

洪水期河流系统生态需水分析

王高旭, 吴永祥, 丰华丽

(南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:归纳了洪水期的生态水文效应和生态需水的研究成果,明确了洪水的生态功能包括输送物质和维护河道整体形态,维持河流系统连通性,维持河流系统生境多样性,对物种生命活动传递提示信息等。针对河流系统组成部分的不同保护目标,提出洪水期生态需水研究的重点包括满足河道汛期生态需求的洪水流量阈值、维持湿地生态健康的洪水流量阈值和维持河口生态健康的洪水流量阈值 3 个方面。通过对满足河道、湿地和河口生态需求的洪水期生态流量阈值的功能和作用分析,明确了 3 类洪水期生态需水的分析计算方法,可为洪水期生态保护以及实施洪水期生态调度提供参考。

关键词:洪水期;河流系统;生态需水

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2017)S1-0138-05

我国自然条件复杂且处于季风控制,河流年际和年内季节性变化巨大,水文情势复杂,水资源短缺和水生态恶化的情况十分严重;严峻的水资源情势使得我们有必要在承担适度风险的前提下,增加对洪水的利用。洪水是一种自然力,洪水扰动是河流生态系统生存和发展的基础,是其演变的主要动力。洪水通过影响河流形态、河湖连通性、河流生境多样性以及生物多样性等多个方面影响河流生态系统的健康。我国的水资源开发利用率本就很高,各流域逐步实施的洪水资源利用又会增加洪水拦蓄量,势必造成河流水文情势的改变,增强对洪水期河流的生态过程影响,进而会削弱河流下游或河口生态功能。目前的生态需水研究更多地侧重于枯水期,对洪水流量衰减的生态影响鲜见针对性的研究。因此,需要开展洪水期的生态需水研究,保障河流系统在洪水期的生态需求。本文在总结已有研究成果的基础上,分析了洪水期生态流量的功能,提出了洪水期生态需水的研究重点和分析方法,可为洪水资源利用、洪水期生态调度提供参考。

1 洪水期生态需水研究进展

国外虽然没有洪水期生态需水的专门研究,但在洪水的生态效应方面却有大量的研究成果。Junk

等^[1]基于在亚马孙河和密西西比河的长期观测数据提出了洪水脉冲概念(Flood Pulse Concept),认为洪水脉冲是河流-洪泛滩区系统生物生存、生产力和交互作用的主要驱动力。Robertson 等^[2]基于澳大利亚 Murray 河流域 6 年的观测数据,评估了洪泛平原植被和生物膜(Biofilm)对洪水频率和历时的响应。Richter 等^[3-4]提出并改进了水文改变指标法(IHA),提出 34 个流量参数描述极端低流量、低流量、高流量脉冲、小洪水和大洪水 5 个生态流量组分,为描述生物体经历河流流量变化的响应提供了探索性框架。Douglas 等^[5]系统分析了洪水对沉积物输送、河道侵蚀和塑造河床等方面的作用。Thomas 等^[6]建立区域回归模型分析了美国境内的大坝对洪水径流的影响,指出全美超过 10% 的河流洪水径流减少了 25% 以上。Burgess 等^[7]分析了洪水带来的洪泛区水文连接度提高对鱼类数量和大型水生植物多样性的重要作用。国外关于洪水生态效应的研究表明,洪水对维持生物多样性、塑造河床、连接生态廊道等方面具有重要作用。

从 20 世纪 90 年代开始,伴随着水生态问题的加重,我国河流生态需水的研究逐渐引起重视。国内学者从引进、吸收国外的生态需水理论方法起步,经过自主研发和创新,迅速发展形成了较为完备

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFA0601703,2016YFC0401005);水利部公益性行业科研专项(201501041);国家自然科学基金(51479222,51109138)

作者简介:王高旭(1979—),男,高级工程师,博士,主要从事水资源管理、生态水文及水利信息化方面的研究。E-mail: gxwang@nhri.cn

的生态需水理论体系和方法^[9-15]。董哲仁等^[16-17]分析了洪水脉冲的生态效应,以美国基西米河生态修复工程为例说明了洪水脉冲理论在河流生态修复中的应用。王忠静等^[18]基于洪水脉冲理论,采用统计分析方法提出了洪水脉冲流量的计算方法。此外,已有的汛期输沙、维持河道形态稳定方面的研究可为洪水期生态流量的研究提供借鉴。在河流输沙需水方面:刘凌等^[19]基于输沙动力学理论,提出了防止河道泥沙淤积的最小环境需水量的计算方法。罗华铭等^[20]以黄河下游为例,按照不同的水沙状态系统研究输沙需水及生态需水的关系,探讨了多沙河流生态需水的特点。张爱静等^[21]采用水文变化指标体系定量评估了黄河水量统一调度与调水调沙对河口段生态水文情势的影响,讨论了河口环境水流需求以及调水调沙后水文情势对环境水流的满足程度,认为调水调沙后黄河河口段汛期除缺乏洪水脉冲过程外,基本能够满足高流量输沙需求。在河道稳定性方面:钱宁等^[22]给出了判断游荡型河流、非游荡型河流和过渡型河流的公式;张瑞瑾^[23]把深泓线平面位置的稳定性作为冲积河流稳定性最主要的指标;谢鉴衡等^[24-25]给出了河床稳定性综合指标。已有的研究成果表明,影响河道稳定的因素众多,无论是纵向稳定性,还是横向稳定性,主要取决于河流所在流域的来水来沙条件、河槽边界条件及河床坡降等因素,这些边界条件的改变,将直接影响河道的稳定与发展。

相对中国而言,多数国家人均水资源量大,人口对自然资源的压力小。处于大西洋流区的欧美主要国家气候温湿,水文情势规律性强,与水有关的生态问题并不突出。即使如南太平洋的澳洲,以及有较多干旱区域的北美、南部非洲等地,由于地广人稀、人口对水土资源的压力小,在生态保护上仍然采取预防性管理思想,将维持自然生态系统的良性循环置于一切经济活动之上,在充分保障自然生态系统对水的需求基础上,合理开发利用流域水土资源,以避免生态危机出现。国外将生态用水优先考虑,河流管理集中于枯水季节最枯时段的调控,已有生态需水计算方法多侧重于提供一个偏安全的“外包线”,很少涉及分季节的危机控制。我国受季风影响显著、水文情势复杂,占 55% 国土面积的干旱区与半湿润半干旱区人均径流量远低于世界平均水平,经济与生态用水竞争性极强,生态用水管理应采用危机管理的模式,在不同的时段应选取不同的生态需水控制标准。根据文献检索,我国主要江河均开展了洪水资源利用的研究或实践,海河、辽河等北方流域的洪水资源利用的研究和实践已十分深入。

上述研究进展表明,随着水资源短缺情势日益突出和洪水资源利用的发展,生态需水的研究时段已经从枯水期拓展到汛期,关于洪水期生态需水的研究方兴未艾。在洪水资源利用与河流系统生态需求的关系研究方面,对洪水流量衰减的生态影响研究较为薄弱,鲜见针对性的研究。在河流形态和稳定性研究方面,尽管许多专家学者在长江、黄河等河流的河流地貌及河流动力学方面已开展了大量研究,但针对洪水资源利用对河流形态影响方面的研究,目前尚未见诸文献。国内对湿地需水的研究多集中在枯水季节,强调在水量短缺的情况下保证湿地临界需求的最小需水量,较少考虑湿地生态系统的汛期需求以及洪水流量衰减引起的湿地水文连通性降低对河流湿地生态系统健康的影响,没有解决洪水期湿地对水量需求的量化问题。在洪水资源利用与河口生态、环境的关系研究方面,河口生态与环境的相关研究多集中于分析枯季河道径流变化对河口盐度、生物种群分布等的影响,关于汛期流量对河口影响的研究相对较少;考虑到流域内水库蓄水、沿程取水以及调水工程等作用的影响在河口处累积,应开展洪水流量衰减与河口生态需求关系的研究。

2 洪水期生态流量的功能与生态需水研究重点

流量条件是造成河流生态系统演变的关键驱动因素。河流水情在一年中的变化基本分为两类:汛期和非汛期。汛期河道水系集中了 60% ~ 80% 或更多的年径流量,但时间很短促,常常是 3 个月左右或者更短。非汛期持续时间长、径流量小。中国北方地区大部分河流一般 8 个月的非汛期径流量占年径流量的 15% ~ 35% 甚至更少。与河流水情变化相应,生态系统随河流水情变化呈现不同生理变化,表现出显著的季节性特点^[15]。河流春夏间的涨水时段是水生生物的繁殖期;河流丰水期一般是水生生物的生长期,而且是输沙造床,以及对下游湿地、河岸生态进行补水的时期;而对水量要求最低的冬季休眠期是河流较枯的季节。陈敏建等^[26]研究提出了生态水文季节的概念:河流生态系统一年内随河流水情脉动,由汛前期、汛期、汛后枯水期构成一个完整的生理变化周期。该研究明确了生态需水的时间特征,将原本被忽视的汛期生态需水的作用凸显出来。

洪水是河流生态系统的固有特征,洪水通过影响河流输沙造床、水文连通性、河流生境等,影响河流生态系统的健康。如果洪水长期受到遏制,河床

淤积抬高,河流、湿地、洪泛区之间将成为孤立的、脆弱的生态斑块,生态系统将发生退化。洪水期生态流量即是维持河流系统(包括湿地、湖泊)的整体动态平衡,河流需要周期性的大流量水分条件。洪水期生态流量的功能主要体现在4个方面:①提高河流输沙能力,增加向下游输送养分,维护河道整体形态;②提高河道连通性,维持河流与湿地、湖泊的连通,促进地表水与地下水的转化;③维持河流系统生境多样性,促进生物生存繁衍;④对物种生命活动传递提示信息。

洪水期生态流量对河流形态稳定和造床作用有积极影响,保证了河流纵向廊道的通畅。洪水期的大流量通过影响沉积物运移、侵蚀和沉积过程,对河道、洪泛区和河口的形态起控制作用。通过冲刷作用,影响底土层(如沙砾层、砂层、泥质层)特征、河道形态及其稳定性、下游和河口的泥沙输送等,避免了河道萎缩和淤积,为特大洪水预备了可用空间;同时在洪泛区,洪水能带来大量营养物质,并控制着洪泛区的沉积过程及其水文地貌的演变。

洪水期生态流量是维持河流横向廊道畅通的关键因素,为提高水文连接度创造了条件。在枯水季节,与河流连通的湖泊或湿地的水面面积减少、洪泛区变干,水文连接度降低甚至断裂,河漫滩生态系统处于陆生期。河流主槽与滩区栖息地之间的连通性成了生物群落多样性的关键^[15-16]。在保证洪水期生态流量的情况下,河流与河漫滩能够动态的联结起来,河流与沿河湖泊或湿地间的水量交换、能量流动和物质循环加强,生物迁移通道连通,水生生物生存空间得以进一步扩展,水文连接度达到较高的水平。同时,洪水期生态流量为沿河的湖泊、湿地和滩区补充了水源,为枯水季节储存了大量的水分,使得河流系统的水文连接度能在较长的时间内维持一定水平。

保证洪水期生态流量是维持河流生态系统的生境多样性和物种多样性的重要条件。大量监测资料表明,横跨河道和河漫滩的生物生境多样性比沿河流主槽更为丰富;在洪水期生态需水得到满足的情况下,河流的高水位保证了滩区中的洼地、水塘和湖泊由水体储存系统变成了水体传输系统,从河道、河岸带、洪泛区,到高地边缘过渡带,形成多种不同的生境^[16]。随着生境多样性的增加,不同生态位的物种都能选择到适合的生境。生存繁殖空间的扩大,为不同生物的生态过程顺利进展创造了条件,生物多样性随之丰富。

洪水的高流量对很多物种的迁徙时间和许多鱼类的产卵具有提示作用^[16]。水流和温度是河流生

态系统中最重要提示因子。研究表明,对于某些鱼类种群来说,具备洪水条件才能成功产卵;对于植物来说,周期性洪水是植物生活史中不可缺少的驱动因子,在无洪水脉冲的情况下,种子的传播、扩散和繁殖将会中断。另外,汛期流量均化或大流量持续时间减小,本土物种可能会失去竞争优势,河流生态系统易受外来物种入侵。

汛期洪水带来了河流生境的多样性,鱼类快速生长、植被更新,是生物迅速成长的季节。大水量同时提高河道连通性,提高输沙造床能力,增加向下游输送养分,维护河道整体形态,维持河流与湿地、湖泊的连通,促进地表水与地下水的转化^[15]。由于取水造成径流量减少或者人工调节使河流流量均化,使汛期洪水逐渐丧失,将会降低诸如河道输沙、河流廊道的生态功能,降低河流生境的多样性,从而降低生物多样性,违背生态系统天然属性。因此,需要在分析河流系统的生态需求的基础上,保障河流的洪水期生态需水。

3 洪水期河流生态需水分析

洪水是河流的自然属性。洪水营造河流地貌,塑造河流形态,影响河岸湿地和生态,影响河口的发育演变和生态状况。经过对汛期洪水生态功能的分析,选定河流形态、河流中下游湿地状况、河口生态作为反映洪水资源利用对河流健康影响的关键因子,洪水期生态需水研究的重点包括满足河道洪水期生态需求的洪水流量阈值、维持湿地生态健康的洪水流量阈值和维持河口生态健康的洪水流量阈值三个方面。

3.1 满足河道生态需求的洪水流量阈值

流域洪水过程与河床变化既相互联系又相互制约。在一定地质背景下,洪水过程对河流地貌以及河流形态都有较大的影响。其中,河流形态变化主要受流域自然地理特征、河流水文、水动力以及地质条件综合作用的影响,当河流水文、水动力以及地质条件处于动态平稳状态时,河流形态处于相对稳定状态。洪水期的大流量通过冲刷作用,促进下游和河口的泥沙输送等,避免了河道萎缩和淤积,为特大洪水预备了可用空间。汛期洪水也是联通河流横向廊道、保障河流与滩区水体水力联系的主要途径。洪水的高水位保证了滩区中的洼地、水塘和湖泊由水体储存系统变成了水体传输系统,从河道、河岸带、洪泛区,到高地边缘过渡带,形成多种不同的生境。随着生境多样性的增加,不同生态位的物种都能选择到适合的生境^[27]。生存繁殖空间的扩大,为不同生物的生态过程顺利进展创造了条件,生物多

样性随之丰富。维持河道生态需求的汛期洪水流量阈值的确定需要分析流域汛期流量与河流形态之间关系,选定河道稳定性指标,计算不同洪水资源利用情境对河流稳定性的影响,同时也需要满足河道的漫滩流量,保证洪水期河流横向廊道的畅通。

3.2 维持湿地生态健康的洪水流量阈值

洪水是联系沿河湿地与河流系统的重要纽带,不定期的洪水扰动维持了河流与其洪泛湿地的水文连通性,对保证沿河湿地景观结构稳定和生态系统平衡起着不可替代的重要作用^[28]。尤其在干旱、半干旱地区,洪水是重要的湿地生态水源。洪水泛滥即洪泛作用,对湿地的形成和发展、物种的生存与繁衍及湿地景观与功能的维系起着重要的作用^[29]。国内对湿地需水的研究多集中在枯水季节,强调在水量短缺的情况下保证湿地临界需求的最小需水量,较少考虑湿地生态系统的汛期需求以及洪水流量衰减引起的湿地水文连通性降低对河流湿地生态系统健康的影响,没有解决洪水期湿地对水量需求的量化问题。我国日趋严峻的水资源短缺形势使得洪水资源的开发利用成为缓解我国水资源供需矛盾的必然选择。洪水资源利用将改变洪水常规的历时、量级和流量过程,因而会对沿河湿地健康和功能产生一定影响。考虑到洪泛过程对湿地的产生和发展起着至关重要的作用,而洪水控制和利用的各项措施影响了洪水对河流中下游湿地的自然补给作用,在湿地消失、退化等方面起到了不利的影响,因此必须未雨绸缪,开展洪水资源利用与河流中下游湿地关系的研究。通常,河流沿程两侧分布着沼泽湿地。它们既是洪水的调节场所,也是重要的生态与环境单元。湿地主要依靠汛期洪水泛滥补给,形成以汛期洪水补给为依托的水文平衡系统。当洪水资源利用可能减少甚至断绝湿地的水量补给时,就可能引起湿地的衰退甚至消失,带来环境和生态损失。维持湿地生态健康的洪水流量阈值的确定需要从湿地水循环原理出发,分析洪水情势变化对湿地演变过程的影响,分析沿河湿地洪水期需水的规律,计算满足汛期指示性植物健康生长的湿地水位阈值和保障湿地连通性的湿地水位阈值;并根据河道和湿地的连接情况确定满足沿河湿地生态系统健康要求的河道洪水流量阈值,为洪水资源利用和湿地保护提供技术支持。

3.3 维持河口生态健康的洪水流量阈值

流域内水资源开发利用对河流水文情势的影响会在河口处累积,河口的生态状态集中反映了全流域的水资源开发利用状况。我国地域辽阔,有入海河口数百个,各河口的自然地理条件和水文泥沙条

件差别很大,洪水资源利用对河口三角洲的影响视不同河口有较大的差异,但总体说来主要包括以下两个方面的内容:①洪水资源利用将减少河口汛期径流量,引起河口、河相关系的变化,从而对河口三角洲地形、河口流路稳定性以及拦门沙、沙坎等产生不良影响;②河口区是淡咸水交汇区,还受到海水上溯的影响,生物多样性丰富且生态脆弱,洪水资源利用也会带来整个河口地区的生物群落等变化剧烈。维持河口生态健康的洪水流量阈值的确定需要分析洪水情势变化对河口生态演变的影响,从防止河口泥沙淤积、保障河口栖息地汛期生态需求两方面出发,确定满足河口生态健康的洪水流量阈值,为洪水资源利用和河口生态保护提供技术支持。

4 结 语

我国受季风影响显著,水文情势复杂,人均径流量远低于世界平均水平,经济与生态用水竞争性极强。严峻的水资源情势使得有必要在承担适度风险的前提下,增加对洪水的利用。我国主要流域均开展了洪水资源利用的研究或实践,海河、辽河等北方流域的洪水资源利用的研究和实践已十分深入。由于取用水造成径流量减少或者人工调节使河流流量均化,使汛期洪水逐渐丧失,将会降低诸如河道输沙、河流廊道的生态功能,降低河流生境的多样性,从而降低生物多样性,违背生态系统天然属性。在这一背景下,河流的生态需水研究从枯水期拓展到汛期,研究洪水流量衰减的生态影响、确定洪水生态流量阈值成为一项亟须解决的研究课题。

洪水是河流生态系统的固有特征,洪水期生态流量即是维持河流系统(包括湿地、湖泊)的整体动态平衡,河流需要周期性的大流量水分条件。洪水期生态流量对河流形态稳定和造床作用有积极影响,保证了河流纵向廊道的通畅;洪水期生态流量是维持河流横向廊道畅通的关键因素,加强了河流系统的能量流动和物质循环,拓展了水生生物生存空间,为沿河的湖泊、湿地和滩区补充了水源,使得河流系统的水文连接度能在较长的时间内维持一定水平。洪水期生态需水研究的重点包括满足河道洪水期生态需求的洪水流量阈值、维持湿地生态健康的洪水流量阈值和维持河口生态健康的洪水流量阈值3个方面。维持河道生态需求的洪水流量阈值的确定需要分析洪水流量与河流形态之间关系,选定河道稳定性指标,计算不同洪水资源利用情境对河流稳定性的影响,同时也需要满足河道的漫滩流量,保证洪水期河流横向廊道的畅通。维持湿地生态健康的洪水流量阈值的确定需要从湿地水循环原理出

发,分析洪水情势变化对湿地演变过程的影响,分析沿河湿地洪水期需水的规律,计算满足汛期指示性植物健康生长的湿地水位阈值和保障湿地连通性的湿地水位阈值;并根据河道和湿地的连接情况确定满足沿河湿地生态系统健康要求的河道洪水流量阈值,为洪水资源利用和湿地保护提供技术支持。维持河口生态健康的洪水流量阈值的确定需要分析洪水情势变化对河口生态演变的影响,从防止河口泥沙淤积、保障河口栖息地汛期生态需求两方面出发,确定满足河口生态健康的洪水流量阈值,为洪水资源利用和河口生态保护提供技术支持。河流系统各部分生态需水不是简单的叠加关系,需要根据不同河流的水系结构、河湖与湿地关系等具体情况进行分析,通过统筹调度满足各部分需求。

参考文献:

[1] JUNK W, BAYLEY P, SPARKS R. The flood pulse concept in river-floodplain systems [J]. Canadian special publication of fisheries and aquatic, 1989,106: 110-127.

[2] ROBERTSON A I, BACON P, HEAGNEY, G. The responses of floodplain primary production to flood frequency and timing [J]. Journal of Applied Ecology, 2001, 38 (1): 126-136.

[3] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems conservation biology [J]. Conservation Biology, 1996, 10:1163-1174.

[4] MATHEWS R, RICHTER B D. Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43:1400-1413.

[5] DOUGLAS M B, DAMIAN M L, DONALD W K, et al. Longitudinal distributions of river flood power: the combined automated flood, elevation and stream power (CAFES) methodology [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009,34(2): 280-290.

[6] THOMAS W F, RICHARD M V. The impact of dams on flood flows in the United States [J]. River Research and Applications, 2010, 27(10): 1192-1215.

[7] BURGESS O T, PINE W E, WALSH S J. Importance of floodplain connectivity to fish populations in the apalachicola river, Florida [J]. River Research and Applications, 2013,29(6): 718-733.

[8] ANTOINE A K, NIGEL J W, DAVID J G. The role of lateral connectivity in the maintenance of macrophyte diversity and production in large rivers [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2013, 23 (2): 301-315.

[9] 王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 生态及环境需水量研究进展与前瞻 [J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 507-514.

[10] 杨爱民, 唐克旺, 王浩, 等. 生态用水的基本理论与计算方法 [J]. 水利学报, 2004(12): 39-45.

[11] 严登华, 王浩, 王芳, 等. 我国生态需水研究体系及关键研究命题初探 [J]. 水利学报, 2007, 38 (3): 267-273.

[12] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲. 生态环境需水量理论、方法与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[13] 严登华, 王浩, 杨舒媛, 等. 面向生态的水资源合理配置与湿地优先保护 [J]. 水利学报, 2008, 39 (10): 1241-1247.

[14] 左其亨, 周可法, 黄均池. 生态环境需水量在水资源规划中的配置方法 [J]. 水利水电技术, 2007, 38 (1): 43-46.

[15] 陈敏建, 丰华丽, 王立群, 等. 生态标准河流和调度管理研究 [J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 631-636.

[16] 董哲仁, 张晶. 洪水脉冲的生态效应 [J]. 水利学报, 2009, 40(3): 281-288.

[17] 张晶, 董哲仁. 洪水脉冲理论及其在河流生态修复中的应用 [J]. 中国水利, 2008(15): 1-4.

[18] 王忠静, 廖四辉, 崔惠娟, 等. 洪水资源利用生态适度性研究: 以淮河为例 [J]. 水力发电学报, 2013(1): 81-88.

[19] 刘凌, 董增川, 崔广柏. 防止河道泥沙淤积的最小生态环境需水量 [J]. 湖泊科学, 2003, 15(4): 313-318.

[20] 罗华铭, 李天宏, 倪晋仁, 等. 多沙河流的生态环境需水特点研究 [J]. 中国科学, 2004(34): 155-164.

[21] 张爱静, 董哲仁, 赵进勇, 等. 黄河水量统一调度与调水调沙对河口的生态水文影响 [J]. 水利学报, 2013, 44(8): 987-994.

[22] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.

[23] 张瑞瑾. 从冲积河流的稳定性谈起 [C] // 张瑞瑾论文集. 北京: 水利电力出版社, 1996.

[24] 谢鉴衡, 丁君松, 王运辉. 河床演变及整治 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

[25] 张红武, 江恩惠, 白咏梅. 黄河高含沙洪水模型的相似率 [M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1994.

[26] 陈敏建, 王浩. 中国分区域生态需水研究 [J]. 中国水利, 2007(9): 31-37.

[27] SAUNDERS D A, HOBBS R J. Nature conservation 2: the role of corridors [M]. New South Wales: Surrey Beatty & Sons Pty Limited, 1991.

[28] CABEZAS A, GONZALEZ E, GALLARDO B, et al. Effects of hydrological connectivity on the substrate and understory structure of riparian wetlands in the Middle Ebro River (NE Spain): implications for restoration and management [J]. Aquatic Science, 2008, 70: 361-376.

[29] NOSS R F, DALY K M. Incorporating connectivity into broad-scale conservation planning [C] // CROOKS K R, SANJAYAN M. Connectivity conservation. New York: Cambridge University Press, 2006: 587-619.

(收稿日期: 2017 - 11 - 23 编辑: 徐 娟)