DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.03.037
李慧,魏兴萍,蔡云丽,等.重庆石漠化和非石漠化区植被绿度时空变化特征[J].水土保持学报,2024,38(3):288-297.
LI Hui, WEI Xingping, CAI Yunli, et al. Spatial and temporal variation characteristics of vegetation greenness in rocky desertification and non-rocky desertification areas of Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(3):288-297.

# 重庆石漠化和非石漠化区植被绿度时空变化特征

李 慧[1], 魏兴萍[1,2,3], 蔡云丽[1], 陈诗蝶[1], 李良鑫[1]
(1.重庆师范大学地理与旅游学院,重庆 401331;2.长江上游湿地科学研究重庆市重点实验室,重庆 401331;
3.三峡库区地表生态过程重庆市野外科学观测研究站,重庆 401331)

**摘　要:**[**目的**]为研究重庆岩溶石漠化和非石漠化地区植被绿度时空变化特征及其对土地利用类型的响应,有利于指导岩溶地区植被生态恢复的影响。[**方法**]基于植被叶面积指数(LAI)及土地利用类型数据,采用趋势分析和 Hurst 指数分析石漠化和非石漠化地区植被绿度的时空演变特征,利用土地利用转移矩阵定量分析土地利用变化对植被绿度的影响。[**结果**](1)石漠化和非石漠化地区的植被绿度整体呈增加趋势,分别在 2007 年和 2012 年达到最大绿度,绿度值为 1.36 和 1.69,年平均增速为 0.014 和 0.012。(2)石漠化和非石漠化地区植被绿度动态变化趋向良好,改善趋势面积占比分别为 86.84%,87.04%,反持续改善趋势面积占比分别为 52.82%,80.29%,是未来植被绿度主要变化趋势。(3)石漠化和非石漠化地区主要的土地利用类型是林地和耕地,且林地转化的耕地是植被绿度退化的主要发生区,耕地、灌木和草地转化的林地是植被绿度改善的主要发生区。(4)高 LAI 的土地利用类型转化为较低 LAI 土地利用类型导致 LAI 减小,降低植被绿度,较低 LAI 土地利用类型转化为高 LAI 土地利用类型,导致 LAI 增加。石漠化和非石漠化地区林地 LAI 转出总量减少最多,分别为 11 902.01 和 4 442.18,转入总量增加最多分别为 14 983.78 和17 109.46;建设用地、水域和裸地面积较小,对 LAI 总量的影响不明显。[**结论**]研究结果有助于揭示生态脆弱区植被绿度的变化特征及对土地利用变化的响应机制,为重庆市岩溶地区石漠化治理、生态安全和经济可持续发展提供科学依据。

**关键词:**石漠化和非石漠化;植被绿度;叶面积指数;时空变化趋势;土地利用类型
**中图分类号:**S171.1　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1009-2242-(2024)03-0288-10

# Spatial and Temporal Variation Characteristics of Vegetation Greenness in Rocky Desertification and Non-rocky Desertification Areas of Chongqing

LI Hui[1], WEI Xingping[1,2,3], CAI Yunli[1], CHEN Shidie[1], LI Liangxin[1]
(1.*College of Geography and Tourism*, *Chongqing Normal University*, *Chongqing* 401331, *China*; 2. *Chongqing Key Laboratory of Wetland Science Research in the Upper Reaches of the Yangtze River*, *Chongqing* 401331, *China*; 3. *Chongqing Field Scientific Observation and Research Station of Surface Ecological Process in the Three Gorges Reservoir Area*, *Chongqing* 401331, *China*)

**Abstract:**[**Objective**] The investigation of temporal and spatial variations in vegetation greenness and its response to different land use types in karst rocky desertification and non-rocky desertification areas in Chongqing is crucial for guiding ecological restoration efforts in karst regions. [**Methods**] This study utilized vegetation leaf area index (LAI) data and land use type information to conduct a trend analysis and Hurst index calculations, aimed at analyzing the temporal and spatial evolution characteristics of vegetation greenness in both rocky desertification and non-rocky desertification areas. Additionally, a land use transfer matrix was employed to quantitatively assess the impact of land use changes on vegetation greenness. [**Results**] (1) Vegetation greenness exhibited an increasing trend in both rocky desertification and non-rocky

**收稿日期:**2023-11-26　**修回日期:**2024-01-24　**录用日期:**2024-02-22　**网络首发日期(www.cnki.net):**2024-04-28
**资助项目:**重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj－msxmX0616)
**第一作者:**李慧(1999—),女,山东济宁人,硕士研究生,主要从事生态系统服务和生态保护研究。E-mail:lh24253153@126.com
**通信作者:**魏兴萍(1974—),女,教授,博士,硕士生导师,主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail:xingpingwei@126.com

desertification areas, reaching maximum values of 1.36 and 1.69 respectively, with average annual growth rates of 0.014 and 0.012. (2) The dynamic changes observed in vegetation greenness within these areas demonstrated positive trends, with improvement trends accounting for 86.84% (rocky desertification) and 87.04% (non-rocky desertification). Furthermore, anti-continuous improvement trends were observed at rates of 52 .82% (rocky desertification) and 80.29% (non-rocky desertification), indicating the primary change trajectory for future vegetation greenness. (3) The main land use types in both rocky and non-rocky desertification areas were woodland and cropland, and cropland converted from woodland was the main occurrence of degradation of vegetation greenness, while woodland converted from cropland, shrubs and grassland was the main occurrence of improvement of vegetation greenness. (4) The conversion of land use types with high leaf area index (LAI) to those with low LAI resulted in a decrease in LAI and vegetation greenness, while the conversion from low LAI land use types to high LAI land use types led to an increase in LAI. In areas affected by stony desertification and non-stony desertification, the maximum reduction in total LAI transfer was 11 902.04 and 4 442.18 respectively, whereas the maximum increase was 14 983.78 and 17 109.46 respectively. The impact on total LAI from construction land, water area, and bare land area was minimal and not significant. [**Conclusion**] These research findings contribute to understanding the change characteristics of vegetation greenness and its response mechanism towards land use changes in ecologically fragile areas. Furthermore, they provide a scientific basis for controlling rock desertification, ensuring ecological security, and promoting sustainable economic development in karst areas of Chongqing.

**Keywords**: rocky desertification and non-rocky desertification; vegetation greenness; leaf area index; the temporal and spatial variation trend; land use types

**Received**:2023-11-26　　**Revised**:2024-01-24　　**Accepted**:2024-02-22　　**Online**(www.cnki.net):2024-04-28

植被是陆地生态系统的重要组成部分,对生态系统状况及其变化具有指示作用[1]。地表绿度是研究植被状况的重要参量,其变化能够反映地表植被的分布状况和生态环境质量变化,成为目前全球变化研究的热点之一[2]。国内外学者[3-4]利用 NDVI 和 LAI 分析全球和区域尺度的植被绿度变化发现,NDVI 因自身公式的局限性和红光波段吸收饱和性的影响,在茂盛区存在饱和的弊端。重庆地处亚热带,市域植物资源丰富,常绿阔叶林、暖性针叶林、竹林和常绿阔叶灌丛等植被类型丰富且茂盛,NDVI 的饱和性弊端影响结果的准确性。叶面积指数(leaf area index,LAI)对植被绿度具有良好的表征作用,能够反映植物叶面量、冠层结构变化和植物群落生命活力,其与植被光合作用、蒸腾作用和碳氮循环等生态过程关系密切[5]。因此,以叶面积指数表征植被绿度,开展重庆市岩溶石漠化和非石漠化地区植被绿度时空变化特征的相关研究。

已有研究表明,全球植被绿度逐渐增加,尤其是干旱和高纬度地区[6],中国森林分布区[7]、东北森林带[8]、半干旱区典型灌草区[9]和秦巴山区[10]等特定自然地理单元或单一用地类型的绿度呈增加趋势,但不同地区的植被变化受到气候和人类活动的影响程度不同。土地是人类活动和植被生存依附的载体,土地利用类型变化是社会经济可持续发展和自然生态交互的纽带,揭示人类活动对地表自然生态系统的影响[11]。土地利用与植被[12]、土壤侵蚀[13]、碳储量[14]和水资源利用[15]密切相关,改变土地利用类型是影响植被绿度的重要手段。WANG 等[16]分析黄河上中游地区 LAI 对不同土地覆被的响应特征;韩思淇等[17]研究发现,黄河源区草地、林地的 LAI 较高,草地 LAI 减少明显;但目前缺少结合土地利用类型变化的植被绿度变化趋势的定量研究,明确植被绿度变化的土地利用响应规律。

岩溶石漠化是在自然气候条件和不合理的人类活动共同作用下产生的植被退化、水土流失和岩石大面积裸露的土地退化现象[18]。岩溶石漠化是动态的,通过封山育林、退耕还林、种植适生经济作物等措施促进生态环境的修复,石漠化得到有效治理,岩溶石漠化转向非石漠化地。重庆是长江上游地区重要的生态屏障和三峡库区核心区[19],岩溶地区特殊的地质环境导致区域生态环境脆弱,岩石裸露率高,水土流失问题严重,制约植被的生长发育,石漠化问题成为最严重的生态问题[20],人口、产业相对密集,经济发展和生态保护矛盾突出[21],威胁三峡库区的生

态安全。因此，研究重庆市岩溶石漠化和非石漠化地区植被绿度的时空变化，对于明确石漠化治理成效、促进区域生态环境改善、生态安全和经济的可持续发展具有重要的意义。

利用长时间序列的 LAI 遥感数据分析重庆岩溶石漠化和非石漠化地区 2000—2020 年植被绿度时空分布和未来变化趋势，并结合土地利用类型数据，定量分析土地利用类型变化对植被绿度的影响。研究结果能加深对岩溶石漠化地区植被绿度变化与土地类型关系的认识，为区域土地合理利用、石漠化地区生态环境治理和保护以及社会经济的可持续发展提供科学依据和决策支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

重庆市位于长江上游（28°10′—32°13′ N，105°17′—110°11′ E），属亚热带季风气候，年平均气温 18 ℃，年降水量 1 000～1 450 mm，冬暖夏热。重庆市总面积 $8.24\times10^4$ $km^2$，岩溶地貌发育广泛，重庆市 24 个区县碳酸岩出露[22]，石漠化面积 9 256 $km^2$，生态环境脆弱且敏感（图 1）。合理保护和监测石漠化地区的植被变化是重庆区域生态治理的关键。

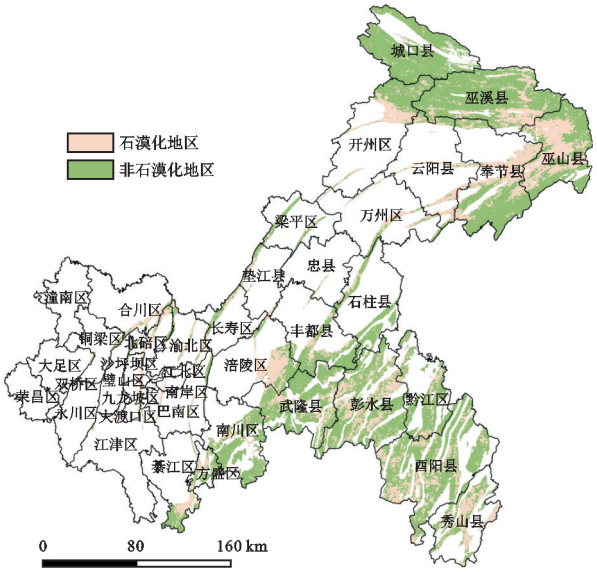


图 1 重庆岩溶区石漠化和非石漠化地区空间分布

Fig. 1 Spatial distribution map of rocky desertification and non-rocky desertification areas in Chongqing karst area

### 1.2 数据来源与处理方法

1.2.1 数据来源与处理 采用的数据为植被叶面积指数（LAI）和土地利用类型。LAI 数据来自美国国家航天局发布的 MODIS 15A2H，时间范围为 2000—2020 年。土地利用类型数据来自中国逐年土地覆被数据集（CLCD），选取重庆岩溶地区 2000 年和 2020 年的土地利用类型，分为耕地、林地、灌木、草地、水域、裸地和建设用地共 7 类，数据精度超过 80.24%，与文献[23]验证结果一致，土地利用类型数据满足研究的精度要求（图 2）。所有数据利用 Arc GIS 10.8软件进行数据裁剪、重采样和投影转换。

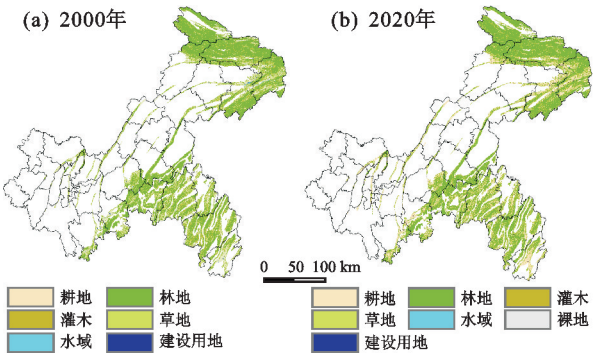


图 2 2000 和 2020 年岩溶地区土地利用类型

Fig. 2 Land use type map of karst area in 2000 and 2020

1.2.2 分析方法

（1）趋势分析

利用 Theil－Sen Median 趋势分析法和 Mann－Kendall 趋势检验法分析石漠化地区和非石漠化地区植被绿度（LAI）趋势变化[2]。Theil－Sen Median 趋势分析法公式为：

$$\beta = Median\left(\frac{LAI_j - LAI_i}{j-i}\right) \quad j > i \tag{1}$$

式中：$\beta$ 为 LAI 的变化趋势，当 $\beta>0$ 表示增加趋势，$\beta<0$ 表示下降趋势；$j$ 和 $i$ 为时间序列，$LAI_j$ 和 $LAI_i$ 表示各像元的 LAI 值。Mann－Kendall 趋势检验法公式为：

$$S = \sum_{i=1}^{n=1} \mathrm{sgn}(LAI_j - LAI_j) \tag{2}$$

$$\mathrm{sgn}(LAI_j - LAI_j) = \begin{cases} +1 & LAI_j - LAI_j > 0 \\ 0 & LAI_j - LAI_j = 0 \\ -1 & LAI_j - LAI_j < 0 \end{cases} \tag{3}$$

$$\mathrm{var}(s) = [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^{q} t_p(t_p-1)(2t_p+5)]/18 \tag{4}$$

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{var}(s)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{var}(s)}} & S < 0 \end{cases} \tag{5}$$

式中：var($s$)为方差；$Z$ 为 LAI 变化的显著性；$n$ 为研究时间序列；$t_p$ 为每年重复的 LAI 值的重复数。双边趋势检验中，在给定的 0.05 置信水平上，时间序列数据在 0.05 置信水平上存在明显的上升或下降趋势。$\alpha=0.05$，即 $|Z|\geqslant1.96$，表示趋势通过信度 95%

的显著性水平检验($p<0.05$)。

(2)植被绿度未来变化趋势分析

Hurst 指数被广泛应用于水文、气象和经济学领域检测长时间序列的未来演变趋势。目前,采用 R/S 分析法计算 Hurst 指数。计算公式为:

$$\overline{\mathrm{LAI}}_T=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\mathrm{LAI}(T)\cdots T=1,2,3\cdots \tag{6}$$

$$x(t,T)=\sum_{t=1}^{T}(\mathrm{LAI}(t)-\overline{\mathrm{LAI}}_T)\cdots 1\leqslant t\leqslant T \tag{7}$$

$$R(T)=\max_{1\mathrm{stsx}}X(t,T)-\min_{1\mathrm{stsx}}X(t,T)\cdots T=1,2,3\cdots \tag{8}$$

$$S(T)=\left[\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}(\mathrm{LAI}(t)-\overline{\mathrm{LAI}}_T)^2\right]^{\frac{1}{2}}\cdots T=1,2,3\cdots \tag{9}$$

$$\frac{R}{S}=\frac{R(T)}{S(T)} \tag{10}$$

式中:$\overline{\mathrm{LAI}}_T$ 为 LAI 均值序列;$T$ 为任意整数;$x(t,T)$ 为累积离差;$R(T)$为极差;$S(T)$为标准差。

$$\frac{R}{S}\propto\left(\frac{T}{2}\right)^H \tag{11}$$

则说明 LAI 时间序列存在 Hurst 现象,称 $H$ 值为 Hurst 指数。当 Hurst 指数($H$)$0<H<0.5$,表明植被 LAI 在未来的变化将和过去呈相反趋势,且 $H$ 越接近 0,反持续性越强;$0.5<H<1$,表示植被 LAI 未来的变化将和过去的变化趋势保持一致,且 $H$ 越接近 1,持续性越强。

(3)土地利用转移阵

土地利用转移矩阵反映不同土地利用类型间的转变状况,直观表现出各土地利用类型变化的特征,是研究土地利用类型时空演变分析的重要方法。利用矩阵表征石漠化地区和非石漠化地区各土地利用类型的转化情况[24]。

$$S_{ij}=\begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{vmatrix} \tag{12}$$

式中:$S$ 为某一土地利用类型的面积;$i$ 和 $j$ 分别为研究初期和末期的土地利用类型;$n$ 为土地利用类型数据,总共 7 类。当 $i\neq j$ 时,$S_{ij}$ 表示第 $i$ 类土地利用类型转化为第 $j$ 类土地利用类型的面积;$i=j$ 时,$S_{ij}$ 表示该土地利用类型未发生转变区域的面积。

## 2　结果与分析

### 2.1　植被绿度时空变化

由图 3 可知,2000—2020 年石漠化和非石漠化地区植被绿度整体呈波动增加趋势,2006—2010 年波动较小,其余年份变化明显,约为 3 年的变化周期。其中,石漠化地区植被绿度年增速为 0.014,多年平均值为 1.15,最高值(1.36)和最低值(0.95)分别在 2007 年和 2001 年,2013—2014 年植被绿度减少最显著。非石漠化地区植被绿度年增速为 0.012,多年平均值为 1.45,最高值(1.69)和最低值(1.24)分别出现在 2010 年和 2013 年,2011—2012 年植被绿度降低最明显,2012—2013 年植被绿度增加最明显。

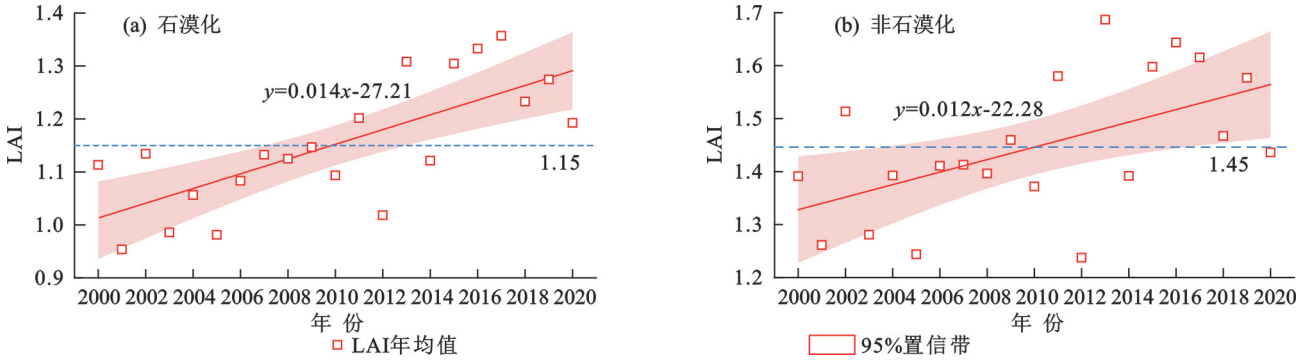


**图 3　石漠化和非石漠化地区植被绿度均值年际变化**

**Fig. 3　Interannual variation of mean vegetation greenness in rocky desertification and non-rocky desertification areas**

由表 1 和图 4 趋势分析可知,石漠化和非石漠化地区植被绿度整体呈改善趋势。石漠化区植被绿度改善趋势占总面积的 86.84%,其中,明显改善面积占比最大,为 61.76%,集中分布在巫山、彭水、武隆、酉阳和涪陵等区县;轻微改善面积占比为 25.08%,彭水和酉阳分布相对集中。轻微退化面积占比为 11.47%,是主要的植被绿度退化趋势,集中分布在西部主城区、巫山和万盛经开区等地区。

非石漠化区植被绿度改善趋势占总面积的 87.04%,明显改善面积占比为 38.96%,空间分布不连续,巫山、奉节、石柱和主城区分布相对集中;轻微改善面积占比最大,为 48.08%,集中分布在城口、巫溪、彭水、酉阳和武隆等区县。非石漠化区植被绿度退化占总面积的 12.96%,其中轻微退化占非石漠化总面积的 11.33%,破碎分布在城口、巫溪、黔江等区县;明显退化仅占 1.63%,零散分布在非石漠化地区。

表 1 2000—2020 年石漠化和非石漠化地区植被绿度变化趋势面积占比

Table 1 The proportion of vegetation greenness change trend area in rocky desertification and non-rocky desertification areas from 2000 to 2020

%

| 变化趋势 | 石漠化地区 | 非石漠化地区 |
|---|---|---|
| 明显退化 | 1.70 | 1.63 |
| 轻微退化 | 11.47 | 11.33 |
| 轻微改善 | 25.08 | 48.08 |
| 明显改善 | 61.76 | 38.96 |

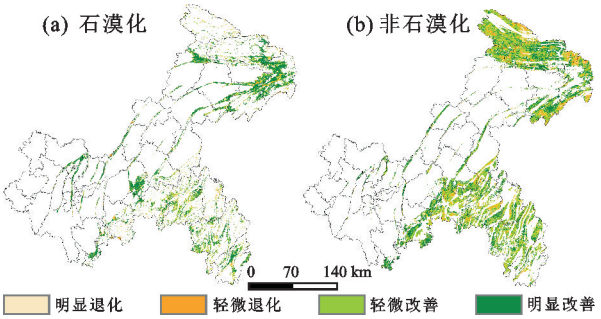


图 4 植被绿度变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution map of vegetation greenness change trend

## 2.2 植被绿度未来变化趋势

由图 5a 可知，石漠化地区 Hurst 指数（$H$）为 0.13～0.93，$H>0.5$ 的区域面积占比为 43.60%，$H<0.5$的区域面积占比为 56.40%，未来植被绿度以反持续性为主。由图 5b 可知，石漠化地区未来植被绿度呈改善趋势的面积占比为 93.45%，其中，40.63%的区域植被绿度为持续改善趋势，集中分布在奉节东部和巫山西部地区；反持续改善趋势面积占比为52.82%，集中分布在巫溪、巫山、奉节、武隆、彭水和主城地区，此地区植被绿度由退化转变为改善，生态环境脆弱，需要注意植被保护。未来植被绿度呈退化趋势的区域中，3.00%的区域植被绿度为持续退化，零散分布在彭水、涪陵、奉节和巫山等地区；3.15%的区域植被绿度由改善转变为退化，绿度值降低，空间分布较为零散。

由图 6a 可知，非石漠化地区 Hurst 指数为 0.14～0.86，平均值为 0.40，表明非石漠化地区未来植被绿度整体以反持续性为主。由图 6b 可知，非石漠化地区未来植被绿度整体呈改善趋势，其中，仅 7.63%的非石漠化地区为持续改善，主要分布在城口、巫溪和巫山等区县；80.29%的区域植被绿度为反持续改善，主要分布巫溪、巫山、奉节、武隆和彭水等区县。未来植被绿度退化趋势占非石漠化区总面积的 12.08%，持续退化面积占比最小（1.18%），空间分布较为零散，主要分布在南川南部、黔江东部、奉节南部和巫山等地区，反持续退化面积占比 11.17%，主要分布在奉节、巫山和万州等区县；未来在气候变化和人类活动的干扰下，绿度退化区内的植被生长状况趋于恶化，是生态修复工程关注的重点。

图 5 石漠化地区植被绿度 Hurst 检验及未来变化趋势

Fig. 5 Hurst test and future change trend spatial distribution map of vegetation greenness in rocky desertification area

## 2.3 土地利用类型变化特征

利用研究区 2000 年和 2020 年的土地利用类型图计算得到 2000—2020 年石漠化和非石漠化地区土地利用类型转移矩阵弦图。

由图 7a 可知，石漠化地区共 3 286.01 $km^2$ 发生土地类型转化，草地面积总计减少 72.56 $km^2$，主要转出为耕地（30.82 $km^2$）和林地（50.62 $km^2$），分别占其转出总面积的 34.27%和56.35%。耕地面积总计减少 414.17 $km^2$，主要转出为林地（304.59 $km^2$）与建设用地（108.63 $km^2$）。灌木面积总计减少 327.08 $km^2$，主要转出为林地（1 441.42 $km^2$）和耕地（77.26 $km^2$）。2020 年林地、建设用地和水域较 2000 年面积总计增加 663.09，96.44，54.27 $km^2$。建设用地增幅较大，增加面积是 2000 年的 1.32 倍，主要由耕地（108.63 $km^2$）和林地（31.48 $km^2$）转入，主要转出类型为耕地（27.61 $km^2$）和水域（11.83 $km^2$）；水域面积增幅 95.45%，主要由耕地、林地和建设用地转入产生。由图 7b 可知，非石漠化地区共 2 369.26 $km^2$ 发

生土地类型转化,草地面积总计减少 59.31 $km^2$,主要转出为耕地(15.88 $km^2$)和林地(38.76 $km^2$),主要转入为林地(10.10 $km^2$)和耕地(7.03 $km^2$)。耕地面积总计增加 141.32 $km^2$,主要转出为林地(851.98 $km^2$)、建设用地(37.0 $km^2$)和灌木(13.4 $km^2$)。灌木面积总计减少 588.12 $km^2$,减少量最大,主要转出为耕地(79.35 $km^2$)和林地(278.60),主要转入为耕地和草地。草地面积减少最显著,总计减少 59.31 $km^2$,减少面积占 2000 年草地总面积的 81.15%。建设用地增加最显著,增加43.53 $km^2$,是 2000 年建设用地总面积的 4.5 倍,耕地和林地为主要转入类型。水域和裸地较 2000 年有小幅增加,增加面积为 5.21,0.03 $km^2$。总体来看,林地和耕地是石漠化和非石漠化地区主要的土地利用类型,林地和耕地及与其他土地利用类型转的转化是主要的土地利用类型变化模式。

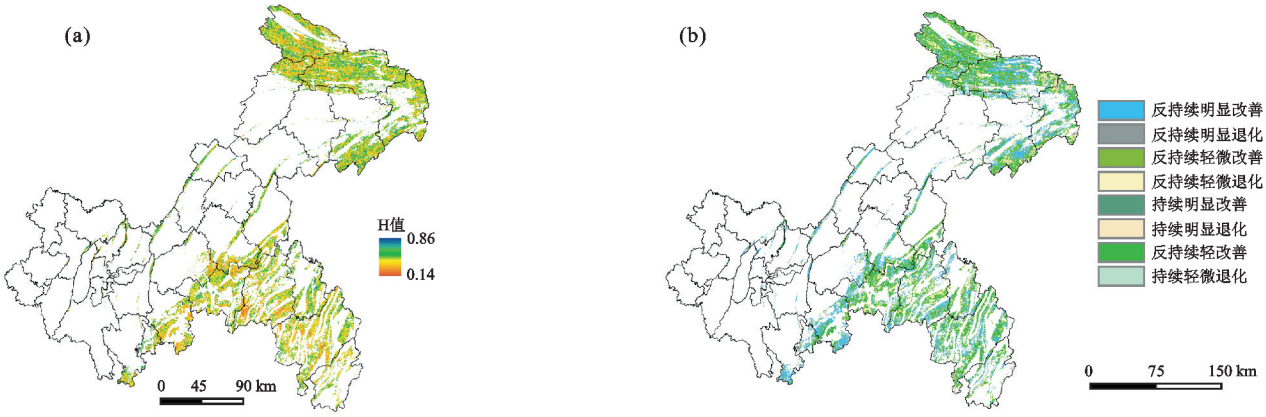


**图 6　非石漠化地区植被绿度 Hurst 检验及未来变化趋势**

**Fig. 6　Hurst test and future change trend spatial distribution map of vegetation greenness in non-rocky desertification area**

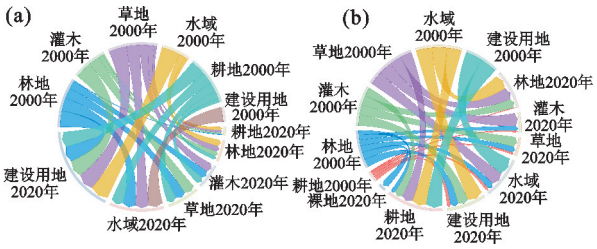


**图 7　土地利用转移矩阵弦图**

**Fig. 7　The land use transfer matrix chord diagram**

## 2.4　植被绿度动态的土地利用类型变化归因分析

2.4.1　*不同土地利用类型的植被绿度差异*　不同土地利用类型的植被绿度存在差异,石漠化地区的植被绿度值为林地(1.22)>灌木(1.16)>草地(1.05)>耕地(1.01)>建设用地(0.72)>水域(0.72),非石漠化地区各土地利用类型植被绿度均值为林地(1.28)>灌木(1.18)>耕地(1.16)>草地(1.15)>水域(1.08)>建设用地(0.91)。林地光合作用能力最强,2 个地区林地植被绿度最高,因此,林地向其他土地利用类型转化均导致植被绿度降低。

2.4.2　*植被绿度对土地利用类型的响应*　由表 2 可知,石漠化区植被绿度显著退化和轻微退化主要分别发生在耕地转入建设用地(30.49%,67.47%)和林地转入耕地(21.33%,23.98%)的区域,耕地转入水域的区域面积占比分别为 10.38%和 11.65%。轻微改善主要发生在耕地、灌木和草地转入林地的区域,面积占比之和为 95.61%。明显改善主要发生在灌木和草地转入林地的区域,面积占比分别为 62.89%,13.46%,草地和建设用地转入耕地的区域面积占比之和为 13.34%。非石漠化区植被绿度显著退化和轻微退化主要发生在林地转入耕地的区域,面积占比分别为 63.85%,90.39%,耕地转入建设用地的区域是显著退化的次要发生区,面积占比为 19.09%。轻微改善主要发生在耕地转入林地的区域,面积占比为 89.49%。明显改善主要发生在耕地、灌木和草地转入林地的区域,面积占比分别为 73.19%,22.27%,1.84%,耕地转入灌木的区域在轻微改善和明显改善区的面积占比均不足 2%。

2.4.3　*土地利用类型转变下 LAI 损益分析*　利用土地利用类型转移矩阵计算石漠化和非石漠化地区土地利用类型变化的 LAI 损益数据(表 3),土地利用类型转变对 LAI 的影响主要为 2 类:一是林地转化为其他土地利用类型植被 LAI 下降;二是耕地和灌木转化为林地植被 LAI 增加。

由表 3 可知,石漠化地区土地利用类型转化导致植被 LAI 总量净增加1 232.15。土地利用类型转出过程中,林地 LAI 转出总量最多,减少 11 902.01,其中,转化为耕地的减少量最大,占比为 96.54%;耕地 LAI 转出总量增加量最大,增加 10 016.83,其中,转化为林地的增加量最大,占比为 96.54%。土地利用类型转入过程中,林地和草地 LAI 总量增加14 983.79和

3.93,耕地、灌木、水域、裸地和建设用地LAI总量分别减少12 971.82,266.23,196.69,2.65,318.08。耕地、灌木和草地转入林地,LAI分别增加9 670.42,3 496.32,1 817.05。建设用地、水域和裸地的土地利用类型转化面积和植被LAI总量变化较小,所以,转化为其他土地利用类型造成的植被LAI总量变化不明显。

**表2 2000—2020年不同变化趋势对应的前4种土地利用变化模式**

**Table 2 The first four land use change patterns corresponding to different change trends from 2000 to 2020**

| 植被绿度变化趋势 | 石漠化地区 | | 非石漠化地区 | |
|---|---|---|---|---|
| | 土地利用变化 | 像元占比/% | 土地利用变化 | 像元占比/% |
| 显著退化 | 耕地—建设用地 | 30.49 | 林地—耕地 | 63.85 |
| | 林地—耕地 | 21.33 | 耕地—建设用地 | 19.09 |
| | 耕地—水域 | 10.38 | 灌木—耕地 | 6.61 |
| | 林地—建设用地 | 6.54 | 林地—建设用地 | 4.18 |
| 轻微退化 | 林地—耕地 | 67.47 | 林地—耕地 | 90.39 |
| | 耕地—建设用地 | 23.98 | 林地—灌木 | 3.43 |
| | 耕地—水域 | 11.65 | 耕地—草地 | 2.57 |
| | 林地—水域 | 6.86 | 林地—草地 | 1.89 |
| 轻微改善 | 耕地—林地 | 76.19 | 耕地—林地 | 89.49 |
| | 灌木—林地 | 17.79 | 草地—林地 | 6.47 |
| | 草地—林地 | 1.63 | 草地—耕地 | 2.61 |
| | 耕地—灌木 | 1.19 | 耕地—灌木 | 1.05 |
| 明显改善 | 灌木—林地 | 62.89 | 耕地—林地 | 73.19 |
| | 草地—林地 | 13.46 | 灌木—林地 | 22.27 |
| | 草地—耕地 | 8.59 | 草地—林地 | 1.84 |
| | 建设用地—耕地 | 4.75 | 耕地—灌木 | 1.47 |

**表3 石漠化地区土地利用类型转化的LAI损益矩阵**

**Table 3 LAI profit and loss matrix of land use type transformation in rocky desertification area**

| 2000年 | 2020年 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 耕地 | 林地 | 灌木 | 草地 | 水域 | 裸地 | 建设用地 | 转出总量 |
| 耕地 | | 9 670.42 | 497.10 | 116.08 | −157.64 | −2.65 | −106.48 | 10 016.83 |
| 林地 | −11 075.13 | | −424.22 | −108.89 | −108.93 | — | −184.84 | −11 902.01 |
| 灌木 | −878.63 | 3 496.32 | | −3.26 | −5.85 | — | −29.91 | 2 578.67 |
| 草地 | −1 091.46 | 1 817.05 | −339.11 | | −2.91 | — | −18.37 | 365.20 |
| 水域 | 58.83 | — | — | −0.10 | | — | 21.52 | 80.25 |
| 建设用地 | 14.57 | — | — | — | 78.64 | — | | 93.21 |
| 转入总量 | −12 971.82 | 14 983.79 | −266.23 | 3.83 | −196.69 | −2.65 | −318.08 | 1 232.15 |

由表4可知,非石漠化地区土地利用类型转化导致植被LAI总量净增加10 916.89。土地利用类型转出过程中,林地LAI转出总量减少4 442.18,其中,转化为耕地的减少量最大,占72.65%;耕地LAI转出总量增加最大,增加8 889.71,其中,转化为林地增加10 463.9;耕地、灌木、草地和水域转化为林地的LAI在各土地类型转出总量中占比最大。土地利用类型转入过程中,各土地利用类型转入林地LAI均增加,林地LAI总量增加17 109.46;耕地、灌木、草地、水域、裸地和建设用地LAI总量分别减少3 470.53,1 400.51,707.21,39.68,7.64,567;其中,灌木、草地和建设用地转入区的最大减少量是因耕地转入造成的,减少量分别为903.60,285.24,351.94。

## 3 讨论

研究区植被绿度整体呈增加趋势,石漠化和非石漠化地区植被绿度年增长速率分别为0.014和0.012,平均值分别为1.15和1.45,植被生长状况趋向良好。植被的生长对水热条件的依赖性较强,重庆冬暖夏热,年降水量丰沛,优越的气候条件使得植被生长较好[19],植被绿度值增加。石漠化和非石漠化地区植被绿度主要变化趋势为显著改善(61.76%)和轻微改善(48.08%),且石漠化地区植被绿度增长速率高于非石漠化地区。石漠化地区因退耕还林还草等生态工程的实施,经济林、人工林等林地大面积增加,植被覆被率显著提高,植被绿度显著改善且绿度增速较快。非石漠化地区林地是主要的土地利用类型,生态环境稳定,植被绿度年际波动较小,植被绿度较高;社会经济和城市化建设快速发展,林地和耕地大量转化为建设用地,导致区域植被绿度增长缓慢。研究区未来植被绿度整体呈改善趋势,石漠化地区绿

度低于非石漠化地区。石漠化地区水土流失问题严重,土层浅薄,植被生长条件较差,植被覆盖率相对于较低,植被绿度低[18]。2001 年、2005 年、2010 年和 2012 年植被绿度处于谷值,其所对应年份出现异常大气环流,出现极端高温,并且降水相对较少,在热浪和干旱的作用下,区域水热条件极度失衡[25],土壤水分快速流失,导致植被叶面受到严重损坏,植被绿度降低。因此,需要进一步开展区域植被绿度对极端气候响应过程的研究,提高石漠化生态脆弱区对极端气候适应能力的科学认知。

**表 4　非石漠化地区土地利用类型转化的 LAI 损益矩阵**

**Table 4　LAI profit and loss matrix of land use type conversion in non－rocky desertification area**

| 2000 年 | 2020 年 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 耕地 | 林地 | 灌木 | 草地 | 水域 | 裸地 | 建设用地 | 转出总量 |
| 耕地 | | 10 463.90 | －903.60 | －285.24 | －29.50 | －3.91 | －351.94 | 8 889.71 |
| 林地 | －3 227.07 | | －584.91 | －413.67 | －15.25 | －3.73 | －197.55 | －4 442.18 |
| 灌木 | －371.82 | 4 894.06 | | －8.75 | －0.23 | － | －10.59 | 4 502.67 |
| 草地 | 109.37 | 1 706.16 | 88.00 | | －4.21 | － | －5.31 | 1 894.01 |
| 水域 | 17.66 | 45.33 | － | 0.45 | － | － | －1.61 | 61.83 |
| 建设用地 | 1.33 | 0.01 | － | － | 9.51 | － | | 10.85 |
| 转入总量 | －3 470.53 | 17 109.46 | －1400.51 | －707.21 | －39.68 | －7.64 | －567.00 | 10 916.89 |

空间上,渝东北和渝东南森林和灌木覆盖度较高、人口稀疏、城市化缓慢的地区植被绿度改善最明显。主城地区、巫山和巫溪等地区主要为耕地和建设用地,人类活动强度大,使植被生长受到抑制,植被绿度较低并出现退化趋势。植被绿度时空变化特征与王一等[19]、徐勇等[26]的研究结果相似。石漠化和非石漠化地区未来植被绿度变化趋势均以反持续改善为主,表明退耕还林还草等生态修复工程对植被绿度增加具有促进作用,未来研究区植被生长状况趋向良好,生态环境得到进一步改善,且植被生长状况逐渐趋于饱和状态,或许出现间歇性停滞状况[27],岩溶地区保护工作中应当引以重视。值得注意的是,非石漠化地区植被绿度的反持续退化明显高于石漠化地区,可能是因为非石漠化地区城市化迅速扩张,建设用地侵占大量耕地和林地,原有的地表覆被连续性破坏,脆弱的区域生态系统环境恶化,导致植被绿度出现退化[25],非石漠化地区的植被恢复和生态保护仍是政府关注的重点。

石漠化和非石漠化地区土地利用类型变化以林地和耕地为主,草地和灌木萎缩,林地、水域和建设用地面积增加,耕地主要转换为林地和建设用地,与吴娇[23]的研究结果一致。土地利用类型转变对岩溶地区的植被绿度既有正向促进作用,又有反向抑制作用。2000 年以来,城镇化建设发展,人类活动空间扩大,对耕地、草地和灌木造成侵占,耕地、草地和灌木面积减少。退耕还林工程、撂荒和旱地水田转换等导致其他土地利用类型向林地转化的面积最多,非石漠化地区林地净增加面积为 663.09 $km^2$,是石漠化地区净增加面积(123.90)的 5 倍,重庆地区实施的生态修复工程取得显著成效。石漠化和非石漠化地区林地转化区植被绿度净增加量为 3 081.78 和 12 667.28。因水土流失治理、农业产业结构调整及土地开发整治项目的实施提高耕地质量[24],灌溉和施肥等农业技术的参与改变栽培作物的种类和生长状况[28],一定程度增加耕地植被 LAI,非石漠化地区耕地植被 LAI 净增加值为 5 419.18。三峡库区建设和蓄水导致研究区水域面积增大,是水域转入区植被 LAI 减少的主要原因。石漠化和非石漠化地区林地转出区 LAI 总量减少(11 902.01 和 4 442.18),转入区 LAI 总量增加分别为 14 983.79 和 17 109.46,其他土地类型转出区 LAI 总量增加,转入区 LAI 总量减少。表明高 LAI 的土地利用类型转化为较低 LAI 土地利用类型(草地、建设用地和水域)导致 LAI 减小,降低植被绿度;反之,较低 LAI 土地利用类型转化为高 LAI 土地利用类型,导致 LAI 增加。

采用植被 LAI 表征植被绿度,选取重庆市岩溶石漠化和非石漠化地区作为研究对象,分析植被绿度演化特征,并从地理学角度,探讨土地利用变化对植被绿度的影响,以期明确岩溶地区石漠化治理的植被恢复状况,为石漠化区生态建设提供理论依据。但是,生态系统存在自然演替的过程,植被生长发育受制于水热条件的变化,定量分析气候、人为和土地利用类型随季节变化对植被绿度的贡献是下一步需要深入研究的内容。

## 4　结 论

(1)2000—2020 年石漠化和非石漠化地区的植被绿度整体呈增加趋势,非石漠化地区植被绿度值高于石漠化地区,明显改善区面积占比低于石漠化区。

(2)石漠化和非石漠化地区主要以林地和耕地为主，林地和耕地与其他土地类型的转化是土地利用类型变化的主要方式，也是植被绿度趋势变化的主要发生区。

(3)土地利用类型转化区，石漠化和非石漠化地区林地和耕地转化区植被绿度变化最显著，林地转化为耕地区域植被LAI损失量最大，分别为11 075.13和3 227.07，耕地转化为林地的地区植被绿度增加量最大，分别为9 670.42和10 463.9。水域、建设用地和裸地面积和植被绿度较低，土地类型转化对植被LAI总量的变化不明显。

**参考文献：**


[1] QIU B, YAN X, CHEN C, et al. The impact of indicator selection on assessment of global greening[J]. GI-Science and Remote Sensing, 2021, 58(3): 1-14.

[2] 曹晓云，祝存兄，陈国茜，等.2000—2021年柴达木盆地地表绿度变化及地形分异研究[J].生态环境学报，2022，31(6)：1080-1090.
CAO X Y, ZHU C X, CHEN G Q, et al. Surface greenness change and topographic differentiation over Qaidam Basin from 2000 to 2021[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(6): 1080-1090.

[3] 安德帅，徐丹丹，刘月，等.高光谱与拟合多光谱植被指数反演武夷山亚高山草甸LAI的对比研究[J].生态科学，2022，41(5)：187-196.
AN D S, XU D D, LIU Y, et al. A comparison of the LAI retrieval for subalpine meadows in Wuyishan by hyperspectral and simulated multispectral vegetation index [J]. Ecological Science, 2022, 41(5): 187-196.

[4] CHEN C, PARK T, WANG X, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. Nature Sustainability, 2019, 2(2): 122-129.

[5] 姚雄，余坤勇，杨玉洁，等.基于随机森林模型的林地叶面积指数遥感估算[J].农业机械学报，2017，48(5)：159-166.
YAO X, XU K Y, YANG Y J, et al. Estimation offorest leaf area index based on random forest model and remote sensing data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 159-166.

[6] DE JONG R, DE BRVINS, DE WIT, et al. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series[J]. Remote Sensing of Environment: An Interdisciplinary Journal, 2011, 115(2): e236.

[7] 侯鑫，赵杰，赵洪飞，等.2003—2018年干旱对中国森林绿度异常的影响[J].中国环境科学，2022，42(1)：336-344.
HOU X, ZHAO J, ZHAO H F, et al. Drought efects on forest geess anomalies in China from 2003 to 2018 [J]. China Environmental Science, 2022, 42(1): 336-344.

[8] 张宇，余振，栾军伟，等.1982—2020年东北森林带植被绿度时空变化特征[J].生态学报，2023，43(16)：6670-6681.
ZHANG Y, YU Z, LUAN J W, et al. Spatiotemporal variations of vegetation greenness in the forest belt of Northeast China during 1982—2020[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6670-6681.

[9] 牛小桃.半干旱区典型灌草植被叶面积指数动态变化的测量与应用[D]. 陕西 杨凌：中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心)，2023.
NIU X T. Measurement and application of dynamics in leaf area index of typical shrubs and grasses in a semiarid region[D]. Yangling, Shaanxi: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Education), 2023.

[10] 董庆栋，陈超男，殷浩然，等.秦巴山地植被绿度特征及其对地表水热的响应[J].生态学报，2023，43(3)：1090-1101.
DONG Q D, CHEN C N, YIN H R, et al. Vegetation greenness characteristics in Qinling-Daba Mountains and its response to surface hydrothermal[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1090-1101.

[11] 王福海，陈丹.基于RS和GIS的土地利用变化时空特征研究：以重庆主城区为例[J].重庆理工大学学报(自然科学)，2016，30(7)：78-85.
WANG F H, CHEN D. Study on spatial-temporal characteristics of land use change in main urban area of Chongqing about 30 years based on RS and GIS[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2016, 30(7): 78-85.

[12] 王彦芳，裴宏伟，赵超.河北坝上地区2000—2019年植被绿度动态及其土地利用/覆被变化归因分析[J].水土保持通报，2021，41(6)：345-352.
WANG Y F, PEI H W, ZHAO C. Vegetation greenness change and its attribution related to land use and land cover change in bashang area of Hebei province during 2000—2019[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 345-352.

[13] 池金洺，刘殿君，于洋，等.黄河流域十大孔兑土地利用变化的土壤侵蚀效应[J].泥沙研究 2023，48(6)：16-23.
CHI J M, LIU D J, YU Y, et al. Effects of land-use changes on soil erosion in Ten Tributaries of the Yellow River Basin[J]. Journal of Sediment Research, 2023, 48 (6): 16-23.

[14] 付宇佳，刘晓煌，孙兴丽，等.近30年西北内陆荒漠资源大区土地利用驱动下生态系统碳储量时空变化[J/OL]. 地质通报，1-17[2024-03-10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20230902.1315.002.html.
FU Y J, LIU X H, SUN X L, et al. Spatial-temporal variation of ecosystem carbon storage driven by land use in northwest Inland desert resource region in recent 30 years[J/OL]. Geological Bulletin of China, 1-17[2024-03-10]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/11. 4648. P. 20230902.1315.002.html.

[15] 李威，吕思思，赵祖伦，等.土地利用对流域水源涵养及

水质净化的影响:以乌江流域为例[J].生态学报,2023,43(20):8375-8389.
LI W, LÜ S S, ZHAO Z L, et al. Impact of land use change on watershed water conservation and water quality purification service: A case study of Wujiang River Basin [J].Acta Ecologica Sinica,2023,43(20):8375-8389.

[16] WANG W, SUN L, LUO Y. Changes in vegetation greenness in the upper and middle reaches of the Yellow River Basin over 2000—2015[J].Sustainability,2019,11(7):e2176.

[17] 韩思淇,麻泽龙,庄文化,等.2000—2018 年黄河源植被叶面积指数时空变化特征[J].灌溉排水学报,2019,38(12):57-62.
HAN S Q, MA Z L, ZHUANG W H, et al. Spatial-temporal change of leaf area index(LAI) in the source region of the Yellow River during 2000—2018[J].Journal of Irrigation and Drainage,2019,38(12):57-62.

[18] 沈明潭,谭炳香,戚曌,等.滇东南喀斯特石漠化地区植被覆盖度时空变化特征研究:以砚山县为例[J].林业调查规划,2022,47(5):1-11.
SHEN M T, TAN B X, QI Z, et al. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage in karst rocky desertification area of southeast Yunnan: A case study of Yanshan county[J].Forest Inventory and Planning,2022,47(5):1-11.

[19] 王一,郝利娜,赵美龄,等.2001—2018 年重庆植被 NDVI 变化及其对气候因子和人类活动的响应[J].水土保持研究,2021,28(5):222-229.
WANG Y, HAO L N, ZHAO M L, et al. Variation of vegetation NDVI and its response to climatic factors and human activities in Chongqing from 2001 to 2018[J].Research of Soil and Water Conservation,2021,28(5):222-229.

[20] 谢慧君,谢亚巍,曹聪,等.重庆市植被净初级生产力时空变化特征及驱动力分析[J].长江流域资源与环境,2023,32(12):2581-2597.
XIE H J, XIE Y W, CAO C, et al. Spatial-temporal variation characteristics and driving forces of vegetation net primary productivity in Chongqing[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2023,32(12):2581-2597.

[21] 朱林富,杨华.重庆巫山县喀斯特石漠化与土地覆被关系研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2015,32(4):61-69.
ZHU L F, YANG H. Study the relationship of rocky desertification and the land cover in karst area at Wushan County in Chongqing[J].Journal of Chongqing Normal University(Natural Science),2015,32(4):61-69.

[22] 管艳霞,龙晓泳,李维杰.重庆喀斯特地区 NDVI 变化的影响因素[J].西南农业学报,2021,34(1):165-173.
GUAN Y X, LONG X Y, LI W J. Impactfactors of annual NDVI change in karst areas of Chongqing [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021,34(1):165-173.

[23] 吴娇.重庆市土地覆被变化及生态响应研究[D].重庆:重庆师范大学,2018.
WU J. Study on land cover change and ecological response in Chongqing[D].Chongqing: Chongqing Normal University,2018.

[24] 李辉丹,史东梅,夏蕊,等.基于地理探测器的重庆坡耕地时空格局演变特征及驱动机制[J].农业工程学报,2022,38(12):280-290.
LI H D, SHI D M, XIA R, et al. Evolution characteristics and driving mechanism for the spatiotemporal pattern of sloping farmland in Chongqing based on geodetector[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2022,38(12):280-290.

[25] 刘婷婷,袁燕萍,叶许春.城市化背景下重庆主城区植被净初级生产力变化特征及其影响因素[J/OL].生态学杂志,1-12[2024-03-07].http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20231019.1527.006.html.
LIU T T, YUAN Y P, YE X C. Change characteristics and influencing factors of vegetation net primary productivity change in the main urban area of Chongqing under urbanization[J].Chinese Journal of Ecology,1-12[2024-03-07]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/21. 1148. Q. 20231019.1527.006.html.

[26] 徐勇,郑志威,郭振东,等.2000—2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测[J].环境科学,2022,43(7):3730-3740.
XU Y, ZHENG Z W, GUO Z D, et al. Dynamic variation in vegetation cover and its influencing factor detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020[J]. Environmental Science,2022,43(7):3730-3740.

[27] 皮贵宁.贵州省植被 LAI 时空演变特征及其驱动力分析[D].贵州:贵州师范大学,2023.
PI G N. Spatio-temporal evolution of vegetation LAI and its driving forces in Guizhou Province [D]. Guizhou: Guizhou Normal University, 2023.

[28] 曾颖婷,李成,林艳,等.1982—2016 年华东地区叶面积指数变化特征及与气候因子的关系[J].干旱气象,2023,41(5):705-713.
ZENG Y T, LI C, LIN Y, et al. Characteristics of LAI variation in east China and its relationship with climate factors from 1982 to 2016[J].Journal of Arid Meteorology,2023,41(5):705-713.