

沙地濒危植物长柄扁桃生物学特性与抗逆性及应用综述^①

黄来明^{1, 2, 3}, 邵明安^{1, 2, 3*}, 裴艳武³, 张应龙⁴

(1 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 4 陕西省神木县生态协会, 陕西神木 719399)

摘要: 揭示长柄扁桃生物学特性与抗逆性机理并提高其在荒漠化治理中的生态效益和经济效益, 是实现西北旱区荒漠化治理可持续发展和提升生态脆弱区生态系统服务功能面临的重要科学问题。本文回顾了长柄扁桃研究所取得的进展, 包括建立了长柄扁桃快速育苗和无灌溉水栽培技术, 揭示了不同地区长柄扁桃生长规律及其对逆境的适应性, 推进了长柄扁桃在荒漠化治理中的应用及其产品开发等; 在此基础上, 提出了长柄扁桃研究面临的机遇和挑战, 包括长柄扁桃的适生土壤类型与耗水量, 不同地区长柄扁桃的合理种植密度及其调控和管理措施, 长柄扁桃抗逆性机理及其产品开发与高值综合利用等, 以期为我国在西北地区推广和建设长柄扁桃林、优化水土资源管理和提高脆弱生态系统的服务功能提供科学依据。

关键词: 长柄扁桃; 抗逆性; 荒漠化防治; 土壤水分; 土壤-植物-大气连续体

中图分类号: P967; Q945; Q948; S728 **文献标识码:** A

国家林业局第五次全国荒漠化和沙化土地监测结果显示: 截至 2014 年底, 我国荒漠化和沙化土地面积分别为 261.2 万 km² 和 172.1 万 km²^[1], 是我国最严重的生态环境问题之一。随着全球气候变暖和人为活动不断加剧, 沙漠化防治成为我国当前特别是西北旱区生态环境建设与可持续发展面临的重要挑战。近年来, 人工生态林在我国西北旱区沙漠化防治中起到了显著作用^[2-4], 使得该区森林覆盖率显著提高, 荒漠化和沙化土地面积持续减少。然而, 由于西北旱区生态脆弱, 特别是水资源严重不足, 单纯选择生态林很难使沙区植被长期保持, 甚至出现大面积的“小老树”和植被衰退^[5-6]。如何选择既耐旱又具有经济效益的经济林进行沙漠治理, 并使种植和产业化开发有机结合, 促进沙漠治理由单纯的国家投入过渡到以沙养沙, 并最终获得经济收益, 是当前气候变暖、极端干旱频发下沙漠治理的新思路。

长柄扁桃 (*Amygdalus pedunculata*) 是蔷薇科 (Rosaceae) 扁桃属 (*Amygdalus*) 的落叶灌木, 由于其根系发达, 且具有耐寒、耐旱、耐瘠薄和抗病虫害等优

良特性, 近年来人工驯化的长柄扁桃逐渐被应用于西北旱区治沙固沙^[7]; 同时, 长柄扁桃还具有潜在的经济价值和药用价值, 其果仁 (含油率高达 45%~55.8%) 可加工为食用油 (不饱和脂肪酸含量高达 98.1%) 和工业用油^[8-9], 种子 (含苦扁桃球蛋白氢氯化物) 可制作为治疗病毒性感冒的中药^[10]。此外, 长柄扁桃还可作为观赏灌木和育种的原始材料及嫁接繁殖普通扁桃的砧木。可见, 长柄扁桃不仅是治沙的先锋树种, 还是优良的油料植物, 兼具生态、经济和社会效益。本文综述了长柄扁桃的生物学特性及抗逆性, 探讨了长柄扁桃在沙漠治理中的应用与产业化开发前景, 在此基础上提出了未来应进一步研究的内容和方向, 以期为实现长柄扁桃在西北旱区大面积种植和产业化开发、推进沙漠治理的可持续发展提供科学参考。

1 长柄扁桃的生物学特性与生境

1.1 区域分布特征

长柄扁桃又名野樱桃、柄扁桃、毛樱桃, 是我国特有的一种扁桃属植物, 主要分布于我国西北干旱、

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41601221), 国家重点研发计划重点专项项目(2016YFC0501605), 国家自然科学基金国际合作与交流项目(41571130081), 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(A314021402-1602)和中国科学院地理科学与资源研究所生态系统观测与模拟重点实验室青年创新研究团队项目(LENOM2016Q0001)资助。

* 通讯作者(shaoma@igsrr.ac.cn)

作者简介: 黄来明(1984—), 男, 浙江安吉人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤地理与水文生态研究。E-mail: huanglm@igsrr.ac.cn

半干旱地区山地和沙漠地带,具有适应范围广、抗旱、固沙、抗风蚀能力强等优良特性^[11]。据 1980 年前后的调查显示^[12],长柄扁桃的分布带主要有两个:一是内蒙古的阴山山脉浅山区,沿山脉东西走向长约 400 km,宽约 100 km 的整个范围内都有分布,在许多山坡上几乎为纯扁桃林;二是内蒙古伊克昭盟的鄂托克旗、乌审旗到陕西北部长城沿线(顶板、榆林、神木)的毛乌素沙漠,其中在榆林孟家湾乡西沙区的樱桃圪塔分布较为集中。长柄扁桃分布区气候条件恶劣,夏季高温炎热,最高温度达 35℃以上;冬季低温寒冷,最低温度到 -20℃以下;蒸发量约为降雨量的 5 倍~10 倍,干燥度为 4.05~8.90。长柄扁桃分布的这些地区地下水深一般在 5 m 以下,土壤类型主要包括干旱沙质新成土和钙积正常干旱土,有机质含量不到 10 g/kg,土质保水能力极差,pH 在 7.8~9.0^[13]。由于生境严酷,并且受到沙漠淹没和人为破坏的威胁,近年来长柄扁桃分布面积日趋减少,《内蒙古珍稀濒危植物图谱》将其列为二级濒危植物^[14];李登武等^[15]在《黄土高原地区种子植物区系中的珍稀濒危植物研究》一文中,也将长柄扁桃列为濒危植物种类。近年来,国家和地方政府积极推进在陕北榆林地区建设百万亩(6.6 万 hm²)长柄扁桃种植示范基地,目前人工驯化的长柄扁桃种植面积已近 50 万亩(3.3 万 hm²),为保护长柄扁桃资源、加快该地区沙漠治理创造了必要条件。

1.2 形态学特性与生长规律

《中国植物志》^[16]第 38 卷详细记载了长柄扁桃的形态特征(图 1):枝开展,具大量短枝,常被短柔毛,枝浅褐色至暗灰褐色;芽短小,在短枝上常 3 个并生,中间为叶芽,两侧为花芽。叶片椭圆形、近圆形或倒卵形,长 1~4 cm,宽 0.7~2 cm,先端极尖或圆钝,基部宽楔形,叶面疏生短柔毛,叶边具不整齐粗锯齿;叶柄长 2~5 mm,被短柔毛。花单生,直径 1~1.5 cm;花梗长 4~8 mm,具短柔毛;萼筒宽钟形,长 4~6 mm;萼片三角状卵形,先端稍钝;花瓣近圆形,直径 7~10 mm,粉红色;雄蕊多数,长约 6 mm;子房密被短柔毛,花柱细长。果实近球形或卵球形,直径 10~15 mm,成熟时暗紫红色,密被短柔毛;果梗长 4~8 mm;果肉薄而干燥,成熟时开裂,离核;果核宽卵形,直径 8~12 mm,顶端具小突尖头,基部圆形,两侧稍扁,浅褐色,表面平滑或具浅的沟纹;果仁宽卵形,棕褐色,味苦,直径 4~6 mm。

长柄扁桃种子萌发后首先生根,当根长到一定长

度时,子叶出土,约 7~10 d 后长出真叶。长柄扁桃根系生长一年有两个高峰:一是开花前 3~4 周至地上部枝条的快速生长前;二是枝条停止生长和果实生长放慢时。长柄扁桃一般于 4 月中下旬开花,先花后叶,两者时间间隔约 5~15 d,5 月中旬为开花盛期。决定长柄扁桃开花时间早晚的因素主要有 3 方面:冬季寒冷时间长短、春季花前暖温量和芽生长时的温度临界值。长柄扁桃始果期为 6 月初,果熟期为 8 月底,落叶期为 10 月下旬至 11 月上旬。据测算,人工管护下的长柄扁桃,栽植 5~7 a 即达到盛果期,亩产鲜果 1 000 kg 左右,收获干果仁 350 kg,经过加工,可生产油 40 kg、蛋白粉 29 kg、苦杏仁甙 2 kg^[10]。近年来,有学者研究了不同地区和树龄的长柄扁桃光合特性及其影响因素,结果表明,毛乌素沙漠长柄扁桃叶片净光合速率(P_n)的日变化呈双峰型曲线,主峰值在 12:00 且具有明显的“午休”现象,2 a 生长柄扁桃叶片 P_n 峰值提前^[17]。气孔导度(G_n)、蒸腾速率(T_n)和光合有效辐射(PAR)对长柄扁桃叶片 P_n 值具有显著正效应。长柄扁桃光补偿点(LCP)和光饱和点(LSP)分别为 25.69 和 2 157.53 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, CO_2 补偿点(CCP)和 CO_2 饱和点(CSP)分别为 57.30 和 1 085.195 3 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。因此,毛乌素沙漠地区的长柄扁桃具有广泛的光强利用范围以及较大的光合潜能,表现出喜光且高效的光合特性。不同地区环境差异导致长柄扁桃光合特性出现明显差异。罗树伟等^[18]研究表明杨凌和神木地区长柄扁桃 LCP、LSP 分别为 49.08、1 512 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 21.44、1 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;CCP、CSP 分别为 84.46、1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 53.92、781 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。可见,杨凌地区生长的长柄扁桃光合能力显著低于神木地区,这与土壤类型和气候条件不同有关。

1.3 生殖生物学特性与人工培育

长柄扁桃体细胞染色体数为 $2n = 96$ ^[19],是多倍体植物,属有性繁殖,即种子发育形成实生苗的繁殖方式,在水分和温度条件较好的情况下,可进行大量的种子繁殖。张应龙等^[7]研究了长柄扁桃育苗及无灌溉水栽培技术,具体步骤如下:用 80~95℃的水浸种,泡 24~48 h,掺 2/3 的沙子,地膜覆盖醒种,5~7 d 发芽后播种,生长至苗高 50~80 cm、地径 0.3~0.8 cm 即可栽植;栽植时将苗截杆至地径以上 35~45 cm,在泥浆中兑 3%~8% 的磷酸二氢钾、1.5%~4% 的锌肥、0.5%~2% 的高锰酸钾,用兑成的混合泥浆蘸根,泥浆稠度以护住根部为准。栽植深度为 40~50 cm,地径以上在土中埋 25~40 cm,外露 5~12 cm,并将坑填平。通过该技术可将人工驯化的长

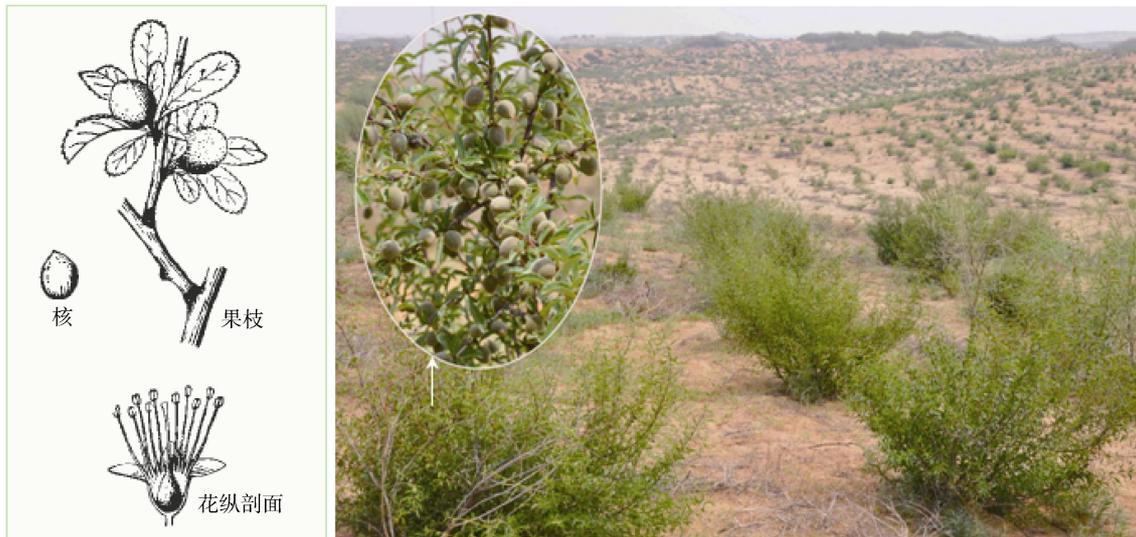


图 1 长柄扁桃果枝、花纵剖面、核示意图(左)^[16]与长柄扁桃林地景观图(右)

Fig. 1 Schematic diagram of branch, longitudinal section through flower, and nutlet of *Amygdalus pedunculata* (left) and picture of *Amygdalus pedunculata* forest (right)

柄扁桃应用于治沙固沙,成活率在 90%~95%,既可覆盖沙地和荒漠化土地,又可产生大量腐殖质改良沙漠和荒漠土壤。

2 长柄扁桃对逆境的适应性及其生理基础

2.1 抗旱性

干旱缺水是西北旱区沙生植物生长的主要限制因子。植物对水分亏缺的抵御一般采用保水和吸水两种途径:保水主要是指减少水分蒸腾和表面散失,吸水主要是靠根系及组织细胞的低水势来实现的。目前有关长柄扁桃抗旱特性的研究主要围绕其形态解剖和生理反应两个方面。郭改改等^[20-21]采用常规石蜡切片技术和光学显微镜观察,研究了河北丰宁、内蒙古乌审旗和固阳、陕西神木和榆阳 5 个地区长柄扁桃在正常生长和干旱胁迫下的叶片解剖结构及其抗旱性,结果表明:不同地区长柄扁桃叶片结构具有相似性,表皮均具有角质层,主脉为双韧维管束,栅栏组织排列紧密整齐,大部分具有上下两层栅栏组织;抗旱性最弱的河北丰宁长柄扁桃叶片最大且最薄,上表皮、角质层及叶片紧密度均最小,栅栏组织只有一层且排列比较疏松,海绵组织细胞排列散乱、不规则且细胞间隙较大,叶脉维管组织口径小,疏导功能微弱;而抗旱性最强的榆阳地区长柄扁桃的叶片最小且最厚,对应的角质层、上表皮厚度及叶片紧密度也最大,双层栅栏组织且第一层细胞细长排列紧密、第二层较短,维管组织发达,含较多的贮水细胞(粘液细胞和含晶细胞)。不同地区长柄扁桃在干旱胁迫下叶片均变小、变厚,茸毛、蜡质等覆盖物相对增加,同时栅

栏组织增厚,细胞变成细长的形状排列紧密,海绵组织细胞却变小,这些特征都能起到降低蒸腾、避免水分过度丧失及储存水分的作用;各地区长柄扁桃抗旱性由强到弱表现为:榆阳>神木>固阳>乌审旗>丰宁。此外,研究表明,长柄扁桃日均耗水量随土壤含水量降低呈下降趋势,与 100% 田间持水量(FC)相比,土壤含水量为 25%FC 时,日均耗水量减少一半,表明长柄扁桃可通过减少蒸腾耗水来应对干旱胁迫^[22]。

除形态解剖方面的抗旱特性外,在生理反应方面长柄扁桃也表现出一定的保水能力。研究表明,长柄扁桃在不同水分胁迫下叶片相对含水量及保护酶活性发生变化。随着胁迫时间的延长和胁迫强度的加大,长柄扁桃叶片相对含水量持续下降,丙二醛(MDA)含量和质膜透性逐渐增大,但在胁迫的前期,下降和上升幅度相对较小;过氧化物酶(POD)活性在不同程度水分胁迫下表现出先降后升的趋势;过氧化氢酶(CAT)活性表现出先升后降的趋势,在轻、中度水分胁迫下超氧化物歧化酶(SOD)活性先升后降,而在重度胁迫下呈现降、升、降的变化。3 种酶(MDA、POD、SOD)的活性在水分胁迫结束时,除重度胁迫低于对照外,其余各处理均高于对照,表明长柄扁桃能够通过调节叶片相对含水量及酶的活性来适应干旱^[23]。

2.2 抗寒性

长柄扁桃分布区冬季极端低温可达 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,在这种气候条件下能正常越冬,表明其具有较强的抗寒性,这与其典型的旱生特征有直接关系。例如,长柄扁桃叶片细胞水势较低,束缚水含量较

高^[24],当胞外结冰时,细胞具有很强的耐脱水能力;叶片的角质层较厚,可有效阻止外部的冰核侵入叶内,协助保持组织水分的超冷状态。此外,茎秆和叶表皮密被的茸毛在冬季有阻止散热、防寒避风的作用,这些特征与同为旱生植物的沙冬青抗寒特性相似^[25]。

一般来说,抗寒性强的植物在冬季会发生适应性变化来抵御严寒。例如,沙冬青在低温时细胞质和液泡浓度增加,大液泡被分隔成小液泡,液泡膜内陷形成吞噬泡,且冬季形成具有防冻作用的内含物,这些特征对冰冻情况下维持细胞内的超冷状态,保持细胞结构和膜的稳定性起着重要作用^[25]。目前,学者们不仅从细胞水平上认识了多种植物的抗寒生理基础,而且在分子水平上揭示了植物抗寒性的遗传机制^[26]。然而,有关长柄扁桃抗寒机制的研究相对较少。蒋宝等^[27]以长柄扁桃 1 a 生枝条为试验材料,研究了不同冷冻处理条件下枝条的相对电导率、超氧化物歧化酶活性、游离脯氨酸和丙二醛含量,结果表明,随着温度的降低游离脯氨酸和丙二醛含量呈现上升趋势,枝条的低温半致死温度为 $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于长柄扁桃的抗寒性不仅受外界环境条件的影响,同时还受自身遗传因素、长势和生长年限的控制,因此,单一选取某一年龄枝条的生理生化指标很难真实反映长柄扁桃的抗寒性本质。未来需进一步从细胞水平和分子水平上研究长柄扁桃的抗寒机制,从而为改良长柄扁桃的抗寒基因、提高其抗寒性奠定基础。

2.3 抗盐碱性

长柄扁桃分布区具有强烈的蒸发作用,使盐分随土壤水或地下水聚集到地表,造成土壤的次生盐渍化。研究表明,长柄扁桃可正常生长的基质含盐量为 $< 1.8\text{ g/kg}$, pH 在 $7.8 \sim 9.0$,致死基质含盐量约为 2.8 g/kg ,可见长柄扁桃具有较强的抗盐碱特性^[28]。尽管长柄扁桃具有耐盐耐瘠薄特性,有研究表明施肥能够显著增加其株高和地径。罗凤敏等^[29]指出与对照相比,当 N、P、K 的质量分数比为 $3.6 : 2.3 : 1.0$,施肥量为 40 g/株 时,长柄扁桃的株高和幅冠均达到最大值,新枝长、地径及新枝直径也达到最大值。目前对长柄扁桃耐盐性的机理了解甚少,这可能与原生质的低水势和粘滞性,以及细胞的抗盐离子毒害功能等密切相关。长柄扁桃是一种重要的抗盐植物,在荒漠化治理中具有重要作用,深入研究其耐盐机理不仅具有重要的理论价值,更具有实际的应用意义。

3 长柄扁桃的开发与应用

3.1 荒漠化治理

我国是世界上沙漠及荒漠化面积较大的国家之一,治理和控制土地荒漠化已成为亟待解决的环境问题^[30]。长柄扁桃是治沙的先锋植物,由于其根系发达,耐寒、耐旱、耐瘠薄,具有很强的沙漠适应性,并且生存期在百年以上,近年来人工驯化的长柄扁桃逐渐被应用于西北旱区治沙固沙,并取得了显著成效^[7]。张应龙等^[7]通过在毛乌素沙地进行长期摸索和实践,发明了一种长柄扁桃快速育苗和无灌溉水栽培技术,为积极推进长柄扁桃大面积种植和加快荒漠化治理提供了重要保障。在陕北榆林地区采用张应龙等^[7]发明的育苗和栽培技术,育苗成活率在 95% 以上,栽培成活率可达 90%,目前长柄扁桃在该地区种植面积近 50 万亩(3.3 万 hm^2),未来将逐步发展到百万亩(6.6 万 hm^2)以上。研究表明,在水分胁迫和寒冷条件下,长柄扁桃体内的抗氧化酶活性显著提高,从而能够有效抵御干旱和严寒。电导率测定表明:长柄扁桃的低温半致死温度可达 $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$,比普通扁桃的 $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 更加耐寒。此外,长柄扁桃根系发达,根冠比最高可达 $46 : 1$,且适应范围广,生长周期长,成林后可长期保土固沙、防止沙尘暴和水土流失,并可加快沙化和荒漠化土地的逆转进程^[10, 20]。

尽管长柄扁桃在我国西北旱区的荒漠化治理中取得了显著成效,但当前防治工作的形势依然十分严峻,主要表现在:一是沙区干旱缺水,生态环境脆弱,自然破坏力大,建设和发展长柄扁桃林需要几代人坚持不懈的努力;二是导致荒漠化和沙化扩展的各种人为因素没有根本消除,滥砍滥发、过度放牧等行为在部分地区仍然存在,提高广大群众的生态保护意识,号召地区群众参与荒漠化防治十分重要。未来应进一步加强长柄扁桃品种选育,因地制宜,科学种植,并在荒漠化严重地区建立封禁保护区,为推进沙区生态文明建设提供有力保障。

3.2 产品开发与利用

长柄扁桃不仅是治沙的先锋树种,而且是优良的油料植物,兼具生态和经济效益。研究表明,长柄扁桃种仁含油量高达 $45\% \sim 58\%$,含糖量约为 8.6% ,粗蛋白含量 21.4% ,粗脂肪含量 54.1% ;含有 18 种氨基酸,其中 8 种人体不能合成的必需氨基酸占氨基酸总量的 29.2% ;富含人体必需的水溶性及脂溶性维生素,其中 α -维生素 E 的含量为 260 mg/kg ,具有软化血管、促进细胞再生、提高人体免疫力和抗癌等功

效,富含人体必需的常量和微量元素,并含有 9.91 $\mu\text{g/g}$ 的氟离子,对人体骨骼和牙齿健康具有重要意义。长柄扁桃仁中含有 3.7% 的苦杏仁甙,它是医药业的重要原料,主要作用是止咳平喘、润肠通便、抗肿瘤、增强免疫力、抗溃疡、镇痛等。此外,长柄扁桃种仁中未检测出 Pb、Cd、Hg、As 等对人体健康有害的元素^[31]。

通过工艺提取的长柄扁桃油不饱和脂肪酸高达 98.1%,单不饱和脂肪酸(包括油酸、棕榈酸、芥酸)总量达到 67.7%,油酸、亚油酸和亚麻酸含量分别为 66.5%、29.9% 和 0.8%,3 种成分的比例与橄榄油相当,优于核桃油、花生油和玉米油等^[8]。因此,长柄扁桃油是一种具有较高营养和保健价值的新型油脂

产品。长柄扁桃还可制备性能良好的生物柴油和副产物甘油,转化率达 98% 以上,生物柴油和甘油通过静置可相互分离,甘油粗品纯度可达 80% 以上。研究表明(表 1),以长柄扁桃油为原料生产的生物柴油各项指标均符合国家标准 GB/T 20828—2007《柴油机燃料调和用生物柴油(BD100)》的要求,其中冷滤点可达 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$,并且硫含量仅为 0.2%,低于国家标准的一个数量级,可以减少酸雨的形成,对环保具有重要意义^[9]。此外,长柄扁桃还可开发制作活性碳、蛋白粉、化妆品、感冒药等系列产品^[8,32-33]。可见,利用长柄扁桃治理干旱沙漠地区和荒漠化黄土地区,并将这些地区建成食用油基地和地上绿色能源基地,有助于促进荒漠化治理实现可持续发展。

表 1 长柄扁桃生物柴油特性及其与国家标准的对比

Table 1 Characteristics of *Amygdalus pedunculata* biodiesel and comparison with different standards

参数	长柄扁桃生物柴油 ^[9]	生物柴油质量标准		
		ASTM D6751	EN14214	GB/T 20828
密度 (kg/m^3 ; 15 $^{\circ}\text{C}$)	877.0	-	860 ~ 900	820 ~ 900
动黏滞率 (mm^2/s ; 40 $^{\circ}\text{C}$)	4.7	1.9 ~ 6.0	3.5 ~ 5.0	1.9 ~ 6.0
燃点 ($^{\circ}\text{C}$)	169	≥ 130	≥ 101	≥ 130
冷滤点 ($^{\circ}\text{C}$)	-11	-	-	-
硫含量 (mg/kg)	2.0	≤ 15 (S15) ≤ 500 (S500)	≤ 10.0	≤ 50 (S50) ≤ 500 (S500)
水含量 (mg/kg)	475	-	≤ 500	≤ 500
铜片腐蚀 (50 $^{\circ}\text{C}$; a)	1	≤ 3	≤ 1	≤ 1
十六烷值	49.2	≥ 47	≥ 51	≥ 49
酸值 (KOH, mg/g)	0.32	≤ 0.50	≤ 0.5	≤ 0.8
抗氧化性 (h; 110 $^{\circ}\text{C}$)	2.2	≥ 3.0	≥ 6.0	≥ 6.0

4 小结与展望

综上所述,前人对沙地濒危植物长柄扁桃进行了较为广泛和深入的研究,取得了以下几方面进展:建立了长柄扁桃快速育苗、无灌溉水栽培技术和种植示范基地,分析了不同地区长柄扁桃生长规律及其对逆境的适应性,促进了长柄扁桃在西北地区荒漠化防治中的应用,开发了长柄扁桃食用油、生物柴油、医药和化妆用品等多种产品,为加快区域荒漠化治理和发展沙区经济奠定了基础。当前长柄扁桃大面积种植仍然面临自然环境恶劣、气候变化及人类活动的多重影响,未来应进一步加强长柄扁桃品种选育,因地制宜,科学种植,并在荒漠化严重地区建立封禁保护区。本文提出了长柄扁桃未来应进一步研究的内容和方向,以期为国家 and 地区实现荒漠化治理的可持续发展及生态文明建设提供科学

依据。目前,长柄扁桃研究主要存在以下几方面的挑战和机遇。

1) 长柄扁桃的适生土壤类型、合理种植密度与耗水量目前尚不清楚,这将限制长柄扁桃在不同地区的合理布局与可持续性建设。解决这一问题的关键在于深入理解长柄扁桃在不同质地土壤和水分条件下的根系吸水过程与耗水规律,揭示长柄扁桃根系吸水速率与耗水量在时(不同生育期或生长年限)空(不同地区或土壤深度)上的变化特征及主控因子。明确上述问题对优化长柄扁桃水分管理、提高西北旱区水分利用效率具有重要的科学意义,同时可为人工灌木林根系吸水模型的建立和改进提供数据支持。

2) 不同地区土壤的水分状况、保水能力与养分含量均不相同^[34-36],因而单位面积土壤承载长柄扁桃的能力具有差异,但相关研究尚未见报道。土壤水分

是西北旱区植被恢复与生态重建的关键因子,基于土壤水分植被承载力的科学概念,耦合土壤水分与植被生长、水文与生物地球化学过程,建立土壤水分植被承载力动态模型,明确不同尺度下(坡面、流域、区域)长柄扁桃的合理种植密度及其调控和管理措施,可为我国在西北地区推广和建设长柄扁桃林、优化水土资源管理、提高脆弱生态系统的服务功能提供科学依据。

3) 长柄扁桃抗旱、抗寒与抗盐碱性的机理目前尚不清晰,未来应进一步从细胞水平和分子水平上揭示长柄扁桃的抗逆性机理,为长柄扁桃品种选育提供理论基础。此外,长柄扁桃营林和造林技术还没有实现规范化和标准化,利用长柄扁桃种仁制备油、药等产品的成本较高,限制了其大面积种植和产业化开发,未来应进一步加强品种选育和栽培管理技术研发,提高长柄扁桃产品开发效率并降低其研发成本,以最大限度地发挥长柄扁桃在荒漠化治理与繁荣地区经济中的作用,从而实现旱区生态环境建设与经济发展双赢之路。

参考文献:

- [1] 国家林业局. 中国荒漠化和沙化状况公报[EB/OL]. 2015-12-29. <http://www.forestry.gov.cn/main/69/content-831684.html>
- [2] Han Z W, Wang T, Sun Q W, et al. Sand harm in Taklimakan desert highway and sand control[J]. Journal of Geographical Sciences, 2003, 13(1): 45-53
- [3] 蒋德明, 宗文君, 李雪华, 等. 科尔沁西部地区荒漠化土地植被恢复技术研究[J]. 生态学杂志, 2006, 25(3): 243-248
- [4] Wang G Q, Wang X B, Li Q. Desertification and its mitigation strategy in China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(2): 97-104
- [5] 侯庆春, 黄旭, 韩仕峰, 等. 黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究- :小老树的成因及其改造途径[J]. 水土保持学报, 1991(4): 75-83
- [6] Yang X H, Li C, Zhang K B. Artificial woodland degradation in semi-arid agro-pastoral transitional area: conceptual model and status assessment[J]. Journal of Forestry Research, 2006, 17(3): 193-196
- [7] 张应龙, 申烨华, 郭春会, 等. 长柄扁桃在治沙固沙中的应用:中国, CN101485274[P]. 2009-07-22
- [8] 李聪, 李国平, 陈俏, 等. 长柄扁桃油脂脂肪酸成分分析[J]. 中国油脂, 2010, 35(4): 77-79
- [9] Chu J M, Xu X Q, Zhang Y L. Production and properties of biodiesel produced from *Amygdalus pedunculata*[J]. Biore-source Technology, 2013, 134(4): 374-376
- [10] 郭春会, 罗梦, 马玉华, 等. 沙地濒危植物长柄扁桃特性研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(12): 125-129
- [11] 苏贵兴, 姚玉卿. 我国的野生扁桃资源[J]. 野生植物研究, 1983(2): 7-11
- [12] 姬钟亮, 钱安东. 长柄扁桃和蒙古扁桃在我国自然分布区的调查[J]. 中国果树, 1981(2): 38-40
- [13] 龚子同, 张甘霖, 陈志诚. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2007
- [14] 赵一之. 内蒙古珍稀濒危植物图谱[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992
- [15] 李登武, 党坤良, 温仲明, 等. 黄土高原地区种子植物区系中的珍稀濒危植物研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24(13): 2321-2328
- [16] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 2004
- [17] 罗树伟, 郭春会, 张国庆. 神木与杨凌地区长柄扁桃光合与生物学特性比较[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(5): 196-202
- [18] 罗树伟, 郭春会, 张国庆, 等. 沙地植物长柄扁桃光合特性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 125-132
- [19] 尚宗燕, 苏贵兴. 我国扁桃属植物的染色体数[J]. 植物科学学报, 1985, 3(4): 363-366
- [20] 郭改改, 封斌, 麻保林, 等. 不同区域长柄扁桃抗旱性的研究[J]. 植物科学学报, 2013, 31(4): 360-369
- [21] 郭改改, 封斌, 麻保林, 等. 不同区域长柄扁桃叶片解剖结构及其抗旱性分析[J]. 西北植物学报, 2013, 33(4): 720-728
- [22] 郑松州, 汪季, 张利文, 等. 科尔沁沙地几种经济植物耗水特征研究[J]. 北方园艺, 2013(16): 64-68
- [23] 罗梦, 郭春会, 马小卫. 水分胁迫对长柄扁桃叶片含水量及保护酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(6): 103-106
- [24] 符雅儒, 万子俊. 沙地植物柄扁桃的生物学特性及引种栽培的研究[J]. 西北植物学报, 1996, 16(5): 19-23
- [25] 刘美芹, 卢存福, 尹伟伦. 珍稀濒危植物沙冬青生物学特性及抗逆性研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(3): 384-388
- [26] 徐呈祥. 提高植物抗寒性的机理研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7966-7980
- [27] 蒋宝, 郭春会, 梅立新, 等. 沙地植物长柄扁桃抗寒性的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 92-96
- [28] 张笑颜, 朱立新, 贾克功. 5种核果类果树的耐盐性与抗盐性分析[J]. 北京农学院学报, 2008, 23(2): 19-23
- [29] 罗凤敏, 张利文, 高永, 等. 科尔沁沙地幼龄长柄扁桃生长特性对施肥的响应[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(6): 87-92
- [30] 常庆瑞, 安韶山, 刘京, 等. 陕北农牧交错带土地荒漠化本质特性研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 518-523

- [31] 王燕, 魏蔚, 董发昕, 等. 长柄扁桃仁的营养成分分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2009, 39(1): 59–62
- [32] 李冰, 李洋, 许宁侠, 等. 氯化锌活化法制备长柄扁桃壳活性炭[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2010, 40(5): 806–810
- [33] 藏小妹, 陈邦, 李聪, 等. 长柄扁桃种仁蛋白粉的提取方法研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2012, 42(6): 940–944
- [34] 刘凯, 高磊, 彭新华, 等. 半干旱区科尔沁沙地土壤水分时空特征研究[J]. 土壤, 2015, 47(4): 765–772
- [35] 吕贻忠, 胡克林, 李保国. 毛乌素沙地不同沙丘土壤水分时空变异[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 152–154
- [36] 董锡文, 张晓珂, 姜思维, 等. 科尔沁沙地固定沙丘土壤氮素空间分布特征研究[J]. 土壤, 2010, 42(1): 76–81

Review on Biological Characteristics and Abiotic Stress Tolerance Mechanisms and Applications of *Amygdalus pedunculata*

HUANG Laiming^{1,2,3}, SHAO Ming'an^{1,2,3*}, PEI Yanwu³, ZHANG Yinglong⁴

(1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4 Shenmu Ecological Association, Shenmu, Shaanxi 719399, China)

Abstract: Understanding the biological characteristics and abiotic stress tolerance mechanisms of *Amygdalus pedunculata* and increasing the ecological and economic benefits during its use for desertification control are important issues for achieving sustainable desertification control and improving ecosystem service function in the ecologically vulnerable areas. This paper reviews the recent progresses in the research of *Amygdalus pedunculata*, which include the development of technique in rapid seedling and cultivation without irrigation water, the studies of the characteristics of growth and adaptability to stress in different regions, and the promotion of the application of *Amygdalus pedunculata* in desertification control and its product development. Based on the previous achievements, we put forward the opportunities and challenges of research on *Amygdalus pedunculata*. The recommendations for future studies include the suitable soil types for *Amygdalus pedunculata* growth and the assessment of its water consumption, the optimum planting densities of *Amygdalus pedunculata* in different regions and the required management practices, the abiotic stress tolerance mechanisms of *Amygdalus pedunculata* and its product development and high value utilization. These research topics are of importance to the spread and construction of *Amygdalus pedunculata* forest, optimize the management of water and soil resources, and improve the ecosystem service function in fragile Northwest China.

Key words: *Amygdalus pedunculata*; Stress tolerance; Desertification control; Soil moisture; Soil-plant-atmosphere continuity