

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.12.023

包覆材料对红外热成像测量生鲜食品 温度效果的影响

Research on temperature measurement of fresh food
by IR imaging technology

程 丽

CHENG Li

(重庆青年职业技术学院经济管理学院, 重庆 400712)

(School of Economics and Management, Chongqing Youth of Career
Technical College, Chongqing 400712, China)

摘要:探索了红外热成像技术在食品冷链中生鲜农产品温度检测中的应用。选择两种类型新鲜农产品甜菜和黄瓜,置于托盘中,并分别覆盖3种材料(Tyvek,金属化PET,金属化发泡PET),将食品托盘置于模拟配送过程中的冷藏室中,分别用红外热成像照相机和探针式测温仪对其表面温度进行检测和比较。结果表明,红外热成像照相机和探针式测温仪所测得的温度相差1.9~6.0℃。应用红外热成像照相机测温时,金属化PET的高发射率会导致食品托盘明显的温度读取误差。而Tyvek的发射率与红外热成像照相机接近,红外热成像照相机获取的温度值误差较小。

关键词:生鲜食品;红外热成像;包覆材料;食品冷链;温度

Abstract: In this study, the application of infrared thermal imaging technology in the detection of fresh agricultural products in cold chain of food was explored. Two fresh agricultural sugar beets and cucumbers were selected and placed on a tray, each covered with three materials (Tyvek, Metallized PET, Metallized Foam PET) to produce a different coated food tray. The food tray was placed in the cold room during the simulation distribution. The surface temperature of the food tray was detected and compared with the infrared thermal imaging camera and the needle detector. The results showed that the temperature measured by the infrared thermal imaging camera and the detecting thermometer was 1.9~6.0℃. High emittance of the metal PET results in significant temperature reading errors on the food

tray when measured with an infrared thermal imaging camera. Tyvek's emission rate was similar to that of the infrared thermal imaging camera, which obtained a lower temperature error. This study could provide theoretical explanation and data support for the application of infrared thermal imaging technology to temperature monitoring of food pallet.

Keywords: fresh food; infrared thermal imaging; covering material; food cold chain; the temperature

生鲜食品在加工、储藏、运输、分销及到消费者手中整个食品冷链中,存在很多导致食品腐败的因素,如温度、湿度、游离水、冷凝水等。这些因素中最重要的是温度的控制^[1-2]。生鲜食品在存储、搬运和运输过程中的温度变化,将会显著增加食品受食源性微生物感染的可能性。因此,在食品冷链中,其各个环节始终都应处于低温环境下,以保证食品质量安全,减少损耗,防止污染^[3]。

在食品冷链中,为进一步提高生鲜食品的保温效果,会选择合适的材料对食品进行包覆^[4]。包覆材料的热传递有3种类型,即热传导、热对流和热辐射^[5]。Thijs等^[6]对冷链中生鲜食品包覆材料的热性能进行了回顾。Macnish等^[7]研究了不同包覆材料对草莓托盘保温效果的影响,并指出其主要传热机制是热辐射和热对流,而覆盖材料对这两种热传递机制起到隔热作用,并且减小了食品受环境湿度的影响。而包覆材料的传热机制将会影响红外热成像照相机捕获食品的实际温度,将红外热成像技术应用用于生鲜食品温度检测时,需要考虑包覆材料的性质及其表面发射率。研究拟将两种生鲜食品置于托盘并用3种不同材料(Tyvek,金属化PET,金属化发泡PET)进行包覆形成食品托盘,使用红外热成像照相机检测食品托盘的温度,并与探针式测温器所测温度进行比

基金项目:重庆市高等教育教学改革研究项目(编号:173272);重庆市高职院校黄蘩“双师型”名师工作资助项目

作者简介:程丽(1986—),女,重庆青年职业技术学院讲师,硕士。
E-mail: 563821606@qq.com

收稿日期:2020-09-16

较,研究红外热成像照相机在不同食品 and 不同包覆材料所测温度的差异性,进而衡量红外热成像技术在评估食品托盘温度分布的有效性。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

冷藏室:由 0.1 m 的聚氨酯夹芯板制成,尺寸 2.0 m × 1.5 m × 1.5 m,用于模拟生鲜食品产品配送过程中的实际情况,其制冷压缩机功率 5 kW · h,采用 R-134a 为制冷剂,内部风速 2.5 m/s,室温传感器位于距地面 1.5 m 处墙壁上;

扩展式温湿度数据自动采集器(探针式测温仪):HOBO U12-013 型,美国 ONSET 公司;

红外热成像照相机:Flir-E6 型,沈阳市尊科技有限公司;

Tyvek 材料:尺寸为 1 200 mm × 1 000 mm × 1 700 mm,杜邦中国集团有限公司;

金属化 PET、金属化发泡 PET(内外两层金属化 PET 材料,中间层为发泡 PET):尺寸为 1 200 mm × 1 000 mm × 1 700 mm,杜邦中国集团有限公司;

托盘:HYM 型,1 200 mm × 1 000 mm,杜邦中国集团有限公司;

塑料格栅箱:500 mm × 380 mm × 280 mm,每层 9 个盒子,共 3 层,杜邦中国集团有限公司;

新鲜甜菜及黄瓜:各 400 kg,采摘后 24 h 内开始试验,市售。

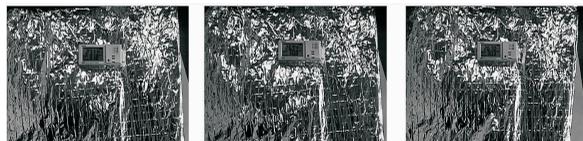
1.2 试验方法

1.2.1 红外热成像照相机参数设置 发射率是指物体表面辐射出的能量与相同温度的黑体辐射能量的比率,取值范围为 0(完美白体)~1(完美黑体)。如果材料发射率为 1(100% 辐射从物体表面发射),红外热成像照相机设定捕获发射率为 1,则照相机测得的温度被视为材料实际温度;但是如果材料的发射率低于 1,则照相机能够捕获发射辐射、透射辐射和反射辐射,最终所测温度为 3 种辐射能量总和^[8-9]。因此,需要降低材料的反射辐射,从而提高测量精度,并降低相机中设定的捕捉发射率,使其等同于材料发射率。研究中所测量的覆盖物表面温度是发射辐射、透射辐射和反射辐射的综合结果。

为降低被测材料的反射辐射,提高测量精度,将铝箔(发射率为 0.04~0.09)覆盖于金属化 PET 材料和金属化发泡 PET 材料的表面,白纸(发射率为 0.7~0.9)覆盖于 Tyvek 材料表面,同时,按红外热成像照相机厂家的建议,将相机捕获发射率设置为 0.040~0.090,但由于发射率低,无法读取温度。随后,分别将发射率设置为 0.95,0.80,0.60,如图 1(a)所示。相机输出值与实际温度相似。在图 1(b)中的探针式测温仪显示表面温度分别是 27.11,26.44,26.70 °C。因此从红外图像的中点提取的温度点(25.4,26.8,27.4 °C)接近真实温度。由于 Tyvek 材料具



(a) 红外热成像照相机测温结果



(b) 探针式测温仪测温结果

图 1 金属化 PET 的红外成像图及测温图

Figure 1 Infrared image and temperature measurement of metallized PET

有较高的发射率,因此读取的温度值较准确。

1.2.2 红外热成像照相机测量食品托盘的温度 如图 2 所示,将 20 kg 黄瓜和 15 kg 甜菜分别放在 18 个盒子中,将 18 个盒子分 3 层置于托盘上。探针式测温仪放置于每层中央位置的盒子中,两个探针则放置于对角线的两个盒子中。一个托盘共 9 个探针并设定为每 5 min 记录一次所测温度。由于探针的位置涵盖了托盘 3 层中心及对角线位置,因此可获取托盘内最高、最低和平均温度。图 2(c)中顶部方框表示用红外热成像照相机拍摄的 3 张照片:分别为左上角,中间及右下角,将其中中心点的温度作为测量温度。因此,位于托盘最上层的传感器所测温度可与红外热成像照相机所捕获的温度进行对比。

将样品在冷藏室中冷却到 4 °C,由探针式测温仪和红外热成像照相机记录温度后,将温度设定为 23 °C,再次记录相应温度数据。黄瓜托盘和甜菜托盘在不同时间内进行 3 次测温试验。数据分析采用 Matlab 嵌入 ad hoc 软件。热成像照相机中记录最高和最低温度及相机屏幕中选定点的温度,然后将照相机测温数据与探针式测温仪的所测数据进行比较分析。

2 结果与分析

2.1 甜菜托盘中红外热成像照相机测温效果分析

如表 1 所示,低温(4.0 °C)环境下,覆盖 Tyvek 托盘的探针式测温仪所测温度分布(4.5~7.0 °C)在红外热成像照相机所测温度范围(1.9~8.1 °C)内,覆盖金属化 PET 和金属化发泡 PET 的托盘也存在同样的情况。但

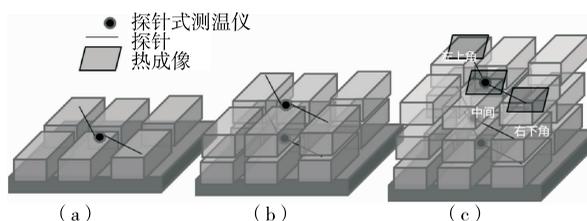


图 2 堆垛构造图

Figure 2 The schematic diagram of pallet

表 1 红外热成像照相机和探针式测温仪测量的甜菜托盘温度值及标准偏差

Table 1 Maximum and minimum temperatures and standard deviation of chard measured with thermal camera and temperature sensor

环境温度	位置	Tyvek				金属化 PET				金属化发泡 PET			
		红外热成像照相机		探针式		红外热成像照相机		探针式		红外热成像照相机		探针式	
		平均值	最大值	最小值	测温仪	平均值	最大值	最小值	测温仪	平均值	最大值	最小值	测温仪
4	左上角	5.4	6.0	1.9	4.5	4.4	5.8	1.7	4.4	4.6	5.5	1.4	4.4
		±0.1	±0.1	±0.1	±0.4	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.2
	右下角	8.1	7.8	2.9	5.2	5.8	9.4	2.5	6.5	8.0	12.9	3.8	4.9
		±0.2	±0.2	±0.1	±0.1	±0.1	±0.2	±0.1	±0.1	±0.2	±0.3	±0.1	±0.1
	中间	7.6	8.0	3.2	7.0	6.7	9.8	2.6	6.4	6.4	7.7	3.6	5.3
		±0.2	±0.2	±0.1	±0.3	±0.1	±0.2	±0.1	±0.1	±0.1	±0.2	±0.1	±0.1
23	左上角	21.4	22.6	18.5	19.2	21.2	22.7	18.6	18.7	22.1	23.7	19.6	18.9
		±0.4	±0.5	±0.4	±0.5	±0.4	±0.5	±0.4	±0.1	±0.4	±0.5	±0.4	±0.1
	右下角	20.6	21.8	17.7	18.2	21.4	23.2	19.2	17.2	22.7	24.9	20.9	16.2
		±0.4	±0.4	±0.4	±0.1	±0.4	±0.5	±0.4	±0.1	±0.5	±0.5	±0.4	±0.1
	中间	20.6	22.1	18.0	18.1	21.6	23.2	19.2	17.3	21.7	23.3	19.3	16.9
		±0.4	±0.4	±0.4	±0.1	±0.4	±0.5	±0.4	±0.1	±0.4	±0.5	±0.4	±0.1

相比于覆盖金属化 PET(1.7~9.8 °C)和带金属化发泡 PET(1.4~12.9 °C)的托盘,覆盖 Tyvek 托盘红外热成像照相机所测温度值更接近探针式测温仪所测温度。室温(23.0 °C)环境中,红外热成像照相机的测量温度大多高于探针式测温仪传感器测量的,但在覆盖 Tyvek 材料的托盘中测得的最低温度低于探针式测温仪。所有室温环境测试中,托盘左上角用探针式测温仪所测温度最高,而在低温环境中结果恰好相反。

表 2 列出了红外热成像照相机检测甜菜托盘的温度值与探针式测温仪所测值的标准误差。由表 2 可知,最大标准误差(16.0 °C)对应于覆盖金属化发泡 PET 托盘的测试中,最小标准误差(12.2 °C)对应于覆盖金属化 PET 托盘的测试中。而覆盖 Tyvek 托盘的平均标准误差(1.9 °C)最低。

2.2 黄瓜托盘中红外热成像照相机测温效果分析

如表 3 所示,环境低温(4 °C)状态下,分别使用 Tyvek 和金属化 PET 材料包覆时,探针式测温仪测得的温度始终高于红外热成像照相机在选定点测得的温度。对于覆盖金属化发泡 PET 的,探针式测温仪与红外热成

表 2 甜菜托盘红外温度和探针式测温仪的标准误差

Table 2 Average root mean square error of chard infrared temperature and sensor temperature

材料	平均标准误差	最大标准误差	最小标准误差
Tyvek	1.9	14.1	1.6
金属化 PET	2.0	12.2	0.2
金属化发泡 PET	3.1	16.0	0.1

像照相机的测量温度更加接近。但在室温(23 °C)环境中,探针式测温仪所测温度均低于红外热成像照相机。在甜菜的测试中也观察到了相似的结果。结合表 1 和表 3 的数据可知,室温环境下,甜菜和黄瓜的红外热成像照相机的大部分测量值都高于探针式测温仪的测量值;低温环境下,红外热成像照相机的测量值低于探针式测温仪的。但金属化发泡 PET 材料包覆这两种食品托盘时未显示出这种一致性,只有 61% 照相机测量值高于传感器测量值。

表 4 列出了红外热成像照相机检测黄瓜托盘的温度值与探针式测温仪所测值的标准误差。由表 4 可知,覆盖金属化发泡 PET 的托盘最大标准误差为 21.8 °C,最小标准误差为 0.3 °C,而金属化 PET 覆盖的托盘最下标准误差只有 0.1 °C。覆盖金属化 PET 和金属化发泡 PET 黄瓜托盘的最大误差值相差 4.3 °C。平均误差最小的是覆盖 Tyvek 托盘,仅为 3.9 °C。结合表 2 和表 4 的温度测量值可知,红外热成像照相机和探针式测温仪平均标准误差范围为 1.9~6.0 °C。

2.3 3 种覆盖材料红外热成像照相机所测温度对比分析

图 3 为 3 组覆盖材料的红外热成像照相机所测温度的对比结果。如前所述,取托盘左上角、右下角、中间位置的测温平均值,这些温度值分为两个区域,分别对应于 4~6 °C 的低温区域和 20~23 °C 的高温区域。

由图 3 可知,低温区域中的所测温度值分布比高温区域的离散性更大,这是由于低温状态下包覆材料的隔热效应导致的。覆盖材料发射率的不同会影响红外热成像照相机所测温度值的离散度^[10],3 种包覆材料中,由于

表 3 红外热成像相机和探针式测温仪测量的黄瓜托盘温度值及标准偏差

Table 3 Maximum and minimum temperatures and standard deviation of cucumber measured with thermal camera and temperature sensor

环境温度	位置	Tyvek				金属化 PET				金属化发泡 PET			
		红外热成像照相机		探针式		红外热成像照相机		探针式		红外热成像照相机		探针式	
		平均值	最大值	最小值	测温仪	平均值	最大值	最小值	测温仪	平均值	最大值	最小值	测温仪
4	左上角	5.4	5.1	1.0	8.0	2.8	4.1	0.0	4.2	4.2	5.7	1.6	4.2
		±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±1.5	±0.1	±0.1	±0.1	±1.1
	右下角	6.6	7.3	2.3	9.2	3.7	8.4	0.7	6.2	6.7	14.8	3.2	5.6
		±0.1	±0.2	±0.1	±0.1	±0.1	±0.2	±0.1	±0.1	±0.1	±0.3	±0.1	±0.1
	中间	6.4	6.3	1.6	9.8	3.5	4.4	0.3	6.0	7.8	9.0	3.1	6.1
		±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.2	±0.2	±0.2	±0.1	±0.1
23	左上角	21.4	22.6	18.5	19.2	21.2	22.7	18.6	18.7	22.1	23.7	19.6	18.9
		±0.4	±0.5	±0.4	±0.5	±0.4	±0.5	±0.4	±0.1	±0.4	±0.5	±0.4	±0.1
	右下角	20.6	21.9	17.8	16.8	19.9	21.6	17.1	14.1	22.4	23.2	19.2	13.9
		±0.4	±0.4	±0.4	±0.3	±0.4	±0.4	±0.3	±0.1	±0.4	±0.5	±0.4	±0.2
	中间	20.9	21.6	17.5	13.6	21.6	21.7	17.2	12.0	22.6	23.0	19.0	10.0
		±0.4	±0.4	±0.3	±0.1	±0.4	±0.4	±0.3	±0.1	±0.4	±0.5	±0.4	±0.1

表 4 黄瓜托盘红外温度和探针式测温仪的标准误差

Table 4 Average root mean square error of cucumber infrared temperature and sensor temperature

材料	平均标准误差	最大标准误差	最小标准误差
Tyvek	3.9	18.5	1.23
金属化 PET	4.5	17.5	0.10
金属化发泡 PET	6.0	21.8	0.30

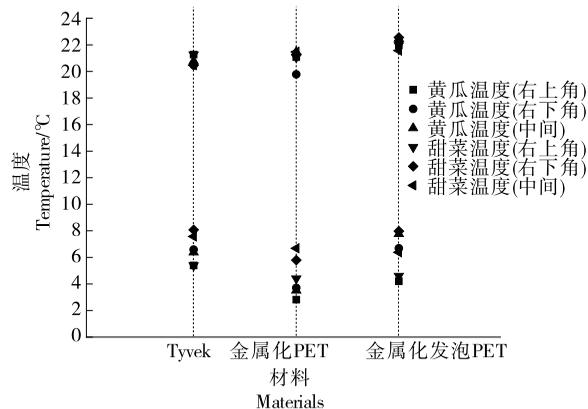


图 3 金属化 PET、金属化发泡 PET 和 Tyvek 的红外热成像照相机温度对比

Figure 3 Temperature comparison of metallized PET, metallized PET bubble and Tyvek

Tyvek 材料的发射率最高, 导致其所测温度值离散度最低, 在低温下的离散度不超过 2.5 °C, 高温下仅在 1 °C 左右。低温环境下, 金属化发泡 PET 分别包覆黄瓜和甜菜托盘时, 其不同区域所测温度值具备类似离散性分布, 离散度超过 4 °C。但在高温环境中, 其离散度在 1.5 °C 以

内。低温环境下, 金属化 PET 的离散度也超过 4 °C, 但与金属化发泡 PET 不同的是, 包覆黄瓜和甜菜时所测的区域温度值分布不同。高温区域, 金属化 PET 的离散度达到了 2 °C。从包覆托盘产品方面分析, 金属化发泡 PET 包覆的黄瓜托盘中, 环境温度为 4~8 °C 时, 其所测温度值离散度达到了 4 °C, 托盘产品为甜菜时, 其离散度也超过 3.5 °C。

包覆材料的隔热效果是通过 300 min 内食品托盘温度增量测试来进行评估。甜菜测试组中, 温度增量分别为: Tyvek 8 °C, 金属化 PET 7 °C 和金属化发泡 PET 5 °C; 黄瓜测试组中, 温度增量分别为: Tyvek 5 °C, 金属化 PET 5 °C 和金属化发泡 PET 3 °C。综合文中的相关数据, 由于在覆盖材料发射率的影响, 其红外热成像照相机所测温度值存在较大差异。而导致测量温度差异的另一个原因是包覆材料不同的保温效果引起的, 由于金属化发泡 PET 材料由 3 层组成, 中间的发泡 PET 可达到一定的气体隔热效果, 因此其保温效果最好, 而单层 Tyvek 材料的保温效果最差。保温效果越好, 在低温状态下, 红外热成像照相机在不同位置的所测的温度值相差就越大。

3 结论

应用红外热成像技术评估带覆盖材料食品托盘的表面温度分布, 结果表明, 红外热成像照相机捕获的数据与探针式测温器之间的温差达 1.9~6.0 °C, 这与覆盖材料、覆盖材料的发射率及覆盖材料的传热影响有关。包覆材料提供了一定的食品保温效果, 其中金属化发泡 PET 材料的保温效果最好, 5 h 内甜菜和黄瓜温度分别只升高 5 °C 和 3 °C。Tyvek 材料提供了最弱的温度保护, 5 h 内

(下转第 158 页)

- sorghum (*Sorghum bicolor* L.) bran and their biological activities[J]. Food Chemistry, 2018, 262: 14-20.
- [20] ÁLVAREZ-CASAS M, GARCÍA-JARES C, LLOMPART M, et al. Effect of experimental parameters in the pressurized solvent extraction of polyphenolic compounds from white grape marc[J]. Food Chemistry, 2014, 157: 524-532.
- [21] NADAR S S, RAO P, RATHOD V K. Enzyme assisted extraction of biomolecules as an approach to novel extraction technology: A review[J]. Food Research International, 2018, 108: 309-330.
- [22] 许先猛, 张增帅, 郭俊花, 等. 苹果多酚提取和纯化关键技术研究进展[J/OL]. 食品与机械. (2020-10-27)[2020-11-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1183.TS.20201027.1736.012.html>.
- [23] 贺银菊, 张旋俊, 杨再波, 等. 响应面优化紫果西番莲叶多酚超声辅助提取工艺及其抗氧化活性[J/OL]. 食品工业科技. (2020-06-24)[2020-11-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20200624.1557.010.html>.
- [24] 蔡如玉, 常世敏, 宋春丽. “凤丹”油用牡丹籽多酚提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 181-186.
- [25] 余欣珂, 明建, 支玲, 等. 真空冷冻干燥对菊花多酚含量及其抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(6): 138-144.
- [26] 董怡. 光果甘草叶黄酮的分离纯化、活性研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 31-45.
- [27] CHEN Xiu-min, MU Kai-wen, KITTS D D. Characterization of phytochemical mixtures with inflammatory modulation potential from coffee leaves processed by green and black tea processing methods [J]. Food Chemistry, 2019, 271(12): 248-258.
- [28] CHEN Xiu-min, MA Zhi-li, KITTS D D. Effects of processing method and age of leaves on phytochemical profiles and bioactivity of coffee leaves[J]. Food Chemistry, 2018, 249(24): 143-153.
- [29] CHEN Xiu-min, KITTS D D, JI Da-yi, et al. Free radical scavenging activities of phytochemical mixtures and aqueous methanolic extracts recovered from processed coffee leaves[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2019, 54(10): 2 872-2 879.

(上接第 114 页)

甜菜和黄瓜温度分别升高了 8 ℃ 和 5 ℃。后续将关注包覆材料发射率与红外热成像照相机读数之间的相互作用。

参考文献

- [1] 龚树生, 梁怀兰. 生鲜食品的冷链物流网络研究[J]. 中国流通经济, 2006(2): 7-9.
- [2] 曾庆菊. 食品冷链物流与技术管理规范化[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(17): 235.
- [3] 申江, 杨萌. 食品冷链的技术发展[J]. 包装工程, 2015, 36(15): 1-8.
- [4] 丁珍妮, 宋海燕. 食品保温包装的发展过程[J]. 上海包装, 2015(12): 62-65.
- [5] 潘嘹, 卢立新, 王军. 生鲜食品冷链控温包装设计方法研究[J]. 食品与生物技术学报, 2017, 36(5): 507-511.
- [6] THIJS Defraeye, PAUL Cronjé, TARL Berry, et al. Towards integrated performance evaluation of future packaging for fresh produce in the cold chain [J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 44(2): 201-225.
- [7] MACNISH A J. Comparison of pallet cover systems to maintain strawberry fruit quality during transport[J]. Hort Technology, 2012, 22(5): 724.
- [8] 刘又夫, 周志艳, 田麓弘, 等. 红外热成像技术在农业中的应用[J]. 农业工程, 2019, 9(11): 102-110.
- [9] 李真, 史智兴, 王成, 等. 红外热成像技术在作物胁迫检测方面的应用[J]. 农机化研究, 2016, 38(1): 232-237.
- [10] GOWEN A A, TIWARI B K, CULLEN P J, et al. Applications of thermal imaging in food quality and safety assessment[J]. Trends in Food Science & Technology, 2010, 21(4): 190-200.
- [11] 黄露. 基于认知心理学的儿童食品包装形象与色彩喜好分析[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 113-116, 205.
- [12] 杨萍. 儿童食品包装设计的安全性、趣味性与人性化[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 99-101.
- [13] 张冰钰. 基于趣味构成形式的现代食品包装设计[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 113-117.
- [14] BIRREN F. Color preference as a clue to personality[J]. Art Psychotherapy, 1973, 1(1): 13-16.
- [15] 薛晓光. 休闲食品包装趣味性的价值及设计原则[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 122-125, 175.

(上接第 122 页)