

我国固沙植物抗旱性及基于水量平衡的沙地造林 合理密度研究进展

蒋德明¹, 张 娜^{1,2}, 阿拉木萨¹, 李雪华¹, 周全来¹, 押田敏雄³, 郭守业⁴

(1. 中国科学院 沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 日本麻布大学 兽医学部, 日本 相模原 252-5201; 4. 翁牛特旗林业局, 内蒙古 赤峰 024500)

摘 要:针对我国部分地区固沙成林出现早衰甚至枯死问题, 本文对沙地典型固沙植物抗旱性特征、固沙林地水分平衡特征和基于水分平衡的沙地合理造林密度研究进行了论述, 明确了沙地植被恢复中, 应根据植物的抗旱性特征, 对水分循环规律进行量化研究, 并参照其地带性植被的特征和立地条件的空间异质性, 进行植物种类和密度的规划确定, 以期建立稳定的人工固沙植被提供依据。

关键词:干旱半干旱区; 固沙植被; 耐旱性; 水分平衡; 造林密度

中图分类号: S727.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2013)06-0075-09

Plant Drought Resistance and Afforestation Density Based on Water Balance in Sandy Land, China: A Review

JIANG De-ming¹, ZHANG Na^{1,2}, A Lamusa¹, LI Xue-hua¹, ZHOU Quan-lai¹, TOSHIO Oshida³, GUO Shou-ye⁴

(1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. Azabu University, Sagami-hara 252-5201, Japan;
4. Wenniute Forestry Bureau, Chifeng, Inner-Mongolia 024500 China)

Abstract: Aiming to solve the problems of presenility and decay of the sand-fixation forests in some sandy areas in China, related factors were discussed in details, such as drought resistance of plants, water balance of sand-fixation forests and optimum afforestation density based on water balance. It was concluded that during vegetation restoration in sandy areas, quantization analysis of water balance should be carried out based on the characteristics of drought resistance of the plants. Distribution patterns of zonal vegetation and spatial heterogeneity of site conditions should also be considered in development of artificial vegetation.

Key words: arid and semi-arid area; sand-fixing vegetation; drought resistance; water balance; planting density

我国在沙地治理过程中广泛使用生物固沙方法, 建立了大面积的人工固沙植被, 有效的遏制了沙漠化的扩大。生物固沙方法以其效果好、成本低、实施方便等优点得到了广泛的应用, 有效的控制了沙地的外侵趋势。随着生物固沙植物生长时间的延续, 固沙植被区出现土壤水分状况恶化现象, 部分植被区土壤水分低于植物凋萎湿度, 固沙植被出现生长衰退甚至死亡现象, 导致现有固沙植被的稳定性

受到威胁, 部分已经固定的沙丘有退化的趋势。这些问题产生的根本原因在于土壤水分供给能力和植被耗水量之间的失衡, 虽然造林初期多栽一些树木可以早日起到固沙作用, 但是后期会导致林木水分营养面积不足, 土壤水分持续严重亏缺, 引起林分衰退, 甚至死亡^[1-4]。为此, 有必要探讨沙地人工固沙林木的抗旱性及基于林地水分平衡的合理造林密度, 为沙地稳定的人工固沙植被建设提供依据。

收稿日期: 2013-04-08 修回日期: 2013-05-27

* 基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD16B0302), 国家林业公益性行业科研专项(201004023)。

作者简介: 蒋德明, 男, 研究员, 研究方向: 荒漠化防治。E-mail: jiangdeming@iae.ac.cn

1 固沙植物抗旱性研究

抗旱性在一定程度上可反映植物对沙地的适生程度。因为沙地固定后,植物生长的最大限制因子为水分,如何选择耐旱品种对于沙地造林成活率有着极为重要的意义^[5]。植物适应干旱的机理可分为3类:御旱、耐旱和高水分利用效率^[6],御旱是指水分胁迫发生时,植株通过维持组织的高水势或以组织水势略微下降来忍受干旱的能力;耐旱则是随水势的降低,植物组织的生理活动或代谢活动下降较低的能力,并在胁迫解除后,尽快恢复各种生理活动的能力;高水分利用效率的植物种则能够在缺水的条件下形成较高的产量^[7]。

1.1 植物抗旱性指标

植物抗旱性鉴定指标一般分为5个指标:生长发育、形态特征指标;生理生化指标;产量鉴定指标;综合评价指标^[8]。植物生长指标往往是与育种目标有关的,如产量、树高、总生物量等,这些指标受水分胁迫的影响明显。形态特征指标方面,植物根系的生长特征是一个重要的耐旱性指标,深根系的植物往往比浅根系的植物更耐旱^[9]。旱生型叶子结构特点要比湿生型叶子更有利于减少水分损失。基于生理指标筛选耐旱性植物品种一直是研究的重点,常用的度量指标有净光合速率、蒸腾强度、水分利用效率、气孔导度等^[10]。水分胁迫导致某些蛋白、氨基酸和可溶性糖等物质大量合成^[11],从目前的研究结果来看,选用生化代谢产物作植物耐旱指标应十分慎重。综合评价指标即把根系、叶、茎生长、生理生化指标按一定的数量综合构成一个选择指数,其优点是容纳更多的信息,以提高选择的可靠性^[12]。

1.2 植物抗旱性研究方法

关于固沙植物的抗旱性研究,在植物幼苗阶段主要是采用盆栽方式,设置不同水分梯度,调查不同水分梯度下材料的各项生理、生化指标变化情况,对比不同植物幼苗的抗旱性强弱,或探讨植物的抗旱机理,或以幼苗为试材探索干旱胁迫下植物的生理生化过程^[13]。成林阶段植物抗旱性研究是对林地进行野外调查,通过对调查因子的分析,探讨植物抗旱机理及各调查因子变化的规律。从研究对象的不同分为个体水平和群体水平两类。个体水平的研究是指对单株植物的调查,研究对象集中在树体本身,包括对离体材料的结构、抗旱生理指标、根系的分布状态及地上、地下部生物量等进行测定,通过对这些因子进行分析研究,探讨植物的抗旱机制^[14]。群体水平研究是指对林地的小气候、土壤水分条件、水量平衡状况进行调查,探索影响植物抗旱能力的环境

因子及植物对各环境因子的影响^[15-16]。

1.3 典型固沙植物抗旱性研究

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙地柏(*Sabina vulgaris*)等物种作为典型固沙植物在沙地植被恢复建设中得到广泛应用,研究其抗旱生理生态特征和抗旱、固沙能力强弱,可为沙地固沙植被选择提供科学依据。

1.3.1 樟子松抗旱性研究 樟子松具有抗旱、抗寒、较速生的优良特性,适应性强,自20世纪50年代开始人工引种栽培用于固沙造林,现已成为我国北方荒漠化地区防风固沙造林的重要树种之一^[13]。

形态特征是植物对环境适应的直接反映^[17]。从形态特征上看,樟子松抗旱性表现在具有发达的角质层、密度较小且深陷的气孔、致密的表皮细胞;单叶比叶面积小;主侧根系大和根系分布深^[18]。章古台沙地樟子松根系主要分布在100 cm以内的土壤层,吸收根主要分布在表土层,既可以有效利用地下水,又不会轻易造成地下水位下降^[19]。

从水分和光合生理角度看,樟子松保水能力越强,临界水分亏缺延迟时间越长;叶片蒸腾强度不大,叶绿素含量大,积累的干物质多;树木耗水量较小^[20]。郭连生^[21]等运用PV技术研究表明樟子松为强抗旱性树种。李进^[22]等通过测定束缚水/自由水、束缚水含量、叶片持水力等指标得出樟子松抗旱性强于油松(*Pinus tabulaeformis*)、小叶杨(*Populus simonii*)。李雪华^[23]等通过对3年生盆栽樟子松苗主要生理指标测定,表明樟子松幼苗抗旱机制以耐脱水为主。成龄樟子松以延迟脱水为主^[24-25]。大量研究和实践证明樟子松耐干旱、耐贫瘠,是防护林体系建设适宜采用的一个理想造林树种^[26]。

1.3.2 柠条抗旱性研究 柠条是豆科锦鸡儿属植物统称,主要栽培种为小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)和柠条锦鸡儿。柠条耐旱、耐寒、耐高温,枝条再生能力强,防风固沙作用突出,是干旱半干旱地区重要的固沙灌木造林树种之一^[27]。

从形态特征上看,柠条根系发达,具有很强的吸收深土层水分的能力。山西省兴县小叶锦鸡儿1 a生主根长度可达81 cm,5 a生可达368 cm。柠条叶退化为条形、狭条或线形,叶面积小,具有很强的旱生结构^[28]。

从生理生化角度研究柠条抗旱性有较多报道。吕忠良^[29]等通过对柠条、杨柴(*Hedysarum fruticosum* var. *mongolicum*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)组织相对含水量变化、幼苗蒸腾速度变化、细

胞膜透性变化测定,得出柠条幼苗抗旱性强于花棒和杨柴。李雪华^[30]等对科尔沁沙地小叶锦鸡儿、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)和胡枝子(*Lespedeza bicolor*)4种植物的若干水分生理生态指标测定,得出其抗旱能力为小叶锦鸡儿>差巴嘎蒿>胡枝子>紫穗槐。可见,柠条抗旱性强,是沙地首选固沙物种。

1.3.3 黄柳(*Salix gordejewii*)抗旱性研究 黄柳是科尔沁、浑善达克等沙地重要的固沙先锋灌木,具有耐寒、耐热、抗风沙、易繁殖、生长快、萌芽力强等特点,对沙地生态环境的改善起着十分重要的作用^[31]。

黄柳叶片叶肉全栅化,为等面叶,上、下表皮细胞外壁加厚且均具角质层,是典型的沙生灌木的形态结构特征;黄柳根系庞大,耐沙埋,易生不定根以加速生长。黄柳采用多种子、高萌发、低存活的繁殖策略以适应沙地环境,属于r型对策者。在生理特性上,黄柳表现出对沙地干旱环境的适应特性^[32]。李红丽^[33]等通过对浑善达克沙地不同土壤水分条件下黄柳的蒸腾速率季节变化测定,证明黄柳为低蒸腾植物。岳广阳^[34]等指出黄柳叶片蒸腾速率和单枝蒸腾耗水量均大于小叶锦鸡儿,相对于小叶锦鸡儿耐旱性较低。

1.3.4 沙地柏(*Sabina vulgaris*)抗旱性研究 沙地柏为常绿针叶灌木树种,它匍匐生长,枝叶茂盛,水平根系特别发达,群聚度高,喜沙压,抗风蚀,是半干旱地区固沙造林的优良树种。从形态解剖特征上看,其叶片小,大部分退化为鳞片状,气孔少且凹陷,栅状组织发达,无海绵组织,角质层厚,机械组织强化,在外部形态和组织结构上均表现为抗旱性。生理生化特征上,沙地柏具有束缚水与自由水值高、子叶内水势低、蒸腾速率低等抗旱性强的特点,是一种优良的固沙树种^[35]。

1.3.5 油松抗旱性研究 油松是我国的特有种,是我国干旱和半干旱地区主要的固沙造林树种之一^[36]。董胜君^[37]通过对油松、山杏(*Armeniaca sibirica*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)的叶片水势、光合作用等生理特征对比,认为油松、山杏相对于其它树种更具有抗旱性。吴祥云^[14]等研究发现科尔沁沙地章古台地区油松耐干旱瘠薄的生理生态特性虽比樟子松差,但优于小青杨(*Populus pseudo-simonii*)。

1.3.6 沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)抗旱性研究 沙枣主要分布在新疆塔里木、吐鲁番和准噶尔3大盆地。其耐旱、耐高温、耐盐碱、耐贫瘠,是防风固沙的优良树种^[38]。张耀甲^[39]研究发现沙枣的抗旱、

耐热能力比白刺(*Nitraria tangutorum*)、梭梭(*Haloxyylon ammodendron*)要低得多,沙枣的抗旱性较小,非真正的抗旱耐热植物。

植物的抗旱性是其对于干旱长期适应的一种复杂的综合遗传特性,具体评价某树种的抗旱性还需考虑多方面的因素。目前,梭梭、花棒、杨柴、柠条、沙柳(*Salix cheilophila*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、枸杞(*Lycium potaninii*)等树种以及圆柏(*Sabina*)、松(*Pinus*)、栎(*Quercus*)等属中很多抗旱性相对强的树种,已被确定为干旱立地的栽培树种^[8]。

2 固沙林地水分平衡研究

在干旱及半干旱地区,水分是影响植物生长发育的限制因子。因此,研究植物栽植区的水分平衡,也就是研究水分的收入(降水量)与支出(蒸腾蒸发量),乃是进行植物栽植工作的重要理论依据^[40]。探讨主要乔灌木林群落土壤水分和水分平衡的研究和植被对水资源的调控机理,对今后沙地综合治理以及生态恢复具有重要的意义。沙地植被区一般的水文循环过程可表示为:

$$P + C_w = ET + R + D + \triangle S \quad (1)$$

式中: P 为降雨量(mm); C_w 为凝结水(mm); ET 为蒸散量(mm); R 为地表径流; D 为深沙层水分渗漏量(mm); $\triangle S$ 为计算时段内沙层水分变化量(mm)^[41]。

蒸散量是干旱半干旱地区水资源与水文研究中非常重要的量值,精确计算固沙植被区的蒸散耗水量对建设和精准管理人工固沙植被,防止人工植被区因水分失衡而衰退具有重要作用。植物固定沙丘后,明显地增加了风沙土的蒸散量,增加的蒸散量主要来源于对土壤深层水分补充量的截留作用,不足部分以消耗土壤贮水量来补充^[42]。从沙地水分的有限性和植物群落土壤水分供需平衡的角度分析,如果植物群落土壤水分亏缺程度较轻,且能及时得到补充,则该植物群落的适应性和稳定性较强^[43]。

我国沙地类型丰富,地理分布及气象条件差异大,研究者在不同沙地区域开展了广泛研究,在林地水分平衡研究中得出大致相同的结果,不同地区、不同树种其蒸散量不同,但年总蒸散量接近年均降水量。降水大部分用于蒸散消耗,土壤贮水量低。

2.1 毛乌素沙地固沙林地水分平衡研究

毛乌素沙地(107°20′~111°30′E,37°30′~39°20′N)包括内蒙古伊克昭盟、陕北榆林和宁夏东北部,面积73 344 km²,具有固定、半固定沙地向黄土

丘陵过渡地貌特征^[44]。

毛乌素沙地南缘的宁夏回族自治区盐池县沙边子治沙基地(107°26′ ~ 107°33′ E, 37°52′ ~ 37°57′ N),年降雨量 280 mm,年蒸发量 2 710 mm。沙柳是毛乌素沙地主要人工固沙树种之一。安慧^[45]等测得该区沙柳人工固沙灌丛(1982 年人工建植)不同栽植密度(0.6 和 0.8 株·m⁻²) 生长季内蒸散量分别为 109.7 mm 和 114.5 mm,分别占同期降雨量的 87.0 %和 90.8 %,较高密度植被区的大部分降雨通过蒸散作用损失,土壤水分难以得到降雨补充,土壤水分状况趋于恶化。黄利江^[46]等测得该沙区油蒿(445 株·hm⁻²) 的根系层易于从周围土壤中吸收水分,可以维持其植被的长期稳定;而柠条固沙林地(334 株·hm⁻²) 立地水分状况不断恶化。

毛乌素沙地伊克昭盟乌审旗图克苏木境内的毛乌素沙地开发整治研究中心,属温带半干旱与干旱区过度地带,年降雨量 360 mm,年蒸发量为 2 100 ~ 2 600 mm,人工植被多为沙柳、樟子松和杨柴等。该沙区分别于 1986 年和 1988 年营造的人工沙柳灌丛(覆盖度 56.7%) 和樟子松人工林(700 株·hm⁻²),2 种植物在多雨的 1998 年均未发生水分亏缺,而 1997 年均发生水分亏缺,其中,樟子松人工林亏缺 37.18 mm;沙柳人工林亏缺 18.64 mm^[42]。

毛乌素沙地是我国沙漠化严重地区之一,治沙存在的主要问题是树木成活率低,沙地土壤含水量低。该沙区由于水分和养分条件差,灌木林成片存在,而乔木林多为“小老树”,因此,在毛乌素沙地人工固沙植被建设时,应强调各灌木树种种类^[47]。

2.2 科尔沁沙地固沙林地水分平衡研究

科尔沁沙地为我国四大沙地之一,位于我国东北西部、内蒙古沙漠带东段,是东北平原向内蒙古高原的过渡地带,总面积约 5.0×10⁴ km²,生态系统极为脆弱,荒漠化现象严重^[48]。小叶锦鸡儿、差巴嘎蒿、黄柳、山竹岩黄芪(*Hedysarum fruticosum*) 和樟子松因其良好的防风固沙效果在科尔沁沙地人工固沙植被建设中广泛采用^[49]。

章古台(122°22′ E, 42°43′ N)地区位于科尔沁沙地东南缘辽宁省西北部,年降水量 369.1 ~ 641.4 mm(平均 496.7 mm),蒸发量 1 700 mm。该区人工固沙过程中,由于忽视了土壤水分平衡问题,造成了对土壤水分的过度利用。雷泽勇^[50]等测得该区 5 种人工林:樟子松纯林(密度 2 m×2 m,林龄 30 a)、油松纯林(密度 4 m×4 m,林龄 43 a)、杨树纯林(密度 2 m×4 m,林龄 9 a)、樟子松杨树混交林(密度 4 m×4 m,松树 44 a,杨树 9 a)、山杏灌木林(密度 1 m×2 m,林龄 5 a),除油松林地稍好

外,其它几种乔木林地处于水分极度亏缺状况,灌木林地和乔木林地水分亏缺度大致相当。

科尔沁沙地西缘内蒙古翁牛特旗乌兰敖都地区(119°39′ E, 43°02′ N),属于温带半干旱气候类型,年平均降水量(284.4 ± 82.4) mm,年蒸发量为 2 000 ~ 2 500 mm。该区小叶锦鸡儿、樟子松等人工植被区绝大部分的降雨量都通过蒸散作用丧失,植被区土壤很难得到水分的补充。例如阿拉木萨^[51]等研究发现该地区人工小叶锦鸡儿(5 a)和樟子松(7 a)固沙林生长季节累计蒸散量大于同期降水量,生长季节土壤水分未能维持收支平衡。固定沙丘樟子松林地(株行距 1.5 m×2.0 m,树龄 25 a)、小叶锦鸡儿林地(株行距 1.0 m×1.0 m,树龄 15 a)土壤平均含水量低于 3 %,最低达到 1.4 %(小叶锦鸡儿灌丛),在生长季节不能完全满足植被生长的需求。王娟^[52]等研究发现该地区 11 年生和 22 年生小叶锦鸡儿群落土壤含水量基本呈下降趋势,绝大多数土层含水量均低于 1.5 %,水分状况较差。

科尔沁沙地东南部奈曼地区(120°43′ E, 42°55′ N),海拔 363 m。年降雨量 365 mm,年蒸发量 1 935.4 mm。张继义^[53]等对该地区沙地樟子松人工林土壤水分动态研究发现,13 a 林龄的樟子松人工林土壤水分状况很差,降水只能浸润浅表层土壤。奈曼沙地樟子松(15 a,造林密度 2 m×1 m)、小叶杨(15 a,造林密度 2 m×1 m)、小叶锦鸡儿(9 a,造林密度 1 m×1 m)人工植被立地水分状况不断恶化,很难长期维持其稳定性。而差巴嘎蒿(5 a,造林密度 2 m×1 m)立地水分状况未发生严重恶化^[4]。

2.3 腾格里沙漠沙坡头地区固沙林地水分平衡研究

腾格里沙漠东南缘的宁夏沙坡头地区(105°02′ E, 37°32′ N),属于荒漠草原地带。年平均降雨量 186.6 mm。沙坡头地区始建于 1956 年的无灌溉条件下防风固沙人工植被,是我国交通干线防沙体系的成功模式。该固沙植被区主要选择沙生植物柠条、花棒和油蒿等植物,沙层含水量随着固沙年限的增加呈逐渐降低趋势,植被建立 9~10 a 后较深沙层的含水量从最初 3.8 % ~ 3.5 %降至 2 %左右,15 a 后接近 1 %,沙层水分含量已无法满足原有密度的固沙灌木生长^[54]。

王新平^[55]等运用 lysimeter 栽植法得出腾格里沙漠沙坡头地区 4 龄油蒿与柠条植丛生长季蒸散约占同期降雨量的 90 %以上,在干旱年份沙层水分将出现亏缺。沙坡头地区密度 75 株/100 m² 的 2 年生油蒿和柠条蒸散量分别占同期降雨量的 136.6 %和 131.1 %,密度偏大,土壤水分被大量消耗,降水不足以补偿植物的蒸散耗水^[56]。

综上所述,在我国干旱、半干旱地区人工固沙植被恢复建设中,由于在实践中忽视水分平衡问题,造成对土壤水分过度利用的现象普遍存在。人工林的营造改变了沙地水分的再分配。加之人工林营造后林地表层细粒物质增加,沙土物理性质发生变化,持水力增加,透水性下降,致使林地水分分布浅层化。深根性植物生长逐渐衰退,浅根性及短命植物得以生存。因此,在固沙植物建设中,如果造林密度、配置技术等不当,极易导致人工林后期水分严重亏缺,大片死亡,沙地再度活化的恶性循环^[57]。

3 基于水量平衡的沙地造林合理密度研究

3.1 人工固沙植被建立适宜位置选择

在建立固沙植被时,必须考虑其抗旱性特征。乔木树种中樟子松的抗旱性优于小叶杨、油松等,在沙地植被建设中成功性较大,樟子松适宜栽植在地下水位不低于4~5 m的丘间低地,而不宜大量栽植在沙丘迎风坡、丘顶部位。山杏、侧柏(*Platycladus orientalis*)、桧柏(*Sabina chinensis*)、油松等乔木也属抗旱性较强的乔木树种,可应用于人工固沙植被建设中。小叶杨根系发达,土壤耗水较多,建议在水分条件较好的沙地可优先发展小叶杨人工纯林。紫穗槐、刺槐、臭椿、沙枣等乔木抗旱性相对较差,应慎重选用。

灌木树种中小叶锦鸡儿和柠条是目前固沙植被建设中主要树种之一,其抗旱性优于花棒、杨柴、黄柳、胡枝子等,小叶锦鸡儿、柠条宜种植在半固定至固定沙地。黄柳宜栽植在背风坡坡脚,以之为先锋阻沙植物^[22]。花棒、杨柴枝叶繁茂,生长迅速、固沙作用明显,但是耗水大、抗旱性差,应选择在水分条件较好的丘间低地栽植,并控制在合理密度范围。差巴嘎蒿适生在水分条件好的流动和半固定沙地^[30]。沙地柏虽然比多数沙生灌木具有较小的蒸腾速率和更强的抗旱性,但是在不能利用地下水的条件下,其过大的密度可引起大量蒸腾耗水,并使植物处于严重的水分亏缺之中。毛乌素沙地沙地柏群落的退化乃至成死过程中,水分胁迫是重要的因素之一,所以,人工栽植沙地柏应选择在水分条件较好的沙地,而在高大的沙丘或梁地栽植沙地柏,应注意规模和密度^[58]。

3.2 人工固沙植物建立适宜密度选择

在干旱、半干旱和亚湿润干旱区,水分平衡是确保固沙林持续、稳定健康生长的保证,合理的造林密度既能充分利用水分资源,又不至于造成土壤干旱现象,确保固沙林能正常生长并具有良好的防护作

用。一般来说,确定固沙林栽植密度的观点有两种:一是保持营养面积的稀植的观点。由于沙地水、养缺乏,而减少过多株数对水、养的消耗,维持单位面积内植株的水、养供应较为有利,因而造林密度应小;二是促进郁闭的密植的观点。从固沙林的目的要求出发,要求固沙林应尽快固定流沙,发挥固沙效益,造林密度应大^[59]。固沙造林的主要目标是改善生态环境条件,应在水量平衡前提下根据不同类型区的生态条件选择合理的植被类型,确定合理的造林密度,任何时候都应把防护效益及稳定性放在首位^[60]。

3.2.1 干旱区 在干旱区,年平均降水量小于250 mm,且以降水量小于5 mm的无效降水为主。在该区域可选固沙植物为梭梭、柠条、沙拐枣、沙枣等,其中梭梭适宜密度为400~600株·hm⁻²,柠条300~500株·hm⁻²,沙拐枣200~300株·hm⁻²,沙枣和杨树仅适于丘间低地和覆沙厚度小于1 m的沙地,密度应小于200株·hm⁻²^[61]。张锦春等^[62]根据民勤地区的樟子松根系分布特征及其生长适应性确定樟子松造林的株距应为5 m。李自珍^[63]等通过建立植物种生态适宜度数学模型,得出沙坡头地区柠条和油蒿的适宜营林密度为2500株·hm⁻²。贺素雯^[64]等通过对甘肃河西荒漠区移栽花棒连续4年成活率、生物量等观测,建议3 m×3 m、3 m×4 m为该区域花棒的最佳密度。

3.2.2 半干旱和亚湿润干旱区 半干旱区和亚湿润干旱区,年降水量250~500 mm,降水量大于5 mm的有效降水占总降水的40%~60%。可选树种为柠条、花棒、樟子松、榆树(*Ulmus pumila*)和杨树等。其中在半干旱区,柠条、小叶锦鸡儿固沙林的适宜密度为600~900株·hm⁻²,花棒、杨柴为800~1200株·hm⁻²、沙柳1000~1500株·hm⁻²,樟子松300~500株·hm⁻²;杨树、榆树为200~400株·hm⁻²;亚湿润干旱区,柠条、小叶锦鸡儿固沙林的适宜密度为1500~1800株·hm⁻²,沙柳1500~2000株·hm⁻²,樟子松500~800株·hm⁻²,杨树、榆树400~800株·hm⁻²^[61]。孙晓辉^[65]等指出在亚湿润干旱区,小叶锦鸡儿、胡枝子等固沙灌木林的合理密度为1500~1800株·hm⁻²,樟子松、油松等针叶固沙林为500~800株·hm⁻²,杨树、榆树等阔叶固沙林在400~800株·hm⁻²。阿拉木萨^[66]等建议在科尔沁沙地西部地区小叶锦鸡儿植被人工固沙过程中,初期(1~4 a)采用1 m×1 m密度,随着植被年龄增长,适当进行间伐(5~8 a)至1 m×2 m密度,成龄后保持在2 m×2 m密度,以保证人工植

被的持续稳定发展。安慧^[45]等根据毛乌素沙地南缘不同栽植密度沙柳人工固沙灌丛蒸散量,建议沙柳适种密度为 $0.6\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。杨文斌等^[67]建议科尔沁沙地中龄杨树固沙林合理密度为 $400\sim1\,000\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。李孙玲等^[68]提出在毛乌素沙地沙棘的适宜于存活的最佳造林密度为 $4\,444\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。赵晓斌^[59]通过对榆林毛乌素沙地樟子松林地沙层水分状况的测定,提出该区樟子松造林的适宜株行距为 $3\text{m}\times4\text{m}$ 。

在干旱、半干旱和亚湿润干旱区,对沙地植被进行恢复,应根据生态学的边缘效应理论、天然林的自然稀疏结果、造林树种的生态学特性以及水分平衡理论^[69],参照其地带性植被的特征,并根据立地条件的空间异质性,选择适宜的栽植密度和抗旱植物,同时兼顾固沙植被防风固沙效益,根据固沙林的防风固沙效益和土壤水分平衡确定其合理的“生态密度”。同时,在亚湿润干旱区,林木的经济效益在植被密度确定中也应考虑。

4 存在问题和展望

水分是干旱、半干旱地区植被建设最重要的生态制约因子,植被恢复与重建是防治土地沙漠化的主要措施。早期采取植物措施的治沙实践中,人工固沙林自身的立地水分状况不断恶化,生长趋于衰退,并出现大量干枯死亡现象。以沙地水资源优化利用为核心,开展沙地固沙植物抗旱性、人工固沙植被密度等研究,是沙地防沙治沙工程急需解决的关键技术需求。

4.1 固沙植物抗旱性研究

固沙植物抗旱性研究方面虽然做了大量工作,总结了一些规律性的结论,对固沙植物抗旱性鉴定的基本指标也研究较多。但是如何将众多的指标联合运作,研究各项指标与固沙植物抗旱性的关联度较少。目前固沙植物抗旱性研究集中在植物生物学特性、形态特性和水分生理生态特性上,而对于隐藏在其机制的背后,存在着一系列复杂的调控过程则研究较少。在群体水平研究中,缺乏对各固沙植物的地理分布边界或较典型地区进行群落调查试验。从气候—植物—土壤构成生态系统的角度来思考固沙植物抗旱性问题还较少。研究手段还不很全面。植物抗旱性具有复杂性,今后应从微观向宏观、从定性向定量,从单一学科向多学科渗透,将生态、生理等作为一个有机整体加以考虑。

4.2 固沙林地水分平衡研究

目前,我国不同区域固沙林地水分平衡场陆续建立,定点(位)固沙林地水分观测、水资源综合评价

得以发展,不同地区的站、点相应进行了固沙林地水分的动态观测,研究取得了一大批科研成果。但是,沙地水分平衡综合研究和动态模拟还比较薄弱,固沙林地水分平衡的研究应与土壤—植物—大气系统、生态系统研究紧密结合,涉及土壤学、气象学、植物生理学等多学科的交叉联合,是未来水分平衡的发展趋势。研究方法上应结合同位素、平衡式张力计、TRM、生态系统仪、遥感等新方法和新技术。同时,长期的监测和数据积累仍十分重要。土壤水分循环与平衡问题是土壤动力水文学的基本研究问题,也是连接土壤动力水文学理论与应用的一个重要纽带,此问题必将得到广泛的关注和深入的研究。

4.3 基于水分平衡的沙地造林合理密度研究

目前根据固沙林地水分平衡指导沙地植被建设已取得一定的成果,但由于沙地植被与立地条件的复杂性,研究成果缺乏系统性和全面性,今后应以不同地区年降水量为水分收入的基本参数,预测在维持水量平衡基础上,建立不同地区的人工固沙植被模式,建立示范基地,将长期效益与短期效益有机结合。在对沙区植被进行恢复的过程中,应对其水分循环规律进行量化研究,参照其地带性植被的特征,根据立地条件的空间异质性,进行植物种类和密度的规划,进一步深入研究不同植物种类构成、合理的空间及密度配置,以及适度的生物量和覆盖度等。

参考文献:

[1] 高阳,高甲荣,温存,等.宁夏盐池沙地土壤水分条件与植被分布格局[J].西北林学院学报,2006,21(6):1-4.
GAO Y,GAO J R,WEN C,*et al.* The relationship between the soil water condition and vegetation distribution pattern in Yanchi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(6):1-4. (in Chinese)

[2] 蒋德明,刘志民,曹成有,等.科尔沁沙地荒漠化过程与生态恢复[M].北京:中国环境科学出版社,2003.

[3] 崔国发.固沙林水分平衡与植被建设可适度探讨[J].北京林业大学学报,1998,20(6):89-94.
CUI G F. Water balance of dune fixation forest and suitability of artificial vegetation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1998, 20(6): 89-94. (in Chinese)

[4] 赵文智,刘志民,常学礼.奈曼沙区植被土壤水分状况的研究[J].干旱区研究,1992(3):40-44.
ZHAO W Z,LIU Z M,CHANG X L. A study on the soil moisture status under the vegetation in Naiman sand land[J]. Arid Zone Research, 1992(3):40-44. (in Chinese)

[5] 涂璟,王克勤.干旱地区造林树种的水分生理生态的研究进展[J].西北林学院学报,2003,18(3):26-44.
TU J,WANG K Q. A review on the progress of physiological and ecological study of afforestation trees in arid areas [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2003, 18(3):26-44. (in Chinese)

[6] HALL A E,Physiological ecology of crops in relation to light, water and temperature.in:CARROLL C R,VANDERMEER J H;POSSET PMCE DS. Agroecology [M]. New York: Mc Graw-Hill 1990;191-234.

[7] MAY L H,MILTHORPE F L. Drought resistance of crop plants [C]. Field Crop Abstr,1962,15(3):171-179.

[8] 季孔庶,孙志勇,方言. 林树木抗旱性研究进展[J]. 南京林业大学学报,2006,30(6):123-128.

JI K S,SUN Z Y,FANG Y. Research advance on the drought resistant in forest[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2006,30(6):123-128. (in Chinese)

[9] SILVA J S,REGO F C,MARTINS M A. Root distribution of Mediterranean woody plants. introducing a new empirical model[J]. Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology,2003,137(1):63-72.

[10] ZGALLAI H,STEPPE K,LEMEUR R. Effects of different levels of water stress on leaf water potential,stomatal resistance,protein and chlorophyll content and certain anti-oxidative enzymes intomato plants[J]. Journal of Integrative Plant Biology,2006,48(6):679-685.

[11] SCHULATE P J,HINCKLEY T M. Absciseic acid relations and the response *Pupulus trichocarpa* stomatato leaf water potential[J]. Tree Physiology,1987,3(2):103-113.

[12] 胡新生,王世绩. 树木水分胁迫生理与耐旱性研究进展及展望 [J]. 林业科学,1998,34(2):77-88.

HU X S,WANG S J. A review studies on water stress and drought tolerance in tree species[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1998,34(2):77-88. (in Chinese)

[13] 赵晓彬,刘光哲. 沙地樟子松引种栽培及造林技术研究综述 [J]. 西北林学院学报,2007,22(5):86-89.

ZHAO X B,LIU G Z. A review of studies of introduction cultivates and afforestation technology on *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in sandy area[J]. Journal of Northwest Forestry University,2007,22(5):86-89. (in Chinese)

[14] 吴祥云,王晓娇,李宏昌,等. 科尔沁沙地主要造林树种抗旱生理生态特性[J]. 东北林业大学学报,2008,36(3):3-4.

WU X Y,WANG X J,LI H C,*et al.* Physiological and ecological characteristics of drought resistance of the main afforestation tree species in Horqin sandy land [J]. Journal of Northeast University,2008,36(3):3-4. (in Chinese)

[15] GRANIER A,BIRON P,LEMOINE D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2000,100(4):291-308.

[16] 赵素华,孟鹏,吴昊. 樟子松抗旱性研究进展[J]. 辽宁林业科技,2011(2):48-51.

[17] MAZZOLENI S,DICKMANN D I. Differential physiological and morphological responses of two hybrid *Populus* clones to water stress[J]. Tree Physiology,1988,4(1): 61-70.

[18] 雷泽勇,张学丽,周风艳. 沙地樟子松抗旱性的研究[J]. 林业科技通讯,1996(1):6-8.

[19] 苏芳莉,刘明国,郭成久,等. 沙地樟子松根系垂直分布特征及对土壤的影响[J]. 中国水土保持,2006(1):20-22.

SU F L,LIU M G,GUO C Y,*et al.* Characteristics of vertical distribution of root system of Mongolian scotch pine growing in sandy area and influence to the soil[J]. Soil and Water Conservation in China,2006(1):20-22. (in Chinese)

[20] IRVINE J,PERKS M P,MAGNANI F,*et al.* The response of *Pinus sylvestris* to drought: stomatal control of transpiration and hydraulic conductance[J]. Tree Physiology,1998,18(6): 393-402.

[21] 郭连生,田有亮. 运用 PV 技术对华北常见造林树种耐旱性评价的研究[J]. 内蒙古林学院学报,1998,20(3):1-8.

GUO L S,TIAN Y L. Study on drought—resistance evaluation of common afforestation species in north China by PV technique[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry College, 1998,20(3):1-8. (in Chinese)

[22] 李进,刘志民,李胜功,等. 科尔沁沙地人工植被建立模式的探讨[J]. 应用生态学报,1994,5(1):46-51.

LI J,LIU Z M,LI S G,*et al.* Establishment of artificial vegetation model for Keerqin sandy land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1994,5(1):46-51. (in Chinese)

[23] 李雪华,蒋德明,骆永明,等. 不同施水量处理下樟子松幼苗叶片水分生理生态特性的研究[J]. 生态学杂志,2003,22(6):7-20.

LI X H,JIANG D M,LUO Y M,*et al.* Physiological characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings at different irrigation treatments[J]. Chinese Journal of Ecology, 2003,22(6):7-20. (in Chinese)

[24] 冯玉龙,王文章,敖红. 长白落叶松和樟子松等五种树种抗旱性的比较[J]. 东北林业大学学报,1998,26(6):16-20.

FENG Y L,WANG W Z,AO H. Drought resistance of *Larix olgensis* Henry and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* etc[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1998, 26 (6): 16-20. (in Chinese)

[25] 全昌明,邢小军,李振昌,等. 伊金霍洛旗樟子松和油松引种试验对比研究[J]. 北京林业大学学报,2004,26(2):63-67.

QUAN C M,XING X J,LI Z C,*et al.* Comparative study on the introduction of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Pinus tabulaeformis* in Ejin Horo Banner, Inner Mongolia[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2004, 26 (2): 63-67. (in Chinese)

[26] 王怀彪,潘鹏,高保山. 毛乌素沙地樟子松抗旱造林关键技术研究[J]. 西北林学院学报,2009,24(6):70-73.

WANG H B,PAN P,GAO B S. Key technologies of drought-resistant afforestation with *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Maowusu sandland[J]. Journal of Northwest Forestry University,2009,24(6):70-73. (in Chinese)

[27] ZHENG Y R,XIE Z X,GAO Y,*et al.* Germination responses of *Caragana korshinskii* Kom. to light, temperature and water stress[J]. Ecological Research,2004,19(5):553-558.

[28] 王志会,夏新莉,尹伟伦. 我国柠条抗旱性研究现状[J]. 河北林果研究,2006,21(4):388-391.

WANG Z H,XIA X L,YIN W L. The developmental status of *Caragana* drought resistance[J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research,2006,21(4):388-391. (in Chinese)

[29] 吕忠良. 柠条等四种沙生植物幼苗抗旱性差异的研究[J]. 内蒙古林业调查设计,2005,28(4): 46-47.

LV Z L. Study on difference of drought—resistance of seedlings of *Caragana korshinskii* and other three kinds of sand plants[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2005,28(4): 46-47. (in Chinese)

- [30] 李雪华,蒋德明,阿拉木萨,等. 科尔沁沙地 4 种植物抗旱性的比较研究[J]. 应用生态学报,2002,13(11):1385-1388.
LI X H,JIANG D M,A L,*et al.* A comparative study on drought resistance of four plant species in Kerqin sandy land [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2002,13(11):1385-1388. (in Chinese)
- [31] YAN Q,LIU Z,MA J,*et al.* The role of reproductive phenology, seedling emergence and establishment of perennial *Salix gordejewii* in active sand dune fields[J]. Annals of Botany,2007,99(1): 19-28.
- [32] 崔秀萍. 浑善达克沙地固沙灌木黄柳的生态特性研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,2012.
- [33] 李红丽,董智,丁国栋,等. 浑善达克沙地植物蒸腾特征的研究 [J]. 干旱区资源与环境,2003,17(5):135-140.
LI H L,DONG Z,DING G D,*et al.* Research on plant transpiration characteristics of Hunshandake sand[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2003,17(5): 135-140. (in Chinese)
- [34] 岳广阳,张铜会,赵哈林,等. 科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿茎流及蒸腾特征[J]. 生态学报,2006,26(10):3205-3213.
YUE G Y,ZHANG T H,ZHAO H L,*et al.* Characteristics of sap flow and transpiration of *Salix gordejewii* and *Caragana microphylla* in Horqin Sandy Land, northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica,2006,26(10):3205-3213. (in Chinese)
- [35] HE W M,ZHANG X S,DONG M. Gas exchange, leaf structure, and hydraulic features in relation to sex, shoot form, and leaf form in an evergreen shrub *Sabina vulgaris* in the semi-arid Mu Us Sandland in China[J]. Photosynthetica, 2003,41(1):105-109.
- [36] 孙鹏森,马履一,王小平,等. 油松树干液流的时空变异性研究[J]. 北京林业大学学报,2000,22(5):1-6.
SUN P S,MA L Y,WANG W P,*et al.* Temporal and spatial variation of sap flow of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) [J]. Journal of Beijing Forestry University,2000,22(5):1-6. (in Chinese)
- [37] 董胜君. 对山杏与臭椿、油松、樟子松、刺槐生理特性的比较研究[J]. 科协论坛,2007(1):68.
- [38] 李磊,贾志清,宁虎森,等. 水分胁迫下 2 种沙枣的抗旱性比较 [J]. 林业科学研究,2009,22(3):335-342.
LI L,JIA Z Q,NING H S,*et al.* Drought resistance of two *Elaeagnus* species under water stress[J]. Forest Research, 2009,22(3):335-342. (in Chinese)
- [39] 张耀甲. 甘肃民勤地区沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.)等植物生理、生态学特性的初步研究[J]. 植物学报,1981,23(5): 393-399.
ZHANG Y J. A preliminary study on the eco—physiological characteristics of *Elaeagnus angustifolia* L. in Min-qin region of Gansu province[J]. Acta Botanica Sinica,1981,23(5):393-399. (in Chinese)
- [40] WANG X P, BERNDTSSON R, LI X R,*et al.* Water balance change for a re-vegetated xerophyte shrub area/Changement du bilan hydrique d’une zone replantée d’arbustes xérophiles [J]. Hydrological Sciences Journal,2004,49(2):295.
- [41] ZHANG L,DAWES W R,WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. Water Resources Research,2001,37(3):701-708.
- [42] 张国盛,王林和,董智,等. 毛乌素沙地主要固沙灌(乔)木林地水分平衡研究[J]. 内蒙古农业大学学报,2002,23(3):1-9.
ZHANG G S,WANG L H,DONG Z,*et al.* A study on water balance of main fixed—dune shrubs(arbors) in Muus[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University,2002,23(3):1-9. (in Chinese)
- [43] WANG S K,ZHAO X Y,QU H,*et al.* Variation in soil water content to rainfall under *Caragana microphylla* shrub in Horqin Sandy Land[J]. Journal of Arid Land,2010,3(2): 174-179.
- [44] 董雯,赵景波. 毛乌素沙地的形成与治理[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版,2006,24(4):41-46.
DONG W,ZHAO J B. The formation and harness of Maowusu desert[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences,2006,24(4):41-46. (in Chinese)
- [45] 安慧,安钰. 毛乌素沙地南缘沙柳灌丛土壤水分及水量平衡 [J]. 应用生态学报,2011,22(9):2247-2252.
AN H,AN Y. Soil moisture dynamics and water balance of *Salix psammophila* shrubs in south edge of Mu Us Sandy land [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2011,22(9): 2247-2252. (in Chinese)
- [46] 黄利江,于卫平,张广才,等. 盐池沙地水分与植被恢复关系的研究[J]. 林业科学研究,2004,17(增刊):148-151.
- [47] 牛兰兰,张天勇,丁国栋. 毛乌素沙地生态修复现状、问题和对策[J]. 水土保持研究,2006,13(6):239-242.
NIU L L,ZHANG T Y,DING G D. Actuality and counter-measure of ecological rehabilitation in Maowusu sandy land [J]. Research of Soil and Water Conservation,2006,13(6): 239-242. (in Chinese)
- [48] 蒋德明,刘志民,寇振武,等. 科尔沁沙地生态环境及其可持续管理[J]. 生态学杂志,2004,23(5):179-185.
JIANG D M,LIU Z M,KOU Z W,*et al.* Ecological environment and its sustainable management of Horqin steppe[J]. Chinese Journal of Ecology,2004,23(5):179-185. (in Chinese)
- [49] 张颖,李伦,曹成有,等. 科尔沁沙地典型人工固沙植物群落土壤硝化活性[J]. 生态学杂志,2011,30(7):1461-1466.
ZHANG Y,LI L,CAO C Y,*et al.* Soil nitrification activity in typical sand-fixing plantations in Horqin sandy land[J]. Chinese Journal of Ecology,2011,30(7):1461-1466. (in Chinese)
- [50] 雷泽勇,阎丽凤,周凯,等. 辽宁西北部沙地主要乔灌木林地水量平衡研究[J]. 干旱区研究,2010,27(4):642-648.
LEI Z Y,YAN L F,ZHOU K,*et al.* Study on water budget of the typical shrub and arbor woods in sandy land of Northwest Liaoning province[J]. Arid Zone Research,2010,27(4):642-648. (in Chinese)
- [51] 阿拉木萨,蒋德明,李雪华,等. 科尔沁沙地典型人工植被区土壤水分动态研究[J]. 干旱区研究,2007,24(5):604-609.
ALAMUSA,JIANG D M,LI X H,*et al.* Study on the dynamic change of soil moisture content in some typical plantations in Horqin sand land[J]. Arid Zone Research,2007,24(5): 604-609. (in Chinese)
- [52] 王娟,贺山峰,邱兰兰,等. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿群落生长季

土壤水分动态和蒸散量估算[J]. 水土保持通报,2009,29(6): 103-106.

WANG J, HE S F, QIU L L, *et al.* Soil moisture dynamics and e-
vapotranspiration of *Caragana microphylla* communities in grow-
ing season on Horqin sandy land[J]. Bulletin of Soil and Water
Conservation, 2009, 29(6): 103-106. (in Chinese)

[53] 张继义, 赵哈林, 崔建垣, 等. 科尔沁沙地樟子松人工林土壤水
分动态的研究[J]. 林业科学, 2005, 41(3): 1-6.

ZHANG J Y, ZHAO H L, CUI J Y, *et al.* Community struc-
ture, soil water dynamics and community stability of *Pinus
sylvestris* var. *mongolica* plantation in Horqin sandy land
[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(3): 1-6. (in Chinese)

[54] 李新荣, 马凤云, 龙立群, 等. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动
态研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 217-222.

LI X R, MA F Y, LONG L Q, *et al.* Soil water dynamics un-
der sand-fixing vegetation in Shapotou area[J]. Journal of
Desert Research, 2001, 21(3): 217-222. (in Chinese)

[55] 王新平, 李新荣, 康尔泗, 等. 沙坡头地区固沙植物油蒿、柠条
蒸散状况的研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 363-367.

WANG X P, LI X R, KANG E S, *et al.* Experiment on evapo-
transpiration of xerophyte communities in a revegetated des-
ert zone[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(4): 363-
367. (in Chinese)

[56] 冯金朝, 陈荷生, 康跃虎, 等. 腾格里沙漠沙坡头地区人工植被
蒸散耗水与水量平衡的研究[J]. 植物学报, 1995, 37(10):
815-820.

FENG J Z, CHEN H S, KANG Y H, *et al.* Study on water
balance and evapotranspiration of artificial vegetation in
Shapotou area, Tenger desert[J]. Acta Botanica Sinica, 1995,
37(10): 815-820. (in Chinese)

[57] 张国盛. 干旱、半干旱地区乔灌木树种耐旱性及林地水分动态
研究进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 363-368.

ZHAN G S. Research progress on trees and shrub drought re-
sistance and woodland water activity in arid and semi-arid re-
gion[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(4): 363-368.
(in Chinese)

[58] 苏世平, 席艳芸, 张继平, 等. 沙地柏抗旱性的研究[J]. 防护林
科技, 2008(4): 1-5.

SU S P, XI Y Y, ZHANG J P, *et al.* Drought-resistant char-
acteristics of *Sabina vulgaris* [J]. Protection Forest Science
and Technology, 2008(4): 1-5. (in Chinese)

[59] 赵晓彬. 樟子松造林密度与沙层水分的关系研究[J]. 防护林
科技, 2004(5): 4-8.

ZHAO X B. Study on relationship between afforestation den-
sity of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and water of sand land
[J]. Protection Forest Science and Technology, 2004(5): 4-8.
(in Chinese)

[60] 单红叶. 沙地造林合理密度的探讨[J]. 内蒙古农业科技, 2006
(7): 217-218.

[61] 韩德儒, 杨文斌, 杨茂仁. 干旱半干旱区沙地灌(乔)木种水分
动态关系及其应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.

[62] 张锦春, 汪杰, 李爱德, 等. 樟子松根系分布特征及其生长适应
性研究[J]. 防护林科技, 2000(3): 46-49.

ZHANG J C, WANG J, LI A D, *et al.* Research on root distri-
bution and growth adaptability of *Pinus sylvestris* var. *mon-
golica* [J]. Protection Forest Science and Technology, 2000
(3): 46-49. (in Chinese)

[63] 李自珍, 黄子琛. 沙坡头地区人工林植物的水分生态位适宜度
分析[J]. 西北植物学报, 1995, 15(5): 97-101.

LI Z Z, HUANG Z C. Fitness analysis of water niches of arti-
ficial forest plants in Shapotou area[J]. Acta Botanica Boreali-
Occidentalia Sinica, 1995, 15(5): 97-101. (in Chinese)

[64] 贺素雯, 喻文虎, 向金城, 等. 河西荒漠草原花棒不同栽植密度
旱作技术研究[J]. 草业科学, 2009, 26(7): 105-109.

HE S W, YU W H, XIANG J C, *et al.* The study on dry farm-
ing technology of the plant density for *Hedisarumu scopari-
um* on the desert pasture of Hexi corridor[J]. Acta Botanica
Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 26(7): 105-109. (in Chi-
nese)

[65] 孙晓辉, 吴祥云, 刘广. 沙地造林合理密度问题的探讨[J]. 防
护林科技, 2004, 58(1): 63-64.

[66] 阿拉木萨, 慈龙骏, 杨晓晖, 等. 科尔沁沙地不同密度小叶锦鸡
儿灌丛水量平衡研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 31-35.

ALAMUSA, CI L J, YANG X H, *et al.* Water balance of dif-
ferent density artificial *Caragana microphylla* shrubs in
Horqin sand land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,
2006, 17(1): 31-35. (in Chinese)

[67] 杨文斌, 王晶莹, 王晓江, 等. 科尔沁沙地杨树固沙林密度、配
置与临汾生长过程初步研究[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27
(4): 33-38.

YANG W B, WANG J Y, WANG X J, *et al.* Relation between
growth of high yield poplar and density and planting composi-
tion in Keerqin sandy land[J]. Journal of Beijing Forestry U-
niversity, 2005, 27(4): 33-38. (in Chinese)

[68] 李孙玲, 李甜江, 李根前, 等. 毛乌素沙地中国沙棘存活及生长
对灌水和密度的相应[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 rhamniodes subsp. sinensis in response to irriga-
tion intensity and initial density in MuUs sand-land[J]. Jour-
nal of Northwest Forestry University, 2011, 26(3): 107-111.
(in Chinese)

[69] 郭宇航, 高静丽, 张国民, 等. 科尔沁沙地造林密度与林农复合
经营问题探讨[J]. 内蒙古林业调查设计, 2011, 34(5): 55-57.