文章编号:1001-1498(2014)04-0481-06

云冷杉过伐林主要树种结构特征分析

曾祥谓[1], 玉 宝[2], 乌吉斯古楞[3*], 红 玉[4], 达楞巴雅尔[5], 杨 浩[6]

(1. 中国林学会,北京 100091; 2. 国家林业局管理干部学院,北京 102600; 3. 中林天合森林认证中心,北京 100714;
4. 国家林业局调查规划设计院,北京 100714; 5. 内蒙古乌审旗林业局,内蒙古 鄂尔多斯 017300;
6. 北京市园林绿化局十三陵林场,北京 102200)

摘要:选择长白山针阔比 9∶1、8∶2、7∶3 的云冷杉过伐混交林,探讨直径结构、空间格局、蓄积生长、林下更新以及植物多样性等林分结构问题,为恢复红松为主的针阔混交林,提出结构调整思路。研究表明:由于过去以不合理的非经营性采伐,红松成主要择伐对象,红松不同年份各径阶株数变化幅度较大,直径 18 cm 开始出现缺损株数现象,缺乏中、大径组株数,导致母树数量、结实量和种源减少,造成在主要树种中红松更新最差的问题,不利于林分正向演替。不同针阔比混交林空间格局与其主要树种空间格局并非完全一致,在同一林分不同树种间存在差异。针阔比 9∶1、8∶2、7∶3 的混交林空间格局分别为随机分布、聚集分布和均匀分布。其中,红松分布格局主要呈聚集分布。因此,恢复以红松为主的针阔混交林,以红松和珍贵阔叶树种作为目标树种,采取目标树培育方法,伐除影响其更新和生长的林木,而将云冷杉和一般阔叶树作为伴生树种,逐渐减少云冷杉的优势,最终逐渐恢复成红松阔叶混交林;对针阔比 8∶2 和 7∶3 混交林红松分布格局,采取人工补植、间伐等措施,结合天然更新,向随机分布进行调整;采取人工补植、清理母树周围枯枝落叶层等措施人工辅助红松天然更新。

关键词:云冷杉;过伐林;混交林;林分结构

中图分类号:S791.18 **文献标识码**:A

Analysis of Structure Characteristics of Main Tree Species in Spruce-Fir Overcutting Forest

ZENG Xiang-wei[1], *YU Bao*[2], *WU Ji-si-gu-leng*[3], *HONG Yu*[4], *DA Leng-ba-ya-er*[5], *YANG Hao*[6]

(1. Chinese Society of Forestry, Beijing 100091, China; 2. State Academy of Forestry Administration, Beijing 102600, China;
3. Beijing Zhonglin Tianhe Forest Certification Center (ZTFC), Beijing 100714, China; 4. Academy of Forest Inventory and Planning, S. F. A, Beijing 100714, China; 5. Inner Mongolia Wushen Banner Forestry Bureau, Eerduosi 017300, Inner Mongolia, China; 6. Ming Dynasty Tombs Forest Farm, Beijing Municipal Bureau of Landscaping, Beijing 102200, China)

Abstract: In order to propose new design ideas of recovering mixed stand which mainly composed by *Pinus koraiensis*, some issues about stand structure were discussed and analyzed, such as diameter, spatial pattern, stand volume growth, regeneration and plant diversity, based on three types of overcutting spruce-fir forest on Changbai Mountains. The most difference among the forests was the ratio of conifer trees to broad-leaved trees, with stepped-rates of 9∶1, 8∶2 and 7∶3. The results showed that: *P. koraiensis* forest became cutting object because of unreasonable and non-operating cutting in the past. The amount of *P. koraiensis* trees greatly changed among different diameter intervals, and loss happened when diameter greater than 18 cm, which led to the decline of parent tree, seed and provenance, contrary to positive evolution. The spatial pattern of mixed stand was not exactly the same as that of

收稿日期: 2014-01-08
基金项目: 国家"十一五"科技支撑计划(2006BAD03A0804);国家科技支撑计划(2012BAD22B0204)
作者简介: 曾祥谓(1969—),男,江西南康人,高级工程师,生态学博士,研究方向: 森林生态系统服务市场。E-mail: zeng-csf@hotmail.com。
* 通讯作者:博士,内蒙古通辽市人,从事森林可持续经营管理研究。E-mail: wjsg@sina.com

the main tree species, and showed difference among different trees in the same stand. The three forests with different needle/broadleaf ratios followed a random, aggregation and uniform distribution. *P. koraiensis* assumed aggregation distribution. So the following should be done to recover mixed stand which mainly composed of *P. koraiensis*. 1. Taking *P. koraiensis* and precious broadleaf species as the goal, adopting the target tree cultivation method, removing the trees affecting the renewal and growth of target trees, taking spruce fir and broad-leaved tree as accompanying species, weakening the dominance of spruce and fir, and eventually restored the stand gradually to the *P. koraiensis* and broad-leaved mixed stand; 2. For the stand with conifer tree and broadleaved tree mixed in the ratio of 8∶2 and 7∶3, changing aggregation distribution into uniform distribution through repair planting, intermediate cutting and combined with natural regeneration; 3. Adopting artificial supplementary interventions to help the natural regeneration of *P. koraiensis*, such as repair planting, litter cleaning and so on.

Key words: spruce-fir; overcut forest; mixed stand; stand structure; distribution pattern

我国天然林由于长期过度利用和经营管理不善等原因,使大量原始林受到不同程度的干扰和破坏而形成了大面积的过伐林等。这些森林如何进行合理经营,优化结构使其正向演替,成为结构稳定、功能完善的林分,是当前亟待解决的关键问题。过伐林是原始林经过高强度采伐之后形成的,如能合理经营,过伐林比次生林更容易恢复成原始状态的针阔混交林[1-2]。林分结构影响林下树种的分布[3]和林分更新[4],而林下幼树将决定未来森林群落的结构[5]。混交林、异龄、复层林较纯林有着诸多优势。混交林的枯落物分解速率较针叶林快[6];多树种混交的林分,林木径级的结构变化幅度大,林分结构复杂,更好地发挥森林的多功能[7-8];针阔混交林的林下更新明显好于纯林[9];混交林可以有效地改善土壤理化性质和营养状况[6]等等。但以何种混交比例和树种组成的林分结构更趋合理,更有利于功能的发挥,按照经营目标具体如何调整混交、复层、异龄林的结构,指导林业生产等仍然是需要解决的重要问题。过去对过伐林结构的研究以直径分布[10-13]、空间结构[14-15]、林分更新[16-17]、物种多样性[18]等以单一指标结构特征研究为主,但对其结构如何调整方面仍缺乏系统性研究,需要深入研究结构优化、调整具体技术措施。长白山林区于20世纪30年代、解放前后以及20世纪60—70年代经过几次高强度采伐后,由原来以红松为主的原始林形成了目前云冷杉为主的过伐林。如何恢复经营过伐林,进行结构优化和促进正向演替一直是研究热点问题。本文以长白山云冷杉过伐混交林为研究对象,比较不同针阔比混交林的结构,系统分析其径阶株数、分布格局、林下更新以及植物多样性等结构特征和问题,并探讨结构调整思路,为长白山过伐林抚育经营提供理论依据和技术支撑。

1 研究区概况

研究区位于吉林省汪清县境内东北部的金沟岭林场。地理坐标为东经130°10′,北纬43°22′。地貌属低山丘陵,海拔300～1 200 m,坡度5°～25°,个别陡坡在35°以上。属季风型气候,年平均气温3.9℃左右,年降水量600～700 mm,植被属长白山植物区系,针叶树种主要有云杉(*Picea koraiensis* Mast.)、臭冷杉(*Abies nephrolepis* Trautv.)、红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)、落叶松(*Larix olgensis* Henry.),阔叶树种主要有椴树(*Tilia amurensis* Spp.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、枫桦(*Betula costata* Trautv.)、柞木(*Xylosma racemosum* Fisch. ex Turcz.)、色木(*Acer mono* Maxim.)等。北京林业大学和汪清林业局自1987年开始在汪清林业局金沟岭林场合作建立了试验基地,从云冷杉针阔混交林生态系统中选择有代表性的林地340.9 hm^2,共设立了3个大区,每个大区内分5个小区,共15个小区。试验区森林类型是以云杉、冷杉为主的针阔混交林,地位级为Ⅰ级,平均年龄在70～80年左右,建国后进行了2～3次强度为30%～50%的择伐。自1987年以来,经过20多年的经营管理后逐渐恢复为针阔比9∶1、8∶2和7∶3的云冷杉针叶混交林。过伐林多呈复层异龄林结构,针阔层次较明显,上层多为冷杉、云杉,下层为椴树、色木等阔叶树种。根据研究区立地、经济社会条件,结合三大效益,可经营为以生态效益为主,兼顾培育用材林的多目标经营异龄、复层、混交林。

2 研究方法

本研究试验选择在1大区3小区和2大区4小

区内,从中选取典型的针阔比为 9∶1、8∶2 和 7∶3 的 49 块固定样地,每 2 年复查 1 次,进行每木检尺。样地面积为 20 m×20 m(表 1)。第 1 大区于 1987 年设立,第 2 大区于 1988 年设立,林分是以冷杉、云杉和红松为主要树种,针阔比大于 7∶3 的混交林。其中,1 大区 3 小区针阔比一直保持在 7∶3,2 大区 4 小区 1989—1999 年为 9∶1,2001—2007 年为 8∶2。不同针阔比云冷杉混交林的树种组成变化不大。在标准地内设置 5 个 2 m×2 m 的小样方,调查更新、植物多样性。采用物种丰富度指数(R)、辛普森多样性指数(D)、香农多样性指数(H')、Alatalo 均匀度指数(E_a)和生态优势度(C)等 5 个指标[19-22]来测定植物多样性。用角尺度(W)指标[23-24]测定林分空间结构(当 $W<0.475$ 时均匀分布;当 $0.475\leqslant W\leqslant 0.517$ 时随机分布;当 $W>0.517$ 时聚集分布)。利用 spss14.0 软件进行统计分析。

表 1　样地基本情况

小区号	样地面积	样地数量	针阔比	树种组成	郁闭度	蓄积生长量 /($m^3\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$)	更新密度 /(株·hm^{-2})	空间格局
2 大区 4 小区	20 m×20 m	27	9 针 1 阔	4 冷 2 云 2 红 1 白 1 落	0.94	9.9	3 122	随机分布
2 大区 4 小区	20 m×20 m		8 针 2 阔	4 冷 2 云 2 红 1 白 1 其他	0.94	8.4	5 579	聚集分布
1 大区 3 小区	20 m×20 m	22	7 针 3 阔	3 冷 2 云 2 红 1 椴 1 色 1 桦	0.90	5.0	4 228	均匀分布

注:2 大区 4 小区样地总数量为 27,因在不同年份其树种组成表现不同(1989—1999 年针阔比为 9∶1,2001—2007 年针阔比为 8∶2)。

3　结果与分析

3.1　径阶株数分布变化

不同针阔比的混交林主要树种径阶株数分布为反“J”型曲线或不对称的左偏单峰山状曲线(图 1、图 2)。随着径阶的增大,林木株数开始时急剧减少,达到一定直径后,株数减少幅度渐趋平缓,呈现为近似双曲线形式的反“J”型曲线或左偏单峰山状曲线形式。随着林龄增加,不同年份径阶株数分布变化为株数峰值向右移,小径阶株数逐渐减少,株数峰值逐渐减小并出现多个拐点是它的显著特点。尽管研究区云冷杉过伐混交林直径结构均近似异龄林直径分布规律,但不同形状的反“J”型曲线其对应的各径阶株数也都有所不同,从而影响林分结构。

针阔比 9∶1 和 8∶2 混交林的主要树种冷杉、云杉和红松的直径分布呈左偏单峰山状曲线其中冷杉和云杉各径阶株数分布较合理(图 1)。但红松不同年份各径阶株数变化幅度较大,波动性较大。说明在过去森林采伐当中,红松主要成为择伐对象,而且以木材为主的非经营性采伐,导致了红松结构特征失去了规律性。针阔比 7∶3 混交林中冷杉的直径分布呈左偏单峰山状曲线,云杉和红松的直径分布出现缺损现象(图 2)。云杉直径 26 cm 开始出现株数缺损现象,红松直径 18 cm 开始出现缺损株数现象,说明云杉缺乏大和特大径组株数,红松缺乏中、大和特大径组株数。这是由不合理的采伐强度和对象所导致。

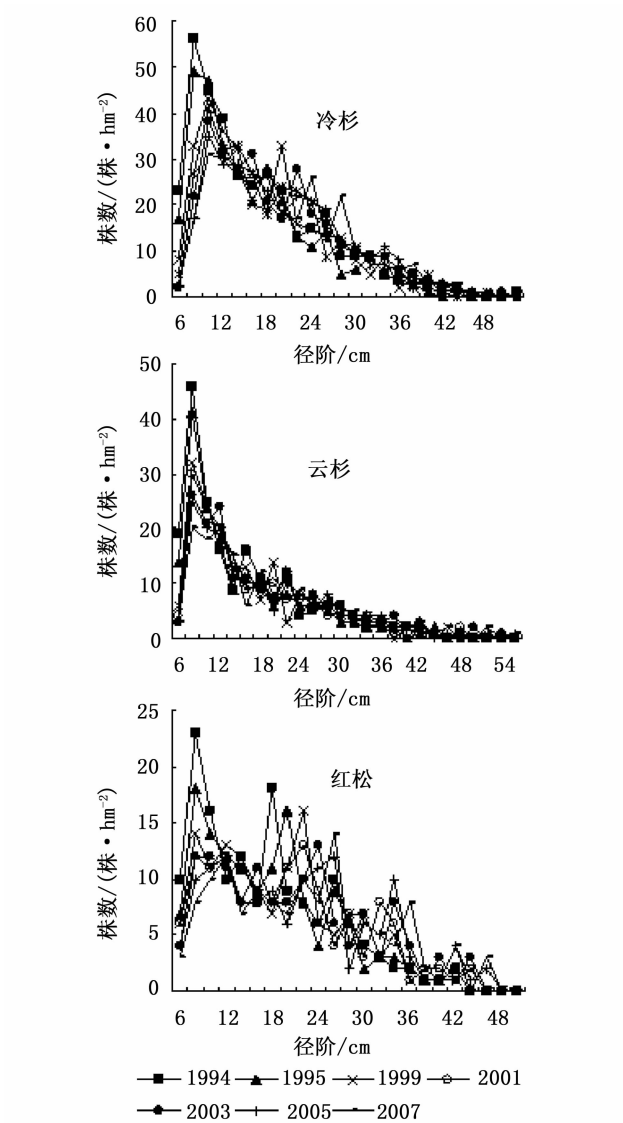

图 1　针阔比 9∶1 和 8∶2 混交林主要树种直径分布

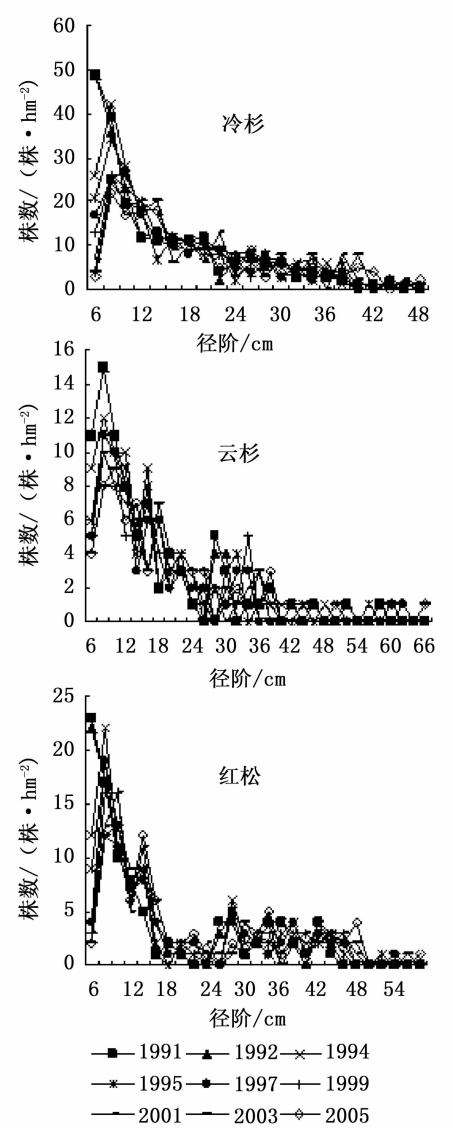

图2 针阔比7∶3混交林主要树种直径分布

3.2 空间格局及蓄积

不同针阔比混交林及其主要树种的角尺度及频率分布有明显不同(表2、表3)。针阔比9∶1混交林的林木呈随机分布($W=0.48$)(表2)。其中,云杉聚集分布,红松随机分布(表3);针阔比8∶2混交林的林木呈聚集分布($W=0.53$)(表2)。其中,云杉、冷杉和红松均呈聚集分布(表3);针阔比7∶3混交林呈均匀分布($W=0.47$)(表2)。其中,冷杉随机分布,云杉和红松聚集分布(表3)。很多研究认为,未受干扰的天然林顶级群落的水平分布格局应为随机分布[24-25]。随机分布是林分调整的目标分布格局,把聚集分布和均匀分布向随机分布调整,调整林分中相邻林木株数差异性,必要时采取间伐或人工补植的方法,也就是应将左右不对称的林分角尺度分布调整为左右基本对称。如8∶2混交林的角尺度平均值为0.53,属于聚集分布。角尺度分布中取值0.5的左右两侧频率相差12%,右侧高于左侧;取值1的单木比例比取值0的单木高9%,取值0.75的单木比例比取值0.25的单木高3%。将聚集分布调整为随机分布,须将角尺度分布中0.5取值的两侧比例分配为均衡,降低W平均值,从角尺度0.75的相邻木中选择全林株数3%($823\times3\%\approx25$)的单木,在角尺度取值为1的相邻木中选择全林株数0.09%($823\times0.09\%\approx1$)的单木作为被伐木。

林分蓄积生长量能够直接反应树种组成、林分密度等林分结构是否合理。将不同针阔比混交林按林分年蓄积生长量从高到低的排序为:9∶1、8∶2、7∶3(表1)。不同树种各年份蓄积量呈逐渐增多趋势,增加趋势比较稳定(图3)。将主要树种按蓄积量从高到低的排序为:冷杉、红松、云杉等(图3)。说明红松培育潜力仍然较大。为恢复红松阔叶混交林,以红松和黄菠萝(*Phellodendron amurense* Rupr.)、水曲柳(*Fraxinus mandschurica* Rupr.)、胡桃楸(*Juglans mandshurica* Maxim.)等珍贵阔叶树种作为目标树种,伐除影响其生长的林木,增加目标树蓄积量比例。将云冷杉不作为目标树,而作为伴生树种,逐渐减小云冷杉的优势。

表2 不同针阔比混交林角尺度及频率分布

针阔比	角尺度(W)					
	0	0.25	0.50	0.75	1	平均
9∶1	0	0.17	0.58	0.20	0.04	0.48
8∶2	0.01	0.17	0.53	0.20	0.10	0.53
7∶3	0	0.21	0.57	0.19	0.03	0.47

表3 不同针阔比混交林主要树种角尺度及频率分布

针阔比	树种	0	0.25	0.50	0.75	1
9∶1	冷杉	0.00	0.27	0.50	0.17	0.06
	云杉	0.00	0.00	0.59	0.41	0.00
	红松	0.00	0.13	0.70	0.17	0.00
8∶2	冷杉	0.01	0.18	0.48	0.21	0.11
	云杉	0.00	0.25	0.25	0.38	0.13
	红松	0.00	0.06	0.67	0.17	0.11
7∶3	冷杉	0.00	0.25	0.50	0.20	0.05
	云杉	0.00	0.10	0.71	0.19	0.00
	红松	0.00	0.18	0.64	0.09	0.09

3.3 更新与林下植被

不同针阔比混交林的更新密度有明显差异(表1)。将不同针阔比混交林按更新密度从高到低的排序为:8∶2、7∶3、9∶1。林分更新受制约的因素较多。符婵娟等[26]认为,植物天然更新受环境条件、自然

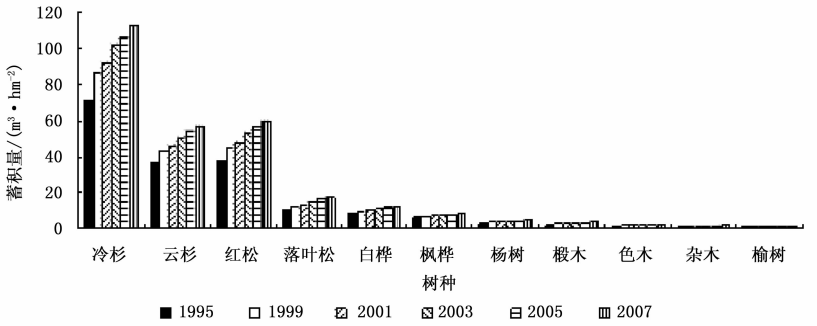

图 3　针阔比 9∶1 和 8∶2 混交林不同树种蓄积量变化

干扰和人为干扰,以及更新树种的遗传学、生理学、生态学特性及其与周围树种的关系(如植物种间的竞争、化感作用)等影响。在不同针阔比混交林中,冷杉更新最好,其次为云杉,在 3 种主要树种中红松的更新最差(图 4)。在 9∶1、8∶2 和 7∶3 等不同针阔比混交林中,将主要树种按更新密度从高至低的排序为:冷杉、云杉、红松;冷杉、红松、云杉;冷杉、云杉、红松。这主要是红松缺乏中、大径组株数,母树数量、结实量和种源减少,导致了红松更新差。因此,需要以人工补植、人工辅助更新相结合,促进红松的更新生长。阔叶树中有更新树种的有椴树、色木槭、枫桦、白桦、榆树(*Ulmus pumila* L.)、水曲柳和紫杉(*Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc.)等(图 4)。对红松和珍贵阔叶树种采取目标树培育方法,伐除影响红松和珍贵阔叶树更新生长的林木。

不同针阔比混交林的乔、灌、草各层植物多样性指数差异并不大。但总体上,以针阔比 8∶2 与 7∶3 混交林的多样性指数较其他混交林高一些(表 4)。如乔木多样性指数中,8∶2 混交林的 R 指数最大,其次为 7∶3 混交林;7∶3 混交林的 D 指数和 H' 指数最大等。在灌木和草本多样性指数中,8∶2 混交林的 R 指数最大。灌木盖度一定程度上将影响草本生长和林下更新数量,因此将间接影响植物多样性等。

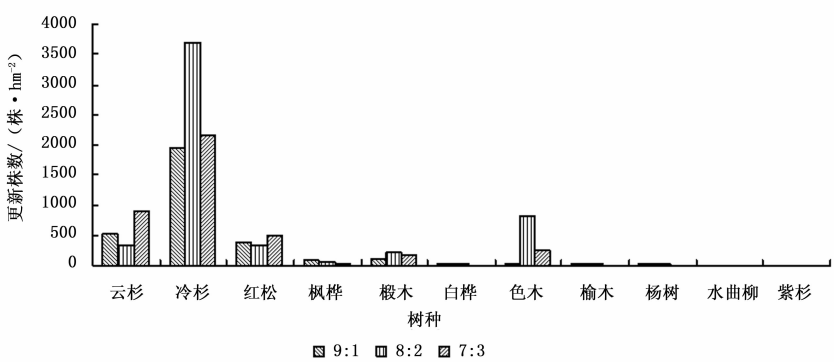

图 4　不同针阔比例混交林各树种更新株数

表 4　乔、灌、草多样性指数

指标	乔木				灌木				草本			
	10∶0	9∶1	8∶2	7∶3	10∶0	9∶1	8∶2	7∶3	10∶0	9∶1	8∶2	7∶3
R	0.040	0.045	0.058	0.047	0.213	0.092	0.294	0.147	0.148	0.014	0.208	0.008
D	0.745	0.603	0.703	0.834	0.895	0.814	0.875	0.786	0.921	0.864	0.901	0.855
H'	1.723	1.321	1.646	1.965	2.319	1.951	2.058	1.765	2.676	2.188	2.411	2.119
E_a	0.627	0.545	0.555	0.800	0.803	0.699	0.826	0.709	0.790	0.798	0.788	0.800
C	0.255	0.397	0.297	0.166	0.105	0.186	0.125	0.214	0.079	0.136	0.099	0.145

注:R 为物种丰富度指数;D 为辛普森多样性指数;H' 为香农多样性指数;E_a 为 Alatalo 均匀度指数;C 为生态优势度

4　讨论

优化过伐林结构,首先必须掌握现有结构特征。其次针对经营目标进行合理调整林分结构。不同经营目标要求林分结构有所区别,但多功能经营应如何调整才合理是当前研究的热点问题之一。本文以长白山比较典型的不同针阔比过伐混交林为研究对象,分析其林分结构特征。研究表明,不同针阔比混

交林结构有明显的差异,这将直接影响各项功能的发挥。针阔比9:1、8:2、7:3的混交林均呈异龄林直径结构,但其空间结构、更新密度、植物多样性表现为较大差异。不同针阔比混交林空间格局不同,而且林分空间格局与其主要树种空间格局并非完全一致,在不同树种间存在差异。在分析中发现,红松作为主要目标培育树种,其结构上存在一些问题:从直径分布看,由于过去不合理的采伐,导致红松径级分布失去规律性,出现了缺损现象,主要缺乏中、大径组株数;红松分布格局主要表现为聚集分布;在不同针阔比混交林3种主要树中,红松的更新最差,不利于林分正向演替。因此恢复以红松为主的针阔混交林,必须采取自然恢复和抚育经营相结合的技术措施。在今后的经营中,采取目标树培育方法,以红松和珍贵阔叶树种作为目标树,不论是林分更新层、林冠层凡是妨碍其生长的林木均应伐除。云冷杉和一般阔叶树作为非目标树,但不妨碍目标树生长的云冷杉和一般阔叶树均可作为伴生树种进行保留,发挥其生态作用,最终逐渐恢复成红松阔叶混交林。针阔比8:2和7:3混交林红松分布格局均呈聚集分布,结合人工补植、更新、间伐等措施,向随机分布调整;采取人工补植、清理母树周围枯枝落叶层等措施人工辅助天然更新。

林分结构、功能与经营目标是复杂系统,确保植物多样性、林下更新和收获量时,过伐林不同林龄各径阶株数比例、树种组成比例多少为合理,仍需要深入研究。如不同林龄林分径阶株数单峰将出现在哪个径阶时有利于林分的哪些主导功能,要兼顾植物多样性、林下更新和生长量等时,不同林龄不同径阶株数比例多少为合理,混交树种组成比例多少时,结构合理,林分稳定,能够确保林下更新,收获量等这些都需要今后深入研究。

参考文献:

[1] 亢新刚,赵俊卉,刘 燕. 长白山云冷杉针阔混交过伐林优化结构研究[J]. 林业资源管理,2008(3):57-62

[2] 叶 林,李巍巍,马景财. 小兴安岭过伐天然林结构特点及经营策略[J]. 东北林业大学学报,2011,39(10):114-116

[3] Denslow J S, Guzman G S. Variation in stand structure, light and seedling abundance across a tropical moist forest chronosequence, Panama[J]. Journal of Vegetation Science, 2000,11:201-212

[4] Nicotra A B, Chazdon R L, Lriatre V B. Spatial heterogeneity of light and woody seedling regeneration in tropical wet forest[J]. Ecology, 1999,80:1908-1926

[5] David R L, Lawrence C B. An analysis of structure of tree seedling populations on a Lahar [J]. Landscape Ecology, 1998,13:307-322

[6] 聂道平,王 兵,沈国舫,等. 油松-白桦混交林种间关系研究[J]. 林业科学,1997,33(5):394-402

[7] Buongiorno J, Dahir S, Lu H, *et al*. Tree size diversity and economic returns in uneven aged forest stand[J]. For Sci, 1994,40(1):83-103

[8] Lahde E, Laiho O, Norokorpi Y. Diversity-oriented silviculture in the Boreal Zone of Europe[J]. Forest Ecology and Manage, 1999, 118:223-243

[9] 毛 磊,王冬梅,杨晓晖,等. 樟子松幼树在不同林分结构中的空间分布及其更新分析[J]. 北京林业大学学报,2008,30(6):71-77

[10] 王艳洁,郑小贤. 金沟岭林场云冷杉过伐林林分直径结构的研究[J]. 林业资源管理,2008(6):71-74

[11] 王 飞,代力民,邵国凡,等. 非线性状态方程模拟异龄林径阶动态-以长白山阔叶红松林为例[J]. 生态学杂志,2004,23(5):101-105

[12] 曲智林,曲 松,唐 翠. 基于矩阵模型的森林动态模拟与经营[J]. 东北林业大学学报,2007,35(6):28-30

[13] 亢新刚,胡文力,董景林,等. 过伐林区检查法经营针阔混交林林分结构动态[J]. 北京林业大学学报,2003,25(6):1-5

[14] 武纪成,张会儒,陈新美. 金沟岭林场天然混交林空间结构分析[J]. 西北林学院学报,2008,23(5):178-181

[15] 乌吉斯古楞,王俊峰,郑小贤,等. 金沟岭林场过伐林更新幼苗空间结构分析[J]. 中南林业科技大学学报,2009,29(4):21-25

[16] 韩景军,肖文发,罗菊春. 不同采伐方式对云冷杉林更新与生境的影响[J]. 林业科学,2000,36(专刊):90-96

[17] 李婷婷,王俊峰,郑小贤. 金沟岭林场主要森林类型林分更新比较研究[J]. 林业资源管理,2009(3):81-84

[18] 雷相东,张会儒,李冬兰,等. 东北过伐林区四种森林类型的物种多样性比较研究[J]. 生态学杂志, 2003,22(5):47-50

[19] 马克平. 生物群落多样性的测度方法Ⅰα多样性的测度方法(上)[J]. 生物多样性,1994,2(3):162-168

[20] 马克平,刘玉明. 生物群落多样性的测度方法Ⅰα多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性,1994,2(4):231-239

[21] 马克平,刘灿然,于顺利,等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究Ⅲ. 几种类型森林群落的种-多度关系研究[J]. 生态学报,1997,17(6):573-583

[22] 王贵霞,李传荣,许景伟,等. 温带森林群落多样性的测度方法比较评述[J]. 浙江林学院学报,2004,21(4):486-491

[23] 惠刚盈, Klaus von Gadow, Matthias Albert. 角尺度——一个描述林木个体分布格局的结构参数[J]. 林业科学, 1999, 35(1):37-42

[24] 惠刚盈,K. v. Gadow, 胡艳波,等. 林木分布格局类型的角尺度均值分析方法[J]. 生态学报,2004,24(6):1225-1229

[25] 惠刚盈,Klaus von Gadow, 胡艳波,等. 结构化森林经营[M]. 北京:中国林业出版社,2007

[26] 符婵娟,刘艳红,赵本元. 神农架巴山冷杉群落更新特点及影响因素[J]. 生态学报,2009,29(8):4179-4186