

水利工程生态环境效应研究综述

尚淑丽,顾正华,曹晓萌
(浙江大学建筑工程学院,浙江 杭州 310058)

摘要:分别从水利工程生态环境效应的内涵、评价指标体系、评价标准、评价方法以及相关学科的发展等 5 个方面,总结了国内外水利工程生态环境效应的研究成果,介绍了建立评价指标体系的模式、评价标准的依据和评价方法的分类,探讨了水利工程生态环境效应的未来研究趋势。我国水利工程生态效应研究还处于探索阶段,必须科学、合理地分析和评价水利工程对生态环境产生的正负效应,促进人类社会和自然环境健康和谐地发展;建立统一的评价标准、改进评价方法和扩大水利工程生态环境效应研究尺度等问题有待进一步研究。

关键词:水利工程;生态环境效应;环境影响;指标体系;评价方法;综述

中图分类号:X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)01-0014-06

Review of research on ecological and environmental effects of water conservancy projects//SHANG Shuli, GU Zhenghua, CAO Xiaomeng (College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The achievements of research on the ecological and environmental effects of water conservancy projects in China and abroad are summarized from five aspects; the implication of the ecological and environmental effects, the evaluation index system, the evaluation standards, the evaluation methods, and the development of related disciplines. The modes of establishing evaluation index system, the basis of evaluation standards, and the classification of evaluation methods are discussed in detail. Moreover, future study trends of the ecological and environmental effects of water conservancy projects are discussed. Research on the ecological effect of water conservancy projects is still in its exploration stage in China. The positive and negative effects of water conservancy projects on the ecological environment must be analyzed and evaluated scientifically and reasonably in order to promote healthy and harmonious development of human society and the natural environment. The problems of establishing a unified evaluation standard, improving evaluation methods, and expanding the scale of research on the ecological and environmental effects of water conservancy projects need further research.

Key words: water conservancy project; ecological and environmental effects; environmental impact; index system; evaluation method; review

水力发电作为一种可再生、无污染的能源被广泛开发利用,人们兴建水利工程可满足防洪、排涝、供水、发电、航运、旅游等需求^[1-3]。水利工程建设对于生态环境系统具有正效应,如筑坝形成水库,为生物生长提供丰富的水源,同时缓解了洪水对生态环境系统的冲击,丁坝的建设能起到河流生态修复的作用等^[4-5]。另一方面,水利工程建设也会对生态环境系统产生胁迫,通常是重大的、局部的影响,且存在于水利工程建设期和运行期两个阶段,如改变局部气候条件,引起河流水文情势变化,导致河流局部断流、水体水质恶化、生物多样性减少、触发地质灾害,同时带来人群健康危害、征地移民、自然景观和文物古迹淹没等社会问题^[6-8]。如何准确分析评价水利工程对生态环境的影响,一直是水利及生态环境科研领域关注的热点问题。

国外对于水利工程生态环境效应的研究开展较早,起初主要是针对水环境中的泥沙沉积和大型底栖无脊椎动物群落特征的研究^[9],目前研究的内容包括局地气候、水文情势、河流水质、生物多样性、地形地貌等在内的水生生态系统、陆生生态系统、人类社会等诸多方面^[8,10]。早在 1969 年美国即制定了环境影响评价条例(environmental impact assessment, EIA),

基金项目:国家自然科学基金(50909085);水利部公益性行业专项(201101027);浙江省水利厅科技计划(RC1106);长江水利委员会长江科学院开放研究基金(CKWV2012322/KY)

作者简介:尚淑丽(1990—),女,安徽太和人,硕士研究生,主要从事水文学水资源及生态环境研究。E-mail: shangshuli@zju.edu.cn

环境影响评价成为大坝建设过程中不可缺少的一部分,且被世界上许多国家和地区效仿^[8]。后来 EIA 不断被改进而形成战略环境评估 (strategic environmental assessment, SEA),不再局限于评估可能的影响,还可以评估直接和间接的影响,并解决这些影响带来的问题^[11]。20 世纪 70 年代末,我国开始对水利工程生态环境效应进行研究,至今大型水利工程生态环境效应的研究理论已较成熟,环境影响评价制度也较完善,但有关水利工程对生态环境系统造成的敏感和不可逆影响的研究有所忽视^[12]。随着近年来小型水电、农村水电以及梯级水电工程的大量建设,出现了一系列特有的、亟待解决的生态环境问题^[10,13]。水利工程生态环境效应评价已从单因子评价发展成综合评价,但目前对于水利工程生态环境效应内涵的理解还没有达成共识,对其评价理论、评价方法以及评价指标体系的研究也处于探索阶段,本文从这几个方面对水利工程生态环境效应的研究成果进行综述。

1 水利工程生态环境效应的内涵

明确水利工程生态环境效应的内涵是进行生态环境效应评价的前提,其重要性体现在评价内容的涵盖范围、评价指标的恰当选取、指标体系的建立等全过程中,关乎最终评价结果的可靠性。目前对于水利工程生态环境效应这一概念,国内外学者没有给出明确定义。从普遍意义上讲,水利工程的生态环境效应是指水利工程的兴建对生态环境系统产生了影响,受扰动的自然界在生物个体、生物群体和生态环境系统 3 个层面上做出的响应。

一般认为,水利工程的生态环境效应是指工程建设及运行对河流生态环境系统结构和功能的各种影响^[14];孙宗凤等^[15]把生态环境效应归纳为水利工程建成后对自然界的生态破坏和生态修复两种效应的综合结果;常本春等^[3]认为水电工程的生态环境效应分析是建立在生态基础之上的,并对人类、自然、野生动植物等受到的影响进行了综合分析,而对经济效益和社会效益不作评价,经过定性分析认为水电工程的生态负效应大于正效应。国外对于水利工程环境影响评价及效应评价没有特意做出区分,前者是指在方案实施前,预测其对环境系统可能的影响,有严格的评估规范和操作步骤^[16];而后者则指水利工程在建设期和运行期对生态环境系统产生的重大、局部的影响,如沉积扰动、径流减少、水质恶化、水生生态系统和河岸生态系统的破坏等^[4]。

把握好水利工程生态环境效应的内涵应重视以下 3 个方面:首先是生态环境效应的时间尺度,不能

仅考虑工程建成后的生态环境效应,还要着眼于水利工程规划、设计、建造、运行的整个过程^[12];其次是生态环境效应的空间尺度,不能局限于河流生态环境系统,还包括陆地生态环境系统、人类生活生产系统,考虑对自然界的综合结果;最后是生态环境效应的全面性,除了考虑工程建设期和运行期所产生的负面效应,也要考虑其正面效应,包括其对生态环境系统的修复作用,对人类社会的经济效益和社会效益。

2 水利工程生态环境效应的评价体系

水利工程生态环境效应是一个涉及生态、环境、社会、经济的复杂大系统,需要客观、全面地分析水利工程对当地生态环境和社会经济的影响。水利工程生态效应评价不同于工程建设前的环境影响评价,与水电工程后评估也不同,它是针对已建成的水利工程,从人居环境影响、野生动植物影响、自然规律影响、经济发展影响等 4 个方面进行综合分析。水利工程生态环境效应评价体系主要由评价指标体系、评价标准和评价方法构成。

2.1 评价指标体系

随着对水利工程生态环境效应的深入研究,国内外专家提出了一些评价指标体系、评价方法和评价模型,但对此还没有达成共识,如何确立一套合理的、科学的、具有代表性的指标体系和评价方法,是众多学者长久以来关注的热点问题。目前水利工程生态环境效应评价指标体系的构建主要有以下几种模式:

a. 基于传统的生态环境质量评价方法建立指标体系。采用传统的层次分析法、主成分分析法、模糊评价法、灰色关联度分析法和 TOPSIS 分析法等,一般指标体系分为目标层、准则层和指标层,是一种树状结构,指标体系的建立遵循系统性、代表性、独立性、动态性、客观性、定性定量相结合等原则^[17-21]。

b. 基于压力-状态-响应模式 (pressure-state-response, PSR) 及改进模式建立指标体系。PSR 模式的理论基础是研究人与自然的相互关系,选取指标时采用“压力-状态-响应”这一逻辑思维方式,目前许多政府和组织都认为 PSR 模式是运用于环境指标组织和环境现状汇报最有效的框架,其已被广泛应用于环境管理、生态安全评价及决策制定等领域^[22-24]。在 PSR 模式广泛应用的同时,国内外也出现了许多改进模式,如状态-压力-响应模式 (state-pressure-response, SPR)、驱动力-状态-响应模式 (driving force-state-response, DSR)、压力-状态-响应-潜力模式 (pressure-state-response-potential framework, PSRP)、驱动力-压力-状态-影响-响应模式 (driving force-pressure-state-impact-

response, DPSIR)和驱动力-压力-状态-响应-控制模式(driving force-pressure-state-response-control, DPSRC)等,基于这些模式建立的指标体系具有其独特的优点,更适合于较陌生生态环境系统的认识和管理,既能考虑各环节指标间的交互作用,又使评价过程得以分解、简化,因此也是国内外学者研究的热点^[25]。常本春等^[3]从生态角度出发借鉴 PSR 模式构建了水电工程生态效应评价指标体系;王兵等^[17]分别采用灰色关联度法、综合评价法和驱动力-压力-状态-影响-响应多方案综合决策支持系统(driving force pressure state impact response-multiple decision support system, DPSIR-mDSS),对黄土高原丘陵区 1999—2009 年水土流失综合治理生态恢复环境效应进行评价,建立了水土流失综合治理生态环境效应的树状评价指标体系和基于 DPSIR-mDSS 模式的生态恢复环境效应评价指标体系。

c. 基于生态足迹法建立指标体系。Rees 等^[26]于 1992 年提出生态足迹法,并由 Wackernagel 等^[27]进行完善,这是一种衡量可持续发展程度的方法,被广泛应用于区域可持续发展度量和生态经济中的多个领域;肖建红等^[28]应用生态足迹法建立了水利工程生态供给足迹模型和生态需求足迹模型,以 2002 年为计算基准年,从全国尺度初步计算了水利工程对河流生态系统服务功能的影响,在一定程度上给水利工程运行的可持续性提供了参考;董雅洁等^[29]应用生态足迹法,从区域尺度计算漫湾水电站生态供给足迹和生态需求足迹,研究电站对河流生态系统服务功能的影响。

2.2 评价标准

无论进行何种评价都需要有依据和标准,确立生态环境效应评价标准就是要建立一套衡量生态环境质量和人类活动影响程度的定量参照系,使决策者能够通过与参照系的比较确定当前状态,进而采取措施减轻或消除生态负效应,改善生态环境现状^[30]。由于评价目的不同或者采用的评价模型不同,生态环境效应评价标准的形式也就不同;另外不同区域的自然环境条件、经济发展状况、社会背景等存在差异,很难形成统一的标准进行评价,因此目前对于生态环境效应评价而言没有绝对的评价标准,要以实际情况为基础制定评价标准。综合国内外已有的研究成果,将制定生态环境效应评价标准的依据概述如下,其中有些可以直接作为水利工程生态环境效应评价标准的依据,有些则只能作为参考,因此在评价前需要明确水利工程生态环境效应评价的独特性,从而制定符合实际的评价标准^[20,30-31]。

a. 国际标准、国家标准、地方标准、行业规范

等,如国家已发布的环境质量标准 GB3838—2002《地表水环境质量标准》、SL395—2007《地表水环境质量评价技术规程》、GB3095—1996《环境空气质量标准》、SL190—2007《土壤侵蚀分类分级标准》等,另外行业环境评价规范、地方政府标准、河流水系保护要求、特别区域的保护要求等也是评价标准的依据。

b. 研究区域的背景值和本底值,包括水利工程兴建前河流水系的连通性、年径流变化、水质达标程度、区域植被覆盖率、生物多样性指数、区域水土流失本底值等。

c. 类比标准,以自然条件相似的原生生态系统或以未受人类严重干扰的相似生态环境作为类比标准;以类似条件的生态因子和功能作为类比标准,如类似生境的生物多样性、植被覆盖率、水资源分配等。

d. 研究成果,如河流水质达标率评价标准、水土流失强度标准等。

e. 专家经验,即根据专家经验确定指标分级标准。

2.3 评价方法

由于水利工程对生态环境的影响是多方面的,单因子评价根本无法全面、准确地反映水利工程的生态环境效应,因此多采用综合评价方法。目前综合评价方法已有数十种之多,在许多学科领域都有广泛应用,王宗军等^[32-33]对典型的综合评价方法进行了综述,根据各方法依据的理论及评判过程的特点,归纳起来大致可以分为以下 3 类。

a. 基于经验的综合评价方法,主要依赖评价专家的经验及其对评价对象、评价领域的通晓程度,代表性方法有专家打分法、德尔菲法。这种评价方法原理简单,适用面广,且在应用过程中的解释较为直观;但是其主观性较强,准确性得不到保证,且时间、人力、物力耗费较多。李春华等^[34]将专家打分法应用于太湖湖滨带生态系统健康评价研究中;刘芳等^[35]将改进后的德尔菲打分法应用于城市生态环境基础质量研究中以确定评价因子权重。

b. 基于数值和统计的综合评价方法,运用数学理论和解析方法对评价系统进行严密的定量描述和计算,代表性方法有加权平均法、TOPSIS 法、主成分分析法、灰色关联度分析法。这种评价方法数学逻辑性强,理论依据充分,充分利用原有数据信息,评价结果可信度高;但是对数据及其定量化要求较高,约束条件太多^[23,33]。Torfi 等^[36]提出了一种模糊多准则决策方法(fuzzy multi-criteria decision-making approach, FMCDM);陈艳萍等^[37]利用模糊优选法

和TOPSIS法确定各地区水权分配比例及分配量;傅湘等^[38]采用主成分分析法进行了区域水资源承载能力的综合评价。

c. 基于决策和智能的综合评价方法,融入人类主观判断或者模仿人脑的功能,通过模仿人类处理信息的思维能力来重现决策支持,代表性方法有层次分析法、模糊综合评价法、人工神经网络法。这种评价方法将定量与定性分析相结合,容错性较好,评价效率高,评价范围广,评价结果可信度高;但是个别方法带有主观性,有些只考虑了主要因素影响,智能评价方法的逻辑推理过程不够清晰。陈桥等^[18]将层次分析法应用于矿山生态环境定量评价研究中;Dahiya等^[19]应用模糊集理论进行地下可饮用水的理化性质决策评价;王俭等^[39]建立了基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型。

3 相关学科的形成和发展

传统的水利工程是通过建设水工建筑物来达到改造和控制河流的目的,满足人们生产生活的多种需求。近20年来,在大力发展水利工程的同时,人们逐渐意识到水利工程建设对生态环境的负面影响,开始注意对生态系统的保护,并在一定意义上发展了生态工程技术和建设理念。关于河川的生态工程,德国称为近自然河道治理工程,日本称为多自然型建设工法(又称生态工法),美国称为自然河道设计技术^[40]。与此同时,许多国家推进了生态工程理论的发展,并逐渐形成了一门新的学科——生态工程学,其研究范围涵盖河流、湖泊、湿地、矿山、森林、土地及海岸等诸多方面,主旨是寻求人类社会和自然环境双方共同受益,探讨可持续生态系统的设计方法^[40-41]。我国水利工程生态环境效应的研究也促进了生态水工学、生态水文学、生态水力学、景观生态学等交叉学科的发展。

传统的水利工程学和生态学交叉融合形成了一门新的学科——生态水利工程学,简称生态水工学,其研究对象不仅包括传统水利工程学研究的河流、湖泊等构成的水文系统,还包括具备生命特性的河流生态系统。董哲仁等^[40,42-44]对生态水工学进行了探索,认为生态水工学是水利工程学的一个新的学科分支,是研究水利工程在满足人类社会需求的同时,兼顾水域生态系统健康与可持续性需求的原理与技术方法的工程学。

生态水文学研究水文过程与生物过程的耦合关系,研究范围包括陆地上的气候-土壤-植被之间的动态关系,河流水文情势及其变化对水生生物和河流生态系统的影响,以及流域尺度上水文过程和生

态系统的相互关系^[45]。自1992年都柏林“水与环境”国际会议至今,生态水文学的内涵在不断改进和完善,其中最重要的一点在于水文要素和生物要素之间的影响和调节作用。

生态水力学是研究水动力学和水生态系统动力学之间相互作用的一门新兴交叉学科,研究范围包括生态流量、鱼道、水质、富营养化与水华、洪泛区、湿地、水生态栖息地和水域生态修复等。它一方面研究水力条件的改变对水生态系统平衡及生物多样性的影响,另一方面研究水生态系统的演变对水力情势的反作用,从微观上探索水与生态系统之间的基础动力学过程。陈求稳等^[46]指出生态水力学模型已很好地应用于莱茵河下游生态栖息地评价和荷兰Veluwe湖沉水植物竞争性生长模拟等案例中。

景观生态学融合了生态学、地理学、系统论和信息技术等学科的理论和方法。早在1939年德国地理学家Troll^[45]即创造了“景观生态学”一词,并把它定义为研究某一景观中生物群落之间错综复杂的因果反馈关系的学科。此后该学科经不断发展充实,目前研究的重点内容包括景观格局的形成和动态及其与生态学过程的相互作用、格局-过程-尺度间的关系、景观的等级结构和功能特征以及尺度推绎、景观异质性的维持和管理等。

4 水利工程生态环境效应研究的发展趋势

a. 评价指标体系的进一步研究。在水利工程生态环境效应评价中,指标体系的建立是关键。生态环境系统的发展变化受多种因素影响,从中选择能较好地反映系统状态、能基本反映水电开发对生态环境产生的累积和叠加影响的指标因子是一个较难把握的问题;此外定量指标的收集、计算以及定性指标的合理分析、估计也是评价过程中的一大难点。未来的研究要综合考虑这些问题,力求建立一套科学合理的、具有代表性的评价指标体系。

b. 统一评价标准的建立。目前水利工程生态环境效应评价还没有统一的评价标准,这里的“统一”是指广义上的统一。由于评价对象各方面条件不同,不可能用统一标准来评价,但可以建立广义上的统一评价标准,如可以根据评价对象所处地区的不同,建立分区评价标准,同一区域内的评价对象采用相同的评价标准;评价对象规模不同,建立分级评价标准,同一级别的评价对象采用相同的评价标准;还可以根据水利工程类型不同,建立相应的评价标准等。有了这样的统一评价标准,在以后的水利工程生态环境效应评价中,不再需要评价者自行建立评价标准,使得评价结果更具有科学性和可比性。

c. 评价方法的改进。联合运用多种综合评价方法并借鉴其他学科领域的评价方法,以弥补单个评价方法的不足,使得评价结果更准确、评价过程更简单。随着计算机技术的飞速发展,大力开发智能评价技术,把专家系统、知识工程、人工神经网络等先进的人工智能技术引入到水利工程生态环境效应评价领域中,研究开发综合评价计算机软件系统,提供友好的人机交互界面,实现问题描述可视化和智能评价过程,减少人工参与,降低综合评价的工作强度及评价成本,提高评价结果的可信度。此外遥感和地理信息系统等信息技术的应用也具有极大的前景。

d. 流域尺度上生态效应的研究。过去水利工程开发的生态影响评价侧重于单一工程的局部影响,较少考虑多个工程开发的综合影响和梯级开发的累积影响,从而导致流域范围内生态环境问题的频繁出现。因而加强水利工程的流域尺度生态效应研究,有助于从根本上分析、评估水利工程对流域生态环境系统结构与功能的影响,为保障流域水资源的合理而适度地开发利用提供技术支持。

5 结 语

水利工程建设在为人类带来巨大社会效益和经济效益的同时,也扰动了长期形成的生态环境系统的稳定性,因此需要科学地分析和评价水利工程与生态环境系统之间的相互作用关系,促进人类社会和自然环境健康和谐地发展。本文综述了水利工程生态环境效应研究中的一些热点问题,包括生态环境效应的内涵、评价指标体系、评价标准、评价方法和相关学科的发展。目前我国水利工程生态环境效应评价还处于探索阶段,建立统一的评价标准、改进评价方法和扩大水利工程生态环境效应研究尺度等问题有待进一步研究。

参考文献:

[1] 汪恕诚. 论大坝与生态[J]. 水力发电,2004,30(4):1-4. (WANG Shucheng. On dams and ecology [J]. Water Power,2004,30(4):1-4. (in Chinese))

[2] LIGGETT J A. What is hydraulic engineering? [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002,128(1):10-19.

[3] 常本春,耿雷华,刘翠善,等. 水利水电工程的生态效应评价指标体系[J]. 水利水电科技进展,2006,26(6):11-15. (CHANG Benchun, GENG Leihua, LIU Cuishan. Index system for ecological effect evaluation of hydropower projects[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2006,26(6):11-15. (in Chinese))

[4] LAWRENCE R E. The impacts of hydro-electric construction works on the hydrology of a subalpine area in

Australia [J]. Environmental Geology, 2001, 40 (4/5): 612-621.

[5] 孙东亚,董哲仁,许明华,等. 河流生态修复技术和实践 [J]. 水利水电技术,2006,37(12):4-7. (SUN Dongya, DONG Zheren, XU Minghua, et al. River ecological restoration; techniques and practices [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37 (12): 4-7. (in Chinese))

[6] 曹永强,倪广恒,胡和平. 水利水电工程建设对生态环境的影响分析 [J]. 人民黄河,2005,27(1):56-58. (CAO Yongqiang, NI Guangheng, HU heping. Analysis of the ecological environment impact on the water conservancy and hydropower engineering construction [J]. Yellow River,2005,27(1):56-58. (in Chinese))

[7] WOHL E. Identifying and mitigating dam-induced declines in river health; three case studies from the western United States [J]. International Journal of Sediment Research, 2012,27(3):271-287.

[8] TULLOS D. Assessing the influence of environmental impact assessments on science and policy; an analysis of the Three Gorges Project [J]. Journal of Environmental Management, 2009,90:208-223.

[9] COPEMAN V A. The impact of micro-hydropower on the aquatic environment [J]. Water and Environment Journal, 1997,11(6):431-436.

[10] KUBECKA J, MATENA J, HARTVICH P. Adverse ecological effects of small hydropower stations in the Czech republic; 1. bypass plants [J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1997,13(2):101-113.

[11] THERIVEL R. Strategic environmental assessment in action [M]. London: Routledge, 2012.

[12] 侯锐,陈静. 国内水利水电工程生态效应评价研究进展 [J]. 水利科技与经济, 2006, 12 (4): 214-215. (HOU Rui, CHEN Jing. Study on ecological effect assessment in domestic water conservancy and hydropower engineering [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2006, 12 (4): 214-215. (in Chinese))

[13] TANG Xianqiang, LI Qingyun, WU Min, et al. Ecological Environment Protection in Chinese rural hydropower development practices: a review [J]. Water, Air&Soil Pollution, 2012, 223 (6): 3033-3048.

[14] 中国大百科全书编写组. 百科知识 [M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2005.

[15] 孙宗凤,董增川. 水利工程的生态效应分析 [J]. 水利水电技术, 2004, 35 (4): 5-8. (SUN Zongfeng, DONG Zengchuan. Ecological effect analysis for a water conservancy project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35 (4): 5-8. (in Chinese))

[16] LEOPOLD L B. A procedure for evaluating environmental impact [M]. Washington: United States Department of the Interior, 1971.

- [17] 王兵,张光辉,刘国彬,等.黄土高原丘陵区水土流失综合治理生态环境效应评价[J].农业工程学报,2012,28(20):150-161. (WANG Bing, ZHANG Guanghui, LIU Guobin. Ecological and environmental evaluation for water and soil loss comprehensive harness in Loess hilly region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(20):150-161. (in Chinese))
- [18] 陈桥,胡克,雒昆利,等.基于 AHP 法的矿山生态环境综合评价模式研究[J].中国矿业大学学报,2006,35(3):377-383. (CHEN Qiao, HU Ke, LUO Kunli, et al. Study on the synthetical assessment model of mine eco-environments based on AHP [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(3):377-383. (in Chinese))
- [19] DAHIYA S, SINGH B, GAUR S, et al. Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 147(3):938-946.
- [20] 张晶,董哲仁,孙东亚,等.河流健康全指标体系的模糊数学评价方法[J].水利水电技术,2010,41(12):16-21. (ZHANG Jing, DONG Zheren, SUN Dongya, et al. Assessment method for a fuzzy theory based complete river health index system[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(12):16-21. (in Chinese))
- [21] 郭潇,方国华,章哲恺.跨流域调水生态环境影响评价指标体系研究[J].水利学报,2008,39(9):1125-1130. (GUO Xiao, FANG Guohua, ZHANG Zhekai. Index system of eco-environment impact assessment for inter-basin water transfer[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(9):1125-1130. (in Chinese))
- [22] BURKHARD B, MULLER F. Driver-Pressure-State-Impact-Response [J]. Ecological Indicators, 2008(2):967-970.
- [23] 曹晓萌,顾正华,刘国良,等.基于 PSR 的农村水电生态环境影响评价体系研究[J].人民长江,2012,43(5):80-83. (CAO Xiaomeng, GU Zhenghua, LIU Guoliang, et al. Evaluation index system for ecological and environmental impact of rural hydropower based on PSR model[J]. Yangtze River, 2012, 43(5):80-83. (in Chinese))
- [24] 梅景,赵清,骆文辉,等.基于 PSR 模式的江苏省区域生态环境可持续能力评价[J].国土与自然资源研究,2009(2):65-66. (MEI Jing, ZHAO Qing, LUO Wenhui, et al. Synthetical evaluation of the regional eco-environment sustainability based on PSR model in Jiangsu Province [J]. Territory & Natural Resources Study, 2009(2):65-66. (in Chinese))
- [25] 周林飞,许士国,孙万光,等.基于压力-状态-响应模型的扎龙湿地健康水循环评价研究[J].水科学进展,2008,19(2):205-213. (ZHOU Linfei, XU Shiguo, SUN Wanguang, et al. Healthy water circulation assessment of Zhalong wetland based on PSR model[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2):205-213. (in Chinese))
- [26] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2):121-130.
- [27] WACKERNAGEL M, REES W E. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth[M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [28] 肖建红,王敏,施国庆,等.水利工程生态供给足迹与生态需求足迹计算[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2008,32(4):593-595. (XIAO Jianhong, WANG Min, SHI Guoqing, et al. Calculation of ecological supply footprint and ecological demand footprint in hydraulic engineering [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2008, 32(4):593-595. (in Chinese))
- [29] 董雅洁,梅亚东.用生态足迹法分析水电站对河流生态系统功能的影响[J].水力发电,2007,33(7):27-29. (DONG Yajie, MEI Yadong. Application of ecological footprint in the analysis of the effects of hydropower station on river ecosystem functions [J]. Water Power, 2007, 33(7):27-29. (in Chinese))
- [30] 侯锐.水电工程生态效应评价研究[D].南京:南京水利科学研究院,2006.
- [31] 左伟,王桥,王文杰,等.区域生态安全评价指标与标准研究[J].地理学与国土研究,2002,18(1):67-71. (ZUO Wei, WANG Qiao, WANG Wenjie, et al. Study on regional ecological security assessment index and standard [J]. Geography and Territorial Research, 2002, 18(1):67-71. (in Chinese))
- [32] 王宗军.综合评价的方法、问题及其研究趋势[J].管理科学学报,1998,1(1):73-79. (WANG Zongjun. On the methods, problems and research trends of comprehensive evaluation[J]. Journal of Management Sciences in China, 1998, 1(1):73-79. (in Chinese))
- [33] 李刚,秦红玲.综合评价方法及探讨[J].节能,2004(10):12-15. (LI Gang, QIN Hongling. Comprehensive evaluation method and discusses [J]. Energy Conservation, 2004(10):12-15. (in Chinese))
- [34] 李春华,叶春,赵晓峰,等.太湖湖滨带生态系统健康评价[J].生态学报,2012,32(12):3806-3815. (LI Chunhua, YE Chun, ZHAO Xiaofeng, et al. The Ecosystem health assessment of the littoral zone of Lake Taihu [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12):3806-3815. (in Chinese))
- [35] 刘芳,尹球,张增祥,等.城市生态环境基础质量遥感评价因子与评价模型研究[J].红外与毫米波学报,2008,27(3):219-222. (LIU Fang, YIN Qiu, ZHANG Zengxiang, et al. Study on remote sensing estimation index and model of urban ecological environment foundation quality [J]. J Infrared Millim Waves, 2008, 27(3):219-222. (in Chinese))

(下转第 48 页)

- Sciences,2000,37(4): 629-643.
- [12] 周永胜,蒋海昆,何昌荣. 不同温压条件下居庸关花岗岩脆塑性转化与失稳型式的实验研究[J]. 中国地震, 2002, 18 (4): 389-400. (ZHOU Yongsheng, JIANG Haikun, HE Changrong. Experiments of brittle-plastic transition, modes of instability of juyongguan granite at different T-P condition [J]. Earthquake Research in China,2002,18(4):389-400. (in Chinese))
- [13] 桑祖南,周永胜,何昌容,等. 辉长岩脆-塑性转化及其影响因素的高温高压实验研究[J]. 地质力学学报, 2001,7(2):130-137. (SANG Zunan,ZHOU Yongsheng, HE Changrong, et al. An experimental study on the brittle-plastic transition in gabbro[J]. Journal of Geomechanics, 2001,7(2):130-137. (in Chinese))
- [14] 左建平,周宏伟,方园,等. 甘肃北山地区深部花岗岩的热开裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30 (6):1107-1115. (ZUO Jianping,ZHOU Hongwei, FANG Yuan, et al. Experimental research on thermal cracking of deep granite in beishan region, Gansu Province [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(6):1107-1115. (in Chinese))
- [15] 徐小丽. 温度载荷作用下花岗岩力学性质演化及其微观机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学,2008.
- [16] 徐小丽,高峰,高亚楠,等. 高温后花岗岩力学性质变化及结构效应研究[J]. 中国矿业大学学报,2008, 37 (3): 402-406. (XU Xiaoli, GAO Feng, GAO Yanan, et al. Effect of high temperatures on the mechanical characteristics and crystal structure of granite[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37 (3): 402-406. (in Chinese))
- [17] 高峰,徐小丽,杨效军,等. 岩石热黏弹塑性模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(1):74-80. (GAO Feng, XU Xiaoli, YANG Xiaojun, et al. Research on thermo-visco-elastoplastic model of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (1):74-80. (in Chinese))
- [18] 张连英. 高温作用下泥岩的损伤演化及破裂机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学,2012.
- (收稿日期:2013-05-06 编辑:周红梅)
-
- (上接第 19 页)
- [36] TORFI F, FARAHANI R Z, REZAPOUR S. Fuzzy AHP to determine the relative weights of evaluation criteria and Fuzzy TOPSIS to rank the alternatives [J]. Applied Soft Computing, 2010, 10(2): 520-528.
- [37] 陈艳萍,吴凤平,吴丹. 基于模糊优选和 TOPSIS 法的流域初始水权分配模型[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2009,37(4):467-471. (CHEN Yanping, WU Fengping, WU Dan. Initial water rights allocation model for basins based on fuzzy optimization and TOPSIS methods [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37 (4):467-471. (in Chinese))
- [38] 傅湘,纪昌明. 区域水资源承载能力综合评价:主成分分析法的应用[J]. 长江流域资源与环境,1999,8(2): 168-173. (FU Xiang, JI Changming. A comprehensive evaluation of the regional water resources carrying capacity-application of main component analysis method [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1999,8(2):168-173. (in Chinese))
- [39] 王俭,孙铁珩,李培军,等. 基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型及其应用[J]. 生态学杂志,2007, 26(1):139-144. (WANG Jian, SUN Tieheng, LI Peijun, et al. Evaluation model of regional water environment carrying capacity based on artificial neural network and its application in Liaoning Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(1):139-144. (in Chinese))
- [40] 董哲仁. 探索生态水利工程学[J]. 中国工程科学, 2007,9(1):1-7. (DONG Zheren. Exploring eco-hydraulic engineering [J]. Engineering Science, 2007, 9 (1): 1-7. (in Chinese))
- [41] BROOKES A, SHIELDS F D. River channel restoration: guiding principles for sustainable projects [M]. Chichester: Wiley, 1996.
- [42] 董哲仁. 生态水工学的理论框架[J]. 水利学报,2003, 34(1):1-6. (DONG Zheren. Theoretical framework for eco-hydraulics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003,34(1):1-6. (in Chinese))
- [43] 董哲仁,孙东亚. 生态水利工程原理与技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社,2007.
- [44] 孙宗凤. 生态水利的理论与实践[J]. 水利水电技术, 2003,34(4):53-55. (SUN Zongfeng. The theory and practice of ecological water conservancy [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003,34(4):53-55. (in Chinese))
- [45] 董哲仁,孙东亚,王俊娜,等. 河流生态学相关交叉学科进展[J]. 水利水电技术,2009,40(8):36-43. (DONG Zheren, SUN Dongya, WANG Junna, et al. Progresses of interdisciplines related to river ecology [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009,40(8):36-43. (in Chinese))
- [46] 陈求稳,欧阳志云. 生态水力学耦合模型及其应用[J]. 水利学报,2005,36(11):1273-1279. (CHEN Qiuwen, OUYANG Zhiyun. Integrated ecohydraulics model and the application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(11):1273-1279. (in Chinese))
- (收稿日期:2013-02-28 编辑:周红梅)