

CLM5-FATES 模式对中国长白山针阔混交林分布的模拟

隋月^{1,2*}, 杨传玉¹

1. 中国地质大学（武汉）环境学院大气科学系，湖北武汉 430078

2. 极端天气气候与水文地质灾害联合研究中心，湖北武汉 430078

摘要：基于植被功能性状的新一代动态全球植被模式 CLM5-FATES (Community Land Model version 5 - Functionally Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator)，对长白山针阔混交林分布的模拟能力亟需检验。这对新一代模式的发展具有重要意义。本文基于 25 °C 时最大羧化速率、比叶面积和叶寿命三个叶片特性参数，首先探讨 CLM5-FATES 模式中长白山针阔混交林分布的参数敏感性，然后检验模式对长白山针阔混交林分布的模拟能力。研究发现，不同的性状参数组合显著影响该地区两种植被类型分布的模拟结果，且 25 °C 时最大羧化速率和比叶面积的影响大于叶寿命。适当的性状参数组合下，CLM5-FATES 模式能再现观测中长白山针阔混交林分布。本研究验证了该模式在长白山针阔混交林的适用性，为进一步的气候植被相互作用研究提供重要支持。

关键词：性状；动态全球植被模型；常绿针叶林；落叶阔叶林。

中图分类号：Q948.12+1

收稿日期：2024-12-25

Simulation of Mixed Needleleaf and Broadleaf Forest Distribution in Changbai Mountain of China using CLM5-FATES Model

SUI Yue^{1,2*}, YANG Chuanyu¹

1. Department of Atmospheric Sciences, School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

2. Center for severe weather and climate and hydro-geological hazards, Wuhan 430078, China

Abstract: The capability of the new generation dynamic vegetation model CLM5-FATES (Community Land Model version 5 - Functionally Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator) for the distribution of mixed needleleaf and broadleaf forest in the Changbai Mountains urgently needs to be evaluated, which is of great significance for the development of the new generation of models. Based on the maximum carboxylation rate at 25 °C, specific leaf area, and leaf longevity, this paper first explores the parameter sensitivity of the distribution of mixed needleleaf and broadleaf forest in the Changbai Mountains in the CLM5-FATES model, and then investigates the model's ability to simulate the distribution of these forests. The study finds that different combinations of trait parameters significantly affect the distribution of vegetation types in the region. The maximum carboxylation rate at 25 °C and specific leaf area have a greater impact compared to leaf longevity. Under an appropriate combination of trait parameters, the CLM5-FATES model can reproduce the observed distribution of mixed needleleaf and broadleaf forest in the Changbai Mountains. This study validates the applicability of the model to the mixed needleleaf and broadleaf forest in the Changbai Mountains, providing crucial support for further research on climate-vegetation interactions.

Key words: Trait; Dynamic global vegetation model; Evergreen needleleaf forest; Deciduous broadleaf forest.

基金项目：国家自然科学基金项目（Nos. 42305041）

作者简介：隋月（1987—），女，讲师，博士，主要从事气候与植被相互作用及数值模拟研究。

E-mail: suiyue@cug.edu.cn, ORCID: 0000-0002-5464-6486.

***通讯作者：**隋月，E-mail: suiyue@cug.edu.cn

植被作为陆地生物圈的主体，与大气之间存在着复杂的相互作用 (Bonan, 2008)。一方面，从植物个体的生长发育到植被的地理分布和演变，受到气候要素及气候变迁的显著影响 (Piao *et al.*, 2019)。另一方面，植被通过生物地球物理过程和生物地球化学过程，调节着陆地与大气之间的能量和物质交换，进而对气候系统产生重要影响 (赵东升等, 2023; Sui *et al.*, 2025)。因此，深入研究植被与大气的相互作用具有重要的科学意义。

长白山阔叶红松林作为我国东北地区的地带性顶极群落，是全球唯一大面积原始针阔混交林，具有独特的建群种和丰富的物种多样性，在全球生物多样性保护、国家碳汇及全球碳循环中占据重要地位 (郝占庆等, 2008)。其群落结构演替不仅受到气候等环境因素的影响，还与植被自身的特性密切相关。而数值模拟是研究植被与大气相互作用以及植被群落演替的重要手段。

从早期的生物地理模型、生物物理模型、生物地球化学模型，到现今的动态全球植被模型 (Dynamic Global Vegetation Models, DGVMs)，这些模型在适用性和模拟能力上均取得了显著进展 (谢新瑶等, 2018; 李新等, 2021)。DGVMs 不仅整合了生物地球物理学、水文过程、生物地球化学循环、植被动态，还考虑了自然干扰和人类活动等主要过程 (彭书时等, 2020)。目前，DGVMs 已成为陆面模式的重要组成部分，可与地球系统模式中的其他模块 (如大气、海洋等子模块) 耦合，广泛应用于模拟不同时空尺度的植被分布，以及估算陆地碳水通量和土地利用变化的影响等 (张仲石等, 2022; 李思其等, 2024)。然而，将 DGVM 的发展与长白山针阔混交林群落结构演替联系起来的研究还相对不足。

当前一代的 DGVMs 仍缺失植物演替和群落组织这些生态学中的核心过程 (Bonan *et al.*, 2024)。通常，DGVMs 采用每种植物功能型 (Plant Functional Type, PFT) 在每个气候网格单元中的单一区域平均代表植物群落。这种简化虽然提高了模型的计算效率，使其在地球系统模式中得以广泛应用，但也存在显著局限 (Argles *et al.*, 2022)。例如，这些功能型的特征参数 (多为性状) 固定，且竞争模拟基于植物功能型而非个体。这种假设忽略了植被个体之间的差异及其效应，严重影响了模型对生态系统结构和功能的模拟精度，导致模拟结果的不确定性较大 (Bonan and Doney, 2018; 鲍艳等, 2023; 王丹云等, 2024)。这种植物功能型框架已成为 DGVMs 发展的主要障碍 (杨延征等, 2018)。

因此，亟需探索新的方法以克服这些局限性。当前，许多模型团队正在开发适用于地球系统模拟的新一代植被群落动态模型，以期捕捉这些更精细的生态过程 (Fisher *et al.*, 2018; Argles *et al.*, 2022; Bonan *et al.*, 2024)。新一代植被群落动态模型提供了对植被斑块动态的尺寸和年龄结构化表示，包括冠层中垂直方向的光竞争、尺寸依赖的生长、分配和死亡率、竞争以及干扰后的补充 (Fisher *et al.*, 2018)。这类模型建立在生态系统动态计算框架的基础上，允许在地球系统模式中进行高效计算，可以模拟植物尺寸 (由相同尺寸和功能类型的植物群体表示) 和自干扰以来的年龄 (由一个或多个群体的斑块表示)。模型中不同的植物功能型由与植物生理、对干扰的响应等其他生活史特征相关的性状定义。例如，Fisher *et al.* (2015) 在通用陆面模式 CLM4.5 (Community Land Model version 4.5) 中发展了基于植物功能性状的植被模块 (Ecosystem Demography, ED)，预测了美国东部生物群系的分布。功能性状不仅能反映植物对环境变化的响应，还与生态系统的结构和功能密切相关，因此能显著提升当前 DGVMs 对生态系统过程的模拟和功能预测能力 (杨延征等, 2018; 夏建阳等, 2020; 刘聪聪等, 2024)。然而，目前的研究大多集中在站点或区域尺度，特别是北美洲和热带地区，而对中国区域以及针阔混交林的关注则不足 (Fisher *et al.*, 2018; Massoud *et al.*, 2019; Koven *et al.*, 2020; Cheng *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2024; Shi *et al.*, 2024)。

目前，通用陆面模式最新版本为 CLM5 (Community Land Model version 5)，并且嵌入了更新的 ED 模块，即新一代动态全球植被模型 FATES (Functionally Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator) (Lawrence *et al.*, 2019)。因此，本研究利用最新的 CLM5-FATES 模式

对中国长白山针阔混交林的分布进行模拟。阔叶红松林是温带针阔混交林的典型代表，也是第四纪冰川期后保存完好的原始裸子植物群落。其主要分布在我国东北三省的东部山区及俄罗斯远东、朝鲜、日本部分地区。以长白山针阔混交林为研究对象，检验 CLM5-FATES 对温带针阔混交林分布的模拟能力。这不仅对基于植被性状的新一代 DGVMs 的发展具有重要意义，也对未来气候与植被相互作用的研究具有重要价值。

在长白山针阔叶混交林中，常绿针叶树和落叶阔叶树是主要的组成部分，它们在叶片构造策略上存在明显差异。通常，相比于常绿树，落叶树的叶片更薄，即叶片比叶重（单位面积叶片碳含量）更小或叶片比叶面积（SLA）更大；阔叶树种的 SLA 大于针叶树种（刘可佳等，2022）。落叶树的叶片仅在一年中尚未脱落的时期内进行光合作用，而常绿树的叶片可全年持续存在。另外，单位面积叶氮含量和生产力也随叶片厚度变化，因此，单位面积叶氮含量和比叶重及叶寿命有关。虽然树种死亡率、碳分配等参数也会影响植被的模拟，但叶氮含量、比叶重和叶寿命这三个叶片参数是现有数据库中量化最好的叶片性状参数之一，并能够合理定义不同的叶片构造策略（Fisher *et al.*, 2015）。因此，本文将基于叶氮含量、比叶重和叶寿命这三个性状参数，探讨 CLM5-FATES 对长白山针阔叶混交林分布的模拟。

1 数据和方法

1.1 研究区域

本研究关注的区域是长白山国家级自然保护区，其位于我国吉林省东南部，地理位置为 $41^{\circ}41'N \sim 42^{\circ}25'N$, $127^{\circ}42'E \sim 128^{\circ}16'E$ (朱琪等, 2019)。长白山阔叶红松林是原始森林干扰后自然演替的顶级群落，是长白山地区代表性植被类型，分布面积广（韩士杰，2012）。本研究的关键点位选在长白山阔叶红松林永久样地（郝占庆等，2008）。该样地位于长白山国家级自然保护区北部，经度范围为 $128^{\circ}05'41''E \sim 128^{\circ}05'46''E$ ，纬度范围为 $42^{\circ}24'10''N \sim 40^{\circ}24'12''N$ 。该样地综合观测场于 1998 年建立，海拔 784 m，观测场面积为 $40\text{ m} \times 40\text{ m}$ 。乔木层优势种 5 种，即针叶树种红松 (*Pinus koraiensis*) 以及阔叶树种水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*)、紫椴 (*Tilia amurensis*)、蒙古栎 (*Quercus mongolica*) 和五角枫 (*Acer pictum*) (韩士杰，2012)。动物活动主要为小型啮齿类和鸟类，偶见大型兽类脚印；人类活动轻度，无任何采伐。

1.2 观测数据

为了验证 CLM5-FATES 模式在长白山阔叶红松林永久样地的针阔混交林的参数敏感性，使用了《2003-2008 年吉林长白山站植物群落种类组成与物质生产观测数据》中 2005 年阔叶红松林综合观测场乔木层植物种组成数据（韩士杰，2012；长白山站，2020）。

为了评估 CLM5-FATES 模式对长白山地区针阔混交林的模拟，使用了中山大学全球变化与陆地生态系统模型研究团队的中国土地利用覆盖和变化数据集（夏晓圣等，2023）。该数据集包含了 1980~2021 年逐年的中国全境的土地利用覆盖和变化资料，空间分辨率为 10 km。本文使用了该数据集中 1991~2010 年长白山地区常绿针叶林和落叶阔叶林两种植被类型的空间分布（即植被类型的面积占格点总面积的百分比）。

1.3 模式介绍

通用陆面模式 CLM 是目前国际上应用广泛、发展较为完善的陆面模式之一 (Dai *et al.*, 2003)。CLM5 是 CLM 的最新版本，是通用地球系统模式 CESM2 (Community Earth System Model version 2) 的默认陆面模式 (<http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm2/>) (Lawrence *et al.*, 2019)。CLM5 在 CLM4.5 的基础上显著改进了土壤和植物的水文、雪、河流、碳氮循环及其耦合等，并增加了臭氧对植物的损害、与大气耦合的火灾排放气体的模拟以及本文使用的可以模拟植被种群动态的全球植被模型 FATES 等可选模块。关于 CLM5 的详细描述可参考 CLM5 的技术手册 (http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm2/land/CLM50_Tech_Note.pdf)。

FATES 是一个植被竞争与共存的种群动态植被模型。该模型结构的具体特征包括: (1) 灵活的植物功能型参数化, (2) 从生态系统种群概念推导出的植物种群统计和演替表示, (3) 基于完美可塑性近似 (Perfect Plasticity Approximation, PPA) 模型的植物自组织冠层, (4) 在较高的时间分辨率 (即半小时) 和垂直分辨率下处理冠层过程, 以及 (5) 在同一垂直光谱中表示多种不同的植物类型的能力 (Fisher *et al.*, 2015; Lawrence *et al.*, 2019)。这使得 FATES 可以直接通过植物生理特征的竞争交互作用预测生物群系, 并且包括了可选的火模块、模块化的异速生长和分配方案、交互式伐木以及植物水动力学过程 (Lawrence *et al.*, 2019)。FATES 的快速时间尺度生理过程基于 CLM5, 但对高度结构化和多 PFT 冠层进行了解析。代码库的开放源代码开发和应用正在进行中 (<https://github.com/NGEET/fates>)。

1.4 性状参数

本文重点关注的是温带地区常绿针叶树和冷落叶阔叶树的叶片构造策略的问题。基于 GLOPNET (Global Plant Trait Network) 全球叶性状数据库 (Wright *et al.*, 2004), 考虑了比叶重 (M_a)、单位面积叶氮含量 (N_{area}) 及叶寿命 (L_l) 三个性状之间权衡的方向和保真度, 根据物候习性 (即常绿或冷阔叶), Fisher *et al.* (2015) 构建了常绿针叶林和落叶阔叶林的三维协方差矩阵; 然后使用多变量正态分布采样程序 (MATLAB 中的 mvnrnd 函数) 采样得到了两种植被类型的 15 组参数组合。

本文使用的常绿针叶林和落叶阔叶林的性状参数请见表 1。序号 0 代表 CLM5-FATES 模式自带的 25°C 时最大羧化速率 ($V_{c,max,25}$)、比叶面积 (SLA) 和叶寿命 (L_l) 三个属性参数组合。序号 1~15 则根据 Fisher *et al.* (2015) 采样的比叶重 (M_a)、单位面积叶氮含量 (N_{area}) 及叶寿命 (L_l) 三个性状的 15 组参数组合计算得到。具体而言, 考虑到常绿针叶林和落叶阔叶林的光合能力与叶氮含量 (N_{area}) 的关系存在差异, 因此, 序号 1~15 的 25°C 时最大羧化速率 ($V_{c,max,25}$) 由 N_{area} 根据公式 (1) 和 (2) 计算得到 (Kattge *et al.*, 2009), 公式中 N_{area} 的单位为 gm^2 , $V_{c,max,25}$ 的单位为 $\mu mol CO_2 m^{-2}s^{-1}$; 比叶面积 (SLA) 由比叶重 (M_a) 的倒数计算得到。叶寿命 (L_l) 则直接使用 Fisher *et al.* (2015) 采样的参数数据。

$$\text{落叶阔叶林: } V_{c,max,25} = 33.79N_{area} \quad (1)$$

$$\text{常绿针叶林: } V_{c,max,25} = 20.72N_{area} \quad (2)$$

表 1 25°C 时最大羧化速率 ($V_{c,max,25}$)、比叶面积 (SLA) 和叶寿命 (L_l) 三个属性的参数组合: 0 为 CLM5-FATES 模式原始参数, 1~15 依据 Fisher *et al.* (2015) 的参数计算得到

Table 1 Parameter combinations for the maximum carboxylation rate at 25 °C ($V_{c,max,25}$), specific leaf area (SLA) and leaf longevity (L_l): Set 0 represents the original parameters in the CLM5-FATES model, while Sets 1-15 are parameter combinations derived from Fisher *et al.* (2015)

参数 组合	25°C 时最大羧化速率 ($V_{c,max,25}$)		比叶面积 (SLA)		叶寿命 (L_l)	
	单位: $\mu mol CO_2 m^{-2}s^{-1}$		单位: $m^2 gC^{-1}$		单位: 年	
序号	常绿针叶	落叶阔叶	常绿针叶	落叶阔叶	常绿针叶	落叶阔叶
0	65	58	0.010	0.030	4.0000	1.0000
1	84	68	0.002	0.010	2.0626	0.3258
2	44	74	0.004	0.008	2.3824	0.5357
3	34	42	0.006	0.014	0.7585	0.6427
4	49	47	0.003	0.017	4.1155	0.1498
5	71	69	0.003	0.010	1.3678	0.4241
6	47	61	0.006	0.021	3.1704	0.2994
7	108	49	0.002	0.017	1.9671	0.2019
8	65	97	0.003	0.006	2.2025	0.3035
9	101	58	0.003	0.021	5.3842	0.3222

10	47	79	0.004	0.010	1.6403	0.3952
11	17	38	0.006	0.024	3.9932	0.2666
12	87	79	0.003	0.010	2.7613	0.5384
13	80	32	0.002	0.013	3.8249	0.4586
14	1	42	0.004	0.018	1.4697	0.3214
15	103	43	0.002	0.016	0.6839	0.2761

1.5 试验设计

在本研究中, CLM5-FATES 模式的模拟首先设定在中国东北长白山阔叶红松林永久样地中心 ($42^{\circ} 24' 11'' N$ 、 $128^{\circ} 05' 44'' E$), 网格大小为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。气象驱动数据采用全球土壤湿度计划强迫数据集 GSWP3v1 (Global Soil Wetness Project phase 3 version 1) 的 1991 年至 2010 年的气象数据 (Hyungjun, 2017), 并在模拟中进行循环。 CO_2 浓度设定为 367.0 ppm。由于 FATES 目前尚未考虑营养限制, 因此不模拟氮循环过程。暂不考虑火灾干扰, 因此火灾组件被关闭。每组试验均从裸土开始初始化, 均匀播种相同数量的常绿针叶树和落叶阔叶树的种子。基于表 1 中的 16 组参数, 测试长白山阔叶红松林永久样地的针阔混交林对模式参数值的依赖性。因此, 仅运行模式直到植被分布趋于稳定, 即 40 年。

其次, 为了进一步对比 $25^{\circ}C$ 时最大羧化速率 ($V_{c,max,25}$)、比叶面积 (SLA) 和叶寿命 (L_l) 这三个参数对长白山针阔混交林分布的影响, 基于模式自带参数, 分别只使用表 1 中第 6 组或第 9 组参数中的一组参数进行替换, 然后进行 40 年的模拟。具体参数请见表 2。选择第 6 组和第 9 组参数进行替换的原因主要是这两组参数下模式能够再现该地区针阔混交林的分布, 且阔叶林数量多于针叶林 (具体请参考结果分析中的 2.1 小节)。

表 2 仅用表 1 的第 6 组或第 9 组中的 $25^{\circ}C$ 时最大羧化速率 ($V_{c,max,25}$)、比叶面积 (SLA) 或叶寿命 (L_l) 参数替换 CLM5-FATES 原始参数的参数组合

Table 2 Parameter combinations replacing the original parameters of CLM5-FATES with the maximum carboxylation rate at $25^{\circ}C$ ($V_{c,max,25}$), specific leaf area (SLA) or leaf longevity (L_l) from Set 6 or Set 9 in Table 1

参数组合序号	25 $^{\circ}C$ 时最大羧化速率 ($V_{c,max,25}$) 单位: $\mu mol CO_2 m^{-2}s^{-1}$		比叶面积 (SLA) 单位: $m^2 gC^{-1}$		叶寿命 (L_l) 单位: 年	
	常绿针叶	落叶阔叶	常绿针叶	落叶阔叶	常绿针叶	落叶阔叶
	0	65	58	0.010	0.030	4.0000
6	47	61	0.006	0.021	3.1704	0.2994
61	47	61	0.010	0.030	4.0000	1.0000
62	65	58	0.006	0.021	4.0000	1.0000
63	65	58	0.010	0.030	3.1704	0.2994
9	101	58	0.003	0.021	5.3842	0.3222
91	101	58	0.010	0.030	4.0000	1.0000
92	65	58	0.003	0.021	4.0000	1.0000
93	65	58	0.010	0.030	5.3842	0.3222

目前, 长白山地区的林龄多在 60 至 100 年 (Cheng *et al.*, 2024)。因此, 与上述试验设计相同, 但仅将上述 16 个参数中在长白山阔叶红松林永久样地模拟较好的参数组合应用于长白山地区, 进行 100 年的模拟。模拟的长白山地区以 $42^{\circ}N$ 、 $128^{\circ}E$ 为中心, 网格范围为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。驱动数据除了使用上述 GSWP3v1, 还使用了 CRUNCEPv7 (Climatic Research Unit National Centers for Environmental Prediction version 7) 的 1991 年至

2010 年的气象数据 (Viovy, 2018)。这两套气象驱动数据是陆面模式的常用强迫数据资料 (彭静漫等, 2020)。

2 结果分析

2.1 长白山阔叶红松林永久样地的针阔混交林分布对 CLM5-FATES 模式参数的依赖性

图 1 为基于表 1 中 0~15 组参数 CLM5-FATES 模式模拟的 40 年中国东北长白山阔叶红松林永久样地的常绿针叶林和落叶阔叶林每平方米个体数量的逐月变化。根据长白山阔叶红松林永久样地观测场内的观测结果, 2005 年红松 (常绿针叶树) 每平方米 0.016 株, 其他落叶阔叶树 (紫椴、水曲柳等) 每平方米 0.152 株 (长白山站, 2020)。模拟结果显示, 第 1、3、4、13、14 和 15 组试验下, 40 年后长白山阔叶红松林永久样地不存在这两种植被类型 (图 1b、1d-1e 和 1n-1p)。第 2、5、8 和 10 组试验下, 40 年后长白山阔叶红松林永久样地仅存在少量常绿针叶林, 每平方米个体数量为 0.002~0.020 株 (图 1c、1f、1i 和 1k)。第 12 组试验下, 40 年后也仅为常绿针叶林, 每平方米为 0.647 株 (图 1m)。第 11 组试验下, 40 年后长白山阔叶红松林永久样地仅存在阔叶落叶林, 每平方米个体数量为 0.350 株 (图 1l)。第 0、6、7 和 9 组试验下模拟范围内在第 40 年时仍为针阔混交林, 其中常绿针叶林分别为每平方米 0.471 株、0.016 株、0.027 株和 0.071 株, 落叶阔叶林分别为每平方米 0.001 株、0.530 株、0.020 株和 0.528 株 (图 1a、1g-1h 和 1j)。第 0 组和第 7 组下, 虽然长白山阔叶红松林永久样地也是针阔混交林, 但两组试验结果中阔叶林模拟偏少。第 6 组和第 9 组能够再现该地区针阔混交林的分布, 且阔叶林数量多于针叶林。

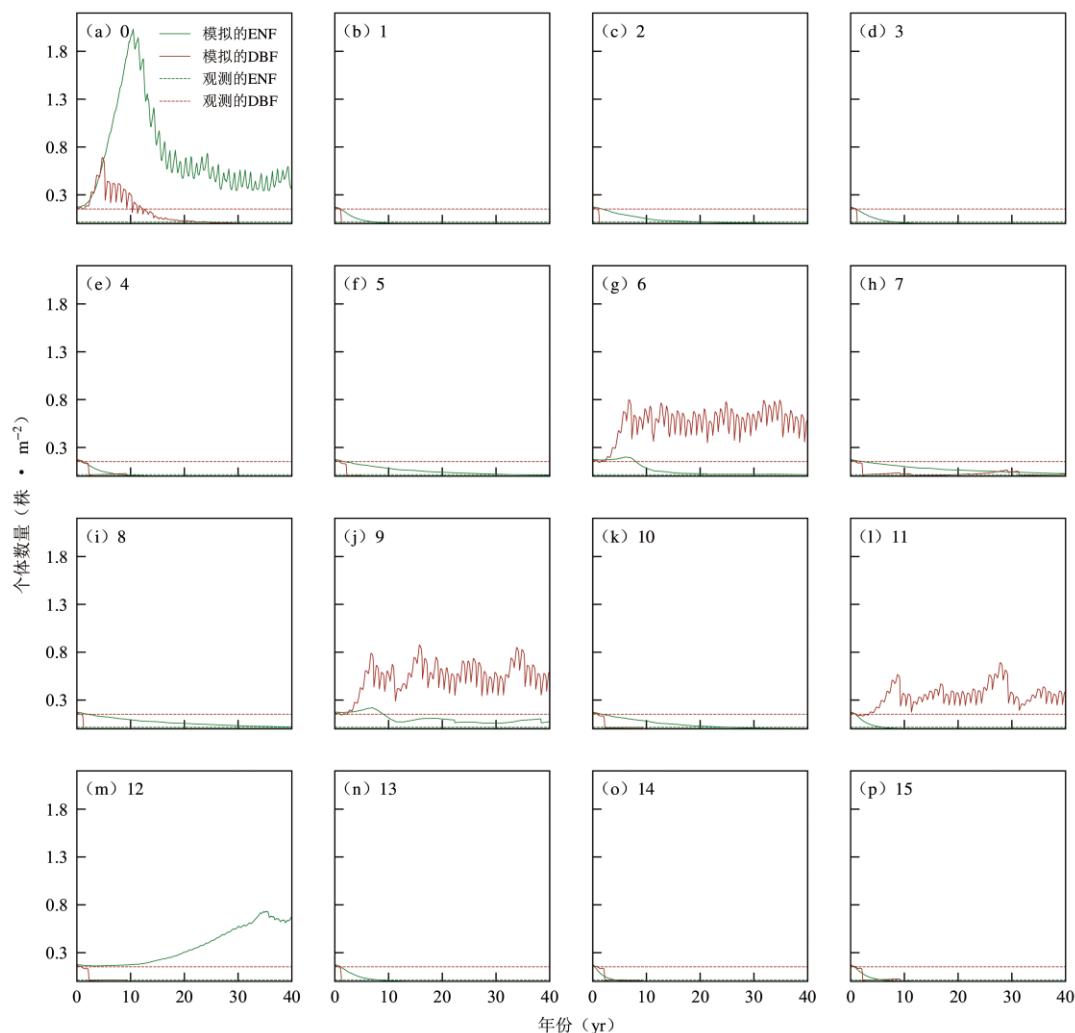


图1 基于表1中0~15组参数, GSWP3v1 驱动 CLM5-FATES 模拟的40年中国东北长白山阔叶红松林永久样地的常绿针叶林和落叶阔叶林每平方米个体数量的逐月变化 (单位: 株· m^{-2})

Fig.1 Monthly variations in the number of individuals per square meter of evergreen needleleaf and deciduous broadleaf forests at the Permanent Sample Plot of the Broadleaved Korean Pine Forest in Northeast China's Changbai Mountain over 40 years, simulated by CLM5-FATES driven by GSWP3v1, based on parameter sets 0 to 15 from Table 1 (units: individuals · m^{-2})

为了进一步比较 25°C 时最大羧化速率 ($V_{c,max,25}$)、比叶面积 (SLA) 和叶寿命 (L_l) 三个属性参数对长白山阔叶红松林永久样地针阔混交林分布的影响, 相对于 CLM5-FATES 模式原始参数, 我们仅使用表1中第6组或第9组的一组参数进行替换, 具体参数组合请见表2, 40年的模拟结果请见图2。选择第6组和第9组参数的原因主要是这两组参数下模式能够再现该地区针阔混交林的分布, 且阔叶林数量多于针叶林。

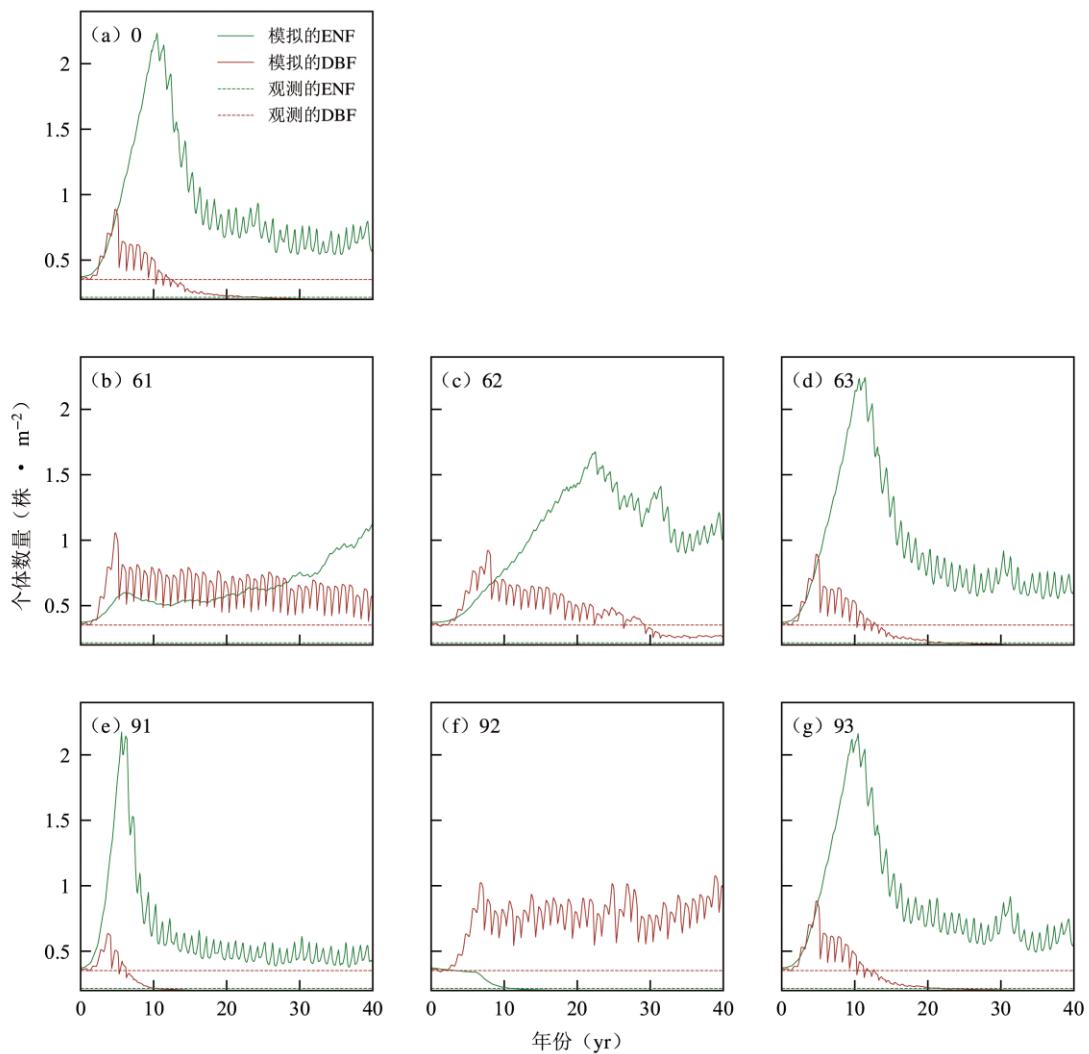


图2 GSWP3v1 驱动 CLM5-FATES 模拟的40年中国东北长白山阔叶红松林永久样地的常绿针叶林和落叶阔叶林每平方米个体数量的逐月变化 (单位: 株· m^{-2})

Fig.2 Monthly variations in the number of individuals per square meter of evergreen needleleaf and deciduous broadleaf forests at Permanent Sample Plot of the Broadleaved Korean Pine Forest in Northeast China's Changbai Mountain over 40 years, simulated by CLM5-FATES driven by GSWP3v1 (units: individuals · m^{-2})

a. 表1中第0组参数组合; b. 第6组的 25°C 时最大羧化速率 ($V_{c,max,25}$) 替换原始参数; c. 第6组的比叶面积 (SLA) 替换原

始参数; d. 第 6 组的叶寿命 (L_l) 替换原始参数; e. 第 9 组的 25℃ 时最大羧化速率 ($V_{c,max,25}$) 替换原始参数; f. 第 9 组的比叶面积 (SLA) 替换原始参数; g. 第 9 组的叶寿命 (L_l) 替换原始参数

首先, 63 试验使用了第 6 组常绿针叶林和落叶阔叶林的叶寿命参数 3.1704 年和 0.2994 年, 替换原始参数 4.0000 年和 1.0000 年。93 试验则使用了第 9 组常绿针叶林和落叶阔叶林的叶寿命参数 5.3842 年和 0.3222 年替换原始参数。对比第 0 组试验, 63 和 93 试验下两种植被类型每平方米个体数量随时间的演变特征与第 0 组试验的结果大体一致 (图 2a、2d 和 2g), 即叶寿命对两种植被类型分布的影响弱于其他两个参数 (图 2)。

其次, 我们来看 25℃ 时最大羧化速率对两种植被类型分布的影响。相对于第 0 组试验, 61 和 91 试验分别使用常绿针叶林和落叶阔叶林的第 6 组 25℃ 时最大羧化速率参数 $47 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $61 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以及第 9 组 25℃ 时最大羧化速率参数 $101 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $58 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 替换原始参数 $65 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $58 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。相比于第 0 组试验, 61 试验下常绿针叶林 25℃ 时最大羧化速率减弱, 落叶阔叶林 25℃ 时最大羧化速率略有增强。这使得相比于 0 试验, 61 试验下常绿针叶林在演替初期的光合能力弱, 进而竞争能力弱, 有利于落叶阔叶林生长 (图 2a 和 2b)。类似地, 相比于第 0 组试验, 91 试验下常绿针叶林 25℃ 时最大羧化速率增强, 光合能力强, 更早地显现出更强的竞争能力 (图 2a 和 2e)。

然后, 我们探讨了比叶面积对两种植被类型分布的影响。相对于第 0 组试验, 62 和 92 试验分别使用常绿针叶林和落叶阔叶林的第 6 组比叶面积参数 $0.006 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$ 和 $0.021 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$ 以及第 9 组比叶面积参数 $0.003 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$ 和 $0.021 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$ 替换原始参数 $0.01 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$ 和 $0.03 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$ 。0、62 和 92 试验下常绿针叶林的比叶面积逐渐减小, 即同样地光合能力下叶片单位面积碳含量越来越高, 使得演替初期常绿针叶林的竞争力越来越弱 (图 2a、2c 和 2f)。

总体上, 在长白山阔叶红松林永久样地的两种植被类型演替初期, 25℃ 时最大羧化速率和比叶面积两个参数的作用强于叶寿命。演替初期, 通常光合能力越弱、比叶面积越小, 其竞争能力越弱。类似地, 表 1 中第 1、7、13、15 组参数试验下, 拥有最小比叶面积 ($0.002 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$) 的常绿针叶林均不能很好生长 (图 1b、1h、1n 和 1p)。即使 25℃ 时最大羧化速率最大的第 7 组试验下, 常绿针叶林也只能少量生长 (图 1h)。第 3、11、14 组试验下, 虽然常绿针叶林的比叶面积略大 ($0.004 \sim 0.006 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$), 但其 25℃ 时最大羧化速率较小 ($1 \sim 34 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 也使其不能很好生长 (图 1d、1l 和 1o)。同样地, 在常绿针叶林比叶面积小于 $0.010 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$ 的情况下, 落叶阔叶林仅在比叶面积达到 $0.021 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$ 的第 6、9 和 11 组试验下才能生长 (图 1g、1j 和 1l)。

2.2 CLM5-FATES 模式对长白山地区针阔混交林分布的模拟

观测结果中, 长白山阔叶红松林永久样地 2005 年落叶阔叶林数量 ($0.152 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$) 多于常绿针叶林 ($0.016 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$) (长白山站, 2020)。然而, 上述试验中, 仅第 0、6、7、9 和 11 组参数下长白山阔叶红松林永久样地在第 40 年时仍存在落叶阔叶林。因此, 基于这 5 组参数, 使用 GSWP3v1 和 CRUNCEPv7 驱动 CLM5-FATES 模式在长白山阔叶红松林永久样地继续模拟至 100 年 (图 3)。首先, 5 组参数下, 模拟前期 (第 1~25 年) 长白山阔叶红松林永久样地两种植被类型的个体数量变化较大; 模拟中后期 (第 25~100 年间) 两种植被类型的个体数量变化趋势不明显, 以年际和年代际波动为主 (图 3)。其次, 同种参数下, 两种气象驱动数据下模拟的两种植被类型分布的变化趋势大致相同, 但存在年际和年代际差异 (图 3)。例如, 第 0 组参数下, 使用 GSWP3v1 和 CRUNCEPv7 驱动 CLM5-FATES 模拟的长白山阔叶红松林永久样地两种植被类型的演变趋势基本一致, 在模拟的最后 20 年都仅为常绿针叶林, 每平方米分别为 0.554 株和 0.631 株 (图 3a)。第 11 组参数下, 使用 GSWP3v1 和 CRUNCEPv7 驱动模式模拟的长白山阔叶红松林永久样地两种植被类型的演变趋势也类

似, 最后都仅存落叶阔叶林; 但两种驱动数据下落叶阔叶林数量有差别, 最后 20 年每平方米分别为 0.379 株和 0.580 株(图 3e)。第 6 组和第 7 组参数下, 使用 GSWP3v1 和 CRUNCEPv7 驱动模式模拟的长白山阔叶红松林永久样地在模拟后期以落叶阔叶林为主, 常绿针叶林较少; 且第 6 组参数下的落叶阔叶林多于第 7 组参数下的结果(图 3b 和 3c)。另外, 第 7 组参数下, 相比于 GSWP3v1, CRUNCEPv7 驱动下的落叶阔叶林数量变化幅度更大(图 3c)。第 9 组参数下, 使用 GSWP3v1 和 CRUNCEPv7 驱动模式模拟的长白山阔叶红松林永久样地均为针阔混交林, 在最后 20 年落叶阔叶林分别为每平米 0.571 株和 0.562 株, 常绿针叶林分别为每平方米 0.129 株和 0.130 株(图 3d)。总的来说, 长白山阔叶红松林永久样地的两种植被类型分布的模拟主要取决于性状参数的影响, 同时也受不同气象驱动数据的调节(图 3)。

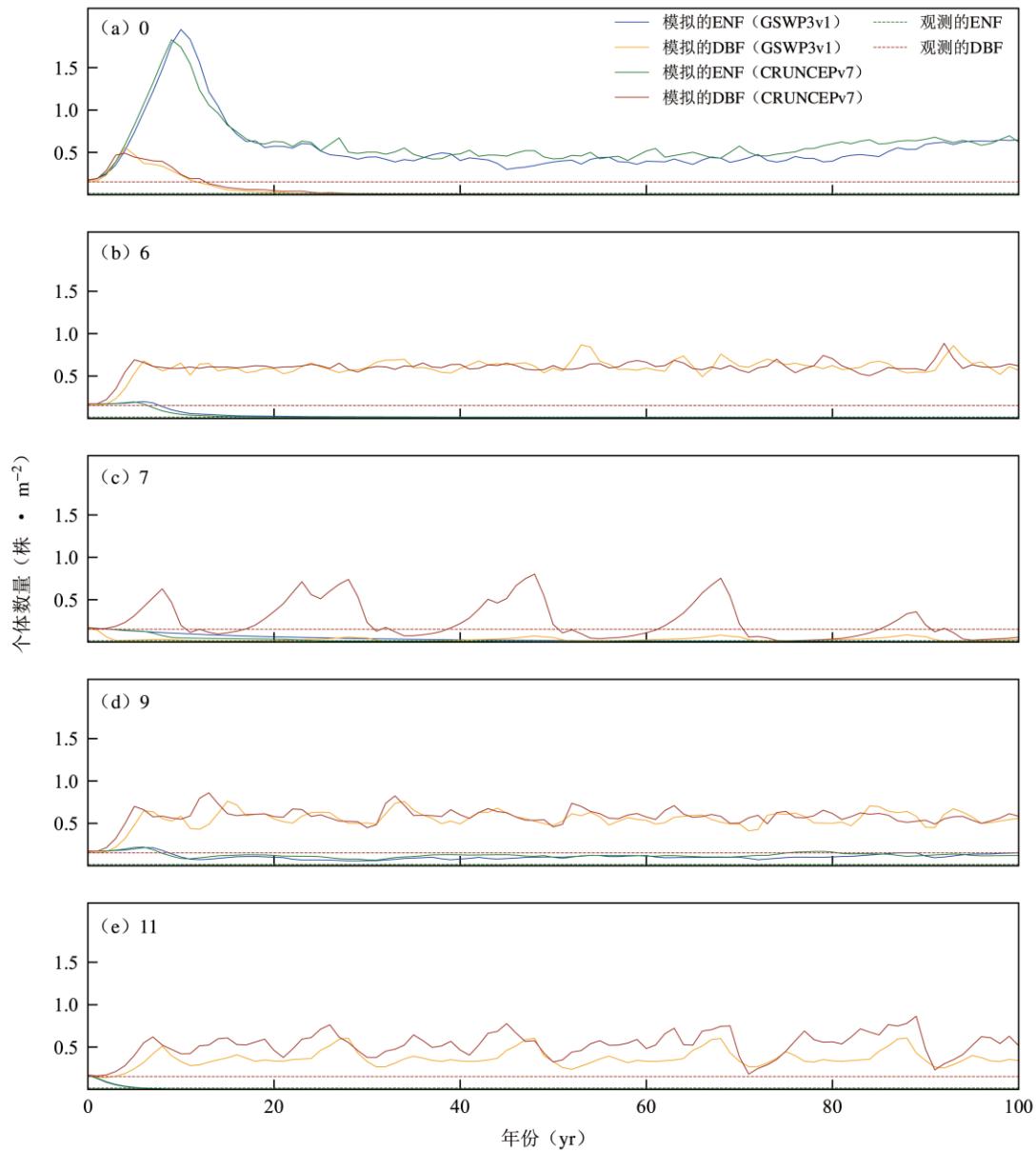


图3 基于第 (a) 0、(b) 6、(c) 7、(d) 9 和 (e) 11 组参数, 使用 GSWP3v1 和 CRUNCEPv7 驱动 CLM5-FATES 模式在长白山阔叶红松林永久样地模拟 100 年的常绿针叶林和落叶阔叶林的逐年变化(单位: 株· m^{-2})

Fig.3 Yearly variations in the number of individuals of evergreen needleleaf and deciduous broadleaf forests at the Permanent Sample Plot of Broadleaved Korean Pine Forest in Changbai Mountain over 100 years, simulated

by the CLM5-FATES model driven by GSWP3v1 and CRUNCEPv7, based on the parameters from Set (a) 0, (b) 6, (c) 7, (d) 9, and (e) 11 in Table 1 (units: individuals $\cdot m^{-2}$)

基于第 0、6、7、9 和 11 组参数, 使用 GSWP3v1 和 CRUNCEPv7 驱动 CLM5-FATES 对长白山地区的针阔混交林进行 100 年的模拟, 最后 20 年的常绿针叶林和落叶阔叶林的空间分布请见图 4。

观测资料显示, 1991~2010 年长白山地区、长白山以南和以东的地区主要以常绿针叶林为主; 长白山以北和以西的地区以落叶阔叶林为主 (图 4a)。基于 CLM5-FATES 原始参数下的模拟显示, 长白山及周边地区在模拟的第 81~100 年仅为常绿针叶林 (图 4b 和 4g)。第 7 组参数下 CLM5-FATES 模拟显示, 模拟的第 81~100 年仅落叶阔叶林分布在长白山西北部和长白山以西的地区 (图 4d 和 4i)。第 11 组参数下 CLM5-FATES 模拟显示, 模拟的第 81~100 年落叶阔叶林分布在长白山及其周边地区 (图 4f 和 4k)。第 6 组参数下, 常绿针叶林主要分布在长白山南部及其以南地区, 其他地区主要以落叶阔叶林为主 (图 4c 和 4h)。对比来看, 第 9 组参数下模拟的长白山地区两种植被类型的分布与观测资料最接近, 即长白山及其以东和以南的地区以常绿针叶林为主, 长白山以西和以北的地区以落叶阔叶林为主 (图 4e 和 4j)。总的来说, CLM5-FATES 模式对长白山及其周边地区的两种植被类型分布的模拟也主要取决于性状参数的影响, 同时受不同气象驱动数据的调节 (图 4)。

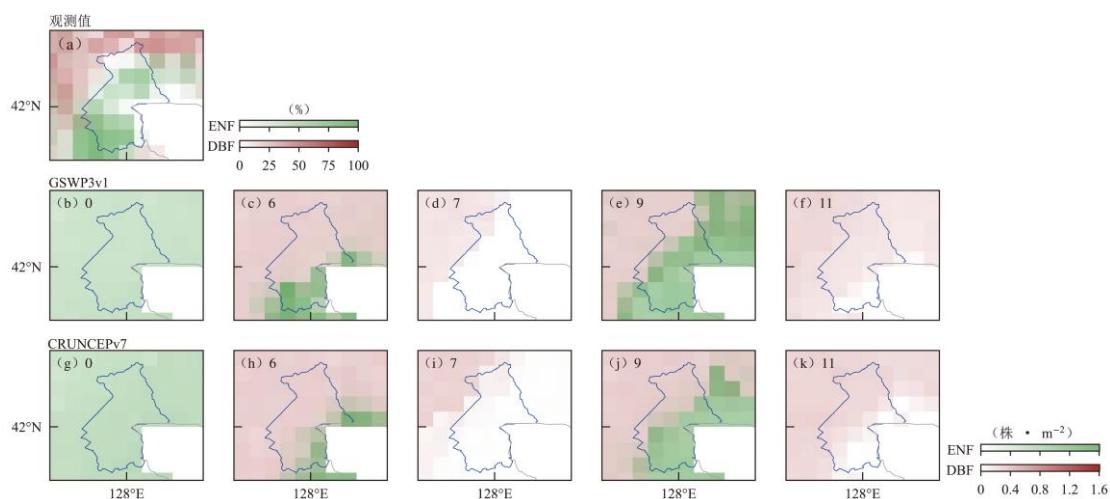


图 4 (a) 基于观测资料 1991~2010 年平均的长白山地区的常绿针叶林 (ENF) 和阔叶落叶林 (DBF) 面积百分比 (单位: %)。第 0、6、7、9 和 11 组参数下, 使用 GSWP3v1 (b-f) 和 CRUNCEPv7 (g-k) 驱动 CLM5-FATES 模式模拟的长白山地区第 81~100 年平均的常绿针叶林和落叶阔叶林的空间分布 (单位: 株 $\cdot m^{-2}$)。蓝色区域为长白山国家级自然保护区。

Fig.4 (a) Percentage of forest area covered by evergreen needleleaf forest (ENF) and deciduous broadleaf forest (DBF) in the Changbai Mountain region based on observation averaged over the period from 1991 to 2010 (units: %). The simulated spatial distribution of evergreen needleleaf forests and deciduous broadleaf forests in the Changbai Mountain region averaged over years 81 to 100, using CLM5-FATES model driven by GSWP3v1 (b-f) and CRUNCEPv7 (g-k) based on parameters from Set 0, 6, 7, 9, and 11 (units: individuals $\cdot m^{-2}$). The blue area represents the Changbai Mountain National Nature Reserve.

3 讨论与结论

基于全球叶性状数据库所定义的参数空间, 我们首先探讨了 CLM5-FATES 模式中长白山针阔混交林分布对 25 °C 时最大羧化速率、比叶面积和叶寿命三个叶片特性参数的敏感性, 然后从植物生理特性及其竞争相互作用中模拟长白山针阔混交林的分布。

(1) CLM5-FATES 模式模拟长白山阔叶红松林分布时, 不同的性状参数组合显著影响两种植被类型分布的模拟结果, 且 25 °C 时最大羧化速率和比叶面积对植被分布的影响大于叶寿命。

(2) 第 0、6、7、9 组参数下在第 40 年时能再现长白山阔叶红松林永久样地的针阔混交分布, 但仅第 6 组和第 9 组参数下能够模拟出与观测一致的混交分布, 即落叶阔叶林数量多于常绿针叶林。100 年的模拟下, 仅第 9 组参数下能再现长白山阔叶红松林永久样地的针阔混交林分布。

(3) 区域上, 与观测资料一致, 第 9 组参数下 CLM5-FATES 模式能再现长白山地区针阔混交林的空间分布特征: 长白山及其以东和以南的地区以常绿针叶林为主, 长白山以西和以北的地区以落叶阔叶林为主。

根据刘可佳等 (2022) 的调查, 中国东北部温带红松针阔叶混交林的落叶林或阔叶林的比叶面积约 $0.025 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$, 常绿林或针叶林的比叶面积约为 $0.006 \sim 0.007 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$ 。本研究中模拟较好的第 6 组和第 9 组的常绿针叶林的比叶面积分别为 $0.006 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$ 和 $0.003 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$, 落叶阔叶林的比叶面积为 $0.021 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$ 。这与刘可佳等 (2022) 在中国温带森林的比叶面积调查结果类似。CLM5-FATES 中默认的常绿针叶林和落叶阔叶林比叶面积分别为 $0.01 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$ 和 $0.03 \text{ m}^2 \text{ gC}^{-1}$; 这比刘可佳等 (2022) 研究中的两种植被类型的比叶面积大。第 6 组和第 9 组参数下常绿针叶林 25 °C 最大羧化效率分别为 $47 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $101 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 与 CLM5-FATES 模式默认值 ($61 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) 和 Aboelyazeed *et al.* (2023) 机器学习方法的估值 ($61 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) 差异大。第 6 组和第 9 组参数下落叶阔叶林 25 °C 最大羧化效率分别为 $61 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $58 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 这与 CLM5-FATES 模式默认的 $58 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 相近, 但大于机器学习方法的估值 ($45 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Aboelyazeed *et al.*, 2023)。另外, 虽然第 9 组参数组合下, CLM5-FATES 能够再现类似观测的针阔混交林分布特征, 但模式模拟的两种植被类型单位面积的个体数量与观测仍有差异 (长白山站, 2020)。CLM5-FATES 模式中, 影响该地区针阔混交林分布模拟的参数较多。未来应该对这些参数进行敏感性分析, 并优化关键参数, 提升对该地区针阔混交林分布的模拟能力。

总的来说, 本研究通过不同性状参数组合的模拟, 验证了 CLM5-FATES 模式对长白山地区针阔混交林分布的模拟能力。CLM5-FATES 对长白山针阔混交林分布的模拟主要受不同性状参数的影响, 并受气象驱动要素的调节。本研究通过模拟验证了 CLM5-FATES 模式在长白山地区的适用性, 为进一步的气候和植被相互作用研究提供了重要的科学支持。

致谢

长白山阔叶红松林观测数据源自国家科技基础条件平台-国家生态科学数据中心 (<http://www.nesdc.org.cn>)。

References

- Aboelyazeed, D., Xu, C. G., Hoffman, F. M., et al., 2023. A Differentiable, Physics-informed Ecosystem Modeling and Learning Framework for Large-scale Inverse Problems: Demonstration with Photosynthesis Simulations. *Biogeosciences*, 20(13): 2671–2692. <https://doi.org/10.5194/bg-20-2671-2023>
- Argles, A. P. K., Moore, J. R., Cox, P. M., 2022. Dynamic Global Vegetation Models: Searching for the Balance between Demographic Process Representation and Computational Tractability. *PLOS Climate*, 1(9): e0000068. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000068>
- Bao, Y., Wang, Y. Q., Nan, S. L., et al., 2023. Evaluation of Vegetation Characteristics over Qinghai-Xizang Plateau Simulated by a Vegetation Dynamic Model. *Plateau Meteorology*, 42(2): 333 – 343 (in Chinese).

- Bonan, G. B., 2008. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 320: 1444–1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Bonan, G. B., Doney, S. C., 2018. Climate, Ecosystems, and Planetary Futures: The Challenge to Predict Life in Earth System Models. *Science*, 359(6375): eaam8328. <https://doi.org/10.1126/science.aam8328>
- Bonan, G. B., Lucier, O., Coen, D. R., et al., 2024. Reimagining Earth in the Earth System. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 16: e2023MS004017. <https://doi.org/10.1029/2023MS004017>
- Changbaishan Station, 2020. Observational Data of Plant Community Species Composition and Material Production in Changbaishan Station from 2003 to 2008. *National Ecosystem Science Data Center* (in Chinese).
- Cheng, K., Chen, Y. L., Xiang, T. Y., et al., 2024. A 2020 Forest Age Map for China with 30 m Resolution. *Earth System Science Data*, 16: 803–819. <https://doi.org/10.5194/essd-16-803-2024>
- Cheng, Y. Y., Leung, L. R., Huang, M. Y., et al., 2022. Modeling the Joint Effects of Vegetation Characteristics and Soil Properties on Ecosystem Dynamics in a Panama Tropical Forest. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14(1): e2021MS002603. <https://doi.org/10.1029/2021MS002603>
- Dai, Y. J., Zeng, X. B., Dickinson, R. E., et al., 2003. The Common Land Model. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(8): 1013–1024. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-8-1013>
- Fisher, R. A., Muszala, S., Verteinstein, M., et al., 2015. Taking off the Training Wheels: the Properties of a Dynamic Vegetation Model without Climate Envelopes, CLM4.5(ED). *Geoscientific Model Development*, 8: 3593–3619. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3593-2015>
- Fisher, R. A., Koven, C. D., Anderegg, W. R. L., et al., 2018. Vegetation Demographics in Earth System Models: A Review of Progress and Priorities. *Global Change Biology*, 24: 35–54. <https://doi.org/10.1111/gcb.13910>
- Hao, Z. Q., Li, B. H., Zhang, J., et al., 2008. Broad-leaved Korean Pine (*Pinus Koraiensis*) Mixed Forest Plot in Changbaishan (CBS) of China: Community Composition and Structure. *Journal of Plant Ecology*, 32(2): 238–250 (in Chinese with English abstract).
- Hyungjun, K., 2017. Global Soil Wetness Project Phase 3 Atmospheric Boundary Conditions (Experiment 1). *Data Integration and Analysis System (DIAS)*. <https://doi.org/10.20783/DIAS.501>
- Kattge, J., Knorr, W., Raddatz, T., et al., 2009. Quantifying Photosynthetic Capacity and Its Relationship to Leaf Nitrogen Content for Global-scale Terrestrial Biosphere Models. *Global Change Biology*, 15: 976–991. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01744.x>
- Koven, C. D., Knox, R. G., Fisher, R. A., et al., 2020. Benchmarking and Parameter Sensitivity of Physiological and Vegetation Dynamics Using the Functionally Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator (FATES) at Barro Colorado Island, Panama. *Biogeosciences*, 17(11): 3017–3044. <https://doi.org/10.5194/bg-17-3017-2020>
- Lawrence, D. M., Fisher, R. A., Koven, C. D., et al., 2019. The Community Land Model version 5: Description of New Features, Benchmarking, and Impact of Forcing Uncertainty. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(12): 4245–4287. <https://doi.org/10.1029/2018MS001583>
- Li, S. Q., Zhang, X., Lu, Z. Y., et al., 2024. Progress of Vegetation Modelling and Future Research Prospects. *Science China Earth Sciences*, 67(9): 2718–2738 (in Chinese).
- Li, X., Ma, H. Q., Ran, Y. H., et al., 2021. Terrestrial Carbon Cycle Model-data Fusion: Progress and Challenges. *Science China Earth Sciences*, 64(10): 1645–1657 (in Chinese).
- Liu, C. C., He, N. P., Li, Y., et al., 2024. Current and Future Trends of Plant Functional Traits in Macro-ecology. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 48(1): 21–40 (in Chinese with English abstract).
- Liu, K. J., He, N. P., Hou, J. H., 2022. Spatial Patterns and Influencing Factors of Specific Leaf Area in Typical Temperature Forests. *Acta Ecologica Sinica*, 42(3): 872–883 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. L., Holm, J. A., Koven, C. D., et al., 2024. Large Divergence of Projected High Latitude Vegetation Composition and Productivity Due to Functional Trait Uncertainty. *Earth Future*, 12(8): e2024EF004563.

<https://doi.org/10.1029/2024EF004563>.

- Massoud, E. C., Xu, C. G., Fisher, R. A., et al., 2019. Identification of Key Parameters Controlling Demographically Structured Vegetation Dynamics in a Land Surface Model: CLM4.5(FATES). *Geoscientific Model Development*, 12(9): 4133–4164. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4133-2019>
- Peng, J. M., Liu, S. F., Dai, Y. J., et al., 2020. Evaluation of Common Land Model Based on International Land Model Benchmarking System. *Climatic and Environmental Research*, 25(6): 649–666 (in Chinese with English abstract).
- Peng, S. S., Yue, C., Chang, J. F., 2020. Developments and Applications of Terrestrial Biosphere Model. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44(4): 436–448 (in Chinese with English abstract).
- Piao, S. L., Liu, Q., Chen, A. P., et al., 2019. Plant Phenology and Global Climate Change: Current Progresses and Challenges. *Global Change Biology*, 25(6): 1922–1940. <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>
- Shi, M. J., Keller, M., Bomfim, B., et al., 2024. Functionally Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator (FATES) for Hurricane Disturbance and Recovery. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 16(1): e2023MS003679. <https://doi.org/10.1029/2023MS003679>
- Sui, Y., Wei, M., Liu, B., 2025. Biophysical Impacts of Global Deforestation on Near-Surface Air Temperature in China: Results from the Land Use Model Intercomparison Project Simulation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 42(6): 1141–1155. <https://doi.org/10.1007/s00376-024-4149-z>
- Vivoy, N., 2018. CRUNCEP Version 7—Atmospheric Forcing Data for the Community Land Model. Research data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO. <https://doi.org/10.5065/PZ8F-F017>
- Wang, D. Y., Zeng, X. D., Song, X., 2024. Evaluation of CMIP6 Models in Simulating the Sensitivity of Leaf Area Index to Temperature and Precipitation Changes over China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 48(5): 1961–1977 (in Chinese with English abstract).
- Wright, I. J., Reich, P. B., Westoby, M., et al., 2004. The Worldwide Leaf Economics Spectrum. *Nature*, 428: 821–827. <https://doi.org/10.1038/nature02403>
- Xia, J. Y., Lu, R. L., Zhu, C., et al., 2020. Response and Adaptation of Terrestrial Ecosystem Processes to Climate Warming. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44(5): 494–514 (in Chinese with English abstract).
- Xia, X. S., Xia, J. Z., Yuan, W. P., 2023. Chinese Land Use State and Transition Datasets During 1980 to 2021. *National Ecosystem Science Data Center* (in Chinese).
- Xie, X. Y., Li, A. N., Jin, H. A., 2018. The Simulation Models of the Forest Carbon Cycle on a Large Scale: a Review. *Acta Ecologica Sinica*, 38(1): 41–54 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. Z., Wang, H., Zhu, Q. A., et al., 2018. Research Progresses in Improving Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs) with Plant Functional Traits. *Chinese Science Bulletin*, 63: 2599–2611 (in Chinese).
- Zhang, Z. S., Li, S. L., Wang, H. J., et al., 2022. Introduction of Crossing Disciplines between Geology and Atmospheric Science. *Earth Science*, 47(10): 3569–3579 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, D. S., Wang, K., Cui, Y. P., 2023. Feedback Mechanisms and Regulatory Effects of Vegetation Change on Climate. *Acta Ecologica Sinica*, 43(19): 7830–7840 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Q., Zhou, W. M., Jia, X., et al., 2019. Ecological Vulnerability Assessment on Changbai Mountain National Nature Reserve and Its Surrounding Areas, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30(5): 1633–1641 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 鲍艳, 王玉琦, 南素兰, 等, 2023. 动态植被模型对青藏高原植被的模拟检验. *高原气象*, 42(2): 333–343.
- 长白山站, 2020. 2003-2008 年吉林长白山站植物群落种类组成与物质生产观测数据. 国家生态科学数据中心.

- 韩士杰, 2012. 中国生态系统定位观测与研究数据集森林生态系统卷: 吉长长白山站(2001-2008). 北京: 中国农业出版社.
- 郝占庆, 李步杭, 张健, 等, 2008. 长白山阔叶红松林样地(CBS): 群落组成与结构. 植物生态学报, 32(2): 238-250.
- 李思其, 张旭, 陆正遥, 等, 2024. 植被模型研究进展与展望. 中国科学: 地球科学, 54(9): 2762-2782.
- 李新, 马瀚青, 冉有华, 等, 2021. 陆地碳循环模型-数据融合: 前沿与挑战. 中国科学: 地球科学, 51(10): 1650-1663.
- 刘聪聪, 何念鹏, 李颖, 等, 2024. 宏观生态学中的植物功能性状研究: 历史与发展趋势. 植物生态学报, 48(1): 21-40.
- 刘可佳, 何念鹏, 侯继华, 2022. 中国温带典型森林植物比叶面积的空间格局及其影响因素. 生态学报, 42(3): 872-883.
- 彭静漫, 刘少锋, 戴永久, 等, 2020. 基于陆面模式基准平台 ILAMB 对陆面模式 CoLM 的评估. 气候与环境研究, 25(6): 649-666.
- 彭书时, 岳超, 常锦峰, 2015. 陆地生物圈模型的发展与应用. 植物生态学报, 44(4): 436-448.
- 王丹云, 曾晓东, 宋翔, 2024. CMIP6 模式关于中国叶面积指数对温度和降水变化敏感性的模拟能力评估. 大气科学, 48(5): 1961-1977.
- 夏建阳, 鲁芮伶, 朱辰, 等, 2020. 陆地生态系统过程对气候变暖的响应与适应. 植物生态学报, 44(5): 494-514.
- 夏晓圣, 夏江周, 袁文平, 2023. 1980-2021 年中国土地利用覆盖和变化数据集. 国家生态科学数据中心.
- 谢馨瑶, 李爱农, 靳华安, 2018. 大尺度森林碳循环过程模拟模型综述. 生态学报, 38(1): 41-54.
- 杨延征, 王焰, 朱求安, 等, 2018. 植物功能性状对动态全球植被模型改进研究进展. 科学通报, 63: 2599-2611.
- 张仲石, 李双林, 王会军, 等, 2022. 浅谈大气科学与地质学的学科交叉. 地球科学, 47(10): 3569-3579.
- 赵东升, 王珂, 崔耀平, 2023. 植被变化对气候的反馈机制及调节效应. 生态学报, 43(19): 7830-7840.
- 朱琪, 周旺明, 贾翔, 等, 2019. 长白山国家自然保护区及其周边地区生态脆弱性评估. 应用生态学报, 30(5): 1633-1641.