有机无机改良剂对滨海盐渍化土壤酶活性和土壤微生物量的影响

李婧男，孙向阳，李素艳
（北京林业大学 林学院，北京 100083）

摘　要：[目的] 为解决滨海地区土壤盐分高和生态环境恶劣的问题，研究发酵园林废弃物与膨润土不同比例配合施用对滨海盐渍土的改良效果。[方法] 通过滨海地区田间试验，采用单独施用 68 kg/m^3 发酵园林废弃物(T_1)、单独施用 15 kg/m^3 膨润土(T_2)和二者混合施用(T_3)的方法，分析不同处理组土壤酶活性、微生物量碳、氮的变化及其与土壤理化性质的相关关系。[结果] 有机无机改良剂混施(T_3)在提高土壤酶活性和微生物量碳、氮方面具有更显著的效果。脲酶、蔗糖酶和脱氢酶分别为对照的 10.1，9.0 和 4.5 倍；土壤微生物量碳、氮分别比对照提高了 24.8%和 78.1%。此外，混施也可以显著改善土壤理化性质，使土壤盐分降低了 62.7%，养分各项指标增幅为 57.2%～101.4%。同有机改良剂处理相比，无机改良剂对土壤酶活和土壤微生物量的影响较小。速效钾与速效氮是影响土壤酶活性与微生物量的主要因子，而含盐量、容重则与土壤酶和微生物量呈负相关，具有抑制作用。[结论] 发酵园林废弃物的加入对土壤酶活性和微生物量的增加起到了决定性的作用。最佳施用处理组为原土混合掺拌 68 kg/m^3 发酵园林废弃物和 15 kg/m^3 膨润土。

关键词：盐渍土；发酵园林废弃物；土壤酶活性；土壤微生物量；冗余分析
文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2019)05-0160-06　　**中图分类号**：S156.2

文献参数：李婧男，孙向阳，李素艳. 有机无机改良剂对滨海盐渍化土壤酶活性和土壤微生物量的影响[J]. 水土保持通报，2019，39(5)：160-165. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.022；Li Jingnan，Sun Xiangyang，Li Suyan. Effects of organic and inorganic amendment on soil enzyme activities and soil microbial biomass in coastal salinized soils[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(5)：160-165.

Effects of Organic and Inorganic Amendment on Soil Enzyme Activities and Soil Microbial Biomass in Coastal Salinized Soils

Li Jingnan，Sun Xiangyang，Li Suyan
(*College of Forestry*，*Beijing Forestry University*，*Beijing* 100083，*China*)

Abstract：[Objective] We investigated the effects of different proportions of garden waste compost and bentonite for improving coastal saline soil. This was in order to formulate suitable amendments for solving the problems of high soil salinity and poor ecological environments in coastal areas. [Methods] Through field trials in a coastal area，changes in soil enzyme activity，microbial biomass carbon，and nitrogen in different treatment groups were measured，and their correlations with soil physical and chemical properties were analyzed. This was achieved by applying 68 kg/m^3 compost garden waste (T_1) alone，15 kg/m^3 bentonite (T_2) alone，and a mixed application of compost garden waste and bentonite (T_3). [Results] The mixed application (T_3) had a more significant effect on increasing soil enzyme activity and microbial biomass carbon and nitrogen. Urease，sucrase，and dehydrogenase activities were 10.1，9.0，and 4.5 times greater than the control，respectively. The soil microbial biomass carbon and nitrogen increased by 24.8% and 78.1%，respectively，compared to the control. In addition，mixed application could significantly improve the soil physical and chemical properties：soil salinity decreased by 62.7% and nutrient indicators increased by 57.2% to 101.4%.

收稿日期：2019-01-11　　**修回日期**：2019-04-10
资助项目：天津市科技支撑计划项目“城市园林碳循环应用研究与示范”(11ZCGYSF02200)
第一作者：李婧男(1983—)，女(汉族)，天津市人，博士研究生，高级工程师，主要从事盐碱地改良利用研究。E-mail：leares@126.com。
通讯作者：孙向阳(1965—)，男(汉族)，河北省沧州人，博士，教授，博士生导师，主要从事土壤生态方向研究。E-mail：sunxy@bjfu.edu.cn。

Inorganic amendments had less effect on soil enzymes and soil microbial biomass compared to organic amendments. The available potassium and available nitrogen were the main factors affecting soil enzymes and microbial biomass, whereas salt content and bulk density were negatively correlated with soil enzymes and microbial biomass. [Conclusion] The addition of garden waste compost played a decisive role in increasing soil enzyme activity and microbial biomass. The best application treatment group was 68 kg/m^3 of garden waste compost with 15 kg/m^3 of bentonite.

Keywords: salinized soils; garden waste compost; soil enzyme activities; soil microbial biomass; redundancy analysis

滨海盐渍土是中国主要的盐渍土类型之一,盐渍化土地面积广泛,滨海地区 15 m 等深线以内的滨海盐土、滩涂和浅海有 1.40×10^7 hm^2,占中国盐渍土总面积的近 40%[1],开发利用土地资源潜力巨大。这些地区的土壤普遍含盐量高、养分贫瘠,并伴有地表附近高度矿化的地下水[2]。高盐度地下水和盐渍土壤阻碍了植物的萌发和生长,导致环境退化[3]。在如此大面积的盐渍化土地上,如何有效地改良治理这些盐碱地资源,并使植物能够周年正常生长发育,对于缓解土地资源紧张,稳步改善滨海地区生态环境具有重要意义。

目前滨海盐渍土改良多采用水利工程配套有机、无机多种改良剂等措施进行综合治理开发[4-6]。园林废弃物因含有大量矿质元素和有机质多经过腐熟发酵后用于盐碱土改良,可增加土壤养分含量,改善土壤通透性。近年来,有关园林废弃物堆肥发酵的研究较多集中在单独施用对土壤理化性质的影响[7-9],但是对配施无机改良剂,研究不同改良剂对盐渍化土壤微生物量及土壤酶活性的作用鲜见报道。

土壤微生物和土壤酶是生态系统中不可缺少的部分,土壤微生物不仅可以促进土壤养分和有机质的循环与转化,还参与土壤有机质的矿化和土壤腐殖质的形成,在生态系统的物质循环和能量流动过程中发挥着重要的作用[10]。土壤酶可以反映土壤微生物的总体活性,两者易受环境中化学、生物及物理等因素影响[11]。本文在天津滨海地区进行有机及无机改良剂改良盐渍土的研究,分析不同改良剂对盐渍化土壤理化性质、土壤酶活性、土壤微生物量的影响及改良后土壤理化性质与土壤酶活性、土壤微生物量之间的相关关系,从土壤生物学角度明确不同改良剂对盐渍土的改良效果,以期为盐渍化土壤改良提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验区域位于天津市黄港水库一库周边的海油大道绿化带(39°07′ N—117°32′E)。该区属暖温带沿海半湿润大陆性和海洋性过渡性季风气候,四季分明。年平均降水量为 516 mm,主要集中在 6 月至 8 月,占年降水总量的 73%以上。多年平均地表水蒸发量为 1 672 mm,蒸发量约为降水量的 3 倍。研究区原多为淤泥回填的鱼塘虾池,土壤源于近海底泥,土质粘重,盐分组成以氯化钠为主,土壤理化性质见表 1。

表 1　滨海盐土理化性质

指标	pH 值	盐分/(g·kg^{-1})	容重/(g·cm^{-3})	总孔隙度/%	有机质/(g·kg^{-1})	速效氮/(mg·kg^{-1})	速效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})
数值	7.62	16.7	1.53	39.37	1.73	41.21	4.53	58.2

1.2　试验设计

田间试验共设 4 个处理:①CK:不添加任何改良剂;②T_1:添加 68 kg/m^3 的园林发酵废弃物;③T_2:添加 15 kg/m^3 的膨润土;④T_3:混合添加 68 kg/m^3 园林发酵废弃物和 15 kg/m^3 膨润土。各处理随机分布,每个处理重复 3 次,共计 12 个小区,每区面积为 54 m^2(6 m×9 m),小区之间设 1 m 宽缓冲带。地下铺设深度 1 m,间距 5 m 的暗管排盐系统。土壤改良剂与 0—40 cm 土壤深层混合后,进行灌溉淋洗以去除土壤中的盐分,淋洗 2 个月后种植香花槐。园林废弃物为天津北林新苑绿化工程有限公司园林修剪的树枝和草屑,粉碎后木屑粒径为 0.5～2 cm,草屑长度为 5～10 cm,将材料的水分含量调节至 50%～60%并将 C/N 比调节至 30 以进行快速发酵,约 40 d 后发酵完全。

1.3　样品采集及测定方法

施用改良剂 1 a 后采用多点混合法采集 0—20 cm 深度的土壤样品,每个小区重复采集 5 个样品,测定电导率、pH 值、容重、孔隙度、土壤养分、土壤酶活性和微生物量碳、氮。采回的土壤样品一部分储存于 4 ℃恒温箱内用于测定土壤微生物和酶活性,另一部分经自然风干后,碾碎过 1 mm 筛,并以水土比 5∶1 制备土壤水溶液,以进行指标测定。

1.3.1　土壤理化性质的测定　土壤容重采用环刀法;

土壤 pH 值和含盐量使用 DZS-706 多参数分析仪测定。有机质用重铬酸钾氧化—外加热法;土壤速效钾用乙酸铵提取火焰光度计法测定,速效磷采用碳酸氢钠提取比色法测定,速效氮使用碱解—扩散法测定[12]。

1.3.2 土壤酶活性的测定 土壤酶的测定参照林先贵[13]的测定方法,其中脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定;脱氢酶活性采用三苯基四氮唑氯化物(TTC)比色法测定;3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶;碱性磷酸酶活性采用苯酚钠比色法测定。

1.3.3 土壤微生物量碳、氮含量的测定 土壤微生物量碳的测定采用氯仿熏蒸—重铬酸钾—浓硫酸外加热法:取新鲜土样,均分为 2 份,其中一份经氯仿熏蒸 24 h,另一份为对照。将两份土样加入 $K_2Cr_2O_7$ 和浓硫酸微沸 2 h 后用 $FeSO_4$ 滴定,样品由橙红色经靛蓝到终点土黄,微生物量碳 BC=2.64×(熏蒸土壤浸提液的有机碳-未熏蒸土壤浸提液的有机碳)[13]。

土壤微生物量氮的测定采用氯仿熏蒸—凯式定氮法:新鲜土样均分为 2 份,其中一份经氯仿熏蒸 24 h,另一份为对照,将两份土样加入 K_2SO_4-$CuSO_4$-Se 混合催化剂和浓硫酸,在高温消化至澄清后放置过夜,次日用凯式定氮仪测定浸提液中的全氮含量,微生物量氮 BN=1.85×(熏蒸土壤浸提液的全氮-未熏蒸土壤浸提液的全氮)[13]。

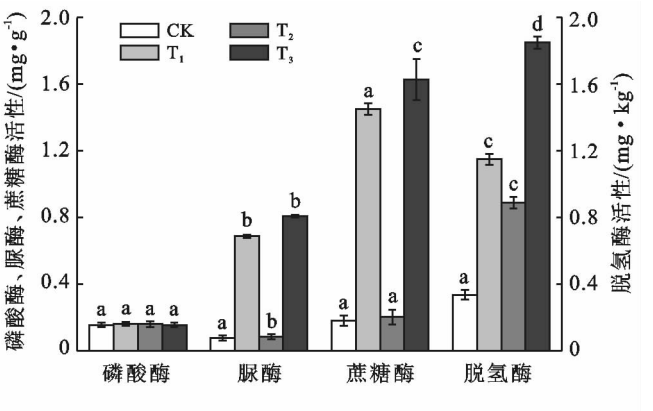
1.4 数据分析

采用 SPSS17.0 进行统计分析,Duncan 新复极差法进行显著性差异分析($p<0.05$),冗余分析及排序图的绘制采用 *R* 语言,图表的绘制采用 Origin Pro 2017。

2 结果与分析

2.1 有机无机改良剂对土壤酶活性的影响

有机无机改良剂对土壤酶活性的影响如图 1 所示,4 组处理的土壤磷酸酶活性没有显著性差异,其活性范围为 0.15~0.16 mg/g。添加了发酵园林废弃物的 T_1 和 T_3 处理组的脲酶分别为 0.69 mg/g 和 0.81 mg/g,是对照组的 8.6 倍和 10.1 倍,显著高于对照。蔗糖酶分别为 1.45 mg/g 和 1.62 mg/g,是对照组的 8.1 倍和 9.0 倍,显著高于对照组。添加了无机改良剂膨润土的处理组(T_2)脲酶和蔗糖酶分别为 0.08 mg/g 和 0.20 mg/g,与对照组没有显著性差异;说明有机质可以显著促进土壤脲酶和蔗糖酶的活性。有机无机改良剂(T_1,T_2 和 T_3)均可以显著促进脱氢酶的活性,其活性分别提高了 2.5,1.6,4.5 倍,混合施用 T_3 组对土壤脱氢酶的促进效果最为明显,显著高于其他处理。



注:使用 Duncan 检验进行显著差异分析,不同的字母表示处理之间差异显著($p<0.05$)。数值为平均数±标准差,$n=15$。CK 为不添加任何改良剂;T_1 为添加 68 kg/m³ 的园林发酵废弃物;T_2 为添加 15 kg/m³ 的膨润土;T_3 为混合添加 68 kg/m³ 园林发酵废弃物和 15 kg/m³ 膨润土。下同。

图 1 土壤磷酸酶、脲酶、蔗糖酶、脱氢酶活性变化

2.2 有机无机改良剂对土壤理化性质的影响

发酵园林废弃物与膨润土对土壤理化性质的影响如表 2 所示。试验区原土 pH 值为 7.62,添加改良材料后 pH 值均略有降低,但差异不显著。添加有机无机改良剂后的各组处理容重分别降低了 13.7%,3.3%和 11.1%;土壤盐分分别降低了 39.0%,41.8%和 62.7%,其中 T_1 和 T_3 组容重和土壤盐分显著低于对照。单独施用园林废弃物可以显著提高土壤养分含量,有机质、速效氮、速效磷和速效钾等各项指标增幅为 29%~56%。单独施用膨润土后土壤养分各项指标增幅较小,分别提高了 2.3%,1.5%,11.5%和8.1%。混合施用 T_3 处理组的养分含量最高,土壤有机质、速效氮、速效磷和速效钾含量分别为对照组的 2.1 倍,2.0 倍,1.8 倍和 1.6 倍,改良效果显著优于其他处理组。

表 2 有机无机改良剂对土壤理化性质的影响

处理组	pH 值	盐分/(g·kg⁻¹)	容重	有机质/(g·kg⁻¹)	速效氮/(mg·kg⁻¹)	速效磷/(mg·kg⁻¹)	速效钾(mg·kg⁻¹)
CK	7.51±0.20^a	10.59±1.09^a	1.53±0.02^a	1.77±0.10^a	39.72±6.51^a	4.00±0.94^a	84.83±8.67^a
T_1	7.60±0.22^a	6.46±1.04^b	1.32±0.04^{bc}	2.22±0.20^b	61.45±8.80^b	6.21±0.97^b	113.15±14.04^b
T_2	7.58±0.31^a	6.16±0.47^b	1.48±0.10^{ab}	1.81±0.20^a	41.18±5.92^a	4.46±0.87^a	91.7±10.38^a
T_3	7.54±0.24^a	3.95±0.74^c	1.36±0.09^c	3.63±0.58^c	80.00±8.79^c	7.12±0.50^c	133.33±12.08^c

注:使用 Duncan 检验进行显著差异分析,不同的字母表示处理之间差异显著($P<0.05$)。数值为平均数±标准差,$n=15$。下同。

2.3　有机无机改良剂对土壤微生物量碳、氮的影响

如图 2 所示,施入发酵园林废弃物与膨润土后,土壤微生物量碳与土壤微生物量氮含量均呈现增加趋势。T_1,T_2,T_3 组土壤微生物量碳分别比对照增加了 18.7%,7.0%和 24.8%,其中 T_3 显著高于其他组处理。添加无机改良剂的 T_2 组土壤微生物量氮为 5.49 mg/kg,比对照略有提高但没有显著性差异。添加了发酵园林废弃物的 T_1 和 T_3 组土壤微生物量氮则分别提高了 62.7%和 78.1%,均显著高于对照。混施组 T_3 的促进作用更明显,土壤微生物量碳和氮显著高于其他组处理。

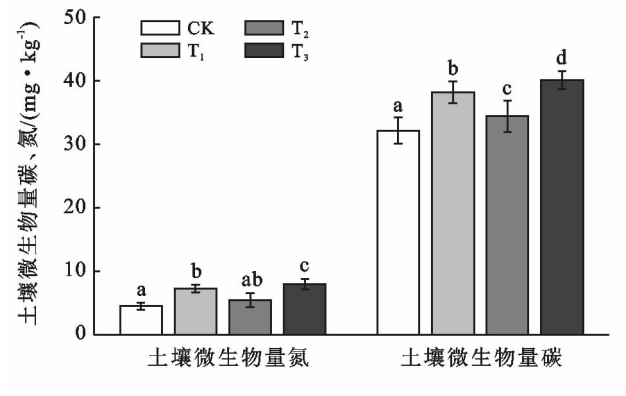


图 2　有机无机改良剂对土壤微生物量碳、氮的影响

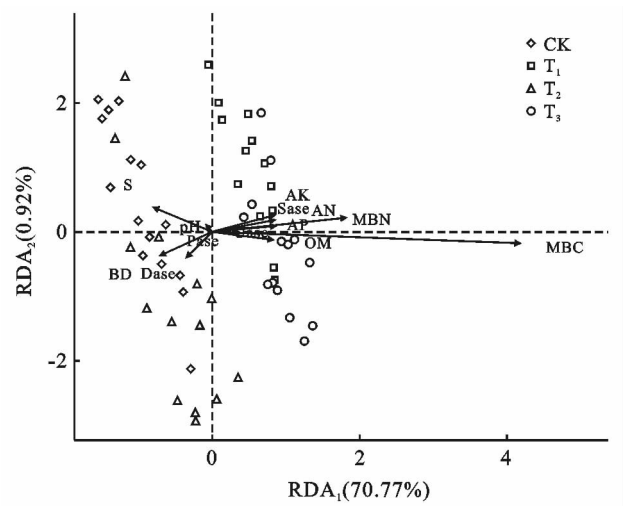
2.4　土壤理化性质与土壤微生物量碳氮和酶活的冗余分析

以土壤酶活性和微生物量碳、氮为响应变量,以土壤理化性质为解释变量,对 4 种处理进行冗余分析,结果如图 3 所示。使用 *R* 语言 Vegan 包 RDA 函数计算得到 RDA_1 和 RDA_2 贡献率分别为 70.77%和 0.92%,说明第 1,第 2 排序轴较好地反映土壤理化性质与土壤微生物量和酶活的关系。表 3 为各样点理化因子与 RDA 排序轴的相关系数,土壤速效磷、速效氮与第 1 排序轴相关系数最大,相关系数分别为 0.885和 0.869,说明第 1 轴主要反映了土壤酶和微生物量对土壤养分的响应;土壤含盐量和容重与第 2 轴的相关系数最大,分别为 0.4 和−0.379,说明盐分特征和土壤容重主要体现在第 2 轴上。不同土壤理化因子对土壤酶和微生物量的影响不同,依据土壤因子特征值排序为:速效钾>速效氮>pH>盐分>速效磷>有机质>容重。

图 3 是土壤理化因子与土壤酶和微生物量碳氮冗余分析二维排序结果。图中箭头连结长度和夹角余弦值代表某个理化因子对土壤酶活性的影响程度,连线越长、余弦值的绝对值越大,说明影响越大;反之则越小[14]。速效氮、速效钾与蔗糖酶和脲酶的箭头连线最长,夹角均较小,可知速效氮、速效钾与蔗糖酶和酶脲的活性呈正相关;容重与脱氢酶箭头连线最长,夹角最小,说明容重对脱氢酶的影响最大;由速效磷与土壤微生物量氮箭头连线与夹角判断速效磷与土壤微生物量氮正相关;有机质与微生物量碳箭头连线最长,夹角最小,二者呈正相关。这一结果与冗余分析中对土壤理化因子按照特征值排序的结果基本一致。

表 3　理化因子 RD 相关系数及理化因子排序

土壤因子	RDA_1	RDA_2	特征值	土壤因子排序
速效氮	0.869	0.249	55.591	2
速效磷	0.885	0.097	5.449	5
速效钾	0.855	0.270	105.760	1
有机质	0.856	−0.131	2.358	6
容　重	−0.734	−0.379	1.420	7
盐　分	−0.823	0.400	6.790	4
pH 值	−0.078	0.112	7.556	3



注:S 为含盐量;BD 为容重;Dase 为脱氢酶;Pase 为磷酸酶;Uase 为脲酶;Sase 为蔗糖酶;AN 为速效氮;AK 为速效钾;AP 为速效磷;MBN 为土壤微生物量氮;MBC 为土壤微生物量碳。

图 3　土壤理化性质与微生物量碳氮和酶活相关性的 RDA 分析

由于 RDA_1 的贡献率为 70.77%,因此各理化性质的向量于 RDA_1 轴的关系可以说明其对于土壤酶活性和微生物量的作用。其中,含盐量、pH 值和容重指向 RDA_1 轴的负向,说明这 3 种指标的增高对土壤酶活性和微生物量具有抑制作用,而有效氮、有效磷、有效钾和有机质 4 种指标则相反。由 RDA 分析可知,不含发酵园林废弃物的 CK 组和 T_2 组集中分布于第二、三象限,而含有发酵园林废弃物的 T_1 组和 T_3 组集中分布于第一、四象限,且两大组间没有重叠,说明发酵园林废弃物的加入对土壤酶活性和微生物量的增加起到了决定性的作用。

3 讨 论

本研究加入发酵园林废弃物可以改善土壤物理性质,通过灌溉淋洗快速脱盐。单独施入膨润土后土壤的容重没有明显改善,但也有一定的脱盐效果,有研究表明膨润土使土壤中水力传导率降低,增加了交换表面的可接近性,因此增强了阳离子交换速率,从而导致阳离子从土壤胶体中的快速释放[15]。此外,添加膨润土可以为阳离子交换提供更大的表面积,这可能有助于更快地淋溶 Na^+[16]。发酵园林废弃物与膨润土混合施用可显著提高土壤养分含量,在降低土壤盐分含量上的效果最显著,可以使土壤中的盐分很容易地被淋洗出来,与王晓洋等[17]的研究结果一致。这是因为有机与无机改良剂施用后活化了土壤养分,增加了土壤的脱盐效果,同时也为无机改良剂发挥阳离子交换作用改良土壤盐渍化创造了有利条件[18]。

土壤酶是土壤中动植物残体、植物根系及土壤微生物所分泌的具有生物活性的物质,参与土壤中几乎所有的有机物质和营养元素的循环,是土壤生物学特征的重要指标[19]。其中蔗糖酶是土壤碳循环转化的关键酶;脲酶用以表征土壤的氮素供应状况[20]。本文研究结果表明,添加有机改良剂可以显著促进土壤脲酶、蔗糖酶与脱氢酶活性,这与徐宪斌等[21]的研究结果一致,微生物在滨海盐渍土中处于一种低营养状态,有机改良剂的加入为微生物提供了新的能源,另一方面发酵园林废弃物本身也带入了大量微生物,进一步提高了土壤微生物包括土壤酶在内的分泌数量[22]。无机改良剂的添加也可以提高土壤蔗糖酶和脱氢酶的活性,原因可能是膨润土通过离子交换作用降低土壤含盐量,从而为微生物生长提供更好的环境,酶活性增加。有研究通过在盐碱土中添加石膏、砂石等无机改良剂后土壤酶活性也得到了提高可以印证本研究的结果[23]。

土壤微生物量是土壤有机质和土壤养分转化与循环的动力,是表征土壤微生物新陈代谢强度,评价土壤质量的重要指标。加入园林废弃物与膨润土后土壤微生物量碳显著提高,特别是发酵园林废弃物与膨润土混合施用后,土壤微生物量碳达到 40.07 mg/kg,显著高于其他处理。这与臧逸飞等[24]的研究结果一致,加入发酵园林废弃物能够使堆肥产品孔隙增大,为微生物提供较好的生长环境,微生物可以通过同化作用将碳、氮素转入微生物体内[25]。单施无机物可以增加土壤的微生物量碳,与有机物混合配施作用更加突出。这是因为在低肥力的农林生态系统中施用有机物可以促进植物和其它生物的生长,增加了植物的根系和根系分泌物,因而促进了土壤微生物的繁殖,提高了微生物生物量[26]。

此外,本研究结果还表明土壤理化性质与酶活性和微生物量有关,本研究中添加有机或无机改良剂后的几组处理磷酸酶活性没有显著性差异,通过冗余分析可知土壤速效磷与第 1 排序轴相关系数最大,主要反映了土壤酶和对土壤养分的响应,对照本文土壤理化性质分析,滨海盐渍土中磷的含量较低是造成磷酸酶活性低的主要原因。

4 结 论

(1) 发酵园林废弃物与膨润土混合施用可显著降低土壤含盐量,改善土壤理化性质,提高土壤酶活性和微生物量碳氮,改良效果明显优于其他处理组。

(2) 速效钾与速效氮是影响土壤酶与微生物量的主要因子,而含盐量、容重则与土壤酶和微生物量呈负相关,具有抑制作用。虽然无机改良剂可以改善土壤理化性质,促进部分土壤酶的活性和微生物量碳,但发酵园林废弃物可以提供更多的氮、磷、钾等养分,降低容重改善土壤结构,显著提高土壤酶的活性和微生物量碳、氮,更有利于土壤生态功能的持续发挥。

[参 考 文 献]

[1] 李建国,濮励杰,朱明,等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报,2012,67(9):1233-1245.

[2] 孙慧,张建锋,许华森,等. 余姚滨海不同盐碱度土壤微生物群落组成及土壤酶活性的变化[J]. 应用生态学报,2016,27(10):3361-3370.

[3] 王卫星,李攻科,侯佳渝,等. 天津滨海地区土壤剖面盐渍化特征及其影响因素[J]. 物探与化探,2015,39(1):172-179.

[4] 李颖,陶军,钞锦龙,等. 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,2014,32(5):154-160.

[5] 南江宽,陈效民,王晓洋,等. 石膏与肥料配施对滨海盐土降盐抑碱的效果研究[J]. 南京农业大学学报,2014,37(4):103-108.

[6] 朱小梅,温祝桂,赵宝泉,等. 种植绿肥对滨海盐渍土养分及盐分动态变化的影响[J]. 西南农业学报,2017,30(8):1894-1899.

[7] 陈浩天,张地方,张宝莉,等. 园林废弃物不同处理方式的环境影响及其产物还田效应[J]. 农业工程学报,2018,34(21):239-244.

[8] 李燕,孙向阳,龚小强. 园林废弃物堆肥替代泥炭用于红掌和鸟巢蕨栽培[J]. 浙江农林大学学报,2015,32(5):736-742.

[9] 刘佳.园林废弃物堆肥化研究及应用[D].天津:天津城市建设学院,2012.
[10] 李凤霞.盐碱地土壤微生物多样性特征研究[M].宁夏:阳光出版社,2015:58.
[11] 田善义,王明伟,成艳红,等.化肥和有机肥长期施用对红壤酶活性的影响[J].生态学报,2017,37(15):4963-4972.
[12] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999:85.
[13] 林先贵.土壤微生物研究原理与方法[M].北京:高新教育出版社,2017:250.
[14] 刘育红,魏卫东,杨元武,等.高寒草甸退化草地植被与土壤因子关系冗余分析[J].西北农业学报,2018,27(4):480-490.
[15] Ghafoor A, Hina K, Murtaza G, Estimation of Gapon exchange coefficient for different textured soils and landforms of Punjab, Pakistan [J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2004, 41(1/2), 25-28.
[16] 赵丽丽,张振华,李陆生.滨海盐渍土和棕壤咸水入渗特征分析[J].水土保持通报,2013,33(3):44-48,117.
[17] 王晓洋,陈效民,李孝良,等.不同改良剂对滨海盐渍土水盐特性的影响[J].水土保持通报,2013,33(1):261-264.
[18] 王晓洋,陈效民,李孝良,刘祖香.不同改良剂与石膏配施对滨海盐渍土的改良效果研究[J].水土保持通报,2012,32(3):128-132.
[19] 解丽娜,贡璐,朱美玲,等.塔里木盆地南缘绿洲土壤酶活性与理化因子相关性[J].环境科学研究,2014,27(11):1306-1313.
[20] 解雪峰,濮励杰,王琪琪,等.滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系[J].环境科学,2018,39(3):1404-1412.
[21] 徐宪斌.蚯蚓粪配施化肥对玉米根际土壤生物学特征的影响[J].水土保持通报,2017,37(1):78-82.
[22] 何瑞成,吴景贵.有机物料对原生盐碱地土壤生物学性质的影响[J].土壤学报,2018,55(3):774-782.
[23] Shi Shaohua, Tian Lei, Nasir Fahad, et al. Response of microbial communities and enzyme activities to amendments in saline-alkaline soils[J]. Applied Soil Ecology, 2019,135:16-24.
[24] 臧逸飞,郝明德,张丽琼,等.26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J].生态学报,2015,35(5):1445-1451.
[25] 景宇鹏,李跃进,姚一萍,等.盐渍化土壤酶活性及其与微生物、理化因子的关系[J].中国农业科技导报,2016,18(2):128-138.
[26] 陶磊,褚贵新,刘涛,等.有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J].生态学报,2014,34(21):6137-6146.

(上接第 159 页)

[29] Fan M X, Mac Kenzie A F. Interaction of urea with triple superphosphate in a simulated fertilizer band[J]. Fertilizer Research, 1993,36(1):35-44.
[30] 张秋英,刘晓冰,金剑,等.水肥耦合对大豆光合特性及产量品质的影响[J].干旱地区农业研究,2003,21(1):47-50.
[31] 任爱霞,孙敏,王培如,等.深松蓄水和施磷对旱地小麦产量和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2017,50(19):3678-3689.
[32] 李开峰,张富仓,祁有玲,等.根区水肥空间耦合对冬小麦生长及产量的影响[J].应用生态学报,2010,21(12):3154-3160.
[33] Gross K L. A comparison of methods for estimating seed numbers in the soil[J]. Journal of Ecology, 1990, 78(4):1079-1093.
[34] Viets F G. Water deficits and nutrient availability// Kozlowsk T T(ed). Water Deficits and Plant Growth [M]. New York: Academic Press,1972.
[35] 华元刚,陈秋波,林钊沐,等.水肥耦合对橡胶树产胶量的影响[J].应用生态学报,2008,19(6):1211-1216.
[36] 张富仓,高月,焦婉如,等.水肥供应对榆林沙土马铃薯生长和水肥利用效率的影响[J].农业机械学报,2017,48(3):270-278.
[37] Thompson T, Doerge T A, Godin R E. Nitrogen and water interactions in subsurface drip-irrigated cauliflower(Ⅱ): Agronomic, economic, and environmental outcomes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(1):412-418.
[38] Yadav R S, Sharwa R K, Pandey U K, et al. Effect of various water potential treatment on nitrate reductase activity in wheat genotypes[J]. Agricultural Science Digest, 1998,18(2):73-75.