

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.04.011

任改弟, 张苗, 张文越, 等. 不同来源有机物料对菜用蚕豆生长和品质及根际土壤性状的影响. 土壤, 2022, 54(4): 740–749.

# 不同来源有机物料对菜用蚕豆生长和品质及根际土壤性状的影响<sup>①</sup>

任改弟<sup>1,2,3,4</sup>, 张苗<sup>1,2</sup>, 张文越<sup>1,2</sup>, 郭德杰<sup>1,2</sup>, 马艳<sup>1,2,4\*</sup>

(1 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2 国家农业环境六合观测实验站, 南京 210014; 3 江苏大学生命科学研究院, 江苏镇江 212013; 4 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏镇江 212013)

**摘要:** 通过盆栽试验, 分析了不同来源有机物料(鸡粪、牛粪、菇渣)对菜用蚕豆生长和品质、根际土化学和生物学性状的影响。结果表明: ①3种有机物料对蚕豆分枝数、荚干重、籽粒干重、大粒重、大粒蚕豆占比、籽粒淀粉含量均有积极作用, 其中牛粪和菇渣能显著 ( $P<0.05$ ) 提高大粒蚕豆占比, 鸡粪能显著 ( $P<0.05$ ) 提高二粒荚和三粒荚的占比, 并且对籽粒淀粉含量的提升效果最为明显 (比对照增加 69.1%); ②3种有机物料增加了根际土中细菌、真菌数量, 显著 ( $P<0.05$ ) 提高了根际土中性转化酶、脲酶、酸性磷酸酶、多酚氧化酶活性(除牛粪使中性转化酶活性提高不显著外), 其中鸡粪对细菌数量、中性转化酶活性、脲酶活性的提高程度均最大; ③鸡粪能显著 ( $P<0.05$ ) 增加根际土有机碳、全氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量, 牛粪、鸡粪能显著 ( $P<0.05$ ) 提高土壤 pH。大粒蚕豆占比与土壤酸性磷酸酶活性、有效磷含量呈显著正相关。蚕豆淀粉含量与细菌数量、中性转化酶活性、有机碳、全氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量呈显著正相关, 这说明有机物料的施用可能为细菌生长提供了更多的碳源和能源, 导致细菌数量增加。细菌是酶的重要生产者, 细菌数量的增加可能提高了碳氮循环相关酶(中性转化酶、脲酶)的产生量和活性, 从而使更多的有机氮转变为无机氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ), 提高了土壤养分( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、全氮)水平, 进而提高了蚕豆营养品质。

**关键词:** 有机物料; 蚕豆; 作物生长和品质; 土壤生物学性状; 土壤化学性状

中图分类号: S141; S154; S153 文献标志码: A

## Effects of Organic Materials from Different Sources on Growth and Quality of Vegetable Broad Beans and Properties of Rhizosphere Soil

REN Gaidi<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Miao<sup>1,2</sup>, ZHANG Wenyue<sup>1,2</sup>, GUO Dejie<sup>1,2</sup>, MA Yan<sup>1,2,4\*</sup>

(1 Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2 National Agricultural Experiment Station for Agricultural Environment, Luhe, Nanjing 210014, China; 3 Institute of Life Sciences, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 4 School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract:** A pot experiment was conducted to investigate the effects of organic materials from different sources (chicken manure, cow manure, and mushroom residue) on the growth and quality of vegetable broad bean, and the chemical and biological properties of rhizosphere soil. The results showed that: 1) Organic materials had positive effects on the number of branches, pod dry weight, kernel dry weight, large-kernel dry weight, percent of large-kernel and kernel starch content. Cow manure or mushroom residue significantly ( $P<0.05$ ) increased the percentage of large-kernel. Chicken manure significantly ( $P<0.05$ ) increased the percentages of two-kernel pod and three-kernel pod, and also resulted in the largest increase in the starch content of kernel (69.1% higher than that of the control). 2) Organic materials not only increased the quantity of rhizosphere bacteria and fungi, but also significantly ( $P<0.05$ ) increased the activities of neutral invertase, urease, acid phosphatase and polyphenol oxidase in rhizosphere soil (except an insignificant increase of neutral invertase by cattle manure treatment). Chicken manure led to the greatest increase in bacterial quantity, and neutral invertase and urease activities. 3) Chicken manure significantly ( $P<0.05$ )

①基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(SBK2020023002)、院基本科研业务专项项目(重点人才配套)(ZX(2020)3011)、江苏省第五期“333工程”科研项目(BRA2019313)和江苏现代农业(蔬菜)产业技术体系废弃资源利用创新团队项目(JATS[2019]333)资助。

\* 通讯作者(myjaas@sina.com)

作者简介: 任改弟(1984—), 女, 河南安阳人, 博士, 副研究员, 主要从事微生物分子生态学研究。E-mail: gaidiren@163.com

increased the contents of organic carbon, total nitrogen, and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  in rhizosphere soil. Cattle manure and chicken manure significantly ( $P<0.05$ ) increased soil pH. The proportion of large kernel was positively correlated with soil acid phosphatase activity and available phosphorus content. Starch content of kernel was positively correlated with the quantity of bacteria, the activity of neutral invertase, and the contents of organic carbon, total nitrogen, and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ . The above results indicated that organic materials can provide more C and energy for bacteria, and hence lead to an increase in bacterial quantity. Bacteria are important producers of enzymes. The increase of bacterial quantity can increase the production and activities of enzymes (neutral invertase and urease) related with carbon and nitrogen cycles, result in more conversion from organic nitrogen to inorganic nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ), then increase soil nutrient ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , total nitrogen) levels, and thus lead to improvement of the nutritional quality of broad bean.

**Key words:** Organic materials; Broad bean; Crop growth and quality; Soil biological properties; Soil chemical properties

施肥是提高作物产量、改善农产品品质的关键因素。在实际生产中, 由于长期施用化肥, 忽视有机类肥料的施用, 往往造成土壤酸化和板结<sup>[1]</sup>、土壤生物活性降低<sup>[2]</sup>、土壤肥力下降<sup>[1]</sup>、土壤碳素过度消耗、有机质含量降低<sup>[1]</sup>等一系列的土壤退化问题, 严重影响了作物的产量和品质。随着土壤生态环境的恶化, 单施化肥已不利于我国农业的可持续发展。现代农业生产中, 为了调节土壤养分平衡, 实现土地的用养结合, 化肥基础上增施有机物料成为有效的解决方法<sup>[3-5]</sup>。

有机物料种类多样, 主要包括天然草炭、畜禽粪便、秸秆、食用菌生产废料、动物内脏、沼气发酵残留物等<sup>[6]</sup>。有机物料作为土壤腐殖质的重要物质来源, 在改善根际土壤性状及提高作物产量和品质方面的意义深远。有机物料施用在改变土壤理化性状的同时, 亦可能会改变土壤的生物学性状。这是因为有机物料是一种高能量的物质, 其进入土壤可以为土壤微生物提供更多的物质和能量来源, 从而增强土壤微生物的活性, 提高微生物酶的合成水平, 改善土壤的生物学性状。土壤理化性状、生物学性状的变化意味着作物的生存环境发生了变化, 这最终可能会影响作物的生长和农产品品质。张启明等<sup>[5]</sup>研究了不同有机物料(普通商品有机肥、生物有机肥、生物质炭)与化肥配施对土壤改良和烤烟产量和质量的影响, 结果表明, 与常规施肥(100% 化肥)相比, 有机物料与化肥配施能够提高土壤酶活性、微生物多样性、烤后烟叶含钾量, 促进烟叶化学成分更为协调, 从而能够提高烟叶均价、上等烟比例和经济效益。赵征宇等<sup>[7]</sup>研究发现有机肥配施能降低番茄果实中的硝酸盐含量, 并且有机肥配施比例越高, 番茄果实中的硝酸盐含量下降越大。

蚕豆(*Vicia faba* Linn.)俗称佛豆、胡豆、寒豆、

南汉豆、利马豆、川豆等, 属于越年生或一年生豆科野豌豆属草本植物。蚕豆是联合国粮农组织支持发展的作物之一, 是世界上重要的豆科作物。因蚕豆具粮食、蔬菜、饲料和绿肥兼用等特点, 并具有较高的固氮量, 而且可以减少病虫害、增加生态系统中生物多样性, 蚕豆在世界范围内广泛种植。据估计, 世界蚕豆的种植面积高达 260 万  $\text{hm}^2$ , 我国的蚕豆种植规模居世界首位, 种植面积占世界种植面积的 40%<sup>[8]</sup>。蚕豆在我国大多数省份都有种植, 长江以南地区以秋播冬种为主, 长江以北以早春播为主。鲜食蚕豆有较高经济效益、生态效益和社会效益, 国内外市场前景广阔, 在一些蚕豆生产基础好的地区, 鲜食蚕豆已成为特色产业进入国内外市场。菜用蚕豆是指采收青荚剥粒作为蔬菜食用的蚕豆品种。目前, 对于有机物料施用在改善根际生态环境、保证作物生长、改善农产品品质方面主要集中于小麦<sup>[9]</sup>、玉米<sup>[10-11]</sup>、烟草<sup>[12]</sup>、黄瓜<sup>[13]</sup>、番茄<sup>[7, 14]</sup>、辣椒<sup>[14]</sup>等作物, 而有机物料对菜用蚕豆生长和品质、根际土壤的生物学和化学性状的影响研究鲜见报道。多数研究表明, 施用有机物料可提高作物的产量和品质, 改善土壤化学性状和生物学性状<sup>[7, 9, 14]</sup>。

蚕豆是江苏省主要栽培的冷季鲜食豆科作物之一, 是江苏省主要的豆类蔬菜作物之一, 为高效设施农业中的主要作物, 在出口创汇蔬菜中占据重要地位<sup>[15]</sup>。本研究以菇渣、鸡粪、牛粪为不同来源的供试有机物料, 以江苏省主要的冷季豆类蔬菜——菜用蚕豆为供试作物, 通过温室盆栽试验, 在常规施肥的基础上施用有机物料, 研究其对蚕豆生长和品质、蚕豆根际土壤化学性状和生物学性状的影响, 耦合分析蚕豆根际土壤化学性状和生物学性状与蚕豆生长和品质的关系, 以期通过施用有机物料改善菜用蚕豆根际环境、保证产量、提高品质提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

菜用蚕豆品种为江苏省农业科学院经济作物研究所提供的苏蚕豆 2 号。供试土壤为马干土, 采自江苏省农业科学院六合动物科学基地(118°37'18"E, 32°29'17"N)。采集的土壤为 0~20 cm 表层土。土壤基本理化性质如下: 土壤 pH ( $m_{\pm}:V_{\text{水}}=1:5$ ) 7.66, 有机质 10.53 g/kg, 全氮 1.15 g/kg, 全磷 0.71 g/kg, 全钾 10.52 g/kg, 有效磷 35.23 mg/kg, 速效钾 202.33 mg/kg,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  3.55 mg/kg,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  11.98 mg/kg。腐熟的牛粪、鸡粪、菇渣来自江苏省农业科学院六合动物科学基地堆肥厂, 这 3 种有机物料养分含量见表 1。

表 1 供试有机物料养分含量

Table 1 Nutrient contents of tested organic materials

有机物料	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷(以 P 计, g/kg)	全钾(以 K 计, g/kg)
牛粪	339.49	14.38	5.54	19.93
鸡粪	412.78	11.78	6.27	20.30
菇渣	805.08	25.52	14.36	17.09

### 1.2 蚕豆盆栽试验设置

盆栽试验在江苏省农业科学院展示温室大棚内进行。设置 4 个处理: ①不加有机物料的对照(CK); ②加鸡粪处理(Chi); ③加牛粪处理(Cow); ④加菇渣处理(Mus)。每个处理 4 个重复, 共计 16 盆。所有处理化肥施入量相同: 氮肥用量为 N 56 mg/kg 土, 以尿素形式施加; 磷肥用量为 P 70 mg/kg 土, 以过磷酸钙形式施加; 钾肥用量为 K 60 mg/kg 土, 以  $\text{K}_2\text{SO}_4$  形式施加。磷钾肥全部作为基肥一次性施入, 氮肥的 55% 以基肥施入, 45% 于盛花期追施。对于添加有机物料处理, 鸡粪、牛粪、菇渣的添加量均为 10 g/kg 土(按照干重计算), 均作为基肥一次性施入。各个处理的有机物料和化肥施用量见表 2。

表 2 各处理有机物料和化肥施用量

Table 2 Amount of organic materials and chemical fertilizer applied in each treatment

处理	有机物料用 量(g/kg)	N (mg/kg)		P (mg/kg)	K (mg/kg)
		基肥	追肥		
CK	0	31	25	70	60
Cow	10	31	25	70	60
Chi	10	31	25	70	60
Mus	10	31	25	70	60

盆栽所用盆钵直径为 30.5 cm, 高度为 24 cm, 每盆装土 12 kg。蚕豆在种植之前, 先用清水浸泡过

夜, 倒掉浸泡后的水, 用清水冲洗蚕豆 2~3 次直到清洗的水变清澈, 再继续用水浸泡 4~5 h 后即可播种。每盆播种 3 颗种子。本试验蚕豆的播种时间为 2019 年 9 月 30 日。待蚕豆出苗生长至株高约 10 cm 时, 间苗, 每盆留 1 棵苗。当到盛花期时, 按照 N 25 mg/kg 土追施尿素。追施方法: 将尿素溶解于水中, 配成尿素溶液, 以根系为中心, 在距离根系 10 cm 处挖一个环形追肥沟, 将尿素溶液均匀加到追肥沟内, 待溶液全部渗入土壤后, 覆土。整个生长过程中, 定期供水, 使土壤水分达到田间持水量的 60%~70%。

### 1.3 样品采集

在蚕豆成熟期采集蚕豆植株样品和根际土, 测定蚕豆植株生长指标、果粒品质指标、根际土生物学指标。

把植株地上部中最长的分枝拉直, 用米尺测量植株基部至该最长分枝顶部的高度, 即为株高。记录分枝高度大于群体一半的分枝数。用剪刀将豆荚剪下, 烘干后, 称荚重量。将荚皮剥开, 统计每个荚中蚕豆个数; 分别统计大粒蚕豆(>0.8 g/粒)、中粒蚕豆(0.6~0.8 g/粒)和小粒蚕豆(<0.6 g/粒)的个数和重量。用刀将地上部与地下部分开, 将地上部装入信封中, 烘干, 测定地上部干重。将地下部连土倒出盆钵, 抖根法采集根际土后, 小心收集根系, 用去离子水将根系冲洗干净, 装入信封中, 烘干称重。

### 1.4 样品测定

**1.4.1 果粒营养品质指标测定** 果粒中淀粉含量采用蒽酮比色法测定<sup>[16]</sup>, 具体操作流程按照 Solarbio 公司的淀粉含量检测试剂盒(北京索莱宝科技有限公司)中的步骤进行。果粒中蛋白质含量采用考马斯亮蓝法测定<sup>[17]</sup>。

**1.4.2 根际土壤酶活性测定** 1) 土壤中性转化酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定<sup>[18]</sup>, 操作流程按照 Solarbio 提供的土壤中性转化酶(S-NI)活性检测试剂盒中的步骤进行。单位定义: 以 37 °C 每 g 土壤每天产生 1 mg 还原糖定义为一个酶活性单位。

2) 土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定<sup>[18]</sup>, 具体操作按照苏州科铭生物科技有限公司提供的土壤脲酶(solid-urease, S-UE)测定试剂盒中的操作步骤进行。单位的定义: 每天每 g 土样中产生 1  $\mu\text{g}$   $\text{NH}_3\text{-N}$  定义为 1 个酶活力单位。

3) 土壤酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定<sup>[18]</sup>, 具体操作按照苏州科铭生物科技有限公司提供的土壤酸性磷酸酶活性(soil acid phosphatase, S-ACP)测定试剂盒中的操作步骤进行。活性单位定

义: 37 °C 土壤中每 g 土壤每天释放 1 μmol 酚为 1 个酶活单位。

4) 土壤多酚氧化酶采用邻苯三酚比色法测定<sup>[19]</sup>, 具体操作步骤按照苏州科铭生物科技有限公司提供的土壤多酚氧化酶(solid-polyphenol oxidase, S-PPO)试剂盒测定。单位定义: 每天每 g 土壤中产生 1 mg 紫色没食子素定义为 1 个酶活力单位。

**1.4.3 根际土壤 DNA 提取** 采用 FastDNA® Spin Kit for Soil(MP Biomedicals 公司)试剂盒提取土壤微生物基因组 DNA。称取 0.5 g 土样, 按照说明书的提取步骤进行。将提取得到的土壤微生物总 DNA 溶解于 100 μl 无菌水后, 采用微量紫外分光光度计(NanoDropND-1000)测定 DNA 浓度和纯度。此外, 采用 1.2% 的琼脂糖凝胶电泳分析 DNA 的完整性。将 DNA 样品置于 -20 °C 备用。

**1.4.4 细菌和真菌荧光定量 PCR** 采用引物 515F (5'-GTGCCAGCMGCCGCGG-3')和 907R (5'-CCGTCAATTCMTTTRAGTTT-3')用于对细菌 16S rRNA 基因的 V4-V5 区进行分析。采用引物 NS1 (5'-GTATGTCATATGCTTGTCTC-3')和 Fung (5'-ATTCCCCGTTACCCGTTG-3')对真菌的 18S rRNA 基因进行定量<sup>[20]</sup>。定量 PCR 标线采用含有目标基因的克隆进行制备。利用特定引物分别扩增目的基因, 构建克隆文库后, 将含有目标基因的重组子在 LB 培养基中扩大培养, 利用试剂盒提取质粒并测定质粒浓度, 然后换算成拷贝数。降质粒进行 10 倍梯度稀释, 获得目标基因的标准曲线。荧光定量 PCR 反应体系如下: 10 μl SYBR Premix Ex Taq (TaKaRa), 1.0 μl 引物 (10 μmol/L), 1.0 μl DNA 模板, 加入无菌水补足至 20 μl。每个样品设置 3 个技术重复。定量 PCR 时, 以无菌水代替模板 DNA 作为阴性对照。细菌和真菌荧光定量 PCR 的条件如下: 94 °C 预变性 30 s; 94 °C 变性 30 s, 55 °C 退火 30 s, 72 °C 延伸 30 s, 35 个循环。

**1.4.5 根际土壤化学性状测定** pH 使用 1:2.5(m:l)土水比电极法测定<sup>[21]</sup>, 土壤有机碳采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定<sup>[21]</sup>, 全氮采用凯氏定氮法测

定<sup>[21]</sup>, 铵态氮采用靛酚蓝比色法测定<sup>[21]</sup>, 硝态氮采用紫外分光光度法测定<sup>[21]</sup>, 有效磷采用 NaHCO<sub>3</sub> 钼锑抗比色法测定<sup>[21]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 不同有机物料对蚕豆植株和豆荚生长的影响

如表 3 所示, 与不加有机物料的对照处理相比, 施用牛粪、鸡粪、菇渣对蚕豆株高、分枝数、地上部和根部生物量没有显著影响, 对荚干重、蚕豆籽粒干重有一定的促进作用, 但并未达到显著水平。尽管如此, 牛粪和菇渣处理却显著( $P<0.05$ )增加了大粒蚕豆的个数百分比(图 1A), 使大粒蚕豆的个数占比由对照处理的 90.3% 分别增加至 98.1% 和 99.0%; 鸡粪增加了大粒蚕豆的个数占比, 但是未达到显著水平。另外, 根据蚕豆荚中含有的豆粒个数, 将蚕豆荚分为一粒荚、两粒荚、三粒荚。如图 1B 所示, 一粒荚的占比最高, 达到 58.1% ~ 76.0%; 其次为两粒荚, 占比为 24.1% ~ 36.0%; 三粒荚占比最低, 仅为 0 ~ 7.14%。鸡粪处理能显著增加( $P<0.05$ )两粒荚和三粒荚的占比, 而显著降低一粒荚的占比, 说明鸡粪处理下, 蚕豆更倾向于形成多籽粒荚(两粒荚或三粒荚)。牛粪也能显著增加( $P<0.05$ )两粒荚的占比, 而显著降低一粒荚的占比。

### 2.2 不同有机物料对蚕豆籽粒营养品质的影响

淀粉是植物中糖的主要储存形式, 是蚕豆籽粒中含量最大的成分, 其含量对于评价食品营养价值有重要意义。蛋白质作为细胞中含量最丰富的生物大分子之一, 是生物体结构和功能最重要的物质基础, 也是评价豆类作物营养价值的重要指标。

本研究发现, 供试有机物料中, 施用鸡粪对蚕豆籽粒淀粉含量提升幅度最大, 比对照增加 69.1%(图 2A), 并且达到显著水平( $P<0.05$ ); 施用牛粪、菇渣对蚕豆籽粒淀粉含量也有提升, 但差异不显著, 分别比对照增加了 18.7% 和 27.6%(图 2A)。3 种有机物料对蚕豆籽粒蛋白质含量也都有提升, 但与对照相比没有显著差异, 分别增加了 6.71%、1.09% 和 8.45%(图 2B)。

表 3 不同有机物料对蚕豆植株和豆荚生长指标的影响  
Table 3 Growth indexes of plants and pods for broad bean under different organic materials

处理	株高 (cm)	分枝数	地上部干重 (g/棵)	根干重 (g/棵)	荚干重 (g/棵)	籽粒干重 (g/棵)	大粒(质量 >0.8 g)干重(g/棵)
CK	69 ± 9 a	12 ± 3 a	65.03 ± 2.72 a	53.03 ± 0.11 a	44.09 ± 19.23 a	28.89 ± 14.01 a	25.37 ± 13.63 a
Cow	63 ± 6 a	15 ± 7 a	61.60 ± 12.46 a	46.85 ± 6.99 a	60.22 ± 15.30 a	41.67 ± 11.74 a	40.49 ± 9.34 a
Chi	65 ± 15 a	14 ± 4 a	50.36 ± 15.57 a	36.70 ± 19.24 a	48.75 ± 8.10 a	34.31 ± 5.25 a	31.77 ± 4.74 a
Mus	67 ± 6 a	13 ± 3 a	68.59 ± 14.55 a	55.59 ± 15.13 a	53.06 ± 16.80 a	38.12 ± 14.46 a	35.13 ± 13.99 a

注: Cow, 牛粪; Chi, 鸡粪; Mus, 菇渣; CK, 对照; 同列小写字母不同表示处理间差异达  $P<0.05$  显著水平; 下同。

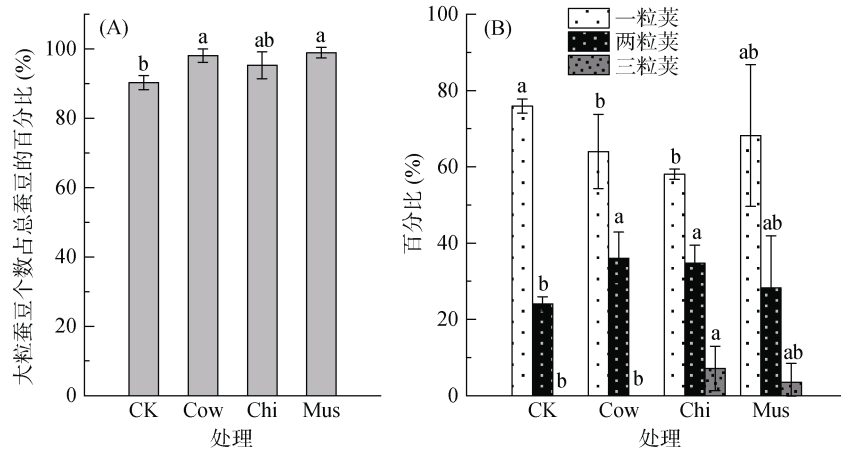


图 1 不同有机物料对大粒蚕豆和豆荚占比的影响

Fig. 1 Proportions of large grain or pods for broad bean under different organic materials

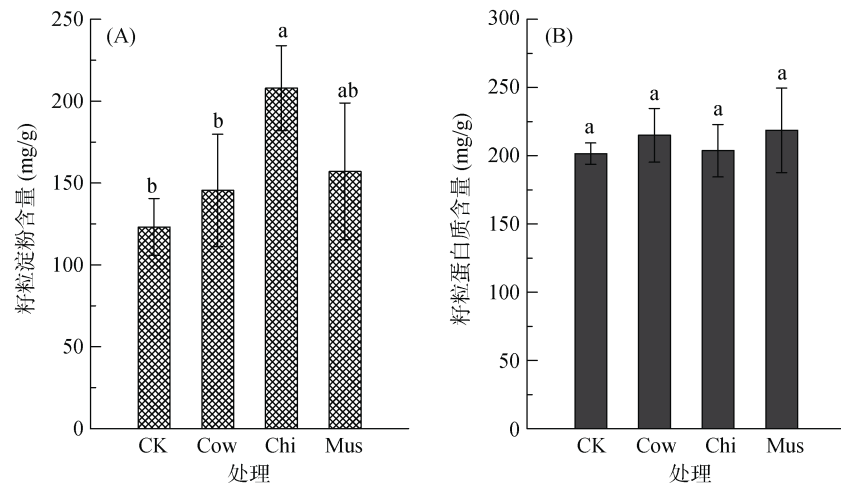


图 2 不同有机物料对蚕豆籽粒中淀粉和蛋白质含量影响

Fig. 2 Contents of starch and protein in broad bean seeds under different organic materials

### 2.3 不同有机物料对蚕豆根际土壤微生物数量的影响

微生物是土壤中一切生物化学过程的主要参与者。细菌、真菌是构成土壤微生物的主要生物量类群，它们的数量变化能反映土壤中生命物质的旺盛程度，是表征土壤微生物活性的重要参数之一。如表 4 所示，与对照相比，牛粪、鸡粪、菇渣处理均有使根际土壤细菌、真菌数量增加的趋势。其中鸡粪处理使细

菌的丰度显著增加( $P < 0.05$ )，增加幅度也最大(比对照增加 19.4%)，这说明鸡粪处理能显著促进根际土壤中细菌的生长繁殖。鸡粪、菇渣处理使土壤真菌数量显著增加( $P < 0.05$ )，菇渣增加幅度最大，为 101.4%，鸡粪增加幅度为 57.5%。进一步分析了根际土中细菌/真菌的比值，结果发现，3 种有机物料对细菌/真菌比例影响不显著。

表 4 细菌和真菌的荧光定量 PCR 结果以及细菌/真菌比值变化

Table 4 Fluorescent quantitative PCR results for bacteria and fungi and changes of bacteria/fungi ratio

处理	细菌		真菌		细菌/真菌
	16S rRNA 基因 ( $10^{12}$ copies/g 干土)	比对照增加 (%)	18S rRNA 基因 ( $10^{10}$ copies/g 干土)	比对照增加 (%)	
CK	$3.12 \pm 0.10$ b	—	$3.89 \pm 1.10$ b	—	$84.0 \pm 26.2$ a
Cow	$3.32 \pm 0.76$ ab	6.42	$5.31 \pm 1.73$ ab	36.6	$66.0 \pm 16.4$ a
Chi	$3.73 \pm 0.25$ a	19.4	$6.12 \pm 1.02$ a	57.5	$62.1 \pm 10.9$ a
Mus	$3.61 \pm 0.84$ ab	15.5	$7.83 \pm 2.34$ a	101.4	$47.9 \pm 11.0$ a

## 2.4 不同有机物料对蚕豆根际土壤酶活性的影响

土壤酶是一类具有一定催化功能的生物活性物质,参与了土壤生态系统的许多重要生态过程,其活性常作为衡量土壤质量变化的敏感指标,表征了土壤的综合肥力特征以及土壤养分转化过程。

### 2.4.1 根际土壤中性转化酶活性

转化酶又称蔗糖

酶,参与土壤中碳水化合物的代谢与循环,是土壤中重要酶类。如图 3A 所示,鸡粪、菇渣处理均显著 ( $P<0.05$ )提高了蚕豆根际土中性转化酶活性,鸡粪处理提高程度最大,较对照提高了 76.2%;其次为菇渣,较对照提高了 49.4%;而牛粪处理对中性转化酶活性的提高作用不显著。

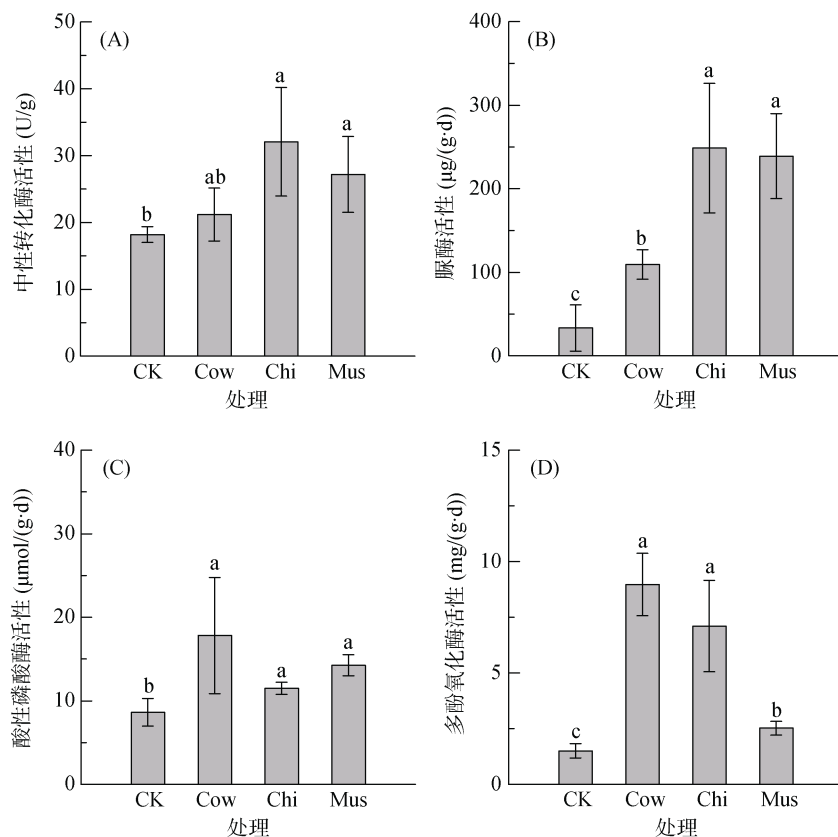


图 3 不同有机物料对根际土壤酶活性的影响

Fig. 3 Enzyme activities in rhizosphere soils under different organic materials

相关性分析表明,土壤中性转化酶活性与根际细菌数量呈显著正相关( $r=0.985$ ,  $P<0.05$ ),与根际真菌数量呈正相关( $r=0.706$ ),但相关性不显著,这说明,有机物料处理下,土壤细菌数量增加可能是土壤中性转化酶活性增加的主要原因。

### 2.4.2 根际土壤脲酶活性

脲酶是将酰胺态有机氮化物水解转化为植物可以直接利用的无机氮化物的酶,是评价土壤质量的重要指标,它能作用于尿素中的 C-N 键,使尿素水解生成  $\text{CO}_2$  和氨。该酶是土壤中最活跃的水解酶类之一,对于提高土壤氮素利用率和土壤氮素代谢有重要意义。如图 3B 所示,牛粪、鸡粪、菇渣处理均显著 ( $P<0.05$ )提高了土壤脲酶活性,其中鸡粪对该酶活性提高幅度最大,较对照提高了 6.45 倍;其次为菇渣,较对照提高了 6.16 倍;牛粪对该酶活性的提高幅度最小,较对照提高

了 2.27 倍。

脲酶活性与土壤细菌数量呈显著正相关( $r=0.990$ ,  $P<0.05$ ),与真菌数量也存在正相关关系,但是相关性不显著( $r=0.885$ ,  $P>0.05$ ),这说明供试有机物料处理下,根际土细菌数量增加可能是根际土壤脲酶活性增加的重要原因。

### 2.4.3 根际土壤酸性磷酸酶活性

土壤磷酸酶是一类催化磷酸单酯水解生成磷酸根离子和自由羟基的酶的统称。通常,土壤中有机磷占总磷的 30%~65%<sup>[22]</sup>。土壤有机磷在磷酸酶酶促水解作用下,可以转化为植物能利用的形态。因此,该酶是催化土壤中有机磷矿化的酶,其活性的高低直接影响着土壤中有机磷的分解及磷的生物有效性,是评价土壤磷素生物转化方向和强度的指标。酸性磷酸酶是目前研究较多的酶。如图 3C 所示,牛粪、鸡粪、菇渣处理均显著

( $P<0.05$ )提高了土壤酸性磷酸酶活性,酶活性分别比对照增加了 100.1%、33.7%、65.3%。

**2.4.4 根际土壤多酚氧化酶活性** 土壤多酚氧化酶是一类以铜、锰为活性中心的氧化还原酶,能把土壤中芳香族化合物氧化成醌,醌与土壤中蛋白质、氨基酸、糖类、矿物等物质反应生成大小分子量不等有机质和色素,完成土壤芳香族化合物循环,是土壤中重要的氧化还原酶类,可以反映土壤的腐殖化程度。如图 3D 所示,供试的 3 种有机物料处理均显著( $P<0.05$ )提高了蚕豆根际土壤多酚氧化酶活性,其中牛粪、鸡粪对该酶活性提高程度较大,使酶活分别比对照增加了 4.76 倍和 3.72 倍;菇渣处理对该酶活性提高程度较小,使酶活比对照增加了 67.4%。

## 2.5 不同有机物料对蚕豆根际土壤化学性状的影响

如图 4 所示,牛粪、鸡粪处理均能显著( $P<0.05$ )提高土壤 pH,鸡粪有机物料还能显著( $P<0.05$ )增加土壤有机碳、全氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量,牛粪和菇渣能显著( $P<0.05$ )增加土壤有效磷含量。相关性分析表明,土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与土壤脲酶活性、中性转化酶活性均呈显著正相关(脲酶:  $r=0.979$ ,中性转化酶:  $r=0.993$ ;  $P<0.05$ );土壤有效磷含量与土壤酸性磷酸酶含量呈显著正相关( $r=0.954$ ;  $P<0.05$ )。这说明,有机物料作用下,土壤中性转化酶、脲酶提高可能是土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  增加的重要驱动力,酸性磷酸酶活性提高是土壤有效磷增加的重要驱动力。

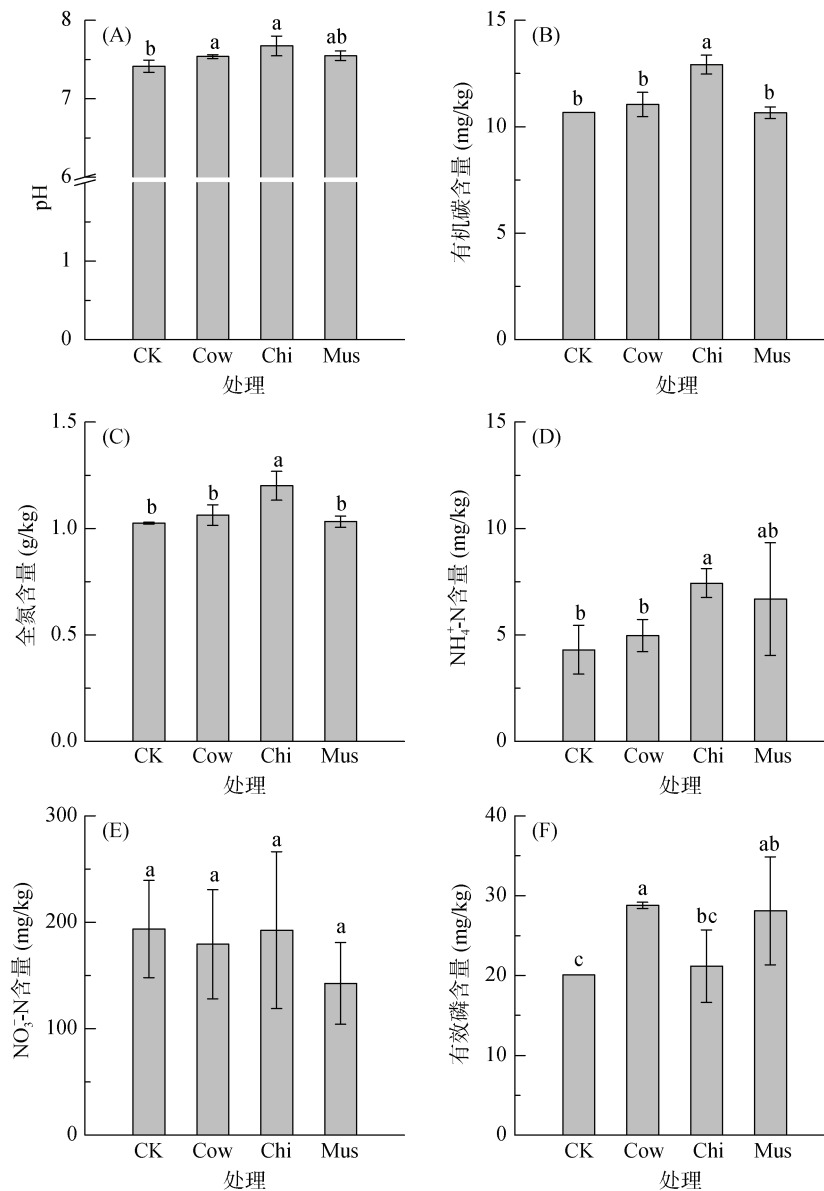


图 4 根际土壤 pH 及养分含量变化

Fig. 4 pH and nutrient contents in rhizosphere soils under different organic materials



## 2.6 根际土壤生物学性状和化学性状与蚕豆生长和品质之间的相关性

有机物料作用下,根际土壤生物学性状和化学性状的改善可能是蚕豆生长指标提高的重要原因。如表5所示,土壤酸性磷酸酶活性和土壤有效磷含量与蚕豆大粒干重和大粒占比呈显著正相关( $P<0.05$ ),这说明,有机物料作用下,有效磷含量的增加可能是大粒蚕豆占比增加的重要驱动因素;土壤多酚氧化酶活性与两粒荚占比呈显著正相关,中性转化酶数量和细菌数量与三粒荚占比呈显著正相关,这说明有机物料作用下,中性转化酶数量和细菌数量的增加使蚕豆更倾向于形成三粒荚。多个土壤性状(细菌数量、中性转化酶活性、pH、有机碳、全氮、 $\text{NH}_4\text{-N}$ )与蚕豆淀粉含量呈显著正相关,这说明,有机物料作用下,蚕豆营养品质的增加可能是由于蚕豆根际土壤生物学性状、化学性状(养分含量增加、pH 提高)得以改善的综合作用的结果。

综合3种有机物料对蚕豆生长指标、营养品质、根际化学性状、生物学性状影响,鸡粪的效果最好,该有机物料不仅可以显著提高蚕豆籽粒的淀粉含量(提高幅度为69.1%),还能使蚕豆倾向于形成二粒荚和三粒荚,并且对大粒干重和占比均有正向影响,而

且该有机物料对根际细菌数量、中性转化酶活性、脲酶活性的提高幅度也最大,对根际酸性磷酸酶、多酚氧化酶活性也有显著的促进作用。

## 3 讨论

本研究发现,无论是动物来源的有机物料(鸡粪和牛粪)还是非动物来源的有机物料(菇渣)对蚕豆分枝数、荚干重、籽粒干重、大粒重、大粒蚕豆占比均有积极的作用,其中牛粪和菇渣还能使大粒蚕豆占比显著增加,鸡粪还能显著增加二粒荚和三粒荚的占比。已有研究表明,有机物料(鸡粪、猪粪、羊粪,或牛粪)对辣椒<sup>[23]</sup>、蚕豆<sup>[24]</sup>、玉米<sup>[25]</sup>等作物生长或产量有提升作用。本研究与前人的研究结果具有一致性。本研究发现,牛粪、鸡粪、菇渣均对蚕豆籽粒的营养品质有积极的作用,使籽粒的淀粉含量比对照增加18.7%~69.1%,使蛋白含量比对照增加1.09%~8.45%。李鸣雷等<sup>[26]</sup>研究发现,以麦草和鸡粪为原料制成的有机无机复混肥使大豆蛋白质和脂肪含量比无机肥和不施肥处理显著增加。梁潘潘<sup>[27]</sup>发现,50%的有机肥氮素替代无机化肥时,可以提高蚕豆中、下部籽粒中可溶性总糖和蛋白含量。因此,本研究与已有研究结果具有一致性。

表5 蚕豆根际土壤生物学性状、化学性状与蚕豆生长指标的相关性  
Table 5 Correlations between biological and chemical properties of rhizosphere soil and growth indexes of broad bean

指标		蚕豆大粒干重	蚕豆大粒占比	一粒荚占比	两粒荚占比	三粒荚占比	蚕豆淀粉含量
根际土壤生物学性状	细菌数量	0.297	0.585	-0.785	0.488	0.952*	0.956*
	真菌数量	0.476	0.814	-0.433	0.234	0.567	0.491
	中性转化酶活性	0.167	0.444	-0.791	0.466	0.974*	0.954*
	脲酶活性	0.327	0.645	-0.714	0.422	0.876	0.837
	酸性磷酸酶活性	0.993*	0.966*	-0.438	0.689	-0.167	0.042
	多酚氧化酶活性	0.713	0.463	-0.803	0.974*	0.165	0.465
根际土壤化学性状	pH	0.392	0.522	-0.961*	0.754	0.872	0.971*
	有机碳含量	-0.024	0.006	-0.825	0.604	0.820	0.956*
	全氮含量	0.027	0.057	-0.853	0.640	0.823	0.958*
	$\text{NH}_4\text{-N}$ 含量	0.184	0.493	-0.741	0.409	0.955*	0.952*
	$\text{NO}_3\text{-N}$ 含量	-0.445	-0.726	-0.072	0.122	-0.042	0.076
	有效磷含量	0.958*	0.985*	-0.176	0.386	-0.249	-0.142

注: \*表示相关性达  $P<0.05$  显著水平。

有机物料可以为微生物生长繁殖提供碳源和能源。本研究中鸡粪、牛粪、菇渣的处理根际土壤的细菌数量显著提高,这与周超<sup>[28]</sup>的研究施用有机肥可以提高果园土壤细菌数量一致。由于土壤酶主要来自微生物细胞,因此,根际土壤细菌数量的变化势必导致土壤酶活性的变化。本研究结果表明,鸡粪、牛粪、

菇渣均能不同程度地提高土壤中性转化酶、脲酶、酸性磷酸酶、多酚氧化酶的活性,其中鸡粪对中性转化酶、脲酶活性的提高幅度最大(增幅分别为76.2%和64.5%)。这些研究结果与已有学者得出的施用有机物料可以不同程度地提高土壤酶活性的结论具有相似性<sup>[28-29]</sup>,Nayak等<sup>[29]</sup>的研究也表明长期使用有机肥配



施无机肥处理能够提高土壤脲酶活性。中性转化酶和脲酶是参与土壤碳循环和氮循环的重要酶类,可以为植物提供简单的碳源和氮源<sup>[30]</sup>。已有研究表明有机物料处理后碳循环相关酶活性的提高主要是由于有机物料增加了土壤有机碳含量<sup>[31]</sup>。本研究发现,有机碳含量与土壤中性转化酶活性呈正相关性( $r=0.764$ ),添加鸡粪处理时土壤有机碳含量最高,中性转化酶活性也最强。另外,有机物料处理下脲酶活性显著增加,可能原因是:①细菌数量显著增加,作为酶的生产者之一,细菌数量的增加可能会提高酶的产生量,增强脲酶活性。本研究中,细菌数量与脲酶活性呈显著正相关的现象支持了这一推断;②有机物料的添加增加了土壤有机质含量,使得土壤酶活性免遭变性或降解,间接增加了脲酶活性<sup>[32]</sup>。本研究中,土壤有机碳含量与土壤脲酶活性呈正相关( $r=0.549$ )的结果也支持了这一推断。Nayak 等<sup>[29]</sup>也发现,土壤有机碳含量与土壤脲酶活性呈高度正相关。

本研究还发现,蚕豆淀粉含量与根系土壤细菌数量、碳氮循环相关酶(中性转化酶、脲酶)活性,养分含量( $\text{NH}_4^+$ 、全氮)、土壤有机碳呈显著正相关。土壤细菌数量与脲酶活性呈正相关,土壤脲酶活性与土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量呈正相关。植物的碳代谢和氮代谢是互为基础的。氮是叶绿素的组成成分,环境中氮素供应水平的高低与叶片中叶绿素的含量呈正相关<sup>[33]</sup>,叶绿素含量的多少直接影响着光合作用产物的形成。因此,我们推断,供试有机物料为微生物生长繁殖提供了碳源和能源,从而使细菌数量明显增加。由于土壤酶主要来自微生物细胞,因此,细菌数量增加使得土壤整体脲酶水平增加和活性增强,脲酶活性的增强使得土壤中  $\text{NH}_4^+$ -N 含量增加,土壤氮素供应的增加促进了叶片中叶绿素含量的增加,促进了光合产物(如淀粉)的积累。

供试牛粪、鸡粪、菇渣均能提高蚕豆根际土壤磷酸酶活性和有效磷含量,且大粒蚕豆个数占比与土壤中的酸性磷酸酶活性和有效磷含量均呈高度正相关(相关系数分别高达 0.966 和 0.985)。多数研究已经表明,磷能加强光合作用和碳水化合物的合成和运转,提高作物产量。胡诚等<sup>[34]</sup>研究表明,土壤磷酸酶活性与小麦产量及土壤有效磷含量呈极显著正相关( $P<0.01$ )。因此,我们推断,供试有机物料通过提高土壤磷酸酶活性而增加了磷的有效性,进而提高了大粒蚕豆的生物量及大粒蚕豆的占比。

综上,有机物料的施用改善了根际土壤的化学和生物学性状,为根系生长提供了良好的土壤环境,利

于蚕豆的生长和品质的提高。具体而言,可能是由于有机物料的施入为微生物生长繁殖提供了更多的碳源和能源,使土壤细菌大量生长繁殖,从而使细菌数量大幅度增加。细菌作为土壤酶的主要产生者之一,细菌数量的增加带来了中性转化酶和脲酶活性增强,更多的有机氮转变为无机氮( $\text{NH}_4^+$ -N),保障了氮的供给,进而通过植株影响到淀粉合成相关代谢过程,从而增加淀粉含量,最终改善蚕豆营养品质。另外,有机物料作用下,大粒蚕豆的形成可能与有机物料添加引起的土壤酸性磷酸酶活性增强以及有效磷含量增加有关。

## 4 结论

良好的土壤微环境(土壤生物学性状、化学性状)是促进蚕豆生长、提升蚕豆营养品质的必要条件。大粒蚕豆的形成可能与有机物料添加引起的土壤酸性磷酸酶活性增强以及有效磷含量增加有关。有机物料作用下,细菌数量增加、碳氮循环相关酶(中性转化酶、脲酶)活性增强、养分( $\text{NH}_4^+$ -N、全氮)含量增加、pH 的提高有助于提高蚕豆籽粒的淀粉含量。综合鸡粪、牛粪、菇渣对蚕豆生长指标、营养品质、根际生物学性状、化学性状的提升效果,鸡粪的效果最好。

致谢:本研究所用的蚕豆种子为江苏省农业科学院经济作物研究所陈新研究员提供,特此致谢。

## 参考文献:

- [1] 黄国勤,王兴祥,钱海燕,等.施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J].生态环境,2004,13(4):656-660.
- [2] 杨小东.长期施肥对三种土壤类型酶活性及硝化微生物丰度的影响[D].北京:中国农业科学院,2020.
- [3] 康国栋,魏家星,邬梦成,等.有机物料施用对旱地红壤作物产量和有机质活性组分的影响[J].土壤,2017,49(6):1084-1091.
- [4] 何伟,王会,韩飞,等.长期施用有机肥显著提升潮土有机碳组分[J].土壤学报,2020,57(2):425-434.
- [5] 张启明,陈仁霄,管成伟,等.不同有机物料对土壤改良和烤烟产质量的影响[J].土壤,2018,50(5):929-933.
- [6] 金慧,吴景贵,李江楠,等.有机肥对作物品质影响的研究进展[J].现代农业科技,2010(11):273-274.
- [7] 赵征宇,孙永红,赵明,等.有机无机肥配施对土壤氮素转化和番茄产量品质的影响[J].华北农学报,2013,28(1):208-212.
- [8] Jensen E S, Peoples M B, Hauggaard-Nielsen H. *Faba bean in cropping systems*[J]. Field Crops Research, 2010, 115(3): 203-216.
- [9] 丁维婷,房静静,武雪萍,等.有机肥替代化肥不同比例对黑土土壤微生物学性质及春麦产量品质的影响[J].中国土壤与肥料,2021(2):44-52.

- [10] 陆欣春, 郑永照, 陈旭, 等. 施生物炭和有机肥对白浆土理化性质和玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2021, 29(6): 137-143.
- [11] 曹寒冰, 谢钧宇, 王楚涵, 等. 不同施肥措施对旱地采煤塌陷区复垦土壤结构及玉米品质的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 251-257.
- [12] 唐莉娜, 陈顺辉. 不同种类有机肥与化肥配施对烤烟生长和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(11): 258-262.
- [13] 陆静. 畜禽粪便组合肥对土壤微生物、酶活性及黄瓜品质的影响[J]. 蔬菜, 2021(4): 19-23.
- [14] 宋雅欣, 马茂亭, 安志装, 等. 有机无机肥料配施对大棚辣椒与番茄产量及品质的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(2): 211-216.
- [15] 袁星星, 崔晓艳, 陈华涛, 等. 蚕豆新品种苏蚕豆2号的选育及高产栽培技术[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(11): 109-110.
- [16] May L A, Smiley B, Schmidt M G. Comparative denaturing gradient gel electrophoresis analysis of fungal communities associated with whole plant corn silage[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2001, 47(9): 829-841.
- [17] 杨正坤, 王秀丽, 龙施华, 等. 考马斯亮蓝染色法测定大豆茎叶中蛋白质含量[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(20): 4610-4612.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [19] 罗慧, 冯程程, 赵境怡, 等. 石油污染土壤多酚氧化酶的动力学及热力学特征[J]. 环境科学研究, 2020, 33(11): 2621-2628.
- [20] May L A, Smiley B, Schmidt M G. Comparative denaturing gradient gel electrophoresis analysis of fungal communities associated with whole plant corn silage[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2001, 47(9): 829-841.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 严玉鹏, 王小明, 刘凡, 等. 有机磷与土壤矿物相互作用及其环境效应研究进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1290-1299.
- [23] 关天霞, 马国泰, 张昊, 等. 不同类型畜禽粪便有机肥对辣椒产量及根际土壤酶活性的影响[J]. 广东农业科学, 2018, 45(11): 53-59.
- [24] 张靖, 王平, 刘淑英, 等. 有机无机肥配施对甘肃省秦王川灌区蚕豆产量、养分吸收量及肥料利用率的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(1): 154-159.
- [25] 李永平, 史向远, 周静, 等. 不同畜禽粪肥对土壤培肥及玉米增产效应的影响[J]. 山西农业科学, 2013, 41(6): 590-593.
- [26] 李鸣雷, 谷洁, 高华, 等. 不同有机肥对大豆植株性状、品质和产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(9): 67-72.
- [27] 梁潘潘. 有机肥替代化肥对设施蚕豆青菜产量、品质影响及相关生理机制[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- [28] 周超. 有机肥部分替代化学肥料对苹果园土壤养分和生物活性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [29] Nayak D R, Babu Y J, Adhya T K. Long-term application of compost influences microbial biomass and enzyme activities in a tropical Aerobic Endoaquept planted to rice under flooded condition[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(8): 1897-1906.
- [30] Antonious G F. Impact of soil management and two botanical insecticides on urease and invertase activity[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 2003, 38(4): 479-488.
- [31] Yu H Y, Ding W X, Luo J F, et al. Long-term effect of compost and inorganic fertilizer on activities of carbon-cycle enzymes in aggregates of an intensively cultivated sandy loam[J]. Soil Use and Management, 2012, 28(3): 347-360.
- [32] 马星竹, 陈利军, 周宝库, 等. 长期施肥对黑土脲酶活性和动力学特性的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2020, (12): 49-53.
- [33] 董文, 范祺祺, 叶亦心, 等. 施氮和施钾水平对冬播马铃薯生长及产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(4): 392-398.
- [34] 胡诚, 刘东海, 乔艳, 等. 施用生物有机肥对土壤酶活性及作物产量的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(S1): 308-312.