

水稻植质钵育秧盘蒸汽干燥工艺优化

于海明¹, 汪春^{1*}, 韩智学², 孙勇³, 张伟¹, 胡军¹, 刘天祥¹

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 牡丹江医学院人事处, 牡丹江 157011;
3. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 水稻植质钵育秧盘的湿强度是保证秧盘成型及机械化插秧要求的关键因素。为了确保秧盘的湿强度能够满足秧盘成型及机械化插秧的要求, 该文以水稻植质钵育秧盘为研究对象, 利用蒸汽干燥技术, 以蒸汽干燥后的秧盘湿强度为试验指标, 通过单因素试验, 分析研究了自然环境预处理时间、干燥时间、干燥温度和后干燥时间对秧盘湿强度的影响, 确定了影响秧盘湿强度的主要因素和取值范围。在单因素试验的基础上, 利用二次正交旋转组合试验建立了秧盘蒸汽干燥数学模型, 并利用双因素分析法分析了各因素与评价指标之间的关系, 确定各因素在数学模型中的主次顺序。试验表明: 植质钵育秧盘干燥的最佳工艺条件是秧盘预处理时间为 10 h, 干燥时间为 21 h, 干燥温度为 130℃, 在此条件下秧盘湿强度预测值为 0.4 MPa, 验证试验得到实际湿强度值为 0.395 MPa, 与理论预测值相比, 相对误差为 1.25%。该研究结果为水稻植质钵育秧盘工业化生产提供一定的理论指导。

关键词: 干燥, 优化, 蒸汽, 水稻植质钵育秧盘, 工艺, 参数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.21.006

中图分类号: S226.6; S223.1³

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-21-0040-10

于海明, 汪春, 韩智学, 等. 水稻植质钵育秧盘蒸汽干燥工艺优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 40-49.
Yu Haiming, Wang Chun, Han Zhixue, et al. Optimization of steam drying conditions for seedling-growing tray made of paddy-straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 40-49. (in Chinese with English abstract)

0 引言

水稻植质钵育秧盘是由稻草粉、生物胶和微肥营养介质土等经混合搅拌、压制成型和干燥定型等工艺过程制备完成^[1-3], 其中干燥定型是秧盘生产的重要环节之一, 采取何种干燥方法和干燥工艺是确保秧盘干燥品质的关键因素^[4]。

秧盘的干燥品质包括翘曲、裂纹、秧盘的湿强度和秧盘的耐腐蚀性。秧盘的翘曲和裂纹不仅影响秧盘的成盘率和机械化种植的农艺要求, 还增加秧盘生产成本; 秧盘的耐腐蚀性决定秧盘育秧质量和秧盘的储存期; 秧盘的湿强度大小, 决定秧盘浸泡成型及机械化插秧^[5-7]的农艺要求。秧盘的干燥方法包括自然环境通风干燥、热风干燥和蒸汽干燥等 3

种干燥方式^[7]。试验研究发现^[7], 在育秧过程中, 自然环境通风干燥的秧盘外边生长出类似细菌的白色衍生物, 内部出现腐朽菌, 使加入的稻草腐烂变质, 水稻秧苗在生长过程中出现发黄、植株矮小等病态特征, 利用机器插秧时, 发现秧盘力学强度不够, 经常折断, 造成插秧不规整和漏插等现象, 严重影响了插秧质量及效率; 利用热风干燥的秧盘^[7], 虽然消除了上述缺陷, 但干燥的效果不理想, 部分秧盘出现开裂、翘曲和变形等缺陷, 少部分秧盘出现烘干不均匀等现象, 严重影响了秧盘的生产质量及机械化插秧的要求; 利用蒸汽干燥的秧盘, 基本上克服了翘曲、裂纹、干燥不均等现象, 但不同的干燥工艺对秧盘的湿强度及耐腐蚀性影响比较大。由于蒸汽干燥具有节能效果显著、传热系数大、热效率高、干后产品品质好、无爆炸和失火等危险、有利于保护环境等特点^[8-11], 在综合考虑 3 种干燥方法对秧盘干燥品质影响及蒸汽干燥优点的基础上, 确定蒸汽干燥方式为水稻植质钵育秧盘干燥的主要方式。

近年来, 许多研究者已经对各种物料如食品^[12-19]、木材^[20]、纸张^[21]、污泥^[22]和生物材料^[23]等的蒸汽干燥进行了应用研究并取得了较大的进展。无论是热风干燥、蒸汽干燥、真空冷冻干燥还是微波干燥等干燥形式, 利用干燥过程的数学模型^[24-27]已成为研究干燥各种物料这一复杂传热、传质过程的重要手段^[8,23,28-30],

收稿日期: 2013-04-30 修订日期: 2013-09-27

基金项目: 国家农业科技成果转化(2009GB2B200101); 黑龙江省科技攻关项目(GZ11B503); 黑龙江农垦总局科技攻关项目(HNK10A-09-05); 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12531459); 黑龙江省普通高等学校八一农垦大学农业机械化工程重点实验室开放课题资助项目(Hljbyndgc2013007)

作者简介: 于海明(1973-), 男, 黑龙江绥化人, 副教授, 博士, 主要从事现代设计理论及方法和新能源研究。大庆 黑龙江八一农垦大学工程学院, 163319。Email: yhm1973@163.com

*通信作者: 汪春(1963-), 男, 黑龙江省延寿县人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事寒地水稻全程机械化栽培技术研究。大庆 黑龙江八一农垦大学工程学院, 163319。Email: wangchun1963@126.com

通过对被干燥对象的干燥特性及其数学模型的研究可为预测和控制干燥过程、优化干燥工艺及设计干燥设备提供理论依据^[31]。目前，对水稻植质钵育秧盘蒸汽干燥数学模型和影响因素研究尚属空白，本文主要采用蒸汽干燥技术对水稻植质钵育秧盘进行干燥试验，以决定秧盘浸泡成型及机械化插秧要求的湿强度为评价指标，研究不同干燥因素对植质钵育秧盘湿强度的影响规律，初步探索蒸汽干燥工艺对秧盘湿强度的影响及影响参数的优化，以期预测和控制水稻秧盘的干燥质量和指导水稻秧盘生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 材料

水稻植质钵育秧盘：水稻植质钵育秧盘为建三江秧盘生产基地生产，秧盘的尺寸为 495 mm × 277 mm × 23 mm，湿基含水率为 22.27%，秧盘的质量为 2.2 kg，干燥前秧盘见图 1。



图 1 干燥前秧盘图

Fig.1 Trays photo before drying

1.1.2 试验设备

秧盘压力机（山东秧盘压力机厂生产）；WDW-1 微机控制电子万能试验机（济南时代新光仪器有限公司）。

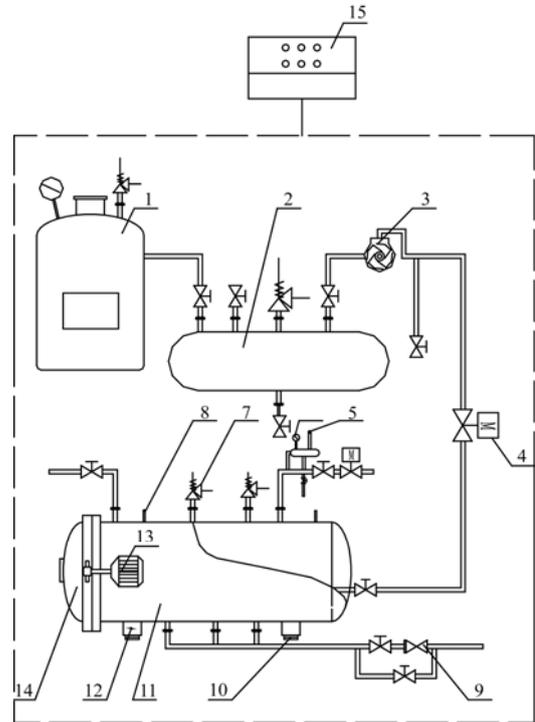
蒸汽干燥装置：安达奇放锅炉厂生产，主要由干燥介质供给装置、蒸汽干燥器和控制系统组成。干燥介质供给装置选用额定蒸发量 0.5 t/h 的蒸汽锅炉提供高温高压的蒸汽，蒸汽锅炉加热能源为秸秆气化气、秸秆燃料棒、煤或者沼气；蒸汽干燥器的尺寸为 Φ2 400 × 5 500 mm，最高承受 0.7 MPa 的工作压力，最高蒸汽温度 140℃。干燥装置的系统图和干燥器实物见图 2。

1.2 试验方法

1.2.1 自然环境预处理过程

秧盘压制出来之后，由于含有大量的水分，秧盘比较软，必须使秧盘在自然环境条件下凉置一定时间，使其强度增加，同时也为后边的干燥过程做准备。

本试验所有秧盘的预处理环境要求为无风和无辐射、环境相对湿度为 40%左右、环境温度为 10℃。预处理的地点为建三江秧盘生产基地秧盘生产储存间。



a. 干燥装置系统图
a. Steam drying system diagram



b. 干燥装置实物
b. Drying device object

- 1. 蒸汽锅炉 2. 蒸汽分配器 3. 蒸汽计量表 4. 电磁阀 5. 压力传感器 6. 压力表 7. 安全阀 8. 温度传感器 9. 自动输液阀 10. 称重传感器 11. 干燥器主体 12. 支撑座 13. 开关门电机 14. 封头门 15. 控制系统
- 1. Steam boiler 2. Steam distributor 3. Steam meter 4. Solenoid valve 5. Pressure sensor 6. Gauge 7. Safety valve 8. Temperature sensor 9. Automatic infusion valve 10. Weighing sensor 11. Drier body 12. Supporting seat 13. Switch door motor 14. Closed doors 15. Control system

图 2 水稻植质钵育秧盘蒸汽干燥装置系统图及实物

Fig.2 Material object and steam drying system diagram of seedling-growing tray made of paddy-straw

1.2.2 蒸汽干燥过程

试验用秧盘为 300 盘，将 300 盘秧盘经自然环境预处理后，放到 5 个干燥柜内，每个干燥柜每层

放 10 块秧盘, 总共 6 层, 层和层之间的距离为 5 mm。将 5 个干燥柜放到 5 辆秧盘干燥车上, 并将秧盘干燥车编号, 从离干燥器门最近的秧盘干燥车开始, 依次编号为 1、2、3、4 和 5。试验用的干燥介质为饱和蒸汽。由于本研究主要是为实际生产提供理论基础, 为了缩短秧盘在蒸汽干燥时达到安全水分的时间(湿基小于 9%), 在保证蒸汽干燥质量的前提下, 根据蒸汽锅炉的额定蒸发量(0.5 t/h), 干燥时的蒸汽流量都是 0.139 kg/s。干燥器内的秧盘的质量变化通过质量传感器测得。干燥时, 每隔 1 h 记录一次秧盘的质量, 记录时扣除排蒸汽和升温的时间, 测量的精度 $\leq \pm 0.05\%F.S.$, 直至含水率小于 9% (湿基) 为止。

1.2.3 干燥后处理过程

干燥完成后, 关掉进气阀门, 缓慢排掉干燥器内的蒸汽, 秧盘在干燥装置内继续放置一定时间后取出。

1.3 试验内容与设计

1.3.1 试验评价指标的确定

中国北方水稻育秧天数为 30~35 d, 育秧期间, 需要经常性的浇灌, 以保证水稻秧苗的正常生长。在水稻育秧浇灌过程中, 水稻秧盘始终处在潮湿的状态, 育秧结束后, 水稻秧盘必须具有一定的湿强度, 才能保证从育秧棚运到插秧机上时, 秧盘不折断、不破碎, 保证秧盘成型; 在插秧时, 秧盘在插秧机上运动, 也需要一定的湿强度, 才能保证秧盘成型和插秧率。同时, 湿强度也是反映秧盘干燥质量的主要内容之一, 所以试验采用秧盘的湿强度作为评价指标。

1.3.2 试验因素的确定

秧盘干燥分为 3 个阶段: 1) 秧盘的自然环境预处理阶段, 即秧盘由压力机压出来后, 在自然环境中放置一段时间; 2) 秧盘在干燥器装置内连续通入蒸汽干燥阶段; 3) 停止供气后的处理阶段。在自然环境预处理阶段, 主要考虑在自然环境中的放置时间(预处理时间)对秧盘湿强度的影响; 在通蒸汽干燥阶段, 主要考虑蒸汽干燥时间和蒸汽干燥温度对湿强度的影响; 停止供蒸汽后, 主要考虑秧盘在干燥器内干燥时间(后干燥时间)对干燥湿强度的影响。因此, 确定预处理时间 Z_1 、蒸汽干燥时间 Z_2 、蒸汽干燥温度 Z_3 和停止供汽后秧盘在干燥器内干燥时间(后干燥时间) Z_4 为影响秧盘湿强度的主要因素。

1.3.3 秧盘蒸汽干燥单因素试验

1) 预处理时间 Z_1 的确定

以水稻植质钵育秧盘为研究对象, 在蒸汽温度 110℃, 蒸汽干燥时间 22 h, 后干燥时间 0 的条件下, 研究在没有风和辐射、环境相对湿度为 40%左右、环境温度 10℃情况下, 不同的预处理时间(3、6、9、

12、15 和 18 h) 对水稻植质钵育秧盘湿强度的影响, 以每种干燥条件下测定的湿强度值做为试验指标。

2) 蒸汽干燥时间 Z_2 的确定

其他干燥条件不变, 预处理时间为上文确定的最佳预处理时间, 研究蒸汽干燥时间(16、19、22、25、28 和 32 h)对水稻植质钵育秧盘湿强度的影响, 以每种干燥条件下测定的湿强度值做为试验指标。

3) 蒸汽干燥温度 Z_3 的确定

其他干燥条件不变, 预处理时间为上文确定的最佳预处理时间, 蒸汽干燥时间为前文确定的最佳蒸汽干燥时间, 研究干燥温度(100、105、110、115、120 和 125℃)对水稻植质钵育秧盘湿强度的影响, 以每种干燥条件下测定的湿强度值做为试验指标。

4) 后干燥时间 Z_4 的确定

干燥条件均为上述单因素试验选出的最佳水平, 研究后干燥时间(0、1、2、3、4 和 5 h)对水稻植质钵育秧盘湿强度的影响, 以每种干燥条件下测定的湿强度值做为试验指标。

1.3.4 二次正交旋转组合试验

根据二次正交旋转组合试验设计原理, 在单因素试验的基础上, 根据上文确定的后干燥时间, 选取自然环境预处理时间 Z_1 、蒸汽干燥时间 Z_2 、蒸汽干燥温度 Z_3 为主要设计自变量, 秧盘的湿强度值为因变量, 对秧盘蒸汽干燥工艺条件进行优化。利用 DPS 试验数据处理系统得试验因素水平编码设计见表 1。根据表 1 的试验水平编码设计, 进行 3 因素二次正交旋转组合试验。

表 1 试验因素水平编码
Table 1 Coding of the experimental factor level

编码值 Coding value	自然环境 预处理时间 Z_1 Natural environment Pretreatment time/h	蒸汽干燥 时间 Z_2 Steam drying time/h	蒸汽干燥 温度 Z_3 Steam drying temperature /℃
+1.6818	17	31	130
+1	15	28	125
0	12	23.5	117.5
-1	9	19	110
-1.6818	7	16	105

1.4 秧盘湿强度的测试方法

通过对播种后育秧 30~35 d 秧盘湿强度与在清水中浸泡 20~35 d 秧盘的湿强度对比发现, 同一批次干燥秧盘的湿强度在上述 2 种条件下的湿强度基本一致, 因此为了节省试验时间, 每次做试验时, 都是以将秧盘放到清水中浸泡 20 d 作为秧盘湿强度测量标准。测量湿强度时, 将浸泡 20 d 的秧盘(每块秧盘的尺寸为 495 mm×277 mm×23 mm)分成 5 等份, 分别放到 WDW-1 微机控制电子万能试验机

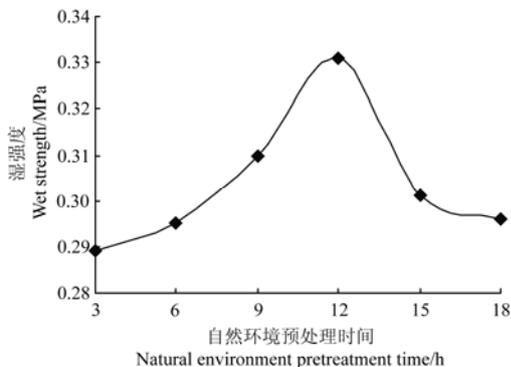
上测试其剪切强度值，然后取其平均值，作为湿强度值。试验连续做 3 次，最后取平均值。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果与分析

2.1.1 预处理时间 Z_1 对湿强度的影响

不同预处理时间对秧盘湿强度值的影响见图 3。



注：蒸汽干燥温度为 110℃，蒸汽干燥时间为 22h，后干燥时间为 0。
Note: steam drying temperature was 110℃, steam drying time was 22h, drying time in dryer after stopping steam supplying of tray was 0.

图 3 自然环境预处理时间对湿强度的影响

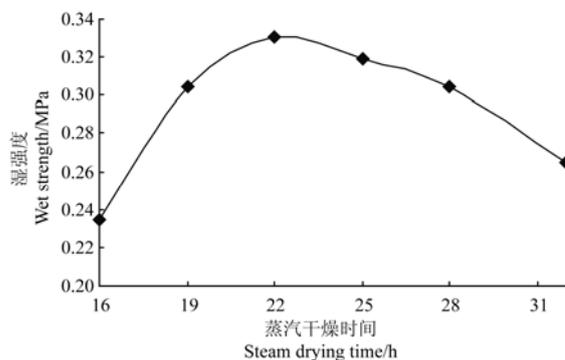
Fig.3 Effect of natural environment pretreatment time on wet strength

预试验结果表明：秧盘湿强度为 0.3~0.4 MPa 时，能够满足机械化插秧要求；湿强度若小于 0.3 MPa，秧盘易折断和易碎；插秧时，靠秧针将秧盘打落到秧田里进行插秧，湿强度若大于 0.4 MPa，将使秧针变弯和加速插秧机秧针的磨损而不能使用；蒸汽干燥前，合适的秧盘含水率将使秧盘的湿强度达到理想值。从图 3 中可以看出，随着预处理时间的增加，秧盘湿强度先增加，然后再有减小的趋势。预处理时间在 12 h 时，湿强度达到最大值 (0.331 MPa)，说明此时秧盘内的含水率适合于生物胶把稻草和微肥营养介质土充分粘合在一起所要求的水份含量。干燥时，生物胶、稻草和微肥营养介质土能够很好的粘合在一起，同时在高压蒸汽的作用下，生物胶和微肥营养介质土进一步发生一定的物理化学反应，生物胶、稻草和微肥营养介质土更加充分粘合在一起，使其湿强度达到最好的状态^[7]，能够很好地满足秧盘成型及机械化插秧的要求。当预处理时间小于 9 h 或大于 15 h 时，秧盘的湿强度值小于 0.3 MPa，其原因是秧盘的预处理时间过长，秧盘的水分损失过大，生物胶的黏性过小，干燥时，生物胶、稻草和微肥营养介质土不能够很好的粘合在一起，造成秧盘的湿强度减小；秧盘的预处理时间过短，秧盘的水分含量大，影响生物胶和微肥营养介质土进一步发生一定的物理

化学反应，使生物胶、稻草和微肥营养介质土不能够充分粘合在一起，造成秧盘湿强度变小，无法满足秧盘成型及机械化插秧的要求。采用方差分析法对秧盘的湿强度值进行显著性分析，分析结果为 $P < 0.01$ ，所以不同预处理时间下的湿强度值显著，选择预处理时间 12 h 为此单因素试验的最佳水平，确定 9~15 h 为二次正交旋转组合试验因素的取值范围。

2.1.2 蒸汽干燥时间 Z_2 对湿强度的影响

不同蒸汽干燥时间对秧盘湿强度值的影响见图 4。



注：蒸汽干燥温度为 110℃，自然环境预处理时间为 12h，后干燥时间为 0。
Note: steam drying temperature was 110℃, natural environment pretreatment time was 12h, drying time in dryer after stopping steam supplying of tray was 0.

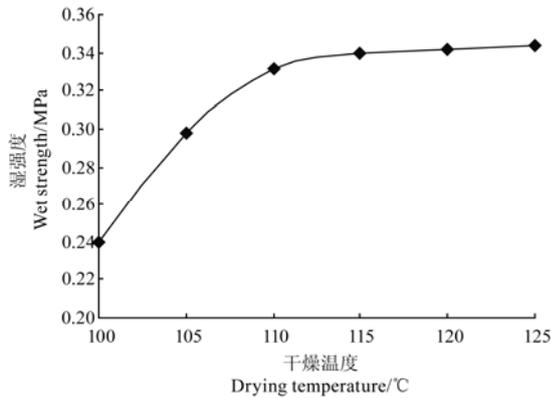
图 4 蒸汽干燥时间对湿强度的影响

Fig.4 Effect of steam drying time on wet strength

由图 4 可以看出，随着干燥时间的增加，秧盘的湿强度逐渐增加，当干燥时间为 22 h 时，秧盘的湿强度达到最大值 0.331 MPa，当干燥时间超过 22 h 时，秧盘的湿强度值又开始逐渐下降。试验表明，若干燥时间小于 22 h，秧盘干燥后的含水率过大，使生物胶的黏性变小，不能将稻草和微肥营养介质土很好的粘合在一起，湿强度变小；若干燥时间大于 22 h，生物胶性能超过所能承受使用条件，使生物胶的性能变差，生物胶黏性减弱、不能将稻草和微肥营养介质土很好的粘合在一起，使秧盘的湿强度减小。同时在长时间的高温下，稻草本身的性能也发生改变，强度变小，这也是造成秧盘湿强度减小的原因。采用方差分析法对秧盘的湿强度值进行显著性分析，分析结果表明蒸汽干燥时间对秧盘的湿强度值有极显著影响 ($P < 0.01$)。此单因素试验中，最佳水平是蒸汽干燥时间为 22 h，确定 19~28 h 为二次正交旋转组合试验因素取值范围。

2.1.3 蒸汽干燥温度 Z_3 对湿强度的影响

不同蒸汽干燥温度对秧盘湿强度值的影响见图 5。



注：自然环境预处理时间为 12 h，蒸汽干燥时间为 22 h，后干燥时间为 0。
Note: natural environment pretreatment time was 12h, steam drying time was 22h, drying time in dryer after stopping steam supplying of tray was 0.

图 5 蒸汽干燥温度对湿强度的影响

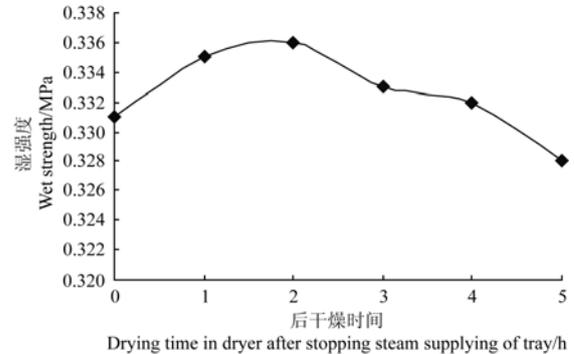
Fig.5 Effect of steam drying temperature on wet strength

从图 5 中可以看出，秧盘的湿强度值呈正相的变化，当达温度到 115℃后，湿强度的变化率减小直至不变。在 110~125℃之间的秧盘的湿强度值较大，最佳干燥温度为 125℃，湿强度值为 0.344 MPa。干燥温度过低（如 100℃），湿强度很低（如 0.24 MPa），在这种状态下的秧盘，无法满足机械化插秧的要求。湿强度低的原因主要是由于干燥温度低，生物胶的性能没有很好的发挥，生物胶的黏性受到影响，使稻草和微肥营养介质土不能很好的粘合在一起，温度条件也达不到某些物理化学反应的要求，从而使秧盘的湿强度减小^[7]。在水中浸泡 15 d 左右的时，秧盘上出现白色的细菌衍生物，说明秧盘的材料中的细菌没有被杀死，从而使秧盘中的稻草发生腐烂，这也是造成秧盘湿强度低的主要原因之一。用这样的秧盘育秧时，将使稻苗矮小、发黄，呈现病态，从而降低水稻的产量^[7]。对试验结果进行单因素方差分析，结果表明发酵温度对秧盘的湿强度有显著影响。此单因素试验中，干燥温度的最佳水平为 125℃，确定 110~125℃为二次正交旋转组合试验因素的取值范围。

2.1.4 后干燥时间 t_2 对湿强度的影响

不同后干燥时间对秧盘湿强度值的影响见图 6。从图 6 中可以看出，随着后干燥时间的增加，秧盘的湿强度值先增加后减小。在 0~5 h 之间的湿强度值变化不大，说明后干燥时间对秧盘的湿强度值影响不大。为进一步检验后干燥时间对秧盘湿强度的影响是否显著，对试验结果进行单因素方差分析，结果表明后干燥时间对秧盘的湿强度影响不显著 ($P>0.05$)。因此在二次正交旋转组合试验中，不将后干燥时间列为试验因素。但是由于是利用饱和蒸汽干燥秧盘，在停止供汽后，秧盘的表面会附着一些水珠，秧盘在干燥器内后干燥一定的时间，

利用干燥器的余温，将秧盘表面的水珠蒸发掉，使秧盘的水分含量进一步降低，从而适合秧盘的储存，增加秧盘的保质期^[7]。从图 6 中可以看出，后干燥 2 h，秧盘的湿强度值最大 (0.335 MPa)，因此，此单因素试验中，最佳水平后干燥时间为 2 h。



注：自然环境预处理时间为 12 h，蒸汽干燥时间为 22 h，蒸汽干燥温度为 110℃。

Note: natural environment pretreatment time was 12 h, steam drying time was 22 h, steam drying temperature was 110℃.

图 6 后干燥时间对湿强度的影响

Fig.6 Effect of drying time in dryer after stopping steam supplying of tray on wet strength

2.2 二次正交旋转组合试验结果与分析

2.2.1 试验因素对秧盘干燥后湿强度影响分析

二次正交旋转组合试验结果见表 2。

表 2 试验结果

Table 2 Experimental results

序号 Serial number	规范变量 Specification variables			湿强度 Wet strength Y/MPa
	X_1	X_2	X_3	
1	1	1	1	0.3754
2	1	1	-1	0.3819
3	1	-1	1	0.3324
4	1	-1	-1	0.3434
5	-1	1	1	0.3782
6	-1	1	-1	0.3953
7	-1	-1	1	0.3451
8	-1	-1	-1	0.3656
9	-1.6818	0	0	0.3838
10	1.6818	0	0	0.3547
11	0	-1.6818	0	0.3536
12	0	1.6818	0	0.3891
13	0	0	-1.6818	0.3423
14	0	0	1.6818	0.3346
15	0	0	0	0.3485
16	0	0	0	0.3566
17	0	0	0	0.3469
18	0	0	0	0.3587
19	0	0	0	0.3689
20	0	0	0	0.3423
21	0	0	0	0.3419
22	0	0	0	0.3555
23	0	0	0	0.3479

1) 非线性回归方程的建立

根据正交试验测得植质钵育秧盘的湿强度，经试验数据处理系统对试验测得的数据进行分析处理，求得各试验因素与植质钵育秧盘湿强度间关系在编码空间的方程为

$$Y = 0.35181 - 0.00733X_1 + 0.01494X_2 - 0.00498X_3 - 0.00706X_1^2 + 0.00781X_2^2 - 0.00382X_3^2 + 0.00234X_1X_2 + 0.00251X_1X_3 + 0.00099X_2X_3 \quad (1)$$

式中， X_j 为试验因素 Z_j 的规范变量， $j=1, 2, 3$ ； Y 为湿强度。回归分析结果如表 3 所示，根据每个偏回归系数 F_j 的大小判断因素的主次顺序， F_j 越大，则对应的因素越重要^[32]。根据表 3 可知， X_1 、 X_2 和 X_3 的 F 值分别为 9.9995、41.5821 和 4.6268，所以 X_1 、 X_2 和 X_3 对指标 Y 的影响大小为 $X_2 > X_1 > X_3$ ，即 $Z_2 > Z_1 > Z_3$ 。

表 3 试验方差分析表

项目 Item	平方和 Quadratic sum	自由度 DOF	F 值 F value
X_1	0.0007	1	9.9995
X_2	0.0030	1	41.5821
X_3	0.0003	1	4.6268
X_1^2	0.0008	1	10.8218
X_2^2	0.0010	1	13.2159
X_3^2	0.0002	1	3.1713
X_1X_2	0	1	0.5965
X_1X_3	0.0001	1	0.6891
X_2X_3	0	1	0.1064
回归 Regression	0.0062	9	$F_2=9.42414$
剩余 Remainder	0.0010	13	
失拟 Lack of fit	0.0003	5	$F_1=0.87857$
误差 Error	0.0006	8	
总和 Sum	0.0072	22	

对于给定的显著水平^[32] $\alpha=0.05$ ， $F_{0.05}(5, 8)=3.69$ ， $F_1 < F_{0.05}(5, 8)$ ，检验结果说明失拟项在 $\alpha=0.05$ 水平上不显著，失拟平方和中含有的不可忽略因素对试验结果的影响很小，方程拟合显著，因此可进一步用统计变量 F_2 对回归模型进行检验。 $F_{0.01}(9, 13)=4.17$ ， $F_2 > F_{0.01}(9, 13)$ ，检验结果表明，回归方程在 $\alpha=0.01$ 水平上显著，试验数据与所采用的回归数学模型基本上是符合的，回归方程与实际情况拟合得非常好。经 F 在 $\alpha=0.1$ 水平上检验，除了 X_1X_2 、 X_1X_3 和 X_2X_3 外，其他回归系数都达到了 $\alpha=0.1$ 以上的显著水平。因此回归方程可以简化为

$$Y = 0.35181 - 0.00733X_1 + 0.01494X_2 - 0.00498X_3 - 0.00706X_1^2 + 0.00781X_2^2 - 0.00382X_3^2 \quad (2)$$

2) 各因素间交互作用分析

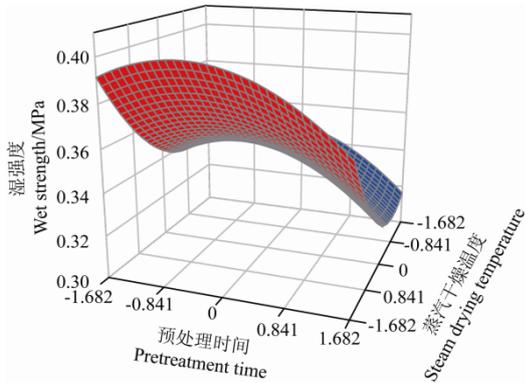
根据影响秧盘湿强度的回归方程，在编码空间内分别对自然环境预处理时间、蒸汽干燥温度和蒸汽干燥时间进行各因素间交互作用分析^[33]。

秧盘自然环境预处理时间与蒸汽干燥温度交互作用如图 7a 所示。从图 7a 中可以看出，在较长的自然环境预处理时间下，随着蒸汽干燥温度的增加，秧盘的湿强度变化趋势不明显。在较短的自然环境预处理时间下，秧盘的湿强度值呈正相关关系，湿强度变化率较大。在相同的干燥温度情况下，秧盘的湿强度值随着预处理时间的增加先增加后减少，且蒸汽干燥温度高时的增幅比蒸汽温度低时的增幅大。在较长的自然环境预处理时间下，秧盘的水分损失过大，生物胶的粘性过小，干燥时，生物胶、稻草和微肥营养介质土不能够很好的粘合在一起，造成秧盘的湿强度减小。当蒸汽干燥温度足够高时，生物胶的性能得到很好的发挥、生物胶的粘性提高，使稻草和微肥营养介质土能很好地粘合在一起，温度条件也达到某些物理化学反应的要求，从而使秧盘的湿强度增加。从图 7a 中湿强度值出现的最大区域可以看出，适当地提高蒸汽干燥温度和延长自然环境预处理时间有利于秧盘湿强度的增加。

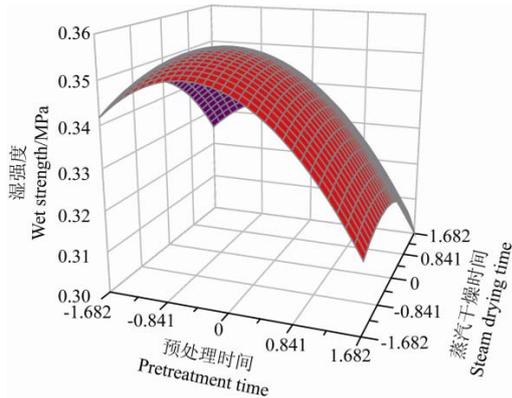
自然环境预处理时间和蒸汽干燥时间的交互作用对试验结果的影响见图 7b。从图 7b 中可以看出，当自然环境预处理时间规范变量取值在 $-1.2615 \sim -0.4205$ 及干燥时间规范变量取值在 $-0.841 \sim 0.841$ 时，秧盘的湿强度值达到最大值范围。当秧盘自然环境预处理时间和干燥时间同时作为影响秧盘湿强度的可变因素时，干燥时间对秧盘湿强度的作用大于自然环境预处理时间对秧盘湿强度的作用。在整个干燥过程中，合理控制预处理时间和干燥时间，对秧盘的浸泡成型及机械化插秧要求有利，当预处理时间和干燥时间过长或过短时，都将影响秧盘内生物胶的性能，同时，过长时间的干燥，也使稻草的性能发生变化，稻草变脆易断，也对秧盘的湿强度产生影响。因此，适当的提高秧盘的干燥时间的同时降低秧盘的预处理时间有利于秧盘湿强度的提高。

秧盘蒸汽干燥温度和蒸汽干燥时间对秧盘湿强度的交互作用见图 7c。从图 7c 中可以看出，蒸汽干燥温度对秧盘的湿强度的影响呈正相关关系。在其他因素选取相同水平条件下，之后，秧盘里的生物胶急剧变性，生物胶、稻草和微肥营养介质土融合在一起的性能变差，稻草的强度也变小，同时也使物料之间的物理化学反应发生改变，随着干燥时间的增加，秧盘的湿强度先增加后减小，减小的幅

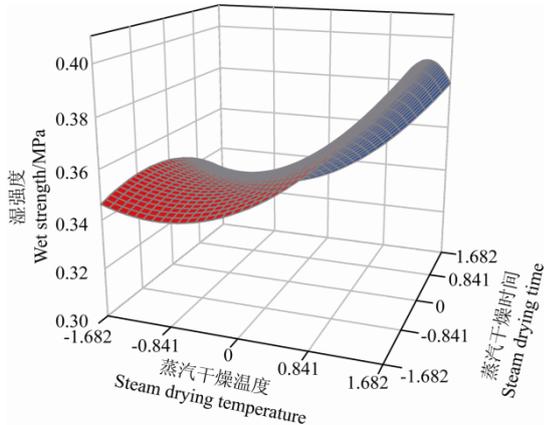
度越来越大,说明在干燥一定时间达不到最佳的反应条件,使秧盘的湿强度变小。在蒸汽干燥温度和干燥时间的相互作用中,蒸汽干燥温度对秧盘湿强度的影响大于蒸汽干燥时间的影响,这也是高温高压的蒸汽能够促进秧盘里物理化学反应的进行,并且随着温度的升高,反应越强烈,能够促使秧盘的成分之间更好的融合在一起,提高秧盘的湿强度。



a. 自然环境预处理时间和蒸汽干燥温度对湿强度的影响
a. Effect of natural environment pretreatment time and steam drying temperature on wet strength



b. 自然环境预处理时间和蒸汽干燥时间对湿强度的影响
b. Effect of natural environment pretreatment time and steam drying time on wet strength



c. 蒸汽干燥温度和蒸汽干燥时间对湿强度的影响
c. Effect of steam drying temperature and drying time on wet strength

图7 各因素间交互作用对湿强度的影响
Fig.7 Effect of interaction among factors on wet strength

2.3 试验因素参数优化

采用目标函数法进行优化。将秧盘湿强度的回归方程作为目标函数,各个设计变量的试验范围为优化的边界约束条件: $-1.682 \leq X_i \leq 1.682$ ($i=1, 2, 3$), 利用 Excel 2003 软件的规划求解进行优化计算。优化结果为: $X_1=-0.519121848$, $X_2=1.682$, $X_3=-0.651832834$, 即自然环境预处理时间 10.4 h, 蒸汽干燥温度 130℃, 蒸汽干燥时间 20.6 h, 植质钵育秧盘的湿强度最优值为 0.40 MPa。在实际生产中为了便于实践操作,对优化条件的参数取整后得到自然环境预处理时间 10 h, 蒸汽干燥温度 130℃, 蒸汽干燥时间 21 h。

2.4 试验验证

为验证所优化的干燥工艺的正确性,按最佳干燥工艺条件重复做 3 次试验并对测得的湿强度值取平均值,验证试验实际测得的湿强度值为 0.395 MPa,与理论预测值相比,相对误差为 1.25%,能够满足机械化插秧的要求。干燥后的秧盘见图 8。

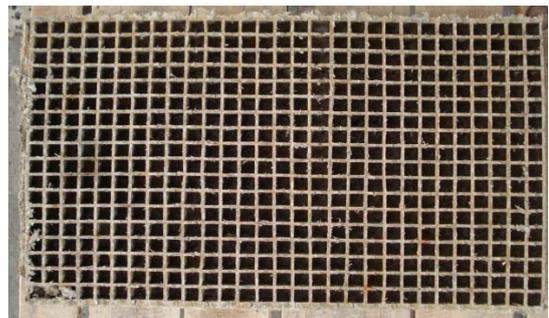


图 8 干燥后秧盘图
Fig.8 Trays photo after drying

3 结论

1) 影响秧盘蒸汽干燥的主要因素有自然环境预处理时间、蒸汽干燥温度、蒸汽干燥时间和后干燥时间。后干燥时间对秧盘的湿强度影响不大。但通过秧盘在干燥器内晾置一定的时间,利用干燥器的余温,将秧盘表面的水蒸气蒸发掉,使秧盘的水分含量进一步降低,从而适合秧盘的储存,增加秧盘的保质期。

2) 得出秧盘自然环境预处理时间、蒸汽干燥温度和蒸汽干燥时间对秧盘湿强度的影响规律,建立了蒸汽干燥植质钵育秧盘湿强度的简化数学模型。

3) 确定各个试验因素在二次非线性模型中对试验指标的影响的主次关系依次为:蒸汽干燥温度、自然环境预处理时间和蒸汽干燥时间。采用目标函数法优化确定秧盘最佳干燥工艺条件为预处理时间 10 h, 干燥温度 130℃, 干燥时间 21 h, 在此条件下,植质钵育秧盘的湿强度的预测值为

0.40 MPa, 试验验证值为 0.395 MPa, 相对误差值为 1.25%, 能够满足机械化插秧的要求。

[参 考 文 献]

- [1] 汪春, 衣淑娟, 郑桂萍, 等. 水稻植质钵育秧盘及其制备方法[P]. 中国专利: ZL200810137207, 2011-12-21.
- [2] 张欣悦, 汪春, 李连豪, 等. 水稻植质钵育秧盘制备工艺及参数优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 153—162.
Zhang Xinyue, Wang Chun, Li Lianhao, et al. Preparation technology and parameters optimization for seedling-growing bowl tray made of paddy straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(5): 153—162. (in Chinese with English abstract)
- [3] 陈恒高, 董晓威, 张吉军. 水稻植质钵育秧盘的研制[J]. 现代化农业, 2005, 15(9): 31—32.
- [4] 杜雪亭, 汪春, 车刚, 等. 植质钵育秧盘蒸汽烘干工艺参数的优化研究[J]. 农机化研究, 2011(10): 107—110.
Du Xueting, Wang Chun, Che Gang, et al. Experiment research on optimal process parameters of steam drying plating bowl-seedling tray[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011(10): 107—110. (in Chinese with English abstract)
- [5] 陈恒高, 汪春, 张吉军, 等. 水稻植质钵育栽培技术的探讨[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2004, 16(3): 38—41.
Chen Henggao, Wang Chun, Zhang Jijun, et al. A study on raising and transplanting technique for rice growing in cupulate compartment tray of plant material[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2004, 16(3): 38—41. (in Chinese with English abstract)
- [6] 于海明, 汪春, 张伟, 等. 水稻植质钵育秧盘蒸汽干燥装置进出物料系统的研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2013, 25(1): 24—27.
Yu Haiming, Wang Chun, Zhang Wei, et al. Study on system of passing in and out of materials in steam drying device of the seedling-growing tray made of paddy-straw[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2013, 25(1): 24—27. (in Chinese with English abstract)
- [7] 于海明. 水稻植质钵育秧盘蒸汽干燥装置的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2011.
Yu Haiming. Study on Steam Drying Device of Sseedling-growing Tray Made of Paddy-straw[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [8] 连政国, 曹崇文. 玉米过热蒸汽薄层干燥数学模型[J]. 农业机械学报, 1999, 30(6): 68—72.
Lian Zhengguo, Cao Chongwen. A mathematical model on thin-layer drying of corn with surper heard steam[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 1999, 30(6): 68—72. (in Chinese with English abstract)
- [9] 邹艳洁, 徐立新. 过热蒸汽干燥技术[J]. 现代浆纸技术, 2005, 24(3): 33—36.
Zhou Yanjie, Xu Xinli. Surpheated steam drying technology[J]. World Pulp and Paper Technology, 2005, 24(3): 33—36. (in Chinese with English abstract)
- [10] 史勇春, 李捷, 李选友, 等. 过热蒸汽干燥技术的研究进展[J]. 干燥技术与设备, 2012, 10(1): 3—9.
Shi Yongchun, Li Jie, Li Xuanyou, et al. Research progress of the superheated steam drying technology[J]. Drying Technology and Equipment, 2012, 10(1): 3—9. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王维斌, 傅宪辉, 李选友, 等. 过热蒸汽干燥传热传质特性的理论分析与试验[J]. 农机化研究, 2010(10): 33—36.
Wang Weibin, Fu Xianhui, Li Xuanyou, et al. Theoretical analysis and experiment of heat and mass transfer process in superheated steam drying[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(10): 33—36. (in Chinese with English abstract)
- [12] Nathakaranakule A, Kraiwanchikul W, Soponronnarit S. Comparative study of different combined superheated steam drying techniques for chicken meat[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(4): 1023—1030.
- [13] 宫英振, 牛海霞, 肖志锋, 等. 油菜籽过热蒸汽流化床常压干燥过程的数学模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 351—356.
Gong Yingzhen, Niu Haixia, Xiao Zhifeng, et al. Simulation on rapeseed drying in superheated steam fluidized bed at atmosphere pressure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 351—356. (in Chinese with English abstract)
- [14] Nimmol C, Devahastin S, Swasdisevi T, et al. Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation drying[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(14/15): 2483—2494.
- [15] 马怡光, 张绪坤, 余蓉, 等. 食品低压过热蒸汽干燥技术[J]. 食品科技, 2012, 37(11): 94—97.
Ma Yiguang, Zhang Xukun, Yu Rong, et al. Drying of foodstuffs by low-pressure superheated steam[J]. Food

- Science and Technology, 2012, 37(11): 94—97. (in Chinese with English abstract)
- [16] 白丽青, 马晓建. 食品过热蒸汽干燥的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2008, 29(6): 180—183.
Bai Liqing, Ma Xiaojian. Drying of food stuffs by low-pressure superheated steam[J]. Food Research and Development, 2008, 29(6): 180—183. (in Chinese with English abstract)
- [17] Uengkimbuan, Narong, Soponronnarit, et al. A comparative study of pork drying using superheated steam and hot air[J]. Drying Technology, 2006, 24(12): 1665—16721.
- [18] Taechapiro, J Chaiyong, Prachayawarakorn, et al. Characteristics of rice dried in superheated-steam fluidized-bed[J]. Drying Technology, 2004, 22(4): 719—7431.
- [19] 肖红伟, 高振江. 干燥对玉米饲用和加工品质影响的研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 290—295.
Xiao Hongwei, Gao Zhenjiang. Research progress in the effects of drying on feeding maize and processing quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(7): 290—295. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张璧光. 木材真空过热蒸汽干燥的应用前景[J]. 木材加工机械, 2005(6): 42—44.
Zhang Biguang. Application prospects of wood drying under vacuum-superheated steam[J]. Wood Processing Machinery, 2005(6): 42—44. (in Chinese with English abstract)
- [21] 袁 玮, 张思洋. 利用过热蒸汽干燥改善纸张的物理性能[J]. 现代浆纸技术, 2009, 28(1): 30—33.
Yuan Wei, Zhang Siyang. Use of superheated steam drying to increase strength and bulk of papers produced from diverse commercial furnishes[J]. World Pulp and Paper Technology, 2009, 8(1): 30—33. (in Chinese with English abstract)
- [22] Fitzpatrick J. Sludge processing by anaerobic digestion and superheated steam drying[J]. Water Research, 1998, 32(10): 2897—2902.
- [23] Peamsuk Suvarnakuta, Sakamon Devahastin, Arun S Mujumda. A mathematical model for low-pressure superheated steam drying of a biomaterial[J]. Chemical Engineering and Processing, 2007, 46(7): 675—683.
- [24] 郑先哲, 蒋亦元. 苜蓿干燥特性试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 159—162.
Zheng Xianzhe, Jiang Yiyuan. Experimental study on the drying process characteristics of alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2005, 21(1): 159—162. (in Chinese with English abstract)
- [25] 黄 艳, 黄建立, 郑宝东. 银耳微波真空干燥特性及动力学模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 362—367.
Huang Yan, Huang Jianli, Zheng Baodong. Microwave vacuum drying properties and kinetics model of white fungus [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 362—367. (in Chinese with English abstract)
- [26] 宫英振, 牛海霞, 肖志锋, 等. 油菜籽过热蒸汽流化床常压干燥过程的数学模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 351—357.
Gong Yingzhen, Niu Haixia, Xiao Zhifeng, et al. Simulation on rapeseed drying in superheated steam fluidized bed at atmosphere pressure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 351—357. (in Chinese with English abstract)
- [27] 覃珊, 温学森, 沈涛, 等. 蒸汽漂烫菊花的薄层干燥特性和质量评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 357—364.
Qin Shan, Wen Xuesen, Shen Tao, et al. Thin layer drying characteristics and quality evaluation of steam blanched chrysanthemum[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural engineering(Transactions of the CSAE), 2011, 27(6): 357—364. (in Chinese with English abstract)
- [28] Poomjai, Sa-adchom, Thanit, et al. Mathematical model of pork slice drying using superheated steam[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(4): 499—507.
- [29] Chaiyong, Taechapiroj, Somkiat Prachayawarakorn, et al. Modelling of parboiled rice in superheated-steam fluidized bed[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(3): 411—419.
- [30] 赵思明, 谭汝成, 刘友明, 等. 方便米粉高温高湿干燥数学模型研究[J]. 食品科学, 2003, 24(7): 52—54.
- [31] 刘坤, 鲁周民, 包蓉, 等. 红枣薄层干燥数学模型研究[J]. 食品科学, 2011, 32(15): 80—83.
Liu Kun, Lu Zhoumin, Bao Rong, et al. Mathematical modeling of thin-layer drying of red dates[J]. Food Science, 2011, 32(15): 80—83. (in Chinese with English abstract)
- [32] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [33] 车刚, 万霖, 李成华, 等. 蕨菜真空冷冻干燥工艺参数的优化试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 98—102.
Che Gang, Wan Ling, Li Chenghua, et al. Optimized

experiment on technological parameters for freeze drying of *pteridium aquilinum*[J]. Transactions of the Chinese

Society of Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 98—102. (in Chinese with English abstract)

Optimization of steam drying conditions for seedling-growing tray made of paddy-straw

Yu Haiming¹, Wang Chun^{1*}, Han Zhixue², Sun Yong³, Zhang Wei¹, Hu Jun¹, Liu Tianxiang¹

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. Office of Human Resources, Mudanjiang Medical University, Mudanjiang 157011, China; 3. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The seedling-growing tray was produced by mixing such materials as straw powder, biological glue, and fertilizer soil with nutrient media, and shaping it by pressing and drying. The drying process is one of the important parts of the production. Which drying method and process to be used is a key factor to ensure the drying quality of the seedling tray. The seedling tray drying quality includes such aspects as warpage, crack, wet strength, and corrosion. The warpage and cracks not only affect the tray modeling rate and agronomic requirements of mechanized cultivation, but also increase the cost of the production. The corrosion of the seedling tray determines the seedling quality and its shelf life. The wet strength determines the shape of the seedling tray as it is steeped in water and the mechanized planting agronomic requirements. The seedling tray drying methods include natural environmental ventilation drying, hot air drying, and steam drying. On an experimental basis, the three kinds of drying methods effects on the quality of seedling tray drying and the advantages of steam drying were considered in this paper. Then the steam drying method was determined to be the major way of drying the seedling tray. The wet strength is also an important indicator of steam drying quality, which is one of the key factors meeting the demands of seedling-growing tray molding and mechanized cultivating to ensure that the wet strength of a seedling-growing tray could fulfill the demands above. In this paper, a seedling-growing tray made of paddy-straw was taken as the research object, and the steam drying technology was used, with the wet strength after steam drying taken as experimental indicators. Through single-factor tests, we analyzed some elements which could affect the wet strength of a seedling-growing tray, such as natural environment pretreatment time, drying time, drying temperature, and drying time in a dryer after stopping steam supplying of a tray, and ascertained the influencing factors and the range of these factors. Based on single-factor tests, we utilized a quadratic orthogonal rotation combination test to establish a seedling-growing tray steam drying mathematics modeling, and analyzed the relationship between each factor and evaluation indicators based on a two-factor analysis method, and prioritized factors in mathematics modeling. Experiments showed the optimum process conditions of a seedling-growing tray made of paddy-straw drying we obtained: seedling tray pretreatment time was 10h, drying time was 21h, drying temperature was at 130 °C. In this condition, the predicted wet strength of a seedling-growing tray was 0.4MPa. And the actual wet strength was 0.395MPa in validation tests. By comparing the theoretical predictions and the actual results, the relative error was 1.25%. The research result could provide certain theory directions for the industrial production of a seedling-growing tray made of paddy-straw.

Key words: drying, optimization, vapors, seedling-growing tray made of paddy-straw, process, parameters

(责任编辑: 张俊芳)