

拉西瓦水电站建设对区域景观格局与生境质量的影响

汪东川^{1,2}, 张 威¹, 王志恒¹, 陈俊合¹, 王 潇¹, 曹泽军¹, 邢 韬¹

(1.天津城建大学地质与测绘学院,天津 300384; 2.天津城建大学天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室,天津 300384)

摘要: 评价水电站建设对景观格局与生境质量的影响对改善当地生态环境质量、减少水土流失具有重要意义。以拉西瓦水电站周边区域为研究区,基于 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年土地利用和 DEM 等数据,利用移动窗口法分析水电站建设各时期景观格局指数的时空演变规律,结合 InVEST 模型研究生境质量的时空分布特征,探究水电站建设对周边区域景观格局与生境质量造成的影响。在此基础上,采用空间自相关方法分析生境质量的时空聚集模式,探讨高原地区水电站建设对周边区域生境质量时空聚集造成的影响。结果表明:(1)在 2005—2010 年水电站建设中期,景观格局指数空间分布发生明显变化,2000—2005 年水电站建设前期与 2010—2015 年水电站建设后期几乎不变。(2)研究区的生境质量数值为 0.3~0.7,在 2005—2010 年水电站建设中期,“中等”生境质量的面积占比由 35.15%变成 45.26%，“良好”生境质量的面积占比由 48.23%变成 40.28%。(3)2000 年、2005 年、2010 年、2015 年 4 期生境质量的 Moran's *I* 均为正值,在空间上呈现非随机性,“高一高”空间聚集主要为河流与裸土地地区,“低—低”空间聚集为稀疏草地与建设用地地区,2005—2010 年在水电站位置的西北区域,“不显著”空间聚集转为“低—低”空间聚集。

关键词: 青藏高原; 水电开发; 景观格局; 生境质量; 空间自相关

中图分类号: X87;TV741

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)03-0200-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.03.028

Impact of Laxiwa Hydropower Station Construction on the Regional Landscape Pattern and Habitat Quality

WANG Dongchuan^{1,2}, ZHANG Wei¹, WANG Zhiheng¹, CHEN Junhe¹,

WANG Xiao¹, CAO Zejun¹, XING Tao¹

(1.College of Geology and Mapping, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384;

2.Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384)

Abstract: Evaluation the influence of hydropower station construction on landscape pattern and habitat quality was of great significance to improve local ecological environment quality and reduce soil erosion. Taking the surrounding area of Laxiwa Hydropower Station as the research area, based on the land use and DEM data in 2000, 2005, 2010 and 2015, the temporal and spatial evolution law of landscape pattern index in each period of hydropower station construction was analyzed by the moving window method, and the temporal and spatial distribution characteristics of habitat quality were studied by combining with invest model, so as to explore the impact of hydropower station construction on the regional landscape pattern and habitat quality of surrounding areas. On this basis, the spatial autocorrelation method was used to analyze the spatial and temporal clustering degree of habitat quality, and the influence of hydropower station construction on the spatial and temporal clustering degree of habitat quality in surrounding areas in plateau area was discussed. The results showed that: (1) In the middle period of hydropower station construction from 2005 to 2010, the spatial distribution of landscape pattern index changed significantly, while that in the early period of hydropower station construction from 2000 to 2005 and the late period of hydropower station construction from 2010 to 2015 remained almost the same. (2) The habitat quality of the study area was mainly between 0.3 and 0.7, during the middle period of hydropower station construction from 2005 to 2010, the proportion of the area

收稿日期:2020-10-19

资助项目:第二次青藏高原科学考察项目(2019QZKK0608)

第一作者:汪东川(1972—),男,博士,教授,主要从事景观格局动态监测分析与模拟研究。E-mail:mrwangdc@126.com

通信作者:王志恒(1983—),男,博士,讲师,主要从事地理信息建模及地质灾害风险评估研究。E-mail:wzh19831221@163.com

with medium habitat quality increased from 35.15% to 45.26%, and the proportion of the area with good habitat quality increased from 48.23% to 40.28%. (3) Habitat qualities of Moran's I in 2000, 2005, 2010 and 2015 were all positive, showing non randomness in space. The "high—high" spatial aggregation was mainly river and bare land area, and the "low—low" spatial aggregation was mainly sparse grass and construction land area. From 2005 to 2010, the "insignificant" spatial aggregation turned to "low—low" spatial aggregation in the northwest of the hydropower station location.

Keywords: Qinghai Tibet Plateau; hydropower development; landscape pattern; habitat quality; spatial autocorrelation

人类活动对自然环境的干扰是水土流失的主要因素之一。随着景观生态学研究的不断深入,景观格局与水土流失间的紧密联系和相互作用日渐清晰,合理的景观格局有利于水分、养分的良性循环、生物生产力的提高和生态环境质量的改善,进而减少水土流失^[1]。

景观结构对土壤的侵蚀和沉积具有重要影响,水分和养分在生物中的循环和景观结构的特征密切相关。当前主要以数值形式研究景观格局演变规律,已在景观格局梯度^[2]、干热河谷^[3]和水电站开发^[4]等方面取得了众多成果。但景观格局分析主要聚焦于地物类型的变化,这种变化无法准确判断水电站建设对环境造成的优劣程度,因需了解生境质量的空间分布。生境质量是环境适宜性优劣的体现^[5],目前对生境质量评价的方法有 ARIES^[6]、MIMES^[7]、InVEST 等模型。InVEST 模型由于所需的数据易于收集,与 ArcGIS 平台的集成度高,便于绘图和空间分析^[8],因而在城市及区域生态安全^[9]、流域生境质量评价^[10]、自然保护区评价^[11]等方面得到了广泛的应用。现有生境质量的研究主要聚焦于不同生境质量分区的空间分布模式,对于生境质量的空间聚集特征探讨还相对欠缺^[12]。而基于 InVEST 模型评估结果,无法清晰地表达生境质量在空间上的关联程度^[13]。空间自相关分析是目前地物属性信息空间聚集程度最常用的研究方法,被广泛应用于生态学、经济学和流行病学研究等方面^[14]。运用此方法探究生境质量的时空聚集模式可以更加清楚地了解区域内地物关联程度,从而提出有针对性的环境保护措施。

综上,本文以拉西瓦水电站周边区域为研究区,基于 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年 4 期土地利用和 DEM 数据,利用移动窗口法分析水电站建设过程中景观格局指数分布的演变规律,利用 InVEST 模型探究水电站建设过程中生境质量的时空分布特征和变化规律,采用空间自相关分析生境质量的时空聚集程度,尝试探究青藏高原地区水电站建设对景观格局演变与生境质量的影响,为后期高原水电站建设

区域景观生态评价、水土流失防治和生态建设提供决策依据和科学参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

拉西瓦水电站是建设在黄河干流上的大型梯级水电站,位于贵德县拉西瓦镇(图 1)。水电站坝高 250 m,最大蓄水容量为 10.56 亿 m^3 ,总装机容量为 420 万 kW,是当前黄河流域装机容量最大的水电站。2004 年拉西瓦水电站开始建设招标与动工,2011 年年底竣工完成。水电站建成后将担负“西电东送”、大电网骨干调峰的任务^[15]。库区上下游地形起伏大,沟壑纵深,相对高差较大,气温、降雨量存在较大差距,从而形成了土壤和植被类型的地带性与非地带性垂直分异。该区属于生态环境脆弱区,其生态组成结构相对不稳定,对外界干扰反映敏感,定量分析各种景观指数变化尤其重要。

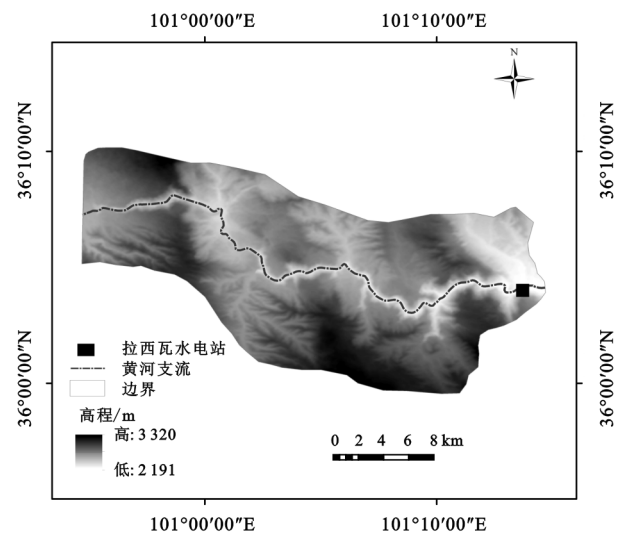


图 1 研究区概况

1.2 数据来源

本文的数据种类有:用于提取拉西瓦流域的 DEM 数据和用于土地利用信息提取的 Landsat 系列遥感数据,来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn>);用于遥感解译校正的数据,来源于野外实地调查、91 卫图、Google Earth 高清遥感影像。

依据拉西瓦水电站建设年份,选择 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年 Landsat 系列遥感数据。依据 DEM 数据进行流域提取,确定研究区边界。参考土地利用分类标准^[16],并根据土地利用解译规则,将研究区土地利用类型解译为裸土地、灌木、高覆盖度草地、耕地、河流、湖泊、沙滩、建设用地、稀疏草地 9 类

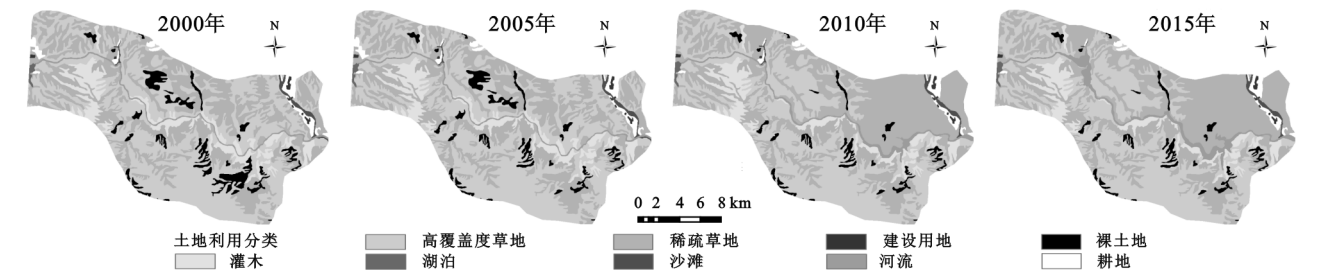


图 2 土地利用分类分布

1.3 研究方法

1.3.1 基于移动窗口法景观格局指数分析 利用移动窗口法分析景观格局的异质性不但解决了难以刻画具体格局空间形态的问题,同时还将空间信息明晰化^[17]。利用移动窗口法刻画景观格局指数的空间分布采用 Fragstats 4.2 软件完成。根据研究区的大小,通过对 30 m×30 m、100 m×100 m、200 m×200 m 窗口试验发现,100 m×100 m 窗口能更好反映研究区情况,因此本文采用 100 m×100 m 窗口对景观格局指数进行空间化,研究各个时期景观指数的区域差异。本文选择的景观格局指数有蔓延度指数 (CONTAG)、最大斑块指数 (LPI)、斑块形状指数 (LSI) 和斑块密度 (PD)。

1.3.2 基于 InVEST 模型生境质量评估 InVEST 模型评估生境质量的原理:假设生物多样性高的区域是生境质量好的区域;结合威胁因子、景观类型图与敏感因子计算生境质量。其用数值的大小表征生境质量的

空间分布,是无量纲综合性指标^[18]。计算公式为:

$$Q_{xj}=H_j(1-\frac{D^Z_{xj}}{D^Z_{xj}+K^Z}) \tag{1}$$

式中: Q_{xj} 为第 j 种景观类型 x 栅格单元的生境质量值; H_j 为第 j 种景观类型的生境适宜性分值; Z 为尺度常数; K 为半饱和常数; D_{xj} 为生境退化程度指数,计算公式为:

$$D_{xj}=\sum_{r=1}^R\sum_{y=1}^{Y_r}(\frac{W_r}{\sum_{r=1}^RW_r})r_yi_{rxy}B_xS_{jr} \tag{2}$$

式中: D_{xj} 为生境退化程度指数; R 为胁迫因子类别总量; W_r 为权重; Y_r 为胁迫因子的栅格单元总数; B_x 为栅格 x 的可达性水平; r_y 为栅格单元上的胁迫因子个数; S_{jr} 为景观 j 对胁迫因子的敏感性; i_{rxy} 为胁迫因子的影响距离,计算公式为:

$$i_{rxy}=1-\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \tag{3}$$

(图 2)。运用目视解译和监督分类解译 4 期遥感影像,依据野外实测数据和高分影像对解译的地物类型进行修改与验证,最终获得拉西瓦流域 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年土地利用空间数据。拉西瓦流域土地利用解译精度验证结果表明,4 期土地利用数据解译精度均达到 88% 以上,符合土地利用解译要求。

$$i_{rxy}=\exp(-\frac{2.99}{d_{rmax}}d_{xy}) \tag{4}$$

式中: d_{xy} 为栅格 x 与 y 间的线性距离; d_{rmax} 为威胁因子 r 的最大影响范围。

本研究在 InVEST 模型手册及相关研究基础上,结合研究区的实际情况来确定相关参数数值^[19],并设计输入参数(表 1 和表 2)。

表 1 各类地物景观对威胁因子的敏感度				
土地利用代码	地物名称	生境适宜性	耕地	建设用地
11	耕地	0.3	0	1.0
22	灌木	0.9	0.8	0.6
31	高覆盖度草地	0.8	0.8	0.6
33	稀疏草地	0.5	0.5	0.6
41	河流	1.0	0.3	0.7
43	湖泊	0.7	0.6	0.7
46	沙滩	0.7	0.7	0.7
52	建设用地	0	0	0
65	裸土地	0.7	0.1	0.9

注:本文将耕地与建设用地 2 类地物作为景观类型威胁因子。

表 2 区域威胁因子权重			
胁迫因子	最大影响距离	权重	衰退类型
耕地	10.0	1.0	线性衰退
建设用地	0.5	0.5	线性衰退

1.3.3 空间自相关分析 全局 Moran's I 指数:Moran's I 指数可以全面表征区域内各个单元的特定变量或属性在空间上的平均相关程度、空间分布模式以及显著性,计算公式为:

$$I=\frac{n}{\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^nw_{ij}}*\frac{\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^n(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2} \tag{5}$$

式中: x_i 和 x_j 为单元 i 、单元 j 所在空间位置,且 $i \neq j$; n 为单元的个数; $\bar{x}$ 为 n 个单元对应属性值的平均值 w_{ij} 为空间权重矩阵。Moran's I 指数值分布在

±1 之间,正负号分别表示变量在区域内呈正、负相关;趋于 0 表示不相关,呈随机分布。

局部 Moran's I ($LISA_i$) 指数表示局部观测变量在空间位置上的聚集模式,当 $LISA_i > 0$ 时,表示空间位置 i 上观测值变量以“高一高”或者“低—低”的模式聚集;当 $LISA_i < 0$ 时,表示空间位置 i 上观测值变量以“高一低”或者“低—高”的模式聚集。计算公式为:

$$LISA_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sum_i \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (6)$$

式中: x_i 和 x_j 为单元 i 、单元 j 所在空间位置,且 $i \neq j$; n 为单元的个数; $\bar{x}$ 为 n 个单元对应属性值的平均

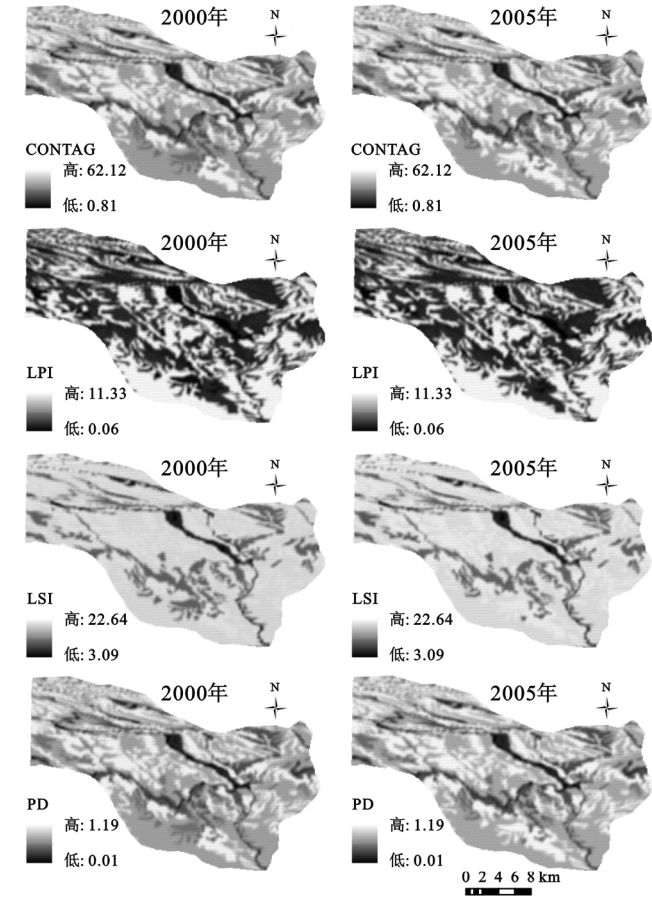


图3 景观格局指数空间分布

2.2 基于 InVEST 模型生境质量评估

InVEST 模型是用 0~1 连续变化的数值刻画研究区生境质量,其值越大,表示生境质量越高,生态系统功能越强;其值越小,表示生境质量越差,生态系统功能相对越差。为了直观描述生境质量信息,本次将连续变化的生境质量指数划分为 5 个区间,依次为 0~0.1,0.1~0.3,0.3~0.5,0.5~0.7,0.7~1.0。

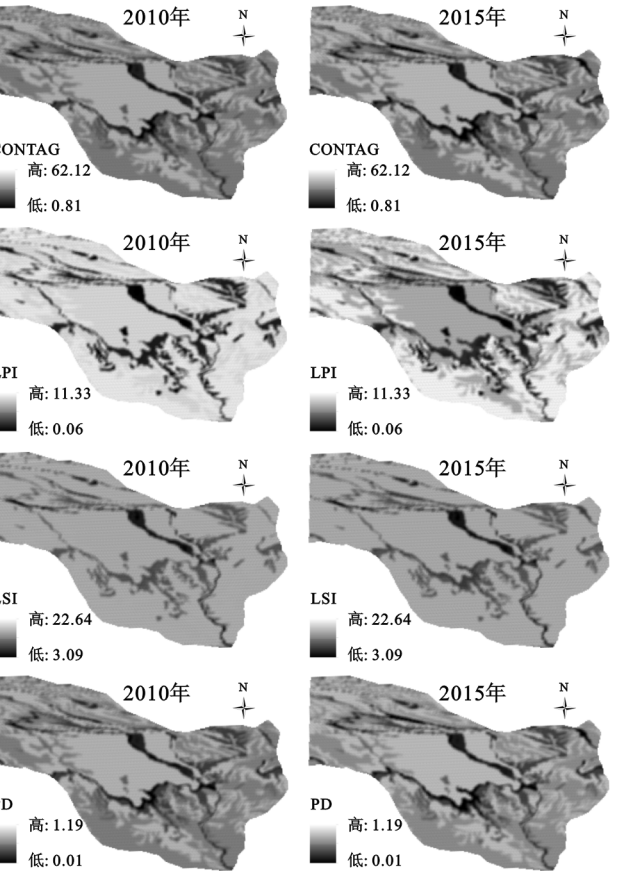
由表 3 可知,水电站周边区域生境质量数值主要在 0.3~0.7。2000 年与 2005 年水电站周边区域生境“良好”占比较多,2010 年与 2015 年水电站周边区域生境“中等”占比较多。由图 4 可知,生境质量“优等”的区域

值; w_{ij} 为空间权重矩阵。

2 结果与分析

2.1 基于移动窗口法的景观格局指数空间分布特征

由图 3 可知,水电站建设过程中,景观指数变化较大的时间段是 2005—2010 年,其原因主要是高覆盖度草地、河流与稀疏草地之间的地物转变。在 2000—2005 年、2010—2015 年时间段,景观格局指数基本不变,2000—2015 年景观格局指数的变化形式为“不变—变化—不变”。由此分析可知,水电站建设对整体的研究区景观格局产生一定影响,为了判断水电站建设对环境产生的优劣程度,还需进一步分析生境质量。



主要为河流,部分为灌木;生境质量“良好”主要为高覆盖度草地,部分为灌木;生境质量“中等”主要为稀疏草地;“较差”与“差”主要是建设用地与耕地。

表3 生境质量等级与所占百分比

等级	生境质量 区间	各等级生境质量 在不同年份所占比例/%			
		2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
差	0~0.1	5.86	4.57	3.36	3.22
较差	0.1~0.3	1.87	1.86	1.58	1.36
中等	0.3~0.5	33.79	35.14	45.26	44.91
良好	0.5~0.7	48.29	48.23	40.28	39.64
优等	0.7~1.0	10.19	10.20	9.52	10.87

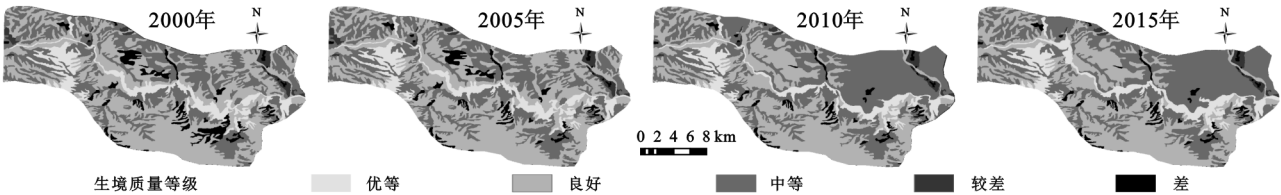


图 4 2000—2015 年生境质量分布

2.3 基于生境质量的空间自相关分析

2000 年、2005 年、2010 年、2015 年拉西瓦水电站周边区域生境质量空间分布并非表现出随机性，其 Moran’s *I* 分别是 0.58, 0.57, 0.57, 0.58, 在整体上表现出空间相关性，即生境质量呈现聚集状态。从局部分析可知，2000 年、2005 年、2010 年、2015 年生境质量指数呈高一高聚集的地区主要为河流（图 5）。生境质量指数呈现低—低聚集主要为裸土地与稀疏草地。其中，最明显的是，在靠近水电站位置的西北部

向上，大量不显著区域变成低—低聚集。出现空间聚集模式发生改变的主要原因可参考图 2、图 4、图 5 以及拉西瓦水电站建设时段进行探究，其主要是高覆盖度草地转变为稀疏草地，导致该区域生境质量从“良好”转变为“中等”，而空间自相关分析是基于生境质量分布结果上进行的，因而直观表达了整个研究区空间聚集模式的变化。2010 年与 2015 年研究区生境质量及其空间聚集模式变化较小，表明水电站建成后对环境造成微动的影响。

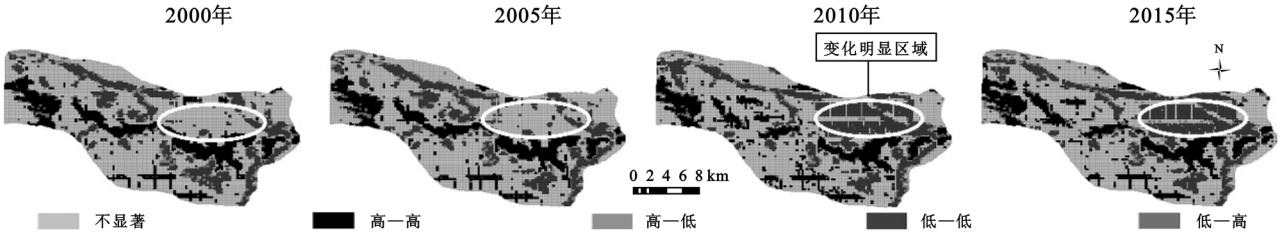


图 5 生境质量指数空间分布

3 讨论

研究水电站建设对环境的影响与减少水土流失对环境保护具有重要作用，在水土流失方面，有些学者通过某些景观类型判断水土流失的变化情况，如杨秋华等^[20]通过研究水电建设后流域面积的增量判断水土流失速率的变化，其指出流域面积增加速率与水土流失呈正相关。而本文整个时段流域面积变化为“不增—增—不增”，表明拉西瓦水电开发过程中，水土流失速率先增加后恢复稳定。

在景观格局与生境质量方面，有些学者从景观类型转移量进行判断，如肖志豪等^[21]研究皂市水电站建设对土地利用变化的影响，根据建站前与建站后的景观格局变化情况分析水电站对土地利用的影响；也有学者从整个研究区生境质量变化情况分进行判断，如王强等^[22]研究梯级水电开发对河流生境质量的影响，根据总的生境质量改变量分析水电开发对环境产生的生态效应。其结果很少定量研究某时间段地物变化，故在此基础上，本文将工程建设划分为 3 个时期，从 2000—2005 年建设前期、2005—2010 年建设中期和 2010—2015 年建设后期进行分阶段分析，分析景观转移情况，寻找变化规律，本研究发现，2005—2010 年建设中期地物景观发生突变。从整个建站过程中景观格局与生境质量变化情况可知，拉西瓦水电站建设对整体景观格局与生境质量产生了微动影响，

与李迪等^[23]从工程建设方面评估拉西瓦水电站对环境的影响结果相同。

在此结果上，本文利用空间自相关方法分析时空聚集特性及各个时段空间聚集特性变化情况发现，主要在河流流域与水电站建设附近位置的空间聚集特性发生改变。王芳等^[24]研究水电站开发与景观格局演变规律时指出，流域周边景观格局演变容易受到河流的影响而发生改变；刘世梁等^[25]研究水电站库区生境质量演变规律时指出，库区周边景观格局发生改变时，周边生境质量也会发生改变。因此，本次生境质量的空间自相关试验结果具有一定准确性。从整个建设过程可知，2005—2010 年水电站建设中期时空聚集模式变化较多，这也是水电站工程建设在开工前需要进行环境评测的原因之一。因此本文可为高原地区水电站建设提供参考依据。

由于数据限制和模型本身存在的局限性，本研究只选取了 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年来分析拉西瓦水电站建设对景观格局和生境质量造成的影响，但拉西瓦水电站建设时间为 2004—2011 年，所选影像时间节点（建设前、建设中、建设后）能够较好地反映水电站建设对环境造成的影响及其恢复情况。另外，本文主要以水电站建设对环境的主要影响因子，未考虑降雨与温度等其他次要因子，但根据中国气象网数据可知，水电站建设期间气候平稳，因此本文以水电开发为环境主要影

响因子是可行的。在后续研究工作中将进一步考虑更详细的影响因素,使结果更加精确,展开进一步研究。

4 结论

(1)在2005—2010年建设中期拉西瓦水电站景观格局指数的空间分布变化较大,主要原因是高覆盖度草地大量变成稀疏的草地,在2000—2005年建设前期和2010—2015年建设后期景观格局指数空间分布变化较小。

(2)生境质量的空间分布在2005—2010年建设中期变化较大,其在空间上的变化主要是由“良好”生境质量变成“中等”(“中等”的面积占比由35.15%变成45.26%，“良好”的面积占比由48.23%变成40.28%),对整体的生境质量造成了影响。生境质量的空间分布在2000—2005年建设前期与2010—2015年建设后期变化不明显。因此,从整个建设过程可知,拉西瓦水电站建设对环境的影响在承载范围之内。

(3)4个时期的拉西瓦水电站周边区域生境质量的Moran's I 分别为0.58,0.57,0.57,0.58,均是空间正相关。对局部空间自相关进行标准化处理,得到拉西瓦水电站周边区域生境质量聚集模式,其中2005—2010年间空间聚集模式变化明显,主要是水电站西北区域由不显著聚集变为低—低聚集,小部分区域高—高聚集变成低—低聚集。

参考文献:

[1] 冯舒,赵文武,陈利顶,等.2010年来黄土高原景观生态研究进展[J].生态学报,2017,37(12):3957-3966.

[2] 刘云龙,何理,聂倩文,等.水电能源开发对雅鲁藏布江流域景观格局的影响[J].水力发电,2020(2):1-5.

[3] 朱永国,舒安平,高小虎.干热河谷区边坡生态恢复技术对建设绿色水电站的重要性探索[J].水利发展研究,2017,17(7):41-43.

[4] 刘琦,刘世梁,赵清贺,等.基于移动窗口法的水电开发影响下景观格局梯度分析[J].山地学报,2012,30(5):628-635.

[5] 曹铭昌,刘高焕,单凯,等.基于多尺度的丹顶鹤生境适宜性评价:以黄河三角洲自然保护区为例[J].生物多样性,2010,18(3):283-291.

[6] Dardenne A, Fernandez C, Wagner A, et al. Benefits of standardizing the treatment of arrhythmias in the sheep (*Ovis aries*) model of chronic heart failure after myocardial infarction [J].Journal of the American Association for Laboratory Animal Science,2013,52(3):290-294.

[7] 刘园,周勇,杜越天.基于 InVEST 模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应[J].长江流域资源与环境,2019,28(10):2429-2440.

[8] Liang H, Zhao Y X, San Z G, et al. The recall alloresponse following retransplantation is more intense com-

pared with the T cell memory-transfer model [J].Immunological Investigations,2010,39(1):39-53.

[9] 黄智洵,王飞飞,曹文志.耦合生态系统服务供求关系的生态安全格局动态分析:以闽三角城市群为例[J].生态学报,2018,38(12):4327-4340.

[10] 白健,刘健,余坤勇,等.基于 InVEST-Biodiversity 模型的闽江流域生境质量变化评价[J].中国科技论文,2015,10(15):1782-1788.

[11] 包玉斌,刘康,李婷,等.基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响:以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J].干旱区研究,2015,32(3):622-629.

[12] 税燕萍,卢慧婷,王慧芳,等.基于土地覆盖和 NDVI 变化的拉萨河流域生境质量评估[J].生态学报,2018,38(24):8946-8954.

[13] 谢怡凡,姚顺波,邓元杰,等.延安市退耕还林(草)工程对生境质量时空格局的影响[J].中国生态农业学报,2020,28(4):575-586.

[14] 褚琳,张欣然,王天巍,等.基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测[J].应用生态学报,2018,29(12):4106-4118.

[15] 陈玉恒.黄河干流最大的水电站拉西瓦水电站可行性研究报告通过审查[J].中国建设信息,2002(11):46.

[16] 黄鹏程,张明明,王新宇,等.基于 Landsat-8 OLI 的西安市土地利用类型遥感分类研究[J].测绘与空间地理信息,2020,249(1):97-100,104.

[17] 田晶,邵世维,黄怡敏,等.土地利用景观格局核心指数提取:以中国广州市为例[J].武汉大学学报,2019,44(3):443-450.

[18] Gong J, Xie Y C, Cao E J, et al. Integration of In VEST-habitat quality model with landscape pattern indexes to assess mountain plant biodiversity change: A case study of Bailongjiang watershed in Gansu Province [J].Journal of Geographical Sciences,2019,29(7):1193-1210.

[19] 孙传淳,甄霖,王超,等.基于 InVEST 模型的鄱阳湖湿地生物多样性情景分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(7):1119-1125.

[20] 杨秋华,黄炎和,范胜龙,等.南方红壤丘陵区流域景观格局与水土流失的关系[J].福建农林大学学报,2017,46(3):329-335.

[21] 肖志豪,张垚,王敏,等.皂市水电站土地利用与景观格局变化[J].南昌大学学报,2013,35(2):120-124.

[22] 王强,庞旭,李秀明,等.水电梯级开发对河流生境质量及纵向连通性影响评价:以五布河和藻渡河为例[J].生态学报,2019,39(15):5508-5516.

[23] 李迪,张竞予.寒旱地区水电工程建设对环境影响的分析:以青海拉西瓦水电站为例[J].河南科技,2018(2):155-156.

[24] 王芳,陈芝聪,谢小平.太湖流域建设用地与耕地景观时空演变及驱动力[J].生态学报,2018,38(9):3300-3310.

[25] 刘世梁,尹艺洁,杨珏婕,等.漫湾库区景观破碎化对区域生境质量的影响[J].生态学报,2017,37(2):619-627.