

沙棘人工林早衰及其更新复壮

唐翠平¹, 乌拉², 袁思安¹, 郭峰¹, 李根前^{1*}, 尤燕³

(1. 西南林业大学, 云南 昆明 650224; 2. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200;
3. 陕西省定边县乱井子机械林场, 陕西 定边 718699)

摘要:针对沙棘人工林大面积早衰问题,在分析其特征、成因的基础上提出更新复壮途径。结果表明:沙棘人工林早衰表现为寿命缩短、生长和繁殖能力下降,形成原因主要包括干旱胁迫、造林密度大、不合理的造林设计等。考虑沙棘克隆习性与生境异质性的耦合作用,可通过及时平茬、配方施肥(激素)、异质性造林设计、径流林业技术促进营养生长和克隆繁殖,从而达到更新复壮或长期维持种群稳定性和克隆持久性之目的。今后应加强沙棘人工林早衰及平茬更新机制研究,为种群持久性维持及早衰种群的复壮提供依据。

关键词:沙棘人工林;早衰特征;早衰成因;更新复壮

中图分类号:S725.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2014)05-0047-06

Premature Senescence and Rejuvenation of *Hippophae* ssp. Plantation

TANG Cui-ping¹, WU La², YUAN Si-an¹, GUO Feng¹, LI Gen-qian^{1*}, YOU Yan³

(1. Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China; 2. Desert Forestry Exeriraental Center, CAF, Dengkou, Inner Mongolia 075200, China; 3. Forest Farm of Luan Jing-zi, Dingbian, Shaanxi 718699, China)

Abstract: Aiming to solve the problem of premature senescence occurring in a large area of *Hippophae* ssp. plantation, based on the analysis of the cause of its characteristics, rejuvenation ways for the plantations were discussed. The main features of premature senescence were shortened life expectancy, reduced abilities of growth and reproduction. These were resulted from drought stress, high planting density, and unreasonable afforestation design. Owing to *Hippophae* ssp. 's cloning habits and coupling effects of habitat heterogeneity, effective rejuvenation approaches were proposed, such as timely stumping, formula fertilization (hormones), heterogeneity afforestation design and runoff forestry technology to promote vegetative growth and clonal propagation, to maintain long-term population stability and cloning persistency. It was suggested in the future to strengthen the researches in mechanism of premature senescence and rejuvenation, in order to provide evidence for it's population persistency and rejuvenation.

Key words: *Hippophae* ssp. plantation; premature features; premature causes; renewal rejuvenation

沙棘(*Hippophae* ssp.)是我国“三北”干旱、半干旱地区优良的多用途树种,具有较强的固氮培土、水土保持和防风固沙作用,果实、叶片广泛用于医药、食品、化妆品等工业^[1]。沙棘还是典型的克隆植物,其侧根具有极强的根蘖繁殖能力,不仅能够“独木成林”,而且可以从丘间地扩散到沙丘顶部、从沟

谷扩散到沟坡、从林内扩散到林外,使人工造林难以成活的地段得到植被覆盖^[2-3]。同时,沙棘依托克隆习性及其克隆植物独特的“整合作用”,可通过林隙更新、平茬萌蘖维持种群的稳定性或克隆持久性,使其具有永生的潜力^[4-6]。由于沙棘的特殊性和优越性,其人工造林一直倍受重视。近20年来,我国平均每

收稿日期:2014-02-24 修回日期:2014-05-09
基金项目:国家自然科学基金(31070551)。
作者简介:唐翠平,女,硕士,研究方向:森林培育。E-mail:TCP849592039@163.com
* 通信作者:李根前,男,教授,博士生导师,研究方向:森林培育学与森林生态学。

年营造沙棘人工林 8 万 hm²,至 2005 年全国的总面积已达 200 万 hm²,成为世界沙棘种植大国^[7]。目前,仅在晋陕蒙甘能源开发区已种植 55.33 万 hm²,且计划近期新增 344.67 万 hm²^[8]。遗憾的是沙棘人工林近年出现了大面积早衰现象,不仅严重影响其生态、经济效益的持续发挥,而且使人们利用其克隆习性的初衷受到威胁。然而,关于其研究集中在早衰现象的报道方面,成因分析较少且不系统,早衰林分的更新复壮综合研究更是罕见^[9-13]。为此,在系统分析早衰成因的基础上,针对沙棘的克隆习性及其分布区环境异质性较高的具体情况,提出早衰林分的更新、复壮途径,期望为其造林设计、森林经营及早衰种群的恢复提供参考。

1 沙棘人工林早衰概述

1.1 人工林早衰现象

“早衰”是指植物衰老提前到来或衰老起始年龄早于自然衰老时间。目前,“早衰”一词多用来描述农作物在未进入自然衰老期之前表现出的叶片黄化、顶梢坏死、产量降低等现象(如水稻、棉花、豇豆等)。林业上,以同一树种连栽导致的林地生产力、土壤肥力下降为研究热点,如杉木、欧洲云杉,称之为人工林衰退,只有少数文献采用“早衰”这一概念^[14-15]。直至 2005 年,朱教君在总结世界森林及沙地樟子松人工林衰退研究时,将森林(林木)在发育过程中遇到环境胁迫出现的生理机能下降、生长滞缓或死亡、生产力降低及地力衰退等状态,归纳为人工林“早衰现象”^[16-17]。

1.2 沙棘人工林早衰特征

杉木的早衰表现为蓄积量减少、生产力下降、生物多样性降低等^[15];樟子松早衰表现为生长滞缓、数量成熟龄提前、生态效益下降、地力衰退等^[16-17]。与杉木、樟子松相比,沙棘人工林的早衰表现更加明显、更具特点。从整个分布区来看,由西南(川西高原)到西北(黄土高原),随着降水量的下降和干燥度的上升,种群或个体寿命从 300 a 降低到 10 a 左右,性状从乔木演变为小乔木或灌木,高度从 16 m 降低到 2 m 左右^[18-19]。即使在同一分布区,天然林的寿命、生长或繁殖能力也明显高于人工林,且不同立地的人工林之间也表现出明显差异。在毛乌素沙地,下湿地尚存 50 a 以上的天然林,生长良好,而流动沙丘 10 a 的人工林便出现严重的早衰现象^[19]。对沙棘人工林的调查也表明:土壤含水量随着北、西、东、南坡向的改变而下降时,种群的繁殖和生长能力随之下降^[20]。由此可见,相对于水分条件较好

的地区或地段,水分条件较差地区或地段的沙棘人工林显然存在早衰现象,具体表现为寿命缩短、生长和繁殖能力降低、种群稳定性和克隆持久性减弱。

1.3 沙棘人工林早衰后果

近年来,关于沙棘人工林早衰或提前死亡的报道越来越多。在黄土高原、毛乌素沙地及内蒙古高原,沙棘平均死亡率达到 58.6%^[10-13]。以鄂尔多斯为例,6.7 万 hm² 的沙棘林已死亡近 5.7 万 hm²,8 a 左右的死亡率高达 85%^[13];而在辽西地区,10 万 hm² 沙棘林已死亡近 6 万 hm²,沙棘资源保存率不到 40%^[21];同样在建平县,6.67 万 hm² 的沙棘林已死亡 3.9 万 hm²,占全县沙棘的 58.5%,10 a 林分的死亡率达 70%^[10-11]。对“三北”地区的统计结果表明,沙棘在 5 a 时就遭受木蠹蛾的危害,8 a 时出现生长滞缓、树干中空等早衰现象,11 a 时虫害率高达 96.7%,树高仅 2.4 m、地径 9.5 cm;在水分条件较差地区,甚至在 5 a 时进入衰老期,10 a 左右死亡,树高仅 0.82 m,地径 2.31 cm^[13,22]。大面积人工林的早衰、死亡,不仅严重影响其生态、经济效益的持续发挥,而且使沙棘克隆繁殖的优越性难以发挥应有的作用。对于造林成活难、成林更难的干旱、半干旱地区而言,无疑与营造沙棘人工林的初衷背道而驰。

2 沙棘人工林早衰成因

2.1 干旱胁迫

适宜沙棘生长、存活的年降水量为 500~700 mm,而在其广泛分布区域的年降水量大多在 250~500 mm,降水不足且比较集中^[8-9]。因此,干旱胁迫成为沙棘早衰的主导因素。田间试验表明,3 a 沙棘人工林生长和克隆繁殖能力最大时的灌水量为 900~1 050 mm,而当地年降雨量仅为 300 mm^[23-24]。盆栽试验表明,土壤含水率 10%时,沙棘存活率较土壤含水率 25%和 40%时分别下降 66.7%、33.4%,且苗木生长不良,严重影响新生子株的存活^[25-27]。试验还表明,轻度和中度干旱使沙棘树高较对照降低 18.0%和 29.8%,而重度干旱使树高下降 57.2%且最终导致 33.3%的幼苗死亡^[25]。肖志勇^[20]等在黄土高原的调查结果表明,在不同坡向和坡位,随着土壤含水率的下降,子株数量减少、萌蘖根的延伸能力和分枝强度降低。由此可见,在干旱胁迫下,种群以降低生长量和克隆繁殖能力为代价来提高现有植株的存活与生长概率^[28]。换言之,干旱胁迫必定导致种群(分株)寿命缩短、个体变小、繁殖能力减弱,最终降低种群的稳定性和持久性。

2.2 病虫害危害

危害沙棘的病虫害共有95种,其中最严重的是干缩病、沙棘木蠹蛾和红缘天牛^[29]。自1990年起,干缩病就一直危害沙棘的存活与生长。2002年半干旱地区的沙棘感病率达40%,导致大片人工林干枯死亡^[30]。同样,沙棘木蠹蛾、红缘天牛通过蛀空树根、树干使根系吸收能力下降、养分输送系统受阻,导致种群早衰。调查结果显示,在我国“三北”地区,由虫害引起的沙棘死亡率达40%;建平县被沙棘木蠹蛾重度侵染的沙棘达60%;山西省约50%的沙棘已受到沙棘木蠹蛾的危害^[9-13,31]。林内养虫试验进一步表明,6 a内山坡林分的有虫株率增加了45.6倍,而河滩林分的有虫株率不但没有增加反而下降。究其原因,是由于河滩林分较高的土壤含水量诱发了一系列抗生因素综合作用的缘故^[31]。据此将沙棘种群早衰的过程描述为:干旱胁迫造成树势衰弱,继而使病虫害侵入,最终导致沙棘种群早衰。

2.3 密度过大

沙棘是典型的克隆植物,其种群扩散极其迅速,而以往的造林设计常采用非克隆植物标准确定造林密度,导致初值密度过大。而过大的初植密度加之克隆繁殖短期内使得群落生产力超过“土壤水分植被承载力”,土壤含水量极度下降且处于负补偿状态,最终形成“土壤干层”^[32]。此时,种群以降低地上生物量投资与分配、增大地下垂直根的投资与分配作为响应,即以降低种群生长和繁殖能力来拓展地下资源吸收的范围和能力,反而又加剧了土壤干层的形成。虽然7—9月份的降雨能补充部分水分,但远不能满足沙棘生长或恢复土壤干层的需要。如果遇到连年干旱,土壤水分亏缺更严重,恢复速度远不及土壤干层的形成速度,最终导致土壤供水能力大大减弱,由此导致土壤水分退化而使植物个体矮小、树冠稀疏、衰老起始龄提前。

2.4 不合理的造林设计

不合理的造林设计是导致沙棘早衰的又一原因。其一,沙棘主栽区虽干旱缺水但环境异质性很高。如,河谷两岸、下湿地拥有丰富的地表水;阴坡土壤含水量高于阳坡、沟谷下部高于上部和中部、丘间地高于流动沙地^[27]。而以往的造林多属集中连片设计,尤其是不同地段采用同一密度造林或相同的造林技术,因此在立地水分条件较差地段造成早衰现象。其二,沙棘是典型的克隆植物,能够通过“串根萌蘖”实施种群的迅速扩散,并通过生理整合、觅养行为、死亡风险分摊等特性利用有利生境斑块、逃避不利生境斑块以及分株之间的资源共享,从而

提高资源的利用效率及克隆繁殖和分株生存的有效性。对这一特性的忽视,使得人们像对待非克隆植物一样将沙棘集中连片造林,从而在不利生境斑块造成沙棘早衰。其三,沙棘广泛分布于干旱、半干旱地区,且能在某些地段正常生长,因此忽视了对抗旱节水技术的应用,缺水导致的早衰在所难免^[9]。由此可见,不同地段采用同一密度、同一技术集中连片造林必将影响其生长和繁殖能力,限制其“克隆整合”特性的发挥,从而造成人工林早衰。

2.5 经营管理不善

经营管理不善导致的沙棘人工林早衰,其原因可归纳为不能及时平茬、掠夺式采收、动物啃食及践踏等方面^[33]。其一,随着降水量或土壤含水量的下降,沙棘逐渐由乔木转变为小乔木或灌木,寿命相应缩短。当沙棘生长到一定年龄时,就会出现长势衰弱现象,继而病虫害入侵造成大面积早衰。如果不能在此之前及时平茬复壮,则会造成早衰。其二,沙棘具枝刺、果实小、易破烂,因此生产中通常以折断枝条来采集果实或叶片,这种掠夺式收获不仅使树体受到直接伤害,而且使光合作用受阻,长势衰弱则难以避免。其三,动物啃食嫩枝、嫩叶对树体造成直接伤害,反复啃食幼苗则使沙棘更新受阻。同时,超载的牲畜践踏使得林地土壤过度紧实,改变了土壤三相和物理结构,从而影响根系的生长及幼苗的萌发,同样影响树体生长和幼苗更新。因此,不能及时平茬、掠夺式采摘、过度放牧都将使林木生长迟缓、更新困难,从而促使沙棘人工林早衰。

3 沙棘人工林更新复壮

干旱胁迫、不合理的造林设计、未能及时平茬复壮等因素引起沙棘长势衰弱、克隆繁殖能力降低,最终导致种群早衰。针对这些实际问题,考虑树种特性和立地特征,可从以下几方面对沙棘人工林进行更新复壮。

3.1 采用平茬促萌技术,及时恢复种群数量和结构

平茬能促使沙棘根系和伐桩大量萌蘖,从而可达到更新复壮之目的。对5~7 a沙棘人工林进行平茬,其萌蘖密度可达3.89万株/hm²,且生长旺盛^[34]。研究还表明,4、9 a平茬萌蘖林分的种群密度和生物量是未平茬同龄林分的122%、684%和208%、430%,年均生产力达1.983、2.834 t/hm²,均高于沙棘种群生物量积累高峰期的产量^[35]。平茬以后,种群密度经过上升、下降再趋于平稳,年龄结构经过增长型、稳定型再趋于衰退。因此,通过平茬萌蘖不仅可以恢复种群数量和结构,而且能够大

幅度提高群落生产力。然而,当平茬萌蘖种群数量趋于稳定或年龄结构趋于衰退时,只有通过再次平茬萌蘖才能重新恢复种群的数量和结构^[36]。

早衰前及时平茬是沙棘林更新复壮的有效途径,其中关键在于平茬年龄、周期等参数的确定^[36-37]。以前,关于沙棘林平茬的年龄主要根据林种来确定。事实上,平茬后能否很好地更新复壮取决于种群的生长状况,只有在长势和繁殖能力下降之前平茬才能取得良好的效果。而生长和繁殖能力与立地条件密切相关,尤其是土壤水分状况。综合相关研究结果,河谷两岸、沙区下湿地的平茬年龄及周期为 20 a、阴坡及丘间地 10 a、半阴坡(半阳坡)8 a、阳坡及流动沙地 6 a 左右;平茬效果以春季萌动前较好,平茬方式可采用团状、带状等^[33,36-37]。

3.2 改善树体营养或激素水平,维持生长与克隆繁殖能力

一方面,在沙棘现代分布中心,土壤普遍存在缺磷少氮问题。因此,通过施肥改善树体及土壤氮磷水平尤其重要。在毛乌素沙地 6 a 林分试验表明,氮、磷合理配施能使子株数量、克隆器官生物量及克隆器官总长度提高 95.32%、59.84%和40.97%^[38]。试验也证明,施肥可使沙棘结实量、树高、地径及冠幅明显增加且结实量增幅高达 126.5%^[39]。另一方面,种群生长及繁殖能力与体内激素状况密切相关。试验表明,配合喷施生长素与细胞分裂素不仅可以提高沙棘生长量,而且能够显著增加克隆子株数量^[40]。因此,通过氮肥与磷肥或生长素与细胞分裂素配合施用,可以有效提高沙棘的生长和繁殖能力,从而维持种群的稳定性。

施肥或喷施激素的效果关键在于用量和配比等参数的确定。在沙棘人工林施肥和喷施激素研究中,采用农业配方施肥推荐的二因素三水平回归设计取得良好效果^[38,40]。与常规方法相比,该法不仅可通过等产线方程求出最佳用量和比例,而且能利用肥料效应方程分析单因素效应和交互效应,值得推荐。如果能在沙棘主产区不同立地类型、不同林分状况开展区域化试验,即可确定不同情况下的最佳用量和比例,为沙棘人工林的持久性维持提供科学依据。

3.3 做好异质性造林设计,发挥克隆整合作用潜力

沙棘之所以能够在我国北方干旱、半干旱地区蔚然成林,主要归因于克隆整合性与生境异质性的耦合作用。以毛乌素沙地为例,沙棘通过克隆繁殖可从丘间地扩散到沙丘坡面甚至沙丘顶部^[2-3]。一方面,通过克隆内的“生理整合”作用,即克隆器官

(联结克隆分株的水平侧根)的转输功能,地处丘间地的母株可与地处沙丘的克隆子株共享水分资源,从而提高克隆分株存活和生长的有效性。另一方面,沙棘通过“形态整合”形成与环境异质性相适宜的散布格局和个体形态,从而提高克隆利用有利生境和避免不利生境的概率^[3,5]。

鉴于以上理由,沙棘造林应该提倡异质性设计,在不同斑块采用不同的造林密度和配置方式,将克隆习性与环境异质性有机结合起来,从而有效地预防早衰。在河流两岸、沟谷,采用块状或带状造林并适当密植;在山地或丘陵坡面,采用块状造林,并从阴坡、半阴坡(半阳坡)到阳坡依次降低造林密度;在丘间地或季节性积水的洼地周边,采用块状、带状造林并适当密植;在沙丘下部或狭小的丘间地,采用行状或零星栽植。然后,依托其自身克隆生长实施种群扩散和维持种群稳定性,辅之以平茬技术保证种群功能的可持续利用。这样的造林设计,还有利于避免短期内群落的密度或生产力超过“土壤水分植被承载力”。

3.4 推广径流林业技术,改善林地土壤水分状况

沙棘人工林早衰虽然表现为提前枯死或病虫害危害,但其根本原因在于干旱胁迫。在沙棘现代分布中心,降水少而蒸发量大是造成干旱缺水的根源。因此,加大林地水分输入、减少土壤水分散失是防止人工林早衰的有效途径。田间试验表明,通过林地灌水不仅可以改善土壤水分状况,而且能够促进沙棘营养生长及其克隆繁殖,从而维持种群的稳定性^[23]。目前,矿区植被恢复、高速公路及城镇周边绿化已普遍采用滴灌设施,为相应地段的沙棘人工林灌溉提供了条件。对于荒山荒地的大面积人工林而言,则可采用工程措施汇集地表径流、采用覆盖措施减少土壤水分蒸发^[41-42]。无论是采用滴灌还是径流林业技术,应充分考虑沙棘的克隆习性,只对部分生长旺盛、繁殖良好的母株或克隆采取相应措施,这样可以收到事半功倍的效果。

除了以上针对性措施,加强林地保护、及时防治病虫害也可促进植株生长及克隆繁殖,从而维持种群的稳定性或持久性。

4 研究展望

通过平茬更新或其他措施恢复或维持种群稳定性和持久性是延缓沙棘人工林早衰的有效途径,但其理论探讨远远落后于技术研究。为了给沙棘人工林稳定性长期维持以及早衰人工林复壮提供理论依据,今后应加强相应的理论基础研究。

4.1 探讨沙棘人工林早衰机制,为种群持久性维持提供依据

沙棘人工林早衰的根源在于干旱胁迫,关键在于干旱胁迫降低了克隆生长能力。但是,目前的研究集中在早衰现象报道和抗旱生理(生态)方面,缺乏干旱胁迫致衰机制研究。事实上,植物外部形态以及体内生理、生化变化源于环境胁迫导致的基因表达的改变^[43-44]。因此,只有从基因表达随水分状况的改变规律入手,分析基因表达、生理(生化)、生态特征之间的因果联系,才能系统了解沙棘人工林早衰的干旱胁迫机制,从而为种群的持久性维持提供理论依据。一方面,需要探讨基因表达对水分状况的响应规律及其对克隆生长的调控作用。另一方面,需要探讨激素状况、生理(生化)过程对基因表达的响应规律,以及激素状况、生理(生化)过程对克隆生长的调控作用。然而,与沙棘激素及抗旱相关的基因目前多属于未知基因,因此研究的关键在于寻找相似性较高的内参基因以及激素、生理(生化)相关基因的克隆。

4.2 探讨沙棘人工林平茬更新机制,为早衰种群恢复提供依据

对沙棘而言,平茬使整个克隆地上构件全部或部分丧失,而克隆的地下构件仍然保持原有状态。因此,平茬不仅会改变地上与地下构件原有的资源分配格局,而且会影响其生理(生化)、生态学甚至基因表达过程。然而,关于沙棘人工林平茬更新的研究目前集中在平茬年龄、周期、季节等技术方面,关于平茬更新效果与这些改变之间的因果关系并不了解。朱万泽^[45]等总结了森林树种萌生更新的研究成果,将其归纳为生境假说、干扰假说、资源分配假说、激素调控假说等 6 种机制,这些假说从各自的角度均能较好地解释植物的萌生更新机制,但它们又有一定的局限性。鉴于这些情况,今后应加强沙棘人工林平茬更新能力对环境条件、平茬状况、资源分配、激素调控等的响应规律与机制研究。也可参考人工林早衰机制研究思路,从基因表达对不同平茬措施、不同环境条件的响应规律入手,分析生态、生理(生化)、激素与基因表达之间的因果关系,较为系统地揭示沙棘人工林平茬更新机制,为早衰人工林复壮提供理论依据。

参考文献:

[1] 李根前,唐德瑞,赵一庆,等.沙棘的生物学与生态学特性[J].西北植物学报,2000,20(5):892-897.
LI G Q, TANG D R, ZHAO Y Q, et al. The biological property and ecological habit of *Hippophae* [J]. Acta Botanica Bore-

ali-occidentalia Sinica, 2000, 20(5): 892-897. (in Chinese)
[2] 胡建忠,包文林,李敏,等.毛乌素沙地南缘陕甘三县市沙棘种植情况考察报告[J].沙棘,1995(8):13-16.
[3] 贺斌,李根前,徐德兵,等.沙棘克隆生长及其生态学意义[J].西北植物学报,2006, 21(3): 54-59.
HE B, LI G Q, XU D B, et al. The clonal growth and its ecological significance of *Hippophae* [J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2006, 21(3): 54-59. (in Chinese)
[4] WATSON M A. Integrated physiological units in plants [J]. Trends in Ecology and Evolution, 1986(1): 119-123.
[5] CARCO T, KEYLLY C K. On the adaptive value of physiological integration in clonal plants [J]. Ecology, 1991, 72: 81-93.
[6] 张大勇.植物生活史进化与繁殖生态学[M].北京:科学出版社,2004.
[7] 李敏.中国沙棘资源开发利用 20 年主要做法与经验[J].沙棘, 2005, 18(4): 1-4.
[8] 胡建忠,土小宁,温秀凤.晋陕蒙甘能源开发区适宜种植沙棘的立地类型及有关建议[J].中国水土保持,2009(4):42-44.
[9] 李秀寨,李根前,韦宇,等.中国沙棘大面积死亡原因探讨[J].沙棘,2005,18(1):24-28.
[10] 惠兴学,张连翔,孔繁弑,等.建平县沙棘林大面积死亡成因调查分析及对策[J].防护林科技,2002(2):53-55.
[11] 宫海志,王军.建平县沙棘林大面积死亡成因分析及经营对策[J].中国水土保持,2003(4):17-18.
[12] 邹吉东,杜海洋,安树超,等.关于沙棘林死亡原因及经营发展对策的探讨[J].内蒙古林业调查设计,2011,34(3):98-99.
[13] 周章义.内蒙古鄂尔多斯市东部老龄沙棘死亡原因及其对策[J].沙棘,2002,15(2):7-12.
[14] 甘家生.谈谈油茶早期衰老及其控制[J].云南林业,1981(2): 26-29.
[15] 薛祚莘,彭松茂.丘陵区杉木人工中龄林抚育抑制早衰的研究[J].湖南林业科技,1997,24(1):13-16.
[16] 朱教君,李凤芹.森林退化/衰退的研究与实践[J].应用生态学报,2007,18(7):1601-1609.
ZHU J J, LI F Q. Forest degradation/decline: research and practice [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(7): 1601-1609. (in Chinese)
[17] 朱教君,曾德慧,康宏樟,等.沙地樟子松人工林衰退机制[M].北京:中国林业出版社,2005.
[18] 吕荣森.四川的沙棘资源研究[J].沙棘,1988,11(1):10-14.
[19] 代光辉,李根前,李甜江,等.水分条件对中国沙棘生长及种群稳定性的影响[J].西北林学院学报,2011,26(2):1-8.
DAI G H, LI G Q, LI T J, et al. Effects of water conditions on the growth and population stability of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(2): 1-8. (in Chinese)
[20] 肖智勇,李根前,代光辉,等.黄土高原不同坡向中国沙棘种群生物量投资与分配[J].东北林业大学学报,2011,39(5):44-48.
XIAO Z Y, LI G Q, DAI G H, et al. Biomass allocation and investment of *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis* populations under different aspects of slope in the Loess Plateau [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(5): 44-48. (in Chinese)
[21] 惠兴学,洪新,于欣,等.辽西地区沙棘退化林分的修复与前

景[J]. 国际沙棘研究与开发,2009,6(4):24-29.

HUI X X, HONG X, YU X, *et al.* Restoration of degraded seabuckthorn stands and prospects in the western Liaoning [J]. The Global Seabuckthorn Research and Development, 2009,6(4):24-29.

[22] 周章义,尹伟伦,梁华军,等. 沙棘抗沙棘木蠹蛾的立地条件及其机理[J]. 北京林业大学学报,2007,29(5):50-57.

ZHOU Z Y, YIN W L, LIANG H J, *et al.* Mechanism and the stand conditions of *Hippophae rhamnoides* resistance to *Holcocerus hippophaecolus* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007,29(5):50-56. (in Chinese)

[23] 李甜江,李根前,徐德兵,等. 中国沙棘克隆生长对灌水强度的响应[J]. 生态学报,2010,30(24):6952-6960.

LI T J, LI G Q, XU D B, *et al.* The clonal of *Hippophae rhamnoides* L. ssp. *sinensis* in response to irrigation intensity [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010,30(24):6952-6960. (in Chinese)

[24] 李孙玲,李甜江,李根前,等. 毛乌素沙地中国沙棘存活及生长对灌水和密度的响应[J]. 西北林学院学报,2011,26(3):107-111.

LI S L, LI T J, LI G Q, *et al.* The growth and survival of *Hippophae rhamnoides* L. ssp. *sinensis* in response to irrigation intensity and initial density in Mu Us Sand [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(3): 107-111. (in Chinese)

[25] 李丽霞,梁宗锁,韩蕊莲. 土壤干旱对沙棘苗木生长及水分利用的影响[J]. 西北植物学报,2002,22(2):296-302.

LI L X, LIANG Z S, HAN R L. Effect of soil drought on the growth and water use efficiency efficiency of seabuckthorn [J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2002,22(2):296-302. (in Chinese)

[26] 贺斌,李根前,高海银,等. 不同土壤水分条件下中国沙棘克隆生长的对比研究[J]. 云南大学学报:自然科学版,2007,29(1):101-107.

HE B, LI G Q, GAO H Y, *et al.* A comparison study on the clonal growth of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* at different soil moisture condition [J]. Journal of Yunnan University: Nat. Sci. Edi., 2007,29(1):101-107. (in Chinese)

[27] 贺斌,李根前,李周岐,等. 木本克隆植物中国沙棘种群数量与结构对土壤水分的响应[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(3):183-188.

HE B, LI G Q, LI Z Q, *et al.* Population quantity and population structure in response to soil moisture in the clonal tree species *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* [J]. Journal of Journal of Northwest Agriculture and Forest University: Nat. Sci. Edi., 2007,35(3):183-187. (in Chinese)

[28] SILVERTOWN J W. Introduction to plant population ecology[M]. 3rd ed. American: Longman Scientific & Technical, 1993.

[29] 王鑫. 沙棘病虫害研究进展[J]. 防护林科技,2010(6):58-61.

[30] 杜汉君. 沙棘干缩病发病规律及成因的调查与分析[J]. 沙棘,2001,14(1):13-15.

[31] 孟晶岩,王贤萍,巫东堂,等. 山西省沙棘资源利用现状及发展对策[J]. 山西农业科学,2004,32(4):64-67.

[32] 郭忠升,邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报,2003,8(4):1640-1647.

GUO Z S, SHAO M A. Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid regions of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003,23(8):1640-1647. (in Chinese)

[33] 肖智勇. 毛乌素沙地中国沙棘人工林衰退的成因及其基本特征[D]. 昆明:西南林业大学,2011.

[34] 包永平,王景余,孙德学,等. 沙棘平茬复壮更新技术研究[J]. 防护林科技,2004(3):14-15.

[35] 李根前,唐德瑞,赵一庆. 毛乌素沙地中国沙棘平茬更新的萌蘖生长与再生能力[J]. 沙棘,2007,20(4):10-13.

[36] 徐德兵,赵粉侠,李根前,等. 中国沙棘种群稳定性维持机制的探讨[J]. 福建林业科技,2008,35(2):148-154.

[37] 党晓宏,高永,汪季,等. 沙棘林能源价值及平茬复壮技术研究[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(2):176-181.

DANG X H, GAO Y, WANG J, *et al.* The technology of stumping and rejuvenation and firewood carbon value of *Xanthoxerces sorbifolia* economic forest[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(2): 176-181. (in Chinese)

[38] 贺斌. 毛乌素沙地中国沙棘克隆生长对氮磷施肥的响应[D]. 昆明:西南林学院,2007.

[39] 王春,毛齐来,张晓玲. 半干旱地区沙棘园施肥试验[J]. 防护林科技,2010(1):28-31.

[40] 李甜江,李根前,贺斌,等. 克隆植物中国沙棘生长对外源植物激素的响应[J]. 生态学报,2010,30(3):0659-0667.

LI T J, LI G Q, HE B, *et al.* The growth of clonal plant *Hippophae rhamnoides* L. ssp. *sinensis* in response to exogenous phytohormone [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(3): 0659-0667. (in Chinese)

[41] 吴淑芳,冯浩,吴普特. 干旱半干旱地区径流林业研究进展[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(4):150-155.

WU S F, FENG H, WU P T. Progress and prospect of runoff forestry in arid and semiarid regions[J]. Northwest Agriculture and Forest University: Nat. Sci. Edi., 2007,35(4):150-155. (in Chinese)

[42] 张海,易永华,杨荣惠,等. 黄土坡地径流收集膜下自流出滴灌溉系统设计及其生态效益研究[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(5):118-123.

ZHANG H, YI Y H, YANG R H, *et al.* A study on the design of runoff-collecting system for auto-flowing drip irrigation under film and its ecological benefit in slope land of the Loess Plateau [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(5):118-123. (in Chinese)

[43] BRAY E A. Molecular responses to water deficit[J]. Plant Physiology, 1993, 103:1035-1040.

[44] 张海娜,谷俊涛,郭程瑾,等. 植物衰老的分子生物学基础[J]. 草业学报,2009,18(1):163-170.

ZHANG H N, GU J T, GUO C J, *et al.* The basis of molecular biology of senescence in plants[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009,18(1):163-170. (in Chinese)

[45] 朱万泽,王金锡,罗成荣,等. 森林萌生更新研究进展[J]. 林业科学,2007,43(9):74-82.

ZHU W Z, WANG J X, LUO C R, *et al.* Progresses of studies on forest sprout regeneration [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007,43(9):74-82. (in Chinese)