

高压均质降解壳聚糖对橘子汁澄清效果的影响

章 斌, 侯小桢, 凡芳华
(韩山师范学院生物系, 广东 潮州 521041)

摘 要: 为提高壳聚糖澄清橘子汁的效果, 将其经过高压均质降解后, 以透光率为指标, 以未经降解的壳聚糖澄清效果为对照, 探讨经高压均质降解的壳聚糖在不同均质压力、均质温度、均质时间和pH值条件下对橘子汁澄清效果的影响, 并采用Box-Behnken响应面法进行40℃条件下壳聚糖高压均质工艺条件对澄清效果的响应面优化。结果表明: 降解后的壳聚糖对橘子汁有较好的澄清效果, 且明显优于未降解的对照组; 建立的响应面模型能较好地预测透光率随高压均质处理条件的变化规律, 其最优高压均质处理条件为壳聚糖用量0.723g/L、均质压力32MPa、均质时间6.8min、pH3.27, 在此条件下按壳聚糖降解液:橘子原汁1:2.5比例添加降解液, 可使橘子汁的透光率达到96.68%, 使复原后的橘子原汁透光率达到92.2%。

关键词: 高压均质; 壳聚糖; 降解; 橘子汁; 澄清

Influence of Chitosan Degradation by High Pressure Homogenization on Its Effect in Orange Juice Clarification

ZHANG Bin, HOU Xiao-zhen, FAN Fang-hua
(Department of Biology, Hanshan Normal College, Chaozhou 521041, China)

Abstract: Chitosan was degraded by high pressure homogenization to increase its effectiveness for clarifying orange juice. The influence of homogenization pressure, temperature, time and pH on clarification of orange juice by chitosan degradation products was examined by measuring the light transmittance of orange juice. The conditions for clarifying orange juice at 40 °C were optimized using Box-Behnken experimental design combined with response surface methodology. Results showed that degraded chitosan had obviously preferable clarification effect on orange juice when compared to the control without degradation. Meanwhile, the response surface model allowed good prediction of juice transmittance as a function of various homogenization conditions. Homogenization of 0.723 g/L acidic aqueous solution of chitosan at pH 3.27 for 6.8 min at 32 MPa was found to be optimal. Transmittance was 96.68% for original orange juice and 92.2% for reconstituted orange juice when mixed with the degraded chitosan in a proportion of 1:2.5.

Key words: high pressure homogenization; chitosan; degradation; orange juice; clarification

中图分类号: TS201.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2013)20-0082-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201320016

壳聚糖(chitosan)及其衍生物具有良好的生物活性, 在食品加工中常用作保鲜剂、增稠剂、抗氧化剂、澄清剂、乳化剂等^[1-7]。大量研究^[8-11]表明壳聚糖及其衍生物的使用性能与其分子质量、溶液黏度密切相关; 一般来说, 经降解后的低相对分子质量、低溶液黏度的壳聚糖在絮凝能力、防腐保鲜、抗氧化等使用性能上有更突出的效果。目前, 壳聚糖的降解方法主要有化学降解(过氧化氢氧化法、NaNO₂降解)、物理降解(超声波降解、辐射降解、光降解)和生物降解(酶法降解等)^[12-15]; 壳聚糖的高压均质降解应用还少^[16-17], 对高压均质降解后的壳聚糖的应用研究更少见。因此, 本实验将壳聚糖经高压均质降解后, 探讨其对橘子汁的澄清效果影响, 以期为其在澄清型果蔬汁的加工应用提供一定技术依据。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

橘子: 九成熟, 购自韩山师院西区市场。

壳聚糖(脱乙酰度72.52%) 浙江玉环化工厂; 盐酸、氢氧化钠、乙酸均为分析纯。

GYB120-3S型高压均质机 上海东华高压均质机厂; PHS-3C型pH计 上海雷磁仪器厂; KA-1000型离心机 上海安亭科学仪器厂; UFJ-7200型分光光度计 上海尤尼科仪器有限公司; HH-2型电热恒温水浴锅 常州华普达教学仪器有限公司; HR1861型榨汁机 珠海飞利浦家庭电器有限公司。

收稿日期: 2012-10-15

作者简介: 章斌(1981—), 男, 讲师, 硕士, 研究方向为食品加工与质量安全。E-mail: zb811223@163.com

1.2 方法

1.2.1 工艺流程

橘子→去皮、去核→榨汁→100目滤网粗滤→离心→原汁→加高压均质处理后的壳聚糖液→静置澄清→离心(4000r/min)→测定上清液透光率

1.2.2 澄清方式

对照组：往橘子原汁中加入一定量未经高压均质处理的壳聚糖液，于一定温度、一定pH值条件下澄清一定时间，离心或抽滤，测定透光率。

实验组：往橘子原汁中加入一定量的经高压均质降解的壳聚糖液，于一定温度、一定pH值条件下澄清一段时间，离心或抽滤，测定透光率。

1.2.3 壳聚糖的高压均质降解

将适量壳聚糖粉加入到800mL蒸馏水中，加4mL冰乙酸，调pH值和温度，搅拌溶解，在一定压力条件下均质处理，即得降解的壳聚糖溶液。

1.2.4 壳聚糖降解液澄清橘子汁

量取高压均质后的降解液10mL，加入到25mL橘子原汁中，40℃条件下静置澄清60min，离心，上清液于波长680nm处测定透光率。

1.2.5 单因素试验

1.2.5.1 壳聚糖用量对澄清效果的影响

称取壳聚糖粉0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8g，按1.2.3节方法加入到800mL蒸馏水中，配成壳聚糖液，调pH4.0和溶液温度50℃；于30MPa压力条件下均质降解3min；再按1.2.4节的方法进行澄清实验，确定壳聚糖最适用量。

1.2.5.2 均质压力对澄清效果的影响

称取0.6g壳聚糖粉共10份，其余条件同1.2.5.1节配成壳聚糖液；分别于10、15、20、25、30、35、40、45、50、55MPa压力条件下降解3min；再按1.2.4节的方法进行澄清实验，确定最适均质压力。

1.2.5.3 均质时间对澄清效果的影响

称取0.6g壳聚糖粉共9份，其余条件同1.2.3节配成壳聚糖液，在30MPa压力条件下分别均质降解1、2、3、4、5、6、7、8、9min；再按1.2.4节的方法进行澄清实验，确定最适均质时间。

1.2.5.4 均质温度对澄清效果的影响

称取0.6g壳聚糖粉共7份，其余条件同1.2.3节配成壳聚糖液，并调整溶液温度为35、40、45、50、55、60、65℃；在30MPa压力条件下均质降解7min；再按1.2.4节的方法进行澄清实验，确定最适均质温度。

1.2.5.5 pH值对澄清效果的影响

称取0.6g壳聚糖粉共8份，其余条件同1.2.3节配成壳聚糖液，调pH值分别为2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0，调整溶液温度为40℃；在30MPa压力条件下均

质降解7min；再按1.2.4节的方法进行澄清实验，确定最适均质pH值。

1.2.6 优化试验

在单因素试验基础上，采用Box-Behnken响应面法进行澄清工艺条件优化，并用SAS 8.1统计软件对试验结果进行分析。

2 结果与分析

2.1 测定橘子汁透光率最适波长的确定

取适量橘子原汁，按1g/100mL比例加入壳聚糖，40℃条件下静置1h，离心，取上清液于440~740nm波长范围测定透光率，结果见图1。

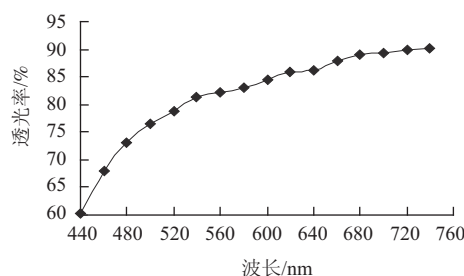


图1 橘子汁透光率与波长的关系

Fig.1 Relationship between light transmittance and wavelength

由图1可看出，当测定波长达到680nm时，橘子汁的透光率趋于稳定。故确定测定橘子汁透光率的最适波长为680nm。

2.2 壳聚糖用量对橘子汁澄清效果的影响

酸性条件下，壳聚糖分子链上的游离氨基结合氢离子而成为带正电荷的聚阳离子电解质，从而可与果汁中带负电荷的蛋白质、果胶等相互作用而絮凝，使果汁变澄清。随壳聚糖用量的增多，生成的聚阳离子电解质也随之增加，对果汁的澄清效果也愈好。

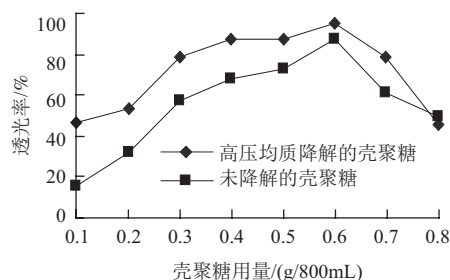


图2 壳聚糖用量对橘子汁澄清效果的影响

Fig.2 Effect of chitosan content on light transmittance of orange juice

图2表明，壳聚糖用量较小时，对胶体物质吸附不完全，澄清效果差；随其用量增大，橘子汁的透光率亦逐渐增大；实验组和对照组均在用量为0.6g/800mL时的透

光率达至最高,分别为95.6%和85.2%。继续增大用量,壳聚糖溶液本身形成胶体溶液,反而使果汁的透光率降低。故选择0.6g/800mL为壳聚糖用量合理水平。同时,从图2也可看出经高压均质降解后的壳聚糖较未降解的壳聚糖对橘子汁有更好的澄清效果。

2.3 均质压力对橘子汁澄清效果的影响

高压均质可产生强烈的剪切、撞击和空穴作用,引起壳聚糖大分子的断链而导致其降解;且其降解效果在一定范围内可随均质压力的增大、循环次数的增加和作用时间的延长而提高^[16]。

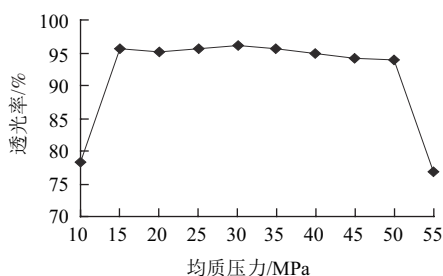


图3 均质压力对橘子汁澄清效果的影响

Fig.3 Effect of homogenization pressure on light transmittance of orange juice

如图3所示,均质压力增大,对壳聚糖分子链及其内部所产生的剪切、撞击和空穴作用愈强,壳聚糖分子链所接受的切点也越多,降解速度加快,对果汁的澄清效果也迅速增加;图3中从10MPa升至15MPa过程中的透光率急剧升高直观地反映了该情况。同时,增大均质压力,剪切作用所产生的热量也相应增多,使壳聚糖慢慢溶解成胶体溶液,在一定程度上阻碍果汁澄清度的升高。在以上两方面的综合作用下,本实验中的橘子汁透光率在30MPa时升至最大;继续增大均质压力,壳聚糖溶解成胶体溶液所引起的透光率降低效应逐渐呈主导作用,透光率开始逐渐降低;当压力高于50MPa时,透光率急剧降低,可能的原因是均质产生的热量使壳聚糖降解液的温度迅速升高,加入到橘子汁中后,使混合液温度随之升高至壳聚糖分子中的氨基与果汁中的还原糖类物质发生羰氨褐变反应而加深溶液颜色。

2.4 均质时间对橘子汁澄清效果的影响

陈冬梅^[18]、孙涛^[19]等认为分子质量太小的壳聚糖容易与果汁中的还原糖类物质发生羰氨反应而加深溶液颜色。图4表明,随均质时间的延长,剪切和空穴作用引起的壳聚糖降解程度加大,壳聚糖分子质量逐渐变小,对果胶等带负电荷物质的絮凝能力也随之增强,使橘子汁的澄清度逐渐升高,7min时达至最大。继续延长均质时间,壳聚糖降解程度进一步加大,分子质量亦继续降低,一定程度上加速了羰氨反应的进程,反而降低溶液透光率;图4的曲线走向说明本实验结果与以上两位的研究结论相一致。

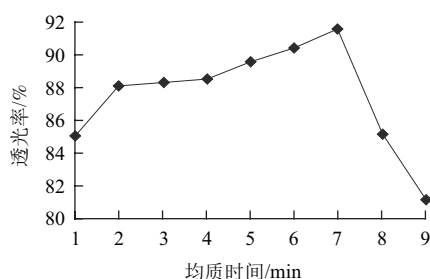


图4 均质时间对橘子汁澄清效果的影响

Fig.4 Effect of homogenization time on light transmittance of orange juice

2.5 均质温度对橘子汁澄清效果的影响

温度是影响高分子聚合物流变性质的重要因素之一^[20]。一方面,温度升高使壳聚糖分子链逐渐舒展,分子间距离增大,作用力相对减弱;另一方面,温度升高可降低活化能,使壳聚糖溶液的黏度逐渐降低,增进壳聚糖在溶液中的溶解度,从而增大壳聚糖分子与果胶等大分子物质的接触面积,提高澄清效率^[21]。

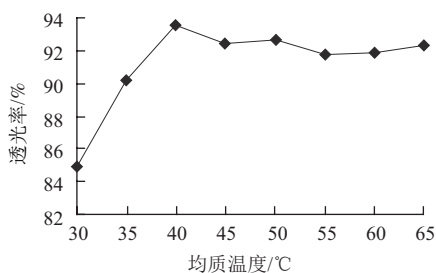


图5 均质温度对橘子汁澄清效果的影响

Fig.5 Effect of homogenization temperature on light transmittance of orange juice

从图5可看出,温度升高,壳聚糖分子链逐渐舒展,在水-乙酸混合体系中的溶解度增大,同时也使均质对壳聚糖分子内部的剪切和空穴作用加强,壳聚糖降解更充分,利于提高透光率;当温度高于40°C时,壳聚糖的溶解度变化不大,均质引起的降解程度也趋于平缓,果汁的澄清度不再增大。从温度因素的总体实验结果来看,均质前的温度变化对壳聚糖的高压均质降解效果影响不大,与顾志明等^[16]的研究结论相近;因而从节能和保证澄清效果的角度考虑,壳聚糖在高压均质降解前,于40°C左右的水-乙酸混合体系中溶解即可。

2.6 pH值对橘子汁澄清效果的影响

酸性条件下,壳聚糖分子上的游离氨基($-NH_2$)可结合1个H原子转变为 $-NH_3^+$,成为带正电荷的聚阳离子电解质,可与果胶等聚阴离子形成聚电解质复合物而絮凝,使果汁得以澄清^[22]。然而pH值的变化可影响壳聚糖分子中游离氨基的量和橘子汁中果胶等胶体物质带电量的多少,从而影响壳聚糖对果汁中胶体物质的絮凝效果。

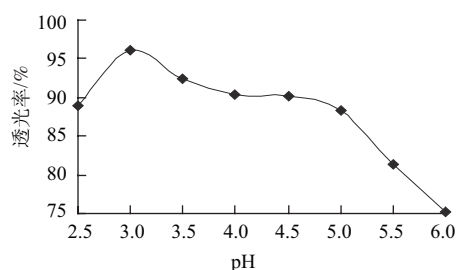


图6 pH值对橘子汁澄清效果的影响

Fig.6 Effect of aqueous solution pH on light transmittance of orange juice

澄清效果与pH值有两方面的关系：一方面，在均质作用下，低pH值对壳聚糖本身起着一种催化降解作用，即溶液的pH值越低，壳聚糖的降解速度越快和降解程度越大，因而可提高对果汁的澄清效果。另一方面，过低的pH值会使橘子汁中的原果胶水解过度，导致果胶脱去酯基和裂解，降低果胶与壳聚糖的结合絮凝，不利于果汁的澄清。图6表明，在这两方面作用下，pH3条件下的降解壳聚糖液对橘子汁的澄清效果较佳。

2.7 优化试验

表1 Box-Behnken试验因素水平编码表

Table 1 Factors and levels used in Box-Behnken design

水平	因素			
	X_1 壳聚糖用量/(g/800mL)	X_2 均质压力/MPa	X_3 均质时间/min	X_4 pH
-1	0.5	25	6	2.5
0	0.6	30	7	3.0
1	0.7	35	8	3.5

表2 Box-Behnken试验设计方案及结果

Table 2 Box-Behnken design and results

试验号	X_1	X_2	X_3	X_4	透光率/%
1	-1	-1	0	0	86.7
2	-1	1	0	0	91.1
3	1	-1	0	0	90.7
4	1	1	0	0	88.8
5	0	0	-1	-1	93.3
6	0	0	-1	1	91.8
7	0	0	1	-1	90.4
8	0	0	1	1	92.9
9	-1	0	0	-1	89.1
10	-1	0	0	1	94.9
11	1	0	0	-1	92.5
12	1	0	0	1	89.8
13	0	-1	-1	0	90.5
14	0	-1	1	0	91.1
15	0	1	-1	0	95.5
16	0	1	1	0	90.5
17	-1	0	-1	0	90.3
18	-1	0	1	0	91.4
19	1	0	-1	0	93.0
20	1	0	1	0	88.5
21	0	-1	0	-1	91.1
22	0	-1	0	1	92.1
23	0	1	0	-1	93.2
24	0	1	0	1	96.6
25	0	0	0	0	97.0
26	0	0	0	0	95.6
27	0	0	0	0	96.4

在单因素试验基础上，40℃条件下，采用Box-Behnken响应面设计法进行壳聚糖高压均质工艺条件对橘子汁澄清效果的优化。各因素编码值见表1，试验结果见表2。

由表2结果可看出，3组零水平中心试验点条件(即壳聚糖用量0.6g/800mL、均质压力30MPa、均质时间7min、均质pH3.0)下的透光率最高，平均值为96.33%；同时，依此中心试验点条件开展对照实验，测得未经高压均质降解的壳聚糖澄清橘子汁后的透光率为87.8%，进一步说明经高压均质降解后的壳聚糖液对橘子汁有较好的澄清作用。

2.7.1 透光率回归模型的建立及可靠性检验

利用运用SAS RSREG程序对27个试验点的响应值进行回归拟合，得到二次多项回归模型方程：

$$Y = 96.33 - 0.016X_1 + 1.125X_2 - 0.8X_3 + 0.708X_4 - 3.808X_1^2 - 1.575X_1X_2 - 1.4X_1X_3 - 2.125X_1X_4 - 2.421X_2^2 - 1.4X_2X_3 + 0.6X_2X_4 - 2.258X_3^2 + X_3X_4 - 1.196X_4^2$$

上述回归模型的可靠性可通过方差分析及相关系数来考察，方差分析如表3所示。

表3 回归模型方差分析结果

Table 3 Analysis of variance for the fitted regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	168.13	14	12.01	9.95	0.0001	**
X_1	0.003	1	0.003	0.003	0.959	
X_2	15.19	1	15.19	12.58	0.004	**
X_3	7.68	1	7.68	6.36	0.027	*
X_4	6.02	1	6.02	4.98	0.045	*
X_1X_2	9.92	1	9.92	8.22	0.014	*
X_1X_3	7.84	1	7.84	6.49	0.026	*
X_1X_4	18.06	1	18.06	14.95	0.002	**
X_2X_3	7.84	1	7.84	6.49	0.026	*
X_2X_4	1.44	1	1.44	1.19	0.296	
X_3X_4	4	1	4	3.31	0.094	
X_1^2	77.35	1	77.35	64.06	0.0001	**
X_2^2	31.26	1	31.26	25.88	0.0002	**
X_3^2	27.20	1	27.20	22.52	0.0005	**
X_4^2	7.63	1	7.63	6.32	0.027	*
总误差	14.49	12	1.21			
总和	182.62	26				
$R^2=92.06\%$		$R_{Adj}^2=82.81\%$				

注：*。 $P < 0.05$ ，差异显著；**。 $P < 0.01$ ，差异极显著。

表3结果显示，方程复相关系数的平方 $R^2=0.9206$ ，说明该模型极显著($P < 0.01$)； R_{Adj}^2 为0.8281，说明建立的模型能较好地描述透光率随均质处理条件的变化规律。同时，由表3可看出，一次项 X_2 ，交互项 X_1X_4 ，二次项 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 对透光率影响极显著($P < 0.01$)；一次项 X_3 、 X_4 ，交互项 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2X_3 ，二次项 X_4^2 对透光率影响显著($P < 0.05$)。

2.7.2 壳聚糖高压均质降解条件的优化与验证

在选取的各因素范围内，对回归模型分析可得最佳澄清条件为：壳聚糖用量0.58g/800mL、均质压力32.01MPa、均质时间6.88min、均质pH3.27；预测的透

光率理论值为96.79%。为实际操作便利,选择工艺条件为壳聚糖用量0.723g/L、均质压力32MPa、均质时间6.8min、pH3.27进行3次验证实验,测到透光率的平均值为96.68%,与预测值接近,说明该方程与实际情况拟合良好,适于高压均质降解的壳聚糖液对橘子汁的澄清工艺进行回归分析和参数优化。

2.7.3 橘子汁的复原与透光率测定

按照2.7.2节的最佳均质工艺条件制备壳聚糖降解液,并按1.2.4节方法开展澄清实验,将离心所得上清液(即橘子汁-壳聚糖降解液混合溶液)干燥浓缩,复原至25mL橘子原汁,然后测定其透光率。测得3次平行实验后的透光率均值为92.2%,接近稀释型橘子汁的透光率96.68%;说明降解后的壳聚糖液对稀释型橘子汁和橘子原汁的澄清效果相当,也进一步说明高压均质降解后的壳聚糖有较好的澄清作用。

2.8 成本分析与工业化应用前景

近几年来,随着高压均质理论的不断丰富和完善、均质技术和工艺的不断改进和成熟、均质设备性能的不断优化与提升,逐步克服了国内高压均质机设备昂贵、耗电量、易磨损的不足。以降解0.723g/L壳聚糖液的均质处理能力为10~12t/d(约7.23~8.68kg壳聚糖/d)、设备价格为10~15万元、功率为50kW的中小型高压均质机为例,借鉴陈丽欢^[23]和王爱军^[24]等的作业成本法对高压均质降解壳聚糖及其澄清橘子汁的生产使用成本进行粗略计算。

表4 生产费用表

Table 4 List of costs for chitosan degradation by homogenization

费用来源	成本动因	作业成本	总费用/(元/d)
设备折旧费	使用时间	10~15元/d	100~180
设备磨损与维护费	使用时间	6~8元/d	60~96
燃油动力费	机油	0.8~1元/d	8~12
	电力	0.8元/(kW·h)	320(日生产8h计)
			总成本: 488~608

考虑均质机的维护和使用寿命,假定企业全年运转高压均质机的时间为200d,依据表4的计算结果,采用高压均质技术降解壳聚糖的总生产费用为9.36~12.16万元/年;该生产成本应在多数企业的承受能力范围。因此,将高压均质技术应用于壳聚糖的降解及澄清型橘子汁等果汁的加工将有较大的发展空间与前景。

3 结论

3.1 本研究结果表明,经高压均质降解的壳聚糖对橘子汁有较好的澄清效果,且较未降解的壳聚糖对橘子汁有更好的澄清效果;为壳聚糖及其降解物在果汁澄清方面的应用提供一定实验参考。

3.2 通过Box-Behnken试验和响应面分析,建立在40℃

条件下壳聚糖用量、均质压力、均质时间和pH值四因素相互关系的模型: $Y=96.33-0.016X_1+1.125X_2-0.8X_3+0.708X_4-3.808X_1^2-1.575X_1X_2-1.4X_1X_3-2.125X_1X_4-2.421X_2^2-1.4X_2X_3+0.6X_2X_4-2.258X_3^2+X_3X_4-1.196X_4^2$ 。

方差分析结果表明拟合检验显著,决定系数 R^2 达0.9206,说明该模型能较好地预测透光率随澄清条件的变化规律。

3.3 经SAS软件分析,优化得到高压均质降解壳聚糖的最佳工艺条件为壳聚糖用量0.723g/L、均质压力32MPa、均质时间6.8min、pH3.27,以1:2.5的经高压均质降解的壳聚糖降解液加入至橘子原汁,40℃条件下静置澄清60min后离心处理,可使橘子汁的平均透光率达到96.68%,使复原后的橘子原汁的透光率均值达到92.2%。

参考文献:

- [1] KHORA E, YONG LIMB L. Implantable applications of chitin and chitosan[J]. Biomaterials, 2003, 24(13): 2339-2349.
- [2] RUNGSARDTHONG V, WONGVUTTANAKUL N, KONGPIEN N, et al. Application of fungal chitosan for clarification of apple juice[J]. Process Biochemistry, 2006, 41(3): 589-593.
- [3] WANG Jiangtao, JIN Xiaoxiao, CHANG Defu. Chemical modification of chitosan under high-intensity ultrasound and properties of chitosan derivatives[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(1): 175-177.
- [4] 何志刚, 李维新, 林晓姿, 等. 壳聚糖澄清杨梅果酒的影响因素与效果评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 199-202.
- [5] 任艳芳, 王思梦, 何俊瑜, 等. 中草药淀粉壳聚糖复合膜对柑桔的保鲜效果[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 300-305.
- [6] 王兆升, 董海洲, 刘传富, 等. 壳聚糖在鲜切生姜涂膜保鲜中的应用[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 237-241.
- [7] 江英, 胡小松, 刘琦, 等. 壳聚糖处理对采后梅杏贮藏品质的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(13): 343-349.
- [8] 龙德武, 吴国忠, 秦宗英, 等. 辐射法降解壳聚糖及其抑菌性能的研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2005, 21(6): 240-242.
- [9] WANG Lili, LI Xiaoyu, ZHU Suwe. The effect of the degradation gradients of chitosan irradiated by ^{60}Co - γ ray on the maize germination and seedling growth[J]. 激光生物学报, 2008, 17(5): 641-646.
- [10] 欧春艳, 杨磊, 李思东, 等. 壳聚糖红外干燥特性及动力学模型研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 91-94.
- [11] 孙涛, 周冬香, 朱颖娜, 等. 羧甲基壳聚糖的降解及其抗氧化性能的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(1): 54-57.
- [12] MURINOV K Y, ROMANKO T V, KURAMSHINA A R, et al. Oxidative degradation of chitosan under the action of hydrogen peroxide[J]. Russian Journal of Applied Chemistry, 2007, 80(1): 159-161.
- [13] LUO Wenbo, ZHONG Han, ZENG Xinan, et al. Study on the degradation of chitosan by pulsed electric fields treatment[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2010, 11(4): 587-591.
- [14] CAI Quanyuan, GU Zhiming, CHEN Yong, et al. Degradation of chitosan by an electrochemical process[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 79(3): 783-785.
- [15] 邱澄宇. 壳聚糖几种降解方法的比较研究[J]. 食品科学, 2004, 25(增刊1): 51-53.
- [16] 顾志明, 蔡泉源, 周今朝, 等. 高压均质技术降解壳聚糖[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(10): 122-125.
- [17] 蔡泉源, 顾志明, 周今朝, 等. 壳聚糖的高压均质降解动力学研究[J]. 食品科技, 2011, 36(2): 230-233.
- [18] 陈冬梅. 壳聚糖的降解及其抑菌性、抗氧化性研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2009: 16-17.
- [19] 孙涛, 陈春红, 朱云, 等. 基于与葡萄糖美拉德反应的低聚壳聚糖衍生物的抗氧化性能[J]. 食品科学, 2011, 32(3): 14-18.
- [20] 李星科, 姜启兴, 夏文水. 壳聚糖溶液的流变学性质及应用研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(2): 65-69.
- [21] 赵丽, 王萍. 壳聚糖溶液稳定性的研究[J]. 化工时刊, 2006, 20(6): 34-36.
- [22] 王岸娜. 壳聚糖澄清猕猴桃果汁及其澄清机理的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2004: 48.
- [23] 陈丽欢, 李毅念, 丁为民, 等. 基于作业成本法的秸秆直燃发电物流成本分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 199-203.
- [24] 王爱军, 张燕, 张小桃. 生物质发电燃料成本分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 17-20.