

# 1987 年大兴安岭特大火灾后北坡森林 景观生态恢复评价

王绪高<sup>1,3</sup>, 李秀珍<sup>1\*</sup>, 贺红士<sup>1,2</sup>, 解伏菊<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 美国密苏里大学, 哥伦比亚 65211; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 通过空间直观景观模型(LAND IS)来探讨大兴安岭北坡 1987 年特大森林火灾后, 在目前这种恢复方案下以及完全依靠天然更新下森林景观的长期动态, 通过对比研究来评价目前所采取的恢复措施是否能够有效地恢复森林资源。研究结果表明: 1987 年大火后所采取的恢复措施可以在很大程度上增加针叶树种在该区所占的比例, 而相应地降低阔叶树种的比重。由于在目前的恢复措施下, 不仅大面积地种植针叶树种, 同时也采伐了大量的成、过熟林, 使落叶松和樟子松的蓄积量在开始阶段不仅没有增加, 反而有大幅度的下降。但最终, 所更新的幼苗逐渐成材, 落叶松和樟子松的蓄积量逐渐超过天然更新下的。在演替前期, 白桦的蓄积量在这 2 种模拟方案下相差不大; 而在演替后期, 白桦在天然更新方案下的蓄积量要高于在目前恢复措施下的蓄积量。另外, 物种在不同的区域的变化动态又有较大的差异。在重度火烧区, 由于人为种植大量的针叶树种, 使它们所占的面积比例明显高于完全依靠天然更新下其在重度火烧区所占的比例; 而阔叶树种则相反, 在完全依靠天然更新方案下所占的面积百分比明显高于在目前恢复方案下的比例。而在未火烧和轻中度火烧区, 由于火后人为采伐大量的落叶松和樟子松, 使这 2 个树种在该区所占的比例在开始 100 多年里要低于完全依靠天然更新下的比例, 随后逐渐高于天然更新下所占的比例, 但相差不大; 阔叶树种则正好相反。另外, 目前恢复方案不仅极大地改变了主要物种在该区所占的比例, 而且还明显的影响了它们的空间分布格局。

**关键词:** LAND IS; 大兴安岭; 恢复; 天然更新

**文章编号:** 1000-0933(2005)11-3098-09 **中图分类号:** Q 149, S718.5 **文献标识码:** A

## Evaluation of landscape restoration in the northern slopes of Great Xing'an Mountains after the 1987 catastrophic fire

WANG Xu-Gao<sup>1,3</sup>, LI Xiu-Zhen<sup>1\*</sup>, HE Hong-Shi<sup>1,2</sup>, XIE Fu-Ju<sup>1,3</sup> (1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. School of Natural Resources, University of Missouri-Columbia, Columbia, MO 65211, USA; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 3098~3106

**Abstract** We used the LAND IS model to study the effects of two management scenarios (current restoration strategy and natural regeneration) on the long-term forest dynamics in the northern slopes of Great Xing'an Mountains after the catastrophic fire in 1987. The results showed that current restoration strategy increased the abundance of coniferous species (larch (*Larix gmelinii*) and Mongolian Scotch pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)) in the study landscape due to large quantity of coniferous seedlings planted, and the amount of broad-leaved species (white birch (*Betula platyphylla*)) decreased. Under current restoration strategy, plenty of matured coniferous forest was harvested within 10 years after the 1987 fire, which resulted in significant decline in the timber volume. As these coniferous seedlings planted soon after the 1987 fire grew

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40331008, 30270225); 中国科学院知识创新资助项目(KSCX2-SW-133); 中俄自然资源与生态环境联合研究中心资助项目

**收稿日期:** 2005-01-27; **修订日期:** 2005-09-24

**作者简介:** 王绪高(1980~), 男, 山东日照人, 博士生, 主要从事景观生态学研究。E-mail: wxg. 7980@163.com

\* **通讯作者** Author for correspondence E-mail: lixz@iae.ac.cn

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 40331008, 30270225), the Project of Chinese Academy of Sciences (No. KSCX2-SW-133) and Sino-Russian Joint Research Center on Natural Resources and Eco-Environmental Sciences

**Received date:** 2005-01-27; **Accepted date:** 2005-09-24

**Biography:** WANG Xu-Gao, Ph.D. candidate, mainly engaged in landscape ecology. E-mail: wxg. 7980@163.com

older with simulation years, the total volume of coniferous species increased and exceeded that under natural regeneration after about 60-80 years. In addition, white birch (*B. platyphlla*) had a similar proportion in the early stage of succession under the two management scenarios. However, the abundance was lower under current restoration strategy than that under the natural regeneration strategy in the later stage of succession. Furthermore, vegetation dynamics differed significantly between the severely burned areas and other areas. In severely burned areas, since coniferous seedlings were planted under the current restoration strategy, the abundance of larch (*L. gmelinii*) and Mongolian Scotch pine (*P. sylvestris* var. *mongolica*) was higher than that under the natural regeneration strategy. Conversely, the abundance of white birch (*B. platyphlla*) was lower under the current restoration strategy. In other areas, due to timber harvesting under current strategy, the abundance of larch and Mongolian Scotch pine was lower than that under the natural regeneration strategy in the first 100 simulation years, and then became slightly higher than that under natural regeneration. However, white birch was more abundant in the early stage of simulation and less abundant in the later stage under the current restoration strategy than that under the natural regeneration strategy in other areas. In addition, the current restoration strategy not only changed species abundance, but also had great influence on species distribution.

**Key words:** LAND IS; Great Xing'an Mountains; restoration; natural regeneration

1987 年大兴安岭林区发生的特大森林火灾, 过火面积达  $1.33 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。这次大火不仅改变了局部区域上物种的组成, 而且也导致了景观尺度上森林结构、功能及动态的变化<sup>[1,2]</sup>。根据不同受灾情况, 制定不同更新方式和更新强度, 用 10 年时间使火烧迹地得到基本恢复, 这是灾后火烧迹地恢复的指导方针<sup>[3]</sup>。

为尽快使针叶树得到恢复, 充分利用母树的天然落种条件, 在有可能的条件下对幼树进行抚育, 对不具备天然落种的火烧迹地进行了大规模的人工更新(落叶松为主)<sup>[4~7]</sup>。另外, 在人工更新的同时, 该林区也进行大量的森林采伐, 使森林所占的比重有所幅度的下降, 自从 1998 年天然林保护工程实施后, 森林采伐才逐渐的减少。现在 10 多年过去了, 这里的植被到底恢复的怎么样了? 如何评价这次火灾后 10 多年的恢复效果应是当前我们所关注的问题。而目前针对这一问题的研究, 主要是集中在这十几年火烧迹地上的植被变化的研究。通过火后十几年的调查研究, 火烧迹地基本上被植被覆盖, 但更新的森林植被类型、结构等则发生了很大的改变, 现有恢复措施从目前看到一定的效果, 但也产生了很多问题<sup>[8~11]</sup>。人们不禁要问目前的森林将会如何变化, 是否火后采取的这些恢复措施真的能够加快森林恢复, 能在多大程度上加快森林恢复; 如果不采取这些恢复措施, 仅依靠天然更新, 森林将如何变化, 是否也能够得到很好的恢复? 所有这些问题并不是通过这十几年的调查研究就可以解决的, 需要进行长期的研究, 而所有这些信息是我们合理科学地进行森林恢复和经营管理所必需的。

传统的野外实验方法只能用于小时空尺度上森林变化的研究<sup>[12]</sup>。而本文要研究几十万  $\text{hm}^2$  的森林景观在未来几百年的动态变化。因此计算机模拟模型则是一种很好的工具来研究森林的长期动态。本文采用一种森林景观模型(LAND IS)来探讨 1987 年火后森林景观在完全依靠天然更新和目前恢复方案下森林长期(300a)的演替动态, 通过它们之间的对比研究来评价当前恢复措施是否起到恢复森林景观的作用, 能在多大程度上加快森林恢复。

## 1 研究区概况

图强林业局地处祖国东北边陲, 位于大兴安岭北坡, 黑龙江上游额尔木河流域。地理坐标为东经  $122^\circ 18' 05''$ ~ $123^\circ 29' 00''$ , 北纬  $52^\circ 15' 55''$ ~ $53^\circ 33' 40''$ , 该局东部与阿木尔林业局交界, 西与西林吉相邻, 南与满归林业局接壤, 北以黑龙江与俄罗斯隔江相望, 总面积约  $4 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。地势属于起伏不大的低山丘陵地区, 山顶浑圆, 沟谷宽阔, 地势南高北低, 东陡西缓。最低海拔 270m, 最高海拔 1210m, 平均海拔 500m 左右, 平均坡度在  $12^\circ$ ~ $15^\circ$ 。地处寒温带大陆性气候区。该区由于气候严寒干燥, 植物种类比较贫乏, 森林结构比较单一, 地带性植被类型为寒温带针叶林, 以兴安落叶松(*L. arix gmelinii*)为主, 其次为樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)和云杉(*Picea koraiensis*)。阔叶乔木树种主要有白桦(*Betula platyphlla*), 山杨(*Populus davidiana*), 甜杨(*Populus suaveolens*), 钻天柳(*Chosenia arbutifolia*)和黑桦(*Betula davurica*)。

1987 年“五、六”特大火灾造成该林业局过火面积  $2.31 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 约占全局总面积的 60%。其中重度火烧面积约占  $9 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。火后根据不同的火烧强度, 相应地采取了不同的更新方式, 在中轻度过火区以天然更新和人工促进天然更新为主, 在重度火烧区由于缺乏种源, 主要采用人工更新, 种植以落叶松为主的针叶树种, 已取得良好成效。

## 2 研究方法

### 2.1 LAND IS 模型

LAND IS 模型主要用于模拟森林景观演替、种子扩散、干扰和管理的空间直观景观模型<sup>[13~15]</sup>。LAND IS 模型把异质性景观划分成多个具有相似环境条件的立地类型区。在每个立地类型(Land type)内, 具有相似的物种重建系数、火烧轮回期和可燃物

积累与分解速率。立地类型可由数字高程模型、遥感图像、土地利用类型图和土壤类型图等获得。LAND IS 模型把景观看作有相同大小的样地(像元)组成的网格, LAND IS 追踪每个像元上各物种存在与否、物种的年龄组成(10a 为步长)、干扰史和可燃物的积累等。初始每个像元优势物种的信息可由遥感影像或现存的植被类型图获得, 亚优势种和年龄信息可根据经验和调查数据得到<sup>[16]</sup>。

LAND IS 模型通过跟踪样地上物种的存在与否来模拟在风、火、病虫害和采伐等自然和人为干扰下样地和景观尺度上森林的动态变化。同时该模型还在每个像元上记录每个物种的年龄信息, 但并不记录物种的准确年龄, 而是以 10a 为间隔的年龄组。LAND IS 模型的输出包括每一个物种的分布图和 10 年龄组分布图、火强度分布图和采伐分布图等。目前, LAND IS 已被广泛用于森林景观的长期预测<sup>[17]</sup>, 森林景观对全球气候变暖的响应<sup>[18]</sup>, 不同火干扰下森林景观的演替<sup>[19]</sup>, 不同采伐方案对森林景观的影响<sup>[20]</sup>等。

## 2.2 LAND IS 模型参数化

运行 LAND IS 模型所需要的主要参数包括<sup>[13]</sup>: 物种生活史特征参数(Species attributes)、立地类型图和森林植被图(Forest composition map)(包括每一像元上的物种和年龄信息)。参数化的空间数据源主要是 1987 年和 2000 年的地形林相图。

**2.2.1 物种生活史特征参数和森林植被图** 该区主要 8 个物种的生活史特征主要从相关文献<sup>[10, 17, 21~24]</sup>, 实地调查以及咨询相关林业专家获得, 具体的参数值见表 1。模型要求输入栅格化的森林植被图, 每一个栅格(像元)包含物种及其年龄信息。本文采用基于小班的随机赋值法<sup>[25]</sup>对每一像元进行赋值。徐崇刚等<sup>[25]</sup>专门针对这一方法进行了不确定性分析, 结果发现虽然该方法所造成的不确定性在像元尺度上随着模拟时间的增加而增加, 但是在景观尺度上却保持相对的稳定并且很小。由于本文主要考虑景观水平上森林的动态变化, 因此基于小班的随机赋值法可用于 LAND IS 模型的参数化。1987 年火后和火后十多年恢复措施下的森林植被图分别由 1987 年和 2000 年的地形林相图和相应的属性数据库得到。

表 1 图强林业局物种生活史特征参数

Table 1 Species attributes for Tuqiang Forest Bureau

| 物种 Species                                        | 寿命(a)<br>Longevity | 成熟年龄(a)<br>MA | 耐阴性<br>ST | 耐火性<br>FT | 有效传播距离(m)<br>ESD | 最大传播距离(m)<br>M SD | 萌发率<br>VRP | 萌发年龄(a)<br>MAVR |
|---------------------------------------------------|--------------------|---------------|-----------|-----------|------------------|-------------------|------------|-----------------|
| 兴安落叶松 <i>L. gmelinii</i>                          | 300                | 20            | 3         | 3         | 150              | 300               | 0          | 0               |
| 樟子松 <i>P. sylvestris</i> var.<br><i>mongolica</i> | 250                | 40            | 1         | 1         | 100              | 200               | 0          | 0               |
| 云杉 <i>P. koraiensis</i>                           | 300                | 30            | 4         | 2         | 100              | 150               | 0          | 0               |
| 白桦 <i>B. p latyphylla</i>                         | 150                | 15            | 1         | 2         | 200              | 4000              | 0.8        | 40              |
| 山杨 <i>P. davidiana</i>                            | 180                | 20            | 1         | 2         | - 1              | - 1               | 1          | 40              |
| 黑桦 <i>B. davurica</i>                             | 150                | 15            | 1         | 4         | 200              | 1000              | 0.8        | 40              |
| 甜杨 <i>P. suaveolens</i>                           | 150                | 25            | 1         | 4         | - 1              | - 1               | 0.9        | 40              |
| 钻天柳 <i>C. arbutifolia</i>                         | 200                | 30            | 2         | 2         | - 1              | - 1               | 0.8        | 30              |

- 1 代表无限距离 Unlimited effective seeding range; MA Maturity age; ST Shade tolerance; FT Fire tolerance; ESD Effective seeding distance; M SD Maximum seeding distance; VRP Vegetative reproduction probability; MAVR Minimum age of vegetative reproduction

**2.2.2 立地类型** LAND IS 将异质性景观分为相对均质立地类型单元, 并假设在同一立地类型单元中的物种具有相同的环境条件<sup>[13]</sup>。在该区, 主要根据地貌将研究区分为 8 种立地类型(图 1): 水域、居民点、阶地、阳坡、阴坡、过火阶地、过火阳坡和过火阴坡。由于 1987 年大火形成了大量的火烧迹地, 而这些火烧迹地其可燃物、距上次火烧时间等条件与未烧区有明显的差异, 因此将过火区从阶地、阳坡和阴坡中分出。所有这些数据从 1987 年地形林相图和 1987 年遥感影像获得。2000 年进行森林调查时林业局的林班划分虽然同 1987 年时有一定的差异, 但立地类型在 10 多年时间不会有大的变化。为了使数据有可比性, 我们用 1987 年的立地类型图作为 2000 年的立地类型图, 也分为这 8 类。

LAND IS 模型将立地类型分为无效立地类型(不模拟)和有效立地类型(模拟)。无效立地类型包括水域和居民地, 占整个研究区面积的 0.90%。有效立地类型包括阶地、阳坡、阴坡、过火阶地、过火阳坡和过火阴坡, 分别占整个研究区面积的 0.94%, 23.57%, 17.39%, 3.39%, 31.43% 和 22.38%。当种子扩散到某地后, 它们由于受到该地区所处的环境因素(光、水、土壤等)以及物种自身的生物学特性等因素(耐阴性等)的影响, 不可能都能够存活。而 LAND IS 模型就通过物种的建群系数来反应物种在各立地类型上能够存活并且正常生长的能力, 取值范围在 0~1 之间, 值越大表明物种越容易在该地区生存<sup>[13]</sup>。物种在各立地类型上建群系数通过一些关于物种属性的文献估计所得<sup>[10, 17, 24]</sup>, 见表 2。

**2.2.3 干扰数据** 火干扰是大兴安岭地区重要的自然干扰因子, 也是该林业局最主要的影响因子。随着人类对大兴安岭地区的不断开发, 人类活动日益加剧, 平均火烧轮回期受人灭火的影响发生了很大变化。特别是本地区 1987 年发生了特大森林火灾, 造成了重大损失, 森林灭火工作更加受到重视。在这种情况下, 火烧轮回期延长, 由于本地区 1987 年后火灾纪录有限, 使用

了同处大兴安岭北坡并且具有相似气候和植被条件的呼中林业局的资料, 火烧轮回期大约为 325a<sup>[24]</sup>。本文主要探讨在火烧轮回期为 325a 条件下森林景观的动态变化。

2.3 景观模拟

本项研究模拟了 1987 年火后完全依靠天然更新和目前采用的恢复方案下该林业局景观 300a 的变化, 研究主要物种的多度、空间分布及其蓄积量。在各模拟年份中, 主要物种的多度用其所占整个林业局的面积百分比来表示, 物种的空间分布格局用聚集度指数来表示。聚集度指数反映物种的聚集程度, 其取值范围在 0~1 之间, 数值越高, 聚集程度越大<sup>[26]</sup>。另外, 根据物种各年龄阶段所对应的单位面积蓄积量以及该模型所模拟的物种年龄组成来计算该区主要物种的蓄积量。

3 结果

3.1 物种分布多度

LAND IS 可以输出各物种在这 2 种方案下, 不同模拟年份中的空间分布。本文主要分析 3 个主要树种(落叶松、樟子松和白桦)的演替动态。在目前的恢复方案下, 针叶树种(落叶松和樟子松)所占的比例明显高于完全依靠天然更新所占的比例(图 2)。而阔叶树种(白桦)则相反, 在所模拟的绝大部分时间里, 其在天然更新下所占的比例要明显高于在当前恢复方案下所占的比例。这主要是因为当前恢复主要措施是种植针叶树种, 使其所占的比例相应地有了较大提高, 也在某种程度上限制了阔叶树种的生长。在目前恢复方案下, 落叶松所占的面积百分比在火后 70a(到 2057 年)就可达到 70%, 而且以后还有增长的趋势, 并维持在 70% 以上。而完全依靠天然更新, 则需要近 260a(到 2247 年)才达到 70%。可见目前所采取的恢复措施与完全依靠天然更新相比, 可以极大地提高落叶松林在该区所占的比例, 而且能够维持近 300a 的时间。樟子松虽然也是该区的顶级群落树种, 由于其自身的不耐火、不耐阴等特性, 使其所占的比例很低(< 5%)。在天然更新条件下, 其在火后经过短期的增加后, 逐渐开始下降, 最终下降到 2% 附近。在目前恢复方案下, 樟子松林的变化趋势跟天然更新方案下的基本相同, 只是其在各模拟年份所占的比例都相对较高, 但其面积百分比也没有超过 5%。樟子松所占的面积百分比下降到 4% 时, 天然更新需要 70a(到 2057 年), 而在目前恢复方案下则需要 130a(到 2117 年)。因此, 目前所采取的恢复方案, 虽然不能极大地增加樟子松的所占比例, 但能在很大程度上延缓樟子松林减少的趋势。

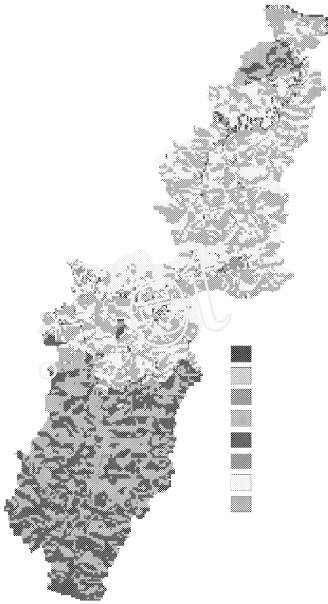


图 1 立地类型图  
Fig 1 Landtype map

表 2 物种在各立地类型中的建群系数

| Table 2 Establishment coefficient for each species in all land types |           |         |        |        |        |        |        |         |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 立地类型 Landtype                                                        | 兴安落叶松 EC1 | 樟子松 EC2 | 云杉 EC3 | 白桦 EC4 | 山杨 EC5 | 黑桦 EC6 | 甜杨 EC7 | 钻天柳 EC8 |
| 阳坡 SS                                                                | 0.3       | 0.25    | 0.03   | 0.3    | 0.01   | 0.1    | 0      | 0       |
| 阴坡 NS                                                                | 0.25      | 0.2     | 0.05   | 0.25   | 0.01   | 0.05   | 0      | 0       |
| 阶地 T                                                                 | 0.002     | 0       | 0      | 0.004  | 0.001  | 0      | 0.01   | 0.05    |
| 过火阳坡 BSS                                                             | 0.3       | 0.25    | 0.03   | 0.3    | 0.01   | 0.1    | 0      | 0       |
| 过火阴坡 BNS                                                             | 0.25      | 0.2     | 0.05   | 0.25   | 0.01   | 0.05   | 0      | 0       |
| 过火阶地 BT                                                              | 0.002     | 0       | 0      | 0.004  | 0.001  | 0      | 0.01   | 0.05    |
| 水域 Water                                                             | 0         | 0       | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       |
| 居民地 Residence                                                        | 0         | 0       | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       |

EC 建群系数(Establishment coefficient); EC1, EC2, EC3, EC4, EC5, EC6, EC7, EC8 are the establishment coefficient for *L. gmelinii*, *P. sylvestris* var. *mongolica*, *P. koraiensis*, *B. platyphylla*, *P. davidiana*, *B. davurica*, *P. suaveolens* and *Chosenia arbutifolia*, respectively; SS Southern slope; NS Northern slope; T Terrace; BSS Burned southern slope; BNS Burned northern slope; BT Burned terrace

白桦由于具有较强的种子扩散和定居能力, 使其在该区占有较高的比例。在天然更新方案下, 白桦迅速增多, 其所占的面积百分比在火后经过 30a 就达到 40%, 在火后 70~80a, 接近于 50%。由于其寿命较短(150a), 使其所占的比例在 150~200a 的期间内低于 40%, 但随后又有了一定的增加, 超过 40%。总之, 在天然更新方案下, 白桦在 1987 年大火后, 其所占的比例得到极大的增加。而在目前恢复方案下, 白桦在火后也迅速增多, 虽然火后 30a(2017 年)其面积百分比达到 40%, 但随后增长较慢, 经过

120a 后,其所占的比例低于 40%,在 150~200a 间甚至低于 30%。

### 3.2 物种在火烧区与未火烧区的分布多度

1987 年大火形成了大量的火烧迹地,根据火烧程度将火烧迹地分为 3 类<sup>[2]</sup>:轻度火烧区(烧死木占蓄积 30% 以下);中度火烧区(烧死木占蓄积 30%~70%)和重度火烧区(烧死木占蓄积 70% 以上)。由于火后该区所采取的人工更新等恢复措施主要集中于重度火烧区,本文进一步对比研究了重度火烧区与未火烧区、轻中度火烧区森林的动态变化。

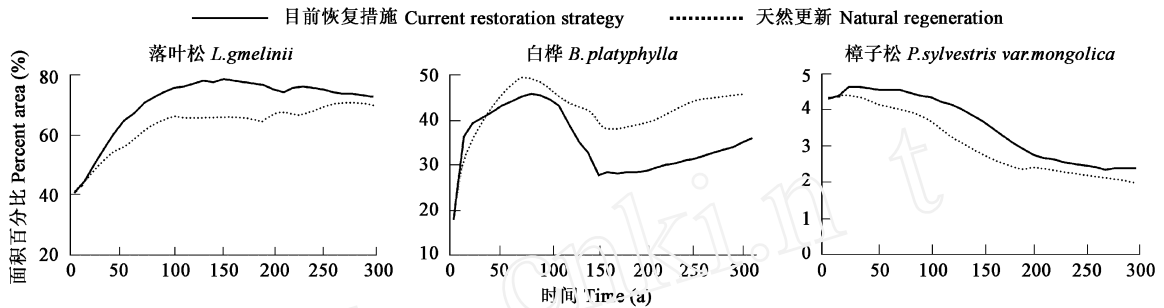


图2 不同模拟年份物种所占的面积百分比

Fig 2 Species percent area at different simulation years

从图 2 可见,目前恢复措施方案下,落叶松所占的面积百分比在整个林业局上一直高于天然更新。然而不同火烧区和未烧区上落叶松所占的面积则有很大的不同(图 3)。在重度火烧区,由于人工造林,使落叶松所占的比例明显高于天然更新下落叶松在该重度火烧区的比例。而在未火烧和轻中度火烧区,在火后 100 多年的时间里,落叶松在天然更新方案下所占的比例反而要高于目前恢复措施下的比例。樟子松在这 2 个区域的变化情况同落叶松相似。主要原因是火后不仅在重度火烧区人工种植了大量的落叶松和樟子松(以落叶松为主),同时未烧区和轻中度过火区也采伐了大量的落叶松和樟子松。另外如果目前在这些区域所进行采伐停止,那么它们所占面积百分比大约要经过 100 多年才能达到天然更新下它们所占的比例。在天然更新方案下,白桦在重度火烧区经过 10a 就可达到 10%,并继续增多,到 110a 所占的面积占到整个林业局的 22%,随后逐渐下降最终维持在 15% 左右。白桦在重度火烧区前 100 多年的时间里,所占的面积百分比要明显高于在目前恢复方案下落叶松所占的比例,这充分说明了白桦是该区演替的先锋树种。在目前恢复方案下,白桦在开始 10a 所占的比例也接近 10%,但随后增长缓慢,最高没有超过 15%,并在 100 多年后逐渐下降,最终维持在 7% 左右。而在未火烧、轻中度火烧区,由于人为采伐落叶松和樟子松,形成了大量的空地,有利于白桦的更新,因此在目前恢复方案下,白桦在未烧区所占的比例要高于天然更新方案下的。但随着针

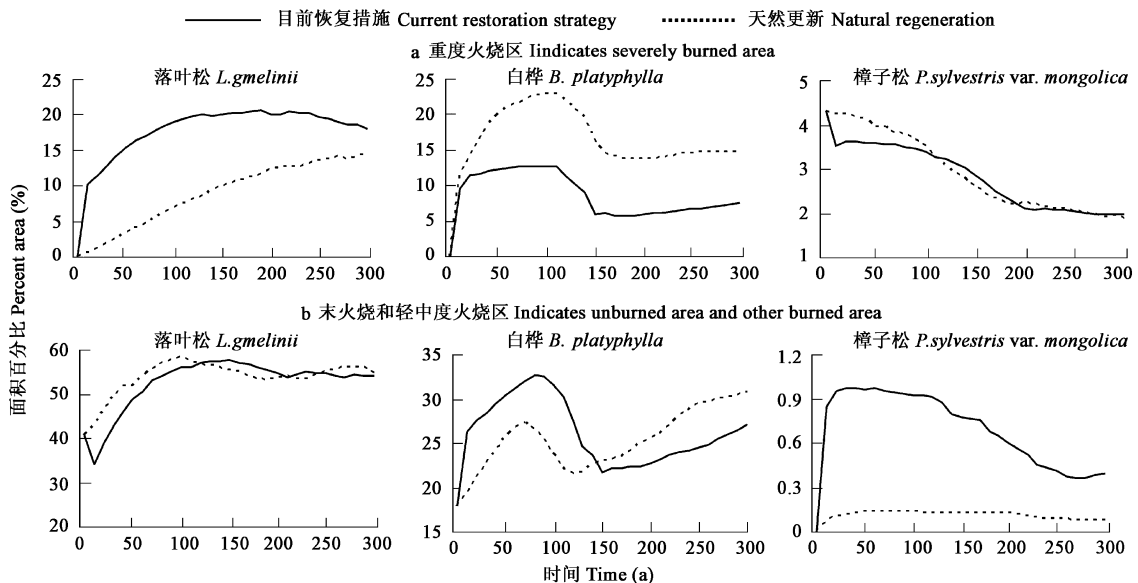


图3 物种在不同地区所占整个景观面积百分比

Fig 3 Species percent area in different areas of study landscape

叶树种的逐渐增多, 林分逐渐郁闭, 在大约 150a 后, 白桦在天然更新下所占的比例逐渐高于目前恢复方案下的, 但相差不大。

### 3.3 物种空间分布格局

物种随着时间的推移不仅多度发生了变化, 而且其空间分布格局也会发生改变。本文采用聚集度指数来量化各物种的空间分布格局。

从图 4 中可看出, 无论在天然更新还是在目前恢复措施方案下, 落叶松的聚集程度都很高。在天然更新方案下, 其聚集度从初始的 0.71, 经过 50a (到 2037 年) 就超过 0.8, 随后又有少许增加, 基本维持在 0.8~0.9 之间。在目前恢复措施下, 落叶松在火后 10a 虽然多度增加了, 但是其聚集度却降低了, 这有可能是由于火后在未火烧区大量的采伐落叶松, 使其变的破碎化, 而目前所种植的落叶松有可能比较分散造成的。随后开始增加, 到 2057 年超过 0.8, 最终也维持在 0.8~0.9 之间。樟子松初始聚集度为 0.4, 在天然更新条件下, 开始 40a 基本保持不变, 随后开始逐渐下降, 150a 后下降到 0.3, 并一直维持在 0.3 左右。而在目前恢复措施下, 樟子松的聚集度在 10a 后就下降到 0.3, 随后虽有少许增加, 但增幅不大, 基本维持在 0.3 附近。白桦不仅在在该区所占的面积百分比比较高, 其聚集程度也很高, 初始条件下可达到 0.48。在天然更新条件下, 其聚集度逐渐增加, 120a 后达到 0.74, 然后有较大的下降, 180a 后甚至低于 0.6, 随后又开始逐渐增加, 但基本维持在 0.6 附近。相比于天然更新方案, 白桦在目前恢复方案下的聚集度波动较小, 而且相对较低。

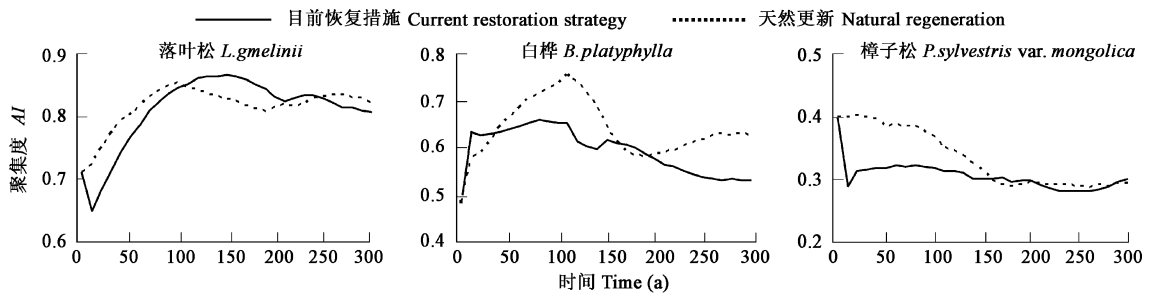


图 4 不同模拟年份物种的分布聚集度

Fig. 4 Species aggregation index (AI) at different simulation year

### 3.4 蓄积量

森林蓄积量是衡量森林生态系统功能的主要指标之一。对于森林蓄积量的计算, 林业部门一般通过选设标准地, 测量标准地上树种的胸径以及高度, 然后通过一元材积表或二元材积表计算得出。而限于目前计算机的运算能力, LAND IS 模型现在只是模拟每个像元上的物种组成及以 10a 为步长的物种年龄, 而没有模拟单一物种的信息。因此本文通过主要树种各年龄阶段所对应的每公顷蓄积量乘以树种各年龄阶段所占的面积, 得到各树种的蓄积量。由于森林景观具有很明显的异质性, 具有相同年龄的同一树种在不同立地条件上, 其蓄积量可能有很大的不同, 即使在相同的立地条件下, 由于其它生物及环境因素, 其蓄积量也可能有较大的不同。为了尽可能的增加蓄积量的准确性, 树种各年龄阶段所对应的每公顷蓄积量主要通过 1987 年的地形林相图和相应的属性数据库得到, 取各年龄阶段所对应的蓄积量的平均值, 另外结合森林调查员手册<sup>[27]</sup>中有关这一地区主要树种的一些信息, 并咨询当地林业部门的专家。在初始条件下, 实地调查的落叶松、樟子松和白桦的蓄积量分别占总蓄积量的 77.2%、6.4% 和 16.0%, 而通过模拟结果得到这 3 个物种蓄积量分别占总蓄积量的 74.7%、9.0% 和 15.7%, 因此误差在 3% 以内。用估计的主要树种不同龄级所对应的每公顷蓄积量, 乘以 LAND IS 模型模拟的物种所占的面积, 来估计未来 300a 内物种的蓄积量 (表 3)。

由于该区主要物种是落叶松、白桦和樟子松, 这 3 个物种的蓄积量之和占该区总蓄积量的绝大部分 (99%), 因此本文只探讨这 3 个物种蓄积量随时间的动态变化。从图 5 可以看出, 落叶松在该区的蓄积量明显高于其他物种的蓄积量。在天然更新方案下, 其蓄积量是随着时间的推移大致呈上升趋势。由开始阶段的  $1.8 \times 10^7 \text{ m}^3$  逐渐增加到 300a 后的  $3 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 但在 120a 到 180a 间有所下降。而在目前恢复措施下, 火后 10a 落叶松的蓄积量大幅度下降到约  $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 这主要是火后虽然在重度火烧区进行了大面积的人工更新, 但是在其他区域进行了很大程度上的森林采伐。随后随着时间的推移, 更新幼苗逐渐成材, 其蓄积量开始大幅度增加, 在火后 60a 超过天然更新方案下的蓄积量, 最高可达  $3.5 \times 10^7 \text{ m}^3$  以上, 但最终维持在  $3 \times 10^7 \text{ m}^3$  左右。人工更新所带来的蓄积量优势可保持 200 多年 (图 5)。樟子松的蓄积量初始阶段仅  $2.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。在天然更新方案下, 其经过少量的增加后, 经过 80a 后开始较大幅度的下降, 最终维持在  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$  附近。而在目前恢复措施下, 樟子松蓄积量由于森林采伐, 经过 10a 后下降到  $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 随后开始增加, 经过 80a 后超过天然更新方案下的樟子松蓄积量。其在 100a 后也开始逐渐下降, 但

要高于天然更新下的蓄积量,最终也维持在 $1\times 10^6\text{m}^3$ 附近,其人工更新优势将在火后80~230a之间得到保持(图5)。白桦的蓄积量在初始条件下大约为在 $4\times 10^6\text{m}^3$ ,无论在天然更新还是在目前恢复措施方案下,其在开始约100a的时间内基本相同,而且一直呈上升趋势,最高可超过 $1.4\times 10^7\text{m}^3$ 。随后开始下降,但在目前恢复措施下,白桦的蓄积量下降的幅度更大,降至 $8\times 10^6\text{m}^3$ 附近,而在天然更新最低降至 $1\times 10^7\text{m}^3$ 左右。

表3 物种不同年龄阶段的单位面积蓄积量  
Table 3 Estimated volume per  $\text{hm}^2$  of species at different age class

| 落叶松 L arch          |                                                        | 樟子松 Pine            |                                                        | 白桦 Birch            |                                                        |
|---------------------|--------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------|
| 年龄组<br>Age class(a) | 平均蓄积量<br>M ean volum e<br>( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ) | 年龄组<br>Age class(a) | 平均蓄积量<br>M ean volum e<br>( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ) | 年龄组<br>Age class(a) | 平均蓄积量<br>M ean volum e<br>( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ) |
| 0~10                | 0                                                      | 0~10                | 0                                                      | 0~10                | 0                                                      |
| 10~20               | 28                                                     | 10~20               | 40                                                     | 10~20               | 20                                                     |
| 20~30               | 45                                                     | 20~30               | 52                                                     | 20~30               | 38                                                     |
| 30~40               | 53                                                     | 30~40               | 65                                                     | 30~40               | 43                                                     |
| 40~50               | 68                                                     | 40~50               | 67                                                     | 40~50               | 54                                                     |
| 50~60               | 72                                                     | 50~60               | 83                                                     | 50~60               | 65                                                     |
| 60~70               | 81                                                     | 60~70               | 98                                                     | 60~70               | 77                                                     |
| 70~80               | 92                                                     | 70~80               | 112                                                    | 70~80               | 82                                                     |
| 80~90               | 115                                                    | 80~90               | 124                                                    | 80~90               | 98                                                     |
| 90~100              | 128                                                    | 90~100              | 135                                                    | 90~100              | 102                                                    |
| 100~110             | 132                                                    | 100~110             | 143                                                    | >100                | 106                                                    |
| 110~120             | 133                                                    | 110~120             | 150                                                    |                     |                                                        |
| 120~130             | 138                                                    | 120~130             | 156                                                    |                     |                                                        |
| 130~140             | 139                                                    | 130~140             | 162                                                    |                     |                                                        |
| 140~150             | 142                                                    | 140~150             | 166                                                    |                     |                                                        |
| 150~160             | 144                                                    | 150~160             | 169                                                    |                     |                                                        |
| 160~170             | 145                                                    | 160~170             | 171                                                    |                     |                                                        |
| 170~180             | 148                                                    | 170~180             | 173                                                    |                     |                                                        |
| 180~190             | 148                                                    | 180~190             | 174                                                    |                     |                                                        |
| 190~200             | 152                                                    | 190~200             | 175                                                    |                     |                                                        |
| >200                | 157                                                    | >200                | 175                                                    |                     |                                                        |

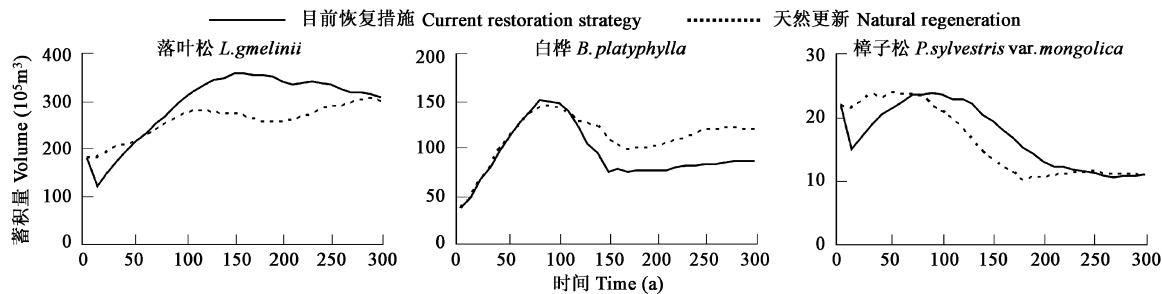


图5 不同模拟年份物种所占的蓄积量

Fig 5 The volume of species at different simulation year

总之,目前所采取的恢复措施在火后10a内大量采伐了针叶树种(落叶松和樟子松),造成了森林蓄积量的大幅度下降,但同时在这10a内人工更新了大量的针叶林幼树,随着时间的推移,幼树逐渐成材,森林蓄积量(尤其是落叶松蓄积量)经过60多年的时间就可以超过天然更新下的蓄积量,并在随后的模拟时间内一直高于天然更新方案下的蓄积量。

4 结论与讨论

空间直观模型所面临的一个挑战是对模型预测结果的验证。预测结果的验证传统上采用某一空间或时间上的独立数据来检查模型在该空间或时间上的预测结果。结果的验证,特别是对那些预测今后几百年的大尺度随机模型来说,尚未有成形的理论和报导。传统的预测结果验证适宜于从过去到现在的预测,对于从现在到未来的预测,由于缺乏独立的时空数据,常规的结果验证方法不适用于此类研究。虽然遥感数据可以为模型的验证提供一种新的可能,但是由于遥感数据不可能获得精确的物种和

年龄信息,而且其时间跨度太小(< 100a),再加上模型模拟的随机性,使模型的完全验证很难做到。Loehle<sup>[28]</sup>提出了一种模型检验的方法来评价生态系统模型,该方法主要强调模型对生物和生态学特性的实现。王绪高等<sup>①</sup>已经应用该方法对该区LAND IS模型进行了火模拟的实现、物种分布的实现和物种组成的实现上的验证。

虽然LAND IS模型模拟的结果能够很好的验证前人的研究成果,而且还得到一些新的结果,加深我们对森林景观不同人为干扰下动态变化的理解。然而模型本身也有一定的局限性。限于目前计算机的能力,为了加快运算速度,LAND IS模型以10a为步长来进行研究,而不是按每年进行研究。这在某种程度上会损失一定的信息量,在本文中由于缺少1997年森林调查资料,因此只能以2000年的森林调查资料来代替火后以目前恢复措施下经过10a,即1997年的资料,来进行对比研究。另外,当地火后造林活动于1997年基本停止。考虑到模型模拟长期(300a)的森林动态,这几年森林变化引起的差异是可以忽略的。另外,由于LAND IS没有考虑物种在演替前期中的自然死亡,只是物种快接近其寿命时才给予较高的死亡率,这种假设在没有人为干扰的情况下是很合理的。但由于目前的恢复方案主要是人为种植针叶树种,在许多地区由于没有很好的考虑到当地的实地情况,可能使所种植的物种不能很好的生长,使它们过早的死亡。该研究是假设在理想的状态下,目前人工种植的物种都能够成活或死亡率很低的情况下森林的演替动态。但考虑到模型模拟整个林业局水平上的森林动态,局部地区的物种死亡对整个景观的影响不大,这种假设也是基本合理的。

通过本文研究表明,1987年大火后所采取的恢复措施可以在很大程度上增加针叶树种(落叶松和樟子松)在该区所占的比例,而在某种程度上降低阔叶树种的比重。但由于在目前恢复措施下,不仅大面积地人工更新针叶树种,而且还采伐了大量的成熟林,使其在火后初期针叶树种(落叶松和樟子松)的蓄积量不仅没有增加,反而有较大幅度的下降。随着时间的推移,更新的幼树逐渐成材,目前恢复措施下落叶松和樟子松的蓄积量逐渐超过天然更新下的蓄积量。由于樟子松具有不耐阴、耐火性差等特性,使其经过一段时间的增加后,逐渐开始下降,目前这种恢复措施使樟子松无论是面积还是蓄积量都不能恢复到火前水平,因此要想使樟子松在该区所占的比例达到1987年火前水平,还应该更多地种植樟子松。由于1987年火灾后,目前森林恢复的指导方针主要是恢复针叶树种(尤其是落叶松)。如果依照这个标准,那么目前的恢复方案与完全依靠天然更新相比,效果还是显著的。然而由于目前的恢复措施加大了针叶林在该区的比重,而如果林分过分单一,阔叶林在该区大量减少,将会产生一些不良后果,如森林病虫害、生物多样性降低等<sup>[10, 29]</sup>。目前这种恢复措施是否会造成大面积的森林病虫害,是否有其他的恢复措施能够更好地加快森林的恢复,而且还能有效地抑制这些不良后果的发生,都是需要进一步探讨的问题。

## References

- [1] Xiao D N, Tao D L, Xu Z B, *et al*. Impacts of an extra-ordinarily disastrous fire on forest resources and environment. *Chinese Journal of Ecology*, 1988, 7(Sup.): 5~9
- [2] Wang X G, Li X Z, Kong F H, *et al*. Model of vegetation restoration under natural regeneration and human interference in the burned area of northern Daxing'anling Mountains. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(5): 30~34
- [3] Chen B X, Wang Y H, Qi M C. *et al*. Report on forest restoration after the catastrophic fire in 1987 in the northern slopes of Daxing'anling Mountains. *Journal of Northeast Forestry University*, 1987, 15(Sup.): 13~25
- [4] Shao C H. Suggestions for the regeneration of burned areas in Tuqiang Forest Bureau. *Chinese Journal of Ecology*, 1988, 7(Sup.): 71~74
- [5] Liu D X. Forest regeneration in burned area of Great Hing'an Mountains, *Forest Investigation Design*, 1989, 1: 22~24
- [6] Yang C T, Li B Y. Strategy and technology of regeneration in burned area in the northern slopes of Great Hing'an Mountains. *Forestry Science and Technology*, 1989, 6: 23~24
- [7] He J T, Wen D X. Methods to restore forest in burned area in the northern slopes of Great Hing'an Mountains. *Forestry Science and Technology*, 1990, 1: 5~6
- [8] Lou Y H, Jiao Z F. *Research on catastrophic fire in 1987*. Harbin: Science and Technology Press of Heilongjiang Province, 1990. 209~241.
- [9] Tan J. Reason and strategy on forest land reduction in Great Hing'an Mountains. *Territory and Natural Resources Study*, 1994, 2: 15~19
- [10] Xu H C. *Forest in Great Hing'an Mountains of China*. Beijing: Science Press, 1998. 1~231.
- [11] Yang S C, Liu X T, Cao H B. Study on vegetational change in burned areas of Daxing'anling. *Journal of Northeast Forestry University*, 1998, 26(1): 19~23
- [12] He H S. Forest landscape response to different harvest scenarios under climate warming — A spatial simulation study. *Geographic Information Sciences*, 2002, 8(2): 109~121.

① 王绪高,李秀珍,贺红士. 2005. 大兴安岭火后森林景观在不同火干扰及人工更新方式下的演替动态模拟. 北京林业大学学报(待发)



- [13] Mladenoff D J, He H S. Design and behavior of LAND IS, and object-oriented model of forest landscape disturbance and succession. In: Mladenoff D J, Baker W L ed. *Advances in Spatial Modeling of Forest Landscape Change: Approaches and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 1~13.
- [14] He H S, Mladenoff D J. Spatially explicit and stochastic simulation of forest landscape fire disturbance and succession. *Ecology*, 1999, **80**: 81~99.
- [15] Mladenoff D J. LAND IS and forest landscape models. *Ecological Modelling*, 2004, **180**: 7~19.
- [16] He H S, Mladenoff D J, Radeloff V C, et al. Integration of GIS data and classified satellite imagery for regional forest assessment. *Ecological Application*, 1998, **8**: 1072~1083.
- [17] He H S, Hao Z, Larsen D R, et al. A simulation study of landscape scale forest succession in China. *Ecological Modelling*, 2002, **156**: 153~166.
- [18] He H S, Mladenoff D J, Gustafson E J. Study of landscape change under forest harvesting and climate warming-induced fire disturbance. *Forest Ecology and Management*, 2002, **155**: 257~270.
- [19] Wimberly M C. Fire and forest landscapes in the Georgia Piedmont: an assessment of spatial modeling assumptions. *Ecological Modelling*, 2004, **180**: 41~56.
- [20] Gustafson E J, Shifley S R, Mladenoff D J, et al. Spatial simulation of forest succession and timber harvesting using LAND IS. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, **30**: 32~43.
- [21] Ai C L, Wang C D, Ai S H. Study on the seed dispersal of *Larix gmelinii*. *Forestry Science and Technology*, 1985, **4**: 2~5.
- [22] Duan X G. Study on fire tolerance of *Larix gmelinii*. *Forest Fire Prevention*, 1991, **31**(4): 7~11.
- [23] Hu H Q, Yao S R, Shang D Y. The characteristics and effect of the forest fire in Northeast China. *Forest Fire Prevention*, 1991, **31**(4): 13~16.
- [24] Hu Y, Xu C, Chang Y, et al. Application of spatially explicit landscape model (LAND IS): A case researches in Huzhong area, Mt Daxing'anling. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(9): 1846~1856.
- [25] Xu C, He H S, Hu Y, et al. Assessing the effect of cell-level uncertainty on a forest landscape model simulation in Northeastern China. *Ecological Modelling*, 2004, **180**: 57~72.
- [26] He H S, DeZonia B, Mladenoff D J. An aggregation index (AI) to quantify spatial patterns of landscapes. *Landscape Ecology*, 2000, **15**(7): 591~601.
- [27] Forest Investigation and Design Bureau in Forest Department. *Brochure of forest investigator*. Beijing: China Forestry Publication House, 1958. 1~351.
- [28] Loehle C. A hypothesis testing framework for evaluating ecosystem model performance. *Ecological Modelling*, 1997, **97**: 153~165.
- [29] Zhou Y L, Wu H Q, Chen T, et al. Accelerating the recovery of forest in the burned area in Daxing'anling according to the synecological characteristics. *Journal of Northeast Forestry University*, 1989, **17**(3): 1~10.

## 参考文献:

- [1] 肖笃宁, 陶大力, 徐振邦, 等. 大兴安岭北坡特大火灾对森林资源及环境的影响. *生态学杂志*, 1989, **7**(增): 5~9.
- [2] 王绪高, 李秀珍, 孔繁花, 等. 大兴安岭北坡火烧迹地自然与人工干预下的植被恢复模式初探. *生态学杂志*, 2003, **22**(5): 30~34.
- [3] 陈伯贤, 王义泓, 齐明聪, 等. 1987. 大兴安岭北部森林特大火灾后森林恢复问题的考察报告. *东北林业大学学报*, 15(增): 13~25.
- [4] 邵春海. 对图强林业局火烧迹地更新方式的意见. *生态学杂志*, 1988, **7**(增): 71~74.
- [5] 刘大兴. 大兴安岭火灾迹地的森林更新. *林业勘查设计*, 1989, **1**: 22~24.
- [6] 杨春田, 李宝印. 大兴安岭北坡火烧迹地更新的策略与技术. *林业科技*, 1989, **6**: 23~24.
- [7] 何静涛, 闻殿堰. 恢复大兴安岭北坡火烧地区森林的途径. *林业科技*, 1990, **1**: 5~6.
- [8] 楼玉海, 焦肇芳, 等. 五·六特大森林火灾的调查分析. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1990. 209~241.
- [9] 谭俊. 大兴安岭林区有林地退缩逆变浅析与对策思考. *国土与自然资源研究*, 1994, **2**: 15~19.
- [10] 徐化成. 中国大兴安岭森林. 北京: 科学出版社, 1998. 1~231.
- [11] 杨树春, 刘新田, 曹海波. 大兴安岭林区火烧迹地植被变化研究. *东北林业大学学报*, 1998, **26**(1): 19~23.
- [12] 艾春霖, 王慈德, 艾淑华. 兴安落叶松种子传播特性的研究. *林业科技*, 1985, **4**: 2~5.
- [13] 段向阁. 兴安落叶松抗火性研究. *森林防火*, 1991, **31**(4): 7~10.
- [14] 胡海清, 姚树人, 尚德雁. 东北林区林火的特点与作用. *森林防火*, 1991, **31**(4): 13~16.
- [15] 胡远满, 徐崇刚, 常禹, 等. 空间直观景观模型 LAND IS 在大兴安岭呼中林区的应用. *生态学报*, 2004, **24**(9): 1846~1856.
- [16] 林业部森林调查设计局森林经理处. *森林调查员手册*. 北京: 中国林业出版社, 1958. 1~351.
- [17] 周以良, 乌弘奇, 陈涛, 等. 按植物群落生态学特性, 加速恢复大兴安岭火烧迹地的森林. *东北林业大学学报*, 1989, **17**(3): 1~10.