

气候变化条件下小兴安岭林区森林采伐面积模拟*

郭锐^{1,2} 布仁仓^{1**} 胡远满¹ 常禹¹ 贺红士¹ 刘晓梅^{1,2} 张志全³

(¹ 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049; ³ 沈阳大学, 沈阳 110044)

摘要 运用空间直观景观模型 LANDIS 6.0 PRO, 以采伐面积代替蓄积量作为采伐量, 模拟了气候变化条件下, 不同采伐强度交替采伐(交替时间分别为 10、20、30 年) 情况下小兴安岭地区 2000—2400 年间当前采伐方案和 11 组模拟采伐预案下的森林采伐面积比。结果表明: 不同采伐强度的交替进行, 一定程度上可以增加研究区采伐面积; 与当前采伐方案相比, 短期内(10~30 年), 研究区模拟预案下每 10 年的采伐面积将增加 3%~5%, 中期(40~60 年) 内, 研究区模拟预案下每 10 年的采伐面积将增加 2.5%~7%, 长期(70~100 年) 内, 研究区模拟预案下每 10 年的采伐面积将增加 3.5%~8%。总体上, 研究区当前总采伐面积仍然过高, 改变采伐模式虽然可以在一段时间内增加采伐面积, 但不具有可持续性。若使研究区森林可持续发展, 还需降低采伐强度、转变森林经营管理理念, 变可持续林业产出为森林生态系统可持续管理。

关键词 气候变化 采伐面积 可持续采伐 小兴安岭 LANDIS 6.0 PRO 模型

文章编号 1001-9332(2010)07-1681-08 **中图分类号** S750 **文献标识码** A

Simulation of timber-harvesting area in Xiao Xing'anling Mountains under climate change.

GUO Rui^{1,2}, BU Ren-cang¹, HU Yuan-man¹, CHANG Yu¹, HE Hong-shi¹, LIU Xiao-mei^{1,2}, ZHANG Zhi-quan³ (¹Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Shenyang University, Shenyang 110044, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(7): 1681-1688.

Abstract: By using the spatially explicit forest landscape model (LANDIS 6.0 PRO), the percentages of timber-harvesting area in Xiao Xing'anling Mountains under current harvesting scenario and under 11 harvesting scenarios with alternating harvesting intensities (alternating time was 10, 20 and 30 years, respectively) in 2000-2400 under climate change were simulated. Alternating harvesting intensity could increase the harvesting area. Comparing with current harvesting scenario, the simulated scenarios could increase the harvesting area by 3%-5% at short term (10-30 years), 2.5%-7% at medium term (40-60 years), and 3.5%-8% at long term (70-100 years). On the whole, the current total harvesting area was still high. Alternating harvesting-intensity could increase the harvesting area within a definite term, but the effect would be unsustainable. To have a sustainable development of forestry in the study area, it is necessary to reduce the harvesting intensity and change the forest management policy.

Key words: climate change; timber-harvesting area; sustainable timber-harvesting; Xiao Xing'anling Mountains; LANDIS 6.0 PRO model.

小兴安岭是我国重要的林区之一, 长期过量采伐导致了一系列问题, 如森林覆被率和质量降低、中幼龄林比重大、成过熟林比例小、珍贵树种濒临消亡、次生林面积加大等^[1-2], 使可采伐面积逐年减

少^[2], 尤其在气候变化条件下无法满足采伐利用的需求^[3]. 因此在未来气候条件下, 探索森林的可持续采伐的实现方式具有重要的现实意义。

20 世纪 90 年代, 研究者开始探讨森林可持续采伐量的计算问题^[4-5]. 森林可持续采伐量指在某个森林经营单位内(国家、省、地、县、林业局、林场、集体和个体林业企业等), 能长期稳定地达到林业可持续利用和森林可持续经营水平的森林采伐量。

* 国家自然科学基金项目(30870441)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-444)资助。

** 通讯作者。E-mail: burc@iae.ac.cn

2010-03-11 收稿, 2010-04-25 接受。

一个年度的森林采伐限额可以高于或低于可持续采伐量^[5]. 赵秀海^[4]通过控制理论方法提出森林采伐量的最优控制方程,以期使森林蓄积保持在最优水平. 国外的相关研究主要集中于生长预测模型的应用^[6-9],如 Hein 等^[8]对多个采伐方案进行模拟后提出,变化采伐轮回期可以增加森林覆盖率. 由于不同地区不同树种的生长速率不同,在采伐轮回期内有的树种可能无法完成更新,而造林可以帮助森林更新^[9]. 基于森林调查数据的试验林场或小班尺度的森林采伐研究为大尺度上的模拟采伐奠定了基础. 但目前,在大的空间尺度和长的时间尺度上对森林采伐的可持续性,尤其是考虑未来气候因素情况的研究仍然较少. 因此,本文采用空间直观景观模型^[10-11](LANDIS 6.0 PRO)模拟了气候变化条件下,2000—2400 年间小兴安岭地区采伐面积的变化,探讨了当前采伐模式可能存在的问题,试图通过变换采伐强度促进采伐的可持续性,以期为我国森林的可持续管理提供参考.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

小兴安岭(46° 28'—49° 21' N, 127° 42'—130° 14' E)位于黑龙江省东北部,属于中温带和寒温带的过渡地带,为针阔混交林(阔叶红松林)与北方针叶林(兴安落叶松林)的过渡区域,是我国受气候变化影响最显著的地区. 本研究区覆盖小兴安岭中北部(47° 3'—49° 14' N, 127° 1'—130° 41' E),包括 16 个林业局(红星、沾河、乌伊岭、乌马河、上甘岭、汤旺河、通北、绥棱、友好、鹤北、金山屯、铁力、新青、翠峦、美溪和五营)、1 个保护区(丰林国家级自然保护区)和丽林实验林场,总面积为 421. 89×10⁴ hm²,其中有林地面积 358. 74×10⁴ hm². 研究区年均温度(−0. 54±0. 48)℃,年均降水量(555. 1±24. 1)mm. 研究区内有一由西南向东北的山脉,将该区分割成明显的南、北两部分,南部主要分布阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林,北部主要分布兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林. 从南到北,研究区中红松、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)和鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)逐渐减少,而兴安落叶松则逐渐增加.

1.2 LANDIS 6.0 PRO 模型

LANDIS 6.0 PRO 模型在 LANDIS 4.0 基础上发展而来,是用于模拟森林景观干扰、演替和管理的空间直观景观模型^[10-13],它综合了森林演替、种子传

播、火、风倒、采伐、可燃物动态和生物干扰(如森林病虫害)等各种景观过程^[14]. 该模型主要源于 2 种模型:样地尺度上的林窗模型(JABOWA-FORET 模型^[15-16])和景观尺度上的 LANDSIM 模型^[17].

LANDIS 6.0 PRO 模型通过跟踪样地上物种的存在或缺失来模拟各种自然和人为干扰下样地和景观尺度上的森林动态. 采用基于像元的栅格数据结构,跟踪某一物种年龄组的存在或缺失,在每个像元上记录每个物种以时间步长为间隔的年龄信息,而不记录具体的物种个体的个数和准确年龄^[18-19]. 因此,该模型无法通过模拟森林生物量来计算蓄积量,在模拟采伐时,本文以采伐面积代替蓄积量作为采伐量的度量.

LANDIS 6.0 PRO 模型将景观看作由相同大小的像元所组成的格网^[18]. 在研究区的每种立地类型内,具有相似的物种建群系数(species establishment coefficient)、火烧轮回期以及可燃物的积累速率和分解速率.

1.2.1 LANDIS 6.0 PRO 模型的采伐模块 LANDIS 6.0 PRO 模型将森林景观分成不同的管理区对森林采伐进行模拟^[10]. 不同的管理区可以有不同的采伐方案和管理目标,且每个管理区又划分为有固定边界的林班,采伐在林班尺度上进行^[19]. 在 LANDIS 6.0 PRO 模型中林班表示为具有相同标识的空间连续像元.

LANDIS 6.0 PRO 模型首先需确定要采伐的管理区,然后在管理区内对林班进行排序. 可根据林班的年龄(林班年龄指林班内所有物种的最大年龄的平均值)、经济价值、年龄级分布或随机对林班进行排序,然后根据排序后的优先顺序选定林班实施采伐方案. 采伐方案包括 3 部分:采伐的时间、地点和物种^[10]. 模型通过在采伐完的像元内产生树木幼苗的方法模拟人工造林情况.

1.2.2 LANDIS 6.0 PRO 模型的参数化 模型参数包括:物种生活史特征、物种组成图、土地类型、采伐管理区图和对应的属性数据库等^[12,20-21].

物种生活史特征包括寿命、成熟年龄、耐阴性、耐火性、有效传播距离、最大传播距离、萌发概率和最小萌发年龄等(表 1). 这些数据主要从相关文献、实地调查以及咨询相关林业专家获得^[20-23].

物种组成图由小兴安岭地区 2000 年林相图获得,该图记录了每个像元上物种的年龄和存在/不存在等信息.

表 1 研究区主要树种及其生物学特征
Tab.1 Main species and their biological characteristics in the study area

树 种 Species	寿 命 Longevity (a)	结实年龄 Maturity age (a)	耐阴性 Shade tolerance	耐火性 Fire tolerance	种子有效 传播距离 Effective seed dispersal distance (m)	种子最大 传播距离 Maximum seed dispersal distance (m)	萌发力 Germination ability	萌发年龄 Age of germination (a)
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	400	80	4	3	200	600	0	0
云杉 <i>Picea jezoensis</i> & <i>Picea koraiensis</i>	300	30	4	3	80	200	0	0
臭冷杉 <i>Abies nephrolepsis</i>	300	30	4	3	80	200	0	0
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	300	20	3	4	100	250	0	0
水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	250	40	3	5	400	5000	0.9	50
胡桃楸 <i>Juglans mandshurica</i>	250	15	3	4	50	100	0.9	60
黄波罗 <i>Phellodendron amurense</i>	250	15	3	4	60	300	0.8	60
蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	350	20	2	5	50	200	1	50
春榆 <i>Ulmus davidiana</i> var. <i>japojica</i>	250	10	2	3	400	5000	0.5	60
色木槭 <i>Acer mono</i>	200	10	3	3	400	8000	0.5	50
枫桦 <i>Betula costata</i>	250	15	3	3	500	8000	0.9	40
黑桦 <i>Betula davurica</i>	150	15	2	5	500	8000	0.9	30
紫椴 <i>Tilia amurensis</i>	300	15	3	2	80	250	0.8	30
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	150	15	1	2	600	6000	0.8	50
山杨 <i>Populus davidiana</i>	150	10	1	1	500	8000	0.9	10

LANDIS 6.0 PRO 模型将异质性景观分为若干个立地类型,同一立地类型内视为均质景观,假设同一立地类型中的物种具有相同的环境条件^[12].立地类型由数字高程模型、地形林相图、土地利用现状图、土壤类型图获得.

LANDIS 6.0 PRO 模型通过物种的建群系数来反映物种在各土地类型上出现的概率和生长能力,其取值范围在 0~1,该值越大表明物种越容易在研究地区生存^[12].本文根据 Bu 等^[3,24]的研究结果,建立了气候变化条件下的树种重建系数.

本文基于小兴安岭林相图得到研究区的管理区分布图(图 1).

1.3 数据来源

本研究 1961—2005 年气象数据源于东北地区 78 个气象台站.据此,建立温度、降水分别与经纬度、海拔高度的线性回归方程,插值得到整个东北地区的温度栅格图和降水栅格图,分辨率为 90 m×90 m^[3, 24].

1.4 降水量和气温变化幅度的计算

CGCM₂ 和 CGCM₃ 模式中 5 个气候变化预案下年均气温的变化幅度公式如下:

$$\Delta T_i = \frac{T_{wi} - T_{ci}}{10}$$

(1)

式中: T_{wi} 为 CGCM₂ 和 CGCM₃ 模拟中气候变化后 10 年的积温; T_{ci} 为 CGCM₂ 和 CGCM₃ 模拟中气候变化前 10 年的积温, i 为模拟年份($2000 \leq i \leq 2100$); ΔT_i

为气候变化前后第 i 年年均温度的变化幅度.降水量变化幅度的计算公式与气温相同.表 2 列出了研究区 2100 年年均气温和降水的变化幅度.

1.5 研究方法

本文采用 2 个全球气候耦合动态模式 CGCM₂ 和 CGCM₃(CGCM₂ 和 CGCM₃ 是加拿大气候模拟和分析中心推出的全球气候耦合模型,空间分辨率可达 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ^[25]) 的 5 个预测结果的平均值,作为研究区未来气候变化情景.运用模型联合技术(model ensembles),模拟未来 100 年(2000—2100 年)

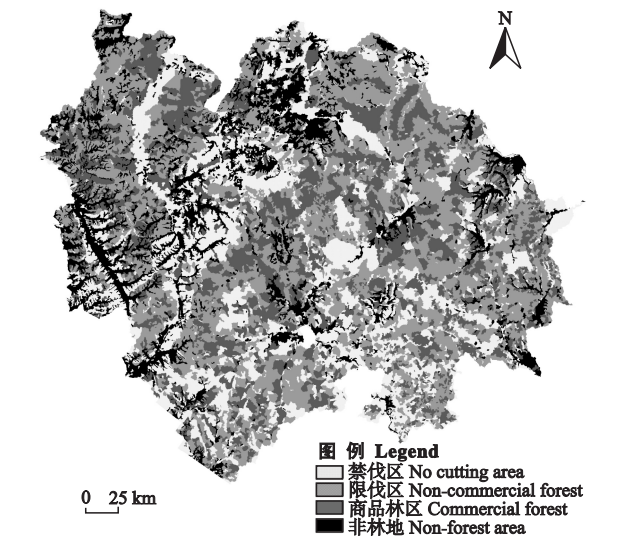


图 1 研究区森林管理概状况
Fig.1 Overview of forest management in the study area.

表 2 气候变化预案下 2100 年的年均降水量和气温的变化幅度

Tab. 2 Variation range of the average annual precipitation and temperature under the climate change scenario in 2100 (mean±SD)

气候变化预案 Scenario	年降水量 Annual precipitation (mm)	年均温度 Average annual temperature (℃)
CGCM ₃ 模拟 CO ₂ 中等排放情景 Moderate level of CO ₂ emission scenario simulated by CGCM ₃	60.22±7.32	2.00±0.02
CGCM ₃ 模拟 CO ₂ 低排放情景 Lower level of CO ₂ emission scenario simulated by CGCM ₃	65.03±16.75	1.00±0.07
CGCM ₃ 模拟 CO ₂ 高排放情景 Higher level of CO ₂ emission scenario simulated by CGCM ₃	240.38±17.30	3.21±0.41
CGCM ₂ 模拟 CO ₂ 低排放情景 Lower level of CO ₂ emission scenario simulated by CGCM ₂	-50.59±31.10	3.47±0.50
CGCM ₂ 模拟 CO ₂ 高排放情景 Higher level of CO ₂ emission scenario simulated by CGCM ₂	-12.17±42.64	5.07±0.28

气候变化对树种潜在分布的影响,获取 LANDIS 6.0 PRO 模型所需的树种重建系数。

本文以研究区 2000 年林相图为基础,采用 LANDIS 6.0 PRO 模型模拟气候变化条件下森林采伐面积的动态变化。模拟的时间尺度为 400 年(2000—2400 年),时间步长为 10 年。空间范围为 3102×2737 像元,像元大小为 90 m×90 m。假设在模拟的前 100 年(2000—2100 年),年均温度和降水按照气候变化预案进行线性变化,100 年后的气候达到稳定,即 2100 年后年均温度和降水量不再发生变化,2100 年以后的气候数据采用 2100 年的值^[25]。在稳定的气候条件下再模拟 300 年(2100—2400 年),使森林在经历气候变化后达到稳定状态。

虽然模型模拟的方法存在诸多不确定性,但其现实意义在于通过相同背景参数下不同目标参数的变化,对若干模拟结果之间进行分析比较,可以反映出目标参数的一些问题。本研究目的旨在探讨气候变化条件下如何更有效地进行森林采伐,在森林资源岌岌可危的当下,使小兴安岭的森林资源实现持续利用。

1.6 模拟方案

由于气候变化、造林和林火是影响森林动态变化和采伐方案制定的重要因素,本文在 LANDIS 6.0 PRO 模拟过程中,将气候变化、造林和林火作为背景条件。造林树种为红松、云杉和落叶松,红松、云杉和落叶松 10 年的造林强度(造林面积比)分别为

1.1%、1%和 5.1%。

本文中假定树木的死亡仅由物种竞争、火烧和采伐引起,忽略了风倒和病虫害等因素。

1.6.1 采伐规则 模拟采伐时,禁伐区不采伐;在限伐区和商品林区,以林班为单位执行采伐,采伐从平均年龄最大的林班开始,按照年龄由大到小的顺序采伐,在同一林班内,先采伐成、过熟林,后采伐近熟林和中幼龄林。小兴安岭多为复层异龄林,所以本文的采伐方式为择伐。

1.6.2 采伐模拟方案 1)当前采伐预案:基于 2003 年研究区限伐区和商品林区采伐方案[其采伐强度(采伐面积比)分别约为 30%·10 a⁻¹和 50%·10 a⁻¹],模拟气候变化条件下 2000—2400 年限伐区和商品林区内采伐量的变化。

2)模拟采伐预案:以当前采伐预案的采伐强度为参照,在采伐强度(37.58%·10 a⁻¹)不变的前提下,设置不同采伐强度交替采伐。表 3 列出了 11 组交替采伐的面积比例设置预案,每组预案在 3 个交替采伐时间(10、20 和 30 年)分别模拟 5 次 400 年(2000—2400 年)的采伐面积。

1.7 数据处理

采用 LANDSTAT 软件导出模型模拟结果,用 Excel 软件完成数据处理。用 SPSS 13.0 软件进行统计分析。将数据按短期(10~30 年)、中期(40~60 年)、长期(70~100 年)和 400 年统计采伐面积比的平均值。采用独立样本 *T* 检验法分析当前采伐模式与各采伐模拟预案结果的差异。

表 3 研究区森林采伐的模拟预案

Tab. 3 Scenarios of simulating for timber harvesting in the study area

采伐预案 Harvest scenarios	限伐区交替 采伐面积比例 Percentage of the alternate harvested area in non- commercial forest (NCF) areas (%·a ⁻¹)	商品林区交替 采伐面积比例 Percentage of the alternate harvested area in commercial forest (CF) areas (%·a ⁻¹)
NCF ₃₀ CF ₅₀	30~30.5	50.0~49.1
NCF ₂₅ CF ₅₈	25~40.9	58.1~35.5
NCF ₂₀ CF ₆₆	20~40.5	66.4~32.7
NCF ₁₅ CF ₇₄	15~45.5	74.6~24.6
NCF ₁₂ CF ₇₉	12~48.5	79.5~19.6
NCF _{10~50} CF _{82~16}	10~50.5	82.7~16.4
NCF ₀₇ CF ₈₇	7~53.5	87.6~11.5
NCF ₀₅ CF ₉₀	5~55.5	90.9~8.2
NCF ₀₃ CF ₉₄	3~57.5	94.2~4.9
NCF ₆₀ CF ₀₀	0~60.5	99.1~0
NCF _{10~60} CF _{82~00}	10~60.5	82.7~0

2 结果与分析

2.1 当前采伐方案的采伐面积

由图 2 可以看出,短期(10 ~ 30 年)内,研究区每 10 年的平均采伐面积比为 29.30%,中期(40 ~ 60 年)内,为 27.64%,长期(70 ~ 100 年)为 23.15%,整个模拟期间(400 年),研究区每 10 年的平均采伐面积比为 21.48%。

当前采伐方案下,研究区采伐强度为每 10 年的采伐面积占采伐区(限伐区和商品林区)面积的 37.58%。无论在短期、中期、长期还是 400 年的模拟时间内,当前采伐方案下研究区平均采伐面积比都无法达到该目标(37.58%)。当前采伐方案下前 60 年的采伐面积比出现了波动现象,到 200 年(2200 年)后稳定在 $17\% \cdot 10a^{-1}$ 左右,此时研究区每 10 年的可采伐面积与森林更新面积达到动态平衡。

2.2 模拟采伐预案的采伐面积

经数据统计分析得出,在模拟的 400 年间,11 组模拟采伐预案中每 10 年的采伐面积比均表现出上下波动、总体逐年递减的规律,且采伐面积比都低于 $37.58\% \cdot 10a^{-1}$ 。由于数据量大,无法一一列举,因此,本文以预案 $NCF_{25}CF_{58}$ 和 $NCF_{60}CF_{00}$ 为例分析模拟采伐预案下研究区的采伐面积。由图 3 可以看出,预案 $NCF_{25}CF_{58}$ 和 $NCF_{60}CF_{00}$ 下,以 10 年为交替采伐时间的研究区采伐面积比高于以 20 和 30 年为交替采伐时间的采伐面积。在以 10 年为交替采伐时间的情况下,研究区限伐区的采伐强度控制在

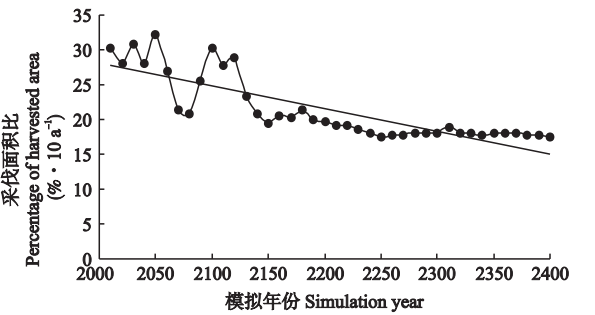


图 2 当前采伐方案下研究区每 10 年的采伐面积比
Fig.2 Harvested area percentage per 10 years under present timber harvesting scenario in the study area.

$12\% \cdot 10a^{-1}$ 以内,可有效提高各时间段的采伐面积。其中,短期内每 10 年的采伐面积可增加 3% ~ 5%,中期内每 10 年的采伐面积可增加 2.5% ~ 7%,长期内每 10 年的采伐面积可增加 3.5% ~ 8%。在可以显著提高采伐面积的预案中,预案 $NCF_{10 \sim 60}CF_{82 \sim 00}$ 在各阶段所提高的采伐面积比例均最大(表 4)。

2.3 不同采伐预案下采伐面积的比较

由表 5 可以看出,短期内,以 10 年为交替采伐时间的情况下,除 $NCF_{30}CF_{50}$ 、 $NCF_{25}CF_{58}$ 和 $NCF_{60}CF_{00}$ 预案外,其他预案的平均采伐面积比均显著大于当前采伐方案, $NCF_{20}CF_{66}$ 、 $NCF_{15}CF_{74}$ 、 $NCF_{12}CF_{79}$ 、 $NCF_{10 \sim 50}CF_{82 \sim 16}$ 、 $NCF_{07}CF_{87}$ 、 $NCF_{05}CF_{90}$ 、 $NCF_{03}CF_{94}$ 和 $NCF_{10 \sim 60}CF_{82 \sim 00}$ 预案分别提高了 3.74%、4.73%、4.64%、4.58%、4.02%、3.61%、3.19%、5.08%;而以 20 和 30 年为交替采伐时间时,与当前采伐方案相比,各模拟预案均未显著提高采伐面积比,有些模

表 4 不同时段内 3 个采伐交替时间各模拟预案下研究区每 10 年的平均采伐面积比例
Tab.4 Average percentage of harvested area in each simulation scenario at 3 alternate timber harvesting times during different periods ($\% \cdot 10a^{-1}$)

采伐预案 Harvest scenario	短 期			中 期			长 期			400 a		
	Short term (10 ~ 30 a)			Medium term (40 ~ 60 a)			Long term (70 ~ 100 a)					
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
$NCF_{30}CF_{50}$	28.78	25.70	29.70	24.59	26.70	20.64	24.34	22.20	20.61	21.09	19.2	18.25
$NCF_{25}CF_{58}$	30.94	27.99	30.36	26.78	24.52	27.04	27.01	21.94	19.91	22.43	19.46	19.01
$NCF_{20}CF_{66}$	33.04	28.00	30.50	27.80	24.79	26.77	28.55	23.15	20.53	22.78	19.91	19.48
$NCF_{15}CF_{74}$	34.03	27.87	28.57	29.35	23.99	28.23	29.25	23.54	22.17	23.10	19.53	19.82
$NCF_{12}CF_{79}$	33.94	27.40	27.01	30.21	24.10	29.14	29.38	23.97	23.11	23.15	19.52	19.56
$NCF_{10 \sim 50}CF_{82 \sim 16}$	33.88	27.02	25.89	30.62	23.88	29.90	29.24	24.04	23.56	23.18	19.48	19.63
$NCF_{07}CF_{87}$	33.32	26.42	24.06	31.82	24.07	30.84	29.38	24.15	23.57	23.30	19.46	19.62
$NCF_{05}CF_{90}$	32.91	26.01	22.82	32.65	23.71	30.76	29.99	24.24	23.59	23.40	19.40	19.52
$NCF_{03}CF_{94}$	32.49	25.59	21.57	33.48	23.36	30.65	30.62	24.39	23.61	23.51	19.43	19.38
$NCF_{60}CF_{00}$	23.55	20.34	12.61	26.07	16.36	22.22	19.78	18.08	18.58	18.81	16.30	15.51
$NCF_{10 \sim 60}CF_{82 \sim 00}$	34.38	29.09	25.89	34.73	22.73	30.11	31.56	24.3	25.17	23.78	19.53	19.74

I：交替采伐时间为 10 年 Alternating time for harvesting was 10 years；II：交替采伐时间为 20 年 Alternating time for harvesting was 20 years；III：交替采伐时间为 30 年 Alternating time for harvesting was 30 years. 下同 The same below.

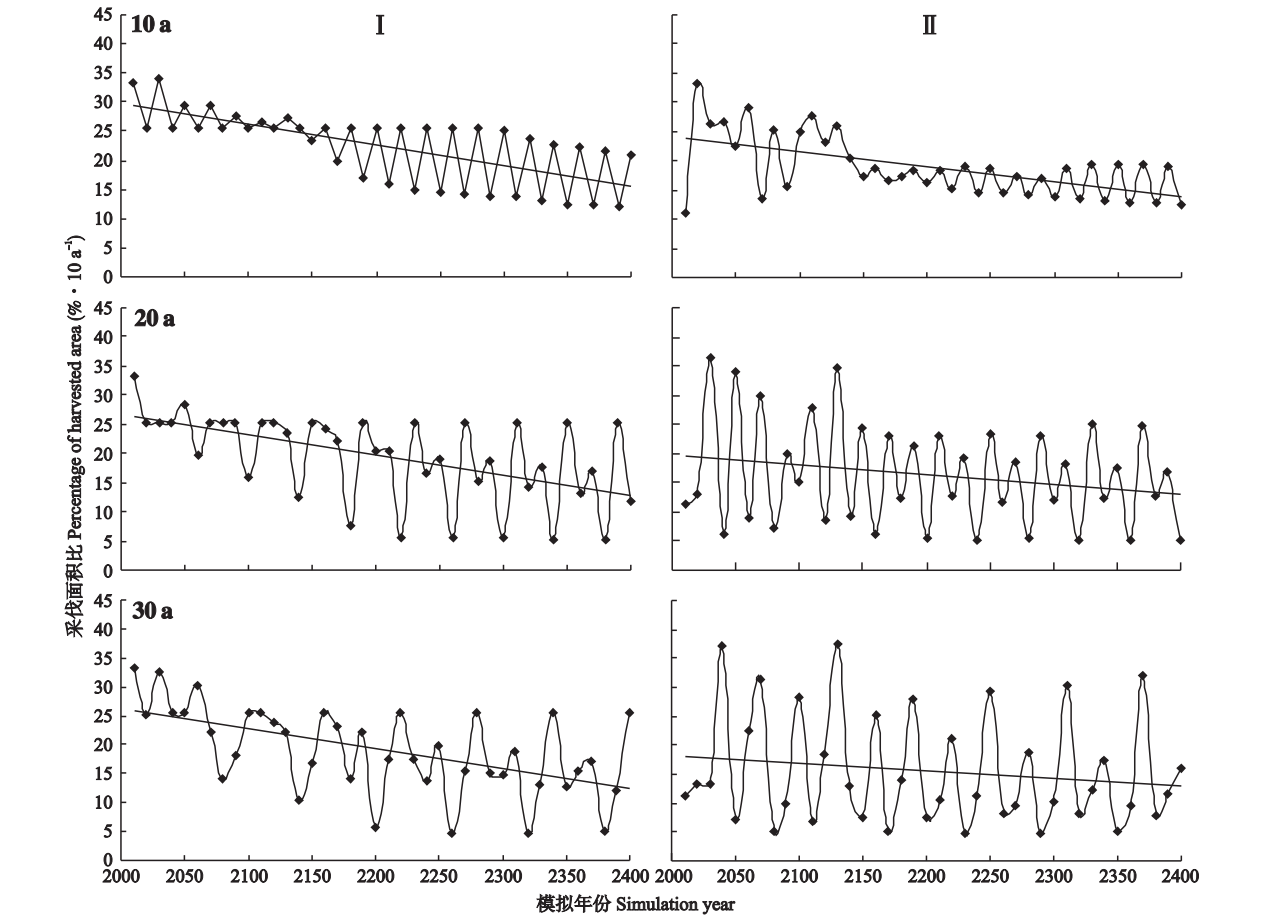


图3 预案NCF₂₅CF₅₈(I)和NCF₆₀CF₀₀(II)在3个采伐交替时间下研究区每10年的采伐面积比
Fig.3 Harvested area percentage per 10 years under the scenario NCF₂₅CF₅₈(I) and NCF₆₀CF₀₀(II) at 3 alternate harvesting times.

拟预案反而显著降低了采伐面积比,如NCF₃₀CF₅₀在20年交替采伐时的平均采伐面积比减少了3.6%,在30年交替采伐时,NCF₀₅CF₉₀、NCF₀₃CF₉₄和NCF₆₀CF₀₀的平均采伐面积比分别减少了0.33%、1.58%和10.54%。

中期内,以10年为交替采伐时间的情况下,与相应的当前采伐方案相比,预案NCF₁₂CF₇₉、NCF_{10~50}CF_{82~16}、NCF₀₇CF₈₇、NCF₀₅CF₉₀、NCF₀₃CF₉₄和

表5 不同时段内3个采伐交替时间各模拟预案下研究区每10年平均采伐面积比例的独立样本T检验
Tab.5 Independent-samples T test of each simulation scenario at 3 alternate timber harvesting times during different periods

采伐预案 Harvest scenario	短期 Short term (10-30 a)			中期 Medium term (40-60 a)			长期 Long term (70-100 a)			400年间 Between 400 a		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
NCF ₃₀ CF ₅₀	-0.26	-2.70 *	0.96	-1.45	-0.44	-7.04 **	0.93	-0.678	-2.13 *	1.35	1.81	-4.55 **
NCF ₂₅ CF ₅₈	1.51	-1.26	1.06	-0.92	-2.58 *	-0.60	4.13 **	-1.025	-2.51 *	3.49 **	-1.82	-2.60 *
NCF ₂₀ CF ₆₆	2.45 *	-0.79	0.75	0.13	-1.61	-0.89	4.64 **	-0.004	-1.68	3.86 **	-1.03	-1.74
NCF ₁₅ CF ₇₄	4.16 **	-0.65	-0.33	1.99	-1.78	0.79	6.72 **	0.188	-0.48	4.28 **	-1.44	-1.61
NCF ₁₂ CF ₇₉	5.38 **	-0.73	-0.89	3.39 *	-1.47	1.78	6.89 **	0.371	-0.02	4.29 **	-1.37	-1.42
NCF _{10~50} CF _{82~16}	6.00 **	-0.78	-1.21	3.71 *	-1.35	2.42 *	6.14 **	0.398	0.16	4.29 **	-1.37	-1.29
NCF ₀₇ CF ₈₇	6.48 **	-0.93	-1.84	4.54 **	-1.26	2.72 *	5.10 **	0.433	0.16	4.38 **	-1.36	-1.26
NCF ₀₅ CF ₉₀	5.26 **	-1.01	-2.27 *	4.91 **	-1.42	2.45 *	5.15 **	0.459	0.16	4.45 **	-1.42	-1.39
NCF ₀₃ CF ₉₄	3.68 *	-1.09	-2.70 *	5.17 **	-1.59	2.13 *	5.18 **	0.505	0.17	4.53 **	-1.21	-1.54
NCF ₆₀ CF ₀₀	-2.33 *	-2.90 *	-44.30 **	-1.51	-3.28 *	-1.61	-2.30 *	-2.450 *	-1.67 *	-3.67 **	-6.08 **	-6.78 **
NCF _{10~60} CF _{82~00}	4.10 **	-0.06	-1.21	5.40 **	-1.89	1.43	5.20 **	0.447	0.71	4.71 **	-1.21	-1.02

* P<0.05; ** P<0.001.

$NCF_{10 \sim 60}CF_{82 \sim 00}$ 的平均采伐面积比分别显著增加了 2.57%、2.98%、4.18%、5.01%、5.84% 和 7.09%；以 20 年为交替采伐时间的情况下,各模拟预案均未显著提高采伐面积;以 30 年为交替采伐时间的情况下, 预 案 $NCF_{10}CF_{82}$ 、 $CF_{07}CF_{87}$ 、 $NCF_{05}CF_{90}$ 和 $NCF_{03}CF_{94}$ 的平均采伐面积比分别比相应的当前采伐方案显著提高了 2.26%、3.2%、3.12% 和 3.01%。

长期内,以 10 年为交替采伐时间的情况下,除预案 $NCF_{30}CF_{50}$ 和 $NCF_{60}CF_{00}$ 外,其他模拟预案均可显著提高采伐面积,与当前采伐方案相比, $NCF_{25}CF_{58}$ 、 $NCF_{20}CF_{66}$ 、 $NCF_{15}CF_{74}$ 、 $NCF_{12}CF_{79}$ 、 $NCF_{10 \sim 50}CF_{82 \sim 16}$ 、 $NCF_{07}CF_{87}$ 、 $NCF_{05}CF_{90}$ 、 $NCF_{03}CF_{94}$ 和 $NCF_{10 \sim 60}CF_{82 \sim 00}$ 预案的平均采伐面积比分别提高了 3.86%、5.40%、6.10%、6.23%、6.09%、6.23%、6.84%、7.47% 和 8.41%；以 20 和 30 年为交替采伐时间时,各模拟预案均未显著提高采伐面积。

模拟期间(400 年),以 10 年为交替采伐时间的情况下,除预案 $NCF_{30}CF_{50}$ 和 $NCF_{60}CF_{00}$ 外,其他模拟预案均显著提高了采伐面积, $NCF_{25}CF_{58}$ 、 $NCF_{20}CF_{66}$ 、 $NCF_{15}CF_{74}$ 、 $NCF_{12}CF_{79}$ 、 $NCF_{10 \sim 50}CF_{82 \sim 16}$ 、 $NCF_{07}CF_{87}$ 、 $NCF_{05}CF_{90}$ 、 $NCF_{03}CF_{94}$ 和 $NCF_{10 \sim 60}CF_{82 \sim 00}$ 预案的平均采伐面积比分别提高了 0.95%、1.30%、1.62%、1.67%、1.70%、1.82%、1.92%、2.03% 和 2.30%；以 20 和 30 年为交替采伐时间时,各模拟预案均不能显著提高采伐面积。

3 讨 论

采用中低采伐强度,并且不同采伐强度交替进行采伐可使森林得以休整。在中低采伐强度下,森林生长量和更新量将大于采伐量,可为下一次高强度的采伐增加可采面积。但在较高的采伐目标下,这种提高采伐面积的方法也不能长期持续。本模拟结果表明,研究区 400 年间的平均采伐面积只增加了 0.95%~2.3%。

在总采伐强度不变的情况下,降低限伐区的采伐强度意味着增加商品林区的采伐强度,反之亦然(表 3),正是因为这样,在交替采伐时间增加到 20 和 30 年时,基本上没有预案可以显著提高采伐面积(表 5),且图 3 中以 30 年为交替采伐时间模拟的采伐面积比都在趋势线以下。

实施天然林保护工程以来,森林经营施行了分管理区采伐并且降低了采伐强度。但不管是当前采伐方案还是模拟采伐预案下的采伐面积均呈逐年下

降趋势(图 2、表 4)。虽然采用不同采伐强度进行 10 年交替采伐可以提高采伐面积,但仍不能达到每 10 年采伐 37.58% 的目标,说明目前的采伐强度($37.58\% \cdot 10 a^{-1}$) 仍然过高。通过模型模拟结果的比较,建议将采伐强度降至 $10\% \cdot 10 a^{-1}$ 以内,并采用不同采伐强度交替采伐,以有效提高采伐面积、完成采伐任务。

在较高强度的森林采伐干扰下,森林生态系统的树种组成和年龄结构也会随之改变。而通过 LANDIS 6.0 PRO 可以模拟树种组成和年龄结构的变化,这方面的研究有待进一步探讨。

模型验证是空间直观景观模型面临的一大挑战。由于缺乏独立的时空数据,常规的方法不适用于验证从现在到未来的预测性研究,特别是对那些模拟今后几百年的大尺度随机景观模型而言,目前尚没有完善的理论^[26]。LANDIS 模型已经过例行的模型程序评价,如灵敏度分析、不确定性分析和模型结构分析^[12],并应用于加利福尼亚、密苏里、大兴安岭图强林业局和呼中林业局、小兴安岭地区以及长白山保护区等区域景观的森林演替和干扰的研究,取得了重要成果,证明了模型的通用性和实用性^[3,23,27]。

虽然大气环流模型(GCMs)预测未来气候变化的总体趋势基本趋于一致^[28],但温室气体的增温效应及幅度大小具有很大的不确定性,仍存在很多分歧^[29]。因此,不同气候预案预测的树种组成与分布状况有所差异^[14,23]。而本文采用平均值的方法(模型集合)提高了气候预测的精度,减少了预测结果的不确定性。

LANDIS 6.0 PRO 模型基于像元个数仅能模拟采伐面积,不能模拟采伐蓄积量,这与我国目前的森林采伐制度不一致。但采伐面积与蓄积量之间在一定关系,以采伐面积比代替采伐蓄积量作为采伐强度,通过预案之间的对比研究可以揭示采伐量的变化。

参考文献

[1] Zhou Y-L (周以良). Vegetation of Xiaoxing'anling in China. Beijing: Science Press, 1994 (in Chinese)
[2] Bai W-G (白卫国), Wang Z-X (王祝雄). On sustainable forest management in forest areas of Northeast China. *Forest Resources Management* (林业资源管理), 2008(6): 1-7 (in Chinese)
[3] Bu RC, He HS, Hu YM, et al. Using the LANDIS model to evaluate forest harvesting and planting strategies under possible warming climates in Northeastern

- China. *Forest Ecology and Management*, 2008, **254**: 407–419
- [4] Zhao X-H (赵秀海). Optimal control of forestry harvest volume. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 1990, **18**(5): 43–48 (in Chinese)
- [5] Dai Y-L (代玉丽). Some issues of determining the sustainable forest harvest level. *Forest Resources Management* (林业资源管理), 2004(1): 15–17 (in Chinese)
- [6] Vanclay JK. Sustainable timber harvesting: Simulation studies in the tropical rainforests of north Queensland. *Forest Ecology and Management*, 1994, **69**: 299–320
- [7] Osho JSA. Optimal sustainable harvest models for a Nigerian tropical rain forest. *Journal of Environmental Management*, 1995, **45**: 101–108
- [8] Hein L, Ierland EV. Efficient and sustainable management of complex forest ecosystems. *Ecological Modelling*, 2006, **190**: 351–366
- [9] Dauber E, Fredericksen TS, Peña M. Sustainability of timber harvesting in Bolivian tropical forests. *Forest Ecology and Management*, 2005, **214**: 294–304
- [10] Gustafson EJ, Shifley SR, Mladenoff DJ, *et al.* Spatial simulation of forest succession and timber harvesting using LANDIS. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, **30**: 32–43
- [11] Gustafson EJ, Roberts LJ, Leefers LA. Linking linear programming and spatial simulation models to predict landscape effects of forest management alternatives. *Journal of Environmental Management*, 2006, **81**: 339–350
- [12] He HS, Mladenoff DJ. Spatially explicit and stochastic simulation of forest-landscape fire disturbance and succession. *Ecology*, 1999, **80**: 81–99
- [13] Mladenoff DJ. LANDIS and forest landscape models. *Ecological Modelling*, 2004, **180**: 7–19
- [14] He HS, Hao ZQ, Mladenoff DJ, *et al.* Simulating forest ecosystem response to climate warming incorporating spatial effects in north-eastern China. *Journal of Biogeography*, 2005, **32**: 2043–2056
- [15] Botkin DB, Wallis JR, Janak JF. Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *Journal of Ecology*, 1972, **60**: 849–872
- [16] Shugart HH. *A Theory of Forest Dynamics*. New York: Springer-Verlag, 1984
- [17] Roberts DW. Modelling forest dynamics with vital attributes and fuzzy systems theory. *Ecological Modelling*, 1996, **90**: 161–173
- [18] Mladenoff DJ, He HS. Design and behavior of LANDIS, an object-oriented model of forest landscape disturbance and succession// Mladenoff DJ, Baker WL, eds. *Advances in Spatial Modeling of Forest Landscape Change: Approaches and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
- [19] Xu C-G (徐崇刚), Hu Y-M (胡远满), Chang Y (常禹), *et al.* Spatially explicit landscape model-LANDIS I. mechanism. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(5): 837–844 (in Chinese)
- [20] Yan X-D (延晓冬), Fu C-B (符淙斌), Shugart HH. Simulating the effects of climate changes on Xiaoxing'an Mountain forests. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2000, **24**(5): 312–319 (in Chinese)
- [21] Yan X-D (延晓冬), Zhao S-D (赵士洞), Yu Z-L (于振良). Modeling growth and succession of north-eastern China forests and its applications in global change studies. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2000, **24**(1): 1–8 (in Chinese)
- [22] Sang W-G (桑卫国), Li J-W (李景文). Dynamics modeling of Korean pine forest in southern Lesser Xing'an Mountains of China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1998, **18**(1): 38–47 (in Chinese)
- [23] He HS, Mladenoff DJ, Gustafson EJ. Study of landscape change under forest harvesting and climate warming-induced fire disturbance. *Forest Ecology and Management*, 2002, **155**: 257–270
- [24] Bu RC. The Responses of Main Tree Species to Climate Warming in the Small Khingan Mountains. PhD Thesis. Shenyang: Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, 2006 (in Chinese)
- [25] Flato GM, Boer GJ. Warming asymmetry in climate change simulations. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**: 195–198
- [26] Xu C-G (徐崇刚), Hu Y-M (胡远满), Jiang Y (姜艳), *et al.* Validation of spatially explicit landscape model. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2003, **22**(6): 127–131 (in Chinese)
- [27] Hao Z-Q (郝占庆), Dai L-M (代力民), He H-S (贺红士), *et al.* Potential response of major tree species to climate warming in Changbai Mountain, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(5): 653–658 (in Chinese)
- [28] Liu G-H (刘国华), Fu B-J (傅伯杰). Effects of global climate change on forest ecosystems. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2001, **16**(1): 71–78 (in Chinese)
- [29] Shackley S, Young P, Parkinson S, *et al.* Uncertainty, complexity and concepts of good science in climate change modelling: Are GCMs the best tools? *Climatic Change*, 1998, **38**: 159–205

作者简介 郭锐,女,1985年生,硕士研究生.主要从事景观生态学研究. E-mail: remainr@126.com

责任编辑 杨弘