文章编号:1000-7601(2020)01-0066-08 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.01.09

生物有机肥部分替代化肥对莴笋生长、产量及品质的影响

张迎春, 颉建明, 郁继华, 唐超男, 王 成

(甘肃农业大学园艺学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要:为了改善因化肥过量施用导致的蔬菜品质下降、肥料利用率降低和环境污染等问题, 通过化肥减量配施生物有机肥, 探讨菜田减肥潜力和生物有机肥增效作用。采用随机区组试验, 研究不同施肥处理对莴笋产量、品质、光合特性及肥料贡献率的影响。试验共设置 6 个施肥处理:不施肥(CK1)、100%常规施肥(CK2)、80%常规施肥+200 kg · 667m^{-2}生物有机肥(T1)、80%常规施肥+400 kg · 667m^{-2}生物有机肥(T2)、70%常规施肥+400 kg · 667m^{-2}生物有机肥(T3)、70%常规施肥+200 kg · 667m^{-2}生物有机肥(T4)。结果表明:生物有机肥部分替代化肥可使莴笋的株高、茎长及茎粗不同程度的增加, 其中 T2 效果最优;在相同的生物有机肥施用量下, 化肥减施 20%较减施 30%有助于根系的生长和根系活力的增强;T2 处理莴笋叶绿素总量分别比 CK1 处理和 CK2 处理提高 17.32%和 1.74%;T2 处理的净光合速率和蒸腾速率最高, 分别高于其他处理 6.90%~49.35%和 6.26%~58.64%;与 CK2 相比, T1、T2、T3 和 T4 分别增产 4.76%、15.31%、11.06%和 4.11%, 其中 T2 产量最高, 达 8 277.00 kg · 667m^{-2}, 其经济效益比 CK2 增长 11.64%;化肥减施并配施生物有机肥的处理肥料贡献率均显著高于 CK2 处理, 100%常规施肥供大于求, 供需平衡破坏, 导致肥料的浪费;随着化肥用量的减少, 莴笋硝酸盐含量降低, T3 处理降低幅度最大, 茎、叶中硝酸盐含量较 CK2 分别降低 26.53%和 20.96%;配施生物有机肥可提高莴笋茎、叶中可溶性蛋白、可溶性糖和维生素 C 的含量, 其中配施 400 kg · 667m^{-2}时效果更优。化肥减施 20%的条件下配施 400 kg · 667m^{-2}生物有机肥可增强莴笋叶片光合能力, 提高产量和改善可食用部分品质, 是实现肥料资源合理配置的良好施肥模式。

关键词:莴笋;化肥减施;生物有机肥;生长;品质;产量;肥料贡献率

中图分类号:S636.2;S147.2 **文献标志码**:A

Effects of partial substitution of chemical fertilizer by bio-organic fertilizer on the growth, yield and quality of asparagus lettuce

ZHANG Yingchun, XIE Jianming, YU Jihua, TANG Chaonan, WANG Cheng

(*College of Horticulture*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*)

Abstract: In order to improve the situations of the excessive application of chemical fertilizers resulting inreduced vegetable quality, low fertilizer utilization rate, environmental pollution, and so on, a field experiment was carried out using combined application of bio-fertilizer with chemical fertilizer to explore the potential of it in vegetable fields and the effect of bio-organic fertilizer, and provide a scientific basis for reasonable fertilization.In this study, asparagus lettuce field experiment was conducted to investigate the effects on yield, quality, photosynthesis, and fertilizer contribution rate under different combinations. Six treatments were as follows: non-fertilization (CK1), 100% chemical fertilizer (CK2), 80% chemical fertilizer with 200 kg · 667m^{-2} bio-organic fertilizer (T1), 80% chemical fertilizer with 400 kg · 667m^{-2} bio-organic fertilizer (T2), 70% chemical fertilizer with 400 kg · 667m^{-2} bio-organic fertilizer (T3), 70% chemical fertilizer with 200 kg · 667m^{-2} bio-organic fertilizer (T4). The results revealed that the combined application of bio-fertilizer with chemical fertilizer treatments increased in different degrees the plant height, stem height, and stem diameter of asparagus lettuce in comparison with CK2,

收稿日期:2019-01-13 **修回日期**:2019-02-28

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0201005);甘肃省引导科技创新发展专项资金项目(2018ZX-02);甘肃省科技重大专项计划(17ZD2NA015);甘肃省瓜菜产业技术体系专项资金(GARS-GC-1)

作者简介:张迎春(1992-), 女, 甘肃张掖人, 硕士研究生, 主要从事设施蔬菜栽培生理与生长调控研究。E-mail:1334200316@qq.com

通信作者:颉建明(1970-), 男, 甘肃甘谷人, 教授, 博士生导师, 主要从事蔬菜学和设施农业研究。E-mail:xiejianming@gsau.edu.cn

and T2 was the most significant. Compared with 30% reduction of chemical fertilizer (T3 and T4) treatments, the 20% reduction of chemical fertilizer (T1 and T2) treatments significant increases root growth and root vitality under the same conditions. The content of photosynthetic pigments with T2 treatment increased by 17.32 and 1.74% compared to CK1 and CK2, respectively. In addition, the net photosynthetic rate and transpiration rate in asparagus lettuce treated with T2 treatment were the highest, with increased degree ranging from 6.90%~9.35% and 6.26%~58.64%, respectively. Compared with CK2, the yield of T1, T2, T3, and T4 increased by 4.76%, 15.31%, 11.06%, and 4.11%, respectively. And the yield of T2 was the highest at 8 277.00 kg · $667m^{-2}$, and its economic benefit was 11.64% higher than that of CK2. The supply of 100% chemical fertilizer exceeded the crop demand, and the balance of supply and demand was broken, which leaded to waste of fertilizer. The contribution rate of fertilizer was significantly improved by combined application of bio-fertilizer with chemical fertilizer. The content of nitrate in stem and leaf decreased with decrease in chemical fertilizer usage. Additionally, the contents of soluble protein, soluble sugar, and vitamin C increased with applying biological organic fertilizer. Therefore, the 80% of conventional chemical fertilizer with 400 kg · $667m^{-2}$ bio-organic fertilizer progress of photosynthetic capacity, improved yield and quality in asparagus lettuce, which was a good fertilization mode to realize the rational allocation of fertilizer resources.

Keywords: asparagus lettuce; reduce fertilizer application; bio-organic fertilizer; growth; quality; yield; fertilizer contribution rate

莴笋(*Lactuca sativa* var. *Angustana*)是一种营养丰富、含有多种维生素、在我国种植比较普遍的短季节蔬菜[1]。莴笋叶可食用，但主要食用部分是肉质茎。肥料在作物生产中起着关键作用，合理施用化肥是作物在生产中获得较高产量的重要措施。农民为追求高产，化肥用量大幅增加，有机肥施用减少，造成蔬菜品质下降和环境污染，已成为蔬菜生产中普遍存在的问题[2-3]。合理减少化肥施用量，配施适宜的生物有机肥，是提高肥料利用率和发展可持续农业的必要选择。

减少化肥、配施有机肥在经济上是可行的，也是发展可持续农业的环保方法[4]。长期施用生物有机肥能增加土壤有机质含量，提高土壤肥力和作物产量[5]。施用有机肥可以改善有机碳的固存，并保持其在土壤中的稳定性，而化肥增加的有机碳稳定性较低[6]。Huang 等[7]研究发现，生物有机肥通过改善土壤理化性质和土壤微生物群落的组成，从而有效地抑制了黄瓜枯萎病的发生。张云伟等[8]研究发现，化肥减量配施生物有机肥，增加了根际土壤中微生物的数量，与常规施肥相比，烟草产量增加了 17.1%。Wu 等[9]在辣椒上的研究表明，施用生物有机肥可以促进辣椒生长，增加产量。徐明岗等[10]通过长期田间定位试验证明有机肥化肥配施能培肥土壤，提高水稻产量和肥料利用率。Shukla 等[11]研究表明，生物肥和化肥配施能显著提高鹰嘴豆的产量。盖霞普等[12]认为，在施用化肥的基础上增施有机肥，在提高产量的同时也会增加氮素淋失的风险。生物肥能显著提高黄瓜植株叶片叶绿素含量和光合能力，同时增强植株根系活力及养分吸收能力[13]。张恩平等[14]研究发现，氮磷钾肥配施有机肥能提高土壤酶活性，改善番茄品质。以往研究大多关注化肥与定量生物有机肥组合对作物生长的影响，但不同施肥特别是不同水平生物有机肥与化肥减量配施对蔬菜生长和产量的影响报道较少。本次试验选择在甘肃省武山县洛门镇蔬菜种植区，研究化肥减量并配施不同水平的生物有机肥对莴笋生长生理、光合作用、品质和产量的影响，旨在研究分析部分生物有机肥替代化肥对莴笋生长的影响机理，筛选出适宜试验区莴笋生产的生物有机肥替代量，为当地莴笋的高效优质和可持续发展提供科学合理的施肥方案和理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2017 年 12 月在甘肃省天水市武山县洛门镇王家庄村一农户的责任田内进行，塑料大棚长 42.5 m，宽 9.5 m，面积 406 m^2，土壤类型为沙壤土。试验田地势平坦，肥力中等均匀，灌溉方便，前茬为蒜苗。试验点地处甘肃省东南部，属温带大陆性半湿润季风气候，位于东经 105°4′25″，北纬 34°35′10″，平均海拔为 1 415 m。年平均气温 9.95℃，年均降水量 570 mm，年蒸发量 1 500 mm，无霜期 175 d。

试验前耕层 0~20 cm 土层土壤理化性状：有机

质 15.73 g · kg^{-1}，碱解氮 85.63 mg · kg^{-1}，速效磷 91.60 mg · kg^{-1}，速效钾 139.67 mg · kg^{-1}，电导率 426.85 μs · cm^{-1}。

1.2 供试材料

供试蔬菜是尖叶莴笋，供试生物有机肥为“绿能瑞奇”精制活性有机肥（有效活菌数≥0.2×10^9 · g^{-1}，N 2.88%，P_2O_5 1.28%，K_2O 1.80%，有机质≥50%，腐植酸≥25%）；化肥为尿素（N46%）、过磷酸钙（$P_2O_5$16%）、硫酸钾（K_2O 52%）。

1.3 试验设计

莴笋于 2017 年 12 月 20 日播种，采用一垄双行垄面覆膜栽培，垄宽 50 cm，沟宽 30 cm，株距 35 cm，生物有机肥作为底肥一次性施入，化肥分三次追施，追肥采用沟施覆土方式，每次施肥后灌水，田间管理与当地种植方式相同，且严格控制一致。经过调研，考虑作物需肥规律，兼顾肥料利用率，在当地农户普通化肥常规施肥的基础上，化肥施肥总量较常规施肥减量 20%（氮、磷、钾分别减施 17%、18%和 25.5%）和 30%（氮、磷、钾分别减施 30%、26%和 35%）。本试验共设 6 个处理：不施肥（CK1）、常规施肥（CK2）、80%常规施肥+200 kg · 667m^{-2}生物有机肥（T1）、80%常规施肥+400 kg · 667m^{-2}生物有机肥（T2）、70%常规施肥+400 kg · 667m^{-2}生物有机肥（T3）、70%常规施肥+200 kg · 667m^{-2}生物有机肥（T4）。试验采用随机区组设计，3 次重复，小区面积为 22 m^2，各处理施肥量见表 1。

表 1 试验各处理的施肥量

Table 1 The amount of fertilization of different treatments in the experiment

处理 Treatment	生物有机肥/(kg · 667m^{-2}) Bio-fertilizer application	化肥/% Chemical fertilizer level	N /(kg · 667m^{-2})	P_2O_5 /(kg · 667m^{-2})	K_2O /(kg · 667m^{-2})
CK1	0	0	0	0	0
CK2	0	100	51.50	42.30	42.30
T1	200	80	42.70	34.70	31.50
T2	400	80	42.70	34.70	31.50
T3	400	70	36.10	31.30	27.50
T4	200	70	36.10	31.30	27.50

1.4 测定项目与方法

1.4.1 *叶片光合作用的测定* 莴笋莲座期每小区随机选取 3 株，于晴天上午 9：00-11：00，采用 CIRAS-2 型便携式光合仪（英国 PP-System 公司生产）测定莴笋植株心叶下第 4 片完全叶的光合特性：净光合速率（*Pn*）、气孔导度（*Gs*）、胞间 CO_2浓度（*Ci*）及蒸腾速率（*Tr*）。光合色素含量（叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素）用 80%丙酮提取，TU-1900 型分光光度计比色。

1.4.2 *生长性状与根系活力的测定* 成熟期每小区随机选取 3 株莴笋，用卷尺测定植株株高（茎基部到生长点的高度，cm）、茎长（茎基部到茎顶端生长点的高度，cm）、根长（主根长度，cm），用游标卡尺测定最大部茎粗（茎基部至第一片真叶叶痕节间中部的直径，cm）、顶端茎粗（茎顶端生长点往下 2 cm 处的直径，cm）、根粗（根基部直径，cm）。采用红四氮唑（TTC）法测定根系活力[15]。

1.4.3 *产量和营养品质的测定* 成熟期按小区进行产量测定。成熟期每小区随机选取 3 株莴笋测定其茎、叶各项品质指标。可溶性蛋白含量用考马斯-G250 染色法测定；可溶性糖含量用蒽酮比色法测定；硝酸盐含量用水杨酸-硫酸法测定；维生素 C 含量用 2，6-二氯酚靛酚比色法测定[16]。

1.4.4 *计算方法*[17-18] 肥料贡献率（FCR）是肥料对作物产量的贡献率，是把不施肥处理（CK1）的产量视为地力对产量的贡献，以其为基准进行计算反映投入肥料生产能力的指标。

肥料贡献率 =（施肥处理产量-不施肥处理产量）/施肥处理产量×100%

增产率 =（施肥产量-对照产量）/对照产量×100%

1.5 数据处理

数据处理和作图采用 Microsoft Excel 2010，统计分析采用 SPSS 17.0，并采用 Duncan 法检验处理间显著水平（$P<0.05$）。

2 结果与分析

2.1 生物有机肥部分替代化肥对莴笋生长的影响

生物有机肥部分替代化肥处理的株高较 CK2 处理均有所提高（表 2），且 T2、T3、T4 显著（$P<0.05$）高于 CK2，其中 T2 最高，与 CK2 相比提高了 4.56%。在相同的化肥施用量下，增施 400 kg · 667m^{-2}生物有机肥的处理株高均高于增施 200 kg · 667m^{-2}的处理。

由表 2 可知，各施肥处理中 CK2 茎长最短，为 43.77 cm，T1 和 T2 处理莴笋茎长最长，显著高于 CK2 处理。在相同生物有机肥施用量下，化肥减量

20%的处理茎长均高于减量 30%的处理。

各处理最大部茎粗和顶端茎粗分别以 T2 处理和 T1 处理最高，较 CK2 处理分别提高了 7.88%和 14.98%。通过对最大部茎粗和顶端茎粗的综合评价，得出各处理莴笋茎粗表现为 T2>T1>T3>T4>CK2>CK1。

从表 2 中看出，增施生物有机肥的各处理根长较 CK2 处理均显著提高，增加了 6.05%~15.55%。各施肥处理的根粗以 T2 处理最大，较 CK2 处理增加了 7.12%。生物有机肥施用量相同时，化肥减施 20%的处理根粗均显著高于化肥减施 30%的处理。

表 2　不同施肥处理对莴笋生长的影响/cm

Table 2　Effects of different fertilization treatments on the growth characteristics of asparagus lettuce

处理 Treatment	株高 Plant height	茎长 Stem height	最大部茎粗 Maximum stem diameter	顶端茎粗 Apical stem diameter	根长 Root height	根粗 Root diameter
CK1	60.83±1.44d	41.00±1.47d	5.37±1.11d	2.58±0.42d	14.47±0.54d	3.89±0.31bc
CK2	62.77±0.37c	43.77±1.05cd	5.84±0.87c	2.67±0.20cd	16.53±0.48c	3.79±0.57c
T1	63.63±0.42bc	49.40±1.04a	5.85±0.80c	3.07±0.25a	19.10±0.08a	3.98±0.36ab
T2	65.63±0.19a	50.67±0.60a	6.30±0.32a	3.05±0.79a	18.37±0.17ab	4.06±0.32a
T3	64.77±0.73ab	46.13±1.65bc	6.08±1.41b	2.68±0.50c	18.93±0.39a	3.81±0.76c
T4	64.60±0.79ab	47.77±1.82ab	5.78±0.80c	2.83±0.29b	17.53±0.48b	3.67±0.81d

注:不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different letters are significantly different among treatments at P<0.05. The same below.

2.2　生物有机肥部分替代化肥对莴笋生理性状的影响

2.2.1　根系活力　图 1 为不同施肥处理下莴笋的根系活力。增施生物有机肥的各处理根系活力较 CK2 处理均有所提高，且 T1、T2、T3 处理与 CK2 差异显著。同一化肥施用量处理下，生物有机肥施用量为 400 kg · 667m^{-2}的处理较施用量为 200 kg · 667m^{-2}的处理根系活力强，差异未达显著水平。在相同的生物有机肥施用量下，化肥减施 20%的处理根系活力较减施 30%的处理强，且差异显著。

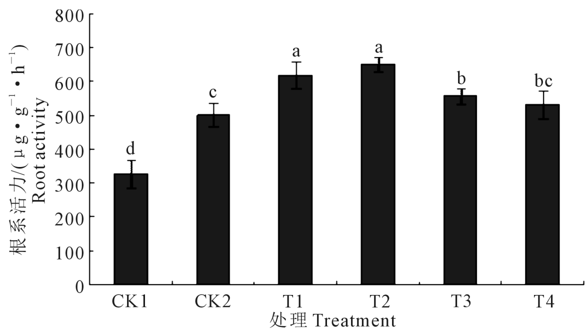

图 1　不同施肥处理对莴笋根系活力的影响

Fig.1　Effects of different fertilization treatments on root activity of asparagus lettuce

2.2.2　光合色素含量　不同施肥水平下(表 3)，叶绿素总量随着化肥施用量的减少先增加后降低，以 T1 和 T2 处理最高。在相同化肥施用量下，生物有机肥增施 400 kg · 667m^{-2}的处理叶绿素总量皆高于增施 200 kg · 667m^{-2}的处理，但差异未达显著水平。

由表 3 可知，各施肥处理叶绿素 a 的含量均显著高于不施肥处理。叶绿素 a 含量变化和叶绿素总量变化趋势基本一致。叶绿素 b 的含量以 T2 处理为最高，达到 0.659 mg · g^{-1}，比 CK2 增加了 1.38%。增施生物有机肥的量相同时，化肥减量 20%的处理叶绿 b 的含量皆高于减量 30%的处理，但差异不显著。在相同的化肥施用水平下，增施生物有机肥的量为 400 kg · 667m^{-2}时叶绿素 b 的含量均高于施用量为 200 kg · 667m^{-2}的处理，但差异不显著。

如表 3 所示，各处理类胡萝卜素含量以 T4 为最高，与 CK2 相比达到显著水平。T1、T2、T3 处理类胡萝卜素含量相差不大，且处理间差异不显著。

表 3　不同施肥处理对莴笋叶片光合色素含量的影响/(mg · g^{-1})

Table 3　Effects of different fertilization treatments on photosynthetic pigment content in asparagus lettuce leaves

处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	叶绿素总量 Chlorophyll a+b	类胡萝卜素 Carotenoid
CK1	1.761±0.046c	0.582±0.048b	2.338±0.077c	0.404±0.029b
CK2	2.051±0.069ab	0.650±0.034ab	2.696±0.103ab	0.409±0.026b
T1	2.084±0.077a	0.648±0.027ab	2.728±0.095a	0.420±0.007ab
T2	2.089±0.051a	0.659±0.030a	2.743±0.067a	0.433±0.014ab
T3	1.989±0.007ab	0.616±0.005ab	2.600±0.005ab	0.419±0.012ab
T4	1.942±0.037b	0.596±0.012ab	2.532±0.034b	0.456±0.013a

2.3　生物有机肥部分替代化肥对莴笋叶片光合参数的影响

由表 4 可知，各施肥处理的净光合速率(Pn)均显著高于 CK1。在同一化肥施用水平下，生物有

机肥用量为 400 kg · 667m^{-2}的处理 *Pn* 均高于用量为 200 kg · 667m^{-2}的处理;增施生物有机肥的量相同时，随化肥施用量的减少，莴笋叶片 *Pn* 降低。各处理间气孔导度(*Gs*)与 *Pn* 的变化趋势相似，T2 处理的 *Gs* 值显著高于其他处理，较 CK2 增加 45.64%。增施生物有机肥的各处理蒸腾速率(*Tr*)较 CK2 处理均有所提高，且 T2 显著高于 CK2，增加 18.39%。施用生物有机肥的处理胞间 CO_2浓度(*Ci*)较 CK2 均有所降低，CK2 的 *Ci* 显著高于其他处理。

2.4 生物有机肥部分替代化肥对莴笋产量的影响

由表 5 可知，各施肥处理的产量均显著高于不施肥处理(CK1)，施用生物有机肥的处理产量分别比单施化肥的处理(CK2)增产 4.76%、15.31%、11.06%和 4.11%，其中 T2 产量最高，达 8 277.00 kg · 667m^{-2}。T1 与 T4 相比、T2 与 T3 相比均无显著差异。在相同化肥施用水平下，增施生物有机肥的量为 400 kg · 667m^{-2}的处理增产率显著高于施用量为 200 kg · 667m^{-2}的处理。肥料贡献率以 T2 最高，T3 次之，CK2 最小。T1 处理与 T4 处理的肥料贡献率无显著差异，但显著高于 CK2 处理。

2.5 生物有机肥部分替代化肥对莴笋品质的影响

与 CK2 相比，减施化肥的处理莴笋茎、叶中硝酸盐含量均显著降低(表 6)，且随着化肥施用量的减少而降低。茎中 T3 处理的硝酸盐含量显著低于 T2 处理，叶中 T4 处理的硝酸盐含量显著低于 T1 处理。同一处理下莴笋茎中硝酸盐含量均高于叶。

在同一处理下，莴笋茎中维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白的含量均低于叶。茎、叶中维生素 C 均以 T2 处理最高，T1 次之，且两者之间差异显著，并显著高于 CK2。生物有机肥施用量相同时，化肥减量 20%的处理维生素 C 含量皆高于减量 30%的处理，且差异显著。相同化肥施肥水平下，生物有机肥施用量为 400 kg · 667m^{-2}的处理维生素 C 的含量均显著高于用量为 200 kg · 667m^{-2}的处理。

表 4 不同施肥处理对莴笋叶片光合参数的影响

Table 4 Effects of different fertilization treatments on photosynthetic parameters of asparagus lettuce leaves

处理 Treatment	净光合速率 *Pn* Net photosynthetic rate /(μmol · m^{-2} · s^{-1})	气孔导度 *Gs* Stomatal conductance /(mmol · m^{-2} · s^{-1})	蒸腾速率 *Tr* Transpiration rate /(mmol · m^{-2} · s^{-1})	胞间 CO_2浓度 *Ci* Intercellular CO_2 concentration /(μmol · mol^{-1})
CK1	13.17±0.90d	272.67±12.26d	3.53±0.33c	217.33±15.17c
CK2	17.50±0.22bc	386.33±21.85c	4.73±0.12b	298.67±15.97a
T1	18.40±0.22ab	495.00±39.91b	5.27±0.45ab	233.00±13.74bc
T2	19.67±0.52a	562.67±12.68a	5.60±0.54a	224.67±11.44bc
T3	17.27±0.86bc	453.00±17.38b	4.93±0.12ab	241.33±11.15bc
T4	16.40±0.59c	449.67±35.12b	4.83±0.12ab	255.67±16.42b

表 5 不同施肥处理对莴笋产量和肥料贡献率的影响

Table 5 Effects of different fertilization treatments on yield and fertilizer contribution rate of asparagus lettuce

处理 Treatment	产量 Yield /(kg · 667m^{-2})	增产率 Ratio of yield increase/%	肥料贡献率 Fertilizer contribution rate/%
CK1	6036.45d	-	-
CK2	7178.00c	-	15.90d
T1	7520.00bc	4.76c	19.73c
T2	8277.00a	15.31a	27.07a
T3	7972.00ab	11.06b	24.28b
T4	7473.00bc	4.11c	19.22c

表 6 不同施肥处理对莴笋茎叶品质的影响

Table 6 Effects of different fertilization treatments on stem and leaf quality of asparagus lettuce

处理 Treatment		硝酸盐 Nitrate/(mg · kg^{-1})	维生素 C Vitamin C/(mg · g^{-1})	可溶性糖 Soluble sugar/%	可溶性蛋白 Soluble protein/(mg · g^{-1})
茎 Stem	CK1	278.3±12.8d	0.186±0.008e	1.41±0.05d	0.890±0.022c
	CK2	492.3±13.9a	0.199±0.010e	1.90±0.03c	1.088±0.034bc
	T1	414.2±12.5b	0.331±0.010b	2.18±0.04b	1.349±0.016ab
	T2	398.9±13.8b	0.395±0.007a	2.70±0.05a	1.511±0.019a
	T3	361.7±17.6c	0.259±0.009c	2.08±0.05b	1.190±0.022bc
	T4	387.0±13.5bc	0.209±0.004d	1.89±0.02c	1.158±0.014bc
叶 Leaf	CK1	226.4±12.5d	0.326±0.007e	2.17±0.03c	1.586±0.026c
	CK2	397.9±13.9a	0.433±0.013d	2.32±0.04bc	2.014±0.010ab
	T1	358.4±11.1b	0.635±0.010b	2.76±0.06ab	2.122±0.024ab
	T2	336.5±13.5bc	0.680±0.008a	2.95±0.07a	2.218±0.040a
	T3	314.5±11.5c	0.623±0.012b	2.74±0.02ab	2.054±0.020ab
	T4	328.8±13.1c	0.568±0.011c	2.46±0.07bc	1.907±0.044b

不同施肥处理下，莴笋茎、叶中的可溶性糖含量均以 T2 处理最高，分别较 CK2 同部位提高了 41.91%和 27.34%，且差异显著。莴笋茎中 T1 与 T2、T4 与 T3 相比，后者可溶性糖含量均高于前者，且差异显著。相同生物有机肥施用量下，茎中可溶性糖含量表现为 T1>T4，T2>T3，且差异显著。叶中可溶性糖含量和茎中表现趋势相似，但差异不显著。

莴笋茎中可溶性蛋白含量以 T2 最高，显著高于 CK2。4 个增施生物有机肥的处理可溶性蛋白含量较 CK2 均有所提高，分别提高了 23.99%、38.88%、9.38%和 6.43%。莴笋叶中以 T2 处理可溶性蛋白含量最高，T1 次之。

2.6 生物有机肥部分替代化肥对莴笋经济效益的影响

由表 7 可知，不同施肥处理的莴笋产值、肥料成本投入和经济效益有差异。以试验进行当年当地的莴笋价格为标准，计算莴笋单位面积的经济效益。配施生物有机肥的各处理莴笋经济效益较 CK2 处理明显增加，其中 T2 处理经济效益最优，净收益为 19 570.73 元 · $667m^{-2}$，比 CK2 增收 2 040.00 元 · $667m^{-2}$，提高 11.64%。

表 7　不同施肥处理对莴笋经济效益的影响/(元 · $667m^{-2}$)

Table 7　Effects of different fertilization treatments on economic benefit of asparagus lettuce/(yuan · $667m^{-2}$)

处理 Treatment	产值 Output	肥料投入 Fertilizer input	经济效益 Economic benefit
CK1	15091.12	0	15091.12
CK2	17945.00	414.28	17530.73
T1	18800.00	721.78	18078.23
T2	20692.50	1121.78	19570.73
T3	19930.00	1078.73	18851.28
T4	18682.50	678.73	18003.78

注:N、P_2O_5 和 K_2O 的价格分别为 2.50、0.75 元 · kg^{-1} 和 6.00 元 · kg^{-1};生物有机肥的价格为 2.00 元 · kg^{-1};莴笋价格为 2.50 元 · kg^{-1}。

Note: The prices of N, P_2O_5, and K_2O were 2.50, 0.75 yuan · kg^{-1} and 6.00 yuan · kg^{-1}, respectively; Bio-organic fertilizer was 2.00 yuan · kg^{-1}; The prices of asparagus lettuce was 2.50 yuan · kg^{-1}.

3 讨 论

3.1 生物有机肥部分替代化肥对莴笋生长与产量的影响

农民为提高作物产量过量施用化肥，而长期偏施化肥会导致土壤有机质含量减少、土壤板结、作物品质下降、环境污染和肥料利用率降低等问题，不能为作物创造有利的生长环境[19-21]。生物有机肥的施入可增加土壤中有机质含量，改变土壤理化性状，培肥土壤，有利于作物根系的伸展和对养分的吸收[22-23]。

刘星等[24]、Yuan 等[25]在马铃薯、烟草上的研究结果表明，生物有机肥能促进作物生长，增加植株叶片数量。本研究发现，化肥减量 20%并配施生物有机肥使莴笋各项生长指标均有不同程度的增加，说明生物有机肥替代 20%的化肥能提供充足的养分以促进莴笋植株的生长。但化肥减量 30%+200 kg · $667m^{-2}$生物有机肥降低了莴笋最大部茎粗和根粗，这与前人在甘蓝[26]上的研究结果一致。可能是因为化肥减量较多加之生物有机肥替代量较少的原因，对其生长有所影响。

张雪艳等[27]通过给基质添加生物有机肥发现，添加适量的生物有机肥能显著促进黄瓜根系的生长。本试验中，增施生物有机肥后莴笋的根长平均提高 11.81%，根系活力平均增加 17.45%，主要是因为增施生物有机肥，在很大程度上改善了根系周围的环境，从而提高了植株根系活力[28]。说明生物有机肥的增施能够促进莴笋植株根系扩大，随着土壤有效养分的增加进而促进了根系的生长和根系活力的提高。

肥料是作物增产的物质保证[29]，本试验结果表明，施肥处理可显著提高莴笋产量，较不施肥处理增产 18.91%~37.12%。增施生物有机肥增产率在 4.11%~15.31%之间，增产效果显著。张钧恒等[30]、Wei 等[31]的研究结果与此一致。增施生物有机肥虽然使成本投入提高，但产量显著高于常规施肥，因此产出能力提升，收益增加。T2 产量显著高于 T1，说明莴笋产量随着生物有机肥施用量的增加而提升。T3 与 T4 差异不显著，可能是化肥减量较多的缘故。T1 与 T4，T2 与 T3 均无显著差异。说明化肥减量 20%和 30%对产量无明显影响，增施生物有机肥有利于提高莴笋产量。引起这一结果的原因可能是生物有机肥中含有的活菌和腐殖酸能有效改善根际土壤生态环境，促进土壤中微生物的繁殖，提高根系活力，促进根系发育，进而提高养分的吸收利用。

本试验中,减施化肥并增施生物有机肥显著提高了肥料贡献率。说明常规施肥供大于求，部分养分不能被植株吸收利用，使肥料贡献率降低，造成资源的浪费，甚至成为污染环境的危险因素。宇万太等[32]的研究结果也与本试验结果一致。

3.2 生物有机肥部分替代化肥对莴笋光合特性及品质的影响

植株产量的高低取决于光合作用的效率，而植物的光合作用又离不开光合色素的参与[33]。本试验中，增施生物有机肥通过提高光合色素含量，可提高功能叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率，降低胞间 CO_2浓度，从而促进莴笋生长期光合产物

的积累。Agegnehu 等[34]研究结果显示，生物有机肥配施对花生叶片叶绿素含量的增加有促进作用。叶片中光合色素含量的升高，就意味着可以将更多的光能转为化学能，进而提高植株光合作用的效率，说明生物有机肥与化肥配施在一定程度上能提高植株的光合效率[35]。本试验中，增施生物有机肥后，莴笋叶片气孔导度较单施化肥增高，400 kg · $667m^{-2}$生物有机肥替代20%的化肥植株光合速率显著提高。本试验结果与许小伟等[36]在花生上的结论大致相同。说明化肥减施并配施生物有机肥对光合作用有促进效果，光合速率和气孔开度升高，其原因可能是增施生物有机肥有利于保持较高的气孔开度，CO_2 易进入叶肉细胞，保证了充足的 CO_2 供应量。化肥减量30%时，莴笋叶片的光合速率有所下降,说明化肥减量过多时会造成植株叶片光合速率的降低，可能原因是钾肥减量过多，因缺钾导致叶片光合速率下降[37]。本试验中，光合速率和气孔导度的变化与胞间 CO_2 浓度的变化趋势相反，说明莴笋光合速率下降并非由气孔导度下降导致 CO_2 的供应量减少所致，而是由非气孔因素阻碍了 CO_2 的利用[38]。

硝酸盐含量是蔬菜安全卫生标准的重要评价指标之一，本试验所有处理中莴笋硝酸盐含量处于226.360~492.325 mg · kg^{-1}之间(表6)。当化肥施用过多时，植物奢侈吸收，硝酸盐在植株体内积累，造成硝酸盐含量超标。本试验结果表明，莴笋茎、叶中硝酸盐含量随着化肥施用量的减少而降低，说明化肥减施可有效降低莴笋可食用部分中硝酸盐的积累，提高莴笋食用安全性。这与李杰等[39]的研究结果一致。施用生物有机肥可以增加莴笋可食用部分中的维生素C的含量。施肥量过多或过少都会降低莴笋茎、叶中可溶性糖的含量[40]，400 kg · $667m^{-2}$生物有机肥替代20%的化肥时茎、叶中可溶性糖含量最高，说明生物有机肥替代适宜的化肥可显著提高可食用部分的可溶性糖含量，改善风味品质。T4处理可溶性糖和可溶性蛋白含量有所降低，可能是因为化肥减量过多，同时配施的生物有机肥也较少的原因。说明生物有机肥部分替代化肥可以提高莴笋可食用部分中维生素C、可溶性糖和可溶性蛋白的含量，从而提高莴笋的品质。冉烈[41]等的研究表明，适当的钾肥水平可以改善莴笋品质。本试验中，对莴笋茎、叶营养品质的研究表明，莴笋叶所含可溶性糖、可溶性蛋白和维生素C均高于茎,而硝酸盐的含量低于茎，说明叶的营养品质优于茎，应提倡食用莴笋叶，以充分发挥茎、叶的营养价值。

4 结　论

400 kg · $667m^{-2}$生物有机肥替代20%的化肥(T2)可显著促进莴笋植株的生长，增强叶片光合速率，增加产量，并改善可食用部分的营养品质，同时还可降低莴笋茎、叶中硝酸盐的含量。所以，化肥减施20%并配施400 kg · $667m^{-2}$生物有机肥，实现了肥料资源的合理配置和利用,可作为莴笋种植中较为科学经济的施肥方式。

参 考 文 献:

[1] 狄彩霞，李会合，王正银，等.不同肥料组合对莴笋产量和品质的影响[J].土壤学报，2005，42(4):652-659.

[2] 高峻岭，宋朝玉，李祥云，等.不同有机肥配比对蔬菜产量和品质及土壤肥力的影响[J].中国土壤与肥料，2008,(1):48-51.

[3] 沈德龙，曹凤明，李力.我国生物有机肥的发展现状及展望[J].中国土壤与肥料，2007，23(6):1-5.

[4] Ning C C, Gao P D, Wang B Q, et al. Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content[J].Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(8):1819-1831.

[5] 王立刚，李维炯，邱建军，等.生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究[J].中国土壤与肥料，2004,(5):12-16.

[6] Fonte S J, Yeboah E, Ofori P, et al. Fertilizer and residue quality effects on organic matter stabilization in soil aggregates[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(3):961-966.

[7] Huang N, Wang W W, Yao Y L, et al. The influence of different concentrations of bio-organic fertilizer on cucumber fusarium wilt and soil microflora alterations[J]. PLoS One, 2017, 12(2):e0171490.

[8] 张云伟，徐智，汤利，等.不同有机肥对烤烟根际土壤微生物的影响[J].应用生态学报，2013，24(9):2551-2556.

[9] Wu Y, Zhao C, Farmer J, et al. Effects of bio-organic fertilizer on pepper growth and fusarium, wilt biocontrol[J].Scientia Horticulturae, 2015, 193:114-120.

[10] 徐明岗，李冬初，李菊梅，等.化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J].中国农业科学，2008，41(10):3133-3139.

[11] Shukla M, Patel R H, Verma R, et al. Effect of bio-organics and chemical fertilizers on growth and yield of chickpea(*Cicer arietinum* L.) under middle gujarat conditions[J]. International Journal of Plant Research, 2013, 26(1):183-187.

[12] 盖霞普，刘宏斌，翟丽梅，等.长期增施有机肥/秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响[J].中国农业科学，2018，51(12):2336-2347.

[13] 曹丹，宗良纲，肖峻，等.生物肥对有机黄瓜生长及土壤生物学特性的影响[J].应用生态学报，2010，21(10):2587-2592.

[14] 张恩平，谭福雷，王月，等.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[J].园艺学报，2015，42(10):2059-2067.

[15] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社，2000.

[16] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社，2005.

[17] 王伟妮，鲁剑巍，李银水，等.当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究[J].中国农业科学，2010，43(19):3997-4007.

[18] 区惠平，周柳强，黄金生，等.长期不同施肥对甘蔗产量稳定性、肥料贡献率及养分流失的影响[J].中国农业科学，2018，51(10):1931-1939.

[19] Paulson N D, Babcock B A. Readdressing the Fertilizer Problem[J]. Journal of Agricultural & Resource Economics, 2010, 35(3):

368-384.

[20] Gao Q, Li C L, Feng G Z, et al. Understanding yield response to nitrogen to achieve high yield and high nitrogen use efficiency in rainfed corn[J]. Agronomy Journal, 2012, 104(1):165.

[21] 汪雅谷, 张四荣.无污染蔬菜生产的理论与实践[M]. 北京:中国农业出版社, 2001.

[22] Yan X Y, Gong W. The role of chemical and organic fertilizers on yield, yield variability and carbon sequestration-results of a 19-year experiment[J]. Plant & Soil, 2010, 331(1/2):471-480.

[23] 温延臣, 张曰东, 袁 亮, 等.商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响[J].中国农业科学, 2018, 51(11):2136-2142.

[24] 刘 星, 张书乐, 刘国锋, 等.土壤熏蒸-微生物有机肥联用对连作马铃薯生长和土壤生化性质的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(3):122-133.

[25] Yuan S F, Wang L L, Wu K, et al. Evaluation of bacillus-fortified organic fertilizer for controlling tobacco bacterial wilt in greenhouse and field experiments[J].Applied Soil Ecology, 2014, 75:86-94.

[26] 牛振明, 张国斌, 刘赵帆, 等.生物肥部分替代化肥对甘蓝(*Brassica oleracea*)养分吸收、光合作用以及品质的影响[J].中国沙漠, 2014, 34(2):464-471.

[27] 张雪艳, 田 蕾, 高艳明, 等.生物有机肥对黄瓜幼苗生长、基质环境以及幼苗根系特征的影响[J].农业工程学报, 2013, 29(1):117-125.

[28] 乔天长, 赵先龙, 张丽芳, 等.玉米秸秆腐解液对苗期根际土壤酶活性及根系活力的影响[J].核农学报, 2015, 29(2):383-390.

[29] 黄倩楠, 王朝辉, 黄婷苗, 等.中国主要麦区农户小麦氮磷钾养分需求与产量的关系[J].中国农业科学, 2018, 51(14):2722-2734.

[30] 张钧恒, 马乐乐, 李建明.全有机营养肥水耦合对番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J].中国农业科学, 2018, 51(14):2788-2798.

[31] Wei W, Yan Y, Cao J, et al. Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil organic matter: An integrated analysis of long-term experiments [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2016, 225:86-92.

[32] 宇万太, 姜子绍, 周桦, 等.不同施肥制度对作物产量及肥料贡献率的影响[J].中国生态农业学报, 2007, 15(6):54-58.

[33] 闻婧, 杨其长, 魏灵玲, 等.不同红蓝LED组合光源对叶用莴苣光合特性和品质的影响及节能评价[J].园艺学报, 2011, 38(4):761-769.

[34] Agegnehu G, Bass A M, Nelson P N,et al.Biochar and biochar-compost as soil amendments:Effects on peanut yield, soil properties and greenhouse gas emissions in tropical North Queensland, Australia[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2015, 213:72-85.

[35] Xu C Y, Hosseinibai S, Hao Y, et al. Effect of biochar amendment on yield and photosynthesis of peanut on two types of soils[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(8):6112-6125.

[36] 许小伟, 樊剑波, 陈 晏, 等.有机无机肥配施对红壤旱地花生生理特性、产量及品质的影响[J].土壤学报, 2015, 52(1):174-182.

[37] 陆志峰, 任涛, 鲁剑巍, 等.缺钾油菜叶片光合速率下降的主导因子及其机理[J].植物营养与肥料学报, 2016, 22(1):122-131.

[38] Winter K, Schramm M J. Analysis of stomatal and nonstomatal components in the environmental control of CO_2 exchange in leaves of welwitschia mirabilis[J]. Plant Physiology, 1986, 82(1):173-178.

[39] 李 杰, 贾豪语, 颉建明, 等.生物肥部分替代化肥对花椰菜产量、品质、光合特性及肥料利用率的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(1):47-55.

[40] 邢英英, 张富仓, 张 燕, 等.滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J].中国农业科学, 2015, 48(4):713-726.

[41] 冉 烈, 李会合.不同钾肥用量对莴笋产量和品质的效应[J].中国农学通报, 2010, 26(5):142-145.

(上接第 42 页)

[8] Lu J. Correlation of the mechanical properties of seed coating films and dust-off,flowability,and plant ability tests [J]. ASTM International, 2016,36:183-201.

[9] Su L Q, Li J G, Xue H, et al. Super absorbent polymer seed coatings promote seed germination and seedling growth of Caragana korshinskii in drought [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE B, 2017, 18(8):696-706.

[10] Kaufman G. Seed coating: a tool for stand establishment; a stimulus to seed quality [J]. Horttechnology, 1991, 1(1):98-102.

[11] Ehsanfar S, Modarres-Sanavy S A. Crop protection by seed coating [J]. Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences, 2005, 70(3):225-229.

[12] Gevrek M N, Atasoy G D, Yigit A. Growth and yield response of rice (*Oryza sativa*) to different seed coating agents [J]. International Journal of Agriculture & Biology, 2012,14(5):826-830.

[13] Zeng D F, Luo X R, Tu R. Application of bioactive coatings based on chitosan for soybean seed protection [J]. International Journal of Carbohydrate Chemistry, 2012,(2):1-5.

[14] Zeng D F, Luo X R. Physiological effects of chitosan coating on wheat growth and activities of protective enzyme with drought tolerance [J]. Open Journal of Soil Science, 2012,2(3):282-288.

[15] Yang D B, Wang N, Yan X J, et al. Microencapsulation of seed-coating tebuconazole and its effects on physiology and biochemistry of maize seedlings [J]. Colloids & Surfaces B Biointerfaces, 2014, 114(2):241-246.

[16] Xie W J, Zeng D F, Zhao H F, et al. Effect of trace elements in seed coating agent on peanut growth [J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(6):992-924, 936.

[17] Paul D, Chakrabarty S K, Dikshit H K, et al. Variation for hard seededness and related seed physical parameters in mung bean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] [J]. Indian Journal of Genetics and Plant Breeding, 2018, 78(3):333-341.

[18] 张鋆, 黄梦迪, 吴会琴, 等. 绿豆荚果发育及籽粒灌浆特性[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(4):16-23.

[19] 王宏燕, 刘书宇, 赵福华. 生物种衣剂对大豆发芽和苗期生长、光合作用及酶活性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2002,33(2):111-115.

[20] 许海涛, 孟丽, 杨正生. 种衣剂对玉米种子活力及生长发育的影响[J]. 农学学报, 2013, 3(5):12-14.

[21] 薛仁风, 陈剑, 赵阳, 等. 不同种植密度和种衣剂处理对小豆生长和生理特性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2015, 38(2):13-17.

[22] 张洪鹏, 张盼盼, 李冰, 等. 烯效唑对淹水胁迫下大豆叶片光合特性及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(5):611-618.

[23] 李春喜, 尚玉磊, 姜丽娜, 等. 不同植物生长调节剂对小麦衰老及产量构成的调节效应[J]. 西北植物学报, 2001,21(5):931-936.

[24] 杨文钰, 樊高琼, 任万君, 等. 烯效唑干拌种对小麦光合作用和 ^{14}C同化物分配的影响[J]. 作物学报, 2005,3(9):1173-1178.

[25] 刘睿, 周园园, 闫继辰, 等. 新型复合型生物种衣剂SN102田间防效研究[J]. 大豆科学, 2017, 36(3):435-440.