

DOI: 10.20103/j.stxb.202310082164

左玲丽, 刘国华, 赵俊彦, 李佳佳, 郑舒元, 王俊晨, 苏旭坤. 川西地区生态系统服务对可持续发展目标的影响. 生态学报, 2024, 44(10): 4203-4216.
Zuo L L, Liu G H, Zhao J Y, Li J J, Zheng S Y, Wang J C, Su X K. Effects of ecosystem services on sustainable development goals in western Sichuan. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4203-4216.

川西地区生态系统服务对可持续发展目标的影响

左玲丽¹, 刘国华^{1,2,3,*}, 赵俊彦¹, 李佳佳¹, 郑舒元¹, 王俊晨¹, 苏旭坤^{2,3}

1 云南大学, 国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091

2 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 中国科学院大学, 资源与环境学院, 北京 100049

摘要: 可持续发展目标 (Sustainable Development Goals, SDGs) 的实现往往会因为生态保护或人类福祉之间可能存在的权衡关系而受到阻碍。将生态系统服务 (Ecosystem services, ESs) 纳入到可持续发展目标的决策中能够避免各方利益的冲突, 促进 SDGs 的实现。然而, 在生态环境脆弱的山区, ESs 对 SDGs 的贡献分析仍然不足。以川西地区为研究区, 对 2000—2020 年 11 个可持续发展目标进行了量化, 利用生态系统服务和权衡的综合评估 (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST) 模型和定量指标法估算了碳固存、土壤保持和食物生产三种重要生态系统服务, 并使用空间面板数据模型研究 ESs 对 SDGs 的影响及其空间溢出效应。结果表明: (1) 可持续发展目标水平整体提升, 但 SDG1 (无贫穷) 和 SDG3 (良好健康和人类福祉) 表现较差, 分值低于 5 分。从空间上看, 与环境相关的 SDGs 在川西北高原表现更好, 与社会经济相关的 SDGs 在川西东部和川西南山地地区表现更好。(2) 川西地区碳固存和食物生产服务呈现线性增长趋势, 土壤保持服务呈现波动增长趋势, 分别增长了 0.23×10^8 t、 8.93×10^5 t 和 1.23×10^8 t。(3) 与土壤保持和食物生产相比, 碳固存对 SDGs 表现出更强烈的直接影响和空间溢出效应。其中县域碳固存对本县域和邻近县域的 SDG11 (可持续城市和社区) 和 SDG1 具有显著的促进作用, 对 SDG2 (零饥饿) 呈现显著负向影响。研究结果可为区域联合管理提供科学依据, 推动可持续发展目标的实现。

关键词: 可持续发展目标; 生态系统服务; 空间面板数据模型; 川西地区

Effects of ecosystem services on sustainable development goals in western Sichuan

ZUO Lingli¹, LIU Guohua^{1,2,3,*}, ZHAO Junyan¹, LI Jiajia¹, ZHENG Shuyuan¹, WANG Junchen¹, SU Xukun^{2,3}

1 Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091, China

2 Research Center for Eco-environmental Sciences, State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The implementation of sustainable development goals (SDGs) is frequently hampered by possible trade-offs between ecological protection and human well-being. Incorporating ecosystem services (ESs) into SDGs decision-making can avoid conflicting interests and facilitate the realization of the SDGs. However, the contribution of ESs to SDGs remains insufficiently analyzed in ecologically fragile mountainous areas. In this study, we quantified 11 SDGs from 2000 to 2020 in Western Sichuan. We estimated three critical ecosystem services, carbon sequestration (CS), soil retention (SR), and food production (FP), using the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) model and the quantitative indicator approach. Moreover, we explored the effects and spatial spillover of ESs on SDGs by spatial panel data model. The results showed that: (1) Overall, the Western Sichuan has improved its SDGs scores, but SDG1 (No Poverty) and SDG3 (Good Health and Well-being) have exhibited poor performance, scoring below 5. Spatially, the environment-related SDGs performed better in the Northwest Sichuan Plateau, and socio-economic-related SDGs performed better in the

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0402)

收稿日期: 2023-10-08; 网络出版日期: 2024-02-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ghliu@cees.ac.cn

eastern and southwestern mountainous regions of Western Sichuan. (2) The CS and FP showed a linear growth trend, and SR showed a fluctuating growth trend which was 0.23×10^8 t, 8.93×10^5 t and 1.23×10^8 t, respectively. (3) Compared with SR and FP, CS showed stronger direct and spillover effects on SDGs. Among them, the county's CS significantly contributed to SDG11 (Sustainable Cities and Communities) and SDG1 in this and neighboring counties, showing a significantly negative effect on SDG2 (Zero Hunger). The results of the study could provide the scientific basis for regional joint management to promote the realization of sustainable development goals.

Key Words: sustainable development goals; ecosystem services; spatial panel data models; Western Sichuan

千年发展目标(Millennium Development Goals, MDGs)到期后,联合国确定了由 17 项目标和 169 项子目标组成的可持续发展体系。可持续发展体系既延续了 MDGs 的核心目标又基于新形势下的机遇与挑战纳入了新的考量,旨在为世界各国经济增长、社会发展、资源利用和环境保护提供战略指导^[1]。目前,距离实现可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)已经不足十年,由于气候变化、经济增长不平衡、资源禀赋差异等加剧了可持续发展目标实现的难度,并可能导致人类在实现可持续发展目标中取得成果面临倒退的威胁^[2]。为了推动 SDGs 的实现,研究者们从多角度不断尝试,包括揭示 SDGs 间复杂相互作用^[3],确定 SDGs 的优先次序^[4],分析 SDGs 的影响因素^[5],预测 SDGs 的未来趋势^[6]等。但大多数研究从全球或者国家尺度展开,对于区域性研究,尤其是对中国西南生态环境脆弱山区的关注较为不足,这导致所得出的结论难以为地区可持续发展目标的实现提供依据。

现有的研究表明,SDGs 的实现不能仅依靠社会和经济的发展,将生态环境纳入可持续发展决策中至关重要^[7]。生态系统服务(Ecosystem services, ESs)由生态系统结构、功能或过程形成,是人类从维持地球生命支持的生态系统中获得的利益和福祉,直接或间接有助于 SDGs 的实现^[8]。例如,供给服务有助于 SDG2(零饥饿)、SDG3(良好健康和人类福祉)、SDG6(清洁饮水和卫生设施)等的实现^[9]。SDG15(陆地生物)、SDG13(气候行动)、SDG14(水下生物)和 SDG6 与气候调节、淡水、食品、水净化、生物多样性和教育等生态系统服务密切相关^[10]。ESs 与 SDG6、SDG13、SDG14 和 SDG15 直接相关,并间接促进其他 13 个目标的实现^[11]。但鲜少有研究系统的分析了 ESs 对 SDGs 广泛而持久的影响。通过对 ESs 与 SDGs 进行充分的时间和空间分析,有助于精准把握两者在时空上的差异,从而有效促进它们之间的共同效益得到充分利用,为推动 SDGs 的长期实现提供有力的支持。

由于相邻地区的生物物理过程比遥远地区的生物物理过程更紧密。因此,邻近地区比遥远和非相邻地区更有可能在地理、社会和经济上建立联系^[12]。ESs 和 SDGs 在空间上相互关联^[13-14],这就意味着某地区的 SDGs 可能受到本区域和相邻区域 ESs 的共同影响。因此,在环境保护和可持续发展中应该深入研究和考虑空间相关性和溢出效应。尽管许多方法已经被应用于分析 ESs 对 SDGs 的影响,包括回归分析^[15]、地理探测器^[7]、结构方程模型^[11,16]、普通面板数据模型^[17]等。但这些方法只能得到 ESs 对 SDGs 的直接影响,未能充分考虑空间相关性和空间溢出效应,ESs 与 SDGs 之间存在的空间依赖性被忽略,这导致估计结果的偏差^[18]。空间面板数据模型能够较好地处理相邻地区之间的依赖和溢出效应问题^[19]。

鉴于上述情况,本文拟解决如下科学问题:(1)2000—2020 年,川西地区 SDGs 的表现及变化情况如何?(2)2000—2020 年,川西地区重要 ESs 的时空演变特征是怎样?(3)ESs 对 SDGs 之间的影响是怎样?是否存在空间溢出效应?为了回答上述问题,本文量化了 2000—2020 年川西地区 11 个 SDGs 以及碳固存、土壤保持和食物生产 3 项生态系统服务,分析了 ESs 和 SDGs 的时空变化特征,揭示了 ESs 对 SDGs 的影响,以期为区域人地关系平衡和可持续发展目标的实现提供重要参考依据。

1 研究区概况、数据来源及处理

1.1 研究区概况

川西地区位于四川西部,属于横断山脉的东段,是第一阶梯向第二阶梯的过渡地带,包括四川省甘孜藏族

自治州、阿坝藏族羌族自治州、凉山彝族自治州以及攀枝花的 53 个县(图 1)。该地区以高原和山地地形为主,地形结构复杂,高山峡谷广泛分布^[20]。北部气候类型以高原气候为主,气候垂直分异明显^[21],川西的东部和南部属于中亚热带季风气候区^[20]。复杂的地形和多样的气候为生态环境提供了丰富资源。川西地区不仅是长江上游重要的生态屏障,也是中国典型的生态环境脆弱区域,其生态战略地位十分突出^[22]。然而,在自然和人为因素共同作用下,水土要素趋于失衡,生态风险逐渐增大。区域内民族分布多样,包括羌、藏、回、彝、汉等,其中凉山彝族自治州是我国最大的彝族聚居区。由于长期受传统农耕经营方式的影响,导致区域社会经济发展水平相对较为落后。截止 2020 年,区域地区生产总值 3596.33×10^8 元(来源:四川统计年鉴),仅占全省的 1/13 左右。

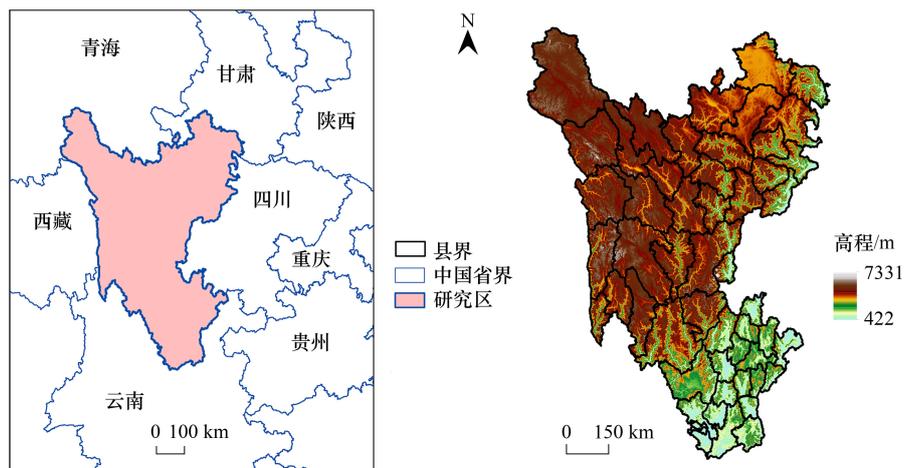


图 1 研究区地理位置

Fig.1 The Location of the study area

1.2 数据来源及处理

土地利用数据来源于 Geo 地理数据研究所 (<https://doi.org/10.5194/essd-13>),土地利用类型包括农田、森林、灌木、草原、水、冰雪、贫瘠、不透水地、湿地九类土地利用数据,空间分辨率为 30m,年份从 1985 年 2021 年。数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)和中国土壤类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/>),分辨率为 250m。气象数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>),包括气温和降水,空间分辨率为 1km。NDVI 数据来源于 MOD17A3 数据集,通过最大值法合成,时间分辨率为 16d,空间分辨率为 250m。四川省土壤可蚀性因子数据由国家地球系统科学数据中心提供 (<http://www.geodata.cn/>),空间分辨率 30m。对上述所有不同空间分辨率的栅格数据进行重采样,使其空间分辨率一致为 1km,利用 ArcGIS 中的分区统计工具将其汇总为县域单元。社会经济数据来源于省、市、县统计年鉴以及国民经济与社会发展公报。县级二氧化碳排放量和县级能耗与能效数据来源于文献数据^[23-24]。由于部分区县在个别年份存在社会经济统计数据缺失,本研究采用了两种方法进行处理^[25]:(1)以同一年社会经济发展水平相近的县域数据进行替代;(2)对现有的数据进行模型构建和精度检验。

2 研究方法

2.1 可持续发展目标量化

联合国提出了 17 个可持续发展目标(SDGs)和 169 个具体目标。参考已有的研究^[15-16,26],构建了由 11 个目标和 31 个指标组成的川西地区县域可持续发展指标体系(表 1)。由于原始指标之间存在不可比性,本文采用最小—最大归一化方法将每个可持续发展指标转换为 0 至 100 之间的值。指标的属性包括正和负,正属性意味着数据越大,对可持续发展越有利,负属性意味着数据越小越有利于可持续发展。各个指标之间的

权重采用熵值法确定,最终得到 11 个可持续发展目标的得分。有关熵值法的具体信息参见相关文献^[27]。在本文中,计算 SDGs 的总分时,11 个可持续发展目标被赋予了相同权重。本研究使用以下公式分别对具有不同属性的指标进行归一化:

$$X^+ = \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \times 100 \quad (1)$$

$$X^- = \frac{(X_{\max} - X_i)}{(X_{\max} - X_{\min})} \times 100 \quad (2)$$

式中, X^+ 表示正属性指标的归一化值, X^- 表示负属性指标的归一化值; X_{\min} 和 X_{\max} 分别代表 21 年里 53 个县域可持续发展指标的最小值和最大值, X_i 代表原始可持续发展指标值。

表 1 基于 SDGs 的本地化可持续发展指标体系

Table 1 The indicator system of localized sustainable development based on SDGs

可持续发展目标 Sustainable development goals	具体目标 Targets	指标 Indicators	属性 Attributes
SDG1:无贫穷 No Poverty	1.1	农村居民人均纯收入/(元/人) 住户储蓄余额/元	正 正
SDG2:零饥饿 Zero Hunger	2.1	人均粮食产量/(kg/人) 单位耕地面积化肥施用量/(kg/hm ²) 农村人均耕地面积/(ha/人)	正 负 正
SDG3:良好健康与福祉 Good Health and Well-being	3.8 3.c 3.8	万人卫生机构床位数/(张/10 ⁴ 人) 卫生技术人员/人 万人福利机构床位数/(张/10 ⁴ 人)	正 正 正
SDG4:优质教育 Quality Education	4.1	中等学生师生比 学龄儿童入学率/%	正 正
SDG6:清洁水和卫生设施 Clean Water and Sanitation	6.1	年均降雨量/mm 水体范围/%	正 正
SDG7:经济适用的清洁能源 Affordable and Clean Energy	7.3	能耗/(100万吨标煤) 能效/(吨标煤每十元)	负 负
SDG8:体面工作和经济增长 Decent Work and Economic Growth	8.2 8.1	二三产业占比/% 人均GDP/(元/人) 人均社会消费品零售总额/(元/人)	正 正 正
SDG9:产业、创新和基础设施 Industry, Innovation, and Infrastructure	9.3 9.5 9.c	第二产业生产总值占地区生产总值的比重/% 第三产业GDP占地区GDP的比重/% 本地电话用户/(×10 ⁶ 户)	正 正 正
SDG11:可持续城市和社区 Sustainable Cities and Communities	11.1 11.2	城市人口占比/% 公路里程密度/(km/km ²)	正 正
SDG13:气候行动 Climate Action	13.2	PM _{2.5} 年平均浓度/(ug/m ³) 每万国内生产总值碳排放量/(t/10 ⁴ 元) 人均二氧化碳排放量/(t/人)	负 负 负
SDGs15:陆地生物 Life on Land	15.1 15.4	林地覆盖率/% 草地覆盖率/% 聚集度 分离度 分裂度 聚合度	正 正 正 负 负 正

SDG1:可持续发展目标 1 Sustainable Development Goal 1,其余缩写同上;表中的聚集度、分离度、分裂度和聚合度为景观格局指数,用以描述生态系统景观结构,具体计算方法参考相关文献^[28]

2.2 生态系统服务评估

本文考虑了三项生态系统服务,包括碳固存(Carbon sequestration, CS)、土壤保持(Soil retention, SR)和食物生产(Food production, FP)。其中,碳固存和土壤保持采用生态系统服务和权衡的综合评估(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, InVEST)模型进行估算。食物生产考虑了种植业和畜牧业的区域发展,利用粮食作物产量和畜牧业的肉类产量对其进行评估。

本文使用 InVEST(3.12.0)中的沉积物输送率(Sediment Delivery Ratio, SDR)模块对土壤保持进行评价,该模块是基于修订的通用土壤流失方程对 SDR 进行估算^[29]。公式如下:

$$SR = RKLS - USLE = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (3)$$

式中, SR 为实际土壤保持量(t/km^2); $RKLS$ 为潜在土壤侵蚀量(t/km^2); $USLE$ 为实际土壤侵蚀量(t/km^2); R 为降雨侵蚀指数; K 为土壤可侵蚀性指数; LS 为坡长和坡度因子; C 为覆盖和管理因子; P 为实践因子。参数计算及设置参考相关文献^[30-32]。

InVEST 模型通过地上碳密度、地下碳密度、土壤有机碳密度和死亡有机质碳密度来估计碳储存量,公式如下:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{dead} + C_{soil} \quad (4)$$

式中, C_{total} 表示碳储量, C_{above} 表示地上碳密度, C_{below} 表示地下碳密度, C_{dead} 表示死亡有机物碳密度, C_{soil} 表示土壤有机碳密度。参数设置参照相关文献^[33-36]。

2.3 空间面板数据模型

设定合理的空间权重矩阵对空间面板数据模型的选取、检验以及拟合效果具有十分重要的作用。本文利用 Queen 邻近关系对空间权重进行赋值,该方法在空间效应分析中被广泛使用^[37],如公式(5)所示。赋值规则如下:如果空间相邻县域 i 和 j 具有共同边界,则表示为 1,否则表示为 0。

$$W_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{县域 } i \text{ 和县域 } j \text{ 相邻} \\ 0, & \text{县域 } i \text{ 和县域 } j \text{ 不相邻, } i=j \end{cases} \quad (5)$$

本研究借助 Stata 17,运用空间面板数据模型来测度生态系统服务对可持续发展目标的影响。空间面板数据模型在考虑到时间维度的同时,更能够全面、准确地分析空间单元的个体异质性,并避免变量缺失和估计误差^[38]。在本研究考虑了三种空间面板数据模型,即空间滞后模型(Spatial lag model, SLM)、空间误差模型(Spatial error model, SEM)和空间杜宾模型(Spatial durbin model, SDM)。其中 SDM 是 SLM 和 SEM 模型的扩展,它同时考虑了自变量和因变量的空间相关性,可以同时引入因变量的空间滞后项和对当前因变量的影响因素^[39]。SDM 的表达式如下:

$$Y_{it} = \vartheta \sum_{j=1}^n W_{ij} Y_{it} + \alpha + X_{it}\beta + \sum_{j=1}^n W_{ij} X_{it}\theta + q_i + \mu_t + \varphi_{it} \quad (6)$$

式中: i 表示县域, t 表示周期; Y_{it} 和 X_{it} 分别表示因变量和自变量; W_{ij} 为空间权重矩阵; $\sum_{j=1}^n W_{ij} Y_{it}$ 和 $\sum_{j=1}^n W_{ij} X_{it}$ 分别表示因变量和自变量的空间相互作用; ϑ 表示因变量在时间上的滞后项系数; β 为参数向量; θ 表示自变量的空间滞后项系数; α 、 q_i 、 μ_t 和 φ_{it} 分别表示常数项、空间固定效应、时间固定效应和随机误差项。

由于回归系数难以充分解释自变量和因变量的边际效应, LeSage 和 Pace 提出自变量对因变量的影响可以分为直接效应(Direct effect, DE)、间接效应(Indirect effect, IE)和总效应(Total effect, TE)^[40]。直接效应显示了本县域自变量对因变量的影响以及反馈效应(公式 7)。间接效应显示了本县域自变量对邻近县域因变量的影响,即空间溢出效应(公式 8)。总效应表示县域自变量对整个地区因变量的平均影响(公式 9)。

$$DE = \{ (I - \rho W)^{-1} \times (\beta_n I + \theta_n W) \}^d \quad (7)$$

$$IE = \{ (I - \rho W)^{-1} \times (\beta_n I + \theta_n W) \}^{\overline{rsum}} \quad (8)$$

$$TE = DE + IE \quad (9)$$

式中, DE 是直接效应, IE 是间接效应, TE 是总效应; β 和 θ 是估计参数, I 是常数标量对角方差—协方差矩阵, W 是空间权重矩阵, \bar{d} 和 \overline{rsum} 分别表示矩阵中对角元素和非对角元素的行平均值。

3 结果分析

3.1 可持续发展目标的时空变化特征

根据图 2 可知,2000—2020 年 SDG1(无贫穷)、SDG8(体面的工作和经济增长)呈现出持续上升趋势,SDG1 的分值从 0.63 上升到 9.58,SDG8 的分值从 2.79 上升到 17.27。2004 年后 SDG15(陆地生物)有明显的下降趋势但是下降幅度较小,下降分值基本维持在 2 分以内。其余 SDGs 呈现出曲折上升的趋势。为了分析研究期间的总体可持续发展情况,本研究计算了 21 年不同类别可持续发展目标的平均得分(图 3 和图 4)。SDG7(负担得起的清洁能源)和 SDG13(气候行动)的分值分别为 89.28 和 80.73,是研究区的优势可持续发展目标。SDG1 和 SDG3(良好的健康与福祉)的平均分值分别为 3.60 和 3.85,目标表现较差,是未来的潜力目标。从 21 年可持续发展目标平均得分的空间分布来看(图 4),SDG13 和 SDG15 在川西北高原的分值明显高于川西南山地,SDG1、SDG2(零饥饿)、SDG6(清洁饮用水和卫生设施)、SDG8 和 SDG9(产业创新和基础设施)在川西的东部和川西南地区的分值比川西北高原高。整体上,川西可持续发展目标分值在不断上升,分值较高的县域集中在川西北高原,但 21 年平均分值只有 26.42 分,可持续发展水平有待提高。

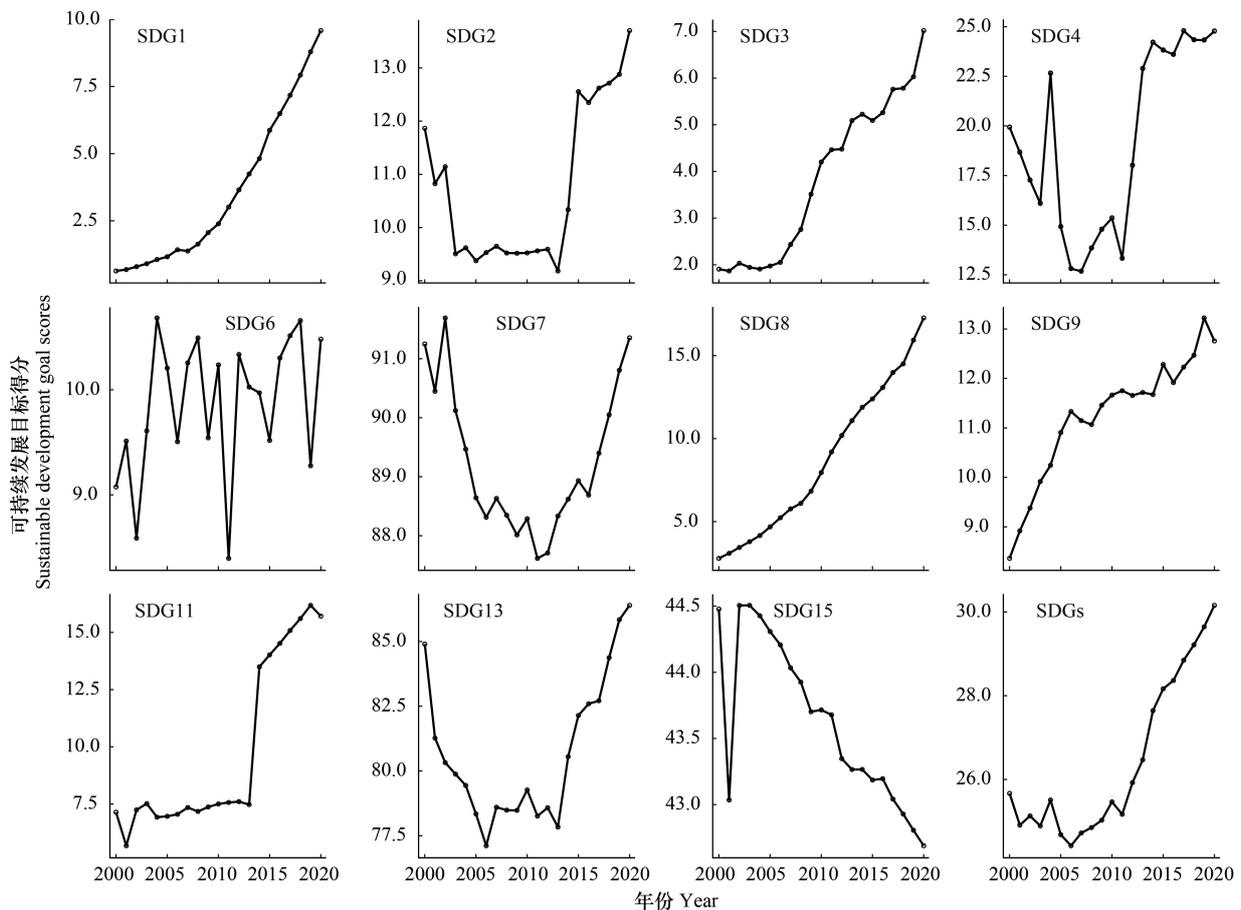


图 2 2000—2020 年川西地区可持续发展目标表现

Fig.2 Performance of the Sustainable Development Goals in Western Sichuan from 2000 to 2020

3.2 生态系统服务的时变化特征

2000—2020 年,川西地区碳固存总量从 $35.97 \times 10^8 \text{ t}$ 增加到 $36.20 \times 10^8 \text{ t}$ (图 5),食物生产从 $29.21 \times 10^5 \text{ t}$ 增

加到 $38.14 \times 10^5 \text{t}$ (图 7), 整体呈现明显线性上升趋势。土壤保持总量从 $13.17 \times 10^8 \text{t}$ 增加到 $14.40 \times 10^8 \text{t}$ (图 6), 年际变化较大。然而, 川西地区的碳固存总量明显高于食物生产和土壤保持。从空间上看, 碳固存的低值县域分布在川西地区的东南部, 土壤保持的低值县域分布在川西地区东南部和北部, 它们的高值主要分布在中部县域。食物生产的低值区域集中在川西地区的西北部, 高值集中在南部。

3.3 生态系统服务对可持续发展目标的影响

3.3.1 空间面板模型选择

为了进一步确定模型的空间相关性, 有必要对模型进行拉格朗日乘数 (Lagrange multiplier, LM) 检验 (表 2)。所有变量的 LM 空间滞后 (LM lag)、LM 空间误差 (LM err)、稳健性 LM 空间滞后 (R-LM lag) 和稳健性 LM 空间误差 (R-LM err) 基本能通过 1% 和 5% 的显著水平检验, 说明数据中存在显著的空间依赖性, 空间面板模型更适合本研究且空间杜宾模型要优于空间误差和空间滞后模型。对于 R-LM lag 未能通过显著性检验的变量, LeSage and Pace 认为可以继续使用空间杜宾模型, 再通过估计模型的参数所获得的结果来检验空间 SDM 是否可以简化为 SLM 或 SEM, 最终确定模型的类型。Hausman 检验结果表明, 原假设均在 1% 和 5% 的置信水平下通过了显著性检验, 因此, 采用固定效应模

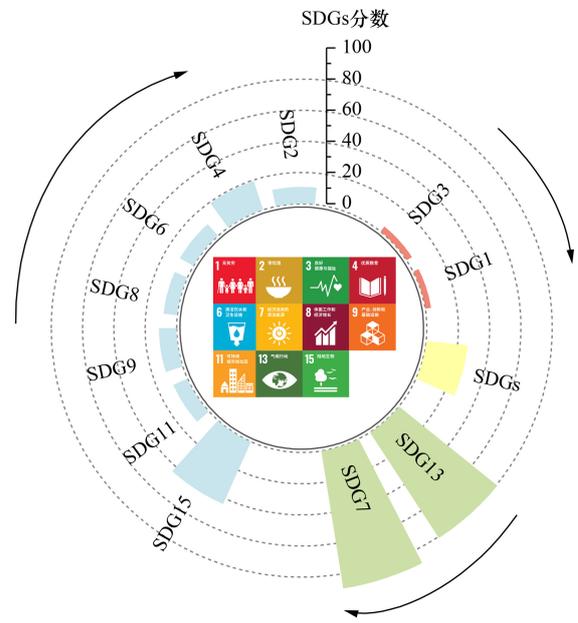


图 3 2000—2020 年川西地区可持续发展目标的整体表现
Fig.3 Overall performance of the SDGs in Western Sichuan from 2000 to 2020

图中径越长, 可持续发展目标得分越高。不同颜色代表不同类别, 其中绿色部分表示得分最高的两种 SDGs, 红色部分表示得分最低的 SDGs, 黄色部分表示整体 SDGs 得分, 蓝色表示其他 SDGs 得分情况。箭头指向代表每一个类别

型。Hausman 检验结果表明, 原假设均在 1% 和 5% 的置信水平下通过了显著性检验, 因此, 采用固定效应模

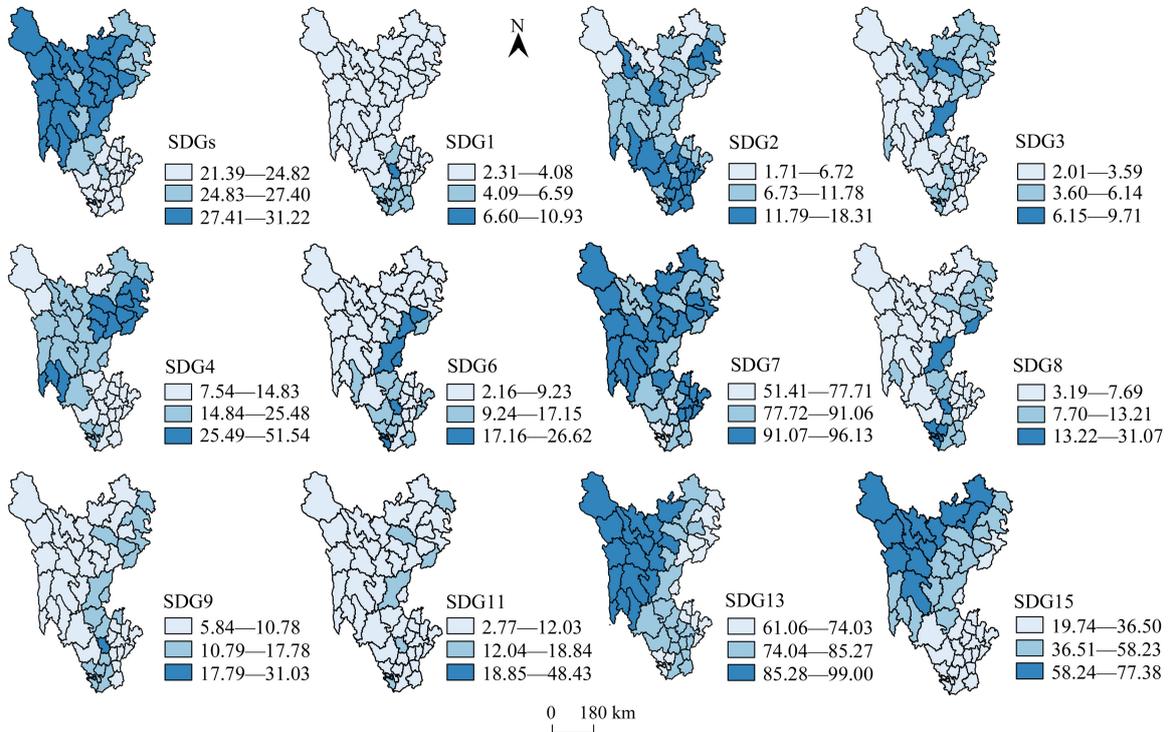


图 4 2000—2020 年川西地区可持续发展目标平均得分的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of the average SDGs scores in Western Sichuan from 2000 to 2020

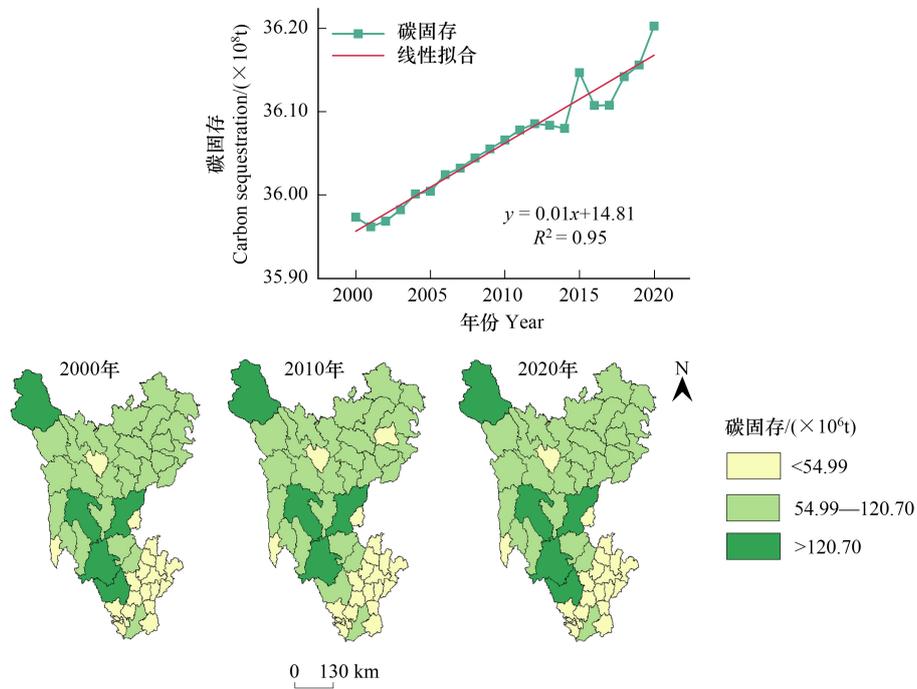


图 5 2000—2020 年川西地区碳固存的时空分布和总量变化特征

Fig.5 Characteristics of spatio-temporal distribution and total amount of carbon sequestration in western Sichuan from 2000 to 2020

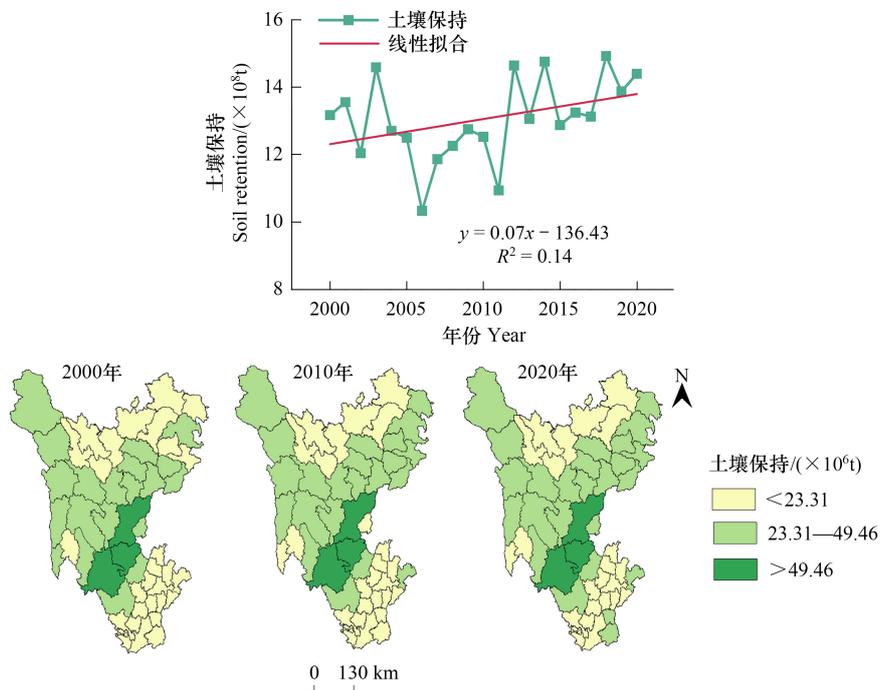


图 6 2000—2020 年川西地区土壤保持的时空分布和总量变化特征

Fig.6 Characteristics of spatio-temporal distribution and total amount of soil retention in western Sichuan from 2000 to 2020

型。似然比(Likelihood ratio, LR)检验和 Wald 检验结果表明,SDM 将退化为 SLM 或 SEM 的原假设在 1%和 5%的水平上被显著否定,时空双固定效应的 SDM 将退化为时间固定效应的 SDM 或空间固定效应的 SDM 的

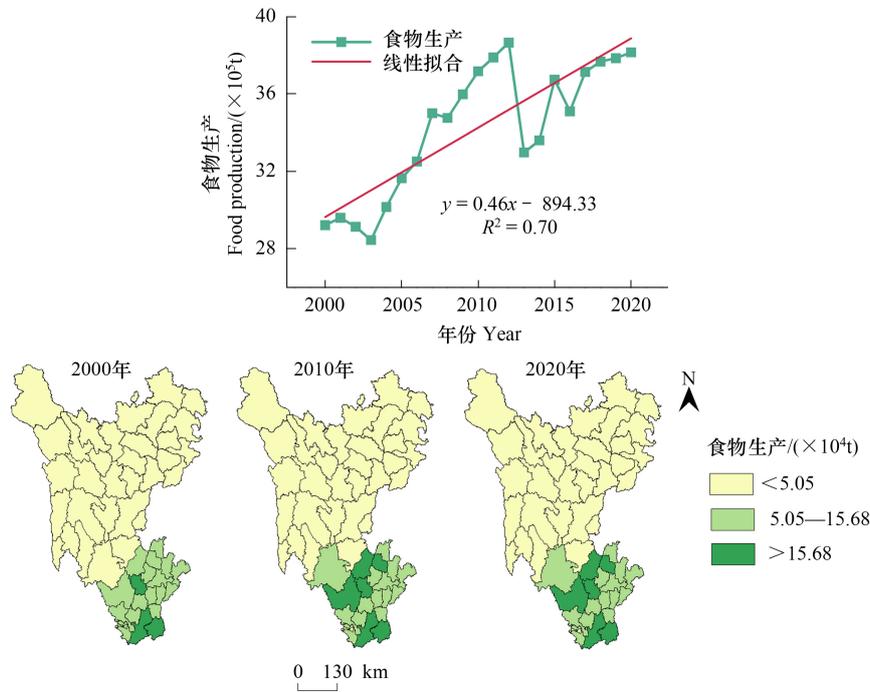


图 7 2000—2020 年川西地区食物生产的时空分布和总量变化特征

Fig.7 Characteristics of spatio-temporal distribution and total amount of food production in western Sichuan from 2000 to 2020

原假设在 1%的水平上被显著否定。因此,本研究采用时空双固定效应的 SDM 模型是合理的。

3.3.2 空间杜宾模型回归结果

本研究采用空间分解效应(直接效应、间接效应和总效应)的结果来解释生态系统服务对可持续发展目标的影响(表 3)。碳固存对 SDG1 的直接效应系数最大,达到 5.65,这意味着本县域碳固存提高 1%时,该县域的 SDG1 将会增加 5.65%。土壤保持对 SDG6 的直接效应系数为 1.21,食物生产对 SDG2 的直接效应系数为 0.52,表明土壤保持和食物生产的增加可以促进 SDG6 和 SDG2 的发展。从间接效应来看,碳固存服务对 SDG11、SDG4、SDG2 和 SDG1 的间接效应系数分别为 15.76、9.27、-9.09 和 8.19,这意味着本县域碳固存的增强可以促进邻近县域 SDG11、SDG4 和 SDG1 的发展,但会抑制邻近县域 SDG2 的发展。此外,碳固存的间接效应大于直接效应,说明其外溢作用更强。土壤保持与食物生产对 SDGs 的间接效应系数绝对值均低于 0.5 且间接效应小于直接效应,这表明尽管土壤保持与食物生产在可持续发展目标中发挥作用,但不容易产生外溢。在总效应中,碳固存对 SDG11、SDG1 和 SDG3 的系数分别为 18.33、13.84 和 10.06,对 SDG2 和 SDG8 的系数值为-14.45 和-8.41,这意味着县域碳固存对整个川西地区的 SDG11、SDG1 和 SDG3 具有显著促进作用,对 SDG2 和 SDG8 存在抑制作用。总体而言,根据系数值大小和显著水平,碳固存对可持续发展目标的影响更为强烈和显著,尤其是 SDG1、SDG2 和 SDG11。

3.3.3 稳健性检验

在这项研究中,通过改变空间权重矩阵对结果进行稳健性检验。采用地理距离权重矩阵代替 Queen 邻近矩阵,估计结果如表 4 所示。空间权重矩阵变换后,主要结果的显著性、系数值方向和相对大小与表 4 给出的结果基本保持一致,说明模型具有较好的稳健性。例如,碳固存对 SDG1,土壤保持对 SDG6 以及食物生产对 SDG2 都具有最强的正向直接影响;碳固存对邻近县域的 SDG11、SDG1 和 SDG3 有显著的正向影响,对 SDG2 和 SDG8 有显著的负向影响;碳固存对可持续发展目标的溢出效应明显强于土壤保持和食物生产。但碳固存对 SDG4 的影响与表 4 的情况存在差异,呈现出不显著。鉴于此,对于这些缺乏稳健性的变量关系,本文不再进行进一步的分析。

表 2 模型检验结果
Table 2 Results of model test

检验类别 Type of test	SDG1	SDG2	SDG3	SDG4	SDG6	SDG7	SDG8	SDG9	SDG11	SDG13	SDG15
LM 检验	298.52***	374.11***	460.70***	691.02***	971.75***	1578.36***	650.08***	1398.20***	1169.74***	1431.49***	1056.49***
LM test	24.73***	44.50***	4.29***	17.81***	158.04***	56.19***	14.06***	137.07***	4.88**	44.68***	78.14***
LM lag	278.70***	331.53***	467.20***	680.23***	817.00***	1523.00***	636.28***	1267.87***	1187.17***	1452.06***	1149.25***
R-LM lag	4.90**	1.92	10.80	7.02***	3.29**	0.83	0.26	6.74***	22.31***	65.25***	170.91***
豪斯曼检验 Hausman test	15.20**	25.07***	21.91***	26.63***	25.91***	28.70***	49.35***	16.22**	24.72***	24.01***	27.02***
LR 检验 LR test	63.80***	41.54***	18.39***	52.43***	84.30***	19.33***	37.38***	9.18**	12.16***	11.45***	50.98***
LR-err	37.93***	26.35***	55.40***	63.98***	17.54***	19.59***	36.87***	18.49***	49.52***	31.50***	40.28***
LR-sdm_time	2094.81***	1699.70***	909.69***	696.86***	2519.75***	2530.18***	2086.04***	2168.71***	1759.67***	3113.06***	1693.39***
LR-sdm_ind	493.83***	205.65***	391.62***	142.89***	163.49***	162.76***	409.30***	238.16***	608.51***	200.69***	100.73***
Wald 检验	64.08***	43.12***	18.23***	53.17***	89.37***	19.46***	37.16***	9.16**	12.13***	11.42***	52.26***
Wald test	37.09***	26.02***	54.56***	59.67***	17.02***	19.14***	36.28***	18.33***	48.21***	30.64***	41.02***

其中*、**和***分别表示在10%、5%和1%的显著性水平下显著;LR-lag和Wald-lag表示LR和Wald检验中SDM能退化或SLM的原假设;LR-err和Wald-err表示LR和Wald检验中SDM能退化或SEM的原假设;LR-sdm_time表示时间和空间固定效应的SDM将退化为时间固定效应的SDM,LR-sdm_ind表示时间和空间固定效应的SDM将退化为空间固定效应的SDM

表 3 SDM 的空间效应分解结果
Table 3 Decomposition results of spatial effects for SDM model

空间分解效应 Spatial decomposition effect	变量 variable	SDG1	SDG2	SDG3	SDG4	SDG6	SDG7	SDG8	SDG9	SDG11	SDG13	SDG15
直接效应 Direct effect	碳固存	5.65***	-5.36***	4.11***	-5.04***	-3.61***	-0.05	-2.46**	0.43	2.57	-0.11	-0.71
	土壤保持	-0.34***	0.11**	0.18*	-0.24**	1.21***	-0.01	-0.16***	-0.04	0.31***	0.03	-0.10***
	食物生产	0.01	0.52***	0.09***	-0.16***	0.02	0.02***	0.03	0.03**	0.12***	-0.01	0.05***
间接效应 Indirect effect	碳固存	8.19***	-9.09***	5.95***	9.27***	3.41*	-0.35	-5.95***	-1.60	15.76***	-0.39	4.50***
	土壤保持	0.05	0.10	0.02	0.41**	0.32***	0.05***	0.17	0.07	-0.27*	0.03	0.00
	食物生产	0.10*	0.08	-0.11	-0.40***	-0.03	0.00	0.07	-0.03	-0.18***	0.01	-0.18***
总效应 Total effect	碳固存	13.84***	-14.45***	10.06***	4.23	-0.20	-0.40	-8.41***	-1.16	18.33***	-0.50	4.29***
	土壤保持	-0.29***	0.21**	0.20	0.17	1.53***	0.03**	0.02	0.04	0.05	0.05**	-0.10*
	食物生产	0.12	0.60***	-0.02	-0.56***	-0.01	0.02	0.10	0.00	-0.05	0.01	0.13***

其中*、**和***分别表示在10%、5%和1%的显著性水平下显著

表 4 稳健性检验结果

Table 4 Results of robustness test

空间分解效应 Spatial decomposition effect	变量 Variable	SDG1	SDG2	SDG3	SDG4	SDG6	SDG7
直接效应 Direct effect	碳固存	6.40 ***	-6.52 ***	5.33 ***	-0.96	-2.55 ***	-0.07
	土壤保持	-0.31 ***	0.15 ***	0.18 **	-0.31 ***	1.31 ***	-0.01
	食物生产	0.02	0.52 ***	0.09 **	-0.14 ***	0.03	0.02 ***
间接效应 Indirect effect	碳固存	32.23 ***	-34.83 ***	23.35 ***	-4.41	-4.95	-1.49 *
	土壤保持	0.21	-0.39	0.33	2.94 ***	-0.19	0.06
	食物生产	0.20	0.64 ***	-0.82 **	-1.54 ***	0.04	0.03
总效应 Total effect	碳固存	38.63 ***	-41.35 ***	28.68 ***	-5.37	-7.50	-1.56 *
	土壤保持	-0.10	-0.24	0.51	2.63 ***	1.12 ***	0.06
	食物生产	0.22	1.15 ***	-0.73 *	-1.68 ***	0.07	0.05 *
空间分解效应 Spatial decomposition effect	变量 Variable	SDG8	SDG9	SDG11	SDG13	SDG15	
直接效应 Direct effect	碳固存	-2.26 **	0.75	4.39 ***	-0.38 ***	0.07	
	土壤保持	-0.14 **	-0.03	0.18 **	0.04 ***	-0.11 ***	
	食物生产	0.03	0.04 **	0.14 ***	0.00	0.05 ***	
间接效应 Indirect effect	碳固存	-20.19 ***	-10.10	40.86 ***	-10.16 **	15.02 ***	
	土壤保持	0.22	0.16	0.55	-0.10	0.10	
	食物生产	-0.01	-0.25	-0.68 ***	0.43 ***	-0.70 ***	
总效应 Total effect	碳固存	-22.44 **	-9.35	45.25 ***	-10.55 **	15.09 ***	
	土壤保持	0.08	0.13	0.73 **	-0.06	-0.01	
	食物生产	0.03	-0.21	-0.54 ***	0.43 ***	-0.65 ***	

4 讨论与结论

4.1 讨论

2000—2020年川西地区53个县域可持续发展水平整体提升,但SDG1(无贫穷)和SDG3(良好健康与福祉)表现较差。贫困是一个全球性与持久性的问题,严重制约可持续发展进程^[41]。2020年中国在现行标准下实现了国家级贫困县全部脱贫,但这并不意味着贫困的完全消除,相对贫困和多维贫困成为新阶段发展的重要特征,尤其是对地理环境复杂和生态环境脆弱的地区^[42]。川西地区稳固脱贫成果,增强居民抗风险的能力,防止返贫,是未来推进可持续发展工作的重点。川西北高原的可持续发展目标表现要优于其他地区,主要原因在于SDG13(气候行动)和SDG15(陆地生物)在川西北高原具有更高的得分。川西北高原相较于川西地区的东部和南部地区,自然地理环境更复杂,经济发展更落后,受人类活动的影响要小于其他地区,SDG13和SDG15表现良好,在整体可持续发展水平提升中发挥主要作用。

已有广泛的研究证实生态系统服务对实现可持续发展目标具有重要贡献^[43—44]。在本研究中,碳固存对SDG1具有显著的正向直接影响,对SDG2具有显著的负向影响。食物生产对SDG2和土壤保持对SDG6具有强烈的正向影响。这些结论与先前的研究相比^[17,45—47],显示了ESs对SDGs的影响方向和强度的相似性。不同于一些研究强调食物生产对实现多个SDGs具有明显的贡献^[48—49],研究中食物生产并未有更为优越的表现。相反,本研究发现碳固存对SDGs的影响系数明显大于土壤保持和食物生产,说明碳固存在促进川西地区可持续发展目标的实现过程中发挥着更重要的作用。这主要是因为川西地区森林和草地等高碳汇生态系统覆盖面积广,占有土地利用/覆被类型的90%以上,使得碳固存服务成为生态系统提供的主要服务类型。相比之下,受复杂的地形和气候条件限制,该地区生态系统提供的土壤保持和食物生产服务相对较低。因此,

碳固存服务对可持续发展目标的影响更显著。综合研究结论,本研究建议通过加强碳固存,进一步推动川西地区潜力目标 SDG1 和 SDG3 的发展。同时,政策制定中也需要考虑保护生态系统与发展农业和维持生计的平衡。

对 2000—2020 年川西地区 53 个县域的研究证明,ESs 与 SDGs 在地理相邻的县域单元之间存在空间溢出效应,证实了县域可持续发展目标的实现不仅需要考虑到本县域生态系统服务对其产生的影响还需要考虑邻近县域生态系统服务对其产生的影响。因此,本文建议应将空间自相关性和溢出效应纳入到政策制定、生态系统保护和可持续发展中,明确不同地区的责任主体,打破行政界线,进行跨区域合作,从区域一体化的角度协调生态、经济和社会目标之间的权衡以及相邻县域之间的利益冲突^[50]。然而,值得注意的是,土壤保持与食物生产对可持续发展目标的溢出效应较弱,碳固存对可持续发展目标产生较强的空间溢出效应。空间溢出效应的存在主要源于邻近区域之间的物质流动、能量流动和信息流动^[51]。相较于碳固存,生态系统提供的食物生产和土壤保持较弱,跨区域间的流动性不强。这削弱了食物生产和土壤保持在相邻县域的空间溢出效应,使它们对相邻县域 SDGs 的影响相对较弱。

本文基于研究区的实际情况,只选择了三种生态系统服务类型。川西地区整体生态环境要优于四川东部社会经济发达地区,对维持或提高区域碳汇具有重要的积极作用。但区域生态脆弱,自然灾害频发,水土流失严重。除此之外,供给服务与居民生存和生计具有直接的关系。因此,本研究选择了与当地可持续发展相关的碳固存、土壤保持和食物生产。未来,这项研究应该对更广泛且具有代表性的 ESs 展开分析,为 ESs 促进 SDGs 的发展提供更充分且准确的证据。由于连续数据获取的限制,本研究很难对可持续发展目标中所有子目标进行覆盖,在未来将进一步扩展数据源,对可持续发展目标进行更全面的衡量。

4.2 结论

本文以川西地区 53 个县域作为研究对象,估算了 2000—2020 年川西连续 21 年可持续发展目标的得分情况,确定了可持续发展目标的优先次序,量化了三种重要的生态系统服务,并揭示了生态系统服务对可持续发展目标的影响及空间溢出效应。本研究的结论能够为生态环境脆弱和经济发展落后地区可持续发展目标的研究提供有效的参考。得出如下结论:川西可持续发展目标整体水平提升,其中 SDG1 和 SDG8 呈现持续上升趋势。SDG7 和 SDG13 是优势目标,SDG1 和 SDG3 得分较低,是潜力目标;从空间上看,SDG13 和 SDG15 在川西北高原表现优于川西南山地,SDG1、SDG2、SDG6、SDG8 和 SDG9 在川西的东部和川西南地区的表现优于川西北高原。整体上,川西北高原的可持续发展水平较高。2000—2020 年,川西地区的碳固存和食物生产呈现线性增长趋势,土壤保持呈现明显的波动增长趋势。从空间上看,三种生态系统服务的县域空间分布相对稳定。川西地区碳固存服务与可持续发展目标之间的空间关联强于土壤保持和食物生产服务,说明碳固存服务是推动区域可持续发展目标实现的重要服务类型。此外,碳固存与 SDG1、SDG2 和 SDG11 之间存在明显的空间溢出效应,这表明需要通过协调本县域和邻近县域的综合努力来促进可持续发展目标的实现。

参考文献 (References):

- [1] 郭茹,戴欣宇,刘林京,曹晓静,陈玲. 可持续发展目标评价研究进展及中国实践. 生态经济, 2022, 38(1): 211-217.
- [2] 冯思远,赵文武,华廷,王涵. 后疫情时代全球可持续发展目标加速行动的推动. 生态学报, 2021, 41(20): 7955-7964.
- [3] Anderson C C, Denich M, Warchold A, Kropp J P, Pradhan P. A systems model of SDG target influence on the 2030 Agenda for Sustainable Development. Sustainability Science, 2022, 17(4): 1459-1472.
- [4] Pradhan P, Costa L, Rybski D, Lucht W, Kropp J P. A systematic study of sustainable development goal (SDG) interactions. Earth's Future, 2017, 5(11): 1169-1179.
- [5] Bali Swain R, Yang-Wallentin F. Achieving sustainable development goals; predicaments and strategies. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2020, 27(2): 96-106.
- [6] Kroll C, Warchold A, Pradhan P. Sustainable Development Goals (SDGs): are we successful in turning trade-offs into synergies? Palgrave Communications, 2019, 5(1): 140.
- [7] Xu Z H, Peng J, Liu Y X, Qiu S J, Zhang H B, Dong J Q. Exploring the combined impact of ecosystem services and urbanization on SDGs realization. Applied Geography, 2023, 153: 102907.
- [8] Yin C C, Zhao W W, Cherubini F, Pereira P. Integrate ecosystem services into socio-economic development to enhance achievement of sustainable

- development goals in the post-pandemic era. *Geography and Sustainability*, 2021, 2(1): 68-73.
- [9] DasGupta R, Hashimoto S, Gundimeda H. Biodiversity/ecosystem services scenario exercises from the Asia - Pacific: typology, archetypes and implications for sustainable development goals (SDGs). *Sustainability Science*, 2019, 14(1): 241-257.
- [10] Yang S Q, Zhao W W, Liu Y X, Cherubini F, Fu B J, Pereira P. Prioritizing sustainable development goals and linking them to ecosystem services: a global expert's knowledge evaluation. *Geography and Sustainability*, 2020, 1(4): 321-330.
- [11] Yang L, Zhou X P, Gu X K, Liang Y. Impact mechanism of ecosystem services on resident well-being under sustainable development goals: a case study of the Shanghai metropolitan area. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 103: 107262.
- [12] Zhang H Y, Jiang C, Wang Y X, Wang J, Li C F, Yang Z Y, Gong Q H, Yang C L. Improving the integrated efficacy of ecosystem restoration efforts by linking land degradation neutrality to ecosystem service enhancement from a spatial association perspective. *Ecological Engineering*, 2022, 181: 106693.
- [13] Guo J C, Jiang C, Wang Y X, Yang J, Huang W M, Gong Q H, Zhao Y, Yang Z Y, Chen W L, Ren H. Exploring ecosystem responses to coastal exploitation and identifying their spatial determinants: re-orienting ecosystem conservation strategies for landscape management. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108860.
- [14] 袁亮, 祁煜智, 何伟军, 吴霞. 新发展理念下长江经济带可持续发展能力评价及空间关联特征分析. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(10): 1993-2005.
- [15] Yin C C, Zhao W W, Ye J Q, Muroki M, Pereira P. Ecosystem carbon sequestration service supports the Sustainable Development Goals progress. *Journal of Environmental Management*, 2023, 330: 117155.
- [16] Qiu J Q, Yu D Y, Huang T. Influential paths of ecosystem services on human well-being in the context of the sustainable development goals. *Science of the Total Environment*, 2022, 852: 158443.
- [17] Liu Y X, Lü Y H, Fu B J, Zhang X. Landscape pattern and ecosystem services are critical for protected areas' contributions to sustainable development goals at regional scale. *Science of the Total Environment*, 2023, 881: 163535.
- [18] Xing L, Zhu Y M, Wang J P. Spatial spillover effects of urbanization on ecosystem services value in Chinese cities. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107028.
- [19] Chen W X, Chi G Q. Urbanization and ecosystem services: the multi-scale spatial spillover effects and spatial variations. *Land Use Policy*, 2022, 114: 105964.
- [20] 周斌, 邹强, 蒋虎, 李聪. 川西高原气候变化特征及泥石流流动态危险性响应研究. *自然灾害学报*, 2022, 31(4): 241-255.
- [21] 王叶兰, 杨鑫, 郝利娜. 2001—2021 年川西高原植被 NDMI 时空变化及影响因素分析. *自然资源遥感*, 2023, 35(3): 212-220.
- [22] Wei J X, Hu A, Gan X Y, Zhao X D, Huang Y. Spatial and temporal characteristics of ecosystem service trade-off and synergy relationships in the western Sichuan Plateau, China. *Forests*, 2022, 13(11): 1845.
- [23] Chen J D, Gao M, Cheng S L, Hou W X, Song M L, Liu X, Liu Y, Shan Y L. County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997—2017. *Scientific Data*, 2020, 7: 391.
- [24] Chen J D, Liu J L, Qi J, Gao M, Cheng S L, Li K, Xu C. City- and county-level spatio-temporal energy consumption and efficiency datasets for China from 1997 to 2017. *Scientific Data*, 2022, 9: 101.
- [25] Wang Y J, Wang M J, Huang B, Li S C, Lin Y H. Evaluation and analysis of poverty-stricken counties under the framework of the UN sustainable development goals: a case study of Hunan Province, China. *Remote Sensing*, 2021, 13(23): 4778.
- [26] 马延吉, 艾小平. 基于 2030 年可持续发展目标的吉林省城镇化可持续发展评价. *地理科学*, 2019, 39(3): 487-495.
- [27] 孙湛, 马海涛. 基于 BP 神经网络的京津冀城市群可持续发展综合评价. *生态学报*, 2018, 38(12): 4434-4444.
- [28] Hou L, Wu F Q, Xie X L. The spatial characteristics and relationships between landscape pattern and ecosystem service value along an urban-rural gradient in Xi'an city, China. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105720.
- [29] Ma S, Qiao Y P, Wang L J, Zhang J C. Terrain gradient variations in ecosystem services of different vegetation types in mountainous regions: vegetation resource conservation and sustainable development. *Forest Ecology and Management*, 2021, 482: 118856.
- [30] Fang L L, Wang L C, Chen W X, Sun J, Cao Q, Wang S Q, Wang L Z. Identifying the impacts of natural and human factors on ecosystem service in the Yangtze and Yellow River Basins. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 127995.
- [31] Liang J, Li S, Li X D, Li X, Liu Q, Meng Q F, Lin A Q, Li J J. Trade-off analyses and optimization of water-related ecosystem services (WRESs) based on land use change in a typical agricultural watershed, Southern China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123851.
- [32] Zheng T, Zhou Z X, Zou Y F, Pulatov B, Biswas A. Analysis of spatial and temporal characteristics and spatial flow process of soil conservation service in Jinghe Basin of China. *Sustainability*, 2021, 13(4): 1794.
- [33] Xu J R, Renaud F G, Barrett B. Modelling land system evolution and dynamics of terrestrial carbon stocks in the Luanhe River Basin, China: a scenario analysis of trade-offs and synergies between sustainable development goals. *Sustainability Science*, 2022, 17(4): 1323-1345.
- [34] Chen D S, Jiang P H, Li M C. Assessing potential ecosystem service dynamics driven by urbanization in the Yangtze River Economic Belt, China. *Journal of Environmental Management*, 2021, 292: 112734.
- [35] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, Tang Z Y, Wang W T, Zhao Y C, Wan H W, Xie Z Q, Shi X Z, Wu B F, Wang G X, Yan J H, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y X, Hu H F, He N P, Yang Y H, Han W X, He H L, Yu G R, Fang J Y, Zhou G Y. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [36] Zhu G F, Qiu D D, Zhang Z X, Sang L Y, Liu Y W, Wang L, Zhao K L, Ma H Y, Xu Y X, Wan Q Z. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107770.
- [37] Sun X Y, Lian W W, Gao T M, Chen Z Z, Duan H M. Spatial-temporal characteristics of carbon emission intensity in electricity generation and

- spatial spillover effects of driving factors across China's Provinces. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 405: 136908.
- [38] Yang W Y, Wang W L, Ouyang S S. The influencing factors and spatial spillover effects of CO₂ emissions from transportation in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 696: 133900.
- [39] Song M, Wu J, Song M R, Zhang L Y, Zhu Y X. Spatiotemporal regularity and spillover effects of carbon emission intensity in China's Bohai Economic Rim. *Science of the Total Environment*, 2020, 740: 140184.
- [40] Liu J J, Wang J, Tan Y. Spatiotemporal pattern and influencing mechanism of the flood-regulating ecosystem service capacity and demand in China's Yellow River basin, 2000 - 2020. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2023, 45: 101312.
- [41] 潘竞虎, 冯娅娅. 中国农村深度贫困的空间扫描与贫困分异机制的地理探测. *地理学报*, 2020, 75(4): 769-788.
- [42] 李文青, 赵雪雁, 何小风. 重点生态功能区农户相对贫困程度及影响因素——以陇南山区为例. *生态学报*, 2023, 43(19): 8206-8218.
- [43] Hawken S, Rahmat H, Sepasgozar S, Zhang K F. The SDGs, ecosystem services and cities: a network analysis of current research innovation for implementing urban sustainability. *Sustainability*, 2021, 13(24): 14057.
- [44] Xu Z H, Peng J, Qiu S J, Liu Y X, Dong J Q, Zhang H B. Responses of spatial relationships between ecosystem services and the Sustainable Development Goals to urbanization. *Science of the Total Environment*, 2022, 850: 157868.
- [45] Yin C C, Zhao W W, Pereira P. Soil conservation service underpins sustainable development goals. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 33: e01974.
- [46] Xu Z H, Peng J, Zhang H B, Liu Y X, Dong J Q, Qiu S J. Exploring spatial correlations between ecosystem services and sustainable development goals: a regional-scale study from China. *Landscape Ecology*, 2022, 37(12): 3201-3221.
- [47] Johnson J A, Jones S K, Wood S L R, Chaplin-Kramer R, Hawthorne P L, Mulligan M, Pennington D, DeClerck F A. Mapping Ecosystem Services to Human Well-being; a toolkit to support integrated landscape management for the SDGs. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2019, 29(8): e01985.
- [48] Wood S L R, Jones S K, Johnson J A, Brauman K A, Chaplin-Kramer R, Fremier A, Girvetz E, Gordon L J, Kappel C V, Mandle L, Mulligan M, O'Farrell P, Smith W K, Willemsen L, Zhang W, DeClerck F A. Distilling the role of ecosystem services in the Sustainable Development Goals. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 70-82.
- [49] Ma Z Y, Gong J Y, Hu C, Lei J P. An integrated approach to assess spatial and temporal changes in the contribution of the ecosystem to sustainable development goals over 20 years in China. *Science of the Total Environment*, 2023, 903: 166237.
- [50] Jiang C, Yang Z Y, Wen M L, Huang L, Liu H M, Wang J, Chen W L, Zhuang C W. Identifying the spatial disparities and determinants of ecosystem service balance and their implications on land use optimization. *Science of the Total Environment*, 2021, 793: 148472.
- [51] 李海峰, 罗琴瑶, 贺丝露, 任臻, 刘瑜. 地理空间因果原则及地理空间效应的因果发现. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(11): 1800-1812.