

DOI: 10.5846/stxb202004010778

王琮琳, 王文义, 林莎, 曹志, 陈琪, 贺康宁. 青海东部人工生态公益林近自然经营的林分结构调整. 生态学报, 2021, 41(12): 5004-5015.

Wang Q L, Wang W Y, Lin S, Cao Z, Chen Q, He K N. Stand structure adjustment based on the near-natural management of plantation ecological public forests in eastern Qinghai. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12): 5004-5015.

青海东部人工生态公益林近自然经营的林分结构调整

王琮琳^{1,2,3}, 王文义⁴, 林莎^{1,2,3}, 曹志^{1,2,3}, 陈琪^{1,2,3}, 贺康宁^{1,2,3,*}

1 北京林业大学水土保持学院, 水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083

2 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083

3 林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083

4 青海省西宁市大通县林业站, 西宁 810100

摘要: 依据研究区 5 种典型人工林近自然状况, 以人工生态公益林的近自然经营管理为目标, 提出林分结构调整策略与方法。主要从林分结构、物种组成、年龄及枯死木几个方面考虑选取了垂直结构、水平结构、草本盖度及其多样性、天然更新、物种多样性、组成系数、直径分布、枯木比例、健康木比例 10 个指标, 应用基于单位圆的 π 值法则, 采取定性定量相结合的方法, 对 5 种林分的近自然状态做出评价并依据评价结果提出相应改造措施。青海云杉-白桦混交林 ($\omega_{PB} = 0.4786$) 属于远近自然林分, 此类林分在密度合理的情况下无需过多人为抚育; 青杨-白桦混交林 ($\omega_{BP} = 0.2664$) 属于近人工林, 此类林分以伐除病虫害严重的青杨、调整密度和补植青海云杉为主; 青海云杉-青杨混交林 ($\omega_{PP} = 0.2283$) 属于近人工林, 此类林分以伐除病虫害严重的青杨、调整密度和补植白桦为主; 青海云杉-落叶松混交林 ($\omega_{PL} = 0.1872$) 属于人工林, 此类林分以调整密度和补植白桦为主; 青海云杉纯林 ($\omega_P = 0.0190$) 属于人工林, 此类林分以调整密度和营造杉桦混交林为主。通过近自然度评价与分析, 为当地近自然经营提供了直观可靠的依据。在进行林分结构调整时, 首先通过伐除干扰木来调整林分密度, 其次要营造针阔混交林分, 其中以青海云杉和白桦混交林为主要目标林分。

关键词: 近自然经营; 人工林; 生态公益林; 林分结构调整; 近自然度评价

Stand structure adjustment based on the near-natural management of plantation ecological public forests in eastern Qinghai

WANG Qionglin^{1, 2, 3}, WANG Wenyi⁴, LIN Sha^{1, 2, 3}, CAO Zhi^{1, 2, 3}, CHEN Qi^{1, 2, 3}, HE Kangning^{1, 2, 3, *}

1 School of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China

3 Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 Datong County Forestry Station, Xining 810100, China

Abstract: At present, although large-scale forest land has been restored and exploited in China through a large number of artificial afforestation, the tree species of the plantation are simple and the structure law, it has caused many ecosystem problems such as pests and diseases, soil fertility decline, etc. Therefore, ensuring the sustainable development of forests through near-natural management is of great significance. Near-natural forest stands can effectively resist natural disasters and pests, optimize soil physical and chemical properties, increase biodiversity, and improve the ecological and economic benefits of forests. Through the evaluation of near-naturalness, we can understand the actual growth status of the stand and

基金项目: 2020 年度青海省科技厅科技成果转化专项《祁连山林草植被结构调整与功能提升试验示范》(2020-SF-144); 国家重点研发计划重点专项(2017YFC0504604)

收稿日期: 2020-04-01; **网络出版日期:** 2021-04-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hkn@bjfu.edu.cn

construct a near-natural evaluation system that conforms to the conditions of the local site conditions, thus providing a reliable basis for near-natural management. According to the natural conditions of five typical plantation forests in the eastern part of Qinghai province, this paper aims at the near-natural management of plantation ecological public forests and tries to put forward the stand structure adjustment strategies and methods. The vertical structure, horizontal structure, herb coverage and its diversity, natural regeneration, species diversity, composition coefficient, diameter distribution, ratio of dead wood, and healthy wood are mainly selected from the aspects of stand structure, species composition, age and dead wood. Based on the combination of qualitative description and quantitative analysis, the near-natural unit circle π -value rule was applied to evaluate the natural characteristics of five typical forest stands and propose corresponding reform measures based on the evaluation results. *Picea crassifolia*-*Betula platyphylla* mixed forest ($\omega_{PB} = 0.4786$) is a far from nature forest. Such forests do not need too much artificial rearing under reasonable density. *Populus cathayana*-*Betula platyphylla* mixed forest ($\omega_{BP} = 0.2664$) is near plantation forest. In this kind of stand, the main activities are to cut down the *Populus cathayana* infested with insect pests, adjust the density and replant *Picea crassifolia*. *Picea crassifolia*-*Populus cathayana* mixed forest ($\omega_{PP} = 0.2283$) is near plantation forest. This kind of stand is mainly to cut off the *Populus cathayana* with serious disease and insect pest, adjust the density, and replant *Betula platyphylla*. *Picea crassifolia*-*Larix principis-rupprechtii* mixed forest ($\omega_{PL} = 0.1872$) is plantation forest. This type of stand is mainly to adjust density and replant *Betula platyphylla*. *Picea crassifolia* forest ($\omega_P = 0.0190$) is plantation forest. This type of stand is mainly for adjusting density and constructing *Picea crassifolia*-*Betula platyphylla* mixed forests. Through the evaluation and analysis of the near-natural condition, it provides a direct and reliable basis for local near-natural management. The method to adjust the stand structure is to first adjust the stand density by removing disturbing trees, and then create a mixed forest of coniferous and broad-leaved trees, among which *Picea crassifolia*-*Betula platyphylla* mixed forest is the main one.

Key Words: near-natural management; plantation; ecological forest; stand structure adjustment; the assessment of naturalness

青海省东部黄土地区现存的大规模人工林,大多起源于 20 世纪 80 年代开始的“西北地区植树种草活动”,后经数期“三北”防护林建设工程、天然林保护工程和退耕还林工程,形成了目前绿化的基本规模;这期间的造林设计以用材林的林分结构为主,林分横平竖直。大通县塔尔沟研究区位于青海省东部,为少数民族聚集区,林分多为当地群众在国家号召下自发造林所形成的不完全横平竖直的林地,造林方式随机但成活率不高,后通过多年补植,形成了多层次、异龄、混交的人工林分。随着人类的发展和进步,人们对于森林的经营和管理理念越来越成熟,且逐渐由人工林向近自然林转变。德国科学家 Gayer 通过大量森林经营实践总结提出近自然经营理念^[1],该理念强调人类在从事林业工作的过程中应该尽可能的遵循树木自然生长规律,顺应自然,减少人为干扰,以促进人为经营管理的森林朝着复层、异龄、混交的近自然林方向发展。多年来,我国虽然通过大量人工造林恢复和开拓了大面积林地,但是人工林的树种单一、结构规律简单且多为用材林,造成了病虫害、小老树、土壤肥力下降等许多生态系统方面的问题^[2]。所以,为了找到适用于青海东部地区的林分结构调整策略与方法,以塔尔沟研究区多层次、混交、异龄的偏向于近自然的林分为例,提出近自然经营措施。通过近自然经营确保森林的可持续发展具有十分重要的意义。近自然林能够有效的抵御自然灾害和病虫害、优化土壤理化性质、增加生物多样性、提高森林的生态和经济效益等。

近自然度作为近自然森林经营中一个重要的技术参数,对近自然森林经营有着重要的意义^[3]。国内有关近自然评价的研究起步较晚,主要是探讨评价指标体系和引进国外先进方法进行评价的研究,且多是对大尺度森林的近自然度定性评价,指标的选取比较片面,评价体系不完善^[4]。常用评价方法有模型法和相对值法^[5]、综合指数法^[6]、层次分析法^[7],每种方法的侧重点、尺度范围、选取的指标均有较大差异,前人对于森林近自然度评价的研究以定性描述为主,后逐渐引入了定量表达方法^[8-10]。国外的定量评价方法主要集中于温

带和北方森林^[10-12]。Oliveira 等通过量化方法评价了巴西阿罗卡里亚的森林自然性^[13]。张敏等通过量化评价指标评价了河北山区的森林自然度,定量评价数据精确,客观性强,但也存在指标体系和分级标准确定上的差异^[7]。喻庆国将定性描述和定量表达相结合评价了森林近自然度,评价结果较单一的定性或定量评价更为可靠^[14]。本文试图通过对塔尔沟典型林分进行近自然度评价,了解林分实际生长状况,使原有的以用材林为目的营造的人工林向生态公益林转变,以充分发挥林分水源涵养功能,应用近自然度 π 值法则,将林分的近自然状态在单位圆中绘制,并由各指标值构成的闭合图形的面积表现出来,此闭合图形面积与单位圆面积(近自然度期望值)的比值即为现实林分近自然状态的最佳度量^[15]。该方法能够客观、直观的反映某一林分的近自然状态。采用定性和定量相结合的方法,构建了大通县塔尔沟人工林林分的近自然度评价体系,为当地和相同立地条件下的近自然经营提供依据,以提高森林的生态、经济和社会效益。

1 研究区概况

1.1 样地概况

塔尔乡塔尔沟村位于青海省大通县东部(图1),坐标东经 101°25'—101°42',北纬 36°58'—37°08',地处半浅半脑山区,属于温带高原大陆性气候,无霜期 97 d,海拔 2471—3656 m,年平均气温为 3.7℃,年内降雨量分布不均匀,蒸发量大,降雨主要集中在 6—9 月份,年均降雨量为 451 mm,年均水面蒸发量为 835.1 mm,土壤类型为黄土母质上发育的山地棕褐土和栗钙土,土壤深厚,属于黄土丘陵沟壑区,试验地林分大多起源于 20 世纪 80 年代,当地群众在缺乏造林经验的情况下,通过国家号召开始自发在塔尔沟山区营造以青杨为主的人工林,后期又在空地补植大量青海云杉,营造出了非完全横平竖直、类似于天然林分布的林分,之后陆续实施了天然林保护、“三北四期”防护林、封山育林及退耕还林等工作,目前完成成片造林 126.5 hm²,完成退耕还林 128.2 hm²,完成封山育林 146.7 hm²,完成“三北四期”防护林 63.4 hm²,治理周边荒坡 76.6 hm²。

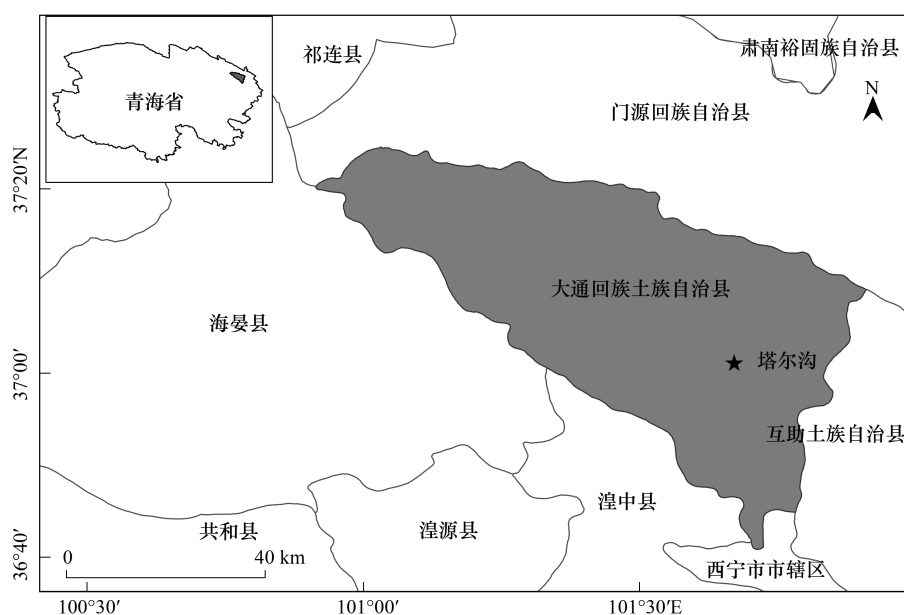


图1 大通县研究区位置图

Fig.1 Location map of the research area in Datong County

1.2 野外调查

试验于 2018、2019 年的 5—9 月在青海省大通县塔尔沟进行,结合当地现有的森林植被资料和野外实地踏查,在大通县塔尔沟内选取 5 种典型林分类型:青海云杉-落叶松混交林、青海云杉-白桦混交林、青杨-白桦混交林、青海云杉-青杨混交林、青海云杉纯林。每种林分类型各设立 5 个 20 m×20 m 的标准地,并统一在样地四周设

置宽 2.5 m 的缓冲区。调查记录各个标准地的基本信息见表 1,典型样地林木空间位置分布如图 2 所示。

表 1 样地基本信息
Table 1 Basic information of plots

林分类型 Forest type	样地号 Plot code	树种组成 Species composition	坡向 Aspect	坡位 Slope position	林分密度 Stand density /(株/hm ²)	郁闭度 Canopy density	坡度 Slope/(°)	海拔 Altitude/m	平均胸径 Mean diameter at breast height/cm
针叶混交林 Coniferous mixed forest	PL1	5 杉 5 落-桦	西北	中坡	4100	0.8	20	2956.9	11.6
	PL2	3 杉 7 落	北	中坡	2750	0.7	19	2877.5	9.1
	PL3	5 杉 5 落	东北	中坡	3575	0.8	17	2821.6	10.9
	PL4	5 杉 5 落	东	中坡	3800	0.8	23	2935.1	10.0
	PL5	6 杉 4 落-桦	东北	上坡	3200	0.7	16	2998.7	11.2
针阔混交林 Coniferous and broad- leaved mixed forest	PB1	5 杉 5 桦	西北	中坡	4125	0.6	18	2955.6	9.0
	PB2	3 杉 7 桦	北	中坡	1825	0.4	21	2939.9	8.7
	PB3	5 杉 5 桦-杨	东北	中坡	4025	0.6	22	2946.6	9.6
	PB4	3 杉 7 桦	东北	上坡	2225	0.5	16	2997.2	9.2
	PB5	5 杉 5 桦	北	上坡	3275	0.6	19	2996.4	8.4
阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest	BP1	7 青杨 3 白桦	西北	中坡	1875	0.7	20	2948.7	11.6
	BP2	7 青杨 3 白桦-杉	西北	下坡	1400	0.6	17	2861.8	11.8
	BP3	5 青杨 5 白桦-杉	西北	中坡	1800	0.7	14	2889.6	10.7
	BP4	6 青杨 4 白桦-杉	西北	中坡	1975	0.7	19	2897.1	11.2
	BP5	5 青杨 5 白桦	东北	中坡	1725	0.7	15	2932.4	10.9
针阔混交林 Coniferous and broad- leaved mixed forest	PP1	5 杉 5 青杨-桦	西北	下坡	2675	0.7	17	2918.5	9.6
	PP2	9 杉 1 青杨-桦	西北	下坡	2625	0.7	8	2899.0	9.6
	PP3	6 杉 4 青杨-桦	北	下坡	2525	0.7	10	2872.9	10.3
	PP4	5 杉 5 青杨-桦	东北	中坡	2800	0.7	12	2921.5	9.1
	PP5	7 杉 3 青杨	东北	中坡	2575	0.7	11	2923.1	9.9
青海云杉针叶林 <i>Picea Crassifolia</i> coniferous forest	P1	10 杉	西北	中坡	3125	0.8	24	2949.3	10.9
	P2	10 杉	东北	中坡	3125	0.8	15	2960.3	11.7
	P3	10 杉-杨	东北	下坡	3175	0.8	13	2912.5	11.5
	P4	10 杉	东北	中坡	3175	0.7	21	2953.2	11.0
	P5	10 杉	东北	中坡	3100	0.8	19	2961.4	10.8

PL:青海云杉-落叶松混交林 *Picea crassifolia* -*Larix principis-rupprechtii* mixed forest;PB:青海云杉-白桦混交林 *Picea crassifolia*-*Betula platyphylla* mixed forest;BP:青
杨-白桦混交林 *Populus cathayana*-*Betula platyphylla* mixed forest;PP:青海云杉-青杨混交林 *Picea crassifolia*-*Populus cathayana* mixed forest;P:青海云杉纯林 *Picea*
crassifolia forest

2 研究方法

2.1 近自然度指标选取

国内外评价林分近自然度的指标主要考虑五大类:经营痕迹、林分结构、物种组成、年龄及枯死木^[10,13,16-17]。由于所选样地均无人工采伐痕迹和抚育管理迹象,故不考虑经营痕迹指标。林分结构指标主要包括垂直结构(C1)和水平结构(C2)^[10],此外还可以考虑草本盖度(C3)及其多样性(C4)^[17]和林下天然更新(C5)^[16-17]。物种组成主要以物种多样性(C6)和组成系数(C7)来表示^[15],林分年龄结构能够反映种群发展趋势^[18],但由于确定每棵树的年龄较为复杂,常用直径分布(C8)代替年龄结构进行分析^[19]。枯死木指标即考虑到林分内的枯木比例(C9),与之类似的还可用健康木比例(C10)来评价林分近自然程度^[15]。这些指标既包括定量指标,也包括定性指标,所以还需要对这些指标进行赋值、标准化和正向处理^[20]。

2.2 指标处理

林分垂直结构用林层数来表示^[21],可参照国际林联(IUFRO)的林分垂直分层标准^[22],根据优势高将林

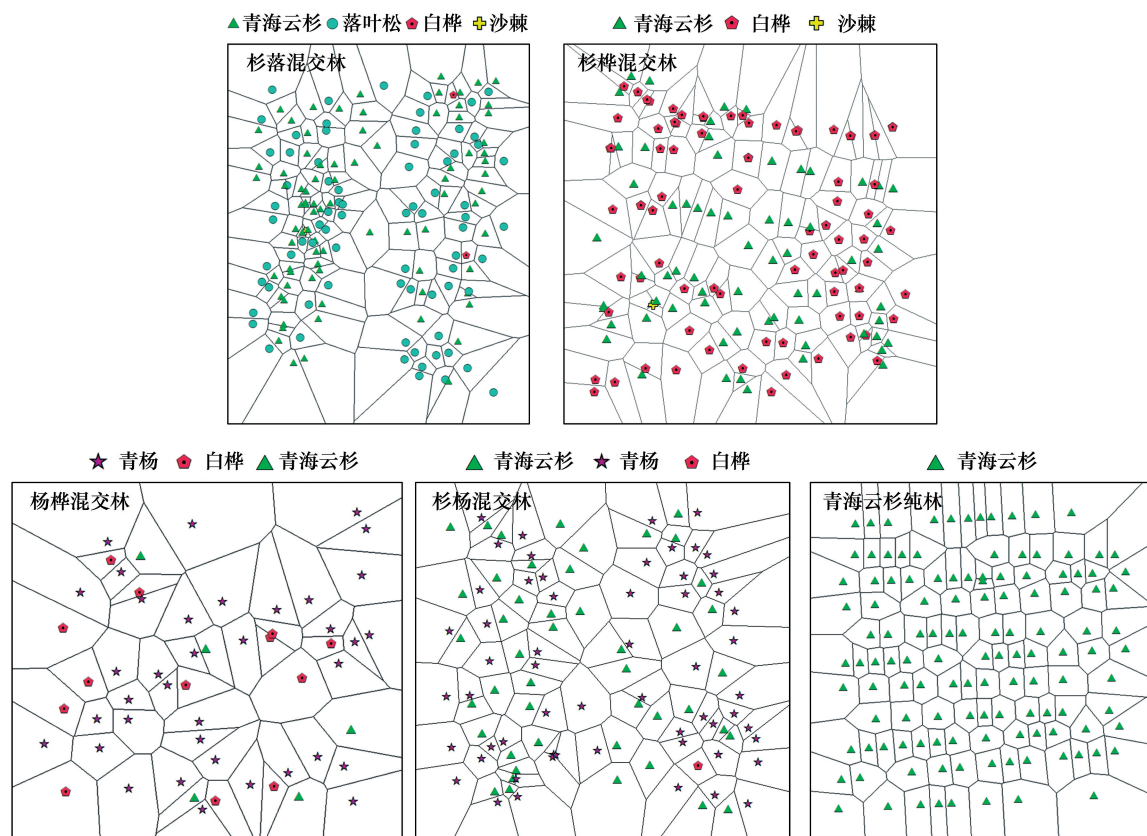


图2 样地林木空间位置分布 Voronoi 图

Fig.2 The Voronoi chart of spatial position distribution in different plots

划分为3层,其中树高 $\geq 2/3$ 优势高的树木划为上层,树高介于 $1/3—2/3$ 优势高之间的树木划为中层,树高 $\leq 1/3$ 优势高的树木划为下层。若各层的林木株数均 $\geq 10\%$,记林层数为3层。若其中有两层的林木株数 $\geq 10\%$,记为2层。若只有一层的林木株数 $\geq 10\%$,记为1层^[15]。

水平结构可用角尺度(W)来表示^[23]。角尺度用于描述林分林木个体水平地面上的分布格局,当林分平均角尺度小于0.475时,林分均匀分布,人为干扰痕迹大;当平均角尺度介于 $[0.475, 0.517]$ 之间时,林分处于随机分布,更接近自然分布;当平均角尺度大于0.517时,林分处于聚集分布^[24]。表达式为:

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z_{ij} \quad (1)$$

式中, $Z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当第 } j \text{ 个夹角 } \alpha \text{ 小于标准角 } \alpha_0 \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$, $\alpha_0 = \frac{360^\circ}{n+1}$, n 为邻近木的株数。

林下草本随着林分近自然程度的增加,其盖度和多样性会随之增加^[25]。其中盖度是基于视觉估计的百分比值,需要进行赋值处理。草本多样性可用 Simpson 多样性指数表示。

林分天然更新越多,越接近于自然林^[16]。根据《森林资源规划设计调查技术规程》(GB/T 26424—2010)调查苗高大于50 cm的幼苗数量,苗数 ≥ 2500 株/hm²时,林分更新良好。介于 $[500, 2500)$ 株/hm²时林分更新一般。 <500 株/hm²时林分更新不良^[15]。

树种组成系数即该树种断面积占林分总断面积的比重,用十分法表示,统计比重超过10%的树种数量, <2 为纯林, $=2$ 为混交林, ≥ 3 为多优势树种混交林^[15]。物种多样性以混交度(M)来表示,混交度能反映树种相互隔离程度^[26],林分平均混交度的值介于0—1之间,越接近1越好。表达式为:

$$M_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_{ij}$$

(2)

式中, $V_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当第 } j \text{ 株最邻近木与对象木不属于同种树木} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

直径分布能够很好的反映林分的近自然状况,当直径分布曲线呈倒“J”型时,林分接近典型天然异龄林结构。当曲线呈多峰状时,表示林分为不完整的异龄林。当曲线呈单峰状时,表示林分近乎为同龄林^[27]。

枯立木状况可表示林分的自然稀疏情况,当枯立木的比例 $\geq 10\%$ 时,林分自然稀疏良好。介于 $5\%—10\%$ 时,林分自然稀疏一般。比例 $<5\%$ 时,林分基本无自然稀疏^[8]。林分越近自然,林木的健康指数越高^[28],故可用无病虫害、无空心、无弯折的健康木比例来评估近自然状况^[15]。

各指标赋值情况及相关算法可参考相应文献^[15,20]。具体赋值情况见表 2。

表 2 定性指标赋值表

Table 2 Qualitative indicator assignment table

指标 Index	赋值大小 Assignment size		
	0	0.5	1
垂直结构(林层数) Vertical structure (number of forest layers)	1	2	3
水平结构(角尺度) Horizontal structure (angular scale)	均匀分布	聚集分布	随机分布
直径分布 Diameter distribution	曲线呈单峰状	曲线呈多峰状	曲线呈倒“J”型
天然更新 Natural regeneration	<500 株/hm ²	$[500, 2500)$ 株/hm ²	≥ 2500 株/hm ²
组成系数 Composition coefficient	<2	$=2$	≥ 3
枯立木状况 Proportion of dead wood	$<5\%$	$[5\%, 10\%)$	$\geq 10\%$
健康木比例 Healthy tree proportion	$<90\%$	—	$\geq 90\%$

2.3 π 值法则

π 值法则是借助单位圆来求得每个林分最终的自然度值,将以 1 为半径的单位圆从圆心用放射线划分为 n (指标个数)个等面积的扇形,以顺时针方向在每条放射线上由大到小标出指标值和指标名,并依次连接形成闭合图形,该图形即可表示某个林分的近自然状态。当各指标值均为 1 时,为最优近自然状态。现实林分近自然度值可用某一林分的近自然状态值与最优近自然状态值的比值来表示^[15]。具体计算公式如下:

$$\omega = \frac{s_1 + s_2}{\pi} = \frac{\frac{\pi(m-1)}{n} + \sum_{i=1}^{n-m+1} s_{2i}}{\pi}, m \geq 1$$

(3)

$$\omega = \frac{s_2}{\pi} = \frac{\sum_{i=1}^n s_{2i}}{\pi}, m = 0$$

(4)

$$s_{2i} = (L_1 L_2 \sin \theta) / 2$$

(5)

式中, ω 表示自然度值, s_1 和 s_2 分别代表闭合图形中的扇形面积之和以及三角形面积之和, m 表示指标值为 1 的指标个数, n 为指标总个数, L_1 和 L_2 分别表示闭合图形中三角形部分相邻的指标值, θ 表示相邻指标间的夹角。

2.4 近自然度等级

参考国家林业局颁布的《国家森林资源连续清查主要技术规定》^[29],结合国内外在近自然度方面的研究^[3,10,30-32],根据大通县人工林实际情况,采用等间距法,将自然度划分为五个等级^[32],见表 3。

表 3 近自然状态分级标准

Table 3 Classification criteria of near-natural state

ω 值 ω Value	近自然等级 Near-natural level	近自然状态 Near-natural state	分级标准 Classification criteria
≥ 0.8	1	近自然	群落结构复杂,由乡土树种组成的天然次生林,林分过去进行过管理,但现在经历了相对较长一段时间的最小人为干扰
$[0.6, 0.8)$	2	半近自然	林分的发展受人类活动的影响,即通过运用生态学原理,林分的物种组成和结构与天然林相似
$[0.4, 0.6)$	3	远自然	林分人为干扰较多,结构较为完整,乔木层优势树种以先锋树种为主,也可见顶级树种出现
$[0.2, 0.4)$	4	近人工	林分人工干扰痕迹明显,结构单一,多以乡土树种为主,林相残败或生长不良的人工林
< 0.2	5	人工林	人为干扰极强,林分结构单一,可见外来树种,包括各种人工林类型、苗圃、迹地、预备造林地及未成林造林地

3 结果与讨论

3.1 林分指标分析

对野外调查数据进行上述处理后得到林分状态特征表(表4)。由表4可以看出,5种典型林分类型均有垂直分层现象,表现良好。在水平结构上,杉落混交林(PL)和青海云杉纯林(P)两种针叶林分都为均匀分布,杉杨混交林(PP)表现为聚集分布,杉桦混交林(PB)和杨桦混交林(BP)均为随机分布。杨桦阔叶林(BP)草本盖度达61.33%,草本多样性丰富。两种针阔混交林(PB、PP)的草本盖度高于两种针叶纯林(PL、P)。杉桦混交林(PB)的草本多样性最为丰富,青海云杉纯林(P)的草本盖度和多样性较低。各类林分的林下更新都较少,其中杉桦混交林(PB)的林下更新优于其他四类林分,青海云杉纯林(P)林下更新最少。杉桦混交林(PB)接近于强度混交,其余三类混交林(PL、BP、PP)均为中度混交。青海云杉纯林(P)的直径分布表现为单峰,近乎为同龄林。四类混交林(PL、PB、BP、PP)的直径分布均呈多峰状,即均为不完整异龄林,说明这些人工林分年龄结构都未达到稳定水平。杉桦混交林(PB)中有较多枯立木,自然稀疏良好,有老龄林的特征。其他三类混交林(PL、BP、PP)自然稀疏一般,而青海云杉纯林(P)几乎无自然稀疏。五种典型林分中只有杉桦混交林(PB)健康木比例达90%以上,其余林分均存在较多不健康林木。

3.2 近自然状态评价结果

应用单位圆 π 值法则处理数据后得到各类样地的近自然度值(图3),近自然度排序为:青海云杉-白桦混交林($\omega_{PB} = 0.4786$)>青杨-白桦混交林($\omega_{BP} = 0.2664$)>青海云杉-青杨混交林($\omega_{PP} = 0.2283$)>青海云杉-落叶松混交林($\omega_{PL} = 0.1872$)>青海云杉纯林($\omega_P = 0.0190$)。依次属于远近自然林、近人工林、近人工林、人工林和人工林。

3.3 林分状态分析

杉桦混交林(PB)近自然度值最高,为0.4786,自然度等级为3,属于远近自然状态,林分为两种乡土树种混交的人工林,树种多样性丰富,林层为复层结构,林木随机分布,有较多林木发育为老龄林,自然稀疏良好,林下更新较多,林木健康,已自然更新为不完整的异龄林,树种隔离程度较高,林下草本覆盖良好,种类丰富,可以看出该林分组成良好,且生长较为稳定,枯立木和林下更新适中,但密度较大,需人为调整。

杨桦混交林(BP)的近自然度值为0.2664,自然度等级为4,属于近人工林状态,林分为两种乡土树种混交的人工林,林层为多层结构,林木呈随机分布,树种多样性丰富,有少量枯立木,林分自然稀疏情况和林下更新一般,已自然更新为不完整的异龄林,混交程度良好,林下草本较多。该林分密度较合理,但青杨病虫害较多,林分健康受到一定影响。

杉杨混交林(PP)的近自然度值为0.2283,自然度等级为4,属于近人工林状态,林分为两种乡土树种混交的人工林,林层为复层结构,物种多样性丰富,林木呈聚集分布,有较少枯立木,自然稀疏和林下更新一般,

草本盖度和多样性较好,已演替为不完整的异龄林,属于中度混交。该混交林分在青海的天然分布较少,密度较大,且青杨病虫害严重,影响林分健康,需进行结构调整。

表 4 林分状态特征表
Table 4 Stand status characteristics

样地号 Plot code	垂直结构 Vertical structure	水平结构 Horizontal structure	草本盖度 Herb coverage	Simpson 多样性指数 Herb diversity index	天然更新 Natural regeneration	平均混交度 Average mingling	组成系数 Composition coefficient	直径分布 Diameter distribution	枯立木状况 Dead trees quantity	健康木比例 Healthy tree proportion
PL1	3	0.4899	41.80%	0.578	300	0.3697	2	多峰	6.2%	73.8%
PL2	3	0.4702	42.61%	0.592	50	0.4881	2	多峰	7.6%	85.6%
PL3	3	0.4342	45.25%	0.511	175	0.3289	2	多峰	6.9%	71.2%
PL4	2	0.3926	39.36%	0.523	50	0.3180	2	单峰	3.4%	59.4%
PL5	3	0.4983	47.11%	0.598	375	0.3984	2	倒“J”	9.2%	81.7%
	3/1	0.4570/0	43.23%/0.66	0.560	190/0	0.3806	2/0.5	多峰/0.5	6.7%/0.5	74.34%/0
PB1	3	0.4761	42.14%	0.553	200	0.4150	2	多峰	8.9%	97.6%
PB2	3	0.4793	51.32%	0.612	525	0.5779	2	倒“J”	13.1%	97.1%
PB3	3	0.4853	49.87%	0.576	550	0.5638	2	倒“J”	14.6%	93.2%
PB4	3	0.4529	45.86%	0.571	250	0.4325	2	多峰	11.2%	96.7%
PB5	3	0.4812	43.21%	0.513	425	0.4811	2	多峰	9.7%	92.8%
	3/1	0.4750/1	46.48%/0.72	0.565	390/0	0.4941	2/0.5	多峰/0.5	11.5%/1	95.48%/1
BP1	2	0.4984	67.14%	0.539	25	0.4984	2	多峰	6.7%	37.3%
BP2	2	0.4795	58.94%	0.518	75	0.4736	2	多峰	6.9%	42.2%
BP3	2	0.4821	51.30%	0.516	50	0.4211	2	多峰	5.2%	56.9%
BP4	2	0.4817	66.75%	0.543	225	0.4897	2	多峰	3.8%	51.1%
BP5	3	0.4786	62.53%	0.523	175	0.4882	2	多峰	5.6%	49.6%
	2/0.5	0.4841/1	61.33%/1.00	0.528	110/0	0.4742	2/0.5	多峰/0.5	5.6%/0.5	47.42%/0
PP1	3	0.5707	53.29%	0.524	175	0.1792	2	多峰	5.9%	38.5%
PP2	3	0.4875	48.96%	0.493	100	0.5063	2	单峰	5.2%	38.3%
PP3	3	0.4352	51.22%	0.510	125	0.5463	2	多峰	8.3%	49.4%
PP4	3	0.5914	54.17%	0.502	200	0.4102	2	多峰	6.7%	52.4%
PP5	3	0.5721	50.01%	0.517	75	0.4003	2	单峰	4.5%	55.9%
	3/1	0.5314/0.5	51.53%/0.82	0.509	135/0	0.4085	2/0.5	多峰/0.5	6.1%/0.5	46.9%/0
P1	2	0.3184	6.14%	0.418	75	0.0000	1	单峰	2.1%	87.3%
P2	2	0.4382	10.23%	0.395	0	0.0000	1	单峰	1.7%	91.5%
P3	2	0.4185	8.90%	0.414	75	0.0000	1	多峰	6.3%	83.2%
P4	2	0.3793	5.42%	0.387	25	0.0228	1	单峰	2.4%	88.4%
P5	2	0.4218	9.16%	0.403	0	0.0000	1	单峰	3.9%	86.1%
	2/0.5	0.3952/0	7.97%/0.00	0.403	35/0	0.0046	1/0	单峰/0	3.3%/0	87.3%/0

杉落混交林(PL)的近自然度值为0.1872,自然度等级为5,属于人工林状态,林分为乡土树种和引进树种混交的人工林,物种多样性丰富,林层为复层结构,林木分布均匀,林下更新较少,有较少枯立木,自然稀疏一般,林分已演进为不完整异龄林,树种隔离程度较良,草本盖度和多样性较高。该林分密度过大、为两针叶树种混交,其在青海的天然分布较少,需进行人为抚育。

青海云杉纯林(P)的近自然度值为0.0190,自然度等级为5,属于人工林状态,林层结构简单,林木分布非常均匀,为树种组成单一的同龄林,林下草本盖度和多样性低,几乎没有枯立木,无林下更新和自然稀疏。这种纯林人工林造林密度过大且林木过于均匀分布,需要人为结构调整才能加快演替进程。

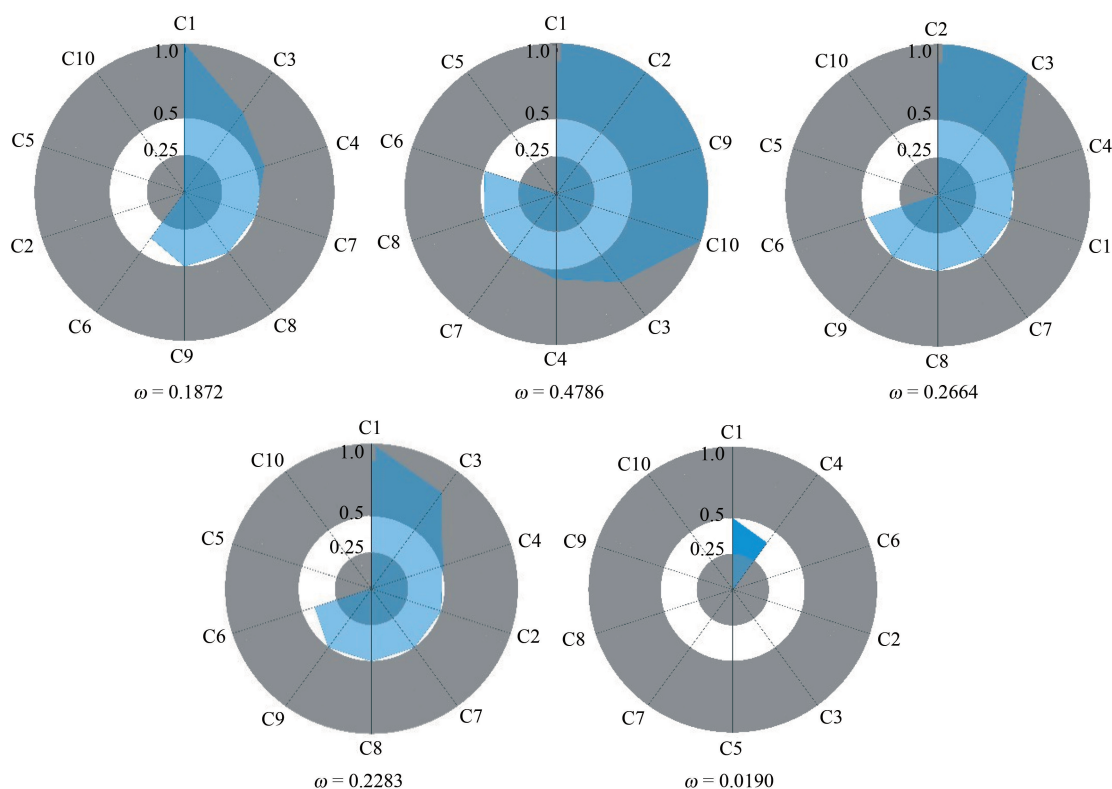


图3 不同类型人工林林分状态单位圆

Fig.3 Stand state unit circles of different types of man-made forest

C1:垂直结构 Vertical structure; C2:水平结构 Horizontal structure; C3:草本盖度 Herb coverage; C4:草本多样性 Herb diversity index; C5:林下天然更新 Natural regeneration; C6:物种多样性 Average mingling; C7:组成系数 Composition coefficient; C8:直径分布 Diameter distribution; C9:枯木比例 Dead trees quantity; C10:健康木比例 Healthy tree proportion

3.4 近自然经营管理探讨

3.4.1 经营方向与调整措施

青海省东部地区自20世纪80年代开始按照用材林技术规程造林,且以存活率高的杨树为主,后因大量引进外来杨树种,导致青海本土生长优良的青杨种退化,因此存在着树种单一、密度过大、病虫害和土壤肥力下降等问题。后虽规划为生态公益林并经过了长期的封禁管理,林分发挥了一定的水土保持功能,但许多林分依旧发挥不了很好的水源涵养作用。为使林分逐步纳入近自然正规管理,加快林分向近自然林发展,需要对现有林分进行结构调整,以充分发挥生态公益林的水源涵养功能。

根据近自然评价结果,确定各个林分近自然经营方向并制定调整措施。杉桦混交林(PB)近自然状况较好,青海云杉作为青藏高原东北边缘特有树种,分布在海拔较高的地区,能够在恶劣的立地条件和生境下生长,是青海省的顶级群落种,具有较高的生态价值。白桦作为青海云杉的混交先锋树种,耐严寒,对土壤适应性强,可以改良土壤,且青海云杉和白桦分布海拔基本相同,通过营造青海云杉-白桦混交林,可使林分逐步向青海云杉顶级群落过渡^[33-34]。此类林分无需过多人为抚育,适当间伐调整密度后,使其自然演替即可,最终白桦会被淘汰,林分演替为青海云杉顶级群落。

杨桦混交林(BP)中青杨耐寒、耐旱,适合青海高寒多风的地理环境,但由于树种退化,病虫害较多,需要伐除病虫害严重,较为劣势的青杨干扰木,并适当在空地 and 枯立木周围补植青海云杉,使得林分在自然演替过程中,逐步淘汰青杨,发展为杉桦混交林。

杉杨混交林(PP)中青海云杉和青杨虽然均为乡土树种,在青海云杉适宜的阴坡、半阴坡,青杨可以生长,

但两树种混交的天然分布很少。此类林分由于青杨耗水量大,且多病虫害,可适当择伐密度、混交度、大小比数不合理及病虫害严重的青杨,并补植白桦,让白桦逐步替代青杨,营造杉桦混交林。

杉落混交林(PL)中青海云杉和落叶松混交可以改善林分的生态条件,使林下草本群落结构得到一定的调整和改善,有利于地表植被的生长发育和恢复,更有利于物种的生存^[35]。对于此类林分,可以通过适当择伐调整林分密度,并在密度不合理处补植白桦,以提高生物多样性,防火和有害生物防治能力,使林分趋于稳定。

青海云杉纯林(P)中,青海云杉虽为当地的顶级群落种,但人工林的人为干扰太大,树种单一,生物多样性欠缺,导致林分稳定性变差,影响林下植被的生长发育。此类林分可以通过择伐调整林分角尺度和密度,并补植白桦,为林分提供足够的枯落物、改良土壤、增加生物多样性等,使林分逐步发展为杉桦混交林。

3.4.2 林分结构调整实例

以青海云杉纯林(P1)为例进行近自然结构调整,该青海云杉人工林初始造林密度过大,且林分横平竖直,整体立地条件较差,若不进行近自然抚育经营而使其自然稀疏逐渐向近自然林发展还需要很长时间,因此依据上述近自然评价结果提出合理的林分结构调整措施。

首先要确定目标树、干扰木和一般林木,其中目标树选取有鸟窝或其它动物栖息场所的生态目标树;优势木;树干通直、冠幅饱满、根系健康没有损伤、无病虫害的林木。干扰木通常为生长较强势或过于衰弱、有病虫害等对目标树生长产生直接影响的林木。除去目标树、生态目标树和干扰树的林木即为一般木,只有在林地密度过大,需要进行大量的采伐来达到经营目的的时候,才对其进行择伐。

其次要确定采伐和补植强度,以近自然评价结果较好的杉桦混交林(PB)为调控模板,根据林分调查分析所得杉桦混交林在适宜针阔混交比约为 7:3 时的合理密度为 2533—3155 株/hm²,以此确定采伐强度应在 44.4%—55.6%之间,补植白桦强度为 30%。由于单次采伐强度不应超过 30%,所以要分次进行结构调整,一般采伐周期为 3—5 年。

据此进行首次结构调整,结合样地中林木个体的角尺度和胸径大小比数,需要伐除云杉纯林中林木分布过于均匀(角尺度接近于 0)和生长过于衰弱(胸径大小比数接近于 1)、有病虫害的干扰木。共选取分布绝对均匀和处于绝对劣态的择伐木 21 株,采伐强度为 25%。采伐后补植白桦 10 株,首次结构调整择伐木位置分布图和补植白桦后林木位置分布图如图 4 和 5 所示。

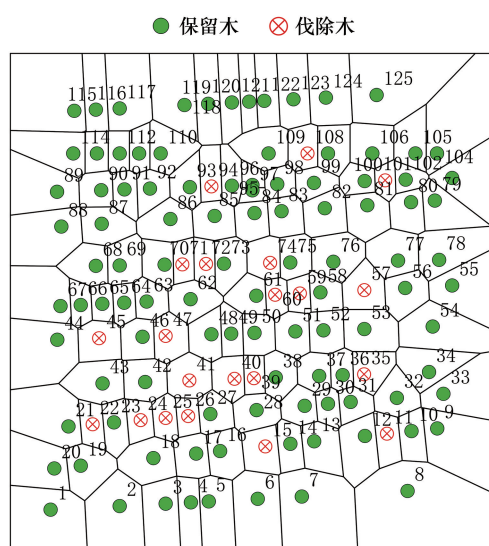


图 4 择伐木位置分布图

Fig.4 Map of selective logging location

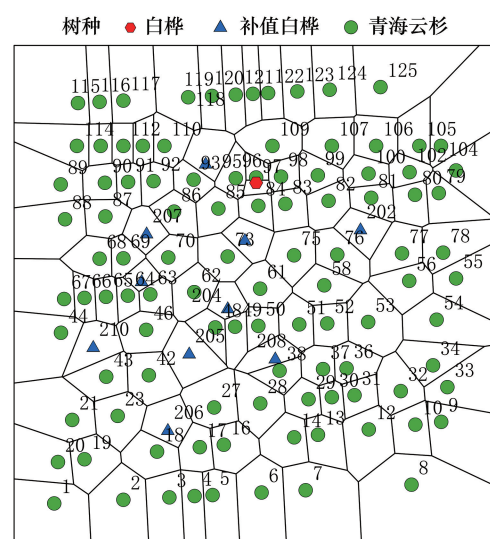


图 5 补植后林木位置分布图

Fig.5 Map of forest trees after replanting

经过结构调整后,该青海云杉纯林的平均角尺度由 0.3184 上升为 0.3347,虽然还没有达到随机分布,但相较于之前过于均匀的结构有了显著提升。平均胸径大小比数也由 0.5202 下降为 0.4723,绝对劣势木明显减少,总体由劣势林分转变为中庸状态。且林分由原来的零度混交变为了中度混交。调整后该林分密度仍然过大,但由于采伐不能过于频繁,林分需要经过一定的生长周期后再进行二次结构调整。

4 结论

评价结果显示:青海云杉-白桦混交林($\omega_{PB} = 0.4786$)>青杨-白桦混交林($\omega_{BP} = 0.2664$)>青海云杉-青杨混交林($\omega_{PP} = 0.2283$)>青海云杉-落叶松混交林($\omega_{PL} = 0.1872$)>青海云杉纯林($\omega_P = 0.0190$)。依次属于远近自然林、近人工林、近人工林、人工林和人工林。评价结果符合现地实际情况,构建了适用于当地和相同立地环境地区的人工林林分近自然评价体系,为大通县人工林近自然经营提供了可靠依据。在青海东部进行人工林近自然经营时,首先对密度过大的林分进行抚育间伐,用人为稀疏的方式使林分都具有良好的生长条件,让干形良好的林木和目的树种形成合理的密度,对于经济价值低及生长落后的林木,在自然稀疏之前就进行间伐利用。其次要营造合理的混交林分,如杉桦混交林,青海云杉作为青海省的顶级群落种,具有较高的生态价值,而白桦作为青海云杉的混交先锋树种,可以改良土壤,通过营造青海云杉-白桦混交林,可以提高林地生产力、增加物种多样性、使林分能够更加健康稳定的生长,且逐步向青海云杉顶级群落过渡,使其发挥良好的水源涵养功能。

参考文献 (References):

- [1] 陆元昌, 栾慎强, 张守攻, Von Der Heyde B, 雷相东, 包源. 从法正林转向近自然林: 德国多功能森林经营在国家、区域和经营单位层面的实践. 世界林业研究, 2010, 23(1): 1-11.
- [2] 王卫斌, 张劲峰, 杨德军. 云南森林及近自然森林经营关键技术应用. 西部林业科学, 2018, 47(6): 1-6.
- [3] 彭舜磊, 王得祥. 秦岭主要森林类型近自然度评价. 林业科学, 2011, 47(1): 135-142.
- [4] 贺志龙, 张芸香, 郭晋平. 我国近自然森林经营技术与效果评价研究进展. 山西农业科学, 2017, 45(9): 1566-1570, 1582-1582.
- [5] 王丽丽, 郭晶华. 江西大岗山植被类型及其自然度与经营集约度的划分和评价. 林业科学研究, 1994, 7(3): 286-293.
- [6] 郝云庆, 王金锡, 王启和, 孙鹏, 蒲春林. 崇州林场不同林分近自然度分析与经营对策研究. 四川林业科技, 2005, 26(2): 20-26.
- [7] 张敏, 黄国胜, 王雪军. 应用层次分析方法进行森林自然性评价的探讨. 林业资源管理, 2004, (3): 25-28.
- [8] 赵中华, 惠刚盈. 基于林分状态特征的森林自然度评价——以甘肃小陇山林区为例. 林业科学, 2011, 47(12): 9-16.
- [9] Bončina A, Klopčič M, Simončič T, Dakskobler I, Ficko A, Rozman A. A general framework to describe the alteration of natural tree species composition as an indicator of forest naturalness. Ecological Indicators, 2017, 77(1): 194-204.
- [10] McRoberts R E, Winter S, Chirici G, LaPoint E. Assessing forest naturalness. Forest Science, 2012, 58(3): 294-309.
- [11] Moravčík M, Sarvašová Z, Merganič J, Schwarz M. Forest naturalness: criterion for decision support in designation and management of protected forest areas. Environmental Management, 2010, 46(6): 908-919.
- [12] Liira J, Sepp T. Indicators of structural and habitat natural quality in boreo-nemoral forests along the management gradient. Annales Botanici Fennici, 2009, 46(4): 308-325.
- [13] Oliveira L Z, Vibrans A C. An approach to illustrate the naturalness of the Brazilian Araucaria forest. Canadian Journal of Forest Research, 2020, 50(1): 32-41.
- [14] 喻庆国. 基于自然度的森林景观时空分异研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [15] 惠刚盈, 张弓乔, 赵中华, 胡艳波, 刘文桢, 张宋智, 白超. 天然混交林最优林分状态的 π 值法则. 林业科学, 2016, 52(5): 1-8.
- [16] Côté S, Bélanger L, Beaugard R, Thiffault É, Margni M. A conceptual model for forest naturalness assessment and application in quebec's boreal forest. Forests, 2019, 10(4): 325.
- [17] Standovár T, Szmorad F, Kovács B, Kelemen K, Plattner M, Roth T, Pataki Z. A novel forest state assessment methodology to support conservation and forest management planning. Community Ecology, 2016, 17(2): 167-177.
- [18] 闫恩荣, 王希华, 黄建军. 森林粗死木质残体的概念及其分类. 生态学报, 2005, 25(1): 158-167.
- [19] 宋永昌. 植被生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [20] 李录林, 刘文桢, 赵中华, 王鹏, 石小龙. 应用 π 值法则评价小陇山林区林分状态. 林业科学研究, 2018, 31(6): 1-6.

- [21] 惠刚盈, 胡艳波, 赵中华. 结构化森林经营研究进展. 林业科学研究, 2018, 31(1): 85-93.
- [22] Kramer H. Waldwachstumslehre. Berlin: Verlag Paul Parey Hamburg und Berlin, 1988.
- [23] 惠刚盈, 胡艳波, 徐海. 森林空间结构的量化分析方法//2005 年中国科协学术年会 26 分会场论文集(2). 新疆: 中国林学会, 2005: 5-5.
- [24] 梁文俊, 魏曦, 朱宝才. 冀北山地典型林分近自然经营技术研究. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2019, 39(1): 48-55.
- [25] 张象君, 王庆成, 王石磊, 孙强. 小兴安岭落叶松人工纯林近自然化改造对林下植物多样性的影响. 林业科学, 2011, 47(1): 6-14.
- [26] 惠刚盈, 胡艳波. 混交林树种空间隔离程度表达方式的研究. 林业科学研究, 2001, 14(1): 23-27.
- [27] 张锋. 秦岭南坡不同林分类型直径分布研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2015.
- [28] 赵婧. 近自然经营对旺业甸主要林分类型森林健康影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017: 58-58.
- [29] 陈雪峰, 曾伟生, 熊泽彬, 张敏. 国家森林资源连续清查的新进展——关于国家森林资源连续清查技术规定的修订. 林业资源管理, 2004, (5): 40-45.
- [30] Çolak A H, Rotherham I D, Çalikoglu M. Combining 'Naturalness Concepts' with close-to-nature silviculture. Forstwissenschaftliches Centralblatt Vereinigt mit Tharandter Forstliches Jahrbuch, 2003, 122(6): 421-431.
- [31] 赵中华. 基于林分状态特征的森林自然度评价研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [32] 黄需霆. 顺昌县人工林近自然度评价与经营保护策略[D]. 福州: 福建农林大学, 2017: 54-54.
- [33] 贾俊姝, 李文忠, 高国雄, 李得庆, 李永良, 周心澄. 大通县退耕还林不同配置模式物种多样性的研究. 西北林学院学报, 2006, 21(3): 1-6.
- [34] 高二鹏, 杨海龙, 贺康宁, 曹恒, 刘慧博, 王冰洁, 王久乐. 青海大通脑山区青海云杉+白桦混交林主要种群的生态位特征. 中国水土保持科学, 2014, 12(3): 101-106.
- [35] 王辉, 贺康宁, 胡兴波, 王伟伟, 王晓, 李杨. 高寒区不同树种配置对林下植被物种多样性的影响. 水土保持研究, 2012, 19(3): 147-150.