

DOI: 10.20103/j.stxb.202310302353

袁二双, 周秋文, 罗应忠. 社会经济因素对中国西南喀斯特区植被恢复的贡献. 生态学报, 2024, 44(14): 6265-6275.

Yuan E S, Zhou Q W, Luo Y Z. Contribution of socioeconomic factors to vegetation restoration in Karst areas of Southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(14): 6265-6275.

社会经济因素对中国西南喀斯特区植被恢复的贡献

袁二双^{1,2}, 周秋文^{2,*}, 罗应忠²

1 复旦大学历史地理研究中心, 上海 200433

2 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550025

摘要: 基于 2000—2020 年中国西南喀斯特地区的增强型植被指数 (EVI) 和植被净初级生产力 (NPP) 数据, 将人口压力、农村经济和非农经济等社会经济因素进行细分, 利用线性混合模型定量评估各社会经济因素对 EVI 和 NPP 的相对贡献率, 探讨社会经济发展与植被恢复之间的关系。结果表明: (1) 2000—2020 年中国西南喀斯特区植被呈上升趋势。 (2) 整体社会经济因素对植被恢复的贡献大于自然因素, 社会经济因素对 EVI 的贡献率为 26.6%, 对 NPP 的贡献率为 41%。 (3) 在社会经济因素中, 非农经济因素对植被恢复的相对贡献率最高, 对 EVI 的贡献率为 19.1%, 对 NPP 的贡献率为 14.7%。 (4) 在各细分社会经济因素中, 第三产业对植被恢复的相对贡献率最高, 其中对 EVI 和 NPP 的相对贡献率分别为 11.8% 和 14.7%。综上所述, 除了生态工程之外, 其余社会经济因素对植被恢复的影响虽然具有间接性或者滞后性, 但同样重要不可忽略。

关键词: 植被恢复; 社会经济因素; 贡献率; 线性混合模型; 喀斯特

Contribution of socioeconomic factors to vegetation restoration in Karst areas of Southwest China

YUAN Ershuang^{1,2}, ZHOU Qiuwen^{2,*}, LUO Yingzhong²

1 Center for Historical Geographical Studies, Fudan University, Shanghai 200433, China

2 School of Geography and Environment Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China

Abstract: Based on the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Net Primary Productivity (NPP) data of the Karst areas in Southwest China from 2000 to 2020, the socioeconomic factors such as population pressure, rural economy and non-farm economy were subdivided. A linear mixed model was used to quantitatively assess the relative contribution of each socio-economic factor to the EVI and NPP, and to explore the relationship between socio-economic development and vegetation restoration. The results showed that: (1) Vegetation in the Karst region of Southwest China presented an upward trend from 2000 to 2020. (2) Overall socio-economic factors contributed more to vegetation recovery than natural factors, and in this paper the contribution of socioeconomic factors to EVI was 26.6% and to NPP was 41%. (3) Among the socio-economic factors, the relative contribution of non-farm economic factors to vegetation restoration was the highest, with a contribution rate of 19.1% to EVI and 14.7% to NPP. (4) Among the subdivided socio-economic factors, the tertiary industry had the highest relative contribution to vegetation restoration, in which the relative contribution to EVI and NPP was 11.8% and 14.7%, respectively. In summary, except for ecological engineering, the influence of the remaining socioeconomic factors on vegetation restoration, although indirect or lagging, is equally important and cannot be ignored.

基金项目: 教育部高校人文社会科学重点研究基地重大项目-复旦大学历史地理研究中心“十四五”规划项目(22JJD770020); 国家自然科学基金委员会-贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目(U1812401)

收稿日期: 2023-10-30; **网络出版日期:** 2024-05-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zouqiuwen@163.com

Key Words: vegetation restoration; socioeconomic factors; contribution; linear mixed model; karst

植被作为生态环境的指示器,在地球表面的能量交换、碳循环、土壤生态系统和区域人类活动中起到重要作用^[1-2]。喀斯特作为一种脆弱的生态系统,近些年植被状况得到了明显的改善,尤其是中国西南喀斯特地区^[3-5]。在这样的背景下,清楚地了解中国西南喀斯特地区植被恢复的影响因素,对于维护该地区的生态系统稳定,巩固生态恢复工程的成果具有重要意义。

目前,喀斯特地区的相关研究通常将植被变化的驱动因素分为自然因素和人类活动因素两大类^[6-8]。在自然因素方面,通常认为降雨和气温的变化是喀斯特地区植被恢复的主要自然因素^[9-11]。随着生态恢复工程的实施以及气候变化的全球性,越来越多的人开始关注气候变化和人类活动对植被变化的影响。已有研究表明,植被恢复主要由自然因素和人类活动共同影响^[12-15]。针对气候因素和人类活动因素的研究,目前主要包括气候和人类活动因素间的相互作用,及气候和人类活动因素对植被变化的贡献两方面。前者主要关注气候变化和人类活动各因子之间的相互作用对植被变化的影响^[16]。例如,Huo 等^[17]利用地理探测器量化各因子之间的相互作用发现,两两因子之间的交互作用对植被变化的影响远大于单个因子之间的交互作用。后者主要关注气候和人类活动因素对植被变化贡献的大小^[18-19]。比如,Liu 等^[20]将人类活动因素作为整体,识别出人类活动对植被变化的贡献率小于气候变化。

以上关于驱动因素的研究,很好的说明了自然因素和人类活动对植被恢复的影响。但是,现有研究通常将人类活动归结于生态工程,而生态工程之外的社会经济因素往往被忽略。实际上,人类活动因素是一个比较综合的概念,包含了很多子因素,除生态工程外,还包括人口、教育、经济、文化等社会经济因素^[21-23]。具体这些因素对植被恢复的贡献如何是不清楚的。而且,越来越多的研究表明,生态工程对植被恢复的促进作用可能是短暂的、范围是局限的,真正对植被恢复产生根本性影响的人类活动因素是经济发展、人口压力减缓等社会经济因素^[24-26]。例如,随着社会经济的发展,生计的多样性,越来越少的农民依赖于从作物生产中获得收入,生计逐渐从农业转向非农业^[24],从而坡耕地废弃植被自然恢复。因此,仅将人类活动因素作为一个综合的概念未对其细分,或者将人类活动都归结为生态工程,不利于充分理解植被恢复的内在机制。

鉴于细分人类活动因素的重要性,一些非喀斯特地区的研究分析了多种人类活动因素对植被变化的影响^[27]。如李婷等^[28]分析了农村经济、非农经济、人口压力对黄土高原植被变化的影响。但非喀斯特地区的研究未必能说明喀斯特地区的问题。原因在于,首先,上述在黄土高原的研究,该区域属于半湿润半干旱气候,地形起伏和缓。而喀斯特区植被恢复较为明显的区域主要是湿润区,地形也多为山地^[29]。气候、地形等方面的差异会造成人类活动适应环境的程度不一样,从而对植被恢复的影响程度也不一样。其次,上述黄土高原区的社会经济条件和喀斯特地区也不同,这也可能会对植被恢复产生不同的影响效果。因此,已有的非喀斯特地区的研究并不能说明喀斯特地区社会经济因素对植被恢复的影响。

虽然也有少量的研究进一步细分了影响喀斯特地区植被变化的社会经济因素,并分析了这些因素对植被变化的影响。如 Zhang 等^[30]将社会经济因素分为道路密度、GDP、人口密度、土地利用类。但是这些研究对于社会经济因素的划分仍不够细致,更重要的是,并未解释这些社会经济因素具体对植被恢复的贡献。因此,喀斯特地区社会经济因素对植被恢复的贡献究竟如何,仍然是未被清楚回答的问题。

基于此,本文选取了中国西南喀斯特地区作为研究区,细分社会经济因素。首先,利用 2000—2020 年的增强型植被指数(EVI)和植被净初级生产力(NPP)数据,通过趋势分析方法,分析了 NPP 和 EVI 在时间和空间上的变化。其次,利用混合线性模型,分别定量计算了各社会经济因素对 EVI 和 NPP 的相对贡献率。本研究将有助于充分认识植被恢复的社会经济因素驱动机制,从而更加有效的维持该地区生态系统稳定,提升生态系统服务价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国西南部的云南省、贵州省及广西壮族自治区三省(以下简称为中国西南喀斯特区,图 1),

地理范围介于 21.53°N — 28.93°N , 97.81°E — 111.67°E 之间, 总共囊括了三省的 39 个地级市(州)和 294 个县(市、区)。总体地势西北高, 东南低, 起伏较大, 地势险峻^[31]。属于典型的亚热带季风湿润气候, 多年平均降雨量约为 1000—1300mm, 年均气温约 16.92°C — 17.87°C 。

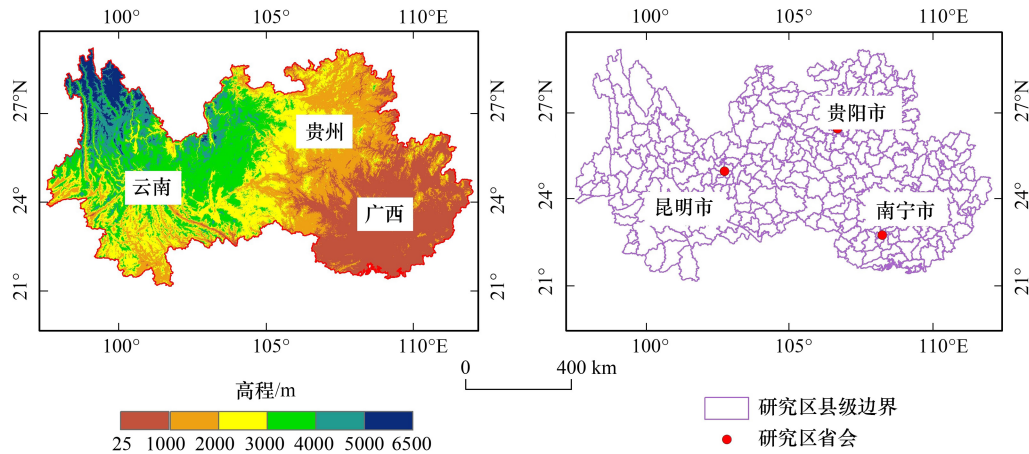


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Geographic location of the study area

1.2 数据来源

2000—2020 年的增强型植被指数 (Enhanced vegetation index, EVI) 和植被净初级生产力 (Net primary productivity, NPP) 数据均来自于美国国家航空航天局 MODIS 数据集 (<http://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>), 利用 MRT (MODIS reprojection tool) 工具对研究区影像进行空间拼接、裁剪、投影转换等处理, 分别得到空间分辨率为 1km 和 500m 的数据。气象数据来自于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://resdc.cn/>), 中国气象要素年度空间插值数据集, 空间分辨率为 1km。该数据集是基于全国 2400 多个站点的气象要素站点日观测数据, 在计算各气象要素年值的基础上, 基于 Anusplin 插值软件生成的 1960—2021 年各年度气象要素空间插值数据。本文使用 2000—2020 年空间分辨率统一为 1km 的年数据。高程 DEM 数据来自于地理空间数据 (<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率为 90 m。

云南省、贵州省、广西壮族自治区的人口、农村经济和非农经济等社会经济因素数据来自于 2001—2021 年年各省统计年鉴和中国县域统计年鉴。通过对各县区每年的统计年鉴的整理, 并结合县区年度统计公报数据进行补充和完善, 剔除数据缺失的县区之后, 可用数据样本量为 274 个县区。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析

Theil-Sen Median 方法又称为 Sen 斜率估计, 是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法。该方法计算效率高, 对于测量误差和利群数据不敏感, 适用于长时间序列数据的趋势分析^[32]。该方法被广泛应用于生态水文、气象学及生态学等领域^[24—25]。其计算方式如下:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad \forall j > i \quad (1)$$

式中 Median() 代表取中值, x 为变量, x_j 和 x_i 表示不同时间序列的变量 x , β 为变量变化趋势。若 β 大于 0, 则表明改变量为上升趋势, 反之则为下降趋势。

Theil-Sen Median 趋势分析方法和 Mann-Kendall (MK) 非参数检验法相结合是判断长时间序列数据趋势的重要方法, 已被广泛用于分析长时间序列植被逐像元趋势的变化^[26]。

Mann-Kendall (MK) 显著性检验是一种非参数的时间序列趋势性检验方法, 其不需要测量值服从正太分

布,不受缺失值和异常值的影响,适用于长时间序列数据的趋势显著检验^[32]。其过程大致如下:对于序列 $X_i = X_1, X_2, \dots, X_n$, 先确定所有对偶值 ($X_i, X_j, j > i$) 中 X_i 与 X_j 的大小关系 (设为 S)。做如下假设: H_0 序列中的数据随机排列,即无显著趋势; H_1 序列存在上升或下降趋势。检验的统计量 S 计算公式如下所示:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sgn}(X_k - X_j) \quad (2)$$

其中, $\text{Sgn}()$ 为函数运算符号,计算公式如下:

$$\text{Sgn}(X_k - X_j) = \begin{cases} 1 & (X_k - X_j) > 0 \\ 0 & (X_k - X_j) = 0 \\ -1 & (X_k - X_j) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

使用统计检验量 Z 进行趋势检验, Z 值估算公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\text{Var} = (S)$ 的计算公式如下:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^n t_k(k-1)(2k-5)}{18} \quad (5)$$

在本文中,取 $\alpha = 0.05$,判断在 0.05 置信水平上即 $|Z| > 1.96$ 时,区域植被变化趋势显著。利用 Matlab 编程语言分析四个时间段 (2000—2005、2005—2010、2010—2015、2015—2020 年) 的植被指数 EVI 和净初级生产力 NPP 逐像元的变化趋势。最终将植被变化分为 5 类:显著增加 ($\beta > 0.0005, |Z| > 1.96$)、不显著增加 ($\beta > 0.0005, -1.96 < Z < 1.96$)、显著减少 ($\beta < 0.0005, |Z| > 1.96$)、不显著减少 ($\beta < 0.0005, -1.96 < Z < 1.96$)、稳定不变 ($-0.0005 < \beta < 0.0005$)。

1.3.2 线性混合分析

线性混合效应模型是估计一个或多个解释变量对响应变量的影响。不同于方差分析,线性混合效应模型在分析数据时不需要对原始数据进行均值处理,同时也允许出现数据缺失^[33]。线性混合模型在一般线性模型的基础上加上了随机效应项,消了观测值之间相互独立和残差 (因变量) 方差齐性的要求^[34]。线性混合模型的一般形式为:

$$Y = X \times \beta + Z \times T + e \quad (6)$$

式中 Y 表示观测值向量, β 表示固定效应参数向量, T 表示随机效应参数向量, e 表示误差向量,矩阵 X 和 Y 都是已知的设计矩阵,它们分别对应着固定效应和随机效应。本文利用 Relaimpo 包中的 linmod 和 lmer 函数计算各社会经济因素对植被恢复的贡献率。Relaimpo 程序包有多种模式计算解释变量的重要性,以上操作均在 R 语言中实现。

1.3.3 理论基础和模型建立

本文研究在生态工程背景下社会经济因素对植被恢复的影响,如人口结构的变化,农民生计的转变等。已有研究表明,事实上,一直以来社会经济因素在植被恢复甚至是生态系统功能中都发挥着重要作用^[35]。在早期,耕地有限、人口密度高、粮食供应不足、以及中国西南喀斯特山地频繁的农业活动,给该地区造成了严重生态环境问题,包括土壤侵蚀、土地退化以及裸露岩石的暴露,这严重威胁了区域的可持续发展^[36]。随着时间发展,该地区的人口结构、耕作模式、发展手段等社会经济因素也随之发生改变。比如,该地区的许多人为了工作机会迁移到沿海城市或者地区城市中心,这减轻了当地的环境负担,尤其是在地形崎岖的地区,并允许一些植被群落恢复^[36]。同时,第三产业的发展也在一定程度上促进了植被恢复^[37]。

基于此,本文将社会经济因素概括为三类:人口压力、农村经济、非农经济(表 1)。假设这三类社会经济因素是影响中国西南喀斯特区植被变化的重要因素,并将其设为潜在自变量。EVI 和 NPP 为潜在因变量。为了控制自然因素的影响,本文将以气温、降雨等作为代表的自然影响因素作为控制变量引入到模型中。样本数据为各时间段内研究区的 EVI、NPP 和社会经济指标数据,去除数据缺失县之后,最终样本量为 274 个县。模型利用 R 语言 Relaimpo 包中的 linmod 和 lmer 函数实现。

表 1 影响植被变化的社会经济因素指标

Table 1 Indicators of socioeconomic factors affecting vegetation change

社会经济因素 Socioeconomic factors	指标 Indicators	解释及表示 Interpretation and representation	参考文献 Reference
人口压力 Population pressure	总人口	年底常住人口 P_1	(Cao 等 ^[5] ; Lü 等 ^[24] ; Lu 等 ^[38])
	农村劳动力	农村从业人口 P_2	
	乡村人口	乡村总人口 P_3	
	第一产业人口	从事第一产业的人口 P_4	
	受教育人口	12 年及以上受教育人口 P_5	
农村经济 Rural economy	第一产业	第一产业生产总值 C_1	(Cobon 等 ^[39] ; Deng 等 ^[40])
	耕地面积	常用耕地面积 C_2	
	粮食产量	年总粮食产量 C_3	
	单位面积产量	当年单位面积粮食产量 C_4	
	农民纯收入	农民人均纯收入 C_5	
非农经济 Non-farm economy	第二产业	第二产业生产总值 N_1	(Michishita 等 ^[41] ; Su 等 ^[42] ; Li 等 ^[43])
	第三产业	第三产业生产总值 N_2	
	财政收入	地方财政收入 N_3	
	财政支出	地方财政支出 N_4	
	固定资产	全社会固定资产 N_5	

2 结果与分析

2.1 中国西南喀斯特区植被的时空变化特征

2.1.1 增强型植被指数(EVI)的时空变化特征

2000—2020 年中国西南喀斯特区植被的变化趋势总体呈波动上升趋势,平均每年 EVI 值上升 0.007,并且整体上升趋势明显, R^2 为 0.81。EVI 值在 2009—2016 年间波动较大,并且在 2016 年 EVI 平均值达到最大(图 2)。

2000—2020 年中国西南喀斯特区植被变化趋势显著。在五种变化趋势类型中,显著增加类型的面积随时间演进而不断扩大,不显著减少类型的面积随时间演进而逐渐缩小,其余类型的面积变化不大(图 3)。

2.1.2 植被净初级生产力(NPP)的时空变化特征

2000—2020 年中国西南喀斯特区 NPP 整体呈波动上升的趋势,平均每年 NPP 值上升 $2.90 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,整体上升趋势不明显。NPP 均值在 $880\text{—}960 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间波动,其中 2003—2007 年间波动较大,均值在 2004 年达到最低值 $870.78 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,2017 年达到最高值 $959.83 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (图 4)。

中国西南喀斯特区 2000—2020 年 NPP 值在空间上变化趋势显著。整体上,2000—2020 年随着时间的演进,NPP 值在空间分布上增加区域面积占研究区总面积的比例逐渐减小,减少区域面积占总面积的比例逐渐增加(图 5)。

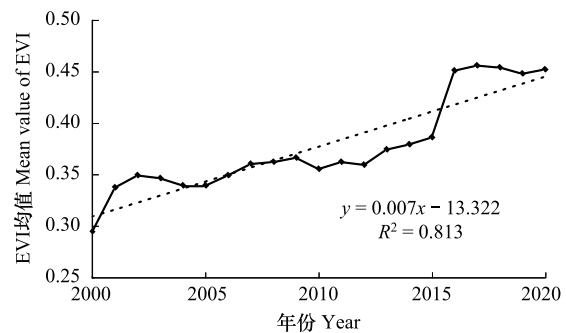


图 2 2000—2020 年中国西南喀斯特区增强型植被指数(EVI)变化趋势

Fig.2 Trends of enhanced vegetation index (EVI) in the Karst Region of Southwest China, 2000—2020

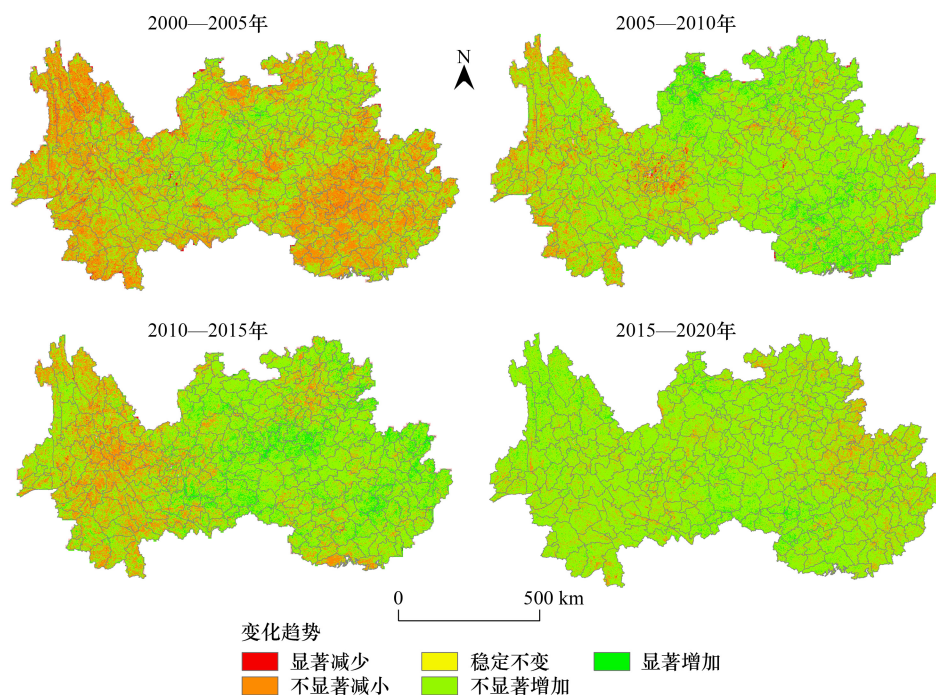


图3 不同时间段中国西南喀斯特区增强型植被指数 EVI 显著性空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the significance of EVI in Karst areas of Southwest China at different time periods

2.2 社会经济因素对植被恢复的贡献率

2.2.1 社会经济因素对增强型植被指数(EVI)的相对贡献率

根据线性混合模型的结果可得,EVI 的效应值在 95%水平下显著, R^2 为 0.617,说明模型效果比较好,能够较好的解释响应变量对植被恢复的贡献。其中,第二产业、固定投入、财政收入、单位面积产量、财政支出,第三产业等因素显著性较强,此处的显著性仅用于判断模型的总体显著性效果。

计算了 2000—2020 年中国西南喀斯特区各驱动因素对 EVI 的相对贡献率可得,自然因素对 EVI 的相对贡献率为 35%,而社会经济因素和其他因素对 EVI 的相对贡献率高达 65%。本文进一步分离了社会经济因素对中国西南喀斯特区 EVI 的相对贡献。本文中的社会经济因素对 EVI 的相对贡献率为 26.6%,其他因素的相对贡献率为 38.4%(图 6)。在社会经济因素中,非农经济对 EVI 的相对贡献率最大为 19.1%,其次是农村经济 6.2%,人口压力对 EVI 的相对贡献率最小为 1.3%(图 6)。

从各观测指标上看,自然因素中气温和日照时数的相对贡献率最大均为 12.4%。在社会经济因素中,第三产业的相对贡献率最高为 11.8%,财政收入、单位面积产量和农民纯收入次之,分别为 3.3%、2.9%和 2.4%。人口压力各观测指标对 EVI 的相对贡献率均在 1%以下(图 7)。

2.2.2 社会经济因素对植被净初级生产力(NPP)的相对贡献率

根据线性混合模型的结果可得,NPP 的效应值在 95%水平下显著, R^2 为 0.426,说明模型效果适中,能够

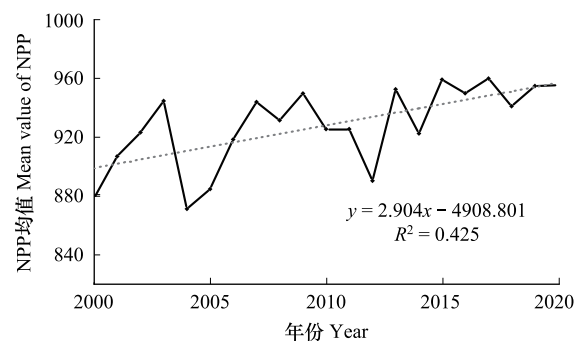


图4 2000—2020 年中国西南喀斯特区植被净初级生产力(NPP)均值变化趋势

Fig.4 Trends in the mean value of net primary productivity (NPP) in Southwest China Karst region, 2000—2020

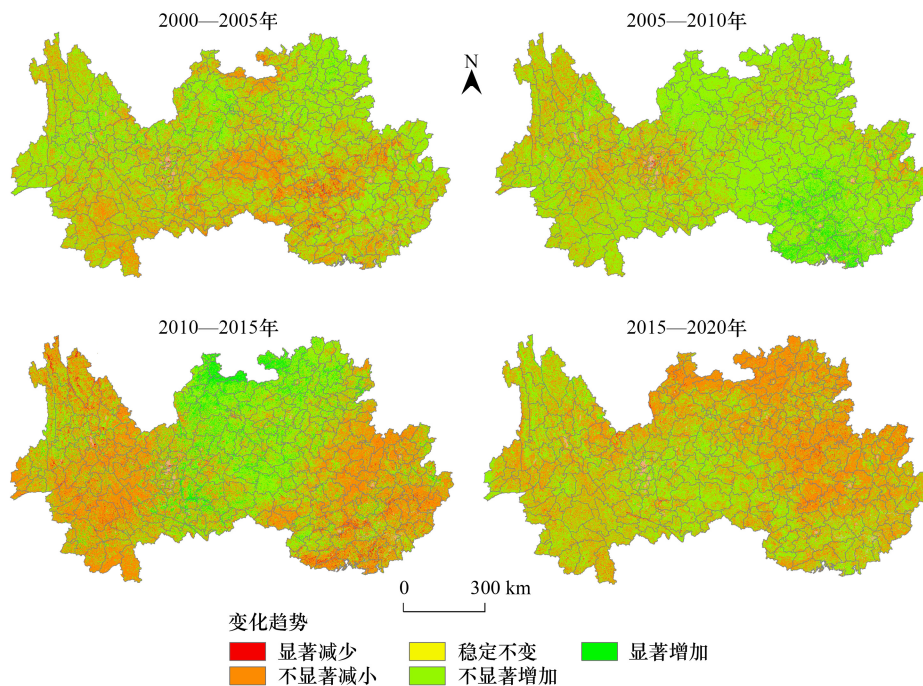


图 5 不同时间段的中国西南喀斯特区植被净初级生产力(NPP)显著性空间分布

Fig.5 Spatial distribution of significance of NPP in Karst areas of Southwest China at different time periods

解释响应变量对植被恢复的贡献。其中,总人口、乡村人口、第一产业、第三产业、固定资产等因素显著性较强。此处的显著性仅代表模型的总体显著性效果。

在各影响因素对中国西南喀斯特区 NPP 的相对贡献率中,自然因素对 NPP 的相对贡献率较小,社会经济因素对 NPP 的相对贡献较大(图 8)。其中,社会经济因素对 NPP 的相对贡献率为 41%,其他因素对 NPP 的相对贡献为 57.2%。在社会经济因素中,非农经济对 NPP 的相对贡献率最高为 27.9%,其次是人口压力,最后是农村经济(图 8)。

从各观测变量来看(图 9),非农经济中第三产业对 NPP 的相对贡献率最高为 14.7%,其次是固定投资为 10.1%。人口压力中总人口、乡村人口和乡村劳动力对 NPP 的相对贡献分别为 3.3%、3.2%和 1%。农村经济中第一产业和单位面积产量对 NPP 的相对贡献率分别为 2.1%和 1.5%。其余观测指标对 NPP 的相对贡献率均小于 1%。

3 讨论

3.1 中国西南喀斯特地区社会经济因素对植被恢复影响的重要性

本文发现,社会经济因素对植被恢复的贡献大于自然因素对植被恢复的贡献,这一结果与前人的研究结果一致^[44–46]。对于这一结果已往大多学者将其归因于以人类活动主导的生态修复工程^[30,47–48]。但本文发现,社会经济因素对中国西南喀斯特区 EVI 的贡献率为 26.6%(图 6),对 NPP 的贡献率为 41%(图 8),仅略小于其他因素对植被恢复的贡献值。首先,相对生态修复工程而言,社会经济因素对植被恢复的影响方式是相对间接的^[23, 35]。比如,生态工程直接进行植树造林,从而对植被恢复效果产生直接的结果。而社会经济因素

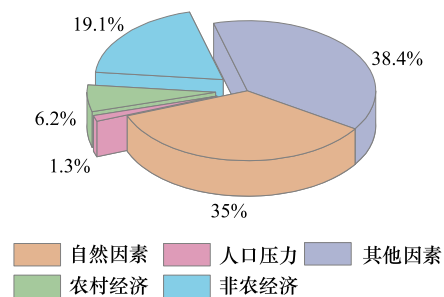


图 6 各影响因素对 EVI 的相对贡献率

Fig.6 Relative contribution of each influencing factor to EVI

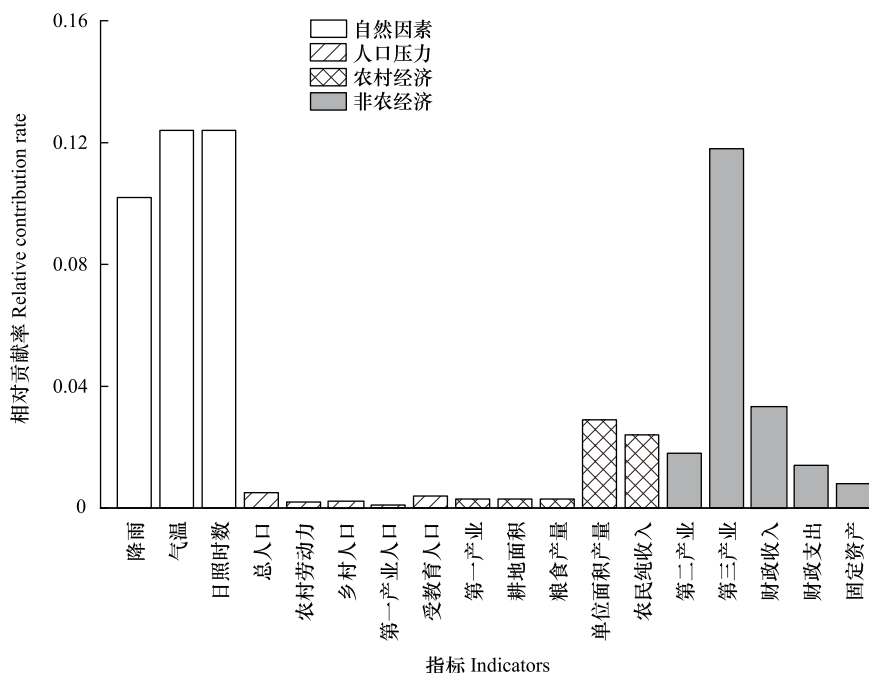


图7 各观测指标对 EVI 的相对贡献

Fig.7 Relative contribution of individual observations to EVI

可能会通过人口的减少,教育水平的提高,农业技术的提高等方式,改变生活和生计方式,从而减小对植被恢复的破坏或者促进植被恢复的效果^[24]。其次,相对生态修复工程而言,社会经济因素对植被恢复产生的影响效果具有滞后性。这是因为社会经济因素对植被恢复产生的影响效果不会像生态工程一样,短时间内看到效果,而是需要较长时间。一方面,社会经济因素对植被恢复产生的影响,一般导致植被进行自然生长,这一过程需要一定时间^[4]。另一方面,社会经济因素本身对植被恢复的影响需要一定时间。比如,人口压力的减少,农业方法的改变,农业技术的提高,这些因素本身都是经过一定时间的演变所形成的。因此,在社会经济因素对植被恢复的贡献中,社会经济因素对植被恢复的影响只是作用方式不同,作用大小和其他社会经济因素一样重要,不应该被忽略。

研究还发现,在社会经济因素中,非农经济因素对植被恢复的相对贡献率最高(图6、图8)。非农经济影响植被恢复主要是通过改变生计方式,减少农业生产和农村居民活动对植被的干扰实现的^[18, 36, 49]。政府财政能力稳定,能够让居民获得足够稳定的经济利益时,有利于促进植被恢复可持续发展^[50]。我们的研究也表明,地方财政收入、支出以及固定资产投资等指标对植被恢复产生明显的贡献(图7、图9)。此外,在非农经济中第三产业的相对贡献最大。在植被恢复初期,第三产业的快速发展可能会对植被景观产生一定程度的破碎化和不完整,但在大量释放劳动力的阶段,劳动密集型的第三产业在吸引大量农村劳动力方面发挥着不可替代的重要。在植被恢复中后期,随着第三产业发展对绿水青山的重视,不断的推动绿色发展,优化发展模式,拉动社会经济。这为中国西南喀斯特地区实施生态工程提供了条件。比如,为实施生态移民政策提供充足的

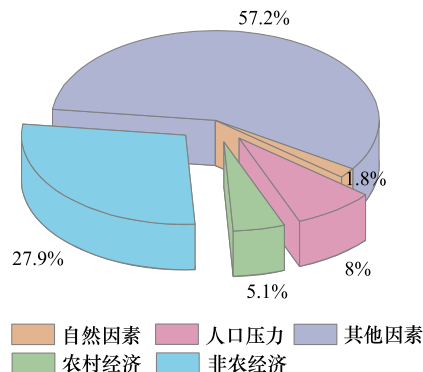


图8 各影响因素对 NPP 的相对贡献率

Fig.8 Relative contribution of each influencing factor to NPP

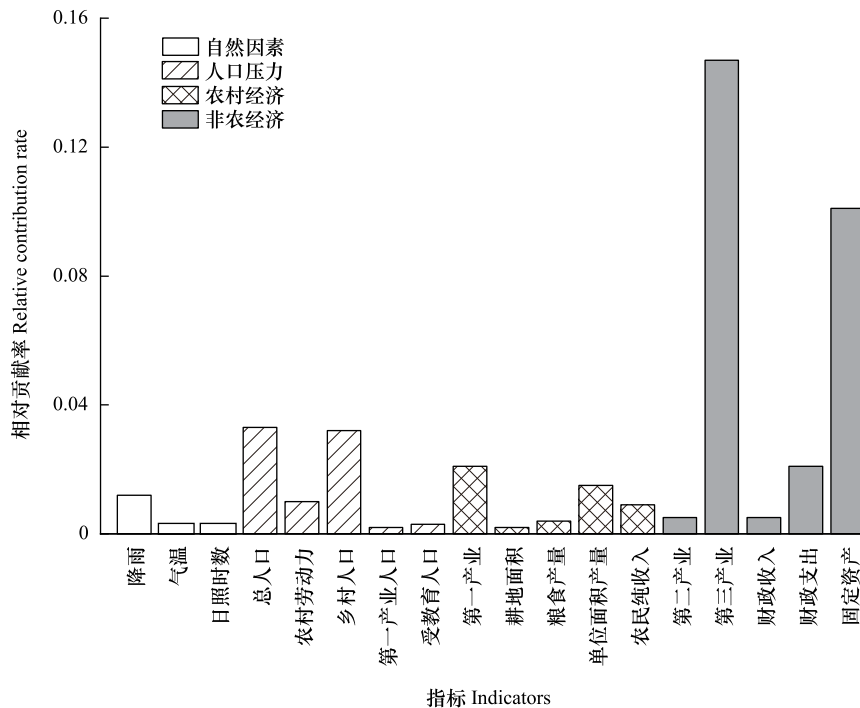


图 9 观测指标对 NPP 的相对贡献

Fig.9 Relative contribution of individual observations to NPP

资金,让部分居住在山区的居民搬迁到合适的安置区,使得居民对山区植被的干扰减小,中国西南喀斯特地区湿热气候背景下植被得以快速恢复^[51—52]。

3.2 中国西南喀斯特区巩固植被恢复成效的启发

本文发现中国西南喀斯特地区社会经济发展对植被恢复产生了明显的促进作用。这一结论对中国西南喀斯特地区植被恢复工作进入新阶段具有一定启发作用,尤其是对石漠化治理成效的维护具有重要参考作用。其一,相对前一阶段进行大量生态工程来看,新阶段政府下一步应该更加注重其他社会经济因素的作用。比如,可通过提高农业技术,合理的结合当地居民的传统文化和价值观念,实现生态发展,推动可持续植被恢复。虽然社会经济因素对植被恢复的影响可能不能立即得到反馈,但其影响程度也是不容忽略的。其二,在开展植被恢复效率评估时,需充分认识到社会经济因素对植被恢复的影响,不应把气候等自然因素以外的植被恢复驱动力都归结为生态工程,这样可能会明显高估生态工程的作用。

4 结论

本文细分了社会经济因素,定量计算了各社会经济因素对中国西南喀斯特区植被恢复的相对贡献率,探讨了除生态工程之外的社会经济因素对植被恢复的重要性。结果表明:

(1)2000—2020 年中国西南喀斯特区植被呈上升趋势。其中,平均每年 NPP 值上升 $2.90\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$,EVI 值上升 0.007。(2)社会经济因素对植被恢复的贡献大于自然因素对植被恢复的贡献,其中,本文中的社会经济因素对 EVI 的贡献率为 26.6%,对 NPP 的贡献率为 41%。(3)在社会经济因素中,非农经济因素对植被恢复的相对贡献率最高,对 EVI 的贡献率为 19.1%,对 NPP 的贡献率为 14.7%。(4)在各观测指标中,对 EVI 相对贡献率最高的是第三产业(11.8%),其次是财政收入(3.3%)。对 NPP 相对贡献率最高的是第三产业(14.7%),其次是固定投资(10.1%)。以上结果可以看出,除了生态工程之外,其余社会经济因素对植被恢复的影响虽然具有间接性或者滞后性,但同样重要,不可忽略。

参考文献 (References):

- [1] 李一静, 曾辉, 魏建兵. 基于归一化植被指数变化分级的深圳市植被变化. 应用生态学报, 2008(5): 1064-1070.
- [2] 王志鹏, 张宪洲, 何永涛, 李猛, 石培礼, 俎佳星, 牛犇. 2000—2015 年青藏高原草地归一化植被指数对降水变化的响应. 应用生态学报, 2018, 29(1): 75-83.
- [3] Guo B, Yang F, Fan Y W, Zang W Q. The dominant driving factors of rocky desertification and their variations in typical mountainous Karst areas of southwest China in the context of global change. *Catena*, 2023, 220: 106674.
- [4] Lv Y, Zhang L, Li P, He H L, Ren X L, Zhang M Y. Ecological restoration projects enhanced terrestrial carbon sequestration in the Karst region of Southwest China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, 11: 1179608.
- [5] Cao J H, Yuan D X, Tong L Q, Mallik A, Yang H, Huang F. An overview of Karst ecosystem in southwest China: current state and future management. *Journal of Resources and Ecology*, 2015, 6(4): 247-256.
- [6] 刘雨亭, 王磊, 李谢辉, 郭蕾. 西南地区 2000—2020 年植被覆盖度时空变化与影响因素分析. 高原气象, 2024, 43(1): 264-276.
- [7] Chen T T, Wang Q, Wang Y X, Peng L. Differentiation characteristics of Karst vegetation resilience and its response to climate and ecological restoration projects. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(16): 5055-5070.
- [8] Zhao Y F, Liu S L, Liu H, Dong Y H, Wang F F. Nature's contributions to people responding to landscape stability in a typical Karst region, southwest China. *Applied Geography*, 2024, 163: 103175.
- [9] Liu H Y, Zhang M Y, Lin Z S, Xu X J. Spatial heterogeneity of the relationship between vegetation dynamics and climate change and their driving forces at multiple time scales in Southwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256/257: 10-21.
- [10] Ni M, Zhang X Y, Jiang C, Wang H S. Responses of vegetation to extreme climate events in southwestern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(6): 626-640.
- [11] Wei X C, Zhou Q W, Luo Y, Cai M Y, Zhou X, Yan W H, Peng D W, Zhang J. Vegetation dynamics and its response to driving factors in typical Karst regions, Guizhou Province, China. *Frontiers of Earth Science*, 2021, 15(1): 167-183.
- [12] Wu Y Y, Yang J L, Li S L, Guo C Z, Yang X D, Xu Y, Yue F J, Peng H J, Chen Y C, Gu L, Shi Z H, Luo G J. NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 2000 to 2020 in Miaoling Karst Mountain area, SW China. *Land*, 2023, 12(7): 1267.
- [13] Buitenwerf R. Vegetation productivity: Humans did it. *Nature Climate Change*, 2016, 6(10): 898-899.
- [14] Mao J F, Ribes A, Yan B Y, Shi X Y, Thornton P E, Séférian R, Ciais P, Myneni R B, Douville H, Piao S L, Zhu Z C, Dickinson R E, Dai Y J, Ricciuto D M, Jin M Z, Hoffman F M, Wang B, Huang M T, Lian X. Human-induced greening of the northern extratropical land surface. *Nature Climate Change*, 2016, 6(10): 959-963.
- [15] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征. 生态学报, 2015, 35(16): 5331-5342.
- [16] Zheng K Y, Tan L S, Sun Y W, Wu Y J, Duan Z, Xu Y, Gao C. Impacts of climate change and anthropogenic activities on vegetation change: evidence from typical areas in China. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107648.
- [17] Huo H, Sun C P. Spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation dynamics based on Geodetector: a case study of the northwestern Yunnan Plateau, China. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108005.
- [18] Chen W, Bai S, Zhao H M, Han X R, Li L H. Spatiotemporal analysis and potential impact factors of vegetation variation in the Karst region of southwest China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(43): 61258-61273.
- [19] Qiao Y N, Jiang Y J, Zhang C Y. Contribution of Karst ecological restoration engineering to vegetation greening in southwest China during recent decade. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107081.
- [20] Liu H Y, Jiao F S, Yin J Q, Li T Y, Gong H B, Wang Z Y, Lin Z S. Nonlinear relationship of vegetation greening with nature and human factors and its forecast—A case study of Southwest China. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 106009.
- [21] 吴熙, 真诗冰, 左雪漫, 胡喜生, 沈嵘枫. 闽南地区植被恢复动态及其对道路网络的响应. 中国环境科学, 2023, 43(S1): 288-300.
- [22] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: impacts, causes, and restoration. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [23] Uchida E, Rozelle S, Xu J T. Conservation payments, liquidity constraints and off-farm labor: impact of the grain for green program on rural households in China. Yin R. *An Integrated Assessment of China's Ecological Restoration Programs*. Dordrecht: Springer, 2009: 131-157.
- [24] Lü Y H, Zhang L W, Feng X M, Zeng Y, Fu B J, Yao X L, Li J R, Wu B F. Recent ecological transitions in China: greening, browning and influential factors. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8732.
- [25] Qu S, Wang L C, Lin A W, Zhu H J, Yuan M X. What drives the vegetation restoration in Yangtze River Basin, China: climate change or anthropogenic factors?. *Ecological Indicators*, 2018, 90: 438-450.
- [26] Lambert C B, Resler L M, Shao Y, Butler D R. Vegetation change as related to terrain factors at two glacier forefronts, Glacier National Park, Montana, U.S.A. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(1): 1-15.
- [27] Naeem S, Zhang Y Q, Zhang X Z, Tian J, Abbas S, Luo L L, Meresa H K. Both climate and socioeconomic drivers contribute to vegetation greening of the Loess Plateau. *Science Bulletin*, 2021, 66(12): 1160-1163.
- [28] 李婷, 吕一河, 任艳姣, 李朋飞. 黄土高原植被恢复成效及影响因素. 生态学报, 2020, 40(23): 8593-8605..

- [29] 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.
- [30] 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. *The Science of the Total Environment*, 2021, 770: 145160.
- [31] 张雪梅, 王克林, 岳跃民, 童晓伟, 廖楚杰, 张明阳, 姜岩. 生态工程背景下西南喀斯特植被变化主导因素及其空间非平稳性. 生态学报, 2017, 37(12): 4008-4018.
- [32] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. 生态学报, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [33] 赵鸣飞, 薛峰, 吕焱, 左婉怡, 王国义, 邢开雄, 王宇航, 康慕谊. 黄土高原森林枯落物储量、厚度分布规律及其影响因素. 生态学报, 2016, 36(22): 7364-7373.
- [34] 彭群. 昆明滇池水污染的线性混合效应模型研究[D]. 昆明: 云南大学, 2020.
- [35] Petursdottir T, Arnalds O, Baker S, Montanarella L, Aradóttir Á L. A social-ecological system approach to analyze stakeholders' interactions within a large-scale rangeland restoration program. *Ecology and Society*, 2013, 18(2): art29.
- [36] 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.
- [37] Chong G S, Hai Y, Zheng H, Xu W H, Ouyang Z Y. Characteristics of changes in Karst rocky desertification in southern and Western China and driving mechanisms. *Chinese Geographical Science*, 2021, 31(6): 1082-1096.
- [38] Luck G W, Smallbone L T, O'Brien R. Socio-economics and vegetation change in urban ecosystems: patterns in space and time. *Ecosystems*, 2009, 12(4): 604-620.
- [39] Cobon D H, Stone G S, Carter J O, Scanlan J C, Toombs N R, Zhang X K, Willcocks J, McKeon G M. The climate change risk management matrix for the grazing industry of northern Australia. *The Rangeland Journal*, 2009, 31(1): 31.
- [40] Deng J, Sun P S, Zhao F Z, Han X H, Yang G H, Feng Y Z. Analysis of the ecological conservation behavior of farmers in payment for ecosystem service programs in eco-environmentally fragile areas using social psychology models. *The Science of the Total Environment*, 2016, 550: 382-390.
- [41] Michishita R, Jiang Z B, Xu B. Monitoring two decades of urbanization in the Poyang Lake area, China through spectral unmixing. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 117: 3-18.
- [42] Su S L, Wang Y P, Luo F H, Mai G C, Pu J. Peri-urban vegetated landscape pattern changes in relation to socioeconomic development. *Ecological Indicators*, 2014, 46: 477-486.
- [43] Li Y B, Fan M M, Li W J. Application of payment for ecosystem services in China's rangeland conservation initiatives: a social-ecological system perspective. *The Rangeland Journal*, 2015, 37(3): 285-296.
- [44] 洪辛茜, 黄勇, 孙涛. 我国西南喀斯特地区 2001—2018 年植被净初级生产力时空演变. 生态学报, 2021, 41(24): 9836-9846.
- [45] 余晨渝, 肖作林, 刘睿, 赵浣玓, 王科宇. 人类活动对西南山地植被覆盖变化的影响——以重庆市为例. 生态学报, 2022, 42(17): 7177-7186.
- [46] 张明祥, 谷晓平, 廖留峰, 田鹏举. 气候变化和人类活动对贵州省石漠化区植被覆盖变化的影响. 地球与环境, 2023, 51(1): 76-86.
- [47] Peng J, Jiang H, Liu Q H, Green S M, Quine T A, Liu H Y, Qiu S J, Liu Y X, Meersmans J. Human activity vs. climate change: distinguishing dominant drivers on LAI dynamics in Karst region of southwest China. *The Science of the Total Environment*, 2021, 769: 144297.
- [48] 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.
- [49] Jiang C, Yang Z Y, Liu C, Dong X L, Wang X C, Zhuang C W, Zhao L L. Win-win-win pathway for ecological restoration by balancing hydrological, ecological, and agricultural dimensions: contrasting lessons from highly eroded agroforestry. *The Science of the Total Environment*, 2021, 774: 145140.
- [50] Winkler D. Participation in forestry in Tibetan southwest China: a strategy to resolve resource use conflicts. *Mountain Research and Development*, 2002, 22(4): 397-399.
- [51] 李秀彬. 农地利用变化假说与相关的环境效应命题. 地球科学进展, 2008(11): 1124-1129.
- [52] Qiu S J, Peng J, Zheng H N, Xu Z H, Meersmans J. How can massive ecological restoration programs interplay with social-ecological systems? A review of research in the South China Karst region. *The Science of the Total Environment*, 2022, 807(Pt 2): 150723.