

旱区盐碱地盐生植物改良研究动态与分析

史文娟, 杨军强, 马媛

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

摘要: 在盐碱地的各项治理措施中,生物措施因其“省水、低投入、环境友好型”等优点而被认为是目前最具有潜力的改良途径,具有广泛的应用前景,但对其研究目前还仅处于初步阶段。通过查阅大量中外相关文献资料并结合合作者在该领域多年的实验研究,本文详细评述了盐碱地盐生植物改良的研究动态,分析了盐生植物改良盐碱地的机理;论述了盐生植物的分类和改良方式,系统分析了根际土壤微环境和植物生长发育及养分吸收等对生物措施改良盐碱地的响应。系统分析发现生物改良对盐碱地改良的效果显著,潜力巨大,同时指出了目前在盐碱地生物改良研究方面存在的问题,并对其前景进行了展望,以期对盐生植物盐碱地改良的后期研究提供直接参考。

关键词: 盐碱地; 盐生植物; 土壤微环境; 植物生长发育

中图分类号: S278

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)05-0229-06

Review on saline – alkali soil improvement with planting halophyte method in arid region

SHI Wenjuan, YANG Junqiang, MA Yuan

(State Key Laboratory Base of Eco – hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Among the measures of saline – alkali land improvement, biological method is considered to be the most effective way which has the advantages such as water – saving, low cost, friendly environmental etc and promising application prospect. But research on the aspect is only at the preliminary stage. Combining reading large number of domestic and foreign relevant literature with years' experimental research in this field, this paper reviewed the research progress on halophyte improvement technology in saline – alkali land, analyzed the mechanism of improving saline – alkali soil with halophyte, discussed the classification and improved way of halophyte, and systemically stated the response of soil micro environment around rhizosphere, plants' growth and nutrient uptake on saline – alkali soil improvement with halophyte. As a result, the biological method is regarded as a promising method for saline – alkali land improvement and has great potential. It proposed the problems existing in improving saline alkali soil with halophyte and look into its application prospect. The result can provide direct reference for the later study on saline alkali soil improving by halophyte.

Key words: saline alkali land; halophyte; soil micro environment; plant growth

土壤的盐碱化问题始终是制约干旱地区农业发展的重要瓶颈,直接影响着国家的粮食生产安全问题。特别是在地域广阔的新疆地区,因降水少、蒸发强烈、地下水埋深浅且矿化度高,土壤的次生盐碱化问题尤为突出。据报道,新疆盐碱地总面积 2181.4 万 hm^2 , 占全国盐碱土 (9913 万 hm^2) 面积的 22.01%; 在 407.84 万 hm^2 的新疆耕地总面积中,受不同程度盐化危害的面积占 30.12%^[1], 这些均制约了该地区

土地的有效利用和经济的持续发展。因此,盐碱化的改良和利用始终是人们关注的热点问题。

盐渍土的改良利用是一项艰巨且复杂的生态工程,目前,国内外常用的盐碱地治理措施主要有水利工程措施、物理覆土改良、化学改良和生物改良等。由于传统的水利工程措施利用淡水压盐,通过排渠将盐分移走,这种方式虽然见效快,但会使“下游”土壤产生次生盐渍化,同时将土壤中的水溶性养分淋洗

收稿日期:2015-03-28; 修回日期:2015-04-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51379173); 新疆维吾尔自治区科技计划项目(201130103-3)

作者简介:史文娟(1972-),女,陕西武功人,博士,教授,主要从事农业水资源高效利用方面的研究。

掉,造成土壤相对贫瘠,且使排入的水体产生富营养化现象;其次灌水洗盐需要大量资金和淡水,而新疆等干旱内陆区淡水资源匮乏,水利工程改良无法长期大面积实施;物理覆土改良由于工程量太大、可以改良的土地面积有限,且持续性较差;而化学改良短期效果显著,但因涉及适宜改良剂的选用和昂贵的费用等问题而受到限制;生物改良盐碱地,即是通过盐生植物的种植或嗜盐微生物的增加等方式来减少土壤中的含盐量,改善土壤结构,达到改良盐碱化土壤的目的^[2]。具有“省水、低投入、环境可持续”等优点。多年的研究证明^[3]:在治理盐碱地的各项技术措施中,生物措施被普遍认为是最有效的改良途径。由于生物改良目前还主要处于研究阶段,以下就其中的盐生植物改良盐碱地的相关研究进展进行评述,以期对盐碱地的改良或研究提供参考。

1 盐生植物分类及盐碱地改良机理

1980年,Greenway等^[4]曾对盐生植物进行了定义,即凡能在含有 3.3×10^5 Pa(相当于70 mmol/L单价盐)以上的渗透压盐水中正常生长并完成生活史的植物都是盐生植物,否则即是非盐生植物。目前,世界上现有盐生植物种类大约有5000~6000种,约占世界种子植物的2%。我国盐生植物资源丰富,种类多,在世界盐生植物数量中占有较大比例。赵可夫等^[5]对我国盐生植物进行了详细的分类,最新数据表明,中国共有盐生植物555种,分属228属和71科。这些盐生植物主要分布在我国西北与华北干旱与半干旱区、黄河三角洲地区及华东与华南沿海地区。中国盐生植物的数量占世界盐生植物5000~6000种的11.1%~9.3%。

盐生植物尽管种类繁多,但从盐碱地改良的角度划分,则分为真盐盐生植物、泌盐盐生植物和假盐盐生植物3大类,这些盐生植物均有各自的耐盐机理特征^[5],泌盐盐生植物之所以抗盐,主要是依靠其叶片和茎上的盐腺将吸收到体内的盐分分泌到体外。真盐盐生植物主要依靠从外界吸收积累无机盐离子作为渗透调节剂,增加细胞液浓度以避免细胞脱水和促进细胞吸水。假盐盐生植物中,有些植物的根部有较强的过滤作用,几乎不吸收或很少吸收土壤中的盐分,但其拒盐的机制非常复杂,目前还没搞清全部机理。无论是哪一种耐盐机理,这些盐生植物大都能够能够在200~400 mmol/L NaCl的土壤中共存,能够在这个浓度范围内生存的盐生植物,其体内含盐量也非常大,一般情况下,它的含盐量可以达到

植物干重的20%,少数植物可以达到植物体干重的30%~40%,如碱蓬属(*Suaeda*)植物、盐角草属(*Salicornia*)等植物^[5]。

从盐碱地改良的角度来说,盐生植物改良的机理主要体现在以下3个方面:一是可作为“生物泵”带走土壤中的盐分,并通过收割实现盐分的转移;二是减少土面蒸发、降低地下水位防止地面返盐;三是植物根系生长可改善土壤物理性状,其分泌的有机酸及植物残体经微生物分解产生的有机酸可中和土壤碱性。利用生物措施改良盐碱地,根据盐碱土壤状况、改良的目的、要求等特点,应从众多盐生植物中筛选最适宜种植的盐生植物,以达到更好的盐碱地治理效果。

为此,许多学者还从盐生植物的耐盐机理^[6]、耐盐范围及最大耐盐量^[7-8],盐生植物新品种的选育^[9]等方面进行了大量研究,这也是目前生物改良领域的热点问题,也曾被列为“863”高科技重大攻关项目。如Rozema J等^[7]模拟了不同盐浓度下的盐生植物生长过程,确定了其最大耐盐量。Belkheiri等^[6]对盐胁迫与地中海盆地两种不同盐生植物的生长、水分关系和离子累积之间的相关关系进行了研究,认为同一盐离子对不同盐生植物的毒害作用不同。从盐生植物间作改良盐碱地的角度,Kilic等^[10]通过盆栽试验研究了盐生植物马齿苋(*purslane*)的最大耐盐量以及不同浓度盐胁迫下马齿苋的脱盐效果,并提出:将一些耐盐性较高的植物间作种植在盐碱地果园中,以改良其土壤盐性这一观点。

利用生物措施改良盐碱地已经被证实是一种切实可行的办法,但耐盐植物的矿质营养、耐盐机制、生理反应等大量的基础性工作有待深入。植物耐盐分子生物学正在成为国内外研究的主要方向,高耐盐性、高经济价值的转基因耐盐牧草或可饲用作物的培育将在盐碱地生物改良中发挥巨大作用。对耐盐植物的筛选特别是耐碳酸盐(高pH)植物的筛选仍然是热点。

2 盐碱地生物改良种植方式

影响生物措施改良盐碱地效果的因素有很多,除了盐生植物的筛选等因素外,如何根据不同土壤质地、不同盐碱化程度来选择种植改良方式也至关重要。干旱内陆地区盐碱土壤根据盐碱化程度不同可分为轻度、中度和重度盐碱地,相应的其生物改良种植模式也大致可分为以下3种:

(1)对于重度盐碱地,一般采用单作种植耐盐

碱植物的方式,连续种植若干年,待土壤盐碱化降低到一般作物耐盐水平时再种植其他作物。吕彪等^[11]1995-1998年进行种植碱茅草改良试验,经过三年试验,土壤含盐量由10.87 g/kg降低到2.50 g/kg,脱盐率达77%,经过治理后,不仅可种植农作物,而且可变为中高产田。

(2)对于中度盐碱地,一般采用间作套种的种植方式,每年交换盐生植物和一般作物的种植区域。王升等^[12]通过在膜下滴灌棉田间作盐生植物(碱蓬和盐角草)后发现,两种盐生植物的脱盐率分别为43.1%(碱蓬)和30.6%(盐角草),同时,间作提高了 K^+/Na^+ ,降低了对作物有毒害作用的 Cl^- 含量。任威等^[13]种植耐盐小麦复播草木樨或苜蓿、或耐盐禾本科牧草套种苜蓿有较强的脱盐效果。脱盐率以耐盐小麦套播豆科牧草为最高,0~40 cm脱盐率可达90.88%,40~100 cm脱盐率可达85%。

(3)对于轻度盐碱地,可采用直接种植耐盐小麦或者其他农作物等方式。中国科学院新获阜康生态站在1987年复垦盐演化荒地13 hm²,其中1 m土层盐分在1.0%以下的面积占50%,盐分含量1.5%以上的面积占10%。第一年种植耐盐小麦4 hm²的地块中,保苗面积75%,在保苗较好的区域春后套播苜蓿,第四年60 cm土层的盐分小于0.3%,可以种植敏感性的高产作物^[14]。

3 根际土壤微环境对生物改良的响应

根据盐生植物改良盐碱地的机理,在盐生植物改良盐碱地的过程中,必然涉及到土壤根区微环境系统的改变,具体包括土壤的物理特性(容重、结构和水分等)、化学特性(盐分、养分和有机质等)及生物特性(即土壤的微生物特性)。以下就从根区微环境这几方面对盐生植物改良盐碱地方面的相关研究进行详细的论述。

3.1 土壤结构及容重对生物改良措施的响应

在新疆等干旱内陆地区,地下水位较低,日照强烈,常年降雨稀少,在土壤蒸发条件下盐分上移,形成地表积盐。由于盐分多,碱性大,使土壤腐殖质遭到淋失,土壤表面积一层白色盐分,导致土壤板结,通气和透水状况不良,土壤结构遭到破坏,严重的会造成植物萎蔫、中毒甚至烂根死亡。

种植耐盐碱植物后,大量盐生植物根系的有机残体会积累在土壤中^[13],一方面通过微生物分解,形成多糖、腐殖质和团聚土粒,并最终形成稳定的土壤结构;另一方面一些未被完全分解的纤维在土壤

中形成通气、通道,同时施用有机肥对土壤形成结构有极好的促进作用。由此,促进土壤变得疏松、有结构,不再板结,有利于作物生长。

胡发成等^[15]研究发现:种植苜蓿改善了土壤物理性质,土壤容重下降,孔隙度提高,土壤的颗粒结构更趋合理。王苗等^[16]研究表明,种植盐生植物后土壤的容重与耐盐植物种植的年限呈负相关,随着植物在土壤种植年限的增加,土壤容重逐年减少。耐盐植物在盐渍土壤种植后表现出:土壤质地变得疏松,单位体积内的土体重量减小,容重变小;土壤的机械组成逐渐由粘土向粗粉、中粉和细粉转化,土壤结构良好,通气透水性能加大;庞大根系的生长,也改善了土壤的结构和渗透性能。

3.2 土壤水分对生物改良措施的响应

种植盐生植物后,地表水分的蒸发被植物的蒸腾作用代替,减少地表蒸发损失;冬季植物地上部分的枯枝能保留一定量的积雪,使早春季节土壤的含水量比裸地高,有利于下一代植物体的存活^[17]。

大量研究表明^[18-19]:盐生植物能够增加地表覆盖,减缓地表径流,调节小气候,减少水分蒸发。同时由于植物根系对土壤透水性、土壤结构等的改善,田间持水量和土壤含水量增加。朱兴运等^[20]研究表明:种植抗盐牧草后,由于土壤结构改善,孔隙度增加,导致透水系数增加。与盐荒地相比,4年生碱茅草地土壤的透水系数增加37.0%,3年生草地增加31.4%,2年生草地增加11.1%。

3.3 土壤盐分对生物改良措施的响应

土壤蒸发量大于降水量是盐土形成的原因之一,在盐土上种植耐盐植物,将裸露的土壤覆盖起来,以植物蒸腾代替土壤蒸发,减少了土壤蒸发量,降低了土壤的积盐速度,减少了盐分在耕层的累积。此外,由于盐生植物能够吸收土壤中盐分并积聚到植物体内,通过作物收割可以将盐分带走,不仅降低了土壤中盐分含量,而且对于一些如碱蓬、盐角草、白茎盐生草等盐生植物,他们还可以作为药材、饲料、工业原料等,具有一定的经济价值,在治理盐碱化改善生态环境的同时也获得了良好的经济收益。

如周东生等^[21]提出:碱蓬是一种耐盐能力很强的真盐生植物,是当前改良利用盐碱土壤的首选植物品种,种植碱蓬能够有效地降低土壤表层含盐量,对盐渍土具有显著的改良作用^[22]。在沿途上种植耐盐碱蓬15株/m²和30株/m²,其20~30 cm土层中的 Na^+ 含量分别减少4.5%和6.7%,0~60 cm土层中的 Na^+ 含量每年分别减少1 245 kg/hm²和

1 920 kg/hm^{2[23]}; 总体上, 土壤脱盐率最高的是中层, 其次是表层, 最少的深层^[24]。王界平等^[25]认为, 在盐碱地上种植盐角草, 是改良利用新疆盐渍土资源的一项经济有效的新途径, 使用盐角草改良后的次生盐渍化土壤的电导值和 Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 等主要盐害离子含量明显降低。同时施氮能显著提高盐角草的生物量、种子产量、各盐离子累积量及全盐累积量。此外, 学者们发现, 白茎盐生草和苜蓿也均对盐碱化有很好的生物修复功能。王文等^[26]的研究表明, 种植白茎盐生草 1 年可从 0 ~ 20 cm 土层中除去盐分 2.434 t/hm², 土壤 pH 下降 0.13 ~ 0.14; 利用白茎盐生草的这种聚盐特性, 则一般需 4 ~ 6 a 可从根本上治理盐碱土壤, 且收割的白茎盐生草制成天然植物碱, 用于食品工业或其他工业。

3.4 土壤养分对生物改良措施的响应

种植耐盐碱植物后, 由于植物的枯枝落叶及死根的腐殖作用, 促进了土壤微生物的生长和繁殖, 改善了土壤养分状况和化学性状, 提高了土壤肥力^[3]。

研究表明, 碱蓬增加土壤有机质和微生物含量, 提高土壤中 N、P、K 含量, 对盐渍土具有显著的改良作用^[22]。魏忠平等^[27]采用工程措施为先导, 生物措施为核心, 在北方泥质海岸盐碱荒地上种植田菁、苜蓿两种牧草对土壤进行培肥效果研究, 结果表明, 种植田菁、苜蓿一个生长季度后, 土壤中氮、磷营养状况得到改善。胡发成^[15]通过对种植苜蓿后土地地力的测定, 结果表明: 种植苜蓿改善了水分渗透性和土壤通气状况, 提高了保肥蓄水功能, 土壤养分发生变化。此外, 利用生物措施改良盐碱地, 在草田轮作中, 每公顷苜蓿每年可产干草 15000 kg 以上, 每年可饲养大约 110 只羊单位的家畜, 年积厩肥可达 36 000 kg 以上^[13]。同时种植苜蓿, 每年的枯枝落叶, 根茬干重大约为 3 636.6 kg/hm², 这样每年可增加土壤中速效养分的含量, 相对减少化肥的使用量。

3.5 土壤有机质对生物改良措施的响应

土壤有机质的含量与土壤结构性、渗透性、通气性、吸附性以及缓冲性都有十分密切的关系, 直接影响土壤的各种性质, 其含量是土壤肥力高低的重要指标之一^[17]。大量研究表明, 生物措施改良盐碱地, 不仅可以改善土壤结构, 增加土壤渗透性和通气性, 还可以改善根际土壤中微生物的活性, 增加土壤有机质含量, 提高土壤肥力。在盐角草改良后的次生盐渍化土壤上种植棉花, 可明显提高棉田土壤有机质含量^[11]。王玉珍等^[28]研究 6 种盐生植物改

良盐碱地情况, 每年测定土壤中氮、磷、钾、有机质等指标, 经过 3 年的人工种植, 发现土壤中氮、磷、钾和有机质含量逐年增加。研究发现^[17], 土壤有机质的含量在种植星星草的第一年就有一定程度的提高, 此后, 随着星星草种植年限的增加而呈上升趋势, 第二年、第三年有机质含量显著升高, 种植 3 年星星草的土壤有机质的含量比碱斑裸地的有机质含量提高近 98% 左右。在盐角草改良后的次生盐渍化土壤上种植棉花, 可明显提高棉田土壤有机质含量^[11]。此外, 土壤有机质含量的变化与耐盐植物的种植年限呈正相关, 其中, 与有机质形成密切相关的腐殖质含量也呈这种正相关的变化^[16]。

3.6 土壤微生物对生物改良措施的响应

微生物是土壤中物质与能量转化的直接参与者, 它们的活动对土壤肥力形成、土壤物质、能量的流动以及土壤生态系统的稳定都起着不容忽视的作用^[29]。土壤微生物直接参与动植物残体的分解、养分的储存转化, 在土壤功能及土壤演变过程中起重要作用^[30]。研究认为, 土壤微生物是一种有效、反应灵敏的土壤质量评价指标^[31]。

种植碱蓬后, 一部分根际土壤的优势微生物种群的盐耐受性明显下降, 耐盐性较低的微生物种群则成为优势种群^[24]。李凤霞等^[32]研究了生物措施等不同改良方式对宁夏盐碱地土壤微生物的影响, 结果表明: 几种改良措施均增加了土壤微生物群落对碳源的利用能力, 提高了土壤碳源, 为土壤微生物生长活动提供了能源, 促进了土壤微生物对碳源的利用能力, 显著影响了土壤微生物不同类群的发育, 提高了土壤微生物活性和多样性。相关研究表明^[33-34]: 土壤微生物对碳源的利用能力、土壤细菌、真菌数量、土壤呼吸作用、土壤微生物区系及生理生化指标等均对生物改良有良好的响应, 提高土壤肥力, 增加土壤微生物多样性。

4 生物改良盐碱地对作物生长发育的影响

作为植物生长环境的载体, 土壤根区微环境的改变必然引起植物生长的一系列响应, 包括作物的生长发育、养分、水分吸收等。

4.1 生物改良盐碱地对作物生长发育及产量的影响

与裸地相比, 种植盐生植物后, 土壤的物理、化学、生物等特性均发生了变化, 从而对作物的生长发育状况也产生了一定的影响; 由于裸露地表被植被

覆盖,改善了土壤微环境,同时,使得植物的生态(株高、根系生长、茎粗)、生理特性(光合、呼吸、蒸腾作用)、作物产量(生物量)以及作物对土壤水分、养分的吸收等得到明显的改善。

研究重度盐碱地改良对土壤特征及不同植物光合生长的影响,结果发现,改良后种植的植物光合能力方面有不同提高,不同植物经过处理后在生物量方面明显提高,同时,实施改良后植物在株高和鲜重等生物量方面的差异也是明显的^[18]。在白茎盐生草改良后的次生盐渍化土壤上种植棉花,棉花出苗率和籽棉产量提高^[11]。在盐角草改良后的次生盐渍化土壤上种植棉花,棉花出苗率和籽棉产量明显提高^[26]。同时,生物改良盐碱地后土地的产量高于灌水洗盐后的产量^[24]。

4.2 生物改良盐碱地对作物水分、养分吸收的影响

作物的生长发育状况与其所生长环境密不可分。作物根系生长模式受基因控制,但根系的最终分布由可利用水量和养分等环境因子所决定,而土壤水分、养分的吸收又主要依赖于根系空间分布,利用生物措施改良盐碱地,通过在裸地上种植耐盐碱植物,可增加植物根系在耕作层中的空间分布,同时由于作物根系在土壤中密布,改善了土壤的通气 and 透水状况,提高了土壤中水分和养分含量以及作物对水分、养分的吸收,并最终改善作物正常生长发育所需环境。然而研究表明,作物的生长发育状况在生物措施的处理下有不同程度的改善,具体改善程度因采用的盐生植物以及作物不同而有所差异。作物产量的提高是盐生植物改良盐碱地最终效果的重要体现,而作物对水分养分的吸收效率直接决定着作物的产量和经济效益,因此盐生植物盐碱地改良过程中,研究作物对养分、水分的吸收特性以及变化机理是盐碱地改良过程中的一项重要内容,但从目前的研究状况来看,这方面的研究很少报道,有待进一步加强和深入。

5 存在的问题及前景展望

可以看出,盐生植物的生物改良盐碱地方式是可行和有效的,由于“省水、低投入、环境可持续”这些独有的特性,生物措施将在盐碱地改良方面具有广阔的应用前景,但在实际应用中也存在一定的问题,而这些问题也将促使人们在生物改良尤其是盐生植物的盐碱地改良方面进行进一步深入系统的研究。具体如下:

(1)利用生物措施改良盐碱地,盐生植物的选

择至关重要,不同类型的盐生植物对盐碱地的治理效果不同,因此,今后应加强系统性、综合性的研究,针对不同类型土壤最适宜哪种盐生植物建立数据库,指导人们的生产活动。

(2)盐碱地盐生植物的改良,不仅涉及到土壤盐分含量的变化,而且涉及到土壤物理、化学及生物特性,目前的研究主要以研究土壤盐分的变化和脱盐为主,即以化学特性为主,对于因土壤物理特性以及生物特性的改变而产生的间接或交叉性的改良效果重视不足,还有待深入研究,这样才能更好的理解盐生植物盐碱地改良的机理。

(3)盐生植物改良盐碱地有不同的方式,对于非重度盐碱地,目前采用间作套种的方式较多,在这种方式下,既能获得大田作物的有效产量,又能在一定程度上利用盐生植物的经济价值获得一部分效益,但在盐生植物和作物共生的阶段,也存在着盐生植物和大田作物竞争水分和养分的问题,从而对大田作物的经济产量和水分利用效率造成一定影响,因此,需要对共生期的大田作物和盐生植物对养分、水分的吸收和竞争机制进行系统深入的研究,才能有效的提高大田作物的水分利用效率和作物产量。

(4)利用生物措施改良盐碱地虽然能取得显著的效果,但不能从源头解决地表积盐问题。盐碱地的形成主要是由于蒸发量大于降水量,地下水位过高等引起。为了更好的解决盐碱化问题,需进行综合治理,控制地下水位,将淋洗掉的盐分及时排出。对于盐碱地来说,防是前提,治是基础,目前主要问题是治理,同时也要防止盐碱化问题的继续扩大,因此,在今后盐碱地的防治中应将生物措施治理和排水系统的完善更好的结合起来。

参考文献:

- [1] 罗廷彬,任崑,谢春虹. 新疆盐碱地生物改良的必要性与可行性[J]. 干旱区研究,2001,18(1):46-48.
- [2] 肖克飏,吴普特,雷金银,等. 不同类型耐盐植物对盐碱土生物改良研究[J]. 农业环境科学学报,2013,31(12):2433-2440.
- [3] 丁海荣,洪立州,王茂文,等. 星星草耐盐生理机制及改良盐碱土壤研究进展[J]. 安徽农学通报,2007,14(16):58-59.
- [4] Greenway H, Munns R. Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1980,31(4):149-190.
- [5] 赵可夫,李法曾,张福锁. 中国盐生植物[M]. 北京:科学出版社,2013.

- [6] Belkheiri O, Mulas M. The effects of salt stress on growth, water relations and ion accumulation in two halophyte *Atriplex* species [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 86: 17–28.
- [7] Rozema J, Schat H. Salt tolerance of halophytes, research questions reviewed in the perspective of saline agriculture [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 92: 83–95.
- [8] Vermue E, Metselaar K, van der Zee S E A T M. Modelling of soil salinity and halophyte crop production [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 92: 186–196.
- [9] de Vos A C, Broekman R, de Almeida Guerra C C, et al. Developing and testing new halophyte crops: A case study of salt tolerance of two species of the Brassicaceae, *Diplotaxis tenuifolia* and *Cochlearia officinalis* [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 92: 154–164.
- [10] Kiliç C C, Kukul Y S, Anaç D. Performance of purslane (*Portulaca oleracea* L.) as a salt-removing crop [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(7): 854–858.
- [11] 吕彪, 秦嘉海. 河西走廊内陆盐渍土治理复合生物系统研究 [J]. *干旱区研究*, 2003, 20(1): 72–75.
- [12] 王升, 王全九, 周蓓蓓, 等. 膜下滴灌棉田间作盐生植物改良盐碱地效果 [J]. *草业学报*, 2014, 23(3): 362–367.
- [13] 任葳, 罗廷彬, 王宝军, 等. 新疆生物改良盐碱地效益研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(4): 211–214.
- [14] Fan Shenggen, Chan-Kang Connie, Qian Keming, et al. National and international agricultural research and rural poverty: the case of rice research in India and China [J]. *Agricultural Economics*, 2005, 33(S3): 369–379.
- [15] 胡发成. 种植苜蓿改良培肥地力的研究初报 [J]. *草业科学*, 2005, 22(8): 47–49.
- [16] 王苗, 齐树亭, 葛美丽. 盐生植物对滨海盐渍土生物改良的研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(7): 2898–2899+2954.
- [17] 范亚文. 种植耐盐植物改良盐碱土的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2001.
- [18] 于兴洋, 王文杰, 杨逢建, 等. 重度盐碱地改良措施对土壤特性和不同植物光合、生长的影响 [J]. *植物研究*, 2010, 30(4): 473–478.
- [19] 李茜, 孙兆军, 秦萍. 宁夏盐碱地现状及改良措施综述 [J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(33): 10808–10810+10813.
- [20] 朱兴运, 沈禹颖, 王锁民, 等. 盐渍化草地培育的理论基础 [J]. *草业科学*, 1997, 14(5): 20–22.
- [21] 周东生, 王奇志, 王鸣, 等. 盐地碱蓬化学成分及其开发利用的研究进展 [J]. *中国野生植物资源*, 2011, 30(1): 6–9.
- [22] 张立宾, 徐化凌, 赵庚星. 碱蓬的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果 [J]. *土壤*, 2007, 39(2): 310–313.
- [23] 刘玉新, 谢小丁. 耐盐植物对滨海盐渍土的生物改良试验研究 [J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2007, 38(2): 183–188.
- [24] 罗廷彬, 任葳, 李彦, 等. 北疆盐碱地采用生物措施后的土壤盐分变化 [J]. *土壤通报*, 2005, 36(3): 304–308.
- [25] 王界平, 田长彦. 不同氮磷水平下盐角草生长及盐分累积特征分析 [J]. *草业学报*, 2011, 20(2): 234–243.
- [26] 王文, 张德罡. 白茎盐生草对盐碱土壤的改良效果 [J]. *草业科学*, 2011, 28(6): 902–904.
- [27] 魏忠平, 邢兆凯, 于雷, 等. 北方泥质海岸盐碱地种植牧草肥土效果研究 [J]. *辽宁林业科技*, 2009(2): 8–10.
- [28] 王玉珍, 刘永信, 魏春兰, 等. 6种盐生植物对盐碱地土壤改良情况的研究 [J]. *安徽农业科学*, 2006, 34(5): 951–952+957.
- [29] 李凤霞, 杨涓, 许兴, 等. 烟气脱硫废弃物在盐碱地土壤改良中的应用研究进展 [J]. *土壤*, 2010, 42(3): 352–357.
- [30] 龙健, 黄昌勇, 滕应, 等. 矿区重金属污染对土壤环境质量微生物学指标的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(1): 60–63.
- [31] Liu X, Lindemann W C, Whitford W G, et al. Microbial diversity and activity of disturbed soil in the northern Chihuahuan Desert [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(3): 243–249.
- [32] 李凤霞, 郭永忠, 王学琴, 等. 不同改良措施对宁夏盐碱地土壤微生物及苜蓿生物量的影响 [J]. *中国农学通报*, 2012, 28(30): 49–55.
- [33] 郭永忠, 李凤霞, 王学琴, 等. 不同改良措施对银川平原盐碱地土壤微生物区系的影响 [J]. *河南农业科学*, 2013, 41(11): 58–63.
- [34] 康贻军, 胡健, 杨小兰, 等. 盐碱地土壤微生物对不同改良方法的响应 [J]. *微生物学杂志*, 2008, 28(5): 102–105.