

莴笋渗透脱水有效扩散系数研究

王 妮, 杨 薇*, 刁卓超

(昆明理工大学现代农业工程学院, 云南昆明 650224)

摘 要:以葡萄糖溶液浓度(10%~40%)和温度(35~65℃)为影响因素,研究了莴笋渗透脱水的动力学过程。分别使用Azura模型和Fick第二扩散定律计算出了平衡时刻的失水率、固形物增加率以及相应的水分和固形物有效扩散系数。设计了均匀实验,通过曲面拟合的方法得到了水分、固形物有效扩散系数与因素的回归方程。结果表明:失水率随着葡萄糖溶液浓度增加而增大,但随着温度的升高而降低;固形物增加率随着溶液浓度和温度的增加而增加。Azura模型可用于预测失水率和固形物增加率,通过曲面拟合得到的有效扩散系数回归方程拟合性较高。有效扩散系数反映了失水率和固形物增加率达到平衡时刻的快慢程度。

关键词:渗透脱水,有效扩散系数,Fick第二定律,莴笋

Study on effective diffusion coefficients of osmotic dehydration of asparagus lettuce

WANG Ni, YANG Wei*, DIAO Zhuo-chao

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

Abstract: The mass transfer kinetics during osmotic dehydration of asparagus lettuce was investigated in glucose solution with concentration between 10%~40% and temperature between 35~65℃. Rates of water loss and solid gain at equilibrium as well as effective diffusivity coefficients were calculated by Azura model and Fick's second law respectively. Regression equations of effective diffusivity coefficients of water loss rate and solid gain rate were obtained based on surface fitting by a uniform design. The results showed that water loss rate increased with the increasing of glucose concentration, but it reduced with the increasing of temperature. Both the increasing of solute concentration and temperature enhanced solid gain rate. Azura model was fit for predicting values of water loss rate and solid gain rate. And a high degree of correlation was observed in regression equations of effective diffusion coefficients by surface fitting. Effective diffusion coefficients represented the rates of water loss and solid gain approaching equilibrium.

Key words: osmotic dehydration; effective diffusion coefficient; Fick's second law; asparagus lettuce

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2012)01-0131-05

渗透脱水技术广泛应用于果蔬和鱼肉类干燥前的预处理,它利用渗透溶液和物料间的浓度差使物料中的水分通过细胞的半渗透膜自发向周围转移;同时,溶液中的溶质也向物料组织中渗入^[1]。该脱水方法具有节约能耗、提高产品品质和延长货架期的优点^[2]。目前,关于渗透脱水的机理还不清楚,大多数学者认为该过程以分子扩散为基础,细胞内物质经历了细胞膜、胞间连丝、细胞外空间的传递到达了渗透溶液^[3]。国内外许多人进行了渗透脱水的理论研究,如Panades^[4]、曹晖^[5]和董全^[6]分别计算了番石榴、猕猴桃及蓝莓渗透脱水的水分和固形物的有效扩散系

数;而Park等人^[7]提出Peleg模型可反映梨的渗透脱水规律。但总体而言,一是渗透脱水基本以水果类为对象,对高含水率绿色蔬菜的研究还比较缺乏,而且因材料的差异性,有关水果研究所得的成果可能在蔬菜类研究的指导方面有一定局限性;其次,在以Fick第二定律为基础的渗透脱水理论研究中,有效扩散系数的实际含义及其与溶液浓度、温度间的数学关系还可进一步探讨。莴笋是一种高含水率绿色蔬菜,含有大量维生素和烟酸,可药食两用^[8]。莴笋干制品不仅运输方便,还可保留大量营养物质和风味,因而受到了消费者的欢迎。虽然程璐^[9]曾研究了莴笋的渗透脱水情况,但对渗透脱水理论方面的讨论还有待加深。因此,实验将以莴笋为对象,研究其渗透脱水的传质规律及有效扩散系数与因素间的关系,希望能为渗透脱水的理论研究起到一定填补作用,同时

收稿日期:2011-01-04 * 通讯联系人

作者简介:王妮(1986-),女,硕士研究生,研究方向:农产品加工与机械。

也为实际生产提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

莴笋 产于云南,购于当地市场,购买后放入冰箱中保存(4~5℃),实验前取出;葡萄糖 购于当地市场,食品级;蒸馏水 实验室自制。

HH-S恒温水浴锅 江苏金坛大地自动化仪器厂;电热鼓风干燥箱 101A-2型,上海实验仪器厂有限公司;电子分析天平 BL310(0.01g),美国西特公司。

1.2 实验方法

1.2.1 工艺流程 莴笋→去皮→切片→渗透脱水→取出,冲洗表面糖液,吸取表面水分→称重→干燥,测定指标

1.2.2 操作要点

1.2.2.1 切片 莴笋片直径为30mm,厚度为5mm。

1.2.2.2 渗透脱水 莴笋片在不同温度(35~65℃)和浓度(10%~40%)的葡萄糖溶液中进行渗透脱水,固液比为1:5。

1.2.2.3 称重 莴笋片在渗透至30、60、90、120、180、240min时取出,称量渗后质量。

1.2.2.4 干燥、测定指标 莴笋渗后样品在70℃温度下干燥,直至最后三次测得的干物质质量相等。

1.2.3 均匀实验 实验采用葡萄糖浓度和温度为因素。其中葡萄糖浓度水平为10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%;温度水平为30、35、40、45、50、55、60℃。根据因素水平数,使用 $U_7(7^4)$ 均匀设计表^[10],具体形式如表1所示。

1.2.4 测定方法

1.2.4.1 莴笋初始水分含量的测定 样品初始水分含量依据GB/T5009.3-2010^[11]测定,测得值为94.1~96.2g/100g。

1.2.4.2 失水率和固形物增加率^[12] 失水率(WL)和固形物增加率(SG)的计算公式如下所示:

$$WL(\%) = [(M_0 X_0 - M_t X_t) / M_0] \times 100\%$$

$$SG(\%) = [(M_t S_t - M_0 S_0) / M_0] \times 100\%$$

式中, M_0 —渗透脱水前物料质量; M_t —渗透至t时刻的物料质量; X_0 —渗透脱水前物料的水分含量(湿基); X_t —渗透至t时刻的物料水分含量(湿基); S_0 —渗透脱水前物料固形物含量; S_t —渗透至t时刻的物料固形物含量。

1.2.4.3 水分和固形物有效扩散系数 水分和固形物有效扩散系数(m^2/s)的计算采用Crank^[1]对Fick第二定律的解析解,如下式所示:

$$Mr = \frac{WL - WL_\infty}{WL_\infty} = \frac{2\alpha(1+\alpha)}{1+\alpha+\alpha^2 q_1^2} \exp\left(\frac{-D_{ew} t q_1^2}{L^2}\right)$$

$$Sr = \frac{SG - SG_\infty}{SG_\infty} = \frac{2\alpha(1+\alpha)}{1+\alpha+\alpha^2 q_1^2} \exp\left(\frac{-D_{es} t q_1^2}{L^2}\right)$$

式中, Mr —水分比; Sr —固形物残存比; α —渗透溶液与每一片物料的体积比; q_1 —方程 $\tan(q_1) = -\alpha q_1$ 的非零正根; D_{ew} —水分有效扩散系数; D_{es} —固形物有效扩散系数; t —时间; L —物料厚度的一半; WL_∞ —平衡时刻的失水率; SG_∞ —平衡时刻的固形物增加率。平衡时刻的失水率及固形物增加率的计算使用Azuaara^[13]的两项系数模型,如下式所示:

$$WL = S_1 t WL_\infty / (1 + S_1 t)$$

$$SG = S_2 t SG_\infty / (1 + S_2 t)$$

式中, S_1 —与失水率有关的系数; S_2 —与固形物增加率有关的系数。

1.3 数据分析与处理

采用Matlab7.0和SPSS13.0软件进行数据分析;采用TableCurve3D v4.0和Excel软件作曲线图。

2 结果与分析

2.1 莴笋渗透脱水传质规律

2.1.1 葡萄糖溶液浓度对失水率的影响 从图1可知,在不同葡萄糖溶液浓度下,莴笋渗透脱水的前30min失水率增长最迅速,随着葡萄糖浓度从15%增加至35%,失水率有明显提高,这与芦荟渗透脱水结果有相同趋势^[14]。因为渗透脱水的传质驱动力与物料和溶液间的浓度梯度成正比,因脱水初始时刻的驱动力最大,在此作用下水分迅速转移,然后随着物料中的水分不断减少,从而浓度梯度减小,引起失水率增长减缓,约120min后失水率趋于平衡。

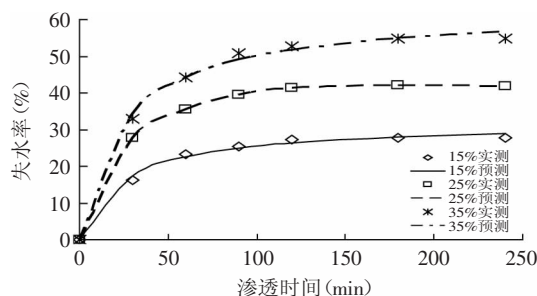


图1 葡萄糖溶液浓度对莴笋渗透脱水失水率的影响(40℃)

Fig.1 Effect of glucose concentration on WL in osmotic dehydration of asparagus lettuce (40℃)

2.1.2 葡萄糖溶液浓度对固形物增加率的影响 在图2中,因葡萄糖溶液浓度增加使得细胞内外浓度梯度增大,引起莴笋渗透脱水固形物增加率相应增大。但与失水率不同的是,固形物增加率并非是在渗透脱水初期增长最快,而是大约在30~90min间增长最快。当图1中的莴笋渗透脱水失水率趋于平衡时,图2中的固形物增加率仍然有增长的趋势,这说明物料中的溶质渗入要稍晚于水分渗出,平衡时刻也相应推迟一段时间。在渗透脱水实际生产中,水分脱去50%即可,而蔬菜干制品内溶质渗入量不应过多,因

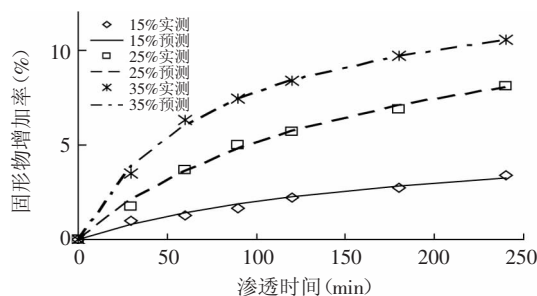


图2 葡萄糖溶液浓度对莴笋渗透脱水固形物增加率的影响(40℃)

Fig.2 Effect of glucose concentration on SG in osmotic dehydration of asparagus lettuce (40℃)

此为减少能耗及防止溶质过多渗入继而影响风味, 莴笋渗透脱水时间应在120min内。

2.1.3 温度对失水率的影响 图3显示, 莴笋渗透脱水失水率随温度的升高而降低。在50℃和60℃条件下, 渗透脱水60min后失水率变化幅度减小, 这可能是因渗透脱水的进行与细胞膜的完整性有着密不可分的关系, 当莴笋片经高温长时间浸泡后, 细胞膜已被破坏, 物料和溶液中的水分可自由进出组织, 失水率基本不再变化^[9]。因此从实验结果可知, 在生产中莴笋渗透脱水的温度应控制在50℃以内。

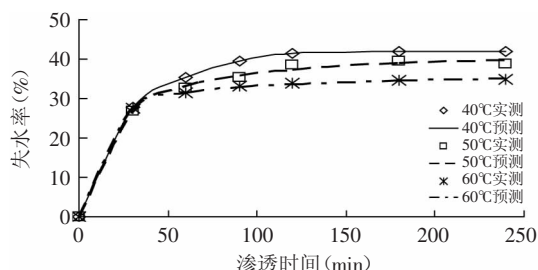


图3 温度对莴笋渗透脱水失水率的影响(葡萄糖溶液浓度25%)

Fig.3 Effect of temperature on WL in osmotic dehydration of asparagus lettuce (glucose concentration of 25%)

2.1.4 温度对固形物增加率的影响 图4显示, 随着渗透溶液温度从40℃上升至60℃, 溶质大量进入莴笋组织, 这是因为细胞膜受高温破坏, 从而失去了阻止溶液中溶质渗入的作用, 而且温度越高, 分子运动越快, 使得更多葡萄糖分子进入细胞组织。

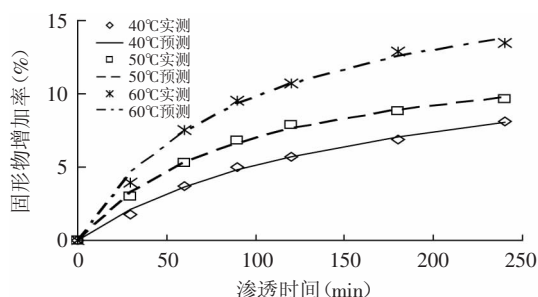


图4 温度对莴笋渗透脱水固形物增加率的影响
(葡萄糖溶液浓度25%)

Fig.4 Effect of temperature on SG in osmotic dehydration of asparagus lettuce (glucose concentration of 25%)

在图1~图4中, 莴笋渗透脱水失水率及固形物增加率的预测值是由Azura模型计算得来。在一定溶液浓度和温度条件下, 莴笋渗透脱水失水率和固形物增加率的实验值与模型计算值拟合程度良好, 因此实际生产中可以该模型为参考, 来预测任意时刻莴笋渗透脱水的失水率和固形物增加率, 同时可使用该模型计算这两指标平衡时刻的数值。

2.2 莴笋渗透脱水的有效扩散系数

2.2.1 有效扩散系数及其回归方程 表1为莴笋渗透脱水均匀设计表及水分和固形物有效扩散系数结果。

由表1可知, 有效扩散系数与葡萄糖溶液浓度和温度间并非完全的正相关关系。Rastogi等人^[15]曾引用Arrhenius方程描述有效扩散系数与因素间函数关

表1 莴笋渗透脱水均匀设计表及有效扩散系数值

Table 1 Uniform design and effective diffusion coefficients in osmotic dehydration of asparagus lettuce

实验号	葡萄糖溶液浓度(%)	温度(℃)	水分有效扩散系数 $\times 10^{-10}$ (m ² /s)	固形物有效扩散系数 $\times 10^{-10}$ (m ² /s)
1	10	55	6.81	1.16
2	15	40	4.51	1.21
3	20	65	5.97	2.40
4	25	50	5.36	2.21
5	30	35	4.15	2.33
6	35	60	6.03	2.75
7	40	45	4.57	2.70

系, 将实验数据与该方程拟合, 得到的Arrhenius方程相关系数低于0.88。从而可推断莴笋在葡萄糖溶液中渗透脱水时, 不适合用此方程描述有效扩散系数与因素间的关系, 因此根据均匀实验结果, 使用曲面拟合方法在Arrhenius模型基础上对方程进行改进, 得到以下有效扩散系数的回归方程(图5和图6为曲面拟合图):

$$-\ln(D_{ew}) = 16.84 + 5.56/C - 66.15/C^2 + 1434.95/T_k$$

$$R^2 = 0.96$$

$$-\ln(D_{es}) = 18.00 + 23.19/C - 80.39/C^2 + 1108.31/T_k$$

$$R^2 = 0.95$$

式中, C—葡萄糖浓度; T_k —热力学温度。根据上述方程的拟合结果可知, 水分和固形物的有效扩散系数回归方程相关系数分别达到了0.96和0.95, 证明方程的拟合性高, 因此该回归方程较适合描述莴笋渗透脱水有效扩散系数与葡萄糖浓度、温度间的关系。

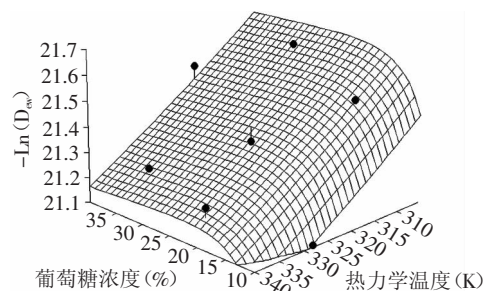


图5 $-\ln(D_{ew})$ 与因素(葡萄糖浓度和温度)的曲面拟合图

Fig.5 Response surface fitting between $-\ln(D_{ew})$ and factors (glucose concentration and temperature)

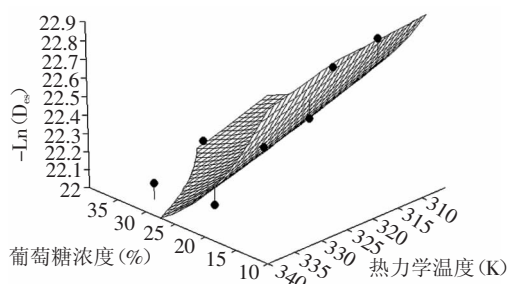


图6 $-\ln(D_{es})$ 与因素(葡萄糖浓度和温度)的曲面拟合图

Fig.6 Response surface fitting between $-\ln(D_{es})$ and factors (glucose concentration and temperature)

2.2.2 有效扩散系数与因素关系分析 为验证有效

表2 莴笋渗透脱水有效扩散系数的实测值与预测值

Table 2 Experimental and predictive effective diffusion coefficients during osmotic dehydration of asparagus lettuce

葡萄糖溶液 浓度(%)	温度 (℃)	平衡时刻 失水率(%)	水分有效扩散 系数 $\times 10^{-10}(\text{m}^2/\text{s})$	水分有效扩散系数 计算值 $\times 10^{-10}(\text{m}^2/\text{s})$	平衡时刻固形物 增加率(%)	固形物有效扩散 系数 $\times 10^{-10}(\text{m}^2/\text{s})$	固形物有效扩散系数 计算值 $\times 10^{-10}(\text{m}^2/\text{s})$
25	40	46.73	5.11	4.40	13.46	1.43	1.98
25	50	42.81	5.36	5.08	13.48	2.21	2.21
25	60	36.45	6.86	5.79	19.37	2.12	2.45
15	40	31.91	4.51	4.58	5.89	1.21	1.34
35	40	62.52	4.57	4.45	13.98	2.47	2.43

扩散系数回归方程,将使用回归方程计算所得的有效扩散系数值与实测值进行比较,结果如表2所示。

2.2.2.1 温度对有效扩散系数的影响 表2数据显示,莴笋渗透脱水的水分有效扩散系数的实测值随着温度从40℃上升至60℃而有所增加。而固形物的有效扩散系数实验值并非随温度的增加而完全呈增长状态,数据显示该数值在50℃时较大。

2.2.2.2 葡萄糖浓度对有效扩散系数的影响 由表2可知,随着葡萄糖溶液浓度增加,莴笋渗透脱水水分有效扩散系数呈现先增后降的不规律变化状态,这一结果说明溶液浓度变化并不直接引起水分有效扩散系数产生相应改变,与相关研究报道(Park^[7]、García-Segovia^[14]和İspir^[16]的研究结果)相一致。固形物有效扩散系数实测值随着浓度从15%升至35%出现了增长趋势,这可能与浓度升高促进固形物渗入有关。

2.2.2.3 有效扩散系数结果分析 表2中莴笋渗透脱水平衡时刻失水率和固形物增加率随因素变化的规律显示,失水率和固形物增加率高并非表示水分和固形物有效扩散系数数值大。结合Crank的有效扩散系数计算公式可推测,水分比及固形物残存比的大小与平衡时刻的失水率和固形物增加率有关。不论平衡时刻这两指标值大小,只要在脱水过程中任意时刻的失水率、固形物增加率分别与平衡时刻两指标的差值小,那么水分比和固形物残存比的值就小,从而对应的水分和固形物有效扩散系数值就大。即便平衡时刻的失水率和固形物增加率数值较小,也可能得到较大的水分和固形物有效扩散系数。如在25%+60℃条件下,虽然莴笋渗透脱水平衡时刻的失水率只有36.45%,但图3显示在物料渗透脱水30min时失水率已达到27.60%,与平衡时刻的失水率差值较小,因此对应的水分有效扩散系数值较高。从这一结果可推断,有效扩散系数大小并非直接对应于失水率或固形物增加率的高低,它反映的是失水率或固形物增加率达到该条件下平衡时刻的快慢程度。如果有效扩散系数值越大,那么到达渗透脱水平衡时刻所需的时间越短。

3 结论

3.1 莴笋渗透脱水的失水率以及固形物增加率随着葡萄糖溶液浓度的增加而增大。而失水率随着温度的升高而降低,固形物增加率随温度的增加而增大。莴笋渗透脱水的失水率先于固形物增加率达到平衡时刻。在实际生产中,莴笋渗透脱水时间应控制

在120min内,且不宜采用50℃以上高温。

3.2 在一定溶液浓度和温度的条件下,可用Azura模型描述莴笋渗透脱水失水率和固形物增加率随时间变化的情况,并可用此模型来计算平衡时刻的两指标值。

3.3 Arrhenius方程不适于描述有效扩散系数与葡萄糖浓度和温度间的关系,而采用曲面拟合方法改进后的有效扩散系数回归方程其相关系数较高。水分和固形物有效扩散系数随着温度或葡萄糖浓度增加并非呈现完全递增或递减的变化。从实验结果推断,有效扩散系数大小并非直接表示失水率或固形物增加率的大小,而是反映了失水率和固形物增加率达到平衡时刻的快慢程度。

参考文献

- [1] Rastogi N K, Raghavarao K S M S, Niranjani I K, et al. Recent developments of osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer[J]. Trends in Food Science & Technology, 2002, 13(2): 48-59.
- [2] 赵彩青, 汪政富, 胡小松. 超声波预处理对樱桃番茄渗透脱水影响研究[J]. 食品工业科技, 2008, 29(3): 149-150.
- [3] 鹿韵华. 组合干燥法生产苹果片的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 24-25.
- [4] Panades G, Castro D, Chiralt A, et al. Mass transfer mechanisms occurring in osmotic dehydration of guava[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87(3): 386-390.
- [5] 曹晖. 高含水率脱水猕猴桃和菜心的加工与安全贮藏研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007: 49-60.
- [6] 董全, Marcotte M, 陈宗道. 真空、脉冲真空和常压下蓝莓渗透脱水的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(9): 92-95.
- [7] Park K J, Bin A, Brod F P R, et al. Osmotic dehydration of pear D'anjou[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 52(3): 293-298.
- [8] 戴国辉, 孙志栋, 吴海军, 等. 莴笋的营养保健价值及其加工开发[J]. 农产品加工·学刊, 2008(11): 43-46.
- [9] 程璐. 莴笋渗透脱水及其复合干燥的实验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007: 9-23.
- [10] 潘丽军, 陈锦权. 实验设计与数据处理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008: 165-190.
- [11] GB/T5009.3-2010. 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [12] 董全, Marcotte M, 陈宗道. 蓝莓渗透脱水的研究[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(7): 1-5.
- [13] Azuara E, Beristain C I, Gutiérrez G F. A method for continuous

鳕鱼皮胶原蛋白肽的功能特性 及抗氧化活性

刘 淇¹, 李 慧^{1,2}, 赵 玲^{1,2}, 柳 倩^{1,2}, 曹 荣¹, 李 亚³

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东青岛 266071; 2. 青岛大学生物系, 山东青岛 266071;
3. 烟台嘉惠生物科技有限公司, 山东烟台 264006)

摘要:以鳕鱼皮胶原蛋白肽为实验材料, 研究其吸水性、保水性、乳化性等功能特性, 并且进行了体外抗氧化实验。结果表明鳕鱼皮胶原蛋白肽具有较好的吸水性、保水性、吸油性和起泡性, 具有一定的乳化性和较弱的泡沫稳定性。体外抗氧化实验结果显示, 鳕鱼皮胶原蛋白肽对DPPH自由基、羟自由基和超氧阴离子自由基均有一定的清除效果, 且清除率与样品溶液的浓度存在剂量依赖关系; 浓度为30mg/mL时, 胶原蛋白肽对DPPH·、·OH和O₂·的抑制率分别可达到73.84%、85.76%、64.09%。分级后, 分子量1ku以下的胶原蛋白肽对DPPH·和·OH的清除能力最强, 30mg/mL时清除率达到84%和90.97%; 分子量5ku以上的胶原蛋白肽对O₂·清除能力最强, 30mg/mL时清除率达到74.02%。

关键词:鳕鱼皮, 胶原蛋白肽, 功能特性, 抗氧化, 自由基清除率

Study on functional properties and antioxidation activity of collagen polypeptide from codfish skin

LIU Qi¹, LI Hui^{1,2}, ZHAO Ling^{1,2}, LIU Qian^{1,2}, CAO Rong¹, LI Ya³

(1. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

2. Biological Department of Qingdao University, Qingdao 266071, China;

3. Yantai Jiahui Biotechnology Co., LTD., Yantai 264006, China)

Abstract: The functional characteristics and antioxidation activity collagen from codfish skin were studied. Results showed that collagen polypeptide had high water solubility, water adsorption, oil absorption and foaming ability, certain emulsifying property and low foam stability; results of the vitro antioxidant experiment showed: collagen polypeptide from codfish had certain activity to scavenge DPPH·, ·OH and O₂·. Further more, scavenging rate of the sample depended on its dose. The inhibition rate to DPPH·, ·OH and O₂· can reach 73.84%, 85.76% and 64.09%. After molecular weight grading, vitro antioxidant experiment showed that the molecular weight of component below 1ku works best in clearing DPPH· and ·OH, clearance can reach 84% and 90.97% respectively. The molecular weight of collagen in 5ku above, the clearance rate to O₂· can reach the 74.02%.

Key words: codfish skin; collagen peptide; functional properties; antioxidation; radical scavenging rate

中图分类号: TS254.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2012)01-0135-04

我国是渔业大国, 随着水产养殖业和加工业的迅速发展, 水产品的综合利用越来越受到人们的重

视, 因而从水产品中获取胶原蛋白及制备活性肽成为水产研究的热点。在水产品加工时, 产生出占鱼体总重约40%~55%的下脚料(包括鱼头、鱼皮、鱼鳍、鱼尾、鱼骨及其残留鱼肉), 其中鱼皮、鱼鳞占7.5%~10%^[1]。通常这些废弃物加工利用程度很低, 大多被

收稿日期: 2011-09-08

作者简介: 刘淇(1965-), 男, 研究员, 研究方向: 水产品加工与综合利用。

kinetic evaluation of osmotic dehydration[J]. Food Science and Technology, 1998, 31(4): 317-320.

[14] Garcia-Segovia P, Mognetti C, Andrés-Bello A, et al. Osmotic dehydration of Aloe vera[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(2): 154-180.

[15] Rastogi N K, Raghavarao K S M S. Mass transfer during

osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration[J]. Food Science and Technology, 2004, 37: 43-47.

[16] İspir A, Toğrul İ T. Osmotic dehydration of apricot: Kinetics and the effect of process parameters[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2009, 87(2A): 166-180.