

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0127

王维琛,蔡宴朋,孙炼,等. 向家坝水电工程影响下区域土地利用及景观格局变化[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 77-84. WANG W C, CAI Y P, SUN L, et al. Land use/cover and landscape pattern changes under influence of Xiangjiaba Hydropower Station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 77-84. (in Chinese)

向家坝水电工程影响下区域土地利用及景观格局变化

王维琛^{1,2}, 蔡宴朋^{1,2}, 孙炼^{1,2}, 杨薇^{1,2}, 易雨君^{1,2}, 徐俏¹

(1. 北京师范大学 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京市流域环境生态修复与综合调控工程技术研究中心, 北京 100875)

摘要: 为研究向家坝水电工程建设对周围区域土地利用和景观格局变化的影响, 本研究采用面向对象分类方法对水电站建设前(2006)与建设后(2017)两个时期的研究区遥感影像进行土地利用和景观格局变化分析, 并以2006年为基准年, 采用CLUE-S模型对研究区2017年“自然发展状态”下土地利用进行模拟, 与2017年实际情形进行对比分析。研究表明: (1)2006-2017年间, 在水电站外部工程和社会发展的双重作用下, 水体面积大幅度增加, 裸地得到开发利用, 建筑区扩张, 林地和耕地减少较多; (2)相较于“自然发展状态”, 水电工程影响下的建筑区面积略有下降, 园地/草地面积下降且与林地之间交叉分布增多; (3)相较于“自然发展状态”, 水电工程影响下研究区景观格局变化表现出不同的特点: 景观水平上, 自然发展对研究区整体的聚集作用减弱; 类型水平上, 研究区景观格局呈现出三种趋势: 耕地与园地/草地呈增强趋势, 建筑区与裸地呈延缓趋势, 林地呈相反趋势。

关键词: 土地利用/覆盖变化; 面向对象分类; 景观格局变化; CLUE-S模拟; 水电工程

中图分类号: X22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)05-0077-08

Land use/cover and landscape pattern changes under influence of Xiangjiaba Hydropower Station

WANG Weichen^{1,2}, CAI Yanpeng^{1,2}, SUN Lian^{1,2}, YANG Wei^{1,2}, YI Yujun^{1,2}, XU Qiao¹

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Engineering Research Center for Watershed Environmental Restoration & Integrated Ecological Regulation, Beijing 100875, China)

Abstract: In order to analyze the influence of Xiangjiaba hydropower project on land use and landscape changes in the peripheral region, we applied the object-oriented classification method to extract the land use types from the Landsat images of 2006 and 2017, and analyzed the landscape pattern changes around Xiangjiaba hydropower station. Then, we used CLUE-S model to simulate the land use and landscape changes in 2017 in the condition of natural development without the hydropower project. The main conclusions are as follows: from 2006 to 2017, the land types of the study area were seriously affected by both social development and the hydropower project. The water area has increased significantly; bare land has been utilized; construction area has expanded; forest and farmland area has decreased a lot. Compared with the situation in the natural development condition, under the influence of the hydropower project, the construction area is slightly smaller, and the garden/grassland area is smaller with more cross distribution with forest land. The landscape pattern presented different trends: enhancement of farmland and garden/grassland, delayed development of construction and bare land, and opposite development of forest land.

Key words: LUCC; object-oriented classification; landscape pattern change; CLUE-S simulation; hydropower project

收稿日期: 2018-04-23 修回日期: 2018-08-15 网络出版时间: 2018-09-10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180906.1715.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502209); 国家自然科学基金(51522901); 中央高校基本科研业务费专项资金

Funds: National Key R & D Program of China (2016YFC0502209); National Natural Science Foundation of China (51522901); Fundamental Research Funds for the Central Universities

作者简介: 王维琛(1994), 男, 河北石家庄人, 主要从事水文及地表过程方面研究。E-mail: 516734017@qq.com

通讯作者: 蔡宴朋(1978), 男, 四川安岳人, 教授, 博士, 主要从事水生态效应管理、气候变化适应性规划、环境-能源系统分析方面研究。E-mail: yanpeng.cai@bnu.edu.cn

土地利用/覆盖变化 (Land Use/Cover Change, LUCC) 是区域环境变化的关键^[1-2], 可以实现地表时空特征的动态变化记录。土地的不合理规划和利用会导致一系列环境问题, 如水土流失、生物多样性降低和荒漠化等。景观格局指数和 CLUE-S 模型 (Conversion of Land Use and its Effects at Small region extent) 都是分析区域尺度 LUCC 变化的有效工具。景观格局分析主要研究景观的结构、功能及其变化^[3], 注重人类活动对于景观格局变化的影响^[4], 国内外学者应用景观格局指数分析受到农业和工业影响下土地利用变化和景观格局变化之间的关系^[5-6], 并对景观格局变化的驱动因子、指数筛选方法和局限性等方面进行研究^[7-10]; CLUE-S 模型是荷兰瓦赫宁根大学在 CLUE 模型的基础上改进得到的, 在定量分析土地利用模拟、土地退化、山区植被变化、政策对土地利用影响等方面应用广泛且表现良好^[11-18]。

随着我国西南地区水电行业的快速发展, 大型水电工程建设对周围区域土地利用和景观格局产生较大影响。研究表明, 水电站的建设使土地利用和景观格局表现出破碎化加剧和分布离散的趋势。但在不同区域, 水电工程的具体影响并不一致^[19-22]。关于金沙江干流大型水电站向家坝水电站, 已有研究主要关注工程建设过程的实施细节以及局部地区生态恢复措施^[23-24], 缺乏区域尺度的水电工程建设对 LUCC 和景观格局影响的分析研究。本文利用“3S”技术、景观指数分析和土地利用模拟等手段, 通过自然状态发展情景与真实情况对比, 放大水电工程因素的影响, 对向家坝水电工程对 LUCC 和景观格局影响进行分析, 以期对日后该区域土地资源可持续开发利用和生态保护提供指导。

1 研究区概况

向家坝水电站是金沙江流域下游的一座巨型水电站, 水库正常蓄水位 380 m, 库容 51.63 亿 m^3 , 装机规模仅次于三峡和溪洛渡水电站, 为中国第三大水电站, 水库面积 95.6 km^2 , 回水长度 156.6 km。向家坝水电站位于两省交界处, 按照行政区划分会导致研究区过大, 不能较好地体现水电工程造成的影响。使用 Arcgis 10.2 水文模块从流域角度对水电站周围区域进行子流域划分, 并结合《金沙江向家坝水电站环境影响报告书》^[25], 合并水电站周围的四个子流域作为研究区来分析水电工程的影响, 如图 1 所示。研究区位于 $28^{\circ}29'37'' - 28^{\circ}45'52''N$ 和 $104^{\circ}14'45'' - 104^{\circ}38'22''E$ 之间。

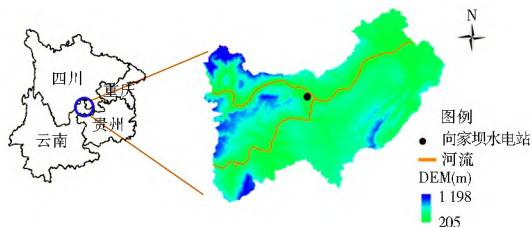


图 1 研究区及向家坝水电站位置
Fig. 1 Research area and the location of Xiangjiaba hydropower station

2 数据源及研究方法

2.1 数据源及面向对象分类

所用数据包括遥感影像数据、研究区的 DEM 数据以及当地土地规划等相关文件。研究区 DEM 数据由 30 m 分辨率的 GDEM DEM 影像裁剪得到, 遥感数据分别为 2006 年 Landsat 5 TM 影像数据和 2017 年 Landsat 8 OLI 影像数据。

对遥感影像进行辐射校正、大气校正等预处理, 利用 eCognition 8.7 软件对预处理结果进行分割和面向对象分类^[26], 使用的各指数如下。

(1) 归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index)。

$$I_{NDV} = (N_{IR} - R_{ED}) / (N_{IR} + R_{ED}) \quad (1)$$

式中: N_{IR} 为近红外波段; R_{ED} 为红光波段; I_{NDV} 为归一化植被指数, $I_{NDV} \in [-1, 1]$, 正值表示有植被覆盖, I_{NDV} 随植被覆盖度增大而增大^[27]。

(2) 归一化建筑指数 (Normalized Difference Build-up Index)。

$$I_{NDB} = (M_{IR} - N_{IR}) / (M_{IR} + N_{IR}) \quad (2)$$

式中: M_{IR} 为中红外波段; I_{NDB} 为归一化建筑指数, 值越高表示建筑密度越大^[28-30]。

(3) 改进归一化差异水体指数 (Modified Normalized Difference Water Index)。

$$I_{MNDW} = (GREEN - M_{IR}) / (GREEN + M_{IR}) \quad (3)$$

式中: $GREEN$ 为绿光波段; I_{MNDW} 为改进归一化差异水体指数, 水体的 I_{MNDW} ^[29-31] 运算结果为正, 其他类别结果为负。

(4) 裸土指数 (Bare Soil Index)。

$$I_{BS} = \frac{(M_{IR} + R_{ED}) - (N_{IR} + B_{LUE})}{(M_{IR} + R_{ED}) + (N_{IR} + B_{LUE})} \quad (4)$$

式中: B_{LUE} 为蓝光波段; I_{BS} 为裸土指数, 该指数可以很好地识别裸土, 将裸土和建筑区分开^[31-32]。

2.2 土地利用/覆盖变化分析

土地利用转移矩阵 (式(5)) 反映区域中土地利用类型的转化过程, 主要包含各类地物面积的转出

和转入信息^[33-34]。

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{11} & \dots & S_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & \dots & S_{nm} \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中: S 代表土地类型的面积; S_{ij} 代表转移前为 i 类的地物转变为 j 类的面积; n 代表土地利用类型数。 i 表示初期状态; j 表示末期状态, 即每一行表示初期一种土地类型转向其他类型的转出面积, 每一列表示末期一种土地利用类型来自其他类型的转入面积。

2.3 景观格局分析方法

在景观水平上选取 A_{WMPFD} (面积加权的平均斑块分形指数)、 A_{WMSI} (面积加权的平均形状因子)、 $CONTAG$ (蔓延度指数)、 MPS (平均斑块面积)、 $SHDI$ (香农多样性指数)、 I_{II} (散布与并列指数), 在类型水平上选取 CA (斑块类型面积)、 A_{WMPFD} 、 A_{WMSI} 、 MPS 、 A_I (聚集度)、 I_{II} 对不同年份和情景下的研究区进行景观格局分析。

2.4 CLUE-S 模型及土地利用/覆盖变化模拟

研究区土地利用变化是当地社会发展和水电工程共同驱动的结果, 为了分离两种驱动的影响, 通过控制 CLUE-S 模型中的参数, 以 2006 年土地利用为基础, 对“自然发展状态”下的研究区 2017 年土地利用变化做出模拟, 并对 2017 年(模拟)和 2017 年(真实)进行对比分析, 可在一定程度上得到向家坝水电工程对研究区土地利用与景观格局变化的影响。

2.4.1 CLUE-S 模型原理

CLUE-S 模型由输入模块和空间分配模块组成^[35-38], 其中, 输入模块包括四个部分: 土地政策与限制区域、土地利用类型转换规则、土地需求和空间

特征。其中空间特征用 Logistic 回归方法得到空间分布格局和各个驱动因子的定量关系见式(6):

$$\log\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ni} \quad (6)$$

式中: P_i 表示一个栅格出现种类为 i 的土地利用类型出现的概率; X 表示驱动因素; β 是回归系数, 表示土地类型和影响因子之间的定量关系。

2.4.2 驱动因子选取

CLUE-S 模型所需的驱动因子可以分为社会驱动因子和自然驱动因子, 自然因子一般为静态特征的因子, 如坡度、高程、区位特征等, 社会因子一般为动态特征的因子, 如人口、经济收入等。由于研究区并未按照行政区划分, 不能保证经济和人口等外部驱动因子的准确性, 故选取 6 种驱动因子见表 1。

表 1 主要驱动因子

Tab. 1 Main driving factors

驱动因子类型	驱动因子	主要说明
社会驱动因子	主要城镇	到主要城镇的距离文件
	铁路	到铁路的距离文件
	公路	到公路的距离文件
自然驱动因子	河流	距离主要河流的距离文件
	坡度	坡度文件
	高程	高程文件

将 6 种影响因子与 2006 年 6 种土地利用类型做二元 Logistic 回归, 利用 ROC 曲线验证所选影响因子对研究区土地利用是否存在影响, ROC 值为 0.5 表示模型为完全随机模型, ROC 值为 1 表示最优结果。最终选出每一类的最优影响因子进行后续模拟, 如表 2 所示, ROC 值最小为 0.673, 大于 0.6, 共有四个 ROC 值大于 0.85, 整体上所选影响因子确实对 6 种地类具有影响, 可以用作后续模拟过程。

表 2 二元 Logistic 回归 Beta 系数

Tab. 2 Beta coefficient of the binary logistic regression

影响因子	土地利用类型						
	水体	水田	园地/草地	林地	裸地	建筑区	耕地
高程	-0.053727	-0.005510	-0.002372	0.007369	0.00103	0.002183	-0.000149
坡度	N	-0.040618	0.018766	0.054533	-0.043801	-0.052936	-0.038331
距铁路距离	0.000077	0.000025	-0.000091	0.000086	0.000141	-0.000029	-0.000008
距城镇中心距离	0.000305	0.000328	0.000122	-0.000015	-0.000552	-0.000618	-0.000049
距主要公路距离	-0.000365	-0.000247	0.000099	-0.000086	-0.00022	-0.000474	0.000089
距河流距离	-0.000831	0.000253	0.0000741	0.000189	0.000309	-0.000247	-0.000253
常数项	15.250949	-3.155231	1.231717	-8.754371	-5.989622	0.702291	-0.469395
ROC 值	0.991	0.804	0.712	0.921	0.862	0.884	0.673

2.4.3 参数设置

土地需求设置。以 2006 年土地利用为初始状

态, 假设除水体以外其他土地利用类型的面积变化趋势与 2006-2017 年实际变化情况相同。

土地利用转化规则。水体不能转化为建筑区,其他各类均可以互相转化。

弹性参数设置。弹性参数 E_{LAS} 表示土地利用类型的稳定性(式(7)), E_{LAS} 为 0 表示该地类极易发生改变, E_{LAS} 为 1 表示该地类非常不容易转变。

$$E_{LASi} = 1 - \frac{(tran_{ia} + tran_{ib})}{tran_{iT}} \quad (7)$$

式中: $tran_{ia}$ 为 i 地物类型第一阶段转为其他类型的面积; $tran_{ib}$ 为 i 地物类型第二阶段转为其他类型的面积; $tran_{iT}$ 为初期该地物类型总面积。结合算出的 E_{LAS} 和研究区的各地类在发展过程中相互转化的实际情况, 得到最终的弹性参数: 水体为 0.89, 园地/草地为 0.77, 林地 0.79, 裸地为 0.43, 建筑区为 0.96, 耕地为 0.82。

3 结果与分析

3.1 面向对象分类结果及土地利用/覆盖变化结果分析

研究区 2006 年和 2017 年的土地利用分类结果见图 2 和图 3。

对面向对象分类结果做精度分析。总体样本数量为 750, 各类型样本所占比例由面积比重和分布情况综合考虑决定。2006 年和 2017 年总体精度与 Kappa 系数分别为 81.97%、0.784 和 83.13%、0.811, 可以满足后续分析。

各土地利用/覆盖类型间转化过程分析主要通过转移矩阵来实现。如表 3 所示, 在 2006-2017 年间, 水电站外部工程结束, 水库蓄水完毕, 大型工程施工和移民等活动会对周围区域产生影响。由于水

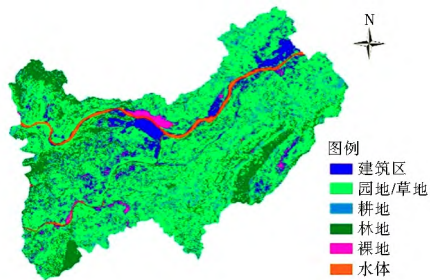


图 2 2006 年研究区土地利用分类

Fig.2 Land use classification of the study area in 2006

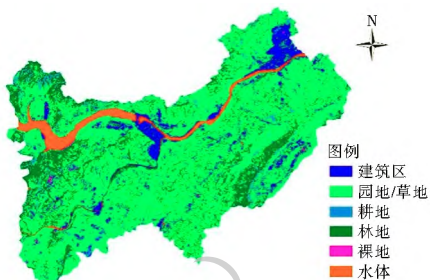


图 3 2017 年研究区土地利用分类

Fig.3 Land use classification of the study area in 2017

库蓄水, 所以水体面积增加 77.7%, 原有河流明显拓宽, 两岸边缘的园地/草地、耕地和建筑区转为水体; 林地继续减少和裸地重新利用导致园地/草地增加, 研究区东部与南部的零散耕地开始改为植被, 使得耕地面积出现大幅度下降, 但在分布上也更加集中。在修建水电站的过程中, 水富县及其周围的土地利用分布发生较大变化, 江北裸地逐渐变为建筑区与园地/草地, 两岸部分建筑区被水淹没, 城区内绿化增加, 建筑规模扩大; 此外人口迁移和主要道路更改, 宜宾县建筑区向北扩张, 周围耕地减少。裸地大幅下降 72.9%, 主要转为建筑区和植被, 变化区域主要位于研究区东南部和中部。

表 3 2006-2017 年土地利用转移矩阵

Tab.3 Land use transfer matrix from 2006 to 2017

项目	建筑区	园地/草地	耕地	林地	裸地	水体	2006 年统计
建筑区	1 455.39	1 799.19	137.16	40.05	57.42	210.87	3 700.08
园地/草地	1 869.48	19 735.38	1 272.51	2 215.35	581.22	663.3	26 337.24
耕地	182.88	4 716	727.74	1 364.4	97.2	62.64	7 150.86
林地	63.99	3 586.77	672.66	5 561.73	21.96	68.76	9 975.87
裸地	606.51	2 398.59	86.13	121.95	194.85	126.36	3 534.39
水体	87.66	15.12	1.62	0.81	5.22	1 203.3	1 313.73
2017 年统计	4 265.91	32 251.05	2 897.82	9 304.29	957.87	2 335.23	52 012.17

3.2 真实情况与假设情景的景观格局对比分析

利用 CLUE-S 模型进行模拟得到自然发展状态下的 2017 年(模拟)土地利用分布图(图 4)。

从景观水平对 2006 年、2017 年和 2017 年(模拟)景观格局进行分析, 可以明确整个景观水平上的变化规律。如表 4 所示, M_{PS} 为 $A < B < C$, 结合 S_{HDI} 和 I_{HJ} 的 $A > B > C$, 说明随着社会发展, 整体上都会

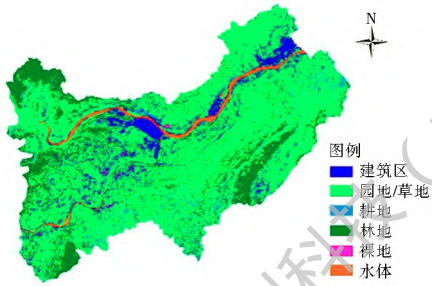


图4 2017年(模拟)研究区土地利用分布

Fig. 4 Land use classification of the study area in 2017 (simulation)

程在一定程度上减慢了这种趋势;对于 A_{WMPFD} 和 A_{WMSI} 的 $B < C$, 说明相较于自然发展, 工程体现出更加规则的整体形状;从 C_{ONTAG} 来看, $A < B < C$, C 的优势斑块之间连接性最好。综合各指标, 聚合化和形状复杂化是社会自然发展的趋势, 但水电工程会使得景观边界更加规则并减缓自然发展对整体的聚集作用。

从类型水平上对 2006 年、2017 年和 2017 年(模拟)景观格局进行分析, 可以明确不同景观类型的动态变化, 见表 5。由表 5 可知如下结果。

表4 2006、2017 年和 2017(模拟)研究区景观尺度分析

Tab. 4 Landscape scale analysis of the study area in 2006, 2017 and 2017(simulation)

年份	A_{WMPFD}	A_{WMSI}	$C_{ONTAG}(\%)$	M_{PS}	S_{HDI}	$I_{II}(\%)$
2006(A)	1.3216	45.9306	35.6972	1.4351	1.3978	66.4381
2017(B)	1.3278	35.4157	46.5772	1.8371	1.1831	65.4803
2017s(C)	1.3436	47.1594	47.5403	2.2300	1.1609	64.7690

表5 2006年、2017 年和 2017年(模拟)研究区类别尺度分析

Tab. 5 Type scale analysis of the study area in 2006, 2017 and 2017(simulation)

土地利用时间	类型	C_A	A_{WMPFD}	A_{WMSI}	M_{PS}	$A_I(\%)$	$I_{II}(\%)$
2006 年土地利用情况(a)	建筑区	3 700.08	1.1825	5.1198	0.6560	60.5368	53.3258
	园地/草地	26 337.33	1.4549	86.1760	12.3014	75.2871	83.8602
	耕地	7 150.95	1.1600	2.7879	0.5482	45.6860	43.3049
	林地	9 975.96	1.2158	6.2479	1.6571	73.2181	45.8733
	裸地	3 534.39	1.1235	2.2189	0.3851	44.1551	45.2400
	水体	1 313.82	1.2556	7.8154	5.9992	88.4506	71.0342
2017 年土地利用情况(b)	建筑区	4 265.91	1.1810	4.9181	0.6889	63.3094	52.7436
	园地/草地	32 252.4	1.4187	54.1929	17.2935	83.6839	82.5972
	耕地	2 898.45	1.1234	2.3707	0.3220	40.4365	49.7841
	林地	9 308.43	1.2028	5.6049	1.4522	71.0984	33.6129
	裸地	957.87	1.0776	1.4991	0.2305	30.2718	52.0100
	水体	2 335.23	1.1953	5.5466	3.3649	90.0933	78.7898
2017 年(模拟)土地利用情况(c)	建筑区	4 411.35	1.1723	4.7571	0.5519	56.9943	43.3286
	园地/草地	32 300.01	1.4343	72.7399	22.3684	84.0482	84.9976
	耕地	3 128.04	1.1570	2.7055	0.5419	45.4765	39.5712
	林地	9 794.97	1.2180	6.3154	1.9450	76.5794	39.9597
	裸地	1 024.38	1.1170	1.8988	0.3958	40.9534	40.6529
	水体	1 353.78	1.2481	7.4819	2.7572	84.7845	52.3424

水体是水电工程影响最明显的土地利用类型。 a 和 c 各指标更为接近, 水电工程建设下的研究区, 水体形状更加规则, 分布更加聚集, 水体斑块周围混杂了更多其他的地物。对于裸地, A_{WMPFD} 、 A_{WMSI} 和 A_I 均为 $a > c > b$, 而 M_{PS} 为 $c > a > b$, 水电工程建设下裸地会由于面积大幅减少而更加破碎且边缘变得复杂; I_{II} 为 $b > a > c$, 与自然发展状态下的变化趋势相反, 裸地斑块周围混杂更多其他地物。上述变化

与裸地大规模转化为建筑区等其他土地利用类型相关, 且较自然发展状态更加明显。对于建筑区, A_{WMPFD} 和 A_{WMSI} 均为 $a > b > c$, M_{PS} 和 A_I 为 $b > a > c$, 水电工程影响下的建筑区在面积增加的同时变得更加聚集, 但相较于自然发展状态, 形状更加复杂; I_{II} 为 $a > b > c$, 自然发展状态和实际变化下的建筑区斑块周围混杂地物趋向减少, 但水电工程建设减缓了这种趋势。

对于耕地, A_{WMPFD} 、 A_{WMSI} 、 M_{PS} 和 A_I 均为 $a > c > b$, I_{II} 为 $b > c$, 两种情景下耕地形状趋向规则, 斑块群之间分布较为离散, 水电工程影响增强了这种趋势, 相比原有的发展情景, 耕地斑块周围的其他地物分布更加复杂, 这也是耕地在分布和面积上收缩的结果之一。在研究区东南部和中部, 原本分散的耕地一部分消失且变得更加聚集。对于园地/草地, A_{WMPFD} 和 A_{WMSI} 均为 $a > c > b$, M_{PS} 和 A_I 均为 $a < b < c$, 随着社会发展, 研究区中园地/草地会由零散趋向聚集, 斑块之间更加紧凑, 边缘形状趋向规则, 而水电工程建设会使这种趋势更加明显; I_{II} 为 $b < a < c$, 意味着水电工程建设导致了园地/草地周围地物类型相比自然状态下更加单一, 与自然状态下的变化相反。对于林地, A_{WMPFD} 、 A_{WMSI} 、 M_{PS} 和 A_I 均为 $b < a < c$, 自然发展状态下林地会趋向聚集, 边缘破碎且复杂, 而水电工程建设导致相反的趋势, 研究区东南部与西部林地零散部分消失, 更加规则, 但整体上斑块之间趋向离散; I_{II} 为 $a > c > b$, 说明两种发展情景都会减少林地与其他地物的混杂, 但水电工程建设会加剧这种变化。

水电工程建设对建筑区和裸地的作用相对其他土地利用类型更加直接, 而水电工程会在一定程度上减缓社会发展使建筑区和裸地集中聚集的趋势, 导致形状复杂边缘破碎, 维持区域周围地物的混杂状态; 水电工程建设会增强自然发展对耕地的作用, 周围的其他地物分布更加复杂; 园地/草地斑块更加紧凑规则, 且周围地物类型相比自然发展状态下更加单一; 林地斑块更加规则且斑块之间趋向离散, 与自然发展作用相反。

4 结论

本文通过遥感、地理信息系统、景观格局分析和土地利用模拟等手段, 分析西南大型水电工程之一的向家坝水电站工程在修建过程中周围区域的 LUCC 和景观格局变化, 并通过 CLUE-S 模型以 2006 年土地利用分布为初始状态, 对“自然发展状态”下研究区 2017 年土地利用做出模拟, 可以在一定程度上分离研究区社会发展和水电工程修建两种因素的混合作用, 得到大型水电工程对研究区土地利用变化与景观格局的影响。得到如下结论。

在 2006 年至 2017 年间, 在水电工程和社会发展的双重作用下, 水库蓄水, 沿岸部分耕地和建筑区转为水体, 水体面积大幅度增加; 裸地得到开发利用, 分布减少, 面积下降 72.9%; 受到人口迁移等活动影响, 建筑区扩张明显, 城区内部更加聚集; 东部与南部

的耕地转为植被, 耕地面积下降, 分布集中; 林地分布更加聚集, 零散分布的林地主要转为园地/草地。

水电工程影响下各地类土地利用变化相较于“自然发展状态”, 除水体大幅增加外, 建筑区面积减少, 林地在河流沿岸及建筑区周围分布减少, 裸地转化为建筑区和园地/草地, 分布更加零散, 园地/草地分布范围扩大但面积略有下降, 且与林地之间交叉分布增多。景观水平上, 水电工程影响下研究区景观格局变化相较于“自然发展状态”, 形状更加规则, 自然发展对整体的聚集作用减弱; 类型水平上, 研究区不同地物类型景观格局变化相较于“自然发展状态”, 呈现出三种不同趋势: (1) 耕地与园地/草地呈现增强趋势, 即水电开发下主要景观指数与自然发展情景下变化方向相同且幅度更大; (2) 建筑区与裸地呈现延缓趋势, 即主要景观指数与自然发展情景下变化方向相同但幅度减小; (3) 林地呈现相反趋势, 即主要景观指数与自然发展情景下变化方向相反。

参考文献(References):

- [1] 陈百明, 刘新卫, 杨红. LUCC 研究的最新进展评述[J]. 地理科学进展, 2003(1): 22-29. (CHEN B M, LIU X W, YANG H. Review of most recent progresses of study on land use and land cover change[J]. Progress in Geography, 2003(1): 22-29. (in Chinese) DOI: 1007-6301(2003)01-0022-08.
- [2] 刘军会, 高吉喜, 耿斌, 等. 北方农牧交错带土地利用及景观格局变化特征[J]. 环境科学研究, 2007(5): 148-154. (LIU J H, GAO J X, GENG B et al. Study on the dynamic change of land use and landscape pattern in the farming pastoral region of Northern China[J]. Research of Environmental Sciences, 2007(5): 148-154. (in Chinese). DOI: 10.13198/j.res.2007.05.150.liujk.024.
- [3] 韩海辉, 杨太保, 王艺霖. 近 30 年青海贵南县土地利用与景观格局变化[J]. 地理科学进展, 2009, 28(2): 207-215. (HAN H H, YANG T B, WANG Y L. Dynamic analysis of land use and landscape pattern changes in Guinan county, Qinghai, in the past 30 years[J]. Progress in Geography, 2009, 28(2): 207-215. (in Chinese))
- [4] TURNER M G. Landscape ecology: The effect of pattern on process[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1989, 20: 171-197
- [5] ULBRICHT K A, HECKENDORFF W D. Satellite images for recognition of landscape and landuse changes [J]. ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 1998, 53(4): 235-243. DOI: 10.1016/S0924-2716(98)00006-9.
- [6] KRISTENSEN S P. Agricultural land use and landscape changes in Rostrup, Denmark: processes of intensification and extensification[J]. Landscape and Urban Planning, 1999. 46(1): 117-123. DOI: 10.1016/S0169-2046(99)00034-1.
- [7] 何鹏, 张会儒. 常用景观指数的因子分析和筛选方法研究[J].

- 林业科学研究, 2009(4): 470-474. (HE P, ZHANG H R. Study on factor analysis and selection of common landscape metrics [J]. Forest Research, 2009(4): 470-474. (in Chinese)) DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2009.04.001.
- [8] JAAFARI S, SAKICH Y, SHABANI A A et al. Landscape change assessment of reservation areas using remote sensing and landscape metrics (case study: Jajroud reservation, Iran) [J]. Environment, Development and Sustainability, 2016, 18(6): 1701-1717. DOI: 10.1007/s10668-015-9712-4.
- [9] 张映雪, 莫文波, 王勇, 等. 北京市高速公路周边土地利用变化对景观格局的影响[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(1): 28-38. (ZHANG Y X, MO W B, WANG Y et al. Impacts of land use changes on landscape patterns round expressways in Beijing [J]. Journal of Geoinformation Science, 2017, 19(1): 28-38. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.00028.
- [10] 刘宇, 吕一河, 傅伯杰. 景观格局土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性[J]. 生态学报, 2011, 31(1): 267-275. (LIU Y, LU Y H, FU B J. 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))
- [11] VERBURG P H, SOEPBOER W, VELDKAMP A. et al. Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: The CLUE-S Model [J]. Environmental Management, 2002, 30(3): 391-405. DOI: 10.1007/s00267-002-2630-x.
- [12] FOX J, VOGLER J B., SEN O L. et al. Simulating Land Cover Change in Montane Mainland Southeast Asia [J]. Environmental Management, 2012, 49(5): 968-979. DOI: 10.1007/s00267-012-9828-3.
- [13] 摆万奇, 张永民, 阎建忠, 等. 大渡河上游地区土地利用动态模拟分析[J]. 地理研究, 2005, 24(2): 206-212. (BAI W Q, ZHANG Y M, YAN J Z et al. Simulation of land use dynamics in the upper reaches of the Dadu river [J]. Geographical Research, 2005, 24(2): 206-212. (in Chinese)) DOI: 1000-0585(2005)02-0206-08.
- [14] 张永民, 赵士洞, VERBURG P H. CLUE-S 模型及其在奈曼旗土地利用时空动态变化模拟中的应用[J]. 自然资源学报, 2003, 18(3): 310-318. (ZHANG Y M, ZHAO S D, VERBURG P H. CLUE-S and its application for simulating temporal and spatial change of land use in Naiman Banner [J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(3): 310-318. (in Chinese)) DOI: 1000-3037(2003)03-0310-09.
- [15] 吴健生, 冯喆, 高阳, 等. CLUE-S 模型应用进展与改进研究[J]. 地理科学进展, 2012, 31(1): 3-10. (WU J S, FENG Z, GAO Y et al. Recent progresses on the application and improvement of the CLUE-S model [J]. Progress in Geography, 2012, 31(1): 3-10. (in Chinese))
- [16] LIANG Y, LIU L, HUANG J. Integrating the SD-CLUE-S and InVEST models into assessment of oasis carbon storage in northwestern China. [J]. Plos One, 2017, 12(2): e0172494. DOI: 10.1371/journal.pone.0172494.
- [17] JIANG W G, CHEN Z, LEI X et al. Simulation of urban agglomeration ecosystem spatial distributions under different scenarios: A case study of the Changsha Zhuzhou Xiangtan urban agglomeration [J]. Ecological Engineering, 2016, 88: 112-121. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.12.014.
- [18] WU M, REN X Y, CHE Y et al. A Coupled SD and CLUE-S model for exploring the impact of land use change on ecosystem service value: A case study in Baoshan district, Shanghai, China [J]. Environmental Management, 2015, 56(2): 402-419. DOI: 10.1007/s00267-015-0512-2.
- [19] 李文波. 基于 RS/GIS 的水电开发生态环境时空影响定量分析研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008. (LI W B. Quantitatively analyzing the spatiotemporal impacts of hydropower exploitation on environment with RS and GIS [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese))
- [20] 吴柏清. "3S"技术支持下的水电开发环境影响回顾评价—以雅砻江二滩水电站为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2010. (WU B Q. Environmental impact retrospective evaluation of hydropower development based on "3S" technologies—Cased by the Ertan Hydropower Station on the Yalong River [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [21] 谢小棠. 大中型水电站开发前后的土地生态环境效应研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015. (XIE X T. Study on land ecological environment effects before and after development of large and medium sized hydropower stations [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015. (in Chinese))
- [22] 赵清贺, 刘世梁, 张兆苓, 等. 漫湾水电开发对库区景观动态的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2343-2350. (ZHAO Q H, LIU S L, ZHANG Z L et al. Effects of Manwan hydropower exploitation on dynamic changes of landscape pattern in related reservoir area [J]. Journal of Ecology, 2011, 30(10): 2343-2350. (in Chinese)) DOI: 1000-4890(2011)10-2343-08.
- [23] 陈静. 向家坝工程扰动区的生态环境和景观变化的分析和评价[D]. 宜昌: 三峡大学, 2012. (CHEN J. A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Ecology [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2012 (in Chinese))
- [24] 曾旭, 陈芳清, 许文年, 等. 大型水利水电工程扰动区植被的生态恢复—以向家坝水电工程为例[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(11): 1074-1079. (ZENG X, CHEN F Q, XU W N et al. Vegetation restoration in disturbance area of large hydropower project [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(11): 1074-1079. (in Chinese)) DOI: 1004-8227(2009)11-1074-06.
- [25] 中南勘测设计研究院. 金沙江向家坝水电站环境影响报告书[Z]. 长沙, 2015. (Central South Survey and Design Institute. Environmental impact statement of Jinsha River Xiangjiaba Hydropower Station [Z]. Changsha, 2015. (in Chinese))
- [26] 郭鹏, 徐丽萍, 王玲, 等. 面向对象的玛纳斯河流域 TM 影像分类技术研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 120-124. (GUO P, XU L P, WANG L et al. Research for object oriented TM image segmentation and information extraction technology [J]. Research of Soil and Water Conservation 2013, 20(3): 120

124. (in Chinese) DOI: 1005 3409(2013) 03 0120 05.
- [27] 王倩, 杨太保, 杨雪梅. 伊犁河流域归一化植被指数的时空变化及其对气候的季节响应[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2016, 52(4): 466-474. (WANG Q, YANG T B, YANG X M. The spatio-temporal changes of normalized difference vegetation index and its response to seasonal climate in Ili River Basin[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2016, 52(4): 466-474. (in Chinese) DOI: 10. 13885/j. issn. 0455-2059. 2016. 04. 007.
- [28] 周春艳, 王萍, 张振勇, 等. 基于面向对象信息提取技术的城市用地分类[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(1): 31-35 (ZHOU C Y, WANG P, ZHANG Z Y, et al. Classification of Urban Land Based on Object-oriented Information Extraction Technology[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(1): 31-35. (in Chinese) DOI: 1004-0323(2008) 01-0031-05.
- [29] PERNOLLET C A, GUELMAMI A, GREEN A J. et al. A comparison of wintering duck numbers among European rice production areas with contrasting flooding regimes[J]. BIOLOGICAL CONSERVATION, 2015, 186: 214-224. DOI: 10. 1016/j. biocon. 2015. 03. 019.
- [30] POLYDOROS A, CARTALIS C. Use of Earth Observation based indices for the monitoring of built up area features and dynamics in support of urban energy studies[J]. Energy and Buildings, 2015, 98: 92-99. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2014. 09. 060.
- [31] 吴志杰, 赵书河. 基于 TM 图像的"增强的指数型建筑用地指数"研究[J]. 国土资源遥感, 2012(2): 50-55. (WU Z J, ZHAO S H. A Study of Enhanced Index-based Built up Index Based on Landsat TM Imagery[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2012, (2): 50-55. (in Chinese) DOI: 10. 6046/gtzyyg. 2012. 02. 10.
- [32] GAO Y C, GAN G J, LIU M F et al. Evaluating soil evaporation parameterizations at near instantaneous scales using surface dryness indices[J]. Journal of Hydrology. 2016, 541(8): 1199-1211. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2016. 08. 027.
- [33] 郝敬锋, 刘红玉, 李玉凤, 等. 基于转移矩阵模型的江苏海滨湿地资源时空演变特征及驱动机制分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1918-1929. (HAO J F, LIU H Y, LI Y F et al. Spatio-temporal variation and driving forces of the coastal wetland resources based on the transition matrix in Jiangsu province[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(11): 1918-1929. (in Chinese) DOI: 1000-3037(2010) 11-1918-12.
- [34] ZU O D P, XU Z X, YAO W Y et al. Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China[J]. Science of The Total Environment, 2016, 544: 238-250. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2015. 11. 060.
- [35] 冯仕超, 高小红, 顾娟, 等. 基于 CLUE-S 模型的湟水流域土地利用空间分布模拟[J]. 生态学报, 2013(3): 985-997. (FENG S C, GAO X H, GU J et al. Land use spatial distribution modeling based on CLUE-S model in the Huangshui River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, (3): 985-997. (in Chinese) DOI: 10. 5846/stxb201204280616.
- [36] 王丽艳, 张学儒, 张华, 等. CLUE-S 模型原理与结构及其应用进展[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(3): 73-77. (WANG L Y, ZHANG X R, ZHANG H et al. Principle and structure of CLUE-S model and its progresses[J]. Geography and Geo-Information Science, 2010, 26(3): 73-77. (in Chinese) DOI: 10. 1672/0504(2010) 03 0073-05.
- [37] 朱春娇. 基于 Markov 和 CLUE-S 模型的浦东新区土地利用变化趋势分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2015. (ZHU C J. Analyzing land use change and trend in Pudong New Area with Markov and CLUE-S model[D]. Shanghai: East China Normal University, 2015. (in Chinese)).
- [38] 李闻. 基于 CLUE-S 模型的土地利用模拟研究——以江苏省镇江市为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2010. (LI W. Simulation of land use based on CLUE-S model——a case study of Zhenjiang City, Jiangsu Province[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2010. (in Chinese))

(上接第 20 页)

- [12] 周洁, 董增川, 朱振业, 等. 基于 MIKE FLOOD 的洪泽湖周边滞洪区洪水演进模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 56-62. (ZHOU J, DONG Z C, ZHU Z Y, et al. Flood routing simulation of Hongze Lake detention basin based on MIKE FLOOD[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 56-62. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 05. 009.
- [13] 苑希民, 田福昌. 宁夏黄河防洪保护区洪水分析与风险图编制研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016. (YUAN X M, TIAN F C. Study on Flood Analysis and Risk Map Compilation of Yellow River Flood Control Area in Ningxia[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2016. (in Chinese))
- [14] 苑希民, 薛文字, 冯国娜, 等. 溃堤洪水分析的一、二维水动力耦合模型及应用[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(4): 53-58. (YUAN X M, XUE W Y, FENG G N, et al. A coupled one and two dimensional hydrodynamic model for analysis of levee breach flood and its application[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(4): 53-58. (in Chinese) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006 7647. 2016. 04. 010.