

沙枣改善盐碱土壤养分的研究进展

武海雯^{1,2} 杨秀艳^{1,2} 王计平^{1,2} 刘正祥^{1,2} 朱建峰^{1,2} 张华新^{1,2*}

(¹国家林业和草原局盐碱地研究中心, 北京 100091; ²中国林业科学研究院天津林业科学研究所, 天津 300270)

摘要 种植多用途耐盐碱树种是盐碱地生态修复的有效手段之一, 具有显著的生态效益和经济效益。沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.) 是其中的代表性植物, 是我国干旱半干旱地区盐碱地改良的先锋树种。沙枣能显著提高盐碱土养分, 但其养分输送机制尚不清晰。本文在分析沙枣地理分布及气候适应性的基础上, 从沙枣林土壤养分变化、生物固氮、凋落物和细根分解等方面综述了沙枣改善盐碱土壤养分的程度及途径, 从数量角度阐述沙枣的养分输送关键过程及土壤盐碱程度的影响, 进一步认识沙枣对盐碱地的改良作用。沙枣在我国绝大部分盐碱地区均有分布, 具有极强的地理和气候适应性; 沙枣耐盐碱性强, 能显著提高中、重度盐碱土壤的养分含量, 尤其是氮素含量, 有显著的培肥作用; 沙枣的培肥作用主要是通过高效的生物固氮以及凋落物和细根的快速分解实现, 能在短期内向土壤释放大量的氮素, 从而快速提高土壤肥力; 沙枣的生物固氮和养分释放过程受土壤盐度的影响。未来, 沙枣-盐碱土系统中养分输送机制的研究应重点加强以氮素循环为核心的长期定位监测及针对不同盐碱类型、不同沙枣种源的定性和定量相结合的研究。对沙枣改良盐碱地养分的机制、途径、作用的精细研究有助于从养分管理角度建立以沙枣为代表的树种改良盐碱地土壤的机制模型, 为盐碱地精准生态修复和植被构建提供科学依据。

关键词 生物固氮; 凋落物; 细根; 分解; 养分释放; 土壤培肥; 生态修复

A review on the improvement of salt-affected soil nutrients by *Elaeagnus angustifolia* L.
WU Hai-wen^{1,2}, YANG Xiu-yan^{1,2}, WANG Ji-ping^{1,2}, LIU Zheng-xiang^{1,2}, ZHU Jian-feng^{1,2}, ZHANG Hua-xin^{1,2*} (¹Research Center of Saline and Alkali Land of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; ²Tianjin Forestry Research Institute of Chinese Academy of Forestry, Tianjin 300270, China).

Abstract: Planting multi-purpose and salt-tolerant tree species is one of the most effective ways for ecological restoration of salt-affected soil, with great ecological and economic benefits. *Elaeagnus angustifolia* L. is a representative tree species as a pioneer species for ecological restoration of salt-affected soil in China. *E. angustifolia* can significantly improve nutrient concentrations in salt-affected soil, with the mechanism underlying nutrient transport being still unclear. Based on the analysis of geographical distribution and climatic adaptability, we summarized the degree and ways of improving nutrient status in salt-affected soil by *E. angustifolia* from the aspects of soil nutrient increase, biological N-fixation, leaf litter and fine root decomposition. We quantitatively elaborated the key processes of nutrient transport and the effect of soil salinity, giving a straightforward understanding of the positive effects of *E. angustifolia* on salt-affected soil. *E. angustifolia* was distributed in most salt-affected areas of China, with great geographical and climatic adaptability. *E. angustifolia* had high salt tolerance, and could significantly increase nutrient content, especially N content, in moderate and severe saline-alkali soils. The prominent fertilization effect of *E. angustifolia* attributed to its efficient biological N-fixation and rapid litter and fine root decomposition, which release a large amount of N into soil in a short time, thus rapidly improving soil fertility. The processes of biological N-fixation and nutrient release were affected by soil salin-

ity. Further studies of nutrient transport mechanism of *E. angustifolia* in salt-affected soil should focus on the long-term positioning monitoring with nitrogen cycle as the kernel, and the combination of qualitative and quantitative research for salt types and *E. angustifolia* provenances. Precise understanding of the mechanism, pathway and function of *E. angustifolia* on improving salt-affected soil nutrients is helpful to establish the mechanism model of soil improvement by tree species represented by *E. angustifolia* from the perspective of nutrient management, which provides scientific support for precise ecological restoration and vegetation construction for salt-affected soils.

Key words: biological N-fixation; litter; fine root; decomposition; nutrient release; soil fertility improvement; ecological restoration.

土壤盐渍化是世界性的生态难题。据估算,全球灌溉区每年因土壤盐渍化导致的农作物减产损失高达 2.73×10^{10} 美元 (Qadir *et al.*, 2014)。我国东北平原、西北干旱和半干旱地区、黄淮海平原及东部沿海地区分布着大量盐碱地,总面积达 9.913×10^7 hm^2 , 约占全国土地面积的 1/10, 既是我国经济社会可持续发展的主要障碍因子, 也是重要的后备土地资源 (朱建峰等, 2018)。对盐碱地的治理和生态修复具有显著的生态价值和经济价值, 是值得投资的领域 (Qadir *et al.*, 2014)。目前, 国内外在工程措施、农艺措施、生物措施和化学措施等盐碱地改良利用的理论与技术方面取得了长足的进步, 但仍然存在成本高、潜在环境污染等问题 (张翼夫等, 2017)。种植耐盐碱植物, 尤其是耐盐碱的多用途树木, 不但能够改良土壤, 改善生态环境, 还能够显著提高投资者的正收益及使用者的经济和社会效益 (Qadir *et al.*, 2014), 是实现盐碱地可持续利用的重要方法 (Hasanuzzaman *et al.*, 2014)。

沙枣 (*Elaeagnus angustifolia* L.) 就是耐盐碱多用途树种中的代表性树种, 在全世界分布广泛, 可固氮、耐寒、耐旱、耐盐碱、耐瘠薄、适应性强, 能在几乎所有类型的土壤上生长, 多用于盐碱地或沙地的造林绿化, 具有生态价值、经济价值、观赏价值、药用价值 (于玮玮等, 2009; Farzaeia *et al.*, 2015; Enescu *et al.*, 2018)。在我国, 沙枣是干旱、半干旱地区防风固沙、水土保持、植被恢复及困难立地造林的优良树种。近年来, 随着盐碱地改良的树种需求急剧上升, 沙枣成为了盐碱地生态修复和植被构建的重要树种。盐碱地区种植沙枣, 不但能够持续有效地改善盐碱地生态环境, 同等条件下还能取得高于胡杨和榆树经济效益 (Lamers *et al.*, 2008)。

目前, 利用沙枣改良盐碱地的研究多集中在其本身的耐盐机制, 而在沙枣对土壤养分输送机制方面缺乏系统的量化研究。种植沙枣究竟能向盐碱土

壤中输送多少养分、能在多大程度上缓解土壤的养分缺乏、哪些过程在其中起到主要作用、土壤盐碱条件对养分输送的过程有哪些影响等问题尚未得到系统的量化答案。本文从沙枣在我国的分布及对气候变化的适应性、改善盐碱土壤养分的效果、生物固氮、落叶和细根的分解以及土壤盐碱条件对固氮和养分输送的影响等几方面进行了综述, 从数量变化的角度总结了沙枣对盐碱地的改良作用, 为盐碱地生物改良和生态修复的深入研究提供参考。

1 沙枣在我国的分布及气候适应性

沙枣是胡颓子科、胡颓子属的落叶乔木或小乔木, 原产于欧洲南部、亚洲中部和东部 (Katz *et al.*, 2003)。在我国, 沙枣又被称为七里香、香柳、刺柳、桂香柳、银柳等, 主要分布在冬季干冷的暖温带和中温带地区以及北纬 $30^\circ \sim 50^\circ$ 之间的干旱半干旱地区, 包括西北各省区、内蒙古西部及华北西北部, 少量分布于华北北部和东北西部。沙枣的天然林较少, 分布在新疆的塔里木盆地与准噶尔盆地的边缘以及甘肃河西走廊与内蒙古额济纳旗的黑河-弱水流域中下游两岸的河滩河谷 (郭普等, 1990), 集中在新疆塔里木河和玛纳斯河、甘肃疏勒河、内蒙古的额济纳河两岸及内蒙古境内一些大三角洲 (如李化中滩、大中滩) (时永杰等, 2003)。沙枣形成的纯林较少, 常与胡杨、灰杨等乔木树种或怪柳、梭梭等灌木树种伴生, 形成怪柳-沙枣混交林、胡杨-沙枣-梭梭林等 (于玮玮等, 2009)。人工沙枣林多分布于西北的新疆、甘肃、宁夏、陕西和内蒙古等省 (区), 尤其是新疆南部、甘肃河西走廊、宁夏中卫、内蒙古的巴彦淖尔盟和阿拉善盟、陕西的榆林等地, 都用沙枣作为农田防护林和防风固沙林; 山西、河北、辽宁、黑龙江、山东、河南等省区, 为改良土壤, 也在沙荒地和盐碱地大量引种栽培沙枣 (时永杰等, 2003)。近年来, 随着盐碱地治理需求的急剧增加, 沙枣还被大量

引种到沿海地区(Qi *et al.*, 2018)。目前,沙枣在我国东北、西北、华北及沿海地区均有广泛分布(张晓芹, 2018)。从沙枣的地理分布和人工引种地域的扩展可以看出,其分布区域与我国北方盐碱地的分布区域重合,其分布扩展方向也与盐碱地改良的需求吻合,是盐碱地区的乡土树种和适生树种,在盐碱地生态修复中具有巨大的应用潜力。

气候条件是决定植物分布的重要因子,沙枣的适宜分布区也受气象因子限制。研究表明(Zhang *et al.*, 2018),当前气候条件下,沙枣潜在最适宜分布区约 $2 \times 10^5 \text{ km}^2$,分布在宁夏、甘肃、新疆、陕西、内蒙古西部、青海、山西、河北和河南;中等适宜分布区约 $1.0 \times 10^6 \text{ km}^2$,扩展至山东、辽宁、西藏、江苏和安徽;低适宜分布区约 $1.4 \times 10^6 \text{ km}^2$,除上述省份外,在湖北、吉林、黑龙江和四川也有少量分布;其他省份和地区为不适宜区。沙枣的气候适宜稳定区面积约占当前适宜区的 83%~98%,总体稳定;其敏感区域主要位于西北干旱区的塔里木和吐鲁番盆地以及河西走廊的北部。在未来低浓度排放情景下,沙枣当前气候适宜分布区的地理质心将以 $19 \text{ km} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 的速度由西向东移动;而在中等和高浓度排放情景下,则将以 $6 \sim 10 \text{ km} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 的速度向西北移动(张晓芹等, 2018)。这些研究表明,沙枣的气候适应性很强,且在我国北方盐碱地区的分布受未来气候变化的影响不大,对于盐碱地的生态修复和绿化具有可持续性。

作为具有较高经济价值、生态价值、药用价值的多用途树种,对盐碱地区地理和气候极强的适应性特质使得沙枣在盐碱地生态修复中成为首选树种。

2 沙枣耐盐碱能力强

沙枣具有很强的耐盐碱性,能够在重度盐碱条件下生长。室内培养实验发现, $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 水培下,沙枣的成活率为 92.7%(Liu *et al.*, 2018)。培养基栽培的沙枣幼苗浇灌 $500 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 后,虽然有明显的落叶,但植株并未出现死亡(杨升等, 2012)。沙培盆栽甘肃民勤的小果沙枣和大果沙枣,以不同浓度的 NaCl 溶液浇灌,发现小果沙枣的耐盐阈值为 $9.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 约为 $165 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 大果沙枣的耐盐阈值为 $13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 约为 $225 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (郑秀玲等, 2017)。对河套灌区盐碱地的研究表明,硫酸盐盐土表层(0~30 cm)含盐量为 $14.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,沙枣仍能正常生长,其耐盐上限为 $18.7 \text{ g} \cdot$

kg^{-1} ;氯化物盐土表层(0~30 cm)含盐量为 $13.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,沙枣仍能正常生长,其耐盐上限为 $17.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;在苏打盐土表层(0~30 cm)含盐量为 $15.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,沙枣能正常生长,其耐盐上限为 $19.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (张雁平等, 2008)。谢小丁(2006)在东营露天盐池以氯化钠盐土为培养介质的实验表明,沙枣幼苗可耐 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的盐水浇灌,可在 0~40 cm 土层含盐量小于 $10.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的地块上正常生长。于雷等(1995)在渤海湾北部的凌海市滨海重度苏打碱土(0~30 cm 土层碱化度 45%、pH 9.7)上种植沙枣,几乎全部成活,两年的保存率达到 90% 以上,远高于槐树、绒毛白蜡等。李绍忠等(1995)在辽宁滨海 pH 9.7~10.5、碱化度 47%~57% 的苏打碱土上种植沙枣,成活率达 98.75%,保存率达 83.44%。陈士刚等(2014)在吉林重度苏打盐碱土(pH 9.62~10.37)上引种不同种源的沙枣,其成活率达到 95% 以上,具有良好的生长表现和适应性。沙枣耐盐主要是通过根系对 Na 和 Cl 的聚积与限制作用以及茎有效地限制 Na 向功能叶片运输来实现的(刘正祥等, 2017)。

以上研究结果表明,沙枣具有很强的耐盐性和耐碱性,能够在我国绝大部分重度盐碱地生存,其耐盐阈值与培养介质的属性密切相关。强耐盐碱性使得沙枣成为重度盐碱地区生态修复的先锋树种。

3 沙枣能有效改善盐碱土养分条件

盐碱地区,尤其是重度盐碱地,盐度高、理化性质差,通常都会存在核心养分元素极度缺乏的现象,土壤供养能力极差。Chmura 等(2003)从印度洋到大西洋东北部的研究发现,滨海盐碱滩地土壤的碳密度为 $9 \sim 78 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均为 $(39 \pm 3) \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$, 远低于红树林沼泽的平均值($(55 \pm 4) \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$)。盐碱土的有机质含量通常会随着盐碱程度增加呈明显的下降趋势(Wong *et al.*, 2010)。我国相关研究也表明,盐碱地区土壤碳氮养分含量很低,浙江余姚(单奇华等, 2011)、河北海兴(刘小京等, 2003)、天津滨海(刘成宝等, 2015)、山东黄河三角洲地区(董合忠等, 2009)、唐山曹妃甸(郑磊等, 2013)等滨海地区盐碱地土壤有机质含量普遍低于 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮仅为 $0.2 \sim 0.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 不到农田土和森林土的一半,并呈现土壤盐碱程度越重,有机质和氮素含量越低的趋势。对东北中、重度碱土地区,如通辽(范富等, 2017)、吉林西部(苑芷茜, 2010)等地的研究也

表明,土壤有机质和全氮均为含量很低或极低水平,显著低于轻度盐碱化和非盐碱化土壤。河西走廊内陆河流域(姚润珏等,2011)、柴达木盆地(李松阳等,2017)等西北内陆盐碱土碳氮含量也有相似的研究结果,均属低至极低水平。可以看出,无论是沿海地区、东北地区,还是西部地区,不同类型的中、重度盐碱土均表现出核心养分极度贫乏的现象。在这样贫瘠的土地上,普通植物难以正常生长。

在盐碱地区种植沙枣,无论是纯林还是混交林都能显著提高土壤养分,快速改善土壤肥力,对中、重度盐碱地有显著的改良作用。李绍忠等(1997)在东北滨海苏打碱土(pH 9.7~10.5)的研究表明,沙枣成林后土壤有机质增加了44.53%,全氮增加了54.44%,速效氮增加了36.4%,土壤全盐量下降了37.14%。准噶尔盆地北部天然分布的沙枣林对土壤养分有明显的表层富集作用,尤其是土壤氮、磷含量显著增加,高于当地的新疆杨和白榆(桑巴叶等,2016)。黄河三角洲滨海盐碱地的沙枣林土壤也有类似的改善(Qi *et al.*, 2018)。利用沙枣、杜梨、红花等耐盐植物复合间作对天津滨海中度盐碱土的改良实验表明(李慧等,2013),配置沙枣的模式相比其他模式显著增加土壤有机质和全氮含量,能够很好地改善土壤养分状况。美国新墨西哥州的研究(DeCant, 2008)结果也表明,沙枣增加了半干旱水滨土壤氮素,沙枣树下的土壤全氮比对照增加了55%,是三角叶杨林下土壤全氮的4倍。Khamzina等(2009)在研究盐碱退化水田时发现,种植沙枣混交林能够使土壤中的有机碳增加19%,总氮增加21%,有效磷增加74%,显著提高了土壤肥力。

沙枣的生长发育时期、种植密度等因素会直接影响其改善土壤养分状况的效果。卢兴霞等(2014,2015)发现,天津重度盐碱地栽植沙枣后,对表土层化学特性影响较大,春季能明显降低土壤pH值,秋季在大幅度降低土壤含盐量同时能增加土壤有机质含量。总体而言,旺盛生长期(5月)、开花初期(6月初)对土壤养分消耗大,有机质含量、速效钾含量、阳离子交换量明显降低;落叶盛期(10月中旬)土壤pH值、有机质含量均高于6月,说明秋季的改良效果好于春夏季。侯志强等(2017)在研究沙枣造林密度的影响时发现,随着造林密度的增大,土壤容重增大,毛管孔隙度、非毛管孔隙度以及通气度下降,土壤肥力降低,中等造林密度在改善土壤含氮量方面效果最好。

4 沙枣改善盐碱土壤养分条件的重要途径

4.1 盐碱条件下的生物固氮

沙枣能通过生物固氮作用,利用空气中的氮素。与豆科植物-根瘤菌共生体系不同,沙枣是与弗兰克氏菌属(*Frankia*)的多种固氮放线菌共生进行固氮的植物。这种共生体系抗逆性强,对空气氮素的固定能力强,弥补了因盐碱土壤氮素不足而造成的养分亏缺,促进了植物的生长。

用乙炔还原法对辽宁滨海苏打盐土上的沙枣测定固氮量时发现,夏季沙枣固氮量最大,可达 $16.1 \sim 52.3 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (李绍忠等,1995;于雷等,1998)。Khamzina等(2009)用 ^{15}N 自然丰度法测定乌兹别克斯坦退化水田地上的沙枣固氮时发现,尽管土壤EC高达 $6 \sim 10 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,土壤有效磷严重缺乏($4 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),固氮百分率在五年内仍然从20%增加到100%,种植沙枣两年后,年均固氮量由 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到 $500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其后降低并稳定在 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,不同树龄的沙枣年固氮量在 $24 \sim 514 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。魏琦等(2017)利用 ^{15}N 自然丰度法测定野外滨海重度盐碱地6年沙枣植株相对于怪柳、白蜡的固氮百分率分别为67.36%和72.01%。在乌兹别克斯坦干旱区用 ^{15}N 丰度法测定一年生沙枣相对于白榆和美国皂角的固氮率为79%和68%;用A值法,测定二年生沙枣的固氮率相对于白榆和美国皂角分别为80%和68%;当密度为每公顷5000株,种植2年后,沙枣的年固氮量为 $14 \sim 16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (Djumaeva *et al.*, 2010)。

沙枣的固氮能力来源于与之共生的弗兰克氏菌。弗兰克氏菌有一定的耐盐能力(Ngom *et al.*, 2016),其固氮酶活性随NaCl的浓度提高而降低(Srivastava *et al.*, 2014)。Zhao等(1992)研究发现,在土壤NaCl含量为 $0 \sim 15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下,沙枣根瘤的数量和大小随着盐度升高而显著降低,根瘤的固氮酶活性则在高盐度下($15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著下降。

以上结果说明,沙枣在中、重度盐碱土中有氮自给的潜力,但是其固氮量因地域、环境条件、植株生长情况、测定方法等而有很大差别,其固氮能力受土壤盐碱程度影响。

4.2 落叶对养分的释放

凋落物的分解和养分的释放是森林植物生长发育所需养分的一个重要来源,是森林生态系统自肥的重要机制。一般而言,叶凋落物占主体地位,能达

到凋落物总量的 49.6%~100% (吴承祯等,2000)。据估算,森林每年通过凋落物分解归还土壤的总氮量占森林生长所需总氮量的 70%~80% (Gholz *et al.*,1985)。

沙枣落叶能为土壤提供大量氮素。对马德里 20 年轮沙枣树的研究发现,落叶平均为 $121.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,含氮量为 3.08%,其中 0.57% 为 $\text{NO}_3\text{-N}$;每年可提供总氮 $34.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ $6.36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (Bermudez de Castro *et al.*,1990)。美国西部三角叶杨下的沙枣林,落叶量仅为混合林总落叶量的 5%,而由其释放的氮占到了土壤总氮投入量的 20%,每 100 g 落叶可释放氮素 1.4 g ,无论是分解速率还是氮的释放量都远高于三角叶杨 (Simons *et al.*,1999; Harner *et al.*,2009;Follstad Shah *et al.*,2010)。Lamers 等 (2010) 在乌兹别克斯坦重度盐碱地用分解袋法研究落叶分解时发现,1 cm 孔径网袋中的沙枣叶每年可向土壤中贡献 $97 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,是榆树和胡杨的 2.9 倍和 4.2 倍。

沙枣落叶能够向土壤中输送大量氮素的主要原因是产量高、含氮量高、C/N 低,易分解。乌兹别克斯坦重度盐碱地上,3 年生沙枣叶生物量可达年均 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-1}$,远高于当地的榆树和胡杨 (Lamers *et al.*,2010)。不同研究中,盐碱地沙枣叶的含氮量为 1.5%~3.5%,远高于当地的榆树、杨树等其他树种;而 C/N 为 14~30,低于榆树和杨树等 3~5 倍,甚至更多 (Domenacha *et al.*,1994;Khamzina *et al.*,2009; Lamers *et al.*,2010;Katz,2016;桑巴叶等,2016;魏琦等,2017)。这些结果说明,沙枣落叶相对于同等条件下的当地其他树种,富含氮素且更容易分解,能向土壤中释放更多养分。

4.3 细根对养分的释放

细根的分解也是植物向土壤释放养分的一个重要途径。细根具有无木质部、直径小、寿命短、周期快、吸收表面积大、生理活性强的特点,比粗根周转速率快,是土壤养分的重要来源。森林的细根对土壤碳库的贡献高达 25%~80%,提供的氮为 29~255 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,在某些生态系统中,甚至超过地上部分 18%~45%,具有持续向土壤输入养分的功能,这在养分受限的土壤中对提高森林的生产力显得尤为重要 (张秀娟等,2005)。如果忽略细根的死亡和分解,土壤有机物质和养分元素的周转将被低估 20%~80% (张小全等,2001)。细根的分解与养分释放与其自身的养分含量及 C/N 有直接关系 (Jo *et*

al.,2016;罗永清等,2017)。

沙枣属浅根系植物,根系生物量占植株总生物量的近 30% (马良清等,2017)。其根系总量的 70%~80% 集中分布在 0~40 cm 土层范围内 (朱玉伟等,2005),困难立地中,0~10 cm 土层内细根生物量比例最大能占根系总生物量的 44.6% (王永吉等,2014)。魏琦等 (2017) 研究发现,沙枣根系含氮量为 2.55%,根氮的分配比为 36.3%,N/P 为 19.41,显著高于同等条件下的怪柳和白蜡;C/N 为 16.7,低于怪柳和白蜡。美国西部的研究表明 (Khamzina *et al.*,2016),在 $4000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的密度下,沙枣细根的生物量为 $1.5 \sim 2.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,细根的含氮量为 2.53%,是三角叶杨和榆树的 3.5 倍和 3.1 倍;C/N 为 17,远低于三角叶杨和榆树,分解比落叶快得多;沙枣细根分解对土壤养分的贡献量远高于榆树和杨树。中亚地区重度盐碱地种植的沙枣细根含氮量为 2.4%~3.0%,是当地杨树和榆树的 3~6 倍 (Khamzina *et al.*,2009)。三工河流域盐碱荒漠的人工沙枣群落中,生长季细根平均生物量为 $146.24 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,年分解率为 58.5%;细根年净生产力为 $151.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,通过细根死亡进入土壤中的有机碳为 $34.79 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$;细根的年周转率为 1.43 次,远高于陆地年平均周转率 (王永吉等,2014;汪依妮等,2018)。这些结果说明,沙枣根系富含氮素,分解快,周转快,能够比同等条件下非固氮树种输出更多的养分。

另外,进入凋落物层生长的根系还可能通过激发效应、共生真菌、N 吸收等方式对分解过程产生了重要影响 (马承恩等,2012;王微等,2016),直接或间接提高枯枝落叶的分解速率,促进养分向土壤中的转移。

4.4 盐碱条件对落叶和细根分解的影响

目前,对于凋落物和细根分解的影响因子研究集中于甜土环境,土壤盐碱条件及其动态变化的影响尚有很多争议。有研究表明,一定范围内提高土壤盐度能够促进落叶的分解,盐度过高则起抑制作用 (Singh *et al.*,2014;Khamzina *et al.*,2016),Jia 等 (2015) 的研究也表明,Na 缺乏或 Na 过多均不利于凋落物中碳的释放。但是,Mendelssohn 等 (1999) 研究纤维素在不同盐度土壤中的分解时发现,纤维素的分解随土壤盐度升高而降低,但在最高的盐度条件下反而升高。Karavin 等 (2016) 也发现,高盐抑制土壤微生物活性,但高到一定水平后有可能通过影响凋落物分解的化学过程从而加快其分解。Con-

nolly 等(2013)发现,盐度和落叶分解之间的关系在室内实验和野外实验间存在很大差别,野外条件下没有明显的关系。Stagg 等(2018)则发现,在滨海沼泽地区,凋落物分解的直接影响因素是其化学组成和质量,盐碱条件只起到间接作用,但是高盐条件会抑制凋落物的分解,残留更多的有机物。Khamzina 等(2016)对沙枣的实验证明,相对低盐度下($EC_e = 7 \sim 8 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$),落叶分解非但不受影响,分解率还与土壤盐度呈正相关,这个阶段中落叶的分解仍然受其他因素影响;当土壤盐度增高到 $11 \sim 18 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 后,落叶分解受到抑制,此时其他因素也不再具有显著影响。

可见,盐碱条件下落叶的分解更为复杂,一方面盐碱条件不但影响土壤微生物、理化性质,也会影响分解的化学过程。另一方面,实验条件的控制、实验方法和试验对象的选择、实验时间点的选取等因素也会造成不同的研究结果。目前,不同盐碱条件下沙枣落叶及细根的分解及养分释放模式尚无定论。

5 展 望

沙枣是我国盐碱地区重要的绿化树种,对沙枣改良盐碱土机制定性和定量的研究有助于盐碱地生态修复理论的细化和深入,并能用于指导盐碱地生态修复工程。

在盐碱条件下,沙枣具有很强的氮素自给潜力和养分供给能力,生物固氮、落叶和细根的养分释放作为重要的养分循环过程在培肥盐碱土壤过程中起到了重要作用。但是这一过程还有很多问题需要进行深入、系统的探索:

(1)缺乏长期定位观测,对沙枣改善土壤质量的关键特征、关键过程及关键参数缺少系统的时空变化描述,缺乏定性和定量相结合的系统性研究。

(2)缺乏对沙枣-盐碱土壤系统内氮素循环和周转的系统性研究。如生物固氮、氮素分配与再分配、氮素释放及土壤氮素的固定、流失与植物吸收等关键过程中,氮素的形态、去向、比例及控制因素如何随时空条件变化,对其他养分元素胁迫的响应等。

(3)缺乏对盐碱条件影响机制的研究。目前,不同盐碱类型、不同盐碱程度对沙枣生物固氮及养分输送的作用及其机制研究很少,数据和结果严重不足。

(4)缺乏对不同种源、不同品种沙枣改善盐碱土壤效果的对比,缺乏对差异性机制的研究。

因此,未来,沙枣-盐碱土系统中养分输送机制研究应重点加强以氮素循环为核心的长期定位监测及针对不同盐碱类型和不同沙枣种源的定性和定量相结合的研究。对沙枣改良盐碱地的机制、途径、作用的精细研究对这些问题的定性和定量研究有助于从养分管理角度建立以沙枣为代表的盐碱地生态修复树种改良土壤的机制模型,为盐碱地生态修复和植被构建提供科学依据。

参考文献

- 陈士刚,陶 晶,秦彩云,等. 2014. 沙枣在吉林苏打盐碱土区的适应性研究. 吉林林业科技, **43**(1): 6-10.
- 董合忠,辛承松,李维江,等. 2009. 山东滨海盐渍棉田盐分和养分特征及对棉花出苗的影响. 棉花学报, **21**(4): 290-295.
- 范 富,张庆国,马玉露,等. 2017. 不同植被覆盖盐碱地碱化特征及养分状况. 草业科学, **34**(5): 932-942.
- 郭 普,屈金声. 1990. 沙枣资源经济利用的途径. 甘肃林业科技, (2): 36-39.
- 侯志强,张兴锐,张国伟. 2017. 不同密度对沙枣人工林土壤肥力的影响. 山西林业科技, **46**(4): 22-23, 34.
- 李 慧,冯 涛,于玮玮,等. 2013. 复合间作栽培模式对滨海盐渍土养分和有机质的影响. 中国农学通报, **29**(15): 89-92.
- 李绍忠,潘文利,于 雷. 1997. 沙枣的耐盐力与固氮研究. 防护林科技, (1): 17-21, 25.
- 李松阳,王晓丽,王彦龙,等. 2017. 柴达木盆地盐碱地土壤离子特征及养分分析. 青海畜牧兽医杂志, **47**(6): 36-40.
- 刘成宝,贾美清,李 阳,等. 2015. 天津滨海地区吹填淤泥与其他类型土壤化学性质的比较. 天津师范大学学报: 自然科学版, **35**(1): 84-87.
- 刘小京,李伟强,杨艳敏,等. 2003. 河北省滨海盐碱地土壤与盐生植物养分特征的研究. 中国生态农业学报, **11**(2): 76-77.
- 刘正祥,魏琦,张华新. 2017. 盐胁迫对沙枣幼苗不同部位矿质元素含量的影响. 生态学杂志, **36**(12): 3501-3509.
- 卢兴霞,张 超,刘 婷,等. 2015. 盐碱地沙枣林不同生长期表层土壤化学性质. 江苏农业科学, **43**(4): 324-326.
- 卢兴霞,周 俊,杨静慧,等. 2014. 两种林木栽植对滨海重盐碱地化学特性的影响. 西南师范大学学报: 自然科学版, (9): 37-43.
- 罗永清,赵学勇,王 涛,等. 2017. 植物根系分解及其对生物和非生物因素的响应机理研究进展. 草业学报, **26**(2): 107-207.
- 马承恩,孔德良,陈正侠,等. 2012. 根系在凋落物层中的生长及其对凋落物分解的影响. 植物生态学报, **36**(11): 1197-1204.
- 马良清,冯大兰,黄小辉. 2017. 民勤荒漠沙枣生物量结构

- 和生长分析. 甘肃林业科学, **42**(4): 21–27, 31.
- 桑巴叶, 朱玉伟, 陈启民, 等. 2016. 准噶尔盆地主要农田防护林的生物量及养分分布特征. 西北林学院学报, **31**(4): 147–152.
- 单奇华, 张建锋, 阮伟建, 等. 2011. 滨海盐碱地土壤质量指标对生态改良的响应. 生态学报, **31**(20): 6072–6079.
- 时永杰, 高万林. 2003. 沙枣. 中兽医医药杂志, (S1): 154–155.
- 汪依妮, 柳鑫, 王健健, 等. 2018. 三工河流域不同植物群落细根对盐碱化的响应. 应用与环境生物学报, **24**(6): 1229–1235.
- 王微, 胡凯, 党成强, 等. 2016. 凋落物分解与细根生长的相互作用. 林业科学, **52**(4): 101–109.
- 王永吉, 赵学春, 来利明, 等. 2014. 沙枣人工群落细根生物量和周转过程. 干旱区地理, **37**(3): 548–554.
- 魏琦, 武海雯, 刘正祥, 等. 2017. 盐胁迫下沙枣生物固氮能力及氮素分配研究. 林业科学研究, **30**(6): 985–992.
- 吴承祯, 洪伟, 姜志林, 等. 2000. 森林凋落物研究进展. 江西农业大学学报, **22**(3): 405–410.
- 谢小丁. 2016. 盐生植物在黄河三角洲滨海盐碱地绿化中的应用模式研究(硕士论文). 泰安: 山东农业大学.
- 杨升, 张华新, 刘涛. 2012. 16个树种盐胁迫下的生长表现和生理特性. 浙江农林大学学报, **29**(5): 744–754.
- 姚润珏, 陈宗英, 王兆峰. 2011. 河西内陆河不同流域盐碱土壤碳、氮、氢分布特征. 甘肃农业科技, (1): 27–30.
- 于雷, 张海军. 1995. 滨海盐渍土沙枣造林试验初报. 辽宁林业科技, (6): 12–16.
- 于雷, 郑景明, 潘文利, 等. 1998. 滨海盐碱地防护林树种固氮特性研究. 辽宁林业科技, (2): 17–19, 50.
- 于玮玮, 阎国荣. 2009. 沙枣的资源及研究现状. 天津农学院学报, **16**(2): 46–50.
- 苑芷茜. 2010. 吉林省西部土壤盐碱特征和养分状况分析(硕士学位论文). 长春: 东北师范大学.
- 张小全, 吴可红. 2001. 森林细根生产和周转研究. 林业科学, **37**(3): 126–138.
- 张晓芹, 李国庆, 杜盛. 2018. 未来气候变化对沙枣适宜分布区的影响预测. 应用生态学报, **29**(10): 3213–3220.
- 张晓芹. 2018. 西北旱区典型生态经济树种地理分布与气候适宜性研究(博士学位论文). 北京: 中国科学院大学.
- 张秀娟, 梅莉, 王政权, 等. 2005. 细根分解研究及其存在的问题. 植物学通报, **22**(2): 246–254.
- 张雁平, 胡春元, 董智, 等. 2008. 河套灌区盐碱地造林树种选择的研究. 内蒙古林业科技, **34**(2): 25–27, 31.
- 张翼夫, 李问盈, 胡红, 等. 2017. 盐碱地改良研究现状及展望. 江苏农业科学, **45**(18): 7–10.
- 郑垒, 于君宝, 王光美, 等. 2013. 曹妃甸吹填区土壤障碍特征研究. 土壤通报, **44**(2): 454–458.
- 郑秀玲, 林静, 信健, 等. 2017. 同一种源地两种沙枣对NaCl胁迫的响应及耐盐阈值. 作物杂志, (4): 143–149.
- 朱建峰, 崔振荣, 吴春红, 等. 2018. 我国盐碱地绿化研究进展与展望. 世界林业研究, **31**(4): 70–75.
- 朱玉伟, 陈启民, 刘康, 等. 2005. 滴灌条件下4种树木生长发育规律的研究. 防护林科技, (1): 1–4, 17.
- Bermudez de Castro F, Aranda Y, Schmitz MF. 1990. Acetylene-reducing activity and nitrogen inputs in a bluff of *Elaeagnus angustifolia* L. *Orisis*, **5**: 85–89.
- Chmura GL, Anisfeld SC, Cahoon DR, et al. 2003. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles*, **17**: 1–22.
- Connolly CT, Sobczak WV, Findlay SEG. 2013. Field and laboratory investigations on the effects of salinity on decomposition dynamics among the Hudson River's freshwater tidal wetlands. Section 1: 1–23// Fernald SH, Yozzo DJ, Andreyko H, eds. Final Reports of the Tibor T. Polgar Fellowship Program, 2012. Hudson River Foundation.
- DeCant JP. 2008. Russian olive, *Elaeagnus angustifolia*, alters patterns in soil nitrogen pools along the Rio Grande River, New Mexico, USA. *Wetlands*, **28**: 896–904.
- Djumaeva D, Lamers JPA, Martius C, et al. 2010. Quantification of symbiotic nitrogen fixation by *Elaeagnus angustifolia* L. on salt-affected irrigated croplands using two ¹⁵N isotopic methods. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **88**: 329–339.
- Domenacha AM, Moiroud A, Jocteur-monrozier L. 1994. Leaf carbon and nitrogen constituents of some actinorhizal tree species. *Soil Biology and Biochemistry*, **26**: 649–653.
- Enescu CM. 2018. Russian olive (*Elaeagnus angustifolia* L.): A multipurpose species with an important role in land reclamation. *Current Trends in Natural Sciences*, **7**: 54–60.
- Farzaei MH, Bahramsoltani R, Abbasabadia Z, et al. 2015. A comprehensive review on phytochemical and pharmacological aspects of *Elaeagnus angustifolia* L. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, **67**: 1467–1480.
- Follstad Shah JJ, Harner MJ, Tibbets TM. 2010. *Elaeagnus angustifolia* elevates soil inorganic nitrogen pools in riparian ecosystems. *Ecosystems*, **13**: 46–61.
- Gholz HL, Fisher RF. 1985. Nutrient dynamics in slash pine plantation ecosystems. *Ecology*, **66**: 647–659.
- Harner MJ, Crenshaw CL, Abelho M, et al. 2009. Decomposition of leaf litter from a native tree and an actinorhizal invasive across riparian habitats. *Ecological Applications*, **19**: 1135–1146.
- Hasanuzzaman M, Nahar K, Mahabub Alam M, et al. 2014. Potential use of halophytes to remediate saline soils. *BioMed Research International*, **2014**: Article ID 589341. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/589341>.
- Jia Y, Kong X, Weiser MD, et al. 2015. Sodium limits litter decomposition rates in a subtropical forest: Additional tests of the sodium ecosystem respiration hypothesis. *Applied Soil Ecology*, **93**: 98–104.
- Jo I, Fridley JD, Frank DA. 2016. More of the same? In situ leaf and root decomposition rates do not vary between 80 native and nonnative deciduous forest species. *New Phytologist*, **209**: 115–122.

- Karavin N, Yalman E, Kizir Z, *et al.* 2016. Variation in leaf litter decomposition rate according to salinity and water regime in *Juglans regia* L. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, **3**: 158–162.
- Katz G. 2016. Russian olive biology, invasion, and ecological impacts in western North America. ERDC TN-EMRRP-ER-2, US Army Engineer Research and Development Center Vicksburg, MS, United States.
- Katz G, Shafroth P. 2003. Biology, ecology and management of *Elaeagnus angustifolia* L. (Russian Olive) in western north America. *Wetlands*, **23**: 763–777.
- Khamzina A, Lamers JPA, Vlek PLG. 2009. Nitrogen fixation by *Elaeagnus angustifolia* in the reclamation of degraded croplands of Central Asia. *Tree Physiology*, **29**: 799–808.
- Khamzina A, Lamers JPA, Martius C. 2016. Above- and below-ground litter stocks and decay at a multispecies afforestation site on arid, saline soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **104**: 187–199.
- Lamers JPA, Bobojonov I, Khamzina A, *et al.* 2008. Financial analysis of small-scale forests in the Amu Darya Lowlands of rural Uzbekistan. *Forests, Trees and Livelihoods*, **18**: 373–386.
- Lamers JPA, Martius C, Khamzina A, *et al.* 2010. Green foliage decomposition in tree plantations on degraded, irrigated croplands in Uzbekistan, Central Asia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **87**: 249–260.
- Liu Z, Zhu J, Yang X, *et al.* 2018. Growth performance, organ-level ionic relations and organic osmoregulation of *Elaeagnus angustifolia* in response to salt stress. *PLoS ONE*, **13**: e0191552.
- Mendelssohn IA, Sorrells BK, Brix H, *et al.* 1999. Controls on soil cellulose decomposition along a salinity gradient in a *Phragmites australis* wetland in Denmark. *Aquatic Botany*, **64**: 381–398.
- Ngom M, Oshone R, Diagne N, *et al.* 2016. Tolerance to environmental stress by the nitrogen-fixing actinobacterium *Frankia* and its role in actinorhizal plants adaptation. *Symbiosis*, **70**: 17–29.
- Qadir M, Quill  rou E, Nangia V. 2014. Economics of salt-induced land degradation and restoration. *Natural Resources Forum: A United Nations Sustainable Development Journal*, **38**: 282–295.
- Qi Y, Li J, Chen C. 2018. Adaptive growth response of exotic *Elaeagnus angustifolia* L. to indigenous saline soil and its beneficial effects on the soil system in the Yellow River Delta, China. *Trees*, **32**: 1723–1735.
- Simons SB, Seastedt TR. 1999. Decomposition and nitrogen release from foliage of Cottonwood (*Populus deltoides*) and Russian-olive (*Elaeagnus angustifolia*) in a riparian ecosystem. *The Southwestern Naturalist*, **44**: 256–260.
- Singh K, Trivedi P, Singh G, *et al.* 2014. Effect of different leaf litters on carbon, nitrogen and microbial activities of sodic soils. *Land Degradation and Development*, **27**: 1215–1226.
- Srivastava A, Mishra AK. 2014. Regulation of nitrogen metabolism in salt tolerant and salt sensitivity *Frankia* strains. *Indian Journal of Experimental Biology*, **52**: 352–358.
- Stagg CL, Baustian MM, Perry CL, *et al.* 2018. Direct and indirect controls on organic matter decomposition in four coastal wetland communities along a landscape salinity gradient. *Journal of Ecology*, **106**: 655–670.
- Wong VNL, Greene RSB, Dalal RC, *et al.* 2010. Soil carbon dynamics in saline and sodic soils: A review. *Soil Use and Management*, **26**: 2–11.
- Zhang X, Li G, Du S. 2018. Simulating the potential distribution of *Elaeagnus angustifolia* L. based on climatic constraints in China. *Ecological Engineering*, **113**: 27–34.
- Zhao K, Harris PJC. 1992. Effect of salt stress on nodulation and nitrogenase activity in *Elaeagnus angustifolia*. *Nitrogen Fixing Tree Research Reports*, **10**: 165–166.

作者简介 武海雯,女,1979年生,博士,助理研究员,研究方向为盐碱地生态修复。E-mail: auhheaven@163.com
责任编辑 李凤芹
