

段晓婷, 叶 静, 林 辉, 等. 地理式秸秆反应堆对南方越冬茄子生产及温室土壤微环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1296–1304.
DUAN Xiao-ting, YE Jing, LIN Hui, et al. Effects of buried straw bioreactor technology on the production of winter greenhouse eggplant and the soil microenvironment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1296–1304.

地理式秸秆反应堆对南方越冬茄子生产及温室土壤微环境的影响

段晓婷^{1,2}, 叶 静^{2*}, 林 辉², 邹 平², 孙万春², 马军伟², 符建荣^{2*}

(1. 浙江农林大学环境与资源学院, 杭州 311300; 2. 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021)

摘要:为分析不同秸秆生物反应堆技术对茄子生产及温室土壤微环境的影响, 设置常规栽培的CK、T1(秸秆 22 500 kg·hm⁻²)、T2(秸秆 22 500 kg·hm⁻²+菌剂 60 kg·hm⁻²+羊粪 7800 kg·hm⁻²)和T3(秸秆 22500 kg·hm⁻²+菌剂 60 kg·hm⁻²+羊粪 7800 kg·hm⁻²+腐植酸 750 kg·hm⁻²)4个处理。结果表明: 使用秸秆生物反应堆技术, 茄子产量可以提高 29.2%~32.0%, 但不同秸秆反应堆处理之间无显著差异; 秸秆反应堆技术可增加茄子中可溶性总糖、维生素 C 和固形物含量, 降低硝酸盐含量, 明显改善品质。3种秸秆反应堆技术均有效提高了温室土壤 CO₂ 排放通量, 增加植株根系周边土壤有机质和总氮含量, 其中有机肥和菌剂的添加促进了早期 CO₂ 释放, 有利于土壤有机质和养分累积, 腐植酸的添加对温室 CO₂ 的产生影响不大, 但可以提高土壤微生物代谢能力。对土壤微生物数量的分析表明, 秸秆生物反应堆提高了植株根系周边土壤中的真菌数量, 降低土壤细菌数量。其中 T3 处理倾向于提高苗期土壤中真菌数量和花期土壤中细菌数量, 而 T2 处理倾向于提高花期和盛果期栽培土壤中的真菌数量以及盛果期栽培土壤细菌数量。研究表明, 秸秆生物反应堆可以显著提高茄子产量和品质, 增加温室土壤 CO₂ 排放通量, 提高植株根系周边土壤有机质和养分含量, 影响土壤中微生物代谢活性, 改变栽培过程中真菌和细菌的数量变化模式。

关键词: 地理式秸秆反应堆; 温室; 茄子; CO₂ 通量; 土壤微生物

中图分类号: X712 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)06-1296-09 doi:10.11654/jaes.2018-1273

Effects of buried straw bioreactor technology on the production of winter greenhouse eggplant and the soil microenvironment

DUAN Xiao-ting^{1,2}, YE Jing^{2*}, LIN Hui², ZOU Ping², SUN Wan-chun², MA Jun-wei², FU Jian-rong^{2*}

(1. School of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China; 2. Institute of Environmental, Resources, Soil and Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract: In order to investigate the effects of different straw bioreactor technologies on greenhouse eggplant production and the soil microenvironment, four treatments were set up in this experiment, namely CK, T1 (straw 22 500 kg·hm⁻²), T2 (straw 22 500 kg·hm⁻² + microbial inoculants 60 kg·hm⁻² + sheep dung 7800 kg·hm⁻²), and T3 (straw 22 500 kg·hm⁻² + microbial inoculants 60 kg·hm⁻² + sheep dung 7800 kg·hm⁻² + humic acid 750 kg·hm⁻²). The results showed that the yield of eggplant could be increased by 29.2%~32.0% under the different straw bioreactor treatments compared with that of CK, but there was no significant difference in eggplant yield between the different straw

收稿日期: 2018-10-10 录用日期: 2018-11-29

作者简介: 段晓婷(1991—), 女, 山西忻州人, 硕士研究生, 从事污染场地修复与农产品安全研究。E-mail: duanxt628@163.com

*通信作者: 叶 静 E-mail: yejing@zaas.ac.cn; 符建荣 E-mail: fujr@zaas.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201007); 浙江省基础公益研究计划项目(LGN18D010005); 浙江省科技计划项目公益技术应用研究计划(2017C32005)

Project supported: The National Key of Research and Development Projects(2016YFD0201007); Basic Public Welfare Research Project of Zhejiang Province (LGN18D010005); Science and Technology Planning Project for Public Technology Application Research Plan of Zhejiang Province (2017C32005)

bioreactor treatments. The bioreactor technology increased the concentration of total soluble sugar, vitamin C, and solids, and decreased the nitrate content in eggplant. The three straw bioreactor technologies effectively increased the average greenhouse soil CO₂ flux and the soil organic carbon and total nitrogen contents. The amendment of organic fertilizers and microbial inoculants promoted CO₂ release in the early growing stage of the greenhouse eggplant, which was beneficial to soil organic carbon and nutrient accumulation. The addition of humic acid had little effect on the greenhouse CO₂ production, but it could improve soil microbial activities. Further analysis of soil microbial quantity showed that the straw bioreactor increased the quantity of fungi in the rhizosphere and reduced the quantity of soil bacteria. Treatment T3 tended to increase the quantity of soil fungi at the seedling stage and the quantity of soil bacteria at the flowering stage, while treatment T2 tended to increase the quantity of soil fungi at the flowering and fruiting stages and the quantity of soil bacteria during the fruiting period. Our results indicated that the straw bioreactor could significantly improve the yield and quality of eggplant, increase the average greenhouse soil CO₂ flux, and increase the soil organic carbon and total nitrogen contents around the root system. The straw bioreactor could also influence soil microbial metabolic activities via microbial community changes during the cultivation process.

Keywords: buried straw bioreactor; greenhouse; eggplant; CO₂ flux; soil microorganism

地理式秸秆生物反应堆技术,又称二氧化碳缓释富氧秸秆发酵技术,是一项全新概念的农业增产、提质的有机栽培理论技术^[1]。该技术依据有机物质的微生物代谢原理,利用微生物菌种发酵作物秸秆释放CO₂,为设施蔬菜光合作用提供CO₂原料,同时产生蔬菜生长所需要的热量^[2]。此外,在内置式秸秆生物反应堆(地理式秸秆生物反应堆)中,秸秆发酵过程中所产生的分泌物及微生物可以进入土壤,具有改善设施蔬菜土壤环境以及抑制土传病虫害发生的潜能^[3-6]。孙婧等^[7]研究指出,在北方温室番茄中应用内置式秸秆反应堆技术,能够显著降低土壤酸性和电导率,缓冲土壤酸化和次生盐渍化,增加土壤有机质含量和土壤微生物量。宋尚成等^[8]表明,秸秆生物反应堆对修复西瓜连作土壤有一定作用。现有的秸秆反应堆技术在我国北方大部分地区设施蔬菜生产中得到推广和广泛应用,并取得了良好的效果^[9-10]。然而,秸秆生物反应堆技术在我国南方设施蔬菜生产中的研究和应用还较少。

浙江省秸秆资源丰富。秸秆还田技术经过长期研究,基本形成了较为成熟的系列技术,但由于不同区域轮作模式的差异、劳动力资源的成本差异等原因,大量的农作物秸秆资源仍未得到合理利用。提高秸秆资源化利用率,是实现生态循环农业的技术关键之一。若能通过秸秆生物反应堆技术,将农作物秸秆进行高值化利用,每公顷土地有机物消纳量可达45~60 t,可在很大程度上解决有机废弃物的出路问题,市场潜力很大。此外,浙江省经济发达,蔬菜连作尤其是设施栽培,提高了土地复种指数,使土地资源得到充分利用,经济效益明显提高。但在设施蔬菜高强度栽培条件下,由于采取的人工措施改变了局部生态环

境的土壤自然条件下的水热平衡,其温度、光照、通气条件和水肥管理等均不同于一般大田,主要表现为CO₂的严重亏缺、土壤有机质及养分容量降低、土壤次生盐渍化趋势加快、土壤养分不平衡等^[11-13]。考虑到秸秆生物反应堆在增温、CO₂施肥和改良土壤方面的潜能,在浙江省蔬菜设施生产中引入秸秆生物反应堆技术很可能有助于以上问题的解决。我国北方秸秆反应堆的应用,主要是解决温室中CO₂不足及提高土壤温度两大问题,而南方气温相对较高,温室栽培中CO₂不足是需要解决的关键问题。同时,南北方土壤性质以及栽培方式等均存在差异,要使秸秆生物反应堆技术能够在南方设施蔬菜应用中取得理想的效果,还需要进一步明确秸秆反应堆的效应、适宜配方及配套技术组合等。

为此,本文在浙江省杭州市温室越冬茄子生产中进行地理式秸秆生物反应堆技术试验,探究不同秸秆生物反应堆技术对茄子产量与品质、土壤理化性质、土壤微生物特征等的影响,筛选最佳的秸秆生物反应堆处理措施,以期为该技术在南方设施蔬菜生长中的应用推广提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2017年12月在浙江省杭州市郑氏蔬菜标准化示范园区进行,地点位于萧山区临浦镇,透明塑料温室,耕层土壤类型为水稻土,pH值为4.37,有效磷含量为31.33 mg·kg⁻¹,速效钾含量为132.25 mg·kg⁻¹。

供试作物为杭长一号,供试秸秆为收获后的水稻秸秆。供试菌种为微生物腐秆剂(有机物料腐熟剂),

可刺激作物生长,增加养分吸收,抑制植物病害发生,提高作物品质,有效活菌数 ≥ 0.5 亿 $\cdot g^{-1}$ 。

1.2 试验设计

地理式秸秆反应堆试验共设置4个处理(4个温室):CK为常规措施;T1为秸秆反应堆1;T2为秸秆反应堆2;T3为秸秆反应堆3。各处理及配方详见表1。

表1 秸秆反应堆各处理详细配方

Table 1 Detailed formulation for each treatment of straw reactor

编号 Number	处理 Treatments	配比用量 The ratio of the dosage
CK	对照	常规栽培,不铺设秸秆
T1	秸秆反应堆1	秸秆 22 500 kg \cdot hm $^{-2}$
T2	秸秆反应堆2	秸秆 22 500 kg \cdot hm $^{-2}$ +菌剂 60 kg \cdot hm $^{-2}$ +羊粪 7800 kg \cdot hm $^{-2}$
T3	秸秆反应堆3	秸秆 22 500 kg \cdot hm $^{-2}$ +菌剂 60 kg \cdot hm $^{-2}$ +羊粪 7800 kg \cdot hm $^{-2}$ +腐植酸 750 kg \cdot hm $^{-2}$

秸秆生物反应堆具体操作方法如图1所示:定植前,在温室种植行下开沟,沟深约30 cm、宽约40~60 cm,长度与行长相等;腐熟剂与麦麸混匀;将秸秆均匀撒于沟内,一层秸秆,一层腐熟剂,一层羊粪混匀铺在沟中,用铁锹拍振一遍后,将两边开沟的土壤分别覆于秸秆上,一般覆土厚度为8~10 cm,并做成栽培畦;地理式反应堆做好后进行浇水,保持土壤湿度,水量以湿透秸秆为准;浇水后3~5 d内将植株移栽在畦的两侧,地膜覆盖后,每隔1.5 m打一孔,孔深以穿透秸秆为宜,以利于O $_2$ 进入发酵,释放CO $_2$,促进秸秆腐熟分解。

1.3 样品采集与处理

茄子采样时间为6月盛果期,在4个温室中各取一定量成熟的茄子,置于4℃冰箱鲜样保存,用于品质检测。在秸秆生物反应堆启动后定期用土钻采集土样,采样分为两个部位:一部分土样取自秸秆反应

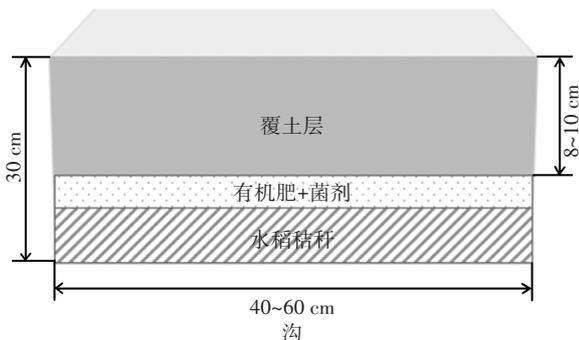


图1 秸秆生物反应堆示意图

Figure 1 Schematic diagram of straw biological reactor

堆两侧,即植株根部外侧约3 cm左右的0~20 cm土样;另一部分取自秸秆生物反应堆中心0~20 cm的土样。具体操作如图2所示。土样一部分于4℃冰箱保存,用于微生物数量和微生物多样性的测定,另一部分风干过筛,用于测定pH值、有机质、全氮等土壤理化参数。

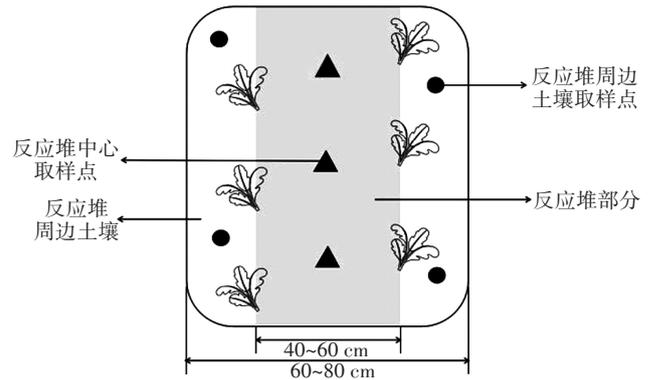


图2 土壤采样示意图

Figure 2 Soil sampling diagram

1.4 测定方法

1.4.1 MicroRESP™方法

MicroRESP™技术是一种基于土壤微生物代谢功能研究土壤微生物生态的方法,其利用土壤在不同碳源诱导下的CO $_2$ 产生情况来表征土壤微生物群落水平的生理特征^[14]。该方法与传统微生物平板培养法、Biolog微平板法和多重底物诱导呼吸相比具有明显优势。MicroRESP™技术可克服微生物平板法只能测定可培养微生物、Biolog微平板法依赖土壤悬浮液提取物和细胞后续生长情况、多重底物诱导呼吸自动化程度低等缺点,是研究原位土壤微生物群落水平生理特征的一种较为灵敏、快捷的测定方法^[15]。大致操作步骤如下:(1)4℃冷藏保存的土壤样品必须先预培养活化微生物。均匀称取50 g新鲜土壤于烧杯中,根据土壤样品含水率明确土壤湿度,将所有土壤湿度调至一致,保鲜膜封口后,25℃预培养4 d。(2)检测板配制。在900 mL超纯水中依次加入18.75 mg 酚酞红、16.77 g 氯化钾和0.315 g 碳酸氢钠,溶解后形成指示剂。同时配制3%的纯化琼脂(Sigma),121℃灭菌20 min充分溶解,冷却到60℃后,加入2倍胶体积的指示剂,混合均匀后,取150 μ L指示琼脂添加到检测板的微孔中,配制好的检测微孔板存放在含有碱石灰的避光干燥器里待用。(3)检测。将待测土壤样品均匀添加到96孔深孔板中,并在每个深孔板中添加16种碳源底物(mg C \cdot g $^{-1}$ soil water):水,0;L-丙氨酸,30;

L-阿拉伯糖,30;精氨酸,30;半胱氨酸盐酸盐,30;柠檬酸,30;D-果糖,30;D-半乳糖,30;D-葡萄糖,30; γ -氨基丁酸,30;L-赖氨酸,30;L-苹果酸,30;N-乙酰葡萄糖胺,7.5;草酸,30;原儿茶酸,7.5;海藻糖,30。将检测板倒扣在深孔板上,用夹子固定,在25℃下培养6h。采用酶标仪读取570nm波长下检测板在土壤样品培养前和培养后6h的吸光值,利用吸光值差异计算CO₂产生率(%)。

CO₂产生率和吸光度数据标准化根据下述公式^[14]计算:

$$A_i = (A_{t_6}/A_{t_0}) \times \text{Average}(A_{t_0}) \quad (1)$$

$$\text{CO}_2(\%) = A + B / (1 + D \times A_i) \quad (2)$$

$$W_{\text{CO}_2} = [\text{CO}_2(\%) / 100] \times L \times (44 / 22.4) \times (12 / 44) \times [273 / (273 + T)] / (W \times U) / t \quad (3)$$

式中: A_{t_6} 为检测板在培养6h后的 $A_{570\text{nm}}$ 值; A_{t_0} 为培养前(0h)的 $A_{570\text{nm}}$ 值; $A = -0.2265$; $B = -1.606$; $D = -6.771$; W_{CO_2} 为CO₂产生率, $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; T 为培养温度,25℃; L 为检测板孔体积,945 μL ; W 为土壤鲜质量,g; U 为土壤含水率; t 为培养时间,6h。

利用多样性指数分析不同处理对土壤微生物群落多样性的影响。Shannon-Winner多样性指数(H')表示整个生态系统土壤微生物群落利用碳源类型的多与少,即功能多样性。生态系统Shannon-Winner多样性指数值越大,该系统的土壤微生物群落功能多样性越高,反之则多样性越低。计算公式:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (4)$$

$$P_i = N_i / N \quad (5)$$

1.4.2 土壤CO₂连续监测技术

通过Li-8100A土壤CO₂通量监测系统实现CO₂通量连续监测。为了去除边际效应,取温室中间的一条畦进行试验,在畦上平均取3个点,之后每次监测均在这3个点上,每个点监测3次。第一次监测时间

点为2017年12月29日,之后每隔10d进行一次监测,直至开棚时截至。

1.4.3 土壤理化性质

风干样品用于测定总氮、有机质等养分参数。总氮和有机质采用元素分析仪测定。

1.4.4 微生物计数

土壤微生物数量测定采用稀释平板法,使用选择性培养基分别测定土壤中细菌、真菌的数量。细菌用牛肉膏蛋白胨培养基,真菌用孟加拉红培养基^[16]。

1.4.5 茄子品质测定

经过对样品中的糖提取后,用斐林法氧化还原滴定测定可溶性总糖。采用偏磷酸溶液提取,用2,6-二氯靛酚氧化还原滴定法测定维生素C。糖/酸测定如下:酸,试样浸出液用0.1 mol·L⁻¹氢氧化钠标准溶液进行电位滴定,以pH 8.1为滴定终点;糖/酸=可溶性总糖(%) / 可滴定酸度(%)^[17]。用手持糖量计(WYT-32型)测定固形物。采用比色法用紫外分光光度计测定硝酸盐^[18]。含水率测定:含水率=(茄子鲜质量-茄子干质量)/茄子鲜质量×100%。

1.5 数据处理

试验数据采用Microsoft Excel 2003和SPSS 19.0统计软件处理。不同处理差异显著性分析用单因素方差分析(One-way ANOVA,最小显著差法LSD)。采用SigmaPlot 10.0作图。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆生物反应堆对茄子产量和品质的影响

由表2可知,秸秆反应堆处理产量明显高于对照组,其中T1、T2、T3比CK分别增产32.3%、32.0%、29.2%,可见使用秸秆反应堆技术对温室越冬茄子的增产效果显著,但是3个秸秆反应堆处理间的产量差异不显著。与常规栽培相比,所有秸秆反应堆处理均可有效提高茄子中维生素C含量,降低硝酸盐含量。

表2 不同秸秆生物反应堆对茄子产量和品质的影响

Table 2 Effects of different straw bioreactors on eggplant yield and quality

处理 Treatments	产量 Yield/kg·hm ⁻²	可溶性总糖 Total soluble sugar/%	维生素C Vitamin C/mg·g ⁻¹	糖/酸 Sugar/Acid	固形物 Solid matter	硝酸盐 Nitrate/mg·kg ⁻¹	含水率 Water content/%
CK	47235	1.29b	0.066 9b	10.42a	3.3b	92.0a	92.94a
T1	62505	1.40ab	0.076 5b	9.65ab	3.6ab	62.2c	92.03a
T2	62370	1.51a	0.130 4a	9.28b	4.5a	62.0c	92.88a
T3	61050	1.28b	0.079 6b	8.99b	3.3b	88.3b	92.35a

注:同一列后不同小写字母表示在5%水平上差异显著。下同。

Notes: Different lowercase letters after the same column indicate significant at the 5% level. The same below.

其中,T2的可溶性总糖含量、维生素C含量和固形物含量均显著高于其他秸秆反应堆处理,且硝酸盐含量在所有处理中最低。综合产量和品质指标,T2在所有秸秆反应堆处理中为最佳。

2.2 不同秸秆生物反应堆对温室CO₂通量和浓度的影响

CO₂通量是反映土壤呼吸强度的重要指标。由图3可知,在100 d的监测时间段内,3个秸秆反应堆的CO₂通量显著高于CK,其中T1、T2和T3处理CO₂累积排放量比CK处理分别增加1 537.50、1 381.04、1 509.96 g·m⁻²,这说明秸秆反应堆处理可有效补给温室内CO₂亏缺,促进温室茄子生产,提高茄子产量。从图中可以看出,在监测前20 d,T3和T2的CO₂通量显著高于T1,CK、T1、T2和T3的CO₂累积排放量分别为261.83、582.91、811.74 g·m⁻²和878.51 g·m⁻²,这表明反应堆中加入一定量微生物腐熟剂的T2和T3处理,加快了秸秆腐解速度,可有效补给温室内CO₂供应,促进茄子苗期生长。在监测后期T1处理秸秆腐熟程度加快,对茄子的后期生长有一定的影响。总体来看,3个反应堆处理的CO₂通量始终高于常规栽培,地理式秸秆反应堆可促进温室茄子生长,提高茄子产量。

由图4可以看出,秸秆生物反应堆技术可以提高温室CO₂浓度。在监测早中期,平均起始CO₂浓度表现为T3、T2>T1、CK,其中T2和T3之间差异不明显,T1与CK之间差异不显著。仅在监测末期(80~100 d),T1处理平均起始CO₂浓度高于其余处理,CK、T2和T3处理之间差异减小,这可能与不同处理秸秆腐熟速度不同有关。T2和T3中菌剂和有机肥的添加加快了秸秆腐熟,促进了早期CO₂释放,而T1处理没有加菌剂,秸秆腐熟程度进度缓慢,随着种植时间的延长,秸秆渐渐腐熟。腐植酸的添加对CO₂浓度影响不大。总

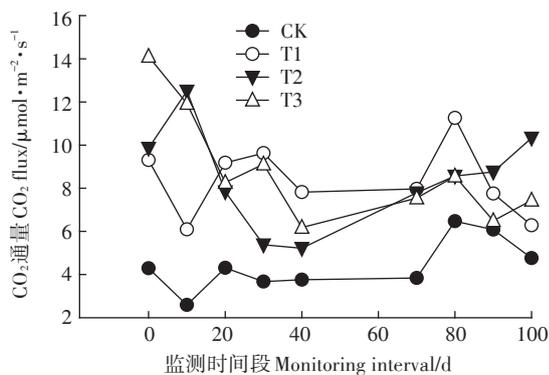


图3 不同处理对CO₂通量的影响

Figure 3 Effects of different treatments on CO₂ flux

体来看,在地理式反应堆中加入菌剂和有机肥,有利于加快秸秆的腐解速度,促进温室土壤CO₂释放。

2.3 不同秸秆生物反应堆对温室土壤有机质和养分的影响

由表3可知,秸秆生物反应堆处理提高了植株根系周边土壤的氮和有机质含量,相比其他秸秆反应堆处理,T2处理增加了茄子苗期和花期土壤氮和有机质含量,T3处理土壤有机质含量高于T1处理。由此可知,有机肥和菌剂的添加有利于土壤有机质和养分累积,但在此基础上再添加腐植酸则效果不显著。由表4可知,在秸秆反应堆中心点土壤中有有机质和氮含量基本为T1>T2>T3,可能是由于添加了有机肥和秸秆腐解菌剂,加快了反应堆及土壤中有有机物的分解和有机氮的矿化。

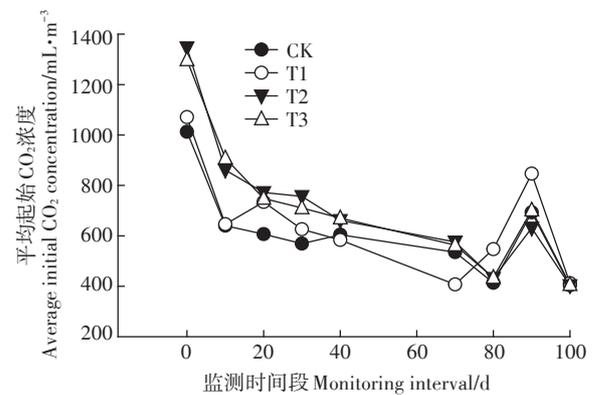


图4 不同处理对平均起始CO₂浓度的影响

Figure 4 Effect of different treatments on average initial CO₂ concentration

表3 不同处理对植株根系周边土壤有机质和总氮的影响

Table 3 Effects of different treatments on soil organic matter and total nitrogen around root system

时间 Time	处理 Treatments	总氮 Total nitrogen/%	有机质 Organic matter/%
1月(苗期)	CK	0.24b	3.44b
	T1	0.27a	3.91a
	T2	0.28a	4.11a
	T3	0.27a	4.05a
4月(花期)	CK	0.24b	3.45b
	T1	0.29a	4.01a
	T2	0.29a	4.13a
	T3	0.28a	4.05a
6月(盛果期)	CK	0.21b	3.35b
	T1	0.25a	3.75a
	T2	0.24a	3.67a
	T3	0.24a	3.78a

表4 不同处理对反应堆中心土层有机质和总氮的影响

Table 4 Effects of different treatments on soil organic matter and total nitrogen in reactor center

时间 Time	处理 Treatments	总氮 Total nitrogen/%	有机质 Organic matter/%
1月(苗期)	T1	0.29a	4.14a
	T2	0.28ab	4.01a
	T3	0.27b	3.91a
4月(花期)	T1	0.31a	4.09a
	T2	0.28a	4.05a
	T3	0.27a	3.93a
6月(盛果期)	T1	0.26a	3.97a
	T2	0.25a	3.79a
	T3	0.24a	3.85a

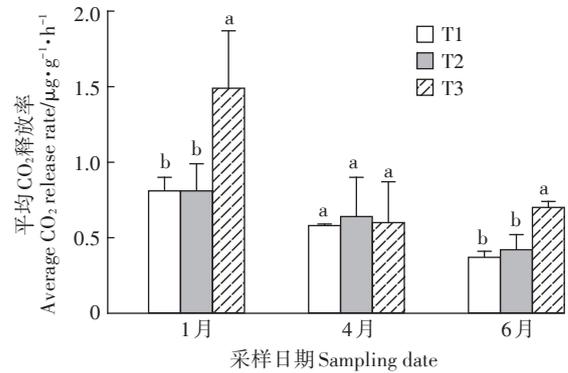
2.4 不同秸秆生物反应堆对温室土壤微生物群落代谢的影响

基于 MicroRESP™ 方法的平均 CO₂ 释放率可作为微生物整体性的有效指标,也可反映微生物群落对碳源利用的能力。平均 CO₂ 释放率越高表明土壤中微生物活性越高,底物代谢的能力越强。图5为不同处理在苗期、花期、盛果期植株根系周边土壤的平均 CO₂ 产出率,可以看出,在茄子生长过程中,土壤的 CO₂ 产出率基本呈不断下降的趋势。不同处理土壤的微生物群落碳氮源利用能力基本表现为 T3>T2、T1,显著性差异主要出现在1月苗期和6月盛果期。因此,T1和T2秸秆生物反应堆处理会抑制栽培土壤中微生物代谢活动,这可能有助于减少土壤中有有机质等养分消耗。T3处理腐植酸添加促进了栽培土壤中微生物代谢,这可能是导致周边植株栽培土壤中有有机质含量低于其他秸秆反应堆处理的重要原因。基于 MicroRESP™ 分析的不同处理表层土壤微生物群落代谢多样性表明,秸秆反应堆处理未对周边植株栽培土壤的微生物群落多样性产生明显影响,不同处理之间均无显著差异。

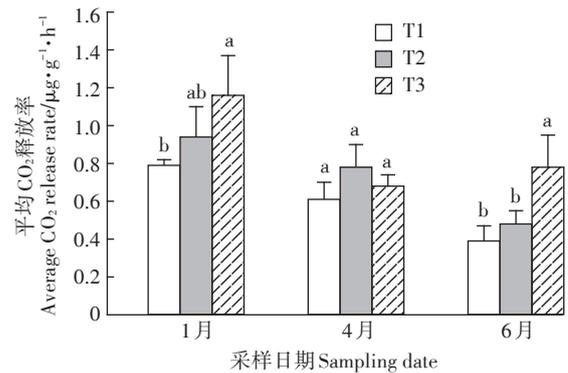
由图6可知,T3处理覆土的微生物代谢能力显著高于其他秸秆反应堆处理,主要表现在苗期和盛果期,因此腐植酸大幅促进覆土中的微生物代谢能力。虽然T2处理的平均 CO₂ 释放率略高于T1,但未达到显著水平。基于 MicroRESP™ 分析的不同处理表层土壤微生物群落代谢多样性表明,秸秆反应堆处理未对覆土的微生物群落多样性产生明显影响,不同处理之间均无显著差异。

2.5 不同秸秆生物反应堆对土壤微生物数量的影响

由图7可知,土壤中的真菌数量基本随着种植时



不同小写字母表示在5%水平上差异显著。下同
The different lowercase letters indicate significant at 5% level.
The same below

图5 不同处理植株根系周边土壤的平均 CO₂ 产出率Figure 5 Average CO₂ yield of soil around roots treated with different treatments图6 秸秆反应堆中心土层的平均 CO₂ 产出率Figure 6 Average CO₂ yield of soil layer in the center of straw reactor

间的增加而下降,但不同处理真菌变化趋势存在一定差异。从总体趋势看,秸秆反应堆处理使土壤中的真菌数量高于常规栽培,其中T3处理倾向于提高栽培早期(主要是苗期)根系周边土壤中真菌数量,可能与反应堆中添加腐植酸,导致了根系土壤环境pH变化较其他处理快有关。而T2处理倾向于提高茄子生产中后期(花期和盛果期)土壤中的真菌数量。

从图8中看出,反应堆周边土壤中的细菌数量基本呈先上升后下降的变化模式。不同处理之间的比较结果显示,采用秸秆反应堆以后,土壤中的细菌数量比对照明显减少,尤其是秸秆反应堆启动后的1~3个月之内,其与真菌变化的趋势正好相反。

3 讨论

越冬栽培秸秆生物反应堆技术能有效利用秸秆,防止因燃烧秸秆所造成的环境污染问题,更重要的是

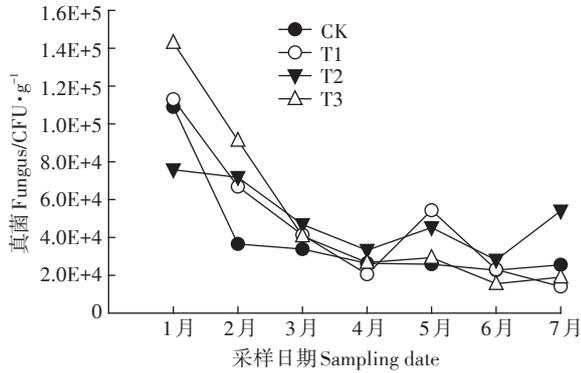


图7 不同秸秆生物反应堆对土壤真菌数量的影响

Figure 7 Effect of different straw bioreactors on the number of soil fungi in the surrounding plants

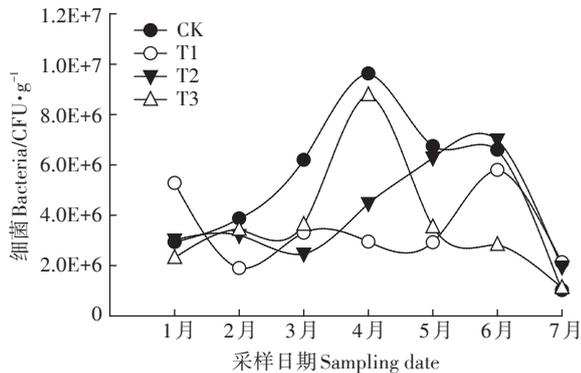


图8 不同秸秆生物反应堆对土壤细菌数量的影响

Figure 8 Effect of different straw bioreactors on the number of soil bacteria cultivated in the surrounding plants

解决了冬天温室种植的气温和地温偏低、CO₂含量不高以及长期连作造成的土壤板结、病虫害严重等问题。秸秆生物反应堆在北方应用普遍,其对植物的生长发育均有不同的促进作用,如提前花期、提高品质和产量等^[9]。本研究显示,在南方应用地埋式秸秆生物反应堆同样可有效提高温室蔬菜产量和品质,具有一定的推广应用潜力。其中,秸秆与羊粪和微生物菌剂配合施用效果最佳,产量较对照增加了32%;茄子各项品质指标也有不同程度的改善,例如可溶性总糖含量增加了17%,维生素C含量增加了95%,固形物含量增加了36.4%,硝酸盐含量降低了32.6%,与常规栽培相比,口感更清香微甜。腐植酸已被证明在改良土壤、提高作物养分吸收等方面具有良好的效果^[10]。在本试验中,我们也尝试在T2处理(秸秆+羊粪+微生物菌剂)的基础上,添加腐植酸,但是发现在秸秆反应堆中增加腐植酸对茄子增产的直接影响并不大,其主要作用是增加了土壤微生物的代谢活性,对提高土壤

肥力有较好的作用。

设施蔬菜栽培过程中,在设施内相对密闭的特殊条件下,日出后作物进行旺盛的光合作用,通常会使得CO₂浓度急剧降低,造成CO₂亏缺,从而影响作物光合作用。在设施内增施CO₂,是强化作物光合作用、促进作物生长发育达到高产优质的有效技术措施,可以实现温室蔬菜的高产^[20]。本试验结果证明,秸秆反应堆技术显著提高了温室土壤CO₂释放速率,增加了土壤CO₂的通气量,是茄子增产的重要原因之一。其中秸秆与有机肥和菌剂配合使用,与秸秆单独使用比较,更可以促进秸秆腐熟,促进CO₂释放。

连作栽培会导致土壤养分失衡、有机质含量降低、微生物多样性减轻^[8]。本试验同样观察到这一变化趋势,但在不同秸秆生物反应堆后,这一状况得到改善。秸秆作为微生物的养料,在其分解过程中会缓慢向土壤释放有机物质和矿物质^[8],提高土壤有机质和养分含量,改善土壤理化性质,增强保肥、保水能力,培肥了地力^[21]。类似结论在本试验中也得到体现,所有秸秆生物反应堆处理后土壤中的有机质和养分含量均高于常规栽培处理。外源有机物对土壤有机质分解的激发效应^[22]也可能是反应堆改变土壤有机质的一个重要原因。激发效应包括正效应和负效应,能够产生负效应的物质有利于土壤有机碳形成或降低有机碳的降解,而正效应则加速土壤中有机质矿化^[23]。纤维素、葡萄糖、秸秆等能够产生负激发效应,而部分氨基酸如谷氨酸、天冬氨酸等能产生正激发效应^[24]。秸秆生物反应堆含有大量的纤维素等物质,能够产生显著的负激发效应,因此能够增加土壤中的有机质含量^[7]。同时,秸秆反应堆处理下,外源有机物进入土壤可以为微生物提供碳源,从而增加土壤微生物量,进而增加有机质含量。在本试验中,不同秸秆生物反应堆处理对土壤有机质和氮含量的影响也存在差异,我们认为可以从激发效应上解释相关现象。首先秸秆生物反应堆本身对土壤有机质分解能够产生较强的负激发效应,增加土壤有机质含量。但是,在T2和T3处理中,我们配套添加了羊粪、菌剂和腐植酸,这些物质部分可以促进氨基酸等具有正激发效应物质产生,例如微生物菌肥的添加可以促进微生物对氨基酸的代谢^[7],在一定时间内增强氨基酸类物质含量,部分可以直接增强土壤微生物代谢,加速土壤有机质分解成无机养分,因此T2和T3处理中的正激发效应大于T1,从而导致了T2和T3处理土壤中的有机质含量下降。此外,通过对比T3和T2处理,我们

可以推测腐植酸主要产生正激发效应,其添加可以加速土壤有机质分解。从微生物代谢活性的角度上看,T3处理土壤微生物代谢和活力总体高于其他秸秆反应堆处理,这个结果同时证明了腐植酸的引入主要是促进土壤微生物的代谢活性,导致有机质分解的质量超过其对微生物生物量增加的促进作用。我们认为,T3土壤中过分活跃的微生物活动加大了其对土壤有机质和养分的消耗,这种情况下,微生物还可能与植物争夺养分,进而影响植物生长发育。本试验分析了秸秆反应堆处理下土壤中的细菌和真菌数量,发现秸秆反应堆处理增加植株根系周边土壤中的真菌数量,但降低了土壤细菌数量。作为土壤酶的主要提供者^[8],土壤真菌和细菌数量增加虽然均会导致土壤呼吸代谢增强,加速有机质和养分分解消耗,但同时二者数量增加又提高了土壤微生物生物量,当微生物量增加超过了分解的有机质质量,净效应表现为土壤有机质含量增加,反之则表现为有机质含量下降。根据本试验结果,我们认为秸秆反应堆中土壤有机质含量的提高主要归功于土壤真菌数量的增加,而土壤细菌数量增加主要促进了土壤有机质分解。因此,在秸秆生物反应堆中添加腐植酸主要是通过促进土壤细菌数量增加,从而加速土壤有机质消耗。本试验中,不同秸秆反应堆处理的土壤细菌和真菌的演替模式存在明显差异。T3处理倾向于提高苗期栽培土壤中真菌数量和花期栽培土壤中细菌数量,而T2处理倾向于提高花期和盛果期栽培土壤中的真菌数量以及盛果期栽培土壤细菌数量。以上现象也反映出T3处理中腐植酸添加加快秸秆分解进程的原因。结合茄子产量、品质以及土壤肥力等结果可知,秸秆生物反应堆中秸秆分解速度过快并不是一种有利的情况。因此,了解作物生长与秸秆生物反应堆中秸秆物料的分解速度以及周边土壤环境变化的相关性,明确控制秸秆生物反应堆中秸秆物料分解的方法,对于未来秸秆生物反应堆推广和应用具有重要意义。

4 结论

(1)在越冬茄子栽培中应用地理式秸秆反应堆技术是一种较为有效且适宜推广的农艺措施,可以显著提高茄子产量和品质,增加温室CO₂排放通量,提高温室土壤作物植株根系周边土壤中的有机质和养分含量。其中,秸秆生物反应堆配合羊粪和微生物菌剂施用(T2)显著提高了茄子品质,且最有利于土壤有机质累积。

(2)地理式秸秆反应堆影响土壤中的微生物代谢活性,改变了栽培过程中土壤真菌和细菌的数量变化模式,表现为提高植株根系周边土壤中的真菌数量,降低土壤细菌数量。秸秆反应堆中土壤有机质含量的提高主要归功于土壤真菌数量的增加,而土壤细菌数量增加主要促进了土壤有机质分解。

(3)在T2处理的基础上加入腐植酸(即T3)对茄子产量的直接影响不大,其主要作用是促进土壤微生物的代谢活性,改善土壤肥力。

参考文献:

- [1] 王宇先,李清泉,郑逢琪,等. 内置式秸秆生物反应堆技术对寒地大棚西瓜产量及品质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2014(2): 37-41.
WANG Yu-xian, LI Qing-quan, ZHENG Feng-qi, et al. Effects of built-in straw stalk biology reactor technology on yield and quality of melon in greenhouse of cold region[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2014(2): 37-41.
- [2] 卞中华,王玉,胡晓辉,等. 外置式与内置式秸秆生物反应堆对番茄生长及光合性能的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 753-758.
BIAN Zhong-hua, WANG Yu, HU Xiao-hui, et al. Effects of outer type and built-in type straw bio-reactors on tomato growth and photosynthetic performance[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3): 753-758.
- [3] 胡英强,宋丽,樊继刚,等. 秸秆生物反应堆技术在日光温室甜瓜上的应用试验[J]. 上海蔬菜, 2018(1): 67-69.
HU Ying-qiang, SONG Li, FAN Ji-gang, et al. Application of straw bio-reactor technology to melon in solar greenhouse[J]. *Shanghai Vegetables*, 2018(1): 67-69.
- [4] 孙振国. 秸秆生物反应堆技术在保护地蔬菜生产中的应用[J]. 西北园艺(蔬菜专刊), 2007(2): 1004-4183.
SUN Zhen-guo. Application of straw bioreactor technology in vegetable production in protected areas[J]. *Northwest Horticulture (Vegetable Special Issue)*, 2007(2): 1004-4183.
- [5] 喻景权,杜尧舜. 蔬菜设施栽培可持续发展中的连作障碍问题[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(1): 124-126.
YU Jing-quan, DU Yao-shun. Soil-sickness problem in the sustainable development for the protected production of vegetables[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2000, 31(1): 124-126.
- [6] 马建华,张丽荣,康萍芝,等. 秸秆生物反应堆技术的应用对设施黄瓜土壤微生物的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(12): 161-165.
MA Jian-hua, ZHANG Li-rong, KANG Ping-zhi, et al. Application impact of straw bio-reactor technology on soil microbial of facility cucumber[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(12): 161-165.
- [7] 孙婧,田永强,高丽红,等. 秸秆生物反应堆与菌肥对温室番茄土壤微环境的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 153-164.
SUN Jing, TIAN Yong-qiang, GAO Li-hong, et al. Effects of straw biological reactor and microbial agents on physicochemical properties and microbial diversity of tomato soil in solar greenhouse[J]. *Transactions of*

- the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(6): 153-164.
- [8] 宋尚成, 朱凤霞, 刘润进, 等. 秸秆生物反应堆对西瓜连作土壤微生物数量和土壤酶活性的影响[J]. 微生物学通报, 2010, 37(5): 696-700.
SONG Shang-cheng, ZHU Feng-xia, LIU Run-jin, et al. Effects of straw bio-reactor on microorganism population and soil enzyme activity in the watermelon replant soil[J]. *Microbiology China*, 2010, 37(5): 696-700.
- [9] 王颖, 孙启原, 李金英, 等. 秸秆生物反应堆对大棚葡萄生育环境及产量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38(5): 590-594, 599.
WANG Ying, SUN Qi-yuan, LI Jin-ying, et al. Effects of straw biological reactor technology on growth environment and yield of greenhouse grape[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2016, 38(5): 590-594, 599.
- [10] 王昊, 韦峰, 张战胜, 等. 不同秸秆生物反应堆对冬季日光温室番茄生长发育的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(2): 141-146.
WANG Hao, WEI Feng, ZHANG Zhan-sheng, et al. Influences of different straw bioreactors on growth of tomatoes in greenhouse in winter[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2018(2): 141-146.
- [11] 李元梅. 沿海地区设施蔬菜土壤次生盐渍化问题与防治措施[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(9): 1423-1425.
LI Yuan-mei. Problems and control measures of secondary salinization of protected vegetable soils in coastal areas[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2016, 57(9): 1423-1425.
- [12] 曾许芳, 方珊珊, 章明奎. 浙江省蔬菜地土壤肥力状况调查[J]. 浙江农业科学, 2012(6): 837-839.
ZENG Xu-fang, FANG Shan-shan, ZHANG Ming-kui. Investigation of soil fertility in vegetable fields in Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2012(6): 837-839.
- [13] 王瑞雪, 徐智, 汤利, 等. 设施菜地土壤质量主要障碍因子及其修复措施研究进展[J]. 浙江农业科学, 2015, 56(8): 1300-1305.
WANG Rui-xue, XU Zhi, TANG Li, et al. Research progress on major obstacles to soil quality in greenhouse vegetable fields and their remediation measures[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2015, 56(8): 1300-1305.
- [14] 林辉, 孙万春, 王飞, 等. 有机肥中重金属对菜田土壤微生物群落代谢的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11): 2123-2130.
LIN Hui, SUN Wan-chun, WANG Fei, et al. Effects of heavy metal within organic fertilizers on the microbial community metabolic profile of a vegetable soil after land application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(11): 2123-2130.
- [15] 陈晓娟, 袁圆, 吴小红, 等. 不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于PLFA和MicroResp™方法[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2375-2382.
CHEN Xiao-juan, YUAN Yuan, WU Xiao-hong, et al. Microbial activity and community structure analysis under the different land use patterns in farmland soils: Based on the methods PLFA and MicroRe-sp™[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(6): 2375-2382.
- [16] 梁仕权, 吉亮, 赵基荃, 等. 微生物菌剂在辣椒地上使用对土壤微生物与作物的影响[J]. 农村经济与科技, 2016, 27(16): 16, 22.
LIANG Shi-quan, JI Liang, ZHAO Ji-quan, et al. Effects of microbial agents on soil microorganisms and crops in pepper fields[J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2016, 27(16): 16, 22.
- [17] 付乃旭. 秸秆生物发酵对日光温室辣椒越冬栽培的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
FU Nai-xu. Effects of straw bio-fermentation on the pepper overwinter cultivation in solar greenhouse[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [18] 杨锚, 邵华, 金芬, 等. 新鲜蔬菜和水果中硝酸盐紫外分光光度法的测定[J]. 华中农业大学学报, 2009, 28(1): 102-105.
YANG Mao, SHAO Hua, JIN Fen, et al. Determination of nitrates in fresh vegetables and fruits by UV-spectrophotometry[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2009, 28(1): 102-105.
- [19] 刘文璐, 杨丽辉, 郭书利, 等. 不同腐植酸含量的复合肥对茄子产量和养分利用率的影响[J]. 化肥工业, 2017, 44(6): 77-81.
LIU Wen-lu, YANG Li-hui, GUO Shu-li, et al. Effects of compound fertilizers with different humic acid contents on eggplant yield and nutrient utilization efficiency[J]. *Chemical Fertilizer Industry*, 2017, 44(6): 77-81.
- [20] 袁冬贞, 廖允成, 赵建兴, 等. 不同菌种秸秆生物反应堆对温室黄瓜生长及产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 171-176.
YUAN Dong-zhen, LIAO Yun-cheng, ZHAO Jian-xing, et al. Effects of straw bio-reactors with different microbial strains on the growth and yield of cucumber in greenhouse[J]. *Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(5): 171-176.
- [21] 雍海燕, 王红梅, 沙龙. 不同有机物料处理对设施番茄土壤中微生物的影响[J]. 宁夏农林科技, 2018, 59(6): 33-37.
YONG Hai-yan, WANG Hong-mei, SHA Long. Study on effects of different organic material on treatments on microorganism in soils for greenhouse tomato[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2018, 59(6): 33-37.
- [22] Bingeman C W, Varner J E, Martin W P. The effect of the addition of organic materials on the decomposition of an organic soil 1[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1953, 17(1): 34-38.
- [23] 陈春梅, 谢祖彬, 朱建国. 土壤有机碳激发效应研究进展[J]. 土壤, 2006(4): 359-365.
CHEN Chun-mei, XIE Zu-bin, ZHU Jian-guo. Advances in research on priming effect of soil organic carbon[J]. *Soils*, 2006(4): 359-365.
- [24] Dalenberg J W, Jager G. Priming effect of some organic additions to ¹⁴C-labelled soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1989, 21(3): 443-448.