

张子怡, 王学虎, 苑莹, 等. 腐植酸与阿氏芽孢杆菌配施对新疆盐碱土改良效果研究[J]. 山西农业科学, 2025, 53(3):68-75.
ZHANG Z Y, WANG X H, YUAN Y, et al. Improvement effect of combined application of humic acid and *Bacillus aryabhattai* on saline alkali soil in Xinjiang[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(3):68-75.

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2025.03.08

腐植酸与阿氏芽孢杆菌配施对新疆盐碱土改良效果研究

张子怡¹, 王学虎², 苑莹¹, 沈志峰¹, 史瑞涛¹, 黄志浩²

(1.河北萌帮生物科技有限公司, 河北 邢台 054000; 2.河北萌帮水溶肥料股份有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘要:为了改善新疆巴州地区土壤盐碱化问题, 探究合适的调控方法, 研究分析腐植酸与微生物菌剂对盐碱地的改良效果, 试验设置4个施肥处理, 即常规用肥(15-15-15复合肥 750 kg/hm², CK)、常规用肥+微生物菌肥(15-15-15复合肥 750 kg/hm²+微生物菌肥 75 kg/hm², T1)、常规用肥+腐植酸(15-15-15复合肥 750 kg/hm²+腐植酸 150 kg/hm², T2)、常规用肥+微生物菌肥+腐植酸(15-15-15复合肥 750 kg/hm²+微生物菌肥 75 kg/hm²+腐植酸 150 kg/hm², T3), 测定不同土层的理化性质、土壤酶活性及微生物数量。结果表明, 常规用肥+微生物菌肥+腐植酸(T3)处理对土壤的改良效果最为显著, 与CK相比, 该处理下0~20 cm土层中全氮含量、有效磷含量、速效钾含量、有机质含量、蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化氢酶活性、碱性磷酸酶活性以及微生物总量分别提高了15.9%、42.6%、45.1%、79.0%、37.6%、43.9%、118.3%、74.4%、136.7%; pH、EC、容重分别降低了11.7%、14.2%、10.9%; 20~40 cm土层与0~20 cm土层各指标相比, 土壤肥力、土壤酶活性、微生物量以及土壤物理性质改良效果略低。相关性分析结果表明, 土壤肥力各指标与土壤微生物量、酶活性呈正相关, 与土壤pH值、EC值、容重呈负相关。综上, 腐植酸和微生物菌肥配施对0~20 cm与20~40 cm土壤改善效果较佳, 是改良盐碱土壤的有效手段之一。

关键词:盐碱地; 土壤改良; 土壤肥力; 腐植酸; 微生物菌剂

中图分类号: S156.4 文献标识码: A 文章编号: 1002-2481(2025)03-0068-08

Improvement Effect of Combined Application of Humic Acid and *Bacillus aryabhattai* on Saline Alkali Soil in Xinjiang

ZHANG Ziyi¹, WANG Xuehu², YUAN Ying¹, SHEN Zhifeng¹, SHI Ruitao¹, HUANG Zhihao²

(1. Hebei Monband Biotechnology Co., Ltd., Xingtai 054000, China;

2. Hebei Monband Water Soluble Fertilizer Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: To improve the soil salinization and alkalization problem in the Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture of Xinjiang, and to explore appropriate control methods, in this study, the improvement effects of humic acid and microbial agents on saline-alkali soil were studied and analyzed. Four fertilization treatments were set up: conventional fertilizer(CK, 15-15-15 compound fertilizer 750 kg/ha), conventional fertilizer+microbial fertilizer(T1, 15-15-15 compound fertilizer 750 kg/ha+microbial fertilizer 75 kg/ha), conventional fertilizer+humic acid(T2, 15-15-15 compound fertilizer 750 kg/ha+humic acid 150 kg/ha), and conventional fertilizer+microbial fertilizer+humic acid(T3, 15-15-15 compound fertilizer 750 kg/ha+microbial fertilizer 75 kg/ha+humic acid 150 kg/ha). The physical and chemical properties, soil enzyme activity, and microbial count of different soil layers were determined. The results showed that the treatment of conventional fertilizer+microbial fertilizer+humic acid(T3) had the most significant improvement effect on soil. Compared with CK, the nitrogen content, available phosphorus content, available potassium content, organic matter content, the activity of sucrase, urease, catalase and alkaline phosphatase, and total microbial quantity in the 0-20 cm soil layer increased by 15.9%, 42.6%, 45.1%, 79.0%, 37.6%, 43.9%, 118.3%, 74.4%, and 136.7% respectively. pH, EC, and bulk density decreased by 11.7%, 14.2%, and 10.9% respectively. Compared with the indexes in the 0-20 cm soil layer, the improvement effects of soil fertility, soil enzyme activity, microbial biomass, and soil physical properties in the 20-40 cm soil layer were slightly lower. Correlation analysis

收稿日期: 2024-04-03

基金项目: 石家庄市厅市会商专项(225490590595A)

作者简介: 张子怡, 助理农艺师, 硕士, 主要从事新型肥料研发与应用研究, E-mail: 2630598794@qq.com

showed that each index of soil fertility was positively correlated with soil microbial biomass and enzyme activity, and negatively correlated with soil pH value, EC value and bulk density. In conclusion, the combined application of humic acid and microbial fertilizer had the best improvement effect on the 0–20 cm and 20–40 cm soil, and it was one of the effective means to improve saline-alkali soil.

Keywords: saline alkali land; soil improvement; soil fertility; humic acid; microbial inoculum

土壤盐碱化已成为影响全球农业和粮食安全的一个重大问题,它会降低土壤的理化性质和生物性质,减少作物产量,影响粮食安全^[1]。据报道,全球有超过8亿hm²土地受到盐碱化影响,占世界陆地总面积的6%,对农业生产构成巨大挑战^[2]。土壤溶液中盐浓度过高,促使钠离子分离和黏土颗粒膨胀,导致土壤结构恶化以及渗透系数和孔隙度下降^[3]。分散的土壤颗粒阻碍了土壤中水和空气的流动,填充了土壤的孔洞和裂缝,上层土壤膨胀吸水,从而使土壤结构分解、土壤养分流失^[4]。此外,土壤盐碱化会对微生物群落结构产生不利影响,降低土壤酶活性,导致植物对土壤营养的吸收能力降低,最终影响植物的生长发育^[5-7]。因此,合理开发、改善与利用盐碱地资源,对保持耕地资源平衡、保障粮食安全具有重要意义。

近年来,腐植酸作为改善土壤质量和维持作物生产力的潜在方法,受到越来越多的关注。腐植酸是腐殖质的主要成分,主要来源于微生物对植物和动物残留物的降解^[8-9]。NASIR等^[10]研究发现,腐植酸作为一种天然的有机物质,在一定程度上能提高土壤结构的稳定性。聂朝阳^[11]研究表明,腐植酸拥有较为稳定的碳形态,不仅对土壤微生物量具有重要调节作用,而且可以提高土壤的酶活性。通过土样筛选和序列分析,阿氏芽孢杆菌MB35-5具有较强的解硅能力,繁殖能力强,可以增加土壤中有效硅含量,改善土壤理化性质^[12],增强作物对逆境的抵抗能力^[13]。目前,不同种类菌肥和腐植酸配施对土壤改良研究已有报道,但针对解硅性菌肥与腐植酸配施对新疆荒漠化盐碱地的

研究较少。

本试验在前人研究基础上,探究阿氏芽孢杆菌MB35-5复配腐植酸对盐碱土壤理化性质、微生物总量以及土壤酶活性的影响,探索该地区微生物菌剂复配腐植酸的施用效果,以期为该地区盐碱土的改良提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试作物为玉米(郑单958),从当地市场购买。复合肥(15-15-15)由史丹利农业集团股份有限公司生产。腐植酸悬浮液(有机质 ≥ 120 g/L,腐植酸 ≥ 150 g/L,黄腐酸 ≥ 20 g/L)、微生物菌肥(阿氏芽孢杆菌有效活菌数 ≥ 2.0 亿个/g,含国家专利(ZL201910161378.2、ZL202110320433.5))均由河北萌帮生物科技有限公司研发部提供。

1.2 试验方法

试验于新疆巴音郭楞蒙古自治州轮台县(42°06'N,84°16'E)进行。0~20 cm土壤全氮、有效磷、速效钾、有机质含量分别为477.54、62.78、176.34 mg/kg和7.54 g/kg,pH值为8.55,EC值为2.79 mS/cm。试验共设置4个处理(表1),即常规用肥(CK)、常规用肥+微生物菌肥(T1)、常规用肥+腐植酸(T2)、常规用肥+微生物菌肥+腐植酸(T3)。小区面积20 m²(10 m \times 2 m),每个处理设置3次重复。玉米播种前,将各处理复合肥和微生物菌肥施入土壤中,深翻混合均匀。玉米播种后,腐植酸悬浮液随水施入土壤。其他田间管理按照当地管理措施统一进行。

表1 盐碱地土壤改良试验底肥施用量

Tab.1 Application amount of base fertilizer in saline alkali soil improvement experiment kg/hm²

处理 Treatment	复合肥(15-15-15) Compound fertilizer	微生物菌肥 Microbial fertilizer	腐植酸 Humic acid
CK 复合肥	750	0	0
T1 复合肥+微生物菌肥	750	75	0
T2 复合肥+腐植酸	750	0	150
T3 复合肥+微生物菌肥+腐植酸	750	75	150

1.3 土壤样品采集及测定

玉米成熟期,采用5点取样法,使用取土器和环刀分别采集0~20、20~40 cm深的根际土壤,取部分鲜土保存于-4℃冰箱中,用来检测土壤微生物群落结构;其余土风干后研磨过1.10 mm筛,测定土壤酶活性及土壤理化性质。土壤全氮、有效磷、速效钾、有机质含量均采用常规方法测定^[14]。土壤pH值采用pH计法测定,土壤EC值采用电导仪法测定。土壤容重、孔隙度均采用环刀法测定^[15]。土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性分别采用苯酚钠-次氯酸钠比色法、高锰酸钾容量法、3,5-二硝基水杨酸比色法和磷酸二钠比色法测定^[16]。土壤真菌、细菌和放线菌测定采用平板计数法^[17]。

1.4 数据分析

采用Excel 2020进行数据整理和IBM SPSS Statistics 20.0进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 增施腐植酸、微生物菌肥对土壤肥力的影响

从表2可以看出,不同施肥条件下,与CK相比,各处理均提高了土壤中的养分含量。0~20 cm土层中,T1处理对全氮、有效磷以及有机质含量影响不显著,T2、T3处理中全氮含量分别较CK显著提高了8.9%、16.0% ($P<0.05$),有效磷含量分别较CK显著提高了9.8%、27.8% ($P<0.05$),有机质含量分别较CK显著提高了47.4%、79.1% ($P<0.05$)。与CK相比,20~40 cm土层中,T1、T2、T3处理中全氮含量分别显著提高了3.2%、7.5%、10.1% ($P<0.05$),有效磷含量分别显著提高了8.8%、9.8%和27.8% ($P<0.05$),T2、T3处理的速效钾含量分别显著提高了32.1%、43.2% ($P<0.05$),有机质含量分别显著提高了47.2%、70.2% ($P<0.05$)。

表2 增施腐植酸、微生物菌肥对土壤养分含量的影响

Tab.2 The effect of increased application of humic acid and microbial fertilizer on soil nutrient content

土层深度/cm Depth	处理 Treatment	全氮含量/(mg/kg) Total nitrogen content	有效磷含量/(mg/kg) Available phosphorus content	速效钾含量/(mg/kg) Available potassium content	有机质含量/(g/kg) Organic matter content
0~20	CK	689.82±21.73c	95.59±13.47c	235.58±9.17c	10.51±0.49b
	T1	719.11±26.60c	102.39±11.35bc	255.76±16.34b	10.80±1.50b
	T2	751.14±23.94b	119.34±29.71ab	295.95±6.16b	15.49±0.81a
	T3	799.77±25.71a	136.34±18.34a	343.69±12.65a	18.82±0.99a
20~40	CK	668.45±12.05d	75.74±2.91c	212.94±16.66c	5.04±0.44c
	T1	689.74±22.35c	82.41±4.04b	233.20±12.16c	5.99±1.28c
	T2	718.26±15.37b	83.17±5.87b	281.36±19.34ab	7.42±0.30b
	T3	736.07±24.63a	96.78±7.94a	304.83±21.15a	8.58±2.36a

注:同列中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicated significant differences among different treatments ($P<0.05$).

2.2 增施腐植酸、微生物菌肥对土壤物理性质的影响

从图1可以看出,与CK相比,各处理均可降低土壤pH值,而T3处理的土壤pH值明显降低,0~20 cm土层中降低了1个单位,20~40 cm土层中降低了0.75个单位。各处理中土壤的EC值均呈下降趋势,T3处理2种土层EC值下降幅度最大,分别下降了12.4%、8.7%。T1、T2、T3处理均可以降低土壤容重,提高土壤孔隙度。0~20 cm土层中,T3处理的土壤容重最小,较CK下降10.9%,土壤孔隙度较CK增加23.1%;20~40 cm土层中,与CK相比,T3处理的土壤容重、孔隙度改善效果最

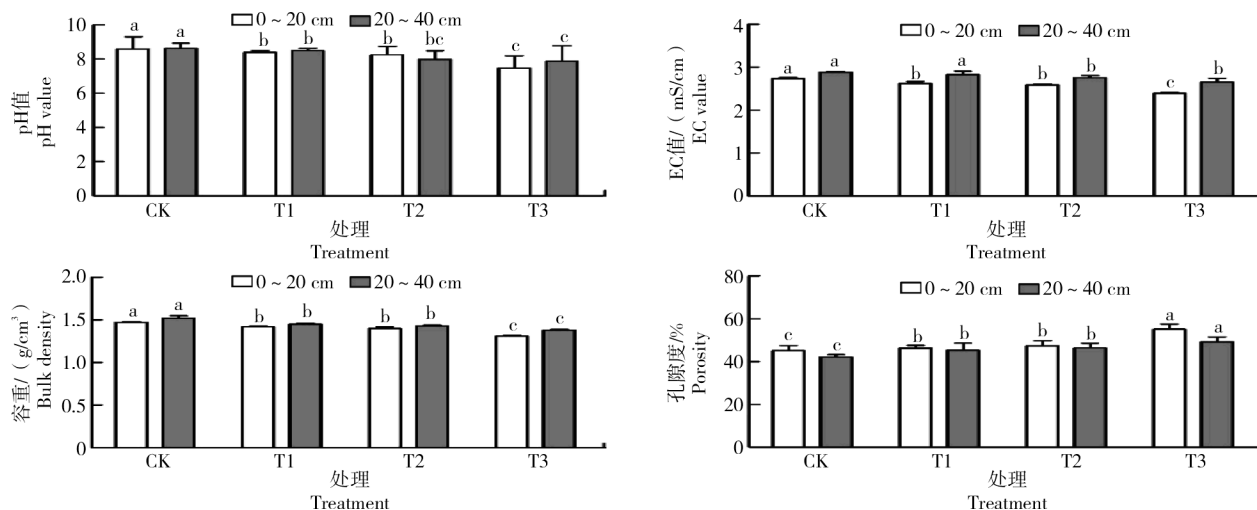
为明显,容重显著降低9.2% ($P<0.05$),土壤孔隙度增加了16.6% ($P<0.05$)。

2.3 增施腐植酸、微生物菌肥对土壤酶活性的影响

由图2可知,不同施肥条件下,相较于CK,各处理均提高了土壤酶活性。0~20 cm土层中,与CK相比,T1、T2、T3处理的蔗糖酶活性分别显著提高了10.6%、32.1%、37.6% ($P<0.05$),脲酶活性分别显著提高了16.1%、18.3%、43.95% ($P<0.05$),磷酸酶活性分别显著提高了22.4%、51.1%、74.4% ($P<0.05$),T1处理对提高过氧化氢酶活性差异不显著,T2、T3处理的过氧化氢酶活性分别显著提高了80.1%、118.3% ($P<0.05$)。20~40 cm

土层中,与CK相比,T1、T2、T3处理的蔗糖酶活性分别显著提高了10.6%、21.9%、33.2% ($P < 0.05$),脲酶活性分别显著提高了12.2%、17.2%、25.1% ($P < 0.05$),磷酸酶活性分别显著提高了

12.9%、16.5%、26.4% ($P < 0.05$),T1处理对提高过氧化氢酶活性差异不显著,T2、T3处理的过氧化氢酶活性分别显著提高了41.4%、60.5% ($P < 0.05$)。



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下图同

Different lowercase letters indicated significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same as below

图1 增施腐植酸、微生物菌肥对土壤物理性质的影响

Fig.1 The effect of increased application of humic acid and microbial fertilizer on soil physical properties

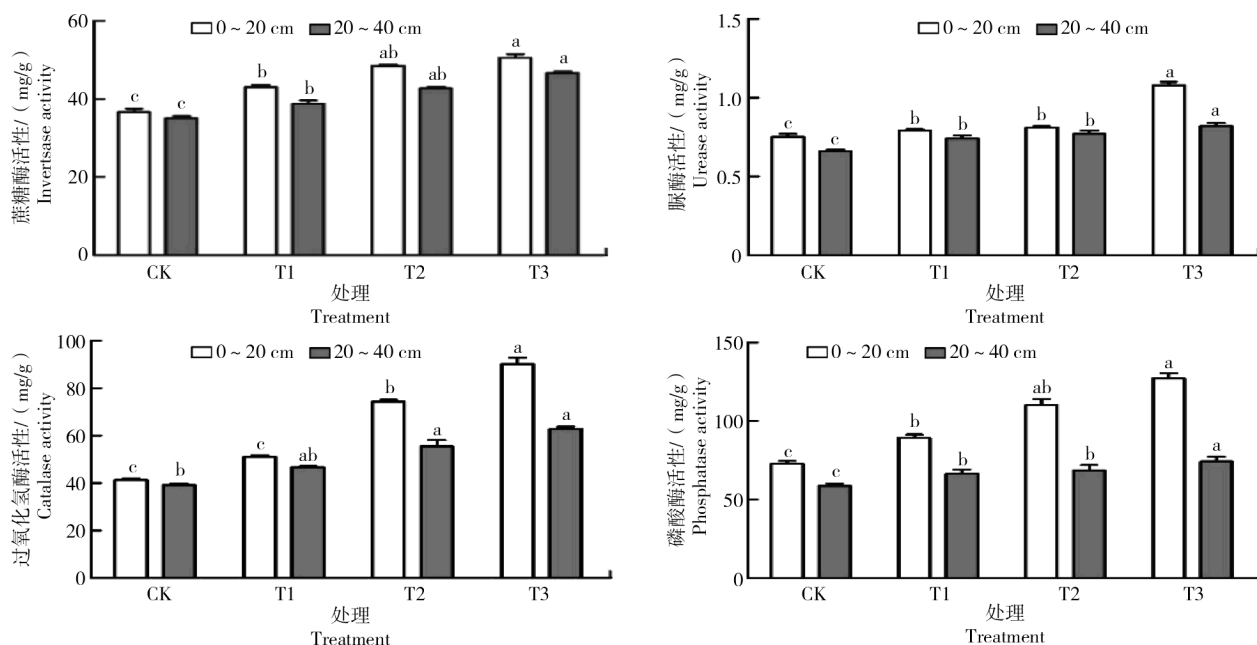


图2 增施腐植酸、微生物菌肥对土壤酶活性的影响

Fig.2 The effect of increased application of humic acid and microbial fertilizer on soil enzyme activity

2.4 增施腐植酸、微生物菌肥对土壤微生物的影响

从图3可以看出,不同施肥条件下细菌、真菌、放线菌以及微生物总量呈上升趋势,与CK相比,0~20 cm土层中细菌、真菌、放线菌及微生物总量

分别提高了69.8%、137.7%、41.7%、136.7%;20~40 cm土层的细菌、真菌、放线菌及微生物总量分别提高了83.3%、51.6%、66.7%、52.5%。其中,T3处理对真菌、细菌、放线菌以及微生物总量影响最

大,由此可见,腐植酸、微生物菌肥以及复合肥的混施给微生物群落的繁殖创造了良好的条件,从

而使数量趋于增加。

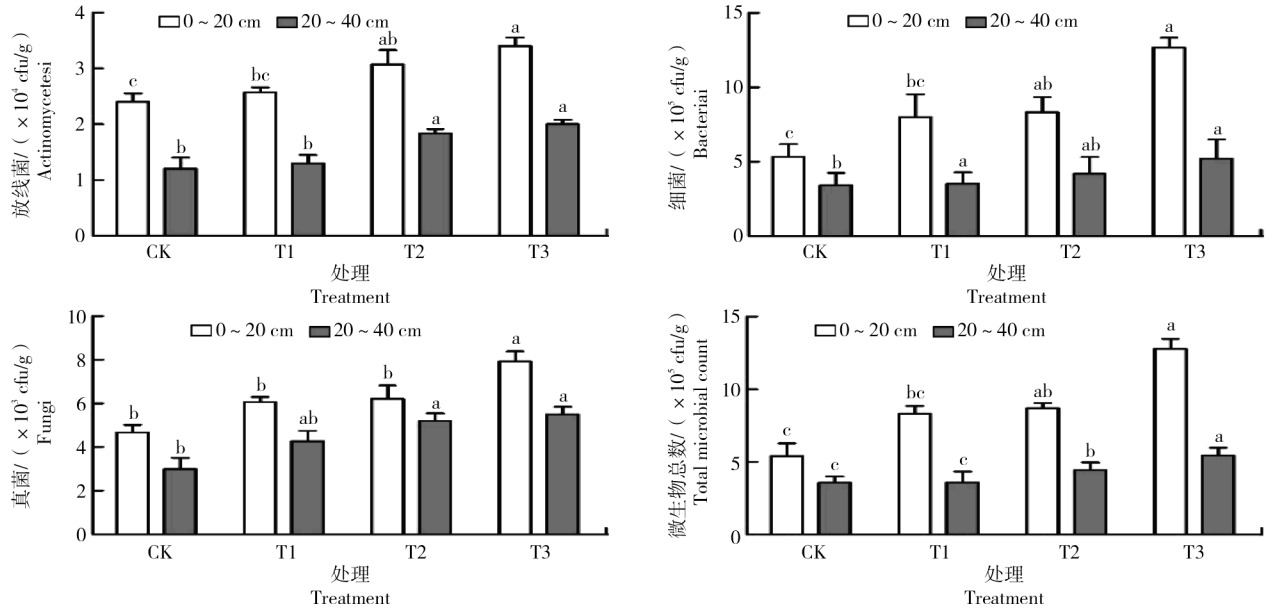


图3 增施腐植酸、微生物菌肥对土壤微生物的影响

Fig.3 The effect of increased the application of humic acid and microbial fertilizer on soil microorganisms

2.5 不同施肥条件下土壤物理性质、土壤肥力、酶活性和微生物总量之间相关性分析

壤酶活性以及土壤微生物之间相关性分析结果如表3所示。

不同施肥条件下土壤物理性质、土壤肥力、土

表3 不同施肥条件下土壤物理性质、土壤肥力、土壤酶活性以及土壤微生物总量之间相关性分析

Tab.3 Correlation analysis between soil physical properties, soil fertility, soil enzyme activity and soil microorganisms under different fertilization conditions

因素	Element	χ_1	χ_2	χ_3	χ_4	χ_5	χ_6	χ_7	χ_8	χ_9	χ_{10}	χ_{11}	χ_{12}	χ_{13}
χ_1		1												
χ_2		0.997**	1											
χ_3		0.996**	0.999**	1										
χ_4		0.997**	0.997**	0.993**	1									
χ_5		-0.959*	-0.949	-0.958*	-0.933	1								
χ_6		-0.951*	-0.955*	-0.965*	-0.930	0.985*	1							
χ_7		-0.960*	-0.965*	-0.974*	-0.942	0.984*	0.999**	1						
χ_8		0.943	0.926	0.937	0.913	-0.996**	-0.967*	-0.965*	1					
χ_9		0.900	0.932	0.931	0.915	-0.819	-0.886	-0.899	0.768	1				
χ_{10}		0.986*	0.908	0.921	0.891	-0.993**	-0.966*	-0.961*	0.998**	0.750	1			
χ_{11}		0.972*	0.988*	0.987*	0.977*	-0.914	-0.946	-0.957*	0.879	0.977*	0.862	1		
χ_{12}		0.925	0.995**	0.992**	0.993**	-0.915	-0.932	-0.945	0.886	0.957*	0.864	0.994**	1	
χ_{13}		0.931	0.942	0.953*	0.911	-0.968*	-0.997**	-0.995**	0.945	0.901	0.945	0.946	0.923	1

注:*.在0.05水平上显著相关;**.在0.01水平上极显著相关。 χ_1 .全氮含量; χ_2 .有机磷含量; χ_3 .速效钾含量; χ_4 .有机质含量; χ_5 .pH; χ_6 .EC; χ_7 .容重; χ_8 .孔隙度; χ_9 .蔗糖酶; χ_{10} .脲酶; χ_{11} .碱性磷酸酶; χ_{12} .过氧化氢酶; χ_{13} .微生物总量。

Note: *. significant correlation at the 0.05 level. **. extremely significant correlation at the 0.01 level. χ_1 . Total nitrogen content; χ_2 . Organic phosphorus content; χ_3 . Content of available potassium; χ_4 . Organic matter content; χ_5 . pH; χ_6 . EC; χ_7 . Bulk density; χ_8 . Porosity; χ_9 . Sucrase; χ_{10} . Urease; χ_{11} . Alkaline phosphatase; χ_{12} . Catalase; χ_{13} . Total microbial count.

从表3可以看出,全氮含量、有效磷含量、速效钾含量以及有机质含量四者之间呈显著正相关($P<0.05$)。全氮含量与脲酶、碱性磷酸酶活性之间呈显著正相关($P<0.05$);有效磷含量与过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性呈显著正相关($P<0.05$);速效钾含量与碱性磷酸酶活性、过氧化氢酶活性、微生物总量呈显著正相关($P<0.05$);有机质含量与碱性磷酸酶、过氧化氢酶活性呈显著正相关($P<0.05$)。pH值与全氮含量、速效钾含量、微生物总量呈显著负相关($P<0.05$),与孔隙度与脲酶活性呈显著负相关($P<0.05$);EC与全氮含量、有效磷含量、速效钾含量、孔隙度、脲酶活性、微生物总量呈显著负相关($P<0.05$);容重与全氮含量、有效磷含量、速效钾含量、微生物总量、孔隙度、脲酶活性、碱性磷酸酶含量、微生物总量呈显著负相关($P<0.05$)。

3 结论与讨论

随着化肥的长期施用,土壤板结、环境污染等一系列问题加剧,化肥减施、肥料利用率提高已成为当前重要的研究方向^[18]。大量研究表明,生物炭和微生物菌肥混合使用,可以降低养分的损失,提高土壤的供肥能力^[19];腐植酸复合微生物菌肥可以提高土壤中有机质和各种营养元素含量,促进中微量元素的吸收利用^[20]。李鹏程等^[19]研究发现,与单施相比,腐植酸和复合微生物菌剂联合施用,可显著改善土壤理化性质,降低土壤pH值,提高土壤养分含量。因此,肥料配施可降低土壤盐含量、提高养分利用率,消除单施的不利影响,对改善盐碱沙化土壤理化性质起到互补提升作用^[21-22]。

本研究中,不同施肥条件下,土壤容重和土壤孔隙度差异明显,其中腐植酸、微生物菌剂处理,对0~20 cm土层的容重和孔隙度改善最为明显,同时,增施腐植酸和微生物菌肥后土壤中大量元素和有机质含量显著增加。国内外学者^[23-25]研究发现,腐植酸可以促进团粒体的形成,从而改善土壤结构,降低土壤容重,同时降低氮释放速度,提高氮肥利用率;将固定在土壤中的磷转化为磷酸铵和磷酸,活化磷酸盐;增强钾素营养,减少养分损失。而生物菌肥兼具微生物肥料和有机肥的双重效应,阿氏芽孢杆菌MB35-5具有较强的解硅能力,硅元素能够与土壤中的铝、铁等离子结合,形成硅铝酸盐等稳定化合物,并且减少土壤黏性和

胶结性,提高土壤的透气、保水性,有利于培肥土壤,提高土壤酶活性,改善土壤微生物群落结构^[26]。由此可见,腐植酸与微生物菌肥配合使用可以改善土壤结构,抑制土壤中的盐分向表层迁移,降低土壤的EC和pH值^[27],同时,增强作物吸水吸肥能力,缓解因土壤盐碱化而造成土壤养分流失,促进增产和增效作用。

土壤各级微生物承载着土壤养分分解与释放转化器的重要角色,也是土壤物质交流和能量交流的主要受体,但土壤盐碱化会影响微生物的正常分解与合成,抑制微生物繁殖^[28-29]。施用生物有机肥作为改良土壤的有效措施已得到普遍认可。有研究表明,生物菌肥可以提高有机物料的腐熟分解转化效率,增加土壤微生物生物量和酶活性^[30]。腐植酸淋洗可以提高微生物菌群丰度,改善微生物群落结构^[31],提高土壤固氮菌、磷细菌和脲酶的活性,促进土壤生物活性和养分吸收^[32]。本试验中,腐植酸及微生物菌剂配施,可以显著增加0~20 cm土层真菌、细菌、放线菌、微生物总量以及土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶的活性。腐植酸与微生物菌肥配合使用,土壤中微生物菌落多样性和丰富度趋于增加,同时促进土壤酶的分解与转化。此结果与王相等^[33]、张蕾等^[34]研究效果一致。

本研究通过对新疆巴州地区荒漠化盐碱地增施微生物菌剂、腐植酸,检测不同土层的理化性质、土壤酶活性、土壤肥力、微生物数量以及各指标相关性分析表明,与单施相比,腐植酸和微生物菌肥的联合施用,可以改善盐碱地土壤理化性质及微生物群落结构,对土壤中有机质、有效磷和速效钾有较好的提升作用,调节土壤养分和电导率,起到互补提升作用。综上所述,腐植酸和阿氏芽孢杆菌配施可作为减轻土壤盐碱化的最有效途径之一,但同时也存在生物有机肥施肥量相对较大、耗费人工成本多等问题,因此,合理安排施用量、优化配施比例与施用方法仍有待深入研究。

参考文献:

- [1] 赵维彬,唐丽,王松,等.两种生物炭对滨海盐碱土的改良效果[J].生态环境学报,2023,32(4):678-686.
ZHAO W B, TANG L, WANG S, et al. Improvement effect of two biochars on coastal saline-alkaline soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(4): 678-686.
- [2] YANG F, TANG C Y, ANTONIETTI M. Natural and artifi-

- cial humic substances to manage minerals, ions, water, and soil microorganisms[J]. *Chemical Society Reviews*, 2021, 50(10): 6221-6239.
- [3] ASGHAR H N, SETIA R, MARSCHNER P. Community composition and activity of microbes from saline soils and non-saline soils respond similarly to changes in salinity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 47:175-178.
- [4] GONG H Y, LI Y F, LI S J. Effects of the interaction between biochar and nutrients on soil organic carbon sequestration in soda saline-alkali grassland: a review[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 26:e01449.
- [5] 迪力热巴·阿不都肉苏力, 穆耶赛尔·奥斯曼, 祖力胡玛尔·肉孜, 等. 盐碱土壤微生物多样性与生物改良研究进展[J]. *生物技术通报*, 2021, 37(10):225-233.
- ABUDUROUSULI D L R B, AOSIMAN M Y S E, ROUZI Z L H M E, et al. Research progress on microbial diversity and biological improvement in saline alkali soil[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2021, 37(10):225-233.
- [6] 娄春荣, 何志刚, 王秀娟, 等. 秸秆不同用量对日光温室番茄土壤次生盐渍化及微生物区系的影响[J]. *北方园艺*, 2013(9): 52-54.
- LOU C R, HE Z G, WANG X J, et al. Effect of different amounts of straw on tomato soil salinization and microbial flora [J]. *Northern Horticulture*, 2013(9):52-54.
- [7] 茹京娜, 郝冰清, 冀晓倩, 等. 小麦非生物胁迫响应研究进展 [J]. *山西农业科学*, 2025, 53(2):45-46.
- RU J N, HAO B Q, JI X Q, et al. Research progress on responses of wheat to abiotic stresses[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2025, 53(2):45-46.
- [8] 顾鑫, 任翠梅, 王丽娜, 等. 施用腐植酸改良大庆苏打盐碱土的效应[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(4):77-82.
- GU X, REN C M, WANG L N, et al. Effects of humic acid application on soda saline-alkali soil in Daqing[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(4):77-82.
- [9] LIU M L, WANG C, WANG F Y, et al. Maize (*Zea mays*) growth and nutrient uptake following integrated improvement of vermicompost and humic acid fertilizer on coastal saline soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 142:147-154.
- [10] NASIR S, SARFARAZ T B, VERHEYEN T V, et al. Structural elucidation of humic acids extracted from Pakistani lignite using spectroscopic and thermal degradative techniques [J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, 92(5):983-991.
- [11] 聂朝阳. 腐殖酸基有机物料对苏打盐碱化耕地土壤改良效应研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2022.
- NIE Z Y. Study on the effect of humic acid based organic materials on soil improvement in soda salinization and alkalization cultivated land[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [12] 黄志浩, 吴广利, 张涛, 等. 阿氏芽孢杆菌 MB35-5 解硅能力及田间应用效果研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(5):140-143.
- HUANG Z H, WU G L, ZHANG T, et al. Quantitative analysis of the ability of *Bacillus aryabhatai* MB35-5 to dissolve silicon using incubation and field experiments[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(5):140-143.
- [13] 熊乙, 欧翔, 贾蓉, 等. 阿氏芽孢杆菌应用研究进展[J]. *生物技术*, 2018, 28(3):302-306.
- XIONG Y, OU X, JIA R, et al. Research progress in application of *Bacillus aryabhatai*[J]. *Biotechnology*, 2018, 28(3): 302-306.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*[M]. 3rd ed. Beijing:China Agriculture Press, 2000.
- [15] 刘萌, 王善举, 樊军, 等. 利用环刀法快速原位测定土壤蒸发量[J]. *土壤通报*, 2021, 52(1):55-61.
- LIU M, WANG S J, FAN J, et al. Rapid *in-situ* determination of soil evaporation with cutting ring method[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(1):55-61.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1986.
- GUAN S Y. *Soil enzymes and their research methods*[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1986.
- [17] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- YAO H Y, HUANG C Y. *Soil microbial ecology and its experimental techniques*[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [18] 牛世全, 杨婷婷, 李君锋, 等. 盐碱土微生物功能群季节动态与土壤理化因子的关系[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(2): 328-334.
- NIU S Q, YANG T T, LI J F, et al. Seasonal trends of microbial functional groups in saline-alkali soil and their relationship with soil physicochemical factors in the east Hexi Corridor[J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(2):328-334.
- [19] 李鹏程, 苏学德, 王晶晶, 等. 腐植酸肥与菌肥配施对果园土壤性质及葡萄产量、品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(1):121-126.
- LI P C, SU X D, WANG J J, et al. Effects of humic acid fertilizer and biological fertilizer on soil properties and grape yield and quality[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(1): 121-126.
- [20] 库永丽, 徐国益, 赵骅, 等. 腐植酸复合微生物肥料对高龄猕猴桃果园土壤改良及果实品质的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33(3):167-175.
- KU Y L, XU G Y, ZHAO H, et al. Effects of humic acid compounded microbial fertilizer on soil improvement and fruit quality of elderly kiwifruit orchard[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(3):167-175.
- [21] 张永宏, 桂林国, 尹志荣, 等. 不同土壤调理剂对盐碱地土壤理化性质及水稻产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(11):6491-6494.
- ZHANG Y H, GUI L G, YIN Z R, et al. Effects of different soil conditioner on the chemical and physical properties of soil in saline land and rice yield[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(11):6491-6494.
- [22] 陈丽美, 李小英, 岳学文, 等. 竹炭与有机肥混施对火龙果产量和品质影响及其改土作用[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(11):2231-2238.
- CHEN L M, LI X Y, YUE X W, et al. Effect of mixed application of bamboo charcoal and organic fertilizer on yield and quality of red pitaya and soil amelioration[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(11):2231-2238.

- [23] 陈花,刘娜,姚晓倩,等. 改良基质对煤矿区土壤理化性质的优化[J]. 山西农业科学, 2025, 53(1):90-100.
CHEN H, LIU N, YAO X Q, et al. Optimization of soil physical and chemical properties in coal mining areas by improving matrix[J]. Journal of Shanxi Agricultural Science, 2025, 53(1):90-100.
- [24] 杨柳,李絮花,胡斌. 腐植酸增效复混肥对不同盐渍化程度土壤小麦产量和氮素利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2):123-132.
YANG L, LI X H, HU B. Effects of humic acid enhanced effect compound fertilizer on wheat yield and nitrogen utilization in soil with different salinization degree[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(2):123-132.
- [25] 王振振,张超,史春余,等. 腐植酸缓释钾肥对土壤钾素含量和甘薯吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1):249-255.
WANG Z Z, ZHANG C, SHI C Y, et al. Effects of Ha-K fertilizer on potassium content of soil and absorption and utilization of potassium in sweet potato[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(1):249-255.
- [26] 史秀宏,孙涛,李嵩,等. 硅酸盐微生物菌剂对水稻硅含量及产量的影响[J]. 作物杂志, 2015(6):121-125.
SHI X H, SUN T, LI S, et al. Impacts of silicate microbes on silicon content and yield of paddy rice[J]. Crops, 2015(6):121-125.
- [27] 杨宇,金强,卢国政,等. 生化黄腐酸土壤改良剂对盐碱菜田土壤改良效果研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(4):1931-1932.
YANG Y, JIN Q, LU G Z, et al. Study on the effect of biochemical fulvic acid soil amendment on soil improvement in saline alkali vegetable fields[J]. Anhui Agricultural Science, 2010, 38(4):1931-1932.
- [28] BONANOMI G, ANTIGNANI V, CAPODILUPO M, et al. Identifying the characteristics of organic soil amendments that suppress soilborne plant diseases[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(2):136-144.
- [29] 王传杰,肖婧,蔡岸冬,等. 不同气候与施肥条件下农田土壤微生物生物量特征与容量分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(6):1067-1075.
WANG C J, XIAO J, CAI A D, et al. Capacity and characteristics of soil microbial biomass under various climate and fertilization conditions across China croplands[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(6):1067-1075.
- [30] 马子茜. 生物菌肥施用方式对连作花生生长和根际微生物群落结构的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2020.
MA Z Q. Effects of biological microbial fertilizer application methods on the growth and rhizosphere microbial community structure of continuous cropping peanuts[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [31] 方明智,唐思琪,孙煜璨,等. 腐植酸淋洗对重金属污染土壤微生物群落结构影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5):1061-1070.
FANG M Z, TANG S Q, SUN Y C, et al. Study on the effect of humic acid leaching on the microbial community structure of heavy metal polluted soil[J]. Journal of Agricultural Environmental Science, 2023, 42(5):1061-1070.
- [32] 刘丹,黄占斌,李柯,等. 腐植酸对氮、磷肥的增效机理研究综述[J]. 腐植酸, 2016(2):1-5.
LIU D, HUANG Z B, LI K, et al. Summary on synergistic mechanism of humic acid to nitrogen and phosphorus fertilizer[J]. Humic Acid, 2016(2):1-5.
- [33] 王相平,杨劲松,张胜江,等. 石膏和腐植酸配施对干旱盐碱区土壤改良及棉花生长的影响[J]. 土壤, 2020, 52(2):327-332.
WANG X P, YANG J S, ZHANG S J, et al. Effects of combined application of gypsum and humic acid on improvement of saline-alkali soil and cotton growth in arid areas[J]. Soils, 2020, 52(2):327-332.
- [34] 张蕾,吴文强,王维瑞,等. 土壤调理剂及其配施微生物菌肥对设施菜田次生盐渍化土壤改良效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3):264-271.
ZHANG L, WU W Q, WANG W R, et al. Study on the effect of soil conditioner and combined application with microbial fertilizer on the improvement of secondary salinized soil in vegetable field[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(3):264-271.