网络出版时间:2026-02-04 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.08.007

基于林分现状的人工林稳定性评价方法
——以塞罕坝机械林场人工林为例

殷正,萨日娜,陈东升,赵中华
(林木资源高效生产全国重点实验室,国家林业和草原局林木培育重点实验室,中国林业科学研究院林业研究所,北京 100091)

[摘 要] 【目的】探讨人工林稳定性评价的指标体系和方法,提出人工林稳定性提升建议和对策,为人工林可持续管理提供科学依据。【方法】以塞罕坝机械林场人工林为例,分析林分现状,借鉴最优林分状态π值法则,从林分的结构、活力、森林火灾风险及病虫害风险等方面选择指标构建人工林稳定性评价指标体系,采用单位圆法评价林分的稳定性。【结果】塞罕坝人工林树种组成单一,林层结构简单,多为单层林,健康林木比例较高,直径分布呈近似正态分布或多峰态分布。北曼甸分场马达窝铺和千层板分场裤裆沟林分的分布格局为随机分布,其余均为均匀分布;三道河口分场窄道子和千层板分场头道沟近熟林林分的密度较低,其他林分密度适中;林分天然更新只有北曼甸分场二台子和冰郎沟林分达到了中等及以上标准,其他林分均更新不良;研究林分的火灾风险均较高。塞罕坝人工林稳定性(SAF)整体较差,8个林分中千层板分场裤裆沟、北曼甸分场二台子和马达窝铺林分的稳定性一般,其中北曼甸分场马达窝铺林分的稳定性最高,SAF值为0.433;三道河口分场2314-947、千层板分场头道沟中龄林和北曼甸分场冰郎沟林分的稳定性评价值在[0.20,0.35),稳定性较差;三道河口分场窄道子和千层板分场头道沟近熟林林分的稳定性最差,SAF值仅为0.188和0.182。【结论】基于林分现状的人工林稳定性评价指标体系和方法可表达林分现实状态特征的差异,指标计算简便,可操作性强,稳定性评价结果清晰、直观,可指导制定人工林稳定性提升经营策略。

[关键词] 人工林;林分现状;稳定性评价;经营策略;塞罕坝
[中图分类号] S725.7 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)08-0059-11

A stability evaluation method for plantations based on the current stand status
—— a case study of Saihanba Mechanical Forest Farm

YIN Zheng, Sarina, CHEN Dongsheng, ZHAO Zhonghua
(*State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry CAF, Beijing* 100091, *China*)

Abstract: 【Objective】 The study aimed to establish an indicator system and methodology for evaluating plantation stability, propose recommendations and strategies for enhancing stability, thereby providing a basis for the sustainable management of plantations. 【Method】 Through a case study of the plantations in Saihanba Mechanical Forest Farm, the current stand status were analyzed. Guided by the rule of π value for optimal stand status, an indicator system for evaluating plantation stability was constructed by selecting key indicators related to stand structure, vitality, forest fire risk, and pest and disease risk. The unit circle method was finally used to evaluate stand stability. 【Result】 The plantations in Saihanba were characterized by a monospecific composition

[收稿日期] 2025-06-16 [修回日期] 2025-07-25
[基金项目] 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2022ZB00103);国家自然科学基金面上项目(32171780)
[作者简介] 殷正(1994—),男,陕西汉中人,助理研究员,博士,主要从事森林经营理论与技术研究。E-mail:yinzh@caf.ac.cn
[通信作者] 赵中华(1976—),男,内蒙古巴彦淖尔人,研究员,博士,主要从事森林经营理论与技术研究。E-mail:zzhwl@caf.ac.cn

and a simplified predominantly single-layered structure. They exhibited a relatively high proportion of healthy trees, with the diameter distributions approximating a normal or multimodal pattern. Regarding spatial distribution, the spatial distribution pattern of stands in Madawopu (Beimandian sub-farm) and Kudanggou (Qiancengban sub-farm) was random, while others were uniformly distributed. The stand density was relatively low in Zhaidaozi (Sandaohekou sub-farm) and the near-mature forests in Toudaogou (Qiancengban sub-farm) whereas other stands exhibited moderate density. Natural regeneration met moderate or higher standards only in Ertaizi and Binglanggou (both in Beimandian sub-farm), with all other stands showing poor regeneration. Furthermore, all studied stands presented a relatively high fire risk. Overall, the stand stability of Saihanba plantations was poor. Among the eight stands, those in Kudanggou (Qiancengban sub-farm), Ertaizi, and Madawopu (both in Beimandian sub-farm) demonstrated moderate stability. The stand in Madawopu exhibited the highest stability, with a SAF value of 0.433. Stands in site 2314-947 (Sandaohekou sub-farm), the middle-aged forest in Toudaogou (Qiancengban sub-farm), and Binglanggou (Beimandian sub-farm) had stability evaluation values within the range of [0.20, 0.35), indicating poor stability. The stands in Zhaidaozi (Sandaohekou sub-farm) and the near-mature forests in Toudaogou (Qiancengban sub-farm) exhibited the poorest stability, with SAF values of 0.188 and 0.182.【Conclusion】The indicator system for stability evaluation and methodology developed based on the current stand status can effectively express differences in stand characteristics. These indicators are straightforward to calculate and highly practical, yielding stability evaluation results that are clear and intuitive. This approach can guide the formulation of management strategies to enhance plantation stability.

Key words: plantation; current stand status; stability evaluation; management strategy; Saihanba

人工林的大面积发展有效增加了森林面积和植被覆盖度,提高了生态系统的碳汇能力。但人工林的林层结构和树种组成单一,林木年龄、大小和分布格局均匀,营养结构相对简单[1-4],对火灾、病虫害等灾害的抵抗力较弱,群落稳定性较差[5-6]。群落稳定性与水碳平衡、气候调节、水源涵养等生态功能密切相关。森林群落稳定性的概念起源于20世纪50年代,起初主要认为天然林群落物种组成及种群大小保持恒定,即组成结构的稳定性[7-8]。20世纪70年代后,森林的稳定性逐渐转向功能的稳定性上来,研究稳定性的核心问题是如何判定森林生态系统的稳定性[9-10]。迄今为止,学者们针对森林生态系统稳定性提出了大量的评判方法,大致可以分为两类,一种是采用极大值标准化法,如灰色关联度法、层次分析法、稳定性指数法等[11-12];一种是固定指标范围的标准化法,如主成分分析法、隶属函数法等[13-14]。有关森林稳定性的评价指标主要从能够反映森林抵抗力、恢复力和持久性的指标中选择,包括林分生长状况、林分结构、物种多样性及更新能力、土壤理化性质、干扰状况及环境因素等方面,这些用于评价森林稳定性的指标多达上百个[15]。但不同研究者关注的重点不同,选择的指标差异较大,这导致评价结果的适用性较窄。这些森林稳定性评价方法的数据处理与计算过程相对复杂,均需要确定评价指标的权重,但主观赋权法和客观赋权法均存在一定的缺陷,不同学者赋权差异也较大,很难精准反映评价指标对稳定性维持的实际贡献,导致在指导人工林经营和稳定性提升过程中的针对性及实际可操作性较差。

人工林稳定性评价方法和指标与天然林大体上相同,但人工林生态系统的稳定性又有其自身的特点,其实质是人工林的可持续性[16]。实现人工林的可持续性是开展人工林稳定性评价的终极目标。因此要求人工林稳定性评价的方法简便,可操作性强,指标体系具有代表性、针对性和可比性,数据易于获取和量化,且在实践中可通过相应的经营措施改善人工林的稳定性。为此,本研究借鉴天然林最优林分状态π值法则和单位圆分析方法[17],从林分的结构、活力及灾害风险等级3个方面选择评价指标,探讨构建可操作性强且能够指导人工林经营的稳定性评价指标体系,并以我国塞罕坝机械林场主要人工林为例评价其稳定性,并提出提升人工林稳定性经营对策,以期为人工林可持续管理提供科学依据。

1 研究区概况

塞罕坝机械林场位于河北省承德市围场满族蒙古族自治县北部,地处内蒙古高原与华北平原的

过渡带，地理坐标为42°02′－42°36′ N，116°51′－117°39′ E。塞罕坝地势较为平坦，海拔高度在1 010～1 940 m，地貌类型以高原、丘陵和山地为主，土壤类型主要为灰色森林土和棕壤土；属于寒温带大陆性季风气候，冬季寒冷漫长，夏季凉爽短促；年平均气温为－1.5 ℃，年降水量约为460 mm，无霜期为60～80 d。塞罕坝在历史上曾是皇家猎场，清朝时期被称为“木兰围场”。20世纪初由于过度放牧和砍伐，塞罕坝的生态环境严重退化，成为一片荒漠。1962年国家在塞罕坝建立机械林场，开始了以华北落叶松（*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*（Mayr）Pilg.）、樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongholica* Litv.）、油松（*Pinus tabuliformis* Carrière）、云杉（*Picea asperata* Mast.）等树种为主的大规模植树造林，目前已建成我国最大的人工林区，生态环境得到了显著改善，森林覆盖率从最初的11.4％提高到现在的80％以上。

2　研究方法

2.1　样地设置和调查

2023年8月采用全站仪在塞罕坝机械林场建立了8个定位监测样地，分别位于三道河口分场2314林班947小班（30 m×120 m），三道河口分场窄道子林班2号小班（30 m×60 m），北曼甸分场马达窝铺、二台子和冰郎沟林班（50 m×50 m），千层板分场头道沟和裤裆沟林班（50 m×50 m）。记录样地经纬度、海拔、坡度等，对样地内胸径（树干1.3 m处直径）大于5 cm的林木进行定位挂牌，记录树种、胸径、树高、冠幅、更新状况、林木健康等基本信息。试验样地及林木概况见表1。

表1　试验样地及林木概况

Table 1　Basic information of experimental plots and trees

样地编号 Plot number	样地小地名 Plot	坡度/(°) Slope	海拔/m Altitude	树种 Tree species	林龄 Forest age	林分密度/(株·hm^{-2}) Stand density	平均胸径/cm Average DBH	平均树高/m Average height	胸高断面积/m^2 Basal area
1	三道河口2314-947 Sandaohekou 2314-947	4	1 471	樟子松 *Pinus sylvestris*	中龄林 Middle-aged forest	1 469	18.3	13.4	38.80
2	三道河口-窄道子 Sandaohekou-Zhaidaozi	4	1 492	樟子松 *Pinus sylvestris*	中龄林 Middle-aged forest	1 211	18.9	14.7	38.56
3	北曼甸-马达窝铺 Beimandian-Madawopu	3	1 629	华北落叶松 *Larix gmelinii*	中龄林 Middle-aged forest	1 557	16.1	11.5	32.82
4	千层板-裤裆沟 Qiancengban-Kudanggou	3	1 510	华北落叶松 *Larix gmelinii*	中龄林 Middle-aged forest	1 074	17.5	12.8	25.89
5	千层板-头道沟(1) Qiancengban-Toudaogou(1)	16	1 645	华北落叶松 *Larix gmelinii*	中龄林 Middle-aged forest	760	16.6	12.0	16.48
6	北曼甸-二台子 Beimandian-Ertaizi	1	1 672	华北落叶松 *Larix gmelinii*	近熟林 Near-mature forest	469	25.5	17.1	23.62
7	北曼甸-冰郎沟 Beimandian-Binglanggou	6	1 701	华北落叶松 *Larix gmelinii*	近熟林 Near-mature forest	565	20.8	13.6	19.15
8	千层板-头道沟(2) Qiancengban-Toudaogou(2)	26	1 760	华北落叶松 *Larix gmelinii*	近熟林 Near-mature forest	427	24.8	22.11	22.11

2.2　人工林稳定性评价方法

2.2.1　稳定性评价指标　森林生态系统的稳定性一般从反映系统的抵抗力、恢复力和持久性等3个方面选择指标进行评价[8]。人工林生态系统的不稳定性主要是由于其生物学上的不稳定性造成的[6]。通过科学的经营管理措施，减少人工林生物学上的不稳定性，是实现人工林可持续发展的根本途径。惠刚盈等[17-18]提出了天然林最优林分状态的π值法则。该方法是参照健康稳定森林生态系统结构和活力等自然属性的普遍规律，对林分的价值或优劣进行评判比较，能够为森林经营决策提供科学依据。本研究开展人工林稳定性评价时借鉴这一方法。由于人工林和天然林在形成过程、结构、功能和管理方式等方面存在显著差异，因此在评价指标的选择和取值标准方面不能完全套用天然林的评价指标和标准。此外天然林林分状态评价方法中，未将自然灾害风险纳入稳定性的评价指标体系中。本研究将从林分的结构、活力及灾害风险等级等方面选择指标，构建人工林稳定性评价指标。其中林分结构指标包括垂直结构、水平结构、径级结构、林分多样性、林分密度等方面；林分活力从林分更新、林木健康、林分长势等方面反映；自然灾害风险包

括森林火灾风险和病虫害风险,用来表达人工林抵御自然灾害的能力。这些指标一方面能够反映林分的现实状态,另一方面在经营管理中具有一定的可操作性。具体指标体系如图1所示。

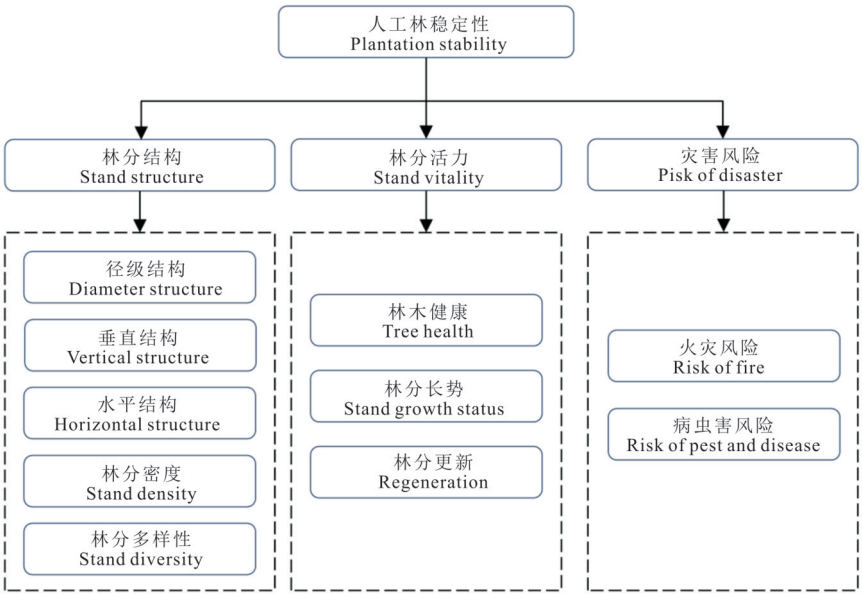


图1 人工林稳定性评价指标体系

Fig. 1 Indicator system for evaluating plantation stability

2.2.2 稳定性评价指标取值标准 评价人工林稳定性的指标既有定性指标也有定量指标,且每个指标的取值和单位差异很大。所以首先要对评价指标进行赋值、标准化和正向处理(数值越大越好),使其变成[0,1]的无量纲数值。

林分径级结构是森林生态系统结构和功能的重要指标,直接反映了林分的生长动态、竞争关系以及生态系统的稳定性。稳定的天然林生态系统的径级分布一般呈倒"J"形分布[19],即存在大量幼树和小径木,具备自我更新能力,同时随着径级增大,林木数量减少。由于人工林大多是同龄林,未受到干扰的人工林直径结构近似遵从正态分布,而受到干扰或管理不当的人工林的直径结构一般为单峰左偏或右偏或者为多峰状分布[18]。本研究将人工林是否具有一定的自我更新能力作为其稳定性评判的重要标准,因此人工林的直径结构呈倒"J"型或接近倒"J"型分布的林分赋值为1,近似正态分布、单峰左偏或多峰状分布赋值为0.5,单峰右偏赋值为0。

林分垂直结构是森林资源调查和生态系统研究的重要内容,一般用林层来表达。林层的划分有多种方法,国际林联(IUFRO)的划分标准以林分优势高为依据将林分划分为3层,但对于人工林而言,按这一标准划分一般都是单层林。本研究以林分优势高和林木株数来划分林层,即低于优势高5 m至10 m且株数≥10%则划分为一个林层,低于优势高10 m及以上且株数≥10%划分为另一个林层,将林层数≥3赋值为1,林层数2赋值为0.5,林层数1赋值为0。

林分水平结构是林木在水平空间上的分布特征,反映了林木之间的空间关系、种间竞争以及环境因子的影响,可用点格局法(Ripley's)、最近邻体法、样方法或角尺度法表达[20-21]。将林木水平分布格局随机分布赋值1,聚集分布赋值0.5,均匀分布赋值0。

林分密度与稳定性之间一般呈现倒"U"形曲线关系,密度过大林木间竞争激烈,可能导致资源(如光照、水分、养分等)分配不均;密度较小则对资源利用效率较低,影响生态系统整体的生产力。合理的密度可以提高资源利用效率,增强抗干扰能力,维持生物多样性,从而提升生态系统的稳定性。林分密度通过林分拥挤度(K)描述[22]。林分拥挤度在[0.9,1.1],林分密度适中,赋值1;$K>1.1$则林分密度较小,$K<0.9$则林分密度过大,均赋值0。林分拥挤度(K)用林木平均距离与平均冠幅的比值表示,计算公式如下:

$$K=L/CW。\tag{1}$$

式中:L为林分中林木平均距离,CW为平均冠幅。

人工林多样性是维持生态系统稳定性、提高生产力和增强抗干扰能力的重要因素。由于人工林

的乔木层大多是单一树种组成，乔木层的多样性极低。本研究通过林分多层次多样性加权法来表达林分多样性，即分别计算乔木层、灌木层和草本层的 Simpson 指数，用不同层次的 Simpson 指数值乘以其权重后相加，其中乔木层权重为 40%，灌木层和草本层权重均为 30%，林分多样性综合值处于[0，1]，其值越大表明林分越稳定。

林分活力是评估森林生态系统健康与可持续性的重要指标，通常是林分生长能力、更新潜力、抗干扰能力及生态功能的综合体现。本研究从林分更新、林木健康、林分长势 3 个方面选择指标来表达。林木健康采用健康林木的比例来表达。健康林木定义为生长健壮，无断梢、弯曲、空心的现象，未受到病虫害的侵扰[17]：当健康林木的比例≥ 90% 时，认为林分整体健康，赋值为 1；当健康林木的比例在[85%，90%)，赋值为 0.5；当健康林木的比例＜85% 时，赋值为 0。林分长势通过林分优势度或林分潜在疏密度表达[23]，林分优势度通常在[0，1]，其值越大越好。林分更新按照《森林资源规划设计调查技术规程》(GB/T 26424－2010)相关标准来评价[24]，即以苗高≥30 cm 的幼苗数量来衡量，幼苗密度＞3 000 株/hm^2，表示更新良好，赋值 1；幼苗密度在 1 000～3 000 株/hm^2，表示更新中等，赋值 0.5；幼苗密度＜1 000 株/hm^2，表示更新不良，赋值 0。

森林火灾风险等级是根据气象条件、可燃物状态和火源风险等因素综合评估的指标，用于衡量森林火灾发生的可能性和蔓延的难易程度。本研究采用丁永全等[25]基于可燃物特征的人工林小班森林火险区划方法中的综合火险等级来评价。该方法将综合火险等级划分为 5 级，即极高火险(Ⅴ$_z$)、高火险(Ⅳ$_z$)、较高火险(Ⅲ$_z$)、较低火险(Ⅱ$_z$)和低火险(Ⅰ$_z$)，分别赋值 5，4，3，2 和 1，并将其转化为[0，1]的正向指标，计算公式见式(2)。森林病虫害风险等级是根据病虫害的发生概率、扩散潜力、危害程度及环境条件等因素，对森林生态系统可能面临的威胁进行量化评估的分类体系，一般分为 5 级，即高风险(Ⅴ)、较高风险(Ⅳ)、中风险(Ⅲ)、较低风险(Ⅱ)和低风险(Ⅰ)。本研究按照病虫害风险等级分别赋值 5，4，3，2，1，并将其值转化为[0，1]的正向指标，计算公式见式(3)。

$$F_d = 1 - \frac{F_z - 1}{4}。\tag{2}$$

式中：F_d为火险等级，其值越大发生火险的可能性越低；F_z为综合火险赋值。

$$\mathrm{DP} = 1 - \frac{V_i - 1}{4}。\tag{3}$$

式中：DP 为火险等级，其值越大发生病虫害的可能性越低；V_i为病虫害风险赋值。

2.2.3　人工林稳定性评价方法　将人工林稳定性定义为 SAF，林分状态评价时参考单位圆分析方法和 π 值法则[17]。根据单位圆分析方法和 π 值法则，表达人工林稳定性的各指标取值将会形成由不同半径扇区构成的图形，该图形的面积最大值为 π，最小值为 0。现实林分状态值与最优林分状态值之比即对人工林稳定性的相对测度。SAF 计算方法如下：

$$\mathrm{SAF} = \sum_{k=1}^{m} \frac{\pi R_k^2}{m} \Big/ \pi R^2 = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m} R_k^2。\tag{4}$$

式中：SAF 为人工林的稳定性；m 为指标个数($m \geq 1$)；R_k为第 k 个指标值；R 为单位圆的半径，其值为 1。SAF 值在[0，1.00]，其值越大表明稳定性越高，其中 SAF∈[0.65，1.00]表示稳定性极佳，SAF∈[0.50，0.65)表示稳定性良好，SAF∈[0.35，0.50)表示稳定性一般，SAF∈[0.20，0.35)表示稳定性较差，SAF∈[0，0.20)表示稳定性极差。

3　结果与分析

3.1　塞罕坝人工林林分现状特征

人工林林分结构和活力特征结果见表 2。由表 2 可以看出，北曼甸分场马达窝铺、千层板分场头道沟中龄林和三道河口分场 2314-947 林分表现出正态分布，三道河口分场窄道子和北曼甸分场二台子林分为多峰状分布，千层板分场裤裆沟林分为左偏分布，而其他 2 个林分则表现出右偏的分布特征。中龄林中除三道河口分场 2314-947 林分外，其他均为多层林，而所有近熟林的林层特征都表现为单层林。北曼甸分场马达窝铺和千层板分场裤裆沟林分平均角尺度值分别为 0.485 和 0.490，在[0.475，0.517]，属于随机分布，而其他林分的角尺度值均小于 0.475，属于均匀分布。大多数林分的拥挤度值在[0.9，1.1]，林木处于刚刚郁闭或即将郁闭的状态，只有三道河口分场窄道子和千层板分场头道沟近熟林林分拥挤度值较大，分别为 1.40 和 1.30，表明林木间的平均距离大于平均冠幅。所有林分中灌木和草本层的多样性较低，Simpson 指数值在 0.316～0.489，总体上表现为近熟林的灌木和草本层的多样性高于中龄林。林分活力指标中，各林分的健康林木比例较高，都达到了 90% 以上，潜在疏

密度在0.427~0.635,近熟林的潜在疏密度较中龄林大。北曼甸分场二台子和冰郎沟林分的林下苗高≥30 cm的更新幼苗株数相对较多,分别达到了3 150和2 450株/hm^2,其余林分苗高≥30 cm的更新幼苗株数均不足800株/hm^2,更新较差。

表2 塞罕坝人工林的林分结构和活力特征

Table 2 Stand structure and vitality characteristics of Saihanba plantations

样地编号 Plot number	直径分布 Diameter distribution	林层数 Number of forest layers	角尺度(W) Uniform angle index	林分拥挤度(K) Stand crowding degree	林分多样性 Stand diversity	健康林木比例/% Healthy tree proportion	潜在疏密度 Potential density	林分更新/(株·hm^{-2}) Regeneration
1	正态 Normal	1	0.454	1.10	0.316	92.1	0.536	320
2	多峰状 Multimodal	2	0.456	1.40	0.327	94.5	0.459	289
3	正态 Normal	2	0.485	1.01	0.445	96.4	0.561	100
4	左偏 Left-skewed	2	0.490	1.08	0.393	94.5	0.473	450
5	正态 Normal	2	0.465	1.05	0.415	92.8	0.427	775
6	多峰状 Multimodal	1	0.460	0.93	0.436	93.1	0.635	3 150
7	右偏 Right-skewed	1	0.464	1.09	0.489	94.2	0.541	2 450
8	右偏 Right-skewed	1	0.461	1.30	0.411	91.6	0.584	450

3.2 塞罕坝人工林森林火险和病虫害风险等级

根据丁永全等[25]的研究结果和样地位置,北曼甸分场马达窝铺、二台子和冰郎沟林分的综合火险等级为Ⅳ$_z$,属于高火险等级;千层板分场头道沟和裤裆沟林分的综合火险等级也为Ⅳ$_z$,属于高火险等级;而三道河口分场2314-947和窄道子林分的综合火险等级为Ⅴ$_z$,为极高火险等级。塞罕坝林场主要的病虫害类型有樟子松叶枯病、红斑病,落叶松八齿小蠹、红脂大小蠹、松毛虫、松尺蛾等。根据塞罕坝林区历史病虫害发生情况,林区整体为中风险区[26]。本研究结合林区近年病虫害发生的区域及样地树种组成、所处位置和交通状况等因素,将三道河口分场2314-947和窄道子林分病虫害发生风险评定为较高风险(Ⅳ),千层板分场头道沟和裤裆沟林分,北曼甸分场马达窝铺、二台子和冰郎沟林分病虫害发生风险评定为中风险(Ⅲ)。

3.3 塞罕坝人工林稳定性评价

按照本研究中提出的人工林稳定性评价指标取值标准,对塞罕坝8个人工林林分的结构、活力、火灾风险及病虫害风险等指标按照取值标准进行赋值,计算林分稳定性综合值,并采用单位圆方法绘制林分稳定性图,结果见表3和图2。

表3 塞罕坝人工林林分稳定性评价指标取值

Table 3 Values of stand stability evaluation indicators of Saihanba plantations

样地编号 Plot number	直径分布 Diameter distribution	林层数 Number of forest layers	角尺度(W) Uniform angle index	林分拥挤度(K) Stand crowding degree	林分多样性 Stand diversity	健康林木比例 Healthy tree proportion	潜在疏密度 Potential density	林分更新 Regeneration	火灾风险 Risk of fire	病虫害风险 Risk of pest and disease
1	0.5	0	0	1	0.316	1	0.536	0	0	0.25
2	0.5	0.5	0	0	0.327	1	0.459	0	0	0.25
3	0.5	0.5	1	1	0.445	1	0.561	0	0.25	0.5
4	0.5	0.5	1	1	0.393	1	0.473	0	0.25	0.5
5	0.5	0.5	0	1	0.415	1	0.427	0	0.25	0.5
6	0.5	0	0	1	0.436	1	0.635	1	0.25	0.5
7	0	0	0	1	0.489	1	0.541	0.5	0.25	0.5
8	0	0	0	0	0.411	1	0.584	0	0.25	0.5

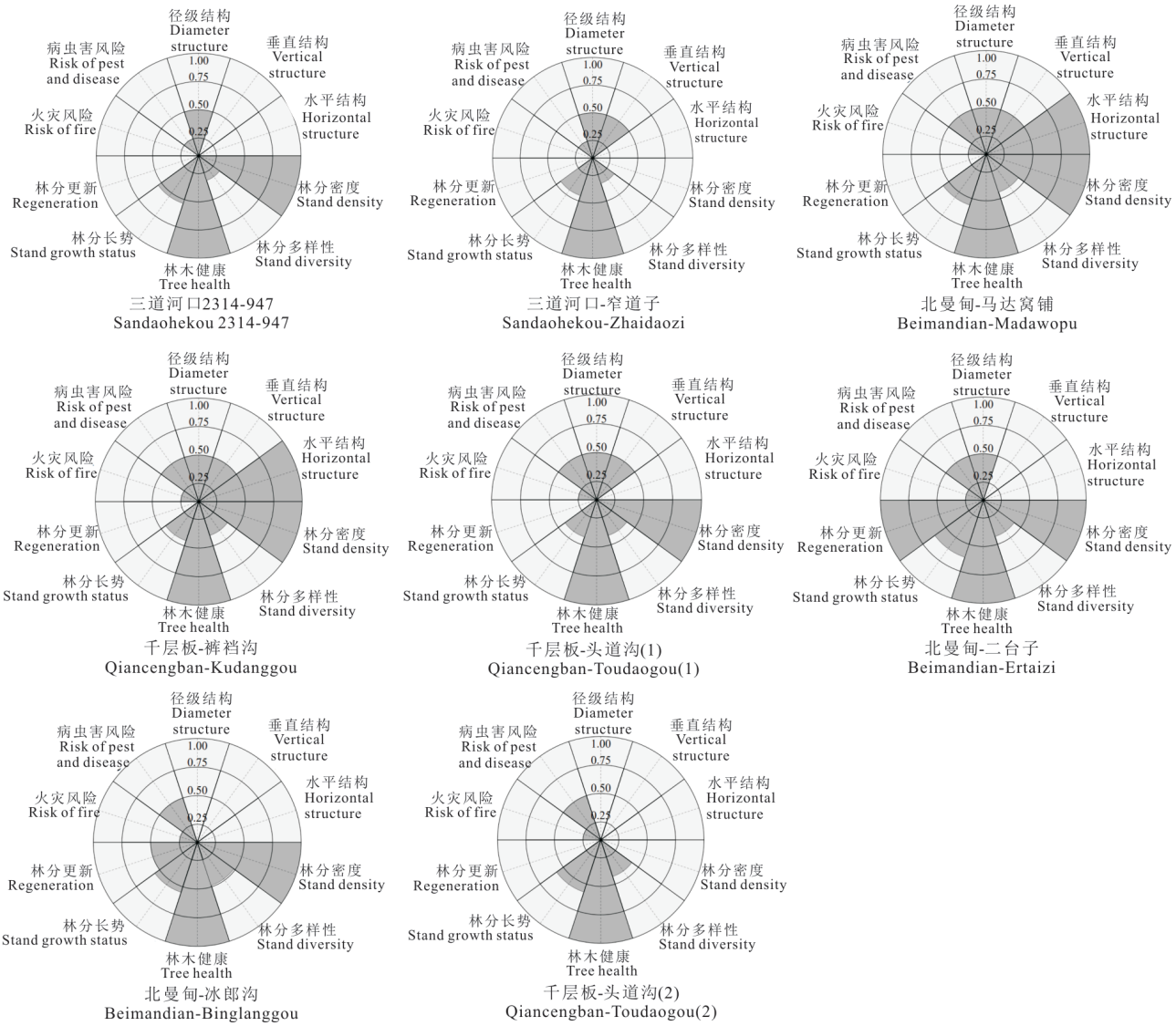


图 2　塞罕坝人工林林分稳定性综合评价

Fig. 2　Comprehensive evaluation of stand stability in Saihanba plantations

由表 3 可以看出，在 8 个林分中，6 个林分的直径分布指标取值为 0.5，2 个取值为 0，均未达到稳定性林分的取值标准。三道河口分场窄道子、北曼甸分场马达窝铺、千层板分场裤裆沟和头道沟中龄林林分可认为是复层林，其余林分均为单层林。人工林在造林时，考虑到施工的便利性及集约化经营的需求，通常将林木按固定行距、株距种植，形成规则分布的格局。因此绝大多数人工林的林木分布格局为均匀分布，同时人为干预和自然因素作用也会导致分布格局趋于随机或聚集分布。研究中的 8 个林分，有 6 个林分的分布格局为均匀分布，而北曼甸分场马达窝铺和千层板分场裤裆沟林分的分布格局为随机分布，这可能是抚育间伐所导致。三道河口分场窄道子和千层板分场头道沟近熟林林分的林木拥挤程度指标取值为 0，其 K 值大于 1.1，说明林分的密度较低，林木稀疏，其他林分密度适中。所有林分健康林木的比例均达到了取值标准，而林分更新只有北曼甸分场二台子和冰郎沟林分达到中等及以上标准。8 个林分的火灾风险等级取值均较低，而病虫害风险等级仅三道河口分场的 2 个林分取值较低。

林分稳定性综合评价结果（图 2）表明，塞罕坝人工林整体的稳定性较差，8 个林分中，SAF 最高的是北曼甸分场马达窝铺林分，其值为 0.433，该林分的评价指标中水平结构、林分密度及健康林木比例均达到了稳定性极佳的标准，但林分整体仍属于稳定性一般等级。千层板分场裤裆沟和北曼甸分场二台子林分的 SAF 值分别为 0.419 和 0.416，稳定

性也属于一般等级。三道河口分场2314-947、千层板分场头道沟中龄林和北曼甸分场冰郎沟林分稳定性较差,SAF值在[0.20,0.35),这3个林分的林分密度和健康林木比例部分达到稳定性标准,其他指标均不满足稳定性林分要求。三道河口分场窄道子和千层板分场头道沟近熟林林分的SAF值分别仅为0.188和0.182,稳定性极差。总体而言,塞罕坝林场的人工林稳定性相对较差,要通过采取综合措施提升林分的稳定性。

4 讨 论

人工林的稳定性是生态系统健康与可持续经营的核心指标,需从多维度进行综合评价,以反映其生态韧性、抗干扰能力及可持续经营潜力。长期以来,国内外学者从不同角度,采用不同方法和指标探讨了森林群落或生态系统的稳定性,但尚未形成统一的认识[8,16,27]。林分现状分析是森林资源管理与生态保护的核心基础工作,其通过对林分结构、功能、健康状况及环境影响的系统性评估,为科学经营决策和生态修复提供关键依据。本研究基于塞罕坝林场人工林林分现状,从林分结构、活力两个方面选择反映林分现状的指标,同时考虑了人工林火灾风险和病虫害风险来评价人工林的稳定性。本研究中,反映林分现状的指标基本涵盖了林分的结构和功能的多个方面,而且这些指标从经营管理上对提升人工林的稳定性具有一定的可操作性,这也符合开展人工林稳定性评价研究的目的。

在林分结构指标中,直径分布结构作为最基本的林分结构,是森林经营管理的重要依据。对于人工林而言,在抚育间伐时应根据林分直径分布特征,保持稳定正态分布,避免出现径级缺失或偏峰分布,同时要及时采取人工措施促进天然更新,增加幼苗、幼树的数量,保持林分的持续性,如北曼甸分场冰郎沟和千层板分场头道沟近熟林林分,亟须通过综合措施进行补植补造,引入乡土树种,增加林分的自我更新能力。对于大多数人工林而言,林木分布格局都属于均匀分布。本研究中,除北曼甸分场马达窝铺和千层板分场裤裆沟林分为随机分布外,其他林分均为均匀分布,在经营中可以采用结构化森林经营方法,针对培育对象调整其相邻木的分布,增加林分中随机结构体的比例,从而逐渐使人工林的林木分布从均匀分布向随机分布转变,有利于资源分配,增加林分的稳定性[28-29]。对于多样性而言,将树种单一的人工林逐渐改造成多树种混交林是提升人工林稳定性的一个重要方向[30-31]。本研究中,塞罕坝人工林多样性普遍偏低,可以通过人工补植其他乡土树种、人工促进天然更新等提升多样性的重要措施,提升林分的树种多样性,同时也能逐渐改变林分的林层结构,最终可形成多树种混交异龄林。林分密度是森林经营管理中能够有效控制的因子[32-33]。在实践中,对于密度较大的林分,可通过抚育间伐来降低密度,但如何精准控制采伐强度是经常遇到的一个问题。用林分中林木的平均距离与平均冠幅的比值来判断林分密度是否合理,在调整密度时可采用结构化森林经营中的密集度指标指导采伐木选择[18,22]。对于密度较低的林分,则要通过在林中空地中补植、促进天然更新等措施增加林地空间的利用率。

在林分活力指标中,人工林的天然更新不足是一个共性的问题,特别是针叶纯林,由于在林下形成分解缓慢的枯枝落叶层,种子萌发后根系很难接触到土壤,大多数幼苗在短期内死亡,很难形成有效的更新层[34-35]。在本研究中,所涉及的8个林分中,如果按照《森林资源规划设计调查技术规程》(GB/T 26424—2010)对更新等级的划分,林分中树高小于30 cm的幼苗完全符合更新良好的标准,甚至达到了每公顷上万株,但林分中树高大于30 cm的幼苗却很少,因此将更新树高大于30 cm的株数作为评判更新的标准,这样更加符合林分的现实状况。本研究中所涉及的8个林分,均存在林下更新困难的问题,主要原因是天然下种后难以接触到土壤,经营中可通过清理枯落物层及局部翻耕等措施增加种子与土壤接触机会,提升有效更新层的形成;此外,还可以通过人工补植补种乡土树种来提高林分更新。

本研究在评价稳定性时还考虑了火灾风险和病虫害风险对稳定性的影响。火灾风险一般基于大空间尺度的气候、地形、植被类型等进行区划,对区域或国家层面火灾风险具有指导意义。本研究中火灾风险等级采用丁永全等[25]的区划方法,结果表明,塞罕坝林场综合火险极高等级($Ⅴ_z$)区域面积占比达19.13%,较高以上等级($Ⅲ_z$、$Ⅳ_z$、$Ⅴ_z$)区域面积总计占比为76.32%,主要分布于林场西部、南部和中部。在对人工林的经营管理中,重点要针对可燃物进行管理,如林缘易燃物清理、修枝、林下割灌割草等,通过降低森林易燃性而降低森林被引燃

的概率[36-37]。针对病虫害风险，本研究根据林区病虫害综合风险、近年病虫害的发生情况、林地树种组成等因素进行了初步判定，未来还需要对林区有害病虫的种类、虫口密度、潜在传播风险、监测和预防措施等多个因素进行调查和综合评价，进一步提升病虫害风险评估的准确性。

综上所述，针对本研究的8个林分提出以下经营建议。北曼甸分场马达窝铺和千层板分场裤裆沟林分可通过割灌除草、清理枯落物层、局部翻耕等措施促进天然更新；加强可燃物管理以降低火灾风险；在抚育间伐时调整直径结构，并通过补植其他乡土树种提升林分多样性，形成复层异龄林。北曼甸分场二台子林分在经营中可采用结构化森林经营方法，增加林分中随机体比例，促使其向随机分布转变；补植其他乡土树种，提升林分多样性，优化林层结构；通过可燃物管理降低易燃性，加强病虫害监测，提升病虫害风险评估的准确性。三道河口分场2314-947林分可通过结构化森林经营方法调整林分结构；补植其他乡土树种提升林分多样性和增加林层数；采取人工措施促进天然更新，形成更新层；加强可燃物管理和病虫害监测，降低自然灾害风险。千层板分场头道沟中龄林林分可通过结构化森林经营方法调整林分结构，促进林分生长；在抚育间伐时调整直径结构，补植其他乡土树种提升林分多样性和增加林层数；采取人工措施促进天然更新，形成更新层；加强可燃物管理和病虫害监测，降低自然灾害风险。北曼甸分场冰郎沟林分亟须通过结构化森林经营方法增加随机体比例，调整林分垂直结构和直径分布；同时补植其他乡土树种，促进形成复层异龄林。三道河口分场窄道子和千层板分场头道沟近熟林林分的稳定性极差，应在通过结构化森林经营方法调整林分结构的同时调整直径分布；通过补植增加林分密度，提高林分多样性，增加林层数；通过割灌除草、局部翻耕等措施促进天然更新；加强可燃物管理，降低火灾风险。

5　结　论

本研究从林分的结构、活力、森林火险等级及病虫害风险等级等方面选择指标，构建了基于林分现状的人工林稳定性评价指标体系，并借鉴天然林林分状态最优π法则，提出了人工林稳定性评价方法，并以塞罕坝典型人工林类型为例，评价了林分的稳定性。该方法选择的指标既可表达林分现实状态特征的差异，也可指导制定人工林稳定性提升经营策略，稳定性评价结果清晰、直观，评价指标计算简便，容易获取，可操作性强，对人工林稳定性提升和实现森林可持续经营具有一定的指导意义。

[参考文献]

[1] 陈幸良，巨茜，林昆仑. 中国人工林发展现状、问题与对策[J]. 世界林业研究，2014，27(6)：54-59.
CHEN X L，JU Q，LIN K L. Development status，issues and countermeasures of China's plantation[J]. World Forestry Research，2014，27(6)：54-59.

[2] 郝天象，王兵，牛香，等. 全面提升我国森林生态系统质量和稳定性的实践与思考[J]. 陆地生态系统与保护学报，2022(5)：13-31.
HAO T X，WANG B，NIU X，et al. Practice and thinking of comprehensively improving the quality and stability of forest ecosystem in China[J]. Terrestrial Ecosystem and Conservation，2022(5)：13-31.

[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 Ecologica Sinica，2018，38(1)：1-10.

[4] 朱教君，张金鑫. 关于人工林可持续经营的思考[J]. 科学，2016，68(4)：37-40，63.
ZHU J J，ZHANG J X. Thoughts on sustainable management of plantation[J]. Science，2016，68(4)：37-40，63.

[5] 盛炜彤. 我国人工林生产力长期保持问题[J]. 林业科技管理，1999(3)：20-23.
SHENG W T. Long-term maintenance of plantation productivity in China[J]. Wetland Science & Management，1999(3)：20-23.

[6] 盛炜彤. 人工林的生物学稳定性与可持续经营[J]. 世界林业研究，2001，14(6)：14-21.
SHENG W T. The relationship between biological stability and sustainable management of plantation[J]. World Forestry Research，2001，14(6)：14-21.

[7] CLEMENTS F E. Nature and structure of the climax[J]. Journal of Ecology，1936，24(1)：252-284.

[8] PIMM S L. The complexity and stability of ecosystems[J]. Nature，1984，307(5949)：321-326.

[9] DE ANGELIS D L. Stability and connectance in food web models[J]. Ecology，1975，56(1)：238-243.

[10] 郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探[J]. 林业科学，2000，36(5)：28-32.
ZHENG Y R. Comparison of methods for studying stability of forest community[J]. Scientia Silvae Sinicae，2000，36(5)：28-32.

[11] SAATY T L. The analytic hierarchy process[M]. New York, London:McGraw-Hill International Book Co.,1980.

[12] 马姜明. 元谋干热河谷地区人工林稳定性及人工生态系统管理的研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2004.
MA J M. Study on the stability of plantation and the management of artificial ecosystem in Yuanmou dry hot valley[D]. Beijing:Chinese Academy of Forestry,2004.

[13] 郭连金. 黄土丘陵区沙棘和小叶杨人工林群落稳定性研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2005.
GUO L J. Study on the community stability of *Hippophae rhamnoide* and *Populus simonii* plantations in hilly-gully region of Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University,2005.

[14] 张明霞,王得祥,彭舜磊,等. 秦岭松栎混交林群落的稳定性[J]. 生态学报,2015,35(8):2564-2573.
ZHANG M X,WANG D X,PENG S L,et al. Community stability analysis for the oak-pine mixed forest in Qinling Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(8):2564-2573.

[15] 周超凡. 基于六种方法的黄龙山林区油松人工林稳定性综合评价研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.
ZHOU C F. Comprehensive evaluation of stability of *Pinus tabuliformis* plantation in Huanglongshan Mountain based on six methods[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University,2018.

[16] 马姜明,李昆. 森林生态系统稳定性研究的现状与趋势[J]. 世界林业研究,2004,17(1):15-19.
MA J M,LI K. Current situation of research and prospects on forest ecosystem stability[J]. World Forestry Research,2004,17(1):15-19.

[17] 惠刚盈,张弓乔,赵中华,等. 天然混交林最优林分状态的π值法则[J]. 林业科学,2016,52(5):1-8.
HUI G Y,ZHANG G Q,ZHAO Z H,et al. π-value rule of optimal stand state of natural mixed forest[J]. Scientia Silvae Sinicae,2016,52(5):1-8.

[18] 惠刚盈,赵中华,张弓乔,等. 结构化森林经营理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2020.
HUI G Y,ZHAO Z H,ZHANG G Q,et al. Theory and practice of structure-based forest management[M]. Beijing: Science Press,2020.

[19] MEYER H A. Structure, growth, and drain in balanced uneven-aged forests[J]. Journal of Forestry,1952,50(2):85-92.

[20] RIPLEY B D. Modelling spatial patterns[J]. Journal of the Royal Statistical Society:Series B (Methodological),1977,39(2):172-192.

[21] 惠刚盈. 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.
HUI G Y. Angular scale-a structural parameter describing the individual distribution pattern of forest trees[J]. Scientia Silvae Sinicae,1999,35(1):37-42.

[22] 惠刚盈,张连金,胡艳波,等. 林分拥挤度及其应用[J]. 北京林业大学学报,2016,38(10):1-6.
HUI G Y,ZHANG L J,HU Y B,et al. Stand crowding degree and its application[J]. Journal of Beijing Forestry University,2016,38(10):1-6.

[23] 刘瑞红,惠刚盈,张岗岗,等. 用潜在疏密度评价林分长势[J]. 北京林业大学学报,2019,41(8):13-18.
LIU R H,HUI G Y,ZHANG G G,et al. Evaluating stand growth state by potential density of stocking[J]. Journal of Beijing Forestry University,2019,41(8):13-18.

[24] 国家林业局调查规划设计院. 森林资源规划设计调查技术规程:GB/T 26424—2010[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2011.
Academy of Inventory and Planning of National Forestry Administration. Technical regulations for inventory for forest management planning and design: GB/T 26424—2010[S]. Beijing:General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China,2011.

[25] 丁永全,李笑笑,赵凤君,等. 基于可燃物特征的塞罕坝林场人工林小班森林火险区划[J]. 林业科学,2024,60(11):107-118.
DING Y Q,LI X X,ZHAO F J,et al. Forest fire risk zoning of artificial forest subcompartment in Saihanba forest farm based on fuel characteristics[J]. Scientia Silvae Sinicae,2024,60(11):107-118.

[26] 毕华明,韩阳,李硕. 影响塞罕坝机械林场林业有害生物发生的气候因子及测报[J]. 中国森林病虫,2013,32(1):24-26.
BI H M, HAN Y, LI S. Climate factors influencing the forest pests in Saihanba Machinery Forest Farm and the forecast of the pests[J]. Forest Pest and Disease,2013,32(1):24-26.

[27] SANKARAN M,MCNAUGHTON S J. Determinants of biodiversity regulate compositional stability of communities[J]. Nature,1999,401(6754):691-693.

[28] HUI G Y,WANG Y,ZHANG G Q,et al. A novel approach for assessing the neighborhood competition in two different aged forests[J]. Forest Ecology and Management,2018,422:49-58.

[29] 惠刚盈,赵中华,张弓乔,等. 基于角尺度的随机体在森林稳定性维持中的作用[J]. 林业科学,2021,57(2):22-30.
HUI G Y,ZHAO Z H,ZHANG G Q,et al. The role of random body based on angular scale in maintaining forest stability[J]. Scientia Silvae Sinicae,2021,57(2):22-30.

[30] 康希睿,李晓刚,张涵丹,等. 不同混交措施下杉木人工林群落稳定性特征[J]. 生态学杂志,2020,39(9):2912-2920.
KANG X R,LI X G,ZHANG H D,et al. Community stability characteristics of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different mixing measures[J]. Chinese Journal of Ecology,2020,39(9):2912-2920.

[31] 杨瑞,赵鹏祥,李卫忠,等. 基于π值法则的油松人工林稳定性与空间结构关联性研究[J]. 中南林业科技大学学报,2020,40(5):95-103.
YANG R,ZHAO P X,LI W Z,et al. Research on relationship between stability and spatial structure of Chinese pine plantation based on rule of π value[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2020,40(5):95-103.

[32] ORMAN O, WRZESIŃSKI P, DOBROWOLSKA D, et al. Regeneration growth and crown architecture of European beech and silver fir depend on gap characteristics and light gradient in the mixed montane old-growth stands[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 482: 118866.

[33] 刘建中，曾素平，王书韧，等. 密度调控对杉木人工林及套种阔叶树生长的影响[J]. 安徽农学通报，2023，29(13)：71-77.
LIU J Z, ZENG S P, WANG S R, et al. Effects of density regulation on the growth of *Cunninghamia lanceolata* plantation and interplanted broadleaved trees[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2023, 29(13): 71-77.

[34] MIGLÉCZ T, TÓTHMÉRÉSZ B, VALKÓ O, et al. Effects of litter on seedling establishment: an indoor experiment with short-lived *Brassicaceae* species[J]. Plant Ecology, 2013, 214(2): 189-193.

[35] 赵冲，蔡一冰，黄晓，等. 杉木凋落物覆盖对自身幼苗出土和早期生长的影响[J]. 应用生态学报，2019，30(2)：481-488.
ZHAO C, CAI Y B, HUANG X, et al. Effects of Chinese fir litter cover on its seedling emergence and early growth[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 481-488.

[36] 高敏，任云卯，周晓东，等. 抚育间伐对西山林场侧柏林冠层可燃物特征及潜在火行为的影响[J]. 北京林业大学学报，2022，44(8)：56-65.
GAO M, REN Y M, ZHOU X D, et al. Effects of thinning on canopy characteristics and potential crown fire behavior of *Platycladus orientalis* in Xishan Forest Farm of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(8): 56-65.

[37] 李伟克，张晨，谷兴翰，等. 北京西山侧柏林可燃物调控措施的影响评价[J]. 浙江农林大学学报，2020，37(3)：472-479.
LI W K, ZHANG C, GU X H, et al. Impact assessment of fuel regulation measures in *Platycladus orientalis* forest in Western Hills of Beijing[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2020, 37(3): 472-479.

（责任编辑：屈李纯）

（上接第 58 页）

[38] 张荣，单立山，李毅，等. 人工模拟降雨格局变化对白刺幼苗生长的影响[J]. 草业学报，2016，25(1)：117-125.
ZHANG R, SHAN L S, LI Y, et al. Effect of change to simulated precipitation patterns on seedling growth of *Nitraria tangutorum*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(1): 117-125.

[39] 朱桐，金华，邹吉祥，等. 干旱胁迫下不同品种杨树矿质离子含量变化[J]. 中南林业科技大学学报，2020，40(2)：102-107.
ZHU T, JIN H, ZOU J X, et al. Changes of mineral ion content of different varieties of poplar under drought stress[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(2): 102-107.

[40] LIU M X, XU X L, WANG D B, et al. Karst catchments exhibited higher degradation stress from climate change than the non-Karst catchments in southwest China: an ecohydrological perspective[J]. Journal of Hydrology, 2016, 535: 173-180.

[41] 李佳奇，郭屹立，李冬兴，等. 桂西南北热带喀斯特季节性雨林土壤钾、钙、镁空间分布特征及其影响因素[J]. 生物多样性，2023，31(2)：178-189.
LI J Q, GUO Y L, LI D X, et al. Spatial distribution characteristics of soil potassium, calcium, and magnesium and their influencing factors in a northern tropical Karst seasonal rainforest in southwestern Guangxi[J]. Biodiversity Science, 2023, 31(2): 178-189.

[42] JIANG Z C, LIAN Y Q, QIN X Q. Rocky desertification in Southwest China: impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1-12.

[43] 刘正祥，魏琦，张华新. 盐胁迫对沙枣幼苗不同部位矿质元素含量的影响[J]. 生态学杂志，2017，36(12)：3501-3509.
LIU Z X, WEI Q, ZHANG H X. Effects of salt stress on mineral element contents in different parts of *Elaeagnus angustifolia* seedlings[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(12): 3501-3509.

[44] RANJAN A, SINHA R, SINGLA-PAREEK S L, et al. Shaping the root system architecture in plants for adaptation to drought stress[J]. Physiologia Plantarum, 2022, 174(2): e13651.

[45] 王硕，刘勇，彭玉信，等. 盐碱胁迫对雄性毛白杨良种苗木生长和生理的影响[J]. 中南林业科技大学学报，2024，44(6)：56-68.
WANG S, LIU Y, PENG Y X, et al. Effects of saline-alkali stress on seedling growth and physiology of male *Populus tomentosa* improved variety[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, 44(6): 56-68.

[46] 胡爱双，张小栋，郭文静，等. 盐胁迫下八棱海棠株系的离子吸收、运输与分配[J]. 植物生理学报，2021，57(9)：1829-1838.
HU A S, ZHANG X D, GUO W J, et al. Ion absorption, transportation and distribution of *Malus micromalus* strains under salt stress[J]. Plant Physiology Journal, 2021, 57(9): 1829-1838.

[47] 茶晓飞，孙丽娟，郭焕仙，等. 钙胁迫对白枪杆幼苗生长及矿质离子代谢的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2024，52(11)：21-29.
CHA X F, SUN L J, GUO H X, et al. Effect of calcium stress on growth and mineral ion metabolism of *Fraxinus malacophylla* seedlings[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2024, 52(11): 21-29.

[48] 宋爱云，董林水，陈纪香，等. 绒毛白蜡雌雄株不同器官矿质元素季节动态的比较[J]. 林业科学，2019，55(10)：162-170.
SONG A Y, DONG L S, CHEN J X, et al. Comparation of seasonal dynamics of mineral elements contents in different organs of male and female plants of *Fraxinus velutina*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(10): 162-170.

（责任编辑：屈李纯）