



张雯琦,金思成,刘智文,等. 4种豆科绿肥养分含量及其对土壤培肥效应分析[J]. 南京农业大学学报,2024,47(5):891-897.

ZHANG Wenqi, JIN Sicheng, LIU Zhiwen, et al. Effects of four different Leguminous green manure on nutrient content and soil fertility[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(5): 891-897.

## 4种豆科绿肥养分含量及其对土壤培肥效应分析

张雯琦\*, 金思成, 刘智文, 钱菁菁, 朱程

(江苏开放大学环境生态学院, 江苏 南京 210036)

**摘要:**[目的]本文旨在明确在不施用化肥的情况下豆科绿肥作物体内养分含量变化及其翻压还田后对土壤肥力的影响。[方法]于2021年10月至2022年5月,通过田间试验研究紫云英、毛叶苕子、蚕豆、箭筈豌豆4种豆科绿肥的生长发育和氮、磷、钾养分含量,并分析绿肥翻压还田后对土壤养分含量的影响。[结果]不同绿肥在苗期与生育后期全氮、全磷和全钾养分含量变化趋势相似,生育后期的养分含量显著高于苗期,干物质量达 $1\ 800\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上,适宜翻压。在生育后期,毛叶苕子的全氮含量(3.34%)和全磷含量(0.29%)显著高于其他3种绿肥,紫云英的全钾含量(3.58%)最高,且差异显著。紫云英和毛叶苕子的氮、磷、钾养分累积量相对较高,蚕豆和箭筈豌豆相对较低。4种豆科绿肥还田,土壤pH值没有显著影响,土壤有机碳、全氮、有效磷和速效钾含量均增加,提高了2.71%~29.50%。其中紫云英还田可以显著提高土壤肥力,土壤有机碳、全氮、有效磷和速效钾含量与休耕相比分别增加了4.04%、3.40%、29.50%和8.22%。[结论]在不额外施用化肥时,种植紫云英有利于土壤肥力提升。

**关键词:**豆科绿肥;养分含量;土壤肥力;养分替代

中图分类号:S158

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2024)05-0891-07

## Nutrient content of four different Leguminous green manure and its effect on soil fertility improvement potential

ZHANG Wenqi\*, JIN Sicheng, LIU Zhiwen, QIAN Jingjing, ZHU Cheng

(School of Environment and Ecology, Jiangsu Open University, Nanjing 210036, China)

**Abstract:**[Objectives] This paper aimed to clarify the change of nutrient content in Leguminous green manure crops and its impact on soil fertility with none extra chemical fertilizer. [Methods] The experiments were conducted to study the growth and development of four Leguminous green manure crops from October 2021 to May 2022 in field. They were Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.), hairy vetch (*Vicia villosa* Roth.), broad bean (*Vicia faba* L.) and common vetch (*Vicia sativa* L.), respectively. The nutrient contents of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) in green manure crops as well as the soil nutrient content were measured. [Results] The changes in N, P, K nutrient content of different Leguminous green manure crops during the seedling stage and later growth stage were similar. Four Leguminous green manure crops had significantly higher nutrient content at the later growth stage than at the seedling stage, with biomass of dry weight of over  $1\ 800\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , making them suitable for flipping. In later growth period, the total N content (3.34%) and total P content (0.29%) of hairy vetch were significantly higher than the others, while the total K content of Chinese milk vetch (3.58%) was the highest and the difference displayed a significant level. The accumulation of N, P and K nutrients in Chinese milk vetch and hairy vetch was relatively high, while that in broad bean and common vetch was relatively low. The pH value of soil did not change with green manure application. After growing Leguminous green manure, the organic carbon content in soil as well as total N, available P and available K contents increased, with a range of 2.71%–29.50%. Among them, the application of Chinese milk vetch to the field could significantly improve soil fertility, and the organic carbon, total N, available P and available K contents increased by 4.04%, 3.40%, 29.50% and 8.22% compared to fallow cultivation, respectively. [Conclusions] Under the condition of disappeared application of chemical fertilizer, Chinese milk vetch was conducive to improving soil fertility.

**Keywords:** Leguminous green manure; nutrient content; soil fertility; nutrient substitution

收稿日期:2023-08-07

基金项目:江苏省大学生创新创业训练计划项目(202114000014Y);校级大学生创新训练计划项目(XJ2021008)

\*通信作者:张雯琦,讲师,研究方向为植物营养学, E-mail: wenqi0708@126.com。

绿肥既是一种作物,又是优质的生物肥源,在提高作物养分供应、改善农田生态环境方面有着巨大的优势,我国从古代就有栽培绿肥培肥地力的传统。有研究表明,在豆科、禾本科、苜科、十字花科绿肥中,豆科绿肥肥效较高,连续种植多年,能够显著提高作物产量及土壤养分含量<sup>[1]</sup>。豆科绿肥能够通过固氮作用供给自身的氮需求,经过翻压、还田等方式提高土壤的氮素储备量,继而供给作物,构成了农业生态系统中氮循环的重要环节<sup>[2]</sup>。此外,绿肥可以部分代替化肥,从而减少农业生产过程中化肥的使用,进而有效控制由于化肥施用过量导致的环境污染<sup>[2]</sup>。由于豆科绿肥卓越的生物固氮作用,近年来众多研究集中在绿肥的氮肥替代效果上,并取得了显著的研究进展。在玉米、麦类、水稻等作物种植时间作豆科绿肥,能减少10%~45%的化学氮肥用量<sup>[3-5]</sup>。

除氮外,磷和钾同为植物生长发育所必需的大量营养元素。其中,磷是构成细胞包括核酸、细胞膜和磷酸腺苷等的重要组分,几乎参与了生命代谢活动的各个主要过程<sup>[6-7]</sup>。然而,磷在土壤中被固定和沉淀,土壤溶液中可以被植物直接利用的无机磷浓度通常只有1~10  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[8]</sup>。因此,农业生产过程中经常投入过量的磷肥来达到高产的目的。这不但直接导致化肥成本增加,而且还造成土壤酸化、水体富营养化等一系列问题。有研究指出,种植绿肥可以减少由土壤侵蚀和地表径流造成的磷流失<sup>[9]</sup>。部分绿肥作物可以通过分泌根系分泌物活化土壤中的难溶性磷,或者利用非真菌特异性菌根调节与有机磷矿化相关的酶活性来提高土壤磷的有效性<sup>[10-11]</sup>。钾在光合作用、蛋白质合成和气孔运动等代谢途径中发挥着至关重要的作用。缺钾会导致植株在源器官中大量积累碳水化合物,不利于生殖器官的生长发育<sup>[12]</sup>。我国农田土壤缺钾情况非常严重,尤其是长江以南地区,约75%的土壤缺钾<sup>[13]</sup>。因此,作物对钾肥的需求量日益增多。我国钾矿资源并不丰富,仅占全球总量的1/800<sup>[14]</sup>,因此提高土壤速效钾含量并减少对钾肥的依赖,有助于提高作物品质,降低生产成本,对于解决钾资源匮乏具有重要的意义。

长江流域绿肥品种资源丰富,本文以豆科绿肥为研究对象,选取紫云英、毛叶苕子、蚕豆、箭筈豌豆4种常见的豆科绿肥展开田间试验,以期探索不施用化肥条件下对不同豆科绿肥养分含量的影响以及绿肥翻压后对土壤的培肥效应,为建立高效的绿肥-作物种植体系提供理论依据,同时为提高土壤养分有效性提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

4种豆科绿肥作物:紫云英、毛叶苕子、蚕豆、箭筈豌豆,均为普通栽培品种,种子均购自江苏明天种业有限公司。试验用肥料和化学试剂:吉地丰硕有机肥(氮、磷、钾养分含量 $\geq 5\%$ ,有机质含量 $\geq 45\%$ ,含水量 $\leq 30\%$ ),常规化学分析试剂。

### 1.2 试验方案

试验地为租用农田,位于江苏省南京市江宁区汤山街道(119°08'E,32°03'N)。该地区属于亚热带季风气候,年平均气温15.3℃,年均降水量1060mm,无霜期237d,年日照量2213h。试验地前作为青菜,土壤种类以河白土为主,土壤基础理化性质:pH7.85,有机碳含量6.04  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮含量1.06  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有效磷含量13.17  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾含量98.53  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

共设置5个处理,分别为对照(不种植绿肥)和种植4种绿肥作物地块,每个处理3次重复,每个小区长、宽均为2m。在绿肥作物种植前,每平方米施有机肥2kg作为基肥,生长期间不再施用化肥。2021年10月10日播种,种植紫云英、毛叶苕子、蚕豆、箭筈豌豆4种绿肥,并设置休耕对照组。在播种90d(2022年1月8日)和180d(2022年4月7日)时,采集绿肥植株地上部及根部,测定生物量和养分含量。在播种180d时,将绿肥作物地上部翻压还田,翻压深度约为20cm。腐熟20d后采集耕作层土壤进行测定。

### 1.3 试验方法

**1.3.1 样品采集** 分别在4种绿肥作物播种90和180d时进行采样,每个小区选取0.3m×0.3m样方,采集植株地上部,称量鲜重,装入信封做好标记。样品采集完成后105℃杀青,于68℃烘干至恒重,称量植株干重并做好记录。

选用梅花形布点法采集土壤样品,每个地块取8个点,重复3次,装入塑封袋做好标记。去除动植物残体等杂质后,用四分法保留部分土样,置于室内通风阴干,然后根据需求过筛测定土壤化学性质和养分含量。

**1.3.2 样品消煮** 用剪刀将烘干的绿肥植物组织剪碎成粉末状,称取植物样品 0.3~0.5 g 装入 100 mL 开式瓶的底部,准确记录所称取质量,加 5 mL 浓硫酸,放置过夜。在电炉上先小火加热,待浓硫酸发白烟后再升高温度,当溶液呈均匀的棕黑色时,取下稍冷却后加 6 滴过氧化氢溶液,再加热至微沸,消煮 7~10 min,稍冷后重复加过氧化氢再消煮,如此重复数次,每次添加的过氧化氢量逐渐减少,消煮至溶液呈无色或清亮后,再加热约 10 min。取下冷却后用水将消煮液无损转移至 100 mL 容量瓶中,冷却至室温后定容。放置澄清后吸取上清液,测定氮、磷、钾含量。每批消煮的同时进行空白试验,以校正试剂和方法的误差。

**1.3.3 样品测定** 植物碳素的测定:用过量重铬酸钾-硫酸溶液将植物样品有机碳氧化为二氧化碳,用硫酸亚铁标准溶液滴定过量的重铬酸钾;植物全氮含量的测定:消煮完成后采用奈氏比色法测定;植物全磷含量的测定:消煮完成后采用钼锑抗比色法测定;植物全钾含量的测定:消煮完成后直接用火焰光度计测定待测液中的钾含量<sup>[12]</sup>。

利用电位法使用 BPH-305 pH 计测定土壤 pH 值;用重铬酸钾容量法测定土壤有机质后根据系数进行换算;采用凯氏定氮法测定土壤全氮含量;用 0.5 mmol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 溶液浸提后采用钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量;用 1 mmol·L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>OAc 溶液浸提后使用火焰光度法测定土壤速效钾含量<sup>[15]</sup>。

#### 1.4 数据统计分析

测定数据用 Excel 2015 进行记录整理,误差使用标准差(SD),用 SPSS Statistics 20 统计分析软件进行 Student's test 和 Duncan's test 方差分析( $P<0.05$ ),用 GraphPad Prism 7 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生育时期不同豆科绿肥生物量变化

从表 1 可知,4 种豆科绿肥在不同生育时期,生物量差异很大。播种后 90 d,绿肥均处于苗期,紫云英鲜重最低,显著低于其他 3 种绿肥,蚕豆鲜重最高。播种 180 d 后,绿肥进入生育后期,紫云英鲜重最高,其次是蚕豆,而毛叶苕子和箭筈豌豆鲜重相对较低。

此外,在播种后的前 90 d,绿肥作物地上部干物质质量积累相对较慢,4 种绿肥除紫云英干重较小外,并没有显著差异。在播种 90 d 后,绿肥作物进入旺盛生长期,干物质迅速积累。在适宜翻压的生育后期,紫云英地上部的干重最大,为 2 406 kg·hm<sup>-2</sup>,显著高于其他 3 种绿肥。

表 1 不同生育时期不同豆科绿肥生物量

Table 1 Biomass of different Leguminous green manure crops in different growing stage kg·hm<sup>-2</sup>

绿肥 Green manure	鲜重 Fresh weight		干重 Dry weight	
	90 d	180 d	90 d	180 d
蚕豆 Broad bean	5 263 <sup>a</sup>	15 499 <sup>b</sup>	397 <sup>a</sup>	2 072 <sup>b</sup>
紫云英 Chinese milk vetch	3 979 <sup>c</sup>	24 383 <sup>a</sup>	332 <sup>b</sup>	2 406 <sup>a</sup>
毛叶苕子 Hairy vetch	4 724 <sup>ab</sup>	12 688 <sup>c</sup>	440 <sup>a</sup>	1 888 <sup>b</sup>
箭筈豌豆 Common vetch	4 578 <sup>b</sup>	13 301 <sup>c</sup>	402 <sup>a</sup>	1 878 <sup>b</sup>

注:同列不同小写字母分别表示 4 种绿肥间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among four green manures at 0.05 level. The same as follows.

### 2.2 不同豆科绿肥养分含量动态变化

从图 1 可知,绿肥作物的碳含量并没有随着生长发生显著变化,不同种类的绿肥在同一生长时期碳含量差异不显著。在苗期及生育后期,紫云英碳含量稍高,约为 45%,其他 3 种绿肥碳含量为 41%~44%。

对 4 种豆科绿肥全氮含量(图 2)进行测定发现,从苗期到生育后期氮含量整体呈下降的趋势。在播种 90 d 时,毛叶苕子全氮含量最高,为 3.88%,蚕豆、紫云英和箭筈豌豆的全氮含量无显著差异。在播种后 180 d,毛叶苕子全氮含量最高,为 3.34%,蚕豆较低,紫云英和箭筈豌豆全氮含量位于中间水平。

为了探究不施用化肥对绿肥作物磷养分积累的影响,测定 4 种豆科绿肥全磷含量。从图 3 可知,不同绿肥全磷含量在苗期和生育后期相比,趋势并不一致。蚕豆和紫云英苗期全磷含量显著高于生育后期,而箭筈豌豆在生育后期全磷含量更高。毛叶苕子全磷含量在播种 90 和 180 d 时无显著差异。此外,在同一生长时期,4 种绿肥全磷含量差异较大,毛叶苕子全磷含量显著高于其他 3 种绿肥。在苗期,蚕豆和箭筈豌豆全磷含量差异不大,但在生育后期,箭筈豌豆全磷含量显著增加,明显高于蚕豆,仅次于毛叶苕子。

从图 4 可知,不同种类绿肥全钾含量在生育后期明显高于苗期,呈升高的趋势,播种 180 d 时绿肥的全钾含量是播种 90 d 时的 2 倍左右。在生育后期,紫云英的全钾含量最高,为 3.58%,蚕豆的全钾含量最低,为 2.11%。在苗期,不同绿肥全钾含量差异与生育后期相似,紫云英最高,毛叶苕子次之,蚕豆和箭筈豌豆全钾含量无显著差异。

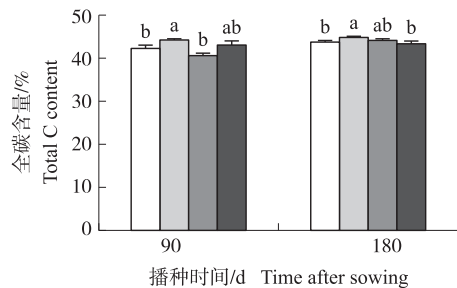


图 1 不同豆科绿肥苗期和生育后期全碳含量

Fig. 1 Total C content of different Leguminous green manure crops at the seedling and later growth stages

不同小写字母表示 4 种绿肥间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among four green manures at 0.05 level. The same as follows.

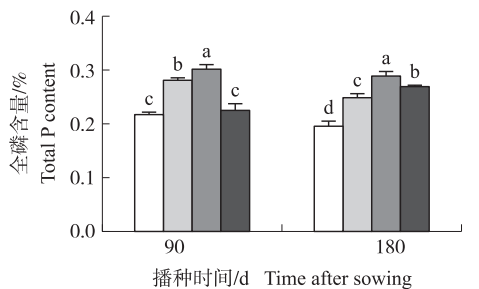


图 3 不同豆科绿肥苗期和生育后期全磷含量

Fig. 3 Total P content of different Leguminous green manure crops at the seedling and later growth stages

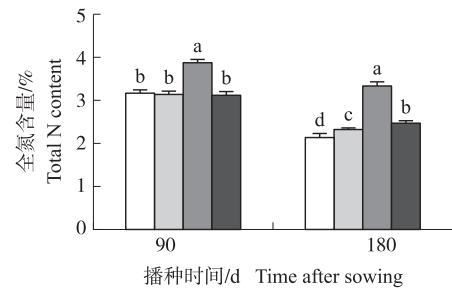


图 2 不同豆科绿肥苗期和生育后期全氮含量

Fig. 2 Total N content of different Leguminous green manure crops at the seedling and later growth stages

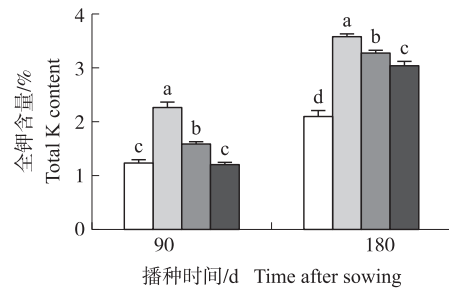


图 4 不同豆科绿肥苗期和生育后期全钾含量

Fig. 4 Total K content of different Leguminous green manure crops at the seedling and later growth stages

### 2.3 不同豆科绿肥地上部养分积累含量变化

对绿肥不同生育时期地上部碳、氮、磷、钾积累量(图 5)进行计算,发现在播种 180 d 的生育后期,各养分的积累量均显著高于苗期,其中绿肥地上部碳积累量变化趋势和地上部干物质积累趋势一致,紫云英最高,其他 3 种绿肥无显著差异。毛叶苕子全氮含量最高,因此其氮积累量也最高,其次是紫云英,蚕豆和箭筈豌豆的氮积累量差异不显著。4 种绿肥在苗期和生育后期,地上部的磷积累量变化趋势略有变化。在播种 90 d 时,毛叶苕子地上部磷积累量显著高于紫云英、蚕豆和箭筈豌豆;在播种后 180 d 时,各绿肥地上部磷积累量从大到小依次为紫云英、毛叶苕子、箭筈豌豆、蚕豆,并且差异显著。绿肥地上部钾积累量的变化在生育后期与磷相似,紫云英显著高于其他 3 种绿肥,在苗期紫云英钾积累量最高。

### 2.4 不同豆科绿肥翻压后对土壤化学性质的影响

在播种 180 d 后,4 种绿肥均已进入盛花期,绿肥的养分含量差异显著(图 1—图 4)。为了探明绿肥还田后对土壤化学性质的影响,在翻压入土 20 d 后采集土壤样品,土壤的化学性质结果(表 2)显示,与休耕相比,绿肥对土壤的 pH 值没有显著影响,紫云英能够显著增加土壤有机碳含量,各绿肥之间并没有显著差异。土壤有机碳含量为 7.74~8.05  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与休耕相比,紫云英翻压后土壤有机碳含量提高了 4.05%,蚕豆、毛叶苕子和箭筈豌豆分别使土壤有机碳含量增加了 2.70%、2.25%和 3.22%。

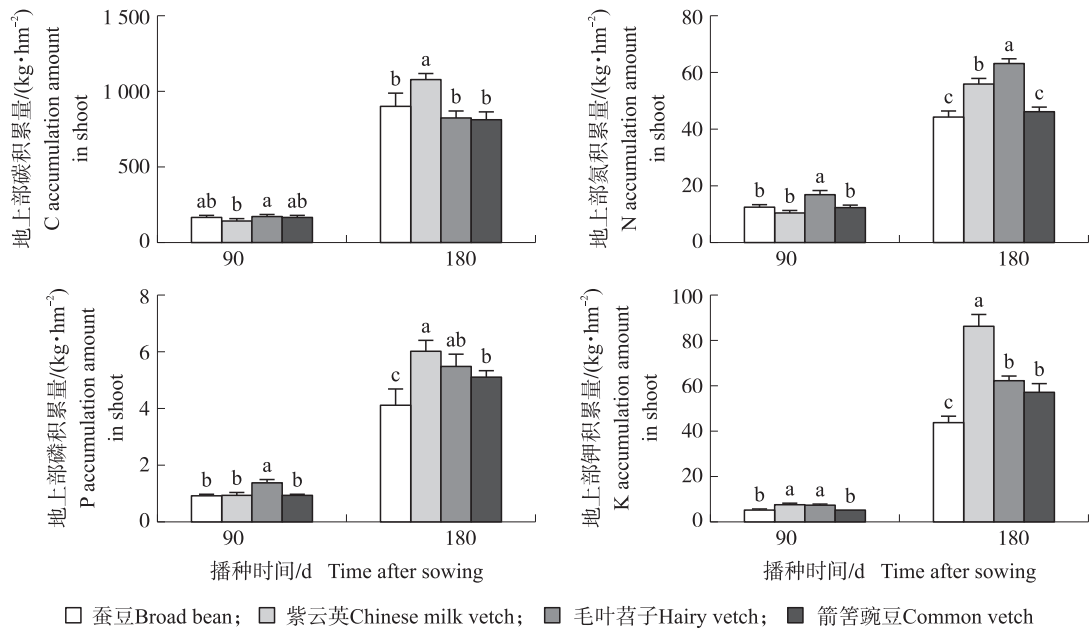


图 5 不同豆科绿肥苗期和生育后期地上部养分积累量

Fig. 5 Nutrients accumulation amounts in shoot of different Leguminous green manure crops at the seedling and later growth stage

绿肥还田后对土壤全氮、有效磷、速效钾含量的测定分析显示,与休耕相比,紫云英可以显著提高土壤全氮含量,其他绿肥种植还田土壤全氮含量也增加,但并不显著。种植蚕豆、紫云英、毛叶苕子和箭筈豌豆的土壤全氮含量分别增加了 1.87%、3.41%、1.25% 和 1.20%。土壤有效磷含量变化与全氮含量相似,紫云英还田后土壤有效磷含量增加了 29.50% ( $P < 0.05$ )。各绿肥之间无显著差异,种植蚕豆和豌豆的土壤有效磷含量比休耕土壤提高了 4.84% 和 9.21% ( $P > 0.05$ )。绿肥翻压后土壤速效钾含量变化也呈相同的趋势,与休耕土壤相比均有不同程度的增加。其中,紫云英还田后土壤速效钾含量显著提高了 8.22%。

表 2 绿肥翻压后对土壤化学性质的影响

Table 2 Impact of green manure crops plowing on soil chemistry properties

处理 Treatment	pH 值 pH value	有机碳含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Organic matter content	全氮含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Total N content	有效磷含量/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Available P content	速效钾含量/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Available K content
对照 Control	7.84 <sup>a</sup>	7.74 <sup>b</sup>	1.32 <sup>b</sup>	17.73 <sup>b</sup>	114.06 <sup>b</sup>
蚕豆 Broad bean	7.84 <sup>a</sup>	7.95 <sup>ab</sup>	1.35 <sup>ab</sup>	18.59 <sup>ab</sup>	117.57 <sup>b</sup>
紫云英 Chinese milk vetch	7.83 <sup>a</sup>	8.05 <sup>a</sup>	1.37 <sup>a</sup>	22.96 <sup>a</sup>	123.44 <sup>a</sup>
毛叶苕子 Hairy vetch	7.85 <sup>a</sup>	7.91 <sup>ab</sup>	1.34 <sup>ab</sup>	17.61 <sup>b</sup>	115.26 <sup>b</sup>
箭筈豌豆 Common vetch	7.85 <sup>a</sup>	7.98 <sup>ab</sup>	1.34 <sup>ab</sup>	19.36 <sup>ab</sup>	116.27 <sup>b</sup>

### 3 讨论

在实际生产中,农民“多施肥,产量高”的观念非但不能提高作物产量和经济效益,往往还会导致土壤退化和农田排水富营养化,造成严重的环境污染<sup>[16]</sup>。研究表明,土壤养分供应能力降低是导致作物产量下降的主要因素,充足的土壤养分供应可以显著提高作物产量<sup>[17]</sup>。化肥和绿肥组合可以改善土壤结构,增加根系生物量,提高土壤微生物活性和多样性,同时种植绿肥可以产生大量作物残留,有利于水土保持和提高作物产量<sup>[18]</sup>。

#### 3.1 不同豆科绿肥养分及养分积累

在生育后期,4 种豆科绿肥地上部干物质量均大于 1 800 kg·hm<sup>-2</sup>,其中紫云英地上部干物质量显著高于其他 3 种绿肥作物,这主要是由于其适应性强,生长良好。不同绿肥在适宜翻压的生育后期,地上部碳积累规律与干物质量积累趋势一致,紫云英最高,蚕豆、毛叶苕子和箭筈豌豆的地上部碳积累量无显著差异。绿肥地上部磷、钾积累规律稍有不同,紫云英的积累量最高,其次是毛叶苕子和箭筈豌豆,蚕豆的积累量最低。毛叶苕子地上部氮积累量最高,其次是紫云英,且差异显著。4 种豆科绿肥适宜的翻压期是在播种 180 d 后的生育后期,紫云英地上部碳、氮、磷、钾积累量较高,其次是毛叶苕子。

### 3.2 不同豆科绿肥翻压对土壤肥力的影响

有机肥为缓效肥,能够持续提高土壤速效养分含量。本试验中,施用有机肥土壤 pH 值没有发生变化,但土壤养分含量显著增加。土壤有机碳含量增加了 28.15%,全氮含量增加了 24.53%,有效磷含量增加了 34.62%,速效钾含量增加了 15.76%。这是因为有机肥中含有的大量有机质为土壤微生物提供了充足能源,施用后有利于土壤微生物的繁殖和生长,继而促进土壤中难溶性养分的转化,改良了土壤环境。

大量研究已经证明,种植并翻压绿肥对土壤有很好的培肥作用,不同绿肥培肥效果并不一致。在盐碱地连续 3 年种植并翻压毛叶苕子和二月兰,不仅改良盐碱土壤的物理性状,土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾的含量均显著增加<sup>[19]</sup>。在关中地区种植光叶苕子、毛叶苕子、紫云英和草木樨,土壤有效磷、速效钾和碱解氮含量都增加<sup>[20]</sup>。本试验中,紫云英还田后显著增加土壤有机碳、全氮、有效磷和速效钾含量。其他几种绿肥对土壤有机碳及养分含量也有一定的提升作用,但并不显著。这可能是因为紫云英的生物量最大,其鲜重在翻压时约是蚕豆的 1.6 倍,约是毛叶苕子和箭筈豌豆的 2 倍。绿肥作物重要的评价指标之一就是翻压时的生物量(干物质量),有研究表明绿肥对土壤的培肥效果与其翻压入土的生物量成正比<sup>[21]</sup>。还有可能是由于紫云英单株生物量较小,翻压入土后所需的腐解时间和转化周期较短;而蚕豆、毛叶苕子和箭筈豌豆单株生物量都比较大,其腐解和转化所需时间较长,在测定土壤养分含量时,还有部分的绿肥植株未腐解完全。因此,与对照相比培肥效果不显著。

土壤有机碳含量是动态变化的,与土壤类型、覆盖作物种类、耕作管理方式以及气候条件有关<sup>[22]</sup>。在本试验中与休耕相比,4 种豆科绿肥翻压后土壤有机碳含量均不同程度增加,并且紫云英达到显著水平,Olson 等<sup>[23]</sup>研究表明种植毛豌豆、黑麦、油菜等可以显著增加土壤有机碳浓度。这可能是因为种植绿肥作物增加了土壤中微生物的多样性和活性,从而导致有机碳增加。此外,种植绿肥还可以通过增加地表植被覆盖来减少土壤侵蚀,而土壤侵蚀有可能会造成土壤有机碳的损失<sup>[22]</sup>。由于土壤有机碳本底值较高,种植绿肥的增益作用往往需要数年才能体现,这也在一定程度上解释了蚕豆等绿肥种植体系与休耕相比土壤有机碳含量并没有显著差异的原因。本试验中,种植 4 种豆科绿肥并翻压对土壤全氮含量的增加有促进作用。豆科绿肥具有优秀的固氮能力,同时不会与土壤中的氮进行有机结合而导致土壤硝酸盐浸出,可以促进土壤氮的保持<sup>[24]</sup>。

在本试验中,种植紫云英显著提高土壤有效磷含量,这可能是因为豆科绿肥具有较高的根系生物量和复杂的根系结构。其通过分泌根系分泌物,比如酸性磷酸酶活化土壤中难溶性的磷<sup>[25-26]</sup>,促进了根际微生物的生长发育,释放土壤中被固定的磷。此外,种植绿肥可能会改变根际理化性质,例如酸化或碱化引起 pH 值发生变化,从而影响绿肥作物对土壤磷的吸收<sup>[27]</sup>。绿肥作物在腐熟过程中,也可以通过分泌有机酸或者促进土壤微生物的活动来充分调动土壤磷库<sup>[17]</sup>。

综上所述,综合绿肥养分积累量、翻压技术难度、腐熟所需时间、还田后对土壤养分的影响等因素,在不施用化肥且仅施用有机肥为基肥的条件下,紫云英优于蚕豆、毛叶苕子和箭筈豌豆,是适宜种植的绿肥。紫云英还田后土壤有机碳、全氮、有效磷和速效钾含量均显著高于休耕对照,分别提高了 4.04%、3.40%、29.50%和 8.22%。其他 3 种豆科绿肥还田,虽然也能增加土壤有机碳和养分含量,但未达显著水平。本研究为探索生态绿色高效绿肥-作物种植体系提供了重要依据。然而,绿肥还田效应的研究还需多年连续种植才更具有指导意义,且土壤养分含量的增加是否会改善后茬作物的养分平衡也需进一步的研究。

#### 参考文献 References:

- [1] 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 (in Chinese with English abstract).
- [2] 季国军,纪洪亭,程琨,等. 江苏稻田轮作模式碳、氮足迹分析[J]. 南京农业大学学报,2023,46(3):510-521. DOI: 10.7685/jnau.202212015.  
Ji G J, Ji H T, Cheng K, et al. Analysis on carbon footprint and nitrogen footprint of paddy field rotation patterns in Jiangsu Province[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(3):510-521 (in Chinese with English abstract).
- [3] 卢秉林,包兴国,张久东,等. 间作绿肥饲草与减施氮肥对河西绿洲灌区玉米产量和土壤肥力的影响[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(2):170-175.  
Lu B L, Bao X G, Zhang J D, et al. Effects of intercropping green manure forages and nitrogen-reduction on corn yield and soil fertility in Hexi

- Oasis Irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2015,33(2):170-175(in Chinese with English abstract).
- [4] Yu Y L,Xue L H,Yang L Z. Winter legumes in rice crop rotations reduces nitrogen loss,and improves rice yield and soil nitrogen supply[J]. *Agronomy for Sustainable Development*,2014,34(3):633-640.
- [5] 陈正刚,崔宏浩,张钦,等. 光叶苕子与化肥减量配施对土壤肥力及玉米产量的影响[J]. *江西农业大学学报*,2015,37(3):411-416,496.  
Chen Z G,Cui H H,Zhang Q,et al. Effects of burying *Vicia villosa* rothvar and chemical fertilizer reduction on soil fertility and corn yield[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*,2015,37(3):411-416,496(in Chinese with English abstract).
- [6] 陆景陵. 植物营养学:上册[M]. 2版. 北京:中国农业大学出版社,2003:35.  
Lu J L. *Plant Nutrition:Volume I* [M]. 2nd ed. Beijing:China Agricultural University Press,2003:35(in Chinese).
- [7] 李轶,张轩轩,郭敬阳,等. 沼肥/钙镁磷肥对土壤-菠菜中重金属 Cd 的影响[J]. *沈阳农业大学学报*,2023,54(5):572-578.  
Li Y,Zhang X X,Guo J Y,et al. Effects of biogas fertilizer/calcium magnesium phosphate fertilizer on heavy metal cadmium in soil and spinach[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*,2023,54(5):572-578(in Chinese with English abstract).
- [8] Raghthama K G. Phosphate acquisition[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*,1999,50:665-693.
- [9] Maltais-Landry G,Frossard E. Similar phosphorus transfer from cover crop residues and water-soluble mineral fertilizer to soils and a subsequent crop[J]. *Plant and Soil*,2015,393(1):193-205.
- [10] 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(in Chinese with English abstract).
- [11] Kunze A,Dalla Costa M,Epping J,et al. Phosphatase activity in sandy soil influenced by mycorrhizal and non-mycorrhizal cover crops[J]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*,2011,35(3):705-711.
- [12] Pettigrew W T. Potassium deficiency increases specific leaf weights and leaf glucose levels in field-grown cotton[J]. *Agronomy Journal*,1999,91(6):962-968.
- [13] Gerendás J,Führs H. The significance of magnesium for crop quality[J]. *Plant and Soil*,2013,368(1):101-128.
- [14] 毛培培,赵云云. 植物对钾营养的吸收、运转和胁迫反应的研究进展[J]. *生物学通报*,2008,43(8):11-13.  
Mao P P,Zhao Y Y. Research progress on absorption,transportation and stress response of potassium nutrition in plants[J]. *Bulletin of Biology*,2008,43(8):11-13(in Chinese).
- [15] 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(in Chinese).
- [16] Qiao J,Yang L Z,Yan T M,et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area[J]. *Agriculture,Ecosystems & Environment*,2012,146(1):103-112.
- [17] Huang S,Zeng Y J,Wu J F,et al. Effect of crop residue retention on rice yield in China;a meta-analysis[J]. *Field Crops Research*,2013,154:188-194.
- [18] Almagro M,Garcia-Franco N,Martínez-Mena M. The potential of reducing tillage frequency and incorporating plant residues as a strategy for climate change mitigation in semiarid Mediterranean agroecosystems[J]. *Agriculture,Ecosystems & Environment*,2017,246:210-220.
- [19] 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(in Chinese with English abstract).
- [20] 张春,杨万忠,韩清芳,等. 夏闲期种植不同绿肥作物对土壤养分及冬小麦产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*,2014,32(2):66-72,84.  
Zhang C,Yang W Z,Han Q F,et al. Effects on soil nutrient and yield of winter wheat of planting different green manures during summer fallow[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2014,32(2):66-72,84(in Chinese with English abstract).
- [21] 李婧,张达斌,王峥,等. 施肥和绿肥翻压方式对旱地冬小麦生长及土壤水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*,2012,30(3):136-142.  
Li J,Zhang D B,Wang Z,et al. Effect of fertilizer and green manure incorporation methods on the growth and water use efficiency of winter wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2012,30(3):136-142(in Chinese with English abstract).
- [22] Blanco-Canqui H,Holman J D,Schlegel A J,et al. Replacing fallow with cover crops in a semiarid soil:effects on soil properties[J]. *Soil Science Society of America Journal*,2013,77(3):1026-1034.
- [23] Olson K,Ebelhar S A,Lang J M. Long-term effects of cover crops on crop yields,soil organic carbon stocks and sequestration[J]. *Open Journal of Soil Science*,2014,4(8):284-292.
- [24] Quemada M,Baranski M,de Lange M N J,et al. Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield[J]. *Agriculture,Ecosystems & Environment*,2013,174:1-10.
- [25] Hinsinger P,Plassard C,Tang C X,et al. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints:a review[J]. *Plant and Soil*,2003,248(1):43-59.
- [26] Nannipieri P,Giagnoni L,Landi L,et al. Role of phosphatase enzymes in soil[M]//Phosphorus in Action. Berlin:Springer,2011:215-243.
- [27] Morel C,Hinsinger P. Root-induced modifications of the exchange of phosphate ion between soil solution and soil solid phase[J]. *Plant Soil*,1999,211:103-110.