

生物有机肥与减量配施化肥对连作黄瓜养分利用率及产量的影响

李小萌¹, 陈效民¹, 曲成闯¹, 张志龙¹, 张俊², 黄春燕², 刘云梅²

(1.南京农业大学资源与环境科学学院,南京 210095;2.如皋市农业科学研究所,江苏 如皋 226500)

摘要: 为了探讨生物有机肥与减量配施化肥对连作黄瓜养分利用率和产量的影响,采用田间小区试验,以黄瓜为供试作物,共设 9 个处理(T1~T9),将 9 个处理分为 3 个处理组:生物有机肥添加量为 0 t/hm²的 CK 处理组(T1 减肥 0%,T2 减肥 10%,T3 减肥 20%);生物有机肥添加量为 10 t/hm²的 Y1 处理组(T4 减肥 0%,T5 减肥 10%,T6 减肥 20%);生物有机肥添加量为 20 t/hm²的 Y2 处理组(T7 减肥 0%,T8 减肥 10%,T9 减肥 20%)。结果表明:Y1 处理组和 Y2 处理组与 CK 处理组相比,黄瓜产量的提高范围分别为 1.48%~38.88%和 15.31%~50.91%,氮肥利用率提高 1.51~10.07 个百分点和 6.41~18.71 个百分点,磷肥利用率提高 2.07~5.38 个百分点和 5.67~8.90 个百分点,钾肥利用率的提高范围分别为 9.50~16.31 个百分点和 16.95~28.43 个百分点;在施用相同量的生物有机肥条件下,随着化肥施用量的减少,CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)黄瓜产量差异显著,Y1 组内的 T4 和 T5 与 T6 相比黄瓜产量差异明显,Y2 组内 T8 与 T9 相比黄瓜产量差异显著。在 9 个处理中,T8 黄瓜产量最高;Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)的氮肥利用率、磷肥利用率和钾肥利用率均呈上升趋势。研究结果可为提高养分利用率和减轻作物连作障碍提供科学依据。

关键词: 化肥减量;生物有机肥;连作黄瓜;产量;养分利用率

中图分类号: S154.4;S642.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0309-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.044

Effects of Bio-organic Fertilizer Combined with Reduced Fertilizer on Nutrient Utilization and Yield of Continuous Cropping Cucumber

LI Xiaomeng¹, CHEN Xiaomin¹, QU Chengchuang¹, ZHANG Zhilong¹,

ZHANG Jun², HUANG Chunyan², LIU Yunmei²

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural

University, Nanjing 210095; 2.Rugao Institute of Agricultural Sciences, Rugao, Jiangsu 226500)

Abstract: In order to explore the effects of bio-organic fertilizer combined with reduced fertilizer on nutrient utilization and yield of continuous cropping cucumber, a field plot experiment with nine treatments (T1~T9) was conducted, and cucumber was taken as the test crop. The nine treatments (T1~T9) were divided into three treatment groups, which were CK treatment group with 0 t/hm² bio-organic fertilizer addition (T1 reduced fertilizer 0%, T2 reduced fertilizer 10% and T3 reduced fertilizer 20%), Y1 treatment group with 10 t/hm² bio-organic fertilizer addition (T4 reduced fertilizer 0%, T5 reduced fertilizer 10% and T6 reduced fertilizer 20%) and Y2 treatment group with 20 t/hm² bio-organic fertilizer addition (T7 reduced fertilizer 0%, T8 reduced fertilizer 10% and T9 reduced fertilizer 20%). The results showed that compared with CK treatment, the cucumber yield of Y1 and Y2 treatment groups increased by 1.48%~38.88% and 15.31%~50.91%, respectively, the nitrogen utilization ratio of Y1 and Y2 treatment groups increased by 1.51%~10.07% and 6.41%~18.71%, the phosphorus utilization ratio of Y1 and Y2 treatment groups increased by 2.07%~5.38% and 5.67%~8.90%, and the potassium utilization ratio of Y1 and Y2 treatment groups increased by 9.50%~16.31% and 16.95%~28.43%, respectively. Under the condition of applying the same amount of bio-organic fertilizer, with the decreasing of chemical fertilizer application, the cucumber yield in

收稿日期: 2019-09-03

资助项目: 国家重点研发计划项目“耕地地力影响化肥养分利用的机制与调控”(2016YFD 0200305);土壤与农业可持续发展国家重点实验室项目(Y20160038);中国博士后基金项目(2016M591884)

第一作者: 李小萌(1996—),男,硕士研究生,主要从事水土资源利用研究。E-mail: 2018103071@njau.edu.cn

通信作者: 陈效民(1957—),男,教授,主要从事水土资源利用与保护研究。E-mail: xmchen@njau.edu.cn

CK treatments group (T1, T2 and T3) was significantly different. In Y1 group, the cucumber yield of T4 and T5 was significantly different from that of T6. In Y2 group, the cucumber yield of T8 was significantly different from that of T9. Among the nine treatments, T8 had the highest yield of cucumber, while the utilization rate of nitrogen, phosphorus and potassium of each treatment in Y1 (T4, T5 and T6) and Y2 group (T7, T8 and T9) all showed increase trends. The results could provide scientific basis for improving nutrient utilization rate and reducing crop continuous cropping obstacles.

Keywords: reduced fertilizer application; bio-organic fertilizer; continuous cropping cucumber; yield; nutrient utilization rate

长期连作和大量施用化肥会导致作物对养分的吸收利用受到抑制,造成严重的病虫害,从而影响作物的产量和品质^[1-2]。长期连作和过量施用化肥最终会降低作物的肥料利用率。肥料利用率是反映作物对施入土壤中肥料的回收效率^[3],作物养分利用率一直是我国肥料学与农业可持续发展研究的重要问题。受“高投入高产出”等传统观念的影响,农民为了获得作物高产,大量施用化学肥料,不合理甚至盲目过量施肥现象相当普遍,尤其在经济发达地区尤为突出。施肥过量是我国肥料利用效率较低的最主要原因^[3]。在我国部分地区和农田过量施肥导致主要粮食作物肥料利用效率下降,并带来严重的环境污染问题。因此,如何在减少化肥施用量的同时,又解决连作障碍问题,提高作物对养分的吸收利用,进而提高作物养分利用率成为迫切需要解决的问题。

近年来,有机肥替代部分化肥或与化肥配施成为研究的热点。有研究^[4]发现,将有机肥和化肥合理配施,不仅可以避免黄瓜遭受“肥害”,而且还有利于黄瓜植株吸收土壤中氮磷钾等养分,黄瓜植株中各种养分都有不同程度的增加,促进了黄瓜的生长。生物有机肥是一类可依靠微生物的生命活动及其代谢产物为作物提供营养物质和其他生理活性物质的微生物制品^[5],是微生物肥料和有机肥的有机统一体,故生物有机肥兼具微生物肥和有机肥的特点^[6]。现有研究^[7-9]表明,生物有机肥具有改善土壤物理性状和生物学特性,增强植物抗逆性,提高土壤养分利用率的效果。本文采用连作黄瓜大田试验,从生物有机肥添加量和化肥减少量 2 个维度来研究生物有机肥与减量配施化肥对连作黄瓜养分利用率和产量的影响,研究结果可为减少化肥施用、缓解黄瓜作物连作障碍和提高作物养分利用率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验地位于江苏省如皋市农业科学研究所推广示范基地(32°22′02.7″N,120°28′54.7″E),该地属于北亚热带季风气候区,四季分明,夏季高温多雨,冬季低温干燥。试验田土壤类型为典型的潮土,供试土壤基本

理化性状为:容重 1.37 g/cm³,总孔隙度 48.31%,pH 7.02,速效磷含量 65.38 mg/kg,速效钾含量 210.43 mg/kg,硝态氮含量 160.48 mg/kg,铵态氮含量 3.01 mg/kg。

供试生物有机肥为江阴市联业生物科技有限公司提供的“饕餮王”牌生物有机肥,由作物秸秆制作而成,总养分含量 8%(N+P₂O₅+K₂O),其中 N 含量 4.23%,P₂O₅ 含量 1.18%,K₂O 含量 2.59%,有机质含量 246.35 g/kg,有效活菌数为 2.00×10⁷ 个/g,其中细菌 1.60×10⁷ 个/g,真菌为 3.00×10⁶ 个/g,其他菌种 1.00×10⁶ 个/g。供试化肥为“金牌”复合肥料(N:P₂O₅:K₂O 为 15:15:15)。供试作物为黄瓜“博美 8 号”。

1.2 试验设计

1.2.1 试验小区 试验采用随机区组设计,其中设置 3 个减肥处理(减肥 0%、减肥 10%和减肥 20%),3 个生物有机肥添加量处理为(0,10,20 t/hm²),共 9 个处理(T1~T9),将 9 个处理分为 3 个处理组:施加生物有机肥 0 t/hm²的 CK 处理组(T1 减肥 0%、T2 减肥 10%和 T3 减肥 20%)、施加生物有机肥 10 t/hm²的 Y1 处理组(T4 减肥 0%、T5 减肥 10%和 T6 减肥 20%)、施加生物有机肥 20 t/hm²的 Y2 处理组(T7 减肥 0%、T8 减肥 10%和 T9 减肥 20%),并外加 1 个空白处理 T0 以计算黄瓜养分利用率,每个处理设置 3 次重复。试验共分 30 个小区,随机区组排列,每个小区面积 7 m²,保护行宽为 1.0 m,小区间排水沟及走道宽均为 0.5 m。

生物有机肥于黄瓜种植前按照试验方案分别施入各小区,并经过人工翻耕与表层土(0—20 cm)充分混和均匀。化肥于黄瓜种植前(2018 年 8 月 28 日)一次性施入,进行人工翻耕混匀,提供黄瓜生命活动所需的养分。减肥 0%处理化肥施入量为 1 t/hm²;减肥 10%化肥施入量为 0.9 t/hm²;减肥 20%处理化肥施入量为 0.8 t/hm²。在黄瓜生长 31 天的苗期,同一天移入大棚各小区内,株距 25 cm,行距 50 cm。在试验期间,按照大棚管理标准进行管理。

1.2.2 土壤样品和植株样品的采集与制备 在 2018 年 12 月 3 日黄瓜收获期结束后采集土样和植株样。土壤样品采集与制备:每个小区采用“之”形采样,随

机选 5 个点,每个点用开口土钻采集 0—20 cm 的土壤,将 5 个点土样混合均匀后作为该小区的 1 个代表性样品;将一部分新鲜土样立即捡去动植物残体以及侵入体等,迅速过 1 mm 筛后放置在 4 ℃ 培养箱密封保存,用于测定土壤硝态氮和铵态氮;另一部分土样于实验室内自然风干,沿土块自然裂隙掰开,去除杂物后研磨,过 1 mm 筛用于土壤速效磷、速效钾和 pH 的测定。黄瓜植株样采集与制备:在黄瓜成熟期采样,每个小区随机采取 3 株,并将根、茎叶和果实用剪刀剪开,装进信封袋中。先将鲜样在 80~90 ℃ 烘箱中烘 15~30 min,然后降温至 60~70 ℃,驱尽水分,在粉碎机中磨碎并过筛,保存在广口瓶中。

1.3 测定项目与方法

土壤 pH、铵态氮、硝态氮、速效磷和速效钾的浸提方法参考《土壤农化分析》^[10]。土壤 pH 测定采用电导法^[10];土壤铵态氮、硝态氮提取采用双通道流动分析仪测定;土壤速效磷、速效钾提取液采用 ICP—OES 测定;土壤容重采用环刀法测定^[11];植株全氮、全磷和全钾的浸提方法参考《土壤农化分析》^[10]。植物全氮提取液采用单通道流动分析仪测定,植物全磷和全钾提取液测定方法采用 ICP—OES 测定。

肥料偏生产力和养分利用率的相关指标计算方法^[12-14]为:

肥料偏生产力(kg/kg)=单位面积作物产量/单位面积养分施入量

肥料利用率(%)=(施肥处理植株养分积累量—空白处理植株养分积累量)/养分施入量×100%

肥料农学利用率(kg/kg)=(施肥处理作物产量—空白处理作物产量)/养分施入量

1.4 数据处理

采用 Origin 9.0、Excel 2016 和 SPSS 25.0 软件对试验数据进行统计分析并作图。采用单因素方差分析法研究生物有机肥与减量配施化肥对土壤理化性质、连作黄瓜养分吸收利用及黄瓜产量的影响。采用 Duncan 法进行多重比较,显著性水平设为 0.05;以黄瓜养分利用率为指标,采用聚类分析法将 9 个处理进行分类。

2 结果与分析

2.1 生物有机肥与减量配施化肥对土壤理化性状的影响

2.1.1 生物有机肥与减量配施化肥对土壤 pH 和容重的影响 由图 1 可知,施用生物有机肥的 Y1 处理组和 Y2 处理组与不施用生物有机肥的 CK 处理组相比,土壤 pH 分别提高 0.08~0.12 和 0.08~0.14,且 Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)与 CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)相比,差异均达到显著水平($P<0.05$),Y1 组内各处理

(T4、T5 和 T6)与 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)相比差异不显著($P>0.05$)。

随着化肥施用量的减少,对于施用相同量生物有机肥的 Y1 处理组和 Y2 处理组,组内各处理(T4、T5 和 T6)和(T7、T8 和 T9)的 pH 均无显著差异。随着生物有机肥施用量的增加,土壤容重呈显著下降趋势,Y2 处理组与 Y1 处理组和 CK 处理组相比,土壤容重分别降低 0.15~0.22 和 0.05~0.11,且 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)与 Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)相比,差异均达到显著水平($P<0.05$);随着化肥施用量的减少,对于施用相同量生物有机肥的 Y1 处理组和 Y2 处理组,组内各处理(T4、T5 和 T6)和(T7、T8 和 T9)的容重均无显著差异($P>0.05$)。

2.1.2 生物有机肥与减量配施化肥对土壤速效养分的影响 由图 1 可知,施用生物有机肥的 Y1 处理组和 Y2 处理组,与不施用生物有机肥的 CK 处理组相比,土壤硝态氮和铵态氮含量呈显著上升趋势,硝态氮含量分别提高范围 8.33%~20.86%和 12.14%~24.09%,铵态氮含量分别提高 3.78%~10.57%和 6.98%~13.29%。Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)的硝态氮和铵态氮含量均无显著差异($P>0.05$)。对于施用生物有机肥的 Y1 处理组和 Y2 处理组,与不施用生物有机肥的 CK 处理组相比,土壤速效磷和土壤速效钾的上升趋势并不显著,Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)的速效磷和速效钾含量均无显著差异($P>0.05$)。

2.2 生物有机肥与减量配施化肥对黄瓜产量及肥料偏生产力的影响

2.2.1 生物有机肥与减量配施化肥对黄瓜产量的影响 由图 2 可知,随着生物有机肥施用量的增加,黄瓜产量呈上升趋势。施用生物有机肥的 Y1 处理组和 Y2 处理组与不施用生物有机肥的 CK 处理组相比,黄瓜产量分别提高 1.48%~38.88%和 15.31%~50.91%,Y1 组内的 T6 与 CK 组内的 T1 相比差异不显著,Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)与 CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)相比差异均达到显著水平($P<0.05$)。施用生物有机肥的 Y2 处理组与施生物有机肥的 Y1 处理组相比,黄瓜产量提高 2.86%~20.05%;随着化肥施用量的减少,不施用生物有机肥的 CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)差异显著,黄瓜产量表现为 $T1>T2>T3$ 。对于施用相同量生物有机肥的 Y1 处理组和 Y2 处理组,Y1 组内 T4、T5 与 T6 相比差异显著,Y2 组内 T8 和 T9 相比差异显著。在 3 个处理组共 9 个处理当中,Y2 组内的 T8 的黄瓜产量最高。

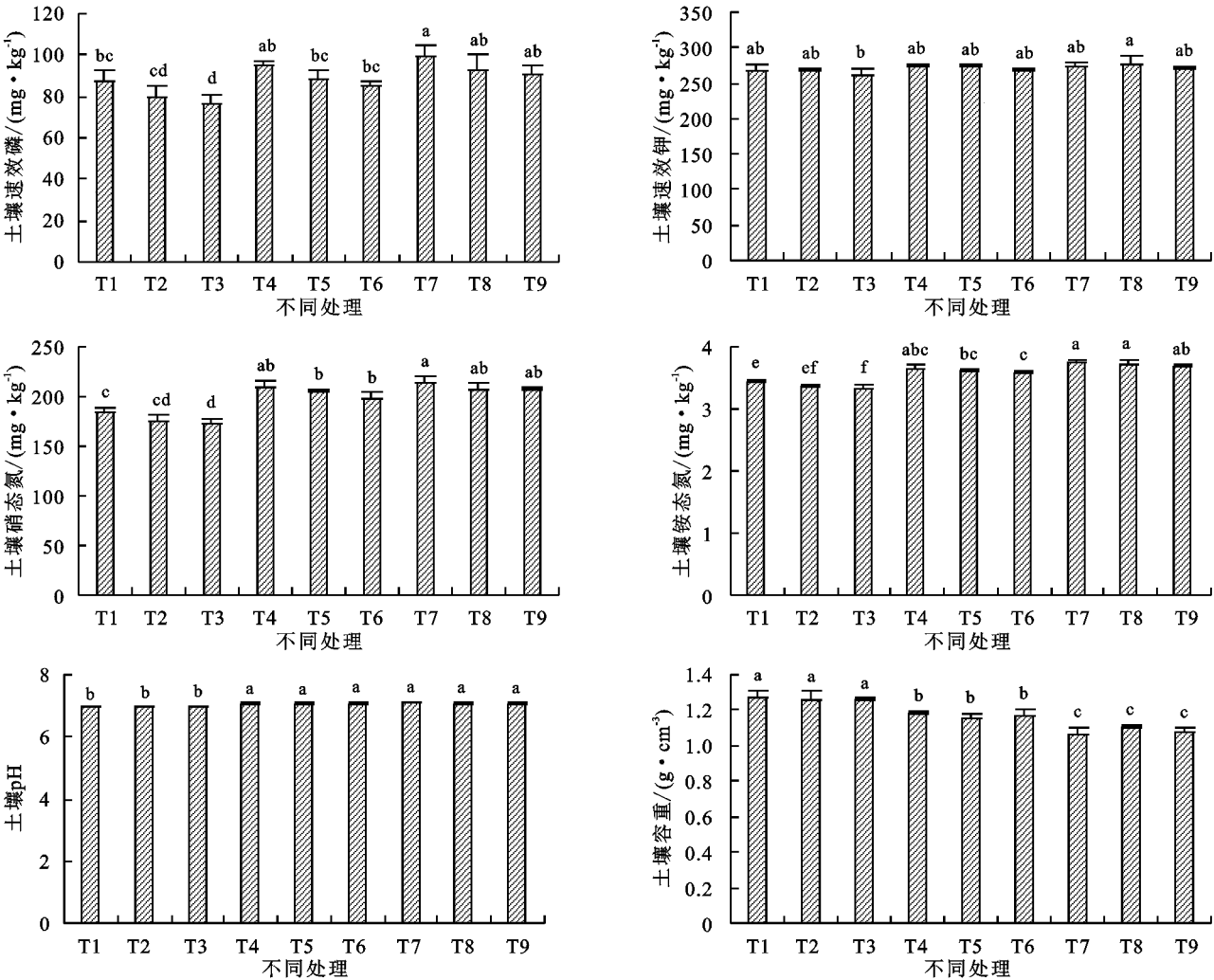


图 1 生物有机肥与减量配施化肥对土壤理化性状的影响

2.2.2 生物有机肥与减量配施化肥对肥料偏生产力的影响 由图 2 可知,施用生物有机肥的 Y1 和 Y2 处理组与不施用生物有机肥的 CK 相比,肥料偏生产力分别提高 11.10%~32.19% 和 16.83%~50.20%,且 Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)与 CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)相比,差异

均达到显著水平($P<0.05$)。随着化肥施用量的减少,不施用生物有机肥的 CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)的肥料偏生产力差异不显著,而施用相同量生物有机肥的 Y1 和 Y2 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 (T7、T8 和 T9)的肥料偏生产力均呈显著上升趋势,组内各处理的偏生产力显著差异($P<0.05$)。

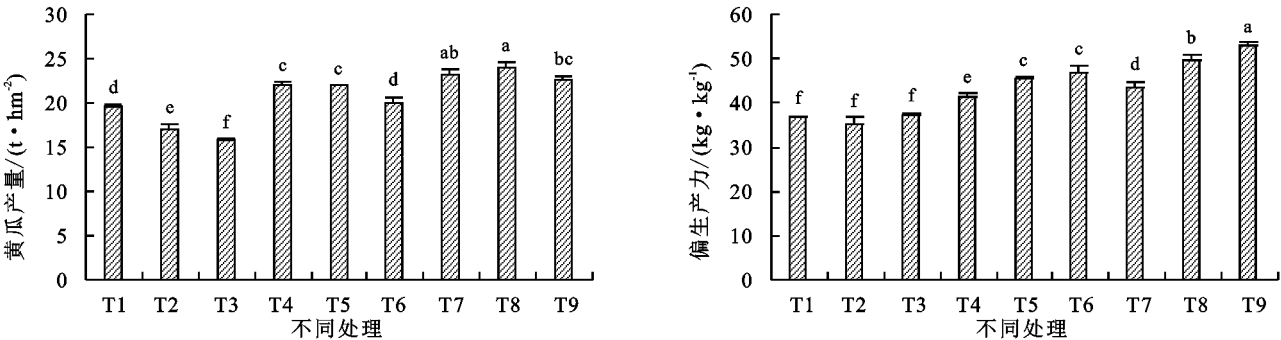


图 2 生物有机肥与减量配施化肥对肥料偏生产力的影响

2.3 生物有机肥与减量配施化肥对黄瓜养分积累量的影响

2.3.1 生物有机肥与减量配施化肥对黄瓜氮素积累量的影响 由图 3 可知,随着生物有机肥施用量的增加,氮素积累量呈上升趋势。施用生物有机肥的 Y1

处理组和 Y2 处理组与不施用生物有机肥的 CK 处理组相比,氮素积累量分别提高 9.36%~25.67% 和 31.58%~48.87%,且 Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)与 CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)相比,差异均达到显著水平($P<0.05$)。

施用生物有机肥的 Y2 处理组与施用有机肥的 Y1 处理组相比,氮素积累量提高 11.99%~27.28%,且 Y1

组内各处理(T4、T5 和 T6)与 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)相比,差异达到显著水平($P<0.05$)。

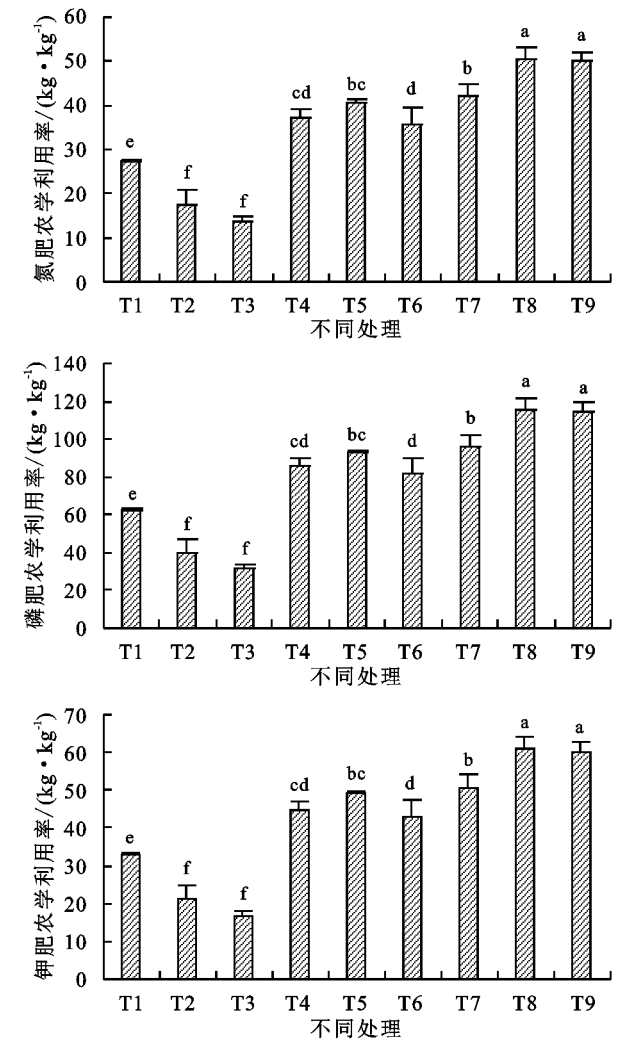
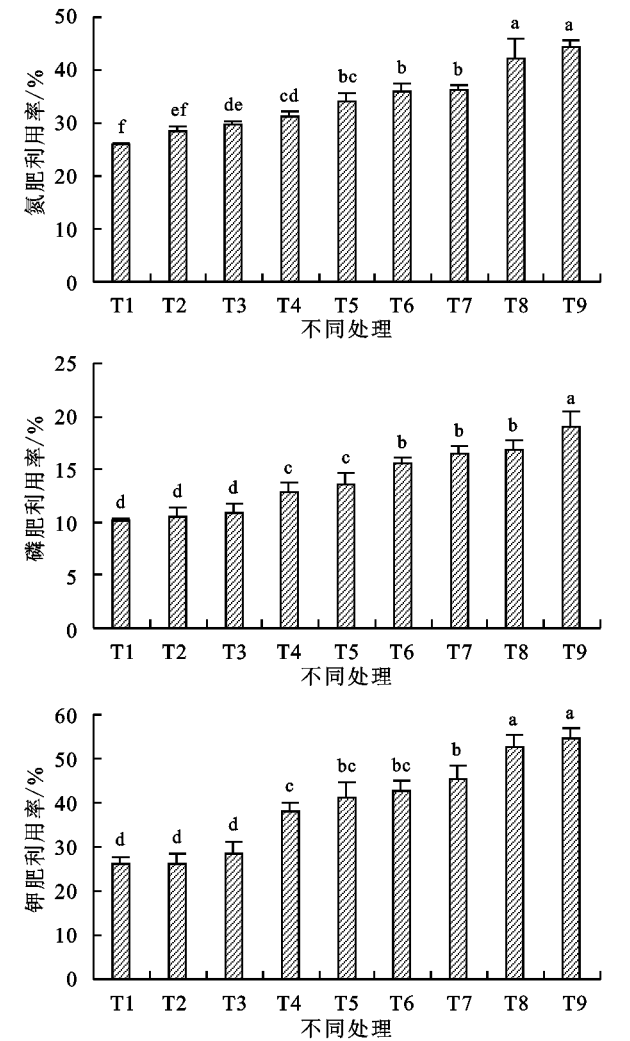


图 3 生物有机肥与减量配施化肥对黄瓜养分利用率的影响

2.3.2 生物有机肥与减量配施化肥对黄瓜磷素积累量的影响 由图 3 可知,各处理组磷素积累量由大到小表现为 Y2>Y1>CK。随着生物有机肥施用量的增加, Y1 处理组和 Y2 处理组与 CK 处理组相比,磷素积累量分别提高 16.76%~40.46%和 42.09%~74.75%。且 Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)与 CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)相比,差异均达到显著水平($P<0.05$)。Y2 处理组与 Y1 处理组相比,磷素积累量显著提高 15.65%~30.91%;随着化肥施用量的减少,CK 处理组内磷素积累量呈下降趋势,且与 T1 和 T3 差异显著($P<0.05$)。

2.3.3 生物有机肥与减量配施化肥对黄瓜钾素积累量的影响 由表 1 可知,与氮素积累量和磷素积累量相同,随着生物有机肥施用量的增加,钾素积累量显著升高。施用生物有机肥的 Y1 和 Y2 处理组与不施用生物有机肥的 CK 处理组相比,钾素积累量分别提高 14.33%~29.75%和 32.13%~48.39%。Y2 处

理组与 Y1 处理组相比,钾素积累量提高 8.60%~21.71%;随着化肥施用量的减少,对于施用相同量生物有机肥的 Y2 处理组,组内各处理(T7、T8 和 T9)的钾素积累量并无显著差异。

表 1 生物有机肥与减量配施化肥对黄瓜养分积累量的影响
单位:mg/plant

处理	氮素积累量	磷素积累量	钾素积累量
T1	854.38±13.08c	144.03±2.49c	1243.20±29.65d
T2	846.82±21.38c	136.15±9.93cd	1183.72±44.53d
T3	798.78±10.88c	125.98±8.23d	1165.81±46.32d
T4	1003.86±25.02b	176.95±9.84b	1512.64±45.59b
T5	985.06±38.10b	168.17±11.93b	1493.60±69.30bc
T6	934.32±37.31b	171.26±4.68b	1421.37±46.78c
T7	1138.47±33.15a	220.15±7.29a	1682.79±44.13a
T8	1189.18±89.53a	204.65±9.68a	1729.90±65.01a
T9	1124.22±22.58a	205.10±13.53a	1642.69±51.31a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。

2.4 生物有机肥与减量配施化肥对黄瓜养分利用率的影响

2.4.1 生物有机肥与减量配施化肥对黄瓜氮肥利用率的影响 由图 3 可知,随着生物有机肥施用量的增加,氮肥利用率呈上升趋势,各处理组氮肥利用率由大到小表现为 Y2>Y1>CK。Y1 和 Y2 处理组与 CK 处理组相比,氮肥利用率分别提高 1.51~10.07, 6.41~18.71 个百分点,且 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)和 CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)相比差异达到显著水平($P<0.05$)。Y2 处理组与 Y1 处理组相比,氮肥利用率提高 0.26~13.28 个百分点;随着化肥施用量的减少,Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)的氮肥利用率均呈上升趋势,且 Y1 组内的 T4 和 T6 差异达到显著水平($P<0.05$),Y2 组内的 T7 与 T8 和 T9 差异达到显著水平($P<0.05$)。在 3 个处理组共 9 个处理中,Y2 组内的 T9 的氮肥利用率最高;施用生物有机肥的 Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)与不施用生物有机肥的 CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)相比,氮肥农学利用率呈显著上升的趋势;在 Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)中,T5 的氮肥农学利用率最高,达 40.81 kg/kg,在 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)中,T8 的氮肥农学利用率最高,达 50.43 kg/kg。

2.4.2 生物有机肥与减量配施化肥对黄瓜磷肥利用率的影响 由图 3 可知,与氮肥利用率相同,随着生物有机肥施用量的增加,磷肥利用率呈上升趋势。Y1 处理组和 Y2 处理组与 CK 处理组相比,磷肥利用率分别提高 2.07~5.30,5.67~8.90 个百分点,且 Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)与 CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)相比,差异均达到显著水平($P<0.05$)。Y2 处理组与 Y1 处理组相比,磷肥利用率提高 0.96~6.16 个百分点;随着化肥施用量的减少,CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)磷肥利用率无显著差异,Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)的磷肥利用率均呈上升趋势,且 Y1 组内的 T4 和 T5 与 T6 相比,差异达到显著水平($P<0.05$),Y2 组内的 T7 和 T8 与 T9 差异达到显著水平($P<0.05$)。在 3 个处理组共 9 个处理中,Y2 组内的 T9 的磷肥利用率最高;施用生物有机肥的 Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)与不施用生物有机肥的 CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)相比,氮肥农学利用率呈显著上升趋势;在 Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)中,T5 的磷肥农学利用率最高,达 93.47

kg/kg,在 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)中,T8 的氮肥农学利用率最高,达 115.49 kg/kg。

2.4.3 生物有机肥与减量配施化肥对黄瓜钾肥利用率的影响 由图 3 可知,随着生物有机肥施用量的增加,钾肥利用率呈上升趋势。Y1 处理组和 Y2 处理组与 CK 处理组相比,钾肥利用率分别提高 9.50~16.31,16.95~28.43 个百分点,且 Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)与 CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)相比,差异均达到显著水平($P<0.05$)。Y2 处理组与 Y1 处理组相比,钾肥利用率提高 2.95~16.62 个百分点;随着化肥施用量的减少,Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)的钾肥利用率均呈上升趋势,不施用生物有机肥的 CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)和施用生物有机肥的 Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)的钾肥利用率无显著差异,Y2 组内的 T7 与 T8 和 T9 差异显著。在 3 个处理组共 9 个处理中,Y2 组内 T9 的钾肥利用率最高;施用生物有机肥的 Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)与不施加生物有机肥的 CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)相比,钾肥农学利用率呈显著上升趋势;在 Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)中,T5 的钾肥农学利用率最高,达 49.19 kg/kg,在 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9)中,T8 的钾肥农学利用率最高,达 60.20 kg/kg。

2.5 黄瓜产量与施肥量之间的相关模型

多元非线性回归方程多用于研究单一因变量与多因素自变量之间的相关关系,通过建立黄瓜产量与生物有机肥—化肥施用量之间的二元二次非线性回归方程,寻求理论黄瓜最高的产量。二元二次非线性回归方程基本形式为:

$$Z=z_0+ax+by+cxy+dx^2+ey^2 \tag{1}$$

式中: Z 为因变量; z_0 为常数项; x 、 y 为自变量, xy 为交互项; x^2 、 y^2 为自变量平方项。以生物有机肥和化肥施用量作因变量,黄瓜产量作自变量,得到非线性二元回归方程:

$$Y_c=-30.390+1.209B+88.150C-0.820BC-0.009B^2-38.500C^2 \quad (R^2=0.942) \tag{2}$$

式中: Y_c 为黄瓜产量(t/hm²); B 为生物有机肥施用量(t/hm²); C 为化肥施用量(t/hm²); BC 为生物有机肥和化肥交互作用; R^2 表示拟合优度,表示在 Z 的总平方和中,由 x 和 y 引起的平方和所占的比例, R^2 越大,拟合效果越好。图 4 为黄瓜产量和肥料施用量间关系的 3D 映射图。

方程(1)和(2)显示了单独或配合施用生物有机肥

和化肥对黄瓜产量均有显著的影响,当各参数量纲相同时,偏回归系数可以反映各自变量对因变量的贡献。方程(2)中 *B*、*C* 因子的偏回归系数分别为 1.209 和 88.150,系数为正表明单独增加生物有机肥和化肥施用量对黄瓜产量具有显著正向影响。*C* 因子的偏回归系数大于 *B* 因子,说明化肥对黄瓜产量的影响大于生物有机肥。*C* 因子的二项系数为 -38.500,表明过量的化肥投入会导致黄瓜的产量降低。根据多元非线性回归模型,计算出生物有机肥和化肥施用量分别为 20.00 ,0.93 t/hm² 时,黄瓜理论最高产量为 23.56 t/hm²。

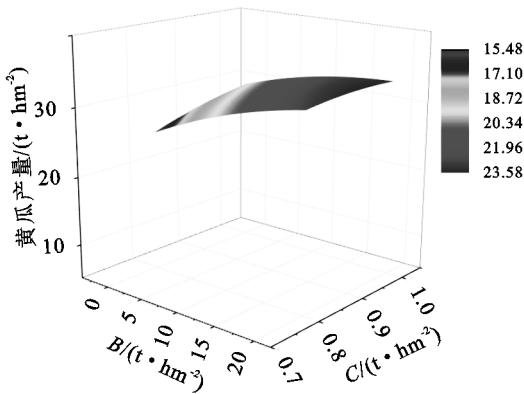


图 4 黄瓜产量与生物有机肥—化肥施用量间的关系

2.6 生物有机肥与减量配施化肥对黄瓜养分利用率的聚类分析

系统聚类是常用的变量聚类方法,通过各种距离统计量描述各变量间的相似程度,从而根据一定的标准对数据进行分类^[15]。本研究为了进一步分析生物有机肥与减量配施化肥后对黄瓜养分利用率的影响,将 9 个不同处理进行了聚类分析(图 5),通过最短距离法聚类把 9 种处理分为 3 大类:

第 1 类: T1、T2 和 T3。3 个处理均属于施加 0 t/hm² 生物有机肥的 CK 处理组。黄瓜的氮肥利用率分别为 25.80%,28.36%和 29.72%;磷肥利用率分别为 10.18%,10.58%和 10.85%;钾肥利用率分别为 26.21%,26.22%和 28.52%。此处理组没有添加生物有机肥,所测各指标数值普遍较低,可以为其他处理组提供基准值。

第 2 类: T4、T5、T6 和 T7。黄瓜的氮肥、磷肥和钾肥利用率与 CK 处理组相比明显提高。黄瓜的氮肥利用率分别为 31.23%,33.94%,35.87%和 36.13%;磷肥利用率分别为 12.92%,13.54%,15.56%和 16.52%;钾肥利用率分别为 38.02%,41.31%,42.52%和 45.47%。T4、T5 和 T6 为施加 10 t/hm² 生物有机肥的 Y1 处理组,这 3 个处理化肥施用量并不相同,与 T4 相比, T5、T6 的化肥施用量分别减少 10%和 20%,但 T4、T5、T6 聚为一类,表明施用相同量生物有机肥处理

后,随着化肥施用量的下降,黄瓜的氮肥、磷肥和钾肥利用率并没有发生明显的变化。

第 3 类: T8 和 T9。这 2 个处理均属于施加 20 t/hm² 生物有机肥的 Y2 处理组,这个处理组对于黄瓜的养分利用率提高效果最显著。与 CK 处理组相比,黄瓜的养分利用率得到显著性提高。T8、T9 的生物有机肥施用量相同,化肥施用量递减, T8、T9 聚为一类,表明施用相同量生物有机肥处理后,随着化肥施用量的下降,黄瓜的氮肥、磷肥和钾肥利用率没有发生明显的变化。

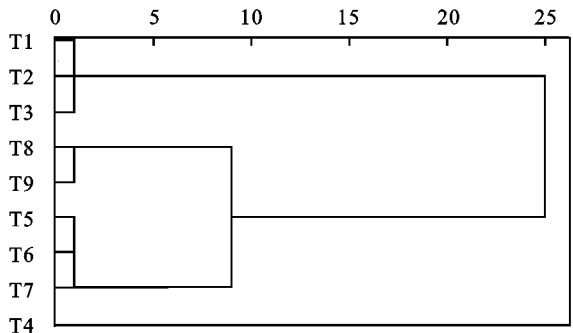


图 5 9 个处理的聚类分析系谱

3 讨论

3.1 生物有机肥与减量配施化肥对土壤理化性状的影响

土壤理化性质是评价土壤质量的最重要指标,其中土壤容重反映了土壤紧实程度、通气状况以及耕性质量好坏等^[16]。本研究发现,随着生物有机肥施用量的增加,土壤容重呈显著下降趋势, Y2 处理组与 Y1 处理组和 CK 处理组相比,土壤容重显著下降。原因是生物有机肥含有丰富的有机质,生物有机肥中的有机质进入土壤发生分解和转化作用,形成多糖和腐殖质等松软、多孔物质,增加土壤孔隙度,进而降低土壤容重^[17]。随着化肥施用量的减少,对于施用相同量生物有机肥的 Y1 处理组和 Y2 处理组,组内各处理(T4、T5 和 T6)和(T7、T8 和 T9)的容重均无显著差异,这表明减少化肥施用量对土壤容重无显著影响。由于过量施用化学肥料,土壤的缓冲能力和离子平衡能力遭到破坏,导致土壤 pH 下降。本研究发现,施用生物有机肥的 Y1 处理组和 Y2 处理组与不施用生物有机肥的 CK 处理组相比,土壤 pH 呈显著上升趋势,这与马铁铮等^[18]的研究结果相似。随着化肥施用量的减少,对于施用相同量生物有机肥的 Y1 处理组和 Y2 处理组,组内各处理(T4、T5 和 T6)和(T7、T8 和 T9)的 pH 均无显著差异,这表明减少化肥施用量对土壤 pH 无显著影响。

施用生物有机肥能显著提高土壤的速效养分含

量^[19], 本研究发现, 施用生物有机肥的 Y1 处理组和 Y2 处理组与不施用生物有机肥的 CK 处理组相比, 土壤硝态氮和铵态氮含量呈显著上升趋势, 原因是生物有机肥可改善土壤结构, 降低土壤容重^[17], 增加土壤孔隙度, 进一步增加土壤通气性, 有利于土壤中微生物的生长和繁殖, 微生物通过生命活动产生的酶或酸性物质可促进土壤中难溶解的养分转化, 且生物有机肥中本身还有一定的养分, 从而提高硝态氮和铵态氮含量。对于施用生物有机肥的 Y1 处理组和 Y2 处理组与不施用生物有机肥的 CK 处理组相比, 土壤速效磷和土壤速效钾的上升趋势不显著, 这主要是因为生物有机肥能够加快分解土壤氮素, 而对土壤磷的转化比较迟钝^[20], 而本试验的土壤速效钾的本底值含量较高, 达到 210.43 mg/kg, 速效磷和速效钾上升趋势并不显著。随着化肥施用量的减少, 对于施用相同量生物有机肥的 Y1、Y2 处理组, 组内各处理(T4、T5 和 T6)和(T7、T8 和 T9)的硝态氮、铵态氮、速效磷和速效钾含量均无显著差异, 这表明减少化肥施用量对土壤速效养分含量无显著影响。

3.2 生物有机肥与减量配施化肥对黄瓜产量及肥料偏生产力的影响

黄瓜是一种易发生连作障碍的作物, 发生连作障碍后土壤质量下降, 黄瓜因缺少适宜生长的土壤环境而受到抑制, 抗逆性减弱, 作物品质和产量下降^[21]。有研究^[4, 22]发现, 将生物有机肥和化肥配施可提高黄瓜地上部生物量, 且与单施化肥相比, 生物有机肥与化肥配施能促进黄瓜生长, 使黄瓜成熟期缩短。本研究发现, 施用生物有机肥的 Y1、Y2 处理组与不施用生物有机肥的 CK 处理组相比, 黄瓜产量呈上升趋势。这与巩子毓等^[23]的研究相似。随着化肥施用量的减少, 不施用生物有机肥的 CK 组内各处理(T1、T2 和 T3)差异显著, 施用生物有机肥的 Y1 组内 T4 和 T5 与 T6 相比差异显著, Y2 组内 T8 和 T9 相比差异显著。在 3 个处理组共 9 个处理中, Y2 组内的 T8 的黄瓜产量最高。根据多元非线性回归分析, 得出生物有机肥和化肥用量分别为 20, 0.93 t/hm² 时, 黄瓜理论最高产量为 23.56 t/hm²。肥料偏生产力是反映土壤基础养分水平和化肥施用量综合效应的重要指标, 本研究发现, 施用生物有机肥的 Y1、Y2 处理组, 与不施用生物有机肥的 CK 处理组相比, 肥料偏生产力呈显著上升趋势。随着化肥施用量的减少, 对于不施用生物有机肥的 CK 处理组, 组内各处理的肥料偏生产力差异不显著, 对于施用相同量生物有机肥的 Y1、Y2 处理组, 组内各处理的肥料偏生产力均呈

显著上升趋势, 且显著差异。

3.3 生物有机肥与减量配施化肥对黄瓜养分积累量的影响

施用不同类型的肥料可以影响植株对养分的吸收和利用。周丹丹等^[4]研究发现, 将有机肥与化肥配合施用, 有利于黄瓜植株吸收土壤中氮磷钾等养分, 植株中各种养分均有不同程度的增加。本研究结果表明, 随着生物有机肥施用量的增加, 与 CK 处理组相比, Y1、Y2 处理组氮素、磷素和钾素积累量均呈显著上升趋势, 这与闫秋艳等^[24]的研究结果相似。随着化肥施用量的下降, 对于施用相同量生物有机肥的 Y1、Y2 处理组, 组内各处理的氮素、磷素积累量没有显著差异, Y2 处理组内各处理的钾素积累量没有显著差异, 这表明减少化肥施用量不会对黄瓜养分积累量产生显著影响。

3.4 生物有机肥与减量配施化肥对黄瓜养分利用率的影响

提高养分利用率是研究生物有机肥与减量配施化肥的重要目的, 本研究结果表明, 随着生物有机肥施用量的增加, 与 CK 处理组相比, Y1 处理组和 Y2 处理组的氮肥、磷肥和钾肥利用率均呈上升趋势, 且施用生物有机肥的 Y2 组内各处理与 CK 组内各处理相比氮肥利用率显著提高, Y1 组内各处理和 Y2 组内各处理与 CK 组内各处理相比, 磷肥和钾肥利用率显著提高, 这主要是因为生物有机肥可在一定程度上减缓连作障碍中土壤的次生盐渍化、酸化、理化性质变差和作物根系“自毒”现象的发生, 提高了连作土壤的质量, 从而促进连作黄瓜对水肥的吸收。由于土壤质量的改善, 为微生物营造适宜的生存空间, 微生物大量繁殖, 在土壤氮素的供给过程中微生物起着重要的调节作用, 不仅提高氮肥的利用率, 而且减少氮素的损失^[25-26], 微生物通过将矿化养分转化为黄瓜可以吸收的有效态养分, 进一步促进黄瓜对养分的吸收, 从而提高黄瓜的养分利用率。随着化肥施用量的减少, Y1 组内各处理和 Y2 组内各处理的氮肥、磷肥和钾肥利用率均呈上升趋势, 这主要是因为生物有机肥对连作障碍的缓解作用, 使得施用相同量生物有机肥的 Y1 处理组和 Y2 处理组, 组内各处理的养分积累量差异不显著, 且化肥施用量递减, 因此, 氮肥、磷肥和钾肥利用率均呈上升趋势。

4 结论

(1) 随着生物有机肥施用量的增加, 与 CK 处理组相比, Y1 处理组和 Y2 处理组的氮肥、磷肥和钾肥利用率均呈上升趋势; 在生物有机肥施用量相同条件

下,随着化肥施用量的减少,Y1 组内各处理(T4、T5 和 T6)和 Y2 组内各处理(T7、T8 和 T9))的氮肥、磷肥和钾肥利用率均呈上升趋势。

(2)施用生物有机肥的 Y1、Y2 处理组与不施用生物有机肥的 CK 处理组相比,黄瓜产量呈上升趋势。在 3 个处理组共 9 个处理中,Y2 组内的 T8 黄瓜产量最高。根据多元非线性回归分析,得出生物有机肥和化肥用量分别为 20,0.93 t/hm²时,黄瓜理论最高产量为 23.56 t/hm²。

参考文献:

[1] 史静,张乃明,包立.我国设施农业土壤质量退化特征与调控研究进展[J].中国生态农业学报,2013,21(7):787-794.

[2] 余海英,李廷轩,周健民.典型设施栽培土壤盐分变化规律及潜在的环境效应研究[J].土壤学报,2006,43(4):571-576.

[3] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.

[4] 周丹丹,周崇峻,杨丽娟.有机肥和化肥配施对露地黄瓜养分吸收、产量和品质的影响[J].沈阳农业大学学报,2012,43(4):498-501.

[5] 宋以玲,于建,陈士更,等.化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响[J].水土保持学报,2018,32(1):352-360.

[6] 孙家骏,付青霞,谷洁,等.生物有机肥对猕猴桃土壤酶活性和微生物群落的影响[J].应用生态学报,2016,27(3):829-837.

[7] 曲成闯,陈效民,韩召强,等.生物有机肥对潮土物理性状及微生物量碳、氮的影响[J].水土保持通报,2018,38(5):70-76.

[8] 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.

[9] 魏晓兰,吴彩姣,孙玮,等.减量施肥条件下生物有机肥对土壤养分供应及小白菜吸收的影响[J].水土保持通报,2017,37(1):40-44.

[10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版,2002.

[11] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978.

[12] 蒋静静,屈锋,苏春杰,等.不同肥水耦合对黄瓜产量品质及肥料偏生产力的影响[J].中国农业科学,2019,52(1):86-97.

[13] 马忠明,杜少平,薛亮.磷钾配施对旱砂田西瓜产量、品质及养分利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,

2014,20(3):687-695.

[14] 洪瑜,王芳,刘汝亮,等.长期配施有机肥对灌淤土春玉米产量及氮素利用的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):248-252.

[15] 温延臣,李燕青,袁亮,等.长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J].农业工程学报,2015,31(7):91-99.

[16] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Mid-western agricultural soil[J].Geoderma,2010,158(3/4):443-449.

[17] Hogberg P, Hogberg M N, Gottlicher S G, et al. High temporal resolution tracing of photosynthate carbon from the tree canopy to forest soil micoorganisms[J].The New Phytologist,2010,177(1):220-228.

[18] 马铁铮,马友华,付欢欢,等.生物有机肥和生物炭对 Cd 和 Pb 污染稻田土壤修复的研究[J].农业资源与环境学报,2015,32(1):14-19.

[19] Elkholy M M, Mahrous S E, Eltohamy S A, et al. Integrated effect of mineral, compost and biofertilizers on soil fertility and tested crops productivity[J]. Research Journal of Agriculture & Biological Sciences,2010,45(8):75-81.

[20] 张敏,孙宝利,宋阿琳,等.微生物多样性对土壤氮磷钾转化、酶活性及油菜生长的影响[J].生态学报,2016,36(18):5856-5864.

[21] 王彩云,武春成,曹霞,等.生物炭对温室黄瓜不同连作年限土壤养分和微生物群落多样性的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1359-1366.

[22] Zhao J, Ni T, Li J, et al. Effects of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system[J]. Applied Soil Ecology,2016,99(18):1-12.

[23] 巩子毓,高旭,黄炎,等.连续施用生物有机肥提高设施黄瓜产量和品质的研究[J].南京农业大学学报,2016,39(5):777-783.

[24] 闫秋艳,董飞,杨峰,等.土壤温度和有机肥对黄瓜生长及养分吸收利用的影响[J].华北农学报,2017,32(6):222-228.

[25] Yevdokimov I, Biagodatsky S, Kudeyarov V N. Microbiological immobilization, remineralization, and plant uptake of fertilizer nitrogen[J]. Eurasian Soil Science,1993,25:16-28.

[26] Zhou J B, Li S X, Chen Z J. Soil microbial biomass nitrogen and its relationship to uptake of nitrogen by plants[J].Pedosphere,2002,12(3):251-256.