

Analysis and Quantitative Evaluation of Human Activities Affecting River System Network Interconnected Relationship*

Guotao Cui, Qiting Zuo[#]

Center for Water Science Research, Zhengzhou University, Zhengzhou
Email: guotaocui@gmail.com, #zuoqt@zzu.edu.cn

Received: Jul. 17th, 2012; revised: Jul. 29th, 2012; accepted: Aug. 11th, 2012

Abstract: The favorable quality of River System Network Interconnected Relationship (RSNIR) is the cornerstone of effective natural and social functioning in Interconnected River System Network (IRSN). However, human activities have become a direct factor affecting RSNIR in recent years. Taking into account national strategy IRSN, this paper discusses influence of RSNIR caused by human activities from macroscopic perspective of watershed. The influence is divided into 2 types: IRSN Form Distribution Influence and Connecting State Influence. The quantitative evaluation index system and method for human activities affecting RSNIR is established. The index system is composed of three layers, namely target layer, classification layer and index layer. By quantifying influence coefficient in each index layer according to the quantitative description of single index, the influence degree in classification layer and target layer can be calculated. As a case study, the application to Huaihe River basin with intense human activity shows that the proposed system and method are feasible.

Keywords: Interconnected River System Network (IRSN); Interconnected Relationship; Human Activities; Influence; Quantitative Evaluation

人类活动对河湖水系连通关系的影响及量化评估*

崔国韬, 左其亭[#]

郑州大学水科学研究中心, 郑州
Email: guotaocui@gmail.com, #zuoqt@zzu.edu.cn

收稿日期: 2012年7月17日; 修回日期: 2012年7月29日; 录用日期: 2012年8月11日

摘要: 良好的河湖水系连通关系是河湖水系自然功能和社会功能发挥的基石, 然而当前人类活动已经成为影响河湖水系连通关系的直接因素。本文在理解当前河湖水系连通战略理念的基础上, 从流域宏观角度分析人类活动对河湖水系连通关系的影响, 将其分为水系形态分布和水系连通状态两个影响方面。然后构建了人类活动对河湖水系连通影响量化指标体系和评估方法, 通过单指标子影响系数的量化, 最终得出分类层和目标层的影响量化评估等级。从人类活动影响剧烈的淮河流域实例研究结果来看, 本文所构建的指标体系和量化方法是可行的。

关键词: 河湖水系连通; 连通关系; 人类活动; 影响; 量化评估

*基金项目: 国家自然科学基金(51279183 和 51079132); 中央水利前期工作基金资助项目(2010518)。

[#]通讯作者: 左其亭, (1967-), 男, 河南固始人, 博士, 教授, 博导, 水文学及水资源专业。

作者简介: 崔国韬, (1989-), 男, 河南淇县人, 硕士研究生, 水文学及水资源专业。

1. 引言

近年来,我国经济快速发展,用水需求不断增长,对水资源的开发利用强度和对水环境的干扰程度显著增加,对区域乃至全国的水系连通格局产生了巨大的影响,出现了人水关系的失衡与错位,水问题仍然是影响经济社会可持续发展、水生态系统健康的重要因素。河湖水系连通作为解决水资源问题的一个重要途径,在国家“十二五”战略规划和 2011 年中央一号文件中明确提出,并已经成为国家江河治理的战略指导思想,其一主要目的就是通过河湖水系连通工程的建设,协调水资源格局与经济社会格局的关系、人水关系,构建一个蓄泄兼筹、丰枯调剂、引排自如、多源互补、生态健康的河湖水系连通网络体系^[1,2]。

自然连通状态下的河湖水系是水循环和水资源形成的载体,是地表水资源的主要存储空间,是流域生态与环境的重要组成部分,对于人类来说,其亦是人类生存空间的支撑,区域经济社会发展的基石。人类为了自身发展,对自然河湖水系进行改造、开发和利用,充分挖掘河湖水系连通社会功能。但与此同时,这些人类活动都将影响自然状态的河湖水系连通关系,进而影响河湖水系连通的自然性和完整性。

当前国内外学者关于河湖水系连通关系的研究集中在河道尺度的纵向、横向、垂直和时间等四维空间的河流物质与能量连通关系的探讨上^[3-6],对于人类活动对流域层面的河湖水系连通关系的探讨较少,影响宏观角度对人水关系、河湖健康及人类活动影响的判断和对策制定。因此,本文将分析河湖水系连通关系的影响因素,着重探讨人类活动对河湖水系连通关系的影响,提出人类活动对河湖水系连通关系影响评估指标体系及量化方法,并以人类活动影响剧烈的淮河流域为例进行研究。

2. 人类活动对河湖水系连通关系影响分析

自然状态下的河湖水系是在一定地质、地形、气候等条件下,水流自由发展的结果,是经过自然演变后形成的具有自然性和完整性的网络系统^[7]。自然连接的河湖水系是水循环的主要通道,承载着丰富的物质流、能量流、信息流,向周边动植物提供质优宝贵的水资源,维系和构建动植物生存空间。但是,在当前人类活动愈加剧烈和气候变化影响的背景下,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流连接通道,直接或间接的改变了自然河湖水系连通关系。

在气候变化、地形地貌变迁、洪水、地震、河床淤积等自然营力的作用下,河湖水系始终处于不断变化之中。但是自然营力通过水流(以及风等)侵蚀地表、侵蚀物通过水流搬运和堆积等过程改变河湖地貌,通常需要很长的时间才能体现出自然营力对河湖水系连通关系的改变。然而,在经济社会发展驱动和人为意愿影响下,水系连通工程、人工调蓄行为、河道利用及整治工程、用水排污、土地资源开发利用等人类活动,快速而直接地改变了河湖水系的自然格局和连通关系。相对而言,人类活动对河湖水系连通关系的影响更为剧烈,其典型特点是短时期内人工直接改变水系连通关系,以建立符合经济社会格局、满足人类防洪除涝、改善特定区域生态与环境的水系连通格局。

河湖水系连通关系是流域内各种水体的形态分布与连接状态的综合描述。河湖水系包括河流、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。根据水系连通的物理连接情况和水体物质能量传递情况,将水体间的连通关系主要分为:活跃连通(连且通:物理上连接并且水体物质能量相通)、部分活跃连通(连而部分通:物理上连接但水体物质能量部分相通)、不活跃连通(连而不通:物理上连接但水体物质能量不相通)、非连通(不连且不通:物理上不连接并且水体物质能量不相通)(见表 1)。因此,不同的人类活动对河湖水系水体直接的连接关系改变也不同,

Table 1. Classification table of river system network interconnected relationship
表 1. 河湖水系连通关系分类表

连通关系	物理连接	水体物质能量传递	示意图
活跃连通	是	是	
部分活跃连通	是	部分	
不活跃连通	是	否	
非连通	否	否	

例如, 不合理开发利用河道水资源引起的截断河流或河流断流, 即将原本处于活跃连通的单一水体, 改变成了非连通或不活跃连通状态的两个水体; 河道上闸坝的建立, 即将原本处于活跃连通的单一水体, 改变为部分活跃连通的两个水体, 虽然其在物理上仍处于连接状态, 但受闸坝影响, 水体中的物质能量传递受到限制^[8]; 修建的运河、沟渠形成了新的河网水力联系, 将原本处于非连通状态的水体, 改造成活跃连通的水体。

随着人类改造自然能力的不断增强, 涉水工程数量越来越多, 工程规模越来越大, 影响范围越来越广, 人类活动已经成为改变河湖水系连通关系的决定因素。人类活动对流域内各水体的开发与利用, 或多或少的影响到河湖水系连通关系, 进而影响河湖水系的自然和社会功能的发挥。因此, 本文的量化研究立足流域宏观角度, 从人类活动对河湖水系连通关系中的形态分布和连通状态两个方面, 探讨人类活动对河湖水系连通关系的影响。

3. 人类活动对河湖水系连通关系影响量化评估

3.1. 评估指标体系

根据河湖水系连通关系中的形态分布和连接状态两方面的特性, 遵循科学性与简明性兼备、完备性

与代表性结合、可获取性和可操作性兼备的指标选取原则, 经过筛选得到4个人类活动对河湖水系连通关系影响的指标。按照评估指标的组成层次构筑成一树状层次结构, 构建人类活动对河湖水系连通关系影响评估量化框架如图1。

目标层中引入“人类活动对河湖水系连通关系影响系数(Human Activities Affecting River System Network Interconnected Relationship Coefficient, HAARS-NIRC)”, 从整体评估人类活动对河湖水系连通关系影响情况。分类层中包括“形态分布影响系数(Interconnected River System Network Form Distribution Influence Coefficient, IRSNFDIC)”和“连通状态影响系数(Interconnected River System Network Connecting State Influence Coefficient, IRSNCSIC)”。本文构建的量化评估指标体系中各指标计算方法如下:

1) 形态分布影响系数

a) 水系分形维数变化率: 河流水系形态是河流地貌的宏观体现, 水系的分形维数是水系形态特征的反映^[9]。该指标计算公式如下:

$$\text{水系分形维数变化率} = \frac{D_1 - D_0}{D_1} \quad (1)$$

其中: D_1 代表现状水系分形维数; D_0 代表没有或较少进行人工连通的水系分形维数。水系分形维数可用网格覆盖法计算获得^[10]。

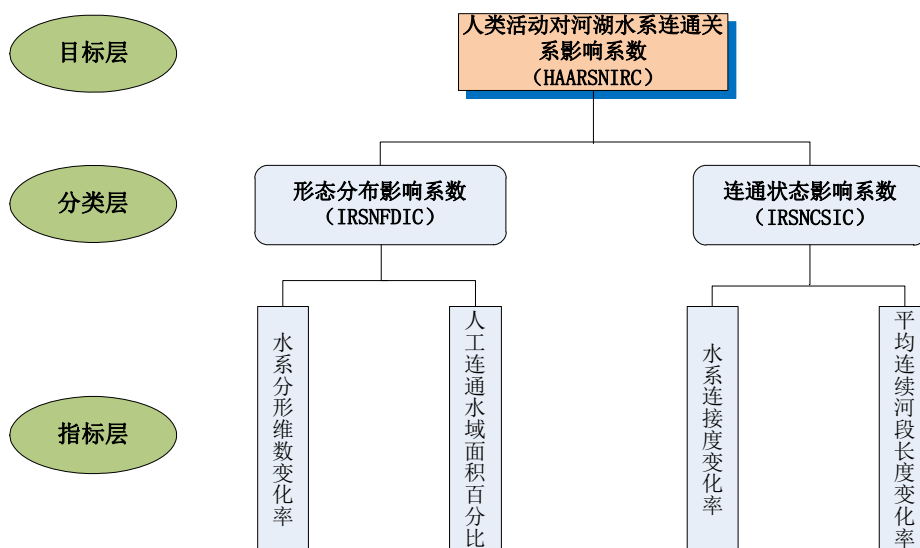


Figure 1. Quantitative evaluation framework of human activities affecting river system network interconnected relationship
图 1. 人类活动对河湖水系连通关系影响量化评估框架

b) 人工连通水域面积百分比: 其反映了流域水系中人工水系连通工程对水域面积影响情况。

$$\text{人工连通水域面积百分比} = \frac{\text{人工连通的水域面积}}{\text{总水域面积}} \quad (2)$$

2) 连通状态影响系数

a) 水系连接度变化率: 通过计算水系连接度 γ 的变化情况, 直接体现出河湖水系所有节点连接改变状况, 进而反映人类活动对河湖水系连通关系中的河湖水系连通状态的影响大小, 该指标的计算公式如下:

$$\text{水系连接度变化率} = \frac{\gamma_1 - \gamma_0}{\gamma_1} \quad (3)$$

式中: γ_1 代表现状水系连接度; γ_0 代表没有或较少进行人工连通的水系连接度。

水系连接度 γ 是用来描述水系网络中所有节点被连接的程度^[11], 其计算公式为:

$$\gamma = L/3(v-2) \quad (4)$$

其中: L 为河道水系分段数; v 为连接点个数^[12]。水系连接度 γ 的变化范围为 0~1, $\gamma = 0$ 时, 表示没有节点相连; $\gamma = 1$ 时表示每个节点都彼此相连^[13]。

b) 平均连续河段长度变化率: 反映河湖水系中水体之间的连续性及其物质能量传递情况, 该指标的计算公式如下:

$$\text{平均连续河段长度变化率} = \frac{L_0 - L_1}{L_1} \quad (5)$$

式中: L_1 代表现状平均连续河段长度, $L_1 = \sum L/n$, n 为水系中总河段数; L_0 代表没有或较少进行人工连通情况下平均连续断河段长度。

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]。人类活动对河湖水系连通关系影响量化评估研究中假定: 各指标均存在 7 个关键值, 其将指标评估分为 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、产生很大正面作用。利用 7 个特征点($a, 0$)、($b, 0.2$)

、($c, 0.35$)、($d, 0.5$)、($e, 0.65$)、($f, 0.8$)和($g, 1$)以及上面的假定, 可以得到某指标子影响系数的变化曲线以及表达式^[14]。

正向指标(如水系分形维数变化率), 其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), 其是指子影响系数随着指标值的增加而减小。正向指标子影响系数的计算公式如公式(6):

$$SIC_i = \begin{cases} 0 & x_i \leq a_i \\ 0.2 \left(\frac{x_i - a_i}{b_i - a_i} \right) & a_i < x_i \leq b_i \\ 0.2 + 0.15 \left(\frac{x_i - b_i}{c_i - b_i} \right) & b_i < x_i \leq c_i \\ 0.35 + 0.15 \left(\frac{x_i - c_i}{d_i - c_i} \right) & c_i < x_i \leq d_i \\ 0.5 + 0.15 \left(\frac{x_i - d_i}{e_i - d_i} \right) & d_i < x_i \leq e_i \\ 0.65 + 0.15 \left(\frac{x_i - e_i}{f_i - e_i} \right) & e_i < x_i \leq f_i \\ 0.8 + 0.2 \left(\frac{x_i - f_i}{g_i - f_i} \right) & f_i < x_i \leq g_i \\ 1 & g_i < x_i \end{cases} \quad (6)$$

逆向指标子影响系数的计算公式如公式(7):

$$SIC_i = \begin{cases} 1 & x_i \leq g_i \\ 0.8 + 0.2 \left(\frac{f_i - x_i}{f_i - g_i} \right) & g_i < x_i \leq f_i \\ 0.65 + 0.15 \left(\frac{e_i - x_i}{e_i - f_i} \right) & f_i < x_i \leq e_i \\ 0.5 + 0.15 \left(\frac{d_i - x_i}{d_i - e_i} \right) & e_i < x_i \leq d_i \\ 0.35 + 0.15 \left(\frac{c_i - x_i}{c_i - d_i} \right) & d_i < x_i \leq c_i \\ 0.2 + 0.15 \left(\frac{b_i - x_i}{b_i - c_i} \right) & c_i < x_i \leq b_i \\ 0.2 \left(\frac{a_i - x_i}{a_i - b_i} \right) & b_i < x_i \leq a_i \\ 0 & a_i < x_i \end{cases} \quad (7)$$

式中: SIC_i 为第 i 个指标的子影响系数, $i = 1, 2, 3,$

4; 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 个评估等级的关键值。

3.2.2. 分类层量化方法

人类活动对河湖水系连通关系影响评估框架中分类层形态分布影响系数(IRS NFDIC)和连通状态影响系数(IRS NCSIC)的量化, 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。计算公式如下:

$$IRS NFDIC = \sum_{i=1}^2 w_i SIC_i \quad (8)$$

$$IRS NCSIC = \sum_{i=1}^2 w_i SIC_i \quad (9)$$

3.2.3. 目标层量化方法

目标层的人类活动对河湖水系连通关系影响系数的计算, 则直接由指标层中的 4 个单项指标集成得到, 计算公式如下:

$$HAARS NIRC = \sum_{i=1}^4 w_i SIC_i \quad (10)$$

其中: 权重 w_i 采用层次分析法与变权法相结合的权重确定方法, 由层次分析法确定基础权重, 再用模糊变权法求最终的权重^[15]。

3.2.4. 评估等级划分

本文构建的人类活动对河湖水系连通关系影响评估等级划分标准如表 2 所示。通过比较目标层人类活动对河湖水系连通关系影响系数和分类层的形态分布影响系数、连通状态影响系数影响系数, 可获得各层次的影响等级, 便于分析人类活动影响情况。

4. 实例研究

4.1. 研究区概况

淮河是位于我国长江和黄河之间的大河, 也是南北气候带的自然分界区, 流域北部是半湿润气候区, 南部是湿润气候区。淮河流域面积 27 万 km^2 , 由于特殊的地形和地理位置, 淮河流域历史上洪水干旱灾害事件频繁, 年内亦经常出现旱涝交替或南涝北旱现象, 严重威胁着流域经济社会的可持续发展。因此, 建国后国家对淮河流域进行了大规模的治理。当前, 淮河现在有大小闸坝 5000 多个, 各种水库 3500 多个, 各种堤防 5 万多 km , 主要堤防 1.1 万多 km , 使淮河

流域的防洪减灾和水资源供需状况得到了改善。但是修建了水坝、大堤以后, 原来的很多湖泊和沼泽地成为了蓄洪区、行洪区、泄洪区。特别是上世纪 50 年代末的时候, 淮河中游的湿地和湖泊面积有 3000 多 km^2 , 现在减少到不到 1000 多 km^2 。淮河流域已经成为人类活动影响剧烈的流域, 其河湖水系连通关系受到了很大影响。

4.2. 单指标及其子影响系数的计算

通过收集淮河治理工程资料及现状流域水系 GIS 图, 分析得到没有或较少进行人工连通条件下的淮河流域河湖水系连通情况, 估算出相关指标值。

1) 形态分布影响系数

a) 水系分形维数变化率: 淮河流域水系分形维数的计算结果如图 2 和图 3 所示。现状的淮河流域水系分形维数计算结果图中斜线的斜率即为水系分形维数 D_1 为 1.3827, 相关系数为 0.96250 接近于 1; 而较少进行人工连通情况下(剔除人工河道)的淮河流域水系分形维数 D_0 为 1.3767, 相关系数为 0.96251 接近于 1, 因此计算得到该指标值为 0.43%。

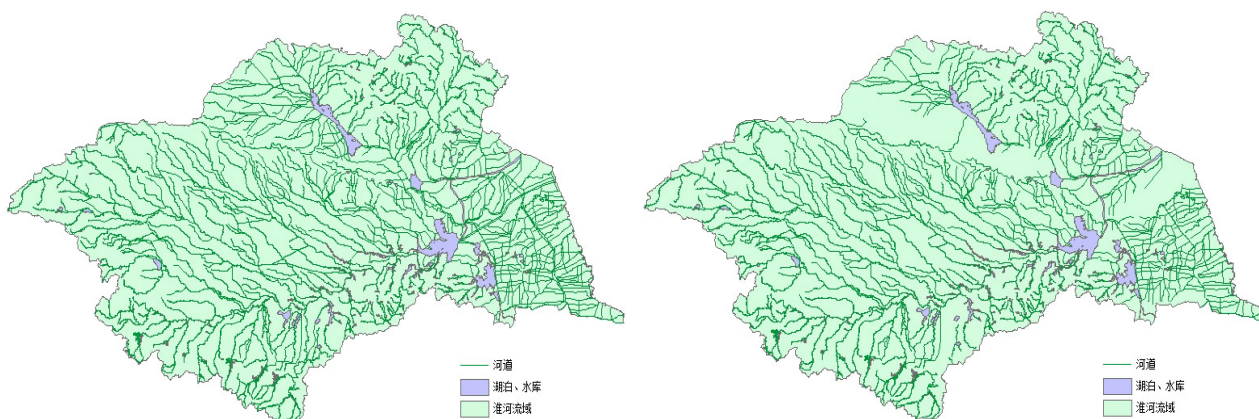
b) 人工连通水域面积百分比: 通过现状河流湖泊及剔除人工建设河流湖泊水库等的淮河流域的水域面积对比, 估算出该指标值为 2.7%。

2) 连通状态影响系数

a) 水系连接度变化率: 通过绘制现状和较少进行人工连通情况下的淮河流域水系格局概图(见图 4)。得到现状淮河流域节点数 v 为 1130, 河道数 L 为 1149, 其水系连接度 γ_1 为 0.3395; 而较少进行人工连通情况下(剔除人工河道)的淮河流域节点数 v 为 1030, 河道数 L 为 1047, 其水系连接度 γ_0 为 0.3394, 得到淮河流域水系连接度变化率值为 0.03%。

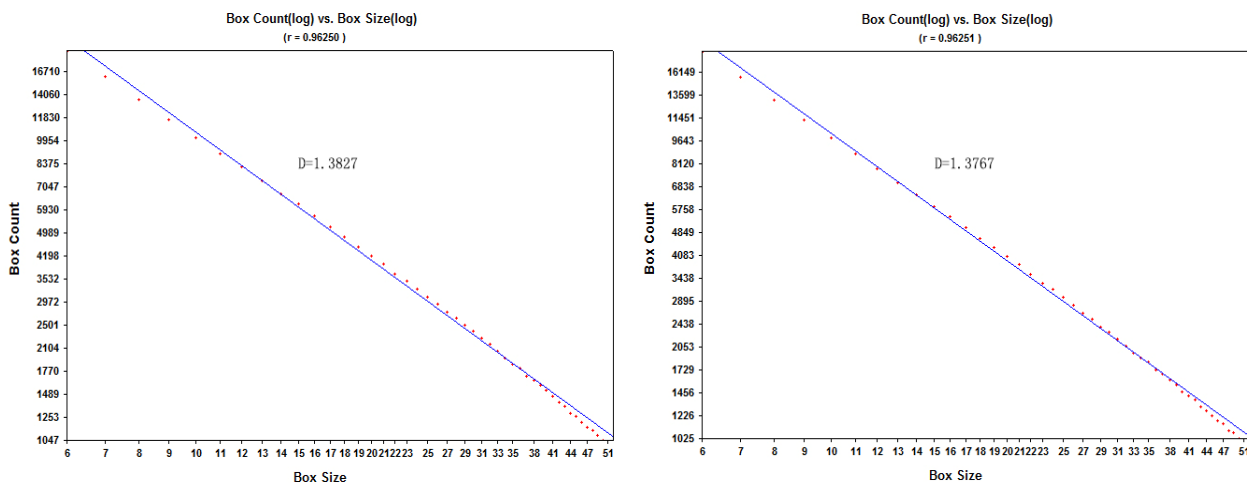
Table 2. Quantitative evaluation grade of human activities affecting river system network interconnected relationship
表 2. 人类活动对河湖水系连通关系影响评估等级划分表

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



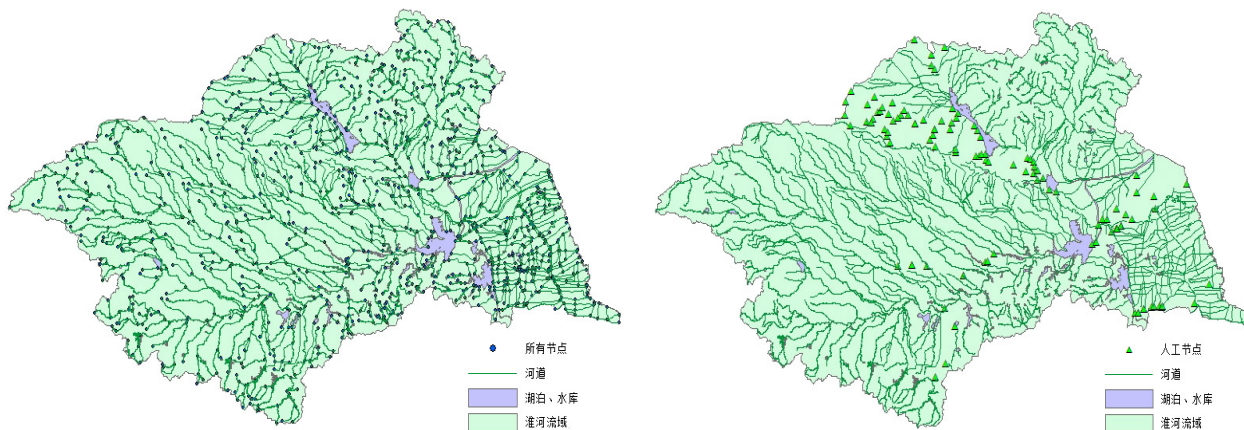
(注: 左图为现状淮河流域概图, 右图为剔除人工河道后的淮河流域概图)。

Figure 2. Comparison diagram of Huaihe River Basin in present and less artificial connectivity situation
图 2. 现状和较少进行人工连通情况下的淮河流域对比图



(注: 左图为现状淮河流域水系分形维数计算结果, 右图为剔除人工河道后的淮河流域水系分形维数计算结果)。

Figure 3. Fractal dimension of Huaihe River Basin in present and less artificial connectivity situation
图 3. 现状和较少进行人工连通情况下的淮河流域水系分形维数计算结果图



(注: 左图为现状淮河流域水系格局概图, 右图为剔除人工河道后的淮河流域水系格局概图)。

Figure 4. River system network of Huaihe River Basin in present and less artificial connectivity situation
图 4. 现状和较少进行人工连通情况下的淮河流域水系格局概图

b) 平均连续河段长度变化率: 通过现状河流及剔除人工河道的淮河流域的水系格局概图对比, 估算现状平均连续河段长度为 3.56 km, 没有或较少进行人工连通情况下平均连续断河段长度为 3.91 km, 计算得出该指标值为 8.95%。

根据淮河流域特点, 制定淮河流域人类活动对河湖水系连通关系影响评估指标的关键值, 并计算个指标的子影响系数, 见表 3。

4.3. 评估结果

根据公式(8)和公式(9), 按照等权重加权计算, 得到分类层形态分布影响系数为 0.605, 连通状态影响系数为 0.44。在计算目标层人类活动对河湖水系连通关系影响系数时, 构造 4 个单指标的判断矩阵(见表 4), 其随机一致性比率 $CR = 0.0114 < 0.1$, 通过一致性检验。经过层次分析法确定基础权重, 再用模糊变权法求得水系分形维数变化率的最终权重为 0.383、人工连通水域面积百分比的最终权重为 0.177、水系连接度变化率的最终权重为 0.318、平均连续河段长

度变化率的最终权重为 0.122。根据公式(10)计算出人类活动对河湖水系连通关系影响系数为 0.551。最终得到淮河流域人类活动对河湖水系连通关系影响评估等级为产生略微正面作用(见表 5)。

4.4. 结果分析

从各指标的子影响系数分类层、目标层的影响系数的评估等级来看: 1) 淮河流域河湖水系连通形态分布受到人类活动的略微正面影响。通常情况下, 水系分形维数越大, 水系分支比越高, 水系越复杂, 流域的径流过程则越简单, 洪涝干旱灾害发生的可能性也就越低^[9,16]。人工连通水域面积百分比也一定程度上体现出淮河流域蓄泄空间的改变情况。实际上, 近年来治淮骨干工程建设在流域防洪除涝方面发挥了巨大作用。计算所得的淮河流域水系分形维数和人工连通水域面积百分比, 与淮河流域对洪涝灾害的抗御性有所增加的现实情况相符合。2) 淮河流域河湖水系连通状态受到人类活动的略微负面影响。虽然人工河道等工程建设, 增强了淮河流域水系网络连接性, 但是

Table 3. Characteristic value and SIC in quantitative evaluation index of human activities affecting river system network interconnected relationship in Huaihe River Basin

表 3. 淮河流域人类活动对河湖水系连通关系影响评估指标的关键值及子影响系数

指标层	人类活动对淮河河湖水系连通关系影响评估指标的关键值							指标方向	指标值	子影响系数
	很大负面影响	较大负面影响	略微负面影响	未产生明显作用	略微正面作用	较大正面作用	很大正面作用			
水系分形维数变化率	-5	-1	-0.5	0	0.5	1	5	正向	0.43%	0.63
人工连通水域面积百分比	-	-	-	0	5	10	20	正向	2.7%	0.58
水系连接度变化率	-5	-1	-0.5	0	0.5	1	5	正向	0.03%	0.51
平均连续河段长度变化率	30	20	10	0	-10	-20	-30	逆向	8.95%	0.37

Table 4. Judgment matrix in quantitative evaluation index of human activities affecting river system network interconnected relationship in Huaihe River Basin

表 4. 淮河流域人类活动对河湖水系连通关系影响系数指标判断矩阵

判断矩阵	水系分形维数变化率	人工连通水域面积百分比	水系连接度变化率	平均连续河段长度变化率
水系分形维数变化率	1	3	2	4
人工连通水域面积百分比	0.33	1	0.5	2
水系连接度变化率	0.5	2	1	3
平均连续河段长度变化率	0.25	0.5	0.33	1

Table 5. Quantitative evaluation grade of human activities affecting river system network interconnected relationship in Huaihe River Basin

表 5. 淮河流域人类活动对淮河河湖水系连通关系影响评估等级

目标层	分类层	分类层评估等级	目标层评估等级
人类活动对河湖水系连通关系影响系数	形态分布影响系数	产生略微正面作用	产生略微正面作用
	连通状态影响系数	造成略微负面影响	

闸坝等工程的建设影响到河流自然连接状态, 降低了河湖物质能量传递功能, 反映出在淮河流域治理过程中应注重河湖自然连通的保护, 这对于维系良性生态系统、保证河湖健康有重要意义。3) 总体而言, 淮河流域人类活动对淮河水系连通关系是有略微正面的影响, 虽然人类活动一定程度上改变淮河自然水系连通格局、控制了水系演变与发展, 但增强了淮河流域洪涝灾害的抗御性及水资源调控能力, 正面作用大于负面影响。

5. 结语

本文在总结大量文献的基础上, 提出河湖水系连通关系分类体系, 探讨了人类活动对河湖水系连通关系的影响。从便于量化评估的角度, 将人类活动对河湖水系连通关系的影响分类为形态分布影响和连通状态影响两个方面, 进而构建了一套评估指标体系和量化评估方法, 并将其应用在人类活动影响剧烈的淮河流域。从淮河流域应用结果来看, 本文所构建的指标体系和量化评估方法是可行的。

参考文献 (References)

- [1] 左其亭, 崔国韬. 河湖水系连通理论体系框架研究[J]. 水电能源科学, 2012, 1: 1-5.
ZUO Qiting, CUI Guotao. Study on theoretical system and framework of interconnected river system network. *Water Resources and Power*, 2012, 1: 1-5. (in Chinese)
- [2] 崔国韬, 左其亭, 李宗礼, 窦明. 河湖水系连通功能及适应性分析[J]. 水电能源科学, 2012, 2: 1-5.
CUI Guotao, ZUO Qiting, LI Zongli and DOU Ming. Analysis of function and adaptability for interconnected river system network. *Water Resources and Power*, 2012, 2: 1-5. (in Chinese)
- [3] 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, 1: 1-5, 78.
ZHANG Ouyang, XIONG Wen and DING Hongliang. Drainage connectivity characteristics and influential factors of Yangtze River Basin. *Yangtze River*, 2010, 1: 1-5, 78. (in Chinese)
- [4] 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, 2: 1-5, 17.
ZHANG Ouyang, BU Huifeng, WANG Cuiping, et al. Impact of drainage connectivity on river health in Yangtze River Basin. *Yangtze River*, 2010, 2: 1-5, 17. (in Chinese)
- [5] WARD, J. V. The four dimensional natures of lotic ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 1989, 8: 2-8.
- [6] JAIN, V., TANDON, S. K. Conceptual assessment of (dis)connectivity and its application to the Ganga River dispersal system. *Geomorphology*, 2010, 118: 349-358.
- [7] 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[J]. 水科学进展, 2007, 5: 95-700.
ZHANG Junyong, CHEN Li, WU Hualin, et al. Cellular model for the form and development of drainage system. *Advances in Water Science*, 2007, 5: 95-700. (in Chinese)
- [8] 左其亭, 高洋洋, 刘子辉. 闸坝对重污染河流水质水量作用规律的分析与讨论[J]. 资源科学, 2010, 32(2): 261-266.
ZUO Qiting, GAO Yangyang and LIU Zihui. Analysis and discussion about the mechanisms of the impacts of dams on water quality and quantity of Heavily Polluted Rivers. *Resources Science*, 2010, 32(2): 261-266. (in Chinese)
- [9] 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[J]. 水科学进展, 2005, 4: 530-534.
MA Zongwei, XU Youpeng and 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. (in Chinese)
- [10] 何钢, 蔡运龙. 不同比例尺下中国水系分维数关系研究[J]. 地理科学, 2006, 4: 4461-4465.
HE Gang, CAI Yunlong. Comparative study on fractal dimensions of river basins in china at different map scales. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 4: 4461-4465. (in Chinese)
- [11] 秦霞, 顾政华, 李旭宏. 区域公路网布局规划方案的连通度评价指标研究[J]. 土木工程学报, 2006, 1: 112-116.
QIN Xia, GU Zhenghua and LI Xuhong. Research on evaluative index of connectivity for regional road network layout planning project. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 1: 112-116. (in Chinese)
- [12] 郭怀成, 王金凤, 刘永, 等. 城市水系功能治理方法及应用[J]. 地理研究, 2006, 25(4): 596-605.
GUO Huaicheng, WANG Jinfeng, LIU Yong, et al. The framework for functional control of urban water systems and its application. *Geographical Research*, 2006, 25(4): 596-605. (in Chinese)
- [13] 王丽, 曾辉. 深圳市道路网络结构特征的成因及其景观格局效应[J]. 地理研究, 2012, 5: 853-862.
WANG Li, ZENG Hui. The principle of road network structures and its ecological effects on landscape in Shenzhen. *Geographical Research*, 2012, 5: 853-862. (in Chinese)
- [14] 左其亭, 张云, 林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究[J]. 水利学报, 2008, 4: 440-447.
ZUO Qiting, ZHANG Yun and LIN Ping. Index system and quantification method for human-water harmony. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 4: 440-447. (in Chinese)
- [15] 左其亭. 和谐论: 理论, 方法, 应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 69-73.
ZUO Qiting. *Harmony theory: Theory, method, application*. Beijing: Science Press, 2012: 69-73. (in Chinese)
- [16] 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[J]. 灾害学, 2002, 3: 10-14.
YANG Xiuchun, ZHU Xiaohua. Fractal analysis applied to the 7 drainage basins and the flood in China. *Journal of Catastrophology*, 2002, 3: 10-14. (in Chinese)