

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.06.019

曹子怡, 李兴军, 宋洪东, 等. 氦气冷等离子体对大米水分吸着等温线影响的研究[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(6): 148-156.

CAO Z Y, LI X J, SONG H D, et al. Effect of helium cold plasma on the moisture sorption isotherms of milled rice[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(6): 148-156.

# 氦气冷等离子体对大米水分吸着等温线影响的研究

曹子怡<sup>1,2,3</sup>, 李兴军<sup>1,2</sup>✉, 宋洪东<sup>3</sup>, 赵明慧<sup>1,2,4</sup>

(1. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮食储运研究所, 北京 100037;

2. 国家粮食储运工程研究中心, 北京 100037;

3. 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093;

4. 河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**我国在低压强射频冷等离子体发生设备的研发有20多年历史,该设备处理大米能够显著缩短蒸煮时间,提高粥中固形物溶解。最近5年冷等离子体技术在食品行业应用的安全性评价受到关注。本研究对120 W-20 s 低压强射频氦气冷等离子体(140 Pa, 13.56 MHz, 冷等离子体源距离样品3 cm, 每次处理样品300 g)重复处理圆粒大米0~4次后的样品,测定水分吸附和解吸等温线,在5~35℃、平衡相对湿度(ERH)10%~90%范围内,与对照样品比较,冷等离子体重复处理不改变大米的吸湿特性(单分子水层和多分子水层的特性)和安全水分值,但能显著降低大米的水分接触角而提高亲水性和大米吸水率。本研究为冷等离子体处理大米样品的安全储藏提供基础数据。

**关键词:**冷等离子体;氦气;大米;吸湿特性;安全水分;水分接触角

中图分类号:TS201.4;S-3 文献标识码:A 文章编号:1007-7561(2023)06-0148-09

## Effect of Helium Cold Plasma on the Moisture Sorption Isotherms of Milled Rice

CAO Zi-yi<sup>1,2,3</sup>, LI Xing-jun<sup>1,2</sup>✉, SONG Hong-dong<sup>3</sup>, ZHAO Ming-hui<sup>1,2,4</sup>

(1. Institute of Grain Storage and Logistic, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 2. National Engineering Research Center for Grain Storage and Transportation, Beijing 100037, China; 3. College of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 4. College of Grain, Oil and Food, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

**Abstract:** The low-pressure radio-frequency (RF) cold plasma equipment has been developing in China for over 20 years. This equipment can significantly shorten rice cooking time and increase the solid solubility in the porridge. The safety evaluation of cold plasma technology in food industry is being carried out during the recent five years. This study measured the moisture desorption/adsorption isotherms of milled rice treated

收稿日期:2023-04-12

基金项目:山东省农业重大应用技术创新项目子课题(SD2019ZZ012-5)

Supported by: The Sub-project of the Major Agricultural Applied Technology Innovation Project in Shandong Province (No.SD2019ZZ012-5)

作者简介:曹子怡,女,1995年出生,在读硕士生,研究方向为食品科学与工程。E-mail:caoziyiz@163.com

通讯作者:李兴军,男,1971年出生,博士,研究员,研究方向为食品科学与工程。E-mail:lxj@ags.ac.cn

zero to four times by 120 W-20 s helium cold plasma (CP, 140 Pa, 13.56 MHz, the distance from plasma resource to the samples is 3 cm, 300 g samples were treated each time). In the range of 5 to 45 °C and 10% to 90% RH, in contrast to the untreated samples, CP repeat treatments did not change the hygroscopic properties such as monolayer and multilayer moisture properties and the moisture content of safe storage, but they increased hydrophilicity and water absorption rate of milled rice with a significant decrease in water contract angle. This study gives basic data for the safe storage of CP-treated milled rice.

**Key words:** cold plasma; helium; milled rice; hygroscopic property; safe storage moisture; water contract angle

冷等离子体 (Cold plasma, CP) 最近几年被广泛用于提高食品的安全性和质量。它是新兴的、环境友好的非热食品加工技术, 类似中性等离子体气体中含有大量的活性氧 (ROS) 和活性氮 (RNS), 使用 CP 进行灭菌可降低食品成本且不会对食品本身造成影响<sup>[1-3]</sup>。Lee 等<sup>[4]</sup>在密闭的介质阻挡放电 (DBD) 反应器中处理 5 g 糙米 5、10、20 min, 需氧细菌、大肠杆菌的干菌丝显著减少,  $\alpha$ -淀粉酶活性显著提高。类似研究分别处理 3 g 白米 5、10、20 min, 谷草杆菌及大肠杆菌干菌丝显著减少, 米饭的硬度和咀嚼度保持不变<sup>[5]</sup>。再次处理 15 g 白米 20 min, 微生物干菌丝减少率 31%~34%, 对白米的果糖、葡萄糖、蔗糖及麦芽糖含量无影响<sup>[6]</sup>。在食品加工中利用冷等离子体技术的其他研究思路包括食品成分的功能性修饰、谷物理化性质的改善、植物油的氢化及产生无反式脂肪酸的食用油、抗营养因子的失活、食物过敏原的控制等方面<sup>[7]</sup>。为了改善糙米米饭口感和减少蒸煮时间, 在静态密闭的 DBD 反应器中, Chen 等<sup>[8]</sup>较早采用 1~3 kV 电压的低压强空气冷等离子体 (输出功率 1.2~3.6 W) 先是处理 20g 长粒糙米 30 min, 与对照不处理比较, 随着功率增大蒸煮时间和粥中固形物显著溶解, 淀粉糊化的焓值和淀粉结晶度显著减少。分析冷等离子体处理后的发芽糙米显示  $\gamma$ -氨基丁酸和总酚含量随着使用功率增大而显著增加<sup>[9]</sup>。同一作者将冷等离子体处理的糙米进行储藏实验, 储藏 3 个月后, 与对照不处理比较, 糙米蒸煮时间和米饭硬度随着处理功率增大仍然显著降低<sup>[10]</sup>。Thirumdas 等<sup>[11]</sup>采用低压强射频空气冷等离子体 (15 Pa, 40 W 和 50 W) 处理糙米 10 min, 蒸煮时间和米粒硬度随

着处理功率增大而显著减少。他们以同一装置 (30~40 W, 5~10 min) 处理印度香米, 提出冷等离子体引起籽粒水滴接触角减少而表面能增加, 籽粒表面变得粗糙而亲水性增加<sup>[12]</sup>, 这就解释了冷等离子体处理导致大米吸水率增加和蒸煮时间减少。就冷等离子体对米粒影响的其他研究, 我们<sup>[13-14]</sup>采用低压强氦气射频冷等离子体 (80~520 W; 样品到等离子体源距离 3 cm) 处理 6 个中国品种大米样品, 处理时间 0~2 min。随着处理时间增加, 蒸煮时间显著减少, 淀粉糊化速率增加, 巯基含量增加。东南亚一些国家把冷等离子体作为改善大米储存和加工品质的潜在技术进行研究, 然而冷等离子体处理大米的吸湿特性缺乏研究。本研究采用动态水分吸附等温线测定仪分析冷等离子体重复处理大米样品的水分吸附/解吸等温线, 以期冷等离子体技术在食品行业安全应用提供基础数据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 仪器设备

氦气冷等离子体发生仪 HD-3N: 冷等离子体种子处理机有限公司; 动态水分吸附测定仪型号 SPS11-10 仪, 温度偏差 $\pm 0.5$  K, 平衡相对湿度 (ERH) 在 (23 $\pm 5$ ) °C 和 RH 0~98% 范围时, 偏差是  $\pm 0.6\%$ : 德国普优米德有限公司; 烘箱 DHG9070A: 杭州蓝天化验仪器厂; 高速冷冻离心机 3-30K: sigma 公司; 电子天平 (万分之一): 梅特勒多利多; JMWT12 大米外观品质检测仪: 北京东方孚德技术发展中心; 水滴角度测定仪 V5: 云帆天津仪器有限公司。

### 1.2 样品冷等离子体处理

大米样品处理采用 HD-3N 冷等离子体种子

处理机<sup>[15]</sup>。该仪器反应室直径 300 mm,长度 300 mm;射频电源 PSG-源型, 13.56 MHz, 0~1 000 W 自动匹配控制;工作真空度 130~160 Pa;电容式耦合辉光放电。圆粒大米购自超市,处理步骤和条件如图 1。圆粒大米在 0 h、24 h、48 h、30 d 时采用 120 W 的氦气冷等离子体 20 s 条件重复处理。对照和每次处理的样品自封袋包装后,储藏在 4 °C 供分析。

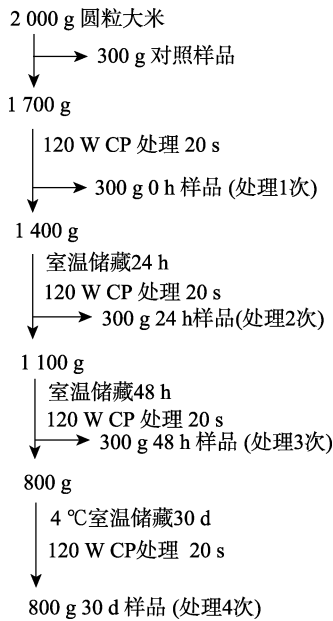


图 1 大米样品冷等离子体处理步骤

Fig. 1 Procedure for cold plasma treatment on rice

### 1.3 水滴接触角、吸水率及籽粒尺寸

米粒水滴接触角采用水滴角度测定仪<sup>[16]</sup>。采用固着液滴法测定, 2.5 μL 去离子水滴加到大米粒表面, 该水滴在米粒表面沉积后立即分析, 水滴形状的动态变化采用电荷耦合器件 (CCD) 照

相机每 10 s 记录一次。样品含水率按照 105 °C 恒重法 (GB5497—1985)<sup>[17]</sup>。籽粒吸水率测定方法是, 称取 2 g 大米籽粒置于 50 mL 离心管, 加入 40 mL 去离子水, 浸泡 4 h 后用滤纸吸干后称重, 计算吸水率。

大米籽粒长宽采用 JMWT12 大米外观品质测定仪测定。这个仪器包括米粒排列器、扫描仪、图像处理系统。米粒排列器用于快速将粳米或籼米排列在扫描仪玻璃板上, 接着扫描仪扫过接触玻璃板的米粒表面, 在计算机软件中 40 秒内可以显示米粒的形状。米粒图像处理按照 GB/T 1354—2018 方法<sup>[18]</sup>。采用自定义模式扫描大米全粒长平均值, 全粒宽平均值, 计算长宽比。每次扫描大米 500 粒左右, 重复 3 次。

### 1.4 平衡水分等温线测定及数据拟合

采用动态水分吸附测定仪测定大米的吸附和解吸等温线, 每次进样时每个样品克数约 2 g。等温线温度范围 10~35 °C, ERH 10%~90%。采用去离子水调节相对湿度, 高纯氮气作为保护气和样品干燥气体。称重循环间隔 10 min, 每个阶段室温湿度设定时长最小为 50 min, 最大为 50 h; 省缺重量限量为+100%, 平衡带宽度 dm/dt 为±0.01%/40min。

采用表 1 的方程对水分吸附和解吸数据进行拟合。SPSS 17 for Windows 软件的非线性回归方法, 在一系列迭代步骤中, 将测定值和理论值之间的残差平方和最小化。通过决定系数 (R<sup>2</sup>)、残差平方和 (RSS)、标准差 (SE) 及平均相对百分

表 1 采用的水分吸附等温线模型

Table 1 Models for fitting with the moisture sorption isotherms

方程名称	缩写	$M = f(ERH, t)$
修正的 Chung-Pfost	MCPE	$M = -\frac{1}{C_3} \ln \left[ -\frac{(t + C_2) \ln(ERH)}{C_1} \right]$
GAB	GAB	$= \frac{M_m C_1 C_2 ERH}{(1 - C_2 ERH)(1 - C_2 ERH + C_1 C_2 ERH)}$
修正的 3-GAB	3-MGAB	$M = \frac{C_1 C_2 \frac{C_3}{t} ERH}{(1 - C_2 ERH) \left( 1 - C_2 ERH + C_2 \frac{C_3}{t} ERH \right)}$
多项式	Poly	$M = C_1 ERH^3 + C_2 ERH^2 + C_3 ERH + C_4 ERH^2 t + C_5 ERH \cdot t + C_6 t + C_7$

注: 引自文献[21]; GAB, Guggenheim-Anderson-deBoer, ERH 是平衡相对湿度, 以小数表示; M 是平衡水分含量 (%); M<sub>m</sub> 是单层水分子含量 (%); t 是温度(°C); C<sub>1</sub>~C<sub>7</sub> 是方程的系数。

Notes: Cited from reference [21]. GAB, Guggenheim-Anderson-deBoer, ERH is equilibrium relative humidity, decimal; M is equilibrium moisture content (%); M<sub>m</sub> is the content of monolayer water molecules; t is temperature (°C); C<sub>1</sub>~C<sub>7</sub> are the equation coefficients.

率误差 (MRE) 来分析模型的拟合情况。 $R^2$  是基本的判定标准, RSS 和 SE 决定拟合的好坏, MRE 小于 10% 时模型拟合度好<sup>[19-20]</sup>。

### 1.5 数据处理

采用随机区组实验设计, 数据以平均值 $\pm$ 标准差表示。LSD 检验中同一列不相同小写字母表示样品之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 冷等离子体重复处理对大米吸水率的影响

从表 1 看出, 与对照比较, 随着氦气冷等离

子体重复处理的次数增加, 大米含水率和水滴接触角显著减少, 而吸水率显著增加。除过第四次氦气等离子体重复处理减少籽粒长度外, 1~3 次重复处理保持了籽粒长度, 等离子体重复处理不影响大米籽粒的宽度和长/宽的比率。

### 2.2 氦气冷等离子体重复处理对大米水分吸着等温线的影响

从图 2 看出, 实测的氦气等离子体处理大米样品的吸附和解吸等温线呈现 S 型曲线, 在同一平衡相对湿度 (ERH) 下, 随着温度的增加, 平衡含水率减少。在相同温度下, 随着 ERH 增加,

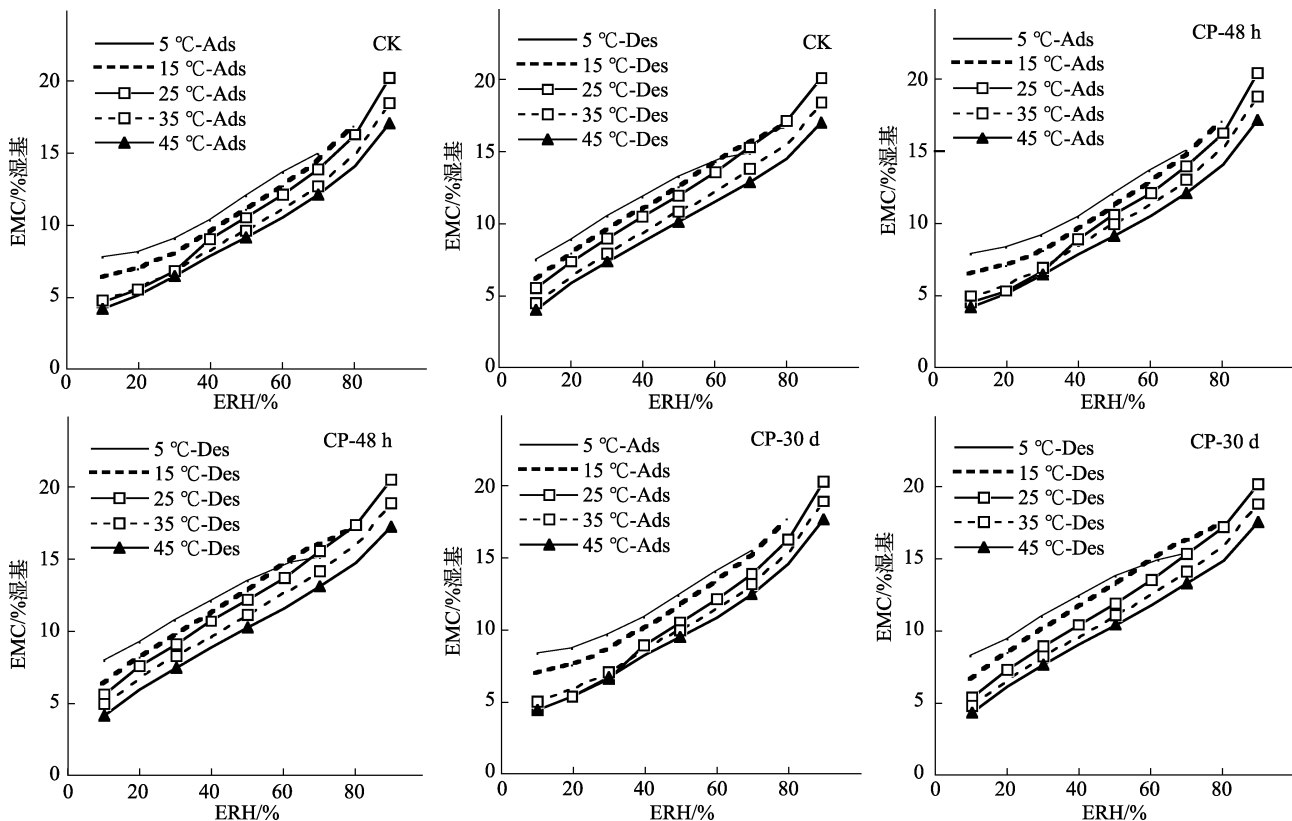
表 1 氦气冷等离子体重复处理大米样品的物理化学指标

Table 1 Effect of helium CP repeating treatments on the physico-chemical parameters of rice

CP 处理间隔及次数	含水率/%	水滴接触角/ $^{\circ}$	吸水率/%	籽粒长度/mm	籽粒宽度/mm	长/宽比率
CK (0)	12.7 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>	79.7 $\pm$ 2.90 <sup>a</sup>	29.1 $\pm$ 1.39 <sup>d</sup>	4.4 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	2.7 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	1.6 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>
0 h (1)	12.6 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	73.8 $\pm$ 1.98 <sup>b</sup>	30.9 $\pm$ 0.19 <sup>c</sup>	4.5 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>	2.8 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	1.6 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>
24 h (2)	11.3 $\pm$ 0.05 <sup>c</sup>	60.8 $\pm$ 1.43 <sup>c</sup>	36.6 $\pm$ 1.40 <sup>a</sup>	4.4 $\pm$ 0.04 <sup>ab</sup>	2.7 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>	1.6 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>
48 h (3)	11.9 $\pm$ 0.05 <sup>c</sup>	55.2 $\pm$ 4.42 <sup>cd</sup>	34.8 $\pm$ 0.20 <sup>b</sup>	4.5 $\pm$ 0.14 <sup>ab</sup>	2.7 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	1.6 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>
30 d (4)	11.7 $\pm$ 0.01 <sup>d</sup>	53.6 $\pm$ 1.94 <sup>d</sup>	37.1 $\pm$ 0.45 <sup>a</sup>	4.3 $\pm$ 0.04 <sup>c</sup>	2.7 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	1.6 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>

注: 同一列不相同小写字母表示样品之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different small superscript letters in the same column indicate significant differences between samples ( $P < 0.05$ ).



注: Ads 是指吸附, Des 是指解吸, 以下同。

Notes: Ads is adsorption, Des is desorption, the same for the following figures.

图 2 氦气冷等离子体重复处理 3 次 (48 h) 和 4 次 (30 d) 对大米吸着等温线的影响

Fig. 2 Effect of helium CP repeating treatment for three (48 h) and four (30 d) times on the moisture sorption isotherms in rice

平衡含水率增加。大米的吸附与解吸等温线之间存在滞后环。

### 2.3 等温线最佳拟合方程

从表 2~3 看出, 由于  $R^2 > 0.962$ ,  $MRE < 7.64\%$ , MCPE、MGAB 及多项式平衡水分方程均是拟合冷等离子体处理大米的水分吸着等温线的适合方程。根据吸附和解吸等温线方程拟合的平均决定系数和 MRE 的大小排序, 方程优劣排序是多项式 > MCPE > MGAB。

图 3 显示了 MCPE 方程拟合的同一温度下冷等离子体重复处理大米样品的吸附或解吸等温线。与对照比较, 氦气冷等离子体重复处理并没有改变大米的吸湿特性。图 4 进一步显示了氦气冷等离子体重复处理 3 次和 4 次的样品与对照吸附或解吸等温线没有显著差异。

### 2.4 冷等离子处理大米样品的水分子层特性和安全水分

表 4 给出了等离子处理大米水分吸着的 GAB

表 2 M=f(fh,t)平衡水分方程的系数和统计参数

Table 2 The coefficients of EMC equation in a form of M=f(fh,t) and statistical parameters

方程	吸着	CP 处理次数	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>	MRE/%
MCPE	吸附	CK(0)	439.522	38.236	0.221	0.974 7	6.073 4
		0 h(1)	449.323	39.451	0.219	0.976 6	6.217 5
		24 h(2)	426.744	38.849	0.215	0.976 3	6.619 9
		48 h(3)	427.376	37.201	0.218	0.976 1	6.309 3
		30 d(4)	414.708	33.343	0.216	0.977 4	6.135 9
	解吸	CK(0)	482.952	35.951	0.216	0.983 4	3.660 2
		0 h(1)	502.329	36.613	0.216	0.983 4	3.617 9
		24 h(2)	482.612	35.693	0.213	0.982 2	3.785 3
		48 h(3)	481.107	34.809	0.215	0.983 3	3.659 4
		30 d(4)	466.352	30.724	0.214	0.984 8	3.549 0
MGAB	吸附	CK(0)	7.996	0.661 2	337.381	0.962 5	7.283 2
		0 h(1)	8.051	0.660 9	350.673	0.964 7	7.218 2
		24 h(2)	8.094	0.662 6	326.906	0.967 1	7.288 5
		48 h(3)	8.115	0.659 5	332.679	0.964 6	7.328 9
		30 d(4)	8.474	0.644 6	329.623	0.963 9	7.636 7
	解吸	CK(0)	9.467	0.585 8	382.149	0.984 3	3.842 8
		0 h(1)	9.567	0.583 5	396.388	0.984 6	3.712 6
		24 h(2)	9.648	0.583 1	380.396	0.984 3	3.818 0
		48 h(3)	9.624	0.582 2	383.597	0.984 4	3.761 0
		30 d(4)	10.064	0.565 6	377.201	0.987 1	3.616 9

表 3 多项式平衡水分方程系数和统计参数

Table 3 The coefficients of polynomial equation in a form of M=f(fh,t) and statistical parameters

吸着	CP 次数	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	R <sup>2</sup>	MRE/%
吸附	CK(0)	18.325	-7.874	10.118	-0.230 4	0.186 4	-0.102 1	6.488	0.991 6	3.528 1
	0 h(1)	17.162	-6.421	9.742	-0.225 4	0.181 3	-0.099 88	6.563	0.990 5	3.645 3
	24 h(2)	16.998	-5.609	9.254	-0.239 8	0.198 3	-0.105 9	6.632	0.989 5	3.909 5
	48 h(3)	18.257	-7.229	9.563	-0.238 4	0.199 3	-0.108 2	6.752	0.990 2	3.765 1
	30 d(4)	16.587	-6.561	9.889	-0.187 9	0.163 5	-0.108 7	7.037	0.986 5	4.518 8
解吸	CK(0)	25.906	-31.709	25.519	-0.098 74	0.096 24	-0.095 48	5.385	0.991 1	2.296 4
	0 h(1)	25.614	-31.467	25.582	-0.095 18	0.090 98	-0.093 38	5.478	0.992 2	2.042 7
	24 h(2)	25.661	-31.301	25.526	-0.105 23	0.102 75	-0.098 59	5.541	0.991 8	2.124 4
	48 h(3)	26.414	-31.957	25.329	-0.107 1	0.107 9	-0.101 2	5.661	0.991 2	2.276 2
	30 d(4)	24.494	-30.551	25.272	-0.066 09	0.077 97	-0.103 3	6.027	0.992 7	2.285 6

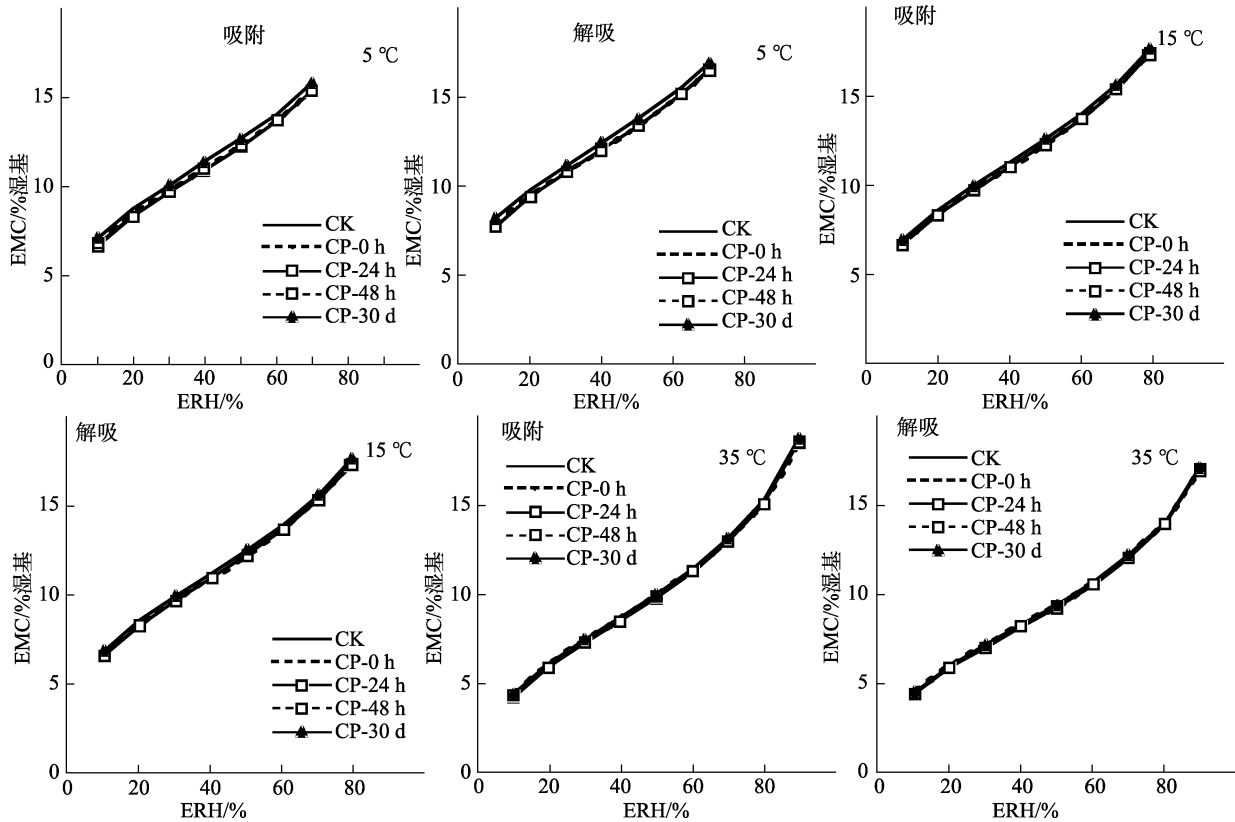


图 3 MCPE 拟合的等离子体重复处理样品三种温度下的吸着等温线

Fig. 3 Fitting with the moisture sorption isotherms at three temperatures from CP repeatedly treated rice with MCPE

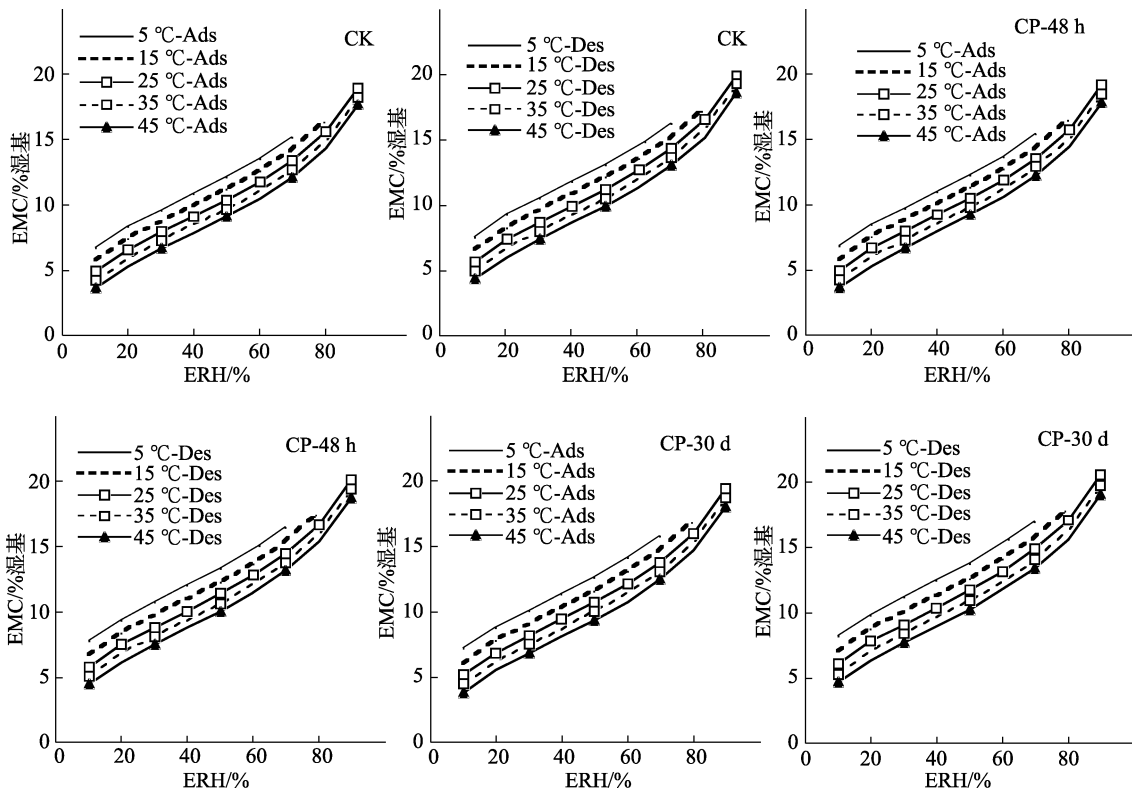


图 4 MCPE 拟合的等离子体重复处理样品的吸着等温线

Fig. 4 Fitting with the moisture sorption isotherms of CP repeatedly treated rice with MCPE

方程系数。随着温度增加,单分子层水含量 ( $M_m$ ) 对吸附过程和解吸过程均减少,等离子重复处理

大米样品与对照差异不明显。以  $C_1$  表示的单分子水特性随着温度增加对吸附过程和解吸过程均减

表 4 GAB 方程的系数  
Table 4 The coefficients of GAB equation in a form of  $M=f(fh,t)$

样品	温度/°C	吸附			解吸		
		$M_m/\%$	$C_1$	$C_2$	$M_m/\%$	$C_1$	$C_2$
CK(0)	5	7.367	207.711	0.745 6	10.666	36.576	0.482 7
	15	7.017	46.264	0.745 5	10.569	19.067	0.530 1
	25	7.391	13.528	0.720 6	9.203	18.098	0.626 7
	35	6.514	20.599	0.728 5	8.531	14.389	0.622 2
	45	6.531	15.582	0.703 1	8.346	12.619	0.602 1
0 h(1)	5	7.381	212.229	0.747 4	10.758	36.586	0.479 7
	15	7.136	51.058	0.745 1	10.678	20.365	0.531 9
	25	7.498	12.164	0.716 1	9.238	17.927	0.626 4
	35	6.695	22.575	0.723 7	8.704	15.846	0.618 5
	45	6.562	16.143	0.703 4	8.353	13.166	0.603 4
24 h(2)	5	7.309	271.379	0.751 9	10.659	37.424	0.488 2
	15	7.168	48.977	0.747 1	10.871	19.765	0.527 1
	25	7.698	10.224	0.711 1	9.353	16.981	0.620 9
	35	6.704	21.508	0.727 1	8.761	15.234	0.620 4
	45	6.593	14.495	0.703 9	8.449	12.214	0.601 3
48 h(3)	5	7.406	411.979	0.743 5	10.548	41.268	0.494 2
	15	7.067	50.318	0.747 8	10.643	19.694	0.533 2
	25	7.527	12.018	0.718 1	9.262	18.063	0.626 8
	35	6.614	22.661	0.730 1	8.596	15.641	0.626 5
	45	6.525	15.256	0.707 3	8.332	12.585	0.605 8
30 d(4)	5	7.699	688.238	0.733 5	10.801	46.259	0.493 7
	15	7.395	59.848	0.738 8	10.929	22.046	0.531 1
	25	7.541	11.484	0.716 9	9.304	17.392	0.624 2
	35	6.678	22.951	0.728 5	8.673	15.815	0.624 9
	45	6.676	17.507	0.705 5	8.425	14.128	0.609 2

少。以  $C_2$  表示的多分子层水特性随着温度增加对吸附过程减少，对解吸过程均增加。冷等离子重复处理没有改变大米的单分子水层和多分子水层的特性。

分别采用 MCPE、MGAB 及多项式的解吸方程计算冷等离子处理大米样品在 25 °C 的绝对 ( $a_w=0.65$ ) 和相对 ( $a_w=0.70$ ) 安全水分 (表 5)。等离子重复处理对大米安全水分没有显著影响。

表 5 氦气冷等离子体重复处理大米样品在 25 °C 的安全水分  
Table 5 Safe stored moisture content of CP treated milled rice at 25 °C

CP 处理时间 (重复数)	安全水分/%湿基	
	$a_w=0.65$	$a_w=0.70$
CK(0)	13.71±0.20 <sup>a</sup>	14.57±0.19 <sup>b</sup>
0 h(1)	13.86±0.21 <sup>a</sup>	14.72±0.20 <sup>ab</sup>
24 h(2)	13.92±0.20 <sup>a</sup>	14.79±0.19 <sup>ab</sup>
48 h(3)	13.86±0.21 <sup>a</sup>	14.72±0.20 <sup>ab</sup>
30 d(4)	14.14±0.24 <sup>a</sup>	15.00±0.22 <sup>a</sup>

注：同一列不相同小写字母表示样品之间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different small superscript letters in the same column indicate significant differences between samples ( $P<0.05$ ).

### 3 讨论与结论

冷等离子体重复处理大米的水分吸附和解吸等温线仍然呈现 S 型曲线，与谷物及其加工品的吸着等温线一致<sup>[22-23]</sup>。冷等离子体以活性氧种类、活性氮种类及羟基自由基等方式与食品表面发生化学反应，从而改变食品表面的亲水性，水滴接触角减少的程度能够反映冷等离子体处理的强度。氦气冷等离子体是高能物质，对大米 120 W 处理 20 s 就可以显著增加大米的吸水率。这是由于氦气等离子体的谱线强度  $3^1P_1 \rightarrow 2^1S_0$  总是在 501.6 nm 最强，指示了存在亚稳态氦原子<sup>[24]</sup>；当高纯度氦气用于冷等离子体介质阻挡放电时，产生 17.7 eV 的高能量光子<sup>[25]</sup>。

最近 5 年，美国食品药品监督管理局 (FDA)、环境保护署 (EPA) 及农业部 (USDA)，以及欧洲食品安全局 (EFSA)、德国食品安全参议院委员会等机构加快了冷等离子体处理食品的毒性和安全性的评价<sup>[26-28]</sup>。本研究首次报道了氦气冷等离

子体处理保持了大米的吸湿特性和安全储存水分。冷等离子体重复处理没有改变大米的单分子水层和多分子水层的特性,与对照样品比较,冷等离子体重复处理没有改变大米样品的单分子水层含量和安全水分含量。

### 参考文献:

- [1] CHEN X L, QIU Y, ZHANG J Y, et al. Degradation efficiency and products of deoxynivalenol treated by cold plasma and its application in wheat[J]. *Food Control*, 2022, 136: 108874.
- [2] GAO G B, WU J Z, WEI Z, et al. Effects of low-pressure radio-frequency cold plasma on the biochemical parameters and fatty acid profile of wheat flours[J]. *Cereal Chemistry*, 2022, 100(2): 393-413.
- [3] CHEN Z T, WANG R L, LI X J, et al. Sorption equilibrium moisture and isosteric heat of cold plasma treated milled rice[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2019, 55: 35-47.
- [4] LEE K H, WOO K S, YONG H I, et al. Evaluation of cold plasma treatments for improved microbial and physicochemical qualities of brown rice[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 73: 442-447.
- [5] LEE K H, WOO K S, YONG H I, et al. Assessment of microbial safety and quality changes of brown and white cooked rice treated with atmospheric pressure plasma[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2018, 27: 661-667.
- [6] LEE K H, WOO K S, JO C, et al. Quality evaluation of rice treated by high hydrostatic pressure and atmospheric pressure plasma[J]. *Journal of Food Quality*, 2019, 4253701.
- [7] EKEZIE F G, SUN D W, CHENG J H. A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: current applications and future trends[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2017, 69: 46-58.
- [8] CHEN H H. Investigation of properties of long-grain brown rice treated by low-pressure plasma[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7: 2482-2491.
- [9] CHEN H H, CHANG H C, CHEN Y K, et al. An improved process for high nutrition of germinated brown rice production: low-pressure plasma[J]. *Food Chemistry*, 2016, 191: 120-127.
- [10] CHEN H H, HUANG C L, LIN S Y, et al. Effect of low-pressure plasma exposure on the storage characteristics of brown rice[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8: 471-477.
- [11] THIRUMDAS R, SARAGAPANI C, AJINKYA M, et al. Influence of low pressure cold plasma on cooking and textural properties of brown rice[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2016, 37: 53-60.
- [12] THIRUMDAS R, DESHMUKH R R, ANNAPURE U S. Effect of low temperature plasma processing on physico-chemical properties and cooking quality of basmati rice[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2015, 31: 83-90.
- [13] LIU J J, WANG R L, CHEN Z T, et al. Effect of cold plasma treatment on cooking, thermomechanical and surface structural properties of Chinese milled rice[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2021, 14: 1-21.
- [14] 刘静静, 王若兰, 李兴军, 等. 氦气冷等离子处理对大米蒸煮品质及理化特性的影响[J]. *河南工业大学学报*, 2020, 41(3): 40-46.  
LIU J J, WANG R L, LI X J, et al. Effect of helium cold plasma on cooked quality and physico-chemical parameters of rice[J]. *Journal of Henan University of Technology*, 2020, 41(3): 40-46.
- [15] 王永维, 曹林, 王俊, 等. 冷等离子体处理对水稻种子萌发的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 44(6): 206-209.  
WANG Y W, CAO L, WANG J, et al. Effect of cold plasma on the germination of paddy seeds[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2016, 44(6): 206-209.
- [16] 徐咏宁, 王若兰, 李兴军, 等. 常压空气冷等离子处理对陈小麦生理生化及全麦粉糊化特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(16): 37-42.  
XU Y N, WANG R L, LI X J, et al. Effect of atmospheric pressure cold plasma on physiological biochemistry and whole meal gelatinization properties of stale wheat[J]. *Journal of Food Industry Science and Technology*, 2020, 41(16): 37-42.
- [17] 国家标准化管理委员会. 粮食、油料检验 水分测定法: GB/T 5497—1985[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.  
Standardization Administration. Inspection of grain and oilseeds Methods for determination of moisture content: GB/T 5497—1985[S]. Beijing: Standards Press of China, 1985.
- [18] 国家标准化管理委员会. 大米: GB/T 1354—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.  
Standardization Administration. Milled rice: GB/T 1354—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [19] 文韵漫, 李兴军, 陈治天, 等. 马铃薯全粉水分吸附等温线及吸附等热研究[J]. *粮油食品科技*, 2019, 27(1): 63-68.  
WEN Y M, LI X J, CHEN Z T, et al. A study on moisture sorption isotherms and isosteric heats in potato whole meal[J]. *Science and Technology of Grain, Oils and Food*, 2019, 27(1): 63-68.
- [20] LI X J, HAN X, TAO L S, et al. Sorption equilibrium moisture and isosteric heats of Chinese wheat bran products added to rice to increase its dietary fiber content[J]. *Grain & Oil Science and Technology*, 2021, 4: 149-161.
- [21] 李兴军主编. 粮食平衡水分理论与实践[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2022: 42-50.  
LI X J. Chief-edition. Grain equilibrium moisture theory and practice[M]. Beijing: China Light-industry Press, 2022, 42-50.
- [22] 李兴军, 姜平. 稻谷及其加工产品平衡水分研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2014, 22(6): 100-105.



- LI X J, JIANG P. Advance in the equilibrium moisture content of paddy and its products[J]. Science and Technology of Grain, Oils and Food, 2014, 22(6): 100-105.
- [23] 盛岩, 李兴军. 不同类型大米吸着等温线差异性研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(19): 69-73.
- SHENG Y, LI X J. A study on the difference in moisture sorption isotherms of different types of rice[J]. Journal of Food Industry Science and Technology, 2013, 34(19): 69-73.
- [24] 闫永辉, 冯贤平, 唐晓亮, 等. 从大气压到超低压范围的氦等离子体发射光谱的基本特性[J]. 光散射学报, 2004, 16(3): 242-245.
- YAN Y H, FENG X P, TANG X L, et al. The basic character of emission spectra of helium plasma from normal pressure to ultra-low pressure[J]. Chinese Journal of Light Scattering, 16(3): 242-245.
- [25] FRANCHINA F A, MAIMONE M, SCIARRONE D, et al. Evaluation of a novel helium ionization detector within the context of low-flow modulation comprehensive two-dimensional gas chromatography[J]. Journal of Chromatography A, 2015, 1402: 102-109.
- [26] BOURKE P, ZIUZINA D, BOEHM D, et al. The potential of cold plasma for safe and sustainable food production[J]. Trends in Biotechnology, 2018, 36(6): 615-626.
- [27] CULLEN P J, LALOR J, SCALLY L, et al. Translation of plasma technology from the lab to the food industry[J]. Plasma Processes and Polymers, 2017, e 1700085.
- [28] 高光标, 吴建章, 李燕羽, 等. 冷等离子体在粮油行业应用研究进展[J]. 中国油脂 2022, 47(8): 133-140.
- GAO G B, WU J Z, LI Y Y, et al. Progress on application of cold plasma in grain and oils industry[J]. China oils, 2022, 47(8): 133-140. 完