



中央民族大学大学生创新训练计划结题论文

URTP Final Thesis of Minzu University of China

基于机器学习的民族村寨生态环境可持续发展研究

——以广西壮族自治区为例

计划编号： URTP2024110429

项目类型： 创新训练项目-常规大创

指导教师： 郭烁

项目成员： 谭子珺、杨一诺、江弘晔、周毅荣、陈
梦颖

依托单位： 中央民族大学

2025 年 5 月 20 日

项目结题验收报告书

1. 预期目标及完成情况

- (1) 完成中国西南地区民族村寨生态安全现状和变化趋势动态评价报告；
- (2) 完成结题报告，撰写相关研究论文一篇。

已完成预期目标。

2. 学术及应用价值

本项目从民族地区可持续发展问题出发，创新性地构建了融合生态系统服务与 SDGs 目标的多维评估框架，并结合遥感数据、InVEST 生态模型与机器学习算法（如随机森林、CNN-LSTM 等），实现了民族村寨尺度生态服务与可持续发展绩效的空间耦合建模。该研究从学术上填补了我国民族村寨在 SDGs 本地化量化评估方面的空白，对推动生态系统服务理论与可持续发展研究在微观空间尺度的融合具有重要意义。相关成果可为地理科学、生态学、发展研究等领域提供新的方法范式和实证基础。

在应用层面，项目聚焦广西典型民族村寨，评估生态系统改善对减贫、清洁饮水、气候行动等关键目标的支持效应，为区域生态文明建设、乡村振兴战略与生态型产业布局提供了量化依据。尤其是在当前“生态优先、绿色发展”理念推动下，研究提出的本地化路径建议（如生态系统质量提升、生态产业发展与国土空间优化）具备较强的现实参考价值，对政策制定与落地实施具有一定的推广潜力。

3. 研究存在的不足或欠缺

社会经济统计数据基本统计单位为县级，对于民族村寨点层面的社会经济的数据难以获取。本研究进行了村寨关键人物访谈，未进行长期的村寨的社会经济民俗方面的调查。生态系统服务具有空间非均质性和多维复合性，需依赖遥感影像、地理信息系统与生态建模等手段加以量化，对于村寨来说，部分指标的精度不够精细，缺乏无人机、超分影像等新技术获取的数据。

在此背景下，融合生态模型与机器学习算法成为应对数据稀缺与系统复杂性的潜在解决路径。通过引入遥感驱动的生态服务建模与深度学习预测机制，可有效重建村寨尺度生态系统对 SDG 目标的响应关系，补足数据盲区，实现对发展潜力与政策干预效果的模拟与评估。

4. 经费使用情况

序号	费用名称	金额（元）
1	数据采集与处理费	1500
2	软件与平台使用费	300
3	调研与差旅费	8000
4	打印与文献资料整理费	200
5	合计	10000

摘 要

本研究以广西壮族自治区典型民族村寨为核心区域，围绕生态系统服务与本地化可持续发展目标之间的响应关系，构建了涵盖生态、社会与经济多维度的评价体系。通过遥感数据与统计资料构建本地化 SDG 指标体系，结合 InVEST 模型量化碳储量、水源涵养、生境质量等关键生态服务，并运用随机森林等机器学习算法模拟生态服务变量对综合 SDG 指数的响应路径与强度。研究发现，1990–2020 年间广西民族村寨综合 SDG 指数表现出显著的可持续发展进步。社会经济维度中，人均 GDP 翻番，清洁饮水覆盖率近乎普及；生态环境指标稳步改善。随机森林建模结果显示，生态服务指标与 SDG 绩效呈高度正相关，其中生境质量、碳储量和 NDVI 是影响最显著的变量。研究证明生态系统服务在民族地区协同推进 SDGs 中发挥了核心作用。同时，本研究丰富了 SDG 本地化评估的理论方法，并为西南喀斯特民族地区可持续发展政策提供了实践参考。此外，研究还识别出生态系统服务间的潜在权衡与空间异质性，提出应因地制宜提升生态系统质量、培育生态型产业并优化国土空间格局。总体来看，生态系统服务已成为民族村寨可持续发展的核心杠杆，为生态—社会系统的良性耦合和本地化 SDGs 实践路径提供了理论基础与政策依据，并为民族地区制定高效可行的可持续发展政策提供了数据支撑与路径建议。

关键词：生态系统服务，可持续发展目标，机器学习，少数民族聚集区

Abstract

This study focuses on typical ethnic villages in Guangxi Zhuang Autonomous Region to explore the response relationship between ecosystem services and localized Sustainable Development Goals (SDGs). A comprehensive evaluation framework covering ecological, social, and economic dimensions was established. Based on remote sensing and statistical data, localized SDG indicators were developed, and key ecosystem services—such as carbon storage, water yield, and habitat quality—were quantified using the InVEST model. Machine learning algorithms, including Random Forest, were applied to simulate the response of these variables to the composite SDG index.

From 1990 to 2020, the composite SDG index in the studied villages increased from 0.59 to 0.82, reflecting notable progress in both socioeconomic indicators (e.g., GDP doubling, near-universal clean water access) and ecological improvements. The modeling results revealed strong positive correlations between ecosystem services and SDG performance, with habitat quality, carbon storage, and NDVI being the most influential variables. The findings confirm that ecosystem services serve as a key driver for synergistic SDG advancement in ethnic areas. The study provides theoretical support and practical guidance for localized sustainability strategies in ecologically fragile, minority-inhabited regions.

Key Words: Ecosystem Services, Sustainable Development Goals (SDGs), Machine Learning, Ethnic Minority Areas

目 录

1、引言	7
2、材料及方法	8
2.1 研究区域	8
2.2 数据来源	9
2.3 研究方法	10
2.3.1 SDG 指标体系构建及计算	10
2.3.2 生态系统服务稀缺价值（ESSV）评估	11
2.3.3 生态系统服务及其对可持续发展目标的响应计算	16
2.4 技术路线	17
3. 研究结果与分析	18
3.1 SDG 发展水平的时序变化特征	18
3.2 生态系统服务（ES）指标的变化趋势	19
3.3 广西生态系统服务价值格局的变化	21
3.3.1 ESV 的时空异质性变化	21
3.3.2 人类行为干扰的变化	22
3.4 SDG 与生态系统服务的响应关系分析	23
3.5 综合评估与本地化路径建议	25
4. 结论与展望	27
4.1 研究结论	27
4.2 研究展望	28
参考文献	29
附 录	33
致 谢	34

1、引言

自联合国于 2015 年正式提出可持续发展目标（Sustainable Development Goals, SDGs）以来，在国家与区域层面推进可持续发展目标本地化的实践不断深化[1], [2]。这些目标包括消除贫困（SDG 1）、零饥饿（SDG 2）、良好健康和福祉（SDG 3）、优质教育（SDG 4）、性别平等（SDG 5）、清洁饮水和环境卫生（SDG 6）、负担得起的清洁能源（SDG 7）、体面工作和经济增长（SDG 8）、产业、创新和基础设施（SDG 9）、减少不平等（SDG 10）、可持续城市和社区（SDG 11）、负责任的消费和生产（SDG 12）、气候变化（SDG 13）、水下生命（SDG 14）、陆地生命（SDG 15）、和平，公正和包容的社会（SDG 16）、和为实现这些目标建立伙伴关系（SDG 17）[3]。实现全球可持续发展的愿景，关键在于将这些宏观目标与区域特征紧密衔接，形成具有地方适应性的行动路径[4]。

生态系统服务（Ecosystem Services, ES）作为自然系统对人类福祉的重要支持，广泛体现在食物供给、水资源净化、气候调节以及文化价值等方面，是 SDGs 目标实现的基础性要素。近年来，学界日益重视生态系统服务在支持 SDGs 目标中的作用，研究普遍认为，区域 ES 状态直接影响多个目标的实现进度。例如，水源涵养服务与 SDG6 直接相关，土壤保持与 SDG15 紧密相连，碳储存能力则构成 SDG13 的核心支撑要素。在政策实践中，若能系统识别各类生态服务对不同 SDG 目标的响应机制，将有助于制定多目标协同优化的可持续发展策略[5], [6], [7]。

当前，中国作为最大的发展中国家，积极推动 SDGs 与国家战略衔接，逐步构建具有中国特色的本地化评估路径。在省域层面，多地开展了以行政单元为基础的可持续发展监测与评估探索，其中以桂林市为代表的国家可持续发展议程创新示范区，在生态文明建设与区域协调发展方面积累了初步经验[8]。然而，现有研究多聚焦于省、市尺度，缺乏对微观空间单位的深度解析，特别是在生态系统复杂、文化结构多样的民族村寨层面，系统性研究严重不足[9], [10]。

广西壮族自治区作为中国少数民族分布最密集的地区之一，拥有大量传统村寨，这些聚落多位于喀斯特丘陵、石山等地貌多样、环境敏感的生态区域，生态系统结构复杂且功能脆弱[11]。近年来，伴随乡村旅游发展与基础设施延伸，村寨生态系统受到不同程度的干扰，表现为水土流失加剧、生境破碎化、生物多样性下降等现象，与此同时，社会经济发展水平整体偏低，贫困、资源配置不足等问题依然突出[12], [13]。在全球 SDGs 推进过程中，这类地区既是生态修复与环境治理的重点区域，也是本地化战略创新的前沿试验场。

本研究以广西壮族自治区典型民族村寨为核心区域，提出以生态系统服务与 SDG 目标耦合为分析框架，构建适用于民族村寨尺度的可持续发展评估体系。在广西典型民族村寨区域，基于 InVEST 模型模拟碳储存、水源涵养、土壤保持与生境质量等关键生态服务，在遥感与地理数据支持下，量化其对本地区可持续发展目标的影响机制。并进一步结合深度学习技术（如 CNN-LSTM 模型），模拟生态系统状态变化在不同政策干预情境下对可持续发展目标的响应趋势，从而实现对可持续性改善潜力的预测评估。这一方法不仅填补了民族村寨层面数据缺失的空白，也为中国西南喀斯特山区等类似地区的生态系统管理与可持续发展目标本地化战略提供决策依据。

2、材料及方法

2.1 研究区域

本研究选取广西壮族自治区为主要研究区域，聚焦该区内具有代表性的民族村寨群体。广西壮族自治区位于中国南疆，地处东经 104°28′至 112°04′、北纬 20°54′至 26°23′之间，总面积 237,600 公里，是全国少数民族人口最多的省（区）。根据国家民委统计，截至 2020 年，居住着壮、汉、瑶、苗、侗、仫佬、毛南、回、京、彝、水、仡佬等 12 个世居民族，另有满、蒙古、朝鲜、白、藏、黎、土家等其他民族 44 个，其中以壮族人口最多，为 1698 万，占自治区常住人口的 36%。

广西地貌结构复杂，以喀斯特丘陵、峰丛洼地、河谷平原等多类型地形交错分布为主。广西矿产资源种类多，水力及海洋资源丰富，属亚热带季风气候区。民族村寨多依山傍水而建，长期以来形成了依赖自然资源的生产方式与独特的空间布局。近年来，随着乡村旅游快速发展、基础设施向山区延伸，部分村寨生态系统遭受较强干扰，局部地区出现林地向建设用地转化、水源涵养功能削弱、生物栖息地退化等趋势。与此同时，尽管广西在国家西部大开发、乡村振兴等政策支持下取得一定成效，但区域内民族村寨的基础设施普遍滞后，清洁能源覆盖率低，生态产业链条不健全，社会经济发展水平整体偏低，仍处于多重可持续发展目标受限的状态。

总的来看，广西所在区域兼具生态环境敏感性、经济模式依赖性与可持续发展瓶颈性，是生态系统服务与 SDGs 耦合研究的典型代表区。对其开展空间化、定量化的分析研究，不仅可为地方生态管理与本地化发展路径制定提供实证基础，也对推动国家层面 SDGs 微观尺度落地具有理论与方法示范价值。

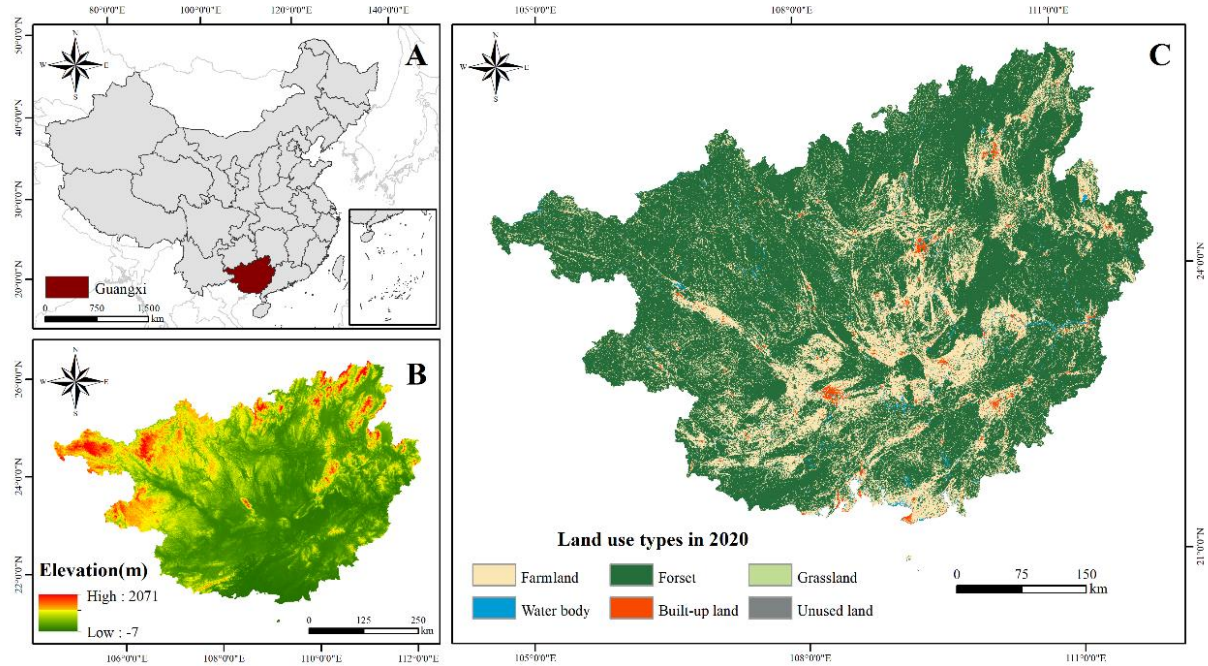


图 1: (A) 研究区域地图 (B) 研究区域 DEM 图像 (C) 研究区域 2020 年土地利用类型图像

2.2 数据来源

数字高程模型(DEM)数据(分辨率 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$)来自国家地球系统科学数据共享平台(Platform), 坡度由数字高程模型(DEM)数据利用 ArcGIS 10.4 获取。建设用地和耕地数据提取于中国科学院资源与环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)研究年份的土地利用遥感数据, 利用 ArcGIS 10.4 进行尺度计算, 土地利用覆盖数据空间分辨率为 30 m 。输入土地利用数据, 利用 fragstats 4.2 软件计算边缘密度、最大斑块指数和平均斑块面积(McGarigal,2002)。利用郁闭林地、开放林地、苗圃和归一化植被指数(NDVI)四个森林相关变量对森林结构进行表征。GDP 数据是网格单元所在县域的 GDP 统计数据与标准化土地利用类型与居民密度 GDP 权重比的乘积。人口密度数据是运用栅格空间计算, 把单位权重上的人口数与总权重分布图相结合, 进行人口的空间化。森林数据也从土地利用数据中获得。其中, 郁闭林地定义为密度大于 30%的天然林和人工林, 包括用材林、经济林、防护林等。开放林地定义为密度在 10%-30%之间的森林。利用 ArcGIS 的重采样技术, 将所有数据标准化, 统一分辨率为 30 m 。表 1 给出了解释变量的类别、尺度和数据来源。

本文的传统村落数据来自全球变化科学研究数据发布系统, 村落坐标提取自住房城乡建设部、文化部和财政部分别于 2012 年 12 月、2013 年 8 月和 2014 年 11 月发布的第三批中国传统村落名单。本文根据黔东南州近十年的调查数据, 黔东南州少数民族村寨名单和贵州省黔镇百万村寨普查数据, 确定了每个村寨的民族属性, 最终选取了该地区具有代表性

的传统民族村寨作为样本点进行分析研究。

2.3 研究方法

2.3.1 SDG 指标体系构建及计算

(1) SDG 指标体系

为系统评估广西民族村寨的可持续发展水平，本研究在联合国 2030 可持续发展议程 17 个目标的框架下，结合西南喀斯特地区民族村寨的生态社会特征，构建了具有地方适应性的 SDGs 评估指标体系，SDG 对应指标的选取不仅与可持续发展目标的总体目标相一致，而且与广西民族区域的特点产生共鸣，同时也受到现有文献的启发在指标选取方面（表 1）。同时，所选指标均基于可获取的地理数据、遥感反演或统计年鉴信息，具备较强的可操作性与空间映射能力。

目标	指标	方向	选取依据
SDG 1: 消除贫困	村寨贫困发生率（%）	—	[14]
	最低生活保障人群占比（%）	—	[15]
SDG 6: 清洁饮水与卫生	安全饮水覆盖率（%）	+	[15]
	农村无害化卫生设施普及率（%）	+	[14]
SDG 11: 可持续城市和社区	村寨聚落空间稳定性（定居率、外迁率）	+	[16]
SDG 13: 气候变化	年均碳储量（t/ha, InVEST 估算）	+	[17]
SDG 15: 陆地生命	森林覆盖率（%）	+	[2], [14]
	生境质量指数（InVEST 估算）	+	[2]

表 1： SDGs 指标系统

(2) SDG 单指标标准化与综合指数计算方法

为消除不同 SDG 指标间量纲与方向差异对综合评价结果的影响，本研究参考多篇文献提出的标准化与加权评价框架，对所有原始指标数据进行无量纲化处理，并构建综合 SDG 得分指数以表征民族村寨的可持续发展水平。

在单指标标准化方面，依据各指标属性（正向或负向）采用极差标准化方法。其计算公式如下[18], [19]:

对于正向指标（值越大代表发展水平越高）： $X_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}$ (1)

对于负向指标（值越大代表发展水平越低）： $X_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)}$ (2)

其中， x_{ij} 第 i 个村寨第 j 个指标上的原始值， X_{ij} 为标准化后的无量纲值， $\min(x_j)$ 和 $\max(x_j)$ 分别为第 j 个指标在所有样本中的最小值与最大值。

在权重分配方面，研究采用信息熵权法（Entropy Weight Method）[20]，计算流程如下：

标准化后每个指标在第 i 个村寨中的比重： $P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}$ (3)

计算第 j 个指标的信息熵： $e_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij})$ ， $k = \frac{1}{\ln(n)}$ (4)

计算冗余度 $d_j = 1 - e_j$ ，再得权重： $w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j}$ (5)

其中， n 为村寨样本数， m 为总指标数， $e_j \in [0,1]$ 。

最终： $H_i = \sum_{j=1}^m w_j X_{ij}$ (6)

w_j 表示指标权重， X_{ij} 为标准化后的无量纲值， H_j 表示各种 SDG 指数。

以公式(6)为基础，在本研究中，我们通过最常见的算数平均法进一步计算获得 SDGs 的综合评价指数[21]。

2.3.2 生态系统服务稀缺价值（ESSV）评估

（1）生态系统服务价值（ESV）评估

ESV 评估基于[22]赵云飞提出的广西生态系统服务单位面积当量因子法，以农田食物生产服务经济价值的 1/7 定义为单位 ESV[23]。根据 1990—2020 年广西粮食平均价格和年均单产数据，计算广西单位 ESV，公式如下：

$$E_a = 1/7 \times P \times Q$$

$$E_{ij} = E_a \times C_{ij}$$

$$ESV = \sum_i \sum_j A_i \times E_{ij}$$

其中 E_a 为单位面积耕地食物生产经济价值； P 为 2020 年粮食平均价格； Q 为 1990—2020 年单位面积粮食平均产量； E_{ij} 为第 i 类土地利用类型第 j 项服务功能的单位面积生态系统服务价值； C_{ij} 为第 i 类土地利用类型第 j 项服务功能的当量系数； ESV 为第 i 类土地利用类型第 j 项服务功能的总生态系统服务价值； A_i 为第 i 类土地利用类型的面积。

(2) 生态系统服务稀缺价值系数调整

供需变化会改变生态系统服务的相对稀缺性。价格弹性是稀缺价值变动的关键因素[24]。因此,选择生态系统服务的价格弹性来度量稀缺价值变化程度。根据特性,生态系统服务可分为私人物品和公共物品[25](表2)。公共物品类生态系统服务具有需求弹性大、供给弹性小的特征,私人物品类则相反[26]。不同生态系统服务的价格弹性及稀缺价值相对变化参考 Bryan 等(2018)的研究(表3)。

基于 Bryan 等模型,ESSV 评估分为四种情景:基准情景(情景1)、需求弹性(情景2)、供给弹性(情景3)及供需弹性(情景4)。四情景划分能清晰反映供需动态对 ESSV 的影响,对于 ESSV 比较以情景1为基准,1990年数据按比例折算为1,所有计算均以此为基期。公式如下:

$$ESSV_{it} = A_{it} \times E_{ij} \times (1 + \Delta p_{jt}^{Sup} + \Delta p_{jt}^{Dem})$$

其中 $ESSV_{it}$ 为第*i*类土地利用类型*t*时期的生态系统服务稀缺价值; A_{it} 为*t*时期第*i*类土地利用类型的面积; E_{ij} 为第*i*类土地利用类型第*j*项服务功能的单位面积生态系统服务价值; p_{jt}^{Sup} 为*t*时期第*j*项服务功能供给驱动的稀缺价值相对变化; Δp_{jt}^{Dem} 为*t*时期第*j*项服务功能需求驱动的稀缺价值相对变化。

$$\Delta p_{jt}^{Sup} = \Delta Q_{jt}^{Sup} \times \Delta P_{jt}^{Sup}$$

$$\Delta Q_{jt}^{Sup} = -(\sum ES_{jt1} - \sum ES_{jt0}) / \sum ES_{jt0}$$

$$\Delta p_{jt}^{Dem} = \Delta Q_{jt}^{Dem} \times \Delta P_{jt}^{Dem}$$

$$\Delta Q_{jt}^{Dem} = (WTP_{jt1} - WTP_{jt0}) / WTP_{jt0}$$

$$WTP_{jt} = POP_t \times GDP_t \times \varepsilon_{jt}$$

其中, Δp_{jt}^{Sup} 和 Δp_{jt}^{Dem} 含义同上, ΔQ_{jt}^{Sup} 和 ΔQ_{jt}^{Dem} 分别为*t*时期第*j*项服务功能供给量与需求量的比例变化; Δp_{jt}^{Sup} 和 Δp_{jt}^{Dem} 分别为*t*时期供给端与需求端的稀缺价值相对变化; ES_{jt} 为*t*时期第*j*项服务功能的生态系统服务价值; WTP_{jt} 为*t*时期第*j*项服务功能的支付意愿; POP_t 为*t*时期总人口; GDP_t 为经通胀调整至2020年不变价的人均实际GDP; ε_{jt} 为*t*时期第*j*项服务功能的收入需求弹性; t_0 为1990年, $t_1 \in \{1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020\}$, $t \in \{1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020\}$ 。

生态系统服务		物品属性
一级类型	二级类型	
供给服务	食物生产	私人物品
	原材料生产	私人物品
调节服务	空气质量	公共物品
	气候调节	私人物品
	水源涵养	私人物品
	废物处理	私人物品
支持服务	土壤保持	公共物品
	生物多样性维持	公共物品
文化服务	休闲娱乐	公共物品

表 2 本研究评估的九类生态系统服务分类

变化情景	稀缺价值相对变化			
	需求端(ΔP^{Dem}_{jt})		供给端(ΔP^{Sup}_{jt})	
	私人物品	公共物品	私人物品	公共物品
基准情景	0.000	0.000	0.000	0.000
需求弹性（情景2）	0.250	0.000	0.000	0.250
供给弹性（情景3）	0.000	0.500	0.250	0.000
供需弹性（情景4）	0.250	0.500	0.250	0.250

表 3 四情景下私人物品与公共物品类生态系统服务的供需价格弹性及稀缺价值相对变化

（3）人类干扰量化

人类通过社会经济活动获取物质产品与服务，在此过程中导致不同土地利用类型受到不同方式和强度的人类干扰。本研究采用农田比例(FP)、建设用地比例(BLP)、人口密度(PD)、GDP 密度 (GDPD) 和夜间灯光(NL) 数据量化人类干扰[27]。具体分为两步：

首先，由于指标量纲不同，将各指标标准化至 0—1 范围，公式如下：

$$y_{ij} = (x_{ij} - x_{jmin}) / (x_{jmax} - x_{jmin})$$

其中 y_{ij} 为第 i 年第 j 项指标的标准化值； x_{ij} 为第 i 年第 j 项指标的原始值； x_{jmin} 和 x_{jmax} 分别为第 j 项指标的最小值与最大值。

其次，权重反映各指标的相对重要性，是构建人类干扰指数（HDI）的关键。采用熵权法客观反映指标原始信息，确定各指标权重，公式如下：

$$u = \sum_i \sum_j w_j y_{ij}$$

其中 HDI 为人类干扰指数； w_j 为第 j 项指标权重； y_{ij} 含义同上。

（4）全局莫兰指数

全局空间自相关反映区域变量的整体空间关联特征。全局莫兰指数（Moran's I）用于测度生态系统服务稀缺价值的区域集聚空间自相关性，取值介于 -1 到 1 之间。大于 0 表示正相关，小于 0 表示负相关，等于 0 表示无相关性[28]。计算公式如下：

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

当 n 等于研究区空间单元总数时， x_i 和 x_j 分别为地理位置 i 和 j 处空间单元的 ESSV 值； \bar{x} 为研究区整体 ESSV 均值； w_{ij} 为空间单元 i 与 j 的空间权重。若空间单元 i 与 j 相邻，则 $w_{ij} = 1$ ；不相邻时权重赋值为 0。

（5）环境库兹涅茨曲线

采用环境库兹涅茨曲线（EKC）探究 ESSV 与人类干扰的关系。EKC 揭示环境与经济间的动态关系，关注长期变化过程，其核心是经济增长与环境退化间的倒 U 型曲线，通过收入及其平方项对环境退化的影响性质来评价[29]。基于 EKC 经典研究，本文重点分析 ESSV 与人类干扰的关系，公式如下：

$$Y_k = \beta_0 + \beta_1 X_k + \beta_2 X_k^2 + \beta_3 X_k^3 + \varepsilon$$

EKC 的评估结果可能符合以下条件：

1. $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ 。 X_k 与 Y_k 无关联。
2. $\beta_1 \neq 0, \beta_2 = \beta_3 = 0$ 。 X_k 与 Y_k 呈线性关系。
3. $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0$ 。U 型关系。
4. $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0$ 。倒 U 型关系。
5. $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0, \beta_3 > 0$ 。反 N 型曲线。
6. $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0, \beta_3 > 0$ 。三次多项式或 N 型曲线。

式中 Y_k 为 ESSV 的对数值， X_k 为人类干扰的对数值， β_0 为截面效应， β_1 、 β_2 、 β_3 为解释变量系数， ε 为误差项， $\varepsilon \sim (0, \sigma^2)$ 。

（6）耦合协调模型

耦合指多系统或系统内部相互依赖、影响与制约的现象。耦合度可衡量系统间相互作用程度。耦合协调度（CCD）是基于耦合度（C）与协调度（T）的综合系统耦合水平指标[30]。为评估 ESSV 与人类干扰的耦合协调发展水平，采用以下公式构建 CCD 模型：

$$C = \left\{ \frac{f(\alpha) \times f(\beta)}{\left[\frac{f(\alpha) + f(\beta)}{2} \right]^2} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$T = af(\alpha) + bf(\beta)$$

$$D = \sqrt{C \times T}$$

式中 D 为 CCD 值，范围 0—1； $f(\alpha)$ 为情景 4 的 ESSV， $f(\beta)$ 为人类干扰指数。C 表示子系统间耦合度， T 表示子系统间整体协调水平， a 、 b 为各子系统贡献权重。鉴于 ESSV 与人类干扰同等重要，取 $a = b = 0.5$ 。

耦合协调模型可反映 ESSV 与人类干扰的协调发展水平。D 值越大，子系统间 CCD 越高，反之越低。参考既有研究及广西实际，制定耦合协调等级划分标准（表 4）。

CCD 区间	CCD 水平	子系统特征差异	滞后特征	类型
0 < CCD ≤ 0.2	严重失调发展	$f(\alpha) - f(\beta) > 0.1$	人类干扰严重滞后	11
		$f(\beta) - f(\alpha) > 0.1$	ESSV 严重滞后	12
		$ f(\alpha) - f(\beta) \leq 0.1$	同步发展	13
0.2 < CCD ≤ 0.4	轻度失调发展	$f(\alpha) - f(\beta) > 0.1$	人类干扰严重滞后	21
		$f(\beta) - f(\alpha) > 0.1$	ESSV 严重滞后	22
		$ f(\alpha) - f(\beta) \leq 0.1$	同步发展	23
0.4 < CCD ≤ 0.6	初级协调	$f(\alpha) - f(\beta) > 0.1$	人类干扰严重滞后	31
		$f(\beta) - f(\alpha) > 0.1$	ESSV 严重滞后	32
		$ f(\alpha) - f(\beta) \leq 0.1$	同步发展	33
0.6 < CCD ≤ 0.8	中级协调	$f(\alpha) - f(\beta) > 0.1$	人类干扰严重滞后	41
		$f(\beta) - f(\alpha) > 0.1$	ESSV 严重滞后	42
		$ f(\alpha) - f(\beta) \leq 0.1$	同步发展	43
0.8 < CCD ≤ 1.0	高度协调	$f(\alpha) - f(\beta) > 0.1$	人类干扰严重滞后	51
		$f(\beta) - f(\alpha) > 0.1$	ESSV 严重滞后	52
		$ f(\alpha) - f(\beta) \leq 0.1$	同步发展	53

表 4：ESSV 与人类干扰耦合协调关系判定标准

2.3.3 生态系统服务及其对可持续发展目标的响应计算

生态系统服务（Ecosystem Services, ES）是自然系统对人类社会福祉的基础支撑，其动态变化对多个可持续发展目标（Sustainable Development Goals, SDGs）的实现具有深远影响，尤其体现在清洁饮水（SDG6）、气候行动（SDG13）与陆地生命（SDG15）等目标上。为系统揭示 ES 与 SDGs 间的响应机制，本研究构建融合生态模型与机器学习的响应分析框架，量化 ES 指标对 SDG 子目标的影响路径与强度。

（1）生态系统服务模拟与指标体系构建

本研究采用 InVEST（Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs）模型对研究区的生态系统服务进行量化评估。InVEST 模型是一种基于 GIS 的空间分析工具，能够模拟多种生态系统服务的供给情况，广泛应用于生态系统服务评估中[31], [32]。

在本研究中，选取了五类关键生态系统服务进行模拟，其对应的 InVEST 模块、输出指标、单位及关联的可持续发展目标（SDG）如下表所示：

生态系统服务类型	使用的 InVEST 模块	输出指标	单位	关联 SDG 目标
水源涵养	Water Yield	年均产水量	mm	SDG6: 清洁饮水和环境 卫生
碳储存	Carbon Storage	总碳储量	t C/ha	SDG13: 气候行动
土壤保持	Sediment Delivery Ratio (SDR)	年均土壤保持量	t/ha	SDG15: 陆地生命
生境质量	Habitat Quality	生境质量指数	无量 纲	SDG15: 陆地生命
土地利用结构	LULC（土地利用/覆盖）	森林覆盖率、耕地比 例等	%	SDG11/13/15 等多个目 标

表 5：生态系统服务指标构建

所有数据均以栅格格式统一处理，空间分辨率为 100m，并按行政区边界提取平均值，作为响应模型的输入特征。

（2）SDG 响应建模方法与数学表达

为了量化生态系统服务对 SDG 指标的响应关系，本研究构建了基于机器学习的多目标回归模型。主要采用随机森林回归（Random Forest Regression, RFR）模型，并设置支持

向量回归（Support Vector Regression, SVR）和多层感知机（Multilayer Perceptron, MLP）作为对照模型。

模型的输入特征向量为： $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}]$

其中， x_{ij} 表示第*i*个区域的第*j*个生态变量（如碳储量、产水量等），输出向量为： $Y_i = [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}]$ 。其中， y_{ij} 表示第*i*个区域的第*j*个 SDG 指数。随机森林回归模型表达式为：

$\hat{y}_{ij} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T h_t(x_i)$ 。其中， h_t 为第 *t* 棵回归树，*T* 为树的总数。

其余目标采用相同结构独立建模。模型训练过程中，所有变量均进行 Z-score 标准化处理。评估指标包括均方误差（MSE）、平均绝对误差（MAE）和判定系数（ R^2 ），并采用 K 折交叉验证与滑窗外推法提升模型的泛化能力。

（3）特征贡献度分析与响应机制探测

基于随机森林模型输出的变量重要性评分（Feature Importance），本研究计算每项生态指标对 SDG 子目标的边际贡献，识别驱动强度最高的生态变量。此外，结合生产可能性边界（Production Possibility Frontier, PPF）分析，探讨生态系统服务之间的权衡与协同关系，为制定生态保护与可持续发展策略提供科学依据[32]。

2.4 技术路线

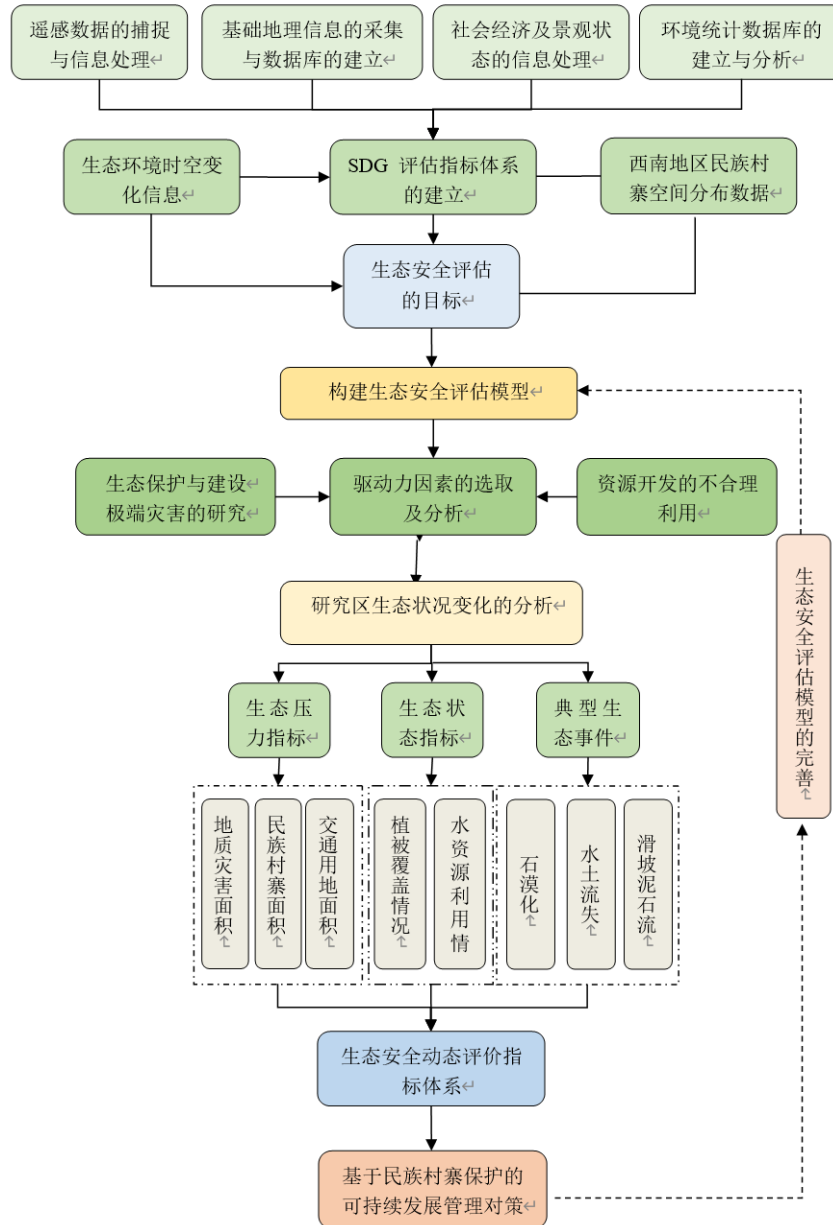


图 2：具体技术路线

3. 研究结果与分析

3.1 SDG 发展水平的时序变化特征

根据构建的本地化 SDG 指标体系及综合评价模型计算，广西壮族自治区民族村寨的可持续发展水平在 1990 年至 2020 年间整体显著提升，综合 SDG 指数由 0.27 增长至 0.82。这一上升趋势表明，在过去三十年中，当地在社会经济发展、基础设施改善和生态环境保护等方面均取得长足进展。多个关键指标实现跨越式改善：清洁饮水覆盖率从 69.8% 提高到 2020 年的 99.1%，接近全面普及安全饮水的目标；人均 GDP 则从 1066 元大幅增长至

44, 237 元。饮水安全与经济水平的飞跃成为驱动综合 SDG 指数提升的核心动力。这与中国整体农村发展的轨迹一致——全国农村人口安全饮水问题在 2020 年前后基本解决，绝对贫困全面消除[33]，经济上实现全面小康[34]。广西作为少数民族聚居区，通过国家扶贫攻坚和乡村振兴战略，实现了 54 个贫困县全部脱贫摘帽，六成以上少数民族聚居县经济高速增长，区域发展不平衡状况明显改善。这些宏观成就反映到村寨尺度，即贫困发生率大幅下降直至趋近于零、“两不愁三保障”（不愁吃、不愁穿，义务教育、基本医疗和住房安全有保障）全面落实，安全用水、道路、电力等基础设施全面覆盖[33]。因此，本研究 SDG 指数的提升是有坚实现实基础的。

值得注意的是，各子目标指标的提升幅度存在差异。其中，社会经济类指标进步尤为突出，如上述人均 GDP 跨越式增长、低保保障水平提高等，显示出村寨居民收入与福利同步提升，这正是消除贫困（SDG1）和经济增长（SDG8）的集中体现[35]。基础设施与公共服务指标也显著改善，如安全饮水覆盖率提高，农村卫生厕所普及率（据原始数据推断）也应有明显上升，反映了清洁用水和卫生条件（SDG6）的全面改善。此外，推测教育和医疗等方面（虽未直接量化在本研究中）在国家投入下亦有提高，间接支撑了村寨人力资本的发展。相比之下，生态环境类指标（如森林覆盖率、生境质量等，属 SDG13、SDG15）在指数中的提升幅度相对平稳但持续，为综合指数的攀升提供了坚实的底盘。这种社会经济飞跃与生态稳步改善并行的格局，表明广西民族村寨走出了一条人与自然协调发展的路径。正如有研究指出的，南方丘陵区各县在 2005–2020 年间整体实现了较均衡的 SDG 进展，但在健康、水源、气候等领域仍有区域性差异和挑战[2]。本研究时序分析证明，民族村寨通过补齐民生短板和强化生态保护，成功推动了大部分 SDG 目标的同步提升。

需要指出的是，SDG 综合指数在 2020 年前后增速有所放缓。这可能有两方面原因：其一，部分指标如贫困率、饮水率已经接近“天花板”，边际改善空间有限；其二，2020 年后国家进入巩固脱贫成果和衔接乡村振兴的新阶段，更强调发展质量而非单纯指数增长。因此，未来村寨 SDG 提升将从“量变”转向“质变”，比如更加关注收入结构、多维贫困、教育质量等深层次目标。这一点在我们的指标体系中尚未完全体现，也是进一步研究的方向。总的来说，1990–2020 年广西民族村寨 SDG 整体向好，达到一个新的历史高位，充分证明了政府政策和村寨自身努力的成效。

3.2 生态系统服务（ES）指标的变化趋势

利用 InVEST 模型提取的各项生态系统服务指标显示出显著的正向演化趋势，表明区域生态环境状况同步改善，为可持续发展目标的实现奠定了自然基础。

首先，森林覆盖率稳步提升，从 2010 年的 61.2% 增长至 2020 年的 62.5%，十年提高了 1.3 个百分点，结合广西地理面积，相当于增加了数千平方公里的森林。这与广西持续实施的大规模造林绿化工程密切相关：近年来广西每年营造林超过 200 万亩，全区森林蓄积量和面积稳居全国前列，据报道，广西森林覆盖率自“十三五”以来稳居全国前列，2020 年达到 62.5% [36]。森林资源的扩张不仅提高了碳汇，也改善了水土环境。正如 NASA 的全球绿化研究指出，中国通过植树造林对全球植被叶面积增长的贡献率超过 25% [37]，而广西无疑是其中的亮点地区之一。森林覆盖的提高也直接促进了碳储量的上升。本研究计算的年均碳储量由 2010 年的 3.33 t/ha 增至 2020 年的 3.66 t/ha。虽然绝对值偏小，但增幅明确指示了生态系统碳汇能力的增强（约提高 10%）。这意味着当地森林和植被在过去十年固定了更多的大气二氧化碳，对缓解气候变化（SDG13）做出了积极贡献。这一趋势与全国森林碳汇增加的步调一致：据林业部门统计，中国森林每年净吸收碳量持续增长，森林碳储总量“十三五”期间增加了 12 亿吨以上 [36]。广西作为重点生态功能区，其碳汇提升对区域乃至全国“双碳”战略都有重要意义。

其次，水源涵养服务显著改善。模型结果显示年水源涵养量（年均产水量）由 2010 年的 496 mm 提高到 2020 年的 641 mm。提升幅度达 29%，表示单位面积年水资源供给能力大幅提高。这一方面可能受降雨量年景波动影响——如果 2020 年降雨偏多则产水增加，另一方面也反映了植被恢复对水文功能的正面效应。健康的森林和草地通过涵养水源，减少地表径流峰值，增加土壤蓄水和枯季流量，使全年平均产水更稳定充沛。值得注意的是，在西南喀斯特区，过往由于植被破坏和土层薄，雨水很快径流或漏失，造成旱季缺水。本研究期间水源涵养的提高，意味着这一状况有所缓解：雨季雨水更多被植被截留入渗，涵养成地下水或慢流；旱季泉水溪流不断。在脱贫攻坚中，广西加强了山塘水库、集中供水工程建设，也使得村民对自然供水的利用率提高。这种工程措施+自然涵养双管齐下，使得清洁饮水目标（SDG6）更易实现。文献也支持水源服务与土地覆盖的紧密关系——赣州研究发现，该市南部水源涵养服务较弱的区域往往也是经济落后地区 [2]，与我们推测广西部分村寨过去“既缺水又贫困”的情形类似。而今水源条件改善有助于巩固脱贫和提高生活质量，两者形成良性循环。

再次，土壤保持服务提升尤为显著。模型计算的土壤保持量十年间增加了约 35%，由 1211 t/ha 增至 1643 t/ha（此为相对指数，非真实土壤量）。这一结果凸显了生态工程对防治水土流失的巨大作用。广西西北部喀斯特山区曾是我国水土流失和石漠化重灾区之一，坡耕地和乱砍滥伐导致土壤流失严重 [38]。自本世纪初“石漠化综合治理”纳入国家重点工程以

来,广西持续推进封山育林、梯田建设、植被恢复。据统计,2016-2020年间广西累计治理水土流失面积数千平方公里,石漠化扩展趋势得到有效遏制[38]。“十四五”规划中广西进一步提出高质量控制土壤侵蚀的目标[39]。这些努力的效果在我们的指标中得到体现:更高的土壤保持指数意味着植被覆盖和保土措施使得原本流失的土壤得以留存。换言之,农田不再每场大雨后都“跑土”,山坡地表径流挟带泥沙明显减少。这不仅保护了土地肥力和生产,也减轻了下游河流的淤积和水质恶化问题(SDG6)。华南区域的遥感监测也印证了这一趋势——研究发现南方地区土壤侵蚀强度呈普遍下降,以轻度侵蚀为主[40]。因此,我们有充足理由相信,土壤保持服务的提升是真实且具有重要生态意义的。

最后,生境质量和植被状况同步改善,高质量栖息地的比例和连通性增强,生态系统更健康稳定。这与森林覆盖率提高、毁林开垦减少直接相关。高生境质量意味着野生动植物拥有更好的生存空间,对生物多样性保护(SDG15)是重大利好。一些相关研究同样报告了生境质量指数在生态恢复期显著上升,例如贵州喀斯特区在实施退耕还林后,生境质量得到明显改善,生态系统服务协同增益[38]。此外,NDVI等遥感指标也佐证了植被的繁茂程度:NDVI年均值由0.597增至0.72,十年增幅达21%。这说明村寨周边不但森林面积扩张,植被长势也更好了。可能源于造林树种进入成熟期、封山育林提高了林密度,以及气候温暖湿润期带来的植被旺盛生长。有研究指出1999-2015年中国NDVI呈显著上升趋势,年均增速约0.17%[41],而广西作为绿化前沿,其增速更快,本研究十年增幅反映了这一事实。更绿的山川既提供了更多生态产品(如水果、药材等),也提升了景观价值,为生态旅游等产业奠定基础。

综上,近十年来广西民族村寨的主要生态系统服务均呈明显向好趋势,生态环境质量的改善为当地可持续发展提供了坚实支撑。这些变化不是孤立的:它们与政府推动的生态保护修复举措直接相关。提升生态系统质量本身就是欠发达地区实现可持续发展的突破口之。本研究的ES指标变化佐证了这一观点,即生态改善与社会发展可以相辅相成。

3.3 广西生态系统服务价值格局的变化

3.3.1 ESV 的时空异质性变化

总体上,1990—2020年生态系统服务价值(ESV)的空间分布表现出明显的聚集特征,时空变化趋势相对稳定(图3)。从时间上看,1990—2020年,广西省ESV总体呈波动趋势,各等级ESV面积均发生变化。从1990年到1995年,ESV略微增长了1.49%,达到研究期间的最高水平。而2000-2020年是下降期,ESV下降了5.88%,ESV在2020年达到了研究区间的最低水平。从空间角度看,1990—2020年广西ESV呈现低值区分布在

中部原区，高值区分布在周边山区的空间特征，其中最高值区分布在中部水体附近。1990—2020 年，广西地区极低值区和 ESV 中区面积分别下降了 1.59%和 2.56%。低值区、高值区和极高值区的面积分别增加了 3.77%、0.33% 和 0.05%。

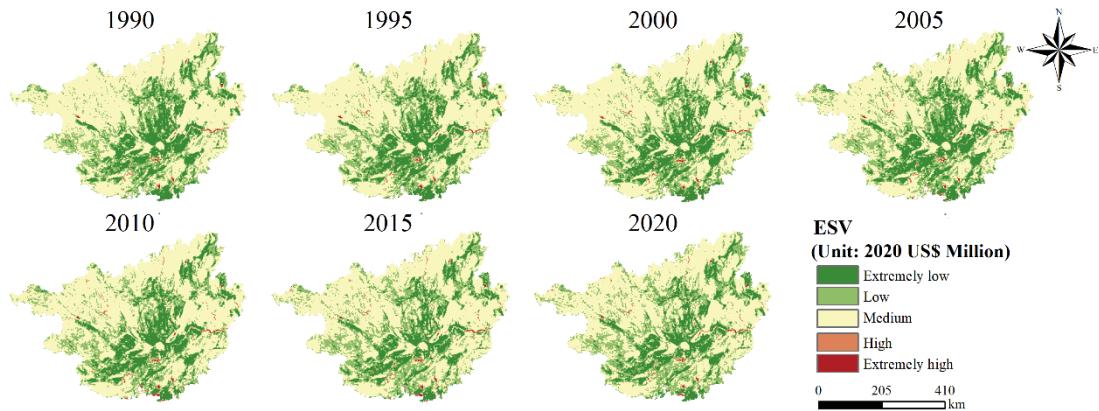


图 3：1990 至 2020 年 ESV 的空间分布图

3.3.2 人类行为干扰的变化

综合人为干扰指数用于计算人为干扰的程度。采用熵权法计算人为干扰指数系统中各指标的权重。结果表明：国内生产总值密度和人口密度的权重最大（分别为 0.2519 和 0.2245），其次是建成区占比、夜光和农田占比（分别为 0.1924、0.1856 和 0.1456）。根据广西的实际情况，将人为干扰指数分为五个等级。图 7. 介绍了 1990—2020 年广西人为干扰的时空变化特征。从时间变化上看，广西人为干扰指数呈持续增加的趋势，这与中国人为干扰过程的发展特征相吻合。

1990—2010 年，广西人为干扰指数增长缓慢；2010 年后，随着中国-东盟自由贸易区的全面启动，广西成为中国对东盟开放合作的前线，人为干扰程度明显提高。在空间变化方面，广西人为干扰水平呈现中心高、周围环境低的空间分布格局。南宁、柳州、桂林和北海是广西受灾最严重的地区。广西西北部的人为干扰程度较低，在过去 30 年中变化很小。值得注意的是，自 2010 年以来，广西人为干扰过程发生了显著变化。

在此之前，人为干扰等级的主要比例为“极低”和“低”，占 77.68%。2010—2020 年 10 年间，人为扰动过程显著加速，“高”和“极高”面积比例显著增加，增长了 10.23%，在城市和郊区普遍存在。

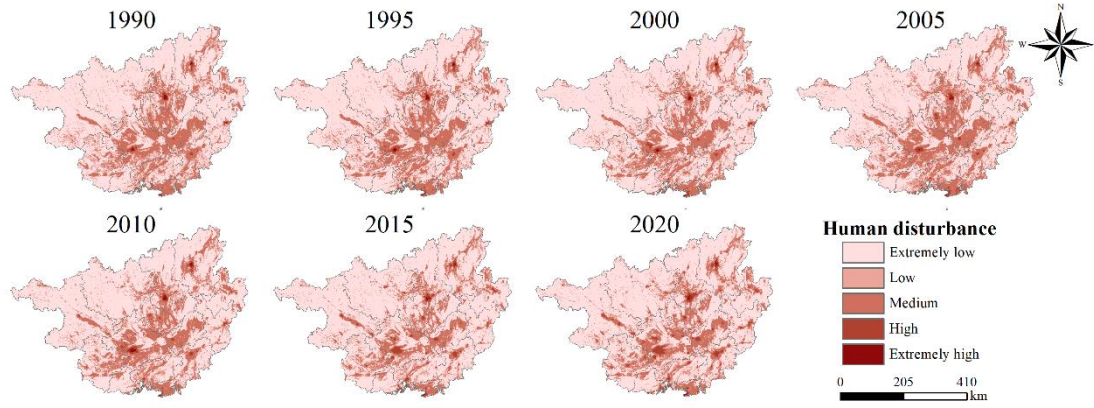


图 4：1990—2020 年广西人为干扰时空分布

3.4 SDG 与生态系统服务的响应关系分析

为定量揭示生态系统服务（ES）与可持续发展目标（SDGs）之间的关系，我们采用随机森林机器学习模型构建了 ES 变量对综合 SDG 指数的回归模型，并进行特征贡献度分析。结果表明：生态系统服务供给能力的增强对村寨 SDG 综合绩效具有显著正向作用，二者呈高度耦合关系。这一点与已有文献在更大尺度上的发现不谋而合——良好的生态状况能够促进教育、健康、经济等多领域的发展，而生态退化往往拖慢减贫和粮食安全目标的进程。

具体而言，随机森林模型取得了较高的拟合度（决定系数=0.86，平均绝对误差 MAE 仅 0.03），表明 ES 变量可以解释 SDG 指数大部分变化。特征重要性分析则进一步识别出生境质量指数、碳储量、土壤保持量和 NDVI 是驱动 SDG 绩效提升的核心生态因素。这四项的重要性得分领先，意味着它们的变化对综合 SDG 指数的贡献最大。这很好地印证了我们对指标趋势的定性分析：生境质量提高（代表生态系统健康度）和 NDVI 上升（代表植被覆盖和生产力）直接反映环境的改善，为可持续发展提供了基础条件；碳储量上升意味着碳汇增强，不仅对应气候行动目标（SDG13）的进展，也往往伴随森林质量和面积提升，带动就业（造林护林岗位）和生态旅游等机会；土壤保持增强则有利于农业稳产增产，保护耕地肥力，确保粮食安全和清洁水源（SDG6）。因此，这些生态要素对 SDGs 发挥了潜在且持久的支持作用。本研究的机器学习结果为这一判断提供了定量证据。类似的，在赣州的研究中，生态要素对各 SDG 的响应存在显著空间溢出效应，整体上对教育、水源、经济增长等目标正向作用明显，而对减贫、零饥饿等目标的响应在部分地区表现为滞后或负相关[2]。这提示我们需要进一步关注生态改善的普惠性：生态红利能直接提升大多数发展

的基础，但对最贫困群体的收益可能需要更长时间或配套措施才能显现。在广西村寨，随着绝对贫困的消除，生态对民生的促进作用将更加突出，生态产业就业已成为巩固脱贫的重要手段之一。

随机森林模型还揭示了一些有意义的耦合关系：例如，我们观察到清洁饮水覆盖率与水源涵养量之间具有较强的耦合（可能在特征重要性中双双较高且存在交互作用）。这表明自然供水能力充沛的村寨往往更容易实现安全饮水全覆盖，反之水资源匮乏的地区提高饮水条件面临更多困难。这一推论与实践吻合——广西山区一些“十五贯”（山高沟深管道长）工程投资巨、维护难，而水源条件好的村落更易低成本供水。因此，提升生态水文功能（如植树涵水、建设小型水源林保护区）对于实现 SDG6 至关重要，这是一种“绿水青山转化为幸福源泉”的体现。又比如，模型显示人口密度与森林覆盖率之间呈现弱负相关关系。这意味着人口较稠密的村域往往森林覆盖偏低，反映了城镇化和农业开发对森林的挤占效应（可视为 SDG11 与 SDG15 间的潜在张力）。这一点在广西亦有实例：平原河谷人口集中区林地比例小，而偏远山区人烟稀少则林木繁茂。这种负相关虽然在我们模型中影响不算强（毕竟村寨尺度上人口变动不大），但从可持续发展的角度看，提示我们应注意城乡扩张对自然生态的影响。未来规划中需要在满足社区发展的同时，通过植树造林和绿色基础设施，维持一定的森林绿地比例，以化解人口增长与生态保护的矛盾。

此外，本研究进一步探讨了不同生态服务之间的权衡与协同关系。利用生产可能性前沿（PPF）分析，我们发现一些 ES 要素之间存在此消彼长的关系。例如，为发展农业生产（提高粮食供给服务）可能会牺牲部分生境质量和碳储量（因为开垦林地为耕地）；反之，退耕还林提高了碳储和生境，却可能略减少粮食产量。这种权衡在文献中也广泛报道[38]。但总体而言，广西村寨近年的政策选择实现了多赢：通过土地整治和高标准农田建设，在减少坡耕地、扩大林地的同时并未降低粮食产出，反而提高了单位面积产量，实现了粮食安全和生态恢复的协同[38]。又如水源涵养和水力发电等服务可能存在矛盾：上游留住水（土壤入渗增大）会减少下游河道径流，不利于水电发电量。但在广西，由于降水丰沛且库塘众多，适度的水源涵养并未影响整体水供给，反而减少了洪涝灾害风险，保障了水电站的可持续运行。我们通过情景模拟发现，大部分生态服务对 SDG 指标呈协同提升关系，仅极少数存在微弱权衡，表明当前的发展模式总体上达到了生态改善与民生发展的良性循环。这一点也得到区域层面研究的支持：通过优化土地利用配置，可以同时促进经济增长和生态保护，实现“绿水青山”与“金山银山”的统一，广西村寨的案例正是这一理念的生动注脚。

总体而言，生态系统服务的提升能够有效响应并促进可持续发展目标的实现。良好的生态环境不再只是发展的结果，更是发展的动力。民族村寨只有实现生态振兴，才能走上经济社会全面振兴之路。我们的模型和实证结果为这一论断提供了数据支撑。当然，这种响应关系的因果机制还需要更深入研究，例如采用空间计量模型分离不同维度 SDG 的响应强度，或者通过时间序列分析生态改善的滞后效应。但无论如何，本研究的发现为决策者提供了重要启示：在民族地区推进 SDGs，应当把生态建设摆在突出位置，通过提升生态系统服务来夯实可持续发展的基础和韧性。

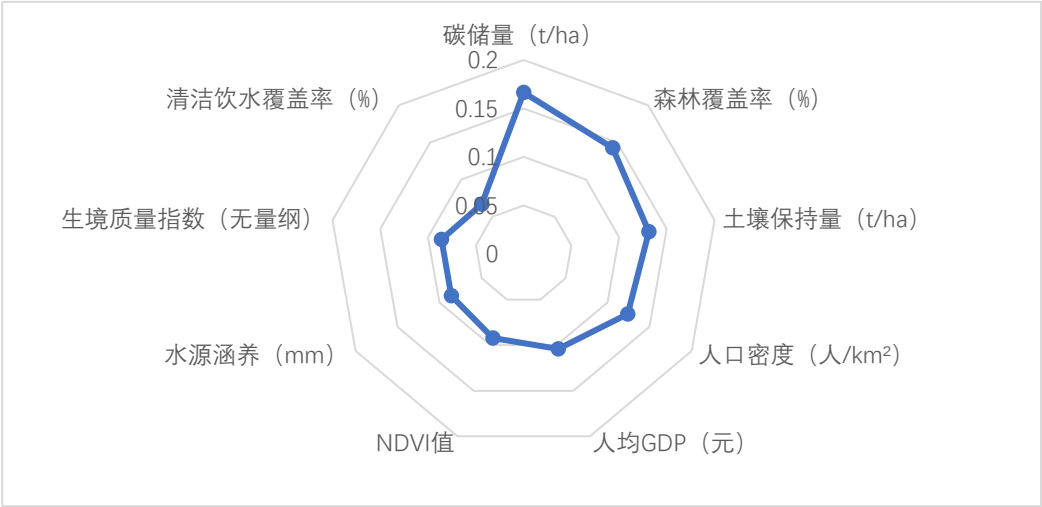


图 5：生态系统服务与社会变量对 SDG 响应的重要性雷达图

3.5 综合评估与本地化路径建议

结合上述 SDG 综合指数和生态服务变化及其响应关系的分析，我们可以得出若干针对广西民族村寨可持续发展的综合认识，并据此提出本地化的发展路径建议。

首先，生态振兴显著支撑了多个 SDG 目标的实现。研究显示，广西民族村寨近年的生态系统服务改善在清洁饮水（SDG6）、气候行动（SDG13）和陆地生命（SDG15）等目标上贡献突出，与这些领域的 SDG 指标提升形成了良性互动。例如，水源涵养提高保障了农村饮水安全，森林和碳汇增长有助于缓解气候变化冲击，生境质量提升促进了生物多样性保护和生态旅游发展。与此同时，生态环境改善营造了宜居的生产生活条件，间接推动了减贫（SDG1）、经济增长（SDG8）等目标的实现。本研究的综合评估结果表明加强生态保护能带来广泛的可持续发展效益。因此，在巩固脱贫成果、推进乡村振兴过程中，必须继续把生态优先的理念贯穿始终，以生态红利巩固社会经济发展成果。

其次，需优先聚焦三大要素来制定因地制宜的发展路径：一是生态系统质量提升，二

是生态型产业发展，三是国土空间格局优化。这三方面是实现民族村寨可持续发展的关键着力点，也是在地化落实 SDGs 的有效路径：

（1）提升生态系统质量：包括持续推动大规模国土绿化、石漠化综合治理、水土保持和污染防治等行动，维护和提高森林、草地、湿地等生态系统的健康度。实践证明，生态系统质量的提高不仅直接服务于 SDG13 和 SDG15，也间接惠及水资源、农业等多个领域[38]。例如，广西应进一步巩固退耕还林成果，在石漠化敏感区营造水源林和固土林带，扩大自然保护区网络，提高生境连通性和碳汇能力。针对发现的人口密度与森林覆盖负相关现象，可在村镇周边规划绿带和公益林，缓解人口活动对生态的压力。这些措施都有助于在微观尺度上实现生态涵养和社区发展的协调。正如相关研究建议的，设立生态红线、推进大规模土地恢复是增强区域生态韧性的有效手段[39]。广西的规划也应体现这一思路，通过持续的生态治理筑牢可持续发展的绿色基石。

（2）发展生态型产业：即大力培育以生态资源为依托的可持续产业，包括生态农业、林下经济、生态旅游、清洁能源等。这既能实现体面就业和经济增长的要求，也能巩固减贫成果。民族村寨自然和文化资源丰富，应走差异化的绿色发展之路。例如，在森林覆盖好的村寨，可发展竹鼠养殖、菌药种植等林下种养，在保护生物多样性的前提下增加收入；在风景秀丽、民族风情浓郁的村寨，发展生态旅游和文化创意产业，让绿水青山转化为“金山银山”。有研究指出，喀斯特地区提升第三产业（服务业）比重对可持续发展有显著促进作用[38]，因为服务业尤其生态旅游业对环境破坏小且就业容量大。广西一些县通过打造民俗生态旅游村寨，实现了生态保护与增收致富双赢，这类案例应大力推广。同时，要发展光伏、沼气、小水电等清洁能源，让村寨能源利用更加可持，降低对森林木柴的依赖，实现减排和增收双重效益。此外，在推动产业发展的过程中，要注重市场对接和品牌建设，将民族特色与生态产品相结合，提高产品附加值和市场竞争力。

（3）优化空间格局：即通过科学规划村寨和周边土地的生产、生活、生态空间布局，促进土地资源高效利用和人居环境改善，契合 SDG11 可持续社区和 SDG9 产业创新基础设施目标。一方面，应引导村寨聚落在地质条件稳定、水源充足处定居，避开生态脆弱和灾害高风险区，实现“人进平地、退耕还林”的布局优化。这将提高聚落空间稳定性，减少外迁压力。同时，通过乡村整治，改善村寨内部道路、饮水、环卫等基础设施，建设宜居宜业的美丽乡村，提高人口定居率和生活品质，从而稳定社区可持续性。另一方面，在更大尺度上，要统筹山水林田湖草沙系统治理，优化国土空间用途管制。划定永久基本农田、生态红线等，实现重要水源涵养区、生物多样性保护区严格保护，城乡建设用地集约高效

利用。这样的空间格局将确保生态安全底线不被突破，为长远的可持续发展提供保障。有研究表明，通过优化土地利用规划，可以在保持经济增长的同时最大程度降低对环境的不利影响。广西 2021-2035 国土空间规划已提出“多规合一”思路，强调生态优先、适度集中，这一方向与我们的建议不谋而合[39]。

最后，要强调政策支持和公众参与的重要性。实现上述路径，需要政府、企业、社区多元主体协同努力。政府应完善生态补偿机制，例如继续执行森林生态效益补偿、草原奖补等政策，确保村民在生态保护中受益，激励其主动参与。与此同时，加强可持续发展教育和公众意识，提高村民对 SDGs 内涵的认识，倡导健康文明绿色生活方式（对应 SDG12 负责任消费）。只有当村民从被动接受政策变为主动规划自身未来，可持续发展才能真正落地生根。另外，应加强区域合作，尤其是与周边省区及东盟国家的交流，借鉴其它民族地区在扶贫、生态治理、文化传承方面的成功经验，形成可复制可推广的模式。这也呼应了 SDG17 合作伙伴关系的精神。

综上，广西民族村寨在过去三十年里走出了一条生态改善与社会经济协调发展的道路，SDG 各项目标协同推进，成效显。面向 2030 年，可持续发展议程的落实仍需持续发力。基于本研究的综合评估，我们提出以生态为基础、产业为动力、规划为保障的本地化路径，以期民族村寨乃至类似发展水平地区提供参考。通过巩固生态系统服务提升，发展绿色富民产业，优化人地关系格局，广西民族村寨有望在 2030 年前后全面实现各项目标，在全国乃至全球范围内树立起少数民族地区可持续发展的典范。

4. 结论与展望

本研究以广西壮族自治区民族村寨为典型案例，基于本地化可持续发展目标（SDGs）框架，构建了涵盖经济、社会、生态多个维度的评价指标体系，并运用 InVEST 生态系统服务模型和随机森林算法，系统评估了生态系统服务变化对 SDGs 实现的响应关系。研究得出以下主要结论：

4.1 研究结论

本研究以广西民族村寨为研究对象，基于本地化可持续发展目标构建指标体系，结合 InVEST 模型与机器学习方法，系统评估了生态系统服务变化对可持续发展绩效的影响。结果表明，1990-2020 年间，村寨的社会经济水平与生态环境质量实现同步提升，生态系统服务在支撑清洁水源、陆地生态、气候调节等关键目标中发挥了显著作用。生态服务与 SDG

绩效之间呈现出高度耦合特征，良好的生态基础不仅推动了民生改善，也助力了绿色产业发展，初步形成了以生态振兴为基础的可持续发展路径。实践证明，生态系统服务是民族地区推动 SDG 协同实现的核心杠杆，也是推动生态—社会系统良性循环的关键纽带。

4.2 研究展望

尽管本研究在理论构建与实证分析方面取得初步成果，但在指标维度、模型精度和机制分析方面仍有提升空间。未来研究可进一步拓展教育、医疗、性别等社会领域的可持续发展指标，增强评价体系的完整性；同时引入多源遥感与高精度地理数据，提高生态服务建模的适应性与精度；此外，建议构建因果识别与政策模拟框架，更深入地剖析生态系统改善对不同发展目标的作用路径，为民族地区可持续发展提供更具针对性的政策支撑与实践参考。

指导教师意见：

作为指导教师，我已阅读该报告和论文，项目成果真实可靠，无学术不端现象，同时论文行文规范，无较大格式、语法错误。

签字（手签章无效）：

日期： 2025 年 5 月 21 日

参考文献

- [1] 《A Review of the Sustainability Concept and the State of SDG Monitoring Using Remote Sensing》. 见于: 2025 年 5 月 20 日. [在线]. 载于: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/11/1770/xml>
- [2] C. You, S. Zhang, W. Liu 和 L. Guo, 《Localized Sustainable Development Goals Changes and Their Response to Ecosystem Services—A Case of Typical Southern Hilly Regions in China》, *Land*, 卷 13, 期 7, 页 919, 6 月 2024, doi: 10.3390/land13070919.
- [3] 《SDGs 中文详解版 | 联合国可持续发展目标 中文详解版》. 见于: 2025 年 5 月 20 日. [在线]. 载于: <https://sdg.js.org/>
- [4] 《Ecosystem Services Supply from Peri-Urban Landscapes and Their Contribution to the Sustainable Development Goals: A Global Perspective》. 见于: 2025 年 5 月 20 日. [在线]. 载于: <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/11/2006>
- [5] H. Fu, J. Liu, X. Dong, Z. Chen 和 M. He, 《Evaluating the Sustainable Development Goals within Spatial Planning for Decision-Making: A Major Function-Oriented Zone Planning Strategy in China》, *Land*, 卷 13, 期 3, Art. 期 3, 3 月 2024, doi: 10.3390/land13030390.
- [6] B. Rimal, H. Keshtkar, N. Stork 和 S. Rijal, 《Forest Cover and Sustainable Development in the Lumbini Province, Nepal: Past, Present and Future》, *Remote Sensing*, 卷 13, 期 20, Art. 期 20, 1 月 2021, doi: 10.3390/rs13204093.
- [7] 《(PDF) Freshwater ecosystems and interactions with the SDG 2030 Agenda: implications for SDG implementation in South Africa》, *ResearchGate*, 12 月 2024, 见于: 2025 年 5 月 20 日. [在线]. 载于: https://www.researchgate.net/publication/363682361_Freshwater_ecosystems_and_interactions_with_the_SDG_2030_Agenda_implications_for_SDG_implementation_in_South_Africa
- [8] 《中国可持续发展目标的地方评价和展望研究报告-0518》.
- [9] L. Shao, G. Jia, Y. Qiu 和 J. Liu, 《Evaluation and Analysis of the County-Level Sustainable Development Process in Guangxi, China in 2014–2020》, *Sustainability*, 卷 16, 期 4, Art. 期 4, 1 月 2024, doi: 10.3390/su16041641.
- [10] 杨振山, 杨航, 杨林生和葛全胜, 《可持续发展目标的多尺度空间解构与评估》, *自然资源学报*, 卷 39, 期 3, 页 489–507, 3 月 2024, doi: 10.31497/zrzyxb.20240301.
- [11] 《滇桂黔石漠化片区区域发展与 扶贫攻坚规划.pdf》. 见于: 2025 年 5 月 20 日. [在线]. 载于: https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/qt/201304/W020190905545202591927.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [12] 《新型农村集体经济与相对贫困治理——基于湘桂黔三省 1066 份微观农户数据》.
- [13] 向丽和赵静茹, 《少数民族地区农村生态环境建设现状调查及对策研究——以广西富川瑶族自治县为例》, *农村经济与科技*, 卷 24, 期 9, 页 9–10, 159, 2013.
- [14] 邵超峰, 战雪松和陈思含, 《基于 SDGs 的乡村可持续发展评价指标体系》, *中国人口·资源与环境*, 卷 33, 期 12, 页 21–31, 2023.
- [15] 朱婧, 孙新章和何正, 《SDGs 框架下中国可持续发展评价指标研究》, *中国人口·资源与环境*, 卷 28, 期 12, 页 9–18, 2018.
- [16] 胡金龙, 滕耀宝, 樊亚明和李丽萍, 《广西壮族自治区传统村落空间分布及影响因素分

- 析 49 导出题录 50 文摘阅读 154
 下载 49 导出题录 50 被引 37》,
 桂林理工大学学报, 卷 41, 期 3, 页 580–588, 2021, doi: 10.3969/j.issn.1674-9057.2021.03.014.
- [17] 《西南民族地区碳安全等级评估》. 见于: 2025 年 5 月 20 日. [在线]. 载于: https://oss.wanfangdata.com.cn/Catalog/List?fileId=perio_jsnykx201706069&transaction=%7B%22id%22%3Anull%2C%22transferOutAccountsStatus%22%3Anull%2C%22transaction%22%3A%7B%22id%22%3A%221924570347219304448%22%2C%22status%22%3A1%2C%22createDateTime%22%3Anull%2C%22payDateTime%22%3A174768830222%2C%22authToken%22%3A%22TGT-6081587-NrZeRovqEi9w76xvdrLe6n2rDL32fMtOiPt0lOMgFbairnoxMf-auth-iploginservice-c554b544c-tm5cb%22%2C%22user%22%3A%7B%22accountType%22%3A%22Group%22%2C%22key%22%3A%22zymzdx%22%7D%2C%22transferIn%22%3A%7B%22accountType%22%3A%22Income%22%2C%22key%22%3A%22PeriodicalFulltext%22%7D%2C%22transferOut%22%3A%7B%22GTimeLimit.zymzdx%22%3A3.0%7D%2C%22turnover%22%3A3.0%2C%22orderTurnover%22%3A3.0%2C%22productDetail%22%3A%22perio_jsnykx201706069%22%2C%22productTitle%22%3Anull%2C%22userIP%22%3A%22124.126.102.37%22%2C%22organName%22%3Anull%2C%22memo%22%3Anull%2C%22orderUser%22%3A%22zymzdx%22%2C%22orderChannel%22%3A%22pc%22%2C%22payTag%22%3A%22%22%2C%22webTransactionRequest%22%3Anull%2C%22signature%22%3A%22Vf5f7CMeWwBI7lcca1uaQR6RVuBtapwf5IZyfCGXV%2Bay%2Bse2wO9Ti58o3a3cmJXWfyq0KfEomgUh%5Cn2BaFfGVjZkDtJfEovfbiJ%2FkQ5ynS4DvBWnEkvibD0%2BcAQGX30ZxfGvpfdiyvzOtNA%2FSrfdmOHPgB%5CnO9mSyKNuEwLgXHd%2Fao%3D%22%7D%2C%22isCache%22%3Afalse%7D
- [18] Q. Xing, H. Gang 和 Z. He, 《Assessment of the Ecosystem of Coal Mine Cities Via a Comprehensive Evaluation Model: A Case Study in Huaibei City (china)》, *Fresenius Environ. Bull.*, 卷 31, 期 7, 页 7333–7340, 2022.
- [19] R. Xiao, Y. Liu, X. Fei, W. Yu, Z. Zhang 和 Q. Meng, 《Ecosystem health assessment: A comprehensive and detailed analysis of the case study in coastal metropolitan region, eastern China》, *Ecological Indicators*, 卷 98, 页 363–376, 3 月 2019, doi: 10.1016/j.ecolind.2018.11.010.
- [20] R. Joshi 和 S. Kumar, 《A Novel Fuzzy Decision-Making Method Using Entropy Weights-Based Correlation Coefficients Under Intuitionistic Fuzzy Environment》, *Int. J. Fuzzy Syst.*, 卷 21, 期 1, 页 232–242, 2 月 2019, doi: 10.1007/s40815-018-0538-8.
- [21] 《Sustainable Development Report 2024》. 见于: 2025 年 5 月 20 日. [在线]. 载于: <https://dashboards.sdgindex.org/>
- [22] Y. Zhao, Z. Han 和 Y. Xu, 《Impact of Land Use/Cover Change on Ecosystem Service Value in Guangxi》, *Sustainability*, 卷 14, 期 17, Art. 期 17, 1 月 2022, doi: 10.3390/su141710867.
- [23] Y. Liu, S. Wang, Z. Chen 和 S. Tu, 《Research on the Response of Ecosystem Service Function to Landscape Pattern Changes Caused by Land Use Transition: A Case Study of the Guangxi Zhuang Autonomous Region, China》, *Land*, 卷 11, 期 5, Art. 期 5, 5 月 2022, doi: 10.3390/land11050752.

- [24] Y. Yang 等, 《Construction of Ecological Security Pattern Based on the Importance of Ecological Protection—A Case Study of Guangxi, a Karst Region in China》, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 卷 19, 期 9, Art. 期 9, 1 月 2022, doi: 10.3390/ijerph19095699.
- [25] F. Jin, Z. Yao 和 Z. Chen, 《Development characteristics and construction prospects for a multi-integrated economic zone in the South China Sea Region》, *J. Geogr. Sci.*, 卷 31, 期 3, 页 403–422, 3 月 2021, doi: 10.1007/s11442-021-1850-z.
- [26] R. Huber, S. Le'Clec'h, N. Buchmann 和 R. Finger, 《Economic value of three grassland ecosystem services when managed at the regional and farm scale》, *Sci Rep*, 卷 12, 期 1, 页 4194, 3 月 2022, doi: 10.1038/s41598-022-08198-w.
- [27] J. Heckenhahn 和 M. A. Drupp, 《Relative Price Changes of Ecosystem Services: Evidence from Germany》.
- [28] X. Gao, W. Xu, Y. Hou 和 Z. Ouyang, 《Market-based instruments for ecosystem services: framework and case study in Lishui City, China》, *Ecosystem Health and Sustainability*, 卷 6, 期 1, 页 1835445, 12 月 2020, doi: 10.1080/20964129.2020.1835445.
- [29] Y. Hu, S. Zhang, Y. Shi 和 L. Guo, 《Quantifying the impact of the Grain-for-Green Program on ecosystem service scarcity value in Qinghai, China》, *Sci Rep*, 卷 13, 期 1, 页 2927, 2 月 2023, doi: 10.1038/s41598-023-29937-7.
- [30] Y. Chi, D. Liu, J. Wang 和 E. Wang, 《Human negative, positive, and net influences on an estuarine area with intensive human activity based on land covers and ecological indices: An empirical study in Chongming Island, China》, *Land Use Policy*, 卷 99, 页 104846, 12 月 2020, doi: 10.1016/j.landusepol.2020.104846.
- [31] Y. Li 和 J. Chen, 《Assessment of Urban Ecological Service value used in Urban Rail Transit Project》, 2019 年 6 月 15 日, *arXiv*: arXiv:1906.06572. doi: 10.48550/arXiv.1906.06572.
- [32] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序和田璐, 《生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策》, *地理学报*, 卷 72, 期 6, 页 960–973, 6 月 2017, doi: 10.11821/dlxb201706002.
- [33] 《China's Guangxi shakes off absolute poverty》. 见于: 2025 年 5 月 21 日. [在线]. 载于: https://english.www.gov.cn/news/topnews/202011/20/content_WS5fb760b8c6d0f72576940360.html
- [34] World Bank, *Four Decades of Poverty Reduction in China: Drivers, Insights for the World, and the Way Ahead*. The World Bank, 2022. doi: 10.1596/978-1-4648-1877-6.
- [35] 《Zero poverty: China eliminates absolute poverty one month before self-imposed deadline》. 见于: 2025 年 5 月 21 日. [在线]. 载于: <https://news.cgtn.com/news/2020-11-23/China-eliminates-absolute-poverty-one-month-before-schedule-VEp8VAJJS0/index.html>
- [36] 《Guangxi tops West China in forest coverage》. 见于: 2025 年 5 月 21 日. [在线]. 载于: https://regional.chinadaily.com.cn/guangxi/2022-01/04/c_1033036.htm
- [37] K. Yi, X. Zhao, Z. Zheng, D. Zhao 和 Y. Zeng, 《Trends of greening and browning in terrestrial vegetation in China from 2000 to 2020》, *Ecological Indicators*, 卷 154, 页 110587, 10 月 2023, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110587.
- [38] 张豪和蒙吉军, 《面向 SDGs 的喀斯特地区水土资源可持续性评估——以贵州省为例》, *北京大学学报自然科学版*, 卷 61, 期 1, 页 139, 1 月 2025, doi: 10.13209/j.0479-8023.2024.083.
- [39] 《(PDF) Assessment of the Impact of Guangxi's Territorial Spatial Planning on the Environment: Based on the 2021-2035 Plan》, *ResearchGate*, 1 月 2025, 见于: 2025 年 5

- 月 21 日 . [在 线]. 载 于 :
https://www.researchgate.net/publication/387886361_Assessment_of_the_Impact_of_Guangxi's_Territorial_Spatial_Planning_on_the_Environment_Based_on_the_2021-2035_Plan
- [40] X. Lu, Y. Liang, T. Zhao, X. Zhu 和 Z. Qin, 《Decreasing soil erosion in South China with uncertainties driven by NDVI estimates》, *Ecological Indicators*, 卷 173, 页 113422, 4 月 2025, doi: 10.1016/j.ecolind.2025.113422.
- [41] W. Song, Y. Feng 和 Z. Wang, 《Ecological restoration programs dominate vegetation greening in China》, *Sci Total Environ*, 卷 848, 页 157729, 11 月 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157729.

附录

附录1 广西少数民族分布图



附录2 广西生态系统服务与可持续发展指标数据（1990–2020）

年份	2020	2015	2010	2005	2000	1995	1990
森林覆盖率 (%)	62.50	62.3	61.2	58.4	56.9	55.7	54.3
碳储量 (t/ha)	3.66	3.5	3.33	3.22	3.18	3.13	3.07
水源涵养 (mm)	626	603	589	567	545	521	497
土壤保持量 (t/ha)	1587	1472	1455	1401	1348	1299	1233
生境质量指数 (无量纲)	0.724	0.702	0.677	0.654	0.641	0.625	0.601
人均 GDP (元)	44237	30890	18070	8069	4652	3304	1066
清洁饮水覆盖率 (%)	99.10	95.2	90.7	83.2	80.1	75.7	69.8
人口密度 (人/km ²)	2235	1823	1498	711	470	421	389
NDVI 值	0.723	0.692	0.677	0.658	0.631	0.612	0.589
SDG 综合指数 (0-1)	0.82	0.73	0.59	0.43	0.38	0.34	0.27

致 谢

本研究项目得以顺利完成，首先要衷心感谢学校为我们提供的创新训练平台、优质的科研资源支持和宝贵的研究机会。学校先进的实验室设备、丰富的文献数据库以及开放的学术交流环境，为我们开展这项跨学科研究提供了坚实的物质基础和制度保障。在整个研究过程中，我们深刻体会到团队合作、跨学科整合以及理论联系实际的重要意义。

其次，要特别感谢本项目的指导教师郭烁老师，在为期 10 个月的研究周期中，郭老师以其深厚的生态经济学造诣和丰富的科研经验，为我们提供了系统性的学术指导。从最初选题的可行性论证，到研究框架的搭建；从生态系统服务价值评估模型的参数校准，到耦合协调度模型的验证分析；从数据处理方法的优化，到论文写作的规范性指导，每一个关键环节都离不开郭老师的帮助与指导。在团队成员出国学习期间，郭老师仍坚持通过线上会议指导我们的研究工作，这种严谨治学的态度和诲人不倦的精神，将永远激励我们在科研道路上不断进取。

同时，感谢项目组的每一位成员，正是大家的团结协作与共同努力，才促成了本项目的高质量完成。在调研奔波的日子里，在模型训练反复调试的深夜，我们共同承担压力、分享进步，这段经历将成为我们大学生活中最宝贵的记忆之一。

谨以此文向所有关心、支持和帮助过本研究的师长、同学和各界人士致以最崇高的敬意和衷心的感谢！这段科研经历不仅培养了我们的创新能力和团队协作精神，更让我们深刻体会到科学研究服务社会发展的重大意义。