

## 蚯蚓-菌根互作对滨海盐碱土的改良作用

于英钗 王冲\* 孙梦实 刘萌丽

(中国农业大学 资源与环境学院,北京 100193)

**摘要** 为改良滨海盐碱地不良的土壤理化性质,使其适合作物生长,从生物改良角度,研究蚯蚓(*Eisenia fetida*)与丛枝菌根真菌(*Rhizophagus intraradices*)互作对滨海盐碱地的改良作用。采用盆栽试验,以玉米为研究对象,设置不加菌根和蚯蚓(CK)、接种菌根真菌(AM)、添加蚯蚓(EW)、添加蚯蚓和菌根真菌(AM+EW)共4个处理,测定不同处理土壤理化性质及玉米生长相关指标。结果表明:添加蚯蚓和接种菌根真菌均能降低土壤pH及水溶性全盐含量( $P<0.05$ ),提高玉米对土壤养分的吸收( $P<0.05$ )。同时,蚯蚓能促进菌根真菌的定殖( $P<0.05$ ),二者互作使土壤水溶性全盐含量降低25.4%,玉米根系表面积增加51.8%,对氮磷钾的吸收量分别提高31.1%、21.0%、48.3%,地上部生物量提高80.2%。因此,在滨海盐碱地添加蚯蚓及菌根真菌可降低土壤pH及水溶性全盐含量,改善植物根际环境,促进玉米根系生长,促进其对土壤养分的吸收,提高玉米养分及生物量。

**关键词** 滨海盐碱地; 生物改良; 蚯蚓; 菌根真菌

中图分类号 S899.8

文章编号 1007-4333(2019)05-0123-07

文献标志码 A

## Meliorative effect of earthworm-mycorrhiza interaction on coastal saline soil

YU Yingchai, WANG Chong\*, SUN Mengshi, LIU Mengli

(College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract** In order to improve the physical and chemical properties of the coastal saline soil and make it suitable for crop growth, this study studied the interaction of earthworms (*Eisenia fetida*) and the arbuscular mycorrhizal fungi (*Rhizophagus intraradices*) on the coastal saline soil. In a pot experiment, 4 treatments were designed and maize was taken as the research object: no mycorrhizal or earthworms (CK); inoculated mycorrhizal fungi (AM); added earthworms (EW); added earthworms and mycorrhizal fungi (AM+EW). The soil physical and chemical properties and growth indexes under different treatments were determined. The results showed that adding earthworms and inoculating mycorrhizal fungi reduced soil pH and the content of total salt ( $P<0.05$ ), and improved maize nutrient uptake ( $P<0.05$ ). Earthworms promoted the colonization of mycorrhizal fungi ( $P<0.05$ ). The interaction between earthworms and mycorrhiza fungi reduced the content of water soluble total salt by 25.4%. The interaction increased the surface area of maize roots by 51.8%, the absorption of nitrogen, phosphorus and potassium by 31.1%, 21%, 48.3% respectively, and the shoot biomass by 80.2%. In conclusion, adding earthworms and mycorrhizal fungi to the coastal saline soil reduced the soil pH and the content of water soluble total salt, improved the rhizosphere environment of plants and the nutrient and biomass of maize in soil, and promoted the growth of maize roots and absorption of soil nutrients.

**Keywords** coastal saline soil; biological improvement; earthworm; AM fungi

土壤盐碱化和次生盐碱化是全球范围普遍存在的问题,由于其抑制作物生长,已经成为世界灌溉农

业可持续发展的资源制约因素<sup>[1]</sup>。我国各类盐碱地总面积约  $9.91 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>。其中现代盐渍土约有

收稿日期: 2018-05-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(3157020097)

第一作者: 于英钗, 硕士研究生, E-mail: yingchai007@163.com

通讯作者: 王冲, 副教授, 主要从事土壤生态学研究, E-mail: wangchong@cau.edu.cn

3.69×10<sup>7</sup> hm<sup>2</sup>,按地理分布包括6个区域,分别是:滨海盐碱土区、黄淮海平原盐碱土区、东北盐碱土区、西北半干旱盐碱土区、西北干旱盐碱土区及青藏高原盐渍土区<sup>[2]</sup>。其中,滨海盐碱土主要沿我国海岸线分布,面积约为2.14×10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup><sup>[2]</sup>,是我国重要的耕地后备资源。山东省是我国产粮大省,其东部半湿润及湿润地区分布有大面积的滨海盐碱地,由于靠近黄渤海,土壤常年受海水影响,地下水位高、土壤含盐量高,土壤自然脱盐率低,季节性返盐严重<sup>[3-4]</sup>,严重阻碍农业生产,因此改良滨海盐碱地迫在眉睫。

玉米是我国北方重要的粮食作物之一,但其耐盐能力相对较差,其生长发育易受到盐碱土的抑制<sup>[5]</sup>。丛枝菌根真菌是自然界中广泛存在的一类土壤微生物,能够通过外生菌丝体帮助植物根系扩大吸收面积,增强植物对养分的吸收,并能提高植物体内渗透调节物质含量从而增强植物耐盐能力<sup>[6-7]</sup>。蚯蚓被誉为“生态系统的工程师”<sup>[8]</sup>,其自身掘穴行为可以增加土壤孔隙度,减轻盐碱土板结程度,增加土壤孔隙度和通气性,有利于根系生长和改善微生物微环境。同时,蚯蚓可以调控微生物活性,改变菌根的侵染率和侵染形态。在土壤养分贫瘠条件下,蚯蚓能通过增加土壤养分有效性促进菌根侵染。蚯蚓活化的土壤有机态氮和无机态氮均可以被菌丝利用,从而促进菌丝生长。有研究发现,不添加秸秆蚯蚓会减少菌根侵染,同时添加秸秆和接种蚯蚓后,可促进菌根侵染,并提高了玉米地上部、地下部氮浓度<sup>[9]</sup>。蚯蚓和菌根互作,能够影响土壤结构的稳定性,改变土壤氮、磷、钾的空间分布,协同提高土壤全碳和全氮含量,增强养分的有效性,促进植物生长<sup>[10]</sup>。但现有关于二者互作的研究大多集中在重金属、有机污染物的降解,而对于二者互作对盐碱地作物生长的作用还有待探究。因此,本研究在前人研究工作的基础上,利用菌根真菌能够提高植物耐盐性,蚯蚓能改善土壤理化性质的特征,进一步探究蚯蚓-菌根互作对盐碱地玉米生长的影响,以期为改良滨海盐碱地和农业可持续发展提供参考依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料

试验于2015年4—6月在中国农业大学温室中进行。供试土壤为山东滨州市无棣县滨海盐碱土,土壤取回后风干,过2 mm筛以备用,土壤基础理化性质为:水溶性全盐含量为1.98 g/kg、电导率为

1 989.00 μS/cm、pH为7.98、全氮含量为0.64 g/kg、有效磷含量为74.43 mg/kg、速效钾含量为206.69 mg/kg、有机质含量为13.37 g/kg。土壤使用前进行γ射线(25 kJ/kg)辐照灭菌48 h。

供试宿主植物为玉米(*Zea mays* L.,郑单958),选择大小均一、无病虫害的种子,播种前用10%的过氧化氢溶液消毒20 min,再用自来水清洗2~3次,最后用蒸馏水清洗干净备用。种子在试验前一天放在湿润纱布上进行萌芽,培养室温度始终维持在22~25℃,黑暗培养,种子萌芽露白时播种。

供试蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*),选取有环带的成熟蚯蚓,采用无污染的牛粪养殖。试验前一周把蚯蚓放在供试土壤中驯化,在试验前一天清肠(挑选质量均匀的驯化后健康的蚯蚓洗净,放入底部铺有吸水纸,且含有少量水分的周转箱内培养24 h),次日取出洗净擦干备用。

供试菌种为根内球囊霉属(*Rhizophagus intraridices*),编号为BEG JX04B,该菌种引自北京市农林科学院植物营养与资源研究院“丛枝菌根真菌种质资源库”(BGC),接种菌种菌剂为含有宿主植物根段、菌根真菌孢子和根外菌丝的砂土混合物。该接种菌剂是以河砂和沸石的混合物为扩繁基质,以盆栽高粱的方法扩繁10周后获得的繁殖体,即含有VA菌根菌丝、孢子和根段,在距土壤表层3 cm处接种,接种量为5%(w/w)。

### 1.2 试验设计

试验采用盆栽方法,分为4个处理:1)CK(不添加菌根真菌和蚯蚓);2)AM(只添加菌根真菌);3)EW(只添加蚯蚓);4)AM+EW(添加菌根真菌和蚯蚓)。每个处理4个重复。按照比例一次性加入底肥:N为150 mg/kg(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>)、P为50 mg/kg(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)、K为150 mg/kg(K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)。

将每个处理所用肥料与土壤充分混合后分别装入同样大小的根箱内(根箱规格为30 cm×20 cm×30 cm,使用前用0.1%的高锰酸钾溶液消毒30 min),每个根箱内加入过筛的灭菌滨海盐碱土1.5 kg并混合5 g小麦秸秆,在距土表层3 cm处平铺一层菌剂,约20 g,在播种前加入足量水分,调节含水量为土壤最大含水量的25%。每个根箱内分开播种2粒玉米种子,在幼苗三叶期统一定苗,并保持各处理的幼苗长势基本一致。有蚯蚓的处理在幼苗三叶期时添加蚯蚓,每盆添加15条。每天定时观察并统一浇水等管理。试验在控温控湿温室中进行。

行,生长期温度维持在 22~32 ℃,相对湿度 50% 左右。

### 1.3 取样方法

幼苗生长 60 d 收获并测定地上部、地下部鲜重和地上部干重。地下部用去离子水洗净后放入 4 ℃ 冰箱保存用于根系扫描,扫描后,按比例取一定量的根系烘干称重,然后用研钵将整个植株研磨,过 0.15 mm 筛,用于植物养分的测定。剩下的根系用去离子水洗净,将一部分新鲜根系样品剪成约 1 cm 根段,用于测定菌根侵染率。收获土壤并过 2 mm 筛混匀,取出一部分作新鲜样品的相关指标测定,剩余土壤风干。

### 1.4 测定方法

#### 1.4.1 植物生物量测定

将植物样品用自来水洗净后用蒸馏水冲洗淋干,再用吸水纸吸干水分后放于纸袋并置于烘箱中用 105 ℃ 杀青 0.5 h,再在 70 ℃ 下烘干至恒重,称重并记录。

#### 1.4.2 植物养分测定

称取植物干样,用研钵研磨,过 0.25 mm 筛后用消煮仪进行硫酸-双氧水消煮。全氮采用凯氏定氮仪测定;全磷用钒钼黄比色法测定;全钾用火焰光度计测定<sup>[11]</sup>。

#### 1.4.3 植物根系形态级生理指标测定

植物根系形态采用根系扫描系统(WinRHIZORA)对植物根系进行扫描,计算植物根系总长度、总表面积、根系体积。根系菌根侵染率采用 KOH 消煮,曲

利苯蓝染色<sup>[12]</sup>,根段法测定。

#### 1.4.4 土壤理化性质测定

土壤有机质用浓硫酸-重铬酸钾浴法测定;无机氮采用 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液浸提,用硝酸盐还原法和靛酚蓝比色法,用流动分析仪测定;全氮用半微量开氏法测定、有机磷用 1 mol/L NH<sub>4</sub>OAc 溶液浸提,火焰光度法测定;pH 采用 pH 计测定;水溶性全盐总量用残渣烘干-质量法测定<sup>[11]</sup>。

### 1.5 数据分析

试验数据采用 Excel 软件前期处理,采用 SPSS (17.0)软件统计分析,用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较处理间差异,用 5% 水平下最小显著法(LSD)比较平均数间差异显著程度,用多因素方差分析 2 个因素间的交互效应,用 Canoca for Windows 4.5 link 对数据进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 蚯蚓-菌根互作对滨海盐碱地玉米生长的影响

#### 2.1.1 对滨海盐碱地玉米生物量和养分吸收的影响

玉米养分及生物量指标直接反映出玉米在盐碱土中的生长情况。表 1 结果表明,接种菌根真菌能显著改善玉米的养分吸收,提高植物吸氮、吸磷及吸钾量( $P < 0.05$ ),添加蚯蚓能显著提高玉米吸氮量,对玉米吸磷量和吸钾量也有所提高,但并不显著。同时接种菌根真菌和添加蚯蚓能显著提高植物吸氮、吸磷和吸钾量,并显著提高玉米地上部生物量。

表 1 不同处理对盐碱地玉米生物量和养分吸收的影响

Table 1 Effect of different treatments on the biomass and nutrient uptake of maize

处理 Treatment	地上部生物量/ g Shoot biomass	地下部生物量/ g Root biomass	地上部吸氮量/ (mg/g) Plant-N	地上部吸磷量/ (mg/g) Plant-P	地上部吸钾量/ (mg/g) Plant-K
CK	3.23±0.20 b	0.83±0.10 a	20.66±1.01 b	60.05±0.49 d	24.72±2.22 b
AM	3.89±0.26 b***	1.02±0.08 a	27.21±0.59 a***	63.83±1.89 b***	36.94±1.29 a***
EW	3.33±0.14 b**	1.00±0.10 a	25.44±0.41 a*	62.44±0.93 bc***	27.67±0.38 b
AM+EW	5.82±0.37 a**	0.92±0.02 a	27.08±0.92 a**	72.63±0.34 a*	36.66±1.22 a

注:所有的数据均为 4 次重复的均值±标准误差。采用方差分析。CK 表示不加蚯蚓和菌根,AM 表示只加入菌根真菌,EW 表示只加入蚯蚓,AM+EW 表示同时加入蚯蚓和菌根真菌。差异显著水平分别为:\*\*\*  $P < 0.001$ ; \*\*  $P < 0.01$ ; \*  $P < 0.05$ 。下同。

Note: Datas are the means of four replicates±SD and are compared by Duncan's multiple range tests. CK is the saline soil without earthworm and mycorrhiza addition. AM is the saline soil with mycorrhiza. EW is the saline soil with earthworm addition. AM+EW is the saline soil with both earthworm and mycorrhiza addition. Significant levels are: \*\*\*  $P < 0.001$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*  $P < 0.05$ . The same below.

### 2.1.2 理对滨海盐碱地玉米根系生长的影响

表2结果表明,同时接种菌根真菌和添加蚯蚓粪的处理玉米根表面积和根体积均显著高于对照处理( $P<0.05$ ),只接种菌根真菌或添加蚯蚓粪的处理根表面积和根体积也高于对照处理,但并不显著。

不同处理间根长没有显著差异,但接种菌根真菌、添加蚯蚓及二者互作处理的玉米根长比对照处理有增加的趋势。添加蚯蚓粪能显著提高植物根系菌根真菌感染率( $P<0.05$ )。

表2 不同处理对盐碱地玉米根系生长的影响

Table 2 Effect of different treatments on the indices of maize root

处理 Treatment	根长/cm Root length	根表面积/cm <sup>2</sup> Root surface area	根体积/cm <sup>3</sup> Root volume	侵染率/% Root colonization
CK	2 519.68±322.08 a	170.72±23.68 b	8.05±1.03 b	—
AM	3 063.80±128.55 a	227.36±2.39 ab	11.77±0.30 ab	73.33±5.44 b***
EW	2 980.77±78.89 a	230.87±14.89 ab	11.61±0.75 ab	—
AM+EW	3 279.91±324.64 a	259.13±32.48 a	12.26±2.14 a	89.17±4.98 a

## 2.2 蚯蚓-菌根互作对滨海盐碱地土壤理化性质的影响

### 2.2.1 对土壤盐碱度的影响

滨海盐碱土土壤 pH 及盐分含量较高,是影响

植物生长的重要因子。由表3可知,与对照处理相比,接种菌根真菌的处理土壤水溶性全盐显著降低;添加蚯蚓的处理土壤 pH 显著降低,水溶性全盐有降低的趋势,但不显著。同时接种菌根真菌和添加蚯蚓的处理土壤 pH、水溶性全盐有降低的趋势,但不显著。

表3 不同处理对盐碱地土壤盐碱度的影响

Table 3 Effect of different treatments on soil salinity and alkalinity

处理 Treatment	土壤 pH Soil pH	水溶性全盐/(g/kg) Total salt
CK	8.07±0.01 a	1.79±0.16 a
AM	8.05±0.01 a*	1.33±0.10 b**
EW	7.83±0.01 b***	1.69±0.02 a
AM+EW	8.00±0.06 a**	1.49±0.05 ab

### 2.2.2 对土壤养分的影响

玉米生长情况与土壤养分密切相关。表4结果表明,接种菌根真菌的处理和添加蚯蚓的处理,土壤有机质、全氮、铵态氮的含量均显著低于对照处理,同时接种菌根真菌和添加蚯蚓粪的处理,其土壤有机质、全氮、铵态氮和有效磷显著低于对照处理,土壤硝态氮、速效钾的含量有降低的趋势,但并不显著。

表4 不同处理对盐碱地土壤养分的影响

Table 4 Effect of different treatments on soil nutrients

处理 Treatment	有机质/ (g/kg) Organic matter	全氮/ (g/kg) Total nitrogen	铵态氮/ (mg/g) Ammonium	硝态氮/ (mg/g) Nitrate nitrogen	有效磷/ (mg/g) Available phosphorus	速效钾/ (mg/g) Exchangeable potassium
CK	13.59±0.04 a	0.66±0.00 a	0.73±0.04 a	0.69±0.24 a	48.62±1.69 a	214.23±3.07 a
AM	12.50±0.07 b***	0.64±0.01 b*	0.47±0.04 b**	0.72±0.32 a	50.50±5.50 a*	221.40±17.52 a
EW	12.40±0.06 b***	0.63±0.01 b**	0.41±0.05 b***	0.95±0.11 a	54.92±1.71 a	217.74±6.84 a
AM+EW	10.14±0.04 c***	0.63±0.00 b*	0.41±0.01 b**	0.53±0.09 a	35.98±1.40 b*	199.07±3.20 a

## 3 讨论

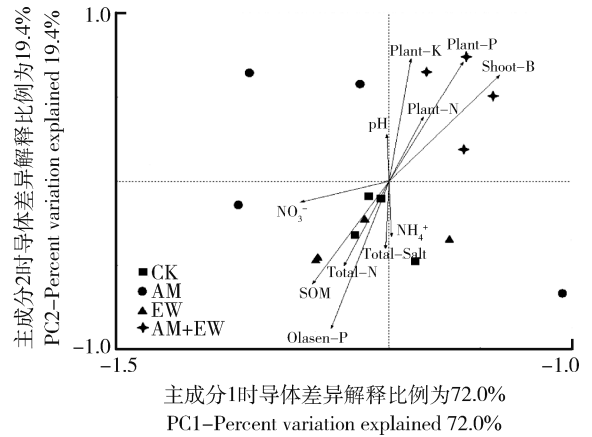
### 3.1 土壤盐碱度和 pH

本研究表明,添加蚯蚓及接种菌根真菌能降低土壤盐碱度。添加蚯蚓的处理土壤 pH 显著降低,水溶性全盐有所下降,但不构成显著性差异(表 3)。这可能与蚯蚓的取食、消化、排泄和掘穴等行为有关。蚯蚓的掘穴行为可以打破土壤板结,在土壤中形成大孔隙,土壤经过蚯蚓取食并排泄出后具有良好的团粒结构,这些行为都增加了土壤孔隙度和通气性,改善土壤物理性质<sup>[13]</sup>,此外,蚯蚓粪中含有  $\text{Ca}^{2+}$ ,能增加  $\text{Na}^+$  交换量<sup>[14]</sup>,这些都能够减少土壤中  $\text{Na}^+$  含量。蚯蚓肠道中具有稳定的 pH(中性)<sup>[15]</sup>,在土壤经过蚯蚓肠道时,其 pH 得到了蚯蚓肠道中酸碱平衡体系的中和。菌根真菌能显著降低土壤水溶性全盐含量(表 3),这是由于菌根真菌能在土壤中形成庞大的菌丝网络,通过菌丝缠绕、分泌糖蛋白等促进土壤水稳性大团聚体的形成<sup>[16-18]</sup>,改善土壤物理结构,促进盐分淋洗,减少土壤可溶性全盐含量。当蚯蚓与菌根互作时,蚯蚓在改善土壤结构同时,通过自身表携带菌根繁殖体而促进菌根真菌定殖<sup>[19]</sup>,显著提高了菌丝侵染率(表 2),二者之间存在显著的交互效应。蚯蚓-菌根互作能共同促进土壤团聚体的形成,改善盐碱土物理结构,降低水溶性全盐含量,并一定程度上降低土壤 pH,使盐胁迫环境得到缓解。

### 3.2 土壤养分含量和植物养分吸收

添加蚯蚓和接种菌根真菌后,土壤养分含量显著降低(表 1),玉米养分吸收量显著提高(表 4),PCA 分析结果表明土壤养分含量和玉米养分吸收呈现负相关关系(图 1),说明添加蚯蚓和接种菌根真菌显著提高了土壤养分向玉米中转移。这可能是由于蚯蚓的取食破碎等行为有利于土壤有机质的分解<sup>[20]</sup>,并为土壤微生物的生长增殖提供碳源,蚯蚓活动改善了土壤通气性,为自养硝化细菌提供了有利的生存条件,加快氮素的硝化过程<sup>[21]</sup>,使土壤中铵态氮显著降低,植物可吸收的硝态氮增多,使植物吸氮量显著提高。菌根真菌在土壤中能形成菌丝网络<sup>[22]</sup>,扩大植物根系的吸收面积,从而增加植物养分吸收<sup>[23]</sup>,菌根真菌还能够通过分泌有机酸使土壤中难溶性磷转化为可溶性磷,提高植物吸磷量<sup>[24]</sup>。

在蚯蚓和菌根真菌互作的处理中,蚯蚓会通过体表携带菌根繁殖体,促进菌根侵染<sup>[19]</sup>,蚯蚓排泄



CK、AM、EW、AM+EW 为 4 个处理, SOM: 有机质, Shoot B: 地上部生物量, Plant-N: 植物体氮含量, Plant-P: 植物体磷含量, Plant-K: 植物体钾含量, Total-N: 土壤全氮含量, Olsen-P: 土壤有效磷含量, Total-Salt: 土壤全盐含量。

CK、AM、EW、AM+EW are the treatments in experiment. SOM-soil organic matter, Shoot B-shoot biomass

图 1 不同处理对玉米养分和土壤养分指标影响的 PCA 分析

Fig. 1 The principal component analysis of the effect between different treatments with maize indices and soil indices

物中的激素类物质也能促进菌丝侵染<sup>[25]</sup>。这也与本研究的结果相符(表 2)。本研究表明,在盐碱土中蚯蚓和菌根真菌之间存在显著的交互效应。可以促进土壤养分矿化,增加盐碱土养分有效性<sup>[26]</sup>。协同促进土壤中养分向植物体内转移<sup>[27-28]</sup>,使作物养分吸收含量显著高于单独添加蚯蚓和单独接种菌根真菌的处理。

### 3.3 植物生物量

本研究表明,分别添加蚯蚓和接种菌根真菌均能提高植物生物量和根系生长的各项指标,并且两者互作能显著提高植物地上部生物量、根表面积和根体积(表 1 和 2)。这可能是因为蚯蚓和菌根真菌在土壤中的活动均有利于打破滨海盐碱土土壤板结、提高土壤孔隙度和通气性、促进土壤水稳性大团聚体的形成并显著降低土壤盐分含量和 pH,这些均减轻了滨海盐碱土对植物根系产生的盐胁迫,并使植物根系可以沿蚯蚓活动产生的孔隙、通道伸长,促进根系生长<sup>[29]</sup>。蚯蚓-菌根互作,增强了二者的改良作用,通过协调改善盐碱土土壤理化性质,从而提高了土壤养分有效性。二者互作减轻了植物受到的胁迫,蚯蚓的掘穴作用改善了植物根系生长,菌丝的传递作用提高了植物的养分吸收水平<sup>[30]</sup>,提高了植物地上部生物量。

## 4 结 论

滨海盐碱地土壤盐分含量高,抑制作物生长,添加蚯蚓及接种菌根真菌显著提高了玉米地上部生物量和氮磷钾吸收量。蚯蚓可以降低盐碱土土壤pH,促进有机质分解矿化,提高土壤氮尤其是铵态氮的生物有效性;菌根能降低土壤含盐量,改善玉米根际环境,扩大根系吸收范围,帮助玉米吸收土壤养分。蚯蚓-菌根互作能降低土壤pH和含盐量,提高土壤养分有效性,增加玉米根系体积和表面积,提高玉米对土壤养分的吸收,改善植物生长,提高作物生物量。

## 参考文献 References

- [1] 李彬,王志春,孙志高,陈渊,杨福. 中国盐碱地资源与可持续利用研究[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(2):154-158  
Li B, Wang Z C, Sun Z G, Chen Y, Yang F. Resources and sustainable resource exploitation of salinized land in China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 154-158 (in Chinese)
- [2] 李志杰,孙文彦. 盐碱土农业生态工程[M]. 北京:科学出版社,2015  
Li Z J, Sun W Y. *Saline-Alkali Soil Agro-ecological Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2015 (in Chinese)
- [3] 李颖,陶军,钞锦龙,张化,顾卫. 滨海盐碱地“台田-浅池”改良措施的研究进展[J]. 干旱地区农业研究,2014(5):154-160  
Li Y, Tao J, Chao J L, Zhang H, Gu W. Research progress of improving measures of “raised field-shallow pool” for coastal saline-alkaline land [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014(5): 154-160 (in Chinese)
- [4] Tripathi S, Kumari S, Chakraborty A, Gupta A, Chakrabarti, K, Bandyopadhyay, B K. Microbial biomass and its activities in salt-affected coastal soils [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2006, 42(3): 273-277
- [5] 王福友,王冲,刘全清,金树杰,解永进. 腐植酸、蚯蚓粪及蚯蚓蛋白肥料对滨海盐碱土壤的改良效应[J]. 中国农业大学学报,2015,20(5):89-94  
Wang F Y, Wang C, Liu Q Q, Jin S J, Xie Y J. Improved effect of humic acid, earthworm protein fertilizer and vermicompost on coastal saline soils [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(5): 89-94 (in Chinese)
- [6] Porcel R, Aroca R, Ruizlozano J M. Salinity stress alleviation using arbuscular mycorrhizal fungi: A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, 32(1): 181-200
- [7] Feng G, Zhang F S, Li X L, Tian C Y, Tang C, Rengel Z. Improved tolerance of maize plants to salt stress by arbuscular mycorrhiza is related to higher accumulation of soluble sugars

- in roots [J]. *Mycorrhiza*, 2002, 12(4): 185-190
- [8] Blouin M, Hodson M E, Delgado E A, Baker G, Brussaard L, Butt K R, Dai J, Dendooven L, Peres G, Tondoh J E, Cluzeau D, Brun J J. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services [J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(2): 161-182
- [9] Ortiz-Ceballos A I, Peña-Cabiales J J, Fragoso C, Brown G G. Mycorrhizal colonization and nitrogen N uptake by maize: combined effect of tropical earthworms and velvetbean mulch [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44(1): 181-196
- [10] Zangerlé A, Hissler C, Lavelle P. Effects of earthworms and plants on the soil structure, the physical stabilization of soil organic matter and the microbial abundance and diversity in soil aggregates in a long term study [J]. *General Assembly Conference Abstracts*, 2014, 16: 293
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京:中国农业大学出版社,2015  
Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2015 (in Chinese)
- [12] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection [J]. *Transactions of the British Mycological Society*, 1970, 55(1): 158, N16-N161, N18
- [13] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, Wh, van der Putten W H, Wall D H. Ecological linkages between aboveground and belowground biota [J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1629-1633
- [14] Oo A N, Iwai C B, Saenjan P. Soil properties and maize growth in saline and nonsaline soils using cassava-industrial waste compost and vermicompost with or without earthworms [J]. *Land Degradation & Development*, 2015, 26(3): 300-310
- [15] Thakuria D, Schmidt O, Finan D, Egan D, Doohan F M. Gut wall bacteria of earthworms: A natural selection process [J]. *The ISME Journal*, 2010, 4(3): 357-366
- [16] 吴强盛,袁芳英,费永俊,李莉,黄咏明. 菌根真菌对白三叶根际团聚体稳定性、球囊霉素相关土壤蛋白和糖类物质的影响[J]. 草业学报,2014(4):269-275  
Wu Q S, Yuan F Y, Fei Y J, Li L, Huang Y M. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on aggregate stability, GRSP, and carbohydrates of white clover [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014(4): 269-275 (in Chinese)
- [17] 冯固,张玉凤,李晓林. 丛枝菌根真菌的外生菌丝对土壤水稳性团聚体形成的影响[J]. 水土保持学报,2001,15(4):99-102  
Feng G, Zhang Y F, Li X L. Effect of external hyphae of arbuscular mycorrhizal plant on water-stable aggregates in sandy soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(4): 99-102 (in Chinese)
- [18] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Plant & Soil*, 1998, 198(1):

97-107

- [19] Lemtiri A, Colinet G, Alabi T, Cluzeau D, Zirbes L, Haubruge E, Francis, F. Impacts of earthworms on soil components and dynamics: A review[J]. *Biotechnologie Agronomie Societe Et Environment*, 2014, 18(1): 121-133
- [20] Cécillon L, Cassagne N, Czarnes S, Gros R, Brun J. Variable selection in near infrared spectra for the biological characterization of soil and earthworm casts[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1975-1979
- [21] Giri B, Mukerji K. Mycorrhizal inoculant alleviates salt stress in *Sesbania aegyptiaca* and *Sesbania grandiflora* under field conditions: Evidence for reduced sodium and improved magnesium uptake[J]. *Mycorrhiza*, 2004, 14(5): 307-312
- [22] Zhang Y F, Wang P, Yang Y F, Bi Q, Tian S Y, Shi X W. Arbuscular mycorrhizal fungi improve reestablishment of *Leymus chinensis* in bare saline-alkaline soil: Implication on vegetation restoration of extremely degraded land[J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(9): 773-778
- [23] Li X L, George E, Marschner H. Extension of the phosphorus depletion zone in VA-mycorrhizal white clover in a calcareous soil[J]. *Plant & Soil*, 1991, 136(1): 41-48
- [24] Zarea M J, Ghalavand A, Goltapeh E M, Rejali F, Zamaniyan M. Effects of mixed cropping, earthworms (*Pheretima* sp), and arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus mosseae*) on plant yield, mycorrhizal colonization rate, soil microbial biomass, and nitrogenase activity of free-living rhizosphere bacteria [J]. *Pedobiologia*, 2009, 52(4): 223-235
- [25] Li H, Li X L, Dou Z H, Zhang J L, Wang C. Earthworm (*Aporrectodea trapezoides*): Mycorrhiza (*Glomus intraradices*) interaction and nitrogen and phosphorus uptake by maize[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(1): 75-85
- [26] Cao J, Wang C, Ji D. Improvement of the soil nitrogen content and maize growth by earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi in soils polluted by oxytetracycline [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 926-934
- [27] Tuffen F, Eason W R, Scullion J. The effect of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi on growth of and 32P transfer between *Allium porrum* plants[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(7): 1027-1036
- [28] 曹佳, 王冲, 皇彦, 纪丁戈, 楼屹. 蚯蚓对土壤微生物及生物肥力的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2015(5): 1579-1586
- Cao J, Wang C, Huang Y, Ji D G, Lou Y. Effects of earthworm on soil microbes and biological fertility: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015 (5): 1579-1586 (in Chinese)
- [29] 李欢, 杜志勇, 刘庆, 史衍玺. 蚯蚓菌根互作对土壤酶活、甘薯根系生长及养分吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016(1): 209-215
- Li H, Du Z Y, Liu Q, Shi Y X. Effect of earthworm-mycorrhiza interaction on soil enzyme activities, root growth and nutrients uptake of sweet potato [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016(1): 209-215 (in Chinese)
- [30] Li H, Wang C, Li X L, Xiang D. Inoculating maize fields with earthworms (*Aporrectodea trapezoides*) and an arbuscular mycorrhizal fungus (*Rhizophagus intraradices*) improves mycorrhizal community structure and increases plant nutrient uptake[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(8): 1167-1178

责任编辑: 王燕华