

# 碱化对土壤性质和植物生理生态特征的影响

张璐<sup>1,2</sup>, 杨帆<sup>1</sup>, 王志春<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 碱化是土壤盐渍化的一种, 相比于其他土壤盐渍化类型, 碱化土壤的性质更加恶劣, 导致严重的土壤退化和植物盐碱胁迫问题, 但研究却相对较少。本文综述了碱化对土壤性质及植物生长代谢的影响。碱化对土壤的影响包括土壤表观形态、土壤质地、pH、电导率、碱化度、Na<sup>+</sup>与其他离子之间关系以及土壤微生物群落变化等物理、化学、生物方面的影响; 对植物生理过程的影响主要包括对渗透胁迫、光合及呼吸作用、离子平衡、养分吸收等方面的影响。简要概括了碱化土壤物理、化学、生物治理措施原理及存在的问题。本文旨在提高对土壤碱化现象的关注, 为未来研究提供思路。

**关键词:** 碱化; 土壤性质; 植物生理; 生态

中图分类号: S156.4

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2021)02-0030-07

## Effects of Alkalization on Soil Properties and Plant Physiological and Ecological Characteristics

ZHANG Lu<sup>1,2</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>, WANG Zhichun<sup>1\*</sup>

(1. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Alkalization is a kind of soil salinization. Compared with other types of soil salinization, the properties of alkalized soil are worse, leading to serious soil degradation and plant salt alkali stress, but the research is relatively less. In this review, the effects of sodium alkalization on soil properties and plant physiological and ecological processes were summarized. The effects of sodium alkalization on soil include deterioration of soil surface morphology, soil structure, pH, conductivity, exchangeable sodium percentage, Na<sup>+</sup> and other ions, as well as the changes of soil microbial communities. The effects on plant growth and metabolism include osmotic stress, photosynthesis and respiration, ion balance and nutrient absorption. Meanwhile, the principles of physical, chemical and biological control measures for alkalized soil and the existing problems were briefly summarized. The purpose of this paper is to raise the attention to the phenomenon of soil alkalization and provide ideas for future research.

**Key words:** Alkalization; Soil properties; Plant physiology; Ecological

土壤碱化是土壤溶液中含有大量可溶性盐, 并且交换性钠含量升高, 其他阳离子含量降低的一种土壤状况逐渐恶化的过程, 也是一种渐进的土壤环境灾害, 对生态环境和植物的生长发育有重要影响。我国各类盐渍土壤总面积达9 910万hm<sup>2</sup>[1], 其中碱化土壤面积约1 982万hm<sup>2</sup>, 主要分

布于东北平原、西北内陆以及河套平原。东北松嫩平原是我国盐碱土壤的集中分布区和重灾区, 由碱化形成的盐碱地面积达373万hm<sup>2</sup>, 占该区土地总面积的15.2%, 且仍以每年1.4%的速度扩展[2-3]。土壤碱化的日益加剧, 不仅危害耕地质量, 而且严重影响区域生态环境质量。遥感影像显示, 松嫩平原在2008~2013年通过盐碱治理, 轻、中度盐碱化土地面积有所降低, 但较难治理的重度盐碱化面积仍在不断增加, 呈上升趋势[4]。对当地土壤资源利用和整合产生极大的影响, 其盐碱地治理和恢复利用也面临巨大的挑战, 也是该区域生态环境保护的当务之急[5]。

治理土壤碱化, 恢复土壤生态环境, 首先要加深对碱化现象的认识, 了解土壤碱化成因及其对

收稿日期: 2019-05-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501200); 国家自然科学基金项目(41771250, 41971066); 国家科技基础性工作专项(2015FY110500)

作者简介: 张璐(1994-), 女, 在读博士, 主要从事盐渍土改良机理研究。

通讯作者: 王志春, 男, 博士, 研究员, E-mail: wangzhichun@iga.ac.cn

土壤、植物等方面的影响,这些是目前碱化土壤生态环境治理和恢复利用的首要工作。我国现阶段关于碱化土壤影响的研究较为缺乏,且已有的关于土壤碱化的研究多集中于其形成原因和不同改良措施等方面<sup>[6-8]</sup>。相较于其他盐渍化土壤,缺少关于碱化对土壤和植物影响的研究,特别是关于碱化对土壤物理、化学、生物性质以及对植物生长代谢机理等方面的影响,缺乏系统研究与论述。本文系统梳理和总结了碱化对土壤理化性质、生物特性等方面的影响,探讨了植物生长对碱化响应特征,并对土壤碱化防治措施进行介绍,以期为土壤碱化研究和改良提供理论参考。

## 1 碱化对土壤性质的影响

盐化土和碱化土是我国盐碱土壤的两种主要发生类型,但两者在物理、化学等土壤特性方面差别很大。盐化土含盐量 $>0.1\%$ , $\text{pH}<8.5$ ,透水性好,土壤含盐量高。碱化土的碱化度(ESP) $>5\%$ (严重时ESP可达70%), $\text{pH}$ 值 $8.5\sim 11$ ,土壤黏重、透水通气性差,物理性质较盐化土壤更为恶劣<sup>[9]</sup>。因此,了解碱化对土壤和植物的影响是治理和改良碱化土壤的关键。

### 1.1 土壤理化性质

#### 1.1.1 碱化改变土壤表现形态,破坏土壤结构

碱化对土壤的直观影响是改变土壤表现形

态,使土壤板结,地表出现盐结皮或盐壳,有时地表呈龟裂状,地表植被较稀疏或出现斑块状缺失,有的甚至成为光板地<sup>[9]</sup>。这些现象使碱化土壤呈现出明显不同于其他土壤的表现形态。

碱化对土壤物理性质的最主要影响是严重破坏土壤结构。碱化土壤中富含的 $\text{Na}^+$ 具有很强的吸水性,同时也会使土壤胶体的扩散双电层厚度和电动电位增加,土壤黏粒外围的水膜增厚,而电动电位的增加又导致土壤黏粒的分散性增加<sup>[10]</sup>,遇水使土壤胶体分散,土壤中大小孔隙堵塞,最终破坏土壤的结构和稳定性。Frenkel等也证实碱化水灌溉导致土壤黏粒分散是造成土壤导水性差的主要原因<sup>[11]</sup>。Sumner等指出土壤中总电解质浓度低于临界絮凝浓度时,黏粒在高ESP值下会自发分散<sup>[12]</sup>;由于碱化土中的主要母质成分为石灰性的蒙脱石等矿物元素,本身具有很强的碱性,且极具膨胀性<sup>[13]</sup>,黏粒的膨胀阻塞土壤中输水的毛细管<sup>[14]</sup>,进一步加剧土壤干燥时强烈收缩、湿时泥泞的物理性质,进而导致土壤透水通气性变差,土壤出现板结,更易使土壤中的盐分反复积累。土壤黏粒的分散和膨胀都会导致土壤孔隙的减少,最终形成恶劣的土壤物理结构。碱化对土壤物理性质的影响通过土壤容重、饱和导水率等基本物理指标的变化得以体现,见表1。

表1 碱化土壤与正常土壤部分物理指标对比

指标	土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	土壤饱和导水率( $\text{cm}/\text{s}$ )	土壤田间持水量(%)	土壤结构系数(%)	土壤团聚度(%)
钠质碱化土壤	1.2 ~ 1.8	$1.05 \times 10^{-5}$	20 ~ 30	0.6 ~ 1.0	0.5 ~ 1.2
正常土壤	$1.0 \pm 0.1$	0.1 ~ 0.8	$40 \pm 5$	50 ~ 80	30 ~ 60

注:数据来源于参考文献[15-22]

碱化土壤与正常土壤相比较,其土壤容重和土壤含盐量显著高于正常土壤;饱和导水率和孔隙度等物理指标则低于正常土壤。碱化土壤的容重高于正常土壤20%,而孔隙度则低于正常土壤40%。研究表明,碱化导致土壤恶劣的物理性质反作用于土壤中盐分的淋洗,其土壤黏重和低孔隙度阻碍水分和盐分的运动,进一步使盐分在土壤中反复积累,恶化土壤物理性质<sup>[23]</sup>。碱化土壤的物理性质还会对其养分等化学性质产生影响,导致土壤有机质积累不足,养分有效性降低,土地生产能力下降<sup>[24]</sup>。

#### 1.1.2 碱化增加土壤ESP,破坏土壤离子平衡

在土壤碱化过程中,土壤 $\text{pH}$ 、电导率(EC)和ESP等基本化学指标的变化最明显。碱化使得这

些指标都显著高于正常土壤。在碱化严重的松嫩平原0~10 cm土层的 $\text{pH}$ 值为 $8.5\sim 11$ ,EC值为 $200\sim 1\ 600\ \mu\text{S}/\text{cm}$ <sup>[25]</sup>,碱化度在15%以上,呈现高盐强碱特性。造成这种化学性质主要的原因是碱化土壤中所含的大量 $\text{Na}^+$ 与盐分组成中 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 相结合,形成的 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NaHCO}_3$ 属于强碱弱酸盐,水解后产生 $\text{OH}^-$ ,使土壤呈现强碱性, $\text{pH}$ 值达到8.5以上,严重时甚至达到10.0,使土壤具有很高的碱性。与 $\text{CaCO}_3$ 等盐分相比, $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 的溶解度较大,因此溶液中的 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 的浓度更高,而 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 的浓度与下述方程所述土壤碱度密切相关: $\text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$ , $\text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 + \text{OH}^-$ <sup>[26-27]</sup>。

碱化土壤胶体上吸附的大量 $\text{Na}^+$ 水解,产生

$\text{OH}^-$ ，是使土壤呈现强碱性以及土壤 pH 进一步增加的主要原因<sup>[2]</sup>(图 1)。具体表现为：在土壤碱化过程中，土壤积盐脱盐频繁交替反复进行<sup>[26]</sup>， $\text{Na}^+$  取代土壤胶体上原有的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等离子<sup>[28]</sup>，水分解出的  $\text{H}^+$  又将  $\text{Na}^+$  取代，使土壤溶液中  $\text{Na}^+$  含量剧增，同时  $\text{Na}^+$  水解产生  $\text{OH}^-$ ，加剧土壤的碱度<sup>[29]</sup>。

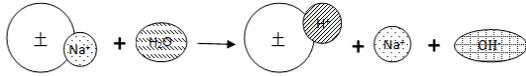


图 1 钠质碱化土壤胶体中钠离子水解示意图

表 2 碱化盐渍土与滨海盐渍土离子含量对比

土壤类型	土壤离子 (cmol/kg)							
	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$
碱化盐渍土	9.92	7.28	0.10	0.93	2.52	11.16	1.17	0.37
滨海盐渍土	3.34	0.20	0.76	0.89	0.16	0.64	3.12	0.46

注：数据引自参考文献[30-31]

## 1.2 土壤微生物活性

土壤 pH、EC 等化学性质的变化以及物理性质的恶化，也会直接或间接对土壤生物特性产生影响<sup>[32]</sup>。

对微生物活性、群落等的影响。碱化对土壤微生物最明显的影响是土壤中细菌、真菌等微生物的数量及其分布变化特征。细菌群落的构成与土壤的理化性质有很大相关性<sup>[33]</sup>，不同程度的盐碱胁迫下，土壤细菌群落会有显著差异，如放线菌门、硝化螺旋菌门的数量会明显减少<sup>[34]</sup>。Wong 等研究发现，相比于高盐度低碱度的处理，低盐度高碱度处理中的微生物生物量低 6~10 倍。高碱度处理中的微生物生物量明显低于低碱度处理中的微生物生物量<sup>[35]</sup>。相较于经过改良后的碱化土壤，未经改良处理的碱化土壤中的累计呼吸速率和土壤微生物生物量最低，说明土壤碱化对土壤累计呼吸速率和微生物生物量都有不利影响<sup>[36]</sup>。碱化程度越高，土壤微生物生物量越小，活性越低，释放的酶就越少。土壤中微生物量的大小也直接或间接影响土壤酶的含量<sup>[37]</sup>。

对土壤酶的影响。碱化土壤对土壤酶的影响主要表现在酶活性及其变化特征上。土壤酶反映了土壤中微生物参与物质循环和能量代谢的活性，也是反映土壤肥力水平的重要指标之一。Rietz 等研究表明，EC 和微生物生物量 C、微生物活动指数以及胞外酶的活动  $\beta$ -葡萄糖苷酶、碱性磷酸酶、芳香基硫酸酯酶都有显著的负指数关系，钠吸附比(SAR)、ESP 与以上几种微生物活性和

在碱性条件下，土壤颗粒吸附的  $\text{Ca}^{2+}$  被  $\text{Na}^+$  置换出来，土壤逐渐被交换性钠所饱和<sup>[29]</sup>。正常土壤中吸附的  $\text{Na}^+$  较少， $\text{Ca}^{2+}$  较多；碱化土壤则相反，土壤中吸附的  $\text{Ca}^{2+}$  较少，而  $\text{Na}^+$  较多(表 2)。一旦土壤中代换性  $\text{Na}^+$  增多，土壤迅速出现碱化特征，导致理化性质发生很大的改变<sup>[9]</sup>。

由表 2 可知，与滨海盐渍土相比，碱化盐渍土中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  都明显高于滨海盐渍土，而  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  含量低于滨海盐渍土，说明两种盐渍土在化学组成和土壤性质上都有很大差异。

酶的指标成线性负相关关系。其中 EC 和 SAR 的增加对碱性磷酸酶的抑制作用比芳香基硫酸酯酶的抑制作用更明显<sup>[37]</sup>。说明土壤中酶的活性与土壤的 EC、pH 值呈显著的负相关关系，土壤碱化对土壤微生物的活性有明显的抑制作用<sup>[32]</sup>。

## 2 碱化对植物生理生态特征的影响

### 2.1 土壤碱化对植物生理代谢的影响

#### 2.1.1 破坏植物体内渗透平衡，形成离子毒害

植物体内渗透平衡被破坏是盐碱土对植物生长最直接的影响之一。碱化土壤中盐分过量积累，导致根际土壤溶液渗透势降低，同时也限制植物根部汲取水分的能力<sup>[38]</sup>，严重时植物细胞液浓度低于周围土壤溶液的浓度，造成植物的生理性缺水，甚至出现反吸现象<sup>[9]</sup>。

另外，土壤中过量的盐离子还可能对植物造成离子毒害。研究表明，盐碱胁迫下， $\text{Na}^+$  在植物根部大量积累<sup>[39]</sup>，碱化土壤中过量的  $\text{Na}^+$  累积使植物出现植株萎缩、叶片坏死等现象<sup>[29]</sup>，其中对植物嫩芽和茎的毒害最严重<sup>[40]</sup>。过量的  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  进入植物体内，植物细胞内多种酶的活性受到抑制，影响植物体内新陈代谢和对其他离子的吸收<sup>[41]</sup>，干扰细胞正常的生理代谢功能<sup>[26]</sup>。碱化土壤复合体中  $\text{Na}^+$  含量过多，会降低  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的有效性，同时也会降低植物对  $\text{Ca}^{2+}$  的吸收和利用，影响植物体细胞壁的形成、破坏质膜的透性，使大量电解质外渗<sup>[9, 26]</sup>。根系周围的高 pH 值环境会造成土壤中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  的沉淀，从而导致植物对离

子的吸收困难,干扰矿质营养的吸收<sup>[42]</sup>。

### 2.1.2 抑制呼吸及光合作用,影响植物生长代谢

碱化土壤特殊的物理性质阻碍植物根部呼吸,危害植物生长。碱化使得土壤黏重、板结,土壤孔隙度低,透水通气性极差,进而造成土壤中氧含量低,二氧化碳浓度高,根压过高;短期内影响植物根部的呼吸速率,长期的缺氧环境造成根部乙醇积累,导致根部中毒受损,使根部吸水功能丧失,危及植物生存。碱化土壤恶劣的物理性质也容易导致种子在土壤中缺氧而萌发困难,严重时还会导致种子腐烂<sup>[24, 43]</sup>。土壤pH过高还会腐蚀植物根系表层的纤维素,使植物无法成活<sup>[27]</sup>。

光合作用是植物生成碳水化合物的生物化学过程,是植物生命生长代谢过程中的重要一环,也是地球碳循环的重要组成部分<sup>[44]</sup>。植物受盐碱影响初期,叶片出现气孔失去膨压、气孔相继关闭的现象<sup>[29, 45]</sup>, Bhuiyan 等研究表明,随着盐碱胁迫增加,细胞间CO<sub>2</sub>浓度和气孔导度显著降低<sup>[46]</sup>。导致光合底物供应不足,使植物的光合效率大大降低。土壤中盐分过多,植物细胞中的蛋白质会大量分解,植物体内蛋白质的减少促使植物体内叶绿体机能结构解体,叶绿体中类囊体膜受到破坏,光能的吸收、转化,电子的传递以及碳同化都受到影响<sup>[41]</sup>,进而导致植物生长速率下降,植株生长缓慢<sup>[9]</sup>。Mg<sup>2+</sup>是合成叶绿素的原料,同时又是多种重要酶的辅因子。由于碱化土壤中Na<sup>+</sup>含量过高,严重影响植物体内离子平衡,导致Mg<sup>2+</sup>活性降低,Mg<sup>2+</sup>活性下降也必然导致叶绿素合成降低,也会阻碍植物的光合作用<sup>[42]</sup>。

### 2.1.3 造成氧化胁迫,引起植株体内激素变化

盐碱胁迫导致植物光合受损和离子毒害进一步促进植物体内线粒体和叶绿体产生过量活性氧,从而生成大量氧自由基,使膜质中不饱和脂肪酸过氧化,蛋白质受损,对生物膜质造成过氧化伤害,丧失细胞正常生理功能<sup>[47-49]</sup>。植物激素是反映和调控土壤盐碱胁迫的重要信号物质,盐碱胁迫也会影响植物体内激素含量的变化。李晓宇等研究表明,盐碱胁迫增强时,苹果酸、柠檬酸等抵御盐碱胁迫的主要有机酸含量在不同盐碱胁迫时期以及植物体不同部位出现不同的变化趋势。说明盐碱对植物激素的分布及含量变化有较大影响。添加外源植物激素如脱落酸ABA等,可以有效提高植物抵御盐碱胁迫的能力<sup>[50]</sup>。

## 2.2 钠质碱化对植株生长及群落分布的影响

土壤是植物赖以生存的环境,土壤的健康状

况也会直接影响植物生长和生态特征。研究显示,随着盐碱胁迫提高,植物叶子形态随之发生改变<sup>[51]</sup>,在盐碱胁迫下,植物茎的直径也较对照偏小<sup>[52]</sup>。20世纪90年代,杜晓光等就提出不同盐碱程度对植物的株高、鲜重、发芽率等生物量都有不同程度限制作用的研究结论。同时,国外研究发现,电导率从1~20 dS/m依次递增的过程中,植物的相对总生物量逐渐降低<sup>[53]</sup>。在高盐碱度土壤试验条件下,盐碱胁迫导致试验水稻品种花粉活力下降,授粉花器和雌蕊植株均受到更严重危害,盐碱地水稻株高均有明显下降<sup>[54]</sup>。其原因可能是由于盐碱条件下,植物生长缓慢,线粒体在高度盐碱胁迫下丧失功能,呼吸速率随之降低,产生能量的能力也相应地降低,最终导致植物生产力下降<sup>[55]</sup>。不同植物对碱化的响应和适应能力不同。试验研究表明,碱蓬在Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>浓度为500 ppm时,生长受到显著促进;而在此浓度下,星星草的生长则受到明显抑制<sup>[55]</sup>。说明不同植物对土壤pH和ESP的适应能力不同。

土壤碱化在宏观上影响植物群落的生态学分布规律。耐盐碱的植物在土壤碱化过程中能够适应这种特殊的土壤环境,并逐渐取代不适应碱化土壤环境的植物种类,导致植物群落分布规律发生变化。以松嫩平原为例,碱化土壤上植物群落主要退化、演替的宏观规律为:羊草群落→星星草群落→碱蓬或角碱蓬群落→光碱斑<sup>[56]</sup>。碱化土壤植被群落分布规律具体表现为:在盐碱化程度较轻(土壤pH 8.0~9.0)、养分情况相对较好的土壤上,羊草(*Leymus chinensis*)群落和芦苇(*Phragmites australis*)群落分布广泛;而在盐碱化程度较重(土壤pH>9.0)且土壤养分条件相对较差的土壤上,碱茅(*Puccinellia distans*)群落、虎尾草(*Chloris virgata*)群落、碱蓬(*Suaeda glauca*)群落占优势,常与碱斑镶嵌分布<sup>[32, 43]</sup>。

反之,植被的退化也会对盐碱土壤性质起到反作用。植被退化后的土壤覆盖度降低,裸露的地表不仅蒸发作用更为强烈,土壤中的盐分上行,更加重土壤的盐碱化程度,使碱化土壤的面积进一步扩大。因此,采取适当的治理措施改良和利用盐碱地是防止盐碱地扩张、保护生态环境和提高土地利用效率的重中之重。

## 3 土壤碱化的防治及前景

碱化土壤防治技术已经取得长足进步,在理论研究和实践工作的过程中积累丰富的经验,同

时也不断涌现出创新点以及新的改良治理途径。总体而言,土壤碱化防治手段仍主要围绕在物理、化学、生物三个大的方面。

物理防治的传统方法如竖井排盐、暗管排盐、“客砂换土”、灌溉洗盐、兴修水利等措施在一定程度上改善了碱化土壤恶劣的物理性质,但同时又存在一定的局限性。如:竖井排盐和暗管排盐不适合质地黏重板结的重度碱化土壤,灌溉洗盐会出现水资源浪费和次生盐渍化的问题。因此,如何在节约水资源和防止土壤次生盐渍化发生的基础上,解决土壤碱化的问题是一个值得今后研究的重点。碱化土壤分布区域往往咸水资源较为丰富,利用微咸水与当地自然环境相结合的微咸水结冰灌溉,能改善土壤结构,增强水分入渗的作用,是一种有效的改良方式<sup>[57-58]</sup>。

化学改良以添加脱硫石膏、硫酸铝、腐殖酸、生物炭等改良剂为主,其主要原理是通过添加高钙镁含量的化学改良剂或工业副产品,以实现土壤中钙和镁离子交换土壤胶体表面吸附的钠离子、提高钠离子从盐碱土中淋洗的目的<sup>[59]</sup>。意大利沿海地区的土壤也受到土壤碱化的影响,土壤中含有过量的钠离子,在添加化学改良剂后,土壤中交换性钠含量下降约40%,同时伴随可交换的二价阳离子( $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ )增加<sup>[60]</sup>。但在对碱化土壤化学改良的过程中可能会产生对土壤二次污染的问题,因此,需要在环保、经济的基础上进一步考虑和研究控制化学改良剂的用量问题。

生物防治是一个经济、有效的碱化土壤改良方式。在过去几十年对盐渍土研究和生物防治生产工作中取得了丰硕的成果,形成了以“种稻洗碱”为核心,苜蓿、羊草等多种植物为主的种植改良方式。但目前作物治碱主要局限在耐盐碱优势作物品种的推广应用上,对于利用分子生物学技术培育耐盐新品种以及微生物措施进行防治等方面还有较大的研究和提升空间。微生物如细菌、真菌、放线菌等对盐渍化土壤的物理和化学性质都有明显的改善。微生物制剂的应用不仅可以改善土壤结构,而且能够增加土壤的孔隙度和透水通气性<sup>[61-62]</sup>。因此,合理利用微生物手段对土壤碱化进行改良是一种环保、高效的治理方式。研究表明,土壤中添加菌肥不仅使土壤pH值和土壤溶液电导率降低,而且提高土壤中的速效磷、速效钾、有机质含量<sup>[63]</sup>。Zhang等在盐碱土壤中接种丛枝菌根真菌,发现其增加了植物对N、P、K、Ca的吸收,同时减少了对Na、Mg和Cl的吸收,植物

的生物量、根梢比和分蘖数均显著提高,也提高了幼苗的存活率<sup>[64]</sup>。印度学者还发现蓝藻可以提高盐碱地的物理、化学和营养特性<sup>[65]</sup>。

在碱化土壤改良过程中,单一的物理、化学或生物措施效果不及综合治理措施的效果全面和有效,特别是生物防治措施要配合一定的物理、化学改良措施。如:在碱化程度低的土壤,耐盐碱植物可以有效改良土壤,但是在高碱化度的土壤中,必须配合化学手段<sup>[28]</sup>;同时,物理、化学措施也能与生物措施相辅相成,如在土壤中加入农家肥之后,与对照相比,显著地提高了盐碱土壤中细菌、真菌、磷酸脂肪酸以及原生动物的数量<sup>[66]</sup>。因此,在碱化土壤改良利用过程中,综合利用物理、化学和生物措施可以最大程度达到改良效果,同时减少土壤次生盐渍化以及污染的发生。

#### 参考文献:

- [1] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993:1-3.
- [2] 李秀军.松嫩平原西部土地盐碱化与农业可持续发展[J].地理科学,2000,20(1):52-55.
- [3] 邓伟,裴善文,梁正伟.中国大安碱地生态试验站区域生态环境背景[M].北京:科学出版社,2006:iii
- [4] 花锦溪,臧淑英,那晓东.松嫩平原盐碱化反演及其动态变化过程[J].水土保持通报,2017,37(1):155-160.
- [5] 王志春,李取生,李秀军,等.松嫩平原盐碱化土地治理与农业持续发展对策[J].中国生态农业学报,2004,12(2):161-163.
- [6] 姚荣江,杨劲松,刘广明.东北地区盐碱土特征及其农业生物治理[J].土壤,2006,38(3):256-262.
- [7] 褚冰倩,乔文峰.土壤盐碱化成因及改良措施[J].现代农业科技,2011(14):309-311.
- [8] 李楠,李强,刘春光,等.粮-草轮作对吉林省西部盐渍化土壤的改良效果[J].东北农业科学,2019,44(5):38-42.
- [9] 黎立群.盐渍土基础知识[M].北京:科学出版社,1986:2-6.
- [10] 李小刚,曹靖,李凤民.盐化及钠质化对土壤物理性质的影响[J].土壤通报,2004,35(1):64-72.
- [11] Frenke H, Goertzen J O, Rhoades J D. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity[J]. Soil Science Society of America, 1978, 42: 32-39.
- [12] Sumner M E. Sodic soils: New perspectives [J]. Soil Research, 1993, 31(6): 683-750.
- [13] 张璐,黄立华.淹水在苏打盐碱土形成过程中的作用—苏打盐碱土形成原因的探讨[J].土壤与作物,2018,7(4):365-373.
- [14] Oster J D, Shainberg I. Soil responses to sodicity and salinity: challenges and opportunities[J]. Australian Journal of Soil Research, 2001, 39: 1219-1224.
- [15] 高中超,中本和夫,王秋菊,等.稻壳深施对碱土物理性质

- 和苜蓿产量的影响[J].土壤通报,2014,45(4):990-995.
- [16] 王 风,韩晓增,李海波,等.不同黑土生态系统的土壤水分物理性质研究[J].水土保持学报,2006,20(6):67-70.
- [17] 迟春明,王志春.碱化盐土饱和导水率特征与影响因素研究[J].土壤通报,2014,45(3):601-607.
- [18] 庞学勇,刘世全,刘 庆,等.川西亚高山针叶林植物群落演替对土壤性质的影响[J].水土保持学报,2003,17(4):42-45.
- [19] 何淑勤,官渊波,郑子成,等.不同植被类型条件下土壤抗蚀性变化特征及其影响因素[J].水土保持学报,2013,27(5):18-22.
- [20] 赵秀兰.影响测定田间持水量的因素及其订正[J].黑龙江气象,2001(1):41-44.
- [21] 姜 波,张 薇.吉林省中西部地区田间持水量实验研究[J].吉林水利,2012(8):21-24.
- [22] 胡顺军,顾桂梅,李岳坦,等.塔里木河干流域防治耕地盐碱化的生态需水量[J].干旱区资源与环境,2007,21(1):145-149.
- [23] 赖民基,方成荣.改良盐碱地的排水设施[J].水利学报,1959(3):53-66.
- [24] 张 磊,侯云鹏,王立春.盐碱胁迫对植物的影响及提高植物耐盐碱性的方法[J].东北农业科学,2018,43(4):11-16.
- [25] 杨 帆,王志春,王云贺,等.松嫩平原微地形下土壤水盐与植物群落分布的关系[J].生态学报,2013,33(19):6202-6208.
- [26] 徐 璐,王志春,赵长巍,等.东北地区盐碱土及耕作改良研究进展[J].中国农学通报,2011,27(27):23-31.
- [27] 李志洪,赵兰坡,窦 森.土壤学[M].北京:化学工业出版社,2005:209-212.
- [28] Ahmads S, Ghafoor A, Akhtar M E. Ionic displacement and reclamation of saline-sodic soils using chemical amendments and crop rotation [J].land degradation & development, 2013, 24: 170-178.
- [29] 宋长春,何 岩,邓 伟.松嫩平原盐渍土壤生态地球化学[M].北京:科学出版社,2003:108-150.
- [30] 杨 帆,王志春,王云贺,等.松嫩平原苏打盐渍土土壤水分特征研究[J].地理科学,2015,35(3):340-345.
- [31] 刘祖香,陈效民,李孝良,等.不同改良剂与石膏配施对滨海盐渍土离子组成的影响[J].南京农业大学学报,2012,35(3):83-88.
- [32] 刘淑慧,康跃虎,万书勤.松嫩平原盐碱草地主要植物群落土壤酶活性研究[J].土壤,2012,44(4):601-605.
- [33] Luo S S, Tian L, Chang C L. Grass and maize vegetation systems restore saline-sodic soils in the Songnen plain of northeast China[J]. Land Degrad Dev, 2018, 29: 1107-1119.
- [34] 张慧敏,郭慧娟,侯振安.不同盐碱胁迫对土壤细菌群落结构的影响[J].新疆农业科学,2018,55(6):1074-1084.
- [35] Wong V N, Dalal R C, Greene R S. Salinity and sodicity effects on respiration and microbial biomass of soil [J]. Biology and fertility of soils, 2008, 44(7): 943-953.
- [36] Wong V N, Dalal R C, Greene R S. Carbon dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: a laboratory incubation [J]. Applied Soil Ecology, 2009, 41(1): 29-40.
- [37] Rietz D N, Haynes R J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35: 845-854.
- [38] Nikos J W, James W B, Krista A E P. Basics of salinity and sodicity effects on soil physical properties[J]. Land Resources and Environmental Department Montana state university-Bozeman, 2002, 129: 1-29.
- [39] 王志春,杨 福,陈 渊.苏打盐碱胁迫下水稻体内的Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>响应[J].生态环境,2008,17(3):1198-1203.
- [40] Kindaide T B. Interactions among Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> in salinity toxicity: quantitative resolution of multiple toxic and ameliorative effects[J]. Journal of Experimental Botany, 1999, 50(338): 1495-1505.
- [41] 刘 欣.植物的耐盐生物学机制研究进展[J].哈尔滨师范大学自然科学学报,2015,31(2):140-145.
- [42] 鲁 松,杨 楠,熊铁一.植物对盐碱胁迫的响应[J].四川林业科技,2013,34(6):93-95.
- [43] 郭继勋,姜世成,孙 刚.松嫩平原盐碱化草地治理方法的比较研究[J].应用生态学报,1998,9(4):425-428.
- [44] 朱新广,熊 燕,阮梅花,等.光合作用合成生物学研究现状及未来发展策略[J].中国科学院院刊,2018,33(11):1239-1248.
- [45] 许振伟,宋慧佳,李明燕,等.不同生态型芦苇种群对盐胁迫的生长和光合特性[J].生态学报,2019,39(2):1-8.
- [46] Bhuiyan M S I, Raman A, Hodgins D S, et al. Salt accumulation and physiology of naturally occurring grasses in saline soils in Australia[J]. Pedosphere, 2015, 25(4): 501-511.
- [47] 王俭珍,刘 倩,高娅妮,等.植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J].生态学报,2017,37(16):5565-5577.
- [48] 赵 霞,叶 林,纳学伟,等.盐碱胁迫下丛枝菌根真菌对紫花苜蓿渗透调节物质及抗氧化能力的影响[J].江苏农业学报,2017,33(4):782-787.
- [49] 刘奕嫩,于 洋,方 军.盐碱胁迫及植物耐盐碱分子机制研究[J].土壤与作物,2018,7(2):201-211.
- [50] 李晓宇,穆春生.盐碱胁迫及外源植物激素对小麦和羊草生长发育的影响[J].草地学报,2017,25(2):257-260.
- [51] Yepes L, Chelbi N, Vivo J M, et al. Analysis of physiological traits in the response of chenopodiaceae, amaranthaceae, and brassicaceae plants to salinity stress[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 132: 145-155.
- [52] A.波杰科夫-梅伯, J.盖尔.盐渍环境中的植物[M].北京:科学出版社,1980:79-85.
- [53] Van Tran T, Fukia S, Giles H E, et al. Salinity tolerance among a large range of bermudagrasses (*Cynodon* spp.) relative to other halophytic and non-halophytic perennial C<sub>4</sub> grasses[J]. Environmental and Experimental Botany, 2018, 145: 121-129.
- [54] Khan M A, Abduliah Z. Salinity-sodicity induced changes in reproductive physiology of rice (*Oryza sativa*) under dense soil conditions[J]. Environmental and Experimental Botany, 2003, 49(2): 145-157.
- [55] 杜晓光,郑慧莹,刘存德.松嫩平原主要盐碱植物群落生物

生态学机制的初步探讨[J]. 植物生态学报, 1994, 18(1): 41-49.

[56] 王晓燕. 松嫩平原南部盐碱植被的初步研究[J]. 中国草地, 1989(3): 32-39.

[57] 郭凯, 陈丽娜, 张秀梅, 等. 不同钠吸附比的咸水结冰融水入渗后滨海盐土的水盐分布[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 506-510.

[58] Li Z G, Liu X J, Zhang X M. Infiltration of melting saline ice water in soil columns: Consequences on soil moisture and salt content[J]. Agricultural water management, 2008, 95(4): 498-502.

[59] Sadegh-adeh-zadeh F, Parichehreh M, Jalili B, et al. Rehabilitation of calcareous saline-sodic soil by means of biochars and acidified biochars[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(10): 3262-3271.

[60] Pistocchi C, Ragaglini G, Colla V, et al. Exchangeable sodium percentage decrease in saline sodic soil after basic oxygen furnace slag application in a lysimeter trial[J]. Journal of environmental management, 2017, 203: 896-906.

[61] Garcia I V, Mendoza R E. Arbuscular mycorrhizal fungi and plant symbiosis in a saline-sodic soil[J]. Mycorrhiza, 2007, 17(3): 167.

[62] Sheng M, Tang M, Chen H, et al. Influence of arbuscular mycorrhizae on root system of maize plants under salt stress[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2009, 55(7): 879-886.

[63] 朱丹, 张磊, 韦泽秀, 等. 菌肥对青稞根际土壤理化性质以及微生物群落的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 628-637.

[64] Zhang Y F, Wang P, Yang Y F. Arbuscular mycorrhizal fungi improve establishment of Leymus chinensis in bare saline-alkaline soil: Implication on vegetation restoration of extremely degraded land[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75: 773-778.

[65] 孔涛, 张德胜, 徐慧, 等. 盐碱地及其改良过程中土壤微生物生态特征研究进展[J]. 土壤, 2014, 46(4): 581-588.

[66] Luo S S, Wang S J, Tian L, et al. Aggregate-related changes in soil microbial communities under different ameliorant applications in saline-sodic soils[J]. Geoderma, 2018, 329: 108-117.

(责任编辑:王昱)

(上接第25页)但不愿承担轮作带来的经济损失。为促进黑龙江省玉米长足发展,政府已建立了轮作补贴政策。目前仅限于规模化种植区,应进一步扩大和完善轮作补贴机制,扩大补贴范围,并根据每年的粮食价格实行动态补贴,保障换茬农民收入。大力鼓励和推进土地流转,扩大种植规模,有效降低生产成本,提高经济效益。扶持和发展大型种植公司,对零星土地进行托管,加强土地种植管理,推进先进生产技术推广应用,促进玉米单产水平提高。

参考文献:

[1] 张研, 钱春荣. 黑龙江省玉米单产水平现状与发展策略[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(7): 155-160.

[2] 杨双. 东北地区玉米产业发展现状及趋势[J]. 中国种业, 2015(3): 6-8.

[3] 李贺. 黑龙江省玉米产业发展现状、问题与对策研究[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(9): 53-56, 124.

[4] 甄善继, 李明, 高祺, 等. 黑龙江省玉米生产分析及未来方向[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(4): 14-21.

[5] 刘海燕. 齐齐哈尔玉米生产现状及持续增产对策[J]. 中国种业, 2016(3): 14-16.

[6] 许健, 马宝新, 刘海燕, 等. 黑龙江省西部半干旱地区玉

米生产现状与对策[J]. 中国种业, 2018(12): 26-29.

[7] 孙士明, 靳晓燕, 韩宏宇, 等. 黑龙江省玉米生产机械化现状与发展建议[J]. 农机化研究, 2015, 37(5): 1-6.

[8] 李梦瑶, 王永, 吉凡, 等. 吉林省主要类型农田土壤中玉米产量和氮肥利用率的研究[J]. 东北农业科学, 2016, 41(4): 53-57.

[9] 赵久然, 王荣焕. 美国玉米持续增产的因素及其对我国的启示[J]. 玉米科学, 2009, 17(5): 156-159, 163.

[10] 王巍. 黑龙江省玉米产业变化及相关因素分析[J]. 黑龙江农业科学, 2012(7): 28-31.

[11] 鲁俊田, 任丽丽, 岳辉, 等. 30年来辽宁省玉米增产因素贡献分析[J]. 辽宁农业科学, 2014(2): 26-28.

[12] 蒋佰福, 牛忠林, 邱磊, 等. 黑龙江省玉米育种存在的问题及对策[J]. 中国种业, 2016(4): 12-16.

[13] 马兴林, 徐安波, 杨久臣, 等. 关于玉米种植密度的思考与讨论[J]. 玉米科学, 2020, 28(2): 96-99.

[14] 韩志, 徐长青, 高强. 东北地区玉米高产高效养分管理技术现状及影响因素[J]. 吉林农业科学, 2012, 37(1): 34-37.

[15] 董文. “十一五”粮食丰产科技工程增产增效的成效分析[J]. 作物杂志, 2013(3): 12-15.

[16] 李少昆, 王崇桃. 我国玉米产量变化及增产因素分析[J]. 玉米科学, 2008, 16(4): 26-30.

[17] 赵伟. 黑龙江省玉米品种近况分析及有关问题的探讨[J]. 作物杂志, 2010(5): 93-97.

(责任编辑:王丝语)