

# 梯级水库建设对水环境的累积影响研究进展

纪道斌<sup>1</sup>, 龙良红<sup>1</sup>, 徐 慧<sup>1</sup>, 刘德富<sup>1,2</sup>, 宋林旭<sup>1</sup>

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 湖北工业大学河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

**摘要:**为全面了解梯级水库建设的水环境累积影响,从水环境累积影响的定义、分类和特征三方面对其进行了总结,介绍了目前水环境累积影响研究的常用方法,着重归纳了梯级开发对径流、水质、水温和泥沙等水环境累积影响的研究成果,指出了各方面的影响范围和主要特征,探讨了梯级水库水环境累积影响研究的新趋势。我国梯级水库水环境累积影响研究处于发展阶段,目前的研究多集中于定性评价,急需建立统一的评价标准和评价方法,系统地认识梯级水库建设的环境效应。

**关键词:**梯级水库;水环境;累积影响;径流;水温;水质;泥沙

**中图分类号:**X-1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2017)03-0007-08

**Advances in study on cumulative effects of construction of cascaded reservoirs on water environment//**JI Daobin<sup>1</sup>, LONG Lianghong<sup>1</sup>, XU Hui<sup>1</sup>, LIU Defu<sup>1,2</sup>, SONG Linxu<sup>1</sup>(1. *College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China*; 2. *Key Laboratory of Ecological Remediation for Lakes & Rivers and Alga Resource Utilization, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China*)

**Abstract:** In order to investigate cumulative water environmental effects of construction of cascaded reservoirs on water environment comprehensively, new understandings of cumulative water environmental effects are summarized from the definition, classification, and characteristics. Common methods for investigating cumulative water environmental effects are compared. Research achievements of cumulative environmental effects of cascade development on runoff, water quality, water temperature, and sediment are reviewed from the aspects of influence scope and main characteristics. New tendencies for future study on the cumulative effects of cascaded reservoirs on water environment are discussed. It is concluded that the study on the cumulative effects of cascade reservoirs in China, mainly qualitative evaluation at present, is in a developing stage. It is necessary to establish a unified evaluation criteria and method in order to systematically investigate the environmental effects of the construction of cascaded reservoirs.

**Key words:** cascaded reservoir; water environment; cumulative effect; runoff; water temperature; water quality; sediment

近年来,“流域-梯级-滚动-综合”模式<sup>[1-3]</sup>已成为水利水电开发的主流模式。流域梯级水电开发是高效利用水资源的趋势和必然途径,形成包括发电、防洪、航运、灌溉等目标在内的综合利用格局<sup>[4-6]</sup>。我国从 20 世纪 80 年代开始提出流域梯级水电开发的能源战略,建立了水电路域梯级滚动开发的十三大水电基地<sup>[7]</sup>,再一次将梯级水电开发推向高潮。在梯级开发模式下,水库空间布局较为密集<sup>[8]</sup>,单个水库对环境的影响必然会以某种形式叠加,产生环境累积效应。同单个水库对环境的影响相比,梯级水库群对环境的影响主要表现为累积性、系统性和可控性<sup>[9]</sup>。随着累积效应一词的提出,不同学者纷纷从累积影响的角度来分析梯级水电开发的环境

问题,大量研究表明梯级水电开发环境累积影响主要体现在水环境、生态环境和社会环境等方面<sup>[10]</sup>,而最显著、最直观的累积影响表现在水环境方面。不同学者从径流<sup>[11-13]</sup>、水质<sup>[14-15]</sup>、水温<sup>[16-17]</sup>和泥沙<sup>[18-19]</sup>等角度分析了梯级水库建设对水环境的累积影响,发现在不同的流域内累积影响效果具有空间异质性,累积影响的表现形式和程度也存在差异。对水文径流的影响主要体现在径流总量降低和径流过程改变;对水质的影响主要体现在库区水体富营养化、河道水质逐渐恶化或改善的两面性特征;对于河流水温的影响则主要体现在两个方面:库区水温分层结构发生改变,下泄水温出现平坦化、均一化特性;对泥沙的累积影响明显,大坝的拦截效应使下游

河流含沙量、水流携沙粒径、泥沙输移能力均发生改变。在以往的研究中,虽已取得部分成果,但仍然存在一些不足,比如评价方法不够明确、评价体系不够完善、评价多局限于单一因子的分析等。

## 1 累积影响认识

### 1.1 累积影响定义

1969年美国《环境政策法案》<sup>[20]</sup>和美国环境质量委员会(CEQ)建立了环境影响评价制度<sup>[21]</sup>,指出环境影响包括直接影响、间接影响以及累积影响,至此累积影响逐渐被社会认识。1979年美国环境质量委员会<sup>[22]</sup>提出在环境评价中要考虑累积影响,随之美国国家政策法<sup>[23]</sup>规定:累积影响是指当异向活动与过去、现在及可预见将来可能开展的其他活动结合在一起时,因影响的增加而产生的对环境的影响。1994年加拿大《环境评价法》<sup>[24]</sup>中将累积影响定义为:累积环境影响来源于一个项目与已完成或将要开展的其他项目或活动的共同作用。随着社会对环境的不断重视,累积影响的研究也不断深入,国内外不同学者<sup>[25-27]</sup>也给出了各种各样的定义,但都大同小异。累积影响是人们从另一个全新的角度来看待生态环境问题,其本身并不是什么新的环境问题。

### 1.2 累积影响分类

随着对累积影响认识的加深,一些学者对累积影响的类型进行了分类。由于对累积影响的判别标准不同,存在多种分类方法,如图1所示。按照影响因子的类型划分,分为同质型和异质型。按照影响

的作用途径不同,可以分为直接累积影响、间接累积影响和多元累积影响。根据影响特征的不同可将其分为8类<sup>[28]</sup>:时间拥挤效应、时间滞后效应、空间拥挤效应、空间滞后效应或跨边界效应、破碎效应或蚕食效应、复合效应或协同效应、间接效应以及触发点或阈值效应。依据累积影响发生的效果不同,累积影响可分为3类<sup>[29]</sup>:协同影响、独立影响和拮抗影响。虽然目前分类的标准很多,这也有助于加深对累积影响的认识,但是实际发生的累积影响往往难于被严格划分为某一类型。由于目前累积影响评价的标准不一而且没有很完善的评价体系,根据研究深度、尺度的不同,对于累积影响的分类也可能存在差异。总体看来,按照累积影响特征的分类方法应用较多,并被大多学者所认可。

### 1.3 累积影响的特征

从上述的定义及分类中可以明显看出无论何种定义和分类方式,对累积影响最本质的概括是环境影响在时间和空间上的累积,因此时空特征是累积影响的最基本特征。

**a. 时间累积特征。**时间累积特征是指若两个干扰之间的时间间隔小于每个干扰恢复所需的时间间隔时,就会产生时间上的累积影响,这种累积可以是连续的、周期性的,甚至是不规则的。时间累积特征可以用累积频率来描述。累积频率是指某个区域在某段时间内出现累积效应或累积影响的频率,反映了干扰对环境影响的时间层面,累积频率越大,环境受到的干扰越大,累积效应越显著。

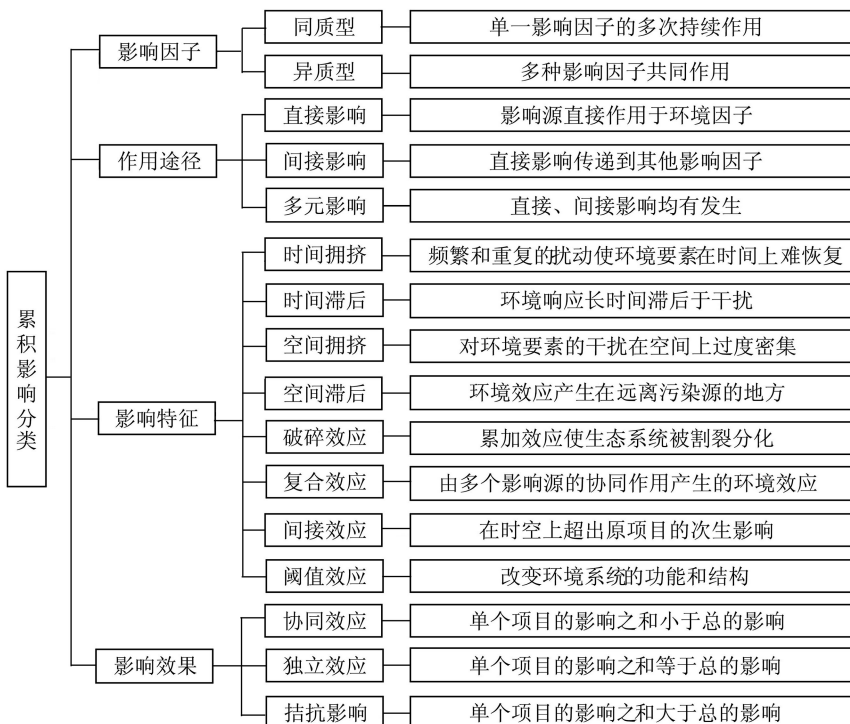


图1 累积影响的分类

b. 空间累积特征。空间累积特征是指当两个干扰之间的空间距离小于疏散每个干扰所需的距离时,干扰就会产生空间上的累积效应,这种累积可以是局部的、流域的,甚至是全球化的。空间累积特征通常用累积度来评价,累积度是指累积影响在累积影响区内的累积程度,定义为累积变化值与环境阈值的比值,比值越大,累积度越大,系统受到的干扰越严重。

## 2 累积影响的研究方法

由于累积影响评价拓展了时空分析范围,对评价方法的要求也有所提高,目前大量学者<sup>[30-31]</sup>从不同的角度、运用不同的方法对累积影响分别作出定量、定性的评价。表1从研究对象、优缺点的角度归纳总结了目前累积效应常用的研究方法,主要包括地理信息系统(geographical information system, GIS)法<sup>[32-33]</sup>、系统动力学<sup>[34]</sup>(system dynamics, SD)法、情景分析法<sup>[35]</sup>、矩阵法<sup>[36]</sup>、专家咨询法<sup>[37]</sup>、模型计算法<sup>[38]</sup>、类比法<sup>[39]</sup>以及列表清单法<sup>[40]</sup>等。

刘红玉等<sup>[41]</sup>通过GIS法分析了挠力河流域湿地景观时空演变产生的累积效应,结果表明,挠力河流域湿地景观变化超过了阈值,累积效应达到了极显著程度。GIS法虽然能够对空间维进行透彻的分析,但是在分析累积影响的过程、方式、机制时能力不足。吴贻名等<sup>[42]</sup>等分析了利用SD法进行累积影响评价的可行性,发现SD法适用于评价影响的累积过程和本质的、突出空间累积效应,但分析过程往往较复杂。矩阵法的一个重要特点在于依赖于人类对各种累积现象的认识而直观地表示交叉或因果关系,但不能处理间接影响及时间特征明显的影响。专家咨询法属于定性分析,主要侧重于分析累积影响的因果条件而对于累积的方式作定性分析,不具有时空分析的能力和结构、功能方面的分析能力。

在满足对环境系统的结构与行为有足够的认识、具有足够可信的数据和模型的前提下,数学模型法是功能较全面的方法,对影响源、累积过程、空间累积、时间累积、结构与功能变化等均能进行较好的分析,但不足之处是对基础数据要求较高,要求具有足够可信的数据和模型。

通过对上述方法的比较发现,GIS法、矩阵法、专家咨询法、列表清单法都只能分析特定的评价指标,并且受历史资料的限制。情景分析法、类比法虽然操作简单可行,但受人为主观影响较大且需要历史案例作为支撑。SD法、模型计算法能力较全面,对累积影响评价的各评价指标均能进行较好的分析,但过程较为复杂,同样需要丰富的基础数据作为支撑。这些方法的研究对象、复杂程度、适用范围不尽相同,采用多种方法联合应用更有利于对累积影响的全面评价。

## 3 梯级水库水环境累积影响研究现状

和自然河流生态系统相比,梯级水电开发会产生一系列破坏性的环境干扰,加上水电开发活动和生态系统的复杂性,这些干扰不可避免的产生累积效应。水电梯级开发对环境的累积影响主要体现在水环境<sup>[43-45]</sup>、生态环境<sup>[46-51]</sup>和社会环境<sup>[52-53]</sup>。其中水环境的影响<sup>[54]</sup>主要体现在河流径流、泥沙、水温和水质方面,生态环境影响主要包括对生境面积、水土流失和生物种群的影响,社会环境影响指对地区经济和产业结构的改变。从国内已有的研究动态来看<sup>[55-57]</sup>,梯级水电开发对水环境的影响成为累积效应最重要的部分,其影响主要体现在水文径流、水质、水温、泥沙和局地气候等方面<sup>[58-60]</sup>,其具体特征见表2。

### 3.1 径流累积效应

钟华平等<sup>[61]</sup>等以怒江水电梯级开发为例,认为

表1 环境累积影响评价方法

评价方法	对象	优点	缺点
地理信息系统法	地理、地图数据	能改善对发展行为和环境状态的监测和跟踪、突出时间累积特征	依赖历史环境变量记录丰富度
系统动力学法	受影响的生态环境因子、生态环境质量值	适用于评价影响的累积过程和本质的、突出空间累积效应	环境评价过程较为复杂
幕景分析法	原始幕景、当前幕景、将来幕景	避免了难以确定评价时间范围的问题、可操作性强,易于实施	受评价人员主观因素影响较大、依赖于其他方法共同完成
矩阵法	规划目标、规划指标、规划方案、环境因素	直观地表示交叉或因果关系	不能处理间接影响、时间特征明显的影响
专家咨询法	专家意见、建议、经验	能评价其他方法不能定量分析评价的环境影响	只能作定性分析、不具有时空分析的能力和结构
数学模型法	影响源、累积过程、空间累积、时间累积、结构和功能	分析功能较为全面	对环境系统的结构和行为必须有足够的认识,对数据和模型的依赖性强
类比法	评价项目、已建成的类比项目	调查类评价、简单可行	环境影响已基本趋于稳定
列表清单法	开发活动、可能受影响的环境因子	使用方便	不能对环境影响程度进行定量评价

表2 梯级水库水环境累积影响特征

水环境因素	影响效果	特征	案例
径流	径流总量降低、径流过程改变	平坦化	怒江流域梯级水库、南水北调东线 13 个梯级
水质	水体富营养化、河道水质恶化或改善	两面性	黄河龙羊峡—刘家峡河段梯级、澜沧江流域梯级、怒江流域梯级
水温	库区水温结构改变、下泄水温过程变化	热源效应、平坦化、均一化	三峡-葛洲坝梯级水库、雅砻江流域锦屏一级、二滩梯级
泥沙	含沙量、水流携沙粒径、泥沙输移能力	含沙量剧减	金沙江下游溪洛渡、向家坝梯级、天全河流域

怒江梯级水电站的建成运行在一定程度上上的削峰减量对下游径流量有明显的调节作用,使得下游河道径流模式发生变化,汛期 6、7 月流量比天然情况减少 30%,4 月和 8—11 月流量基本不变,12 月至次年 4 月流量增加约 20%,梯级水库建设对下游河段水文情势影响显著。何鹏等<sup>[62]</sup>分析表明南水北调东线工程上 13 级梯级抽水泵站的建设阻隔了原有的天然河道,从而使天然河流的径流过程发生了显著的逐河段累积变化,造成河流径流量明显减少,且径流形态特征极端不规律。Lu 等<sup>[63]</sup>研究表明,由于上游梯级的层层拦截,澜沧江 8 座梯级水库使下游湄公河径流严重减少,与自然河流径流过程差异较大;Zhang 等<sup>[64]</sup>对淮河流域的研究表明,在 1991—2000 年期间大坝和水闸的修建使淮河年平均径流减少了 2%,并且对丰水年和枯水年年径流量影响不同,在丰水年(1991 年)年径流量增加了 8%,在枯水年(1999 年)年径流量减少了 12%。总结大量学者的研究成果,发现梯级水库建设对径流的累积影响主要体现在以下 3 个方面:①梯级水库建设阻隔河道,改变河流的连续性,使自然河流连续渐变的水位线变成阶梯状水位线,改变了河流水文特性的时空分布;②人为控制下泄流量,使得下游的径流过程发生显著改变,出现平坦化特征;③天然河流形态的改变,河流型水体向湖泊型水体过渡,局地气候的改变使得降水量、蒸发量发生改变,库区内流速显著降低,紊动扩散能力减弱,水体自净能力降低。

### 3.2 水质累积效应

水质是反映一条河流是否健康的最直观指标,而影响河流水质的因素很多,包括水量、水温、泥沙以及河流沿程的污染情况。目前不少学者对梯级水库的水质累积影响也做了一定的研究,Cada 等<sup>[65]</sup>研究了 San Joaquin、Qwens 和 Ohio 流域的水电站建设对水质的影响,并建立了基于流域的累积影响评价框架。da Silva 等<sup>[66]</sup>研究了巴西 Iguacu 流域 5 座梯级水库对水质的影响,认为梯级水库建设改变了

水流动态特性,流速降低,水体垂向分层明显,水下真光层增加,有利于浮游植物的繁殖,水体富营养化程度逐渐加重,严重影响水库水质。寇晓梅等<sup>[67]</sup>等通过对比黄河龙羊峡—刘家峡河段梯级水库建设前后水质单项和综合指标,发现库区点、面污染源较小,水质良好,为 I 至 II 类,未发生水体富营养化现象。由于上游龙羊峡、刘家峡水库的调节作用,河段枯水期、丰水期水质变化不显著,即使在水量偏枯和污染源加重的趋势下,由于水库水体的稀释作用以及拦截作用,下游河段沿程水质变化也趋于平缓并且污染物浓度整体有下降趋势。然而,刘恒等<sup>[68]</sup>通过分析澜沧江流域、怒江流域梯级开发的生态环境累积影响,提出随着澜沧江、怒江流域的梯级开发,总体上水质呈恶化趋势,清洁水体逐年减少;按照湖库标准评价,澜沧江干流总磷在各监测断面均超标,为 V 类水质。随着澜沧江流域的梯级开发,加上上游金属矿采选、冶炼和生活垃圾、废水入库,使得水体富营养化程度进一步加重。由此可见,梯级水库建设通过重塑河流的水文过程,从而影响河流的水质状况,这一过程主要体现在两个方面:一是库区水体自净能力降低、营养物沉积;二是人为干扰导致河段沿程污染负荷增加,水体富营养化程度加重。但是对于不同的梯级水库,水质的累积影响表现出两面性,在水库水体的稀释作用和拦截作用下,当入库负荷较小时,水库下游水质能得到一定程度的改善,污染程度趋于减缓。

### 3.3 水温累积效应

流域水电梯级开发虽然能充分利用流域的水能资源,但水库蓄水的热源效应会很大程度地改变河流水温过程,影响年内年际的水温分布,产生较大的水温累积影响。郭文献等<sup>[69]</sup>分析了三峡-葛洲坝梯级水库对水温的影响,葛洲坝水库蓄水使得宜昌站水温平均增温 0.3℃,其中 1 月、2 月、5 月、12 月增温效应较明显,其他月份增温不显著,葛洲坝水库蓄水对不同月份下泄水温都具有一定的增温效应。而三峡水库对水温的影响程度大小不同,其中 3—5 月为降温,降温程度平均达到 0.9℃,10 月至次年 1 月增温效应明显,尤其是 12 月增温为 3.1℃,由此可见,不同类型水库的水温效应不尽相同。邓云等<sup>[60]</sup>通过建立立面二维水库水温模型,分析了雅砻江梯级开发的水温累积效应,发现梯级水库联合运行后下游二滩库区水温分层有所减弱,下泄水温过程的延迟和均化现象进一步加强。周孝德等<sup>[70]</sup>通过对比不同类型的水库水温累积影响差异,提出由于水库的类型不同,水温影响存在协同增大和削弱降低效应,不同水库联合运行期水库水温累积影响的差

异显著。同样,在乌江干流中上游水电梯级开发水温累积影响效应的研究中,黄峰等<sup>[58]</sup>发现不同水库水温结构对水温累积效应的影响各不相同,稳定分层型水库对水温累积影响具有正效应(正效应指温差由于该库的调节作用而增大),混合型水库具有负效应(负效应指温差由于该库的调节作用而降低),同时水库在梯级开发中所处的位置也直接影响水温的累积效应。从众多学者的研究<sup>[71]</sup>中发现,梯级电站运行不仅改变了库区的水温分布,同时也改变了天然河流的水温年变化过程,使得春夏季下泄水温低于天然河流水温,秋冬季则高于天然河流水温,下泄水温的过程表现出延迟、均化特征。水库越深,库容越大,调节性能越好,对天然水温年过程的影响就越大,环境累积影响也越大。

### 3.4 泥沙累积效应

有关资料表明,尼罗河阿斯旺高坝建库前后汛期含沙量减小 99%;科罗拉多河格伦峡坝建库前后年平均含沙量下降了 98%;官厅水库自 1956 年蓄水以后的 3 年内,永定河下游的含沙量减少了 90%左右;三门峡水库的黄河下游和丹江口水库的汉江下游,也都普遍出现含沙量较建库前大幅度减少的现象。Vörösmarty 等<sup>[72]</sup>指出在科罗拉多河和尼罗河等流域,大型梯级水库的修建使局部拦沙效率可超过 80%;Williams 等<sup>[73-74]</sup>的研究表明,对于库容大于  $10^7 \text{ m}^3$  的梯级水库而言,其拦沙效率一般超过 99%。Jorcín 等<sup>[75-76]</sup>研究了巴西东南部 Paranapanema 流域 2000—2001 年梯级水库泥沙的物理化学动态特性。杨丽虎等<sup>[77]</sup>通过建立流域综合模型分析了金沙江下游长江上游梯级水库建设对水沙的累积影响,得知拦沙系数最大的支流为嘉陵江流域,为 0.008 6/a,最小的为乌江流域,为 0.004 8/a,从总体上来看,长江上游梯级水库的拦沙系数为 0.006 8/a;同时由于下泄流量的平坦化使得河段流速降低,挟沙能力也显著降低。李帅等<sup>[78]</sup>研究发现天全河 2000 年平均含沙量为  $0.52 \text{ kg/m}^3$ ,2004 年梯级开发以后,天全河年平均含沙量减少为  $0.46 \text{ kg/m}^3$ ,截止 2008 年,其年平均含沙量已锐减到  $0.37 \text{ kg/m}^3$ ,仅为 2000 年的 71.2%。天全河流域梯级水库的建设使得上游和支流来沙大部分被拦于各梯级库内,年拦沙量高达 7.109 万  $\text{m}^3$ ,梯级水库的拦沙系数为 0.004 4/a。大量研究表明,梯级水库改变了下游河段来水来沙过程,对下游河流产生再造河床的作用,使得河床会发生一系列变化。泥沙的累积效应主要体现在 3 个方面:改变水流含沙量、水流携沙粒径、泥沙输移能力。

## 4 梯级水库水环境累积效应研究新趋势

由于梯级水电开发是一项具有长期性和艰巨性

的系统工程,对流域的环境影响深远。目前国内对梯级水电开发产生的累积影响的关注正逐渐增多,从水环境的角度来评价梯级水库的环境效应也逐渐走向成熟,但在以往的研究中仍发现一些问题,比如在水环境评价中,虽然逐渐明确到径流、水质、水温、泥沙等指标,但仍然没有形成明确的评价指标体系和评价方法,而且很多研究结果都局限于概念性的评价,针对这些问题可能呈现以下新的研究趋势:

a. 现场监测的完善化。结合以往的研究发现:在过去的研究中,由于历史基础数据的缺乏导致累积效应评价困难重重。不论采用何种研究方法,生态环境监测数据都是进行累积影响评价的基础,持续、跟踪监测也可为检验累积影响结论提供依据。在今后的研究中,应进一步完善监测指标,规范监测过程,并坚持长期持续野外生态环境监测。

b. 评价体系的标准化。累积效应评价中最关键的技术问题是如何进行累积影响的准确预测和定量分析,而目前还没有一个明确和得到共识的评价技术体系,使得进行累积效应评价时,评价对象、评价时空范围、评价边界受主观影响较大,站在不同的角度对累积效应进行评价可能得到不同的结果。因此,随着累积影响定义和科学体系的完善,将形成明确的评价指标体系。

c. 评价结果的系统化。由于累积影响的复杂性,在水环境累积影响的研究中,一般将径流、水质、水温、泥沙、鱼类种群、生境、局地气候等直接累积影响问题应用到现有的数学模型中单独研究,分别进行影响评价。在未来的研究中,应该考虑各指标之间的相互影响和耦合作用,给出更全面、系统的累积影响评价结果。

### 参考文献:

- [1] 夏忠. 黄河上游梯级水电滚动开发理论与实践[D]. 西安:西安理工大学,2001.
- [2] Cascade development improvement:3,105,770[P]. 1963-10-01.
- [3] ZHENG Y, FU X, WEI J. Evaluation of power generation efficiency of cascade hydropower plants: a case study[J]. Energies, 2013, 6(2): 1165-1177.
- [4] 王赵松, 李兰. 流域水电梯级开发与环境生态保护的进展[J]. 水电能源科学, 2009, 27(4): 43-45. (WANG Zhaosong, LI Lan. Research development of basin cascade hydropower development and environment ecological protection [J]. Water Resources and Power, 2009, 27(4): 43-45. (in Chinese))
- [5] 卢有麟. 流域梯级大规模水电站群多目标优化调度与多属性决策研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
- [6] 李友辉, 孔琼菊, 马秀峰, 等. 流域梯级开发环境影响评

- 价指标体系研究[J]. 水电能源科学,2010,28(5):101-104. (LI Youhui, KONG Qiongliu, MA Xiufeng, et al. Research on index system for environmental impact assessment in basin cascade development [J]. Water Resources and Power, 2010, 28 (5): 101-104. (in Chinese))
- [7] 朱玉方,宋兴. 我国水电发展趋势及投资策略研究[J]. 红水河,2012,31(2):1-5. (ZHU Yufang, SONG Xing. Study on China's hydropower development trends and investment strategies[J]. Hongshui River, 2012, 31(2): 1-5. (in Chinese))
- [8] 钱玉杰. 我国水电的地理分布及开发利用研究[D]. 兰州:兰州大学,2013.
- [9] 张士杰,闫俊平,李国强. 流域梯级开发方案调整的水温累积影响研究[J]. 水利学报,2014,45(11):1336-1343. (ZHANG Shijie, YAN Junping, LI Guoqiang. Cumulative effects of cascade development project adjustment on water temperature[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(11):1336-1343. (in Chinese))
- [10] MANDER U, KUUSEMETS V, KRISTA L, et al. Efficiency and dimensioning of riparian buffer zones in agricultural catchments[J]. Ecological Engineering, 1997, 8(4):299-324.
- [11] KIBLER K M, TULLOS D D. Cumulative biophysical impact of small and large hydropower development in Nu River, China [J]. Water Resources Research, 2013, 49(6):3104-3118.
- [12] COLLIER M, WEBB R H, SCHMIDT J C. Dams and rivers: a primer on the downstream effects of dams [M]. [S. l.]: Diane Publishing, 1996.
- [13] DEITCH M J, MERENLENDER A M, FEIRER S. Cumulative effects of small reservoirs on streamflow in Northern Coastal California catchments [J]. Water Resources Management, 2013, 27(15):5101-5118.
- [14] 徐丽媛,逢勇,罗缙,等. 河流水电梯级开发水质影响评价方法研究[J]. 工业安全与环保,2014,40(4):74-77. (XU Liyuan, PANG Yon, LUO Jin, et al. Research on water quality effects evaluation method of cascade development of hydropower stations[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2014, 40(4):74-77. (in Chinese))
- [15] 薛联芳,顾洪宾,韦兵,等. 红水河干流水电梯级开发对水质累积影响调查研究[J]. 水力发电,2013,39(4):9-12. (XUE Lianfan, GU Hongbin, WEI Bin, et al. Study on cumulative effects of water quality by hydroelectric cascade development in Hongshui River [J]. Water Power, 2013, 39(4):9-12. (in Chinese))
- [16] 梁瑞峰,邓云,脱友才,等. 流域水电梯级开发水温累积影响特征分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(增刊2):221-227. (LIANG Ruifeng, DEN Yun, TUO Youcai, et al. Analysis on characteristics of water temperature's cumulative effects of river cascade hydropower stations [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44 (Sup2):221-227. (in Chinese))
- [17] HAO H S, DENG Y, LI K F, et al. Study on water temperature cumulative effects of diversion type cascade development [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(2):7.
- [18] WALLING D E, FANG D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers [J]. Global and Planetary Change, 2003, 39(1):111-126.
- [19] KUMMU M, VARIS O. Sediment-related impacts due to upstream reservoir trapping, the lower Mekong River [J]. Geomorphology, 2007, 85(3):275-293.
- [20] COOPER T, CANTER L. Documentation of cumulative impacts in environmental impact statements [J]. Environmental Impact Assessment Review, 1997, 17(6):385-411.
- [21] CEQ. Considering cumulative effects under the national environmental policy act [M]. Washington, D. C.: [s. n.], 1997.
- [22] MCDERMOTT J E. Improving NEPA: new regulations of the council on environmental quality [J]. Boston College Environmental Affairs Law Review, 1979, 8:89.
- [23] ANDERSON F R. NEPA in the courts: a legal analysis of the national environmental policy act [M]. New York: Routledge, 2013.
- [24] SADLER B. Environmental assessment in a changing world: Evaluating practice to improve performance [M]. Ottawa: Canadian Environmental Assessment Agency, 1996.
- [25] TOLLEFSON C, WIPOND K. Cumulative environmental impacts and aboriginal rights [J]. Environmental Impact Assessment Review, 1998, 18(4):371-390.
- [26] 杨宏. 流域水电梯级开发累积环境影响评价研究[D]. 兰州:兰州大学,2007.
- [27] 毛文锋,吴仁海. 建议在我国开展累积影响评价的理论与实践研究[J]. 环境科学研究, 1998, 11(5):8-11. (MAO Wenfeng, WU Renhai. Launching theoretical and practical studies on cumulative impact assessment in China [J]. Research of Environmental Sciences, 1998, 11(5):8-11. (in Chinese))
- [28] COCKLIN C, PARKER S, HAY J. Notes on cumulative environmental change I: concepts and issues [J]. Journal of Environmental Management, 1992, 35(1):31-49.
- [29] 王波,黄薇,陈进. 累积环境影响研究进展[J]. 水科学进展, 2009, 20(1):145-152. (WANG Bo, HUANG Wei, CHEN Jin. Advances in study of cumulative environmental impacts [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(1):145-152. (in Chinese))
- [30] SOUTHERLAND M. Methods, techniques, and tools for analyzing cumulative effects [R]. Washington, D. C.: National Association of Environmental Professionals, 1995.
- [31] CANTER L. Cumulative effects and other analytical challenges of NEPA [M]. Winter Park: St. Lucie Press, 1997.
- [32] JOHNSTON C A, Detenbeck N E, Bonde J P, et al. Geographic information systems for cumulative impact

- assessment[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54(11): 1609-1615.
- [33] 刘瑞民, 沈珍瑶. 大宁河流域生态环境综合评价及其演变[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2006, 42(2): 200-203. (LIU Ruimin, SHEN Zhenyao. Integrated assessment and changes of ecological environment in Daning River Watershed[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2006, 42(2): 200-203. (in Chinese))
- [34] 王行风, 汪云甲, 李永峰. 基于 SD-CA-GIS 的环境累积效应时空分析模型及应用[J]. 2013, 33(7): 2078-2086. (WANG Xingfeng, WANG Yunjia, LI Yongfeng. Analysis and assessment model of environmental cumulative effects based on the integration of SD, CA and GIS methods and its application[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(7): 2078-2086. (in Chinese))
- [35] 林逢春, 陆雍森. 幕景分析法在累积影响评价中的实例应用研究[J]. 上海环境科学, 2001, 20(6): 288-291. (LIN Fengchun, LU Yongsen. Application of scenarios analysis to cumulative impacts assessment: case study[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2001, 20(6): 288-291. (in Chinese))
- [36] LAGORY K, STULL E, VINIKOUR W. Proposed methodology to assess cumulative impacts of hydroelectric development in the Columbia River Basin [J]. Environmental Analysis: the NEPA Experience, 1993(1): 408-423.
- [37] 王海伟, 王波. 环境累积影响评价方法及在水利工程中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2013(11): 20-23. (WANG Haiwei, WANG Bo. Environment cumulation impact statement methods and their application in water projects[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(11): 20-23. (in Chinese))
- [38] 廖振良, 徐祖信, 高廷耀. 苏州河环境综合整治一期工程水质模型分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(4): 499-502. (LIAO Zhenliang, XU Zuxin, GAO Tingyao. Analysis on the first stage of Suzhou Creek rehabilitation project based on water quality model[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(4): 499-502. (in Chinese))
- [39] REID L M. Cumulative watershed effects: caspar creek and beyond[J]. Forest Service Research & Development, 1998, 168: 117-127.
- [40] CANTER L W, KAMATH J. Questionnaire checklist for cumulative impacts[J]. Environmental Impact Assessment Review, 1995, 15(4): 311-339.
- [41] 刘红玉, 吕宪国, 张世奎. 湿地景观变化过程与累积环境效应研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 22(1): 60-70. (LIU Yuhong, LÜ Xianguo, ZHANG Shikui. Progress on the study of process of wetland landscape changes and cumulative environmental effects [J]. Progress in Geography, 2011, 22(1): 60-70. (in Chinese))
- [42] 吴贻名, 张礼兵, 万颀. 系统动力学在累积环境影响评价中的应用研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(1): 70-73. (WU Yiming, ZHANG Libing, WAN Biao. Study on application of system dynamics to cumulative environment impact assessment[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2000, 33(1): 70-73. (in Chinese))
- [43] 何鹏. 南水北调东线工程受水区水环境累积影响评价[D]. 河北: 河北工程大学, 2012.
- [44] ORMEROD S J. Climate change, river conservation and the adaptation challenge [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2009, 19(6): 609-613.
- [45] 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, 38(增刊1): 577-581. (ZHONG Huaping, LIU Heng, GENG Leihua. Cumulative effects of Lancang River Basin cascade hydropower development on ecology and environment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(Sup1): 577-581. (in Chinese))
- [46] CALLISTO M, GOULART M, BARBOSA F A R, et al. Biodiversity assessment of benthic macroinvertebrates along a reservoir cascade in the lower São Francisco River (northeastern Brazil) [J]. Brazilian Journal of Biology, 2005, 65(2): 229-240.
- [47] 范继辉. 梯级水库群调度模拟及其对河流生态环境的影响[D]. 成都: 中国科学院研究生院, 2007.
- [48] KIBLER K M, TULLOS D D. Cumulative biophysical impact of small and large hydropower development in Nu River, China [J]. Water Resources Research, 2013, 49(6): 3104-3118.
- [49] DRASTIK V, KUBECKA J, TUSER M, et al. The effect of hydropower on fish stocks: comparison between cascade and non-cascade reservoirs [J]. Hydrobiologia, 2008, 609(1): 25-36.
- [50] ZHAI H, CUI B, HU B, et al. Prediction of river ecological integrity after cascade hydropower dam construction on the mainstream of rivers in Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR), China [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(4): 361-372.
- [51] LI J, DONG S, YANG Z, et al. Effects of cascade hydropower dams on the structure and distribution of riparian and upland vegetation along the middle-lower Lancang-Mekong River [J]. Forest Ecology and Management, 2012, 284: 251-259.
- [52] 王波, 黄薇, 杨丽虎. 梯级水电开发对水生境累积影响的方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2007(4): 127-130. (WANG Bo, HUANG Wei, Yang Linhu. Research on the cumulative impacts of cascade hydropower development on water biology environment [J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(4): 127-130. (in Chinese))
- [53] 瞿群. 流域水电规划环境影响评价研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [54] 薛联青. 流域水电梯级开发环境影响成本辨识及其动态评估理论[D]. 南京: 河海大学, 2002.
- [55] 李兰, 李亚农, 袁旦红, 等. 梯级水电工程水温累积影响预测方法探讨[J]. 中国农村水利水电, 2008(6): 86-

90. (LI Lan, LI Yanong, YUAN Danhong, et al. An approach to prediction method of cumulative impact of water temperature on the cascade hydropower project [J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(6):86-90. (in Chinese))
- [56] 杨宏. 流域水电梯级开发累积环境影响评价研究[D]. 兰州:兰州大学, 2007.
- [57] 钟姗姗. 流域水电梯级开发项目累积环境影响作用机制及评价研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.
- [58] 黄峰, 魏浪, 李磊, 等. 乌江干流中上游水电梯级开发水温累积效应[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(4): 337-342. (HUANG Feng, WEI Lang, LI Lei, et al. Cumulative effects of water temperature by cascade hydropower stations built on upper and middle reaches of the Wujiang River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(4):337-342. (in Chinese))
- [59] XUE X, HONG H, CHARLES A T. Cumulative environmental impacts and integrated coastal management: the case of Xiamen, China [J]. Journal of Environmental Management, 2004, 71(3): 271-283.
- [60] 邓云, 李嘉, 李克锋, 等. 梯级电站水温累积影响研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(2):273-279. (DENG Yun, LI Jia, LI Kefeng, et al. Cumulative impact of cascade power stations on water temperature [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2):273-279. (in Chinese))
- [61] 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. (ZHONG Huaping, LIU heng, GENG Leihua. Ecology and environment cumulative effects of cascaded hydropower development in Nujiang River [J]. Water Resources and Power, 2008, 26(1):52-55. (in Chinese))
- [62] 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. (HE Peng, XIAO Weihua, LI Yanjun, et al. Experimental research on PRB reaction medium in remediation of nitrate contaminated groundwater [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(11): 44-46. (in Chinese))
- [63] LU X X, SIEW R Y. Water discharge and sediment flux changes over the past decades in the lower Mekong River: possible impacts of the Chinese dams [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2006, 10(2):181-195.
- [64] ZHANG Y, XIA J, LIANG T, et al. Impact of water projects on river flow regimes and water quality in Huai River Basin [J]. Water Resources Management, 2010, 24(5): 889-908.
- [65] CADA G F, HUNSAKER C T. Cumulative impacts of hydropower development: reaching a watershed in impact assessment [J]. Environ Profess, 1990, 12(1): 2-8.
- [66] da SILVA C A, TRAIN S, RODRIGUES L C. Phytoplankton assemblages in a Brazilian subtropical cascading reservoir system [J]. Hydrobiologia, 2005, 537(1/2/3):99-109.
- [67] 寇晓梅, 牛天祥, 黄玉胜, 等. 黄河上游已建梯级电站的水环境累积效应[J]. 西北水电, 2009(6):11-14. (KOU Xiaomei, NIU Tianxiang, HUANG Yusheng, et al. Cumulative effect of water environment of existing cascade stations on the upper Yellow River [J]. Northwest Hydropower, 2009(6):11-14. (in Chinese))
- [68] 刘恒, 刘九夫, 唐海行. 澜沧江流域(云南段)水资源开发利用现状及趋势分析[J]. 水科学进展, 1998, 9(1): 70-76. (LIU Heng, LIU Jiufu, TANG Haixing. Present and future of water resources development in Lancang River Basin in Yunnan Province [J]. Advances in Water Science, 1998, 9(1):70-76. (in Chinese))
- [69] 郭文献, 王鸿翔, 夏自强, 等. 三峡-葛洲坝梯级水库水温影响研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(6):182-187. (GUO Wenxian, WANG Hongxiang, XIA Ziqiang, et al. Effects of Three Gorges and Gezhouba Reservoir on river water temperature regimes [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(6):182-187. (in Chinese))
- [70] 周孝德, 宋策, 唐旺. 黄河上游龙羊峡—刘家峡河段梯级水库群水温累积影响研究[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(1): 1-7. (ZHOU Xiaode, SONG Ce, TANG Wang. Cumulative effects of cascade reservoirs on water temperature from Longyang Gorge to Liujia Gorge in the Yellow River Upstream [J]. Journal of Xian University of Technology, 2012, 28(1):1-7. (in Chinese))
- [71] 李兰, 武见. 梯级水库三维环境流体动力学数值预测和水温分层与累积影响规律研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2010, 25(2):155-164. (LI Lan, WU Jian. The three-dimensional environmental fluid dynamics code model for research of reservoir water temperature law [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(2): 155-164. (in Chinese))
- [72] VÖRÖSMARTY C J, MEYBECK M, FEKETE B, et al. Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments [J]. Global and Planetary Change, 2003, 39(1):169-190.
- [73] WILLIAMS G P, WOLMAN M G. Downstream effects of dams on alluvial rivers [M]. Washington D. C.: United States Government Printing Office, 1984.
- [74] GRAF W L. Geomorphology and American dams: the scientific, social, and economic context [J]. Geomorphology, 2005, 71(1):3-26.
- [75] JORCIN A, NOGUEIRA M G. Temporal and spatial patterns based on sediment and sediment-water interface characteristics along a cascade of reservoirs (Parapanema River, south-east Brazil) [J]. Lakes & Reservoirs: Research & Management, 2005, 10(1):1-12.
- [76] SANTOS I R, BAISCH P R M, LIMA G T N P, et al. Nutrients in surface sediments of Mirim lagoon, Brazil-Uruguay border [J]. Acta limnologica Brasiliensia, 2004, 16:85-94.
- [77] 杨丽虎. 梯级水库对流域出口水沙的累积影响研究[D]. 武汉:长江科学院, 2007.
- [78] 李帅. 天全河流域梯级开发对环境的累积影响研究[D]. 成都:四川农业大学, 2010.

(收稿日期:2016-04-06 编辑:郑孝宇)