

基于GIS的流域水电开发生态约束性评价

董昭恺¹,王东胜²,隋欣¹

1. 国家水电可持续发展研究中心;中国水利水电科学研究院,北京 100038
2. 水电水利规划设计总院,北京 100120

摘要 基于地理信息系统(GIS)方法构建大尺度流域生态评价工具,对于整体评价流域/区域自然生态系统对水电开发的约束状况,编制水电梯级开发规划具有重要意义。本文探讨了流域尺度生态约束性概念模型,从生态环境约束、物种多样性约束及环境敏感区约束方面构建生态约束性评价指标体系,建立基于GIS和层次分析法的生态约束性空间加权评价模型,提出相应的计算流程,并以中国西南某流域为例开展了案例研究。结果表明,所构建的基于GIS的流域水电开发生态约束性评价方法,能够客观地反映流域自然生态系统对水电开发的约束状况,且方法简便、易于操作,可为编制水电开发规划及方案提供参考。

关键词 地理信息系统;流域水电开发;生态约束;评价指标体系;计量方法

中国水能资源丰富,水能蕴藏量及技术可开发装机容量均居世界首位。截至2015年底,水电装机容量3.19亿kW,占全球水电总装机容量的26%^[1]。根据《水电发展“十三五”规划(2016—2020)》,十三五期间,中国将在保护好生态环境、妥善安置移民的前提下,积极稳妥发展水电,科学有序开发大型水电,严格控制中小水电,加快建设抽水蓄能电站;2020年中国水电装机容量将达到3.8亿kW。

流域/区域内对水电开发活动具有特殊敏感性,或极易受其影响产生负面效应的区域,是流域水电开发的主要生态约束区,例如,自然保护区、重要河岸带湿地、重要水生生物的自然产卵场、索饵场、越冬场和洄游通道等。评价流域生态约束范围及程度,可为水电规划阶段规避生态环境风险,水电设计阶段减轻或最小化生态环境影响提供重要依据。

针对流域社会、经济、生态环境因子对水能资源开发的约束影响,美国能源部选取重要栖息地、珍稀与特有鱼类、景观动态与基础设施、娱乐与审美、水资源利用、土地所有权、水质7类49个约束因子,复查了单河水能资源蕴藏量大于1 MW的11041条河流水能资源技术可开发量,并发布了《新增流域开发:美国水能资源潜力综合评估报告》(DOE, 2014)^[2]。中国各部委也在国家层面组织开展了相关工作,包括:国家发改委的全国主体功能区划^[3]、水利部的水功能区

划^[4]、环保部的全国生态功能区划^[5]和生态保护红线^[6],依据职能统筹发展格局并识别限制开发区域。同时,已有相关文献涵盖了自然生态系统的生态敏感性^[7-9]、生态脆弱性^[10-12]、生态风险^[13-15]等内容,为生态保护、区域持续发展发挥了重要作用。但已有流域尺度生态分析研究,多以整个流域背景为研究对象,往往侧重对流域生态系统进行整体描述,对河流载体缺乏必要的空间定位和分析。流域水电开发以河流为基础,涉及水生与河岸带系统,涵盖人类水电开发活动与流域自然生态的相互作用。因此,以水生生态系统为主体,结合河岸带及陆生生态系统,综合构建流域尺度水电开发生态约束性评价方法,可用于宏观识别流域内水电开发的生态约束状况和程度,意义重大。

本文基于地理信息系统(GIS)技术,基于水电项目特征及其对流域生态系统的主要影响因子,研究构建一种流域尺度生态约束性评价方法。

1 评价方法

1.1 概念模型

生态约束性表征流域/区域自然生态系统对水电开发活动的约束作用和限制程度。约束空间代表了生态系统对水电开发活动的约束状态,如图1所示。不同水电开发方案受

收稿日期:2017-01-18;修回日期:2017-04-20

基金项目:政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0102400);中国长江三峡集团公司资助项目(0799564)

作者简介:董昭恺,硕士研究生,研究方向为生态水文学,电子信箱:dongzhaokai@163.com;隋欣(通信作者),教授级高工,研究方向为水电政策分析与评价,电子信箱:suixin@iwhr.com

引用格式:董昭恺,王东胜,隋欣.基于GIS的流域水电开发生态约束性评价[J].科技导报,2017,35(10):87-92;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.10.012

到的约束阻力可以通过空间点表示,如A点表示某水电开发规划方案所处的约束状态,OA为矢量约束力,反映流域水电开发需要克服的生态约束阻力。生态约束性包括3个方面,即生态环境约束性、物种多样性约束性和环境敏感区约束性。其中,生态环境约束性指生态系统可能发生的生态问题对水电开发的制约,物种多样性约束性指物种丰富程度对水电开发的约束,环境敏感区约束性指受法律保护或者生态影响因子特别敏感的区域。

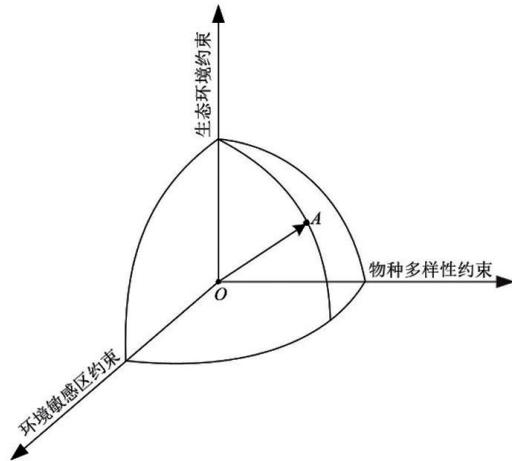


图1 生态约束性概念模型示意
Fig. 1 Ecological constraint concept model

1.2 评价指标体系

参考生态敏感性、生态脆弱性评价等研究指标体系和因子选取的研究^[12-16],兼顾水电开发对河流生态的扰动,应用层次分析法,建立4级评价指标框架,如图2所示。其中,目标层为生态约束性;系统层为目标层下的生态约束性子目标,

是约束性的表现形式和基础;准则层为生态约束性评价中的类别指标,表征不同生态因子与系统层的响应关系;指标层是不同生态约束性类别指标的表达形式。层次分析法可与基于GIS加权叠加计算模型联合应用,克服指标间等权缺点。不同自然本底下的流域生态约束性评价,需根据不同生态系统的特征对准则层和指标层进行适当调整,以更符合流域生态系统状况。

1.3 计算方法

1.3.1 计算模型

GIS具有空间处理、分析和展示功能,基于GIS的空间表达已广泛应用在生态环境研究方面^[10,12,16-17]。应用GIS工具,可空间计算并直观流域开发生态约束状态。基于GIS的生态约束性计算过程包括赋值、计算、叠加3个步骤,针对构建的评价指标框架,以下层约束度与权重的乘积加权值,作为上层约束度结果,叠加得到综合生态约束度。计算公式为

$$M = \sum_{i=1}^j d_i \cdot W_i \quad (1)$$

式中, M 为约束度; d_i 为*i*指标权重值; W_i 为*i*指标值; j 为指标个数。

采用层次分析法(AHP)确定各因子的权重,方法如下:

1) 构造判断矩阵 P ,计算矩阵的最大特征根 λ_{max} 及其对应的特征向量为 I ,满足 $PI = \lambda_{max}I$ 。特征向量 I 的分量就是各因子的权重。

2) 进行Saaty一致性检验,计算一致性指标

$$C_{CI} = \lambda_{max} / (n - 1)$$

其中 n 为矩阵 P 的阶数。根据 n 值查阅平均随机一致性指标 R_{RI} 表。当 $C_{CI}/R_{RI} \leq 0.1$ 时,认为矩阵 P 完成一致性检验,即权重

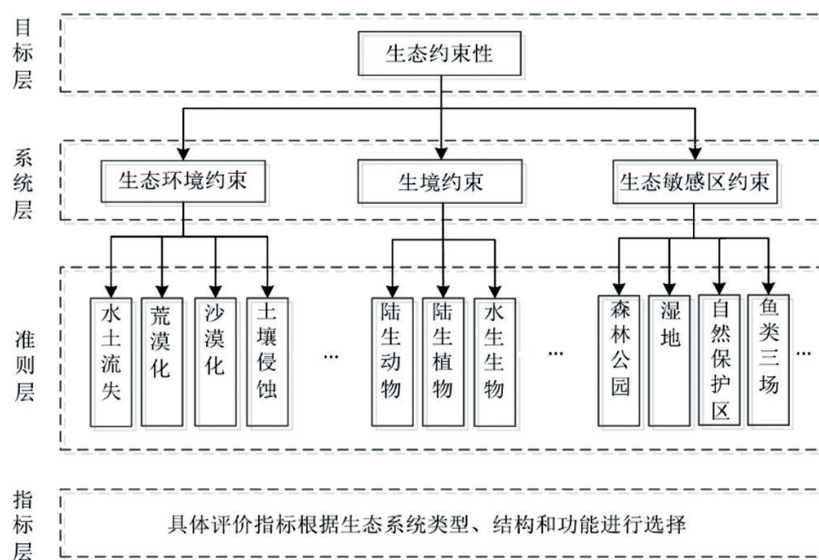


图2 生态约束性评价指标框架
Fig. 2 Framework of ecological constraint evaluation indexes

值可靠;反之,则需要重新调整计算判断矩阵。

1.3.2 计算流程

基于构建的生态约束度评价指标体系及计量模型,应用 Arcgis 空间分析工具(spatial analyst tools)开展流域水电开发生态约束性评价,计算流程如图3所示。

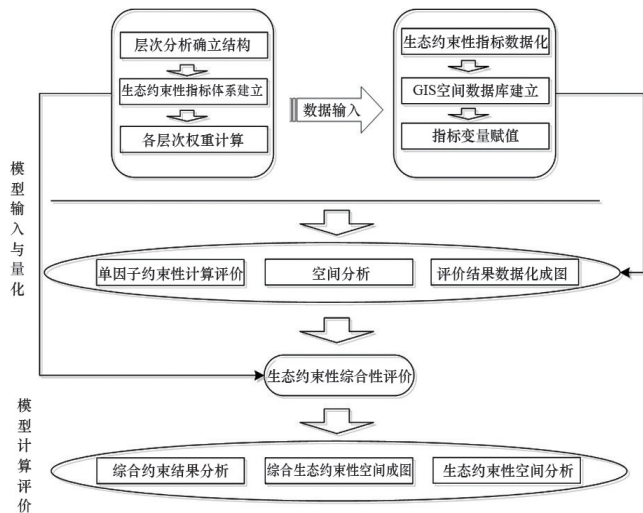


图3 生态约束性计算流程

Fig. 3 Computation of ecological constraints

1) 数据预处理。GIS 空间计算过程涉及的数据类型包括遥感数据、纸质(电子)地图、实地数据和统计资料等。为统一数据格式,首先对约束性数据进行处理,进行矢量化、地图配准和投影转化。与矢量数据相比,栅格数据更适合空间叠加等空间分析^[18],因此,选定栅格为基本计算单元。

2) 建立空间数据库。建立空间数据库实际上是完成不同类型的生态基础信息数据与计算单元(栅格)配对,实现数据在 GIS 平台的空间显示、查询和计算。在 ArcCatalog 中建立空间数据库,根据评价指标框架,建立相应的属性字段,将收集的生态约束性数据录入到不同的要素集和要素类中,赋值变量并划定栅格大小。

3) 生态约束度计算。计算过程是将栅格内部属性值的加权叠加,从指标层、准则层、系统层、目标层的顺序输出新的栅格值作为约束度的计算结果,最终输出综合生态约束性计算值。

2 案例研究

2.1 数据处理

选取中国西南地区某流域作为案例区域,开展流域水电开发生态约束性评价。由于流域数据来源的多样,计算过程中需统一坐标体系。本文投影坐标选择 Krasovsky_1940_Albers,地理坐标系统选择 GCS_Krasovsky_1940,所有数据最终格式统一为 1000 m×1000 m 的 GRID。

数据来源:美国地质勘探局 90 m 分辨率 DEM 数据;2000

年 1:10 万土地利用图,1:100 万中国土壤类型图;流域内气象站点少,数据缺乏,根据美国国家航空航天局 TRMM 逐日降水在流域内插值得到气象数据空间分布(1998—2013);物种分布等数据是根据该地区的《环境保护“十三五”规划》《生态功能保护区名录》《生物多样性保护策略》《统计年鉴》《水利发展“十三五”规划》和《动植物保护名录》,进行地图数字化处理得到分布图。

开展了流域生态系统的地质、地貌、气候、生物组成等基本特征分析。案例流域海拔较高,土壤侵蚀严重,地质灾害频发,因此,生态环境约束性选择土壤侵蚀、地质灾害作为典型因子。其中,土壤侵蚀约束根据地形起伏度、降水冲蚀力 R 值、植被类型和土壤质地等指标进行敏感性分级^[19],并对指标层赋值。流域敏感区主要为自然保护区,鉴于河流中分布有特种鱼类和洄游鱼类,且水域中包括集中式引用水水源地,环境陆生敏感区以保护类别、限制级别和开发位置作为赋值指标;水生敏感区通过对水源地建立不同距离的缓冲区表征。流域濒危、保护动物分布广泛,陆生生物多样性通过计算单位栅格内的动植物种数,对栅格属性值进行赋值;水生生物以鱼类作为指示物种,由于数据有限,案例研究中以不同河段的鱼类种数进行概化,通过 ArcGIS 的 Buffer 和 Create Fishnet 工具对点、线数据进行数据处理和指标赋值。针对陆生动植物,应用 Create Fishnet 建立 3000 m 网格,并统计、赋值单位栅格陆生物种种数。河流水生生物则采用 Buffer 建立 1000m 缓冲进行鱼类种数赋值。

应用 1~9 标度法构建判断矩阵计算各级指标权重,并完成 Saaty 一致性检验^[20],如表 1 所示。在 Arcgis 中通过 Model-Builder 建立空间加权模型(SAW),导入权重值和栅格数据进行叠加运算,并以 ARCGIS 自然间断点分类法(jenks natural breaks)将流域生态约束性计算结果按大小分为无约束、轻度约束、中度约束、高度约束、极度约束,然后根据空间分布划分不同等级的约束区;并根据河流约束性状况,将河流划分为 6 河段 A、B、C、D、E、F,如图 4 所示。

2.2 评价结果

根据流域地形、地貌、物种分布等自然条件及敏感区状况,开展流域生态约束性评价,评价结果如图 5 所示。结果表明,该流域的生态约束性整体较高,其中,无约束区占流域总面积的 13.12%,轻度约束区占流域总面积的 43.93%,中度约束区占流域总面积的 36.92%,高度约束区占流域总面积的 4.62%,极度约束区为占流域总面积的 1.41%,中、高、极度约束区占流域总面积的 42.95%。

从空间分布来看,流域生态约束的空间格局为西低东高、北低南高,中部为过度约束性区域。较高约束性区域集中分布于流域东、南部,该区域起伏度大,土壤侵蚀严重,地震、泥石流等自然灾害频发,包括国家级自然保护区、濒危动植物分布广泛且集中;由于地广人稀,区域内大部分依然保持着原始状态,生态系统结构简单,一旦受到人类活动影响,

表 1 约束性评价指标体系
Table 1 Ecological constraint evaluation indexes

目标层	系统层	准则层		指标层				
		指标	权重	指标	标准	赋值		
生态约束性	生态环境约束	土壤侵蚀	0.04	敏感级别	不敏感	0		
					轻敏感	2		
					较敏感	3		
					高敏感	5		
					极敏感	6		
					500 m	5		
	地质灾害	0.06	频发灾害点缓冲距离	1000 m	4			
				2000 m	3			
				3000 m	2			
				4000 m	1			
				陆生动、植物	0.10	单位网格陆生生物种数	0种	0
							1种	2
	2种	3						
	3种	5						
	4种	6						
	鱼类	0.20	河段鱼类种数	1~3种	2			
				4~10种	3			
				>10种	5			
自然保护区				0.05	保护级别	国家级	6	
						省级(自治区级)	3	
	市级	2						
重要湿地	0.05	开发限制	国家禁止	6				
			省(自治区)禁止	3				
			开发位置	涉水	3			
未涉水	0							
环境敏感区约束	鱼类索饵场	0.13	约束级别	不约束	0			
				轻约束	2			
				较约束	3			
				高约束	5			
				极约束	6			
鱼类洄游通道	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13			
						鱼类产卵场	0.14	0.14
重要水源地	0.08	水源地类型	地下水	3				
			河道	5				
			1000 m	5				
			2000 m	4				
			3000 m	3				
缓冲距离	0.08	缓冲距离	4000 m	2				
			5000 m	1				

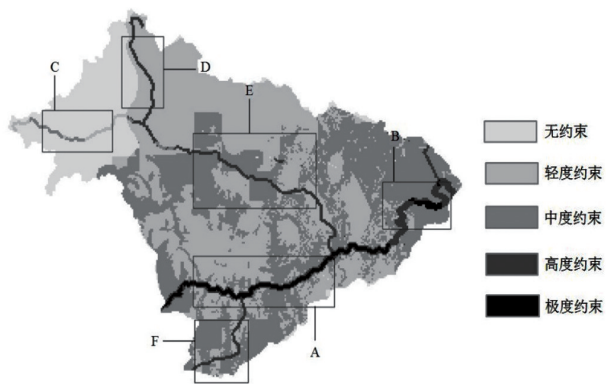
极易产生退化,且恢复困难。流域西、北部约束性较低,区域内降水多、植被相对茂密,以森林植被为主。从干支流分布来看,干流生态约束性高于支流,其中,干流A、B段为极度约束区,支流D、E、F段为高度约束集中分布区。干流流经自然保护区缓冲区,部分涉及核心区,且河段特有鱼类较为丰富,东、南部支流多为洄游鱼类“三场”分布区,对水电开发具有较强的约束作用。

基于评价结果提出该流域水电开发生态保护措施和影

响减缓措施如下。

1) 流域水电协调开发,通过优化梯级水电工程的开发时序,有效降低生态约束和生态风险。生态约束性较低的C区域可优先开发,约束性较高的A、B区域推迟开发,从流域尺度协调水电开发规划,将梯级水电站对生态环境的影响降至最小。

2) 为减少水库移民、保护耕地资源,在编制河流水电开发规划时应因地制宜,控制开发规模。



A、B—极度约束河段；D、E、F—高度约束河段；
C—无约束和轻度约束河段

图4 生态约束性综合评价

Fig. 4 Comprehensive evaluation of ecological constraints

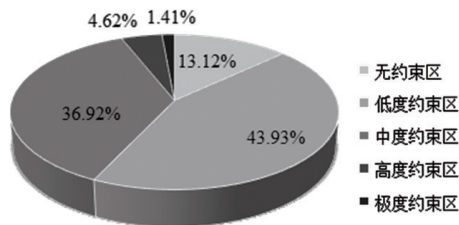


图5 不同约束区面积比例

Fig. 5 Percentages of different constraint areas

2.3 讨论

利用GIS工具建立空间数据库和空间加权评价模型,是当前广泛采用的大尺度空间分析方法^[21],可实现各类评价指标通过点、线、面形式进行空间叠加,并可解决地图叠加制图法中的难以辨别阴影等技术问题,提高水电梯级规划生态约束空间分析精度。应用层次分析法计算指标权重,可减少人为主观影响,结果更加科学^[22]。

针对本文所选案例区域开展的陆生敏感性评价中,高清华^[19]研究表明,区域生态环境敏感性呈现水平地带性特点,西北低,东南高;于伯华^[12]研究表明研究区域内脆弱性空间分布趋势为西低东高;二者的研究成果与本文空间分布趋势相同。同时,本文提出的流域水电开发生态约束性评价指标体系,除陆生因子外,涵盖了涉水约束因子,河流高、极度约束分布区与水功能区划中保护区、保留区分布范围相一致,对于水电开发生态约束性评价具有较高的精度和针对性。李亦秋^[23]应用GIS开展了全国库坝工开发的生物多样性敏感研究,考虑自然保护区分布、生态系统类型及水生生物物种丰富度等指标,在全国范围内划分5级敏感区,其中本方案例区域范围被划分为中度敏感区,与本文研究成果类似。

案例研究结果表明,本文综合GIS技术和层次分析法构建的流域水电开发生态约束性评价方法,可用于流域尺度水电开发生态约束区域及约束强度评价,提高评价过程的准

确性,且易于操作。流域水电开发生态约束性评价指标的选取面向西南流域特征,因此,应用于国家层面,需要根据各流域基本特征进行调整。

3 结论

本文构建了流域水电开发生态约束性评价方法,并选取西南某流域开展了案例研究。该流域干流约束性高于支流,整个流域近43%的区域处于中、高、极度约束区内,水电开发受到生态制约性约束较大。计算结果可以得出流域约束性整体及其内部空间分异,对于掌握该流域的生态约束性空间分异规律,进而有针对性地开展水电开发和生态保护具有积极作用。同时,流域生态系统是一个复杂的复合生态系统,水电梯级开发与流域生态系统的响应关系,流域生态系统内部的生态、社会、经济各子系统的相互关系是未来研究重点。

参考文献(References)

- [1] International Renewable Energy Agency. Roadmap for a renewable energy future executive summary[R]. Bonn: International Renewable Energy Agency, 2016.
- [2] Kao S C, McManamay R A, Stewart K M, et al. New stream-reach development: a comprehensive assessment of hydropower energy potential in the United States[R]. Washington: US Department of Energy (DOE), 2014.
- [3] 国家发展与改革委员会. 全国及各地区主体功能区规划[M]. 北京: 人民出版社, 2015.
China's National Development and Reform Commission. National and regional main functional area planning[M]. Beijing: People's Press, 2015.
- [4] 水利部水资源司. 全国重要江河湖泊水功能区划手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
China's Ministry of Water Resources. Handbook of water function zoning for important rivers and lakes in China[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013.
- [5] 环境保护部. 全国生态功能区划: 修编版[EB/OL]. (2015-11-23) [2017-01-18]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201511/t20151126_317777.htm.
- [6] 环境保护部. 生态保护红线划定技术指南[EB/OL]. (2015-05-08) [2017-01-18]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201505/t20150518_301834.htm.
- [7] 环境保护部. 技术指南用于生态红线划定[EB/OL]. (2015-05-08) [2017-01-18]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201505/t20150518_301834.htm.
- [7] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J]. 生态学报, 2000, 20(1): 9-12.
Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Miao Hong. China's eco-environmental sensitivity and its spatial heterogeneity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(1): 9-12.
- [8] Bergengren J C, Waliser D E, Yung Y L. Ecological sensitivity: a biospheric view of climate change[J]. Climatic Change, 2011, 107(3): 433-457.

- [9] Lioubimtseva E, Henebry G M. Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations[J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(11): 963-977.
- [10] 乔青, 高吉喜, 王维, 等. 生态脆弱性综合评价方法与应用[J]. *环境科学研究*, 2008(5): 117-123.
Qiao Qing, Gao Jixi, Wang Wei, et al. Method and application of ecological fragility assessment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008(5): 117-123.
- [11] Bramwell B, Pomfert G. Planning for lake and lake shore tourism: Complexity, coordination and adaptation[J]. *Anatolia*, 2007, 18(1): 43-66.
- [12] 于伯华, 吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价[J]. *地理研究*, 2011, 30(12): 2289-2295.
Yu Bohua, Lv Changhe. Assessment of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau[J]. *Geographical Research*, 2011, 30(12): 2289-2295.
- [13] 许妍, 高俊峰, 赵家虎, 等. 流域生态风险评价研究进展[J]. *生态学报*, 2012, 32(1): 284-292.
Xu Yan, Gao Junfeng, Zhao Jiahu, et al. The research progress and prospect of watershed ecological risk assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(1): 284-292.
- [14] 王雪梅, 刘静玲, 马牧源, 等. 流域水生态风险评价及管理对策[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(2): 237-245.
Wang Xuemei, Liu Jingling, Ma Muyuan, et al. Aquatic ecological risk assessment and management strategies in a watershed: An overview[J]. *Acta Scientia Circumstantiae*, 2010, 30(2): 237-245.
- [15] 卢宏伟, 曾光明, 谢更新, 等. 洞庭湖流域区域生态风险评价[J]. *生态学报*, 2003(12): 2520-2530.
Lu Hongwei, Zeng Guangming, Xie Gengxin, et al. The regional ecological risk assessment of the Dongting Lake watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003(12): 2520-2530.
- [16] 白杨, 郑华, 欧阳志云, 等. 海河流域生态功能区划[J]. *应用生态学报*, 2011(9): 2377-2382.
Bai Yang, Zheng Hua, Ouyang Zhiyun, et al. Ecological function regionalization of Haihe River basin[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011(9): 2377-2382.
- [17] Wang J, Cheng Q, Chen J. A GIS and remote sensing-based analysis of land use change using the asymmetric relation analysis method: a case study from the city of Hangzhou, China[J]. *Mathematical Geosciences*, 2011, 43(4): 435-453.
- [18] Bates P D. A simple raster-based model for flood inundation simulation[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 236(1/2): 54-77.
- [19] 高清竹, 段敏杰, 万运帆, 等. 藏北地区生态与环境敏感性评价[J]. *生态学报*, 2010(15): 4129-4136.
Gao Zhuqing, Duan Minjie, Wan Yunfan, et al. Comprehensive evaluation of eco-environmental sensitivity in Northern Tibet[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010(15): 4129-4136.
- [20] 李勇, 丁日佳, 王如燕, 等. AHP判断矩阵的一致性检验与修正[J]. *统计与决策*, 2007(8): 29-30.
Li Yong, Ding Rijia, Wang Ru, et al. A statistical method to check and rectify the consistency of a judgment matrix[J]. *Statistics and Decision*, 2007(8): 29-30.
- [21] 李亦秋, 鲁春霞, 邓欧, 等. 流域库坝工程开发的生物多样性敏感度分区[J]. *生态学报*, 2014(11): 3081-3089.
Li Yiqiu, Lu Chunxia, Deng Ou, et al. Biodiversity sensitivity zoning of river dam and reservoir engineering development[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014(11): 3081-3089.
- [22] 李滨勇, 陈海滨, 唐海萍. 基于AHP和模糊综合评判法的北疆各地州生态脆弱性评价[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2010(2): 197-201.
Li Binyong, Chen Haibin, Tang Haiping. Assessing ecological fragility with AHP and fuzzy integrated evaluation in autonomous prefectures of Northern Xinjiang[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science Edition)*, 2010(2): 197-201.

An Evaluation of Watershed Ecological Constraints of Hydropower Development Based on GIS

DONG Zhaokai¹, WANG Dongsheng², SUI Xin¹

1. National Center of Hydropower Sustainable Development, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

2. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China

Abstract When using the GIS to construct a watershed ecological evaluation tool, it is of great significance to evaluate the watershed ecological constraints on the development of the hydropower, serving as a reference for the hydropower cascade development. The present paper summarizes the concept model of the ecological constraint assessment. It is shown that the basic indexes for the evaluation of the ecological constraints include three aspects, namely, the environmental status constraint, the species diversity constraint, and the environmental sensitive area constraint. With a process combined analytic hierarchy process (AHP) and the GIS, an integrated assessment method for the ecological constraints is proposed. Taking one basin in southwestern China as a sample case, it is shown that the method of the ecological evaluation of the hydropower development based on the GIS proposed in this paper can objectively reflect the spatial condition and the diversity of the ecological constraints on the hydropower development, which allows for a simple and easy operation, and can provide a scientific basis and support for the comprehensive hydropower cascade development in the study area.

Keywords geographic information systems; watershed hydropower development; ecological constraints; evaluation index system; computation method

(责任编辑 韩星明)