

绿肥作物种植翻压对苏打盐碱土壤改良效果的影响

张铁毅¹, 杨帆², 王志春², 邵玺文¹, 周杰²,
苗月^{1,2}, 聂朝阳², 张璐², 马乐^{1,2}, 郭丽颖¹,
耿艳秋¹, 罗雪娇², 王润泽²

(1.吉林农业大学农学院,吉林长春130118; 2.中国科学院东北地理与农业生态研究所,吉林长春130102)

摘要:为筛选出适宜松嫩平原苏打盐碱地修复的绿肥作物,以松嫩平原西部苏打盐碱地为研究对象,于2022—2023年通过田间试验比较4种绿肥作物(田菁、草木樨、高丹草、‘朝牧1号’稗子)在苏打盐碱地的生长适应性,及其翻压后对土壤理化性质和土壤酶活性的影响,并对各指标进行相关性分析,旨在阐明不同绿肥作物种植翻压入土后对苏打盐碱土壤的改良效果和机理。结果表明:4种绿肥作物中,田菁的生物量干重和鲜重均为最高,在种植第二年产草量达 $30.35\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,是其他绿肥作物的5~35倍;种植翻压第二年,田菁耕层土壤容重为 $1.17\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,较裸地显著降低 $0.21\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、土壤pH显著降低0.15~0.50个单位、电导率显著降低32.22%~51.72%,其他绿肥作物0~20 cm土层土壤容重及pH与裸地无显著差异。在20~40 cm土层,‘朝牧1号’稗子和高丹草土壤电导率较裸地分别显著降低40.00%和31.11%,种植翻压田菁的土壤全氮、全磷、全钾和有机质含量高于其他绿肥处理;在0~20 cm土层,土壤养分提升33.98%~189.75%,种植翻压4种绿肥对耕层土壤酶活性的提升能力存在差异,其中田菁土壤酶活性提升表现优异,其土壤脲酶活性、土壤碱性磷酸酶活性、土壤蔗糖酶活性、土壤 β -木糖苷酶活性分别较对照处理显著提高685.95%、80.78%、63.42%、19.10%($P<0.05$)。综上所述,种植翻压田菁更有利于苏打盐碱地降碱培肥及土壤酶活性的提升。

关键词:苏打盐碱土壤;绿肥作物;土壤酶活性;土壤养分

中图分类号:S156.4⁺9 **文献标志码:**A

Effects of planting and overturning green manure crops on improvement of saline-sodic soils

ZHANG Tieyi¹, YANG Fan², WANG Zhichun², SHAO Xiwen¹, ZHOU Jie²,
MIAO Yue^{1,2}, NIE Zhaoyang², ZHANG Lu², MA Le^{1,2}, GUO Liying¹,
GENG Yanqiu¹, LUO Xuejiao², WANG Runze²

(1. Faculty of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130102, China)

Abstract: To identify the suitable green manure crops for the restoration of saline-sodic soils in Songnen Plain, this study focused on the western saline-sodic soils of the Songnen Plain. From 2022 to 2023, field experiments compared the growth adaptability of four green manure crops (*Sesbania cannabina*, *Melilotus officinalis*, *Sorghum bicolor* × *sudanense*, and *Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv ‘Chaomu 1’) in saline-sodic soils and their effects on soil physical and chemical properties and soil enzyme activities after overturning. The correlation analysis was conducted on various indicators. The goal was to examine the effects and mechanisms of planting and overturning green manure crops on saline-sodic soils. The results indicated that among the four green manure crops, *Sesba-*

收稿日期:2024-03-01

修回日期:2024-04-30

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA28010403);国家自然科学基金项目(41971066);中国科学院黑土区农业生态重点实验室开放基金项目(2020ZKHT-03);吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项资金项目(2022SYHZ0018)

作者简介:张铁毅(1997-),男,吉林长春人,硕士研究生,研究方向为作物优质高产高效理论与技术。E-mail: zhangtieyi0510@163.com

通信作者:邵玺文(1966-),男,吉林长春人,教授,主要从事水稻优质高产高效理论与技术研究。E-mail: shaoxiwen@126.com

nia cannabina produced the highest dry and fresh biomass, yielding $30.35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the second year of planting, which was 5 to 35 times greater than the yields of the other three green manure crops. In the second year after planting and green manure crops returning, the soil bulk density with the *Sesbania cannabina* treatment was $1.17 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, a significant reduction of $0.21 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ compared to the control. The soil pH also decreased significantly by 0.15 to 0.50 units, and the electrical conductivity (EC) decreased significantly by 32.22% to 51.72%, both compared to the control. The bulk density and pH of the soil in the 0~20 cm layer for other green manure crops showed no significant differences compared to the control. In the 20~40 cm soil layer, the EC of *Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv ‘Chaomu 1’ and *Sorghum bicolor* × *sudanense* significantly decreased by 40.00% and 31.11%, respectively, compared to the control. The soil total nitrogen, total phosphorus, total potassium, and organic matter content of *Sesbania cannabina* planted and overturned were superior to other green manure treatments. In the 0~20 cm soil layer, soil nutrients increased by 33.98% to 189.75%. The promotion ability of soil enzyme activity by planting and turning over four types of green manure varies. Among them, the enhancement of soil enzyme activity by *Sesbania cannabina* was outstanding. Compared with the control treatment, the soil urease activity, soil alkaline phosphatase activity, soil sucrase activity and soil β -xylosidase activity of *Sesbania cannabina* were significantly increased by 685.95%, 80.78%, 63.42% and 19.10%, respectively ($P < 0.05$). In summary, compared to the other three green manure crops, planting and incorporating *Sesbania cannabina* into the soil is more effective in reducing alkalinity and enhancing soil enzyme activity in saline-sodic soils. These findings provide a valuable theoretical foundation for the ecological restoration of such soils.

Keywords: soda saline-sodic soil; green manure crop; soil enzyme activity; soil nutrient

我国盐碱地面积约为 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^{-2}$ [1], 盐碱地严重限制作物生长, 制约了农业发展, 其生态改良利用是农业发展面临的一个重要挑战。绿肥改良盐碱地作为一种生态友好型的改良方法, 近年来在盐碱地改良中引起了广泛关注。我国绿肥种质资源丰富, 主要有豆科、禾本科、十字花科和菊科等 [2]。绿肥植物因其抗逆性强等生长特性可以用来改良盐碱地, 提高土壤质量, 可为后续作物种植创造良好的土壤环境 [3-4]。绿肥改良盐碱土是将前茬种植的绿肥植物新鲜植株切碎或整株翻压入土壤, 通过其腐解来改善土壤理化性状, 提升土壤肥力和养分含量, 改善土壤盐碱环境, 提高土壤微生物种群数量, 进而提高下茬作物产量 [5-6]。研究表明, 将绿肥作物翻压还田能够加速土壤有机质的矿化分解, 绿肥还田后也将自身养分转化到土壤中, 增加了土壤中宏、微量养分 [7]。绿肥植物翻压腐解过程中可以产生大量可溶性有机物, 并提高土壤磷、钾等养分含量, 促进下茬作物对土壤养分的利用, 调节土壤养分平衡 [8-10]。已有研究表明, 种植绿肥作物的土壤含盐量、pH、土壤容重随时间推移逐渐降低, 土壤有机质、全氮、全磷含量则逐渐升高 [11-12]; 此外, 绿肥植物还田还可以促进微生物与作物之间的相互作用, 提高作物产量 [13]。

土壤酶是陆地生态系统功能的基础, 可作为评价土壤质量的生物指标 [14]。Luo 等 [15] 研究发现盐

碱土壤会抑制微生物的活动以及呼吸进程, 使土壤酶活性降低。因此改良土壤盐碱环境对土壤微生物活动及土壤酶活性有深远影响。针对松嫩平原西部地区重度盐碱荒地的生态改良, 探究绿肥种植翻压对苏打盐碱土壤养分和土壤酶活性的影响, 筛选出适宜的绿肥作物, 对重度苏打盐碱荒地改良及开发利用具有重要意义。

本研究通过田间试验, 在不施用化肥条件下, 评价田菁、草木樨、高丹草和‘朝牧 1 号’稗子 4 种绿肥作物对中重度苏打盐碱土壤的生长适应性, 以及绿肥作物种植翻压还田后对土壤基础理化性质、土壤酶活性和土壤养分含量的影响, 旨在寻求苏打盐碱地最适生的绿肥作物, 阐明绿肥作物种植翻压对苏打盐碱土壤的改良效果和机理, 进而丰富苏打盐碱土壤生态修复与利用的理论和技術。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

田间试验于吉林省大安市大岗子镇双岗子村 ($45^{\circ}15'44''\text{N}$, $123^{\circ}34'35''\text{E}$) 进行, 该地区位于松嫩平原西部, 气候类型属中温带季风气候。年平均降水量 413.7 mm , 年平均气温 4.3°C , 年平均积温 2921.3°C , 多年平均无霜期 132 d 。试验开始前为盐碱荒地, 土壤类型为苏打盐碱土, 土壤初始理化性质如表 1 所示。

表1 试验区土壤初始基本理化性质

Table 1 Initial basic physical and chemical properties of soil in the experimental area

土壤深度 Soil depth/cm	pH	电导率 Electrical conductivity /(mS · cm ⁻¹)	容重 Bulk density /(g · cm ⁻³)	有机质 Organic matter /(g · kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen /(g · kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus /(g · kg ⁻¹)	全钾 Total potassium /(g · kg ⁻¹)
0~20	10.20	0.60	1.68	3.39	0.31	0.39	0.44
20~40	10.50	0.94	1.74	2.30	0.37	0.43	0.51

1.2 供试材料

本研究中供试绿肥作物共计4种,包括田菁(*Sesbania cannabina*)、草木樨(*Melilotus officinalis*)、高丹草(*Sorghum bicolor* × *sudanense*)以及‘朝牧1号’稗子(*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv ‘Chaomu 1’)

1.3 试验设计

于2022—2023年进行田间试验,共设置5个处理,包括田菁种植翻压、草木樨种植翻压、高丹草种植翻压、‘朝牧1号’稗子种植翻压并以裸地作为对照(CK,不种任何作物,自然生长),各处理3次重复,共计15个小区,每个小区面积28 m²(2.8 m×10 m)。绿肥作物播种量以各自最适播种量为准,其中田菁播种量为75 kg · hm⁻²、草木樨播种量为30 kg · hm⁻²、高丹草播种量为30 kg · hm⁻²、‘朝牧1号’稗子播种量为15 kg · hm⁻²,每年6月中旬采用条播方式种植,各处理均不另施肥料,且在绿肥作物生长期不进行其他田间管理,于每年9月下旬绿肥生长至最大生物量时进行翻压。

1.4 测定项目与方法

绿肥作物种植后35 d,于各小区随机选取3个点,沿种植行取1 m记录出苗数,根据播种量确定基本苗数,计算成苗率。绿肥作物收获前,各小区选取长势均匀处1 m×1 m样方(避开边行),测定其株高并采集地表植物样本称得鲜重,置于105℃烘箱杀青30 min后70℃烘干至恒重,测定绿肥作物干物质生物量。除去因试验所需采集的样品外,其余绿肥植株收割测产后进行粉碎并均匀覆盖各小区,而后使用旋耕机翻压入土。

土壤样品于绿肥作物收获期进行采集,每个小区内随机选取3个点,采集0~20 cm和20~40 cm土层的土壤分别混匀,带回实验室自然风干,而后根据测定指标的不同土壤粒径大小需求研磨过筛。土壤pH和电导率(EC)通过土水比1:5提取浸提液并分别采用电位法和电导率仪测定,土壤容重采用环刀法测定,火焰分光光度计法测定土壤Na⁺,重铬酸钾氧化法测定土壤有机质,凯氏定氮法测定土壤全氮,NaOH熔融—钼蓝比色法测定土壤全磷,NaOH熔融—火焰光度计法测定土壤全钾,具体操

作步骤参照《土壤农业化学分析方法》^[16]和《土壤农化分析》^[17],土壤酶活性测定利用试剂盒(北京盒子生工科技有限公司)方法测定。

土壤钠吸附比(SAR, sodium adsorption ratio)和总碱度计算公式为:

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+} + Mg^{2+}]}{2}}} \quad (1)$$

式中,[Na⁺],[Ca²⁺]和[Mg²⁺]表示土壤浸提液中相应离子浓度(mmol_c · L⁻¹)。

$$\text{总碱度} = [CO_3^{2-}] + [HCO_3^-] \quad (2)$$

式中,[CO₃²⁻]和[HCO₃⁻]表示土壤浸提液中相应离子浓度(mmol_c · L⁻¹)。

1.5 数据处理与分析

采用Excel 2019进行数据汇总整理,SPSS分析软件进行单因素方差分析,利用Pearson相关分析对土壤理化性质间及其与土壤酶活性间进行相关性检验,使用Origin 2021进行绘图。

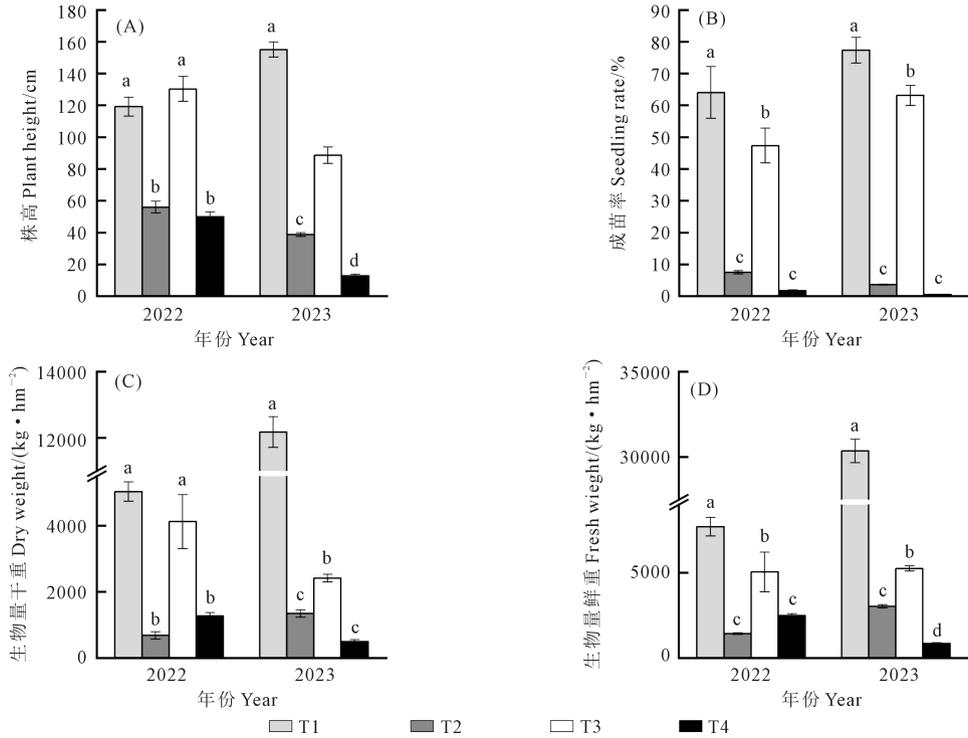
2 结果与分析

2.1 绿肥作物对苏打盐碱土的适应性特征

4种绿肥作物的株高(图1A)、成苗率(图1B)、生物量干重(图1C)及生物量鲜重(图1D)存在显著差异。综合两年数据分析,田菁和高丹草的株高、成苗率、生物量干重和生物量鲜重均显著高于其他两种绿肥($P < 0.05$),4种绿肥作物中田菁长势最好。2023年与2022年相比,‘朝牧1号’稗子的生物量干重由1 277.19 kg · hm⁻²下降到498.23 kg · hm⁻²,生物量鲜重由2 491.55 kg · hm⁻²下降到846.64 kg · hm⁻²;高丹草的生物量干重由4 122.92 kg · hm⁻²下降到2 413.62 kg · hm⁻²;田菁和草木樨的生物量鲜重分别由5 029.33、7 704.77 kg · hm⁻²增加到12 174.79、30 347.05 kg · hm⁻²。2022年,4种绿肥作物株高表现为高丹草(130.22 cm) > 田菁(119.11 cm) > 草木樨(56.00 cm) > ‘朝牧1号’稗子(49.89 cm);成苗率表现为田菁(64.01%) > 高丹草(47.31%) > 草木樨(7.49%) > ‘朝牧1号’稗子(1.74%);2023年,4种绿肥作物株高表现为田菁

(155.00 cm) > 高丹草 (88.56 cm) > 草木樨 (38.67 cm) > ‘朝牧 1 号’ 稗子 (12.78 cm); 成苗率表现为田菁 (77.28%) > 高丹草 (63.08%) > 草木樨 (3.63%) > ‘朝牧 1 号’ 稗子 (0.50%)。总体而言, 田菁在 pH =

10、总碱度 $5 \sim 7 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的苏打盐碱土壤生长适应性显著优于其他三种绿肥, 其生物量最大并逐年增加, 高丹草次之, 而草木樨相对较低, ‘朝牧 1 号’ 稗子生物量最低。



注: T1: 田菁; T2: 草木樨; T3: 高丹草; T4: ‘朝牧 1 号’ 稗子。不同字母表示同一年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: T1: *Sesbania cannabina*; T2: *Melilotus officinalis*; T3: *Sorghum bicolor* × *sudanense*; T4: *Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv ‘Chaomu 1’. Different letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 1 不同绿肥作物适应性生长差异

Fig. 1 Differences in adaptive growth of different green manure crops

2.2 绿肥作物对土壤理化性质的影响

连续种植翻压不同绿肥作物两年后的土壤理化指标测定结果如表 2 和图 2 所示, 各处理 0~20 cm 土层土壤容重和土壤含水量均显著低于 20~40 cm 土层。在 0~20 cm 土层, 田菁土壤容重 $1.17 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 与 CK 相比显著降低了 $0.21 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ($P < 0.05$), 高丹草和‘朝牧 1 号’稗子土壤容重均低于 CK 处理 ($P > 0.05$); 在 20~40 cm 土层, 各处理土壤容重与 CK 处理相比均无显著性差异。通过分析土壤含水量可知, 20~40 cm 土层的田菁土壤含水量显著低于其他处理。在 0~20 cm 土层, 田菁土壤含水量 4.54%, 较 CK 降低了 2.71%, 在该土层高丹草土壤含水量最高, 达 11.76%; 在 20~40 cm 土层, 各处理土壤含水量均显著低于 CK 处理 ($P < 0.05$), 绿肥作物中以田菁土壤含水量最低, 含水量为 14.65%, 另外三种绿肥作物间的土壤含水量无显著性差异 ($P > 0.05$)。

种植翻压田菁土壤 pH 和 EC 与其他处理相比均为最低。在 0~20 cm 土层, 田菁土壤 pH 和 EC 分别为 9.68 和 $0.28 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 与 CK 相比, 平均降低了 0.5 个单位和 51.72% ($P < 0.05$), 其他处理土壤的 pH 与 CK 间无显著性差异, 高丹草 EC 值最高 ($0.95 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)、田菁的 EC 值最低 ($0.28 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$); 在 20~40 cm 土层, 田菁和高丹草土壤 pH 较 CK 处理分别显著降低了 0.15 和 0.08 个单位 ($P < 0.05$), 该土层中草木樨 EC 值最大 ($0.94 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)。土壤钠吸附比 (SAR) 和总碱度是评估土壤盐碱化程度的关键指标。各处理 0~20 cm 土层 SAR 及总碱度低于 20~40 cm。在 0~20 cm 土层, ‘朝牧 1 号’稗子的 SAR 显著高于田菁和高丹草处理 ($P < 0.05$), 而田菁和高丹草处理土壤 SAR 与 CK 相比无显著性差异。与其他绿肥处理相比, 田菁 0~20 cm 土层的土壤总碱度显著降低, 但与 CK 间无显著性差异; 在 20~40 cm 土层, 田菁处理土壤 SAR 显

著低于 CK 及其他绿肥处理,各处理间的土壤总碱度无显著性差异($P>0.05$)。

通过分析土壤养分数据可知(图 2),在 0~20 cm 土层,各绿肥作物土壤全氮含量显著高于 CK($P<0.05$),其中高丹草土壤的全氮含量显著高于其他绿肥作物土壤,整体表现为高丹草>田菁>‘朝牧 1 号’稗子>草木樨>CK,按全氮含量由大到小排序,各处理较 CK 分别显著增加 162.22%、99.91%、

79.31%、61.43%;全磷含量表现为田菁>草木樨>高丹草>‘朝牧 1 号’稗子>CK,其中田菁土壤的全磷含量较 CK 显著增加 58.45%;田菁土壤的全钾含量较 CK 增加 33.99%;田菁土壤有机质含量最高(9.92 g·kg⁻¹),较 CK 显著增加 189.75%;在 20~40 cm 土层,田菁土壤养分含量最高,其中仅全钾含量均显著高于其他绿肥作物土壤,与 CK 相比,田菁土壤有机质、全钾和全磷含量均得到了显著提升($P<0.05$)。

表 2 不同绿肥作物的土壤基础理化性质

Table 2 Soil basic physical and chemical properties of different green manure crops

处理 Treatment	土壤深度 Soil depth/cm	pH	电导率 Electrical conductivity /(mS·cm ⁻¹)	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	土壤含水量 Soil moisture /%	SAR /(mmol _c ·L ⁻¹) ^{1/2}	总碱度 Total alkalinity /(mmol _c ·L ⁻¹)
CK	0~20	10.18±0.07a	0.58±0.06b	1.38±0.05a	7.25±0.35b	6.38±0.13ab	5.18±0.42ab
	20~40	10.21±0.02a	0.90±0.08a	1.60±0.07a	27.34±1.50a	7.78±0.25a	6.71±0.41a
田菁 <i>Sesbania cannabina</i>	0~20	9.68±0.08b	0.28±0.09c	1.17±0.05b	4.54±0.19c	4.66±0.45b	4.27±0.07b
	20~40	10.06±0.02c	0.61±0.01b	1.45±0.02a	14.65±0.03c	5.50±0.21b	6.07±0.13a
草木樨 <i>Melilotus officinalis</i>	0~20	10.16±0.03a	0.77±0.10ab	1.39±0.07a	6.00±0.68bc	5.92±0.69ab	5.67±0.43a
	20~40	10.20±0.03ab	0.94±0.01a	1.46±0.02a	21.74±1.10b	7.72±0.31a	7.20±0.64a
高丹草 <i>Sorghum bicolor</i> × <i>sudanense</i>	0~20	10.17±0.03a	0.95±0.08a	1.26±0.08ab	11.76±0.71a	4.83±0.26b	5.82±0.26a
	20~40	10.13±0.03bc	0.62±0.07b	1.61±0.04a	21.24±1.14b	7.59±0.52a	7.07±0.44a
‘朝牧 1 号’稗子 <i>Echinochloa crusgalli</i> (L.) <i>Beauv</i> ‘Chaomu 1’	0~20	10.10±0.07a	0.54±0.05b	1.32±0.03ab	7.09±0.41b	7.61±0.92a	5.76±0.41a
	20~40	10.27±0.02a	0.54±0.09b	1.61±0.08a	21.78±0.76b	8.30±0.62a	7.36±0.53a

注:表中数据为平均值±标准差,不同字母表示同一年份同一土壤深度不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: The data in the table is mean ± standard deviation. Different letters indicate significant differences among treatments of the same soil depth in the same year ($P<0.05$).

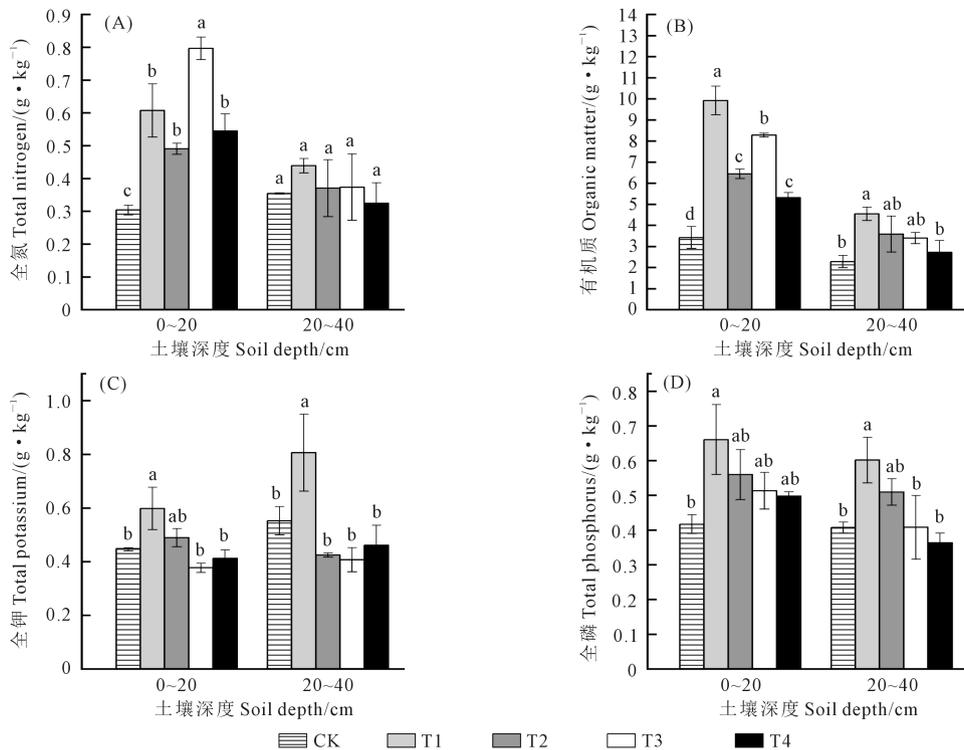


图 2 不同绿肥作物对土壤有机质及养分的影响

Fig.2 Effects of different green manure crops on soil organic matter and nutrients

2.3 绿肥作物对土壤酶活性的影响

不同绿肥作物土壤酶活性如图 3 所示,种植翻压四种绿肥处理除过氧化氢酶活性与 CK 相比无显著性差异外,绿肥作物能提高耕层土壤(0~20 cm)其他四种酶活性。过氧化氢酶参与抗氧化防御系统,对抗有害的过氧化物质。在 0~20 cm 土层,与 CK 相比,种植翻压草木樨的土壤过氧化氢酶活性显著提高 4.16%; β -木糖苷酶参与木糖的水解,将木糖分解为葡萄糖。这对于分解木质纤维素和其他复杂的多糖类物质,释放植物与土壤中的碳和能量具有重要作用。种植翻压草木樨、高丹草、田菁、‘朝牧 1 号’稗子处理的土壤 β -木糖苷酶活性分别显著提高 43.24%、21.86%、19.10%、18.33%;碱性磷酸酶在土壤中参与有机磷的水解,将有机磷酸转化为无机磷,供植物生长发育吸收利用。土壤碱性磷酸酶活性表现为田菁>‘朝牧 1 号’稗子>高丹草>草木樨>CK,较 CK 处理分别显著提高 80.78%、

57.76%、54.54%、47.06%;蔗糖酶主要将蔗糖分解为葡萄糖和果糖,为植物和微生物提供能量。‘朝牧 1 号’稗子处理的土壤蔗糖酶活性最高,其次是高丹草处理、草木樨处理,最后是田菁处理,较 CK 分别显著提高 490.77%、464.63%、157.75%、63.42%;土壤脲酶主要是催化尿素水解,将尿素中的氮释放到土壤中,以供植物吸收利用。田菁土壤脲酶活性显著高于其他绿肥处理,高丹草和‘朝牧 1 号’稗子处理次之,与 CK 相比分别显著提高 685.95%、457.34%、314.43%,草木樨处理与 CK 处理无显著性差异。在 20~40 cm 土层,种植翻压田菁和草木樨土壤的土壤过氧化氢酶活性显著高于其他处理;田菁处理土壤碱性磷酸酶活性最高,较 CK 显著提高 52.44%;高丹草和草木樨处理土壤脲酶显著高于其他处理,分别是 CK 的 5.76 和 5.65 倍。综上所述,种植翻压绿肥作物可有效提升耕层土壤酶活性。

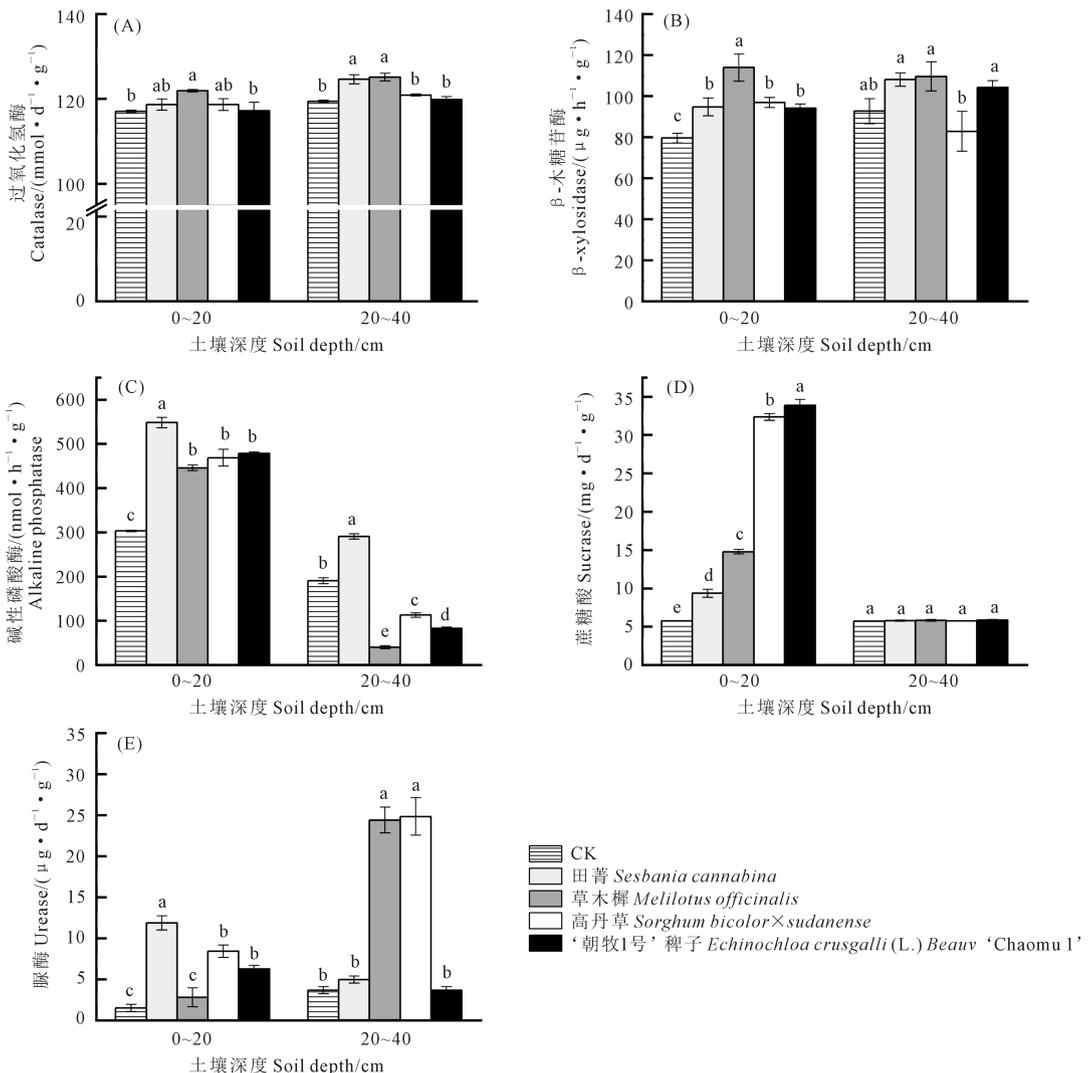


图 3 不同绿肥作物对土壤酶活性的影响

Fig.3 Effects of different green manure crops on soil enzyme activities

2.4 绿肥作物生物量、耕层土壤理化性质及酶活性相关性分析

4种绿肥作物生物量、耕层土壤理化性质及土壤酶活性间的 Pearson 相关性分析结果表明(图4),各指标间存在不同程度的相关性。绿肥作物生物量与盐碱指标 pH、EC、SAR 和总碱度呈显著负相关关系;生物量与养分及酶活性指标全钾、土壤有机质、脲酶和碱性磷酸酶呈显著正相关关系。pH 与 EC 和总碱度呈显著正相关关系;pH 与 TK、SOM 和碱性磷酸酶呈显著负相关关系。EC 与水分含量呈显著正相关关系,总碱度与水分含量和蔗糖酶呈显著正相关关系,水分含量与全钾呈显著负相关关系,容重与脲酶和碱性磷酸酶呈显著负相关关系,全氮与碱性磷酸酶和蔗糖酶呈显著正相关关系,全钾与土壤有机质呈显著正相关关系,全钾与蔗糖酶活性呈显著负相关关系,土壤有机质与脲酶和碱性磷酸酶活性呈显著正相关关系, β -木糖苷酶与过氧化氢酶活性呈显著正相关关系,脲酶与碱性磷酸酶活性呈极显著正相关关系。

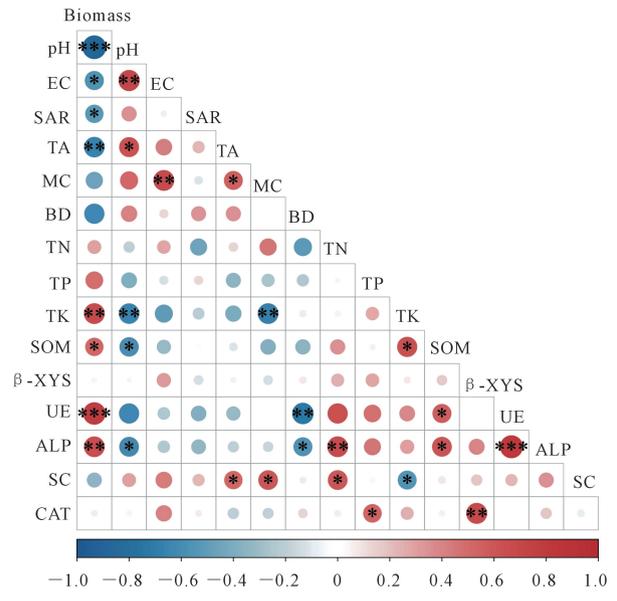
3 讨论

3.1 不同绿肥作物对苏打盐碱地种植的适应性

本研究表明,不同绿肥作物生长存在显著差异,田菁和高丹草株高及成苗率显著优于草木樨和‘朝牧1号’稗子。在种植第二年,田菁的生物量干重和生物量鲜重均显著高于其他绿肥处理($P < 0.05$)。综上所述,田菁相较于其他三种绿肥作物具有更强的耐盐碱生长能力,对松嫩平原西部苏打盐碱地有更好的适应性。已有研究表明,田菁在 $2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的盐浓度胁迫下生长不受抑制,反而会促进其生长^[18]。谢文军等^[19]研究发现,在未施用改良剂的滨海重度盐渍化土壤上种植田菁,其地上部生物量仍可超过 $14 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,田菁表现出优异的耐盐碱能力。在黑龙江省大庆地区苏打盐碱地,种植田菁表现出较强的适应性并逐年提高,同时也促进了其他植被生长^[20]。绿肥作物生物量与土壤指标相关性分析结果表明,生物量与 pH、EC、SAR 和总碱度呈显著负相关关系,生物量与 TK、SOM、UE 和 ALP 呈显著正相关关系。说明在本研究中,绿肥作物生物量越大,对土壤修复作用越好,土壤盐碱性越低、有机质和全钾含量越高、土壤脲酶和碱性磷酸酶活性越强。

3.2 不同绿肥作物种植翻压对土壤物理性质及盐碱性质的改良作用

不同处理对土壤容重的改善存在差异,各处理 0~20 cm 土层容重和含水量均显著低于 20~40 cm



注: Biomass: 生物量; EC: 电导率; SAR: 土壤钠吸附比; TA: 总碱度; MC: 水分含量; BD: 容重; TN: 全氮; TP: 全磷; TK: 全钾; SOM: 土壤有机质; β -XYS: β -木糖苷酶; UE: 脲酶; ALP: 碱性磷酸酶; SC: 蔗糖酶; CAT: 过氧化氢酶。不同颜色代表相关性大小, *、**、*** 分别代表在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.001$ 水平显著。

Note: Biomass: Biomass; EC: Electrical conductivity; SAR: Soil sodium adsorption ratio; TA: Total alkalinity; MC: Moisture content; BD: Bulk density; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; TK: Total potassium; SOM: Soil organic matter; β -XYS: β -Xylosidase; UE: Urease; ALP: Alkaline phosphatase; SC: Sucrase; CAT: Catalase. *, ** and *** represent the significant at the $P < 0.05$, $P < 0.01$, and $P < 0.001$ level, respectively.

图4 不同绿肥作物生物量、耕层土壤理化性质和土壤酶活性的相关性

Fig.4 Correlations between biomass of different green manure crops, physical and chemical properties of topsoil and soil enzyme activities

土层,这一结果表明试验地苏打盐碱土下层渗水性差,土壤黏性强,致使容重和含水率增大。苏打盐碱土壤的特点之一是高 pH、高盐含量,可直接导致植物生长受抑制甚至死亡。在本研究中,种植翻压 4 种绿肥作物对耕层土壤 pH 均有降低效果,其中田菁土壤 pH 最低。土壤 EC 可以表征土壤中可溶性盐分含量,本研究表明,0~20 cm 土层中,仅田菁土壤 EC 较 CK 显著降低 $0.30 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$;在 20~40 cm 土层,与 CK 相比,‘朝牧1号’稗子、田菁和高丹草的土壤 EC 均显著降低。张国发等^[20]研究表明,田菁种植翻压可降低大庆苏打盐碱土壤 pH 和 EC。刘慧等^[21]研究表明,油菜绿肥翻压能够降低新疆盐碱土壤 pH 和 EC。印度南部半干旱盐碱区轮作绿肥后,在减少石膏使用的基础上,降低了 pH、电导率

及可交换钠百分比^[22]。本研究结果与上述前人研究结果相似。此外,本研究发现,‘朝牧 1 号’稗子土壤耕层 SAR 较 CK 处理有所上升,其余三种绿肥作物土壤 SAR 较 CK 均降低。在 0~20 cm 耕层土壤总碱度方面,田菁土壤较 CK 未见显著性差异,但田菁耕层土壤总碱度显著低于其他三种绿肥作物土壤。这与前人研究得出的不同绿肥作物种植翻压皆显著降低土壤碱化度、土壤 SAR 和总碱度的结果^[20-21]并不完全一致。相关分析表明生物量与土壤 SAR 和总碱度呈显著负相关关系,上述不一致的结果可能是由于三种绿肥生物量过低,导致翻压入土的绿肥腐解量不足以显著改善土壤 SAR 和土壤总碱度。综上所述,本研究 4 种绿肥作物对苏打盐碱土壤盐碱性均有改良作用,其中以田菁改善效果最好。

3.3 不同绿肥作物种植翻压对土壤养分及土壤酶活性的影响

研究表明,4 种绿肥作物种植翻压不同程度的增加了耕层土壤有机质、全氮含量,这与前人研究认为绿肥作物可提高土壤有机质、全氮等养分含量的结果一致^[23-26],绿肥作物种植翻压腐解后增加了土壤中的氮素含量,进而促进了土壤有机质的提升。有研究表明,在盐碱地中埃及三叶草可作为优质绿肥,可以降低矿物氮肥施用量,提高小麦产量^[27]。在河套灌区盐碱地种植饲料油菜,可增加土壤 C、N 组分和相关酶活性,进而提高小麦产量^[28]。在本研究中,绿肥作物种植翻压一定程度上增加了土壤全磷、全钾含量,这与前人研究结果绿肥植物增加土壤全氮、全磷和全钾含量的研究结果一致^[29-31],而与朱小梅等^[32]对绿肥种植降低滩涂生地土壤全钾含量的研究结果不一致。这可能是由于绿肥作物吸收了土壤中的钾供给自身生长,而在其收获后绿肥未翻压还田。4 种绿肥作物中以田菁对苏打盐碱土壤养分含量提升效果最佳。

土壤酶活性是评估土壤肥力的重要指标,其与土壤养分紧密关联,反映了土壤养分转化的程度^[33]。研究表明,种植翻压 4 种绿肥对耕层土壤过氧化氢酶活性影响不显著,这与王晓春等^[34]研究结果一致。绿肥作物种植翻压提升了耕层土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和 β -木糖苷酶活性,且较 CK 显著提高。这与前人研究得出的绿肥可提升土壤酶活性的结论一致^[35-38]。本研究中,绿肥作物对土壤酶活性的提升存在差异,这可能与 4 种绿肥作物不同根系发达程度和翻压生物量有关^[39]。综上所述,在松嫩平原西部苏打盐碱土种植绿肥作物,

能够提升土壤酶活性、培肥地力,4 种绿肥作物中田菁提升效果最佳,研究结果对中重度苏打盐碱土壤提升地力及开发利用具有借鉴意义。

4 结 论

1) 4 种不同绿肥作物中,田菁对松嫩平原西部苏打盐碱土壤具有更强的适应性,且成苗率及生物量逐年提高。

2) 相较于 CK 处理,种植翻压田菁入土可显著降低土壤盐碱性,其土壤 pH 降低 0.15~0.50 个单位;同时可提高土壤全氮、全磷、全钾和有机质含量,其中有机质含量提升最大,提升幅度为 99.30%~189.75%;此外,种植翻压田菁还可提高土壤酶活性,其中碱性磷酸酶和脲酶提升效果更好。

3) 整体而言,田菁对吉林省西部的重度苏打盐碱土壤改良具有优异效果,可作为优质适应性绿肥作物用于生态改良修复松嫩平原苏打盐碱土壤。

参 考 文 献:

- [1] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.
YANG J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837-845.
- [2] 李子双, 廉晓娟, 王薇, 等. 我国绿肥的研究进展[J]. 草业科学, 2013, 30(7): 1135-1140.
LI Z S, LIAN X J, WANG W, et al. Research progress of green manure in China[J]. Pratacultural Science, 2013, 30(7): 1135-1140.
- [3] BUGG L R, MCGOURTY G, SARRANTONIO M, et al. Comparison of 32 cover crops in an organic vineyard on the North coast of California[J]. Biological Agriculture & Horticulture, 2012, 13(1): 63-81.
- [4] CHEN G H, WEIL R R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 117: 17-27.
- [5] 潘福霞, 鲁剑巍, 刘威, 等. 三种不同绿肥的腐解和养分释放特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 216-223.
PAN F X, LU J W, LIU W, et al. Study on characteristics of decomposing and nutrients releasing of three kinds of green manure crops[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1): 216-223.
- [6] YANG X, DRURY C, REYNOLDS D, et al. Legume cover crops provide nitrogen to corn during a three-year transition to organic cropping [J]. Agronomy Journal, 2019, 111(6): 3253-3264.
- [7] 兰延, 黄国勤, 杨滨娟, 等. 稻田绿肥轮作提高土壤养分增加有机碳库[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 146-152.
LAN Y, HUANG G Q, YANG B J, et al. Effect of green manure rotation on soil fertility and organic carbon pool[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(13): 146-152.
- [8] 蔺鑫, 李想, 王安宁, 等. 冀东滨海盐碱地造林密度对白榆生长和土壤理化性质的影响[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 66-74.
LIN X, LI X, WANG A N, et al. Effects of planting densities on the growth and soil physico-chemical properties of ulmus pumila in seashore saline-alkali land of Jidong[J]. Journal of Northwest Forestry

- University, 2018, 33(5): 66-74.
- [9] 何海锋, 吴娜, 刘吉利, 等. 柳枝稷种植年限对盐碱土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 285-292.
HE H F, WU N, LIU J L, et al. Effects of planting years of *Panicum virgatum* on soil physical and chemical properties[J]. Ecology and Environment Sciences, 2020, 29(2): 285-292.
- [10] GILARDI G, PUGLIESE M, GULLINO L M, et al. Effect of different organic amendments on lettuce fusarium wilt and on selected soilborne microorganisms[J]. Plant Pathology, 2016, 65(5): 704-712.
- [11] 阮佳萍, 杜照奎, 吴夏杉, 等. 七种草本植物对台州滩涂盐渍土的改良效果[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(16): 50-56.
RUAN J P, DU Z K, WU X S, et al. Evaluation of the effects of seven herbaceous plants on the improvement of saline soil in the tidal flat reclamation area of Taizhou[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(16): 50-56.
- [12] 贾晓东, 王涛, 任全进, 等. 3种药赏两用植物对滨海盐碱土改良效应的比较[J]. 植物资源与环境学报, 2011, 20(4): 76-82.
JIA X D, WANG T, REN Q J, et al. Comparison of improvement effect of three plants for both medicinal and ornamental uses on coastal saline-alkali soil[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2011, 20(4): 76-82.
- [13] Larkin, R P. Green manures and plant disease management[J]. CAB Reviews, 2013, 8(37): 1-10.
- [14] 王文锋, 李春花, 黄绍文, 等. 不同施肥模式对设施菜田土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 873-882.
WANG W F, LI C H, HUANG S W, et al. Effects of different fertilization patterns on soil enzyme activities in greenhouse vegetable field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 873-882.
- [15] LUO J Y, ZHANG S, ZHU X Z, et al. Effects of soil salinity on rhizosphere soil microbes in transgenic Bt cotton fields[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(7): 1624-1633.
- [16] 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, 2000.
LU R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] 魏秀君, 殷云龙, 芦治国, 等. NaCl胁迫对5种绿化植物幼苗生长和生理指标的影响及耐盐性综合评价[J]. 植物资源与环境学报, 2011, 20(2): 35-42.
WEI X J, YIN Y L, LU Z G, et al. Effects of NaCl stress on growth and physiological indexes of five greening plant seedlings and comprehensive evaluation of their salt tolerance[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2011, 20(2): 35-42.
- [19] 谢文军, 王济世, 靳祥旭, 等. 田菁改良重度盐渍化土壤的效果分析[J]. 中国农学通报, 2016, 32(6): 119-123.
XIE W J, WANG J S, JIN X X, et al. Effect of *Sesbania cannabina* cultivation on severe salinity soil fertility improvement[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(6): 119-123.
- [20] 张国发, 吴园园, 徐太海, 等. 田菁秸秆还田对松嫩平原盐碱土改良效果的研究[J]. 大庆师范学院学报, 2018, 38(3): 48-50.
ZHANG G F, WU Y Y, XU T H, et al. Study on the improvement effect of returning *sesbania* straw to the field on saline alkali soil in Songnen Plain[J]. Journal of Daqing Normal University, 2018, 38(3): 48-50.
- [21] 刘慧, 李子玉, 白志贵, 等. 油菜绿肥翻压还田对新疆盐碱土壤的改良效果研究[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 914-923.
LIU H, LI Z Y, BAI Z G, et al. Effects of rape green manure returned to field on saline alkali soil improvement in Xinjiang[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(6): 914-923.
- [22] SEENIVASAN R, PRASATH V, MOHANRAJ R. Restoration of sodic soils involving chemical and biological amendments and phytoremediation by *Eucalyptus camaldulensis* in a semiarid region[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2015, 37(3): 575-586.
- [23] 张立宾, 郭新霞, 常尚连. 田菁的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(2): 310-312.
HANG L B, GUO X X, CHANG S L. Salt tolerance of *sesbania* and its improvement effect on coastal saline soil[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(2): 310-312.
- [24] 孙文彦, 孙敬海, 尹红娟, 等. 绿肥与苗木间种改良苗圃盐碱地的研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(5): 1221-1225.
SUN W Y, SUN J H, YIN H J, et al. Effect of winter green manure on improving saline-alkali nursery garden land[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(5): 1221-1225.
- [25] 景宇鹏, 张建中, 李秀萍, 等. 种植绿肥作物对河套灌区盐碱土改良效果研究[J]. 北方农业学报, 2019, 47(6): 42-46.
JING Y P, ZHANG J Z, LI X P, et al. Study on the effect of planting green manure crops on the improvement of saline-alkali soil in Hetao irrigation area[J]. Journal of Northern Agriculture, 2019, 47(6): 42-46.
- [26] 高高涓, 周国朋, 曹卫东. 南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12): 2115-2126.
GAO C J, ZHOU G P, CAO W D, et al. Effects of milk vetch (*As-tragalus sinicus*) as winter green manure on rice yield and rate of fertilizer application in rice paddies in south China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(12): 2115-2126.
- [27] EL-SHAMY M, EL-NAQMA K, EL-SHERPINY M. Possibility of using clover residues, green manures as a partial substitute of mineral nitrogen fertilizer to wheat plants grown on normal and saline soils[J]. Journal of Global Agriculture and Ecology, 2022, 14(4): 51-63.
- [28] YU R, ZHANG H Y, CHANG F D, et al. Mixed sowing of feed rape and *Vicia villosa* can substitute nitrogen fertilizer to improve soil multifunctionality in the Hetao irrigation district[J]. Catena, 2024, 235: 107617.
- [29] LI F X, GUO Y Z, WANG Z J, et al. Influence of different phytoremediation on soil microbial diversity and community composition in saline-alkaline land[J]. International Journal of Phytoremediation, 2022, 24(5): 507-517.
- [30] 牛雅琼, 吴兴洪, 冉斌, 等. 豆科绿肥翻压对猕猴桃产质量和土壤肥力的影响[J]. 北方园艺, 2020, (5): 87-94.
NIU Y Q, WU X H, RAN B, et al. Effects of turning leguminous green manure on yield quality and soil fertility of kiwi fruit[J]. Northern Horticulture, 2020, (5): 87-94.
- [31] 魏晓斌, 王志锋, 于洪柱, 等. 不同生长年限苜蓿对盐碱地土壤肥力的影响[J]. 草业科学, 2013, 30(10): 1502-1507.
WEI X B, WANG Z F, YU H Z, et al. Effects of alfalfa with different growth years on soil fertility in saline-alkali land[J]. Pratacultural Science, 2013, 30(10): 1502-1507.