DOI: 10.5846/stxb202004160913
王权,唐芳,李阳兵,黄娟,白雪飘.岩溶地区景观格局演变及其生态安全的时空分异——以贵州省东北部槽谷为例.生态学报,2021,41(18):7273-7291.
Wang Q, Tang F, Li Y B, Huang J, Bai X P.Spatio-temporal differentiation of landscape pattern evolution and its ecological security in karst areas: a case study of trough valley in northeast Guizhou Province.Acta Ecologica Sinica,2021,41(18):7273-7291.

岩溶地区景观格局演变及其生态安全的时空分异
——以贵州省东北部槽谷为例

王 权[1,2],唐 芳[1],李阳兵[1,*],黄 娟[1],白雪飘[3]
1 贵州师范大学地理与环境科学学院,贵阳 550025
2 武汉大学资源与环境科学学院,武汉 430079
3 北京师范大学遵义附属学校,遵义 563000

摘要:景观生态安全能反映区域生态保护与经济发展之间的关系,有助于了解生态环境压力和缓解人地关系矛盾具有重要意义。基于 2005、2010、2014 和 2017 年 LandSat 影像为数据源,借助 ArcGIS 和景观格局指数法构建景观生态安全指数,对槽谷区景观格局演变及其对生态安全的时空分异规律研究,从而提出环境友好型的土地利用组合模式。结果表明:(1)2005—2017 年,槽谷区景观内部整体呈现破碎化,景观斑块数量增多,景观格局由单一规则化、简单化向复杂混合型转变,多样性增加且空间异质性增强。随着时间变化,岩溶槽谷区景观生态安全整体呈现上升趋势,西、东部槽谷景观生态安全指数(Ecological Security Index, ESI)由槽坝向山坡两侧逐渐增加,而中部槽谷则由山坡向槽坝增加。(2)在 200 m 尺度下,西部槽谷 ESI 的全局正相关性最显著,其 Moran's *I* 值呈先增加后减小的趋势,而中部和东部槽谷则相反。岩溶槽谷区 ESI 的空间集聚形式主要表现为高高和低低值集聚区,空间集聚程度较高,而高低和低高集聚区分布较少且变化不明显。(3)景观集聚分布格局受低地形起伏和坡度较缓区域影响较高且呈现倒"U"型共性趋势,而海拔则相反。(4)岩溶槽谷区景观格局以扩充"林地-灌木林地-草地"的土地利用组合模式能增加景观生态安全。(5)景观格局及其生态安全的时空分异是受当地自然环境、社会经济和政策导向共同作用的结果,通过分析多重因素对槽谷区景观格局及其生态安全演变趋势的驱动机制可为地区科学决策提供科学参考。
关键词:景观格局;景观生态安全;时空分布;岩溶槽谷区;贵州省;GIS

Spatio-temporal differentiation of landscape pattern evolution and its ecological security in karst areas: a case study of trough valley in northeast Guizhou Province

WANG Quan[1,2], TANG Fang[1], LI Yangbing[1,*], HUANG Juan[1], BAI Xuepiao[3]
1 *School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang* 550025, *China*
2 *School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan* 430079, *China*
3 *Zunyi Affiliated School of Beijing Normal University, Zunyi* 563000, *China*

Abstract: Landscape ecological security can reflect the relationship between regional ecological protection and economic development. It is of great significance to understand the pressure on the ecological environment and alleviate the contradiction between human and land. Based on the remote sensing image of 2005, 2010, 2014 and 2017 as the data source combined with field survey to verify the images, we used the ArcGIS and landscape pattern index method to construct landscape ecological security index to analyze the evolution of landscape pattern and the spatio-temporal differentiation laws

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502300);国家自然科学基金项目(41661020)
收稿日期:2020-04-16; **网络出版日期**:2021-06-15
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: li-yapin@sohu.com

of ecological security in the trough valley area. Therefore, an environment-friendly land use combination model is proposed. The results were as follows: (1) from 2005 to 2017, the overall landscape pattern of trough valley area presented fragmentation, the number of landscape patches increased, the landscape pattern changed from single regularization and simplification to complex and mixed type, the diversity increased and the spatial heterogeneity enhanced. With the variation of time, the overall landscape ecological security in karst trough valley showed an upward trend, the Ecological Security Index (ESI) of the western and eastern trough valleys increased from the trough basin to the two sides of the hillside, while the middle trough valley increased from the hillside to the trough basin. (2) At a research scale of 200 m, the global positive correlation of ESI in the western trough valleys is the most significant, and its Moran's *I* value showed a trend of first increased and then decreased, but the middle and eastern troughs were the opposite. The spatial agglomeration pattern of ESI in karst trough valley area was mainly manifested as high-high and low-low value agglomeration areas, and the spatial agglomeration degree was higher, while the distribution of high-low and low-high agglomeration areas was less and its change was not obvious. (3) The landscape agglomeration distribution pattern is influenced by low topographic relief and low slope that presents similar trend of inverted "U" shape, while the elevation is opposite. (4) The landscape pattern of karst trough valley area can increase the landscape ecological security by expanding the land use combination pattern of "woodland-shrub woodland-grassland". (5) The spatio-temporal differentiation of landscape pattern and its ecological security is the result of the joint action of the local natural environment, social economy and policies. We can provide scientific reference for regional scientific decision-making by analyzing the driving mechanism of multiple factors on landscape pattern and ecological security evolution trend of trough valley area.

Key Words: landscape pattern; landscape ecological security; spatio-temporal distribution; karst trough valley area; Guizhou Province; GIS

景观格局是指在特定时间特定区域范围内,不同属性的斑块大小和形状各异的景观要素特征在空间上的排列和组合[1]。长期以来,景观格局演变和生态环境建设过程之间具有直接影响,其通过自然和人为活动的土地利用方式和决策时对景观生态环境质量带来显著变化[2]。景观生态安全是土地资源安全的子系统,也是保障国民社会经济健康发展的基本前提,对国家和地区发展与建设至关重要,已成为 21 世纪以来人类社会可持续发展面临的新主题。土地资源作为社会经济发展的基本载体,面临着巨大的压力,在当前土地利用过程中,由于快速的社会经济发展和人口持续增长带来的土地资源利用不足,从而促使土地生态问题愈加突出[3],出现了资源枯竭、土地石漠化[4]、土地盐碱化[5]、草地退化以及环境污染等一系列问题[6],这已直接威胁到社会和经济的可持续发展[7]。因此有必要采用科学合理的方法对区域景观生态安全状况进行深度剖析具有重要价值。

当前,探讨景观生态安全问题、评价景观生态安全状况等成为学术界和相关部门关注的重要问题。根据前人专家学者关于景观生态安全评价应用的方法主要有综合指数法[8]、生态足迹法[9]、景观生态学法[10-11]、遗传算法[12]、突变级数法[13];研究尺度上,呈现由国家级和省级的宏观尺度向市、县级中微观尺度转变,尺度上充分考虑了区域间的差异;研究模型主要包括压力-状态-响应模型(PSR)[14]、DPSIR[15]、熵权模糊物元模型[16];研究对象上,空间技术的发展使得研究区内纵向研究得以深化,例如,同区域不同年份的对比研究,但缺乏时序性横向对比,以及同区域不同评价方法的对比研究。横向对比,可以了解区域间景观格局演变及其生态安全的时空分异规律及差异性;同区域不同评价方法的对比,则可以优化并提高评价结果的可信度。通过多方面的对比研究,才能系统全面地了解研究区域景观生态安全状况及发展趋势,以便制定科学合理的政策以指导并实践,对促进该地区土地资源的可持续利用具有重要意义。

研究区位于西南岩溶山地区域,地势险要,地形起伏多变,高差大,地势险要,生态环境极其脆弱[17],拥有典型的槽谷地貌单元。槽谷区箱型紧密式北东向背斜/向斜构造发育,岩层构造倾角变化大,受多种岩性控

制,地形空间上形成山坡-槽坝交替出现,地形地貌分异明显,形成高度异质性的景观结构特征,导致区域自然资源禀赋差异大。在当前城镇化和工业化发展背景下,槽谷区资源不合理利用造成生态环境日益遭受到不同程度的破坏。因此,有必要深入探究槽谷这典型地貌单元的景观格局演变及其生态安全的时空分异状况及形成机制。基于此,本文主要选取具有代表性的贵州省铜仁市德江、沿河、印江三县交界处的三条岩溶槽谷作为研究对象,使用 2005、2010、2014、2017 年 4 期遥感数据,借助 ArcGIS 软件、景观指数法和生态安全指标构建深入探讨三条槽谷区景观格局演变及其生态安全的时空演变特征规律及其差异,对槽谷区进行空间定量分析,探讨自然、人类活动造成景观结构和功能变化的动因,揭示景观格局及生态安全过程的影响机制,从而为景观生态安全评价和高效引导土地合理利用,协调好生态保护与区域经济发展,为岩溶槽谷区土地利用管理、景观规划和生态环境修复提供科学参考。

1　研究区概况

研究区域位于贵州省德江县、沿河县和印江县三县交界处,坐标位置为 108°21′48″—108°32′37″E 和 28°12′41″—28°26′35″N 之间,三条槽谷分别是西部槽谷、中部槽谷、东部槽谷;西部槽谷位于枫香溪镇和谯家镇,中部槽谷位于杉树镇,东部槽谷位于沙子坡镇[18]。三条槽谷呈北东向排列组合,地形上为背斜呈山向斜呈谷。每条槽谷又分别由中间谷地和两侧坡面构成,山-槽梳状紧密褶皱交替出现。其中西部槽谷长为 38.96 km,宽为 7.29 km,平均海拔为 760 m,平均坡度为 12°;中部槽谷长为 42.85 km,宽为 3.90 km,平均海拔为 880 m,平均坡度为 16°;东部槽谷长为 3.257 km,宽为 4.86 km,平均海拔为 680 m,平均坡度为 17°。研究区总面积 503.39 km^2,其中,西部槽谷区人口分布为 8.43 万,生产总值为 8560 万元,全年人均收入 1015 元;中部槽谷耕地面积为 51.89 km^2,人口分布为 2.53 万,生产总值为 4204 万元,全年人均收入 1661 元;东部槽谷人口分布为 2.63 万,生产总值为 5321 万元,全年人均收入 2023 元。研究区气候类型属于亚热气候和暖温带季风山地气候,年平均气温 15℃,年均降雨量 1200 mm。

2　研究数据与方法

2.1　数据来源与处理

采用 2005、2010、2014、2017 年 4 期 LandSat 遥感影像为数据源,运用 Erdas imagine 9.0 软件对各期影像进行几何校正。在此基础上,根据 2005、2010、2014、2017 年的各期数据的进行配准,配准误差控制在 0.5 个像元内,在 ArcGIS 10.2 软件的支持下,采用人工目视解译得到 2017 年土地利用矢量图层数据,并依次与 2014 年 2010 年和 2005 年遥感影像进行叠加,采用矢量底图影像对比判读的方法依次识别提取 2014、2010 和 2005 年的土地利用信息,最后获取 2005、2010、2014 和 2017 年的土地利用矢量线划图,再经过 ArcGIS 10.2 软件进行拓扑检查与修改处理,并参照 GB/T 21010—2017 年全国土地利用分类体系将研究区分为 12 种景观类型,即:灌木林地、农村居民用地、水田、水域、沟渠、道路、城镇用地、工矿用地、有林地、草地以及裸露岩地(图 1)。

槽谷区数字高程模型(Digital Elevation Model)来源于 ASTER GDEM 数据,采用 ArcGIS 10.2 软件处理得到研究区坡度、高程、地形起伏数据。

2.2　研究方法

2.2.1　景观指标的选取

景观格局通常是指一定范围景观的空间结构特征,具体是指由自然或人为形成一系列大小、形状各异,不同的景观镶嵌体在景观空间上的排列组合,它即是景观异质性的具体表现,同时又是包括干扰在内的各种生态过程在不同尺度上作用结果[19]。根据研究区实际情况,为全面反映岩溶槽谷区景观格局破碎度和多样性的空间差异特征,从而选取类型水平和景观水平两个尺度对岩溶槽谷区景观格局进行系统分析。在类型水平上选取斑块密度、边缘密度、最大斑块指数和景观形状指数来表征景观破碎化状况;在景观水平上选取蔓延度、聚集度、Shannon′s 多样性指数和 Shannon′s 均匀度指数来表征景观多样性。在选取以上景观指标的基础

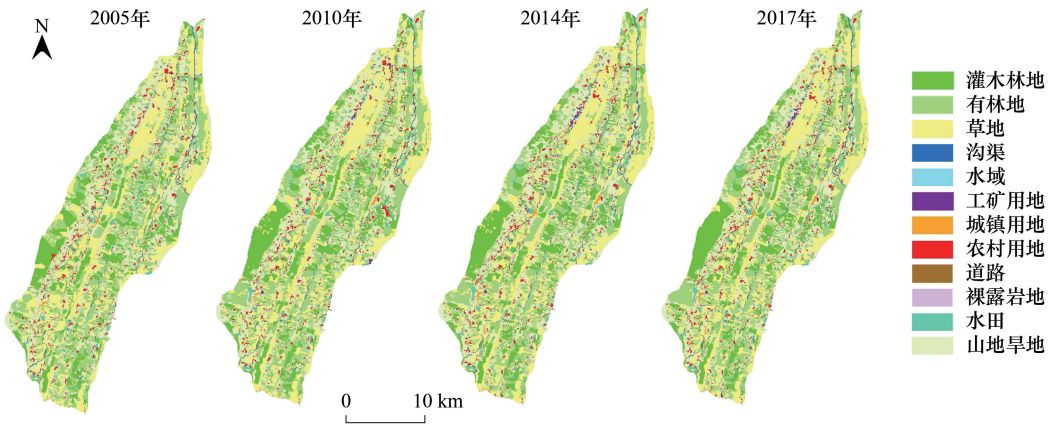


图 1 研究区土地利用图

Fig.1 Land use map in the study area

上并利用 ArcGIS 10.2 软件的栅格转换工具对土地利用景观矢量数据栅格化,然后导入 Fragstats4.2 软件对各景观指标计算并统计得到研究区景观指数值。选取景观格局指数见表 1:

表 1 研究区景观格局指标及其意义

Table 1 Landscape pattern index and its significance in the study area

	景观格局指标 Landscape pattern index	意义 Meaning
景观类型 Landscape types	斑块密度(PD)	反映一定区域范围内景观破碎程度,斑块密度越大,破碎程度越高
	边缘密度(ED)	一定区域景观范围内单位面积上异质景观要素斑块间的边缘长度
	最大斑块指数(LPI)	最大斑块面积占总景观面积的百分比,是斑块水平上优势度的度量
	景观形状指数 (LSI)	是斑块聚散程度的度量,一定区域范围内 LSI 越大,斑块越离散
景观水平 Landscape level	蔓延度(CONTAG)	一定区域范围内景观中不同斑块类型的聚集程度,CONTAG 越高,斑块离散程度越低
	聚集度(AI)	反映斑块的聚集程度,AI 值越大,聚集程度越高
	Shannon's 多样性指数(SHDI)	反映一定区域范围内景观要素的多少和各景观要素所占比例的变化
	Shannon's 均匀度指数(SHEI)	测量一定区域范围内各类型景观占总面积的比例

PD: Patch density; ED: Edge density; LPI: Largest patch index; LSI: Landscape shape index; CONTAG: Contagion; AI: Aggregation index; SHDI: Shannon's diversity index; SHEI: Shannon's evenness index

2.2.2 土地干扰度指数

$$LDI_i = \alpha C_i + \beta H_i + \gamma F_i \quad (1)$$

式中,LDI_i为景观生态安全干扰度指数;C_i土地利用景观破碎度;H_i表示土地利用多样性指数;F_i表示槽谷区土地利用景观分维数;α、β、γ为其权重,参考已有学者研究成果[20],依据土地指数的重要性对破碎度、分离度和优势度分别赋以权重为 0.5、0.3、0.2,对量纲不同的指数进行归一化处理。

①土地斑块破碎度(C_i)是指度量景观利用类型破碎化程度,公式为:

$$C_i = N_i / A \quad (2)$$

②土地分离度(S_i)主要用于反映区域景观异质性,公式为:

$$S_i = \sqrt{C_i} / 2p_i \quad (3)$$

③土地优势度(D_i)是指某种景观利用类型在类型要素中镶嵌结构的复杂性与稳定性,公式为:

$$D_i = (Q_i + M_i + P_i) / 3 \quad (4)$$

式中,C_i为景观利用类型 i 的破碎度,N_i为景观利用类型 i 的斑块数,A 为土地的总面积,S_i为某一景观利用类

型的分离度,p_i为某一景观的面积占区域景观面积的比例,频度 Q_i=斑块出现的样方数/总样方数,密度 M_i=斑块 i 的数目/斑块的总数目,面积比例 P_i=斑块 i 的面积/样方的总面积。

2.2.3　土地脆弱度指数(LVI)

选取该指标主要是反映岩溶槽谷区景观利用类型遭受干扰后的变化程度状况。一般而言,景观类型不同,其抗干扰度和敏感度都存在差异性。参考前人研究基础并结合岩溶槽谷区实际情况,将各景观利用类型脆弱性状况分为 5 个等级:1 为城镇用地、农村居民用地、道路、工矿用地,2 为山地旱地、水田,3 为草地,4 为灌木林地、有林地,5 为水域和沟渠,6 为裸露岩地,其中城镇用地、农村居民用地、道路以及工矿用地最稳定,裸露岩地最敏感;灌木林地和有林地大都分布在山坡,均为人类不易到达的天然林分,研究中认为它们的脆弱度相近,均赋值为 2;山地旱地和水田同属人工种植经营的土地类型,研究中认为它们的脆弱度相近,均赋值为 4。最后赋值进行归一化处理(表 2)。

表 2　研究区景观利用类型的脆弱性指数

Table 2　Vulnerability index of landscape (LVI) utilization types in the study area

赋值级别 Assignment level	景观利用类型 Landscape use type					
	城镇、农村居民用地、道路、工矿用地	灌木林地、有林地	草地	山地旱地、水田	水域、沟渠	裸露岩地
等级 Level	1	2	3	4	5	6
LVI	0.05	0.10	0.14	0.19	0.23	0.29

2.2.4　槽谷区景观生态安全指数(ESI)

本文根据研究区土地利用斑块面积情况,建立槽谷区 200 m×200 m 大小网格。基于土地干扰度指数和土地脆弱性指数的基础上[21],通过面积加权求和计算岩溶槽谷区每个网格的土地利用生态安全指数(ESI_k),其计算数学模型为:

$$ESI_k = \sum_{i=1}^{n} \frac{A_{ki}}{A_k} \times (1 - 10 \times LDI_i \times LVI_i) \tag{5}$$

式中,ESI_k 为第 k 个评价单元的土地利用景观生态安全指数;LDI_i 为土地利用干扰度指数;LVI_i为土地利用脆弱性指数;n 为景观利用类型数目;A_{ki}为第 k 个评价单元的第 i 类景观利用类型的面积;A_k 为第 k 个评价单元的总面积。其数值越小,反映出生态安全程度越来越低,反之则高。

2.2.5　评价标准的确定

为了便于比较研究区景观生态安全指数的大小,根据研究区景观生态安全指数分布的具体情况,利用相同间距法,制定了针对研究区的相对评价标准,即是将岩溶槽谷区各网格景观生态安全指数分为 4 个等级,即低安全区(ESI<0.9100)、一般安全区(0.9100≤ESI<0.9400)、较高安全区(0.9400≤ESI<0.9700)、高安全区(ESI≥0.9700),然后再基于研究区每个网格前后安全指数等级的变化,将景观生态安全指数变化分为 3 级,分别为:不变(ESI 不变)、下降(ESI 下降小于等于一个等级)、上升(ESI 上升大于等于 1 个等级)。

2.2.6　空间自相关分析

Moran′s I 指数可以反映出空间邻近的区域单元属性值的相似特征。Moran′s I 指数取值在-1—1 之间:大于 0 时表示存在正的空间自相关,等于 0 时表示不相关,小于 0 时表示存在负的空间自相关。由此本文采用全局空间自相关 Moran′s I 指数和局部空间自相关统计量 (LISA) 来分析岩溶槽谷区景观生态安全的空间自相关特征[22-23]。数学模型如公式(6)和(7)所示:

(1)全局空间自相关分析

$$\text{Moran's } I = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{6}$$

式中,n 为变量 x 的样点总数;x_i 和 x_j 为 i、j 样区单元上某属性的观测值;$\bar{x}$ 为 n 样区的属性值的平均值;W_{ij}

为空间权重矩阵。

(2)局部空间自相关分析

$$\mathrm{LISA}_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sum_i \frac{(x - \bar{x})^2}{n}} \sum_j W_{ij}(x_j - \bar{x}) \qquad i \neq j \tag{7}$$

一般来讲,LISA_i 值大于 0 则表示该区域单元周围相似值(高值或低值)在空间上的聚集,LISA_i 值小于 0 则表示非相似值在空间上的聚集。

2.2.7 三元图

利用三元图可构建一个等边三角形坐标系统,描述三元系统中各变量的相对比例关系[24],各变量的数量要标准化,使得 3 个变量之和为 1。

3 结果与分析

3.1 槽谷区景观类型尺度分析

由图 2 可见,2005—2017 年间,槽谷区景观类型的斑块密度总体上平稳且上升趋势,可知槽谷区随着时间发展,土地利用景观都遭到了不同程度破坏。其中山地旱地的斑块密度(PD)呈现先增后减的变化趋势,而有林地和灌木林地呈现先减后增变化,是因为 2005—2014 年期间当地居民依附土地生产生活大,开发林草地资源进行转为山地旱地,从而对其破坏程度较大。槽谷区边缘密度(ED)变化较大的是有林地、山地旱地和草地。2005—2017 年时期,有林地和山地旱地呈现出先减后增的变化,草地呈现出持续略下降的变化趋势。

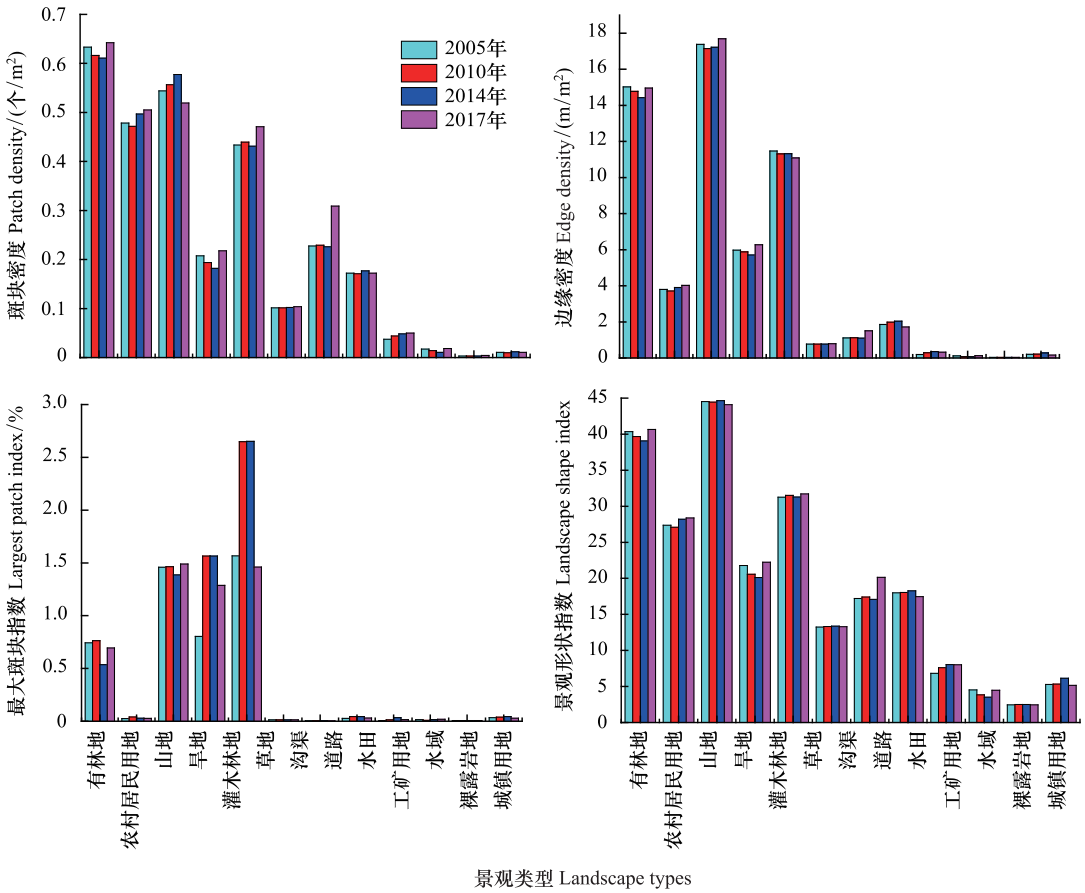


图 2 研究区景观指数的动态变化

Fig.2 Landscape index dynamic changes in the study area

最大斑块指数(LPI)在景观类型尺度上表示为斑块类型中最大斑块组成,其变化幅度可揭示出当地人为活动对景观类型的扰动强度。由图 2 可见,槽谷区最大斑块指数(LPI)主要以有林地、山地旱地、灌木林地和草地为主导。从 2005—2017 年,有林地和山地旱地呈现出先减后增的变化,是因为 2005—2014 阶段,当地耕地面积呈现扩张,而有林地面积呈先减少趋势,整体上山地旱地的最大斑块指数较有林地大,2014—2017 年斑块连片增大。从 2005—2017 年,槽谷区有林地和灌木林地的形状指数(LSI)变化明显,主要原因是近 12 年来实施退耕还林所致;其他各景观类型整体上呈现稳定状态,变化不显著。

3.2　槽谷区景观水平尺度演变分析

蔓延度指数(CONTAG)和聚集度指数(AI)均可反映景观斑块类型团聚程度的指标。由图 3 可见,2005—2017 年时期,槽谷区景观斑块类型的演变表现出最大限度破碎化及蔓延连通性较高。随着社会经济不断提高,槽谷区人为扰动频繁且扰动区域不断扩大,土地利用不断受到影响,这些使得景观内部斑块类型不断分散,部分区域聚集程度降低。受到人类活动影响,岩溶槽谷区槽坝区域城镇用地、道路增加,山地旱地减少,使得自然景观斑块类型不断被分割和蚕食[25],从而衍生出更多的单体斑块,各类斑块间离散程度增大,蔓延度指数(CONTAG)增强。2005—2017 年时期,西东部槽谷区聚集度指数(AI)比例呈现逐渐降低,而中部槽谷地形地貌崎岖,其聚集度指数(AI)由槽坝向山坡延伸整体上呈现出先增加后降低变化。

Shannon′s 多样性指数(SHDI)和 Shannon′s 均匀度指数(SHEI)均可反映研究区域的景观多样性指标[26]。由图 3 可见,2005—2017 年期间,西东部槽谷的 Shannon′s 多样性指数(SHDI)和香浓多样性指数(SHEI)在空间分布上呈现出基本一致性,主要集中于槽坝平坦部位,槽坝向山坡延伸均呈现降低趋势,原因是西东部槽谷槽坝向山坡边缘效应明显且斑块分散;中部槽谷区的香浓多样性指数(SHDI)和香浓多样性指数(SHEI)主要分布山坡两侧。这说明,随着时间发展,槽谷槽坝低地形起伏区受城镇、农村居民用地、工矿及交通用地分割,槽坝内部结构复杂,景观空间异质性最强、多样性和均匀度达到最大、破碎化最严重,聚集度较低且连通性高[27]。

3.3　槽谷区景观生态安全的时空演变特征

由于景观生态安全指数变化反映的是区域多种景观利用类型变化趋势的叠加效应[28],因而其空间分布差异显著,总体上向逐渐增高的趋势发展(图 4)。其中东部槽谷南部、西部槽谷北部和南部的生态安全指数高值和低值相间分布或高值集聚分布,这说明在该区域内地形起伏相对较小,景观类型多样性较高,而西部槽谷中部的高值主要集中分布在山坡,低值主要分布在槽坝,但中部槽谷中部则相反;与 2005 年相比,2010 年生态安全指数整体在提高,尤其西部和东部槽谷最为明显;2014 年景观生态安全指数整体呈降低的趋势,说明人类活动增强,农村居民和城镇用地规模在扩张[29];2017 年低值区域由深红转为淡红,系统内生态安全度有所降低,且有逐渐向槽谷区南部转移的趋势,而高值区域未发生明显波动。

3.4　槽谷区景观生态安全指数空间相关性分析

3.4.1　景观生态安全指数的特征尺度及其全局空间相关性

景观生态安全指数全局自相关 Moran′s *I* 值随测定距离的缩小而变得更相似,表现出相似值在空间上的集聚,也表明区域内 ESI 变量呈空间全局正相关,其相关性存在明显尺度效应。2014 和 2010 年 Moran′s *I* 指标值在各距离上很接近,但在 1400 m 处差异明显(图 5),表明 2014 年较 2010 年全局自相关区域有所增加;2017 年景观生态安全指数全局自相关区域较 2014 和 2010 年有所减小,较 2005 年有所增加;在距离 200 m 时,趋势图上四期 Moran′s *I* 指标值趋于稳定,表明该尺度可以作为反映研究区域的特征尺度,尺度过大(400、600 m)会导致部分空间信息的损失。因此,本研究选择 200 m 作为分析岩溶槽谷区景观生态安全指数分布格局的特征尺度。在 200 m 的研究尺度下,西部槽谷 ESI 的全局正相关性最为显著,其 Moran′s 值呈现先增加后减小的趋势,而东部和中部槽谷则相反,表明在时间序列上,西部槽谷景观生态安全的空间自相关程度有所减弱,空间分异性增强,而中、东部槽谷空间趋同性和自相关程度逐渐增强(表 3)。

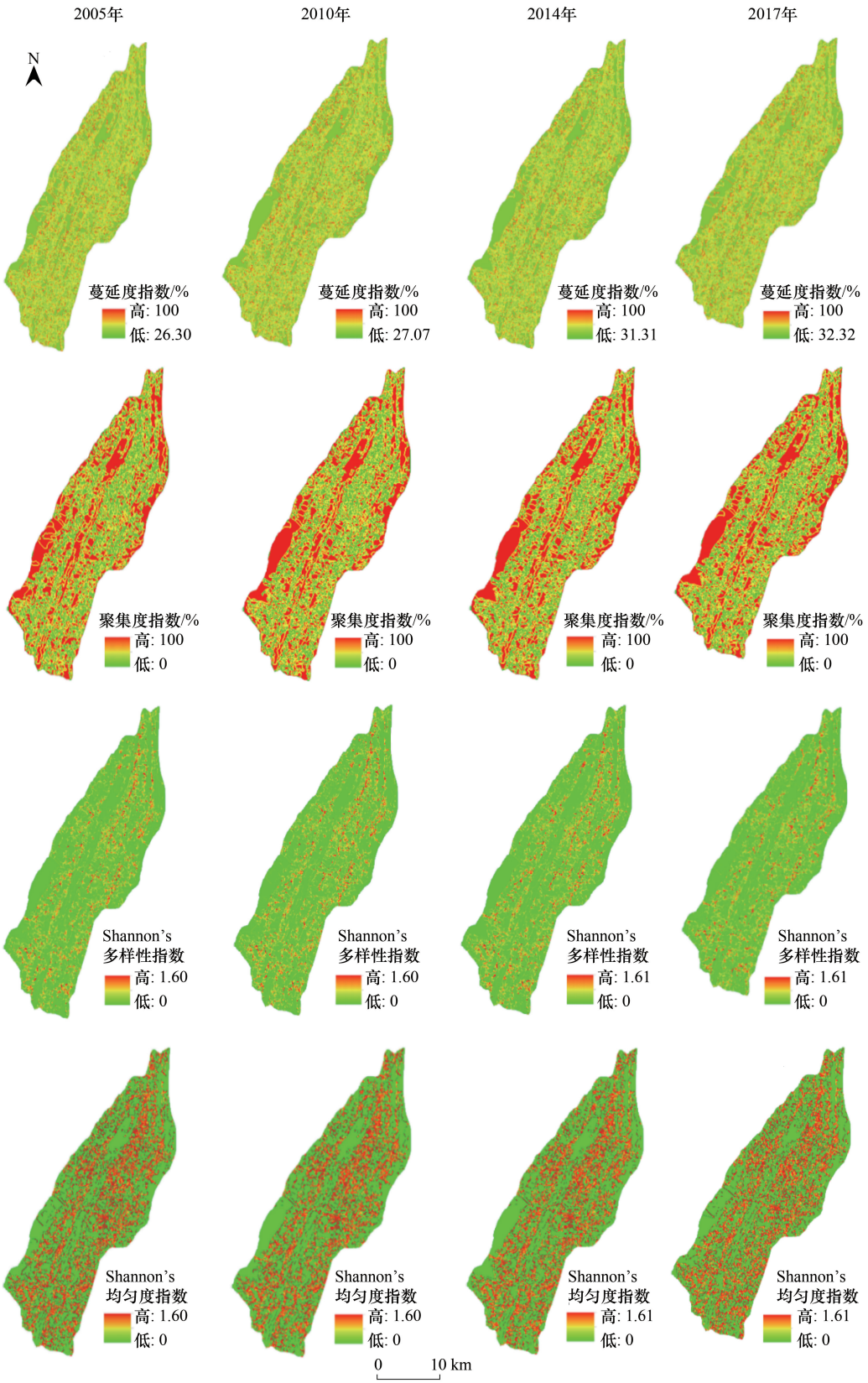


图 3 2005—2017 年研究区 CONTAG、AI、SHDI 和 SHEI 的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of CONTAG, AI, SHDI and SHEI in the study area from 2005 to 2017

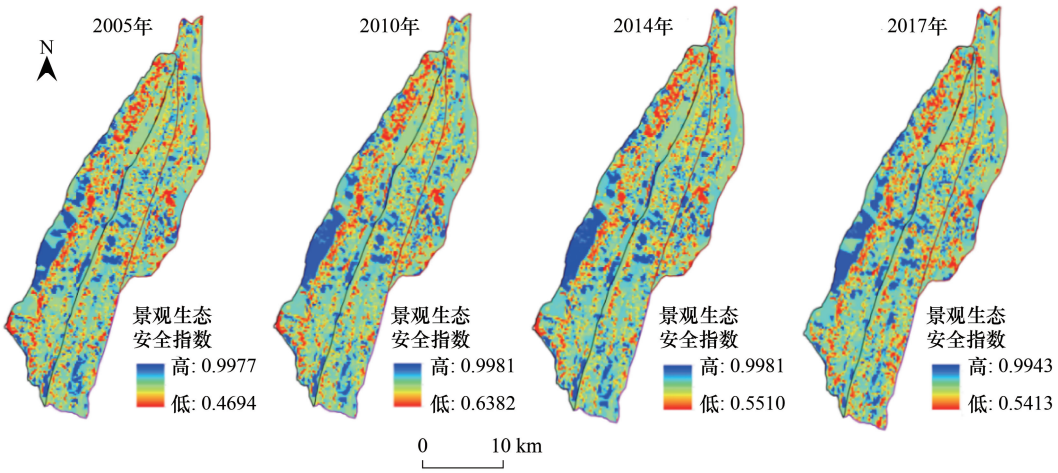


图 4　研究区景观生态安全空间分布

Fig.4　Spatial distribution of landscape ecological security in the study area

3.4.2　槽谷区景观生态安全指数局部空间自相关分析

景观利用类型的多样化可以直接导致景观生态安全指数空间分布的显著性增强[30]。由图 6 可以看出,岩溶槽谷区 ESI 的空间集聚形式主要表现为高高和低低值集聚区,空间集聚程度较高,而高低和低高集聚区分布较少且变化不明显。高值集聚区主要集中分布在西部槽谷中部的两翼、中部槽谷中部与南部的槽坝区域,而东部槽谷槽坝和山坡皆有分布,这主要是由于该区域有林地、灌木林地和草地的规模化分布且景观利用类型单一,对区域生态安全系统贡献率较大,呈现出植被覆盖率高的区域景观生态安全指数高的特征。低值集聚区主要集中分布于西部槽谷的槽坝、中部槽谷北部的两翼、而东部槽谷与高值集聚区分布特征一致,这主要是与区域内植被覆盖率低、土地利用强度大以及地形较缓等特征有关,使得区域内环境效益较差而直接导致景观生态安全指数下降,整体呈现出沿景观利用类型多样和人类活动强的区域分布。

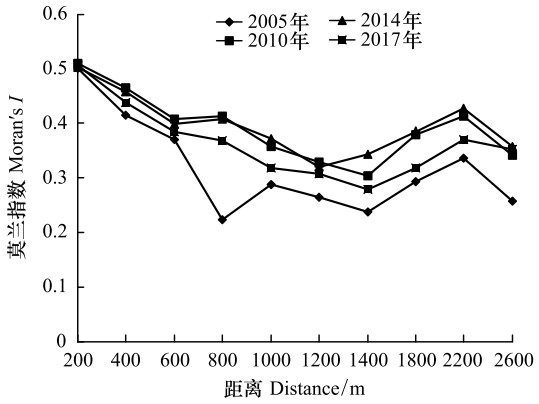


图 5　研究区景观生态安全指数空间自相关性特征值趋势图

Fig.5　Trend chart of spatial autocorrelation eigenvalues of landscape ecological security index in the study area

由图 7 可知,岩溶槽谷区大部分区域 ESI 空间相关性不显著,空间相关性较显著的区域主要集中在低低值和低低值集聚区,主要以点状的形式呈带状分散于西部槽谷槽坝区域,而中部和东部槽谷则呈现杂乱无序的分布特征,显著性水平为 0.05 的区域规模逐渐扩大,而显著性水平为 0.01 主要以高高值形式分布在西部槽谷中部,其规模呈现先增大后减小的趋势,ESI 空间异质性逐渐增大,可见,岩溶槽谷区近年来景观利用类型朝多样化发展,区域内土地利强度增大,导致生态环境出现退化现象[31]。

3.4.3　槽谷区土地利用转移对景观生态安全的影响

土地利用变化复杂多变,其景观生态安全指数受到多种土地利用类型变化共同影响[32]。根据槽谷区 2005—2017 年土地利用转移方向的具体情况,选取面积动态变化最显著的几种土地转移类型,既是有林地、山地旱地、灌木林地、草地以及农村居民用地作为景观生态安全网格研究样本(图 8)。

土地利用转移减少:①有林地各时段内等级上升下降曲线走势差异较大,由同增同减向一增一减过渡,山地旱地的转移面积逐渐增加,可见山地旱地对 ESI 的贡献率较低。②山地旱地 ESI 等级上升曲线逐渐下降,

表 3 研究区不同时期景观生态安全指数

Table 3 Landscape ecological security index in different periods in the study area

槽谷区 Trough valley area	景观生态安全指数 Landscape ecological security index	2005 年	2010 年	2014 年	2017 年
西部槽谷	最大值	0.9977	0.9981	0.9981	0.9901
Western trough valley	最小值	0.6096	0.6382	0.5510	0.5413
	平均值	0.9347	0.9364	0.9373	0.9374
	Moran′s *I*	0.5585	0.5888	0.5726	0.5690
中部槽谷	最大值	0.9954	0.9972	0.9981	0.9899
Middle trough valley	最小值	0.4489	0.8178	0.8649	0.8333
	平均值	0.9352	0.9363	0.9366	0.9339
	Moran′s *I*	0.4609	0.4282	0.4421	0.4438
东部槽谷	最大值	0.9977	0.9981	0.9981	0.9943
Eastern trough valley	最小值	0.7989	0.7669	0.7127	0.7060
	平均值	0.9332	0.9352	0.9348	0.9343
	Moran′s *I*	0.4387	0.4259	0.4150	0.4263

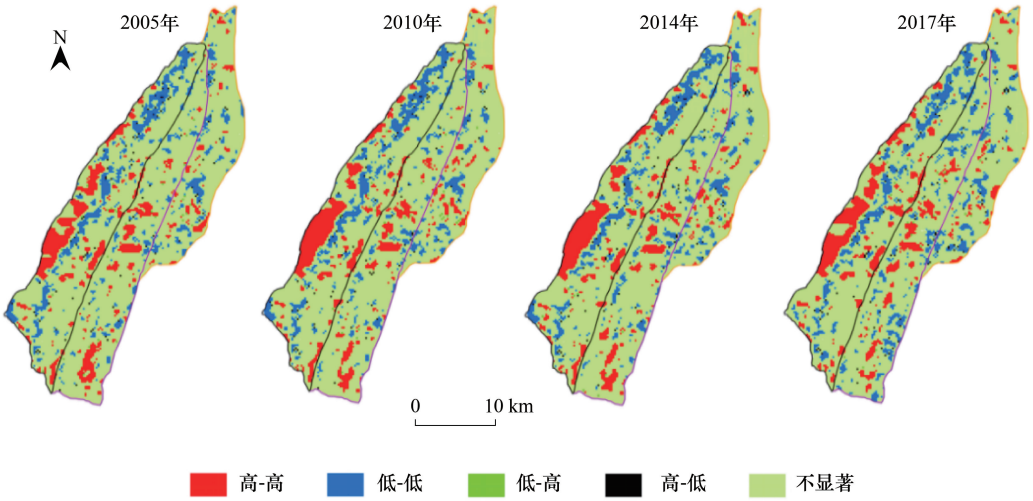


图 6 研究区景观生态安全指数局域空间自相关 LISA 聚类图

Fig.6 LISA clustering diagram of local spatial autocorrelation of landscape ecological security index in the study area

LISA:空间联系的局部指标 Local indicators of spatial association

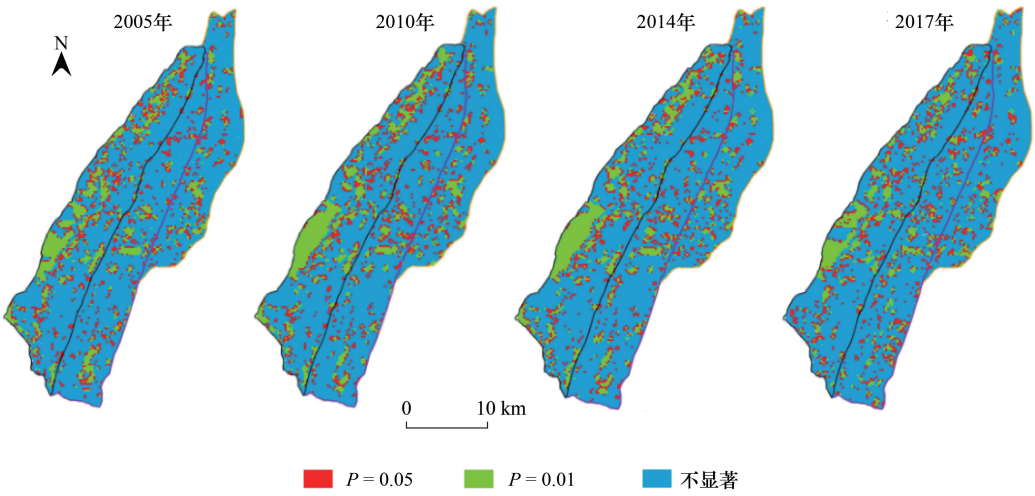
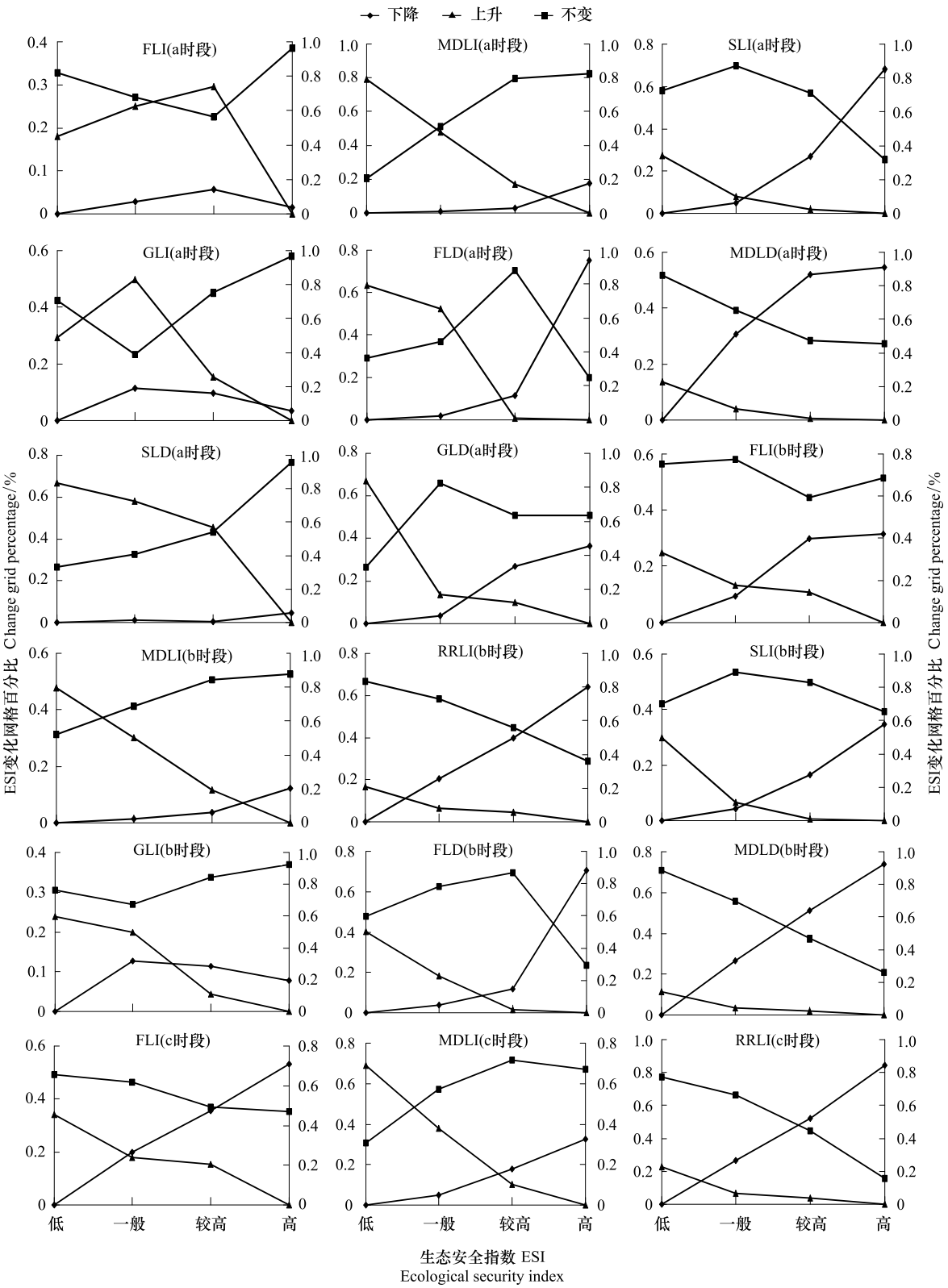


图 7 研究区生态安全指数局域空间自相关 LISA 显著性水平

Fig.7 LISA significance level of local spatial autocorrelation of ecological security index in the study area

而下降曲线呈小波动上升,这由于其转移成的有林地、灌木林地和草地高等级的 ESI 大于山地旱地自身的等级范围,即 ESI 的上升空间会随着转移的景观利用类型逐渐增强。③灌木林地 ESI 上升等级曲线小幅降低而下降曲线则呈大幅上升的趋势,其中 a 与 c 时段相似,b 则与总时段相似,说明有林地对岩溶槽谷区 ESI 的贡献率较灌木林地稍大。④草地 ESI 下降等级曲线由小波动下降向大波动上升转移,上升等级曲线由大波动下



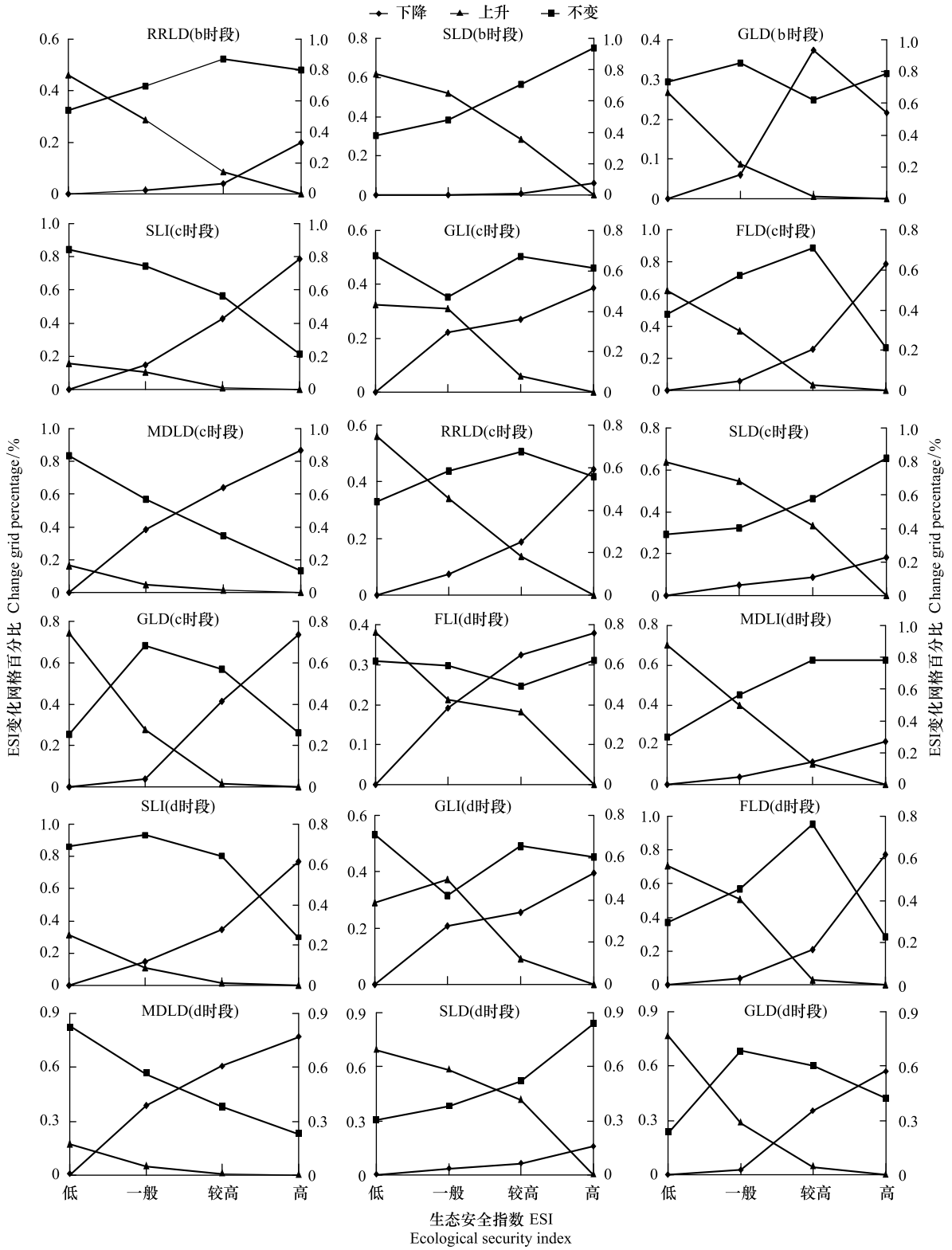


图 8 研究区土地利用转移对景观生态安全的影响

Fig.8 Impact of land use transfer on landscape ecological security in the study area

FLI:有林地增加 Forestland increase;MDLI:山地旱地增加 Mountainous dry land increase;SLI:灌木林地增加 Shrubland increase;GLI:草地增加 Grassland increase;RRLI:农村居民用地增加 Rural residential land increase;FLD:有林地减少 Forestland decrease;MDLD:山地旱地减少 Mountainous dry land decrease;SLD:灌木林地减少 Shrubland decrease ;GLD:草地减少 Grassland decrease;RRLD:农村居民用地减少 Rural residential land decrease;; a 时段:2005—2010; b 时段:2010—2014; c 时段:2014—2017; d 时段:2005—2017

降向小波动下降过渡,主要是由于初期草地大部分转移为有林地,而后期一部分还转移成了山地旱地,山地旱地的增加直接导致 ESI 下降。⑤农村居民用地在 b 与 c 时段动态变化最为显著,其导致的 ESI 等级变化的趋势与灌木林地相似,说明山地旱地对 ESI 的贡献率较农村居民点大。

土地利用转移增加:①有林地 ESI 等级上升和下降等级曲线皆呈相反的波动趋势,说明有林地的增加能显著的提高区域的景观生态安全指数。②山地旱地 ESI 的等级变动趋势与其减少时相反,也说明了山地旱地的增加能降低区域的 ESI。③灌木林地对 ESI 的影响与山地旱地相反,它的增加会造成区域 ESI 提高。④草地初期主要是由有林地转移而来,后期则是由山地旱地和有林地转移,这就造成了同期 ESI 下降等级曲线异常波动。⑤农村居民用地 c 时段较 b 时段的 ESI 下降等级网格占比大,多样性的土地利用转移方式较单一方式对 ESI 影响更大。

3.4.4　槽谷区景观生态安全指数在地形上的分布

槽谷区景观生态安全与地形因子具有显著影响作用,探究地形因子对土地利用景观的生态安全空间相关联性具有重要意义。由图 9、10、11 可见,岩溶槽谷区不同显著性水平下集聚分布的景观生态安全在海拔、坡度和地形起伏度上都呈倒“U”型分布,但地形起伏度和坡度对景观生态安全的集聚分布格局有相似的驱动趋势,而海拔则相反。①低海拔区域主要分布显著性 $P=0.05$ 的集聚形式,而高海拔处则以显著性 $P=0.01$ 的集聚形式为主,在海拔在 1080—1180 m 范围内最明显,这是由于高海拔区域土地利用方式单一、人类活动少,致使该范围内景观生态安全度高且内部稳定。$P=0.05$ 高-高值集聚主要分布在 680—980 m 范围内,自身年际波动在高海拔处较明显,与大量分布在 780—1180 m 间的低-低值集聚的趋势一致,但其以更大的幅度向逐渐增多的趋势发展。海拔小于 780 m 区域,以高-高值集聚为主,而海拔超过 780 m,以低-低值集聚为主。$P=0.01$高-高值和低-低值集聚都主要分布在 880—1180 m 范围内,海拔对其分布量之间存在正比关系,且变化幅度逐年增强。②2005、2010 和 2017 年的 ESI 显著性水平为 0.05 和 0.01 皆在地形起伏度上的分布趋势保持一致,在地形起伏度小于 120 m 范围内,以低-低值集聚为主,在大于 120 m 区域以高-高值集聚为主,而 2017 年 ESI 不同显著性在地形起伏上的分布变化曲线存在异常的波动,在低地形起伏度区域分布量减少,而在高地形起伏度范围内急剧增多,且 $P=0.01$ 高-高值集聚变化最明显,这表明了岩溶槽谷简单化的土地利用方式正在向地形起伏度大的区域转移。③ESI 在不同的显著性水平下的分布,随坡度的增大呈先增加后降低的趋势,且在 5—10°区域内都达到最大值。坡度小于 10°区域,以低低值集聚分布为主,大于 10°则以主要以高-高值为主。综上可得,岩溶槽谷区高程、坡度和地形起伏度对土地利用景观的生态安全具有明显相关性。

4　讨论

4.1　槽谷区景观格局演变及生态安全的演变规律

4.1.1　槽谷区景观格局的演变规律

在当前快速城镇化和工业化大发展多因素驱动背景下,岩溶槽谷区景观格局演变呈现显著性变化。在对槽谷区山坡-槽坝土地利用变化的基础上[33],本文主要从槽谷区山坡-槽坝进行分析景观格局演变及其在时序上的演变阶段做出系统分析。岩溶槽谷区山坡-槽坝景观格局演变存在着共同特征和差异性(图 12)。由于城镇用地、农村居民用地、水田、道路等景观类型主要集中分布于槽坝,林地、草地等主要分布山坡[34],槽坝景观格局主要由混合复杂型向规整现代农业型转变,演变阶段由扩张模式向集约化模式转变;山坡的景观格局由林地,农地混合型向林地多,农地少的景观演变,其演变阶段主要为人为活动扩张模式向人为活动收缩模式转变。通过探讨槽谷区山坡-槽坝的景观格局演变剖析,掌握其土地利用景观演变特征,从而更加清楚掌握其土地利用/覆被变化情况、以及景观恢复取得客观全面的认识。

4.1.2　槽谷区景观生态安全的演变规律

(1)景观生态安全分布规模。岩溶槽谷区系统内生态安全度有先提高后降低的趋势,并逐渐向南部转移。西部槽谷 ESI 的高值集聚区主要分布在中部山坡两翼,其规模呈现先增加后减少的趋势,而低值集聚区

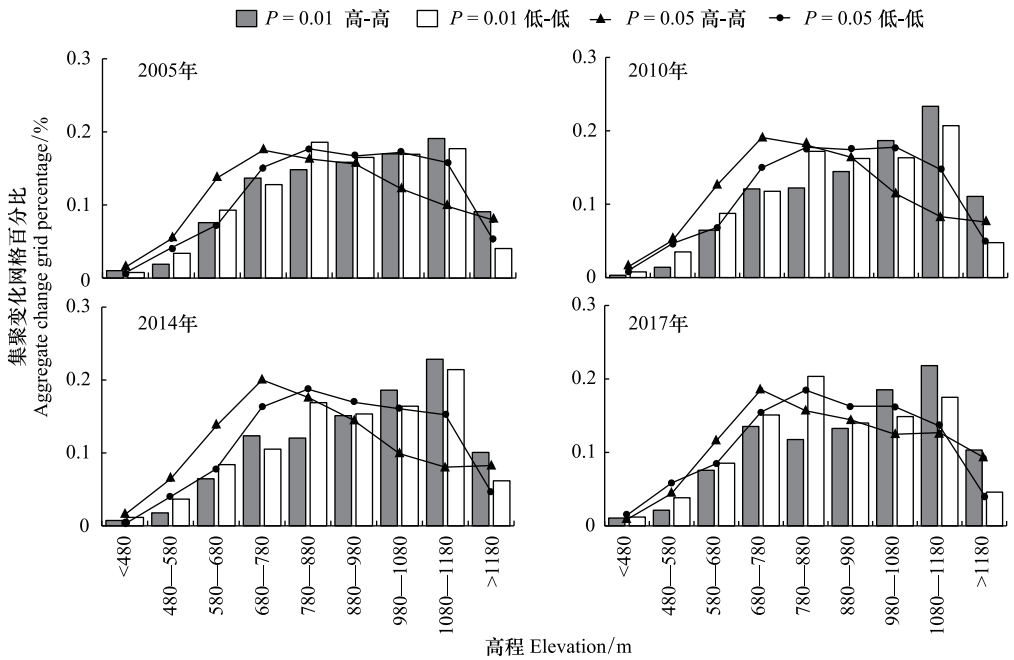


图 9 研究区 ESI 的不同显著性水平在高程上的分布

Fig.9 Distribution of different significance levels of ESI on elevation in the study area

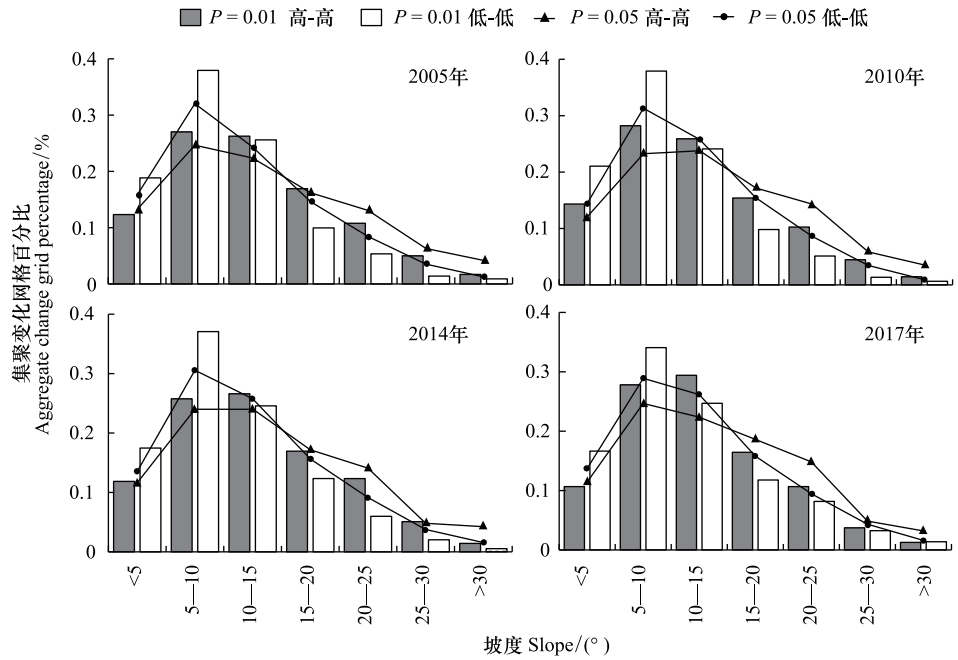


图 10 研究区 ESI 的不同显著性水平在坡度上的分布

Fig.10 Distribution of different significance levels of ESI on slope in the study area

主要分布在槽坝,其分布规模以减小的趋势逐渐由山坡向槽坝聚拢;中部槽谷北部 ESI 较低且分布凌乱,中、北部 ESI 高低值集中分布区域与西部槽谷相反,低值分布规模逐渐增大;东部槽谷北、中部 ESI 年际变化不明显,南部 ESI 高值集聚区规模降低。

(2)土地利用景观的组合模式。景观生态安全度的动态变化与土地利用变化存在密切的关系[35]。本文

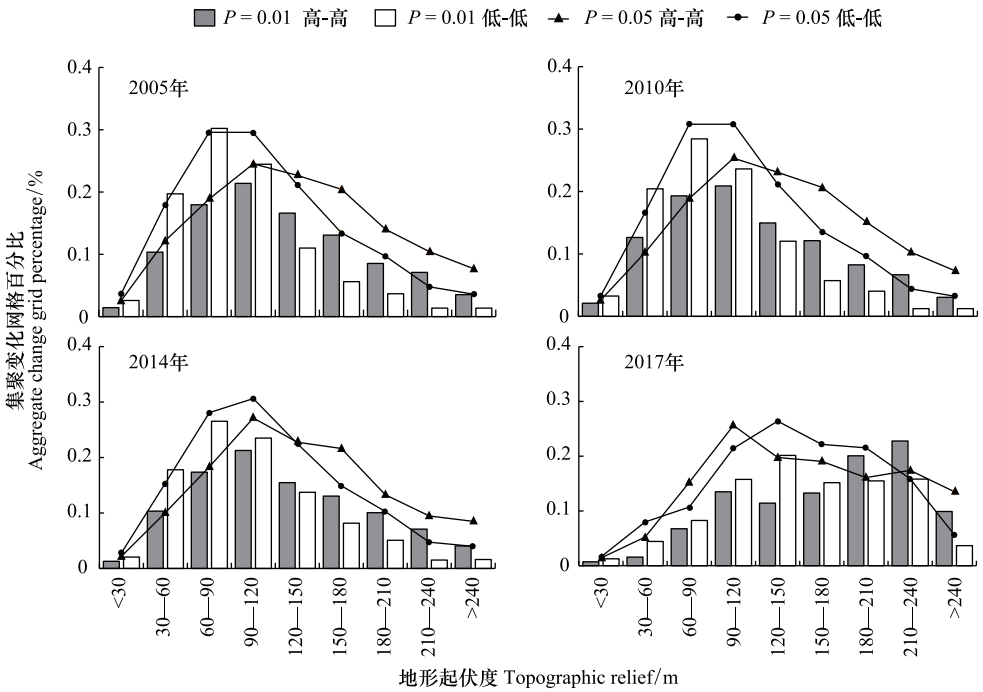


图 11　研究区 ESI 的不同显著性水平在地形起伏度上的分布

Fig.11　Distribution of different significance levels of ESI on topographic relief in the study area

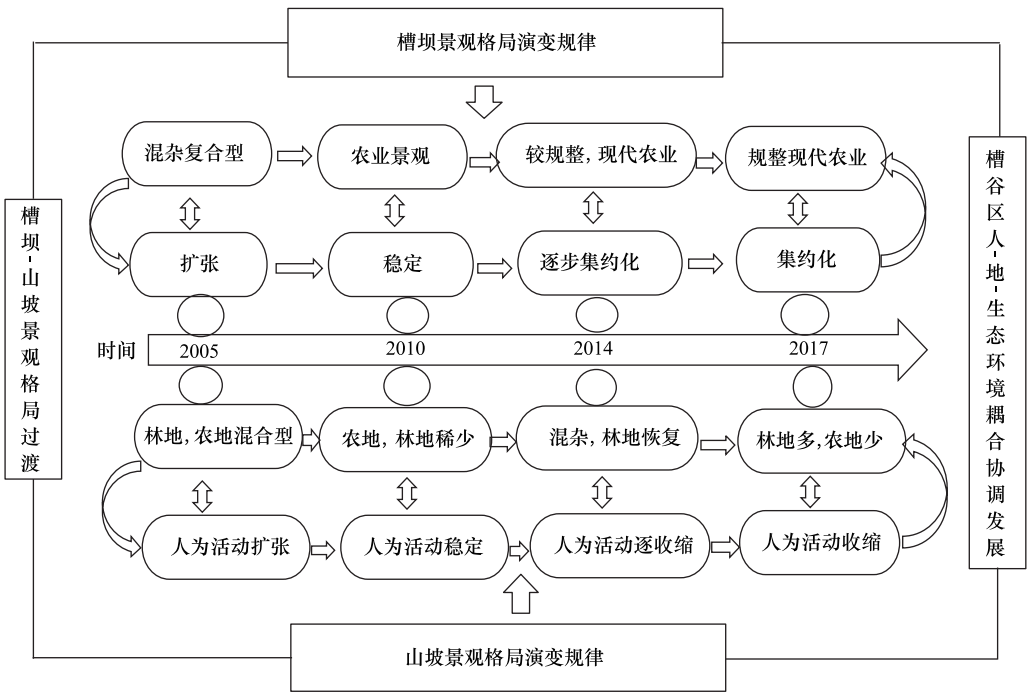


图 12　研究区景观格局演变规律

Fig.12　Landscape pattern evolution laws in the study area

基于网格量化槽谷区土地利用类型的转移过程,探究出土地利用类型的组合模式对景观生态安全的提高或降低具有显著影响(图 13)。由图 13 可知,在西部槽谷区灌木林地的减少中,有林地-草地-山地旱地的转移组合

能降低区域 ESI;而山地旱地的减少中,有林地-灌木林地-草地的组合能增加区域 ESI,以中部槽谷最为明显;东部槽谷景观利用类型相对单一,以至区域 ESI 变化不显著。通过土地利用对生态安全的贡献效率分析得出,西东部槽谷景观格局的演变现状,其采用适当的缩减“有林地-草地-山地旱地”的组合模式降低该区域景观生态安全;中部槽谷需扩充“林地-灌木林地-草地”的组合模式能增加该区域景观生态安全。

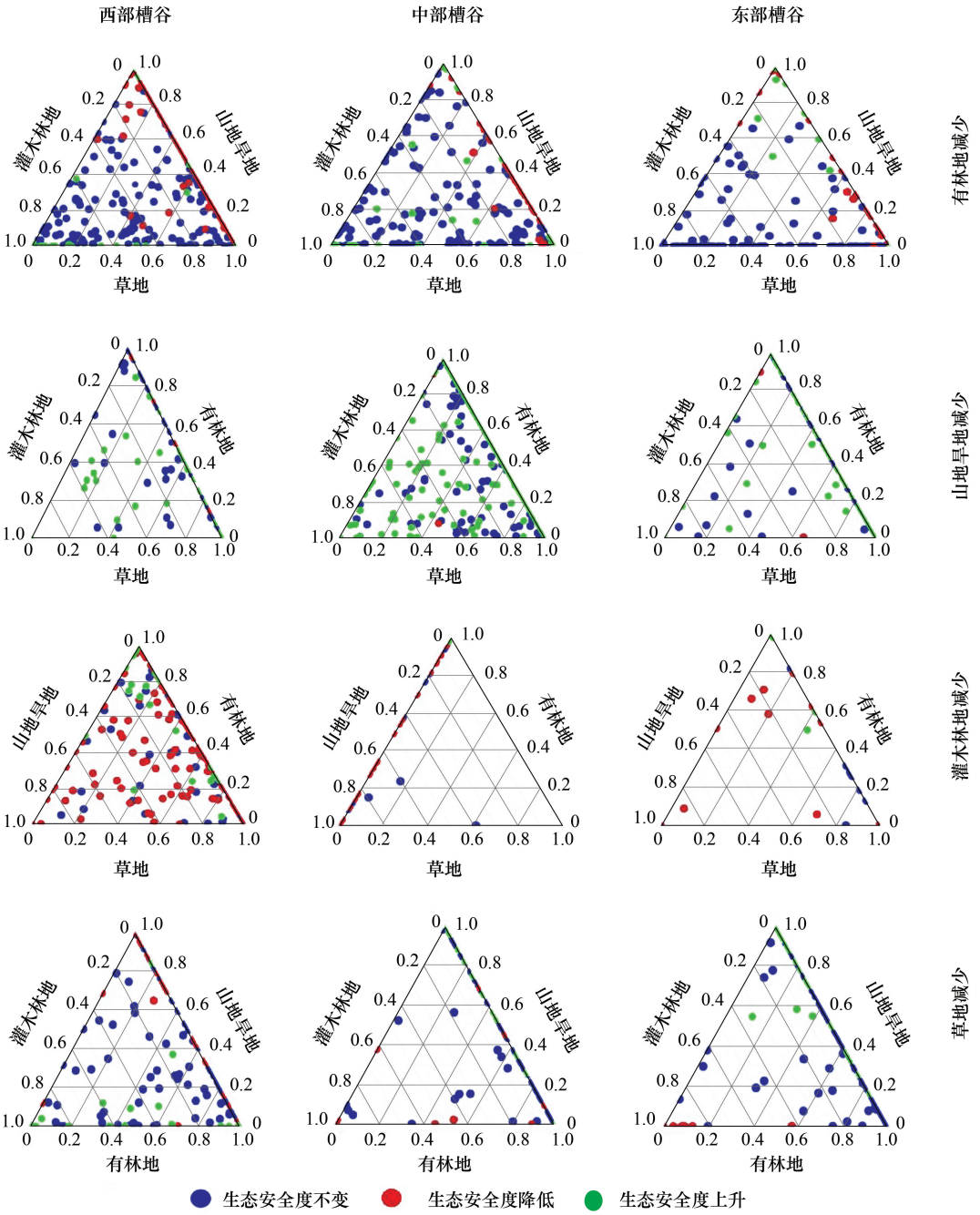


图 13 基于土地利用组合模式的研究区 ESI 的变化

Fig.13 ESI changes based on the combined land use mode in the study area

4.2 槽谷区景观格局演变及其生态安全的驱动机制

岩溶槽谷区景观格局演变受当地自然环境因素、社会经济发展和地方政策的导向共同作用[36],然而景观格局受影响的同时随之导致其生态安全受到不同程度的影响(图 14)。由于槽谷区地形地貌复杂、降水在空

间上分布不均,水资源禀赋差异大,山坡-槽坝气候温差等直接形成了槽谷区山坡-槽坝的景观类型分布差异;其中景观类型山地旱地、草地、有林地、灌木林地是主要分布山坡部位,城镇用地、农村居民用地及农业耕作景观利用类型主要分布于槽坝部位。社会经济发展对景观格局的演变具有推动作用[37],其中区域人口增长加快,城镇化和工业化、市场需求不断加大,地方产业结构调整、基础设施规模不断加大,各项农村资源整合使得区域土地利用方式发生转变,城乡一体化不断加强,农户维持生计转型及生活质量提高、地方生产方式转变和农业朝着现代化[38]。社会经济提高,人为活动对区域景观扰动不断加大,其景观破碎度和多样性在一定程度上空间异质性加强。由于人为活动主要集中于槽坝区域,造成山坡的生态安全大于槽坝部位。近年来,随着槽谷区实施生态修复工程,例如,封山育林、退耕还林,退牧还草、石漠化综合治理工程以来,促使大面积的未利用地、裸露岩地、草地转变为生态林地,从而提高区域生态功能,其生态安全也不断增高(图 15)。2014 年来,在国家实施精准扶贫政策、生态移民搬迁,导致山地旱地、水田、草地撂荒现象突出,大面积转为草地、林地和灌木林地;另一方面,在地区乡村旅游发展和乡村振兴战略和城乡一体化建设制度下,集中连片的经果林和观光旅游业等规模利用增加,槽谷区景观利用呈现转型阶段[39]。

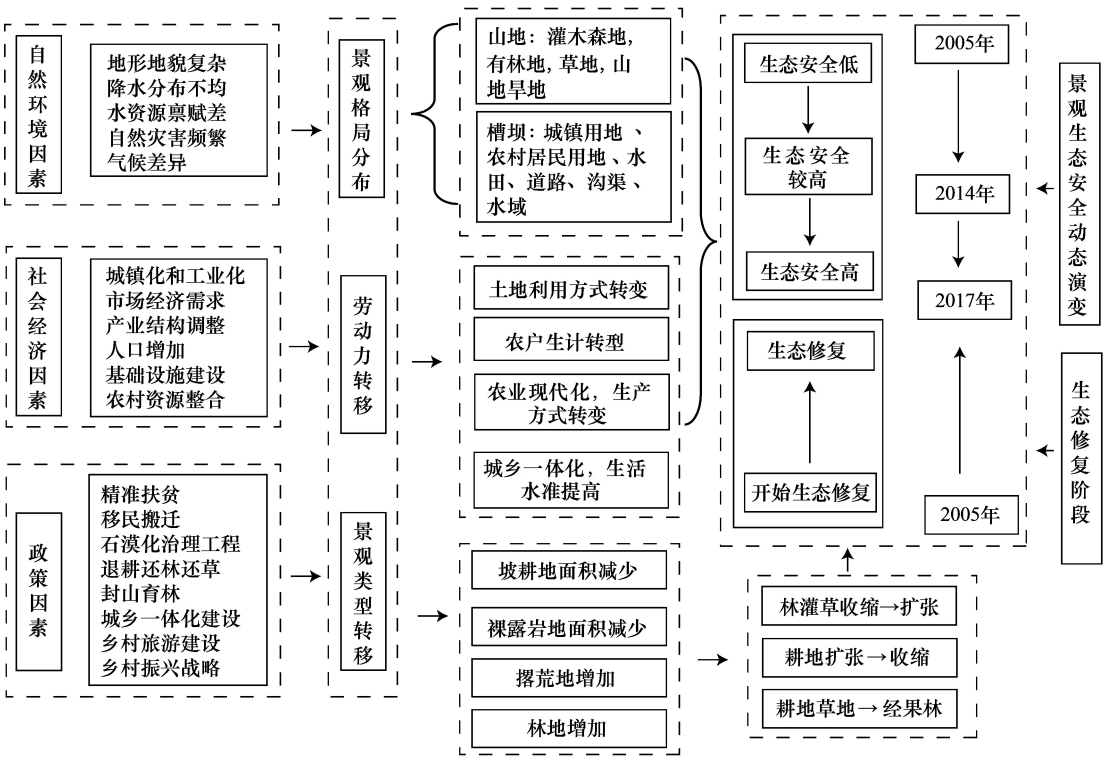


图 14　研究区景观格局演变及其生态安全的驱动机制

Fig.14　The landscape pattern evolution and its ecological security of driving mechanism in the study area

4.3　槽谷区景观格局演变及其生态安全的意义

随着国家对生态文明建设的明确要求,山区应承担更多的平衡责任。本文通过对槽谷区三条槽谷景观生态安全进行横向对比分析,以量化每个网格 ESI 的途径,有效平衡数据统计和空间分析,定量分析景观利用类型对区域生态安全的影响。由土地利用景观格局带来的生态安全状况不同,在槽坝和山坡因地制宜进行区域性生态安全保护策略[40]。依据景观生态安全局域空间自相关分为 4 种不同类型,其中高高值集聚区存在明显的空间扩散效应,采用扩张型策略,对其周边区域的生态安全水平起到带动作用,低低值集聚区主要分布在槽坝,采用集聚型手段[41-42],改善槽谷这典型地貌单元的生态环境具有重大意义。

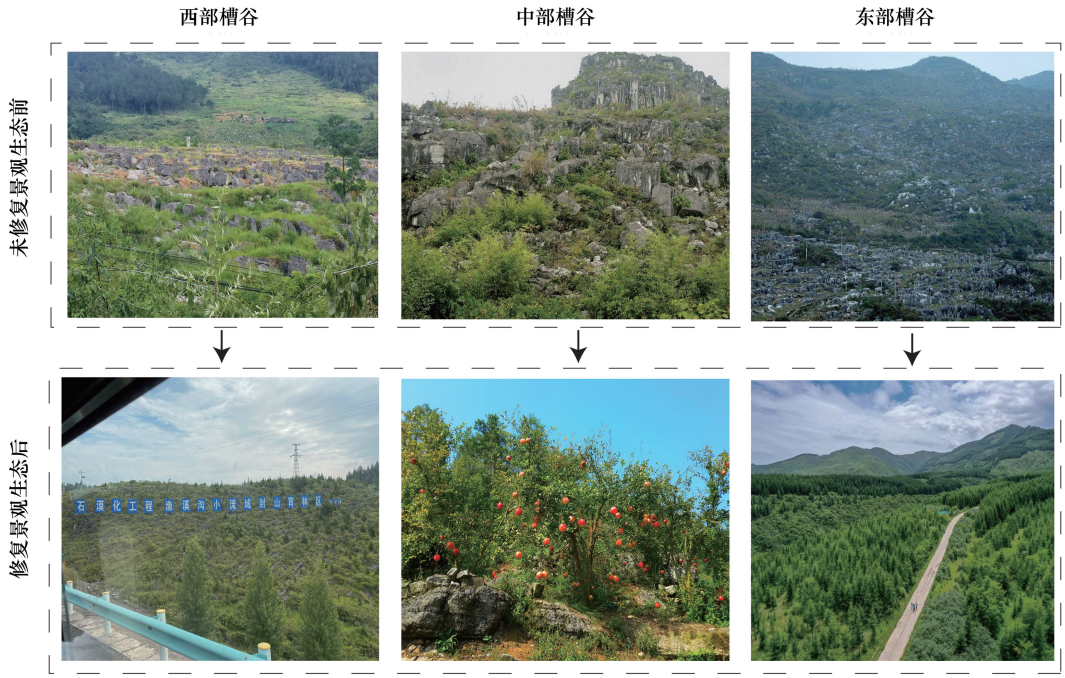


图 15 研究区生态修复

Fig.15 The ecological restoration in the study area

5 结论

本文以贵州省东北部西中东部槽谷区这典型地貌单元为研究对象,利用遥感影像和景观空间分析方法,基于景观生态理论,构建槽谷区景观生态安全模型,系统分析了景观格局变化情况及其生态安全的时空格局变化规律,并解释其景观格局及生态安全的驱动机制,得到以下几点结论:

(1)2005—2017 年,槽谷区内部景观整体呈现破碎化,景观斑块数量增多,景观格局由单一规则化、简单化向复杂混合型演变,槽坝区域较山坡变化显著,多样性增加且空间异质性增强。

(2)2005—2017 年,槽谷区 ESI 在时序上整体呈现升高趋势;西、东部槽谷 ESI 由槽坝向山坡两侧逐渐呈现增加,而中部槽谷则由山坡向槽坝呈现增加。

(3)槽谷区景观生态安全与地形因子具有显著影响关系,景观集聚分布格局受低地形起伏和坡度较缓区域影响较高且呈现共性趋势,而海拔则相反。

(4)岩溶槽谷区景观格局以扩充“林地-灌木林地-草地”的土地利用组合模式能增加景观生态安全。景观格局及其生态安全的时空分异是受当地自然环境、社会经济和政策导向共同作用的结果。

(5)近年来,在人工干预下实施生态修复工程,槽谷区生态由裸露石漠化逐渐恢复,实现了绿水青山就是金山银山的新面貌。

参考文献(References):

[1] 王权, 李阳兵. 岩溶槽谷区地形起伏特征及其对景观格局的影响. 山地学报, 2019, 37(5): 702-716.

[2] Macfarlane R. Implementing agri-environment policy: a landscape ecology perspective. Journal of Environmental Planning and Management, 1998, 41(5): 575-596.

[3] 王千,金晓斌,周寅康.河北省耕地生态安全及空间聚集格局.农业工程学报,2011,27(8):338-344.

[4] Li Y B, Shao J A, Yang H, Bai X Y. The relations between land use and karst rocky desertification in a typical karst area, China. Environmental Geology, 2009, 57(3): 621-627.

[5] Besser H, Mokadem N, Redhouania B, Rhimi N, Khlifi F, Ayadi Y, Omar Z, Bouajila A, Hamed Y. GIS-based evaluation of groundwater quality and estimation of soil salinization and land degradation risks in an arid Mediterranean site (SW Tunisia). Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10

(16): 350.
[6] Cerretelli S, Poggio L, Gimona A, Yakob G, Boke S, Habte M, Coull M, Peressotti A, Black H. Spatial assessment of land degradation through key ecosystem services: the role of globally available data. Science of the Total Environment, 2018, 628-629: 539-555.
[7] Guerra A J T, Fullen M A, Bezerra J F R, Jorge M D C O. Gully erosion and land degradation in Brazil: a case study from São Luís Municipality, Maranhão State//Dagar J C, Singh A K, eds. Ravine Lands: Greening for Livelihood and Environmental Security. Singapore: Springer, 2018: 195-216.
[8] Li S. Evaluation on urban land ecological security based on the PSR model and matter-element analysis: a case study of Zhuhai, Guangdong, China. Journal of Landscape Research, 2019, 11(3): 82-88, 92-92.
[9] Costa I, Martins F G, Alves I. Ecological Footprint as a sustainability indicator to analyze energy consumption in a Portuguese textile facility. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 2019, 10(4): 523-528.
[10] Pearson D, Nawaz M, Wasson R. Creating sustainable future landscapes: a role for landscape ecology in the rangelands of Northern Australia. The Rangeland Journal, 2019, 41(1): 13-21.
[11] Nowosad J, Stepinski T F. Information theory as a consistent framework for quantification and classification of landscape patterns. Landscape Ecology, 2019, 34(9): 2091-2101.
[12] 聂艳, 彭雅婷, 于婧, 周勇, 于雷, 罗静. 基于量子遗传投影寻踪模型的湖北省耕地生态安全评价. 经济地理, 2015, 35(11): 172-178.
[13] 刘珮勋,刘成林,韦倩柳.基于突变级数法的工业园区环境风险评价多参数集成指标体系.南昌大学学报(工科版),2018,40(1):19-22.
[14] Shao C F, Guan Y, Chu C, Shi R, Ju M, Shi J. Trends analysis of ecological environment security based on DPSIR model in the coastal zone: a survey study in Tianjin, China. International Journal of Environmental Research, 2014, 8(3): 765-778.
[15] 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.
[16] Lv H, Guan X J, Meng Y. Comprehensive evaluation of urban flood-bearing risks based on combined compound fuzzy matter-element and entropy weight model. Natural Hazards, 2020, 103(1): 1823-1841.
[17] 王正雄, 蒋勇军, 张远嘱, 段世辉, 刘九缠, 曾泽, 曾思博. 基于 GIS 与地理探测器的岩溶槽谷石漠化空间分布及驱动因素分析. 地理学报, 2019, 74(5): 1025-1039.
[18] 王权, 李阳兵, 胡先培, 李珊珊, 陈会. 岩溶槽谷区坡耕地利用的时空演变特征及驱动机制. 生态与农村环境学报, 2020, 36(1): 53-61.
[19] 李阳兵, 姚原温, 谢静, 王发艳, 白晓永. 贵州省山地——坝地系统土地利用与景观格局时空演变. 生态学报, 2014, 34(12): 3257-3265.
[20] 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.
[21] 李睿康. 三峡库区腹地典型流域土地利用变化及其景观格局演变[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2018.
[22] 周德,徐建春,王莉.环杭州湾城市群土地利用的空间冲突与复杂性.地理研究,2015,34(9):1630-1642.
[23] 孙才志,闫晓露,钟敬秋.下辽河平原景观格局脆弱性及空间关联格局.生态学报,2014,34(2):247-257.
[24] 阿里木江·卡斯木.人口密度、夜间光数据及 MODIS 的全球城市分类.遥感信息,2018,33(1):86-92.
[25] 任志远, 张晗. 银川盆地土地利用变化对景观格局脆弱性的影响. 应用生态学报, 2016, 27(1): 243-249.
[26] 李瑞, 张克斌, 边振, 尤万学. 宁夏哈巴湖自然保护区湿地景观多样性分析. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 139-143.
[27] 刘骏杰,陈璟如,来燕妮,骆博雅,赵芳,杜钦.基于景观格局和连接度评价的生态网络方法优化与应用.应用生态学报,2019,30(9):3108-3118.
[28] 谢余初,巩杰,张玲玲.基于 PSR 模型的白龙江流域景观生态安全时空变化.地理科学,2015, 35(6): 790-797.
[29] 刘纪远,匡文慧,张增祥,徐新良,秦元伟,宁佳,周万村,张树文,李仁东,颜长珍,吴世新,史学正,江南,于东升,潘贤章,迟文峰.20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局.地理学报,2014, 69(1): 3-14.
[30] Newbold T, Boakes E H, Hill S L L, Harfoot M B J, Collen B. The present and future effects of land use on ecological assemblages in tropical grasslands and savannas in Africa. Oikos, 2017, 126(12): 1760-1769.
[31] 罗旭玲,王世杰,白晓永,谭秋,冉晨,陈欢,习慧鹏,陈飞,操玥,吴路华,李汇文,钟昕.西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析.生态学报,2021, 41(2): 680-693.
[32] Galbraith S M, Hall T E, Tavárez H S, Kooistra C M, Ordoñez J C, Bosque-Pérez N A. Local ecological knowledge reveals effects of policy-driven land use and cover change on beekeepers in Costa Rica. Land Use Policy, 2017, 69: 112-122.
[33] 王权, 李阳兵, 刘亚香. 岩溶槽谷区山坡——槽坝土地利用变化的对比研究. 长江流域资源与环境, 2019, 28(1): 122-133.
[34] 王权, 李阳兵, 刘亚香, 胡先培. 基于地形梯度的岩溶槽谷区土地利用空间格局分析. 生态学报, 2019, 39(21): 7866-7880.
[35] Guedes C R, VanWey L K, Hull J R, Antigo M, Barbieri A F. Poverty dynamics, ecological endowments, and land use among smallholders in the Brazilian Amazon. Social Science Research, 2014, 43: 74-91.
[36] Hishe H, Giday K, Van Orshoven J, Muys B, Taheri F, Azadi H, Feng L, Zamani O, Mirzaei M, Witlox F. Analysis of land use land cover dynamics and driving factors in Desa'a Forest in Northern Ethiopia. Land Use Policy, 2021, 101: 105039.
[37] Gwedla N, Shackleton C M. Perceptions and preferences for urban trees across multiple socio-economic contexts in the Eastern Cape, South Africa. Landscape and Urban Planning, 2019, 189:225-234.
[38] 梁鑫源,李阳兵.三峡库区规模农地时空变化特征及其驱动机制.地理学报,2018, 73(9): 1630-1646.
[39] 梁鑫源,李阳兵,邵景安,刘雁慧,冉彩虹.三峡库区山区传统农业生态系统转型.地理学报,2019,74(8):1605-1621.
[40] Rapai S B, McMullin R T, Maloles J R, Turgeon M H, Newmaster S G. An ecological restoration approach to biological inventories: a case study in the collection of a vegetation biolayer that will inform restoration planning. Ecological Restoration, 2018, 36(2): 116-126.
[41] Iftekhar M S, Polyakov M, Ansell D, Gibson F, Kay G M. How economics can further the success of ecological restoration. Conservation Biology, 2017, 31(2): 261-268.
[42] Kim C J. *Dugong v. Rumsfeld*: social movements and the construction of ecological security. European Journal of International Relations, 2020, doi: 10.1177/1354066120950013.