

设施番茄废弃物原位厌氧还田 对土壤理化特性的影响

车江伟, 蔡兴栋, 徐发明, 王利, 李金霞, 白彭彭, 杨晓妮, 李富强, 孙小妹

(甘肃农业大学资源与环境学院 兰州 730070)

摘要:为解决环保低成本处理生产环节中设施蔬菜废弃物处理不当引发的农业面源污染问题,以设施番茄废弃物为外源碳,设置大样本量的番茄废弃物全量原位厌氧还田(TRR)与不还田(CK)处理,分析其对还田前期、还田结束期和果实成熟期3个时期土壤pH、电导率及有机质、速效磷、速效钾、碱解氮含量的影响。结果表明,与CK相比,TRR处理对土壤速效磷含量影响不显著,但使果实成熟期的土壤电导率及有机质、速效钾、碱解氮含量分别显著提高15.47%、21.80%、25.63%、18.54%。在TRR处理中,番茄废弃物全量原位厌氧还田处理前期、处理结束期和果实成熟期3个时期土壤pH先上升后下降,速效磷含量变化不显著;与番茄废弃物全量原位厌氧还田处理前期相比,果实成熟期土壤有机质、速效钾、碱解氮含量以及电导率分别显著提高25.88%、47.86%、23.70%、12.90%。以上结果表明,番茄废弃物全量原位厌氧还田可提高土壤有机质和速效养分含量,对土壤理化特性具有正向效应,是一种环境友好型的处理措施。

关键词: 蔬菜废弃物; 原位厌氧还田; 土壤理化特性

中图分类号: S154

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2024)08-146-06

Effect of tomato residues in-situ anaerobic return on soil physicochemical properties

CHE Jiangwei, CAI Xingdong, XU Faming, WANG Li, LI Jinxia, BAI Pengpeng, YANG Xiaoni, LI Fuqiang, SUN Xiaomei

(College of Resource and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: To solve the problem of agricultural non-point source pollution caused by improper treatment of facility vegetable waste in the production process of environmental protection and low-cost treatment, a large sample of tomato waste was treated with in-situ anaerobic return (TRR) and no return (CK) using facility tomato waste as external carbon. The effects of TRR and CK on soil pH, conductivity, organic matter, available phosphorus, available potassium, and alkaline nitrogen content during the early stage of returning to the field, the end stage of returning to the field, and the fruit ripening stage were analyzed. The results showed that compared with CK, TRR treatment had no significant effect on soil available phosphorus content, but significantly increased soil conductivity, organic matter, available potassium, and alkaline nitrogen content during fruit ripening by 15.47%, 21.80%, 25.63%, and 18.54%, respectively. In TRR treatment, the soil pH first increased and then decreased during the early stage, end stage, and fruit ripening stage of the in-situ anaerobic return of tomato waste, and the change in available phosphorus content was not significant. Compared with the early stage of in-situ anaerobic return of tomato waste, the soil organic matter, available potassium, alkaline nitrogen content, and electrical conductivity during fruit ripening were significantly increased by 25.88%, 47.86%, 23.70%, and 12.90%, respectively. In summary, the results indicated that the complete in-situ anaerobic return of tomato waste can increase soil organic matter and available nutrient content, have a positive effect on soil physicochemical properties, and is an environmentally friendly treatment measure.

Key words: Vegetable residues; In-situ anaerobic return; Soil physicochemical properties

收稿日期: 2023-12-07; 修回日期: 2024-06-07

基金项目: 甘肃省科技厅乡村振兴专项(23CXNA0002); 甘肃省科技重大专项计划(24ZD6CN007); 甘肃省现代丝路寒旱农业科技支撑计划(GSLK-2021-19); 甘肃省科技重点研发计划(20YF8NH154)

作者简介: 车江伟, 男, 在读硕士研究生, 主要从事农业生态学方面的研究。E-mail: 3462755998@qq.com

通信作者: 孙小妹, 女, 副教授, 主要从事农业生态学方面的研究。E-mail: sunxm@gsau.edu.cn

我国作为蔬菜生产与消费大国,2019年全国蔬菜产量达到7.20亿t^[1]。在过去的10年里,中国每年蔬菜种植面积超过2080万hm^{2[2]},约占全球蔬菜种植面积的49%^[3],每年生产了超过7.12亿t各类蔬菜。根据联合国粮农组织(FAO)统计,在蔬菜收获、贮存、加工包装和运输过程中,会产生占比高达30%~50%的蔬菜废弃物(残果、根、茎、叶)^[4]。由于蔬菜废弃物含水量高,随意倾倒和堆积,易腐烂并产生恶臭气体,造成农业面源污染^[5-6]。茄果类蔬菜作为全国设施蔬菜的主栽类型,存在废弃物量大、纤维化程度高、不易分解的问题。农户多采用户外堆积晾晒后焚烧的方式来处理,导致农业CO₂排放量增加^[7],有违“双碳”目标。因此,探究低成本且高效、环保的设施茄果类蔬菜废弃物处理措施,对打破设施蔬菜产业发展壁垒、减少农业碳排放量具有指导意义。

目前,蔬菜废弃物的资源化利用方式主要有肥料化、原料化、饲料化、能源化和基料化。利用蔬菜废弃物制造肥料的研究在国内外已有较多报道,如利用蔬菜废弃物堆肥处理后还田,可显著降低土壤容重,增强土壤持水能力和增大通气孔隙,为小麦高产提供良好的土壤条件^[8]。但是蔬菜废弃物中高达85%的含水量是肥料化技术推广的瓶颈^[9]。原料化处理中有效成分的提取分离或高附加值产物的生产需要成熟的技术支撑且安全性有待评估^[10]。沤肥和堆肥方式产生臭气、氮损失严重且病原微生物去除率低^[6]。能源化对蔬菜废弃物纯度、粒径及生产工艺要求高,附属产品(沼液与沼渣)处理不当造成二次污染而限制推广实施^[11]。因此,急需探索经济可行、全量化高效利用蔬菜废弃物的处理技术。

生物土壤灭菌(reductive soil disinfection, BSD)是一种修复退化土壤的生态恢复法^[12],将易分解的有机或无机物料添加入土壤,结合灌溉+覆膜措施,在短时间内创造强烈的土壤厌氧还原状况,利用缺氧环境和分解过程产生的酸性物质,降低土传病原菌丰度,减缓连作障碍,达到土壤修复的效果。常用的有机物料有水稻秸秆、玉米秸秆、苜蓿粉、甘蔗渣等^[13]。基于BSD的原理,以茄果类蔬菜废弃物替代BSD法的常用有机物料,是否既能实现茄果类蔬菜尾菜的环保型处理,又具有改善土壤质量的效果有待于进一步研究。此外,考虑到茄果类废弃物中纤维素含量较高,添加腐解菌剂可加快有机物的分解,缩短焖棚处理时间。因此,笔者基于BSD法的原理,在日光温室中开展番茄废弃物不

田和全量原位还田+灌水+覆膜处理,通过大样本量比对分析番茄废弃物全量原位厌氧还田对土壤理化特性的影响,探究设施番茄废弃物环境友好型的处理方式,为加强茄果类设施蔬菜废弃物处理提供可靠的数据支撑,促进设施蔬菜产业的健康发展。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于河西走廊东端的武威市凉州区发放镇日光温室产业园区。该区属于温带大陆性干旱气候,干旱少雨、日照充足、昼夜温差大。年平均降水量170.3mm,年蒸发量1994.3mm,年平均温度7.7℃,无霜期150d左右,日照时数2873.4h,昼夜温差7.9℃^[14]。发放镇日光温室产业园区土壤理化特性如下:pH为7.64~8.35,电导率为345~514μS·cm⁻¹,土壤有机质含量(w,后同)为18.23~25.15g·kg⁻¹,碱解氮含量为99.40~108.20mg·kg⁻¹,速效磷含量136.21~207.06mg·kg⁻¹,速效钾含量为714.29~832.00mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验于2021年6月至2022年2月进行。2021年6月,在武威市凉州区发放镇日光温室产业园区陆续开展番茄废弃物全量原位厌氧还田处理,具体操作流程参照孙小妹等^[15]的报道。为避免所调查日光温室基底环境差异和管理模式对处理间差异显著性的影响,通过增大调查样本量,探明番茄废弃物全量原位厌氧还田对土壤理化特性的影响规律。试验设定2个处理:番茄废弃物全量原位厌氧还田1次(TRR, n=44)、番茄废弃物不还田(CK, n=26),n为日光温室数目。分别监测番茄废弃物全量原位厌氧还田处理前期(2021年6月)、番茄废弃物全量原位厌氧还田处理结束期(2021年7月)、果实成熟期(2022年2月)的土壤特性。

1.3 测定指标与方法

于番茄废弃物全量原位厌氧还田处理前期、处理结束期和果实成熟期采用“S”型布点法,在70个日光温室内(面积420m²)分别选5点采集0~20cm土层土样,3次重复。土样混匀后按照四分法剔除细根、石块等杂质,带回实验室风干过筛后测定土壤理化活性。采用电位法测定土壤pH,采用电极法测定电导率,采用重铬酸钾外加热法测定有机质含量,采用硼酸扩散吸收法测定碱解氮含量,采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定速效磷含量,采用火焰光度法测定速效钾含量^[16]。

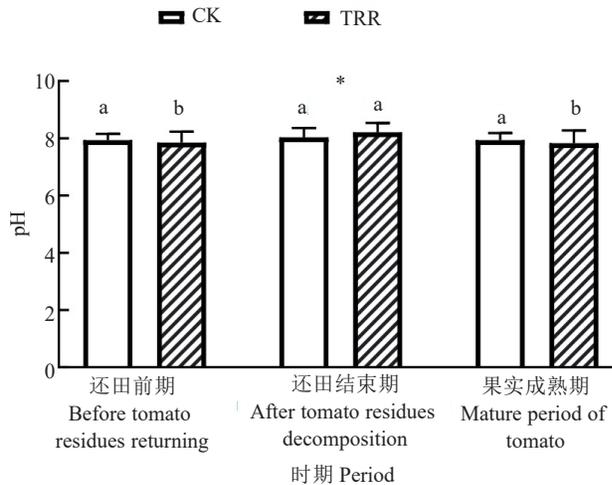
1.4 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 26.0 对数据进行处理和差异显著性分析;采用 Graphpad Prism 8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 番茄废弃物全量原位厌氧还田对土壤 pH 的影响

由图 1 可以看出,在番茄废弃物全量原位厌氧还田处理结束期,TRR 处理的土壤 pH 较 CK 显著提高 2.22%,但在果实成熟期,TRR 与 CK 处理间土壤 pH 差异不显著。CK 处理下番茄废弃物全量原位厌氧还田处理前期、处理结束期和果实成熟期土壤 pH 差异不显著,而在 TRR 处理下,番茄废弃物全量原位厌氧还田处理结束期土壤 pH 显著高于还田处理前期 4.43%和果实成熟期 4.64%。



注: *表示同一时期的不同处理在 0.05 水平差异显著;不同小写字母表示同一处理的不同时期在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: * represents significant difference among different treatments of the same period at 0.05 level; different small letters represent significant difference among different periods of the same treatment at 0.05 level. The same below.

图 1 番茄废弃物全量原位厌氧还田对土壤 pH 的影响
Fig. 1 Effect of tomato residues anaerobic incorporation on soil pH

2.2 番茄废弃物全量原位厌氧还田对土壤电导率的影响

由图 2 可以看出,TRR 处理使番茄废弃物全量原位厌氧还田处理结束期和果实成熟期的土壤电导率分别显著高于 CK 8.85%和 15.47%。CK 处理下番茄废弃物全量原位厌氧还田处理前期、处理结束期和果实成熟期 3 个时期土壤电导率差异不显著;而 TRR 处理中,番茄废弃物全量原位厌氧还田处理结束期和果实成熟期的土壤电导率分别比

番茄废弃物全量原位厌氧还田处理前期显著提高 7.03%和 12.90%。

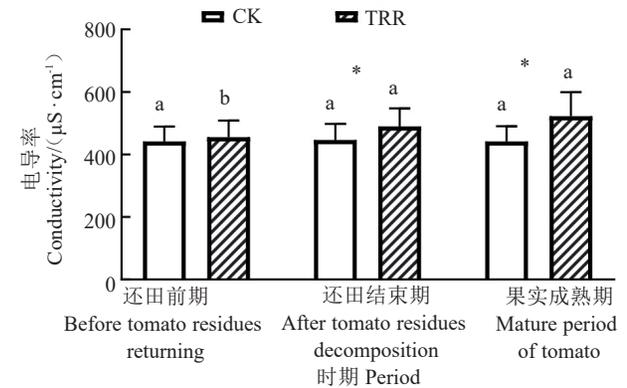


图 2 番茄废弃物全量原位厌氧还田对土壤电导率的影响
Fig. 2 Effect of tomato residues anaerobic incorporation on soil conductivity

2.3 番茄废弃物全量原位厌氧还田对土壤有机质含量的影响

由图 3 可以看出,TRR 处理使番茄废弃物全量原位厌氧还田处理结束期和果实成熟期的土壤有机质含量分别显著高于 CK 12.03%和 21.80%。在 CK 处理中,番茄废弃物全量原位厌氧还田处理前期、处理结束期和果实成熟期 3 个时期土壤有机质含量差异不显著。而 TRR 处理中,果实成熟期土壤有机质含量显著高于番茄废弃物全量原位厌氧还田处理前期 25.88%和处理结束期 13.40%,番茄废弃物全量原位厌氧还田处理结束期土壤有机质含量比还田处理前期显著提高 14.40%。

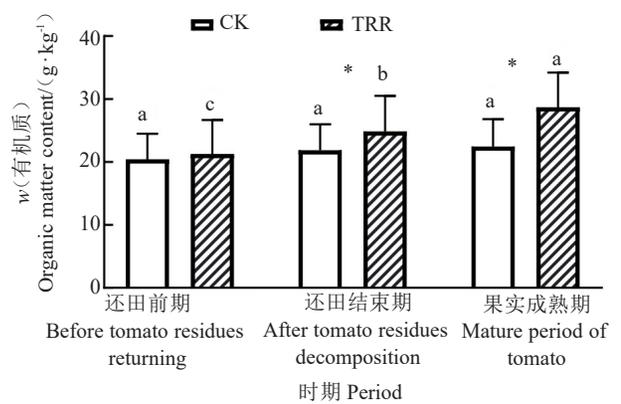


图 3 番茄废弃物全量原位厌氧还田对土壤有机质含量的影响
Fig. 3 Effect of tomato residues anaerobic incorporation on soil organic matter content

2.4 番茄废弃物全量原位厌氧还田对土壤碱解氮含量的影响

由图 4 可以看出,TRR 处理使番茄废弃物全量

原位厌氧还田处理结束期和果实成熟期的土壤碱解氮含量分别比 CK 显著提高 13.70% 和 18.54%。在 CK 处理中,番茄废弃物全量原位厌氧还田处理结束期和果实成熟期的土壤碱解氮含量分别比还田处理前期显著提高 5.90% 和 9.92%;在 TRR 处理中,果实成熟期的土壤碱解氮含量比番茄废弃物全量原位厌氧还田处理前期显著提高 23.70%。

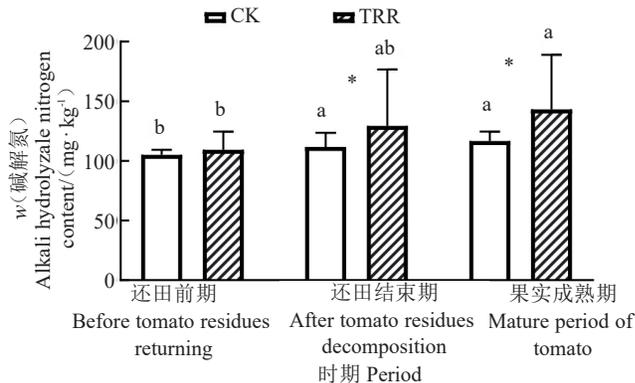


图4 番茄废弃物全量原位厌氧还田对土壤碱解氮含量的影响

Fig. 4 Effect of tomato residues anaerobic incorporation on soil alkaline nitrogen content

2.5 番茄废弃物全量原位厌氧还田对土壤速效磷含量的影响

由图5可以看出,CK和TRR处理在番茄废弃物全量原位厌氧还田处理前期、还田处理结束期和果实成熟期3时期均表现为土壤速效磷含量差异不显著。在CK处理中,番茄废弃物全量原位厌氧还田处理前期、还田处理结束期和果实成熟期3时期的土壤速效磷含量差异不显著;在TRR处理中,番茄废弃物全量原位厌氧还田处理前期、还田

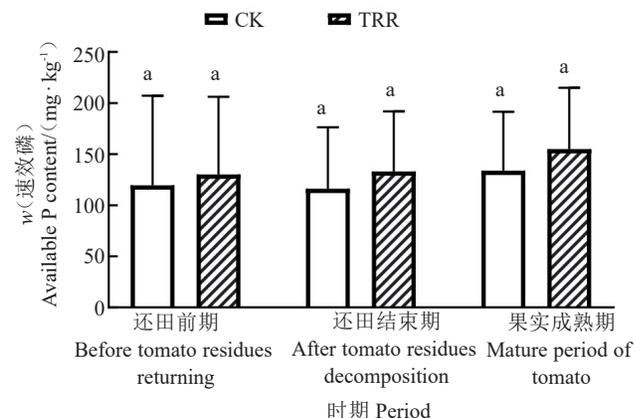


图5 番茄废弃物全量原位厌氧还田对土壤速效磷含量的影响

Fig. 5 Effect of tomato residues anaerobic incorporation on soil available phosphorus content

处理结束期和果实成熟期3个时期的土壤速效磷含量差异不显著。

2.6 番茄废弃物全量原位厌氧还田对土壤速效钾含量的影响

由图6可以看出,TRR处理使番茄废弃物全量原位厌氧还田果实成熟期的土壤速效钾含量比CK显著提高25.63%。在CK处理中,番茄废弃物全量原位厌氧还田处理前期与还田处理结束期的土壤速效钾含量差异不显著,而果实成熟期的土壤速效钾含量比番茄废弃物全量原位厌氧还田处理前期显著提高37.01%;在TRR处理中,果实成熟期的土壤速效钾含量显著高于番茄废弃物全量原位厌氧还田处理前期(47.86%)和还田处理结束期(42.48%)。

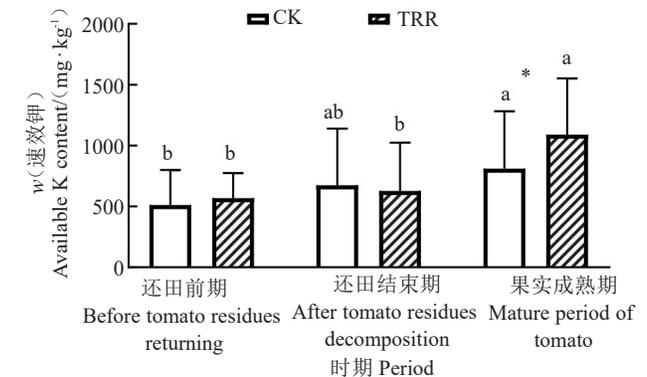


图6 番茄废弃物全量原位厌氧还田对土壤速效钾含量的影响

Fig. 6 Effect of tomato residues anaerobic incorporation on soil available potassium content

3 讨论与结论

土壤pH是衡量有机物分解和微生物群落进化程度的重要指标^[1]。笔者在本研究发现,TRR处理下,土壤pH先升高后降低。闫元元等^[17]研究表明,pH与淹水时间呈显著的线性正相关,淹水处理土壤晾干后,各处理土壤pH又有所回降。由灌水覆膜处理营造的强还原环境,会消耗更多的H⁺,导致在番茄废弃物厌氧还田腐解过程中pH升高,而当厌氧环境所形成的强还原过程减弱后,pH又有所回降^[18]。电导率一定程度上能反映溶液中可溶性盐含量的变化^[4],TRR处理使土壤电导率显著高于CK,即番茄废弃物全量原位厌氧还田会造成土壤中可溶性盐类离子增加,变化幅度为0.2~1.5 mS·cm⁻¹。朱同彬等^[19]在利用玉米秸秆厌氧还田修复退化设施蔬菜地土壤的研究中发现,淹水处理待土壤排水落

干后,土壤电导率显著升高,且随有机物料添用量的增加而增大,这与土壤中速效养分的释放有关^[20]。

土壤有机质含量是衡量土壤肥力和保墒能力的关键指标^[21],增加土壤有机质的重要性在于其对改善土壤物理性质、保持水分和增加有效养分的作用^[22]。番茄废弃物全量原位厌氧还田处理结束期土壤有机质含量较前期显著升高,这与前人的研究结果一致。蔬菜废弃物全量原位厌氧还田有效提高土壤有机质含量,秸秆还田能够显著提高土壤有机碳和活性有机碳的含量^[23]。由于番茄废弃物富含有机碳,微生物的分解作用使外源有机碳投入增加,提高了土壤有机质含量^[24-25]。研究表明,土壤微生物与秸秆之间存在反馈效应,土壤微生物影响秸秆的分解和腐殖质的形成,而秸秆也会影响土壤微生物的数量和群落结构^[26]。番茄废弃物全量原位厌氧还田会提高土壤微生物的丰度,从而促进微生物群落的新陈代谢及其产物的积累^[27-28],微生物残渣及其产物促进了有机质循环转化,这是增加土壤有机质的另外一个关键原因。而不同类型的外源有机物料还田后对增加土壤有机质的效果存在差异,甘蓝叶残体还田后土壤有机碳含量普遍高于番茄秸秆还田处理^[24],这是由于甘蓝叶木质化程度较低,部分易分解木质素,经微生物转化为稳定的有机物质^[21]。

外源有机物的添加在实现土壤有机质含量提升的同时,大量和微量营养元素也被释放。本研究中碱解氮含量随番茄废弃物全量原位厌氧还田处理进程而有所升高。玉米秸秆释放出的氮素和有机质对土壤 NH_4^+ 具有正反馈效应,土壤氮的矿化和供氮能力随秸秆还田而提高^[29]。但 Su 等^[30]在秸秆还田对土壤理化特性影响的 Meta-分析中发现,秸秆还田量是影响土壤理化特性的关键。在秸秆还田量为 50% 处理下,土壤速效氮含量显著高于秸秆还田量为 100% 的处理^[26]。因此,有关蔬菜废弃物全量原位厌氧还田量对土壤速效氮影响的研究有待继续深入。番茄废弃物全量原位厌氧还田提高了土壤速效钾的含量,这是因为蔬菜废弃物在分解过程中,矿质元素也被释放;同时强还原过程中产生的大量有机酸对固定钾化合物的溶解具有抑制效应,加速土壤中矿物钾向交换性钾的转化^[31]。

综上所述,番茄废弃物全量原位厌氧还田对土壤速效磷含量的影响不显著,但番茄废弃物全量原位厌氧还田使果实成熟期的土壤电导率及有机质、速效钾、碱解氮含量分别显著提高 15.47%、21.80%、25.63%、18.54%。即番茄废弃物全量原位厌氧还田

处理后可以提高土壤肥力,使蔬菜废弃物合理高效利用,提高了温室土壤的可持续利用能力。

参考文献

- [1] AWASTHI M K, WANG Q, CHEN H Y, et al. Evaluation of biochar amended biosolids co-composting to improve the nutrient transformation and its correlation as a function for the production of nutrient-rich compost[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 237:156-166.
- [2] JI L, YOU L Z, SEE L, et al. Spatial and temporal changes of vegetable production in China[J]. *Journal of Land Use Science*, 2018, 13(5):494-507.
- [3] 巴音,张光全,薛伟,等.黄土高原半干旱区尾菜高量埋压抑制土壤氮淋溶的研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(2):434-444.
- [4] CAO C, LIU S Q, MA Z B, et al. Dynamics of multiple elements in fast decomposing vegetable residues[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 616:614-621.
- [5] YUN C X, YAN C R, XUE Y H, et al. Effects of exogenous microbial agents on soil nutrient and microbial community composition in greenhouse-derived vegetable straw composts[J]. *Sustainability*, 2021, 13(5):2925.
- [6] LIU F, QIU L, LI Z L. Gas characteristics generated from vegetable wastes by anaerobic fermentation[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2013, 22(10):162-170.
- [7] LI Y, FENG H, DONG Q G, et al. Ammoniated straw incorporation increases wheat yield, yield stability, soil organic carbon and soil total nitrogen content[J]. *Field Crops Research*, 2022, 284:108558.
- [8] 张志刚,董春娟,高苹,等.蔬菜残株堆肥及微生物菌剂对设施辣椒栽培土壤的改良作用[J]. *西北植物学报*, 2011, 31(6):1243-1249.
- [9] 刘佳豪,姚昕,翟胜,等.我国蔬菜废弃物资源化利用技术分析及其展望[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(5):636-644.
- [10] SAGAR N A, PAREEK S, SHARMA S, et al. Fruit and vegetable waste: Bioactive compounds, their extraction, and possible utilization[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2018, 17(3):512-531.
- [11] 朱同彬,孟天竹,张金波,等.强还原方法对退化设施蔬菜地土壤的修复[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9):2619-2624.
- [12] 蔡祖聪,张金波,黄新琦,等.强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3):469-476.
- [13] MOMMA N, MOMMA M, KOBARA Y. Biological soil disinfection using ethanol: Effect on *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* and soil microorganisms[J]. *Journal of General Plant Pathology*, 2010, 76(5):336-344.
- [14] 汪玮玮,冯永林,刘海龙.甘肃省武威市凉州区西北部干热岩资源分布与潜力评估[J]. *工程建设与设计*, 2018(15):26-28.
- [15] 孙小妹,俞兆鹏,吕文军,等.番茄秸秆原位还田配施腐解菌剂对番茄生产的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(3):136-144.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [17] 闫元元,周开胜,张金波,等.强还原土壤灭菌处理对连作病土

- 改良效果的影响因素[J].土壤,2022,54(3):508-516.
- [18] 秦渊渊,李友丽,郭文忠,等.3种发酵因素对蔬菜废弃物降解与产物特性的影响[J].中国蔬菜,2019(5):45-51.
- [19] 朱同彬,孙盼盼,党琦,等.淹水添加有机物料改良退化设施蔬菜地土壤[J].土壤学报,2014,51(2):335-341.
- [20] 李继福,鲁剑巍,李小坤,等.麦秆还田配施不同腐秆剂对水稻产量、秸秆腐解和土壤养分的影响[J].中国农学通报,2013,29(35):270-276.
- [21] LIU X, HERBERT S J, HASHEMI A M, et al. Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation-a review[J]. Plant Soil and Environment, 2006, 52(12): 531-543.
- [22] TURMEL M S, SPERATTI A, BAUDRON F, et al. Crop residue management and soil health: A systems analysis[J]. Agricultural Systems, 2015, 134: 6-16.
- [23] 吴文辉,朱为静,朱凤香,等.蔬菜废弃物还田量及配施菌剂对土壤腐殖质组成的影响[J].农业资源与环境学报,2022,39(1):182-192.
- [24] ZHANG J J, CAO Z Y, FENG G Z, et al. Effects of integrated soil-crop system management on soil organic carbon characteristics in a Primosol in Northeast China[J]. Pedosphere, 2017, 27(5):957-967.
- [25] WANG F, LIANG Y T, JIANG Y J, et al. Planting increases the abundance and structure complexity of soil core functional genes relevant to carbon and nitrogen cycling[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14345.
- [26] MAARASTAWI S A, FRINDTE K, GEER R, et al. Temporal dynamics and compartment specific rice straw degradation in bulk soil and the rhizosphere of maize[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 127: 200-212.
- [27] BLAGODATSKAYA E V, BLAGODATSKY S A, ANDERSON T H, et al. Contrasting effects of glucose, living roots and maize straw on microbial growth kinetics and substrate availability in soil[J]. European Journal of Soil Science, 2009, 60(2): 186-197.
- [28] SHAN J, YAN X Y. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils[J]. Atmospheric Environment, 2013, 71: 170-175.
- [29] WANG Y L, WU P N, MEI F J, et al. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 288: 112391.
- [30] SU Y, LÜ J L, YU M, et al. Long-term decomposed straw return positively affects the soil microbial community[J]. Journal of Applied Microbiology, 2020, 128(1): 138-150.
- [31] CABILES D M S, ANGELES O R, JOHNSON-BEEBOUT S E, et al. Faster residue decomposition of brittle stem rice mutant due to finer breakage during threshing[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(2): 211-216.