

稻壳/大豆蛋白基黏合剂成型育苗钵性能评价及成因分析

孙恩惠^{1,2}, 黄红英^{1,2*}, 武国峰^{1,2}, 曲萍^{1,2}, 常志州^{1,2}, 徐跃定^{1,2}

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2.江苏省农业废弃物资源化工程技术中心, 南京 210014)

摘要:以稻壳为原材料,采用大豆蛋白基黏合剂捏合成型制备育苗钵,研究了稻壳育苗钵的耐水特性;通过育苗试验研究了育苗钵对黄瓜的生物学效应,并分析了育苗钵育苗周期与拉伸强度间的相关性。结果表明:育苗钵最大平衡吸水率及厚度膨胀率分别为26.78%和10.73%,具有较好的耐水特性;育苗钵经干湿热循环处理后拉伸强度最大降幅约50%($P<0.05$)。生物学效应试验表明,育苗钵高浓度浸提液对黄瓜发芽率影响显著,低浓度浸提液对种子发芽率有一定的促进效应;育苗效果试验验证育苗钵对黄瓜生长势有促进作用。以干湿热循环处理后拉伸强度为自变量,育苗钵育苗周期为因变量,建立了相关模型 $y=-0.35X^2+9.43X-5.85$ ($R^2=0.9473$)。该育苗钵具有适宜的耐水性和强度,育苗效果良好,是一种理想的育苗器具,可应用于作物的育苗。

关键词:稻壳;育苗钵;大豆蛋白基黏合剂;耐水性;拉伸强度;育苗效果

中图分类号:X712 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)06-1202-08 doi:10.11654/jaes.2015.06.026

Performance Evaluation and Analysis of Nursery Containers Made from Rice Husk/Soybean Protein Adhesives

SUN En-hui^{1,2}, HUANG Hong-ying^{1,2*}, WU Guo-feng^{1,2}, QU Ping^{1,2}, CHANG Zhi-zhou^{1,2}, XU Yue-ding^{1,2}

(1.Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Nanjing 210014, China; 2.Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Nanjing 210014, China)

Abstract: In recent decades, it has drawn increasing interest to develop environmentally friendly products with natural plant fibers as filler. Straw nursery containers, made from crop straw, enable seedlings to be transplanted directly into soil without harming roots. They are alternatives to plastic pots and have been widely used in agri-forestry production. In the present study, a new type of bio-containers with rice husk as filler and soybean protein as adhesive through thermal compression process was developed. The water resistant property of the containers was assessed and the effect of these containers on seed germination and growth of cucumber was also evaluated. The correlation between tensile strength and seedling period was further studied. Results showed that the maximum balance water absorption rate and thickness expansion rate of the nursery containers were 26.78% and 10.73%, respectively, indicating that the containers had a good resistance to water. The greatest reduction of their tensile strength was about 50% ($P<0.05$) after four dry-wet and heat cycles. The germination of cucumber seeds was promoted by H₂O-extracting solution of the containers at low concentrations, but inhibited at high concentrations, which might be due to the formaldehyde from urea formaldehyde resin. Compared with plastic containers, the new type bio-containers could significantly promote the growth of cucumber seedlings at seedling raising period. The tensile strength and seedling period had a significant correlation as $y=-0.35X^2+9.43X-5.85$ ($R^2=0.9473$). These results suggest that straw bio-containers would be a good nursery containers for both agriculture and environment.

Keywords: rice husk; nursery bio-container; soybean protein adhesive; water resistance; tensile strength; seedling effect

秸秆纤维是自然界巨大的再生性生物高分子材料之一,全世界每年秸秆纤维产量约 40×10^8 t,我国秸

秆每年产量达数亿吨^[1]。采用植物纤维填充制备复合材料具质轻价廉、易加工、可生物降解等性能,天然植物纤维复合材料已成为复合材料领域中研究热点之一^[2-4],以秸秆为原料,制备环境友好型材料势在必行^[5]。迄今,有关秸秆综合利用如还田肥料^[6-7]、新型能源^[8-11]、畜牧饲料、可降解材料、培养食用菌基料以及建筑材料等^[12-13]技术成果已趋成熟。

收稿日期:2015-01-23

基金项目:江苏省科技支撑计划(BE2013420);江苏省农业自主创新(CX(12)1002);国家自然科学基金(51303071)

作者简介:孙恩惠(1984—),女,助理研究员,硕士,研究方向为农业废弃物材料化利用。E-mail:enhsun@126.com

*通信作者:黄红英 E-mail:sfmicrolab@163.com

可降解育苗钵是由农作物秸秆等废弃物生物质材料制备,利用秸秆纤维制备可降解育苗钵替代塑料钵,可缓解资源环境压力^[14-16]。近年来,国内外寻求制备营养育苗钵的技术日益增多,研究人员已就秸秆育苗钵在作物育苗移栽中的应用效果、黏结剂对秸秆育苗钵成型质量和成型工艺优化、热处理对育苗钵强度及热稳定性的影响有良好进展^[16-19]。可降解育苗钵的制备技术及其开发,对农业废弃物资源化利用及作物育苗具有重要的应用价值。

制备可降解育苗钵的关键问题是缺乏具有保证育苗期钵体强度、同时随苗移栽后快速降解及满足不同育苗期要求的专用黏合剂技术。目前制备育苗钵所用的黏合剂,存在耐水性不足(如糊化淀粉胶),容器遇水易崩解或黏合剂降解性能差(如脲醛树脂胶),钵体短期内崩解率低造成植物根系难以穿透或黏合剂盐分过高(碱糊淀粉胶、次氯酸钠氧化淀粉胶)影响作物幼苗根系生长等问题^[14]。基于环境友好型可再生生物质胶黏剂的研究越来越得到重视,改性大豆蛋白胶黏剂再次成为热点^[20]。

本研究以稻壳为增强材料,通过自主研制的大豆蛋白基黏合剂捏合,模压成型制备育苗钵。研究不同改性大豆蛋白基黏合剂对稻壳育苗钵的耐水特性、干湿热循环处理拉伸强度波动规律、植物生物学效应的影响,并对育苗钵的应用效果进行印证,旨在明确稻壳育苗钵的理化特性及其对植物的生物学效应影响,将育苗钵“制备-性质-应用”有效结合,为育苗钵的推广提供理论和技术依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

增强材料为国审泗稻 12 号的稻壳,取自江苏省农科院粮食作物研究所稻麦田,自然风干,使用前利用 9FQ-400 锤片式粉碎机(广州标诚机械)简单粉碎至 0.32~0.42 mm,基本理化性质:含水率 11%~13%,粗纤维质量分数 36%~40%,木质素 21%~25%,灰分 13%~15%^[21]。脱脂大豆粉购自淄博坤兴粮油有限公司,颗粒大小为 0.23~0.83 mm;70# 石蜡购自合肥安邦化工有限公司。

基体树脂为大豆蛋白基黏合剂(Soybean protein adhesives, SA),江苏省农科院资环所课题组自制。为制备不同胶接强度的黏合剂,本试验试制了 4 组配方。具体合成步骤:将 90 g 甲醛溶液(浓度为 36.5%)投入反应釜,用质量分数为 25%的氢氧化钠溶液调节

pH 值为 8.0~8.5,加入改性剂聚乙烯醇 7 g,温度至 40 ℃时,加入第①批尿素 58 g,继续升温至 60 ℃,保温 20 min;补加 280 g 水,加入第①批大豆蛋白 120 g,调节 pH 为 8.5,在 60 ℃下保温 30 min;继续升温至 90 ℃,保温 20 min;用质量分数为 25%的柠檬酸溶液调节 pH 为 5.5~6.0,缩聚反应 30 min;降温至 70 ℃,调节 pH 为 8.0,加入第②批尿素 33 g 和大豆蛋白 50 g,保温 20 min;然后降温至 45~50 ℃,放料,标记为 SA-I。SA-II 为 170 g 大豆蛋白一次性在第①批投入,其他步骤相同。在上述 2 种黏合剂合成工艺的基础上,继续合成 2 种黏合剂,其第①、②批尿素添加量分别改为 81 g 和 45 g,标记为 SA-III 和 SA-IV。

1.2 试验设计

秸秆育苗钵采用热压成型方法,操作如下:将稻壳、大豆蛋白基黏合剂及 70# 石蜡按照一定比例在 SHR-10A 高速混炼机中充分混合均匀,经搅拌、脱水,干燥至物料含水率在 12%~14%,放置 30 min,即可压制。依照容器规格称取相应质量,注入自行设计模具中,在 YQ 32-200T 型三梁四柱液压机下热压成型,热压压力 25 MPa,热压温度 100~120 ℃,热压时间 15 s。物料混炼工序参照文献[5]。育苗钵上口直径 60 mm,底部直径 40 mm,器壁平均厚度 1.7 mm。育苗钵成品见图 1,黄瓜育苗效果如图 2 所示。

育苗钵共设 6 组处理:稻壳粉分别与 SA-I、SA-II、SA-III 和 SA-IV 按照干物质质量比 3:1,成型育苗钵分别标记为 RSA-I、RSA-II、RSA-III 和 RSA-V;RSA-III 和 RSA-V 物料混炼过程中分别添



图 1 育苗钵成品

Figure 1 Final products



图 2 育苗效果

Figure 2 Seedling growth in bio-containers

加增强材料干重 10% 的脱脂豆粕粉, 育苗钵标记为 RSA-IV 和 RSA-VI。6 组育苗钵理化指标见表 1。70# 石蜡添加量为稻壳干物质质量的 2%。每组处理取适量容器样品测定全氮、全磷、全钾、有机碳、pH 值及电导率, 部分样品用于测定吸水率、吸水厚度膨胀率、拉伸强度、生物学效应指标。

表 1 育苗钵理化指标

Table 1 Physical and chemical indicators of nursery bio-containers

育苗钵 Nursery container	有机碳 Organic carbon/g·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/ g·kg ⁻¹	全磷 Total phosphorus/ g·kg ⁻¹	全钾 Total potassium/g· kg ⁻¹	C/N
I	36.81	5.71	0.10	0.67	6.45
II	32.93	6.35	0.31	0.67	5.19
III	35.43	6.82	0.09	0.69	5.19
IV	27.04	6.31	0.12	0.76	4.28
V	27.42	6.17	0.13	0.69	4.43
VI	33.46	5.88	0.11	0.72	5.68

1.3 测试项目及方法

全氮采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮, 凯氏定氮法^[23]; 全磷采用钒钼黄比色法; 全钾采用火焰光度计法; 有机碳含量测定采用重铬酸钾氧化-外加热法^[23]。将粉碎样品与去离子水固液比 1:5 和 1:10 于 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 30 min, 滤液用于测定 pH 值及电导率, 分别采用酸度计 (Phs-2F 型, 上海精密科学仪器有限公司) 和电导率仪 (DDS-11A, 上海雷磁仪器有限公司) 进行测定。

吸水率 (Water absorption, WA) 及吸水厚度膨胀率 (Thickness swelling rate of water absorption, TSR) 的测试参照国家标准 GB/T 17657—1999 进行; 拉伸强度 (Tensile strength, TS) 测定所用试样的形状和尺寸依据国家标准 GB/T 1040.4—2006 加工制作。测试前将试样放置于 $(103\pm 2)^\circ\text{C}$ 烘箱中烘至质量恒重, 部分样品测定拉伸强度, 其余样品放置于 63°C 的水槽中, 试件垂直于水平面并保持水面高于试件上表面, 浸泡 1 h, 取出试件, 置于 $(63\pm 2)^\circ\text{C}$ 烘箱中热处理 30 min, 留取部分样品测定拉伸强度; 进行 4 次干湿热循环处理。每组处理 5 个试样, 3 次平行。

种子发芽试验: 将样品粉碎过 0.3 mm 筛, 分别与去离子水按照浸提比 (W/V, 以干物质计) 1:5 和 1:10 混合振荡 2 h^[22], 上清液经滤纸过滤后待用; 试验在人工气候箱中进行, 培养温度 $(28\pm 2)^\circ\text{C}$, 湿度 $(60\pm 2)\%$, 芽床由直径 9 cm 的定量滤纸和培养皿构成。将培养皿置于烘箱内 120°C 消毒 2 h; 试验前黄瓜种子 (品种津优 30) 先用清水漂洗, 再将种子置于 45°C 蒸馏水

(自然冷却) 中浸种催芽 24 h。每个培养皿放置 30 粒籽粒饱满种子, 重复 3 次。同时, 以去离子水替代容器浸提液作空白对照。每天加入 1 mL 试验浸提液, 每隔 24 h 统计 1 次发芽粒数, 共培养 7 d。

育苗试验: 将等体积营养基质分别装入育苗钵中, 播入催芽 (催芽方法同上) 后的黄瓜种子 1 颗, 置于内部环境温度约 30°C 的塑料大棚进行育苗试验。试验每处理设置 40 个平行, 育苗期 25 d, 同时以塑料育苗钵作对照 (CK)。各处理黄瓜全生育期间温度、光照、水分、养分管理等操作一致。定期按常规方法测定株高、茎粗、叶长、叶宽、壮苗指数及叶面积指数等。

1.4 数据统计分析

采用 Origin 8.0 作图, Excel 2007 软件处理试验数据, SPSS 17.0 软件进行统计分析, 不同处理对育苗效果影响差异采用邓肯法检验 (Duncan' test), 置信水平为 95% ($P<0.05$)

2 结果与讨论

2.1 稻壳育苗钵耐水性能分析

2.1.1 不同处理的育苗钵吸水率差异

将不同稻壳育苗钵在温度为 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 的水槽中浸泡, 每隔一定时间测定育苗钵吸水率, 趋势图如图 3 所示。可以看出, 样品在 20.5~24 h 后, 吸水速率达到最高值; 在 44.5 h 基本进入一个平台区, 吸水速率变化缓慢; 浸泡 212.5 h 后, 秸秆育苗钵 RSA-I、RSA-II、RSA-III、RSA-IV、RSA-V 和 RSA-VI 的最大平衡吸水率分别为 20.22%、20.64%、23.18%、25.86%、26.78% 和 26.53%。

育苗钵吸水特性由稻壳和大豆蛋白基黏合剂两相吸水协同作用决定, 而稻壳纤维是一类多羟基亲水性材料, 为满足育苗钵机械强度和耐水性要求, 制备

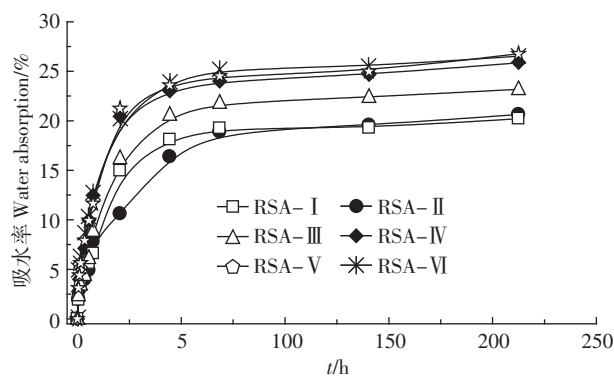


图 3 育苗钵的吸水率

Figure 3 Water absorption of nursery bio-containers

过程中加入大豆蛋白基黏合剂捏合成型。依靠大豆蛋白基黏合剂中的羟甲基脲、羧基、氨基及疏水性基团与稻壳纤维素、半纤维素的羟基进行反应,相对封闭稻壳纤维亲水性羟基基团,育苗钵耐水性提高。处理 RSA-I 和 RSA-II 最大平衡吸水率相对较小,是由于基体树脂 SA-I 和 SA-II 加成阶段甲醛与尿素的初摩尔较高,羟甲基化反应过程,二羟甲基脲的生成占主导,缩聚反应后,树脂分子高度交联,黏合剂耐水性相对较高^[24-25]。为了适当降解黏合剂的胶接强度,在 SA-I 和 SA-II 黏合剂的基础上,经过改进,合成了 SA-III 和 SA-IV 黏合剂,由于该体系中游离尿素、氨基含量相对增加,树脂耐水性有所下降^[24]。与 RSA-I 和 RSA-II 相比,RSA-III 和 RSA-V 育苗钵的最大平衡吸水率分别提高至 23.18% 和 26.78%,分析是 SA-III 加成阶段,适当的热处理可有效提高大豆蛋白的疏水性和力学性能,且经过一定程度的碱解,大豆蛋白疏水基外露,与甲醛、尿素和羟甲基脲之间可以通过化学键合,形成结构紧凑的网状构架,阻止水分子浸入,有效保障黏合剂的耐水性^[24]。后期通过一次性添加大豆蛋白合成的 SA-IV 黏合剂,由于大豆蛋白为富含氨基酸的高聚酰胺化合物,具有高吸水性,从而降低了黏合剂耐水性^[25]。育苗钵 RSA-VI 略高于 RSA-V 的最大平衡吸水率,而 RSA-IV 与 RSA-III 差异较明显,说明脱脂豆粕粉可有效提高育苗钵的吸水性。

2.1.2 不同处理的育苗钵吸水厚度膨胀率差异

吸水厚度膨胀率的大小可以反映材料拉伸强度大小,拉伸强度随 TSR 的增大而增大。图 4 是育苗钵经过 212.5 h 浸泡后 TSR 趋势图。在浸泡 44.5 h 时,育苗钵器壁 TSR 基本达到平衡,随浸泡时间的延长,育苗钵 TSR 变化不大,育苗钵 RSA-I、RSA-II、

RSA-III、RSA-IV、RSA-V 和 RSA-VI 的平衡 TSR 分别为 3.82%、5.89%、7.60%、10.22%、9.13% 和 10.73%。结合图 3 可见,育苗钵吸水率越高,最大平衡 TSR 也越高,两者呈正相关。

育苗钵器壁吸水膨胀的根本原因在于:一是稻壳纤维素大分子的聚集态结构中无定型区吸湿或吸水性较强,易产生吸胀^[26];二是育苗钵受潮时稻壳与黏合剂间因水分子作用,极易形成弱界面层,使纤维因吸水而产生压缩回弹,吸水膨胀^[27]。RSA-VI 的 TSR 是 RSA-I 的 3 倍左右,主要是由于 RSA-VI 育苗钵材料内部分子结合力较弱。

2.1.3 干湿热循环处理对育苗钵拉伸强度的影响

通过老化试验,经加速耐候性试验,可获得材料耐候性结果。本文采用干湿热循环试验测试稻壳育苗钵的拉伸强度(Tensile strength, TS),可更好地印证育苗周期过程中钵体强度指标是否满足育苗要求。从图 5 可以看出,6 组育苗钵 TS 经处理后均大幅降低,从 15.38、15.26、14.74、11.05、15.06、9.57 MPa 分别降低到 9.87、9.57、9.43、6.23、9.57、5.31 MPa,降低了 35.83%、37.29%、36.02%、43.62%、36.45%、44.51%,其中 RSA-IV 和 RSA-VI 降幅最大($P < 0.05$)。

分析认为,主要是育苗钵在干湿热循环处理过程中,长时间处于水分与高温交替变换环境,器壁结构内易产生湿热形变与较大应力,促使容器器壁刚度及强度发生变化^[28],稻壳与胶黏剂界面结合质量的下降,导致拉伸强度下降^[5,29]。由于 RSA-IV 和 RSA-VI 育苗钵制备过程中加入了豆粕粉,在湿润状态下,稻壳纤维膨胀率比胶黏剂高,胶黏剂反复处于内部压力下,持久遭受损害,易微裂及变形,且胶黏剂小分子键水解断裂,分子间力削弱,钵体界面破裂^[5]。各

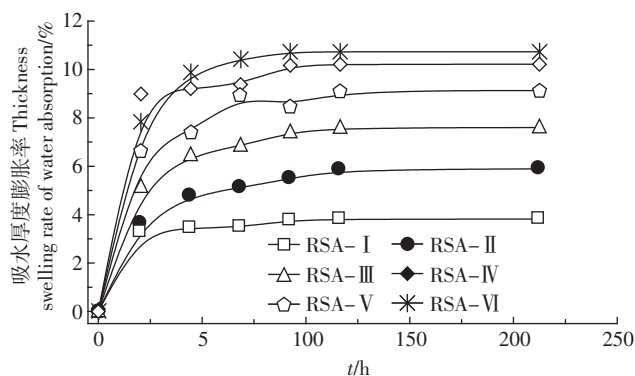


图 4 育苗钵的吸水厚度膨胀率

Figure 4 Thickness swelling rate of water absorption of nursery bio-containers

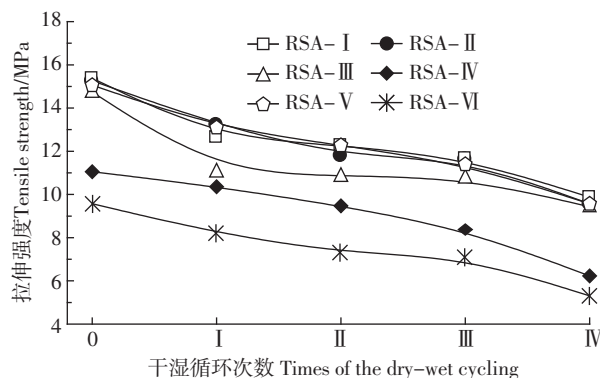


图 5 干湿热循环处理对育苗钵拉伸强度变化的影响

Figure 5 Changes in tensile strength of nursery bio-containers under dry-wet and heat cycle

种作用强弱不同及相互消涨,导致育苗钵拉伸强度下降。

2.2 稻壳育苗钵生物学效应指标分析

2.2.1 种子发芽率分析

育苗钵浸提液浓度大小对种子发芽率有一定的影响^[31],因此本试验选取了2个不同浓度的浸提液,来判定对黄瓜种子发芽率的影响,为实际育苗应用作指导。从图6可以看出,料水比1:5浸提液对黄瓜种子发芽初期表现一定程度的抑制作用,24 h发芽率均显著低于去离子水对照(CK),随着培养时间延长其抑制作用逐渐减弱,发芽率接近清水对照水平,其中RSA-VI、RSA-V和RSA-III分别在第48、72、120 h已高于对照。当料水比1:10时,浸提液24 h发芽率仅RSA-II和RSA-III表现出微弱抑制作用,其余各处理以及所有处理在24 h后对黄瓜种子发芽均表现不同程度促进作用。试验表明,本研究稻壳育苗钵对植物种子萌发基本无毒性或毒性极低,但材料中可能存在某种高浓度条件下抑制种子发芽、低浓度下能促进种子发芽的化学物质。

从育苗钵制作材料化学组分构成方面推测,该物质极有可能是甲醛。有研究表明:甲醛浓度较高时,可加剧种子萌发过程中细胞膜的脂质过氧化,破坏膜结构的完整性,抑制种子的萌发;但是,低浓度甲醛对植物种子发芽却具有促进作用,当甲醛溶液浓度 $\leq 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,西瓜种子的发芽率、发芽指数及发芽势相对于清水对照组显著增加^[30]。本研究大豆蛋白基胶黏剂制备过程中,添加了一定数量甲醛,作为提供活性官能团(-CHO)的单体与尿素氨基、大豆蛋白链段游离氨基发生缩聚反应。因该反应具有可逆性,致使合成的胶黏剂中存在一定数量游离甲醛分子,反应工艺

参数不同(如物料质量比、物料添加次序等)反应体系中残留游离甲醛数量也不同。育苗钵5倍水提取液对种子萌发初期表现轻微抑制效应,后期抑制作用被解除,可能与甲醛挥发有关。

盐分及酸碱度也是影响种子萌发最常见环境因子,本文测定了各处理容器水浸提液电导率及pH,并对其与黄瓜种子发芽率相关性进行了分析(见表2、表3)。结果显示,容器水浸提液电导率与pH之间存在显著负相关($P < 0.05$),两者与种子发芽率之间均无显著相关性($P > 0.05$)。这表明,浸提液对种子发芽抑制作用,不是由容器所含盐分或酸碱度引起的,两者均在黄瓜种子发芽所需正常值范围内^[31]。

从表2可以看出,配方RSA-I、RSA-II浸提液电导率低于其他处理,而pH高于其他处理,浸提液电导率与pH显著负相关,可能是因为胶黏剂SA-III、SA-IV中合成配方中甲醛与尿素摩尔比低,形成多羟基甲基量少,胶黏剂固化时所需酸性盐固化剂 NH_4Cl 用量增大的缘故。

表2 育苗钵的电导率及pH

Table 2 Electrical conductivity(EC) and pH in H_2O -extracting solution of nursery bio-containers

育苗钵 Nursery container	浸提液浓度 1:5 Solution concentration 1:5		浸提液浓度 1:10 Solution concentration 1:10	
	电导率 EC/ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	pH	电导率 EC/ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	pH
I	2860	7.19	1660	7.37
II	2460	6.80	1440	7.04
III	4270	4.67	2340	4.84
IV	4470	5.01	2430	5.15
V	4180	4.57	2270	4.76
VI	4540	4.86	2510	5.02

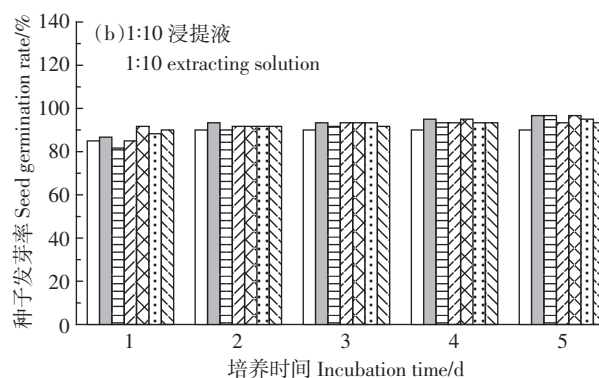
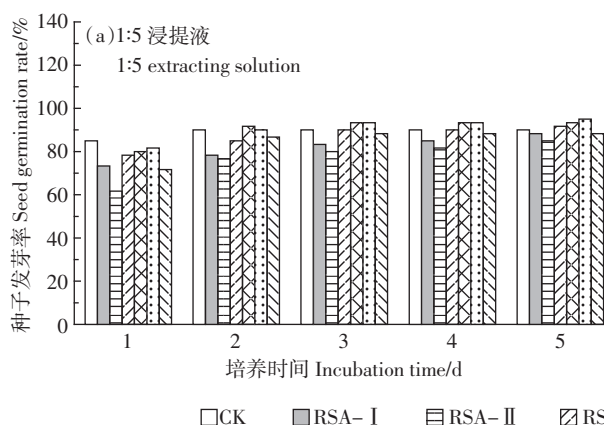


图6 育苗钵的水浸提液对黄瓜种子发芽率的影响

Figure 6 Effect of H_2O -extracting solution of nursery bio-containers on cucumber seed germination rate

表 3 育苗钵电导率、pH 与黄瓜种子发芽率之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between cucumber seed germination rate and electrical conductivity and pH of nursery bio-containers						
项目	浸提液浓度 1:5(Extraction solution concentration, 1:5)			浸提液浓度 1:10(Extracting solution concentration, 1:10)		
	电导率 Electrical conductivity	pH	发芽率 Germination rate	电导率 Electrical conductivity	pH	发芽率 Germination rate
电导率 Electrical conductivity	1	-0.846*	0.383	1	-0.792*	0.532
pH		1	-0.648		1	-0.009
发芽率 Germination rate			1			1

注:*表示在 $P<0.05$ 水平显著相关(两侧检验)。
Note:*Indicates significant correlation at $P<0.05$ (On both sides of the test).

2.2.2 育苗效果分析

以黄瓜为被试植物,对 6 种稻壳育苗钵进行了育苗试验,育苗 15 d 幼苗长势基本符合移栽要求。对黄瓜苗长势进行跟踪,结果见表 4。6 种稻壳育苗钵中育苗 15 d 仅有 RSA-Ⅳ育成的黄瓜苗长势劣于塑料容器,其他均好于塑料容器。观察育苗过程发现,RSA-Ⅳ容器浇水后器壁膨胀现象严重,外表显现稻壳颗粒,水分蒸发落干后器壁出现开裂,开裂现象在所有容器中最为严重。尽管各处理采用相同水分管理,因 RSA-Ⅳ器壁开裂现象较重,育苗器内基质水分蒸发速率快,幼苗与其他容器苗相比表现出缺水症状,影响了幼苗生长。RSA-Ⅰ长势优于 RSA-Ⅱ,可能是在甲醛:尿素(F/U)高摩尔比条件下,分批次添加(RSA-Ⅰ)比一次性添加(RSA-Ⅱ)大豆分离蛋白更有利于降低树脂中游离甲醛含量^[25],从而降低了甲醛对植物幼苗毒性作用。制作容器模压原料过程,添加豆粕粉 RSA-Ⅳ处理植物幼苗长势劣于对应的未添加豆粕粉 RSA-Ⅲ处理,主要是添加了豆粕粉后,增加了吸水性大豆蛋白,容器壁吸水性增强,器壁出现不同程度膨

胀开裂现象,导致基质脱水过快。而 RSA-Ⅵ与 RSA-Ⅴ处理差异不大。

对 6 种育苗钵所育黄瓜苗长势进行综合评价结果显示,幼苗长势最好为 RSA-Ⅰ,其次为 RSA-Ⅵ,由于 RSA-Ⅰ胶粘剂强度高,吸水性较差,移栽后容器短期难以降解,影响根系生长,而 RSA-Ⅵ容器在土壤中可快速崩解(另文报道),因此 RSA-Ⅵ更宜于黄瓜育苗。

2.3 稻壳育苗钵性能效果应用验证试验

从稻壳育苗钵耐水性能分析过程中,发现当不同配方育苗钵的吸水率及吸水厚度膨胀率达到最大时,所对应的育苗钵经干湿热循环处理 4 次后拉伸强度最小为 5.31 MPa,通过育苗试验结果可知 RSA-Ⅵ育苗钵形体完整率保持约 85%以上。因此,本部分以拉伸强度为主要考察指标,建立与育苗周期的相关性。

如何建立育苗钵机械强度与育苗钵形体完整率(育苗周期)间的相关性。结合图 5 中 6 种育苗钵的干湿热循环处理 4 次后的拉伸强度,以拉伸强度为自变量 X (MPa),育苗周期为因变量 y (d),建立了育苗周

表 4 育苗钵对黄瓜育苗效果的影响

Table 4 Effect of nursery bio-containers on growth of cucumber plant							
指标 Index	塑料钵 Plastic container	育苗钵 Nursery containers					
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ
株高 Plant height/cm	16.9±3.78c	16.24±3.99d	17.29±4.58b	17.13±5.65b	16.23±5.39d	17.82±5.47a	17.91±4.88a
茎粗 Stem diameter/mm	4.15±0.55b	4.51±0.37a	4.19±0.52b	3.99±0.42c	4.14±0.38b	4.17±0.42b	4.38±0.41a
叶长 Leaf length/cm	5.56±0.51b	5.73±0.43a	5.39±0.46c	5.28±0.42cd	5.21±0.52d	5.32±0.53cd	5.62±0.49ab
叶宽 Leaf width/cm	6.10±0.59e	6.46±0.45bc	6.29±0.49cd	6.82±0.55a	6.19±0.47de	6.52±0.49b	6.43±0.65bc
壮苗指数 Seedling index	0.246	0.278	0.242	0.233	0.255	0.234	0.245
叶面积指数 Leaf area index	33.92	37.02	33.74	36.01	32.19	34.69	36.14
权重值 Growth weight value	5.90	6.26	5.92	5.95	5.80	5.96	6.14

注:壮苗指数=茎粗/株高;叶面积指数=叶长×叶宽^[32];权重值=Σ(株高/株高均值+茎粗/茎粗均值+叶长/叶长均值+叶宽/叶宽均值+壮苗指数/壮苗指数均值+叶面积指数/叶面积指数均值)。同行不同字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note:Seedling index=stem diameter/plant height; Leaf area index=leaf length×leaf width^[32]; Growth weight value=Σ (Plant height/averageplant height + stem diameter/average stem diameter + leaf length/average value of leaf length + leaf width/average leaf width+seedling index/average seedling index + leaf area index /average leaf area index). Data with different letters within a raw are significantly different($P<0.05$).

期与干湿热循环处理后拉伸强度间的回归方程

$$y = -0.35X^2 + 9.43X - 5.85 (R^2 = 0.9473)$$

该方程中回归系数的单位是 $\text{d} \cdot \text{MPa}^{-1}$, R^2 为回归方程的相关性系数(Coefficient of determination), 表示方程中自变量 X 对因变量 y 的解释程度, 其值表明回归方程与试验值整体上符合程度较高。进一步对回归进行显著性检验, 拟合模型的回归项 F 值为 59.95, 育苗周期的方程模型回归关系极显著 ($P \leq 0.01$), 说明所建立的二次回归模型在 $P=0.01$ 水平下显著, 模型拟合度较高, 能反映干湿热循环处理后钵体拉伸强度对育苗周期的影响。

根据拟合模型, 可以对 RSA-VI 型育苗钵的育苗周期进行验证, 干湿热循环处理后拉伸强度 $X=5.31 \text{ MPa}$, 则 RSA-VI 型育苗钵育苗周期 $y=34 \text{ d}$, 而实际观察天数为 35 d, 误差范围 $<3\%$, 回归预测值与试验值可信度较高。继而选取 RSA-VI 型育苗钵进行大棚黄瓜育苗效果的验证试验, 试验结果为育苗 30 d 后钵体完整保持率为 $85\% \pm 2\%$, 霉菌分布面积达 60% 以上, 钵体强度适中, 随苗移栽后根系易穿透钵壁, 能够满足育苗周期和钵体随苗移栽实际应用需求, 具一定增肥效力。有关育苗钵养分释放规律及对土壤微环境的影响程度, 将另文报道。

3 结论

(1) 稻壳/大豆蛋白基黏合剂育苗钵适用于茄果类蔬菜幼苗的育苗, 育苗期间 RSN-VI 钵体强度适中, 随苗移栽后能促进茄果类蔬菜幼苗的生长, 是一种理想的农业育苗钵。

(2) 以干湿热循环 4 次处理后的拉伸强度为自变量 X , 以育苗周期为因变量 y , 建立了回归方程 $y = -0.35X^2 + 9.43X - 5.85 (R^2 = 0.9473)$, 其中回归系数的单位是 $\text{d} \cdot \text{MPa}^{-1}$ 。RSN-VI 育苗钵拉伸强度为 5.31 MPa , 育苗周期为 35 d。

参考文献:

[1] Pan M Z, Zhou D G, Zhou X Y, et al. Improvement of straw surface characteristics via thermomechanical and chemical treatments[J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101: 7930-7934.

[2] 何春霞, 顾红艳, 薛盘芳. 四种植物纤维粉/聚丙烯复合材料应用性能[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 381-384.

HE Chun-xia, GU Hong-yan, XUE Pan-fang. Performances of polypropylene composite material filled with four kinds of plant fiber powders[J]. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2): 381-384.

[3] 何春霞, 侯人鸾, 薛 娇, 等. 不同模压成型条件下聚丙烯木塑复合材料性能[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 145-150.

HE Chun-xia, HOU Ren-luan, XUE Jiao, et al. Performances of PP wood-plastic composites with different processing methods[J]. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(15): 145-150.

[4] 于 旻, 何春霞, 张 还, 等. 预处理对麦秸/聚丙烯复合材料摩擦磨损性能影响实验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 138-143.

YU Min, HE Chun-xia, ZHANG Huan, et al. Effect of different pretreatments on tribological properties of wheat straw/polypropylene composites[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7): 138-143.

[5] 孙恩惠, 黄红英, 武国峰, 等. 稻壳粉/改性脲醛树脂模压成型材料的力学性能[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 228-237.

SUN En-hui, HUANG Hong-ying, WU Guo-feng, et al. Mechanical properties of moulding material made from crop stalks and modified UF resin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(13): 228-237.

[6] 郭梨锦, 曹凑贵, 张枝盛, 等. 耕作方式和秸秆还田对稻田表层土壤微生物群落的短期影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1577-1584.

GUO Li-jin, CAO Cou-gui, ZHANG Zhi-sheng, et al. Short-term effects of tillage practices and wheat-straw returned to rice fields on top-soil microbial community structure and microbial diversity in central China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8): 1577-1584.

[7] 韩新忠, 朱立群, 杨敏芳, 等. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2192-2199.

HAN Xin-zhong, ZHU Li-qun, YANG Min-fang, et al. Effects of different amount of wheat straw returning on rice growth, soil microbial biomass and enzyme activity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2192-2199.

[8] Talebnia F, Karakashev D, Angelidaki I. Production of bioethanol from wheat straw: An overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation[J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101(13): 4744-4753.

[9] Xu Q, Li S, Fu Y Q, et al. Two-stage utilization of corn straw by *Rhizopus oryzae* for fumaric acid production[J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101(13): 6262-6264.

[10] Kaparaju P, Felby C. Characterization of lignin during oxidative and hydrothermal pre-treatment processes of wheat straw and corn stover[J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101(9): 3175-3181.

[11] 樊永胜, 蔡忆昔, 李小华, 等. 油菜秸秆真空热解液化生物油分析与表征[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 206-211.

FAN Yong-sheng, CAI Yi-xi, LI Xiao-hua, et al. Analysis and characterization of bio-oil produced from vacuum pyrolysis of rape straw[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(6): 206-211.

[12] Binod P, Sindhu R, Singhanian R R, et al. Bioethanol production from rice straw: An overview[J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101(9): 4767-4774.

- [13] Zhou X Y, Zheng F, Li H G, et al. An environment friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(7):1070-1074.
- [14] 黄红英, 常志州, 唐双凌, 等. 一种可降解育苗钵及其制备方法和应用[P]. 中国专利:102504560, 2012-06-20.
- [15] Nechita P, Dobrin E, Ciolacu F, et al. The biodegradability and mechanical strength of nutritive pots for vegetable planting based on lignocellulose composite materials[J]. *Bioresources*, 2010, 5(2):1102-1113.
- [16] Wu G F, Sun E H, Huang H Y, et al. Preparation and properties of biodegradable planting containers made with straw and starch adhesive[J]. *Bioresources*, 2013, 8(4):5358-5368.
- [17] 张志军, 王慧杰, 李慧珍, 等. 秸秆育苗钵在棉花育苗移栽上的应用及效益分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7):279-282.
- ZHANG Zhi-jun, WANG Hui-jie, LI Hui-zhen, et al. Application and benefit analysis of straw block in seedling transplanting of cotton[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(7):279-282.
- [18] 高玉芝, 王君玲, 尹伟达, 等. 黏结剂对秸秆育苗钵成型质量影响的试验研究[J]. 农机化研究, 2009(12):147-149.
- GAO Yu-zhi, WANG Jun-ling, YIN Wei-da, et al. Experimental study on cohesive material for the molding quality of straw seedling nursing container[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009(12):147-149.
- [19] 白晓虎, 李芳, 张祖力, 等. 秸秆挤压成型育苗钵的试验研究[J]. 农机化研究, 2008(2):136-138.
- BAI Xiao-hu, LI Fang, ZHANG Zu-li, et al. Experimental study on seedling pot extrude by straw[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2008(2):136-138.
- [20] 张亚慧, 于文吉. 大豆蛋白胶黏剂在木材工业中的研究与应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2008, 25(5):20-23.
- ZHANG Ya-hui, YU Wen-ji. Synthesis and property of a copolymerizable flame retardant[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2008, 25(5):20-23.
- [21] 孙恩惠, 黄红英, 武国峰, 等. 不同环境中秸秆/SPI 改性脲醛树脂复合材料花盆降解行为[J]. 复合材料学报, 2014, 31(5):1198-1205.
- SUN En-hui, HUANG Hong-ying, WU Guo-feng, et al. Environmental effects on the degradation behavior of straw/SPI modified urea-formaldehyde resin composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(5):1198-1205.
- [22] 王定美, 武丹, 李季, 等. 猪粪及其堆肥不同水浸提比对种子发芽特性指标的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3):579-584.
- WANG Ding-mei, WU Dan, LI Ji, et al. Effects of water extraction ratio of pig manure and its compost on seed germinative indicators[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3):579-584.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2007:25-58.
- [24] 孙恩惠, 黄红英, 常志州. 水解大豆分离蛋白改性 UF 的合成工艺及性能研究[J]. 中国胶黏剂, 2012, 21(11):33-37.
- SUN En-hui, HUANG Hong-ying, CHANG Zhi-zhou. Study on synthesis technology and properties of urea-formaldehyde resin modified by hydrolysis soy protein isolate[J]. *China Adhesives*, 2012, 21(11):33-37.
- [25] 黄红英, 孙恩惠, 武国峰, 等. 大豆分离蛋白水解物改性三聚氰胺脲醛树脂的合成及表征[J]. 林产化学与工业, 2013, 33(3):85-90.
- HUANG Hong-ying, SUN En-hui, WU Guo-feng, et al. Synthesis and characterization of melamine-urea-formaldehyde modified by soy protein isolate[J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2013, 33(3):85-90.
- [26] 崔莉, 贾军芳, 张传杰, 等. 纤维素多孔材料的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(10):142-145.
- CUI Li, JIA Jun-fang, ZHANG Chuan-jie, et al. Preparation and properties of cellulose porous material[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2013, 29(10):142-145.
- [27] 温福泉, 海凌超, 廖桂福, 等. 浅谈人造板产品的吸水厚度膨胀率[J]. 木材加工机械, 2009, 4:22-24.
- WEN Fu-quan, HAI Ling-chao, LIAO Gui-fu, et al. The thickness swelling of wood-based panels[J]. *Wood Processing Machinery*, 2009, 4:22-24.
- [28] 王伟宏, 王清文, 宋永明. 木塑复合材料老化性能研究进展[J]. 林业科学, 2008, 44(5):143-149.
- WANG Wei-hong, WANG Qing-wen, SONG Yong-ming. Compatibility of wood fiber/plastic composite with environment[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(5):143-149.
- [29] Stark N M. Influence of moisture absorption on mechanical properties of wood flour-polypropylene composites[J]. *Journal of Thermoplastic Composites*, 2001, 14(5):421-432.
- [30] 南连成. 秸秆盆钵甲醛释放对种子萌发的影响及应对措施初探[D]. 南京理工大学, 2012.
- NAN Lian-cheng. The influence of formaldehyde released by straw pot on seeds germination and preliminary exporation on measures[D]. Nanjing University of Science & Technology, 2012.
- [31] 吴春蕾, 曹福磊, 丁云洁, 等. 不同 pH 对甘草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(14):8270-8272.
- WANG Chun-lei, CAO Fu-lei, DING Yun-jie, et al. Study on the effect of pH on seed germination and seedling growth of glycyrrhiza uralensis[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(14):8270-8272.
- [32] 许高平, 王璞, 薛绪掌, 等. 负压控水下不同株型玉米水分利用效率和产量的盆栽试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15):148-156.
- XU Gao-ping, WANG Pu, XUE Xu-zhang, et al. Experiment on water use efficiency and yield of different plant type of potted maize under negative pressure water control[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(15):148-156.