

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.033

低聚木糖生产废渣基可降解育苗钵研究*

李道义 王晓燕 景全荣 司伟伟 李进 李树君

(中国农业机械化科学研究院,北京 100083)

摘要:利用前期研制的秸秆基育苗钵生产试验系统,以低聚木糖生产废渣为主要原料,采用干法热压成型工艺,进行了育苗钵制备试验,以原料成本为指标优化了原料配比,以力学强度为指标优化了工艺参数,并对成型钵性能进行了检测。研究表明,成型配方适宜的低聚木糖生产废渣、麦麸、胶黏剂、脱模剂质量比为68:26:6.3:1;最佳工艺参数为上模具温度180℃,一次压力180 MPa,一次保压时间4.5 s,此条件下,育苗钵干强度为2 251 N,湿强度为417 N。相对于玉米芯,低聚木糖生产废渣具有高木质素含量和低半纤维素含量,使得育苗钵具有更高力学强度和更低吸水性。育苗钵生物降解性能较好,霉菌侵蚀试验结果为V级。

关键词:低聚木糖生产废渣 可降解育苗钵 干法热压成型 强度

中图分类号: S216.2; S223.1*1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)S0-0207-06

引言

当前育苗钵主要由石油基材料和生物基材料制成。石油基材料,如:聚乙烯、聚氯乙烯、聚丙烯等,制得的育苗钵通常难以降解,在秧苗移栽过程需将钵体移除大田,且石油资源不可再生,日益紧缺^[1-2]。生物基材料制得的钵体,可以降解,原料可以再生,环境危害小。但现有生物基育苗钵主要由纸浆、农作物秸秆等植物纤维添加胶黏剂湿法成型制得,前处理步骤复杂,成品脱水能耗大^[1-3]。寻求一种性能较好、生产成本较低的生物基育苗钵,已成为当前研究的一个热点。

低聚木糖生产废渣(Xylooligosaccharides producing solid waste, XPSW)是低聚木糖生产产生的固体废弃物,为玉米芯经汽爆、木聚糖酶水解、过滤后所得固体残渣,具有量大、集中、无毒、价廉等特点^[4],通常作为锅炉燃料用于提供工厂热能。然而锅炉燃烧为这种新兴生物质资源的最简单,也是最低值的利用方式^[5]。开发此类生物炼制废弃生物质的高值利用方法,具有现实意义。

前期研究曾采用干法热压成型工艺,以植物纤维为主要原料,添加少量胶黏剂和脱模剂、塑化剂等辅助成分,制得一次性餐饮具^[4],并对所制得秸秆基餐具进行了力学性能分析^[5],成型工艺简便高效、能耗小,成型产品力学性能和生物降解性能良

好。相对于一次性餐饮具,可降解育苗钵在许多方面提出了更高要求,主要体现在:生产成本低,原料应价廉易得;具有一定透水、透气性,以满足植物生长需求;具有较好干强度和湿强度,以满足育苗与移栽的农艺要求;降解周期和秧苗生长周期符合度较好,育苗钵在育苗过程保持一定强度,外型较为完整,而钵、苗同时移栽大田后,可快速破裂、崩解,不影响植物根系伸展。

本文将在前期基础上,以XPSW为主要原料,采用干法热压成型工艺,进行育苗钵制备试验研究,优化原料配比和工艺参数,并对成型钵进行力学性能和生物降解性能检测,以期开发一种新型可降解育苗钵并实现XPSW的高值利用。

1 试验材料与方法

1.1 材料与设备

玉米芯、低聚木糖生产废渣由山东龙力生物科技股份有限公司提供。麦麸购自北京北郎中面粉厂。将原料用组合式高速粉碎机粉碎,粒度在40~60目之间,按配方工艺添加定量的添加剂,并通过医用搅拌机采用三维无死角的方式对物料进行充分混合搅拌,含水率控制在10%左右^[6]。

秸秆基育苗钵成型机及其配套成型模具如图1所示。成型机由中国农业机械化科学研究院研制,由定量送料、压制成型、制品取出3个主要功能部件

收稿日期:2014-06-29 修回日期:2014-08-20

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2010BAD32B02)

作者简介:李道义,工程师,博士,主要从事生物质利用工程技术研究,E-mail: daoyili@126.com

通讯作者:李树君,研究员,博士生导师,主要从事农副产品加工、生物质能和生物基材料研究,E-mail: lisj@caams.org.cn

组成。主要技术参数为:压力小于等于 1 600 kN;成型温度小于等于 260℃;生产效率 240 个/h。成型模具采用了独立电加热盘和温度传感器,以保证对成型温度的精确控制。参考市售育苗钵尺寸规格,确定成型育苗钵高度 72 mm、钵口直径 67 mm、钵底直径 62 mm、壁厚 0.7 mm。

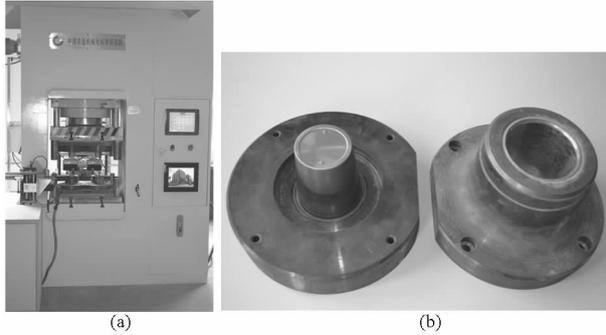


图 1 秸秆基育苗钵成型机和成型模具

Fig. 1 Seedling pots molding machine and its molding moulds

(a) 成型机 (b) 成型模具

1.2 试验方法

1.2.1 热压成型试验

调节喂料计量装置,上料量控制为 (22.0 ± 0.2) g。采用二次干法热压成型工艺,上模具温度比下模具温度高 15℃,两次保压压力和时间相同。每组成型试验连续压制 50 个苗钵,观察并记录苗钵制备过程苗钵成型完整性,所制育苗钵室温冷却和老化 1 d 后进行后续性能检测^[6]。

1.2.2 成型配方优化

将 XPSW、麦麸、胶黏剂(密胺树脂, Melamine formaldehyde resin, A5)、脱模剂按比例混合均匀备用,其中脱模剂用量为 XPSW、麦麸、胶黏剂质量总和的 1%。成型条件为上模具温度 180℃,一次保压压力 165 MPa,一次保压时间 3 s。以苗钵成型完整性、苗钵漏水性和跌落性能等为指标,确定配方中麦麸含量与胶黏剂最小用量关系,获得原料成本最低的 XPSW 基育苗钵成型配方。

1.2.3 成型工艺参数优化

以植物纤维为原料干法热压成型过程中,保压压力、保压时间、上模具温度是影响成型效果和性能的主要工艺参数^[6]。采用优化后育苗钵配方,以力学强度为评价指标,对保压压力、保压时间、上模具温度进行三因素三水平正交优化,各因素水平见表 1,各因素编码值为 A、B、C。

1.2.4 苗钵性能检测

跌落试验:随机取离水泥地面垂直高度 0.8 m 处自然跌落,无任何裂损为合格。

漏水试验:在苗钵中注满 (23 ± 2) ℃ 的水,静置 12 h 后,观察苗钵有无掉渣或变形,钵体有无阴渗、

表 1 试验因素水平

Tab. 1 Factors and levels

水平	上模具温度 /℃	一次保压压力 /MPa	一次保压时间 /s
1	165	140	1.5
2	180	160	3.0
3	195	180	4.5

漏水现象。

压缩试验:利用电子万能材料试验机对苗钵进行压缩试验,压缩速度为 20 mm/min,测定苗钵压裂前的最大压力。苗钵破裂的临界压力是其力学强度的重要参数,对应着宏观结构的破坏^[7],因此本文将以压裂力来表达苗钵的力学强度。样品室温干燥状态测定得到的压裂力为苗钵的干强度,将样品浸泡 (23 ± 2) ℃ 的水中 4 h 后测定得到的压裂力为湿强度。

生物降解性能:参照 GB/T 18600.2—1999 进行霉菌侵蚀试验以检测苗钵生物降解性能。试验菌种为黑曲霉、土曲霉、球毛壳霉、绿色木霉、出芽短梗霉、绳状青霉,试验时间 28 d,相对湿度大于 90%,温度 30℃。

1.2.5 原料组分分析

原料中木质素、纤维素、半纤维素含量采用 Van Soest 法测定^[8]。

2 结果与分析

2.1 育苗钵成型配方

采用二次干法热压成型工艺,在一次保压压力 165 MPa、一次保压时间 3.0 s、上模具温度 180℃ 条件下,进行 XPSW 基育苗钵配方筛选试验,确定完整性、漏水性和跌落性能等指标均合格时,成型配方中不同麦麸含量对应的胶黏剂最小用量。麦麸含量与胶黏剂最小用量关系如图 2 所示,临界配比时育苗钵力学强度如表 2 所示。

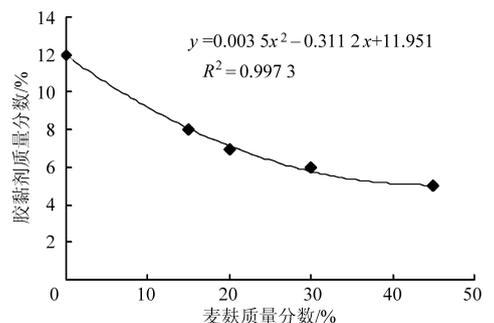


图 2 育苗钵配方中麦麸含量与胶黏剂最小用量关系

Fig. 2 Relation of wheat bran content and minimum adhesive content in formulations of seedling pots

结合图 2 和表 2 可知,添加胶黏剂和麦麸均有

助于苗钵成型,且直接影响苗钵的干强度和湿强度。试验采用了热固性胶黏剂,在高温高压条件下具有极强粘合作用,可大幅提高苗钵防水性能和力学强度,如配方1中胶黏剂为12%,此时干强度为2 752 N,湿强度为1 817 N。胶黏剂售价高,需适当减少胶黏剂用量以降低苗钵成本。而麦麸中含有较多麸质和淀粉,在高温高压以及少量水分存在条件下,具有胶黏作用,有助于成型,但是麦麸吸水性较强,含量过高时会急剧影响苗钵的防水性能。如配方5中麦麸质量分数为45%,此时胶黏剂用量仅需5%,所得苗钵干强度1 747 N,湿强度为109 N,较配方1苗钵分别下降了36.5%和94.0%。

表2 不同配比条件下育苗钵的力学强度

Tab.2 Strength of seedling pots with different formulas

配方编号	成型配方中 XPSW、麦麸、胶黏剂、脱模剂的质量比	干强度/ N	湿强度/ N
1	88:0:12:1	2 752	1 817
2	77:15:8:1	2 180	434
3	73:20:7:1	2 064	419
4	64:30:6:1	1 816	325
5	50:45:5:1	1 747	109

从图2可得,苗钵成型配方中麦麸、胶黏剂和XPSW比例关系需满足

$$y \geq 0.0035x^2 - 0.3112x + 11.951 \quad (1)$$

$$y = 1 - x - z \quad (2)$$

式中 x ——麦麸质量分数,%

y ——胶黏剂质量分数,%

z ——低聚木糖生产废渣质量分数,%

假定XPSW价格为500元/t,胶黏剂为12 000元/t,麦麸为2 000元/t,脱模剂为6 000元/t,则苗钵粉料成本 C_m 为

$$C_m = \frac{2000x + 12000y + 500z + 6000}{101} \quad (3)$$

合并式(1)、(2)、(3)可得

$$C_m = \frac{40.25x^2 - 2078.8x + 193436.5}{101} \quad (4)$$

当 $x = 25.82\%$ 时, C_m 具有最小值。即XPSW、麦麸、胶黏剂、脱模剂的质量比为67.92:25.82:6.25:1时,苗钵原料吨成本最低,为1 649.5元/t。选取适合操作的物料质量比例进行后续试验,即:XPSW、麦麸、胶黏剂、脱模剂的质量比为68:26:6.3:1,此时苗钵粉料成本为1 654.5元/t,合苗钵原料成本为0.0364元/个,经济性较好。

2.2 成型工艺参数优化

选用优化后苗钵配方,以力学强度为指标,对上模具温度、一次保压压力、一次保压时间进行了三因

素三水平正交试验,试验结果见表3。

表3 正交试验结果

Tab.3 Results of orthogonal test

试验编号	试验参数			试验结果		
	上模具	一次保压	一次保压	干强	湿强	综合
	温度A	压力B	时间C	度/N	度/N	强度/N
1	1	1	1	1 385	179	420
2	1	2	2	1 671	236	523
3	1	3	3	1 986	337	667
4	2	1	2	1 895	306	624
5	2	2	3	2 219	413	774
6	2	3	1	1 728	290	578
7	3	1	3	2 113	403	745
8	3	2	1	1 772	238	545
9	3	3	2	1 883	343	651

试验数据分析结果见表4。影响苗钵干强度的三因素主次排列顺序为 $C > A > B$,其中一次保压时间和上模具温度影响显著,压力影响不显著,较优组合为 $A_2B_2C_3$,即上模具温度180℃、一次保压压力160 MPa、一次保压时间4.5 s时干强度最大;而影响苗钵湿强度的三因素主次排列顺序为 $C > A > B$,其中一次保压时间和上模具温度影响显著,压力影响不显著,较优组合为 $A_2B_3C_3$,即上模具温度180℃、一次保压压力180 MPa、一次保压时间4.5 s时湿强度最大。

表4 方差分析

Tab.4 Analysis of variance

项目	方差来源	离差平方和	自由度	均方	F值	P值
干强度	A	130 284	2	65 142	24.4	0.039
	B	131 34	2	6 567	2.46	0.29
	C	347 416	2	173 708	65.1	0.015
	误差	5 340	2	2 670		
湿强度	A	13 389	2	6 694	22.9	0.042
	B	1 513	2	756	2.59	0.28
	C	33 603	2	16 801	57.5	0.017
	误差	584	2	292		
综合强度	A	27 194	2	13 597	1 345	0.000 74
	B	1 908	2	954	94.4	0.010
	C	69 891	2	34 945	3 456	0.000 29
	误差	20	2	10		

因干强度和湿强度均为苗钵重要力学性能参数,所以综合干强度和湿强度性能,以综合强度为指标对工艺参数进行优化。综合强度为0.2倍的干强度与0.8倍的湿强度之和。由表4可见,上模具温度、一次保压压力、一次保压时间三因素均影响显著,影响苗钵综合强度的三因素主次排列顺序为 $C > A > B$,较优组合为 $A_2B_3C_3$,即上模具温度

180℃、一次保压压力 180 MPa、一次保压时间 4.5 s 时综合强度最大。优化试验在前期秸秆基餐具的研究基础上进行,忽略了成品外观,重点考虑了苗钵的力学性能。干法热压成型是在较高温度范围内(165~195℃),物料中胶黏剂和木质素熔融、淀粉糊化,与植物纤维胶合形成三维网络,并在较高模压下发生产性形变而成型^[5]。因此,适当提高温度有利于胶合反应进行,但当温度过高时可能导致胶黏剂部分分解,从而导致强度下降;而适当延长保压时间有利于粉料充分胶合,加大模压有利于增加胶合强度。此结论与前期报道一致^[6]。

2.3 苗钵性能分析

采用优化后苗钵配方和工艺参数(上模具温度 180℃、一次保压压力 180 MPa、一次保压时间 4.5 s)进行了 XPSW 基育苗钵样品制备,并用玉米芯粉替代配方中 XPSW 进行了相同条件下的玉米芯基育苗钵样品制备。两种育苗钵外观如图 3 所示,部分性能指标对比见表 5。



图 3 苗钵实物图

Fig. 3 Photo of seedling pots

(a) XPSW 基 (b) 玉米芯基

表 5 XPSW 基和玉米芯基育苗钵性能对比

Tab. 5 Properties of xylooligosaccharides producing solid waste based and corn cobs based seedling pots

主要基料	吸水率/%	干强度/N	湿强度/N
XPSW	38.5	2 251	417
玉米芯	48.6	1 662	193

从图 3 可知,所制得 XPSW 基育苗钵为深咖啡色而玉米芯育苗钵为黄色,均成型完整,外表光滑有亮泽,表面无裂纹、起皮和明显起泡。从表 5 可知,所得 XPSW 基育苗钵干强度 2 251 N,湿强度 417 N,吸水率为 38.5%,分别为玉米芯基育苗钵的 135%、216%和 79.2%,力学性能和防水性能均有很大改善。

在玉米芯制备低聚木糖过程需经过高温蒸煮或者汽爆预处理以及木聚糖酶水解,导致其组分和物理结构发生变化,这可能是造成两种育苗钵性能差异的主要原因。

对 XPSW 和玉米芯中纤维素、半纤维素和木质素进行了分析,结果见表 6。可见 XPSW 具有更高

木质素含量。木质素是一种网状结构多取代基聚合物,具有热硬性,可用作黏合剂把纤维素和半纤维素粘在一起,起到维持结构和增强张力的作用^[5]。

表 6 玉米芯和低聚木糖生产废渣主要成分

Tab. 6 Main components of corn cobs and xylooligosaccharides producing solid waste %

材料	纤维素	半纤维素	木质素
低聚木糖生产废渣	57.3	8.57	23.0
玉米芯	40.1	39.6	13.7

在低聚木糖生产过程,玉米芯经过高温蒸煮或者汽爆预处理,部分木质素会熔出并在木质纤维表面重新沉积^[9],蜡质层和果胶被去除^[10],再经过木聚糖酶水解后,木聚糖(玉米芯半纤维素主要成分)与木质素完全分离^[11],很大程度地暴露了玉米芯中高活性的羟基基团^[10],从而提高植物纤维与胶黏剂之间的胶合强度,并在植物纤维外表面形成由胶黏剂外壳,增加了苗钵的防水性能,使得苗钵在浸湿状态下仍可以保持较高强度。例如,付顺鑫等利用蒸汽爆破改性有效提高了麦秸板的强度和防水性能^[10],此结论与本研究报告一致。

对 XPSW 基育苗钵进行了霉菌侵蚀试验,接种 28 d 后,育苗钵表面肉眼可见菌落生长,约占总面积 100%,样品表面霉菌生长分级达到 V 级,如图 4 所示。表明该育苗钵生物降解性能较好,不会破坏生态环境,在随秧苗移栽至农田后,所残留的钵体可以促进土壤中微生物生长,从而提高土壤生物活性。

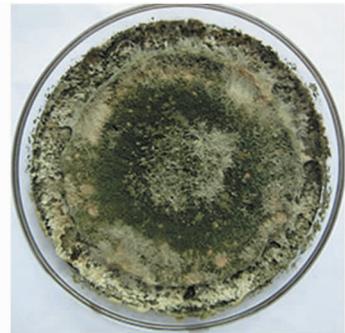


图 4 霉菌侵蚀试验结果

Fig. 4 Result of fungal-growth test

XPSW 基育苗钵配方中含有较多有机物质,如: XPSW、麦麸等,因此生物降解性能较好。其中添加的麦麸在潮湿土壤填埋条件下,降解速率快^[12],降解过程中在苗钵钵体逐渐形成细微孔洞,促进苗钵与土壤之间物质传递,利于秧苗移栽后根系伸展并穿透钵体。而配方中适量胶黏剂可以保证育苗钵的湿强度以及在育苗过程育苗钵的完整性,以便于钵苗移栽。因此,通过调整配方中麦麸和胶黏剂比例,可以简便地调控育苗钵降解周期,使之与秧苗生长

周期相符,有望解决既符合农艺要求,又满足力学性能和降解性能之间的矛盾。后续将进一步研究麦麸和胶黏剂比例对 XPSW 基育苗钵降解周期的影响,并开展育苗试验。

3 结论

(1) 通过试验确定 XPSW 基育苗钵配方中麦麸含量与胶黏剂最小用量关系,获得了最低原料成本的成型配方,即 XPSW、麦麸、胶黏剂、脱模剂的质量比为 68:26:6.3:1。

(2) 通过正交试验,以综合强度为指标,获得最佳成型工艺参数(一次保压时间 4.5 s,上模温度 180℃,一次保压压力 180 MPa),所制得 XPSW 基育苗钵力学性能和生物降解性能良好。

(3) XPSW 可以替代玉米芯或其他植物纤维用于育苗钵制备,且性能更为优越。干法热压成型制备 XPSW 基育苗钵,提高了玉米芯综合利用水平,原料成本低,成型工艺简便,适合推广应用。可为糠醛渣、木糖生产废渣、纤维素乙醇生产废渣等生物炼制废渣的利用模式提供参考。

参 考 文 献

- 1 Evelia Schettinia, Gabriella Santagata, Mario Maliniconicob, et al. Recycled wastes of tomato and hemp fibres for biodegradable pots: physico-chemical characterization and field performance[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2013, 70:9-19.
- 2 Petronela Nechita, Elena Dobrin, Florin Ciolacu, et al. The biodegradability and mechanical strength of nutritive pots for vegetable planting based on lignocellulose composite materials[J]. Bioresources, 2012, 5(2): 1102-1113.
- 3 刘洪杰,刘俊峰,郝建军,等.生物质育苗钵及成型装备[J].农业机械学报,2012,43(2):52-54,74.
Liu Hongjie, Liu Junfeng, Hao Jianjun, et al. Biomass seeding bowl and molding equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 52-54, 74. (in Chinese)
- 4 Vazquez M J, Alonso J L, Dominguez H, et al. Xylooligosaccharides: manufacture and applications[J]. Trends in Food Science and Technology, 2000, 11(11): 387-393.
- 5 Birgit Kamm, Patrick R Gruber, Michael Kamm. 生物炼制——工业过程与产品:上卷[M]. 马延和,译.北京:化学工业出版社,2007.
- 6 刘天舒,李树君,景全荣.植物纤维餐具干法热压成型工艺响应面法优化[J].农业机械学报,2012,43(9):116-119.
Liu Tianshu, Li Shujun, Jing Quanrong. Optimization of plant fiber tableware dry-hot molding process using response surface methodology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 116-119. (in Chinese)
- 7 高德,景全荣,徐锋.玉米秸秆包装容器压缩性能分析[J].农业机械学报,2009,40(3):117-120,129.
Gao De, Jing Quanrong, Xu Feng. Compression property analysis of plant straw packaging container[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 117-120, 129. (in Chinese)
- 8 van Soest P J, Wine R H. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. IV. Determination of permanganate[J]. Journal of AOAC, International, 1967, 50(1): 50-55.
- 9 Michael J Selig, Sridhar Viamajala, Stephen R Decker, et al. Deposition of lignin droplets produced during dilute acid pretreatment of maize stems retards enzymatic hydrolysis of cellulose[J]. Biotechnology Progress, 2007, 23(6): 1333-1339.
- 10 付顺鑫,韩广萍,程万里,等.蒸汽爆破改性处理对麦秸性能的影响[J].东北林业大学学报,2011,39(4):99-100,104.
Fu Shunxin, Han Guangping, Cheng Wanli, et al. Effect of steam explosion modification on properties of strawboard[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(4): 99-100, 104. (in Chinese)
- 11 杨瑞金,许时婴,王璋.酶法生产低聚木糖过程中纤维素和木聚糖——木质素复合物结构的变化[J].中国粮油学报,2001,16(6):43-46.
Yang Ruijin, Xu Shiyong, Wang Zhang. Changes in the structure of cellulose and xylan-lignin complex during the production of xylooligosaccharides[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2001, 16(6): 43-46. (in Chinese)
- 12 燕红,杨谦.地衣芽孢杆菌对麦麸降解作用的研究[J].林产化学与工业,2007,27(4):97-102.
Yan Hong, Yang Qian. Study on the degradation of wheat bran by *Bacillus licheniformis*[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2007, 27(4): 97-102. (in Chinese)

Preparation of Xylooligosaccharides Producing Solid Waste Based Biodegradable Seedling Pots

Li Daoyi Wang Xiaoyan Jing Quanrong Si Weiwei Li Jin Li Shujun
(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Xylooligosaccharides producing solid waste (XPSW) was the main solid waste of

xylooligosaccharides producing from corn cobs. To utilize that biorefinery waste, biodegradable seeding pots were prepared using XPSW as main ingredient through dry thermo-compression molding method. The most economical formula of raw powders for XPSW based seeding pots was screened out as XPSW: wheat bran: adhesive: release agent = 68:26:6.3:1 by weight. Also the molding parameters were optimized by orthogonal test, and the optimal compression temperature, compression pressure and holding time was 180°C, 180 MPa and 4.5 s, respectively. Under those conditions, the dry compress strength of XPSW based seeding pots was 2 251 N, and wet compress strength was 417 N. Compare to corn cobs, higher lignin content and lower hemicellulose content of XPSW made the XPSW based seedling pots had better mechanical strength and lower water absorption. Fungal-growth test showed that the XPSW based seedling pots had good biodegradability.

Key words: Xylooligosaccharides producing solid waste Biodegradable seedling pots Dry thermo-compression molding Compress strength

(上接第 229 页)

Effect of Components of WPC Neutrase Hydrolysates on Iron Uptake by Caco-2 Cells

Gao Qian Liu Yunzhu Liang Jianfen

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Neutrase hydrolysis of WPC produces hydrolysates that were proved to enhance iron uptake by Caco-2 cells. The objectives of this study were to investigate effects of components of hydrolysates and digestion products of hydrolysates of neutrase-treated WPC on iron uptake. The hydrolysates of WPC treated with neutrase were separated by ultrafiltration. Effect of different components of hydrolysates on iron uptake was studied by in vitro digestion combined with Caco-2 cell model. The results showed that low molecular components (below 10 kDa) enhanced iron bioavailability significantly ($p < 0.05$). The components of 3 kR (3 ~ 10 kDa) and 3kF (below 3 kDa) increased iron bioavailability to 23.32% and 24.23%, respectively, compared to untreated WPC (2.58%). Bioavailability of iron from ferrous sulfate added with different components of the hydrolysates was significantly associated with iron absorption ($r = 0.935$, $p < 0.01$), while there was no significant relation between iron dialyzability and bioavailability. The hydrolysates of neutrase-treated WPC was digested by pepsin and trypsin gradually to obtain the digestion products, and then separated into four components of different molecular weight by Sephadex G-25. Iron absorption was studied by Caco-2 cells. The results suggested that the components at molecular weight no more than 1 kDa significantly ($p < 0.05$) increased iron absorption to 90.47% compared with 25.13% in the control, while the components with molecular weight at 1 ~ 5 kDa acted as inhibitor.

Key words: Iron WPC Hydrolysates Separation of components Absorption Bioavailability