

基于改进阻隔系数法的全国主要河流纵向连通性评价

侯佳明¹, 曾庆慧¹, 胡鹏¹, 蒋云钟¹, 唐家璇¹, 杨钦¹, 张璞²

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 中国南水北调集团有限公司, 北京 100036)

摘要:为提升河流纵向连通性评价的合理性,在传统阻隔系数法的基础上,引入阻隔物位置和类型修正系数,提出了一种综合考虑拦河建筑物位置和类型的改进阻隔系数法,并采用改进阻隔系数法评价了全国流域面积超过1万km²的215条主要河流的纵向连通性。评价结果表明:2020年评价河流的平均纵向连通性指数为1.08,等级为差;在时间维度上,自1960年以来全国主要河流纵向连通性呈加速受损趋势,且2000年以后受损程度最为强烈;在空间维度上,东南诸河区、珠江区和长江区现状纵向连通性等级为劣,海河区和辽河区等级为差,松花江区是唯一综合评价等级为优的一级区。

关键词:水系连通;纵向连通性;阻隔系数法;水利工程;河流健康评价

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)06-0181-07

Assessment of longitudinal connectivity of major rivers across China based on enhanced barrier coefficient method//HOU Jiaming¹, ZENG Qinghui¹, HU Peng¹, JIANG Yunzhong¹, TANG Jiaxuan¹, YANG Qin¹, ZHANG Pu²
(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. China South-to-North Water Diversion Corporation Limited, Beijing 100036, China)

Abstract: To improve the rationality in river longitudinal connectivity evaluation, an enhanced barrier coefficient method was proposed based on the traditional barrier coefficient method, which takes into account the location and type of river blocking structures by introducing corresponding correction factors. The enhanced barrier coefficient method was used to assess the longitudinal connectivity for 215 major rivers across China, each with a watershed area exceeding 10 thousand km². The results indicate that in 2020, the average longitudinal connectivity index of the evaluated rivers was 1.08, categorized as a poor level. Temporally, since 1960, the longitudinal connectivity of the major rivers has exhibited an accelerating trend of deterioration, with the most intense deterioration occurring after 2000. Spatially, the worst longitudinal connectivity occurred in the Southeast River Region, Pearl River Basin, and Yangtze River Basin, categorized as a very poor level, the Haihe River Basin and Liaohe River Basin were categorized as a poor level in the longitudinal connectivity, and the Songhuajiang River Basin was the sole area exhibiting the best connectivity.

Key words: water system connectivity; longitudinal connectivity; barrier coefficient method; hydraulic engineering; river health assessment

保障河流连通性是维持其上下游、干支流之间物质流、物种流、能量流和信息流畅通传递的基本条件^[1-2],对发挥河流生态和社会功能具有重要的作用。在空间维度上,河流连通性表现为纵向连通性(源头-河口)、横向连通性(湖泊-河道、湿地-河道、滩地-河道等)和垂向连通性(地表-地下)^[3]。其中,纵向连通性的降低是导致全球河流连通性变化最主

要的因素^[4]。为满足经济社会发展需求,全球范围内目前已兴建超过280万座水库大坝^[5]以及各类灌溉和引水工程^[6],这些基础设施的建设导致河流上下游的传输通道变得支离破碎,引起生境破碎化、生物多样性丧失等一系列问题,严重影响了河流生态系统服务功能的正常发挥^[7-8]。

为深入了解河流纵向连通性的现状和演变趋

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3204200);国家自然科学基金项目(52122902, U2240202);流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究项目(WR110146B0022024)

作者简介:侯佳明(1994—),男,博士研究生,主要从事水文水资源和水生态环境保护研究。E-mail:houjiaming0214@icloud.com

通信作者:曾庆慧(1990—),女,高级工程师,博士,主要从事水文水资源和水生态环境保护研究。E-mail:qhzheng1990@126.com

势,世界各国开展了大量的定量评价研究。在全球范围内 1 200 万 km 的河流中,仅有 37% 河长超过 1 000 km 的河流保持着自由流动状态,其中绝大部分集中在人烟稀少的北极、亚马逊和刚果流域^[4]。欧洲境内 36 个国家共修建了至少 120 万座拦河坝,平均每千米河长 0.74 座,其中 68% 为小型拦河坝^[9]。1900—2018 年,巴西的树状水系连通性指数从 100 下降至 83,且 2000 年后下降速率显著加快^[10]。自 2010 年以来我国高度重视河湖水系的连通性问题,众多学者对长江流域^[11-12]、松花江流域^[13]、淮河流域^[14]、珠江流域^[15]开展了纵向连通性的定量评价工作。然而,由于不同流域之间存在方法选择上的差异,导致评价结果缺乏可比性,无法从宏观角度全面评价我国河流纵向连通性的整体状况与时空演变特征。

对于河流纵向连通性评价,目前已有指标法、图论法、水文模型法、连通性函数法等方法^[16-19]。其中,宏观尺度上目前多采用指标法,例如《全国水资源保护规划技术大纲》^[20]和 SL/Z 738—2016《水生态文明城市建设评价导则》提出的河流纵向连通性指数,通过计算每 100 km 河长中拦河建筑物数量表征河流纵向连通性。该方法虽适用于较大尺度的宏观评价,但计算过程较为粗略,忽略了不同类型拦河建筑物阻隔程度的差异。尽管有学者在此基础上通过引入阻隔系数来表征不同类型建筑物的阻隔程度,并在松花江流域^[13]、海河流域^[21-22]、长江流域^[12]、珠江流域^[23]等得到广泛应用,但并未考虑建筑物在河流中的分布位置这一影响其阻隔效应和程度的重要因素。

鉴于此,本文在应用较为广泛的阻隔系数法的基础上,进一步细化制定不同类型人工建筑物的阻隔系数,引入位置修正系数以表征建筑物分布位置对河流纵向连通性的影响,提出了一种改进的阻隔系数法。采用改进阻隔系数法,开展全国十大水资源一级区 215 条主要河流的纵向连通性评价,以揭示我国主要河流纵向连通性现状和时空演变趋势。

1 评价对象

本文河流纵向连通性的评价对象为全国十大水资源一级区流域面积超过 1 万 km² 的部分河流,共计 215 条,具体位置分布如图 1 所示(审图号 GS (2024)0650 号)。参与评价的河流在长江区、西北诸河区、松花江区、西南诸河区、黄河区、辽河区、珠江区、海河区、淮河区和东南诸河区的占比分别为 20.9%、19.5%、17.2%、11.6%、7.9%、6.0%、5.6%、4.7%、3.3% 和 3.3%。考虑的阻隔物为建设在

215 条河流上且对河流纵向连通性具有明显影响的拦河建筑物,包括中型以上水库(总库容大于或等于 1 000 万 m³)、小(I)型以上水电站(装机容量大于或等于 1 万 kW)、中型以上水闸(最大过闸流量大于或等于 100 m³/s)、橡胶坝。引水式水电站多为低坝或无坝,对河流纵向连通性的阻隔程度相对较低,因此将拦河建筑物的工程类型按阻隔程度特征划分为闸坝式工程(水库和闸坝式水电站)、引水式水电站、水闸和橡胶坝 4 类。水利工程数据信息主要来源于《第一次全国水利普查公报》,并根据现状情况进行补充和修正,包括工程名称、类型、规模、经纬度和开工/建成时间,河流数据包括河流名称、流域面积、长度和分布位置等。

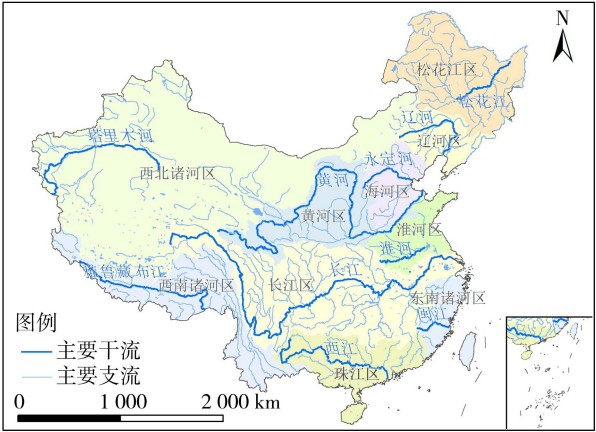


图 1 参与评价的 215 条全国主要河流位置分布

Fig. 1 Spatial distribution of 215 major rivers across China involved in evaluation

为探究全国主要河流纵向连通性的时空演变特征,在时间维度上,将 1960—2020 年划分成 4 个时间段,分别为 1960 年、1960—1980 年、1980—2000 年、2000—2020 年;在空间尺度上,选择全国十大水资源一级区作为评价对象,对比分析我国各大流域河流纵向连通性的变化特征。

2 研究方法

2.1 阻隔系数法

SL/Z 738—2016《水生态文明城市建设评价导则》中关于纵向连通性的评价方法是计算每 100 km 河长中阻隔河流连通的人工建筑物数量,其中不包括已有过鱼设施且发挥作用的建筑物:

$$K = (M/L) \times 100 \quad (1)$$

式中: K 为河流纵向连通性指数; M 为阻隔河流连通的人工建筑物数量; L 为河流的总长度。

该方法计算简便,但仅考虑了拦河建筑物数量的影响,忽略了不同类型建筑物的阻隔程度差异。吕军等^[13]在此基础上通过引入阻隔系数 a_i 表征不

同建筑物类型的阻隔程度:

$$K_j = \left(\frac{1}{L_j} \sum_{i=1}^n N_i a_i \right) \times 100 \tag{2}$$

式中: K_j 为第 j 段河流的纵向连通性指数; n 为建筑物类型的数量; N_i 为第 i 种建筑物的数量; a_i 为第 i 种建筑物的阻隔系数; L_j 为第 j 河段的河流长度。

阻隔系数法虽同时考虑了拦河建筑物数量和类型的双重影响,但建筑物的分布位置对河流纵向连通性的阻隔程度也存在明显差异。Cote 等^[24] 研究表明,当建筑物位于河流中央时,对半洄游性鱼类的阻隔影响最大;当建筑物位于河口时,对洄游性鱼类的阻隔影响最大。因此,有必要引入位置修正系数,从而更精确地表征建筑物分布位置对河流纵向连通性的影响,提高评价结果的合理性。

2.2 改进阻隔系数法

在阻隔系数法的基础上,引入位置修正系数表征建筑物分布位置对本级河流和下级河流(本级河流所汇入的干流或河口)纵向连通性的阻隔程度:

$$K_j = \left(\frac{1}{L_j} \sum_{k=1}^m a_k b_k \right) \times 100 \tag{3}$$

其中 $b_k = (b_{Lk} + b_{Qk})/2$

式中: a_k 为第 k 个建筑物的阻隔系数; b_k 为第 k 个建筑物的位置修正系数; b_{Lk} 为第 k 个建筑物对本级河流连通性影响的位置修正系数; b_{Qk} 为第 k 个建筑物对本级河流与下级河流间连通性影响的位置修正系数; m 为建筑物的数量。

a. 阻隔系数 a_k 。阻隔系数法中原有的阻隔系数考虑的工程类型较少,且对鱼类洄游通道的阻隔特征相对单一,本文在原有基础上增加了水闸和橡胶坝两类工程,同时丰富了对鱼类洄游通道的阻隔特征类型,并赋予相应的阻隔系数(表 1)。

表 1 改进后的阻隔系数取值

Table 1 Enhanced barrier coefficient values		
拦河建筑物类型	对鱼类洄游通道阻隔特征	阻隔系数
水库	完全阻隔	1.00
	有过鱼设施	0.50
	有船闸	0.75
水电站	闸坝式水电站	1.00
	引水式水电站	0.50
水闸	部分时间段对鱼类洄游造成阻隔	0.25
橡胶坝	对部分鱼类洄游造成阻隔	0.25

b. 位置修正系数 b_{Lk} 。当建筑物处于河流中间位置时,会将原本畅通的河流一分为二,此时该条河流的最大连续河长减少至原来的 1/2,对本级河流连通性影响最大;随着建筑物从河流中间向两端移动,最大连续河长有所回升,对河流的阻隔程度逐渐减小。 b_{Lk} 的表达式为

$$b_{Lk} = \frac{2\sqrt{(L_{ak}/L_j)(L_{bk}/L_j)}}{\alpha} \tag{4}$$

式中: L_{ak} 为第 k 个建筑物所在位置距河流源头的距离; L_{bk} 为第 k 个建筑物所在位置距汇入干流或河口处的距离; α 为标准化系数。标准化系数 α 的设定是为了保证不同建筑物位置分布的 b_{Lk} 均值趋近于 1,使评价结果与使用 K 指数和传统阻隔系数法的评价结果具有可对比性。本文设置了 100 个建筑物的位置分布情景(即 $L_{ak}/L_j = 0, 1\%, 2\%, \dots, 100\%$),计算不同情景下的位置修正系数 b_{Lk} ,并求其均值,得到 $\alpha = 0.78$ 。

c. 位置修正系数 b_{Qk} 。由于水量与生物通量、鱼类洄游通道存在显著的正向相关关系^[25],计算建筑物所在位置处与河口处的多年平均天然径流量比值,比值越大,说明建筑物所在位置对本级河流与下级河流间连通性的阻隔程度越大,对水生生物的迁移、栖息和繁殖发育的影响也越大。 b_{Qk} 的表达式为

$$b_{Qk} = \frac{Q_k/Q_j}{\beta} \tag{5}$$

式中: Q_k 为第 k 个建筑物所在位置的多年平均天然径流量; Q_j 为该河段汇入干流或河口处的多年平均天然径流量; β 为标准化系数。本文设置了 100 个建筑物所在位置的多年平均天然径流量占比(即 $Q_k/Q_j = 0, 1\%, 2\%, \dots, 100\%$),计算不同情景下的位置修正系数 b_{Qk} ,并求其均值,得到 $\beta = 0.5$ 。

2.3 评价标准

根据《水生态文明城市建设评价导则》《全国水资源保护规划技术大纲》,将河流纵向连通性评价等级分为优、良、中、差、劣,对应的纵向连通性指数范围分别为 ≤ 0.3 、 $>0.3 \sim 0.5$ 、 $>0.5 \sim 0.8$ 、 $>0.8 \sim 1.2$ 、 >1.2 。

3 结果与分析

3.1 方法改进效果

相比传统阻隔系数法,改进阻隔系数法更能体现出拦河建筑物类型和分布位置对河流纵向连通性的阻隔特征。以 2020 年为例,215 条全国主要河流中,有 42 条河流(占比 19.5%)采用改进阻隔系数法后的评价等级发生改变,其中 38 条河流上下浮动一个等级。而位于黄河区的葫芦河评价等级发生了极端改变,其传统阻隔系数法的纵向连通性指数为 1.25,评价等级为劣;而改进阻隔系数法的纵向连通性指数仅为 0.18,评价等级上升至优。究其原因,葫芦河上有 4 座闸坝式工程和 1 座水闸,阻隔系数之和为 4.25,河流长度为 298 km,属于相对较短的河流,若仅考虑建筑物数量和阻隔程度的影响,传统

方法计算出该河流纵向连通性受到极大破坏。然而,通过观察河流中建筑物的分布位置发现(图 2(a)),葫芦河上阻隔程度较大的闸坝式工程均集中在河流源头段,下游仍具有较长的自由流动河长,采用改进阻隔系数法的评价结果更加合理。

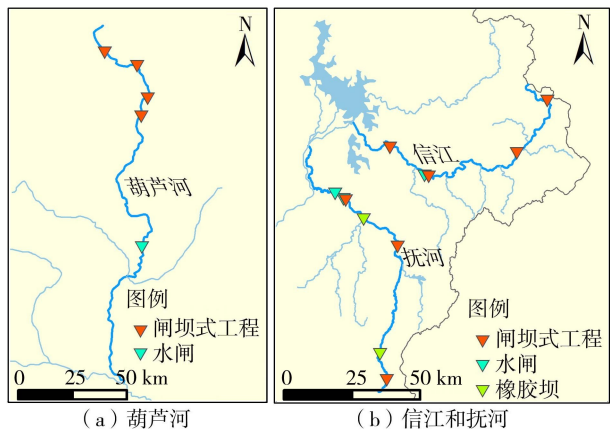


图 2 典型河流拦河建筑物位置分布
Fig. 2 Distributions of barriers on typical rivers

对于一些采用传统阻隔系数法评价结果相近的河流,在利用改进阻隔系数法评价后,其评价结果更能体现出内部差别,验证了改进方法的合理性。例如:位于长江区内的信江和抚河,由于两条河流上的建筑物数量与类型类似,阻隔系数之和分别为 4.25 和 4.00,河流长度也十分相近,分别为 366 km 和 344 km,因此传统阻隔系数法的计算结果均为 1.16,评价等级为差。然而,两条河流上的建筑物位置分布有较大差别,信江上的建筑物均为阻隔程度较强的闸坝式工程,其中上游 2 座、下游 2 座,且分布较为平均,将河流近乎均匀地划分为 5 段,这会对纵向连通性造成更大的影响(图 2(b))。而抚河上的建筑物虽集中在中下游,但多数为阻隔程度较弱的水闸和橡胶坝,而阻隔程度较强的闸坝式工程仅有 1 座位于下游,另 2 座分别位于中游和源头区域,对整条河流的纵向连通性影响相对较小(图 2(b))。因此,通过两条河流上拦河建筑物的位置分布可以判断,信江的纵向连通性受到更大影响。采用改进阻隔系数法,可以较好地反映这种差别,其中信江的纵向连通性指数上升至 1.35,评价等级为劣;抚河的纵向连通指数仍为 1.16,评价等级为差。

3.2 全国主要河流纵向连通性时间演变特征

采用改进阻隔系数法对全国 215 条主要河流不同年代纵向连通性进行评价,发现自 1960 年以来全国主要河流纵向连通性呈加速受损趋势,且 2000 年以后的受损程度最为强烈。1960 年全国主要河流纵向连通性指数均值为 0.05,评价等级为优;1960—1980 年总体保持较好状态,仅个别河流出现

小幅变化,1980 年平均纵向连通性指数上升至 0.18,总体评价等级仍为优;1980 年以后呈现初步受损趋势,2000 年平均纵向连通性指数上升至 0.40,较 1980 年上升了 0.22,整体评价等级下降至良;2000 年以后总体受损程度愈发强烈,2020 年平均纵向连通性指数上升至 1.08,较 2000 年上升了 0.68,整体评价等级下降至差。

不同年份全国主要河流纵向连通性评价结果如图 3 所示(审图号 GS(2024)0650 号)。215 条评价河流中,1960 年评价等级为优的有 203 条(占比 94.4%),评价为差的仅 1 条,无评价为劣的河流(图 3(a))。1960—1980 年,33 条河流评价等级发生改变,1980 年等级为优的减少至 173 条(占比 80.5%),等级为差和劣的分别增加至 5 条(占比 2.3%)和 2 条(占比 0.9%)(图 3(b))。1980—2000 年 52 条河流评价等级发生改变,2000 年等级为优的减少至 134 条(占比 62.3%),等级为差和劣的分别增加至 11 条(占比 5.1%)和 13 条(占比 6.0%)(图 3(c))。2000—2020 年 103 条河流评价等级发生改变,2020 年等级为优的减少至 81 条(占比 37.7%),等级为差和劣的分别增加至 25 条(占比 11.6%)和 52 条(占比 24.2%)(图 3(d))。

不同河长范围河流纵向连通性分布如表 2 所示,河长较短的河流纵向连通性受建筑物阻隔影响更为敏感。其中,100~500 km 中等河长的河流纵向连通性受损期更早,即从 1980 年开始出现明显变化,等级为优的从 1980 年 103 条减少至 2000 年 78 条,又进一步减少至 2020 年 48 条;等级为劣的从 1980 年 2 条增加至 2000 年 11 条,又进一步增加至 2020 年 38 条。而 500~1 000 km 较长河长和 >1 000 km 超长河长的河流,其纵向连通性则在 2000 年后出现明显受损趋势,500~1 000 km 河长等级为优的从 2000 年 39 条减少至 2020 年 23 条,等级为差和劣的从 2 条分别增加至 2020 年 10 条和 11 条;>1 000 km 河长等级为优的从 2000 年 17 条减少至 2018 年 10 条,且 2000 年前均未出现等级为差和劣的河流,但到 2020 年分别增加至 2 条和 3 条,其中等级为劣的河流是长江区的沅江(1 053 km)、嘉陵江(1 132 km)和大渡河(1 240 km)。

3.3 全国主要河流纵向连通性空间演变特征

在空间维度上,全国十大水资源一级区河流纵向连通性呈现不同的受损程度(表 3)。2020 年评价结果显示,东南诸河区、珠江区和长江区纵向连通性受损最严重,纵向连通性指数均值分别为 2.41、1.80 和 1.58,整体等级为劣。海河区和辽河区整体评价等级为差,其中海河区的纵向连通性指数为

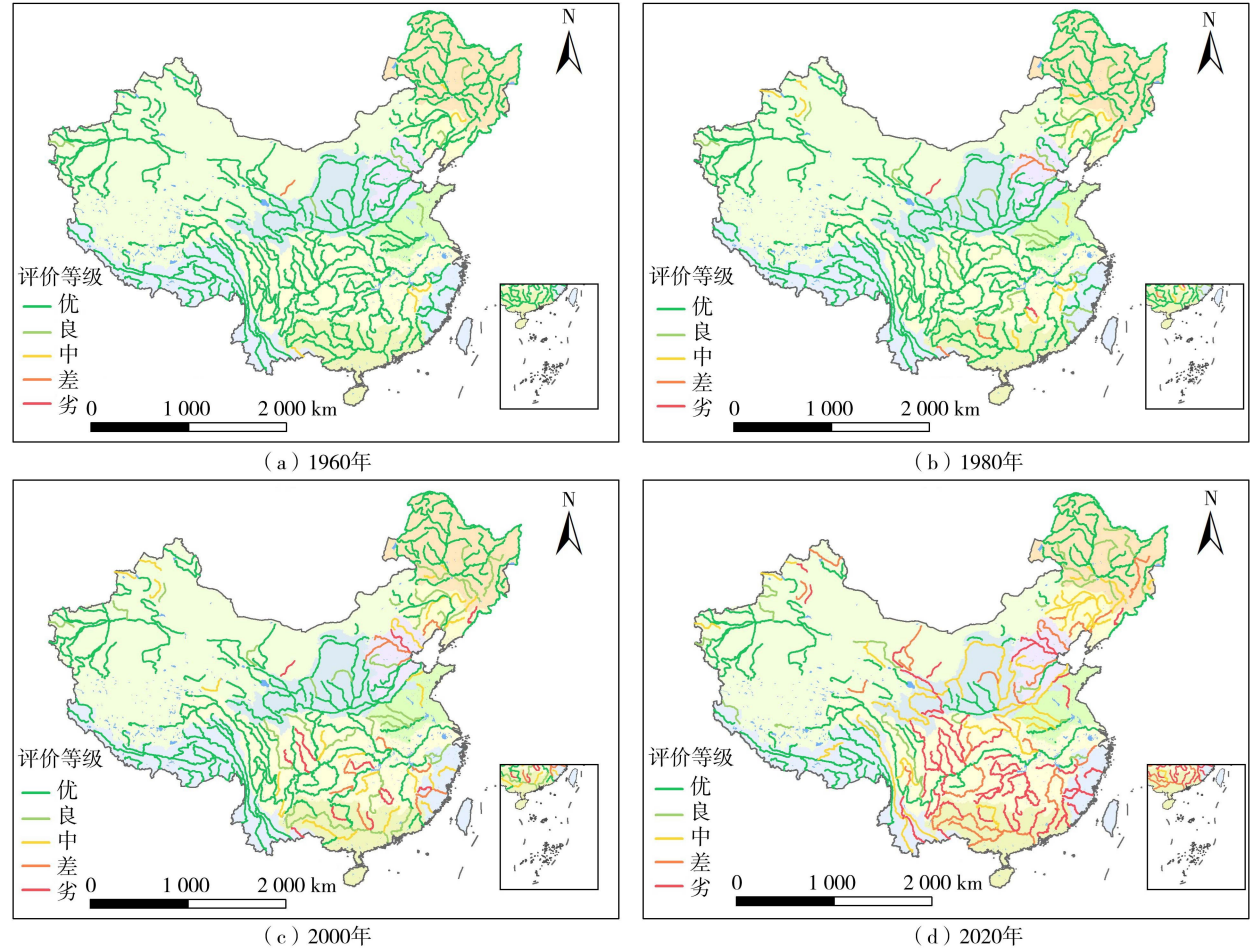


图3 不同年份主要河流纵向连通性评价结果

Fig. 3 Longitudinal connectivity assessment results of major rivers for different years

表2 不同河长范围河流纵向连通性等级分布

Table 2 Distribution of longitudinal connectivity level for rivers with different length ranges

河长/km	年份	河流数量/条				
		优	良	中	差	劣
100~500	1960	125	6	5	1	0
	1980	103	18	10	4	2
	2000	78	20	19	9	11
	2020	48	17	21	13	38
>500~1000	1960	58	0	0	0	0
	1980	50	5	2	1	0
	2000	39	10	5	2	2
	2020	23	4	10	10	11
>1000	1960	20	0	0	0	0
	1980	20	0	0	0	0
	2000	17	2	1	0	0
	2020	10	1	4	2	3

表3 各区域不同年份河流纵向连通性评价结果

Table 3 Longitudinal connectivity assessment results in different water resource regions for different years

区域	纵向连通性指数			
	1960 年	1980 年	2000 年	2020 年
东南诸河区	0.00 ^a	0.22 ^a	0.72 ^c	2.41 ^e
珠江区	0.01 ^a	0.21 ^a	0.66 ^c	1.80 ^e
长江区	0.04 ^a	0.16 ^a	0.50 ^c	1.58 ^e
海河区	0.05 ^a	0.29 ^a	0.56 ^c	1.15 ^d
辽河区	0.12 ^a	0.31 ^b	0.49 ^b	0.82 ^d
淮河区	0.16 ^a	0.25 ^a	0.49 ^b	0.79 ^c
西北诸河区	0.05 ^a	0.14 ^a	0.19 ^a	0.66 ^c
西南诸河区	0.03 ^a	0.04 ^a	0.11 ^a	0.64 ^c
黄河区	0.02 ^a	0.09 ^a	0.14 ^a	0.61 ^c
松花江区	0.03 ^a	0.08 ^a	0.14 ^a	0.28 ^a

注:a~e 分别表示纵向连通性处于等级优、良、中、差、劣。

在不同时间段,十大水资源一级区河流纵向连通性也呈现不同的变化趋势。如表3所示,1960年十大一级区的纵向连通性均处于良好的初始状态,等级均为优。1960—1980年各区域河流仍保持较强的纵向连通性,1980年仅辽河区的等级发生改变,由优下降至良。1980—2000年局部区域出现明

1.15,接近劣等级的阈值(1.20)。淮河区、西北诸河区、西南诸河区和黄河区等级为中,其中淮河区的纵向连通性指数为0.79,接近差等级的阈值(0.80)。全国十大水资源一级区中,松花江区的河流连通性现状最好,纵向连通性指数为0.28,是唯一等级为优的一级区。

显受损趋势,主要集中在我国东南部,2000 年 4 个区域的评价等级由优下降到中,分别为海河区、长江区、东南诸河区 and 珠江区。2000—2020 年则是全国河流纵向连通性受损程度最严重和最广泛的时期,2020 年除松花江区外,其余 9 区的评价等级均发生改变。等级为差的增加至 2 个,分别为辽河区和海河区;等级为劣的增加至 3 个,分别为东南诸河区、珠江区和长江区。

3.4 讨 论

本文在传统阻隔系数法的基础上,引入位置修正系数表征建筑物分布位置对河流纵向连通性的影响。通过实际案例的对比分析,验证了改进方法的评价结果更具合理性。国外也有诸多适用于宏观尺度河流纵向连通性的评价方法,如 Grill 等^[4]提出了破碎度指标评价全球河流纵向连通性的破碎程度,Cote 等^[24]提出了树状河网连通性指数。总的来说,评价河流纵向连通性的方法众多,在实际应用中,尤其是开展宏观尺度评价工作时,需要依据已掌握的数据量和评价目标,选择最适宜的评价方法,在保证方法可执行性的同时尽可能全面考虑各项影响因素,增强评价结果的合理性。

在现状评价结果中,全国十大水资源一级区纵向连通性受损程度较严重的是东南诸河区、珠江区和长江区。究其原因,东南诸河区水系密集且多为源短流急、独流入海的中小河流^[26],区域内流域面积 1 万 km² 以上的河流仅 7 条,平均河长仅为 399.7 km。然而,流域内却建有大量中小水电站^[27]。据统计,2021 年东南诸河区水电资源开发程度为 77.7%^[28]。因此,在原本就短促的河流中进行高强度水电开发,会对纵向连通性带来更严重的破坏,使得东南诸河区成为受损程度最严重的流域。珠江区是我国经济最发达的地区之一,截至 2022 年,珠江区已建成西江干流 11 级、北盘江 11 级、柳江 15 级、郁江 11 级、贺江 13 级等一系列梯级水利枢纽^[15,29]。在本文的统计数据中,珠江区的水利工程以对河流阻隔程度最高的闸坝式工程为主,其数量在全国十大水资源一级区中仅次于长江区。长江区多年平均水资源总量为 9958 亿 m³,约占全国水资源总量的 1/3^[30],同时长江干流总落差约 5400 m,上游雅砻江、岷江、大渡河、嘉陵江等主要支流落差也达到了 2000~4000 m^[31],使得长江区成为全国水能资源最富集的地区,水力资源蕴藏量达 30.5 万 MW,年发电量 2.67 万亿 kW·h,约占全国年水力发电量的 40%。2022 年白鹤滩水电站投入运行后,长江区水电总装机容量 23.36 万 MW,占区域内水力资源蕴藏量的 77.7%^[32]。水库、水电站

等各类水利工程的大量建设,导致长江区河流纵向连通性受损严重,生境破碎化问题突出。此外,长江上游仍规划建设一批大型水利工程,未来长江流域河流纵向连通性可能会进一步降低,亟须综合考虑水能资源开发利用和河流生态保护的需求,制定长江流域河流连通性的整体保护规划。

2000 年以来,我国河流纵向连通性受损程度愈发严重,未来对于连通性的保护和恢复成为流域水资源保护的重点工作之一^[33],主要可以从两方面开展相关工作。一方面要强化已被阻隔河流的功能连通和恢复,主要措施包括:加强河湖水系连通工程建设,通过水系连通、灌江纳苗、生态调度等形式,着力恢复河湖天然水力联系;推进水利工程过鱼设施建设,对未建过鱼设施的大中型水利工程,选择适宜形式进行补建或改造,对已建过鱼设施的大中型水利工程,着力创造诱鱼适宜水流条件,提升过鱼效力;在科学论证的前提下,对有重大生态影响或经济效益低下的小水电予以拆除。另一方面是对未来规划待建的拦河建筑物予以管控,主要措施包括:依据河流连通性的整体评价结果,并基于鱼类资源分布和洄游路线的调查,编制流域水系连通性保护整体规划;对未来确需规划建设的水利工程,严格要求配套建设适宜的过鱼设施,并做好支流替代生境的科学论证工作。

4 结 论

a. 在传统阻隔系数法的基础上,通过细化制定各类型阻隔物的阻隔系数,并引入阻隔物位置修正系数,提出了一种适用于宏观尺度、考虑更全面影响因素的改进阻隔系数法。通过实际应用案例的对比分析,验证了改进方法更能体现拦河建筑物分布位置对河流纵向连通性的影响,其评价结果更具合理性。

b. 改进阻隔系数法对全国主要河流纵向连通性的评价结果显示,1960 年以来全国主要河流纵向连通性呈加速受损趋势,且 2000 年来的受损程度最为严重。2020 年全国平均河流纵向连通性指数为 1.08,较 2000 年上升了 0.67,整体评价等级下降至差。

c. 在空间维度上,2020 年全国十大水资源一级区纵向连通性受损最严重的是东南诸河区、珠江区和长江区,评价等级为劣;其次是海河区和辽河区,评价等级为差;松花江区最好,是唯一评价等级为优的一级区。

参考文献:

[1] FREEMAN M C, PRINGLE C M, JACKSON C R.

- Hydrologic connectivity and the contribution of stream headwaters to ecological integrity at regional scales [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(1): 5-14.
- [2] 董哲仁, 赵进勇, 张晶. 3 流 4D 连通性生态模型 [J]. 水利水电技术, 2019, 50(6): 134-141. (DONG Zheren, ZHAO Jinyong, ZHANG Jing. Three types flows via four dimensional connectivity ecological model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(6): 134-141. (in Chinese))
- [3] WARD J V. The four-dimensional nature of lotic ecosystems [J]. Journal of the North American Benthological Society, 1989, 8(1): 2-8.
- [4] GRILL G, LEHNER B, THIEME M, et al. Mapping the world's free-flowing rivers [J]. Nature, 2019, 569(7755): 215-221.
- [5] LEHNER B, LIERMANN C R, REVENGA C, et al. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2011, 9(9): 494-502.
- [6] REVENGA C, BRUNNER J, HENNINGER N, et al. Pilot analysis of global ecosystems: freshwater systems [R]. Washington, D. C.: World Resources Institute, 2000.
- [7] DUDGEON D, ARTHINGTON A H, GESSNER M O, et al. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges [J]. Biological Reviews, 2006, 81(2): 163-182.
- [8] CARDINALE B J, DUFFY J E, GONZALEZ A, et al. Biodiversity loss and its impact on humanity [J]. Nature, 2012, 486(7401): 59-67.
- [9] BELLETTI B, GARCIA DE LEANIZ C, JONES J, et al. More than one million barriers fragment Europe's rivers [J]. Nature, 2020, 588(7838): 436-441.
- [10] COUTO T B, MESSENGER M L, OLDEN J D. Safeguarding migratory fish via strategic planning of future small hydropower in Brazil [J]. Nature Sustainability, 2021, 4(5): 409-416.
- [11] 贺达, 董纯, 曹恒源, 等. 长江干流及主要支流纵向连通性初步研究 [C]//中国水利学会 2018 学术年会论文集. 南昌: 中国水利学会, 2018: 230-233.
- [12] 唐家璇, 曾庆慧, 胡鹏, 等. 近 60 年长江流域河流纵向连通性演变特征 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2022, 20(1): 40-53. (TANG Jiaxuan, ZENG Qinghui, HU Peng, et al. Evolution characteristics of river longitudinal connectivity within Yangtze River Basin in the past 60 years [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 40-53. (in Chinese))
- [13] 吕军, 汪雪格, 刘伟, 等. 松花江流域主要干支流纵向连通性与鱼类生境 [J]. 水资源保护, 2017, 33(6): 155-160. (LYU Jun, WANG Xuege, LIU Wei, et al. Longitudinal connectivity and fish habitat of main tributaries in Songhuajiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6): 155-160. (in Chinese))
- [14] 谢悦. 淮河中上游河流健康评价指标体系与方法研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [15] 范利平, 吴利桥, 林文杰. 珠江流域主要支流纵向连通性研究 [J]. 人民珠江, 2022, 43(增刊 1): 4-8. (FAN Liping, WU Liqiao, LIN Wenjie. Study on the longitudinal connectivity of major tributaries in the Pearl River Basin [J]. Pearl River, 2022, 43(Sup 1): 4-8. (in Chinese))
- [16] 方佳佳, 王烜, 孙涛, 等. 河流连通性及其对生态水文过程影响研究进展 [J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 19-26. (FANG Jiajia, WANG Xuan, SUN Tao, et al. Review of research on river connectivity and its impact on eco-hydrological process [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(2): 19-26. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 陈星, 许伟, 李昆朋, 等. 基于图论的平原河网区水系连通性评价: 以常熟市燕泾圩为例 [J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 26-29. (CHEN Xing, XU Wei, LI Kunpeng, et al. Evaluation of plain river network connectivity based on graph theory: a case study of Yanjingwei in Changshu City [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 26-29. (in Chinese))
- [19] 孟祥永, 陈星, 陈栋一, 等. 城市水系连通性评价体系研究 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2014, 42(1): 24-28. (MENG Xiangyong, CHEN Xing, CHEN Dongyi, et al. Evaluation system of urban water system connectivity [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(1): 24-28. (in Chinese))
- [20] 朱党生, 王超, 程晓冰. 水资源保护规划理论及技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [21] 刘辉风. 基于流域地貌特征的水系结构及河网片段化研究 [D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [22] 于栋. 流域水网结构及其特性评价研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [23] 王申芳, 杨晓灵, 梁雯珊. 城镇化进程中水电站建设对河流连通性的影响研究与实践 [J]. 人民珠江, 2022, 43(12): 104-112. (WANG Shenfang, YANG Xiaoling, LIANG Wenshan. Research and practice on the influence of hydropower station construction on river connectivity in the process of urbanization [J]. Pearl River, 2022, 43(12): 104-112. (in Chinese))

hydrological threshold regulation in inland arid region[J].
Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(3): 377-387.
(in Chinese))

[31] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

[32] 崔思梦, 吴梦洋, 王小军, 等. 基于水足迹与水-能源-粮食关联关系的提水灌溉系统种植结构优化[J]. 水利学报, 2023, 54(8): 967-977. (CUI Simeng, WU Mengyang, WANG Xiaojun, et al. Optimization of planting structure in pumping irrigation system based on water footprint and water-energy-grain nexus [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(8): 967-977. (in Chinese))

[33] 常奂宇, 赵勇, 桑学锋, 等. 京津冀水资源-粮食-能源-生态协同调控研究 I: 方法与模型[J]. 水利学报, 2022, 53(6): 655-665. (CHANG Huanyu, ZHAO Yong, SANG Xuefeng, et al. Research on the coordinated regulation of water resources-food-energy-ecology in Beijing-Tianjin-Hebei Region I: methods and model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(6): 655-665. (in Chinese))

[34] 张洪芬, 曾静静, 曲建升, 等. 资源高强度流动区水、能源和粮食耦合协调发展研究: 以京津冀地区为例[J]. 中国农村水利水电, 2019(5): 17-21. (ZHANG Hongfen, ZENG Jingjing, QU Jiansheng, et al. Research on the coupling coordinative degree among water-energy-food system in high-intensity flow areas: a case study of Beijing, Tianjin and Hebei Province [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(5): 17-21. (in Chinese))

[35] 王浩, 刘家宏. 引汉济渭工程在国家水资源战略布局中的作用[J]. 中国水利, 2015(14): 47-50. (WANG Hao, LIU Jiahong. Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project plays an important role in China strategy of water resources [J]. China Water Resources, 2015(14): 47-50. (in Chinese))

[36] QI Y Y, FARNOOSH A, LIN L, et al. Coupling coordination analysis of China's provincial water-energy-food nexus [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(16): 23303-23313.
(收稿日期: 2023-10-30 编辑: 施业)

+++++

(上接第 187 页)

[24] 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.

[25] PRACHEIL B M, MCINTYRE P B, LYONS J D. Enhancing conservation of large-river biodiversity by accounting for tributaries[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2013, 11(3): 124-128.

[26] 苏爱平. 东南诸河区水资源形势及管理对策浅议[J]. 水利科技, 2012(2): 6-8. (SU Aiping. A brief discussion on the water resources situation and management strategies in the Southeastern River Basin [J]. Hydraulic Science and Technology, 2012(2): 6-8. (in Chinese))

[27] 吴浩云, 唐力, 秦忠, 等. 重点河湖生态流量管控下的美丽幸福太湖流域片建设[J]. 中国水利, 2019(20): 4-6. (WU Haoyun, TANG Li, QIN Zhong, et al. Construction of the beautiful and happy Taihu Lake under the control of ecological flow of key rivers and lakes [J]. China Water Resources, 2019(20): 4-6. (in Chinese))

[28] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴: 2022 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.

[29] 万东辉, 杨芳, 解河海, 等. 西江干流四大家鱼繁殖期水库生态调度时机分析 [C]//中国水利学会 2018 学术年会论文集 (第二分册). 南昌: 中国水利学会, 2018: 183-188.

[30] 陈进, 刘志明. 近 20 年长江水资源利用现状分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(1): 1-4. (CHEN Jin, LIU Zhiming. Analysis of water resources utilization in the Changjiang River Basin in recent two decades [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(1): 1-4. (in Chinese))

[31] 柳林云, 丁毅. 长江流域水力资源与水电规划[J]. 人民长江, 2013, 44(10): 69-71. (LIU Linyun, DING Yi. Analysis on hydropower resources in Yangtze River Basin and hydropower generation planning [J]. Yangtze River, 2013, 44(10): 69-71. (in Chinese))

[32] 陈桂亚, 陈潇, 蔡淑兵, 等. 新阶段提升长江流域水能资源利用效能研究[J]. 人民长江, 2023, 54(10): 1-6. (CHEN Guiya, CHEN Xiao, CAI Shubing, et al. Study on improving water energy resources utilization efficiency of Changjiang River Basin in new stage [J]. Yangtze River, 2023, 54(10): 1-6. (in Chinese))

[33] 王浩, 王建华, 胡鹏. 水资源保护的新内涵: “量-质-域-流-生”协同保护和修复[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 1-9. (WANG Hao, WANG Jianhua, HU Peng. New connotation of water resources protection: “quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 1-9. (in Chinese))
(收稿日期: 2024-01-19 编辑: 施业)