

塞罕坝自然保护区华北落叶松和樟子松人工林健康评价

赵金满, 韩馨悦, 程瑞明, 张志东*

(河北农业大学林学院, 河北省林木种质资源与森林保护重点实验室, 河北 保定 071000)

摘要:【目的】了解自然保护区人工林健康状况, 指导森林经营和保护区建设。【方法】以河北省塞罕坝自然保护区华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)和樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)人工林为研究对象, 基于分层随机取样法, 设置36块样地, 选取生产力、林分结构、物种多样性、土壤质量和稳定性等5个方面17个指标, 建立森林健康评价指标体系。运用主成分分析法计算森林健康指数、K均值聚类法划分森林健康等级、Fisher判别分析法验证聚类结果的准确性。【结果】研究区森林健康指数范围在-1.02~1.46; 土壤质量和林分结构是影响研究区森林健康的最主要因素; 森林健康等级所占面积比例从大到小依次为: 中健康(50%)>不健康(25%)>亚健康(19%)>健康(6%); 在中龄林(20~30 a)和近熟林(>30 a)中, 华北落叶松林健康状况均优于樟子松林; 随着林分密度的增加, 华北落叶松林和樟子松林的森林健康指数呈降低趋势。【结论】塞罕坝自然保护区人工林主要处于中健康和亚健康状态, 亟须采取有效经营活动改善森林健康状态。

关键词:森林健康; 人工林; 主成分分析; 华北落叶松; 樟子松; 塞罕坝自然保护区

中图分类号: S757

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2006(2024)03-0199-08



Health assessment of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in Saihanba Nature Reserve

ZHAO Jinman, HAN Xinyue, CHENG Ruiming, ZHANG Zhidong*

(Hebei Province Key Laboratory of Forest Trees Germplasm Resources and Forest Protection, College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

Abstract: 【Objective】The study aimed to understand the health status of plantations in nature reserves for forest management and the construction of nature reserves. 【Method】A total of 36 sample plots were surveyed in the pure *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in the Saihanba Nature Reserve of Hebei Province using the stratified random sampling method. A total of 17 indicators, including the five aspects of productivity, stand structure, species diversity, soil quality, and stability, were selected to establish an indicator system for assessing forest health. The forest health index was calculated by principal component analysis, and the forest health grades were classified using the K-means clustering method. The accuracy of the clustering results was verified by Fisher's discriminant analysis. 【Result】The forest health index of the study area ranged between -1.02 and 1.46. The soil quality and stand structure were the most important indicators that influenced forest health in the study area. The proportionate areas were in the following order; mid-health (50%) > unhealthy (25%) > sub-health (19%) > healthy (6%). The health status of *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* forests was better than that of *P. sylvestris* var. *mongolica* forests for middle-aged (20–30 a) and near-mature (> 30 a) stands. The forest health indices of *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* and *P. sylvestris* var. *mongolica* forests tended to decrease with increasing stand density. 【Conclusion】The plantations in the Saihanba Nature Reserve were primarily in the mid-health and non-health states. Therefore, the findings revealed that effective management strategies are urgently necessary for improving forest health in the study area.

收稿日期 Received: 2022-04-25

修回日期 Accepted: 2023-08-31

基金项目: 河北省重点研发计划(22326803D); 中央财政林业和草原科技推广示范项目(冀 TG[2022]018)。

第一作者: 赵金满(zhaojinman1003@163.com)。* 通信作者: 张志东(zhzhido@163.com), 副教授。

引文格式: 赵金满, 韩馨悦, 程瑞明, 等. 塞罕坝自然保护区华北落叶松和樟子松人工林健康评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(3): 199–206. ZHAO J M, HAN X Y, CHENG R M, et al. Health assessment of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in Saihanba Nature Reserve[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, 48(3): 199–206. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202204058.

Keywords: forest health; plantation; principal component analysis; *Larix gmelinii* var. *prinoipis-rupprechtii*; *Prinus sylvestris* var. *mongolica*; Saihanba Nature Reserve

森林健康是森林生态系统健康的简称,用于评价森林生态系统的健康程度^[1]。拥有一个状态稳定、结构合理的森林生态系统是森林可持续经营的目标。目前,我国森林蓄积、面积及覆盖率保持快速增长趋势,但主要是人工林面积的增长,森林质量不高、森林健康指数较低等问题依然存在^[2-3]。森林健康评价是了解森林健康状态的重要手段,通过对森林健康的合理监测,可以了解生态系统的变化,减少生态系统服务功能价值的损失^[4-5]。

森林健康评价体系包括评价尺度的确定、评价指标的选取及评价方法的运用。不同的评价尺度所衡量的森林健康标准不同,因此,评价尺度的确定对于森林健康评价非常重要。常见的评价涉及单木、林分、小班、森林生态系统和森林景观等尺度^[6-8],多数学者主要从林分和小班尺度进行分析^[9-11],其涵盖面广泛且适合大区域的森林健康评价研究。评价指标的选取是森林健康评价的关键步骤,根据研究目的和实际情况,选取合适的评价指标,尽可能完整地反映森林的健康状况。谷鑫鑫等^[12]从生产力、组织结构、土壤和抵抗力等4个方面选取14个指标构建评价体系;王玮玮等^[13]从组织结构、土壤状况以及人为干扰等方面进行健康评价;贾大鹏等^[14]从水源涵养功能、生态系统保护功能和木材生产功能等3个方面选取评价指标,该体系中的指标选取缺少森林火灾等抵抗力指标,但指标针对性较强。不同学者针对不同的研究对象所选取指标有所差异,指标过多会导致信息重叠,指标选取较少则不能准确反映森林生态系统的健康状况。目前,有关森林健康评价没有统一的评价体系,针对不同的研究对象和评价尺度,学者们提出多种评价方法,主要包括层次分析法^[15]、主成分分析^[11]、健康距离法^[16]、综合指数法^[5]和模糊综合评价法^[17]等。这些方法被划分为主观分析法和客观分析法,在森林健康评价中均有不同程度的应用。总之,森林健康评价尺度、评价指标及评价方法的确定因不同的研究目的和研究内容而异。

塞罕坝自然保护区造林树种以樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)和华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *prinoipis-rupprechtii*)为主。该地区樟子松和华北落叶松人工林多为纯林。受制于自然保护区的严格条例规定,保护区内的林分尚未开展大规模森林经营活动。目前,部分林地出现了生长衰

退、生产力下降及生态服务功能降低等问题^[18-19]。2020年,在河北省林业和草原局的支持下,首次在塞罕坝自然保护区试验区内开展了人工林生态抚育活动。为准确了解保护区华北落叶松和樟子松人工林生态系统健康状况及存在的问题,本研究基于林分尺度建立森林健康评价指标体系,进行森林健康诊断,拟为保护区森林可持续经营提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河北省承德市围场县的塞罕坝机械林场(117°22'E,42°46'N),海拔在1 000 m以上,该地处于内蒙古高原向华北平原的过渡地带,地势南低北高,地形以丘陵和平原为主。属于半干旱半湿润寒温带的大陆季风气候,年平均气温-1.3℃,土壤类型主要是风沙土、沼泽土、山地棕壤土及灰色森林土,年均降水量460 mm左右,且主要集中在夏季。霜冻、大风、干旱等灾害天气较多。该地区的乔木树种主要有华北落叶松、樟子松、白桦(*Betula platyphylla*)、云杉(*Picea asperata*)等;灌木物种主要包括山刺玫(*Rosa davurica*)、金花忍冬(*Lonicera chrysantha*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)等;草本物种主要有蒙古蒿(*Artemisia mongolica*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)、鼠掌老鹳草(*Geranium sibiricum*)、展枝唐松草(*Thalictrum squarrosum*)等。

1.2 样地调查

2020年8月,在对保护区进行实地考察的基础上,依据典型性和代表性原则,同时考虑林分密度、林龄和林分化程度,要求所选样地能够反映研究区林分基本特征。基于分层随机取样方法,在华北落叶松和樟子松林各设置18块30 m×30 m的标准地,共36块(表1)。自2002年该地划定为省级保护区后,近20年未进行过抚育,各样地受人为干扰活动较小,海拔、坡度基本一致。对所有样地的乔木进行每木检尺,记录树种名称、胸径、树高、冠幅、株数及相对坐标。调查样地内的所有灌木,并按照对角线设置3块1 m×1 m的草本样方,记录灌木和草本的种类、株数、盖度、高度等因子。每块标准地内随机选取5个土壤采样点,采用环刀法取表层土(0~20 cm),土壤过孔径0.85 mm筛,将同一样地的土样等量混合,取1 kg左右装袋带回实验室。土壤样品分为两部分,一份保存在-80℃进行土壤

微生物高通量测序^[20],另一份在室温干燥后进行土壤化学性质分析。有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定;全氮含量用凯氏定氮-消煮法测定;全磷含量采用酸溶-钼锑抗比色法测定;全钾含量采用氢氧化钠熔融-火焰光度法测定^[21]。

表1 样地基本情况

Table 1 Basic condition of sampling plots

林龄/a stand age	林型 stand type	平均胸径/cm mean DBH	平均树高/m average height	林分密度/ (株·hm ⁻²) stand density
20~30	L	14.24±1.55	13.05±1.72	2 284.67±527.00
	P	14.70±1.19	10.31±2.06	1 997.11±543.69
>30	L	20.64±1.63	17.97±1.58	1 224.33±256.72
	P	15.96±0.81	13.70±1.79	2 357.67±408.51

注:L.华北落叶松人工林 *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantation; P.樟子松人工林 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation。下同。The same below.

1.3 评价指标选取及计算

1) 指标选取。评价结果的合理性和准确性取决于评价指标体系构建的合理程度。评价指标的选取应遵循客观性、可操作性和全面性原则:①客观性,指标选取要考虑研究对象特点和林分实际情况,要求指标能够客观反映森林特征。②可操作性,指标在实际调查中容易获取,计算过程简单,能为后续研究提供指导,在实践中推广应用。③全面性,结合前人研究成果和本研究目标,所选指标要尽可能完整地反映森林各方面情况,但为避免指标重复,需选择影响森林健康的关键指标。基于此,本研究以维护健康稳定优质的森林生态系统为核心,以保护生物多样性、改善林分空间结构、提高生产力、降低森林火险等级、确保生态系统的良性循环为目标,从生产力、林分结构、物种多样性、土壤质量和稳定性5个方面选取17个指标构建评价体系(表2)。

2) 评价指标计算。采用文献[22-29]方法计算单位面积蓄积量、竞争指数、角尺度、尺小比、物种多样性指数及森林火险系数等5类指标。单位面积蓄积量采用“标准木法”计算,选取与样地平均胸径和平均树高相近的1~3株标准木,结合塞罕坝华北落叶松和樟子松人工林的二元立木材积公式^[22-23],可计算标准木材积。

竞争指数是衡量林木个体生长差异的量化指标,主要反映林木间的竞争强度^[24]。本研究利用改进的单木竞争模型计算竞争指数^[25-26]。

根据研究区实际情况,选取角尺度和大小比两个空间结构指标。角尺度指林木个体在水平面上的分布形式,大小比表示树木个体大小的分化

程度^[27]。

表2 森林健康评价指标体系

Table 2 Forest health assessment indicator system

指标分类 indicator classification	评价指标 evaluation index
生产力 productivity	平均胸径(DBH) mean DBH
	平均树高(H) average height
	单位面积蓄积量(V) volume per unit area
林分结构 forest structure	林分密度(SD) stand density
	竞争指数(CI) competition index
	角尺度(UA) uniform angle
物种多样性 species diversity	大小比(NC) neighborhood comparison
	草本 Shannon-Wiener 指数(H-SW) herb Shannon-Wiener index
	灌木 Shannon-Wiener 指数(S-SW) shrub Shannon-Wiener index
土壤质量 soil quality	土壤细菌丰富度(R_B) soil bacterial richness
	土壤真菌丰富度(R_F) soil fungus richness
	有机碳含量(SOC) SOC content
稳定性 stability	全氮含量(TN) TN content
	全磷含量(TP) TP content
	全钾含量(TK) TK content
稳定性 stability	森林火险系数(FRC) forest fire risk coefficient
	林分更新(SR) stand regeneration

本研究所选物种多样性指标为草本和灌木的 Shannon-Wiener 多样性指数^[28]。

森林火险系数为定性指标,采用乔木平均枝高、灌草盖度和林龄3个亚指标对该定性指标进行定量化。首先对各亚指标进行森林火险等级赋值1~5,其次采用计算公式^[29]:

$$R = \sum_{i=1}^n m_i w_i \quad (1)$$

式中: R 为森林火险系数; m_i 为亚指标*i*赋值数; w_i 为权重(将影响火灾发展最大的灌草盖度设为0.4,其余亚指标设为0.3)。

1.4 森林健康评价指标体系的构建

1.4.1 数据标准化

由于各指标的量纲不统一,缺乏可比性,需要对原始数据进行标准化处理,采用 Z-score 法使数据量纲一致。

1.4.2 数据检验

对各样地的指标数据进行 KMO (>0.5) 和 Bartlett 球形度检验 ($P < 0.05$), 验证数据是否适合主成分分析。本研究的检验结果 KMO 为 0.626, Bartlett 球形度检验 $P < 0.001$, 适用于该分析方法。

1.4.3 主成分提取及森林健康指数计算

根据总方差解释结果,按照特征值大于1的原

则提取主成分,用提取出的主成分代表原始指标。根据主成分表达公式计算各样地的主成分得分和森林健康指数,计算公式为:

$$F_{jm} = \sum_{i=1}^n D_{mi} Z_{ij}; \quad (2)$$

$$W_m = C_m / \sum_{m=1}^n C_m; \quad (3)$$

$$F = F_{jm} \times W_m。 \quad (4)$$

式中: F_{jm} 为第 j 个样地第 m 个主成分的得分; D_{mi} 为第 i 个指标的第 m 个成分得分系数; Z_{ij} 为第 i 个指标的第 j 个样地观测值的标准化数据; W_m 为第 m 个主成分的权重系数; C_m 为主成分分析后得到的各主成分贡献率; F 为各样地的森林健康指数值。

1.4.4 健康等级划分及验证

参考国内外学者研究成果和研究区的林分实际情况,采用K均值聚类法划分为健康、亚健康、中健康和不健康4个等级。为便于划分等级,对森林健康指数进行离差标准化,转换公式如下:

$$F^* = (F - F_{\min}) / (F_{\max} - F_{\min})。 \quad (5)$$

式中: F^* 为离差标准化后的森林健康指数值; F_{\max} 为样本数据最大值; F_{\min} 为样本数据最小值。

以各样地的森林健康指数为基础,采用Fisher判别法,建立判别函数,以此来验证聚类分析结果的准确性。

1.4.5 数据处理

在Winkelmass和R 4.1.2中进行指标计算及作图,在SPSS 26.0中进行主成分分析、K均值聚类、Fisher判别分析、方差分析和多重比较等。

2 结果与分析

2.1 影响森林健康的主成分分析

本研究在主成分分析过程中共提取5个主成分,累计贡献率为73.46%。第1主成分贡献率达到31.19%,包含全氮、有机碳、全磷,该主成分可解释为土壤质量指标;第2主成分贡献率达到17.34%,包含林分密度、平均胸径、竞争指数和角尺度,该主成分主要反映了林分结构方面的信息;第3主成分贡献率为9.70%,包含单位面积蓄积量、全钾含量和平均树高,该主成分主要体现生产力方面的信息;前3个主成分累计贡献率将近60%,第4和第5主成分贡献率分别是7.80%和7.43%,主要反映了稳定性和物种多样性方面的信息(表3)。

表3 旋转后的成分矩阵

Table 3 Rotation component matrix

指标 indicator	主成分 principal component				
	1	2	3	4	5
全氮含量 TN	0.926	0.137	0.187	0.155	-0.006
有机碳含量 SOC	0.901	0.209	0.174	0.110	-0.017
全磷含量 TP	0.893	0.247	0.143	0.112	-0.109
林分密度 SD	-0.299	-0.844	0.046	0.160	0.081
平均胸径 DBH	0.336	0.835	0.377	0.008	0.015
竞争指数 CI	0.004	0.825	0.082	0.037	0.115
角尺度 UA	0.245	0.425	-0.421	-0.299	0.021
单位面积蓄积量 V	0.112	0.207	0.867	0.127	-0.064
全钾 TK	-0.227	0.123	-0.760	-0.030	-0.056
平均树高 H	0.381	0.508	0.724	-0.005	-0.016
林分更新 SR	-0.012	0.016	-0.048	-0.777	0.209
土壤细菌丰富度 R_B	0.495	-0.127	0.133	0.680	0.196
灌木 Shannon-Wiener 指数 S-SW	0.164	-0.008	0.078	0.669	-0.064
土壤真菌丰富度 R_F	0.100	0.434	-0.069	0.109	0.657
草本 Shannon-Wiener 指数 H-SW	0.300	0.299	-0.025	0.139	-0.623
大小比 NC	-0.125	-0.013	-0.096	0.403	-0.567
森林火险系数 FRC	-0.393	0.462	-0.284	-0.075	0.490
方差贡献率/(VCR) variance contribution rate	31.19	17.34	9.70	7.80	7.43

2.2 森林健康等级划分

塞罕坝自然保护区森林健康指数为-1.02~1.46,将36块样地的森林健康指数值离差标准化后进行K均值聚类,聚类数为4,其中“1”代表健

康,“2”代表亚健康,“3”代表中健康,“4”代表不健康。根据聚类分析结果,划分森林健康等级为:健康(0.92,1.46]、亚健康(0.12,0.92]、中健康(-0.35,0.12]和不健康[-1.02,-0.35](表4)。

表4 塞罕坝自然保护区森林健康等级划分结果

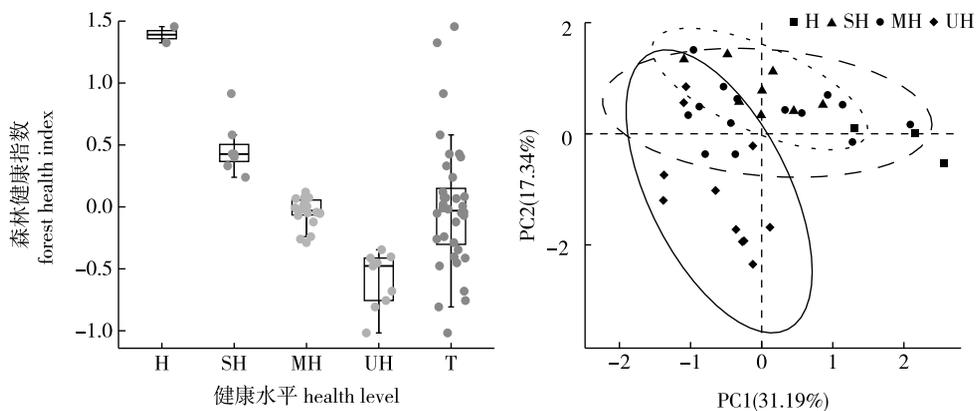
Table 4 The results of forest health classification in Saihanba Nature Reserve

样地号 plot No.	F	F*	健康等级 classify	样地号 plot No.	F	F*	健康等级 classify	样地号 plot No.	F	F*	健康等级 classify
L1	0.43	0.58	2	L13	-0.01	0.41	3	P7	0.01	0.41	3
L2	0.40	0.57	2	L14	0.43	0.58	2	P8	-0.41	0.24	4
L3	0.58	0.65	2	L15	0.12	0.46	3	P9	-0.04	0.39	3
L4	-0.26	0.31	3	L16	-0.24	0.31	3	P10	-0.81	0.09	4
L5	0.08	0.45	3	L17	0.07	0.44	3	P11	-1.02	0.00	4
L6	0.24	0.51	2	L18	-0.05	0.39	3	P12	0.08	0.44	3
L7	-0.05	0.39	3	P1	-0.07	0.38	3	P13	0.33	0.55	2
L8	-0.48	0.22	4	P2	-0.05	0.39	3	P14	-0.40	0.25	4
L9	-0.35	0.27	4	P3	0.07	0.44	3	P15	-0.68	0.14	4
L10	1.46	1.00	1	P4	-0.29	0.30	3	P16	-0.02	0.40	3
L11	1.33	0.95	1	P5	-0.76	0.11	4	P17	0.02	0.42	3
L12	0.92	0.78	2	P6	-0.45	0.23	4	P18	-0.12	0.36	3

2.3 森林健康评价

塞罕坝自然保护区森林健康指数随着森林健康水平的下降而逐渐减小,林分整体处于中健康和亚健康状态(图1)。对聚类分析结果验证得到,各健康水平样地占全部样地面积比例从大到小次序

为:中健康(50%)>不健康(25%)>亚健康(19%)>健康(6%)。聚类分析与判别分析验证结果一致,表明聚类分析结果准确,研究所采用的模型是可行的。



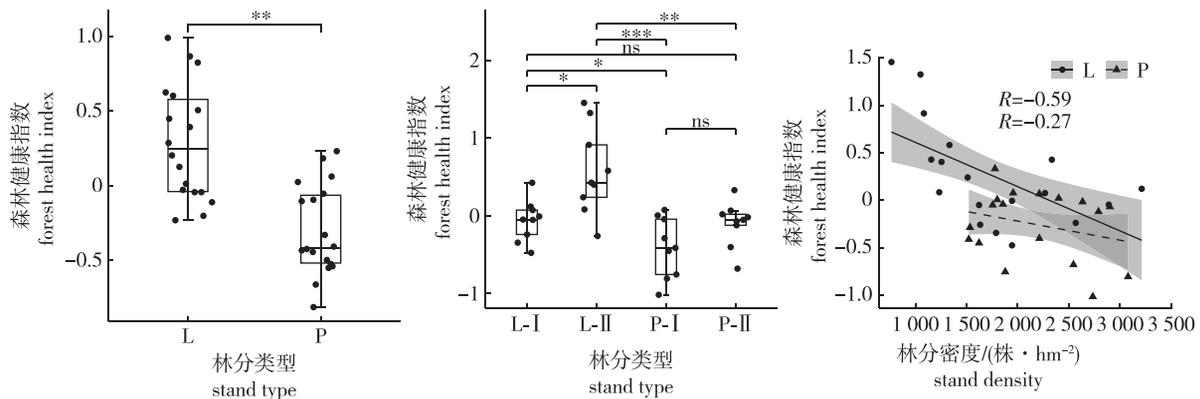
H.健康 healthy;SH.亚健康 sub-healthy;MH.中健康 mid-health;UH.不健康 unhealthy;T.总计 total。

图1 塞罕坝自然保护区森林健康指数和健康等级

Fig. 1 Forest health index and health level in Saihanba Nature Reserve

在不同林分类型的平均健康指数水平上,华北落叶松林呈亚健康状态,樟子松林呈中健康状态;华北落叶松林的健康指数显著高于樟子松林,华北落叶松林的整体健康状况优于樟子松林。不同林龄的华北落叶松和樟子松林中,其健康指数均表现

为近熟林高于中龄林,但在樟子松林中无显著差异。此外,在相同林龄的两种林分类型中,华北落叶松林健康指数显著高于樟子松林。随着林分密度的增加,不同林分类型的健康指数均呈降低趋势(图2)。



L-I. 华北落叶松中龄林 mid-aged *L. principis-rupprechtii* plantation; L-II. 华北落叶松近熟林 near-matured *L. principis-rupprechtii* plantation; P-I. 樟子松中龄林 mid-aged *P. sylvestris* plantation; P-II. 樟子松近熟林 near-matured *P. sylvestris* plantation。ns. 无显著差异 no significant difference。* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ 。

图2 不同林龄和林分密度的林分健康状况差异

Fig. 2 Differences of health status among stands with different ages and densities

3 讨论

森林健康评价是通过对林地进行监测评估来掌握森林的健康状况,是了解森林经营现状的重要手段^[11]。指标体系的建立、指标的确定、指标权重的赋值和评价方法的选择等都影响着评价结果的科学性和准确性。当前的森林健康评价研究存在着一些问题,如评价指标反映信息重复、评价方法有一定主观性和单一性、难以对评价结果的正确性和合理性进行验证等。本研究以维护研究区森林生态系统健康稳定优质高效为目标,基于林分尺度,选取生产力、林分结构、物种多样性、土壤状况和稳定性5个方面的17个指标建立塞罕坝自然保护区森林健康评价体系,较全面地反映了森林生态系统的真实情况。

土壤质量是影响塞罕坝自然保护区森林健康等级的最主要因素。这与曹小玉等^[30]的研究结果一致。一方面土壤养分含量会影响林木生长状况和林分质量,另一方面土壤微生物类群的数量及组成多样性常被用来表征土壤肥力变化以及生态系统恢复效果^[31-33]。适宜的林分密度能够显著改善人工林的土壤质量,对密度过高的林分进行合理疏伐,可以降低林分郁闭度以增加林内光照,加快土壤微生物分解凋落物的速率,有效提高土壤养分含量^[34-35]。在林分结构指标中,竞争指数和林分密度这两个指标对森林健康等级的影响较高。有研究指出^[36],林木间的竞争强度极大程度上受到林分密度的影响。通过对林地合理间伐来调整林分密度,可以提高林分的树种空间隔离程度并降低林

分竞争强度,同时促进保留木的快速生长。此外,华北落叶松林和樟子松林的竞争压力主要来自种内,相较于纯林,混交林中的竞争较少发生,树种之间主要表现为相互促进作用^[24,37]。在本研究中,华北落叶松和樟子松人工林多为单一树种纯林,林木个体生长受种内竞争影响较大。因此,在后期的森林经营中应营造混交林提高林分生产力^[38]。物种多样性和稳定性指标对森林健康等级影响较小,间接表明林分结构和土壤质量对研究区的森林健康状况起主要决定作用。而林下植被发育及天然更新主要受林分密度影响,通过合理地调控林分密度,可以提高林下植被多样性,进而改善群落结构,维持人工林稳定性^[39-40]。与此同时,稳定性指标中的森林火险系数对研究区森林健康等级影响最低,这与朱柱等^[41]的研究结果不一致。原因可能是该定性指标在定量化过程中,未纳入路网密度、人口密度等影响火灾发生的人为活动因子,导致结果存在一定差异。

进一步分析得出研究区的华北落叶松林健康状况整体上优于樟子松林。一方面樟子松林的分密度普遍比落叶松林高。林分密度会直接影响林分内的光照、水分和土壤质量条件,进而影响林分健康状况。因此,对高密度林分进行采伐作业是有必要的。另一方面,林龄的差异影响到林分生长及养分循环速率,随着林龄的增加,林分各方面渐趋稳定,而处于中龄林阶段的林分还有一定的生长空间,对这类林分进行合理经营,有利于促使其由非健康状态向健康状态转变。

目前,研究区人工林均为纯林,存在混交程度

差和林分结构不稳定等问题。森林整体处于中健康和亚健康状态,对这些林分若不采取必要的经营措施,则极有可能向不健康林分退化。为此,提出如下建议:

1) 塞罕坝自然保护区人工林中健康和亚健康样地占全部样地面积比例的75%,应对此类密度过大的林分进行及时疏伐作业。疏伐时要考虑间伐强度和间伐周期。

2) 目前,绝大多数森林火灾除因野外吸烟、祭祀烧纸、野炊等人为用火引起,还主要受到林下积累的枯枝落叶、杂草等可燃物的影响,森林可燃物的积累量关系到林火蔓延范围和强度^[42]。但林下枯枝、倒木及凋落物作为维持森林健康经营的因素之一,在森林生态系统的物质循环和能量流动中发挥重要作用,应慎重考虑清理作业。人为因素作为影响森林火灾发生的关键因素,也是最可控的因素,相关部门需加大宣传森林防火教育,增强人们的森林防火意识,杜绝一切因人为用火而引发森林火灾的可能性。此外,还需在保护区周围易于观测处,设立专职管护人员,加强对森林的看护管理。

3) 考虑补植白桦等阔叶树种作为混交树种,形成针阔混交林。已有研究表明,该混交方式能显著提高塞罕坝华北落叶松纯林土壤肥力^[43]和林分生产力^[37]。

参考文献 (reference):

- [1] 刘建泉, 孙建忠. 东大河林区青海云杉林健康评价[J]. 草业科学, 2012, 29(4): 624-628. LIU J Q, SUN J Z. Health assessment of *Picea classifolia* forest in the Dongdahe forest region[J]. Pratacultural Sci, 2012, 29(4): 624-628.
- [2] LU S S, LI J P, GUAN X L, et al. The evaluation of forestry ecological security in China: developing a decision support system[J]. Ecol Indic, 2018, 91: 664-678. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.03.088.
- [3] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 1-10. LIU S R, YANG Y J, WANG H. Development strategy and management countermeasures of planted forests in China: transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services[J]. Acta Ecol Sin, 2018, 38(1): 1-10. DOI: 10.5846/stxb201712072201.
- [4] TRUMBORE S, BRANDO P, HARTMANN H. Forest health and global change[J]. Science, 2015, 349(6250): 814-818. DOI: 10.1126/science.aac6759.
- [5] 郑学良, 陈丽华, 李洪洋, 等. 基于水源涵养功能的辽东防护林体系健康评价[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(2): 102-110. ZHENG X L, CHEN L H, LI H Y, et al. Health assessment of Liaodong shelterbelt system based on water conservation[J]. Sci of Soil Water Conserv, 2020, 18(2): 102-110. DOI: 10.16843/j.sswc.2020.02.013.
- [6] XIAO F J, OUYANG H, ZHANG Q, et al. Forest ecosystem health assessment and analysis in China[J]. J Geogr Sci, 2004, 14(1): 18-24. DOI: 10.1007/BF02873086.
- [7] MENG Y, CAO B H, DONG C, et al. Mount Taishan forest ecosystem health assessment based on forest inventory data[J]. Forests, 2019, 10(8): 657. DOI: 10.3390/f10080657.
- [8] 董灵波, 刘兆刚. 森林健康评价及其多尺度转换方法[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 206-216. DONG L B, LIU Z G. Forest health assessments and multi-scale conversion methods[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2021, 45(3): 206-216. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.201911007.
- [9] 闫晋升, 王永东, 姜泊远, 等. 哈萨克斯坦首都努尔苏丹人工林健康评价[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1474-1483. YAN J S, WANG Y D, LOU B Y, et al. Health assessment of plantations in Nursultan, capital of Kazakhstan[J]. Arid Zone Res, 2021, 38(5): 1474-1483. DOI: 10.13866/j.azr.2021.05.30.
- [10] LU S S, ZHOU Y, SUN H S, et al. Examining the influencing factors of forest health, its implications on rural revitalization: a case study of five forest farms in Beijing[J]. Land Use Policy, 2021, 102: 105265. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.105265.
- [11] 赵勇钧, 谢阳生, 王建军, 等. 基于多元统计分析的马尾松人工林健康评价研究: 以广西热带林业实验中心为例[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(7): 100-107. ZHAO Y J, XIE Y S, WANG J J, et al. Health assessment of *Pinus massoniana* plantation on multivariate statistical analysis: a case study of Guangxi Tropical Forestry Experimental Center[J]. J Cent South Univ For Technol, 2019, 39(7): 100-107. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2019.07.014.
- [12] 谷鑫鑫, 司剑华. 基于层次分析法的西宁市油松人工林健康评价[J]. 青海大学学报, 2020, 38(3): 34-43. GU X X, SI J H. Health evaluation of *Pinus tabuliformis* Carr. plantation in Xining City based on analytic hierarchy process[J]. J Qinghai Univ, 2020, 38(3): 34-43. DOI: 10.13901/j.cnki.qhwxzbk.2020.03.005.
- [13] 王玮玮, 许彦红, 杨俊灵, 等. 纳板河流域国家级自然保护区主要森林植被类型健康评价研究[J]. 中国农学通报, 2021, 37(26): 32-39. WANG W W, XU Y H, YANG J L, et al. Health evaluation of main forest vegetation types in Naban River Nature Reserve[J]. Chin Agric Sci Bull, 2021, 37(26): 32-39. DOI: 10.11924/j.issn.1000-6850.cash2020-0755.
- [14] 贾大鹏, 王新杰, 刘雨. 金沟岭林场森林健康评价[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(8): 47-52, 57. JIA D P, WANG X J, LIU Y. Forest health assessment of Jingouling Forest Farm[J]. J Northeast For Univ, 2019, 47(8): 47-52, 57. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2019.08.009.
- [15] TAO N, LIU D, WU J. Assessment of forest ecosystem health based on fuzzy evaluation method: a case study of forest ecosystem in Liangshui Natural Reserve[J]. Rev Int Contam Ambie, 2019, 35(esp01): 159-164. DOI: 10.20937/rica.2019.35.esp01.15.
- [16] ZHANG F, ZHANG J Q, WU R N, et al. Ecosystem health assessment based on DPSIRM framework and health distance model in Nansi Lake, China[J]. Stoch Environ Res Risk Assess, 2016, 30(4): 1235-1247. DOI: 10.1007/s00477-015-1109-2.
- [17] 王秋燕, 陈鹏飞, 李学东, 等. 森林健康评价方法综述[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(2): 177-183. WANG Q Y, CHEN P F, LI X D, et al. Review of forest health assessment methods[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2018, 42(2): 177-183. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201703105.
- [18] ZHU J J, TAN H, KANG H Z, et al. Comparison of foliar nutrient concentrations between natural and artificial forests of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy land, China[J]. J For Res, 2006, 17(3): 177-184. DOI: 10.1007/s11676-006-0042-0.
- [19] 扈梦梅, 田龙, 吴亚楠, 等. 塞罕坝华北落叶松人工林间伐和混交改造对大型土壤动物群落结构的影响[J]. 林业科学, 2019, 55(11): 153-162. HU M M, TIAN L, WU Y N, et al. Influences of thinning and mixed transformation of *Larix principis-rupprechtii* plantations on the community structure of soil macrofauna in Saihanba area[J]. Sci Silvae Sin, 2019, 55(11): 153-

162. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20191117.
- [20] 牛小云, 孙晓梅, 陈东升, 等. 辽东山区不同林龄日本落叶松人工林土壤微生物、养分及酶活性[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2663-2672. NIU X Y, SUN X M, CHEN D S, et al. Soil microorganisms, nutrients and enzyme activity of *Larix kaempferi* plantation under different ages in mountainous region of eastern Liaoning Province, China[J]. Chin J Appl Ecol, 2015, 26(9): 2663-2672. DOI: 10.13287/j.1001-9332.20150630.014.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. LU R K. Methods of soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2000.
- [22] 潘湘海. 塞罕坝樟子松人工林二元立木材积表的研制[J]. 河北林业科技, 2010(6): 20. PAN X H. Compilation of binary standing volume tables of *Pinus sylvestris* forest in Saihanba area[J]. J Hebei For Sci Technol, 2010(6): 20. DOI: 10.16449/j.cnki.issn1002-3356.2010.06.023.
- [23] 张菲, 张岩. 塞罕坝地区华北落叶松人工林二元立木材积表编制研究[J]. 河北林果研究, 2016, 31(2): 128-131. ZHANG F, ZHANG Y. Compilation of binary standing volume tables of *Larix principis-rupprechtii* forest in Saihanba area[J]. Hebei J For Orc Res, 2016, 31(2): 128-131. DOI: 10.13320/j.cnki.hjfor.2016.0025.
- [24] 杜秀芳, 汤孟平, 潘建勇, 等. 临安区不同森林类型竞争指数比较研究[J]. 生态学报, 2020, 40(12): 4064-4072. DU X F, TANG M P, PAN J Y, et al. Study on competition index of different typical forest types on Lin'an Region[J]. Acta Ecol Sin, 2020, 40(12): 4064-4072. DOI: 10.5846/stxb201901240181.
- [25] 潘磊磊, SEMYUNG K, 刘艳书, 等. 沙地樟子松天然林南缘分布区林木竞争、空间格局及其更新特征[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3687-3699. PAN L L, SEMYUNG K, LIU Y S, et al. Tree competition, spatial pattern, and regeneration of a Mongolian pine natural forest in the southern geographical edge[J]. Acta Ecol Sin, 2019, 39(10): 3687-3699. DOI: 10.5846/stxb201804270955.
- [26] 喻泓, 杨晓晖. 地表火干扰时间序列上樟子松林竞争强度的变化[J]. 生态学报, 2010, 30(1): 79-85. YU H, YANG X H. Variation of competition intensity across a chronosequence in surface firemediated Mongolian pine forest[J]. Acta Ecol Sin, 2010, 30(1): 79-85.
- [27] 胡艳波, 惠刚盈. 优化林分空间结构的森林经营方法探讨[J]. 林业科学研究, 2006, 19(1): 1-8. HU Y B, HUI G Y. A discussion on forest management method optimizing forest spatial structure[J]. For Res, 2006, 19(1): 1-8. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1498.2006.01.001.
- [28] 姜雨, 黄选瑞, 时田雨, 等. 不同间伐强度对自然保护区人工林植被多样性及分布格局的影响: 以河北省塞罕坝机械林场为例[J]. 中南林业科技大学学报(自然科学版), 2022, 42(12): 68-81. JIANG Y, HUANG X Y, SHI T Y, et al. Effects of tending thinning on the vegetation diversity and distribution pattern of artificial forests in nature reserves: a case study of Saihanba Mechanical Forest Farm in Hebei Province[J]. J Cent South Univ For Technol, 2022, 42(12): 68-81. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2022.12.008.
- [29] 徐梅, 关庆伟. 徐州侧柏人工林健康评价研究[J]. 西南林业大学学报, 2014, 34(2): 39-43, 54. XU M, GUAN Q W. Health assessment of *Platycladus orientalis* plantation in Xuzhou[J]. J Southwest For Univ, 2014, 34(2): 39-43, 54. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1914.2014.02.008.
- [30] 曹小玉, 委霞, 赵文菲, 等. 基于结构方程模型的森林健康评价[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2635-2647. CAO X Y, WEI X, ZHAO W F, et al. Evaluation of forest health based on structural equation model[J]. Chin J of Ecol, 2021, 40(8): 2635-2647. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202108.018.
- [31] DU C, XU C Y, JIAN J S, et al. Seasonal dynamics of bacterial communities in a *Betula albosinensis* forest[J]. Eur J Soil Sci, 2018, 69(4): 666-674. DOI: 10.1111/ejss.12568.
- [32] LIU T, WU X H, LI H W, et al. Soil organic matter, nitrogen and pH driven change in bacterial community following forest conversion[J]. For Ecol Manag, 2020, 477: 118473. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118473.
- [33] QU Z L, LIU B, MA Y, et al. Differences in bacterial community structure and potential functions among *Eucalyptus* plantations with different ages and species of trees[J]. Appl Soil Ecol, 2020, 149: 103515. DOI: 10.1016/j.apsoil.2020.103515.
- [34] 刘慧敏, 韩海荣, 程小琴, 等. 不同密度调控强度对华北落叶松人工林土壤质量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 50-59. LIU H M, HAN H R, CHENG X Q, et al. Effects of different density regulation intensities on soil quality in *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. J Beijing For Univ, 2021, 43(6): 50-59. DOI: 10.12171/j.1000-1522.20200322.
- [35] BOLAT İ. The effect of thinning on microbial biomass C, N and basal respiration in black pine forest soils in Mudurnu, Turkey[J]. Eur J For Res, 2014, 133(1): 131-139. DOI: 10.1007/s10342-013-0752-8.
- [36] 刘怡青, 田育红, 宋含章, 等. 胸径和林分密度决定内蒙古东部落叶松林种内竞争[J]. 生态学杂志, 2018, 37(3): 847-853. LIU Y Q, TIAN Y H, SONG H Z, et al. DBH and stand density regulate intraspecific competition of *Larix gmelinii* in eastern Inner Mongolia[J]. Chin J Ecol, 2018, 37(3): 847-853. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201803.016.
- [37] 董雪婷, 张静, 张志东, 等. 树种相互作用、林分密度和树木大小对华北落叶松生产力的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2722-2728. DONG X T, ZHANG J, ZHANG Z D, et al. Effects of tree species interaction, stand density, and tree size on the productivity of *Larix principis-rupprechtii* [J]. Chin J Appl Ecol, 2021, 32(8): 2722-2728. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202108.006.
- [38] PRETZSCH H, SCHÜTZE G. Tree species mixing can increase stand productivity, density and growth efficiency and attenuate the trade-off between density and growth throughout the whole rotation[J]. Ann Bot, 2021, 128(6): 767-786. DOI: 10.1093/aob/meab077.
- [39] 王杰, 陆景星, 王相震, 等. 华北落叶松人工林间伐后9-10年林下天然更新研究[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(12): 17-28. WANG J, LU J X, WANG X Z, et al. Natural regeneration of *Larix principis-rupprechtii* plantations in nine to ten years after thinning[J]. J Beijing For Univ, 2021, 43(12): 17-28. DOI: 10.12171/j.1000-1522.20200371.
- [40] 徐雪蕾, 孙玉军, 周华, 等. 间伐强度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J]. 林业科学, 2019, 55(3): 1-12. XU X L, SUN Y J, ZHOU H, et al. Effects of thinning intensity on understory growth and soil properties in Chinese fir plantation[J]. Sci Silvae Sin, 2019, 55(3): 1-12. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20190301.
- [41] 朱柱, 杨海龙, 黄乾, 等. 青海高寒黄土区典型水源涵养林健康评价[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(6): 1166-1173. ZHU Z, YANG H L, HUANG Q, et al. Health evaluation of typical water conservation forests in the alpine loess area of Qinghai[J]. J Zhejiang A F Univ, 2019, 36(6): 1166-1173. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.2019.06.014.
- [42] 安佳怡, 冯仲科, 马天天, 等. 基于GIS格网的重庆合川区森林火险等级区划[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(9): 91-101. AN J Y, FENG Z K, MA T T, et al. Zoning of forest fire risk levels in Hechuan District of Chongqing based on GIS grid[J]. J Cent South Univ For Technol, 2022, 42(9): 91-101. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2022.09.011.
- [43] 常旭, 邱新彩, 刘欣, 等. 塞罕坝华北落叶松纯林和混交林土壤肥力质量评价[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(8): 50-59. CHANG X, QIU X C, LIU X, et al. Soil fertility quality evaluation of pure and mixed *Larix principis-rupprechtii* forests in Saihanba, Hebei Province of northern China[J]. J Beijing For Univ, 2021, 43(8): 50-59. DOI: 10.12171/j.1000-1522.20210189.