

黑龙江省森林固碳能力评估及未来趋势预测

于成龙¹, 刘丹^{1*}, 李伟根², 卫莉³

(1. 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030; 2. 嫩江市气象局, 黑龙江 嫩江 161400; 3. 青冈县气象局, 黑龙江 青冈 151600)

摘要: 区域尺度陆地生态系统固碳速率和潜力的定量认证方法是区域碳评估和应对气候变化的基础性工作。基于未来情景的气象、遥感和地面观测等资料, 利用DNDC模型评估和预测黑龙江省森林生态系统碳汇总量和未来发展趋势。结果表明: 2023-2060年黑龙江省森林植被净初级生产力平均为 $(548.87 \pm 40.14) \text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, 无显著变化趋势, 最高值出现在2039年, 为 $607.18 \text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$; 土壤异氧呼吸速率平均为 $(293.67 \pm 8.71) \text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, 存在极显著增加趋势, 平均增加速率为 $0.68 \text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$; 森林固碳总量介于 $82.04 \sim 122.23 \text{TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$, 平均为 $(104.53 \pm 10.58) \text{TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$, 存在一定的增加趋势。黑龙江省森林植被碳吸收能力保持稳定, 但土壤异氧呼吸速率的显著增加可能对森林碳汇潜力产生长期影响。研究结果以期为推动区域森林生态系统碳收支评估技术方法的发展做出贡献。

关键词: DNDC模型; 固碳; 森林生态系统

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2025)04-0120-09

Assessment of Forest Carbon Sequestration Capacity and Future Trend Prediction in Heilongjiang Province

YU Chenglong¹, LIU Dan^{1*}, LI Weigen², WEI Li³

(1. Heilongjiang Province Institute of Meteorological Sciences, Harbin 150030; 2. Nenjiang Meteorological Bureau, Nenjiang 161400; 3. Qinggang County Meteorological Bureau, Qinggang 151600, China)

Abstract: Quantitative validation methods for carbon sequestration rates and potential of terrestrial ecosystems at the regional scale are fundamental for carbon assessment and climate change mitigation strategies. Based on future scenario data of meteorology, remote sensing, and ground observation, the DNDC model is used to assess and predict the total carbon sequestration capacity and future development trend of the forest ecosystem in Heilongjiang Province. The results show that from 2023 to 2060, the average net primary productivity (NPP) of forest vegetation in the province is projected to be $(548.87 \pm 40.14) \text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, with no significant trend, peaking in 2039 at $607.18 \text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$. The soil heterotrophic respiration rate is expected to average $(293.67 \pm 8.71) \text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, showing a significant increasing trend with an average annual increase of $0.68 \text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$. The total carbon sequestration in forests is projected to range from 82.04 to 122.23 $\text{TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$, with an average of $(104.53 \pm 10.58) \text{TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$, showing a moderate increase. Forest vegetation in Heilongjiang Province maintains a stable carbon sequestration capacity, yet a significant increase in soil heterotrophic respiration rates may exert long-term constraints on its carbon sink potential. These findings aim to contribute to the development of regional forest carbon balance evaluation techniques, providing insights for enhancing carbon management strategies under climate change.

Key words: DNDC model; Carbon sequestration; Forest ecosystem

联合国气候变化框架公约已经把人类活动造

成的生态系统碳吸收或排放纳入全球温室气体控制体系中, 过去几十年, 在全球和区域陆地生态系统碳储量清查方面开展了大量研究^[1-4], 获得了丰厚的成果, 这些工作已经初步定量评估了区域乃至全球尺度典型生态系统的碳源汇强度、季节变化和年际变异。然而气温升高、CO₂浓度富集、降水格局改变等全球变化过程正在强烈地影响着

收稿日期: 2025-03-10

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2022D023); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J059)

作者简介: 于成龙(1973-), 男, 正高级工程师, 博士, 从事气候变化影响研究。

通信作者: 刘丹, E-mail: nefuliudan@163.com

陆地生态系统碳源汇强度及其空间分布格局^[5-7],因此,准确评估各种全球变化因素对陆地生态系统固碳速率和潜力的影响,仍然是当前陆地碳循环研究领域所面临的重大挑战。

森林生态系统是陆地上最大的碳储库,具有长期碳增汇作用,在减缓和应对气候变化方面发挥着重要作用^[8]。黑龙江省森林覆盖率在47%以上,是我国北方重要的生态屏障,该省又处于全球气候变化的敏感区域,高温、干旱、雷暴等极端气候事件频率增加,致使碳汇效应的气候风险在逐步增大^[9]。因此准确预测森林生态系统碳汇能力,对于提高该省森林碳汇核算的科学性,增加在碳排放交易市场的主动性具有积极意义。生态系统碳循环预测只能依靠模型模拟,目前多数研究只关注植被净初级生产力的发展变化,而忽略了土壤异氧呼吸对生态系统碳循环的影响,从而导致森林碳汇预估结果偏高。本研究针对这一问题,基于气象、遥感、地理信息等数据,利用DNDC

模型^[10]模拟黑龙江省森林生态系统碳收支,预估2023-2060年森林生态系统碳汇总量和发展趋势,以期为推动区域森林生态系统碳收支评估技术的发展做出贡献。

1 研究区概况

黑龙江省位于中国的东北部,地理坐标介于东经121°11'~135°05',北纬43°26'~53°33',土地面积约46万km²(图1)。该省气候类型为中温带至寒温带的大陆性季风气候,年平均气温在-3.60~6.00℃,气温由东南向西北逐渐降低;年平均降水量为409.00~672.80mm(数据来源于国家气象信息中心 <http://data.cma.cn/>; 1991-2020年中国地面气候标准值数据集),西南部降水量较低,而中部和东部降水量较高。森林主要分布在海拔较高的大兴安岭、小兴安岭以及东部山地(包括张广才岭、老爷岭和完达山脉)。

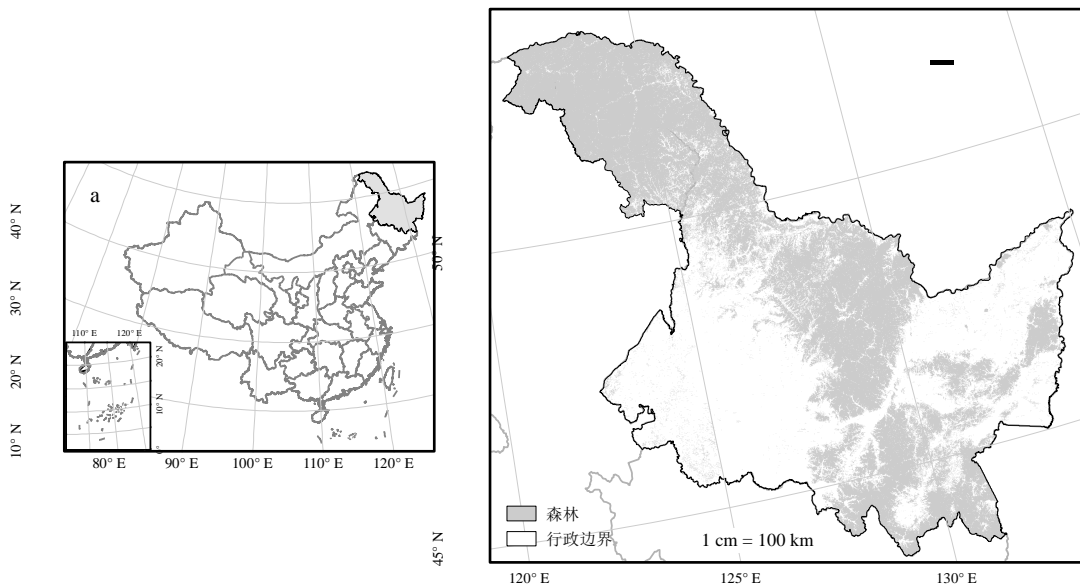


图1 研究区位置示意图

Fig.1 Location map of the study area

2 数据处理

2.1 气象数据

未来情景模式的气象数据用于输入DNDC模型,模拟森林净初级生产力和土壤异氧呼吸速率。数据来自美国宇航局地球交易所全球每日降尺度预测数据集(NEX-GDDP-CMIP6),该数据集已经过偏差校正,空间分辨率为25 km,包含4个SSP排放情景。本研究选用SSP2-4.5排放情景。根据王倩之等^[11]的研究结果,选取CSIRO-MK3-

6-0模式数据开展后续分析。

2.2 森林分布数据

从2022年的MODIS/MCD12Q1数据产品(土地类型覆盖产品),提取黑龙江省森林分布范围。该数据产品来源于美国NASA LPDAAC(The Land Processes Distributed Active Archive Center,数据获取网址为:<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)EOS数据中心,空间分辨率为500 m,是基于当年Terra和Aqua星数据进行的土地利用分类产品,产品包含5种不同土地覆盖分类方案的分类结果和

对应的质量信息数据集。本研究选用“IGBP全球植被分类方案”的分类结果,并将常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、稠密灌丛、稀疏灌丛合并称为森林。

2.3 通量观测数据

该数据用于 DNDC 模型参数优化,来源于五营森林通量观测系统 2022 年观测数据,观测塔位于小兴安岭南坡腹地(129.02°E, 49.05°N),涡度相关系统由碳水平衡系统(三维超声风速仪、开路式红外 CO₂/H₂O 分析仪、数据采集器)和能量平衡系统(光合有效辐射传感器、四分量净辐射传感器、土壤热通量传感器等)组成,气象要素与碳水通量同步观测,原始采样频率为 2 Hz,采集并在线计算和输出平均周期为 30 min 的 CO₂ 和 H₂O 通量数据。观测数据经 EddyPro-7.0.9 和 Tovi 软件进行预处理和初步质量控制、通量空间代表性分析、数据插补和拆分等处理。

2.4 土壤理化性质数据

本研究应用 0~30 cm 土层深度的土壤有机质含量参与 DNDC 模型运算。数据来源于联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)构建的世界土壤数据库(<https://www.fao.org/soils-portal/en/>)。中国境内数据为第二次全国土地调查南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据,该数据采用 FAO-90 土壤分类系统。数据包含了 0~30 cm 的土壤有机碳含量、土壤容重、土壤中粒径大于 2 mm 的砾石所占的比率等项目。

2.5 DNDC 模型参量优化

DNDC 模型是用来模拟生态系统中碳、氮循环的生物地球化学模型^[12],该模型可用于预测作物生长、土壤温度、水分状况、土壤碳动态、氮淋失和气体排放,能够进行点位和区域生态系统的模拟,已被广泛用于不同尺度、不同生态系统碳氮循环的模拟,是被国际生态学界广泛应用的生物地球化学过程模型之一。

2.5.1 模型参数的灵敏度分析

以净生态系统碳交换量(NEE)为目标变量,假定 DNDC 模型中各参数间相互独立,利用独立参数扰动法^[13]对 DNDC 模型中气候模块、土壤模块和植被模块的相关参数进行灵敏度分析。参考薛静等^[14]的灵敏度分析及标定误差统计指标选取方法,按照 5% 的幅度对参数进行相应扰动,并利用相对敏感系数(RS)分析各参数的灵敏度,计算公式为:

$$RS = \left| \frac{[y(x + \Delta x) - y(x)]/y(x)}{\Delta x/x} \right|$$

式中: x 为参数初始值; Δx 为参数扰动值; $y(x)$ 为目标变量初始值; $y(x + \Delta x)$ 为目标变量扰动后数值。

分析图 2 可知,与土壤体积含水量参数相关的田间持水量(FC)对碳排放有明显的负向影响,可见通过维持合理的水管理,能够促进森林的碳汇功能;与地上部分生物量参数相关的叶面积修正系数(WLAI)和生育期积温(WT)对碳排放有明显的影响,其中 WLAI 呈现明显的负向影响,而 WT 正负影响差别很小,原因是较高的 LAI 通常意味着更大的光合作用表面积,提高了碳吸收能力^[15],而较高的积温同时促进光合作用和呼吸作用,因此在不同森林生态系统中对碳吸收的作用表现会存在差异,这种差异还依赖于森林的其他环境因素^[16-17]。

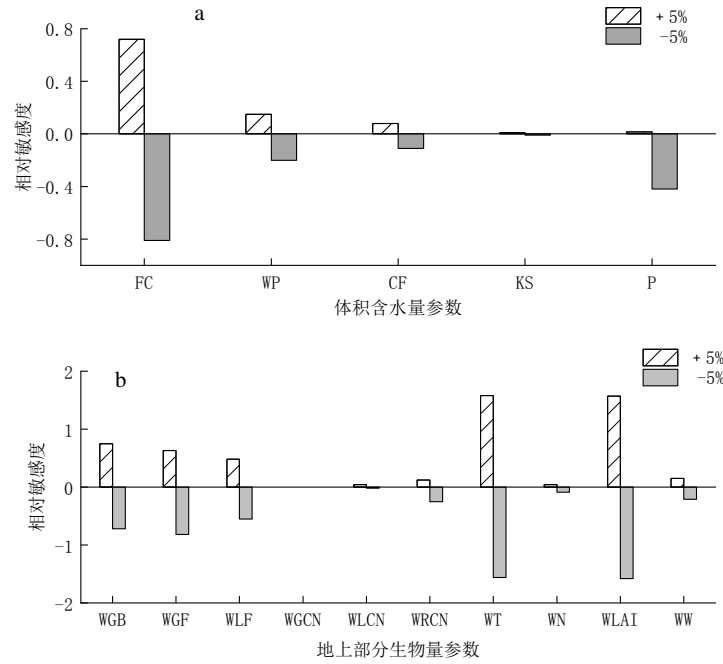
2.5.2 参数率定及模拟效果评价

参考秦发倡等^[18]基于贝叶斯推断的模型参数的校正方法,利用五营森林通量观测数据,对筛选出的敏感参数进行校正,并推断由敏感参数不确定性导致的碳排放的不确定性区间。

首先,假定 DNDC 模型输入参数的先验分布为均匀分布,采用贝叶斯推断与马尔科夫链蒙特卡洛(MCMC)方法,从输入参数的先验不确定性区间中随机抽样,生成超过 20 000 个输入参数集。将这些参数集输入 DNDC 模型,模拟每个样点的温室气体排放量。选取归一化均方根误差(NRMSE)小于参数集的 25%^[19],并确保模拟结果与实测值的吻合度,进而重构 DNDC 模型输入参数的后验概率分布,并统计温室气体排放模拟结果的不确定性置信区间,从而实现不确定性的定量评估。此外,采用 Python 编写的 Metropolis-Hastings(MH)算法,基于满足条件的输出结果进行逆向推断,重建输入参数与输出结果的后验分布。最后,利用均方根误差(RMSE)、模型模拟效率(E 值)及一致性指数(d)对 DNDC 模型参数率定前后的模拟结果与实测数据的吻合程度进行评估^[20-22]。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}}$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2}$$



注:FC-田间持水量,WP-萎蔫点,CF-土壤黏粒含量,KS-饱和导水率,P-孔隙度,WGB-籽粒最高生物量,WGF-籽粒占生物量的分配比例,WLF-茎叶占生物量的分配比例,WGCN-籽粒碳氮比例,WLCN-茎叶碳氮比例,WRCN-根碳氮比例,WT-生育期积温,WN-生育期固氮系数,WLAI-叶面积修正系数,WW-需水量。

Notes: FC - Field Capacity, WP - Wilting Point, CF - Clay Content, KS - Saturated Hydraulic Conductivity, P - Porosity, WGB - Maximum Grain Biomass, WGF - Allocation Ratio of Grain to Biomass, WLF - Allocation Ratio of Stems and Leaves to Biomass, WGCN - Carbon to Nitrogen Ratio of Grain, WLCN - Carbon to Nitrogen Ratio of Stems and Leaves, WRCN - Carbon to Nitrogen Ratio of Roots, WT - Growing Degree Days, WN - Nitrogen Fixation Coefficient during the Growing Period, WLAI - Leaf Area Index Correction Factor, WW - Water Requirement.

图2 DNDC模型参数敏感度

Fig.2 Sensitivity of DNDC model parameters

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - O| + |O_i - O|)^2}$$

式中: n 为样本个数; S_i 和 O_i 分别为模拟值和实测值, O 为实测平均值。

当 $RMSE$ 趋近于0时,模拟值更接近于真实值,模拟效果越好; $E \in (-\infty, 1)$, E 值越趋近于1,模拟值越接近真实值; $d \in (0, 1)$, d 越趋近于1,模拟值与真实值的一致性越接近。

3 结果与分析

3.1 DNDC模拟效果评价

分析不同时间尺度观测 NEE (Net Ecosystem Exchange)值与DNDC模拟 NEE 值的关系可见(图3),随着时间尺度的增加,观测 NEE 值与DNDC模拟的 NEE 值的相关性越好。原因是长时间尺度的平滑效应,即在较长的时间尺度上,气候、土壤条件和生物因素等对生态系统碳交换的影响往往是逐渐变化的,而短期内可能存在较大的波动。

结合不同时间尺度DNDC模型参数率定前后的模拟值与真实值的吻合程度见表1,日尺度下 $RMSE$ 最小,随着时间尺度的增加, $RMSE$ 随之增加;月尺度的模型模拟效率 E 最高,接近1;3个时间尺度的一致性指数均超过0.9,其中日尺度较高。

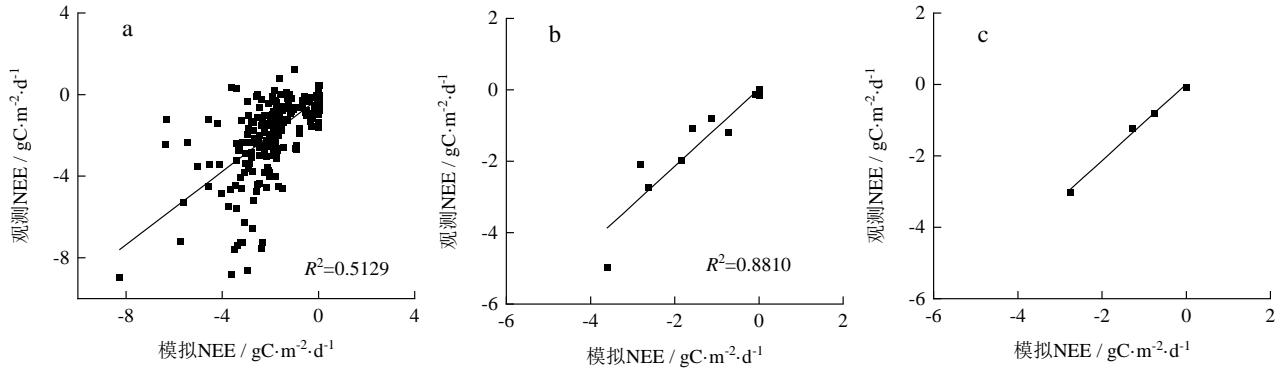
3.2 2023-2060年森林碳交换量预估

3.2.1 森林植被生产潜力

本研究将DNDC模型模拟的植物茎叶、根和种子增加速率的合计作为植被的净初级生产力。分析图4可见,未来黑龙江省森林 NPP (Net Primary Productivity)并未出现明显的变化趋势,平均为 $(548.87 \pm 40.14) \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。最高值出现在2039年,为 $607.18 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$;最低值出现在2030年,为 $460.33 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。

3.2.2 森林土壤异氧呼吸潜力

图5为2023-2060年黑龙江省森林土壤异氧呼吸速率的时间变化图,分析可见,2023年以来黑龙江省森林 R_h 介于 $276.06 \sim 313.13 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$,



注：a-日尺度，b-月尺度，c-季节尺度。

Notes: a-Daily scale, b-Monthly scale, c-Seasonal scale.

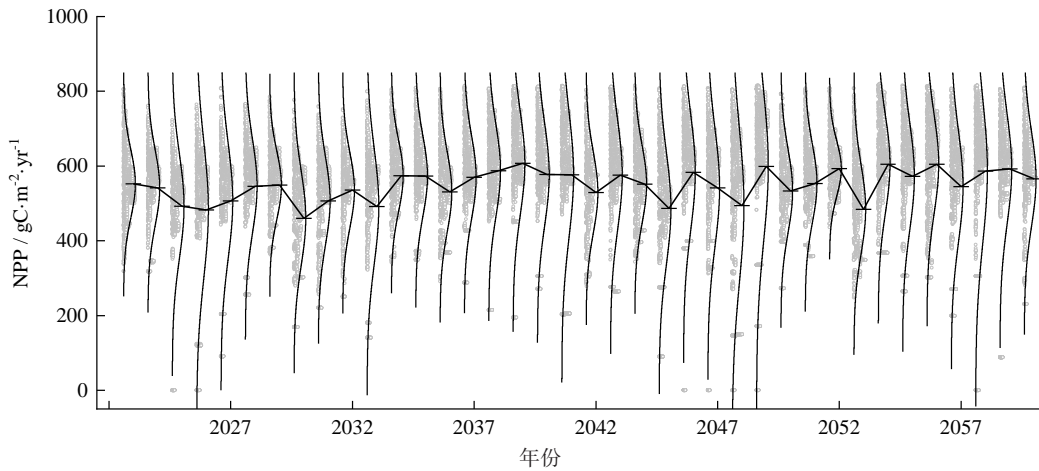
图3 2022年观测NEE值与DNDC模型模拟的NEE值的关系

Fig.3 Relationship between the observed NEE values and the simulated NEE values by the DNDC model in 2022

表1 DNDC模型参数率定前后的模拟值与真实值的吻合程度

Table 1 Degree of agreement between the simulated values and the actual values before and after the DNDC model parameter calibration

时间尺度 Time scale	均方根误差 Root mean square error(RMSE)	模型模拟效率 Modeling efficiency(E)	一致性指数 Consistency index(d)
日	0.007 8	0.982 5	0.993 9
月	0.026 5	0.996 0	0.993 2
季节	0.034 0	-0.344 0	0.986 7



注：图中每个点代表DNDC模型模拟的森林斑块内的平均NPP。

Notes: Each point in the fig. represents the average NPP simulated by the DNDC model within a forest patch.

图4 2023-2060年黑龙江省森林NPP潜力值分布

Fig.4 Distribution of forest NPP potential values in Heilongjiang Province from 2023 to 2060.

平均为 $(293.67 \pm 8.71) \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ ，存在极显著的增加趋势(线性拟合方程为 $y=0.68x-102.78$ ，决定系数 $R^2=0.7621$ ， $P<0.001$)，平均增加速度为 $0.68 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。

本研究利用静态室/气相色谱法和静态/动态室/红外气体分析法，监测大兴安岭^[23-27]、小兴安

岭^[28]和东北山地^[29-32]森林土壤异氧呼吸，分别平均为 215.10 、 294.81 、 $300.53 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ ，与本研究2023年的结果相近，说明本研究利用DNDC模型模拟的森林生态系统土壤异氧呼吸结果可用。存在差异的原因与测量范围、时间、研究方法等因素有关。

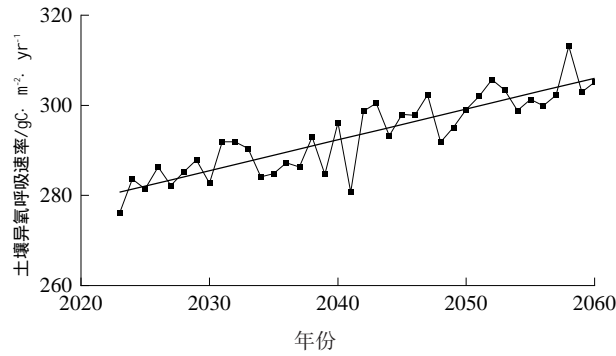


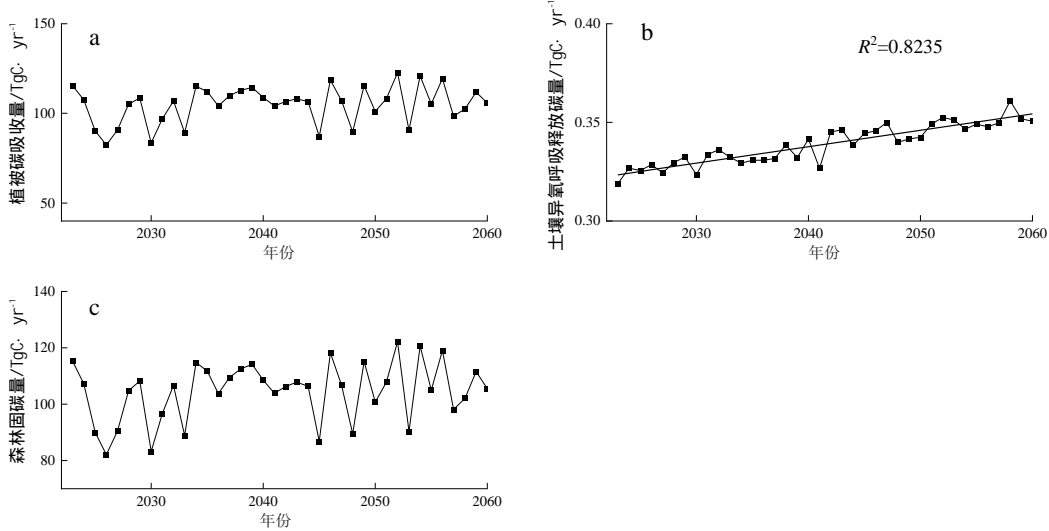
图5 2023-2060年黑龙江省森林土壤异氧呼吸速率

Fig.5 Heterotrophic respiration rate of forest soil in Heilongjiang Province from 2023 to 2060

3.2.3 未来森林生态碳汇总量发展变化

根据2022年黑龙江省森林分布数据和DNDC模型模拟结果,计算森林碳汇总量,结果如图6a所示。分析可见,2023-2060年黑龙江省森林植被碳吸收量介于82.38~122.58 TgC·yr⁻¹,平均为(104.87±10.58) TgC·yr⁻¹,存在一定的增加趋势,但

并不显著($P=0.097$);土壤异氧呼吸释放碳量介于0.31~0.36 TgC·yr⁻¹,平均为(0.34±0.01) TgC·yr⁻¹,存在极显著的增加趋势($P<0.001$),平均增加速度为0.000 8 TgC·yr⁻¹(图6b);森林固碳总量(图6c)介于82.04~122.23 TgC·yr⁻¹,平均为(104.53±10.58) TgC·yr⁻¹,存在一定的增加趋势,但并不显著($P=0.098$)。



注:a—植被碳吸收量,b—土壤异氧呼吸释放碳量,c—森林固碳总量。

Notes: a—Carbon uptake by vegetation, b—Carbon released by heterotrophic respiration in soil, c—Total carbon sequestration by forests.

图6 2023-2060年黑龙江省森林碳交换量

Fig.6 Forest carbon exchange in Heilongjiang Province from 2023 to 2060

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)DNDC模型在模拟森林生态系统碳交换量时,NEE对温度、土壤水分和叶面积指数较为敏感,这一结论与薛静等^[14]的研究结果一致;随着时间尺度的增加,DNDC模拟的NEE值与观测NEE值之间的相关性越好。

(2)2023-2060年黑龙江省森林植被净初级生产力平均为(548.87±40.14) gC·m⁻²·yr⁻¹,无显著变

化趋势,最高值出现在2039年,为607.18 gC·m⁻²·yr⁻¹;土壤异氧呼吸速率平均为(293.67±8.71) gC·m⁻²·yr⁻¹,存在极显著增加趋势,平均增加速度为0.68 gC·m⁻²·yr⁻¹;

(3)未来黑龙江省森林植被碳吸收量平均为(104.87±10.58) TgC·yr⁻¹,土壤异氧呼吸释放碳量平均为(0.34±0.01) TgC·yr⁻¹,森林固碳总量平均为(104.53±10.58) TgC·yr⁻¹。

4.2 讨论

本研究基于DNDC模型,结合气象、遥感和地面观测数据,对黑龙江省森林生态系统的固碳能

力进行预测,并分析了2023–2060年的碳汇动态。研究表明,黑龙江省森林植被的NPP在未来几十年内保持相对稳定,而土壤异氧呼吸速率则呈现显著增加趋势,这一发现揭示了气候变化背景下森林碳汇能力的潜在变化趋势,也为区域碳收支评估提供了参考。

研究结果显示,黑龙江省森林植被的NPP在2023–2060年无显著变化趋势。这一结果与全球范围内许多森林生态系统的研究结果一致。PIAO等^[33]指出,尽管气候变化对全球森林生产力产生显著影响,但在某些区域,尤其是温带森林中,NPP的变化并不显著。而且NPP的稳定性并不意味着森林碳汇能力的完全不变。随着气候变化的加剧,极端气候事件(如干旱、高温等)发生的频率和强度可能会增加,这将对森林生产力产生潜在威胁。ALLEN等^[34]指出,极端气候事件可能导致森林生态系统的碳汇能力下降,尤其是在干旱和高温条件下。因此,尽管当前研究未发现NPP的显著变化趋势,未来仍需关注极端气候事件对森林生产力的潜在影响。

同时本研究结果显示,黑龙江省森林土壤异氧呼吸速率在2023–2060年呈现显著增加趋势,这一结果与全球范围内关于土壤呼吸对气候变化响应的研究结果一致。BOND-LAMBERTY等^[35]指出,随着全球气温的升高,土壤呼吸速率普遍呈现增加趋势,尤其是在高纬度地区。土壤呼吸速率的增加意味着更多的碳从土壤释放到大气中,这可能会影响土壤碳库的长期稳定性^[36]。

本研究基于DNDC模型对黑龙江省森林生态系统的碳汇能力进行预测,尽管模型在模拟森林固碳能力时与已有研究结果表现出较高的一致性,但仍存在一定的不确定性:(1)模型对极端气候事件的响应机制不足,这可能会影响预测结果的准确性;(2)模型的输入数据主要依赖于气象预测数据和遥感数据,这些数据的精度和分辨率可能对模型结果产生一定影响,而且本研究仅考虑了SSP2–4.5排放情景下的未来气候变化,但其他排放情景(如SSP1–2.6或SSP5–8.5)可能导致不同的结果;(3)模型中未考虑森林火灾等干扰因素对碳循环的影响,这可能在一定程度上高估了森林生态系统的固碳能力。

未来的研究可以进一步优化模型输入数据,提高数据的精度和分辨率,考虑更多生态系统的干扰因素,如极端气候事件、森林火灾、病虫害等,这些因素对森林生态系统碳循环的影响不容

忽视。此外,可以结合实地观测数据,进一步验证模型结果的可靠性。

参考文献:

- [1] APONTE C, KASEL S, NITSCHKE C R, et al. Structural diversity underpins carbon storage in Australian temperate forests[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(5): 789–802.
- [2] BALCERAK E. Assessing carbon storage in western U.S. ecosystems[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2013, 94(1): 3.
- [3] SHOWSTACK R. Carbon storage initiatives at energy department[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2009, 90(25): 216.
- [4] 王依琳,张莉莉. 新质生产力视角下农业碳汇价值实现路径探析[J]. *东北农业科学*, 2025, 50(2): 106–112.
WANG Y L, ZHANG L L. Exploring the realization path of agricultural carbon sink value from the perspective of new qualitative productive forces[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2025, 50(2): 106–112. (in Chinese)
- [5] GIORGETTA M A, JUNGCLAUS J, REICK C H, et al. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5 [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2013, 5(3): 572–597.
- [6] JAHN M, SACHS T, MANSFELDT T, et al. Global climate change and its impacts on the terrestrial Arctic carbon cycle with special regards to ecosystem components and the greenhouse-gas balance[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173(5): 627–643.
- [7] KAPLAN J O, KRUMHARDT K M, ZIMMERMANN N E. The effects of land use and climate change on the carbon cycle of Europe over the past 500 years[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(3): 902–914.
- [8] WATSON R T, NOBEL I R, BOIN B, et al. Land use, land-use change, and forestry[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 2–5.
- [9] 陈博,李丽光,陈振举. 东北三省植被气候生产力的时空变化及对气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(12): 3339–3348.
CHEN B, LI L G, CHEN Z J. Spatio-temporal variation of climate productivity of vegetation and its responses to climate change in three provinces of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(12): 3339–3348. (in Chinese)
- [10] YU G, ZHENG Z, WANG Q, et al. Spatiotemporal pattern of soil respiration of terrestrial ecosystems in China: the development of a geostatistical model and its simulation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(16): 6074–6080.
- [11] 王倩之,刘凯,汪明. NEX-GDDP降尺度数据对中国极端降水指数模拟能力的评估[J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(1): 31–43.
WANG Q Z, LIU K, WANG M. Evaluation of extreme precipitation indices performance based on NEX-GDDP downscaling data over China[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(1): 31–

43. (in Chinese)
- [12] LI C, FROLKING S, FROLKING T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 2. Model applications[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(D9): 9777-9783.
- [13] ZHENG C, BENNETT G D. Applied contaminant transport modeling, 2nd edition[M]. New York: John Wiley and Sons, 2002: 10-13.
- [14] 薛静,毛萌,任理. DNDC模型在曲周试验站的参数灵敏度分析及率定[J]. 中国农业科学, 2013, 46(13): 2695-2708.
XUE J, MAO M, REN L. The parameter sensitivity analysis and calibration of DNDC model in Quzhou Agricultural Experiment Station[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(13): 2695-2708. (in Chinese)
- [15] PANDEY P, SRIVASTAVA P, CHETRI T, et al. Forest biomass estimation using remote sensing and field inventory: a case study of Tripura, India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191(9): 593.
- [16] LI Z, LAI Q, BAO Y, et al. Carbon allocation to leaves and its controlling factors and impacts on gross primary productivity in forest ecosystems of Northeast China[J]. Forests, 2024, 15(1): 1-18.
- [17] WANG M, ZHAO J, WANG S, et al. Regional contributions and climate attributions to interannual variation of global net ecosystems production by an ecosystem processed model driven by remote sensing data over the past 35 years[J]. Remote Sens, 2022, 14(13): 3208.
- [18] 秦发倡,赵永存,史学正,等. 基于贝叶斯推断的DNDC模型参数校正与不确定性评价研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 247-254.
QIN F L, ZHAO Y C, SHI X Z, et al. Input parameters calibration and uncertainty estimation of the NDNC model based on Bayesian inference[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(2): 247-254. (in Chinese)
- [19] GJETTERMANN B, STYCZEN M, HANSEN H C B, et al. Challenges in modelling dissolved organic matter dynamics in agricultural soil using DAISY[J]. Soil Biol Biochem, 2008, 40(6): 1506-1518.
- [20] 耿文杰,李晓文,王晓杰,等. 近60年来辽宁省农业气候资源重心时空特征变化研究[J]. 东北农业科学, 2024, 49(3): 93-101.
GENG W J, LI X W, WANG X J, et al. Spatial and temporal characteristics of agricultural climate resource center in Liaoning province for recent 60 years[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2024, 49(3): 93-101. (in Chinese)
- [21] 梁浩,胡克林,李保国,等. 土壤-作物-大气系统水热碳氮过程耦合模型构建[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 54-66.
LIANG H, HU K L, LI B G, et al. Coupled simulation of soil water-heat-carbon-nitrogen process and crop growth at soil-plant-atmosphere continuum system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(24): 54-66. (in Chinese)
- [22] 杨福芹,李蕊,冯海宽,等. 不同生育期冬小麦植株氮含量遥感反演方法比较[J]. 东北农业科学, 2023, 48(3): 118-124.
YANG F Q, LI R, FENG H K, et al. Comparison of hyperspectral remote sensing inversion methods for plant nitrogen content in different growth stages[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(3): 118-124. (in Chinese)
- [23] 段北星,满秀玲,宋浩,等. 大兴安岭北部不同类型兴安落叶松林土壤呼吸及其组分特征[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(2): 40-50.
DUAN B X, MAN X L, SONG H, et al. Soil respiration and its component characteristics under different types of *Larix gmelinii* forests in the north of Daxing'an Mountains of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(2): 40-50. (in Chinese)
- [24] 高明磊,满秀玲,段北星. 林下植被和凋落物对我国寒温带天然林土壤CO₂通量的短期影响[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(3): 55-65.
GAO M L, MAN X L, DUAN B X. Short-term effects of understory vegetation and litter on soil CO₂ flux of natural forests in cold temperate zone of China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(3): 55-65. (in Chinese)
- [25] 李岳泰,满秀玲,喻武,等. 不同地形樟子松天然林土壤呼吸特征及其影响因素[J]. 森林工程, 2020, 36(1): 1-9, 24.
LI Y T, MAN X L, YU W, et al. Soil respiration characteristics and influencing factors of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* natural forest under different terrain[J]. Forest Engineering, 2020, 36(1): 1-9, 24. (in Chinese)
- [26] 谭稳稳. 大兴安岭兴安落叶松林土壤呼吸特征及其对火干扰的响应[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
TAN W W. Soil respiration of *Larix gmelinii* Rupr. forest in the Da Xing'an Mountain and the responses to the fire disturbances [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012. (in Chinese)
- [27] 颜学佳,魏江生,周梅,等. 兴安落叶松林土壤呼吸及组分的变化特征[J]. 生态环境学报, 2013, 22(6): 948-954.
YAN X J, WEI J S, ZHOU M, et al. Variation characteristics of soil respiration and its components in *Larix gmelinii* forest[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(6): 948-954. (in Chinese)
- [28] 陆彬,王淑华,毛子军,等. 小兴安岭4种原始红松林群落类型生长季土壤呼吸特征[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4065-4074.
LU B, WANG S H, MAO Z J, et al. Soil respiration characteristics of four primary Korean pine communities in growing season at Xiaoxing'an Mountain, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(15): 4065-4074. (in Chinese)
- [29] 焦振. 帽儿山温带森林土壤呼吸组分时空动态及其影响因素[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
JIAO Z. Spatiotemporal dynamics in soil respiration components of the temperate forests in the Maoershan region of Northeast China[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019. (in Chinese)
- [30] 孙龙,李远,赵彬清,等. 中度火干扰对帽儿山次生林土壤呼吸组分及土壤微生物生物量的影响[J]. 东北林业大学学

- 报, 2019, 47(7): 90-98.
- SUN L, LI Y, ZHAO B Q, et al. Effects of moderate fire disturbance on soil respiration components and soil microbial biomass in secondary forest of Maoer Mountains, China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(7): 90-98. (in Chinese)
- [31] 王瑶, 张利敏, 徐胜楠, 等. 帽儿山3种森林生态系统土壤动物与土壤呼吸及其相互关系研究[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 172-183.
- WANG Y, ZHANG L M, XU S N, et al. Analysis on soil animals, soil respiration and the correlation in three forest ecosystems in Maershan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 172-183. (in Chinese)
- [32] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤呼吸组分的分离量化[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1640-1647.
- YANG J Y, WANG C K. Partitioning soil respiration of temperate forest ecosystems in Northeastern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(6): 1640-1647. (in Chinese)
- [33] PIAO S, WANG X, PARK T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(1): 14-27.
- [34] ALLEN C D, MACALADY A K, CHENCHOUNI H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(4): 660-684.
- [35] BOND LAMBERTY B, THOMSON A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. Nature, 2010, 464: 579-582.
- [36] DAVIDSON E A, JANSSENS I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. Nature, 2006, 440: 165-173.
- (责任编辑: 王 昱)

.....

(上接第 119 页)

- Journal of Systems Engineering, 2019, 34(1): 116-129. (in Chinese)
- [29] 孔令成, 郑少锋. 家庭农场的经营效率及适度规模—基于松江模式的 DEA 模型分析[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2016, 16(5): 107-118.
- KONG L C, ZHENG S F. Operational efficiency and moderate scale of family farms: Analysis based on DEA model of Songjiang model[J]. Journal of Northwest A&F University(Social Science Edition), 2016, 16(5): 107-118. (in Chinese)
- [30] 尹春洋, 田露, 李志坚, 等. 肉牛养殖户适度规模经营效率及其优化路径实证分析—以西北优势产区为例[J]. 中国畜牧杂志, 2016, 52(8): 22-26, 30.
- YIN C Y, TIAN L, LI Z J, et al. An empirical analysis of operational efficiency of moderate scale and its optimization path for beef cattle farmers: Taking the northwest advantageous production area as an example[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2016, 52(8): 22-26, 30. (in Chinese)
- [31] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 农业社会化服务 农机专业合作组织建设指南[R]. 北京: 国家标准委, 2023.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Agricultural socialized services—guidelines for the construction of agricultural machinery professional cooperative organizations[R]. Beijing: Standardization Administration of China, 2023. (in Chinese)
- (责任编辑: 王 昱)