

接种蚯蚓对盐碱土养分、土壤生物及植被的影响

伍玉鹏 吕丽媛 毕艳孟 张一 孙振钧*

(中国农业大学 资源与环境学院,北京 100193)

摘要 在施用牛粪的盐碱土中分别接种 15 和 30 条蚯蚓,以不接种蚯蚓为对照,进行了 6 个月的温室培养,旨在研究接种蚯蚓对盐碱土养分、土壤生物及植被的影响。结果表明:接种蚯蚓增加了土壤中速效磷、速效钾的含量,土壤有机质的含量则显著降低。接种蚯蚓并未显著增加植被的生物量,但增加了土壤微生物量碳、线虫丰富度及螨虫丰富度。接种蚯蚓改变了线虫各营养类群的相对丰富度和螨虫各亚目的相对丰富度,但未显著影响土壤中细菌、线虫及螨虫的多样性指数和均一度指数。在盐碱地中接种蚯蚓能够改善土壤的理化性质及生物特性,是巩固盐碱地改良效果、促进盐碱地持续利用的有效方法之一。

关键词 盐碱土; 蚯蚓; 调控; 土壤生物

中图分类号 S 156.4

文章编号 1007-4333(2013)04-0045-07

文献标志码 A

Effects of earthworm inoculation on saline-alkali soil nutrient, soil organisms and plant cultivation

WU Yu-peng, LÜ Li-yuan, BI Yan-meng, ZHANG Yi, SUN Zhen-jun*

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

Abstract Over a period of six months, at the China Agricultural University greenhouse, 15 and 30 individual earthworms were introduced into saline-alkali soil, to study the effect of earthworm inoculation on saline-alkali soil nutrient, soil organisms and plant cultivation. The results showed that earthworm inoculation increased the contents of soil available phosphorus and potassium, while soil organic matter content significantly decreased. Although plant biomass was not increased after earthworm inoculation, microbial biomass carbon, nematodes and mite abundance were increased. Earthworm inoculation changed the relative abundance of nematode trophic groups and mite suborder, but did not significantly affect soil bacteria, nematodes and mites Shannon Wiener diversity index and Evenness index. Earthworm inoculation improved the biological, chemical and physical processes of the soil ecosystem, which may play important roles on saline-alkali soil improvement.

Key words saline-alkali soil; earthworm; regulation; soil organisms

面对中国日益增长的人口和不断减少的耕地面积,改良盐碱地使其成为能够进行高效农业种植的后备土地资源具有非常重要的意义。目前对盐碱地的改良主要集中在植物耐盐性研究、利用劣质水灌溉、覆盖改良盐碱地和化学改良盐碱地等方面^[1],而土壤生物对盐碱地的改良作用研究则较少。土壤生物是土壤生态系统中不可分割的组成部分,它们在

分解残体、改变土壤理化性质、土壤形成与发育、土壤物质迁移与能力转化等方面都具有重要意义^[2]。土壤生物也是联结地上部分和地下部分的纽带,通过直接作用于根系,或通过改变养分的矿化速率及其在土壤中的空间分布,改变植物根际的激素状况以及土壤环境等间接作用方式,对地上生物产生正、负反馈作用^[3]。通过改善盐碱土壤生物群落结构,

收稿日期: 2012-11-18

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 伍玉鹏, 博士研究生, E-mail: wyp19851205@126.com

通讯作者: 孙振钧, 教授, 主要从事蚯蚓人工养殖与综合利用及生态畜牧业研究, E-mail: sun108@cau.edu.cn

可以促进盐碱地植被的生长,强化盐碱地的改良修复,是未来盐碱地修复改良的一种新方法。

蚯蚓是土壤中分布非常广泛的动物之一,它通过取食、消化、排泄和掘穴等活动在其体内外形成众多的反应圈,从而对土壤生态系统的生物、化学和物理过程产生影响,被称为“生态系统工程师”^[4]。

本研究以人工接种的方式向盐碱土中添加蚯蚓来进行短期的温室试验,通过测定土壤中微生物、线虫及螨虫的类群等指标,来探讨接种蚯蚓对盐碱土养分、土壤生物以及对盐碱土地上部植被生物量的影响,旨在为进一步利用蚯蚓修复盐碱地提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自河北省唐山市唐海县,为典型的滨海盐碱土。其土壤含水率为 19.2%,电导率(1:5 水土比)为 2.9 dS/m, pH(1:2.5 水土比)为 7.94,交换性钠含量 15.42%,总氮含量 0.05%,速效磷含量 4.90 mg/kg,速效钾含量 81.43 mg/kg,土壤有机质含量 1.21%。供试土壤微生物碳含量为 98 mg/kg。在 100 g 鲜土中观察到线虫 14 只(*Arcoboloides* 18%,*Ceroidellus* 27%,*Eucephalobus* 27%,*Aphelenchus* 9%,*Eudorylaimus* 18%)。在 300 g 鲜土中观察到螨虫 5 只(*Microdispidae* 50%,*Tarsonemidae* 25%,*Ceratozetoid mites* 25%)。

供试牛粪购买自北京市得益蚯蚓养殖厂,含水率为 45.6%,干重总氮含量 2.09%,总磷含量 1.28%,总钾含量 2.48%,有机质含量 60.43%。

供试蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*),购买自北京市得益蚯蚓养殖厂。先在供试牛粪与供试土壤为 1:8 的混合物中预养一段时间,然后选择相同大小,具有环带的健壮成体进行试验,蚯蚓体重约 0.3~0.6 g。

供试植物为耐盐碱的优质牧草紫花苜蓿中苜 1 号(ZhongMu No.1),由中国农业科学院植保所提供。

1.2 试验方法

试验于 2011 年 5 月至 11 月在中国农业大学温室进行(白天温度为(25±2)℃,夜晚温度为(19±2)℃)。8 kg 土壤与 500 g 牛粪混匀后装入底部开有小孔的 35 cm×25 cm×20 cm(长×宽×高)塑料盒中,在适当湿润土壤后接种不同量的蚯蚓。试验

共设置 3 个处理,即接种 0 条(CK)、接种 15 条(E15)和接种 30 条蚯蚓(E30)。每个处理设 4 次重复。蚯蚓放置于土壤表面由其自己钻入土壤,不能顺利钻入土壤的蚯蚓人工拣出后替换其他蚯蚓。待蚯蚓全部顺利进入土壤后播种 1.5 g 紫花苜蓿草种。在草种发芽前视土壤湿润情况每 3 d 进行一次小量灌溉以保证土壤湿润但底部不渗水,草种发芽后每 7 d 进行 1 次灌溉,每次 1.2 L,由盒子底部小孔渗出的水收集后用于下次灌溉。

1.3 测定指标及方法

在完成 6 个月的种植之后,对植物进行整株取样,同时对土壤进行取样测定土壤理化性质和土壤生物。

植物生物量:植物整株取样后洗净、烘干、称重。

螨虫:土壤螨虫的分离在实验室进行。取新鲜土样 300 g 于 Tullgren 分离器的纱网上,用 40 W 白炽灯连续照射,网下接盛有 75% 酒精的胶卷盒。利用土壤动物避热避光的特性连续收集螨虫 3 周,将收集到的螨虫标本取出,逐一用 Hoyer's 封固液制成玻片标本,在光学显微镜下进行分类鉴定^[5]。成年螨虫参照已有文献鉴定到科^[6],幼螨不进行鉴定但计入总数。螨虫丰富度表示为每 300 g 干土中螨虫的总数。

线虫:在实验室利用蔗糖悬浮离心法提取土壤线虫^[7]。取 100 g 新鲜土样进行线虫分离并在 50× 光学显微镜下计总数,在 100~400× 光学显微镜下随机选取 100 条线虫鉴定到属^[8]。线虫丰富度表示为每 100 g 干土中线虫的总数。

细菌:采用氯仿熏蒸方法测定土壤微生物量碳^[9]。采用末端限制性酶片段长度多态性(terminal restrictions fragment length polymorphism, T-RFLP)技术分析土壤细菌多样性,具体方法如下:利用土壤 DNA 提取试剂盒(OMEGA, USA)提取土壤微生物总 DNA,1% 琼脂糖凝胶电泳检测,用带 FAM 荧光标记的细菌通用引物 8F-FAM(5'-AGAGTTTGATCCTGGCT-CAG-3')和 1492R(5'-TACGGTTACCTTGTT-ACGACTT-3')扩增 16S rDNA 片段^[10],PCR 扩增采用 2 管平行,反应体系 40 μL 包括 2 μL DNA 模板,2 μL 正向引物,2 μL 反向引物,20 μL 2×PCR premix(legend, North America)及 14 μL ddH₂O,反应条件为 94℃ 预变性 2 min,94℃ 变性 30 s,61℃ 退火 30 s,72℃ 延伸 45 s,30 个循环,最后 72℃ 延伸 5 min。两管混合

后使用 Cycle-Pure Kit (OMEGA, US) 试剂盒进行纯化并用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测, 纯化后的 PCR 产物用限制性内切酶 *Msp* I (BioLabs, New England) 进行酶切, 酶切产物由北京基诺莱普生物技术有限公司于 ABI 373 (Applied Biosystems, Inc., USA) 自动测序分析仪上进行毛细管电泳, 以 ROX-500-LIS 作为内标, 用 Peak Scanner Software V1.0 (Applied Biosystems, Inc.) 对毛细管电泳结果进行分析^[11]。

土壤化学性质: 土壤 pH(1:2.5 土水比)、电导率 (EC)(1:5 土水比)、全氮 (TN)、速效磷 (AP)、速效钾 (AK) 和有机质 (SOM) 参照《土壤农化分析》进行^[12]。

1.4 统计分析方法

使用 BIO-DAP (Gordon Thomas, Canada) 软件计算细菌、线虫及螨虫的香农多样性指数 (H') 和均一度指数 (J')。使用 SPSS ver. 13.0 (IBM, USA) 分析各处理间土壤理化性质、植物生物量、土壤生物丰富度及多样性指数的差异, 图表中数据后或图柱上标相同字母表示不同处理在 0.05 水平上无显著差异。

2 结果与讨论

2.1 接种蚯蚓对盐碱土化学性质的影响

不同处理下种植紫花苜蓿 6 个月以后, 土壤的化学性质见表 1。接种蚯蚓未对盐碱土壤的电导率、pH 及全氮含量产生显著影响。土壤速效养分

(速效磷及速效钾) 含量在接种蚯蚓后有所提高, 但差异显著性仅仅出现在速效钾上。接种蚯蚓导致盐碱土中有机质含量显著降低。该研究结果与李辉信等人的研究结果存在一定差异^[13], 在秸秆还田的土壤中接种环毛蚓后发现, 蚯蚓对土壤有机碳和全氮含量无显著影响, 李辉信认为, 蚯蚓活动可能通过促进作物生长增加有机物(根系及分泌物)的归还而补偿一部分消耗的有机质, 另外, 作物生长后期尤其是成熟期, 根系逐渐老化、死亡, 归还的有机物数量增加, 也是土壤有机碳水平恢复的主要原因。而对于植被贫瘠的盐碱地来说, 由植物生长而归还土壤的有机碳含量则较少, 6 个月种植后的整株收割也带走了根系死亡后能够归还土壤的有机质。盐碱土壤养分贫瘠, 施用的牛粪可能是趋粪性较强的赤子爱胜蚓可依赖的作为生命活动能量来源的主要有机物, 牛粪经过蚯蚓肠道后以蚯蚓粪的形式排出。已有报道证明, 牛粪经过赤子爱胜蚓处理后, 其有机质含量降低, 速效磷、速效钾含量增加^[14-15], 可能是该研究中土壤速效养分增加而有机质降低的原因之一。另外, 蚯蚓还可能通过活动提高土壤养分的有效性和养分周转率^[16], 通过改变微生物数量、群落结构和组成等方式与微生物共同促进土壤氮、磷的循环和释放^[17], 以及通过自身的新陈代谢活动直接向土壤中释放养分^[18]来增加土壤中速效养分的含量。

表 1 不同处理 6 个月栽培后的土壤理化性质
Table 1 Soil nutrient content in different treatments

处理 Treatment	CK	E15	E30
电导率/(dS/m) Electrical conductivity	2.88±0.05 a	2.94±0.09 a	2.82±0.19 a
pH	7.95±0.13 a	7.84±0.11 a	7.95±0.14 a
全氮/% Total nitrogen	0.13±0.02 a	0.11±0.02 a	0.12±0.03 a
速效磷/(mg/kg) Available phosphorus	23.34±0.69 a	25.23±2.71 a	25.43±2.32 a
速效钾/(mg/kg) Available potassium	100.84±3.80 a	114.86±6.42 b	119.78±2.89 b
有机质/% Soil organic matter	2.39±0.07 a	2.04±0.14 b	1.99±0.11 b

2.2 接种蚯蚓对植被生物量及盐碱土微生物、线虫、螨虫丰富度的影响

表 2 显示, 接种蚯蚓未对植被生物量产生显著影响, 但增加了盐碱土土壤微生物量碳, 接种 30 条蚯蚓处理的土壤微生物量碳为 376.1 mg/kg, 在 0.05 水平显著高于对照处理的 297.3 mg/kg。这与已有的研究结果类似, 大量研究学者均发现在土

壤中接种蚯蚓能够增加土壤微生物的数量, 蚯蚓可能通过自身的活动改善土壤物理环境、分泌富含氨基酸、多糖类和生物酶等成分的分泌物以及破碎粗有机物使有机物更容易被微生物分解来促进微生物的生长和繁殖, 另外, 蚯蚓的消化道也是某些细菌和放线菌等微生物的一个产生源^[19-22]。

表 2 显示, 接种 15 条蚯蚓后土壤线虫数量比

对照的 224 增加到 281 只, 接种 30 条蚯蚓的处理线虫数量则为 275 只。接种蚯蚓增加了土壤的线虫丰富度, 但处理内重复间变异较大, 接种蚯蚓的处理并未与对照产生显著差异。与本研究结果相反, 已有的研究结果显示接种蚯蚓降低了土壤线虫的丰富度^[23], Dominguez 把接种蚯蚓后线虫丰富度的降低归结为蚯蚓的取食作用^[24]。Wurst 认为, 除了通过取食直接影响线虫外, 蚯蚓还能通过改变土壤理化性质的间接作用来影响线虫群落^[25]。盐碱土中线虫较少, 并非蚯蚓主要的取食对象, 蚯蚓对线虫的作用主要通过对土壤理化性质的改变实现。

接种蚯蚓对土壤理化性质的改善^[26]而导致土壤微生物数量的增加可能是该研究中线虫丰富度提高的原因之一。

表 2 显示, 对照、接种 15 和 30 条蚯蚓处理的土壤螨虫丰富度分别为 62、66 和 64 只, 各处理之间无显著差异。虽然已有文献证实接种蚯蚓能够增加土壤甲螨的丰富度和多样性^[27], 但这是在长期试验下得到的结果, 与本研究的研究结果并不冲突。土壤螨虫在土壤中的营养级高于线虫和微生物, 因此需要更长的时间来对土壤环境的变化作出响应, 可部分的解释本研究的结果。

表 2 不同处理 6 个月栽培后的植被生物量、土壤微生物量碳及线虫和螨虫丰富度

Table 2 Plant biomass, soil microbial biomass carbon, nematode abundance and mite abundance in different treatments

处理 Treatment	CK	E15	E30
植被生物量/g Plant biomass	90.0±5.7 a	89.5±7.9 a	88.7±7.6 a
微生物量碳/(mg/kg) Soil microbial biomass carbon	297.3±34.8 a	351.4±37.3 ab	376.1±28.3 b
线虫丰富度/(个体数/100 g 干土) Nematode abundance	224.0±40.0 a	281.0±58.0 a	275.0±40.0 a
螨虫丰富度/(个体数/300 g 干土) Mite abundance	62.0±11.0 a	66.0±10.0 a	64.0±9.0 a

2.3 接种蚯蚓对盐碱土细菌、线虫和螨虫群落结构的影响

各处理间细菌的 T-RFLP 图谱形状较为相似(图 1), 在经过统计分析后获得了 51 个 T-RFLP 片

段, 其中大部分片段大小在 63~498 bp 之间。不同处理间的 T-RFLP 片段数目没有显著差异, 香农多样性指数(图 2(a))和均一度指数(图 2(b))也没有显著性差异。

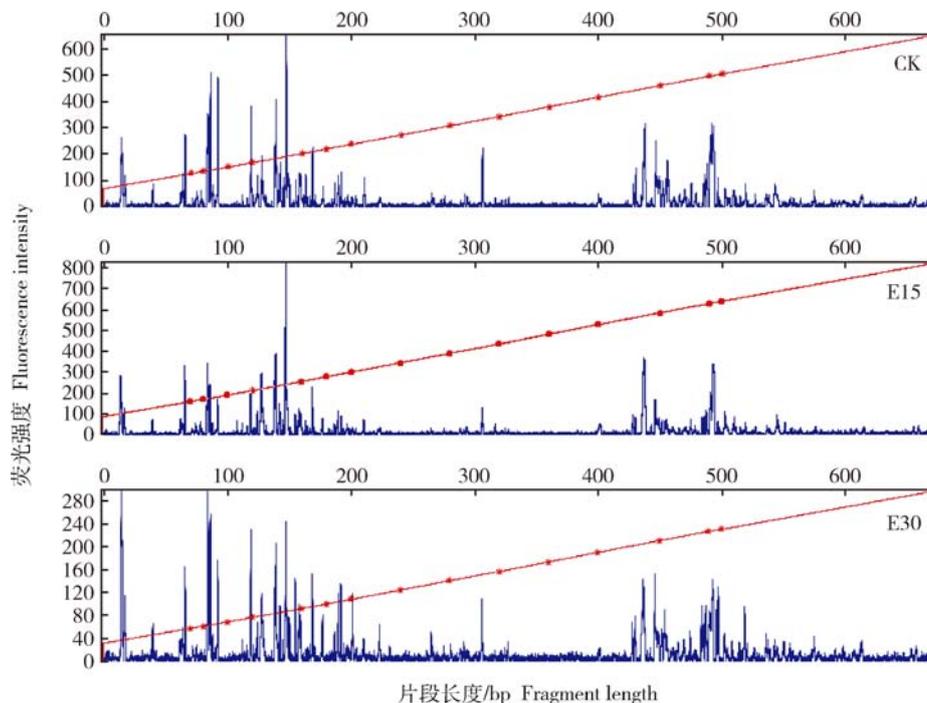


图 1 不同处理土壤细菌群落 *Msp* I 酶切的 T-RFLP 图谱

Fig. 1 T-RFLP profiles produced by the digestion of bacterial community 16S rRNA genes by *Msp* I

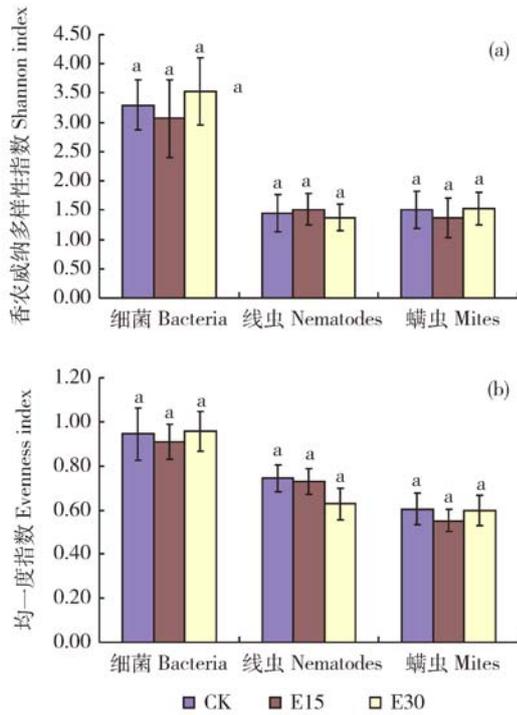


图 2 不同处理对土壤细菌、线虫及螨虫香农威纳多样性指数 (a) 和均一度指数 (b) 的影响

Fig. 2 Shannon Index (a) and Evenness Index (b) of bacteria, nematodes, and mites in different treatments

在所有土样中共鉴定出土壤线虫 7 个科 14 个属,包括 10 属食细菌线虫,1 属食真菌线虫,2 属植食性线虫和 1 属杂食-捕食性线虫(表 3)。其中 *Arcobeloidea* 为对照处理中的优势种,相对比例是 42.6%,*Protorhabditis* 则是接种蚯蚓处理的优势种,分别占 42.0%和 46.0%。不同处理对盐碱土线虫营养类群的影响见图 3(a)。各处理中均以食细菌线虫为优势类群,蚯蚓的接种,进一步扩大了食细菌线虫所占的相对丰度,由对照的 95.8%增加至 100%和 98%,这可能与土壤中微生物量的增加有关^[28]。但不同处理下线虫的香农多样性指数(图 2(a))和均一度指数(图 2(b))没有显著性差异。

在所有土样中共鉴定出土壤螨虫 13 科,包括前气门 2 科,无气门 1 科,甲螨 6 科,中气门 4 科。不同处理的土壤中均以前气门 *Microdispidae* 科为优势种群(表 4)。接种蚯蚓的处理导致土壤中前气门螨虫及甲螨相对丰富度的增加,及无气门螨虫相对丰富度的显著降低(图 3(b))。无气门螨虫能够对土壤环境的变化做出迅速的反应^[29],在养分相对贫瘠的盐碱土中,蚯蚓对有机物质的消耗可能是导致无气门螨虫相对丰富度下降的原因,而前气门螨虫拥有相对更加复杂的食性^[30],则有利于其相对丰富度的增加。接种蚯蚓未导致香农多样性指数(图 2(a))和

表 3 不同处理下观察到的土壤线虫属及其相对丰富度

Table 3 Proportional contribution of various nematode genera to the soil nematode assemblage %

营养类型 Trophic group	科 Family	属 Genera	处理 Treatment			
			CK	E15	E30	
Bacterivores	Cephalobidae	<i>Acrobeles</i>	0.0	1.8	1.2	
		<i>Arcobeloidea</i>	42.6	0.0	0.0	
		<i>Ceroidellus</i>	0.0	2.7	1.4	
		<i>Eucephalobus</i>	0.0	14.0	31.2	
		<i>Acrolobus</i>	6.4	2.4	0.0	
		<i>Heterocephalobellus</i>	0.0	0.0	1.0	
		Rhabditidae	<i>Rhabditis</i>	2.1	4.0	12.0
			<i>Protorhabditis</i>	19.1	42.0	46.0
		Panagrolaimidae	<i>Panagrolaimus</i>	25.5	28.8	5.0
			Diplogasteroidea	<i>Diplogaster</i>	0.0	4.0
Fungivores	Aphelenchidae	<i>Aphelenchus</i>	2.1	0.0	0.0	
Plant parasites	Tylenchidae	<i>Filenchus</i>	2.1	0.0	0.0	
		<i>Basiria</i>	0.0	0.0	1.0	
Omnivores	Dorylaimidae	<i>Dorylaimus</i>	0.0	0.0	1.0	

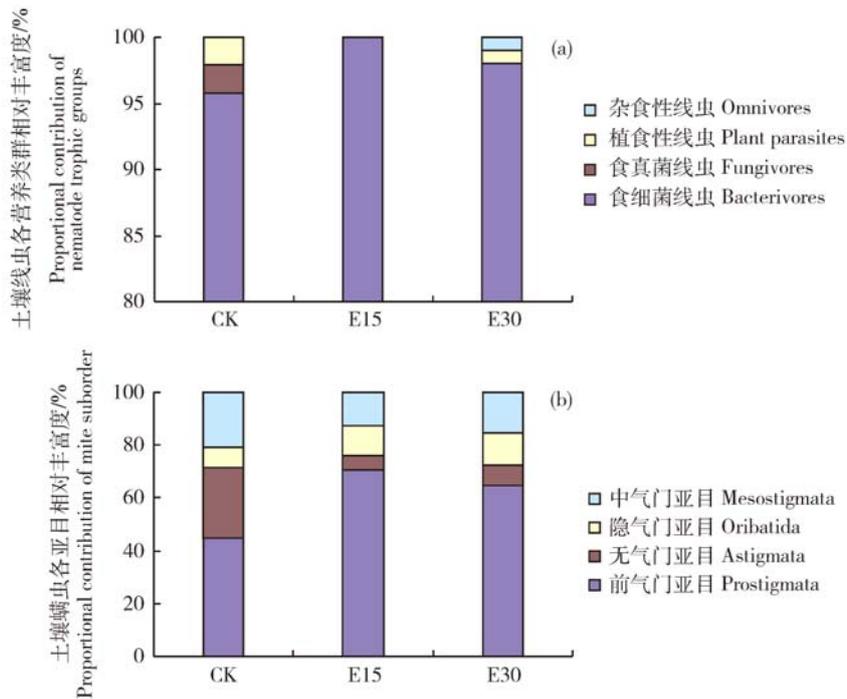


图3 不同处理对土壤线虫各营养类群相对丰富度(a)及土壤螨虫各亚目相对丰富度(b)的影响

Fig. 3 Proportional contribution of nematode trophic groups (a) and mite suborder (b) in different treatments

表4 不同处理下观察到的土壤螨科及其相对丰富度

Table 4 Proportional contribution of various mite families to soil mite assemblage %

亚目 Suborder	科 Family	处理 Treatment		
		CK	E15	E30
Prostigmata	Tarsonemidae	2.4	6.8	5.8
	Microdispidae	42.3	63.9	58.8
Astigmata	Acaridae	26.8	5.4	7.7
Oribatida	Hypochthonioid mites	0.4	0.0	0.8
	Ceratozetes	0.4	1.8	1.3
	Oribatuloid mites	2.8	3.2	3.9
	Nothroid mites	1.6	3.2	3.9
	Oppioid mites	0.8	1.4	1.4
	Suctobelboid mites	1.6	1.8	2.1
	Mesostigmata	Ascidae	19.5	11.1
Mesostigmata	Laelapidae	0.0	0.4	0.8
	Pachylaelapidae	0.4	0.4	0.8
	Uropodidae	0.8	0.7	1.4

均一度指数(图2(b))产生显著性差异。

3 结论

在盐碱土中施用牛粪的同时接种蚯蚓增加了土

壤中速效磷、速效钾的含量,土壤有机质的含量则显著降低。在短期的温室试验中,接种蚯蚓并未显著增加植被的生物量,但增加了土壤微生物量碳、线虫丰富度及螨虫丰富度。接种蚯蚓未显著影响土壤中细菌、线虫及螨虫的多样性指数和均一度指数,但改变了线虫和螨虫的群落结构。

盐碱土大多养分贫瘠,土壤生物也较少。在施用牛粪进行改良的同时接种蚯蚓,能够加快盐碱土中有机物质的分解,增加盐碱土中的速效养分,增加盐碱土中土壤生物的丰富度。在盐碱地中通过接种蚯蚓加强土壤培肥、改善土壤生物结构,可能是巩固盐碱地改良效果、促进盐碱地持续利用的有效方法之一。

参 考 文 献

- [1] 牛东玲,王启基. 盐碱地治理研究进展[J]. 土壤通报, 2002, 33(6): 449-455
- [2] 朱永恒,赵春雨,王宗英,等. 我国土壤动物群落生态学研究综述[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1477-1481
- [3] 王邵军,阮宏华. 土壤生物对地上生物的反饋作用及其机制[J]. 生物多样性, 2008, 16(4): 407-416
- [4] 张卫信,陈迪马,赵灿灿. 蚯蚓在生态系统中的作用[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 142-153

- [5] Macfadyen A. Notes on methods for the extraction of small soil arthropods[J]. *J Anim Ecol*, 1953, 22(1): 65-77
- [6] Krantz G W. A Manual of Acarology [M]. 3rd ed. Oregon: Texas Tech Press, 2009
- [7] Hu C, Qi Y. Effect of compost and chemical fertilizer on soil nematode community in a Chinese maize field[J]. *Eur J Soil Biol*, 2010, 46(3): 230-236
- [8] Yeates G W, Bongers T, Degoede R G M, et al. Feeding-habits in soil nematode families and genera: An outline for soil ecologists[J]. *J Nematol*, 1993, 25(3): 315-331
- [9] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass-C[J]. *Soil Biol Biochem*, 1987, 19(6): 703-707
- [10] Yi H, Kim H J, Kim C G, et al. Using T-RFLP to assess the impact on soil microbial communities by transgenic lines of watermelon rootstock resistant to cucumber green mottle mosaic virus (CGMMV)[J]. *J Plant Biol*, 2009, 52(6): 577-584
- [11] Tiquia S M. Microbial community dynamics in manure composts based on 16S and 18S rDNA T-RFLP profiles[J]. *Environ Technol*, 2005, 26(10): 1101-1113
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [13] 李辉信, 胡锋, 沈其荣, 等. 接种蚯蚓对秸秆还田土壤碳、氮动态和作物产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1637-1641
- [14] 王艳, 鄢海印, 杜亚琴, 等. 蚯蚓堆肥处理对不同物料农化性质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(6): 3416-3418
- [15] Wu Y, Zhang N, Wang J, et al. An integrated crop-vermiculture system for treating organic waste on fields[J]. *Eur J Soil Biol*, 2012, 51: 8-14
- [16] Basker A, Macgregor A N, Kirkman J H. Influence of soil ingestion by earthworms on the availability of potassium in soil: An incubation experiment[J]. *Biol Fert Soils*, 1992, 14(4): 300-303
- [17] Wolters V. Invertebrate control of soil organic matter stability [J]. *Biol Fert Soils*, 2000, 31(1): 1-19
- [18] 申为宝, 杨洪强. 蚯蚓和微生物对土壤养分和重金属的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(3): 760-765
- [19] 徐晓燕, 高晓玲, 郑琪, 等. 不同季节蚯蚓活动对土壤微生物类群数量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(11): 6478-6479
- [20] 杨维来, 赵红. 蚯蚓对温室土壤中不同微生物类群数量的影响[J]. *安徽技术师范学院学报*, 2005, 19(1): 25-28
- [21] Parle J N. A microbiological study of earthworm casts[J]. *J General Microbiol*, 1963, 31(1): 13-22
- [22] 王丹丹, 李辉信, 魏正贵, 等. 蚯蚓和秸秆对铜污染土壤微生物类群和活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 1113-1119
- [23] Tao J, Chen X, Liu M, et al. Earthworms change the abundance and community structure of nematodes and protozoa in a maize residue amended rice-wheat rotation agro-ecosystem[J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, 41(5): 898-904
- [24] Dominguez J, Parmelee R W, Edwards C A. Interactions between *Eisenia andrei* (Oligochaeta) and nematode populations during vermicomposting[J]. *Pedobiologia*, 2003, 47(1): 53-60
- [25] Wurst S. Effects of earthworms on above- and belowground herbivores[J]. *Appl Soil Ecol*, 2010, 45(3): 123-130
- [26] Shapiro D I, Berry E C, Lewis L C. Interactions between nematodes and earthworms: Enhanced dispersal of *steinernema-carpcapsae*[J]. *J Nematol*, 1993, 25(2): 189-192
- [27] Burke J L, Maerz J C, Milanovich J R, et al. Gandhi, Invasion by exotic earthworms alters biodiversity and communities of litter- and soil-dwelling oribatid mites[J]. *Diversity*, 2011, 3(1): 155-175
- [28] Villenave C, Bongers T, Ekschmitt K, et al. Changes in nematode communities after manuring in millet fields in Senegal[J]. *Nematology*, 2003, 5(3): 351-358
- [29] Behan-Pelletier V M. Oribatid mite biodiversity in agroecosystems: Role for bioindication [J]. *Agr Ecosyst Environ*, 1999, 74(1): 411-423
- [30] Cao Z, Han X, Hu C, et al. Changes in the abundance and structure of a soil mite (Acari) community under long-term organic and chemical fertilizer treatments[J]. *Appl Soil Ecol*, 2011, 49: 131-138