

河北坝上地区 2 种主要人工固沙林的生物学稳定性研究

高云昌^{1,2}, 赵广智^{1,2}, 马增旺^{1,2}, 邢存旺^{1,2*}, 刘春鹏^{1,2}

(1. 河北省林业和草原科学研究院, 河北 石家庄 050061; 2. 河北丰宁沙地生态系统国家定位观测研究站, 河北 丰宁 068357)

摘要:通过林木保存率、林木生长、自然更新和防护功能 4 个指标来反映河北坝上地区北京杨和樟子松 2 种主要人工固沙林的生物学稳定性。结果表明,北京杨随着林龄的增长,死亡株数迅速增加,25 a 林木保存率仅有 21.5%,且生长衰退现象严重,大多为萌生个体,幼树全部为萌蘖更新,5 a 和 25 a 林分内的输沙率分别为 5.7 、 $5.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$;24 a 樟子松林木保存率达到 70.4%,但生长分化现象严重,林内存在天然更新幼苗,但数量很少,8 a 和 24 a 生林分内的输沙率分别为 1.9 、 $0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。坝上地区北京杨人工固沙林生物学稳定性差,而樟子松人工固沙林则有较高的生物学稳定性。人工固沙林的生物学稳定性从林分层次反映了造林树种对造林地自然环境的适应性,研究结果可为坝上地区的造林树种选择和经营管理提供理论参考。

关键词:人工固沙林;生物学稳定性;北京杨;樟子松

中图分类号:S727.23

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)05-0030-06

Biological Stability of Two Main Sand-fixation Plantations in Bashang Area of Hebei Province

GAO Yun-chang^{1,2}, ZHAO Guang-zhi^{1,2}, MA Zeng-wang^{1,2}, XING Cun-wang^{1,2*}, LIU Chun-peng^{1,2}

(1. Hebei Academy of Forestry and Grass Science, Shijiazhuang 050061, Hebei, China;

2. Hebei Fengning Desert Ecosystem Research Station, Fengning 068357, Hebei, China)

Abstract: The biological stability of sand fixation plantation reflects the adaptability of the tree species to the natural environment at the level of stand. In this paper, the biological stabilities of two sand fixation plantations (*Populus beijingensis* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica*) in Bashang of Hebei Province were studied based on indexes related to preserve rate, stand growth, natural regeneration and protection function. The results showed that the rate of preserve rate of 25-year-old *P. beijingensis* plantation was just 21.5%, which decreased rapidly with the stand growth. The growth recession was serious. Most of the trees within the stand were individual ramets and all the saplings were clone propagation. The sand transporting rates of 5 a and 25 a plantations were 5.7 and $5.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively. For *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation, the preserve rate of 24-year-old stand was 70.4%, but the growth differentiation was serious. There were seedlings that were naturally generated, the number was very few. The sand transporting rates in 8 a and 24 a plantations were 1.9 and $0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively. The biological stability of *P. beijingensis* plantation was under the condition of low level. While *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation showed high level. The results of the research can provide theoretical reference for the tree species choice and management of sand-fixation plantation in Bashang Area.

Key words: sand-fixation plantation; biological stability; *Populus beijingensis*; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

收稿日期:2021-09-17 修回日期:2021-11-16

基金项目:河北省重点研发计划项目(19226814D);中央财政林业和草原科技推广示范项目(冀 TG[2020]003 号)。

第一作者:高云昌,硕士,工程师。研究方向:荒漠化防治。E-mail:493008924@qq.com

*通信作者:邢存旺,博士,正高级工程师。研究方向:荒漠化防治。E-mail:xingcunwang@163.com

人工固沙林是营建于沙漠化土地上的以防风固沙为主要经营目标的林分^[1]。造林环境往往存在着水分条件差、养分缺乏和风蚀沙埋等不利因素,因此,树种的选择对于营建人工固沙林尤为重要^[2]。河北坝上地区位于内蒙古高原东南缘,生态环境脆弱,是京津冀乃至整个华北地区上风向重要的沙尘源区^[3]。坝上地区的植被恢复与建设,对整个华北地区的生态安全至关重要。自 20 世纪七八十年代起,坝上地区广泛营建杨树(*Populus* spp.)防护林,但经过几十年的生长,杨树防护林出现了大规模的衰退现象。因此,目前关于坝上地区杨树人工固沙林的研究也主要集中在退化成因^[4-6]、退化对林分环境与功能的影响^[7-9],以及植被的恢复与重建技术^[10-12]等方面。这些研究都忽视了杨树对坝上自然环境的适应性,或者说杨树是否可以作为坝上地区的造林树种。近年来,坝上地区造林开始大规模地使用樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*),而在辽宁西北地区,引种后沙地樟子松人工林出现衰退枯死现象^[13],因此对坝上地区樟子松人工固沙林的适应性研究就显得很有必要,但目前相关研究却很少。丁丽等^[14]研究了坝上樟子松林土壤养分与林木生长的关系,吴雪铭等^[15]研究了间伐强度对坝上樟子松林下持水能力的影响。但这些研究同样都没有体现出樟子松对坝上自然环境的适应性。

造林的一个基本原则或者前提是坚持适地适树^[16],即从生物学角度研究该树种能够适应该地区的自然环境条件。生物学适应性是选择造林树种的重要依据。然而,目前关于杨树和樟子松对坝上地区自然环境的生物学适应性还缺乏研究。当一个树种用于某地区的造林实践时,其生物学适应性不仅仅指树种或者单株林木的成活与生长,而应从林分层次表现为能够形成稳定的林分^[17]。邢存旺^[18]在研究黄羊滩人工固沙林的生态稳定性时,将固沙林的自然更新和经营目标的实现程度(即固沙林的防护功能)纳入了生物学适应性的范畴,即固沙树种应

用于造林实践后,其生物学适应性表现为固沙林营建后,具有较高的林木保存率,能够正常生长,并通过自然更新实现种群延续与稳定,同时发挥其生态防护功能,实现造林的经营目标,并将这一理念概括为人工固沙林的生物学稳定性。本研究通过林木保存率、林木生长、自然更新和防护功能 4 个指标来反映北京杨和樟子松 2 个主要人工固沙林的生物学稳定性,以此反映这 2 个树种对坝上地区自然环境的适应能力和防护功能的实现程度,从而对坝上地区营建人工固沙林的树种选择提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于河北省丰宁满族自治县坝上地区(41°21′—42°00′N,115°54′—116°38′E),属于大陆季风型半湿润、半干旱高原山地气候,小气候明显,气候寒冷干燥,年平均气温 6.7℃,≥10℃积温 1 600~1 798℃,多年平均降水量 350~500 mm,降雨季节分布格局很不均匀,主要集中于 7—9 月,占全年降水量的 79%左右。无霜期 80~140 d。地带性土壤以草原栗钙土和风沙土为主,土壤砂粒含量高、质地松、内聚力差。该地区植被具有内蒙古高原草原的特点,但植被类型较为复杂,植物种类组成较丰富,是森林向草原的过渡地区,具有明显的过渡性特征^[19]。由于该区天然植被破坏严重,近几十年来,植被恢复主要以人工营造固沙林为主。现有人工固沙林多以樟子松、北京杨(*Populus beijingensis*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)等构成单一的人工纯林类型。

2 研究方法

2.1 样地设置

在丰宁坝上地区分别选择 5 a 和 25 a 生北京杨纯林、8 a 和 24 a 生樟子松纯林 4 块典型林分,在每块林分内设置 3 块 20 m×30 m 的样地,调查林地基本特征见表 1。

表 1 林分基本特征

Table 1 The basic information of investigated stands

树种	林型	海拔/m	坡度/(°)	造林地类型	林龄/a	平均高/m	平均胸径/cm
北京杨	纯林	1 354	0	退耕地	5	5.6	6.3
北京杨	纯林	1 494	0	荒滩	25	5.8	6.1
樟子松	纯林	1 568	4	退耕地	8	2.8	4.2
樟子松	纯林	1 254	15	荒地	24	10.5	12.9

2.2 现实保存率调查

根据林分的株行距以及样地内的林木株数(25 a 生北京杨林分中的萌生个体未统计在内),推算不同林分的初植密度和保存密度,计算现实保存率。

2.3 径级结构

径级结构能否反映出种群同龄个体的生长分化和其对生境的适应程度^[20],本研究采用径级结构反映人工固沙林的生长状况。样地内所有树高>1.3

m 的个体,以胸径 2 cm 为一个径级,共划分为 11 个径级,每个径级以胸径范围的中值表示,其中 >20 cm 的个体归为一个径级(21 cm)。统计每块样地不同径级内的林木株数,以径级为横坐标,相同林分类型 3 块样地内同一径级的林木株数求平均值作为纵坐标,绘制种群径级结构图。

2.4 自然更新

由于样地内更新幼苗很少,因此在整块样地范围内进行更新调查,统计幼苗幼树的数量,并区分更新方式。幼苗幼树的划分标准^[21]:幼苗($H \leq 1$ m);幼树($H > 1$ m, $DBH < 4$ cm)。根据国家林业和草原局 2020 年颁布的《森林资源连续清查技术规程》中天然更新等级评定标准^[22],对不同林分的更新状况评定等级,同时结合更新方式来对 2 个树种在坝上地区的自然更新能力作出评价。樟子松林和 5 a 北京杨林内虽然存在 $H > 1$ m, $DBH < 4$ cm 的林木,经调查,此类林木为当年植苗造林时的个体,因此不以幼树对待。

2.5 防护功能

2.5.1 防护成熟期的确定 姜凤岐等^[23]将人工固沙林的防护成熟表述为:当固沙林的生长发育开始达到全面有效地控制沙地风蚀,其所对应的年龄称

为初始防护成熟龄;当林木进入过熟状态,固沙林总体郁闭不能再维持,其所对应的年龄称为终止防护成熟龄。把初始防护成熟龄和终止防护成熟龄作为防护成熟期的 2 个端点,进而计算得出人工固沙林的防护成熟期。由于坝上地区现有北京杨和樟子松人工固沙林不能够满足通过现场调查确定其终止防护成熟龄的需要,因此借用姜凤岐等^[23-24]对北京杨和樟子松防护成熟期的研究成果,2 个防护成熟龄通过生长模型推算得出。

2.5.2 林内输沙率的测定 林内输沙率在春季采用 10 孔阶梯式集沙仪进行观测^[25]。

3 结果与分析

3.1 人工固沙林的现实保存率

相近林龄的樟子松林分的保存率要大于北京杨林分。5 年生北京杨林的保存率为 77.5%,到 25 a 时则迅速降低到 21.5%,说明北京杨在坝上地区,随着林龄增长,死亡株数会迅速增加。8 年生樟子松林的保存率为 82.8%,到 24 a 降低到 70.4%,只降低了 14.98%,说明樟子松能够较好地适应冀北坝上地区的自然气候条件(表 2)。

表 2 不同林分的现实保存率

Table 2 The current preserve rate of different stands

林分类型	株行距	初植密度/(株·hm ⁻²)	保存密度/(株·hm ⁻²)	保存率(%)
5 年生北京杨	2 m×3 m	1 665	1 290.0±96.5	77.5±5.8
25 年生北京杨	3 m×3 m	1 110	238.5±95.6	21.5±8.6
8 年生樟子松	2 m×3 m	1 665	1 378.5±47.8	82.8±2.9
24 年生樟子松	2 m×3 m	1 665	1 173.0±74.9	70.4±4.5

3.2 人工固沙林的径级结构

人工林建群种的径级结构可以反映种群同龄个体的生长分化和其对生境的适应程度^[20]。5 年生北京杨纯林和 8 年生樟子松纯林均处于幼龄阶段,未发现更新(实生和萌生)个体,24 年生樟子松纯林内虽有实生更新个体,但均为幼苗,因此不同径级内的个体数量是当年造林苗木生长分化的结果。5 年生北京杨纯林平均胸径为 6.3 cm,主要分布在 2~10 cm 范围内,而 8 年生樟子松纯林平均胸径为 4.2 cm,主要分布在 2~6 cm 范围内,说明杨树的生长速度要快于年龄相近的樟子松,但在幼龄阶段的分化也比樟子松严重。25 年生北京杨纯林平均胸径仅为 6.1 cm,原因在于小径级的萌生个体所占比例较大。而在实际调查中发现,当年植苗造林个体中有 35.7% 的个体存在枯梢现象,说明 25 年生北京杨林分已经出现严重的生长衰退。24 年生樟子松纯林平均胸径为 12.9 cm,最小为 2.9 cm,最大

24.2 cm,且在所分布的各径级内数量较为均衡,说明在营林过程中缺少必要的抚育措施,林木生长分化极为严重(图 1)。在实际调查当中,除了 3 棵枯立木外,其余林木并未出现枯梢等生长衰退现象。

3.3 人工固沙林的自然更新

种群的自然更新影响着群落的物种组成以及动态变化,是种群得以延续并维持群落稳定的一个重要生态过程^[26]。5 年生北京杨纯林内未见更新发生。25 年生北京杨纯林内无幼苗,幼树全部为萌蘖更新的个体,天然更新评定等级为中等,由于萌生苗对杨树种群影响小,绝大多数并不发育^[18],因此林分的可持续性差。8 年生樟子松林由于林龄较小,未见幼苗幼树。24 年生樟子松林内仅存有数量很少的实生幼苗,无幼树,评定等级为不良,说明樟子松在丰宁坝上地区可以结实,且种子可以萌发,存在天然更新的基础,但更新存在障碍(表 3)。

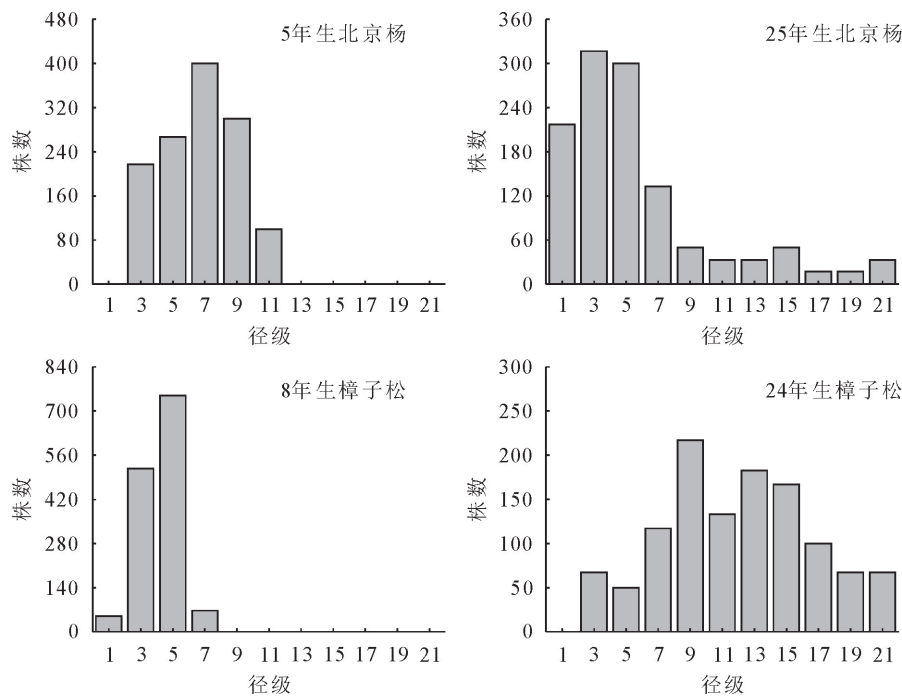


图 1 人工固沙林的径级结构

Fig. 1 The diameter class of different stands

表 3 林下更新情况

Table 3 The regeneration of different stands

林分类型	更新数量 /(株·hm ⁻²)	评定等级	综合评价
5年生北京杨	0	—	
25年生北京杨	幼树: 533.3 ± 183.3	中等	萌芽更新, 林分持续性差
8年生樟子松	0	—	
24年生樟子松	幼苗: 77.8 ± 61.4	不良	种子更新, 存在更新障碍

3.4 人工固沙林的防护功能

3.4.1 人工固沙林的防护成熟期 防护成熟期是人工固沙林发挥防护功能的持续时间, 表征了人工固沙林生物学稳定性的持久性^[27]。根据姜凤岐等^[23-24]的研究成果, 虽然樟子松林开始发挥防护功能的时间要稍晚于北京杨林, 但其终止防护成熟龄可达到 56 a, 远远晚于北京杨林。樟子松的防护成熟期比北京杨多 21 a, 说明樟子松能够维持更长时间全面有效的防护状态(表 4)。

表 4 不同林分的防护成熟期

Table 4 The protection period of different stands a

人工林类型	初始防护成熟龄	终止防护成熟龄	防护成熟期
北京杨林	15.5	33.5	18
樟子松林	17	56	39

3.4.2 人工固沙林的输沙率 人工固沙林内的输沙率变化情况表明了固沙功能的实现程度, 是沙漠

化治理效果最重要的评价指标^[25]。对比不同类型林分的输沙率(图 2), 8、24 a 樟子松纯林和 5、25 a 北京杨纯林的输沙率分别为 1.9、0.5、7.5、1.1 g·cm⁻¹·d⁻¹, 樟子松林的输沙率明显低于北京杨林。8 年生樟子松林在近地表 6 cm 以上不再有输沙发生, 随着林龄增长, 24 年生的樟子松林输沙率为 0, 完全达到了降低风沙侵蚀、遏制风沙危害的目的。而 25 年生的北京杨林内输沙率几乎与 5 年生的林分相当, 仍然处于较严重发生的状态, 防护作用不明显。综合来看, 樟子松纯林的防护效果要明显优于北京杨纯林。

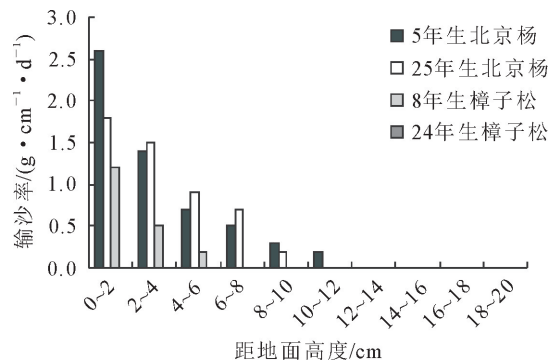


图 2 林分近地面 20 cm 高度输沙率

Fig. 2 Distribution of sand transporting rate in the height of 0—20 cm above ground

4 结论与讨论

4.1 结论

北京杨在坝上地区具有生长快的特点, 但较早

出现生长衰退的现象,林分个体大都被萌生苗所代替,已很难通过自然更新实现种群的延续,且固沙作用差,不能有效实现营造固沙林的经营目标,人工固沙林的生物学稳定性差。对于北京杨林分,建议通过更换树种^[28]或营建混交林^[29]的方式进行改造。

樟子松在坝上地区具有较高的现实保存率,生长表现良好,且存在实生幼苗,能够完全遏制风沙危害,具有较高的生物学稳定性。林分密度是人工纯林林分结构最重要的影响因子^[30],对于生长分化严重的樟子松林分,建议通过间伐等抚育措施,促进林分的健康发育,同时应加强对坝上地区樟子松天然更新障碍的研究。

4.2 讨论

4.2.1 人工固沙林的生物学稳定性 适地适树是选择造林树种的重要依据,但营建人工林时,适地适树的含义不仅包括林木在某一自然环境或立地条件下的存活与生长,还应考虑造林后能否成林,成林后能否实现其造林的目的^[17],即从林分层次考虑某树种的生物学稳定性。人工固沙林营建在沙质土壤上,以防风固沙为主要经营目的。邢存旺^[18]认为,具有高生物学稳定性的人工固沙林应该能够适应严酷的环境,顺利完成生命周期,并有效发挥防护功能。其中高保存率、正常生长和顺利实现自然更新,反映了人工固沙林对造林环境的适应性,而整体防护功能的发挥则体现了营林目的的实现程度,从而实现人工固沙林生物学稳定性的概念化和指标化。

4.2.2 林木保存率和生长状况 与造林后的成活率相比,林木保存率反映了苗木在经历了多年的环境适应后的现实存活情况,结合林分的生长状况,更能准确体现出某树种内在生活力和对环境的适应能力。杨树在坝上地区的生长退化已是不争的事实^[4-12]。虽然从林木生长角度来看,北京杨具有生长快的特点^[31],但结合保存率来分析,随着林龄增长,死亡株数迅速增加,北京杨生长衰退现象严重,林分逐渐被萌生个体所代替,说明单纯的生长指标不能真实地反映树种对环境的适应性。辽宁西北地区 25~30 年生樟子松人工固沙林出现大面积的生长衰退现象^[13],而本研究中 24 a 樟子松人工林现实保存率可达 70.4%,且未发现生长衰退现象,说明樟子松能够较好地适应冀北坝上地区的自然气候条件。但随着林龄增长,林木生长分化现象严重,需要合理的人工抚育措施。

4.2.3 林分的自然更新 种群的自然更新是从种子的成熟、扩散、萌发,到幼苗的存活与生长,最后长成健壮个体的连续过程,其中任一环节出现对某一环境因子的不适应,该环节就会成为自然更新的瓶

颈,从而影响到林分的延续^[32]。因此种群能够顺利实现自然更新是该树种对造林地环境适应性的一个重要体现,是林分生物学稳定性的重要内容。北京杨林分内大多为萌生个体,幼树全部为萌蘖更新。萌蘖往往是由于外界不良环境的抑制,使林木生理平衡遭受破坏,休眠芽被刺激而产生的生理性现象,是对逆境的一种适应和生长衰退的表现^[33]。萌生苗虽然在短期内能够达到种群更新的目的,但长期占主导地位的无性繁殖必然会导致种群遗传多样性的降低和物种生活力的下降^[34],因此北京杨在坝上地区很难实现长期可持续的发育。樟子松在天然分布区具有良好的更新能力^[35-37]。本研究中 24 a 樟子松人工林存在数量很少的实生幼苗,但未发现大龄幼苗或幼树,说明樟子松在坝上地区具有天然更新的基础,但由于影响林分天然更新的因素复杂,种子萌发及幼苗定居困难。这与樟子松其他引种区域的调查研究结果一致^[38-39]。

4.2.4 林分的防护功能 目前对固沙林防护成熟期的界定大都是依据林分郁闭度进行推算,即林分郁闭度维持在使林分能够有效发挥防护作用的范围内^[23,27]。依据防护成熟期的计算,樟子松比北京杨能够维持更长时间全面有效的防护状态。但防护成熟期的推算基于这样一种观点,即覆盖对固定沙面而言具有最为直观的作用,在推算过程中,则以乔木林的郁闭度代替了这种“覆盖”,这忽略了地表枯枝落叶层和草本层的覆盖作用。林内输沙率表明了固沙功能的实现程度,是人工固沙林防护效果最直观的评价指标^[25]。本研究中,8 年生樟子松林具有较低的输沙率,而 24 a 林分则已无输沙发生,说明樟子松具有良好的固沙表现。这可能是因为松针掉落分解缓慢,且松针细密,在地表堆积后不易被风吹走,从而形成厚且紧密的覆盖层,能够有效覆盖地表。而北京杨林分在生长过程中,始终不能发挥良好的固沙作用,可能是因为树叶掉落干枯后,堆积松散,且叶干而轻,易被大风吹走,不能覆盖地表,同时由于林冠的遮挡,地面草本盖度较低。

参考文献:

- [1] 邢存旺,黄选瑞,李玉灵,等.黄羊滩人工固沙林生态稳定性评价[J].林业科学,2014,50(5):101-108.
XING C W, HUANG X R, LI Y L, et al. Ecological stability of sand-fixed plantations in Huangyangtan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(5): 101-108. (in Chinese)
- [2] 赵存玉,康春风.河北坝上风蚀沙化地区固沙造林植物的选择[J].中国沙漠,1999,19(1):63-67.
ZHAO C Y, KANG C F. Plant species selection for afforestation on Bashang sandified land of Hebei Province[J]. Journal of

- Desert Research, 1999, 19(1): 63-67. (in Chinese)
- [3] 高尚玉. 京津风沙源治理工程效益[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [4] 常晓敏, 余新晓, 贾国栋, 等. 基于随机森林的不同径级树木死亡影响因子研究[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 8003-8009.
CHANG X M, YU X X, JIA G D, *et al.* Influence factors of tree mortality in different size classes based on random forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 8003-8009. (in Chinese)
- [5] 郑春雅, 许中旗, 马长明, 等. 冀西北坝上地区杨树防护林退化的影响因素[J]. 林业资源管理, 2018(1): 9-15, 147.
ZHENG C Y, XU Z Q, MA C M, *et al.* The factors influencing the poplar shelterbelt degradation in the Bashang Plateau of northwest Hebei Province [J]. Forest Resources Management, 2018(1): 9-15, 147. (in Chinese)
- [6] 孜尔蝶·巴合提. 坝上地区不同退化程度小叶杨水分来源与利用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [7] 刘山宝. 河北坝上土壤水分对杨树防护林退化响应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [8] 孙立博, 余新晓, 陈丽华, 等. 坝上高原杨树人工林的枯落物及土壤水源涵养功能退化[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 104-110.
SUN L B, YU X X, CHEN L H, *et al.* Degradation of litter and soil water conservation function of poplar plantation in Bashang Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 104-110. (in Chinese)
- [9] 郑春雅, 许中旗, 马长明, 等. 冀西北坝上地区退化防护林的土壤性质[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 203-207.
ZHENG C Y, XU Z Q, MA C M, *et al.* Soil properties of degraded shelter forests in Bashang Plateau of northwestern Hebei Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 203-207. (in Chinese)
- [10] 荣艳菊, 陈立根, 曲鸿燕. 河北张家口坝上地区杨树更新改造模式探究[J]. 河北林业科技, 2020(1): 35-37.
- [11] 王学勇, 张金香, 高云昌, 等. 张家口坝上杨树防护林根蘖更新试验[J]. 林业科技通讯, 2020(3): 73-75.
- [12] 高俊峰, 郑焰锋, 王博宇. 张家口坝上地区退化杨树防护林改造与配套政策建议[J]. 林业资源管理, 2016(4): 30-33.
GAO J F, ZHENG Y F, WANG B Y. Transformation and countermeasures of degenerated poplar protection forest in Bashang district of Zhangjiakou City [J]. Forest Resources Management, 2016(4): 30-33. (in Chinese)
- [13] 吴祥云, 姜凤岐, 李晓丹, 等. 樟子松人工固沙林衰退的主要特征[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2221-2224.
WU X Y, JIANG F Q, LI X D, *et al.* Major features of decline of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy land [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(12): 2221-2224. (in Chinese)
- [14] 丁丽, 许晴, 许中旗, 等. 冀北坝上不同樟子松林的土壤养分及其与林木生长的关系[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(1): 49-55.
DING L, XU Q, XU Z Q, *et al.* Soil nutrients of different *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in northern Bashang area of Hebei Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(1): 49-55. (in Chinese)
- [15] 吴雪铭, 余新晓, 陈丽华, 等. 间伐强度对坝上樟子松林下持水能力的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2347-2354.
WU X M, YU X X, CHEN L H, *et al.* Effects of thinning intensity on the understory water-holding capacity of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in the Bashang area of north China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7): 2347-2354. (in Chinese)
- [16] 瞿明普, 沈国舫. 森林培育学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016.
- [17] 梁一民, 陈云明. 论黄土高原造林的适地适树与适地适林[J]. 水土保持通报, 2004, 24(3): 69-72.
LIANG Y M, CHEN Y M. A discussion on trees and forest suitability to sites on the Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2004, 24(3): 69-72. (in Chinese)
- [18] 邢存旺. 黄羊滩人工固沙林生态稳定性的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2013.
- [19] 刘建立. 河北丰宁坝上地区植被恢复研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2005.
- [20] 康迪, 郭垚鑫, 杜焰玲, 等. 小陇山人工油松林径级结构及林下植物多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(4): 54-59.
KANG D, GUO Y X, DU Y L, *et al.* Diameter-class structure and understory diversity of *Pinus tabulaeformis* plantations in Xiaolong Mountain [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(4): 54-59. (in Chinese)
- [21] 于倩, 谢宗强, 熊高明, 等. 神农架巴山冷杉(*Abies fargesii*)林群落特征及其优势种群结构[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 1931-1941.
YU Q, XIE Z Q, XIONG G M, *et al.* Community characteristics and population structure of dominant species of *Abies fargesii* forests in Shennongjia national nature reserve [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 1931-1941. (in Chinese)
- [22] 国家林业和草原局. 森林资源连续清查技术规程: GB/T 38590—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020: 38.
- [23] 姜凤岐, 曾德慧, 朱教君. 固沙林的经营基础与技术对策[J]. 中国沙漠, 1997, 17(3): 250-254.
JIANG F Q, ZENG D H, ZHU J J. Fundamentals and technical strategy for sand-fixation forest management [J]. Journal of Desert Research, 1997, 17(3): 250-254. (in Chinese)
- [24] 姜凤岐, 朱教君, 周新华, 等. 林带的防护成熟与更新[J]. 应用生态学报, 1994, 5(4): 337-341.
JIANG F Q, ZHU J J, ZHOU X H, *et al.* Protective maturity (PM) and regeneration of shelterbelts [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1994, 5(4): 337-341. (in Chinese)
- [25] 马增旺, 范少辉, 官凤英, 等. 冀北零星沙地杨树人工固沙林输沙率的研究[J]. 河北农业大学学报, 2013, 36(5): 65-71.
MA Z W, FAN S H, GUAN F Y, *et al.* Study on sand transporting rate of different types of poplar sand-fixation plantation in scattered sandy land in northern Hebei [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2013, 36(5): 65-71. (in Chinese)
- [26] 李小双, 彭明春, 党承林. 植物自然更新研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2081-2088.
LI X S, PENG M C, DANG C L. Research progress on natural regeneration of plants [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(12): 2081-2088. (in Chinese)

- Forestry Research, 2010, 2009: 1-5.
- [24] 山西省林业厅林业调查队. 山西省主要树木生长量汇编[G]. 太原: 山西省林业厅林业调查队, 1965.
- [25] 中央人民政府林业部. 中国主要树木生长量汇编第1辑[M]. 北京: 中国林业出版社, 1951.
- [26] 中央人民政府林业部. 中国主要树木生长量汇编第2辑[M]. 北京: 中国林业出版社, 1952.
- [27] 中央人民政府林业部. 中国主要树木生长量汇编第3辑[M]. 北京: 中国林业出版社, 1954.
- [28] 中央人民政府林业部. 中国主要树木生长量汇编第4辑[M]. 北京: 中国林业出版社, 1958.
- [29] 段爱国, 张建国, 童书振. 6种生长方程在杉木人工林分直径结构上的应用[J]. 林业科学研究, 2003, 16(4): 423-429.
- DUAN A G, ZHANG J G, TONG S Z. Application of six growth equations on stands diameter structure of Chinese fir plantations[J]. Forest Research, 2003, 16(4): 423-429. (in Chinese)
- [30] RICHARDS F J. A flexible growth function for empirical use[J]. Journal of experimental Botany, 1959, 10(2): 290-301.
- [31] 洪滔, 吴承祯, 胡喜生. 安曹下杉木丰产林不同阶段生长比较研究[J]. 福建林学院学报, 2008(1): 19-22.
- HONG T, WU C Z, HU X S. Compared study on the growth in different stages of the *Cunninghamia lanceolata* forest in Ancaoxia[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2008(1): 19-22. (in Chinese)
- [32] 林丽平, 徐期瑚, 罗勇, 等. 广东省樟树立木生长规律和生长模型研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(6): 23-29.
- LIN L P, XU Q H, LUO Y, *et al.* Study on the growth laws and models of *Cinnamomum camphora* in Guangdong Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(6): 23-29. (in Chinese)
- [33] 马武, 雷相东, 徐光, 等. 蒙古栎天然林单木生长模型研究——I. 直径生长量模型[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(2): 99-105.
- MA W, LEI X D, XU G, *et al.* Growth models for natural *Quercus mongolica* forests——I. Diameter growth model[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2015, 43(2): 99-105. (in Chinese)
- [34] 杨锦昌, 尹光天, 李荣生, 等. 5种生长方程在2种藤林生长模型中的应用[J]. 福建林学院学报, 2007(3): 217-221.
- [35] 杨秋香, 牛云. 青海云杉连年生长模型的分析[J]. 河西学院学报, 2003(5): 83-86.
- [36] STERBA H, KOROL N, RÖSSLER G. Preliminary evaluation of an individual tree growth model for Norway spruce stands[J]. European Journal of Forest Research, 2001, 120(1): 406-421.
- [37] 马志海. 东北林区天然混交林单木生长模型的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006.
- [38] 包昱君, 亢新刚, 杜志, 等. 天然林单木生长模型研究综述[J]. 林业调查规划, 2013, 38(2): 1-5.
- (上接第35页)
- [27] 邢存旺, 黄选瑞, 李玉灵, 等. 黄羊滩人工固沙林防护期分析与评价[J]. 林业科学, 2012, 48(11): 134-139.
- XING C W, HUANG X R, LI Y L, *et al.* Analysis and assessment on protection period of sand-fixation plantations in Huangyangtan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(11): 134-139. (in Chinese)
- [28] 马增旺. 冀北人工固沙林分特征与综合评价研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [29] 侯贵荣. 坝上张北典型杨树人工林恢复重建技术基础研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [30] 曾德慧, 姜凤岐, 范志平, 等. 樟子松人工固沙林稳定性的研究[J]. 应用生态学报, 1996, 7(4): 337-343.
- ZENG D H, JIANG F Q, FAN Z P, *et al.* Stability of mongolian pine plantation on sandy land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(4): 337-343. (in Chinese)
- [31] 张全锋, 支恩波, 顾新庆, 等. 北京杨在河北坝上地区的生长表现[J]. 河北林业科技, 2010, (5): 19-21.
- [32] 李娜, 康永祥, 曾商春, 等. 太白红杉林窗更新与环境因子的关系研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(6): 30-36.
- LI N, KANG Y X, ZENG S C, *et al.* Relationship between the regeneration of *Larix chinensis* and environmental factors in forest gaps [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(6): 30-36.
- [33] 遂川县大坑林站. 杉木实生幼林萌蘖的原因及防治[J]. 江西林业科技, 1984(2): 32-34.
- [34] 符婵娟. 神农架巴山冷杉群落更新特点及影响因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [35] 王妍. 呼伦贝尔沙地天然樟子松林更新研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [36] 王妍, 卢琦, 吴波, 等. 呼伦贝尔沙地樟子松更新苗分布特征研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 86-91.
- WANG Y, LU Q, WU B, *et al.* Seedling dispersal pattern research of the natural mongol scotch Pine individual plant in Hulun Buir Sandland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(5): 86-91. (in Chinese)
- [37] 潘磊磊, KWON SEMYUNG, 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, KWON S, LIU Y S, *et al.* Tree competition, spatial pattern and regeneration of a Mongolian pine natural forest in the southern geographical edge[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): 3687-3699. (in Chinese)
- [38] 宋鸽. 科尔沁沙地南缘樟子松人工林土壤种子库及天然更新特征[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [39] 闫德仁, 袁立敏, 胡小龙, 等. 浑善达克沙地东南缘樟子松人工林天然更新调查[J]. 内蒙古林业科技, 2018, 44(3): 8-11.