

DOI: 10.20103/j.stxb.202207212097

程研, 关颖慧, 吴秀芹. 基于土地利用变化的喀斯特断陷盆地景观格局演变与生态安全评价. 生态学报, 2023, 43(22): 9471-9485.

Cheng Y, Guan Y H, Wu X Q. The spatial and temporal evolution of landscape pattern and landscape ecological security assessment in Karst Fault Basin based on land use change. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9471-9485.

基于土地利用变化的喀斯特断陷盆地景观格局演变与生态安全评价

程 研^{1,2,3}, 关颖慧^{1,2,3,*}, 吴秀芹^{1,2,3}

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083

3 北京林业大学云南建水荒漠生态系统国家定位观测研究站, 建水 654399

摘要: 喀斯特地区生态重要性与脆弱性并存, 研究喀斯特断陷盆地景观生态安全格局演变对当地土地利用高效管理和生态修复具有重要意义。以云南、四川、贵州三省交界处的喀斯特断陷盆地为研究对象, 基于 2000—2020 年土地利用数据, 通过构建土地利用转移矩阵、计算景观格局指数和景观生态安全指数, 系统分析土地利用、景观格局与景观生态安全水平的时空演变特征。结果如下: (1) 林地、草地、耕地是研究区主要土地利用类型, 面积占比超过 96%。土地利用变化主要发生在 2005—2010 年和 2015—2020 年, 空间上表现出整体稳定而局部变化剧烈的特点, 以退耕还林还草和林地向草地转换为主, 耕地面积在过去 20 年共减少了 386.62 km²。(2) 景观多样性与均匀度上升, 景观蔓延度下降。林地的最大斑块面积比例下降而草地上升, 多数用地的斑块密度上升而集聚度下降, 土地利用结构整体优化, 但破碎化趋势明显, 尤其是林地、耕地和草地。此外, 建设用地呈连片化扩张。(3) 景观生态安全水平明显提升, 一般安全及以上安全区面积占比由 2000 年的 62.35% 上升到 2020 年的 98.11%。在石漠化治理和生态保护的推动下, 南部的生态安全水平大幅提高, 推动空间格局从“北高南低”逐步转向“南北相对均衡”。景观生态安全水平的空间集聚性明显, 高-高值集聚区主要在北部而低-低值集聚区主要在南部, 需进一步推动北部生态保护以保障其生态屏障功能的发挥, 并加强南部生态修复来提升其生态安全水平。此外, 需持续推进石漠化治理并合理调控当地经济发展与生态保护间的关系, 来维持生态安全水平的长期稳定。

关键词: 土地利用; 景观格局; 景观生态安全; 喀斯特断陷盆地; 石漠化治理

The spatial and temporal evolution of landscape pattern and landscape ecological security assessment in Karst Fault Basin based on land use change

CHENG Yan^{1,2,3}, GUAN Yinghui^{1,2,3,*}, WU Xiuqin^{1,2,3}

1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Yunnan Jianshui Desert Ecosystem National Positioning Research Station, Jianshui 654399, China

Abstract: Karst region is characterized by its ecological significance and vulnerability. Exploring its spatial and temporal evolution of landscape ecological security pattern will shed light on local land use management and ecological restoration. Here, we examined in depth the features of spatial and temporal evolution of land use change, landscape pattern, and landscape ecological security pattern in Karst Fault Basin at junction of Yunnan, Sichuan, and Guizhou provinces, based on five phases of land use data in 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020 and used methods of land use transition matrix analysis, landscape pattern index, and landscape ecological security index calculation. The results were as follows. (1) In

基金项目: 公路交通环境保护技术交通运输行业重点实验室开放课题(2022ZXHTSBXY022); 国家重点研发计划(2016YFC0502500)

收稿日期: 2022-07-21; **采用日期:** 2023-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gyhdem@bjfu.edu.cn

terms of land use change, forest, grass land and cultivated land were the dominant land use types in the past two decades, aggregately accounting for over 96% of the study area. Land use transformation took place mainly in 2005—2010 and 2015—2020. It were manifested by two major forms, including the conversion of cultivated land into forest and grass land and the conversion of forest into grass land. As a result, the area of cultivated land declined by 386.62 km² in the past two decades. In general, the land use spatial structure kept relatively stable while that of some parts of the study region demonstrated drastic change during the study periods. (2) As for landscape pattern, the landscape diversity and evenness index increased while the contagion index dropped. Specifically, the largest patch index of forest decreased while that of grass land rose. For most land use types, the patch density grew while the aggregation index fell, indicating an increasing fragmentation trend against the background of land use structure generally optimizing, especially for forest, cultivated land, and grass land. In the meantime, continuous expansion of construction land was observed. (3) In terms of landscape security pattern, the past two decades witnessed a remarkable improvement of the landscape ecological security level in the study area. The proportion of area with a security level higher than “relatively low security” surged from 62.35% in 2000 to 98.11% in 2020. As for the spatial features of landscape security pattern, the level of landscape ecological security was high in the north and low in the south initially. Thanks to relentless efforts put into rocky desertification control and ecological improvement, the security level of the south increased considerably. This consequently contributed to a relative balance of security level between the north and south of the study area. In addition, the landscape ecological security index was featured by significantly spatial agglomeration, with high-high value clustered in the north and low-low value clustered in the south. These findings underscore the need for further advanced ecological conservation to ensure the ecological barrier function in the north and further intensified ecological restoration to improve the landscape ecological security level in the south of the study area. In addition to vigorously enhancing rocky desertification control, it is also crucial to strike a balance between economic development and ecological conservation to ensure the long-term stability of local landscape ecological security.

Key Words: land use; landscape pattern; landscape ecological security; Karst Fault Basin; rocky desertification control

生态安全是生态系统的完整性和健康水平的整体反映,是人类在生产、生活与健康等方面不受生态破坏与环境污染等影响的保障程度^[1]。在诸多影响区域生态安全的因素中,土地利用及其格局变化是影响区域生态安全最重要的方面^[2]。土地利用变化记录了人类改变地球表面特征的空间格局,再现了地球表面景观的时空动态变化过程^[3],影响着生态系统的能量交换、水分循环、生物地球化学循环等主要生态过程^[4],从而影响景观生态安全格局。在城市化快速推进与生态环境问题凸显的背景下,景观生态安全已成为景观生态学、地理学等学科研究的热点。

目前,关于景观生态安全的研究主要从以下三方面开展:一是通过景观格局指数构建景观生态安全指数,并通过统计分析、空间相关分析等方法来反映生态格局演变^[5-7];二是选取自然、经济社会因子,基于 P-S-R 模型构建生态安全指标体系^[8];三是通过识别生态源地和廊道来分析并优化生态安全格局^[9],并逐步融入生态系统服务相关热点内容^[10]。总体来看,关于景观生态安全评价研究的方法不断多元化,研究尺度从乡镇县域^[11-12]细化至斑块^[13]、网格^[6,14]精度,但研究成果主要集中在流域^[8,14-16]、城市^[17]、农业区^[11-12]等。这些研究从景观生态学理论、人地关系耦合等理论出发,为生态安全格局的研究提供了范例。

喀斯特断陷盆地是石漠化综合治理八大类型区之一,位于长江、珠江中上游,隶属国家“三区四带”中长江重点生态区的川滇森林及生物多样性生态功能区和桂黔滇喀斯特石漠化防治生态功能区,也是乌蒙山、滇桂黔石漠化连片特困区。该区域盆-山地形变化剧烈,土壤流/漏失严重,水土资源分离,植被立地条件差,面临着石漠化严重、干旱频发、植被恢复难等突出生态问题^[18],是我国石漠化综合治理八大类型区中治理成效最低、治理难度最大的区域。为此,自 2008 年以来,国家陆续开展了岩溶地区石漠化综合治理一期工程(2006—2015 年)和二期工程(2016—2020 年)^[19]。石漠化综合治理作为国家重大生态工程之一,不仅会直

接影响当地的植被变化,还将深刻影响喀斯特断陷盆地的土地利用结构,从而影响该区的景观生态安全格局及区域可持续发展。相对于喀斯特峰丛洼地、高原^[20]和槽谷^[6]等岩溶地貌区,强烈的构造运动制约着断陷盆地地貌演化过程和生态环境的空间分异格局,使其生态安全演化呈现复杂特征。

然而,关于喀斯特断陷盆地的研究还存在以下不足:第一,从研究内容上看,学者们多从喀斯特断陷盆地石漠化演变规律^[21]、植被退化与恢复生态学机制^[22]、石漠化治理模式与对策^[23-24]等方面,重点围绕该区石漠化治理与植被恢复技术开展深入研究,缺少对石漠化治理背景下景观生态安全格局演变的系统分析;第二,从研究区域上看,针对西南喀斯特这一特殊地貌区的关注不够,尤其是对石漠化严重、生态系统脆弱、地质环境特殊的喀斯特断陷盆地尚缺乏深入研究。喀斯特断陷盆地作为西南喀斯特地区特殊生态系统的代表之一,以及石漠化综合治理八大类型区之一,探究其长时间序列的景观生态安全格局演变,能够加深对西南喀斯特地区景观生态安全演变规律的理解,推进对石漠化综合治理规律的理解和治理效果的科学评估,从而为该地区生态保护与生态修复提供科学指导,并为断陷盆地和其他类型区的石漠化治理提供经验积累与借鉴。因此,有必要对喀斯特断陷盆地的景观生态安全格局进行长时间序列的深入研究。

基于此,本研究选取云南、四川、贵州三省交界处的喀斯特断陷盆地为研究对象,基于 2000、2005、2010、2015 和 2020 年 5 期土地利用类型数据,借助土地利用转移矩阵、景观格局指数、景观生态安全评价以及空间自相关分析等方法,深入探讨以下问题:1)在石漠化综合治理的背景下,该区近 20 年的土地利用结构和景观格局发生了哪些变化;2)喀斯特断陷盆地景观生态安全格局演变呈现何种特征,与石漠化治理措施存在什么样的联系。研究结果可为喀斯特断陷盆地土地利用高效管理和当地生态修复提供科学指导,并推动当地经济社会生态可持续发展。

1 研究区概况

喀斯特断陷盆地位于云南、四川和贵州三省交界处(22°39'N—29°09'N,100°03'E—105°09'E),总面积 11.03 万 km²,包含 43 个县(区)。该区属南亚热带季风气候,干湿分明,年均降雨量为 900—1200 mm,年均气温为 13.5—15.5℃。植被以亚热带常绿阔叶林为主,地貌类型以盆地、山地为主,地势西北高,东南低。研究区内岩溶地貌发育典型,石漠化面积达 1.51 万 km²^[25-26],是我国石漠化重点治理区之一。为行文方便,本文将研究区按照方位位置划分为北部、中部、西南部与东南部四个区域(图 1)。

2 研究数据与方法

2.1 数据来源

本文土地利用数据来自于中国科学院资源环境科学与数据中心提供的全国土地利用类型遥感监测空间分布数据(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率为 30 m×30 m,统一空间参考坐标系为 Krasovsky_1940_Albers 坐标系,包含 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 5 个时期的土地利用数据。该数据集土地利用类型综合评价精度达到 90%以上,在土地利用、景观格局演变相关研究中得到了广泛应用^[14,25-26]。根据研究需要,本文将土地利用类型划分为林地、耕地、草地、水域、建设用地、未利用地六类。喀斯特石漠化治理措施数据来自中南林业调查规划设计院提供的三期石漠化监测成果数据。其中,第一期(2005 年)监测数据涵盖农艺措施、工程措施、生物措施、综合措施、未采取措施共五种措施的面积大小和空间分布,第二期(2011 年)、第三期(2016 年)监测数据涵盖封山管护、封山育林育草、工程措施、农业技术措施、林草措施、未采取措施共六种措施的面积大小和空间分布。第一期治理措施中的农艺措施对应第二、三期中的农业技术措施,第一期措施中的生物措施在第二、三期中细分为为了封山管护、封山育林育草、林草措施三类措施,而第一期措施中的综合措施在第二、三期中无对应项。该数据采用天地空一体化监测技术,可操作性强,能准确反映石漠化治理措施的动态变化,在喀斯特断陷盆地植被修复、生态系统服务相关研究中得到了有效应用^[25-26]。

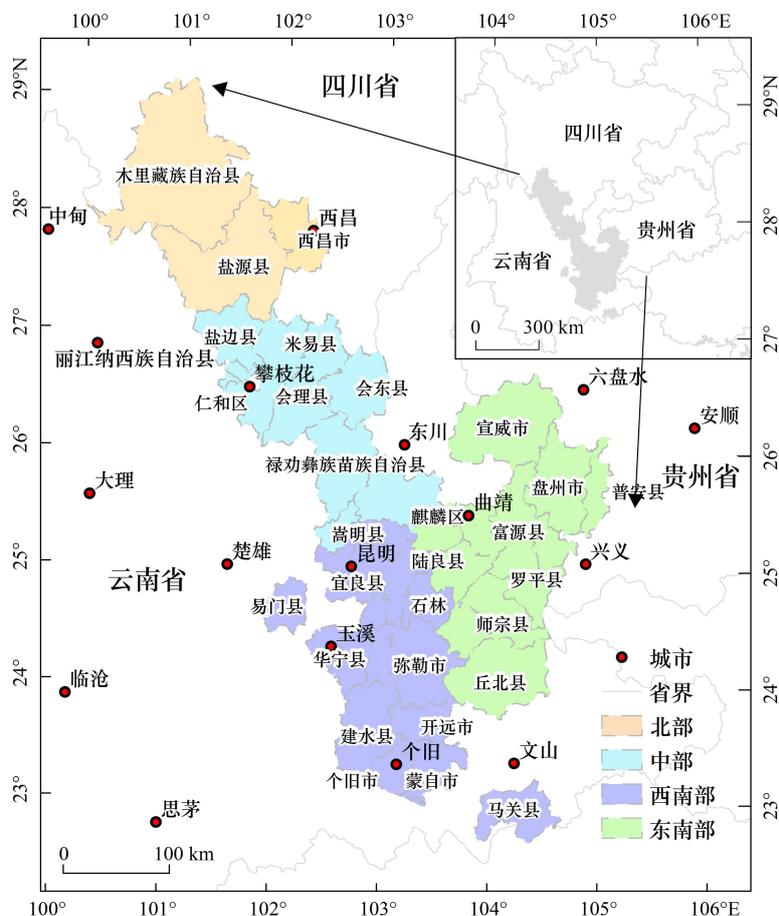


图1 研究区区位示意图

Fig.1 Sketch map of location of study area

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵能反映区域土地利用变化的结构特征及各用地类型的变化方向,其数学形式如下,其中 S 为面积, n 为土地利用类型数, i, j 分别为研究期初和研究期末的土地利用类型。

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2.2 景观格局指数

景观格局指数能够表示景观要素的数量、形状和空间分布等特征^[14]。根据研究需要,为了全面反映研究区景观格局的破碎度和多样性特征,分别从类型水平和景观水平两个尺度对喀斯特断陷盆地的景观格局进行系统分析,具体包括4个类型水平和3个景观水平的景观格局指数(表1),并利用 fragstats 4.2 软件对各景观格局指数进行计算。

2.2.3 景观生态安全指数

基于景观干扰度和景观脆弱度构建景观生态安全指数的方法在许多研究中得到了广泛应用^[5-6,14-15],不同学者将其运用于我国喀斯特槽谷地区^[6]、喀斯特高原^[15-16]、典型红壤丘陵区^[5]、川滇生态屏障区^[27]等,并建立了景观格局指数与景观生态安全之间的定量化表达。景观干扰度表示不同景观生态系统受到干扰的程度^[14],由景观破碎度、景观分离度和景观优势度加权计算得到。现有研究认为景观破碎度最为重要,其次为

分离度和优势度,因此分别赋值为 0.5、0.3 和 0.2^[6,27]。景观脆弱度表示景观利用类型遭受干扰后的变化程度状况^[6],根据现有研究^[5-6]并结合研究区实际情况进行赋值:其中建设用地最为稳定,赋值为 1;林地与草地多分布在距离居民点较远的位置,相对稳定,分别赋值为 2 和 3;耕地易受人类扰动,赋值为 4;水域紧邻建设用地和耕地,受人类活动干扰大,赋值为 5;未利用地代表的生态系统最为脆弱^[5],赋值为 6,具体计算公式见表 2。在 ArcGIS 10.7 中将研究区划分成 1333 个 10 km×10 km 的网格,在此基础上计算各个网格的景观生态安全指数,最后通过克里金插值得到研究区景观生态安全指数。

表 1 研究区景观格局指数及其意义

Table 1 Landscape pattern index and its contents of study area

尺度 Scale	景观格局指数 Landscape pattern index	指数意义 Contents
类型水平 Class level	斑块密度 PD/(个/km ²) 最大斑块面积比例 LPI/% 周长-面积分维数 PAFRAC	单位面积上某一类型斑块的个数 某一类型中最大斑块的面积占总面积的比例 反映各类型斑块形状的复杂性
景观水平 Landscape level	聚集度 AI/% 蔓延度 CONTAG/% 香农多样性指数 SHDI 香农均匀度指数 SHEI	表征某类型景观斑块在空间上的集聚程度 描述景观中不同斑块类型的团聚程度和蔓延趋势 基于信息理论的测量指数,能反映景观多样性 反映景观中各斑块在面积上分布的均匀程度

PD: Patch density; LPI: Largest patch index; PAFRAC: Perimeter-area fractal dimension; AI: Aggregation index; CONTAG: Contagion index; SHDI: Shannon's diversity index; SHEI: Shannon's evenness index

表 2 景观生态安全指数计算方法

Table 2 Calculation methods of landscape ecological security index

名称 Name	计算方法 ^[5-6,14-15] Calculation methods	说明 Notes
景观破碎度 Landscape fragmentation index (C_i)	$C_i = N_i / A_i$	N_i 和 A_i 为景观类型 i 的斑块数量和面积
景观分离度 Landscape separation index (S_i)	$S_i = \frac{A}{2A_i} \sqrt{\frac{N_i}{A}}$	A 为景观总面积, km ²
景观优势度 Landscape dominance index (D_i)	$D_i = \frac{2 \ln(P_i/4)}{\ln A_i}$	P_i 为景观类型 i 的周长, km
景观干扰度 Landscape disturbance index (E_i)	$E_i = aC_i + bS_i + cD_i$	a, b, c 为权重, 参考前人研究 ^[6,27] 分别赋值 0.5、0.3 和 0.2
景观脆弱度 Landscape fragility index (F_i)	F_i : 专家咨询法	参考前人研究 ^[5-6] , 按景观受干扰的敏感性进行赋值, 具体为: 未利用地 6, 水域 5, 耕地 4, 草地 3, 林地 2, 建设用地 1
景观生态安全指数 Landscape ecological security index (ES_k)	$ES_k = \sum_{i=1}^m \left(\frac{A_{ki}}{A_k} \right) (1 - 10 E_i F_i)$	m 为景观类型数, A_{ki} 代表第 k 个采样单元第 i 种景观类型的面积

2.2.4 景观生态安全评价标准的确定

为了反映研究区景观生态安全指数的时空差异特征,参考已有研究成果^[6]并结合研究区景观生态安全指数分布的实际情况,采用自然断点法将研究区域的景观生态安全水平划分为五个等级,并以 2000 年分类区间作为基准统一其他年份分类区间,具体见表 3。

表 3 景观生态安全评价标准

Table 3 Evaluation standard of landscape ecological security

景观生态安全指数 ES_k Landscape ecological security index	景观生态安全水平 Landscape ecological security level	景观生态安全指数 ES_k Landscape ecological security index	景观生态安全水平 Landscape ecological security level
$0.70 \leq ES_k < 0.82$	低安全	$0.89 \leq ES_k < 0.91$	较安全
$0.82 \leq ES_k < 0.86$	较低安全	$0.91 \leq ES_k < 1.00$	安全
$0.86 \leq ES_k < 0.89$	一般安全		

2.2.5 空间自相关分析

全局空间自相关能揭示地理现象是否具有空间集聚性,局部空间自相关能反映整个大区域中的一个局部小区域单元上的某种地理现象或某一属性与相邻局部小区域单元上同一现象或属性的相关程度^[5,28],二者分别可以通过 Moran's I 和 LISA 指数表征。本研究基于该指标分析景观生态安全指数的空间分布模式,计算公式如下^[5-6]。

(1) 全局空间自相关:

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

式中, n 为变量 x 的样点总数; x_i 和 x_j 为 i, j 样区上某属性的观测值; \bar{x} 为 n 样区属性值的平均值; W_{ij} 为空间权重矩阵。Moran's I 的取值范围为 $[-1, 1]$, 值大于 0 表示空间正相关, 值小于 0 表示空间负相关, 值等于 0 表示不相关。

(2) 局部空间自相关:

$$\text{LISA}_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sum_i \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}} \sum_j W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (i \neq j) \quad (3)$$

LISA_i 并无固定的取值范围, LISA_i 值大于 0 表示该区域单元周围相似值在空间上的集聚, 表现为高-高集聚或低-低集聚; LISA_i 值小于 0 表示非相似值在空间上的集聚, 表现为高-低集聚或低-高集聚。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

3.1.1 土地利用现状

2000—2020 年间, 林地、草地和耕地是研究区的主要用地类型, 各年份面积变化不大, 占比均超过 96%。建设用地持续扩张, 面积扩大了 1.21 倍(表 4)。从空间上看, 各类用地的空间分布总体保持稳定, 优势地类林地和草地广泛分布于研究区各个部分, 且在北部最为集中。耕地分布较为零散, 主要集中在研究区南部(图 2)。

表 4 2000—2020 年研究区土地利用变化

Table 4 Land use change in study area from 2000 to 2020

土地利用类型 Land use type	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	面积	比例								
	Area/km ²	Proportion/%								
林地 Forest	56148.77	50.84	56157.12	50.85	56168.48	50.86	56077.54	50.78	55198.13	49.99
草地 Grass land	29087.37	26.34	29078.19	26.33	28605.65	25.90	28490.17	25.80	29063.15	26.32
耕地 Cultivated land	22699.91	20.56	22625.54	20.49	22716.04	20.57	22553.33	20.42	22313.29	20.21
建设用地 Construction land	1192.37	1.08	1264.96	1.15	1594.40	1.44	1889.50	1.71	2308.73	2.09
水域 Water	1177.35	1.07	1179.71	1.07	1232.50	1.12	1307.05	1.18	1430.16	1.30
未利用地 Unused land	126.88	0.11	127.21	0.12	116.06	0.11	115.45	0.10	113.38	0.10

3.1.2 土地利用结构变化

2000—2020 年, 林地、草地、耕地三类用地的相互转换是研究区土地利用转换的主要方向(图 3)。20 年间, 总计 2876.17 km² 林地转为草地, 主要位于研究区东南部(图 2); 2346.17 km² 草地转为林地, 主要位于研究区北部; 1527.28 km² 和 1070.15 km² 耕地分别转为林地和草地, 主要位于研究区北部、中部和东南部。此外, 共

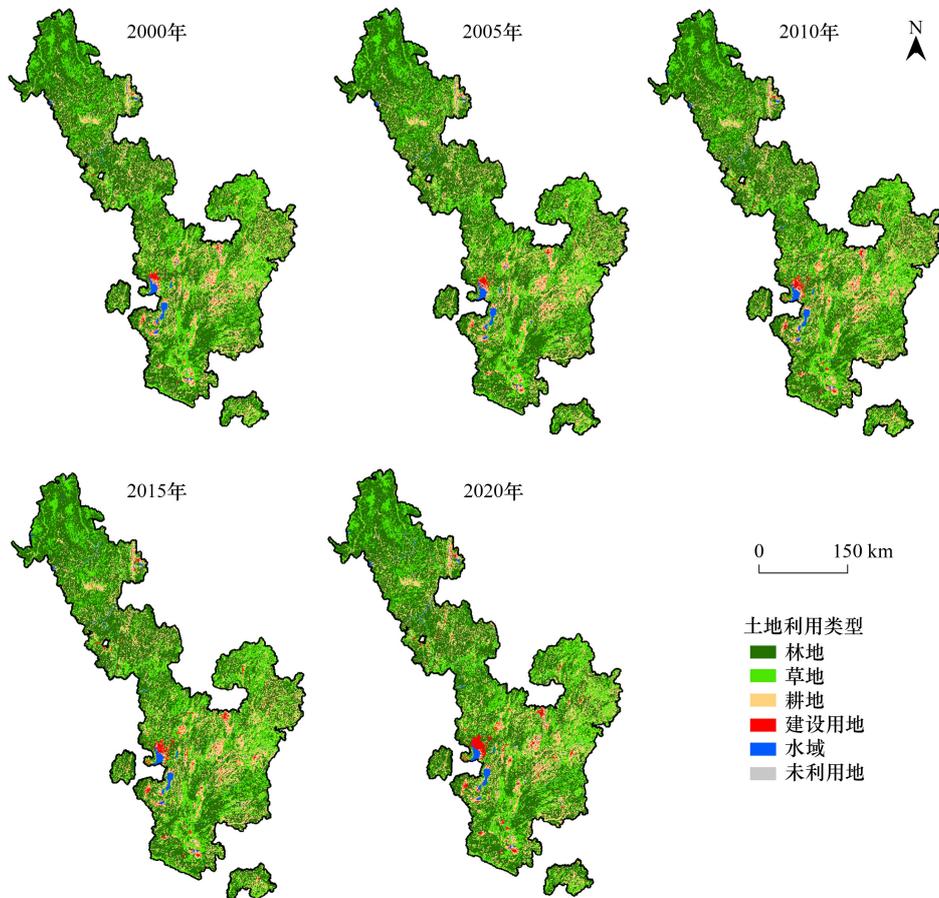


图2 2000—2020年研究区土地利用变化

Fig.2 Land use change in study area from 2000—2020

761.29 km²耕地转为建设用地,主要位于研究区北部的西昌市、西南部的宜良县和东南部的富源县,说明在生态恢复的同时,研究区仍然面临着城镇发展带来的较大压力。

不同时期来看,各类用地的转换主要发生在2005—2010年以及2015—2020年。2005—2010年,共有735.12 km²耕地转为林地和草地,但同期林地和草地向耕地的转换却达到1005.67 km²。另外,该时期新增的建设用地主要来源为耕地,共有272.18 km²耕地转化为建设用地(图3)。2015—2020年,由于国家退耕还林还草政策的驱动,耕地向林地、草地转换的面积达2107.85 km²,相比2005—2010年增加了1.87倍,且主要转换区域由研究区东南部扩展到中部和北部。林地与草地间的相互转换同样剧烈,其中林地向草地的转换达2283.88 km²,主要位于云黔交界处的盘州市。耕地向建设用地的转换面积相比前期有所增加,达到379.95 km²(图3)。整体来看,2000—2020年各类用地面积变化幅度相对较小,空间分布较为稳定,但林地、草地、耕地之间,以及耕地和建设用地之间存在着较为明显的转换,土地利用格局总体上表现出整体稳定而局部变化剧烈的特点。

3.2 景观格局变化分析

3.2.1 类型水平

在斑块密度(PD)上(图4),耕地是PD最大的用地类型,说明其破碎化程度最为严重,主要是由于喀斯特断陷盆地特殊的地形条件导致该区适宜耕作的土地较少,从而造成耕地在空间上的破碎化分布。在2000—2020年间,各类用地的PD均呈上升趋势,说明喀斯特断陷盆地土地利用景观都遭到了不同程度的扰动。此外,林地、草地、耕地的聚集度(AI)在2000—2020年间呈下降趋势,同样反映了主要用地类型的破碎

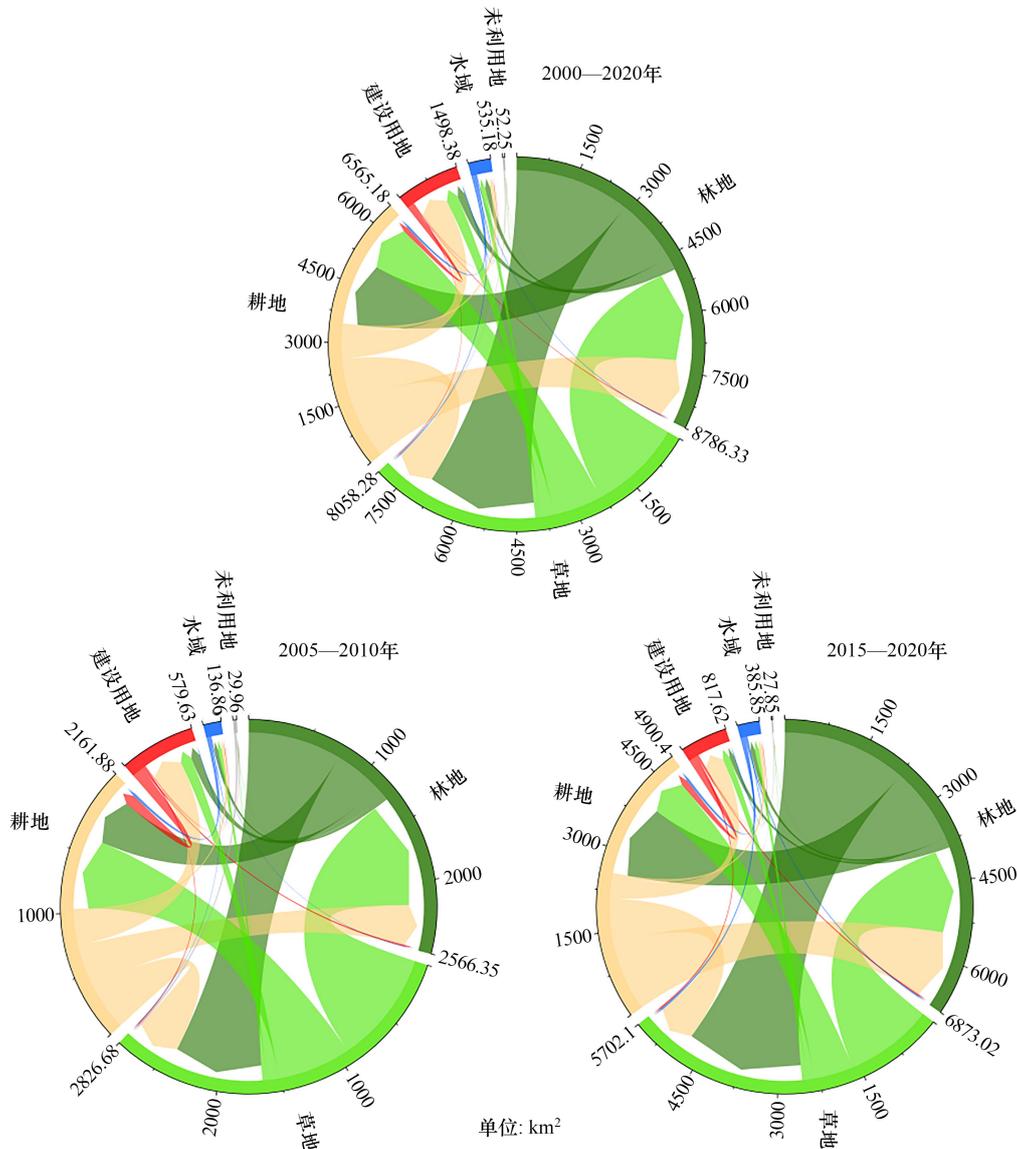


图3 不同年份间研究区不同地类间土地利用转移格局

Fig.3 Land use transition pattern in study area between different land use types and different years

化趋势(图4),这将影响生态系统的完整性和稳定性,从而对生态功能的发挥造成不利影响。

在最大斑块面积占比(LPI)上(图4),林地始终是研究区的优势景观类型。2005—2010年,林地的LPI增大,这主要是由于该时期耕地向林地转换的面积相比2000—2005年间增大,从而导致局部地区林地斑块面积变大。2015—2020年,林地的LPI减小,而草地的LPI增大,这与该时期林地向草地转换,林地面积减小而草地面积增加有关。

林地、草地、耕地的周长面积分维数(PAFRAC)相对稳定(图4),而水域和未利用地的PAFRAC在2015—2020年间大幅上升,反映了其形状的复杂化,这与该时期水域向耕地以及未利用地向草地的转换有关。建设用地的PAFRAC呈下降趋势,反映了人为干扰下其形状趋于规整的特点。

3.2.2 景观水平

在集散性上,研究区的蔓延度在20年间持续下降,说明景观呈现较为分散的状态,连通性较低,这与各类用地的破碎化有关,会导致景观整体的抗干扰能力下降^[14]。在多样性上,香农多样性指数和香农均匀度指数

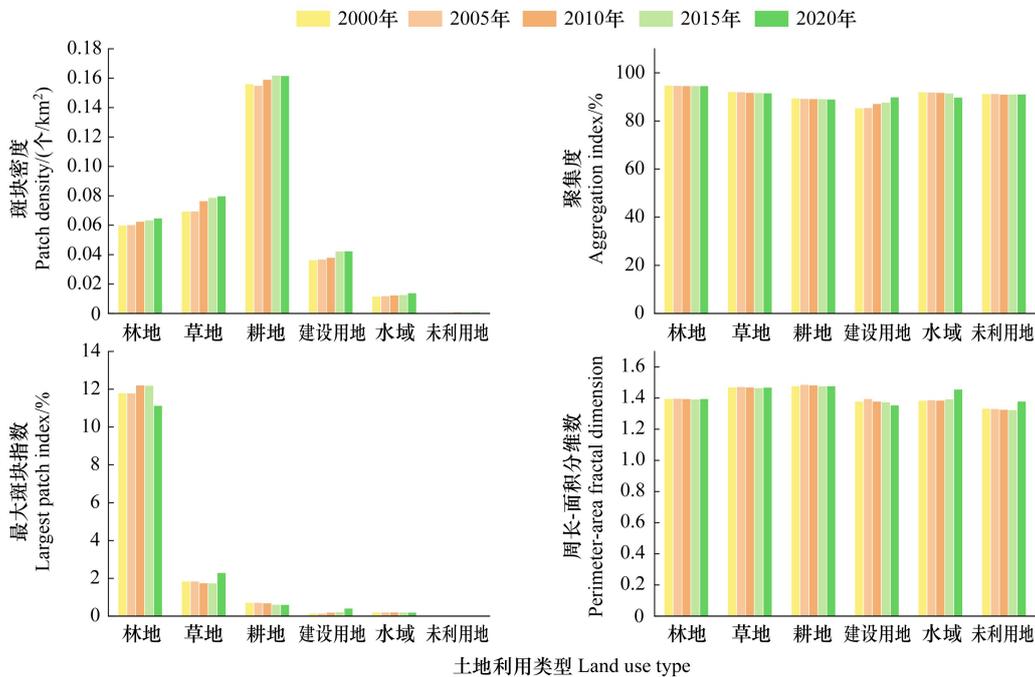


图 4 2000—2020 年研究区类型水平景观格局指数变化

Fig.4 Landscape pattern index variation of type level in study area from 2000—2020

均持续上升,说明林地这一优势景观的地位有所下降,其他各类用地在景观中的占比有所上升,这主要与生态修复过程中草地面积增加,以及城镇化的发展导致建设用地面积增加有关。整体来看,在人类活动的影响下,喀斯特断陷盆地景观的多样性增强但整体连通性下降,破碎化的斑块在空间上呈现出夹杂分布特征(图 5)。

3.3 景观生态安全格局演变

3.3.1 景观生态安全指数总体格局分析

总体上看,2000—2020 年间研究区景观生态安全水平呈现北高南低的空间分布特征,且景观生态安全格局整体好转(图 6)。具体来看,2000 年,研究区低安全区和较低安全区的面积占比共达到 12.93%(图 6),主要分布在研究区南部和北部的西昌市,这些地区均存在建设用地、耕地等多种用地交错分布的特点,各类用地较为破碎。较安全和安全区面积占比共达到 62.35%,主要分布在研究区北部和中部,这些地区是林地和草地的集中分布区,用地较为完整。

2005 年、2010 年和 2015 年,研究区生态安全水平继续保持北高南低的格局,并总体呈现缓慢提升的趋势。其中,一般安全及以下水平的区域面积占比从 2005 年的 42.44%降低至 2015 年的 30.52%,而较安全和安全区的面积占比从 2005 年的 57.56%上升至 2015 年的 69.48%(图 6),说明生态修复工程取得了一定成效,生态安全水平整体提升。但局部地区如东南部的曲靖市和西南部的呈贡区等存在较低安全区面积增加的情况(图 6),这主要与当地建设用地的扩张有关。

2020 年,研究区景观生态安全水平全面好转,景观生态安全水平由北高南低逐步转换为南北相对均衡的局面,南部的生态安全水平明显提高。其中,安全区和较安全区的面积总占比达到 98.11%,而低安全区和较低安全区的面积占比下降到 0.72%(图 6),说明生态修复工程取得了明显成效。

3.3.2 景观生态安全水平空间自相关分析

2000—2020 年五个时期的全局自相关指数分别为 0.301, 0.486, 0.501, 0.501, 0.515, 均通过了显著性水平 $P=0.01$ 的检验,说明生态安全指数在空间上存在集聚性,且局部空间自相关结果表明其以高-高值集聚和

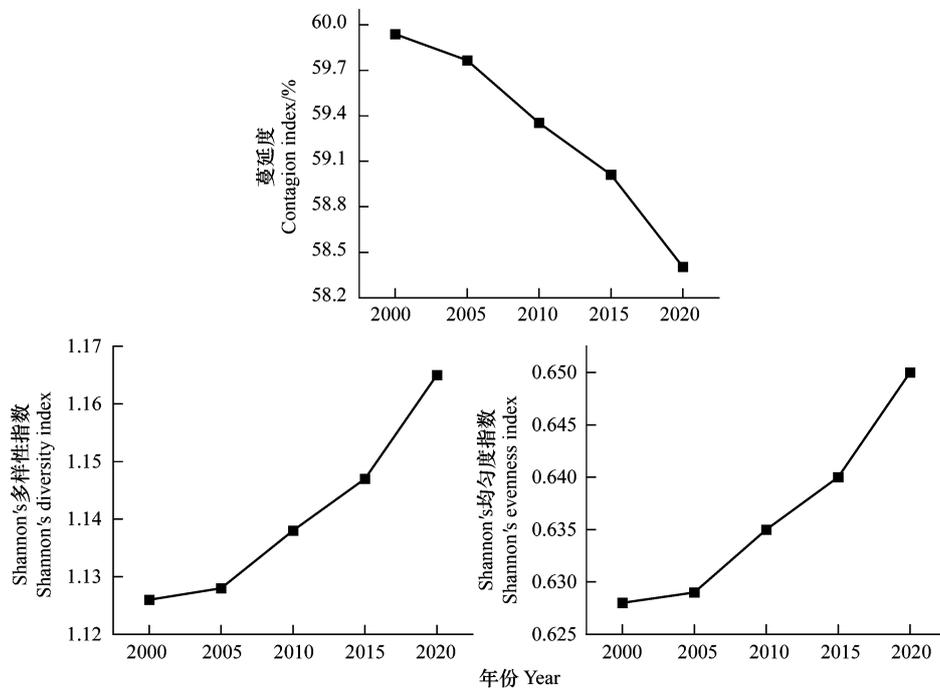


图 5 2000—2020 年研究区景观水平景观格局指数变化

Fig.5 Landscape pattern index variation of landscape level in study area from 2000—2020

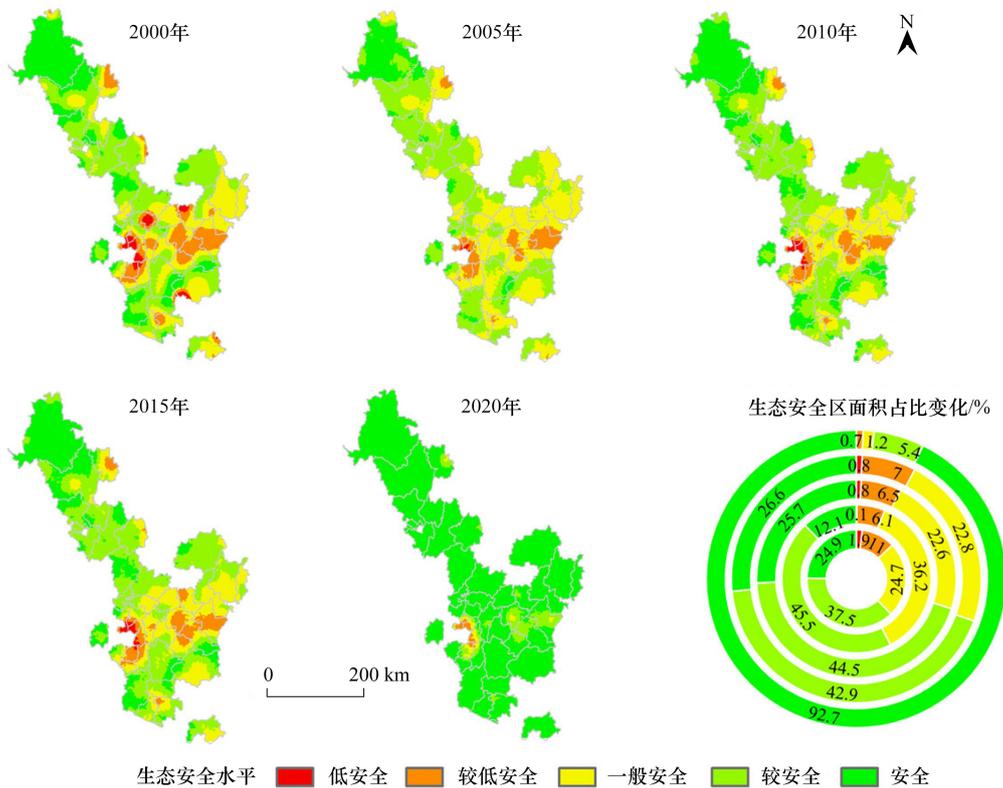


图 6 2000—2020 年研究区景观生态安全格局演变

Fig.6 Evolution of landscape ecological security pattern in study area from 2000—2020

图中环形图内圈到外圈依次代表 2000、2005、2010、2015 和 2020 年各级别生态安全区的面积占比

低-低值集聚为主(图7)。2000年生态安全指数聚集单元较为分散,2005—2020年间生态安全指数局部相关性空间分布格局整体保持稳定,高-高值集聚区主要位于研究区北部的木里藏族自治县,该地区是林地集中分布区,而低-低值集聚区主要集中于西南部和东南部的部分县区。从局部上看,北部的高-高值集聚区面积逐渐扩大,空间分布上趋于集中,反映了北部地区生态安全水平的提高。南部的低-低值集聚区面积逐渐减小,但空间分布上仍较为集中,说明在景观生态水平整体好转的趋势下,南部仍存在着生态恶化的风险。生态安全指数的空间自相关结果表明,北部作为林地、草地集中分布地区,主要起到生态屏障作用,未来需进一步保障其生态功能的发挥,而南部作为各类用地交错分布区以及主要的石漠化地区,受人类活动影响更大,生态更为脆弱,未来仍需注重其生态系统的保护和修复。

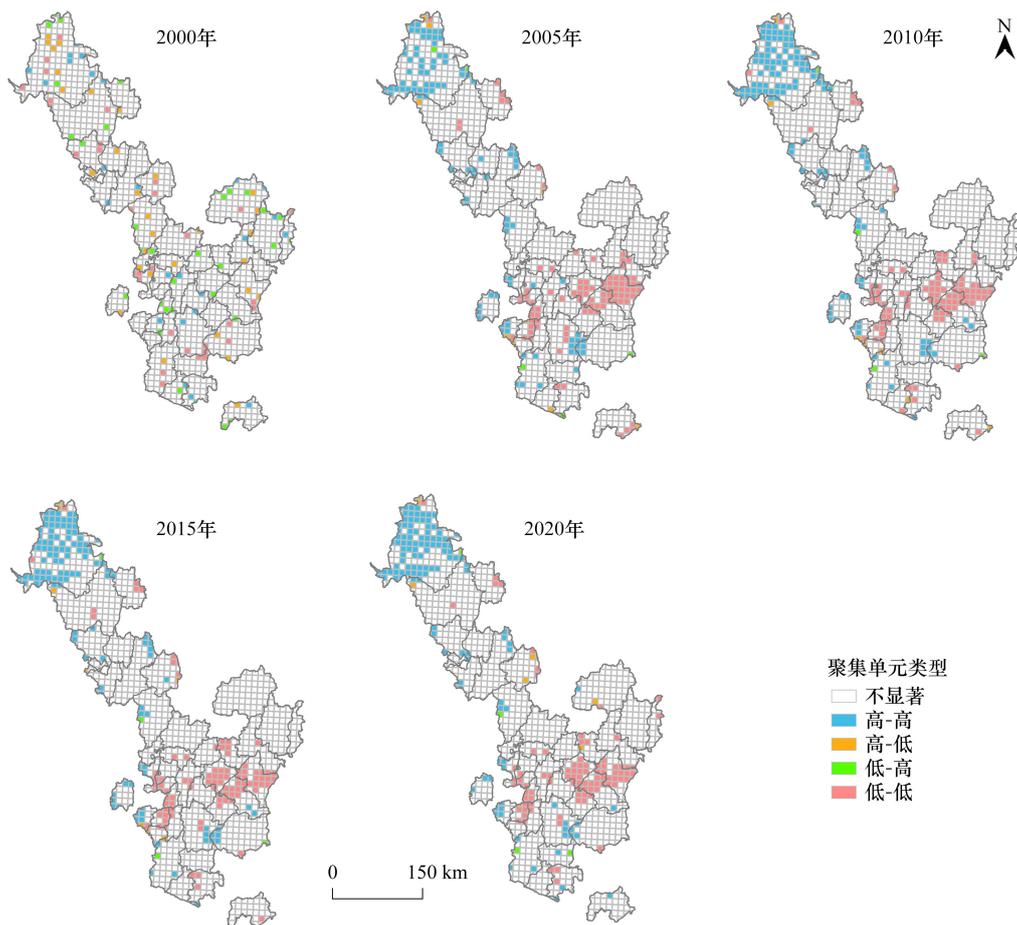


图7 2000—2020年研究区景观生态安全指数局部空间自相关图($P=0.01$)

Fig.7 Local spatial auto-correlation map of landscape ecological security index in study area from 2000—2020 ($P=0.01$)

4 讨论

基于以上分析,2000—2020年间,喀斯特断陷盆地的土地利用结构有所优化,景观生态安全格局整体好转,这在一定程度上与该区实施的石漠化治理工程有关。自20世纪80年代后,不同学者开始从多角度开展石漠化治理研究,并设立示范区、示范县,取得了一定进展^[25]。我国在2006—2015年以及2016—2020年实施了两期岩溶地区石漠化治理工程,并由国家林业和草原局牵头分别在2005、2011、2016和2021年开展了四次石漠化监测(2021年的石漠化监测数据尚未公布)。2005年,石漠化监测数据显示该区石漠化治理面积达2448.36 km²(图8),主要分布在研究区南部(图9),涉及生物、农艺、工程和综合措施四大类。其中,生物措施

(主要包括封山育林育草等)面积最大,达到 1946.68 km²(图 8),在一定程度上促进了当地植被的恢复。因此,2005 年喀斯特断陷盆地的生态安全水平相比 2000 年有所提高。

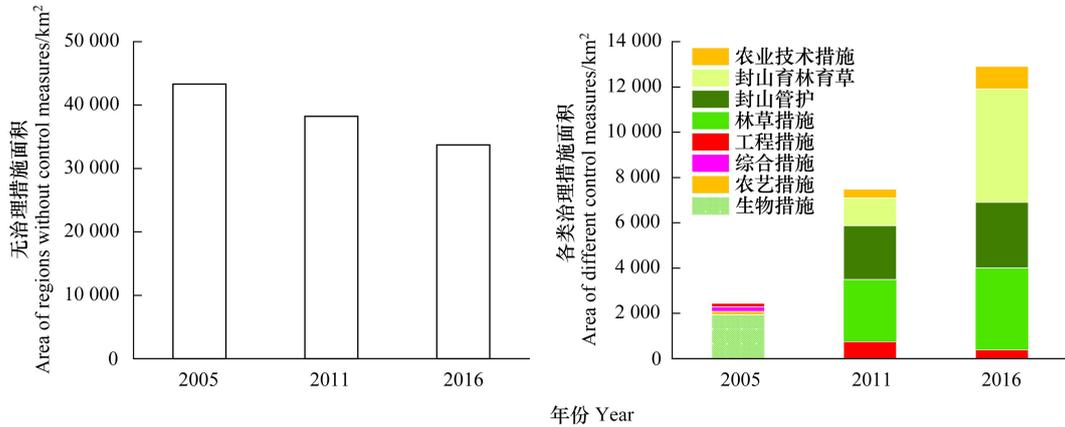


图 8 研究区石漠化治理措施面积变化

Fig.8 Area change of rocky desertification control measures in study area

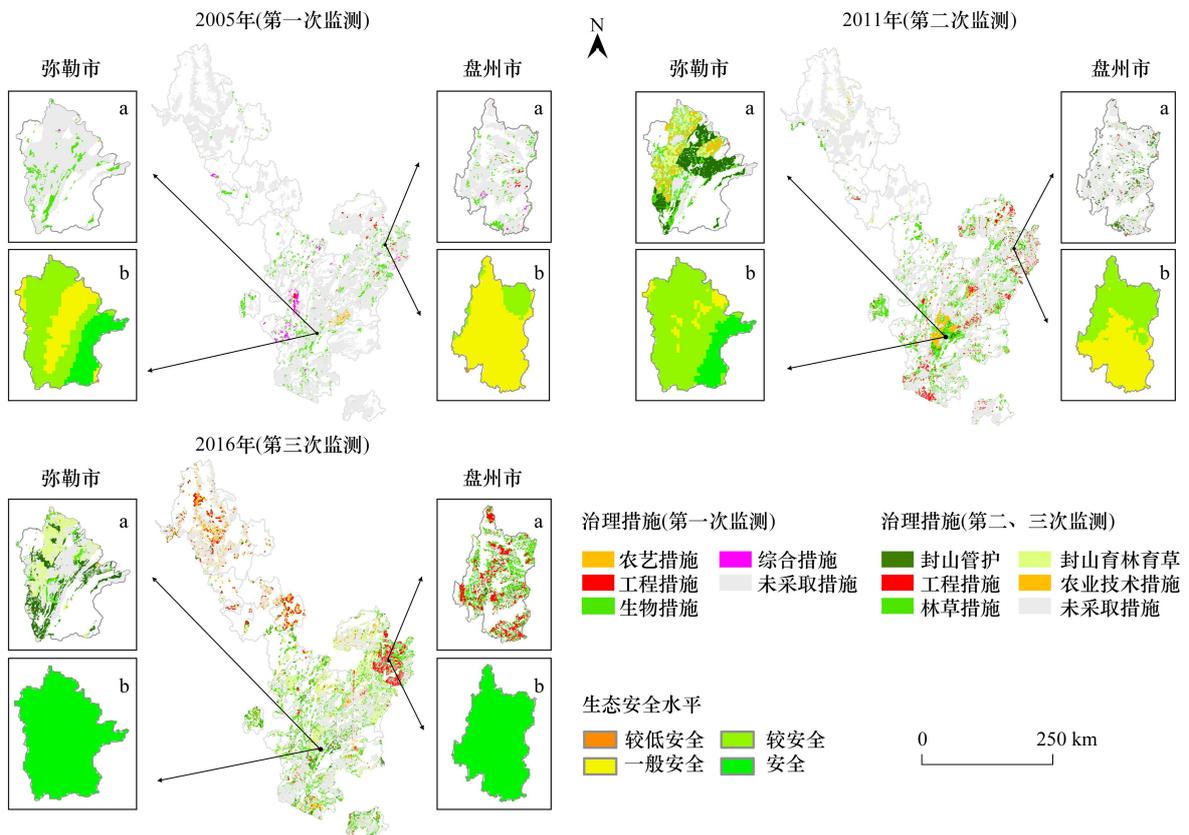


图 9 研究区石漠化治理措施空间分布

Fig.9 Spatial distribution of rocky desertification control measures

a 窗口为该市的治理措施,b 窗口分别为该市 2000 年、2010 年和 2020 年的生态安全水平

2011 年该区石漠化治理面积达 7481.95 km², 相比上个时期增加了 2.06 倍, 治理范围仍以南部为主 (图 9)。鉴于石漠化治理往往遵循先易后难的原则, 导致当地生态恢复需要更长的时间, 研究区 2010 年和 2015 年的生态安全水平相比 2005 年提升不大。

2016 年石漠化治理面积进一步增加到 12907.73 km²(图 8),治理范围从南部扩展到北部(图 9),治理措施以封山育林育草为主,其面积达到 5009.02 km²。经过了多年的石漠化治理,各类措施的生态效应逐步显现,本文的研究结果均表明过去 20 年间研究区的土地利用结构明显优化,景观生态安全格局明显改善。具体表现为,研究区南部有较多耕地转为林地和草地,耕地向林、草地转换的面积达到 2107.85 km²,草地面积增加了 572.98 km²,景观生态安全区的面积大幅增加(图 6)。

具体以盘州市和弥勒市为例(图 9),盘州市的石漠化治理以封山管护和林草措施为主,总措施面积从 2005 年的 243.46 km²增加到 2016 年的 1459.73 km²。在此过程中,其较安全区面积占比从 2000 年的 14.12% 上升到 2010 年的 47.94%,到 2020 年,其安全区面积占比已达到 100%。同样,弥勒市的石漠化治理面积从 2005 年的 267.05 km²增加到 2016 年的 1169.04 km²。在此过程中,较安全和安全区的总面积占比从 2000 年的 73.19% 增加到 2010 年的 93.51%,到 2020 年,其安全区面积占比均达到 100%。以上表明,随着石漠化治理面积的扩大与治理力度的提升,当地生态安全水平得到了明显提高,生态修复取得明显进展。

深入来看,石漠化综合治理工程对当地景观生态安全水平变化的作用机理,主要体现在以下三方面。

第一,从宏观上看,石漠化治理改变了当地的土地利用结构。石漠化治理本质上是人类对自然环境的主动干预,会不可避免地改变流域景观结构组分与要素在数量、空间上的变化、景观功能上的变化以及景观类型的演变^[15]。本文发现,尽管退耕还林还草推动了景观结构组分重组,导致局部地区用地破碎化程度提升、连通性降低,但由于耕地这一土地利用类型上发生的人类活动强度较大,其石漠化发生面积较大^[29],退耕还林还草能够因此减少土地受到的人为干扰,降低石漠化发生的可能性。同时,生物、林草等措施的实施重新优化了土地利用结构,使脆弱度更高的地类向脆弱度更低的草地、林地转换,增加了土壤有机质积累^[30],提升了林、草地水土保持等生态系统服务功能^[31];而农艺措施等则通过改变小地形、增加土壤入渗等,推动了耕地等用地内部结构的优化。各类措施的组合最终整体上优化了研究区土地利用结构与景观组分,提升了景观生态安全水平。

第二,从微观上看,石漠化治理推动了植被恢复^[32]。一方面,林草措施以封山育林育草、人工造林、种草等手段直接推动了植被恢复,而工程措施则通过沟道整治等进一步为植被恢复提供保障。相关研究也表明,中国西南喀斯特地区的人工造林和生态保护工程提高了当地的植被覆盖率和碳汇功能,且治理面积越大,效果越明显^[33]。而植被恢复改变了石漠化地区的地表裸露率,从而作用于当地景观生态安全的变化^[34]。但另一方面,石漠化治理对植被恢复的作用效果需要长时间才能显现。本文发现,尽管石漠化治理开展多年,喀斯特断陷盆地的景观生态安全水平直至 2015 年后才出现快速提升趋势,这可能与植被恢复缓慢有关。而植被恢复缓慢,一方面受到喀斯特地区土壤成土速率缓慢、土壤湿度较低等因素的制约^[35],另一方面则与断陷盆地特殊的地质环境、脆弱的生态本底以及自然灾害频发等因素有关,导致其与其他喀斯特地形区相比,植被恢复相对较差^[36]。

石漠化综合治理不单单是一项技术工程,更涉及脱贫攻坚、乡村振兴等民生建设,多种因素共同驱动了当地的经济社会要素的变化,从而影响景观生态安全,但其影响同样呈现出复杂性。一方面,人口转移降低了喀斯特地区的生态压力,推进了当地的植被恢复^[37]。另一方面,石漠化治理在带动林下经济、生态旅游等产业发展,推动非农人口向城镇转移的同时,也导致建设用地持续扩张,对区域景观类型的改变较大^[20],使得局部地区土地利用交错破碎分布,威胁景观生态安全。总体来看,石漠化综合治理工程对喀斯特断陷盆地景观生态安全的变化存在复杂的作用机制,未来还需进一步深入研究,以为喀斯特地区生态修复和可持续发展提供科学支撑。

5 结论

本文以喀斯特断陷盆地为研究对象,借助土地利用转移矩阵、景观格局指数计算、景观生态安全评价以及空间自相关分析等方法,系统分析了该区景观格局变化及其生态安全的时空演变格局,并探讨了景观生态安

全与石漠化治理措施之间的关系,主要结论如下:

(1) 2000—2020年,林地、草地和耕地是喀斯特断陷盆地的优势土地利用类型,三类用地的相互转换是研究区土地利用转换的主要方向,且建设用地不断扩张。土地利用格局空间上表现出整体稳定而局部变化剧烈的特点。

(2) 林地、草地和耕地破碎化趋势明显,建设用地则呈面积增大化、形态连片化的趋势,景观蔓延度有所降低,城镇化进程不断加快。景观整体表现出多样性、均匀性的特点,优势景观的地位有所下降。研究区在土地利用结构整体优化的背景下土地破碎化问题不容忽视,未来需要开展更加精细化的治理。

(3) 20年间研究区景观生态安全水平整体好转,生态环境整体呈向好态势。空间上,景观生态安全水平由“北高南低”逐步转向“南北相对均衡”的局面。且景观生态安全指数在空间上存在集聚性,主要以高-高值集聚和低-低值集聚为主,其中高-高值集聚主要位于研究区北部林地集中分布区,低-低值集聚主要位于研究区南部各类用地夹杂分布区。

(4) 研究区生态安全水平的提升与石漠化治理面积的扩大和治理力度的不断加强有关。然而,受研究区生态环境复杂性、石漠化治理难度以及植被自身生长规律的影响,石漠化治理生态效应的发挥呈现出长期性,未来需持续推进石漠化治理并合理调控当地经济发展与生态保护间的关系,来维持生态安全水平的长期稳定。

参考文献(References):

- [1] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354-358.
- [2] 谢花林. 土地利用生态安全格局研究进展. 生态学报, 2008, 28(12): 6305-6311.
- [3] 史培军, 宋长青, 景贵飞. 加强我国土地利用/覆盖变化及其对生态环境安全影响的研究——从荷兰“全球变化开放科学会议”看人地系统动力学研究的发展趋势. 地球科学进展, 2002, 17(2): 161-168.
- [4] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [5] 谢花林. 基于景观结构的土地利用生态风险空间特征分析——以江西兴国县为例. 中国环境科学, 2011, 31(4): 688-695.
- [6] 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.
- [7] Zhang W, Chang W J, Zhu Z C, Hui Z. Landscape ecological risk assessment of Chinese coastal cities based on land use change. Applied Geography, 2020, 117: 102174.
- [8] Ma L B, Bo J, Li X Y, Fang F, Cheng W J. Identifying key landscape pattern indices influencing the ecological security of inland river basin: the middle and lower reaches of Shule River Basin as an example. Science of the Total Environment, 2019, 674: 424-438.
- [9] Fu Y J, Shi X Y, He J, Yuan Y, Qu L L. Identification and optimization strategy of County ecological security pattern: a case study in the Loess Plateau, China. Ecological Indicators, 2020, 112: 106030.
- [10] Gao J B, Du F J, Zuo L Y, Jiang Y. Integrating ecosystem services and rocky desertification into identification of Karst ecological security pattern. Landscape Ecology, 2021, 36(7): 2113-2133.
- [11] 韩逸, 郭熙, 江叶枫, 饶磊, 孙凯, 李婕, 王澜珂. 南方丘陵区耕地景观生态安全影响因素及其空间差异. 生态学报, 2019, 39(17): 6522-6533.
- [12] 彭文君, 舒英格. 喀斯特山区县域耕地景观生态安全及演变过程. 生态学报, 2018, 38(3): 852-865.
- [13] 施馨雨, 赵筱青, 普军伟, 冯严, 周世杰, 和春兰. 基于斑块尺度的云南省景观生态安全时空演变及归因. 生态学报, 2021, 41(20): 8087-8098.
- [14] 刘希朝, 李效顺, 蒋冬梅. 基于土地利用变化的黄河流域景观格局及生态风险评估. 农业工程学报, 2021, 37(4): 265-274.
- [15] 奚世军, 安裕伦, 李阳兵, 蔡沛伶, 龙立美, 陈啟英. 基于景观格局的喀斯特山区流域生态风险评估——以贵州省乌江流域为例. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 712-721.
- [16] Li Y, Geng H C. Evolution of land use landscape patterns in Karst watersheds of Guizhou Plateau and its ecological security evaluation. Land, 2022, 11(12): 2225.
- [17] 于婧, 汤昇, 陈艳红, 张蕾, 聂艳, 邓文胜. 山水资源型城市景观生态风险评价及生态安全格局构建——以张家界市为例. 生态学报, 2022, 42(4): 1290-1299.
- [18] 曹建华, 邓艳, 杨慧, 蒲俊兵, 朱同彬, 蓝芙宁, 黄芬, 李建鸿. 喀斯特断陷盆地石漠化演变及治理技术与示范. 生态学报, 2016, 36

(22): 7103-7108.

- [19] 关于印发《岩溶地区石漠化综合治理工程"十三五"建设规划》的通知(发改农经[2016]624号)-国家发展和改革委员会(2016-03-21)[2022-04-22]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201604/t20160422_962180.htmlcode=&state=123.
- [20] 郑可君,李琛,吴映梅,高彬嫔,李婵,武燕. 云南边境山区景观生态风险时空演变及其影响因素. 生态学报, 2022, 42(18): 7458-7469.
- [21] 李强,蒲俊兵,黄妮,杜红梅,祁向坤,王力,杨慧. 断陷盆地生态环境地质分异及石漠化演变机理的研究途径. 地球科学进展, 2017, 32(9): 899-907.
- [22] 王克林,岳跃民,陈洪松,吴协保,肖峻,祁向坤,张伟,杜虎. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应. 生态学报, 2019, 39(20): 7432-7440.
- [23] 王克林,岳跃民,陈洪松,曾馥平. 科技扶贫与生态系统服务提升融合的机制与实现途径. 中国科学院院刊, 2020, 35(10): 1264-1272.
- [24] 陈洪松,岳跃民,王克林. 西南喀斯特地区石漠化综合治理:成效、问题与对策. 中国岩溶, 2018, 37(1): 37-42.
- [25] 史晨璐. 喀斯特断陷盆地生态系统生产力对土地利用及石漠化治理措施时空变化的响应[D]. 北京:北京林业大学, 2020.
- [26] 史晨璐,吴秀芹. 喀斯特断陷盆地土地利用对生态系统生产力的影响. 北京大学学报:自然科学版, 2020, 56(2): 341-351.
- [27] 高彬嫔,李琛,吴映梅,郑可君,武燕. 川滇生屏障区景观生态风险评价及影响因素. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1603-1613.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Tong X W, Wang K L, Yue Y M, Brandt M, Liu B, Zhang C H, Liao C J, Fensholt R. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the Karst regions of Southwest China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 54: 105-113.
- [31] Zhang M Y, Wang K L, Liu H Y, Zhang C H, Yue Y M, Qi X K. Effect of ecological engineering projects on ecosystem services in a Karst region: a case study of northwest Guangxi, China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 183: 831-842.
- [32] Zhang X M, Yue Y M, Tong X W, Wang K L, Qi X K, Deng C X, Brandt M. Eco-engineering controls vegetation trends in southwest China Karst. *Science of the Total Environment*, 2021, 770: 145160.
- [33] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Horion S, Wang K L, De Keersmaecker W, Tian F, Schurgers G, Xiao X M, Luo Y Q, Chen C, Myneni R, Shi Z, Chen H S, Fensholt R. Increased vegetation growth and carbon stock in China Karst via ecological engineering. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.
- [34] Pu J W, Zhao X Q, Huang P, Gu Z X, Shi X Q, Chen Y J, Shi X Y, Tao J Y, Xu Y F, Xiang A M. Ecological risk changes and their relationship with exposed surface fraction in the Karst region of Southern China from 1990 to 2020. *Journal of Environmental Management*, 2022, 323: 116206.
- [35] Zhang S R, Bai X Y, Zhao C W, Tan Q, Luo G J, Cao Y, Deng Y H, Li Q, Li C J, Wu L H, Wang J F, Chen F, Xi H P, Ran C, Liu M. Limitations of soil moisture and formation rate on vegetation growth in Karst areas. *Science of the Total Environment*, 2022, 810: 151209.
- [36] Zhao S, Wu X Q, Zhou J X, Pereira P. Spatiotemporal tradeoffs and synergies in vegetation vitality and poverty transition in rocky desertification area. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141770.
- [37] Wang K L, Zhang C H, Chen H S, Yue Y M, Zhang W, Zhang M Y, Qi X K, Fu Z Y. Karst landscapes of China: patterns, ecosystem processes and services. *Landscape Ecology*, 2019, 34(12): 2743-2763.