doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.037

感应离子电流盐渍腌菜工艺研究*

杨　哪[1]　金亚美[1]　马　倩[1]　吴凤凤[1]　金征宇[1]　徐学明[2]

(1.江南大学食品学院,无锡 214122;2.江南大学食品科学与技术国家重点实验室,无锡 214122)

摘要:利用交变磁通在盐渍液回路体系产生的感应电动势驱动 Na^+、Cl^- 形成离子电流,对 4 种常见腌菜进行了快速盐渍加工。选取盐渍液质量分数、处理时间和孔隙率为影响因素,考察了经过该方法浸渍处理的 4 种蔬菜的渗盐量并通过响应面分析建立了针对孔隙率为 5.4% ~8.2% 的蔬菜渗盐量预测模型。结果表明:随盐渍液质量分数的增加体系磁能转换为电能的效率增高,蔬菜的渗盐量增大。对厚度为 24 mm 且孔隙率在 6% 的蔬菜,采用离子电流浸渍处理后最快可在 30 min 时使蔬菜的渗盐量达到 5% 左右,渗盐量随盐渍液质量分数和孔隙率的增大呈现增加的趋势。选取孔隙率为 7.3% 的茄子作为实测验证对象,通过数据拟合表明该模型能较好地预测经过离子电流浸渍处理后蔬菜的盐分含量。

关键词:感应离子电流　蔬菜　盐渍　孔隙率　渗盐量

中图分类号:TS255.54　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2014)10-0238-07

引言

食品腌制加工按操作方式可分为干腌、湿腌、真空腌制和脉动压力腌制[1-4]。我国腌制食品历史悠久且产业巨大,代表性产品如咸鱼、腌肉、咸蛋、泡菜等都深受人们青睐[5-8]。为提高生产效率,缩短盐渍时间通常采用:提高腌制温度,即加快溶质扩散;提高溶质浓度,即提高渗透压;改变环境压力,即真空或者脉动压力浸渍,利用流体动力学机制并除去细胞中对渗透作用阻碍的气体[9]。但腌制过程中,若提高腌渍温度则易造成食材的酸败和发酵,而增加腌渍溶质浓度则会造成食材偏咸,后期需增加脱盐工艺。真空浸渍技术是目前唯一流行的可实现快速盐渍的加工手段,国内外已有大量报道[10-11]。

若让盐渍液中的离子形成电流并对多孔状食材进行浸渍,则同样可以达到快速盐渍的效果。目前,对离子电流的运用主要在电解、电镀、电泳和电渗析领域[12-15],即依靠通电极板所形成的电势差来驱动阴、阳离子运动,同时在极板表面发生电化学反应。利用中心充满电解质溶液的塑料管绕组,当绕组中的磁通量周期变化时,可在电解液回路体系产生感应离子电流,而运动的离子在垂直磁场区域受到洛伦兹力影响其迁徙轨迹发生偏移,强制性向多孔状组织渗透,以此完成对食品物料的浸渍处理[16-17]。该方法由感应电动势来驱动离子迁移,而不需要在 NaCl 电解质溶液中直接插入通电极板,可避免极板表面发生氧化还原反应产生 NaOH,从而不会对盐渍液造成污染。腌渍产品根据风味可分为盐渍、糟渍、酸渍、糖渍和酱渍,其中盐渍蔬菜在腌制行业中占有很大比例。

本文选取 4 种常见蔬菜即白萝卜、黄瓜、生姜和莴苣作为原料,并采用感应离子电流进行快速盐渍处理。研究盐渍液不同质量分数,不同孔隙率蔬菜经过离子电流处理的蔬菜渗盐量并观察微观组织结构,为实现快速盐渍技术提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料与仪器

选取新鲜的白萝卜、胡萝卜、生姜和莴苣,将原料削皮后切成 2.4 cm × 2.4 cm × 2.4 cm 正方体块状,并采用化学纯的 NaCl 作为盐渍液溶质。

感应离子电流浸渍装置如图 1 所示。利用感应电动势让浸渍液中的阴、阳离子形成离子电流完成对多孔状食品材料的浸渍。电解质溶液充满在螺旋塑料管路中且与硅钢铁芯形成多个绕组并和物料腔体连接形成导通状态,当管路绕组中的磁通量变化时,溶液回路体系产生的感应电动势推动离子往复迁移并受物料腔体的垂直磁场影响,离子运动轨迹

收稿日期:2013-09-03　修回日期:2013-11-23

*"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAD37B01)

作者简介:杨哪,博士生,主要从事食品浸渍技术研究,E-mail:yangna19820911@126.com

通讯作者:徐学明,教授,博士生导师,主要从事食品组分与物性研究,E-mail:xmxu@jiangnan.edu.cn

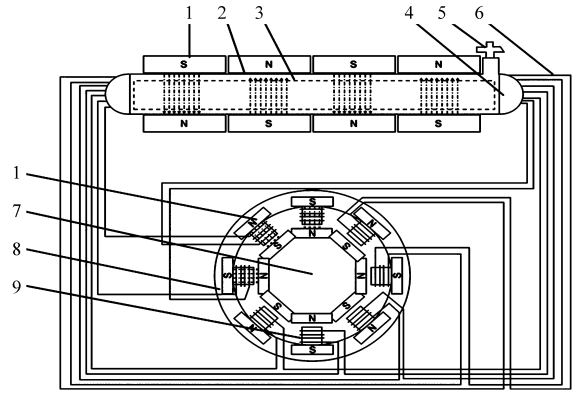


图 1　感应离子电流浸渍装置示意图

Fig. 1　Layout of induced ion current impregnation device

1. 钕铁硼磁钢　2. 玻璃腔体　3. 样品网框　4. 腔体侧盖　5. 阀门　6. 真空硅胶管　7. 转子　8. 定子　9. 硅钢铁芯

偏移，进而加强扩散渗透作用，其本质是将磁能转换为电能。

1.2　试验步骤

1.2.1　样品处理方法

各样品装入网框后置于玻璃腔体，将配置好的固定质量分数的 NaCl 溶液灌入腔体并浸没样品，抽真空排气使溶液充满整个塑料管路，打开阀门进气使回路系统恢复到常压，开启电动机转子转动，螺旋塑料管路的磁通量发生变化，电解液体系中产生离子电流。4 种蔬菜在经过不同时间（10、20、30、40 和 50 min）、不同盐渍液（NaCl 质量分数 3%、5%、8%、12% 和 16%）处理后取出进行盐分含量测定。

1.2.2　感应离子电压和电流

铂片电极与交流毫伏表连接并置于浸渍槽两侧，其铂片电极尺寸为 5 mm × 5 mm × 0.15 mm，电位稳定后读数并立即取出，得到体系的感应离子电压 E。采用钳形微安电流表的交流挡位检测各绕组管路中的感应电流，其值之和记为 I。

1.2.3　蔬菜孔隙率

采用干燥法测定样品含水率[18]，首先称取 5 g 样品，置于 105℃ 干燥箱中直到恒量，记录样品前、后质量，计算含水率

$$\chi_w = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \tag{1}$$

式中　χ_w——样品含水率，g/g

M_1——样品干燥前质量，g

M_2——样品干燥后的质量，g

蔬菜的表观密度采用改进的比重瓶法于 25℃ 测定[19]：称量并记录已干燥恒量的空温控比重瓶质量，将约 5 g 样品置于比重瓶中，然后称量装有试样的比重瓶质量。注入去离子水（25℃ 水的密度为 0.996 8 g/cm^3）直到浸没试样，将比重瓶抽至压力 0.01 MPa 保持 10 min，排除试样孔隙空气，放气后再将比重瓶放入 25℃ 恒温水浴中，再注入浸渍液至比重瓶某刻度处并标记，待比重瓶恒温后，再调节浸渍液面至比重瓶此前标记的刻度。取出比重瓶擦干并记录质量。然后将比重瓶倒空，清洗后只装入去离子水，进行抽真空排气处理，恒温后再调节液面至比重瓶此前标记的刻度处并再次记录质量，表观密度计算式为

$$\rho_a = \frac{(W_1 - W_0)\rho_{25℃}}{m_2 - m_1} \tag{2}$$

式中　ρ_a——样品表观密度，g/cm^3

$\rho_{25℃}$——25℃ 水的密度，g/cm^3

W_0——干燥恒量的空温控比重瓶质量，g

W_1——装有试样的比重瓶质量，g

m_1——排气后含样品的浸渍体系质量，g

m_2——排气后不含样品的浸渍体系质量，g

因环境难以达到绝对真空，真实环境下除去蔬菜样品孔隙中的所有气体较困难，所以真实密度为[20]

$$\rho_r = \frac{1.590}{1 + 0.590\chi_w} \tag{3}$$

式中　ρ_r——样品真实密度，g/cm^3

样品蔬菜孔隙率为[21]

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right) \times 100\% \tag{4}$$

1.2.4　NaCl 质量分数

氯化钠质量分数采用硝酸银滴定法进行测定[22]。

1.2.5　盐渍蔬菜微观结构观察

样品切成 4 mm × 1.5 mm × 5 mm 的矩形块状，直接置于液氮中冷冻（−210℃）5 min，取出后将其掰断，在冻干机的 −45℃ 冷阱中于压力 12 Pa 环境下脱水 30 min 后取出。在干燥样品的掰裂表面喷金，于 Quanta 200 型扫描电子显微镜（荷兰）下观察样品微观结构。

2　结果与分析

2.1　盐渍液质量分数、感应离子电压和电流

盐渍体系为强电解质溶液，含有大量的正、负离子。从表 1 可以看出，交变磁通在充满 NaCl 溶液的绕组管路中产生感应离子电压，在浸渍槽两端检测到 E = 7.3 V，其值与盐渍液质量分数无关且读数稳定。盐渍溶液体系中的离子电流则随 NaCl 质量分数的提高而增加。当 NaCl 质量分数为 3% 时体系中 I = 20.7 mA，质量分数为 16% 时 I = 91.8 mA。离子电流为交流值则微观上表明溶液体系中的离子在

交变感应电动势驱动下作往复运动。输出功率为

$$P_{out} = EI \tag{5}$$

式中 P_{out}——输出功率, V·A

因转子转动速率不变,所以装置的输入功率 P_{in} 没有变化,由式(5)可知[23],盐渍液体系的 E 值不变,I 提高,则体系获得的能量提高。实际设备的效率为[24]

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_{out}} \times 100\% \tag{6}$$

式中 η——机械效率,%

P_{in}——输入功率, V·A

故当提高溶质质量分数时,盐渍液回路体系将磁能转换为电能的效率提高。离子电流增强则离子迁移运动增强,在磁场下利于离子渗透[25]。

表 1 浸渍液体系的感应电学参数

Tab. 1 Induced electrical parameters of impregnating solution

参数	浸渍液 NaCl 质量分数/%				
	3	5	8	12	16
E/V	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3
I/mA	20.7 ± 0.14^{e}	36.9 ± 1.83^{d}	52.2 ± 0.56^{c}	71.1 ± 1.56^{b}	91.8 ± 2.55^{a}

注:每个数字是 3 个测量值的平均值,同一行中的数据若不含相同字母做肩注,则表示数据在 0.05 水平上差异显著,下同。

2.2 盐渍体系质量分数和处理时间对渗盐量影响

表 2 为 4 种蔬菜的理化特性参数。孔隙率由高到低依次是白萝卜、莴苣、黄瓜和生姜。采用 NaCl 质量分数为 3%、5%、8%、12%、16% 的浸渍液对 4 种多孔状蔬菜进行离子电流浸渍处理,时间为 30 min。从图 2 可看出,经过相同时间处理后,若盐渍液质量分数一致,则食材的孔隙率越高渗盐量就越大。处理同一种蔬菜时,盐渍体系的质量分数越高则离子电流就越大,蔬菜盐分含量就越高,即离子电流大小与渗盐量呈正相关。但随着盐渍液质量分数的提高,蔬菜渗盐量提高比例呈现减小趋势。当体系 NaCl 质量分数从 3% 提高到 5% 后,白萝卜的盐分质量分数从 1.9% 提高到 3.4%,渗盐量增加 79%;生姜的盐分质量分数从 1.1% 提高到 2.8%,渗盐量则增加了 154%。但当体系质量分数从 12% 提高到 16% 后,白萝卜的盐分质量分数从 5.3% 提高到 5.7%,渗盐量仅增加 7.5%;生姜的盐分质量分数从 4.3% 提高到 4.5%,渗盐量仅增加 4.6%。在离子电流处理下,随着盐渍体系质量分数的提高,蔬菜渗盐量增加趋势缓慢是因为溶质质量分数提高,离子电流增强,大量离子向植物组织渗入的过程中造成表层孔隙阻塞,影响离子进一步向组织内的渗透和扩散。

表 2 4 种蔬菜的理化特性参数

Tab. 2 Physicochemical properties of four kinds of vegetables

品种	含水率 χ_w/(g·g^{-1})	表观密度 ρ_a/(g·cm^{-3})	真实密度 ρ_r/(g·cm^{-3})	孔隙率 ε/%
白萝卜	0.956 9 ± 0.000 8^{b}	0.932 7 ± 0.015 4^{b}	1.016 ± 0.009 6^{a}	8.2 ± 1.42^{a}
莴苣	0.965 6 ± 0.002 5^{a}	0.943 4 ± 0.028 0^{ab}	1.013 ± 0.006 7^{a}	6.8 ± 2.70^{a}
黄瓜	0.960 5 ± 0.001 1^{b}	0.959 2 ± 0.013 0^{ab}	1.015 ± 0.000 9^{a}	5.4 ± 1.24^{a}
生姜	0.911 2 ± 0.001 5^{c}	0.990 2 ± 0.212 1^{a}	1.034 ± 0.003 0^{a}	4.2 ± 2.11^{a}

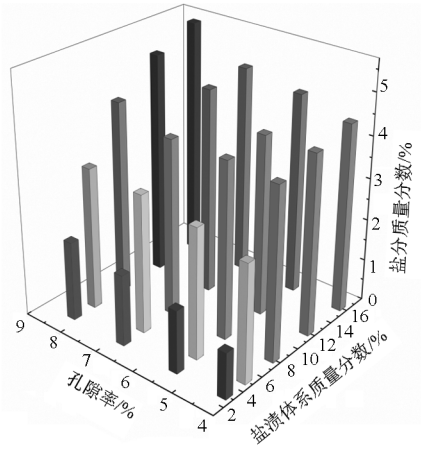


图 2 盐渍体系质量分数和孔隙率对蔬菜渗盐量的影响

Fig. 2 Effects of concentration and porosity on salt content of different vegetables

固定盐渍体系质量分数为 8%,采用离子电流对 4 种蔬菜分别处理 10、20、30、40 和 50 min 后考察渗盐量。从图 3 可以看出,经过相同时间处理下,孔隙率越大的蔬菜则渗盐量就越大。随处理时间的延长渗盐量呈现增加趋势,但后期盐分增加缓慢。当处理时间从 10 min 提高到 20 min,白萝卜的盐分质量分数从 2.5% 提高到 3.4%,渗盐量增加了 36%;生姜的盐分质量分数从 1.4% 提高到 3%,渗盐量则增加了 114%。但当处理时间从 40 min 提高到 50 min,白萝卜的盐分质量分数从 5.1% 提高到 5.2%,渗盐量只增加 1.9%;生姜的盐分质量分数从 3.9% 提高到 4.1%,渗盐量仅增加 5.1%。表明处理前期离子大规模迁徙,于时间 30 min 左右盐分逐渐于组织表层聚集后开始造成细胞间隙阻塞,故在腌渍后期盐分向植物组织渗入的趋势变缓。通过品尝发现离子电流盐渍处理的 4 种蔬菜都有表面过

咸而内部过淡的情况，表明盐分分布不均匀。

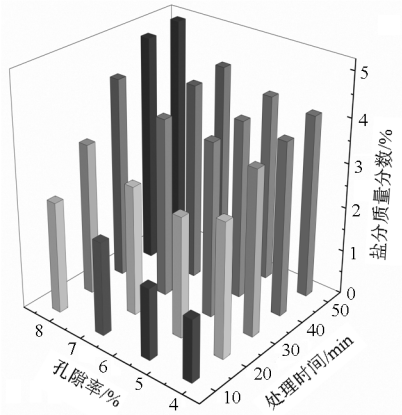


图 3　处理时间和孔隙率对蔬菜渗盐量的影响

Fig. 3　Effects of impregnating time and porosity on salt content of different vegetables

2.3　盐分分布与微观结构观察

采用质量分数 8% 的 NaCl 浸渍液并用离子电流浸渍处理 50 min 后，将 4 种尺寸为 2.4 cm × 2.4 cm × 2.4 cm 的正方体蔬菜块状样品，切分为外层、中层、内层 3 部分，即每层共剥取 8 mm 厚度（图 4），再将这 3 部分样品分别进行盐分质量分数测定并与样品的整体盐分质量分数进行对比，结果如表 3 所示，同时进行微观结构观察（图 5）。由图 5 可知，盐分大量聚集在蔬菜组织外层部位，由于内层盐分较少故显微镜无法观察到盐分结晶颗粒。外层部位的盐分含量明显大于中层和内层部位的盐分。白萝卜外部盐分质量分数为 6.9%，而内层盐分质量分数为 0.2%；生姜外层盐分质量分数 6.3%，而内层盐分质量分数 0.4%。说明离子电流盐渍处理多孔状食品材料会有盐分分布不均的现象。根据交流电的集肤效应[26-27]，即感应作用所引起的导体材料截面积电流分布不均匀现象可知，离子电流只在其农产品材料表层传导迁徙，故造成样品盐分分布不均，原理示意简图如图 6 所示。目前，真空浸渍技术也主要研究目标成分的总渗入量，极少考察浸渍溶质的具体位置分布情况[28]。

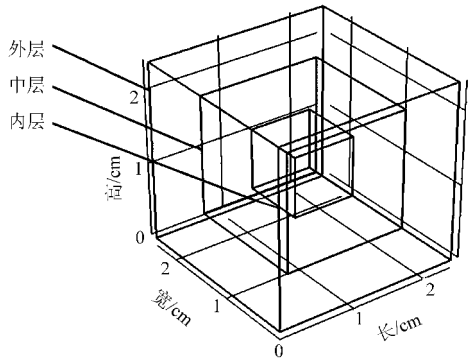


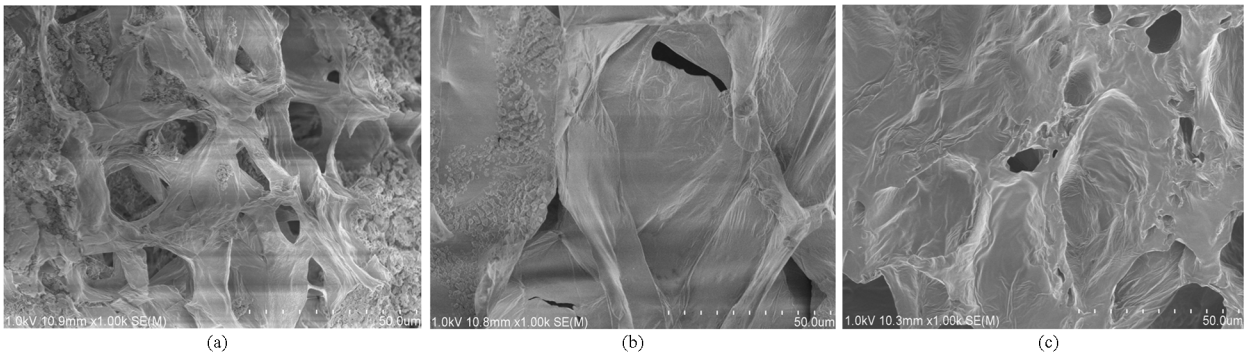
图 4　蔬菜取样示意图

Fig. 4　Schematic diagram of sampling on vegetables

表 3　样品中的盐分分布

Tab. 3　Location of salt content in sample　%

品种	总含盐质量分数	外层含盐质量分数	中层含盐质量分数	内层含盐质量分数
白萝卜	5.2 ± 0.13^{a}	6.9 ± 0.27^{a}	1.3 ± 0.04^{a}	0.2 ± 0.03^{a}
莴苣	4.5 ± 0.21^{b}	6.5 ± 0.14^{ab}	0.8 ± 0.01^{b}	0.4 ± 0.06^{b}
黄瓜	4.2 ± 0.04^{bc}	6.3 ± 0.06^{b}	0.6 ± 0.08^{c}	0.3 ± 0.04^{b}
生姜	4.1 ± 0.06^{c}	6.3 ± 0.08^{b}	0.5 ± 0.04^{c}	0.4 ± 0.03^{c}



(a)　(b)　(c)

图 5　植物组织盐分分布的扫描电子显微镜观察

Fig. 5　Location of sodium chloride in plant tissues by Cryo-SEM micrographs

（a）外层部位　（b）中层部位　（c）内层部位

2.4　渗盐量预测模型

通过离子电流浸渍处理后，为了能够使用数学模型对不同孔隙率的蔬菜渗盐量进行预测。根据 Box-Benhnken 的中心组合试验设计原理，综合对盐渍溶液质量分数和时间的单因素试验结果，选取盐渍液溶质质量分数、处理时间、孔隙率为食材渗盐量影响显著的 3 个因素，采用三因素三水平响应面分析方法，试验以随机次序进行，重复 3 次，因素与水平设计如表 4 所示，响应面分析方案及试验结果如表 5 所示。

对表 5 在不同条件下所测得的蔬菜实际渗盐量利用 Design Expert 8.05 软件进行回归拟合，得到渗盐量响应值（y）的回归方程为

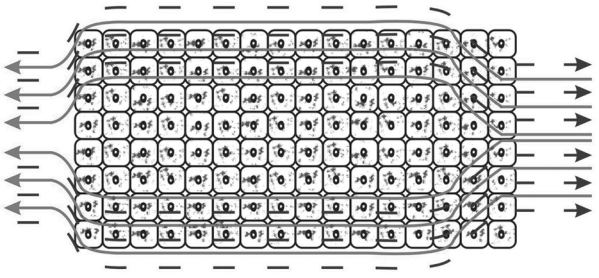


图 6 离子电流处理时植物组织表面的趋肤效应

Fig. 6 Skin effect on plant tissue surface during ion current treatments

表 4 响应面法的因素水平编码

Tab. 4 Factors and levels coding of response surface method test

编码	因素		
	浸渍液质量分数 x_1/%	处理时间 x_2/min	孔隙率 x_3/%
-1	8	20	5.4
0	12	30	6.8
1	16	40	8.2

表 5 响应面试验与结果

Tab. 5 Scheme and experimental results for response surface analysis

试验号	X_1	X_2	X_3	渗盐质量分数 y/%
1	1	1	0	5.1
2	-1	1	0	4.4
3	0	0	0	5.0
4	0	0	0	4.7
5	1	-1	0	3.9
6	-1	0	-1	4.2
7	-1	-1	0	2.9
8	0	0	0	4.9
9	-1	0	1	4.4
10	0	-1	1	4.2
11	0	-1	-1	3.5
12	0	0	0	5.2
13	0	1	1	5.4
14	0	1	-1	4.5
15	1	0	1	5.5
16	0	0	0	5.2
17	1	0	-1	4.5

$$y = 5 + 0.39X_1 + 0.61X_2 + 0.35X_3 - 0.075X_1X_2 + 0.2X_1X_3 + 0.05X_2X_3 - 0.34X_1^2 - 0.59X_2^2 - 0.012X_3^2 \quad (7)$$

根据得到的回归模型方程进行方差分析，如表 6 所示。3 个因素中的 P 值相差较小，该法对渗盐量的影响顺序由大到小依次为：处理时间、盐渍液质量分数、孔隙率。从方差分析看出模型 $P < 0.01$，表明该模型方程高度显著。从模型的失拟项 $P = 0.723\,5 > 0.05$ 可知，模型失拟不显著。决定系数 $R^2 = 7.42/7.66 = 0.968 > 0.8$，说明实际值与预测值有较好的拟合度，该模型可以很好地用于分析离子电流盐渍处理孔隙率为 5.4% ~8.2% 的蔬菜渗盐量。现选取实测孔隙率为 7.3% 的茄子并采用离子电流进行盐渍处理，盐渍液质量分数为 8%、12%、16%，处理时间为 20、30 和 40 min。根据式(7)进行验证，实际值与预测值如图 7 所示，通过 t 检验得知 $P = 0.908 > 0.05$，说明实际值和预测值之间无显著性差异，该模型可对其他孔隙率为 5.4% ~8.2% 的蔬菜的渗盐量进行预测。

表 6 离子电流盐渍回归方程方差分析

Tab. 6 Analysis of variance of regression equation for ion current salting treatments

方差来源	平方和	自由度	均分	F	P
模型	7.42	9	0.82	23.79	0.000 2
X_1	1.20	1	1.20	34.68	0.000 6
X_2	3.00	1	3.00	86.63	0.000 1
X_3	0.98	1	0.98	28.29	0.001 1
X_1X_2	0.023	1	0.023	0.65	0.446 8
X_1X_3	0.16	1	0.16	4.62	0.068 7
X_2X_3	0.001	1	0.001	0.29	0.607 7
X_1^2	0.48	1	0.48	13.84	0.007 4
X_2^2	1.45	1	1.45	41.95	0.000 3
X_3^2	0.000 6	1	0.000 6	0.019	0.894 3
失拟	0.063	3	0.021	0.46	0.723 5
残差	0.24	7	0.035		
误差	0.18	4	0.045		
总和	7.66	16			

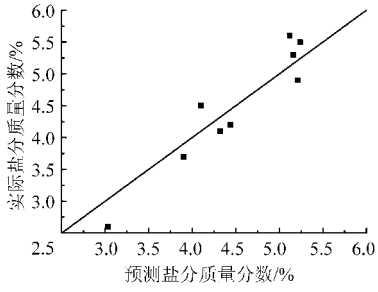


图 7 茄子渗盐量回归方程的预测值与实际值相关性

Fig. 7 Correlation between predicted values of regression model and actual values on eggplant

3 讨论

本研究采用交变磁通在含 NaCl 盐渍液的螺线管绕组回路中产生感应电动势并以此驱动 Na^+、Cl^- 往复运动，对不同孔隙率的 4 种蔬菜样品在磁场区域进行快速盐渍处理。对于厚度为 24 mm 且孔隙率在 6% 以上的蔬菜，最快可在 30 min 使其盐分质量分数达到 5% 左右。盐渍溶液体系中的感应离子电流随体系溶质质量分数提高而增加，感应电压不发生变化，盐渍效果增强。可以推测当离子电

流提高到一定程度后，在宏观上会造成体系出现湍流现象，而干扰溶质的渗透扩散。研究发现蔬菜的孔隙率越大则越利于浸渍处理。因为大多数食品材料都具有一定的孔隙率，如一些果蔬类食品的薄壁组织中的细胞直径为 50 ~ 500 μm，间隙有 210 ~ 350 μm 的距离，所以除正、负离子外，像大多数尺寸为数百纳米的蛋白质或者尺寸为数微米到数十微米范围的菌体而言，这样的空间也足以让它们在食材中容纳富集[29]。通过离子电流盐渍处理，会造成盐分在蔬菜组织中的分布不均匀。通过考察发现盐分大量聚集在样品的外层部位。造成此现象的原因是虽然植物组织有一定孔隙率，但在离子电流影响下，短时间内大量的 Na^+ 和 Cl^- 涌入组织孔隙会造成阻塞，影响离子的继续渗透和扩散。这一现象与磁电镀类似，即电解质溶液中迁徙的溶质在垂直磁场区域受洛伦兹力影响，在被处理的金属表面迅速完成溶质堆积[30-31]。将盐渍液质量分数、处理时间和孔隙率作为影响因素，采用响应面设计可建立渗盐量预测模型，实现对离子电流盐渍处理蔬菜样品的渗盐量预测。针对离子电流盐渍处理后样品溶质分布不均匀的特点，可通过旋转磁阱诱导离子渗入到多孔状食品材料使溶质分布更均匀[32]。同时，根据交流集肤效应，由正、负离子于植物原料表层部位迁徙的特性，可通过控制产品厚度来实现盐分的均一并达到所预期含量，对于常规盐渍产品 4% ~5% 的盐分质量分数则可将原料厚度控制在 1 cm 左右。

4　结束语

采用交变磁通在盐渍液回路体系生产感应电动势并驱动 Na 和 Cl 离子在磁场作用下实现对多孔状蔬菜即白萝卜、莴苣、黄瓜和生姜的快速盐渍处理。分析发现该技术对孔隙率为 6% 以上的蔬菜，能在 30 min 内使其样品盐分质量分数达到 5% 左右，但盐分大多分布于样品厚度为 8 mm 的表层区域，盐渍液离子数量越多则磁能转换为电能的效率越高。通过响应面分析建立了渗盐量的预测模型，发现该技术对蔬菜浸渍处理后的渗盐量影响顺序由大到小依次为：处理时间、盐渍液质量分数、孔隙率，经验证该模型可对其他孔隙率为 5.4% ~8.2% 的蔬菜的渗盐量进行预测。

参　考　文　献

1　Barat J M, Grau R, Ibáñez J B, et al. Post-salting studies in Spanish cured ham manufacturing. Time reduction by using brine thawing-salting [J]. Meat Science, 2005, 69(2): 201 - 208.

2　Li J R, Hsieh Y H. Traditional Chinese food technology and cuisine [J]. Asia Pacific Journal of Clinical Nnutrition, 2004, 13(2):147 - 155.

3　Chiralt A, Fito P, Barat J M, et al. Use of vacuum impregnation in food salting process [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49(2 - 3): 141 - 151.

4　王晓拓，高振江，曾贞，等. 脉动压腌制双孢菇工艺参数优化[J]. 农业工程学报，2012，28(7)：282 - 287.
Wang Xiaotuo, Gao Zhenjiang, Zeng Zhen, et al. Optimization of technical parameters of pickling on agaricus bisporus under pulsed pressure [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7): 282 - 287. (in Chinese)

5　章银良，夏文水. 海鳗盐渍过程的动力学和热力学[J]. 农业工程学报，2007，23(2)：223 - 228.
Zhang Yinliang, Xia Wenshui. Diffusion kinetics and thermodynamics in pike eel salting [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 223 - 228. (in Chinese)

6　Alino R, Grau R, Fernandez-Sanchez A, et al. Influence of brine concentration on swelling pressure of pork meet throughout salting [J]. Meat Science, 2010, 86(3): 600 - 606.

7　Kaewmanee T, Benjakul B, Visessanguan W. Changes in chemical composition, physics properties and microstructure of duck egg as influenced by salting [J]. Food Chemistry, 2009, 112(3): 560 - 569.

8　Mcfeeters R F, Fleming H P, Thompson R L. Malic and citric acids in picking cucumbers [J]. Journal of Food Science, 1982, 47(6): 1859 - 1865.

9　Schulze B, Peth P, Hubbermann E M, et al. The influence of vacuum impregnation on the fortification of apple parenchyma with quercetin derivatives in combination with pore structure X-ray analysis [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(3): 308 - 387.

10　Sanzana S, Gras M L, Vidal-Brotóns D. Functional foods enriched in Aloe vera. Effects of vacuum impregnation and temperature on the respiration rate and the respiratory quotient of some vegetables [J]. Procedia Food Science, 2011, 1: 1528 - 1533.

11　Igual M, Castelló M L, Ortolá M D, et al. Influence of impregnation on respiration rate, mechanical and optical properties of cut persimmon [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 86(3): 315 - 323.

12　Ebbesen S D, Mogensen M. Electrolysis of carbon dioxide in solid oxide electrolysis cells [J]. Journal of Power Sources, 2009, 193(1): 349 - 358.

13　Jun J, Kim I, Jung J, et al. New process of electroplate Sn bumping TSV without a PR mould for 3D-chip stacking [J]. Metals and Materials International, 2011, 17(4): 631 - 635.

14 Sadrzadeh M, Ghadimi A, Mohammadi T. Coupling a mathematical and a fuzzy logic-based model for prediction of zinc ions separation from wastewater using electrodialysis [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 151(1): 262 - 274.
15 Turgeon R T, Bowser M T. Micro free-flow electrophoresis: theory and applications[J]. Analitical and Bioanalytical Chemistry, 2009, 394(1):187 - 198.
16 Wright J J, Beken S V D. The hall effect in a flowing electrolyte [J]. American Journal of Physics, 1972, 40(2): 245 - 247.
17 杨哪. 一种基于感应离子电流的食品快速腌制方法:中国,0056569.0[P]. 2013 - 02 - 27.
18 GB/T 5009.3—2010 食品中水分的测定[S]. 2010.
19 刘昊,何勇. 双比重瓶粉体真密度测定法[J]. 计量与测试技术,2005,32(3):39 - 40.
Liu Hao, He Yong. A method to determine the dust real proportion by double specific gravity bottles [J]. Metrology & Measurement Technique, 2005, 32(3): 39 - 40. (in Chinese)
20 Zhao Yanyun, Xie Jing. Practical applications of vacuum impregnation in fruit and vegetable processing [J]. Trends in Food Science & Technology, 2004, 15(9): 434 - 451.
21 Derossi A, Pilli T D, Severini C. Application of vacuum impregnation techniques to improve the pH reduction of vegetables: study on carrots and eggplants [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(11): 3217 - 3226.
22 黄伟坤. 食品检验与分析[M]. 北京:中国轻工业出版社,1989:21 - 22.
23 Moreau E, Touchard G. Enhancing the mechanical efficiency of electric wind in corona discharges [J]. Journal of Electrostatics, 2008, 66(1 - 2): 39 - 44.
24 Senft J R. Mechanical efficiency of heat engines [M]. New York: Cambridge University Press, 2007: 15.
25 Tacken R A, Janssen L J J. Application of magnetoelectrolysis [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1995, 25(1):1 - 5.
26 Villone F, Pustovitov V D. Skin effect modifications of the resistive wall mode dynamics in tokamaks [J]. Physics Letters A, 2013, 377(22): 2780 - 2784.
27 Barrière O D L, Ragusa C, Appino C, et al. A computationally effective dynamic hysteresis model taking into account skin effect in magnetic laminations [J]. Physica B: Condensed Matter, 2014, 435(15): 80 - 83.
28 Hironaka K, Kikuchi M, Koaze H, et al. Ascorbic acid enrichment of whole potato tuber by vacuum-impregnation [J]. Food Chemistry, 2011, 127(3): 1114 - 1118.
29 Betoret N, Puente L, Díaz M J. Development of probiotic-enriched dried fruits by vacuum impregnation [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 56(2): 273 - 277.
30 West J, Karamata B, Lillis B, et al. Application of magnetohydrodynamic actuation to continuous flow chemistry [J]. Lab on a Chip, 2002, 2(4): 224 - 230.
31 Hinds G, Coey J M D, Lyons M E G. Influence of magnetic forces on electrochemical mass transport [J]. Electrochemistry Communications, 2001, 3(5): 215 - 218.
32 Setija I D, Werij H G C, Luiten O J, et al. Optical cooling of atomic-hydrogen in a magnetic trap[J]. Physical Review Letters, 1993, 70(15): 2257 - 2260.

Vegetable Salting Process Based on Inductive Ion Current

Yang Na[1] Jin Yamei[1] Ma Qian[1] Wu Fengfeng[1] Jin Zhengyu[1] Xu Xueming[2]
(1. *School of Food Science and Technology*, *Jiangnan University*, *Wuxi* 214122, *China*
2. *State Key Lab of Food Science and Technology*, *Jiangnan University*, *Wuxi* 214122, *China*)

Abstract: This study presents a new impregnation technique for brining four kinds of vegetables based on Na^+ and Cl^- ion current generated by the electromagnetic induction. Saline concentration, processing time and porosity were identified as main variables, which influenced pickling efficiency. Based on the principle of Box-Benhnken central composite design, response surface analysis was applied to obtain the regression model to estimate the salt content of vegetables in the porosity range from 5.4% ~8.2%. The results showed that the efficiency of magnetic energy converting to electrical energy increased along with increasing the concentration of solution. With a thickness of 24 mm and a porosity of more than 6% of the vegetables tissue, the sample were immersed in saline solutions subjected to ion current under the influence of the static magnetic field for 30 min, the salt content reached 5% approximately. The regression model provided reliable prediction of the salt content in eggplant with the porosity of 7.3%.

Key words: Inductive ion current Vegetable Salting Porosity Salt content