

# 大兴安岭呼中林区虫害与火干扰交互作用的长期模拟\*

陈宏伟 胡远满\*\* 常禹 布仁仓 李月辉 刘淼

(中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

**摘要** 虫害和林火是森林生态系统的两种主要干扰类型,各种干扰在大时空尺度上存在一定的交互作用.本文采用空间直观景观模型 LANDIS 模拟虫害和林火在 300 年内的交互作用.结果表明:虫害干扰降低了细可燃物载量,提高了模拟前期(0~100 a)和中期(100~200 a)的粗可燃物载量,降低了模拟前期和中期的林火频率,不同干扰预案模拟后期(200~300 a)火烧频率的结果比较接近;虫害干扰降低了模拟前期和中期的火烧强度,增加了模拟中期的火烧强度,提高了模拟中期的森林火险等级,降低了模拟前期和中期的火险等级.人类灭火可增加虫害的发生面积,因此建议森林管理部门采取适当的防火措施,不可只注重灭火,可以采取可燃物去除和计划火烧等方式管理林火,促进森林生态系统的可持续发展.

**关键词** LANDIS 虫害干扰 林火 森林景观

**文章编号** 1001-9332(2011)03-0585-08 **中图分类号** S718.5 **文献标识码** A

**Interaction between pest and fire disturbances in Huzhong area of Great Xing'an Mountains: Long-term simulation.** CHEN Hong-wei, HU Yuan-man, CHANG Yu, BU Ren-cang, LI Yue-hui, LIU Miao (*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(3): 585-592.

**Abstract:** Forest pest and forest fire are the two major disturbances of forest ecosystem, and there exists definite interaction between the disturbances at large spatial and temporal scales. In this paper, the spatially intuitional landscape model (LANDIS) was adopted to simulate the long-term (300 years) interaction between forest pest and forest fire in Huzhong area of Great Xing'an Mountains. The results showed that pest disturbance decreased the fine fuel load, increased the coarse fuel load at the early (0-100 a) and middle (100-200 a) stages of simulation course, and decreased the fire frequency at the early and middle stages. The fire frequency under different forest pest disturbance scenarios was similar at the later stage (200-300 a) of simulation course. Pest disturbance decreased the fire intensity and fire risk class at the early and later stages, but increased the fire intensity and fire risk class at the middle stage. Fire suppression could increase the occurrence area of forest pest, and thus, it was suggested that forest managers should take appropriate measures to prevent insect pest, not solely with the focus on fire suppression but also adopting the forest fire management measures such as taking off coarse fuel and implementing prescribed fire to ensure the sustainable development of forest ecosystem.

**Key words:** LANDIS; forest pest disturbance; forest fire; forest landscape.

森林生态系统是陆地上最重要的生态系统之一,在全球物质循环和能量流动中起着重要作用.干扰伴随着森林生态系统发展的全过程,在维持森林生态系统的物种多样性、群落稳定性和景观异质性

等方面起着极其重要的作用.常见的自然干扰包括林火、病虫害、风、地质灾害等,人类干扰包括采伐、造林、人为灭火和森林经营等<sup>[1]</sup>.研究表明,森林中各种干扰之间存在一定的交互作用,尤其是虫害与林火干扰具有很强的相关性<sup>[2]</sup>,虫害爆发经常导致灾难性林火的发生<sup>[3]</sup>,过火后林地的虫害种类和数量会明显增加<sup>[4]</sup>.对于虫害与林火干扰之间的交互

\* 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421101)和国家自然科学基金项目(31070422,40871245)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: huym@iae.ac.cn

2010-09-27 收稿,2010-12-23 接受.

作用,以往的研究都是基于样地和群落水平的定位观测,而大时空尺度上虫害与林火交互作用对森林的物种组成、年龄结构和森林生态系统健康有着深远影响,同时其对森林景观的形成与发展有着重要作用<sup>[5-6]</sup>,因此有必要对此进行深入研究。

对大空间范围( $>10^6 \text{ hm}^2$ )和时间跨度( $>100 \text{ a}$ )的森林干扰研究已经超越了传统的范畴,野外观测方法很难对大时空尺度上的森林变化进行研究,因此模型模拟成为一种有效的研究手段<sup>[7]</sup>。LANDIS 模型是模拟森林景观演替、干扰和管理的空间直观景观模型,广泛应用于森林生态研究中的各领域,如森林景观对全球气候变化的响应<sup>[8]</sup>、采伐方式对景观的影响<sup>[9]</sup>、不同火干扰模式下森林景观的演替<sup>[10]</sup>、病虫害干扰对景观格局的影响<sup>[11]</sup>等。大兴安岭森林的地带性植被为东西伯利亚北方明亮针叶林,是中国境内唯一的寒温带针叶林区。该区是我国主要的木材生产基地,不仅具有重大经济价值,而且在维持区域生态安全方面有着重要作用<sup>[12]</sup>。由于该区植被组成相对简单,加上长期不合理的人为采伐,导致虫害和林火爆发比较频繁<sup>[13-14]</sup>。本文利用 LANDIS 模型,选择落叶松毛虫(*Dendrolimus superans*)为典型虫害,探讨大兴安岭呼中林区森林虫害与林火之间的交互作用,旨在为该区森林可持续经营管理提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

呼中林区地处黑龙江省大兴安岭北部( $51^{\circ}14'40''\text{--}52^{\circ}25'\text{N}$ ,  $122^{\circ}39'30''\text{--}124^{\circ}21'\text{E}$ ),位于大兴安岭主山脉东坡、伊勒呼里山脉北坡、呼玛河上游,西部与内蒙古相邻,总面积  $93.72 \text{ km}^2$ ,海拔  $500\sim1000 \text{ m}$ ,平均海拔  $812 \text{ m}$ 。该区属于寒温带季风气候,1992–2005 年年均降水量  $511 \text{ mm}$ ,雨季集中在 6–8 月,年均气温  $4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$  年积温  $1800\text{ }^{\circ}\text{C}\sim2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均无霜期  $85 \text{ d}$ 。地貌类型属石质中低山山地,坡度平缓,一般在  $15^{\circ}$  以下,局部阳坡陡,可达  $35^{\circ}$  以上,全区地势西南部高、东北部低。土壤主要包括棕色针叶林土、草甸土、沼泽土、河滩森林土和石质土。森林植被属于泛北极植物区欧亚植物亚区大兴安岭植物区系,地带性植被类型为寒温性针叶林,以兴安落叶松(*Larix gmelinii*)为单优势种。主要的针叶乔木有:兴安落叶松、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)和云杉(*Picea koraiensis*)以及分布于高海拔地带的偃松(*Pinus pumila*),

主要的阔叶乔木有:白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、甜杨(*Populus suaveolens*)和钻天柳(*Chosenia arbutifolia*)<sup>[15]</sup>。

呼中林区是大兴安岭林火和虫害发生频繁的地区,具有较强的代表性,加之数据资料积累齐全,因此作为典型区域进行研究。据不完全统计,1990–2000 年呼中林区共发生林火 84 次,年均火烧面积约  $203 \text{ hm}^2$ ,最大火烧面积  $410 \text{ hm}^2$ ,严重阻碍森林生态系统的稳定和生态效益的发挥,但 50 年来严格的火控制政策已经极大地改变了自然火格局,使火的平均轮回期从 1950 年之前的  $120\sim150 \text{ a}$ <sup>[12]</sup>延长到现在的  $500 \text{ a}$  左右<sup>[10]</sup>。呼中林区的虫害干扰可分为食叶和蛀干两大类,食叶害虫主要有落叶松毛虫、松癭小卷蛾(*Laspeyresia zebeana*)和稠李巢蛾(*Yponomeuta evonymallus*)等;蛀干害虫主要有八齿小蠹(*Ips subelongatus*)、云杉小黑天牛(*Monochamus sutor*)等。蛀干害虫在本地区主要侵害火烧后的衰弱及死亡木,由于 LANDIS 只能跟踪每个像元上的树种有无,不能很好地模拟蛀干害虫的干扰,所以只对食叶害虫进行研究。根据林相图和虫害记载资料,落叶松毛虫是本地区最主要的食叶害虫,占有食叶害虫发生面积的 80% 以上。1991–2002 年统计数据显示,年最大发生面积为  $5500 \text{ hm}^2$ ,年最小发生面积为  $2800 \text{ hm}^2$ ,年均面积为  $3400 \text{ hm}^2$ ,主要发生在阳坡和林分长势衰弱的地带。本研究以落叶松毛虫为代表,探讨虫害与林火干扰之间的交互作用。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 LANDIS 模型简介** LANDIS 模型是一种模拟大时空尺度( $10^3\sim10^6 \text{ hm}^2$ ,  $10\sim10^3 \text{ a}$ )森林景观演替、空间干扰和管理的空间直观景观模型。LANDIS 在样地尺度上跟踪以  $10 \text{ a}$  为间隔的物种年龄级,半定量描述干扰过程和可燃物积累等过程,它能同时在物种、样地和景观尺度上模拟各种生态过程(火-FIRE、采伐-HARVEST、病虫害-BDA、风倒-WIND)及其相互关系。LANDIS 模型将森林景观看作由相同大小像元(样地)组成的网格,每个像元上都记录树种组成信息和干扰特征,这些信息可通过遥感影像或植被类型图以及经验和调查数据获得。每个像元又被归入环境相似的立地类型或生态区,同一立地类型具有相同的树种建群系数、虫害发生强度、火烧轮回期等。LANDIS 模型通过跟踪像元上树种的存在与否来模拟在自然和人为干扰下样地和景观尺度上森林的动态变化<sup>[16]</sup>。LANDIS 模型的输

出包括每个物种的分布图、年龄组分布图和各种干扰分布图等。

火烧是一个自下而上的过程,地表火可损伤幼树,林冠火可烧毁大树.在模型设计过程中根据火的危害程度不同,把火烧的严重程度分为 5 级,即 1、2、3、4、5 级.物种的耐火性和脆弱性也分为 5 级.其中,耐火性是不同物种对火的抗性,脆弱性是同一树种的不同年龄阶段对火的抗性.物种寿命分 5 个阶段,即年龄组成分别为 0 ~ 20%、21% ~ 50%、51% ~ 70%、71% ~ 85% 和 86% ~ 100%,分别对应 5 个脆弱性等级,年龄越小,脆弱性越高.物种的耐火性级别越高,耐火性就越强.不同级别的火清除不同的物种和物种年龄组.1 级火只清除耐火性级别=1 且脆弱性级别≤4 的物种,或耐火性级别=2 且脆弱性级别≤2 的物种,或耐火性级别=3 且脆弱性级别=1 的物种.火烧的严重程度受距离上次火烧时间和火灾区所在立地类型的火烧严重程度曲线控制.火烧严重程度曲线指随着可燃物的不断积累(距离上次火烧或采伐的时间),火烧所能达到的严重程度.林火干扰主要通过改变树种的组成和年龄结构来影响虫害的发生,加之可燃物是影响森林火烧频率和强度的主要因子,因此模型设计虫害干扰改变细小和粗可燃物的载量来影响林火过程<sup>[7,16]</sup>.

**1.2.2 LANDIS 模型的参数化** LANDIS 模型的需要 GIS 图形参数文件和属性参数文件. GIS 图形参数文件主要包括:树种组成图、土地类型图和管理区图.属性参数主要包括:树种生活史特征参数、树种建群系数和干扰参数.参数化的空间数据主要源于 2000 年林相图和 1 : 10 万地形图,对其进行栅格化,考虑计算机的运算能力,栅格大小设置为 90 m×90 m.

虫害对森林的干扰过程通过 BDA 模块实现,每个像元内发生森林病虫害的可能性由该像元内的树种组成、年龄结构决定,同时模型也考虑立地类型以及其他干扰对病虫害爆发的影响.模型设定随着森林年龄的增加,可提供的食物来源越多.研究区内落叶松是害虫的主要寄主,樟子松为次要寄主<sup>[11]</sup>. FIRE 模块主要模拟林火干扰过程,对比灭火和自然林火状态下的虫害变化.根据历史资料设定自然林火状态下的火烧轮回期为 120 a,而灭火状态下火烧轮回期为 500 a.

**1.2.3 物种生活史特征及物种组成** LANDIS 模型中,树种竞争力主要由寿命、耐阴性、耐火性、成熟年龄、萌发能力和种子传播距离等树种特性决定.研究区内 8 个主要树种的生活史特征参数由相关文献、实地调查获得<sup>[9,17]</sup>(表 1).同时采用基于小班的赋值法对每个像元进行赋值得到物种组成.假定每一个像元内只有一个物种,根据小班内物种组成百分比,产生一个范围在 0 ~ 100 的随机数来确定每一个像元的物种信息.如 1 个像元内有 2 个物种,其组成百分比分别为 P1 和 P2,产生一个随机数 Pr.如果 P1>Pr,像元被赋予物种 1;如果 P1<Pr<P1+P2,像元被赋予物种 2;如果 P1+P2<Pr<100,像元没有物种信息.对于物种年龄,如果被赋予的物种是小班内的优势种,直接赋予小班记录的优势种的年龄;如果不是优势种,赋予所在林班内所有以该物种为优势种的小班优势种年龄面积加权平均值<sup>[18]</sup>.物种的生物学特性见表 1.

**1.2.4 立地类型图** LANDIS 模型将异质景观分成相对均质的土地类型单元.在每一种立地类型中,假设每一个物种具有相同的环境条件.根据研究区 2000 年林相图获得无林地和水域,依据 TM 影像获

表 1 呼中林区主要树种及其生物学特性  
Table 1 Main tree species and their attributes in Huzhong Forest 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)	萌发率 Vegetative reproduction probability (%)	萌发年龄 Minimum age of vegetative reproduction (a)
落叶松 <i>Larix gmelini</i>	300	20	3	4	150	200	0	0
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	210	40	1	2	50	200	0	0
云杉 <i>Picea koraiensis</i>	300	30	5	2	50	150	0	0
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	150	15	1	3	200	2000	0.8	30
山杨 <i>Populus davidiana</i>	180	30	1	3	-1 *	-1 *	1	40
甜杨 <i>Populus suaveolens</i>	150	25	1	4	-1 *	-1 *	1	40
钻天柳 <i>Chosenia arbutifolia</i>	250	30	2	2	-1 *	-1 *	0.9	30
偃松 <i>Pinus pumila</i>	250	30	4	1	50	100	0	0

1 ~ 5:耐受性依次增强 Tolerance increasing in turn. \* 无限距离 Infinite distance.

得阶地、阳坡和阴坡,从数字高程模型 (DEM) 获得 >1000 m 的亚高山区. 同时 LANDIS 模型又将各种立地类型分为无效土地类型和有效土地类型,并只跟踪模拟有效土地类型上的植被变化. 水域和居民点是无效土地类型,占研究区面积的 0.8%. 另外 4 个立地类型(阶地、阳坡、阴坡和亚高山区)为有效土地类型,分别占研究区面积的 4.8%、37.3%、42.5% 和 14.7% (图 1).

**1.2.5 不同立地类型的物种建群系数** LANDIS 模型利用树种的建群系数表征树种在各土地类型上能否存活并且正常生长的能力. 建群系数可用来测度环境条件(湿度、气候和养分等)对树种生长的适合程度,可通过经验或生态系统过程模型的模拟而获得,其值在 0~0.3<sup>[19]</sup>,值越大表明树种越容易在该土地类型上生存. 物种在同一立地类型中的建群系数相同,根据文献资料<sup>[9]</sup>获得物种在各土地类型上的建群系数(表 2).

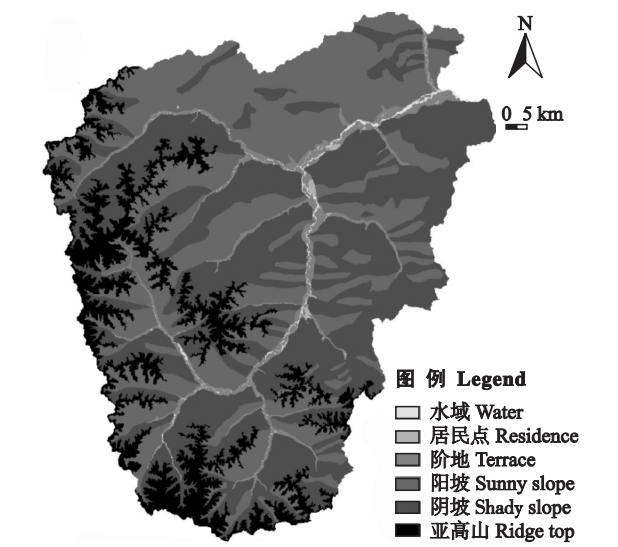


图 1 呼中林区立地类型图  
Fig. 1 Land type map of Huzhong forest area.

表 2 各土地类型上物种的建群系数  
Table 2 Establishment coefficients of species in all land types

立地类型 Site type	MAS (a)	物种建群系数 Species establishment coefficients							
		EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7	EC8
阳坡 Sunny slope	50	0.30	0.20	0.03	0.30	0.20	0	0	0
阴坡 Shady slope	40	0.20	0.10	0.05	0.20	0.20	0	0	0
亚高山 Ridge top	100	0.05	0.08	0	0.05	0	0	0	0.10
阶地 Terrace	40	0.01	0	0	0.05	0.05	0.07	0.20	0
居民点 Residence	0	0	0	0	0	0	0	0	0
水域 Water	0	0	0	0	0	0	0	0	0

MAS: 最小成荫年龄 Minimum age before enough shade was created; EC1、EC2、EC3、EC4、EC5、EC6、EC7、EC8 分别为落叶松、樟子松、云杉、白桦、山杨、甜杨、钻天柳、偃松的建群系数 EC1、EC2、EC3、EC4、EC5、EC6、EC7、EC8 indicated establishment coefficients for *Larix gmelini*, *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, *Picea koraiensis*, *Betula platyphylla*, *Populus davidiana*, *Populus suaveolens*, *Chosenia arbutifolia*, and *Pinus pumila*, respectively.

**1.2.6 模拟预案设计** 虫害的发生面积是衡量虫害干扰强度的重要指标,也是最容易获得的数据. 由于实际数据只记录了人为灭虫条件下落叶松毛虫的发生面积,无法满足研究不同虫害等级干扰对森林景观的影响<sup>[20]</sup>,加之研究区的年均气温较低,虫害发生面积较小,因此为了更接近自然状况下虫害的发生状况,调整模型的随机参数,人为划分了 3 个虫害程度:虫害发生面积小于研究区面积的 1% 为轻度 (light),发生面积在 1%~5% 为中度 (moderate),发生面积 >5% 为重度 (severe);同时选择无任何虫害干扰作为对照 (P). 对比分析不同虫害干扰强度对林火过程的影响,同时探讨不同林火管理方式,即灭火 (fire suppression) 和自然火 (natural fire scenario) 条件下虫害发生面积的变化. 落叶松最长寿命为 300 a,为模拟一个完整的生命周期,因此模拟的时间尺度设为 300 a.

2 结果与分析

2.1 虫害干扰对森林可燃物的影响

影响林火发生的自然因素主要包括气象、地形、森林可燃物. 其中气象因素一般用于森林火险的预测,地形是长时间不变的因子,森林可燃物是人类唯一能够控制的林火因子<sup>[21]</sup>. 森林可燃物载量是决定森林火烧频率和强度的重要指标,理解大时空尺度上森林可燃物载量的变化对理解林火行为和林火管理具有一定的指导意义. 森林可燃物可分为两大类,即细可燃物和粗可燃物. 细可燃物主要来源于森林凋落物和细小的枯枝,粗可燃物 (coarse woody debris, CWD) 主要来源于直径 >7.6 cm 的枯枝,包括较大的枯枝、采伐剩余的伐桩和枯立木等<sup>[22]</sup>. 根据可燃物载量大小,可燃物由低到高可分为 1~5 级. 细可燃物级别越高越容易起火,粗可燃物级别越高林火强度越大<sup>[23]</sup>.

对比不同虫害干扰强度下森林可燃物的变化(图2),发现随模拟时间的延长,对照和轻度预案中森林细可燃物载量的变化比较一致,基本保持在2、3级,并且均呈先上升后下降的趋势.细可燃物载量在模拟的前100年由2级逐渐增至3级,反映出随着森林演替,自然整枝现象逐渐显现,林内细小的枯枝落叶逐渐增加,又由于森林的更新演替,细可燃物载量随后逐渐降低至2级.在中度和重度预案下,森林细可燃物载量在模拟的前20年内出现较大波动,模拟后期两种预案结果比较接近,这可能是由于落叶松毛虫是食叶害虫,在模拟初期对森林的取食作用明显,而后随着森林演替,对虫害干扰形成了一定的适应性,因此细可燃物载量又逐渐上升.随着虫害干扰强度的增加,森林的细可燃物载量逐渐降低,各预案之间的差异极显著( $P<0.01$ ),反映出虫害干扰降低了细可燃物的载量.

粗可燃物载量在干扰预案(轻度、中度、重度)和对照预案(P)下均呈逐渐上升的趋势,其原因可能是随着森林演替,林冠逐渐增大,树木间的竞争加剧,森林的自然稀疏现象越来越明显,导致林内较大的枯枝越来越多.各预案间的粗可燃物载量差异极显著( $P<0.01$ ),在模拟的前170年,粗可燃物载量随着虫害干扰强度的增大而逐渐增大,这可能是由于虫害干扰使部分长势弱的树木死亡,进而导致林内较大的枯枝增加.模拟230 a以后,随着虫害干扰

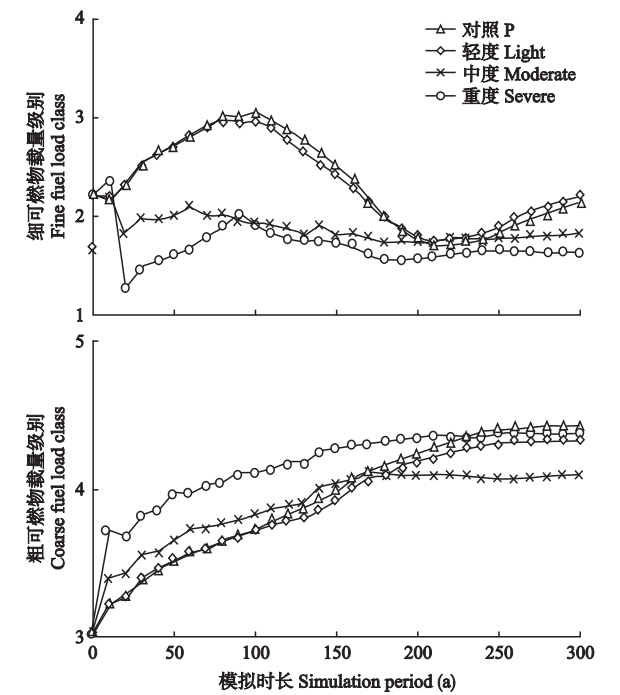


图2 不同虫害干扰预案下的可燃物载量  
Fig.2 Fuel load in different pest disturbance scenarios.

累积作用的增加,粗可燃物的载量也逐渐增加,不同预案下粗可燃物载量逐渐接近.其原因可能是尽管虫害对森林可燃物载量有明显影响,但森林对虫害具有一定的抵抗力,受到干扰的森林可以逐渐恢复,因此不同干扰预案下的模拟结果逐渐接近.中度干扰预案下的粗可燃物载量在160 a以后基本保持不变,可能是由于中度干扰下虫害对粗可燃物的影响与森林本身的抵抗能力相对持平,因此粗可燃物载量比较稳定.

2.2 虫害干扰对火烧频率的影响

由图3可以看出,各虫害干扰预案下模拟年份的火烧频率[火烧次数·(10 a<sup>-1</sup>)]波动较大,模拟前200年,随着虫害干扰程度的增大,火烧频率逐渐降低,其原因可能是虫害干扰导致林内的细可燃物载量降低,而细可燃物是引起火灾的主要因素之一;

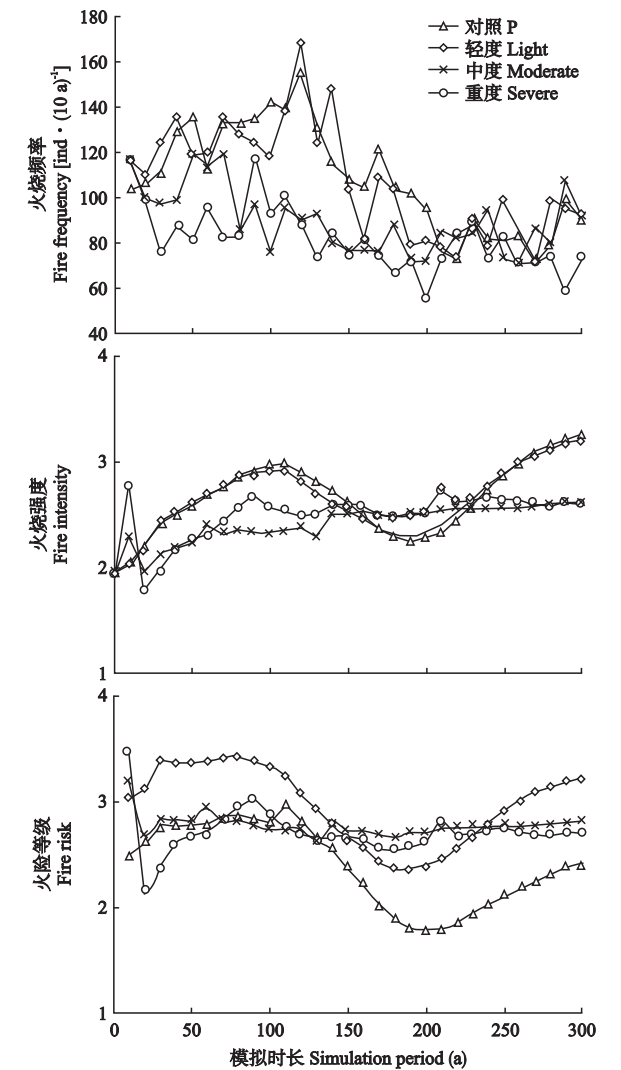


图3 不同虫害干扰预案下火烧频率、火烧强度和火险等级  
Fig.3 Fire frequency, fire intensity and fire risk in different pest disturbance scenarios.

虫害干扰可导致部分林木死亡,而更新树种白桦为阔叶树,其含水率高于针叶树,这可能是火烧频率有所降低的另一个原因. 模拟后期,不同虫害干扰预案下的森林火烧频率比较接近,这可能是随着模拟时间的延长,森林不断演替,白桦逐渐被落叶松代替,因此不同预案下的林火发生频率逐渐降低并互相接近.

2.3 虫害干扰对火烧强度的影响

火烧强度是由树种的耐火性、地形、可燃物、气象和干扰等多因子决定的,也是林火破坏程度的重要指标<sup>[24]</sup>. 对比 300 a 内不同虫害干扰程度下的林火强度变化(图 3),结果表明,对照和轻度干扰预案下的林火强度的变化比较相近,总体上呈先上升后下降再上升的趋势;中度和重度干扰预案下的变化趋势比较平缓. 在模拟前期和后期,对照和轻度干扰预案下林火强度高于中度和重度干扰预案,其原因可能是中度和重度虫害干扰导致大量落叶松死亡,产生的森林空隙被白桦占领,而白桦含水率高于落叶松,因此火烧强度降低.

2.4 虫害干扰对潜在火险等级的影响

森林火险是由潜在的火烧强度和起火可能性决定的,对森林火险的判定是林火预防管理的基础和林火管理的重要依据,也是降低森林损失的主要措施<sup>[25]</sup>. 由图 3 可以看出,在模拟的前 20 年,不同虫害干扰预案下火险等级的变化均比较剧烈,这主要是由于虫害干扰的出现改变了林分组成,进而导致了火险等级的变化. 轻度干扰预案的火险等级高于对照预案,两者的火险等级变化趋势相似,即在 30 ~ 150 a 间变化趋势平缓,150 a 后逐渐降低,在 210 a 降到最低后逐渐增加. 中度和重度干扰预案的火险等级变化趋势相似,均比较平缓,前者的火险等级略高于后者. 从总的趋势来看,轻度虫害干扰在模拟期间增加了森林火险等级,而中、重度干扰在模拟的中、后期增加了火险等级.

2.5 林火对虫害发生面积的影响

近年来由于林火的危害逐渐受到森林管理部门的重视,防火和灭火的力度逐渐加大<sup>[24]</sup>. 对比自然林火和人类灭火预案下虫害在大时空尺度上的变化(图 4),结果表明:两种预案下,虫害发生面积的变化趋势相似,即在模拟的 300 a 内均呈先增加后降低的趋势,但是虫害发生面积在人类灭火预案下明显高于自然林火预案. 其原因可能是由于人类高强度的灭火导致火烧强度的降低,间接地减小了白桦等火后先锋树种的分布面积,增加了落叶松的面积,

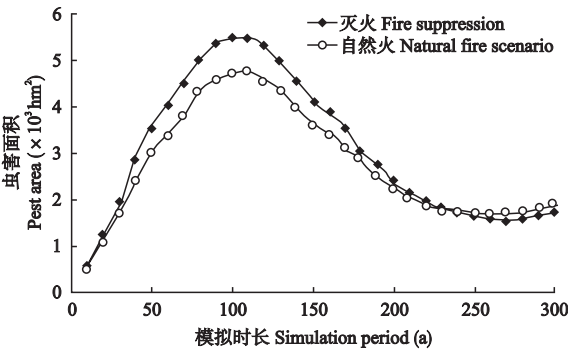


图 4 自然林火和人类灭火预案下的虫害面积  
Fig. 4 Pest area in natural fire and fire suppression scenario.

尤其是落叶松老龄林的增加<sup>[19]</sup>,而落叶松老龄林可以为害虫提供更多的食物来源,因此人类的灭火间接地为虫害发生提供了有利条件.

3 讨 论

本研究发现,虫害干扰降低了森林的细可燃物载量,增加了粗可燃物载量,随着虫害干扰程度的增加,可燃物载量的变化越明显,这与以往的研究结果相似<sup>[25-26]</sup>. 虫害干扰降低了火烧频率以及模拟前期和后期的火烧强度,提高了模拟中期的火烧强度和火险等级. 人类的灭火措施导致了虫害面积的增加. 因此建议林业管理部门采取适当的虫害防治措施<sup>[27]</sup>,并且放弃一味的防火灭火,借鉴国内外的先进经验,采取可燃物去除和计划火烧等方式<sup>[28-30]</sup>,以保证森林生态系统的稳定健康发展.

模型验证是所有景观模型面对的共同难题,由于缺乏大的空间尺度上的长期监测数据,很难对空间直观景观模型进行直接验证. 本研究采用的 LANDIS 模型已经过模型程序评价,如灵敏度分析、不确定性分析和模型结构分析<sup>[31-32]</sup>,模型有效性已在众多应用中得到体现. 本文运用 Loehle<sup>[33]</sup>在 1997 年提出的评价生态系统模型的检验方法强调模型对生物和生态学特性的实现. 在大兴安岭林区,乔木层以兴安落叶松为绝对优势树种,当其与白桦共生时,白桦组成亚乔木层. 本研究中 LANDIS 模型模拟的结果表明,在不同级别的虫害干扰和所有模拟年份中,落叶松的平均面积百分比都大于 60%,是该地区的绝对优势种,白桦的平均面积百分比都大于 15%,是阔叶树种中的优势种,说明 LANDIS 模型对物种组成的模拟结果与实际情况及前人的研究结果一致<sup>[34]</sup>. 虫害在目前人类灭火预案下平均发生面积与实际发生面积接近,同时不同预案下火烧频率平均值也与实际情况接近,因此可以认为该模型模拟

的结果具有一定的准确性。

人为灭火会导致火烧频率和火烧强度等因子的变化,本研究只笼统地考虑人为灭火对虫害的影响,没有考虑不同火烧强度对虫害的影响,存在一定的片面性。同时本研究没有考虑其他自然和人类干扰对虫害和林火的影响。如在 300 a 的模拟时间内气候可能会发生变化,物种的定居能力和植物对虫害和疾病易感染性可能会变化<sup>[35]</sup>,气候变化会导致林火频率和强度的变化<sup>[36]</sup>,人类采伐也会导致森林物种组成的改变,进而导致虫害和林火过程的变化,这些问题需要在今后的工作中深入研究。

### 参考文献

- [1] Zhu J-J (朱教君), Liu Z-G (刘足根). A review on disturbance ecology of forest. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(10): 1703-1710 (in Chinese)
- [2] Waldron JD, Lafon CW, Coulson RN, *et al.* Simulating the impacts of southern pine beetle and fire on the dynamics of xerophytic pine landscapes in the southern Appalachians. *Applied Vegetation Science*, 2007, **10**: 53-64
- [3] Wang R-J (王瑞君). Study on the relationship between forest fire and forest insect damage. *Protection Forest Science and Technology* (防护林科技), 2005(3): 93-95 (in Chinese)
- [4] Bouchard M, Pothier D. Simulations of the effects of changes in mean fire returns intervals on balsam fir abundance, and implications for spruce budworm outbreaks. *Ecological Modelling*, 2008, **218**: 207-218
- [5] Cairns DM, Lafon CW, Waldron JD, *et al.* Simulating the reciprocal interaction of forest landscape structure and southern pine beetle herbivory using LANDIS. *Landscape Ecology*, 2008, **23**: 403-415
- [6] Bebi P, Kulakowski D, Thomas TV. Interactions between fire and spruce beetles in a subalpine rocky mountain forest landscape. *Ecology*, 2003, **84**: 362-371
- [7] He HS. Forest landscape models: Definitions, characterization, and classification. *Forest Ecology and Management*, 2008, **254**: 484-498
- [8] 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
- [9] Gong X (公霞), Chang Y (常禹), Bu R-C (布仁仓), *et al.* Long-term effects of different forest harvesting models on forest landscape pattern in Huzhong Forestry Bureau. *Chinese Journal of Ecology* (生态学报), 2006, **25**(7): 805-812 (in Chinese)
- [10] Chang Y, He HS, Hu YM, *et al.* Historic and current fire regimes in the Great Xing'an Mountains, Northeastern China: Implications for long-term forest management. *Forest Ecology and Management*, 2008, **254**: 445-453
- [11] Chen H-W (陈宏伟), Hu Y-M (胡远满), Chang Y (常禹), *et al.* Long-term effects of *Dendrolimus superans* Bulter disturbance on forest landscape in Huzhong Forest Bureau of the Great Xing'an Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(5): 1090-1096 (in Chinese)
- [12] Zhou Y-L (周以良). Vegetation of Daxing'anling in China. Beijing: Science Press, 1991 (in Chinese)
- [13] Zheng H-N (郑焕能), Hu H-Q (胡海清). Influence of fire on the balance of forest ecosystem. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 1990, **18**(1): 8-13 (in Chinese)
- [14] Tian X-R (田晓瑞), Shu L-F (舒立福), Wang M-Y (王明玉), *et al.* Analysis of forest characteristics of Great Xing'anling Mountains. *Forest Fire Prevention* (森林防火), 2008(2): 31-36 (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] Mladenoff D. LANDIS and forest landscape models. *Ecological Modelling*, 2004, **180**: 7-19
- [17] Chang Y, He HS, Hu YM, *et al.* Long-term forest landscape responses to fire exclusion in the Great Xing'an Mountains, China. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, **16**: 34-44
- [18] Xu CG, He HS, Hu YM, *et al.* Assessing the effect of cell level uncertainty on a forest landscape model simulation in Northeastern China. *Ecological Modelling*, 2004, **180**: 57-72
- [19] Wang X-G (王绪高), Li X-Z (李秀珍), He H-S (贺红士), *et al.* Long-term effects of different planting proportion on forest landscape in Great Xing'anling Mountains after the catastrophic fire in 1987. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(5): 855-861 (in Chinese)
- [20] Sturtevant BR, Gustafson EJ, Li W, *et al.* Modeling biological disturbances in LANDIS: A module description and demonstration using spruce budworm. *Ecological Modelling*, 2004, **180**: 153-174
- [21] Ganteaume A, Marielle J, Corinne LM, *et al.* Fuel characterization and effects of wildfire recurrence on veg-

- etation structure on limestone soils in southeastern France. *Forest Ecology and Management*, 2009, **258**: 15–23
- [22] Agee JK, Skinner CN. Basic principles of forest fuel reduction treatments. *Forest Ecology and Management*, 2005, **211**: 83–96
- [23] Siitonen J, Martikainen P, Punttila P, *et al.* Coarse woody debris and stand characteristics in mature managed and old-growth boreal mesic forests in southern Finland. *Forest Ecology and Management*, 2000, **128**: 211–225
- [24] He HS, Mladenoff DJ. Spatially explicit and stochastic simulation of forest-landscape fire disturbance and succession. *Ecology*, 1999, **80**: 81–99
- [25] Bergeron Y, Leduc A. Relationships between change in fire frequency and mortality due to spruce budworm outbreak in the southeastern Canadian boreal forest. *Journal of Vegetation Science*, 1998, **9**: 493–500
- [26] Xu A-J (徐爱俊), Zheng W-D (郑文达), Fang L-M (方陆明), *et al.* Key technology of the forest fire prevention system at county level based on 3D. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2008, **30**(1): 170–174 (in Chinese)
- [27] Jenkins WA, Murray BC, Kramer RA, *et al.* Bark beetles, fuels, fires and implications for forest management in the Intermountain West. *Forest Ecology and Management*, 2008, **254**: 16–34
- [28] Lynch HR, Crabtree RA, Moorcroft RL. The influence of previous mountain pine beetle (*Dendroctonus ponderosae*) activity on the 1988 Yellowstone fires. *Ecosystems*, 2006, **9**: 1318–1327
- [29] Lin Q-Z (林其钊), Shu L-F (舒立福). *Conspectus of Forest Fire*. Beijing: University of Science and Technology of China Press, 2003 (in Chinese)
- [30] Waldrop TA, Yaussy DA, Phillips RJ, *et al.* Fuel reduction treatments affect stand structure of hardwood forests in Western North Carolina and Southern Ohio, USA. *Forest Ecology and Management*, 2008, **255**: 3117–3129
- [31] He HS, Mladenoff DJ, Boeder J. An object-oriented forest landscape model and its representation of tree species. *Ecological Modelling*, 1999, **119**: 1–19
- [32] Xu C-G (徐崇刚), Hu Y-M (胡远满), Chang Y (常禹), *et al.* The effect of cell-level uncertainty on spatially explicit landscape model simulation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(9): 1938–1950 (in Chinese)
- [33] Loehle C. A hypothesis testing framework for evaluating ecosystem model performance. *Ecological Modelling*, 1997, **97**: 153–165
- [34] Hu Y-M (胡远满), Xu C-G (徐崇刚), Chang Y (常禹), *et al.* Application of spatially explicit landscape model (LANDIS): A case researches in Huzhong area, Mt. Daxing'anling. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(9): 1846–1856 (in Chinese)
- [35] Zhao T-L (赵铁良), Geng H-D (耿海东), Zhang X-D (张旭东), *et al.* Influence of temperature change on forest pests in China. *Forest Pest and Disease* (中国森林病虫), 2003, **22**(3): 29–32 (in Chinese)
- [36] Flannigan M, Campbell I, Wotton M, *et al.* Future fire in Canada's boreal forest: Paleoecology results and general circulation model-regional climate model simulations. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, **31**: 854–864

---

**作者简介** 陈宏伟,男,1980年生,博士,助理研究员.主要从事森林景观模型和森林虫害研究,发表论文8篇. E-mail: chenhw@iae.ac.cn

**责任编辑** 孙菊

---