

太阳能干燥装置性能及三七干燥效果

王云峰¹, 李明^{1*}, 王六玲², 魏生贤¹

(1. 云南师范大学可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室, 昆明 650092;

2. 云南师范大学物理与电子信息学院, 昆明 650092)

摘要:为提高三七干燥效率和干燥品质, 该文提出了一种由单层盖板V型波纹槽吸热面双通道的空气集热器和绝热干燥箱及通风装置组成的太阳能三七干燥设备, 研究了该太阳能干燥设备的集热性能, 并在昆明的气候条件下对三七进行了太阳能干燥试验, 且与传统的自然干燥作了比较。试验结果表明, 所设计的空气集热器在空气流量为0.0597 kg/s时, 冬季晴天条件下最高温度和最高效率分别达到62.2℃和76.7%, 平均温度和热效率分别为54.6℃和66.5%, 在多云的天气下平均热效率和平均温度可分别达53.9%和47.5℃; 干燥箱采用上进风方式时, 虽干燥箱内温度分布不均匀, 上、中、下层温差较大, 但升温较快, 且平均箱温也比采用下进风方式高; 采用了导风板后, 箱内温度分布均匀性有显著改善。利用该太阳能干燥系统对三七进行干燥, 其干燥周期为450 min, 是自然干燥周期的一半, 同时避免了二次污染, 三七产品质量得到提高, 有较好的应用前景。

关键词: 太阳能干燥机, 农产品, 干燥, 三七

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.10.063

中图分类号: S214.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-10-0377-07

王云峰, 李明, 王六玲, 等. 太阳能干燥装置性能及三七干燥效果[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 377-383.

Wang Yunfeng, Li Ming, Wang Liuling, et al. Performance of solar dryer and drying effect for panax notoginseng[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 377-383. (in Chinese with English abstract)

0 引言

名贵中药材——三七, 广泛种植于中国云南省文山州境内。由于科技条件等原因, 至今绝大多数种植户仍沿用原始的露天自然晾晒方式对其进行干燥。露天自然晾晒干燥具有晾晒占地面积大, 侵占城市道路等缺点, 给城市交通带来了巨大的压力; 又由于蝇虫鼠蚁、汽车尾气等的二次污染的出现, 影响三七干燥后的品质; 此外太阳辐射直接照射还会对三七外观色泽和有效成分造成一定影响^[1-3]。为解决上述问题, 很多学者已对干燥三七进行了研究, 如云南农业大学的李一果提出用真空冷冻干燥三七的方法^[4], 但此法加工工艺和设备复杂、能耗大、成本高, 不太适合农村分散加工模式。利用合理、高效、廉价的设备将取之不尽、用之不竭且无污染的太阳能来干燥农副产品和中草药, 以取得较好的经济效益, 是近年来世界各国众多太阳能热利用中的研究热点^[5-10]。国外学者 Akbulut 对桑葚进行了太阳能干燥的试验研究并建立了其薄层干燥数学模型^[11]; Tiwari 研制了热、电联

产 (photovoltaic/thermal, PV/T) 联合干燥设备且对其工作参数进行了分析^[12]; Montero 等人设计建造了专为工农业副产品进行干燥的太阳能干燥设备^[13]。国内学者王海等研制了混联式太阳能果蔬干燥机, 并对无核葡萄进行了干燥试验研究^[14-15]; 刘圣勇等利用太阳能设备对皮毛制品和玉米进行了干燥研究^[16-17], 这些研究为利用太阳能干燥农副产品作出了有益的尝试, 但是对于中草药三七的太阳能干燥, 国内外鲜见报道, 本文尝试提出并研制了一种太阳能三七干燥设备, 对其性能进行了测试, 以期探索三七干燥的节能、环保方法提供參考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

该太阳能集热干燥装置由3部分组成: 太阳能空气集热器部分, 干燥箱部分和通风部分, 装置示意及实物如图1所示。其工作原理如下: 空气集热器内的黑色V型波纹吸热板因吸收太阳热辐射能而升高温度, 冷空气由底部进风口进入集热器, 流经吸热板后被加热升温, 并在风机牵引下由集热器顶端出口流入干燥箱中, 对箱内潮湿物料进行干燥。流经吸热板的冷空气被加热升温, 虽含水率不变, 但相对湿度降低, 因而吸湿能力加强, 能带走待干物料中的更多水分, 提高了干燥速率, 缩短了干燥周期。

1.1.1 空气集热器

太阳能空气集热器采光面积为2.0 m²; 集热器长2.0 m, 宽1.0 m, 厚0.16 m, 采光面玻璃盖板厚0.4 cm, 中间铝制V型吸热板厚0.05 cm, V型槽高3 cm, 经氧化

收稿日期: 2010-03-08 修订日期: 2010-10-08

基金项目: 云南省社会发展科技计划(2007C00162; 2008CA024); 国家自然科学基金项目(50966004); 高等学校博士学科点专项科研基金(20095303110001); 教育部长江学者和创新团队发展计划资助

作者简介: 王云峰(1984-), 男, 山西高平人, 主要从事太阳能光热利用。昆明 云南师范大学可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室, 650092。Email: wyfdoc@mail.ustc.edu.cn

*通信作者: 李明(1964-), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事太阳能利用研究。昆明 云南师范大学可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室, 650092。Email: lmillydy@126.com

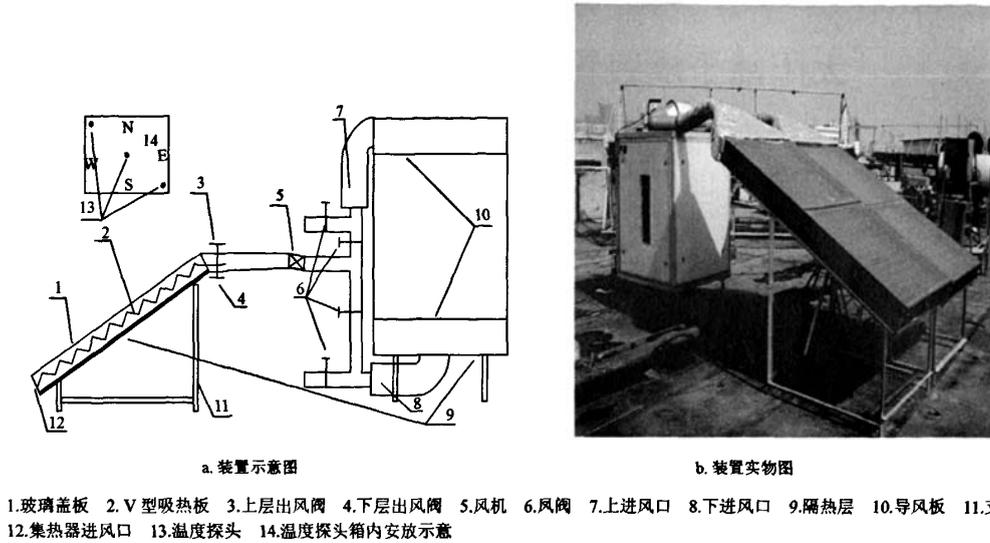


图1 太阳能干燥试验系统
Fig.1 Experimental system of solar drier

处理后变黑,吸热板最高点距玻璃盖板3 cm,最低点距底部背板2 cm,侧面及底部保温层厚2.5 cm,保温层主要原料为丁腈橡胶和聚氯乙烯,其导热系数为0.034 W/mK。集热器采光面与水平面呈30°角朝正南方向倾斜放置,顶部开口,通过管道与风机相连。该空气集热器为双通道,即空气可在V型吸热板与玻璃盖板组成的上层通道中流动,或在V型吸热板与背板组成的下层通道中流动,也可同时在上、下两层中流动,由集热器出口处的上、下风阀选择气流通道并控制各层气流大小以调节混合比例和调节风温。为增加得热量,采用2个相同的集热器并联供热。

1.1.2 通风部分

气流动力采用低噪音高速管道风机,额定功率250 W,转速2 880 r/min。风机将集热器出来的热空气抽进干燥箱中,可通过调节管道上的风阀控制进入干燥箱内热空气的流量。通风管道直径为15 cm,所有管道外均用2 cm厚的保温石棉包裹后再贴上锡箔纸,以减少管道的热损失。

1.1.3 干燥箱

长方体结构的干燥箱高135 cm,长107 cm,宽96 cm,外箱壁用彩钢板夹5 cm厚的聚苯乙烯泡沫板制成以保证机械强度和耐候性,箱内容积为120 cm×95 cm×80 cm。干燥箱在顶部和底部分别设有进、出风口,通过风口处安装的风阀可选择进风通道和控制进、出风量以调节箱温和箱内湿度。在上、下进风口处增设有分风孔的导风板,不同位置处的分风孔其尺寸大小及分布密度根据具体情况而定,以达到使进出干燥箱的风量在整个水平面上均匀分布的目的。箱内设有可调物料架,可根据干燥物料的数量、堆放密度和高度调整每个料架之间的距离,以控制干燥生产率 and 箱内温度垂直分布情况,最终优化干燥过程。

1.2 试验方法及过程

将上述2块平板空气集热器用直径15 cm的空气管道并联,并在集热器出风口处及风机两端用1.5 cm厚的保温棉和锡箔纸包裹,以减少热空气传输过程中的对流及辐射换热损失。1) TBQ-2型总辐射表(锦州阳光科技有限公司,误差±2%)与空气集热器同角度倾斜放置,以测量试验过程中的太阳辐射值。2)在干燥箱内顶层、中层和底层3个区域中,每个区域分别用3枚温度探头测试该区域温度分布情况,各层的3个温度探头处于同一水平面上,位置如图1a中14所示,分别用其所测温度的平均值代表所测区域的温度;另外在百叶箱内布置1枚温度探头以测量环境温度。3)3个空气湿度传感器(测量范围为10%~99%,相对湿度在20%~80%时误差为±3%,其余范围误差为±5%)分别放置于集热器空气进口处、干燥箱内和干燥箱排气口处用以测量该处的空气相对湿度。4) AR816型风速仪(香港希玛科技有限公司,测量范围0.3~30 m/s,误差±5%)测量空气管道内的热风流速。每隔10 min记录一次试验数据。

干燥物料取文山州境内种植采收后的鲜三七10 kg。去泥、洗净并去除毛根后分为等质量的2部分,一部分均匀平铺于85 cm×70 cm的物料网架上并置于干燥箱内用该太阳能干燥装置干燥,另一部分与干燥箱内同样的堆放密度置于室外空气流动、阳光充足的地方自然晾晒干燥。

试验地点选在云南昆明的云南师范大学光热试验中心。试验时间从2009-12-03至2010-02-01,均分别对干燥装置进行了空仓及实仓测试。

2 结果与分析

三七采收季节多为春、冬季,因此太阳能干燥系统在春、冬季的集热性能尤为重要。在三七采收期对该太阳能集热干燥系统连续多天进行测试,得出了不同工况

下的多组试验数据，其部分试验结果如表 1 所示。表 1 中所示的工作温度指的是箱内 3 个高度上温度的平均值，效率是由式 (1) 计算得到的集热器的效率。效率稍微偏高，笔者认为一是由于在实测过程中某些测量仪器对外

界条件变化的响应时间过长，产生测量结果的延时而导致计算结果的偏差；二是由于集热器存在一定的热容，当辐照度波动时，集热器存储的热量向外释放热量而引起温度的恒定，也导致了实测效率的偏高。

表 1 太阳能集热干燥系统试验结果
Table 1 Measured data of the solar collector drying system

试验日期	工作时间	环境温度/℃	累计接收辐照量/MJ	最高工作温度/℃	平均工作温度/℃	最高效率/%	平均效率/%
2010-01-19 (典型晴天)	10:00-16:00	16.3~24.0	16.7	58.6	50.8	75.8	60.8
2010-01-21 (典型晴天)	8:40-16:40	8.2~20.4	19.3	62.2	54.6	76.1	66.5
2010-01-22 (典型晴天)	9:00-16:00	9.3~19.5	20.0	60.1	51.3	76.7	67.1
2010-01-20 (晴间多云)	11:30-16:30	16.4~22.8	14.6	54.7	47.5	60.7	53.9
2010-01-26 (晴间多云)	10:20-16:20	8.9~19.3	15.5	56.4	45.4	63.9	51.6

注：进风流量为 0.597 kg/s，下同。

2.1 干燥系统热性能

2.1.1 太阳能空气集热器热性能

太阳能集热器的瞬时效率为^[18]

$$\eta = \frac{C_p m_a (T_o - T_i)}{A_c G_T} = F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{G_T} \quad (1)$$

式中， η 为集热器效率； C_p 为空气的比热容，J/(kg·℃)； m_a 为集热器的空气流量，kg/s； T_o 为集热器出口空气温度，℃； T_i 为集热器进口空气温度，℃； T_a 为环境温度，℃； A_c 为太阳能集热器采光面积，m²； G_T 为太阳辐照值，W/m²； F_R 为集热器热迁移因子； τ 为集热器玻璃盖板对太阳光的透射率； α 为集热器玻璃盖板对太阳光的吸收率； U_L 为集热器的总热损系数。由式 (1) 整理得^[5]

$$T_o - T_i = \frac{F_R (\tau\alpha) \cdot A_c}{C_p m_a} G_T - \frac{F_R I_{th} (\tau\alpha) \cdot A_c}{C_p m_a} \quad (2)$$

式中 I_{th} 为门限入射辐照值 $I_{th} = \frac{U_L (T_i - T_a)}{(\tau\alpha)}$ 。由式 (1) 知，

当集热器进口空气温度就是环境温度时，热效率只取决于集热器的热迁移因子和透射吸收积，此时集热器效率为

$$\eta = F_R (\tau\alpha) \quad (3)$$

透射吸收积为常数时，其效率只与热迁移因子有关，而热迁移因子主要取决于空气流量，在试验流量为 0.0597 kg/s 时，由式 (2) 可知该空气集热器进、出口温差与太阳辐照值呈线性关系，这个线性关系根据 2009-12-2010-01 典型天气条件中 28 d 的试验数据线性拟合得式 (4)

$$T_o - T_i = 0.03001G_T + 9.21115 \quad (4)$$

结果如图 2 所示，试验期间的太阳辐照值在 200~1 100 W/m² 之间变化，其拟合决定系数 R^2 为 0.6659。同时，可得集热器出口温度与进口温度的关系为

$$T_o = 2.49656T_i + 10.22823 \quad (5)$$

如图 3 所示，式 (5) 中的集热器进口温度 T_i 也就是环境温度 T_a 。

对于本文所设计的太阳能空气集热器，只需根据升温公式 (4) 和太阳辐射值即可预测出集热器的出口温升，这对于该集热器的实际应用是很有帮助的。

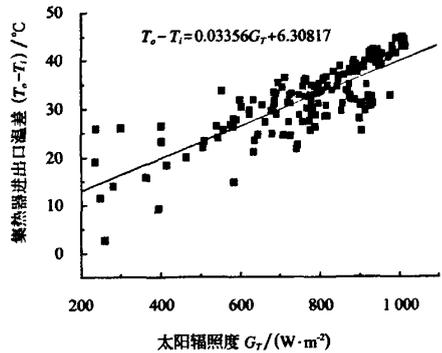


图 2 进出口温差与辐照度的线性关系
Fig.2 Linear correlation between solar radiation and difference between outlet and inlet temperature

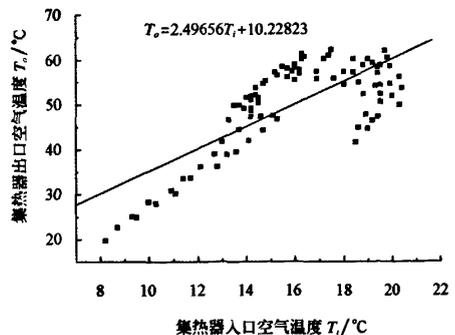


图 3 进口温度与出口温度的线性关系
Fig.3 Linear correlation between inlet ambient air and output-air temperature

由式 (1) 知，在一天中集热器效率和出口温度随着太阳辐照值和环境温度的变化而变化，其变化趋势如图 4 所示。在一个典型晴天测试，如表 1 中 2010-01-21 和图 4a 所示，当天风机出口热空气最高温度值 62.2℃ (时间 13:36; 辐射值 992 W/m²)，全天平均出口风温为 54.6℃，平均热效率为 66.5%；在一个典型多云天进行测试，如表 1 中 1 月 20 日和图 4b 所示，虽太阳辐照值波动很大，但集热器出口热风温度相对稳定，几乎都在 45℃ 以上，全天平均温度为 47.5℃，平均热效率为 53.9%。此外，该太

太阳能干燥系统在天气晴朗条件下日平均热效率均在 60% 以上, 在多云天气状况下日平均热效率也高于 50%。

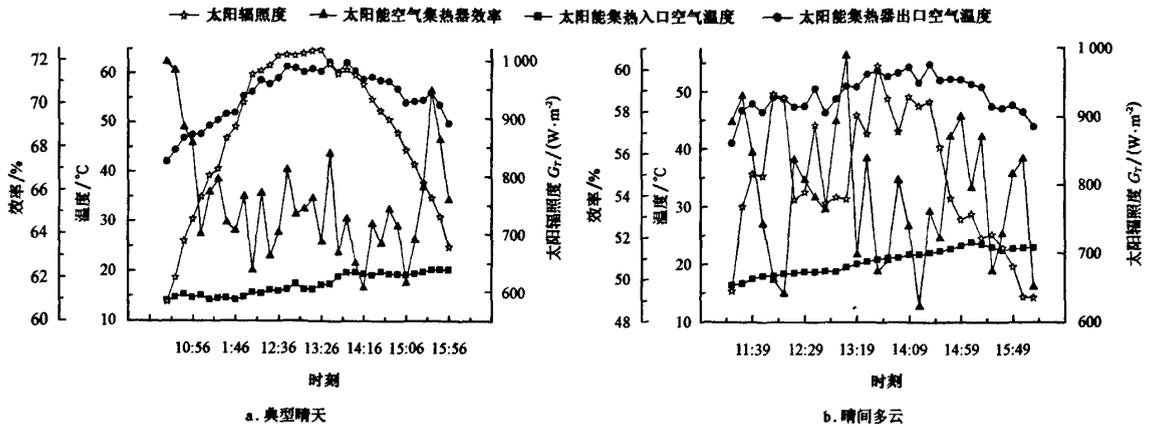


图4 太阳能空气集热器效率和出口温度随太阳辐照度变化曲线

Fig.4 Variation of efficiency and outlet temperature of solar air-heating collector with insolation

从图 4 发现, 集热器出口温度总的变化趋势与集热器采光面受到的太阳辐照值变化一致, 即当太阳辐照值增加时集热器出口风温会随之升高, 但升高到一定的温度后趋于稳定, 这是因为此时空气集热器的吸热板、盖板及边框都充分吸热, 温度比环境温度高很多, 其对流散热损失和向外热辐射很大, 损失大量热量, 这也是出口温度越高但效率反而下降的原因; 中午过后太阳辐照值明显下降, 但集热器出口热空气温度下降并不很明显, 这主要是由于集热器的热惯性因素, 它将之前板壁吸收

的热量逐渐释放给流过它的空气。
2.1.2 太阳能干燥箱热性能

在如图 1 所示的系统装置中, 分别采取 2 种通风方式对干燥箱供热。一种采用热风由干燥箱顶部进入, 从底部排气口排出; 另一种则采取相反的流动方式, 即底部进风, 顶部排风。2 种方式的进风流量同为 0.0597 kg/s, 在设有导风板的情况下分别对干燥箱内温度进行测试, 测试结果如图 5 及表 2 所示。

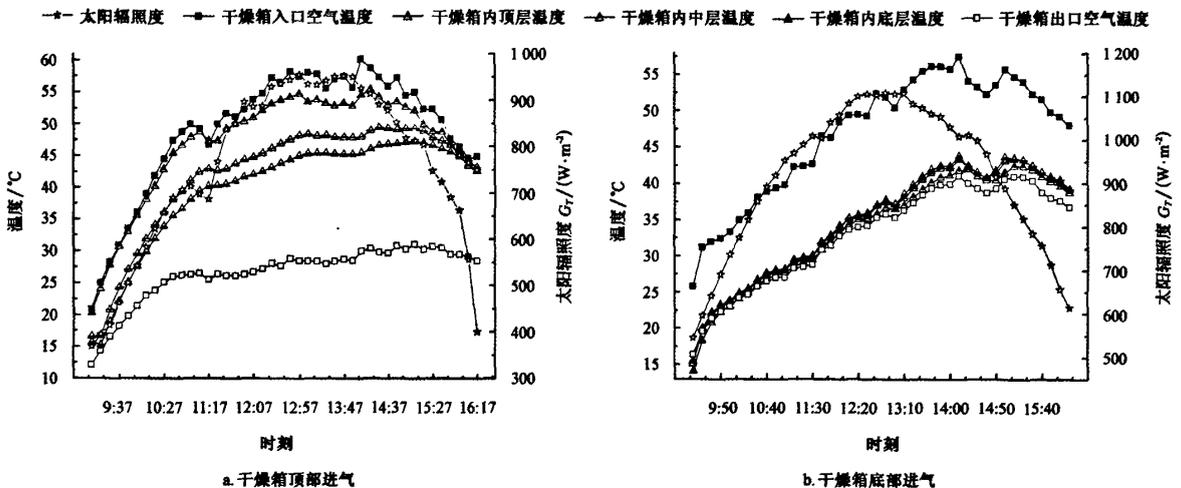


图5 两种通风方式下干燥箱内不同高度温度变化

Fig.5 Variation of temperature of drying air in different height inside the chamber with two modes of ventilation

表2 2种通风方式下的干燥箱内温度对比

Table 2 Contrast of temperature of the drying air inside the chamber with two modes of ventilation

	$\Delta T_{\max(L, \Phi)}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\text{avg}(L, \Phi)}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\max(F, \Phi)}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\text{avg}(F, \Phi)}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{avg}}/^{\circ}\text{C}$
顶部进风, 底部排风	7.2	5.4	3.2	2.5	55.0	42.9
底部进风, 顶部排风	0.6	0.3	1.5	0.5	40.0	32.0

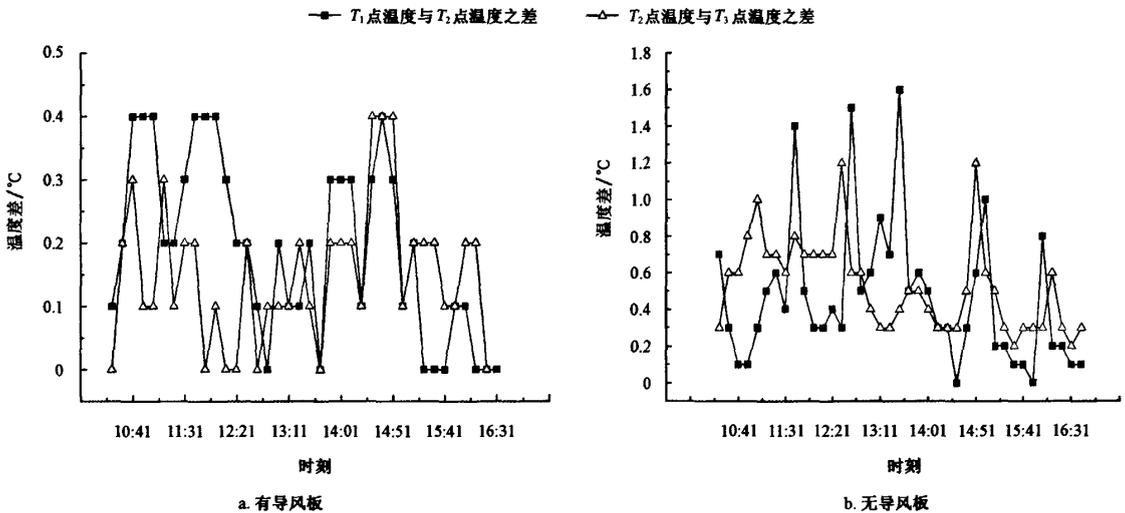
注: $\Delta T_{\max(L, \Phi)}$ 和 $\Delta T_{\text{avg}(L, \Phi)}$ 分别为干燥箱内上、中层的最大温差和平均温差; $\Delta T_{\max(F, \Phi)}$ 和 $\Delta T_{\text{avg}(F, \Phi)}$ 分别为干燥箱内下、中层的最大温差和平均温差; T_{\max} 和 T_{avg} 分别为干燥箱内的最高温度和平均温度。

采用顶部进风底部排风方式时，干燥箱内上、中、下层有较大温差，温度由上而下逐渐降低，且出口排风温度与箱内最低的下层温度也具较大温差，最大达 17℃，平均在 10℃以上。采取该方式时，干燥箱内整体温度上升较快，干燥系统从上午 9:07 开始工作，到 10:17 时箱内上层温度即达到 40℃，约 2 h 后，整个箱内温度都在 40℃以上，之后虽随着辐照度的增加有缓慢增长，但总体趋于稳定，上层最高温度可达 55℃。在下午 14:00 过后，太阳辐照值迅速降低，干燥箱内各层温度随着进风温度的降低逐渐缩小温差，约在下午 16:00，太阳辐照强度降为 401 W/m²，上、中、下层温度均趋于 42℃。

采用底部进风顶部排风方式时，干燥箱内上、中、下层温度较为接近，温差范围较小，均在 1℃左右，底部温度略高，顶部略低，出口排风温度也与顶部接近，最大温差仅为 2.3℃。箱内整体温度分布均匀，但总体温度

较低，箱内最高温度 40℃（下午 14:00 太阳辐照值为 990 W/m²）。采取此种方式时，进风温度高、密度小，热空气不断向干燥箱上层运动，直接从顶端出口排出，热量并未被干燥物有效利用，因此排风温度较高，能量损失较大，可见此方式不利于箱内保温和节能。

干燥箱中采用了导风板以消除箱内热风死角和保持温度分布均匀。为考察导风板的实际效果，进行了对比测试，测试结果如图 6 及表 3 所示。从图 6 可看出，有导风板时干燥箱内温度分布较为均匀，同一平面的温差较小，在 0~0.4℃范围内稳定波动，平均温差低于 0.2℃。无导风板时干燥箱内温度分布较不均匀，同一平面上的温差相对较大，在 0~1.6℃范围内波动，平均温差达 0.5℃，与有导风板时相比略高，这与试验所用干燥箱体积较小有关，若采用更大容积干燥箱，则导风板对温度分布均匀性影响将更为显著。



注：T₁、T₂、T₃ 分别为干燥箱内中层平面上不同点的温度，其中 T₂ 为测试平面中轴线处的温度，T₁ 和 T₃ 分别为以 T₂ 为对称中心的矩形测试面对角线的相互对称点的温度，如图 1a 中 14 所示，E 面为进风面，靠近该面处的温度为 T₁ 所测，靠近 W 面的温度为 T₃ 所测

图 6 有、无导风板情况下同一水平面上各点温度差

Fig.6 Variation of temperature differences of the drying air on identical horizon inside the chamber with or without air deflector

表 3 有、无导风板情况下同一水平面上温度差对比

Table 3 Contrast of temperature difference of the drying air on identical horizon inside the chamber with or without air deflector

	$\Delta T_{max(1,2)}$ /℃	$\Delta T_{avg(1,2)}$ /℃	$\Delta T_{max(2,3)}$ /℃	$\Delta T_{avg(2,3)}$ /℃
有导风板	0.40	0.19	0.40	0.15
无导风板	1.60	0.46	1.20	0.52

注： $\Delta T_{max(1,2)}$ 和 $\Delta T_{avg(1,2)}$ 分别为 T₁ 与 T₂ 的最大温差与平均温差， $\Delta T_{max(2,3)}$ 和 $\Delta T_{avg(2,3)}$ 分别为 T₂ 与 T₃ 的最大温差与平均温差。(T₁、T₂、T₃ 为图 6 所注)

2.2 三七干燥过程

图 7 为放置在太阳能干燥箱内和露天自然环境中的 2 组三七干燥样品的含水率变化对比图。对比试验测试期间的太阳辐照度和环境温度变化情况已在图 8 中给出，在傍晚及夜间不工作时 2 组样品均被密封保存，图中给

出的只是干燥工作起、止期间的气象数据，夜间数据未给出因此图中数据不连续。可以看出，鲜三七从初始含水率 66.53%降低至最终含水率 17.15%，在空气流量为 0.0597 kg/s 的太阳能干燥箱中干燥只用 450 min。而同样天气状况，露天自然晾晒干燥的鲜三七样品，在 450 min 后含水率仅降为 34.11%，由于夜晚气温低，空气相对湿度较大，隔夜的三七吸湿后含水率又略有上升，再经过 440 min 的露天干燥，最终含水率才降至 18.36%，即整个自然干燥过程需 990 min。从图 7 知，在干燥开始后的前 100 min 内 2 种干燥方式的降水速率相差不大，这主要是由于这段时间脱掉的水分主要是三七内的非结合水和表面的附着水，这部分水分结合强度弱较易脱去，干燥速率主要取决于环境温度和风速。之后，自然干燥速率逐渐降低，是由于此时三七中水分主要以结合水形式存在，

这部分水分较难脱去,主要取决于外界空气的相对湿度和温度。而太阳能干燥箱中的温度比环境温度高,热空气的相对湿度较低,湿三七中的水蒸气分压大大高于周围热空气的水蒸气分压,较利于推动三七内部水分向表面运动,因此干燥速率较快。这是采用太阳能干燥比自然干燥更有效的原因之一。

在对干燥后的三七样品进行加工的过程中发现,采用太阳能干燥设备干燥的三七,由于整个干燥过程都是封闭在干燥箱中进行的,干燥前洗净的三七被外界的灰尘、污染物污染几率很小,经过干燥后可直接加工或食用。而自然露天晾晒干燥的三七,虽干燥前去泥、洗净,但由于干燥过程开放,晾晒地选于空气流动较好的风口处,干燥过程中三七难免会受到尘土及空气中的铅、汞等污染物污染。若要将其加工成粉末状,还须再次清洗及反复晒干,这将耗时耗工。显然,采用本太阳能干燥系统干燥三七的优势在于不仅大大缩短干燥时间,还提高了干燥质量。

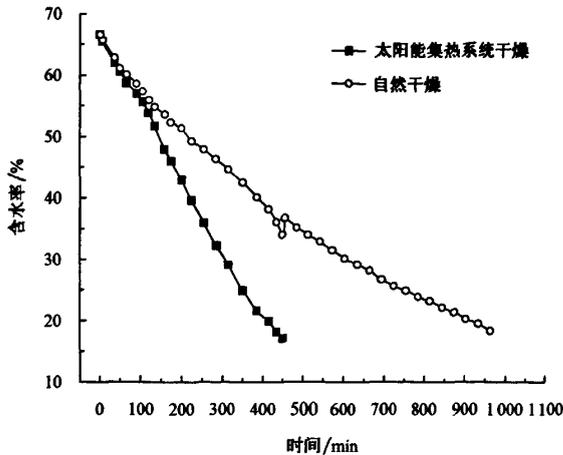


图7 自然干燥与太阳能干燥含水率变化对比

Fig.7 Contrast of moisture content between the solar drying and natural drying

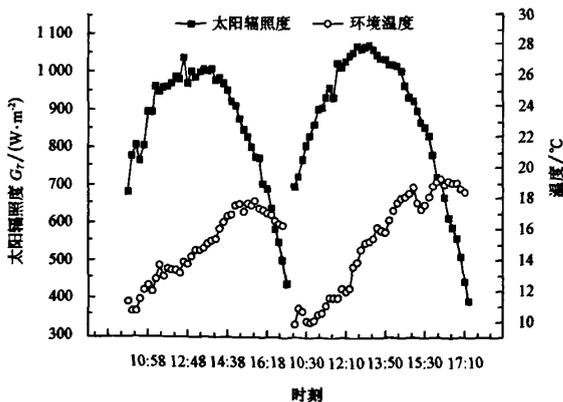


图8 试验期间的辐照度与环境温度变化

Fig.8 Variation of ambient air temperature and solar radiation during the period of experiment

3 结论

本文通过对自行设计的太阳能三七干燥设备进行了性能测试,并在相同条件下与自然干燥进行了对比研究,结果表明:

1) 单层玻璃盖面V型吸热板双通道的太阳能空气集热器在昆明冬季某个典型晴天,空气流量为0.0597 kg/s时,集热器出口最高温度可达62.2℃,效率最高可达76.7%,平均效率最高达67.1%;在多云天气状况下也能保持热效率在50%以上。

2) 设有导流板的保温干燥箱,采用上部进风、底部排风方式,平均箱温为48.9℃要高于采用底部进风、顶部排风时的平均箱温32.3℃,且升温较快,保温效果好。

3) 采用太阳能干燥能将三七干燥周期缩短一半,约7h,还能免除环境污染对三七品质的影响。此种太阳能三七干燥系统具有广阔的发展前景和推广价值。

【参考文献】

- [1] 郑光植, 杨崇仁. 三七生物学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [2] 崔秀明, 朱艳, 廖鹤龄, 等. 三七产业核心竞争力研究[M]. 昆明: 云南民族出版社, 2008.
- [3] 崔秀明, 詹华强, 董婷霞, 著. 参中之王三七[M]. 香港: 天地图书有限公司, 2008.
- [4] 李一果, 段承俐, 萧凤回, 等. 冻干技术在中药材及三七加工中的应用[J]. 现代中药研究与实践, 2003C00: 60-62.
- [5] Gbaha P, Yobouet Andoh H, Kouassi Saraka J, et al. Experimental investigation of a solar dryer with natural convective heat flow[J]. Renewable Energy, 2007, 32(11): 1817-1829.
- [6] Janjai S, Tung P. Performance of a solar dryer using hot air from roof-integrated solar collectors for drying herbs and spices[J]. Renewable Energy, 2005, 30(14): 2085-2095.
- [7] Dattatreya M K, Samuel D V K. Convective flat-plate solar heat collector for cauliflower drying[J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(2): 189-198.
- [8] Li Zhimin, Zhong Hao, Tang Runsheng, et al. Experimental investigation on solar drying of salted greengages[J]. Renewable Energy, 2006, 31(6): 837-847.
- [9] Smitabhindu R, Janjai S, Chankong V. Optimization of a solar-assisted drying system for drying bananas[J]. Renewable Energy, 2008, 33(7): 1523-1531.
- [10] Khalil E A, Abdul Jabbar N K, Tadahmun A Y. Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq[J]. Desalination, 2007, 209(1/2/3): 163-170.
- [11] Abdullah A, Aydin D. Thin layer solar drying and mathematical modeling of mulberry[J]. International Journal of Energy Research, 2009, 33(7): 687-695.
- [12] Tiwari G N, Sujata N, Swapnil D, et al. Performance analysis of a conventional PV/T mixed mode dryer under no load condition[J]. International Journal of Energy Research, 2009, 33(10): 919-930.
- [13] Montero I, Blanco J, Miranda T, et al. Design, construction

- and performance testing of a solar dryer for agroindustrial by-products[J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51(7): 1510–1521.
- [14] 马洪江, 王海, 王颀. 混联式太阳能果蔬烘干机的研制[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(3): 50–54.
- Ma Hongjiang, Wang Hai, Wang Jie. Design of hybrid type mixed-mode solar dryer for fruits and vegetables[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(3): 50–54. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘一健, 杨洋, 王海, 等. 混联式太阳能果蔬干燥设备干燥无核白葡萄的试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 288–292.
- Liu Yijian, Yang Yang, Wang hai, et al. Experiment for drying Thomson seedless grape with a multifunctional composed of series-parallel solar energy collectors for drying fruits and vegetables[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(5): 288–292. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘圣勇, 杜金生, 杨群发, 等. 太阳能干燥毛皮制品的实验研究[J]. *农业工程学报*, 1997, 13(2): 225–229.
- Liu Shengyong, Du Jinsheng, Yang Qunfa, et al. An experimental study on solar energy to dry fur products[J]. *Transactions of the CSAE*, 1997, 13(2): 225–229. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘圣勇, 张百良, 袁超, 等. 采用太阳能集热器干燥玉米的研究[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(6): 93–96.
- Liu Shengyong, Zhang Bailiang, Yuan Chao, et al. Experimental study on drying corn using solar collectors[J]. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(6): 93–96. (in Chinese with English abstract)
- [18] John A. duffie, William A. backman. *Solar engineering of thermal processes*[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc: 251–252.

Performance of solar dryer and drying effect for panax notoginseng

Wang Yunfeng¹, Li Ming^{1*}, Wang Liuling², Wei Shengxian¹

(1. Key Laboratory of Advanced Technique and Preparation for Renewable Energy Materials, Ministry of Education, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China;

2. School of Physics and Electric Information, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and quality of panax notoginseng drying, a solar dryer consisting of two identical solar collector, solar drying cabinet, and air blower for panax notoginseng drying were constructed. The air solar collector consists of two air passes having V-groove absorption plates, and a single glass cover. The thermal performance of solar dryer was investigated and experiment with the solar dryer for panax notoginseng was conducted under climate condition of Kunming, Yunnan Province. Drying effect of the equipment was compared with that of traditional nature drying. The results showed that the solar air heating collectors could obtain a good thermal performance in winter season. While the air flow mass was 0.0597 kg/s, the maximum temperature of outlet air and maximum thermal efficiency were 62.2°C and 76.7% respectively. Its average efficiency and temperature was 53.9% and 47.5°C even in cloudy day, respectively. With the mode of air entering from the top, the temperature distribution in drying cabinet was non-uniform, causing great temperature differences in different areas. However, air temperature with this mode rose rapidly and a higher average temperature could be gained than the way air entering from the bottom. With the air deflector, the uniformity of temperature distribution inside cabinet was improved significantly. The experimental comparison between two methods suggested that the solar drying was very effective, and the drying time was shorten to about 450 minutes from 990 minutes of the traditional sun drying. It is observed that the solar dryer could obtain higher quality than traditional drying method.

Key words: solar dryers, agricultural products, drying, panax notoginseng