

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.05.016

河流水系连通性机制及计算方法综述

夏继红¹, 陈永明², 周子晔¹, 张琦¹, 彭苏丽¹, 王金平¹, 余根听¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310009)

摘要: 河流水系连通性具有水文调蓄、保障生物迁徙通畅、改善水土环境等功能, 目前主要从水文、景观和生态等方面对其进行了定义, 而河流水系连通性对社会发展也发挥着重要作用, 故河流水系连通性具有自然和社会双重属性, 其连通性机制主要表现为纵向、横向、垂向连通性。目前主要从景观学、水文学、水力学、生态学等学科角度提出了图论法、水文-水力学法、景观法、生物法和综合指标法等计算方法, 各方法有其适用性和不足, 应用中须针对实际问题选择适宜方法或进行修正。河流水系连通性未来研究应综合多尺度、多领域、多学科, 在研究内容上, 重点开展尺度协同、连通性含义界定、响应机理及修复问题研究, 在研究手段上, 重点开展多方法、多技术集成问题研究。

关键词: 河流水系; 连通性; 定量计算; 图论

中图分类号: TV122; G353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2017)05-0780-08

河流生态学中的“连通性”一词源于景观学^[1-2], 最早由 Amoros 和 Roux^[3]于1988年引入。通畅的河流水系具有保障水文调蓄安全性、生境安全与生物迁徙的通畅性以及改善水土环境等多项功能^[4-6]。可见, 河流水系连通性程度决定着区域水资源调蓄、水文循环、景观格局、生态环境和经济社会发展等诸多方面。但由于过去河湖填埋、过度的水利和涉水工程建设等, 河湖水系的布局、连通程度等都发生了巨大变化, 造成区域洪水调蓄能力下降、洪灾风险增加、河湖健康退化, 严重威胁着区域生态、生产与生活安全^[6-7]。因此, 提高河流水系连通性正成为中国江河湖管理的重大需求^[6-7]。河流水系连通性也已成为江河湖治理中有待深入研究的新难点和热点^[8]。自1988年提出河流连通性以来, 国外很多学者已就河流连通性的定义、机制以及定量计算方法开展了大量研究^[1,9], 而中国对这一问题的研究起步较晚。

本文在综述国内外河流水系连通性概念和机制的基础上, 分析比较现有河流水系连通性定量计算方法的适用性与不足, 探讨河流水系连通性未来研究中的重点问题, 以期为中国河流水系研究与管理提供借鉴。

1 河流水系连通性概念与机制

1.1 河流水系连通性概念

“连通性”一词最早出现于图论中, 是空间或集合不间断连续的一种拓扑性质^[10]。自20世纪60年代以来, “连通性”作为一种数学工具已被运用于多个领域^[11]。1984年 Merriam^[10]将这一概念引入景观学, 提出了“景观连通性”。1988年 Amoros 和 Roux^[3]认为河流水系作为一种独特的景观类型, 连通性也是它的重要特性, 提出了“河流连通性”: 指河流景观空间结构和功能上的关联性, 用于度量景观单元相互关联的程度,

收稿日期: 2017-01-17; 网络出版时间: 2017-10-01

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20171001.1423.034.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41471069); 浙江省水利科技项目(RC1527)

作者简介: 夏继红(1970—), 男, 江苏如皋人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事河流健康与生态修复方面研究。

E-mail: syjhxia@hhu.edu.cn

通信作者: 陈永明, E-mail: jhccym@zjwater.gov.cn

表示景观功能的一个参数。到 20 世纪 90 年代末, 这一概念已被广泛接受。尤其是 21 世纪以来, 河流水系连通性问题已成为河流管理的重要热点, 很多学者从不同学科角度提出了景观连通性^[12]、水文连通性^[1,5]、生态连通性^[9,13]、连通性修复^[14-15]等多个相关概念。在景观学上, 河流水系是由不同等级廊道和斑块组成的网状或树状景观结构, 不同等级廊道之间以及不同景观斑块之间的通畅性程度即为河流水系的景观连通性, 表现为结构连通性和功能连通性^[12]。这一概念类似于 1980 年 Vannote 提出的河流连续体概念(RCC)^[12-15], 但较 RCC, 河流水系景观连通性不仅强调结构关系, 还强调了功能关系。水文连通性是指河流水系在水文过程的调节下, 物质、能量和生物运移过程的通畅性程度, 取决于流路组成、流路长度、分叉汇合程度、流量和流速等参量^[1]。生态连通性是指河流水系中物质、能量与信息在各组成部分之间流动、扩散的通畅性程度^[13,16], 主要表现为生物的迁徙、栖息、繁衍通道的畅通性。景观连通性与水文连通性是生态连通性的驱动条件和内在动力。2009 年前, 河流水系连通性在中国仅仅是作为部分学者的理论研究兴趣^[2,4]。自 2010 年国务院回良玉副总理、水利部陈雷部长分别指出河湖连通是提高水资源配置能力的重要途径、维持连通性是河流水系管理和健康维护的重要要求^[6]后, 河流水系连通性问题得到国家的高度重视。国内很多学者开展了河湖连通性定性和定量研究, 并提出了多个定义。为国内广泛接受的定义由夏军等^[6]提出: 在自然和人工形成的江河湖库水系基础上, 维系、重塑或新建满足一定功能目标的水流连接通道, 以维持相对稳定的流动水体及其联系的物质循环的状况。从上述概念可以看出, 河流水系连通性涉及自然地貌、水文变化、生态环境等多个自然要素, 具有自然属性。另外, 社会生产与发展也需依赖于河流水系连通性, 同时, 社会生产方式和发展程度也会对河流水系连通性产生一定的影响。可见, 社会要素也是河流水系连通性问题不可忽略的要素, 其概念内涵还应包含社会要素, 它具有自然和社会双重属性。

1.2 河流水系连通性机制

河流水系是在空间和时间上的一个四维自然生态系统, 其连通性机制表现为空间纵向、横向、垂向连通性以及时间上的动态性^[17-18], 如图 1 所示。

1.2.1 纵向连通性机制

河流水系纵向连通性是指生物、物质、能量在河流纵向上运移的通畅程度^[14]。从源头到河口, 河流水文-水力学过程为营养物质交换、运移、转化、累积和释放等提供了条件, 保证了物质流与能量流在河流纵向上的畅通性^[14-19]。河流纵向上水位、流速、水温等因子在塑造生物栖息地的同时, 也为生物繁殖、生长和迁徙提供了生命信号, 生物依据生命信号不断调整适应, 形成了河流水系多样而有序的生物群落^[16]。尤其是河口区洄游生物利用潮汐溯河产卵, 完成其生命循环。然而, 现实中由于过度建设水闸、堰、坝等, 使得基流量明显减小, 打破水沙、水热平衡, 隔绝生物上下游迁徙路径, 严重影响河流水系的生态完整性。

1.2.2 横向连通性机制

河流水系横向连通性是指主河槽与滩地、河岸带之间的相互连通^[14,20]。涨水时, 水流漫溢滩区, 为河岸带、滩地输送营养物质, 促进河岸带、滩地植被生长, 水生动物可进入滩区产卵或避难。退水时, 归槽水流带走腐殖质, 为植物种子传播提供条件, 水生动物回归主流, 完成其生活史过程^[21]。可见, 河流水系横向连通性涵盖了河流植物演替、生物迁移、泥沙运移、地形地貌变化、溶质养分运移等多个方面^[22-23]。但是, 由于筑堤、建坝、切槽等, 造成河流横向连通性降低, 减小了滩地淹没频率, 减弱了水动力条件及调洪能力, 降低了生态系统的生产力、养分交换和生物扩散能力等。

1.2.3 垂向连通性机制

河流水系垂向连通性是指河流地表水与地下水之间的水流、生物和溶质等的运移连通程度^[19]。由于水

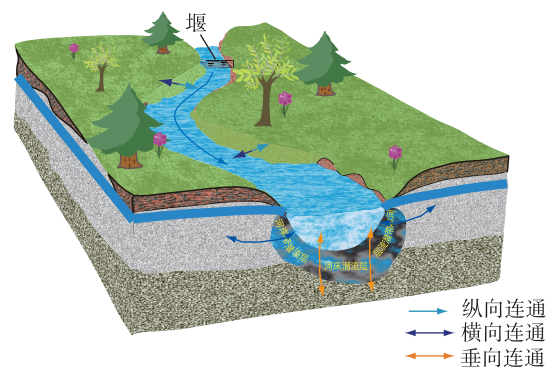


图 1 河流水系连通性机制示意

Fig. 1 Connectivity mechanism of a river system

力梯度的作用, 河流地表水会流入、流出河岸或河床与地下水相互交换, 产生上升流和下降流^[19]。下降流能为潜流生物群落提供溶解氧、养分、有机质, 上升流能为地表水输送一些特殊的化学物质, 可提高地表水栖息地多样性, 影响河流中的生物种群。垂向连通性程度取决于地表水-地下水交换条件、生物地下栖息条件以及水体环境的差异性和交换强度等因素。

1.2.4 连通的动态性

河流水系的水位、流量、生物分布等均有显著的季节性变化。随着季节变化, 河流水系纵向、横向、垂向连通性也会动态变化^[14,19]。洪水季节, 河流水系径流量较大, 边滩淹没, 河流水系纵向、横向与垂向连通性较好, 尤其是纵向连通与垂向连通性较为显著。枯水季节, 河流水系径流量较小, 边滩露出水面, 河流水系(尤其是山丘区河流水系)纵向连通性会受较大影响, 这时的横向连通性最为显著。时间维是河流水系连通性的关键要素, 动态性是连通性机制的重要表现。

2 连通度计算方法及适用性

2.1 定量计算方法

近20年来, 国内外很多学者从不同学科角度提出了多种河流水系连通度的计算与评价方法。2000—2010年, 主要针对生物迁移、景观斑块、水文连续性问题, 形成了以空间图形法^[24]、景观分析法^[2,21]、水文模型^[5,25]为主的计算方法。2011年以来, 主要针对河流水系多功能要求, 开展了多方法综合的研究, 形成了图论-水文法^[8,26-27]、图论-生态法^[9,13]等方法。尤其是2014年以来, 一些学者应用GIS、网络和数理推理等, 开展了多技术耦合的定量研究, 提出了基于GIS的计算与评价方法^[12,28]。另外, 还有学者综合河流水系的特点, 建立了河流水系连通性的综合指标评价方法^[29-30]。总体而言, 目前最为典型的方法有图论法、水文-水力学法、景观法、生物法以及综合指标评价法等。

(1) 图论法。基于图论的河流水系连通度计算是将河流水系以图的方式简明描述, 并根据图连通性评判方法计算河流水系连通度。山丘区河流水系大多为树状结构, 其拓扑结构可概化为单向有向图(图2)。平原区域河流水系大多为网状结构, 对流速较小的平原河网拓扑结构可概化为网状无向图(图3)。感潮型河网拓扑结构可概化为网状双向有向图(参照图3)。^① 矩阵法。用邻接矩阵或关联矩阵表示河流水系图的点、边关系, 并构造复合矩阵, 再以复合矩阵的特征值或非零元素个数占总元素个数的比作为连通度^[8]。该方法不能有效表达点边之间的方向关系。^② 分割法。从连通图(记为 G)中去掉最少点数或边数, 使图不连通, 这一过程分别称为点割和边割^[31]。通过计算最少点割数 $k(G)$ 或最少边割数 $\lambda(G)$ 来确定河流水系连通性程度。^③ 统计法。用一定水位、流量条件下任一节点到达其他节点的保证率来计算连通度^[31], 该方法首先需统计边分割数计算边连通度, 进而计算出河流水系的连通度。

(2) 水文-水力学法。水流状况(尤其是径流特征)是河流水系连通性最为直接和重要的反映。过流量和阻力特性是径流特征的主要表现。因此, 可根据河流的过流能力和阻力特性来确定河流水系的连通度。^① 水文连通函数法。通过计算平均流量、径流系数或过流能力, 建立河流水文连通性函数^[5,32]。^② 水力阻力法。根据水流阻力特性来定量计算连通度^[8]。^③ 水文-水力综合法。综合考虑水文过程和水流阻力, 用任一河流与其他河流连通度的最大值来建立河网连通度, 进而计算河网的加权连通度^[27]。

(3) 景观法。^① 区域景观指数法。从景观生态学角度计算连通度的方法较多, 目前使用较为广泛的是由Pascual-Hortal和Saura^[21]提出的整体连通性指数和可能连通性指数计算方法。^② 局部斑块指数法。将河流(河段)各组成部分看作不同的斑块, 通过计算不同斑块间的连通度来反映河流的连通性^[11]。

(4) 生物法。河流水系中生物迁徙或扩散能力在一定程度上也反映了河流水系的连通程度。^① 区域扩散阻力法。通过计算生物经过不同景观单元所需克服的最小累积阻力来确定河流水系的连通度^[33]。^② 局部迁移能力法。以生物通过泵、闸、堰等障碍物的能力指数表示河流连通度^[34-35]。

(5) 综合指标法。河流水系连通性可综合考虑自然、社会等属性特点, 通过建立多指标进行综合评判。

① 区域综合指标法。根据区域内河流水系景观、水文、生物、社会的特点, 从形态、结构、功能等方面建立一套综合评价指标体系^[29], 选择适宜数学方法, 系统综合评价连通性状况。② 区段综合指标法。对于局部河段或断面, 根据纵横垂向特征, 选择适宜指标, 分别计算纵横垂向连通性指数, 再经复合计算出局部河段或断面的综合连通性指数^[30]。

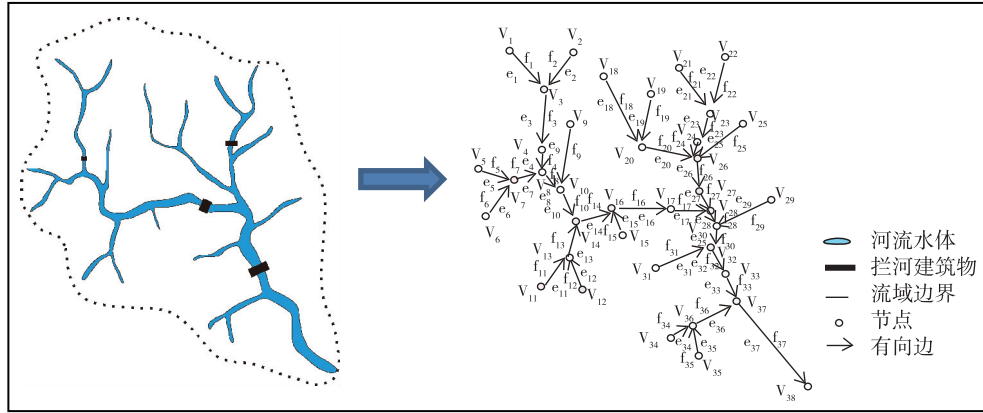


图 2 树状水系概化单向有向图模型

Fig. 2 Directed graph of a dendritic river system in a hilly area

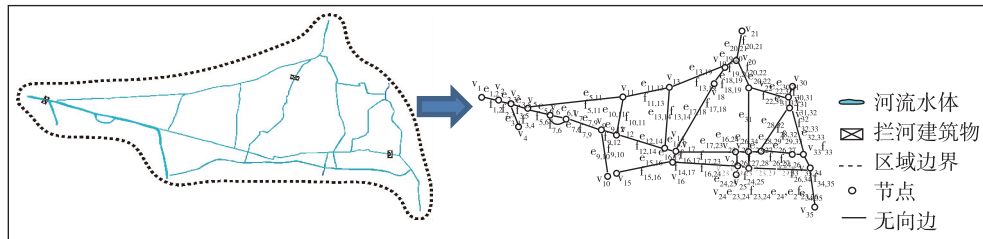


图 3 平原河网水系概化网状无向图模型

Fig. 3 Non-direction graph of a river network in a flat area

2.2 主要方法适用性比较

现有定量研究方法主要从景观学、生态学、水文学、水力学等学科角度, 根据河流水系特征和功能要求, 考虑景观格局、水文过程、输水能力、生物通过不同栖息地和障碍物的能力, 提出了一系列连通度定量计算方法。近几年来, 由于网络和信息技术的发展, 出现了多尺度、多要素、多功能复合的河流水系连通度计算方法。这些方法为中国河流水系连通性定量研究提供了有效借鉴。但是, 各种方法有其适用条件(表 1), 在实际使用中需根据实际问题选择适宜方法。

表 1 连通度定量计算方法的比较

Table 1 Comparison of different quantifying methods of river connectivity

方法	特点	适用性	不足与改进	
图论法	矩阵法	以图元素间的数学矩阵确定连通度	用于计算不同尺度下景观、水文、生态连通度	未能反映点边的方向关系
	分割法	利用图论基本原理确定连通度, 包括点分割法与边分割法	点分割法主要用于计算河流(河段)的连通度, 边分割法主要用于计算树状水系或河网水系的连通度	点、边分割算法较难选择
	统计法	综合图论原理, 计算节点或边的连通概率值, 确定连通度	用于计算区域尺度下景观、水文、生态连通度	取决于数据量与概率算法
水文水力学法	水文连通函数法	根据水文原理确定连通度	用于计算区域尺度下水文连通度, 尤其适用于脉动水文条件下的连通性分析	改进算法以适应源头性中小河流的连通性
	水力阻力法	用水流阻力计算河流连通度	用于计算河流、河段、断面水文连通度, 评价水流通畅性与过流能力	改进算法以适应源头性中小河流的连通性
	水文-水力综合法	综合考虑水文过程与水力阻力特性, 确定连通度	适用于河流水文连通性计算与降雨径流的响应关系分析, 解释连通程度对内涝的影响程度	改进算法以适应源头性中小河流的连通性

续表1

	方法	特点	适用性	不足与改进
景观法	区域景观指数法	根据区域自然地理与景观格局原理确定连通度	可用于计算区域内多景观单元的景观连通度,亦可解释景观单元的边缘效应	依赖尺度选择与图件资料的精度
	局部斑块指数法	以局部地理单元内斑块邻接关系确定河流斑块的连通度	可用于计算局部区域景观连通性与各斑块对连通性的重要值,还可用于评价生态连通性	依赖尺度选择与图件资料的精度
生物法	区域扩散阻力法	根据生物扩散与生境动态需求原理确定连通度	用于计算区域尺度下河流水系生态连通度	需熟悉生物习性,未考虑动态变化
	局部迁移能力法	以生物可用栖息地条件和迁移能力确定生态连通度	用于计算有障碍物河流的生态连通度	连通度受到生物种类的影响
综合指标法	区域综合指标法	确定多因素指标,应用综合评价数学模型,计算综合连通指数	综合评判大区域河流水系连通性,亦可为河流水系管理综合决策提供依据	取决于区域尺度、适宜指标与数据量
	区段综合指标法	以区段内障碍物分布及贡献大小计算连通指数	明确河流、河段、断面上综合连通性,评判障碍物的阻碍等级	取决于障碍物识别、打分方法以及数据量

3 研究展望

3.1 连通性的尺度问题

未来应探究微小尺度下的连通性,并现有研究主要关注了流域尺度和河流(河段)尺度下的连通性,而对小尺度和微观尺度的连通性研究较少。注重连通性的多维、多尺度的协同性、动态性及尺度相互转换。

① 空间多尺度协同。从空间上看,河流水系涉及区域大尺度、河流(河段)中尺度、断面或微地形等小尺度,甚至土壤孔隙等微观尺度。连通度计算和连通性修复应针对不同问题,选择适宜尺度,但同时亦需兼顾其他尺度。在研究河流堰坝生态修复时,既要考虑局部生物迁徙和径流要求,同时还要考虑堰坝在整条河流甚至整个流域中的协同效应。

② 时间多尺度转换。须根据河流水系的动态特征,选择适宜的时间尺度,动态评判连通性程度和修复措施。综合考虑不同时间尺度间的转换。

3.2 连通性的含义与机理问题

(1) 拓展连通性的内涵。现有研究重点界定了景观、水文、生态等方面的自然连通性含义,而河流水系是社会发展的基础,承载着重要的历史文化,不同区域的文化通过河流水系相互交流。因此,河流水系连通性不仅要体现自然属性,同时还应考虑服务社会的社会属性。笔者将河流水系与社会的连通性称为社会连通性,其具体内涵需进一步拓展。

(2) 探究多源因素作用下的河流水系连通性响应机理。目前已从水文、景观、生物等学科领域深入研究了河流水系连通性机理,形成了河流水系连通性的多个学科理论。河流水系连通性涉及多学科,易受多源因素的影响,因此,需综合多学科理论,探究多源因素作用下的连通性响应机理,为河流生态恢复提供理论基础。

3.3 连通性定量计算方法与手段问题

(1) 多方法耦合。河流水系连通性涉及多时空尺度、多要素、大量数据,因此,单一方法、单一技术很难准确探究连通性。应根据具体问题,在传统方法的基础上,应用现代数学、水文、景观、生态、社会等理论,研究探讨多目标联合、多方法耦合的定量研究方法。图论与网络理论是现有河流水系连通性研究的重要方法,目前主要考虑了纵向连通性,对横向、垂向连通性定量研究较少。笔者将河流三维结构概化为如图4的拓扑结构图,耦合多方法,研究三维连通性定量计算方法。

(2) 多技术集成。集成大数据、网络、3S、云计算等技术,建立集成度高、方便快捷的河流水系连通性数据管理、同步计算、评判和预测的智能工具平台,以适应多尺度协同和动态变化的需求。特别需借助现代监测手段,加强基础数据的积累和管理,为机理分析和准确预测提供可靠基础数据。

3.4 连通性修复问题

(1) 辩证看待连通性,科学把握连通性修复的度。当前,中国非常重视河流水系的连通性问题,实施水系连通与中小河流生态修复工程,强调河流水系的高连通性,这在一定程度上解决了河流水系破碎化、硬化、

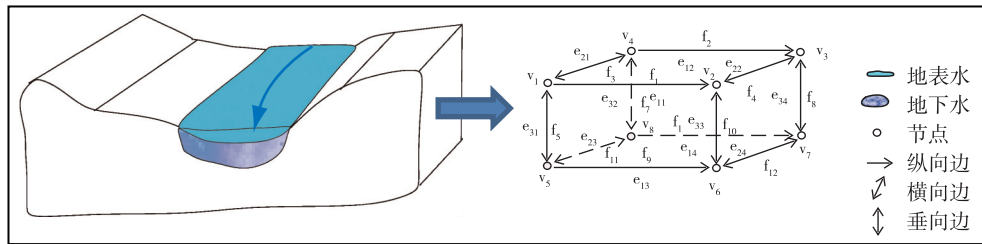


图 4 概化的河流三维拓扑结构图模型

Fig. 4 3-D graphic model of a river reach

渠道化等问题。但过高的河流水系连通性也会增加下游区域的防洪压力, 为外来物种入侵提供了便利条件, 造成本土物种的退化甚至消失, 扩大污染物影响范围, 引起环境恶化, 为疾病传播和扩散提供了通畅的通道, 不利于疾病防控等。因此, 在连通性修复中, 需充分了解区域特点, 深入研究连通性修复的适宜程度。

(2) 连通性修复的多维方向。连通性修复中往往注重纵向连通性和横向连通性修复。但是, 由于垂向连通性不易看到, 在实际河流治理或修复工程中, 垂向连通性常被忽略, 引起局部生态环境恶化。因此, 河流生态修复中也应考虑垂向连通性的修复, 注重多维方向上连通性修复。

4 结 语

自 1988 年提出河流连通性以来, 河流水系连通性已成为河流管理的重要热点, 很多学者从不同学科角度提出了景观连通性、水文连通性、生态连通性以及连通性修复等多个概念, 重点阐述了连通性的自然属性, 而河流水系连通性还具有社会属性。从作用机制看, 河流水系连通性包括纵向、横向、垂向连通性以及连通性的动态性等机制特征。近 20 年来, 很多学者从不同学科角度, 提出了多种河流水系连通性定量计算与评价方法, 最为典型的方法有图论法、水文-水力学法、景观法、生物法以及综合指标法, 各方法有其适用性和不足, 应用中需针对实际问题特征, 选择适宜方法。河流水系连通性涉及多尺度、多学科、多要素, 未来应深入研究连通性理论, 并拓展研究方法和技术。在研究内容上, 着重研究连通性的尺度协同、内涵界定、响应机理以及修复等问题; 在技术方法上, 拓展现有方法, 着重开展多方法耦合、多技术集成研究。

参考文献:

- [1] PRINGLE C M. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17: 2685-2689.
- [2] 徐慧, 徐向阳, 崔广柏. 景观空间结构分析在城市水系规划中的应用[J]. *水科学进展*, 2007, 18(1): 108-113. (XU H, XU X Y, CUI G B. Application of landscape spatial structure analysis to urban river system planning[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(1): 108-113. (in Chinese))
- [3] AMOROS C, ROUX A L. Interaction between water bodies within the floodplain of large rivers: function and development of connectivity[J]. *Munstersche Geographische Arbeiten*, 1988, 29: 125-130.
- [4] 陈云霞, 许有鹏, 付维军. 浙东沿海城镇化对河网水系的影响[J]. *水科学进展*, 2007, 18(1): 68-73. (CHEN Y X, XU Y P, FU W J. Influences of urbanization on river network in the coastal areas of East Zhejiang Province[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(1): 68-73. (in Chinese))
- [5] 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.
- [6] 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 J, GAO Y, ZUO Q T, 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))
- [7] 王跃峰, 许有鹏, 张倩玉, 等. 太湖平原区河网结构变化对调蓄能力的影响[J]. *地理学报*, 2016, 71(3): 449-458. (WANG Y F, XU Y P, ZHANG Q Y, et al. Influence of stream structure change on regulation capacity of river networks in Taihu Lake basin

- [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(3): 449-458. (in Chinese))
- [8] 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 G L, XU Y P, WANG L Y. Evaluation of river network connectivity based on hydraulic resistance and graph theory[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(6): 776-781. (in Chinese))
- [9] STOFFELS R J, REHWINKEL R A, PRICE A E, et al. Dynamics of fish dispersal during river-floodplain connectivity and its implications for community assembly[J]. *Aquatic Sciences*, 2016, 78: 355-365.
- [10] MERRIAM G. Connectivity: a fundamental ecological characteristic of landscape pattern[C]//BRANDT J, AGGER P. Proceedings First International Seminar on Methodology in Landscape Ecological Research and Planning. Theme I: International Association for Landscape Ecology. Roskilde: Roskilde University, 1984: 5-15.
- [11] 岳天祥, 叶庆华. 景观连通性模型及其应用[J]. *地理学报*, 2002, 57(1): 67-75. (YUE T X, YE Q H. Models of landscape connectivity and their applications[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(1): 67-75. (in Chinese))
- [12] VANLOOY 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.
- [13] MCKAY S K, SCHRANSKI J R, CONYNGHAM J N, et al. Assessing upstream fish passage connectivity with network analysis[J]. *Ecological Applications*, 2013, 23(6): 1396-1409.
- [14] KONDOLF G M, NOULTON A J, O'DANIEL S, et al. Process-based ecological river restoration: visualizing three-dimensional connectivity and dynamic vectors to recover lost linkages[J]. *Ecology and Society*, 2006, 11(2): 5.
- [15] STAMMEL B, FISCHER P, GELHAUS M. Restoration of ecosystem functions and efficiency control: case study of the Danube floodplain between Neuburg and Ingolstadt (Bavaria/Germany)[J]. *Environment Earth Science*, 2016, 75: 1174.
- [16] MAY R. "Connectivity" in urban rivers: conflict and convergence between ecology and design[J]. *Technology in Society*, 2006, 28: 477-488.
- [17] WARD J V. The four-dimensional nature of lotic ecosystems[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1989, 8: 2-8.
- [18] 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, 30(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))
- [19] 夏继红, 陈永明, 王为木, 等. 河岸带潜流层动态过程与生态修复[J]. *水科学进展*, 2013, 24(4): 589-597. (XIA J H, CHEN Y M, WANG W M, et al. Dynamic processes and ecological restoration of hyporheic layer in riparian zone[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(4): 589-597. (in Chinese))
- [20] 赵进勇, 董哲仁, 孙东亚, 等. 基于图论的河道-滩区系统连通性评价方法[J]. *水利学报*, 2011, 42(5): 537-543. (ZHAO J Y, DONG Z R, SUN D Y, et al. Evaluation method for river floodplain system connectivity based on graph theory[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(5): 537-543. (in Chinese))
- [21] PASCUAL-HORAL L, SAURA S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation[J]. *Landscape Ecology*, 2006, 21(7): 959-967.
- [22] STEVAUX J C, CORRADINI F A, AQUINO S. Connectivity processes and riparian vegetation of the upper Paranu River, Brazil [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2013, 46: 113-121.
- [23] 夏继红, 林俊强, 姚莉, 等. 河岸带的边缘结构特征与边缘效应[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(2): 215-229. (XIA J H, LIN J Q, YAO L, et al. Edge structure and edge effect of riparian zones[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2010, 38(2): 215-229. (in Chinese))
- [24] URBAN D L, KEITT T H. Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective[J]. *Ecology*, 2001, 82: 1205-1218.
- [25] JACKSON C R, PRINGLE C M. Ecological benefits of reduced hydrologic connectivity in intensively developed landscapes[J]. *BioScience*, 2010, 60: 37-46.
- [26] KARIM F, KINSEY-HENDERSON A, WALLACE J, et al. Modelling wetland connectivity during overbank flooding in tropical floodplain in north Queensland, Australia[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(18): 2710-2723.
- [27] 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, 34. (CHEN X, XU W, LI K P, et al. Evaluation of plain river network connectivity based on graph theory: a case study of Yanjingwei in Changshu City[J]. *Water Resource Protection*, 2016, 32(2): 26-29, 34. (in Chinese))

- [28] DAM M H V, MATZKE N J. Evaluating the influence of connectivity and distance on biogeographical patterns in the southwestern deserts of North America[J]. *Journal of Biogeography*, 2016, 43: 1514-1532.
- [29] 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 X Y, CHEN X, CHEN D Y, et al. Evaluation system of urban water system connectivity[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(1): 24-28. (in Chinese))
- [30] 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 Ecosystem*, 2016, 26 (Suppl 1): 29-38.
- [31] 林泽芳. 有向图和图的边连通性与点连通性[D]. 济南: 山东师范大学, 2014. (LIN Z F. The properties of edge connectivity and vertex connectivity of digraphs and graphs[D]. Ji'nan: Normal University of Shandong, 2014. (in Chinese))
- [32] 茹彪, 陈星, 张其成, 等. 平原河网区水系结构连通性评价[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(5): 9-12. (RU B, CHEN X, ZHANG Q C, et al. Evaluation of structural connectivity of river system in plain river network region[J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(5): 9-12. (in Chinese))
- [33] 赵筱青, 和春兰. 外来树种桉树引种的景观生态安全格局[J]. *生态学报*, 2013, 33(6): 1860-1871. (ZHAO X Q, HE C L. Landscape ecological security pattern associated with the introduction of exotic tree species Eucalyptus[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(6): 1860-1871. (in Chinese))
- [34] SHAW E A, LANGE E, SHUCKSMITH J D, et al. Importance of partial barriers and temporal variation in flow when modelling connectivity in fragmented river systems[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 515-528.
- [35] 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))

Review of mechanism and quantifying methods of river system connectivity *

XIA Jihong¹, CHEN Yongming², ZHOU Ziye¹, ZHANG Qi¹, PENG Suli¹, WANG Jinping¹, YU Genting¹

(1. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;*

2. *College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310009, China)*

Abstract: “Connectivity” in a river ecosystem originated from landscape ecology, which plays a significant role in hydrological cycle, wildlife migration, and environment improvement. Now days, from the subjects of landscape, hydrology and ecology, many definitions of river system connectivity have been delimited as hydrological connectivity, landscape connectivity, and ecological connectivity, respectively, which are characterized as natural attribution. However, due to the role of human on a river system, river system connectivity should have social attributes and its concept should be extended to cover social connectivity as well. The connotation of connectivity could be illustrated from the mechanism of longitudinal connectivity and lateral connectivity and vertical connectivity. Particularly, these interaction mechanisms are dynamic. Many quantifying methods of connectivity, such as graphic method, hydrological and hydraulic method, landscape method, biological method and comprehensive index method, have been developed. However, as all these methods have their own limitation and disadvantages, they should be suited for many problems after being modified. In advance, it could be focused on research contents, methods and techniques. In the aspect of research contents, it should be significant to extend the connotation of the connectivity and investigate the responding mechanisms to many acting factors and develop the suitable measures of recovery connectivity. What's more, it should be paid attention to the fit scales and develop new methods and tools with integrated mathematic, landscape, hydrological models with GIS, network techniques and ect.

Key words: river system; connectivity; quantifying method; graphic theory

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41471069).