

人类活动对河湖水系连通的影响评估

左其亭, 崔国韬

(郑州大学水利科学与工程学院 水科学研究中心, 郑州 450001)

摘要: 河湖水系承载着人类赖以生存的水资源,也支撑着经济社会的可持续发展。在自然因素和人类活动双重影响下,河湖水系不断发生着改变,也影响着人类生存和发展。特别是在人类活动日益剧烈的背景下,研究人类活动对河湖水系连通的影响是一个非常重要的科研问题,也是河湖水系连通工程实践的一个关键问题。本文从自然和人工两个方面分析了河湖水系连通的影响因素,阐述了人类活动对河湖水系连通的影响过程,并从河湖水系连通关系、河湖水系功能(自然角度)、河湖水系连通功能(社会角度)三个方面归纳了人类活动的正负面影响;在此基础上,提出了有针对性的影响量化评估方法,便于宏观角度量化和分析人类活动对河湖水系连通的影响。本研究以人类活动剧烈的淮河流域为实例应用,分析了人类活动对淮河水系的影响评价结果。

关键词: 河湖水系连通;人类活动;河湖水系;影响;量化评估

DOI: 10.11821/dlxb202007011

1 引言

水是人类赖以生存和发展的自然资源,支撑着经济社会的可持续发展。河湖水系是水的主要载体,为人类提供多种多样的资源和物质服务,也同时维系着生态环境系统的稳定。随着人类改造自然能力的提高,人们通过各类水利工程和水资源配置网络的建设,改变了自然河湖水系连通关系,充分开发利用了水资源。但与此同时,中国经济社会的快速发展,各地区对水资源的需求不断增长,再加上自然资源禀赋和水资源分布不均匀,从格局角度出发,水资源分布格局与经济社会需水格局也存在差异,造成经济社会格局与水资源格局之间的不匹配^[1-2]。此外,水污染、水生态危机、防洪除涝风险加大,严重制约了中国经济社会的可持续发展。

作为服务于建设生态文明社会、社会经济可持续发展等国家战略的一种重要手段,河湖水系连通已经成为中国新时期治水策略之一,全国各地区已经进行了广泛实践^[3]。众多专家、学者已经对河湖水系连通进行了广泛研究,包括理论框架^[3]、内在机理^[4]、连通方案的分析^[5-14]、快速城市化的影响^[15]、城市湖泊群河湖水系连通的水环境改善^[16]、河湖水系连通变异下的流域水文干旱演变^[17]等。从河湖水系连通关系而言,河湖水系将物质流(水、泥沙、生物、污染物等)、能量流(流量、流速等)和信息流(水体生命信息、人类信息等)进行传递交换,进而最终趋于动态平衡^[2,9]。这些河湖水系之间的“量质交换”相互作用的有效性和合理性也决定着河湖水系健康状况。当前,人类活动已经成为

收稿日期: 2019-06-29; 修订日期: 2020-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1803241, 51779230); 中央水利前期工作基金项目(2010518) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.U1803241, No.51779230; Preliminary Project Fund from the Ministry of Water Resources, No.2010518]

通讯作者: 左其亭(1967-), 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

影响和改变河湖水系的主要因素和驱动力。从人类影响河湖水系连通的主要目的（价值流）来看，河湖水系连通主要是通过工程措施提高水资源配置能力、改善水生态环境和提高防洪除涝能力，从而支撑经济社会发展。因此，本文将分析人类活动对河湖水系连通的影响，并提出有针对性的宏观量化评估方法，并以淮河流域为实例进行研究，为河湖水系连通的进一步研究与实践提供支撑。

2 人类活动对河湖水系连通的影响分析

河湖水系连通主要是指相互间有一定水力、水资源联系的江河湖泊等水体。影响河湖水系连通主要有两个方面：① 自然因素：包括洪水、气候变化、河床淤积和地形地貌变迁等^[18-19]，例如著名的黄河夺淮事件^[20]；② 人类活动：包括水系连通工程、人工调蓄、河道利用及整治工程、用水排污和土地资源开发利用等，如古老的尼罗河引水灌溉工程和当今的南水北调工程。

河湖水系连通关系是自然因素和人类活动对河湖水系连通影响的关键。其既包括河流、湖泊、湿地等自然水体和水库、人工河道、人工湖泊等人工水体的物理连接和格局分布的情况，也包括水体之间的“量质交换”^[2, 21-22]。河湖水系连通关系的改变，不仅会影响水资源的分布和供给情况、水动力条件和地貌塑造能力，也同样改变着水生生物和周边环境^[23-24]。在当前经济社会的强劲驱动和人类活动愈加剧烈的背景下，河湖水系已经不再是纯自然状态下的河湖水系，特别是各种涉水工程的建设，维系、重塑或新建满足一定功能目标的水系连接通道，直接或间接地改变了自然河湖水系连通关系，改变了物质流、能量流、信息流的构成和分配，影响到河湖水系的自然角度和社会角度的功能，使得漫长演变形成的河湖水系关系被人类活动在短期内进行了改造。其影响过程如图1所示。

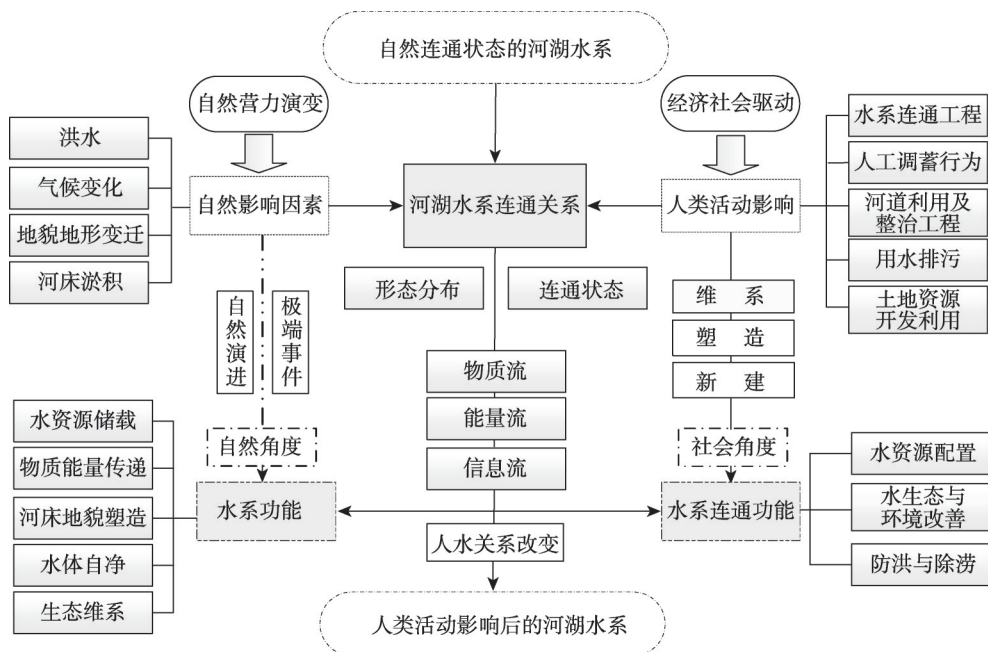


图1 人类活动对河湖水系连通的影响过程示意图

Fig. 1 Schematic of human activities affecting interconnected river system network

以人类为中心、带有目的性的人类活动现已成为影响河湖水系连通的直接因素,也是当前河湖水系连通研究和实践的主要研究对象。因此,分析人类活动对河湖水系连通关系的影响,进而分析对自然角度的和社会角度的河湖水系连通功能的影响是很重要的。其主要正负面影响如表1所示^[25],这指导着后文构建影响量化评估指标。

表1 人类活动对河湖水系连通的影响分析

Tab. 1 Influences of human activities on interconnected river system network

正负影响	三个层面		
	河湖水系连通关系	↔	↔
		河湖水系功能 (自然角度)	河湖水系连通功能 (社会角度)
正面影响	<ul style="list-style-type: none"> 增强水系系统内部及外部联系 增加流域的水系连接度 提高水系分形维数 人工连通水域面积 	<ul style="list-style-type: none"> 增强区域水循环能力 增加水资源储载空间 汇集和储存水分,保护动植物生存环境 增加了水资源可利用量 提高了河湖的纳污能力 	<ul style="list-style-type: none"> 水利建设与发展,支撑经济社会可持续发展 提高水资源配置能力 改善水生态与环境 增强防洪、除涝能力
负面影响	<ul style="list-style-type: none"> 改变了自然演变形成的符合自然规律的水系连通关系 过滤或阻隔物质流、能量流、信息流的传递 	<ul style="list-style-type: none"> 减弱物质能量传输,改变了自然水文情势 改变河湖水系周边的水质水量分布,对生态系统形成威胁 改变水文循环,水文破碎化,破坏连续性 	<ul style="list-style-type: none"> 经济合理性问题、投资量大、回收期长、正常运行风险 生态和环境的破坏有时是不可逆的 移民及社会稳定问题

3 人类活动对河湖水系连通影响量化评估

3.1 评估指标体系

河湖水系连通是水与社会、经济、生态、环境等諸多要素相互作用、协同耦合而成的复合巨系统。并且当前各种涉水人类活动广泛,对河湖水系连通影响复杂。因此,人类活动对河湖水系连通影响评估是非常复杂的。本研究将评估系统按其组成层次构筑成一树状层次结构,构建了以目标层、准则层、分类层、指标层4个层次构成的量化指标体系,从而量化评估人类活动分别对河湖水系连通总体、河湖水系连通关系、河湖水系功能和河湖水系连通功能的影响。具体的量化指标体系框架如图2所示。

针对表1中人类活动对河湖水系连通的正负面影响,本文将其划分为3个方面(即河湖水系连通关系、河湖水系功能和河湖水系连通功能)的具体影响。在指标体系构建时,参考前人相关文献、实践的常用评价指标,尽量采取宏观的、直观的、易获取的指标,选取了表2所示的影响量化指标体系,从而在宏观层面上尽可能体现人类活动对河湖水系连通的影响。计算选定指标的变化率时,使用现状与历史时期没有或较少进行人工连通情况的指标之差与现状指标的比值。指标相关介绍如表2所示。

3.2 量化评估方法

3.2.1 单指标量化方法 采用分段线性隶属函数量化描述方法。在指标体系中,各个指标均有一个子影响系数(Sub Influence Coefficient, SIC),取值范围为[0, 1]。本文拟定各指标均存在7个代表性数值,将指标评估分为7级:造成很大负面影响、产生较大负面影响、造成略微负面影响、未产生明显作用、产生略微正面作用、产生较大正面作用和产生很大正面作用,其对应的代表性数值分别为:0、0.2、0.35、0.5、0.65、0.8、1^[26-27]。例如,某个指标的SIC = 0.75,此时0.65 < SIC < 0.8,则表示人类活动对河湖水系连通在该方面有较大的正面影响。

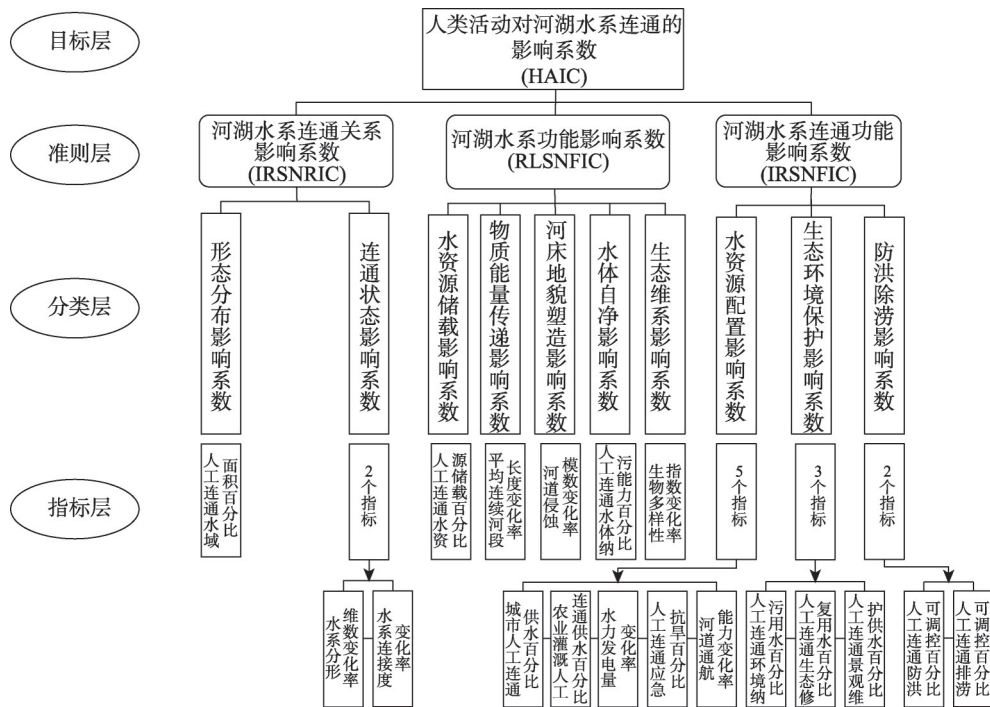


图2 人类活动对河湖水系连通影响量化指标体系框架

Fig. 2 Quantitative evaluation framework of human activities affecting interconnected river system network

正向指标（如水系连接度变化率），是指子影响系数随着指标值的增加而增加；逆向指标（如平均连续河段长度变化率），是指子影响系数随着指标值的增加而减小。例如，正向指标子影响系数的计算公式如公式（1）^[28]：

$$SIC_i = \begin{cases} 0 & x_i \leq a_i \\ 0.2 \times \left(\frac{x_i - a_i}{b_i - a_i} \right) & a_i < x_i \leq b_i \\ 0.2 + 0.15 \times \left(\frac{x_i - b_i}{c_i - b_i} \right) & b_i < x_i \leq c_i \\ 0.35 + 0.15 \times \left(\frac{x_i - c_i}{d_i - c_i} \right) & c_i < x_i \leq d_i \\ 0.5 + 0.15 \times \left(\frac{x_i - d_i}{e_i - d_i} \right) & d_i < x_i \leq e_i \\ 0.65 + 0.15 \times \left(\frac{x_i - e_i}{f_i - e_i} \right) & e_i < x_i \leq f_i \\ 0.8 + 0.2 \times \left(\frac{x_i - f_i}{g_i - f_i} \right) & f_i < x_i \leq g_i \\ 1 & g_i < x_i \end{cases} \quad (1)$$

式中： SIC_i 为第*i*个指标的子影响系数； a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 、 e_i 、 f_i 和 g_i 分别为第*i*个指标的7个评估等级的代表性数值。

3.2.2 多指标的综合描述 针对河湖水系连通关系影响系数（IRSNRIC）、河湖水系功能影响系数（RLSNFIC）和河湖水系连通功能影响系数（IRSNFIC）的三大准则指标，采用多指标集成方法，即是通过相应指标层单项指标的子影响系数等权重加权得到。目标

表2 人类活动对河湖水系连通影响量化指标体系

Tab.2 Quantitative evaluation criteria of human activities affecting interconnected river system network					
准则层	分类层	指标层	含义		
河湖水系 连通关系 影响系数	形态分布影响系数	人工连通水域面积百分比	人工连通的水域面积占总水域面积的百分比		
		水系分形维数变化率	$(D_1 - D_0)/D_1$; D_1 为现状水系分形维数; D_0 为没有或较少进行人工连通的水系分形维数		
河湖水系 功能影响 系数	连通状态影响系数	水系连接度变化率	$(\gamma_1 - \gamma_0)/\gamma_1$; γ_1 为现状水系连接度; γ_0 为没有或较少进行人工连通的水系连接度		
		水资源储载影响系数	人工连通水资源储载百分比		
	物质能量传递影响系数	平均连续河段长度变化率	$(L_1 - L_0)/L_1$; L_1 为现状平均连续河段长度, $L_1 = \sum L/n$; L_0 为没有或较少进行人工连通情况下平均连续河段长度		
	河流地貌塑造影响系数	河道侵蚀模数变化率	$(M_0 - M_1)/M_1$; M_1 为现状河道侵蚀模数; M_0 为没有或较少进行人工连通的河道侵蚀模数		
	水体自净影响系数	人工连通水体纳污能力百分比	人工连通水体纳污能力占整个水系纳污能力的百分比		
河湖水系 连通功能 影响系数	水资源配置影响系数	生态维系影响系数	生物多样性指数变化率		
		城市供水	城市人工连通供水百分比	人工连通城市供水量占总连通城市供水量的百分比	
		农业灌溉	农业灌溉人工连通供水百分比	人工连通农业灌溉供水量占总连通农业灌溉供水量的百分比	
	水力发电	水力发电	水力发电量变化率	$(E_1 - E_0)/E_1$; E_1 为现状水电站多年平均发电量; E_0 为没有或较少进行人工连通情况下水电站多年平均发电量	
		应急抗旱	人工连通应急抗旱百分比	人工连通应急调水量占总连通应急调水量的百分比	
	水运交通	水运交通	河道通航能力变化率	$(W_1 - W_0)/W_1$; W_1 为现状水运交通多年平均运力; W_0 为没有或较少进行人工连通情况下水运交通多年平均运力	
		生态环境保护影响系数	环境改善	人工连通环境纳污用水百分比	人工连通的环境纳污用水量占总环境纳污用水量的百分比
			生态修复	人工连通生态修复用水百分比	人工连通的生态修复用水量占总生态修复用水量的百分比
	景观维护		人工连通景观维护供水百分比	人工连通的景观维护供水量占总景观维护供水量的百分比	
	防洪除涝影响系数	防洪减灾	人工连通防洪可调控百分比	人工连通的防洪蓄泄空间可调控水量占总防洪蓄泄空间可调控水量的百分比	
除涝治碱		人工连通排涝可调控百分比	人工连通的排涝蓄泄空间可调控水量占总排涝蓄泄空间可调控水量的百分比		

层的人类活动对河湖水系连通的影响系数 (HAIC), 计算方法与此相同。例如, 河湖水系连通功能影响系数的计算公式如下:

$$IRSNFIC = \sum_{i=1}^n w_i SIC_i \quad (2)$$

式中: n 为河湖水系连通功能影响系数的指标子功能影响系数个数; w_i 为各指标的权重, 本研究采用层次分析法与变权法相结合的权重确定方法, 先由层次分析法确定基础权重, 再用模糊变权法求出最终的权重^[29]。

3.2.3 评估等级划分 参考有关南水北调工程、人水和谐的综合评估等级的构建与探讨^[26, 30-31], 本文将人类活动对河湖水系连通关系影响度分为7个等级, 各个级别名称及标准

如表3所示。准则层的三大影响方面的评估等级与此相似，根据评估等级，可从宏观角度分析人类活动对河湖水系连通的影响。

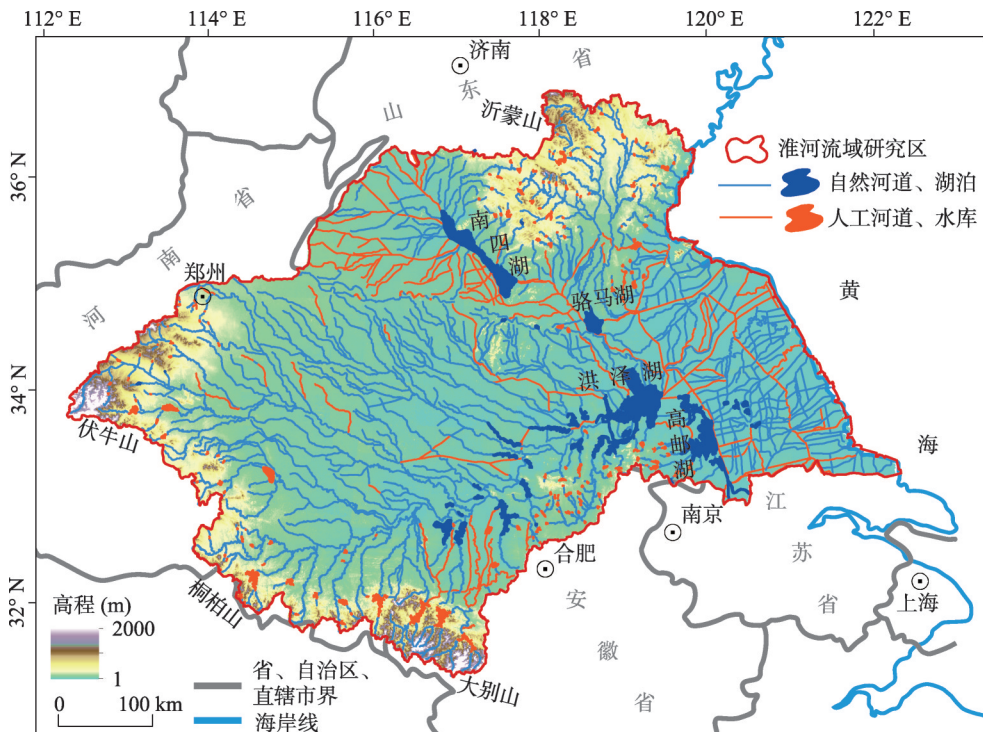
表3 人类活动对河湖水系连通影响评估等级划分
Tab.3 Quantitative evaluation grade of human activities affecting interconnected river system network

影响评估等级	取值范围
产生很大正面作用	$0.8 \leq HAIC \leq 1$
产生较大正面作用	$0.65 \leq HAIC < 0.8$
产生略微正面作用	$0.55 \leq HAIC < 0.65$
未产生明显作用	$0.45 \leq HAIC < 0.55$
造成略微负面影响	$0.35 \leq HAIC < 0.45$
造成较大负面影响	$0.2 \leq HAIC < 0.35$
造成很大负面影响	$0 \leq HAIC < 0.2$

4 实例研究

4.1 研究区概况

淮河是南北气候带的自然分界区，地跨湖北、河南、安徽、江苏和山东5省，面积27万 km²，占全国国土面积的2.9%。淮河流域降雨时空分布极不均匀，年际相差悬殊，丰枯年的降雨量相差几倍，历史上该地区洪涝干旱灾害频繁，对该地区社会稳定、经济发展和人民生活等影响十分严重。从南宋以来，淮河河道多次被黄河侵占，使得淮河失去出海口。流域内天然湖泊众多，有68个面积大于1 km²的湖泊，包括面积最大的洪泽湖（面积达2069 km²）、南四湖（1266 km²）、高邮湖（760.67 km²）和骆马湖（375 km²）等。自1949年以来，中国对淮河流域进行了大规模治理，以应对水资源供给和旱涝危机。因此，除了自然湖泊和河道，淮河河湖水系还包括各类水库5670多座（如宿鸭湖、鲇鱼山、梅山、岸堤、响洪甸等大型水库）和人工开辟的总长达2000 km的河道（如茨淮新河、怀洪新河、入海水道、淮沭新河、鲁运河、苏北灌溉总渠、通榆河、梁济运河、里运河等）。图3中分类的自然河道、



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1827号的标准地图制作，底图无修改。

图3 人工连通工程前后淮河湖水系

Fig. 3 Comparison of Huaihe River between the present and the past without human-made channels/reservoirs

水库和人工河道、水库的对比, 直观展示人类活动对淮河流域的改变。作为中国粮食主产区和重要的农产品基地, 淮河流域经济社会发展快速, 淮河受到了严重污染, 曾出现了水生生态危机。因此, 本研究选取人类活动影响剧烈的淮河流域为研究实例, 进行宏观量化评估研究。

4.2 量化评估结果

本文大量查阅相关淮河的数据资料, 并针对淮河流域研究区的特点, 通过计算、转换、经验估算, 分别获得量化评估体系中相对应的指标值, 并通过加权计算出各项指标值, 进而得到人类活动对淮河水系连通影响评价结果(表4)。根据已建立的人类活动对河湖水系连通影响评价等级划分标准, 得出各准则层和目标层的评价结果(表5)。

表4 人类活动对淮河河湖水系连通影响量化评价结果

Tab. 4 Results of quantitative evaluation of human activities affecting Huaihe River basin

目标层	准则层	分类层	指标值(%)	子影响系数	准则层指数	目标层系数	
人类活动对河湖水系连通的影响系数(HAIC)	河湖水系连通关系影响系数(IRSNNIC)	形态分布影响系数	13.6	0.68	0.732	0.660	
		连通状态影响系数	0.43	0.63			
	河湖水系功能影响系数(RLSNFIC)	水资源承载影响系数	0.03	0.51	0.405		
		物质能量传递影响系数	58.2	0.88			
		河流地貌塑造影响系数	8.95	0.23			
		水体自净影响系数	17.17	0.70			
	河湖水系连通功能影响系数(IRSNNIC)	生态维系影响系数	8.57	0.63	0.816		
		城市供水	40.00	0.10			
		水资源配置影响系数	农业灌溉	18.16			0.77
			水力发电	20.68			0.81
			应急抗旱	8.89			0.63
			水运交通	100			1.00
		河湖水系连通功能影响系数(IRSNNIC)	环境改善	250			1.00
			生态环境保护影响系数	生态修复			15
景观维护	15			0.73			
防洪除涝影响系数	防洪减灾		45	0.74			
	除涝治碱	65	0.95				
			60	0.90			

表5 人类活动对淮河河湖水系连通影响评价等级

Tab. 5 Quantitative evaluation grade of human activities affecting Huaihe River basin

目标层	准则层	准则层评价等级	目标层评价等级
人类活动对河湖水系连通的影响系数	河湖水系连通关系影响系数	产生较大正面作用	产生较大正面作用
	河湖水系功能影响系数	造成略微负面影响	
	河湖水系连通功能影响系数	产生很大正面作用	

4.3 结果分析

(1) 淮河研究区域的河湖水系连通关系影响系数为0.732, 人类活动对淮河河湖水系连通关系产生了较大正面作用。通常情况下水系分形维数和水系连接度的增大, 水系分支比越大, 水系愈加复杂, 流域径流过程较为简单, 则该流域的洪涝灾害发生的可能性将会降低^[32-34]。并且人工增加的水域面积也增加了流域水系复杂度, 同时增加流域洪水的蓄泄空间。可见, 淮河流域的新建河道、水库等各种涉水改造活动对淮河水系格局产生了一定的正面作用。

(2) 淮河研究区域的河湖水系功能影响系数为0.405, 人类活动对淮河河湖水系功能产生了略微负面影响。例如, 淮河中大量闸坝的建立, 阻碍或者截断了闸坝上下水体间的物质、能量、信息的交换, 影响到下游水生生物和周边环境^[35]。淮河流域的各种取水、用水、涉水改造等人类活动对淮河水系的自然功能产生了一些负面影响, 对淮河自然水系演变与发展有一定改变。

(3) 淮河研究区域的河湖水系连通功能影响系数为0.816, 人类活动对淮河河湖水系连通功能产生了很大正面作用。1949年后的大量淮河流域治理工程, 主要针对淮河的洪涝灾害、水资源紧缺和生态环境危机等问题。淮河流域的各种水资源开发工程、防洪除涝工程的建设对于淮河水系的社会功能有很大提高, 但其在生态环境保护方面效果相对不尽如人意, 流域的水生态与污染问题依旧较为严重。

(4) 人类活动对河湖水系连通影响系数为0.660, 表明人类活动对淮河河湖水系连通产生较大正面作用, 虽然淮河各种水系连通工程、人工调蓄工程、河道利用及整治工程和土地资源开发利用等人类活动增强了淮河河湖水系连通功能, 对流域的稳定及可持续发展起到非常重要的支撑作用。但对于淮河自然水系来讲, 其改变了自然水系连通情况, 减弱了水系自然功能, 影响了淮河水系的完整性和自然性。相对而言, 淮河流域人类活动对淮河水系连通起到了较大的正面作用, 其与淮河流域人类活动影响认知基本一致, 本研究评估结果较为合理。

5 结论

受自然营力和人类活动的共同作用, 河湖水系一直处于不断变化之中, 但人类活动已经是近年来河湖水系连通变化的主导因素。因此要充分发挥河湖水系连通在水资源配置、生态环境改善和水旱灾害防御等方面的作用, 必须厘清人类活动对河湖水系连通的影响过程及正负面影响, 量化评估其影响大小, 从而规范涉水人类活动, 促进人水和谐。本研究所构建的评价体系在人类活动剧烈的淮河流域得以应用。对于大型的跨流域工程如南水北调、大型水利枢纽如三峡工程等河湖水系连通工程的影响评价, 本研究所提的量化指标体系的准则层和分类层仍可适用, 能较为全面体现人类活动对河湖水系连通关系、水系功能和连通功能的影响。然而, 对于细化的指标层指标, 目前只采用了比较直观、宏观的指标, 需要进一步完善来体现河湖水系连通中的物质、能量、信息流的交换。并且在各类应用中应结合连通工程的主要功能进行评价, 应结合工程实践的详细资料进行修正和完善。同时也应注意到, 一些大型河湖水系连通工程的影响并不能在短期得出准确的评价, 如河湖周边生态健康等。及早建立和完善评价体系并进行阶段性的动态评价, 更助于准确地评价人类活动对河湖水系连通的影响和有效地采取工程措施。本研究作为河湖水系连通研究的初步成果, 以期抛砖引玉为河湖水系连通相关研究和实践提供技术支撑。

参考文献 (References)

- [1] Wang Zhonggen, Li Zongli, Liu Changming, et al. Discussion on water cycle mechanism of interconnected river system network. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(3): 523-530. [王中根, 李宗礼, 刘昌明, 等. 河湖水系连通的理论探讨. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 523-530.]
- [2] Zhao Junkai, Li Lixian, Zhang Aishe, et al. Discussions of the river-lake interconnected relationship connotation. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2016(4): 118-128. [赵军凯, 李立现, 张爱社, 等. 再论河湖连通关系. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2016(4), 118-128.]

- [3] Zuo Qiting, Cui Guotao. Study on theoretical system and framework of interconnected river system network. *Water Resources and Power*, 2012, 30(1): 1-5. [左其亭, 崔国韬. 河湖水系连通理论体系框架研究. *水电能源科学*, 2012, 30(1): 1-5.]
- [4] Han Qiwei. Variation mechanism of the relation between Jingjiang River and Dongting Lake. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(6): 104-112. [韩其为. 江湖关系变化的内在机理. *长江科学院院报*, 2014, 31(6), 104-112.]
- [5] Wan Rongrong, Yang Guishan, Wang Xiaolong, et al. Progress of research on the relationship between the Yangtze River and its connected lakes in the middle reaches. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(1): 1-8. [万荣荣, 杨桂山, 王晓龙, 等. 长江中游通江湖泊江湖关系研究进展. *湖泊科学*, 2014, 26(1): 1-8.]
- [6] Dou Ming, Yu Lu, Jin Meng, et al. Study on relationship between box dimension and connectivity of river system in Huaihe River Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(6): 670-678. [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. *水利学报*, 2019, 50(6): 670-678.]
- [7] Wang Yan, Zuo Qiting, Shi Shujie. Harmony problems and research approaches in interconnected river system network. *Yellow River*, 2018, 40(5): 49-53, 57. [王妍, 左其亭, 史树洁. 河湖水系连通的和谐问题及研究途径. *人民黄河*, 2018, 40(5): 49-53, 57.]
- [8] Yang Wei, Zhang Liping, Zhang Yanjun, et al. Developing a comprehensive evaluation method for interconnected river system network assessment: A case study in Tangxun Lake group. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(3): 71-87.
- [9] Zhao Junkai, Li Lixian, Zhang Aishe, et al. A new approach for the health assessment of river systems based on interconnected water system networks. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(3): 251-258.
- [10] Gan Rong, Zuo Qiting. An analysis of the characteristics and the evaluation indexes of evolution of spatial pattern of river-lake system in Xiangyang city. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(6): 53-57. [甘容, 左其亭. 襄阳市河湖水系空间格局演变评估分析. *中国农村水利水电*, 2017(6): 53-57.]
- [11] Zhang Lei, Pan Baozhu, Jiang Xiaoming, et al. Research progress on the river-lake relation based on hydrological connectivity analysis. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(12): 167-178. [张磊, 潘保柱, 蒋小明, 等. 基于水文连通分析的江湖关系研究进展. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(12): 167-178.]
- [12] Yang Wei, Zhang Liping, Zhang Yanjun, et al. Developing a comprehensive evaluation method for Interconnected River System Network assessment: A case study in Tangxun Lake group. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(3): 389-405.
- [13] Cai Baofeng, Meng Chong, Wang Xianen, et al. Application of a fuzzy two-stage chance constrained stochastic programming model for optimization of the ecological services value of the interconnected river system network project in the western Jilin Province, China. *Water*, 2019, 11(1): 68.
- [14] Zhang Lei, Hou Guanglei, Li Fengping. Dynamics of landscape pattern and connectivity of wetlands in western Jilin Province, China. *Environment, Development and Sustainability*, 2019: 1-12.
- [15] Wu Lei, Xu Youpeng, Xu Yu, et al. Impact of rapid urbanization on river system in a river network plain. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 104-114. [吴雷, 许有鹏, 徐羽, 等. 平原水网地区快速城市化对河流水系的影响. *地理学报*, 2018, 73(1): 104-114.]
- [16] Yang Wei, Zhang Liping, Li Zongli, et al. Interconnected river system network scheme of urban lake group based on water environment improvement. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 115-128. [杨卫, 张利平, 李宗礼, 等. 基于水环境改善的城市湖泊群河湖连通方案研究. *地理学报*, 2018, 73(1): 115-128.]
- [17] Dai Wen, Lu Dianqing, Li Jingbao, et al. Identification of hydrologic drought characteristics under water system connectivity variation in river system of three outlets of Jingjiang river. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 557-571. [代稳, 吕殿青, 李景保, 等. 水系连通变异下荆南三口河系水文干旱识别与特征分析. *地理学报*, 2019, 74(3): 557-571.]
- [18] Gao Ting, Li Chong, Liao Wengen. A study of historical evolution of rivers and lakes driven by natural and artificial forces and its enlightenment. *Yangtze River*, 2012, 43(1): 12-17. [高婷, 李翀, 廖文根. 二元驱动的河湖历史演变及其启示. *人民长江*, 2012, 43(1): 12-17.]
- [19] Zhang Junyong, Chen Li, Wu Hualin, et al. Cellular model for the form and development of drainage system. *Advances in Water Science*, 2007(5): 695-700. [张俊勇, 陈立, 吴华林, 等. 水系形成与发展的元胞自动机模型研究. *水科学进展*, 2007(5): 695-700.]
- [20] Chen Zhiqing. The deposition, breach, and diversion in the lower Yellow River and their relationships with human

- activities during the historical period. *Progress in Geography*, 2001, 20(1): 44-50. [陈志清. 历史时期黄河下游的淤积、决口改道及其与人类活动的关系. *地理科学进展*, 2001, 20(1): 44-50.]
- [21] Jain V, Tandon S K. Conceptual assessment of (dis)connectivity and its application to the Ganga River dispersal system. *Geomorphology*, 2010, 118(3/4): 349-358.
- [22] Ward J V. The four dimensional nature of lotic ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 1989, 8(1): 2-8.
- [23] Vörösmarty C, Lettenmaier D, Leveque C, et al. Humans transforming the global water system. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2004, 85(48): 509-514.
- [24] Gregory K J. The human role in changing river channels. *Geomorphology*, 2006, 79(3/4): 172-191.
- [25] Xia Jun, Gao Yang, Zuo Qiting, et al. Characteristics of interconnected rivers system and its ecological effects on water environment. *Progress in Geography*, 2012, 31(1): 26-31. [夏军, 高扬, 左其亭, 等. 河湖水系连通特征及其利弊. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 26-31.]
- [26] Zuo Qiting, Zhang Yun, Lin Ping. Index system and quantification method for human-water harmony. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(4): 440-447. [左其亭, 张云, 林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究. *水利学报*, 2008, 39(4): 440-447.]
- [27] Zuo Qiting, Zhao Heng, Ma Junxia. Study on harmony equilibrium between water resources and economic society development. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(7): 785-792, 800. [左其亭, 赵衡, 马军霞. 水资源与经济社会和谐平衡研究. *水利学报*, 2014, 45(7): 785-792, 800.]
- [28] Cui Guotao, Zuo Qiting. Analysis and quantitative evaluation of human activities affecting river system network interconnected relationship. *Journal of Water Resources Research*, 2012, 1(5): 326-333. [崔国韬, 左其亭. 人类活动对河湖水系连通关系的影响及量化评估. *水资源研究*, 2012, 1(5): 326-333.]
- [29] Zuo Qiting. *Harmony Theory: Theory Method Application*. Beijing: Science Press, 2012. [左其亭. *和谐论: 理论·方法·应用*. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [30] Gao Yongnian, Gao Junfeng. Comprehensive assessment of eco-environment impact of the South-to-North Water Transfer Middle Route Project on the middle-lower Hanjiang River basin. *Progress in Geography*, 2010, 29(1): 59-64. [高永年, 高俊峰. 南水北调中线工程对汉江中下游流域生态环境影响的综合评价. *地理科学进展*. 2010, 29(1): 59-64.]
- [31] Guo Xiao, Fang Guohua. *Eco-environment Impact Assessment for Inter-basin Water Transfer*. Beijing: China Water & Power Press, 2010. [郭潇, 方国华. *跨流域调水生态环境影响评价研究*. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.]
- [32] Ma Zongwei, Xu Youpeng, Li Jiajun. River fractal dimension and the relationship between river fractal dimension and river flood: Case study in the middle and lower course of the Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2005(4): 530-534. [马宗伟, 许有鹏, 李嘉峻. 河流形态的分维及与洪水关系的探讨: 以长江中下游为例. *水科学进展*, 2005(4): 530-534.]
- [33] Yang Xiuchun, Zhu Xiaohua. Fractal analysis applied to the 7 drainage basins and the flood in China. *Journal of Catastrophology*, 2002(3): 10-14. [杨秀春, 朱晓华. 中国七大流域水系与洪涝的分维及其关系研究. *灾害学*, 2002(3): 10-14.]
- [34] Dou Ming, Zhang Yuandong, Zhang Yazhou, et al. Assessment on the water system interconnection degree of Huaihe River Basin. *China Water Resources*, 2013(9): 21-23. [窦明, 张远东, 张亚洲, 等. 淮河流域水系连通状况评估. *中国水利*, 2013(9): 21-23.]
- [35] Lu Shanlong, Wu Bingfang, Wang Hao, et al. Hydro-ecological impact of water conservancy projects in the Haihe River Basin. *Acta Oecologica*, 2011, 44: 67-74.

Quantitative evaluation of human activities affecting an interconnected river system network

ZUO Qiting, CUI Guotao

(School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The natural river system, which is inherently interconnected, is an essential resource for human and economic society. Beyond water, and the flows of substance (e.g. sediment, contaminant), energy (e.g. streamflow velocity), and information (e.g. livelihood and activity) are exchanged in an interconnected river system. However, under the joint influences of natural evolution and human activities, the natural river system has been and is being changed. Particularly, water-related human activities in recent years are frequent and highly intensified, such as the water allocation projects and man-made reservoirs. Therefore, research on the evaluation of human activities affecting the interconnected river system network (IRSN) is needed to technically support the relevant practices. This study analyzed the affecting factors of IRSN from two perspectives: natural perspective and social perspective. The processes of human activities affecting the IRSN were theoretically explained. On this basis, both the positive and negative influences of human activities on IRSN were summarized in three aspects: interconnected-river-system-network function relationship, rivers-lake-system natural function, and interconnected-river-system-network function. To this end, the study proposed a quantitative evaluation method to assess human activities affecting the IRSN in the above three aspects. As the Huaihe River basin was severely influenced by human activities, we applied the evaluation method in this basin. Results show that human activities contributed to the interconnected- river- system- network function, meaning that possible influences on water scarcity and flood protection were generated in improving the complexity of man-made river system. Meanwhile, slight negative influences on the rivers-lake-system natural function were reported, as downstream aquatic life and surrounding environment were affected by the flow changes of water, substance and information. Together with characteristics of the Huaihe River basin, the overall quantitative evaluation results suggested that stepping up the efforts to protect the environment could further positively influence the IRSN in the Huaihe River basin. This study sheds new light on our understanding and quantitative evaluation of the influence of human activities on the IRSN.

Keywords: interconnected river system network (IRSN); human activities; river system; influence; quantitative evaluation