

菌渣还田对设施土壤微生物量碳、氮的影响

赵自超^{1,2}, 赵时峰³, 翟合生³, 张海兰^{1,2}, 辛淑荣^{1,2}, 姚利^{1,2}

(1. 山东省农业科学院 农业资源与环境研究所, 山东 济南 250100;

2. 农业农村部废弃物基质化利用重点实验室, 山东 济南 250100; 3. 山东省莘县农业农村局, 山东 莘县 252423)

摘要: [目的] 探究设施土壤微生物量碳、氮对菌渣还田的响应, 为实现设施瓜菜生产的可持续发展提供理论依据和技术支持。[方法] 以草菇菌渣为材料, 在山东省莘县进行了田间试验, 以常规鸡粪还田为对照 (CON), 设置 5 个菌渣 (FR) 还田量, 研究菌渣还田对设施土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN) 和微生物量碳 (MBC)、氮 (MBN) 的影响。[结果] 5 个菌渣还田处理的菌渣使用量分别为 15, 30, 45, 60 和 75 t/hm²) 相比 CON 增加了 SOC 和 TN。SOC 分别增加了 12.0%, 11.2%, 21.6%, 33.1% 和 31.7%, TN 分别增加了 3.1%, 6.3%, 19.9%, 29.4% 和 26.4%。除 FR₁ 以外, 其他 4 个菌渣还田处理相比增加了 MBC 和 MBN, MBC 分别增加了 16.1%, 19.9%, 36.8% 和 50.7%, MBN 分别增加了 3.3%, 37.7%, 40.4% 和 60.9%。相比 CON, 高量菌渣还田处理增加了 MBC/SOC 和 MBN/TN。相关分析表明, MBC, MBN 与 SOC 和 TN 均呈极显著正相关。[结论] 菌渣还田可以提高土壤有机碳、土壤全氮和土壤微生物碳、氮。土壤微生物碳、氮含量随着菌渣还田量的增加而增加, 因此菌渣还田是提高设施土壤微生物活性及土壤肥力的有效措施。

关键词: 菌渣; 设施土壤; 微生物量碳; 微生物量氮

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2020)04-0163-05

中图分类号: S156

文献参数: 赵自超, 赵时峰, 翟合生, 等. 菌渣还田对设施土壤微生物量碳、氮的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 163-167. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.04.022; Zhao Zichao, Zhao Shifeng, Zhai Hesheng, et al. Effects of fungal residue on microbial biomass carbon and nitrogen in greenhouse soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 163-167.

Effects of Fungal Residue on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Greenhouse Soil

Zhao Zichao^{1,2}, Zhao Shifeng³, Zhai Hesheng³, Zhang Hailan^{1,2}, Xin Shurong^{1,2}, Yao Li^{1,2}

(1. Institute of Agricultural Resource and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan, Shandong 250100, China; 2. Key Laboratory of Wastes Matrix Utilization, Ministry of Agriculture and Rural, Ji'nan, Shandong 250100, China; 3. Authority of Agricultural and Rural of Shexian of Shandong Province, Shexian, Shandong 252423, China)

Abstract: [Objective] The response of microbial biomass carbon and nitrogen in greenhouse soil to the addition of fungal residue was studied in order to provide theoretical basis and technical support for the sustainable development of greenhouse production. [Methods] Field experiments were conducted in Shexian County, Shandong Province, with six organic fertilizer treatments which application of chicken manure (CON) and five application rate of fungal residue (FR), to examine the effects of fungal residue on organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) in greenhouse soil. [Results] Compared with CON, the application of 5 fungal residue treatments (The usage of bacteria residues was 15, 30, 45, 60 and 75 t/hm² respectively) increased SOC by 12.0%, 11.2%, 21.6%, 33.1% and 31.7%, respectively, and increased TN by 3.1%, 6.3%, 19.9%, 29.4% and 26.4%, respectively. The later four treatments increased the MBC (16.1%, 19.9%, 36.8% and 50.7%) and the MBN (3.3%,

收稿日期: 2020-04-26

修回日期: 2020-05-25

资助项目: 山东省农业重大应用技术创新项目“农业废弃物高值化利用的智慧农业关键技术研究示范”(SD2019ZZ020); 山东省重点研发计划项目“利用农牧废弃物制备环保型栽培基质技术研究与示范”(2018GSF116013); 山东省食用菌产业技术体系产后加工与菌渣利用岗位专家项目(SDAIT-07-09); 山东农科院创新工程项目(CXGC2018E03)

第一作者: 赵自超(1987—), 男(汉族), 山东省莘县人, 博士, 助理研究员, 主要从事废弃物资源化利用方面的研究。Email: 2008zzc@163.com。

通讯作者: 张海兰(1962—), 女(汉族), 山东省济南市人, 博士, 研究员, 主要从事菌渣资源化利用方面的研究。Email: hailan.zhang@163.com。

37.7%, 40.4% and 60.9%), compared to the CON treatment. There were significant positive correlations between MBC, MBN and SOC, TN. [Conclusion] The application of fungal residue could increase the contents of SOC, TN, MBC and MBN, and the content of MBC and MBN increased with the increase of fungal residue to the field. As a result, the appropriate application of fungal residue could improve the soil microbial activity and soil fertility in greenhouse soil.

Keywords: fungal residue; greenhouse soil; microbial biomass carbon; microbial biomass nitrogen

设施农业不受季节限制,经济效益高,环境适应性强,已成为许多地区的主导产业^[1]。在华北农业生态系统,设施农业土壤占据了主要地位,相比其他土地利用方式能固定更多的有机碳氮。土壤碳氮含量是表征土壤质量状况和肥力水平的重要指标,其中土壤微生物量碳氮是土壤碳氮库中最活跃的部分,可以综合反映土壤的肥力和生物活性,在农业生态系统中其数量主要受外源碳(有机肥)氮的添加^[2-6]。在设施瓜菜生产中,因为实惠易取,畜禽粪便直接使用一直是农户用来代替有机肥的常见措施,但是大量使用畜禽粪便会导致设施土壤次生盐渍化、酸化、滋生根结线虫、抗生素重金属超标等一系列问题,严重制约了设施瓜菜生产的可持续发展^[1,6]。菌渣是食用菌栽培后剩下的废料,作为一种有机物料,营养丰富,富含植物生长的氮、磷、钾、糖类、蛋白质、以及微量元素等有机无机营养物质,其营养成分可与天然有机肥相当^[7-8]。中国是世界第一食用菌生产大国,每年至少产出 1.50×10^7 t 菌渣,但是目前却因营养价值认识不足往往被随意丢弃,以至于约2/3的菌渣得不到有效利用,这不仅会造成了大量资源浪费,还会导致环境污染^[9-12]。研究^[7,13-14]表明,菌渣可以作为底肥直接还田,增加土壤有机质含量,提高土壤肥力,进而提高作物的产量与质量,但目前没有大面积推广。因而研究菌渣还田对设施土壤微生物量碳氮的影响,不仅可以促进农业废弃资源化利用,而且还能改善设施土壤质量,具有重要的理论的实践意义。目前,有关菌渣还田对土壤微生物量碳氮影响的研究报道主要集中于小麦、玉米和水稻等大田作物土壤^[15-18],而菌渣还田对设施土壤微生物量碳、氮影响方面的研究鲜见报道。因此,本文在设施瓜菜主产区研究不同量菌渣还田对设施土壤微生物量碳、氮及其占有机碳、全氮的比例与相关关系,以期评价菌渣还田对设施土壤质量的影响,为实现设施瓜菜生产的可持续发展提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

试验于2017年8月至2019年6月在全国瓜菜主产区山东省莘县(115°67'E, 36°23'N)的一个日光温室(120 m长, 12 m宽)内进行,该地区属于典型的

温带大陆性季风气候,四季分明,光照充裕,年日照时数2480 h,年平均气温13.4℃,年平均降水量502 mm。试验地土壤质地为潮土,供试土壤(0—30 cm)试验开始前的基本理化性质为:有机质15.5 g/kg,碱解氮52.2 mg/kg,速效磷44.4 mg/kg,速效钾167.1 mg/kg。一年两熟,轮作制度为秋冬茬黄瓜—冬春茬甜瓜,2017年8月16日试验开始,2019年6月15日试验结束,每种作物两个生长季。

本试验设置6个处理,分别为农民常规处理(鸡粪+化肥)和5个不同量菌渣还田处理(菌渣+化肥),每个处理3次重复,随机设计,共有18个小区,每个小区面积60 m²。常规处理(Conventional, CON)每茬的鸡粪施用量为45 t/hm²,菌渣(fungal residue, FR)还田处理每茬的菌渣使用量分别为15 (FR₁), 30 (FR₂), 45 (FR₃), 60 (FR₄)和75 (FR₅) t/hm²。菌渣和鸡粪全部作为基肥使用,菌渣为当地常见易取的草菇菌渣,主要成分为:有机质含量62.1%~77.6%,全氮含量1.0%~1.3%,全磷(P₂O₅)含量0.6%~1.2%,全钾(K₂O)含量0.6%~1.0%。鸡粪购自当地养殖场,主要成分为:有机质含量25%~40%,全氮含量1.6%~2.7%,全磷含量1.2%~2.3%,全钾含量1.1%~2.7%。所有处理的化肥施用量一致,每季黄瓜施肥量为30 kg N, 15 kg P₂O₅, 40 kg K₂O,其中基肥量为12 kg N, 10 kg P₂O₅, 15 kg K₂O,追肥量为18 kg N, 5 kg P₂O₅, 25 kg K₂O;每季甜瓜施肥量20 kg N, 15 kg P₂O₅, 30 kg K₂O,其中基肥量为4.5 kg N, 2.5 kg P₂O₅, 4.5 kg K₂O,追肥量为15.5 kg N, 12.5 kg P₂O₅, 25.5 kg K₂O。黄瓜和甜瓜定值前按照比例将菌渣或鸡粪和化肥(基肥)撒施到地面,然后旋耕与土壤混合均匀。追肥时先将肥料按比例溶于水,然后通过施肥器进行灌溉施肥。试验期间采取的其他田间管理措施,诸如铺地膜、灌溉、防病等各试验小区实施水平严格一致。

1.2 土壤样品采集与测定方法

土壤样品于试验结束后在各个小区0—30 cm土层多点采集,土壤样品带回实验室后分两份,一份通风阴干后用于测定土壤有机碳和全氮,另一部分剔除根系及有机残体后用于测定土壤微生物量碳、氮。

土壤有机碳和全氮分别采用重铬酸钾—浓硫酸氧化(外加热法)和凯氏法消煮半微量滴定法测

定^[19]。采用氯仿熏蒸法—硫酸钾浸提法测定微生物量碳、氮含量^[20]。

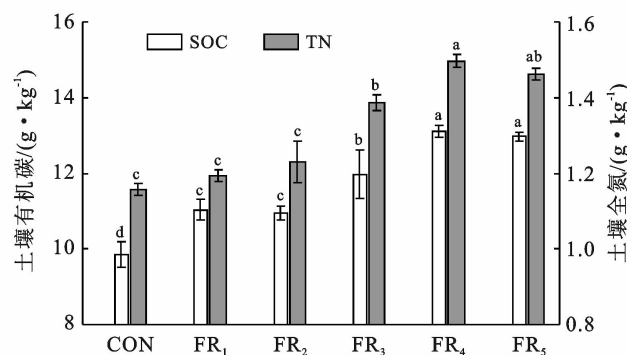
1.3 数据处理

采用 Excel 软件对数据进行处理和绘图,采用 SPSS 22.0 统计分析软件对数据进行差异显著性检验(Duncan 法, $\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 菌渣还田对土壤有机碳和全氮的影响

如图 1 所示,相比常规处理(CON),菌渣还田(FR₁₋₅)可以显著增加土壤有机碳含量,FR₁,FR₂,FR₃,FR₄和FR₅的增幅分别为 12.0%,11.2%,21.6%,33.1%和 31.7%。土壤全氮的变化趋势与土壤有机碳的变化趋势类似,相比 CON,FR₁,FR₂,FR₃,FR₄和FR₅的土壤全氮分别增加了 3.1%,6.3%,19.9%,29.4%和 26.4%,但是FR₁,FR₂与CON处理间差异不显著。综合土壤有机碳与全氮的变化趋势来看,土壤有机碳与土壤全氮含量都是呈现随着菌渣施用量的增加先增加后降低的趋势,FR₄处理的土壤有机碳和土壤全氮含量均呈一元三次函数关系(见图 2),菌渣还田量的多少可以解释 99.96%的土壤有机碳变化和 99.91%土壤全氮变化。



注:不同小写字母表示不同处理在 $p<0.05$ 水平差异显著。下同。

图 1 菌渣还田对土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)的影响

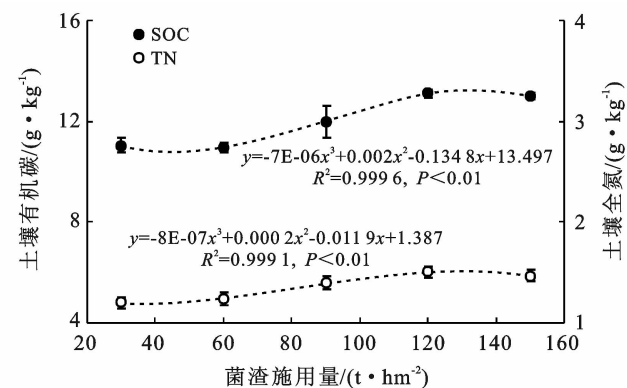


图 2 土壤有机碳和全氮与菌渣还田量的关系

从图 3 可以看出,所有处理的碳氮比(C/N)无显著差异,在 8.5~9.2 之间变化,尽管没有显著差异,但是相比 CON 处理,菌渣还田处理还是增加了土壤碳氮比,FR₁,FR₂,FR₃,FR₄和FR₅分别增加了 8.6%,5.2%,1.4%,2.8%和 4.1%。

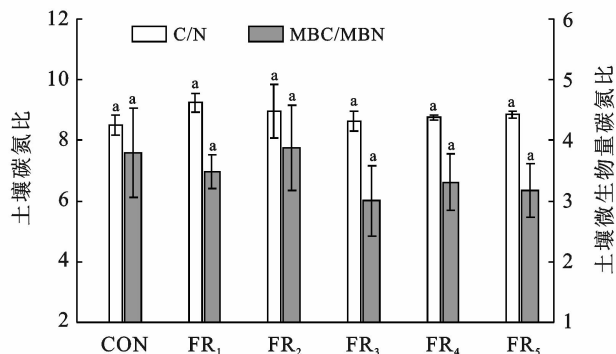


图 3 菌渣还田对土壤碳氮比(C/N)和土壤微生物碳氮比(MBC/MBN)的影响

2.2 菌渣还田对土壤微生物量碳、氮的影响

从图 4 可以看出,随着菌渣还田量的增加,土壤微生物量碳、氮含量也随之增加,并且微生物量碳、氮与菌渣还田量呈线性关系(见图 5),菌渣还田量的变化可以解释 97.31%的土壤微生物量碳含量变化和 94.54%的土壤微生物量氮含量变化。与 CON 相比,除了FR₁处理的土壤微生物量碳、氮降低以外,其他 4 个菌渣还田处理均增加了土壤微生物碳、氮含量。FR₂,FR₃,FR₄和FR₅的微生物量碳的增幅分别为 16.1%,19.9%,36.8%和 50.7%,而微生物量氮的增幅则分别 3.3%,37.7%,40.4%和 60.9%。图 3 表明,所有处理的微生物量碳氮比(MBC/MBN)无显著差异,在 3.0~3.9 之间变化。与土壤碳氮比不同是,菌渣还田处理(FR₂ 除外)相比常规处理降低了土壤微生物量碳氮比。FR₁,FR₃,FR₄和FR₅相比 CON 处理分别降低了 8.3%,20.9%,12.8%和 16.6%。

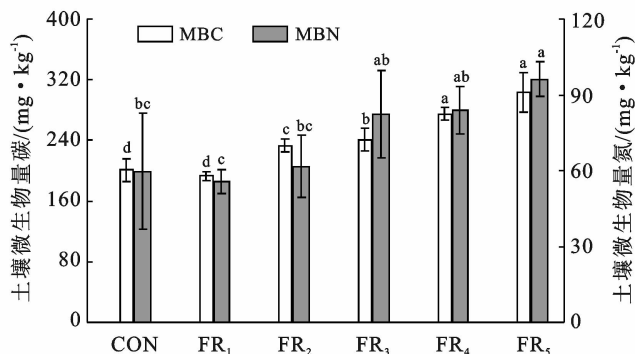


图 4 菌渣还田对土壤微生物量碳(MBC)和微生物量氮(MBN)的影响

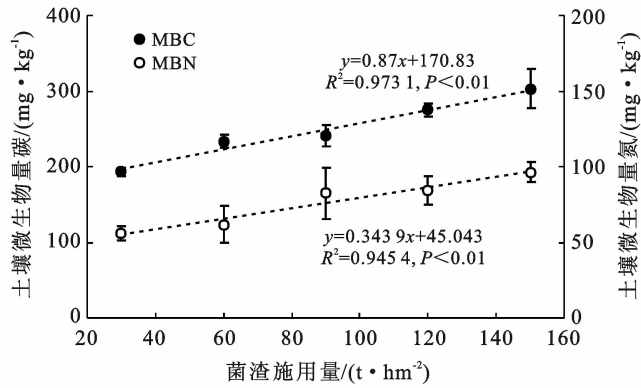


图 5 土壤微生物量碳和微生物量氮与菌渣还田量的关系

2.3 土壤微生物量碳氮与土壤有机碳和全氮的相关性分析

如图 6 所示, MBC/SOC 和 MBN/TN 的变化范围分别是 1.75%~2.34% 和 4.67%~6.58%, 且均在 FR₅ 处理最高, FR₁ 处理最低. 与常规处理相比, 高量菌渣还田处理 (FR₄ 和 FR₅) 均增加了 MBC/SOC 和 MBN/TN. FR₁ 相比 CON 处理降低了 MBC/SOC 和 MBN/TN, 降幅分别为 14.1% 和 9.3%.

FR₂ 相比 CON 处理增加了 MBC/SOC, 但是降低了 MBN/TN, FR₃ 处理的情况与 FR₂ 恰恰相反, 相比 CON 处理增加了 MBN/TN.

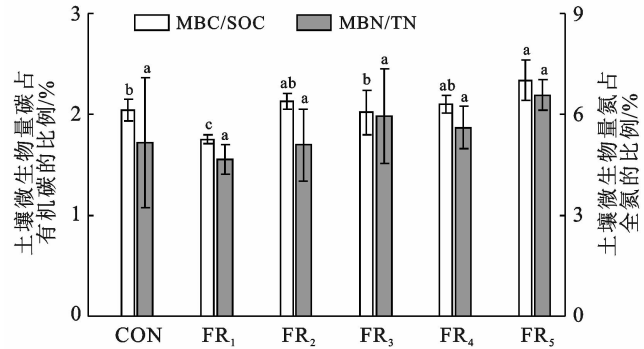


图 6 土壤微生物碳占有有机碳 (MBC/SOC) 和土壤微生物氮占全氮 (MBN/TN) 的比例

从表 1 可以看出, SOC 与 TN, MBC 和 MBN 均呈极显著正相关关系, 相关系数分别为 0.914, 0.816, 0.654. TN 与 MBC 和 MBN 分别呈极显著正相关关系, 相关系数分别为 0.825, 0.681. MBC 与 MBN 之间呈现极显著正相关关系, 相关系数为 0.745.

表 1 土壤不同形态碳氮的相关性分析

因子	SOC	TN	C/N	MBC	MBN	MBC/MBN	MBC/SOC	MBN/TN
SOC	1	0.914**	0.127	0.816**	0.654**	-0.269	0.337	0.339
TN		1	-0.284	0.825**	0.681**	-0.268	0.444	0.327
C/N			1	-0.079	-0.113	0.017	-0.267	0.016
MBC				1	0.745**	-0.214	0.818**	0.505*
MBN					1	-0.764**	0.580*	0.911**
MBC/MBN						1	-0.102	-0.860**
MBC/SOC							1	0.504*
MBN/TN								1

注: * 表示在 $p < 0.01$ 水平显著相关, ** 表示在 $p < 0.01$ 水平极显著相关。

3 讨论

土壤微生物量碳、氮可以表征土壤微生物量, 能够准确地反映土壤状况, 是评价土壤质量和肥力的重要指标^[21-22]。研究发现, 施用菌渣等有机肥可以快速增加土壤微生物量碳、氮含量^[18,20]。本研究发现, 施用菌渣比施用鸡粪增加了土壤微生物量碳、氮含量, 并且分别与土壤有机碳和全氮呈极显著正相关关系, 这可能是因为菌渣原料在种菇前已经经过了一次发酵, 活性有机碳和氮含量要比没有经过发酵的鸡粪高, 从而增加土壤有机碳和全氮, 经过土壤和菌渣中微生物的作用进而增加土壤微生物量碳、氮含量。本研究还发现, 随着菌渣还田量的增加, 土壤微生物量碳、氮含量呈现直线上升, 菌渣还田量的变化可以解

释 97.31% 的土壤微生物量碳含量变化和 94.54% 的土壤微生物量氮含量变化, 这可能是因为菌渣本身富含碳、氮可以为微生物提供充足的碳、氮源的原因。研究^[23-24]表明, 土壤微生物碳氮比 (MBC/MBN) 可以反映土壤氮素的供应能力, MBC/MBN 较低时, 土壤氮素有较高的生物有效性, 从而可以提高土壤氮素利用率。本研究发现, 菌渣还田可以降低 MBC/MBN, 这可能是因为菌渣还田后土壤氮素的生物活性增大, 更多的氮素被微生物同化, 从而使微生物体内氮含量升高, 造成微生物碳氮比下降。这说明菌渣还田可以提高设施土壤氮素的生物有效性进而可以提高氮素利用率, 其中 FR₃ 处理的效果最好。虽然土壤微生物量碳、氮分别在土壤有机碳和全氮占很小的比例, 但它们在土壤碳氮循环与转化的过程中起着非常重要

的作用,土壤微生物量碳与有机碳的比值(MBC/SOC)可以表征土壤有机碳生物有效性^[4,18]。研究表明,有机物料还田能提高MBC/SOC^[3,25]。本研究发现,相比常规处理的鸡粪还田,少量菌渣还田(FR₁)降低了MBC/SOC,这说明虽然少量菌渣还田可以提高土壤SOC,但有机碳的周转速度有可能降低,而高量菌渣还田则不存在这个问题。土壤微生物量氮与全氮的比值(MBN/TN)可以作为土壤氮素可利用指标^[4,21]。本研究发现,相比常规鸡粪还田,高量菌渣还田(FR₃,FR₄和FR₅)增加了MBN/TN,这说明高量菌渣还田可以提高土壤氮素可利用性。本文初步研究了菌渣还田对设施土壤有机碳、全氮、微生物量碳氮的影响,但是本研究只有一年两个生长季,而菌渣还田对土壤质量的影响是长期的,并且本次所用菌渣为单一品种菌渣。因而今后要加强不同物料配比菌渣还田对设施土壤质量、微生物特征及其长期影响等研究方向。

4 结论

(1) 本试验条件下,菌渣代替鸡粪还田可以显著提高土壤有机碳和全氮含量,土壤有机碳和全氮含量与菌渣还田量均呈一元三次函数关系,其中FR₄处理对土壤有机碳和全氮含量的提高能力最高。

(2) 本试验条件下,菌渣代替鸡粪还田可以显著提高土壤微生物碳、氮含量,并且土壤微生物碳、氮含量随着菌渣还田量的增加而增加,土壤微生物碳、氮含量与菌渣还田量呈线性关系,但FR₄和FR₅处理间的土壤微生物碳、氮含量差异不显著。

(3) 本试验条件下,菌渣代替鸡粪还田可以提高土壤氮素供应能力和土壤生物有效性,进而提高土壤肥力。

(4) 综合考虑,在设施瓜菜生产中用菌渣代替鸡粪还田是改善设施土壤状况、提高土壤肥力的有效途径,同时又可减少投入和提高菌渣的资源化利用,对于瓜菜菌的绿色和可持续发展具有重要意义。

[参 考 文 献]

[1] 郑健,殷李高,朱传远,等. 全生育期施用沼液对设施番茄生长与土壤生态环境的影响[J]. 农业机械学报,2019,50(10):278-288.

[2] Bittman S, Forge T A, Kowalenko C G. Responses of the bacterial and fungal biomass in a grassland soil to multi-year applications of dairy manure slurry and fertilizer [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 37(4): 613-623.

[3] 王振龙,包蕾,葛新伟,等. 有机滴灌肥对酿酒葡萄园土

壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(2):61-67,97.

- [4] 赵军,耿增超,尚杰,等. 生物炭及炭基硝酸铵对土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 生态学报,2016,36(8):2355-2362.
- [5] 曲成闯,陈效民,张志龙. 土壤有机碳库的变化可及时反映土壤碳动态和土壤质量的变化状[J]. 应用生态学报,2019,30(9):3147-3154.
- [6] 魏益华,邱素艳,张金艳,等. 农业废弃物中重金属含量特征及农用风险评估[J]. 农业工程学报,2019,35(14):212-220.
- [7] 吴韶辉,温明霞,王鹏,等. 菌渣还田对本地早光合作用和果实品质的影响[J]. 浙江柑橘,2019,36(1):15-20.
- [8] 马征,崔荣宗,官志远,等. 葱麦轮作模式下菌渣有机肥与氮肥配施对作物产量、品质的影响[J]. 江西农业学报,2019,31(9):102-107.
- [9] 刘中良,焦娟,谷端银,等. 菌渣基质栽培对日光温室番茄品质和产量的影响[J]. 天津农学院学报,2018,25(2):13-16.
- [10] Zhou J M. The effect of different C/N ratios on the composting of pig manure and edible fungus residue with rice bran [J]. *Compost Science & Utilization*, 2017,25(2):120-129.
- [11] Phan C W, Sabaratnam V. Potential uses of spent mushroom substrate and its associated lignocellulosic enzymes [J]. *Applied Microbiology Biotechnology*, 2012,96(4):863-873.
- [12] Zhang J, Wang P C, Fang L, et al. Isolation and characterization of phosphate-solubilizing bacteria from mushroom residues and their effect on tomato plant growth promotion [J]. *Polish Journal of Microbiology*, 2017,66(1):57-65.
- [13] 刘吉青,兰挚谦,田兴武,等. 不同有机底肥对设施番茄生长和土壤肥力的影响[J]. 北方园艺,2019(19):67-74.
- [14] 黄武强,周红. 提高环境效益的食用菌菌渣循环再利用方式[J]. 中国食用菌,2019,38(1):104-106.
- [15] 聂胜委,张巧萍,李向东,等. 施用不同菌渣肥对小麦/玉米轮作系统土壤养分的影响[J]. 山西农业科学,2018,46(4):588-594.
- [16] 陈雯雯,申卫收,韩成,等. 施用不同配比菇渣、熟牛粪对酸性土壤质量和花生产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2014(1):69-74.
- [17] 龚臣,王旭东,倪幸,等. 长期菌渣化肥配施对稻田土壤活性有机碳组分和有效养分的影响[J]. 浙江农林大学学报,2018,35(2):252-260.
- [18] 石思博,王旭东,叶正钱,等. 菌渣化肥配施对稻田土壤微生物量碳氮和可溶性碳氮的影响[J]. 生态学报,2018,38(23):8612-8620.

- 泥石流敏感性分析:以吉林省洮南市北部山区为例[J].水土保持通报,2019,39(5):204-210,217,2.
- [19] 廖炳勇,何晓飞,曾强,等.龙门山构造带茂汶断裂在茂县、汶川一带构造特征[J].四川地质学报,2019,39(3):374-378.
- [20] 文海家,李洋,薛靖元,等.基于大数据挖掘的山区公路沿线滑坡易发性小区划[J].自然灾害学报,2018,27(4):159-165.
- [21] 袁宏.茂县地质灾害的主要成因和预防措施[J].能源与环境,2019(6):108-109.
- [22] Norbazlan M Y, Biswajeet P, Helmi Z M S, et al. Spatial landslide hazard assessment along the Jelapang corridor of the north-south expressway in Malaysia using high resolution airborne LiDAR data [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015,8(11): 9789-9800.
- [23] 杨城,林广发,张明锋,等.基于DEM的福建省土质滑坡敏感性评价[J].地球信息科学学报,2016,18(12):1624-1633.
- [24] Breiman L. Bagging predictors [J]. Machine Learning, 1996,24(2):123-140.
- [25] Ho T. The random subspace method for constructing decision forests [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998,20(8):832-844.
- [26] Breiman L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001,45(1):5-32.
- [27] 董师师,黄哲学.随机森林理论浅析[J].集成技术,2013,2(1):1-7.
- [28] 王仁超,朱品光.基于随机森林回归方法的爆破块度预测模型研究[J].水力发电学报,2020,39(1):89-101.
- [29] 赖成光,陈晓宏,赵仕威,等.基于随机森林的洪灾风险评估模型及其应用[J].水利学报,2015,46(1):58-66.
- [30] YiLmaz I. Comparison of landslide susceptibility mapping methodologies for Koyulhisar, Turkey: Conditional probability, logistic regression, artificial neural networks, and support vector machine [J]. Environmental Earth Sciences, 2010,61(4):821-836.

(上接第167页)

- [19] 鲍士旦.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [20] 王文锋,李春花,黄绍文,等.不同施肥模式对设施菜田土壤微生物量碳、氮的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1286-1297.
- [21] 符鲜,杨树青,刘德平,等.施氮水平对河套灌区套作小麦—玉米土壤微生物量碳、氮的影响研究[J].生态环境学报,2018,27(9):1652-1657.
- [22] Mandal A, Patra A K, Singh D, et al. Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(18):3585-3592.
- [23] Lovell R D, Jarvis S C, Bardgett R D. Soil microbial biomass and activity in long term grassland: Effects of management changes [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995,27(7):969-975.
- [24] 陶朋闯,陈效民,靳泽文,等.生物质炭与氮肥配施对旱地红壤微生物量碳、氮和碳氮比的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):231-235.
- [25] Tian Yongqiang, Zhang Xueyan, Liu Jun, et al. Effects of summer cover crop and residue management on cucumber growth in intensive Chinese production systems: Soil nutrients, microbial properties and nematodes [J]. Plant and Soil, 2011,339(1/2):299-315.