

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0522

# 秸秆反应堆技术对设施棚室土壤环境及南瓜 光合特性、品质和产量的影响

王 祎<sup>1,2</sup>, 邓超超<sup>3</sup>, 张 靖<sup>3</sup>

(1. 甘肃省科学院生物研究所 兰州 730070; 2. 凉州区农业技术推广中心 甘肃武威 733000;  
3. 甘肃省农业工程技术研究院 兰州 730070)

**摘要:**为明确秸秆反应堆技术对设施棚室土壤环境及南瓜光合作用、品质与产量的影响,以常规种植为对照(CK),探究行间(HJ)、行内(HN)2种秸秆反应堆模式对早春低温季节南瓜生育期土壤温度、呼吸速率以及植株光合特性、农艺性状、品质和产量的影响。结果表明,与CK相比,2种秸秆反应堆模式不仅能显著提高0~30 cm土壤温度,增强土壤呼吸速率,而且能通过改善南瓜植株光合特性和农艺性状提升南瓜品质和产量。其中,土壤日均地温、全生育期地温和土壤呼吸速率分别提高1.71~2.31℃、1.94~2.78℃、12.22%~28.41%;光合特性、农艺性状、品质和产量指标分别提升5.71%~29.09%、6.61%~13.00%、6.61%~44.1%和13.4%~28.3%,且以行内秸秆反应堆(HN)效果最佳。综上,在早春等低温季节,设施大棚南瓜生产中优先采用行内秸秆反应堆技术,即垄上沟槽长10 m×宽0.8 m×深0.3 m,秸秆52 500 kg·hm<sup>-2</sup>+尿素225 kg·hm<sup>-2</sup>+激发剂1500 kg·hm<sup>-2</sup>+秸秆腐熟剂45 kg·hm<sup>-2</sup>能有效调控棚内环境,促进植株健壮生长与物质积累,实现品质和产量协同提升。

**关键词:**南瓜;秸秆反应堆;土壤环境;光合特性;品质;产量

中图分类号:S642.1

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)05-067-10

## Effects of straw reactor technology on soil environment and photosynthetic, quality and yield of pumpkin in greenhouse

WANG Yi<sup>1,2</sup>, DENG Chaochao<sup>3</sup>, ZHANG Jing<sup>3</sup>

(1. Biological Research Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Agricultural Technology Promotion Center in Liangzhou District, Wuwei 733000, Gansu, China; 3. Gansu Academy of Agricultural Engineering Technology, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract:** In order to clarify the effects of straw reactor technology on soil environment and photosynthetic quality and yield of pumpkin in greenhouse, in this study, conventional planting (CK) was used as a control to explore the effects of two straw reactor modes of inter-row (HJ) and intra-row (HN) on soil temperature, respiration rate, photosynthetic characteristics, agronomic traits and quality and yield of pumpkin during the growth period in early spring and low temperature season. Moreover, it can improve the quality and yield of pumpkin by improving the photosynthetic characteristics and agronomic traits of pumpkin. The average daily soil temperature, soil temperature and soil respiration rate during the whole growth period increased by 1.71-2.31 °C, 1.94-2.78 °C and 12.22%-28.41%, respectively. The photosynthetic characteristics, agronomic traits, quality and yield were increased by 5.71%-29.09%, 6.61%-13.00%, 6.61%-44.1% and 13.4%-28.3%, respectively, and the effect of straw reactor (HN) was the best. In general, in the early spring and other low temperature seasons, the in-row straw reactor technology (ridge groove length 10 m × width 0.8 m × depth 0.3 m, straw 52 500 kg · hm<sup>-2</sup> + urea 225 kg · hm<sup>-2</sup> + activator 1500 kg · hm<sup>-2</sup> + straw decomposition agent 45 kg · hm<sup>-2</sup>) should be preferentially adopted in the production of pumpkin in greenhouse to effectively regulate the environment in the greenhouse, promote the healthy growth and material accumulation of plant, and achieve the synergistic improvement of quality and yield.

**Key words:** Pumpkin; Straw reactor; Soil environment; Photosynthetic characteristics; Quality; Yield

收稿日期: 2025-07-22; 修回日期: 2025-11-30

基金项目: 甘肃省民生科技专项-科技特派员(基地)专项(23CXNH0019); 甘肃省第十批“陇原之光”人才培养项目(甘组通字(2024)38号)

作者简介: 王 祎, 男, 高级农艺师, 主要从事作物水肥高效利用技术研究。E-mail: 494135466@qq.com

通信作者: 邓超超, 男, 助理研究员, 主要从事土壤改良与作物高效栽培研究。E-mail: 865851869@qq.com

农业可持续发展战略背景下,农业废弃物资源化利用已成为现代农业绿色转型的核心任务<sup>[1]</sup>。据统计,我国每年产出约9亿t的农作物秸秆<sup>[2]</sup>。传统的秸秆焚烧不仅造成了氮、磷、钾等养分资源浪费,还引起严重的碳排放问题<sup>[3]</sup>。截至2024年,我国设施农业栽培面积约 $2.67 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,连作障碍<sup>[4]</sup>、土壤退化<sup>[5]</sup>、化肥过量施用<sup>[6]</sup>等问题日益凸显。如何将农业废弃物高效转化利用,同时实现设施作物的优质高产,已成为当前设施农业科技领域亟待攻克的关键难题<sup>[7]</sup>。

秸秆生物反应堆技术,又称 $\text{CO}_2$ 缓释富氧秸秆发酵技术,是一项创新性的生态循环农业技术<sup>[8]</sup>。研究表明,在设施蔬菜种植中应用秸秆反应堆技术设施棚内 $\text{CO}_2$ 浓度提高4~6倍,耕层地温提升3~6 $^\circ\text{C}$ <sup>[9-11]</sup>,同时改善土壤理化性质,增加土壤有机质含量,改善土壤团粒结构,优化了根际微生态环境,促进了土壤中有益微生物的繁殖,从而提高产量<sup>[12-13]</sup>。南瓜作为我国重要的设施蔬菜作物,具有营养丰富、适应性强、经济价值高等特点,市场需求逐年攀升<sup>[14]</sup>。

目前针对秸秆反应堆技术对温室南瓜提质增产的系统性研究相对匮乏。笔者基于秸秆反应堆技术原理,通过设施定位试验,系统探究秸秆反应堆技术在温室南瓜种植中的应用效果,深入解析秸秆反应堆技术对南瓜土壤温度、呼吸速率、植株光合特性、生长发育、果实营养品质及产量形成的影响,以期对秸秆反应堆技术在设施南瓜种植中的科

学应用提供坚实的理论依据与技术支撑,推动设施农业朝着绿色低碳方向发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2024年3—8月在兰州新区兰州润泽骏业农牧林科技发展有限公司试验基地进行。该地区属于温带大陆性季风气候,年均气温10.3 $^\circ\text{C}$ ;年均降水量300mm,年均蒸发量1880mm,日照时数1744~2659h。试验土壤为砂质壤土,前茬作物为番茄,地力均匀,耕层土壤(0~30cm)基本理化性质:pH 8.55,水溶性盐含量(w,后同)6.43 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,容重1.58 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,有机质(SOM)含量15.26 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮(TN)含量1.06 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有效磷(AP)含量36.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾(AK)含量118.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 材料

供试贝贝南瓜品种为栗妹5号,由兰州润泽骏业农牧林科技发展有限公司培育。

供试玉米秸秆,MT激发剂,秸秆腐熟剂肥料等物料的基本理化性质见表1。

### 1.3 试验设计

本试验共设置3个处理:常规措施(CK),地理式行间秸秆反应堆(HJ),地理式行内秸秆反应堆(HN),为避免处理间互相影响,3个处理分别布置于3个地力水平一致的大棚。试验设计见表2。地理式秸秆反应堆布置好后浇透水,以秸秆湿透为准;每隔0.5m反应堆垄面上垂直打直径1.0cm

表1 物料来源及成分信息

Table 1 Material source and composition information

材料名称 Name of the material	来源 Source	理化性质 Physicochemical property
有机肥 Organic fertilizer	南京三美农业发展有限公司 Nanjing Sanmei Agricultural Development Co., Ltd.	$w(\text{N})=1.5\%$ , $w(\text{P})=1.0\%$ , $w(\text{K})=2.5\%$
尿素 Urea	宁夏和宁化学有限公司 Ningxia Hening Chemical Co., Ltd.	$w(\text{N})=46\%$
过磷酸钙 Calcium superphosphate	云南安宁化肥有限公司 Yunnan Anning Fertilizer Co., Ltd.	$w(\text{P}_2\text{O}_5)=16\%$
硫酸钾镁 Potassium magnesium sulfate	青海联宇钾肥有限公司 Qinghai Lianyu Potash Fertilizer Co., Ltd.	$w(\text{K}_2\text{O})=24\%$
玉米秸秆 Corn straw	农户粉碎玉米秸秆 Farmers crush corn stalks	$w(\text{总N})=0.87\%$ , $w(\text{总P})=0.13\%$ , $w(\text{总K})=0.12\%$ Total N content=0.87%, total P content=0.13%, total K content=0.12%
MT激发剂 MT activator	北京中向利丰公司 Beijing Zhongxiang Lifeng Company	$w(\text{有机质})\geq 50\%$ , $w(\text{黄腐酸})\geq 5\%$ Organic matter content $\geq 50\%$ , humic acid content $\geq 5\%$
秸秆腐熟剂 Straw composting agent	北京中向利丰公司 Beijing Zhongxiang Lifeng Company	蛋白酶活性 $\geq 15 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ , 纤维素酶活性 $\geq 30 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ , 有效活菌数 $\geq 5 \times 10^7 \text{ CFU}\cdot\text{g}^{-1}$ Protease activity $\geq 15 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ , cellulase activity $\geq 30 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ , effective viable cell count $\geq 5 \times 10^7 \text{ CFU}\cdot\text{g}^{-1}$

表 2 试验设计  
Table 2 Experimental design

代码 Code	处理 Treatment	处理描述 Processing description
CK	常规措施 Conventional planting	有机肥 30 t·hm <sup>-2</sup> 和过磷酸钙 1.9 t·hm <sup>-2</sup> 全作底肥, 尿素 0.8 t·hm <sup>-2</sup> 和硫酸钾镁 2.1 t·hm <sup>-2</sup> (1/3 作为底肥, 2/3 追肥)。灌溉采用水肥一体化膜下滴灌方式, 每垄铺设 2 根滴灌带, 每隔 7~10 d 滴 1 次水, 其他管理方式同当地设施管理 Organic fertilizer of 30 t·hm <sup>-2</sup> and superphosphate of 1.9 t·hm <sup>-2</sup> are used as base fertilizers, urea of 0.8 t·hm <sup>-2</sup> and potassium magnesium sulfate of 2.1 t·hm <sup>-2</sup> (1/3 as base fertilizer and 2/3 as topdressing). Irrigation adopts the integrated drip irrigation method under the film, with 2 drip irrigation belts laid on each ridge and water dripping every 7-10 days. Other management methods are the same as local facility management
HJ	行间反应堆 Inter-row straw reactor	种植前, 在定植垄间开挖长×宽×深=10 m×0.4 m×0.3 m 的沟槽, 将玉米秸秆 52 500 kg·hm <sup>-2</sup> +尿素 225 kg·hm <sup>-2</sup> +激发剂 1500 kg·hm <sup>-2</sup> +秸秆腐熟剂 45 kg·hm <sup>-2</sup> 混均匀撒于沟槽, 一层秸秆混合物, 喷洒一次秸秆腐熟剂(秸秆腐熟剂与水 1:100 混匀); 然后将挖出原土回填, 形成高×宽=0.3 m×0.4 m 的沟面。施肥、灌溉等管理方式同 CK Before planting, excavate a trench with dimensions of (10 m×0.4 m×0.3 m) between the planting ridges. Mix corn stover (52 500 kg·hm <sup>-2</sup> ), urea (225 kg·hm <sup>-2</sup> ), activator (1500 kg·hm <sup>-2</sup> ), and straw composting agent (45 kg·hm <sup>-2</sup> ) evenly in the trench. Spray a layer of straw mixture and apply straw composting agent (straw composting agent mixed with water at a ratio of 1:100) once; then the excavated soil will be backfilled to form a trench surface with a height by width of (0.3 m×0.4 m). Fertilization, irrigation and other management methods are the same as CK
HN	行内反应堆 In-row straw reactor	种植前, 在定植垄上开挖长×宽×深=10 m×0.8 m×0.3 m 的沟槽, 将玉米秸秆 52 500 kg·hm <sup>-2</sup> +尿素 225 kg·hm <sup>-2</sup> +激发剂 1500 kg·hm <sup>-2</sup> +秸秆腐熟剂 45 kg·hm <sup>-2</sup> 混均匀撒于沟槽, 一层秸秆混合物, 喷洒一次秸秆腐熟剂(秸秆腐熟剂与水 1:100 混匀); 然后将挖出原土回填, 形成高×宽(0.3 m×0.8 m) 垄面。施肥、灌溉等管理方式同 CK Before planting, excavate a long × wide × deep=10 m×0.8 m×0.3 m trench on the planting ridge, mix corn straw (52 500 kg·hm <sup>-2</sup> ), urea (225 kg·hm <sup>-2</sup> ), activator (1500 kg·hm <sup>-2</sup> ), and straw composting agent (45 kg·hm <sup>-2</sup> ) evenly and sprinkle them in the trench. A layer of straw mixture is sprayed once with straw composting agent (straw composting agent mixed 1:100 with water); then the excavated soil will be backfilled to form a ridge surface with a height×width=0.3 m×0.8 m. Fertilization, irrigation and other management methods are the same as CK

孔, 孔深以穿透秸秆最佳, 利于 O<sub>2</sub> 进入, 促进秸秆腐熟分解, 释放 CO<sub>2</sub>, 放置 20 d 后覆膜种植。本试验地理式秸秆反应堆布置于 2024 年 3 月 25 日, 4 月 16 日定植幼苗, 8 月 9 日收获。

#### 1.4 测定指标与方法

1.4.1 地温测定 (1) 土壤温度季节变化监测: 采用曲管地温计测定。南瓜幼苗定植后, 将曲管地温计埋至定植垄中间, 每个处理 3 套, 分别监测 10、20 和 30 cm 深度土壤温度, 每隔 15 d 记录 11:00—11:30 各深度地温。(2) 土壤温度日变化监测: 采用曲管地温计在南瓜抽蔓期(5 月 27 日)07:00—21:00 每隔 2 h 监测 3 个处理各深度地温。

1.4.2 南瓜生育期土壤呼吸速率测定 采用原位监测每个处理的土壤呼吸速率, 在定植垄上布设 PVC 管土壤呼吸圈, 选择晴朗少云天气 09:30—11:00, 用土壤碳通量测量系统(LI-8100, LI-COR Inc, USA)测定。4 月 21 日(幼苗定植后)开始第 1 次测定, 8 月 7 日(成熟期)最后 1 次测定。每隔 15 d 左右测定 1 次, 测定前一天, 揭开测定圈内的地膜于圈外, 排除膜内 CO<sub>2</sub>, 测定结束后, 盖好地膜, 在整个观测过程中测定圈埋设位置保持不变, 并及时去除圈内杂草和枯落物<sup>[15]</sup>。

1.4.3 南瓜光合特性测定 选择晴朗天气 09:00—

11:00, 采用便携式光合仪(LI-6400XT, 美国)测定贝贝南瓜植株生长点向下第 3 片功能叶的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T$ ), 各处理重复测定 6 次。测定日期与生长指标测定相同。

1.4.4 南瓜生长指标测定 贝贝南瓜苗期(4 月 21 日)、抽蔓期(5 月 23 日)、坐果期(6 月 21 日)和成熟期(7 月 21 日), 每个处理选择生长旺盛、长势良好、具有代表性的贝贝南瓜 10 株, 测定植株蔓长[(VL: vine length)卷尺测定, 单位: cm]、茎基部 5 cm 处茎粗[(ST: stem thickness)游标卡尺 DWKC-2038, 杭州德力西, 单位: mm]和植株生长点向下第 3 片功能叶的叶绿素相对含量(叶绿素仪 SPAD-502Plus, 美能达, 日本), 每株测定 6 次, 取平均值。

1.4.5 南瓜品质测定 品质指标测定参考刘文君等<sup>[16]</sup>的方法, 在贝贝南瓜成熟期各处理选取具有代表性的 10 个果实, 在果实赤道部位取样, 采用游标卡尺测量南瓜果肉厚度(FT: fruit thickness), 采用酸水解-蒽酮比色法测定淀粉含量(SC: starch content), 采用 2, 6-二氯喹酚滴定法测定维生素 C 含量, 采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量(SCC: soluble sugar content), 采用 BCA 法测定可溶性蛋白含量(SPC: soluble protein content)。

1.4.6 南瓜产量测算 在贝贝南瓜成熟期,用电子天平测定每个小区产量,求均值后换算公顷产量(kg·hm<sup>-2</sup>)。

### 1.5 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2020 整理试验数据和绘图,采用 IBM SPSS 21.0 进行方差分析、多重比较和相关性分析。

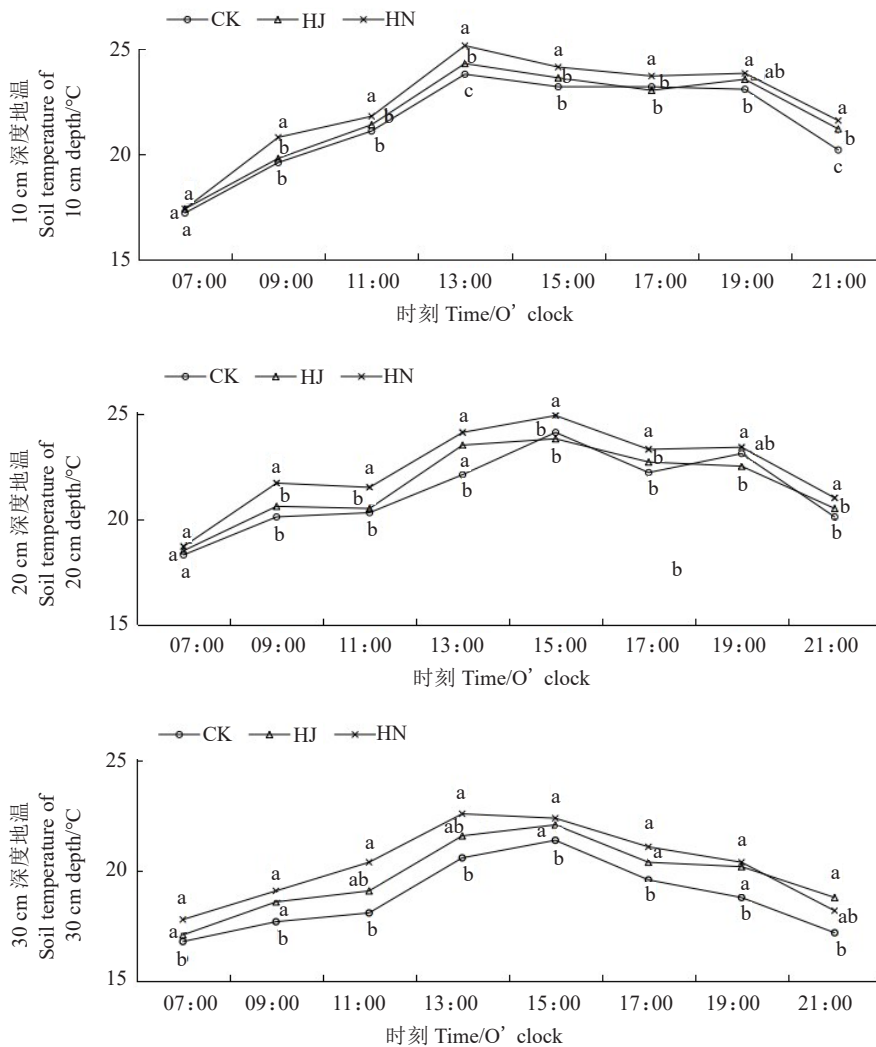
## 2 结果与分析

### 2.1 不同秸秆反应堆处理下南瓜根系土壤地温日动态变化规律

秸秆反应堆技术对日光温室土壤地温具有明显影响(图1)。各深度土壤地温在一天内整体上均呈先升后降的趋势,13:00—19:00 土壤地温较高;随着土层深度的递增,土壤地温表现为 10 cm≥20 cm>

30 cm。10 cm 深度土壤地温日动态变化整体表现为 HN>HJ>CK,HN 处理与 CK 差异显著,20 cm 和 30 cm 深度土壤地温也表现为 HN 处理最高,HJ 处理次之,CK 最低的相同规律,且 HN 处理与 CK 差异显著。以上数据表明,秸秆反应堆处理会产生热量,其中行内秸秆反应堆(HN)处理对日光温室内土壤地温的提升效果最好,行间反应堆(HJ)次之。

由表 3 可知,不同秸秆反应堆处理对 10、20 和 30 cm 深度土壤地温日均值产生影响。HN、HJ 处理的 10 cm 深度土壤地温日均值较 CK 分别提高 2.89、2.07 °C,且 HN、HJ 处理与 CK 差异显著,HN、HJ 处理间差异不显著。20 和 30 cm 深度土壤地温日均值也表现 HN 处理最高,HJ 处理次之,CK 最低,HN、HJ 处理与 CK 差异显著。HN、HJ 处理的 10、20 和 30 cm 深度平均土壤地温日均值较 CK 分



注:不同小写字母表示同一时间的不同处理在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference between treatments of the same time at 0.05 level. The same below.

图 1 不同处理下土壤 10、20 和 30 cm 深度地温日动态变化

Fig. 1 Daily dynamic variation of soil temperature at 10, 20 and 30 cm depth under different treatments

别显著提高 2.31、1.71 °C, HN、HJ 处理间差异不显著。以上结果表明, 秸秆反应堆发酵过程中能产生热量, 显著影响日光温室土壤地温。

表 3 不同处理下土壤 10、20 和 30 cm 深度地温日均值分析  
Table 3 Analysis of daily average value of soil temperature at 10, 20 and 30 cm depth under different treatments °C

处理 Treatment	土层深度 Soil layer/cm			均值 Average
	10	20	30	
CK	19.42±0.12 c	20.28±0.16 c	18.27±0.10 c	19.32±0.10 c
HJ	21.79±0.08 ab	21.57±0.18 b	19.73±0.09 b	21.03±0.08 ab
HN	22.31±0.09 a	22.32±0.08 a	20.25±0.13 a	21.63±0.12 a

注: 同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

### 2.2 不同秸秆反应堆处理下南瓜全生育期土壤地温动态变化规律

贝贝南瓜全生育期不同处理 10、20 和 30 cm 深度的土壤地温动态变化规律如图 2 所示。随着秸秆发酵时间与贝贝南瓜生育期的同时推进, HN、HJ 处理前期提升土壤地温的效果优于后期。贝贝南瓜全生育期各处理 10 和 20 cm 深度土壤地温变化波动较大, 30 cm 深度土壤地温变化平稳。贝贝南瓜全生育期 10 cm 深度土壤地温呈现 HN>HJ>CK 的总体规律, HN 处理与 CK 差异显著, 除 6 月 7 日和 6 月 21 日两个测定时间点外, HN、HJ 处理在其他测定时间点差异不显著。贝贝南瓜全生育期 20 和 30 cm 深度土壤地温也表现为 HN 处理最高, HJ 处理次之, CK 最低, 除 20 cm 处 8 月 7 日测定时间点外, HN 处理与 CK 在其他时间点均差

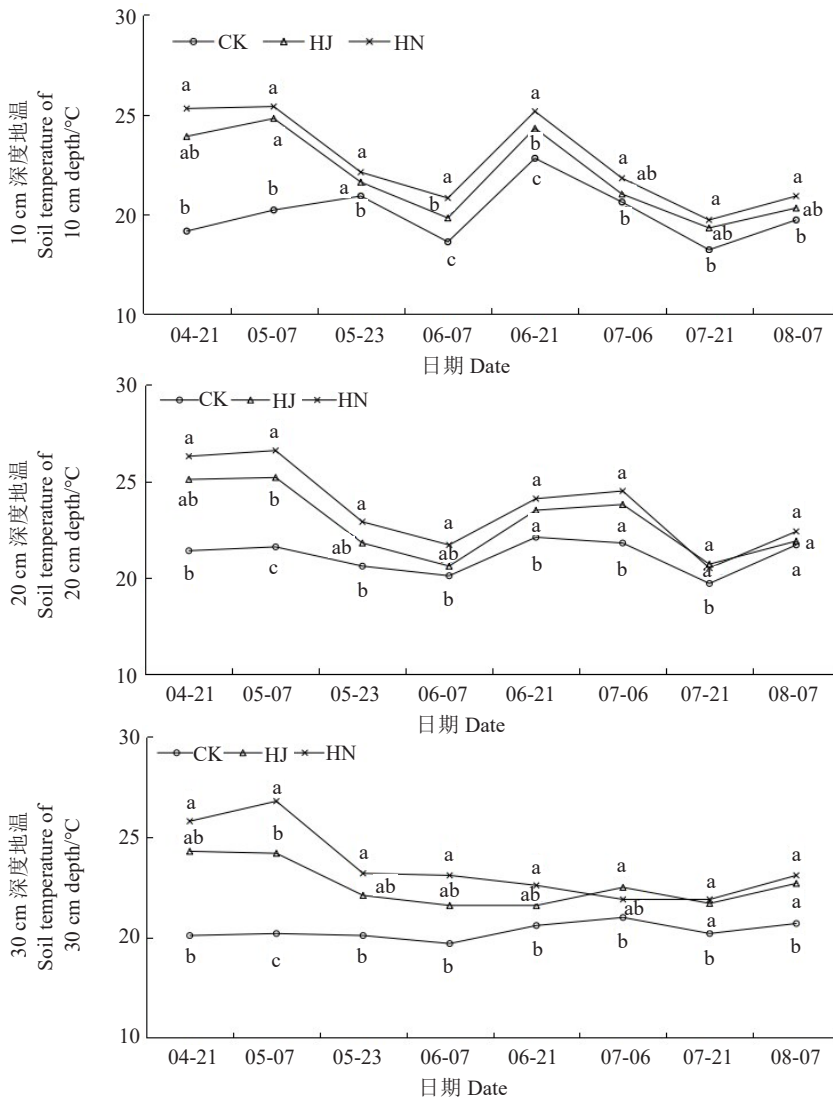


图 2 南瓜全生育期各处理土壤 10、20 和 30 cm 深度地温动态变化

Fig. 2 Dynamic change of soil temperature at depths of 10, 20, and 30 cm for each treatment during the whole growth period of pumpkin

异显著。以上结果表明, 秸秆反应堆技术能够提高贝贝南瓜生育期土壤地温, 以前期提升效果更显著, 行内秸秆反应堆(HN)处理效果优于行间(HJ)处理。

分析不同处理对贝贝南瓜全生育期 10、20 和 30 cm 土壤深度地温均值的影响(表 4), 结果表明, 贝贝南瓜全生育期 HN、HJ 处理的 10 cm 深度土壤地温均值较 CK 分别显著提升 2.63 和 1.86 °C, HN 与 HJ 处理差异显著。贝贝南瓜全生育期 20 cm 和 30 cm 深度土壤地温均值也呈现 HN > HJ > CK, HN、HJ 处理和 CK 三者间均呈显著差异。贝贝南瓜全生育期 HN、HJ 处理的 10、20 和 30 cm 深度平均土壤地温均值较 CK 分别显著提高 2.78 和 1.94 °C, HN 与 HJ 处理差异显著。以上结果表明, 秸秆腐熟分解产生热量可以有效提高土壤地温, 缓解低温对耕层微生物活动、养分分解及对作物根系生长发育的限制。

表 4 不同处理下南瓜全生育期土壤 10、20 和 30 cm 深度地温均值分析

Table 4 Analysis of average soil temperature at 10, 20 and 30 cm depths during the whole growth period of pumpkin under different treatments °C

处理 Treatment	土层深度 Soil layer/cm			均值 Average
	10	20	30	
CK	20.02±0.13 c	21.13±0.16 c	20.33±0.07 c	20.49±0.10 c
HJ	21.88±0.18 b	22.83±0.15 b	22.59±0.11 b	22.43±0.06 b
HN	22.65±0.26 a	23.63±0.09 a	23.55±0.13 a	23.27±0.10 a

2.3 不同秸秆反应堆处理下南瓜全生育期土壤呼吸速率的动态变化规律

由图 3 可知, 随着秸秆反应堆发酵与贝贝南瓜生育期的共同推进, 土壤呼吸速率整体上呈降低-升高-降低的变化趋势。与 CK 相比, 秸秆反应堆处理(HN、HJ)均能提高南瓜生育期的土壤呼吸速率, 其

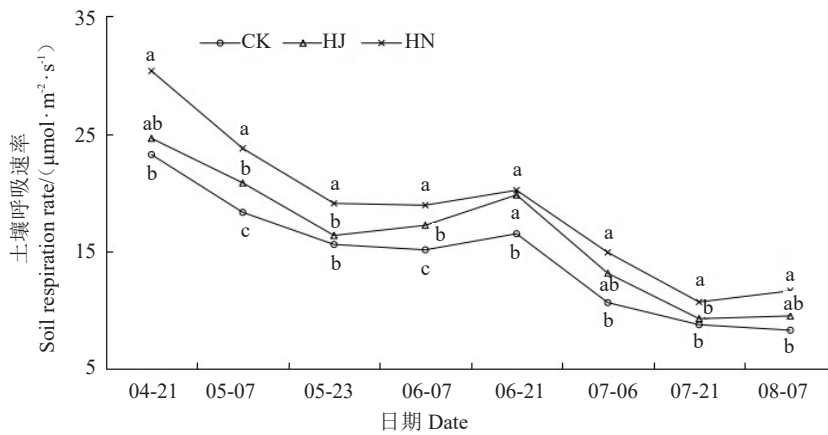


图 3 南瓜全生育期不同处理下土壤呼吸速率的变化

Fig. 3 Change of soil respiration rate under different treatments during the whole growth period of pumpkin

中以行内秸秆反应堆(HN)处理效果最佳。

由表 5 可知, 南瓜全生育期土壤呼吸速率均值表现为 HN > HJ > CK, 不同处理间均差异显著, HN 处理的南瓜全生育期土壤呼吸速率均值较 CK 显著提高 28.41%。

表 5 不同秸秆反应堆处理下的南瓜全生育期土壤呼吸速率均值分析

Table 5 Analysis of average soil respiration rate of different straw reactor treatments during the whole growth period of pumpkin (μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	CK	HJ	HN
数值 Value	14.57±0.11 c	16.35±0.12 b	18.71±0.16 a

注: 同行不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different small letters in the same row indicate significant difference at 0.05 level.

2.4 不同秸秆反应堆处理对南瓜生育期光合特性的影响

秸秆反应堆处理对南瓜全生育期的叶片光合特性具有显著影响。由表 6 可知, 随南瓜生育期的推进, 不同处理下南瓜光合特性指标(净光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和蒸腾速率)均呈先升后降的趋势, 在开花-坐果期达到峰值。2 种秸秆反应堆处理较 CK 均能显著提升南瓜抽蔓期-成熟期的叶片净光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和蒸腾速率。除成熟期叶片气孔导度、蒸腾速率及苗期气孔导度外, HN、HJ 处理的南瓜苗期-成熟期叶片的其他光合特性指标均呈显著差异。

对南瓜苗期-成熟期叶片的净光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和蒸腾速率均值进行比较, 发现

表 6 不同处理下南瓜叶片光合特性的变化趋势

Table 6 Trends of photosynthetic characteristics of pumpkin leaves under different treatments

生育时期 Growth stage	处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	气孔导度 Stomatal conductivity/ ( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 Intercellular CO <sub>2</sub> concentration/( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	蒸腾速率 Transpiration rate/( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
苗期 Seedling stage	CK	10.77±0.12 c	0.42±0.02 b	339.63±0.43 b	3.08±0.04 c
	HJ	11.60±0.13 b	0.48±0.03 ab	341.09±0.77 b	3.21±0.03 b
	HN	12.19±0.14 a	0.53±0.01 a	345.87±0.16 a	4.54±0.08 a
抽蔓期 Growing stage	CK	11.20±0.06 c	0.54±0.02 c	341.08±0.71 c	4.13±0.11 c
	HJ	12.67±0.13 b	0.64±0.04 b	344.78±0.21 b	4.63±0.15 b
	HN	13.61±0.06 a	0.67±0.03 a	358.41±0.87 a	5.21±0.14 a
开花-坐果期 Flowering-setting fruit stage	CK	13.07±0.02 c	0.79±0.02 c	343.86±4.95 c	5.15±0.18 c
	HJ	15.05±0.06 b	0.95±0.06 b	350.78±3.84 b	6.28±0.17 b
	HN	16.40±0.15 a	0.98±0.15 a	367.83±2.64 a	6.58±0.11 a
成熟期 Maturity stage	CK	12.42±0.25 c	0.46±0.02 b	331.75±1.49 c	4.98±0.12 b
	HJ	14.45±0.30 b	0.64±0.03 a	340.46±1.04 b	5.45±0.21 a
	HN	15.41±0.20 a	0.66±0.03 a	359.91±1.25 a	5.70±0.07 a
均值 Average	CK	11.87±0.26 c	0.55±0.02 c	338.41±1.36 c	4.34±0.01 c
	HJ	13.44±0.22 b	0.68±0.02 b	344.11±1.01 b	4.89±0.08 b
	HN	14.40±0.08 a	0.71±0.01 a	357.74±1.55 a	5.51±0.05 a

各处理的南瓜苗期-成熟期叶片的净光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和蒸腾速率均表现为 HN>HJ>CK, 且 HN、HJ 处理和 CK 三者间均呈显著差异。HN 处理的净光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和蒸腾速率较 CK 分别显著提高 21.31%、29.09%、5.71% 和 26.96%。以上结果表明, 应用秸秆反应堆技术能显著提高南瓜生育期的叶片光合效率, 其中以行内秸秆反应堆(HN)处理效果最优。

## 2.5 不同秸秆反应堆处理对南瓜各生育期农艺性状的影响

秸秆反应堆处理对南瓜苗期-成熟期农艺性状的影响存在差异。由表 7 可知, 在苗期, CK 与 HJ、HN 处理的南瓜蔓长和茎粗差异均不显著, HN、HJ 处理与 CK 的叶绿素相对含量(SPAD)差异显著, HN、HJ 处理间差异不显著。在抽蔓期和开花-坐果期, 秸秆反应堆处理(HN、HJ)均能提高南瓜蔓长、茎粗和叶绿素相对含量, 以 HN 处理的提升效果最

表 7 不同时期各处理南瓜农艺性状分析

Table 7 Analysis of agronomic traits of pumpkin at different stages

生育时期 Growth stage	处理 Treatment	蔓长 Vine length/cm	茎粗 Stem thickness/mm	叶绿素相对含量 Relative chlorophyll content/SPAD
苗期 Seedling stage	CK	8.22±0.46 a	5.06±0.06 a	42.19±0.51 b
	HJ	8.25±0.14 a	5.17±0.12 a	43.49±0.70 a
	HN	8.17±0.19 a	5.16±0.32 a	43.84±0.33 a
抽蔓期 Growing stage	CK	85.05±0.68 b	7.28±0.52 c	44.80±0.48 b
	HJ	87.38±1.57 b	8.08±0.23 b	46.15±0.71 b
	HN	92.02±1.58 a	8.78±0.12 a	48.73±1.44 a
开花-坐果期 Flowering-setting fruit stage	CK	130.47±3.03 c	11.44±0.74 c	48.83±1.01 c
	HJ	137.58±2.13 b	12.97±0.41 b	50.58±0.71 b
	HN	142.84±2.54 a	14.06±0.58 a	52.94±1.44 a
成熟期 Maturity stage	CK		14.78±0.91 b	44.01±2.29 b
	HJ		15.19±0.69 b	45.94±1.17 a
	HN		16.30±0.78 a	47.06±2.08 a
均值 Average	CK	74.58±1.32 c	9.64±0.72 c	44.96±1.04 c
	HJ	77.74±0.54 b	10.36±0.12 b	46.54±0.22 b
	HN	81.01±1.26 a	11.08±0.46 a	48.14±0.96 a

为显著。在成熟期,瓜蔓太长,为避免数据统计对南瓜生长造成的影响,此部分数据缺失,但南瓜茎粗与叶绿素相对含量依旧表现为HN处理最高,HJ处理次之,CK最低。

对南瓜苗期-成熟期蔓长、茎粗和叶绿素相对含量均值进行比较,发现南瓜生长农艺性状指标均值表现为HN>HJ>CK,且三者间均差异显著。HN处理的苗期-成熟期蔓长、茎粗和叶绿素相对含量较CK分别显著提高8.62%、14.94%和7.07%。以上结果表明,应用秸秆反应堆技术能够促进植株健壮生长,为南瓜早日上市、高产奠定基础,且以行内秸秆反应堆(HN)处理效果最佳。

### 2.6 不同秸秆反应堆处理对南瓜品质和产量的影响

秸秆反应堆处理对南瓜品质和产量具有显著影响(表8)。分析各项指标的结果均显示,HN处理

效果最优,HJ处理次之,CK最差。其中HN和HJ处理的南瓜果肉厚度、淀粉含量、维生素C含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和产量较CK分别显著提高33.90%和24.29%、34.79%和18.38%、44.09%和27.18%、36.51%和13.97%、24.38%和16.38%、28.31%和13.39%。以上结果表明,秸秆反应堆处理能提高南瓜品质及产量,HN处理在提质增产效果方面最为突出。

### 2.7 南瓜生育期土壤地温、土壤呼吸速率、光合特性、农艺性状、品质及产量间相关性分析

由表9可知,南瓜全生育期土壤地温与土壤呼吸速率、光合特性指标(净光合速率、气孔导度、蒸腾速率)、品质指标(果肉厚度、淀粉含量、维生素C含量)及产量均呈极显著或显著正相关,表明地温的适宜升高能够有效提高土壤呼吸速率,促进南瓜

表8 秸秆反应堆处理对贝贝南瓜品质与产量的影响

Table 8 Effects of straw reactor treatment on quality and yield of pumpkin

处理 Treatment	果肉厚度 Flesh thickness/ cm	w(淀粉) Starch content/ (g·100 g <sup>-1</sup> )	w(维生素C) Vitamin C content/ (mg·100 g <sup>-1</sup> )	w(可溶性糖) Soluble sugar content/ %	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/ (g·100 g <sup>-1</sup> )	产量 Yield/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
CK	1.77±0.06 c	16.70±0.17 c	22.66±1.42 c	15.53±0.70 c	5.25±0.11 c	34 388.99±1 139.53 c
HJ	2.20±0.10 b	19.77±0.34 b	28.82±0.52 b	17.70±0.82 b	6.11±0.10 b	38 994.75±766.46 b
HN	2.37±0.12 a	22.51±0.10 a	32.65±1.24 a	21.20±0.36 a	6.53±0.10 a	44 125.03±678.02 a

表9 南瓜生育期土壤地温、土壤呼吸速率、光合特性、农艺性状、品质及产量间相关性分析

Table 9 Correlation analysis between soil temperature, soil respiration rate, photosynthetic characteristics, agronomic traits, quality, and yield during the growth period of pumpkin

指标 Index	SRR	P <sub>n</sub>	G <sub>s</sub>	C <sub>i</sub>	T <sub>r</sub>	VL	ST	SPAD	FT	SC	VC	SCC	SPC	Y
T	0.821*	0.778*	0.720*	0.544	0.723*	0.467	0.513	0.522	0.783*	0.758*	0.853**	0.608	0.611	0.827**
SRR		0.712*	0.743*	0.738*	0.834**	0.734*	0.556	0.769*	0.409	0.924**	0.778*	0.889**	0.732*	0.767*
P <sub>n</sub>			0.715*	0.603	0.722*	0.758*	0.611	0.734*	0.899**	0.823**	0.817**	0.722*	0.735**	0.853**
G <sub>s</sub>				0.844**	0.657	0.443	0.572	0.682	0.653	0.743*	0.743*	0.653	0.686	0.745*
C <sub>i</sub>					0.778*	0.611*	0.556	0.778*	0.783*	0.633	0.589	0.748*	0.556	0.838**
T <sub>r</sub>						0.722*	0.444	0.546	0.617	0.736*	0.667	0.773*	0.637	0.748*
VL							0.611*	0.722*	0.725*	0.778*	0.611	0.611	0.544	0.722*
ST								0.556	0.667	0.500	0.567	0.467	0.667	0.667
SPAD									0.725*	0.843**	0.729*	0.889**	0.745*	0.856**
FT										0.667	0.841**	0.725*	0.783*	0.783*
SC											0.753**	0.833**	0.722*	0.751*
VC												0.759*	0.617	0.857**
SCC													0.567	0.737*
SPC														0.743*

注:T.生育期温度;SRR.土壤呼吸速率;P<sub>n</sub>.净光合速率;G<sub>s</sub>.气孔导度;C<sub>i</sub>.胞间CO<sub>2</sub>浓度;T<sub>r</sub>.蒸腾速率;VL.蔓长;ST.茎粗;SPAD.叶绿素相对含量;FT.果肉厚度;SC.淀粉含量;VC.维生素C含量;SCC.可溶性糖含量;SPC.可溶性蛋白含量;Y.产量。\*表示P<0.05水平上显著相关;\*\*表示P<0.01水平上极显著相关。

Note: T. Temperature during the growth period; SRR. Soil respiration rate; P<sub>n</sub>. Net photosynthetic rate; G<sub>s</sub>. Stomatal conductance; C<sub>i</sub>. Intercellular CO<sub>2</sub> concentration; T<sub>r</sub>. Transpiration rate; VL. Vine length; ST. Stem thickness; SPAD. Relative chlorophyll content; FT. Fruit thickness; SC. Starch content; VC. Vitamin C content; SCC. Soluble sugar content; SPC. Soluble protein content; Y. Yield. \* indicates significant correlation at 0.05 level; \*\* indicates extremely significant correlation at 0.01 level.

生长发育和物质积累。南瓜全生育期土壤呼吸速率除与茎粗和果肉厚度相关性不显著外,与其他指标均呈显著或极显著正相关,表明土壤微生物活动强度与南瓜植株生长发育和物质生产过程密切相关,活跃的土壤微生物活动能够为植株提供更充足的养分,促进植株健康生长。南瓜全生育期光合特性指标(净光合速率、气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度、蒸腾速率)与农艺性状(蔓长、叶绿素相对含量)、品质指标(果肉厚度、淀粉含量、维生素 C 含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量)及产量也呈极显著或显著正相关,表明南瓜地上光合作用与地下呼吸二者协调植株生理生长,提高光合效率,促进物质积累,最终实现产量提升。品质指标(果肉厚度、淀粉含量、维生素 C 含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量)与产量呈极显著或显著正相关,表明南瓜果实品质的提升往往伴随着产量的增加,二者并非对立关系,通过优化种植模式可以实现品质与产量的协同提高。因此,适宜的秸秆反应堆技术能够提高土壤温度,促进土壤养分循环,提高光合效率,促进植株物质积累,实现提质增产。

### 3 讨论与结论

秸秆反应堆技术对土壤温度的调控作用,源于微生物代谢与物理屏障的协同效应<sup>[17]</sup>。土壤温度是影响作物生长发育的重要环境因素之一,适宜的土壤温度能够促进作物根系生长,增强根系对养分和水分的吸收能力,进而提高作物产量与品质<sup>[18-19]</sup>。研究表明,早春或晚秋等低温季节,采用秸秆反应堆技术的土壤耕作层温度可有效提高 3~5 °C,该增温效应能有效打破作物根系生长的温度瓶颈,促进作物根系早生快发<sup>[20]</sup>。本研究结果表明,秸秆反应堆处理(HJ、HN)能有效提高南瓜全生育期 0~30 cm 土层地温,且该技术前期提升土壤温度的效果更明显。与对照相比,秸秆反应堆处理组南瓜生育期 0~30 cm 深度土壤地温平均日均值提高 1.71~2.31 °C,全生育期地温均值提高 1.94~2.78 °C,其中行内秸秆反应堆(HN)处理对日光温室内土壤地温的提升效果最好。这与王昊等<sup>[10]</sup>、刘德龙等<sup>[21]</sup>的研究结论一致,其原因是:一方面秸秆反应堆自身的结构设计有助于保持土壤内部温度<sup>[22]</sup>;另一方面秸秆施入后,适宜的土壤温度促进土壤微生物活动,加快了秸秆腐化分解,产生  $\text{CO}_2$ 、水、甲烷等气体,释放热能,促进土壤温度提升<sup>[13]</sup>。

秸秆反应堆技术对土壤呼吸速率的影响呈现

动态调控特征,其核心机制与微生物活性、底物供应及土壤环境的改变密切相关<sup>[23]</sup>。本研究结果显示,秸秆反应堆处理能显著提高南瓜生育期土壤呼吸速率,以行内秸秆反应堆(HN)处理提升(28.41%)的效果最佳。这与马凤捷等<sup>[24]</sup>、段晓婷等<sup>[8]</sup>的研究结果一致。同时本研究发现,南瓜生育期土壤呼吸速率变化呈现逐渐降低-缓慢升高-逐渐降低的变化规律。其原因可能是秸秆作为高碳底物输入土壤后,反应堆初、前期土壤微生物会快速分解秸秆中的易降解有机物,刺激微生物活动,使土壤呼吸速率处于较高水平,随着秸秆分解进入中后期,土壤呼吸速率逐渐趋于稳定但仍高于对照<sup>[25-26]</sup>。总体而言,秸秆反应堆技术通过“底物输入-环境优化-微生物激活”的连锁反应,显著提高了土壤呼吸速率。

秸秆反应堆技术通过发挥“温度-碳循环-养分转化-生理功能”的协同作用实现对作物生长发育的系统性调控,提质增产是秸秆反应堆技术应用价值的最终综合体现<sup>[27]</sup>。秸秆反应堆技术能够提升温室大棚土壤温度和室内  $\text{CO}_2$  浓度,促进作物的光合作用<sup>[28]</sup>;同时刺激作物根系生长,提高作物根系吸收养分的潜力,促使植株长势旺盛及品质与产量双提升<sup>[29]</sup>。马凤捷等<sup>[24]</sup>研究表明,应用秸秆生物反应堆技术能够提高番茄株高、结果数及叶绿素含量,果实转色快,提早上市。本研究结果显示,行内秸秆反应堆(HN)技术能更有效提高南瓜生育期土壤温度,提高土壤呼吸速率,提高光合效率,从而促进植株健壮生长,适宜的土壤温度和活跃的土壤呼吸推动养分高效转化利用,光合作用的高效运转促使光合产物的快速累积,地下与地上协同促进南瓜品质与产量的双重提升。

综上所述,在早春等低温季节应用行内秸秆反应堆技术,即定植垄上开挖长×宽×深=10 m×0.8 m×0.3 m 的沟槽,玉米秸秆 52 500 kg·hm<sup>-2</sup>+尿素 225 kg·hm<sup>-2</sup>+激发剂 1500 kg·hm<sup>-2</sup>+秸秆腐熟剂 45 kg·hm<sup>-2</sup>能有效提升设施大棚土壤温度,促进作物苗期根系早生快发;并通过秸秆腐熟分解,提高土壤呼吸速率,加速土壤养分转化,提升棚室内  $\text{CO}_2$  浓度,直接调控光合作用,促使植株健壮生长和物质积累,实现品质与产量的双提升。

### 参考文献

- [1] 沈秀丽,张辉,孟海波,等.澳大利亚、新西兰、新加坡废弃物资源化利用对中国的启示[J].农业工程学报,2024,40(19):

- 225-230.
- [2] 杨竣皓, 骆永丽, 陈金, 等. 秸秆还田对我国主要粮食作物产量效应的整合(Meta)分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(21): 4415-4429.
- [3] 霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 等. 中国农作物秸秆综合利用潜力研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 218-224.
- [4] 卢维宏, 张乃明, 包立, 等. 我国设施栽培连作障碍特征与成因及防治措施的研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(4): 651-658.
- [5] 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.
- [6] 孙玲玲, 张鸿龄, 陈亮亮, 等. 不同种植年限设施菜地土壤重金属分布、累积特征及风险评估[J]. 环境科学, 2024, 45(12): 7187-7195.
- [7] 农业农村部办公厅, 国家发展改革委办公厅. 关于印发《秸秆综合利用技术目录(2021)》的通知[EB/OL]. (2021-10-29) [2025-06-26]. <https://www.ndrc.gov.cn>.
- [8] 段晓婷, 叶静, 林辉, 等. 埋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.
- [9] 张黎杰, 周玲玲, 姜若勇, 等. 不同种类秸秆生物反应堆对西葫芦环境因子和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(增刊2): 89-92.
- [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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 张靖, 周琦, 王祎, 等. 增施有机肥对河西走廊设施沙质土质量及贝贝南瓜生长的影响[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(6): 95-103.
- [15] 邓超超, 张靖, 周琦, 等. 新型生态保水剂施量对兰州新区土壤微环境及马铃薯产量效益的影响[J]. 节水灌溉, 2024(12): 12-18.
- [16] 刘文君, 黄凤婵, 范爱丽, 等. 南瓜果肉营养成分相关性分析及综合营养品质评价[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(8): 150-153.
- [17] 冷杨, 赵义平. 设施蔬菜生物秸秆反应堆技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2016.
- [18] 李宝占, 周萌, 董志香, 等. 不同麦秆带状覆盖对西北旱作区冬小麦土壤水热状况及产量的影响[J]. 华北农学报, 2025, 40(3): 68-78.
- [19] 王婧, 郑粉莉, 赵苗苗, 等. CO<sub>2</sub>浓度倍增、增温和轻度干旱对冬小麦根系生长和氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(11): 1977-1989.
- [20] 庞明亮, 李波, 姚名泽. 日光温室玉米秸秆深埋土壤温度变化规律研究[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(16): 231-237.
- [21] 刘德龙, 朱博, 孙绍宽, 等. 设施温室秸秆还田生物反应堆技术的应用[J]. 农业环境与发展, 2012, 29(3): 33-36.
- [22] 武春成, 马楠, 曹霞, 等. 香菇废料秸秆反应堆在平泉市温室越冬茬黄瓜栽培中的应用[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(4): 33-38.
- [23] RUIXIA D, WEIYU W Y, QING Z. Effect of straw mulching on soil respiration and its' temperature sensitivity under different crop rotation systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(8): 2017, 25(8): 1160-1118.
- [24] 马凤捷, 刘强, 王振龙, 等. 埋式秸秆反应堆技术对土壤呼吸及番茄植株生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(16): 166-172.
- [25] 雷琬莹, 李娜, 滕培基, 等. 农田生态系统有机物料腐解过程及土壤培肥机制研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(9): 1393-1408.
- [26] 乔建磊, 郭瑞雪, 刘爽, 等. 秸秆生物反应堆对温室葡萄根围土壤微环境及生长的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 52-60.
- [27] 郭伟, 周云鹏, 陈美淇, 等. 秸秆与有机无机肥配施对潮土关键微生物及小麦产量的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 1134-1146.
- [28] DAHAL K, KNOWLES V L, PLAXTON W C, et al. Enhancement of photosynthetic performance, water use efficiency and grain yield during long-term growth under elevated CO<sub>2</sub> in wheat and rye is growth temperature and cultivar dependent[J]. Environmental & Experimental Botany, 2014, 106: 207-220.
- [29] 蔡尽忠, 王理玲, 邓盈. 蔬菜废弃物堆肥对设施蔬菜连作土壤生态质量的改良效果[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(3): 151-157.