

# 采伐与人工更新对红壤丘陵区森林面积和地上生物量的影响模拟

## ——以会同县磨哨林场为例

戴尔阜<sup>1,2</sup>, 汪晓帆<sup>3</sup>, 朱建佳<sup>4</sup>, 王晓莉<sup>5</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 拉萨高原生态系统研究站, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国国土勘测规划院, 自然资源部土地利用重点实验室, 北京 100035; 4. 河北科技师范学院园艺科技学院, 秦皇岛 066004; 5. 国家海洋信息中心, 天津 300171)

**摘要:** 我国人工林生态系统正面临着结构退化、功能降低等问题, 迫切需要通过合理的森林管理方案实施有效的管理措施加以改善。本文以湖南省会同县磨哨林场为研究区, 应用生态系统过程模型 PnET-II 和森林景观模型 LANDIS-II, 采用情景模拟的方式研究未来 100 年低、中、高强度的采伐措施以及人工更新对森林面积和地上生物量的影响。结果表明: (1) 随着采伐强度增加, 人工针叶林面积持续减少、森林 AGB 下降幅度加大; (2) 人工更新措施能够使人工针叶林面积保持稳定, 促进其 AGB 积累, 有利于人工林更新与生长; (3) 对人工林采取中等强度采伐且实施伐后人工更新的管理方案有利于我国南方以杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松 (*Pinus massoniana*) 为主要树种的人工林地区实现森林可持续经营。

**关键词:** 森林管理; 采伐; 人工更新; 森林面积; 地上生物量

森林是全球陆地生态系统的主体, 具有重要的生态系统服务功能<sup>[1,2]</sup>。我国森林资源总量不足, 其中人工林占我国森林面积的 1/3, 长期以来存在经营方式粗放、地力衰退严重、木材生产和生态功能不可持续等问题<sup>[3,4]</sup>, 亟需通过科学合理的森林管理措施实现生态与生产功能优化。森林采伐与人工更新是森林管理的主要手段, 能够直接改变森林生态系统的结构和功能<sup>[5]</sup>, 不同采伐方式以及采伐强度对森林的景观格局<sup>[6]</sup>和森林生物量<sup>[7]</sup>的影响差异十分明显。采伐从不同尺度上对森林生态系统结构产生影响, 能够改变森林林分结构和景观结构, 使物种组成结构发生改变, 景观格局破碎化<sup>[8,9]</sup>。目前我国很多地区仍然保留着传统的粗放式经营模式, 不利于我国人工林的可持续经营。研究不同采伐模式对区域森林生态系统结构和功能的影响, 阐明不同采伐方案下人工林的响应机理与过程, 将为实现森林管理模式的科学化与合理化提供科技支撑。

近年来, 随着模拟方法在长期生态学、景观生态学上的发展, 景观生态模型从数学模型的理论探讨发展到林窗模型分析林分尺度问题, 直到空间景观模型的出现, 开始研究更大空间尺度的森林生态问题, 进而发展到结合生态系统过程的模型, 实现了森林景

收稿日期: 2019-05-10; 修订日期: 2020-04-26

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC1502903, 2018YFC1508805); 中国科学院 A 类战略性先导科技专项 (XDA19040304); 国家自然科学基金项目 (41530749)

作者简介: 戴尔阜 (1972-), 男, 甘肃平凉人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事综合自然地理研究、气候变化及其区域响应以及土地利用变化模拟研究。E-mail: daief@igsnr.ac.cn

通讯作者: 汪晓帆 (1987-), 女, 吉林吉林人, 博士, 高级工程师, 主要从事综合自然地理、土地生态及土地利用变化研究。E-mail: wangxf.12b@igsnr.ac.cn

观模型在大时空尺度、多因子驱动、结构与过程结合方面的研究<sup>[10]</sup>。多因子驱动的森林景观模型多用于模拟森林生长演替过程、自然和人为干扰过程对森林的影响<sup>[11]</sup>，并且在采伐对森林生态系统影响的研究方面开展了大量工作<sup>[12,13]</sup>。这类模型能够通过树种的空间分布、森林群落与树种组成的动态变化及其相互作用模拟森林演替，并根据研究需要选择所需的自然以及人为干扰过程模拟其对森林生态系统的影响<sup>[14,15]</sup>。对于森林管理的相关研究，其优点在于能够从景观结构、生物量积累、森林更新、树种生长等方面全面反映森林管理对森林生态系统的影响<sup>[3,15]</sup>，实现对大空间尺度森林长期影响的模拟，而且可以实现采伐方案的灵活设计。本文采用的威斯康辛大学麦迪逊分校开发的LANDIS-II模型，此模型主要用于模拟森林演替、种子传播、自然干扰和人类经营管理对森林结构和功能的影响<sup>[10]</sup>。

中国南方红壤丘陵地区是我国重要的生态类型区和人工林产区<sup>[3]</sup>，选择该区域内的典型样区进行森林管理对人工林的影响研究对我国南方以杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 为主的人工林的可持续经营具有示范意义。因此，本文以具有长期观测数据积累的湖南省会同森林生态实验站磨哨林场作为研究区，应用LANDIS-II模型与PnET-II模型，模拟森林生态系统在低、中、高采伐强度以及是否采用人工更新措施下，未来100年人工针叶林、人工阔叶林和天然林的面积与地上生物量 (Aboveground Biomass, AGB) 动态变化情况。研究目标：(1) 明确研究区人工针叶林、人工阔叶林和天然林的分布面积与AGB变化特征；(2) 分析低、中、高采伐强度对人工针叶林、人工阔叶林和天然林面积与AGB的影响；(3) 研究人工林伐后人工更新措施对人工林更新、生长以及持续经营的重要意义；(4) 提出对我国南方以杉木林为主要人工林树种地区森林管理的适宜采伐和人工更新方案。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

磨哨林场位于湖南省会同县境内 (26°50'40"~26°51'20"N, 109°36'0"~109°37'0"E)，总面积为0.98 km<sup>2</sup>，是中国科学院会同森林生态实验站 (会同站) 的实验林场，属于中亚热带湿润季风气候，气候温暖，雨量充沛，1998—2013年平均温度为16.36℃，平均降水量为1137.32 mm (据会同站自动气象站观测资料)，降水主要集中在夏季，具有四季分明、雨热同季、无霜期长等特点。研究区以低山丘陵地貌为主，海拔高度为300~580 m，坡度多在25~35°之间，地势由西北向东南逐渐降低，林地土壤为山地黄壤，母质以板页岩为主。该区域地带性植被是以栲 (*Castanopsis* spp.) 和石栎 (*Lithocarpus* spp.) 属为主的亚热带常绿阔叶林。在长期人类活动的影响下，自然植被受到破坏，形成了以杉木和马尾松 (*Pinus massoniana*) 为主的人工林。研究区内天然次生阔叶林占总森林面积的52.61%、人工林占47.39%，其中天然林的优势种有：红栲 (*Castanopsis fargesii*)、樟树 (*Cinnamomum camphora*)、青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*)、白栎 (*Quercus fabri*)、枫香 (*Liquidambar formosana*) 等；人工林除杉木外，还有马尾松、火力楠 (*Michelia macclurei* Dandy) 等纯林以及杉木与阔叶树、马尾松与阔叶树的混交林 (图1)。

### 1.2 模型介绍

本文采用森林景观模型LANDIS-II<sup>[10,16]</sup>与生态系统过程模型PnET-II<sup>[17]</sup>，模拟研究未来

100年森林管理对研究区森林生态系统的影响。LANDIS-II模型能够将自然干扰(如风、火、虫)、人为干扰(如采伐、人工更新)与森林演替过程相结合,模拟森林景观格局、物种组成、生物量、碳氮循环的动态变化<sup>[18-20]</sup>,已广泛应用于气候变化及森林管理对森林生态系统影响研究<sup>[12,21,22]</sup>。LANDIS-II模型把景观看作由相同大小的像元组成的格网,每个像元都有自己的物种组成及干扰特征;每个像元被归入环境相似的生态区,在生态区内树种的生长情况和抗干扰的能力取决于树种特有的物种生活史参数、在特定环境下的生长速度和种子萌发能力<sup>[10]</sup>。LANDIS-II模型以10年为一个年龄级来划分同一树种的年龄组,记录树种在栅格中的出现或者缺失,比如1~10年、11~20年的杉木记录为杉木10年龄组、杉木20年龄组。LANDIS-II模型通过演替模块模拟树木的生长、种子传播、衰老死亡等过程,同时可以选用干扰模块<sup>[10]</sup>,在森林演替基础上叠加不同干扰的影响。模拟过程中,树种生长速率由树种的地上净初级生产力(aboveground net primary productivity, ANPP)和物种建群系数(species establishment probability, SEP)决定,其中代表SEP是指某一树种在特定的自然环境条件下,林木生长的可能性,取值范围在0~1。PnET-II模型能在特定的土壤、气候和水文条件下对林木的生长进行模拟,用于估算物种的SEP及森林生态系统最大生产潜力(maximum ANPP, ANPP<sub>MAX</sub>)<sup>[23,24]</sup>,估算结果可作为LANDIS-II模型的重要输入参数用于森林生长模拟及不同树种群落AGB的估算<sup>[16]</sup>。

本文应用LANDIS-II模型中的4个模块模拟未来100年的森林动态,其中Age-only Succession模块仅对森林生长进行模拟,不考虑其他干扰或环境变量的影响,用于没有采伐措施的对照情景。Base Harvest模块即采伐模块,通过选择性地移除一定年龄级的物种来模拟森林管理,用于模拟不同采伐强度和人工更新情景的模拟。Biomass Succession以及Biomass Harvest模块能够模拟森林生长过程中地上生物量的积累、变化情况,其中Biomass Harvest模块与Harvest模块的采伐情景设置一致,模拟采伐与人工更新情景森林地上生物量动态变化。因此,本文应用LANDIS-II模型核心模块及其扩展模块模拟不同森林管理方案下未来100年森林面积与AGB的动态变化情况。

### 1.3 模型参数化

LANDIS-II模型以初始森林群落作为模拟的起点,初始森林群落图记录模拟初始年份的森林群落分布情况。本文解译了0.5 m分辨率的Pleiades卫星图像(时相为2014年2月2日),并通过野外实地调研对解译结果进行校正,得到磨哨林场2014年森林小班图。将磨哨林场森林小班图栅格化(分辨率为10 m×10 m),作为LANDIS-II模型的初始森林群落图。初始群落图的属性数据中,输入栅格内林分优势树种及其年龄。树种由野外实地调查结果中各森林小班的主要树种确定,树种年龄由磨哨林场人工林人工更新年

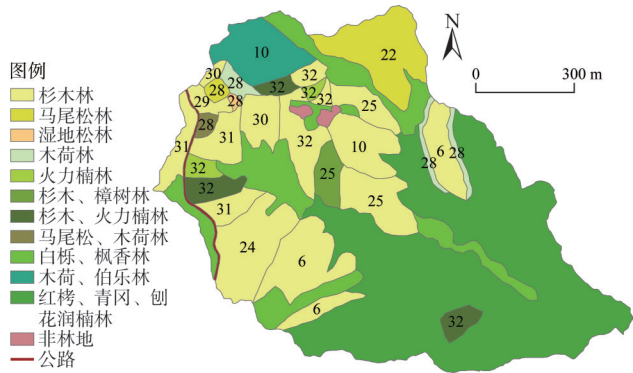


图1 磨哨林场森林类型

Fig. 1 Spatial distribution of forest types in Moshao forest farm

份、天然林平均树龄确定。根据研究区主要林木类型,本文共选取了15种主要乔木建群种来代表磨哨林场森林的主要树种,根据LANDIS-II模型需要,通过会同站提供的实测数据、野外调研数据、咨询当地专家、查找文献<sup>[25-29]</sup>等方式确定树种生活史参数(表1)。由于磨哨林场面积较小,相对海拔高度变化不足300 m,区域自然条件差异对树种生长造成的影响较小,因此本文将磨哨林场视为一个生态区,即假设研究区内的环境条件相同。

表1 磨哨林场主要树种生活史参数

Table 1 Life history parameters of main species of Moshao forest farm

树种	寿命/年	结实年龄/年	耐荫性	耐火性	种子有效传播距离/m	萌条率
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	200	10	3	1	50	0.35
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	200	10	3	2	200	0
火力楠 <i>Michelia macclurei</i>	300	10	3	2	200	0
红栲 <i>Castanopsis fargesii</i>	300	20	4	4	20	0.35
木荷 <i>Schima superba</i>	500	30	4	4	20	0.4
湿地松 <i>Pinuselliottii</i>	300	30	4	4	40	0.6
刨花润楠 <i>Machilus pauhoi</i>	200	30	4	4	30	0.6
伯乐 <i>Bretschneidera sinensis</i>	200	30	4	3	20	0.5
青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	200	7	4	3	10	0.4
樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	300	15	3	3	20	0.35
白栎 <i>Quercus fabri</i>	300	15	3	3	10	0.35
刺楸 <i>Kalopanax septemlobus</i>	300	20	3	4	20	0.4
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	200	8	3	3	100	0.5
笔罗子 <i>Meliosma rigida</i>	300	8	4	3	20	0.5

注:耐荫性、耐火性取值范围1~5;萌条率取值范围0~1。

PnET-II模型需要输入气象数据、物种参数、立地条件等数据<sup>[23]</sup>。立地条件参数中的土壤属性数据(土壤碳、田间持水量、萎蔫系数)来自磨哨林场土壤实测数据;物种参数的确定依据磨哨林场多年样地观测数据及研究组2014年7月、11月野外调查数据(表1);气候数据(包括月最低气温、月最高气温、月降水、辐射量数据)来源于磨哨林场气象观测站1998—2013年观测数据,取观测数据的多年月平均值作为模型初始气候输入数据。应用PnET-II模型估算历史平均气候条件下磨哨林场主要树种的SEP与ANPP值。研究模拟未来100年磨哨林场在不同森林管理情景下的动态变化情况,以10年为模拟步长,每10年输出森林景观、森林地上生物量结果。

#### 1.4 森林管理模式设计

磨哨林场作为会同站的实验林场,实际经营管理模式以科研需求、试验观测要求为主,林场内人工纯林、人工混交林、天然林等森林类型均有分布,通过该实验林场观测、实验,为我国南方红壤丘陵区人工林长期持续经营提供科学参考。为了突出本研究对我国南方人工林持续经营的实际意义,将其视为我国南方红壤丘陵区森林代表进行森林经营管理模式的设计。本文重点探讨的森林经营管理方式为采伐和人工更新,其中采伐能够实现木材生产并且能够一定程度上促进森林的更新,而人工更新是保证人工林



生长的重要措施。为了研究这两种森林经营管理措施对磨哨林场森林生态系统的影响, 结合我国南方人工林管理方式设计森林管理模式(表2), 设置了三种程度的采伐强度(低强度采伐、中强度采伐、高强度采伐)以及是否采取人工更新措施。

表2 磨哨林场森林管理模式

Table 2 Forest management scenarios simulated in LANDIS-II

模式	天然林采伐			人工林采伐			人工更新 (Y/N)
	比例/%	斑块/hm <sup>2</sup>	年龄/年	比例/%	斑块/hm <sup>2</sup>	年龄/年	
NH	—	—	—	—	—	—	N
LH	5	0.01	杉木31	10	0.01	杉木21	N
LH+AR	5	0.01	马尾松36	10	0.01	马尾松31	Y
MH	5	0.01	湿地松31	20	0.05	湿地松21	N
MH+AR	5	0.01	速阔21	20	0.05	速阔14	Y
HH	5	0.01	中阔36	30	0.1	中阔26	N
HH+AR	5	0.01	慢阔51	30	0.1	慢阔41	Y

注: NH为无采伐模式; LH为低强度采伐; MH为中强度采伐; HH为高强度采伐; LH+AR为低强度采伐+人工更新; MH+AR为中强度采伐+人工更新; HH+AR为高强度采伐+人工更新; 采伐年龄来源《湖南省林木采伐区划调查设计技术规定》; 人工更新Y代表实施, N代表不实施。

应用LANDIS-II模型的Harvest模块进行森林管理模式的模拟, 模拟的采伐措施为选取树龄满足要求的林地, 在其中按比例随机选择采伐斑块, 采伐斑块内进行主伐。模型需要输入森林管理区, 每个森林管理区采取不同的管理方案。根据磨哨林场的森林类型图, 将研究区划分为包括天然林保护区(白栎—枫香林、红栲—青冈—刨花润楠林)、人工针叶林采伐区(杉木林、马尾松林、湿地松林)、人工混交林采伐区(杉木混交林、马尾松混交林)、人工阔叶林采伐区共8个森林管理区。天然林保护区以森林保护为主要目的, 采用低强度的采伐干扰, 以促进森林更新; 人工林采伐区以木材生产兼顾生态功能保护为目的, 采用不同强度的采伐和人工更新措施, 以获取木材并使人工林达到可持续经营的要求。采伐选择择伐的方式, 采伐满足年龄的森林; 人工更新则是人工林伐后种植原人工林树种。依据《森林采伐更新管理办法》及《湖南省林木采伐区划调查设计技术规定》中对于商品林、公益林等不同用途森林采伐更新的规定, 综合考虑森林用途及树种差异, 模型模拟采用10年为采伐间隔, 选取采伐面积比例、采伐斑块面积作为采伐变量设计采伐方案。

## 2 结果分析

分析不同管理模式, 未来100年(2014—2114年)磨哨林场森林面积和森林AGB变化情况, 对比森林管理措施对人工针叶林(简称针叶林)、人工阔叶林、天然次生阔叶林(简称天然林)的影响差异, 分析在不同森林管理方案下三种森林类型在面积和AGB上的区别。

### 2.1 森林面积

森林面积在不同的森林管理模式, 未来100年变化不大, 其中LH、MH、HH三种采取伐后自然更新模式的森林面积略有降低, 且随着采伐强度的增加面积减少幅度增加(图2、图3)。在NH模式下(图2), 天然林面积随时间逐渐增加, 至模拟第100年增加

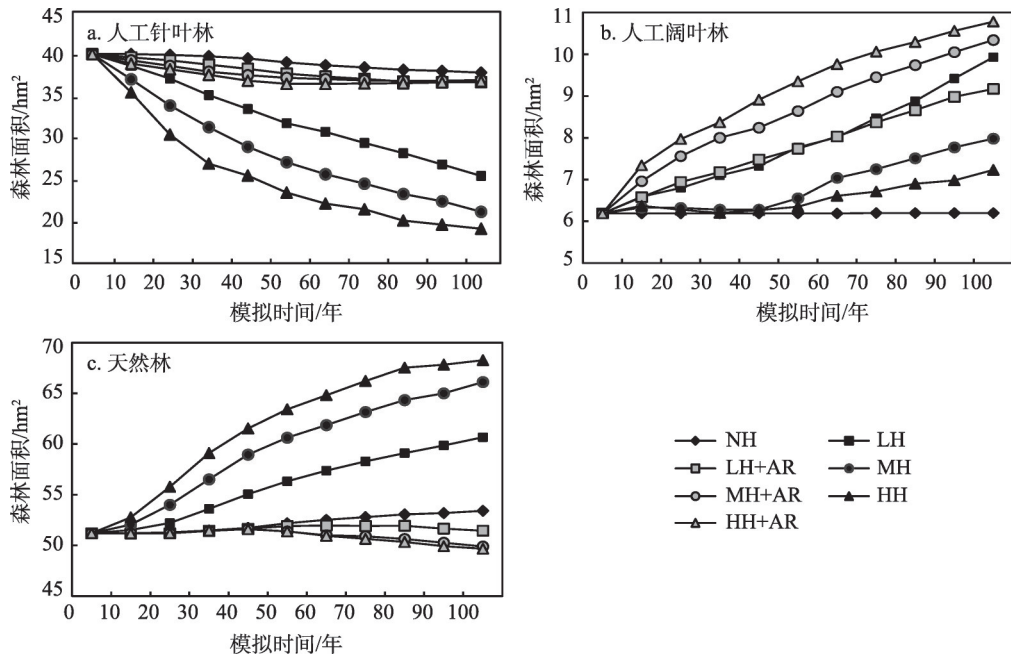
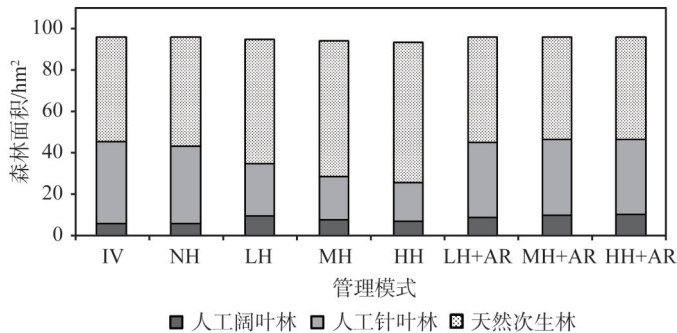


图2 不同森林管理模式三种类型森林面积变化情况

Fig. 2 Dynamic changes of areas of three forest types under forest management scenarios



注：IV为初始值；NH、LH、MH、HH、LH+AR、MH+AR、HH+AR分别代表对应森林管理模式模拟第100年森林面积值。

图3 不同森林管理模式三种类型森林面积组成

Fig. 3 Areas of three forest types under forest management scenarios

2.21 hm<sup>2</sup>；针叶林面积逐渐减少，被天然林取代，或形成以阔叶林为主的混交林，在统计中归为天然林类型；人工阔叶林面积没有变化。在LH、MH、HH模式下，天然林与针叶林面积变化趋势与NH模式相似，但是变化幅度明显增强，而且随着采伐强度的增强变化幅度增强，如HH模式模拟至第100年天然林增加17.08 hm<sup>2</sup>，针叶林减少20.84 hm<sup>2</sup>；人工阔叶林面积增加，但随着采伐强度的增加面积增加幅度减小，LH模式增加量最大，为3.74 hm<sup>2</sup>。LH+AR、MH+AR、HH+AR三种模式是在采伐的基础上，人工林采取伐后人工更新的措施，人工针叶林和天然林面积变化较小，人工阔叶林面积略有增加。

对比7种森林管理模式森林面积差异，可以看出人工阔叶林初始分布面积最小，

未来100年森林面积均表现为增加趋势,变化绝对值较小,但是变化比例最大(图3)。针叶林与天然林面积基本呈现此消彼长的情况,但是主要表现为天然林侵占针叶林,针叶林很难入侵天然林;即使在采取人工更新措施的方案中,针叶林面积也小幅减少,这主要可能是人工阔叶林在人工更新措施与自然生长共同作用下的扩张造成的。

## 2.2 森林地上生物量

模拟起始年(2014年),磨哨林场森林单位面积AGB为 $206.23 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。NH方案中,AGB在模拟0~60年呈现增加趋势,且增加速率逐渐下降;模拟的60~100年呈下降趋势,未来100年平均AGB达 $268.53 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,在所有方案中为最高值(图4)。在各种采伐方案中(图4),LH和LH+AR方案的AGB与NH方案变化趋势相似,变化幅度减小,平均AGB为 $231.58 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $234.25 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;MH、MH+AR、HH和HH+AR方案下,AGB均呈现缓慢降低趋势,平均AGB依次为 $198.09 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $203.74 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $186.15 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $191.61 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。随着采伐强度的增加,森林AGB逐渐降低,而采取人工更新措施的方案平均AGB要高于同等采伐强度没有采取人工更新措施方案,低采伐强度增加最小,中采伐强度增加最大。

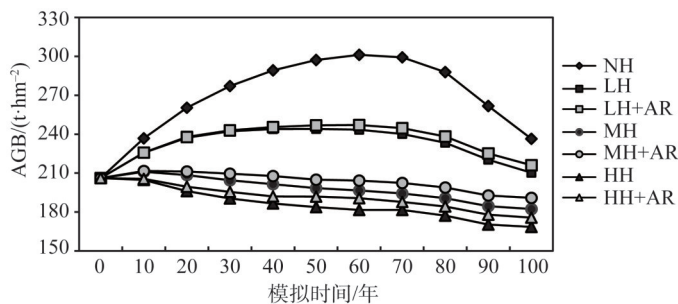


图4 不同森林管理模式下森林单位面积AGB变化情况

Fig. 4 Dynamic changes of forest AGB under forest management scenarios

模拟起始年,人工针叶林AGB总量为5681.23 t,人工阔叶林AGB为718.97 t,天然林AGB为13675.83 t,模拟过程中三种类型森林AGB总量呈现不同的变化趋势(图5)。NH方案下,人工阔叶林AGB呈增加趋势,针叶林0~70年AGB增加而后降低,天然林AGB 0~60年小幅增加、60~100年降低。仅采伐方案下,天然林AGB总量均有小幅度降低;人工针叶林AGB总量随着采伐强度增高降低幅度增大;人工阔叶林AGB总量随时间均呈增加小幅趋势,增加量随采伐强度增加而减小。在采伐且伐后人工更新的三个方案下,对人工针叶林AGB总量影响最大,其中LH+AR情景小幅升高,MH+AR情景保持稳定,HH+AR情景略有降低。

## 3 讨论

LANDIS-II模型被广泛应用于自然干扰和森林管理对森林生态系统的影响研究,但是由于空间直观模型模拟未来森林生态系统动态变化,因此此类模型均存在难以进行直接验证的问题<sup>[30]</sup>。PnET-II与LANDIS-II模型中输入的一系列物种生活史参数与生态特征参数决定了物种的生长演替动态过程,大量参数的输入增加了模型的不确定性<sup>[14,24]</sup>,但磨

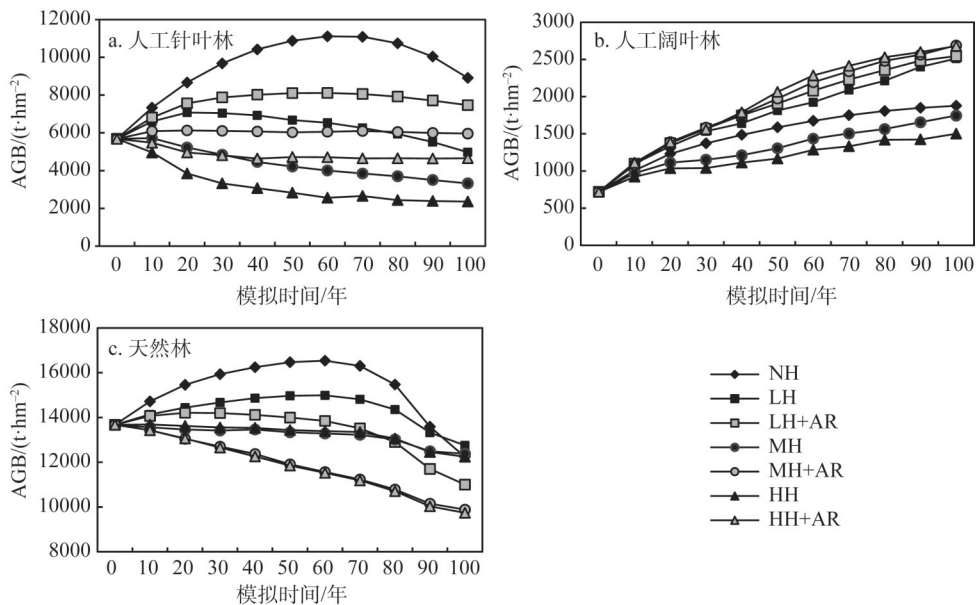


图5 不同森林管理模式下三种类型森林AGB总量变化情况

Fig. 5 The dynamic changes of forest AGB under forest management scenarios

哨林场的长期观测数据为本文中模型参数确定提供了基础。针对模型验证,采用模拟值与实测森林AGB进行对比的方法,分别对三种类型森林AGB模拟的初始值进行验证(表3)。杉木林是磨哨林场针叶林最主要类型,面积占人工针叶林的75%;木荷—伯乐林面积占人工阔叶林的62%;红栲—青冈—刨花润楠林占天然林的77%。因此选择以上三种林地的AGB样地实测值(2014年野外调查测量样地内乔木树干、树枝、树叶以及树皮生物量,加和值为AGB)代表针叶林、人工阔叶林和天然林对模拟值进行对比。对比结果可以看出针叶林模拟值偏低,人工阔叶林模拟值与实测值相近,天然林模拟值略偏低。总体上模拟值与实测值较为接近,模拟结果能够反映三种类型森林AGB的规律。

本文应用LANDIS-II模型设计了低、中、高强度采伐与人工林是否进行人工更新的森林管理方案,分别模拟6种管理方案与无管理方案下未来100年磨哨林场森林面积与地上生物量变化。在没有人为干扰的情况下(NH),天然林面积小幅度增加而针叶林面积较少,说明在自然演替过程中,构成该区域的地带性植被的树种将会扩张,随着演替的进行以针叶树种为代表的先锋树种将被取代。NH情况下AGB前期升高,主要是因为人工林平均林龄较低,仍处于生物量快速积累的阶段,而天然林也有小幅度的生长空间,随着模拟进行,人工林生物量积累变缓,天然林由于林龄持续增长生物量开始下降,进

表3 AGB模拟结果与实测结果对比

Table 3 Comparison between simulated and measured values of AGB (t·hm<sup>-2</sup>)

森林类型	观测样地	AGB模拟结果	AGB实测结果
人工针叶林	杉木林	142.17	176.82
人工阔叶林	木荷—伯乐林	116.15	112.64
天然次生阔叶林	红栲—青冈—刨花润楠林	267.11	284.78



而表现为AGB整体呈下降趋势。在有采伐干扰的情况下,AGB变化趋势变缓,特别是在中、高强度采伐中逐年降低,采伐在提供木材生产的同时必将导致森林生物量降低,从而影响森林其他生态功能。因此在实际森林管理中需要确定合理的采伐强度,即能够满足木材生产的需求,又不破坏森林的生态功能,实现森林可持续经营<sup>[3,31]</sup>。

在人工林管理措施中,人工更新是保持采伐后人工林面积迅速恢复到原有水平的最重要方式。研究表明在相同采伐强度的管理模式中,人工更新使人工林面积大幅度增加。在缺少人工更新的情景下,天然林面积增加,这可能是在采伐迹地中人工树种与天然数据均有萌发生长可能,因此天然林占据了一定的采伐迹地,从而有所扩张。而采取了人工更新措施后,人工林采伐迹地及时被人工林树种补充,降低了天然林向采伐迹地扩张的可能性,天然林面积保持稳定。此外,人工更新能够促进AGB积累,特别是解决了采伐导致的人工林AGB持续降低的问题,在中等强度采伐后采取人工更新措施能够使人工针叶林AGB在百年尺度上维持稳定,对人工林生长起到了十分重要的作用,在现实人工林可持续经营中起到了积极作用。人工更新能够使人工林保持活力和功能并对森林生物量、碳汇以及景观格局有着最显著的影响<sup>[32,33]</sup>,有研究证实在南美洲人工松林与当地牧草进行转化,可以大大提高生物量碳库<sup>[34]</sup>。对于人工林采伐后造林树种的选择,本文采用的是种植原树种,即杉木纯林采伐后种植杉木,马尾松木荷混交林采伐后种植马尾松和木荷,也有研究表明将人工纯林改造成针阔混交林的森林管理模式有助于实现森林多目标管理<sup>[35]</sup>,可以对人工纯林采伐后种植的树种进行多种选择,研究人工更新树种对于人工林结构和生物量的影响。

在LANDIS-II模型模拟的过程中,没有考虑未来气候变化对树种生长的影响,这是因为气候变化对森林生长的影响相比于采伐而言微弱<sup>[12]</sup>;同时,目前能获取的未来气候变化情境数据,用在研究区尺度上存在很大误差,如何采用降尺度方法,获取更为精准的气候变化情境数据,尚需深入开展工作。由于中国人工林管理中林火和虫害是严格控制的,而且在研究区内几乎没有风倒造成的干扰,模拟没有考虑其他自然干扰因素,如风干扰、火干扰以及虫灾等。此外,在研究生物量与木材生产的权衡中,本文计算的生物量仅是AGB,没有将地下生物量、枯枝落叶等其他生物量计算在内。在森林管理模式的设计中采用的是实验处理方式,而在实际的森林管理中政策因素<sup>[36]</sup>、采伐指标配额等因素必然影响森林管理的具体实施,但是研究结果能够为制定森林管理方案提供一定的科学理论依据。

## 4 结论

选择位于我国南方红壤丘陵区的磨哨林场作为研究区,应用PnET-II模拟树种生长过程、LANDIS-II模型模拟不同森林管理方案对不同类型森林(人工针叶林、人工阔叶林、天然林)的影响。森林景观模型LANDIS-II能够有效模拟不同管理方案下未来三种类型森林面积、AGB变化情况。研究表明采取森林管理措施对森林的影响显著,采伐导致人工针叶林面积显著下降,天然次生阔叶林面积增加,人工阔叶林面积变化较小,人工更新措施能够保障人工林,特别是针叶林面积维持在一定的水平,不会因采伐而快速降低。对于AGB而言,自然演替导致天然林AGB先升高后降低,人工林生物量在100年内呈积累趋势;在采伐干扰下,AGB随采伐强度的增加而降低程度增加。人工

更新措施能够使人工林尤其是人工针叶林AGB增加,综合来看,中等强度采伐且实施人工更新措施更有利于我国南方红壤丘陵区以杉木为主要树种的人工林地地区进行森林管理。研究结果对林业部门制定森林管理方案具有积极意义和实际作用。

### 参考文献(References):

- [1] COSTANZA R, DARGE R, DEGROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [3] 朱臻, 徐志刚, 沈月琴, 等. 非农就业对南方集体林区不同规模林农营林轮伐期的影响. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 236-249. [ZHU Z, XU Z G, SHEN Y Q, et al. Effect of off-farm employment on the harvesting decision-making of households with different scales in China's collective forest area. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(2): 236-249.]
- [4] 陈幸良, 巨茜, 林昆仑. 中国人工林发展现状、问题与对策. *世界林业研究*, 2014, 27(6): 54-59. [CHEN X L, JU Q, LIN K L. Development status, issues and countermeasures of China's plantation. *World Forestry Research*, 2014, 27(6): 54-59.]
- [5] GUSTAFSON E J, CROW T R. Simulating spatial and temporal context of forest management using hypothetical landscapes. *Environmental Management*, 1998, 22(5): 777-787.
- [6] MATONIS M S, WALTERS M B, MILLINGTON J D A. Gap-, stand-, and landscape-scale factors contribute to poor sugar maple regeneration after timber harvest. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(2): 286-298.
- [7] WALSH D, STRANDGARD M. Productivity and cost of harvesting a stemwood biomass product from integrated cut-to-length harvest operations in Australian *Pinus radiata* plantations. *Biomass & Bioenergy*, 2014, 66: 93-102.
- [8] SCHELLER R M, HUA D, BOLSTAD P V, et al. The effects of forest harvest intensity in combination with wind disturbance on carbon dynamics in Lake States Mesic Forests. *Ecological Modelling*, 2011, 222(1): 144-153.
- [9] DAI E F, WU Z, WANG X F, et al. Progress and prospect of research on forest landscape model. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(1): 113-128.
- [10] SCHELLER R M, DOMINGO J B, STURTEVANT B R, et al. Design, development, and application of LANDIS-II, a spatial landscape simulation model with flexible temporal and spatial resolution. *Ecological Modelling*, 2007, 201(3-4): 409-419.
- [11] SEIDL R, RAMMER W, SCHELLER R M, et al. An individual-based process model to simulate landscape-scale forest ecosystem dynamics. *Ecological Modelling*, 2012, 231: 87-100.
- [12] GUSTAFSON E J, SHVIDENKO A Z, SCHELLER R M. Effectiveness of forest management strategies to mitigate effects of global change in South-central Siberia. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, 41(7): 1405-1421.
- [13] STEENBERG J W N, DUINKER P N, BUSH P G. Exploring adaptation to climate change in the forests of Central Nova Scotia, Canada. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(12): 2316-2327.
- [14] HE H S. Forest landscape models: Definitions, characterization, and classification. *Forest Ecology and Management*, 2008, 254(3): 484-498.
- [15] SCHELLER R M, MLADENOFF D J. An ecological classification of forest landscape simulation models: Tools and strategies for understanding broad-scale forested ecosystems. *Landscape Ecology*, 2006, 22(4): 491-505.
- [16] SCHELLER R M, MLADENOFF D J. A forest growth and biomass module for a landscape simulation model, LANDIS: Design, validation, and application. *Ecological Modelling*, 2004, 180: 211-229.
- [17] ABER J D, FEDERER C A. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems. *Oecologia*, 1992, 92(4): 463-474.
- [18] HE H S, MLADENOFF D J. Spatially explicit and stochastic simulation of forest-landscape fire disturbance and succession. *Ecology*, 1999, 80(1): 81-99.
- [19] XU C, GERTNER G Z, SCHELLER R M. Potential effects of interaction between CO<sub>2</sub> and temperature on forest landscape response to global warming. *Global Change Biology*, 2007, 13(7): 1469-1483.
- [20] KARAM S L, WEISBERG P J, SCHELLER R M, et al. Development and evaluation of a nutrient cycling extension for

- the LANDIS-II landscape simulation model. *Ecological Modelling*, 2013, 250: 45-57.
- [21] SCHELLER R M, TUYL S, CLARK K, et al. Simulation of forest change in the New Jersey Pine Barrens under current and pre-colonial conditions. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(5-6): 1489-1500.
- [22] YANG J, WEISBERG P J, SHINNEMAN D J, et al. Fire modulates climate change response of simulated aspen distribution across topoclimatic gradients in a semi-arid montane landscape. *Landscape Ecology*, 2015, 30(6): 1055-1073.
- [23] ABER J D, OLLINGER S V, FEDERER C A, et al. Predicting the effects of climate change on water yield and forest production in the Northeastern United States. *Climate Research*, 1995, 5(3): 207-222.
- [24] 石浩, 王绍强, 黄昆, 等. PnET-CN模型对东亚森林生态系统碳通量模拟的适用性和不确定性分析. *自然资源学报*, 2014, 29(9): 1453-1464. [SHI H, WANG S Q, HUANG K, et al. Application of the PnET-CN Model to different forest ecosystems in East Asia. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(9): 1453-1464.]
- [25] 陈存及, 何宗明, 陈东华, 等. 37种针阔树种抗火性能及其综合评价的研究. *林业科学*, 1995, 31(2): 135-143. [CHEN C J, HE Z M, CHEN D H, et al. Studies on the fire-resistance of 37 species of coniferous and broadleaf trees and its appraisal. *Scientia Silvae Sinicae*, 1995, 31(2): 135-143.]
- [26] 陈晓阳, 李文刚, 潘奇敏, 等. 杉木种子园花粉空间分布和传播距离的研究. *北京林业大学学报*, 1996, 18(2): 24-30. [CHEN X Y, LI W G, PAN Q M, et al. Studies on spacial distribution and the spread distance of pollen in chinese fir seed orchards. *Journal of Beijing Forestry University*, 1996, 18(2): 24-30.]
- [27] 舒立福, 田晓瑞, 李红, 等. 我国亚热带若干树种的抗火性研究. *火灾科学*, 2000, 9(2): 1-7. [SHU L F, TIAN X R, LI H, et al. Studies on fire resistance forest species. *Fire Safety Science*, 2000, 9(2): 1-7.]
- [28] 肖金香, 黄亚哲, 李冬, 等. 江西常见树种抗火性研究. *江西农业大学学报*, 2011, 33(1): 76-83. [XIAO J X, HUANG Y Z, LI D, et al. A study on fire-resistance of mountain tree species in Jiangxi. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2011, 33(1): 76-83.]
- [29] 朱建佳, 戴尔阜, 郑度, 等. 会同森林生态实验站磨哨林场森林碳密度及分配特征. *自然资源学报*, 2016, 31(11): 1871-1880. [ZHU J J, DAI E F, ZHENG D, et al. Carbon density and allocation of forest ecosystems of moshao forest farm at Huitong National Research Station of forest ecosystem. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(11): 1871-1880.]
- [30] GARDNER R H, URBAN D L. *Model Validation and Testing: Past Lessons, Present Concerns, Future Prospects*. *Models in Ecosystem Science*, Princeton, NJ: Princeton University Press, 2003: 184-203.
- [31] VIHARVAARA P, KUMPULA T, TANSKANEN A, et al. Ecosystem services: A tool for sustainable management of human-environment systems: Case study Finnish Forest Lapland. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 410-420.
- [32] 徐伟义, 金晓斌, 杨绪红, 等. 中国森林植被生物量空间网格化估计. *自然资源学报*, 2018, 33(10): 1725-1741. [XU W Y, JIN X B, YANG X H, et al. The estimation of forest vegetation biomass in China in spatial grid. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(10): 1725-1741.]
- [33] SHI J, LIU J, GAO Z, et al. Research advances of the influence of afforestation on terrestrial carbon sink. *Progress in Geography*, 2004, 23(2): 58-67.
- [34] LACLAU P. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in Northwest Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 2003, 180(1-3): 317-333.
- [35] LIMAELI S M, KOUHI M S, SHARAJI T R. Goal programming approach for sustainable forest management: Case study in Iranian Caspian forests. *Journal of Forestry Research*, 2014, 25(2): 429-435.
- [36] DUVENECK M J, SCHELLER R M, WHITE M A. Effects of alternative forest management on biomass and species diversity in the face of climate change in the northern Great Lakes region (USA). *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 2014, 44(7): 700-710.

# Modeling the long-term impacts of harvest and artificial regeneration on forest area and aboveground biomass in Red Soil Hilly Region: A case study in Moshao forest farm of Huitong county

DAI Er-fu<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-fan<sup>3</sup>, ZHU Jian-jia<sup>4</sup>, WANG Xiao-li<sup>5</sup>

(1. Lhasa Plateau Ecosystem Research Station, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China Land Surveying and Planning Institute, Key Laboratory of Land Use, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China; 4. College of Horticulture Science and Technology, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao 066004, Hebei, China; 5. National Marine Data and Information Service Center, Tianjin 300171, China)

**Abstract:** Plantations in China are facing a series of issues, such as structure degradation and function reduction. Thus, it is urgently requested to implement effective measures on plantations through reasonable forest management strategies. The Moshao forest farm of Huitong ecological station, which is a typical forest ecosystem in Red Soil Hilly Region of South China, is the study area to examine the dynamics of forest area and aboveground biomass (AGB) in the next century. The landscape disturbance model named LANDIS-II was employed in this study to simulate the effects of harvesting intensities and artificial regeneration on artificial coniferous forest, artificial broad-leaved forest, and natural broad-leaved forest by six scenarios. The scenarios included low, middle, high harvest intensity and each scenario had an artificial regeneration option after harvesting. The results showed that as the harvesting intensity went heavier, the area of artificial coniferous forest decreased. Conversely, natural forest area increased. And the forest AGB decreased sharply when the harvesting intensity was high. Plantations could take advantages of artificial regeneration to remain the area and facilitate the AGB accumulation. The scheme of harvesting with 20% of plantations every 10 years and followed by artificial regeneration would basically retained the area and AGB at the initial level in the next century. Therefore, this scheme was more applicable to the long term development of the forest in the study area and helpful to achieve the forest sustainable management of Chinese fir and masson pine plantations.

**Keywords:** forest management; harvest; artificial regeneration; forest area; aboveground biomass