

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.11.010

黄梦思, 阎建忠, 吴雅, 等. 西南高山峡谷区水土保持变化及驱动因素分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(11): 121-135.

# 西南高山峡谷区水土保持变化及驱动因素分析

黄梦思, 阎建忠, 吴雅, 周洪

西南大学 资源环境学院, 重庆 400715

**摘要:** 西南高山峡谷区曾是中国水土流失最严重的区域之一, 近 20 年来这一区域却是中国水土流失治理成效最为显著的区域。然而, 生态政策对西南高山峡谷区水土保持能力的贡献还缺少研究。基于中国防止水土流失的土壤保持能力数据集, 分析了西南高山峡谷区 2000—2018 年水土保持能力的分布以及时空变化特征, 揭示了西南高山峡谷区不同地带水土保持能力变化的影响因素。结果表明: 西南高山峡谷区是中国水土保持能力变化最为明显的区域, 整体上呈现极为明显的净增强趋势, 且以四川省最为明显, 而云南省的大理白族自治州、怒江傈僳族自治州的部分区县以及丽江市部分区县的水土保持能力降低最为明显。西南高山峡谷区水土保持能力变化具有明显的空间聚集效应, 且水土保持能力增强的空间聚集程度高于水土保持能力降低的空间聚集程度。生态政策对该区域水土保持能力变化的影响程度最强, 自然条件因素的海拔、坡度、气温、降水、归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), 社会经济因素的 GDP 和夜间灯光也是影响西南高山峡谷区水土保持能力变化的关键驱动因素。

**关键词:** 西南高山峡谷区; 水土保持; 冷热点分析; 生态政策;  
驱动机制

中图分类号: S157; P333

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2025)11-0121-15

## Analysis on the Change of Soil and Water Conservation Capacity and Its Driving Factors in Southwest Alpine-Canyon Area

HUANG Mengsi, YAN Jianzhong, WU Ya, ZHOU Hong

College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

收稿日期: 2024-12-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1302904-04)。

作者简介: 黄梦思, 硕士, 主要从事水土保持研究。

通信作者: 阎建忠, 研究员。

**Abstract:** The southwest alpine-canyon area was one of the most severe regions of soil erosion in China, but in the past 20 years, it has become the region with the most significant achievements in soil erosion control. However, there is a lack of research on the contribution of ecological policies to the soil and water conservation capacity in southwest alpine-canyon area. This paper, based on the dataset of soil and water conservation capacity for preventing soil erosion, analyzes the distribution and spatiotemporal variation characteristics of soil and water conservation capacity in southwest alpine-canyon area from 2000 to 2018. It reveals the influencing factors of changes in soil and water conservation capacity across different zones in southwest alpine-canyon area. The results show that the change of soil and water conservation capacity was the most obvious in the alpine and canyon regions in southwest alpine-canyon area, and the overall trend of net increase was extremely obvious, and the increase was the most obvious in Sichuan province, which was a typical region where the soil and water loss control had achieved obvious results. In Yunnan Province, Dali Bai Autonomous Prefecture, some districts and counties of Nujiang Lisu Autonomous Prefecture and some districts and counties of Lijiang City had the most obvious decrease in soil and water conservation capacity. The change of soil and water conservation capacity in southwest alpine canyon region had obvious spatial aggregation effect, and the spatial aggregation degree of enhanced soil and water conservation capacity was higher than that of reduced soil and water conservation capacity. Ecological policies had the strongest influence on the change of soil and water conservation capacity in this area, and the elevation, slope, temperature, precipitation of natural conditions, NDVI, GDP of social and economic factors and night light were also the key driving factors affecting the change of soil and water conservation capacity in southwest alpine-canyon area.

**Key words:** southwest alpine canyon areas; soil and water conservation; hot/cold spot analysis; ecological policy; driving mechanism

水土流失一直是世界性的生态问题,严重的水土流失导致资源破坏、生态环境恶化、自然灾害加剧,具有难以逆转的破坏性<sup>[1-2]</sup>。作为受土壤侵蚀影响最严重的国家之一,中国的水土流失问题尤为突出,20世纪80年代末,全国水土流失面积达到367万km<sup>2</sup>,约占国土总面积的38.2%<sup>[3]</sup>,严重威胁中国的粮食安全,制约着经济社会的可持续发展。为了预防和治理水土流失,保护和合理利用水土资源,国家采取了一系列政策措施,例如,自20世纪中期以来,中国政府提出了发展生产和根治黄河流域水土流失的双重目标,之后还相继建设了八大林业工程(如“三北”防护林体系建设工程、太行山绿化工程、长江中上游防护林体系建设工程等)和生态功能保护区,使中国的植被得以持续恢复,水土保持能力得以增强<sup>[4]</sup>。除此之外,修建梯田、拦砂坝、排水系统等工程措施<sup>[5-7]</sup>,造林种草、封山育林等生物措施<sup>[8-10]</sup>以及等高耕作、少耕免耕等耕作措施<sup>[11-12]</sup>也使中国的水土流失治理以及水土保持工作取得了进一步成功。根据水利部发布的《中国水土保持公报(2023年)》,2023年全国水土流失面积与2022年相比减少2.58万km<sup>2</sup>,强烈及以上侵蚀面积占比由18.74%下降到18.43%,水土保持率由72.26%提高到72.56%。与2011年相比,全国水土流失面积减少超过十分之一,实现面积、强度“双下降”,水蚀、风蚀“双减少”,水土保持率稳步提升,生态系统质量和稳定性持续向好。由此可见,生态政策的出台与实施有效预防和控制了中国的水土流失,因此,探究生态政策对水土保持能力变化的影响程度,不仅可以对中国的水土流失治理提供重要的参考和指导,对保障中国粮食安全也具有重要意义。

西南高山峡谷区作为中国典型的生态环境脆弱区,土层浅薄,土壤保水性差,强降水冲刷导致水土流

失和土壤侵蚀异常严重<sup>[13]</sup>。2010—2012 年水利普查结果显示, 西南石质山区水土流失面积达  $3.612 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占全国水土流失总面积的 27.93%, 并且该地区侵蚀程度为强烈及以上的面积占比高出全国平均值 5%<sup>[14]</sup>。因此, 为了综合治理水土流失以及促进生态恢复, 西南高山峡谷区被列为林业工程和生态功能保护区的典型覆盖区域。近年来, 由于一系列生态政策和各种水土保持项目的出台与实施, 西南高山峡谷区水土流失治理取得了显著成效<sup>[15]</sup>。根据各省份 2022 年的水土保持公报公布的数据, 四川省 2022 年完成新增水土流失综合治理面积  $5\,268 \text{ km}^2$ , 全省水土流失面积较上一年减少近  $2\,000 \text{ km}^2$ , 水土保持率高于全国平均增幅, 水土流失面积、强度双降态势持续巩固。云南省 2022 年共完成水土流失综合治理面积  $5\,532.08 \text{ km}^2$ , 各项水土保持措施减少土壤侵蚀量 753.86 万 t, 项目区生态环境和农业生产生活条件明显改善。西藏自治区 2022 年以来累计治理水土流失面积  $942.88 \text{ km}^2$ , 草原生态修复治理面积  $6\,443.69 \text{ km}^2$ , 完成造林  $1\,195.14 \text{ km}^2$ , 水土流失综合治理取得明显成效。由此可见, 西南高山峡谷区对其他地区水土保持具有重要的示范作用。分析该地区的水土保持能力变化特征, 厘清生态政策对水土保持能力的影响, 对于揭示水土保持能力驱动机制, 制定有效政策以缓解当地及其他地区水土流失具有重要的现实意义。

目前已有不少学者围绕中国西南高山峡谷区水土保持问题展开研究, 但此前的研究大多集中在小区域, 例如, 黄柔等<sup>[16]</sup>对云南永胜县的水土保持技术进行了研究; 朱军等<sup>[17]</sup>研究了云南泸水县高山峡谷区的土壤侵蚀; 蒋刚等<sup>[18-20]</sup>对西南高山峡谷区澜沧江流域的土壤侵蚀及其时空特征进行了分析, 而鲜有研究探讨西南高山峡谷区不同地带水土保持的影响因素; 丁琳等<sup>[13]</sup>研究了西南高山峡谷区的土壤侵蚀空间分异特征, 但未曾涉及其时空变化以及驱动机制的研究; 廖瑞恩等<sup>[21]</sup>虽然探究了西南高山峡谷区土壤侵蚀的驱动机制, 但对生态政策作用的研究较少。

目前生态政策对生态恢复的作用仍然存在争议。有研究认为, 近年来, 在青藏高原高寒生态系统实施的一系列生态政策, 不仅显著增强了其植被覆盖率和土壤保持率, 还减少了其水土流失量以及沙尘暴的发生概率<sup>[22]</sup>; 也有研究认为, 在中国的干旱和半干旱地区, 包括东北、华北和西北地区, 降水增加才是生态恢复的主要原因, 而生态政策的作用却很小<sup>[23]</sup>。因此, 生态政策对西南高山峡谷区水土保持能力的驱动作用如何, 仍有待研究。此外, 以往关于生态政策对水土保持的影响研究大多集中在这些生态政策实施的有效性上<sup>[24-26]</sup>, 而忽略了气候条件、社会经济条件等因素的作用, 这就可能导致生态政策对生态恢复的作用被高估。因此, 有必要将自然因素、社会经济因素以及生态政策因素等结合起来, 综合分析生态政策对生态恢复的影响。

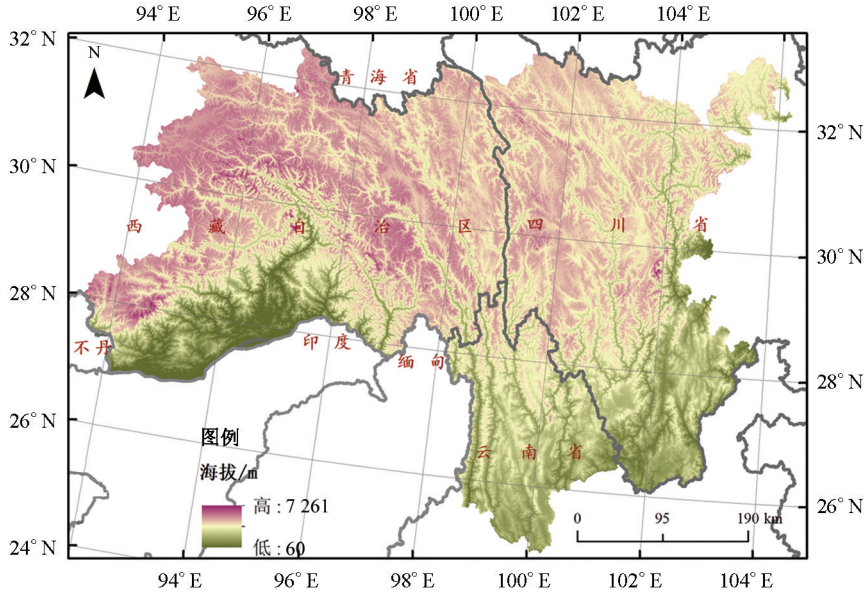
鉴于此, 本研究基于中国防止水土流失的土壤保持能力数据集, 采用空间自相关分析对西南高山峡谷区 2000—2018 年水土保持能力的分布以及时空变化特征进行分析, 并基于自然条件数据、社会经济数据以及生态政策数据揭示了 2000—2020 年西南高山峡谷区不同地带水土保持能力变化的影响因素。本研究的目标是: ① 分析 2000—2018 年西南高山峡谷区水土保持能力变化的时空动态过程; ② 揭示 2000—2020 年西南高山峡谷区不同地带水土保持能力变化的关键驱动因素, 尤其是生态政策的驱动作用。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

西南高山峡谷区( $25^{\circ}$ — $33^{\circ}\text{N}$ ,  $91^{\circ}$ — $105^{\circ}\text{E}$ )位于大横断“七脉六江”地带, 是西藏自治区、四川省和云南省的交界处, 共涉及 3 省的 91 个区县, 面积约为  $61 \text{ 万 km}^2$ 。该区地势高峻, 谷坡陡峭, 河谷深切狭窄, 地貌类型主要为高山和中山, 海拔最高达  $7\,261 \text{ m}$ , 最低海拔为  $60 \text{ m}$ , 相对高差  $7\,201 \text{ m}$ , 垂直地带性差异明显; 该区域由东南向西北横跨干旱区、半干旱区、半湿润区以及湿润区, 由于热带和亚热带季风气候的交替影响, 气候空

间分布差异明显<sup>[27]</sup>,降水充沛集中,夏季多暴雨,研究期内年降水量为 406.29~1 497.88 mm,呈现南多北少、东多西少分布,平均气温 6.56℃,一年中最低气温达到-14.7℃,最高气温 23.6℃。复杂多变的气候和自然地理环境,造就了该区丰富的植被类型和土壤类型<sup>[14]</sup>。植被类型主要有阔叶林、针叶林、草甸和灌丛;土壤类型主要以铁铝土、高山土和淋溶土为主。此外,西南高山峡谷区还分布着 36%的岩溶地貌。由于特殊地质地貌和气候条件影响,西南高山峡谷区生态环境十分脆弱,属于生态环境重点保护区域(图 1)。



审图号: GS(2023)2767

图 1 研究区地理位置

## 1.2 数据来源

本研究采用了中国防止水土流失的土壤保持能力数据集、自然背景数据、社会经济数据、生态政策数据、农户调研数据以及其他数据(表 1)。其中,课题组在西南高山峡谷区进行了农户问卷调查,获得了 407 份农户调研数据。

中国防止水土流失的土壤保持能力数据集是基于改进的 RUSL 模型开发的,用于估计中国潜在和控制的土壤侵蚀,该数据集包括 1992—2018 年中国年土壤保持能力及其影响因子,可分为综合数据和详细数据,综合数据包括 1992—2018 年中国土壤保持能力均值和变化率、植被覆盖与管理因子、降雨侵蚀力因子。详细数据包括水土保持措施因子、土壤可蚀性因子、地形因子、降雨侵蚀力、植被覆盖与管理因子数据、中国土壤保持能力均值和变化率因子数据,本研究选取 2000—2018 年中国土壤保持能力均值作为被解释变量,分辨率为 300 m×300 m,数据可通过网址 <https://www.scidb.cn/detail?dataSetId=3b2e9ea9d65c4c92b6357519a7ddc6dd&version=V1> 下载使用。

自然条件数据包括 DEM 高程数据、坡度、坡向、气温、降水、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)以及土地覆被数据。其中,土地覆被数据包含农田、森林、灌木、草地、水体、冰雪、荒地、不透水和湿地 9 种土地覆被分类方案,根据中国科学院地理科学与资源研究所采用的分类系统的一级地类,将土地利用划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 个类型;社会经济数据包括总人口、人口密度、GDP 以及夜间灯光指数;生态政策数据包括中国林业工程区和生态功能保护区数据。其他数据包括国界、省界和县界等空间矢量数据。以上数据的来源及分辨率如表 1 所示。

农户调研数据主要采用 2023 年 7 月份至 8 月份在云南省云龙县以及四川省康定市开展的半结构化问卷调查数据,问卷内容主要包括家庭基本情况(年龄、职业、受教育情况、非农工作情况、家庭资产情况

等)、农地基本利用情况(耕地面积、退耕还林面积、农用地种植情况等)、作物投入及产出情况(化肥、农家肥施用情况、作物播种及产出情况等)、作物种植与牲畜饲养及其变化情况、家庭收入情况、能源利用及生态恢复情况、薪柴砍伐和水土流失情况以及政府干预情况等。最终经过数据筛选得到了 407 份有效问卷(云南省云龙县 206 份、四川省康定市 201 份)。

表 1 数据来源统计表

数据类型		数据来源	分辨率
中国防止水土流失的土壤保持能力数据集		<a href="https://www.scidb.cn/detail?dataSetId=3b2e9ea9d65c4c92b6357519a7ddc6dd&amp;-version=V1">https://www.scidb.cn/detail?dataSetId=3b2e9ea9d65c4c92b6357519a7ddc6dd&amp;-version=V1</a>	300 m×300 m
自然背景数据	海拔	中国科学院资源环境科学与数据中心	30 m×30 m
	坡度	利用 DEM 数据在 ArcGIS 10.8 软件里面生成	
	坡向		
	气温	中国气象数据网	1 km×1 km
	降水		
	NDVI	中国科学院资源环境科学与数据中心	30 m×30 m
	土地覆被数据	CLCD 土地覆被数据集	
社会经济数据	总人口	LandScan 人口数据集	1 km×1 km
	人口密度	WorldPop 世界人口密度地图	
	GDP	中国科学院资源环境科学与数据中心	
	夜间灯光指数	国家地球系统科学数据中心	500 m×500 m
生态政策数据	中国林业工程区	中国科学院资源环境科学与数据中心	
	生态功能保护区	中国科学院资源环境科学与数据中心	
农户调研数据	云南省云龙县	206 份	
	四川省康定市	201 份	
其他数据	国界	国家基础地理信息系统	
	省界	国家基础地理信息系统	
	县界	国家基础地理信息系统	

## 2 研究方法及模型

### 2.1 空间聚类分析

空间自相关分析能够度量某一变量在空间上的分布特征及其对邻近领域的影响程度,从而判断变量在空间上是否相关以及相关程度如何,主要包括全局空间自相关分析和局部空间自相关分析<sup>[28]</sup>。Moran's  $I$  指数是一种应用非常广泛的全局空间自相关分析方法,该方法可以检验一个区域内所有空间单元的属性值是否存在聚集特性, Moran's  $I > 0$  表示空间正相关,其值越大,空间相关性越明显,反映出变量之间具有空间聚集特征; Moran's  $I < 0$  则表示空间负相关,其值越小,空间差异越大,变量之间越无空间聚集特征; Moran's  $I = 0$  则表示空间离散分布,空间分布呈随机性。

冷热点分析是一种探索局部空间聚类分布的方法,用于确定空间聚集的高(热点)/低(冷点)值区域。一个热(冷)斑是具有显著统计学意义的高(低)值群集区域<sup>[29]</sup>。该方法能够反映出西南高山峡谷区水土保持能力变化的高低值在空间上发生聚类的位置。 $G$  观测值的大小可以用来描述冷热分布,如果该

指数为具有统计学意义的正值,则值越高热点聚类的分布越集中<sup>[29]</sup>。 $G_i^*$  值为正且具有统计学意义,说明空间单元  $i$  周围的空间单元值相对较高,则该区域为热点区域; $G_i^*$  值为负且具有统计学意义,说明空间单元  $i$  周围的空间单元值相对较低,则该区域为冷点区域。Moran's  $I$  和  $G_i^*$  的显著性均采用  $Z$  统计量进行检验。

## 2.2 影响因素分析

### 2.2.1 模型选择

为了更好地探究生态政策对西南高山峡谷区水土保持能力变化的影响,本研究分别构建模型 1、模型 2 和模型 3,在模型 1 中探究生态政策对水土保持能力变化的影响,在模型 2 中探究在没有政策干预下的自然条件和社会经济因素对水土保持能力变化的影响,在模型 3 中探究政策干预之后各因子对水土保持能力变化的影响。在模型 3 中,本研究根据海拔将西南高山峡谷区分为河谷区(2 000 m 以下)、半山区(2 000~3 500 m)以及高山区(3 500 m 以上)<sup>[15]</sup>,进行 3 个不同地带的对比研究,回归模型的表达式如下:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_k x_{ki} + u_i \quad (1)$$

式中: $y_i$  为水土保持能力变化; $\beta_0$  为常数项; $\beta_k$  为回归系数; $x_{ki}$  为自变量; $u_i$  为随机误差项。在进行计量回归之前,通过皮尔逊相关系数(PCC)、方差膨胀因子(VIF)以及容忍度(T)对各变量之间进行多重共线性检验。在模型 1 中, $PCC$  最大值为 0.37, $VIF$  最大值为 1.03, $T$  最小值为 0.97;在模型 2 中, $PCC$  最大值为 0.44, $VIF$  最大值为 1.40, $T$  最小值为 0.71;在模型 3 中,全区、高山区、半山区以及河谷区  $PCC$  最大值分别为 0.45、0.44、0.52、0.65; $VIF$  最大值分别为 1.45、1.38、2.13、3.09; $T$  最小值分别为 0.69、0.72、0.47、0.32,均满足  $PPC < 0.8$ ,  $VIF < 10$ ,  $T > 0.1$ ,表明各变量之间不存在多重共线性的问题。

### 2.2.2 变量说明与描述性统计

为了探究西南高山峡谷区水土保持能力变化的影响因素,本研究选取自然条件(海拔、坡度、坡向、气温变化量、降水变化量和 NDVI 变化量)、社会经济因素(总人口变化量、人口密度变化量、GDP 变化量以及夜间灯光指数变化量)、生态政策(林业工程覆盖区和生态功能保护区)作为自变量。需要说明的是,本研究选择的自然条件<sup>[23, 30-31]</sup>和社会经济因素<sup>[15, 32-33]</sup>均是影响水土流失治理的常用指标。选择林业工程覆盖区和生态功能保护区来代表生态政策的原因如下:首先,林业工程共包含“三北”防护林体系建设工程、太行山绿化工程、辽河流域防护林体系建设工程、黄河中游防护林体系建设工程、淮河太湖流域防护林体系建设工程、长江中上游防护林体系建设工程、珠江流域防护林体系建设工程、沿海防护林体系建设工程等八大林业工程。八大林业工程是中国政府为了改善生态环境、促进可持续发展而实施的一系列重大生态恢复和建设项目,是中国生态政策的直接体现。这些工程涵盖了森林资源保护、水土保持、防沙治沙、退耕还林还草等多个方面,体现了中国在生态建设上的政策导向和实际行动。其次,生态功能保护区共包含横断山南部生态功能保护区、藏东南山地生态功能保护区、京津水源涵养生态功能保护区等 50 个生态功能保护区,生态功能保护区是中国生态保护和恢复的重要措施之一,它们旨在保护具有重要生态功能的区域,如水源涵养区、土壤保持区、生物多样性保护区等。生态功能保护区的设立和管理,不仅体现了中国在生态保护上的政策导向,还包括了一系列具体的措施,如限制开发、生态修复、监测和评估等。林业工程覆盖区和生态功能保护区形成了综合性和系统性的生态保护和恢复体系,这些工程和保护区不仅停留在政策层面,还通过具体的行动和措施来实施和推进,体现了国家层面对生态保护和恢复的重视程度。因此,选择林业工程覆盖区和生态功能保护区作为中国生态政策的代表。各变量的描述性统计如表 2 所示。

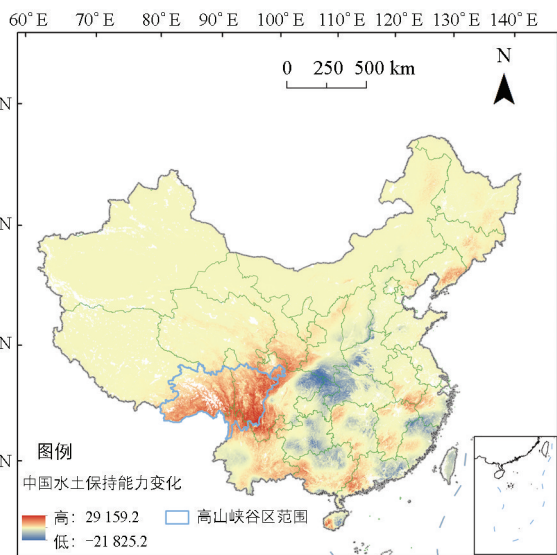
表 2 变量的描述性统计

变量类型	变量/单位	变量说明	全区		高山区		半山区		河谷区	
			平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
自然条件	海拔/m( $x_1$ )	研究区域的海拔	3 705.72	1 008.22	4 439.74	390.49	2 745.95	342.30	1477.00	293.16
	坡度/(°)( $x_2$ )	研究区域的坡度	24.79	11.05	23.49	10.55	23.86	11.25	20.29	11.30
	坡向( $x_3$ )	研究区域的坡向	177.26	104.01	177.97	103.13	179.93	106.04	193.60	106.24
	气温变化量/°C( $x_4$ )	研究期气温变化量	-0.29	1.48	-0.46	1.39	-0.04	1.32	0.57	1.14
	降水变化量/mm( $x_5$ )	研究期降水变化量	-43.87	93.21	-63.38	68.69	-17.04	113.08	28.05	95.96
	NDVI 变化量( $x_6$ )	研究期 NDVI 变化量	-38.22	30.61	-43.37	30.88	-25.87	26.77	-38.75	27.16
社会经济因素	总人口变化量/万人( $x_{10}$ )	研究期户籍人口总数变化量	2.86	132.81	0.19	14.48	3.91	80.86	48.39	684.00
	人口密度变化量/ (万人·km <sup>-2</sup> )( $x_{11}$ )	研究期人口密度变化量	2.05	37.85	0.98	4.63	3.72	43.38	-10.16	112.55
	GDP 变化量/万元( $x_{12}$ )	研究期 GDP 变化量	46.51	61.56	24.94	5.16	82.52	83.61	124.07	107.43
	夜间灯光指数变化量( $x_{13}$ )	研究期夜间灯光变化量	0.02	0.43	0.00	0.05	0.06	0.75	0.19	0.77
生态政策	林业工程覆盖区( $x_{14}$ )	1=无林业工程覆盖 0=有林业工程覆盖	1.62	0.48	1.55	0.50	1.70	0.46	1.82	0.39
	生态功能保护区( $x_{15}$ )	1=不属于生态功能保护区 0=属于生态功能保护区	1.28	0.45	1.21	0.41	1.34	0.47	1.19	0.39

### 3 结果与分析

#### 3.1 水土保持能力分布特点及其时空变化分析

从全国水土保持能力变化来看, 西南高山峡谷区是中国水土保持能力变化最为明显的区域之一, 且整体上呈现出明显增强的态势(图 2)。2000—2018 年西南高山峡谷区水土保持能力增长 96.49%, 净增强趋势明显。具体来看, 2000—2018 年间, 2006 年的增长率为负值(图 3), 水土保持能力相较于 2000 年降低了 22.35%, 2006 年之后, 水土保持能力逐渐恢复, 2012—2018 年, 西南高山峡谷区水土保持能力增长 114.63%。



审图号: GS(2023)2767

图 2 中国 2000—2018 年水土保持能力变化分布图

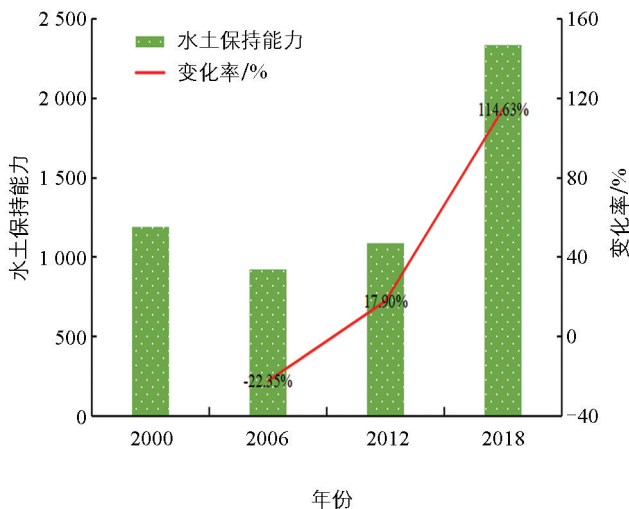
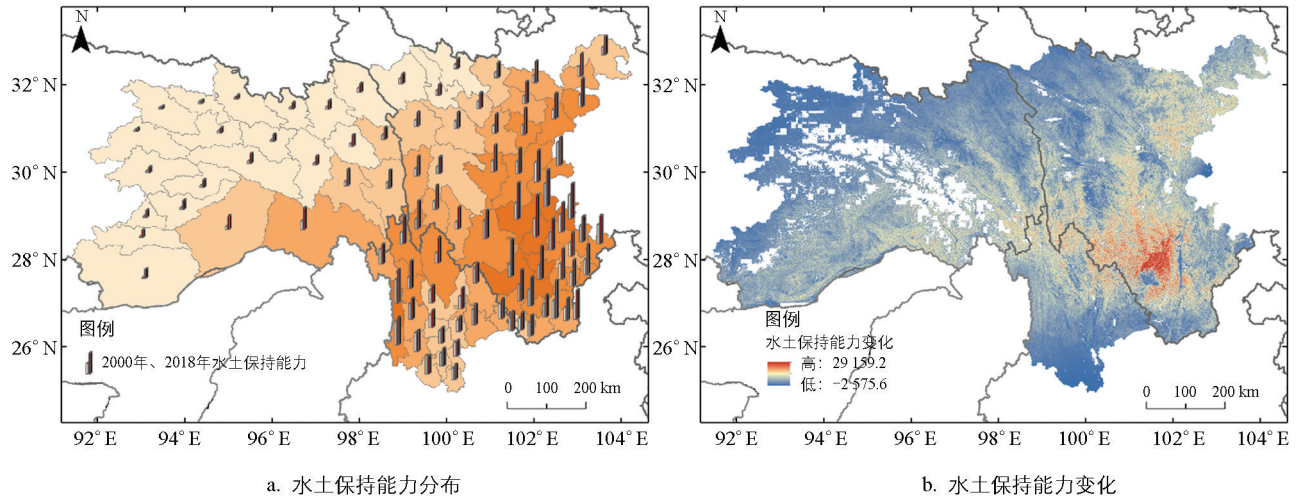


图 3 西南高山峡谷区 2000—2018 年水土保持能力变化趋势与变化率

西南高山峡谷区四川省水土保持能力的增强相较于云南省和西藏自治区更为明显, 其余地区和省份的水土保持能力均有增强, 但不明显。除此之外, 云南省部分地区存在水土保持能力减弱的情况(图 4a)。西南高山峡谷区水土保持能力较强的区域主要分布在研究区东南部, 具体以四川省(九龙县、石棉县以及凉山彝族自治

州的部分区县最为明显)和云南省的部分区县(福贡县最为明显)为主,研究区北部以及西藏自治区水土保持能力普遍较弱(图 4a)。此外,西南高山峡谷区各区域水土保持能力均有不同程度的增强和减弱,但总体上增强的趋势占主导(图 4b),且水土保持能力变化最明显的区域分布在研究区的东南部,以四川省增强和云南省减弱为主,具体以四川省的盐源县、冕宁县、木里藏族自治县以及三县的交界区域增强最为明显,而云南省的大理白族自治州、怒江傈僳族自治州的部分区县以及丽江市部分区县的水土保持能力降低最为明显。



审图号: GS(2023)2767

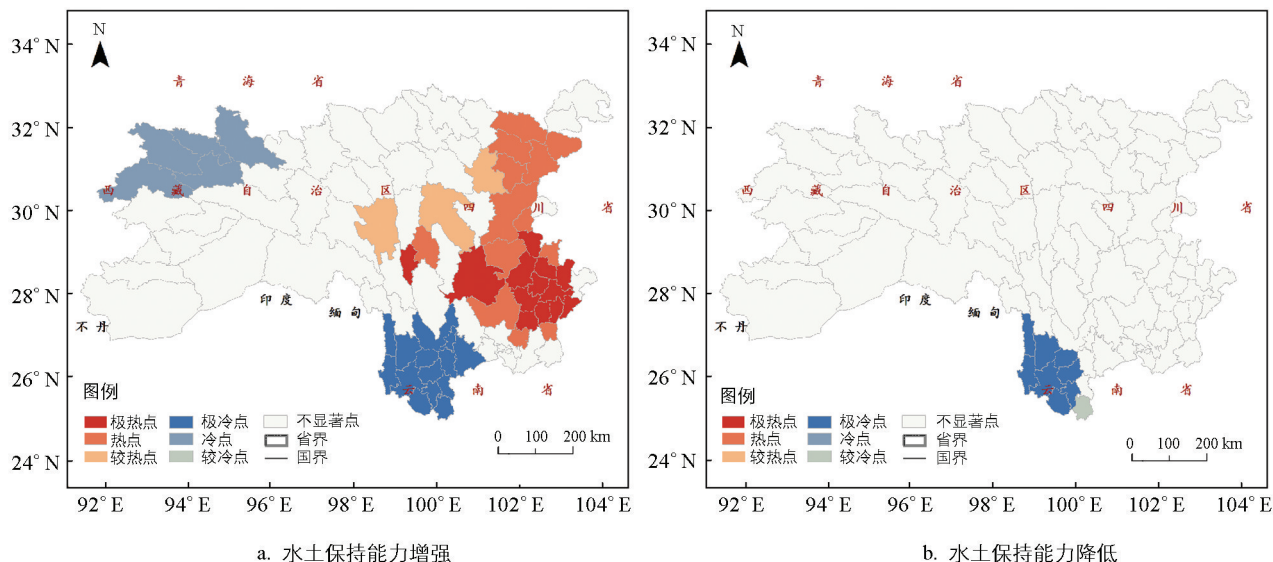
图 4 西南高山峡谷区 2000—2018 年水土保持能力分布及变化图

Moran's  $I$  指数全局空间分析能够反映出研究区水土保持能力变化是否具有空间聚集的特征。对西南高山峡谷区 2000—2018 年水土保持能力增强和降低进行 Moran's  $I$  指数全局空间分析,发现西南高山峡谷区水土保持能力增强和降低的 Moran's  $I$  指数值均大于 0,均通过了 1% 的显著性检验 ( $p < 0.01$ ),且  $Z_{score}$  均大于临界值 1.96,表明西南高山峡谷区水土保持能力增强和降低的空间相关性显著,具有明显的空间聚集效应(表 3)。此外,水土保持能力增强的 Moran's  $I$  值大于水土保持能力降低的 Moran's  $I$  值,说明水土保持能力增强的空间聚集程度高于水土保持能力降低的空间聚集程度。

表 3 2000—2018 年西南高山峡谷区水土保持能力变化 Moran's  $I$  系数全局分析及统计检验

类型	水土保持能力增强	水土保持能力降低
Moran's $I$	0.604 1	0.151 3
$Z_{score}$	10.352 3	3.464 6
$p$	0	0.000 5

分别对西南高山峡谷区水土保持能力增强和降低进行冷热点分析,且冷热点分析结果分别按照 99%、95% 和 90% 的置信区间将其分为 6 个等级(图 5)。总体来看,西南高山峡谷区水土保持能力以增强为主,且以四川省增强最为明显。具体来看,西南高山峡谷区水土保持能力增强的热点区域主要聚集在四川省,具体以得荣县、石棉县以及凉山彝族自治州最为明显;而水土保持能力降低并没有显示热点区域,这表明西南高山峡谷区水土保持能力降低的趋势和程度均不明显,主要以水土保持能力增强为主要趋势。水土保持能力增强的冷点区域主要以云南省的大部分区县为主,西藏自治区北部的那曲市和昌都市也有涉及。此外,水土保持能力降低的冷点区域主要集中在云南省的怒江傈僳族自治州(福贡县、兰坪县、泸水市)和大理白族自治州(剑川县、云龙县、洱源县、漾濞彝族自治县、永平县)。虽然云南省实施了大规模的水土保持生态修复方案<sup>[34]</sup>,但其水土保持能力仍旧增强不明显甚至部分区域出现了下降的情况。这可能与其本身独特的地理地势环境以及石漠化问题严重<sup>[35]</sup>、地质灾害频发<sup>[36]</sup>等有关,也与劳动力转移、畜牧业发展有关。劳动力转移可能是水土保持能力变化的原因。劳动力析出会造成农业劳动力不足,从而使得部分不宜耕作的土地退耕还林还草,有助于水土保持,减轻水土流失<sup>[37]</sup>。此外,过度放牧是导致草地退化和水土流失的重要原因之一<sup>[38]</sup>,而非农收入的提高增加了牲畜养殖的机会成本,导致农民不再愿意养殖牲畜,牲畜饲养量下降<sup>[39]</sup>,有助于草地的恢复和生长,在一定程度上还会使部分草地转为林地,提高植被覆盖度,减少水土流失<sup>[40]</sup>。



审图号: GS(2023)2767

图 5 2000—2018 年西南高山峡谷区水土保持能力变化冷热点分布图

问卷调查表明, 2022 年四川省康定市户均劳动力转移 1.80 人, 达到每户拥有劳动力人数的 46.95%, 户均牲畜养殖数量下降了 11.40%, 而云南省云龙县户均牲畜养殖数量却增加了 11.58%(表 4)。西南高山峡谷区河谷地带的农户均位于四川省, 河谷地带村资源禀赋较差, 牧草资源缺乏, 但经济发展水平较高, 工业化、城市化进程明显, 因此, 非农就业机会多, 劳动力析出较多。而大多数半山地带的农户位于云南省, 虽然半山地带毗邻河谷地带, 劳动力转移程度也相对较高, 但半山区农户同时拥有较多的耕地资源和草地资源, 对农业生产的依赖性强。有研究表明, 在非农收入增加和各类农业生产政策措施的鼓励下, 农户积极进行耕种<sup>[41]</sup>或增加对牲畜的养殖<sup>[42]</sup>, 农畜系统将表现出强化的趋势。而半山地带毗邻河谷地带所带来的市场信息来源广, 有较多的非农收入等优势突破了农户扩大农业生产的资金约束, 使得半山区农户倾向于将非农收入投资到农业生产中, 农畜系统得到强化。半山区农户的农机和牲畜饲料加工设备拥有量以及牲畜养殖数量的增加支撑了此解释的合理性(表 4), 同时, 农机的使用提高了农业生产效率<sup>[43]</sup>, 有利于农户扩大生产规模。而农畜系统的强化导致云南省部分区县的土壤受到更为强烈的扰动, 水土流失加剧, 不利于水土保持能力的提高。此外, 问卷调查发现, 云南省云龙县的农户还会从山上搜集松针(平均每户每年 1 686.70 kg)来进行垫圈, 这种行为导致林下覆盖的松针大量减少, 使土壤裸露, 当遇到降水尤其是强降水的时候, 地表的土壤由于没有松针覆盖会直接被雨水冲走, 导致水土流失加剧。这可能是西南高山峡谷区云南省水土保持能力下降的原因之一。

表 4 西南高山峡谷区样本区劳动力转移及农业资产情况

指标类型		云南省云龙县	四川省康定市
户均劳动力转移人数	人数/人	1.21	1.80
	比例/%	35.98	46.95
户均牲畜养殖数量	2002 年/头	7.60	11.05
	2022 年/头	8.48	9.79
	变化率/%	11.58	-11.40
农机拥有情况	户数/户	165	117
	比例/%	80.10	58.21
	户均个数/个	1.70	0.86
饲料加工设备拥有情况	户数/户	81	35
	比例/%	39.32	17.41
	户均个数/个	0.42	0.17

### 3.2 水土保持能力变化影响因子分析

本研究分别构建了模型 1、模型 2 和模型 3 来探究各因子尤其是生态政策对西南高山峡谷区水土保持能力变化的影响,需要说明的是,由于数据的可获得性,水土保持能力数据只获取到 2000—2018 年,而其余数据均为 2000—2020 年,因此本研究中将 2018 年水土保持能力代替 2020 年的数据使用以构建 2000—2020 年水土保持能力变化回归模型,探究西南高山峡谷区水土保持能力变化的驱动机制,结果如表 5 所示。

表 5 西南高山峡谷区水土保持能力变化影响因素模型估计结果

%

类型	变量	模型 1	模型 2	模型 3			
		全区	全区	全区	高山区	半山区	
自然条件	海拔/m( $x_1$ )	—	-0.111***	-0.069***	-0.457***	0.176*	0.255
		—	(0.014)	(0.013)	(0.031)	(0.103)	(0.162)
	坡度/(°)( $x_2$ )	—	45.427***	45.925***	33.184***	59.201***	34.100***
		—	(1.105)	(1.016)	(1.023)	(3.147)	(4.105)
	坡向( $x_3$ )	—	0.125	0.010	-0.081	0.724**	-0.664
		—	(0.116)	(0.106)	(0.102)	(0.331)	(0.415)
气温变化量/°C( $x_4$ )	—	9.434	-15.764**	-29.502***	14.501	-43.885	
	—	(8.395)	(7.778)	(7.731)	(27.455)	(43.408)	
降水变化量/mm( $x_5$ )	—	1.095***	-0.837***	-1.887***	-2.330***	-0.508	
	—	(0.137)	(0.142)	(0.165)	(0.444)	(0.767)	
NDVI 变化量( $x_6$ )	—	1.171***	1.753***	2.987***	-1.122	-1.682	
	—	(0.399)	(0.366)	(0.362)	(1.334)	(1.680)	
社会经济因素	总人口变化量/万人( $x_{10}$ )	—	-0.097	-0.088	-0.602	-0.251	0.027
		—	(0.092)	(0.084)	(0.728)	(0.454)	(0.066)
	人口密度变化量/(万人·km <sup>-2</sup> )( $x_{11}$ )	—	0.615**	0.432	-3.634	0.346	0.713*
		—	(0.327)	(0.299)	(2.258)	(0.936)	(0.382)
	GDP 变化量/万元( $x_{12}$ )	—	2.234***	1.938***	3.321***	0.899**	0.447
		—	(0.221)	(0.203)	(0.408)	(0.424)	(0.457)
夜间灯光指数变化量( $x_{13}$ )	—	-57.226**	-64.403**	-152.374	-30.188	-72.975	
	—	(28.615)	(26.153)	(199.952)	(54.852)	(61.987)	
生态政策	林业工程覆盖区( $x_{14}$ )	828.228***	—	920.432***	569.768***	1 629.549***	939.480***
		(26.713)	—	(26.763)	(24.173)	(102.037)	(191.482)
生态功能保护区( $x_{15}$ )	生态功能保护区( $x_{15}$ )	292.581***	—	85.450***	334.629***	-655.589***	-713.307***
		(28.914)	—	(26.324)	(24.176)	(89.230)	(137.605)
常数项	—	-424.289***	548.381***	-1 258.990***	911.498***	-2 489.492***	1 081.413***
	—	(53.126)	(70.945)	(84.121)	(173.156)	(323.450)	(380.636)
$R^2$	—	0.150 3	0.246 6	0.370 9	0.452 1	0.418 0	0.472 9

注: \*、\*\*、\*\*\* 分别表示在 10%、5%、1% 水平有统计学意义;括号内为估计系数的标准误差。

结果表明: 在模型 1 中, 生态政策对西南高山峡谷区水土保持能力变化具有显著的正向影响, 且林业工程覆盖区与生态功能保护区每增加一个百分点, 西南高山峡谷区的水土保持能力便会分别增强 828.228% 和 292.581%。可见, 生态政策对西南高山峡谷区水土流失治理发挥了重要作用。

在模型 2 中, 自然条件中的海拔对西南高山峡谷区水土保持能力变化具有显著的负向影响, 海拔每增加一个百分点, 水土保持能力就会降低 0.111%, 随着海拔的升高, 植被覆盖减少, 土层更加稀薄, 地势更陡, 一旦遇到降水便易造成山体滑坡和水土流失, 不利于水土保持能力的提升。坡度、降水以及 NDVI 具有显著的正向影响, 众所周知, 森林植被可以有效地减缓水土流失, 森林生长情况越好、森林覆盖率越高, 水土保持能力就越好, 但坡度对水土保持能力显著的正向作用却与水土流失风险会随着坡度的增加而增加的一般认识不同<sup>[30]</sup>, 这可能与坡度小的地方人口聚集, 人类活动的扰动较强, 而坡度大于 25° 的坡耕地退耕使植被覆盖度在一定范围内随着坡度的增加而增加有关<sup>[44-45]</sup>。社会经济因素中的人口密度和 GDP 对西南高山峡谷区水土保持能力变化具有显著的正向影响, 而夜间灯光指数变化则对西南高山峡谷区水土保持能力变化具有显著的负向影响, 夜间灯光每增加一个百分点, 水土保持能力就会降低 57.226%。

在模型 3 中, 从全区范围来看, 自然条件中的海拔、气温以及降水均对西南高山峡谷区水土保持能力变化具有显著的负向影响, 坡度和 NDVI 对西南高山峡谷区水土保持能力变化具有显著正向影响, 其中, 降水对水土保持能力变化影响由正向变为负向, 可能是因为在自然条件下, 降水对生态系统来说是必要的, 甚至是促进土壤肥力和植被生长的关键因素, 而在考虑政策因素时, 可能更多地关注了降水在不良土地管理条件下的破坏作用, 例如, 降水尤其是强降水不仅会破坏土壤结构, 在坡度大的地方还会造成严重的水土流失, 降低其水土保持能力; 气温对水土保持能力变化的影响由不显著变为负向显著, 气温升高导致土壤水分蒸发和有机质分解速度加快, 降低土壤的黏结力和抗侵蚀能力, 进而降低水土保持能力; 社会经济因素中的 GDP 对西南高山峡谷区水土保持能力变化具有显著的正向影响, 经济的发展往往意味着有更多的资金和更好的技术用于水土保持项目, 而夜间灯光指数变化则对西南高山峡谷区水土保持能力变化具有显著的负向影响, 夜间灯光通常与人类活动增加有关, 这可能会增加土壤侵蚀的风险; 生态政策对西南高山峡谷区水土保持能力变化具有显著的正向影响, 林业工程的实施和生态功能保护区的建立为中国防止和减轻水土流失、泥石流等自然灾害, 提高水土保持能力以及森林恢复做出了巨大贡献。

从不同地带来看, 自然条件中的海拔对高山区水土保持能力变化具有显著的负向影响, 而在半山区则表现出显著的正向影响, 这可能是因为半山区, 随着海拔的升高, 人类活动减少, 对环境干扰减小, 有利于水土保持能力的提高; 坡度对高山区、半山区、河谷区以及坡向对半山区水土保持能力变化均具有显著的正向影响; 气温对高山区以及降水对高山区和半山区水土保持能力变化具有显著的负向影响, 且均在 1% 的水平上显著; NDVI 对高山区水土保持能力变化具有显著的正向影响, NDVI 每增加一个百分点, 其水土保持能力就会增强 2.987%; 社会经济因素中的人口密度对河谷区水土保持能力变化具有显著的正向影响, 这可能是因为城镇主要分布在河谷, 使得人口密度增大, 而随着人口增加, 其环境意识提升, 更能意识到水土流失对生活质量的负面影响, 因此更愿意参与水土保持活动, 这与人口增长会使土地被过度开发和利用导致水土流失风险增加、水土保持能力降低的观点形成对比<sup>[32]</sup>; GDP 对高山区和半山区水土保持能力变化具有显著的正向影响, 而总人口和夜间灯光指数在不同地带表现不显著; 在生态政策方面, 林业工程覆盖区对高山区、半山区以及河谷区水土保持能力变化均表现出了显著的正向影响, 生态功能保护区对高山区水土保持能力变化具有显著的正向影响, 且整个回归分析当中, 生态政策对西南高山峡谷区水土保持能力的影响程度最大, 尤其是在林业工程覆盖区, 但生态功能保护区却在半山区和河谷区表现出显著的负向影响, 这可能是因为半山区和河谷区人类活动比较频繁, 尤其是河谷区, 是城镇的主要分布地带, 会对植被和土壤造成生态扰动, 不利于水土保持能力的提高, 但长期来看, 林业工程的实施和生态功能保护区的建立为中国防止和减轻水土流失、泥石流等自然灾害, 提高水土保持能力以及森林恢复同样做出了巨大贡献。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

本研究结果发现,西南高山峡谷区水土保持能力是全国范围内增强最为明显的区域,且生态政策在很大程度上促进了西南高山峡谷区水土保持能力的提高。一些研究表明,在中国“三北”地区的干旱和半干旱地区,生态政策的作用较小,气候条件(尤其是降水)才是其生态恢复的主要原因<sup>[23, 31]</sup>。全球气候变暖已成为趋势,而随着全球气温的上升,大气环流模式发生改变,降水分布也随之发生改变。中国气象局发布的《2021年中国气候公报》显示,降雨带出现了明显的“北抬北扩”特征,2021年北方的降雨量位居历史第二位,原本干旱和半干旱地区获得了更多的降水,且在干旱和半干旱地区,植被的生长对于旱特别敏感,此时即使实施了生态政策,也难以抵挡气候变化的直接影响<sup>[46-47]</sup>。因此,对于干旱和半干旱地区来说,气候变化可能会迅速改变其生态环境,使得生态政策的效果不如气候变化显著。而在西南高山峡谷区,尽管近20年来降雨量呈现减少的趋势,但其植被指数却呈现出波动上升的趋势<sup>[48]</sup>,这表明即使在降雨量减少的情况下,生态政策仍然能够有效促进植被恢复和生态改善。此外,该区域拥有丰富的水资源,在一定程度上缓冲了气候变化对生态系统的影响,使得生态政策在该区域更容易发挥效果<sup>[49]</sup>。许多学者一致认为,生态政策对中国2000年后植被恢复产生了有利影响<sup>[50-51]</sup>,而植被的水土保持效应已被相关研究所证实<sup>[52-54]</sup>。例如,近年来,在青藏高原高寒生态系统实施的一系列生态恢复项目,不仅显著增强了其植被覆盖率和土壤保持率,还减少了其水土流失量以及沙尘暴的发生概率<sup>[22]</sup>。同样,有研究将近20年来西南地区植被绿化归因于天然林保护和植树造林以及其他一系列生态修复工程<sup>[55]</sup>。为此,本研究在ArcGIS中利用土地覆盖数据计算了西南高山峡谷区2000—2020年的林地面积以及各土地利用类型的转换情况,结果显示,在2000—2020年间,西南高山峡谷区林地面积从269 648.08 km<sup>2</sup>增加到276 060.42 km<sup>2</sup>,林地面积增加了6 412.34 km<sup>2</sup>,增长2.38%,整体上呈现林地净增加的趋势,且西南高山峡谷区林地面积增加主要来源于耕地,其贡献率为70.88%,耕地减少也可能是该区域水土保持能力增强的原因之一,这与Wen等<sup>[56]</sup>的研究结果一致。天然林资源保护、长江流域防护林体系建设等生态修复工程的实施促进了西南高山峡谷区的植被恢复,为其水土流失治理以及水土保持能力的提高做出了巨大贡献。

在本研究中,夜间灯光指数对西南高山峡谷区水土保持能力的影响仅次于政策措施。有研究表明,夜间灯光指数与人类的生产和生活足迹密切相关,尤其是在人口密集的城市化地区,在一定程度上可以反映人类活动强度<sup>[57]</sup>。有研究表明,人类活动加剧的土壤侵蚀速率可能比所有自然过程加起来的速率高4~10倍,比土壤形成的速率高10~40倍<sup>[58]</sup>。因此,有许多研究者认为人类活动是导致水土流失的主导因素。例如,有研究指出,人类活动是导致中国东北地区水蚀显著增加的主要驱动力<sup>[33]</sup>;中国约一半的水土流失是由人类活动引起的,而由于人类严重依赖土壤来维持农业生产和牲畜养殖,因此,在农业密集地区,人类对土壤侵蚀的影响激增<sup>[59]</sup>。而在西南高山峡谷区,其农业耕种集约化程度高,尤其是在2 000 m以下的河谷区,该区域巨大的人口压力导致过度放牧和过度使用土地,并导致植被被破坏,生态功能下降,进一步加剧了水土流失<sup>[15]</sup>。

### 4.2 结论

为探究生态政策在生态恢复中的作用,本研究选择了西南高山峡谷区作为研究区域,该区域水土流失严重,一直以来都是中国典型的生态环境脆弱区,为此,该区域也是中国生态政策的重要实施地。本研究分析了2000—2018年西南高山峡谷区水土保持能力的分布和变化情况,并估计了其水土保持能力变化的影响因素,结果表明:① 2000—2018年间,西南高山峡谷区是中国水土保持能力变化最为明显的区域,整体上呈现极为明显的净增强趋势,且这种变化具有明显的空间聚集效应,具体以四川省增强最为明显。云南省部分区域则由于较好的资源禀赋以及增加的非农收入使其农畜系统得到强化,再加上农户常年拾捡林下松针垫圈的习惯,导致其成为水土保持能力下降的主要区域。② 生态政策在西南高山峡谷区水土保持能

力的变化中发挥了重要作用, 其影响程度远高于其他因素, 与“三北”地区的干旱和半干旱地区不同, 西南高山峡谷区气候条件更加稳定, 丰富的水资源可以在一定程度上缓冲气候变化的影响, 生态政策可以得到更好实施, 更容易发挥效果。此外, 自然条件的海拔、坡度、气温、降水、NDVI, 社会经济因素的 GDP 和夜间灯光指数也是影响西南高山峡谷区水土保持能力变化的关键驱动因素。

本研究揭示了西南高山峡谷区水土保持能力变化背后的关键驱动因素, 并证明了政策措施对该区域水土保持能力提高的重要作用, 为之后的水土保持和生态恢复工作提供了重要的参考, 对西南高山峡谷区实现绿色可持续发展具有重要意义。但本研究也存在不足之处: 时间序列有限, 只研究了 2000—2018 年的水土保持能力变化, 并没有与 2000 年生态项目实施之前的水土保持能力进行比较。因此, 未来在针对西南高山峡谷区水土保持能力变化的研究中, 需要在数据可获得的前提下拉长时间序列, 对比生态政策措施实施前后的水土保持能力变化情况, 为今后水土流失治理和水土保持工作提供更有意义的参考和指导。

### 参考文献:

- [1] 王占礼. 中国水土流失的成因、威胁及其防治途径 [J]. 世界科技研究与发展, 2000, 22(3): 78-83.
- [2] 张哲, 方政, 董智, 等. 鲁中南山区侵蚀性降雨及典型作物对坡面产流产沙影响研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(1): 69-76.
- [3] 王一峰, 屈丽琴, 李建明, 等. 基于近 20 年《中国水土保持公报》的水土流失治理分析 [J]. 长江科学院院报, 2023, 40(7): 59-65.
- [4] 张道军. 植被恢复“潜力-实现”视角下生态政策效果评价的理论初探、模型构建及应用 [J]. 地理研究, 2023, 42(12): 3099-3114.
- [5] 王良平, 唐晓春. 粤东山地丘陵区水土流失治理中的植被工程措施研究 [J]. 水土保持通报, 1999, 19(2): 15-16.
- [6] 时乐, 张维, 李占斌, 等. 石窑店煤矿水土保持与生态修复措施体系研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(1): 104-108.
- [7] 赵妍, 周珊珊, 高云飞, 等. 特大暴雨下残垣丘陵沟壑区水土流失与梯田措施效益评价 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 92-99.
- [8] 付兴涛, 叶碎高, 赵聚国, 等. 人工河岸水土保持生物措施土壤持肥和固土效应分析 [J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 237-239, 244.
- [9] 孟新华. 强化生物措施治理黄土高原水土流失之对策 [J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 59-61.
- [10] 王峰, 石辉, 黄林, 等. 红壤丘陵区生物措施治理水土流失的技术体系——以江西省信丰县崇墩沟流域为例 [J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 248-251.
- [11] 张忠学, 尹致皓, 余佩哲, 等. 黑土区坡耕地水土保持耕作措施对土壤理化性状的影响 [J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 282-293.
- [12] 牛晓乐, 秦富仓, 杨振奇, 等. 黑土区坡耕地几种耕作措施水土保持效益研究 [J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5): 67-72.
- [13] 丁琳, 黄婷婷, 秦伟, 等. 西南高山峡谷区土壤侵蚀空间分异特征 [J]. 泥沙研究, 2023, 48(6): 51-58, 66.
- [14] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持, 2013(10): 2-3, 11.
- [15] 周金星, 关颖慧, 汪亚峰, 等. 西南高山峡谷区水土流失综合防治技术与示范 [J]. 生态学报, 2024, 44(18): 7937-7943.
- [16] 黄柔, 吴秀芹, 石婕妤, 等. 西南高山峡谷区水土保持技术与生态产业协调发展定量研究——以云南省永胜县为例 [J]. 生态学报, 2024, 44(21): 9924-9934.
- [17] 朱军, 李益敏, 蒋德明. 基于 GIS 和 RUSLE 的高山峡谷区土壤侵蚀研究——以云南省泸水县为例 [J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 277-283, 370.
- [18] 蒋刚, 康金莲, 曹广超, 等. 基于 RUSLE 模型的青海澜沧江流域土壤侵蚀研究 [J]. 高原科学研究, 2022, 6(4): 1-13.
- [19] 陈龙, 谢高地, 张昌顺, 等. 澜沧江流域土壤侵蚀的空间分布特征 [J]. 资源科学, 2012, 34(7): 1240-1247.

- [20] 陈晨, 武谦, 张占友, 等. 澜沧江中下游流域土壤侵蚀时空演变特征 [J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 11-17, 30.
- [21] 廖瑞恩, 齐实, 赖金林, 等. 西南高山峡谷区水力侵蚀时空变化及其驱动力 [J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 139-147.
- [22] ZHAO Z X, DAI E F. Vegetation Cover Dynamics and Its Constraint Effect on Ecosystem Services on the Qinghai-Tibet Plateau under Ecological Restoration Projects [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 356: 120535.
- [23] CAI D W, GE Q S, WANG X M, et al. Contributions of Ecological Programs to Vegetation Restoration in Arid and Semiarid China [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(11): 114046.
- [24] YIN R S, YIN G P, LI L Y. Assessing China's Ecological Restoration Programs: What's Been Done and What Remains to Be Done [J]. *Environmental Management*, 2010, 45(3): 442-453.
- [25] XU J T, YIN R S, LI Z, et al. China's Ecological Rehabilitation: Unprecedented Efforts, Dramatic Impacts and Requirement Policies [J]. *Ecological Economics*, 2006, 57(4): 595-607.
- [26] BENNETT M T. China's Sloping Land Conversion Program: Institutional Innovation or Business as Usual [J]. *Ecological Economics*, 2008, 65(4): 699-711.
- [27] 赖金林, 齐实, 崔冉冉, 等. 西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析 [J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6833-6846.
- [28] 赵伟, 刘昊铮, 蒲海霞. 中国“十三五”期间空气质量时空演变特征及社会经济驱动力 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(9): 99-109.
- [29] GETIS A, ORD J K. The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics [J]. *Geographical Analysis*, 1992, 24(3): 189-206.
- [30] 季翔, 黄炎和, 林金石, 等. 基于 DEM 的坡形与水土流失的关系——以西溪小流域为研究区 [J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(2): 161-171.
- [31] PENG D L, WU C Y, ZHANG B, et al. The Influences of Drought and Land-Cover Conversion on Inter-Annual Variation of NPP in the Three-North Shelterbelt Program Zone of China Based on MODIS Data [J]. *PLoS One*, 2016, 11(6): e0158173.
- [32] 谌柯. 南充市水土流失的人为因素分析及对策研究 [J]. 水土保持通报, 2006, 26(1): 103-107.
- [33] TANG Q, HUA L, CAO Y F, et al. Human Activities Are the Key Driver of Water Erosion Changes in Northeastern China [J]. *Land Degradation and Development*, 2024, 35(1): 62-75.
- [34] 郑文杰, 郑毅. 云南省水土流失概况及水土保持措施 [J]. 湖北农业科学, 2005, 44(6): 4-7.
- [35] 谷勇, 陈芳, 李昆, 等. 云南岩溶地区石漠化生态治理与植被恢复 [J]. 科技导报, 2009, 27(5): 75-80.
- [36] 王宇. 云南省地质灾害防治与研究历史评述 [J]. 灾害学, 2019, 34(3): 134-139.
- [37] 王玉纯, 赵军, 付杰文, 等. 退耕还林还草工程对干旱区内陆河流域生态系统服务的影响 [J]. 生态科学, 2021, 40(6): 56-66.
- [38] 李瑜琴, 赵景波. 过度放牧对生态环境的影响与控制对策 [J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 404-408.
- [39] 向道艳, 周洪, 林妮, 等. 劳动力转移程度对农户牲畜饲养行为的影响——基于生计转型视角 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(11): 128-140.
- [40] 李佳秀, 张青松, 杜子银. 减畜对草地植被生长和土壤特性的影响研究进展 [J]. 草地学报, 2022, 30(9): 2280-2290.
- [41] 吴妨. 农民土地转入意愿的影响因素分析——以广东英德、鹤山为例 [J]. 广东农业科学, 2011, 38(6): 207-209.
- [42] MCCARTHY N, CARLETTO C, KILIC T, et al. Assessing the Impact of Massive Out-Migration on Albanian Agriculture [J]. *The European Journal of Development Research*, 2009, 21(3): 448-470.
- [43] 张昆扬, 张改清, 韩嫣, 等. 农机作业服务对农业生态效率的影响: 本地效应与空间溢出 [J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(3): 223-237.
- [44] 吴吉东, 李宁, 牛定炜, 等. 退耕对粮食生产灾情的间接影响分析——以甘肃省定西市安定区为例 [J]. 自然灾害学报, 2008, 17(2): 8-12.
- [45] 刘尧文, 沙晋明. 基于 Landsat 影像的多时相植被覆盖度与地形因子关系研究——以平潭岛为例 [J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2016, 32(4): 89-98.

- [46] 魏瑞江, 张文宗, 陈道红, 等. 异常气候下极端天气事件对河北省农业的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(11): 35-38.
- [47] NOY-MEIR I. Desert Ecosystems: Environment and Producers [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973(4): 25-51.
- [48] 赖金林, 齐实, 廖瑞恩, 等. 2000—2019 年西南高山峡谷区植被变化对气候变化和人类活动的响应 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 155-163.
- [49] 李峰平, 章光新, 董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述 [J]. 地理科学, 2013, 33(4): 457-464.
- [50] CHEN Y Z, FENG X M, TIAN H Q, et al. Accelerated Increase in Vegetation Carbon Sequestration in China after 2010: A Turning Point Resulting from Climate and Human Interaction [J]. Global Change Biology, 2021, 27(22): 5848-5864.
- [51] GE W Y, DENG L Q, WANG F, et al. Quantifying the Contributions of Human Activities and Climate Change to Vegetation Net Primary Productivity Dynamics in China from 2001 to 2016 [J]. Science of the Total Environment, 2021, 773: 145648.
- [52] BORRELLI P, ALEWELL C, ALVAREZ P, et al. Soil Erosion Modelling: A Global Review and Statistical Analysis [J]. Science of the Total Environment, 2021, 780: 146494.
- [53] HAO H X, QIN J H, SUN Z X, et al. Erosion-Reducing Effects of Plant Roots during Concentrated Flow under Contrasting Textured Soils [J]. Catena, 2021, 203: 105378.
- [54] LUO J, ZHOU X L, RUBINATO M, et al. Impact of Multiple Vegetation Covers on Surface Runoff and Sediment Yield in the Small Basin of Nverzhai, Hunan Province, China [J]. Forests, 2020, 11(3): 329.
- [55] QIAO Y N, JIANG Y J, ZHANG C Y. Contribution of Karst Ecological Restoration Engineering to Vegetation Greening in Southwest China during Recent Decade [J]. Ecological Indicators, 2021, 121: 107081.
- [56] WEN X, DENG X Z, ZHANG F. Scale Effects of Vegetation Restoration on Soil and Water Conservation in a Semi-Arid Region in China: Resources Conservation and Sustainable Management [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 151: 104474.
- [57] 张晓平, 高珊珊, 陈明星, 等. 夜间灯光数据在城市化及其资源环境效应研究中的热点主题追踪 [J]. 中国科学院大学学报, 2022, 39(4): 490-501.
- [58] LANG Y Q, YANG X H, CAI H Y. Quantifying Anthropogenic Soil Erosion at a Regional Scale——The Case of Jiangxi Province, China [J]. Catena, 2023, 226: 107081.
- [59] LI K K, YANG J Y, WANG J Y, et al. Human-Altered Soil Loss Dominates Nearly Half of Water Erosion in China but Surges in Agriculture-Intensive Areas [J]. One Earth, 2024, 7(11): 2008-2018.

责任编辑 包颖