

DOI: 10.5846/stxb201801060037

马世五, 谢德体, 张孝成, 彭正涛, 朱慧, 洪惠坤, 肖玖金. 三峡库区重庆段土地生态状况时空格局演变特征. 生态学报, 2018, 38(23): - .

Ma S W, Xie D T, Zhang X C, Peng Z T, Zhu H, Hong H K, Xiao J J. Spatiotemporal variation in the ecological status of the Three Gorges Reservoir area in Chongqing, China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): - .

三峡库区重庆段土地生态状况时空格局演变特征

马世五^{1,2,3}, 谢德体^{1,*}, 张孝成^{2,3}, 彭正涛^{2,3}, 朱慧^{2,3}, 洪惠坤⁴, 肖玖金⁵

1 西南大学资源环境学院, 重庆 400715

2 重庆市国土资源和房屋勘测规划院, 重庆 400020

3 国土资源部土地利用重点实验室重庆研究中心, 重庆 400020

4 西南大学地理科学学院, 重庆 400715

5 四川农业大学林学院, 温江 611130

摘要:以三峡库区重庆段为研究对象, 基于“基础-结构-效益-胁迫”框架构建了土地生态状况评估指标体系, 利用变异函数理论模型对研究区 2000 年、2009 年、2014 年土地生态状况综合指数进行了拟合分析, 通过空间自相关、冷热点分析及转移矩阵分析方法, 分析了 2000—2014 年研究区域土地生态状况的时空演化规律。结果表明: ①研究区土地生态质量呈现出库区腹地、库区中部、库区尾部依次降低的分布特征, 且 2000—2014 年呈现出快速恶化-缓慢逆转的变化过程。②研究区 2000—2014 年 $C_0/(C_0+C)$ 先减后增, 呈中等空间自相关, 表明结构性因素引起的空间异质性起主要作用, 但随机性因素对土地生态状况的空间分异影响亦不可忽视, 这与研究区 14 年来经济高速发展、人类对土地资源利用强度加剧以及区域自然灾害频发的实际情况相符。③从 Moran's I 值判断, 2000—2014 年三峡库区重庆段的土地生态状况在区域上一直处于较高的集聚状态, 2000—2009 年集聚增强, 2009—2014 年集聚减弱。④从冷热点分析结果来看, 2000—2014 年, 热点区域、冷点区域范围总体上均呈现出逐渐增加的趋势, 但在空间上表现出了一定的分异特征: 库区尾部的热点区域不断拓展, 而库区腹地的热点区域则表现出逐年减小的趋势; 且研究区热点区域主要集中分布在库区尾部的主城区和库区腹地万州区的中心城区, 冷点区域主要分布在库区腹地的巫山县、巫溪县、奉节县、开州区和库区中部的石柱县、丰都县、武隆区等土地利用程度相对较弱、植被覆盖相对较好地区。

关键词: 三峡库区; 土地生态状况; 时空演变; 转移矩阵; 冷热点

Spatiotemporal variation in the ecological status of the Three Gorges Reservoir area in Chongqing, China

MA Shiwu^{1,2,3}, XIE Deti^{1,*}, ZHANG Xiaocheng^{2,3}, PENG Zhengtao^{2,3}, ZHU Hui^{2,3}, HONG Huikun⁴, XIAO Jiu Jin⁵

1 College of Resources and Environments in Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Chongqing Land Resources and Housing Surveying and Planning Institute, Chongqing 400020, China

3 Chongqing Research Center of the Key Laboratory of land use under the Ministry of Land and Resources, Chongqing 400020, China

4 College of Geographical sciences in Southwest University, Chongqing 400715, China

5 Forestry College of Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, China

Abstract: The Three Gorges Reservoir Area (TGRA) of Chongqing is located in the throat area of the ecological barrier in the Yangtze River Basin, which is one of the key areas for biodiversity conservation in China. The ecological environment of the TGRA is directly related to the safety of the Three Gorges Project, stability of millions of immigrants, ecological security of the Yangtze River Basin, and sustainable development of the region's social economy. The study on the characteristics of the spatiotemporal evolution of land ecological status in the TGRA of Chongqing has certain reference value for further

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41671291, 31400457)

收稿日期: 2018-01-06; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xdt@swu.edu.cn

strengthening the regional land ecological environment protection, which is of great significance for the understanding and solution of the current national ecological security strategy issues that are highly concerned. The aim of the present study was to develop an index system for assessing the land ecological status of the TGRA of Chongqing using the "basic-structure-benefit-stress" framework, to use a theoretical model of variation to fit and analyze the comprehensive index of land ecological status in 2000, 2009, and 2014, and to use spatial autocorrelation to perform hot and cold spot analysis and transfer matrix analysis of the spatiotemporal evolution of land ecological status in the study area from 2000 to 2014. (1) The quality of the land ecological status in the study area shows the distribution characteristics of the inner section of the TGRA > the middle sections of the TGRA > the end sections of the TGRA, and the process of rapid deterioration-slow reversal was exhibited in the TGRA of Chongqing from 2000 to 2014. (2) The $C_0/(C_0+C)$ ratio initially decreased but then increased from 2000 to 2014, thereby indicating medium spatial autocorrelation and that spatial heterogeneity caused by structural factors played a major role in the spatial differentiation of land ecological status. However, the impact of random factors on the spatial heterogeneity of land ecological status cannot be neglected, which is consistent with rapid economic development, intensified use of land resources, and frequent occurrence of regional natural disasters during the past 14 years. (3) The evaluation of Moran's I values indicated that the land ecological status of Chongqing's TGRA during 2000—2014 has been in a high state of agglomeration, which increased during 2000—2009 and decreased during 2009—2014. (4) The areas of both the hot and cold spots generally increased from 2000 to 2014 but differed in spatial differentiation. The hot spots in the end section of the TGRA continuously increased, whereas the hot spots in the inner section of the TGRA continuously decreased. The hot spots were mainly concentrated in the main urban area in the end section of the TGRA and central urban area in the Wanzhou District, the inner section of the TGRA. The cold spots were mainly distributed in the inner sections of the TGRA in Wushan County, Wuxi County, Fengjie County, and the Kaizhou District and in the middle section of the TGRA in Shizhu County, Fengdu County, and the Wulong District, where the extent of land use is relatively low and vegetation coverage is relatively high. To some extent, the cluster characteristics of the hot and cold spots in the land ecological quality status reflect the differentiated land resource utilization policies and different regional development strategies of the TGRA of Chongqing.

Key Words: Three Gorges Reservoir Region; land ecological status; spatiotemporal evolution; transition matrix; hot spot; cold spot

中国正处于新型工业化、城镇化的关键时期^[1],人地矛盾愈发凸显,不合理的土地利用方式以及土地利用强度不断加大,部分区域土地生态系统遭受到严重的威胁和破坏,区域土地生态安全倍受关注。为保障我国国土资源安全和生态文明建设,实现国土资源管理从单纯的“数量管理”走向“数量管控、质量管理、生态管护”三位一体综合管护的转变,土地生态状况的调查与评估日益成为热点。土地生态状况和区域自然地理要素、社会发展状况密切相关。由于这些因素在空间分布上存在随机性与结构性,土地生态状况必然存在一定的空间关联性。因此,对区域土地生态状况的时空分异特征进行研究,有利于揭示研究对象之间的空间相互作用机制,对于区域的生态保护和土地管理政策制定具有重要的意义。

土地生态状况方面的研究源于对生态安全的研究,可追溯到 20 世纪 40 年代^[2],Aldo Leopold 提出了“土地健康”的概念并将其应用于土地功能状况的评价,为土地生态安全研究奠定了基础^[3]。1977 年,美国著名环境问题专家 Leister R. Brown 提出了“生态安全”这一概念^[4]。1996 年缔结的地球公约《面对全球生态安全的市民条约》,得到了 100 多个国家的 200 多万人签字,生态安全概念得到了国际社会的广泛认可^[5],自此,区域生态安全已成为国际上广泛关注的研究热点之一。随着生态安全研究的不断深入,生态安全研究引入到了土地科学领域,土地生态状况方面研究应运而生,国内外学者进行了大量的研究。国外关于土地生态状况方面的研究主要集中在土地生态质量概念与内涵^[6-7]、土地利用结构优化^[8-9]、土地生态评价指标^[10-11]及方法^[12]等方面。国内关于土地生态状况方面的研究,主要涉及土地生态质量^[13-14]、生态风险^[15-16]、生态安全^[17-20]、生态环境^[21]、生态脆弱性^[22]、生态适宜性和敏感性^[23-24]、生态退化^[25]等方面。然而,尽管国内外学

者在土地生态状况方面开展了大量研究,但仍存在以下不足:一是流域层面的土地生态状况评价指标尺度多为省或者县(区)行政单元,难以反映县(区)内部土地生态状况的局部差异;二是流域层面的土地生态状况评价指标体系过多地依赖统计年鉴等社会统计资料,对土地生态状况的自然属性重视不够,全面研究土地生态系统中本底、结构、效益和影响等方面的成果罕见;三是忽略了土地生态状况在空间上的聚集规律、关联模式和时间上的冷热程度变化等时空格局演变特征,难以揭示区域土地生态状况的驱动机制。鉴于此,本文选择三峡库区重庆段 2000 年、2009 年、2014 年 3 个时期以行政村为评价单元开展土地生态状况时空演变研究,构建基于“基础-结构-效益-胁迫”框架的区域土地生态状况评价指标体系,应用空间自相关、冷热点分析及转移矩阵分析方法开展流域层面的土地生态状况时空分异特征研究,以为破解三峡库区生态环境瓶颈要素制约,实现区域土地资源可持续利用和社会经济可持续发展提供决策参考。

1 研究区域概况与数据来源

1.1 研究区概况

三峡库区重庆段位于长江上游末端,地理范围在 $28^{\circ}31'—31^{\circ}44'N$ 、 $105^{\circ}49'—110^{\circ}12'E$ 之间。东南、东北与鄂湘交界,西南与川黔接壤,西北与川陕相邻,包括重庆市 22 个区、县(自治县)(图 1),幅员面积 46163.67 km^2 ,其下辖 112 个乡,322 个镇,140 个街道办事处;其中包括:库区腹地的“两区四县”:万州区、开州区、巫山县、巫溪县、云阳县、奉节县;库区中部的“三区三县”:涪陵区、长寿区、武隆区、石柱县、丰都县、忠县;库区尾部的江津区和主城 9 区^[26]。2014 年,户籍总人口 1989.31 万人,其中农业人口 1062.80 万人。2014 年三峡库区重庆段国民生产总值 9878.29 亿元,农民人均纯收入 9716 元。

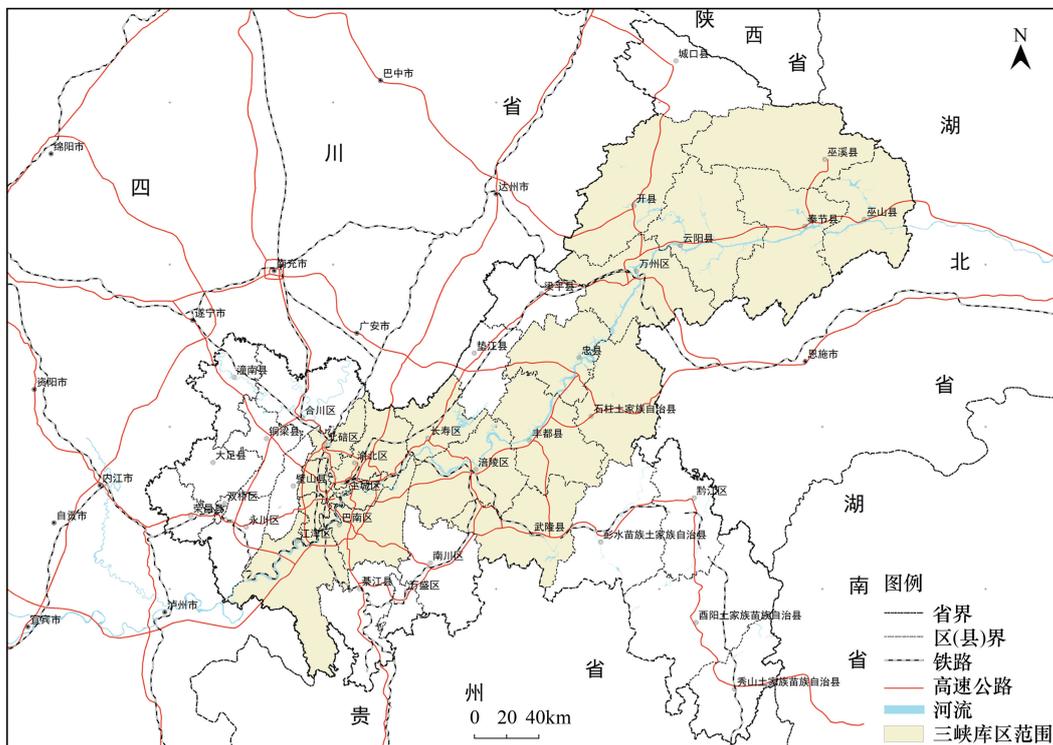


图 1 三峡库区位置图

Fig.1 The location of the Three Gorges Reservoir Area

研究区属于亚热带季风气候区,气候温和湿润,空气湿度大,降雨充沛,多年平均气温 $15—18^{\circ}C$ 。该地区处于大巴山褶皱带、川东褶皱带和川鄂湘黔隆起带三大构造单元交汇处,地形起伏剧烈。全区土壤类型主要有水稻土、紫色土、黄壤、石灰岩土、新积土、黄棕壤、棕壤、山地草甸土等。库区物种资源丰富,植被以亚热带

常绿阔叶林、暖性针叶林为主^[27]。

三峡库区具有重要的生态地理位置,位于长江流域生态屏障的咽喉地带,是中国 17 个具有全球保护意义的生物多样性关键地区之一。其生态环境的优劣,不仅直接关系到三峡工程的安全,百万移民的安稳致富,更关系到整个长江流域的生态安全与区域社会经济的可持续发展。三峡库区是长江上游主要的生态脆弱和敏感区之一,是中国乃至世界最为特殊的生态功能区,其生态环境问题对于三峡工程的长期安全运行、长江中下游的防洪与生态安全具有特殊的、重要的战略意义;而三峡库区重庆段面积则占了整个三峡库区面积的 85%,覆盖了大部分三峡库区范围,生态地理位置极其重要。

1.2 数据来源

本研究所用数据主要由 5 部分组成:1)重庆市国土房管局提供的研究区历年土地利用变更调查数据库、土地利用现状图(2000、2009、2014 年)、1:1 万 DEM 数据、多目标地球化学数据、农用地分等数据库、行政区划图、土地利用变更调查遥感影像及监测图斑实地调查信息等数据(2000、2009、2014 年);2)重庆市水利局提供的研究区水土流失强度类型图;3)重庆市气象局提供的 34 个气象监测点的监测数据(2000、2009、2014 年);4)重庆市农委提供的研究区土壤图和土壤报告等资料;5)其他社会经济数据来源于 2001 年、2010 年、2015 年三峡库区重庆段 22 个区县统计年鉴(表 1)。为便于空间运算,所有数据均转换为统一的坐标与投影系统,利用 ArcGIS 10.2、GeoDa 等软件进行数据的分析处理。

2 研究思路与方法

2.1 土地生态状况评价模型构建

2.1.1 指标体系构建

本研究遵循科学性、综合动态性、指标可获得及可操作性、灵敏性原则,综合三峡库区重庆段土地生态状况实际情况^[28-30],参照 20 世纪 80 年代末联合国环境规划署(UNEP)和经济合作开发组织(OECD)联合提出的“压力—状态—响应”(Pressure-State-Response,即 PSR)框架模型和联合国(UN)修改 PSR 模型后提出的“驱动力—状态—响应”(Driving Force-State-Response,即 DSR)框架模型^[10,31-32],并结合《生态环境状况评价技术规范》(HJ 192-2015),采用德尔菲法、相关分析法,充分运用国土、环保、林业、农业等领域 15 位专家深厚的专业理论知识和丰富的实践经验,从基础、结构、效益与胁迫角度出发选取 32 项指标构建土地生态状况调查与评估指标体系(表 1)。本研究构建的土地生态状况评估指标体系中,基础性指标反映区域气候、土壤、立地、覆被条件等土地自然生态背景;结构性指标表征土地生态系统的景观格局及其覆被类型所占比例和特点;效益性指标衡量土地生态系统的恢复能力、生产功能与社会价值;胁迫性指标反映土地生态系统的损毁、退化状况及其面临的社会经济压力。

2.1.2 指标标准化处理与权重确定

(1) 指标标准化处理

本研究中指标既有正向指标又有逆向指标,因此在进行指标的处理上有所区分。文中参照极差归一化法^[1]进行指标的标准化,其公式为:

$$\text{正向指标处理: } Y_{ij} = (1 - a) + a \frac{X_{\max j} - X_{ij}}{X_{\max j} - X_{\min j}} \quad (1)$$

$$\text{逆向指标处理: } Y_{ij} = (1 - a) + a \frac{X_{ij} - X_{\min j}}{X_{\max j} - X_{\min j}} \quad (2)$$

式中, Y_{ij} 为标准化后的值, X_{ij} 为第 i 年第 j 项指标的原始值, $X_{\max j}$ 和 $X_{\min j}$ 分别为相应指标的最大值和最小值, $a \in (0, 1)$, 一般取 0.9。

(2) 权重确定

本研究选取熵权法作为权重的处理办法,该法可以准确判断熵值的离散程度,较为客观而科学的进行赋

权^[33-34];并选取国土、环保、林业、农业等领域 15 位专家采用特尔菲法进行校核,综合确定区域土地生态状况评估指标的权重值(表 1)。

表 1 三峡库区重庆段土地生态状况评估指标体系

Table 1 The system of indexes table of land ecological status assessment in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing

准则层 Rule layer	指标层 Index layer	元指标层 Meta-index layer	权重值/% Weights	指标性质 Index properties	数据来源 Data sources	
基础性指标 Basic indicators	气候条件	年均降水量	1.98	逆	2000、2009、2014 年重庆市 34 个气象监测点的监测数据	
		土壤条件	土壤有机质含量	1.58	正	多目标地球化学数据、农业部门提供的土壤图和土壤报告等资料
	立地条件	有效土层厚度	2.51	正		
		土壤碳蓄积量水平	2.91	正		
		坡度	3.96	逆	1:1 万 DEM 数据	
	生态结构指标 Ecological structure indicators	景观格局指数	高程	5.71	逆	2000、2009、2014 年 MODIS 的 NDVI 产品
植被状况			植被覆盖度	4.4	正	
土地利用/覆盖指数			土地利用类型多样性指数	3.46	正	
生态效益指标 Ecological benefits indicators		土地利用/覆盖指数	土地利用格局多样性指数	3.64	正	2000、2009、2014 年土地利用变更调查数据库;重庆市农用地分等成果
			斑块多样性指数	3.21	正	
			高等别耕地比例	1.17	正	
			有林地与防护林比例	3.36	正	
		土地恢复	水面比例	1.31	正	
			生态基础设施用地比例	3.86	正	
			非渗透地表比例	4.41	逆	
生态胁迫指标 Ecological stress indicators	生产能力	未利用土地开发与改良面积年均增加率	1.71	正	2000、2009—2011、2014—2016 年土地利用变更调查数据库	
		水域湿地年均增加率	1.68	正		
		生态退耕年均比例	1.37	正		
	生态价值	人均粮食产量	4.02	正	2001、2010、2015 年三峡库区重庆段 22 个区县统计年鉴	
		人均林草地面积	2.48	正		
	土地损毁	地均生态服务价值	6.17	正	2000、2009、2014 年土地利用变更调查数据库及相关研究 ^[37]	
		土地损毁	压占土地比例	2.12		逆
		自然灾毁土地比例	1.68	逆		
		土壤侵蚀面积比例	3.57	逆		重庆市水土流失强度类型图
		土壤侵蚀程度	3.47	逆		
土地退化指数		耕地林地草地年均减少率	1.19	逆		
社会经济压力		距城镇工矿用地距离	湿地水域年均减少率	1.07		逆
	距交通主干道距离		5.73	正		
	人口密度	距交通主干道距离	5.16	正		
		GDP 年增长率	6.1	逆	2001、2010、2015 年三峡库区重庆段 22 个区县统计年鉴	
城镇化率	2.04	逆				
		城镇化率	2.97	逆		

2.1.3 综合指数测算

参照相关研究^[35-36],采用乘算模型对评价单元土地生态状况综合指数进行计算,公式如下:

$$LESI = \sum_{i=1}^n A_i \times W_i \quad (3)$$

式中,LESI 为某类指标的土地生态状况综合指数; A_i 为评价指标标准化值; W_i 为土地生态状况评价指标 A_i 的权重; n 为指标总项数。

2.1.4 土地生态状况质量判别标准

本研究采用系统聚类法计算模糊等价关系进行初始分类,再经 ISODATA 聚类法反复迭代进行研究区土地生态状况质量级别分类,并划分出质量优、质量良好、质量中等、质量较差、质量差等 5 个土地生态状况质量等级,详见表 2。

表 2 土地生态状况质量等级分级参数

Table 2 Quality grade grading parameters of land ecological status

质量等级 Quality grade	质量优 Excellent quality	质量良好 Good quality	质量中等 Medium quality	质量较差 Poor quality	质量差 low quality
评价指数分级范围 Evaluation index grading range	<0.3620	0.3620—0.3989	0.3989—0.4396	0.4396—0.5061	0.5061—0.7058

2.2 土地生态状况时空演变统计学方法

2.2.1 地统计学方法

目前,地统计学方法已成为生态安全空间变异性的一种有效方法。区域土地生态状况综合指数是一种空间变量,空间变化特征具有结构性和随机性,可以采用地统计学中空间变异函数的方法,借助半方差函数进行区域土地生态状况的空间分析^[38]计算公式如下:

$$r(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

式中, $r(h)$ 是半变异函数,揭示了整个尺度上的空间变异格局; h 为两样本点的空间分割距离; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 处的数值; $n(h)$ 为空间距离为 h 时的样本对数。

2.2.2 空间自相关

地理学第一定律指出:任何事物之间均相关,而离得较近的事物总比离得较远的事物相关性要高^[39],亦即地理实体由于受到空间吸引和空间扩散的影响而表现出一定的相关性^[40]。空间自相关分析是理论地理学的基本方法之一^[41],主要用来分析空间数据的统计性分布规律。全局自相关 Moran's I 是评价空间自相关统计的常用指标,用于验证整个研究区域土地生态状况的空间相关关系,判断其在空间上是否存在集聚,从而分析整个研究区的空间关联结构模式。Moran's I 指标的计算公式如下^[42-43]:

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij}} \quad (5)$$

式中, $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, x_i 表示第 i 地区的观测值, n 为栅格数, W_{ij} 为二进制的邻接空间权重矩阵,表示空间对象的邻接关系。 $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$; 当区域 i 和区域 j 相邻时, $W_{ij} = 1$; 当区域 i 和区域 j 不相邻时, $W_{ij} = 0$ 。Moran's I 一般介于 -1 到 1 之间,大于 0 为正相关,小于 0 为负相关,绝对值越大表示空间分布具有越强关联性,即空间上有强聚集性或强相异性。反之,绝对值越小,表示空间分布关联性较小,当值趋于 0 时,即代表此时空间分布呈随机性。

2.2.3 冷热点分析

$$G_i^*(d) = \sum_{j=1}^n W_{ij}(d) X_j / \sum_{j=1}^n X_j \quad (6)$$

冷热点分析是探索局部空间聚类分布特征的方法,通过计算要素集中每一个要素的 $Getis - OriidG_i^*$, 判别其是否存在高值聚类或低值聚类,并对其位置进行识别。 $Getis - OriidG_i^*$ 指数是刻画区域冷热点的常用指标,本研究用其反应区域之间土地生态状况指数的关联程度,其计算通过 ArcGIS 10.2 实现。 $Z(G_i^*) = (G_i^* - E(G_i^*)) / \sqrt{Var(G_i^*)}$, $Z(G_i^*)$ 的显著程度则用于识别不同区域热点与冷点的空间分布。参考相关研究^[26], 本文对 $Z(G_i^*)$ 通过 ArcGIS10.2 的自然间断点法分类,划分为热点区域、次热点区域、不明显区域、次冷点区域、冷点区域。

3 结果与分析

3.1 区域土地生态状况的时间演变

由图 2 和表 3 可以看出,2000 年土地生态状况质量优、质量良好、质量中等、质量较差、质量差土地面积分别占区域土地总面积的 35.59%、36.63%、21.13%、5.59%、1.06%,土地生态状况以质量优和质量良好为主。2000—2009 年,区域土地生态状况快速恶化,质量优、质量良好的土地面积出现不同程度的减少,其动态度分别为 -5.54% 和 -1.08%,而质量中等、质量较差、质量差的土地面积则大幅增加,其动态度分别为 6.65%、13.94%、17.26%,可见,质量较差、质量差的土地在该时期土地生态状况的恶化中起主导作用。2009—2014 年,土地生态状况变化较 2000—2009 年明显减缓,虽然质量差的土地面积进一步增加,质量优、质量良好、质量中等、质量较差土地却发生了逆转,其动态度分别为 1.4%、0.4%、-0.5%、-1.95%,表明在该时期土地生态状况有较为明显的改善,较 2000—2009 年表现出向质量优、质量良好转移的趋势。总体来说,尽管研究区

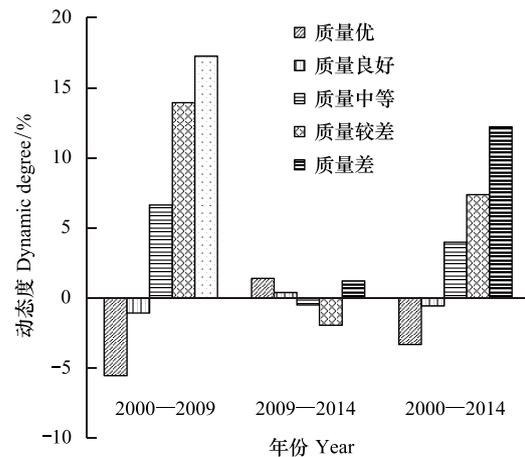


图 2 2000—2014 年三峡库区重庆段土地生态状况等别类型动态度

Fig.2 Dynamic degrees of different grades of land ecological status in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing during 2000—2014

2009—2014 年土地生态状况得到了一定改善,但 2000—2009 年土地生态状况的恶化幅度远大于其改善的幅度,导致区域 2000—2014 年土地生态质量总体呈恶化趋势,可见 2000—2009 年期间是区域土地生态安全状况变化的关键时段。这主要是由于 2000—2009 年期间三峡库区重庆段城镇化和工业化进程的加快,加剧了人地矛盾,农田、园地和未利用地都存在被不同程度开发占用的现象,进而导致土地生态环境受到越来越大的压力,生态系统稳定性逐步变差,土地生态质量亦随之下降。而随着近年来国家生态文明建设战略的大力实施和绿色发展理念的深入践行,区域土地生态环境得到的保护力度不断增强,这在一定程度上使区域 2009—2014 年期间土地生态质量得到了一定程度的改善。

3.2 区域土地生态状况的空间变化

3.2.1 空间位置分布变化

由图 3 可以看出,2000 年三峡库区重庆段土地生态状况较好的区域(质量优、质量良好)主要分布在库腹地区的巫山县、巫溪县、奉节县、开州区,库中地区的石柱县、武隆区、丰都县、涪陵区和库尾地区的巴南区 and 江津区;而土地生态状况较差的区域(质量较差、质量差)主要分布在库尾地区的渝中区、江北区、大渡口区、南岸区、九龙坡区、沙坪坝区和渝北区。

表 3 研究区 2000—2014 年各土地生态状况等别面积变化表

Table 3 The change table of different grades of land ecological status area in the study area from 2000 to 2014

土地生态状况等别 Quality level of land ecological status	2000 年面积 Area in 2000	2009 年面积 Area in 2009	2014 年面积 Area in 2014	2000—2009 年 During 2000—2009		2009—2014 年 During 2009—2014		2000—2014 年 During 2000—2014	
				面积 Area/hm ²	增加幅度 Increased amplitude/%	面积 Area/hm ²	增加幅度 Increased amplitude/%	面积 Area/hm ²	增加幅度 Increased amplitude/%
				质量优 Excellent quality	1642751.08	823833.68	881382.96	-818917.4	-49.85
质量良好 Good quality	1691063.07	1526453.05	1557222.77	-164610.02	-9.73	30769.72	2.02	-133840.3	-7.91
质量中等 Medium quality	975589.56	1559389.35	1520084.82	583799.79	59.84	-39304.53	-2.52	544495.26	55.81
质量较差 Poor quality	257846.01	581281.24	524618.94	323435.23	125.44	-56662.3	-9.75	266772.93	103.46
质量差 Low quality	49117.61	125410.01	133057.84	76292.4	155.33	7647.83	6.1	83940.23	170.9
总面积 Total Area	4616367.33	4616367.33	4616367.33	0	—	0	—	0	—

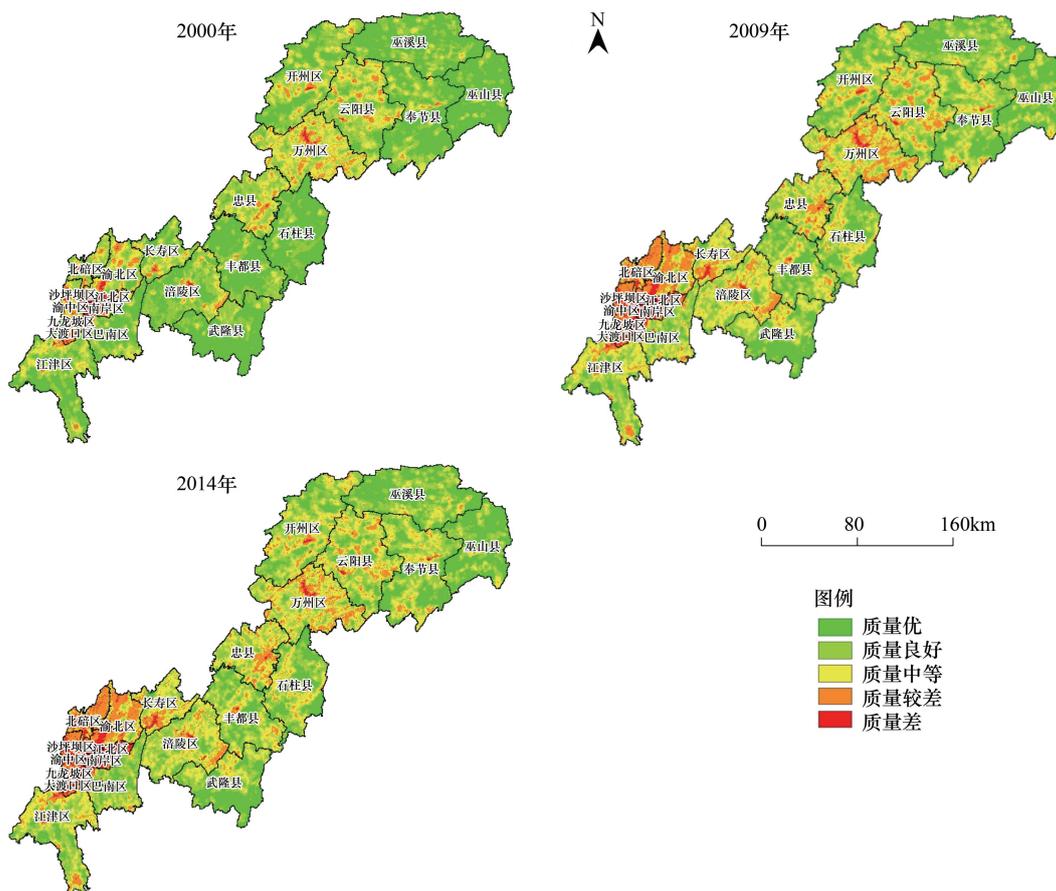


图 3 三峡库区重庆段土地生态状况等别分布

Fig.3 The space distribution of different grades of land ecological status in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing

2000—2009 年,研究区土地生态状况呈现出普遍恶化的趋势,土地生态状况较好的区域(质量优、质量良好)日渐萎缩,而土地生态状况较差的区域(质量较差、质量差)则快速拓展,库尾地区的北碚区、沙坪坝区、九龙坡区、渝北区、南岸区、大渡口区、江北区,库中地区的长寿区、涪陵区和库腹地区的万州区、云阳县的土地生态状况较差区域大幅度增加。可以看出,土地生态状况恶化速度较快地区均出现在区域土地城镇化、工业化较快地区,城镇化、工业化的快速发展,必然给土地生态环境的保护带来较大压力,保障发展与保护环境矛盾较大。

2009—2014 年,土地生态状况总体变化不明显,略有提升,库尾地区的巴南区、库中地区的涪陵区和库腹

地区的万州区、云阳县的土地生态状况较好的区域出现明显增加。

总体来看,区域土地生态质量呈现出库区腹地、库区中部、库区尾部依次降低的分布特征,土地生态状况较好区域主要分布在库区腹部的巫山县、巫溪县、奉节县、开州区以及库区中部的武隆区、丰都县、石柱县等土地利用程度相对较弱、植被覆盖好地区;库区尾部的主城九区,库区中部的涪陵区、长寿区及库区腹地的万州区等区域性中心城市的土地生态质量则相对较差;且 2000—2014 年土地生态状况动态变化特征也表现出类似特征,库区腹地、库区中部、库区尾部土地生态质量的下降幅度依次降低。

3.2.2 空间结构变异性分析

结合土地生态状况综合指数,运用 GS+地统计学软件对研究区土地生态状况进行变异函数理论模型的拟合,拟合结果见表 4。可以看出,2000 年、2009 年、2014 年研究区土地生态状况综合指数均为指数模型的拟合效果最佳。

土地生态状况的空间异质性受结构性因素和随机性因素(或称非结构性因素)的影响,随机性因素(外因)包括各种自然灾害以及人为活动等因素;而结构性因素(内因)包括气候、地形地貌、土壤类型、植被类型等主导区域土地生态安全状况的空间分布因素。块金值 C_0 的大小表示区域土地生态状况受随机性因素影响的程度;基台值(C_0+C)表示空间的最大变异程度; $C_0/(C_0+C)$ 表示随机性变异占总变异的比,该值可作为研究对象空间自相关的分类依据,若该比值小于 25%,属于强度空间自相关,说明因子具有很好的空间结构性,若比值在 25%—75%,属于中等程度空间自相关,若比值大于 75%,属于弱空间相关,反映随机部分引起的空间异质性程度起主要作用^[44]。本次研究中区域土地生态状况的块金效应逐步增强, C_0 从 2000 年的 0.00103 增加到 2014 年的 0.00139,随机性因素逐步增强;2000、2009 和 2014 年 $C_0/(C_0+C)$ 分别为 47.91%、41.91%、47.91%,表明区域土地生态状况属中等空间自相关,结构性因素引起的空间异质性起主要作用,但随机性因素对土地生态状况的空间分异影响亦不可忽视,这与三峡库区重庆段 14 年来经济高速发展、人类对土地资源利用强度加剧以及区域自然灾害频发的实际情况相符。从表 4 可以看出,2000、2009 和 2014 年研究区土地生态状况空间分异的变程分别为 2.79、3.72、5.34km,表明研究区土地生态状况的空间相关性范围在不断扩张。

表 4 研究区土地生态状况理论变异函数

Table 4 The variogram of land ecological status in the study area

时期 Period	模型 Model	C_0	C_0+C	A_0	$C_0/(C_0+C)$	R^2	RSS
2000	线性	0.001872	0.002192	235652.8	0.8540	0.102	1.198×10^{-6}
	球形	0.000010	0.002080	21600.0	0.0048	0.320	9.074×10^{-7}
	指数	0.001032	0.002154	27900.0	0.4791	0.514	6.485×10^{-7}
	高斯	0.000244	0.002088	18706.2	0.1169	0.324	9.026×10^{-7}
2009	线性	0.001972	0.002858	235652.8	0.6900	0.608	6.683×10^{-7}
	球形	0.001319	0.002648	108400.0	0.4981	0.936	1.238×10^{-7}
	指数	0.001114	0.002658	37200.0	0.4191	0.943	9.728×10^{-8}
	高斯	0.001314	0.002638	75517.4	0.4981	0.907	2.159×10^{-7}
2014	线性	0.001990	0.003083	235652.8	0.6455	0.788	4.252×10^{-7}
	球形	0.001403	0.002816	121600.0	0.4982	0.875	2.926×10^{-7}
	指数	0.001377	0.002874	53400.0	0.4791	0.925	1.509×10^{-7}
	高斯	0.000235	0.002630	21650.6	0.0894	0.548	9.123×10^{-7}

C_0 : 块金值, Nugget; C : 偏基台值, Partial Sill; C_0+C : 基台值, Sill; A_0 : 变程, Range; R^2 : 复相关系数平方, The square of Multiple correlation coefficient; RSS: 残差平方和, Residual Sum of Squares

3.2.3 空间结构关联性分析

(1) 空间自相关分析

本文利用 GeoDa 软件,根据 2000 年、2009 年和 2014 年土地生态状况综合指数的空间分布数据得出 Moran's I 散点图(图 4)。全局 Moran's I 值在各时期分别为 0.7001、0.7908 和 0.7970,表明研究区土地生态状

况存在较强的正相关现象,其空间分布并不是随机的,存在一定内在联系,即土地生态状况在空间上存在趋于集群的现象(图4)。亦即总体格局上,土地生态状况较好的区域倾向于与其他土地生态状况较好的区域相毗邻,而土地生态状况较差的区域倾向于与其他土地生态状况较差的区域相毗邻。可以看出,14年来,三峡库区重庆段土地生态状况的全局自相关程度整体逐渐增强,尤其是2000—2009年期间增加特别明显。

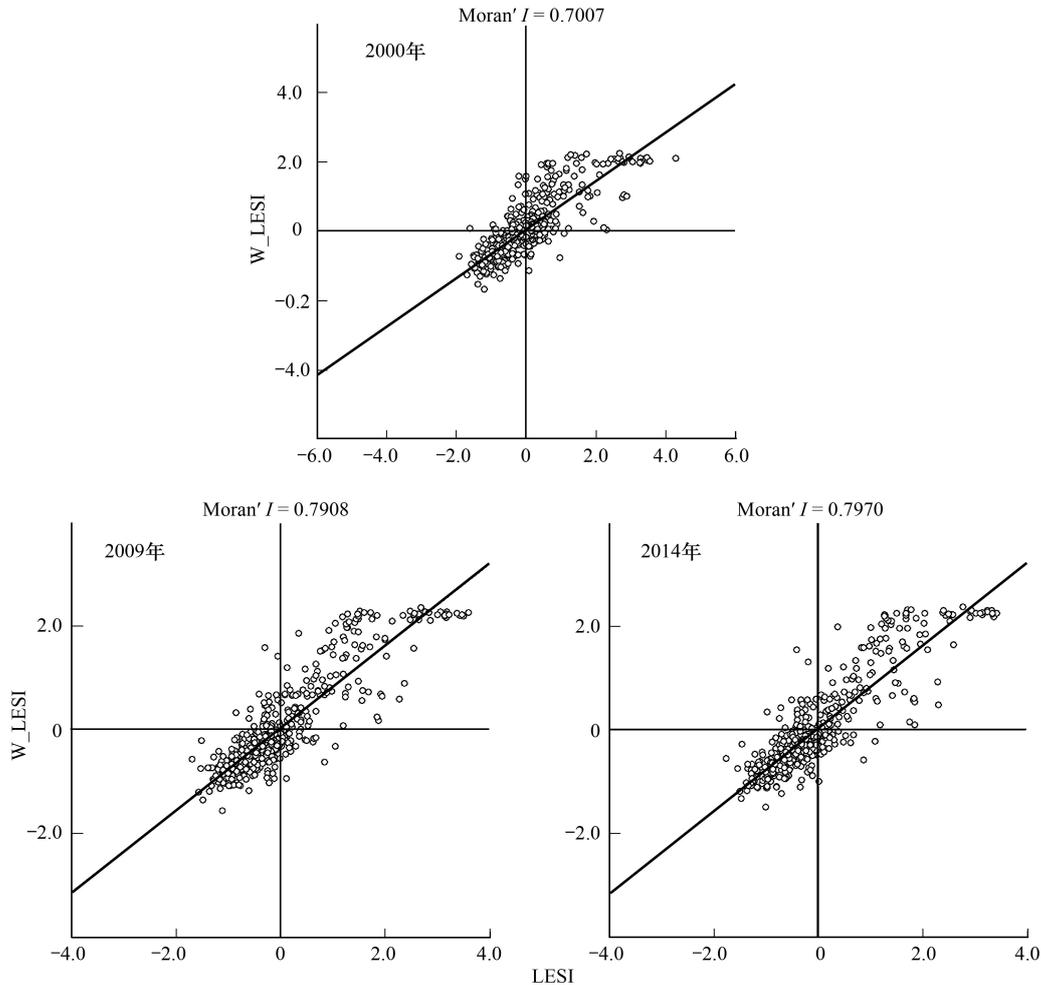


图4 土地生态状况综合指数 Moran 散点图

Fig.4 Moran scatter plot of Composite index of land ecological Status

LESI,土地生态状况综合指数,Comprehensive index of land ecological status

(2)冷热点分析

全局空间自相关指标虽能揭示区域土地生态状况的总体关联性特征,但不能用来测度相邻区域间的要素或属性的空间关联模式^[43],不能在时间变化的冷热程度上反映区域土地生态状况的变化特征,需借助冷热点分析方法进一步探索局部区域土地生态状况的关联程度。本研究通过对研究单元的土地生态状况综合指数进行冷热点分析,得到其冷热点的时空格局演化图(图5)。

从图5可以看出,2000年热点区域分布集中,主要集中分布在库区尾部的主城七区(沙坪坝区、九龙坡区、渝北区、南岸区、大渡口区、江北区、渝中区)和库区腹地万州区的中心城区。主城七区集中体现重庆作为国家中心城市的政治经济、历史文化、金融创新、现代服务业中心功能,是高端要素集聚、辐射作用强大、具有全国性影响的大都市中心区,而万州区亦是全市第二大城市、渝东北的区域中心城市,两者均是经济社会快速发展地区,人类土地利用活动剧烈,土地生态保护压力较大。冷点区域分布相对零散,主要分布在库区腹地的巫山县、巫溪县、奉节县和库区中部的石柱县、丰都县、武隆区和涪陵区,与这一时期的土地生态状况较好区域

(质量优、质量良好)分布基本一致。次热点区域主要集中分布在库区尾部的北碚区、渝北区、江津区和库区腹地万州区中心城区周围;次冷点区域仅有零星分布。

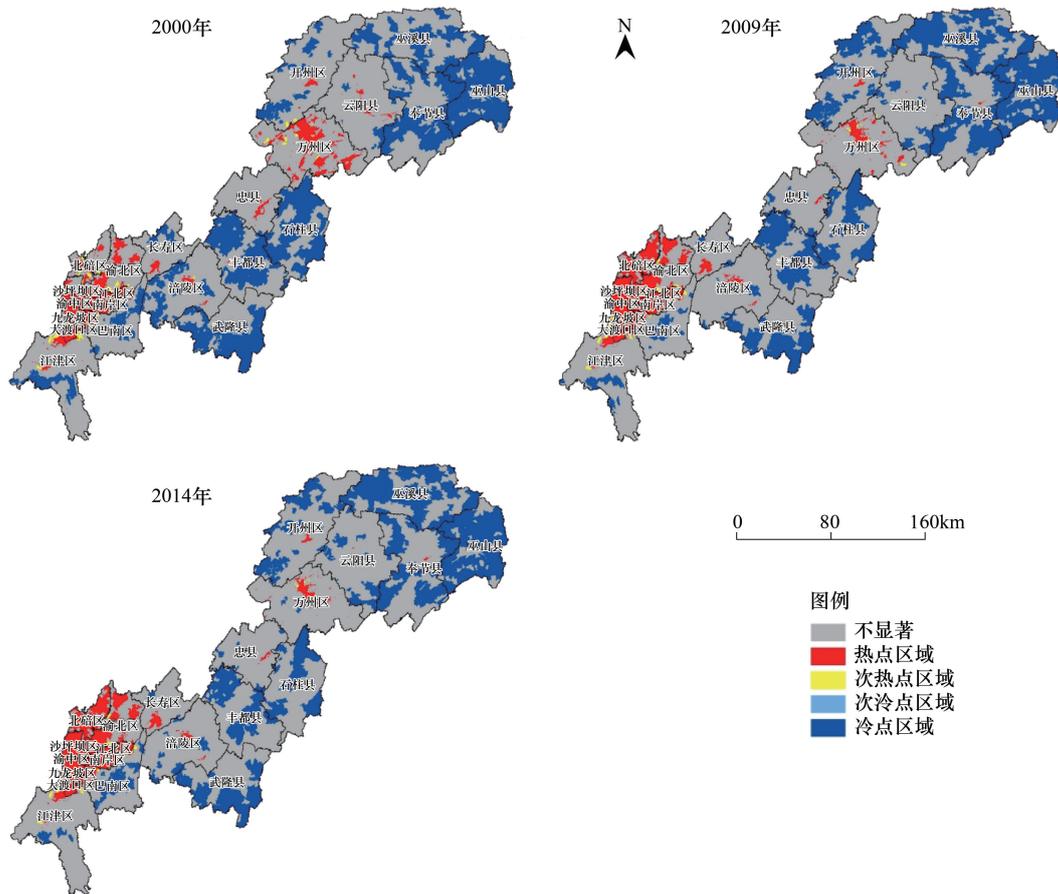


图5 三峡库区重庆段土地生态状况冷热点区域的时空格局演化

Fig.5 Spatial and Temporal Evolution of hot and cold spots of land ecological status in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing

2000—2009年研究区土地生态状况冷热点分布状况发生了明显变化,库区尾部的热点区域范围向渝北区、北碚区、沙坪坝区进一步扩大,库区腹地万州区的热点区域出现缩小趋势;而冷点区域则向库区腹地西北部的开州区及北部的巫溪县进一步拓展。位于热点拓展区域范围内的渝北区、北碚区,包含了内陆第一个国家级开放新区两江新区,受到了其高速发展的经济发展活动的影响,土地利用强度较大,区域土地生态保护面临较大压力。在冷点拓展区域范围内的开州区和巫溪县,受国家退耕还林工程、“天保工程”的大力实施,景观格局多样性逐步提高,土地生态状况逐步得到改善。

2009—2014年,位于库区尾部的主城九区(沙坪坝区、九龙坡区、渝北区、南岸区、大渡口区、江北区、渝中区、北碚区、巴南区)热点区域未发生明显变化,而在库区腹地万州区出现的热点区域范围则进一步缩小,主要受益于国家生态文明建设战略的大力实施和“走生态优先、绿色发展之路”、“共抓大保护,不搞大开发”等绿色发展理念的深入践行,库区腹地土地生态环境得到的保护力度不断增强。研究区冷点区域范围未发生明显变化,仍主要分布在库区腹地的巫山县、巫溪县、奉节县、开州区和库区中部的石柱县、丰都县、武隆县等植被覆盖相对较好地区。

3.3 土地生态状况的转移分析

运用 ArcGIS 10.2 对三期矢量图层进行叠加分析,得到三峡库区重庆段 2000—2009 年、2009—2014 年和 2000—2014 年时段不同土地生态状况等级之间的转移矩阵(表 5)。

由表 5 可以看出,2000—2009 年期间,不同土地生态状况等级之间的转移表现为:生态状况质量优、质量

良好、质量中等、质量较差的土地转移比重分别为 53.85%、57.76%、44.67%、39.29%，且转移比例最大的土地生态状况等别分别对应为质量良好、质量中等、质量较差和质量差土地；质量差的土地几乎未发生转移，仅有 1.38%，且全部转移为质量较差土地。可以看出，2000—2009 年土地生态状况处于快速恶化阶段。

2009—2014 年，不同土地生态状况等级之间的转移表现为：生态状况质量优、质量良好、质量中等、质量较差、质量差的土地转移比重分别为 5%、10.86%、11.63%、14.82% 和 3.44%，转移比重远小于 2000—2009 年期间，且转移比例最大的土地生态状况等别分别对应为质量良好、质量优、质量良好、质量中等、质量较差。由此可知，2009—2014 年区域土地生态状况逆转明显，区域土地生态状况快速恶化的势头得到了有效控制，也表明国家生态文明建设战略的实施在研究区取得了较好的效果。

总体来看，2000—2014 年期间，生态状况质量优、良好、中等、较差、差的土地转移比重分别为 51.19%、56.04%、42.19%、42.83% 和 1.8%，且转移比例最大的土地生态状况等别分别对应为良好、中等、较差、差和较差。不难发现，尽管区域土地生态状况在 2009—2014 年得到了一定程度改善，但并未从整体上改变区域土地生态状况，区域土地生态环境保护面临较大的压力。

表 5 研究区 2000—2014 年不同土地生态状况等级的相互转移/%

Table 5 Transfer matrix among different grades of land ecological status in the study area/%

年份 Year	土地生态状况等别 Quality level of land ecological status	质量优 Excellent quality	质量良好 Good quality	质量中等 Medium quality	质量较差 Poor quality	质量差 Low quality
2000—2009	质量优	46.15	44.06	9.78	0.01	0
	质量良好	3.74	42.24	48.99	5.03	0
	质量中等	0.26	8.95	55.33	34.73	0.73
	质量较差	0	0.37	11.82	60.71	27.1
	质量差	0	0	0	1.38	98.62
2009—2014	质量优	95	4.89	0.11	0	0
	质量良好	6.45	89.14	4.39	0.02	0
	质量中等	0.01	10.02	88.37	1.6	0
	质量较差	0	0	12.76	85.18	2.06
	质量差	0	0	0	3.44	96.56
2000—2014	质量优	48.81	43.29	7.89	0.01	0
	质量良好	4.54	43.96	46.7	4.8	0
	质量中等	0.3	10.39	57.81	30.23	1.27
	质量较差	0	0.48	14.25	57.17	28.1
	质量差	0	0	0	1.8	98.2

4 结论与讨论

本研究以三峡库区重庆段为研究对象，基于“基础-结构-效益-胁迫”框架构建了土地生态状况评估指标体系，计算了区域土地生态状况综合指数并划分土地生态状况质量等级，通过 CS+软件和 ArcGIS 地统计模块对研究区土地生态状况综合指数变异函数理论模型进行了拟合分析，在此基础上，通过空间自相关、冷热点分析和转移矩阵分析方法，以 2000 年、2009 年、2014 年为 3 个年份为基础，分析了 2000—2014 年研究区土地生态状况时空演变状况特征，结论及建议如下：

(1) 本研究构建的土地生态状况评估指标是借鉴 PSR、DSR 框架模型，从土地管理学、土地生态学角度出发，基于三峡库区重庆段自然生态基底与人类社会对生态环境需求而选取的评价指标，改变了以往流域尺度上土地生态状况评价中过多地依赖于社会经济统计资料而对土地生态状况自然属性重视不够的不足之处，能更加科学合理地表征三峡库区的土地生态状况。

(2)从时间演变上来看,14年来区域土地生态状况表现出快速恶化-缓慢逆转的变化过程。2000—2009年期间区域土地生态状况处于快速恶化阶段,9年来土地生态状况较差(质量较差、质量差)的土地面积增加了399727.63 hm²,年均增加率为14.47%;2009—2014年期间区域土地生态状况出现了缓慢逆转,5年来土地生态状况较差(质量较差、质量差)的土地面积为减少了49014.47 hm²,年均逆转率为1.39%。不难发现,尽管区域土地生态状况快速恶化的趋势得到一定程度缓解,土地生态状况安全形势依然严峻,在“十三五”期间乃至今后更远时期内,有关部门必须把实行最严格的生态环境保护制度落到实处,加强污染治理和生态保护、控制建设用地盲目扩张和水土流失、预防地质灾害、科学实施山水林田湖生态保护和修复工程、深化生态环境监管体制改革、完善国土空间开发保护制度、提高绿色发展水平,促进土地生态系统安全平稳运行,为社会经济可持续发展提供坚实保障。

(3)从空间分布上来看,区域土地生态质量呈现出库区腹地、库区中部、库区尾部依次降低的分布特征,土地生态状况较好区域主要分布在库区腹部的巫山县、巫溪县、奉节县、开州区以及库区中部的武隆区、丰都县、石柱县等土地利用程度相对较弱、植被覆盖好地区;而库区尾部的主城九区,库区中部的涪陵区、长寿区及库区腹地的万州区等区域性中心城市则由于近年来城镇化、工业化的快速发展导致其土地生态状况相对较差。可以看出,当前三峡库区的城镇化、工业化发展并未协调好与生态保护的关系,越是城镇化、工业化快速发展的地区,土地生态安全水平越低;在未来的土地利用中,必须更加注重推进新型工业化、新型城镇化建设,创新发展理念,转变发展方式,从而实现经济发展和生态保护的高度统一。

(4)从区域土地生态状况变化的冷热点格局来看,2000—2014年,热点区域主要集中分布在库区尾部的主城九区(沙坪坝区、九龙坡区、渝北区、南岸区、大渡口区、江北区、渝中区、北碚区、巴南区)和库区腹地万州区的中心城区;冷点区域主要分布在库区腹地的巫山县、巫溪县、奉节县、开州区和库区中部的石柱县、丰都县、武隆区等植被覆盖相对较好地区。研究表明,冷热点分布在空间上存在趋于集群的现象,尽管热点区域、冷点区域在2000—2014年范围总体上呈现出逐渐增加的趋势,但在空间上亦表现出了一定的分异特征:库区尾部的热点区域范围不断拓展,而库区腹地的万州区热点区域范围则表现出逐年减小的趋势。近年来,重庆市在深入贯彻国家“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念基础上,大力实施实施差别化国土资源政策,在主城九区,不断完善城市功能,优化产业结构,不断打造内陆重要的先进制造业和现代服务业基地、长江上游地区的金融中心和创新中心、内陆地区对外开放的重要门户和现代化大都市;在库区腹地则把生态文明建设放在更加突出的地位,加快经济社会发展与保护生态环境并重,着力引导人口相对聚集和超载人口梯度转移,着力涵养保护好三峡库区的青山绿水,实现库区人民安稳致富,建设天蓝、地绿、水净的美好家园。可见,土地生态质量状况的冷热点集群变化特征在一定程度上反映了全市差别化的国土资源政策和发展战略。

(5)本研究构建基于“基础-结构-效益-胁迫”模型的土地生态评估指标体系和采用空间变异函数模型、空间自相关分析、热冷热点分析方法的研究适用于区域土地生态状况时空变化特征的诊断,有利于促进区域土地生态环境的保护和改善。但是,研究未对土地生态状况变化特征的驱动因素或影响机理进行分析,区域土地生态状况变化特征的驱动因素分析是今后值得进一步研究的方向。此外,本研究中采用极差归一化法进行指标的标准化处理,未考虑指标阈值问题,而土地生态状况评估指标阈值的确定是一个长期的复杂的学术问题,目前学术界对指标阈值问题尚未形成一定的定论,还有待进一步深入探讨和验证,笔者将在以后的研究中,进一步探索评估指标体系的阈值确定问题。

参考文献 (References):

- [1] 洪惠坤,廖和平,李涛,杨俊,谢德体. 基于熵值法和 Dagum 基尼系数分解的乡村空间功能时空演变分析. 农业工程学报, 2016, 32 (10): 240-248.
- [2] 王根绪,程国栋,钱鞠. 生态安全评价研究中的若干问题. 应用生态学报, 2003(09): 1551-1556.
- [3] Rapport D J. Ecosystems not optimized; a reply. Journal of Aquatic Ecosystem Health, 1993, 2(1): 57-57.
- [4] Brown L R. Building A Society of Sustainable Development. Beijing: Scientific and Technological Literature Press, 1984.
- [5] Eckersley R. Environmental security dilemmas. Environmental Politics, 1996, 5(1): 140-146.

- [6] Newman E I. Applied Ecology & Environmental Management. 2nd ed. Oxford, UK: Blackwell Science, 2000.
- [7] Thomsen M, Faber J H, Sorensen P B. Soil ecosystem health and services-evaluation of ecological indicators susceptible to chemical stressors. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 67-75.
- [8] Allan I, Peterson J. Spatial modelling in decision support for land-use planning: a demonstration from the Lal Lal Catchment, Victoria, Australia. *Geographical Research*, 2002, 40(1): 84-92.
- [9] Makowski D, Hendrix E M T, van Ittersum M K, Rossing W A H. A framework to study nearly optimal solutions of linear programming models developed for agricultural land use exploration. *Ecological Modelling*, 2000, 131(1): 65-77.
- [10] FAO. Land Quality Indicators and Their Use in Sustainable Agriculture and Rural Development: Proceedings of the Workshop Organized by the Land and Water ... January 1996 (FAO land & Water Bulletin; 5). Rome: FAO, 1997: 2-5.
- [11] Hammond A L, Adriaanse A, Rodenburg E, Bryant D, Woodward R. Environmental Indicators: A Systematic Approach to Measuring and Reporting on Environmental Policy Performance in the Context Of Sustainable Development. Washington, DC, USA: World Resources Institute, 1995.
- [12] De Lange H J, Sala S, Vighi M, Faber J H. Ecological vulnerability in risk assessment—a review and perspectives. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(18): 3871-3879.
- [13] 徐昌瑜, 陈健, 孟爱农, 周生路. 基于FRAGSTATS的区域土地生态质量综合评价研究——以江苏省宜兴市为例. *土壤*, 2013, 45(2): 355-360.
- [14] 吴滢滢, 吴绍华, 周生路, 林晨, 臧玉珠, 彭慧. 昆山市土地生态质量空间分异及其对土地利用程度的响应. *水土保持研究*, 2015, 22(4): 201-205, 209-209.
- [15] 叶长盛, 冯艳芬. 基于土地利用变化的珠江三角洲生态风险评价. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 224-232.
- [16] 刘勇, 邢育刚, 李晋昌. 土地生态风险评价的理论基础及模型构建. *中国土地科学*, 2012, 26(6): 20-25.
- [17] 孙丕苓, 杨海娟, 刘庆果. 南水北调重要水源地的土地生态安全动态研究——以陕西省商洛市为例. *自然资源学报*, 2012, 27(9): 1520-1530.
- [18] 黄辉玲, 罗文斌, 吴次芳, 李冬梅. 基于物元分析的土地生态安全评价. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 316-322.
- [19] 余敦, 陈文波. 基于物元模型的鄱阳湖生态经济区土地生态安全评价. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2681-2685.
- [20] 高杨, 黄华梅, 吴志峰. 基于投影寻踪的珠江三角洲景观生态安全评价. *生态学报*, 2010, 30(21): 5894-5903.
- [21] 程晋南, 赵庚星, 李红, 唐秀美, 索秋魁. 基于RS和GIS的土地生态环境状况评价及其动态变化. *农业工程学报*, 2008, 24(11): 83-88.
- [22] 许倍慎, 周勇, 徐理, 聂艳, 于雷. 湖北省潜江市土地生态脆弱性时空分析. *中国土地科学*, 2011, 25(7): 80-85.
- [23] 赵小娜, 宫雪, 田丰昊, 李明玉. 延龙图地区城市土地生态适宜性评价. *自然资源学报*, 2017, 32(5): 778-787.
- [24] 吴金华, 李纪伟, 朱鸿儒. 基于ArcGIS区统计的延安市土地生态敏感性评价. *自然资源学报*, 2011, 26(7): 1180-1188.
- [25] 袁金国, 王卫, 龙丽民. 河北坝上生态脆弱区的土地退化及生态重建. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(2): 139-143.
- [26] 张广纳, 邵景安, 王金亮, 倪九派, 谢德体. 三峡库区重庆段农村面源污染时空格局演变特征. *自然资源学报*, 2015, 30(7): 1197-1209.
- [27] 李月臣, 刘春霞, 赵纯勇, 王才军, 张虹, 闵睫, 汪洋. 三峡库区(重庆段)土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异特征. *生态学报*, 2009, 29(2): 788-796.
- [28] 洪惠坤, 廖和平, 魏朝富, 李涛, 谢德体. 基于改进TOPSIS方法的三峡库区生态敏感区土地利用系统健康评价. *生态学报*, 2015, 35(24): 8016-8027.
- [29] 周启刚, 张晓媛, 王兆林. 基于正态云模型的三峡库区土地利用生态风险评价. *农业工程学报*, 2014, 30(23): 289-297.
- [30] 魏兴萍. 基于PSR模型的三峡库区重庆段生态安全动态评价. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1095-1099.
- [31] 全川. 环境指标研究进展与分析. *环境科学研究*, 2000, 13(4): 53-55.
- [32] Walz R. Development of environmental indicator systems: experiences from Germany. *Environmental Management*, 2000, 25(6): 613-623.
- [33] 刘利霞, 王凤兰, 徐永新. 基于熵权法的区域农村饮水安全评价——以云南省为例. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(1): 99-103.
- [34] 马世五, 谢德体, 张孝成, 彭正涛, 洪惠坤, 罗卓, 肖玖金. 三峡库区生态敏感区土地生态安全预警测度与时空演变——以重庆市万州区为例. *生态学报*, 2017, 37(24): 8227-8240.
- [35] 喻锋, 李晓兵, 王宏, 余弘婧. 皇甫川流域土地利用变化与生态安全评价. *地理学报*, 2006, 61(6): 645-653.
- [36] 冯异星, 罗格平, 尹昌应, 周德成, 鲁蕾, 许文强, 戴丽. 干旱区内陆河流域土地利用程度变化与生态安全评价——以新疆玛纳斯河流域为例. *自然资源学报*, 2009, 24(11): 1921-1932.
- [37] 马世五, 谢德体, 张孝成, 彭正涛, 颜峥, 袁朝兵. 西南山区生态敏感区生态服务价值对土地利用变化的响应——以重庆市万州区为例. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 40(11): 80-87.
- [38] 游巍斌, 何东进, 巫丽芸, 洪伟, 詹仕华, 覃德华, 游惠明. 武夷山风景名胜区景观生态安全度时空分异规律. *生态学报*, 2011, 31(21): 6317-6327.
- [39] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, 1970, 46(S1): 234-240.
- [40] 韦仕川, 熊昌盛, 栾乔林, 胡月明. 基于耕地质量指数局部空间自相关的耕地保护分区. *农业工程学报*, 2014, 30(18): 249-256.
- [41] 陈彦光. 基于Moran统计量的空间自相关理论发展和方法改进. *地理研究*, 2009, 28(6): 1449-1463.
- [42] Anselin L. Local Indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.
- [43] 谢花林. 基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析. *生态学报*, 2008, 28(10): 5020-5026.
- [44] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 陈利顶. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征——半变异函数. *地理学报*, 2000, 55(4): 428-438.