无法体现出丰、平、枯水期闸坝不同开启频率下连通性的变化。傅春等^[22]将闸坝当作障碍物,引用 Cote 等^[23]提出的评估障碍物对鱼类在河流水系中上下游通行能力影响的树状连通性指标(dendritic connectivity index, DCI)方法,将该方法中鱼类上下游移动的可能性替换为不同闸坝的开启频率,计算得出的 DCI 值可以很好反映闸坝在不同开启频率下对水系连通性的影响。但是,DCI 方法也具有一定的局限性,在水系结构方面考虑不足,只关注了被闸坝分隔的上下游河流的长度,只要上下游河流的长度不变,无论上游河流的数量和连接方式如何变化,计算的 DCI 值均相同,因此该方法适用于闸坝变化而水系结构不变的情况。

鉴于目前常用连通性指标难以同时反映水系结构和闸坝数量、开启频率均变化情形下水系连通性的演变特性,本文通过构建 4 种类型水系算例对目前几种常用指标进行局限性分析,在此基础上提出了可以综合考虑水系结构和闸坝影响的水系连通性新指标(闸化节点率 β_0 和闸化连通度 γ_0),通过案例解析了新指标的优势,并利用新指标解析了秦淮河流域 20 世纪 60 年代以来水系结构与闸坝双重影响背景下水系连通性的时空演变特征。

1 新指标构建

1.1 现有水系连通性指标局限性分析

针对目前连通性评估时常用的两类指标进行局限性分析,一类是考虑水系结构影响的节点率 β 和水系连通度 γ ,另一类是考虑闸坝影响的纵向连通性 C 和 DCI。节点率表示河网中河链与节点的通达程度^[16];水系连通度为实际河链数与最大可能连接河链数之比^[18];纵向连通性为单位长度上的闸坝数量^[24];DCI 是根据闸坝的数量、可通过能力以及地理位置,定量评价水系连通性水平的指标^[22-23]。为了解析这些常用典型指标的局限性,本文设计了一个包含 4 种水系的算例(图 1)来进行分析。如图 1 所示,每个水系的河网总长度都相同,均为 59.82 km,其中水系 1、2 的水系结构相同,河链数均为 3 条,节点数均为 6 个;水系 3、4 的水系结构也相同,河链数均为 8 条,节点数均为 14 个;水系 2、4 的水系上有闸坝,闸坝位置以及被闸坝分隔的两端河网长度都相同,闸坝分隔的上段河网长度为 33.62 km,下段长度为 26.20 km。针对以上 4 种水系计算不同连通性指标,其中计算水系 2、4 的节点率和水系连通度时,采用目前常用的不考虑闸坝影响和将闸坝概化为单一节点两种方式;计算 DCI 时闸坝开启频率考虑 0.5 和 0.8 两种情形,具体计算结果见表 1。

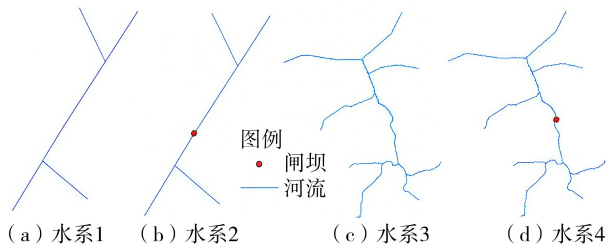


图 1 4 种水系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the four river systems

由表 1 可知,对于表征水系结构影响的连通性指标(节点率和水系连通度),水系 1、3 这两种不同河网水系结构中节点率和水系连通度计算结果有所不同;在有闸坝的河网(水系 2、4)中,以水系 2 为例,节点率和水系连通度的计算不考虑闸坝影响时,水系 2 的计算结果与水系 1 相同,十分不合理;而将闸坝作为单一节点进行概化时,水系 2 的计算结果比水系 1 小,体现水系连通性下降,比不考虑闸坝影

表 1 常用典型连通性指标计算结果

Table 1 Calculated results of typical connectivity indicators

水系	节点率	水系连通度	纵向连通性	DCI
1	0.50	0.25		
2	0.50/0.42	0.25/0.20	59.82	75.39/90.15
3	0.57	0.22		
4	0.57/0.53	0.22/0.20	59.82	75.39/90.15

注：“/”前后数据,对于节点率和水系连通度分别为不考虑闸坝影响和将闸坝概化为单一节点两种方式的计算结果,对于 DCI 分别为闸坝开启频率取 0.5 和 0.8 时的计算结果。

响的方式有所改进,但实际情形下丰、平、枯水期闸坝开启频率往往存在明显差异,概化为单一节点无法体现这种变化。

对于表征闸坝影响的连通性指标(纵向连通性和 DCI),水系 2、4 的计算结果相同,但两者水系结构明显不同。这是由于纵向连通性由单位长度上的闸坝数量来表征,河网结构的差异无法体现。此外,DCI 只要闸坝分隔的上下游河流长度的比值不变,无论上游河流的数量和连接方式如何变化,计算得到的 DCI 值均相同,也无法准确体现出水系结构变化的影响,明显不合理。但是相比于纵向连通性,DCI 可以体现闸坝不同开启频率变化的影响(开启频率为 0.5 时 DCI 为 75.39,开启频率 0.8 时 DCI 为 90.15)。

综上,目前常用的几个典型指标均存在一定的局限性,难以同时体现闸坝与水系结构双重变化的影响。

1.2 水系连通性新指标的提出

为了综合体现水系结构、闸坝数量及其开启频率的影响,在表征水系结构连通性指标节点率、水系连通度的基础上,通过纳入不同开启频率闸坝的概化节点方法,提出了同时考虑水系结构和闸坝动态变化双重影响的水系连通性新指标——闸化节点率和闸化连通度。新指标包含的闸坝概化节点数是随开启频率而变化的,具体节点概化方法为:一般情况下水系中两条河链由相连变为不相连时,原有的一个交汇节点会变成 2 个边界节点。在计算的某个时段内,如果闸坝一直处于开启状态,即开启频率为 1,此时水系被视为连通的,闸坝概化为水系中两个河链之间的一个交汇节点,概化值为 1;如果闸坝一直处于关闭状态,开启频率为 0,水系被视为不连通,此时连接闸坝的两条河流被阻断,闸坝概化为两个河链的各自边界节点,概化值为 2;如果某段时间内闸坝开启频率介于 0~1 之间时,闸坝概化的节点数应该大于开启状态下的 1 个节点,小于关闭状态下的 2 个节点。因此,综合考虑闸坝动态情况以及

水系结构连通性,提出闸化节点率 β_D 和闸化连通度 γ_D 两个新指标,分别反映河网中闸坝动态调控情形下河链与节点的通达程度,以及河链之间相互连续程度,计算公式如下:

$$\beta_D = (L + k) / \left[V + \sum_{i=1}^n (2 - P_i) \right] \tag{1}$$

$$\gamma_D = (L + k) / 3 \left\{ \left[V + \sum_{i=1}^n (2 - P_i) \right] - 2 \right\} \tag{2}$$

式中: L 为河网中河链的数量; V 为河网中节点的数量; n 为闸坝的数量; P_i 为第*i*个闸坝的开启频率; k 为河链增加值。 k 取值分两种情况,一是水系中有*a*个闸坝完全关闭时,此时河链数增加, $k=a$;二是水系中没有闸坝完全关闭,此时河流是连通的,没有增加新的河链, $k=0$ 。

1.3 新指标的算例计算与分析

利用图 1 中含有闸坝的水系 2、4 进行新指标的计算,并与目前常用指标进行对比分析,解析新指标的优势,计算结果见表 2。

表 2 新指标与目前常用指标对比

Table 2 Comparison of the new index with the current commonly used indicators

水系	开启频率	闸化节点率	闸化连通度	节点率	DCI
2	0.5	0.40	0.18	0.50	75.39
	0.8	0.42	0.19	0.50	90.15
4	0.5	0.51	0.20	0.57	75.39
	0.8	0.53	0.21	0.57	90.15

水系 2 闸坝开启频率为 0.5 时,闸化节点率为 0.40、闸化连通度为 0.18;开启频率为 0.8 时,闸化节点率为 0.42、闸化连通度为 0.19,两项指标均体现出相同水系在不同开启频率下水系连通性的变化,即随着闸坝开启频率增大水系连通性上升。而对于不同水系(水系 2、4),闸坝开启频率都为 0.5 时,水系 2、4 的闸化节点率分别为 0.40 和 0.51;水系 2、4 的闸化连通度分别为 0.18 和 0.20,两个指标也均可以体现出水系结构不同带来的连通性变化。相比之下,目前常用指标节点率在不同水系结构下计算结果不同(分别为 0.50 和 0.57),但是不同闸坝开启频率下计算结果相同;DCI 正好相反,不同闸坝开启频率下计算结果不同,但是不同水系结构却计算结果相同。可见,两个新指标克服了目前常用指标的局限性,可以同步体现水系结构和闸坝动态变化的双重影响。在上述分析基础上对新指标与目前常用指标进行相关性分析,发现闸化节点率、闸化连通度与节点率、开启频率和 DCI 呈高相关性,进一步说明新指标可以同步反映水系结构和闸坝启闭的影响,更加合理。

2 实例应用

2.1 研究区概况

秦淮河流域(图 2)位于江苏省西南部,是长江下游右岸的主要支流,介于 31°34'N~32°10'N、118°39'E~119°19'E 之间,流域的面积为 2631 km²,形状类似正方形,长和宽各约 50 km,整个流域涵盖了南京市的核心城区及其周边地区。秦淮河有南北两源,北源句容河,南源漂水河,其中大部分是在南京市境内,是南京市流域面积最大的地区性河流。流域的地势从南向北倾斜,上游的坡度和扇面大,而中下游坡度较缓,总共有大小 16 条支流汇入,是一个典型的树状河网^[25]。

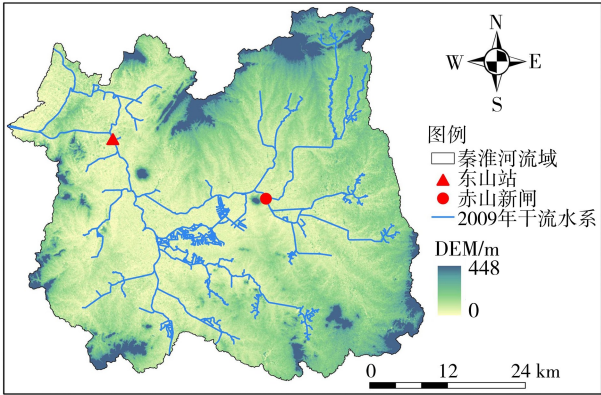


图 2 秦淮河流域概况

Fig. 2 Regional map of the Qinhuai River Basin

随着社会经济高速发展及城市化快速推进,秦淮河流域内相继兴建了大量闸坝,尽管这些闸坝在经济和社会效益方面发挥了重要作用,但是它们对河流的连通性也产生了显著的影响。

2.2 数据来源和处理

秦淮河流域 3 个典型时期(20 世纪 60 年代(1960s)、2009 年和 2016 年)河网数据以 1 : 50 000 地形数据(DLG)形式呈现,来源于江苏省测绘档案馆。运用 ArcGIS 10.8 和 ArcGIS Pro 对水系进行处

理,包括地表水、河流、干渠、湖泊、水库等。考虑到干流上闸坝影响远大于支流上闸坝^[26],因此研究选取河网干流上的闸坝进行讨论。

秦淮河流域干流上具有长期水位数据的站点只有东山站和赤山新闸。东山站是流域内下游出口的控制站,是秦淮河流域防汛工作中的重要站点^[27];赤山新闸在流域上游句容河区域防汛工作中也具有重要作用,因此选取两个站点作为流域闸坝的调控站点。东山站和赤山新闸日水位数据均来自水文年鉴。图 2 高程数据来源于 NASA 地球科学数据网站(<https://nasa daacs.eos.nasa.gov>),选取 ALOS 卫星获取的 12.5 m 分辨率数字高程数据。进行水系空间分区时,参考了 HydroSHEDS 数据^[28]划分子流域(该数据集基于 15"(大约 500 m)的网格分辨率),将秦淮河流域划分为 17 个子流域。

2.3 流域水系连通性的时间演变特征

基于提出的连通性新指标(闸化节点率和闸化连通度)分析秦淮河流域水系连通性的时间演变特征。选取秦淮河流域 1960s、2009 年和 2016 年水系数据进行计算,由于干流上闸坝的影响远大于支流上闸坝,只针对 3 个时期的干流水系和对应闸坝进行分析,3 个时期干流上闸坝分别为 13 座、41 座和 49 座。干流水系和闸坝位置分布见图 3。

2.3.1 丰、平、枯水期划分和闸坝开启频率确定

丰、平、枯水期划分方法主要基于年际尺度,通过数理统计方法从概率角度进行划分^[29]。选取流域中重要的代表性水位站——东山站 1950—1952 年、1960—1972 年和 1981—2017 年共 53 个年份的逐日水位数据,以开启频率 $P=25\%$ 为丰水期与平水期界限、 $P=75\%$ 为平水期与枯水期界限^[30]确定秦淮河流域的丰水期为 7—10 月、平水期为 3—6 月和 11 月、枯水期为 1—2 月和 12 月。

由于每个闸坝的具体开启时间、闸孔的开启大小和数量等数据缺乏,本文引入了一种基于闸坝水

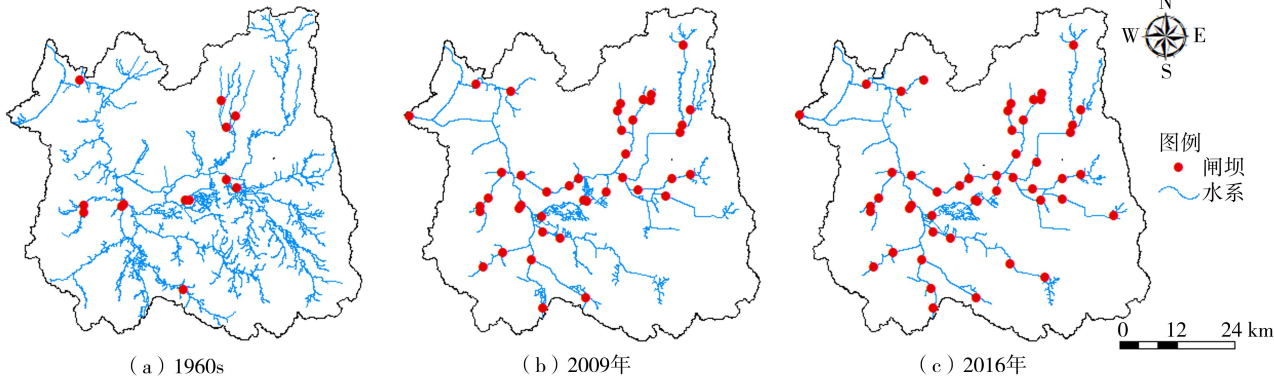


图 3 不同时期秦淮河干流水系和闸坝位置

Fig. 3 The river system and the location of sluices and dams in different periods of mainstream of the Qinhuai River

位数据概率分布的方法来近似表示闸坝开启的天数。位于溧水区、江宁区和老城区的闸坝由东电站调控,而位于句容市的闸坝由赤山新闸调控。东电站在 2000—2016 年水位达到 7.5 m 时,下游会开闸泄洪^[27]。由于季节性时间序列稳定,采用统计频率分析法推算 1960s 东电站泄洪水位。对于赤山新闸而言,其闸下游水位大于 8.5 m 时会开闸泄洪^[31]。根据每个时期的年内逐日水位数据,采用指示函数来表示每一天水位是否超过水位阈值,指示函数在水位大于阈值时输出 1,否则输出 0,计算公式为

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(x_i > k) \quad (3)$$

式中: P 为开启频率,即闸坝在不同水期内开启概率; N 为所求水期总天数; x_i 为第 i 天的水位; k 为水位阈值; $I(x_i > k)$ 为一个指示函数,当 $x_i > k$ 时取值为 1,否则为 0。

经计算,得到东电站和赤山新闸在 1960s、2009 年与 2016 年 3 个时期的闸坝开启频率如图 4 所示。

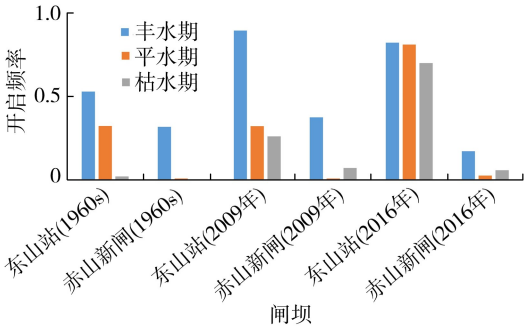


图 4 东电站和赤山新闸的闸坝开启频率
Fig. 4 Dam opening frequency at Dongshan Station and Chishan New Gate

2.3.2 流域水系连通性的时间演变特征分析

基于秦淮河流域 1960s、2009 年和 2016 年水系结构数据和闸坝开启频率,采用闸化节点率和闸化连通度计算不同年份丰、平、枯水期的水系连通性,结果如图 5 所示。

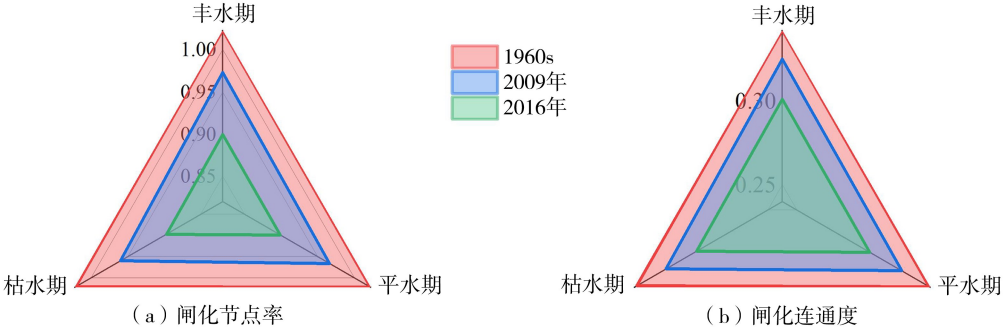


图 5 3 个时期丰、平、枯水期秦淮河水系连通性指标分布
Fig. 5 The distribution of connectivity index in the Qinhuai River system during the three periods of wet, normal, and dry seasons

由图 5 可知,秦淮河水系连通性 1960—2016 年整体呈下降趋势。3 个时期中 20 世纪 60 年代丰、平、枯水期的闸化节点率和闸化连通度最高,水系连通性最好,是由于 1960s 秦淮河流域城市化进程相对缓慢,人类对河流的开发利用程度低,且大规模的水利工程建设较少,所以河流的自然形态得以较好地保留。从 1960—2009 年城市化进程的快速推进使得流域内自然水系结构快速简化,此外河网上还建设了大量的闸坝(从 13 座到 41 座)以满足防洪、灌溉等需求,闸坝的建设阻碍了水流的自由通行,进一步导致河流的连通性降低。1960—2009 年丰、平、枯水期的闸化节点率分别下降了 4.9%、5.5% 和 6.0%,闸化连通度下降了 4.8%、5.5% 和 6.0%。水系连通性在丰、平、枯水期的下降幅度有所不同,其中枯水期下降幅度最大,丰水期下降幅度最小,主要原因是流域闸坝数量增加和水系结构简化共同导致连通性下降,但闸坝在丰水期开启频率较高(如起主要调控作用的东电站 1960s 的开启频率为 0.529,2009 年为 0.894),闸坝开启频率的增大削弱了闸坝数量上升对水系连通性的负面影响,而枯水期闸坝开启频率都较低,闸坝数量上升的负面影响凸显,所以连通性的下降幅度最大。2009—2016 年城市化的进一步发展和闸坝数量的持续增加,使得秦淮河流域的水系连通性仍然呈下降趋势。

2.4 流域水系连通性的空间演变特征分析

将秦淮河流域划分为 17 个子流域以探求其水系连通性的空间演变特征。由于 17 个子流域丰、平、枯水期的闸化节点率与闸化连通度的变化趋势相同,故以闸化节点率为代表进行秦淮河流域水系连通性空间演变特征分析。1960—2009 年和 2009—2016 年不同子流域闸化节点率的变化率如图 6 所示。

从图 6 可以看出秦淮河流域水系连通性演变在空间上具有明显的异质性,以 1960—2009 年丰水期为例,变化显著的区域主要集中在南京老城区

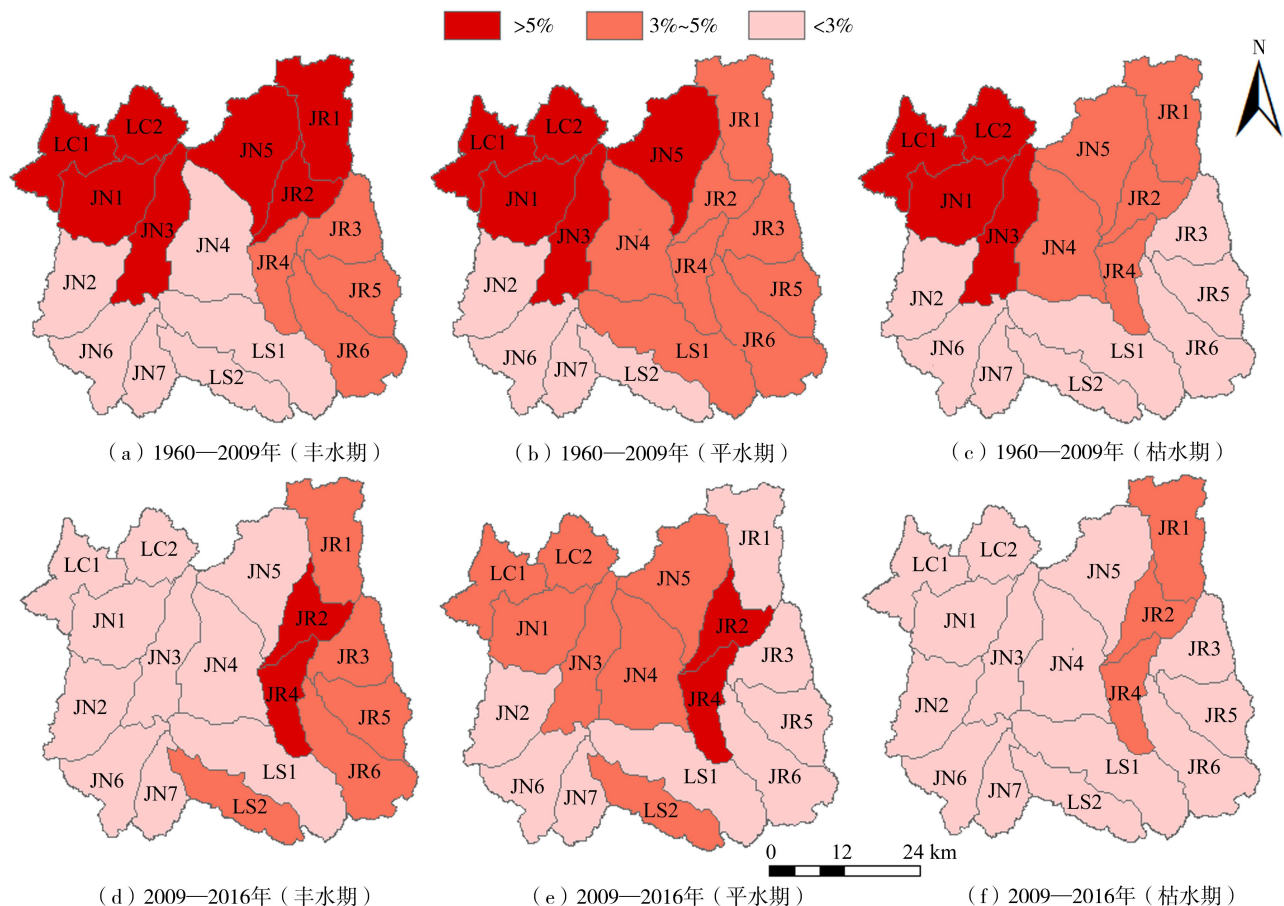


图6 秦淮河不同子流域不同时段闸化节点率的变化率

Fig. 6 The change rate of the gated node ratio in different sub-basins of the Qinhuai River at different time periods

(LC1、LC2)和江宁区中心发展地带(JN1、JN3)等区域以及整个句容市区域(JR1、JR2等),其中南京老城区和江宁区中心发展地带连通性下降主要是因为这些区域快速发展导致土地利用类型发生巨变,大量水域被不透水面所取代,众多末端河道被填埋而消失,或被阻隔变成断头河;而句容市水系连通性下降主要是由于该区域闸坝数量的快速增加且闸坝开启频率较低(1960s开启频率为0.317,2009年为0.374),水系之间的自然流动受到较大限制。2009—2016年丰水期句容市整个区域以及溧水区的LS2子流域水系连通性变化较为显著,其中句容市的JR2和JR4区域以及溧水区的LS2下降明显,主要原因是这些区域属于发展迅速的新城区,水系结构发生大幅简化,导致水系连通性显著下降;句容市其他区域(JR1、JR3、JR5、JR6)这一时期水系连通性下降较大的主要原因是控制句容市水系的闸坝数量上升且开启频率显著下降(从2009年的0.374下降至2016年的0.171)。

1960—2009年平、枯水期水系连通性变化显著区域与丰水期相似但略有变化,这些变化主要是由于平、枯水期闸坝较低的开启频率的叠加效应所致。此外,2009—2016年枯水期除句容市的JR1、JR2、

JR4子流域变化相对较为明显外,其余流域变化幅度均较小,主要是因为秦淮河2016年发生洪水,枯水期东山站的开启频率上升到0.7,这一时期闸坝开启频率的显著增大削弱了闸坝数量上升的负面影响,所以其他区域水系连通性下降趋势变缓。

3 结 论

a. 目前常用水系连通性指标难以有效兼顾水系结构和闸坝动态变化的双重影响,提出的闸化节点率与闸化连通度两个新指标成功克服了目前常用指标表征维度单一的问题,不仅能准确量化水系结构变迁引起的连通性差异,还可动态表征闸坝启闭频率变化对水系连通的影响,表现出更强的适用性与合理性。

b. 应用新指标解析秦淮河流域水系连通性演变时空特征,发现秦淮河流域1960—2016年水系连通性整体呈显著下降趋势,但是丰、平、枯水期的下降幅度并不相同,枯水期因为闸坝开启频率较低,闸坝数量上升的负面影响凸显,下降幅度最大;丰水期则因为闸坝开启频率的增大削弱了闸坝数量上升对水系连通性的负面影响,所以下降幅度最小。流域内17个子流域的水系连通性演变具有显著的异质

性,下降幅度有所不同,1960—2016 年老城区、江宁区 and 句容市中心地带是水系连通性下降显著区域。此外,2016 年洪水的发生导致枯水期闸坝开启频率居高不下,一定程度上削弱了闸坝数量上升的负面影响,导致 2009—2016 年大部分区域水系连通性变化不大。

参考文献:

[1] ZHANG Xingyuan, LI Fawen, SHI Shuhui. Study on the consistency of evaluation methods for river network connectivity in data-scarce watersheds [J]. Journal of Hydrology, 2024, 645: 132267.

[2] ZHANG Xingyuan, LI Fawen, ZHAO Yong. Impact of changes in river network structure on hydrological connectivity of watersheds [J]. Ecological Indicators, 2023, 146: 109848.

[3] 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))

[4] 夏军, 高扬, 左其亭, 等. 河湖水系连通特征及其利弊 [J]. 地理科学进展, 2012, 31 (1): 26-31. (XIA Jun, GAO Yang, ZUO Qiting, et al. Characteristics of interconnected rivers system and its ecological effects on water environment [J]. Progress in Geography, 2012, 31 (1): 26-31. (in Chinese))

[5] 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), 1-13 [2025-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20250225.0939.007.html>. (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), 1-13 [2025-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20250225.0939.007.html>. (in Chinese))

[6] WOHL E, BRIERLEY G, CADOL D, et al. Connectivity as an emergent property of geomorphic systems [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(1): 4-26.

[7] POEPPL R E, KEESSTRA S D, MAROULIS J. A conceptual connectivity framework for understanding geomorphic change in human-impacted fluvial systems [J]. Geomorphology, 2017, 277: 237-250.

[8] SHAO Xiaojing, FANG Yu, JAWITZ J W, et al. River

network connectivity and fish diversity [J]. Science of the Total Environment, 2019, 689: 21-30.

[9] ZHANG Yinghu, HUANG Chenyang, ZHANG Wenqi, et al. The concept, approach, and future research of hydrological connectivity and its assessment at multiscales [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(38): 52724-52743.

[10] GRILL G, LEHNER B, THIEME M, et al. Mapping the world’ s free-flowing rivers [J]. Nature, 2019, 569 (7755): 215-221.

[11] WOHL E. Connectivity in rivers [J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2017, 41 (3): 345-362.

[12] 李美萍, 段斌, 王海胜, 等. 大渡河上游某河段鱼类栖息地适宜性评价 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52 (5): 30-36. (LI Meiping, DUAN Bin, WANG Haisheng, et al. Suitability evaluation of fish habitat for one upper reach of Dadu River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (5): 30-36. (in Chinese))

[13] 高学平, 胡泽, 闫晨丹, 等. 考虑水力连通性的水系连通评价指标体系构建与应用 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (2): 41-47. (GAO Xueping, HU Ze, YAN Chendan, et al. Construction and application of water system connectivity evaluation index system considering hydraulic connectivity [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 41-47. (in Chinese))

[14] 赵安邦, 王嘉芃, 沈家晓, 等. 1960 年以来 6 个时期长三角一体化示范区嘉善县姚庄镇水系结构与连通性变化分析 [J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2023, 22 (2): 211-217. (ZHAO Anbang, WANG Jiapeng, SHEN Jiaxiao, et al. Changes of water system structure and connectivity in Yaozhuang Town, Jiashan County, Yangtze River Delta Integration Demonstration Zone in six periods since 1960 [J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2023, 22 (2): 211-217. (in Chinese))

[15] 谭羿鍼, 王世岩, 韩祯, 等. 闸坝对北运河流域河流栖息地连通性的影响 [J]. 中国农村水利水电, 2023 (7): 111-116. (TAN Yiqian, WANG Shiyan, HAN Zhen, et al. Impact of dams on river habitat connectivity in the North Canal River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(7): 111-116. (in Chinese))

[16] 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))

(下转第 246 页)

Geophysics,2004,11(5/6):561-566.

[23] LI Wei,JIANG Shan,ZHAO Yong,et al. A copula-based security risk evaluation and probability calculation for water-energy-food nexus [J]. Science of the Total Environment,2023,856(2):159236.

[24] 张向明. 基于 Copulas 函数的黑河流域多变量水文干旱研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.

[25] 齐跃明. 矿区岩溶地下水动态的随机模拟及应用研究 [D]. 徐州:中国矿业大学,2009.

+++++

(上接第 237 页)

[17] 窦明,于璐,靳梦,等. 淮河流域水系盒维数与连通度相关性研究[J]. 水利学报,2019,50(6):670-678. (DOU Ming, YU Lu, JIN Meng, et al. Study on relationship between box dimension and connectivity of river system in Huaihe River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(6):670-678. (in Chinese))

[18] ZHANG Xianqi, QIAO Wenbao, LU Yaohui, et al. Construction and application of urban water system connectivity evaluation index system based on PSR-AHP-Fuzzy evaluation method coupling [J]. Ecological Indicators,2023,153:110421.

[19] 韩龙飞,许有鹏,邵玉龙,等. 城市化对水系结构及其连通性的影响:以秦淮河中、下游为例[J]. 湖泊科学,2013,25(3):335-341. (HAN Longfei, XU Youpeng, SHAO Yulong, et al. Effect of urbanization on the stream structure and connectivity: a case study in the midlower reaches of the Qinhuai River [J]. Journal of Lake Sciences,2013,25(3):335-341. (in Chinese))

[20] 徐光来,许有鹏,王柳艳. 基于水流阻力与图论的河网连通性评价[J]. 水科学进展,2012,23(6):776-781. (XU Guanglai, XU Youpeng, WANG Liuyan. Evaluation of river network connectivity based on hydraulic resistance and graph theory[J]. Advances in Water Science,2012,23(6):776-781. (in Chinese))

[21] SHAO Xiaojing, FANG Yu, CUI Baoshan. A model to evaluate spatiotemporal variations of hydrological connectivity on a basin-scale complex river network with intensive human activity [J]. Science of the Total Environment,2020,723:138051.

[22] 傅春,裴伍涵,肖昆. 闸坝对抚河流域连通性的影响研究[J]. 中国农村水利水电,2020(8):66-70. (FU Chun, PEI Wuhan, XIAO Kun. Research on the influence of gate dams on the connectivity of Fuhe River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(8):66-70. (in Chinese))

[23] COTE D, KEHLER D G, BOURNE C, et al. A new measure of longitudinal connectivity for stream networks [J]. Landscape Ecology,2009,24(1):101-113.

[24] FRÉMION F, BORDAS F, MOURIER B, et al. Influence of dams on sediment continuity: a study case of a natural metallic contamination [J]. Science of the Total Environment,2016,547:282-294.

[25] 闵克祥,何琴,刘建龙,等. 秦淮河流域水利治理现状分析[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(12):101-105. (MIN Kexiang, HE Qin, LIU Jianlong, et al. Current situation analysis of water management in Qinhuai River Basin in Nanjing City [J]. China Flood & Drought Management, 2022,32(12):101-105. (in Chinese))

[26] DENG Xiaojun, XU Youpeng, HAN Longfei. Impacts of human activities on the structural and functional connectivity of a river network in the Taihu Plain [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(8):2575-2588.

[27] 张轩,张行南,江唯佳,等. 秦淮河流域东电站水位预报研究[J]. 水资源保护,2020,36(2):41-46. (ZHANG Xuan, ZHANG Xingnan, JIANG Weijia, et al. Study on water level forecast of Dongshan Station in Qinhuai River Basin [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2):41-46. (in Chinese))

[28] LEHNER B, VERDIN K, JARVIS A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2008, 89(10):93-94.

[29] 刘赛艳,解阳阳,黄强,等. 流域水文年及丰枯水期划分方法[J]. 水文,2017,37(5):49-53. (LIU Saiyan, XIE Yangyang, HUANG Qiang, et al. Method of partitioning water year, wet season and dry season of river basin [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(5):49-53. (in Chinese))

[30] 方少文,王仕刚,欧阳千林. 鄱阳湖丰、平、枯水期界定标准探讨 [J]. 水文, 2022, 42(1):11-15. (FANG Shaowen, WANG Shigang, OUYANG Qianlin. Discussion on the definition standard of the wet season, normal season and dry season in Poyang Lake [J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(1):11-15. (in Chinese))

[31] 王建群,季晓翠,杜开莲,等. 基于气象模式的赤山湖流域洪水预报与调度[M]. 南京:河海大学出版社,2020:17-18.

(收稿日期:2025 - 03 - 31 编辑:熊水斌)