

氮素水平对娃娃菜栽培基质微生物数量、酶活性及养分含量的影响

赵 兆¹, 胡琳莉¹, 郁继华¹, 周忠雄², 高 艳¹, 王 彤¹, 吴羽翔¹, 罗智文¹
(1. 甘肃农业大学园艺学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 湖北凯龙楚兴化工集团有限公司, 湖北 钟祥 431913)

摘要: 研究了不同氮素水平对基质盆栽娃娃菜的基质微生物数量、酶活性以及养分含量的影响。结果表明, 在施磷、钾肥量相同条件下, 随着生育期的推进, 栽培基质的氨化细菌数量除施尿素 26 g/株处理外, 其他处理均降低; 硝化细菌、亚硝酸细菌及反硝化细菌数量均增加, 且氮素水平对这几种微生物数量化的影响不显著。施氮处理下过氧化氢酶活性显著高于不施氮处理; 莲座期追肥后, 施尿素 8 g/株处理下的基质纤维素酶、脲酶具有较高的活性, 而过氧化氢酶和蔗糖酶分别在施尿素 36 g/株和施尿素 16 g/株处理下达到最大值。不同施氮量对基质中全磷和有效磷含量无显著影响, 随施氮量的增加, 全钾、速效钾含量呈先增加后降低趋势, 在施尿素 26 g/株处理下达到最大值。植株地上部全氮、全磷、全钾含量均高于地下部, 且均在施尿素 26 g/株处理下达到最大值, 全氮和全钾显著高于不施氮处理。综上所述, 基质盆栽条件下, 娃娃菜施肥方案选用尿素 26 g/株、硫酸钾 38 g/株、普通过磷酸钙 34 g/株, 有利于提高基质土壤酶活性、基质和植株中养分含量, 促进植株养分向地上部运输。

关键词: 娃娃菜; 氮素水平; 基质微生物; 土壤酶; 养分含量

中图分类号: S634.3; Q81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1463(2019)09-0063-10
[doi: 10.3969/j.issn.1001-1463.2019.09.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1463.2019.09.015)

Effects of Nitrogen Level on Microbial Quantity, Enzyme Activity and Nutrient Content of Substrate in Mini Chinese Cabbage Cultivated

ZHAO Zhao¹, HU Linli¹, YU Jihua¹, ZHOU Zhongxiong², GAO Yan¹, WANG Tong¹, WU Yuxiang¹, LUO Zhiwen¹

(1. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. Hubei Kailong Chuxing Chemical Industry Group Co., Ltd., Zhongxiang Hubei, 431913, China)

Abstract: The pot experiment was conducted to study effects of different nitrogen levels on microbial quantity, enzyme activity and nutrient content in mini Chinese cabbage (*Brassica pekinensis*) cultivated with substrate. The results showed that with the same application of phosphorus and potassium fertilizer, with the advance of growth period, the quantity of ammoniated bacteria in the substrate of a. ambrosia cultivation decreased with the addition of urea treatment at 26 g/plant. The number of nitrifying bacteria, nitrite bacteria and denitrifying bacteria increased, and the influence of nitrogen level on the quantification of these microorganisms was not significant. Catalase activity was significantly higher under nitrogen application than that

收稿日期: 2019-04-19

基金项目: 甘肃农业大学大学生科研训练项目(20181209); 甘肃省自然科学基金(18JR3RA166); 甘肃农业大学人才专项(GSAU-RCZX201713); 甘肃农业大学盛彤笙科技创新基金(GSAU-STS-1746); 甘肃省科技重大专项(17ZD2NA015-03)。

作者简介: 赵 兆(1996—), 男, 四川德阳人, 在读硕士研究生, 研究方向为蔬菜生理与栽培。联系电话: (0)18783839954。Email: 2275257339@qq.com。

通信作者: 胡琳莉(1988—), 女, 湖北随州人, 讲师, 研究方向为蔬菜逆境生理与生长调控。联系电话: (0)13919975193。

under no nitrogen application. After topdressing at lotus stage, matrix cellulase and urease had higher activity under urea application of 8 g/plant, while catalase and sucrase reached their maximum values under urea application of 36 g/plant and 16 g/plant, respectively. With the increase of nitrogen application rate, the total and available potassium contents increased first and then decreased, and reached the maximum under the treatment of urea 26 g/plant. The contents of total nitrogen, total phosphorus and total potassium in the shoot were higher than those in the underground, and reached the maximum under the treatment of 26 g/plant urea per plant. The contents of total nitrogen and total potassium were significantly higher than those under the treatment of no nitrogen application. In summary, under the condition of pot culture with substrate, the fertilization schemes of Mini Chinese cabbage include 26 g/plant urea per plant, 38 g/plant potassium sulfate per plant and 34 g/plant common superphosphate per plant, which are beneficial to improving soil enzyme activity, nutrient content in matrix and plant, and promoting nutrient transport from plant to shoot.

Key words: Mini Chinese cabbage; Nitrogen level; Substrate microorganisms; Soil enzymes; Nutrient content

土壤根际间的微生物具有调节土壤环境和提高养分循环的作用,根际土壤是微生物、植物根系、土壤及其与外界环境相互作用的中心^[1-2]。唐海明等^[3]对不同氮素水平下微生物数量的变化研究发现,适当增施氮素可以增加微生物数量,提高养分利用率,从而为植物体提供较好的生长发育条件。李玉浩等^[4]研究表明,在不同的生育期,不同的氮素水平对水稻根际微生物有显著影响。过氧化氢酶是一种抗逆性酶,在植物体内和土壤中都具有清除有害过氧化氢的作用,并且在一定意义上可以表示土壤有机质含量^[5-6]。蔗糖酶是一种水解酶,将蔗糖转化成葡萄糖供植物体利用,对土壤肥力有一定的影响,能够改善和提高土壤肥力^[7]。纤维素酶可以用来表征土壤的碳素循环速率,基质中含有大量的纤维素,尤其是含有玉米秸秆、菇渣等成分的基质,纤维素酶的活性越高,对基质中纤维素的分解效力越大,分解产生的单糖是作物营养生长和生殖生长的重要营养物质^[8]。脲酶能使土壤中尿素分子中的碳氮键打开,生成氨和二氧化碳,氨是植物氮素营养的来源之一^[9]。宋玉婷等^[10]对水稻的研究表明,土壤脲酶活性受到氮素水平的影响。冯龙等^[11]研究发现,氮素含量增加有利于土壤酶活性的提高,可能是由于氮素的提高,提供了充足的碳源,使微生物

数量增加,进而提高酶活性。刘志恒等^[12]研究表明,随着氮素水平的提高,玉米地上部的养分含量提高,但过高的施氮量会对玉米的养分含量起抑制作用。王小娟等^[13]在研究不同施氮量对春茬厚皮甜瓜生育后期氮磷钾吸收及利用的影响中指出,在同一生育期时,施氮量的增加能够显著增加植株根茎叶及果实中氮磷钾积累量,同时,氮磷钾含量也与植株生育期有关,不同生育期其含量不同。巨晓棠等^[14]指出,有机无机配合,能为微生物提供碳源,既可以维持土壤相对较大的有机碳氮库,增加土壤的缓冲性能,又可以维持土壤较好的无机氮供应能力,提高土壤保水保肥性能。尽管目前在大多数作物上进行了施氮水平试验,但在基质盆栽条件下关于氮素水平对娃娃菜栽培基质微生物数量、土壤酶活性以及养分含量和分配的研究尚未见报道。我们采用基质盆栽的方法,研究不同氮素水平对娃娃菜栽培基质微生物数量、土壤酶活性以及养分分配的调控作用,旨在为基质栽培条件下,娃娃菜的施肥和养分管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

指示娃娃菜品种为惠农金娃娃。培基质为甘肃绿能有限公司生产的商品基质,含全氮 19.87 g/kg、全磷 2.40 g/kg、全钾 5.57 g/kg、

速效钾 0.13 mg/kg、有效磷 6.67 mg/kg、碱解氮 157.65 mg/kg。试验所用氮肥为尿素(含 N 46%)，磷肥为普通过磷酸钙(含 P₂O₅ 17%)，钾肥为硫酸钾(含 K₂O 51%)。

1.2 试验设计

试验于 2018 年 4—10 月在甘肃农业大学现代玻璃温室进行。共设 5 个氮素水平，分别为 N0、N8、N16、N26、N36，其中磷肥和钾肥施用量一致，均为硫酸钾 38 g/株，普通过磷酸钙 34 g/株，普通过磷酸钙一次性基施，尿素和硫酸钾基施 50%，莲座期追施 50%。具体施肥方案见表 1。

1.3 试验方法

试验于 4 月 1 日开始育苗，5 月 1 日移栽定植。选取大小一致、无病虫害、生长健壮的娃娃菜幼苗定植于装有 1.5 kg 基质的花盆中。采用随机区组设计，每处理 6 盆，每盆定植 1 株娃娃菜，重复 5 次。同年 6 月 23 日采收。

1.4 测定项目和方法

1.4.1 样品的采集 基施肥料前、娃娃菜定植后 16 d(莲座期)、53 d(结球期)，采集各小区 0~20 cm 基质层的基质样，用于测定微生物数量、土壤酶活性以及养分含量。采收的娃娃菜植株分为地上部和地下部，烘干之后的样品用于测定养分含量。

1.4.2 基质酶活性测定 参考关松荫的方法测定基质脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶及纤维素酶活性^[15]。采用靛酚蓝比色法测定基质脲酶活性，采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶活性，采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法

测定蔗糖酶活性，采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定纤维素酶活性。

1.4.3 基质微生物数量的测定 参考林先贵的方法测定氨化细菌、硝化细菌、亚硝酸细菌及反硝化细菌^[16]。氨化细菌在 28 ℃恒温箱中培养 7 d，硝化细菌、反硝化细菌、亚硝酸细菌于 28 ℃恒温箱中培养 14 d。氨化细菌用奈氏试剂显色，硝化细菌用格里斯试剂、二苯胺试剂显色，反硝化细菌用奈氏试剂、格里斯试剂、二苯胺显色，亚硝酸细菌用格里斯试剂 A 及 B 显色。

1.4.4 基质和植株养分含量的测定 基质和植株养分含量的测定参照鲍士坦的方法稍作修改^[17]。称取风干过筛的基质样品 0.1 g(或烘干研细的植株样品 0.2 g)，倒入 100 mL 三角瓶中，沿玻璃壁旋转加入 5 mL 浓硫酸，充分混合后加入 5 mL 双氧水，混合均匀后，置于电热板上加热，煮沸，当出现大量白烟后，再煮 2~3 min，直至消煮液呈无色透明状(若未达透明状继续加入少许过氧化氢加热，直至消煮液呈透明状)，稍冷却后，将消煮液无损地洗入 100 mL 容量瓶中，用蒸馏水定容，摇匀，过滤，滤液供全氮，全磷，全钾以及碱解氮、有效磷和速效钾的测定。

全氮采用凯氏定氮仪(海能 K1100 K1100 型)测定。全磷采用磷钼蓝比色法，用 TU-1900 双光束紫外可见分光光度计进行比色测定。全钾采用火焰光度法，用火焰光度计(AP1302型)测定。碱解氮测定时先吸取待测液 20 mL 置于消化管中，调试定氮仪，

表 1 试验设计

处理	尿素/(g/株)			硫酸钾/(g/株)			普通过磷酸钙/(g/株)	
	基施	追施	合计	基施	追施	合计	基施	合计
N0	0	0	0	19	19	38	34	34
N8	4	4	8	19	19	38	34	34
N16	8	8	16	19	19	38	34	34
N26	13	13	26	19	19	38	34	34
N36	18	18	36	19	19	38	34	34

加入硼酸和碱液。连接好管路，打开冷凝水，开启仪器清洗管路，并空蒸几分钟。待水蒸气气流稳定后，将盛有待测液的消化管放置好，关闭防护门，设置好相应参数，测定碱解氮。速效磷采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法，使用 TU-双光束紫外可见分光光度计进行比色。速效钾采用乙酸铵提取-火焰光度法，用 AP1302 型火焰光度计测定。

1.5 数据处理

利用 Excel 2010 对试验所获数据进行整理，利用 SPSS 20.0 软件采用 Duncan's 多重比较法进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 氮素水平对娃娃菜栽培基质氨化细菌数量的影响

从表 2 可以看出，莲座期时相比于基施前，各处理氨化细菌数量均表现出不同程度的下降。在采收期，除 N26 处理下较基施前氨化细菌数量小幅增加外，其余各处理均呈现不同程度的下降。莲座期和采收期各施氮水平处理间差异不显著。

2.2 氮素水平对娃娃菜栽培基质硝化细菌数量的影响

从表 3 可以看出，随着生育期的推进，硝化细菌数量呈现增加趋势，采收期时各处理均达到最大值。在 5 个氮素处理下，采收期硝化细菌数量均比莲座期高。在莲座期，N8 处理下硝化细菌数量达到最大值，相比于 N0 处理下提高 28.46%；在采收期，硝化细菌数量在 N36 处理下达到最大值，相比于 N0 处理提高 245.50%，莲座期和采收期各施氮处理间差异不显著。

2.3 氮素水平对栽培基质反硝化细菌数量的影响

从表 4 可以看出，5 个氮素水平处理下采收期的反硝化细菌数量均比莲座期高。莲座期时，随着施氮水平的提高，反硝化细菌数量随着施氮量的增加呈现出先增后降又增的趋势，并在 N8 处理下达到最大值，较基施前增加 28.13%，而在 N16 处理、N26 处理、N36 处理下较基施前均出现不同程度的降低。采收期各施肥水平较基施前都有不同程度的增加，N8 处理下反硝化细菌数量增

表 2 氮素水平对基质氨化细菌数量的影响

处理	基施前 $I/(\times 10^7 \text{ cfu/g})$	莲座期 $I/(\times 10^7 \text{ cfu/g})$	较基施前增量 /%	采收期 $I/(\times 10^7 \text{ cfu/g})$	较基施前增量 /%
N0	146.67 ± 11.55	136.67 ± 25.17a	-6.82	113.33 ± 25.17a	-22.73
N8	146.67 ± 11.55	136.67 ± 25.17a	-6.82	113.33 ± 64.29a	-22.73
N16	146.67 ± 11.55	113.33 ± 25.17a	-22.73	106.67 ± 57.74a	-27.27
N26	146.67 ± 11.55	130.00 ± 36.06a	-11.37	153.33 ± 11.55a	4.54
N36	146.67 ± 11.55	136.67 ± 25.17a	-6.82	113.33 ± 64.29a	-22.73

表 3 氮素水平对基质硝化细菌数量的影响

处理	基施前 $I/(\times 10^4 \text{ cfu/g})$	莲座期 $I/(\times 10^4 \text{ cfu/g})$	较基施前增量 /%	采收期 $I/(\times 10^4 \text{ cfu/g})$	较基施前增量 /%
N0	1.10 ± 0.50	2.67 ± 1.75a	142.72	7.67 ± 7.23a	597.27
N8	1.10 ± 0.50	3.43 ± 3.52a	211.81	7.50 ± 6.50a	581.82
N16	1.10 ± 0.50	1.37 ± 0.25a	24.54	21.33 ± 15.01a	1 839.09
N26	1.10 ± 0.50	1.37 ± 0.55a	24.54	18.83 ± 6.83a	1 611.82
N36	1.10 ± 0.50	2.00 ± 1.78a	81.82	26.50 ± 17.80a	2 309.09

幅最大,较基施前增幅达到 162.52%,但莲座期和采收期各施氮水平处理间差异不显著。

2.4 不同氮素处理对娃娃菜栽培基质亚硝酸细菌数量的影响

从表 5 可以看出,5 个氮素水平处理下采收期的亚硝酸细菌数量均比莲座期高。莲座期时,N0 处理、N8 处理、N36 处理下的基质中亚硝酸细菌数量较基施前相比降低,降幅分别达 8.36%、61.67%、40.41%;N16 处理、N26 处理下基质中亚硝酸细菌数量较基施前相比增加,增幅分别为 127.64%、126.48%。采收期时,各氮素处理下亚硝酸细菌数量较基施前均明显增加,其中 N0 处理、N36 处理增幅最大,均为 4429.62%,但莲座期和采收期各施氮水平处理间差异不显著。

2.5 氮素水平对娃娃菜栽培基质酶活性的影响

从表 6 可以看出,过氧化氢酶活性在莲座期相对于幼苗期略微降低。而在同一生育期下,随着氮肥水平增加,过氧化氢酶活性也逐渐增加,均在 N36 处理时达到最大值,幼苗期为 1.88 mL/(g·h),莲座期为 1.81 mL/

(g·h),与不施氮处理(N0处理)相比分别提高了 6.21%、9.70%。幼苗期 N36 处理下过氧化氢酶活性与 N0 处理、N8 处理之间差异显著,与其余处理差异不显著;莲座期 N36 处理下过氧化氢酶活性与 N0 处理下差异显著,与其余处理差异不显著。

莲座期纤维素酶活性相比于幼苗期增加。幼苗期和莲座期均表现出先增加后降低的趋势,在 N8 处理时达到最大,幼苗期为 6.85 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$,莲座期为 7.50 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$,与不施氮处理相比分别提高了 10.66%、8.85%。幼苗期 N8 处理下纤维素酶活性与 N26 处理和 N36 处理之间差异显著,而与其他处理差异不显著;莲座期 N8 处理下纤维素酶活性与其余处理均差异显著。

莲座期脲酶活性相对于幼苗期呈现下降的趋势。在同一生育期时,随着氮素水平的提高,表现出先增加后降低的趋势,均在 N8 时达到最大值,幼苗期为 38.64 $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{d})$,莲座期为 33.50 $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{d})$,与不施氮处理(N0处理)相比分别提高 29.75%、11.82%。幼苗期 N8 处理下脲酶活性与 N26 处理和 N36 处理差异显著,与其余处理差异不显著。莲座期 N8 处理下脲酶活性与其余处理均差异

表 4 氮素水平对基质反硝化细菌数量的影响

处理	基施前 $I/(\times 10^5 \text{ cfu/g})$	莲座期 $I/(\times 10^5 \text{ cfu/g})$	较基施前增量 /%	采收期 $I/(\times 10^5 \text{ cfu/g})$	较基施前增量 /%
N0	53.33 ± 49.07	60.00 ± 44.44a	12.51	83.33 ± 46.19a	56.26
N8	53.33 ± 49.07	68.33 ± 63.31a	28.13	140.00 ± 0.000a	162.52
N16	53.33 ± 49.07	16.50 ± 7.86a	-69.06	93.33 ± 56.86a	79.48
N26	53.33 ± 49.07	31.67 ± 11.55a	-40.62	83.33 ± 46.19a	56.26
N36	53.33 ± 49.07	52.00 ± 50.71a	-2.49	120.00 ± 17.32a	125.01

表 5 氮素处理对基质亚硝酸细菌的影响

处理	基施前 $I/(\times 10^3 \text{ cfu/g})$	莲座期 $I/(\times 10^3 \text{ cfu/g})$	较基施前增量 /%	采收期 $I/(\times 10^3 \text{ cfu/g})$	较基施前增量 /%
N0	2.87±1.48	2.63±1.80a	-8.36	130.00±17.32a	4 429.62
N8	2.87±1.48	1.10±0.40a	-61.67	98.33±48.56a	3 326.24
N16	2.87±1.48	6.53±7.37a	127.53	103.33±63.51a	3 500.46
N26	2.87±1.48	6.50±1.73a	126.48	103.33±63.51a	3 500.46
N36	2.87±1.48	1.70±1.13a	-40.41	130.00±17.32a	4 429.62

显著。

蔗糖酶活性在莲座期相对于幼苗期呈现出增加的趋势。在同一生育期时,随着氮肥水平的提高,蔗糖酶活性呈现出先增加后降低的趋势,均在 N16 处理时达到最大值,幼苗期为 23.60 mg/(g·d),莲座期为 24.62 mg/(g·d),相对于 N0 处理下分别提高 13.35%、15.64%。幼苗期 N16 处理下相对于 N36 处理下差异显著,而与其余处理差异不显著,莲座期 N16 处理下与其余处理差异均不显著。

2.6 氮素水平对娃娃菜栽培基质养分含量的影响

从表 7 可以看出,基质中全氮和碱解氮含量均呈现出先增加后降低的趋势,且均在 N26 处理下达到最大值。全氮为 36.60 g/kg,碱解氮为 195.58 mg/kg,与 N0 处理相比分别提高了 84.20%、24.06%。N26 处理下全氮含量与 N0 处理和 N8 处理之间差异显著,与其余处理差异不显著;碱解氮含量与 N0 处理、N8 处理、N36 处理之间差异显著,而与 N16 处理间差异不显著。全磷和有效磷含量均表现出先增加后降低的趋势,且均

在 N26 处理下达到最大值,全磷为 4.39 g/kg,有效磷为 82.11 mg/kg,与 N0 处理相比分别提高了 77.02%、8.64%,N26 处理下全磷和有效磷含量与其他处理差异均不显著。基质中全钾和速效钾含量均呈现出先增加后降低的趋势,且均在 N26 处理下达到最大值,全钾为 6.3 g/kg,速效钾为 12.1 mg/kg,与 N0 处理相比分别提高了 45.16%、9.70%。N26 处理下全钾含量与 N16 差异不显著,与其余处理差异显著;速效钾含量与 N36 处理差异显著,与其他处理差异不显著。

2.7 氮素水平对娃娃菜植株养分含量的影响

从表 8 可以看出,娃娃菜地上部全氮、全磷、全钾含量要明显高于地下部。施氮处理下,植株地上部和地下部全氮含量都是随着氮素水平的提高而呈现出先增加后降低的趋势,且均在 N26 处理时达到最大值,分别为 62.67、39.60 g/kg,相对于 N0 处理分别提高 31.47%、48.15%;N26 处理下地上部全氮含量与 N0 处理、N8 处理差异显著,与其他处理差异不显著,地下部全氮含量与其他处理均差异显著。各处理植株全磷含量随着施氮水平的提高呈现出先增加后降低的

表 6 氮素水平对基质土壤酶活性的影响

处理	过氧化氢酶活性 /[mL/(g·h)]		纤维素酶活性 /[μg/(g·d)]		脲酶活性 /[mg/(g·d)]		蔗糖酶活性 /[mg/(g·d)]	
	幼苗期	莲座期	幼苗期	莲座期	幼苗期	莲座期	幼苗期	莲座期
N0	1.77±0.04c	1.65±0.10b	6.19±0.67a	6.89±0.06b	29.78±4.88ab	29.96±1.78b	20.82±2.82ab	21.29±0.99a
N8	1.83±0.03b	1.77±0.02a	6.85±0.63a	7.50±0.38a	38.64±7.66a	33.50±2.35a	22.11±1.81ab	22.22±4.99a
N16	1.87±0.02ab	1.78±0.03a	6.07±0.21ab	6.94±0.05b	35.72±5.25a	25.84±1.17c	23.60±1.11a	24.62±4.93a
N26	1.87±0.02ab	1.80±0.01a	5.32±0.07bc	6.91±0.07b	23.63±0.93bc	16.77±1.24d	20.69±0.65ab	23.90±0.61a
N36	1.88±0.01a	1.81±0.00a	5.17±0.06c	6.82±0.14b	20.22±2.95c	14.79±0.78d	18.72±2.88b	22.78±2.47a

表 7 氮素水平对娃娃菜栽培基质养分含量的影响

处理	全氮 /(g/kg)	全磷 /(g/kg)	全钾 /(g/kg)	碱解氮 /(mg/kg)	有效磷 /(mg/kg)	速效钾 /(mg/kg)
N0	19.87±0.20c	2.48±0.30a	4.34±0.22c	157.65±7.40b	75.58±0.71a	11.03±0.35a
N8	28.60±0.34b	2.92±0.21a	4.63±0.40c	165.35±15.19b	79.25±1.03a	11.47±0.45a
N16	34.07±0.07a	3.79±0.15a	5.60±0.26ab	176.61±11.43ab	81.82±2.82a	11.93±1.10a
N26	36.60±0.15a	4.39±0.38a	6.30±0.79a	195.58±28.22a	82.11±4.01a	12.10±0.89a
N36	35.67±0.35a	4.23±2.97a	5.20±0.82bc	158.83±5.43b	78.48±10.58a	3.3±1.28b

趋势,且均在 N26 处理时达到最大值,分别为 10.02、5.48 g/kg,相对于 N0 处理分别提高 25.41%、35.98%,地上部和地下部各处理全磷含量均差异不显著。植株地上部和地下部全钾含量随着氮素水平的提高而呈现出先增加后降低的趋势,且在 N26 处理时达到最大值,分别为 29.73、11.03 g/kg,相对于 N0 处理分别提高 24.55%、29.76%;N26 处理下地上部和地下部全钾含量均与 N0 处理差异显著,而与其他处理差异不显著。

3 结论与讨论

通过试验可以得出,不同氮素水平娃娃菜栽培基质的细菌数量由大到小依次为氨化细菌、反硝化细菌、硝化细菌、亚硝酸细菌。随着生育期的推进,栽培基质氨化细菌数量除施尿素 26 g/株处理外,其余处理均降低;硝化细菌、亚硝酸细菌及反硝化细菌数量均增加,且氮素水平对这几种微生物数量化的影响不显著。在同一生育期,在施硫酸钾 38 g/株、普通过磷酸钙 34 g/株的条件下,随着氮肥水平增加,过氧化氢酶活性也逐渐增加,显著高于不施氮处理。纤维素酶活性、脲酶活性、蔗糖酶活性均表现出先增加后降低的趋势,纤维素酶活性、脲酶活性在施尿素 8 g/株时达到最大值。蔗糖酶活性在施尿素 16 g/株时达到最大值。不同施氮水平对基质中全磷、有效磷含量无显著影响。随氮素水平的提高,基质中全氮、碱解氮、全钾、速效钾含量均呈先增加后降低的趋势,且均在施尿素 26 g/株时达到最大值。娃娃菜地上部全氮、全磷、全钾含量明显高

于地下部。植株地上部和地下部全氮、全磷、全钾含量随着氮素水平的提高呈先增加后降低的趋势,且均在施尿素 26 g/株达到最大值。说明基质盆栽条件下,施尿素 26 g/株、硫酸钾 38 g/株、普通过磷酸钙 34 g/株的施肥方案有利于提高基质土壤酶活性、基质和植株中养分含量,促进植株养分向地上部运输。

氨化作用、硝化作用、反硝化作用三者都属于土壤中的氮转化作用,氮转化细菌数量越多,土壤肥力越高、土壤理化性质越好^[18]。氨化细菌可以参与土壤中有机氮的氨化作用,它可以将水体中的有机氮化物分解,产生无机物供植物体利用,土壤中的氨化细菌数量越多,则土壤中的氨化作用越强^[19]。在长期施肥条件下,土壤中的硝化细菌数量增加^[20],这与本次试验研究结果一致。土壤中的硝化细菌具有将氨转化成硝酸,同时产生 NO_3^- ,供植物体直接吸收利用。硝化是一个与其他过程紧密相连的过程,例如和氨化和氨的损失,同时硝化细菌数量受温度、含水率、pH 等因素的影响,此外,土壤深度越深,硝化细菌数量越低^[21-23]。土壤中的含氮化合物过高会产生较多的有害化合物,不利于植物体的生长,而氨化作用、硝化作用,反硝化作用可以将这些有害化合物转化成氨气,减小或消除含氮有害化合物对植物体的伤害,反硝化细菌在土壤的氮转化过程中具有重要作用,研究反硝化细菌具有重要的意义^[24]。亚硝酸细菌主要参与土壤中的氮素循环,氨态氮

表 8 氮素水平对娃娃菜植株养分含量的影响

处理	地上部/(g/kg)			地下部/(g/kg)		
	全氮	全磷	全钾	全氮	全磷	全钾
N0	47.67±0.70c	7.99±16.5a	23.87±1.60b	26.73±0.23d	4.03±1.58a	8.50±1.51b
N8	53.53±2.40bc	8.48±0.64a	27.13±1.74ab	31.83±1.10c	4.26±1.87a	9.83±0.92ab
N16	61.80±5.03a	9.22±1.58a	27.67±2.92ab	36.73±1.85b	4.45±1.69a	10.57±0.65ab
N26	62.67±5.33a	10.02±0.09a	29.73±1.50a	39.60±1.59a	5.48±1.28a	11.03±0.95a
N36	56.97±2.17ab	8.71±0.61a	28.70±3.42a	34.00±0.53c	5.27±0.90a	10.43±1.53ab

经过亚硝酸细菌的作用下转化成硝态氮,硝态氮再经过反硝化作用形成气体态氮而挥发出去,造成氮损失^[25-26]。本试验中,由于栽培基质的 pH 呈弱碱性,而氨化细菌适宜的生长环境是中性环境,其余 3 种细菌适宜的生长环境是碱性,因此在植株生长后期,3 种细菌(硝化细菌、反硝化细菌、亚硝酸细菌)的数量增加,反硝化细菌在莲座期时增加不明显,可能是由于前期缺乏 NO_3^- ,而在后期随着 NO_3^- 的增加促进了反硝化细菌数量的增加。此外,随着生育期的推进,氨化细菌数量逐渐降低,可能与基质中有机质含量的减少有关。由于是盆栽试验,与外界环境隔离没有物质交换,有机态氮得不到补充。亚硝酸细菌数量增长趋势与硝化细菌数量的增长趋势一致。随着生育期的推进,硝化细菌数量在采收期时较莲座期增加,可能与施入的氮肥改善了基质土壤环境有关。反硝化细菌在莲座期时增加不明显,可能是由于前期缺乏 NO_3^- ,基质中水分较少,通气性好,而后期随着反硝化作用的增加,浇水次数多基质中含水量变高,反硝化细菌的生长条件得以改善,反硝化细菌数量也随之上升。相对于基施前,氮素供应在整个生育期过程中仅对亚硝酸细菌数量影响显著(特别是采收期),其原因可能因为是硝化细菌数量的增加为亚硝酸细菌繁殖提供了氮源,高温多水的环境适宜亚硝酸细菌数量的增长,同时也可能与亚硝酸细菌对氮素供应量较其他微生物敏感有关。

土壤中微生物能够影响土壤的理化性质及矿物质循环,土壤中有益微生物越多对植物体越有利^[27]。前人研究发现,土壤中的微生物数量氨化细菌>反硝化细菌>硝化细菌^[28-31]。土壤微生物数量在一定程度上可以表示土壤肥力强弱。根据尹国丽等^[32]对小麦和玉米轮作的研究发现,氨化细菌、硝化细菌、反硝化细菌、亚硝酸细菌等土壤微

生物数量越多,则土壤肥力越高,土壤中的自毒物质越少,可以有效改善土壤的微环境,利于植物体生长发育。

N、P、K 与有机肥长期配合施用能明显提高土壤转化酶、磷酸酶、脲酶和过氧化氢酶的活性^[33]。幼苗期脲酶活性大于莲座期脲酶活性,说明随着生育期的推进,脲酶活性降低,增施氮肥可以提高脲酶活性,但在其他处理下脲酶活性相比于不施氮肥脲酶活性降低,说明适当增加氮肥可以提高脲酶活性,但过高的氮素浓度却会抑制脲酶活性,这与前人的研究结果有相似之处^[34]。蔗糖酶在适宜的尿素施用量时达到最高,表明尿素在适宜浓度下有益于过氧化氢酶、纤维素酶、脲酶和蔗糖酶活性的提高,过高则酶活性下降^[35-36]。

本试验表明,氮素不同水平对娃娃菜植株养分含量有显著的影响。娃娃菜地上部全氮养分含量随着氮素梯度的提高而提高,但氮素梯度增加到一定水平时达到稳定。王超然等^[37]研究不同水肥对甘蔗的影响,随着 N、P、K 肥的增加,植株对元素的吸收也增加。施氮处理下娃娃菜地下部全氮含量比不施氮处理低,说明施氮肥可以促进氮元素由地下部向地上部转运。郭金金等^[38]研究缓释氮肥对玉米成熟期各器官氮素分配和产量影响发现,增施氮肥有利于促进养分向地上部经济器官输送,这与本试验的结果一致。娃娃菜地上部和地下部全磷含量各处理之间差异不显著,说明氮素水平对娃娃菜植株磷元素的吸收利用影响并不显著,这与曹哲等^[39]研究不同施氮量对马铃薯养分吸收中在采收期时地下部全磷含量差异显著相悖,可能是因为基质中磷元素含量大于娃娃菜所能吸收的最大量,故差异不显著。施氮处理下娃娃菜地上部和地下部全钾含量均比不施氮处理高,说明基质中施入一定浓度的氮肥有利于植株对钾元素的吸收和利用,这

与倪玉琼等^[40]研究不同施氮量对高粱植株养分吸收积累中得出结论一致。

基质速效钾、速效磷、碱解氮含量能够表明基质中肥力水平,常被作为测定基质肥力的重要指标^[41]。基质速效钾含量是评价作物对基质钾素有效利用水平的主要指标之一。本试验表明,不同施氮量对基质中全磷和有效磷含量的影响不显著,这与冷冰涛等^[42]研究秸秆还田条件下不同施氮量对土壤养分的影响中得出的结论一致。本试验中,施氮处理下,基质有效钾的含量随氮肥浓度的增加呈现先升高后降低的趋势,说明适宜的氮素水平能够增加基质中有效钾的含量,而过高的氮素梯度下会降低基质中的有效钾,这与前人研究的结果相似^[43]。在不同的施氮处理下,基质碱解氮的含量随着氮素梯度的提高呈现出先增加后降低的趋势,说明适宜的氮素水平能够增加基质中碱解氮含量。

参考文献:

- [1] 崔佩佩,武爱莲,王劲松,等.不同施肥处理对高粱根际土壤微生物功能多样性的影响[J].华北农学报,2018,33(5):195-202.
- [2] 陆雅还,张福锁.根际微生物研究进程[J].土壤,2006,38(2):113-121.
- [3] 唐海明,李超,肖小平,等.有机肥氮投入比例对双季稻田根际土壤微生物生物量碳、氮和微生物熵的影响[J/OL].应用生态学报,2019,(30)4:1-12 [2019-05-04].
<https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201904.014>.
- [4] 李玉浩,何杰,王昌全,等.控释氮肥配施尿素对土壤无机氮、微生物及水稻生长的影响[J].土壤,2018,50(3):469-475.
- [5] 刘家雄,金陈斌,张静,等.古树土壤酶活性与土壤肥力的关系[J].安徽农业科学,2018,46(12):146-148.
- [6] 权刚.土壤中的土霉素对蔗糖酶活性的影响[J].陕西农业科学,2019,65(1):59-61.
- [7] 李燕红,赵辅昆.纤维素酶的研究进展[J].生命科学,2005(5):392-396.
- [8] 王小纯,李高飞,安帅,等.氮素形态对中后期小麦根际土壤氮转化微生物及酶活性的影响[J].水土保持学报,2010,24(6):204-207.
- [9] 牛静,甄安忠,葛生珍,等.不同施氮量对植烟土壤理化特性和酶活性的影响[J].西南农业学报,2013,26(4):1561-1566.
- [10] 宋玉婷,吕小红,陈温福.水稻土壤碱解氮与脲酶活性对不同氮素水平的响应[J].北方水稻,2010,40(4):8-12.
- [11] 冯龙,张崇玉,陶雯,等.不同施肥处理对大白菜土壤酶和微生物量碳、氮含量的影响[J].山地农业生物学报,2018,37(4):45-50.
- [12] 刘志恒,徐开未,王科,等.不同施氮量对玉米产量及各器官养分积累的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2018,44(5):573-579.
- [13] 王小娟,朱白婢,陈健晓,等.不同施氮量对春茬厚皮甜瓜生育后期氮磷钾吸收及利用的影响[J].热带作物学报,2018,39(8):1476-1482.
- [14] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795.
- [15] 关松荫.土壤酶及其研究方法[M].北京:农业出版社,1983:294-313.
- [16] 林先贵.土壤微生物研究原理与方法[M].北京:高等教育出版社,2010:113-126.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:30-177.
- [18] 张淑红,高巍,张恩平,等.长期定位施氮对连作番茄土壤可培养微生物数量的影响[J].土壤通报,2012,43(1):60-65.
- [19] 王红,阮爱东,徐洁.太湖氨化功能菌群的分布及其有机氮降解条件[J/OL].河南科学,2019(3):439-446 [2019-04-12].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1084.N.20190401.10>
- [20] JICHEN WANG, JIANLEI WANG, GEOFF RHODES, et al. Adaptive responses of co-

- mammox nitrospira and canonical ammonia oxidizers to long-term fertilizations: Implications for the relative contributions of different ammonia oxidizers to soil nitrogen cycling[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 668: 224-233.
- [21] 陈秋霜, 俞如旺. 漫谈硝化作用 [J]. *生物学教学*, 2019, 44(2): 77-79.
- [22] RAFAELA CÁ CERES, KRYSZYNA MALIŃSKA, ORIOL MARFÀ. Nitrification within composting: A review[J]. *Waste Management*, 2018, 72(2): 119-137.
- [23] 吴承林, 田伟君, 官晓敏, 等. 龙门口水库滨岸带硝化作用研究 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(7): 77-81.
- [24] 司圆圆, 陈兴汉, 许瑞雯, 等. 好氧反硝化细菌脱氮研究进展[J]. *山东化工*, 2018, 47(4): 157-158.
- [25] 王海斌, 叶江华, 陈晓婷, 等. 连作茶树根际土壤酸度对土壤微生物的影响 [J]. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(3): 480-485.
- [26] 刘云芬, 王薇薇, 祖艳侠, 等. 过氧化氢酶在植物抗逆中的研究进展[J]. *大麦与谷类科学*, 2019(1): 5-8.
- [27] 林耀奔, 叶艳妹, 杨建辉, 等. 土地整治对土壤微生物多样性的影响分析[J/OL]. *环境科学学报*: 2019, 39(8): 1-10[2019-04-12]. <https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2019.0129>.
- [28] 强浩然, 张国斌, 郁继华, 等. 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[J]. *园艺学报*, 2018, 45(5): 943-958.
- [29] 曾 齐, 王继华, 车 琦. 不同生长期大豆根际微生物的数量动态变化研究[J]. *黑龙江大学工程学报*, 2018, 9(3): 73-79; 85.
- [30] 刘 明, 黄 磊, 高 旭, 等. 潜流湿地中微生物对三峡库区微污染水净化效果的影响 [J]. *湖泊科学*, 2012, 24(5): 687-692.
- [31] 李艺红. 锦州湾水环境污染对沉积物微生物生态状况的影响关系研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2014.
- [32] 尹国丽, 蔡卓山, 陶 茸, 等. 不同草田轮作方式对土壤肥力、微生物数量及自毒物质含量的影响[J]. *草业学报*, 2019, 28(3): 42-50.
- [33] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(4): 406-410.
- [34] 王 楠, 徐俊平, 赵志祎, 等. 施氮水平对中温带典型白浆土微生物学特性的动态影响 [J]. *华南农业大学学报*, 2017, 38(2): 55-62.25.
- [35] 王胜楚. 尿素对土壤微生物和土壤酶活性的影响研究[J]. *湖南农业科学*, 2011(9): 48-50.
- [36] 刘 星, 汪金松, 赵秀海. 模拟氮沉降对太岳山油松林土壤酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(14): 4613-4624.
- [37] 王超然. 不同水肥配比对甘蔗生长及养分状况的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [38] 郭金金, 张富仓, 闫世程, 等. 缓释氮肥与尿素掺混对玉米生理特性和氮素吸收的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1194-1204.
- [39] 曹 哲, 何文寿, 侯贤清, 等. 不同施氮量对马铃薯养分吸收及产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(7): 1600-1605.
- [40] 倪玉琼, 张 强, 曹方琴, 等. 不同施氮量对高粱产量及植株养分积累的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 95-99; 105.
- [41] 周箬涵. 不同氮素形态及配比对娃娃菜产量、品质及其养分吸收的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015.
- [42] 冷冰涛, 宋付朋. 秸秆还田条件下不同施氮量对玉米产量及土壤养分的影响[J]. *化肥工业*, 2017, 44(3): 80-86.
- [43] 陈 亚. 水氮耦合对植烟土壤理化生物特性及烤烟生长的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2009.

(本文责编: 陈 伟)