

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.05.012

梯级水电开发累积环境影响评价理论框架

史婉丽¹, 杨帆², 王尚玉³, 陈凤先²

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 环境保护部 环境工程评估中心, 北京 100012; 3. 山东省威海市水文局, 山东 威海 264200)

摘要: 梯级水电开发的流域叠加累积性环境效应逐渐凸显, 客观评价流域梯级水电开发的累积影响并分析其形成机制, 对丰富累积环境影响评价理论具有重要的研究意义, 也是流域开发的生态环境累积叠加效应研究的重要基础。本文基于流域重大水利工程建设累积影响特性、途径以及评价方法等的基础理论梳理和实践特性概纳, 重点分析累积环境影响评价的关键技术和热点问题, 提出了我国流域重大水利工程累积影响研究的理论框架及其在实践中亟待解决的问题, 并给出对应的完善策略。

关键词: 累积影响评价; 梯级水电开发; 阈值理论; 时空尺度

中图分类号: TV 213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0871-06

Preliminary theoretical frame of cumulatively environmental assessment of cascade hydropower development

SHI Wann li¹, YANG Fan², WANG Shang yu³, CHEN Feng xian²

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Appraisal Center for Environment & Engineering of State Environmental Protection Administration, Beijing 100012, China; 3. Weihai Hydrology Bureau of Shandong Province, Weihai 264200, China)

Abstract: Environmental effects of cascade hydropower development on river ecosystems are largely cumulative in nature, which are caused by individually minor but collectively significant actions that accumulate over space and time. Assessment of watershed cumulative effects of cascade hydropower development with its mechanisms can enrich the theory of Cumulative Effects Assessment (CEA) and provide the important basis of cumulative effects of ecological environment with watershed development. Based on the theoretical and practical theories on the hydropower development including cumulative effects and evaluation method, the key techniques and problems of CEA are analyzed, and the theoretical frame and practical problems of cumulatively environmental assessment of cascade hydropower development in China are proposed, as well as the adaptive management measures.

Key words: cumulative effects assessment (CEA); cascade hydropower development; threshold; spatial and temporal scale

在我国水电开发进程加快、规模不断扩大且呈现出梯级开发态势的背景下, 流域生态环境叠加累积性影响逐渐凸显, 日益受到关注^[1-3]。梯级水电开发的累积环境影响呈现出一种阶梯式的变化过程, 呈现出全局性、系统性、非线性和累积性的特点^[4-7]。从20世纪60年代起, 多国开展了流域累积环境影响评价实践探索, 大量的河流累积影响研究案例涌现, 但是研究对象主要是梯级水库群叠加累积影响评价的概念性研究, 针对累积生态影响的响应机制、关键生态环境指标阈值确定以及减缓措施方面的研究甚少。现阶段, 国外累积环境影响评价研究已从最初作为项目环境影响评价程序的

一部分^[8,9]发展到作为流域可持续发展的综合措施^[10-13], 甚至上升为战略累积环境影响评价层面^[14-15]。人们已经意识到, 累积环境影响评价是一种从全新的角度看待环境, 日渐成为国际流域规划管理研究中的一个热点领域, 解决环境问题的有效途径; 同时, 流域生态环境累积影响的发生机理与形成机制是累积环境影响评价理论的核心科学问题。变化环境下流域开发活动导致一系列生态环境问题不断突显, 传统的环境影响评价很难满足可持续发展的需求, 迫切需要在流域尺度开展累积环境影响评价^[16-18]。时空尺度问题是流域累积影响评价面临的挑战之一, 也有助于解决累积影响评价范围、

收稿日期: 2014-11-18 修回日期: 2015-08-21 网络出版时间: 2015-09-25
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150925.1024.003.html>
基金项目: 国家自然科学基金项目(51409279)
作者简介: 史婉丽(1979-), 女, 陕西大荔人, 博士, 主要从事水文水资源及水环境学方面研究。E-mail: shiwanli_swet@126.com

规划层面上的战略决策、项目过去影响分析和未来影响预估等问题^[19]。流域规划实施对环境的影响存时间滞后性和不确定性,增加了累积影响评价的难度^[20]。然而,由于目前没有统一认可的概念性方法和原则,很难基于现有的环境影响评价体系提高和改进累积影响评价^[15,21]。国外已经开展了梯级水库的累积影响评价方面关键性问题研究,并逐步过渡到累积影响形成机制研究。例如, Kelly 和 Desiree(2013) 采用水库水面、淹没范围、栖息地多样性、河湖连通性、保护区影响、滑坡危害、潜在地震、径流改变等 14 个指标来研究怒江水电开发的累积影响^[6]; 通过对比分析小水电群的累积影响与大型水利工程的影响,发现小水电群累积影响远大于大型水利工程产生的影响,特别是对栖息地和水文情势改变的影响。

当前,我国大多数流域的水电开发引发的累积性生态环境状况不容乐观,特别是上游水电开发对下游生态环境以及干流开发对支流生态的累积性影响问题。2011 年颁布新修订的《环境影响评价技术导则 总纲》中明确指出,重大水利工程的累积环境影响评价是我国现有环境影响评价体系中不可或缺的一部分。然而,关于梯级水库群开发对河流生态系统的结构和功能产生的累积性影响研究仍处于探索阶段。目前的主要研究领域为累积影响评价的概念性研究^[22-24]和流域水电开发对河流生态环境的累积影响^[25],然而,累积影响形成机制、累积影响评价方法及其预测、累积影响的风险评估及其减缓策略是未来的主要研究方向。钟华平等^[26-27]、宗永臣等^[28]、侯宝灯等^[29]、李帅^[4]、何鹏等^[30]分别评价了澜沧江流域、怒江流域、西藏巴河、岷江上游、天全河流域和南水北调东线工程等梯级水电开发累积影响,并从径流、泥沙、水温、水质和鱼类等河流生境方面进行累积影响分析,这些研究在一定程度上解决了流域时空累积效应问题,但是很难阐明这些生态环境要素的累积影响形成机制。陈庆伟等^[1]尝试用交互矩阵法研究两个以上的水电工程叠加对流域水环境的累积影响程度,受监测资料 and 理论研究不足的影响,现有的方法尚不能定量计算累积影响结果。选择典型生态环境因子评价流域水电开发在河流非生物因素的累积影响^[31-32],缺乏河流生态环境累积影响的发生机理和作用机制方面的研究,而累积影响预测及潜在的风险评估尚属空白^[33]。

总的来说,梯级水电开发的累积影响评价仍处于初级阶段,存在很多不足。首先,梯级水电工程累积影响形成机理的科学认识不足。目前,大部分研究主要集中于累积影响的概念性方面的研究,很难作深入分析;其次,缺乏定量评价累积影响的关键技术支撑,部分研究不是建立在累积影响形成的物理过程分析基础上,难以反映出河流生态系统要素之间的内在联系和生态过程的演变机制,无法体现出累积影响的时空特性和不确定性;最后,尽管认识到梯级水电开发的累积影响的重要性,但是很难提出基于累积影响形成机理的调控方案和减缓措施。^[19]为此,本文根据国内外流域梯级水电开发的累积影响研究动态和应用实践,总结梯级水电开发累积影响评价的经验和教训,并从梯级水电开发的累积影响形成机理出发,构建适宜我国的梯级水电开发累积环境影响评价的理论框架与技术支撑体系,并以为进一步研究或应用提供参考。

1 梯级水电开发的累积影响形成机理

水的二元特性决定了梯级水电工程开发也是经济社会系统和生态环境系统相互博弈、相互反馈和相互影响的双向过程。流域梯级水电工程开发改变了河流天然的水循环过程,连续的自然河流受到阻隔,河流天然的水文节律逐渐均衡化,打破河段间的水量平衡,水资源量的时空分布格局发生改变,河道内和河道外间的用水矛盾日益突出,特别是在极端最不利情景下,易导致流域间水冲突事件;自然水文情势的改变导致河流生态系统中生态要素间发生协同、拮抗等负向反馈作用,破坏河流生态完整性,影响河流生态系统的组成、结构和功能,威胁河流生态安全,增加生态环境风险。为此,梯级水电工程对河流生态环境的累积影响具有时间尺度的持续性、空间上不同电站之间的相互作用以及河流生态系统不同影响层次的关联性,不仅表现在河流生态系统各种要素之间的累积,还体现在单一要素在不同时空尺度上的累积(图 1)。水电工程之间的累积影响作用方式主要有:加和作用、协同作用、减弱作用和混合作用,其中前三者作用分别表示梯级水电开发对河流生态环境的累积影响等于、大于和小于每一电站对生态环境影响之和;而混合作用为加和作用、协同作用和减弱作用三种作用方式的混合。在时空尺度上,水电工程群对河流生态环境的累积影响主要体现在河段水量平衡、水文情势过程、水动力特性以及水生生态系统的四大层次的累积影响,而不同层次的影响要素之间也存在时空尺度上的累积效应。水电工程群的水文累积影响是流域梯级水电开发生态环境累积影响的基础和关键。梯级水电工程累积影响形成机理的理论框架见图 2。

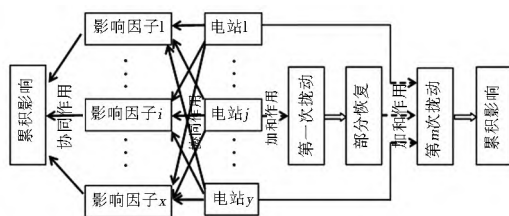


图 1 空间尺度上梯级水电工程群的累积影响过程

Fig. 1 Cumulative effects of cascade hydropower development at the spatial scale

2 累积影响评价的技术框架构建

现阶段,累积影响评价面临的挑战主要源于很难客观确定累积影响的边界、缺乏定量数据和精确的评估模型^[34],因此累积影响评价面临的关键问题主要是:累积影响评价的尺度;建立基线;选择评价指标,并为这些指标设定一定的阈值等^[35-38]。解决这些问题的主要途径是构建梯级水库的累积影响评价技术框架,以期定量评估梯级水电工程的累积影响。

基于国内外梯级水电开发的累积影响研究进展及其形成机制研究现状,针对现有研究中存在的问题,本研究提出基于累积影响形成机理的梯级水电开发的累积影响评价技术框架,其基本思路是:以生态水文学、水文学、生态水力学、水环境学、水库调度与水利计算等学科理论为基础,从梯级水电工程开发对河流生态系统的可能影响中识别出受影响

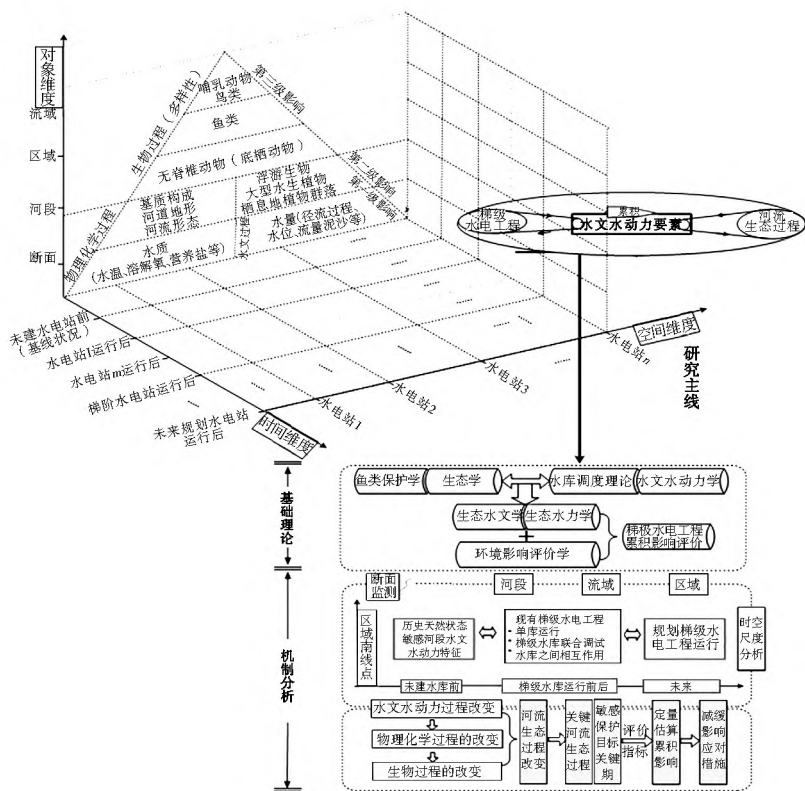


图 2 梯级水电工程累积影响形成机理的理论框架

Fig. 2 Framework of the formation mechanism of cumulative effects of cascade hydropower development on the river ecosystem

的水文水动力学要素和河流生态过程,明确河流生态系统的敏感保护目标和关键生态过程,量化不同时空尺度下的梯级水电开发对水文水动力过程改变与河流生态过程之间的响应关系,并构建其耦合模型,建立评价梯级水电工程的累积效应的指标体系,定量估算梯级水电开发对河流生态系统的累积影响,从而有针对性地提出减缓负面累积效应的应对措施。

该框架是从梯级水电开发的累积影响机制及其评估角度出发,将这些本质上紧密关联的内容有机地联系起来,构建成具有物理形成机制且可定量估算累积影响及其应对措施的评估框架。^[11-12]它是在环境影响评价理论、水文水动力学理论、水库调度理论和鱼类保护理论等理论基础上,构建以水文水动力联合模拟技术、生态水文水力学耦合作用机理识别技术、评价指标体系与评价标准的构建技术等为核心的梯级水电工程累积影响定量评估技术体系。图 3 为梯级水电工程对河流生态系统的累积影响评价体系总体框架图,重点关注河道内鱼类保护的累积影响。梯级水电开发的累积影响评价工作包括以下内容。

(1) 确定评价的对象。梯级水电开发前,扰动了河流的自然水循环过程,改变河流生态过程,影响水生生物的多样性。河流生态系统是复杂的系统,一般分别从食物链和生物组织角度来表征河流生态系统。表征河流生态系统的角度不同,所选择的评价对象也不同。食物链角度主要分为藻类、浮游动物、底栖动物和鱼类等由低到高的层次;生物组织主要分为生物化学、细胞、组织、个体、种群和群落。选择能够代表河流生态系统的哪一层次开展的评价取决于可否有利于决策。河流生态系统可持续的表征主要基于鱼类种

群和鱼类栖息地的变化,而底栖生物群落是河流生态系统健康的评价标准。为此,鱼类群落(生长、繁殖以及生活史)和栖息地的再造能力成为梯级水电开发后河流生态系统累积影响的表征。

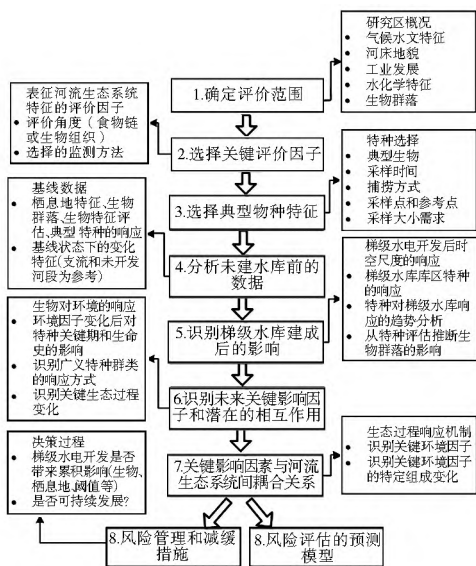


图 3 梯级水电工程对河流生态系统累积影响评价体系总体框架

Fig. 3 Evaluation index framework of cumulative effects of cascade hydropower development on the river ecosystem

(2) 从不同的梯级水电开发的时序评价累积影响。主要包括三个时间节点(图 4),即未见水库前的河流生态系统的天然状态(参考状态)、不同梯级水库开发后的叠加累积影响(累积影响评价)和未来规划的水库建成后累积影响的预测

(模型模拟)。考虑到流域未来发展,规划实施后对环境的影响的时间滞后性所导致的不确定性增加累积影响评价的工作难度^[20],同时还需要考虑极端气候事件的影响^[39]。

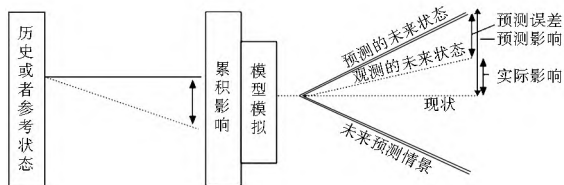


图 4 梯级水电开发的累积影响评价概化图

Fig. 4 The generalized figure of cumulative effects assessment of cascade hydropower development

(3) 空间尺度上梯级水电开发的累积影响评价。流域累积影响评价的生态过程发生在不同的时空尺度上,为了确定合理的空间尺度,评价过程中需要确定累积影响源,定义地理边界^[40],开展多尺度的评价工作。不同尺度上累积影响评价的问题也不同^[19],所以累积影响评价的空间尺度往往太小^[40],限制监测的空间范围。空间上水电工程群的加和作用,对河流生态系统产生累积叠加影响。Therivel and Ross^[19]指出,在累积影响中不考虑尺度问题,很难采取有效方法确定累积影响范围,也不能完全考虑规划层面所面临的生态环境问题。

(4) 评价河流生态系统的累积影响(图 5)。从前面的分析可知,梯级开发影响下的河流生态系统的扰动以及河流生态过程的响应存在层次性和关联性,因此通过分析河流生态系统的表征因子和梯级水电工程开发的不同时空尺度的叠加影响,识别出梯级水电开发影响下的关键河流生态过程、敏感生态保护目标和河流生物群落的栖息特征,研究水电工程群开发对河流生态系统的累积影响形成机制及其耦合过程,并预测未来规划水电工程可能产生的累积影响,从而提出有针对性减缓累积影响的应对措施,以便于更科学、合理、有效地配置和利用水资源。

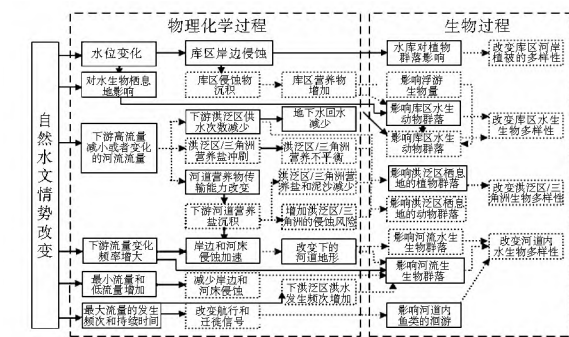


图 5 水电工程影响河流生态系统过程的概化图

Fig. 5 The generalized figure of effects of cascade hydropower development on the river ecosystem

3 累积影响评价的关键技术与难点

3.1 水文水动力联合模拟技术

梯级水电工程改变河道内的水文水动力学过程,而河流水文累积影响是流域梯级水电开发生态环境累积影响评价的基础。由于梯级水电工程累积影响评价的河道断面与流

域内的水文站点在空间上分布不一致,从已知断面的水文水动力学过程推算河段内研究断面的水文水动力学过程存在困难。因此,当研究流域河道内的敏感目标的栖息地的断面与流域内监测站点空间不匹配时,需要将河流水动力学模型、水库调度模型、河道流量演算模型、分布式流域水文模型等模型的耦合,从梯级水库和水循环的各个要素过程相互作用机制入手,形成断面(点)-河段(线)-流域不同空间分布的模拟格局,突破传统流域水文模型模式,构建梯级水库群调度下的分布式流域水文水动力学模型,实现对水文水动力的联合模拟,特别是通过对影响鱼类生活、繁殖和生长的栖息断面/河段过程的模拟,实现多维调控目标约束下的一体化模型模拟体系。然而,时空尺度的不匹配是构建流域水文水动力联合模拟技术的难点。流域水文模型和河道演算模型的时间尺度分日、月和年,而水库调度模型一般基于流域实际的调度规程制定,通常基于旬或者日流量过程调度,而且河道演算过程中存在区间汇流和上断面流量至下断面流量的汇流时间滞后,模拟时间尺度一致是水文水动力联合模拟的前提;流域水文模型为一维或者二维流量模拟,而评价梯级水电工程对鱼类的累积影响需要三维的河流水动力模型以及基于生态过程的梯级水库优化调度模型,这些模型的空间尺度的一致性,是解决梯级水电工程的河流生态环境累积影响模拟的基础。

3.2 生态水文耦合作用机理识别技术

梯级水电工程开发改变了河流水文过程,而后者则主导了河流生态过程的变化。所以,生态水文过程的耦合关系及其作用机理是研究梯级水电工程水文累积影响机制的突破口。对自然水文过程改变的生态响应:研究有助于建立累积影响评价的基线或者参考状态,从而揭示河流生态系统,确定合适的累积影响评价指标,并分析流域水生生态系统变化过程和作用方式。流域的基线(参考状态)指的是未受到人类活动影响或者人为活动的影响很小的一种近自然状态,反映了河流生态系统的健康状况和河流生态系统的变化范围。随着人类文明的不断发展,现实中很难找到一个不受人为活动影响的研究区域作为参考,特别是在流域尺度层面。一般情况下,可以选择人为活动稀少的流域上游作为基线状态,分析梯级水电开发对下游的生态环境影响^[23]。选择“参考状态”需要考虑多个参考区域,具有一定的灵活性^[39]。河流水文过程改变并非对所有生态保护目标的生态过程产生负面影响,因此,为确定生态保护敏感目标及其关键生活期的生态需水过程,亟需以大量的野外观测数据和先进的监测手段作为支撑,量化生态水文过程的响应关系和耦合机制。

3.3 评价指标体系与评价标准的构建技术

梯级水电工程累积影响评价的核心是如何量化生态系统中各个要素和过程之间的相互作用,而构建合适的评价指标体系是描述基线状态和量化预测多种扰动下的累积影响的有效途径。选取的累积影响评价指标的合理性,关系到梯级水库开发后对河流生态系统累积影响评价的可信度以及减缓措施的可行性。为此,评价河流累积环境影响需要建立不同时空尺度的评价指标,同时这些指标能够反映人为活动的影响且能代表河流状态^[41]。目前,累积环境影响评价指标主要集中在对群落和利益相关者较为重要的指标,称为“重要

生态系统组成指标(Valued Ecosystem Component)”。Canter和Atkinson^[10]对7个国家或者区域尺度指标、4个重要生态组成指标、12个特定区域的指标和3个栖息地适应模型进行了归纳总结,指出这些指标有助于建立累积环境影响评价和管理系统(CEAM)。累积环境影响评价指标的阈值范围是辨别梯级水库产生累积影响负效应的,其定义^[35]为“当环境要素发生变化,造成的环境影响不再为人们所接受的临界点,即产生累积影响的负效应此时必须采取一定的措施补救修复梯级水库开发对河流生态系统的破坏”。阈值往往是某一指标的变化程度,考虑了过去、现在和将来在不同空间尺度上的影响,与决策过程息息相关^[42]。在不同尺度上,河流生态过程的驱动力因子不同,选择的评价指标不同,其阈值范围也不尽相同。阈值的获得需要进行长期的监测、反馈以及响应机制的研究,同时也需要加强多方共同努力去管理流域开发和保护河流生态系统。

4 结语

梯级水电开发的累积环境影响评价逐步成为流域内水电可持续发展和水环境科学领域研究的重要内容。构建梯级水电开发与关键河流生态过程的互反馈机制及其演变机理是累积影响评价理论的核心内容。梯级水库开发后,河流生态系统的敏感要素的响应机制是识别累积影响负效应的关键,梯级水库开发与河流生态系统之间的水文水动力学过程的耦合机制是构建流域累积影响评价指标体系的基础,有助于有针对性地提出减缓累积影响负效应措施。

到目前为止,我国尚未建立适合梯级水电开发背景下的流域累积环境影响评价体系,缺乏完整的、系统的、操作性强的累积影响评价理论体系及其评估技术规范,流域梯级水电工程累积环境影响评价仍存在减缓措施不到位、环境监管不力的现状,加强梯级水库运行后的后评价和后续的监测工作,为此,应对流域梯级水电工程的累积影响评价技术主要包括:生态水文水力学的联合调控、水电工程群的多目标联合调度技术、长效动态监测机制和第三方监控等。

参考文献(References):

- [1] 陈庆伟,陈凯麒,梁鹏.流域开发对水环境累积影响的初步研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2003,1(4):56-61.(CHEN Qingwei, CHEN Kaiqi, Liang Peng. Preliminary study on cumulative impact of basin development on water environment[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003, 1(4): 56-61. (in Chinese))
- [2] 付雅琴,张秋文.梯级与单项水电工程生态环境影响的类比分析[J].水力发电,2007,33(12):5-9.(FU Ya qin, ZHANG Qiurwen. A comparative analysis of ecological and environmental impacts between cascade hydropower station group and single hydropower station[J]. Water Power, 2007, 33(12): 5-9. (in Chinese))
- [3] 翟红娟.纵向峡谷区水电工程胁迫对河流生态完整性影响的研究[D].北京师范大学,2009.(ZHAI Hongjuan. Study on the river ecological integrity under the threat of hydropower development in LRGR[D]. Beijing Normal University, 2009. (in Chinese))
- [4] 李帅.天全河流域梯级开发对环境的累积影响研究[D].四川农业大学,2010.(LI Shuai. Study on cumulative effects assessment of hydropower cascade development in Tianquan River[D]. Sichuan Agricultural University, 2010. (in Chinese))
- [5] Carlisle D M, Wolock D M, Meador M R. Alteration of stream flow magnitudes and potential ecological consequences: a multi-regional assessment[J]. Frontiers in Ecology and Environment, 2011, 9: 264-270.
- [6] Kibler K M and Tullos D D. Cumulative biophysical impact of small and large hydropower development in Nu River, China [J]. Water resources research, 2013(49): 3104-3118.
- [7] 毛战坡,王雨春,彭文启,等.筑坝对河流生态系统影响研究进展[J].水科学进展,2005,16(1):134-140.(MAO Zhanpo, WANG Yur chun, PENG Wenqi, et al. Advances in effects of dams on river ecosystem[J]. Advances in water science, 2005, 16(1): 134-140. (in Chinese))
- [8] Beanlands G, Erckmann W, Orian G et al(editors). Cumulative environmental effects: a bi-national perspective[C]. Ottawa, Canada: The Canadian Environmental Assessment and Research Council and the United States National Research Council, Minister of Supply and Services, 1986.
- [9] Stakhiv E Z. An evaluation paradigm for cumulative impact analysis[J]. Environmental Management, 1988, 12: 725-748.
- [10] Canter L W and Kamath J. Questionnaire checklist for cumulative impacts[J]. Environmental Impact Assessment Review, 1995. 15(14): 311-339.
- [11] McCold L N, Saulsbury J W. Including past and present impacts in cumulative impact assessments [J]. Environmental Management, 1996, 20: 767-776.
- [12] Cooper L M, Sheate W R. Cumulative effects assessment: A review of UK environmental impact statements[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2002. 22: 415-439.
- [13] Megan A. F. Investigating the suitability of Northern Mummichog (Fundulus Heteroclitus Macrolepidotus) for the assessment of cumulative and nonpoint source pollution in prince Edward Island Estuaries[R]. University of Prince Edward Island. 2008.
- [14] Cooper L. M , Sheate R W. Integrating cumulative effects assessment into UK strategic planning: implications of the European Union SEA Directive[J]. Impact Assessment and Project Appraisal, 2004, 22(5): 5-16
- [15] Jill G. and Bram F N. Conceptual and methodological challenges to integrating SEA and cumulative effects assessment[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2011, 31: 154-160.
- [16] Macdonald L H. Evaluating and managing cumulative effects: process and constraints[J]. Environmental Management, 2000. 26(3): 299-315.
- [17] Dub M G. Cumulative effect assessment in Canada: a regional framework for aquatic ecosystems[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2003. 23: 723-745.
- [18] Harriman J A E, Noble B F. Characterizing project and strategic approaches to regional cumulative effects assessment in Canada[J]. Journal of Environmental Assessment Policy and Management, 2008. 10(1): 25-50.
- [19] Therivel R, Ross B. Cumulative effects assessment: Does scale

- matter[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2007, 27: 365-385.
- [20] Reid L M, Cumulative watershed effects and watershed analysis in River ecology and management: lessons from the pacific coastal ecoregion[C], R Naiman and R Bilby, Editors. 1998, Springer Verlag New York. 476-501.
- [21] Dub M G, Johnson B, Dunn G, et al. Development of a new approach to cumulative effects assessment: a northern river ecosystem example[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 113(F3): 87-115.
- [22] 李巍, 王淑华, 王华东. 累积环境影响评价研究[J]. 环境科学进展, 1995(6): 71-76. (LI Wei, WANG Shu hua, WANG Hua dong. Research on cumulative environmental impact assessment[J]. Advances in environmental science, 1995(6): 71-76 (in Chinese)).
- [23] 彭应登, 王华东. 累积影响研究及其意义[J]. 环境科学, 1997(1): 87-89; 97. (PENG Ying deng, WANG Hua dong. Cumulative impact assessment and its meanings[J]. Environmental Science, 1997(1): 87-89; 97. (in Chinese)).
- [24] 王波, 黄薇, 陈进. 累积环境影响研究进展[J]. 水科学进展, 2009(1): 145-152. (WANG Bo, HUANG Wei, CHEN Jin. Advances in study of cumulative environmental impacts[J]. Advances in Water Science, 2009(1): 145-152. (in Chinese)).
- [25] 杨宏. 流域水电梯级开发累积环境影响评价研究[D]. 兰州大学, 2007. (YANG Hong. Study on cumulative effects assessment of cascade hydropower development in drainage area[D]. Lanzhou University, 2007. (in Chinese)).
- [26] 钟华平, 刘恒, 耿雷华. 澜沧江流域梯级开发的生态环境累积效应[J]. 水利学报, 2007(S1): 577-581. (ZHONG Hua ping, LIU Heng, GENG Lei hua. Cumulative effects of Lancang River basin cascade hydropower development on ecology and environment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(S1): 577-581. (in Chinese)).
- [27] 钟华平, 刘恒, 耿雷华. 怒江水电梯级开发的生态环境累积效应[J]. 水电能源科学, 2008, 26(1): 52-55, 59. (ZHONG Hua ping, LIU Heng, GENG Lei hua. Ecology and Environment cumulative effects of cascaded hydropower development in Nujiang River[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(1): 52-55, 59. (in Chinese)).
- [28] 宗永臣, 杨永红, 金建立, 等. 基于 AHP 的巴河水电梯级开发累积环境影响评价研究[J]. 四川环境, 2009, 28(3): 94-99. (ZONG Yong chen, YANG Yong hong, JIN Jian li, et al. Research on CEA of Cascade Hydropower Development in Bahe River Based on AHP[J]. Sichuan Environment, 1009(3): 94-99. (in Chinese)).
- [29] 侯保灯, 朱晓旭, 梁川. 岷江上游典型河段水电梯级开发水环境累积影响[J]. 人民长江, 2010, 41(7): 32-37. (HOU Bao deng, ZHU Xiao xu, LIANG Chuan. Water environment cumulative impact of cascade hydropower development in upper typical reaches of Minjiang River[J]. Yangtze River, 2010, 41(7): 32-37. (in Chinese)).
- [30] 何鹏, 肖伟华, 李彦军, 等. 南水北调东线工程生态环境累积效应机理分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(11): 44-46, 210. (HE Peng, XIAO Wei hua, LI Yan jun, et al. Mechanism analysis of ecological environment cumulative effects on east route of south to north water transfer project[J]. Water resources and power, 2011, 29(11): 44-46, 210. (in Chinese)).
- [31] 耿福明, 薛联青, 陆桂华. 基于复合生态系统的流域梯级开发累积环境影响识别[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(1): 30-32, 38. (GENG Fu ming, XUE Lian qing, LU Gui hua. Identification of cumulative environmental impact of basin cascade development based on complex ecology system[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2006, 17(1): 30-32, 38. (in Chinese)).
- [32] 王波. 梯级水库对河流生境因子的累积影响研究[D]. 长江科学院, 2008. (WANG Bo. Cumulative impact study of cascade reservoir on River ecological factors[D]. Changjiang River Scientific Research Institute, 2008. (in Chinese)).
- [33] 吴健, 由文辉. 流域累积效应及其评估中存在问题的探讨[J]. 上海环境科学, 2002, 21(7): 444-447, 458. (WU Jian, YOU Wen hui. Approach on cumulative watershed effects and problems in its assessment[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2002, 21(7): 444-447. (in Chinese)).
- [34] Swenson D P and Ambrose R F. A spatial analysis of cumulative habitat loss in Southern California under the Clean Water Act Section 404 program[J]. Landscape and Urban Planning, 2007, 82, 41-55.
- [35] Spaling H, Smit B. Cumulative environmental change: conceptual frameworks, evaluation approaches, and institutional perspectives[J]. Environmental Management, 1993. 17(5): 587-600.
- [36] Eccles R, Green J, Morgan R, et al. Approaches to cumulative effects assessment of petroleum development in Alberta Cumulative Effects Assessment in Canada: From concept to Practice[M]. Edmonton, Alberta, Canada, 1994.
- [37] Baxter W, Ross W A, Spaling H. Improving the practice of cumulative effects assessment in Canada[J]. Impact Assessment and Project Appraisal, 2001. 19(4): 253-262.
- [38] Stoddard J L, Larsen D P, Hawkins C P, et al. Setting expectation for the ecological condition of streams: The concept of reference condition[J]. Ecology Application, 2006. 16: 1267-1276.
- [39] Harvey B C. and Railsback S F. Estimating multifactor cumulative watershed effects on fish populations with an individual based model[J]. Fisheries, 2007. 32(6): 292-298.
- [40] Zieman R R. Cumulative effects assessment impact thresholds: Myths and realities in Cumulative effects assessment in Canada: From concept to practice[C], A J Kennedy, Editor. 1994, Alberta Association of Professional Biologists: Edmonton Alberta Canada. 319-326.
- [41] Munkittrick K R, McMaster M E, Kraak G J V D, et al. Development of methods for effects-driven cumulative effects assessment using fish populations: Moose River project[M], in Society of Environmental Toxicology and Chemistry. 2000: Pensacola. 236.
- [42] Adams S M. Establishing causality between environmental stressors and effects on aquatic ecosystems[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2003. 9: 17-35.