

模拟轮伐期长短对杉木人工林氮动态的影响

辛赞红¹, 江洪^{1,2}, 接程月¹, 魏晓华³, BLANCO Juan³, 周国模¹

(1. 浙江农林大学 国际空间生态与生态系统生态研究中心, 浙江 临安 311300; 2. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093; 3. 不列颠哥伦比亚大学 地球与环境科学系, 不列颠哥伦比亚 基隆那 V1V1V7)

摘要: 近年来由于杉木 *Cunninghamia lanceolata* 连栽造成生产力日趋下降, 已严重影响了杉木人工林的持续经营。运用 FORECAST 模型模拟杉木人工林在 200 a 间的生长情况, 从而揭示其在不同轮伐期下氮循环的特点。模拟分好、中、差 3 种立地条件和 10, 25, 50 a 等 3 个不同的轮伐期长度。预测结果显示: 杉木人工林氮的吸收量和归还量都随着轮伐期的增长而增加; 叶片氮的含量也随着轮伐期的增长而增大; 土壤有效氮在 25 a 轮伐期时下降, 而后随着轮伐期变长又有所回升。以中等立地为例, 10, 25, 50 a 轮伐期土壤有效氮的 200 a 的平均值分别为 96.24, 86.87 和 96.07 kg·hm⁻²; 吸收氮的平均值分别为 49.22, 58.44 和 69.07 kg·hm⁻²; 凋落物形式归还氮的平均值分别为 26.75, 44.76 和 60.74 kg·hm⁻²。随着轮伐期增长, 氮的循环系数增大, 不同轮伐期的前 4 个轮伐期(前 4 代)氮的循环系数分别为 0.544, 0.766, 0.847 和 0.879。模型预测的氮的吸收量与实测值具有很高的拟合度, 达到显著水平。图 6 表 1 参 34

关键词: 森林生态学; 杉木; 轮伐期; 氮动态; FORECAST 模型

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2011)06-0855-08

Simulated nitrogen dynamics for a *Cunninghamia lanceolata* plantation with selected rotation ages

XIN Zan-hong¹, JIANG Hong^{1,2}, JIE Cheng-yue¹, WEI Xiao-hua³, BLANCO Juan³, ZHOU Gou-mo¹

(1. International Research Center of Spatial Ecology and Ecosystem Ecology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 3. Department of Earth and Environmental Sciences, University of British Columbia Okanagan, Kelowna V1V1V7, BC, Canada)

Abstract: To show nitrogen dynamics for successive rotations of *Cunninghamia lanceolata* plantations with declining productivity and the affect on sustainable management, the FORECAST model was used to simulate 200 years of growth for *Cunninghamia lanceolata* plantations with different rotation ages in China. Results suggested that N uptake, N return to the soil, and foliar N content could increase with a longer rotation age. The model showed that soil available N decreased with a 25-year rotation age and then increased with longer rotation ages. With the medium site, the average soil available N was 96.24 kg·hm⁻² for a 10-year rotation age, 86.87 kg·hm⁻² for a 25-year rotation age, and 96.07 kg·hm⁻² for a 50-year rotation age; the average uptake N

收稿日期: 2010-12-29; 修回日期: 2011-03-07

基金项目: 科学技术部重大国际合作项目(200073819); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2010CB950702, 2010CB428503, 2005CB422207, 2005CB422208); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(2009AA122001, 2009AA12205); 科技部重大基础性项目(2007FY110300-08); 国家自然科学基金资助项目(40671132); 浙江省重大科技专项(2008C13G2100010)

作者简介: 辛赞红, 从事森林生态模型研究, E-mail: zanhoon812@yahoo.com.cn。通信作者: 江洪, 教授, 博士生导师, 从事生态系统生态学、环境遥感、生态模型与模拟等研究。E-mail: jianghong_china@hotmail.com

was $49.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for a 10-year rotation age, $58.44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for a 25-year rotation age, and $69.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for a 50-year rotation age; and the average return of N to the soil was $26.75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for a 10-year rotation age, $44.76 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for a 25-year rotation age, and $60.74 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for a 50-year rotation age. The recycled N ratios from the first four rotations were 0.544, 0.766, 0.847, and 0.879. [Ch, 6 fig. 1 tab. 34 ref.]

Key words: forest ecology; *Cunninghamia lanceolata*; rotation age; nitrogen dynamics; FORECAST model

森林生态系统的养分循环是生态系统的重要功能过程之一,直接影响着森林的生产力^[1-2]。作为生命必需元素之一的氮是影响森林生态系统生产力的重要限制因素^[2]。研究一定立地条件下森林生态系统中氮元素的分配、积累和循环,可以进一步认识森林生态系统的功能^[3]。这对于改进森林经营策略,促进林木速生、丰产、优质也有重要意义。杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是中国南方最重要的用材树种,生长快,材质好,单产高,已有 1 000 多年的栽培历史,在中国南方林业生产中占举足轻重的地位^[4]。近年来由于杉木连栽造成生产力日趋下降,已严重影响了杉木人工林的持续经营^[5-8]。长期定位试验是研究森林连栽或轮伐对地力影响的重要方法,但是,其需时长,不确定性大,操作起来有很大的难度。现阶段,利用模型进行相关的模拟,已是一个重要的发展趋势^[9-10]。森林生态系统生物地球化学过程模拟模型是了解森林生态系统生物组分与其无机环境之间相互作用的重要工具^[9]。目前已经开发出了许多种生态系统过程模拟模型用以森林生态系统的研究^[10-13], FORECAST 模型也是其中重要的一种^[14]。本研究通过运用 FORECAST 模型模拟杉木人工林在不同轮伐期的生长过程,揭示其氮循环的特点,从而为深入了解杉木人工林在连栽条件下的养分循环机理和杉木人工林的合理经营管理提供基础数据。

1 研究方法

1.1 FORECAST 及其氮循环的简单示意图

FORECAST 模型是一个以林分群体特征及林地养分循环为基础的森林生态系统管理模型^[14]。FORECAST 模型关注的是土壤有机物和营养库不断变化的层面上树木的生长状况和林材的收获产量。运用该模型进行模拟可以得到土壤有机物和营养库中各种营养元素循环变化的情况。FORECAST 模型使用的模拟方法是将生物产量表方法和过程模拟方法相结合的混合模拟方法。模型的驱动函数是叶氮同化率(FNE)。FORECAST 模型氮循环的简单示意图 1 所示。

1.2 杉木 FORECAST 模型的校准和应用

FORECAST 模型的应用有 4 个步骤:①数据的收集、输入和验证;②建立生态系统模拟运行的初始条件;③定义森林管理方式或者干扰方式;④模拟各种管理方式并分析模型输出结果。前 2 个步骤即为模型的参数校准。模型的校准数据是由描述不同养分条件林地上林木(地上部分和地下部分)和小型植被按照林分生长的时间序列而逐渐累积的生物量的数据组成。林木生物量和林分自疏率通常由树高、胸径和林分密度结合具有树种特异性的组分生物量异速生长方程得到。在模型的养分模拟部分,需要不同养分在各种生物量组分中的含量的数据。模型同时还需要不同叶量所产生的遮光度的数据和树叶对不同光照强度响应的数据。模型校准所需的这些数据主要来自于文献,包括福建、湖南等主要杉木中心产区的研究报告和江西、广西等气候相似区域的杉木林的研究文献。

第 2 阶段的校准需要在“设置”模式下运行模型来建立立地初始条件。在这个阶段,模型运行时需关闭养分反馈,从而使表示立地条件的植被、凋落物和土壤有机质得以积累,这反映出历史的积累模式。

杉木人工林的模型参数在借鉴 Bi 等^[15]的基础上进行了一些调整,数据主要来源于田大伦等编著的《杉木林生态系统》以及盛炜彤等编著的《杉木人工林长期生产力保持机制研究》。模型中的降水营养输入、坡面渗流、矿质土壤阳离子和阴离子交换能力、腐殖质质量、凋落物分解速率等数据来源于廖利平等^[16-17]、黄志群等^[18]、丁应祥等^[19]、杨玉盛等^[20]的研究结果。树木生物量、死亡率和林分密度、树高以及林冠高度、活组织的营养浓度的数据以杨玉盛等^[21]、肖文发等^[22]、林开敏等^[23]、刘茜等^[24]、周后盛等^[25]发表的数据为基础。

1.4 模拟方案

模型的校准数据来自中国可观测的杉木人工林范围内的所有立地,立地按照质量情况分为较差、中

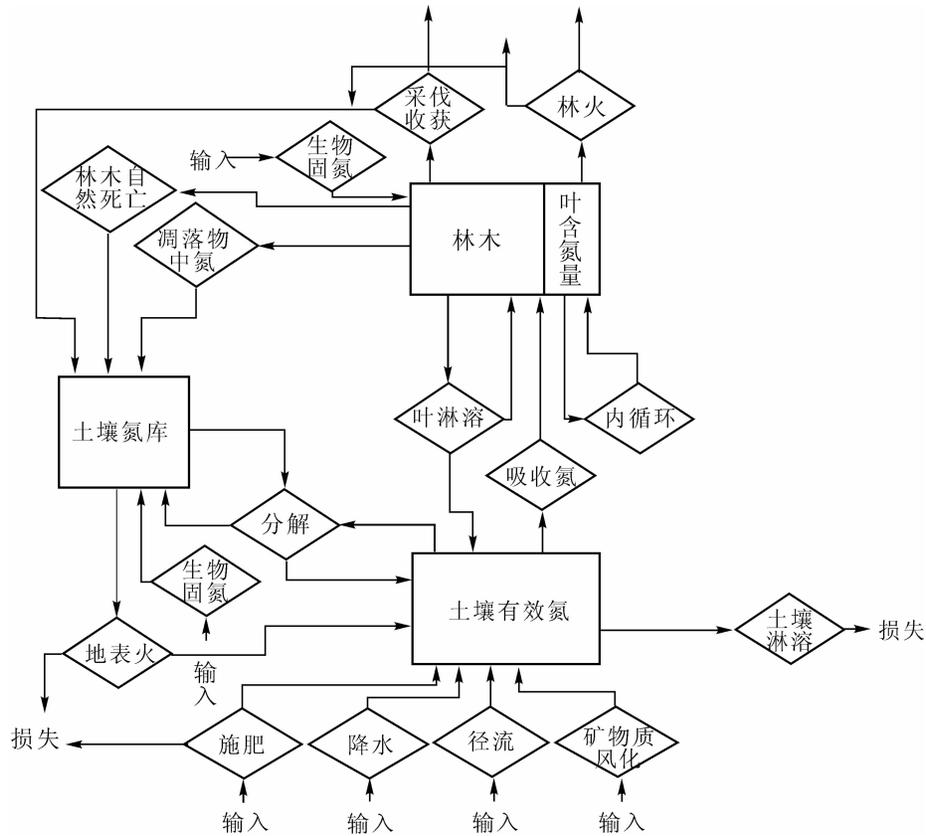


图 1 FORECAST 模型氮循环的简单示意图

Figure 1 Diagram of nitrogen cycling in FORECAST model

等、较好，并被量化为 17, 21 和 27(从差到好，基于优势木 50 a 的生长高度)来代表模型推演林木生长的相关指数。FORECAST 模型中数量化的立地质量可以是但并不是必须基于立地指数即某一指数年龄优势木的平均高度^[26-27]。模拟的年限为 200 a；3 种不同的轮伐期为 10, 25 和 50 a；模拟的收获方式为茎干采伐法(每次轮伐期末除去 90%的树干生物量，残留部分均遗留在原地)。除采伐收获外没有其他干扰。

2 模拟结果

2.1 FORECAST 模型模拟结果的检验

模型验证有很多方法。本研究采用模型模拟结果与实验测量数据对比的方法来进行验证。由于比较不同轮伐期(不同代数)养分氮循环的研究很少，所以我们获得的相关文献数据非常有限。根据刘爱琴等^[1]的结果，可以得到立地指数为 16 的 2 代 11 年生和 31 年生杉木人工林氮吸收量的数据。由模拟结果可知，3 种不同立地 20 a 的优势木高分别为：较差立地 12.1 m，中等立地 15.3 m，较好立地 19.1 m。对照文献地位指数，可以选用中等立地 11 a 轮伐期末和 31 a 轮伐期末的氮吸收量数据与文献数据进行比较。模拟结果与实测数据的对比如表 1。将模拟结果与实测数据作回归分析，可得方程 $y = 1.895 6x - 76.728$, $r^2 = 0.969 3^{**}$ 。由此可见：模型模拟第 1 代和第 2 代杉木人工林氮的吸收量有较高的可信度。

2.2 土壤有效氮的模拟结果

由图 2 可见：3 种不同立地条件下，轮伐期长短对土壤有效氮含量有显著的影响。在较差立地上，10 a 轮伐期的前 5 个轮伐期土壤有效氮含量较大，下降也较快；从第 6 个轮伐期开始有小幅下降，然后逐渐过渡到平稳。25 a 轮伐期的第 1 个轮伐期，其土壤有效氮含量小于 10 a 轮

表 1 氮吸收量预测数据与实测数据对比

Table 1 Comparison between predicted data and observed data

氮吸收量	11 a 轮伐期/(kg·hm ⁻²)		31 a 轮伐期/(kg·hm ⁻²)	
	第 1 代	第 2 代	第 1 代	第 2 代
实测数据	78.35	72.78	77.96	75.72
预测结果	70.73	61.05	72.06	67.05

伐期第1个轮伐期的值,但是25 a轮伐期的下降幅度较小,并且在第2个轮伐期之后就逐渐平稳。50 a轮伐期的土壤有效氮含量高于25 a轮伐期的土壤有效氮含量,并且高于第2个轮伐期之后的10 a轮伐期的值;50 a轮伐期的土壤有效氮含量在各个轮伐期之间的变化不大。中等立地和较好立地有相似的规律,只是相比差等立地25 a轮伐期的值要低于10 a轮伐期的值。

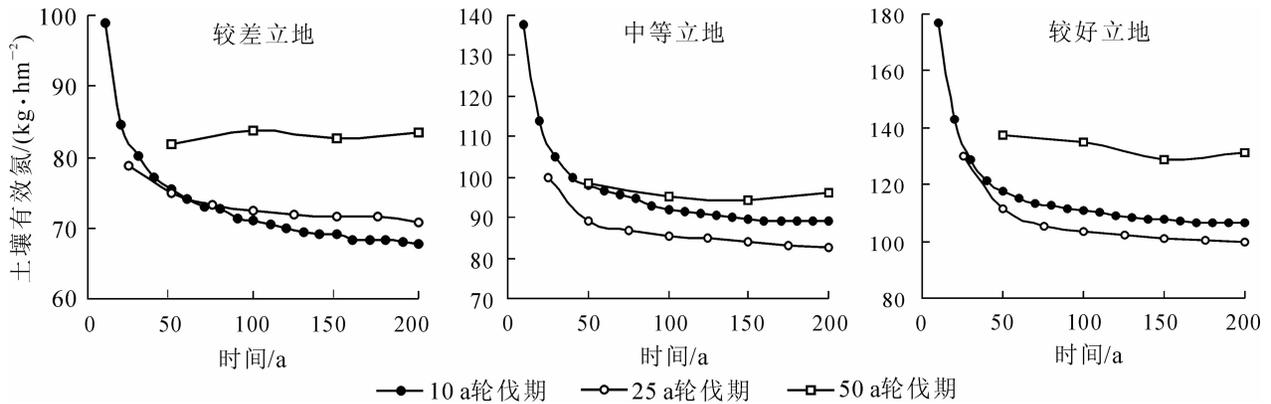


图2 杉木人工林不同轮伐期土壤有效氮含量

Figure 2 Soil available N in different rotations of Chinese fir plantation

2.3 氮的吸收量和归还量

由图3和图4可见:3种不同立地条件下,氮的年吸收量和凋落物形式氮的年归还量,总体趋势都是随着轮伐期的增长而增加,随着轮伐代数的增加而减少。10 a轮伐期的吸收量和归还量在前4个轮伐

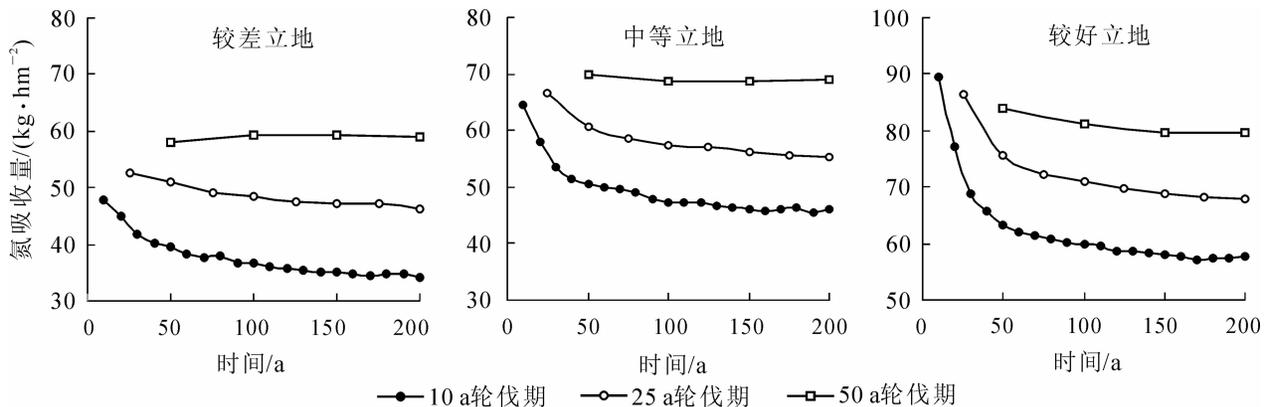


图3 不同轮伐期氮的年均吸收量

Figure 3 Uptake N in different rotations of Chinese fir plantation

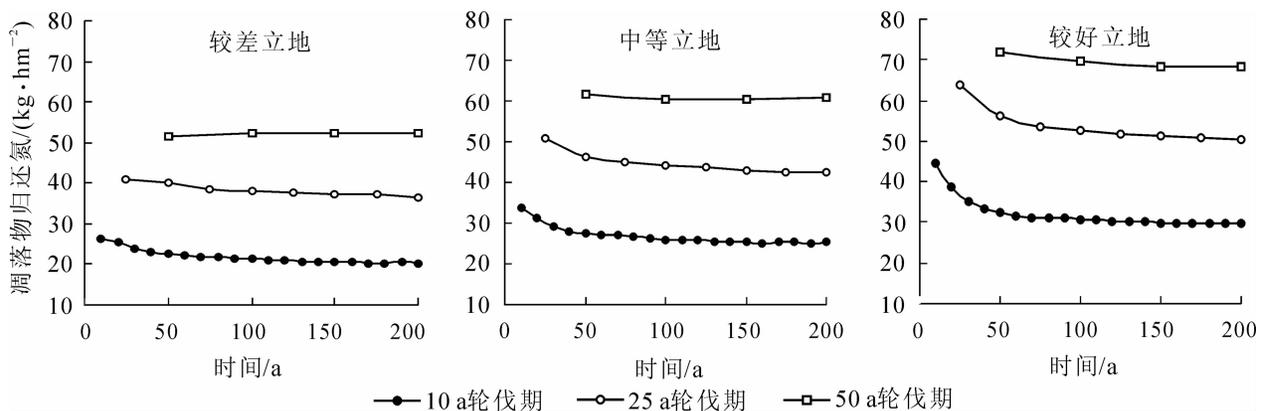


图4 不同轮伐期凋落物形式氮的年归还量

Figure 4 Average quantity of N returned by litterfall at different rotations

期有明显的下降，而且下降幅度相较 25 a 轮伐期要大；50 a 轮伐期的吸收量和归还量，在各轮伐期之间变化不大，趋势相对比较平稳。由于模拟采用的是茎干采伐的收获方式，枝叶和根均遗留在原地，所以大量的氮以凋落物的形式归还给土壤。以中等立地为例，不同轮伐期氮的循环系数^[28](即氮的年归还量比氮的年吸收量)分别为：0.544, 0.766, 0.847 和 0.879，可见随着轮伐期增长氮的循环系数增大。

2.4 土壤中氮的年淋溶损失

由图 5 可知：杉木人工林的土壤氮淋溶损失量总体是随着立地条件的变好而增大。3 种不同立地条件下，10 a 轮伐期的年平均土壤氮淋溶损失量较大，并且在前 3 个轮伐期表现尤为明显，3 个轮伐期之后逐渐平稳；25 a 轮伐期的年均土壤氮淋溶损失量较小，只在第 1 个轮伐期和第 2 个轮伐期之间变化比较大；50 a 轮伐期的年均土壤氮淋溶损失量较小，轮伐期之间的变化也不大。总体趋势上，较差立地和中等立地，土壤氮淋溶损失量都是随着轮伐期的增长而减小；较好立地 50 a 轮伐期的土壤氮淋溶损失量要大于 25 a 轮伐期的土壤氮淋溶损失量，但是小于 10 a 轮伐期的淋溶量。

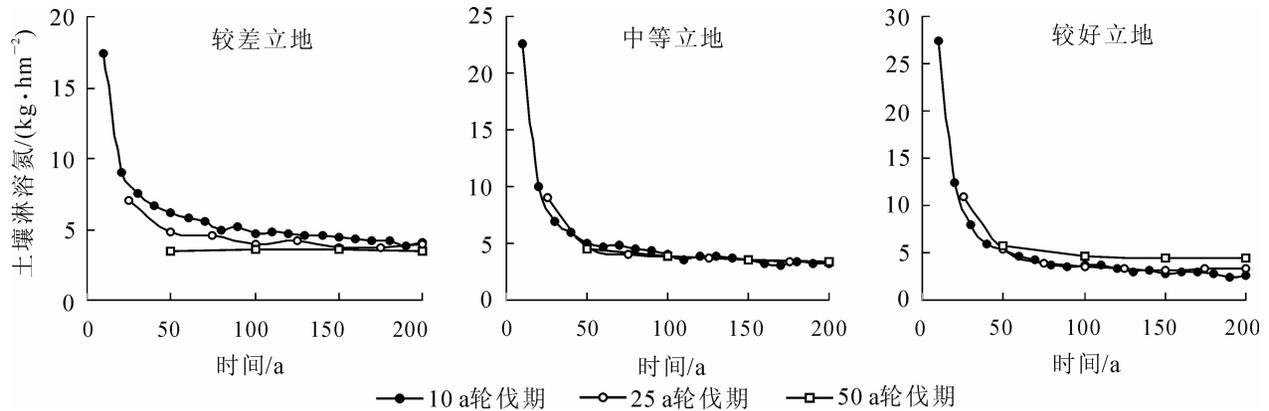


图 5 不同轮伐期土壤氮的淋溶损失量

Figure 5 Chinese fir plantation soil N leaching loss at different rotations

2.5 叶片含氮量的动态

叶片含氮量是 FORECAST 模型一个重要的输出参数。通过这个参数，我们可以看出伴随着林分生长，氮元素在叶片中积累的量。图 6 显示了 3 种立地条件下，不同轮伐期叶片含氮量的变化趋势。由图 6 可知：随着轮伐期的增长积累在叶片中的氮逐渐增加。10 a 轮伐期的叶片含氮量随着立地条件变好与 25 a 轮伐期的差距逐渐减小，这可能是因为随着立地条件的变好，林木迅速生长，使得 10 a 轮伐期的密度优势逐渐显现了出来，从而造成了叶片含氮量在总量上的增加。

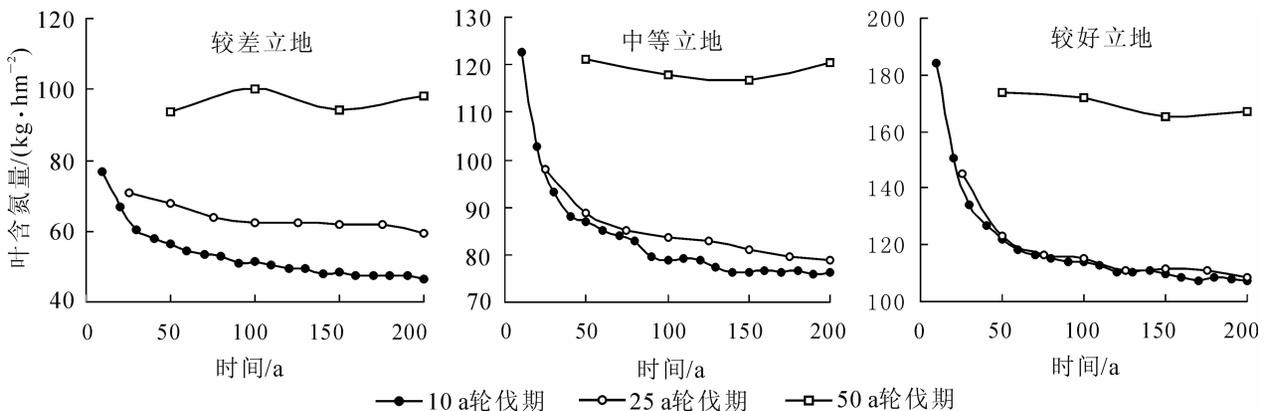


图 6 杉木人工林不同轮伐期叶片氮含量的动态

Figure 6 Chinese fir plantation foliage N dynamics at different rotations

3 分析与讨论

3.1 FORECAST 模型模拟的精度

FORECAST 模型通过大量森林生态系统的模拟, 已得到了较好的检验^[29-34]。对于杉木森林生态系统, Bi 等^[15]作了实测数据与模拟结果的测试, 证明模拟结果精度较高。本模拟的结果也证明, FORECAST 模型模拟杉木林生态系统氮循环的关键变量, 具有较高的模拟精度, 可以广泛应用在有关的模拟实践中。

3.2 不同轮伐期杉木人工林生态系统氮元素的变化趋势

轮伐期的长短会影响杉木人工林氮元素的循环和利用。彭长辉等^[10]、江洪等^[11]运用Century 4.0 模型对加拿大北方森林和中国北方森林所做的研究显示, 在采伐强度一定的情况下, 土壤有效氮含量在长轮伐期下最大, 并且随着轮伐期的缩短而减小。极短的轮伐期会造成北方森林减产达 65%。通过 FORECAST 模型的模拟结果我们可以看出: 在采伐方式一定的情况下, 短轮伐期(10 a)土壤有效氮含量下降, 氮吸收量降低, 长轮伐期(50 a)土壤有效氮和氮的吸收都保持较大的量并且轮伐期之间的变化较平稳。随着轮伐期的增长, 凋落物形式氮的年归还量也逐渐增大。以中等立地为例, 10, 25, 50 a 轮伐期土壤有效氮 200 a 的平均值分别为 96.24, 86.87 和 96.07 kg·hm⁻²; 25 a 轮伐期相对 10 a 轮伐期减少了 9.7%; 50 a 轮伐期与 10 a 轮伐期基本持平, 相对 25 a 轮伐期增加 10.6%。吸收氮的平均值分别为 49.22, 58.44 和 69.07 kg·hm⁻²; 25 a 轮伐期相对 10 a 年轮伐期增加了 18.7%; 50 a 轮伐期相对 10 a 轮伐期增加了 40.3%, 相对 25 a 轮伐期增加 18.2%。凋落物形式归还氮的平均值分别为 26.75, 44.76 和 60.74 kg·hm⁻²; 25 a 轮伐期相对 10 a 年轮伐期增加了 67.3%; 50 a 轮伐期相对 10 a 轮伐期增加了 127.1%, 相对 25 a 轮伐期增加 35.7%。从模拟结果看: 10 a 短轮伐期下土壤氮的淋溶损失总量, 较差立地为 1 167.57 kg·hm⁻², 中等立地为 1 075.27 kg·hm⁻², 较好立地为 1 085.70 kg·hm⁻²; 25 a 轮伐期分别为 895.05, 893.60 和 924.28 kg·hm⁻²; 50 a 轮伐期分别为 707.33, 765.98 和 959.05 kg·hm⁻²。10 a 短轮伐期土壤氮的淋溶损失总量均高于同等立地条件下 25 a 轮伐期和 50 a 轮伐期的总量。从以上模拟结果可以看出: 轮伐期的长短对杉木人工林生态系统氮元素的循环和利用具有重要影响, 过短的轮伐期会导致土壤有效氮含量下降, 氮吸收量降低, 淋溶损失增加, 从而破坏土壤肥力, 造成林木生产力的下降。

3.3 连栽代数对杉木人工林氮元素循环和利用的影响

从模拟结果可以看出: 相同轮伐期不同代数杉木林的氮循环和利用存在着显著差异。随着代数的增加, 土壤有效氮含量、年吸收量和年归还量均呈递减趋势, 而且这种趋势随着轮伐周期的变短而愈加明显。以中等立地前 4 代(即前 4 个轮伐期)为例, 10 a 轮伐期的第 2 代、第 3 代和第 4 代土壤有效氮较第 1 代分别减少了 17.2%, 23.6%和 27.2%; 年吸收量分别减少了 10.1%, 16.9%和 20.4%; 年归还量分别减少了 8.1%, 14.1%和 17.9%。25 a 轮伐期的第 2 代、第 3 代和第 4 代土壤有效氮相较第 1 代分别减少了 10.6%, 13.1%和 14.5%; 年吸收量分别减少了 9.2%, 12.0%和 13.9%; 年归还量分别减少了 8.9%, 11.8%和 13.4%。可见, 随着杉木连栽代数的增加, 土壤有效氮减少, 土壤供肥和保肥的能力下降, 吸收氮和凋落物归还氮的量也在减少, 从而可能导致林分产量的降低。本研究的模拟结果中, 第 1 代、第 2 代和第 3 代土壤有效氮的变化幅度较大, 这与盛炜彤^[6]、杨玉盛等^[22]研究者的结论相似。

3.4 展望

在这次模拟工作中, 只是研究不同立地条件下轮伐期长短对杉木人工林生态系统氮动态的影响, 而没有考虑炼山、整地和疏伐等育林干扰。我们将进一步完善模型, 加入炼山、整地、疏伐等育林措施, 使模型模拟更贴近现实的生产管理, 为杉木人工林的合理经营提供更为准确的数据。

参考文献:

- [1] 刘爱琴, 范少辉, 林开敏, 等. 不同栽植代数杉木林养分循环的比较研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11 (2): 273 - 278.
LIU Aiqin, FAN Shaohui, LIN Kaimin, *et al.* Comparison on nutrient cycling in different generation plantations of Chinese-fir [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2005, 11 (2): 273 - 278.
- [2] 湛小勇, 潘维俦. 杉木人工林生态系统中氮素的动态特征[J]. 生态学报, 1989, 9 (3): 201 - 206.

- SHEN Xiaoyong, PAN Weichou. Nitrogen dynamics of Chinese-fir plantation ecosystem [J]. *Acta Ecol Sin*, 1989, **9** (3): 201 – 206.
- [3] 沈国航, 董世仁, 聂道平. 油松人工林养分循环的研究营养元素的含量及分布[J]. 北京林学院学报, 1985, **7** (4): 1 – 14.
- SHEN Guofang, DONG Shiren, NIE Daoping. Study on nutrient cycling in *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem [J]. *J Beijing For Coll*, 1985, **7** (4): 1 – 14.
- [4] 范少辉, 盛炜彤, 马祥庆, 等. 多代连栽对不同发育阶段杉木人工林生产力的影响[J]. 林业科学研究, 2003, **16** (5): 560 – 567.
- FAN Shaohui, SHENG Weitong, MA Xiangqing, *et al.* Effects of successive-generation planting on Chinese-fir plantation productivity at different development stages [J]. *For Res*, 2003, **16** (5): 560 – 567.
- [5] 徐化成. 关于人工林的地力下降问题[J]. 世界林业研究, 1992, **5** (1): 66 – 73.
- XU Huacheng. On the plantation soil fertility declination [J]. *World For Res*, 1992, **5** (1): 66 – 73.
- [6] 盛炜彤. 人工林地力衰退研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.
- [7] 俞新妥. 杉木林地持续利用问题的研究和看法[J]. 世界林业研究, 1993, **6** (2): 80 – 86.
- YU Xintuo. Study and suggestions on the sustainable utilization of Chinese fir land [J]. *World For Res*, 1993, **6** (2): 80 – 86.
- [8] 马祥庆. 杉木人工林连栽生产力下降研究进展[J]. 福建林学院学报, 2001, **21** (4): 380 – 384.
- MA Xiangqing. Advance in researches on productivity decline of repeating Chinese fir forests [J]. *J Fujian Coll For*, 2001, **21** (4): 380 – 384.
- [9] KROS H, WARFVINGE P. Evaluation of model behaviour with respect to the biogeochemistry at the *Solling spruce* site [J]. *Ecol Model*, 1995, **83**: 255 – 262.
- [10] PENG Changhui, JIANG Hong, APPS M J, *et al.* Effects of harvesting regimes on carbon and nitrogen dynamics of boreal forests in central Canada: a process model simulation [J]. *Ecol Model*, 2002, **155**: 177 – 189.
- [11] JIANG Hong, APPS M J, PENG Changhui, *et al.* Modeling the influence of harvesting on Chinese boreal forest carbon dynamics [J]. *For Ecol Manage*, 2002, **169**: 65 – 68.
- [12] FERRIER R C, WRIGHT R F, COSBY B J, *et al.* Application of the MAGIC model to the Norway spruce stand at Solling, Germany [J]. *Ecol Model*, 1995, **83**: 77 – 84.
- [13] VERBURG P S J, JOHNSON D W. A spreadsheet-based biogeochemical model to simulate nutrient cycling processes in forest ecosystems [J]. *Ecol Model*, 2001, **141**: 185 – 200.
- [14] 接程月, 辛赞红, 信晓颖, 等. FORECAST 模型的原理、方法和应用[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26** (6): 909 – 915.
- JIE Chengyue, XIN Zanhong, XIN Xiaoying, *et al.* Principle, method and application of FORECAST model [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26** (6): 909 – 915.
- [15] BI J, BIANCO J A, SEELY B, *et al.* Yield decline in Chinese-fir plantations: a simulation investigation with implications for model complexity [J]. *Can J For Res*, 2007, **37**: 1615 – 1630.
- [16] 廖利平, 杨跃军, 汪思龙, 等. 杉木 *Cunninghamia lanceolata*, 火力楠 *Michelia macclurei* 纯林及其混交林细根分布、分解与养分归还[J]. 生态学报, 1999, **19** (3): 246 – 250.
- LIAO Liping, YANG Yuejun, WANG Silong, *et al.* Distribution, decomposition and nutrient return of the fine root in pure *Cunninghamia lanceolata*, *Michelia macclurei* and the mixed plantations [J]. *Acta Ecol Sin*, 1999, **19** (3): 246 – 250.
- [17] 廖利平, 马越强, 汪思龙, 等. 杉木与主要阔叶造林树种凋落物的混合分解[J]. 植物生态学报, 2000, **24** (1): 27 – 33.
- LIAO Liping, MA Yueqiang, WANG Silong, *et al.* Decomposition of leaf litter of Chinese fir in mixture with major associated broad-leaved plantation species [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2000, **24** (1): 27 – 33.
- [18] 黄志群, 廖利平, 汪思龙, 等. 杉木根桩和周围土壤酚含量的变化及其化感效应[J]. 应用生态学报, 2000, **11** (2): 190 – 192.
- HUANG Zhiqun, LIAO Liping, WANG Silong, *et al.* Dynamics of phenolics content of Chinese fir stump-roots and the rhizosphere soil and its allelopathy [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2000, **11** (2): 190 – 192.

- [19] DING Yingxiang, TIAN Ye. A testing simulation with FOORTOON on long-term productivity of Chinese fir plantations [J]. *For Study China*, 1999, **1** (2): 34 – 38.
- [20] 杨玉盛, 陈光水, 黄宝龙. 杉木多世代连栽的土壤水分和养分变化[J]. 南京林业大学学报, 2000, **24** (2): 25 – 28.
YANG Yusheng, CHEN Guangshui, HUANG Baolong. Variation in the soil water and nutrients between different rotation stands of Chinese fir [J]. *J Nanjing For Univ*, 2000, **24** (2): 25 – 28.
- [21] 杨玉盛, 邱仁辉, 何宗明, 等. 不同栽杉代数 29 年生杉木林净生产力及营养元素生物循环的研究 [J]. 林业科学, 1998, **34** (6): 3 – 11.
YANG Yusheng, QIU Renhui, HE Zongming, *et al.* Study on the stand net productivity and biological cycle of nutrients in the 29-year-old plantations of Chinese fir on different rotations [J]. *Sci Silv Sin*, 1998, **34** (6): 3 – 11.
- [22] 肖文发, 聂道平, 张家诚. 我国杉木林生物量与能量利用率的研究[J]. 林业科学研究, 1999, **12** (3): 253 – 258.
XIAO Wenfa, NIE Daoping, ZHANG Jiacheng. Study on biomass and energy use efficiency of the stands of *Cunninghamia lanceolata* in China [J]. *For Res*, 1999, **12** (3): 253 – 258.
- [23] 林开敏, 俞新妥, 何智英, 等. 不同密度杉木林分生物量结构与土壤肥力差异研究[J]. 林业科学, 1996, **32**(5): 385 – 392.
LIN Kaimin, YU Xintuo, HE Zhiying, *et al.* Study on the difference of biomass structure and soil fertility in Chinese fir stands of different densities [J]. *Sci Silv Sin*, 1996, **32** (5): 385 – 392.
- [24] 刘茜. 杉木种子营养化学成分的研究[J]. 林业科学, 1998, **34** (2): 92 – 95.
LIU Qian. A study on the chemical composition of Chinese fir seeds [J]. *Sci Silv Sin*, 1998, **34** (2): 92 – 95.
- [25] 周后盛. 杉木多代连栽地营造混交林生产力的初步研究[J]. 福建林学院学报, 1999, **19** (2): 165 – 169.
ZHOU Housheng. Study on productivity of mixed forest planted on site of continuously planted Chinese fir [J]. *J Fujian Coll For*, 1999, **19** (2): 165 – 169.
- [26] KIMMINS J P, MAILLY D, SEELY B. Modeling forest ecosystem net primary production: the hybrid simulation approach used in FORECAST [J]. *Ecol Model*, 1999, **122**: 195 – 224.
- [27] KIMMINS J P. *Scientific Foundations for the Simulation of Ecosystem Function and Management in FORCYTE-II* [R]. Vancouver: University of British Columbia. Faculty of Forestry. Department of Forest Sciences, 1993: 3 – 7.
- [28] 方晰, 田大伦, 蔡宝玉, 等. 第 2 代杉木人工林氮、磷、钾的吸收、积累和迁移[J]. 中南林学院学报, 2002, **22** (2): 1 – 6.
FANG Xi, TIAN Dalun, CAI Baoyu, *et al.* Absorption, accumulation and transportation of N, P, K elements in the second-generation Chinese-fir plantation [J]. *J Central South For Univ*, 2002, **22** (2): 1 – 6.
- [29] MORRIS D M, KIMMINS J P, DUCKERT D R. The use of soil organic matter as a criterion of the sustainability of forest management alternatives: a modeling approach using FORECAST [J]. *For Ecol Manage*, 1997, **94**: 61 – 78.
- [30] WEI Xiaohua, LIU W, WATERHOUSE J, *et al.* Simulations on impacts of different management strategies on long-term site productivity in lodgepole pine forests of the central interior of British Columbia [J]. *For Ecol Manage*, 2000, **133**: 217 – 229.
- [31] WEI Xiaohua, KIMMINS J P, ZHOU Guoyi. Disturbance and the sustainability of long-term site productivity in lodgepole pine forests in the central interior of British Columbia: an ecosystem modeling approach [J]. *Ecol Model*, 2003, **164**: 239 – 256.
- [32] SEELY B, WELHAM C, KIMMINS J P. Carbon sequestration in boreal forest ecosystem: results from the ecosystem simulation model, FORECAST [J]. *For Ecol Manage*, 2002, **169**: 123 – 135.
- [33] WELHAM C, SEELY B, KIMMINS J P. The utility of the two-pass harvesting system: an analysis using the ecosystem simulation model FORECAST [J]. *Can J For Res*, 2002, **32**: 1071 – 1079.
- [34] REICH P B, GRIGAL D F, ABER J D, *et al.* Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils [J]. *Ecology*, 1997, **78**: 335 – 347.