

长期施用有机肥对松嫩平原西部 盐碱土肥力和玉米产量的影响

于菲,赵硕,赵影,汪勇,范益恺,孟庆峰

(东北农业大学资源与环境学院,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:依据施用有机肥(腐熟牛粪)年限的不同,共设置 4 个不同处理,分别为:施用有机肥 13 a(13A)、19 a(19A)和 24 a(24A),以未施用有机肥的盐碱土作为对照(CK),采集各处理 0~20 cm 和 20~40 cm 的土壤样品,测定土壤养分、物理性状和盐碱性质,旨在探明长期施用有机肥措施下苏打盐碱土壤的肥力状况及其促进玉米产量提升的机制。结果表明:与 CK 相比,施用有机肥显著提高了 0~20、20~40 cm 土层的土壤有机质、全氮、速效养分含量和土壤田间持水量($P<0.05$),显著降低了土壤容重和土壤密度($P<0.05$),显著增加了 0~20 cm 土层的土壤孔隙度($P<0.05$)。0~20 cm 土层中,土壤有机质、全氮以 19A 处理最高,分别达 $39.31\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;土壤碱解氮、速效磷、速效钾均以 24A 含量最高,较 CK 分别提高了 89.31%、81.07% 和 107.64%,土壤孔隙度以 24A 含量最高,较 CK 提高了 54.56%,各处理土壤容重和土壤密度平均较 CK 下降率达 31.91% 和 6.29%,处理间不显著。同时,施用有机肥各处理的土壤 pH、电导率(EC)和碱化度(ESP)显著低于处理 CK($P<0.05$),其中在 0~20 cm 土层,土壤 pH 值以 24A 最低,较 CK 低 24.45%;EC 和 ESP 以 19A 处理最低,分别降低至 $0.14\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 2.52%。可见,随着有机肥施用年限的增加,对土壤理化性质的改善效果越明显。处理 24A 的玉米产量最高,达到了 $13\,780\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,与 CK 相比提高了 58.57%,各处理间均达到显著性差异($P<0.05$),CK 的玉米产量最低($8\,690\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。结构方程模型分析结果显示,长期施用有机肥后,通过土壤有机质含量的提升,主要提高了土壤的田间持水量和全氮含量,降低了土壤容重,进而影响土壤的 pH 值而影响到玉米产量,其中,土壤容重的降低、田间持水量的提高是影响玉米产量的关键因素。

关键词:盐碱土;有机肥;玉米产量;土壤理化性质;SEM 分析

中图分类号:S513;S365;S156.4 **文献标志码:**A

Effects of long-term application of cattle manure on soil fertility and corn yield of saline-sodic soil in western Songnen Plain

YU Fei, ZHAO Shuo, ZHAO Ying, WANG Yong, FAN Yikai, MENG Qingfeng

(College of Resources and Environments, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

Abstract: Based on the number of years of cattle manure application, four different treatments were set in this study. The treatments included 13 years (13A), 19 years (19A) and 24 years (24A) of applying cattle manure, and the saline-sodic soil without applying cattle manure was used as control (CK). Soil samples of 0~20 cm and 20~40 cm in each treatment were collected to determine soil nutrients, physical properties and saline-sodic properties to explore the fertility of saline-sodic soil and the mechanism of increasing corn yield under long-term application of cattle manure. The results showed as follows: Compared with CK, cattle manure application significantly increased the contents of soil organic matter, total nitrogen, available nutrients and soil field water capacity in 0~20 cm and 20~40 cm layers ($P<0.05$) and significantly decreased the soil bulk density and soil density ($P<0.05$) as well as significantly increased the soil porosity in 0~20 cm layer ($P<0.05$). In 0~20 cm soil layer, soil organic matter and total nitrogen were the highest under 19A treatment, reaching $39.31\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $1.30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively.

The content of available nitrogen, available phosphorus and available potassium reached the highest at 24A, which increased by 89.31%, 81.07% and 107.64% compared with CK. The content of soil porosity reached the highest at 24A, which increased by 54.56% when compared with CK. The average decrease rate of soil bulk density and soil density of each treatment was 31.91% and 6.29% compared with CK, however, there were no significant differences between treatments. At the same time, the soil pH, electrical conductivity (*EC*) and alkalinity (*ESP*) of all treatments were significantly lower than those of CK ($P<0.05$). In 0~20 cm soil layer, the soil pH value was the lowest at 24A, which was 24.45% lower than that of CK. The *EC* and *ESP* were the lowest in 19A treatment, which decreased to $0.14 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ and 2.52%, respectively. The improvement effect of organic fertilizer on soil physical and chemical properties was more obvious with the increase of application years. The corn yield of treatment for 24A was the highest, reaching $13\,780 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was increased by 58.57% compared with CK, and significant difference was found among all treatments ($P<0.05$). The corn yield of CK was the lowest ($8\,690 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). The results of structural equation model analysis showed that after long-term application of cattle manure fertilizer, soil field capacity, total nitrogen content, and soil organic matter content were increased, soil bulk density was decreased, and soil pH value was changed. As a result, the corn yield was increased. The decrease of soil bulk density and the increase of field water holding capacity were the key factors affecting corn yield.

Keywords: saline-sodic soils; cattle manure; corn yield; physical and chemical properties of soil; structural equation model

近年来,土壤盐渍化在全球化环境中已经成为了很严重的问题,这一问题主要由自然因素和人类活动引起,并且已经成为主要的环境风险之一^[1-2]。全世界约有盐渍土面积 $9.55 \times 10^8 \text{ hm}^2$,共占据约 100 多个国家和地区,每年以 $1.00 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 的速度增加^[3-4]。我国东北地区盐渍土面积约 $3.84 \times 10^6 \text{ hm}^2$,是我国土地盐渍化最严重的地区之一^[5-6]。随着时间的不断推移,可耕地面积日渐减少、土地资源不断匮乏,它已成为了非常重要的后备资源。盐渍化问题不仅危害耕地质量,而且严重影响国家粮食安全和区域生态环境。因此,盐碱地治理已成为生态环境保护的当务之急^[7]。我们应采取合理开发和改良利用并存的措施,大幅度提高盐碱地区农业的综合生产效率,增加盐碱区的有效耕地面积,这将对保障我国 $1.43 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 耕地面积以及提高粮食产量和粮食安全具有重大战略意义。

盐碱土水-肥-盐方面的研究大约从 20 世纪 70 年代开始。研究得出以施肥来改良盐渍土的基本观点^[8-9];建议利用有机质和土壤养分在时间、空间、形态上影响土壤的盐基交换量,改善土壤的水、肥、气、热并促进土壤团粒结构的形成,从而能够调节和影响盐碱土壤中离子的固定、迁移和淋溶,达到了调控盐分的作用^[10]。研究表明,在土壤中施用有机肥可以达到一定的增产效果^[11-12],可提高土壤速效养分,促进土壤团聚体形成,改善土壤结构^[13],改善土壤盐类离子组成^[14-15],降低土壤 pH 值^[16],提高土壤生产力。同时,施用有机肥可以改善土壤

结构、降低土壤容重,增加土壤孔隙度,影响土壤盐分运移,利于排盐^[17-19]。

松嫩平原位于东北地区中部,是我国重要的粮食产区,在我国粮食生产安全中发挥着重要作用。然而,它也是世界三大苏打盐碱土集中分布区之一,面积约为 $3.73 \times 10^6 \text{ hm}^2$,是我国盐碱化最严重、对农业影响最大的地区之一^[20],同时盐碱土作为后备土地资源对我国耕地数量的动态平衡具有重要意义。目前,已开展的盐碱土改良工作只具有短期效果,缺乏持续性的长期定位试验。通过长期定位试验所获取的研究数据更为稳定、可靠,并能正确地反映盐碱土的改良效果及其变化趋势。因此,本研究以松嫩平原西部草甸碱土为研究材料,通过长期施用有机肥的方式进行盐碱土改良,阐明长期施用有机肥对土壤养分、物理性状和盐碱性质的影响,并利用结构方程模型(SEM)分析玉米产量提升的机制。本研究结果对其他区域的盐碱土改良工作亦可提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区定位于黑龙江省大庆市肇州县永乐镇东北农业大学盐碱土长期定位试验站(125.06°E , 45.40°N ,海拔 135 m),地处松嫩平原中部,位于黑龙江盐渍土的主要分布区。试验区地处黑龙江省第一积温带,气候类型为中温带大陆性季风气候,年均活动积温 $2\,800^\circ \text{C}$,年均降水量 436 mm,年均

蒸发量 1 800 mm,属半干旱地区。试验区四季分明,春季多风少雨;夏季炎热多雨;秋季凉爽,易出现早霜;冬季寒冷干燥。土壤类型为草甸碱土,质

地为粘土(26%砂粒,22%粉粒,52%粘粒)。未开垦前试验区为盐碱荒地,碱斑零星分布,碱斑面积约占 40%左右,开垦前土壤基本理化性质见表 1。

表 1 开垦前土壤基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of soil prior to reclamation

pH 值 pH value	EC /(dS · m ⁻¹)	ESP /%	有机质 Organic matter /(g · kg ⁻¹)	全氮 Total-N /(g · kg ⁻¹)	碱解氮 Available N /(mg · kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg · kg ⁻¹)
9.50	6.23	32.03	10.95	0.37	39.11	12.06	125.18

注:EC 为土壤电导率(dS · m⁻¹);ESP 为土壤碱化度(%),下同。开垦前试验区基本概况为多点取样后取平均值所得。
Note: EC is soil electrical conductivity(dS · m⁻¹), ESP is exchange sodium percentage(%), the same below. The basic general situation of the test area before cultivation was the average value obtained after multi-point sampling.

1.2 试验设计

本研究根据施用腐熟牛粪的年限,在碱斑土上共设置 4 个处理,分别是施用有机肥 13 a(13A),施用有机肥 19 a(19A),施用有机肥 24 a(24A),以不施用有机肥的处理作为对照(CK)。供试作物为玉米,施肥方式为每年四月下旬以垄作结合方式只施入干质量为 10 000 kg · hm⁻²的腐熟牛粪,不施用化肥。在玉米拔节期全部处理追施尿素 375 kg · hm⁻²。玉米生育期内无灌溉。腐熟牛粪的性质为:有机质含量 590.69 g · kg⁻¹,氮含量 13.28 g · kg⁻¹,磷含量 12.02 g · kg⁻¹,钾含量 15.35 g · kg⁻¹,pH 值 8.42,钙含量 9.77 g · kg⁻¹,镁含量 4.58 g · kg⁻¹。

1.3 样品采集

2019 年 10 月中旬采集 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤样品,每小区随机选取 3 个点。土壤样品带回实验室内剔除外侵入物后进行自然风干,风干后将土壤样品磨碎并过筛,先全部通过 1 mm 筛;然后,将土壤样品均匀取出一部分过 0.25 mm 筛。过筛后用于土壤化学性质的测定;在采集土壤农化样品的同时,利用环刀采集相同原状土壤,用于测定土壤的物理性质。

1.4 研究方法

土壤 pH 值与电导率(EC)按照 5 : 1 水土比,采用 pH 计和电导率仪测定;土壤有机质采用重铬酸钾氧化法测定;土壤全氮采用浓硫酸消煮,凯氏定氮仪蒸馏法测定;土壤碱解氮采用碱解扩散法测定;土壤速效钾采用醋酸铵浸提,火焰光度法测定;土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提,钼锑抗显色法测定;土壤交换性钠离子采用 1 mol · L⁻¹醋酸铵浸提,火焰光度法测定;土壤阳离子交换量(CEC)采用乙酸钠—火焰光度法测定。依据公式(1)计算土壤碱化度(ESP)。

$$ESP = \frac{\text{交换性 Na}^+}{CEC} \times 100 \tag{1}$$

式中,ESP 为土壤碱化度(%);交换性 Na⁺ 为交换性钠离子(cmol · kg⁻¹);CEC 为土壤阳离子交换量(mol · kg⁻¹)。

用环刀收集未搅动的土壤样品,测定田间持水量;采用环刀法测定土壤容重;采用比重瓶法测定土壤颗粒密度,并根据公式(2) 计算土壤孔隙度。

$$f_i = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_d} \times 100 \right) \tag{2}$$

式中,f_i 为土壤孔隙度(%);ρ_b 为容重(g · cm⁻³);ρ_d 为土壤颗粒密度(g · cm⁻³)。

1.5 数据处理

数据经 Excel 处理后,采用 SPSS 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)比较处理间差异,用 Duncan's 法检验差异显著性(P<0.05)。采用 AMOS 21.0 的结构方程模型(SEM)探讨土壤理化因子主要驱动因素的影响路径及程度。

2 结果与分析

2.1 施用有机肥对土壤有机质的影响

由图 1 可知,与 CK 相比,施用有机肥后,土壤 0~20 cm 和 20~40 cm 土层有机质含量均明显增加。同时除处理 24A 外,其余处理随土层深度增加土壤有机质含量均减小,即在 0~20 cm 土层中土壤有机质含量达到最大。在 0~20 cm 土层中,处理 19A 的有机质含量达到最高,较不施肥的处理有机质含量提高了近 3.5 倍。在 20~40 cm 土层中,处理 19A 的有机质含量达到最高,较不施肥的处理有机质含量提高了约 5.3 倍。方差分析结果表明,在 0~20 cm 土层中,各处理与 CK 相比差异显著(P<0.05),施用有机肥的各处理间差异不显著;在 20~40 cm 土层中,各处理与 CK 相比均差异显著(P<0.05);处理 19A、处理 24A 与处理 13A 相比差异显著(P<0.05)。

2.2 施用有机肥对土壤养分的影响

不同施肥年限各处理下 0~20 cm 和 20~40 cm 土层中全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量随时间的变化规律见表 2。与 CK 相比,施用有机肥后的 0~20 cm 土层中全氮、碱解氮、速效钾的含量均显著增加。在 0~20 cm 的土层中,与 CK 相比,处理 24A 的全氮、碱解氮、速效钾含量都提高了 2 倍左右,速效磷含量较不施肥处理下的速效磷含量提高了 81.07%。在 20~40 cm 的土层中,土壤全氮、碱解氮含量都显著提升。随着有机肥施用年限的增加,土壤全氮、速效磷、速效钾在处理 24A 时达到最高含量。方差分析结果表明,在 0~20 cm 土层中,各处理土壤全氮含量与 CK 相比差异显著 ($P<0.05$);处理 24A 的土壤碱解氮与 CK 相比差异显著 ($P<0.05$);处理 13A、24A 的土壤速效磷与 CK 相比差异显著 ($P<0.05$);处理 24A 的土壤速效钾与 CK 相比差异显著 ($P<0.05$),而处理 13A、19A 差异不显著。在 20~40 cm 土层中,各处理的土壤全氮与 CK 相比均差异显著 ($P<0.05$);处理 24A 的土壤碱解氮与 CK 相比差异不显著,其他处理均差异显著 ($P<0.05$);处理 24A 的土壤速效磷与 CK 相比差异显著 ($P<0.05$);处理 13A、24A 的土壤速效钾与 CK 相比差异显著 ($P<0.05$),而处理 19A 差异不显著。

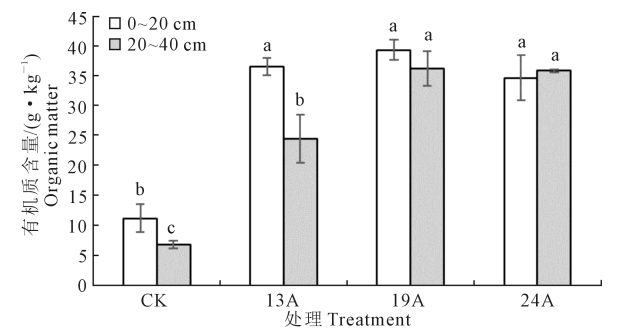
2.3 施用有机肥对土壤盐碱性质的影响

不同施肥年限处理下 0~20、20~40 cm 土层的 pH 值、EC、ESP 随时间的变化规律见表 3。0~20cm 土层中,土壤 pH 值随施肥年限的增加逐渐降低,各处理的 pH 值比 CK 降低了 20.00%~24.45%;各处理的 EC、ESP 与 CK 相比均显著降低,降幅为 42.86%~77.78%。在 20~40 cm 土层中,各处理的 EC、ESP 与 CK 相比均显著降低。方差分析结果表明,在 0~20 cm 土层中,与 CK 相比,各处理 pH 值

均差异显著 ($P<0.05$)。EC 与 ESP 具有相似趋势,各处理与 CK 相比均差异显著 ($P<0.05$)。在 20~40 cm 土层中,各处理 pH 值、EC、ESP 与 CK 的差异均达显著水平 ($P<0.05$)。

2.4 施用有机肥对土壤物理性质的影响

不同施肥年限处理下 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的土壤容重、密度、孔隙度随时间的变化规律见表 4。与 CK 相比,长期施用有机肥后土壤孔隙度呈上升趋势;容重、密度呈下降趋势。2019 年试验结束时,在 0~20 cm 土层中,处理 24A 的容重为 $1.08\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,较不施肥处理容重 ($1.64\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 降低了 34.15%;土壤密度较 CK 降低了 5.91%;孔隙度较 CK 升高了 54.56%。方差分析结果表明,在 0~20 cm 土层,与 CK 相比,各处理容重、密度、孔隙度均差异显著 ($P<0.05$);在 20~40 cm 土层,各处理的容重与 CK 相比均差异显著 ($P<0.05$);处理 19A、24A 的土壤密度较 CK 差异显著,处理 13A 与 CK 间差异不显著 ($P<0.05$);施用有机肥后,各处理孔隙度虽呈上升趋势,但均与 CK 差异不显著。



注:不同小写字母表示同一土层处理间差异显著 ($P<0.05$),下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments in the same soil layer ($P<0.05$). The same below.

图 1 不同处理的土壤有机质含量
Fig.1 Soil organic matter under different treatments

表 2 不同处理的土壤养分含量

Table 2 Nutrient contents under different treatments

土层深度 Soil layer/cm	处理 Treatment	全氮 Total N/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮 Available N/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available P/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
0~20	CK	0.63±0.08c	48.07±4.28b	32.28±1.28b	132.47±19.62b
	13A	1.68±0.11a	76.07±12.33ab	18.24±1.65c	165.74±6.02ab
	19A	1.77±0.22a	68.13±19.01ab	33.12±8.25b	176.39±7.06ab
	24A	1.30±0.04b	91.00±35.41a	58.45±8.84a	275.06±109.77a
20~40	CK	0.34±0.03b	19.13±0.40b	18.15±4.96b	145.28±4.24b
	13A	1.21±0.12a	59.97±21.52a	8.42±0.63b	111.34±8.88c
	19A	1.38±0.21a	69.77±13.01a	23.04±3.91b	135.96±3.32b
	24A	1.40±0.16a	50.87±23.10ab	42.88±15.85a	186.37±14.13a

注:不同小写字母表示同一土层处理间差异显著 ($P<0.05$)。数值是 3 次重复±标准差的平均值。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments in the same soil layer ($P<0.05$). Values are the mean of three replicates ± standard deviation. The same below.

表 3 不同处理的土壤盐碱性质

Table 3 Saline-alkaline properties under different treatments

土层深度 Soil layer/cm	处理 Treatment	pH	EC /(dS·m ⁻¹)	ESP/%
0~20	CK	10.55±0.09a	0.63±0.02a	58.15±13.61a
	13A	8.44±0.05b	0.17±0.01c	5.31±1.09b
	19A	8.33±0.08b	0.14±0.00c	2.52±1.10b
	24A	7.97±0.34c	0.36±0.11b	10.94±2.14b
20~40	CK	10.68±0.01a	2.56±0.57a	51.06±3.12a
	13A	8.68±0.13b	0.22±0.04b	16.63±8.29b
	19A	8.30±0.08c	0.15±0.01b	3.10±0.66c
	24A	8.40±0.19c	0.31±0.04b	13.50±6.65bc

表 4 不同处理的土壤物理性质

Table 4 Physical properties under different treatments

土层深度 Soil layer/cm	处理 Treatment	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	土壤密度 Soil density /(g·cm ⁻³)	孔隙度 Total porosity/%
0~20	CK	1.64±0.05a	2.54±0.03a	35.52±1.83b
	13A	1.14±0.07b	2.39±0.03b	52.35±3.42a
	19A	1.13±0.05b	2.38±0.07b	52.35±3.35a
	24A	1.08±0.15b	2.39±0.07b	54.90±6.27a
20~40	CK	1.59±0.05a	2.5±0.03a	36.42±2.86a
	13A	1.4±0.10b	2.45±0.03ab	42.77±4.21a
	19A	1.38±0.10b	2.4±0.02bc	42.77±4.06a
	24A	1.39±0.07b	2.39±0.03c	41.55±3.38a

由图 2 可知,与 CK 相比,随着施用有机肥年限的增长,土壤田间持水量呈上升趋势。施用有机肥后,0~20 cm 土层的田间持水量高于 20~40 cm 土层。在 0~20 cm 土层中,各处理的田间持水量与 CK (18.22%) 相比提高至 36.55%~42.35% 之间,处理 24A 的田间持水量达到最高值 42.35%;在 20~40 cm 土层中,各处理的田间持水量与 CK 相比提升范围在 23.74%~38.54% 之间。方差分析结果表明,在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层中,各处理的田间持水量与 CK 相比均差异显著 ($P<0.05$)。

2.5 施用有机肥对玉米产量的影响

由长期定位试验的玉米测产结果 (图 3) 可以得知,施肥年限的不同对玉米增产效果的影响有差异,产量呈现了一定的规律性,即处理 24A>19A>13A>CK。方差分析结果表明,处理 13A、19A、24A 与 CK 差异均显著 ($P<0.05$)。2019 年试验结束时处理 24A 的玉米产量达到了 13 780 kg·hm⁻²,较玉米产量为 8 690 kg·hm⁻² 的处理 CK 相比提高了 58.57%,表明随着有机肥施用年限的增加产量会显著提高。

2.6 土壤肥力的结构方程模型

为了明确长期施用有机肥后土壤肥力对玉米产量的影响,通过构建 SEM 来分析 0~20 cm 土层 (耕作层) 的土壤有机质、养分、盐碱指标、物理性质

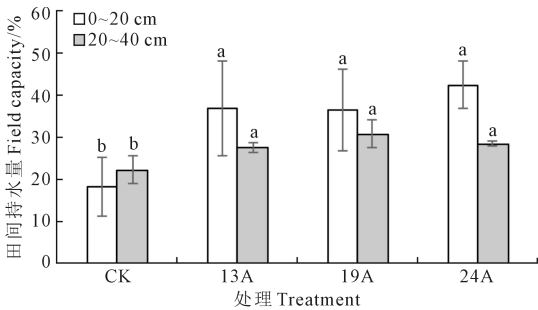


图 2 不同处理的土壤田间持水量

Fig.2 Soil field capacity under different treatments

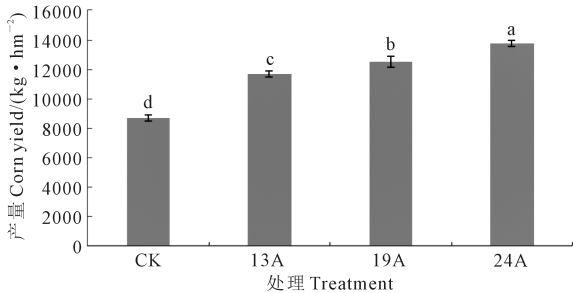
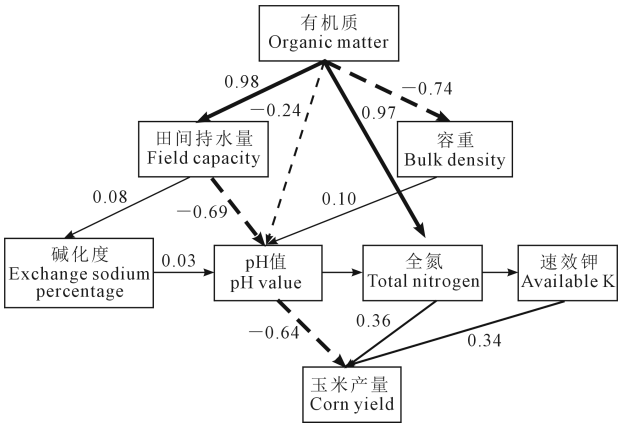


图 3 2019 年不同处理的玉米产量

Fig.3 Corn yield in 2019 under different treatments



注:每个箭头的粗细和箭头上的数值分别代表路径系数及其大小,实线代表正相关,虚线代表负相关。

Note: The thickness of each arrow and the value on the arrow represent the path coefficient and its size, the solid line represents the positive correlation, and the dashed line represents the negative correlation.

图 4 土壤理化性质影响因素的结构方程模型 (SEM) 分析

Fig.4 SEM analysis of influencing factors of soil physical and chemical properties

对玉米产量的综合响应,见图 4。SEM 拟合结果为: $P=0.94$, 拟合优度指数 (GFI) = 0.89, 均方根误差 ($RMSEA$) = 0.00, 说明模型适配良好。模型解释了玉米产量改变的影响因素并不是唯一。结果表明,通过施用有机肥调控土壤有机质,从而影响土壤容重、田间持水量以及土壤全氮来提高玉米产量,其中,有机质对田间持水量和土壤全氮的影响体现为

正效应,其路径系数分别为 0.98 和 0.97;对容重体现为负效应,其路径系数为-0.74。田间持水量与土壤 pH 值呈负相关关系(路径系数为-0.69)从而影响玉米产量,土壤 pH 值与土壤有机质也呈负相关关系(路径系数为-0.24),并在比较小的程度上受到土壤碱化度和容重的影响。土壤全氮和速效钾含量对玉米产量也产生了直接的影响,其路径系数分别为 0.36 和 0.34。综上,土壤有机质可通过改善土壤结构和土壤全氮供应达到增产效果。并且在此模型中,容重的降低、田间持水量的提高成为对玉米产量影响最大的、对多因素综合影响的重要因素。

表 5 盐碱土各指标之间的相关系数
Table 5 Correlation coefficient among indexes of saline-sodic soil

指标 Indicator	有机质 Organic matter	全氮 Total N	碱解氮 Available N	速效磷 Available P	速效钾 Available K	pH	EC	ESP	田间持水量 Field capacity	容重 Bulk density	土壤密度 Soil density	孔隙度 Total porosity
有机质 Organic matter	1.00											
全氮 Total N	0.95 **	1.00										
碱解氮 Available N	0.44 *	0.28	1.00									
速效磷 Available P	0.07	0.18	0.42	1.00								
速效钾 Available K	0.47	0.21	0.34	0.68 *	1.00							
pH	-0.95 **	-0.83 **	-0.61 *	-0.31	-0.62 *	1.00						
EC	-0.98 **	-0.91 **	-0.55	-0.09	-0.43	0.97 **	1.00					
ESP	-0.95 **	-0.90 **	-0.46	-0.02	-0.35	0.91 **	0.96 **	1.00				
田间持水量 Field capacity	0.74 **	0.68 *	0.59 *	0.31	0.43	-0.79 **	-0.76 **	-0.67 **	1.00			
容重 Bulk density	-0.90 **	-0.81 **	-0.75 **	-0.23	-0.45	0.95 **	0.94 **	0.88 **	-0.87 **	1.00		
土壤密度 Soil density	-0.85 **	-0.78 **	-0.44	-0.24	-0.58 *	0.86 **	0.81 **	0.75 **	-0.58 *	0.74 **	1.00	
孔隙度 Total porosity	0.85 **	0.76 **	0.78 **	0.23	0.40	-0.91 **	-0.91 **	-0.85 **	0.87 **	-0.99 *	-0.65 *	1.00

注: * 代表在 $P<0.05$ 水平上显著相关, ** 代表在 $P<0.01$ 水平上极显著相关。
Note: * means significant correlation at $P<0.05$ level, ** means extremely significant correlation at $P<0.01$ level.

3 讨 论

通过有机培肥长期定位试验,施用有机肥后,土壤有机质和养分显著提高,原因是有机肥中富含植物生长所必需的大量营养元素,如氮、磷、钾和丰富的有机质,还含有数量丰富的有机营养成分,如氨基酸、核酸、糖、维生素等,施入土壤后有利于有机质的积累,使土壤养分得到不同程度的改善^[21],活化土壤内部的潜在养分和增强土壤微生物活性,增加作物的生物量^[22],并有效增加土壤中可利用的有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾含量,从而改善作物的生长环境。也可能是因为有机肥活化土

2.7 土壤理化性质的相关性分析

对土壤理化性质进行相关性分析。结果表明,土壤有机质与容重、土壤密度、pH 值、电导率、碱化度呈极显著负相关($P<0.01$),与土壤田间持水量、孔隙度、全氮呈极显著正相关($P<0.01$)。土壤碱解氮与土壤有机质呈显著正相关($P<0.05$)。土壤速效磷、速效钾与有机质未达显著相关水平。土壤田间持水量与土壤 pH 值、电导率、碱化度呈极显著负相关($P<0.01$)。土壤容重与土壤 pH 值、电导率、碱化度呈极显著正相关($P<0.01$),与全氮、碱解氮呈极显著负相关($P<0.01$)。

壤中潜在养分后,促进了土壤原有有机质的矿化分解。在本研究中,施用有机肥后,与不施肥的处理相比,0~20 cm 土层的土壤有机质与速效氮、速效钾和碱解氮含量均有提高,这与韩晓增^[23]、李娟^[24]等的研究结论基本一致,只是增加的幅度不同,可能是受研究区的气候条件、土壤类型、施肥时间等因素影响所致。然而,有机肥中的有机质与微生物对土壤磷的转化比较迟钝^[25],故施用有机肥后土壤有机质含量和全氮含量增幅较大,土壤速效磷含量增幅较小。处理 24A 的土壤有机质含量与其他更短时间施用有机肥的处理相比尽管有下降趋势,但差异不显著,且与 CK 处理相比仍达到显著差异水

平($P<0.05$)。这可能是由于长期施肥后胶结物质增多,土壤的结构得到改善,环境条件变得适宜的情况下,微生物活动旺盛,则分解作用进行较快,有机质产生了矿化作用^[26],导致有机质的矿化量大于有机质的累积量,有机碳库呈亏缺状态。从表 5 可知,有机质与全氮之间呈极显著正相关($r=0.95^{**}$),与碱解氮呈显著正相关($r=0.44^{*}$)。因此,土壤全氮、碱解氮含量的变化趋势与有机质含量变化趋势基本一致。其他养分也与有机质含量呈现正相关关系,出现波动但是略有偏差。

本研究表明,有机肥除了能够增加土壤养分的积累,还能够改善各土层土壤容重、密度,对于土壤板结的减轻程度具有较好的改良效应。有机肥料的孔隙结构和土壤的团聚体结构降低了土壤容重,并且土壤有机质的增加也会促进微团聚体的形成,进而降低土壤容重,尤其对于 0~20 cm 土壤的影响较为显著。土壤容重降低的同时,土壤的紧实度和透气性也会得到改善,土壤的孔隙度增加,增强土壤的保水性能^[27],从而提高土壤的蓄水能力,降低土壤水分的蒸发速率^[28]。从表 5 可以看出,孔隙度与田间持水量之间呈极显著正相关关系($P<0.01$),孔隙度与田间持水量的提高,能够进一步促进根系的下扎和对深层土壤水分及养分的利用,调控作物应对水分和养分欠缺的能力^[29-30]。因此,施用有机肥对改善土壤物理性质具有重要意义。

从盐碱土各指标之间的相关系数(表 5)可以看出,土壤 EC 与容重之间呈极显著正相关($r=0.94^{**}$)。由此可以得出,施用有机肥通过影响土壤的物理性质进而影响盐分的表聚性。与不施肥处理相比,增施有机肥一方面可以改善土壤通透性,提高土壤的毛管孔隙度,利于表层土壤盐分向土体下层淋洗,促进土壤排盐并抑制返盐,从而电导率降低。这与王世斌^[31]、李国辉^[32]等的研究结果一致。另一方面有机肥中的 Ca^{2+} 将土壤胶体中的 Na^{+} 置换出来,被吸附到土壤溶液中,改变了盐碱土中盐分离子的组成,从而降低了碱化度,起到改良盐碱土的效果^[33]。由表 3 可知,处理 24A 的 0~20 cm 盐分含量与 20~40 cm 土层盐分差异不显著。可能是因为地下水位浅,矿化度高,盐分在毛管作用下向上迁移^[17],并且是在秋季收获后取样,没有地表覆盖,蒸发强度大,盐分向表层移动。土壤 pH 值经过有机肥的处理均低于对照,降低的原因可能是有机肥降解过程中形成的有机酸可以降低土壤中的碱性物质,增强土壤对 pH 的缓冲能力,降低土壤 pH 值。然而,处理 24A 的土壤 ESP 略高于处理

19A,这与较高的土壤盐分有关,从表 5 可知,土壤 ESP 与 EC 呈极显著正相关关系($r=0.96^{**}$)。有机质均能不同程度地影响土壤 pH 值、盐分含量、碱化度。在本研究中,随着施用有机肥年限的增加,与 CK 相比,有机质含量增加,盐碱性质显著降低。

本研究对草甸碱土的理化指标建立 SEM,较好地证明了施用有机肥后土壤中理化性质对玉米产量的影响及作用,从模型中验证了土壤物理性质和盐碱性质是影响玉米产量的主要原因。其中,土壤物理性质的改善是促使玉米产量提升的关键因素。长期施用有机肥后,盐碱土壤的田间持水量提高,持水性能增强,容重下降。物理结构的改善促进土壤排盐,减轻了盐分对作物的胁迫作用,有效减缓了土壤的板结与返盐,在一定程度上,使水、肥、盐、气形成一种动态平衡。吴春涛、张瑜^[34-35]等研究结果表明,施用有机肥能有效改善土壤理化性状,减少土壤水分蒸发,降低盐分的积累,达到提高作物产量的效果。盐碱性质是无法消除的,在此前提下,改善土壤物理性质作为改良盐碱土的一个重要方向,是满足作物生长所需的必备条件。本研究结果表明,施用有机肥后土壤的物理性状变化显著,土壤环境更加适合作物生存,玉米产量得到提升。在今后的研究改良过程中,我们需继续长期定位实行上述处理,以验证长期施用有机肥对盐碱土的改良效应。

4 结 论

长期施用有机肥后,0~20、20~40 cm 土层的有机质在土壤中不断积累,释放养分供给作物吸收利用,全氮、速效养分含量显著提高;土壤 pH 值、电导率(EC)、碱化度(ESP)显著降低;土壤容重、颗粒密度显著降低,土壤田间持水量、饱和含水量显著提高,土壤物理结构得到明显改善。随有机肥施用年限的增加,玉米产量显著提高。有机肥处理在连续施用有机肥 24 a 后玉米产量达到最高水平。并通过结构方程模型分析得出,长期施肥后通过提升土壤有机质,降低了容重、提高了田间持水量,进而影响土壤的 pH 值,改善了土壤的微环境,达到增产效果。其中容重的降低、田间持水量的提高在改良盐碱土中发挥主要作用,对玉米产量的提高和稳定具有重要影响。

参 考 文 献:

[1] 景宇鹏,李跃进,高娃,等.不同利用方式河套平原盐碱土盐分特征[J].水土保持研究,2020,27(1):372-379.
JING Y P, LI Y J, GAO W, et al. Salt characteristics of saline-alkali

- soil in Hetao plain with different utilization methods[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 372-379.
- [2] 徐子棋,许晓鸿.松嫩平原苏打盐碱地成因、特点及治理措施研究进展[J].中国水土保持,2018(2):54-59,69.
- XU Z Q, XU X H. The cause of formation and characteristics of soda saline-alkaline land of the Songnen plain and the study progress of control measures[J]. Soil and Water Conservation in China, 2018(2): 54-59, 69.
- [3] 张雅贞,李跃进,景宇鹏,等.施用有机肥对土默川平原盐碱土壤盐分及养分特征的影响[J].北方农业学报,2019,47(6):34-41.
- ZHANG Y Z, LI Y J, JING Y P, et al. Effect of increasing amounts of organic fertilizer on the soil salinity and nutrient characteristics of saline-alkaline soil in Tumochuan plain[J]. Journal of Northern Agriculture, 2019, 47(6): 34-41.
- [4] 景宇鹏,林春野,赵沛义,等.5种植物改良河套灌区盐渍化土壤的效果研究[J].土壤与作物,2020,9(2):114-125.
- JING Y P, LIN C Y, ZHAO P Y, et al. Salinized soil improvement by planting 5 plant species in Hetao irrigation area[J]. Soils and Crops, 2020, 9(2): 114-125.
- [5] 王利民,陈金林,梁珍海,等.盐碱土改良利用技术研究进展[J].浙江林学院学报,2010,27(1):143-148.
- WANG L M, CHEN J L, LIANG Z H, et al. Research progress of improvement and utilization of saline and alkali soil[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2010, 27(1): 143-148.
- [6] 杨真,王宝山.中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J].山东农业科学,2015,47(4):125-130.
- YANG Z, WANG B S. Present status of saline soil resources and countermeasures for improvement and utilization in China[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2015, 47(4): 125-130.
- [7] 董伟,杜学军,王栋,等.新型改良剂对苏打碱土理化性质及水稻产量的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):61-65.
- DONG W, DU X J, WANG D, et al. Effects of a new type of soil amendment on physical and chemical properties of soda alkali-saline soil and yield of the rice[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(1): 61-65.
- [8] 王庆蒙,景宇鹏,李跃进,等.不同培肥措施对河套灌区盐碱地改良效果[J].中国土壤与肥料,2020,(5):124-131.
- WANG Q M, JING Y P, LI Y J, et al. Effect of different fertilizer regime on the improvement of saline-alkali soil in Hetao irrigation district[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020,(5): 124-131.
- [9] 刘国强,王洪斌,郑勇.盐碱地专用肥研究进展[J].新疆师范大学学报(自然科学版),2017,36(4):50-54.
- LIU G Q, WANG H B, ZHENG Y. Research progress of the research on the special fertilizer application of saline-alkali soil[J]. Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition), 2017, 36(4): 50-54.
- [10] WANG S T, FENG Q, ZHOU Y P, et al. Dynamic changes in water and salinity in saline-alkali soils after simulated irrigation and leaching[J]. Plos One, 2017, 12(11): e0187536.
- [11] DENG W, QING X G, YANG Y. Effects of applying organic fertilizer on rice lodging resistance and yield[J]. Agricultural Science & Technology, 2010, 11(2): 98-101.
- [12] 陈香碧,胡亚军,秦红灵,等.稻作系统有机肥替代部分化肥的土壤氮循环特征及增产机制[J].应用生态学报,2020,31(3):1033-1042.
- CHEN X B, HU Y J, QIN H L, et al. Characteristics of soil nitrogen cycle and mechanisms underlying the increase in rice yield with partial substitution of mineral fertilizers with organic manure in a paddy ecosystem: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(3): 1033-1042.
- [13] 应金耀,阮弋飞,郭奇峰,等.有机肥配施生物炭对土壤肥力与蔬菜生长的影响[J].中国农学通报,2019,35(16):82-87.
- YING J Y, RUAN Y F, WU Q F, et al. Combined application of organic manure and biochar affects soil fertility and vegetable growth[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(16): 82-87.
- [14] 李玉,田宪艺,王振林,等.有机肥替代部分化肥对滨海盐碱地土壤改良和小麦产量的影响[J].土壤,2019,51(6):1173-1182.
- LI Y, TIAN X Y, WANG Z L, et al. Effects of substitution of partial chemical fertilizers with organic fertilizers on soil improvement and wheat yield in coastal saline and alkaline land[J]. Soils, 2019, 51(6): 1173-1182.
- [15] 郑敏娜,梁秀芝,韩志顺,等.不同措施对苏打型盐碱土壤盐分淋洗特征的影响[J].山西农业科学,2021,49(3):318-323.
- ZHENG M N, LIANG X Z, HAN Z S, et al. Effects of different measures on soil salinity leaching characteristics in saline-alkali soil[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2021, 49(3): 318-323.
- [16] 唐继伟,李娟,车升国,等.长期单施不同量化肥和有机肥后盐化潮土pH和EC的变化[J].植物营养与肥料学报,2019,25(8):1300-1307.
- TANG J W, LI J, CHE S G, et al. Changes in pH and EC of salinized fluvo-aquic soil after long-term application of chemical or organic fertilizers[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(8): 1300-1307.
- [17] 李晓爽.掺沙及施用生物有机肥对盐碱地水盐运移和冬小麦生长发育影响的研究[D].北京:中国农业科学院,2020.
- LI X S. Study on the influence of yellow river sediment mixed and application biological fertilizer on water and salt transport, winter wheat growth in saline-alkali land[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [18] 胡敏,屈忠义,王丽萍,等.不同改良剂对河套灌区盐渍化土壤性状和葵花生长特性的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):316-322.
- HU M, QU Z Y, WANG L P, et al. Effects of different amendments on the properties of salinized soil and sunflower growth in Hetao irrigation district[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 316-322.
- [19] 贾利梅,毛伟兵,孙玉霞,等.不同改良材料对粘质盐土物理性状和棉花产量的影响[J].中国农学通报,2017,33(13):81-87.
- JIA L M, MAO W B, SUN Y X, et al. Effects of different modified materials on physical properties of clayey saline soil and yield of cotton[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(13): 81-87.
- [20] 殷厚民,胡建,王青青,等.松嫩平原西部盐碱土旱作改良研究进展与展望[J].土壤通报,2017,48(1):236-242.
- YIN H M, HU J, WANG Q Q, et al. Advance and prospect of the research on improvement by dry farming measures of saline-alkali soils in western Songnen plain of China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(1): 236-242.

- [21] 王凡.长期秸秆还田及施用粪肥对小麦产量和矿质营养品质及重金属的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2016.
- WANG F. Responses of wheat yield, quality and heavy metals to longterm straw returning and manure compost application[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2016.
- [22] 毕庆芳.施肥模式和耕作年限影响土壤磷有效性和碳氮磷耦合转化的微生物学机制[D].杭州:浙江大学,2020.
- BI Q F. Different fertilization modes and cultivation years affect soil phosphorus availability and carbon-nitrogen-phosphorus coupling transformations and their microbial mechanisms[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [23] 韩晓增,王凤仙,王凤菊,等.长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(1):66-71.
- HAN X Z, WANG F X, WANG F J, et al. Effects of long-term organic manure application on crop yield and fertility of black soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(1): 66-71.
- [24] 李娟,赵秉强,李秀英,等.长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J].中国农业科学,2008,(1):144-152.
- LI J, ZHAO B Q, LI X Y, et al. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, (1): 144-152.
- [25] 张敏,孙宝利,宋阿琳,等.微生物多样性对土壤氮磷钾转化、酶活性及油菜生长的影响[J].生态学报,2016,36(18):5856-5864.
- ZHANG M, SUN B L, SONG A L, et al. Effects of soil microbial diversity on soil NPK transformation, enzyme activities, and canola growth[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): 5856-5864.
- [26] 王齐齐.长期不同培肥模式下典型潮土有机碳、氮矿化特征及其驱动因素[D].北京:中国农业科学院,2019.
- WANG Q Q. Mineralization characteristics of soil organic carbon and nitrogen, and their driving factors under long-term different fertilization regimes in fluvo-aquic soil [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [27] 何瑞成,吴景贵,李建明.不同有机物料对原生盐碱地水稳性团聚体特征的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):310-316.
- HE R C, WU J G, LI J M. Effects of different organic materials on the characteristics of water stable aggregates in a primary saline alkali soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 310-316.
- [28] 陈刚,王璞,陶洪斌,等.有机无机配施对旱地春玉米产量及土壤水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(6):139-144.
- CHEN G, WANG P, TAO H B, et al. Effects of combined application of organic and chemical fertilizers on the yield and water utilization of spring maize in dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(6): 139-144.
- [29] GETAHUN G T, KÄTTERER T, MUNKHOLM L J, et al. Short-term effects of loosening and incorporation of straw slurry into the upper subsoil on soil physical properties and crop yield[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 184: 62-67.
- [30] WANG X L, REN Y Y, ZHANG S Q, et al. Applications of organic manure increased maize (*Zea mays* L.) yield and water productivity in a semi-arid region[J]. Agricultural Water Management, 2017, 187: 88-98.
- [31] 王世斌,高佩玲,赵亚东,等.生物炭、有机肥连续施用对盐碱土壤改良效果研究[J].干旱地区农业研究,2021,39(3):154-161.
- WANG S B, GAO P L, ZHAO Y D, et al. Effect of continuous application of biochar and organic fertilizers on saline-alkali soil improvement[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 154-161.
- [32] 李国辉,宋付朋,骆洪义,等.不同有机肥用量对滨海盐渍土盐分表聚性及物理性状的影响[J].山东农业科学,2019,51(5):83-88.
- LI G H, SONG F P, LUO H Y, et al. Effect of different amounts of organic fertilizer on salt surface aggregation and physical properties of coastal salinized soil[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(5): 83-88.
- [33] 燕新红.不同改良方法对碱化草甸土理化性状的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2012.
- YAN X H. Effect of different improvement measures on physicochemical characteristics[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012.
- [34] 吴春涛.滨海盐碱地银杏有机肥深施技术研究[J].安徽农业科学,2017,45(28):166-168.
- WU C T. Study on organic manure deep placement technology of *Ginkgo biloba* L. in coastal saline-alkali land[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(28): 166-168.
- [35] 张瑜,徐子棋,杨献坤.不同改良剂对吉林西部重度盐碱土的改良及牧草的增产[J].森林工程,2020,36(2):25-34.
- ZHANG Y, XU Z Q, YANG X K. Effects of different soil amendments on the soil improving and the forage grass yield increasing on the severe saline-alkali soil in the western Jilin province [J]. Forest Engineering, 2020, 36(2): 25-34.