

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170952

郭耀东, 程曼, 赵秀峰, 郝保平, 张延芳, 曹卫东, 郑普山. 轮作绿肥对盐碱地土壤性质、后作青贮玉米产量及品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(6): 856-864

GUO Y D, CHENG M, ZHAO X F, HAO B P, ZHANG Y F, CAO W D, ZHENG P S. Effects of green manure rotation on soil properties and yield and quality of silage maize in saline-alkali soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(6): 856-864

## 轮作绿肥对盐碱地土壤性质、后作青贮玉米产量及品质的影响\*

郭耀东<sup>1</sup>, 程曼<sup>2</sup>, 赵秀峰<sup>2</sup>, 郝保平<sup>2</sup>, 张延芳<sup>3</sup>, 曹卫东<sup>4</sup>, 郑普山<sup>2\*\*</sup>

(1. 山西省农业科学院玉米研究所 忻州 034000; 2. 山西省农业科学院农业环境与资源研究所 太原 030031; 3. 山西省农业科学院 太原 030031; 4. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 北京 100081)

**摘要:** 为明确种植和翻压绿肥改良和培肥盐碱地的效果, 采用田间试验研究了种植和翻压毛叶苕子(*Vicia villosa* Roth.)、田菁(*Sesbania cannabina* Poir.)、草木樨(*Melilotus officinalis* L.)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、箭筈豌豆(*Vicia sativa* L.)和黑麦草(*Lolium perenne* L.) 6种绿肥对中度苏打盐碱地土壤理化性质、返还土壤的N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O数量、后作青贮玉米(*Zea mays* L.)鲜草产量及蛋白质含量的影响。结果表明: 与对照(不种植绿肥)相比, 绿肥生长后期可显著提高土壤含水量1.0%~6.2%, 使pH降低0.03~0.43, EC降低0.12~1.50 mS·cm<sup>-1</sup>; 翻压绿肥可返还土壤N 15.6~195.4 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 5.3~58.8 kg·hm<sup>-2</sup>和K<sub>2</sub>O 34.5~127.9 kg·hm<sup>-2</sup>, 使土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾分别提高0.42~1.86 g·kg<sup>-1</sup>、0.05~0.34 g·kg<sup>-1</sup>、0.5~32.3 mg·kg<sup>-1</sup>、0.42~4.65 mg·kg<sup>-1</sup>和3.8~26.1 mg·kg<sup>-1</sup>; 与对照相比, 青贮玉米的鲜草产量和蛋白质含量分别增加1 294~19 391 kg·hm<sup>-2</sup>和0.4~23.9 mg·g<sup>-1</sup>。总体而言, 种植和翻压豆科绿肥在保蓄土壤水分, 降低土壤pH和EC, 提升土壤有机质含量和N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O养分数量(特别是N素数量), 提高青贮玉米鲜草产量与蛋白质等方面的效果均显著优于禾本科绿肥, 其中以适应性强、生长快、生物量大的毛叶苕子处理的改良、培肥土壤, 生产优质牧草的效果最好; 其次是草木樨处理。种植和翻压豆科绿肥可有效改良中度苏打盐碱地, 显著提高土壤肥力, 提供无机养分替代部分化肥, 提高优质牧草的生产, 是适合大同盆地中度苏打盐碱地经济、有效和环保的改良模式, 对稳定耕地面积、保证粮食安全具有重要意义。

**关键词:** 绿肥; 盐碱地; 土壤理化性状; 青贮玉米; 产量; 品质

中图分类号: S142 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2018)06-0856-09

## Effects of green manure rotation on soil properties and yield and quality of silage maize in saline-alkali soils\*

GUO Yaodong<sup>1</sup>, CHENG Man<sup>2</sup>, ZHAO Xiufeng<sup>2</sup>, HAO Baoping<sup>2</sup>, ZHANG Yanfang<sup>3</sup>, CAO Weidong<sup>4</sup>, ZHENG Pushan<sup>2\*\*</sup>

(1. Maize Research Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Xinzhou 034000, China; 2. Institute of Agricultural

\* 公益性行业(农业)科研专项(201103005)、国家绿肥产业技术体系(CARS-22)和山西省农业科学院推广项目(2015CGZH016)资助

\*\* 通信作者: 郑普山, 主要从事土壤改良与绿肥利用研究。E-mail: 18636854896@163.com

郭耀东, 主要从事农作物栽培和技术推广工作。E-mail: ymsgyd@163.com

收稿日期: 2017-10-21 接受日期: 2018-02-15

\* This study was supported by the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201103005), and China Agriculture Research System of Green Manure Industry (CARS-22) and the Promotion Project of Shanxi Academy of Agricultural Sciences (2015CGZH016).

\*\* Corresponding author, E-mail: 18636854896@163.com

Received Oct. 21, 2017; accepted Feb. 15, 2018

Environment and Resource, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China; 3. Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China; 4. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Saline-alkali lands are widespread in Datong Basin, Shanxi Province. For years, little manure has been used to improve the saline-alkali soils in the region. The barren soil and harsh ecological environment have resulted in a very low production efficiency of agriculture. Green manure has not only been an important part of modern agriculture, but also been traditionally used in agriculture in China for improvement of soil quality. In order to explore the effects of plantation and incorporation of green manure in saline-alkali soil management, a field experiment was conducted to explore the effects of green manure crops in middle level saline-alkali lands on soil physic-chemical properties, maize silage yield and protein content. Soil water content, pH, EC, nitrogen, available nitrogen, available phosphorus and available potassium were analyzed. Six types of green manure (*Vicia villosa* Roth., *Sesbania cannabina* Poir., *Melilotus officinalis* L., *Medicago sativa* L., *Vicia sativa* L. and *Lolium perenne* L.) were used in the study. Results showed that compared with the control (no green manure plantation), soil water content increased by 1.0%–6.2% during the middle and later growth periods of green manure, whereas soil pH and EC decreased by 0.03–0.43 mS·cm<sup>-1</sup> and 0.12–1.50 mS·cm<sup>-1</sup>, respectively. Incorporation of green manure led to the return of 15.6–195.4 kg(N)·hm<sup>-2</sup>, 5.3–58.8 kg(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)·hm<sup>-2</sup> and 34.5–127.9 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup> to soil. With overturning of green manure, soil organic matter, total nitrogen, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium contents in the 0–20 cm soil layer increased by 0.42–1.86 g·kg<sup>-1</sup>, 0.05–0.34 g·kg<sup>-1</sup>, 0.5–32.3 mg·kg<sup>-1</sup>, 0.42–4.65 mg·kg<sup>-1</sup> and 3.8–26.1 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. The yield and protein content of silage maize increased by 1 294–19 391 kg·hm<sup>-2</sup> and 0.4–23.9 mg·g<sup>-1</sup>, respectively. Compared with *L. perenne*, *V. villosa* and *M. suaveolens* increased soil water content respectively by 1.2%–5.2% and 1.0%–5.0% during the middle and later growth periods, whereas decreased soil pH by 0.06–1.30 and 0.06–1.27 and EC by 0.08–0.51 mS·cm<sup>-1</sup> and 0.08–0.47 mS·cm<sup>-1</sup>, respectively. Overturning of *V. villosa* and *M. suaveolens* respectively returned 179.8 kg(N)·hm<sup>-2</sup> and 150.3 kg(N)·hm<sup>-2</sup>, 40.9 kg(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)·hm<sup>-2</sup> and 36.2 kg(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)·hm<sup>-2</sup>, and 65.0 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup> and 93.4 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup> to the soil. The yield of silage maize increased respectively by 18 097 kg·hm<sup>-2</sup> and 14 903 kg·hm<sup>-2</sup> with overturning of *V. villosa* and *M. suaveolens*, and protein content increased respectively by 23.5 mg·g<sup>-1</sup> and 19.2 mg·g<sup>-1</sup>, compared with overturning of *L. perenne*. In general, the cultivation of legume green manures was better than graminaceous green manure (*L. perenne*) in decreasing soil pH, keeping soil water content, returning N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O to soil and enhancing soil organic matter. Among the green manures used, *V. villosa* was the most effective, followed by *M. suaveolens*. In short, the approach of “planting and incorporating green manure and then rotation” was applicable in similar saline-alkali soil conditions. The planting and incorporation of green manure economically, effectively and environmentally improved medium saline lands, enhanced soil fertility and returned nutrient to soil.

**Keywords:** Green manure; Saline-alkali soil; Soil physical and chemical property; Silage maize; Yield; Quality

盐碱地改良措施包括水利工程措施、化学改良措施和农业改良措施。水利工程措施是最早采用、也是效果最好的改良措施,但需要大量的淡水资源和投资,且用于维护与管理的代价也较大。化学改良措施是通过施用化学物质来降低土壤较高的 pH,但化学措施必须与农田基本建设和水利措施相结合。目前燃煤电厂脱硫副产品脱硫石膏已替代天然石膏用于盐碱地改良,但个别电厂的脱硫石膏中某些重金属含量较高,长期或过量施用存在重金属污染土壤和进入食物链的风险<sup>[1]</sup>,还人为地增加土壤盐分含量。农业改良措施是通过精耕细作、浅沟种植、地面覆盖、增施有机肥改善土壤结构等措施减少土表水分蒸发和抑制盐分上移表聚与耕层积盐,或通过筛选耐盐、喜盐的作物进行适应性种植,但农业改良措施改良盐碱地的效果均受到水源、改良时间、土壤含盐量及盐碱化程度等条件的制约。

大同盆地是山西省盐碱地主要分布区,面积

20.4 万 hm<sup>2</sup>, 占全省盐碱地面积的 66%<sup>[2]</sup>, 类型复杂、苏打含量高,表层含盐量高,但土地资源丰富,开发潜力巨大。大同盆地气候属暖温干旱大陆性季风气候,平均海拔 1 100 m,年均温 7.0 ℃左右,多年平均降雨量 398.9 mm,蒸发量 1 876 mm,70%的降雨主要集中在 7—9 月。气候冷凉、春旱严重。20 世纪 90 年代以来,随着地下水位整体下降,土壤盐碱程度有所降低,但大面积分布的中度及中度以上苏打盐碱地,土壤有机质及养分含量低、土壤结构差、种植效益不佳,严重影响该区域农业生产和畜牧养殖的可持续发展。

绿肥是清洁的有机肥源,也是现代生态农业的重要组成部分<sup>[3-4]</sup>。翻压绿肥能够明显提高土壤酶活性和土壤肥力水平<sup>[5-7]</sup>,改善土壤的物理性状,提高土壤有机质和各种矿质养分含量<sup>[8-10]</sup>。豆科绿肥可以利用根部根瘤菌的固氮作用,增加土壤中的氮含量<sup>[11]</sup>,绿肥可以通过自身的生长降低土壤对磷的吸附和富集作用,

还可以通过自身的氧化还原过程,活化土壤中难以被利用的磷和钾<sup>[12]</sup>。绿肥作物普遍具有较强的适应性和耐盐碱能力。李燕青等<sup>[13]</sup>研究表明,毛叶苕子(*Vicia villosa* Roth.)、田菁(*Sesbania cannabina* Poir.)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)均可在全盐量 2~4 g·kg<sup>-1</sup>的中度氯化物-硫酸盐盐渍土上种植。王晓栋<sup>[14]</sup>研究认为在沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、毛叶苕子、红豆草(*Onobrychis viciaefolia* Scop.)、黄花草木樨(*Melilotus officinalis* (L.) Desr.)和扁蓿豆(*Melissilus ruthenicus* (L.))这几种作物中,毛叶苕子和黄花草木樨具有较强的耐盐性。蔺海明等<sup>[15]</sup>研究表明种植翻压毛叶苕子可明显降低土壤中可溶性盐分,同时可以改变可溶性盐分和盐离子层次分布及盐离子组成,有效地防止土壤次生盐渍化。黑麦草(*Lolium perenne* L.)也具有耐瘠薄和耐盐特性<sup>[3,16]</sup>,箭筈豌豆(*Vicia sativa* L.)耐旱耐瘠,是山西省北部常见的旱地绿肥作物,很容易获得种子。本研究选取毛叶苕子、田菁、草木樨、紫花苜蓿、箭筈豌豆和黑麦草等 6 种绿肥种植于中度苏打盐碱地,研究不同绿肥作物在试区适应性差异及其改土培肥效果,为绿肥高效利用提供实证和技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

田间试验于2015年5月—2016年9月在山西省山阴县古城镇古城村(9°25'28"N, 112°55'34"E)进行。该试验地海拔940 m,属温带干旱大陆性季风气候。年均气温7.0℃,年均降水量410 mm,季节性分布不均,多集中于夏、秋季,雨热同季;蒸发量为1 870 mm,强烈蒸发期在春季和秋季;初霜期为9月下旬,无霜期130 d,作物一年1熟。该试区除冬前可引水灌溉1次外,基本属于雨养农业区。供试土壤为碱化潮土,质地为轻壤,试验地耕层土壤(0~20 cm)农化性状为:有机质3.32 g·kg<sup>-1</sup>,全氮0.31 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮3.25 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷3.36 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾96.2 mg·kg<sup>-1</sup>,全盐量1.16 g·kg<sup>-1</sup>,pH9.12,电导率(EC)3.31 ms·cm<sup>-1</sup>,碱化度(ESP)13.2%。

### 1.2 试验材料

试验所用土库曼毛苕、华东田菁、黄花草木樨、‘中苜 1号’紫花苜蓿、‘春箭筈豌豆3号’、雅晴黑麦草等绿肥品种由中国农业科学院农业资源与农业区划研究所提供,‘瑞德 2号’青贮玉米(*Zea mays* L.)从当地农资市场购买。

### 1.3 试验设计与田间管理

绿肥种植试验共7个处理:对照(不种绿肥,休闲),种植毛叶苕子、田菁、草木樨、箭筈豌豆、紫

花苜蓿和黑麦草,采用随机区组设计,每处理重复3次,共21个小区。小区之间筑40 cm×30 cm的地埂,小区面积30 m<sup>2</sup>(6 m×5 m)。

2015年6月12日结合整地,施入复合肥(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=15-10-5)375 kg·hm<sup>-2</sup>。6月15日条播绿肥,播种量(参照各种绿肥常规播种量)分别是:毛叶苕子60 kg·hm<sup>-2</sup>、田菁60 kg·hm<sup>-2</sup>、草木樨15 kg·hm<sup>-2</sup>、箭筈豌豆60 kg·hm<sup>-2</sup>、紫花苜蓿15 kg·hm<sup>-2</sup>和黑麦草30 kg·hm<sup>-2</sup>;出苗后30 d中耕除草1次,生长期间不施肥、不灌溉。9月25日收获地上部,切碎后就地均匀撒施,之后用小型机械翻压。2015年11月10日引水冬灌1次,灌水量为900 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>。2016年4月25日结合整地,撒施复合肥(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=18-12-5)750 kg·hm<sup>-2</sup>作底肥,旋耕20 cm,5月2日播种青贮玉米,行距50 cm,播种量45 kg·hm<sup>-2</sup>;出苗后30 d左右中耕1次,乳熟期收获。

### 1.4 样品采集与测定方法

2015年绿肥出苗后,每隔15 d左右用交叉法在各小区采取耕层0~20 cm混合土样,用于土壤含水量、pH及EC变化的动态监测;绿肥翻压前每小区选取平均长势的2 m×3 m样方,测定绿肥地上部生物量并随机抽取1 000 g左右鲜样,称重后在烘箱内90℃杀青30 min,60℃条件下烘干48 h,称重、粉碎后装瓶,用于测定全氮、全磷和全钾,根据测定结果推算不同翻压绿肥处理地上部返回土壤的养分数。2016年4月28日整地前在各小区随机采取0~20 cm混合土样,风干处理后室内分析土壤pH、EC、有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾。青贮玉米乳熟期分别收获各小区,测定产量。

土壤pH采用酸度计测定(土水比为1:2.5),EC采用电导仪测定(土水比为1:5);土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾均采用常规方法测定;青贮玉米蛋白质含量采用浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮,半微量凯氏定氮法测定全氮后乘系数6.25得出<sup>[17]</sup>。

### 1.5 试验数据分析

试验数据采用Microsoft Excel 2003和SPSS 13.0统计软件进行统计分析。各处理间的差异显著性用Fisher's LSD检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 绿肥生长期间 0~20 cm 土层土壤含水量、pH 和 EC 的变化

#### 2.1.1 种植绿肥期间土壤含水量的变化

由图1可知,不同处理的土壤含水量在绿肥生长期间均呈先波动上升、后波动下降的动态变化趋势。绿肥生长前期(6月23日—7月25日),对照与

种植不同绿肥的小区, 其 0~20 cm 土层土壤含水量无显著差异。绿肥生长中后期(8 月 9 日—9 月 23 日), 6 个种植绿肥处理的土壤含水量比对照提高 1.0~6.2 个百分点, 分析显示, 除 8 月 9 日田菁处理的土壤含水量与对照之间不显著外, 其他种植绿肥处理 4 个监测期的土壤含水量均与对照之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 表明种植绿肥增加了地表覆盖, 可显著蓄蓄土壤水分。5 个豆科绿肥处理 0~20 cm 土层土壤含水量均显著高于禾本科绿肥黑麦草处理的土壤含水量, 其中毛叶苕子和草木樨 2 个处理的土壤含水量比黑麦草处理提高 1.2%~5.2% 和 1.0%~5.0%。

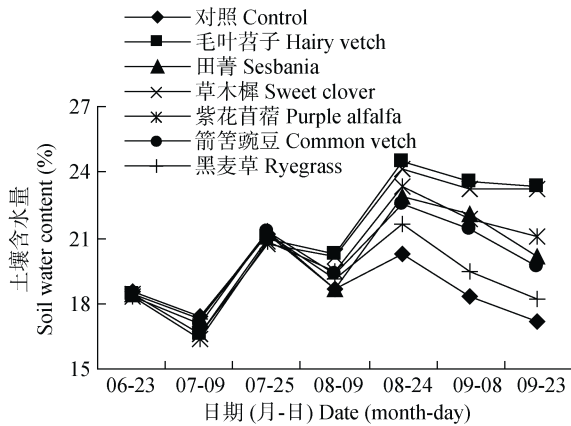


图 1 种植不同绿肥对绿肥生长期 0~20 cm 土层土壤含水量的影响

Fig. 1 Effect of different green manure crops planting on water content in 0~20 cm soil layer during growth period of green manure corps

### 2.1.2 种植绿肥期间土壤 pH 的变化

由图 2 可知, 在绿肥生长前期(6 月 23 日—7 月 25 日), 6 个绿肥处理的 0~20 cm 土层土壤 pH 与对照相比变化不大, 绿肥生长中后期(8 月 9 日—9 月 23 日), 6 个绿肥处理的土壤 pH 均低于对照。分析结果显示, 绿肥生长中后期, 黑麦草处理 4 个监测期的土壤 pH 与对照之间差异不显著, 毛叶苕子、田菁、草木樨、紫花苜蓿和箭筈豌豆等 5 个豆科绿肥处理 4 个监测期的土壤 pH 均与对照之间差异显著, 其中毛叶苕子处理和草木樨处理的土壤 pH 最低。5 个豆科绿肥处理中后期土壤 pH 均与禾本科绿肥黑麦草处理的土壤 pH 之间差异显著, 其中毛叶苕子和草木樨处理中后期的土壤 pH 分别比黑麦草处理降低 0.06~1.30 和 0.06~1.27。

### 2.1.3 种植绿肥期间土壤 EC 的变化

从图 3 看出, 7 个处理的土壤 EC 在绿肥生长前期(6 月 23 日—8 月 9 日)均呈现持续降低的趋势, 但在绿肥生长中期(8 月 9 日)之后各处理的土壤 EC 形

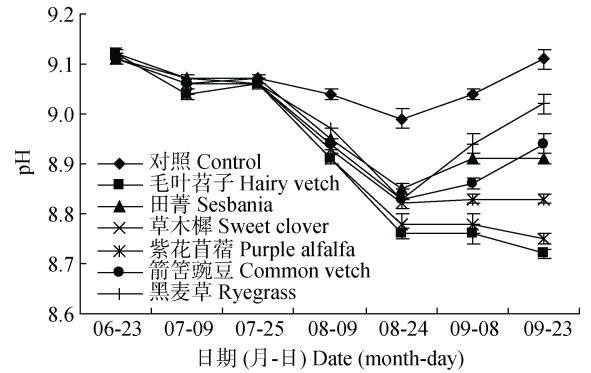


图 2 种植不同绿肥对绿肥生长期 0~20 cm 土壤 pH 的影响

Fig. 2 Effect of different green manure crops planting on soil pH in 0~20 cm soil layer during growth period of green manure corps

成不同分化: 对照区土壤 EC 先缓慢升高, 到绿肥翻压前快速上升; 黑麦草处理的土壤 EC 呈持续缓慢升高趋势; 紫花苜蓿、箭筈豌豆和田菁 3 个处理的土壤 EC 变化相对稳定; 毛叶苕子和草木樨 2 个处理的土壤 EC 呈持续稳定下降趋势。分析结果显示, 绿肥生长中后期的 4 个监测期, 6 个绿肥处理的土壤 EC 监测值均与同期对照之间差异显著。表明种植绿肥可有效降低土壤 EC, 5 个豆科绿肥处理降低土壤 EC 的幅度均大于禾本科绿肥黑麦草处理, 其中以毛叶苕子处理和草木樨处理降低土壤 EC 的幅度较大, 分别比黑麦草处理降低土壤 EC 0.08~0.51  $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$  和 0.07~0.47  $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

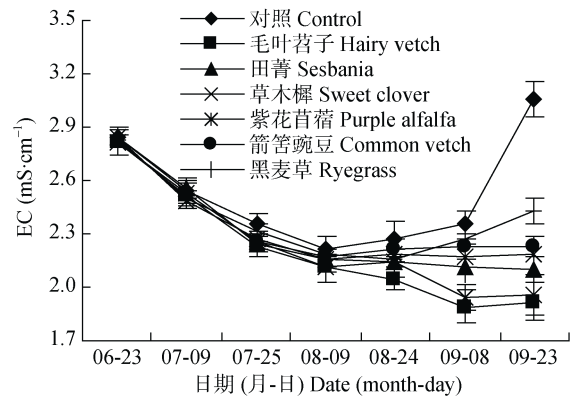


图 3 不同绿肥生长对绿肥生长期 0~20 cm 土层土壤 EC 的影响

Fig. 3 Effect of different green manure crops planting on soil EC in 0~20 cm soil layer during growth period of green manure corps

## 2.2 翻压绿肥对返回土壤养分数量及土壤农化性状的影响

### 2.2.1 不同绿肥翻压期的地上部生物量和 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 养分还田量

由表 1 可知, 5 种豆科绿肥的翻压量达 17 882~35 521  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 黑麦草的翻压量为 8 221  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 5 种

豆科绿肥的翻压量与黑麦草的翻压量之间差异显著; 5 种豆科绿肥 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 的养分还田量分别为 68.0~195.4 kg·hm<sup>-2</sup>、12.5~58.8 kg·hm<sup>-2</sup> 和 72.4~127.9 kg·hm<sup>-2</sup>, 均显著高于黑麦草的 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 的养分还田量, 因此翻压绿肥可以还田大量的有机物料和矿质养分, 从而有利于改善土壤肥力。就不同种类绿肥的 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 养分还田量而言, 翻压毛叶苕子、草木樨、紫花苜蓿和箭筈豌豆 4 种绿肥的养

分还田量为 N>K<sub>2</sub>O>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 翻压田菁和黑麦草的养分还田量则表现为 K<sub>2</sub>O>N>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>。本试验条件下, 不同绿肥翻压后返回土壤 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 的养分总量由大到小的顺序为毛叶苕子>草木樨>紫花苜蓿>箭筈豌豆>田菁>黑麦草, 其中翻压毛叶苕子和草木樨比翻压黑麦草返回土壤 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 的养分增加 179.8 kg·hm<sup>-2</sup> 和 150.3 kg·hm<sup>-2</sup>、40.9 kg·hm<sup>-2</sup> 和 36.2 kg·hm<sup>-2</sup>、65.0 kg·hm<sup>-2</sup> 和 93.4 kg·hm<sup>-2</sup>。

表 1 不同绿肥翻压期地上部生物量与返回土壤的养分量

Table 1 Biomasses and returned nutrient amounts to soil after overturning of different green manure crops

| 绿肥植物<br>Green manure crop | 生物量<br>Biomass (kg·hm <sup>-2</sup> ) | 返回土壤的养分量 Returning nutrient content for soil (kg·hm <sup>-2</sup> ) |                               |                  |
|---------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------|------------------|
|                           |                                       | N   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O |
| 毛叶苕子 Hairy vetch          | 35 521±376a                           | 195.4±10.4a   | 46.2±4.4b                     | 99.5±7.2a        |
| 田菁 Sesbania               | 17 882±153c                           | 68.0±7.4c   | 12.5±2.3c                     | 112.7±4.5c       |
| 草木樨 Sweet clover          | 34 569±384a                           | 165.9±11.2a   | 41.5±3.9a                     | 127.9±6.1b       |
| 紫花苜蓿 Purple alfalfa       | 24 022±261b                           | 115.3±9.3b  | 43.2±2.6b                     | 76.9±2.6b        |
| 箭筈豌豆 Common vetch         | 18 952±215c                           | 98.6±8.0c   | 58.8±3.5a                     | 72.4±3.2c        |
| 黑麦草 Ryegrass              | 8 221±195d                            | 15.6±2.6d   | 5.3±1.2d                      | 34.5±1.5d        |

同列不同小写字母表示处理间差异达显著水平( $P<0.05$ )。Different lowercase letters in the same column mean significant differences at 0.05 level.

### 2.2.2 翻压绿肥后土壤农化性状的变化

表 2 表明, 与对照相比, 翻压绿肥处理的土壤 pH 降低 0.01~0.08, 有机质提高 0.42~1.86 g·kg<sup>-1</sup>、全氮提高 0.05~0.34 g·kg<sup>-1</sup>, 碱解氮、速效磷和速效钾分别提高 0.5~32.3 mg·kg<sup>-1</sup>、0.42~4.65 mg·kg<sup>-1</sup> 和 3.8~26.1 mg·kg<sup>-1</sup>, 其中 5 个翻压豆科绿肥处理的土

壤 pH 显著降低, 土壤有机质、全氮及速效养分含量显著提高, 而翻压禾本科绿肥黑麦草处理仅土壤有机质和速效钾含量显著提高。翻压豆科绿肥培肥土壤的效果优于翻压禾本科绿肥, 其中翻压毛叶苕子和翻压草木樨 2 个处理对提高土壤肥力的效果最显著。

表 2 翻压不同绿肥对 0~20 cm 土层土壤农化性状的影响

Table 2 Chemical properties of 0~20 cm soil layer with the overturning of different green manure crops

| 绿肥植物<br>Green manure crop | pH          | 有机质<br>Organic matter<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全氮<br>Total N<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 碱解氮<br>Alkali-hydrolysis N<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效磷<br>Available P<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾<br>Available K<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|---------------------------|-------------|--|--|--|--|--|
| 对照 Control                | 9.15±0.01a  | 3.30±0.22d                                     | 0.31±0.00d                             | 3.4±0.16d  | 3.69±0.24d                                   | 101.8±0.82d                                  |
| 毛叶苕子 Hairy vetch          | 9.07±0.01d  | 5.16±0.37a                                     | 0.65±0.00a                             | 35.7±1.13a   | 8.34±0.43a                                   | 122.3±1.53a                                  |
| 田菁 Sesbania               | 9.09±0.01c  | 4.14±0.22c                                     | 0.43±0.00c                             | 15.3±0.32c   | 5.26±0.25c                                   | 117.4±1.12b                                  |
| 草木樨 Sweet clover          | 9.07±0.01d  | 4.83±0.36a                                     | 0.61±0.00a                             | 31.3±0.54a   | 7.55±0.19a                                   | 127.9±0.89a                                  |
| 紫花苜蓿 Purple alfalfa       | 9.12±0.02c  | 4.35±0.25b                                     | 0.53±0.00b                             | 22.8±0.31b   | 6.13±0.25b                                   | 112.7±0.76b                                  |
| 箭筈豌豆 Common vetch         | 9.10±0.01c  | 4.16±0.33c                                     | 0.47±0.00c                             | 16.9±0.21c   | 7.26±0.14b                                   | 109.2±0.85c                                  |
| 黑麦草 Ryegrass              | 9.14±0.01ab | 3.72±0.15c                                     | 0.36±0.00d                             | 3.9±0.10d  | 4.11±0.12d                                   | 105.6±2.16c                                  |

同列不同小写字母表示处理间差异达显著水平( $P<0.05$ )。Different lowercase letters in the same column mean significant differences at 0.05 level.

### 2.3 翻压绿肥对青贮玉米产量和品质的影响

#### 2.3.1 翻压绿肥对青贮玉米鲜草产量的影响

从图 4 可知, 在 7 个试验处理中, 翻压毛叶苕子处理的青贮玉米鲜草产量最高, 达 45 997 kg·hm<sup>-2</sup>, 其次是翻压草木樨处理的青贮玉米鲜草产量, 达 42 803 kg·hm<sup>-2</sup>, 对照的青贮玉米鲜草产量最低, 为 26 606 kg·hm<sup>-2</sup>。6 个翻压绿肥处理轮作青贮玉米的鲜草产量分别比对照提高 19 391 kg·hm<sup>-2</sup>、4 658 kg·hm<sup>-2</sup>、16 197

kg·hm<sup>-2</sup>、12 910 kg·hm<sup>-2</sup>、7 401 kg·hm<sup>-2</sup> 和 1 294 kg·hm<sup>-2</sup>, 比对照分别增产 72.9%、17.5%、60.9%、48.5%、27.8% 和 4.87%, 其中 5 个翻压豆科绿肥轮作青贮玉米处理的鲜草产量均显著高于黑麦草轮作青贮玉米处理与对照, 而翻压黑麦草处理轮作青贮玉米的鲜草产量与对照之间差异不显著。本试验条件下, 5 个翻压豆科绿肥处理中, 毛叶苕子和草木樨处理的青贮玉米鲜草产量分别比黑麦草处理提高 18 097 kg·hm<sup>-2</sup> 和 14 903 kg·hm<sup>-2</sup>。

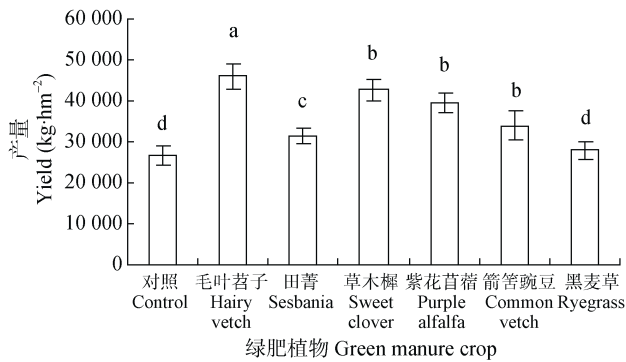


图 4 翻压不同绿肥后的青贮玉米产量

Fig. 4 Yield of silage maize with the overturning of different green manure crops

### 2.3.2 翻压绿肥对青贮玉米品质的影响

蛋白质是青贮玉米品质的重要指标之一, 提高青贮玉米蛋白质含量在生产中具有重要意义。从图 5 看出, 5 个翻压豆科绿肥处理的青贮玉米蛋白质含量均与黑麦草处理和对照的青贮玉米蛋白质含量之间差异显著, 而翻压黑麦草处理的青贮玉米蛋白质含量与对照之间差异不显著。6 个翻压豆科绿肥处理中, 毛叶苕子处理的蛋白质含量最高, 为  $94.7 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 草木樨处理为  $90.4 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 黑麦草处理为  $71.2 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 5 个翻压绿肥处理的青贮玉米蛋白质含量比对照提高  $10.2\sim 23.9 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 而翻压黑麦草处理青贮玉米的蛋白质含量仅比对照提高  $0.4 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。与翻压禾本科绿肥相比, 翻压豆科绿肥给土壤提供了更多的 N 素, 提高了青贮玉米的蛋白质含量, 从而改善了青贮玉米品质, 其中毛叶苕子处理和草木樨处理青贮玉米蛋白质含量分别比黑麦草处理提高  $23.5 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $19.2 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

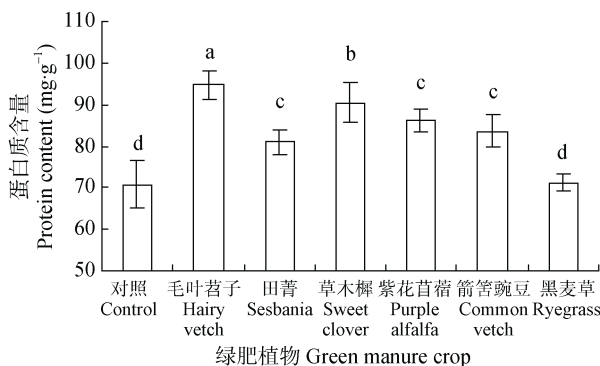


图 5 翻压不同绿肥的青贮玉米蛋白质含量

Fig. 5 Protein content of silage maize with the overturning of different green manure crops

## 3 讨论

3.1 种植绿肥利于盐碱土蓄水, 降低耕层土壤 pH 和盐分含量  
盐碱地耕层土壤含水量的变化与土壤盐分的上

下迁移与表聚密切相关。本研究过程中监测种植绿肥生长期耕层土壤含水量、pH 和 EC 的变化, 在于了解不同绿肥在不同生长时期对耕层土壤蓄水保墒、抑制土壤盐分表聚与改良盐碱地的效果。本研究表明, 绿肥生长前期, 不同监测期不同绿肥处理与对照(不种植绿肥)土壤含水量呈波动上升趋势, 但各处理之间土壤含水量相差不大; 而在绿肥生长中后期, 除禾本科绿肥黑麦草处理外, 5 个豆科绿肥处理的土壤含水量与对照之间差异显著。这一方面与当地自然降雨有关, 另一方面与绿肥的适应性(耐盐碱、耐旱特性)与生长特性有关: 绿肥生长前期, 植株个体和群体较小, 覆盖地率低, 土表蒸发量大。绿肥生长中后期, 适应性较强的豆科绿肥随着群体不断增大和地表覆盖度的增加, 抑制了地表水分的蒸发, 保蓄了土壤水分, 提高了耕层土壤含水量。其中毛叶苕子、草木樨两种绿肥适应性强、生长速度快、分枝多, 群体和地表覆盖率快速增大, 因此毛叶苕子处理和草木樨处理保蓄土壤水分的效果最显著。比较而言, 供试的 5 种豆科绿肥在盐碱地的适应性均优于禾本科绿肥黑麦草。在盐碱地推广种植绿肥时, 为获得较高的绿肥生物量, 应选择适应性强、生长速度快的豆科绿肥并适时早播。

土壤 pH、EC 是衡量盐碱地土壤盐碱程度与盐碱地改良效果的重要指标。本研究表明, 种植绿肥可降低耕层土壤 pH 和 EC, 可能是绿肥生长过程中根系分泌的有机酸中和了土壤胶体上的  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$ , 降低了土壤 pH, 同时绿肥覆盖地表减少了土壤水分的直接蒸发, 提高了耕层土壤含水量, 从而抑制了土壤中盐离子向地表迁移和聚集, 降低了土壤 EC。本研究结果与魏忠平等<sup>[18]</sup>盐碱地种植田菁、苜蓿降低土壤 pH、含盐量的研究结论相一致。

### 3.2 翻压绿肥显著提高盐碱土的土壤肥力

土壤有机质是衡量土壤肥力状况的重要指标, 翻压绿肥可提高土壤有机质含量。赵秋等<sup>[19]</sup>种植毛叶苕子和二月蓝 [*Orychophragmus violaceus* (L.) O. E. Schulz] 作为冬绿肥, 2 年试验结果表明, 冬绿肥区碳蓄积量是冬闲区的 2.4~3.6 倍, 氮蓄积量约为冬闲区的 4.0~4.7 倍, 有机碳含量比冬闲区提高 4.5%~5.7%。赵秋等<sup>[20]</sup>还在冬季空闲耕地种植二月蓝、毛苕、黑麦草、草木樨和紫花苜蓿作为冬闲覆盖绿肥, 研究结果表明, 5 种覆盖绿肥的全碳蓄积量为  $1.80\sim 3.14 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 是冬闲田碳蓄积量的 1.9~3.3 倍, 氮素蓄积量以种植苜蓿最高, 为  $202.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 并提高土壤有机质质量分数 ( $0.90\sim 2.86 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。孙文

彦等<sup>[21]</sup>在盐碱苗圃地树苗行间空地连续 3 a 种植并翻压耐盐绿肥作物毛叶苕子和二月蓝, 0~40 cm 土层土壤有机质由 8.43 g·kg<sup>-1</sup> 上升到 10.51 g·kg<sup>-1</sup> 以上, 土壤全氮增加近 1 倍, 速效磷由 4.36~4.67 mg·kg<sup>-1</sup> 增加到 12.0 mg·kg<sup>-1</sup> 以上, 速效钾增加 10.37%~10.71%。

本研究结果表明翻压绿肥返回土壤 N 15.6~195.4 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 5.3~58.8 kg·hm<sup>-2</sup> 和 K<sub>2</sub>O 34.5~127.9 kg·hm<sup>-2</sup>, 其中翻压豆科绿肥返回土壤的 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 养分量均显著高于黑麦草; 与对照相比, 春播青贮玉米前耕层翻压绿肥处理的土壤 pH 降低 0.01~0.08, 有机质提高 0.42~1.86 g·kg<sup>-1</sup>、全氮提高 0.05~0.34 g·kg<sup>-1</sup>, 碱解氮、速效磷和速效钾分别提高 0.5~32.3 mg·kg<sup>-1</sup>、0.42~4.65 mg·kg<sup>-1</sup> 和 3.8~26.1 mg·kg<sup>-1</sup>, 表明翻压绿肥提高了土壤养分含量, 培肥了土壤。

需要指出的是, 本研究中 2015 年秋季绿肥翻压后—冬灌阶段气温较低, 绿肥翻压后只有少部分可以腐解, 自冬灌后至 2016 年 4 月上旬为试验地土体封冻期, 绿肥不能腐解和释放养分, 故 2016 年春播前土壤理化性质的分析结果只反映了少量绿肥腐解后释放的营养元素对土壤养分的贡献, 大部分绿肥的腐解和养分释放必须在春播之后的青贮玉米生长季才能进行, 对青贮玉米生长期间的绿肥腐解和养分释放情况还需开展进一步的研究。

### 3.3 轮作绿肥利于青贮玉米产量提高和品质改善

马磊等<sup>[22]</sup>研究发现, 施用氮肥均显著增加青贮玉米的产量和茎叶比, 并显著提高青贮玉米的 SPAD 值和全株粗蛋白含量。胡春花等<sup>[23]</sup>研究青贮玉米不同种植密度、收获期和施肥水平对产量和营养品质的影响, 结果表明不同种植密度、收获期和施肥水平均极显著影响青贮玉米的产量和营养品质, 其中氮肥对青贮玉米的鲜、干生物产量的提高及青贮玉米营养品质、饲用价值的提高贡献最大, 其次是磷肥, 钾肥的影响较小。说明增加 N 素营养有利于提高青贮玉米的产量和蛋白质含量。

本研究表明, 绿肥翻压后, 黑麦草处理的青贮玉米鲜草产量和蛋白质含量分别比对照提高 1 294 kg·hm<sup>-2</sup> 和 0.4 mg·g<sup>-1</sup>, 而翻压毛叶苕子等 5 种豆科绿肥处理的青贮玉米鲜草产量和蛋白质含量分别比对照提高 1 294~19 391 kg·hm<sup>-2</sup> 和 10.0~23.9 mg·g<sup>-1</sup>, 本研究结果与马磊等<sup>[22]</sup>、胡春花等<sup>[22-23]</sup>研究结果相一致。说明在本试验条件下采用绿肥轮作青贮玉米, 对提高青贮玉米的鲜草产量和蛋白质含量, 促进试

验地的畜牧业发展和提高养殖效益具有实证作用和理论依据。

### 3.4 对农业生产的指导作用

盐碱地是重要的土壤资源, 在农家肥难以满足供应土壤时, 种植绿肥无疑是培肥土壤最经济有效的途径。本研究结果表明, 种植绿肥可改良盐碱地、提供土壤养分、提高牧草的产量和品质, 对盐碱土地地区农业的可持续发展具有重要的指导意义。绿肥最重要的作用就是养分还田<sup>[10]</sup>, 以小肥换大肥, 提供养分, 培肥土壤。本研究中, 翻压豆科绿肥返回土壤的 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 数量也远高于绿肥播种前施入土壤中复合肥中的 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O (56.3 kg·hm<sup>-2</sup>、37.5 kg·hm<sup>-2</sup> 和 18.8 kg·hm<sup>-2</sup>) 的数量。研究表明, 种植和翻压豆科绿肥可有效改良中度苏打盐碱地, 显著提高土壤肥力, 提供无机养分替代部分化肥, 提高优质牧草的生产, 是适合大同盆地中度苏打盐碱地经济、有效和环保的改良模式, 对稳定耕地面积、保证粮食安全具有重要意义。同时, 利用种植和翻压绿肥改良、培肥盐碱地, 也符合我国农业科技“十三五”规划提出的“耕地质量提升、肥料减施增效”农业资源高效利用发展要求及国家农业部提出的“两减一增”(减肥减药, 增加有机肥) 农业发展大方向。

## 4 结论

中度苏打盐碱地种植绿肥, 可显著提高 0~20 cm 土层土壤含水量 1.0%~6.2%, 降低土壤 pH 和含盐量, 有效改良盐碱地; 翻压绿肥可返还土壤 N 15.6~195.4 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 5.3~58.8 kg·hm<sup>-2</sup> 和 K<sub>2</sub>O 34.5~127.9 kg·hm<sup>-2</sup>, 提高土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量, 培肥土壤, 提高青贮玉米的鲜草产量和蛋白质含量 1 294~19 391 kg·hm<sup>-2</sup> 和 0.4~23.9 mg·g<sup>-1</sup>。种植和翻压豆科绿肥改良中度苏打盐碱地的效果均显著优于禾本科绿肥黑麦草, 其中以种植和翻压毛叶苕子绿肥改良、培肥盐碱地的效果最好, 其次是草木樨。建议本研究结果在同类型地区大力推广。

## 参考文献 References

- [1] 李丽君, 张强, 刘平, 等. 火电厂烟气脱硫石膏重金属含量监测与分析[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 209-214  
LI L J, ZHANG Q, LIU P, et al. Survey and analysis of heavy metals in FGD gypsum from coal-fired power plants[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2): 209-214
- [2] 刘耀宗, 张经元. 山西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992

- LIU Y Z, ZHANG J Y. Soil of Shanxi[M]. Beijing: Science Press, 1992
- [3] 焦彬, 顾荣申, 张学上. 中国绿肥[M]. 北京: 农业出版社, 1986
- JIAO B, GU R S, ZHANG X S. Green Manure of China[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986
- [4] 曹卫东, 黄鸿翔. 关于我国恢复和发展绿肥若干问题的思考[J]. 中国土壤与肥料, 2009, (4): 1-3
- CAO W D, HUANG H X. Ideas on restoration and development of green manures in China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009, (4): 1-3
- [5] 潘福霞, 鲁剑巍, 刘威, 等. 不同种类绿肥翻压对土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1359-1364
- PAN F X, LU J W, LIU W, et al. Effect of different green manure application on soil fertility[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(6): 1359-1364
- [6] 叶协锋, 杨超, 李正, 等. 绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 445-454
- YE X F, YANG C, LI Z, et al. Effects of green manure in corporation on soil enzyme activities and fertility in tobacco-planting soils[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 445-454
- [7] 张珺, 曹卫东, 徐昌旭, 等. 种植利用紫云英对稻田土壤微生物及酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012, (1): 19-25
- ZHANG J T, CAO W D, XU C X, et al. Effects of incorporation of milk vetch (*Astragalus sinicus*) on microbial populations and enzyme activities of paddy soil in Jiangxi[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2012, (1): 19-25
- [8] 陈国军, 闫慧峰, 吴凯, 等. 不同收获期的籽粒苋绿肥还田对土壤养分的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(3): 215-224
- CHEN G J, YAN H F, WU K, et al. Green manure returning effect of *Amaranthus hypochondriacus* harvested at different times on soil fertility[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(3): 215-224
- [9] 赵娜, 赵护兵, 曹群虎, 等. 渭北旱区夏闲期豆科绿肥对土壤肥力性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 124-128
- ZHAO N, ZHAO H B, CAO Q H, et al. Effect of green manure on soil fertility properties in summer fallow period in Weibei dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(2): 124-128
- [10] 李宏图, 罗建新, 彭德元, 等. 绿肥翻压还土的生态效应及其对土壤主要物理性状的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(5): 172-175
- LI H T, LUO J X, PENG D Y, et al. Effect of ploughed-back green manures on soil physical properties and its corresponding ecological benefit[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(5): 172-175
- [11] 姚鹏伟, 张达斌, 王峥, 等. 豆科绿肥养分累积规律及其对后茬小麦生长和产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(3): 111-117
- YAO P W, ZHANG D B, WANG Z, et al. Nutrients accumulation of leguminous green manures and the effects on growth and yield of winter wheat[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2014, 42(3): 111-117
- [12] ZHANG Y S, WERNER W, SUN X. Phosphorus adsorption and desorption in paddy soils as affected by organic manure and cellulose[J]. Agribiological Research, 1993, 46: 286-294
- [13] 李燕青, 孙文彦, 许建新, 等. 华北盐碱地耐盐经济作物筛选[J]. 华北农学报, 2013, 28(S1): 227-232
- LI Y Q, SUN W Y, XU J X, et al. The evaluation of salt tolerant cash crops in northern China[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2013, 28(S1): 227-232
- [14] 王晓栋. 10份豆科牧草种质材料耐盐性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008
- WANG X D. Study on salt tolerance of 10 germplasm materials of leguminous forage[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008
- [15] 蔺海明, 贾恢先, 张有福, 等. 毛苕子对次生盐碱地抑盐效应的研究[J]. 草业学报, 2003, 12(4): 58-62
- LIN H M, JIA H X, ZHANG Y F, et al. Effect of salt restraint on *Vicia villosa* in secondary salinization land[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 12(4): 58-62
- [16] 曹卫东, 徐昌旭. 中国主要农区绿肥作物生产与利用技术规程[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010
- CAO W D, XU C X. The Technical Regulations for the Production and Utilization of Green Manure Crops in the Main Agricultural Areas of Chain[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2010
- [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] 魏忠平, 邢兆凯, 于雷, 等. 北方泥质海岸盐碱地种植牧草肥土效果研究[J]. 辽宁林业科技, 2009, (2): 8-10
- WEI Z P, XING Z K, YU L, et al. Study on the fertility effect of planting herbage grass on saline-alkaline land of silting coastal area on northern China[J]. Journal of Liaoning Forestry Science & Technology, 2009, (2): 8-10
- [19] 赵秋, 高贤彪, 宁晓光, 等. 华北地区春玉米-冬绿肥轮作对碳、氮蓄积和土壤养分以及微生物的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 1005-1011
- ZHAO Q, GAO X B, NING X G, et al. Effects of spring maize and winter cover crop rotation on accumulation of carbon and nitrogen and soil nutrition and microbe in North China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(4): 1005-1011
- [20] 赵秋, 高贤彪, 宁晓光, 等. 华北地区几种冬闲覆盖作物碳氮蓄积及其对土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 750-753
- ZHAO Q, GAO X B, NING X G, et al. Carbon-nitrogen fixation and effects on the physical and chemical properties in winter cover crop in North China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(4): 750-753
- [21] 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
- [22] 马磊, 袁飞, 朱玲玲, 等. 氮复合肥种类及施氮量对坝上地区青贮玉米产量和品质的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(6): 53–59  
MA L, YUAN F, ZHU L L, et al. Yield and quality of silage corn (*Zea mays*) as affected by type and quantity of N fertilization[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(6): 53–59
- [23] 胡春花, 张吉贞, 孟卫东, 等. 不同栽培措施对青贮玉米产量和营养品质的影响[J]. 热带作物学报, 2015, 36(5): 847–853  
HU C H, ZHANG J Z, MENG W D, et al. Effects of different cultivation measures on silage maize yield and nutrition quality[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, 36(5): 847–853