

专题论述

森林生态系统混合斑块模型模拟机理、应用及启示*

张旭峰¹ 吴水荣¹ Manfred Lexer² 陈绍志³ 余洋婷¹

(1 中国林业科学研究院林业科技信息研究所,北京 100091;2 奥地利维也纳自然资源与应用生命科学大学,维也纳 1190;3 中国绿色时报社,北京 100714)

摘要:随着人们对森林多功能性认识加深及对森林多种产品与服务的需求增加,森林经营受到更广泛的关注。传统设置样地比较经营活动效果的方式在时间上具有迟滞性,学者认为应采用数学模型对森林经营进行计算机仿真,森林生长与动力学模型在森林可持续经营中应用的作用愈加突出。文中对基于林分经营尺度的森林生态系统混合斑块模型(PICUS)进行引介,详细介绍了其2个基础组成模型——林窗模型与基于生理过程的3-PG模型,对PICUS模型的林木死亡率、更新、森林经营以及森林生态系统地下过程等子模块进行了简要概述,并阐述了该模型在欧洲及中国的应用与启示,对于促进PICUS模型在实践中的推广应用以及提高人们对森林生长过程与动态的认识和理解具有重要意义。

关键词:森林生态系统,计算机仿真,PICUS模型,林窗模型,3-PG模型

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1001-4241(2020)01-0001-07

DOI:10.13348/j.cnki.sjlyyj.2019.0088.y

Forest Ecosystem Hybrid Patch Model: Modelling Mechanism, Application and Inspiration Zhang Xufeng¹ Wu Shuirong¹ Manfred Lexer² Chen Shaozhi³ Yu Yangting¹

(1 Research Institute of Forestry Policy and Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2 University of Natural Resources and Life Sciences Vienna, Vienna 1190, Austria; 3 China Green Times, Beijing 100714, China)

Abstract: As people have gained the awareness of forest multi-functionality and set more demand for forest ecosystem goods and services, forest management has drawn a wide attention. However, the conventional way of setting sample plots takes time to reflect the effects of forest management. People begin to apply mathematic models to simulate the forest management. Models of forest growth and dynamics play an increasingly prominent role in the development of sustainable forest management. This paper introduces the PICUS model (Forest Ecosystem Hybrid Patch Model), especially the two fundamental models, i. e., forest gap model and 3-PG model, elaborates the sub-/modules of mortality, regeneration, management and underground process of forest ecosystem, and discusses the PICUS model application in the Europe and China and its inspiration. This study is of great significance to promote the application of PICUS model in practices and increase the understanding of forest growth and dynamics.

Keywords: forest ecosystem, simulation, PICUS model, forest gap model, 3-PG model

* 收稿日期:2019-04-24;修回日期:2019-10-14;网络出版日期:2019-10-15。

基金项目:国家自然科学基金“树种选择与配置对森林多重服务功能的影响机制及模拟优化研究”(31270681);国家林业局林业软科学研究项目“我国森林经营经济理论创新与决策优化研究”(2016-R18);国家林业局948项目“人工林多功能经营及模拟预测技术引进”(2012-4-69)。

第一作者:张旭峰,博士研究生,研究方向为森林资源管理与环境经济,E-mail: xufengzhang010@163.com。

通信作者:吴水荣,博士,研究员,研究方向为森林资源与环境经济、森林多目标经营管理、气候变化林业政策,E-mail: shuirongwu@126.com。

当前全球气候变化形势严峻,国内木材供需总量矛盾与结构性矛盾并存,社会对于良好的生态系统服务的需求日渐高涨^[1-3]。森林对于木材供给的唯一主体地位以及森林生态系统对陆地生态系统的主体地位^[4],共同决定了森林生态系统的可持续管理事关人类命运、经济发展与社会公平的大局^[5]。国家林业和草原局发布的《全国森林经营规划 2016—2050 年》明确要求“确立以多功能森林经营理论为指导的经营思想,树立全周期森林经营理念,明确培育健康稳定优质高效森林生态系统的核心目标”^[6]。这标志着森林经营工作从政策、技术层面都受到高度重视,未来森林经营工作将有相对于传统森林经营方式的重大变革。

与此同时,近些年来学术界聚焦森林经营开展了广泛的研究,主要包括探索森林经营发展战略的转折^[7]、探索现代森林经营理论与技术创新实践^[8-12]、以及探索不同经营措施或者模式的社会经济与生态影响^[13-16]。前两者在当前中国森林经营转折期具有重要的指向性意义;而后者则事关现代森林经营战略与理论能否落地,更具有基础性,影响深远。但目前对于具体经营措施或者模式的研究具有很强的局限性:1)大部分研究是静态的,仅有的极少数动态研究也存在数据采集年份较少、时间尺度较短的缺陷,不能完全揭示长时间尺度下全周期经营的效果;2)大部分研究仅探讨了森林经营措施对某一指标或是少量指标的影响,不能揭示森林经营对多目标效益的综合影响;3)实验对象是经过传统经营后的林分,研究结果并不能完全揭示森林经营措施的真正影响^[13-14, 16-24]。这些局限性在一定程度上影响了研究结果对于深处转折期的中国森林经营工作的现实指导意义。这也是由于森林分布、组成和结构等的复杂性造成的,对于森林生态系统长时间尺度、多生态指标的调查所耗时间、人力、物力成本太高。而如果在重新设置预设经营方式的非传统林分样地开展林分不同发育阶段的观察,则周期更加长久。因此,应用模型模拟已经成为研究基于森林经营的森林生态系统动态变化的重要方法。由于森林经营活动发生在较小的空间尺度小班地块上,林窗模型和植物生理模型这2类小尺度模拟模型就成为比较适用的2类模型^[25-26]。这2类模型的视角、机理建模各有其优劣势,但现有研究表明,不同模型的混合是一个可行的途径,可以减少单一建模方法的

局限性^[27-28]。本文重点对森林生态系统混合斑块模型(PICUS)的模拟机理进行分析阐述,以期促进PICUS模型的推广应用,且对我国森林生态系统建模具有积极启示意义;还可提高人们对森林生长过程与动态的认识和理解,进而采取相应的育林措施推进森林可持续经营。

1 森林生态系统模型概述

森林生态系统混合斑块模型 PICUS 是由奥地利维也纳自然资源与应用生命科学大学 Manfred Lexer 教授团队从 1996 年开始研究开发的,历经了 20 余年的迭代更新^[29]。作为一个混合模型,PICUS 模型基于经典的林窗模型,耦合了基于生理过程的 3-PC 模型,并实现三维可视化呈现。该模型基于 10 m × 10 m × 5 m 的结构化树冠网格模拟树木生长,并通过内嵌的 3D 光模块考虑了斑块之间的空间交互影响。同时,PICUS 模型内嵌了种子传播自然更新、林木死亡率和森林生态系统地下进程子模块,以及允许对任何营林措施进行精准模拟的森林经营模块^[30]。截至目前,PICUS 模型已成功应用于研究温带森林生态系统中的森林动态、评估气候变化的影响以及研究森林适应性经营策略的效果等。

PICUS 模型的宏观过程图解如图 1 所示。

2 林窗子模型

林窗模型以气候因子为驱动变量,以样地为基本研究单元,通过描述树木个体的生长、死亡和更新过程来模拟森林演替过程中树种组成、结构和功能的变化。第 1 代林窗模型 JABOWA 是由 Botkin 于 1972 建立的^[31],我国学者霍常富等^[32]、于振良等^[33]在不同时期做了详细综述。需要强调的是,在 PICUS 模型中,除了光照、温度、水分等环境因子外,还增加了土壤酸碱度、养分供给 2 个方面的因子,这在一定程度上增强了 PICUS 模拟的逼真程度。具体而言,基于树种潜在生长高度,PICUS 模型以立地环境因子和光照因子为主要驱动变量对森林生长动态进行模拟(见中国知网本文录用定稿版附件 1)。其中,立地环境影响包括温度、土壤湿度、土壤酸碱度、养分供给 4 个主要方面。树木潜在生长高度方程是根据经验函数得出的。对于胸径生长,在树高生长计算的基础上,根据受光生长树木的概念,利用胸径与高度的关系公式对每棵树木的

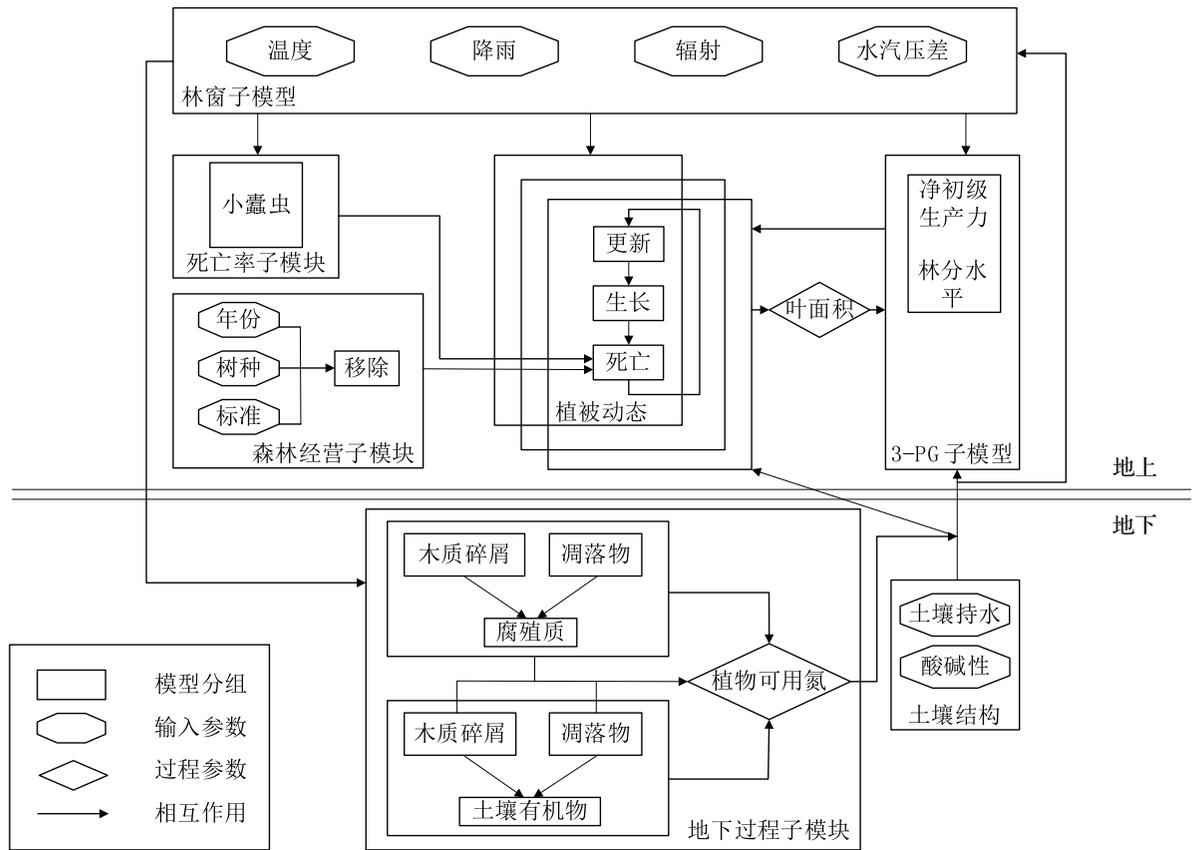


图1 PICUS模型的总体构架和要素

胸径连年潜在生长量进行估测(见中国知网本文录用定稿版附件2)。然后采用与以上相同的思路,以潜在生长量为基础,扣除实际光照和立地环境的抑制效应,得出实际胸径增量^[34]。

对于单株林木各个部位(树枝、树叶、粗根)的生物量,运用异速生长关系函数根据胸径生长量进行计算;树干部生物量由总生物量减去枝叶生物量计算得到,而细根生物量则由叶片生物量计算得到^[34]。对于材积的计算,则是根据1974年Pollanschütz的材积函数估算出树干(带皮)材积^[35](见中国知网本文录用定稿版附件3)。

3 3-PG子模型

3-PG模型是基于生理过程的、林分尺度的净初级生产力模型。与其他生理过程模型一样,总初级生产力则根据光合有效辐射量与实际量子利用效率计算得出,而净初级生产力则由扣减呼吸所致的消耗得出(见中国知网本文录用定稿版附件4)。在此,PICUS模型有2个重要假设:对于植被吸收光合的有

效辐射,冠层潜在量子利用效率为 1.8 g C/MJ ;呼吸作用在总初级生产力中占据的百分比不变,这个假设来源于Lansberg等的前期工作^[36]。另外,在3-PG模拟中,时间步长单位以月计算,并以林分/种群为单位。3-PG模型模拟过程主要包含2个部分:计算林分初级生产力,分配生物量到树木不同部位。

生物量分配过程主要包括地上净初级生产力分配、生物量增量分布与再分配。关于地上净初级生产力的分配,PICUS模型假定在不利条件下地上净初级生产力与地下净初级生产力之比会下降,故通过估测环境严苛程度决定地上净初级生产力的百分比(见中国知网本文录用定稿版附件5)。而关于生物量增量分布与再分配,林分水平上的生物量增量很有可能与根据林窗模型计算得出的各个林木个体生物量增量后加总得到的总量有差距。因此,为了提高准确度,PICUS模型基于林木个体在林窗模型中的相对竞争力将此差值重新分配到各株林木个体生物量的相应部位^[37](见中国知网本文录用定稿版附件6)。

4 其他子模块

4.1 林木死亡率子模块

PICUS 模型中的死亡率子模块不仅包括经典林窗模型中的 2 大死亡率来源即以老化和立地质量为主要原因的林木基本死亡率与受压死亡率^[31];而且还考虑了小蠹虫所致死亡率,其综合了小蠹虫侵染热力学子模块及小蠹虫生理发育相关研究成果,具有很强的物种特定性与专业性,具体可见文献[38]。

关于基本死亡率,与经典林窗模型一致,这部分的死亡率子模块主要包含由于内在原因导致的树木枯死。基本死亡率取决于实际树龄与该树种最长树龄的比较以及与相对立地质量的比较。而关于受压死亡率,主要指的是一棵树木在连续若干年内无法达到一定的直径增长阈值导致的死亡情况。就其生态学合理性而言,生长缓慢的树木,由于其较差的碳平衡表现而更容易受到病虫害侵扰而死亡。在 PICUS 模型中将直径阈值定义为绝对值以及直径增长潜力的相对百分比,树木生长连续数年低于阈值则被定义为受压。

而对于枯死树木,树木个体可在后期森林经营作业中从立地上移除;或者作为枯立木留在模拟环境中,枯死林木个体的叶片总生物量以一定转移速率转移到土壤层,而树枝的生物量则逐步转移到凋落物层;剩余的基本由树干生物量组成的枯立木的质量流失,则根据 TRACE 模块(参见本文“地下过程子模块”部分)按照离散时间进行模拟。

4.2 更新子模块

在 PICUS 模型中既可以通过人工植树,也可以通过天然更新增加新的林木。对于后者而言,PICUS 模型假定了 2 种种子来源:源自位于模拟环境中的树木种子以及来自模拟林分之外的种子输入。

PICUS 模型中的林木个体生产的种子数量受不同树种的最大产种量值、结实年周率、非结实年的产种量、树高及光指数的影响。假定种子的随风传播平均速率,将种子传播模拟为围绕每棵树木树干的一个锥形密度函数。另外,PICUS 模型还考虑了动物传播,对动物传播成团种子的情况也进行了假设。根据以上传播途径模型,可反映基于种子的林分更新情况。

4.3 森林经营子模块

PICUS 模型可以利用森林经营子模块模拟任何一种现实中开展的营林活动,包括间伐和终伐中

的灵活作业方法,并且能够在林地斑块上种植具有空间可视化的林木。PICUS 模型既能在模型数据库中定义经营,也可导入外部程序化的森林经营脚本文件(*.txt 格式)实现经营活动,其编程的核心是灵活的脚本语言^[30]。

4.4 地下过程子模块

PICUS 模型在发展过程中,内嵌了森林土壤过程的生物地球化学过程模型——TRACE 模型^[39],用以从土壤肥力、植物可用 N 方面增强模型主要驱动因子的可靠性和生理学基础;能够动态显示植物—土壤之间的反馈作用,这在有关森林演替的时间尺度上尤其重要;可对作为森林生态系统主要碳库之一的土壤碳进行模拟。

TRACE 模型成熟且独立,也比较复杂^[40-41],是一个针对森林水、碳和氮循环的生物地球化学过程模型,能够对连续时间内¹⁵N 富 N 示踪剂的再分配进行模拟和预测^[42]。总体上,TRACE 模型对 DOCMOD 土壤进程模型^[39]进行了拓展,并且结合了光合与蒸腾模型中与植被相关的内容^[43]。

5 模型应用

截至目前,PICUS 模型已在欧洲成功应用于研究温带森林生态系统中的森林动态、评估气候变化的影响以及研究适应性森林经营策略的效果,在奥地利维也纳自然资源与应用生命科学大学营林研究所、苏黎世联邦理工学院森林生态研究所等机构的科学研究中得到了成熟和广泛的应用。总体来看,其在欧洲的应用已逐渐从单一走向综合,即从基本林分特征模拟走向基于模拟的森林多目标可持续经营综合评估。在早期,PICUS 模型主要用于模拟异质性森林景观中的树种组成、生物量等基本生态系统指标的时空变化^[34, 44-45]。在对基本指标模拟的不断应用过程中,其模型可靠性被不断地改进与验证,混合模型的优势得以显示^[34]。在此过程中,模型模拟进一步细化,病虫害干扰对森林生态系统演化的影响以及森林经营策略对落石保护的效果逐渐添加到模型中并得以进一步研究^[46-49]。后来,随着全球气候变化议题重要性的不断增加,基于 PICUS 模拟得出的树种组成、生物量、碳储量等基本指标,探讨了森林经营对气候变化的响应与适应情况,成为 PICUS 模型的主要应用领域^[50-55]。从模型的当前应用来看,PICUS 模型在欧洲的应用已逐渐趋于成熟,形成了以 PICUS 模型模

拟结果为基础的应对气候变化或多目标森林经营决策框架,支持林业决策的功能显著提升。

PICUS 模型在中国的应用,始自 2012 年前后中国林业科学研究院林业科技信息研究所牵头开展的国家林业局“948”项目。在该项目引进过程中,PICUS 模型首次被应用于不同经营方式下红椎纯林分木材生产、生物量、生产力等功能的模拟,并与实地调查数据进行比较,模型模拟精确度良好^[56]。在此基础上,PICUS 模型被进一步应用于马尾松与红椎的纯林和混交林固碳量、木材生产的中长期(50年)模拟,以综合评估不同树种配置模式的效果,研究结果表明:在中长期尺度上,马尾松、红椎混交林均优于其纯林模式;异龄混交林在固碳效果方面非常显著,但同龄混交林更具有综合优势^[57]。这一结论与前期营林实践结果基本吻合,有助于指导后续造林、营林实践。此外,PICUS 模型还被应用于山西人工油松纯林与油栎混交林的经营策略比较分析,模拟结果表明,对于油松纯林,相对于传统经营和经营,近自然经营模式更有利于培育大径级优质油松材;而对于油栎混交林,在相同抚育强度情况下,相对于株间混交模式,团状混交模式油栎混交林表现出一定的生态与经济优势^[58]。从整体上来看,PICUS 模型在我国的应用,主要集中于对生态系统基本指标的一般模拟,尚未形成成熟的决策框架逻辑,属初始探索阶段。但在纯林与混交林经营策略的模拟中,已表现出其在支持森林质量精准提升决策中具有有良好的应用前景。

6 模型启示

本文详细解析 PICUS 模型的模拟机理,并结合其在我国的初步应用案例,充分学习其建模思维与技术,有助于“引进—消化吸收—再创新”,对开发我国自主知识产权的森林生态系统模型具有重要意义。

首先,构建混合模型是提升森林生态系统模型模拟精确度的可行方法之一。有别于目前在我国较为流行的单一模型,PICUS 模型是以林窗模型、3-PG 模型耦合为基础的混合模型,其在欧洲的实践与验证已表现出相对于单一模型的优势;在中国的实践,也被证明具有良好的精确度。因此,通过构建混合模型提升模拟精确度具有可行性。

其次,多模块内嵌耦合有助于更好地模拟揭示森林生态系统动态变化。森林生态系统并非一成不变

的,而是在自然和人为干扰下呈现动态变化过程。PICUS 模型内嵌了林木死亡率、林分更新、森林经营措施以及地下过程的子模块,充分考虑了自然死亡与胁迫死亡、人工更新与天然更新,以及任意森林经营措施等情况,与现实接近程度比较高,可以更真实地模拟森林生态系统动态变化情况。

再次,规范且共享的数据集是开展模型模拟的有力保证。由于 PICUS 模型在欧洲的长期应用研究,以及欧洲更好的数据规范共享机制,模型模拟所需的相关树种参数、土壤参数等均有充分且可靠的基础数据。但在中国的应用中,基础参数数据缺乏成为最大的掣肘,大部分参数数据来自于项目调查搜集,所耗人力、物力和财力偏大。因此,加强构建基于科研项目与国家清查体系的规范化、共享化的数据集,是开展森林生态系统模型模拟的有力保障。

最后,明确模拟模型的工具性,关注发展成熟的完善决策框架,有助于提高模型的支持决策能力。当前,PICUS 模型在欧洲森林多目标经营、可持续管理决策方面的支持作用,得益于其后续逐渐完善的决策支持框架。模型模拟的结果只是基本的指标变量数据,对其解读并应用是关键。因此,在关注模型构建的同时,也要重视基于模型模拟的决策支持逻辑框架发展。

参 考 文 献

- [1] 习近平:良好生态环境是最公平的公共产品[EB/OL]. (2015) [2018-12-01]. http://www.xinhuanet.com/politics/2015-05/06/c_1115193871.htm.
- [2] 唐守正,雷相东. 加强森林经营,实现森林保护与木材供应双赢[J]. 中国科学(生命科学), 2014, 44(3): 223-229.
- [3] 联合国. 巴黎协定[EB/OL]. (2015) [2018-12-01]. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
- [4] 国家林业局. 2016年中国林业发展报告[M]. 北京:中国林业出版社, 2017.
- [5] 祝列克. 森林可持续经营[M]. 北京:中国林业出版社, 2001.
- [6] 国家林业局. 全国森林经营规划(2016-2050年)[R]. 北京:中国林业出版社, 2016.
- [7] 刘世荣,代力民,温远光,等. 面向生态系统服务的森林生态系统经营:现状、挑战与展望[J]. 生态学报, 2015, 35(1): 1-9.
- [8] 吴水荣,海因里希·施皮克尔,陈绍志,等. 德国森林经营及其启示[J]. 林业经济, 2015(1): 50-55.
- [9] 兰倩,吴水荣,郭可义,等. 近自然小流域森林经营理论与实践[J]. 世界林业研究, 2016, 29(2): 7-11.
- [10] 陆元昌,张守攻,雷相东,等. 人工林近自然化改造的理论基础和

- 实施技术[J]. 世界林业研究, 2009, 22(1): 20-27.
- [11] 惠刚盈, VON KLAUS G, 胡艳波, 等. 结构化森林经营[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [12] 刘世荣, 马姜明, 缪宁. 中国天然林保护、生态恢复与可持续经营的理论与技术[J]. 生态学报, 2015, 35(1): 212-218.
- [13] 雷相东, 陆元昌, 张会儒, 等. 抚育间伐对落叶松云冷杉混交林的影响[J]. 林业科学, 2005, 41(4): 78-85.
- [14] 李婷婷, 陈绍志, 吴水荣, 等. 采伐强度对水源涵养林分结构特征的影响[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 102-108.
- [15] 梁星云, 何友均, 张谱, 等. 不同经营模式对丹清河林场天然次生林植物群落结构及其多样性的影响[J]. 林业科学, 2013, 49(3): 93-102.
- [16] 何友均, 梁星云, 覃林, 等. 南亚热带人工针叶纯林近自然改造早期对群落特征和土壤性质的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2484-2495.
- [17] 姜俊, 谢阳生, 陆元昌, 等. 不同林龄阶段马尾松人工林群落结构特征及经营策略[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(6): 1-7.
- [18] 李婷婷, 陆元昌, 庞丽峰, 等. 杉木人工林近自然经营的初步效果[J]. 林业科学, 2014, 50(5): 90-100.
- [19] 李春义, 马履一, 王希群, 等. 抚育间伐对北京山区侧柏人工林林下植物多样性的短期影响[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(3): 60-66.
- [20] 李春义. 抚育间伐对北京山区侧柏、油松人工林林下植物的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [21] 安长生. 抚育间伐对小陇山林区日本落叶松人工林生长的影响[J]. 甘肃科技, 2009, 25(8): 155-156.
- [22] 郭万军, 王广海, 张利民, 等. 抚育间伐对林木生长及其稳定性的影响[J]. 河北林果研究, 2011, 26(3): 243-246.
- [23] 徐国巧. 华北落叶松人工林抚育间伐效果研究[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2008.
- [24] 辛力. 森林抚育对不同林分类型结构及健康的影响研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [25] 高西宁, 赵亮, 尹云鹤. 气候变化背景下森林动态模拟研究综述[J]. 地理科学进展, 2014, 33(10): 1364-1374.
- [26] 李双成. 植物响应气候变化模型模拟研究进展[J]. 地理科学进展, 2001, 20(3): 216-225.
- [27] MÄKELÄ A, LANDSBERG J, EK A R, et al. Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art and challenges for practical implementation[J]. *Tree Physiology*, 2000, 20(5/6): 289-298.
- [28] PENG C. Understanding the role of forest simulation models in sustainable forest management[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2000, 20(4): 481-501.
- [29] University of Natural Resources and Life Sciences. The ecosystem model PICUS[R]. Austria: University of Natural Resources and Life Sciences, 2013.
- [30] RAMMER W. PICUS user guide[R]. Vienna, Austria: Institute of Silviculture, Department of Forest and Soil Science, University of Natural Resource Management and Applied Life Science, 2006.
- [31] BOTKIN D B, JANAK J F, WALLIS J R. Some ecological consequences of a computer model of forest growth[J]. *Journal of Ecology*, 1972, 60(3): 849-872.
- [32] 霍富常, 赵晓敏, 鲁旭阳, 等. 林窗模型研究进展[J]. 世界林业研究, 2009, 22(6): 43-48.
- [33] 于振良, 赵士洞. 林隙(Gap)模型研究进展[J]. 生态学杂志, 1997, 16(2): 43-47.
- [34] LEXER M J, HÖNNINGER K. A modified 3D-patch model for spatially explicit simulation of vegetation composition in heterogeneous landscapes[J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 144(1/2/3): 43-65.
- [35] POLLANSCHUTZ J. Formzahlfunktionen der hauptbaumarten österreichs[J]. *Allgemeine Forstzeitung*, 1974(1): 341-343.
- [36] LANDSBERG J J, WARING R H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning[J]. *Forest Ecology and Management*, 1997, 95(3): 209-228.
- [37] SEIDL R, LEXER M J, JÄGER D, et al. Evaluating the accuracy and generality of a hybrid patch model[J]. *Tree Physiology*, 2005, 25(7): 939-951.
- [38] SEIDL R, LEXER M J, RAMMER W, et al. Impact of bark beetle infestations on timber production and carbon sequestration under scenarios of climate change[C]. Edinburg, UK: IUFRO, 2006.
- [39] CURRIE W S, ABER J D. Modeling leaching as a decomposition process in humid montane forests[J]. *Ecology*, 1997, 78(6): 1844-1860.
- [40] CURRIE W S, NADELHOFFER K J, ABER J D. Soil detrital processes controlling the movement of ¹⁵N tracers to forest vegetation[J]. *Ecological Applications*, 2006, 9(1): 81-102.
- [41] CURRIE W S, HELMERS D. A user guide for the TRACE model [EB/OL]. (2005)[2018-12-31]. <https://www.nrc.gov/docs/ML1200/ML120060239.pdf>.
- [42] CURRIE W S, NADELHOFFER K J. Original articles: dynamic redistribution of isotopically labeled cohorts of nitrogen inputs in two temperate forests[J]. *Ecosystems*, 1999, 2(1): 4-18.
- [43] ABER J D, OLLINGER S V, DRISCOLL C T. Modeling nitrogen saturation in forest ecosystems in response to land use and atmospheric deposition[J]. *Ecological Modelling*, 1997, 101(1): 61-78.
- [44] BADECK F, LISCHKE H, BUGMANN H, et al. Tree species composition in european pristine forests: comparison of stand data to model predictions[J]. *Climatic Change*, 2001, 51(3/4): 307-347.
- [45] LEXER M J, HÖNNINGER K, SCHEIFINGER H, et al. The sensitivity of Central European mountain forests to scenarios of climatic change: methodological frame for a large-scale risk assessment[J]. *Silva Fennica*, 2000, 2(34): 113-129.
- [46] SEIDL R, BAIER P, RAMMER W, et al. Modelling tree mortality by bark beetle infestation in Norway spruce forests[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 206(3/4): 383-399.
- [47] SEIDL R, RAMMER W, JÄGER D, et al. Impact of bark beetle

- (*Ips typographus* L.) disturbance on timber production and carbon sequestration in different management strategies under climate change [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(3): 209–220.
- [48] SEIDL R, SCHELHAAS M, LINDNER M, et al. Modelling bark beetle disturbances in a large scale forest scenario model to assess climate change impacts and evaluate adaptive management strategies [J]. *Regional Environmental Change*, 2009, 9(2): 101–119.
- [49] RAMMER W, BRAUNER M, RUPRECHT H, et al. Evaluating the effects of forest management on rockfall protection and timber production at slope scale [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2015, 30(8): 719–731.
- [50] SEIDL R, RAMMER W, JÄGER D, et al. Assessing trade – offs between carbon sequestration and timber production within a framework of multi – purpose forestry in Austria [J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 248(1/2): 64–79.
- [51] LEXER M J, SEIDL R. Addressing biodiversity in a stakeholder – driven climate change vulnerability assessment of forest management [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258: S158–S167.
- [52] SEIDL R, RAMMER W, LEXER M J. Climate change vulnerability of sustainable forest management in the Eastern Alps [J]. *Climatic Change*, 2011, 106(2): 225–254.
- [53] MAROSCHEK M, RAMMER W, LEXER M J. Using a novel assessment framework to evaluate protective functions and timber production in Austrian mountain forests under climate change [J]. *Regional Environmental Change*, 2015, 15(8): 1543–1555.
- [54] SEIDL R, LEXER M J. Forest management under climatic and social uncertainty: trade – offs between reducing climate change impacts and fostering adaptive capacity [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 114: 461–469.
- [55] SEIDL R, RAMMER W, LEXER M J. Adaptation options to reduce climate change vulnerability of sustainable forest management in the Austrian Alps [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, 41(4): 694–706.
- [56] 中国林业科学研究院林业科技信息研究所. 人工林多功能经营及模拟预测技术引进研究报告 [R]. 北京: 中国林业科学研究院林业科技信息研究所, 2013.
- [57] 张旭峰. 树种配置对森林多功能影响的模拟与综合效益评价 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [58] 中国林业科学研究院林业科技信息研究所. 油松与栎类人工林多功能经营及模拟预测 [R]. 山西: 中条山国有林管理局, 2018.