

曲昭杰,朱坤森,胡吕良,等.木醋液和生物炭复合处理种子对油菜萌发、生长、产量和品质的影响[J].华中农业大学学报,2025,44(1):24-34.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.01.003

木醋液和生物炭复合处理种子对油菜萌发、生长、 产量和品质的影响

曲昭杰¹,朱坤森²,胡吕良³,周钰¹,原保忠¹,胡立勇¹

1.农业部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室/华中农业大学植物科学技术学院,武汉 430070;

2.农产品营养品质与安全湖北省重点实验室/湖北省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所,
武汉 430064; 3.湖北省农业技术推广总站,武汉 430072

摘要 为提高直播油菜种子出苗率及壮苗率,以华油杂50油菜种子为试验材料,进行室内筛选与田间种植试验,以评估木醋液引发(wood vinegar priming,PV)和稻秆生物炭(rice straw biochar,BC)丸粒化对油菜萌发出苗、幼苗生长、产量和品质的影响,木醋液引发设7个处理(m/V):0(纯蒸馏水,HP)、1:200(PV200)、1:400(PV400)、1:600(PV600)、1:800(PV800)、1:1 000(PV1000)和1:1 200(PV1200),稻秆生物炭设5个处理(m/m):20%(BC20)、30%(BC30)、40%(BC40)、50%(BC50)和60%(BC60)。结果显示:稀释1 000倍的木醋液(PV1000)引发和30%BC的种衣剂丸粒化是促进萌发和幼苗生长的最佳配比。PV1000引发和PV1000引发+30%生物炭丸粒化(PV1000+BC30)处理显著提高油菜的出苗率,分别提高20.2%和22.1%;PV、BC、PV+BC处理的生物量分别较对照提高13.7%、21.6%、35.3%;油菜产量分别提高达14.4%、13.6%、17.0%;同时,PV+BC处理显著提高了油酸含量,降低了硫苷含量。因此,PV和PV+BC是有效的种子处理方法。

关键词 木醋液;生物炭;种子处理;油菜;种子萌发;生长;产量

中图分类号 S351.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)01-0024-11

油菜是我国种植面积最大的油料作物。随着我国耕作制度和农业产业结构变化以及农村劳动力向城镇转移,省工节本、轻简高效的高密度直播油菜种植方式正在逐渐代替传统的稀植移栽方式^[1]。但直播油菜普遍存在出苗率低、出苗不整齐、幼苗素质差等问题,直接影响油菜的群体建立,最终导致产量和品质下降。同时长江流域普遍采用稻-稻-油复种模式,晚季稻晚熟品种的应用造成了油菜播期被不断推迟、播后易受到低温、干旱影响、油菜出苗困难的问题。因此,采用适宜的栽培措施来促进直播油菜快速整齐出苗且保证幼苗生长健壮成为油菜的热点问题^[2]。

播前采用种子引发和种子丸粒化等种子处理技术,是促进种子快速均匀出苗和提高幼苗质量的有效途径^[3]。种子引发是一种“引而不发”技术,是控制种子缓慢速吸水和后期逐步回干的处理方法^[4]。近

年来,研究人员报告了褪黑素、葡萄糖酸钠、6-BA、抗坏血酸等多种引发剂具有提高生菜、玉米、小麦和棉花等作物种子萌发速度^[5-7],并促进幼苗生长的作用。在油菜上也有应用多效唑、葡萄糖酸钠等物质进行种子引发促进种子萌发、提高抗性和延缓叶片衰老^[1,8]的报道。但不同引发物质的作用各异,并存在出苗与壮苗难于统一的问题。木醋液(wood vinegar)是由树木、秸秆、果壳等生物质材料制备生物炭过程中产生的副产物,是一种具有多种生物学功能的植物生长调节类物质^[9-11],含有154种以上的有机物^[12],主要为有机酸、酚类、酯类、醛酮类,这些物质在适宜浓度下可协同作用,具有促进植物生长发育并提高其抗逆性的综合作用。目前的研究表明,木醋液浸种处理可有效促进小麦、水稻和辣椒等作物的种子萌发^[11-13],然而利用木醋液进行油菜种子引发,以及通过种子引发诱导植株中后期生长潜能的

收稿日期:2024-08-15

基金项目:湖北省农业科技创新项目

曲昭杰,E-mail:15853286186@163.com

通信作者:胡立勇,E-mail:liyonghu@mail.hzau.edu.cn;朱坤森,E-mail:929930972@qq.com

影响尚缺乏系统报道。

种子丸粒化是通过人工或机械加工制成表面光滑、大小均匀、颗粒增大的种子^[14]。丸粒化材料可防治病虫鼠害、缓慢释放药肥、促进植物生长^[15]。但是目前常见的种衣剂大多为具有成膜特性的有机物质,其中主要为杀菌杀虫的农药,具有潜在的环境污染以及人畜等误食引发中毒的风险,还可能导致种子活力的降低。因此,无公害环保型种子丸粒化材料的研制越来越受到人们的关注^[16]。生物质炭是生物质在无氧或限氧条件下经高温热解后炭化得到的一种含碳有机物质^[17-18]。近年来的多项研究表明,生物质炭在促进植物生长、改善土壤理化性质与微生物环境^[19]、减少温室气体排放^[20]等方面显示出很大潜力。然而,利用生物炭的特性进行种子丸粒化的研究相对很少。本研究以华油杂50油菜种子为试验材料,进行室内筛选与田间种植试验,评价木醋液引发(wood vinegar priming, PV)、秸秆生物炭(rice straw biochar, BC)丸粒化以及二者联合使用对油菜种子萌发出苗、生长发育和产量品质的影响,旨在探索适合油菜齐苗壮苗的种子处理方式,为实现油菜节本增效栽培提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试品种为甘蓝型杂交油菜华油杂50,由圣光种业有限责任公司提供。供试杨木木醋液由湖北楚天生物质能源技术开发有限公司提供, pH 3.45。秸秆生物炭(rice straw biochar, BC)为稻草在600 °C的高温下热解而成,由湖北金智生态能源有限公司提供:pH 9.42,其中含有氮0.74%、碳47.14%、氢1.62%、氧11.85%、磷0.32%、钾18.90%和灰分19.43%。滑石粉、凹凸棒土和种子丸粒化机(型号RH-325),均购于青岛瑞华农业科技有限公司(中国山东省青岛市)。

1.2 培养箱试验

试验在光照培养箱(HP250GS-C,宁波东南仪器有限公司)中进行,光照12 h/黑暗12 h(13 000 lx),昼夜温度为25 °C/20 °C。油菜种子播种在12.0 cm×12.0 cm×6.0 cm的发芽盒中,每盒100粒种子,每处理3盒。

1.3 木醋液引发有效质量浓度的筛选

将100颗灭菌种子分别浸泡在加入0(纯蒸馏水,HP)、1:200(PV200, m/V, 下同)、1:400(PV400)、1:

600(PV600)、1:800(PV800)、1:1 000(PV1000)和1:1 200(PV1200)木醋液的灭菌水中12 h。种子引发处理参照Hussain等^[21]方法。完成浸种的种子播种在无菌发芽盒中,无菌发芽盒内置有3层滤纸,滤纸用10 mL纯水浸透。每天用1 mL水浸湿种子,持续1周。播种后第3天(DAS)和第7天分别计算种子发芽数、出苗数。种子发芽的标准为胚根长度大于2 mm,种子出苗的标准为幼苗直立、子叶平展、子叶由淡黄转为绿色。

1.4 种子丸粒化生物炭有效比例的筛选

在 $m_{\text{滑石粉}}:m_{\text{凹凸棒土}}=1:1$ 的丸粒化材料配方基础上,设置生物炭含量为20%(BC20)、30%(BC30)、40%(BC40)、50%(BC50)和60%(BC60)(m/m)。种子质量与丸粒化剂质量之比设定为1:2。在进行丸粒化之前,将干燥的生物炭粉碎过筛至0.60 mm的粒径。种子丸粒化方法参考Zhang等^[22]的方法。将发芽盒内装满500 g风干土壤。然后将土壤水分保持最大田间持水量,每天采用称质量法保持上述含水量。每种处理将50粒生物炭丸粒化种子播种在0.5 cm土壤深度。每天记录出苗数,在第7天进行调查取样。

1.5 大田播种及种植试验

田间试验在华中农业大学试验场进行,前茬为水稻。小区面积为10 m²(2 m×5 m),采用随机区组设计,3个重复。于2018年10月13日直播,将裸种子、木醋液引发种子、生物炭丸粒化种子以及木醋液引发加生物炭丸粒化种子等4种处理均匀地播种在播种行中,行距15 cm,播种量为7.5 kg/hm²。田间施氮量为225 kg/hm²,施磷112.5 kg/hm²和钾90 kg/hm²。基肥施用复合肥(15-15-15),施用量为全部磷、钾和50%的氮。在越冬期(油菜5叶期)采用尿素施用50%的氮。试验过程中,对病虫草害进行严格防控,以避免产量损失,并于2019年5月2日收获。

1.6 发芽和幼苗属性

在培养箱中进行培养观察,每天记录发芽率,自出苗之日起每天统计出苗率。第7天进行幼苗取样,测定幼苗形态指标,如发芽势(germination potential, GE)、最终发芽率/出苗率(final germination/emergence, FG/FE)、出苗指数(emergence index, EI)、平均出苗时间(mean emergence time, MET)^[23]、幼苗活力指数I (seedling vigor index I, SVI-I)和幼苗活力指数II (seedling vigor index II, SVI-II)^[24]。田

间试验在小区第2~4行取1.5 m观察田间出苗,并随机抽取10株幼苗,记录其芽长和根长,然后在75 ℃下烘干至恒质量,分别测量地上部干质量和地下部干质量。

1.7 农艺性状的测定

在苗期、蕾薹期、开花期和角果期分别取不同处理5株油菜植株,测量株高、根颈粗、总叶数、绿叶数、鲜质量和干质量。用直尺测量从子叶节到植株顶部的距离来确定植株的高度。根颈粗用游标卡尺测量。在105 ℃时对植株进行杀青,将温度调节至75 ℃烘干至恒质量。对干燥样本称质量,以获得5株油菜的干质量平均值。

在晴朗无云的上午10:00,使用SPAD-502(日本大阪美能达)叶绿素仪测量SPAD值。选择有代表性的5株油菜,对倒4功能叶(自上而下的第4片完全展开叶),避开叶脉在叶片不同部位测量6次,取平均值。

1.8 产量及产量构成

在约2/3的油菜种子为棕色时,每个小区取10株代表性油菜进行相关指标测定,如株高、根颈粗、有效分枝数、有效角果数、每角粒数和千粒重,并在干燥后对植株分部位称质量。对每个小区单独收获并干燥后,在菜籽含水率低于10%时,测产量。

1.9 油菜菜籽品质指数的测定

使用近红外分析仪(NIRSystem3750)测定不同处理籽粒油、蛋白质和硫代葡萄糖苷的含量,5次重复。

1.10 数据分析

所有试验数据均采用Excel 2016进行记录与整理,SPSS Statistics 25软件进行方差分析。各处理间显著性检验采用LSD法^[25]。

2 结果与分析

2.1 不同质量浓度木醋液引发对种子萌发出苗的影响

不同质量浓度木醋液引发下油菜种子萌发出苗情况见表1,以木醋液稀释800~1 200倍引发的效果较好,与CK相比,稀释1 000倍处理的出苗率、出苗指数、幼苗活力指数Ⅰ、幼苗活力指数Ⅱ分别提高了5.0%、23.4%、10.0%、7.4%,平均出苗时间缩短了3.3%。与对照比较,高质量浓度的木醋液(PVW200)对种子萌发和幼苗生长产生一定抑制作用,导致种子出苗率降低,幼苗活性略有下降;与水引发相比差异更大,出苗率和出苗指数分别下降了6.5%、11.2%。

表1 不同质量浓度的PV对油菜种子萌发的影响

Table 1 Effects of PV at different concentrations on rapeseed germination

处理 Treatments	出苗率/% Emergence rate	出苗指数 Emergence index	平均出苗时间/d Average emergence time	幼苗活力指数Ⅰ Seedling vitality index I	幼苗活力指数Ⅱ Seedling vitality index II
CK	79.3±1.3a	13.0±0.7b	6.30±0.11a	995.4±23.4b	785.8±26.1b
HP	82.0±1.2a	16.1±0.6a	6.10±0.05b	1 016.6±29.3ab	816.2±10.7ab
PV200	76.7±3.7ab	14.3±1.1ab	6.15±0.07b	994.7±46.7b	791.9±2.5ab
PV400	70.0±3.5b	13.1±0.5b	6.12±0.05b	1 065.8±21.7ab	821.0±13.8ab
PV600	76.7±1.2ab	16.1±0.3a	6.05±0.04b	1 054.6±21.7ab	826.2±16.7ab
PV800	84.0±1.3a	16.2±0.7a	6.03±0.06b	1 100.3±11.9a	839.8±24.6ab
PV1000	83.3±1.3a	16.3±0.5a	6.09±0.06b	1 095.0±27.4a	843.9±15.4a
PV1200	82.7±1.3a	15.1±1.2ab	6.16±0.13b	1 050.5±12.6ab	842.1±5.1a

注:每列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。CK:未处理种子;HP:水引发;PV后的数字表示用于种子引发的PV质量浓度(m/V)。下同。Note: According to the LSD test, different lower case letters after each column of figures in the table represent significant differences ($P < 0.05$) among treatments. CK: Untreated seeds, HP: Water induced. The number after PV represents the concentration of PV induced by seeds. The same as below.

由不同质量浓度下木醋液处理下幼苗素质指标(表2)可见,PV800和PV1000的引发效果最好且优于水引发处理。与水引发相比,PV1000处理的根长和地下部干质量均显著提高,分别提高8.6%、12.5%。与表1趋势相同,高质量浓度的木醋液(PV200)也造成了根长与地下部干质量的下降。因此,在后续大田试验中使用

PV1000处理。

2.2 生物质炭丸粒化比例的筛选

由表3可见,在培养箱内发芽盒(滤纸)萌发条件下,20%~30%生物炭丸粒化处理的出苗率比对照略有降低,但差异不显著;BC20与BC30可显著提高幼苗活力指数。与对照相比,BC30幼苗活力指数

表2 不同质量浓度木醋液处理对油菜幼苗素质的影响

Table 2 Effects of PV at different concentrations on the quality of rapeseed seedlings

处理 Treatments	苗高/cm Height	根长/cm Root length	地上部干质量/(mg/plant) Above ground dry weight	地下部干质量/(mg/plant) Underground dry weight	总干质量/(mg/plant) Total dry weight
CK	1.41±0.13a	9.38±0.37ab	5.95±0.21a	2.34±0.06c	8.30±0.14bc
HP	1.17±0.03a	9.39±0.87ab	6.13±0.18a	2.41±0.07bc	8.54±0.03abc
PV200	1.21±0.09a	9.01±0.79a	6.01±0.03a	2.13±0.04d	8.14±0.15c
PV400	1.27±0.04a	9.83±0.13ab	6.09±0.24a	2.47±0.10bc	8.55±0.17abc
PV600	1.19±0.08a	9.72±0.43ab	6.13±0.12a	2.41±0.17bc	8.55±0.13abc
PV800	1.31±0.11a	10.00±0.24b	6.05±0.41a	2.57±0.09ab	8.63±0.23ab
PV1000	1.31±0.06a	10.10±0.23b	6.14±0.14a	2.65±0.06a	8.79±0.10a
PV1200	1.29±0.12a	9.50±0.33ab	6.12±0.23a	2.53±0.07ab	8.65±0.11ab

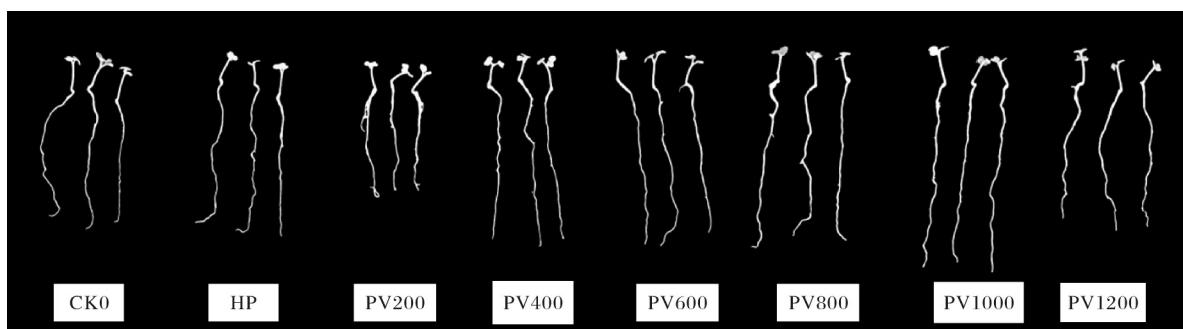


图1 培养箱条件下,不同质量浓度PV处理的油菜幼苗在第7天的生长情况

Fig.1 Growth of rapeseed seedlings treated with different concentrations of PV under incubator conditions on the seventh day

表3 不同含量生物炭(BC)丸粒化对油菜种子萌发出苗的影响

Table 3 Effects of different content of biochar (BC) coating on seed germination and emergence of rapeseed

处理 Treatments	出苗率/% Emergence rate	出苗指数 Emergence index	平均出苗时间/d Average emergence time	幼苗活力指数 I Seedling vitality index I	幼苗活力指数 II Seedling vitality index II
CK	89.3±0.7a	25.9±0.2a	5.77±0.01a	1 334.3±87.1b	645.7±20.0b
BC20	88.0±2.3ab	25.5±0.4ab	5.76±0.01a	1 513.0±47.2a	705.7±24.8ab
BC30	86.7±0.7abc	25.4±0.4ab	5.74±0.02a	1 506.3±40.6a	746.7±8.3a
BC40	84.0±1.2bcd	23.3±0.4abc	5.82±0.04a	1 329.3±30.5b	715.3±29.1ab
BC50	82.7±1.8cd	23.1±1.2bc	5.79±0.04a	1 342.0±15.8b	629.3±31.4b
BC60	80.7±1.8d	21.3±1.5c	5.85±0.05a	1 335.7±25.5b	637.7±21.9b

I、幼苗活力指数 II 分别提高了 12.9%、15.6%。即 20%~30% 生物炭丸粒化对幼苗形态建成有显著的促进作用。40%~60% 生物质炭丸粒化则显著降低油菜种子的出苗率与出苗指数, 分别降低 5.3~8.6%、10.0~17.8%。生物质炭用量如大于 40%, 采用生物质炭丸粒化对油菜种子萌发出苗会产生明显的抑制作用。

从不同含量生物炭丸粒化处理下油菜幼苗素质指标(表4)可见, BC 处理的根长、地上部干质量、地下部干质量、根冠比方面都要优于 CK 处理。其中,

BC20 和 BC30 在幼苗素质方面要明显优于其他处理, 且 BC30 在地下部干质量方面要明显优于 BC20。与对照相比, BC30 的苗高、根长、地上部干质量、地下部干质量、根冠比分别提高了 11.0%、20.6%、12.7%、61.1%、50.0%。因此, 选择 BC30 进行后续的试验。

2.3 木醋液与生物炭最佳用量与组配处理种子效果的比较

对稀释 1 000 倍木醋液引发(PV)、30% 生物炭丸粒化(BC)、以及二者联合使用(PV+BC)等 3 种方

表4 不同含量生物炭(BC)丸粒化对油菜幼苗素质的影响

Table 4 Effects of biochar (BC) coating with different contents on the quality of rapeseed seedlings

处理 Treatments	苗高/cm Height	根长/cm Root length	地上部干质量/(mg/plant) Above ground dry weight	地下部干质量/(mg/plant) Underground dry weight	总干质量/(mg/plant) Total dry weight
CK	8.65±0.59b	6.76±1.11b	6.33±0.30b	0.90±0.27d	7.23±0.23a
BC20	9.13±0.15a	8.27±0.61a	7.02±0.17a	1.00±0.20cd	8.02±0.59ab
BC30	9.15±0.41a	7.93±0.83a	7.14±0.24a	1.48±0.24a	8.62±0.21a
BC40	8.28±0.31b	7.55±0.44ab	7.19±0.83a	1.22±0.21b	8.41±0.33a
BC50	8.66±0.31ab	7.58±0.66ab	6.44±0.37b	1.17±0.24bc	7.61±0.10ab
BC60	8.31±0.81b	8.23±0.62a	6.70±0.13ab	1.21±0.24bc	7.91±0.04ab

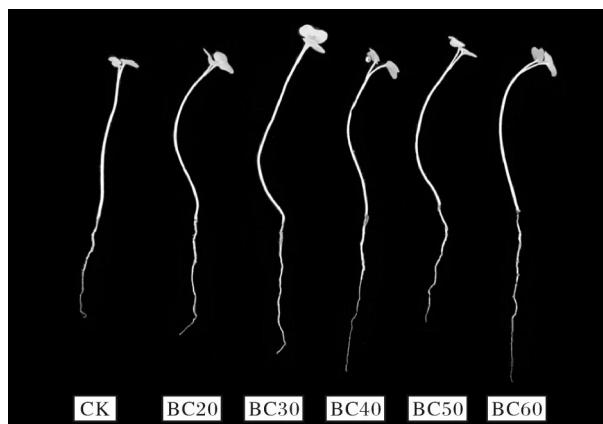


图2 培养箱条件下不同含量生物炭(BC)丸粒化的油菜幼苗在第7天的生长情况

Fig.2 Growth of rapeseed seedlings with different contents of biochar (BC) pellets under incubator conditions on the seventh day

式进行萌发比较试验,结果见表5。可以看出,3种种子处理方式对油菜种子萌发出苗均具有良好的促进

表5 不同种子处理方式对油菜种子萌发出苗的影响

Table 5 Effects of different seed treatment methods on germination and emergence of rapeseed seeds

处理 Treatments	出苗率/% Emergence rate	出苗指数 Emergence index	平均出苗时间/d Average emergence time	幼苗活力指数 I Seedling vitality index I	幼苗活力指数 II Seedling vitality index II
CK	85.3±2.3b	15.9±0.6c	6.17±0.04a	899.2±6.4c	353.5±17.6c
PV	94.0±3.5a	21.3±1.1a	5.97±0.07c	1 026.0±4.5b	434.5±12.3b
BC	83.7±5.1b	18.3±1.8b	6.10±0.03ab	1 024.7±7.4b	528.7±3.9a
PV+BC	96.7±1.2a	22.1±0.9a	6.00±0.08bc	1 215.9±2.4a	559.4±6.8a

表6 不同种子处理方式对油菜幼苗素质的影响

Table 6 Effects of different seed treatment methods on the quality of rapeseed seedlings

处理 Treatments	苗高/cm Height	根长/cm Root length	地上部干质量/(mg/plant) Above ground dry weight	地下部干质量/(mg/plant) Underground dry weight	总干质量/(mg/plant) Total dry weight
CK	1.16±0.02b	7.95±0.02d	2.63±0.20c	0.96±0.13c	3.58±0.21c
PV	1.17±0.01b	9.23±0.02b	2.98±0.14b	1.43±0.08b	4.40±0.07b
BC	1.89±0.04a	8.71±0.07c	3.94±0.11a	1.53±0.09b	5.47±0.07a
PV+BC	1.90±0.02a	10.59±0.18a	4.00±0.18a	1.75±0.14a	5.75±0.33a

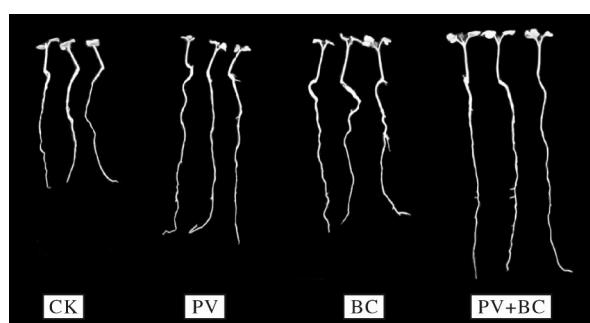


图3 培养箱条件下不同种子处理方式的油菜幼苗在第7天的生长情况

Fig. 3 Growth of rapeseed seedlings under different seed treatment methods on the seventh day under incubator conditions

表7 大田直播条件下油菜不同种子处理的出苗特性

Table 7 Seedling emergence characteristics of rapeseed under different seed treatments under field live broadcasting conditions

处理 Treatments	出苗数/(株/m ²) Emergence rate	苗高/cm Height	单株鲜质量/(mg/plant) Fresh weight	单株干质量/(mg/plant) Dry weight	幼苗活力指数 Seedling vitality index
CK	99.2±7.7b	3.7±0.2c	79.6±4.1c	5.1±0.4c	276.9d
PV	112.1±3.1a	3.9±0.2bc	91.7±2.8b	5.8±0.3bc	321.7b
BC	95.4±6.1b	4.2±0.2ab	102.7±4.8b	6.2±0.5ab	321.7c
PV+BC	119.2±4.7a	4.3±0.1a	111.7±4.4a	6.9±0.4a	420.6a

表8 不同处理下油菜株高和根颈粗

Table 8 Rapeseed plant height and root neck thickness under different seed treatments

处理 Treatments	株高/cm Plant height				根颈粗/mm Root collar diameter			
	苗期 Seedling stage	蕾薹期 Bolting stage	花期 Flowering stage	角果期 Pod stage	苗期 Seedling stage	蕾薹期 Bolting stage	花期 Flowering stage	角果期 Pod stage
CK	14.0±1.2a	20.6±2.4a	152.8±9.8a	173.0±8.5b	8.3±0.4b	11.1±0.3a	14.1±1.2a	11.8±0.2d
PV	14.6±0.5a	22.0±1.3a	166.1±9.3a	187.8±1.8a	8.9±0.2b	12.5±0.5a	14.2±0.7a	14.9±0.6b
BC	15.9±1.8a	24.0±2.5a	158.3±4.6a	178.8±5.6ab	8.8±0.5b	11.6±0.8a	14.5±0.6a	13.9±0.1c
PV+BC	14.2±2.2a	22.8±5.0a	157.6±7.3a	177.2±7.9ab	10.1±0.2a	12.7±0.3a	15.5±1.2a	15.9±0.8a

木醋液和生物炭处理均可以促进油菜绿叶数和总叶数的增加(表9)。尤其是在花期和角果期,表现最好的是PV+BC。与CK相比,PV+BC的总叶数分别增加了11.7%、10.1%,绿叶数分别增加了

11.4%、17.4%。PV和BC对绿叶数和总叶数的促进作用相当。不同处理在花期和荚果期均具有延缓植物衰老和增加绿叶数的作用。

表9 不同处理下油菜总叶数和绿叶数

Table 9 The total number of leaves and green leaves in rapeseed under different seed treatments

处理 Treatments	总叶数 Total leaves				绿叶数 Green leaves			
	苗期 Seedling stage	蕾薹期 Bolting stage	花期 flowering stage	角果期 Pod stage	苗期 Seedling stage	蕾薹期 Bolting stage	花期 Flowering stage	角果期 Pod stage
CK	9.7±0.6a	11.5±0.9b	19.7±1.4a	25.7±1.3b	5.5±0.5b	3.7±0.8c	10.5±1.5a	9.2±0.8b
PV	10.0±0.5a	12.8±1.3ab	19.8±1.4a	27.7±0.6a	5.3±0.3b	4.2±0.3ab	9.7±0.8a	10.0±0.3a
BC	9.7±0.3a	14.0±0.5a	20.3±1.2a	26.8±0.8ab	5.7±0.3b	3.9±0.3bc	10.5±0.9a	10.0±1.3ab
PV+BC	10.2±0.6a	12.3±0.8ab	22.0±1.0a	28.3±0.8a	6.7±0.8a	4.3±0.3a	11.7±1.0a	10.8±0.5ab

由表10可见,木醋液引发和生物炭丸粒化均显著增加了油菜苗期、蕾薹期、开花期和角果期单株鲜质量和干质量,其中提升效果最为明显的是PV+BC。与CK相比,PV+BC处理油菜苗期、蕾薹期、开花期和角果期鲜质量分别提高了24.4%、34.04%、27.8%、72.2%,其中角果期鲜质量增加效果最为明显。PV+BC处理干质量在油菜苗期、蕾薹期、开花期和角果期分别比对照增加了31.0%、19.5%、9.7%、65.3%,同样是角果期增加效果最为明显。比较PV与BC,PV对油菜干质量和鲜质量的增加效果要优于BC,尤其在生育后期。

由表11可见,木醋液引发、生物炭丸粒化及二者联合使用均可提高油菜在各个生育期的叶面积,并且在生育前期效果更加明显。其中PV+BC的处理效果是最好的,与CK相比在各时期分别提升了33.0%、35.6%、27.8%。在花期各处理的SPAD值与CK相比没有明显差异,但在苗期与蕾薹期3个处理的SPAD值要明显高于CK,并且在蕾薹期表现出显著差异。其中表现最好的PV+BC,与CK相比提升了13.1%。说明PV+BC在生育前期可有效促进叶绿素的生成和积累,在生育后期可延缓叶片的衰老。

表10 不同处理下油菜鲜质量和干质量

Table 10 Fresh and dry weight per plant of rapeseed under different treatments

处理 Treatments	鲜质量/(g/plant) Fresh weight				干质量/(g/plant) Dry weight			
	苗期 Seedling stage	蕾薹期 Bolting stage	花期 Flowering stage	角果期 Pod stage	苗期 Seedling stage	蕾薹期 Bolting stage	花期 Flowering stage	角果期 Pod stage
CK	46.7±7.0b	99.0±7.3b	216.0±8.3b	202.5±21.1c	5.8±0.5a	8.7±0.7a	22.6±0.9b	33.7±3.1b
PV	56.8±4.1a	127.9±8.9a	235.2±9.3ab	322.2±35.1ab	7.4±0.6a	11.0±1.0a	25.9±3.0a	51.7±4.7a
BC	53.3±5.1ab	115.8±6.5ab	238.6±22.0ab	291.6±14.4b	6.4±0.7a	9.4±0.7a	26.6±0.8a	50.5±2.1a
PV+BC	58.1±2.9a	132.7±9.5a	276.2±17.8a	348.8±23.0a	7.6±0.5a	10.4±1.1a	24.8±0.8ab	55.7±5.2a

表11 不同处理下油菜叶面积及SPAD值

Table 11 Leaf area and SPAD value of rapeseed under different treatments

处理 Treatments	叶面积/(cm ² /plant) Leaf area				SPAD		
	苗期 Seedling stage	蕾薹期 Bolting stage	花期 Flowering stage	角果期 Pod stage	苗期 Seedling stage	蕾薹期 Bolting stage	
CK	70.9±4.3b	90.9±5.2b	216.0±6.2b	49.1±2.8a	51.8±3.2b	51.7±2.1a	
PV	90.7±8.6a	111.1±9.5ab	235.2±10.7ab	50.7±1.0a	56.5±1.6a	50.3±2.6a	
BC	77.0±5.4b	102.9±6.3ab	238.6±5.2ab	51.0±0.9a	56.2±0.4a	51.6±3.2a	
PV+BC	94.3±5.8a	123.3±7.9a	276.2±8.8a	51.3±0.9a	58.6±2.0a	50.8±3.1a	

3)产量及产量构成。在收获期测定了油菜不同处理的产量和产量构成因素性状(表12),结果显示,PV、BC、PV+BC处理与CK相比产量分别提升14.4%、13.6%、17.0%,PV+BC处理产量提升效果最为明显。比较产量构成因素测定结果,3个处理下

的分枝数、千粒重和每角粒数没有显著差异,而单株角果数都显著增加,其中PV+BC处理增加最多,达到了66.2%。因此,PV和BC处理都是通过增加单株角果数来提升产量,且二者联合使用效果更为明显。

表12 不同处理下油菜产量及产量构成因素

Table 12 Rapeseed yield and yield components under different treatments

处理 Treatments	一次分枝数 Branch number per plant	主茎角果数 Pods number on the main stem	分枝角果数 Branch pods number per plant	单株角果数 Pods number per plant	千粒重/g Seed weight	每角粒数 Seeds number per pod	单株产量/g Yield per plant	实际产量/ (kg/hm ²) Actual yield
	Branch number per plant	Pods number on the main stem	Branch pods number per plant	Pods number per plant	Seed weight	Seeds number per pod	Yield per plant	Actual yield
CK	6.7±0.4a	74.5±3.2b	81.1±3.5b	168.5±11.2c	3.5±0.1a	12.4±0.4b	7.3±0.2b	1 814.2±34.6c
PV	6.4±0.8a	97.5±7.7a	176.0±17.2a	268.0±11.6ab	3.4±0.2a	13.6±0.8ab	12.4±1.0a	2 075.2±119.6b
BC	6.3±0.6a	78.2±2.8b	164.2±10.0a	242.7±13.1b	3.3±0.1a	14.6±0.9a	11.6±0.6a	2 060.7±119.5b
PV+BC	6.8±0.3a	97.4±7.2a	190.5±21.8a	280.1±19.0a	3.4±0.1a	13.7±0.7ab	13.2±1.7a	2 122.2±94.7a

4)品质性状。不同种子处理方式下油菜品质性状测定结果(表13)显示,与对照相比,木醋液和生物质炭联合使用显著降低了油菜种子的硫苷含量,降幅达12.1%。此外,3个处理均提高了油菜种子的油酸含量,其中提升效果最明显是PV+BC,与CK相

比有显著差异,油酸含量提高了13.8%。不同处理的含油量以及亚油酸的含量与对照相比没有明显差异,但有增加趋势;蛋白质、亚麻酸含量差异也不显著,但有降低趋势。

表13 不同种子处理方式对油菜籽品质的影响

Table 13 Effects of different seed treatments on rapeseed quality

处理 Treatments	含油量/% Oil content	蛋白质含量/% Protein content	硫苷/(μmol/g) Glucosinolate	亚麻酸/% Linolenic acid	亚油酸/% Linoleic acid	油酸/% Oleic acid
CK	44.5±0.9a	19.5±0.5a	30.5±1.2a	6.1±0.8a	16.0±2.0a	59.3±2.0b
PV	45.8±2.0a	18.2±2.0a	29.0±3.0ab	6.5±0.9a	17.7±0.5a	65.6±5.5ab
BC	45.5±1.7a	18.6±1.5a	30.5±1.6a	6.5±0.7a	17.5±0.8a	64.6±5.4ab
PV+BC	45.3±0.4a	18.8±0.4a	26.8±1.1b	6.0±0.1b	17.3±0.7a	67.5±2.0a

3 讨 论

3.1 木醋液和生物炭对油菜产量和品质的提升作用

合适的种子处理方法可以促进作物生长、提高产量和改善品质。种子引发也可以称为渗透调节物处理,其原理是控制种子的吸水作用至一定水平,即允许种子处在准备发芽的代谢作用下,引发处理可加速种子萌发、整齐出苗、并最终增加产量^[26]。本试验中采用稀释1000倍的木醋液进行种子引发,对大田油菜出苗率及各农艺性状都有不同程度提高,最终产量提升14.4%。种子丸粒化是使用易吸水的惰性物质作为填充物,将有效成分在粘合剂的作用下与填充物均匀包裹在种子表面,达到调整种子形状、扩大体积,促进种子萌发及植株生长,提高种子抗逆性的作用^[14]。本研究采用30%生物质炭含量的丸粒化处理可有效促进油菜生长,对各农艺性状均有良好的提升作用,产量最终提升13.6%。木醋液稀释1000倍的种子引发和生物炭含量30%的种子丸粒化联合应用有着比单独使用更好的促进效果,大田油菜成苗率明显提高,个体发育旺盛,产量最终提升17%。油菜籽品质也有较明显的改善,硫苷含量降低12.1%,油酸含量提高13.8%,含油量与亚麻酸含量均有提高趋势。生物炭丸粒化与种子引发技术的结合有效改善了单独丸粒化对种子萌发的物理阻碍,2种种子处理技术结合使用优势互补、共同促进油菜生长发育。

3.2 木醋液引发对油菜萌发与生长的促进作用

种子引发处理后具有萌发速度快、出苗整齐和

成活率高等特点^[3]。本研究采用木醋液作为引发物对油菜种子进行处理,结果表明在适宜质量浓度下木醋液浸种显著促进了出苗并增强了幼苗素质,尤其对根长与地下部干质量的促进作用更强。这是因为木醋液中含有较高的酸类和酚类物质,这2种物质都具有高生物活性并能够促进植物生长^[27]。此外,研究表明木醋液中的一些醇类物质对植物发芽和生长也具有促进作用^[28]。同时,木醋液中丁烯内酯、呋喃及其衍生物等物质也表现出联合作用^[13]。本研究中木醋液稀释800~1 200倍进行种子引发对油菜种子萌发和幼苗生长具有良好的促进作用,其中以稀释1 000倍引发的作用最好。这些物质在适宜质量浓度木醋液作用下达到一种平衡,从各方面促进油菜的萌发生长,表现出综合促进作用。

3.3 生物炭丸粒化对种子萌发的促进与抑制作用

生物炭是木屑、秸秆、果壳等生物质在无氧或缺氧条件下经高温裂解产生的碱性固体产物,含有40%~60%的炭以及多种植物营养物质,包括40%~70%的碳,以及氮、磷、钾、钙、钠、镁、硅等,并具有较大的孔隙度与比表面积。种子丸粒化可利用其强吸附力、抗氧化力和抗生物分解能力,增强种子对水分和养分的吸收与利用,促进萌发及幼苗生长发育。同时,正因为其孔隙率高、有机碳和营养物质浓度高,可刺激植株根系周围有益微生物的增殖,从而为幼苗的建立创造有利的环境^[29]。

本研究结果表明,20%~30%的生物炭含量对油菜萌发具有积极影响,并且BC30为最适比例。但从发芽盒试验来看,即使在最适生物炭条件下,对油菜种子的出苗率及出苗时间也可能表现出一定的抑

制趋势,可能因实际萌发时水分、温度、土壤条件差异而有不同。BC50、BC60处理对种子出苗产生了明显的抑制作用,出苗率下降、出苗时间长。产生抑制作用的原因首先可能是生物炭呈强碱性($\text{pH}>9$),包裹种子后对油菜种子萌发产生不利影响,生物炭用量超过40%对出苗的阻碍作用更强^[30-31],因为油菜是一种适合在中性或弱酸性土壤中生长的作物。此外,生物质炭生产原料中的一些有害物质(如重金属等)在制备过程中没有被清除,在生物质炭使用比例较高的情况下,这些有害物质对于作物的影响也被放大,会明显抑制油菜种子的萌发出苗。同时,丸粒化形成的外壳对种子萌发可能会造成一定的物理阻碍,影响种子的萌发出苗^[31-32],尤其是种子置于发芽盒内的滤纸上萌发时出现抑制作用的几率会增加。因此利用生物炭进行种子丸粒化应充分注意适宜比例及其相关问题,以避免其带来的不利影响。

3.4 木醋液引发与生物炭丸粒化对种子萌发及出苗的影响差异

室内试验和大田试验结果均显示,木醋液引发与生物炭丸粒化2种种子处理方式均具有促进油菜萌发与生长的作用,但两者作用表现不同,适宜质量浓度木醋液引发提高油菜种子的出苗率、加快萌发的作用更显著;而适宜比例生物炭丸粒化增强油菜幼苗素质与生物量的作用更强。

2种种子处理方式对油菜幼苗素质的促进作用在不同生育时期也不同。生物炭丸粒化对油菜幼苗素质的促进要优于木醋液引发,这主要是因为生物质炭丸粒化能够提高种子周围的水分利用率并通过生物质炭丰富的营养元素以及发达的多孔结构促进养分供给,并可为幼苗创造有利的微环境。但在植株进入蕾薹期以后,生物炭丸粒化提供养分的作用逐渐减弱直至消失。木醋液处理种子对植株生长潜在能力的激发作用则一直持续。木醋液引发处理的植株生物量在苗期低于生物炭丸粒化处理、在花期至成熟期高于生物炭。

本研究表明木醋液稀释1 000倍的种子引发和生物炭含量30%的种子丸粒化是促进油菜萌发出苗和幼苗生长的最佳处理。PV处理能提高出苗率和活力指数,缩短平均出苗时间。BC30处理在增强油菜幼苗素质方面的效果要强于PV。此外,PV和BC的联合应用产生了互作效应,对株高、根颈粗、叶面积、生物量积累和角果数产生了显著影响,最终导致

油菜籽产量提高且品质得到改善。进一步研究种子处理技术在油菜上的应用,特别是在田间的应用,可以为实现直播油菜齐苗壮苗以及油菜节本增效栽培提供实践指导。

参考文献 References

- [1] KUAI J, YANG Y, SUN Y Y, et al. Paclobutrazol increases canola seed yield by enhancing lodging and pod shatter resistance in *Brassica napus* L. [J]. Field crops research, 2015, 180: 10-20.
- [2] ZHU K M, GU S C, LIU J H, et al. Wood vinegar as a complex growth regulator promotes the growth, yield, and quality of rapeseed [J/OL]. Agronomy, 2021, 11(3): 510 [2024-08-15]. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030510>.
- [3] 刘阳,袁会珠,闫晓静,等.种子引发与引发种子药剂处理研究进展[J].种子,2024,43(1):76-83.LIU Y, YUAN H Z, YAN X J, et al. Advances in seed priming and the primed seeds' treatment with pesticides [J]. Seeds, 2024, 43(1): 76-83 (in Chinese with English abstract).
- [4] BIJANZADEH E, NOSRATI K, EGAN T. Influence of seed priming techniques on germination and emergence of rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. Seed science and technology, 2010, 38 (1):242-247.
- [5] KAMRAN M, KHAN A L, ALI L, et al. Hydroquinone; a novel bioactive compound from plant-derived smoke can cue seed germination of lettuce [J/OL]. Frontiers in chemistry, 2017, 5: 30 [2024-08-15]. <https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00030>.
- [6] SHARMA V, PRASANNA R, HOSSAIN F, et al. Priming maize seeds with cyanobacteria enhances seed vigour and plant growth in elite maize inbreds [J/OL]. 3 biotech, 2020, 10(4): 154 [2024-08-15]. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-2141-6>.
- [7] 马晔,杨进文,李宁,等.双氧水与PEG协同引发对小麦种子活力的影响[J].农学学报,2022,12(4):6-12.MA Y, YANG J W, LIN N, et al. Synergistic initiation effect of hydrogen peroxide and PEG on wheat seed vigor [J]. Journal of agriculture, 2022, 12(4):6-12 (in Chinese with English abstract).
- [8] GHASSEMI-GOLEZANI K, JABBARPOUR S, ZEHTAB-SALMASI S, et al. Response of winter rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars to salt priming of seeds [J]. African journal of agricultural research, 2010, 5(10):1089-1094.
- [9] GREWAL A, ABBEY L, GUNUPURU L R. Production, prospects and potential application of pyroligneous acid in agriculture [J]. Journal of analytical and applied pyrolysis, 2018, 135:152-159.
- [10] FLEMATTI G R, GHISALBERTI E L, DIXON K W, et al. A compound from smoke that promotes seed germination [J]. Science, 2004, 305(5686):977.

- [11] WANG Y Y, QIU L, SONG Q L, et al. Root proteomics reveals the effects of wood vinegar on wheat growth and subsequent tolerance to drought stress [J/OL]. International journal of molecular sciences, 2019, 20 (4) : 943 [2024-08-15]. <https://doi.org/10.3390/ijms20040943>.
- [12] ZHU K M, LIU J H, LUO T, et al. Wood vinegar impact on the growth and low-temperature tolerance of rapeseed seedlings [J/OL]. Agronomy, 2022, 12 (10) : 2453 [2024-08-15]. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102453>.
- [13] LUO X X, WANG Z Y, MEKI K, et al. Effect of co-application of wood vinegar and biochar on seed germination and seedling growth [J]. Journal of soils and sediments, 2019, 19 (12) : 3934-3944.
- [14] 常瑛,魏廷邦,臧广鹏,等.种子丸粒化技术在小粒种子中的研究与应用 [J].中国种业,2020(11):18-21.CHANG Y, WEI T B, ZANG G P, et al. Research and application of seed pelleting technology in small seed [J]. China seed industry, 2020(11):18-21 (in Chinese with English abstract).
- [15] HOSEINI A, SALEHI A, SAYYED R Z, et al. Efficacy of biological agents and fillers seed coating in improving drought stress in anise [J/OL]. Frontiers in plant science, 2022, 13: 955512 [2024-08-15]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.955512>.
- [16] ZHAO X Q, CHEN Y, LI H S, et al. Influence of seed coating with copper, iron and zinc nanoparticles on growth and yield of tomato [J]. IET nanobiotechnology, 2021, 15(8):674-679.
- [17] KHAN Z, NAUMAN KHAN M, LUO T, et al. Compensation of high nitrogen toxicity and nitrogen deficiency with biochar amendment through enhancement of soil fertility and nitrogen use efficiency promoted rice growth and yield [J]. GCB bioenergy, 2021, 13(11):1765-1784.
- [18] CAO X D, HARRIS W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation [J]. Bioresource technology, 2010, 101(14):5222-5228.
- [19] BASHIR A, RIZWAN M, ZIA UR REHMAN M, et al. Application of co-composted farm manure and biochar increased the wheat growth and decreased cadmium accumulation in plants under different water regimes [J/OL]. Chemosphere, 2020, 246: 125809 [2024-08-15]. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125809>.
- [20] WANG J Y, ZHANG M, XIONG Z Q, et al. Effects of biochar addition on N_2O and CO_2 emissions from two paddy soils [J]. Biology and fertility of soils, 2011, 47(8):887-896.
- [21] HUSSAIN S, KHAN F, HUSSAIN H A, et al. Physiological and biochemical mechanisms of seed priming-induced chilling tolerance in rice cultivars [J/OL]. Frontiers in plant science, 2016, 7: 116 [2024-08-15]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00116>.
- [22] ZHANG K K, ZAID K, LIU J H, et al. Germination and growth performance of water-saving and drought-resistant rice enhanced by seed treatment with wood vinegar and biochar under dry direct-seeded system [J/OL]. Agronomy, 2022, 12, 1223 [2024-08-15]. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051223>.
- [23] ELLIS R H, ROBERTS E H. The quantification of aging and survival in orthodox seeds [J]. Seed science and technology, 1981, 9(2): 373-409.
- [24] ABDUL-BAKI A A, ANDERSON J D. Vigor determination in soybean seed by multiple Criteria¹ [J]. Crop science, 1973, 13 (6):630-633.
- [25] WICKHAM H, NAVARRO D, PEDERSEN T L. ggplot2: elegant graphics for data analysis [M]. [S. l.] : Springer, 2011: 245.
- [26] RUAN S, XUE Q. Plant seed priming [J]. Plant physiology communications, 2002, 38(2): 198-202.
- [27] WEI Q, MA X H, ZHAO Z, et al. Antioxidant activities and chemical profiles of pyrolygneous acids from walnut shell [J]. Journal of analytical and applied pyrolysis, 2010, 88 (2) : 149-154.
- [28] KIM J M, TO T K, MATSUI A, et al. Acetate-mediated novel survival strategy against drought in plants [J/OL]. Nature plants, 2017, 3:17097 [2024-08-15]. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.97>.
- [29] MUNGKUNKAMCHAO T, KESMALA T, PIMRATCH S, et al. Wood vinegar and fermented bioextracts: natural products to enhance growth and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. Scientia horticulturae, 2013, 154:66-72.
- [30] 刘金灵,张亚茹,王宇光,等.生物炭对土壤微生物影响的研究进展 [J].中国农学通报,2023,39(26):60-66.LIU J L, ZHANG Y R, WANG Y G, et al. Research progress on the effects of biochar on soil microorganisms [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2023, 39(26):60-66 (in Chinese with English abstract).
- [31] AFZAL I, JAVED T, AMIRKHANI M, et al. Modern seed technology: seed coating delivery systems for enhancing seed and crop performance [J/OL]. Agriculture, 2020, 10(11) : 526 [2024-08-15]. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110526>.
- [32] SOLAIMAN Z M, MURPHY D V, ABBOTT L K. Biochars influence seed germination and early growth of seedlings [J]. Plant and soil, 2012, 353(1):273-287.

Effects of treating seeds compositely with wood vinegar and biochar on germination, growth, yield and quality of rapeseed

QU Zhaojie¹, ZHU Kunmiao², HU Lüliang³, ZHOU Yu¹, YUAN Baozhong¹, HU Liyong¹

1. Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in the Middle Reaches of the Yangtze River/College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Province Key Laboratory of Nutritional Quality and Safety of Agro-Products/Institute of Quality Standard and Testing Technology for Agro-Products, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China;

3. Hubei Province Extension Station of Agricultural Technology, Wuhan 430072, China

Abstract Seeds of Huayouza 50 rapeseed were used to conduct laboratory screening and field experiments to evaluate the effects of wood vinegar priming (PV) and rice straw biochar (BC) coating on the germination and seedling, the growth of seedling, the yield and quality of rapeseed to improve the rate of seedling and vigor seedling in rapeseed with direct-seeding. 7 treatments of wood vinegar priming including 0 (pure distilled water, HP), 1:200 (PV200), 1:00 (PV400), 1:600 (PV600), 1:800 (PV800), 1:1 000 (PV1000), and 1:1 200 (PV1200) and 5 treatments of rice straw biochar (BC) including 20% (BC20), 30% (BC30), 40% (BC40), 50% (BC50) and 60% (BC60, *m/m*) were set up. The results showed that the optimal ratio for promoting the germination and the growth of seedling was triggered by diluting the wood vinegar solution 1 000 times (PV1000) and using a seed coating agent with BC30 for granulation. The treatment of PV1000 and PV1000+BC30 significantly increased the rate of seedling in rapeseed by 20.2% and 22.1%, respectively. The biomass of PV, BC, and PV+BC treatment increased by 13.7%, 21.6%, and 35.3% respectively compared to that of the control. PV, BC, and PV+BC treatment increased yield of rapeseed by 14.4%, 13.6%, and 17.0%, respectively. PV+BC treatment significantly increased the content of oleic acid and reduced the content of glucosinolate. It is indicated that PV and PV+BC are effective methods for treating seeds of rapeseed.

Keywords wood vinegar; biochar; seed treatment; rapeseed; germination of seed; growth; yield

(责任编辑:张志钰)