



# 氮磷钾用量对基质培茄子产量、根系形态和根际微生物数量与酶活性的影响

郜永博<sup>1</sup>, 王世显<sup>1</sup>, 魏珉<sup>1</sup>, 李静<sup>1</sup>, 高中强<sup>4</sup>, 孟伦<sup>5</sup>, 杨凤娟<sup>1,2,3</sup>✉

<sup>1</sup> 山东农业大学园艺科学与工程学院/作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018; <sup>2</sup> 农业农村部黄淮地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室, 山东泰安 271018; <sup>3</sup> 山东果蔬优质高效生产协同创新中心, 山东泰安 271018; <sup>4</sup> 山东省农业技术推广总站, 济南 250100; <sup>5</sup> 山东狮克现代农业投资有限公司, 山东菏泽 274051

**摘要:**【目的】研究日光温室基质培条件下, 不同氮磷钾用量对茄子产量、根系生长和根际基质中微生物数量及酶活性的影响, 为基质培茄子氮磷钾养分合理施用提供理论依据。【方法】采用基质槽栽和水肥一体化滴灌方式, 以前期试验得到的基质配方沙子: 炉渣: 菇渣=6: 3: 1 (体积比) 为栽培基质, 以不施肥处理为对照 (CK), 以目标产量施肥量 (目标产量施肥量= (目标产量需肥量-基质中速效养分含量)/化肥利用率) 设定 100% 施肥量 (F4), 在此基础上, 分别减少 60% (F1)、40% (F2)、20% (F3) 及增加 20% (F5) 和 40% (F6) 施肥量, 研究氮磷钾用量对茄子产量、根系发育和根际基质微生物数量和酶活性的影响。【结果】茄子单株产量随氮磷钾用量增加呈先增高后降低的趋势, 较 CK 增产幅度为 101.1%—212.9%, F3 处理下单株产量最高, 比 CK 高 212.9% ( $P < 0.05$ )。根际基质中微生物以细菌为主, 其次为放线菌, 真菌较少。定植 90 d 后, 随氮磷钾施用量增加, 茄子根际基质中速效氮、磷、钾含量逐渐增加, 细菌、真菌和放线菌数量, 蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性呈先升高后降低的趋势, F3 处理下均较高, 高氮磷钾处理 (F4、F5 和 F6) 下脲酶活性较高; 根系活力、根系总长度和根系表面积呈先增加后降低的趋势, 在 F2 处理下较高, 分别较 CK 增加 109.2%、49.2% 和 46.5%, 差异显著。细菌数量与基质酶活性呈显著正相关, 脲酶活性与速效氮、磷、钾含量呈极显著正相关, 过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性与速效磷、钾含量呈显著正相关; 细菌数量、过氧化氢酶活性与根系活力和产量呈极显著正相关, 脲酶活性、速效磷、速效钾含量与根系活力和产量呈显著正相关, 根系活力与单株产量呈极显著正相关。【结论】在沙子: 炉渣: 菇渣=6: 3: 1 (体积比) 的栽培基质条件下, 日光温室冬春茬茄子的适宜氮磷钾用量分别为 N 180.6 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 212.1 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 434.9 kg·hm<sup>-2</sup>, 依此量施肥有利于茄子产量、根系活力和基质微生物数量及酶活性的提高, 可为茄子生长提供良好的微生态环境。

**关键词:** 茄子; 基质培; 氮磷钾肥; 产量; 根系形态; 微生物数量; 酶活性

## Effects of Nitrogen, Phosphorus and Potassium Dosage on the Yield, Root Morphology, Rhizosphere Microbial Quantity and Enzyme Activity of Eggplant Under Substrate Cultivation

GAO YongBo<sup>1</sup>, WANG ShiXian<sup>1</sup>, WEI Min<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, GAO ZhongQiang<sup>4</sup>, MENG Lun<sup>5</sup>, YANG FengJuan<sup>1,2,3</sup>✉

收稿日期: 2021-01-17; 接受日期: 2021-04-19

基金项目: “十三五”国家重点研发计划 (2019YFD1001904)、国家自然科学基金 (31672169)、宁夏蔬菜产业技术协同创新中心 (2017DC55)、2020 年度山东省重点扶持区域引进急需紧缺人才项目 (鲁发改动能办[2020]1285 号)、山东农业大学“双一流”科技创新团队设施园艺优势团队专项 (SYL2017YSTD07)

联系方式: 郜永博, E-mail: 1158840500@qq.com. 通信作者杨凤娟, E-mail: beautyyfj@163.com

<sup>1</sup>College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an 271018, Shandong; <sup>2</sup>Huanghuai Region Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tai'an 271018, Shandong; <sup>3</sup>Shandong Province Collaborative Innovation Center of Fruit and Vegetable, Tai'an 271018, Shandong; <sup>4</sup>Shandong Agricultural Technology Extending Station, Ji'nan 250100; <sup>5</sup>Shandong Shike Modern Agricultural Investment Co., Ltd., Heze 274051, Shandong

**Abstract:** 【Objective】 The effects of different levels of NPK on eggplant yield and roots growth as well as rhizosphere microbial numbers and enzyme activities were studied, so as to provide the theoretical basis for the scientific management of NPK (nitrogen, phosphorus and potassium) for the eggplant cultivation by using substrate in solar greenhouse. 【Method】 Substrate trough with sand, slag and mushroom residue (6 : 3 : 1, V : V : V) obtained from the previous experiment and drip irrigation integrated with water and fertilizer were used. There were six treatments with fertilization dosage and 100% fertilization dosage (F4) was considered as required by the target yield (fertilization dosage of the target yield = (fertilizer required by target yield - available nutrient content in substrate) / fertilizer utilization rate), based on the 100% fertilization dosage of F4, the fertilization dosage was reduced by 60% (F1), 40% (F2), 20% (F3) and increased by 20% (F5) and 40% (F6), respectively, and no fertilization treatment was control (CK). The effects of NPK dosage on the yield and roots growth of eggplant as well as rhizosphere microbial numbers and enzyme activity were studied. 【Result】 The eggplant yield was increased firstly and then decreased with the increasing of NPK dosage. Compared with CK, the yield per plant under all treatments increased by 101.1%-212.9%. The eggplant under F3 treatment showed the highest yield per plant and was increased by 212.9% compared with CK. Bacteria were the main microbial in the rhizosphere substrate of eggplants, followed by actinomycetes and fungi. After 90 days of transplanting, with the increasing of NPK dosage, the contents of available NPK in the substrate were increased, the numbers of bacteria, actinomycetes and fungi, the activities of sucrose, catalase and alkaline phosphatase in rhizosphere substrate were increased firstly and then decreased, the values of which were higher under F3 treatment and the urease activity was higher under F4, F5 and F6 than that under other treatments. The root activity, total root length and root surface area of eggplant were increased first and then decreased with the increasing of NPK dosage. Notably, the root activity, total root length and root surface area of eggplant under F2 treatment were increased significantly by 109.2%, 49.2% and 46.5% compared with CK, respectively. There was a significant positive correlation between bacteria number and the enzyme activities in rhizosphere substrate. The urease activity showed extremely significant positive correlation with the contents of available NPK. The activities of catalase and alkaline phosphatase showed significant positive correlation with the contents of available phosphorus and potassium. The number of bacteria, catalase activities showed significant positive correlation with root activity and yield per plant, while urease activity, available phosphorus and potassium content showed significant positive correlation with root activity and yield. The root activity showed extremely significant positive correlation with yield. 【Conclusion】 In summary, the optimal fertilizer dosage for the eggplant cultivation using the mixture of sand, slag and mushroom residue in winter-spring crop in solar greenhouse was N 180.6 kg·hm<sup>-2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 212.1 kg·hm<sup>-2</sup> and K<sub>2</sub>O 434.9 kg·hm<sup>-2</sup>, which was important to increase the yield of eggplants, root activity, rhizosphere microbial numbers and enzyme activity, and could provide a good micro ecological environment for eggplant growth.

**Key words:** eggplant; substrate cultivation; nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer; yield; root morphology; microbial number; enzyme activity

## 0 引言

【研究意义】基质栽培是由传统农业向现代化农业转化的新型栽培方式之一,在设施园艺产业中迅速发展<sup>[1]</sup>。而在设施蔬菜生产中,往往通过大量施肥来获得高产,但过多或不合理施肥,造成肥料利用率降低、土壤理化性状恶化、根际微环境破坏和生态环境污染等一系列问题,从而影响作物产量和品质<sup>[2-3]</sup>。微生物数量和酶活性是影响作物根际微生

态环境的重要因素,对土壤养分的转化有重要意义,是评价土壤肥力的重要指标<sup>[4]</sup>。因此,探讨基质培和水肥一体化条件下,不同氮磷钾用量对茄子产量、根系发育、根际微生物数量和酶活性的影响,对指导基质培茄子的合理施肥具有重要意义。【前人研究进展】适宜养分供应可有效改善作物根际微环境和提高作物产量,而过量施肥则会降低土壤微生物数量和酶活性<sup>[5]</sup>,减少产量和降低品质<sup>[6]</sup>。华国伟<sup>[7]</sup>研究表明辣椒单果重和产量均随施肥水平的增加呈

先增加后降低的趋势; SHARMA 等<sup>[8]</sup>发现在稻麦轮作中增施磷肥可增加土壤酶活性, 提高土壤质量; 雋英华等<sup>[9]</sup>发现随施氮量增加, 春玉米土壤脲酶活性增加, 但当施氮量超过 180 kg·hm<sup>-2</sup>时, 脲酶活性无显著变化。植株根际微环境受到环境因子的显著影响, 与根际养分供应密切相关<sup>[10]</sup>, 在黄瓜<sup>[11]</sup>、番茄<sup>[12]</sup>等作物上已有相关报道。【本研究切入点】茄子(*Solanum melongena* L.) 在我国设施果菜类蔬菜栽培中面积位居第四, 因富含蛋白质、糖类营养物质, 且紫色茄皮中还含有丰富的类黄酮、花青苷物质, 是一种良好的保健蔬菜<sup>[13]</sup>。目前关于茄子养分用量的研究一般均采用土壤栽培方式, 多集中于产量、品质和养分吸收利用等方面<sup>[14-15]</sup>, 对于基质培和水肥一体化条件下, 不同氮磷钾用量对茄子根际基质微环境的研究较少。【拟解决的关键问题】本试验采用前期得出的以低成本农业废弃物为原料的基质配方, 拟通过水肥一体化方式, 研究不同氮磷钾用量对茄子产量、根系发育、根际基质微生物数量和酶活性的影响, 以期为基质培茄子合理施肥方案的制定提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

试验于 2018 年 1—5 月(栽培期 125 d)在山东农业大学南校区园艺实验站日光温室内进行。供试基质配方为前期试验筛选出的沙子: 炉渣: 菇渣=6: 3: 1(体积比)<sup>[16]</sup>, 其容重为 0.99 g·cm<sup>-3</sup>, 速效氮、速效磷和速效钾含量分别为 85.1、45.1 和

221.88 mg·kg<sup>-1</sup>。供试茄子品种为‘布利塔’嫁接苗(砧木为‘托鲁巴姆’)。栽培槽宽 30 cm×高 20 cm×长 600 cm, 采用大小行距定植, 大行距 80 cm, 小行距 50 cm, 株距 50 cm, 每个小区面积为 3.9 m<sup>2</sup>(即一个栽培槽), 每栽培槽定植茄子 13 株, 每处理 3 次重复。槽内覆无纺布, 防止植株根系与土壤接触。

每生产 1 000 kg 茄子需要 N 1.72 kg、P 0.97 kg、K 4.90 kg<sup>[17]</sup>, 设定目标产量为 112 500 kg·hm<sup>-2</sup>(施肥期为 150 d), 参照熊静<sup>[18]</sup>、潘铜华<sup>[19]</sup>和李建勇<sup>[20]</sup>等的研究结果, 基质培氮、磷、钾当季利用率范围分别为 16.42%—53.25%、49.4%—58.26%和 27.69%—64.74%, 因此本试验以氮、磷、钾当季利用率分别为 40%、45%和 60%来计算。目标产量施肥量=(目标产量需肥量-基质中速效养分含量)/化肥利用率, 以此设定为 100% (F4), 分别减少 60% (F1)、40% (F2) 和 20% (F3) 及增加 20% (F5) 和 40% (F6) 用量, 以不施肥处理为对照 (CK)。根据前期研究结果<sup>[17]</sup>, 定植缓苗后整个生育期分为幼苗期 (0—30 d) 和结果期 (31 d 至拉秧), 幼苗期和结果期每 15 d 氮磷钾用量详见表 1, 溶解到同一容器中。定植 5 d 后开始供肥, 每 15 d 配制一次营养液, 微量元素选择通用的微量元素配方。采用滴灌方式供应肥水, 依据设施环境及植株生长情况确定滴灌量和滴灌频率, 滴灌量为每株 0.4—1.2 L·d<sup>-1</sup>, 滴灌频率为每小时 1 次, 每天 8—10 次。提供营养元素的化合物分别为 Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O、KNO<sub>3</sub>、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O。

表 1 试验设计处理  
Table 1 Treatments of experiment design

处理 Treatment	幼苗期每 15 d 施肥量			结果期每 15 d 施肥量			总施肥量		
	Fertilization dosage of 15 days at the seedling stage			Fertilization dosage of 15 days at fruiting stage			Total fertilization dosage		
	N (kg·hm <sup>-2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg·hm <sup>-2</sup> )	K <sub>2</sub> O (kg·hm <sup>-2</sup> )	N (kg·hm <sup>-2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg·hm <sup>-2</sup> )	K <sub>2</sub> O (kg·hm <sup>-2</sup> )	N (kg·hm <sup>-2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg·hm <sup>-2</sup> )	K <sub>2</sub> O (kg·hm <sup>-2</sup> )
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1	6.95	8.16	16.73	12.74	14.96	30.67	90.3	106.1	217.5
F2	10.42	12.24	25.09	19.10	22.44	46.00	135.4	159.1	326.2
F3	13.89	16.31	33.46	25.47	29.91	61.34	180.6	212.1	434.9
F4	17.36	20.39	41.83	31.83	37.39	76.68	225.7	265.1	543.7
F5	20.84	24.47	50.19	38.20	44.87	92.02	270.9	318.2	652.5
F6	24.31	28.55	58.55	44.57	52.35	107.35	316.0	371.2	761.2

## 1.2 测定方法

**1.2.1 基质样品的采集** 分别于茄子定植后 60、90 和 120 d 取样。每处理取样 3—5 株, 先将 2 cm 表层基质除去, 小心挖出完整根系, 抖落根际基质, 混合均匀, 一部分放入无菌自封袋, 迅速于 4℃ 冰箱内保存, 用于基质微生物分析; 一部分自然风干保存, 用于基质酶活性测定。定植后 90 d, 另取一部分放入烘箱 45℃ 烘干后, 磨碎过 1 mm 筛, 用于基质速效氮、磷、钾含量和 pH 测定。

**1.2.2 基质 pH 的测定** 采用基质: 水=1: 5 (W/V) 浸提<sup>[21]</sup>, 滤液 pH 用 HANNA 数据型笔式 pH 测量仪测定。

**1.2.3 基质速效氮、磷、钾含量的测定** 采用扩散吸收法测定速效氮含量; 碳酸氢钠浸提比色法测定速效磷含量; 乙酸铵浸提火焰光度法测定速效钾含量<sup>[22]</sup>。

**1.2.4 基质微生物数量的测定** 采用稀释平板计数法测定<sup>[23]</sup>: 以牛肉膏蛋白胨培养基培养细菌; 改良高氏 1 号培养基培养放线菌; 马丁氏培养基培养真菌。

**1.2.5 基质酶活性的测定** 脲酶活性采用苯酚一次氯酸钠比色法测定, 蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定, 磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定, 过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定<sup>[24]</sup>。

**1.2.6 根系构型参数和根系活力的测定** 定植后 90 d, 根系总长度、根系表面积和根系体积采用 Win RHIZO 根系分析软件分析; 根系活力采用 TTC 法测定<sup>[25]</sup>。

**1.2.7 茄子产量的测定** 采用双干整枝方式, 定植后标记 15 株, 以便统计产量。待果实达到商品成熟时, 统计单株果数, 并称量单果重量, 以单株为单位统计产量。

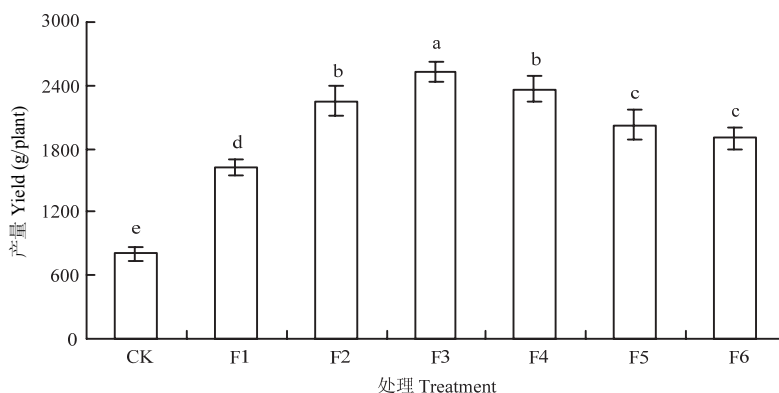
## 1.3 数据处理

采用 Excel 2010 软件处理数据和作图, SPSS 18.0 软件进行方差分析、差异显著性检验 ( $P<0.05$ ) 和 pearson 相关性分析。

## 2 结果

### 2.1 不同氮磷钾用量对茄子产量的影响

随着氮磷钾用量增加, 茄子单株产量呈先升高后降低趋势 (图 1)。各施肥处理下的单株产量均较 CK 增加, 增产幅度为 101.1%—212.9%, 差异显著。F3 处理下单株产量最高, 较 CK 增加 212.9% ( $P<0.05$ ); F4 和 F2 处理次之, 且两者无显著差异; F6 较 F5 略有降低, 两处理间也无显著差异; F1 处理下单株产量较低。



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。下同

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ). The same as below

图 1 不同氮磷钾用量对茄子产量的影响

Fig. 1 Effects of different nitrogen, phosphorus and potassium dosages on the yield of eggplant

### 2.2 不同氮磷钾用量对茄子根系形态指标和根系活力的影响

茄子根系活力和根系构型参数随氮磷钾用量增加呈先增加后降低趋势 (表 2)。F2 处理下的根系活力、

根系总长度和根系表面积均较高, 但根系活力与 F3 和 F4 处理无显著差异, 三者分别比 CK 增加 109.2%、104.1%和 97.8% ( $P<0.05$ ), F1 处理的活力较低, 但仍显著高于 CK。T2 处理的根系总长度与 F3 处理

无显著差异，F6 处理较低，但与 CK 无显著差异。T2 处理下的根系表面积显著高于其他处理；F6 和 CK 处理显著低于其他处理，但两者间无显著差异。根系体积以 F3 和 F4 处理下较高，两者无显著差异，F6 处理下较低，但仍显著高于 CK。

2.3 不同氮磷钾用量对茄子根际基质速效氮、磷、钾含量和 pH 的影响

如表 3 所示，根际基质中速效氮含量随氮磷钾用

量增加呈增加趋势，均显著高于 CK，分别较 CK 增加 20.9%、44.4%、56.5%、63.9%、75.3%和 81.6% ( $P<0.05$ )。F4、F5 和 F6 处理的速效磷含量较高，但 3 个处理间无显著差异，三者分别较 CK 高 86.7%、93.4%和 87.9%( $P<0.05$ )；速效钾含量分别比 CK 高 41.0%、67.5%、89.4%、99.7%、117.6%和 114.1% ( $P<0.05$ )。pH 以 F1 和 F2 处理较高，但与 CK 无显著差异；F6 处理较低，显著低于 CK。

表 2 不同氮磷钾用量对茄子根系形态指标和根系活力的影响

Table 2 Effects of different nitrogen, phosphorus and potassium dosage on the root morphological indexes and root activity of eggplants

处理 Treatment	根系活力 Root activity ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}\cdot\text{h}^{-1}$ )	根系总长度 Root total length (cm)	根系表面积 Root surface area ( $\text{cm}^2$ )	根系体积 Root volume ( $\text{cm}^3$ )
CK	72.30±4.10e	4222.2±191.9d	1614.9±75.0d	73.7±7.0d
F1	92.64±3.24d	5164.2±186.1bc	1880.9±76.9c	87.3±5.4cd
F2	151.28±10.25a	6300.5±269.9a	2366.4±91.6a	105.3±2.8ab
F3	147.53±2.39a	5660.4±309.2ab	2096.5±51.9b	110.4±3.1a
F4	143.04±8.06ab	5469.1±66.1 b	1938.3±135.6bc	112.7±2.0a
F5	131.56±5.56bc	5567.6±203.5b	1883.7±55.9c	98.5±3.8abc
F6	125.54±6.17c	4589.0±262.0cd	1654.4±53.4d	92.3±6.4bc

不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。下同

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ). The same as below

表 3 不同氮磷钾用量对茄子根际基质速效氮、磷、钾含量和 pH 的影响

Table 3 Effects of different nitrogen, phosphorus and potassium dosage on the contents of available nutrients and pH in rhizosphere substrate of eggplant

处理 Treatment	速效氮含量 Available nitrogen content ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效磷含量 Available phosphorus content ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效钾含量 Available potassium content ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	pH
CK	37.54±1.20f	38.54±2.54d	93.88±1.41e	7.57±0.014a
F1	45.40±3.66e	49.52±1.37c	132.33±2.84d	7.57±0.009a
F2	54.20±1.38d	63.49±3.45b	157.22±7.73c	7.54±0.024ab
F3	58.74±1.21cd	65.46±1.37b	177.79±8.98b	7.51±0.014bc
F4	61.53±2.53bc	71.95±1.79a	187.46±7.06b	7.48±0.031c
F5	65.79±2.70ab	74.54±1.30a	204.28±3.37a	7.46±0.034c
F6	68.19±1.60a	72.42±1.44a	201.02±6.34a	7.37±0.037d

2.4 不同氮磷钾用量对茄子根际基质微生物数量的影响

随生育期延长，基质中细菌、真菌和放线菌数量呈先升高后降低的趋势，峰值出现在定植后 90 d (图 2)。所有处理下的细菌数量均显著高于 CK；定植后 60 d，F3 和 F6 处理的细菌数量较高，分别比 CK 高 47.6%和 43.4% ( $P<0.05$ )；定植后 90 和 120 d，随

施肥量增加，细菌数量呈先升高后降低的趋势，F3 和 F4 处理的细菌数量较高，两者间无显著差异。

定植后 60 d，各处理间真菌数量无显著差异，但均高于 CK；定植后 90 d，F6 处理较 CK 显著降低，其他处理间无显著差异，但均高于 CK；定植后 120 d，真菌数量随施肥量增加呈先升高后降低的趋势，F5 和 F6 处理显著低于 CK。



定植后 60 d, 各处理下放线菌数量均显著高于 CK, F3、F4 和 F5 处理显著高于其他处理; 定植后 90 和 120 d, F1、F2 和 F3 处理较高, 均显著高于 CK。

F6 处理较低, 但定植后 90 d, F6 与 CK 无显著差异, 定植后 120 d, F6 处理比 CK 显著减少 16.9% ( $P<0.05$ )。

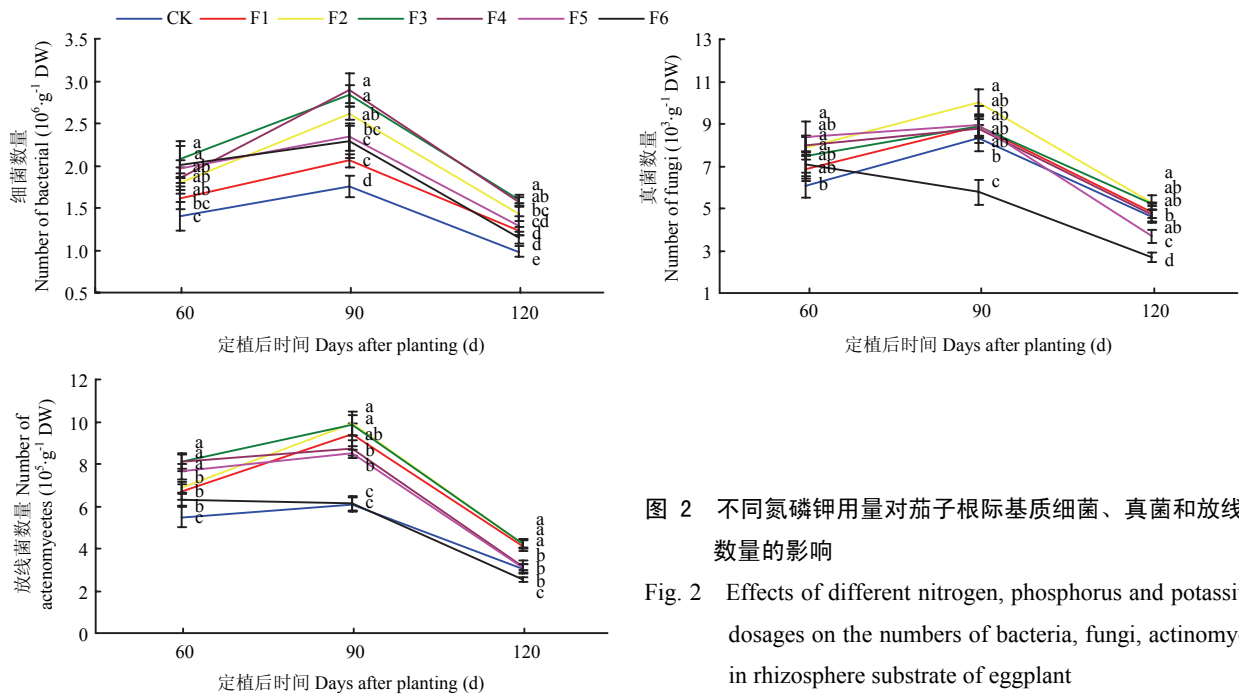


图 2 不同氮磷钾用量对茄子根际基质细菌、真菌和放线菌数量的影响

Fig. 2 Effects of different nitrogen, phosphorus and potassium dosages on the numbers of bacteria, fungi, actinomycetes in rhizosphere substrate of eggplant

表 4 对根际基质微生物多样性进行了分析, 结果表明, 定植后 90 d, F1 处理的微生物香农指数较定植后 60 d 升高, 其他处理随生育期延长呈降低趋势。定植后 60 d, F4 处理下微生物香农指数较高, F6 处理下较低; 定植后 90 d, 香农指数表现为  $F1>F2>F5>CK>F3>F4>F6$ ; 定植后 120 d, 香农指数表现为  $F1>CK>F2>F3>F5>F6>F4$ 。

表 4 不同氮磷钾用量对茄子根际基质微生物香农指数的影响

Table 4 Effects of different nitrogen, phosphorus and potassium dosages on microbial Shannon index in rhizosphere substrate of eggplant

处理 Treatment	香农指数 Shannon index (H)		
	60 d	90 d	120 d
CK	0.613±0.028ab	0.593±0.017b	0.568±0.025ab
F1	0.623±0.022a	0.640±0.004a	0.581±0.021a
F2	0.610±0.011ab	0.605±0.005b	0.556±0.017abc
F3	0.610±0.032ab	0.585±0.008bc	0.529±0.018bcd
F4	0.634±0.006a	0.557±0.019cd	0.467±0.020e
F5	0.611±0.017ab	0.597±0.012b	0.509±0.028cde
F6	0.566±0.029b	0.529±0.019d	0.487±0.014de

2.5 不同氮磷钾用量对茄子根际基质酶活性的影响

由图 3 可知, 脲酶活性在定植后 60—90 d 变化较为平缓, 但定植后 120 d 其活性明显下降, 与 CK 相比, F1—F6 脲酶活性均有所升高。定植后 60 d, F6 处理酶活性最高, 显著高于 CK 和其他处理; 定植后 90 d, F4、F5 和 F6 处理较高, 但三者间无显著差异; 定植后 120 d, F2、F3 和 F4 处理较高。

而蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性均随生育期延长呈先增加后降低的趋势, 基本在定植后 90 d 达到最大值。定植后 60 d, F3 处理的蔗糖酶活性最高, F5 和 F6 处理较低, 但仍显著高于 CK; 定植后 90 d, F2、F3 和 F4 处理的活性较高, 分别比 CK 增加 58.0%、47.0%和 48.8%, 差异显著, F6 处理则显著低于 CK; 定植后 120 d, F2 和 F3 处理的活性较高, 显著高于 CK, 而 F5 和 F6 处理的活性分别比 CK 显著降低 18.7%和 24.8% ( $P<0.05$ )。

定植后 60 d, 所有处理下的过氧化氢酶活性差异较小, F5 处理的活性略低, 但均显著高于 CK; 定植后 90 d, 所有处理显著高于 CK, F3 处理的活性较高, F4 与 F5 处理无显著差异, F1 和 F6 处理活性较低, 二者也无显著差异; 随生育期延长, 氮磷钾用量过多

会抑制过氧化氢酶活性, 定植后 120 d, F5 和 F6 处理的活性显著低于 CK。

定植后 60 d 和 90 d, 所有处理下的碱性磷酸酶活性均显著高于 CK; 定植后 60 d, F3 和 F4 处理的活性

较高, 分别比 CK 高 66.8%和 73.9%; 定植后 90 d, F3 处理的活性较高, 但与 F4 和 F5 处理无显著差异; 定植后 120 d, F1、F2 和 F3 处理的活性显著高于 CK, F4 和 F6 处理显著低于 CK。

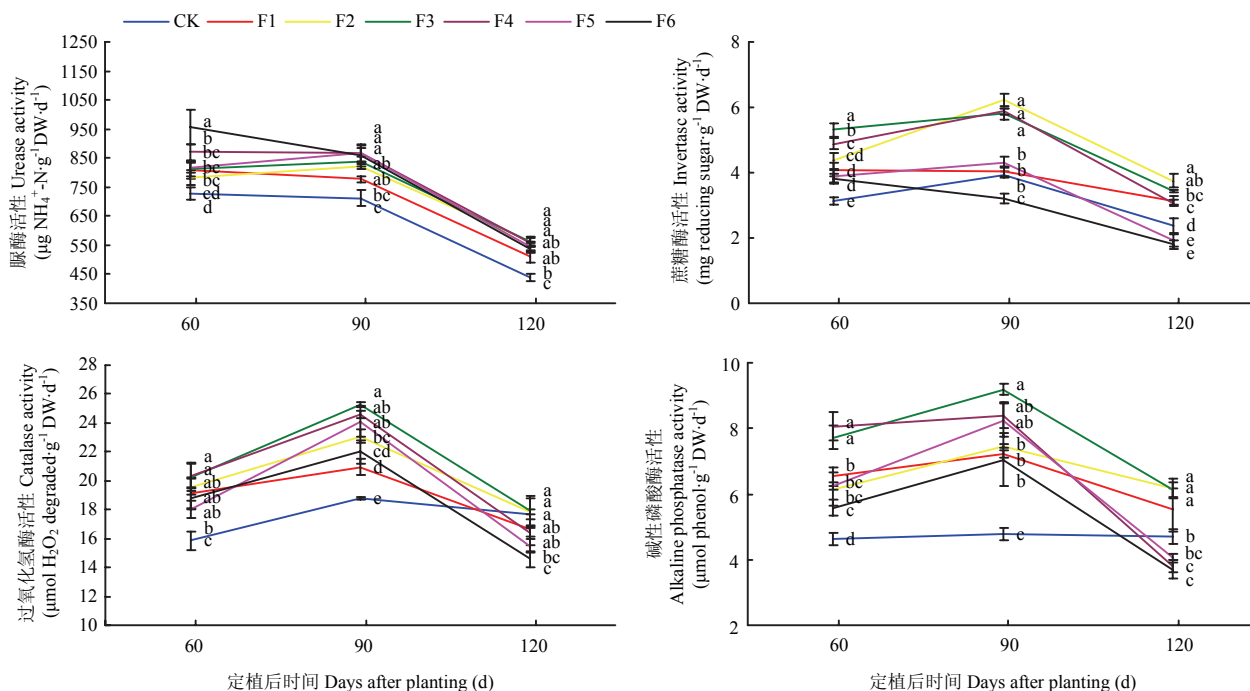


图3 不同氮磷钾用量对茄子根际基质脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性的影响

Fig. 3 Effects of different nitrogen, phosphorus and potassium dosages on the activities of urease, invertase, catalase and alkaline phosphatase in rhizosphere substrate of eggplant

## 2.6 茄子根际基质微生物数量、酶活性、速效氮、速效磷、速效钾含量、pH、根系活力和产量的相关性

表5所示, 根际基质中细菌数量与脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性呈显著正相关, 与过氧化氢酶活性相关系数为 0.928, 达极显著水平; 真菌与放线菌数量显著正相关; 放线菌数量与蔗糖酶活性相关系数为 0.766, 达显著水平, 与其他酶活性和速效氮、磷、钾含量相关性差异不显著。基质中脲酶活性与过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性呈显著正相关, 与速效氮、速效磷、速效钾含量均呈极显著正相关; 过氧化氢酶与碱性磷酸酶活性呈极显著正相关, 与速效磷和钾含量呈显著正相关。基质中细菌、过氧化氢酶活性均与根系活力呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.927 和 0.913; 细菌、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性均与单株产量呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.952、0.954

和 0.942; 脲酶活性、速效磷、速效钾含量均与根系活力和产量呈显著正相关; 根系活力与单株产量呈极显著正相关, 相关系数达 0.956; 各处理根际基质中 pH 相差较小, pH 与根际微生物数量、酶活性相关性均未达到显著水平。

## 3 讨论

施肥可显著提高作物产量<sup>[26]</sup>。本研究结果表明, 与 CK 相比, 各施肥处理均显著提高了茄子产量, 增产幅度为 101.1%—212.9%。在一定范围内, 茄子产量随氮磷钾用量增加而升高, 但超过一定范围后则产生相反结果, 李建勇等<sup>[20]</sup>在番茄上的结果与本研究一致。本试验条件下, 冬春茬茄子 (生育期 125 d) 最有利于产量形成的肥料使用量为 N 180.6  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  212.1  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  434.9  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。而张燕燕等<sup>[14]</sup>开展“3414”肥料效应试验得到, 秋植茄子达到经济最佳

表 5 茄子结果盛期根际微生物数量、酶活性、速效氮、速效磷、速效钾含量、pH、根系活力及单株产量的相关性关系  
Table 5 Correlation between microbial quantity, enzyme activity, available N/P/K content, pH, root activity and yield per plant of eggplant rhizosphere substrate

相关系数 Correlation coefficient	细菌 Bacteria	真菌 Fungi	放线菌 Actinomycetes	脲酶 Urease	蔗糖酶 Sucrase	过氧化氢酶 Catalase	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	速效氮 Available nitrogen	速效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium	pH	根系活力 Root activity	单株产量 Yield/plant
细菌 Bacteria	1												
真菌 Fungi	0.278	1											
放线菌 Actinomycetes	0.627	0.783*	1										
脲酶 Urease	0.761*	-0.122	0.300	1									
蔗糖酶 Sucrase	0.786*	0.739	0.766*	0.279	1								
过氧化氢酶 Catalase	0.928**	0.261	0.624	0.859*	0.636	1							
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	0.866*	0.257	0.710	0.816*	0.552	0.961**	1						
速效氮 Available nitrogen	0.619	-0.341	0.075	0.964**	0.071	0.744	0.688	1					
速效磷 Available phosphorus	0.723	-0.162	0.226	0.993**	0.242	0.829*	0.763*	0.980**	1				
速效钾 Available potassium	0.656	-0.256	0.170	0.982**	0.121	0.797*	0.758*	0.992**	0.987**	1			
pH	-0.274	0.733	0.387	-0.738	0.319	-0.369	-0.304	-0.879**	-0.780*	-0.824*	1		
根系活力 Root activity	0.927**	0.219	0.570	0.848*	0.685	0.913**	0.830*	0.753	0.840*	0.772*	-0.420	1	
单株产量 Yield/plant	0.952**	0.230	0.681	0.849*	0.664	0.954**	0.942**	0.726	0.811*	0.769*	-0.356	0.956**	1

\*表示在  $P<0.05$  水平显著相关, \*\*表示在  $P<0.01$  水平极显著相关  
\* represents at  $P<0.05$  level significantly correlated, \*\* represents at  $P<0.01$  level significantly correlated



产量时的 N、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$  施用量分别为 164.9、107.1 和 186.3  $kg \cdot hm^{-2}$ ; 卢家柱等<sup>[27]</sup>采用牛粪: 草炭: 蛭石 = 1: 1: 2 (体积比) 进行茄子基质培试验, 发现  $P_2O_5$  179  $kg \cdot hm^{-2}$ 、 $K_2O$  489  $kg \cdot hm^{-2}$  前提下, N 231  $kg \cdot hm^{-2}$  最有利于茄子产量形成。以上不同研究条件下得出的氮磷钾需求量不同, 分析其原因可能为: 一是不同茄子品种, 对养分需求特性和耐肥能力不同; 二是茄子为无限生长型作物, 生育期愈长则需肥愈多; 三是栽培介质的营养状况不尽相同, 其养分供应能力也不同。另外, 熊静等<sup>[18]</sup>研究发现, 封闭式基质栽培较开放式而言, 番茄氮磷钾养分利用率均有所提高, 从节水、节肥和保护环境角度出发, 基质栽培应着力发展封闭式供液方式。

基质微生物是基质的重要组成部分, 也是最活跃的部分。细菌是基质微生物种群中最大的一类, 其次为放线菌, 真菌较少<sup>[28]</sup>。基质微生物易受环境因子的影响, 氮磷钾供应与其数量和活性密切相关。LOW 等<sup>[29]</sup>研究发现高浓度营养液下, 硝化细菌和氨化细菌数量显著下降; 强浩然等<sup>[30]</sup>研究表明, 中高水平供应条件下, 辣椒栽培基质中脲酶活性随氮肥供应增加呈先增加后降低的趋势。本研究结果表明, 在一定范围内, 基质中细菌和放线菌数量均随氮磷钾用量增加而升高, 超过一定范围后呈相反趋势。其原因可能是: 一方面, 适量的氮、磷、钾为微生物提供了充足营养源, 可显著改善根际微生物环境, 提高微生物数量。郭萍等<sup>[31]</sup>研究也表明, 施肥较不施肥处理使成熟期小麦土壤中细菌数量明显提高。另一方面, 植物光合作用固定的碳可通过根系分泌物形式释放到土壤中, 为土壤微生物提供丰富的营养源<sup>[32]</sup>; 根系分泌物量与微生物数量密切相关<sup>[33]</sup>。超过一定的氮磷钾用量后, 其微生物数量降低可能是因为随氮磷钾施用量增加和生育期延长, 基质中盐浓度不断升高, 降低了茄子根系活力, 影响了其根系生长, 因此根系分泌物随之降低, 进而使根际微生物数量下降。但不同氮磷钾用量下根际基质微生物香农指数与基质微生物总数量的变化趋势不一致, 定植后 60、90 和 120 d, F3 处理下微生物总数量较高, 但微生物香农指数分别在 F4、F1 和 F1 处理下较高。也有研究发现, 几种苹果砧木中以东北山荆子根际微生物数量最多, 但其微生物多样性指数并不是相应地最高<sup>[26]</sup>。这可能是由于在本试验的栽培基质条件下, 不同氮磷钾用量适于某一类或几类微生物的生长, 结果使基质中微生物总数量升高, 但其微生物多样性指数没有增加。

研究表明, 土壤酶活性反映了土壤中各种生物化学过程的强度和方向, 与养分供应和植物生长关系密切<sup>[34]</sup>。其酶活性与微生物数量存在一定关系, 尤其与细菌密切相关<sup>[35]</sup>。本试验结果表明, 基质中细菌数量与脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性均显著正相关。陈汝等<sup>[28]</sup>研究也发现不同苹果砧木的根际细菌与脲酶、蔗糖酶活性呈显著正相关。研究还发现, 高钾处理 (300  $kg K_2O \cdot hm^{-2}$ ) 下, 棉花吐絮期土壤脲酶、磷酸酶和转化酶活性受到抑制<sup>[36]</sup>; 随施氮量增加, 间作条件下, 现蕾期马铃薯的土壤脲酶活性呈上升趋势, 而在成熟期均呈先增加后下降的趋势<sup>[37]</sup>。本研究结果表明, 不同氮磷钾处理对基质酶活性影响不同, 蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性随氮磷钾用量增加呈先升高后下降趋势, 而高氮磷钾处理下脲酶活性较高。因脲酶活性能够反映土壤中氮素的转化和能量交换过程, 与土壤硝态氮含量显著正相关<sup>[38]</sup>。另外, 施入过量氮磷钾会使土壤中无机氮磷钾富集, 抑制氧化酶基因表达, 降低过氧化氢酶活性<sup>[39]</sup>。因此, 基质培条件下, 高氮磷钾下基质的脲酶活性较高, 过氧化氢酶活性降低。且有研究表明土壤酶主要来源于植物的根系分泌物、土壤微生物活动和动植物残体腐解过程<sup>[40]</sup>, 因此基质培条件下, 基质酶活性高低应与根系活力、微生物变化趋势密切相关。

本研究中, 脲酶活性与速效氮、速效磷、速效钾含量呈极显著正相关, 蔗糖酶活性与速效氮、磷、钾含量相关性不显著, 过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性与速效磷、速效钾含量呈显著正相关。而周东兴等<sup>[41]</sup>研究发现玉米/大豆轮作下, 玉米土壤中脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性与土壤有机质、硝态氮、铵态氮、速效磷和速效钾呈显著正相关, 与本研究结果不一致, 这可能与施肥方式和肥料用量不同有关。本试验中基质细菌数量与 pH 呈负相关, 李春越等<sup>[42]</sup>发现土壤全效养分和微生物磷随 pH 增加有减少趋势, 营养源的减少抑制了细菌的扩增。pH 对基质微生物数量的相关性分析达到显著水平, 该基质化学性质较稳定, pH 变化幅度较小, 且均在微生物生长的正常范围内, 对其没有产生显著抑制或显著促进。

## 4 结论

不同氮磷钾用量对茄子产量、根系形态、根际基质微生物数量和酶活性差异显著。F3 处理下单株产量最高, 较 CK 增加 212.9%。随着氮磷钾用量的增加,

茄子根系活力、根系总长度和根系表面积呈先增加后降低的趋势,以 F2 处理较好。定植后 90 d,根际基质微生态系统较好。微生物数量和蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性随氮磷钾用量增加呈先升高后降低趋势, F3 处理下均较高;而高氮磷钾处理(F4、F5 和 F6)下脲酶活性较高。综上,以沙子:炉渣:菇渣=6:3:1(体积比)为栽培基质条件下,日光温室冬春茬(栽培期 125 d)茄子适宜氮磷钾用量为 N 180.6 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 212.1 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 434.9 kg·hm<sup>-2</sup>;此施肥条件有利于茄子产量、根系活力和基质微生物数量及酶活性的提高,可为茄子生长提供良好的微生态环境。

## 参考文献 References

- [1] 郭世荣. 无土栽培学. 北京: 中国农业出版社, 2003.  
GUO S R. Soilless Culture. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2003. (in Chinese)
- [2] ZHU S S, VIVANCO J M, MANTER D K. Nitrogen fertilizer rate affects root exudation, the rhizosphere microbiome and nitrogen-use efficiency of maize. *Applied Soil Ecology*, 2016, 107: 324-333.
- [3] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 259-273.  
ZHU Z L, JIN J Y. Fertilizer use and food security in China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 259-273. (in Chinese)
- [4] 王渭玲, 杜俊波, 徐福利, 张晓虎. 不同施肥水平对桔梗土壤微生物和土壤酶活性的影响. *中国中药杂志*, 2013, 38(22): 3851-3856.  
WANG W L, DU J B, XU F L, ZHANG X H. Effect of fertilization levels on soil microorganism amount and soil enzyme activities. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2013, 38(22): 3851-3856. (in Chinese)
- [5] 武盼盼, 刘书武, 朱毅, 李大肥, 卢鑫, 许龙, 赵正雄. 不同施肥措施对酸性植烟土壤酶活性及微生物的影响. *中国农学通报*, 2017, 33(30): 103-110.  
WU P P, LIU S W, ZHU Y, LI D F, LU X, XU L, ZHAO Z X. Effects of different fertilization on soil enzyme activities and microbial community in acid tobacco-planting soil. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(30): 103-110. (in Chinese)
- [6] 张守才, 赵征宇, 孙永红, 蔡葵, 王文娇, 赵明. 设施栽培番茄的氮磷钾肥料效应研究. *中国土壤与肥料*, 2016(2): 65-71.  
ZHANG S C, ZHAO Z Y, SUN Y H, CAI K, WANG W J, ZHAO M. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on tomato cultivation in greenhouse. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2016(2): 65-71. (in Chinese)
- [7] 华国伟. 不同地膜覆盖与施肥水平对辣椒生长及产量的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2020.  
HUA G W. Effects of different plastic film mulching and fertilization levels on pepper growth and yield [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2020. (in Chinese)
- [8] SHARMA S, THIND H S, SINGH Y, SINGH V, SINGH B. Soil enzyme activities with biomass ashes and phosphorus fertilization to rice-wheat cropping system in the Indo-Gangetic Plains of India. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 101(3): 391-400.
- [9] 隗英华, 孙文涛, 韩晓日, 邢月华, 王立春, 谢佳贵. 春玉米土壤矿质氮累积及酶活性对施氮的响应. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1368-1377.  
JUAN Y H, SUN W T, HAN X R, XING Y H, WANG L C, XIE J G. Response of soil mineral nitrogen accumulation and enzyme activities to nitrogen application in spring maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(6): 1368-1377. (in Chinese)
- [10] 王理德, 王方琳, 郭春秀, 韩福贵, 魏林源, 李发明. 土壤酶学研究进展. *土壤*, 2016, 48(1): 12-21.  
WANG L D, WANG F L, GUO C X, HAN F G, WEI L Y, LI F M. Review: Progress of soil enzymology. *Soils*, 2016, 48(1): 12-21. (in Chinese)
- [11] 关颂娜, 吴凤芝, 姜爽. 不同氮素水平对不同氮效率黄瓜生长及其根际土壤酶活性的影响. *作物杂志*, 2013(1): 68-72.  
GUAN S N, WU F Z, JIANG S. Effects of nitrogen fertilizer rate on the growth and enzyme activities in the rhizosphere of cucumber cultivars with different nitrogen use efficiency. *Crops*, 2013(1): 68-72. (in Chinese)
- [12] 张恩平, 谭福雷, 王月, 张淑红, 段瑜, 周芳. 氮磷钾与有机肥配施对番茄产量品质及土壤酶活性的影响. *园艺学报*, 2015, 42(10): 2059-2067.  
ZHANG E P, TAN F L, WANG Y, ZHANG S H, DUAN Y, ZHOU F. Effects of NPK fertilizers and organic manure on nutritional quality, yield of tomato and soil enzyme activities. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, 42(10): 2059-2067. (in Chinese)
- [13] SADILOVA E, STINTZING F C, CARLE R. Anthocyanins, colour and antioxidant properties of eggplant (*Solanum melongena* L.) and violet pepper (*Capsicum annuum* L.) peel extracts. *Zeitschrift fur Naturforschung*, 2006, 61(7/8): 527-535.
- [14] 张燕燕, 唐懋华, 缪其松, 刘叶琼. 不同施肥处理对秋植茄子生长及产量的影响. *中国土壤与肥料*, 2015(1): 33-37.  
ZHANG Y Y, TANG M H, MIAO Q S, LIU Y Q. Effect of fertilization treatment on growth and yield of autumn planting eggplant. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2015(1): 33-37. (in Chinese)

- Chinese)
- [15] 黄巧义, 卢钰升, 唐拴虎, 黄旭, 付弘婷, 蒋瑞萍, 李苹, 陈建生. 茄子氮磷钾养分效应研究. 中国农学通报, 2011, 27(28): 279-285.
- HUANG Q Y, LU Y S, TANG S H, HUANG X, FU H T, JIANG R P, LI P, CHEN J S. The nutrient effect of nitrogen, phosphorus and potassium on eggplant. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(28): 279-285. (in Chinese)
- [16] 郇永博, 马晟, 杨凤娟, 王秀峰, 魏珉, 史庆华, 李岩. 沙子、炉渣、菇渣不同配比对茄子产量和品质的影响. 中国蔬菜, 2018(10): 50-54.
- GAO Y B, MA S, YANG F J, WANG X F, WEI M, SHI Q H, LI Y. Effect of different ratios of sand, slag and mushroom residue on yield and quality of eggplants. China Vegetables, 2018(10): 50-54. (in Chinese)
- [17] 陈震. 茄子优化施肥方案及对氮磷钾吸收分配规律的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- CHEN Z. Study on the optimum fertilization scheme and absorption and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium of eggplant [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [18] 熊静, 陈清, 王敬国, 刘伟. 供液方式对番茄基质栽培盐分累积与养分利用率的影响. 农业机械学报, 2017, 48(2): 224-231.
- XIONG J, CHEN Q, WANG J G, LIU W. Effect of culture systems on salt accumulation in substrate and nutrient use efficiency of tomato. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 224-231. (in Chinese)
- [19] 潘铜华. 温室番茄长季节基质袋培水肥耦合效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- PAN T H. Study on the effect of water and fertilizer coupling on tomato long-season cultivated in bag with substrate in greenhouse [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015. (in Chinese)
- [20] 李建勇, 高俊杰, 徐守国, 史修柱, 于贤昌. 化肥施用量对有机基质栽培番茄养分吸收利用的影响. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 602-606.
- LI J Y, GAO J J, XU S G, SHI X Z, YU X C. Effect of chemical fertilizer dose on nutrient absorption and utilization of tomato cultured in organic substrate. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 602-606. (in Chinese)
- [21] 程斐, 孙朝晖, 赵玉国, 李式军. 芦苇末有机栽培基质的基本理化性能分析. 南京农业大学学报, 2001, 24(3): 19-22.
- CHENG F, SUN Z H, ZHAO Y G, LI S J. Analysis of physical and chemical properties of reed residue substrate. Journal of Nanjing Agricultural University, 2001, 24(3): 19-22. (in Chinese)
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis. 3rd ed. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [23] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术. 北京: 科学出版社, 2006.
- YAO H Y, HUANG C Y. Soil Microbial Ecology and Its Experimental Techniques. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [24] 关松荫. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986.
- GUAN S Y. Soil Enzymes and the Research Methods. Beijing: Agriculture Press, 1986. (in Chinese)
- [25] 赵世杰. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.
- ZHAO S J. Techniques of Plant Physiological Experiment. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002. (in Chinese)
- [26] 李国龙. 甘肃戈壁滩日光温室基质栽培番茄和黄瓜氮磷钾均衡管理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- LI G L. Study on balanced fertilization of nitrogen, phosphorus, potassium in cucumber and tomato cultivated in greenhouse organic substrates in gobi desert regions of Gansu province [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)
- [27] 卢家柱, 赵贵宾, 颀建明, 何志学, 赵常旭, 杨煜. 不同施氮量对茄子产量、品质及肥料利用率的影响. 华北农学报, 2016, 31(3): 205-211.
- LU J Z, ZHAO G B, JIA J M, HE Z X, ZHAO C X, YANG Y. Effects of different nitrogen fertilizer application rates on yield, quality and fertilizer utilization rate of eggplant. Journal of North China Agriculture, 2016, 31(3): 205-211. (in Chinese)
- [28] 陈汝, 王海宁, 姜远茂, 魏绍冲, 陈倩, 葛顺峰. 不同苹果砧木的根际土壤微生物数量及酶活性. 中国农业科学, 2012, 45(10): 2099-2106.
- CHEN R, WANG H N, JIANG Y M, WEI S C, CHEN Q, GE S F. Rhizosphere soil microbial quantity and enzyme activity of different apple rootstocks. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(10): 2099-2106. (in Chinese)
- [29] LOW A P, STARK J M, DUDLEY L M. Effects of soil osmotic potential on nitrification, ammonification, N-assimilation, and nitrous oxide production. Soil Science, 1997, 162(1): 16-27.
- [30] 强浩然, 张国斌, 郁继华, 马国礼, 张柏杨, 季磊, 王翠丽, 叶洁, 杜森鑫. 不同水分和氮素供应对日光温室辣椒栽培基质氮转化细菌和酶活性的影响. 园艺学报, 2018, 45(5): 943-958.
- QIANG H R, ZHANG G B, YU J H, MA G L, ZHANG B Y, JI L, WANG C L, YE J E, DU M X. Effects of different water and nitrogen supply on nitrogen transformational bacteria and enzyme activities in substrate cultivated greenhouse pepper. Acta Horticulturae Sinica,

- 2018, 45(5): 943-958. (in Chinese)
- [31] 郭萍, 文庭池, 董玲玲, 魏成熙, 石俊雄, 李波. 施肥对土壤养分含量、微生物数量和酶活性的影响. 农业现代化研究, 2011, 32(3): 362-366.
- GUO P, WEN T C, DONG L L, WEI C X, SHI J X, LI B. Effect of fertilizer to content of soil nutrient, amount of soil microorganism and soil enzyme activities. Research of Agricultural Modernization, 2011, 32(3): 362-366. (in Chinese)
- [32] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望. 植物生态学报, 2014, 38(3): 298-310.
- WU L K, LIN X M, LIN W X. Advances and perspective in research on plant-soil-microbe interactions mediated by root exudates. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(3): 298-310. (in Chinese)
- [33] 袁秀梅, 耿赛男, 郑梦圆, 习向银, 宋大利, 黄伏森. 蚕豆根分泌物对紫色土有效养分及微生物数量的影响. 中国生态农业学报, 2016, 24(7): 910-917.
- YUAN X M, GENG S N, ZHENG M Y, XI X Y, SONG D L, HUANG F S. Effects of faba bean (*Vicia faba* L.) root exudate on soil available nutrients and microbial population in different purple soils. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(7): 910-917. (in Chinese)
- [34] 邱莉萍, 刘军, 王益权, 张兴昌. 长期施肥土壤中酶活性的剖面分布及其动力学特征研究. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 737-741, 749.
- QIU L P, LIU J, WANG Y Q, ZHANG X C. Profile distribution of enzyme activity of long-term fertilization soil and its dynamic characteristics. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(6): 737-741, 749. (in Chinese)
- [35] WANG J, LI G, XIU W M, SONG X L, ZHAO J N, YANG D L. Effects of nitrogen and water on soil enzyme activity and soil microbial biomass in stipa baicalensis steppe, Inner Mongolia of North China. Journal of Agricultural Resources & Environment, 2014, 31(3): 237-245.
- [36] 刘丽平, 孟亚利, 杨佳萌, 胡伟, 周治国. 不同施钾处理对棉田土壤钾素形态与土壤肥力的影响. 水土保持学报, 2014, 28(2): 138-142.
- LIU L P, MENG Y L, YANG J S, HU W, ZHOU Z G. Effects of different K fertilizer treatments on soil K forms and soil fertility in cotton. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(2): 138-142. (in Chinese)
- [37] 覃潇敏, 郑毅, 汤利, 龙光强. 施氮对玉米//马铃薯间作根际土壤酶活性和硝化势的影响. 云南农业大学学报(自然科学版), 2015(6): 886-894.
- QIN X M, ZHENG Y, TANG L, LONG G Q. Effects of nitrogen application rates on rhizosphere soil enzyme activity and potential nitrification in maize and potato intercropping. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science Edition), 2015(6): 886-894. (in Chinese)
- [38] 仇振杰, 李久生, 赵伟霞. 再生水地下滴灌对玉米生育期土壤脲酶活性和硝态氮的影响. 节水灌溉, 2016(8): 1-6.
- QIU Z J, LI J S, ZHAO W X. Effects of subsurface drip irrigation on soil urease activity and nitrate during maize growing season while applying treated sewage effluent. Water Saving Irrigation, 2016(8): 1-6. (in Chinese)
- [39] HASSETT J E, ZAK D R, BLACKWOOD C B, PREGITZER K S. Are basidiomycete laccase gene abundance and composition related to reduced lignolytic activity under elevated atmospheric  $\text{NO}_3^-$  deposition in a northern hardwood forest? Microbial Ecology, 2009, 57(4): 728-739.
- [40] 万忠梅, 吴景贵. 土壤酶活性影响因子研究进展. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(6): 87-92.
- WAN Z M, WU J G. Study progress on factors affecting soil enzyme activity. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2005, 33(6): 87-92. (in Chinese)
- [41] 周东兴, 李磊, 李晶, 宁玉翠, 曹旭, 郭欣慧, 荣国华. 玉米/大豆轮作下不同施肥处理对土壤微生物生物量及酶活性的影响. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1856-1864.
- ZHOU D X, LI L, LI J, NING Y C, CAO X, WU X H, RONG G H. Effects of different fertilization treatments on soil microbial biomass and enzyme activities in maize-soybean rotation system. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(6): 1856-1864. (in Chinese)
- [42] 李春越, 王益, PHILIP Brookes, 党廷辉, 王万忠. pH 对土壤微生物 C/P 比的影响. 中国农业科学, 2013, 46(13): 2709-2716.
- LI C Y, WANG Y, PHILIP B, DANG T H, WANG W Z. Effect of soil pH on soil microbial carbon phosphorus ratio. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(13): 2709-2716. (in Chinese)

(责任编辑 赵伶俐)