

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2022.0005

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 J X, ZENG Q H, HU P, 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)

近 60 年长江流域河流纵向连通性演变特征

唐家璇¹, 曾庆慧¹, 胡鹏¹, 侯佳明¹, 李亨特¹, 侯虹波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. 北京市通州区推进京津冀协同发展服务中心, 北京 101125)

摘要:以长江流域为研究区,基于流域内水库、水电站、水闸和橡胶坝等 4 类拦河建筑物建设情况,采用阻隔系数法、最长连续河段占比法和区域整体法 3 种评价方法,探究近 60 年长江流域河流纵向连通性的演变特征。结果表明:基于阻隔系数法和最长连续河段占比法,2018 年长江流域 45 条主要河流中评价等级为差、劣的河流数量皆为 30 条;在时间维度上,近 60 年长江流域主要河流的纵向连通性呈逐渐恶化的趋势,其中 2000—2018 年纵向连通性恶化最为显著;在空间分布上,评价等级为劣的主要河流集中分布在岷沱江、嘉陵江和洞庭湖水系水资源二级区;基于区域整体法,2000—2018 年是长江流域二级区河流纵向连通性整体恶化的时期,2018 年长江流域 12 个水资源二级区中有 5 个二级区的河流纵向连通性评价等级为优、良,其余 7 个二级区评价等级为中、差和劣。研究结果可为长江流域河流生态系统的保护修复提供参考。

关键词:纵向连通性;河流健康;阻隔系数法;最长连续河段占比法;长江流域

中图分类号:TV214 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



水系是指由流域内所有河流、湖泊、湿地等各种水体组成的脉络相通的水网系统^[1]。河流作为水系的主体^[2],其结构和功能的连通性在维持景观生态完整性和质量^[3-5]、优化水资源配置与管理^[6]、抵御洪涝灾害^[5]、维持水体纳污和自净能力^[7]以及保证水生生物生境与鱼类洄游^[8-10]等方面具有重要作用。随着社会经济的发展,人类对水资源的高度开发利用导致许多流域出现水系衰落、河流连通性受阻的现象^[11],严重影响了河流功能的发挥。因此,需要重视流域内河流连通性的变化特征和规律,为河流结构和功能连通性的恢复提供科学的参考。

自 1988 年 Amoros 等^[12]提出河流连通性的概

念以来,国内外学者在河流连通性的定义、机制、定量计算和评价等方面做了大量工作。在河流连通性定义方面,不同研究背景的学者^[13-17]分别从生态学、河流地貌学等不同角度定义了河流连通性。Freeman 等^[14]认为在生态学背景下河流连通性是指物质、能量和生物在河流水系各组分间转移扩散的通畅程度。Hooke^[16]从河流地貌学的角度将连通性定义为河流系统中流水和沉积物的物理连接。在河流连通性机制研究方面,Ward^[18]于 1989 年提出了河流生态系统时间和空间的四维结构,成为 20 世纪 90 年代至今河流连通性评价研究重要的理论基础。在空间维度上,河流连通性机制表现为源头-河口的纵向连通,河道-河滩地/湿地/湖泊之间的横向连通

收稿日期:2021-01-19 修回日期:2021-10-09 网络出版时间:2021-10-19

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20211019.1020.002.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401302;2017YFC0404503);国家自然科学基金项目(51625904);中国水科院基本科研业务费项目(WR0145B522017);受水利部水生态安全保障人才创新团队资助项目

作者简介:唐家璇(1997—),男,安徽阜阳人,主要从事生态水文学研究。E-mail:1970397749@qq.com

通信作者:胡鹏(1985—),男,湖北松滋人,正高级工程师,博士,主要从事流域水资源保护研究。E-mail:hp5426@126.com

以及河流地表水-地下水的垂向连通;在时间维度上,河流连通性机制表现为河流水系随季节变迁而产生的动态变化^[18-21]。其中,河流纵向连通性作为受人为因素影响最显著的维度,受到许多学者^[22-24]的关注。

目前,定量计算和评价河流连通性的方法主要有指标法、累积法、水文模型法和图论法等^[19-20],其中又以指标法的研究最为普遍。如:Cote等^[25]考虑不同位置闸坝对鱼类顺流、溯流运动的不同影响,提出了树状河网连通性指数计算方法(dendritic connectivity index,DCI),并说明了其合理性及适用性;王强等^[26]采用简化的树状河网连通性指数法说明了水电梯级开发对西南地区藻渡河纵向连通性的影响较五布河更大;孙鹏等^[27]基于累积法确定了淮河水系内各河段的闸坝可通过能力,进而采用DCI法对淮河水系的纵向连通性进行评价,为未来淮河水系连通性修复可能面临的闸坝拆除次序的确定提供了参考。此后,Rivers-Moore等^[28]将不同类型拦河建筑物的阻隔特征纳入考虑范畴,提出了河流纵向连通性指数计算方法(longitudinal index,LGI)。借鉴该方法,吕军等^[29]采用阻隔系数法评价了松花江主要干支流的纵向连通性,并分析了河流连通性降低对鱼类洄游和鱼卵漂流的影响;王坤等^[30]分析了1980—2015年清水河流域水系纵向连通性的变化特征,结果表明清水河流域纵向连通性差的区域呈逐渐减少的趋势。另外,在较大空间尺度上的长时间序列河流纵向连通性研究较为缺乏,仅Duarte等^[31]对欧洲水系近百年来大坝的时空变化进行了研究,分析了大坝对河流纵向连通性的破坏,重点关注了对洄游性鱼类的影响;Nilsson^[9]采用最长连续

河段占比量化了大坝对河道的破碎作用,对全球292条大型河流进行了评价,指出104条河流的纵向连通性已受到了严重破坏。

现有研究对河流纵向连通性的评价大都采用单一方法,具有一定的局限性,缺少不同评价方法的对比及分析,并且由于数据不易获取,对国内重点流域河流纵向连通性的长系列演变规律研究不足。本文在前述研究的基础上,采用阻隔系数法、最长连续河段占比法以及新提出的区域整体法等3种不同评价方法对长江流域河流纵向连通性进行评价,以期较为全面地揭示近60年长江流域河流纵向连通性的演变特征,并对不同评价方法结果的差异进行分析,研究结果可为长江流域未来水利工程建设和水生态系统保护修复提供参考和支持。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

长江流域横跨我国西部、中部和东部,流域总面积约180万km²,约占我国国土总面积的18.8%,是我国和亚洲的第一大流域^[32]。长江流域自然资源丰富,水资源总量约占全国的35%,淡水鱼类种类约占全国的40%,湿地面积约占全国的20%,在国家未来发展战略中处于重要地位^[33-34]。流域内水系发达,分为12个水资源二级区,分别是金沙江石鼓以上、金沙江石鼓以下、岷沱江、嘉陵江、乌江、宜宾至宜昌、洞庭湖水系、汉江、鄱阳湖水系、宜昌至湖口、湖口以下干流以及太湖水系。流域内共有流域面积50 km²及以上河流10 741条,其中流域面积10 000 km²及以上的主要河流45条,见图1。

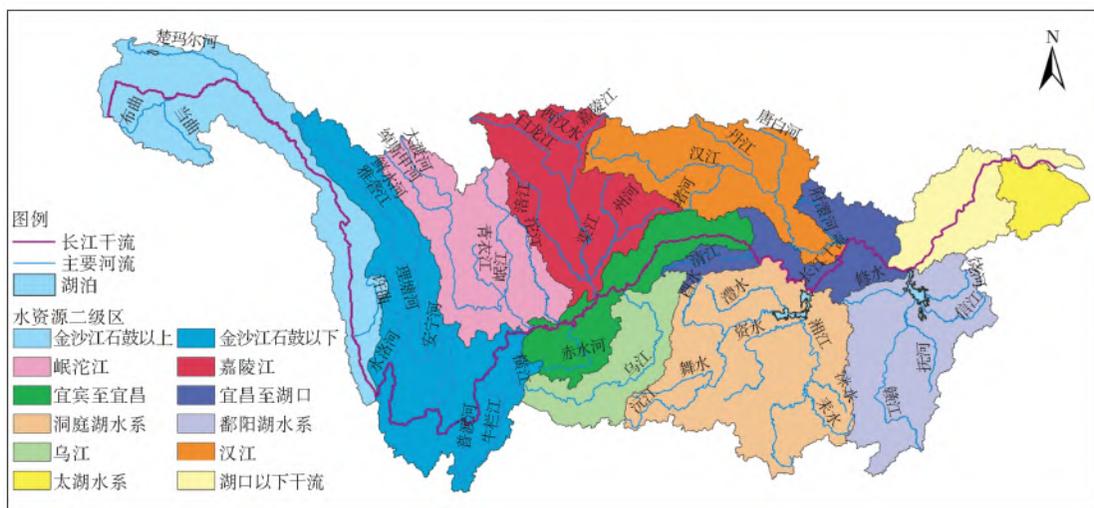


图1 长江流域水资源二级区及主要河流分布

Fig. 1 Distribution of water resources regions(class II)and major rivers in the Yangtze River basin

1.2 数据说明

根据《第一次全国水利普查公报》^[35],选取对河流纵向连通性具有重要影响的水库、水电站、水闸和橡胶坝 4 类拦河建筑物进行评价。长江流域内河流拦河建筑物信息主要来自 2010 年水利普查数据,其中包含了 2010 年已开工但尚未建成的水利工程名录。在此基础上,参考长江流域水电梯级开发相关规划,补充查阅大量网络资料,对 2010 年后建成的水利工程进行了补充。数据内容包含了水利工程名称、所在河流、经纬度坐标、开工时间、规模等基本信息。根据水利工程的建成时间,梳理不同时间节点(1960、1980、2000、2018 年)已建水利工程数量,进行不同时期河流纵向连通性的评价。其中,水库、水电站和水闸的规模分级参考《水利水电工程等级划分及洪水标准》^[36],分别根据总库容、装机容量、过闸流量确定。

2 研究方法

本研究基于长江流域内水库、水电站、水闸和橡胶坝 4 类拦河建筑物建设情况,采用 3 种不同评价方法探究近 60 年长江流域河流纵向连通性的演变特征。其中:阻隔系数法侧重于体现拦河建筑物的数量和阻隔特征对物质流、生物流、能量流、信息流畅通程度的影响;最长连续河段占比法侧重于体现拦河建筑物位置分布特征及其对以鱼类为代表的水生生物适宜生境面积的影响;区域整体法侧重于从总体上对长江流域各水资源二级区的河流纵向连通性进行评价。

2.1 阻隔系数法

阻隔系数法评价对象为长江流域范围内流域面积 10 000 km² 及以上的主要河流,共 45 条。参与评价的拦河建筑物类型包括水库、水电站、水闸和橡胶坝,其中水库规模为大、中型,水电站规模为小(1)型及以上,水闸规模为大型,橡胶坝不区分规模。阻隔系数法表征的是单位长度河段受拦河建筑物阻隔的程度,其值越大,说明阻隔越强,纵向连通性越差。阻隔系数法计算公式^[29]为

$$B_j = \frac{\sum_{i=1}^n N_i a_i}{L_j} \times 100 \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

式中: B_j 为第 j 条河流的纵向连通性指数; n 为拦河建筑物类型的数量; N_i 为第 i 种拦河建筑物的总数量; a_i 为第 i 种拦河建筑物的阻隔系数; L_j 为第 j 条河流的长度。

在对长江流域拦河建筑物类型进行整理和分析的基础上,结合相关资料和专家意见,确定了水电站、水库、水闸以及橡胶坝 4 类拦河建筑物在不同阻隔特征下的阻隔系数,见表 1。

表 1 拦河建筑物类型及阻隔系数赋值

Tab. 1 Types of river blocking structures and their barrier coefficients

| 类型 | 阻隔特征 | 阻隔系数 | 参考文献 |
|-----|----------------|------|---------|
| 水库 | 完全阻隔 | 1.00 | [29,30] |
| | 有船闸 | 0.75 | * |
| | 有过鱼设施 | 0.50 | * |
| 水电站 | 闸坝式 | 1.00 | [29,37] |
| | 引水式 | 0.50 | [29,37] |
| 水闸 | 部分时间段对鱼类洄游造成阻隔 | 0.25 | [37] |
| 橡胶坝 | 对部分鱼类洄游造成阻隔 | 0.25 | [37] |

注:“*”表示该类型拦河建筑物阻隔系数由专家参考资料后确定。

参考《水资源保护规划编制规程》^[38]和《全国水资源保护规划技术大纲》^[39]中关于河流纵向连通性评价的规定,结合长江流域主要河流的实际情况,确定了阻隔系数法河流纵向连通性的评价标准,见表 2。

表 2 阻隔系数法河流纵向连通性评价标准

Tab. 2 Evaluation criteria based on the barrier coefficient method

| 评价等级 | 优 | 良 | 中 | 差 | 劣 |
|-------|------------|-----------|-----------|-----------|---------|
| 纵向连通性 | ≤ 0.3 | (0.3,0.5] | (0.5,0.8] | (0.8,1.2] | > 1.2 |

2.2 最长连续河段占比法

最长连续河段占比法的评价对象与参评拦河建筑物同阻隔系数法。最长连续河段占比法表征的是河流内不受拦河建筑物阻隔的最长自由流动河段长度占总河长的比例,其值越大,说明河流内水生生物连续生境面积越能得到保证,纵向连通性越好。最长连续河段占比法计算公式^[40]为

$$W_j = \frac{I_{\max}}{L_j} \times 100\% \quad (2)$$

式中: W_j 为第 j 条河流的纵向连通性; I_{\max} 为河流内 2 个相邻拦河建筑物之间不受拦河建筑物阻隔的最长连续河段长度,km; L_j 含义同上。

参考 Hu 等^[40]的研究内容,结合水生生物生境需求和长江流域主要河流的实际情况,确定了基于最长连续河段占比的河流纵向连通性评价标准,见表 3。

表 3 基于最长连续河段占比法的河流纵向连通性评价标准

Tab. 3 Evaluation criteria based on the longest continuous reach ratio method

| 评价等级 | 优 | 良 | 中 | 差 | 劣 |
|---------|--------|---------|---------|---------|-----------|
| 纵向连通性/% | > 90 | (70,90] | (50,70] | (30,50] | ≤ 30 |

2.3 区域整体法

区域整体法是基于阻隔系数法衍生出的能够从面的维度评价区域河流整体纵向连通性的方法,计算公式为

$$B_k = \frac{\sum_{i=1}^n N_i a_i}{\sum_{j=1}^m L_j} \times 100 \quad (i=1,2,\dots,n;j=1,2,\dots,m) \quad (3)$$

式中: B_k 为第 k 个水资源二级区的区域整体连通性指数; m 为该二级区内流域面积 50 km^2 及以上河流的总数量; n 、 N_i 、 a_i 、 L_j 含义同阻隔系数法。

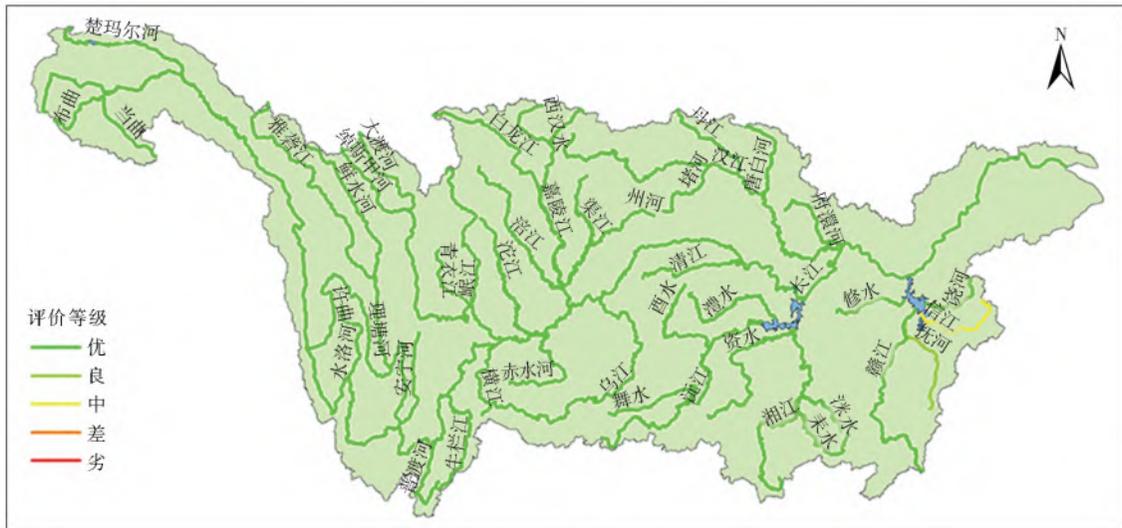
区域整体法的评价对象为长江流域 12 个水资源二级区,参与评价的拦河建筑物包括流域面积 50 km^2 及以上河流(共 10 741 条)上所有的水电站、水库、水闸和橡胶坝。由于目前各二级区内小型拦河建筑物的数量占比较大,因此在对现状年进行评

价时分别针对考虑小型拦河建筑物与不考虑小型拦河建筑物 2 种情况进行评价,以评估小型拦河建筑物对各二级区河流纵向连通性的影响程度。在不考虑小型拦河建筑物时,区域整体法的评价标准同阻隔系数法,见表 2。在考虑小型拦河建筑物后,由于计算结果的数值会远大于仅考虑大中型拦河建筑物的数值,因此对于原评价标准中等级为劣的区间进一步做了细分:[1.2,10]为劣 I,(10,20]为劣 II,(20,30]为劣 III,大于 30 为劣 IV。

3 结果与分析

3.1 阻隔系数法评价结果

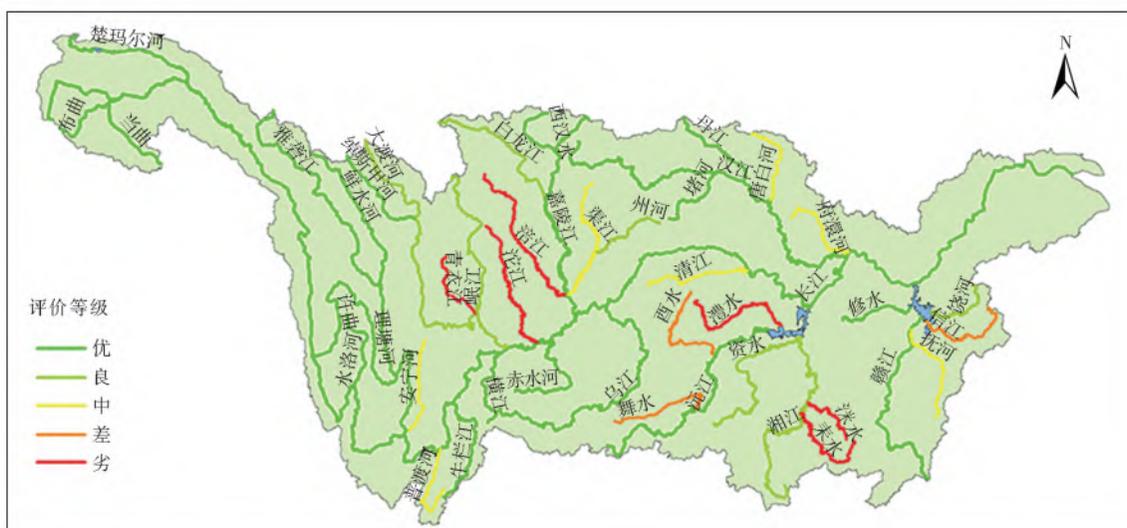
根据长江流域 45 条主要河流上拦河建筑物建设情况,采用阻隔系数法计算公式及其评价标准,分别对 1960、1980、2000 和 2018 年 4 个时间点流域内主要河流的纵向连通性进行评价,评价结果见图 2。



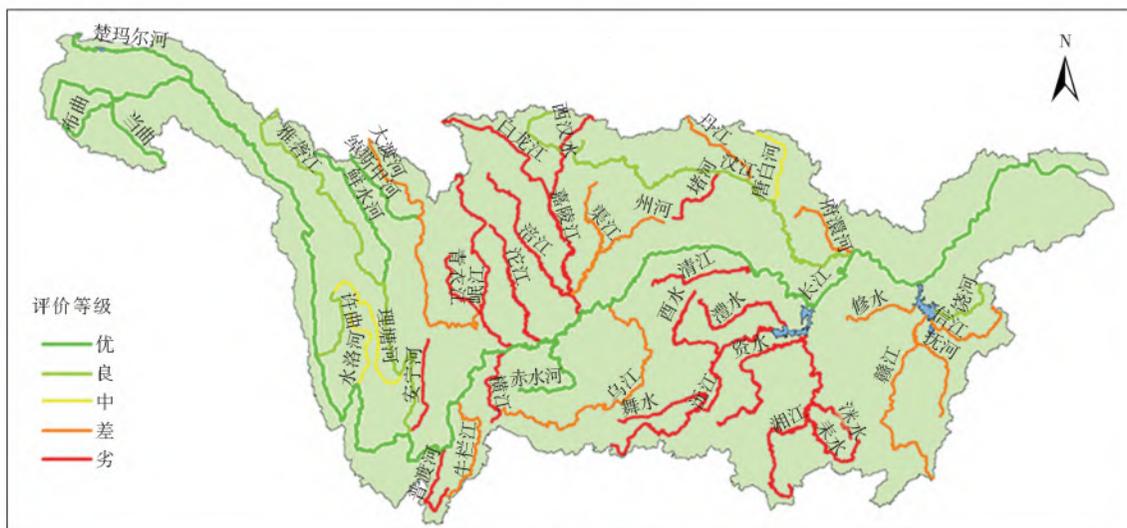
(a) 1960年



(b) 1980年



(c) 2000年



(d) 2018年

图 2 基于阻隔系数法的河流纵向连通性评价结果

Fig. 2 Evaluation results based on barrier coefficient method

图 3 展示的是 1960、1980、2000 和 2018 年 4 个时间点根据阻隔系数法评价结果确定的不同评价等级的河流数量和占比。结合图 2 和图 3 可以看出,在时间维度上,长江流域 45 条主要河流的纵向连通性呈现逐步恶化的趋势:1960 年除抚河、信江外,其余 43 条主要河流的评价等级都为优;1960—1980 年洙水成为第一条评价等级降为差、劣的河流;1980—2000 年评价等级为差、劣的河流占比逐步增长至 20.0%,数量达到 9 条;2000—2018 年评价等级为差、劣的河流占比分别增长至 24.4%、42.2%,占比之和达到了 66.6%,数量增加到 30 条。可见,2000—2018 年是长江流域主要河流纵向连通性急剧恶化的时段。

图 4 为 1960—1979 年、1980—1999 年以及 2000—2018 年 3 个时段 45 条主要河流 4 类拦河建筑物的

建设情况。根据图 4 可知,近 60 年长江流域大、中型水库和小(1)型以上水电站新增数量最多,分别占新增拦河建筑物总数的 57.3%和 22.8%,大型水闸和橡胶坝新增数量较少,仅占新增总数的 19.9%。2000—2018 年共修建大、中型水库 175 座,占大、中型水库新增总数的 66.8%;修建小(1)型及以上规模水电站 82 座,占小(1)型以上规模水电站新增总数的 78.8%;大型水闸建设数量为 42 座,占大型水闸新增总数的 67.7%;3 个时段橡胶坝共建设 29 座,其中 2000—2018 年集中建设了 24 座。总体来看,2000—2018 年大中型水库、小(1)型以上水电站、大型水闸新增数量在 3 个时段中最多,由于橡胶坝数量较少、阻隔性不强,因此,大中型水库、小(1)型及以上水电站和大型水闸的骤增对 2000—2018 年长江流域主要河流纵向连通性的恶化产生了重要影响。

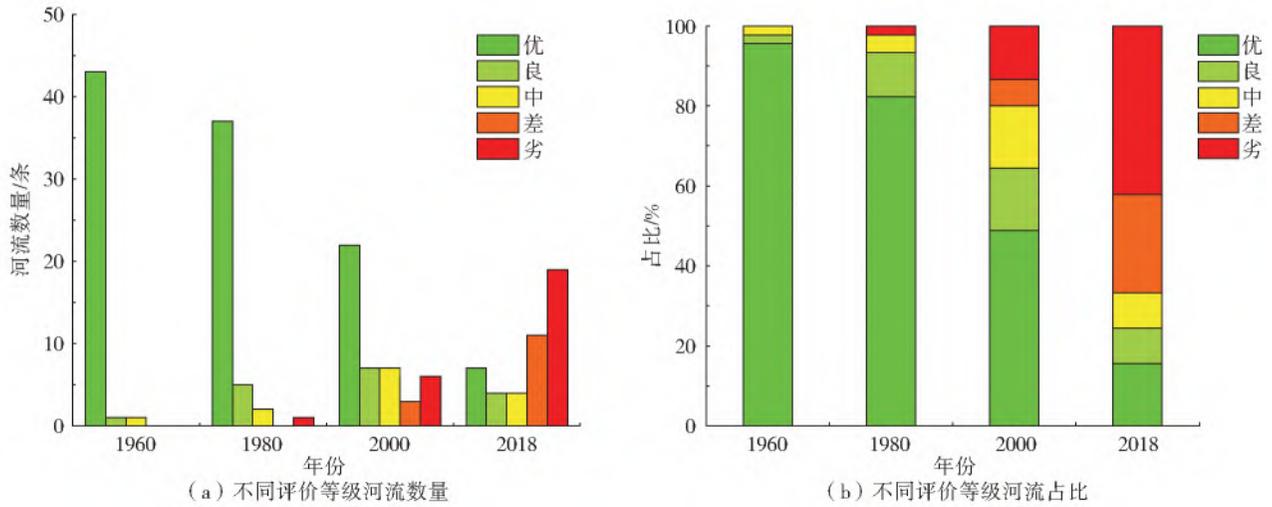


图3 基于阻隔系数法不同评价等级河流数量和占比

Fig. 3 The number and proportion of rivers in different evaluation grades based on barrier coefficient method

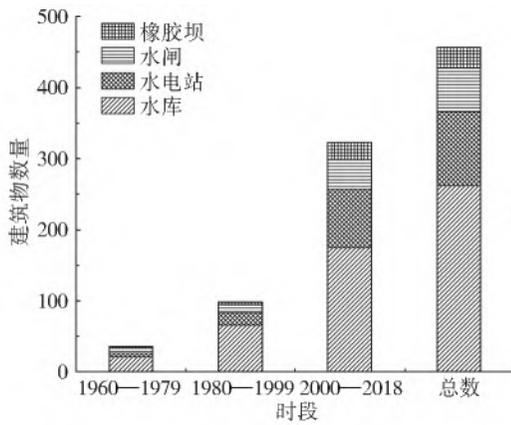


图4 不同时段4类拦河建筑物修建数量

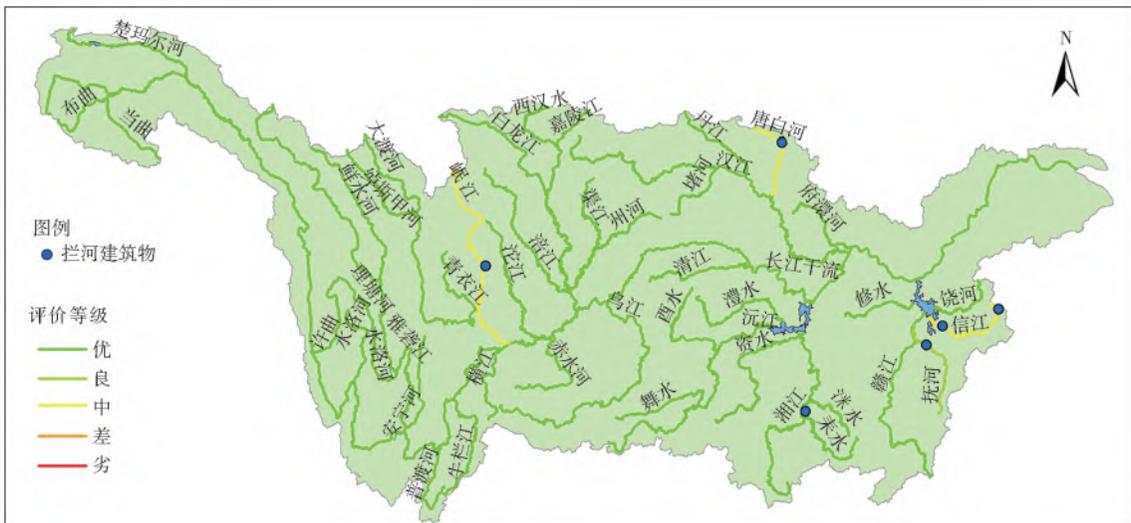
Fig. 4 Number of constructions about four types of river blocking structures in different periods

在空间分布上,根据图2中2018年评价结果,评价等级为劣的主要河流集中分布在岷沱江、嘉陵江以及洞庭湖水系水资源二级区,共14条,占评价

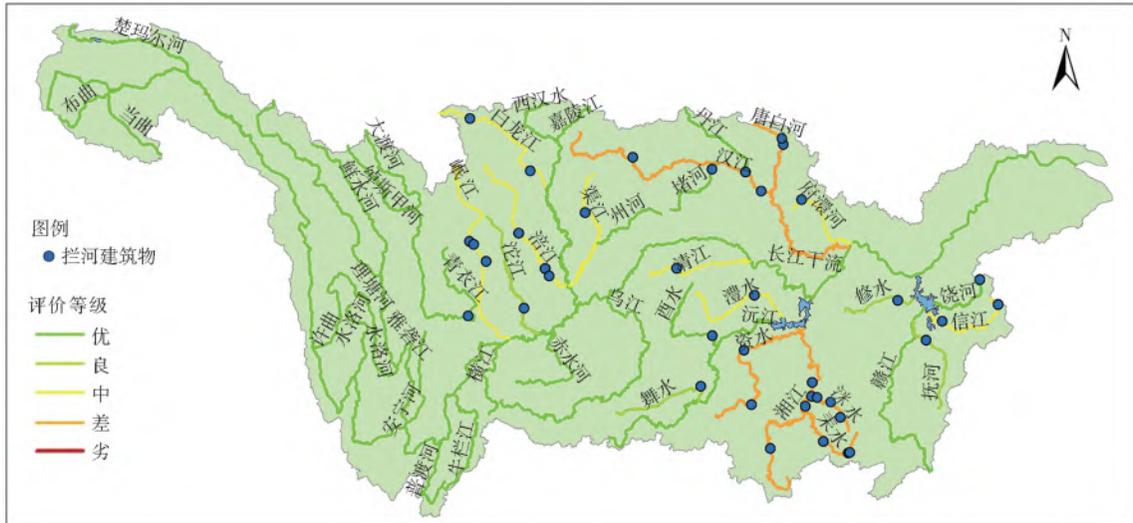
等级为劣的河流总数的73.7%。因此,要重点关注岷沱江、嘉陵江和洞庭湖水系3个二级区主要河流纵向连通性的保护和修复,从而在一定程度上恢复因物理上的阻隔所造成的河流系统物质、能量、生物和信息的传导功能的减弱和丧失。河流纵向连通功能的恢复可采取以下措施:增建鱼道等过鱼设施,帮助洄游性鱼类上溯产卵繁殖;开展增殖放流,有助于水生生物物种数量的恢复和种群向下游的迁移扩散;进行水利工程生态调度,为以鱼类为代表的水生生物创造适宜繁殖的水文、水动力条件。

3.2 最长连续河段占比法评价结果

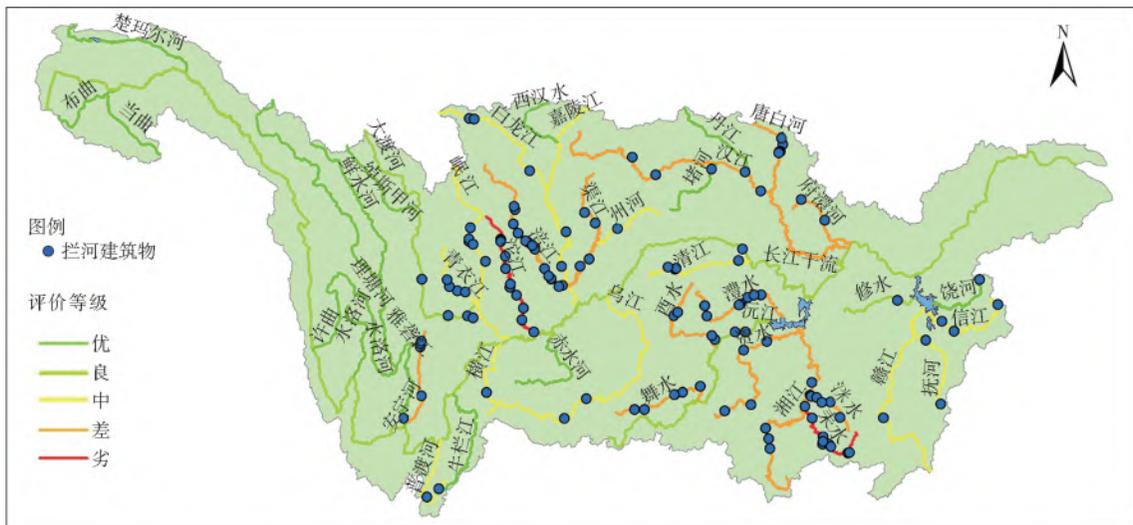
根据长江流域45条主要河流拦河建筑物的建设情况,采用最长连续河段占比法计算公式及其评价标准,分别对1960、1980、2000和2018年4个时间点流域内主要河流的纵向连通性进行了评价,评价结果及拦河建筑物位置分布见图5。



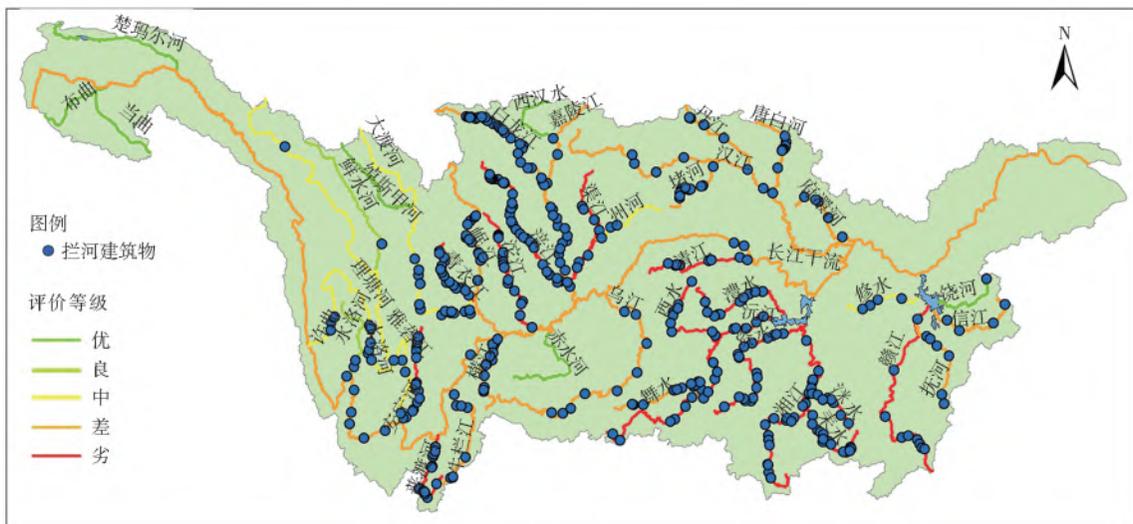
(a) 1960年



(b) 1980年



(c) 2000年



(d) 2018年

图 5 基于最长连续河段占比法的河流纵向连通性评价结果及主要拦河建筑物分布

Fig. 5 Evaluation results based on the longest continuous reach ratio method and distribution of major river blocking structures

对比图2和图5可知,最长连续河段占比法的评价结果与阻隔系数法的评价结果在整体变化规律上基本一致,除汉江和长江干流的评价等级差别较大外,其余河流的评价等级均在相邻等级范围内变化。值得说明的是:赣江、唐白河等5条河流的评价等级较阻隔系数法有所下降,说明这些河流虽然拦河建筑物数量不多或阻隔性不强,但由于分布较为分散,对河流连续生境的破碎作用更加突出;白龙江、水洛河等12条河流的评价等级较阻隔系数法有所提升,说明这些河流虽然拦河建筑物较多、阻隔性较强,但由于分布较为集中,河流内部仍保留有一定

比例的自然连通生境。

在时间维度上,最长连续河段占比法的评价结果在总体趋势上与阻隔系数法基本相同。1960、1980、2000和2018年45条主要河流的平均最长连续河段占比分别为96.5%、82.9%、66.4%和47.8%,平均最长连续河段占比在1960—1980年、1980—2000年、2000—2018年3个时段分别下降了13.6%、16.5%、18.6%。虽然平均连续河段占比在3个时段的变化相差不大,但是河流评价等级降为劣的过程基本集中在2000—2018年,从2000年的2条(占比4.4%)迅速增加至2018年的15条(占比33.3%)。见图6。

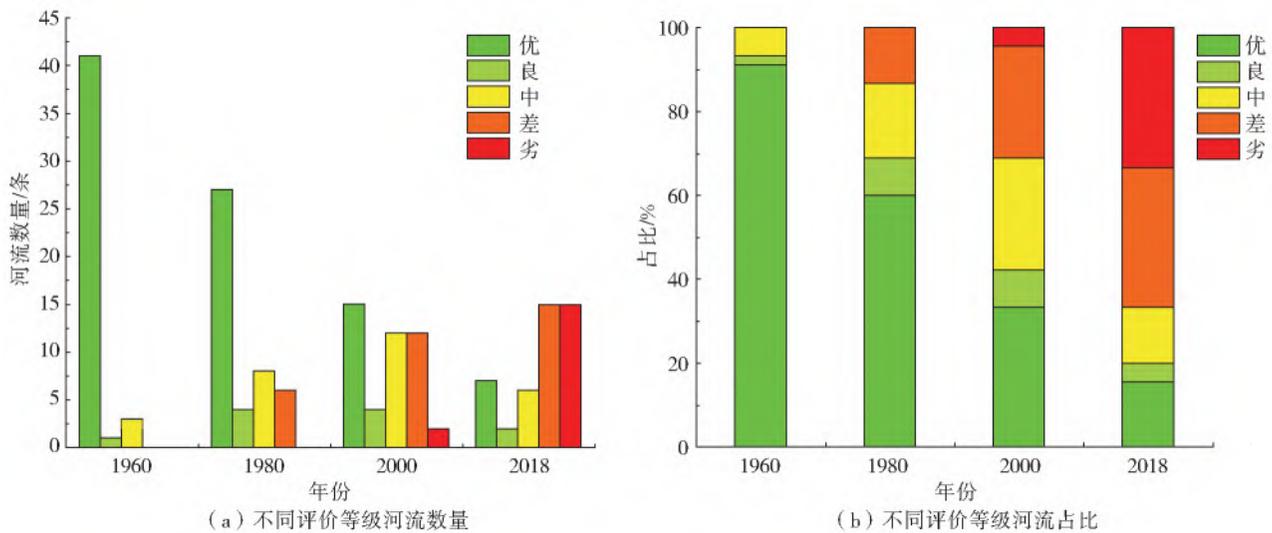


图6 基于最长连续河段占比法的不同评价等级河流数量和占比

Fig. 6 The number and proportion of rivers in different evaluation grades based on the longest continuous reach ratio method

在空间分布上,对比2种方法2018年的评价结果,最长连续河段占比法也与阻隔系数法基本一致。评价等级为劣的15条主要河流中,7条位于洞庭湖水系,2条位于岷沱江二级区,2条位于嘉陵江二级区,共11条,占评价等级为劣的河流总数的73.3%。因此,岷沱江、嘉陵江以及洞庭湖水系水资源二级区主要河流纵向连通性的保护恢复工作亟待规划和实施。

综合2种方法的评价结果,阻隔系数法和最长连续河段占比法揭示的长江流域近60年河流纵向连通性的时空演变特征基本一致,且与实际情况较为符合。如洞庭湖水系二级区沅水、澧水、资水等主要河流属于湘西水电基地,由于规划的梯级水电站逐步建成,河流纵向连通性破坏严重,在2种评价方法下评价等级都为劣。另外,2种方法的评价标准都有所依据,数据准确可靠,保证了本研究评价结果的可信度和合理性,评价结果可作为长江流域河流生态系统保护修复的参考。

3.3 区域整体法评价结果

根据长江流域各水资源二级区拦河建筑物统计数据,仅考虑大中型拦河建筑物,采用区域整体法计算公式及其评价标准,分别对1960、1980、2000和2018年4个时间点12个水资源二级区的整体河流纵向连通性进行了评价,评价结果见图7。

在时间维度上:1960年以前,长江流域各二级区的河流纵向连通性基本未受到拦河建筑物的破坏;1960—1980年,除洞庭湖水系、鄱阳湖水系和宜昌至湖口二级区外,其余二级区的河流纵向连通仅受到拦河建筑物轻微影响;1980—2000年,各二级区的河流纵向连通性未发生明显恶化,仍有7个二级区的评价等级为优;2000—2018年是长江流域二级区河流纵向连通性整体恶化的时期,仅有金沙江以上二级区评价等级仍为优,这与主要河流纵向连通性的时间变化特征基本一致。

在空间分布上:长江流域东部地区的区域整体连通性较西部地区更差,位于长江中下游的洞庭湖

水系、鄱阳湖水系和宜昌至湖口二级区是河流纵向连通性状况最为恶劣的地区。其中,洞庭湖水系二级区的河流纵向连通问题最为突出,不仅区域内主要河流纵向连通性状况堪忧,区域整体河流纵向连

通性的评价等级也自 1980 年开始即变为差。因此,洞庭湖水系二级区主要河流和区域整体纵向连通性修复工作应同步进行。

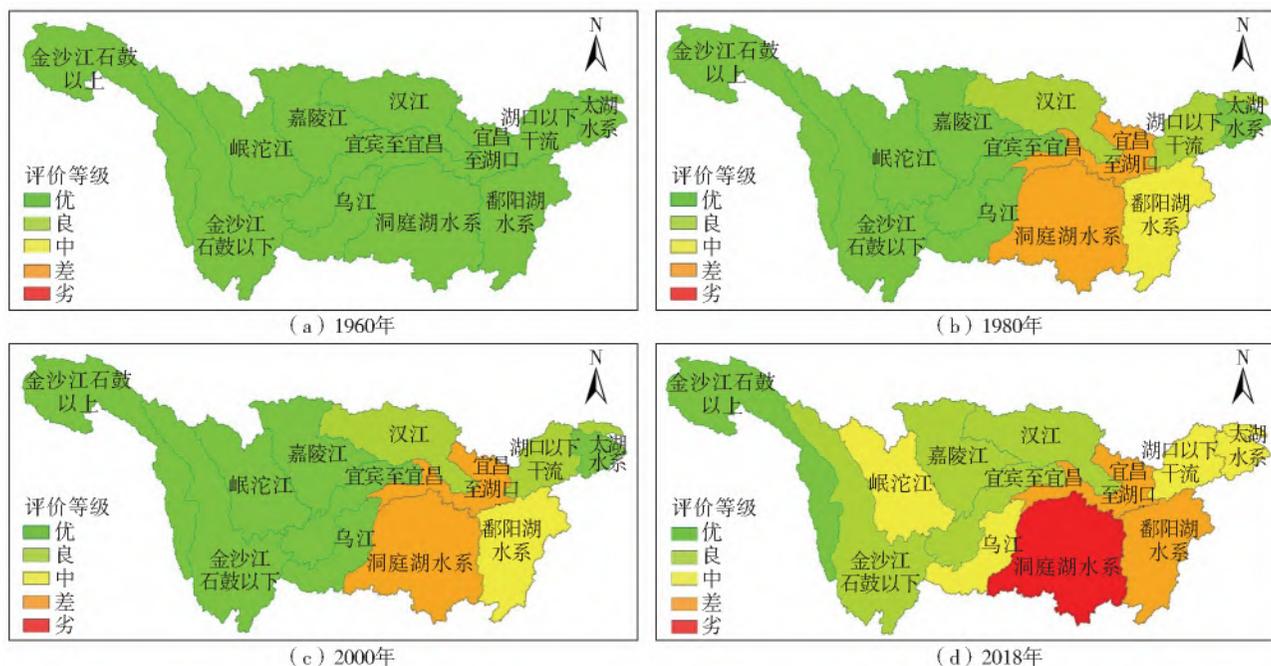


图 7 仅考虑大中型拦河建筑物的区域整体法评价结果

Fig. 7 Evaluation results based on the regional overall method considering only large and medium-sized river blocking structures

经过近 60 年的水利水电开发,2018 年 12 个二级区内小型拦河建筑物的数量占比皆已超过 95%,各二级区河流纵向连通现状的形成与小型拦河建筑物密不可分。如图 8 所示,考虑小型拦河建筑物后,2018 年长江流域评价等级为优的水资源二级区有 1 个,评价等级为劣 I 的水资源二级区有 3 个,评价等级为劣 II 的有 4 个,评价等级为劣 III 和劣 IV 的各有 2 个。对比图 7 和图 8 中 2018 年评价结果可知,小型拦河建筑物参与评价

后,12 个水资源二级区中,除金沙江石鼓以上(评价等级都为优)二级区外,其余二级区的评价结果都发生了不同程度的变化:金沙江石鼓以下、汉江、嘉陵江和宜昌至宜昌的评价等级由良变为了劣 I 和劣 II;岷沱江、湖口以下干流和乌江的评价等级由中变为了劣 I 和劣 II;太湖水系的评价等级由中变为了劣 III;宜昌至湖口、鄱阳湖水系的评价等级由差变为了劣 III 和劣 IV,洞庭湖水系的评价等级由劣 I 变为了劣 IV。

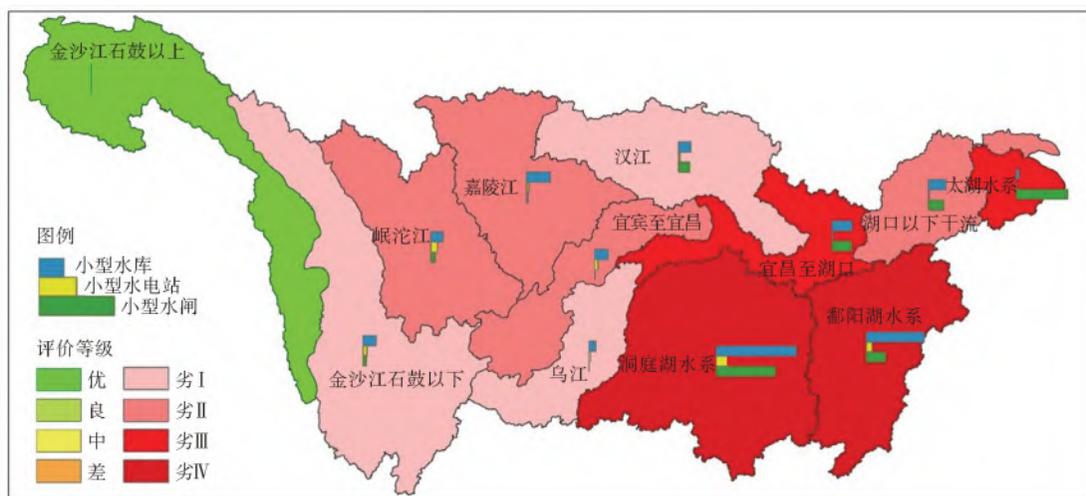


图 8 考虑全部拦河建筑物的区域整体法评价结果

Fig. 8 Evaluation results based on the regional overall method considering all river blocking structures

可以看出,数量巨大的小型拦河建筑物对于区域整体河流连通性的破坏是显著的。在评价等级发生较大变化的8个二级区中:金沙江石鼓以下、岷沱江二级区主要由小型水库、小型水电站导致;汉江、湖口以下干流二级区主要由小型水库、小型水闸导致;太湖水系二级区主要由小型水闸导致;小型水库在嘉陵江、乌江和宜宾至宜昌二级区河流纵向连通性的恶化中起主导作用。为了恢复长江流域各二级区的河流纵向连通性,应科学评估小水电的生态、经济和社会效益,率先合理退出小水电^[41]。

4 讨论

根据前述分析,长江流域大部分主要河流的阻隔系数法和最长连续河段占比法评价结果较为一

致,但汉江、长江干流在2种方法下的评价结果差异较大,且均是最长连续河段占比法的评价结果差于阻隔系数法。以汉江为例,图9展示了汉江在2018年拦河建筑物的分布情况以及基于阻隔系数法、最长连续河段占比法的评价结果。由于汉江河长较长,无大型水闸、橡胶坝,仅分布有5座大、中型水库和2座小(1)型及以上闸坝式水电站,故在阻隔系数法下评价等级为良。但7座拦河建筑物的分布较为分散,上、中、下游皆有分布,导致最长连续河段不足汉江总河长的1/3,故在最长连续河段占比法下评价等级为差,反映出梯级水电开发对于鱼类等水生生物连续生境的显著破坏性。因此,从不同的保护对象及需要重点说明的问题出发,应考虑综合采用阻隔系数法、最长连续河段占比法等不同方法。

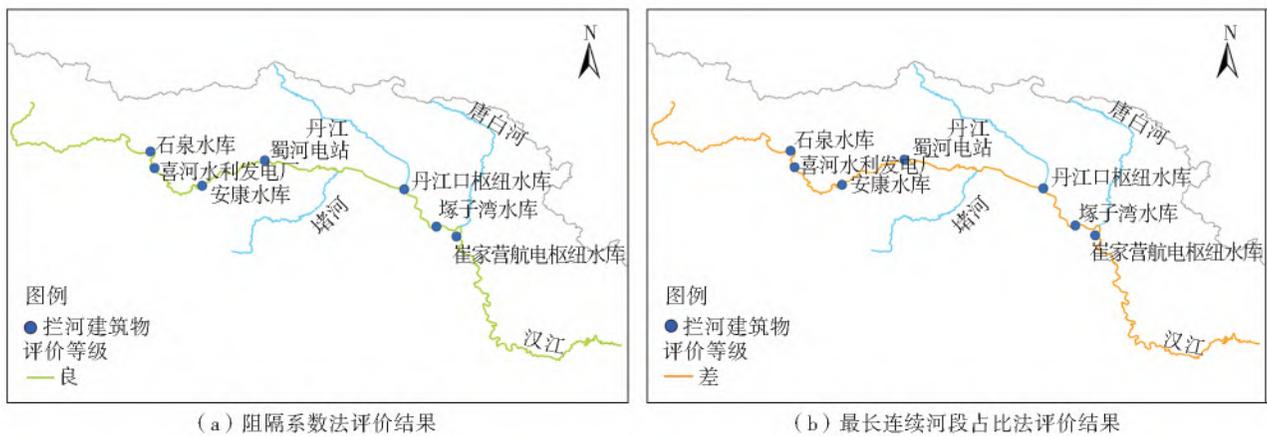


图9 汉江2018年拦河建筑物分布情况及2种方法评价结果

Fig. 9 Distribution of river blocking structures in 2018 and evaluation results based on different methods of Han River

根据长江流域相关规划,金沙江、雅砻江和大渡河未来还将继续推进梯级水电开发,其中,金沙江水电基地和大渡河水电基地目前已基本完成了中、下游的梯级水电站建设,雅砻江水电基地目前只完成了下游的梯级水电站建设。以雅砻江为例,2018年雅砻江按照阻隔系数法的评价等级为良,按照最长连续河段占比法的评价等级为中,未来中游两河口等水电站、上游阿达等水电站建成后,雅砻江的纵向连通性会受到进一步影响。为了给以鱼类为典型代表的水生生物留有足够大的连续生境,降低梯级水电站建设对河流纵向连通性的影响,在未来进行梯级水电站规划和建设时,应与相邻拦河建筑物间的距离、河流是否保留有足够长的连续河段、干流开发建设后是否有足够的支流替代生境等纳入考虑范畴,并配备升鱼机、鱼道等设施。

5 结论与展望

以长江流域作为研究区,采用阻隔系数法、最长

连续河段占比法和区域整体法,对长江流域近60年河流纵向连通性的时空演变特征进行了分析,主要结论如下:

在时间维度上,近60年来长江流域境内主要河流的纵向连通性呈明显的下降趋势,其中纵向连通性恶化最显著的时期是2000—2018年。在空间分布上,纵向连通性评价等级为劣的主要河流集中在岷沱江、嘉陵江和洞庭湖水系3个水资源二级区内。

区域整体法评价结果表明,2000—2018年是长江流域二级区河流纵向连通性整体恶化的时期,长江流域西部地区的区域整体连通性较东部地区受拦河建筑物的破坏较轻。与大中型水利工程相比,小型水利工程对区域整体河流纵向连通性的破坏更大,建议合理有序退出长江流域小水电。

本文采用的3种评价方法各有侧重:阻隔系数法体现的是拦河建筑物数量和阻隔特征对单条河流纵向连通性的影响;最长连续河段占比法体现的是

拦河建筑物分布位置对单条河流连续生境的破坏;区域整体法体现的是区域内拦河建筑物总数、阻隔特征对区域整体河流纵向连通性的影响。为了更加全面地反映河流纵向连通性的变化,可以综合参考不同方法的评价结果。

参考文献(References):

- [1] 王中根,李宗礼,刘昌明,等. 河湖水系连通的理论探讨[J]. 自然资源学报, 2011, 26(3): 523-529. (WANG Z G, LI Z L, LIU C M, et al. Discussion on water cycle mechanism of interconnected river system network[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3): 523-529. (in Chinese)) DOI:1000-3037(2011)03-0523-07.
- [2] 孙鸿烈. 中国资源科学百科全书:上册[M]. 东营:中国石油大学出版社, 2000. (SUN H L. China encyclopedia of resources science: Volume 1[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2000. (in Chinese))
- [3] NADEAU T L, RAINS M C. Hydrological connectivity between headwater streams and downstream waters: how science can inform policy[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(1): 118-133. DOI:10.1111/j.1752-1688.2007.00010.x.
- [4] PRINGLE C. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? [J]. Hydrological Processes, 2003, 17(13): 2685-2689. DOI: 10.1002/hyp.5145.
- [5] 李原园, 郦建强, 李宗礼, 等. 河湖水系连通研究的若干问题与挑战[J]. 资源科学, 2011, 33(3): 386-391. (LI Y Y, LI J Q, LI Z L, et al. Issues and challenges for the study of the interconnected river system network[J]. Resources Science, 2011, 33(3): 386-391. (in Chinese)) DOI:1007-7588(2011)03-0386-06.
- [6] 崔国韬, 左其亭, 李宗礼, 等. 河湖水系连通功能及适应性分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(2): 1-5. (CUI G T, ZUO Q T, LI Z L, et al. Analysis of function and adaptability for interconnected river system network[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(2): 1-5. (in Chinese)) DOI:1000-7709(2012)02-0001-05.
- [7] 张欧阳, 卜惠峰, 王翠平, 等. 长江流域水系连通性对河流健康的影响[J]. 人民长江, 2010, 41(2): 1-5, 17. (ZHANG O Y, PU H F, WANG C P, et al. Impact of drainage connectivity on river health in Yangtze River basin[J]. Yangtze River, 2010, 41(2): 1-5, 17. (in Chinese)) DOI:1001-4179(2010)02-0001-05.
- [8] GOSSET C, RIVES J, LABONNE J. Effect of habitat fragmentation on spawning migration of brown trout (*Salmo trutta* L.) [J]. Ecology of Freshwater Fish, 2006, 15(3): 247-254. DOI: 10.1111/j.1600-0633.2006.00144.x.
- [9] NILSSON C. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems [J]. Science, 2005, 308(5720): 405-408. DOI:10.1126/science.1107887.
- [10] LI R N, CHEN Q W, DUAN C. Ecological hydrograph based on *Schizothorax chongi* habitat conservation in the dewatered river channel between Jinping cascaded dams [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(1): 54-63. DOI:10.1007/s11431-011-4614-7.
- [11] JUNKAI Z, LIXIAN L, AISHE Z, et al. A new approach for the health assessment of river systems based on interconnected water system networks [J]. Journal of Resources and Ecology, 2017, 8(3): 251-257. DOI:10.5814/j.issn.1674-764x.2017.03.005.
- [12] AMOROS C, ROUX A L. Interaction between water bodies within the floodplains of large rivers: function and development of connectivity [J]. Münstersche Geographische Arbeiten, 1988, 29(1): 125-130.
- [13] HERRON N, WILSON C. A water balance approach to assessing the hydrologic buffering potential of an alluvial fan [J]. Water Resources Research, 2001, 37(2): 341-351. DOI:10.1029/2000WR900253.
- [14] 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. DOI:10.1111/j.1752-1688.2007.00002.x.
- [15] 张欧阳, 熊文, 丁洪亮. 长江流域水系连通特征及其影响因素分析 [J]. 人民长江, 2010, 41(1): 1-5, 78. (ZHANG O Y, XIONG W, DING H L. Drainage connectivity characteristics and influential factors of Yangtze River basin [J]. Yangtze River, 2010, 41(1): 1-5, 78. (in Chinese)) DOI:1001-4179(2010)01-0001-05.
- [16] HOOKE J M. River channel adjustment to meander cutoffs on the River Bollin and River Dane, northwest England [J]. Geomorphology, 1995, 14(3): 235-253. DOI:10.1016/0169-555X(95)00110-Q.
- [17] VAN LOOY K, PIFFADY J, CAVILLON C, et al. Integrated modelling of functional and structural connectivity of river corridors for European otter recovery [J]. Ecological Modelling, 2014, (273): 228-235. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2013.11.010.
- [18] WARD J V. The four-dimensional nature of lotic ecosystems [J]. Journal of the North American Benthological Society, 1989, 8(1): 2-8. DOI: 10.2307/1467397.
- [19] 夏继红, 陈永明, 周子晔, 等. 河流水系连通性机制及

- 计算方法综述[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 780-787. (XIA J H, CHEN Y M, ZHOU Z Y, et al. Review of mechanism and quantifying methods of river system connectivity[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(5): 780-787. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.05.016.
- [20] 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 J J, WANG X, SUN T, et al. Review of research on river connectivity and its impact on eco-hydrological process[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2018, 29(2): 19-26. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2018.02.04.
- [21] 丰华丽, 王超, 李剑超. 河流生态与环境用水研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002(3): 19-23. (FENG H L, WANG C, LI J C. Advances in research of ecological and environmental water consumption of river basins[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2002, 30(3): 19-23. (in Chinese)) DOI: 1000-1980(2002)03-0019-05.
- [22] GRILL G, DALLAIRE C O, CHOUNARD E F, et al. Development of new indicators to evaluate river fragmentation and flow regulation at large scales: A case study for the Mekong River basin[J]. *Ecological Indicators*, 2014, (45): 148-159. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.03.026.
- [23] FULLER M R, DOYLE M W, STRAYER D L. Causes and consequences of habitat fragmentation in river networks[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2016, 1355: 31-51. DOI: 10.1111/nyas.12853.
- [24] 窦明, 张远东, 张亚洲, 等. 淮河流域水系连通状况评估[J]. 中国水利, 2013(9): 21-23. (DOU M, ZHANG Y D, ZHANG Y Z, et al. Assessment on the water system interconnection degree of Huaihe River basin[J]. *China Water Resources*, 2013(9): 21-23. (in Chinese)) DOI: 1000-1123(2013)09-0021-03.
- [25] 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. DOI: 10.1007/s10980-008-9283-y.
- [26] 王强, 庞旭, 李秀明, 等. 水电梯级开发对河流生境质量及纵向连通性影响评价: 以五布河和藻渡河为例[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5508-5516. (WANG Q, PANG X, LI X M, et al. Assessment method for the influence of hydroelectric dams on the physical habitat quality and longitudinal connectivity of rivers: A case study of the Wubu and Zaodu rivers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15): 5508-5516. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201808261822.
- [27] 孙鹏, 王琳, 王晋, 等. 闸坝对河流栖息地连通性的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(2): 53-56. (SUN P, WANG L, WANG J, et al. A study of the effect of sluices and dams on river habitat connectivity[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(2): 53-56. (in Chinese)) DOI: 1007-2284(2016)02-0053-04.
- [28] RIVERS-MOORE N, MANTEL S, RAMULIFO P, et al. A disconnectivity index for improving choices in managing protected areas for rivers[J]. *Aquatic Conservation Marine & Freshwater Ecosystems*, 2016, 26: 29-38. DOI: 10.1002/aqc.2661.
- [29] 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, 174. (LYU J, WANG X G, LIU W, et al. Longitudinal connectivity and fish habitat of main tributaries in Songhuajiang River basin[J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(6): 155-160, 174. (in Chinese)) DOI: 1004-6933(2017)06-0155-06.
- [30] 王坤, 许超, 王文杰, 等. 1980—2015年清水河流域水系连通变化研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 747-754. (WANG K, XU C, WANG W J, et al. Study on the change of river connectivity in Qingshui River basin from 1980 to 2015[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(4): 747-754. (in Chinese)) DOI: 10.13209/j.0479-8023.2019.043.
- [31] DUARTE G, SEGURADO P, HAIDVOGL G, et al. Damn those damn dams: Fluvial longitudinal connectivity impairment for European diadromous fish throughout the 20th century[J]. *Science of The Total Environment*, 2020(761): 143293. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143293.
- [32] 丁肇慰, 肖能文, 高晓奇, 等. 长江流域2000—2015年生态系统质量及服务变化特征[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1308-1314. (DING Z W, XIAO N W, GAO X Q, et al. Changes of ecosystem quality and services between 2000 and 2015 in Yangtze River basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1308-1314. (in Chinese)) DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.03.24.
- [33] 刘录三, 黄国鲜, 王璠, 等. 长江流域水生态环境安全主要问题、形势与对策[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1081-1090. (LIU L S, HUANG G X, WANG F, et al. Main problems, situation and countermeasures of water eco-environment security in the Yangtze River basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1081-1090. (in Chinese)) DOI: 10.

- 13198/j. issn. 1001-6929. 2020. 04. 30.
- [34] 王政祥,徐高洪,丁志立. 长江流域水资源评价[J]. 人民长江,2011,42(18):58-61. (WANG Z X, XU G H, DING Z L. Assessment on water resources of Yangtze River[J]. Yangtze River, 2011, 42(18): 58-61. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2011. 18. 011.
- [35] 中华人民共和国水利部,国家统计局. 第一次全国水利普查公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics. Bulletin of first national census for water [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese))
- [36] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程等级划分及洪水标准. SL 252—2017[S]. 北京:中国水利水电出版社,2017(Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for rank classification and flood protection criteria of water and hydropower projects. SL 252-2017 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2017(in Chinese))
- [37] 侯佳明. 基于改进阻隔系数法的全国主要河流纵向连通性评价[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2020. (HOU J M. Evaluation of longitudinal connectivity of major rivers in China based on improved barrier coefficient method[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020. (in Chinese))
- [38] 中华人民共和国水利部. 水资源保护规划编制规程. SL 613—2013[S]. 北京:中国水利水电出版社,2013. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code of practice for water resources protection planning. SL 613-2013 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese))
- [39] 水利部水利水电规划设计总院. 全国水资源保护规划技术大纲[Z]. 北京:水利部水利水电规划设计总院,2012. (General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources. National water resources protection planning technical outline[Z]. Beijing: General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, 2012. (in Chinese))
- [40] HU P, ZENG Q H, WANG J H, et al. Identification of hotspots of threatened inland fish species and regions for restoration based on longitudinal river connectivity[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 290. DOI: 10. 1016/j. jenvman. 2021. 112572.
- [41] 王秘学,谭界雄,李麒. 长江大保护下的小水电退出探讨[J]. 中国水利,2020(9):40-43. (WANG M X, TAN J X, LI Q. Preliminary studies on small dam removal for the protection of the Yangtze River[J]. China Water Resources, 2020(9): 40-43. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: SLZG. 0. 2020-09-018.

Evolution characteristics of river longitudinal connectivity within Yangtze River basin in the past 60 years

TANG Jiakuan¹, ZENG Qinghui¹, HU Peng¹, HOU Jiaming¹, LI Hengte¹, HOU Hongbo²

(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. Beijing Tongzhou District Service Center of Advance of Beijing-Tianjin-Hebei Cooperative Development, Beijing 101125, China)

Abstract: In the context of ecology, river connectivity refers to the smoothness of the transfer and diffusion of materials, energy and organisms among the various components of the river system. With the development of society and economy, the rapid human development and utilization of water resources has led to the decline of water systems and obstructed river connectivity in many river basins, which has seriously affected the function of rivers, such as maintaining the water body's capacity of holding pollution and self-purification, ensuring the habitat of aquatic organisms and fish migration. As an important area of the national future development strategy, conducting evaluation and analysis about longitudinal connectivity of rivers within the Yangtze River basin to reveal its temporal and spatial evolution characteristics has great significance to the future construction of water conservancy projects and the protection and restoration of water ecosystems.

Three different evaluation methods are adopted to explore the evolution characteristics of the rivers longitudinal connectivity within Yangtze River basin by taking construction data of four types of river blocking structures including reservoirs, hydropower stations, sluices, and rubberdams. Among them, the barrier coefficient method focuses on barrier characteristics of blocking structures on material flow, biological flow, energy flow, and information flow. The longest continuous reach ratio method focuses on embodying the distribution characteristics of blocking structures and their impact on suitable habitat areas for aquatic organisms represented by fish. The regional overall method focuses on the overall evaluation of the river's longitudinal connectivity of the water resources regions(class II) within the Yangtze River basin.

Evaluation results of barrier coefficient method: among the 45 major rivers, in 1960, except Fu River and Xin Jiang, the longitudinal connectivity of the other 43 major rivers are rated as excellent. In 1980, 37 rivers are rated as excellent, in 2000, there

are 9 rivers with poor longitudinal connectivity while in 2018, the number has increased to 30. Evaluation results of the longest continuous reach ratio method: among the 45 major rivers, in 1960, the longitudinal connectivity of 41 rivers are rated as excellent. In 1980, there are 27 rivers with excellent evaluation grades. In 2000, there are 14 rivers with inferior evaluation grades. In 2018, there were 15 rivers each with poor evaluation grades. Evaluation results of the regional overall method: among the 12 water resources regions (class II), in 1960, 12 water resources regions (class II) have excellent evaluation grades. In 1980 and 2000, there are 7 water resources regions(class II) with excellent evaluation grades. In 2018, there are 3 water resources regions (class II) with poor evaluation grades.

The evaluation results of the barrier coefficient method and the longest continuous reach ratio method show that: In the time dimension, the longitudinal connectivity of rivers within the Yangtze River basin has gradually declined in the past 60 years, and the deterioration of longitudinal connectivity from 2000 to 2018 was the most significant. In spatial distribution, rivers with inferior evaluation grades are mainly distributed in three water resources regions (class II) including Mintuo River water resources region, Jialing River water resources region, and Dongting Lake water resources region. The evaluation results of the regional method show that the longitudinal connectivity of the water resources regions (class II) within Yangtze River basin deteriorated integrally in 2000-2018, and the overall regional connectivity of the western part of the Yangtze River basin is less damaged by the river blocking structures than the eastern part. Compared with large and medium-sized water conservancy projects, small water conservancy projects have more damage to the longitudinal connectivity. It is recommended to withdraw from the small hydropower stations in the Yangtze River basin in a reasonable and orderly manner.

Key words: longitudinal connectivity; river health; barrier coefficient method; longest continuous reach ratio method; Yangtze River basin

