

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2016.02.009

通天河干流水电梯级开发景观效应与生态安全评价

唐夫凯^{1,2}, 崔明¹, 周金星², 王昭艳³, 马国青⁴, 方健梅⁴

(1. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091; 2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083;
3. 中国水利水电科学研究院泥沙研究所, 北京 100048; 4. 国家林业局调查规划设计院, 北京 100714)

摘要:为评价通天河干流水电开发对区域生态环境的影响,利用数字影像和野外调查等基础数据,以“3S”技术为支撑,运用景观生态学和生态安全指数等方法对通天河干流水电梯级开发引起的陆地生态环境变化进行了分析和评价。结果表明:水电梯级开发后流域内水体面积增加 300.72 km²,草地面积减少 296.80 km²,主要植被类型和土地利用格局未产生明显变化;流域景观格局中的优势景观类型为草地,其次为裸地和林地,在景观格局水平上景观破碎度降低,景观优势度增加,同时景观多样性增加,有利于区域生态系统的稳定;水电梯级开发未对流域内植被生产力和河流两岸物种丰富度造成显著影响,水电站建成后植被生产力值减小 1.83×10⁵ t/a,仅占区域原植被生产力值的 0.78%;水电梯级开发后流域总体生态安全指数为 0.819,较开发前增大 0.001,流域生态安全指数总体维持较高水平。通天河干流水电梯级开发后流域景观格局、生态系统的功能与性质未发生改变,未对流域生态环境与安全造成威胁。

关键词:水电梯级开发;环境影响;景观效应;生态安全;通天河

中图分类号:TV213.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)02-0046-07

Landscape effect and ecological security evaluation of cascade hydropower development in the mainstream of Tongtian River Basin//TANG Fukai^{1,2}, CUI Ming¹, ZHOU Jinxing², WANG Zhaoyan³, MA Guoqing⁴, FANG Jianmei⁴
(1. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Department of Sediment Research, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 4. Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: In order to evaluate the impacts of hydropower development on the ecological environment, the impacts of the cascade development of hydropower projects in the main stream of the Tongtian River on the terrestrial ecological environment were analyzed and evaluated using the “3S” technology combined with the methods of landscape ecology and the ecological security index, as well as data from digital images and field surveys. The results show that, subsequent to cascade hydropower development, the water area increased by 300.72 km², the grassland area decreased by 296.80 km², and there was no significant change in the main vegetation types and land use patterns. Grassland was the dominant landscape type in the basin, followed by bare land and woodland. Landscape fragmentation decreased after hydropower development, while landscape dominance and diversity increased, which was conducive to the stability of regional ecosystem. Cascade hydropower development did not significantly affect the productivity of vegetation in the basin and the richness of species on both sides of the river. The productivity of vegetation decreased by 1.83×10⁵ t/a, and the productivity after the development only accounted for 0.78% of that before the development. The ecological security index of the overall basin was 0.819 after the development, 0.001 higher than that before it, indicating a high ecological security index. In summary, since there were no major changes in landscape patterns or in ecosystem features and functions, cascade hydropower development does not pose a threat to the ecological environment and safety in the Tongtian River Basin.

Key words: cascade development of hydropower; environmental impact; landscape effect; ecological security; Tongtian River

拦河建坝修建水电站是当前水资源开发利用的主要方式^[1],对河流水电资源的梯级开发可以充分利用河流的落差和最大限度地开发河流的水能和水运资源,产生较大的综合效益,是当前水电开发的趋

势^[2-3]。历史上美国密西西比河、科罗拉多河流域和苏联伏尔加河流域的梯级水电开发建设都促进了区域经济的发展^[4]。水电工程开发与建设在给人类带来经济和环境利益的同时,也会对流域生态系统产生多层次的负面影响,如导致生态系统退化、生物多样性下降等^[5-6]。生态风险(ecological risk)反映了种群、生态系统或景观的生态功能受外界干扰胁迫,导致生态系统功能减弱的状况^[7]。脆弱生态区的土地利用变化对区域生态风险和生态安全格局起到至关重要的作用。生态环境因素已成为大型水电工程建设主要的制约性因素,整个社会对大型水电工程建设可能引起的复杂生态环境风险问题越来越重视^[8]。

水电开发中淹没引起的景观空间结构与功能的变化,影响着区域的物质流、信息流和能量流特征,进而会影响该区域的资源开发利用与保护。目前有关梯级水电开发对生态环境影响评价的研究多沿用单个水电工程生态环境的研究成果,并已有学者从水电站建设对河流水文过程、地貌生物多样性、水质等的影响做了单一或综合研究^[9-10],但从整体上认识、理解和把握梯级水电站对流域生态环境的影响不足,梯级水电站建设对生态环境安全与风险评价的系统研究仍比较欠缺^[1,5]。

三江源是长江、黄河、澜沧江的发源地,因其具有充沛的水资源,被誉为“中华水塔”。由于地理环境和气候条件特殊,区域生态系统较为脆弱,三江源生态环境与生态平衡的变化直接关系到我国的生态安全。本文采用野外调查、遥感影像解译和Fragstats3.3 软件平台相结合的方法,研究青海省三江源重要干流——通天河干流水电梯级开发对区域生态环境的影响,分析工程建设前后区域景观格局、植被生产力、物种多样性和生态安全指数的变化状况,以期为区域生态安全调控提供理论依据。

1 研究区概况

通天河地处青海省玉树藏族自治州,是三江源保护区最上游的主干流,是我国青藏高原生态屏障的重

要组成部分;通天河同时也是南水北调西线工程的水源地之一。流域内水量充沛,落差大,水能资源蕴藏丰富。通天河干流河长 769 km,河道天然落差 953 m,多年平均流量 424 m³/s,理论蕴藏量 2 668 MW,约占青海省蕴藏总量的 11.5%;河段平均比降 0.124%,单位河长蕴藏的水流出力约为 3.47 MW/km^[11]。流域平均海拔高度 4 400 m,区域自然环境条件相对较差,社会经济发展水平低。

通天河流域水电开发是国家西部大开发战略的要求,即在保护生态环境的基础上,充分利用通天河丰富的水力资源积极开发水电、促进地区旅游发展,远期满足南水北调西线通天河调水要求^[12-13]。由于通天河位于三江源自然保护区,其生态环境保护非常重要,水电开发需充分考虑环境敏感区和重要淹没对象的分布特点。通天河流域水电开发规划按整个梯级分 8 级开发水资源,总利用落差 592 m,装机总容量 2 838 MW,年发电量 128.32 亿 kW·h。梯级水电站自上而下依次为克陇、若钦、立新、勒义、仲昌、跟着、拉贡和玉树,其中拉贡水电站为已建成电站。梯级水电站布局合理,技术可行,整个流域地广人稀,沿河两岸居民及耕地较少,淹没损失较小。各梯级水电站水库特征参数见表 1。

2 研究方法

2.1 研究范围与基础数据

研究的现场调查时间为 2011 年 8 月,评价时段为 2011 年到工程施工前的时段,评价内容为水库拟淹没库区对区域陆生生态环境的影响。研究范围为楚玛尔河汇口(克陇水电站水库回水末端)至巴塘河口沿通天河两岸第一重山脊线所包括的陆域范围,干流河段长约 511 km,总面积 38 346.7 km²。

根据阶梯电站的位置分布,在评价区选取 11 个典型河流断面(楚玛尔河口、克陇坝址、治曲、曲麻莱、若钦、立新、勒义、仲昌、跟着、拉贡和玉树)设置 11 个调查样带,每个样带在河流两岸淹没区和非淹没区分别设置样地,并进行固定样地调查,调查资料包括植被群落统计数据,工程影响范围内 GPS 定位

表 1 通天河干流各梯级水电站水库特征参数

水电站	流域面积/ km ²	多年平均流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	正常蓄 水位/m	死水位/ m	正常蓄水位以下 库容/亿 m ³	死库容/ 亿 m ³	调节库容/ 亿 m ³	利用落差/ m	装机容量/ MW
克陇	106 747	265	4 215	4 200	12.10	4.73	7.37	48	120
若钦	125 268	311	4 140	4 100	107.10	41.20	65.90	151	640
立新	125 668	313	3 985	3 980	2.28	1.81	0.47	50	240
勒义	130 960	350	3 935	3 925	21.43	17.84	3.59	147	800
仲昌		381	3 785	3 780	4.01	3.28	0.73	65	380
跟着	136 189	385	3 720	3 715	8.55	7.42	1.13	88	520
拉贡	136 800	388	3 632	3 632	0.19	0.19	0	15	8
玉树	137 728	395	3 570	3 565	0.42	0.29	0.14	28	130

植被记录数据等。在现场调查的基础上,对研究区 2011 年 Landsat ETM 卫星遥感数据影像和 DEM 数据(分辨率 30 m×30 m)进行信息提取和专题解译,确定水库拟淹没范围,在 Arcgis10.0 软件平台上建立土地利用类型数据库^[14]。利用 GIS 对景观类型现状等数据叠加分析,得到水电开发工程拟淹没区景观类型、景观格局指数和植被盖度等数据,用于进行各项预测分析。

2.2 景观格局与生态功能分析

a. 景观格局指数变化。以土地利用现状图为基础数据,在Fragstats3.3景观格局软件平台上,基于斑块和景观两个尺度计算区域淹没前后景观格局指数并对其进行分析。斑块类型尺度景观格局指数包括斑块数、斑块密度、最大斑块指数、景观形状指数和分离度指数等;景观水平尺度景观格局指数包括蔓延度指数、分离度指数、平均分维数、Shannon 多样性指数等。具体计算方法见文献[15-16]。

b. 植被生产力。以基于光能利用率的家CASA模型思路来计算区域植被净初级生产力(NPP)^[17-18]。面积的准确计算是统计分析的必要前提,采用特定的Albers等面积投影,计算得到基于栅格图像的结果。选取2000年、2005年和2010年对评价区典型植被类型年际、年间分布特征进行分析,采用其平均值与淹没后区域植被生产力做对比分析。

c. 物种多样性。根据11个固定调查样带的植被群落调查信息计算各调查样带河流两岸淹没区和非淹没区α物种多样性指数,计算公式^[15,19]如下:

$$H = - \sum P_i \ln P_i \tag{1}$$

$$D = 1 - \sum P_i \tag{2}$$

$$J_{sw} = - \sum P_i \ln P_i / \ln S \tag{3}$$

式中:H为Shannon-Wiener指数;D为Simpson多样性指数; J_{sw} 为Pielou均匀度指数;S为物种丰富度指数(群落中的物种总数); P_i 为物种*i*的相对重要值。

2.3 生态风险与生态安全评价方法

影响区域生态安全的因素主要有自然和人为两大类,对于通天河流域水电开发而言,生态安全的主要影响因素为人类活动,通过区域的土地利用/覆被变化来反映。采用基于土地利用的区域生态风险指数(ERI),构建区域生态安全指数(ESI)来表征区域的生态风险程度^[20-21]。计算公式为

$$I_{ER} = \sum \frac{A_j W_j}{A} \tag{4}$$

$$I_{ES} = 1 - I_{ER} \tag{5}$$

式中: I_{ER} 、 I_{ES} 分别为生态风险指数和生态安全指数;

*j*为土地利用类型; A_j 为样本区域内第*j*种土地利用类型的总面积;*A*为样本区的土地总面积; W_j 为第*j*种土地利用类型的生态风险强度系数。生态风险越高,相应生态安全指数则越小,表明区域内的生态安全程度越低;反之生态安全程度越高。本研究生态风险强度权重系数参照曾辉等^[20]的研究成果,并结合研究区实际情况做适当修改,最终确定不同土地利用类型生态风险权重系数为:耕地0.31,水体0.18,林地0.14,草地0.2,裸地0.109,冰川及永久积雪0.10。

以10 km×10 km为基本栅格单元计算生态安全指数,将栅格单元值转化为点数据,并通过Arcgis10.0软件进行插值,得到通天河流域的生态安全空间分布图;为准确评估水电开发后土地利用对生态风险的影响程度,将生态安全指数进一步细分为低、中、中高和高4类,并生成生态安全等级区范围图,以直观地反映区域生态风险的空间分布状况。采用Excel 2007和Sigmaplot10.0软件平台进行数据分析、处理以及图表制作。

3 结果与分析

3.1 水电梯级开发对土地利用方式的影响

水电站建成蓄水后会导致河流两岸的土地利用类型发生改变,使一定面积的草地、林地、裸地等土地利用类型被水覆盖成为水体。通天河流域总面积38 346.70 km²,其中草地面积所占比例最大,其次为裸地。表2为流域淹没前后水库与陆域土地利用类型面积的变化情况。

表2 淹没前后土地利用类型面积变化

土地利用类型	淹没前面积/km ²	淹没后面积/km ²	面积变化/km ²	变化率/%
草地	33 395.48	33 098.68	-296.80	0.89
裸地	3 778.53	3 777.21	-1.32	0.03
林地	1 061.15	1 058.55	-2.60	0.25
水体	73.22	373.94	300.72	410.71
冰川及永久积雪	38.32	38.32	0	0

梯级水电站建设完成后,研究区土地利用类型有一定的变化,占优势地位的草地淹没的面积最大,其面积变化比例也较大,其他土地利用类型的淹没面积和比例均很小。裸地减少1.32 km²,林地减少2.60 km²,草地减少296.80 km²,冰川及永久积雪没有变化。梯级水电站建成后水体面积变化最明显,面积增加300.72 km²,且水体面积的增加以草地的贡献最大,所占比例为98.70%。由于坝址的选择一般位于悬崖峭壁,建设前后各土地利用类型面积总体变化不大,土地利用类型优势度不变,草地最

大,其次是裸地、林地和水体,冰川及永久积雪最小。

3.2 水电梯级开发对景观格局的影响

3.2.1 斑块类型尺度景观格局指数变化

研究区内斑块类型水平上的景观格局变化见表3。各类型景观要素由于分布范围不同,受水库的影响程度也不同,其中裸地、林地和冰川及永久积雪类型景观各个指数值在淹没前后基本没有变化,受水库建设影响较大的是草地和水体^[14]。

草地淹没后斑块数、斑块密度和最大斑块指数有所增加,草地的景观破碎度有所提高;草地景观形状指数较淹没前增加0.937,说明景观的稳定性有所降低。裸地的斑块数、斑块密度和景观形状指数淹没后略微降低,最大斑块指数保持不变,而平均斑块面积略有增加。林地淹没后除斑块数降低1个外,其余景观指数都有所增加,说明淹没在一定程度上影响了景观格局,使景观受到一定程度的干扰。由于水库的形成,水体景观的斑块数、斑块密度明显下降,最大斑块指数、景观形状指数和平均斑块面积则明显增大。由于水体在区域中所占的比重很小,不足1%,因此水体景观的改变对流域的生态功能与作用影响小,在大尺度上表现不明显。冰川及永久积雪所占比例小,其一般都位于流域的边缘地带,基本不受人活动干扰,其景观指数都保持不变。

3.2.2 景观水平尺度景观格局指数变化

表4为在景观水平尺度上淹没前后研究区景观

格局指数变化状况,淹没后区域斑块数、斑块密度和最大斑块指数均降低,说明淹没后整个景观格局的破碎化程度降低。景观形状指数和分维数指数在淹没后呈增大趋势,平均形状分布指数增大,表明景观斑块几何形状较淹没前规则^[22-23]。淹没后蔓延度指数呈减小趋势(-2.4%),而景观分裂指数增大(5.76%),表明工程建设会造成各斑块之间的连接性水平降低。淹没后Shannon多样性指数和均匀度指数分别增大了0.041和0.025,但都维持在较低水平,表明工程实施后区域的景观格局更复杂,各景观要素斑块更加均匀,优势度水平会降低。

3.3 水电梯级开发对陆生植被生态系统的影响

3.3.1 梯级开发对植被生产力的影响

评价区2000年、2005年、2010年陆地生态系统植被生产力(以C计,下同)的平均值分别为679.87g/(m²·a)、631.04g/(m²·a)和652.81g/(m²·a),年总生产量分别为2.61×10⁷t/a、2.42×10⁷t/a、2.50×10⁷t/a。植被生产力的总体分布趋势与植被类型、太阳辐射、温度、降雨等气候条件密切相关,具有一定的空间异质性。评价区平均植被生产力的空间分布格局与植被类型和植被群落关系密切,以高寒草甸植被为主的地区为植被生产力分布高值区,而在亚高山阔叶落叶灌丛分布的区域属于植被生产力次高值区,高海拔无植被地段属于植被生产力分布低值区。

从表5可以看出,水电站的建设降低了评价区

表3 淹没前后研究区斑块类型尺度景观格局指数的变化

土地利用类型	面积/km ²		面积比/%		斑块数		斑块密度/(个·km ⁻²)		最大斑块指数/%		景观形状指数		平均斑块面积/km ²	
	淹没前	淹没后	淹没前	淹没后	淹没前	淹没后	淹没前	淹没后	淹没前	淹没后	淹没前	淹没后	淹没前	淹没后
草地	33395.48	33098.68	87.09	86.31	86	90	0.22	0.23	86.992	86.196	22.265	23.202	3.8857	3.6794
裸地	3778.53	3777.21	9.85	9.85	1012	1010	2.64	2.63	0.419	0.419	46.545	46.529	0.0372	0.0373
林地	1061.15	1058.55	2.77	2.76	419	418	1.09	1.09	0.179	0.179	26.244	26.400	0.0252	0.0252
水体	73.22	373.94	0.19	0.98	125	96	0.33	0.25	0.013	0.569	13.143	14.256	0.0058	0.0394
冰川及永久积雪	38.32	38.32	0.10	0.10	37	37	0.10	0.10	0.015	0.015	6.760	6.760	0.0102	0.0102

表4 淹没前后研究区景观水平尺度景观格局指数的变化

状态	斑块数	斑块密度/(个·km ⁻²)	最大斑块指数/%	景观形状指数	平均形状分布指数	平均分维数	蔓延度指数/%	景观分裂指数/%	Shannon多样性指数	Shannon均匀度指数
淹没前	1679	4.38	86.992	21.155	1.354	1.037	75.786	0.243	0.465	0.289
淹没后	1651	4.31	86.196	21.943	1.370	1.038	73.996	0.257	0.506	0.314

表5 淹没前后研究区植被生产力值变化情况

土地利用类型	淹没前面积/km ²	面积占比/%	淹没后面积/km ²	面积变化值/km ²	植被生产力	
					变化值/(t·a ⁻¹)	变化比例/%
草地	33395.48	87.09	33098.68	-296.80	-201838.84	-0.89
裸地	3778.53	9.85	3777.21	-1.32	-60.27	-0.03
林地	1061.15	2.77	1058.55	-2.60	-1530.78	-0.25
水体	73.22	0.19	373.94	300.72	20427.91	410.71
冰川及永久积雪	38.32	0.10	38.32	0	0	0
合计	38346.70	100	38346.70	0	-183001.98	-0.78

的植被生产力值,减小值为 $1.83\times10^5t/a$,减少了区域原植被生产力值的0.78%。5种主要土地利用类型中,只有水体面积增加,且增加比例较大,为原来面积的4倍多;其余除冰川及永久积雪外,都有所减少,其中草地减少的面积最大,而草地的平均植被生产力值也较水体面积高很多,所以区域总体表现为植被生产力值减小。

3.3.2 梯级开发对物种多样性的影响

水电梯级开发会淹没大坝上游的部分沿河地带,使部分生境丧失,表6为在物种多样性层次上水电梯级开发对评价区陆生生态系统的影响。由表6可知,各调查样带中左岸和右岸、淹没区与非淹没区样地的物种丰富度指数、Shannon-Wiener指数、Simpson多样性指数、Pielou均匀度指数变化都很小,从而可以看出,修建电站堤坝以及水库蓄水对两岸的物种多样性影响不大。

3.4 水电梯级开发对区域生态安全影响程度

经计算,研究区梯级水电站建设前总体的生态安全指数为0.818(图1(a)),梯级水电站建设完成后,通天河流域的总体生态安全指数为0.819(图1

(b)),建设完成后区域总体生态安全指数增加0.001。与其他研究区相比,本区域内生态安全程度相对较高,其原因主要为区域景观以自然景观为主,受到的人为活动影响较小,对生态安全有影响的破坏性活动较少。梯级水电站建成后,10 km×10 km基本栅格单元上的生态安全统计值和其空间分布同电站建设前基本一致,其最大生态安全指数和最小生态安全指数的栅格未发生变化。

通天河流域生态安全指数最大值为0.86,最小值为0.80,基本未发生变化。生态安全指数较高的区域同电站建设前的区域基本一致,生态安全指数较低的区域在东北部,整体趋势也表现为东低西高。为了更细致地对比建设前后的生态安全变化,在Arcgis10.0软件中将两个时期的生态安全数据叠加对比,可以发现:日阿让涌西南部、切如陇给、加巧、夏日贡巴、当江荣西北、来涌与奇迪之间等区域的生态安全指数有所下降;冬特考等地生态安全指数有轻微的增大。8个梯级水电站正常蓄水后,淹没的主要土地利用类型为草地,从土地利用类型转移来看,草地转换为水体,生态安全指数有所增大。从不

表6 淹没前后不同样带生物多样性变化

样带 编号	物种丰富度				Shannon-Wiener 指数				Simpson 多样性指数				Pielou 均匀度指数			
	Zy	Zf	Yy	Yf	Zy	Zf	Yy	Yf	Zy	Zf	Yy	Yf	Zy	Zf	Yy	Yf
1	20	20	20	21	2.28	2.42	2.17	2.15	0.76	0.80	0.81	0.81	0.74	0.74	0.72	0.72
2	26	28	26	27	2.16	2.18	2.31	2.72	0.80	0.80	0.78	0.79	0.79	0.79	0.78	0.78
3	30	30	30	30	3.06	3.66	3.02	3.64	0.88	0.90	0.87	0.85	0.90	0.90	0.90	0.90
4	13	14	13	15	2.96	2.82	2.51	2.8	0.92	0.92	0.91	0.92	0.9	0.92	0.90	0.92
5	29	30	28	31	2.22	2.16	2.19	2.24	0.74	0.74	0.73	0.73	0.94	0.93	0.94	0.96
6	26	27	26	25	2.26	2.31	2.18	2.13	0.82	0.82	0.82	0.82	0.90	0.90	0.90	0.90
7	26	28	24	26	2.36	2.44	2.34	2.32	0.88	0.89	0.86	0.88	0.92	0.92	0.92	0.92
8	17	16	18	19	2.55	2.56	2.45	2.76	0.70	0.71	0.70	0.72	0.84	0.84	0.88	0.89
9	16	17	18	15	3.04	3.12	3.00	3.06	0.92	0.92	0.92	0.92	0.72	0.72	0.71	0.70
10	16	18	15	16	2.90	2.87	2.74	2.93	0.90	0.90	0.90	0.90	0.74	0.74	0.72	0.72
11	12	14	13	14	2.93	2.93	2.71	2.84	0.94	0.94	0.92	0.93	0.78	0.81	0.79	0.82

注:Zy、Zf、Yy、Yf 分别表示左岸淹没区、左岸非淹没区、右岸淹没区和右岸非淹没区。

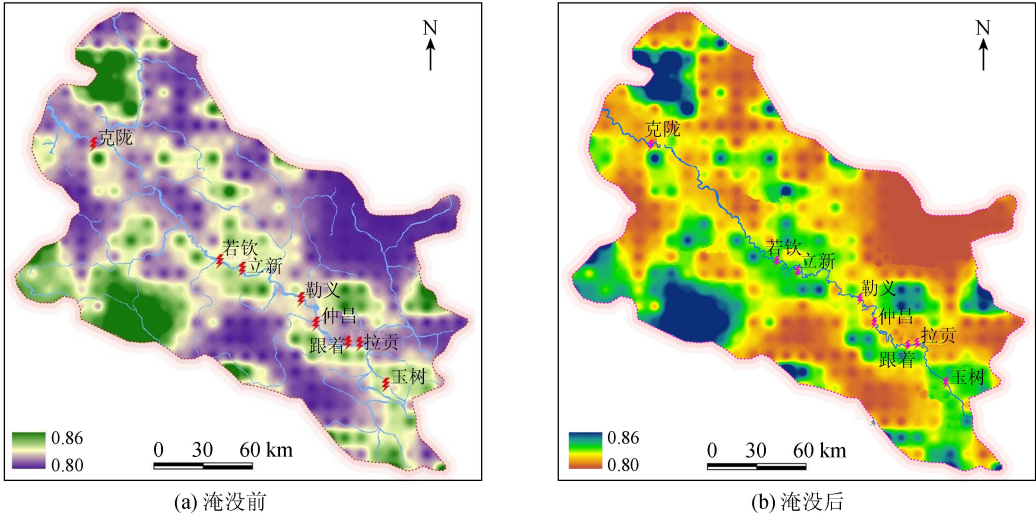


图1 梯级水电站建成前后区域生态安全指数空间分布

同土地利用类型和植被的生态效益上来看,水体的生态效益大于草地,因此,淹没区水体面积增加,这些区域的生态安全指数有轻微增大的趋势。

通天河流域分为4个生态安全等级区域(图2),分别为低生态安全区(0.80~0.81)、中生态安全区(0.81~0.82)、中高生态安全区(0.82~0.83)、高生态安全区(0.83~0.86)。通天河流域的西部生态安全明显高于东部地区,且通天河流域多为低生态安全区和中生态安全区。整体上中生态安全区面积最大,其次是低生态安全区、中高生态安全区,而高生态安全区面积最小,低、中、中高和高生态安全区的面积比为0.86:1:0.47:0.11。对淹没前后生态安全等级图叠加发现淹没前后4个生态安全等级区的空间分布基本一致,未发生明显变化。通天河流域生态安全以中低等级为主,水电开发中应着重考虑区域的生态安全空间分布规律,采取因地制宜的方法,尽量避免造成区域生态问题。

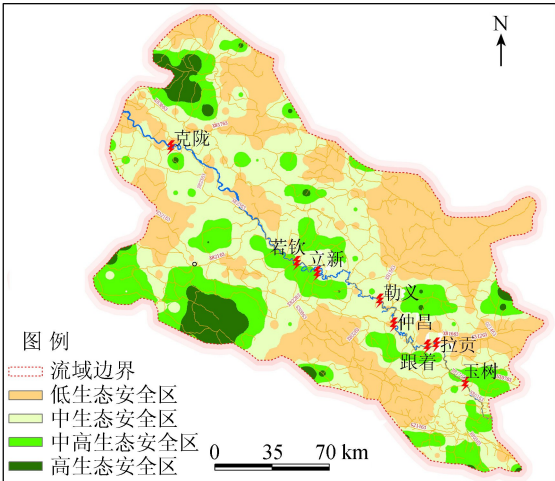


图2 电站建成后区域生态安全等级空间分布

4 结 语

通天河干流水电梯级开发后区域不同土地利用类型面积变化不大,未对土地利用类型的优势度产生影响。水库建成蓄水后区域景观格局指数,在斑块类型尺度上景观优势度水平降低,景观形状也较淹没前更规则;在景观水平尺度上景观优势度水平降低,景观破碎化增加,受淹没影响斑块形状更加规则。水库建成淹没后,由于草地面积的显著减少,研究区内陆地植物植被生产力较淹没前降低。从多样性指数、丰富度指数和均匀度指数来看,梯级水电站的建设对流域内物种的生物多样性无显著影响。梯级水电站建设未对区域整体生态安全产生影响,梯级水电站建设后流域生态安全指数较建设前增大0.001,且研究区生态安全程度相对较高。从总体上看,研究区东北部的生态安全指数相对较低,特别是

海拔较高的区域,在项目建设中需注意生态的保护。

研究结果显示通天河干流水电梯级开发后流域景观要素的基本构成不会发生明显改变,以高山、高寒草地为主的草地在研究区的景观结构主导地位不会发生本质变化;景观多样性指数略有变化,但不会减弱生态系统抵御干扰的能力和其自然体系的稳定性;生态安全指数略有增加,区域生态系统仍处于较稳定的水平^[24]。

本研究主要讨论了通天河干流梯级水电站建设对流域土地利用类型、景观格局、植被生态系统生产力及区域生态安全的影响,除此之外,梯级水电站的建设对陆生动物、文物古迹、土壤侵蚀和自然保护区等都会产生一定的影响。工程建设会影响鸟类和兽类动物的生化和取食环境,但其一般分布在较高海拔地段,且具有迁徙性,因而不会对动物栖息地造成较大影响。此外,尽管工程建设会产生土壤侵蚀,由于坝址的选择多位于悬崖峭壁和自然山谷,最大限度地减小了对植被的破坏^[25];工程结束后梯级水库会产生拦沙效益,辅以适当的植被恢复措施,能够有效防治区域水土流失。

参考文献:

[1] 李锦胜. 水电站建设对生态环境的影响及评价[J]. 环境科学导刊, 2011, 30(5): 81-83. (LI Jinsheng. Impacts and assessment on ecological environment by hydroelectric station construction [J]. Environmental Science Survey, 2011, 30(5): 81-83. (in Chinese))

[2] 付雅琴. 基于复杂系统理论的梯级水电开发生态环境影响评价研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.

[3] 杨净, 王宁, 陈燕. 河流水电资源的梯级开发对生态环境的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 58-62. (YANG Jing, WANG Ning, CHEN Yan. Impact of cascade hydropower development on ecological environment [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(4): 58-62. (in Chinese))

[4] HUANG Hailun, ZHENG Yan. Present situation and future prospect of hydropower in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13: 1652-1656.

[5] 周世春, 周晓蔚. 中国水电可持续发展实践[J]. 水力发电学报, 2012, 31(6): 1-6. (ZHOU Shichun, ZHOU Xiaowei. Practices of sustainable hydropower development in China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(6): 1-6. (in Chinese))

[6] 刘世梁, 崔保山, 温敏霞, 等. 重大工程对区域生态安全的驱动效应及指标体系构建[J]. 生态环境, 2007, 16(1): 234-238. (LIU Shiliang, CUI Baoshan, WEN Minxia, et al. Ecological effects and ecological security index system of major engineering project [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(1): 234-238. (in Chinese))

- [7] 张学斌,石培基,罗君,等.基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析:以石羊河流域为例[J].自然资源学报,2014,29(3):410-419. (ZHANG Xuebin, SHI Peiji, LUO Jun, et al. The ecological risk assessment of arid inland river basin at the landscape scale: a case study on Shiyang River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3): 410-419. (in Chinese))
- [8] 夏继红,白传贞,严忠民,等.淮入江水道夹江段左岸带生态综合评价[J].水利水电科技进展,2007,27(4):20-22. (XIA Jihong, BAI Chuazhen, YAN Zhongmin, et al. Ecological comprehensive assessment of left riparian zone of Jiajiang section of Huaihe River outfall water way[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(4): 20-22. (in Chinese))
- [9] 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 Lianfang, GU Hongbin, WEI Bing, et al. Investigation of the influence of hydropower cascade development on water quality accumulation in Red River mainstream[J]. Water Power, 2013, 39(4): 9-12. (in Chinese))
- [10] 毛华平,杨兰蓉,许人骥,等.三峡水库库周生态屏障建设对策研究[J].水土保持学报,2014,28(1):63-68. (MAO Huaping, YANG Lanrong, XU Renji, et al. Countermeasures of ecological barrier construction in Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(1): 63-68. (in Chinese))
- [11] 国家林业局调查规划设计院.通天河干流水电规划环境影响评价:陆生生态调查与评价专题报告[R].北京:国家林业局调查规划设计院,2012.
- [12] 武志刚.通天河水电开发对生态环境影响的研究[J].水力发电,2011,37(12):8-12. (WU Zhigang. Impact study of hydropower development on ecological environment in Tongtian River Basin[J]. Water Power, 2011, 37(12): 8-12. (in Chinese))
- [13] 蒋丽伟,孟佩.通天河干流水电梯级开发对区域景观格局的影响[J].林业资源管理,2013(3):106-111. (JIANG Liwei, MENG Pei. Effects of cascade hydropower development on the landscape pattern in the Tongtian River[J]. Forest Resources Management, 2013(3): 106-111. (in Chinese))
- [14] 高群.三峡库区景观格局变化及其影响因素:以重庆市云阳县为例[J].生态学报,2005,25(10):2499-2506. (GAO Qun. Landscape changes and human activities in three gorges reservoir area: the case of Yunyang County [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2499-2506. (in Chinese))
- [15] 邬建国.景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [16] 崔晓伟,张磊,朱亮,等.三峡库区开县蓄水前后景观格局变化特征[J].农业工程学报,2012,28(4):227-234. (CUI Xiaowei, ZHANG Lei, ZHU Liang, et al. Changes of landscape pattern and its characteristics in Kaixian County before and after impoundment of Three Gorges Dam Project [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(4): 227-234. (in Chinese))
- [17] BONDEAU A, KICKLIGHTER D W, KADUK J, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results[J]. Global Change Biology, 1999, 5(Sup1): 1-5.
- [18] 喻庆国,曹顺伟,华朝朗.云南糯扎渡保护区电站建设水淹区植被资源调查[J].南京林业大学学报(自然科学版),2004,28(2):80-82. (YU Qingguo, CAO Shunwei, HUA Chaolang. Inventory of vegetation at the flooded area after the construction of hydroelectric station in Nuozhadu Nature Reserve of Yunnan [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2004, 28(2): 80-82. (in Chinese))
- [19] MAGURRAN A E. Ecological diversity and its measurement[M]. Princeton: Princeton University Press, 1988.
- [20] 曾辉,刘国军.基于景观结构的区域生态风险分析[J].中国环境科学,1999,19(5):454-457. (ZENG Hui, LIU Guojun. Analysis of regional ecological risk based on landscape structure [J]. China Environmental Science, 1999, 19(5): 454-457. (in Chinese))
- [21] 万利,陈佑启,谭靖,等.北京郊区生态安全动态评价与分析[J].地理科学进展,2009(2):238-244. (WAN Li, CHEN Youqi, TAN Jing, et al. RS/GIS-based assessment and analysis of ecological security dynamics in the suburbs of Beijing [J]. Progress in Geography, 2009(2): 238-244. (in Chinese))
- [22] 李秀珍,布仁仓,常禹,等.景观格局指标对不同景观格局的反应[J].生态学报,2004,24(1):123-134. (LI Xiuzhen, BU Renchang, CHANG Yu, et al. The response of landscape metrics against pattern scenarios [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 123-134. (in Chinese))
- [23] 吴计生,刘惠清,刘小曼.周边区域景观破碎对铜鼓岭国家级自然保护区的压力分析[J].生态学杂志,2006,25(4):405-409. (WU Jisheng, LIU Huiqing, LIU Xiaoman. Stress of surrounding areas landscape fragmentation on Tongguling Nature Reserve [J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(4): 405-409. (in Chinese))
- [24] 崔胜辉,洪华生,黄云凤,等.生态安全研究进展[J].生态学报,2005,25(4):861-868. (CUI Shenghui, HONG Huasheng, HUANG Yunfeng, et al. Progress of the ecological security research [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(4): 861-868. (in Chinese))
- [25] 刘宇,吕一河,傅伯杰.景观格局-土壤侵蚀研究中景观格局指数的意义解释及局限性[J].生态学报,2011,31(1):267-275. (LIU Yu, LÜ Yihe, FU Bojie. Implication and limitation of landscape metrics in delineating relationship between landscape pattern and soil erosion [J], Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(1): 267-275. (in Chinese))

(收稿日期:2014-11-28 编辑:熊水斌)