

## 新疆辣椒戈壁滩自然干制过程监测及技术规程探究

徐嘉悦<sup>1</sup>, 王兴波<sup>1</sup>, 彭思嘉<sup>1</sup>, 连畅<sup>1</sup>, 马燕<sup>2</sup>, 孙志健<sup>1</sup>, 赵靓<sup>1</sup>, 廖小军<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup> 中国农业大学食品科学与营养工程学院 国家果蔬加工工程技术研究中心

农业农村部果蔬加工重点实验室 北京 100083

<sup>2</sup> 新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所 新疆主要农副产品精深加工工程技术研究中心 乌鲁木齐 830091)

**摘要** 新疆辣椒戈壁滩自然干制过程包括挂果干燥、采收、摊晒、拢堆、发汗、装袋运输 6 个步骤,然而干制过程以经验为主,缺乏技术规范、理论指导,且存在辣椒易碎、发霉等问题。有必要对其实际干制过程进行监测,并制订相应的技术规程,以规范辣椒的自然干制过程,保障其安全性,提高其品质。本研究跟踪了红龙 18、红龙 23 和铁皮椒 3 个常见品种的自然干制过程,监测了环境温湿度及风速、辣椒干基含水量、水分活度、色差及发霉率等指标,建立新疆辣椒戈壁滩自然干制模型,其干制过程符合 Logarithmic 干制模型。结合实际经验,提出应在辣椒干基含水量为 1.0 g/g 时开始拢堆,辣椒干基含水量为 0.16 g/g 时自然干制结束。此外,研究发现机械采收的辣椒损伤较多,自然干制过程中更易发霉。降低采收机械对辣椒的损伤、规范自然干制过程,有利于提高干制效率,保障干制辣椒安全性,促进干制辣椒产业高质量发展。

**关键词** 新疆戈壁滩; 辣椒; 自然干制; 动力学分析; 技术规程

**文章编号** 1009-7848(2023)08-0274-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.08.028

辣椒(*Capsicum*)作为蔬菜及调味品深受消费者喜爱<sup>[1-2]</sup>。我国是世界辣椒第一大生产国和出口国,辣椒出口量约占全球辣椒市场份额的 50%以上<sup>[3-4]</sup>。与其它蔬菜相比,辣椒种植面积更广泛、生产产值更高、产业发展更成熟<sup>[5-7]</sup>。辣椒可用于生产干制辣椒、鲜辣椒酱、发酵制品等传统产品以及用于提取辣椒红色素、辣椒碱、辣椒油树脂等高附加值产品。近年来,辣椒已从鲜食蔬菜和调味品逐渐成为天然色素和制药原料的重要来源<sup>[3,8]</sup>。辣椒红色素是从成熟辣椒果皮中提取的天然色素,色泽鲜艳、安全无毒,被世界卫生组织(WHO)和联合国粮食及农业组织(FAO)列为 A 类食用色素<sup>[9-10]</sup>。色素提取要求干制辣椒原料价格低、供应时间长,新疆、山东、内蒙古等地区种植面积大、干制范围广,因而具有较大优势<sup>[11-12]</sup>。研究新疆等地辣椒自然干制方式及过程,探究并解决其中存在的问题,有利于促进辣椒干制初加工、辣椒红色素提取深加工等方面的发展。

新疆是全国鲜辣椒和干制辣椒重要出口基

地<sup>[12-14]</sup>,2020 年新疆干制辣椒种植面积已达约 5 万 hm<sup>2</sup><sup>[15]</sup>。由于新疆戈壁滩日照时间长、光照丰富、昼夜温差大、降水量少、空气湿度低、风速大、晾晒范围广,独特的气候及地理条件适宜辣椒的种植与自然干制<sup>[16-18]</sup>,进而可获得产量大、价格低的干制辣椒并进行辣椒红色素提取<sup>[19]</sup>。辣椒戈壁滩自然干制包括自然晾晒和自然阴干(或风干),其具有投资少、操作简便、节约能源的优点<sup>[20]</sup>。

新疆辣椒戈壁滩自然干制过程缺乏理论指导及相应技术规程,导致辣椒晾晒不规范,辣椒因干制时间过长、拢堆较晚等出现发霉、变脆易碎等问题,难以保障干制辣椒的品质及安全<sup>[21-25]</sup>。针对新疆辣椒戈壁滩自然干制过程中存在的问题,2018-2019 年团队调研并监测了新疆辣椒自然干制实际生产过程,总结其自然干制工艺流程及常见自然干制辣椒品种。2020 年跟踪了红龙 18、红龙 23 及铁皮椒的戈壁滩自然干制过程,监测辣椒堆温度及湿度、环境风速、辣椒水分含量、水分活度、质构、色差、发霉率等指标,分析影响其自然干制的因素并建立新疆辣椒戈壁滩自然干制数学模型。分析干基含水量与干制时间的动态关系,确定自然干制过程的关键技术参数,为新疆辣椒戈壁滩自然干制技术规程的制订提供理论依据,从而有利于提升新疆干制辣椒品质,保障食品安全。

收稿日期: 2022-08-17

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助项目

第一作者: 徐嘉悦,女,博士生

通信作者: 廖小军 E-mail: liaoxjun@cau.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 辣椒品种

表 1 为自然干制监测的 3 个辣椒品种及其相关信息,干制辣椒均来源于新疆和静隆平高科红安种业有限责任公司。

### 1.2 仪器与设备

JM-B502T 型电子天平,余姚纪铭称量校验设备有限公司;百工 0~150 mm 型电子数显卡尺,上海申韩量具有限公司;OLB-121 型快速水分测定仪,山东博科科学仪器有限公司;FBS-3A 型水分活度测试仪,深圳弗布斯仪器有限公司;GSP-6 型温湿度记录仪,江苏精创电气股份有限公司;AZ8911 型风速测定仪,衡欣 AZ 仪器仪表有限公司;BGD60CP 型便携式色差计,青岛博格达检测仪器有限公司;TMS-PRO 型质构仪,美国 FTC 公司。

### 1.3 新疆辣椒戈壁滩自然干制

新疆辣椒戈壁滩自然干制分为 6 个步骤,如图 1 所示:1)挂果干燥,降低鲜椒水分含量,减少

表 1 辣椒品种及自然干制起止时间

Table 1 Pepper variety, harvesting date and start and end date for natural drying

辣椒品种	自然干制起止日期
红龙 18(Honglong 18)	2020.09.26-2020.10.06
	2020.10.05-2020.10.18
红龙 23(Honglong 23)	2020.09.23-2020.10.02
	2020.10.05-2020.10.18
铁皮椒(Pepper Tiepi)	2020.10.12-2020.10.28

辣椒采收过程中的损伤;2)采收,分为人工采收与机械采收;3)摊晒,摊晒辣椒厚约 20~25 cm,并剔除未完全成熟的小果、病虫害果、霉果、烂果;4)拢堆,辣椒堆厚约 30~40 cm,堆之间形成的风道利于辣椒阴干;5)堆垛“发汗”,将同批次辣椒堆成 1 个厚约 1~1.5 m 的梯形长垛,盖上透气篷布,用重物(石块、木板)压实,排出辣椒果实内的空气;6)装袋运输,“发汗”后辣椒立即打包装袋,防止辣椒干制过度导致的破碎、白壳等<sup>[26]</sup>。

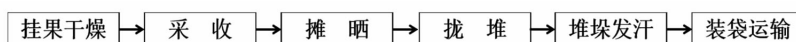


图 1 新疆辣椒戈壁滩自然干制工艺流程图

Fig.1 Flow chart of natural drying process of chili peppers in Xinjiang Gobi Desert

### 1.4 新疆辣椒自然干制监测点

选择新疆巴州和静县 223 团戈壁滩作为辣椒自然干制监测点,戈壁滩干制规模大、无建筑物遮挡、阳光充足、热量丰富、昼夜温差大、风速大。监测的辣椒每批长约 40 m、宽约 15 m、厚约 20~25 cm。

### 1.5 试验方法

1.5.1 辣椒长度、辣椒横径、辣椒厚度的测定 在辣椒堆中随机采样,并随机取样本中的 10 个鲜辣椒,使用游标卡尺测得每个辣椒的长度(从果顶至基部的距离)、横径(辣椒身最宽横断面处的宽度)、厚度(将每个辣椒纵向切开,中间位置的厚度)。

1.5.2 籽肉比、水分含量、水分活度的测定 在辣椒堆中随机采样,并随机取样本中的 10 个辣椒,测其总质量,并将辣椒籽、肉分离,测籽与果肉质量,籽与果肉质量比为籽肉比。

采用快速水分含量仪和水分活度仪分别测定果肉和籽的水分含量和水分活度。

$$X(\%) = X_a \times \frac{m_a}{m} + X_b \times \frac{m_b}{m} \quad (1)$$

式中, $X$ ——辣椒含水量,%; $m$ ——10 个辣椒总质量,g; $X_a$ ——辣椒果肉含水量,%; $m_a$ ——10 个辣椒的果肉总质量,g; $X_b$ ——辣椒籽含水量,%; $m_b$ ——10 个辣椒的籽总质量,g。

1.5.3 干制曲线 在辣椒堆中随机采样并标记 30 个辣椒,监测期内每日 11:00 称量标记好的 30 个辣椒总质量,绘制干基含水量-时间的干制曲线。

$$m_d(g) = m_t \times (1 - X) \quad (2)$$

式中, $m_t$ ——干制时间为  $t$  时的 30 个辣椒的总质量,g; $m_d$ ——辣椒中干物质含量,g。

$$X_t(g/g) = \frac{m_t - m_d}{m_d} \quad (3)$$

式中, $X_t$ ——干制时间为  $t$  时的辣椒干基含水

量, g/g。

1.5.4 辣椒堆温度及湿度、环境风速的测定 将温湿度记录仪插于辣椒堆中部, 将风速仪安装于晾晒场上, 记录干制过程中辣椒堆温度、湿度及环境风速的变化情况, 以监测第 1 天 11:00 作为记录起点, 每半小时自动记录 1 次。

1.5.5 色差的测定 在辣椒堆中随机采样, 取样本中的 10 个辣椒, 采用手持色差仪测定每个辣椒的表观颜色变化。

1.5.6 质构的测定 在辣椒堆中随机采样, 取 10 个辣椒并纵向切开, 从辣椒中心取 5 cm×5 cm 大小的均匀薄片, 确保辣椒表面与底片平整。采用质构剖面分析法测定辣椒的硬度、破裂力等质构特性, 测试参数为: 采用燕尾形剪切探头对干制辣椒进行剪切测试, 测试预压速度为 6 mm/s, 下压速度为 1 mm/s, 测后上行速度为 6 mm/s, 剪切距离为 45 mm, 样品压缩变形 60%, 触发力 1.0 N。

1.5.7 发霉率的测定 在辣椒堆中随机采样, 并随机取样本中的 200 个辣椒并纵向切开, 检查辣椒外观及内部是否发霉, 记录发霉辣椒个数。

$$\text{发霉率}(\%) = \frac{\text{发霉辣椒数量}}{\text{采集辣椒总数}} \times 100 \quad (4)$$

## 1.6 辣椒戈壁滩自然干制动力学模型

选择 Page、Logarithmic 和 Lewis 3 种常用的薄层干制模型对辣椒戈壁滩自然干制数据进行拟合<sup>[27-28]</sup>, 最终选取拟合程度最高, 即相关系数 ( $R^2$ ) 最大的模型作为新疆辣椒戈壁滩自然干制模型。

$$\text{Page 模型: } X_t = \exp(-k \times t^n) \quad (5)$$

$$\text{Logarithmic 模型: } X_t = a \times \exp(-k \times t) + c \quad (6)$$

$$\text{Lewis 模型: } X_t = \exp(-k \times t) \quad (7)$$

式中,  $a, c, k, n$  均为待定系数。

## 1.7 数据统计分析

采用 Microsoft Office Excel 2019 进行数据收集和处理, 采用 Origin 2019 软件进行数据统计分析、拟合与作图, 采用 SPSS Statistics 26 进行独立样本检验。显著性水平  $\alpha=0.05$ , 试验进行 3 重复 3 平行, 试验所得数据为 3 次试验的平均值。

## 2 结果

### 2.1 3 个辣椒品种基本特点

辣椒红龙 18、红龙 23 及铁皮椒基本特点如表 2 所示。铁皮椒果长、横径、厚度和籽肉比都是最大的, 其会影响辣椒干制速率。此外, 红龙 18 横径较小, 较适合机械采收。

表 2 3 个辣椒品种特点

Table 2 Characteristics of three naturally dried chili pepper varieties

品种	新鲜辣椒				干辣椒		果形、采收及用途
	果长/cm	横径/cm	厚度/cm	籽肉比	单果重/g		
红龙 18	18.20 ± 1.02	3.02 ± 0.11	0.87 ± 0.30	16.41	3.48 ± 0.39	果实呈羊角形, 机械采收, 用于色素提取	
红龙 23	17.26 ± 1.06	3.56 ± 0.13	0.66 ± 0.19	13.86	3.77 ± 0.54	果实呈羊角形, 人工采收, 用于色素提取	
铁皮椒	22.81 ± 1.44	5.54 ± 0.33	1.03 ± 0.12	24.31	6.73 ± 0.88	类似铁皮状, 人工采收, 用于色素提取、制酱	

## 2.2 新疆戈壁滩自然干制环境分析

2.2.1 温度和相对湿度 本研究监测了自然干制过程中辣椒堆温湿度变化情况, 结果如图 2 所示。干制过程中辣椒堆内最高温度为 31.8 °C、最低温度为 0.8 °C, 最大温差为 29.4 °C、平均温差为 13.2 °C、昼夜温差较大。然而干制过程中辣椒堆内最低温度持续下降, 9 月 23-28 日辣椒堆内最低温度高于 10 °C, 29 日辣椒堆最低温度降至 10 °C 以下; 干制过程中辣椒堆内最高湿度为 75.73%、最低湿度为 26.73%, 平均湿度为 50% 左右。辣椒堆内的湿度差受温度差影响, 10 月 4-18 日温度差减小

时湿度差也变小, 其不利于辣椒堆内水分散失。

2.2.2 风速 堆内空气流通缓慢, 湿度较高, 因此堆内辣椒的自然干制受风速影响较大<sup>[29-30]</sup>。如图 3 所示, 戈壁滩日最大风速可达 6.0 m/s, 日平均风速在 1.0 m/s 上下波动, 达到食品风干常用风速 1.0 m/s 要求<sup>[31]</sup>, 因此戈壁滩环境适宜辣椒的自然干制。

### 2.3 新疆辣椒戈壁滩自然干制曲线与模型拟合

基于对新疆辣椒的戈壁滩自然干制监测, 绘制了红龙 18、红龙 23 及铁皮椒的戈壁滩自然干制曲线, 结果如图 4 所示, 辣椒干基含水量随干制

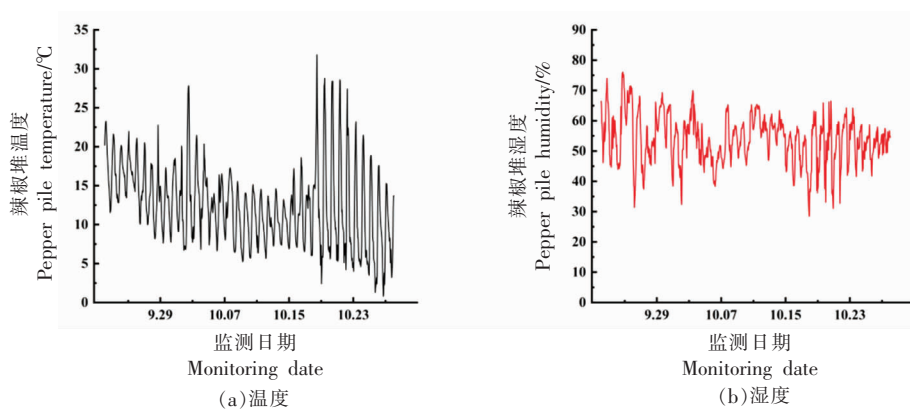


图 2 辣椒自然干制过程中辣椒堆温湿度变化图

Fig.2 The temperature and humidity curve of chili pepper pile during the natural drying

时间延长显著下降,同一品种的辣椒鲜椒干基含水量(自然干制第 0 天的干基含水量)相似。此外,9 月开始干制的辣椒自然干制时间为 10 d 左右,10 月初开始干制的辣椒自然干制时间为 13 d 左右。

为了更好地反映辣椒干基含水量随干制时间的变化规律,选择常用自然干制模型 Page、Logarithmic 和 Lewis 模型对新疆辣椒戈壁滩自然干制曲线进行拟合(图 4),得到的回归方程和相关系数  $R^2$  见表 3,其中 Logarithmic 模型的相关系数  $R^2$  最大,说明该模型拟合效果最好。Logarithmic 模型拟合的方程中,当  $t$  为第 0 天时,系数  $a+c$  表示鲜椒干基含水量,不同辣椒品种鲜椒干基含水量不同,该系数受辣椒采收时间的影响:辣椒成熟后采收的越晚、挂杆干燥时间越长,鲜椒干基含水量越低。系数  $a$  和  $k$  的大小反映新疆辣椒戈壁滩自然干制速率, $a$  和  $k$  值越大自然干制速率越大,该系数受辣椒品种、起始干制时间及天气条件影响:相比红龙 18、23,铁皮椒的椒型更大、果肉更厚,进而内部水分越不容易蒸发出来,同一时间内的含水量越高、脱水速率越慢、干制时间随之延长;起始干制时间越晚,戈壁滩温度越低、空气湿度差越小,进而导致辣椒内部湿度变化减小、辣椒表面水分蒸发速度和内部水分迁移速度都减小、干制速率降低、干制时间随之延长<sup>[32]</sup>。

## 2.4 戈壁滩辣椒自然干制过程中品质分析

### 2.4.1 水分活度 图 5 为红龙 18、红龙 23 和铁

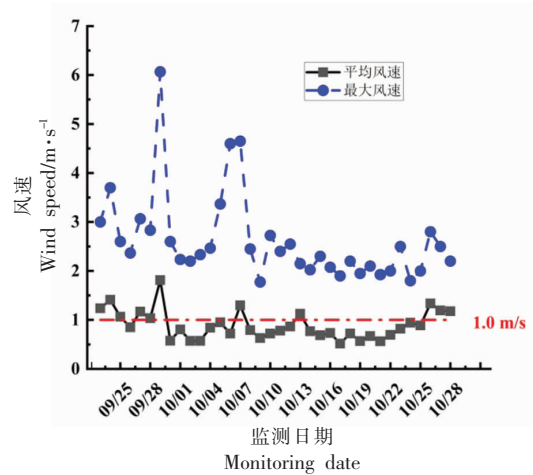


图 3 新疆戈壁滩风速变化图

Fig.3 Wind speed curve of Gobi Desert in Xinjiang

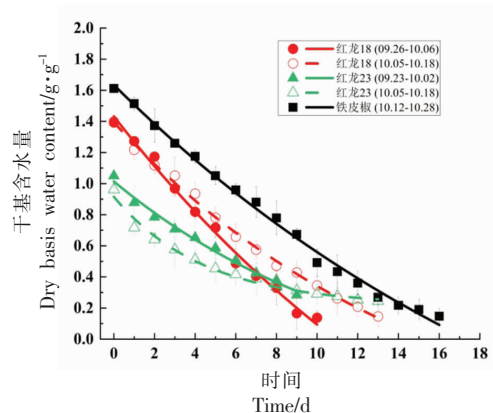


图 4 Logarithmic 模型拟合红龙 18、红龙 23、铁皮椒戈壁滩自然干制曲线

Fig.4 Using Logarithmic model fitting the natural drying curve of Honglong 18, Honglong 23 and Pepper Tiepi in Gobi Desert



表3 3种干燥模型对新疆辣椒戈壁滩自然干制过程模拟结果

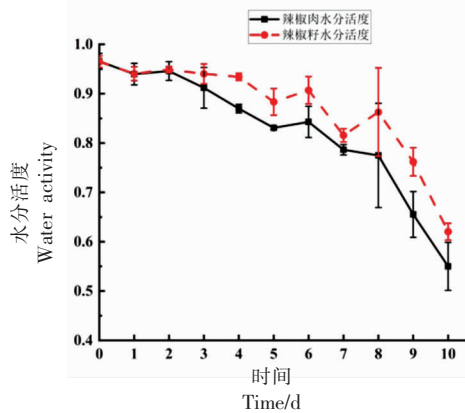
Table 3 Statistical results of three kinds of drying model for chili peppers in Xinjiang Gobi Desert

辣椒品种	起止日期	Page 模型		Logarithmic 模型		Lewis 模型	
		$X_t = \exp(-k \times t^n)$	$R^2$	$X_t = a \times \exp(-k \times t) + c$	$R^2$	$X_t = \exp(-k \times t)$	$R^2$
红龙 18	2020.09.26– 2020.10.06	$X_t = \exp(-0.0013t^{3.39})$	0.4436	$X_t = 7.6464 \exp(-0.0195t) - 6.2406$	0.9921	$X_t = \exp(-0.0858t)$	0.3572
	2020.10.05– 2020.10.18	$X_t = \exp(-0.0059t^{2.30})$	0.8217	$X_t = 2.0263 \exp(-0.0747t) - 0.6282$	0.9969	$X_t = \exp(-0.0891t)$	0.7537
红龙 23	2020.09.23– 2020.10.02	$X_t = \exp(-0.0997t^{1.14})$	0.9903	$X_t = 1.3183 \exp(-0.0916t) - 0.2875$	0.9942	$X_t = \exp(-0.1322t)$	0.9876
	2020.10.05– 2020.10.18	$X_t = \exp(-0.3024t^{0.60})$	0.9741	$X_t = 0.7148 \exp(-0.2734t) + 0.2450$	0.9961	$X_t = \exp(-0.1392t)$	0.9534
铁皮椒	2020.10.12– 2020.10.28	$X_t = \exp(-0.0001t^{3.88})$	0.4952	$X_t = 3.5885 \exp(-0.0347t) - 1.9699$	0.9973	$X_t = \exp(-0.0438t)$	0.3112

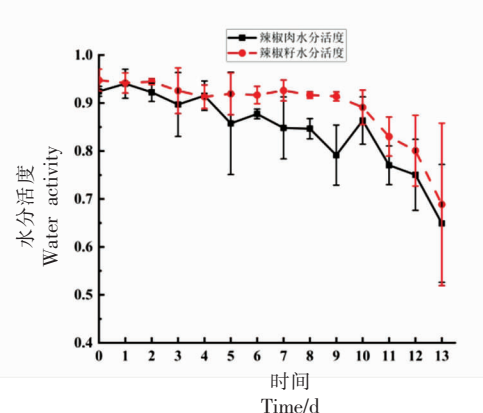
注:  $t$  为自然干制时间;  $X_t$  为自然干制  $t$  时辣椒的干基含水量。

皮椒自然干制过程中水分活度的变化情况。干制过程中辣椒肉和辣椒籽中的水分活度逐渐下降, 由于辣椒籽位于辣椒肉内部且分布聚集, 故辣椒肉比辣椒籽更易干燥, 因此干制过程中辣椒肉、籽的水分活度差异先增大后减小; 由于红龙 18 相比

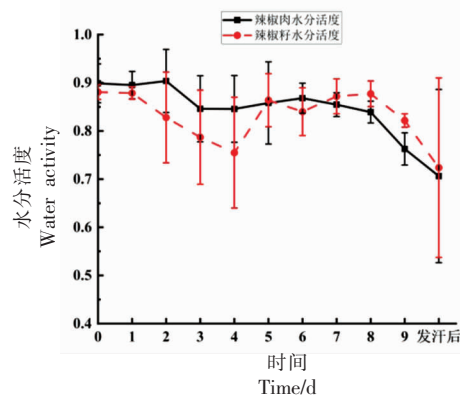
红龙 23 含有更多辣椒籽, 故红龙 18 干制 0~5 d 的水分活度下降得更慢, 但由于红龙 18 的椒型更小, 因此相同时间干制结束后红龙 18 的水分活度更低; 相较 9 月, 10 月戈壁滩气温下降, 因此该时期辣椒达到相同水分活度所需干制周期更长; 3



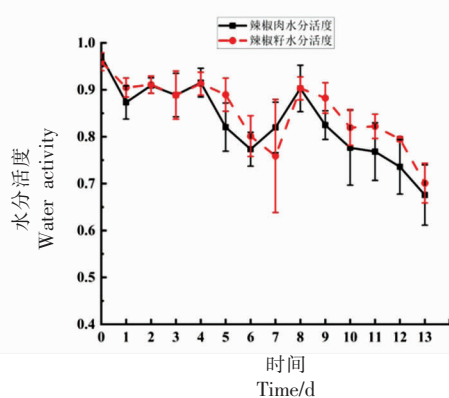
(a) 红龙 18 水分活度变化曲线 (2020.09.26–2020.10.06)



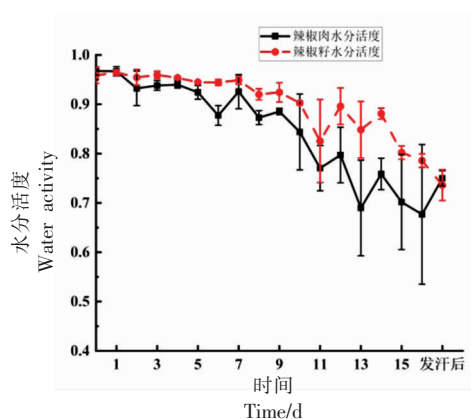
(b) 红龙 18 水分活度变化曲线 (2020.10.05–2020.10.18)



(c) 红龙 23 水分活度变化曲线 (2020.09.23–2020.10.02)



(d) 红龙 23 水分活度变化曲线 (2020.10.05–2020.10.18)



(e) 铁皮椒水分活度变化曲线(2020.10.12–2020.10.28)

图 5 自然干制过程中辣椒水分活度变化曲线

Fig.5 Water activity curve of chili peppers during natural drying

种辣椒干制终点时水分活度为 0.55~0.75,该水分活度能抑制干制辣椒中的微生物滋生<sup>[33]</sup>;相较“未发汗”的红龙 18,“发汗”后的红龙 23 及铁皮椒干制终点时辣椒肉、籽水分活度几乎相同。

2.4.2 质构 图 6 为红龙 18、红龙 23、铁皮椒自

然干制过程中的质构变化曲线,干制过程中辣椒水分减少、硬度值增加。此外,相比拢大堆时红龙 23、铁皮椒的硬度值,“发汗”后二者硬度值降低、更柔韧;而红龙 18 未进行“发汗”,因此干制过程中其硬度值随干制时间延长持续升高。

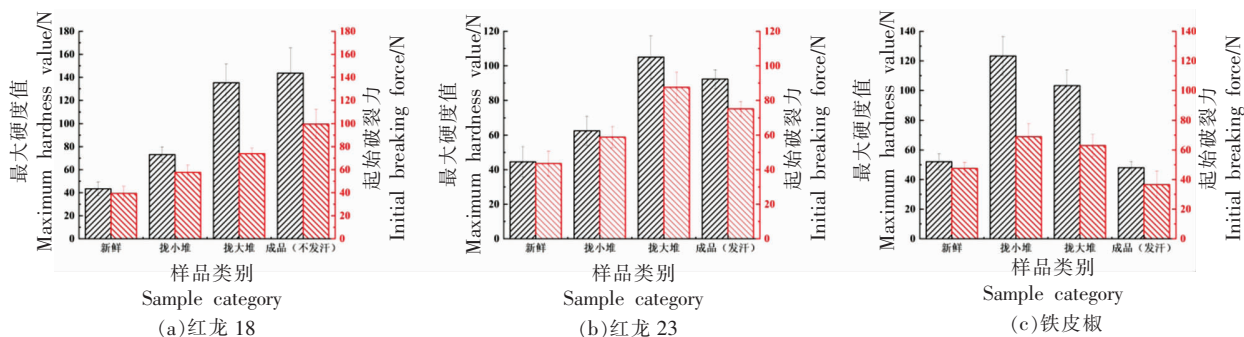


图 6 自然干制过程中红龙 18、23 和铁皮椒质构变化曲线

Fig.6 Texture change curve of Honglong 18, 23 and Pepper Tiepi during natural drying

2.4.3 色差 监测了红龙 18、红龙 23、铁皮椒在干制过程中的色差变化情况,如表 4~6 所示。干制过程中辣椒果皮亮度  $L^*$  无明显变化。红度  $a^*$ 、黄度  $b^*$  均在干制过程中有下降趋势,说明干制过程中辣椒发生了褐变。 $\Delta E \geq 2$  说明干制过程中辣椒

色泽变化肉眼可见。颜色变化可能与辣椒含水量下降,辣椒中维生素 C、多酚等抗氧化物质的氧化褐变有关,也可能与多酚氧化酶造成的酶促褐变有关<sup>[34]</sup>。

表 4 红龙 18 自然干制过程中色差变化表(2020.09.26–2020.10.06)

Table 4 Color difference table during natural drying of Honglong 18 (2020.09.26–2020.10.06)

时间/d	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
0	$31.00 \pm 1.64$	$20.37 \pm 3.50$	$6.03 \pm 2.02$	—
1	$31.28 \pm 1.59$	$20.87 \pm 3.29$	$6.43 \pm 1.91$	0.70

(续表 4)

时间/d	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
2	31.96 ± 1.52	20.29 ± 3.17	6.44 ± 2.27	1.05
3	31.02 ± 1.42	21.01 ± 3.42	6.46 ± 2.21	0.77
4	31.01 ± 2.16	20.61 ± 4.29	6.12 ± 3.08	0.26
5	29.90 ± 3.12**	19.28 ± 3.64	5.44 ± 2.39	1.66
6	30.49 ± 1.87	19.95 ± 4.39	5.43 ± 2.78	0.89
7	30.13 ± 1.93*	18.55 ± 4.84*	5.12 ± 3.13	2.21
8	30.00 ± 1.65*	18.59 ± 3.40	4.95 ± 1.67*	2.31
9	29.72 ± 1.55**	18.80 ± 5.28*	4.80 ± 2.50*	2.37
10	30.31 ± 1.81*	18.55 ± 3.29*	4.80 ± 1.79*	2.30

注:采用LSD方法分析,\*. 差异显著( $P < 0.05$ );\*\*. 差异非常显著( $P < 0.01$ );\*\*\*. 差异极显著( $P < 0.001$ ),下同。

表 5 红龙 23 自然干制过程中色差变化表 (2020.09.23–2020.10.02)

Table 5 Color difference table during natural drying of Honglong 23 (2020.09.23–2020.10.02)

时间 d	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
0	31.67 ± 1.52	22.12 ± 3.77	7.15 ± 2.69	–
1	31.23 ± 1.58	21.12 ± 6.57	6.57 ± 2.10	1.24
2	31.41 ± 2.64	22.23 ± 4.13	6.99 ± 2.11	0.32
3	31.00 ± 1.19	22.48 ± 4.07	6.03 ± 1.95	1.35
4	30.98 ± 1.44	20.54 ± 3.66	6.53 ± 2.26	1.83
5	30.63 ± 1.86*	20.54 ± 3.48	5.48 ± 2.19*	2.52
6	30.64 ± 1.46*	19.68 ± 3.33*	5.39 ± 1.94**	3.18
7	30.75 ± 1.87*	20.81 ± 4.32	5.53 ± 3.13	2.28
8	30.58 ± 1.73*	20.62 ± 4.72	5.55 ± 2.78*	2.45
9	30.28 ± 1.40**	19.14 ± 3.17**	4.76 ± 1.50**	4.06
“发汗”后	30.24 ± 1.46**	18.45 ± 3.75**	4.79 ± 1.88**	4.58

表 6 铁皮椒自然干制过程中色差变化表 (2020.10.12–2020.10.28)

Table 6 Color difference table during natural drying of Pepper Tiepi (2020.10.12–2020.10.28)

时间 d	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
0	31.21 ± 1.44	25.20 ± 2.73	8.15 ± 2.45	–
1	30.96 ± 1.22	25.86 ± 3.58	7.77 ± 2.25	0.80
2	31.90 ± 1.71	25.12 ± 3.20	9.06 ± 2.86	1.14
3	31.87 ± 2.23	24.73 ± 3.00	8.62 ± 2.38	0.94
4	30.92 ± 1.98	23.75 ± 3.96	7.85 ± 2.98	1.51
5	32.07 ± 2.20	25.45 ± 3.90	10.00 ± 3.81*	2.06
6	31.28 ± 1.84	24.58 ± 3.67	8.22 ± 2.56	0.63
7	31.06 ± 1.81	23.27 ± 3.52*	7.36 ± 2.25	2.09
8	30.29 ± 1.67	22.82 ± 3.74*	6.66 ± 2.13*	2.95
9	30.34 ± 1.54	23.09 ± 3.47*	6.38 ± 1.47*	2.77
10	30.50 ± 2.02	21.67 ± 3.98***	6.11 ± 2.09**	4.14
11	30.32 ± 1.53	21.77 ± 4.28***	6.19 ± 2.49**	4.05
12	30.45 ± 2.06	22.25 ± 4.12**	5.86 ± 2.78**	3.81
13	31.44 ± 1.69	23.47 ± 4.16	8.61 ± 2.85	1.80
14	30.55 ± 1.55*	21.99 ± 3.17**	6.64 ± 1.49*	3.65
15	31.43 ± 2.09	21.32 ± 4.18***	7.64 ± 2.78	3.92
16	30.80 ± 1.76	21.47 ± 4.30***	7.13 ± 2.92	3.89
“发汗”后	30.31 ± 1.95	21.38 ± 4.11***	6.19 ± 2.27**	4.39

2.4.4 发霉率 图7为红龙18、红龙23、铁皮椒干制结束后的发霉率情况,其分别为20.5%,3.5%,9.0%。由于红龙18为机械采收,更易在采收过程中受到机械破坏、伤口较多,因此干制结束时红龙18发霉率最高;此外,因为铁皮椒的椒型较大、且其干制时温度显著下降,因此相比红龙23,铁皮椒的干制周期更长、发霉率更高。

### 3 讨论

#### 3.1 干制时间对新疆辣椒戈壁滩自然干制的影响

根据新疆辣椒成熟期,将新疆辣椒戈壁滩自然干制时间规定为9月中旬至10月底。该时间段内,新疆戈壁滩的气候特点为:风速大、昼夜温差大、辣椒堆内湿度变化显著,利于辣椒自然晒干及风干。相较9月下旬,10月时戈壁滩温度显著下降,不利于辣椒堆内水分的散失,所需干制时间更长,使辣椒更易出现褐变<sup>[35]</sup>、发霉等问题,影响辣椒安全及质量品质。因此在10月进行辣椒自然干制时要勤翻辣椒堆,避免堆内辣椒长霉。

#### 3.2 采收方式对新疆辣椒戈壁滩自然干制的影响

相比辣椒的人工采摘方式,机械采收的效率更高、成本更低。由于辣椒外形存在差异,而机械采收设备的尺寸无法随时根据采收辣椒的形状、大小进行调节,因此机械采收更易破坏辣椒,又因为干制初期辣椒水分含量较高,伤口处更易滋生微生物。因此机械采收时辣椒的破损率越高,干制过程中的发霉率也越高,进而影响干制辣椒产品品质。

#### 3.3 新疆辣椒戈壁滩自然干制过程中关键参数的确定

辣椒戈壁滩自然干制过程中拢堆、终点判断等步骤受人为因素影响大,难以保障批次间干制辣椒产品品质及其稳定性。因此要结合实际生产经验及戈壁滩自然干制监测得到的数据,总结辣椒戈壁滩自然干制过程中各操作步骤的干基含水量,便能进一步结合Logarithmic模型预测拢堆时间、干制周期,将其作为理论依据指导制订新疆辣椒戈壁滩自然干制技术规程。

1) 拢堆时辣椒干基含水量与拢堆时间的确定 实际生产中以“辣椒果皮变干发硬、一握就

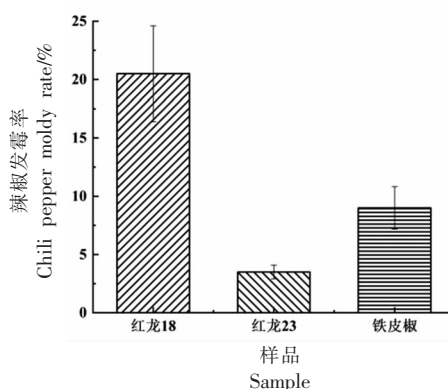


图7 红龙18、红龙23、铁皮椒干制成品发霉率

Fig.7 Moldy rate of dried products of Honglong 18, Honglong 23 and Pepper Tiepi

碎,辣椒籽处较软,扬起的辣椒落下后与其它辣椒碰撞有声”作为辣椒能否拢堆的判断依据。本研究监测了实际生产中辣椒拢堆时的干基含水量为0.96~1.18 g/g(相应湿基含水量为48.98%~54.13%),平均干基含水量为(1.08±0.08)g/g,为了便于该理论数值运用于实际生产中,规定辣椒拢堆时干基含水量应为1.0 g/g。基于这个值,结合干制拟合曲线可预测辣椒拢堆时间,避免人为判断失误造成拢堆过早堆内辣椒发霉,拢堆过晚辣椒表面过干易碎等问题。

2) 干制终点时辣椒干基含水量与干制周期确定 实际生产中以“辣椒表面干燥易碎,晃动时辣椒籽粒哗哗声”作为干制终点的判断依据。本研究监测了实际生产中干制终点时辣椒干基含水量为0.14~0.28 g/g(相应湿基含水量为12.28%~22.40%),平均干基含水量为(0.19±0.05)g/g,结合国家农业、国内贸易行业标准对干制辣椒含水量≤14%的规定<sup>[36-37]</sup>,规定辣椒干制终点时干基含水量应为0.16 g/g。基于这个值,结合干制拟合曲线可预测辣椒干制周期,保障干制辣椒品质及批次间的质量稳定性。

3) “发汗”后辣椒干基含水量 根据辣椒后续加工方式决定其是否堆垛“发汗”。若干制辣椒需要长途运输,则需堆垛“发汗”;若干制辣椒拉运至周边工厂提取辣椒红色素,则无需堆垛“发汗”。

实际生产中以“发汗后辣椒柔韧,绕指不碎,晃动时辣椒籽粒哗哗声”作为“发汗”结束的判断依据。监测得到“发汗”不会影响整批干椒的干基



表7 辣椒自然干制过程中关键参数  
Table 7 Key parameters in the natural drying process of chili peppers

辣椒品种	起止日期	辣椒拢堆		辣椒干制终点		辣椒“发汗”		
		经验描述	干基含水量/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	经验描述	干基含水量/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	是否“发汗”	经验描述	干基含水量/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
红龙 18	2020.09.26– 2020.10.06	辣椒果皮变 干发硬、一握 就碎,辣椒籽 处较软,扬起 的辣椒落下	$1.17 \pm 0.02$	辣椒表面 干燥易碎, 晃动时辣 椒内部有 籽粒晃动	$0.14 \pm 0.05$	否	辣椒柔 韧,绕指 不碎,晃 动时辣椒 内部有籽	–
	2020.10.05– 2020.10.18		$1.05 \pm 0.12$		$0.15 \pm 0.06$	否		–
红龙 23	2020.09.23– 2020.10.02	后与其它辣 椒碰撞有声	$1.15 \pm 0.03$	“哗哗”声	$0.28 \pm 0.01$	是	粒晃动 “哗哗”声	$0.27 \pm 0.08$
	2020.10.05– 2020.10.18		$0.96 \pm 0.01$		$0.24 \pm 0.05$	否		–
铁皮椒	2020.10.12– 2020.10.28		$1.05 \pm 0.06$		$0.15 \pm 0.05$	是		$0.12 \pm 0.05$

含水量,且有助于辣椒之间以及辣椒籽、肉之间的水分平衡,其既能增加辣椒柔韧性、防止辣椒破碎,又能避免辣椒局部水分活度过高,进而防止辣椒在长途运输过程中的霉变。

#### 4 结论

本研究监测了红龙 18、红龙 23 和铁皮椒 3 个常见辣椒品种在新疆戈壁滩的自然干制过程,通过对比分析 3 种常见干制模型得到了新疆辣椒戈壁滩自然干制过程符合 Logarithmic 模型。此外,本研究总结了新疆辣椒戈壁滩自然干制中关键步骤的干基含水量,确定辣椒拢堆时干基含水量为  $1.0 \text{ g/g}$ ,干制终点时干基含水量为  $0.16 \text{ g/g}$ ,进一步结合 Logarithmic 模型可计算得到辣椒自然干制过程中拢堆、干制终点时间的理论值,指导实际生产,避免因拢堆、干制时间不合理导致的辣椒发霉、破碎、白壳等问题。接下来,应基于本研究制定新疆辣椒戈壁滩自然干制技术规程,使得该过程标准化、规范化;重点关注机械采收后辣椒损伤多,干制过程中更易发霉的问题,提出优化干制机械装备、减少对辣椒损伤,以及辣椒干制全程机械化的建议,促进辣椒干制产业的高质量发展。

#### 参 考 文 献

- [1] SPENCE C. Why is piquant/spicy food so popular? [J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2018, 12: 16–21.
- [2] 朱妞. 辣椒籽综合开发利用前景分析[J]. 中国调味品, 2014, 39(1): 120–123.  
ZHU N. Analysis of the comprehensive development and utilization perspective of chili seeds [J]. China Seasoning, 2014, 39(1): 120–123.
- [3] HERNÁNDEZ PÉREZ T, GÓMEZ GARCÍA M D R, VALVERDE M E. Capsicum annum (hot pepper): An ancient Latin - American crop with outstanding bioactive compounds and nutraceutical potential [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(6): 2972–2993.
- [4] 张茜,肖红伟,杨旭海,等. 线辣椒气体射流冲击干燥特性的研究[J]. 食品科技, 2011, 36(7): 80–85.  
ZHANG Q, XIAO H W, YANG X H, et al. Experiment on air impingement drying characteristics of line pepper [J]. Food Science and Technology, 2011, 36(7): 80–85.
- [5] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT[EB/OL]. (2019–01–01)[2021–05–01]. <https://www.fao.org/faostat/zh/#data/QCL>.

- [6] 王立浩, 张宝玺, 张正海, 等. “十三五”我国辣椒育种研究进展、产业现状及展望[J]. 中国蔬菜, 2021(2): 21-29.  
WANG L H, ZHANG B X, ZHANG Z H, et al. Status in breeding and production of *Capsium* spp. in China during the Thirteenth Five-Year Plan period and future prospect[J]. China Vegetables, 2021(2): 21-29.
- [7] 邹学校, 马艳青, 戴雄泽, 等. 辣椒在中国的传播与产业发展[J]. 园艺学报, 2020, 47(9): 1715-1726.  
ZOU X X, MA Y Q, DAI X Z, et al. Spread and industry development of pepper in China[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2020, 47(9): 1715-1726.
- [8] 曹悦, 马燕, 赵靛, 等. 辣椒籽及其高值化利用研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(21): 320-327.  
CAO Y, MA Y, ZHAO L, et al. Research progress on pepper seeds and their high value-added utilization[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(21): 320-327.
- [9] World Health Organization. WHO Guidelines[EB/OL]. (2019-01-01) [2021-05-01]. <https://www.who.int/publications/who-guidelines>.
- [10] 魏雅雯, 靳玲侠. 辣椒红色素的提取方法及应用的研究进展[J]. 中国调味品, 2017, 42(8): 142-147.  
WEI Y W, JIN L X. Research progress on the extraction methods and application of capsanthin[J]. China Codiment, 2017, 42(8): 142-147.
- [11] 胡宝, 李慧琴, 崔建强. 南疆地区色素辣椒新品种引进与示范[J]. 新疆农垦科技, 2018, 41(11): 12-14.  
HU B, LI H Q, CUI J Q. Introduction and demonstration of new pigmented pepper varieties in South Xinjiang [J]. Science and Technology of Xinjiang Agricultural Reclamation, 2018, 41(11): 12-14.
- [12] 宋文胜, 袁丰年, 张新贵. 新疆制干加工辣椒产业概况及发展趋势[J]. 辣椒杂志, 2010, 8(3): 5-8.  
SONG W S, YUAN F N, ZHANG X G. The status and development trend of dried-fruit-processing hot pepper industry in Xinjiang [J]. Journal of China Capsium, 2010, 8(3): 5-8.
- [13] 葛菊芬, 颜彤, 欧阳炜, 等. 新疆辣椒产业现状及发展对策建议[J]. 辣椒杂志, 2010, 8(2): 8-10, 16.  
GE J F, YAN T, OUYANG W, et al. Current situation of pepper industry in Xinjiang and suggestions for development countermeasures[J]. Journal of China Capsium, 2010, 8(2): 8-10, 16.
- [14] 王宾, 李红, 袁丰年. 新疆辣椒区域比较优势实证研究[J]. 辣椒杂志, 2014, 12(4): 22-26.  
WANG B, LI H, YUAN F N. Regional comparative advantage of hot pepper production in Xinjiang [J]. Journal of China Capsium, 2014, 12(4): 22-26.
- [15] 王雪. 红色产业 红透新疆一片天[J]. 大陆桥视野, 2011(5): 48-55.  
WANG X. Red industry red through the sky in Xinjiang [J]. Continental Bridge Vision, 2011(5): 48-55.
- [16] 李艳, 王亮, 刘志刚. 新疆绿洲干旱区制干辣椒生产技术现状与产业发展对策[J]. 北方园艺, 2014(13): 189-192.  
LI Y, WANG L, LIU Z G. The production status and development strategy of dried chili in Xinjiang oasis of arid area [J]. Northern Horticulture, 2014(13): 189-192.
- [17] 王疆龙. 红辣椒中辣椒红色素的提取工艺研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2015.  
WANG J L. Study on the extraction technology of red pepper in capsanthin [D]. Shihezi: Shihezi University, 2015.
- [18] 周洁, 孔晓玲. 自然干燥与热风干燥对甘薯粉丝质量的影响[J]. 包装与食品机械, 2011, 29(6): 14-16.  
ZHOU J, KONG X L. Effects of natural drying and hot-air drying on quality of sweet potato vermicelli [J]. Packaging and Food Machinery, 2011, 29(6): 14-16.
- [19] PUGLIESE A, CALLAGHAN Y O, TUNDIS R. *In vitro* assessment of the bioaccessibility of carotenoids from sun-dried chilli peppers [J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2014, 69(1): 8-17.
- [20] 张茜, 耿智化, 张军辉, 等. 辣椒干燥装备技术研究进展[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(5): 6, 50-56.  
ZHANG Q, GENG Z H, ZHANG J H, et al. Research progress in pepper drying equipment technology [J]. Packaging and Food Machinery, 2019, 37(5): 6, 50-56.
- [21] GAMBACORTA L, MAGISTÀ D, PERRONE G. Co-occurrence of toxigenic moulds, aflatoxins, ochratoxin A, *Fusarium* and *Alternaria* mycotoxins in fresh sweet peppers (*Capsicum annuum*) and their

- processed products [J]. *World Mycotoxin Journal*, 2018, 11(1): 159–174.
- [22] JIN W, MUJUMDAR A S, ZHANG M. Novel drying techniques for spices and herbs: A review[J]. *Food Engineering Reviews*, 2018, 10(1): 34–45.
- [23] NEGEDU A, ATAWODI S E, FAPOHUNDA S O. Mould and mycotoxin contamination of pepper: A review[J]. *Acta Horticulturae*, 2018, 1225: 473–492.
- [24] SANATOMBI K, RAJKUMARI S. Effect of processing on quality of pepper: A review[J]. *Food Reviews International*, 2020, 36(6): 626–643.
- [25] 肖波. 对果蔬智能平衡干制技术的探讨[J]. *当代农机*, 2016(3): 67–69.
- XIAO B. Discussion of intelligent balanced drying technology for fruits and vegetables[J]. *Contemporary Farm Machinery*, 2016(3): 67–69.
- [26] 杨咏鹏. 干制技术与干辣椒品质变化相关性研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2009.
- YANG Y J. Study on the correlation between drying technology and quality changes of dried chili peppers[D]. Guizhou: Guizhou University, 2009.
- [27] 关志强, 王秀芝, 李敏, 等. 荔枝果肉热风干燥薄层模型[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(2): 151–158, 191.
- GUAN Z Q, WANG X Z, LI M, et al. Mathematical model of hot air drying of thin layer litchi flesh [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2012, 43(2): 151–158, 191.
- [28] 刘莉. 辣椒干制及干燥过程模型的建立[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2018.
- LIU L. The establishment of dry process model of dried pepper[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2018.
- [29] 高国华. 辣椒恒温与分阶段控温热风干燥的对比试验研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- GAO G H. Contrast between hot-air drying of chili under constant temperature and that under graded and controlled temperature[D]. Chongqing: Southwest University, 2012.
- [30] 张建军, 王海霞, 马永昌, 等. 辣椒热风干燥特性的研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 298–301.
- ZHANG J J, WANG H X, MA Y C, et al. Experimental research on hot-air drying properties of capsicum[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(3): 298–301.
- [31] 农业农村部农产品加工标准化技术委员会. 风干肉加工技术规范: NY/T 2782–2015[S]. 北京: 中华人民共和国农业农村部, 2015: 3.
- Agricultural Products Processing Standardization Technical Committee of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Technical specification on processing of air-dried meat: NY/T 2782–2015[S]. Beijing: Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 2015: 3.
- [32] 张芳, 黄玉龙, 汤莹, 等. 苹果片太阳能低温吸附干燥工艺优化与模型研究[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(8): 160–167, 235.
- ZHANG F, HUANG Y L, TANG Y, et al. Studies on characteristics and model of solar low-temperature adsorption drying for fresh apple slices[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2019, 35(8): 160–167, 235.
- [33] 王鹏宇. 农业食品加工中的微生物污染及其控制研究[J]. *南方农机*, 2021, 52(3): 73–74.
- WANG P Y. Research on microbial contamination in agrifood processing and its control[J]. *Southern Agricultural Machinery*, 2021, 52(3): 73–74.
- [34] 张慧. 红辣椒晾晒过程中褐变的原因[J]. *辣椒杂志*, 2014, 12(3): 29–34.
- ZHANG H. Main factors affect fruit browning during hot pepper fruit drying[J]. *Journal of China Capsicum*, 2014, 12(3): 29–34.
- [35] 张茜, 耿智化, 张文凯, 等. 辣椒干燥预处理技术研究进展[J]. *食品工业*, 2019, 40(11): 276–282.
- ZHANG Q, GENG Z H, ZHANG W K, et al. Research progress of pepper drying pre-treatment technology[J]. *Food Industry*, 2019, 40(11): 276–282.
- [36] 中华人民共和国商务部. 红辣椒干流通规范: SB/T 10967–2013[S]. 北京: 中华人民共和国商务部, 2013: 2.
- Ministry of Commerce of the People's Republic of China. Specification of circulation for dried chilies: SB/T 10967–2013[S]. Beijing: Ministry of Commerce of the People's Republic of China, 2013: 2.
- [37] 农业农村部农产品加工标准化技术委员会. 干红辣椒质量分级: NY/T 3610–2020[S]. 北京: 中华人民共和国农业农村部, 2020: 2.
- Agricultural Products Processing Standardization Technical Committee of the Ministry of Agriculture

and Rural Affairs. Quality grades of dried hot peppers: NY/T 3610-2020[S]. Beijing: Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 2020: 2.

## Monitoring Natural Drying Process of Chili Peppers in Xinjiang Gobi Desert and Developing Its Technical Protocol

Xu Jiayue<sup>1</sup>, Wang Xingbo<sup>1</sup>, Peng Sijia<sup>1</sup>, Lian Chang<sup>1</sup>, Ma Yan<sup>2</sup>, Sun Zhijian<sup>1</sup>, Zhao Liang<sup>1</sup>, Liao Xiaojun<sup>\*</sup>  
(<sup>1</sup>College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, National Engineering Research Centre for Fruit and Vegetable Processing, Key Laboratory of Fruit and Vegetable Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083

<sup>2</sup>Institute of Agro-products Storage and Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Xinjiang Deeper Processing and Engineering Technology Research Centre of Main Byproducts, Urumqi 830091)

**Abstract** The natural drying process of chili peppers in Xinjiang Gobi Desert includes six steps which are hanging and drying, harvesting, spreading and drying, piling, sweating, bagging and transportation. However, the natural drying process is based on experience without technical protocol and theoretical guidance, in order that dried chili peppers are easy to be fragile and moldy. Therefore, it is necessary to monitor the natural drying process of chili peppers in Xinjiang Gobi Desert and develop its technical protocol, so as to standardize the natural drying process, ensure the safety and the quality of dried chili peppers. This study followed the natural drying process of three common varieties of chili peppers which were Honglong 18, Honglong 23 and Pepper Tiepi, and monitored the environmental temperature, humidity, wind speed, dry basis water content, water activity, color difference and moldy rate of drying chili peppers, and established a mathematical model of natural drying process of chili peppers in Xinjiang Gobi Desert. The natural drying process of chili peppers in Xinjiang Gobi Desert was in accordance with the Logarithmic drying model. Combined with the actual experience, this study regulated that the dry basis water content of peppers was about 1.0 g/g and 0.16 g/g when they were piled-up and at the end of natural drying. The determination of the dry base water content of chili peppers at the beginning of piling and the end of drying could provide a theoretical basis for the development of the technical protocol. In addition, this study found that mechanically harvested peppers were more damaged and more prone to mold in the natural drying process. Therefore, reducing the mechanical damage of peppers and standardizing the natural drying process were conducive to improving drying efficiency, ensuring the safety of dried peppers, and promoting the high-quality development of the dried chili pepper industry.

**Keywords** Xinjiang Gobi Desert; chili pepper; natural drying; kinetics analysis; technical protocol