第76卷 第1期
2021年1月

地 理 学 报
ACTA GEOGRAPHICA SINICA

Vol.76, No.1
January, 2021

南方红壤丘陵区采伐变量对森林面积和生物量影响模拟

汪晓帆[1,2],戴尔阜[1,2],郑 度[3],吴 卓[4]

(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. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟院重点实验室,北京 100101; 4. 广州大学地理科学学院,广州 510006)

摘要: 在优化森林结构的同时保障其木材生产功能和生态功能,实现森林可持续经营,如何采取科学、合理的森林管理措施越来越受到人们的关注。本文选取采伐年龄、采伐斑块大小、采伐频率、采伐面积比例作为变量,以江西省泰和县为研究区,设定多种强度和方式的森林管理方案,耦合生态过程模型(PnET-II)和景观模型(LANDIS-II)模拟初始年(2009年)起,未来100年森林面积和生物量的动态变化情况。研究发现:① 森林对不同采伐变量的响应差异明显,采伐年龄对森林面积影响较小,采伐斑块面积仅对生物量有影响,采伐频率对面积和生物量均有较大影响,采伐面积比例是采伐变量中对森林影响最大的变量; ② 每10 a以20%的采伐面积比例,5 hm^2的采伐斑块,采伐21 a以上的杉木、26 a以上的松林、41 a以上的阔叶树种的采伐情景能够保证有林地的生物量较初始年有所增加,有效地保障红壤丘陵区人工林在木材生产的同时保持一定的生态功能。

关键词: 森林管理;地上生物量;LANDIS-II模型;红壤丘陵区;人工林

DOI: 10.11821/dlxb202101017

1 引言

森林生态系统作为陆地生态系统的主体，一方面提供了保障人类生存的生产功能，同时也具有固碳释氧、水土保持等重要的生态功能[1-2]。人类活动与气候变化对地球生态环境已经造成了越来越深刻的影响，同时森林生态系统在减缓全球变化中的巨大贡献日益受到人们重视[3-5]。但中国的森林资源仍然存在总量不足、质量较低等问题，特别是人工林占比较高，而且长期面临着生产力低下、种植结构单一、地力衰退、生产与生态功能不可持续等问题[6-7]，需要通过科学有效的森林管理方式进行优化。

森林采伐既是实现森林管理目标的主要手段，也是调节森林结构、促进森林生长和健康发展的重要措施之一。采伐可以直接改变森林生态系统的结构和功能[8-9]，不同的采伐方式和强度对森林生态系统的景观格局[10]以及生物量[11-12]的影响非常显著，尤其是森林生物量随着采伐强度增加而大幅度降低[13]，必将对森林生态功能造成负面影响。同时，采伐对森林生产力具有一定调节作用，与森林的自疏作用相似，合理的择伐、间伐能够

收稿日期: 2020-05-17; **修订日期:** 2020-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571098, 41530749); 国家重点研发计划(2017YFC1502903, 2018YFC1508805) [**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No.41571098, No.41530749; National Key R&D Program of China, No.2017YFC1502903, No.2018YFC1508805]

作者简介: 汪晓帆(1987-), 女, 博士, 研究方向为综合自然地理。E-mail: wangxf.12b@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 戴尔阜(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 中国地理学会会员, 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。E-mail: daief@igsnrr.ac.cn

223-234页

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

促进森林生长和更新[14]。科学合理的采伐方式、强度的选择对森林管理有着十分重要的意义，目前我国很多地区仍然保留着传统的粗放式经营模式，不利于森林的可持续发展，无法到达森林结构优化、功能提升的要求。但是由于森林生态系统的复杂性以及采伐等森林管理措施对森林生态系统的影响是综合的、区域性的、长期的，通过样地采伐观测难以得到区域性结果且观测时间跨度需求较长，而森林景观模型能够弥补这方面的不足，为森林结构、功能和过程之间的综合模拟和预测提供可行的方法[15]。森林景观模型能模拟森林演替以及自然和人为干扰对森林的影响，适用于较大时空尺度的研究工作[16]。近年来利用景观生态模型模拟森林生长演替过程、人为和自然干扰过程的研究逐渐成熟[17-19]，并且在对森林生态系统长期影响的研究中得到了广泛应用[20-21]。其中LANDIS-II模型作为森林景观预测模型的代表，优点在于能够从森林结构、森林生物量、森林树种更新等方面反映管理措施对森林生态系统的影响[16, 18]，同时能够实现采伐方案的灵活设计。由于目前对于采伐比例、采伐斑块、采伐树种、采伐年龄、采伐方式等多采伐变量的综合分析较少[22-24]，有必要从多因素开展多采伐变量对森林的影响差异研究，为森林采伐措施优化提供科学依据。

南方红壤丘陵地区是中国重要的生态类型区以及人工林分布的主要区域，1949年以来，南方人工林的大面积种植与快速增长为中国经济发展提供了所需的大量木材。随着中国生态文明建设的不断推进、自然资源统一管理理念的提出，森林管理的要求更加注重生态功能和生产功能的协同发展。为了满足在提供木材的同时提升森林的生态功能的新目标，如何实现森林可持续发展、协调木材生产和生态功能，需要综合考虑树种的特点、生境对树种生长的影响、森林的结构合理化，深入研究森林管理策略，提出较为适合南方红壤丘陵区森林的管理方案。本文应用PnET-II模型和LANDIS-II模型，模拟江西省泰和县森林生态系统在不同采伐措施下未来100年（2009—2109年）森林面积和生物量的变化情况，分析不同采伐变量对森林面积和生物量的影响程度，讨论对于研究区内森林较为适宜的采伐年龄、采伐斑块大小、采伐频率、采伐面积比例，为中国南方红壤丘陵区森林管理方式提供科学依据。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究区概况

泰和县（26°27′N~26°59′N, 114°18′E~115°20′E）总面积2667 km²（图1），属于中亚热带湿润季风气候，气候温暖，雨量充沛，年平均气温18.6 ℃，年平均降水量1378.5 mm，水热同期的特点十分适合森林生长。县境内水系遍布，中部为河谷平原多种植水稻和经济作物，东西部为山地、丘陵以种植用材林为主。红壤分布广泛，多分布在低山、高丘等区域。地带性植被为东部湿润林区亚热带常绿阔叶林，林多为次生林，主要树种有苦槠（*Castanopsisclerophylla*）、甜槠（*Castanopsiseyrei*）、白皮栎（*Quercus fabri*）、樟树（*Cinnamomumcamphora*）等。

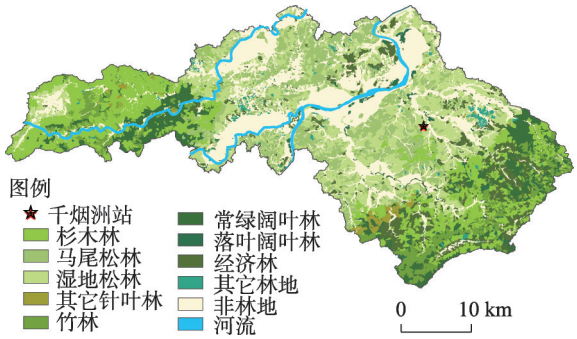

图1 泰和县森林类型分布图

Fig. 1 Spatial distribution of forest types in Taihe County

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

常绿阔叶林中也常有一些阳性落叶树，如枫香（*Liquidambar formosana*）、檫木（*Sassafras tzumu*）、桤木（*Alnuscremastogyne*）、鹅掌楸（*Liriodendron chinense*）等；针阔混交林主要以木荷（*Schimasuperba*）、甜槠、栲类等阔叶树与杉木（*Cunninghamialanceolata*）或马尾松（*Pinusmassoniana*）混交为主；亚热带针叶林面积占全县森林面积的60%以上，其中杉木、马尾松和湿地松（*Pinuselliottii*）分布面积最大。泰和县森林资源丰富，林地面积达1632 km^2，森林覆盖率61.2%，森林蓄积从1981年的401.23万 m^3增长到2009年的676万 m^3（2009年江西省森林资源二类调查成果）。

泰和县具备良好的科研条件和雄厚的科研基础，境内有中国科学院地理科学与资源研究所的长期观测台站——千烟洲红壤丘陵综合开发试验站（以下简称千烟洲站），为本文提供了相关长期观测数据及相关参数成果。

2.2 模型参数化

本文基于生态过程模型PnET-II与景观模型LANDIS-II的耦合，实现模拟在特定生长环境下树种生长过程以及森林管理方案对森林面积、生物量的影响。PnET-II模型能够模拟树种在特定的土壤、气候和水文条件下的生长过程，用于估算各个物种的物种建群系数（Species Establishment Probability, SEP）及地上净初级生产力（Aboveground Net Primary Production, ANPP）[17, 25]。LANDIS-II模型是一个基于栅格的空间动态森林景观模型，能够将干扰（如风、火、虫、采伐）与森林自然演替过程相结合，模拟森林景观格局、物种组成、生物量、碳氮储量的动态变化[26]，广泛应用于气候变化和森林管理对森林生态系统影响研究[16]。LANDIS-II模型通过输入物种生活史参数、SEP、ANPP以及空间数据等参数来模拟森林景观动态变化。将PnET-II模型的模拟得到的SEP、ANPP作为重要参数，输入LANDIS-II模型，模拟不同森林管理方案下初始年（2009年）至未来100年泰和县森林面积和地上生物量动态变化情况。本文利用LANDIS-II模型的Age Succession 模块、Biomass Succession模块、Biomass Harvest模块模拟采伐变量对森林面积和生物量的影响。LANDIS-II以像元为单位，采用栅格形式记录森林景观，每个像元记录自己的物种组成及干扰特征，像元又被归入环境相似的生态区，在同一生态区内树种的生长情况和抗干扰的能力取决于每个树种特有的物种生活史参数、生长速度和种子萌发能力[18]。为简化模型，将树种以10年为间隔划分为年龄级，模拟树木的生长、种子传播、衰老死亡等过程。模型的输入参数包括空间参数数据和属性参数数据两类。

将空间参数数据统一为分辨率30 m的栅格数据，包括生态分区图、初始群落图、森林管理区图等。其中，生态分区是将研究区划分为若干个自然条件相似的类型区，其气候条件、土壤条件等影响植物生长的环境因素被认为是一致的[27]。本文以地貌类型作为划分生态区的依据，将研究区划分为低丘、中丘、高丘、山地以及非模拟区（包括建筑用地、农业用地、经济林、竹林等土地利用类型）在内的5个生态类型区（图2）。初始森林群落图为模拟初始森林群落分布情况，对应的文本文件中记录每个林班的主要树种及年龄信息。森林群落分布数据来源于2009年江西省森林二类调查的1∶1万森林小班图，并根据泰和县森林群落主要

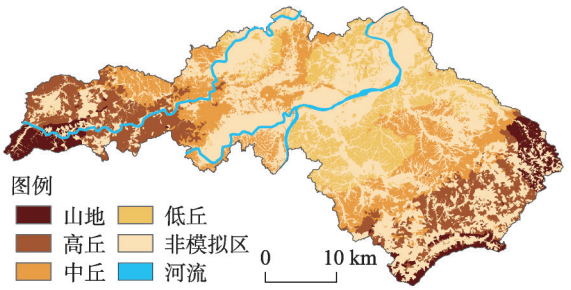

图2　LANDIS-II模型生态分区图

Fig. 2　Ecoregions division for LANDIS-II model considering geomorphic types

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

树种和年龄差异将其划分为73类森林群落。树种及其年龄根据2009年江西省森林二类调查小班数据的优势树种及平均年龄确定。森林管理区图可将研究区划分为若干区域，实施不同采伐措施，本文将森林管理区划分为松林管理区、杉木林管理区、阔叶林管理区以及混交林管理区。

属性数据包括物种生活史参数、SEP、ANPP、土壤属性数据及气候数据等。研究根据江西省森林资源二类调查数据、一类调查样地数据，结合2012年赣江中上游野外实地考察情况，选取18种常见的主要建群乔灌树种来代表泰和县森林的主要树种进行模型模拟。树种的物种生活史参数（表1）主要包括树种最长寿命、性成熟年龄、耐阴性、耐火性、种子有效传播距离等，参数主要来源于文献资料、样地调查数据以及咨询当地林业部门专家[28-29]。由于自然条件差异，树种在不同生态区内的SEP及ANPP不同，应用PnET-II模型根据生态区内气候数据、土壤属性数据等进行计算。其中土壤属性数据（土壤碳、田间持水量、萎蔫系数）根据泰和县1∶10万土壤类型图以及野外调查样品测定结果确定；气候数据以千烟洲站自动气象观测站2005—2013年气象数据均值作为模型初始气候输入数据，包括月最低气温、月最高气温，月平均降水、辐射量等。

表1 物种生活史参数

Tab. 1 Species life history parameters

序号	物种	寿命(a)	性成熟年龄(a)	耐阴性	耐火性	种子有效传播距离(m)	种子最大传播距离(m)	萌发可能性	叶寿命(a)
1	杉木	200	10	1	2	200	500	0.4	3
2	柏木	500	35	2	3	70	200	0.4	3
3	马尾松	200	10	2	2	200	500	0	4
4	湿地松	200	10	1	2	200	500	0	4
5	木荷	300	20	5	5	20	200	0.6	2
6	樟树	1000	15	4	5	50	120	0.5	3
7	楠木	1000	50	5	5	40	120	0.5	3
8	槠树	200	20	5	4	50	120	0.6	2
9	栲树	150	30	5	4	75	250	0.6	3
10	栎	120	15	4	4	20	200	0.6	2
11	细叶青冈	150	7	4	3	20	50	0.4	3
12	枫香	130	8	3	3	100	375	0.5	1
13	光皮桦	100	15	2	3	200	400	0.5	1
14	桤木	125	5	3	4	15	60	0.5	1
15	拟赤杨	80	15	2	3	300	500	0.4	1
16	檫木	120	20	3	4	50	150	0.5	1
17	苦楝	50	5	2	3	200	400	0.3	1
18	杨树	100	10	2	3	200	500	0.5	1

注：耐阴性和耐火性中数字越大表示耐受性越强，数值范围为1~5。

2.3 采伐情景设计

在LANDIS-II模型中，森林管理区用于确定采伐区域，并在不同管理区采取不同方式、强度的采伐，在同一管理区也可在不同时段进行不同方式、强度的采伐[13]。本文根据森林类型采取差异化采伐管理，将森林管理区划分为松林管理区、杉木林管理区、阔叶林管理区、混交林管理区，其中混交林管理区包括针叶混交林、针阔混交林以及阔叶混交林。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

森林主伐方式多种多样，实际操作非常复杂，模型难以将所有采伐方式都进行模拟。研究选取采伐年龄、采伐频率、采伐斑块面积、采伐面积比例4个变量作为调控采伐强度的变量（表2）。A情景为不进行采伐的自然演替情景，B1~B3情景体现采伐年龄差异、C1~C3情景体现采伐频率（伐后森林更新及恢复时间）差异、D1~D2情景体现采伐斑块面积差异、A~D情景体现采伐面积比例差异。采伐斑块是指采伐的单位面积，采伐面积比例是最能够体现采伐强度的变量，基本控制了每次采伐的总量。

表2　森林采伐情景

Tab. 2　Forest harvesting scenarios

采伐情景	采伐面积(%)	采伐斑块面积(hm^2)	采伐树种及其采伐年龄(a)	采伐频率(a)
A	—	—	—	—
B1	5	1	杉类≥ 11; 松类≥ 16; 阔叶≥ 21	10
B2	5	1	杉类≥ 21; 松类≥ 26; 阔叶≥ 41	10
B3	5	1	杉类≥ 36; 松类≥ 51; 阔叶≥ 71	10
C1	10	5	杉类≥ 21; 松类≥ 26; 阔叶≥ 41	5
C2	10	5	杉类≥ 21; 松类≥ 26; 阔叶≥ 41	10
C3	10	5	杉类≥ 21; 松类≥ 26; 阔叶≥ 41	20
D1	20	5	杉类≥ 21; 松类≥ 26; 阔叶≥ 41	10
D2	20	10	杉类≥ 21; 松类≥ 26; 阔叶≥ 41	10

2.4 模型验证

LANDIS-II模型已经过灵敏度分析、不确定性分析和模型结构分析等模型评价[27, 30]，但由于缺乏景观尺度上的长期观测数据，很难对空间模型进行直观的验证。本文利用2009年泰和县森林二类调查数据中森林小班活立木蓄积量计算研究区主要森林类型（马尾松、湿地松、杉木、硬阔、软阔、混交林)的生物量，作为生物量的实测值用来验证模型模拟结果的准确性。其估算参照生物量转换因子法[31]。计算公式：

$$B = a \times V + b \qquad (1)$$

式中：B为地上生物量（t/hm^2）；V为单位面积活立木蓄积（m^3/hm^2）；a、b为转换参数。地下生物量由地上与地下生物量的比值计算得到（表3）。

在15707个小班中剔除非林地、经济林、竹林等非模拟小班后，随机选取500个小班的生物量实测值。提取该500个小班中模拟的第0年生物量平均值，与实测值进行对比（图3）。模拟值与实测值呈线性相关关系，且相关关系显著（$R^2 = 0.6163$, $p < 0.001$），证明模型能够较好的模拟泰和县森林生物量。

表3　生物量和立木蓄积转换方程参数[32]

Tab. 3　Parameters of transfer equation for biomass and volume

植被类型	a	b	地上生物量/地下生物量
马尾松林	0.51	1.05	6.23
湿地松林	0.52	33.24	4.12
杉木林	0.40	22.54	4.70
硬阔林	0.76	8.31	5.04
软阔林	0.48	30.60	6.25
针叶混交林	0.59	24.52	5.02
针阔混交林	0.71	16.97	3.85
阔叶混交林	0.84	9.42	4.95

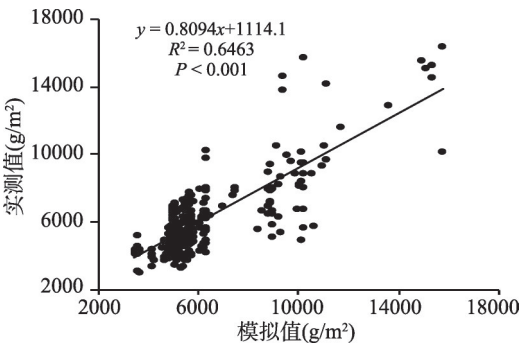

图3　地上生物量模拟值与实测值比较

Fig. 3　Comparison between simulated and measured values of AGB

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 结果与分析

应用Landis-II模型的Age Only Succession、Biomass Succession、Base Harvest和Biomass Harvest模块模拟2009—2109年9种森林管理情景下森林生长过程。分析采伐年龄、采伐频率、采伐斑块面积、采伐面积比例对森林面积、AGB及其分布的影响，以期选择适用于优化森林结构和功能的森林管理方案。

3.1 采伐年龄对森林面积的影响

森林面积在无采伐情景下变化很小，仅后40 a缓慢减小，模拟末期森林面积比初始年下降约3%（图4）。在5%的采伐强度下，采伐年龄不同导致森林面积的减少趋势略有差异，采伐年龄越高，森林面积减少的趋势则更为平缓，但至模拟80 a后森林面积基本相同，说明在长时间尺度上采伐树种年龄的差异对森林总面积的影响较为微弱。

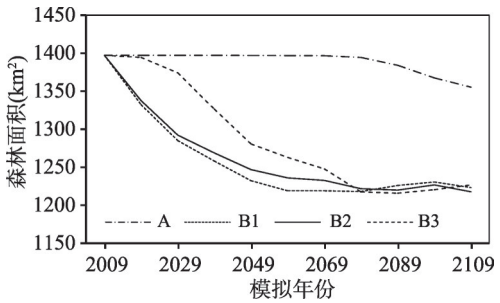

图4 不同采伐年龄情景下森林总面积变化

Fig. 4 Changes in total forest area under different scenarios

3.2 采伐频率对森林面积和AGB的影响

模拟过程中C1~C3情景分别以相同的采伐强度每5 a、10 a、20 a进行1次采伐，森林面积随着采伐频率成倍增加而减少的幅度成倍降低（图5a）。到2049年左右，C1情景森林面积减少32.3%，C2情景减少21.6%，C3情景减少约为13%。其中C3情景的面积波动是采伐间期森林更新生长导致的面积增加。无采伐情景下，泰和县森林单位面积AGB前40 a持续增加达到最高，之后呈减少趋势；在C1~C3情景模拟的AGB结果与A情景变化趋势相同（图5b）。C1情景单位面积AGB变化幅度较小，均值在6300 g/m²左右；C2情景单位面积AGB均值约为6700 g/m²；C3情景单位面积AGB均值约为7400 g/m²。变化趋势方面，由于模拟初期人工林面积较大且处于迅速积累生物量阶段的幼龄林阶段，模拟前30 a单位面积AGB基本呈上升趋势，而后由于林龄的变化及采伐的影响，造成AGB呈现波动下降趋势。

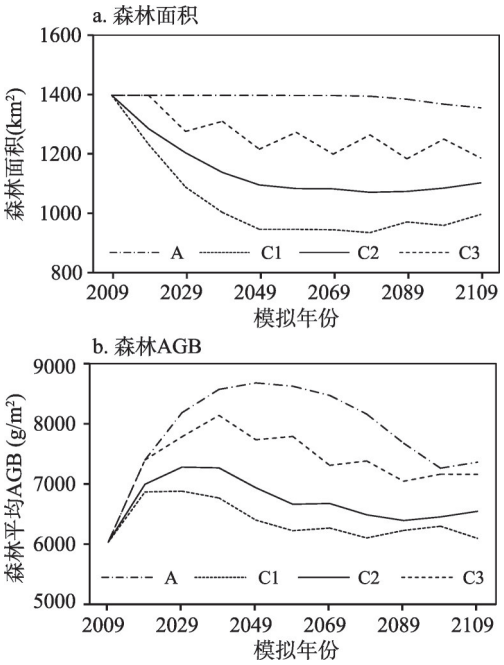

图5 不同采伐频率情景下森林面积和森林地上生物量变化

Fig. 5 Changes in forest area and AGB under different harvesting frequency scenarios

3.3 采伐斑块面积对森林面积和AGB的影响

D1与D2情景用于对比相同采伐比例，不同采伐斑块大小对森林的影响，结果表明森林面积在前30年迅速减少，D1情景森林面积减少程度略低于D2情景（图6a）。说明采伐斑块面积越大，采伐模拟越容易完成，但采伐斑块面积不能决定森林总面积的变化。采伐斑块面积对森林单位面积AGB影响较大（图6b）。D1情景下森林AGB呈现先升高后降低的趋势，整体均值

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

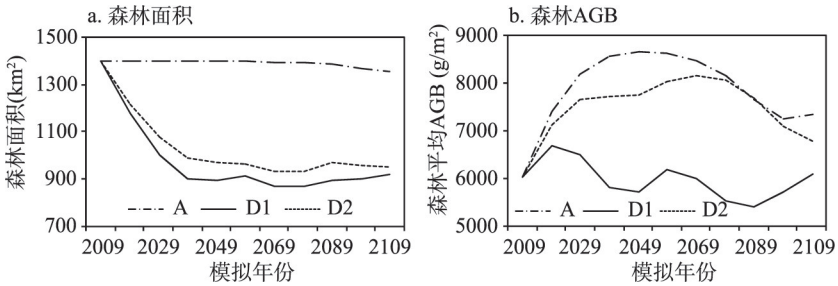

图6　不同采伐斑块面积情景下森林面积和森林地上生物量变化

Fig. 6　Changes in forest area and AGB under different cut-block size scenarios

为7470 g/m²，虽然森林面积减少但是单位面积AGB反而增加。D2情景下，森林AGB基本呈现下降趋势，且与无采伐情况下相差约2000 g/m²，而且该情景下森林面积减少约500 km²，森林总AGB急剧下降。

3.4 采伐面积比例对森林面积、AGB和分布的影响

3.4.1 对森林面积和AGB的影响　A、B2、C2、D1情景分别采伐森林面积的0%、5%、10%、20%。B2、C2情景的采伐比例相差5%，C2、D1情景相差10%，但是森林面积减少幅度相近，说明D1情景采伐量较大导致了森林面积减少最大，但是却促进了森林的更新，弥补了一部分森林面积的损失（图7a）。在不同采伐面积比例的森林单位面积AGB变化情况中，D1的平均AGB明显高于B2与C2情景，说明该情景的采伐强度使森林平均AGB达到一个较好水平（图7b）。

3.4.2 采伐面积比例对森林AGB分布的影响　初始年（2009年）、模拟中期（2059年）和模拟末期（2109年）泰和县AGB分布整体上中部低、东西部高（图8），主要原因是赣江流经泰和县中部形成河谷平原，适合人类居住及耕种，因此中部地区居民建设用地及农用地等非林地面积大；中部地区以马尾松林和湿地松林为主，均属于人工松林，树龄短、森林结构单一使得人工松林AGB较低。东西部主要以丘陵、山地为主，森林类型主要有杉木林和阔叶林，其中阔叶林分布的地区AGB基本达到8000 g/m²以上。在森林自然演替情景（A）下，初始年到模拟中期泰和县整体森林AGB呈上升趋势，针叶林和阔叶林的AGB积累速度均较快；模拟中期到模拟末期森林AGB呈下降趋势，以东西部的杉木人工林AGB下降最为为明显，其次是中部的马尾松林和湿地松林等人工林，以阔叶林为主的次生林AGB降低较少。采伐面积比例5%情景（B1）下，森林分布区域基本不变，初始年至模拟中期各森林类型AGB呈上升趋势，模拟中期至模拟末期变化较小。采伐面积比例10%情景（C1）下，森林分布区域略有减少，初始年至模拟中期AGB整体

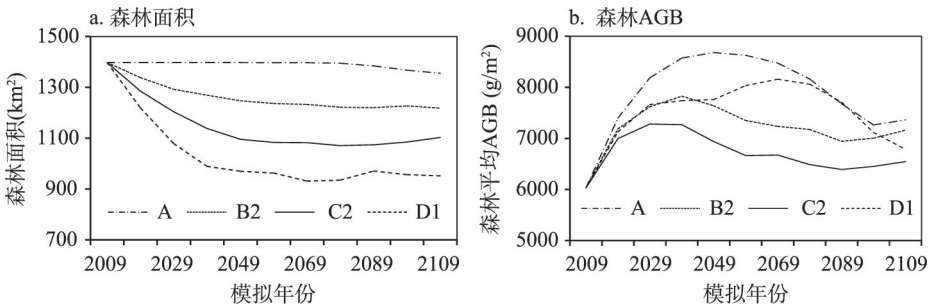

图7　不同采伐面积比例情景下森林面积和森林地上生物量变化

Fig. 7　Changes in forest area and AGB under different harvesting area ratio scenarios

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

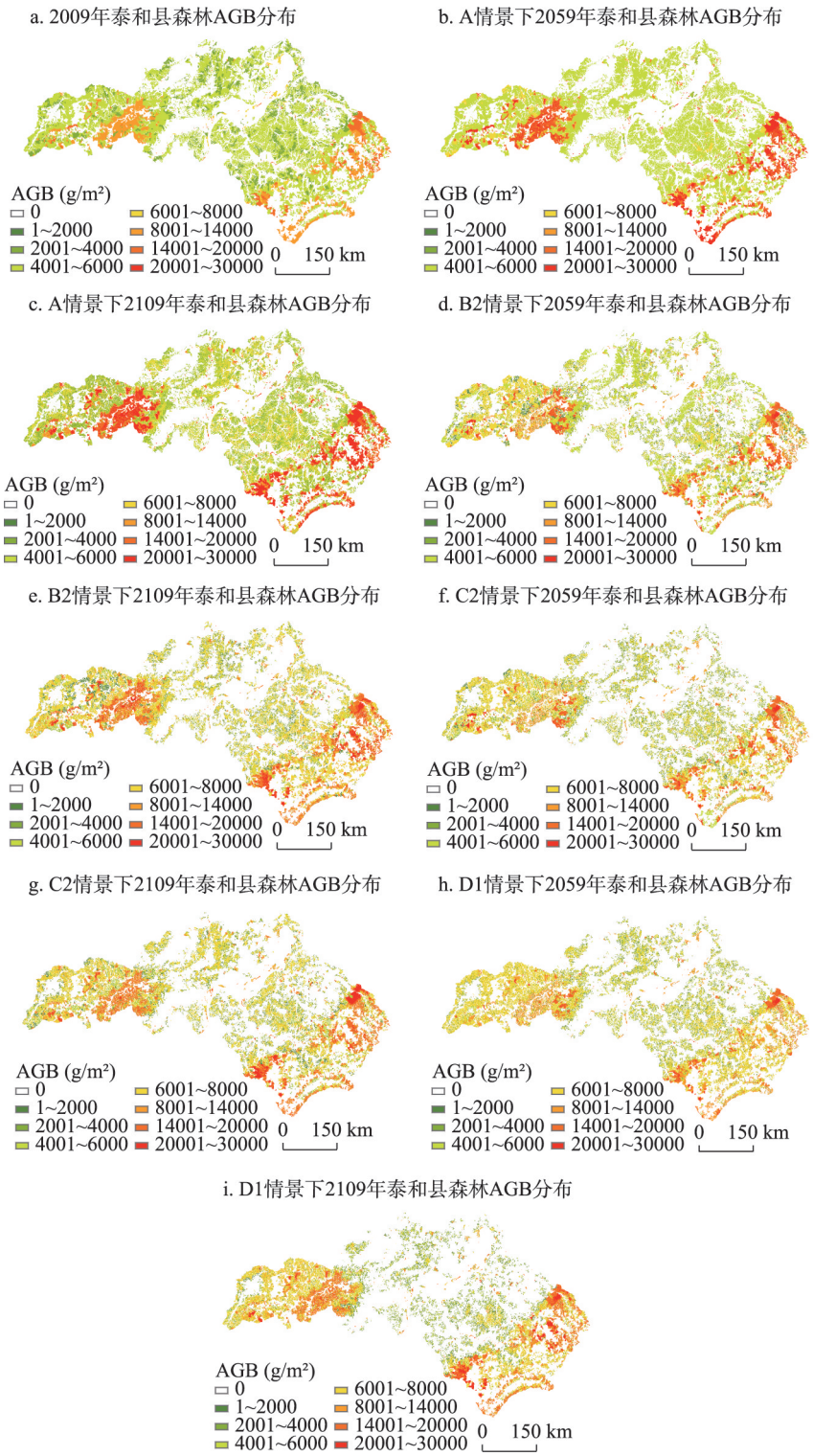

图8 2009年、2059年和2109年不同采伐面积比例情景下森林地上生物量分布

Fig. 8 The AGB distribution under different harvesting area ratio scenarios in 2009, 2059 and 2109

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

小幅降低，其中阔叶林AGB降低较为明显，模拟中期至模拟末期变化较小。采伐面积比例20%情景（D1）下，森林分布区域逐步减少，特别是中部平原地区马尾松林和湿地松林森林分布减少较多，模拟中期至模拟末期以人工林区域AGB下降明显，阔叶林AGB较少幅度相对较小。总体来说，实施采伐措施后，模拟中期与模拟末期AGB分布差异变小，可能在采伐的影响下，森林生长增加的AGB与采伐减少的AGB存在一定相互抵消的作用，使得AGB变化趋于平缓。

4 结论与讨论

4.1 讨论

（1）模型模拟的不确定性分析

本文主要应用的LANDIS-II模型广泛应用于在自然干扰和森林管理对森林生态系统影响研究。由于实际情况复杂多变，模拟过程存在一系列不确定性，首先，考虑到气候变化响应敏感性远低于对采伐和虫灾的敏感性[20]，因此本文没有考虑气候变化对森林的影响，可能导致结果与实际情况存在一定偏差。第二，在实地考察和对当地林业部门的调研中得知研究区森林发生其它干扰的情况较少，因此仅对采伐干扰进行研究，忽略了虫灾、林火等对森林的作用。第三，PnET-II模型和LANDIS-II模型自身参数较多，每个参数对模型敏感性的差异、参数之间关系复杂以及部分难以获取实测结果的参数，都造成了结果的不确定性。本文利用野外采样测定数据、千烟洲站长期观测数据和文献资料研究成果，确定模型参数，研究结果在景观尺度上已能够反应采伐对人工林的作用。

模型在直接验证方面存在一定困难，一是长时间尺度的模型验证需要大量历史数据支撑，但高精度森林种群空间分布历史数据难以获取；二是由于空间直观模型主要用于模拟区域尺度未来森林生态系统动态变化，因此此类模型均难以进行直接验证[33]。

基于中国森林管理实际需求及具体情况，在采伐变量研究基础上，模拟研究的变量选取以及关注问题可以从可持续发展、精细管理、综合响应等不同方面进行适当的扩展与完善。全面停止天然林商业采伐后，人工林的可持续经营尤为重要。为落实《关于全面推进林长制的意见》中“加强森林经营和退化林修复，提升森林质量”的要求，可以从权衡森林生产功能与生态功能开展森林可持续经营模拟研究。可以尝试将阔叶林进行更细致的划分，更好的反应真实的森林采伐对各类树种的影响；对于森林面积不同幅度减少，考虑进行人工补植方案，在森林自然更新的基础上，增加人为促进森林更新生长，实现森林的精细化管理。在模拟中综合考虑气候变化、采伐、林火等干扰，模拟多种因素对森林生态系统的综合作用，开展森林的综合响应研究。

（2）基于采伐变量的森林管理方案

影响森林总面积的主要采伐变量是采伐比例和采伐频率，而对于森林地上生物量来讲采伐频率、采伐面积比例、采伐斑块面积对其影响较大，而采伐年龄影响很小。采伐频率高、比例大、斑块大都会导致泰和县森林地上生物量大幅降低，所以需要在满足木材生产需求的同时采取小面积、低频率的采伐。此外不同树种的生长也会受到不同程度的影响，比如随着采伐的进行杉木和湿地松这两种泰和县最主要的人工林树种面积大幅度下降，说明目前森林的可持续发展存在一定的风险。此外，采伐有助于减少过熟林，促进森林的更新，但高强度采伐会导致幼龄林比例增加，森林的生态效益下降，因此需要分析不同采伐变量的影响差异，寻求一个较为合理的采伐方案。

本文中的采伐是指选择满足树龄要求的林班进行择伐。采伐年龄最高的B3情景前几十年有部分树种全部未达年龄要求而无法进行采伐，对杉木、湿地松和桤木等造成前期

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

采伐不足，后期采伐加剧。由于森林在幼龄及中龄林能够快速积累地上生物量，采伐应尽量在近熟林以及成熟林中进行，因此在杉木21 a、马尾松和湿地松26 a、阔叶树种41 a进行采伐更为合理。在采伐频率的选择上，每5 a进行采伐对森林面积和地上生物量影响过大，森林面积和地上生物量均大幅度减少；每20 a采伐一次可以较好的恢复森林面积，而且有利于森林地上生物量积累；每10 a进行采伐的影响程度介于两者之间。本文认为从生态恢复的角度考虑应20 a采伐一次，而结合木材生产与生态恢复10 a的采伐频率更适合中国南方红壤丘陵区森林管理实际情况。5 hm^2为采伐斑块面积的森林平均地上生物量明显高于10 hm^2的情景，为了森林能够积累更多的地上生物量，因此5 hm^2为采伐斑块面积明显优于10 hm^2。在森林管理的实际操作中，可以根据交通、人力、采伐成本等多方面因素考虑尽可能做到小面积采伐，这样的采伐方式更有利于森林生长及其可持续发展。在采伐面积的20%情景下，单位面积地上生物量高于其它采伐情景，更有利于泰和县森林的生长。

长期以来，中国人工林实行以采伐限额制度为核心的森林采伐管理制度，按照数量（生长量、消耗量）进行管理，对于人工林的生态效益考虑较少。林长制更加注重统筹协调保护与发展的关系，通过整合各类森林及政策资源，实现生态改善、绿色发展。为了全面提升森林资源的生态、经济、社会功能，针对南方红壤丘陵区人工林生态系统的特点，进行分类施策、科学管理，本文提出在杉木年龄达到21 a、松林26 a、阔叶树种41 a的林地，以5 hm^2为单位面积，每10 a采伐面积的20%这一采伐模式，为南方人工林精细化管理提供了理论依据。但是实现上述森林管理目标需要从森林整体出发，这是基于农户的小面积森林管理不能实现的，因此还需要积极推动土地流转。

4.2 结论

研究通过生态过程模型（PnET-II）和景观模型（LANDIS-II）的耦合，模拟中国红壤丘陵区森林在不同管理情景下2009—2109年的动态变化，通过对比4个采伐变量对森林影响的差异，探讨了从森林面积、森林生物量的角度出发中国南方红壤丘陵区人工林的适宜管理方案。主要结论如下：

（1）研究表明不同采伐变量之间对人工林的影响有明显差异，采伐年龄对森林面积影响很小，采伐斑块面积仅对森林地上生物量有影响，而采伐频率对面积和地上生物量有较大影响，采伐面积比例是采伐变量中对森林影响最大、最重要的变量。

（2）综合考虑森林的生产与生态功能，在采伐面积比例为20%，采伐斑块面积为5 hm^2，采伐频率每10 a一次采伐，采伐年龄杉木21 a、松林26 a、阔叶树种41 a的情景是较为适合理的森林管理方式，能够保证有林地的地上生物量较2009年有所增加，主要物种的年龄结构趋于多样化，各年龄级面积较为接近。

（3）中国南方红壤丘陵区森林的面积、树种、年龄等主要受到人为影响，本文从采伐变量的角度为人工林管理提供了一种可行的采伐方案。研究结果对林业部门进行森林管理具有积极意义和实际作用，在中国南方红壤丘陵区人工林管理过程中，可以借鉴本文结果，实行较低频率的小面积成熟林采伐，这不仅有利于人工林木材生产可持续性，也有利于人工林发挥其生态功能，对于阔叶林可实行低强度采伐以促进其森林更新。

参考文献(References)

[1] Melillo J M, Mcguire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate-change and terrestrial net primary production. Nature, 1993, 363: 234-240.

[2] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387: 253-260.

[3] Schroter D, Cramer W, Leemans R, et al. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Science, 2005, 310: 1333-1337.

[4] Fayolle A, Picard N, Doucet J L, et al. A new insight in the structure, composition and functioning of central African moist forests. Forest Ecology and Management, 2014, 329: 195-205.

[5] Fu Bojie, Zhou Guoyi, Bai Yongfei, et al. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China. Advances in Earth Science, 2009, 24(6): 571-576. [傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 等. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. 地球科学进展, 2009, 24(6): 571-576.]

[6] Peng Shunlei, Wang Dexiang, Zhao Hui, et al. Discussion the status quality of plantation and near nature forestry management in China. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(2): 184-188. [彭舜磊, 王得祥, 赵辉, 等. 我国人工林现状与近自然经营途径探讨. 西北林学院学报, 2008, 23(2): 184-188.]

[7] Wang Hui, Guo Jinping. The present situation of plantation in China and its nature-approximating forestry management. Modern Agricultural Sciences, 2008(10): 124-125. [王慧, 郭晋平. 中国人工林现状及其近自然经营. 现代农业科学, 2008(10): 124-125.]

[8] Mladenoff D J, White M A, Pastor J, et al. Comparing spatial pattern in unaltered old-growth and disturbed forest landscapes. Ecological Applications, 1993, 3: 294-306.

[9] Gustafson E J, Crow T R. Simulating spatial and temporal context of forest management using hypothetical landscapes. Environmental Management, 1998, 22: 777-787.

[10] 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: 286-298.

[11] Peckham S D, Gower S T, Perry C H, et al. Modeling harvest and biomass removal effects on the forest carbon balance of the Midwest, USA. Environmental Science & Policy, 2013, 25: 22-35.

[12] 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 and Bioenergy, 2014, 66: 93-102.

[13] Scheller R M, Mladenoff D J. A spatially interactive simulation of climate change, harvesting, wind, and tree species migration and projected changes to forest composition and biomass in northern Wisconsin, USA. Global Change Biology, 2005, 11: 307-321.

[14] Zhu Jiaojun, Liu Zugen. A review on disturbance ecology of forest. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15: 1703-1710. [朱教君, 刘足根. 森林干扰生态研究. 应用生态学报, 2004, 15: 1703-1710.]

[15] Fu Bojie, Chen Liding, Ma Keming, et al. The Principle and Application of Landscape Ecology. Beijing: Science Press, 2011. [傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2011.]

[16] 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, 2007, 22: 491-505.

[17] Aber J D, Federer C A. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and noreal forest ecosystems. Oecologia, 1992, 92: 463-474.

[18] 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: 409-419.

[19] 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.

[20] 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: 1405-1421.

[21] 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: 2316-2327.

[22] 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: 144-153.

[23] Thompson J R, Foster D R, Scheller R, et al. The influence of land use and climate change on forest biomass and composition in Massachusetts, USA. Ecological Applications, 2011, 21: 2425-2444.

[24] Steenberg J W N, Duinker P N, Bush P G. Modelling the effects of climate change and timber harvest on the forests of central Nova Scotia, Canada. Annals of Forest Science, 2013, 70: 61-73.

[25] Xu C G, Gertner G Z, Scheller R M. Uncertainties in the response of a forest landscape to global climatic change. Global Change Biology, 2009, 15: 116-131.

[26] He H S, Mladenoff D J. The effects of seed dispersal on the simulation of long-term forest landscape change. Ecosystems, 1999, 2: 308-319.

[27] He H S, Mladenoff D J. Spatially explicit and stochastic simulation of forest-landscape fire disturbance and succession. Ecology, 1999, 80: 81-99.

[28] Chen Xiaoyang, Li Wengang, Pan Qimin, et al. Studies on spacial distribution and the spread distance of pollen in

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Chinese Fir seed orchards. Journal of Beijing Forestry University, 1996, 18(2): 24-30. [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.]

[29] Editorial Committee of Forest of China. Forest of China (Vols. 2&3). Beijing: China Forestry Publishing House, 2000. [中国森林编辑委员会. 中国森林(第二、三卷). 北京: 中国林业出版社, 2000.]

[30] Xu C G, He H S, Hu Y M, et al. Assessing the effect of cell-level uncertainty on a forest landscape model simulation in northeastern China. Ecological Modelling, 2004, 180: 57-72.

[31] Fang J Y, Wang G G, Liu G H, et al. Forest biomass of China: An estimate based on the biomass-volume relationship. Ecological Applications, 1998, 8: 1084-1091.

[32] Wu Dan, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. Spatiotemporal dynamics of forest carbon storage in Taihe County of Jiangxi Province in 1985-2030. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1): 41-46. [吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 等. 1985—2030年江西泰和县森林植被碳储量的时空动态. 应用生态学报, 2011, 22(1): 41-46.]

[33] Gardner R H, Urban D L. Model Validation and Ttesting: Past lessons, Present Concerns, Future Prospects. Princeton: Princeton University Press, 2003.

Effects of harvesting variables on area and aboveground biomass of forest in Southern China

WANG Xiaofan[1, 2], DAI Erfu[1, 2], ZHENG Du[3], WU Zhuo[4]

(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. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Forest ecosystems play important roles in provisioning and regulating services. In China, forest ecosystems have been facing problems such as poor quality, simple structures, and weak ecological functions. Scientific, reasonable, and applicable forest management strategies are concerned with optimizing the structure of forests, achieving sustainable development, and promoting ecological functions while meeting production requirements. Therefore, a coupling path of the ecosystem progress model (PnET-II) and landscape model (LANDIS-II) were used to simulate dynamic changes in the area and aboveground biomass (AGB) of the plantations over the next 100 years, considering from the initial year (2009). The variables of the designed factorial experiment were cut-block size, cutting area ratio, as the initial year cutting age and cutting frequencies. It was found that the cutting age and cut-block size had limited impacts on the forest area, although they affected the levels of AGB. Both the cutting area ratio and cutting frequency, however, had significant impacts on forest area and AGB. Moreover, the cutting area ratio was a crucial variable with the greatest influence on forests among the four variables. The management strategy of a harvest scenario with a 20% cutting area ratio, 5 ha cut-block size and 10-year cutting frequency on 21-year-old Chinese fir, 26-year-old pine and 41-year-old broad-leaved forests provided the optimal results among all the tested scenarios. This ensured that the AGB of the forest remained relatively stable during the simulation. Therefore, it is an effective way to maintain the ecological functions of artificial forests while producing wood.

Keywords: forest management; aboveground biomass; landscape pattern; plantations; LANDIS-II; red soil hilly region; artificial forest

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net