王 芳,向首仪,任金铜.1980~2020 年西南地区陆地生态系统碳储量时空格局与演进规律 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1577-1592.
Wang F, Xiang S Y, Ren J T. Spatiotemporal patterns and evolutionary trajectory of terrestrial ecosystem carbon storage in southwest China from 1980 to 2020 [J]. China Environment Science, 2026,46(3):1577-1592.

1980~2020 年西南地区陆地生态系统碳储量时空格局与演进规律

王 芳[1,2],向首仪[1],任金铜[3,4*] (1.内江师范学院地理与测绘科学学院,四川 内江 641100；2.长江上游生态环境数据分析与绿色发展智能决策重点实验室,四川 内江 641100；3.贵州工程应用技术学院生态工程学院,贵州 毕节 551700；4.贵州工程应用技术学院,贵州省高原湿地保护与修复全省重点实验室,贵州 毕节 551700)

摘要：以我国西南地区为例,运用 InVEST 模型、泰尔指数、空间自相关和地理探测器等方法,研究陆地生态系统碳储量时空演变规律及驱动机制.结果表明: 1980~2020 年,碳储量总体减少 2.048Pg C,呈现先加速下降后回升趋势,其中 1990~2000 年降幅最大,空间上呈西高东低的分布特征;土地利用转移对碳储量的扰动作用在 1980~2000 年较强,其后 20 年显著减弱,其中耕地转林地是主要碳汇增益路径,草地向未利用地转化构成碳损失主渠道,建设用地侵占耕地是碳储量演变的重要压力源.碳密度演变呈现先衰减后增长特征,2000 年后增长区超越衰减区成为主导;泰尔指数分析显示,区域碳密度总体差异趋缓,但省内市际及区县差异加剧;空间聚集模式动态变迁显著,川西高原由高值集聚转为低值集聚并向北迁移,西藏由高值集聚转为低值集聚,云贵交界后期(2010~2020)形成新高值集聚区.GDP 是影响碳储量的核心因素,GDP、土壤类型和人口密度与其他因素的交互作用是影响碳储量区域差异及变化的主导因素组合,40 年间驱动机制由空间依附型向生态胁迫型转变.

关键词：西南地区；碳储量；时空格局；演进规律
中图分类号：X171.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)03-1577-16

Spatiotemporal patterns and evolutionary trajectory of terrestrial ecosystem carbon storage in Southwest China from 1980 to 2020. WANG Fang[1,2], XIANG Shou-yi[1], REN Jin-tong[3,4*] (1.School of Geographic Sciences and Geomatics, Neijiang Normal University, Neijiang 641100, China; 2.Key Laboratory of Ecological Environment Data Analysis and Intelligent Decision-Making for Green Development in the Upper Yangtze River, Neijiang 641100, China; 3.School of Ecological Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Guizhou 551700, China; 4.Guizhou Key Laboratory of Plateau Wetland Conservation and Restoration, Guizhou University of Engineering Science, Guizhou 551700, China), *China Environment Science*, 2026,46(3)：1577~1592

Abstract：Taking the southwestern region of China as a representative case, the spatiotemporal evolution and driving mechanisms of terrestrial ecosystem carbon storage were systematically investigated through the integrated application of the InVEST model, Theil index, spatial autocorrelation, and geographical detector. The findings revealed that: ①Terrestrial carbon storage was reduced by 2.048Pg C during 1980~2020, showing a phased characteristic of accelerated decline followed by gradual recovery. The most pronounced reduction was observed between 1990 and 2000, with a distinct spatial pattern of higher values in the west and lower values in the east. Land use conversions were found to have significantly impacted carbon storage before 2000, while this effect was substantially weakened thereafter. The transformation from cropland to forestland was identified as the principal pathway for carbon sequestration, whereas grassland degradation to unused land was recognized as the major route for carbon loss. In addition, cropland conversion to construction land was shown to constitute a persistent pressure on carbon storage. ②Carbon density evolution exhibited a transition from decline to increase, with expanding areas surpassing declining zones as the dominant pattern after 2000. Theil index analysis indicated a general convergence in overall regional carbon density disparities, while heterogeneity at municipal and county levels within provinces was progressively intensified. Spatial aggregation patterns underwent significant reorganization: the western Sichuan Plateau was characterized by a shift from high-value to low-value clustering accompanied by notable northward migration; Tibet transitioned from high-high to low-low aggregation; and a new high-value cluster emerged in the Yunnan-Guizhou border area during 2010~2020. ③ GDP was identified as the dominant determinant of carbon storage variation. The interactive effects among GDP, soil type, and population density with other environmental factors were demonstrated to constitute the primary

收稿日期：2025-08-17
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金资助项目(42207413);内江市基础研究与应用基础研究项目(2024NJJCYJNJSY023);毕节市科学家工作站(毕科合平台〔2025〕2 号);喀斯特高原资源与环境遥感人才团队(毕委人领通〔2023〕14 号);智慧地理空间信息应用工程中心(毕科联合(2023〕8 号)

* 责任作者, 副教授, asttear@163.com

combination governing regional differentiations in carbon storage. Over the 40-year period, the dominant driving mechanism was observed to transition from spatial dependency-oriented to ecological stress-dominated.

Key words：southwest China；carbon storage；spatiotemporal patterns；Evolutionary trajectory

陆地生态系统碳储量主要赋存于植被和土壤有机质层,是系统与大气碳交换形成的动态存量.研究表明,在土地利用保持状态下,植被光合作用累积的生物碳是重要碳汇[1-2],然而,不同土地利用类型固碳能力迥异,其间的相互转化是驱动碳汇格局重组与碳储量变化的核心动力.在气候变化与人为活动的双重胁迫下,土地利用的空间重构过程主导着区域碳储量的波动[3-4],使其成为表征区域碳汇动态演变的显性指示因子.西南地区因其复杂的地形(高原、山地、盆地)和独特的气候(亚热带季风、高原寒带)孕育出多样的生态系统,1980~2020 年间,其生态系统碳储量约为全国的 27.36%,是我国碳储量的主要来源之一[5].

当前碳储量估算研究已形成较为完善的方法体系,主要分为两类:其一是基于野外调查的样地实测法,通过系统采样获取碳密度数据,并采用空间插值技术实现区域尺度碳储量估算[6],该方法数据较为精确,但周期长,效益有限;二是基于过程模型(DigiBog 模型[7-8]、RFR 模型[9-10]、RothC 模型[11-12]等)的模拟估算法,但其在参数校准方面存在挑战,且操作流程较为复杂.在碳储量研究不断深化的背景下,融合实地调查与遥感技术的综合模型应运而生.其中,由斯坦福大学与世界自然基金会联合开发的 InVEST 模型,以其操作简便、运行高效的优势,有效克服了传统模型数据需求复杂、成本高昂与可视化表现不足等局限.该模型能高效评估土地利用变化对生态系统碳储量的影响[13],已在全球范围内得到广泛应用[14].目前,西南地区作为我国重要碳汇功能区,其碳储量研究正日益受到关注.现有研究围绕该区域碳储量空间格局及影响因素已开展多维度探索:在研究对象上,现有研究多以地貌、植被类型为分类指标,聚焦于局部区域或单一生态系统(林地或耕地等)[15-17]或对土壤/植被等碳库及其空间布局[17-19]进行估算和探讨.但西南地区地形复杂、气候多样,将森林、湿地等生态系统视为独立单元,忽视了不同生态系统间的碳循环交互机制,导致碳汇评估存在偏差,区域尺度局限性较大;在影响因素上,现有研究多侧重单一因素(如土壤或植被类型)的静态分析[20-22],未能充分反映气候、地形与人类活动等多要素的协同作用,因而难以量化碳库的潜在变化,缺乏对长期演变趋势的系统解析;在研究尺度上,在研究尺度上,多数成果集中在市级或省级层面的碳储量数值汇总与分析[23-25],未能实现高精度的空间计量分析,难以量化碳储量的空间集聚性、热点区识别及驱动机制,缺少碳储量时空动态规律的解析与模拟.

针对现有研究中存在的研究对象单一、长期演变趋势分析不足及空间计量分析缺乏等问题,整合多期土地利用数据及相关资料,系统解析 1980~2020 年区域碳储量的动态变化及其空间格局演变,在此基础上,引入土地利用响应弹性指标揭示土地利用转型过程与碳储量波动的关联机制;其次,构建覆盖 476 个县域的多层级分析框架,解析区域碳储量的宏观空间分布特征,并引入泰尔指数多阶段嵌套分解,逐级揭示省-市-县尺度碳储量分异特征,采用空间自相关分析精准刻画区县单元碳密度的集聚格局与动态演变;利用地理探测器定量识别自然与人为因素对碳储量区域分异的驱动作用及其交互效应.为西南地区国土空间优化与差异化碳管理策略的制定提供科学参考.

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况与数据来源

1.1.1 研究区概况 西南地区(21°08′N~36°53′N, 78°24′E~110°11′E)覆盖 5 个省级行政单元(滇、黔、川、渝、藏)(图 1),区域面积达 234.06 万 km^2,占全国陆地面积的近 1/4[26].地处低纬度区域,海拔差异显著:四川盆地(约 500m)、贵州高原(约 1000m)、云南高原(约 2000m)、青藏高原东缘(>3500m),地势呈西北高、东南低的阶梯下降趋势.涵盖青藏高原东缘、横断山区、云贵喀斯特高原和四川盆地四类地貌单元,形成三大特征性分区:四川盆地-周边山地复合体、云贵高原高山丘陵交错带、青藏高原高海拔山地群,造就了该区域内丰富的植被类型;年降水量东多西少,其空间异质性和时间变异性尤为突出[27],受季风环流和复杂地理环境影响,导致该地区频繁出

现局部强降水现象[28],气候垂直分异显著、干湿季分明;复杂的地形与气候格局塑造了高异质性的碳储存能力.

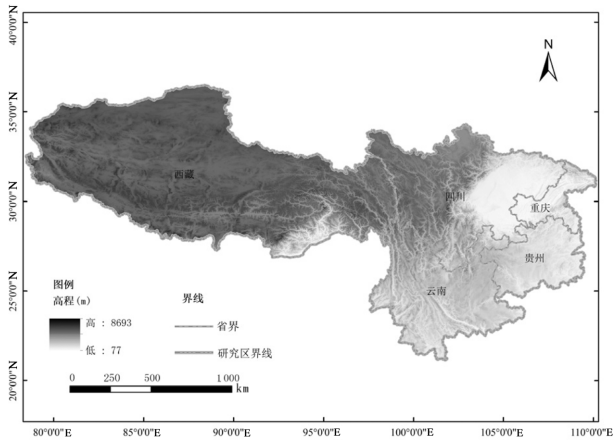


图 1　研究区概况

Fig.1　Overview of the study area

审图号:GS(2020)4619 号

表 1　驱动因子数据

Table 1　Driver factors

大类	二级类	因素	分辨率(m)	数据来源
自然因素	气候	年均降雨	1000	https://www.resdc.cn
		年均气温	1000	
	土壤	土壤类型	1000	
		土壤侵蚀	1000	
	植被	NDVI	1000	
	地形	DEM	30	https://www.gscloud.cn
		坡度	30	
		坡向	30	
人为因素	经济	GDP	1000	https://www.resdc.cn
		夜间灯光	500	
	人口	人口密度	1000	
	区位条件	距铁路距离	30	https://www.gscloud.cn
		距高速公路距离	30	
		距国道距离	30	
		距省道距离	30	

1.1.2　数据来源　数据源包括土地利用、驱动因子、行政边界和碳密度参数与气候分区等数据.其中,30m 土地利用数据来自中科院资源环境科学数据中心,参考既有研究[29],将其重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 类;不同类型土壤有机碳密度表(按 0~100cm)深度层进行定义与核算)及各类自然植被生物量碳密度表均源于已有文献[30],并结合相应空间分布及 Beck 等[31]提出的气候分区成果进行修正.从自然与社会经济两个维度构建了驱动力指标体系,包含 7 个二级指标与 15 个三级指标(表 1).将所有数据投影至 WGS84 坐标系, 重采样为 250m.

1.2　研究方法

1.2.1　InVEST 模型　InVEST 模型可量化评估多种生态系统服务并实现结果空间可视化[32];该模型操作简便、运行高效,克服了传统方法预处理复杂、资源消耗大和可视化弱等局限[33],模型中的 Carbon Storage and Sequestration 模块依据碳库稳态理论,构建了涵盖地上生物量、地下生物量、土壤有机碳和死亡有机碳的四维碳库体系,通过土地利用类型与碳密度的映射关系,逐像元累加核算碳储量.公式如下:

$$C_i = C_{i\text{-a}} + C_{i\text{-s}} + C_{i\text{-d}} + C_{i\text{-b}} \tag{1}$$

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{n} C_i \times S_i \tag{2}$$

式中:C_i 为地类 i 的碳密度,Mg C/hm^2;$C_{i\text{-a}}$、$C_{i\text{-s}}$、$C_{i\text{-d}}$、$C_{i\text{-b}}$ 分别为地类 i 地上生物碳密度、土壤碳密度、死亡有机碳密度、地下生物碳密度,单位均为 Mg C/hm^2;C_{total} 为总碳储量,Mg C;S_i 为地类 i 的面积;n 为土地利用总数.

参照王少剑等[5]提出的碳密度表构建方法(未计入死亡有机质与地下生物量),首先通过空间叠置分析,分别生成土壤与植被碳密度的空间分布.在此基础上,引入柯本气候分类以细化土地利用类型,构建土地利用—气候区划二维分类体系.再通过分区统计生成“气候-地类-碳密度”三维综合图,并据此测算土壤与植被碳密度.公式如下:

$$\text{AD}_{a,b} = \frac{\sum_{i=1}^{l}(m_{iab} \cdot \text{AD}_{iab})}{M_{ab}} \tag{3}$$

$$\text{SD}_{a,b} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(m_{jab} \cdot \text{SD}_{jab})}{M_{ab}} \tag{4}$$

式中:$\text{AD}_{a,b}$ 和 $\text{SD}_{a,b}$ 分别表示 a 气候区 b 地类组合单元的植被碳密度和土壤碳密度;AD_{iab} 和 SD_{jab} 分别对应组合单元内植被类型 i 的碳密度和土壤类型 j 的碳密度;m_{iab} 和 m_{jab} 分别对应组合单元内植被类型 i 和土壤类型 j 面积;M_{ab} 为 a 气候区地类 b 面积.

1.2.2　泰尔指数多阶段嵌套分解　以县级行政区为基本单元,采用泰尔指数多阶段嵌套分解法,将碳密度总体差异分解为省际、市际与区内县际 3 个层

级,以此解析碳密度在多层次行政单元间的空间异质性特征.公式如下[34]:

$$T = T_{\mathrm{r}} + T_{\mathrm{p}} + T_{\mathrm{c}} \tag{5}$$

$$T_{\mathrm{r}} = \sum_{i} \frac{Y_i}{Y} \log \frac{y_i}{\overline{y}} \tag{6}$$

$$T_{\mathrm{p}} = \sum_{i} \sum_{j} \frac{Y_{ij}}{Y} \log \frac{y_{ij}}{\overline{y}_i} \tag{7}$$

$$T_{\mathrm{c}} = \sum_{i} \sum_{j} \sum_{k} \frac{Y_{ijk}}{Y} \log \frac{y_{ijk}}{\overline{y}_{ij}} \tag{8}$$

式中:T 为泰尔指数总差异值;T_{r}、T_{p}、T_{c} 分别为区域内省间、省内市间和市内区县间泰尔指数之和;i、j 和 k 分别为省份 i、市 j 和区县 k;Y_i 和 Y 分别为省份 i 碳储量和区域总碳储量;Y_{ij}、Y_{ijk} 分别为省份 i 市 j 碳储量和省份 i 市 j 区县 k 碳储量;y_i、y_{ij} 和 y_{ijk} 分别为省份 i 碳密度、省份 i 市 j 碳密度、省份 i 市 j 区县 k 碳密度;$\overline{y}$、$\overline{y}_i$ 和 $\overline{y}_{ij}$ 分别为区域平均碳密度、省份 i 平均碳密度和省份 i 市 j 平均碳密度.

1.2.3 土地利用响应弹性系数 融合经济学弹性分析框架与生态学土地利用变化响应机制[35],融合经济学弹性理论与生态学响应机制,构建土地利用弹性响应系数,以量化碳储量对地类转换的敏感性.该系数值与关联强度正相关,值越小表明互动效应越弱.公式如下:

$$E = \left| \frac{\left(C_{t_1} - C_{t_0}\right)/C_{t_0}}{\mathrm{LC}} \right| \quad \mathrm{LC} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta L_i}{\sum_{i=1}^{n} L_i} \tag{9}$$

式中:E 表示碳储量对土地利用类型转化的响应弹性系数,t_0、t_1 分别为初期和末期,LC 为地类变化占比,ΔL_i 为地类 i 面积变化,L_i 为地类 i 总面积.

1.2.4 地理探测器模型 运用地理探测器“因子探测”与“交互探测”模块,揭示不同因素对碳储量区域分异的影响程度.因子探测核心公式为[36]:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2 \tag{10}$$

式中:q(范围 0~1)为驱动因子 X_i 对碳储量空间分异的解释力,值愈大影响越显著;N 和 N_h 分别为整个研究区及第 h 层子区的单元数量;σ_h^2 和 σ^2 分别为全区与第 h 层内因变量 Y(即碳储量)的方差;h=1,2,…L 表示分层数.

生态系统碳储量区域差异自然与社会经济因素综合作用的结果.基于既有研究[14,37]与西南地区实际,从自然与人文两个维度选取了 15 项驱动因子(表 1).自然驱动方面,地形与气候通过调控水热与植被分布塑造碳储量格局[14,38];人文驱动方面,道路交通、夜间灯光亮度、人口密度与 GDP 表征了人类活动对碳储量的直接或间接干扰[39].

2 结果与讨论

2.1 碳储量时空演变分析

2.1.1 碳储量时序演变分析 由图 2(a)可知,40 年间,碳储量净减少 2.048Pg C,呈先加速下降后回升趋势,具有明显的阶段性特征:1980~2010 年间持续下降,累计损失达 2980.80Tg C,且于 1990~2000 年间达到峰值(降幅 4.03%),贡献了前 30 年总损失量的 45.15%;2010~2020 年间出现显著回升,增量(933.24Tg C)约抵消了前期总损失量的 45.58%.

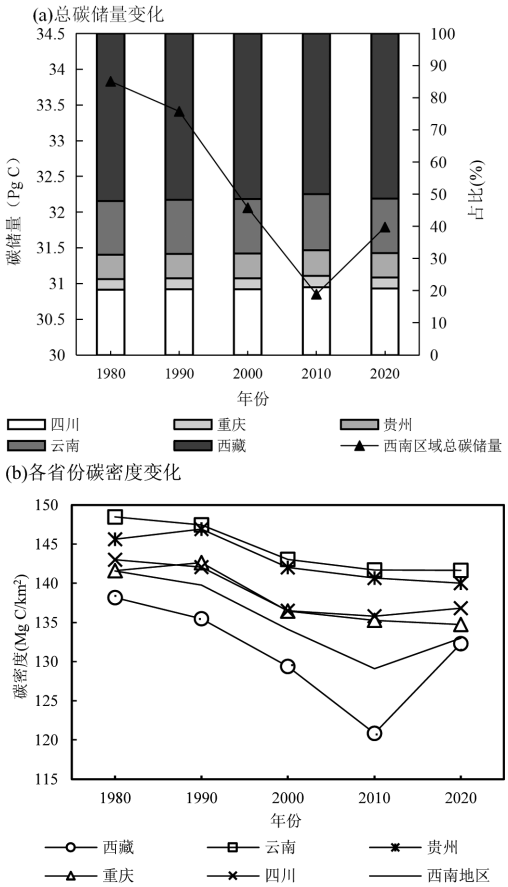


图 2 1980~2020 年西南地区陆地生态系统碳储量及其变化情况

Fig.2 Carbon storage and its change in the terrestrial ecosystems of Southwest China from 1980 to 2020

由图 2 知,省级尺度上,1980~2020 年,西南地区碳储量演变时空分异特征明显.从时序变化来看,各

省(市)碳储量变化轨迹差异显著:重庆与贵州呈小幅增长—快速下降—减缓下降模式,云南为持续下降型,而西藏和四川则呈现典型的 V 型演变特征.2000 年为关键转折点,此前各省碳储量普遍衰减;此后除西藏外,其余省份下降趋势均明显趋缓,其中四川最为突出,云、贵次之.2000~2010 年,四川降幅较前阶段收窄约 85%,并于 2010~2020 年实现正向增长;云贵两省降幅亦减少 65%以上,且 2010~2020 年进一步减缓,其中云南尤为显著.空间格局上,2000 年后西藏成为主导研究区碳储量变化的关键.2000~2010 年,西藏碳储量减少 108.987Tg C,占同期总下降量的 90.21%.由于其余省份尚未实现碳汇增长,致使该阶段总碳储量仍处于快速下降通道.

2.1.2　碳储量空间分布格局　如图 3 所示,西南地区碳储量空间分布异质性显著,呈西高东低格局.高值区集中于川西高原、滇西北山地及西藏东南部,以森林和草地生态系统为主;西藏北部亦为碳储量高值区,其地表覆被以冻土-植被系统为特征.低值区主要分布于四川盆地、重庆主城区以及云贵两省城市化区域,具有建设用地密集、生态用地占比低的特征.

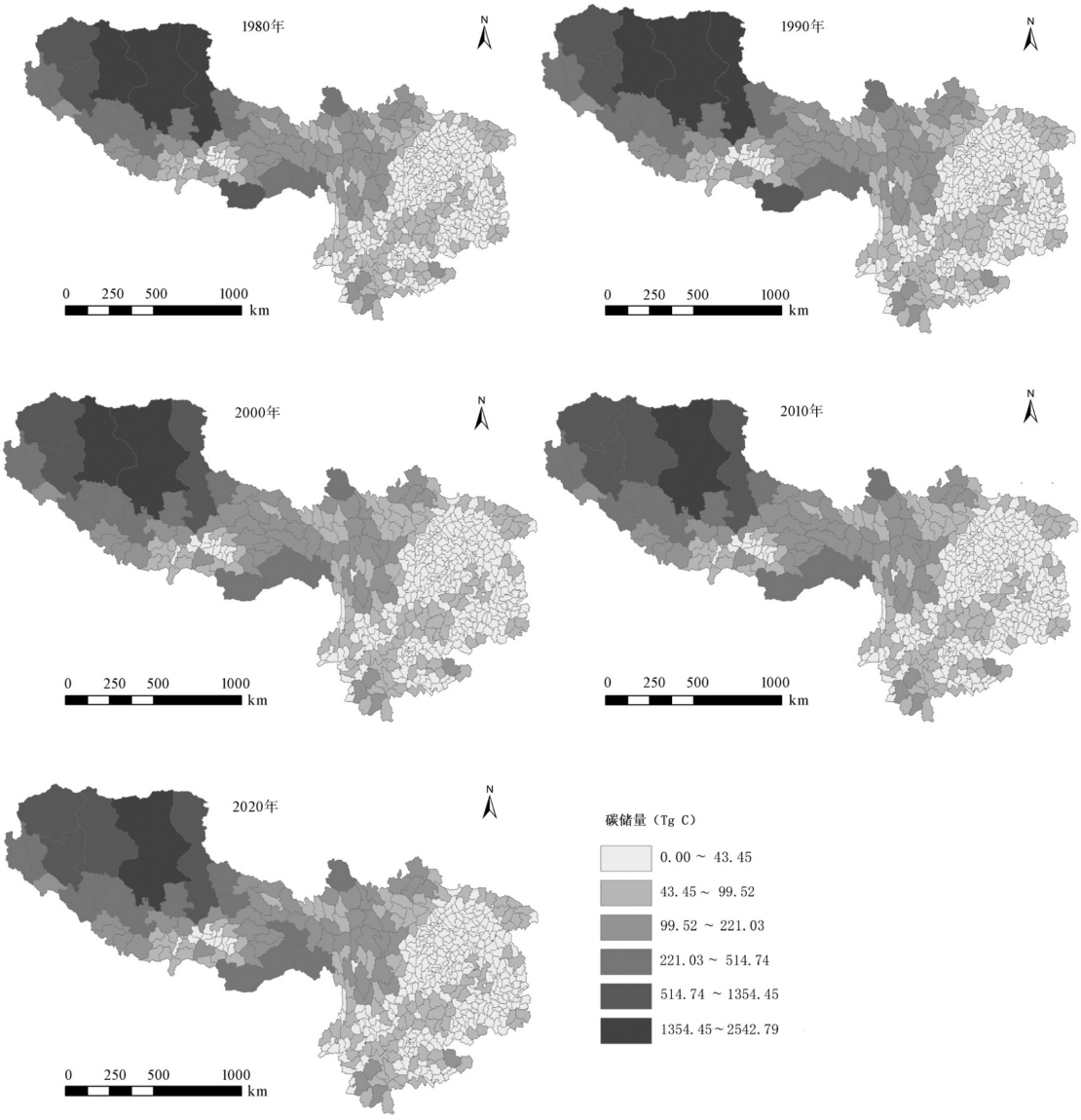


图 3　1980~2020 年西南地区区县碳储量空间分布

Fig.3　Spatial pattern of carbon storage at the county level in Southwest China from 1980 to 2020

2.1.3　土地利用变化的碳效应　采用弹性系数表征碳储量对土地利用变化的响应程度,并结合不同土地利用类型的面积与碳储量变化(表 2)综合分析碳储量波动的成因.西南地区碳储量结构差异显著

(图 4),草地和林地的碳储量贡献最大,耕地与未利用地次之,水域和建设用地占比均低于 3%.40 年间,土地利用变化累计面积达 $6.838\times10^5km^2$,其中 2000~2010 年变化最为剧烈,面积为 $6.631\times10^5km^2$. 1980~1990 年与 1990~2000 年期间分别为 1.352 和 2.094,而在 2000~2010 年骤降至 0.025,2010~2020 年略回升至 0.067.这表明尽管 2000 年后土地利用变化规模更大,但其对碳储量的影响强度显著低于前 20 年,反映出地类转换的生态扰动效应在后期明显减弱.

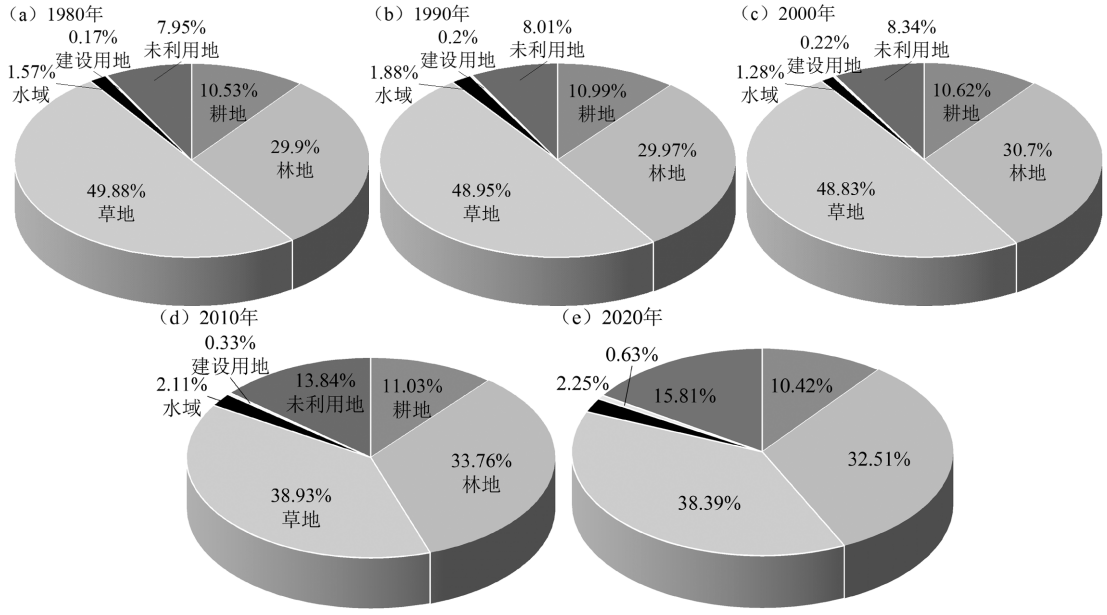


图 4 1980~2020 年西南地区不同土地利用类型碳储量占比

Fig.4 Proportion of carbon storage across land-use types in Southwest China from 1980 to 2020

表 2 1980~2020 年碳储量对土地利用变化响应的弹性系数

Table 2 Elastic coefficient of carbon storage in response to land use changes from 1980 to 2020

年份	碳储量(Pg C)	土地利用变化面积(km^2)	*E*(响应弹性系数)
1980~1990	−0.427	3189.10	1.352
1990~2000	−1.346	9056.74	2.094
2000~2010	−1.208	663094.27	0.025
2010~2020	0.933	126887.44	0.067
1980~2020	−2.048	683814.07	0.038

根据图 5、图 6 和表 3,进一步分析各时期地类转换及其碳储量效应:耕地面积与碳储量总体呈下降趋势,分别减少 6282.54km^2 和 252.10Tg C.耕地主要流向林地,转化面积达 15757.83km^2,形成 36.51Tg C 的碳汇增益.值得注意的是,2000~2010 年期间耕地面积出现回升,而该阶段及之后由耕地转为林地所带来的碳汇增益(分别为 41.20Tg C 与 52.91Tg C)显著高于转为草地的增益(10.59Tg C 与 9.33Tg C).

林地面积及碳储量整体波动增长,增幅分别为 47805.57km^2 和 218.86Tg C.林地主要转为草地(51120.89km^2)和耕地(15174.92km^2),分别导致 112.77Tg C 与 56.67Tg C 碳损失,前者空间上高度集中于藏东南.2000−2010 年林地激增 52396.92km^2,碳储量增长 576.51Tg C,其中草地和未利用地转为林地分别贡献 183.70Tg C 与 37.28Tg C 碳增益.

草地波动下降 307570.80km^2,碳储量减少 4704.80Tg C,主要转为未利用地(315291.80km^2)与林地(88201.73km^2),分别带来 804.33Tg C 碳损失与 89.46Tg C 碳增益.2000~2010 年草地急剧减少 313607.79km^2,碳损失 3668.92Tg C,仅退化为未利用地部分(31760.02km^2)就贡献碳损失 1054.80Tg C,西藏是该轮退化的核心,尽管 2010~2020 年退化趋缓,草地转未利用地仍造成碳损失 14.27Tg C.

水域及其碳储量总体增加,面积扩张 27055.60km^2,碳储量增加 183.69Tg C.以 2000~2010 年最为显著,主要由草地(30549.83km^2)与未利用地 12712.14km^2)转入,分别导致碳损失 183.52Tg C 和 73.18Tg C,西藏是该时段水域变化的主要区域.

建设用地持续扩张,面积及其碳储量分别增加 11848.97km^2 和 143.68Tg C,主要源于耕地转入

(9199.85km^2),造成碳损失 10.69Tg C.其扩张呈现以成渝为核心、省会城市为节点的蔓延格局.

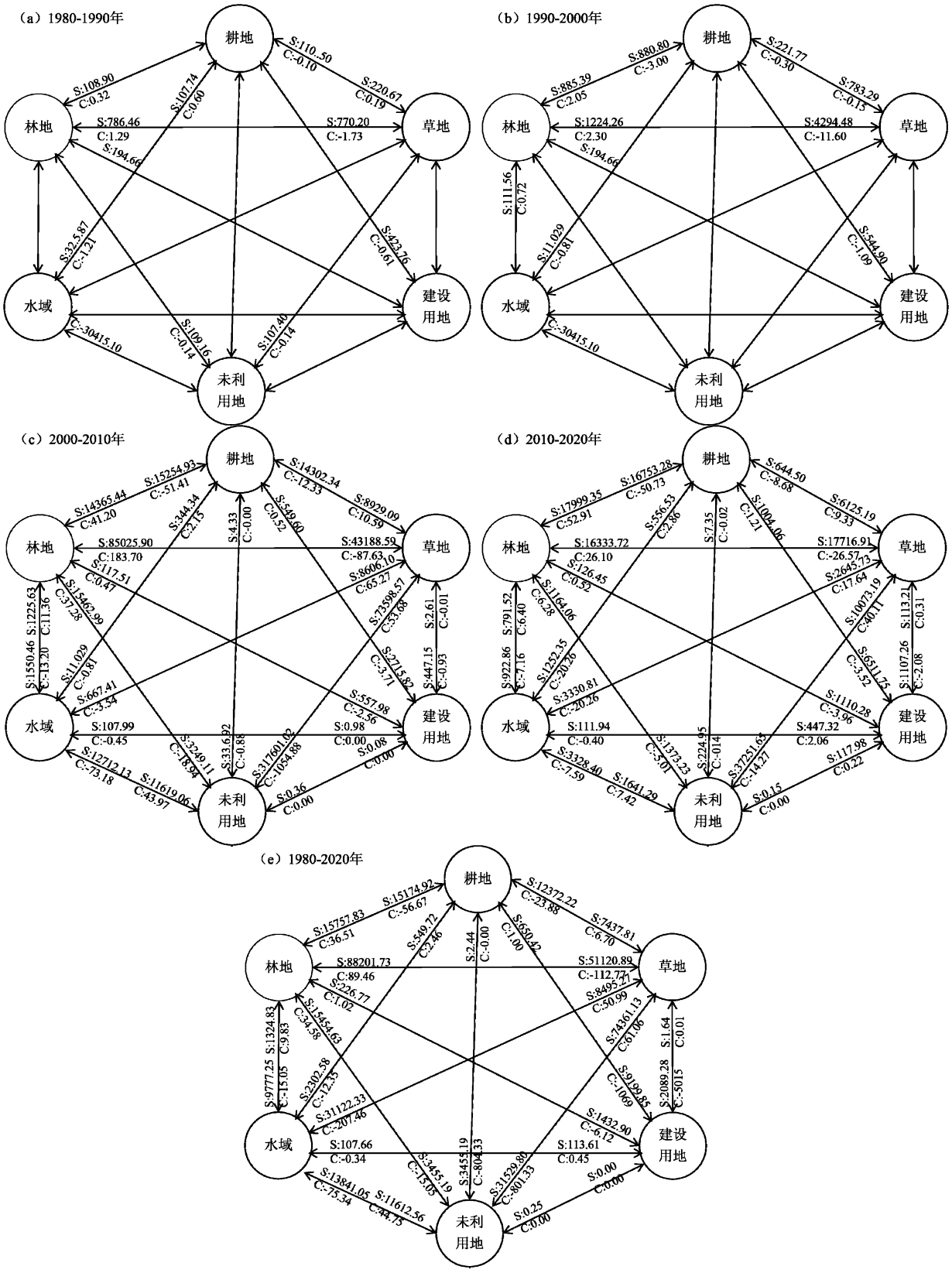


图 5　1980~2020 年西南地区土地利用转移引起的碳储量变化

Fig.5　Carbon carbon storage caused by land use/cover transfer in Southwest China from 1980 to 2020

未利用地与碳储量呈波动上升,分别增加 227153.46km^2、2350.45Tg C.其主要由草地

(315291.80km^2)转入,造成碳损失 804.33Tg C,是碳流失的主要来源.尤其在 2000~2010 年,草地转未利用地达 317601.02km^2, 碳损失达 1054.88Tg C.

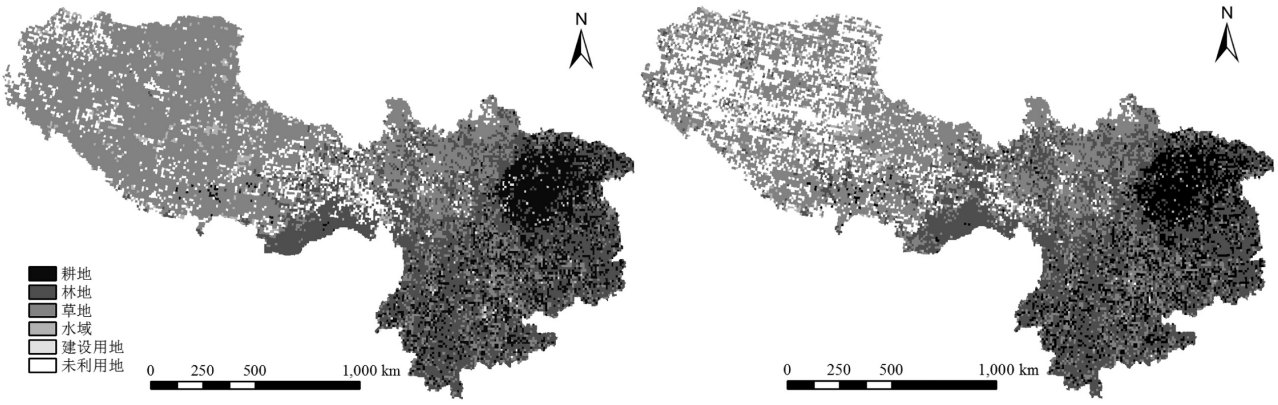


图 6 1980 年与 2020 年西南地区土地利用分布

Fig.6 Spatial distribution of land use in Southwest China in 1980and 2020

表 3 1980~2020 各土地利用类型及其碳储量变化

Table 3 Changes in land use types and their carbon storage from 1980 to 2020

土地利用类型	变化指标	1980~1990 年	1990~2000 年	2000~2010 年	2010~2020 年	1980~2020 年
耕地	面积(km^2)	−860.91	−1221.30	3439.19	−7639.53	−6828.54
	碳储量(Tg C)	110.95	−267.41	−1.02	−94.62	−252.10
林地	面积(km^2)	16.01	−2954.05	52396.92	−1653.30	47805.57
	碳储量(Tg C)	−105.26	−169.86	576.51	−82.53	218.86
草地	面积(km^2)	104.94	3631.73	−313607.79	2300.30	−307570.80
	碳储量(Tg C)	−524.52	−705.14	−3668.92	193.78	−4704.80
水域	面积(km^2)	99.64	−1.27	23675.24	3282.00	27055.60
	碳储量(Tg C)	98.05	−219.79	243.34	62.09	183.69
建设用地	面积(km^2)	423.76	544.90	943.41	7936.90	11848.97
	碳储量(Tg C)	8.39	5.85	30.60	98.84	143.68
未利用地	面积(km^2)	215.56	0.00	231036.42	−4099.52	227153.46
	碳储量(Tg C)	−16.12	0.00	1605.16	761.42	2350.45

2.2 碳密度时空演变分析

2.2.1 碳密度时序演变分析 为减弱行政单元面积差异对评估结果的影响,采用碳密度(即单位面积碳储量)作为区县尺度碳储量分析的衡量指标.基于 1980~2020 年共 5 期碳密度空间分布(图 7)可知,碳密度空间分异显著,具有明显的空间集聚特征.高值区集中分布于川西高原、藏东南及云贵部分地区,低值区则主要位于四川盆地城市群及西藏北部区域.空间上,碳密度低值区与成渝城市群分布区及未利用地扩张范围高度重合.

采用泰尔指数多阶段嵌套分解从全局、省际、市域及区县系统解析 1980~2020 年西南地区碳密度空间分异特征(表 4).结果显示,40 年间碳密度总体差异波动下降.从层级结构看,1980 年省际与市际差异是总体差异的主要来源.1990~2020 年,省际差异始终为总体差异的主导因素,其值由 1990 年的 0.0019 下降至 2010 年的 0.0015,2020 年小幅回升至 0.0016.省内市域差异与总体差异保持同步演变,后 30 年呈轻微上升态势,贡献率波动增长,至 2020 年成为总体差异的第二大来源.相比之下,市内区县间差异整体下降,由 1980 年的 0.0009 降至 2020 年的 0.0007,其贡献位次从 1990~2010 年的第二位至 2020 年略低于省内市间差异降为第三位.层级分解结果表明西南地区碳密度空间分异层级结构呈动态演变特征:总体差异逐步收敛,而省内市域差异贡献度相对增强,反映出碳密度空间分异机制存在尺度依赖性.

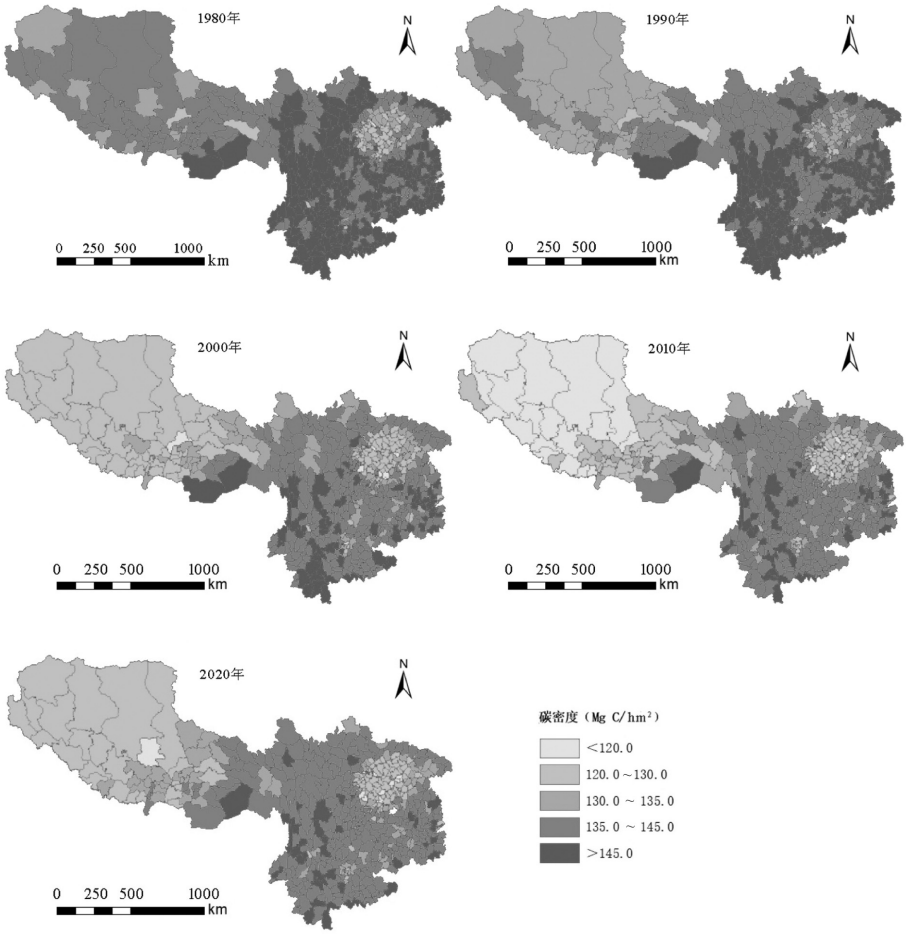


图 7　1980~2020 年西南地区区县碳密度空间分布

Fig.7　Spatial distribution of the carbon density at the county level in Southwest China from 1980 to 2020

表 4　1980~2020 年西南地区碳密度泰尔指数多阶段嵌套分解

Table 4　Multi-stage nested decomposition of the theil index of carbon density in southwest China from 1980 to 2020

年份	泰尔指数(贡献率%)				泰尔指数变化量(贡献率变化量%)			
	总值	地区内省间	省内市间	市内区县间	总值	地区内省间	省内市间	市内区县间
1980	0.0263	0.0090 (34.149)	0.0165 (62.503)	0.0009 (3.348)	—	—	—	—
1990	0.0027	0.0019 (68.711)	0.0001 (4.903)	0.0007 (26.386)	−0.0236	−0.00712 (34.562)	−0.01633 (−57.599)	−0.00016 (23.038)
2000	0.0030	0.0018 (61.399)	0.0003 (9.927)	0.0009 (28.674)	0.0003	−0.00002 (−7.312)	0.00017 (5.024)	0.00014 (2.288)
2010	0.0025	0.0015 (61.754)	0.0001 (5.527)	0.0008 (32.718)	−0.0005	−0.00032 (0.355)	−0.00016 (−4.400)	−0.00005 (4.045)
2020	0.0032	0.0016 (50.628)	0.0009 (27.182)	0.0007 (22.190)	0.0007	0.00010 (−11.126)	0.00074 (21.654)	−0.00010 (−10.528)

2.2.2　西南地区碳密度变化及聚集情况　据图 8 可知,西南地区碳密度空间格局呈现明显的阶段性演变特征.2000 年前,碳密度衰减区占主导地位;2000 年后,增长区扩张并成为主要趋势.1980~1990 年,碳密度下降区主要分布于西藏大部、川西部分区域及滇西北,而四川盆地则呈现小幅上升.1990~2000 年,碳密度普遍下降,其中藏西北部及四川盆地城市周边下降尤为显著,云贵两省下降幅度相对较缓.2000~2010 年,藏西北仍为主要下降区,上升区集中于云贵交界及川西部分地区,四川盆地则以轻微下降为主.2010~2020 年间,西藏及川西地区成为主要上升区,藏西北上升显著,成都、重庆中心城区出现

小幅回升,云贵两省仍以下降为主,但局部区域呈现上升态势.

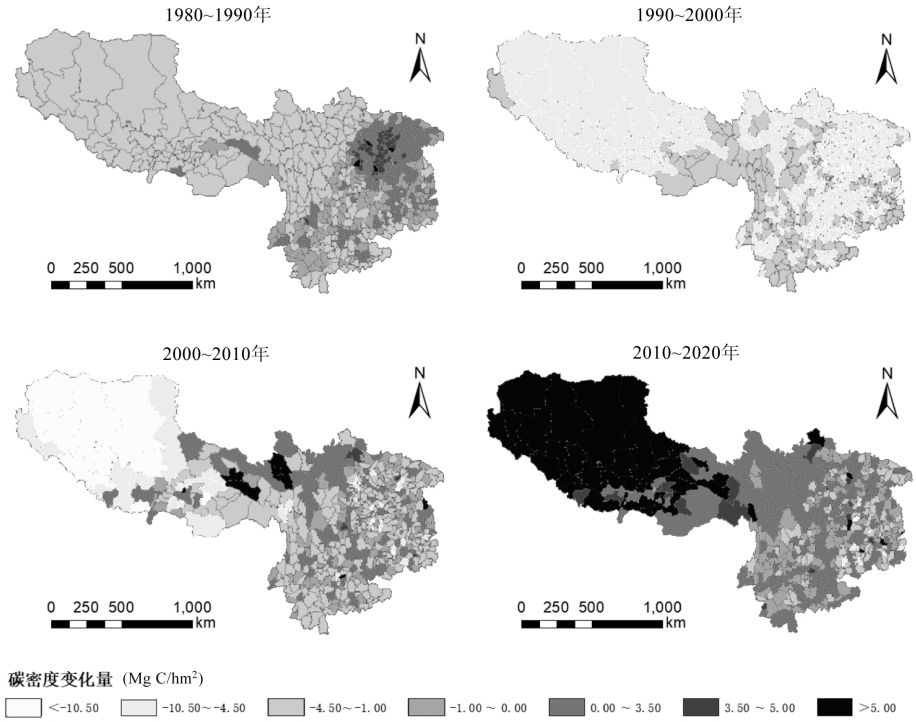


图 8 1980~2020 年西南地区区县碳密度变化

Fig.8 Changes in carbon density at the county level in Southwest China from 1980 to 2020

空间自相关分析表明,区县尺度碳密度变化存在显著空间依赖性.全局 Moran's I 指数均为正值,整体呈集聚分布特征,其值由 0.719 逐步演替至 0.046 (0.719–0.447–0.0043–0.046).以 2000 年为转折点,之后全局空间相关性明显减弱,反映出其空间关联模式经历了强集聚—弱传导—微重构"阶段性演变.为进一步揭示局部空间依赖性,采用 LISA 方法分析区县尺度碳密度变化的集聚格局(图 9).

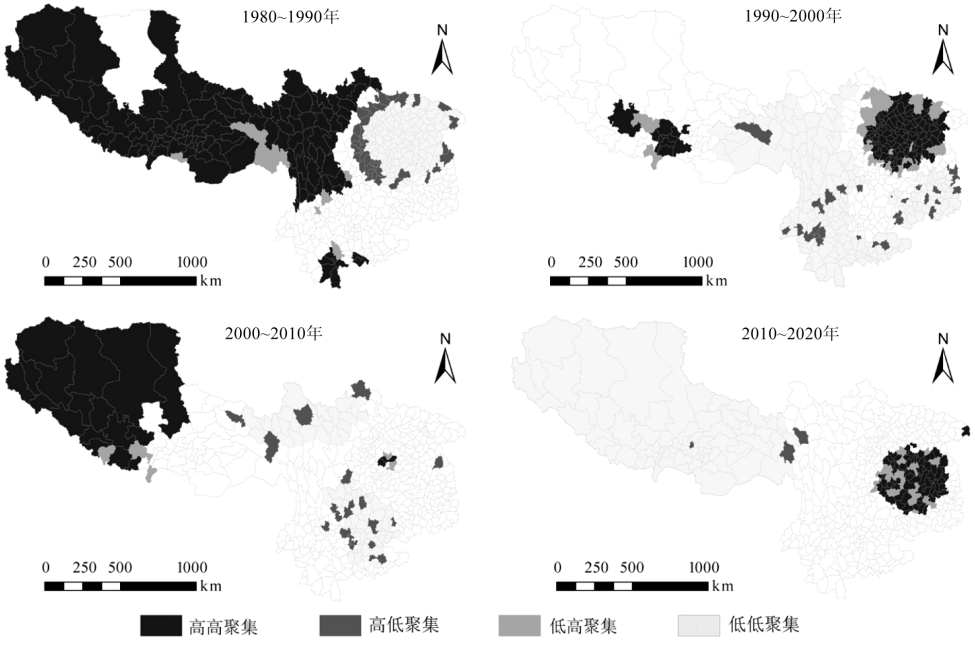


图 9 1980~2020 年西南地区碳密度变化 LISA 图

Fig.9 LISA cluster map of carbon density change in Southwest China from 1980 to 2020

川渝地区中,四川盆地在 1980~2000 年由最初中间低-低聚集,边缘高-低聚集转变为中间高-高聚集,边缘低-高聚集,2000~2020 年集聚特征不明显;川西高原则由早期“高-高”集聚转为低-低集聚,并逐渐向北部迁移,后期逐渐消散;1980~1990 年云南西北部呈现“高-高”集聚;1990~2000 年转为以东北部“低-低”集聚为主,并向东北部转移;2010~2020 年无明显集聚;西藏在 40 年间由高-高聚集转变成低-低聚集,1990~2000 年藏东南呈低-低聚集,2000~2010 年藏西北呈高-高聚集(西藏其他未说明地区均未出现明显聚集情况); 1990~2000 年贵州东南部存在“低-低”集聚;2010~ 2020 年云贵川渝交界区域出现“高-高”集聚,主要分布于遵义与贵阳之间.综上,西南地区碳密度空间集聚模式 40 年间呈现明显的动态演变与区域分异特征.

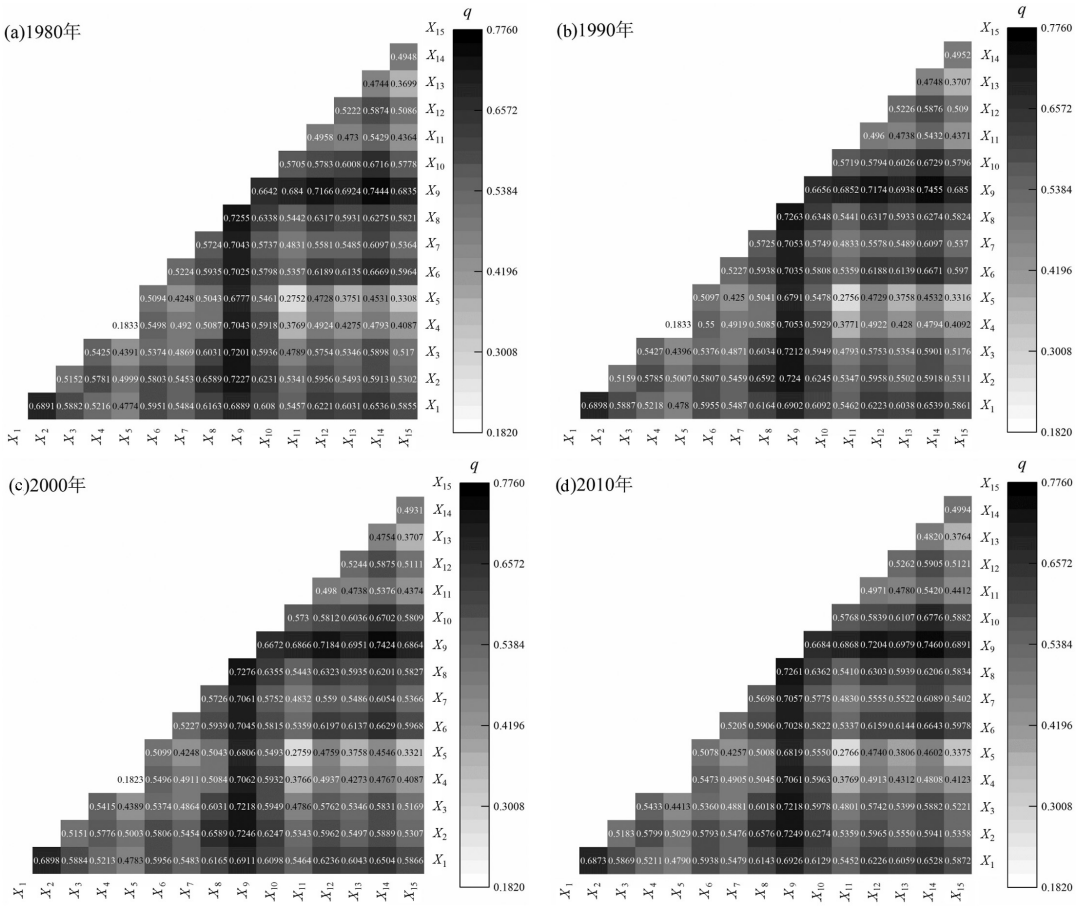
2.3　碳储量变化驱动因素分析

2.3.1　单因子探测结果分析　单因子分析表明(表 5),1980~2020 年各影响因子 q 值排序依次为:GDP>人口密度>年均气温>NDVI>土壤类型>年均降雨>距国道距离>距铁路距离>DEM>土壤侵蚀>距高速公路距离>距省道距离>夜间灯光指数>坡度>坡向.这表明西南地区社会经济因素(GDP、人口密度)是导致碳储量区域差异的最主要驱动力,其影响力甚至超过了自然本底因素(气候、植被、地形).

表 5　碳储量区域差异的单因子探测结果

Table 5　Results of single-factor detection of regional differences in carbon storage

年份	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
1980	0.4438	0.4802	0.3634	0.1496	0.0174	0.4657	0.3634	0.4631	0.6633	0.5252	0.2229	0.3918	0.3419	0.428	0.3023
1990	0.4443	0.4809	0.3825	0.1495	0.0175	0.4661	0.3635	0.463	0.6647	0.527	0.2232	0.3919	0.3428	0.4282	0.3032
2000	0.4446	0.4805	0.3819	0.1485	0.0175	0.4632	0.3634	0.4632	0.6663	0.5283	0.2234	0.3947	0.343	0.4265	0.3038
2010	0.4449	0.4830	0.384	0.1475	0.0178	0.4640	0.3638	0.4593	0.6673	0.5337	0.2238	0.3930	0.3494	0.4325	0.3104
2020	0.4458	0.4844	0.3854	0.1486	0.0176	0.4674	0.3655	0.4625	0.6678	0.5323	0.2246	0.3943	0.3462	0.4298	0.3068



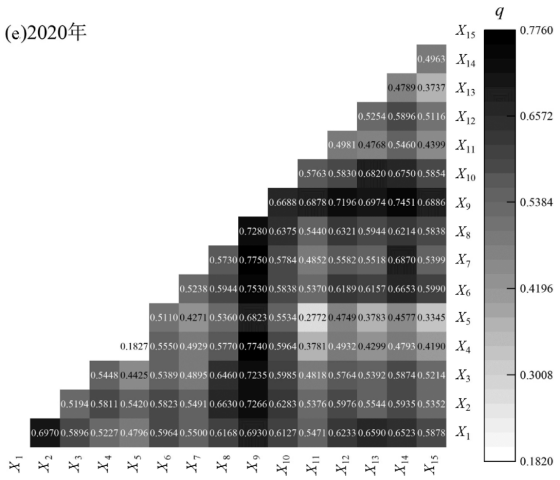


图 10 碳储量区域差异的因子交互探测结果

Fig.10 Results of factor interaction detection of regional differences in carbon storage

从因子影响力看,GDP 的 q 始终高于 0.66,为 0.6633~0.6678,变幅仅为 0.0045,为影响最显著、最稳定的驱动因子.NDVI 与土壤类型的 q 分别在 0.4632~0.4674 和 0.4593~0.4632 之间窄幅波动.部分因子呈持续上升趋势,其中人口密度、年均气温、年均降雨与夜间灯光指数的 q 增幅分别为 0.0071,0.0042,0.0020,0.0017.DEM 的 q 由 0.3634 升至 0.3854,增幅较明显.土壤侵蚀的 q 略有上升,从 0.3634 增至 0.3655.距高速公路、省道距离的 q 亦呈波动上升态势,而距铁路、国道距离的 q 则保持相对稳定.

2.3.2 交互因子探测结果分析 交互因子探测结果显示(图 10),各驱动因子间的交互作用普遍表现为非线性增强效应,且其时序格局保持稳定.任意两因子交互的 q 均大于其独立作用时的 q,表明因子间存在协同增强机制.1980~2010 年,GDP 与距国道距离(X9∩X14)的交互作用最强,q 均大于 0.74;GDP 与多数自然因子(如土壤类型、年均气温、DEM、坡度、土壤侵蚀、NDVI)的交互 q 也均高于 0.70.至 2020 年,GDP 与土壤侵蚀(X9∩X7)的交互作用跃居首位,q 为 0.7750,其次为 GDP 与坡度(X9∩X4),q 为 0.7740;GDP 与其他自然因子的交互作用仍维持在 0.72 以上,与区位因子的交互 q 也均大于 0.71.

研究期间,驱动机制呈现明显演变特征:1980~2010 年间表现为空间依附型模式,GDP 与距国道距离的强交互作用(q>0.74)主导碳格局;至 2020 年转变为生态胁迫型模式,GDP 与土壤侵蚀的交互作用跃居首位,表明经济发展在转向生态脆弱区同时,显著激化了负向生态过程对碳储量的破坏效应.

综合分析表明,GDP 与其他因子的交互作用对碳储量区域差异的驱动增强效应最为显著,土壤类型与人口密度次之.这说明 GDP、土壤类型和人口密度与其他因素的交互作用是影响西南地区生态系统碳储量空间格局及变化的主导因素组合,因子间的协同作用增强了碳储量空间格局的解释力,共同驱动了生态系统碳储量的格局变化.

2.4 讨论

2.4.1 碳储量/碳密度时空演变及政策启示 本研究表明,碳储量变化呈现出明显的 V 型轨迹,与既有研究一致[5],这一演变模式深刻反映了人类活动与生态政策之间的动态博弈[40].碳储量/碳密度空间分布均呈现“西高东低”格局,高值区集中于川西高原、滇西北及藏东南等区域,主要得益于保存完好的生态系统及独特的自然环境[41];而低值区则与成渝城市群及云贵高原高度城市化区域地重叠,这些地区长期作为农业与经济核心区,大量自然生态系统转为农田与建设用地,导致碳库严重流失[42],体现了自然本底与人类活动的共同塑造作用.

从时空动态来看,碳储量/碳密度变化均表现出以 2000 年为拐点的阶段性特征.1980~2000 年为失控衰退期,经济高速发展驱动下的土地利用变化导致碳汇功能显著减弱,碳密度衰减区占主导地位,印证了优先发展战略的生态压力效应[43].2000 年后,随着退耕还林等生态工程的实施,碳流失趋势得到遏制,生态系统逐步进入功能提升阶段.但至 2020 年碳储量仍未恢复至初期水平,表明生态恢复具有长期

性[44].土地利用变化的碳效应分析显示,前 20 年地类转换对碳储量的弹性响应系数较高(1.352~2.094),表明此阶段土地利用变化对碳库稳定性的扰动作用较为突出;而 2000 年后尽管地类转换规模仍然巨大,但弹性系数显著降低(0.025~0.067),这主要得益于退耕还林等生态工程的实施,增强了生态系统的稳定性[45].不同地类转换路径的碳效应存在显著差异:林地和未利用地大幅扩张是碳储量变化的主要驱动因素,其中草地大规模转化为未利用地导致碳损失 804.33Tg C,是碳流失的主要路径;而耕地转向林地则带来显著的碳汇增益,特别是 2000~2010 年间在生态工程推动下林地碳储量增长 576.51Tg C,有效缓解了区域碳损失.西藏因气候变暖与人类活动叠加影响成为草地退化的核心区,其持续的草地−未利用地转化导致严重碳流失.这表明优化土地利用转换路径、遏制生态脆弱区草地退化是实现碳汇功能提升的关键.

多尺度分析进一步揭示了碳密度格局的深刻转变.泰尔指数分解表明,省际差异始终占主导地位,但省内市际差异贡献率持续上升,至 2020 年已成为第二大来源,反映出地市级政策干预已逐步取代自然变异,成为碳密度演变的关键驱动力[46].同时,全局 Moran's I 指数从 0.719 下降至 0.046 的空间关联性演变过程,表明其经历了强集聚−弱传导−微重构的演变过程,LISA 图识别的集聚动态迁移进一步印证了人类活动对碳密度格局的重塑作用,这标志着西南地区碳密度分布已完成从自然主导向人文主导的根本性转变.

省级尺度分析揭示了碳储量演变时空分异异质性显著.四川省呈现 V 型强反弹,反映出自然条件与政策干预的有效协同[25];云贵高原受喀斯特生态脆弱性制约,恢复缓慢[47];重庆体现出高度城镇化地区的典型困境;西藏则出现脱钩响应,其碳库动态主导因子由人类活动转向气候变化,传统生态工程在此效果有限甚至可能产生负效应,亟待从管理范式层面进行调整[48],这种区域分异格局既反映了不同生态系统的敏感性与恢复力差异,也凸显了差异化生态管理策略的必要性.

值得注意的是,尽管生态工程在整体上促进了碳汇恢复,但其效果受自然条件、政策适配性与区域发展阶段的共同制约.东部丘陵山区响应迅速,碳汇功能明显提升;而西部高寒地区由于气候变化(如冻土退化、冰川消融)的主导作用,传统生态工程效果有限.建设用地持续扩张虽然表现为碳储量增加,但实质是低效碳库(如城市绿地、建筑碳储存)对高效自然碳库(如森林、湿地)的替代过程[49],这种结构变化虽在碳储量上有所体现,却使整体碳汇功能下降,并对生态系统构成持续压力.

综上,西南地区碳储量/碳密度的时空演变是自然过程与人类活动共同作用的结果,其 V 型轨迹完整呈现了从生态退化到功能恢复的闭环过程.未来生态治理应建立多尺度协同的管理体系,充分考虑不同层级行政单位干预效应的差异性,特别关注高寒区域和快速城市化地区的差异化机制.东部地区需协调城镇化与生态保护的关系,西部地区则应探索适应气候变化的生态恢复路径,通过建立基于主导驱动因子的差异化治理范式,实现区域碳汇功能的整体提升.

2.4.2　碳储量时空演变驱动机制　地理探测器分析结果从驱动因子角度系统揭示了 1980~2020 年西南地区碳储量时空演变的形成机制.单因子探测显示,社会经济因素已成为主导碳储量空间分异的核心驱动力.GDP 的 q 始终维持在 0.6633~0.6678 的高位,人口密度的 q 也达到 0.5252~0.5337,其解释力显著超过年均气温(0.4802~0.4844)、NDVI(0.4632~0.4674)等自然因子.这一发现与先前观察到的碳密度分布从自然主导向人文主导的转变相吻合,进一步确认了人类活动对区域碳格局的关键调控作用.值得注意的是,部分自然因子的影响力呈持续增强趋势.DEM 的 q 从 1980 年的 0.3634 上升至 2020 年的 0.3854,年均气温的 q 增幅达 0.0042,表明地形和气候因素在调节碳储量空间分布中的作用正逐步提升.这一现象与气候变化背景下高海拔地区生态系统的敏感性增强有关,尤其在西部高寒区域,自然条件对碳库稳定性的制约效更为显著.

交互探测结果进一步揭示了驱动机制的复杂性.各因子间普遍存在非线性增强效应,任意两因子交互的 q 均大于其独立作用值,表明碳储量空间分异是多重因素协同作用的结果.GDP 与其他因子的交互作用尤为突出,其中 GDP∩土壤侵蚀的交互作用从 2010 年的 0.7057 显著提升至 2020 年的 0.7750,跃居各交互组合之首;GDP∩坡度的交互作用也从

0.7061 增强至 0.7740.这表明,经济发展与生态退化的关联正在不断加强,人类活动通过改变自然过程而间接影响碳循环的效应日益突出[48].

从时序演变来看,驱动机制呈明显的阶段性.1980~2010 年,GDP 与区位因子的交互作用占主导地位(空间依附型),如 GDP∩距国道距离的 q 值维持在 0.74 以上,反映了基础设施建设对碳储量格局的强烈影响.2020 年 GDP 与生态因子的交互作用显著增强(生态胁迫型),特别是与土壤侵蚀、坡度等因子的交互效应大幅提升,体现了生态工程实施后经济发展与生态恢复的复杂博弈关系[44].

分析表明,碳储量时空演变是自然本底与社会经济因素协同作用的结果.GDP 作为主导驱动因子,不仅独立发挥着重要作用,还通过与其他因子的交互效应进一步放大其影响力.这种驱动机制的时空异质性为理解区域碳循环演变规律提供了新的视角:在经济发展压力较大的东部地区,人类活动是碳储量变化的主要驱动力;而在自然条件制约显著的西部地区,气候变化与地形因子的作用更为突出[50].

研究结果对区域生态管理具有重要启示:首先,应当建立基于主导驱动机制差异化的分区管控策略,在人文因子主导区域强化土地利用规划管理,在自然因子主导区域增强生态系统适应性;其次,需要重视多因子交互效应的调控,特别是在 GDP 与生态因子交互作用强烈的区域实施重点治理;最后,应充分考虑驱动机制的时空动态特征,建立适应发展阶段变化的弹性管理机制.

2.4.3 不足 本研究存在以下不足:首先,采用的碳密度参数主要基于文献和经验值确定,虽经过气候分区校正,但仍存在不确定性,尤其在地下生物量碳库和土壤有机碳垂直分布方面数据支撑不足,可能影响估算精度;其次,土地利用数据分辨率为 30m,综合精度较高,但受分辨率及解译误差影响,复杂地形区的分类依然存在不确定性,可能引致碳储量估算偏差;最后,本研究虽通过地理探测器揭示了人为因子的主导作用,但未整合县域社会经济面板数据.

未来研究需通过增强实地观测、融合多源遥感数据、构建县域社会经济-生态综合数据库,整合统计年鉴、企业工商数据等多元信息,并结合机器学习与多情景模拟等方法,提升碳储量估算精度和驱动机制解析能力,强化研究成果的政策支撑价值.

3 结论

3.1 1980~2020 年,西南地区碳储量总体下降 2.048Pg C,呈现 V 型演变轨迹,其中 1990~2000 年为碳流失高峰期(降幅 4.03%),2010~2020 年实现 933.239Tg C 的显著回升,其空间格局呈现西高东低分异特征;省级尺度呈现明显时空分异:西藏和四川表现为典型“V”型轨迹,其余省份则呈差异化下降模式,2000 年成为关键转折点;研究发现,2000 年后土地利用变化规模虽更大,但弹性系数由 1.352~2.094 骤降至 0.025~0.067.

3.2 1980~2020 年碳密度空间分异具有显著尺度依赖特征,总体差异波动下降,而省内市域差异贡献持续增强;2000 年前碳密度衰减区占主导,此后增长区显著扩大,形成以川西高原和藏东南为核心的高值区与四川盆地城市群低值区并存的空间格局;碳密度变化经历了强集聚-弱传导-微重构的演变过程,局部集聚模式呈现动态迁移特征,2010~2020 年间云贵川渝交界处出现新兴高-高集聚区.

3.3 1980~2020 年西南地区碳储量空间分异是各因子共同驱动的结果,主要受社会经济因素主导,GDP 与人口密度为最具影响力的核心驱动因子,其解释力显著高于自然因子;各驱动因子间存在显著的非线性增强效应,GDP、土壤类型和人口密度与其他因素的交互作用是影响生态系统碳储量空间格局及变化的主导因素组合;研究期间,驱动机制由空间依附型(1980~2010 年)向生态胁迫型(2020 年)转变,表现为主导交互因子从 GDP 与距国道距离(q>0.74)转为 GDP 与土壤侵蚀(q=0.775)

参考文献:

[1] 刘 坤,张 慧,孔令辉,等.陆地生态系统碳汇评估方法研究进展[J]. 生态学报, 2023,43(10):4294-4307.
Liu K, Zhang H, Kong L, et al. An overview of terrestrial carbon sink assessment methods towards achieving carbon neutrality in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(10):4294-4307.

[2] 王志远,吴 凡,万 鼎,等.多情景模拟区域土地利用变化对碳储量的影响 [J]. 中国环境科学, 2023,43(11):6063-6078.
Wang Z Y, Wu F, Wan D, et al. Multi-scenario simulation of the impact of regional land use change on carbon reserve [J]. China Environmental Science. 2023,43(11):6063-6078

[3] 王怡冰,李成亮,张 鹏,等.济南南部山区土地利用/覆被变化对碳储量的影响研究 [J]. 中国环境科学, 2024,44(7):3986-3998.
Wang Y B, Li C L, Zhang P, et al. Research on the impact of land use/cover change on carbon storage in the southern mountain area of

Jinan [J]. China Environmental Science, 2024,44(7):3986−3998.

[4] 邹桃红,陈　鹏,刘家福,等.不同土地利用情景下四平市生态系统碳储量时空演变 [J]. 中国环境科学, 2023,43(10):5508−5518.
Zou T H, Chen P, Liu J F, et al. Spatio−temporal dynamics of territorial ecosystem carbon storage under different land use scenarios in Siping City [J]. China Environmental Science, 2023,43(10):5508−5518.

[5] 王少剑,周诗洁,方创琳.1980~2020 年中国陆地生态系统碳储量时空格局与演进规律 [J]. 中国科学:地球科学, 2024,54(10):3323−3339.
Wang S J, Zhou S J, Fang C L. Spatial−temporal patterns and evolution of carbon storage in China’s terrestrial ecosystems from 1980 to 2020 [J]. Science China Earth Sciences, 67(10):3270−3287.

[6] 周沛芳,周　涛,刘　霞,等.青海省土壤有机碳估算及其不确定性分析 [J]. 地理科学进展, 2022,41(12):2327−2341.
Zhou P F, Zhou T, Liu X, et al. Estimation of soil organic carbon and its uncertainty in Qinghai Province [J]. Progress in Geography, 2022, 41(12):2327−2341.

[7] 李　萌,夏正宇,李跃峰,等.基于 DigiBog 模型模拟东亚季风区雨养型泥炭地碳累积过程:参数敏感性与气候响应机制 [J]. 第四纪研究, 2025,45(3):789−805.
Li M, Xia Z Y, Li Y F, et al. Simulating carbon accumulationof rain−fed peatlands in the East Asian monsoon region using the DigiBog model: Parameter sensitivity and climate response mechanism [J]. Quaternary Sciences, 2025,45(3):789−805.

[8] Baird A J, Morris P J, Belyea L R. The DigiBog peatland development model 1: rationale, conceptual model, and hydrological basis [J]. Ecohydrology, 2012,5(3):242−255.

[9] 田惠玲,朱建华,何　潇,等.基于随机森林模型的东北三省乔木林生物质碳储量预测 [J]. 林业科学, 2022,58(4):40−50.
Tian H L, Zhu J H, He X, et al. Projected biomass carbon stock of arbor forest of three provinces in Northeastern China based on random forest model [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022,58(4):40−50.

[10] Breiman. Random forests [J]. Mach Learn, 2001,2001,45(1):5−32.

[11] Jenkinson D S, Rayner J H. The turnover of soil organic matter in some of the rothamsted classical experiments [J]. Soil Science, 1977, 123(5):298−305.

[12] 王文俊,梁爱珍,张　延,等.黑土区保护性耕作土壤有机碳动态的模型模拟研究 [J]. 中国农业科学, 2024,57(10):1943−1960.
Wang W. J., Liang A. Z, Zhang Y, et al. Model simulation research of soil organic carbon dynamics of long−term conservation tillage in black soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024,57(10):1943−1960.

[13] Nie X, Lu B, Chen Z P, et al. Increase or decrease? Integrating the CLUMondo and InVEST models to assess the impact of the implementation of the Major Function Oriented Zone planning on carbon storage [J]. Ecological Indicators, 2020,118:106708.

[14] 刘　康,张　寒,张道军,等.黄土高原生态系统碳储量情景模拟与驱动因素——基于 PLUS–InVEST−Geodector 模型的研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(4):2147−2158.
Liu K, Zhang H, Zhang D J, et al. Scenario simulation and driving factors of ecosystem carbon storage in the Loess Plateau: A study based on the PLUS−InVEST−Geodector model [J]. China Environmental Science, 2025,45(4):2159−2170.

[15] 燕　腾,彭一航,王效科,等.西南 5 省市区森林植被碳储量及碳密度估算 [J]. 西北林学院学报, 2016,31(4):39−43.
Yan T, Peng Y H, Wang X K, et al. Estimation on carbon reserve and carbon density of the forest vegetation in five southwestern provinces [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016,31(4):39−43.

[16] 肖林林.山地丘陵区耕地土壤有机碳密度空间变异特征分析及预测[D]. 重庆:西南大学, 2013.
Xiao L L. Analysis of spatial variability and prediction of cultivated soil organic carbon in hilly area [D]. Chongqing: Southwest University. 2013.

[17] 唐　霄.四川森林植被碳储量估算及其空间分布特征 [D]. 成都:四川农业大学, 2007.
Tang X. Carbon storage of forest vegetation and spatial distribution in Sichuan province [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2007.

[18] 包承宇.云南省土壤有机碳储量估算及空间分布分析 [J]. 昆明:昆明理工大学, 2014.
Bao C Estimation and spatial distribution of soil organic carbon in Yunnan Province. Kunming: Kunming University of Science and Technology [D]. 2014.

[19] 吴思政,李小英,王毅雯,等.滇中 4 种典型公益林土壤活性有机碳分布特征 [J]. 中南林业科技大学学报, 2025,45(2):185−193.
Wu S Z, Li X Y, Wang Y W, et al. Distribution pattern of labile organic carbon in soil of four representative public welfare forests incentral Yunnan [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technolog, 2025,45(2):185−193,215.

[20] 曹若云.青藏高原土壤有机碳的精细化制图与储量估算研究 [D]. 兰州:兰州大学, 2024.
Cao R Y. Predictive mapping and storage estimation of soil organic carbon on the Qinghai−TibetPlateau at a high spatial resolution [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2024.

[21] 杜明凤,李明军,赵文静.贵州省 1995~2015 年森林碳储量时空变化研究 [J]. 浙江林业科技, 2022,42(1):41−47.
Du M, Li M, Zhao W. Temporal and spatial variation of forest carbon storage in Guizhou from 1995 to 2015 [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2022,42(1):41−47.

[22] 邵　波,燕　腾.四川省森林植被碳储量及碳密度估算 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2017,37(2):179−183.
Shao B, Yan T. Study on carbon storage and carbon densityof forest in Sichuan province [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science), 2017,37(2):179−183.

[23] 杨静怡,吴　峰.贵阳市 1980~2018 年土地覆盖类型及碳储量变化研究 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020,40(4):115−121.
Yang J Y, Wu F. Study on change of land cover type and carbon storage during 1980~2018 in Guiyang [J]. Journal Of Southwest Forestry University (Natural Science), 2020,40(4):115−121.

[24] 葛立雯,潘　刚,任德智,等.西藏林芝地区森林碳储量、碳密度及其分布 [J]. 应用生态学报, 2013,24(2):319−325.
Ge L W, Pan G, Ren D Z, et al. Forest carbon storage,carbon density,and their distribution characteristics in Linzhi area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013,24(2):319−325.

[25] 魏熙乐,李　倩,邓爱平,等.基于土地利用变化的四川省碳储量时空演变与预测及驱动因素分析 [J]. 水土保持研究, 2025,(3):373−383.
Wei X L, Li Q, Deng A P, et al. Spatiotemporal evolution, forecast, and driving factor analysis of carbon storage in Sichuan Province based land use change [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(3):373−383.

[26] 张志斌,杨　莹,张小平,等.我国西南地区风速变化及其影响因素 [J]. 生态学报, 2014,34(2):471−481.
Zhang Z B, Yang Y, Zhang X P, et al. Wind speed changes and its influencing factors in Southwestern China. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(2):471−481.

[27] 罗　曼,陶　敏,雒苑婷,等.依据核归一化差异植被指数的西南五省植被覆盖度时空变化及气候驱动因子 [J]. 东北林业大学学报,

2024,52(11):100-107.
Luo M, Tao M, Luo Y T, Yang C, et al. Temporal and spatial variation of vegetation cover and climate driving factors in the five southwestern provinces based on the kernel normalized difference vegetation index. Journal of northeast forestry university, 2024,52(11): 100-107.

[28] 王映思,肖天贵,董雪峰,等.东亚和南亚季风协同作用对西南地区夏季降水的影响 [J]. 气象学报, 2021,79(4):541-557.
Wang Y S, Xiao T G, Dong X F, et al. Enfluence of east asian monsoon and south asian monsoonsynergy on summer precipitation in southwest China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2021,79(4):41-557.

[29] 许澳康,胡梦珺,石 晶,等.石羊河流域生态系统碳储量时空变化及多情景模拟 [J]. 中国环境科学, 2024,44(6):3365-3375.
Xu A K, Hu M J, Jing S, et al. Spatial and temporal variability of ecosystem carbon storages and multi-scenario simulation in the Shiyang River basin [J]. China Environmental Science, 2024,44(6): 3365-3375.

[30] 赖 力.中国土地利用的碳排放效应研究 [D]. 南京:南京大学, 2010.
Lai L. 2010. Carbon Emission Effect of Land Use in China [D]. Nanjing: Nanjing University.

[31] Beck H E, Zimmermann N E, McVicar T R, et al. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution [J]. Scientific Data, 2018,5(1):180214.

[32] Piyathilake I D U H, Udayakumara E P N, Ranaweera L V, et al. Modeling predictive assessment of carbon storage using InVEST model in Uva province, Sri Lanka [J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2022,8(2):2213-2223.

[33] 张平平,李艳红,殷浩然,等.中国南北过渡带生态系统碳储量时空变化及动态模拟 [J]. 自然资源学报, 2022,37(5):1183-1197.
Zhang P, Li Y, Yin H, et al. Spatio-temporal variation and dynamic simulation of ecosystem carbon storage in the north-south transitional zone of China [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(5):1183-1197.

[34] 刘华军,邵明吉,吉元梦.中国碳排放的空间格局及分布动态演进——基于县域碳排放数据的实证研究 [J]. 地理科学, 2021, 41(11):1917-1924.
Liu H J, Shao M J, Ji Y M. The spatial pattern and distribution dynamic evolution of carbon emissions in China: Empirical study based on county carbon emission data [J]. Scientia Geographica Sinica, 2021,41(11):1917-1924.

[35] 刘志涛,王少剑,方创琳.粤港澳大湾区生态系统服务价值的时空演化及其影响机制 [J]. 地理学报, 2021,76(11):2797-2813.
Liu Z T, Wang, S J, Fang C L. Spatiotemporal evolution and influencing mechanism of ecosystem service value in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Acta Geographica Sinica, 2021,76(11):2797-2813.

[36] 张 婕,刘玉洁,张二梅,等.中国县域耕地动态演变及其驱动机制 [J]. 地理学报, 2023,78(9):2105-2127.
Zhang J, Liu Y J, Zhang E M, et al. Dynamics and driving mechanisms of cultivated land at county level in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2023,78(9):2105-2127.

[37] 张 爽,高启晨,张 戎,等.基于 PLUS-InVEST 模型碳储量时空演变及驱动因素分析——以纳帕海流域为例 [J]. 中国环境科学, 2024,44(9):5192-5201.
Zhang S, Gao Q C, Rong Z, et al. Evaluating the changes and driving factors of carbon storage using the PLUS-InVEST Model: A case study of Napa Sea Basin [J]. China Environmental Science, 2024,44 (9):5192-5201.

[38] Li M, Zhou Y, Xiao P, et al. Evolution of Habitat Quality and Its Topographic Gradient Effect in Northwest Hubei Province from 2000 to 2020 Based on the InVEST Model [J]. Land, 2021,10(8),857.

[39] 施智勇,谢慧黎,王圳峰,等.基于参数最优地理探测器的福州市生境质量时空格局与驱动力分析 [J]. 环境工程技术学报, 2023,13(5): 1921-1930.
Shi Z Y, Xie H L, Wang Z F, et al. Analysis of spatiotemporal heterogeneity of habitat quality and their driving factors based on optimal parameters-based geographic detector for Fuzhou City, China [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023,13(5): 1921-1930.

[40] 帕茹克·吾斯曼江,艾 东,冀正欣,等.人地关系视角下北京市“三生”空间转型及其碳储量效应 [J]. 中国环境科学, 2024,44(5):2786-2798.
Paruke W S M J, Ai D, Ji Z X, et al. The spatial transition of “production-living-ecological” space in Beijing and its effect on carbon storage under the perspective of human-land relation [J]. China Environmental Science, 2024,44(5):2786-2798.

[41] Xu L, Yu G R, He N P, et al. Carbon storage in China’s terrestrial ecosystems: A synthesis [J]. Scientific Reports, 2018,8(1):2806.

[42] Liu X P, Wang S J, Wu P J, et al. Impacts of Urban Expansion on Terrestrial Carbon Storage in China [J]. Environmental Science and Technology, 2019,53(12):6834-6844.

[43] Fang W, Jing L, Jian W, et al. Multi-Scenario Simulation of Land Use Change in Chengyu Economic Zone and Its Influence on Carbon Reserves [J]. Environmental Science, 2025,46(9):5718-5728.

[44] Xiang M S, Wang C J, Tan Y X, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of carbon storage in the Western Sichuan Plateau [J]. Scientific Reports, 2022,12(1):8114.

[45] 李海萍,李定恒,李 豪.贵州省退耕还林还草潜在碳汇效益评估 [J]. 生态学报, 2022,42(23):9499-9510.
Li H P, Li D, H, LiH. Evaluation of potential carbon sink benefits of Grain for Green Project in Guizhou Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(23):9499-9510.

[46] 周 波,许源溪,冯 田.成渝城市群碳平衡空间分异与优化对策 [J]. 长江流域资源与环境, 2024,33(8):1650-1662.
Zhou B, Xu Y X, Feng T. Spatial differentiation of carbon balance and optimization countermeasures in Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024,33(8):1650-1662.

[47] Zhang C, Xiao Q, Wu Z Y, et al. Ecosystem-driven karst carbon cycle and carbon sink effects [J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2022,(2):99-112.

[48] 周文强,韩 宇,王金龙,等.洞庭湖流域碳储量的时空异质性及驱动力分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(4):1851-1862.
Zhou W Q, Han Y, Wang J L, et al. Spatiotemporal heterogeneity and driving forces of carbon storage in the Dongting Lake Basin [J]. China Environmental Science, 2024,44(4):1851-1862.

[49] Zhang M, Huang X, Chuai X, et al. Impact of land use type conversion on carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A spatial-temporal perspective [J]. Scientific Reports, 2015,5(1):10233.

[50] Mu C, Abbott B W, Norris A J, et al. The status and stability of permafrost carbon on the Tibetan Plateau [J]. Earth-Science Reviews, 2020,211:103433.

作者简介：王 芳(1983-),女,河南周口人,副教授,博士,主要从事主要研究方向为资源与环境遥感、土地利用信息提取与碳储量变化研究.发表论文 20 余篇.398321192@qq.com.