

# 粤东北山地生态系统植被及其碳储量时空变化\*

贺一聪<sup>1</sup>, 陶贞<sup>1</sup>, 梁誉正<sup>1</sup>, 欧先交<sup>2</sup>, 钟庆祥<sup>1</sup>, 吴迪<sup>1</sup>, 宋文婕<sup>1</sup>

1. 中山大学地理科学与规划学院 / 粤北岩溶区森林生态系统碳水耦合野外观测研究站, 广东广州 510006
2. 嘉应学院地理科学与旅游学院, 广东梅州 514015

**摘要:** 根据遥感影像和实测土壤(选择林地、草地、耕地和建设用地等28个样地, 采集112个土壤样品)有机碳含量数据, 运用Sen氏趋势分析、Hurst指数、偏相关分析和InVEST模型等方法, 探究粤东北山地生态系统植被及其碳储量时空变化特征。研究结果表明: 1) 研究区植被覆盖度较高, 归一化植被指数(NDVI)变化范围为0.14~0.95, 平均值为0.79。2000—2021年全域植被覆盖度呈上升趋势, 空间分布存在差异, 除梅州市区外, 其他地区NDVI均有不同程度的增加, 其中山地NDVI增加显著, 且随海拔先上升后下降。研究区未来植被变化可能存在下降趋势(Hurst指数 $<0.5$ ); 2) 2000—2020年研究区碳储量呈现减少趋势, 共计减少1.33 Tg。土地利用变化, 尤其林地、草地转化为耕地和建设用地是研究区碳储量减少的主要原因。研究结果可为我国亚热带生态系统碳汇功能变化研究提供基础数据。

**关键词:** 植被变化; 碳储量; NDVI; 土地利用变化; InVEST模型; 山地生态系统

**中图分类号:** P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)03-0001-11

## Spatiotemporal variations in vegetation and carbon storage of mountainous ecosystems in Northeastern Guangdong Province

HE Yicong<sup>1</sup>, TAO Zhen<sup>1</sup>, LIANG Yuzheng<sup>1</sup>, OU Xianjiao<sup>2</sup>, ZHONG Qingxiang<sup>1</sup>, WU Di<sup>1</sup>, SONG Wenjie<sup>1</sup>

1. Carbon-Water Research Station in Karst Regions of Northern Guangdong / School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China
2. School of Geography and Tourism, Jiaying University, Meizhou 514015, China

**Abstract:** Based on remote sensing images and measurements of soil organic carbon content (including 28 sample sites, 112 soil samples from forests, grasslands, croplands, and construction lands), methods including Sen's trend analysis, Hurst exponent, partial correlation analysis, and the InVEST model were employed to investigate the spatiotemporal variations in vegetation and carbon storage of the mountainous ecosystem in northeastern Guangdong province. The results show that: (1) The research area exhibits relatively high vegetation coverage, with a Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ranging from 0.14 to 0.95 and an average value of 0.79. From 2000 to 2021, the vegetation coverage of the study region increased. Apart from the city area of Meizhou, the rest showed varying degrees of NDVI increase, especially in mountainous areas, where it showed a trend of rising and subsequently declining with elevation. The Hurst exponent ( $<0.5$ ) implies a potential declining trend in vegetation changes in the study area. (2) From 2000 to 2020, the carbon storage in

\* 收稿日期: 2023-11-05

录用日期: 2023-12-08

网络首发日期: 2024-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(41771216); 广州市科技计划项目(202201011738)

作者简介: 贺一聪(1999年生),男;研究方向: 植被变化和陆地生态系统碳循环; E-mail: heyc5@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 陶贞(1965年生),女;研究方向: 陆地生物地球化学循环; E-mail: taozhen@mail.sysu.edu.cn

the study area displayed a decreasing trend, amounting to a total reduction of 1.33 teragrams (Tg). Land use changes, particularly the conversion of forests and grasslands into agricultural and urban areas, are the primary reasons for the decrease in carbon storage in the study area. The conclusions can serve as fundamental data for investigating the changes in carbon sequestration functionality within subtropical ecosystems in China.

**Key words:** vegetation changes; carbon storage; NDVI; land use changes; InVEST model; mountainous ecosystems

随着全球环境变化和人类活动的加剧,陆地生态系统变化及其物质循环成为近年来科学研究的热点问题(朴世龙等,2022)。植被通过其物候、类型、结构和功能变化,在陆地生态系统和气候系统中发挥着重要作用(Wang et al.,2022),常被用作陆地生态系统变化的指示器(Gao et al.,2022;Kong et al.,2017)。根据卫星遥感红光波段和近红外波段反射率推导计算得出的归一化植被指数(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)与植被第一生产力、冠层覆盖面积和生物量显著相关并能够较好地反映植被生长状况从而被广泛应用于植被动态变化研究(Tucker,1979;王正兴等,2003)。根据区域NDVI的变化趋势可揭示该地区植物生长过程和植被变化特征,例如根据NDVI变化趋势揭示中国长时间序列植被覆盖变化呈显著增加趋势(刘宪锋等,2013,2015b;王思等,2022);采用Sen氏趋势分析结合M-K检验的方法揭示新疆阿勒泰地区NDVI整体呈上升趋势,但是存在弱反持续特征,且区域内植被改善区与退化区呈破碎化分布(许洁等,2020;付含培等,2022;黄豪奔等,2022;朱思佳等,2022)。Hurst指数被广泛应用于探究植被未来变化趋势的研究(邓兴耀等,2017;刘宪锋等,2013,2015a),如计算中亚干旱区植被Hurst指数(平均值为0.63),得出该地区未来植被覆盖变化趋势以持续增加为主(邓兴耀等,2017)。应用相关分析法揭示广东省NDVI与日照时长、地表温度及降水量等存在相关性,且NDVI与日照时长不具有时间滞后现象(穆少杰等,2012;邓玉娇等,2021;孙红雨等,1998)。

陆生植物作为陆地生态系统的重要组成部分,通过光合作用将大气CO<sub>2</sub>转化为有机物储存在植物体内成为大气CO<sub>2</sub>汇,形成陆地生态系统碳库之一(如植物生物量碳);同时植被凋落物及其根系分泌物输入土壤成为土壤有机碳库的主要物源(Cotrufo & Lavelle, 2022)。陆地生态系统碳库

(包括植被碳库和土壤碳库)是地球表层碳循环的主要环节之一,植被生长状况直接影响陆地生态系统-大气圈之间碳通量和陆地生态系统的土壤碳储量;土壤是陆地生态系统最大的有机碳库(Witzgall et al.,2021),其微小变化将对全球碳平衡、气候变化、粮食安全、生物多样性等产生重大影响(Hicks et al.,2017;Rumainul et al.,2022),因此,陆地生态系统碳储量变化对改变大气CO<sub>2</sub>浓度、减缓全球气候变化以及维持生态平衡发挥着重要作用(Luo et al.,2020;Piao et al.,2009;Wei et al.,2022;向书江等,2022;刘冠等,2021)。

为定量研究陆地生态系统有机碳储量变化特征,生态系统服务和交易综合评估模型(InVEST, integrated valuation of ecosystem services and trade-offs)中的碳储量模块被广泛应用于陆地生态系统碳储量研究(刘洋等,2021;朱志强等,2021;张燕等,2021;吴佩君等,2016;朱文博等,2019)。该模型利用土地利用分类遥感影像的各个土地利用类型对应的碳密度与其面积乘积来估算总碳储量,其计算结果可用于评估不同土地利用类型或植物群落-土壤系统碳储量变化(丁岳等,2023;柯新利和唐兰萍,2019;刘晓娟等,2019;杨激威等,2022)。关于陆地生态系统碳储量研究较多(丁岳等,2023;刘晓娟等,2019;杨激威等,2022;朱志强等,2021;张燕等,2021),但是,迄今关于陆地生态系统碳储量变化及其影响因素研究较少(向书江等,2022;朱文博等,2019)。本研究选择北回归线附近、南亚热带和中亚热带过渡区的粤东北山地生态系统为研究对象,根据实测土壤有机碳含量数据和遥感影像数据,运用Sen氏趋势分析、Hurst指数、偏相关分析和InVEST模型等方法探讨全球变化背景下研究区植被变化特征及其碳储量变化,为陆地生态系统碳循环研究和粤北生态屏障建设提供基础数据。

## 1 研究区概况

粤东北山地行政区划上隶属于广东省梅州市。梅州市位于 $23^{\circ}23' \sim 24^{\circ}56'N$ 、 $115^{\circ}18' \sim 116^{\circ}56'E$ , 属于亚热带和中亚热带过渡地带(图1), 地势北高南低, 以山地丘陵台地为主, 其面积约占80%, 平原约15%, 河流水库等水域面积占5%。该研究区属亚热带季风气候, 年平均气温为 $21.3^{\circ}C$ , 冬季平均气温 $11.8^{\circ}C$ , 夏季约 $28.5^{\circ}C$ ; 年平均降水量为 $1\ 508.8\ mm$ , 最小月平均降水量为 $0.52\ mm$ ,

最大月平均降水量为 $454.68\ mm$ ; 由于受地形影响, 研究区具有温差大、气流闭塞等山区气候特点。研究区河流主要有韩江、梅江、琴江等。研究区植被覆盖率较高(74.5%), 植被类型以亚热带常绿阔叶林为主; 山地植被垂直带性显著, 海拔高度小于 $900\ m$ 为亚热带常绿阔叶林;  $900 \sim 1\ 000\ m$ 为灌丛-草本群落,  $1\ 000\ m$ 以上为中山草甸。盆地和台地主要种植农作物(水稻)。研究区土壤类型复杂多样, 主要为铁铝土, 成土母岩多为花岗岩和砂页岩。

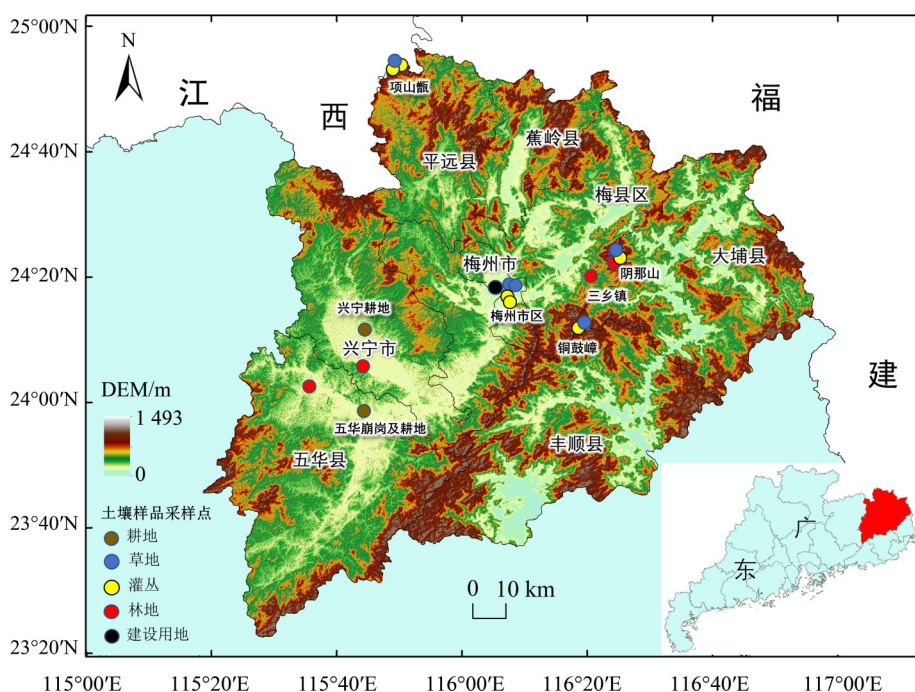


图1 研究区位置和土壤样品采样点图

Fig. 1 The study area location and soil sampling sites

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源及处理

本文数据主要来自GEE(Google Earth Engine)平台(<https://code.earthengine.google.com>)和实地测量。

1) NDVI数据: 来自GEE平台提供的美国国家航空航天局(NASA)的MOD13Q1数据(<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v061/>), 空间分辨率为 $250\ m \times 250\ m$ , 时间分辨率为 $16\ d$ 。通过GEE平台收集2000—2021年研究区NDVI数据, 采用最大合成法(MVC)合成月NDVI和年最大NDVI影像, 再利用研究区边界裁切NDVI数据, 获得逐年和逐月NDVI影像(Holben, 1986)。

2) 气象数据: 来自GEE平台提供的ECMWF(European centre for medium-range weather forecasts)发布的第5代全球大气再分析数据集(ERA5), 分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。选用研究区2000—2021年逐月地表(2m)温度数据及月均降水量数据, 重采样为 $250\ m \times 250\ m$ 分辨率以匹配NDVI数据。

3) DEM数据: GEE平台提供的SRTM V3产品数据, 空间分辨率为 $30\ m \times 30\ m$ 。

4) 土地利用类型数据: 来自我国研制的 $30\ m$ 空间分辨率全球地表覆盖数据(GlobeLand30, <https://data.casearth.cn/>), 目前有2000、2010和2020年版, 采用WGS-84坐标系。GlobeLand30的2010和2020年数据的总体精度分别为83.5%和85.7%, Kappa系数分别为0.78和0.82。

5) 碳密度数据: 分别选择研究区内梅州市区、平远县项山甌、梅县区阴那山和三乡镇、丰顺县铜鼓嶂、兴宁市和五华县的自然群落(乔木、灌丛-草本、草地)和人工群落(柚子林、农田、菜地)共计 28 个样地, 采集 112 个土壤样品, 经预处理后测量土壤有机碳含量, 然后计算研究区土壤碳密度。地上碳密度和地下碳密度数据来自文献(罗薇等, 2018; 徐丽等, 2019; 林彤等, 2022; 吴佩君等, 2016)并修正。

## 2.2 分析方法

**2.2.1 Theil-Sen median 趋势分析结合 Mann-Kendall 检验** 是植被长时间序列分析中常用的方法(蔡博峰和于嵘, 2009; 刘宪锋等, 2015a; 许洁等, 2020; 付含培等, 2022; 黄豪奔等, 2022; 朱思佳等, 2022), 该方法具有不需要数据样本遵循特定的分布, 不易受离群值干扰等优点, 具有很强的避免测量误差或异常数据的能力(蔡博峰和于嵘, 2009)。

**2.2.2 Hurst 指数** Hurst 指数(即  $H$  值)常被用于植被时空分布特征研究。 $H$  值体现了时间序列的自相关性, 尤其反映序列中隐藏的长期趋势(也称“长期记忆”), 是定量描述时间序列长期依赖性的有效方法(刘宪锋等, 2013, 2015a; 李卓等, 2017)。 $H$  值域为 0~1, 其大小可用于判断 NDVI 序列的持续性。当  $0.5 < H < 1$ , 表明时间序列是一持续性序列且有长期相关的特征,  $H$  越接近 1, 持续性越强;  $H=0.5$ , NDVI 序列为随机序列;  $0 < H < 0.5$ , 则 NDVI 序列具有反持续性,  $H$  越接近 0, 反持续性越强(李卓等, 2017)。关于  $H$  值的计算方法较多, 在植被时空分布研究中多采用 R/S 分析法(李卓等, 2017)。

**2.2.3 偏相关分析** 植被分布通常受气候、地貌、水文、土壤等多个要素耦合影响。偏相关分析可以在 2 个变量同时与第 3 个变量相关时, 将第 3 个变量的影响剔除, 只分析另外两个变量之间的相关程度。偏相关分析更适合应用在植被时空分布研究中(Sun et al., 2019; 刘宪锋等, 2013, 2015b)。

**2.2.4 InVEST 模型碳储量模块** InVEST 模型旨在模拟陆地不同生态系统物质质量和价值量的变化, 其中碳储量模块即生态系统碳储量, 包括地上碳储量(地上碳库)、地下碳储量(地下碳库)、土壤碳储量(土壤碳库)和死亡有机体碳储量。地上碳库包括地表以上所有活植物的碳储量; 地下碳库包括植物根系系统的碳储量; 死亡有机体碳

库包括枯立木、凋落物和倒木中的碳储量; 土壤碳库即土壤有机碳储量(柯新利和唐兰萍, 2019)。由于死亡有机体碳数据难以获取, 计算时常被忽略不计(张燕等, 2021; 朱文博等, 2019)。不同土地利用类型下的生态系统碳储量计算公式为:

$$C_i = C_{i\_soil} + C_{i\_above} + C_{i\_below}, \quad (1)$$

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i, \quad (2)$$

式中  $i$  为第  $i$  种土地利用类型;  $C_i$  代表土地利用类型总碳密度;  $C_{i\_soil}$  代表土壤碳密度;  $C_{i\_above}$  代表地上碳密度;  $C_{i\_below}$  代表地下碳密度;  $C_{total}$  代表研究区总碳储量;  $S_i$  为土地利用类型面积。土壤碳密度依据实测土壤有机碳含量计算;  $C_{i\_above}$  和  $C_{i\_below}$  数据来自文献(罗薇等, 2018; 徐丽等, 2019; 林彤等, 2022; 吴佩君等, 2016), 并根据公式(3~7)(陈光水等, 2007; Alam et al., 2013)修正碳密度。

$$C_{BP} = 6.798 \exp(0.0054p), \quad (3)$$

$$C_{BT} = 28t + 398, \quad (4)$$

式中  $C_{BP}$  和  $C_{BT}$  分别为年降雨量和年均气温修正下得到的生物量碳密度;  $p$  为年均降雨量(mm);  $t$  为年均气温( $^{\circ}\text{C}$ )。

$$K_{BP} = C'_{BP}/C''_{BP}, \quad (5)$$

$$K_{BT} = C'_{BT}/C''_{BT}, \quad (6)$$

$$K_B = K_{BP} \times K_{BT}, \quad (7)$$

式中  $K_{BP}$  为生物量碳密度年降雨量因子修正系数;  $K_{BT}$  为生物量碳密度年均气温因子修正系数;  $K_B$  为生物量碳密度修正系数;  $C'_{BP}$  和  $C''_{BP}$  分别为研究区与广东省根据年降水量得到的生物量碳密度数据;  $C'_{BT}$  和  $C''_{BT}$  分别为研究区与广东省根据年均温得到的生物量碳密度数据。分别将研究区和广东省的年均温度和降水量带入公式(3~7), 二者之比即为修正系数, 广东省碳密度数据与修正系数的乘积为研究区碳密度数据。

## 3 结果与讨论

### 3.1 NDVI 时空变化特征及其影响因素

NDVI 与植被覆盖度存在极显著线性相关关系, 能有效反映植被覆盖特征(穆少杰等, 2012)。研究区 NDVI 平均值为 0.79, 而且大于 0.7 的区域占全区面积的 92.2%, 揭示粤东北山地生态系统植被生长较好。2000—2021 年研究区 NDVI 呈波动上升趋势, 增速为 0.4%/10a(图 2)。年内 NDVI 最低值出现在 3 月(平均值为 0.48), 最高值出现在 9 月(平均值为 0.81)。3~9 月 NDVI 平均值逐渐上升, 10 月到次年 2 月下降。这一变化趋势与对亚热带

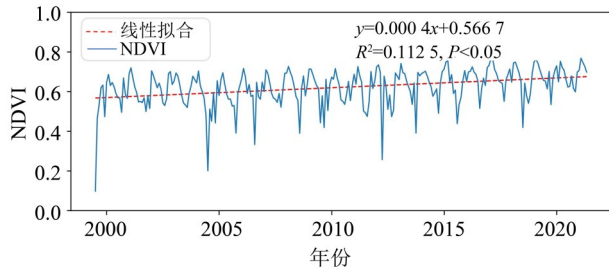


图2 2000—2021年粤东北山地生态系统月平均NDVI变化趋势

Fig. 2 Monthly average NDVI change trend of the mountainous ecosystems in northeastern Guangdong from 2000 to 2021

NDVI变化趋势的研究结果相一致, 且与北半球大气CO<sub>2</sub>浓度变化趋势相反(阮柱, 2021; 邓玉娇等, 2021; 姜春等, 2016; 刘金山等, 2022; 陈丹等, 2006; 陈文裕等, 2022; 王思等, 2022)。

研究区NDVI空间上呈现由西南向东北逐渐升高的趋势(图3(a)), 西部NDVI平均值为0.78, 东部NDVI平均值为0.81, 其中西南部五华县NDVI值最低(0.77), 这主要是研究区土地利用方式及其变化所导致。位于西南部的兴宁市广布平原、阶地、台地, 是研究区的种植业基地, NDVI偏低; 20世纪60~70年代, 五华县滥开荒地, 滥伐森林, 在禁垦坡度内开荒耕地等不合理地利用土地资源, 导致其地表植被遭到周期性破坏, 生态失调, 植被恢复缓慢; 五华县境内岩性以砂页岩为主, 广布低山丘陵, 降雨集中且强度大(汛期平均降雨量1 145.8 mm, 占全年总降雨量的76%(钟美英和李凤梅, 2010), 表层土壤以砂页岩、花岗岩

风化壳为母质, 土壤砂性大, 保水性能差(尚志海和丘世钧, 2004); 另外, 五华县人口密度(约为470人/km<sup>2</sup>)较大(梅州为341人/km<sup>2</sup>)。上述因素耦合作用使其成为广东省荒山面积最大、水土流失最严重的县(尚志海和丘世钧, 2004), 目前植被正处于恢复阶段。研究区东部、东北部和西北部中山广布, 森林覆盖度高, NDVI平均值较大。

一般情况下随海拔升高, 植被类型从森林依次变化为灌丛、草甸等, NDVI下降(Zhang et al., 2013)。研究区海拔<300 m, 广布耕地和城镇居民点, NDVI较小(0.58); 300~1 100 m之间, NDVI随海拔升高而增大, NDVI平均值高达0.84。这是由于这一高度区间广布亚热带常绿阔叶林, 局部分布人工竹林和柚子林; >1 100 m, NDVI降低(0.78)(图4), 广布中山草甸。这是由于海拔高度大于1 100 m地区, 风速和坡度均较大, 土壤发育较差, 导致土壤肥力较低。箱线图可反映数据的分散情况和数据分布特征, 被用作探究NDVI随海拔和气候梯度上的变化(Sun et al., 2019)。研究区NDVI离群值多处于箱线图最小非异常值下方, 即NDVI异常小值的情况较多, 且离群值数量随着海拔升高而减少, 考虑到研究区整体植被覆盖度较高, NDVI值较大, NDVI离群值数量减少应为人类活动随海拔升高而减少所致。

研究区NDVI值变化除了受土地利用方式改变和海拔高度影响外, 还受气候因子变化的制约(孙红雨等, 1998)。研究区2000—2021年月均降水量呈现略微下降趋势(-0.47 mm/10a), 地表温度呈现略微上升趋势(0.047 °C/10a), 这与欧亚大陆平均

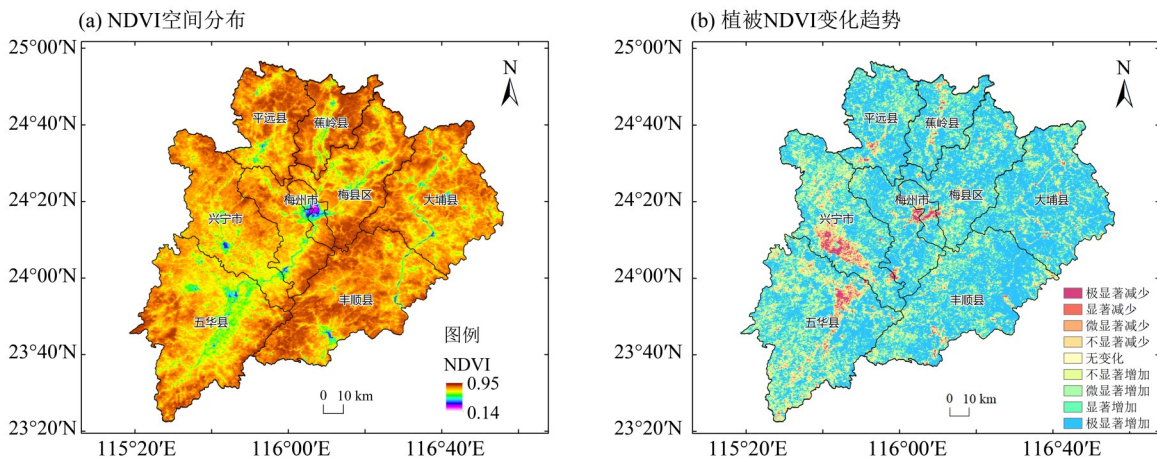


图3 粤东北山地生态系统NDVI空间分布图(a)及其变化趋势(b)

Fig. 3 (a) Spatial distribution map of NDVI; (b) Trend analysis of NDVI changes in the vegetation of the mountainous ecosystems in northeastern Guangdong

温度变化趋势一致(Piao et al., 2011; Tao et al., 2015)。研究区 NDVI 与气象因子的偏相关关系(图 5)显示, 研究区东部山区 NDVI 与平均气温显著正相关( $r > 0.43$ ,  $P < 0.05$ ); 各个区县的城镇区域, NDVI 与平均气温负相关( $r < 0.5$ ,  $P < 0.05$ ), 这可能是因为城镇热岛效应导致气温较高, 植被生长受到抑制, NDVI 降低(彭保发等, 2013)。研究区 NDVI 与降水量的相关性不明显, 这与其他研究结果一致(Wang et al., 2022)。

运用 Sen 氏趋势分析结合 M-K 检验的方法, 分析得出 2000—2021 年研究区植被覆盖度呈现上升趋势(图 3(b),  $P = 0.05$ )。其中 51.9% 的区域 NDVI 呈极显著增加, 17.6% 的区域 NDVI 呈显著增加, 23.4% 的区域呈增加趋势, 只有 7.2% 的区域呈现降低趋势, 0.03% 的区域无变化。东部山区 NDVI 呈极显著增加的区域大于西部。NDVI 减少的区域仅在城镇及其周边区域, 这是城镇化不断扩张的结果(杨春来等, 2013)。

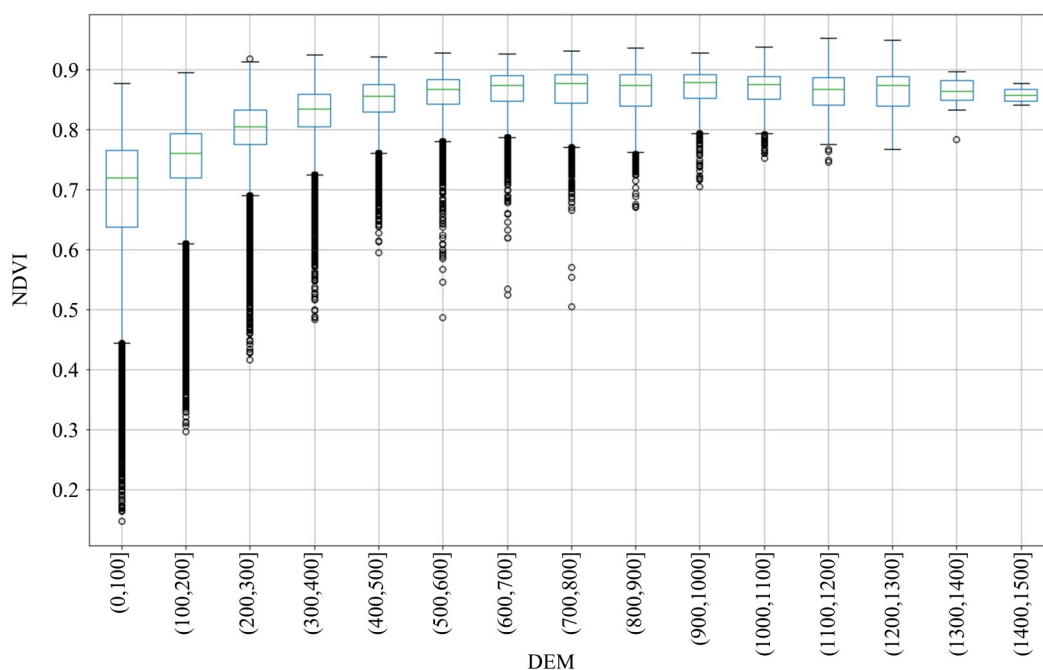


图 4 2000—2021 年粤东北山地生态系统 NDVI 随海拔高度变化箱线图

Fig. 4 The box plot of the variation of NDVI in the mountainous ecosystems with respect to altitude in northeastern Guangdong from 2000 to 2021

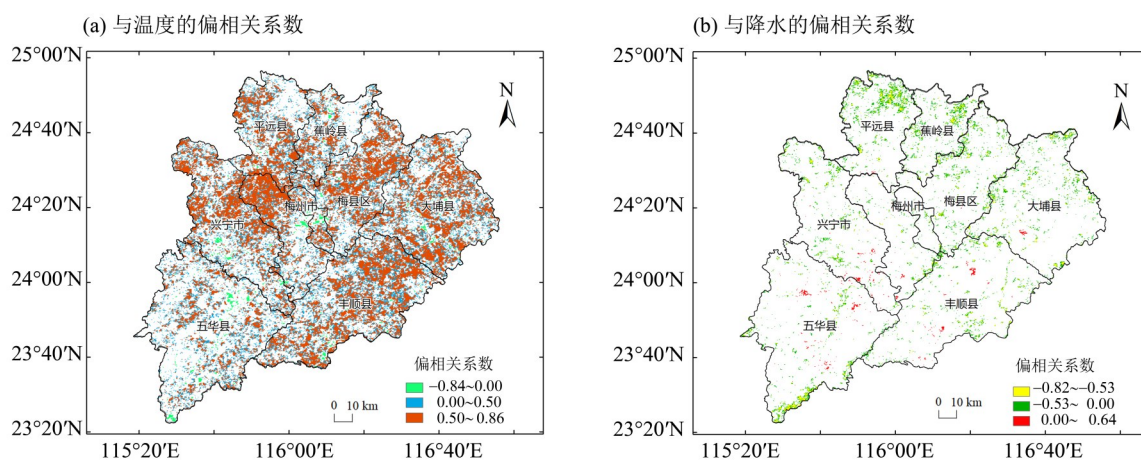


图 5 粤东北山地生态系统 NDVI 与温度、降水的偏相关系数

Fig. 5 Partial correlation coefficients between NDVI and meteorological factors in the mountainous ecosystems in northeastern Guangdong

采用Hurst指数( $H$ )预测研究区植被覆盖未来变化趋势(图6)。研究区 $H=0.12\sim 0.92$ , 平均值为0.45。空间分布上 $H<0.5$ 的区域占70.2%, 其中 $0.4<H<0.5$ 的区域占41.2%,  $H<0.4$ 的区域占28.9%。 $0.5<H<0.6$ 的区域占研究区总面积的23.7%,  $H>0.6$ 的区域仅占6.2%, 这些地域多为城镇及周边区域, 揭示未来粤东北山地生态系统大部分地区植被覆盖度处于不明显的下降趋势。

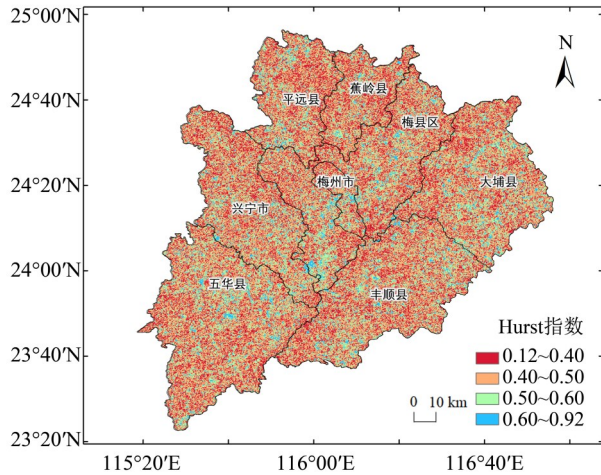


图6 粤东北山地生态系统植被Hurst指数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of Hurst index for vegetation in the mountainous ecosystems of northeastern Guangdong

### 3.2 研究区土地利用变化对碳储量的改变

**3.2.1 土地利用类型时空变化** 土地利用类型变化(LUCC, land use and cover change)是陆地生态系统碳储量变化的主要驱动力之一(Cen et al., 2023), 不同土地利用方式导致土壤有机碳密度(SOCD)存在差异, 例如草甸和森林SOCD最高, 灌丛和农田次之, 再其次是草原, 最低的是荒漠(解宪丽等, 2004); 又如退耕还林还草措施的实施显著增加土壤有机碳(SOC)储量(Lyu et al., 2023); 温带地区自然生态系统转化为农业生态系统导致SOC库减少60%(Lal, 2004); 城市用地扩张侵占草地、林地等导致SOC下降(Feng et al., 2023; Lyu et al., 2023; 柯新利和唐兰萍, 2019)。可见, 土地利用方式变化是研究区植被变化和碳储量时空变化的关键。

研究区土地利用类型以林地为主, 其次是耕地和草地。2000—2010年林地面积占比由2000年的65.5%减少到2010年的65.1%; 耕地面积占比由2000年的16.8%增加到2010年的17.5%; 草地面积占比由2000年的10.5%减少到2010年的10.4%;

灌丛面积增加628 hm<sup>2</sup>, 建设用地面积减少941 hm<sup>2</sup>。耕地是研究区面积增加幅度最大的土地利用类型, 主要由林地和草地转换而来。林地面积减少幅度最大, 主要转换为草地(30 234 hm<sup>2</sup>)、灌丛(21 894 hm<sup>2</sup>)和耕地(234 hm<sup>2</sup>)。

2010—2020年间研究区仍以林地为主, 其次为耕地和草地。但是林地、耕地和草地面积都呈现不同程度的减少, 依次为64.5%, 16.2%和9.9%。建设用地面积增加, 由2010年的1.6%上升到2020年的3.8%。耕地对建设用地贡献最大, 其次为草地和林地, 分别有33 169、6 239和4 858 hm<sup>2</sup>转换为建设用地。这期间面积减少幅度最大的土地利用类型为耕地, 其主要转换为建设用地、林地和草地(图7)。

2000、2010和2020年研究区土地利用类型变化存在空间差异(图8(a))。2000—2010年研究区土地利用类型变化主要为林地和草地向耕地转换, 如研究区中西部海拔较低且地面平缓的梅县区和兴宁盆地的林地和草地被广泛转换为耕地, 此时段研究区东部山地广布中山林地。2010—2020年研究区多个地方出现耕地、林地和草地转换为建设用地, 其中兴宁市和五华县分别有11.8%的耕地(8 468 hm<sup>2</sup>)和7.9%的耕地(6 247 hm<sup>2</sup>)转换为建设用地, 蕉岭县和平远县亦出现耕地转换为建设用地; 梅县区畲江镇林地和草地转换为建设用地的面积最大, 五华县也存在林地和草地转换为建设用地的情况。

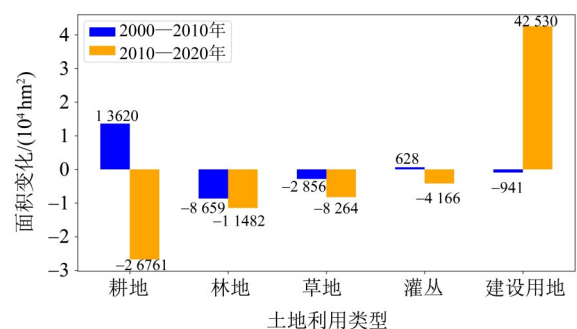


图7 2000—2010年和2010—2020年粤东北山地生态系统土地利用面积变化

Fig. 7 Land use area changes in the mountainous ecosystems of northeastern Guangdong during 2000-2010 and 2010-2020

**3.2.2 碳储量时空变化** 根据公式(1~7)计算得到2000—2020年粤东北山地生态系统不同土地利用类型的碳密度(表1)。根据表1数据分别计算2000年研究区碳储量为67.51 Tg, 2010年

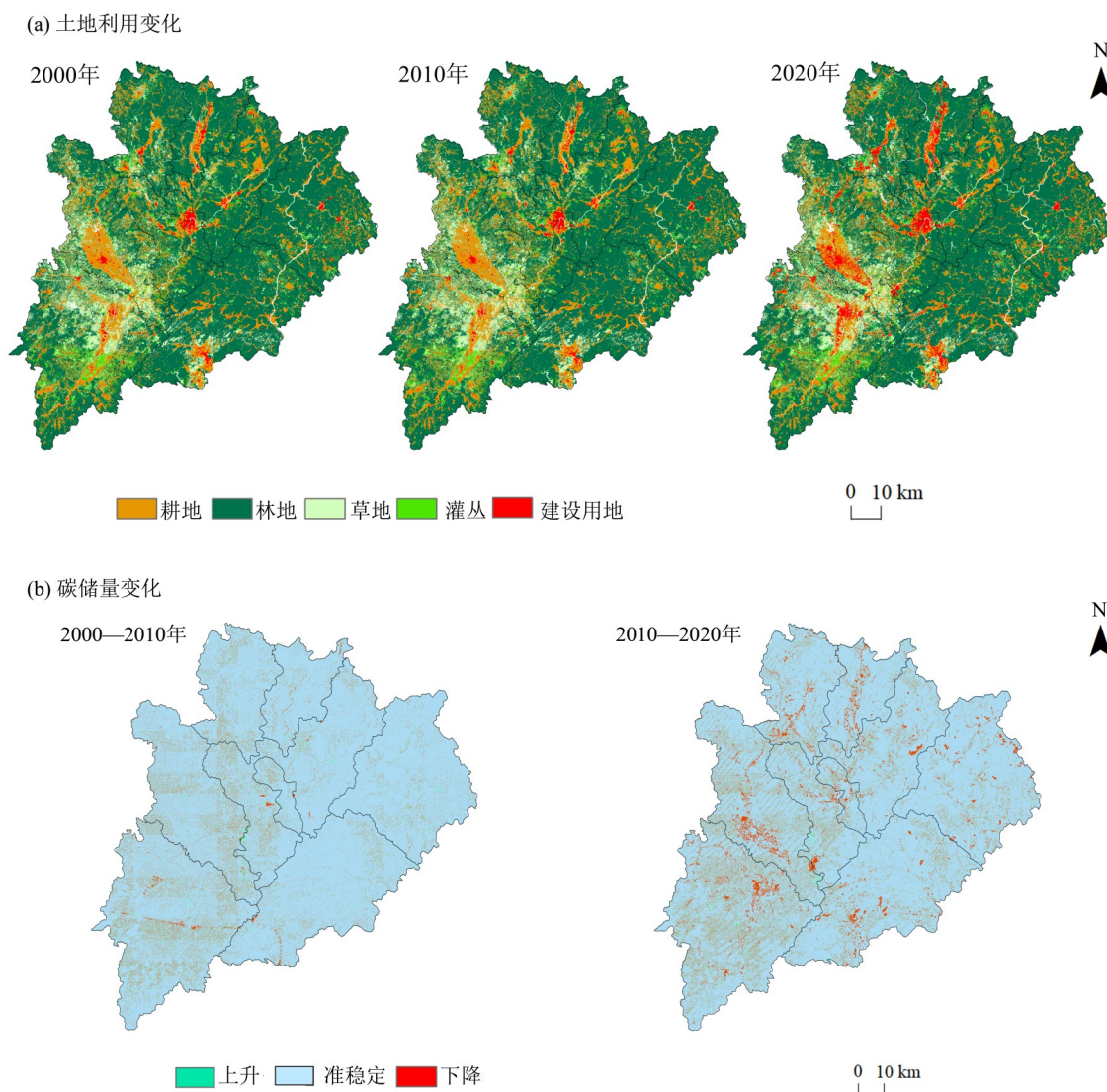


图 8 粤东北山地生态系统土地利用变化和碳储量变化

Fig. 8 Land use changes and carbon storage changes in the mountainous ecosystems in northeastern Guangdong

表 1 研究区不同土地利用类型的碳密度及其碳储量

Table 1 Carbon density and carbon storage of land use types in northeastern Guangdong

土地利用类型	碳密度/(Mg·hm <sup>-2</sup> )				碳储量/Tg		
	$C_{i\_above}$	$C_{i\_below}$	$C_{i\_soil}$	$C_i$	2000年	2010年	2020年
耕地	13.71	2.74	5.33	21.78	7.04	7.34	6.75
林地	16.84	5.05	8.94	30.83	38.83	38.56	38.21
草地	13.98	72.71	6.95	93.64	18.90	18.64	17.86
灌丛	16.51	4.96	4.11	25.58	2.21	2.23	2.12
建设用地	9.83	1.97	5.31	17.11	0.53	0.52	1.24

碳储量为 67.29 Tg, 2020 年碳储量为 66.18 Tg, 共计减少 1.33 Tg。研究区有机碳储量呈现下降趋势, 与其他研究结果一致(林彤等, 2022)。不同土地利用类型对研究区碳储量的贡献存在差异。研究区 64.5% 以上面积为林地覆盖, 林

地碳密度较高(30.83 Mg/hm<sup>2</sup>), 其对研究区碳储量的贡献大于 55.6%; 草地覆盖面积虽小(约 10%), 但其碳密度高(93.64 Mg/hm<sup>2</sup>), 对研究区碳储量的贡献达 26.0%; 耕地的贡献为 12.3%。

和2000—2010年相比, 2010—2020年粤东北山地生态系统碳储量减少较多, 除建设用地外, 其他类型用地碳储量均减少(图9)。2000—2010年研究区碳储量减少0.24 Tg, 其中林地和草地碳储量均减少0.27 Tg, 耕地碳储量增加0.30 Tg。2010—2020年研究区碳储量减少1.09 Tg, 碳密度较高的草地碳储量减少最多(0.77 Tg), 林地和耕地碳储量分别减少0.35 Tg和0.58 Tg, 新增的建设用地碳储量增加0.73 Tg, 这主要是由于这一时期碳密度较高的草地、林地和耕地转换为碳密度较低的建设用地所致(林彤等, 2022; 吴佩君等, 2016)。

随着土地利用方式的变化, 研究区有机碳储量存在时空变化。空间变化呈现西部有机碳储量变化幅度大于东部、较平缓低地大于山地的特征, 2010—2020年更甚(图8(b))。这是由于研究区西部和较平缓低地的大面积耕地、草地转换为建设用地(图8(a))所致。研究区有机碳储量下降的区域可分为3类: ① 城镇扩张, 使得高碳密度的草地转换为绿地较少的建设用地导致碳储量下降, 如平远县和五华县建设用地侵占草地; ② 草地转

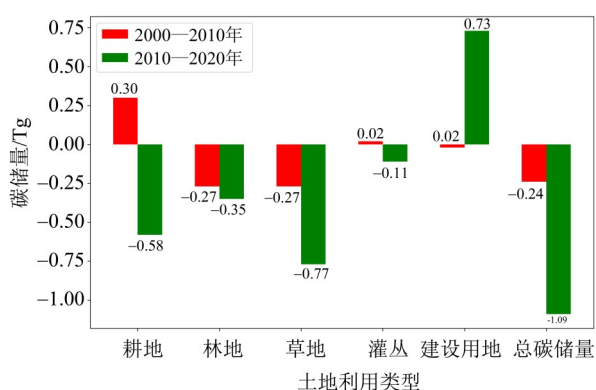


图9 粤东北山地生态系统碳储量变化

Fig. 9 The changes in carbon storage in the mountainous ecosystems in northeastern Guangdong

#### 参考文献:

蔡博峰, 于嵘, 2009. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J]. 遥感学报, 13(6):1170-1186.  
 陈丹, 钱峻屏, 张虹鸥, 等, 2006. 基于遥感数据的广东省植被指数时空变化研究[J]. 生态科学, 25(5):412-416.  
 陈光水, 杨玉盛, 刘乐中, 等, 2007. 森林地下碳分配(TBCA)研究进展[J]. 亚热带资源与环境学报, 2(1):34-42.  
 陈文裕, 夏丽华, 徐国良, 等, 2022. 2000—2020年珠江流域NDVI动态变化及影响因素研究[J]. 生态环境学报, 31(7):1306-1316.

换为碳密度较低的灌丛和耕地导致碳储量下降, 如丰顺县南部草地转换为灌丛和耕地。③ 耕地转化为水体导致碳储量下降, 如兴宁市合水水库和五华县益塘水库加固扩建, 蓄水位增高, 淹没耕地面积增大(董良山, 2011)。显然, 土地利用类型的变化, 尤其是碳密度较高、碳周转较慢的林地、草地转换为碳密度较低、碳周转较快的耕地(Wang et al., 2023)和建设用地(丁岳等, 2023; 柯新利和唐兰萍, 2019; 刘洋等, 2021; 杨激威等, 2022), 是研究区碳储量减少的主要原因。

## 4 结论

基于实测土壤有机碳数据和MODIS-NDVI数据, 运用Sen氏趋势分析与M-K检验结合的方法, Hurst指数, 偏相关系数以及InVEST模型等方法, 分析2000—2020年粤东北山地生态系统植被变化特征和有机碳储量变化, 得到如下主要结论:

1) 粤东北山地生态系统植被覆盖度较高, NDVI平均值约0.79; NDVI变化呈增加趋势, 增速为0.4%/10a。研究区植被覆盖呈现东部高、西部低的空间分布特点。Hurst指数(平均值为0.45)揭示研究区未来植被覆盖有下降趋势。

2) 研究区NDVI与气温正相关( $r>0.43$ ,  $P<0.05$ ), 与降水量相关性不明显, 揭示研究区植被变化主要受气温变化调控。

3) 2000—2020年, 粤东北山地生态系统有机碳储量呈现快速下降趋势, 空间变化表现为东部有机碳储量变化缓慢, 西部变化较大的特点。林地和草地是研究区主要碳汇。土地利用类型变化, 尤其是碳密度较高、碳周转较慢的林地、草地转换为碳密度较低、碳周转较快的耕地和建设用地, 是研究区碳储量减少的主要原因。

邓兴耀, 姚俊强, 刘志辉, 2017. 基于GIMMS NDVI的中亚干旱区植被覆盖时空变化[J]. 干旱区研究, 34(1):10-19.  
 邓玉娇, 王捷纯, 徐杰, 等, 2021. 广东省NDVI时空变化特征及其对气候因子的响应[J]. 生态环境学报, 30(1):37-43.  
 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 等, 2023. 基于InVEST模型和PLUS模型的环杭州湾生态系统碳储量[J]. 环境科学, 44(6):3343-3352.

- 董良山, 2011. 合水水库加固扩建征地移民和泥沙淤积问题的解决[J]. 广东水利水电, (6):23-25+48.
- 付含培, 王让虎, 王晓军, 2022. 1999—2018年黄河流域NDVI时空变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 29(2): 145-153+162.
- 黄豪奔, 徐海量, 林涛, 等, 2022. 2001—2020年新疆阿勒泰地区归一化植被指数时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 42(7): 2798-2809.
- 姜春, 吴志峰, 程炯, 等, 2016. 广东省土地覆盖变化对植被净初级生产力的影响分析[J]. 自然资源学报, 31(6):961-972.
- 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等, 2004. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. 土壤学报, 41(5): 687-699.
- 柯新利, 唐兰萍, 2019. 城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响——以湖北省为例[J]. 生态学报, 39(2):672-683.
- 李卓, 孙然好, 张继超, 等, 2017. 京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析[J]. 生态学报, 37(22):7418-7426.
- 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等, 2022. 基于InVEST-PLUS模型的碳储量空间关联性及预测——以广东省为例[J]. 中国环境科学, 42(10):4827-4839.
- 刘冠, 李国庆, 李洁, 等, 2021. 基于InVEST模型的1999—2016年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J]. 干旱区研究, 38(1):267-274.
- 刘金山, 张蓓, 彭泰来, 等, 2022. 广东省国家级公益林NDVI时空变化特征分析[J]. 中南林业调查规划, 41(2):32-35.
- 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等, 2015a. 2000—2014年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 地理学报, 70(5):705-716.
- 刘宪锋, 任志远, 林志慧, 等, 2013. 2000—2011年三江源区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报, 68(7): 897-908.
- 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等, 2015b. 1982—2012年中国植被覆盖时空变化特征[J]. 生态学报, 35(16):5331-5342.
- 刘晓娟, 黎夏, 梁迅, 等, 2019. 基于FLUS-InVEST模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J]. 热带地理, 39(3):397-409.
- 刘洋, 张军, 周冬梅, 等, 2021. 基于InVEST模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J]. 生态学报, 41(10): 4052-4065.
- 罗薇, 张会化, 陈俊坚, 等, 2018. 广东省土壤有机碳储量及分布特征[J]. 生态环境学报, 27(9):1593-1601
- 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等, 2012. 2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报, 67(9): 1255-1268.
- 彭保发, 石忆邵, 王贺封, 等, 2013. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律——以上海市为例[J]. 地理学报, 68(11):1461-1471.
- 朴世龙, 何悦, 王旭辉, 等, 2022. 中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望[J]. 中国科学:地球科学, 52(6):1010-1020.
- 阮柱. 2021. 基于NDVI重构的广东省NDVI变化及其驱动因素分析[D]. 北京:中国科学院大学.
- 尚志海, 丘世钧, 2004. 广东省红色风化壳地区水土流失严重性的成因分析——以五华县为例[J]. 地质灾害与环境保护, 15(4):15-18.
- 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等, 1998. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于NOAA时间序列数据分析[J]. 遥感学报, 2(3):204-210, T001.
- 王思, 张路路, 林伟彪, 等, 2022. 基于MODIS归一化植被指数的广东省植被覆盖与土地利用变化研究[J]. 生态学报, 42(6):2149-2163.
- 王正兴, 刘闯, HUETE Alfredo, 2003. 植被指数研究进展:从AVHRR-NDVI到MODIS-EVI[J]. 生态学报, 23(5): 979-987.
- 吴佩君, 刘小平, 黎夏, 等, 2016. 基于InVEST模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估——以广东省为例[J]. 地理与地理信息科学, 32(5): 22-28+36+127.
- 向书江, 张骞, 王丹, 等, 2022. 近20年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析[J]. 自然资源学报, 37(5):1198-1213.
- 许洁, 陈惠玲, 商沙沙, 等, 2020. 2000—2014年青藏高原植被净初级生产力时空变化及对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 43(3):592-601.
- 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞, 2019. 2010中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. 中国科学数据, 4(1): 86-92.
- 杨春来, 夏斌, 连剑波, 2013. 梅州市土地利用变化及生态环境效应分析[J]. 南方农业学报, 44(12):2027-2030.
- 杨激威, 赵娟, 朱家田, 等, 2022. 基于PLUS和InVEST模型的西安市生态系统碳储量时空变化与预测[J]. 自然资源遥感, (4):175-182.
- 张燕, 师学义, 唐倩, 2021. 不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估[J]. 生态学报, 41(1):360-373.
- 钟美英, 李凤梅, 2010. 五华县近52年降水统计分析及其最大降水量重现期的估算[J]. 广东水利水电, (12): 37-40.
- 朱思佳, 冯微微, 邹滨, 等, 2022. 2000—2019年洞庭湖流域植被NPP时空特征及驱动因素分析[J]. 自然资源遥感, (3): 196-206.

- 朱文博,张静静,崔耀平,等,2019.基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估——以太行山淇河流域为例[J].地理学报,74(3):446-459.
- 朱志强,马晓双,胡洪,2021.基于耦合FLUS-InVEST模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测[J].水土保持通报,41(2):222-239.
- ALAM S A,STARR M,CLARK B J F,2013. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study[J]. J Arid Environ,89: 67-76.
- CEN Y,LOU Y,GAO Z, et al,2023. Vegetation carbon input moderates the effects of climate change on topsoil organic carbon in China[J]. CATENA,228: 107188.
- COTRUFO M F, LAVALLEE J M,2022. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration[M]//Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier. 1-66.
- FENG H,KANG P,DENG Z,et al,2023. The impact of climate change and human activities to vegetation carbon sequestration variation in Sichuan and Chongqing[J]. Environ Res,238: 117138.
- GAO W,ZHENG C,LIU X,et al,2022. NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 1982 to 2020: A case study in the Mu Us Sandy Land,China[J]. Ecol Indic,137: 108745.
- HICKS PRIES C E,CASTANHA C,PORRAS R C,et al,2017. The whole-soil carbon flux in response to warming[J]. Science,355(6332): 1420-1423.
- HOLBEN B N,1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data[J]. Int J Remote Sens,7(11): 1417-1434.
- KONG D,ZHANG Q,SINGH V P,et al,2017. Seasonal vegetation response to climate change in the Northern Hemisphere (1982-2013)[J]. Glob Planet Change,148: 1-8.
- LAL R,2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 304(5677): 1623-1627.
- LUO Z,LUO Y,WANG G,et al,2020. Warming-induced global soil carbon loss attenuated by downward carbon movement[J]. Glob Change Biol,26(12): 7242-7254.
- LYU J,FU X,LU C,et al,2023. Quantitative assessment of spatiotemporal dynamics in vegetation NPP,NEP and carbon sink capacity in the Weihe River Basin from 2001 to 2020 [J]. J Clean Prod,428: 139384.
- PIAO S,FANG J,CIAIS P,et al,2009. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature,458(7241): 1009-1013.
- PIAO S, WANG X, CIAIS P, et al,2011. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. Glob Change Biol,17(10): 3228-3239.
- RUMAINUL I M,BALWANT S,DIJKSTRA FEIKE A,2022. Stabilisation of soil organic matter: Interactions between clay and microbes[J]. Biogeochemistry,160(2): 145-158.
- SUN W,WANG Y,FU Y H,et al,2019. Spatial heterogeneity of changes in vegetation growth and their driving forces based on satellite observations of the Yarlung Zangbo River Basin in the Tibetan Plateau[J]. J Hydrol, 574: 324-332.
- TAO J,ZHANG Y,DONG J,et al,2015. Elevation-dependent relationships between climate change and grassland vegetation variation across the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Int J Climatol,35(7): 1638-1647.
- TUCKER C J,1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. Remote Sens Environ,8(2): 127-150.
- WANG X,LI S,WANG L,et al,2023. Effects of cropland reclamation on soil organic carbon in China's black soil region over the past 35 years[J]. Glob Change Biol,29(18): 5460-5477.
- WANG X,OU T,ZHANG W,et al,2022. An overview of vegetation dynamics revealed by remote sensing and its feedback to regional and global climate[J]. Remote Sens, 14 (20): 5275.
- WEI X,YANG J,LUO P,et al,2022. Assessment of the variation and influencing factors of vegetation NPP and carbon sink capacity under different natural conditions[J]. Ecol Indic, 138: 108834.
- WITZGALL K,VIDAL A,SCHUBERT D I,et al,2021. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon[J]. Nat Commun, 12(1): 4115.
- ZHANG G,ZHANG Y,DONG J,et al,2013. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011[J]. Proc Natl Acad Sci USA,110(11): 4309-4314.