

利用高温发酵菌糠研制水稻育秧基质

郑丹^{1,2} 王轶¹ 赵春霞¹ 陈金国¹ 程薇¹ 郭鹏^{1*} 崔宗均³

(1. 湖北省农业科学院 农产品加工与核农技术研究所, 武汉 430064;

2. 广西壮族自治区土壤肥料工作站, 南宁 530007;

3. 中国农业大学 农学院, 北京 100193)

摘要 将经高温发酵处理后的杏鲍菇菌糠与土壤按照比例进行配比制作水稻育秧基质, 分析不同配比的水稻育秧基质的理化性质, 比较研究水稻秧苗的秧苗素质、根系性状和营养吸收情况等。结果表明添加高温发酵腐熟的杏鲍菇菌糠对育秧基质的容重、总孔隙度、通气孔隙和持水孔隙具有改善作用, 随着菌糠添加量的增加, 容重逐渐减少, 总孔隙度、通气孔隙和持水孔隙逐渐增加。水稻秧苗的株高、叶绿素含量、秧苗地上部百株干重、根的百株干重、根系活力和水稻秧苗的氮、磷、钾含量水平均优于 100% 土壤和 100% 菌糠, 其中 V(土壤): V(菌糠) 为 20%: 80% 的基质配比更有利于水稻壮秧、干物质积累、根系生长发育和对氮、磷、钾的吸收。

关键词 杏鲍菇; 菌糠; 腐熟; 水稻; 育秧基质

中图分类号 S 511.4; S 39

文章编号 1007-4333(2016)10-0023-07

文献标志码 A

Study of fermented spent mushroom substrate of *Pleurotus eryngii* as basic materials for rice seedling

ZHENG Dan^{1,2}, WANG Yi¹, ZHAO Chun-xia¹, CHEN Jin-guo¹,
CHENG Wei¹, GUO Peng^{1*}, CUI Zong-jun³

(1. Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear Agriculture Technology Research,

Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China;

2. Guangxi Soil and Fertilizer Station, Nanning 530007, China;

3. College of Agronomy, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract The rice seedling-raising substrate (RSRS) was prepared with fermented spent mushroom substrate (SMS) of *Pleurotus eryngii* and soil. The physical and chemical indices of the RSRS were investigated. The results indicated that the fermented SMS was fully composted and was very suitable for preparing RSRS. The most appropriate proportion of soil and SMS was identified by analyzing the physical characteristics of seedling substrates, agronomic indices, root traits and nutrient contents of rice seedlings. The investigation showed that the fermented SMS effectively regulated the bulk density, total porosity, aeration porosity and water holding porosity. With the increasing of the SMS, gradually, the bulk density decreased, and the total porosity, aeration porosity and water holding porosity increased. The analysis of plant height, dry weight, SPAD, root activity and the content of N, P, K of rice seedling indicated that the combination of SMS and soil in a certain proportion was better than each of SMS (100%) and soil (100%). The results also showed that the optimal volume ratio of soils and SMS was 20%: 80%.

Keywords *Pleurotus eryngii*; spent mushroom substrate; maturity; rice; seedling substrates

收稿日期: 2015-12-11

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201303080); 武汉市科技人才培育计划晨光计划(2015070404010189); 湖北省科技支撑计划(2015BBA199); 湖北省科技创新中心资助项目(2016-620-000-001-033)

第一作者: 郑丹, 农艺师, 主要从事固体废物处理与植物营养研究, E-mail: zhengdan_2004@163.com

通讯作者: 郭鹏, 副研究员, 主要从事生物质资源利用与应用微生物学研究, E-mail: gp.pengguo@gmail.com

水稻是我国最重要的粮食作物,种植面积达 3 031.175 万 hm^2 ,总产量达 20 361.22 万 t,约占粮食总产量的 34%^[1]。育秧移栽是我国水稻种植的主要方式,也是水稻生产中的关键环节。常规水稻育秧以土壤为主要基质,需消耗大量耕作层表土,导致优质土壤资源流失和生态环境恶化。此外,因土壤往往携带病、虫害和肥力不均,通常需要添加农药、化肥等,势必带来新的污染^[2]。因此,开发替代土壤的新型水育秧基质是水稻生产和农业可持续发展的必然选择。

食用菌菌糠是食用菌栽培过程中收获子实体后剩余的栽培废料,是重要的生物质资源^[3]。近些年来,我国食用菌产业迅猛发展,食用菌工厂化生产企业数量和生产规模也日益增大,产生的菌糠资源量也越来越大。据统计,我国食用菌总产量超过 2 800 万 t,占世界总产量的 75%以上,每年产生 3 000 多万 t 菌糠^[4]。目前,这些菌糠资源仅有少量被作为原料生产有机肥^[5]、饲料^[6]和作为食用菌栽培基料二次利用^[7],大部分被当作废弃物焚烧或露天堆弃,不仅浪费资源,还对环境造成严重污染。因此,解决菌糠利用问题对农业资源循环利用和治理环境污染具有极其重要的意义。菌糠中含有粗纤维、粗脂肪、粗蛋白、矿物元素和磷、钾以及腐殖质等物质,经适当发酵处理和营养配比可开发为水稻育秧基质。

本研究利用湖北地区工厂化生产的杏鲍菇 (*Pleurotus eryngii*) 菌糠为主要原料,通过微生物发酵对菌糠原料进行腐熟处理,利用腐熟的菌糠原料配制水稻育秧基质,研究菌糠发酵后与土壤不同配比基质的物理性质和对水稻秧苗生长的影响,以期为食用菌菌糠资源转化利用和发展现代化水稻无土育秧和机插秧技术提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

杏鲍菇菌糠(湖北新冠食品科技有限公司工厂化生产);菌糠高温发酵复合菌剂(湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所研制^[8]);水稻品种两优 6326;尿素(湖北宜化化工有限责任公司生产, $\text{N} \geq 46.4\%$);三元复合肥(湖北新洋丰肥业股份有限公司生产, $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ 为 15-15-15)。土壤为长江冲积物发育而成的潮土,其基本理化性质: pH 6.5,有机质 31.4 g/kg,全氮 1.8 g/kg,碱解氮 130.5 mg/kg,有效磷(P)22.3 mg/kg,速效钾(K)

216.6 mg/kg。

1.2 试验方法

1.2.1 菌糠固体发酵方法

将新鲜杏鲍菇菌糠置入发酵槽(长 \times 宽 \times 深=40 cm \times 175 cm \times 120 cm)中,用鸡粪和适量尿素将碳氮比(C/N)调节至 30,接入菌糠高温发酵复合菌剂,混匀,调水分含量至 60%,发酵堆体高度 100 cm。每天测定堆体温度和环境温度 1 次,利用行走式翻堆机进行翻堆,前 20 d 每天翻堆 1 次,后 30 d 每 5 d 翻堆 1 次。发酵 50 d 后,当堆体温度与环境温度趋于一致,终止发酵,将发酵后菌糠基质风干保存备用。

1.2.2 试验处理的设置

水稻育秧基质设计 7 个处理(体积比): T0,为土壤对照(即 100%土壤); T1, V(土壤): V(菌糠)为 50%: 50%; T2, V(土壤): V(菌糠)为 40%: 60%; T3, V(土壤): V(菌糠)为 30%: 70%; T4, V(土壤): V(菌糠)为 20%: 80%; T5, V(土壤): V(菌糠)为 10%: 90%; T6, 100%菌糠。

各处理的育秧基质中掺入少量肥料(每个育秧托盘中掺入 0.26 g 三元复合肥和 0.17 g 尿素),用石膏调节 pH 至 5.5。准备好的基质均匀平铺于事先准备好的托盘(长 \times 宽 \times 深=60 cm \times 28 cm \times 4 cm,底部带孔)中,基质厚度控制为 3 cm。

1.2.3 水稻种子处理及播种

经过筛选的种子在 25 $^{\circ}\text{C}$ 水中浸泡 60 h。浸泡好的种子在 30~35 $^{\circ}\text{C}$ 破胸,25~28 $^{\circ}\text{C}$ 催芽,芽长 1.5 mm 时,待播种。

每个托盘中播种等量谷芽,均匀播种,播种后用基质覆盖。秧苗生长至 22 d 后测定农艺性状。

每天观察生长情况,育秧过程中保持托盘湿润不发白。

1.3 记录及测定的各项指标

1.3.1 菌糠基质指标及测定方法

pH 测定采用日本 HORIBA 公司产 B-212 型微量 pH 计测定。基质中的可溶性盐浓度暨电导率(EC)采用电位测定法^[9]。粗纤维和粗灰分分析采用范氏洗涤法^[10]。有机质、全氮、全磷、全钾等按 NY525-2012 方法检测。腐熟度采用种子发芽指数(Germination index, GI)表示,参考文献[11]的方法。

1.3.2 容重及总孔隙度测定

容重、总孔隙度、通气孔隙度和持水孔隙度的测

定参照文献[12]的方法。

1.3.3 水稻秧苗生长状况及生物量测定

22 d 后秧苗生长情况：测量水稻成活苗数，株高和叶龄。叶绿素含量采用 SPAD-502 Plus 叶绿素仪测定。干鲜重测定：每处理随机取幼苗 20 株将地上部分和地下部分用手术刀小心切分，再放入 105 °C 烘箱 2 h, 80 °C 烘干至恒重，用电子天平测定干重。根系活力的测定采用 TTC 法^[13]。水稻秧苗植株和根部氮、磷、钾的测定参照文献[14]进行。

2 结果与分析

2.1 菌糠基本营养成分分析

对新鲜杏鲍菇菌糠和发酵后的菌糠进行了基本营养成分测定，结果见表 1。新鲜杏鲍菇菌糠 pH 为 5.8，其有机质含量较高，为 75.1%，最主要的成分是粗纤维和粗蛋白，该菌糠原料的 C/N 为 36.8，N、P、K 含量分别为 1.42%、0.21% 和 0.72%。

经过发酵后，杏鲍菇菌糠的水分含量 33.8%，pH 为 6.0，有机质含量为 57.8%，C/N 为 21.7。发酵结束后全氮、全磷、全钾含量分别为 1.65%、0.49% 和 1.14%，与发酵开始时相比出现了不同程度的升高，这可能与微生物群体的活动致使干物质损失以及因堆体的重量和体积减少产生的浓缩效应有关。

电导率的大小与堆肥的含盐量有关，含盐量越高，其 EC 值越大，越容易造成盐化和损害植物根部功能。电导率过高造成土壤溶液的渗透势低，渗透压过高，影响秧苗水分和养分吸收^[15]。本试验中，发酵后菌糠的 EC 值出现了下降，这可能是由于随着 CO₂、NH₃ 的挥发和微生物的利用，以及胡敏酸物质含量的升高和阳离子交换量的升高造成的^[16-17]。由表 1 可知，杏鲍菇菌糠经过发酵，电导率由的 3.548 降到了 1.953，更加适合水稻育秧。

用生物学的方法测定堆肥的毒性，是检验正在堆肥的有机质腐熟度的一种非常直接而有效的方法^[18]。Zucconi 等^[11]认为，GI>50% 时，堆肥对植物已基本没有毒性，堆肥已基本腐熟；而当 GI>80% 时，堆肥已经完全腐熟。从表 1 可知，杏鲍菇菌糠基质经过 50 d 的发酵，GI 值由 39.8% 提高到了 84.1%，已达到腐熟标准。

2.2 杏鲍菇菌糠发酵过程的温度变化

菌糠发酵过程中的温度变化如图 1 所示，杏鲍菇菌糠发酵温度上升较快，2~3 d 后即可达到最高

表 1 杏鲍菇菌糠基本营养成分与理化指标

Table 1 The nutritional components and physical and chemical index of spent mushroom substrate

检测项目 Item	发酵前 Before fermentation	发酵后 After fermentation
粗灰分/% Crude ash	4.9	5.1
粗蛋白/% Crude protein	5.1	8.8
粗纤维/% Crude fiber	14.37	15.56
粗脂肪/% Crude fat	0.47	0.81
全磷/% Total phosphorus	0.21	0.49
全氮/% Total nitrogen	1.42	1.65
有机质/% Organic matter	75.1	57.8
全钾/% Total potassium	0.72	1.14
pH	5.8	6.0
C/N	36.8	21.7
电导率 EC/(mS/cm)	3.548	1.953
发芽指数 GI/%	39.8	84.1

温度 66 °C。堆体温度 50 °C 以上达 25 d，达到了高温堆肥的卫生标准^[19]。本研究中杏鲍菇菌糠发酵过程调节了 C/N 至 30，提供了充足的氮源，并且接种了高温发酵复合菌剂，加速了菌糠分解，迅速提升了发酵温度，这与黄向东等^[19]、王伟东等^[20]研究结果基本一致。

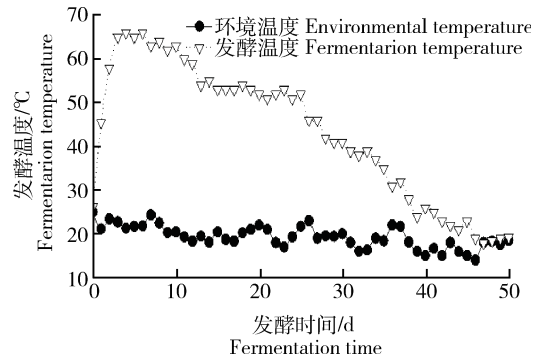


图 1 杏鲍菇菌糠发酵过程中的温度变化

Fig. 1 The change of temperature during spent mushroom substrate of *Pleurotus eryngii* in fermentation

2.3 基质的容重和孔隙度分析

基质容重是自然状态下单位容积的基质干重，可反映基质的紧实度和孔隙状况^[21]。农业生产中，

适宜的基质容重有利于养分转化和作物生长。容重太小则基质过松,黏结力弱,使作物物根系难以扎稳,保水保肥能力差,基质也容易随灌溉水流失。容重太大则基质过紧实,小孔隙数量多,通气透水性差,同时影响耕作质量、幼苗出土和作物根系的正常发育。表2是不同菌糠配比基质的容重及孔隙度的比较结果,由表2可知,T0的容重最高,达到了

1.36 g/cm³,T6的容重最低,为0.56 g/cm³,可见添加菌糠能显著减小育秧基质的容重。

基质孔隙度是单位容积基质内孔隙所占的百分比,其大小和孔径的分布状况将影响基质肥力的发挥和作物的生长^[21]。由表2可知,T2、T3、T4、T5和T6总孔隙度为70%~90%,为较理想的土壤孔隙度^[15]。

表2 不同育秧基质的容重及孔隙度比较

Table 2 Comparison of bulk density and porosity of media used among different treatments

处理 Treatment	容重/(g/cm ³) Bulk density	总孔隙度/% Total porosity	通气孔隙/% Aeration porosity	持水孔隙/% Water holding porosity
T0	1.36±0.03 a	48.10±1.28 d	7.22±0.12 d	40.89±0.07 c
T1	0.95±0.03 b	66.85±2.68 c	25.80±1.34 c	41.05±0.88 b
T2	0.88±0.02 bc	70.55±3.74 c	28.79±1.18 bc	41.76±1.89 b
T3	0.79±0.02 c	75.64±1.05 b	32.46±0.85 b	43.18±0.67 a
T4	0.70±0.03 d	78.62±0.08 ab	35.50±0.06 ab	43.12±0.03 a
T5	0.62±0.01 de	82.37±1.22 a	38.90±1.07 a	43.47±0.94 a
T6	0.56±0.01 e	85.68±3.59 a	42.04±2.46 a	43.64±1.95 a

注:同一列数据不同字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著。下表同。

Note: Different letters within the same column denote significant difference at $P<0.05$ level. The same below.

2.4 水稻秧苗质量评价

良好的栽培基质,对水稻秧苗的生长、地上地下部分形态建成具有重要意义,同时,叶子中叶绿素含量与作物目前的营养状况有关,叶绿素含量(用SPAD值表示)与叶子中的氮含量成比例增长,对特定作物品种来说,SPAD指数越高,代表此作物越健康^[22]。表3是水稻播种后22d不同处理的秧苗素质情况表。由表3可知,T4处理的株高16.89 cm、SPAD值28.82、秧苗百株干重2.82 g、地上部百株干重1.51 g、根百株干重1.30 g,均优于其他处理。其次为T3处理,株高16.87 cm、SPAD值为28.19、秧苗百株干重2.76 g、地上部百株干重1.48 g、根百株干重1.28 g。T6处理的水稻生长情况最差,其中,株高13.24 cm,SPAD值25.2,秧苗百株干重1.62 g、地上部百株干重0.91 g,均显著低于其他处理。可见,V(土壤):V(菌糠)为20%:80%的搭配最有利于水稻壮秧和干物质积累。菌糠体积比例超过80%时,水稻秧苗出苗率、SPAD值,秧苗的百株干重等指标随着菌糠比例的增加而下

降,这说明添加一定量的菌糠有利于水稻秧苗的生长,但菌糠数量过多反而不利于水稻秧苗的生长。

2.5 不同配比育苗基质对水稻秧苗根系性状的影响

根系的优劣是水稻秧苗素质极其重要的指标。表4是水稻播种22d后不同处理水稻根系性状表,由表4可知,T3的根系活力最大,达到0.018 mg/(g·h),同时根鲜重、根干重和发根条数均为最大,分别为0.029、0.013 g和6.6条/株。T4的根系活力为0.017 mg/(g·h),根鲜重、根干重和发根条数分别为0.027、0.013 g和6.5条/株。二者并无显著性差异。T6的根系活力、根鲜重、根干重和发根条数均为最低。可见,100%菌糠不适合水稻秧苗根系的生长。V(土壤):V(菌糠)为30%:70%和20%:80%的搭配更有利于水稻根系的生长,不仅总根数高,根的干物质也高,同时具有较强的发根能力和根系活力,对于满足水稻机械化插秧具有重要的意义。

表 3 水稻播种 22 d 后不同处理的秧苗素质比较

Table 3 Comparison of the agronomic traits of rice seedlings after grown for 22 d among different treatments

处理 Treatment	出苗率/% Emergence rate	株高/cm Plant height	叶龄 Leaf age	叶片叶绿素 SPAD 值 SPAD value	秧苗百株 干重/g Dry weight of 100 plants	地上部百株 干重/g Dry weight of shoots of 100 plants	百根干重/g Dry weight of the roots of 100 plants
T0	92.5	15.21±1.28 b	2.61±0.42 c	25.80±1.12 c	1.91±0.05 c	1.09±0.03 c	0.82±0.03 c
T1	92.6	16.34±0.65 ab	2.79±0.14 a	26.20±0.87 c	2.53±0.04 b	1.36±0.02 b	1.17±0.07 b
T2	92.4	16.65±0.72 ab	2.84±0.42 a	27.75±0.76 b	2.53±0.06 b	1.38±0.04 b	1.15±0.08 b
T3	93.5	16.87±0.16 a	2.72±0.13 b	28.19±1.47 b	2.76±0.08 a	1.48±0.04 a	1.28±0.04 a
T4	93.4	16.89±0.37 a	2.75±0.31 ab	28.81±0.99 a	2.82±0.12 a	1.51±0.08 a	1.30±0.05 a
T5	92.8	16.42±1.15 ab	2.81±0.32 a	27.56±1.02 b	2.63±0.11 ab	1.40±0.05 ab	1.23±0.05 ab
T6	92.4	13.24±1.02 c	2.53±0.33 c	25.20±1.25 c	1.62±0.10 d	0.91±0.03 d	0.71±0.03 c

表 4 水稻播种 22 d 后不同处理的水稻根系性状的比较

Table 4 Characterization of rice seedling root after grown for 22 d among different treatments

处理 Treatment	根鲜重/g Underground fresh weight	根干重/g Underground dry weight	发根数 Root number	根系活力/ (mg/(g·h)) Root activity
T0	0.017±0.001 b	0.008±0.001 b	4.9±0.1 ab	0.013±0.002 ab
T1	0.025±0.003 a	0.012±0.002 a	5.1±0.2 ab	0.008±0.001 b
T2	0.026±0.002 a	0.012±0.001 a	5.3±0.2 a	0.009±0.002 b
T3	0.029±0.003 a	0.013±0.002 a	6.6±0.5 a	0.018±0.003 a
T4	0.027±0.004 a	0.013±0.003 a	6.5±0.4 a	0.017±0.002 a
T5	0.023±0.003 a	0.012±0.002 a	5.4±0.2 a	0.010±0.001 b
T6	0.016±0.001 b	0.007±0.001 b	4.4±0.1 b	0.004±0.001 c

2.6 秧苗的氮、磷、钾含量情况

水稻秧苗的氮、磷、钾的含量可以反映水稻对养分的吸收效率。表 5 是水稻播种 22 d 后不同处理水稻秧苗氮、磷、钾含量情况表,从表 5 可知,所有处理的水稻秧苗对氮、磷、钾的吸收趋势是一致的,随着菌糠体积比例从 0 逐渐增加至 80%,水稻秧苗对氮、磷、钾的吸收呈现增加趋势。当菌糠体积比例达到 90% 甚至更高时,水稻秧苗对氮、磷、钾的吸收逐渐降低。其中,以 T4 的氮、磷、钾含量最高,分别达

到了 19.46、7.31 和 12.29 mg/g。其次是 T5,分别为 18.95、7.26 和 12.03 mg/g。T2、T3、T4、T5 之间差异并不显著。T6 处理的水稻氮、磷、钾含量最低。这表明 100% 菌糠并不利于水稻对氮、磷、钾养分的吸收,V(土壤):V(菌糠)为 20%:80% 的搭配更有利于水稻秧苗对氮、磷、钾养分的吸收与利用。当菌糠体积比例达到 90% 甚至更高时,水稻秧苗对氮、磷、钾养分的吸收利用下降,这可能与菌糠比例较高时,育苗基质容重较低、EC 值较高等因素有关。

表5 水稻播种22 d后不同处理水稻秧苗的氮、磷、钾含量比较

Table 5 Nutrient contents of rice seedlings after grown for 22 d on media of different treatments mg/g

处理 Treatment	N	P	K
T0	14.32±0.15 c	4.97±0.03 c	5.72±0.12 c
T1	15.28±0.44 b	5.83±0.08 b	7.94±0.13 b
T2	18.60±0.52 a	7.02±0.28 a	11.80±0.34 a
T3	18.80±0.67 a	7.19±0.21 a	11.92±0.28 a
T4	19.46±0.55 a	7.31±0.35 a	12.29±0.22 a
T5	18.95±0.37 a	7.26±0.29 a	12.03±0.19 a
T6	14.01±0.08 c	4.55±0.05 c	5.58±0.09 c

3 结论与讨论

杏鲍菇菌糠原料的干物质成分以木质纤维素为主,有机质含量较高,是栽培基质的优质原料。经高温发酵50 d完全腐熟后,C/N由36.8降低为21.7,电导率由3.548 mS/cm减少为1.953 mS/cm,粗纤维、粗蛋白、全氮、全磷和全钾等的含量均不同程度的增加,更适合用做水稻育秧基质。在菌糠堆肥初期,由于有机物的分解和矿化产生了大量的小分子物质,如碳酸盐、铵离子和磷酸盐等,导致堆肥产品的电导率逐渐上升^[16],在堆肥后期随着氨氮的挥发和微生物利用,可溶性无机盐不断减少,胡敏酸物质含量和阳离子交换量的升高,从而导致堆体电导率不断下降^[15-17]。杏鲍菇菌糠含有丰富的有机质、可利用有效矿物质元素成分以及多种可溶性有机营养物质,用作改良土壤孔隙度的效果良好,进而能使基质的通水透气性得到明显改善,为作物根系吸收养分和水分提供了良好的条件。随着杏鲍菇菌糠用量的增加,基质的容重逐渐减少,总孔隙度、通气孔隙和持水孔隙逐渐增加。然而,并不是孔隙度越大越利于水稻秧苗的生长发育^[9,21]。基质中含90%以上的菌糠并不适合水稻秧苗地上部和根系的生长,根系活力水平低下,同时水稻秧苗对氮、磷、钾营养元素的吸收利用也受到一定的抑制。可能与90%以上菌糠容重较低,不利于植物根系扎根^[21],以及EC值较高,影响根系发育等因素的综合作用对水稻秧苗的生长发育产生了一定的抑制作用有关^[15-17]。

腐熟杏鲍菇菌糠与土壤按适当比例混合后,更加适合水稻秧苗的生长。土壤与杏鲍菇菌糠组合的

株高、叶绿素含量、秧苗地上部、根的百株干重、根系活力和水稻秧苗的氮、磷、钾含量均优于100%土壤和100%杏鲍菇菌糠。V(土壤):V(菌糠)为20%:80%的基质配比有利于水稻壮秧和干物质积累,水稻秧苗的株高、SPAD值、秧苗百株地上部和地下部干重,对氮、磷、钾的营养吸收量等指标均最佳。综合水稻秧苗综合素质和根系情况来看,V(土壤):V(菌糠)为20%:80%是配制水稻育秧基质的较好配比。如何通过对菌糠种类、处理方式和添加比例进行调整使水稻秧苗地上部分和根系更加协调的生长,还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014
National Bureau of Statistics. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2014 (in Chinese)
- [2] 肖明, 董楠, 吕新. 农产品质量安全的生态观认识[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2571-2580
Xiao M, Dong N, Lv X. Discussion on agricultural product quality and safety problem from ecological view [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(8): 2571-2580 (in Chinese)
- [3] 邹德勋, 汪群慧, 隋克俭, 潘斯亮, 马鸿志. 餐厨垃圾与菌糠混合好氧堆肥效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 269-273
Zou D X, Wang Q H, Sui K J, Pan S L, Ma H Z. Aerobic composting effect of kitchen garbage and spent mushroom substrate [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(11): 269-273 (in Chinese)
- [4] 李玉. 中国食用菌产业的发展态势[J]. 食药菌, 2011, 19(1): 1-5
Li Y. The development of Chinese edible mushroom industry [J]. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 2011, 19(1): 1-5 (in Chinese)

- [5] 曾振基,陈逸湘,凌宏通,侯永康,周卫雄,林敏,陈东标,李钦艳,宋斌. 食用菌菌糠生产有机肥研究[J]. 中国食用菌,2015,34(2):56-59
Zeng Z J, Chen Y X, Ling H T, Hou Y K, Zhou W X, Lin M, Chen D B, Li Q Y, Song B. Study on the production of organic fertilizer by spent mushroom substrate[J]. *Edible Fungi of China*, 2015, 34(2):56-59 (in Chinese)
- [6] 徐溟,王红连,周群兰,蒋益,全卫丰,张东升,谢骏. 微生物分步发酵法制备功能性高蛋白菌糠饲料的研究[J]. 饲料工业,2015,36(10):47-52
Xu H, Wang H L, Zhou Q L, Jiang Y, Quan W F, Zhang D S, Xie J. Studies on the preparation of functional and high protein feeds from mushroom bran by the stepwise fermentation[J]. *Feed Industry*, 2015, 36(10):47-52 (in Chinese)
- [7] 陶艺,王天琛,金方,林碧恺,陈德育. 菌糠二次利用栽培秀珍菇实验研究[J]. 陕西农业科学,2014,60(12):11-12,18
Tao Y, Wang T C, Jin F, Lin J K, Chen D Y. Study on secondary times utilization of waste substrate for pleurotus geesteranus singer cultivation [J]. *Shanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 60(12):11-12, 18 (in Chinese)
- [8] 郭鹏,程薇,周明,陈明利,高虹,王晨,杨德,李露,薛淑静,史德芳. 一种菌糠高温分解复合菌剂及其制备方法. 中国: ZL201310478232. 3[P], 2013-10-13
Guo P, Cheng W, Zhou M, Chen M L, Gao H, Wang C, Yang D, Li L, Xue S J, Shi D F. Preparation method of a thermophilic microbial composite agent for spent mushroom substrate degradation. China: ZL201310478232. 3 [P], 2013-10-13 (in Chinese)
- [9] 孙守如,杨秋生,董晓宇,王吉庆. 玉米秸有机栽培基质矿质营养及理化性质分析[J]. 农业工程学报,2008,24(6):41-44
Sun S R, Yang Q S, Dong X Y, Wang J Q. Analysis of mineral element contents and physical and chemical properties of corn stalk substrate[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(6):41-44 (in Chinese)
- [10] Goering H K, Van Soest P J. *Forage Fiber Analysis (Apparatus, Reagents, Procedures and Some Applications)* [M]. Washington: United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1970.
- [11] Zocconi F, Pera A, Forte M, de Bertoldi M. Evaluating toxicity of immature compost[J]. *Biocycle*, 1981, 22(2):54-57
- [12] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003
Guo S R. *Soilless Culture* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2003 (in Chinese)
- [13] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
Zhang X Z. *Crop Plant Physiology Research Method* [M]. Beijing: Agricultural Press, 1992 (in Chinese)
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
Lu R K. *Soil Agriculture Chemistry Analysis Method* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000 (in Chinese)
- [15] 胡亚利,孙向阳,龚小强,田赞,张璐. 混合改良剂改善园林废弃物堆肥基质品质提高育苗效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18):198-204
Hu Y L, Sun X Y, Gong X Q, Tian Y, Zhang L. Mix-ameliorant improving substrates quality of waste compost from garden and seedling effect [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(18):198-204 (in Chinese)
- [16] Gomez Brandon J W C, Lazcano C, Dominguez J. The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure[J]. *Chemosphere*, 2008, 70(3):436-444
- [17] 王子超. 消化污泥和玉米秸秆强制通风堆肥的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011
Wang Z C. Study on forced aerated composting of digested sewage sludge and maize straw[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011 (in Chinese)
- [18] 汤江武,吴逸飞,薛智勇,杨敏华,杨红. 畜禽固废弃物堆肥腐熟度评价指标的研究[J]. 浙江农业学报, 2003, 15(5):293-296
Tang J W, Wu Y F, Xue Z Y, Yang M H, Yang H. Study on evaluation index of maturity of livestock and poultry solid wastes[J]. *Acta Agriculture Zhejiangensis*, 2003, 15(5):293-296 (in Chinese)
- [19] 黄向东,韩志英,石德智,黄啸,吴伟祥,刘玉学. 畜禽粪便堆肥过程中氮素的损失与控制[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1):247-254
Huang X D, Han Z Y, Shi D Z, Huang X, Wu W X, Liu Y X. Nitrogen loss and its control during livestock manure composting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1):247-254 (in Chinese)
- [20] 王伟东,刘建斌,牛俊玲,吕育财,崔宗均. 堆肥化过程中微生物群落的动态及接菌剂的应用效果[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4):148-152
Wang W D, Liu J B, Niu J L, Lv Y C, Cui Z J. Dynamics of microbial community and the effect of inoculum on the composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(4):148-452 (in Chinese)
- [21] 张宝峰,曾路生,李俊良,陈清. 优化施肥处理下设施菜地土壤容重与孔隙度的变化[J]. 中国农学通报, 2013, 29(32):309-314
Zhang B F, Zeng L S, Li J L, Chen Q. Soil bulk density and porosity in greenhouse vegetables field under the optimized fertilization treatment [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(32):309-314 (in Chinese)
- [22] 郭世荣. 固体栽培基质研究、开发现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2005, 21(S):1-4
Guo S R. Research progress, current exploitations and developing trends of solid cultivation medium[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(S):1-4 (in Chinese)