

DOI: 10.20103/j.stxb.202303020379

陈田田, 陈果, 王强. 贵州省碳吸收/碳排放时空变化特征及其与经济的脱钩效应. 生态学报, 2024, 44(3): 915-929.

Chen T T, Chen G, Wang Q. Spatiotemporal change patterns of carbon absorption/emission and decoupling effect with economy in Guizhou Province. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 915-929.

# 贵州省碳吸收/碳排放时空变化特征及其与经济的脱钩效应

陈田田<sup>1,2</sup>, 陈 果<sup>1,2</sup>, 王 强<sup>3,\*</sup>

1 重庆师范大学三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331

2 重庆市三峡库区地表生态过程野外科学观测研究站, 重庆 401331

3 重庆市规划和自然资源调查监测院, 重庆 401121

**摘要:** 贵州省是我国喀斯特生态系统的典型分布区, 生态敏感且脆弱, 同时其也曾是我国的连片特困区, 经济发展愿望迫切。对区域环境-经济发展状况及相互作用关系进行研究具有重要意义。研究从植被净生态系统生产力、土壤碳储量、岩溶碳通量三方面计算了贵州省陆地生态系统碳吸收, 以能源燃烧排放的 CO<sub>2</sub> 表征碳排放量, 对区域碳吸收和碳排放的时空变化特征进行剖析, 在此基础上构建环境碳负荷指数和脱钩弹性系数, 用于解析贵州省碳收支状况及环境碳负荷与经济发展之间的脱钩关系。结果显示: (1) 贵州省植被净生态系统生产力均值为 257.72 g C/m<sup>2</sup>, 呈逐步增强趋势, 空间上呈现西高东低、南高北低的分布格局; 岩溶碳通量的均值为 6.71 t C/km<sup>2</sup>, 年际波动较大, 集中分布在研究区东北和西南部; 土壤碳储量的均值为 8.38 t/hm<sup>2</sup>, 其高值区主要位于研究区南部和东部边缘; (2) 区域碳排放呈现出了逐年增长的特征, 表明了能源消耗的增强, 形成了以城市高值区为中心向外辐射递减, 各点之间以道路连通为特征的分布格局; (3) 环境碳负荷指数呈逐年增长趋势, 表征区域面临的环境压力越来越大, 特别是在贵州省主城区出现了明显的收支不平衡, 能源结构优化亟待加强; (4) 综合脱钩状态整体以弱脱钩和扩张连接为主, 且随时间推移脱钩状态由弱脱钩向扩张连接转变, 说明环境保护滞后于经济发展, 也就意味着贵州省经济的发展一定程度上牺牲了环境保护。未来应进一步强化生态修复工程的可持续性, 同时发展绿色经济以促进区域生态-经济可持续发展。

**关键词:** 净生态系统生产力; 土壤碳储量; 岩溶碳通量; 碳排放; 脱钩效应

## Spatiotemporal change patterns of carbon absorption/emission and decoupling effect with economy in Guizhou Province

CHEN Tiantian<sup>1,2</sup>, CHEN Guo<sup>1,2</sup>, WANG Qiang<sup>3,\*</sup>

1 Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

2 Chongqing Field Observation and Research Station of Surface Ecological Process in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China

3 Chongqing Institute of Surveying and Monitoring for Planning and Natural Resources, Chongqing 401121, China

**Abstract:** As a typical distribution area of China's karst ecosystem, the ecology in Guizhou Province is sensitive and fragile. Meantime, it used to be a contiguous area of dire poverty in China, with an urgent desire for economic development. It is of great significance to study the development status of regional ecological environment-economy and their interaction relationship. Based on this, we calculated the carbon absorption of terrestrial ecosystems in Guizhou Province from three aspects: net ecosystem productivity of vegetation, soil carbon storage, and karst carbon flux, characterized the carbon

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (42001090); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN202000512); 重庆市教委社科规划项目 (2020BS45)

**收稿日期:** 2023-03-02; **网络出版日期:** 2023-11-08

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

emissions by CO<sub>2</sub> emissions from energy combustion and analyzed the spatiotemporal characteristics of regional carbon absorption and emissions. Then, we clarified the situation of carbon budget in Guizhou Province by building an environmental carbon loading index and decoupling elasticity value, and explored the decoupling relationship between environmental carbon loading and economic development. The result showed that: (1) The mean value of vegetation net ecosystem productivity in Guizhou Province was 257.72 g C/m<sup>2</sup>, showing a gradually increased trend and a spatial distribution pattern of high value in the west and south part of the study area, while low in the east and north regions; the mean value of karst carbon flux was 6.71 t C/km<sup>2</sup>, with a significant inter-annual fluctuation, and the regions with high value were concentrated in the northeast and southwest part of the study area; the average soil carbon storage was 8.38 t/hm<sup>2</sup>, and the regions with high value were mainly distributed in the southern and eastern marginal areas. (2) The carbon emissions in Guizhou Province showed the overall increasing trend, indicating an increase in energy consumption and forming a distribution pattern with the city as the center and decreasing outward, and the points were connected by roads. (3) The environmental carbon loading index also increased over time, indicating the increasing environmental pressure in this region. Especially in the main urban areas of Guizhou Province, there was an obvious imbalance in carbon budget, and energy structure optimization needs to be strengthened. (4) The comprehensive decoupling status was dominated by weak decoupling and expansion connection, and the decoupling status changed from weak decoupling to expansion connection over time, indicating that environmental protection lagged behind economic development, and the economic development of Guizhou Province sacrificed environmental protection to a certain extent. In the future, the sustainability of ecological restoration projects should be further strengthened, and green economy should be developed to promote the sustainable development of regional ecology and economy.

**Key Words:** net ecosystem productivity of vegetation; soil carbon storage; karst carbon flux; carbon emissions; decoupling effect

以全球变暖为主要特征的气候变化正在持续对自然环境和人类福祉产生影响,成为了当今国际社会普遍关注的全球问题,而人类活动导致的大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升是气候变暖的主要驱动因素<sup>[1]</sup>。国际能源署(IEA)在 2009 年的报告中指出,中国 CO<sub>2</sub> 排放总量在 2007 年超过美国成为世界首位<sup>[2]</sup>,碳排放的持续增长已经对经济发展、人类健康和生态系统稳定造成威胁<sup>[3]</sup>。在巨大的碳排放压力下,中国开始加强以增强碳吸收能力、降低碳排放为目的生态工程建设和经济转型<sup>[4]</sup>。碳吸收与碳排放变化特征、驱动机制及对全球气候变化影响等也成为了重要研究内容。

喀斯特地貌占全球陆地面积的 15%,作为全球植被的重要组成部分,喀斯特植被不仅提供了多种生态服务功能,更是全球碳循环的重要组成部分和关键环节,提供了强大的碳吸收功能<sup>[5]</sup>。目前对喀斯特生态系统中碳的研究主要集中在两方面:一是碳吸收的时空演变特征研究;二是碳吸收变化的驱动机制探讨。喀斯特生态系统碳吸收主要由三部分组成,即喀斯特植被碳、岩溶碳和土壤碳。在植被碳吸收研究中发现,喀斯特植被绿度显著上升<sup>[6]</sup>,拥有巨大的碳吸收潜力,以全球 0.36% 的面积贡献了 5% 的地上生物量<sup>[7]</sup>,能够抵消或平衡大部分因森林砍伐和城市扩张造成的碳损失<sup>[8]</sup>;在岩溶碳吸收的研究中发现,岩溶碳吸收对全球大气 CO<sub>2</sub> 回收的贡献占陆地净碳汇的四分之一以上<sup>[9]</sup>,且随着增温和 CO<sub>2</sub> 排放量的增加其发挥的作用越来越重要,并表现出了明显的尺度差异性<sup>[10]</sup>;在土壤碳研究中发现,喀斯特地区有机碳储量是非喀斯特地区的 3.5 倍,且土壤的固碳速度更快、时间更长<sup>[11]</sup>。虽然这些研究指明了喀斯特陆地生态系统碳吸收的时空变化规律及其重要性,但不难发现这些研究多集中于喀斯特陆地生态系统碳吸收的某一方面,很少将三个方面的碳进行综合研究,因此可能会导致喀斯特生态系统碳吸收能力被低估。关于碳吸收变化的驱动机制,学者们一致认为以气温、降水量<sup>[12]</sup>、土壤环境<sup>[13]</sup>为代表的自然因素和以土地利用<sup>[14]</sup>、生态工程<sup>[15]</sup>为代表的人为因素是造成碳吸收能力不断变化的主要动力。其中 CO<sub>2</sub> 排放增多引起的气候变暖是造成陆地生态系统碳吸收能力变化

的重要影响因素<sup>[16]</sup>,同时 CO<sub>2</sub>的排放与社会经济发展又息息相关。中国喀斯特地貌集中分布的西南地区在历经“西部大开发”后其已成为我国经济发展最快速的区域之一<sup>[17]</sup>。特别是近十年来,西南地区经济以年均 10.18% 的速度增长,高于全国平均水平,人均可支配收入也由 2000 年的 2733.40 元增长至 2019 年的 24280.05 元<sup>[18]</sup>。然而,随着社会经济快速发展,城市化、工业化的推进致使区域能源消耗碳排放也日益增加。最新的统计数据显示,2010 至 2020 年,西南地区碳排放量由 7.99 亿 t 上升至 10.99 亿 t<sup>[19]</sup>,碳排放上升率为 37.42%,较全国平均水平高出 10%,碳减排形势严峻。因此,有效评估碳排放、碳吸收时空变化规律,探讨社会经济发展与碳排放造成的环境压力之间的复杂关系成为了重要研究内容。目前,学者们通过环境-经济耦合协调度<sup>[20]</sup>、环境库兹尼茨曲线<sup>[21]</sup>、生态足迹<sup>[22]</sup>、耦合-解耦指数<sup>[23]</sup>、脱钩指数<sup>[24]</sup>等方法对区域环境-经济相互关系进行了探讨,其中以脱钩指数运用较为广泛。只是,这些研究多集中于静态分析或以整个研究期为对象<sup>[25]</sup>,很少剖析长时间、不同发展阶段喀斯特地区经济-环境之间的相互作用关系。

贵州省作为中国喀斯特生态系统的典型分布区,具有土地瘠薄、生境脆弱、环境容量小、抗干扰能力低等特点;此外,贵州省曾是我国涵盖连片贫困区最多的省份之一,以高强度农业活动为主,经济发展落后,人口压力突出,同时面临巨大的生态和经济难题<sup>[26]</sup>。为此,20 世纪初区域内陆续实施退耕还林还草、石漠化综合治理等生态工程,并同时进行了一系列产业开发活动以推动经济发展<sup>[27]</sup>。不可否认各项生态修复措施极大地增强了区域的碳吸收能力,但同时经济发展带来的碳排放对环境造成的压力也日益增大。区域碳收支变化情况、与经济发展之间的相互关系等成为了重要的研究内容。基于此本文在对贵州省陆地生态系统碳吸收、能源消耗碳排放量进行计算分析的基础上,利用碳吸收、碳排放计算结果构建环境碳负荷指数,探究环境碳负荷与经济之间的脱钩关系,以期对贵州省增汇减排、发展经济提供科学参考。

## 1 研究区概况

贵州省(103°36′—109°35′E、24°37′—29°13′N)地处云贵高原(图 1),全省总面积约 17.2 万 km<sup>2</sup>,共包含 88 个行政区(县)。贵州省地貌类型复杂多样,其中喀斯特地貌分布最为广泛,约占全省陆地总面积的 73.6%;因其地质条件特殊加之人类活动的不合理开发,区域石漠化、水土流失等生态环境问题突出<sup>[28]</sup>。同时,贵州省也曾是我国最大的连片特困区,即使已经消除了绝对贫困但其相对贫困区县的增加速率仍然较高,经济发展愿望迫切<sup>[29]</sup>。为此,区域实施了相应的产业开发活动,但主要以资源消耗型为主<sup>[30]</sup>,CO<sub>2</sub>排放压力

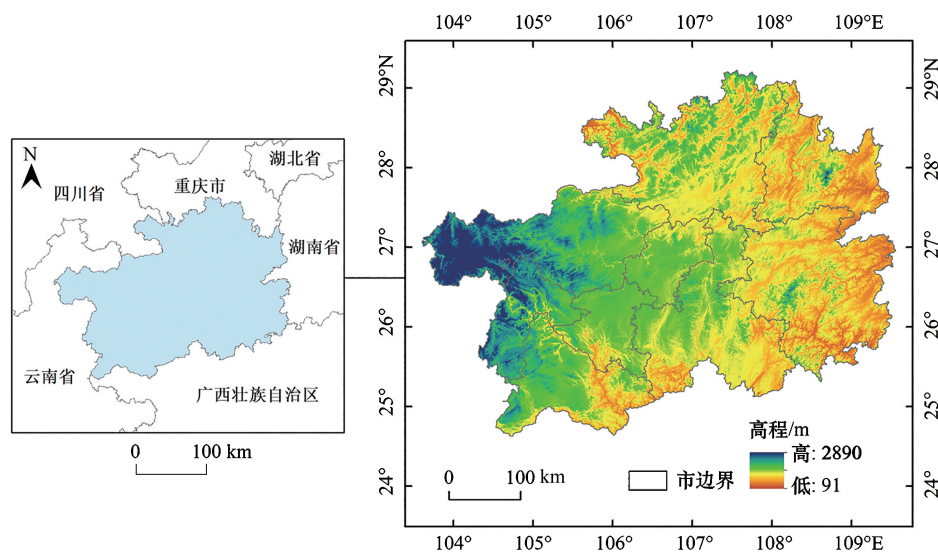


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Location of the study area

增大、植被生态系统破坏明显、石漠化问题凸显。为解决这些矛盾,区域实施了一系列生态修复工程,这在一定程度上增加了植被覆盖度及其带来的碳吸收能力<sup>[6]</sup>。区域碳收支变化以及其与经济间的相互作用关系成为了重要的研究内容。

## 2 数据来源与评估方法

### 2.1 数据源

本文使用的蒸散发 (Evapotranspiration, ET) 数据以及植被净初级生产力 (Net Primary Production, NPP) 数据,均来自蒙大拿大学分析处理后的 MODIS 16 (ET) 和 MODIS 17 (NPP) (<https://www.nts.gov/umt.edu/project/modis/>) 数据,时间序列为 2000—2020 年,空间分辨率为 500 m;2000—2020 年的气象数据,主要包含气温和降水,来自于青藏高原数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>),空间分辨率为 1 km;土壤数据来自于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>),空间分辨率为 1 km;岩溶碳通量计算中的溶解无机碳 (dissolved inorganic carbon, DIC) 浓度数据来源于相关文献<sup>[10]</sup>;2000—2020 年的夜间灯光数据来源于时空三级大数据平台 (<http://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/>),空间分辨率为 1 km;高程数据来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m;省域、区(县)等边界数据来源于全国地理信息资源目录服务系统 (<https://www.webmap.cn/>);地区生产总值 (Gross Domestic Product, GDP) 来源于《中国县域统计年鉴 (2001—2021)》。基于以上数据,本文对其空间分辨率以及坐标进行了统一。

### 2.2 评估方法

#### 2.2.1 净生态系统生产力 (NEP)

净生态系统生产力 (Net Ecosystem Production, NEP) 作为估算植被碳源/汇的重要指标,是陆地生态系统响应气候变化的重要衡量依据<sup>[31]</sup>。本文使用植被 NEP 来表示植被碳吸收能力,其大小可以用植被净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 与土壤异养呼吸 ( $R_H$ ) 之差来表示,具体计算公式如下:

$$NEP_x = NPP_x - R_{H_x} \quad (1)$$

式中,  $NEP_x$  为研究区栅格单位  $x$  的年净生态系统生产力;  $NPP_x$  为研究区栅格单元  $x$  的年植被净初级生产力;  $R_{H_x}$  为研究区栅格单元  $x$  的土壤异养呼吸,以上参数均为  $g\ C/m^2$ 。

土壤异养呼吸 ( $R_H$ ) 即土壤碳排放量,本文采用裴志永等<sup>[32]</sup> 建立的温度、降水与土壤碳排放的回归方程对其进行估算,计算公式如下:

$$R_{H_x} = 0.22 \times (\exp(0.0912T_x) + \ln(0.3145R_x + 1)) \times 30 \times 46.5\% \quad (2)$$

式中,  $R_{H_x}$  为研究区栅格单位  $x$  的年土壤异养呼吸 ( $gC/m^2$ );  $T_x$  为研究区栅格单元  $x$  的年均温 ( $^{\circ}C$ );  $R_x$  为研究区栅格单元  $x$  的年降水量 (mm)。

#### 2.2.2 土壤有机碳储量 ( $SOC_s$ )

本文通过计算不同厚度的土壤碳储量 (Soil Organic Carbon Storage,  $SOC_s$ ,  $t/hm^2$ ),并将不同厚度土壤碳储量相加来表征整体的土壤碳吸收能力,计算公式如下:

$$SOC_s = H \times B_i \times SOC \times 0.1 \quad (3)$$

式中,  $SOC_s$  为土壤有机碳储量;  $H$  为土层土壤厚度 (cm);  $B_i$  为土层土壤的容重 ( $g/cm^3$ );  $SOC$  为土壤有机碳含量 ( $g/kg$ )。

#### 2.2.3 岩溶碳汇 (CCSF)

本文先使用相关学者<sup>[10]</sup> 提出的岩溶碳汇通量计算公式求得岩溶碳汇通量 (Carbon Sink Flux, CCSF),再将面积乘以岩溶碳汇通量得出岩溶碳汇总量,用于表征岩溶的碳吸收能力,计算公式如下:

$$CCSF = 0.5 \times 12 \times R \times [HCO_3^-] \quad (4)$$

式中, CCSF 为岩溶碳通量 ( $t\ C\ km^{-1}\ a^{-1}$ );  $R$  为研究区的径流深度 ( $m/a$ ),等于降水与实际蒸散发之差;  $[HCO_3^-]$  为水中的溶解无机碳 (Dissolved Inorganic Carbon, DIC) 浓度 ( $mmol/L$ )。

### 2.2.4 趋势分析

本文采用基于像元的一元线性回归法对植被 NEP 以及岩溶碳通量研究期内的变化趋势及其空间分布进行分析,斜率大于 0 则表示像元值在研究期内呈增加趋势,反之则呈减少趋势<sup>[33]</sup>,计算公式如下:

$$\theta_{\text{slop}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times x_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (5)$$

### 2.2.5 能源消耗碳排放量

本文使用张永年等<sup>[34]</sup>根据夜间灯光数据与化石能源消耗产生的碳排放统计数据之间存在的正相关关系所构建的面板数据模型模拟碳排放量,模型结构如下:

$$\ln \text{TCO}_2 = 0.36 \ln \text{NTL} + 2.73 \quad (6)$$

式中,TCO<sub>2</sub>为模拟的能源消耗碳排放量;NTL 为夜间灯光亮度总值。

### 2.2.6 城市环境碳负荷指数

本文使用潘竟虎等<sup>[2]</sup>提出的城市环境碳负荷指数表征区域内的碳收支平衡程度。当环境碳负荷指数小于 0 时,碳吸收增速大于碳排放增速,两者之间呈协调状态,碳吸收压力小;若环境碳负荷指数大于 0,则指数越大碳吸收与碳排放之间越不平衡,环境吸收 CO<sub>2</sub>的压力越大,具体计算公式如下:

$$EP_x = \frac{\delta \text{CO}_2 / \text{CO}_2 + \delta \text{CBI}_x / \text{CBI}_x}{2} \quad (7)$$

式中,EP<sub>x</sub>(Environment Pressure)为研究区栅格单位  $x$  的城市环境碳负荷指数;CBI<sub>x</sub>为研究区栅格单位  $x$  的年碳足迹压力指数; $\delta \text{CO}_2$ 、 $\delta \text{CBI}$  为 CO<sub>2</sub>、CBI 起始年份与末尾年份之差。

碳足迹压力指数(CBI)是区域能源碳排放量与区域碳吸收能力之比,本文使用卢俊宇等<sup>[35]</sup>构建的碳足迹压力公式进行计算,并将陆地生态系统植被、岩溶、土壤碳吸收能力之和作为陆地生态系统总的碳吸收能力,具体计算公式如下:

$$\text{CBI}_x = \frac{CE_x}{CS_x} \quad (8)$$

式中,CBI<sub>x</sub>为栅格单元  $x$  的碳足迹压力指数;CE<sub>x</sub>(Carbon Emission, CE)为栅格单元  $x$  的化石能源碳排放总量;CS<sub>x</sub>为栅格单元  $x$  的碳吸收能力(Carbon Sink, CS);碳排放和碳吸收单位均为万 t。

### 2.2.7 脱钩弹性值

“脱钩”一词最早来源于物理学领域,经济合作与发展组织(OECD)首次将其应用于环境领域,用以反映环境压力状态与经济驱动力之间的关系<sup>[36]</sup>。只是,OECD 提出的脱钩模型仅能识别环境压力与经济驱动力不同步变化的现象,难以识别变量同时增减的情况;同时,其脱钩状态的判定取决于期末和期初值的选择,具有高度的敏感性<sup>[25]</sup>。鉴于此,学者 Tapio<sup>[37]</sup>在综合考虑环境压力变量与经济变量脱钩的基础上构建了新的脱钩弹性值,该值不仅可以反映经济-环境间不同方向的变化趋势而且有效避免了基期选择随机性造成的计算偏差,已被广泛运用于相关研究<sup>[38]</sup>。因此,本文基于 Tapio 模型用以测度经济发展与城市环境碳负荷之间的脱钩关系,其计算公式如下:

$$e = \frac{EP}{\delta \text{GDP} / \text{GDP}} \quad (9)$$

式中, $e$ 为脱钩弹性值;EP 为环境碳负荷指数; $\delta \text{GDP}$  为起始年份与末尾年份 GDP 之差;根据 Tapio 模型中对脱钩弹性值区间的划分,可将脱钩状态细分成 8 类,如表 1 所示:

本文研究期内未出现经济增长小于 0 的情况,因此不包含强负脱钩、弱负脱钩、衰退脱钩、衰退连结这四种脱钩状态;剩下的四种脱钩状态中,强脱钩是最理想的状态,经济类型为挖潜发展型,此状态下环境-经济协调发展;扩张负脱钩为最不利状态,经济类型为粗狂扩展型,此时环境-经济发展最不协调;其他两个状态处于中间类型。

表 1 脱钩指数及脱钩状态划分

Table 1 Decoupling indicators and its criteria

| 脱钩状态<br>Decoupling state   |       | 环境压力<br>Environmental pressure | 经济增长<br>Economic growth | 弹性<br>Elastic decoupling | 济发展类型<br>Type of economic development |
|----------------------------|-------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| 负脱钩<br>Negative decoupling | 扩张负脱钩 | >0                             | >0                      | $e>1.2$                  | 低效扩张型                                 |
|                            | 强负脱钩  | >0                             | <0                      | $e<0$                    | 粗放扩展型                                 |
|                            | 弱负脱钩  | <0                             | <0                      | $0\leq e<0.8$            | 发展迟滞型                                 |
| 脱钩<br>Decoupling           | 弱脱钩   | >0                             | >0                      | $0\leq e<0.8$            | 集约扩张型                                 |
|                            | 强脱钩   | <0                             | >0                      | $e<0$                    | 挖潜发展型                                 |
| 连结<br>Coupling             | 衰退脱钩  | <0                             | <0                      | $e>1.2$                  | 发展迟滞型                                 |
|                            | 扩张连结  | >0                             | >0                      | $0.8\leq e\leq 1.2$      | 低效扩张型                                 |
|                            | 衰退连结  | <0                             | <0                      | $0.8\leq e\leq 1.2$      | 发展迟滞型                                 |

3 结果分析

3.1 贵州省陆地碳吸收时空变化特征

3.1.1 植被净生态系统生产力时空变化特征

2000—2020 年,贵州省植被净生态系统生产力整体呈波动上升趋势,表明区域内植被吸收能力不断增强(图 2)。同时,整个研究期贵州省植被碳吸收量的最高点出现在 2017 年,年植被固碳总量为 58.1 TgC,最低点出现在 2008 年,植被固碳总量为 33.6 TgC。在空间分布上,贵州省植被净生态系统生产力基本呈南高北低的分布格局(图 3),高值区主要位于研究区南部,该区域森林覆盖率高、降水丰富、自然条件较优越;低值区主要位于城市主城区及研究区西北部,这类区域人口集聚度较高、人类活动频繁。

就贵州省植被净生态系统生产力的变化而言,68%

的区域呈增加趋势,主要位于研究区西北部;28%的区域处于稳定的状态,主要包括黔西南南部、黔南南部、黔东南南部区域;仅有 2.2%的区域出现变差的情况,主要分布于城市主城区(图 4)。这种变化离不开 2000 年以来的退耕还林还草以及针对喀斯特地区实施的一系列生态修复工程,这使得贵州省成为植被生长的热点区域,不仅改善了区域内生态环境,还增强了植被碳吸收能力。

3.1.2 岩溶碳通量时空变化特征

2000—2020 年,贵州省岩溶碳通量整体呈上升趋势,但年际波动较大(图 5)。研究期内岩溶碳通量的最高点出现在 2015 年,总量为 2.11 TgC,最低点出现在 2011 年,总量为 0.49 TgC。在空间分布上,岩溶碳通量呈现出西南高、东北低的格局(图 6),最高值出现在黔西南地区,该地区热量充足、雨量充沛、径流丰富,终年温暖湿润,拥有较高的水热通量;较低值集中分布于北部地区,北部地区岩溶地貌稀少,因此岩溶作用产生的岩溶碳通量也相应较低。

从贵州省岩溶碳通量变化上看,91%的区域呈增加趋势,主要集中在中北部地区;2%的区域保持基本稳定的状态,分散布局在黔东南地区;有 5%的区域出现明显变差的情况,主要位于研究区北缘(图 7)。岩溶碳通量显著增加的区域主要集中在长江流域,径流是影响岩溶碳通量的重要因素,受到流域中的气候因子、植被多样性的影响,因此呈现出的变化更加显著。

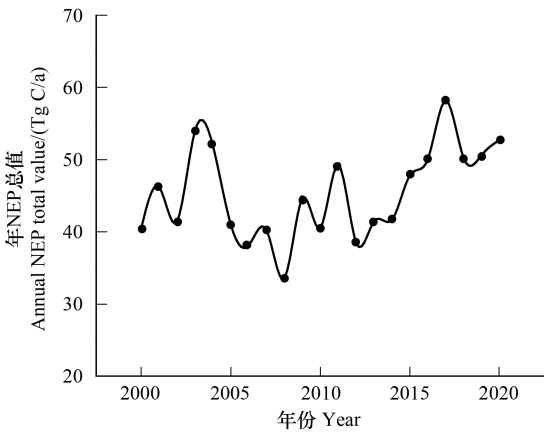


图 2 2000—2020 年贵州省年 NEP 总值年际变化

Fig.2 Interannual variation in total annual NEP value in Guizhou Province, 2000—2020

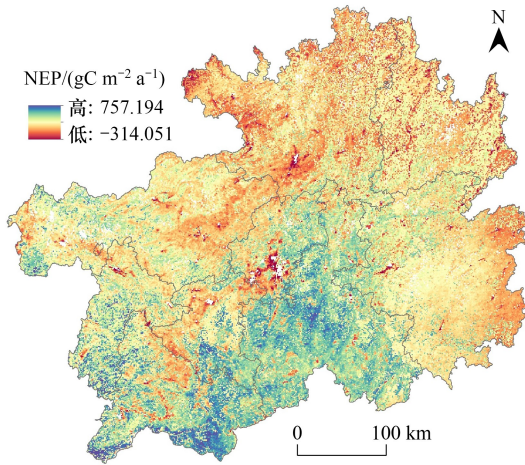


图3 2000—2020年贵州省植被NEP平均值空间分布

Fig.3 Spatial distribution of vegetation NEP averages in Guizhou Province, 2000—2020

NEP: 植被净生态系统生产力 Net ecosystem production

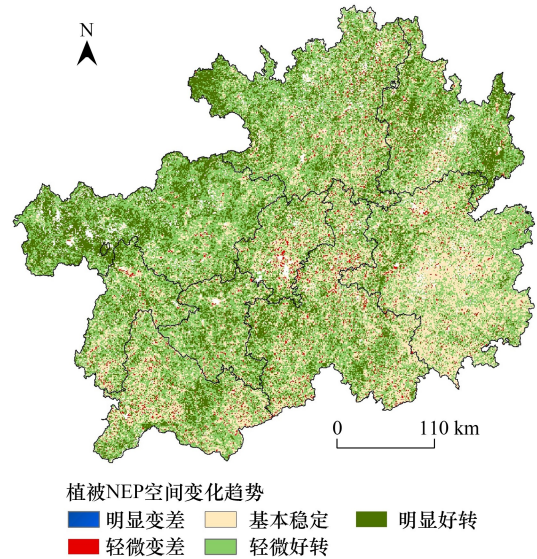


图4 2000—2020年贵州省植被NEP空间变化趋势

Fig.4 Spatial trends in vegetation NEP in Guizhou Province, 2000—2020

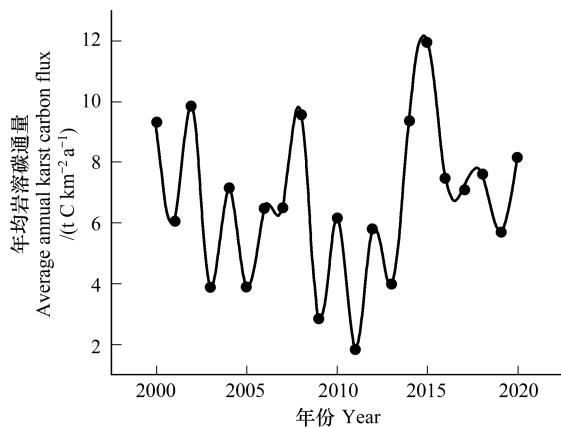


图5 2000—2020年贵州省岩溶碳通量年际变化

Fig.5 Interannual variation in karst carbon fluxes in Guizhou Province, 2000—2020

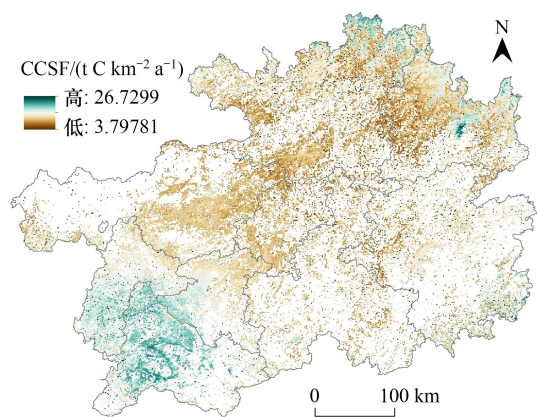


图6 2000—2020年贵州省岩溶碳通量平均值空间分布

Fig.6 Spatial distribution of mean karst carbon fluxes in Guizhou Province, 2000—2020

CCSF: 岩溶碳通量 carbon sink flux

### 3.1.3 土壤碳储量空间分布特征

贵州省喀斯特地貌分布广泛,环境状况复杂且地貌和植被多样,土壤厚度和有机碳含量空间分布差异大,因此土壤碳储量的分布异质性强。浅层土壤的平均碳储量为  $5.1 \text{ t/hm}^2$ ,高值区主要分布在研究区北部、西南部和东南部,低值区分布在东部;深层土壤的平均碳储量为  $3.5 \text{ t/hm}^2$ ,高值区主要分布在研究区西南部、东南部和东部边缘,低值区同样分布在研究区东部。总的土壤碳储量空间分布均匀,高值区聚集明显,集中在西南部、东南部和东部边缘(图8);因为贵州省的土层较薄、土壤退化严重,土壤碳储量相较于非喀斯特地区略低。

### 3.1.4 总碳吸收量时空变化特征

2000—2020年,贵州省陆地生态系统总碳吸收量随着时间变化呈上升趋势,而后上升态势趋于平缓,说明区域内陆地生态系统的碳吸收能力不断增强(图9)。研究期内,贵州省碳吸收量最高点出现在2017年,年碳吸收量为  $211.54 \text{ TgC}$ ,最低点出现在2008年,年碳吸收量为  $186.96 \text{ TgC}$ 。在空间分布上,贵州省总碳吸收量分布较为均匀(图10),高值主要集中分布在西南部、东南部及东部,该区域土壤碳储量丰富、植被覆盖度

高,碳吸收能力较强;低值位于城市地域,呈星点状分布,频繁的人类活动抑制了区域的碳吸收能力。贵州省虽是生态极为敏感和脆弱的区域,但其水热条件具备、生物资源丰富且各类生态修复工程使土壤修复和植被恢复潜力大,因此贵州省拥有巨大的碳吸收潜力。

### 3.2 贵州省碳排放时空变化特征

2000—2020 年贵州省碳排放呈现持续上升的趋势(图 11),最高值出现在 2020 年,全年碳排放量为 1.96 亿 t,最低值出现在 2001 年,碳排放量为 0.51 亿 t;研究期内 2016—2018 年碳排放量出现大幅度下降,得益于省内大力扶持新能源产业和实施生态战略;但传统的能源消费结构过渡时间长,加之贵州省曾经作为中国贫困问题较为严重的省份之一,经济正处于上升阶段,尤其是近 10 年来的城镇化、工业化,能源需求量不断加大,因此碳排放呈增长的趋势仍将持续。

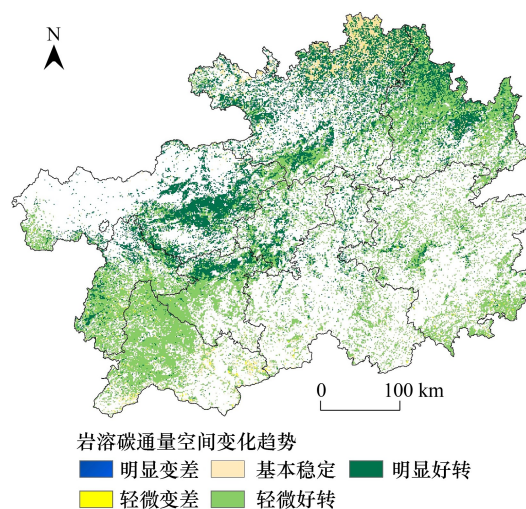


图 7 2000—2020 年贵州省岩溶碳通量空间变化趋势  
Fig.7 Spatial trends in karst carbon fluxes in Guizhou Province, 2000—2020

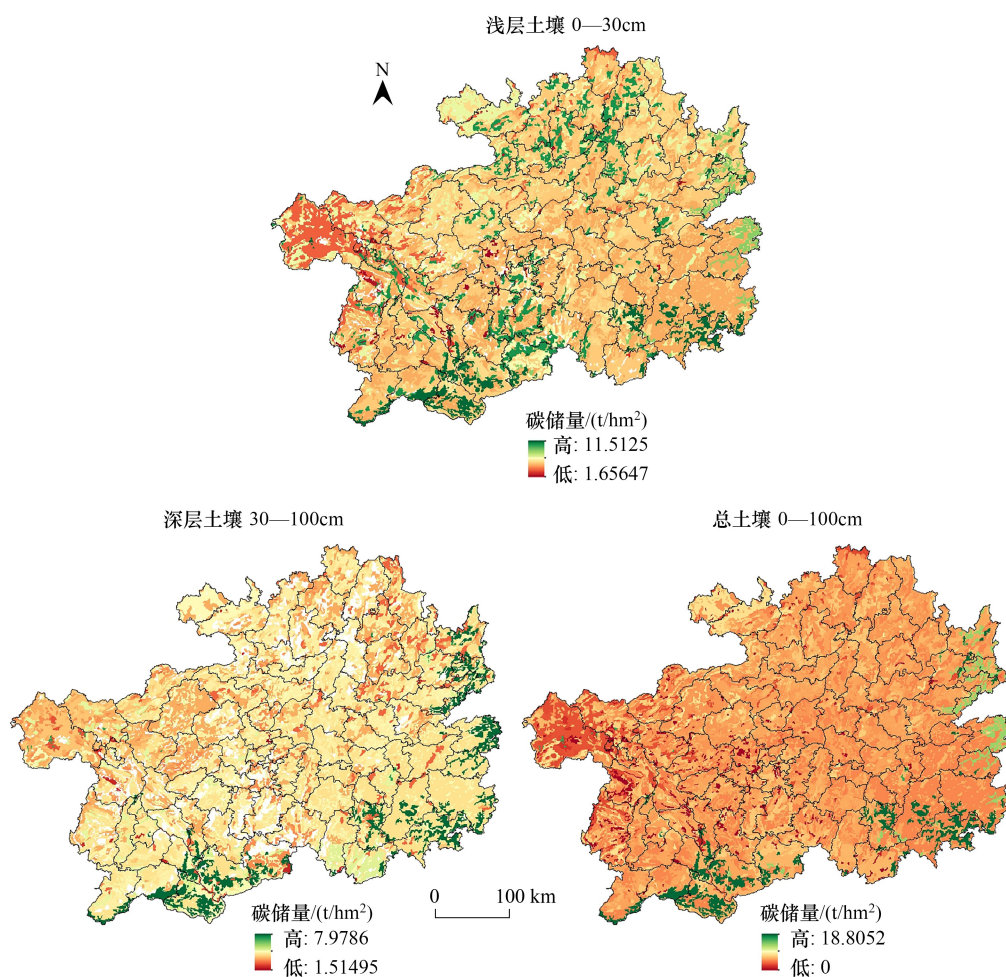


图 8 土壤碳储量空间分布  
Fig.8 Spatial distribution of soil carbon stocks

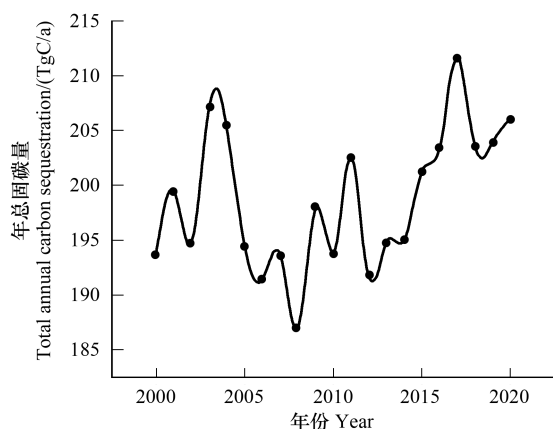


图9 2000—2020年贵州省年固碳量年际变化

Fig.9 Interannual variation in annual carbon sequestration in Guizhou Province, 2000—2020

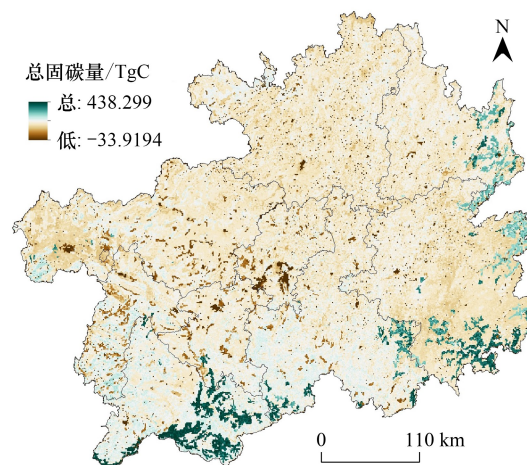


图10 2000—2020年贵州省总固碳量空间分布

Fig.10 Spatial distribution of total carbon sequestration in Guizhou Province, 2000—2020

从空间上看,贵州省碳排放的格局呈现以城市为中心,沿道路向外扩张,形成高碳排放核心连通链条(图12);碳排放的高值主要集中在人类活动频繁的城镇地区,密集的人口能源需求高,造成碳排放严重;低值主要集中在黔南、黔东南地区,此类区域植被覆盖率高、人类活动较少,因此碳排放聚集点也相对较少,并且分布稀疏。

### 3.3 环境碳负荷指数的特征分析

2000—2020年贵州省整体环境碳负荷指数为0.61,说明研究期内贵州省碳排放增速大于碳吸收增速,环境正处于超负荷状态。本文将环境碳负荷指数计算结果按照自然断点法分为5类(图13),发现环境碳负荷指数较低和中等区县数量较多,分别占研究区区县总数的40%和33%,环境碳负荷指数高和较高的区县数较少,仅占区县总数的19%。整体上看,贵州省环境碳负荷指数的相对高值区主要位于研究东部和中部,相对低值区位于研究区西部,这一定程度上与区域人口分布相吻合。

同时,本文以5年为间隔,将整个研究期划分为了4个时期(2000—2005年、2005—2010年、2010—2015年、2015—2020年),旨在明晰不同阶段贵州省环境碳负荷状况。结果显示,一到四期贵州省环境碳负荷指数分别为0.294、0.353、0.389、0.559,呈逐步增长的趋势,说明区域内碳排放的增长速度超过了碳吸收的增长速度,碳收支不平衡加剧。实际上,1990年代后期区域就开展了大规模的退耕还林还草工作,在此作用下区域碳吸收能力不断增强,但仍出现碳负荷增长的情况,究其根本是因为碳排放增长速度过快。这主要是因为贵州省经济相对较落后,其产业发展主要依靠的是资源消耗型企业,特别是煤炭的利用<sup>[39]</sup>。

就一期的环境碳负荷指数而言,其主要以中等和较高值为主,其中,中等值区域呈团状分布在研究区中部,较高值区呈环状围绕在中值区外围(图14)。该时期处于区域经济转型的初级阶段,经济结构仍以高能耗产业为主,碳排放量大、环境负荷较重。相较于一期而言,二期的高值及较高值区县数量有所下降,这与区域实施的退耕还林还草工程紧密相关;空间上,环境碳负荷指数的较低值区主要分布在区域北部和西南部,较高值区主要位于研究区西部(图14)。三期的环境碳负荷指数以中等值及高值区为主,呈团块状分布于整个区

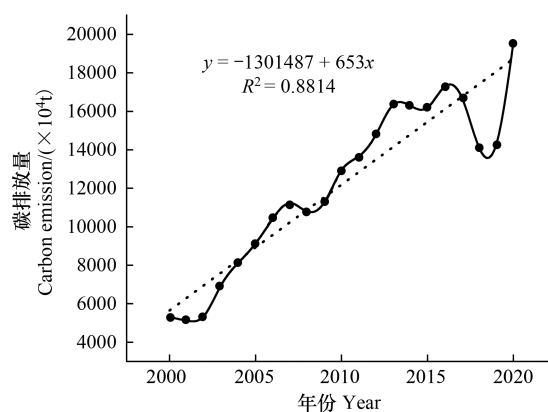


图11 2000—2020年贵州省碳排放年际变化

Fig.11 Interannual variation in carbon emissions in Guizhou Province, 2000—2020

域内(图 14)。此阶段为第一轮向第二轮退耕还林还草工程实施的过渡阶段,区域碳吸收能力增速放缓<sup>[40]</sup>,需进一步强化生态修复措施的可持续性。四期环境碳负荷指数的高值和较高值区域范围扩大,主要位于研究外围区县(图 14),主要是因为单纯依靠林地面积扩张的生态修复方式对区域碳吸收能力的增长具有一定阈值效应<sup>[41]</sup>。截止到四期,贵州省森林覆盖率已较高,继续一味扩大森林面积对区域碳汇而言将成效甚微,未来应强化森林管理及景观格局优化等来实现区域持续性碳汇能力的增加。

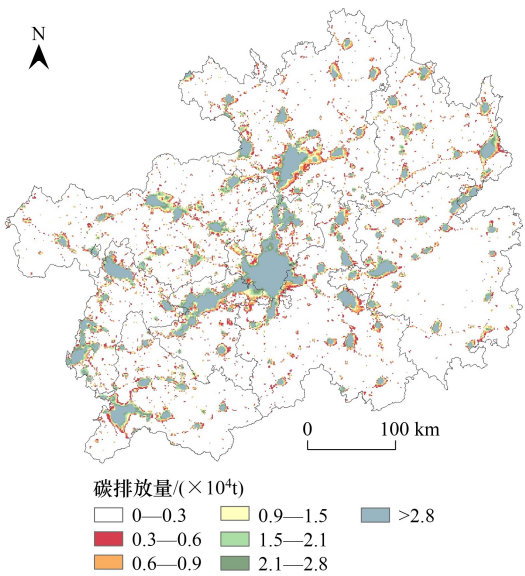


图 12 2000—2020 贵州省碳排放量平均值空间分布  
Fig.12 Spatial distribution of average carbon emissions in Guizhou Province, 2000—2020

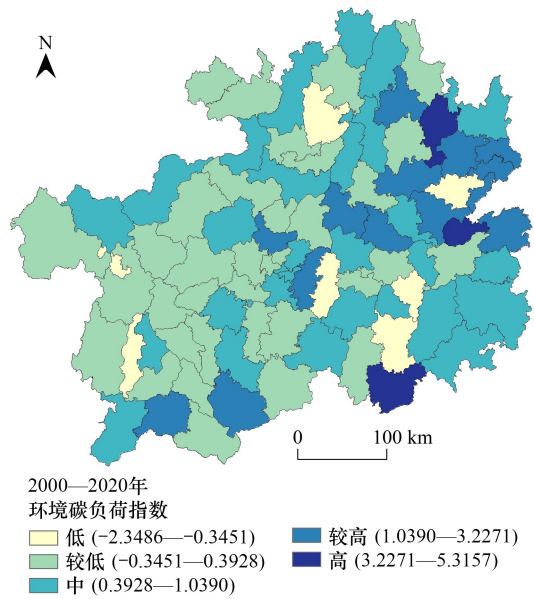


图 13 2000—2020 年贵州省环境碳负荷指数空间分布  
Fig.13 Spatial distribution of environmental carbon load index in Guizhou Province, 2000—2020

3.4 环境-经济脱钩关系

2000—2020 年贵州省环境碳负荷指数与经济增长的弹性系数是 0.65,为弱脱钩状态,其中环境碳负荷指数为 0.61,经济增长指数为 0.69,说明经济增长速度大于其发展过程中碳排放造成环境碳负荷增长的速度,但整体上区域环境-经济相互关系较为协调。对不同区县而言,其脱钩状态主要以弱脱钩和扩张连接为主,其中,弱脱钩主要分布在研究区中部和西部,扩张连接则主要分布于研究区东部和西南角(图 15)。

同时,本文以 5 年为周期,将 2000—2020 分为 4 个时期尺度(2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年、2015—2020 年)分析各阶段的综合脱钩指数及脱钩状态。一期到四期贵州省平均脱钩弹性值分别为 0.71、0.58、0.71 和 0.90(表 2),脱钩弹性值波动上升,脱钩状态呈现先改善后恶化的趋势。其中,脱钩状态的改善验证了生态修复措施对区域碳吸收能力提升的积极影响,而脱钩状态的恶化说明区域产业改革、能源转型不彻底以及生态修复措施的可持续性需要进一步优化<sup>[42]</sup>。

表 2 贵州省各时期环境碳压力、经济增长及弹性系数

Table 2 Environmental carbon pressure, economic growth and elasticity coefficients in Guizhou Province by period

|                         | 时期<br>Periods | 环境碳压力<br>Environmental carbon pressure | 经济增长<br>Economics growth | 弹性<br>Elastic decoupling | 脱钩状态<br>Decoupling state |
|-------------------------|---------------|----------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 贵州省<br>Guizhou Province | 一期            | 0.29                                   | 0.41                     | 0.71                     | 弱脱钩                      |
|                         | 二期            | 0.35                                   | 0.6                      | 0.58                     | 弱脱钩                      |
|                         | 三期            | 0.39                                   | 0.55                     | 0.71                     | 弱脱钩                      |
|                         | 四期            | 0.56                                   | 0.62                     | 0.90                     | 扩张连接                     |

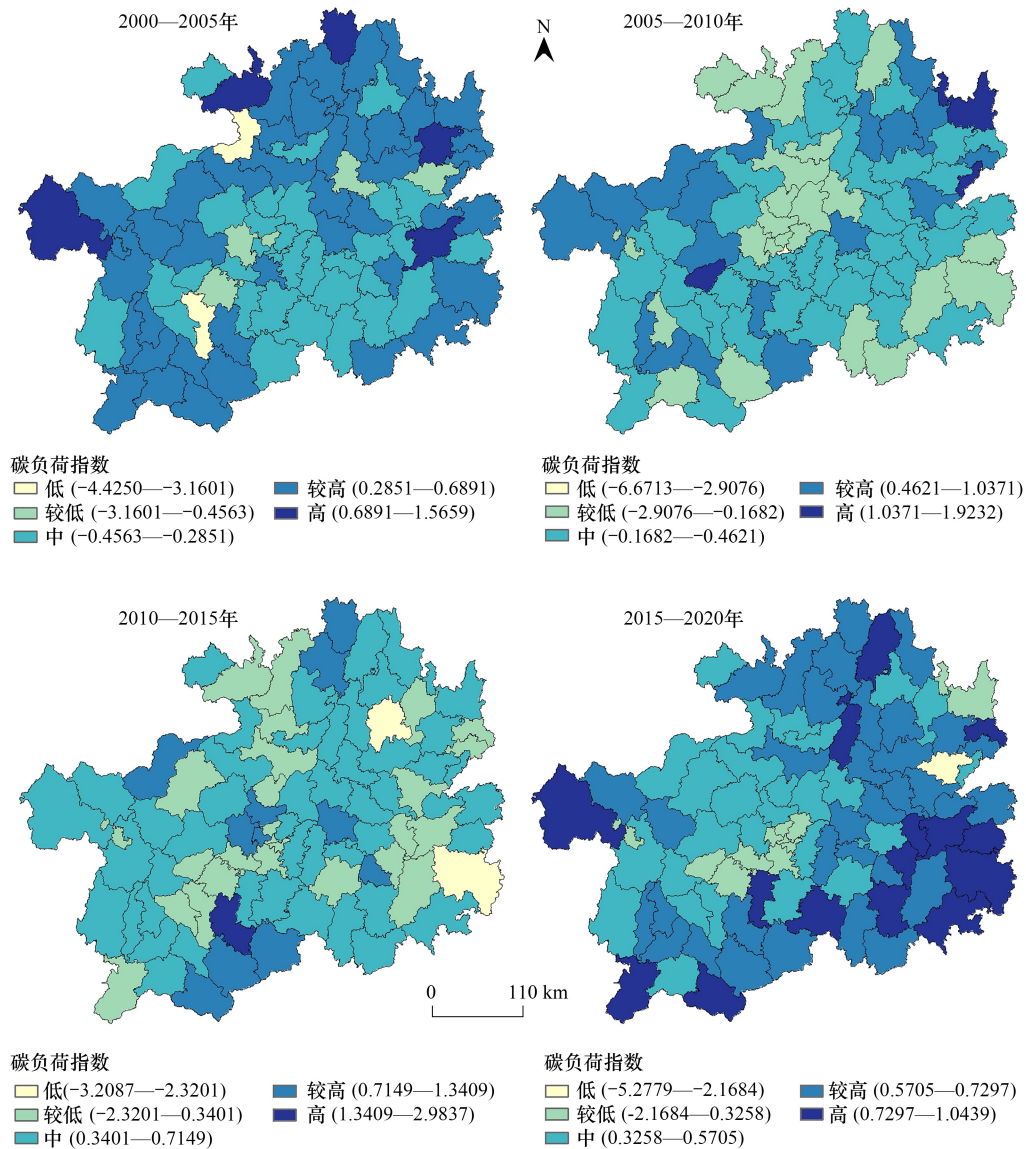


图 14 各时期环境碳负荷指数空间分布

Fig.14 Spatial distribution of environmental carbon load indices by period

就空间分布而言,一期区域脱钩状态以弱脱钩为,主要分布于研究区东南部,其次是扩张连结和扩张负脱钩分布于研究区的北部;相较于一期,二期环境-经济的脱钩状态有所缓解,主要表现为弱脱钩区县数的扩张,约占区县总数的 71.6%;到第三期,各区县的环境-经济关系又重新变得紧张,此时仍以弱脱钩为主,分散分布于整个研究区;到第四期,环境-经济关系继续紧张,以扩张连结和扩张负脱钩为主,特别是扩张负脱钩以团状分布于研究期东南部;同时,该区域也是贵州省典型的非喀斯特分布区,经济发展任务艰巨,面临着更大的环境-经济冲突(图 16)。

整体上看,四个时期中环境-经济关系最为协调的是第二期,最糟糕的是第四期。整个研究期内,弱脱钩是贵州省经济增长与环境碳负荷指数关系的常态,但已经出现有弱脱钩向扩张连接、扩张负脱钩转化的情况,即经济-环境发展的不平衡性加强,未来需将经济-环境可持续研究纳入到区域整体发展中。在空间上,经济发达的中心地区更趋于呈现经济发展与环境碳负荷的脱钩状态,尚未发挥出中心城市的带动作用。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

喀斯特生态系统受其独特的地质条件以及不合理人类活动的影响,区域内生态破坏严重、环境问题突出,表现出明显的生态脆弱性和敏感性。为此,区域实施了一系列包括石漠化治理、退耕还林还草在内的生态修复工程。研究表明,生态修复工程实施期间区域植被覆盖度<sup>[28]</sup>、地上生物量<sup>[43]</sup>、土壤保持功能<sup>[11]</sup>等有了显著提升。不难发现,以往研究多集中在喀斯特地区植被生产力、生态系统功能及其相互关系上,对区域陆地生态系统碳吸收能力研究较少<sup>[44]</sup>。实际上,在全球碳减排及我国提出的碳达峰、碳中和背景下,对喀斯特地区的碳吸收功能进行研究同样意义重大。基于此,本文对贵州省陆地生态系统的碳吸收能力进行了评估。结果表明,区域碳吸收能力呈波动增长趋势,这一定程度上反映了生态修复工程对区域碳吸收的积极作用;同时,区域碳

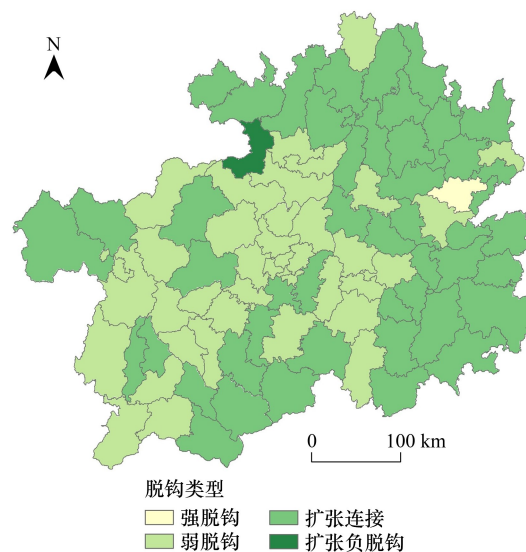


图 15 2000—2020 年贵州省环境碳负荷脱钩效应空间分布格局

Fig.15 Spatial distribution pattern of environmental carbon load decoupling effect in Guizhou Province, 2000—2020

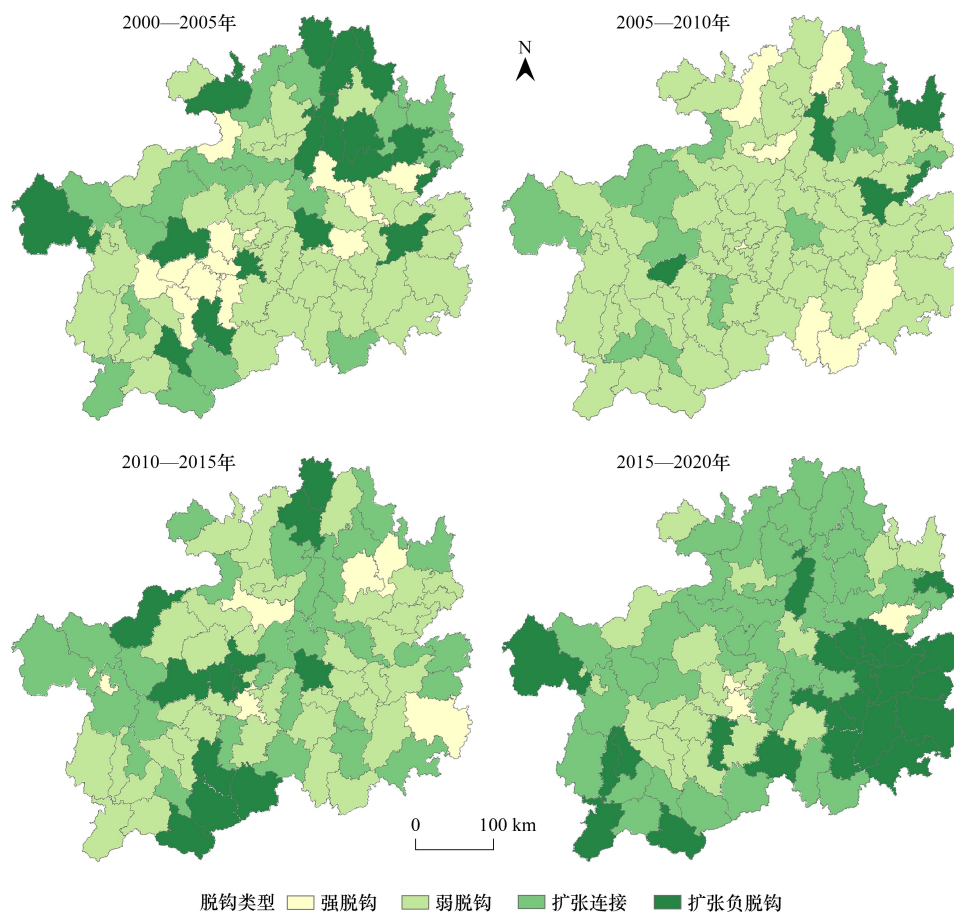


图 16 贵州省各时期环境碳负荷脱钩效应空间格局

Fig.16 Spatial patterns of environmental carbon load decoupling effects in Guizhou Province by period

吸收能力随时间推移呈现出了增长放缓的趋势,这与学者们得到的森林饱和生长、土壤含水量下降等会对碳吸收能力的可持续增长提出挑战的结论相吻合<sup>[45]</sup>。贵州省喀斯特生态系统的碳吸收能力表现出了明显的空间异质性。植被净生态系统生产力的高值区集中在黔西南和黔南地区,通过对比贵州省的气象数据发现,植被净生态系统生产力的提升与降水增加具有直接关系;贵州省北部岩溶碳通量上升明显,这可能与长江生态屏障建设导致的区域小气候和径流变化有关<sup>[46]</sup>;土壤碳储量的高值区分布在黔西南和黔东南,这反映了土壤植被覆盖率对土壤碳储量的促进作用<sup>[11]</sup>。

喀斯特地区因其脆弱的本底条件,经济活动受到制约,曾是我国集中连片特困区。后来,在国家大力帮扶下,区域消除了绝对贫困,但在划分的相对贫困县中,喀斯特地区约占全国总数的 47%<sup>[29]</sup>,经济发展愿望迫切。同时,区域经济发展很大程度上依赖于能源消耗,一方面会对区域植被产生破坏作用,另一方面会向大气中排放大量 CO<sub>2</sub>,对区域环境-经济协调发展产生一定的消极影响。经济发展过程中区域碳收支状况及其相互作用关系研究变得十分必要。为此,本文在使用环境碳负荷指数对区域碳收支情况进行评估后,从脱钩视角对区域生态环境与经济间的相互关系进行剖析。结果显示,2000—2020 年贵州省的环境碳负荷指数均值为 0.61,表明贵州省的人为碳排放大于生态系统碳吸收,存在明显的碳失衡问题;同时,区域生态环境与经济发展的关系具有阶段性,在初期由于人为开发活动相对较弱、生态系统保存完好,环境-经济相对较协调,以弱脱钩为主;后期,由于经济发展加速、能源消耗剧增、生态破坏问题突出,区域生态-经济朝着非协调方向发展,表现为扩张连接。而这种碳收支及环境-经济发展的不平衡必将阻碍未来碳达峰、碳中和的实现及区域经济的发展,使环境与经济发展的关系进一步恶化。因此,未来应大力发展清洁能源与技术、加快绿色生产与产业低碳转型、同时优化区域生态修复措施增强区域碳吸收能力,使环境与经济的良性关系得以体现。

本文对贵州省 2000—2020 年碳吸收、碳排放及碳收支状况进行解析,在此基础上重点探究了区域环境碳负荷与经济发展之间的关系。在区域碳吸收能力的量化中,本文综合考虑了喀斯特植被碳、岩溶碳和土壤碳,对碳吸收能力的估算更加全面,避免了以往研究中只针对单方面的植被碳或岩溶碳进行估算而造成碳吸收能力被低估的问题。同时本文在评估区域碳收支平衡状况的基础上揭示了不同阶段经济发展与环境碳负荷之间的脱钩关系。通过对结果的解析发现,不同阶段它们呈现的脱钩状态也差异明显,在前期经济发展滞后于环境保护时,区域应重点加强生态经济发展,提升区域经济实力;在后期环境压力大于经济发展时,则需在发展生态经济的同时强化生态修复措施的可持续性。因此,本文建立和剖析不同时期经济发展与环境碳负荷之间的脱钩关系,对区域产业结构调整、生态环境建设与保护具有指导作用。只是,本文在对区域碳排放进行估算时主要考虑的是化石能源碳排放,实际上,广义上的碳排放还包括农业、土地利用等多个方面,未来可以通过相关调研和数据获取渠道,对区域碳排放进行更全面的解析。除此之外,贵州省喀斯特地貌分布广泛空间异质强,本底条件差异大,这必然对环境-经济脱钩关系的形成产生一定作用,但这种作用造成的影响是未知的,需作进一步探讨。同时,环境碳负荷-经济之间的相互关系研究是一个复杂的系统工程,影响它们之间关系变化的因素及因素间的相互关系也较复杂,未来可以采用系统动力学对区域环境碳负荷-经济间的关系进行更深入的解析,以期为区域可持续发展提供更可靠的参考。

## 4.2 结论

本文以贵州省为研究对象,通过相关算法对区域内植被净生态系统生产力、岩溶碳通量、土壤碳储量进行计算得出陆地生态系统碳吸收能力;根据区域灯光数据对区域碳排放进行模拟;在此基础上构建了环境碳负荷指数,运用脱钩模型探讨区域环境与经济的相互关系。研究主要结论如下:

(1) 贵州省陆地生态系统碳吸收能力呈波动上升趋势,并表现出了明显的空间异质性。其中,植被净生态系统生产力呈南高北低的分布特征,岩溶碳通量表现为由西南向东北降低的趋势,土壤碳储量的高值区集中分布与研究区南部和东部边缘地区;贵州省碳排放增长明显,基本形成了以城镇高碳排放区为核心,沿道路向外扩张递减的分布格局。

(2) 2000—2020 年贵州省的环境碳负荷指数为 0.61,表明生态系统碳吸收能力小于碳排放强度,特别是

贵州省主城区;同时,区域环境碳负荷的变化具有阶段性,表现为随时间推移区域碳收支不平衡加剧。

(3) 贵州省环境-经济的脱钩状态以弱脱钩和扩张连接为主,表明区域生态环境与经济发展间存在一定的不协调;且随时间推移,脱钩状态呈现先改善后恶化的趋势,弱脱钩状态的区县数量减少,扩张连接和扩张负脱钩的数量持续增多,环境保护明显滞后于经济发展。未来在发展绿色产业的同时需进一步强化生态修复的可持续性,以实现环境-经济的协同发展。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 翟盘茂,周伯铨,陈阳,余荣. 气候变化科学方面的几个最新认知. 气候变化研究进展, 2021, 17(06): 629-635.
- [ 2 ] 潘竞虎,张永年. 中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应. 地理学报, 2021, 76(1): 206-222.
- [ 3 ] An N, Yao Q A, Shen Q J. A review of human settlement research on climate change response under carbon-oriented: literature characteristics, progress and trends. *Buildings*, 2022, 12(10): 1614.
- [ 4 ] Zhang X M, Brandt M, Yue Y M, Tong X W, Wang K L, Fensholt R. The carbon sink potential of Southern China after two decades of afforestation. *Earth's Future*, 2022, 10(12): e2022EF002674.
- [ 5 ] Wu L H, Wang S J, Bai X Y, Tian Y C, Luo G J, Wang J F, Li Q, Chen F, Deng Y H, Yang Y J, Hu Z Y. Climate change weakens the positive effect of human activities on Karst vegetation productivity restoration in Southern China. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106392.
- [ 6 ] Wang K L, Yue Y M, Brandt M, Tong X W. Karst ecosystem observation and assessment at local and regional scales. *InterCarto InterGIS*, 2019, 25(2): 43-47.
- [ 7 ] Brandt M, Yue Y M, Wigneron J P, Tong X W, Tian F, Jepsen M R, Xiao X M, Verger A, Mialon A, Al-Yaari A, Wang K L, Fensholt R. Satellite-observed major greening and biomass increase in South China Karst during recent decade. *Earth's Future*, 2018, 6(7): 1017-1028.
- [ 8 ] Brandt M, Rasmussen K, Peñuelas J, Tian F, Schurgers G, Verger A, Mertz O, Palmer J R B, Fensholt R. Human population growth offsets climate-driven increase in woody vegetation in sub-Saharan Africa. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1(4): 0081.
- [ 9 ] Zeng S B, Kaufmann G, Liu Z H. Natural and anthropogenic driving forces of carbonate weathering and the related carbon sink flux: a model comparison study at global scale. *Global Biogeochemical Cycles*, 2022, 36(3): e2021GB007096.
- [ 10 ] 曾思博,刘再华. 我国岩溶碳汇和在非岩溶区播撒碳酸盐粉的碳中和潜力. 科学通报, 2022, 67(34): 4116-4129.
- [ 11 ] Yang Y, Ouyang Y D, Chen H, Xiao K C, Li D J. Effects of vegetation restoration on soil nitrogen pathways in a Karst region of southwest China. *Huan Jing Ke Xue = Huanjing Kexue*, 2018, 39(6): 2845-2852.
- [ 12 ] 曹建华,杨慧,康志强. 区域碳酸盐岩溶蚀作用碳汇通量估算初探:以珠江流域为例. 科学通报, 2011, 56(26): 2181-2187.
- [ 13 ] Banwart S, Menon M, Bernasconi S M, Bloem J, Blum W E H, de Souza D M, Davidsdotir B, Duffy C, Lair G J, Kram P, Lamacova A, Lundin L, Nikolaidis N P, Novak M, Panagos P, Ragnarsdottir K V, Reynolds B, Robinson D, Rousseva S, de Ruiter P, Zhang B. Soil processes and functions across an international network of Critical Zone Observatories: introduction to experimental methods and initial results. *Comptes Rendus Geoscience*, 2012, 344(11/12): 758-772.
- [ 14 ] 章程. 不同土地利用下的岩溶作用强度及其碳汇效应. 科学通报, 2011, 56(26): 2174-2180.
- [ 15 ] Ni J, Luo D H, Xia J, Zhang Z H, Hu G. Vegetation in Karst terrain of southwestern China allocates more biomass to roots. *Solid Earth*, 2015, 6(3): 799-810.
- [ 16 ] Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, Peylin P, Reichstein M, Luyssaert S, Margolis H, Fang J Y, Barr A, Chen A P, Grelle A, Hollinger D Y, Laurila T, Lindroth A, Richardson A D, Vesala T. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, 2008, 451(7174): 49-52.
- [ 17 ] 李川龙. 西南地区城市蔓延的碳排放影响研究——基于多源夜间灯光遥感数据的分析[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- [ 18 ] 高云虹,张彦淑,杨明婕. 西部大开发 20 年: 西北地区与西南地区的对比. 区域经济评论, 2020, No. 47(05): 36-51.
- [ 19 ] Crippa M, Guizzardi D, Muntean M, Schaaf E, Solazzo E, Monforti-Ferrario F, Vignati E. Fossil CO<sub>2</sub> emissions of all world countries. Luxembourg: European Commission, 2020: 1-244.
- [ 20 ] 任祁荣,于恩逸. 甘肃省生态环境与社会经济系统协调发展的耦合分析. 生态学报, 2021, 41(8): 2944-2953.
- [ 21 ] Yilanci V, Pata U K. Investigating the EKC hypothesis for China: the role of economic complexity on ecological footprint. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(26): 32683-32694.
- [ 22 ] Li X Q, Xiao L M, Tian C, Zhu B Z, Chevallier J. Impacts of the ecological footprint on sustainable development: evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 352: 131472.
- [ 23 ] 冯雨雪,李广东. 青藏高原城镇化与生态环境交互影响关系分析. 地理学报, 2020, 75(7): 1386-1405.

- [24] Yu X, Li M Q, Kang W M. Heterogeneity of decoupling between economic development and carbon emissions in China's green industrial parks. *Earth's Future*, 2022, 10(7): e2022EF002753.
- [25] Gao C C, Ge H Q, Lu Y Y, Wang W J, Zhang Y J. Decoupling of provincial energy-related CO<sub>2</sub> emissions from economic growth in China and its convergence from 1995 to 2017. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 297: 126627.
- [26] 陈起伟,熊康宁,但文红,牛莲莲. 典型喀斯特区生态与贫困耦合特征分析——以贵州省 9000 个省级贫困村为例. *生态学报*, 2021, 41(8): 2968-2982.
- [27] 宋同清,彭晚霞,杜虎,王克林,曾馥平. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策. *生态学报*, 2014, 34(18): 5328-5341.
- [28] 陈田田,黄强,王强. 基于地理探测器的喀斯特山区生态系统服务关系分异特征及驱动力解析——以贵州省为例. *生态学报*, 2022, 42(17): 6959-6972.
- [29] 徐黎丹,邓祥征,姜群鸥,马丰魁. 中国县域多维贫困与相对贫困识别及扶贫路径研究. *地理学报*, 2021, 76(6): 1455-1470.
- [30] 罗怀良. 基于区域视角的西南地区成熟型资源城市分类及转型障碍研究——以地级成熟型资源城市为例. *山地学报*, 2018, 36(4): 598-606.
- [31] Gong Z Q, Mao R J, Jiang J J. Coupling and coordination degree between urbanization and ecological environment in Guizhou, China. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2021, 2021: 1-10.
- [32] 裴志永,周才平,欧阳华,杨文斌. 青藏高原高寒草原区域碳估测. *地理研究*, 2010, 29(1): 102-110.
- [33] Zhang J P, Zhang L B, Xu C, Liu W L, Qi Y, Wo X. Vegetation variation of mid-subtropical forest based on MODIS NDVI data—a case study of Jinggangshan City, Jiangxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 7-12.
- [34] 张永年,潘竟虎. 基于 DMSP/OLS 数据的中国碳排放时空模拟与分异格局. *中国环境科学*, 2019, 39(4): 1436-1446.
- [35] 卢俊宇,黄贤金,陈逸,肖潇. 基于能源消费的中国省级区域碳足迹时空演变分析. *地理研究*, 2013, 32(2): 326-336.
- [36] Yu Y D, Chen D J, Zhu B, Hu S Y. Eco-efficiency trends in China, 1978-2010: Decoupling environmental pressure from economic growth. *Ecological Indicators*, 2013, 24: 177-184.
- [37] Tapio P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137-151.
- [38] 彭红松,郭丽佳,章锦河,钟士恩,虞虎,韩娅. 区域经济增长与资源环境压力的关系研究进展. *资源科学*, 2020, 42(04): 593-606.
- [39] 安芬. 贵州省城镇化与能源碳排放的关系研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.
- [40] 吴普侠,汪晓珍,吴建召,张晓梅,蔺雨阳,王凯博. 中国退耕还林工程固碳现状及固碳潜力估算. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 342-349.
- [41] 陈田田,王钰茜,曾兴兰,王强. 西南地区生态系统服务关系特征及其与植被覆盖的约束效应. *生态学报*, 2023, 43(6): 2253-2270.
- [42] 何霄嘉,王磊,柯兵,岳跃民,王克林,曹建华,熊康宁. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展. *生态学报*, 2019, 39(18): 6577-6585.
- [43] Kong R, Zhang Z X, Zhang F Y, Tian J X, Chang J, Jiang S S, Zhu B, Chen X. Increasing carbon storage in subtropical forests over the Yangtze River Basin and its relations to the major ecological projects. *Science of the Total Environment*, 2020, 709: 136163.
- [44] Huang J, Ge Z X, Huang Y Q, Tang X G, Shi Z, Lai P Y, Song Z J, Hao B F, Yang H, Ma M G. Climate change and ecological engineering jointly induced vegetation greening in global Karst regions from 2001 to 2020. *Plant and Soil*, 2022, 475(1): 193-212.
- [45] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Ciais P, Jepsen M R, Penuelas J, Wigneron J P, Xiao X M, Song X P, Horion S, Rasmussen K, Saatchi S, Fan L, Wang K L, Zhang B, Chen Z C, Wang Y H, Li X J, Fensholt R. Forest management in southern China generates short term extensive carbon sequestration. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 129.
- [46] Chu X, Zhan J Y, Li Z H, Zhang F, Wei Q. Assessment on forest carbon sequestration in the Three-North Shelterbelt Program region, China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 382-389.