

河流连通性及其对生态水文过程影响研究进展

方佳佳^{1,2}, 王 烜^{1,2}, 孙 涛^{1,2}, 李春晖², 蔡宴朋¹, 李 智²

(1. 北京师范大学 环境学院 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学 环境学院 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘 要: 为研究流域水资源开发利用对生态系统和水资源承载力的影响,梳理了河流连通性的内涵、分类及评价方法,并着重探讨了河流的纵向连通性,从水质、水量和生物3个方面剖析人工构筑物对水生态系统的影响机理。认为河流连通性是一个具有4维尺度的概念,即1个时间维度、3个空间维度,影响生态水文过程及群落结构的抵抗力与生态系统整体的稳定性,对其评价应该考虑时空变异性。指出后续的研究方向为:从指示物种层面进一步明晰河流连通性程度与生态水文过程的交互影响机理;统一河流连通性程度定量化评价方法和标准,增加不同河流、同一河流不同时期之间的可比性,为面向水资源承载力提升的河流可持续发展与保护提供理论基础。

关键词: 河流连通; 生态水文格局与过程; 流域水资源承载力; 研究进展

中图分类号:TV213; P343.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0019-08

Review of research on river connectivity and its impact on eco-hydrological process

FANG Jiajia^{1,2}, WANG Xuan^{1,2}, SUN Tao^{1,2}, LI Chunhui², CAI Yanpeng¹, LI Zhi²

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing

Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of

Ministry of Education, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: To study the influence of water resources development on ecosystem and water resources carrying capacity, the connotation, classification and evaluation methods of river connectivity are summarized, and the vertical connectivity of river is discussed in detail. From the aspects of water quality, water quantity and organism, the influence mechanism of the barrier building on the water ecosystem is analyzed. As a four-dimensional concept, that is, a time dimension and three spatial dimensions, the river connectivity affects the eco-hydrological processes, the resistance of community and the stability of the ecosystem, thus the connectivity evaluation should take into account the spatial and temporal variability. Based on analyses of current research progress, the future research directions are pointed out as follows: to further clarify the interaction between river connectivity and eco-hydrological processes from the indicated species level, to unify quantitative assessment methods and standards of the river connectivity degree to increase the comparability among different rivers or different periods for the same river, so as to provide a theoretical basis for sustainable development and protection of rivers aiming at improving the carrying capacity of water resources.

Key words: river connectivity; eco-hydrology pattern and process; water resources carrying capacity; research progress

随着社会经济的发展,人类对水资源的开发利用达到空前的规模,许多流域出现了水系衰落、连通

收稿日期:2017-10-09; 修回日期:2017-12-05

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0401302); 国家自然科学基金项目(51679008、51439001)

作者简介:方佳佳(1993-),女,浙江湖州人,硕士研究生,主要从事生态水文与水力研究。

通讯作者:王 烜(1973-),女,云南昆明人,博士,教授,博士生导师,主要从事水环境精细模拟、气候变化下的生态水文响应、流域水资源安全评价与调控研究。

受阻的现象^[1],流域上下游物质、能量、信息传输受到阻滞,并对正常发挥流域生态系统服务功能产生极大的负面影响。高强度的人为活动背景下,基于“水资源-社会经济-生态环境”互馈关系的水资源承载力研究不应仅沿袭传统的水量平衡分析、水质达标管理,而应拓展新的视角,更多地关注河流生态水文格局对生态水文过程的影响,从而为提升流域水资源承载力、修复受损的水生态系统提供决策支持。近年来,优化生态水文格局的理论和实践研究逐渐兴起,对河流连通性进行量化分析作为流域水资源可持续开发利用和管理的必要基础,日益受到国内外研究者和管理部门的关注^[2-4]。本文拟梳理近 20 年来国内外学者对于河流连通性的定义、分类、评价方法,并就水流纵向连通性进行着重分析,探讨人工阻隔物对于河流生态水文过程的影响机制,为河流水资源的可持续开发利用与生态环境保护提供理论基础。

1 河流连通性的内涵

对于河流连通性的研究,最早可追溯到 1980 年由 Vannote 等^[5]提出的河流连续体(River Continuum Concept, RCC)的概念,其认为从上游到下游河流系统内的物理变量随环境条件的变化呈现出连续变化梯度。河流连通性对于把握流域的生态水文动态至关重要^[6]。国外学者对连通性的研究集中于水文学、地貌学和景观生态学领域,并对连通性的量化方法进行了探讨。水流连通通常被定义为在水文循环中或各要素间的以水为介质的物质、能量及生物的传输过程^[3,7-8]。Ward^[9]从四维角度提出了河流连接度的概念,将其作为度量水资源在河流景观内相互传递能力大小的指标。Croke 等^[10]从景观特征角度将水文连通定义为流域上游来水与外界来水产生的径流和泥沙的内部连接,包括两种类型,一是通过沟渠产生的直接连通;二是地表径流通过地面路径和河流网络相连产生的扩散连通。Hook^[11]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。对于无明显地表径流的坡面水文连通,主要是指当地下水位高于不透水层时,河岸区域与陆地区域通过地下径流产生的连通^[12-13]。Jencso 等^[14]研究了流域景观要素(山坡和河岸带)与渠道网络之间的连通,根据蒙大纳州洛矶山北部的 Tenderfoot Creek 实验林(美国森林服务)内的 24 个 HRS 断面分布的 84 个记录井观测数据量化了水位连通性。

国内对于河湖水系连通的实践自古有之,但关于连通性的理论基础研究要落后于实践,目前在连通性概念与内涵、构成要素、连通性分类、功能、研究尺度等方面已有了初步进展。长江水利委员会编写的《维护健康长江,促进人水和谐研究报告》将水系连通性定义为:河道干支流、湖泊及其他湿地等水系的连通情况,反映水流的连续性和水系的连通状况。2010 年 1 月,水利部陈雷部长在全国水利规划计划工作会议提出“河湖连通是提高水资源配置能力的重要途径”后,国内学者对于连通性的研究也日益增多。王中根等^[15]指出水系连通性本质上是受流域(区域)水循环背景条件和过程影响,由水系的结构形式(如树枝状水系、网状水系等)和水系特征参数(如河网密度、湖泊率等)所决定的。由于研究区域和环境的不同,水文连通的概念未有统一的定义,至今也没有进行现场观测考核的明确方式^[16]。国内对于水文连通的研究多集中横向连通,即河流与湖泊、河流与人工湿地、河流与沼泽、河流与蓄滞洪区的连通,而对于直接体现河流连续体在流动空间上前后接续关系的纵向连通研究尚不够深入。《全国水资源保护规划技术大纲》中指出纵向连通性是生态状况评价中“物理形态”这一准则层中的指标,表征河流系统内生态元素在空间结构上的纵向联系。但笔者认为纵向连通性不应该仅仅是关乎“物理形态”,其所带来的一系列水环境条件变化、水文生态交互响应过程不应该被忽略,因而其内涵需要得到完善。

流域内的河流连通具有 4 个维度的特征^[17],即 1 个时间维度和 3 个空间维度(源头-河口的纵向连通,湖泊/沼泽/人工湿地/蓄滞洪区-河道的横向连通,河流地表水-地下水的垂向连通),其平面图如图 1 所示,其分类如图 2 所示。河流连通性是生态水文格局的一个重要指征,各维度相互关联,持续影响着生态水文系统的过程。

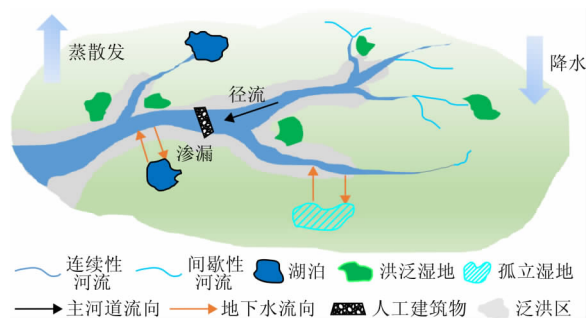


图1 流域内的水系连通平面图



图2 河流连通性分类

综上,笔者认为河流的连通性可定义为河道干支流、湖泊及其他湿地等水系在物质、能量和信息上的连通情况,它反映了水流的连续性和可循环性,关乎水文与生态交互作用,关乎生态系统的可持续发展,是一个多维度且存在时空变异性的概念。

2 河流连通性对水生态系统的影响

河流的生态功能包括:栖息地功能、过滤作用、屏蔽作用、通道作用、源汇功能等方面^[18]。良好的连通性可以促进河流生态系统的物质与能量循环,为水中生物及鸟类等营造良好的生存环境。天然河流通过季节性的洪泛,不仅有助于周边土壤、地貌的发育,还有利于种群的繁殖扩大及生物多样性水平的维护^[17]。而河流连通的受阻或中断则会影响生态系统的进程,人类高强度开发的河流系统易于出现栖息地片段化,其树状网络的连接易地被人工建筑物诸如大坝和涵洞之类的共同基础设施所断开^[19]。这些阻隔物会阻碍了河流生物群的洄游,繁殖,栖息和扩散^[20]。而且,在栖息地碎片中分离的种群会更容易受到随机扰动,并存在近亲繁殖的风险,一旦消失就很难重新建群^[21]。更有研究表明,在极端的情况下,河流受阻已经引起了动物种群数量的显著下降甚至灭绝^[22]。河流连通受阻已经成为人水关系不和谐的重要表现,成为影响区域经济社会可持续发展、河流健康的关键制约因素。因而揭示河流连通性对于水生态过程的影响机理对于河流的健康管理尤为重要。

为了更有效的利用水资源,我国在流域河流中建设了为数众多人工构筑物,如水库、闸坝、道桥等。这些建筑物对于河流的纵向连通性产生了巨大的阻隔,易造成末端河流消失、河网主干化明显、栖息地破碎等现象^[23-24]。由人工构筑物带来的连通受阻是目前许多高强度开发河流所面临的最直接的问题,也是河流管理中解决上下游用水冲突和协调必

须考虑的首要问题之一,然而当前鲜有针对此方面的研究。因而,笔者将重点探讨河流纵向连通性对生态系统的影响机理。人工构筑物带来的连通性改变对水量、水质、生物的影响及三者的相互作用如图3所示。人工构筑物对连通性的影响主要包括3种途径:阻断动物迁徙通道而影响上游连通^[25],滞留营养物质及生物而影响下游连通^[26],影响水土界面营养物质交换通量来影响关键生态过程^[27]。

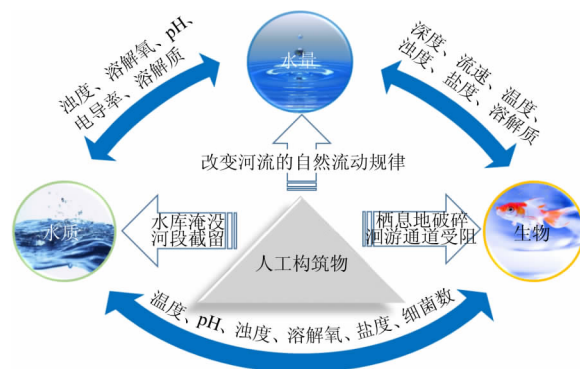


图3 人工构筑物对水量、水质、生物的影响及三者的相互作用

2.1 河流连通性对水量的影响

河流纵向连通性的改变对水量影响主要是由于人类通过修建水库、闸坝等改变了河流的自然流动规律,改变了自然河流本身所服从的季节流量模式,形成了一种人为的流量变化模式,例如澳大利亚境内的活勒甘巴水坝的建立使得其所在河流的每年平均洪水量减小至少一半以上^[28]。另外,整个流域的水文情势也将受到极大的影响,薛联青等^[29]以塔里木河干流为研究区,运用改进的RVA法来评价水利工程对其生态水文情势的影响,结果表明水库建设运行对塔里木河干流径流影响较大:多数月份的月均流量减少;年内低流量的次数增加;部分站点流量逆转次数增加。Guyassa等^[30]研究了埃塞俄比亚北部高原的拦砂坝对径流的影响,通过安装三角堰、自动传感器分别测量径流排放与径流深度,结果表明由于自然地理环境的不同,河流连通性对水量影响的后果也存在较大的差异,与未处理的沟渠相比,安装了拦砂坝的沟渠会出现径流滞后现象,且峰值流量及径流量总体均呈减少状态。由于自然地理环境的不同,河流连通性对水量影响的后果也存在较大的差异,如在中国干旱区和半干旱区,由于河流连通性受阻将直接导致河道断流、生态流量亏缺,水量影响成为最基本的问题;而在水资源丰沛的西南大江大河源区,水电梯级开发导致的河流连通性变化对水量影响相对较小,研究者则更多地关注除水量影

响之外的生物、信息连通等问题。

2.2 河流连通性对水质的影响

在河流上构筑人工建筑物后,河水被拦蓄形成水面面积广阔的水库,相比于自然河流,暴晒于太阳下的水面面积大大增加,蒸发量将会增大,河流的盐度就会增加^[31]。另外,从坝区水库上部泄水口的出水的温度常年比天然河水高,因由泄水口注入天然河流中的水会改变原有的水温,而物质在水中的溶解度与水温息息相关,这会对水中的溶解氧以及悬移物质的数量产生一定的影响,同时,还会影响河流中的相关化学反应。由于河水季节温度发生改变,会对水生生物的生命周期产生影响。此外,由于水库的形成,若水流连通性不佳,流速缓慢则极易产生水体富营养化问题,如 Zubala^[32]对黄土农业区的水质进行了检测,结果发现建立闸坝使得流入水库的水含磷浓度提高,同时化学需氧量、生物需氧量、 Fe^+ 也达到高值。在此情况下,若在汛期开闸泄洪,就会进一步污染下游健康的水体,影响整个生态系统。可见,人工建筑物带来的河流纵向连通性的改变会对河流的水质产生显著影响,影响的大小主要受制于人为活动方式(闸坝调度的时空特性等),同时与当地的自然环境状况(水温、地形、坡度、流速等)密切相关。

2.3 河流连通性对生物的影响

水系连通对于维持生态系统的完整性,水生生物多样性具有重要意义。人类开发程度较高的河流,由于短时限高强度的人类活动干扰,河流的连通模式和格局发生转变会快速影响关键生态过程,最终影响生物群落和种群数量以及食物网结构与功能。研究发现,河流连通受阻会对栖息地生物的生存以及群落结构的抵抗力产生严重影响^[33],栖息地的破碎会削弱物种在不同生境间的迁移能力^[34],从而降低生物多样性^[35-36]。刘玉年等^[37]采用多种生物指数法分析淮河流域的闸、坝等水利设施对水生生态环境的影响,结果发现所调查评价的河流中有 64% 处在不健康或亚健康状态。其中,闸、坝上游,49% 的河段的生态多样性略有增加,11% 的河段水生生物生活习性有明显变化;对于闸坝下游河段,40% 的河段的生态多样性有明显降低。由于连通性的变化,迁徙种受到的影响尤为大,Yi 等^[38]研究了长江大坝建设引起的河湖关系变化及对迁徙鱼的影响,发现障碍物威胁该地区的一些鱼类,尤其是迁徙鱼类,河湖的连通度决定了迁徙鱼类的生长繁殖,其产量与分流量正相关,水库管理特别要注重

产卵季节应满足生态需求。故而人工建筑物使得河流的纵向连通性大大下降,不仅截断了鱼类的洄游通道,使栖息地破碎化,同时改变了原有的水文规律和生态水文格局,影响了河流的物流、能流和信息流,进一步对生物产生巨大的影响。

3 河流连通性的评判

近 20 年来,河流连通性评价逐渐发展起来,国内外出现了多种河流水文连通性评价方法,如图论法、指标法、水文模型、连通性函数等。国外在定量化方法上的探讨较为广泛,国内起步较晚,随着近年来对于防洪减灾、水资源优化配置及水生态文明建设的需求日益增加,河网连通性越来越受到重视^[39]。目前相关研究尚处于起步阶段,各类方法简述如下:

3.1 指标法

指标法即选取与水文连通相关的特征参数,如河段长度、土壤特性、生物受影响程度等,以求综合考量水流的连续性。比较典型的几种方法如下:

为了充分了解水流的连通程度,Ali 等^[16]将景观特征、土壤湿度模式和水流路径作为识别连通度的主要指标。其相关的变量如图 4 所示。

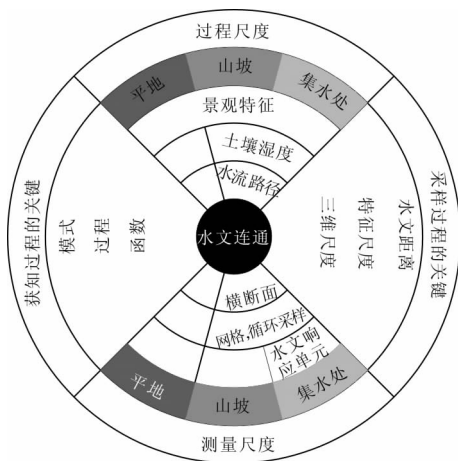


图4 水文连通关键因子及研究尺度(改自文献[18])

该方法给出了将模式、过程和函数 3 个方面作为流域响应的关键,多参数变量协调过程和度量尺度。国内同样试图提出指标来评价全国河流的连通情况。全国水生态文明建设评价导则提出了河流纵向连通性指数 $K_{\text{连通}}$, 将其定义为区内流域面积 100 km^2 以上的河流中,每 100 km 河长中阻隔河流连通的人工建筑物数量。虽然该评价方法适用全国,但是较为粗略,仅仅依照单位长度上的人工建筑物个数来评价连通性,忽略了河流生态系统复杂的交互

影响。此外该方法不考虑已有过鱼设施且发挥作用的闸坝、不影响鱼类通过的小型跌水工程和溢流坝,一定程度上低估了过鱼设施有限的实际效用对生态环境的负面影响。因此,该方法只能简单评价大流域单一河道的整体情况。

针对流域内复杂河网的情况,Cote 等^[40]提出了树状河网连通性指数(Dendritic Connectivity Index, *DCI*),该指数主要根据水利工程设施的数量、可通过性以及地理位置,定量评估河网连通性状况。*DCI*可根据公式(1)进行计算:

$$DCI = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(C_{ij} \frac{l_i}{L} \frac{l_j}{L} \times 100 \right) \quad (1)$$

式中: C_{ij} 为*i*河段与*j*河段之间的连通性; l_i 及 l_j 分别为*i*河段与*j*河段的长度,m; L 为河网的总长度,m; n 为河网被障碍物切割而形成的河段数量。*DCI*的取值范围为0~100,其值越高,河网的连通性越好。

*DCI*相较于 $K_{\text{连通}}$ 能够较为全面地分析不同数量、可通过性及地理位置的闸坝对河网连通性的影响,可以广泛应用于流域规划过程中不同方案的比较,但并未考虑闸坝的实际通过率,而是采用了假设法,在案例中^[41]作者假设所有闸坝从上游至下游及从下游至上游的生物体通过概率均为0.8,这与实际情况不符。

3.2 累积法/瓶颈法

针对上面所述假设法造成的实际障碍物通过率衡量与实际不符的情况,为更好地计算鱼类对于障碍物的通过率以更准确地评价水流连通性,采用累积法(cumulative method)或者瓶颈法(bottle-neck method)。累积法即一条河流中鱼类对于多个障碍物的组合率是单个障碍物通过概率的乘积,将每个连续的屏障视为一些鱼不能越过障碍的概率(例如,鱼类能否发现鱼道入口等随机过程),而不是与鱼类个体之间的差异(例如最大游泳速度,条件)相关的因素,O'Hanley 等^[42]、Numm 等^[43]都采用了此种方法计算了障碍物的组合通过率。孙鹏等^[44]认为河流的连通性随着闸坝可通过能力*p*的增加逐渐增加,在计算*p*时采用了基于累积法的*DCI*指数来衡量。

相比之下,瓶颈法则代表鱼类通过障碍物的能力的特定变化(例如最大游泳速度的差异)。它假设所有能够穿过一定难度的障碍物的鱼都能够通过所有随后的难度相同或更小的障碍。因此,一系列障碍物的组合通过性等于障碍物最困难上限的通过性,Kemp 等^[45]在计算障碍物对鱼类通过的影响时

就用了瓶颈法。

障碍物的组合通过率实质上是一个随机过程,累积法与瓶颈法从不同的角度考虑了对其的影响,国内学者现有的研究多采用第一种方法,但笔者认为在计算 C_{ij} 时没有孰优孰劣,应综合权衡分析两种方法给出的评价结果,以期得到较为合理的河流连通性评价结论。

3.3 图论法

图论方法可用于评估河流健康、优化河流生态修复工程、定量分析河湖水系连通程度等。基于河湖水系的特点和图论相关理论,对河湖水系进行数学概化,建立图的邻接矩阵,从而实现河网水系连通程度的定量化分析^[46]。许多学者都应用此方法开展了研究,如徐光来等^[47]以水流阻力倒数表征水流通畅度,将河网概化成图模型,进行河网图顶点水流通畅度计算及连通度分析,使河网水系连通性分析实现定量化;窦明等^[48]以淮河流域为研究对象,结合GIS数据绘制出全流域廊道-节点示意图;结合景观生态学理论方法,提出宏观尺度下水系连通性评价方法和评价标准,进而评价了全流域13个水资源三级区的水系连通状况,并分析了影响水系连通的主要因素;赵进勇等^[49]利用图论理论对河道-滩区系统进行数学概化,并利用点连通度描述河道-滩区系统开挖水流通道前后网络连通程度;Chen 等^[50]将河网连通分为结构连通与水力连通两部分,基于图论模型的可达性,运用Matlab定量评估常熟市平原河网的连通性。

该方法能将流域概化成数学图形,对于复杂大流域的江河关系研究较为便利,但是它只适用于空间平面上的河湖连通性评价,无法用于河流纵向流通中的生物流、物质流受阻情况考量。

3.4 水文模型法

水文模型是指使用仿真方法对复杂的水文现象和过程概括为广义的科学模型,并在一定目标下能代替实际的水文系统。构建流域的水文模型,可以对河流连通的时间、连通持续时间及空间的连通程度进行研究。Karim 等^[51]采用MIKE21模型预测澳大利亚Tully-Murray流域洪泛平原与河流连通的时间、连通持续时间及空间的连通程度。张永勇等^[52]利用SWAT模型模拟有闸和无闸情景下各条河流的流量、区间产流量、人类活动取用水量以及河道和水库的蓄变量等作为水质模型的输入,模拟有闸无闸情景下河流水质浓度的变化,评价不同河流连通性对河流水环境的影响程度。Bracken 等^[6]利

用 CRPPL 模型研究集水区内不同水文单元间的水文连通动态。

水文模型法可以较好地模拟流域的水文、水环境条件及其变化过程,同时还能结合时间变异性综

合评价河流的连通情况。

上述 4 类连通性评价方法的原理、指标和评价流程存在明显的差异,其优势和不足可归纳为表 1。

表 1 4 类河流连通性评价方法总结

评判方法	原理和应用方法	优势	不足
指标法	将景观特征、土壤湿度模式和地下水流路径、水利工程数量等作别识别连通度的主要指标。	单一变量(针对河道)或多参数变量(针对河网)表征,评价快速,应用广泛。	较为粗略,忽略了河流生态系统复杂的交互过程。
累积法/瓶颈法	考虑鱼类通过多个障碍物的组合率(累积法)或最困难障碍物上限的通过性(瓶颈法)。	改进了假设法的误差,提高了生物对于连通性响应的代表性。	过鱼效率是一个随机过程,需要长时间的实验,才能提高样本的代表性。
图论法	对河湖水系进行数学概化,建立图的邻接矩阵,并利用图论的连通度概念描述河湖水系的连通程度,使河网水系连通程度分析实现量化。	易表征流域河道干支流、湖泊、湿地等水体间的连通状况。	不能用于河流纵向连通性的评价。
水文模型法	应用 MIKE21 等流域水文模型研究河流连通的时间、连通持续时间及空间的连通程度。	较好地模拟流域的水文、水环境条件及其变化过程,同时还能结合时间变异性综合评价河流的连通情况。	模型参数多基于样地或坡面尺度上的试验获取,因此该方法的推广应用尚需解决尺度转换问题。

4 研究展望

河流连通性是河流生态系统格局的主要特征之一,对水体理化性质、水文条件等具有重要影响,并进一步影响生物的栖息、扩散,影响生态系统的稳定性及抵抗力,影响流域的物质、能量及信息的连通。河流连通性好坏是一个区域水生态健康与否的重要指标。虽然目前对于水系连通的关注越来越多,但是纵观现有的研究成果,在机理的明确、评价体系的形成等方面仍然存在不足。为此,本文提出以下几点展望:

(1)在倡导人水和谐共处的今天,“水资源-社会-经济”互馈关系视角下,河流连通性作为流域生态水文格局的关键要素,对生态水文过程健康发展和水资源安全有重要影响。良好的连通性不仅有利于资源生态的保护,也有利于经济、社会的可持续发展,因此明晰河流连通与生态水文过程的交互机理尤为重要。对机理的研究仍然是未来工作的重点之一,不仅要在河流连通性评价时融入机理,而且在恢复河流连通性决策时也要考虑生态水文过程的变

化及社会经济的要求,从而避免生态恢复时对于拆除人工建筑物综合效益不清的现象。可通过开发生态水文格局与过程交互的机理模型,并融入社会-经济模块,结合地学信息技术与野外监测数据,从指示物种层面进行系统的分析,以便为自然环境变化、人为活动影响下的水资源可持续开发利用提供适应性对策。

(2)未来研究应建立一个统一的评价方法和标准体系,基于不同的流域管理目标,从水环境、水系结构等多角度明确连通性评价的指标与方法。为了增加可比性,应结合连通性四维尺度的特性,考虑时间、空间的差异性,根据不同的地区、时段,形成等级表。参照此标准逐点核实评价,按照实际环境条件和数据的可获得性选取适宜的评价方法,获取一个流域、中不同河流、或者同一河流在不同位置、不同时段细致的连通性结果,利于流域管理者进行现状评价以及修复后的效果追踪,通过改善河流的连通性来提升水资源承载力,从根本上保障流域水资源安全。

参考文献:

- [1] ZHAO Junkai, LI Lixian, ZHANG Aishe, 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.
- [2] 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.
- [3] GOOSEFF M N, WLOSTOWSKI A, MCKNIGHT D M, et al. Hydrologic connectivity and implications for ecosystem processes – lessons from naked watersheds[J]. *Geomorphology*, 2017, 277: 63–71.
- [4] 周峰, 吕慧华, 许有鹏. 城镇化下平原水系变化及河网连通性影响研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(3): 402–409.
- [5] VANNOTE R L, MINSHALL G W, CUMMINS K W, et al. The river continuum concept – canadian journal of fisheries and aquatic sciences[J]. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 1980, 37(2): 130–137.
- [6] BRACKEN L J, JACKY C. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff – dominated geomorphic systems[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 21(13): 1749–1763.
- [7] PRINGLE C. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(13): 2685–2689.
- [8] BRACKEN L J, WAINWRIGHT J, ALI G A, et al. Concepts of hydrological connectivity: research approaches, pathways and future agendas[J]. *Earth – science Reviews*, 2013, 119: 17–34.
- [9] WARD J V. The four – dimensional nature of lotic ecosystems[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1989, 8(1): 2–8.
- [10] CROKE J, MOCKLER S, FOGARTY P, et al. Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity[J]. *Geomorphology*, 2005, 68(3–4): 257–268.
- [11] 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.
- [12] VIDON P G F, HILL A R. Landscape controls on nitrate removal in stream riparian zones [J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(3): 114–125.
- [13] OCAMPO C J, OLDHAM C E, SIVAPALAN M. Nitrate attenuation in agricultural catchments: shifting balances between transport and reaction[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(1): 85–88.
- [14] JENCSCO K G, MCGLYNN B L, GOOSEFF M N, et al. Hydrologic connectivity between landscapes and streams: transferring reach – and plot – scale understanding to the catchment scale. [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(4): 262–275.
- [15] 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.
- [16] ALI G A, ROY A G. Revisiting hydrologic sampling strategies for an accurate assessment of hydrologic connectivity in humid temperate systems [J]. *Geography Compass*, 2009, 3(1): 350–374.
- [17] 崔保山, 蔡燕子, 谢 浩, 等. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(6): 738–746.
- [18] 黄伟, 刘晓波, 马 巍, 等. 河流功能性指标的研究进展及应用[J]. *水利学报*, 2016, 47(9): 1105–1114.
- [19] FULLERTON A H, BURNETT K M, STEEL E A, et al. Hydrological connectivity for riverine fish: measurement challenges and research opportunities [J]. *Freshwater Biology*, 2010, 55(11): 2215–2237.
- [20] JUNGWIRTH M, MUHAR S, SCHMUTZ S. Fundamentals of fish ecological integrity and their relation to the extended serial discontinuity concept [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 422–423(4): 85–97.
- [21] MORITA K, YAMAMOTO S. Effects of habitat fragmentation by damming on the persistence of stream-dwelling charr populations [J]. *Conservation Biology*, 2010, 16(5): 1318–1323.
- [22] STEEL E A. Lost watersheds: barriers, aquatic habitat connectivity, and salmon persistence in the willamette and lower columbia river basins [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2006, 135(6): 1654–1669.
- [23] 马爽爽. 基于河流健康的杭嘉湖水系格局与连通性研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [24] 郭亚萍. 泗河流域水系连通性评价研究[D]. 济南: 山东农业大学, 2016.
- [25] PÉPINO M, RODRÍGUEZ M A, MAGNAN P. Impacts of highway crossings on density of brook charr in streams [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2012, 49(2): 395–403.
- [26] STANLEY E H, DOYLE M W. Trading off: the ecological effects of dam removal [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(1): 15–22.
- [27] FEBRIA C M, BEDDOES P, FULTHORPE R R, et al. Bacterial community dynamics in the hyporheic zone of an intermittent stream [J]. *Isme Journal*, 2012, 6(5): 1078–1088.

- [28] 赵惠君,张 乐. 关注大坝对流域环境的影响[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2002,19(1):4-8.
- [29] 薛联青,张 卉,张洛晨,等. 基于改进 RVA 法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017,45(3):189-196.
- [30] GUYASSA E, FRANKL A, ZENEBE A, et al. Effects of check dams on runoff characteristics along gully reaches, the case of northern ethiopia[J]. Journal of Hydrology, 2017,545:299-309.
- [31] 崔 凯. 闸坝对河流水质水量影响评价研究[D]. 郑州: 郑州大学,2012.
- [32] ZUBALA T. Influence of dam reservoir on the water quality in a small upland river[J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2009,9(2-4):165-173.
- [33] CARRARA F, ALTERMATT F, RODRIGUEZ-ITURBE I, et al. Dendritic connectivity controls biodiversity patterns in experimental metacommunities[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012,109(15):5761-5766.
- [34] PERKIN J S, GIDO K B, COOPER A R, et al. Fragmentation and dewatering transform great plains stream fish communities[J]. Ecological Monographs, 2016,85(1):73-92.
- [35] LINDLEY S T. Directed connectivity among fish populations in a riverine network[J]. Journal of Applied Ecology, 2007,44(6):1116-1126.
- [36] MCKAY S K, SCHRAMSKI J R, CONYNGHAM J N, et al. Assessing upstream fish passage connectivity with network analysis. [J]. Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America, 2013,23(6):1396-1409.
- [37] 刘玉年,夏 军,程绪水,等. 淮河流域典型闸坝断面的生态综合评价[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2008,9(6):693-697.
- [38] YI Yujun, YANG Zhifeng, ZHANG Shanghong. Ecological influence of dam construction and river-lake connectivity on migration fish habitat in the yangtze river basin, china[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010,2(5):1942-1954.
- [39] 孟慧芳,许有鹏,徐光来,等. 平原河网区河流连通性评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014,23(5):626-631.
- [40] 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.
- [41] 罗 贤,许有鹏,徐光来,等. 水利工程对河网连通性的影响研究——以太湖西苕溪流域为例[J]. 水利水电技术, 2012,43(9):12-15.
- [42] O'HANLEY J R, TOMBERLIN D. Optimizing the removal of small fish passage barriers[J]. Environmental Modeling and Assessment, 2005,10(2):85-98.
- [43] NUNN A D, COWX I G. Restoring river connectivity: prioritizing passage improvements for diadromous fishes and lampreys[J]. Ambio, 2012,41(4):402-409.
- [44] 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.
- [45] KEMP P S, O'HANLEY J R. Procedures for evaluating and prioritising the removal of fish passage barriers: a synthesis[J]. Fisheries Management & Ecology, 2010,17(4):297-322.
- [46] 杨晓敏. 基于图论的水系连通性评价研究[D]. 济南: 济南大学,2014.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 赵进勇,董哲仁,杨晓敏,等. 基于图论边连通度的平原水网区水系连通性定量评价[J]. 水生态学杂志, 2017,38(5):1-6.
- [50] 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+34.
- [51] KARIM F, KINSEY-HENDERSON A, WALLACE J, et al. Modelling wetland connectivity during overbank flooding in a tropical floodplain in north queensland, australia[J]. Hydrological Processes, 2012,26(18):2710-2723.
- [52] 张永勇,夏 军,王纲胜,等. 淮河流域闸坝联合调度对河流水质影响分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007,40(4):31-35.