

# 基于CLCD数据的云南高原岩溶石漠化区植被扩展研究

丁文荣<sup>1</sup>, 李玉辉<sup>1</sup>, 俞筱桢<sup>2</sup>, 付荣<sup>1</sup>, 曾浚恒<sup>1</sup>

(1.云南师范大学 地理学部, 云南 昆明 650500; 2.黔南民族师范学院, 贵州 都匀 558000)

**摘要:** [目的] 探究长时相、高分辨率的土地覆盖产品在中国南方岩溶区的适用性, 为揭示云南高原岩溶石漠化区植被演变的特征提供新的数据支持。[方法] 以云南高原中部石林县为例, 采用精度检验、Sen's 斜率、转移矩阵等方法, 对研究区 1985—2022 年 30 m 分辨率的 CLCD\_v1.0.2 土地覆被数据集进行精度评价, 并基于该数据研究云南高原岩溶石漠化区植被扩展的时空特征。[结果] ① 研究区验证样本的总体精度 (overall accuracy, OA) 达 87.85%, KAPPA 系数为 0.83, 植被中林地的使用者精度 (user accuracy, UA) 最高, 达 95.24%, 而草地最低, 为 73.76%。② 耕地、林地、草地是石林县 4 种主要的植被类型, 多年平均值为 810.20, 632.85, 245.74 km<sup>2</sup>, 灌丛与非植被面积相对较少, 分别为 14.90, 15.31 km<sup>2</sup>。③ 1985—2022 年石林县耕地、林地和非植被面积呈增加趋势, 分别增加 34.17, 112.24, 10.79 km<sup>2</sup>, 灌丛、草地面积则呈减少趋势, 分别减少 15.62, 141.58 km<sup>2</sup>, 林地、非植被增加趋势显著, 草地减少趋势显著。④ 1985—2022 年期间耕地转出主要是林地和草地, 林地主要转为耕地, 草地主要转出为耕地和林地, 灌丛主要转为林地。⑤ 其他植被类型转为林地集中于石林世界自然遗产地核心区、缓冲区, 圭山国家森林公园片区, 以及石林断陷盆地边缘地带。[结论] CLCD 数据满足岩溶石漠化区植被演变分析的精度要求, 石林岩溶石漠化区植被空间转移格局弥补了因保护区建设导致的耕地面积减少, 同时体现了退耕还林、封山育林政策实施的空间范围及效果。

**关键词:** 岩溶区; 石漠化; 植被扩展; CLCD/LULC 数据; 石林彝族自治县

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)02-0201-10

中图分类号: S19

**文献参数:** 丁文荣, 李玉辉, 俞筱桢, 等. 基于 CLCD 数据的云南高原岩溶石漠化区植被扩展研究[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 201-210. Ding Wenrong, Li Yuhui, Yu Xiaoya, et al. Vegetation expansion assessment in karst rocky desertification areas of Yunnan Plateau based on CLCD LULC data [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 201-210. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.021; CSTR: 32312.14. stbctb.2025.02.021.

## Vegetation expansion assessment in karst rocky desertification areas of Yunnan Plateau based on CLCD LULC data

Ding Wenrong<sup>1</sup>, Li Yuhui<sup>1</sup>, Yu Xiaoya<sup>2</sup>, Fu Rong<sup>1</sup>, Zeng Junheng<sup>1</sup>

(1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500,

China; 2. Qiannan Normal University for Nationalities, Duyun, Guizhou 558000, China)

**Abstract:** [Objective] The applicability of long-term and high-resolution land cover products in karst areas of Southern China was explored to provide new data support for revealing the characteristics of vegetation evolution in karst rocky desertification areas of Yunnan Plateau. [Methods] Precision testing, Sen's slope, a transition matrix, and other methods were used to evaluate the accuracy of CLCD\_v1.0.2 land cover data, with a resolution of 30 m, from 1985 to 2022, using Shilin County in the central part of the Yunnan Plateau as an example. The spatiotemporal characteristics of the expansion of the vegetation in the karst rocky desertification areas on the Yunnan Plateau were studied based on these data. [Results] ① The overall accuracy of the validation samples in the study area was 87.85% and the kappa coefficient of 0.83. The user accuracy of forest land was the highest at 95.24%, whereas that of grassland was the lowest at 73.76%. ② Arable land, forest land, and grassland were the main vegetation types in Shilin County, with average

收稿日期: 2024-08-15

修回日期: 2024-11-30

采用日期: 2024-12-02

资助项目: 国家自然科学基金项目“云南高原喀斯特石漠化植被持续恢复和扩展机制研究”(42361009); 国家自然科学基金: “亚热带高原岩溶区陆地植被—湖泊湿地间的水文协同效应观测研究”(41761105)

第一作者: 丁文荣(1979—), 男(彝族), 云南省昆明市人, 博士, 教授, 主要从事生态水文方面的研究工作。Email: dingwenrong@163.com。

annual areas of 810.20, 632.85, and 245.74 km<sup>2</sup>, respectively. Shrubs and unvegetated areas cover relatively small areas, at 14.90 and 15.31 km<sup>2</sup>, respectively. From 1985 to 2022, the areas of cultivated land, forest land, and unvegetated areas in Shilin County increased by 34.17, 112.24, and 10.79 km<sup>2</sup>, respectively. Shrub and grassland areas decreased overall by 15.62 and 141.58 km<sup>2</sup>, respectively. The forest and unvegetated areas markedly increased, whereas the grassland considerably decreased trend from 1985 to 2022; forested land and grassland were the main cultivated land types. Forest land mainly changed to cultivated land, grassland mainly converted into cultivated and forest land, and shrubland mainly converted into forest land. The conversion of other vegetation types to forest land concentrated in the core and buffer zones of the Shilin World Natural Heritage Site and the Guishan National Forest Park as well as the edge of the Shilin rift basin. [Conclusion] The CLCD data met the requirements for vegetation evolution analysis in the karst rocky desertification areas. The pattern in the spatial changes of the vegetation in the karst rocky desertification areas compensated for the reduction in arable land area caused by the construction of protected areas and reflects the spatial scope and effectiveness of the implementation of policies, such as returning farmland to forests and halting afforestation on mountains.

**Keywords:** karst area; rocky desertification; vegetation expansion; CLCD LULC data; Shilin Yi Autonomous County

岩溶石漠化是严重的社会、经济、生态问题,截至 2021 年,中国石漠化土地面积为  $7.22 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,占岩溶面积的 14.92%<sup>[1-2]</sup>。半个世纪以来,国家投入了大量的人力、物力和财力开展石漠化治理,与上个调查周期(2016 年)相比,5 a 来石漠化土地净减少  $3.33 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,年均缩减率为 7.72%。然而,治理区仅相当于石漠化面积的 24.4%,且潜在石漠化土地面积增加  $2.33 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,局部石漠化土地仍在扩展。至今,中国石漠化土地面积已经得到有效遏制,石漠化治理工作也从以控制石漠化面积扩张为主,转向石漠化生态系统恢复力提升为主的新阶段<sup>[3-4]</sup>。

云南省有岩溶区面积  $11.1 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,占全省总面积的 28.1%,居全国第二位。全省 129 个县(市、区)中,有 118 个县(市、区)不同程度存在岩溶分布,是全国石漠化最严重的省份之一<sup>[5]</sup>。虽然治理使石漠化面积有所降低,从 2005 年的  $2.88 \times 10^4$  km<sup>2</sup> 降低到 2016 年的  $2.35 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,但治理区仅相当于石漠化土地面积的 20.9%,未治理区仍高达 79.1%<sup>[6]</sup>,防治形势依然非常严峻。

促进植被恢复以及近自然状态恢复是中国当前石漠化治理的重要方向。近年来,随着卫星遥感技术和 GIS 技术的快速发展,极大程度促进了土地覆被产品的时空分辨率和精度的提高,涌现出了大量优质的土地覆被数据集。如 MODIS LULC, CLCD LULC, GlobeLand 和 World Cover 等<sup>[7]</sup>。其中,中国逐年土地覆盖数据集(annual china land cover dataset, CLCD)是由武汉大学杨杰等基于 Google Earth Engine 平台 1982—2021 年的多传感器观测数据,利用随机森林分类器得到的土地覆盖分类产品,

空间分辨率为 30 m<sup>[8]</sup>。因该数据集具有开源、长时相、高分辨率等优势,在森林植被变化、水体和不透水面等时序数据方面与其他专题产品具有较好的一致性而被重视<sup>[9]</sup>。然而,虽然诸多学者对该产品的研究取得了一些有意义的成果,但通常是对同一地区不同数据集的比较<sup>[10-13]</sup>,鲜见关于该数据集在岩溶区使用的公开报道,对于该套遥感产品在岩溶区使用的适宜性问题,也有待进一步研究。

因此,本文以云南高原中部石林彝族自治县为研究区,基于长序列的 CLCD\_v1.0.2 土地覆盖数据集,在进行精度评价的基础上,系统研究云南高原岩溶石漠化区植被扩展规律,成果可为岩溶石漠化区自然公园规划、退耕还草还林等的决策提供参考依据。

## 1 研究区概况

石林彝族自治县位于云南高原中部,隶属于云南省昆明市,地处东经  $103^{\circ}10'$ — $103^{\circ}41'$ ,北纬  $24^{\circ}30'$ — $25^{\circ}03'$ 之间,面积 1 719 km<sup>2</sup>。境内起伏和缓,切割轻微,海拔高度多为 1 700~1 950 m,地势东北高西南低。东部老圭山主峰海拔 2 601 m 为全县最高处,西南部巴江河谷大叠水瀑布海拔高度 1 500 m 为全县最低点,境内平均海拔高度为 1 730 m。该县属典型的亚热带低纬高原山地季风气候,四季温差小,干湿季分明,雨量充沛,无霜期超过 310 d。年平均气温为 16.3 ℃,多年平均降雨量为 939.5 mm,年平均日照 2 096.8 h。云南省第四次石漠化监测报告显示,石林县有石漠化土地面积 422.18 km<sup>2</sup>,潜在石漠化面积 517.28 km<sup>2</sup>,是滇中地区石漠化最为严重区域之一。

石林世界自然遗产地总面积 350 km<sup>2</sup>,其中核心区 120.7 km<sup>2</sup>,缓冲区 229.3 km<sup>2</sup>,是中国最早公布的国家重点风景名胜区之一(图 1)。国家自 20 世纪 80 年代初开始陆续建设石林公园、森林公园与地质公园等保护地,2007 年云南石林喀斯特、贵州荔波喀斯特与重庆武隆喀斯特一起组成的中国南方喀斯特,成功列入世界自然遗产地名录。石林世界自然遗产地也因此成为云南高原岩溶石漠化区内具备植被恢复时段明确、植被恢复措施清晰的典型样地<sup>[14-15]</sup>。

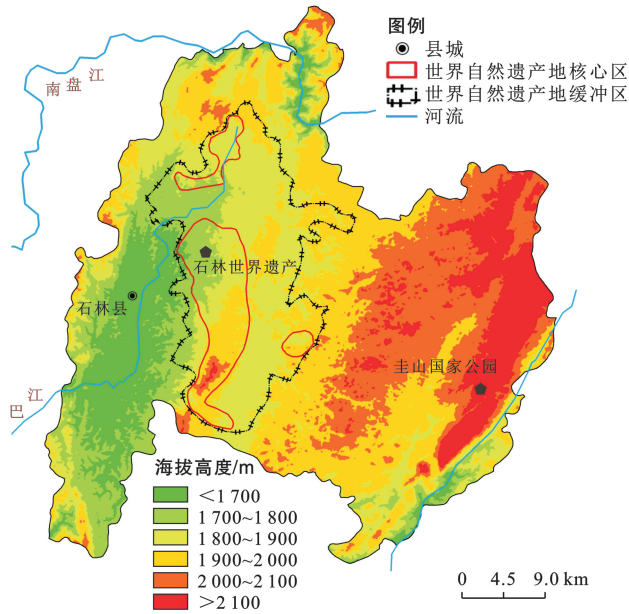


图 1 石林彝族自治县地形及石林世界自然遗产地分区  
Fig.1 Topography of Shilin Yi Autonomous County and zoning of Shilin World Natural Heritage Site

## 2 数据来源和方法

### 2.1 数据及预处理

CLCD LULC 数据集是由武汉大学杨杰、黄昕团队制作的 30 m 分辨率的土地覆被数据(<https://zenodo.org/records/8176941>)。数据起始年份为 1985 年,每年 8 月份更新上一年的数据,目前已经更新至 2022 年(version 1.0.2)。该数据基于 Google Earth Engine 平台,利用 Landsat 系列卫星影像,采用随机森林、时空滤波和逻辑后处理等方法制作,分出包括耕地、林地、灌丛、草地、水域等在内的 9 种土地利用类型,分类总体精度为 79.31%<sup>[16]</sup>。

在对 CLCD 数据进行校准、重投影、裁剪等预处理后,针对 CLCD 分类体系,参照全国土地利用遥感分类系统标准,本文结合研究区的地形地貌及土地利用特点,将 CLCD 数据按一级大类重分类为耕地、林地、灌丛、草地和非植被 5 种植被类型。

### 2.2 验证样本选择及精度计算

本研究所采用的验证样本点是在 Google Earth

上通过对 2021 年石林县的历史影像进行目视解译筛选出来的。为减少不同样本由于定位误差和解译误差所带来的影响,在进行上述样本选择及解译时遵循以下原则:①随机性,即各样本选择是随机的,每个样本都有被选取的机会;②典型性,样本能够准确反映研究区的整体情况,至少为 30 m×30 m 均质区域的中心点;③一致性,使用与待评价数据时相一致的 2021 年的遥感影像,并参考 2015—2022 年的多时相数据。在上述原则的基础上,共采集到 276 个样本点(图 2),其中耕地 65 个,林地 61 个,灌丛 36 个,草地 22 个和非植被 92 个。

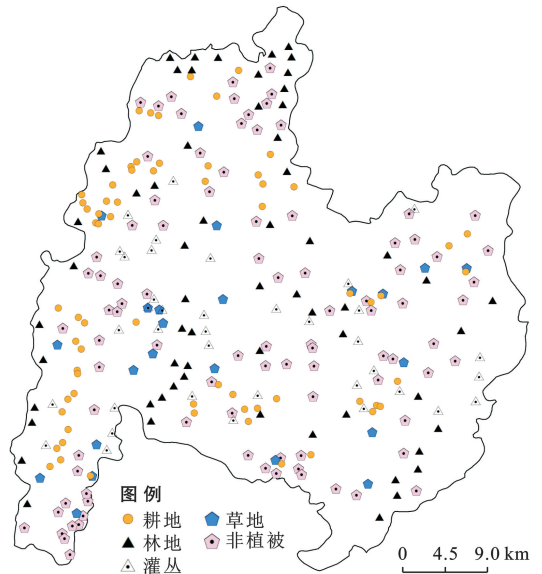


图 2 基于 Google Earth 的研究区样点分布  
Fig.2 Sample points distribution of study area basin based on Google Earth

在使用数据之前对现有土地覆被数据的精度分析与评价至关重要。由于 Google Earth 影像具有定位准确、分辨率高、时相丰富、覆被广泛、获取方便等优势,成为目前精度评价的重要数据源之一<sup>[17]</sup>。本研究采用 Google Earth 影像作为样本,生成了 5 种土地覆被分类数据的混合矩阵,分别计算总体精度(overall accuracy, OA),kappa 系数(K)以评估混合矩阵的整体精度,并以使用者精度(user accuracy, UA)评价各植被类型的具体精度。各种精度计算公式分别为<sup>[18]</sup>:

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{N} \quad (1)$$

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^n x_{ij} - \sum_{i=1}^n (x_i + x_j)}{N^2 - \sum_{i=1}^n x_i + x_j} \quad (2)$$

$$UA = \frac{x_{ij}}{x_{i+}} \quad (3)$$

式中:  $N$  是参与评价的样本总数;  $n$  是混合矩阵中的行列数;  $x_{ij}$  是矩阵中第  $i$  行第  $j$  列的样本;  $x_{i+}$  和  $x_{+j}$  分别为第  $i$  行和第  $j$  列的样本总数。

### 2.3 变化趋势及显著性检验

植被变化趋势分析采用 Sen's 斜率法, Sen's 斜率  $\beta$  值表示植被时间序列的变化率及趋势, 当  $\beta > 0$  时序列呈增加趋势,  $\beta = 0$  时趋势不明显, 而当  $\beta < 0$  时表示呈下降趋势。Sen's 斜率  $\beta$  值可以判断植被序列变化趋势及大小, 但无法确定趋势的显著性程度, 本文采用 Mann-Kendall 非参数检验法确定研究区植被变化趋势的置信水平<sup>[19]</sup>。对于植被时间序列  $x_i = (x_1, x_2 \cdots x_n)$ , Sen's 斜率的计算公式为<sup>[20]</sup>:

$$\beta = \text{median} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (4)$$

式中: median 为中值函数;  $\forall$  为逻辑符号, 表示对于所有。

### 2.4 植被类型转移矩阵

植被转移矩阵能够揭示某一时段植被类型空间和时间的变化特征, 不仅可以描述某个时间内固定区域的土地利用数量特征, 也可以动态揭示某段时间内土地利用类型的转移方向、数量和变化趋势<sup>[21]</sup>。计算公式为:

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nm} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中:  $S_{ij}$  为研究初期  $i$  至末期  $j$  的植被类型;  $n, m$  为不同植被类型的数量。其中, 若 1985 与 2022 年的植被类型一致, 识别为“稳定像元”, 反之则为“变化像元”。

## 3 结果与分析

### 3.1 样本精度评价

以石林县 2021 年 Google Earth 历史影像的人工解译结果与同时段 CLCD\_v1.0.2 的土地覆被产品进行精度计算, 结果显示: CLCD\_v1.0.2 数据集在研究区的总体精度(OA)为 87.85%, kappa 系数  $K$  为 0.83。对于使用者精度(UA), 不同植被类型存在差异, 其中林地的 UA 达 96.24%, 而草地最低, 为 73.76%(表 1)。

表 1 不同植被类型的样本精度

植被类型	耕地	林地	灌丛	草地	非植被
使用者精度	93.82	96.24	81.16	73.76	97.83

从样本总体精度及不同植被类型精度的计算结果来看, CLCD\_v1.0.2 数据产品适宜作为岩溶石漠化区植被演变分析的基础数据。

### 3.2 植被面积变化趋势

论文从 CLCD\_v1.0.2 中提取了石林县各代表年份不同植被类型的面积(表 2), 从中可以看出, 不同植被类型面积在研究区存在较大差异。作为一个典型的岩溶区农业县, 耕地在各种植被类型中占第一位, 多年平均值为 810.20 km<sup>2</sup>, 其次是林地, 多年平均值为 632.85 km<sup>2</sup>, 草地面积 245.74 km<sup>2</sup> 位列第三, 灌丛与非植被面积相对较少, 分别仅有 14.90 km<sup>2</sup>, 15.31 km<sup>2</sup>。

表 2 石林彝族自治县不同年份各类植被面积  
Table 2 Area of various vegetation types in different years in Shilin Yi Autonomous County km<sup>2</sup>

年份	面积/km <sup>2</sup>				
	耕地	林地	灌丛	草地	非植被
1985	860.34	549.00	28.15	270.82	10.68
1990	827.63	572.98	19.20	288.67	10.53
1995	816.07	641.24	14.68	235.32	11.69
2000	729.29	677.21	10.27	287.03	15.19
2005	778.35	643.37	10.01	271.46	15.81
2010	796.47	646.47	11.76	246.91	17.39
2015	778.90	671.27	12.62	236.47	19.74
2022	894.51	661.24	12.53	129.25	21.47
平均值	810.20	632.85	14.90	245.74	15.31

从 1985—2022 年不同植被类型的历史变化来看, 各植被类型变化趋势存在较大差异(图 3)。线性趋势显示, 1985—2022 年石林耕地、林地和非植被面积呈增加趋势, 三者分别增加 34.17, 112.24, 10.79 km<sup>2</sup>, 但灌丛、草地面积则呈减少趋势, 分别减少 15.62, 141.58 km<sup>2</sup>。

为验证线性趋势结果, 分别计算了不同植被变化趋势的 Sen's 斜率。其中耕地、林地和非植被的  $\beta$  值分别为 1.27, 0.89, 0.38, 表明三者研究时段确为增加趋势, 而灌丛、草地的  $\beta$  值分别为 -0.05 和 -3.02, 表明两者在研究时段内确为减少趋势。Mann-Kendall 检验结果表明, 林地、草地和非植被的变化趋势通过 0.05 的置信水平检验, 耕地、灌丛则没有, 即林地、非植被增加趋势显著, 草地减少趋势显著, 而耕地、灌丛变化趋势不明显。

### 3.3 植被类型转化

为分析研究区 1985—2022 年不同植被类型之间的转移情况, 计算了该时段土地利用转移矩阵, 结果见表 3。从表 3 中可以看出, 研究区不同植被类型之间的转移存在较大的差异。

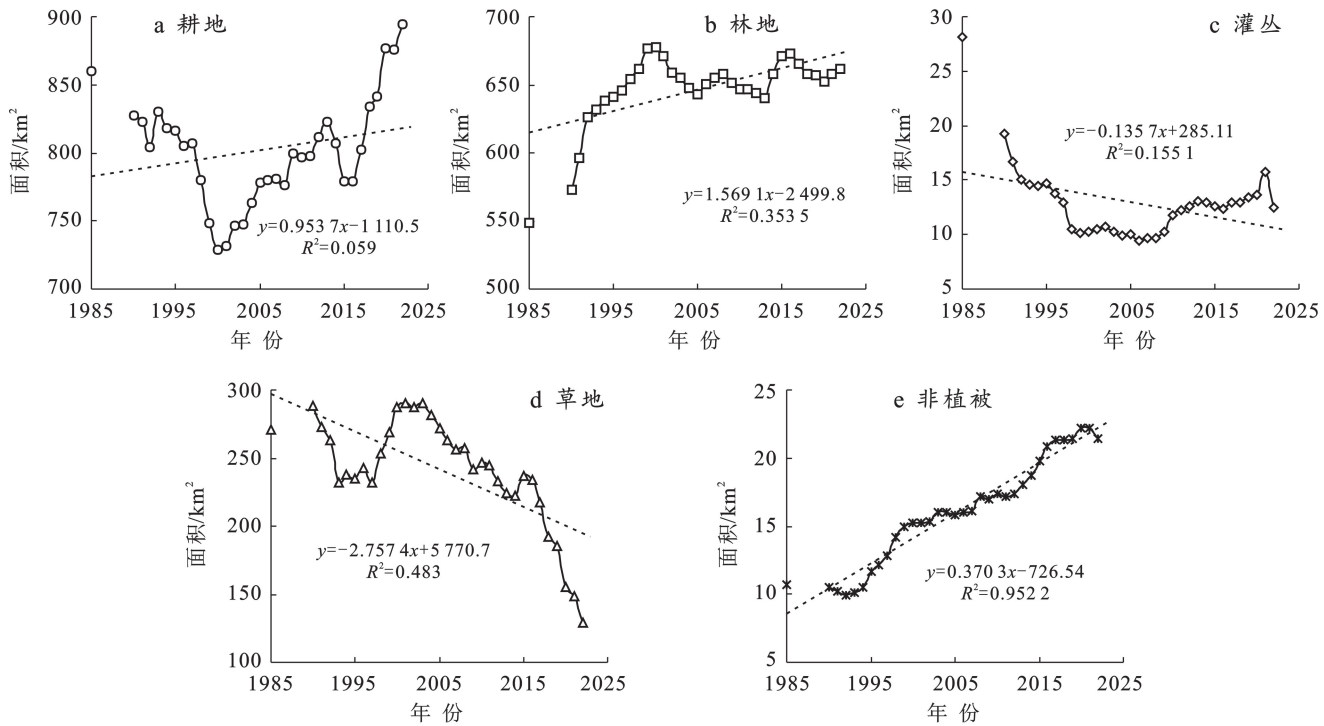


图 3 1985—2022 年石林彝族自治县不同植被类型历史变化趋势

Fig.3 Historical trends of different vegetation types in Shilin Yi Autonomous County from 1985 to 2022

表 3 1985—2022 年石林彝族自治县不同植被类型的转移矩阵

Table 3 Transfer matrix of different vegetation types in Shilin Yi Autonomous from 1985 to 2022

项目	2022 年转移面积/km <sup>2</sup>					合计
	耕地	林地	灌丛	草地	非植被	
1985 年面积/km <sup>2</sup>						
耕地	677.37	75.61	4.21	135.51	1.81	894.51
林地	115.86	460.65	17.51	66.83	0.39	661.24
灌丛	2.18	2.95	4.04	3.35	0.01	12.53
草地	55.20	9.62	2.33	61.60	0.49	129.25
非植被	9.73	0.17	0.05	3.52	7.99	21.47
合计	860.34	549.00	28.15	270.81	10.69	
变化率/%	21.27	16.09	85.65	77.25	25.18	

(1) 耕地作为石林彝族自治县最主要的植被类型,1985—2022 年期间耕地呈微弱增加趋势,其他植被类型转入耕地的面积大于转出面积。其中转入面积为 217.14 km<sup>2</sup>,主要由林地和草地转入,两者占总转入面积的 97.22%,同期耕地总的转出面积为 182.97 km<sup>2</sup>,去向同样为林地和草地。在 1985—2022 年期间,耕地的变化率为 21.27%。

(2) 林地面积在研究区排在第二位,在 1985—2022 年期间林地总体呈现增加趋势和转入为主,其他植被类型转入面积达 200.59 km<sup>2</sup>,其中又以耕地转入为主,占转入总面积的 57.76%,这主要是 2005 年政府提出退耕还林、封山育林政策,使得耕地发生转入。同一时期,林地转出去向也以耕地为主,75.61 km<sup>2</sup> 的林地依旧被开发成为耕地。总体而言,研究时段林地

的变化率为 16.09%。

(3) 草地是除耕地、林地之外面积较多的植被类型,也是变化最为剧烈的一种植被类型。在 1985—2022 年期间草地总体呈现减少趋势,以向耕地、林地转出为主,且转出面积大于转入面积,总体上草地面积呈现减少趋势,从 1985 年的 270.82 km<sup>2</sup> 面积减少到 2022 年的 129.25 km<sup>2</sup>,研究时段内草地的变化率为 77.25%。

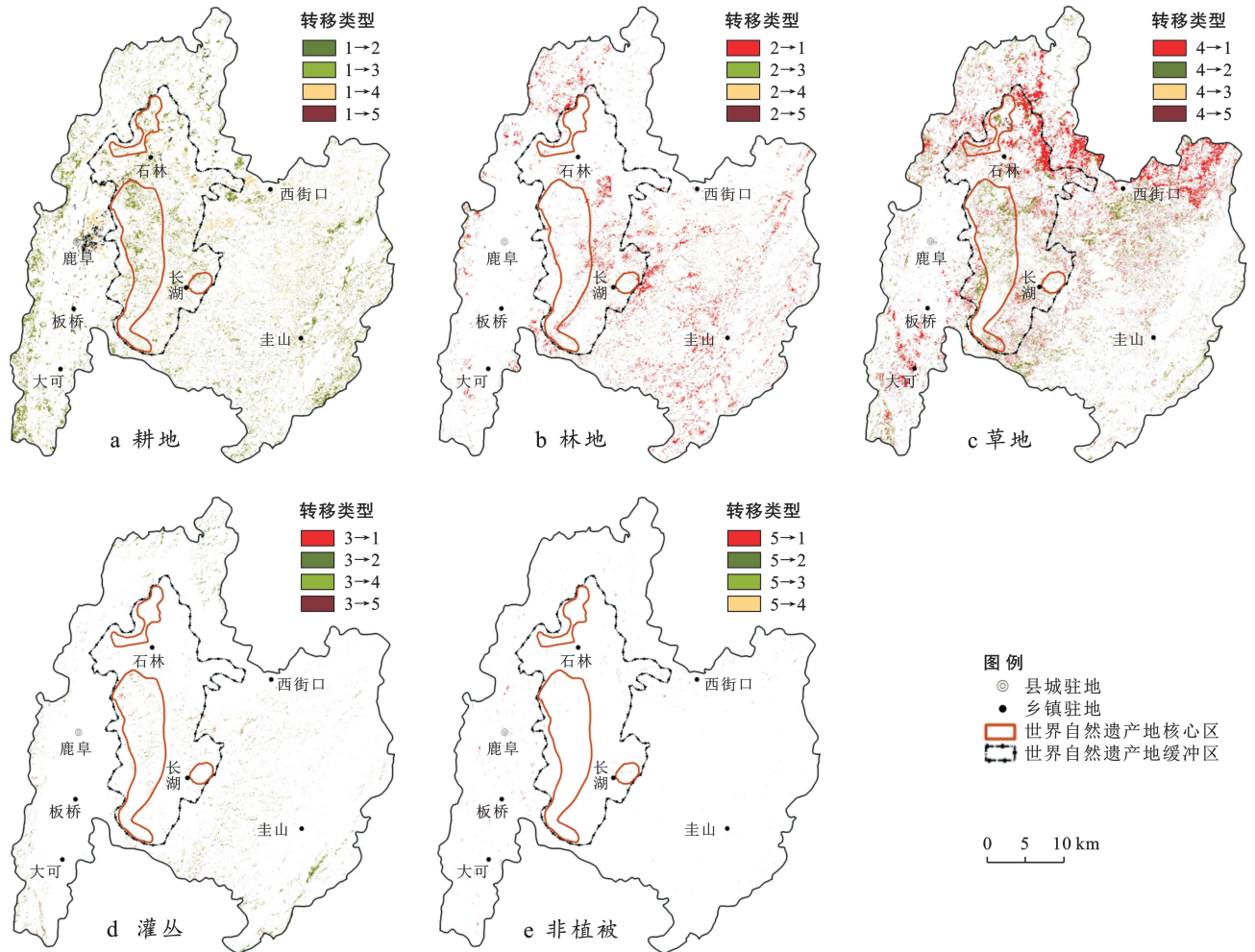
(4) 灌丛和非植被在研究区面积占比不大,灌丛在 1985—2022 年期间以转出为主,合计转出面积为 15.62 km<sup>2</sup>,其中 17.51 km<sup>2</sup> 转为林地,而非植被则一直处于增加趋势,共增加了 10.79 km<sup>2</sup>,且主要以耕地和草地的转入为主。研究时段内灌丛的变化率高达 85.65%,而非植被的变化率则为 25.18%。

### 3.4 植被转化空间格局

绘制了研究区不同植被类型间的转出(图 4)、转入关系(图 5)。从图 4a 可以看出,1985—2022 年期间耕地转出主要是林地和草地,其中转出为林地集中于石林世界自然遗产地核心区、缓冲区,以及圭山国家森林公园片区,前者 2007 年列入世界自然遗产地,后者成立于 2000 年。而耕地转为草地在研究区较为均匀,以西街口镇辖区相对居多。耕地转为灌丛、非

植被主要集中在县城驻地周边的缓丘区。

从图 4b 中可以看出,林地在 1985—2022 年期间主要转为耕地,且这种转化集中在两个片区:第一是石林自然遗产地缓冲区外围,如长湖以东,另一个片区是圭山镇,该镇圭山国家森林公园列为保护区后,耕地由保护区转移到外围。林地转为其他类型的植被较少,主要分布于西街口镇、长湖镇及圭山镇的溶丘区。



注:本文分别以 1,2,3,4,5 代表耕地、林地、灌丛、草地和非植被,并以“→”表示植被类型间的转移。如“1→2”表示耕地转为林地,“2→4”表示林地转为草地等。下同。

图 4 1985—2022 年石林彝族自治县不同植被类型间的转出分布

Fig.4 Transfer out distribution among different vegetation types in Shilin Yi Autonomous County from 1985 to 2022

草地是除耕地、林地之外面积第三的植被类型,在 1985—2022 年期间草地总体呈现减少趋势,主要转出为耕地和林地(图 4c)。其中转出为耕地地区集中在石林镇、西街口镇的东北侧,转出为林地地区集中在石林自然遗产地核心区及西街口镇西南部。

灌丛、非植被在研究区面积所占比例不大,1985—2022 年期间灌丛以转出为主,并主要转为林

地,集中于石林世界自然遗产地核心区、圭山国家森林公园以及石林东北方向的柴石滩水库区(图 4d)。非植被的转出主要是耕地,但无明显的集中区(图 4e)。

对于转入的空间分布来看,耕地在研究时段内的转入主要来源于草地和林地。其中草地的转入主要分布在石林镇东北部、西街口镇及大可乡,而林地的转入则主要分布于圭山镇周围的溶丘区(图 5a)。

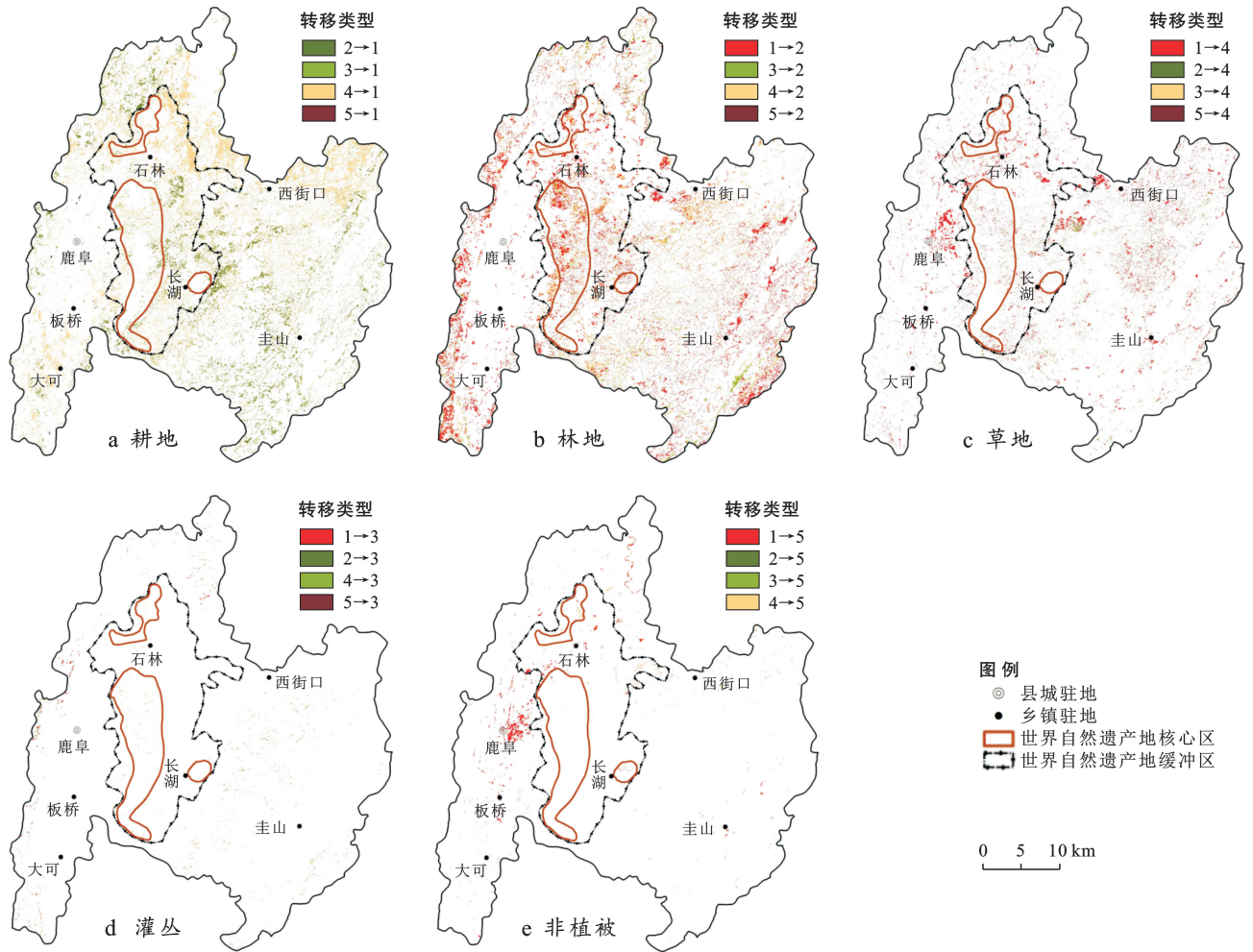


图 5 石林彝族自治县不同植被类型间的转入分布

Fig.5 Transfer in distribution among different vegetation types in Shilin Yi Autonomous County

就林地来看(图 5b),转入主要是耕地和草地,其中耕地的转入主要分布在石林世界自然遗产地核心区、缓冲区,以及石林断陷盆地边缘地带。而草地的转入除了同样分布在石林世界自然遗产地核心区、缓冲区外,还分布在西街口镇南边的丘陵区。

从灌丛和草地转入来看,研究时段内灌丛转入仅有 8.49 km<sup>2</sup>,无明显的集中区(图 5c)。草地的转入主要来源于耕地,且集中在石林县城驻地鹿阜镇周边,以及西街口镇的月湖外围(图 5d)。

从非植被的转入来看,主要集中在两大片区:第一是石林县城驻地鹿阜镇周边,随着城镇面积扩大,部分耕地被占用进而转为城镇用地;另一片是北面的柴石滩水库周边,伴随着水库 2017 年正式开工建设并蓄水,库区耕地、草地转为了非植被水域(图 5e)。

## 4 讨论

4.1 CLCD 数据在云南高原岩溶石漠化区的适用性  
已有成果表明,对于不同的数据集,由于样本的

选择、目标分类系统、评价方法等的差异会对结果造成一定影响,导致数据的精度评价结果也存在差异。与同类数据产品如 WorldCover10 m, ESRI10 m, Globeland30, GLC\_FCS30 m, CNLUCC 等相比,不同的研究成果均表明 CLCD 具有可靠性<sup>[22]</sup>。此外,在同类的研究中,如全国农用地中 CLCD 数据的总体精度 OA 值为 84.59%<sup>[23]</sup>,西部草地的 OA 值波动于 73.02%~73.99%之间<sup>[24]</sup>,黄河流域为 88.12%<sup>[16]</sup>,石羊河流域为 83.03%<sup>[25]</sup>,呼包鄂榆城市群为 74.57%<sup>[13]</sup>,以及黄土丘陵沟壑区为 41.08%等<sup>[26]</sup>,而本研究中 OA 值为 87.85%。因此,从本文结果来看,该数据适宜作为岩溶石漠化区植被分析的基础数据。

## 4.2 自然公园、海拔坡度与植被扩展的关系

植被恢复是岩溶石漠化治理的重要方面,自然公园建设则是促进重要生态功能区经济、社会和环境协调发展的有效途径。李坤等的研究成果表明,随着自然演替,石林自然公园植被覆盖度从 63.40%上升至 96.50%<sup>[27]</sup>。

本研究统计了石林自然遗产地核心区、缓冲区以及外围 1985,2022 年两个年份的植被面积变化趋势(表 4),进一步发现核心区耕地减少而外围增加,林

地在核心区、缓冲区以及外围都在增加,但核心区、缓冲区增加趋势更为明显,这种空间转移格局弥补了自然公园建设导致的耕地面积减少。

表 4 研究区自然公园、海拔高度、坡度与植被变化

Table 4 Nature reserves, altitude gradient and vegetation changes at study areas

参数	面积比例/%	耕地/km <sup>2</sup>		林地/km <sup>2</sup>		灌丛/km <sup>2</sup>		草地/km <sup>2</sup>		非植被/km <sup>2</sup>		
		1985 年	2022 年	1985 年	2022 年	1985 年	2022 年	1985 年	2022 年	1985 年	2022 年	
自然公园	核心区	7.02	48.94	42.46	40.31	59.50	2.49	1.03	20.93	9.22	0.88	1.35
	缓冲区	13.34	151.94	167.21	41.64	59.71	2.02	0.50	56.37	22.50	3.60	5.65
	外围	79.64	659.48	684.85	467.05	542.02	23.64	11.00	193.51	97.53	6.19	14.48
海拔高度/m	<1 700	10.58	151.81	139.07	14.22	21.96	1.42	0.52	8.60	8.31	2.90	9.09
	[1 700,1 800)	13.07	152.68	145.94	39.34	60.52	3.80	1.58	26.58	12.97	2.28	3.67
	[1 800,1 900)	22.75	207.44	216.54	102.00	138.91	6.50	3.13	72.53	28.26	2.46	4.09
	[1 900,2 000)	27.65	201.16	231.86	186.40	208.36	8.46	2.98	77.01	28.81	1.91	2.93
	[2 000,2 100)	17.15	94.53	104.14	134.07	150.39	5.64	2.93	59.66	36.10	0.69	1.01
	≥2 100	8.79	52.36	56.59	72.53	80.51	2.30	1.37	26.27	14.76	0.43	0.66
坡度/(°)	<8	63.75	588.56	612.47	310.10	376.79	14.76	6.38	174.02	83.84	7.49	15.44
	[8,15)	10.98	108.91	114.27	45.28	55.30	1.49	0.56	31.54	15.61	1.42	2.90
	[15,25)	12.33	100.12	105.97	72.16	85.20	2.66	1.04	35.82	17.53	1.24	2.25
	[25,35)	7.28	41.87	43.82	60.72	70.79	2.93	1.29	19.17	8.50	0.40	0.67
	≥35	5.66	20.52	17.63	60.30	72.58	6.29	3.25	10.12	3.72	0.14	0.20

已有成果表明,石林县自 2002 年开始实施退耕还林工程,2002—2015 年退耕还林总面积为 226.93 km<sup>2</sup>,其中退耕还林 36.85 km<sup>2</sup>,封山育林 86.2 km<sup>2</sup>,荒山、人工和石漠化造林 103.88 km<sup>2</sup>,2021 年全县森林覆盖率 34.56%。然而,因石林地处云南高原面上,地形起伏和缓,从海拔来看有近 75%的国土面积都集中在 2 000 m 以下,植被扩展与海拔之间没有明显的对应关系。此外,石林县有 63.75%的国土面积坡度都在 8°以内。因此,除坡度≥35°的地段即断陷盆地边缘地带带有显著的退耕还林外,坡度与海拔之间同样没有显著的相关关系(表 4)。

此外,国家 2000 年实施西部大开发战略以来,退耕还林还草是重要内容。但研究区从 2000 年开始耕地面积有所增长,这既是当地发展经济作物,如烤烟、人参果种植的结果,也是草地转出为耕地集中在石林镇、西街口镇周边的主要因素<sup>[28]</sup>。

## 5 结论

本研究以云南高原岩溶区石林为例,在对分辨率为 30 m 的 CLCD\_v1.0.2 土地覆被数据进行精度分析的基础上,基于该数据研究了云南高原岩溶石漠化区植被扩展的时空特征。

(1) 研究区 CLCD\_v1.0.2 数据的 OA 值是 87.85%,KAPPA 系数 K 为 0.83,植被中林地 UA 最高达 96.24%,而草地最低为 73.76%,适宜作为岩溶石漠化区植被

分析的基础数据。

(2) 耕地是石林县最主要的植被类型,多年平均值为 810.20 km<sup>2</sup>,其次是林地,多年平均值为 632.85 km<sup>2</sup>,草地面积 245.74 km<sup>2</sup> 位列第三,灌丛与非植被面积相对较少,分别为 14.90,15.31 km<sup>2</sup>。

(3) 1985—2022 年石林耕地、林地和非植被面积呈增加趋势,分别增加 34.17,112.24,10.79 km<sup>2</sup>,灌丛、草地面积则呈减少趋势,分别减少 15.62,141.58 km<sup>2</sup>,林地、非植被增加趋势显著,草地减少趋势显著。

(4) 1985—2022 年期间耕地转出主要是林地和草地,林地主要转为耕地,草地主要转出为耕地和林地,灌丛主要转为林地。

(5) 其他植被类型转为林地集中于石林世界自然遗产地核心区、缓冲区,圭山国家森林公园片区,以及石林断陷盆地边缘地带。这种空间转移格局既弥补了自然公园建设导致的耕地面积的减少,同时也体现了退耕还林、封山育林政策实施的空间范围及效果。

石林岩溶区植被变化是云南高原岩溶区植被扩展的一个缩影,是遗产地保护、国家公园建设、退耕还林还草工程实施、产业转换等多方面因素协同作用的结果。鉴于所采用数据集的分类系统所限,在后续研究中,有待细化植被、非植被类型的划分,以便于揭示研究区的城镇化、交通建设等建设用地变化及其对植被类型变化的间接影响,从而为科学决策提出精准的建议。

## 参考文献 (References)

- [1] 袁道先.西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究[M].北京:科学出版社,2014.  
Yuan Daoxian. Research on Major Environmental Geological Problems and Countermeasures in Southwest Karst Stone Mountain Areas [M]. Beijing: Science Press, 2014
- [2] 宋同清,彭晚霞,杜虎,等.中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J].生态学报,2014,34(18):5328-5341.  
Song Tongqing, Peng Wanxia, Du Hu, et al. Occurrence, spatial-temporal dynamics and regulation strategies of karst rocky desertification in Southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(18):5328-5341.
- [3] Jiang Zhongcheng, Lian Yanqing, Qin Xiaoqun. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration [J]. Earth-Science Reviews, 2014,132:1-12.
- [4] Wang Ke, Sheng Maoyin, Wang Linjiao, et al. Response of soil phytolith occluded organic carbon accumulation to long-term vegetation restoration in Southwest China karst [J]. Land Degradation & Development, 2022,33:3088-3102.
- [5] 王宇,张华,张贵,等.云南省石漠化调查及治理综述[J].中国岩溶,2016,35(5):486-496.  
Wang Yu, Zhang Hua, Zhang Gui, et al. Review of the investigation and integrated renovation on rocky desertification in Yunnan Province, China [J]. Carsologica Sinica, 2016,35(5):486-496.
- [6] 段华超,郑鑫华,李世民,等.云南石漠化地区植被恢复模式及优化建议[J].中国岩溶,2024,43(1):137-146.  
Duan Huachao, Zheng Xinhua, Li Shimin, et al. Vegetation restoration model and suggestions on its optimization in rocky desertification areas of Yunnan Province [J]. Carsologica Sinica, 2024,43(1):137-146.
- [7] Sun Wenyi, Ding Xiaotong, Su Jingbo, et al. Land use and cover changes on the Loess Plateau: A comparison of six global or national land use and cover datasets [J]. Land Use Policy, 2022,119:106165.
- [8] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021,13(8):3907-3925.
- [9] 王志华,郝酷,杨晓梅,等.地理学视角下土地利用/覆被分类发展探讨[J].地理研究,2022,41(11):2946-2962.  
Wang Zhihua, Gao Ku, Yang Xiaomei, et al. Land use/land cover classification development from a geographical perspective [J]. Geographical Research, 2022,41(11):2946-2962.
- [10] Liu Jiyuan, Zhang Qian, Hu Yunfeng. Regional differences of China's urban expansion from late 20th to early 21st century based on remote sensing information [J]. Chinese Geographical Science, 2012,22(1):1-14.
- [11] Li Zongmei, Li Lanhui, Wang Yang, et al. Spatial change of the farming-pastoral ecotone in Northern China from 1985 to 2021 [J]. Land, 2022,11(12):2179.
- [12] 李舒畅,郭正,张凤宝,等.基于多源数据融合产品的黄河中游多沙粗沙区耕地时空动态变化[J].水土保持学报,2024,38(5):139-150.  
Li Shuchang, Guo Zheng, Zhang Fengbao, et al. Spatiotemporal dynamic changes of cropland in rich and coarse sediment areas of Middle Yellow River basin based on multi-source data fusion products [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(5):139-150.
- [13] 夏子龙,杜培军,郭山川,等.呼包鄂榆城市群遥感土地覆被产品评估分析与集成学习[J].干旱区地理,2024,47(8):1367-1379.  
Xia Zilong, Du Peijun, Guo Shanchuan, et al. Evaluation and ensemble learning of remote sensing land-cover products in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration [J]. Arid Zone Geography, 2024,2024,47(8):1367-1379.
- [14] 李玉辉.从中国南方喀斯特,看中国世界自然遗产地如何服务国家新战略[J].遗产与保护研究,2016,1(1):95-100.  
Li Yuhui. How do China's world natural heritage sites serve the new national strategy in case of South China karst sites [J]. Research on Heritages and Preservation, 2016,1(1):95-100.
- [15] 李坤,邢小艺,李逸伦,等.石林风景区不同石漠化人工修复方式对木本植物群落组成及种群生态位的影响[J].生态学报,2020,40(13):4641-4650.  
Li Kun, Xing Xiaoyi, Li Yilun, et al. Effect of different artificial restoration methods of karst rocky desertification on community composition and niche characteristics of woody populations in Shilin scenic area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(13):4641-4650.
- [16] 吴宗洋,蔡卓雅,郭英,等.黄河流域多源遥感土地覆被数据精度评价与一致性分析[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(6):917-927.  
Wu Zongyang, Cai Zhuoya, Guo Ying, et al. Accuracy evaluation and consistency analysis of multi-source remote sensing land cover data in the Yellow River basin [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2023,31(6):917-927.
- [17] Nwilo P C, Okolie C J, Onyegbula J C, et al. Positional accuracy assessment of historical Google Earth imagery in Lagos State, Nigeria [J]. Applied Geomatics, 2022,14(3):545-568.
- [18] 马慧.基于遥感和地理信息系统的黄土高原土地利用时

- 空格局分析[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2023.
- Ma Hui. Spatio-temporal patterns of land use dynamics over the Loess Plateau based on remote sensing and geographical information systems [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023
- [19] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945,13(3):245.
- [20] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968,63(324):1379-1389.
- [21] 戴玉婷, 齐斐, 董明明, 等. 基于地理探测器的山东省莱阳市耕地类型时空分布及其影响因素[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(4): 211-219.
- Dai Yuting, Qi Fei, Dong Mingming, et al. Spatio-temporal distribution of cultivated land types and their influencing factors in Laiyang City of Shandong Province based on geographical detectors [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(4): 211-219.
- [22] 邵正艳, 李南南, 尤慧, 等. 多种土地覆被产品一致性与精度评价: 以淮河流域为例[J]. *现代农业科技*, 2024(7): 170-175.
- Shao Zhengyan, Li Nannan, You Hui, et al. Consistency analysis and accuracy evaluation of multiple land cover products: Taking the Huai River basin as an example [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2024(7): 170-175.
- [23] Cui Yifeng, Liu Ronggao, Li Zhichao, et al. Decoding the inconsistency of six cropland maps in China [J]. *The Crop Journal*, 2024, 12(1): 281-294.
- [24] Hou Mengjing, Ge Jing, Xiu Yangjing, et al. The urgent need to develop a new grassland map in China: Based on the consistency and accuracy of ten land cover products [J]. *Science China Life Sciences*, 2023, 66(2): 385-405.
- [25] Zhao Yaxuan, Cao Bo, Sha Linwei, et al. Land use and cover change and influencing factor analysis in the Shiyang River basin, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2024, 16(2): 246-265.
- [26] 陈乐, 卫伟. 多源土地利用产品在黄土丘陵沟壑区的精度评估[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 177-186.
- Chen Le, Wei Wei. Accuracy assessment of multi-source land use products in the loess hilly and gully region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 177-186.
- [27] 李坤, 张梦园, 李逸伦, 等. 云南石林风景区石漠化自然恢复过程中植被覆盖度及空间格局演变[J/OL]. *生态学杂志*, 2024 (2024-06-20). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.q.20240618.1818.008.html>.
- Li Kun, Zhang Mengyuan, Li Yilun, et al. Dynamics of fractional vegetation coverage and vegetation spatial pattern in natural restoration process of rocky desertification in Yunnan Shilin Geopark [J/OL]. *Journal of Ecology*, 2024 (2024-06-20). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.q.20240618.1818.008.html>.
- [28] 石林彝族自治县史志办公室. 石林年鉴-2022(总第 24 卷)[M]. 云南 昆明: 云南民族出版社, 2022.
- Shilin Yi Autonomous County Local Chronicles Office. *Shilin Yearbook 2022 (Vol. 24)* [J]. Kunming, Yunnan: Yunnan Ethnic Publishing House, 2022.
- ~~~~~
- (上接第 200 页)
- [23] Hong Haoyuan, Liu Junzhi, Zhu Axing. Modeling landslide susceptibility using LogitBoost alternating decision trees and forest by penalizing attributes with the bagging ensemble [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 137231.
- [24] 田凡凡, 薛喜成, 郭有金. 基于主元分析和信息量模型的滑坡易发性评价: 以丹凤县为例[J]. *能源与环保*, 2021, 43(8): 6-12.
- Tian Fanfan, Xue Xicheng, Guo Youjin. Evaluation of landslide susceptibility based on principal component analysis and information model: Taking Danfeng County as an example [J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2021, 43(8): 6-12.
- [25] Wang Yi, Fang Zhice, Hong Haoyuan. Comparison of convolutional neural networks for landslide susceptibility mapping in Yanshan County, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 666: 975-993.
- [26] Yang Zhiqiang, Xu Chong, Shao Xiaoyi, et al. Landslide susceptibility mapping based on CNN-3D algorithm with attention module embedded [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(10): 412.
- [27] 赵会芹. 基于不同空间分辨率遥感影像的滑坡提取方法研究[D]. 广西 桂林: 桂林电子科技大学, 2023.
- Zhao Huiqin. Research on landslide extraction methods based on remote sensing images with different spatial resolutions [D]. Guilin, Guangxi: Guilin University of Electronic Science and Technology, 2023.
- [28] Yang Zhiqiang, Xu Chong, Li Lei. Landslide detection based on ResU-net with transformer and CBAM embedded: Two examples with geologically different environments [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(12): 2885.