

# 切片厚度对太阳能干燥哈密瓜片品质的影响

郭雪霞<sup>1</sup>, 张子赫<sup>2</sup>, 刘瑜<sup>1</sup>, 冉国伟<sup>1</sup>, 郭海枫<sup>1</sup>, 王海<sup>1\*</sup>

(1. 农业农村部规划设计研究院/农业农村部农产品产后处理重点实验室, 北京 100125; 2. 河北农业大学, 河北 保定 071001)

**摘要:**为提高哈密瓜片的干燥品质,采用太阳能干燥哈密瓜片,分析了2、5、8、11 mm不同切片厚度下,哈密瓜片的干燥时间、干燥速率、水分活度、质构、色泽、香气成分及能耗等指标。结果表明:哈密瓜片干燥时间随着厚度的减小而缩短,干燥过程只有降速阶段,厚度越大,哈密瓜干燥速率越慢;不同厚度的哈密瓜切片的水分活度会随着时间变化而减小,厚度越大,水分活度下降越快;随着切片厚度增加,哈密瓜干制品的硬度、黏附性、弹性和咀嚼性均增加;哈密瓜干制品的色泽 $L^*$ 随着切片厚度的增加而下降, $a^*$ 和 $b^*$ 值均随着厚度的增加而增加;不同切片厚度的干燥哈密瓜干中检出170种香气成分,相对含量最高的四类物质均为醇、酮、醛和酯类。不同切片厚度下的总能耗随着切片厚度的增加而增加,单位时间能耗在切片厚度为11 mm时显著高于其他各组( $P<0.05$ );2~8 mm切片厚度下,哈密瓜片品质优于其他厚度,适于哈密瓜片的太阳能干燥。

**关键词:**太阳能干燥;哈密瓜;切片厚度;品质;能耗

中图分类号: TS255.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-8581(2022)01-0172-06

## Effect of Slice Thickness on Quality of Solar Dried Hami Melon Slices

GUO Xue-xia<sup>1</sup>, ZHANG Zi-he<sup>2</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>, RAN Guo-wei<sup>1</sup>, GUO Hai-feng<sup>1</sup>, WANG Hai<sup>1\*</sup>

(1. Academy of Agricultural Planning and Engineering, Key Laboratory of Agro-Products Postharvest Handling, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 2. Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

**Abstract:** In order to improve the drying quality of Hami melon slices, solar energy was used to dry Hami melon slices. The drying time, drying rate, water activity, texture, color, aroma formation and energy consumption of Hami melon slices with different thickness of 2 mm, 5 mm, 8 mm and 11 mm were analyzed. The results showed that the drying time of Hami melon slices decreased with the decrease of thickness, and the drying process was only in the deceleration stage. The larger the thickness, the slower the drying speed of Hami melon slices. The water activity of Hami melon slices with different thickness would decrease with the change of time. The greater the thickness was, the faster the water activity would decrease. With the increase of slice thickness, the hardness, adhesiveness, elasticity and chewiness of dried Hami melon increased. The color  $L^*$  of dried Hami melon decreased with the increase of slice thickness, and the values of  $a^*$  and  $b^*$  increased with the increase of slice thickness. 170 kinds of aroma components were detected in dried Hami melon with different slice thickness, and the four kinds of substances with the highest relative content were alcohol, ketone, aldehyde and ester. Under different slice thickness, the total energy consumption increased with the increase of slice thickness, and the energy consumption per unit time of Hami melon slices with 11 mm was significantly higher than that of other groups ( $P<0.05$ ). Under the slice thickness of 2~8 mm, the quality of Hami melon slice was better than that of other thickness, which was suitable for Hami melon slices drying.

**Key words:** Solar drying; Hami melon; Slice thickness; Quality; Energy consumption

哈密瓜有“瓜中之王”的美称,风味独特,营养丰富,富含大量的矿物元素、丰富的膳食纤维和抗坏血酸、黄酮类化合物等健康功能成分,经常食用对身体健康有极大益处,其深受广大消费者喜爱<sup>[1]</sup>。哈密瓜采收期集中且货架期短,容易受温度、生产季节等不利因素的影响<sup>[2]</sup>,造成大量的

浪费,在贮运过程中有部分腐烂变质就会严重影响其商品性,因此哈密瓜的干燥技术逐渐受到人们的重视<sup>[3]</sup>。

干燥技术在哈密瓜加工中被广泛应用。目前,哈密瓜的干燥技术研究主要有自然晾晒、普通热风干燥、真空冷冻干燥、热泵干燥、变温压差膨化

收稿日期: 2021-06-28

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2015BAD19B01)。

作者简介: 郭雪霞(1978—),女,高级工程师,硕士,研究方向为农产品加工技术与装备。\*通信作者: 王海。

干燥、气体射流冲击干燥、太阳能干燥等。自然晾晒哈密瓜干是其加工普遍采用的方法,自然晾晒一般需要 10 d 左右时间<sup>[4]</sup>;杨咪等<sup>[5]</sup>也对哈密瓜热风烘干的工艺进行了正交试验,对比得出哈密瓜最佳的热风烘干工艺参数,为后续的加工贮藏提供依据。高静静等<sup>[2]</sup>研究了热风干燥和真空冷冻的干燥方式对哈密瓜片品质的影响,得出不同干燥方式对哈密瓜片的营养成分、色泽、微观结构以及香气成分均有显著影响。罗磊等<sup>[6]</sup>开展了充氮低氧热泵干燥哈密瓜片的工艺研究,得到最佳干燥工艺参数为干燥温度 50 ℃,切片厚度 5 mm,氧体积分数 5%。毕金峰等<sup>[7]</sup>对哈密瓜变温压差膨化的干燥工艺进行了优化研究,得出回归方程,通过响应面分析表明预干燥后原料的 3 个变量对于制后的产品含水率、色泽、膨化度和脆度都有显著的影响,干燥时间大约 8.1 h。张茜等<sup>[8]</sup>将气体射流冲击干燥技术用于哈密瓜片的干制,通过建立模型,经过对比分析,发现 Modified Page 模型可以较好地模拟干燥过程中的水分比变化,且与温度和风速都呈正相关,整个过程干燥的时间为 6 h。太阳能干燥技术是一种新型、节能、环保加工技术<sup>[9-11]</sup>,其干燥农产品可减少常规能耗 50% 以上<sup>[12-15]</sup>。郭雪霞等<sup>[16]</sup>研究对比了自然晾晒、太阳能干燥、真空冷冻干燥和市售这 4 种条件下的哈密瓜干产品品质,得到不同干燥方式对哈密瓜干的色泽、硬度、能耗、感官评分等影响差异显著,太阳能的干燥时间短,干燥产品的硬度、咀嚼性、色泽较好,香气成分保留较好,能耗较低,适合哈密瓜的干燥。本研究以哈密瓜片为原料,研究了不同太阳能干燥温度对哈密瓜片品质的影响,旨在为哈密瓜片工业干制提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与设备

哈密瓜为金蜜宝品种(购自超市);强制对流太阳能干燥器产自张家口市泰华机械厂;DRT-2 辐照仪产自北京天裕德有限公司;温度传感器产自天津市万博仪表制造有限公司;无纸记录仪产自北京中旺传感设备公司;OH6-914385-III 电热恒温鼓风干燥箱产自广东精华智能装备有限公司;FA-stlab 水分活度测定仪产自法国 GBX 公司;TMS-Pro 型食品物性分析仪产自美国 Food Technology Corporation 公司;CR-400 型色彩色差计产自柯尼卡美能达公司;电子秤产自凯丰集团

有限公司;DY5 多功能电量检测仪产自深圳多一电子有限公司;高效液相色谱产自美国 Waters 公司;GC-MS 气质联用仪产自美国 Agilent 公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 预处理方法 选择的哈密瓜大小适中,成熟度适宜,无病虫害,清洗、去皮、挖瓤。按照由内到外的顺序将哈密瓜切成厚度均匀的切片。每次试验前均使用新鲜样品进行预处理,同时测定初始含水率。

1.2.2 干燥试验设计 本试验旨在探究不同厚度参数对哈密瓜切片干燥过程的影响。设置 4 个水平,分别为切片厚度 2、5、8、11 mm,其中每个处理的干燥风速恒定为 3 m/s,干燥温度恒定为 60 ℃。将经预处理的哈密瓜切片,平铺到干燥箱 2 个托盘里,每个托盘里均匀放置 500 g 哈密瓜切片。干燥过程中每隔 1 h 测定哈密瓜的质量、水分活度和设备耗电量。每次称重待 5 min 后再次称重,用来计算不同时刻的干燥速率,直至哈密瓜切片的湿基含水率低于 15%,并测定哈密瓜干制品的理化性质。每个试验重复 3 次。

1.2.3 水分含量测定 初始含水率的测定参照 Hossain 等<sup>[17]</sup>的方法并改进,将哈密瓜样品按约 1 mm × 1 mm × 1 mm 大小切块,称重起始重量记为  $M_0$ ;然后放入称量瓶中,置于 105 ℃ 烘箱干燥 24 h,再次称重记为  $m_{干}$ ,试验重复 3 次。

初始含水率计算公式:

$$\text{初始干基含水率: } Db_i = (M_0 - m_{干}) / m_{干}$$

$$\text{初始湿基含水率: } Wb_i = (M_0 - m_{干}) / M_0$$

干燥过程中含水率计算公式:

$$\text{干基含水率: } Db_t = (M_t - m_{干}) / m_{干}$$

$$\text{湿基含水率: } Wb_t = (M_t - m_{干}) / M_t$$

其中,  $Db_t$ 、 $Wb_t$  分别为  $t$  时刻哈密瓜切片的干基含水率、湿基含水率,  $M_t$  为  $t$  时刻哈密瓜切片的质量。

1.2.4 水分活度测定 利用水分活度仪测定,参照文献<sup>[18]</sup>的方法测定。

1.2.5 质构测定 参照毕金峰等<sup>[7]</sup>方法并改进,将哈密瓜干裁剪为 2 cm × 2 cm 大小的方块。具体参数为感应元量程 999 N,样品形变量 75%,测试前后速度均为 2 mm/s,测试速度 1 mm/s,测试距离 5 mm,阈值 0.3 N,探头 P/50。试验重复 3 次。

1.2.6 色泽测定 利用 CR-400 型色彩色差计,参照文献<sup>[18]</sup>的方法测定。



1.2.7 香气成分测定 哈密瓜干粉碎、萃取、色谱条件、升温程序、质谱条件、定性分析等参考文献[18]的方法。

1.2.8 耗电量测定 利用DY5电量监测仪,参照文献[18]的方法测定。

1.2.9 试验结果统计分析 试验数据统计使用Excel软件,数据分析使用SPSS软件(差异显著性水平为0.05),试验数据用 $\bar{x} \pm SD$ 表示;香气成分分析使用Smica软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同切片厚度对哈密瓜切片干基含水率的影响

不同切片厚度下哈密瓜切片的干基含水率随时间的变化如图1所示。从图1可知,在干燥温度为60℃、风速3 m/s条件时,哈密瓜切片达到干燥终点的时间随着厚度的减小而缩短,各组之间差异显著( $P < 0.05$ ),说明减小切片厚度可以显著提高干燥效率。这可能是由于哈密瓜内部水分扩散到表面的时间和扩散距离呈正比,厚度小,水分扩散时间短,从而提高干燥效率,但厚度过大会使哈密瓜干的品质下降。

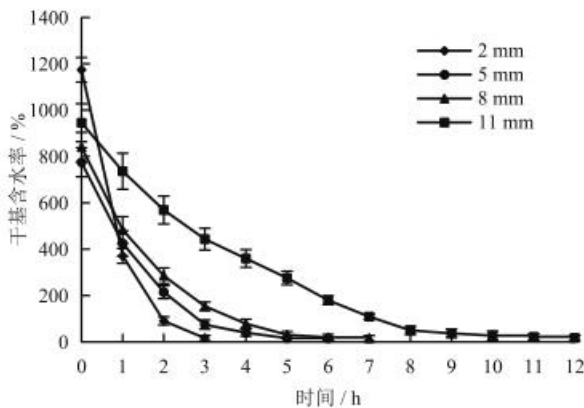


图1 不同切片厚度下哈密瓜切片含水率随时间的变化情况

### 2.2 不同切片厚度对哈密瓜切片干燥速率的影响

不同切片厚度对哈密瓜片干燥速率的影响如图2所示。从图2可见,在干燥温度为60℃、风速3 m/s条件时,不同厚度的哈密瓜太阳能干燥过程都只观察到降速阶段,没有反映出阶段0(初始阶段)和阶段I(恒定速率阶段),这是由于哈密瓜切片表面的非结合水很少,可以在很短时间内完全汽化,切片且厚度越大,哈密瓜干燥速率越慢。这是因为降至临界含水量后,哈密瓜切片内部水分扩散速率低于表面水分蒸发速率,此阶段的干燥速

率取决于材料内部的水分扩散活性。随着厚度增加,哈密瓜切片内部水分的扩散距离增加,同时单位体积哈密瓜切片的有效干燥面积减少<sup>[22]</sup>,从而降低了干燥速率。

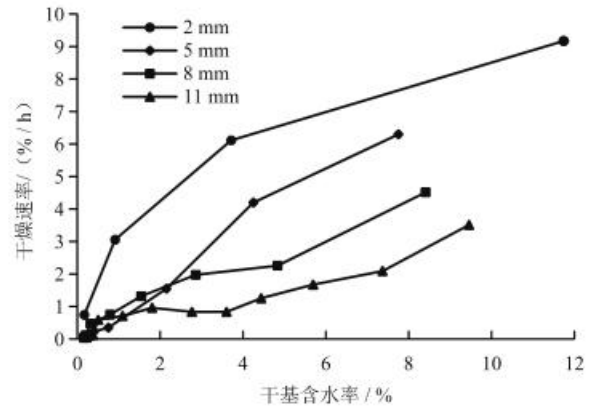


图2 不同哈密瓜切片厚度下干燥速率与干基含水率的关系

### 2.3 不同切片厚度对哈密瓜切片水分活度的影响

不同切片厚度对哈密瓜片水分活度变化的影响如图3所示。由图3可见,不同厚度的哈密瓜切片的水分活度会随着时间变化而减小,且在干燥初期,不同厚度的水分活度差异不显著。这是由于干燥初期主要为大量游离水的蒸发,对水分活度影响不大。当干燥进行到一定程度,水分活度会快速下降至0.4左右。其中干燥至4 h时,除了8 mm和11 mm外,其余各组间差异显著( $P < 0.05$ ),说明厚度越大,水分活度下降越快。这是因为厚度越小,水分扩散时间越短,水分活度变化越快。

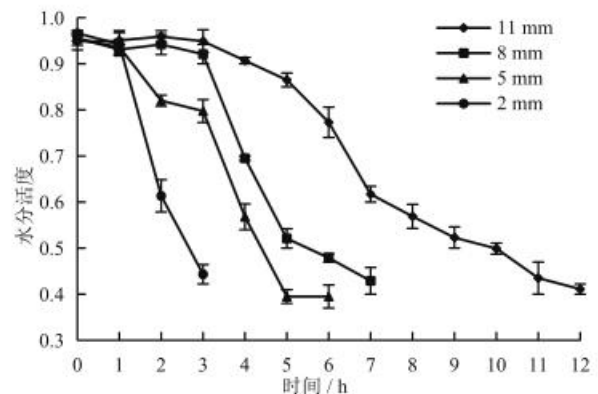


图3 切片厚度和时间参数对哈密瓜水分活度的影响

### 2.4 不同切片厚度对哈密瓜干质构的影响

不同切片厚度对哈密瓜干质构的影响见表1。由表1可见,当干燥温度为60℃、干燥风速3 m/s条件时,随切片厚度增加,哈密瓜干制品的硬度、

黏附性、弹性和咀嚼性均增加。其中,除了5 mm和8 mm切片厚度的哈密瓜外,其余厚度的硬度差异显著( $P<0.05$ );除了2 mm切片厚度哈密瓜的弹性、黏附性显著减小,其余各组间差异不显著;内聚性各组间差异均不显著;咀嚼性在2 mm和11 mm之

间差异显著( $P<0.05$ ),其他各组间差异不显著。研究表明增加切片厚度可以增加哈密瓜干的硬度和咀嚼性,这可能是由于随着切片厚度的增加,哈密瓜干制品的内部结合力增大,从而使硬度和咀嚼性增大。因此,适宜干燥风速范围为2~8 mm。

表1 不同切片厚度对哈密瓜干制品质构的影响

切片厚度/mm	硬度/N	黏附性/mJ	内聚性/Ratio	弹性/mm	咀嚼性/mJ
2	22.05 ± 13.22 c	0.12 ± 0.01 b	0.17 ± 0.05 a	0.56 ± 0.34 b	1.67 ± 0.51 c
5	128.36 ± 18.39 b	0.78 ± 0.15 a	0.09 ± 0.01 a	1.71 ± 0.04 a	18.91 ± 5.46 ab
8	137.90 ± 6.08 b	0.71 ± 0.86 a	0.08 ± 0.01 a	1.44 ± 0.14 a	15.03 ± 3.53 ab
11	177.60 ± 5.80 a	0.61 ± 0.16 a	0.11 ± 0.06 a	1.95 ± 0.25 a	37.13 ± 16.10 a

## 2.5 不同切片厚度对哈密瓜干色泽的影响

不同切片厚度对哈密瓜干色泽的影响见表2。由表2可知,在太阳能温度为60 ℃、干燥风速3 m/s条件时,哈密瓜干制品的 $L^*$ 随着切片厚度的增加而下降, $a^*$ 和 $b^*$ 值均随着厚度的增加而增加;5 mm和8 mm之间 $L^*$ 值和 $b^*$ 值差异性不显著,其余各组间差异性均显著( $P<0.05$ ); $a^*$ 值在11、2、

5 mm切片厚度之间差异性显著( $P<0.05$ ),说明厚度是影响哈密瓜干制品色泽的重要因素。这可能是由于厚度越大,干制品内部色素沉积越多,导致颜色加深;同时厚度增加使干燥时间大幅延长,从而导致干燥过程中各种反应的发生时间延长。因此,干燥时切片不应过厚,所以适宜切片厚度范围为2~8 mm。

表2 厚度参数对哈密瓜干色泽的影响

切片厚度/mm	$L^*$	$a^*$	$b^*$
2	81.59 ± 2.50 a	5.77 ± 3.85 c	27.73 ± 2.29 c
5	71.02 ± 2.04 b	10.02 ± 0.21 bc	44.02 ± 0.36 b
8	71.86 ± 3.68 b	13.22 ± 0.97 ab	45.25 ± 2.72 b
11	63.70 ± 1.35 c	17.26 ± 0.83 a	51.46 ± 2.52 a

## 2.6 不同切片厚度对哈密瓜干香气组成的影响

不同切片厚度的哈密瓜制得的哈密瓜干中共检测出170种香气成分,根据官能团的不同,将检测出的香气成分分为10类,其相对含量、种类数量由表3所示。由表3可知,在不同切片厚度制得的

哈密瓜干中,相对含量最高的4类物质为醇、酮、醛和酯类。为进一步分析不同厚度对哈密瓜干香气组成的影响,对表3中的数据进行PCA主成分分析,其结果如图4所示。

表3 不同干燥切片厚度哈密瓜干挥发性成分分类比较

组分	切片厚度2 mm		切片厚度5 mm		切片厚度8 mm		切片厚度11 mm	
	种类	相对含量/%	种类	相对含量/%	种类	相对含量/%	种类	相对含量/%
醇	7	15.17	13	20.96	12	20.32	12	19.29
酮	12	22.33	18	21.90	17	23.41	14	24.17
醛	14	28.92	11	18.95	14	23.20	13	24.32
酯	16	16.37	22	17.62	22	16.86	16	16.36
酸	1	1.17	3	4.26	3	1.01	4	1.87
烯	3	1.77	9	0.80	4	1.47	7	2.38
烷	5	2.46	2	0.95	2	1.44	2	0.72
醚	1	1.07	1	0.78	2	0.84	3	1.31
酚	4	4.42	5	4.00	5	3.64	8	3.82
其他	12	6.32	11	9.77	13	7.81	13	5.76



由图4可知,第一主成分(F1)的方差贡献率为60.6%,第二主成分(F2)的为30.4%,二者方差贡献率合计91%,说明这两种主成分可以解释原有大部分香气的成分信息。F1主要和酯类、酸类、其他类呈正相关,和烯类、醛类、醚类呈负相关;F2主要和酚类、烷类呈正相关,和酮类、醇类呈负相关。2 mm和11 mm的哈密瓜干位于代表醛类和酮类较多的象限,说明过薄或过厚都会使干燥过程产生更多具有不良气味的醛类和酮类化合物。可能是由于2 mm的哈密瓜干虽然干燥时间短,但由于其厚度小,温度梯度小,所以内部温度相对厚度较大的哈密瓜干要高,使氧化反应和美拉德反应更剧烈;而11 mm的哈密瓜干由于干燥时间很长,从而产生了更多的醛类和酮类。因此哈密瓜切片厚度应适中。

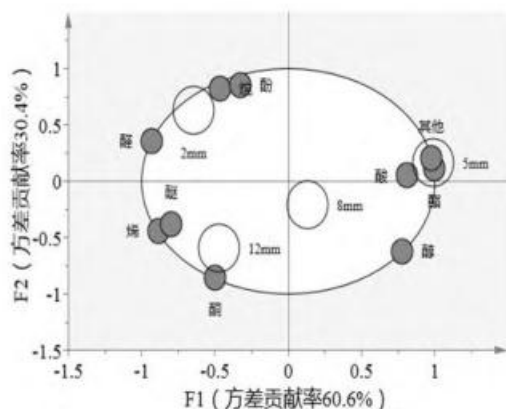


图4 不同干燥切片厚度哈密瓜干的香气得分图

## 2.7 不同切片厚度对哈密瓜片干燥过程中能耗的影响

切片厚度对哈密瓜太阳能干燥能耗的影响如图5所示。由图5可知,不同切片厚度下,单位时间能耗11 mm的处理显著高于其他各组( $P<0.05$ ),不同切片厚度下总能耗随着切片厚度的增加而增加,除了5 mm和8 mm外,其余各组间差异显著( $P<0.05$ )。说明切片厚度过高,会显著增加太阳能设备的能耗,因此较适宜厚度范围为2~8 mm。这是由于当哈密瓜切片厚度过大时,干燥速率低,干燥时间长。干燥后期太阳能辐照度下降,太阳能收集器所收集的热量不足以维持整个干燥过程中干燥室的温度恒定,干燥设备自动打开热泵补偿干燥室热量,从而使能耗显著提高。

## 3 结论

通过分析不同的切片厚度(2、5、8、11 mm)对哈密瓜片品质的影响,得出哈密瓜切片达到干燥终

点的时间随着厚度的减小而缩短,减小切片厚度可以显著提高干燥效率;不同厚度的哈密瓜太阳能干燥过程都有降速阶段,厚度越大,哈密瓜干燥速率越慢;不同厚度的哈密瓜切片的水分活度会随时间变化而减小;随着切片厚度的增加,哈密瓜干制品的硬度、黏附性、弹性和咀嚼性均增加;哈密瓜干制品的色泽 $L^*$ 随着切片厚度的增加而下降, $a^*$ 和 $b^*$ 值均随着厚度的增加而增加;不同切片厚度的干燥哈密瓜干中检出170种香气成分,相对含量最高的四类物质均为醇、酮、醛和酯类;不同切片厚度单位时间能耗在切片厚度11 mm时显著高于其他各组( $P<0.05$ ),不同切片厚度下总能耗随着切片厚度的增加而增加;2~8 mm切片厚度下,哈密瓜片干制品硬度、黏附性、弹性和咀嚼性、香气成分等理化特性较优,干燥能耗低,适宜哈密瓜片的干燥。

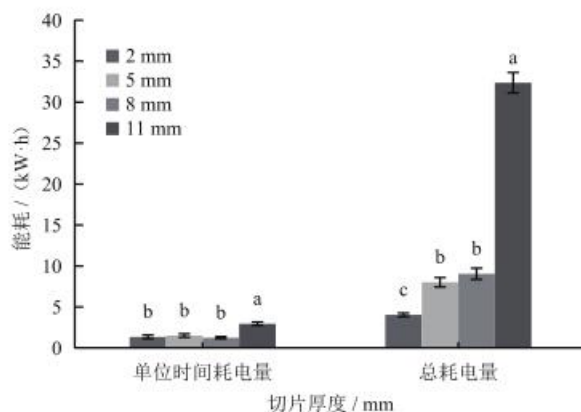


图5 不同切片厚度对能耗的影响

## 参考文献:

- [1] 常安太,郑霞,肖红伟,等.哈密瓜干燥技术现状与装备研究展望[J].包装与食品机械,2020,38(6):61-67.
- [2] 高静静,冯作山,白羽嘉.真空冷冻和热风干燥对哈密瓜片品质的影响[J].保鲜与加工,2020,20(3):78-84.
- [3] Zielinska M, Michalska A. Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture [J]. Food Chemistry, 2016, 212: 671-680.
- [4] 廖新福,刘曼双.新疆哈密瓜产业现状及发展对策[J].新疆农业科技,2011(3):1-2.
- [5] 杨咪,杜娟,廖新福,等.哈密瓜热风烘干工艺初探[J].天津农业科学,2016,22(8):64-68.
- [6] 罗磊,王强,任广跃,等.哈密瓜片充氮低氧热泵干燥工艺研究[J].干燥技术与设备,2013,11(6):50-57.
- [7] 毕金峰,魏益民,王秋,等.哈密瓜变温压差膨化干燥工

- 艺优化研究[J].农业工程学报,2008(3):232-237.
- [8] 张茜,肖红伟,代建武,等.哈密瓜片气体射流冲击干燥特性和干燥模型[J].农业工程学报,2011,27(S1): 382-388.
- [9] Yuan G, Hong L, Li X, et al. Experimental investigation of a solar dryer system for drying carpet [J]. Energy Procedia, 2015, 70: 626-633.
- [10] Yataganbaba A, Kurtbaş İ. A scientific approach with bibliometric analysis related to brick and tile drying: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59: 206-224.
- [11] He G, Kammen D M. Where, when and how much solar is available? A provincial-scale solar resource assessment for China [J]. Renewable Energy, 2016, 85: 74-82.
- [12] 班婷,朱明,王海. 太阳能集热器的研制及结构优化 [J].农业工程学报,2011,27(S1):277-281.
- [13] 刘瑜.太阳能干燥农产品节能减排技术装备的研究应用[J].农业工程技术:农产品加工业,2012(11):44-46.
- [14] 郭洁.扇贝柱太阳能干燥效果初探[D].保定:河北农业大学,2015.
- [15] 王海,高月,王颖,等.适宜干燥方法提高干制枸杞品质[J].农业工程学报,2015,31(21):271-276.
- [16] 郭雪霞,张子赫,刘英娜,等.不同干燥方式对哈密瓜品质的影响[J].北方园艺,2020(19):23-31.
- [17] Hossain M A, Woods J L, Bala B K. Single-layer drying characteristics and colour kinetics of red chilli [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2007, 42(11): 1367-1375.
- [18] 郭雪霞,张子赫,刘英娜,等.响应面法优化哈密瓜太阳能干燥工艺研究[J].食品科技,2020,45(9):14-21.

(责任编辑:许晶晶)