

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.03.012 CSTR:32310.14.stbcbx.2025.03.012

吴阳,张杰琳,彭守璋.中国典型自然植被碳储量对气候变化的动态响应及驱动力分析[J].水土保持学报,2025,39(3):182-190.

WU Yang, ZHANG Jielin, PENG Shouzhang. Dynamic response and driver analysis of carbon storage in typical natural vegetation over China under climate change[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3):182-190.

中国典型自然植被碳储量对气候变化的 动态响应及驱动力分析

吴阳^{1,2}, 张杰琳^{3,4}, 彭守璋^{3,4}

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院大学,北京 100049;
3.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院,陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学
水土保持与荒漠化整治全国重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 通过分析不同气候区自然植被的植被碳储量(VCS)和土壤碳储量(SCS)的变化趋势与环境要素对碳储量变化的驱动机制,以期为研究区制定适应气候变化的植被管理策略提供依据。[方法] 通过构建基于LPJ-GUESS模型和随机森林方法的混合模型,模拟1851—2100年中国典型自然植被VCS和SCS的动态变化,结合Mann-Kendall趋势检验和Sen's斜率估计方法,分析碳储量动态变化与趋势特征。[结果] 1)混合模型模拟自然植被的VCS和SCS的决定系数分别为0.83和0.61,均方根误差分别为2.42、3.73 kg/m²(以C计),可准确捕捉生态系统碳动态。2)与历史时期相比,本世纪末VCS,SCS和总碳储量(TCS,即VCS+SCS)在整个研究区分别增加44.8%~88.1%、7.5%~13.4%和10.4%~19.8%,在高原半干旱区增幅最大,不同SSPs气候情景下的增幅表现为SSP119<SSP245<SSP585。3)不同SSPs情景下,自然植被VCS以4.6~9.7 g/(m²·a)(以C计)的速率显著上升,SCS变化趋势不显著,TCS在SSP245和SSP585情景下分别以14.6、18.0 g/(m²·a)(以C计)的速率显著上升。4)不同SSPs气候情景下碳储量受环境因素影响的变化程度表现为SSP119<SSP245<SSP585,VCS对气候变化的敏感性大于SCS;降水是中国典型自然植被碳汇功能增强的主要驱动因子。[结论] 混合模型能够准确表征碳储量变化,相较于温度大气CO₂浓度,降水是驱动未来时期中国自然植被碳汇功能增强的关键因子。

关键词: 气候变化; LPJ-GUESS; 混合模型; 碳储量

中图分类号:X171.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2025)03-0182-09

Dynamic Response and Driver Analysis of Carbon Storage in Typical Natural Vegetation over China under Climate Change

WU Yang^{1,2}, ZHANG Jielin^{3,4}, PENG Shouzhang^{3,4}

(1.The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] To analyze the trends of vegetation carbon storage (VCS) and soil carbon storage (SCS) of natural vegetation across different climatic zones and the driving mechanisms of environmental factors on the changes of carbon storage, in order to provide a basis for the development of vegetation management strategies adapted to climate change in the study area. [Methods] By constructing a hybrid model based on the LPJ-GUESS model and the random forest method, the dynamic changes of VCS and SCS of typical natural vegetation in China

收稿日期:2024-11-06 修回日期:2024-12-24 录用日期:2025-01-02 网络首发日期(www.cnki.net):2025-03-20

资助项目:第二次青藏高原综合科学考察研究(2022QZK0101);国家自然科学基金项目(42401338,U2243226,42077451)

第一作者:吴阳(1998—),女,硕士研究生,主要从事气候变化与植被动态研究。E-mail:wyy98117@163.com

通信作者:彭守璋(1986—),男,博士,研究员,主要从事气候变化与植被动态研究。E-mail:szp@nwfau.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

from 1851 to 2100 were simulated, and the carbon storage dynamics were analyzed by combining the Mann-Kendall trend test and Sen's slope estimation method. [Results] 1) The determination coefficients of VCS and SCS of natural vegetation simulated by the hybrid model were 0.83 and 0.61, respectively, and the root mean square errors (RMSEs) were 2.42 and 3.73 kg/m², respectively, which could accurately capture the ecosystem carbon dynamics. 2) Compared to the historical period, VCS, SCS and TCS in the whole study area were expected to increase by 44.8%–88.1%, 7.5%–13.4%, and 10.4%–19.8% by the end of this century, respectively, with the largest increase in the semi-arid plateau region. The increases under different SSPs climate scenarios followed the order of SSP119<SSP245<SSP585. 3) Under different SSPs scenarios, VCS of natural vegetation increased significantly at a rate of 4.6–9.7 g/(m²·a), while the trend of changes in SCS was not significant. TCS increased significantly at a rate of 14.6 and 18.0 g/(m²·a) under the SSP245 and SSP585 scenarios, respectively. 4) The degree of influence of environmental factors on carbon storage under different SSP scenarios followed the order of SSP119<SSP245<SSP585, with VCS being more sensitive to climate change than SCS. Precipitation was identified as the main driving factor enhancing the carbon sink function of typical natural vegetation in China. [Conclusions] The hybrid model can accurately characterize carbon storage changes. Precipitation is the key factor driving the enhancement of the carbon sink function of natural vegetation across China in the future, compared to temperature and atmospheric CO₂ concentration.

Keywords: climate change; LPJ-GUESS; hybrid model; carbon storage

Received: 2024-11-06

Revised: 2024-12-24

Accepted: 2025-01-02

Online(www.cnki.net): 2025-03-20

工业革命以来,气候变化正逐渐影响陆地生态系统原本的自然环境,并在未来一段时间内持续。陆地生态系统作为全球最大碳库,其碳汇功能能够有效减缓大气CO₂浓度升高^[1],从而缓解全球变暖。生态系统碳储量作为研究碳收支的关键要素,是生态系统碳汇的基础,是实现“双碳”目标的关键因素之一,其变化受温度、降水、大气CO₂浓度、植被和土壤状况的影响,具有明显的区域差异^[2]。因此,在气候变化背景下,合理估计未来时期中国典型自然植被碳储量的动态变化,对评估陆地生态系统生态服务功能具有重要意义。

现有研究主要探究历史时期气候变化对碳储量的影响,且研究大多在区域尺度上进行,如李妙宇等^[3]、孔蕊等^[4]、LIU等^[5]在黄土高原、长江流域、西藏等区域基于历史数据探讨影响生态系统碳储量的气候因子,而对于未来时期碳储量变化及其主要驱动因子研究不足,限制人们对未来时期碳储量变化的深入理解和准确预测。因此,本研究基于未来气候情景,在国家尺度上分析生态系统碳储量的动态变化趋势及主要驱动力,有助于理解全球碳循环和气候变化的相互作用,为生态系统植被管理和减排增汇政策的制定提供重要的科学依据。

模型模拟是研究生态系统碳储量变化的重要研究方法,主要包括基于过程的机理模型和数据驱动的经验模型。机理模型集成多种生态生理过程,

对自然过程的解释度较高。LPJ-GUESS模型作为典型的动态植被模型,能够模拟生态系统组成、结构及功能对气候变化的动态响应,得到广泛应用^[6]。但由于自然过程的复杂性,机理模型无法量化多种环境因子及其相互作用对生态系统结构与功能的影响,模型模拟精度难以提升^[7]。随着计算机性能和算法技术的突破,机器学习为机理模型精度受限的问题提供解决方案。其中随机森林(random forest, RF)作为经典机器学习算法,显著提高模拟的精度和速度^[8]。然而,基于数据驱动的RF方法不依赖具体的自然过程,难以解释陆地生态系统内各环境要素的相互作用机制^[9]。针对以上限制,耦合机理模型和机器学习的特点,有研究者提出混合模型的新思路^[10]。

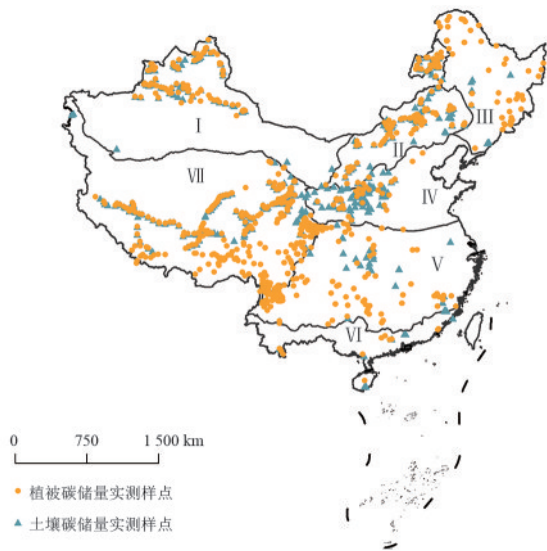
基于此,本研究结合1 848个中国典型自然植被的植被碳储量(VCS)样点和567个土壤碳储量(SCS)样点的实测数据,构建基于LPJ-GUESS模型和RF方法的混合模型,模拟1851—2100年中国典型自然植被VCS和SCS的动态变化,分析其在未来时期对气候变化的响应及关键驱动因子,为中国典型自然植被的科学管理提供理论依据。

1 研究方法

1.1 数据收集

自然植被VCS和SCS(0—100 cm)的实测数据源自2010s中国陆地生态系统碳密度数据集^[11]和文

献公开数据,用于 LPJ-GUESS 模型参数校准和精度验证。本研究共获取中国 1 848 个样点的 VCS 数据, 567 个样点的 SCS 数据, 将其整合至 0.25° 分辨率。根据年积温与干燥度将中国划分为 7 个主要气候区: 中温带干旱地区、中温带半干旱地区、中温带半湿润地区、暖温带半湿润地区、北亚热带湿润地区、边缘热带湿润地区和高原温带半干旱地区。所获样点在每个气候区均有分布(图 1)。



注: I 为中温带干旱地区; II 为中温带半干旱地区; III 为中温带半湿润地区; IV 为暖温带半湿润地区; V 为北亚热带湿润地区; VI 为边缘热带湿润地区; VII 为高原温带半干旱地区; 基于审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作, 底图无修改。

图 1 实测样点分布

Fig. 1 Distribution of the sampling points

1.2 LPJ-GUESS 模型模拟与验证

LPJ-GUESS 模型的驱动数据包括气候数据(月平均降水量、月平均温度、月平均云量), 大气 CO₂ 浓度数据、土壤类型数据及植被生理生态参数。其中, 历史时期的气候数据来自 1901—2022 年 0.5° 的 CRU TS 4.07 数据集(<https://crudata.uea.ac.uk/>), 2023—2100 年气候数据采用 EC-Earth3 大气环流模式下共享社会经济路径(SSPs)情景中的 SSP119、SSP245 和 SSP585 情景^[12], 其中 SSP119 属于低减缓压力和低辐射强迫下的未来情景, 表示可持续发展路径; SSP245 属于中等辐射强迫下的未来情景, 表示维持当前社会经济和科学技术发展趋势的中度发展路径; SSP585 属于高辐射强迫下的未来情景, 表示以燃烧化石燃料为主的高速发展路径。气候数据利用 Delta 空间降尺度方法整合至 0.25°^[13]。土壤数据采用 LPJ-GUESS 模型推荐的土壤信息。1851—1958 年和 1959—2022 年的大气 CO₂ 浓度数据分别来自冰芯估算^[14]和莫纳罗亚天文台(<https://gml.noaa.gov/>

ccgg/trends/), 2023—2100 年的大气 CO₂ 浓度数据来自 SSP 数据集^[15]。1851—2022 年的 0.25° 氮沉降数据根据 CMIP6 的强迫数据库采用双线性插值法生成。

结合自然植被 VCS 与 SCS 的实测数据与对应时间段内 LPJ-GUESS 模型模拟结果, 利用 Sobol' 全局敏感性分析方法与遗传算法对模型内部的敏感参数进行识别与校准, 从而得到最优的参数组合。Sobol' 方法共识别敏感参数 73 个, 设置遗传算法的种群数量为 40 个, 迭代次数为 20 次, 最优参数组的选择指标为皮尔逊相关系数(pearson correlation coefficient, r)和纳什效率系数(nash-sutcliffe efficiency, NSE), 利用校准后的最优参数驱动模型。LPJ-GUESS 模型模拟过程分为 2 个阶段: 第 1 阶段使用 1851—1880 年的输入数据循环使用 1500 年进行 spin-up, 使植被与土壤的碳库和氮库达到动态平衡状态; 第 2 阶段输入 1851—2100 年的气候与大气 CO₂ 数据模拟每年自然植被 VCS 和 SCS 动态。

1.3 混合模型建立与评价

利用随机森林方法建立混合模型, 表达式为:

$$Y = (\text{Sim}, X_{\text{climate}}) \quad (1)$$

式中: Y 为自然植被 VCS(SCS), kg/m²(以 C 计); Sim 为敏感参数校准后 LPJ-GUESS 的输出变量, 包括蒸散发、总初级生产力、净初级生产力、叶面积指数、碳氮相关指数、地表径流量和最大羧化速度等 21 个因子; X_{climate} 为与 LPJ-GUESS 模拟年份相同的气候(温度、降水)、土壤、地形等环境因子数据。气候数据和运行 LPJ-GUESS 模型所用的数据一致。土壤数据来自全球土壤数据中心(<https://soilgrids.org/>)和全球 1 km 风化岩和沉积层厚度数据集^[16]。岩性数据来自全球岩性数据集 v1.0^[17]。高程数据来自 World Clim^[18]。岩性数据、土壤数据与高程数据的分辨率均为 0.25°。

基于历史时期 VCS 与 SCS 的实测数据对模型进行训练, 利用五折交叉验证确定随机森林模型中的最优混合模型。结合 LPJ-GUESS 在网格上的输出结果和环境因子数据, 利用最优混合模型, 模拟中国典型自然植被的 VCS 和 SCS。此外, 对比了混合模型与其他 2 种方法模拟的自然植被 VCS(SCS)精度。一种方法为敏感参数优化后的 LPJ-GUESS 模型; 另一种方法仅使用 LPJ-GUESS 模型的 21 个输出变量进行随机森林建模。采用决定系数(coefficient of determination, R^2)和均方根误差(root mean square error, RMSE)作为精度评价指标。

1.4 趋势分析

利用距平法分析中国典型自然植被 VCS、SCS 和 TCS 在本世纪末(2071—2100年)相较于历史时期(1993—2022年)的变化,并采用 Mann-Kendall 趋势检验法和 Sen's 斜率估计法分析未来时期(2023—2100年)VCS、SCS 和 TCS 动态变化的趋势特征。Mann-Kendall 趋势检验法通过检验统计变量 Z 来判断时间序列数据是否存在单调趋势,广泛应用于气候、水文等要素的时间序列趋势评估。 $|Z| \geq 1.96$ 时,时间序列数据存在显著变化趋势。 $Z > 0$ 时,数据存在上升趋势, $Z < 0$ 时,序列存在下降趋势。Sen's 斜率估计是一种非参数趋势斜率计算方法,不受序列奇异值的影响,能较好地反映序列的趋势变化程度,将其作为对 Mann-Kendall 趋势检验的补充。

1.5 驱动力分析

分析温度、降水和大气 CO_2 浓度 3 种环境因子在未来时期对自然植被 VCS、SCS 和 TCS 的驱动力。以未来时期不同 SSPs 情景下温度、降水与大气 CO_2 浓度数据驱动混合模型,将 VCS、SCS 和 TCS 的模拟结果设置为基准值。利用 2022 年温度数据对 2023—2100 年温度数据进行逐年替换,使用替换后的温度数据、2023—2100 年的降水量与大

气 CO_2 浓度数据驱动混合模型,比较模拟结果与基准值在本世纪末的差异,从而分析中国典型自然植被 VCS、SCS 和 TCS 对温度变化的敏感性。表达式为:

$$EP_{\Delta} = \frac{E - E_{\Delta}}{E} \times 100\% \quad (2)$$

式中: EP_{Δ} 为自然植被 VCS(SCS、TCS) 相对基准值的变化率,%; E 为自然植被 VCS(SCS、TCS) 的基准值, kg/m^2 (以 C 计); E_{Δ} 为温度作为控制因子时,混合模型模拟自然植被 VCS(SCS、TCS) 的结果, kg/m^2 (以 C 计)。降水与大气 CO_2 浓度的驱动力计算与温度同理。

2 结果与分析

2.1 模型建立与评价

利用历史时期中国典型自然植被 VCS 和 SCS 的实测数据验证模型精度。VCS 混合模型训练集 R^2 和 RMSE 分别为 0.97、1.03 kg/m^2 (以 C 计),验证集 R^2 和 RMSE 分别为 0.83、2.42 kg/m^2 (以 C 计),SCS 混合模型训练集 R^2 和 RMSE 分别为 0.89、2.14 kg/m^2 (以 C 计),验证集 R^2 和 RMSE 分别为 0.61、3.73 kg/m^2 (以 C 计)(图 2)。结果表明,混合模型模拟 VCS 和 SCS 的模拟结果是合理的。

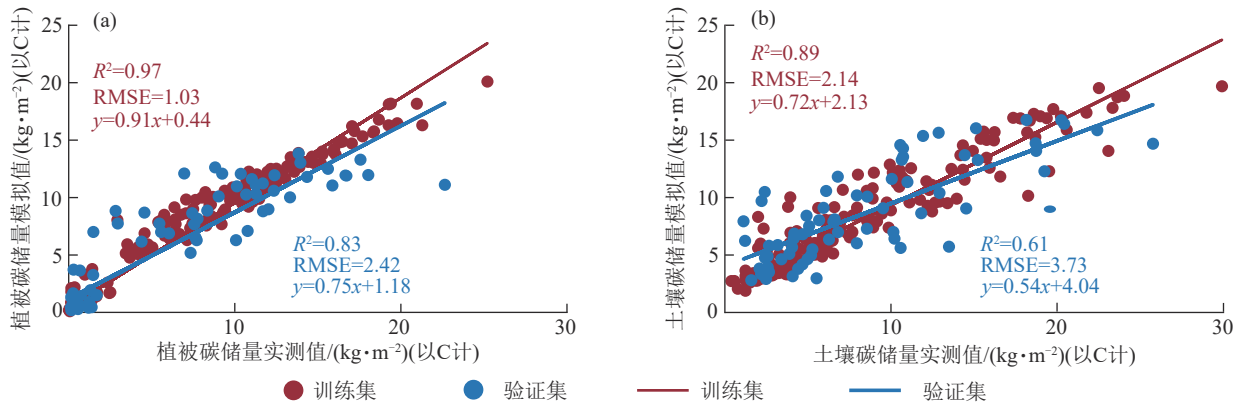


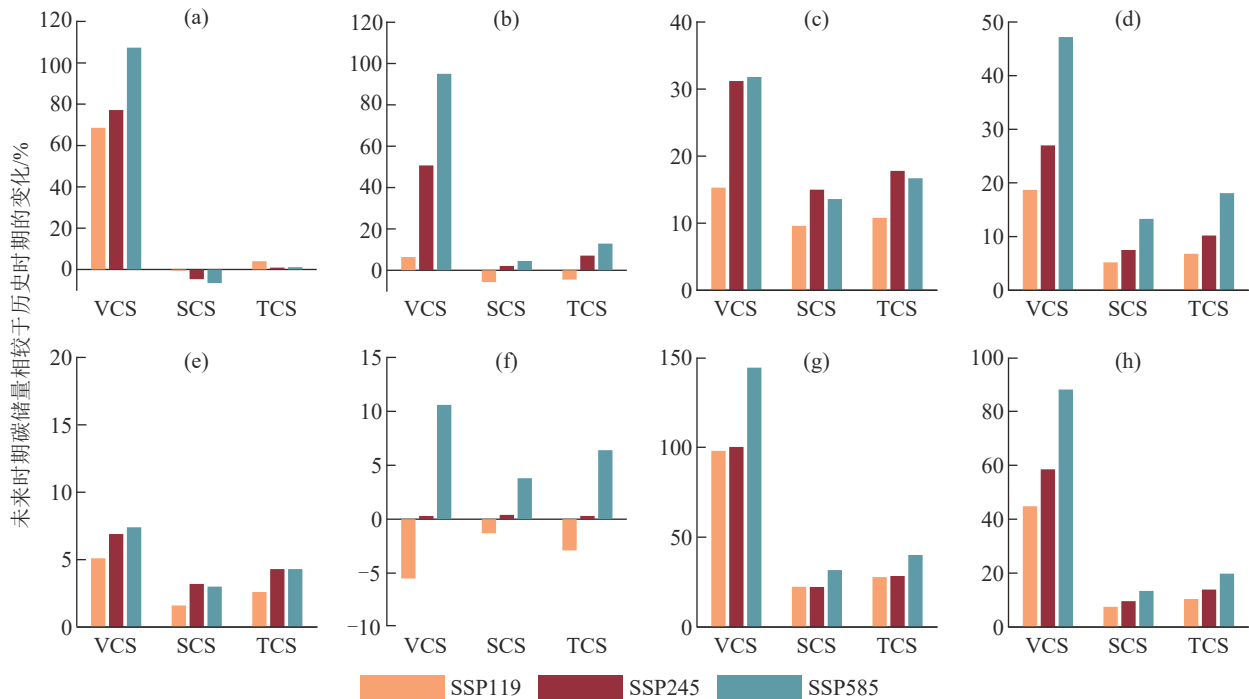
图 2 混合模型训练与验证评价

Fig. 2 Evaluation of the training and validation of the hybrid model for carbon storage

对敏感参数校准后的 LPJ-GUESS 模型的模拟结果进行验证,VCS 的 R^2 为 0.34, RMSE 为 4.93 kg/m^2 (以 C 计);SCS 的 R^2 为 0.21, RMSE 为 6.73 kg/m^2 (以 C 计)。对仅考虑 LPJ-GUESS 模型输出的混合模型的模拟结果进行验证,VCS 的 R^2 为 0.93, RMSE 为 1.55 kg/m^2 (以 C 计);SCS 的 R^2 为 0.84, RMSE 为 2.41 kg/m^2 (以 C 计)。结果表明,同时考虑 LPJ-GUESS 模型的输出和环境变量的混合模型模拟精度能准确表征碳储量动态,且在混合模型中考虑 LPJ-GUESS 的模型输出是必不可少的。

2.2 未来时期自然植被碳储量动态变化

从整个研究区来看,本世纪末自然植被 VCS、SCS 和 TCS 在不同 SSPs 下均有所增加(图 3)。其中 VCS 增幅最大,在 SSP119、SSP245 和 SSP585 情景下分别为 44.8%、58.5% 和 88.1%;SCS 在 SSP585 情景下增幅最大(13.4%);TCS 在 SSP119、SSP245 和 SSP585 情景下分别增长 10.4%、13.9% 和 19.8%。自然植被 VCS 在不同 SSPs 情景下的变化幅度大于 SCS, TCS 的变化情况与 SCS 相似,自然植被 VCS、SCS 和 TCS 在 SSP585 情景下的变化更为强烈。



注:图a为中温带干旱地区;图b为中温带半干旱地区;图c为中温带半湿润地区;图d为暖温带半湿润地区;图e为北亚热带湿润地区;图f为边缘热带湿润地区;图g为高原温带半干旱地区;图h为整个研究区。

图3 3种气候情景下未来时期碳储量相较于历史时期的变化

Fig. 3 Changes in future carbon storage compared to historical period (1993—2022) under three SSP scenarios

与历史时期相比,不同 SSPs 下的自然植被 VCS 在绝大多数气候区均有所增加,在Ⅶ区的增幅最大,不同 SSPs 下的增幅分别为 98%、100.2% 和 144.3%,而Ⅵ区 VCS 在 SSP119 情景下降低 5.5%,可能是因为高原温带半干旱地区在水分条件改善的情况下,植被生产力可能显著增加,从而促进碳的固定,而在边缘热带湿润地区,CO₂ 的施肥效应是有限的。SCS 在Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅶ区有所增加,在Ⅶ区的增幅最大,不同 SSPs 下的增幅分别为 22.4%、22.3% 和 31.7%,Ⅰ区自然植被 SCS 在不同 SSPs 情景下均有所减少,降幅分别为 0.6%、4.5% 和 6.6%,可能是因为气温升高加速土壤有机质的分解速率,造成土壤中的碳的释放,进而降低土壤碳储量。TCS 的变化趋势与 SCS 相似,而在Ⅰ区 TCS 与 SCS 的变化方向相反,TCS 在不同 SSPs 情景下均有所上升。

2.3 未来时期自然植被碳储量变化趋势

在未来时期不同 SSPs 下,整个研究区自然植被 VCS 均显著上升,SCS 的变化不显著,TCS 在 SSP245 和 SSP585 情景下分别以 14.6、18.0 g/(m²·a) (以 C 计) 的速率显著上升(图 4 和表 1)。相较于 SCS,自然植被 VCS 对气候变化的响应趋势更为显著,是由于植被对于环境变化的响应更加直接和迅速,而土壤中的碳循环过程较为缓慢,使得土壤碳库相对稳定而不易受短期气候波动的影响。

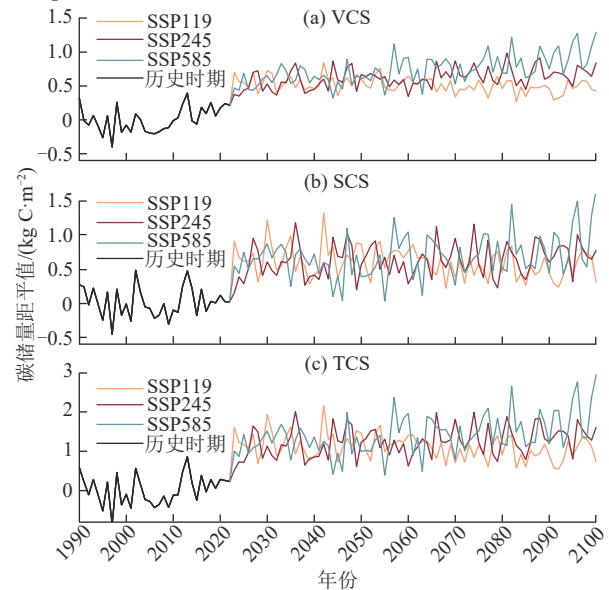


图4 3种气候情景下碳储量距平值变化

Fig. 4 Changes of the anomaly of carbon storage from 1990 to 2100 under three SSP scenarios

由表 1 不同 SSPs 下 2023—2100 年碳储量的变化趋势可以看出,Ⅲ区和Ⅶ区 VCS、SCS 和 TCS 在不同 SSPs 下均显著上升,Ⅲ区在 SSP245 情景下的上升速率最大,Ⅶ区则在 SSP585 情景下的上升速率达到最大。Ⅵ区 VCS 在 SSP119 情景下以 4.9 g/(m²·a) (以 C 计) 的速率显著下降,而在 SSP585 情景下以 10.0 g/(m²·a) (以 C 计) 的速率显著上升。Ⅰ区 SCS 在 SSP585 情景下以 7.7 g/(m²·a) (以 C 计) 的速率显著下

降, II 区 SCS 在 SSP119 情景下同样显著下降, 下降的速率为 7.4 g/(m²·a)(以 C 计)。

表 1 3 种气候情景下未来时期(2023—2100)碳储量的变化趋势

Table 1 Trends of carbon storage changes in different future period (2023—2100) under three SSP scenarios

分区	g/(m ² ·a)(以 C 计)								
	VCS			SCS			TCS		
	SSP119	SSP245	SSP585	SSP119	SSP245	SSP585	SSP119	SSP245	SSP585
I	4.9*	5.7*	7.5*	-1.8	-4.3	-7.7*	3.3	1.6	0.1
II	0.3	5.6*	8.5*	-7.4*	-0.1	-0.7	-7.2	5.6	7.9
III	8.1*	13.2*	13.0*	12.4*	18.6*	17.3*	20.1*	31.2*	29.4*
IV	2.8	6.0*	9.5*	3.8	7.3*	10.7*	6.9	13.7*	20.5*
V	3.3	5.8*	5.8*	1.6	4.7	4.5	4.9	10.5*	10.2*
VI	-4.9*	-0.3	10.0*	-2.1	-0.3	5.5*	-7.4	-0.6	15.3*
VII	8.1*	9.4*	12.1*	15.8*	14.6*	18.9*	23.8*	23.8*	30.9*
研究区	4.6*	7.4*	9.7*	4.9	7.2	8.3	9.5	14.6*	18.0*

注:*表示 p<0.05。

2.4 碳储量变化的驱动力分析

不同 SSPs 下, 整个研究区环境因素对自然植被 VCS、SCS 和 TCS 的影响程度均表现为 SSP119 < SSP245 < SSP585(表 2)。随着气候变化强度的增加, 自然植被碳储量的变化程度增加。在不同

气候情景下, 降水与大气 CO₂ 浓度的增加促进本世纪末 VCS、SCS 和 TCS 的增加, 而温度随气候情景的变化降低本世纪末自然植被 VCS、SCS 和 TCS。自然植被 VCS、SCS 和 TCS 对降水的变化更为敏感。

表 2 3 种气候情景下不同气候区域碳储量相比基准时期的变化

Table 2 Changes of carbon storage across different climatic zones under three SSP scenarios compared to the base period %

分区	气候情景	VCS			SCS			TCS		
		CFC	CFP	CFT	CFC	CFP	CFT	CFC	CFP	CFT
		I	SSP119	0	30.0	1.5	0.3	8.4	-4.4	0.3
	SSP245	0.1	30.4	6.0	0	9.0	-9.1	0	11.8	-7.4
	SSP585	3.2	28.8	13.0	1.0	12.1	-12.9	1.4	14.7	-9.4
II	SSP119	-1.0	6.8	1.1	-0.5	-5.5	-3.3	-0.5	-4.0	-2.9
	SSP245	4.5	30.1	-0.5	1.5	3.3	-6.4	2.0	7.4	-5.7
	SSP585	14.4	37.9	-9.0	4.4	9.3	-12.8	6.2	14.3	-12.3
III	SSP119	-0.4	-2.3	-1.4	0	0.7	0.8	-0.1	-0.1	0
	SSP245	2.7	6.8	-2.6	1.5	5.0	0.2	1.9	5.4	-0.9
	SSP585	6.8	7.9	-9.0	2.6	7.3	-3.0	4.1	7.2	-5.4
IV	SSP119	-0.8	-5.0	-1.4	0.1	4.3	0.8	-0.1	2.0	0.5
	SSP245	4.0	-0.6	-3.2	1.7	4.8	-1.0	2.2	3.3	-1.6
	SSP585	11.1	8.7	-10.8	3.6	8.7	-2.6	5.4	8.3	-5.0
V	SSP119	-0.9	1.7	4.1	-0.3	1.9	0.8	-0.5	1.7	2.1
	SSP245	5.0	1.4	0.2	2.1	3.1	-0.5	3.2	2.4	-0.2
	SSP585	9.7	2.3	-5.7	3.7	2.4	-1.8	6.1	2.3	-3.3
VI	SSP119	-0.7	-7.9	1.9	-0.8	-3.8	2.0	-0.8	-5.3	2.0
	SSP245	2.0	-6.3	-2.7	2.2	-4.7	0.1	2.2	-5.3	-0.9
	SSP585	9.5	-0.7	-0.6	4.6	-2.8	-0.5	6.6	-1.9	-0.5
VII	SSP119	0	35.7	2.1	0	13.8	1.7	0	17.2	1.6
	SSP245	1.3	38.0	0.3	0.5	16.7	-1.5	0.7	19.9	-1.4
	SSP585	3.8	39.0	2.7	2.3	19.7	-0.5	2.8	22.8	0
研究区	SSP119	-0.5	15.7	1.4	-0.1	5.0	-0.4	-0.2	6.3	-0.2
	SSP245	2.8	22.7	0.1	1.1	8.4	-3.1	1.5	10.4	-2.8
	SSP585	7.9	25.8	-2.2	3.0	11.6	-5.2	4.3	13.8	-5.2

注:CFC 为大气 CO₂ 浓度作为控制因子;CFP 为降水量作为控制因子;CFT 为温度作为控制因子。

在 SSP119 情景下,自然植被 VCS、SCS 和 TCS 对大气 CO₂ 浓度的敏感性较低,大气 CO₂ 浓度作为控制因子时,VCS、SCS 和 TCS 在大部分气候区均有所下降,但降幅不大。降水量作为控制因子时,Ⅲ区、Ⅳ区和Ⅵ区的 VCS 及Ⅱ区、Ⅵ区的 SCS 和 TCS 降低,且在Ⅵ区降幅最大;在其他气候区,降水量变化对自然植被 VCS、SCS 和 TCS 均产生正向作用。温度的变化降低Ⅰ、Ⅱ气候区的 SCS、TCS 与Ⅲ区、Ⅵ区的 VCS;而在其他气候区温度则对自然植被 VCS、SCS 和 TCS 产生正向作用。SSP245 情景下,大气 CO₂ 浓度的增加驱动未来时期自然植被 VCS、SCS 和 TCS 的增加。降水量在大部分气候区对自然植被 VCS、SCS 和 TCS 产生正向作用,而在Ⅵ区则相反。温度的变化抑制自然植被 VCS、SCS 和 TCS 的增加,但升温使Ⅰ区 VCS 增加 6.0%。在 SSP585 情景下,环境因子对碳储量的影响与 SSP245 情景一致。

3 讨论

本研究基于混合模型预测气候变化背景下未来时期中国自然植被 VCS、SCS 和 TCS 的动态变化。研究结果表明,未来时期的气候变化增加中国典型自然植被的 VCS、SCS 和 TCS,与前人^[19]的研究结果保持一致。一般来说,水热条件与大气 CO₂ 浓度的增加可以通过增强植被光合与水分利用效率来增加碳的积累^[20],同时通过加速植物呼吸和土壤碳的分解而降低生态系统碳储量。就研究结果而言,研究区内气候变化对 VCS、SCS 和 TCS 的正向作用大于负向作用。自然植被 VCS、SCS 和 TCS 的增加幅度在不同气候情景下表现为 SSP585>SSP245>SSP119。SSP585 情景下增幅最大的原因可能是其降水量^[21]、温度^[22]与 CO₂ 排放强度的增幅大于 SSP119 和 SSP245 情景。从整个研究区来看,本世纪末中国典型自然植被 VCS、SCS 和 TCS 对降水的变化最为敏感,尤其是在半干旱地区,与 WANG 等^[23]的研究结果一致。本研究表明,VCS、SCS 和 TCS 在半干旱地区与半湿润地区的增幅较大,碳汇功能提升潜力较高,与 LUO 等^[24]、戴尔阜等^[25]在我国东北与内蒙古地区的研究结果一致。在半干旱地区,降水量主导生态系统 VCS、SCS 和 TCS 的增加^[3]。水分条件作为限制因素阻碍该地区的植被生长,而降水量的增加能够提高土壤含水量,改善干旱胁迫,从而促进生态系统碳储量增加^[26]。在半湿润地区,温度与大气 CO₂ 浓度的变化对碳储量的变化产生剧烈的影响。温度的升高通过延长植物生长季和提高植被的光合速率增加生态系统碳储量^[27],同时升温也加速土壤微生物活动与有机质分解速率,

导致土壤碳的释放^[28]。但长期来看,土壤呼吸能逐渐适应气候变化趋势,其呼吸速率随着温度的进一步升高而减弱^[29]。大气 CO₂ 浓度的升高则直接影响植被生长和水分利用,其施肥效应促进生态系统碳储量的增加。

本研究将 LPJ-GUESS 模型模拟结果与环境变量共同作为随机森林模型的输入数据建立混合模型,用于模拟中国典型自然植被 VCS、SCS 的变化情况。模拟结果显示,相较于 LPJ-GUESS 模型,混合模型有更好的表现,能够准确表征生态系统碳储量变化。混合模型通过提高数据的输入质量,一定程度上弥补机器学习算法的缺陷,提高模型的模拟和预测能力^[30]。然而,由于所处气候、土壤、地形等自然地理特点存在较大的空间差异性,自然植被 VCS、SCS 和 TCS 的变化趋势与驱动因素也存在区域差异^[1]。极端气候事件与偶然事件的出现难以预测,使得模型无法准确预测所有空间尺度上的碳储量变化。因此,如何克服这些缺陷,减少模拟不确定性仍是下一步需要探讨的问题。

4 结论

本研究通过构建基于 LPJ-GUESS 模型和随机森林方法的混合模型,预测气候变化背景下未来时期中国典型自然植被 VCS 和 SCS 的动态变化,明确碳储量变化的主要驱动因子。研究结果表明,混合模型能够有效地捕捉生态系统碳动态,且混合模型的模拟精度高于 LPJ-GUESS 模型。在气候变化背景下,未来时期中国自然植被 VCS 与 SCS 相较历史时期分别增加 44.8%~88.1% 和 7.5%~13.4%,有较大的碳汇潜力,但在不同气候区内,碳储量增加的幅度有所不同。降水作为关键因子通过影响植被生长、土壤碳循环等方式驱动未来时期生态系统碳储量的变化。鉴于此,我国要如期实现“双碳”目标,必须进一步加强对自然植被的保护与经营,针对不同气候区制定区域管理策略,确保自然植被的碳汇功能得到最大程度的发挥。

参考文献:

- [1] 杨元合,石岳,孙文娟,等.中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J].中国科学:生命科学,2022,52(4):534-574.
YANG Y H, SHI Y, SUN W J, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J].Scientia Sinica (Vita), 2022, 52(4):534-574.
- [2] 孙忠祥,李勇,赵云泽,等.旱作区土壤有机碳密度空间分布特征与其驱动力分析[J].农业机械学报,2019,50

- (1):255-262.
- SUN Z X, LI Y, ZHAO Y Z, et al. Analysis on spatial distribution characteristics and driving forces of soil organic carbon density in dry farming region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1):255-262.
- [3] 李妙宇,上官周平,邓蕾.黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J].生态学报,2021,41(17):6786-6799.
- LI M Y, SHANGGUAN Z P, DENG L. Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17):6786-6799.
- [4] 孔蕊,张增信,张凤英,等.长江流域森林碳储量的时空变化及其驱动因素分析[J].水土保持研究,2020,27(4):60-66.
- KONG R, ZHANG Z X, ZHANG F Y, et al. Spatial and temporal dynamics of forest carbon storage and its driving factors in the Yangtze River basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4):60-66.
- [5] LIU S Q, BIAN Z, XIA C Z, et al. Forest biomass carbon pool dynamics in Tibet Autonomous Region of China: Inventory data 1999—2019[J]. PLoS One, 2021, 16(5):e0250073.
- [6] 张计深,史新杰,刘宇诺,等.气候变化下中国潜在自然植被生态系统碳储量动态[J].植物生态学报,2024,48(4):428-444.
- ZHANG J S, SHI X J, LIU Y N, et al. Dynamics of ecosystem carbon storage of potential natural vegetation in China under climate change [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(4):428-444.
- [7] BLÖSCHL G, BIERKENS M F P, CHAMBEL A, et al. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH): A community perspective[J]. Hydrological Sciences Journal, 2019, 64(10):1141-1158.
- [8] 张文强,罗格平,郑宏伟,等.基于随机森林模型的内陆干旱区植被指数变化与驱动力分析:以北天山北坡中段为例[J].植物生态学报,2020,44(11):1113-1126.
- ZHANG W Q, LUO G P, ZHENG H W, et al. Analysis of vegetation index changes and driving forces in inland arid areas based on random forest model: A case study of the middle part of northern slope of the north Tianshan Mountains [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(11):1113-1126.
- [9] LAZER D, KENNEDY R, KING G, et al. The parable of google flu: Traps in big data analysis [J]. Science, 2014, 343(6176):1203-1205.
- [10] REICHSTEIN M, CAMPS-VALLS G, STEVENS B, et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science [J]. Nature, 2019, 566(7743):195-204.
- [11] 徐丽,何念鹏,于贵瑞.2010s中国陆地生态系统碳密度数据集[J].中国科学数据,2019,4(1):90-96.
- XU L, HE N P, YU G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s) [J]. China Scientific Data, 2019, 4(1):90-96.
- [12] EYRING V, BONY S, MEEHL G A, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization [J]. Geoscientific Model Development, 2016, 9(5):1937-1958.
- [13] PENG S Z, DING Y X, LIU W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4):1931-1946.
- [14] HANSEN J, SATO M. Greenhouse gas growth rates [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(46):16109-16114.
- [15] RIAHI K, VAN VUUREN D P, KRIEGLER E, et al. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview [J]. Global Environmental Change, 2017, 42:153-168.
- [16] PELLETIER J D, BROXTON P D, HAZENBERG P, et al. Global 1-km gridded thickness of soil, regolith, and sedimentary deposit layers [DB]. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2016.
- [17] HARTMANN J, MOOSDORF N. The new global lithological map database GLiM: A representation of rock properties at the earth surface [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2012, 13(12):e12004.
- [18] FICK S E, HIJMANS R J. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas [J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(12):4302-4315.
- [19] 李奇,朱建华,冯源,等.中国森林乔木林碳储量及其固碳潜力预测 [J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(3):287-294.
- LI Q, ZHU J H, FENG Y, et al. Carbon storage and carbon sequestration potential of the forest in China [J]. Climate Change Research, 2018, 14(3):287-294.
- [20] AINSWORTH E A, LONG S P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂ [J]. New Phytologist, 2005, 165(2):351-372.
- [21] 苏艳丽,吴璿,郭辰昱,等.2001-2100年中国降水时空格局及其趋势分析 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2022, 58(5):641-649.
- SU Y L, WU X, GUO C Y, et al. The spatiotemporal pattern and trend of annual precipitation over China from

- 2001 to 2100[J].*Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2022, 58(5):641-649.
- [22] 张计深,陈笑蝶,彭守璋. 2001—2100年中国温度变化趋势及时空差异研究[J].*西南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(12):112-124.
ZHANG J S, CHEN X D, PENG S Z. Trend and spatiotemporal differences of annual mean temperature in China from 2001 to 2100[J].*Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2022, 44(12):112-124.
- [23] WANG B, CHEN Y L, LI Y, et al. Differential effects of altered precipitation regimes on soil carbon cycles in arid versus humid terrestrial ecosystems [J].*Global Change Biology*, 2021, 27(24):6348-6362.
- [24] LUO W X, KIM H S, ZHAO X H, et al. New forest biomass carbon stock estimates in northeast Asia based on multisource data[J].*Global Change Biology*, 2020, 26(12):7045-7066.
- [25] 戴尔阜,黄宇,吴卓,等. 内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系[J].*地理学报*, 2016, 71(1):21-34.
DAI E F, HUANG Y, WU Z, et al. Spatial-temporal features of carbon source-sink and its relationship with climate factors in Inner Mongolia grassland ecosystem [J].*Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1):21-34.
- [26] TANG G P, BECKAGE B, SMITH B. Potential future dynamics of carbon fluxes and pools in New England forests and their climatic sensitivities: A model-based study [J].*Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28(3):286-299.
- [27] 吕超群,孙书存. 陆地生态系统碳密度格局研究概述[J].*植物生态学报*, 2004, 28(5):692-703.
LÜ C Q, SUN S C. A review on the distribution patterns of carbon density in terrestrial ecosystems [J].*Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004, 28(5):692-703.
- [28] PENDALL E, OSANAI Y, WILLIAMS A L, et al. Soil carbon storage under simulated climate change is mediated by plant functional type[J].*Global Change Biology*, 2011, 17(1):505-514.
- [29] CAREY J C, TANG J W, TEMPLER P H, et al. Temperature response of soil respiration largely unaltered with experimental warming [J].*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(48):13797-13802.
- [30] LÜ T, PENG S Z, LIU B, et al. Planting suitability of China's main grain crops under future climate change [J].*Field Crops Research*, 2023, 302:e109112.
- (上接第 181 页)
- [22] 冀泳帆,贾鲁净,杨联安,等. 耦合 InVEST-PLUS 模型的榆林市生境质量时空演变及预测分析[J].*水土保持学报*, 2023, 37(1):123-132.
JI Y F, JIA L J, YANG L A, et al. Spatio-temporal evolution and prediction analysis of habitat quality in Yulin City coupled with InVEST-PLUS model[J].*Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1):123-132.
- [23] 马彩依,曹洪涛,崔铁军,等. 京津冀 2000—2021 年地表水面积时空变化及其影响因素[J].*水土保持通报*, 2024, 44(4):309-320.
MA C Y, CAO H T, CUI T J, et al. Spatiotemporal variation of surface water area in Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2000 to 2021 and its influencing factors [J].*Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(4):309-320.
- [24] 谢名睿,危小建,赵莉,等. 南昌市生态用地景观结构与网络连通性多情景模拟[J].*水土保持通报*, 2023, 43(2):202-211.
XIE M R, WEI X J, ZHAO L, et al. Multi scenario simulation of landscape structure and network connectivity of ecological land in Nanchang City [J].*Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(2):202-211.
- [25] 曾黎,杨庆媛,杨人豪,等. 三峡库区生态屏障区景观格局优化:以重庆市江津区为例[J].*生态学杂志*, 2017, 36(5):1364-1373.
ZENG L, YANG Q Y, YANG R H, et al. Landscape pattern optimization for ecological barrier in the Three Gorges Reservoir Area: A case study in Jiangjin, Chongqing [J].*Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(5):1364-1373.
- [26] 费勇强,黄爱民,罗义,等. 基于 Maxent 模型与电路理论的大熊猫栖息地内废弃矿山生态修复研究[J].*环境工程技术学报*, 2024, 14(2):622-632.
FEI Y Q, HUANG A M, LUO Y, et al. Ecological restoration of abandoned mines within giant panda habitat based on Maxent model and circuit theory [J].*Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(2):622-632.
- [27] 林志,李石华,易邦进,等. 多情景视角下云南省“三生”空间变化模拟与效应评价[J].*水土保持学报*, 2024, 38(1):220-230.
LIN Z, LI S H, YI B J, et al. Multiple scenario perspective of production-living-ecological space change simulation and effect evaluation in Yunnan Province [J].*Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1):220-230.