

# 气候变化对我国南方人工林地上生物量影响的模拟研究——以会同生态站磨哨实验林场为例

戴尔阜<sup>1,2</sup> 周恒<sup>3</sup> 吴卓<sup>1,2,4\*</sup> 汪晓帆<sup>1,2,4</sup> 奚为民<sup>5,6</sup> 朱建佳<sup>1,2,4</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101; <sup>2</sup>中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室,北京 100101; <sup>3</sup>首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048; <sup>4</sup>中国科学院大学,北京 100049; <sup>5</sup>Department of Biological and Health Sciences, Texas A&M University, Kingsville, Texas 78363, USA; <sup>6</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所,沈阳 110016)

**摘要** 全球气候变暖对陆地生态系统尤其是森林生态系统有着重要的影响,气温升高、辐射强迫的增强将显著改变森林生态系统的结构和功能.南方人工林作为我国森林的重要组成部分,对气候变化的响应日益强烈.为了探究未来气候情景下我国南方人工林对气候变化的响应,降低未来气候变化对人工林可能带来的损失,本研究采用3种最新的气候情景—典型浓度排放路径情景(RCP2.6情景、RCP4.5情景、RCP8.5情景)预估数据,应用生态系统过程模型PnET-II和空间直观景观模型LANDIS-II模拟2014—2094年间湖南省会同森林生态实验站磨哨实验林场森林的地表净初级生产力(ANPP)、物种建立可能性(SEP)和地上生物量的变化.结果表明:不同森林类型的SEP和ANPP对气候变化的响应有明显的差异,各森林类型对气候变化的响应程度表现为:对于SEP,在RCP2.6和RCP4.5情景下,人工针叶林>天然阔叶林>人工阔叶林;在RCP8.5情景下,天然阔叶林>人工阔叶林>人工针叶林.对于ANPP,在RCP2.6情景下,人工阔叶林>天然阔叶林>人工针叶林;在RCP4.5和RCP8.5情景下,天然阔叶林>人工阔叶林>人工针叶林.人工针叶林的地上生物量在2050年左右开始下降,天然阔叶林和人工阔叶林整体呈现上升趋势.2014—2094年,研究区地上总生物量在不同气候情景下增加幅度不同,RCP2.6情景下增加了68.2%,RCP4.5情景下增加了79.3%,RCP8.5情景下增加了72.6%.3种情景下的总地上生物量大小排序为:RCP4.5>RCP8.5>RCP2.6.我们认为,适当的增温将有助于未来研究区森林总地上生物量的积累,但过度的增温也可能阻碍森林的生产和生态功能的持续发展.

**关键词** RCPs; ANPP; 森林地上生物量; LANDIS-II模型

**Simulation study on the effects of climate change on aboveground biomass of plantation in southern China: Taking Moshao forest farm in Huitong Ecological Station as an example.**

DAI Er-fu<sup>1,2</sup>, ZHOU Heng<sup>3</sup>, WU Zhuo<sup>1,2,4\*</sup>, WANG Xiao-fan<sup>1,2,4</sup>, XI Wei-min<sup>5,6</sup>, ZHU Jian-jia<sup>1,2,4</sup> (<sup>1</sup>Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; <sup>2</sup>Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; <sup>3</sup>College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; <sup>4</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>5</sup>Department of Biological and Health Sciences, Texas A&M University, Kingsville, Texas 78363, USA; <sup>6</sup>Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China).

**Abstract:** Global climate warming has significant effect on territorial ecosystem, especially on forest ecosystem. The increase in temperature and radiative forcing will significantly alter the structure and

本文由国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452702, 2012CB416906)、国家自然科学基金项目(41530749, 41571098, 41371196)、国家科技支撑计划项目(2013BAC03B04)资助. This work was supported by the National Key Basic Research Program of China (2015CB452702, 2012CB416906), the National Natural Science Foundation of China (41530749, 41571098, 41371196) and the National Key Science and Technology Support Program (2013BAC03B04).

2016-02-04 Received, 2016-07-11 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wuz.14b@igsrr.ac.cn

function of forest ecosystem. The southern plantation is an important part of forests in China, its response to climate change is getting more and more intense. In order to explore the responses of southern plantation to climate change under future climate scenarios and to reduce the losses that might be caused by climate change, we used climatic estimated data under three new emission scenarios, representative concentration pathways (RCPs) scenarios (RCP2.6 scenario, RCP4.5 scenario, and RCP8.5 scenario). We used the spatially dynamic forest landscape model LANDIS-II, coupled with a forest ecosystem process model PnET-II, to simulate the impact of climate change on aboveground net primary production (ANPP), species' establishment probability (SEP) and aboveground biomass of Moshao forest farm in Huitong Ecological Station, which located in Hunan Province during the period of 2014–2094. The results showed that there were obvious differences in SEP and ANPP among different forest types under changing climate. The degrees of response of SEP to climate change for different forest types were shown as: under RCP2.6 and RCP4.5, artificial coniferous forest > natural broadleaved forest > artificial broadleaved forest. Under RCP8.5, natural broadleaved forest > artificial broadleaved forest > artificial coniferous forest. The degrees of response of ANPP to climate change for different forest types were shown as: under RCP2.6, artificial broadleaved forest > natural broadleaved forest > artificial coniferous forest. Under RCP4.5 and RCP8.5, natural broadleaved forest > artificial broadleaved forest > artificial coniferous forest. The aboveground biomass of the artificial coniferous forest would decline at about 2050, but the natural broadleaved forest and artificial broadleaved forest showed a rising trend in general. During the period of 2014–2094, the total aboveground biomass under RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios increased by 68.2%, 79.3% and 72.6%, respectively. The total aboveground biomass under various climatic scenarios sort as: RCP4.5 > RCP8.5 > RCP2.6. We thought that an appropriate temperature might be beneficial to the biomass accumulation in this study area. However, overextended temperature might hinder the sustainable development of forest production and ecological function.

**Key words:** RCPs; ANPP; forest aboveground biomass; LANDIS-II model.

随着大气中 CO<sub>2</sub> 等温室气体浓度的升高以及地表土地利用和土地覆被变化的加剧, 地球-大气系统辐射平衡状态也将随之发生变化. 根据 IPCC 第五次评估报告 2011 年由于温室气体浓度的变化所引起的辐射强迫已达到 2.83 (2.54 ~ 3.12) W · m<sup>-2</sup>, 与 IPCC 第四次评估报告相比, 增加了 0.20 (0.18 ~ 0.22) W · m<sup>-2</sup>[1]. 而在今后的 100 ~ 300 年中, 由于人类活动强度不断加剧, 全球气候变暖将仍然是未来气候变化的主要趋势. 因此, 为了预估未来气候变化, IPCC 根据未来温室气体和气溶胶可能的排放情况开发了不同的气候情景. 最初的两套排放情景 (IS92 和 SRES) 分别应用于 IPCC 的第三、第四次评估报告, 而第五次报告则采用新一代的排放情景, 典型浓度路径 (representative concentration pathways, RCPs) 情景, 包括 RCP2.6 情景: 2050 年以前温度持续上升, 上升温度限制在 2 °C 之内, 辐射强迫在 21 世纪末之前达到最大, 到 2100 年降到 2.6 W · m<sup>-2</sup>; RCP4.5 情景: 2070 年以前温度持续上升, 2070 年以后温度增加趋势变缓慢, 2100 年辐射强迫稳定在 4.5 W · m<sup>-2</sup>; RCP6.0 情景: 21 世纪末升温将超过 2 °C, 辐射强迫上升至 6.0 W · m<sup>-2</sup>; RCP8.5 情景: 到 21 世纪末, 温室气体排放持续增加, 温度持续上升, 增温

幅度将达到 5 °C, 2100 年辐射强迫上升至 8.5 W · m<sup>-2</sup>[2]. 目前, 这些气候情景正逐渐被应用到气候变化影响及适应研究当中.

森林是陆地生态系统中面积最大、群落结构最复杂的自然生态系统, 它与气候变化的关系十分密切. 森林生态系统具有丰富的物种、群落和功能多样性, 在维持生态系统稳定、改善区域环境、调节小气候、水源涵养、土壤保持等方面发挥着巨大作用[3]. 森林具有很高的生物生产力和生物量, 其碳储量占陆地全部植被碳储存量的 86% 以上, 在碳循环中扮演着汇、库的角色[4]. 因此, 森林生态系统在生物圈碳循环、减缓气候变化等过程中发挥着重要的作用. 随着全球气候变化的不断加剧, 气候变化将不可避免地对森林生态系统的结构、功能以及演替过程产生一定的影响[5]. 例如, 气候变暖将导致山地森林林线上升, 改变树种分布的垂直地带性[6]; 气候变暖将使气候过渡带地区的一些树种竞争优势减弱, 使这些树种消失或迁移[7]. 此外, 气候变暖对森林也有着一定积极的影响, 如温度的增加和 CO<sub>2</sub> 浓度的升高将会提高森林生产力, 加速森林生物量的增长. 目前, 气候变化对森林生态系统的影响已经引起人们越来越多的关注和重视.

模型模拟是景观尺度上研究森林景观动态变化最为有效的方法, 目前已有诸多成果发表。例如, Botkin 等<sup>[8]</sup>采用 JABOWA 模型模拟了美国哈伯德布鲁克森林 200 年间森林植被次级演替生长的变化; Liu 等<sup>[9]</sup>利用多尺度空间随机模型 FORMOSAIC, 模拟了马来西亚地区亚热带森林景观的变化; Yan 等<sup>[10]</sup>利用 NEWCOP 模型模拟了气候变化对中国东北地区红松林生长演替的影响。而在诸多模型中, LANDIS-II 模型在研究气候变化对森林影响方面取得了突出的进展。例如, Gustafson 等<sup>[11]</sup>采用 LANDIS-II 模型研究气候变化对西伯利亚中南部森林组成和生物量的影响, 他们发现气温和降水改变了物种生境, 进而使树种生产力和生物量增加; Thompson 等<sup>[12]</sup>利用 LANDIS-II 模型研究气候变化对美国马萨诸塞州未来 50 年森林结构组成和地上生物量 (AGB) 的影响, 发现气候变暖促使该地区 AGB 增加了 17.3 Tg; Xu 等<sup>[13]</sup>结合了 PnET-II 模型、LINKAGES 模型和 LANDIS-II 模型, 对美国北部明尼苏达州地区进行了研究, 模拟了 1990—2350 年森林景观的变化。与国外相比国内应用森林景观模型的研究相对较少, 并且更加关注气候变化和森林管理方面。如马俊等<sup>[14]</sup>利用 LANDIS 模型预测了气候变化对小兴安岭地区森林地上碳固定速率的变化, 结果表明针叶树种比阔叶树种受气候变化的影响更加明显; 李晓娜等<sup>[15]</sup>将 LANDIS 和林窗模型 LINKAGES 结合, 模拟并比较了气候变化对大兴安岭森林景观的直接影响与通过火干扰改变所产生的影响, 认为火干扰与气候变化的直接影响同等重要; 周宇飞等<sup>[16]</sup>采用 LANDIS 模型模拟了 6 种不同比例针阔造林预案下树种的空间变化; 胡远满等<sup>[17]</sup>利用 LANDIS 模型模拟大兴安岭呼中林区植被演替过程中种群年龄结构、物种分布聚集度的动态变化, 结果表明人为活动能够显著改变森林景观结构。从上述研究成果可以看出, 森林景观模型模拟主要用于研究森林景观格局与生态过程变化两个方面, 而学者们尤其更关注气候变化对森林的影响研究。目前, 这些应用对实现区域森林管理、流域管理、生态系统结构与过程研究、森林资源开发利用、气候变化影响与响应等方面具有重要的现实意义。它们不仅克服了传统森林定点观测的局限性, 同时增加了森林管理的可操作性。然而, 受到树种和森林分布的影响, 目前国内的研究多是针对东北地区天然林开展的研究, 而对我国南方人工林生态系统的研究尚不多见, 因此本文将采用 LANDIS-II 模型研究未来气候变化对我国南方人

工林地上生物量的影响。

我国人工林面积为  $6.93 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 占全国总森林面积的 36%, 蓄积量为  $2.48 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 占全国森林总蓄积量的 17%, 人工林在减缓全球气候变化影响和提供木材等方面具有重要作用<sup>[18]</sup>。南方人工林作为中国森林生态系统的重要组成部分, 具有重要的研究意义。受全球气候变暖的影响, 南方人工林地上生物量也将受到一定的影响。目前, 由于未来气候变化对我国南方人工林生态系统的影响还存在诸多不确定性, 使得我国南方红壤丘陵区的人工林生态系统在面对全球气候变化时, 脆弱性加剧<sup>[19]</sup>。因此, 本文选择南方人工林典型分布区的会同县磨哨林场, 开展人工林对气候变化的区域响应研究。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

本研究区选择中国科学院会同森林生态实验站磨哨实验林场(简称磨哨林场), 该林场位于湖南省怀化市会同县广坪镇境内, 总面积为  $0.98 \text{ km}^2$ , 海拔 300~600 m, 为低山丘陵地貌类型<sup>[20]</sup>。研究区属于中亚热带季风湿润气候区, 光能充足, 热量丰富; 年平均气温为  $16.7 \text{ }^\circ\text{C}$ , 最高气温  $38 \text{ }^\circ\text{C}$ , 出现在 7、8 月, 最低气温  $-2 \sim 3.5 \text{ }^\circ\text{C}$ , 多出现在 1 月; 渠水、巫水(为湘江的一级支流) 两河由南向北流经会同县全境, 水系发达。研究区内降水充沛、蒸发量小、相对湿度大, 年平均降水总量 1200 mm, 年平均相对湿度 80%<sup>[21-22]</sup>。土壤类型为黄红壤<sup>[23]</sup>, 主要植被类型包括人工针叶林、人工阔叶林和天然阔叶林; 主要树种有杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松 (*Pinus massoniana*)、木荷 (*Schima superba*)、火力楠 (*Michelia macclurei*)、红栲 (*Castanopsis fargesii*)、青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*)、刨花润楠 (*Machilus pauhoi*)、枫香 (*Liquidambar formosana*)、白栎 (*Quercus fabri*)、刺楸 (*Kalopanax septemlobus*)、樟树 (*Cinnamomum camphora*)、伯乐 (*Bretschneidera sinensis*)、湿地松 (*Pinus elliotii*)、笔罗子 (*Meliosma rigida*) 及其他阔叶树种(图 1)。

### 1.2 试验设计

通过野外植物样方调查、土壤采样和实验室分析等方法, 调查并获取了研究区的树种分布、年龄、树高胸径、树种生活史参数、树种生物量以及土壤含水量、田间持水量、土壤机械组成等参数。本研究首先利用 PnET-II 模型模拟不同气候情景下 (RCP 2.6、RCP4.5、RCP8.5) 不同树种的地表净初级生产

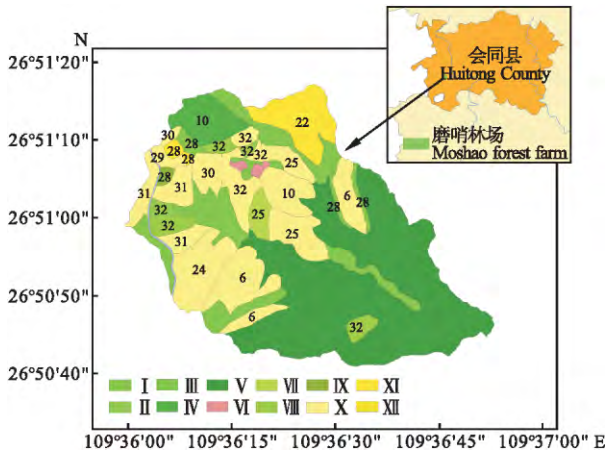


图1 磨哨林场植被分布

Fig.1 Vegetation distribution of Moshao forest farm.

图中数字代表每类森林的平均年龄 The numbers stood for the average age of each forest type. I: 木荷林 *Schima superba* forest; II: 火力楠林 *Michelia macclurei* forest; III: 白栎、枫香林 Mixed *Quercus fabri* and *Liquidambar formosana* forest; IV: 木荷、伯乐林 Mixed *Schima superba* and *Bretschneidera sinensis* forest; V: 红栲、青冈、刨花润楠林 Mixed *Castanopsis fargesii*, *Cyclobalanopsis glauca* and *Machilus pauhoi* forest; VI: 非林地 Nonforest; VII: 杉木、樟树林 Mixed *Cunninghamia lanceolata* and *Cinnamomum camphor* forest; VIII: 杉木、火力楠林 Mixed *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei* forest; IX: 马尾松、木荷林 Mixed *Pinus massoniana* and *Schima superba* forest; X: 杉木林 *Cunninghamia lanceolata* forest; XI: 马尾松林 *Pinus massoniana* forest; XII: 湿地松林 *Pinus elliottii* forest.

力 (aboveground net primary production, ANPP) 和物种建立系数 (species' establishment probability, SEP) 再将 ANPP 和 SEP 输入 LANDIS-II 模型, 利用 Biomass-Succession 模块, 模拟不同气候情景下磨哨林地上生物量的变化趋势, 并对比分析人工针叶林、人工阔叶林和天然阔叶林的 ANPP、SEP 和地上生物量的变化 (图 2)。

**1.2.1 PnET-II 模型** PnET-II 模型是一个模拟森林生态系统碳、氮和水动态的生态过程模型<sup>[24]</sup>。该模型的输入数据包括月最高气温、月最低气温、月平均降水量、光合有效辐射 (PAR) 和 CO<sub>2</sub> 浓度。模型的输出结果可以为 LANDIS-II 模型提供 SEP 和 ANPP 等关键输入参数。

**1.2.2 LANDIS-II 模型** LANDIS-II 是用于模拟森林

景观演替、种子扩散、干扰和管理等的空间直观景观模型<sup>[25]</sup>。它是从 LANDIS 模型发展而来的一个栅格模型, 可以模拟较大空间和时间尺度上的森林景观变化。LANDIS-II 有许多扩展模块用于实现不同的研究目标。模型所需数据主要包括空间数据和非空间数据, 空间数据包括初始群落图、生态分区图, 非空间数据主要包括物种生活史参数、SEP 和 ANPP 等。同时, 将 PnET-II 模型和 LANDIS-II 模型结合, 并应用 Biomass-Succession 模块可以实现气候变化对森林地上生物量影响的模拟。LANDIS-II 模型在空间尺度上具有较大的灵活性, 既可以模拟大尺度下的森林景观变化, 也可以模拟小尺度 (林分尺度) 下树种分布的变化; 在时间尺度上, 模拟的时间可以根据不同的干扰机制而定, 可以模拟从几十年到几百年的森林景观变化<sup>[25]</sup>。

**1.3 模型参数化**

**1.3.1 PnET-II 参数化** 本文采用的气候情景数据是由国家气候中心提供的国际耦合模式比较计划 (CMIP5) 全球气候模式预估数据, 该数据是基于 21 个 CMIP5 全球气候模式的模拟结果, 经过插值计算将其统一降尺度到同一分辨率下 (1°×1°), 利用简单平均方法进行多模式集合, 包括了 RCP2.6、RCP4.5 及 RCP8.5 气候情景下的月最低气温、月最高气温及月降水数据。采用 MATLAB 软件提取出研究区 2014—2094 年间不同情景下的气候数据。数据显示, RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 情景下气温增幅逐渐增大, 到 2094 年, RCP2.6 情景下最低气温增加了 0.62 °C, 最高气温增加了 1.35 °C; RCP4.5 情景下最低气温增加了 1.10 °C, 最高气温增加了 1.21 °C; RCP8.5 情景下最低气温增加了 3.74 °C, 最高气温增加了 4.11 °C; 研究区年均降水量在 1200 mm, 其中 RCP4.5 情景下的年均降水量整体高于另外两种情景 (图 3)。

PnET-II 模型除了输入气候参数外, 还需要输入立地参数和植物参数<sup>[26]</sup>。通过参考相关的树种文

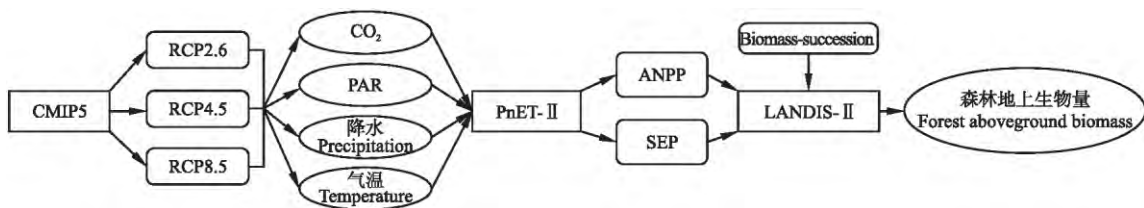


图2 PnET-II 和 LANDIS-II 模型耦合过程

Fig.2 Process of model coupling of PnET-II and LANDIS-II.

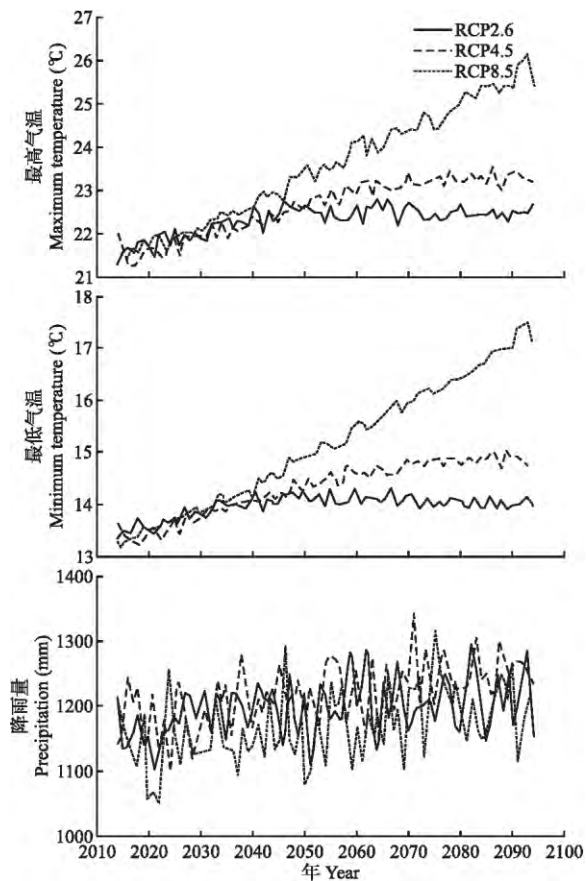


图3 磨哨林场温度和降水的预估值

Fig.3 Predicted values of temperature and precipitation under RCPs scenarios in Moshao forest farm.

献,以及查阅会同森林生态试验的观测数据,获得了各树种的植物参数,保证了模型输入参数的可靠性

表1 物种的 PnET-II 模型参数

Table 1 PnET-II model parameters of species

物种 Species	光合作用 最低温度 PsnTMin (°C)	光合作用 最高温度 PsnTOpt (°C)	叶氮含量 FolNCon* (%)	树种树冠 比叶重 SLWmax (g·m <sup>-2</sup> )	夏季最大 比叶重 FolMsMx (g·m <sup>-2</sup> )	叶子生长 开始积温 GDDFolS* (°C·d)	叶子生长 结束积温 GDDFolE* (°C·d)
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> <sup>[27-29]</sup>	-9	24	1.035	126.42	572.48	381	1824
马尾松 <i>Pinus massoniana</i> <sup>[27-29]</sup>	4	22	1.075	116.01	528.43	377	1600
木荷 <i>Schima superba</i> <sup>[30]</sup>	10	24	1.114	112.47	459.26	300	900
火力楠 <i>Michelia macclurei</i> <sup>[31-32]</sup>	10	24	1.211	122.36	473.36	300	900
红栲 <i>Castanopsis fargesii</i> <sup>[33]</sup>	7	26	0.937	109.67	438.68	105	900
青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> <sup>[32]</sup>	9	24	1.110	120.48	636.80	81	900
刨花润楠 <i>Machilus pauhoi</i> <sup>[32]</sup>	10	23	0.928	94.29	578.67	87	900
枫香 <i>Liquidambar formosana</i> <sup>[32-33]</sup>	9	25	0.900	61.73	253.09	65	880
白栎 <i>Quercus fabri</i> <sup>[30,33]</sup>	6	24	1.208	43.10	176.72	77	840
刺楸 <i>Kalopanax septemlobus</i> <sup>[34]</sup>	6	26	1.303	84.31	344.35	66	864
樟树 <i>Cinnamomum camphora</i> <sup>[35]</sup>	10	28	1.059	98.36	403.28	71	900
伯乐 <i>Bretschneidera sinensis</i> <sup>[36]</sup>	6	26	1.106	76.33	312.82	100	890
湿地松 <i>Pinus elliotii</i> <sup>[27-28]</sup>	4	22	0.789	165.56	822.95	300	1400
笔罗子 <i>Meliosma rigida</i> <sup>[30]</sup>	6	26	1.171	43.08	172.27	81	900

\* 来源磨哨林场实测数据 From the measured data of Moshao forest farm. PsnTMin: Minimum temperature for photosynthesis; PsnTOpt: Maximum temperature for photosynthesis; FolNCon: Foliar nitrogen; SLWmax: Specific leaf mass at tip canopy; FolMsMx: Maximum specific leaf mass in summer; GDDFolS: Growing degree days (GDD) at which foliar production began; GDDFolE: GDD at which foliar production ended.

(表1)。

1.3.2 LANDIS-II 参数化 LANDIS-II 模型参数包括: 1) 树种生活史,包括树种的寿命、成熟年龄、耐阴性和耐火性、种子有效传播距离和最大传播距离、种子萌发率、萌发最小年龄和萌发最大年龄。树种的生活史参数是从实地调查和相关文献中获得,具体参数见表2; 2) 地上生物量动态,包括每10年不同树种的 SEP 和 ANPP。该参数来源于 PnET-II 模型计算结果; 3) 初始群落信息,包括初始的树种空间分布图以及相应的树种的年龄信息。树种空间分布图采用 Pléiades 卫星图像解译而成。Pléiades 高分辨率卫星具有定位精准、反应迅速、获取便利、重返周期短等特点。通过几何校正(图像配准)和图像融合后可得到 0.5 m 分辨率的多光谱图像。采用目视解译和实地调查结合的方法,利用多光谱图像颜色和纹理特征区分出森林边界,再结合实际样地调查的数据,确定森林类型;树种年龄信息源自会同站记录的人工林管理数据(包括造林时间、造林树种等); 4) 生态分区图,由于研究区树种生境差异不明显,在模拟过程中将研究区视为均质。

## 2 结果与分析

利用 PnET-II 模型模拟了 2014—2094 年不同情景下磨哨林场 14 个树种的 SEP 和 ANPP ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )。再利用 LANDIS-II 模型模拟地上生物量变化,将模拟结果分为 3 类: 人工针叶林(杉木和马尾

表 2 物种生活史特征参数

Table 2 Species life-history attributes of Moshao forest farm

物种 Species	寿命 Longevity (a)	成熟年龄 Maturity age (a)	耐阴性 Shade tolerance	耐火性 Fire tolerance	种子有效 传播距离 Effective seeding distance (m)	种子最大 传播距离 Maximum seeding distance (m)	萌发率 Reproduction probability	萌发最小 年龄 Minimum resprouting age (a)	萌发最大 年龄 Maximum resprouting age (a)
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> <sup>[37]</sup>	500	20	2	2	300	600	0.87	20	30
马尾松 <i>Pinus massoniana</i> <sup>[38]</sup>	300	8	1	2	100	200	0.28	10	15
木荷 <i>Schima superba</i> <sup>[38]</sup>	200	60	3	5	30	50	0.9	60	70
火力楠 <i>Michelia macclurei</i> <sup>[38]</sup>	1000	50	5	5	40	120	0.5	6	200
红栲 <i>Castanopsis fargesii</i>	200	30	4	4	15	25	0.52	32	35
青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> <sup>[38]</sup>	300	7	4	3	5	20	0.44	25	30
刨花润楠 <i>Machilus pauhoi</i> <sup>[38]</sup>	200	20	4	4	25	60	0.4	10	40
枫香 <i>Liquidambar formosana</i> <sup>[38]</sup>	130	8	3	3	100	375	0.5	4	100
白栎 <i>Quercus fabri</i>	120	15	4	4	20	200	0.6	5	100
刺楸 <i>Kalopanax septemlobus</i>	200	40	3	4	20	60	0.5	3	40
樟树 <i>Cinnamomum camphora</i> <sup>[35, 38]</sup>	1000	30	2	5	25	100	0.84	30	35
伯乐 <i>Bretschneidera sinensis</i>	110	31	4	1	200	500	0.79	2	15
湿地松 <i>Pinus elliotii</i> <sup>[27, 38]</sup>	500	10	1	2	80	150	0.4	12	20
笔罗子 <i>Meliosma rigida</i>	250	25	3	4	20	40	0.5	20	30

耐阴性和耐火性的范围为 1~5, 数值越大表明耐阴性和耐火性越强 The value of shade tolerance and fire tolerance was integer between 1 to 5, where 1 meant the least tolerance and 5 meant the most tolerance.

松)、人工阔叶林(木荷和火力楠)和天然阔叶林(红栲和青冈)。其中杉木和马尾松在人工针叶林中占较大的比例,占人工针叶林总面积的 99.6%。人工阔叶林

全部为木荷和火力楠,红栲和青冈占天然阔叶林面积的 77.4%。因此本研究选取这 6 个优势树种作为 3 种不同森林类型的典型代表进行分析(图 4、图 5)。

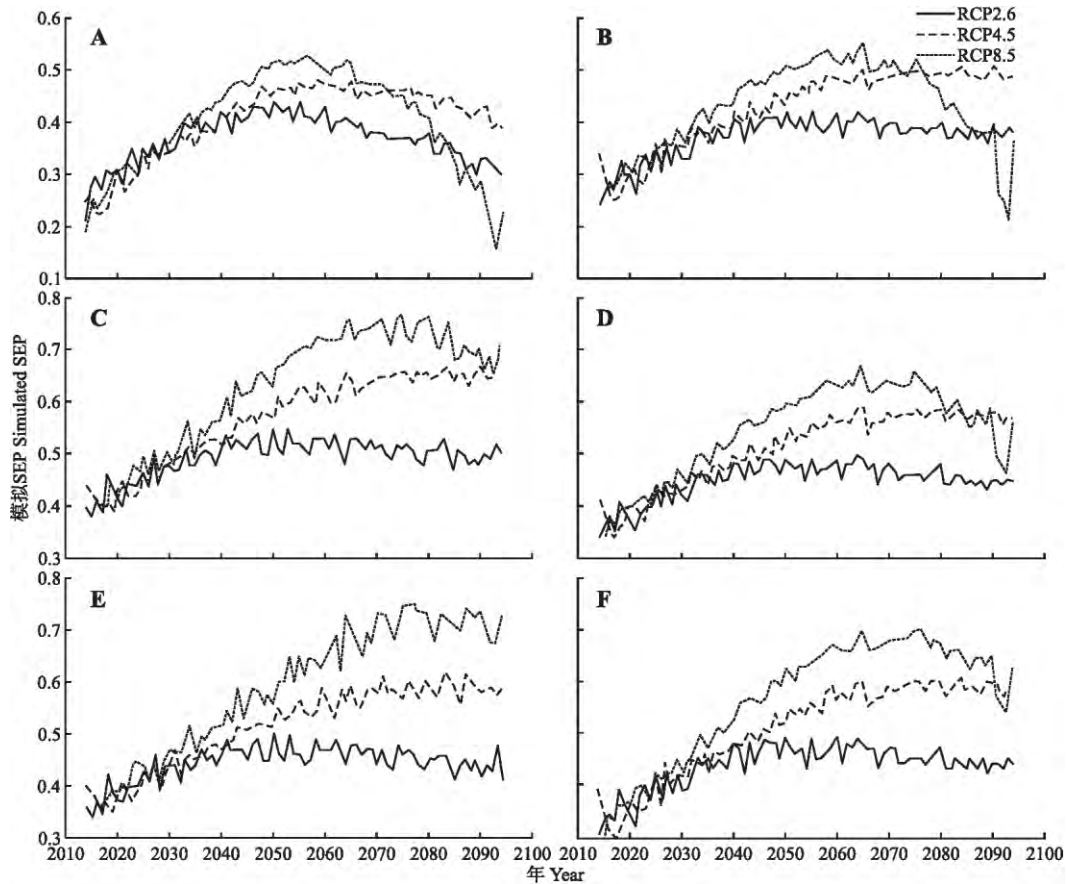


图 4 不同气候情景下 SEP 模拟结果

Fig.4 Simulated SEP under various climate scenarios.

A: 杉木 *Cunninghamia lanceolata*; B: 马尾松 *Pinus massoniana*; C: 木荷 *Schima superba*; D: 火力楠 *Michelia macclurei*; E: 红栲 *Castanopsis fargesii*; F: 青冈 *Cyclobalanopsis glauca*. 下同 The same below.

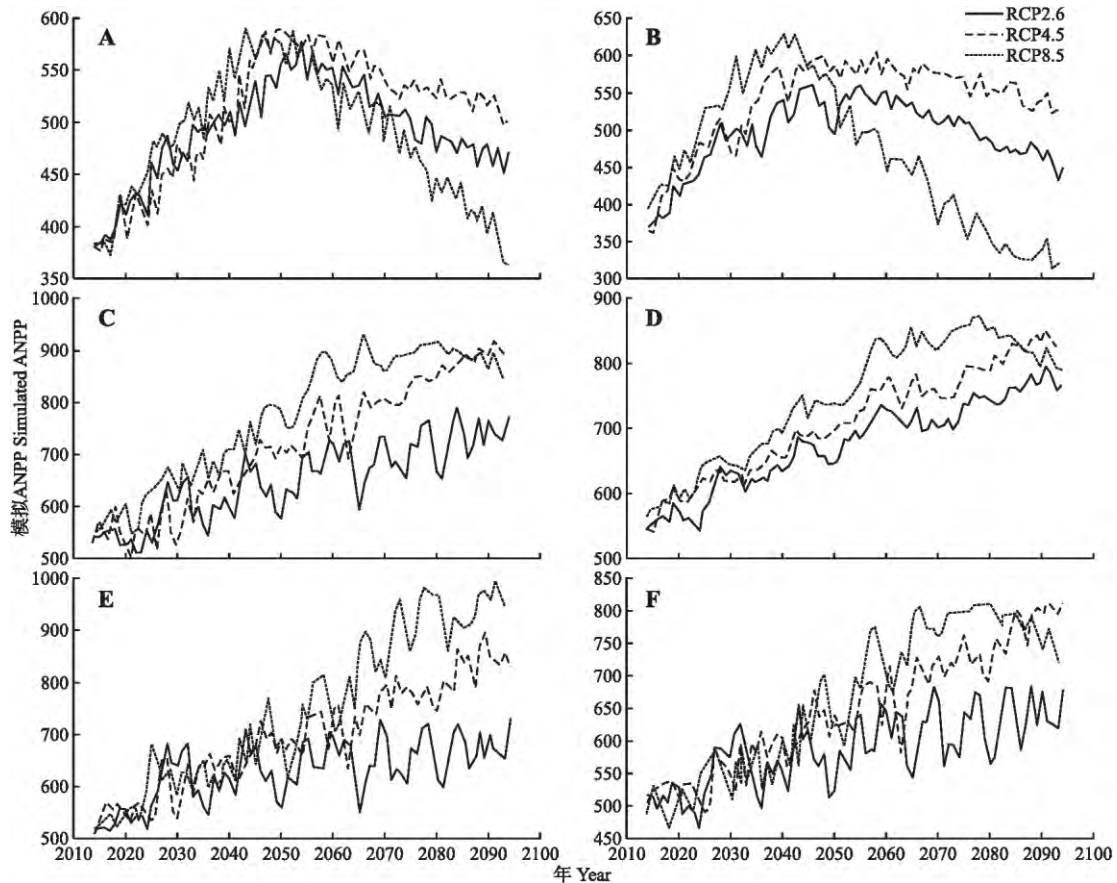


图 5 不同气候情景下 ANPP 模拟结果

Fig.5 Simulated ANPP under various climate scenarios.

## 2.1 SEP 结果

从图 4 可以看出,人工针叶林、人工阔叶林和天然阔叶林的 SEP 模拟结果表现出较大差异。对于人工针叶林,到 2094 年,杉木在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的 SEP 值比 2014 年分别增加了 42.9%、56.0% 和 21.1%; 马尾松在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的 SEP 值分别增加了 58.3%、44.1% 和 48.0%。在 2050 年之前,杉木和马尾松 SEP 在 3 种气候情景下均表现出增加的趋势。其中 RCP8.5 情景下增加最快。不同森林类型在 3 种气候情景下的 SEP 从 2060 年开始下降,降幅表现为 RCP8.5>RCP2.6>RCP4.5。对于人工阔叶林,到 2094 年,木荷在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的 SEP 值比 2014 年分别增加了 25.0%、45.0% 和 77.5%; 火力楠在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的 SEP 值分别增加了 32.4%、39.0% 和 67.6%。在 2050 年之前,3 种情景下的 SEP 变化均表现为增加趋势。2050 年以后,RCP2.6 情景下人工阔叶林的 SEP 逐渐下降,RCP4.5 情景下则先上升后趋于平稳,在 RCP8.5 情景下人工阔叶林 SEP 在 2070 年达

到峰值后下降,同时火力楠比木荷下降的更加明显。对于天然阔叶林,红栲 SEP 的绝对值要略高于青冈林。到 2094 年,红栲在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的 SEP 值比 2014 年分别增加了 13.9%、47.5% 和 100.5%; 青冈在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的 SEP 值分别增加了 46.7%、48.7% 和 113.3%。在 RCP8.5 情景下,红栲和青冈的 SEP 在 2070 年前后达到峰值,之后呈下降趋势,青冈比红栲的 SEP 下降更加明显。

从以上结果可以看出,不同森林类型对不同气候情景的响应存在差异,我们用 SEP 在 2014—2094 年间变化的绝对值表示各森林类型对气候变化的响应程度,得到:在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下,人工针叶林>天然阔叶林>人工阔叶林;在 RCP8.5 情景下,天然阔叶林>人工阔叶林>人工针叶林。

## 2.2 ANPP 结果

对于人工针叶林,到 2094 年,杉木在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下的 ANPP 值比 2014 年分别增加了 23.9% 和 33.2%,在 RCP8.5 情景下减少了 5.2%; 马尾松在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下的 ANPP 值分别

增加了 21.6%、42.7% ,在 RCP8.5 情景下减少了 19.9%。在 3 种气候情景下的变化趋势均表现为先增加后降低 ,到 2050 年达到峰值。2050 年之后 ,ANPP 值开始下降 ,降幅表现为: RCP8.5 情景>RCP2.6 情景>RCP4.5 情景。对于人工阔叶林 ,木荷的 ANPP 值波动较大且绝对值要高于火力楠。到 2094 年 ,木荷在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的 ANPP 值比 2014 年分别增加了 43.5%、63.7%和 58.6% ;火力楠在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的 ANPP 值分别增加了 40.6%、51.6%和 39.7%。对于天然阔叶林 ,到 2094 年 红栲在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的 ANPP 值比 2014 年分别增加了 41.9%、61.8%和 83.6% ;青冈在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的 ANPP 值分别增加了 31.3%、60.5%和 46.2%。

从以上结果可以看出 ,在不同气候情景下 ,不同树种、森林类型的 ANPP 对气候变化的响应存在差异 ,我们用 ANPP 在 2014—2094 年间变化的绝对值表示各森林类型对气候变化的响应程度 ,得到: 在 RCP2.6 情景下 ,人工阔叶林>天然阔叶林>人工针叶林; 在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下 ,天然阔叶林>人

工阔叶林>人工针叶林。

### 2.3 地上生物量结果

本研究通过 PnET-II 模型模拟了 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 气候情景下各树种的 SEP 和 ANPP ,将 SEP 和 ANPP 输入到 LANDIS-II 模型 Biomass-Succession 模块中 ,来模拟地上生物量的变化。本研究仅模拟了在气候变化条件下 2014—2094 年间各优势树种地上生物量及总地上生物量的变化趋势 ,以 2014 年为起始年 ,每 10 年输出一次结果 ,模拟结果见图 6。

从图 6 可以看出 ,对于人工针叶林 ,马尾松的地上生物量的绝对值要大于杉木 ,杉木和马尾松的地上生物量在 3 种气候情景下总体上呈现先升高后下降的趋势。2064 年以后 ,各气候情景下的地上生物量差异随着模拟时间的增长而逐渐显著。到 2094 年 ,地上生物量在各情景下的排序为: RCP4.5 情景>RCP2.6 情景>RCP8.5 情景。对于人工阔叶林 ,火力楠的地上生物量绝对值要明显高于木荷 ,且两种树种在 2064 年前呈现出较快的增加趋势 ,之后生物量趋于平稳 ,在 2094 年出现小幅下降。其中 ,到 2094 年 ,

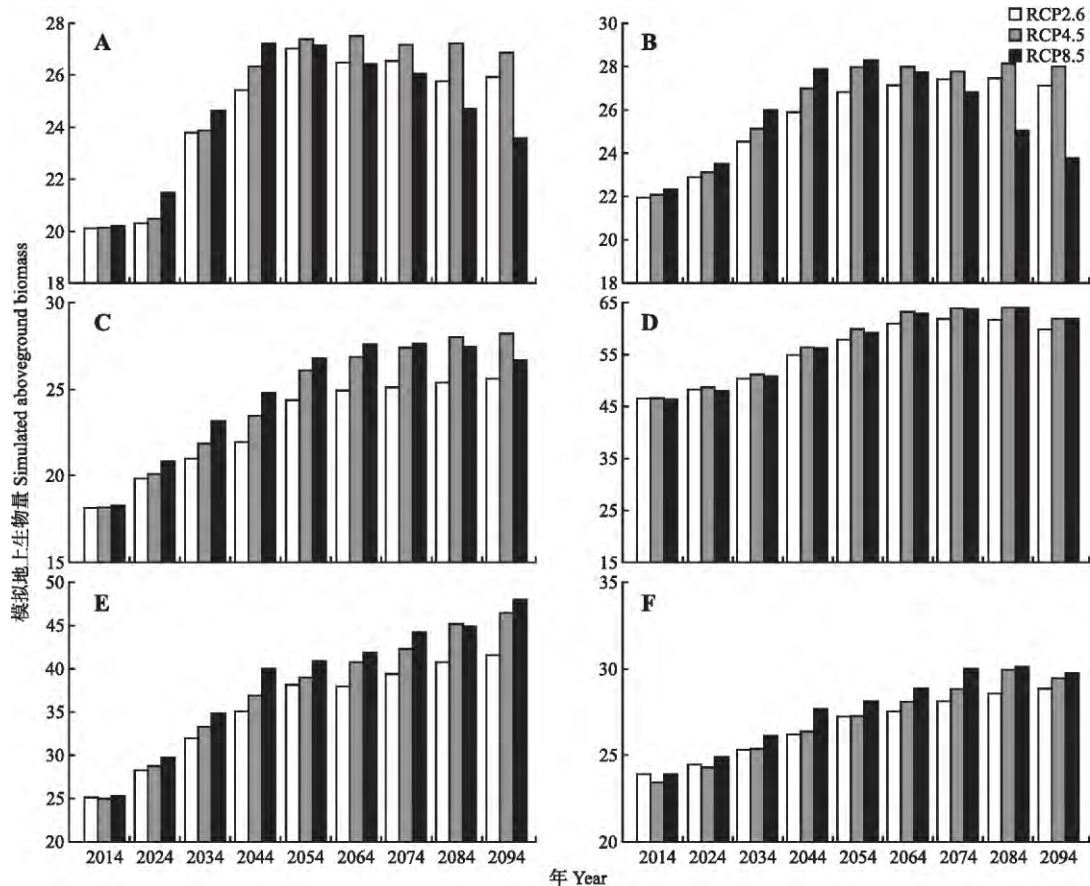


图 6 不同气候情景下不同树种地上生物量的模拟结果

Fig.6 Simulated aboveground biomass of different species under various climate scenarios.



木荷的生物量在 RCP4.5 情境下最大, 在 RCP2.6 情景下最小, 而火力楠在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的地上生物量基本一致。对于天然阔叶林, 红栲和青冈地上生物量在整个模拟期间持续上升, 在 2054 年以前增幅较大, 之后变化趋于稳定。其中, 红栲的地上生物量绝对值要明显高于青冈地上生物量的绝对值。到 2094 年, 红栲和青冈的地上生物量在各情景下的排序为: RCP8.5 情景 > RCP4.5 情景 > RCP2.6 情景。

从图 7 可以看出, 在 2014—2094 年模拟期间, 研究区森林的总地上生物量在 3 种气候情景下呈现出较大差异, 但总体上是呈逐渐增加的趋势。在 RCP2.6 情景下, 森林总地上生物量从 2014 年的  $23.80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  上升到 2094 年的  $40.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 增加了 68.2%。在 RCP4.5 情景下, 总地上生物量从 2014 年的  $23.54 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  上升到 2084 年的  $43.76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 2084—2094 年间有小幅下降, 到 2094 年降低到  $42.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 2094 年比 2014 年增加了 79.3%。在 RCP8.5 情景下, 总地上生物量在 2074 年前呈现逐渐增加的趋势, 之后有所下降, 森林总地上生物量从 2014 年的  $23.78 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  增加到 2074 年的  $42.73 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 到 2094 年总地上生物量下降到  $41.06 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 2094 年比 2014 年增加了 72.6%。到 2094 年, 各气候情景下森林总地上生物量的排序为: RCP4.5 情景 > RCP8.5 情景 > RCP2.6 情景。

根据以上的研究结果可以看出, 气候变化对森林生物量有显著影响, 不同的森林类型对不同气候变化程度的响应也存在差异。由于 RCP8.5 情景下的增温明显大于其他情景, 因此, 我们认为适当的增温将有助于未来研究区森林总地上生物量的积累, 但过度的增温也可能会阻碍森林的生产和生态功能的持续发展。

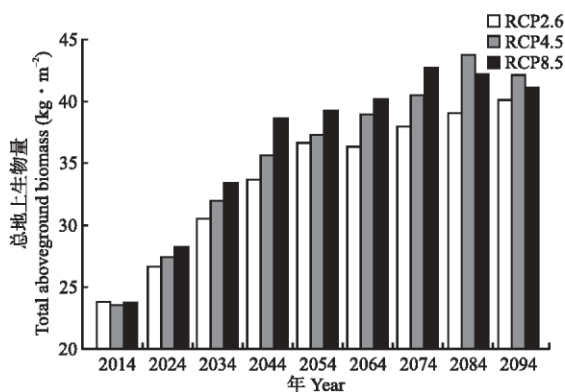


图 7 研究区不同情景下总地上生物量的模拟结果

Fig.7 Simulated total biomass under different climate scenarios in the study area.

### 3 讨 论

本文以我国南方红壤丘陵区会同森林生态实验站磨哨林场为研究对象, 在景观尺度上运用模型模拟方法预估了 3 种气候情景下森林尤其是人工林的 ANPP、SEP 以及地上生物量的变化。在模型模拟结果中, 我们选择 ANPP、SEP 和地上生物量指标来表征气候变化下的森林变化。我们认为这 3 个指标相互影响, 紧密联系, 是森林结构优劣和功能高低的最直接表现。对于 ANPP, 它表征的是树种在单位时间单位面积上利用光合作用把无机碳固定、转化为有机碳这一过程的能力。而地上生物量正是树种在一定时间内积累的有机质总量, 也就是说 ANPP 的值决定了树种、森林地上生物量的聚集。而对于 SEP, 它是在一个特定立地条件下某树种在该地区建立的可能性, 其值大小反映了该树种向外扩散迁移建立的可能性, 从而决定了该地区森林的 ANPP 及地上生物量。研究显示, 不同森林类型在不同气候情景下的变化差异, 而各情景中温度又是各情景差异的显著变量。从 SEP 和 ANPP 的结果可以看出, 几乎所有的树种和森林类型均显示了随着温度升高程度越高值越大的情况。这主要是由于适当的温度和降水的增加会有利于该地区这些优势树种的生长与建立。但是, 对于少数树种和森林类型(如人工针叶林), 它们在 2050 年左右的 RCP8.5 情景下出现了明显的下降。这主要是由于在 RCP8.5 情景下, 温度升高了近  $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这种变化已经超过了树种的最适光合温度, 影响了树种的光合作用并导致树种及森林生产力下降, 这一结果也与其他人在南方红壤丘陵区的研究相一致<sup>[39]</sup>。对于地上生物量变化, 结果显示了随着气温升高森林生物量聚集逐渐缓慢的变化过程, 这主要是由 SEP 和 ANPP 以及森林类型分布的面积所决定的。

本研究在大量的数据收集和模型参数化的基础上, 总体模拟结果较为可信。但同时受数据来源和模型的限制等影响, 模型模拟仍存在一定的不确定性。首先是气候变化的预估结果的不确定性。对于 RCPs 气候数据集, 我们应用的是国家气候中心提供的将 21 个全球气候模式平均后的结果, 该数据集是月气温降水的平均值, 而不包括一些极端气候事件的模拟, 这会使数据结果存在一定的不确定性。此外, 对于森林景观模型来说, 模型验证存在一定困难。森林景观模型验证需要大尺度长时间的观测数据来对模拟结果进行验证, 然而在实际野外观测过程中

这些数据难以获取. 本文的采用 LANDIS-II 模型, 已有学者开展过不确定性分析, 包括灵敏度分析、不确定性分析和模型结构分析等. 同时, 该模型目前已经被广泛应用于世界各地不同森林中, 其结果有效性在各研究中均有体现<sup>[11-13]</sup>. 本文的目标是为了模拟未来气候变化对森林地上生物量在景观尺度上影响的总体趋势, 而不是对森林动态变化的一个准确预测. 因此, 我们认为对研究区不同未来气候情景下森林地上生物量的模拟结果可行, 并具有一定的指导作用.

在实际森林管理过程中, 气候变化的适应性是森林可持续管理的重要组成部分. 针对我们的研究区甚至南方红壤丘陵区人工林管理现状, 同时结合本文的研究结果, 我们提出几点区域森林管理的适应性建议. 首先, 在确保区域木材生产量的同时, 应选择适应性更强的树种作为人工林优先种植的树种. 将火力楠等阔叶树种适当地引入到一些人工针叶纯林中以提升其应对气候变化的能力. 最后, 在适当的区域采用分区管理的方式来提升林业管理效率, 针对不同分区的自然条件制定特定的分区管理方案, 最终保障南方人工林的可持续发展.

#### 参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2013
- [2] Zhang H (张华), Huang J-P (黄建平). Interpretation of the IPCC Fifth assessment report on anthropogenic and natural radiative forcing. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis* (气候变化研究进展), 2014, **10**(1): 40-44 (in Chinese)
- [3] Zhao T-Q (赵同谦), Ouyang Z-Y (欧阳志云), Zheng H (郑华), et al. Forest ecosystem services and their valuation in China. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2004, **19**(4): 480-491 (in Chinese)
- [4] Post WM, Emanuel WR, Zinke PJ, et al. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, **298**: 156-159
- [5] Zhu J-H (朱建华), Hou Z-H (侯振宏), Zhang Z-J (张治军), et al. Climate change and forest ecosystem: Impacts, vulnerability and adaptation. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2007, **43**(11): 138-145 (in Chinese)
- [6] Ning Y-L (宁攸凉), Wu S-R (吴水荣), Li Z-Y (李智勇), et al. Effects of climate change on China forest ecosystems: An assessment based on regional vegetation types. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2013, **32**(8): 1967-1972 (in Chinese)
- [7] Hao J-F (郝建锋), Jin S (金森), Ma Q-Y (马钦彦), et al. The influence of climate change on the structure and productivity of the typical forest ecosystem in the warm temperate zone. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2008, **22**: 63-69 (in Chinese)
- [8] Botkin DB, Janak JF, Wallis JR. Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *Journal of Ecology*, 1972, **60**: 849-872
- [9] Liu J, Ashton PS. FORMOSAIC: An individual-based spatially explicit model for simulating forest dynamics in landscape mosaics. *Ecological Modelling*, 1998, **106**: 177-200
- [10] Yan XD, Zhao SD, Yu ZL. Modeling growth and succession of northeastern China forests and its applications in global change studies. *Journal of Plant Ecology*, 2000, **24**: 1-8
- [11] Gustafson EJ, Shvidenko AZ, Sturtevant BR, et al. Predicting global change effects on forest biomass and composition in south-central Siberia. *Ecological Applications*, 2010, **20**: 700-715
- [12] Thompson JR, Foster DR, Scheller RM, et al. The influence of land use and climate change on forest biomass and composition in Massachusetts, USA. *Ecological Applications*, 2011, **21**: 2425-2444
- [13] Xu CG, Gertner GZ, Scheller RM. Potential effects of interaction between CO<sub>2</sub> and temperature on forest landscape response to global warming. *Global Change Biology*, 2007, **13**: 1469-1483
- [14] Ma J (马俊), Bu R-C (布仁仓), Deng H-W (邓华卫), et al. Simulating climate change effect on aboveground carbon sequestration rates of main broadleaved trees in the Xiaoxing'an Mountains area, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(9): 2449-2459 (Chinese)
- [15] Li X-N (李晓娜), He H-S (贺红士), Wu Z-W (吴志伟), et al. Responses of boreal forest landscape in northern Great Xing'an Mountains of Northeast China to climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(12): 3227-3235 (in Chinese)
- [16] Zhou Y-F (周宇飞), He H-S (贺红士), Bu R-C (布仁仓), et al. Modeling of forest landscape change in Xiaoxing'anling Mountains under different planting proportions of coniferous and broadleaved species. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(8): 1775-1781 (in Chinese)
- [17] Hu Y-M (胡远满), Xu C-G (徐崇刚), Chang Y (常禹), et al. Application of spatially explicit landscape model (LANDIS): A case researches in Huzhong area. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(9): 1846-1857 (in Chinese)
- [18] Liu SR, Wu SR, Wang H. Managing planted forests for multiple uses under a changing environment in China. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2014, **44**: 1-10
- [19] Lin K-H (林考焕), Ye G-F (叶功富). Review of the stability studies on plantation ecosystem. *Journal of Southwest Forestry University* (西南林业学院学报), 2010, **30**(5): 88-94 (in Chinese)
- [20] Xiao F-M (肖复明), Wang S-L (汪思龙), Fan S-H (范少辉), et al. Mensuration of respiration amount in the community of secondary evergreen broadleaved forests in Huitong County, Hu'nan Province. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2006, **28**(2): 40-44 (in Chinese)

- [21] Liao L-P (廖利平), Gao H (高洪), Yu X-J (于小军), *et al.* Nutrient retranslocation in fine roots of *Cunninghamia lanceolata*, *Alnus cremastogyne* and *Kalopanax septemlobum* in the mixed plantations: A pilot study. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11**(2): 161-164 (in Chinese)
- [22] Tang Q-Z (唐全忠). The status and development strategies of the sparse forest in Huitong County. *Hunan Forestry Science & Technology* (湖南林业科技), 2002, **29**(1): 59-60 (in Chinese)
- [23] Deng S-J (邓仕坚), Liao L-P (廖利平), Wang S-L (汪思龙), *et al.* Bioproductivity of *Castanopsis hysrix* - *Cyclobalanopsis glauca* - *Machilus pauhoi* community in Huitong, Hunan. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11**(5): 651-654 (in Chinese)
- [24] Aber JD, Federer CA. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems. *Oecologia*, 1992, **92**: 463-474
- [25] Scheller RM, Domingo JB, Sturtevant BR, *et al.* Design, development, and application of LANDIS-II, a spatial landscape simulation model with flexible temporal and spatial resolution. *Ecological Modelling*, 2007, **201**: 409-419
- [26] Wu Z-F (吴正方). Assessment of eco-climatic suitability and climate change impacts on broad-leaved Korean pine forest in Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(5): 771-775 (in Chinese)
- [27] Li X-R (李轩然), Liu Q-J (刘琪璟), Cai Z (蔡哲), *et al.* Specific leaf area and leaf area index of conifer plantations in Qianyanzhou station of subtropical China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2007, **31**(1): 93-101 (in Chinese)
- [28] Ma Z-Q (马泽清), Liu Q-J (刘琪璟), Zeng H-Q (曾慧卿), *et al.* Estimation of leaf area index of planted forests in subtropical China by photogrammetry. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(5): 1971-1980 (in Chinese)
- [29] Liu YP, Yu DY, Xun B, *et al.* The potential effects of climate change on the distribution and productivity of *Cunninghamia lanceolata* in China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**: 135-149
- [30] Bai K-D (白坤栋), Jiang D-B (蒋得斌), Wan X-C (万贤崇). Photosynthesis-nitrogen relationship in evergreen and deciduous tree species at different altitudes on Mao'er Mountain, Guangxi. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(16): 4930-4938 (in Chinese)
- [31] Zhan X-Y (展小云), Yu G-R (于贵瑞), Sheng W-P (盛文萍), *et al.* Foliar water use efficiency and nitrogen use efficiency of dominant plant species in main forests along the North-South Transect of East China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(3): 587-594 (in Chinese)
- [32] Zhang J-G (张继光), Fu S-L (傅声雷), Wen D-Z (温达志), *et al.* Relationships of key leaf traits of 16 woody plant species in low subtropical China. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 2009, **17**(4): 395-400 (in Chinese)
- [33] Huang M (黄玫), Ji J-J (季劲钧). The spatial-temporal distribution of leaf area index in China: A comparison between ecosystem modeling and remote sensing reversion. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(11): 3057-3064 (in Chinese)
- [34] Xia J-B (夏江宝), Liu X-R (刘信儒), Wang G-X (王贵霞), *et al.* Effects of soil moisture and microclimate factors on gas exchange parameters of *Kalopanax septemlobus* Koidz. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2005, **19**(2): 179-183 (in Chinese)
- [35] Zhang C-C (张赐成), Han G (韩广), Guan H-D (关华德), *et al.* Responses of optimal photosynthesis temperature to changes in ambient temperature for *Cinnamomum camphora* and *Osmanthus fragrans*. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2014, **33**(11): 2980-2987 (in Chinese)
- [36] Wang J (王娟), Liu R-L (刘仁林), Liao W-M (廖为明). A study on growth and development rhythm, phenological characteristics of *Bretschneidera sinensis*. *Jiangxi Science* (江西科学), 2008, **26**(4): 552-555 (in Chinese)
- [37] Song Y-Q (宋永庆). Studies on mature age in economy of *Cunninghamia lanceolata* plantation. *Jiangxi Forestry Science and Technology* (江西林业科技), 1993(1): 1-6 (in Chinese)
- [38] China Forest Editorial Board (中国森林编辑委员会). *China Forest* (volumes 2, 3). Beijing: China Forestry Press, 2000 (in Chinese)
- [39] Ding Q-F (丁庆福), Wang J-B (王军邦), Qi S-H (齐述华), *et al.* Spatial patterns of vegetation net primary productivity in Jiangxi Province of China in relation to climate factors. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2013, **32**(3): 726-732 (in Chinese)

作者简介 戴尔阜,男,1972年生,研究员,博士生导师。主要从事自然地理综合、气候变化及其区域响应、土地利用变化模拟研究。E-mail: daief@ignsr.ac.cn

责任编辑 肖红

戴尔阜,周恒,吴卓,等. 气候变化对我国南方人工林地上生物量影响的模拟研究——以会同生态站磨哨实验林场为例. *应用生态学报*, 2016, **27**(10): 3059-3069

Dai E-F, Zhou H, Wu Z, *et al.* Simulation study on the effects of climate change on aboveground biomass of plantation in southern China: Taking Moshao forest farm in Huitong Ecological Station as an example. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(10): 3059-3069 (in Chinese)