

# 温室生物质发酵酿热的碳氮水 耦合调控效应研究

李陈浩,胡艺馨,王浩,肖金鑫,宋磊,苗丽丽,李建明

(西北农林科技大学园艺学院,陕西杨凌 712100)

**摘要:**最大限度利用可再生能源并减少调控成本,是温室生物质发酵高效酿热产能的基础,也是温室生产可持续发展的核心。以麦秸为原料,牛粪为辅料,以初始物料容重(Bulk Density, BD)、碳氮比(Carbon Nitrogen Ratio, C/N)和含水率(Moisture Content, MC)为研究因素,利用响应面法研究因素间交互作用的优势。试验为三因素五水平设计,设置23个处理,以升温速率、产热速率、热能转化率和总有机碳降解率为发酵评价目标,基于TOPSIS法建立综合评价体系,用熵权法合理确定各指标权重,构建了多因素耦合下生物质发酵酿热的响应模型,解析了碳氮水多因素耦合对生物质发酵酿热的综合作用规律。结果表明,单因素效应中综合评分与C/N值呈近线性关系,与BD和MC值均呈凸型二次曲线关系;BD、MC和C/N协同影响综合酿热效果评价。当BD、C/N和MC分别为0.05~0.07 g·cm<sup>-3</sup>, 38.30~38.40, 52.94%~59.83%时,综合评价存在最优区间,将所得发酵因素综合调控下的最优方案应用于冬季延安地区的温室采暖,可使该地区大跨度非对称塑料温室夜温提高0.94~1.50℃。

**关键词:**生物质酿热;好氧发酵;多因素耦合;综合酿热模型;温室

中图分类号:S216 文献标志码:A

## Coupling regulation of multi-parameters on heat recovery from greenhouse waste composting

LI Chenhao, HU Yixin, WANG Hao, XIAO Jinxin, SONG Lei, MIAO Lili, LI Jianming

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Maximizing the use of renewable energy and reducing regulation costs are the basis for efficient greenhouse heating from biomass composting and the core of sustainable development of greenhouse production. In this study, wheat straw was used as raw material and cow dung as auxiliary material, and initial material bulk density (BD), carbon nitrogen ratio (C/N) and moisture content (MC) were taken as research factors. The response surface methodology was employed to examine the advantages of interaction among factors. The composting evaluation targets were the heat rate, heat production rate, heat energy conversion rate and total organic carbon degradation rate. Based on the TOPSIS method, a comprehensive evaluation system was established. The entropy weight method was used to reasonably determine the weight of each index, and the response model of biomass composting heat generation under multi-factor coupling was constructed, and the comprehensive effect of carbon, nitrogen and water multi-factor coupling on biomass fermentation heat brewing was analyzed. The results showed that when other factors were at the intermediate level, the comprehensive score showed a nearly linear relationship with the increase of C/N, and convex quadratic curve relationships with the increase of BD and MC. BD, MC and C/N synergistically affected the comprehensive composting process. When BD, C/N and MC are 0.05~0.07 g·cm<sup>-3</sup>, 38.30~38.40, 52.94%~59.83%, respectively, the comprehensive evaluation value had an optimal interval. The optimal scheme of the obtained compositing factors was applied in winter, the nighttime temperature increased by 0.94~

收稿日期:2022-04-10

修回日期:2022-06-13

基金项目:陕西省重点研发计划(2019TSLNY01-01);国家大宗蔬菜产业技术体系(CARS-23-C05);陕西省农业科技创新转化项目(NYKJ-2020-YL-08)

作者简介:李陈浩(1994-),男,山西阳城人,在读硕士,研究方向为生物质资源开发与利用技术。E-mail:1229793501@qq.com

通信作者:李建明(1966-),男,教授,博士生导师,主要从事温室新能源开发与利用研究。E-mail:lijianming66@163.com

1.50°C in the large-span asymmetric plastic greenhouse in Yan'an area.

**Keywords:** biomass heat generation; aerobic composting; multifactor coupling; integrated composting heat generation model; greenhouse

温室栽培是提升农业生产力的有效方式,作为环境可控农业,其对能源依赖很大。而随化石能源的不断减少,如何最大限度利用自然能源,减少调控成本,寻求绿色经济的温室加温技术,成为温室生产可持续发展的核心问题。温室生物质发酵酿热作为可再生能源利用技术具有巨大潜力<sup>[1]</sup>,可利用农业废弃物好氧发酵产生的热量与CO<sub>2</sub><sup>[2]</sup>为温室供暖并增施气肥,由于其能效显著且处理循环利用农业有机废弃物高效而受到广泛重视<sup>[3-4]</sup>。

温室生物质发酵高效酿热产能依赖于科学合理的发酵参数调控技术<sup>[5-7]</sup>。已有研究提出数学模型结合基于VS降解率和O<sub>2</sub>吸收量的简单热转换因子对发酵酿热进行了预测与管理<sup>[8-9]</sup>,最大产热量为30.29 kJ·(kg TS·h)<sup>-1</sup><sup>[10]</sup>。但目前国内外研究的生物质好氧发酵参数调控主要停留在满足农业废弃物全量化处理的需求<sup>[11-12]</sup>,未考虑发酵因素交互影响<sup>[13-14]</sup>与农业废弃物资源化利用<sup>[15-16]</sup>的需求性。生物质好氧发酵酿热研究与参数调控技术研究仍缺乏系统联系,因此,系统解析生物质发酵酿热效应与必需发酵因素间的耦合效应是实现温室生物质好氧发酵精准控制和高效酿热的基础。

生物质发酵过程中,若兼顾产热量最高则无法实现农业废弃物的全量化处理;而基于废弃物降解最大化的调控技术,其能源转化效率不一定最佳。因此有必要引入对发酵酿热各项指标综合考量的评价方法,兼顾农业废弃物处理与发酵酿热需求,以获取更科学、更合理的生物质发酵酿热调控方案。本研究旨在利用近似理想解法(TOPSIS)进行多因素耦合下生物质发酵酿热的科学评价,系统构建多因素耦合对生物质发酵酿热的调控模型,揭示必需发酵参数间的耦合调控效应,更准确地解释酿热对发酵参数的需求规律,模拟寻优,提出并验证适用于冬季延安地区温室采暖的多因素调控方案。开发环境友好、绿色清洁、可再生利用的生物质能源,为温室生物质发酵高效酿热产能与农业废弃物的全量化处理提供依据。对于开发清洁能源以最大限度地替代石油、煤炭等不可再生能源,具有显著的生态环境效益和社会意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与装置

供试材料为小麦秸秆,取自西北农林科技大学

小麦试验田,自然风干,经粉碎机切割至5~10 cm的小段。氮源调理剂为奶牛粪,取自西北农林科技大学畜牧教学试验基地(农作三站)奶牛场。物料基本性状见表1。中试试验与温室应用试验均采用相同试验材料。

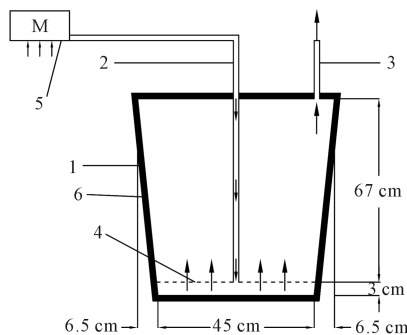
中试试验发酵装置为自制圆台状强制通风好氧发酵反应器(图1)。反应器容积200 L,主体为0.2 cm厚高密度聚乙烯,外侧覆盖1.5 cm厚黑色橡塑保温层。桶内布有开孔率20%的不锈钢筛板,孔径5 mm。发酵物料混合均匀后放置其上。空气从反应器顶部由进气管流至底部,再透过不锈钢筛孔板均匀供入反应器内,流经发酵物料后从顶部排气口排出。

应用验证试验装置为发酵拱棚,长6 m,跨度5 m,高3 m,利用直径20 cm PVC管与供试温室连通,进行气体循环与热量供应。供试温室为大跨度非对称塑料温室<sup>[17]</sup>(图2),东西走向,长100.0 m,跨度18.0 m,脊高6.0 m,南北屋面覆盖10.0 cm保温被,室内面积1 800.0 m<sup>2</sup>。对照温室位于试验温室北侧,结构尺寸与其相同。

表1 发酵原料基本性状

Table 1 Basic properties of composting materials

原料 Material	含水率 MC/%	碳氮比 C/N	总有机碳 TOC/(g·kg <sup>-1</sup> )/(g·kg <sup>-1</sup> )	总氮 TN
牛粪 Cow manure	64.34±0.50	20.00±0.82	245.73±2.57	19.97±1.36
小麦秸秆 Wheat straw	7.01±0.03	67.22±0.80	452.67±3.76	6.73±0.10



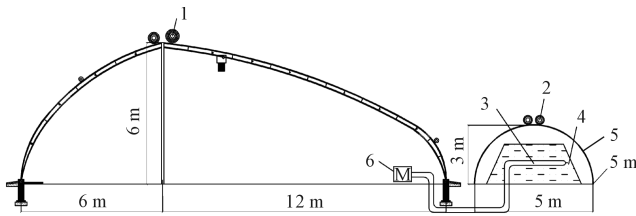
1. 反应器; 2. 进气管; 3. 排气管; 4. 筛板; 5. 气泵; 6. 保温隔热材料  
1. Reaction chamber; 2. Ventilation pipe; 3. Exhaust pipe;  
4. Sieve plate; 5. Air pump; 6. Thermal insulation material

图1 发酵装置示意图

Fig.1 Illustration of composting device

## 1.2 试验设计与方法

中试模拟试验于 2019 年 7—8 月在陕西省杨陵区揉谷镇千玉乡土风情园塑料大棚内进行(108°07'E, 34°28'N)。以初始物料容重(Bulk density, BD)、碳氮比(Carbon nitrogen ratio, C/N)及含水率(Moisture content, MC)为研究因素,采用二项式中心点组合设计,试验因素水平编码值与试验方案见表 2,共计 23 个处理。各处理按表 2 设计将麦秸与牛粪均匀混合(不添加生物菌剂),调节 BD、C/N 和 MC 后将物料转移至各密封反应器中进行好氧发酵。采用机械强制间歇通风,通风率为 5 L·min<sup>-1</sup>,每天通风 5 min·h<sup>-1</sup>。发酵周期 30 d。各处理 3 次



1. 试验温室; 2. 保温被; 3. 通风管道; 4. 物料; 5. 发酵拱棚; 6. 风机  
1. Testing greenhouse; 2. Thermal insulated quilt; 3. Aeration duct; 4. Composting material; 5. Composting tunnel; 6. Air pump

图 2 温室结构示意图

Fig.2 Structure of greenhouse and composting tunnel

表 2 试验方案

Table 2 Experiment plan

处理 Treatment	容重 BD	碳氮比 C/N	含水率 MC
T1	1(0.13)	1(35)	1(64%)
T2	1(0.13)	-1(25)	1(64%)
T3	1(0.13)	1(35)	-1(46%)
T10	1(0.13)	-1(25)	-1(46%)
T5	-1(0.07)	1(35)	1(64%)
T6	-1(0.07)	-1(25)	1(64%)
T7	-1(0.07)	1(35)	-1(46%)
T8	-1(0.07)	-1(25)	-1(46%)
T9	-1.6818(0.05)	0(30)	0(55%)
T4	1.6818(0.15)	0(30)	0(55%)
T11	0(0.10)	0(30)	-1.6818(40%)
T12	0(0.10)	0(30)	1.6818(70%)
T13	0(0.10)	-1.6818(21.59)	0(55%)
T14	0(0.10)	1.6818(38.41)	0(55%)
T15	0(0.10)	0(30)	0(55%)
T16	0(0.10)	0(30)	0(55%)
T17	0(0.10)	0(30)	0(55%)
T18	0(0.10)	0(30)	0(55%)
T19	0(0.10)	0(30)	0(55%)
T20	0(0.10)	0(30)	0(55%)
T21	0(0.10)	0(30)	0(55%)
T22	0(0.10)	0(30)	0(55%)
T23	0(0.10)	0(30)	0(55%)

注:表中数据为各因素编码值,括号内数据为各处理实际因素值;容重单位为 g·cm<sup>-3</sup>。

Note: The data in the table are the coded and actual values of each factor; the number before the preceding parentheses is the coded value, and the number inside the double parentheses is the actual value; the unit of bulk density (BD) is g·cm<sup>-3</sup>.

重复。分别在发酵的第 0、7、14、30 d 翻堆,同时在堆体上、中、下 3 部位采集鲜样 100 g,用于基本理化性质的分析。取回的样品分为 2 份,1 份鲜样用于测定物料含水率;1 份风干、研磨、过 100 目筛,用于总有机碳含量测定。在反应器内距底部 0.20、0.35、0.50 m 位置处上、中、下 3 点,以及室内垂直地面 0.5、1.0、1.5 m 处布置温湿度探头,以监测室内气温、空气相对湿度以及堆体温度。

温室应用验证试验于 2020 年 12 月—2021 年 2 月在陕西延安(109°48'E, 36°60'N)进行,供试材料为小麦秸秆和牛粪(表 1)等农业废弃物共计 20 t,依据中试试验所得最佳方案调节初始物料参数组合(BD、C/N 和 MC),均匀混合后置于发酵拱棚内进行好氧发酵(不添加微生物菌剂)。采用强制间歇通风,通风速率 0.17 L·L<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>,不翻堆。以每天 10:00(保温被揭开)至 15:00—16:00(保温被落下)为白天时间段,其余时间为夜间时段。除了必要的通风时间段和操作人员进出外,温室内的门窗处于密闭状态,以此减少外界因素对室内温度的影响。试验期间每周取样处理,样品处理和保存方法与中试试验一致。于温室内几何中心垂直地面 0.5、1.0、1.5 m 处布置温度探头,监测室内气温。

## 1.3 测定指标及方法

含水率采用 105℃ 烘干法测定;总有机碳含量(Total organic carbon, TOC)采用岛津 TOC-L 总有机碳分析仪<sup>[18]</sup>测定。采用哈尔滨物格电子公司的多路环境测试仪(PDE-KI)监测环境气温和空气相对湿度。温湿度传感器设置在试验区域中心位置,以 30 min 为时间间隔采集并储存数据。温度量程: -30~70℃,准确度±0.5℃,分辨率 0.1℃;湿度量程: 0~99%,准确度±3%,分辨率 1%。采用美国安捷伦公司的 34970A 数据采集器监测物料温度,设置 T 型热电偶作为温度探头,以 30 min 为时间间隔采集并储存数据。

## 1.4 数据处理与分析

1.4.1 热量计算方法 基于前人研究中的计算方法与公式<sup>[19]</sup>,进行简化改进,主要考虑热传导、蒸发潜热和通风显热,由于水蒸气在反应器顶部内侧冷凝回流可回收出气口气体中所携带的潜热<sup>[20]</sup>,且热辐射在好氧发酵热量平衡占比相对较小,本文不予考虑。

(1) 发酵酿热总量计算<sup>[10]</sup>:

$$Q_{\text{generate}} = \sum [\lambda A (T_{\text{pile}} - T_{\text{ambient}}) \times 24 \times 3.6 / L + (M_{\text{aeration dry air}} C_{\text{dry air}} + M_{\text{aeration vapor}} - C_{\text{vapor}}) (T_{\text{pile}} - T_{\text{aeration}}) +$$

$$(M_{\text{water}}C_{\text{water}} + M_{\text{solid}}C_{\text{solid}})(T_{i+1} - T_i)] \quad (1)$$

式中,  $Q_{\text{generate}}$  为发酵过程中酿热总量 (kJ);  $A$  为反应器表面积 ( $\text{m}^2$ );  $\lambda$  为反应器侧壁及保温材料导热系数 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $T_{\text{pile}}$  为堆温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{\text{ambient}}$  为环境气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $L$  为反应器侧壁及保温材料厚度 (m);  $M_{\text{aeration dryair}}$  为通风过程中干空气质量 (kg);  $M_{\text{aeration vapor}}$  为水蒸气质量 (kg);  $C_{\text{dryair}}$  为干空气比热容 ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $C_{\text{vapor}}$  为水蒸气比热容 ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $T_{\text{aeration}}$  为通风气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $M_{\text{water}}$  为物料中水分 (kg);  $M_{\text{solid}}$  为物料中固体质量 (kg);  $C_{\text{water}}$  为水的比热容 ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $C_{\text{solid}}$  为固体比热容 ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $T_i$  为第  $i$  天的堆温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{i+1}$  为第  $i+1$  天的堆温 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

(2) 总有机碳降解率<sup>[16]</sup>:

$$\eta_{\text{oc}} = (TOC_{\text{initial}} - TOC_{\text{production}}) / TOC_{\text{initial}} \quad (2)$$

式中,  $\eta_{\text{oc}}$  为发酵物料中总有机碳降解率;  $TOC_{\text{initial}}$  为发酵原料中总有机碳含量 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $TOC_{\text{production}}$  为产物中总有机碳含量 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

(3) 热能转化率<sup>[16]</sup>:

$$UH = Q_{\text{generate}} / M_{\text{total dry mass}} \quad (3)$$

式中,  $UH$  为热能转化率, 即单位干质量发酵物料产生的热量 ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $M_{\text{total dry mass}}$  为发酵物料干质量 (kg)。

(4) 产热速率:

$$\bar{E} = Q_{\text{generate}} / n \quad (4)$$

式中,  $\bar{E}$  为产热速率 ( $\text{kJ} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $n$  为发酵周期 (d)。

(5) 升温速率<sup>[11]</sup>:

$$v = (T_{\text{max}} - T_0) / \text{days} \quad (5)$$

式中,  $v$  为升温速率 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $T_{\text{max}}$  为高温期平均堆温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_0$  为发酵第 0 天堆温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\text{days}$  为从发酵第 0 天到堆体进入高温期所需天数, 即升温期 (d)。

1.4.2 数据分析方法 采用 Excel 2016 和 Design-Expert 8.0.6 进行数据统计与分析。用 Excel 2016 将单一指标数据归一化处理<sup>[21]</sup>, 通过熵权法<sup>[22]</sup> 计算各指标权重, 并通过 TOPSIS 法<sup>[23]</sup> 进行综合酿热效果评价; 用 Design-Expert 8.0.6 软件<sup>[24]</sup> 进行数据分析与建模; 采用 Excel 2016 和 Origin 2017 进行数据图表制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 基于 TOPSIS 法的生物质发酵酿热综合评价

为统筹协调各酿热指标热能转化率 ( $UH$ ,  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、降解率 ( $\eta_{\text{oc}}$ )、产热速率 ( $\bar{E}$ ,  $\text{kJ} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 以及升温速率 ( $v$ ,  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 对生物质发酵酿热综合效果的

影响, 利用熵权法计算各单一指标权重, 并依据 TOPSIS 法对生物质发酵酿热的 4 个指标进行综合评判, 以便更准确地解析碳氮水耦合对生物质发酵酿热的促进规律。得各指标权重为:  $v(0.30) > \eta_{\text{oc}}(0.28) > UH(0.27) > \bar{E}(0.15)$ 。依据 TOPSIS 法得各处理综合酿热效果评价值  $C_i$  及排序 (表 3)。各处理的综合评价得分表现为:  $T3 > T14 > T7 > T10 > T23 > T18 > T16 > T21 > T20 > T19 > T13 > T17 > T2 > T22 > T5 > T4 > T15 > T8 > T12 > T9 > T11 > T1 > T6$ 。其中, 综合得分最高和最低的处理分别为 T3 和 T6, 其 BD、C/N 和 MC 分别为  $0.13 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、35.46% 和  $0.07 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、25.64%。可以看出, 高 C/N 的处理更利于促进综合酿热效果, 低 C/N 则导致综合酿热效果削弱。

### 2.2 生物质发酵酿热综合效果对发酵因素耦合的响应

以 BD、C/N 和 MC 为自变量, 编码范围均为  $(-1.68, 1.68)$ , 以生物质发酵酿热综合评分为因变量, 进行二次多项式拟合, 所得模型为:

$$Y = 0.54 - 0.06BD + 0.10C/N - 0.02MC - 0.09BD \times C/N - 0.10BD \times MC - 0.02C/N \times MC - 0.06BD^2 + 0.02C/N^2 - 0.10MC^2 \quad (6)$$

其决定系数  $R^2 = 0.82$ ,  $F = 6.40$ ,  $P = 0.0015 < 0.01$ , 失拟项  $P$  值为  $0.23 > 0.05$  不显著, 模型拟合良好, 可极显著表示发酵因素与综合酿热效果的关系。对回归模型进行降维处理<sup>[25]</sup>, 消除其他因素对分析因素的影响。结果表明 (图 3), 在试验范围内, 综合评分随 C/N 的增加而增大, 二者间接近线性关系, 而对 BD 和 MC 的响应均呈凸型二次曲线。当各因素均处于较低水平时, 综合评分对 MC 的响应最为明显; 而在较高水平时, BD 和 MC 均产生抑制作用, 仅 C/N 对综合评分有正向调节作用。

图 4 (见 217 页) 中栅格颜色深浅代表综合评价价值的大小<sup>[21]</sup>。在试验范围内, 综合评价价值会随 C/N 的增加而升高, 随 BD 的增大而降低 (图 4a)。在较高水平 C/N 与较低水平 BD 区间内, 评价价值较高。二者在一定范围内存在负交互效应, 且相互抑制。同样, 当 BD 与 MC 均处于高水平时 (图 4b), 综合评价价值较小, 随 BD 与 MC 的逐渐降低, 评价价值逐渐升高, 但其最优区间为较低水平 BD 与中高水平 MC, 故二者也存在负交互效应, 且相互抑制。由三因素耦合模拟结果 (图 5, 见 217 页) 可知, 中高水平 MC、中高水平 C/N 以及中低水平 BD 组合下存在最适于生物质发酵综合酿热的最优区间。随 C/N 增加, 最优区间由较高 BD 中低 MC 区向中低 BD 中高 MC 迁移, 综合评价价值同步增大; 随物料水分增加, BD

与  $C/N$  的交互效应逐渐增强,综合评价值同步增大。当  $BD$  过高对综合酿热效果产生抑制时,水分

的调节作用比  $C/N$  更明显,适当降低物料  $MC$  可解除抑制现象,能促进综合酿热效果。

表 3 基于 TOPSIS 法确定的发酵酿热综合效果指标评价得分

Table 3 Comprehensive score of composting heat generation determined by TOPSIS method

处理 Treatment	$\eta_{oc}$	$UH$	$\bar{E}$	$v$	$D'$	$D''$	$C_i$	排序 Rank
T1	0.067	460.88	313.16	1.73	0.401	0.068	0.13	22
T2	0.058	393.75	479.84	4.50	0.314	0.133	0.27	13
T3	0.103	700.61	626.39	8.51	0.128	0.215	0.59	1
T10	0.081	539.83	598.06	7.24	0.205	0.192	0.46	4
T5	0.179	1131.27	299.22	5.69	0.287	0.108	0.72	15
T6	0.100	668.62	277.91	2.53	0.383	0.061	0.29	23
T7	0.109	742.81	205.40	9.32	0.128	0.161	0.59	3
T8	0.066	439.33	182.60	5.70	0.301	0.089	0.29	18
T9	0.134	750.56	89.26	4.63	0.347	0.065	0.46	20
T4	0.072	459.89	550.33	1.45	0.398	0.139	0.23	16
T11	0.073	510.80	309.60	1.92	0.397	0.067	0.16	21
T12	0.094	657.96	417.79	1.53	0.400	0.099	0.28	19
T13	0.078	567.38	511.43	4.87	0.301	0.145	0.35	11
T14	0.138	949.84	535.09	8.38	0.140	0.194	0.76	2
T15	0.100	660.44	352.26	4.92	0.308	0.106	0.40	17
T16	0.122	812.14	451.22	7.17	0.214	0.159	0.62	7
T17	0.119	791.72	459.00	5.01	0.298	0.133	0.51	12
T18	0.123	818.52	454.77	7.26	0.209	0.161	0.63	6
T19	0.108	719.64	479.80	5.42	0.283	0.142	0.48	10
T20	0.123	816.66	473.46	6.05	0.260	0.148	0.58	9
T21	0.125	830.06	527.06	5.66	0.272	0.157	0.58	8
T22	0.105	695.67	403.32	5.17	0.296	0.121	0.44	14
T23	0.123	816.32	473.26	7.68	0.187	0.171	0.64	5
$Z^-$	0.000	0.000	0.000	0.000				
$Z^+$	0.280	0.265	0.153	0.302				

注: $\eta_{oc}$ 、 $UH$ 、 $\bar{E}$ 、 $v$  分别代表总有机碳降解率、热能转化率 ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、产热速率 ( $\text{kJ} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 和升温速率 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 的实测值。 $C_i$  表示综合评价价值, $Z^+$ 、 $Z^-$  分别表示理想解和负理想解; $D'$ 、 $D''$  分别表示与理想解和负理想解的距离。

Note:  $\eta_{oc}$ 、 $UH$ 、 $\bar{E}$  and  $v$  represents actual value of total organic carbon degradation rate, unit heat, heat production rate and pile temperature rise rate, respectively.  $C_i$  is comprehensive score;  $Z^+$  is the ideal solution,  $Z^-$  is the inverse ideal solution;  $D'$  is the distance between the ideal solution and the treatment,  $D''$  is the distance between the inverse ideal solution and the treatment.

### 2.3 多因素耦合对生物质发酵酿热的模拟寻优及验证

以生物质高效循环利用为出发点,以发酵酿热快速启动、持续高温、充分降解为主要目标,通过 MATLAB 软件模拟寻优<sup>[26]</sup> 得,当初始物料容重为  $0.05 \sim 0.07 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,碳氮比为  $38.30 \sim 38.40$ ,含水率为  $52.94\% \sim 59.83\%$  时,综合酿热效果存在最优区间。将该方案应用于规模化验证试验,结果表明测试期间堆体均温连续 48 d 稳定保持在  $50^{\circ}\text{C}$  以上(图 6),已达无害化标准<sup>[12]</sup>, $\eta_{oc}$  达 0.23, $UH$  为  $1482.11 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,与中试试验结果( $\eta_{oc}$  为 0.20, $UH$  为  $1232.29 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 相比差异不显著,说明了模型的准确性。由连续 5 d 温室热环境统计数据可知(图 7),延安地区白天室外气温最高不超过  $-1.30^{\circ}\text{C}$ ,夜

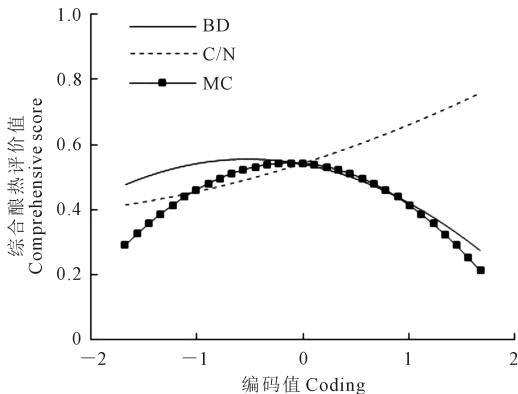
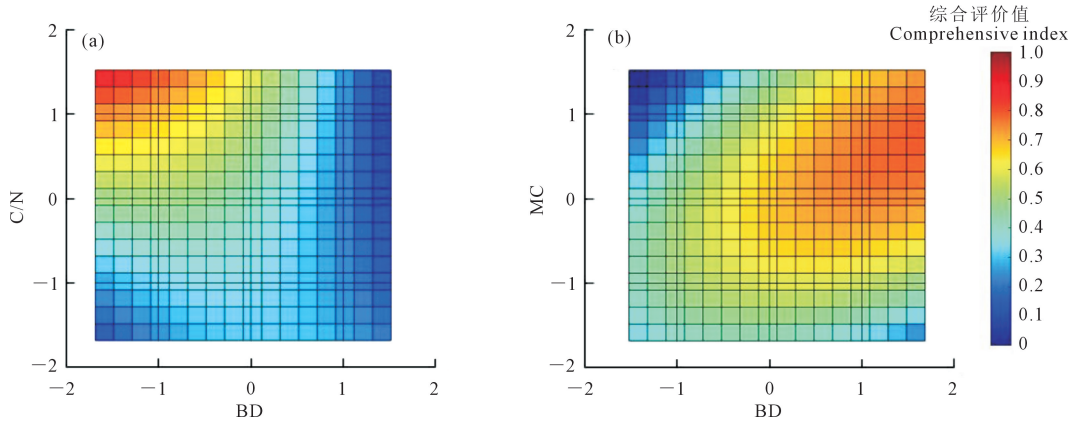


图 3 发酵因素对综合酿热效果的影响

Fig.3 Effect of single factor on comprehensive score



注:(a)容重(BD)与碳氮比(C/N)耦合对综合酿热效果的影响;(b)容重(BD)与含水率(MC)耦合对综合酿热效果的影响。

Note: Figure a represents interactive effect of bulk density (BD) and carbon nitrogen ratio (C/N) on comprehensive score, and Figure b represents interactive effect of bulk density (BD) and moisture content (MC) on comprehensive score.

图 4 两因素耦合对综合酿热效果的影响

Fig.4 Interactive effects of two factors on comprehensive score

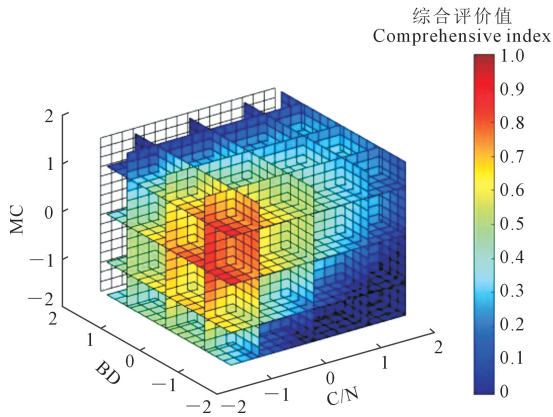


图 5 容重 (BD)、碳氮比 (C/N) 与含水率 (MC) 耦合对综合酿热效果的影响

Fig.5 Interactive effects of bulk density (BD), carbon nitrogen ratio (C/N), and moisture content (MC) on comprehensive score

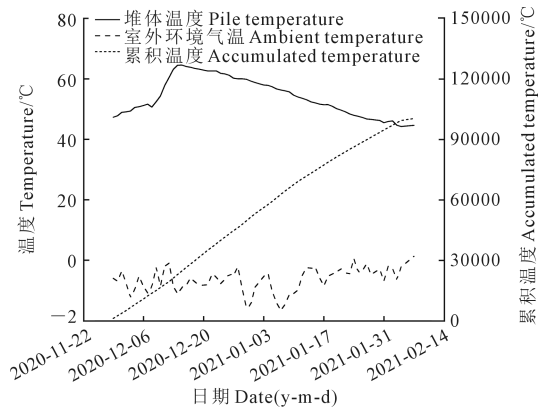


图 6 堆体温度与累积温度变化

Fig.6 Curve of pile temperature and accumulated temperature

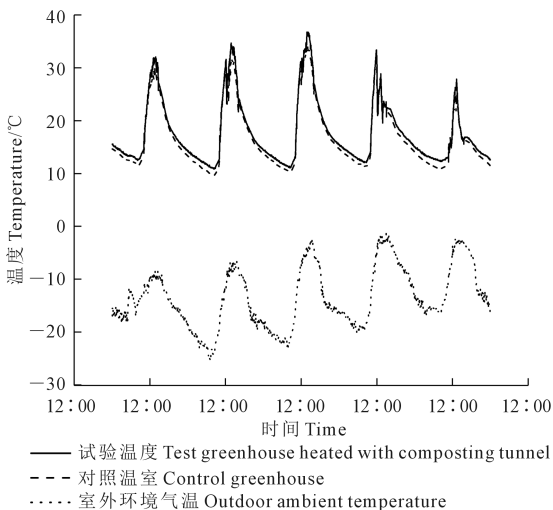


图 7 连续 5 日 (2021-01-06—2021-01-10) 试验与对照温室内气温变化

Fig.7 Curve of testing and control greenhouse indoor temperature in 5 d (2021-01-06—2021-01-10)

间室外最低温度为 $-25.5^{\circ}\text{C}$ ,试验温室内夜间气温始终高于室外且不低于 $10.9^{\circ}\text{C}$ ,对照温室最低夜温则为 $9.70^{\circ}\text{C}$ ,测试期二者夜间最大温差为 $1.50^{\circ}\text{C}$ ;而试验温室平均夜温高于对照温室 $0.94^{\circ}\text{C}$ 。表明温室生物质发酵酿热手段对于延安地区大跨度非对称塑料温室夜温提升效果可观。本试验所得最优方案可使生物质发酵酿热有效提高温室夜温,改善夜晚温室热环境。

### 3 讨论

温室生物质发酵酿热是一种外源加热措施。相比煤、电等外界热源,生物质酿热具有绿色、经济、长效缓释的特点。相同热值的原料,通过燃烧手段会快速并彻底释放其中热量,而通过生物质发酵手段则放热缓慢且一部分能量可被用于微生物的合成代谢。本文中,20 m<sup>3</sup>发酵物料提高延安地区

日光温室(跨度 11 m, 长度 100 m, 脊高 7 m)夜间气温 0.94~1.50℃。对于庞大的温室体积, 一定体积的发酵物料虽然瞬时增温幅度有限, 却有效改善了温室内热环境。利用显热计算公式<sup>[27-28]</sup>, 可根据温室类型与加热面积, 调整发酵物料体量, 以达到更显著的加温效果。以温室番茄为例, 其生长发育进程在一定范围内随环境温度的升高而加快, 发育速率与某一生育阶段的有效积温值呈正相关<sup>[29]</sup>。据计算, 生物质发酵酿热措施在 5 d 内提高有效积温 4.7~7.5 °C · d<sup>-1</sup>, 理论上可加快番茄生长发育, 使采收期提前。从实际生产的角度, 生物质发酵酿热措施可满足基质栽培的温度需求, 实现热量的长效缓释。同时, 生物质好氧发酵产生的 CO<sub>2</sub> 可被温室作物吸收固定, 实现作物增产并降低农业废弃物的碳排放量。

C/N 是影响好氧发酵的关键因素, 传统理论认为最适 C/N 为 20~35<sup>[4]</sup>, 但不同生物质发酵应用的最适 C/N 因原料性质差异而有所变化<sup>[30]</sup>, 同时因目标不同也存在差异。以生物质肥料化利用为最终目标时, 需更关注发酵产物腐熟度<sup>[7]</sup>、养分含量<sup>[3]</sup>与保氮效果<sup>[31]</sup>等指标。故中低水平 C/N 更适合以粪便腐熟度与臭气减排为综合目标的发酵管理<sup>[32]</sup>。而本试验以生物质发酵高效酿热为主要目标, 强调堆体快速启动、持续产热与有机质充分降解。故高 C/N 可增大碳源比例, 补充微生物生命活动所需的主要能量, 提高有机质降解速率<sup>[10]</sup>与产热<sup>[33]</sup>。在以麦秸为主体的好氧发酵体系中, 随 C/N 增大, 麦秸比例增加, 可有效促进堆肥起爆<sup>[34]</sup>。鉴于秸秆的良好保水性<sup>[35]</sup>, 在其他因素固定时, 高 C/N 物料仍可满足微生物对水分和氧气的需求<sup>[36]</sup>, 增大麦秸总有机碳降解率<sup>[30]</sup>, 加快降解速率, 利于微生物活动。因此本试验中最适发酵酿热 C/N 为 38.30~38.40 具有合理性与科学性。

## 4 结 论

1) 本研究构建了碳氮水耦合对生物质发酵的调控模型,  $R^2 = 0.816$ ,  $P = 0.0015$ , 模型达极显著水平。在单因素分析下, 生物质发酵综合酿热效果与 C/N 接近线性关系, 与 BD 和 MC 均呈凸型二次曲线关系。

2) 各因素对综合评分的作用大小依次为 C/N > BD > MC; BD 和 C/N、BD 和 MC 均呈负交互作用, 且相互抑制。大容重抑制下, 调节物料水分比调节碳氮比更有利于改善综合酿热效果。通过综合评价得出, 较高水平 C/N、中等偏高 MC、中等偏低 BD 更

能提升综合酿热效果。

3) 通过计算机模拟寻优得生物质发酵酿热最佳调控方案, 即 BD、C/N 与 MC 分别为 0.05~0.07 g · cm<sup>-3</sup>, 38.30~38.40, 52.94%~59.83% 时, 存在最优综合酿热效果, 可使冬季延安地区大跨度非对称塑料温室夜温提高 0.94~1.50℃。结果表明本文提出的生物质发酵酿热的调控模型具有较好准确性与应用效果。

## 参 考 文 献:

- [1] IRVINE G, LAMONT E R, ANTIZAR-LADISLAO B. Energy from waste: reuse of compost heat as a source of renewable energy[J]. International Journal of Chemical Engineering, 2010, 2010: 627930.
- [2] ELANGO D, THINAKARAN N, PANNEERSELVAM P, et al. Thermophilic composting of municipal solid waste[J]. Applied Energy, 2009, 86(5): 663-668.
- [3] 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 J, TIAN Y Q, GAO L H, 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.
- [4] SMITH M M, ABER J D, RYNK R. Heat recovery from composting: a comprehensive review of system design, recovery rate, and utilization [J]. Compost Science & Utilization, 2017, 25(sup1): S11-S22.
- [5] 王亮, 刘克锋, 孙向阳, 等. 牛粪好氧发酵规模化生产参数优化 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 115-121.  
WANG L, LIU K F, SUN X Y, et al. Parameter optimization for large-scale production of cattle manure aerobic fermentation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 115-121.
- [6] 田智辉, 王亚妮, 邹超, 等. 牛粪和秸秆好氧发酵堆肥的初始条件研究[J]. 中国土壤与肥料, 2018, (6): 192-197.  
TIAN Z H, WANG Y N, ZOU C, et al. Study on aerobic composting of cow dung and straw under different initial conditions[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018, (6): 192-197.
- [7] GUO R, LI G X, JIANG T, et al. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost [J]. Bioresource Technology, 2012, 112: 171-178.
- [8] MASON I G. Mathematical modelling of the composting process: a review[J]. Waste Management, 2006, 26(1): 3-21.
- [9] KAISER J. Modelling composting as a microbial ecosystem: a simulation approach [J]. Ecological Modelling, 1996, 91(1/3): 25-37.
- [10] GE J Y, HUANG G Q, HUANG J, et al. Particle-scale modeling of oxygen uptake rate during pig manure - wheat straw composting: a new approach that considers surface convection [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 97: 735-741.
- [11] 常瑞雪, 甘晶晶, 陈清, 等. 碳源调理剂对黄瓜秧堆肥进程和碳氮养分损失的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 2): 254-259.

- CHANG R X, GAN J J, CHEN Q, et al. Effect of carbon resources conditioner on composting process and carbon and nitrogen loss during composting of cucumber stalk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(S2): 254-259.
- [12] 徐智, 张勇, 陈雪娇, 等. 稻壳-鸡粪好氧高温堆肥体系中磷石膏消纳能力的研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 208-213.
- XU Z, ZHANG Y, CHEN X J, et al. Processing capacity of phosphogypsum in rice husk-chicken manure high-temperature composting system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(1): 208-213.
- [13] 王锦彪, 杨立中, 张列宇, 等. 猪粪与秸秆协同发酵产热及溶解性有机质的转化特征[J]. 环境科学研究, 2013, 26(2): 194-201.
- WANG J B, YANG L Z, ZHANG L Y, et al. Pig manure and straw ferment produce heat collaboratively and transformation of dissolved organic matter [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(2): 194-201.
- [14] 雷大鹏, 黄为一, 王效华. 发酵基质含水率对牛粪好氧堆肥发酵产热的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(5): 54-57.
- LEI D P, HUANG W Y, WANG X H. Effect of moisture content of substance on fermentation and heat production of cattle manure in aerobic composting[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, 27(5): 54-57.
- [15] KLEJMENT E, ROSINSKI M. Testing of thermal properties of compost from municipal waste with a view to using it as a renewable, low temperature heat source [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(18): 8850-8855.
- [16] SMITH M M, ABER J D. Energy recovery from commercial-scale composting as a novel waste management strategy [J]. Applied Energy, 2018, 211: 194-199.
- [17] 肖金鑫, 李建明, 武莹. 大跨度非对称酿热温室热环境及节地增产效果分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 65-76.
- XIAO J X, LI J M, WU Y. Effect of large span asymmetric fermentation heat storage greenhouse on thermal environment, land saving and production increase [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48(1): 65-76.
- [18] 李剑, 孙友宝, 马晓玲, 等. 离子色谱(IC)前处理法测定土壤中的总有机碳含量[J]. 环境化学, 2014, 33(8): 1425-1426.
- LI J, SUN Y B, MA X L, et al. Determination of total organic carbon in soil by ion chromatography (IC) pretreatment [J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(8): 1425-1426.
- [19] LIU H T, WANG L X, LEI M. Positive impact of biochar amendment on thermal balance during swine manure composting at relatively low ambient temperature [J]. Bioresource Technology, 2019, 273: 25-33.
- [20] 王永江, 黄光群, 韩鲁佳. 自由空域对猪粪麦秸好氧堆肥的影响实验分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 122-126.
- WANG Y J, HUANG G Q, HAN L J. Effects analysis of free airspace to pig slurry wheat straw aerobic composting in laboratory reactor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 122-126.
- [21] 朱常安, 和志豪, 蔡泽林, 等. 融合镁元素的水肥多因子耦合对黄瓜综合营养品质的调控[J]. 中国农业科学, 2019, 52(18): 3258-3270.
- ZHU C A, HE Z H, CAI Z L, et al. Regulation of comprehensive nutritional quality of cucumber by water and fertilizer coupling with magnesium [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(18): 3258-3270.
- [22] 李莎莎. 基于改进层次分析法和熵权法的采矿方法优选研究[J]. 化工矿物与加工, 2020, 49(3): 1-4.
- LI S S. Optimization of mining methods based on improved AHP and entropy weight method [J]. Industrial Minerals & Processing, 2020, 49(3): 1-4.
- [23] 马乐乐, 高宁, 杨百良, 等. 全有机营养模式下番茄综合品质评价及其对有机肥水耦合的响应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 63-72.
- MA L L, GAO N, YANG B L, et al. Construction of integrated quality index of tomato with total organic nutrition and its response to organic fertilizer and water coupling [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(6): 63-72.
- [24] 陈超鹏, 全伟, 吴明亮, 等. 基于离散元法的油菜移栽垂直入土式成孔部件参数优化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(4): 433-439.
- CHEN C P, QUAN W, WU M L, et al. Parameter optimization of vertical soil-filling hole-forming parts for rapeseed transplantation based on discrete element method [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2019, 45(4): 433-439.
- [25] 张智, 和志豪, 洪婷婷, 等. 基于多层次模糊评判的樱桃番茄综合生长水肥耦合调控[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 278-287.
- ZHANG Z, HE Z H, HONG T T, et al. Coupling regulation of water and fertilizer factors for comprehensive growth of cherry tomatoes based on multi-level fuzzy comprehensive evaluation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 278-287.
- [26] SHOJAEI S, ARDAKANI M A H, SODAIEZADEH H, et al. Simultaneous optimization of parameters influencing organic mulch test using response surface methodology [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 6717.
- [27] HUNCE S Y, CLEMENTE R, BERNAL M P. Selection of Mediterranean plants biomass for the composting of pig slurry solids based on the heat production during aerobic degradation [J]. Waste Management, 2020, 104: 1-8.
- [28] YEH C K, LIN C, SHEN H C, et al. Optimizing food waste composting parameters and evaluating heat generation [J]. Applied Sciences, 2020, 10(7): 2284.
- [29] 徐刚, 张昌伟, 李德翠, 等. 温室长季节栽培番茄发育动态模拟模型的研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊2): 243-246.
- XU G, ZHANG C W, LI D C, et al. Developmental stage simulation model for long-term tomato growing in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(S2): 243-246.
- [30] 马若男, 李丹阳, 亓传仁, 等. 碳氮比对鸡粪堆肥腐熟度和臭气排放的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 194-202.
- MA R N, LI D Y, QI C R, et al. Effects of C/N ratio on maturity and odor emissions during chicken manure composting [J]. Transac-



- tions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36 (24): 194-202.
- [31] 周海瑛, 邱慧珍, 杨慧珍, 等. C/N 比对好氧堆肥中  $\text{NH}_3$  挥发损失和含氮有机物转化的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38 (2): 69-77.
- ZHOU H Y, QIU H Z, YANG H Z, et al. Effects of C/N ratio on  $\text{NH}_3$  volatilization loss and nitrogen-containing organic compounds conversion in aerobic composting[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(2): 69-77.
- [32] 孙向平, 李国学, 肖爱平, 等. 添加不同比例玉米秸秆对猪粪高温堆肥过程中胡敏酸的结构组成及红外光谱特性影响分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(9): 2413-2418.
- SUN X P, LI G X, XIAO A P, et al. Analysis on the impact of composting with different proportions of corn stalks and pig manure on humic acid fractions and IR spectral feature[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(9): 2413-2418.
- [33] 王永江, 黄光群, 韩鲁佳. 猪粪好氧堆肥过程有机质降解和热量平衡模型[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 121-124, 115.
- WANG Y J, HUANG G Q, HAN L J. Modeling of organic matter degradation and thermal balance during pig slurry aerobic composting [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 121-124, 115.
- [34] 常瑞雪, 王骞, 甘晶晶, 等. 易降解有机质含量对黄瓜秧堆肥腐熟和氮损失的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 231-237.
- CHANG R X, WANG Q, GAN J J, et al. Influence of easily-degraded organic matter content on maturity and nitrogen loss during composting of cucumber vine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 231-237.
- [35] 王擎运, 何咏霞, 陈景, 等. 秸秆或粉煤灰添加对砂姜黑土持水性及小麦抗干旱胁迫的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 95-102.
- WANG Q Y, HE Y X, CHEN J, et al. Effects of straw or fly ash addition on water holding capacity of typical Shajiang black soil and drought stress tolerance in wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(2): 95-102.
- [36] 王永江, 黄光群, 韩鲁佳, 等. 塑料和麦秸膨胀剂对猪粪好氧堆肥的影响试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 158-163.
- WANG Y J, HUANG G Q, HAN L J, et al. Effects of plastic and straw bulking agents on swine manure composting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44 (5): 158-163.

(上接第 200 页)

- [21] 唐建昭, 肖登攀, 柏会子. 未来气候情景下农牧交错带不同灌溉水平马铃薯产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2020, 36 (2): 103-112.
- TANG J Z, XIAO D P, BAI H Z. Yield and water use efficiency of potato at different irrigation levels in agro-pastoral ecotone under future climate change[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(2): 103-112.
- [22] 肖国举, 仇正跻, 张峰举, 等. 增温对西北半干旱区马铃薯产量和品质的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 830-836.
- XIAO G J, QIU Z J, ZHANG F J, et al. Influence of increased temperature on the potato yield and quality in a semiarid district of Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 830-836.
- [23] 国家气象局. 农业气象观测规范(上卷)[M]. 北京: 气象出版社, 1993.
- National Meteorological Administration. Agrometeorology observation standards (volume 1) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993.
- [24] 林而达, 张厚瑄, 王京华, 等. 全球气候变化对中国农业影响的模拟[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1997: 1-20.
- LIN E D, ZHANG H X, WANG J H, et al. Simulation of the impact of global climate change on Chinese agriculture[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1997: 1-20.
- [25] 张强, 邓振镛, 赵映东, 等. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1210-1218.
- ZHANG Q, DENG Z Y, ZHAO Y D, et al. The impacts of global climatic change on the agriculture in northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1210-1218.
- [26] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书: 2020[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- Climate Change Center of China Meteorological Administration. Blue book on climate change in China: 2020 [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [27] 乔焕焕, 李红兵, 郑太波, 等. 干旱与复水对马铃薯块茎膨大期碳氮转运的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(4): 154-162.
- QIAO H H, LI H B, ZHENG T B, et al. Effects of drought stress and rehydration on carbon and nitrogen translocation in potato tuber swelling stage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(4): 154-162.
- [28] PUGET P, CHENU C, BALESDENT J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates [J]. European Journal of Soil Science, 2000, 51(4): 595-605.
- [29] YODER R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. Agronomy Journal, 1936, 28(5): 337-351.
- [30] KASPER M, BUCHAN G D, MENTLER A, et al. Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105(2): 192-199.