

基于神经网络法对原料大豆豆腐加工特性的评价

谢来超, 沈 群, 张新艳, 郭顺堂

(中国农业大学 食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘 要:以 51 种大豆为原料, 对大豆理化指标与豆腐品质指标进行相关性分析, 然后以显著相关的大豆理化指标为输入, 豆腐品质指标为输出, 建立基于神经网络法的原料大豆的豆腐加工特性评价方法。结果表明: 大豆可溶性蛋白含量与豆腐产量($r=0.743$)呈极显著正相关; 粗蛋白含量与豆腐的黏附性($r=0.481$)和弹性($r=0.456$)呈显著正相关; 豆腐硬度与总固形物含量($r=0.466$)呈显著相关性, 与滴定酸度($r=-0.478$)呈显著负相关; 建立的神经网络预测模型, 相对较准确地预测了不同大豆品种加工成豆腐的加工特性, 产量、硬度和弹性的预测相对误差分别为 1.046%、3.05% 和 8.49%。

关键词:大豆; 豆腐; 神经网络; 评价方法

中图分类号:TS205

文献标识码:A

文章编号:1000-9841(2013)01-0093-05

Evaluation on Tofu Processing Characteristics of Soybean Based on Neural Network

XIE Lai-chao, SHEN Qun, ZHANG Xin-yan, GUO Shun-tang

(College of Food Science and Nutrition Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A novel method of tofu processing characteristics of soybeans was established by analyzing the correlation between soybean cultivar's physical-chemical characteristics and tofu qualities. The method was based on neural network, where significant correlational characteristics as input and tofu qualities as output. The results indicated that soluble protein content significantly positive-correlated with yield($r=0.743, p<0.01$), raw protein content significantly positive-correlated with adhesive($r=0.481, p<0.05$) and springness($r=0.456, p<0.05$), while yield had significant correlation with total solid($r=0.466, p<0.05$) and titratable acidity($r=-0.478, p<0.05$). Tofu qualities made from different soybean cultivars were accurately predicted by the established neural network. Comparing to the experiment data, the relative error of yield, hardness and springiness of prediction data were 1.046%, 3.05% and 8.49%, respectively.

Key words: Soybean; Tofu; Neural network; Evaluation method

大豆的原料特性决定了其加工品质。采取何种指标作为选取豆腐加工用大豆原料的判断标准, 一直困扰着生产企业和育种者。尽管我国制定了大豆原料标准, 但仅限于蛋白和油脂的含量, 还不能满足加工企业对选择专用原料的要求。因为大豆食品加工特性受多种因素控制, 十分复杂, 难以用一个或几个指标简单地描述。关于大豆蛋白含量与豆腐产量的关系, 不同研究者的报道存在差异^[1-4]。大豆储藏蛋白中氨基酸组成和结构对大豆蛋白功能特性有不同的贡献^[5]。大豆中的 11S 和 7S 球蛋白的比值及各自的含量均与豆腐质构特性存在显著的相关性^[4, 6-7]。在豆乳的凝乳过程中, 脂肪通过与蛋白粒子聚集而结合到豆腐凝胶中, 从而影响豆腐凝胶的形成和物理特性^[8-9]。矿物质种类与含量也是豆腐凝胶形成过程中重要的影响因素, 尤其是磷或植酸对豆乳的凝乳过程和豆腐质构特性有较大的影响^[10-14]。由此可见, 豆腐凝胶的形成是一个多因素耦合的复杂过程, 要素间

关系表现出极大的不确定性和非线性。

因此, 尽管已有许多有关大豆组成与豆腐品质间相关性的研究报道, 但是由于大豆理化特性与豆腐品质之间的复杂关系, 目前大豆加工品质的评价还仅限于不同大豆品种间的加工测试和比较, 还没有提出一种基于统计学的简单有效的方法对大豆的加工产品进行预测。为此, 本文借助于神经网络方法, 以大豆各理化指标为基础对原料大豆豆腐加工特性进行了预测。建立的大豆加工特性评价模型, 可以简化大豆加工者筛选原料的繁琐而复杂的过程, 建立加工者与育种者之间的桥梁, 更有效的指导行业发展。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选取我国东北、黄淮海地区的 51 个大豆种质为原料, 详见表 1。

收稿日期: 2012-08-16

第一作者简介: 谢来超 (1988-), 男, 在读硕士, 研究方向粮食油脂与植物蛋白。E-mail: ben_moody@163.com。

通讯作者: 郭顺堂 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事蛋白质加工利用研究。E-mail: shuntang@cau.edu.cn。

表 1 实验选用大豆品种

Table 1 Soybean cultivars selected in the experiment

编号 No.	大豆种质 Soybean germplasm	编号 No.	大豆种质 Soybean germplasm	编号 No.	大豆种质 Soybean germplasm	编号 No.	大豆种质 Soybean germplasm
1	吉育 59 Jiyu 59	14	GY08Y36	27	杂交豆 2 Zajiaodou 2	40	皖豆 15 Wandou 15
2	吉育 62 Jiyu 62	15	GY08Y66	28	吉青 1 Jiqing 1	41	皖豆 24 Wandou 24
3	吉育 66 Jiyu 66	16	吉 55 Ji 55	29	吉青 2 Jiqing 2	42	中黄 30 zhonghuang30
4	吉育 91 Jiyu 91	17	吉 69 Ji 69	30	301	43	中黄 39 Zhonghuang39
5	吉育 94 Jiyu 94	18	吉 71 Ji 71	31	垦丰 17 Kenfeng 17	44	中黄 40 Zhonghuang40
6	吉育 101 Jiyu 101	19	吉 79 Ji 79	32	合丰 25 Hefeng 25	45	中黄 41 Zhonghuang41
7	吉育 102 Jiyu 102	20	吉 82 Ji 82	33	合丰 50 Hefeng 50	46	中黄 42 Zhonghuang42
8	GY06Ls31	21	吉 92 Ji 92	34	合丰 55 Hefeng 55	47	中黄 43 Zhonghuang43
9	GY06Y22	22	吉 93 Ji 93	35	阜豆 9 Fudou 9	48	中黄 44 Zhonghuang44
10	GY07Y11	23	吉 95 Ji 95	36	阜豆 11 Fudou 11	49	中黄 48 Zhonghuang48
11	GY07Y13	24	吉小 6 Jixiao 6	37	蒙 9235 Meng 9235	50	中黄 49 Zhonghuang49
12	GY07Y16	25	吉小 7 Jixiao 7	38	蒙 9449 Meng 9449	51	中黄 50 Zhonghuang50
13	GY07Y31	26	吉小 8 Jixiao 8	39	蒙 9801 Meng 9801		

1.2 仪器与设备

九阳料理机(JYL-CO20, 山东九阳小家电有限公司);大容量离心机(TGL-16C, 上海安亭科学仪器厂);电热鼓风干燥箱(DF206, 北京医疗设备二厂);千分之一天平(GF-300, AND, Japan);万分之一天平(AY220, SHIMASZU, Japan);电磁炉(IH-P10, 南海市富士宝家用电器有限公司);恒温水浴锅(SHJ-A, 金坛市华峰仪器有限公司);循环水真空泵(SHI-Ⅲ, 上海亚荣生化仪器厂);质构仪(BrookfieldCT3, America)。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 大豆理化指标的测定 百粒重参照国标 GB/T 5519-1988 测定,蛋白质、脂肪、P、Ca 含量委托北京谱尼公司参照国标 GB5009. 5-2010、GB/T5009. 6-2003、GB/T5009. 87-2003 和 GB/T5009. 92-2003 进行检测。

1.3.2 石膏豆腐的制备 将原料进行挑拣、除杂,称取 100 g 大豆样品,清洗两遍后,用 300 mL 水 4℃ 冰箱中浸泡 12 h。除去浸泡水,以豆:水 = 1:7 (约 700 mL)打浆,以 30 s 为一个时间间隔,共计打浆 2 min,加入适量消泡剂,以两层纱布为介质,真空抽滤除渣。沸水浴加热至 95℃ 后保持 5 min,将熟制的豆浆冷却至 85℃,按原料大豆重的 2.5% 加入研磨好的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 分散液,边加边搅拌,85℃ 水浴静置 15 min,破脑,压榨排水(压力 500 g·44 cm⁻² 挤压 15 min 后,再在压力 1 000 g·44 cm⁻² 下挤压 15 min)得到石膏豆腐。

1.3.3 豆腐质构特性的测定 测试过程中,TPA 循环的触发点负载为 10 g,测试速度 0.5 mm·s⁻¹,预测速度 2 mm·s⁻¹,返回速度 0.5 mm·s⁻¹,数据频

率 10 点·s⁻¹,下压距离 10 mm,负载单元 1 500 g,探头 TA25/1000,夹具 TA-RT-KIT,对边长为 15 mm 的每份立方体样品进行质构特性分析。

1.3.4 神经网络分析 采用 MATLAB 建立了 BP 神经网络模型(训练函数为 TRAINSCG,学习函数为 LEARN_GDM,误差性能函数为 MSEREG,网络层数为 15 层,训练精度为 10⁻⁶,网络的训练步长为 5 × 10⁻⁷,终止训练次数为 1 000,目标为 10⁻⁵)。任选 51 种大豆原料中 48 种作为神经网络的训练样本,分别以大豆理化指标作为神经网络的输入样本,以豆腐的品质特性作为神经网络的输出值,通过网络自我学习、自我矫正各个权重训练网络。随机选取其他 3 种样品作为检验样本,对输出结果进行验证。

1.4 数值分析

应用软件 SPSS 17.0 和 Origin 8.0 对实验结果进行统计分析。每个样本分析重复 3 次。神经网络的预测结果正确率范围设定为实验值的 5%。

2 结果与分析

2.1 大豆理化指标与豆腐品质的相关关系

对大豆的各种理化指标与豆腐的得率、保水性、含水量等表观品质和豆腐的硬度、弹性等质构品质进行了相关性分析,结果见表 2。

大豆的粗蛋白及可溶性蛋白含量与豆腐产量呈正相关,而且可溶性蛋白含量与豆腐得率的相关性达到极显著水平($r = 0.743$),可见大豆原料转化成豆腐的产量不但受蛋白总量的控制,更重要的是取决于可溶性蛋白含量,可溶性蛋白含量越高越有利于提高加工产品的产量。另一方面,大豆的粗蛋白含量与豆腐粘性和弹力的相关性达到显著水平(r

=0.481; $r=0.456$),并且豆乳总固形物含量与豆腐的硬度也呈显著正相关($r=0.466$)。豆腐的硬度和弹性说明了豆乳蛋白质分子间结合的密实程度和强度,而增强蛋白质结合作用的因素包括蛋白质种类、蛋白粒子的数量、溶液中盐的种类等^[15-17]。因此,蛋白含量和总固形物指标的内容很复杂,仅用这两个指标难以充分地解析豆乳的凝固性质。

滴定酸度是豆乳弱酸成分解离质子数量的指标,滴定酸度越高说明豆乳中弱酸或弱酸盐含量也越

高,钙镁金属离子的结合能力就越强。从表2可以看出,滴定酸度与豆腐的硬度呈显著负相关($r=-0.478$),说明滴定酸度越高的大豆越不利于加工高硬度的豆腐。

大豆蛋白的主要成分是11S和7S,且大豆蛋白的组成或7S/11S显著影响豆腐的产量和硬度^[9]。但是,由于本实验所使用的大豆品种的7S/11S为0.417~0.743,变幅较小,从而导致实验结果并未显示蛋白组成或7S/11S与豆腐品质之间存在的显著相关性。

表2 大豆理化指标与豆腐品质的相关关系

Table 2 Correlations between physical chemical properties of soybean and tofu quality

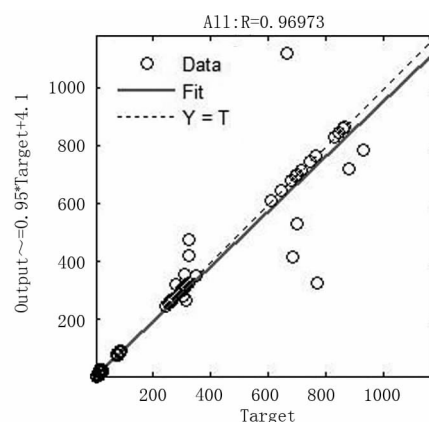
	得率 Yield	含水量 Moisture content	保水性 Water Holding	硬度 Hardness	粘性 Viscosity	弹力 Elasticity	内聚性 Cohesive	弹性 Springiness	咀嚼性 Chewiness
粗蛋白 Crude protein	0.441	0.156	0.083	-0.039	0.481 *	0.456 *	0.181	-0.010	0.194
脂肪 Lipid	-0.215	0.022	0.130	-0.261	-0.350	-0.417	-0.001	0.012	-0.114
磷 Phosphorus	-0.190	-0.139	-0.027	0.084	-0.248	-0.321	-0.379	-0.079	-0.175
钙 Calcium	0.113	0.210	0.385	0.102	-0.355	-0.258	0.114	-0.139	-0.217
7S	-0.156	-0.242	-0.373	0.396	0.259	0.185	-0.059	0.360	0.254
11S	0.156	0.242	0.373	-0.396	-0.259	-0.185	0.059	0.360	-0.254
11S/7S	0.164	0.257	0.392	-0.382	-0.299	-0.210	0.042	-0.400	-0.296
总固形物 Total solid	0.417	0.119	0.032	0.466 *	0.091	0.057	-0.280	-0.154	-0.134
可溶性蛋白 Soluble protein	0.743 **	0.424	0.307	-0.385	0.097	0.008	-0.383	-0.307	-0.245
滴定酸度 Titration acid	-0.032	-0.103	-0.067	-0.478 *	0.262	0.273	0.385	-0.004	0.295

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

2.2 BP神经网络法对大豆加工品质的预测

基于误差反馈算法的多层前馈型神经网络(BP神经网络)具有自学能力和强大自动归纳、非确定性推理、判断、识别和分类能力,尤其是当数据值奇异或非线性时,可通过建立影响因素信息输入与输出间非线性映像关系,实现对复杂非线性问题处理,发现问题解决途径和事物发展潜在的规律性^[18],本研究借助神经网络的预测能力分析了大豆理化成分与豆腐品质的关系。

随机选取其中48种大豆,以与豆腐品质呈现显著相关的粗蛋白、总固形物含量、滴定酸度等大豆理化指标为神经网络的输入值,以豆腐的得率、质构等品质为神经网络的输出值,训练神经网络,训练结果如图1所示。其中,横坐标为实验值即目标值,纵坐标为神经网络的输出结果,我们的期望是神经网络的输出值与目标值相同,即如虚线所示。由图1可以看出,神经网络的预测值绝大部分排列在虚线上,说明神经网络的预测值大部分与目标值



以大豆各种理化指标为神经网络的输入值,豆腐的各种指标为输出值。○表示真实的实验数据,“—”表示拟合数据,“---”表示线性情况下的分布。Soybean physicochemical indicators as input value, while indicators of tofu as output value. ○ is the experiment values, “—” is the simulated values, “---” is the linear distribution of results.

图1 基于大豆理化成分与豆腐品质的神经网络训练结果
Fig.1 Simulated results of neural network training based on soybean physicochemical compositions and tofu qualities

相近或相等。仅有 10% 的神经网络预测值离虚线距离较远。网络预测值大部分与虚线吻合,但部分预测值偏离目标值,神经网络的预测值出现一定程度的误差,这种误差在神经网络误差允许范围之内^[19]。根据预测数据,神经网络给出拟合曲线即实线,相关系数为 $r = 0.9697$ 。因此,神经网络模型的预测值与目标值基本吻合。

为检验模型预测结果的可靠性,将中黄 39、吉小 6 和 GY08Y66 作为神经网络的检测样本进行豆

腐加工品质预测。结果如表 3 所示,3 个品种(系)的豆腐得率和硬度预测都达到了较高的准确率。豆腐保水性和含水量指标仅有吉小 6 满足了设定预测误差的要求,而中黄 39 和 GY08Y66 的误差太大,预测失准。

吉小 6 和 GY08Y66 品种的硬度、黏附性、内聚性、弹性和咀嚼性的预测均达到了设计要求,而对中黄 39 弹性的预测结果较差。

表 3 神经网络预测的豆腐的得率和品质

Table 3 Accuracy verification of tofu quality prediction model established by soybean components

指标 Indexes	中黄 39 Zhonghuang 39			吉小 6 Jixiao 6			GY08Y66		
	EV	SV	相对误差 Relative error/%	EV	SV	相对误差 Relative error/%	EV	SV	相对误差 Relative error/%
得率 Yield/g · 100g ⁻¹	280.90	276.33	1.63	239.73	240.42	0.288	266.94	263.69	1.220
保水性 Water holding capacity/%	71.90	55.16	23.30	71.90	73.03	1.570	71.32	58.52	17.900
含水量 Moisture content/%	83.22	68.19	18.10	84.45	85.41	1.140	83.36	69.27	16.900
硬度 Hardness/g	479.36	462.96	3.42	516.52	520.79	0.827	436.65	415.21	4.910
黏附性 Viscidity/mJ	0.123	0.117	4.89	0.107	0.109	1.870	0.116	0.109	6.030
内聚性 Cohesive	0.333	0.345	3.60	0.107	0.109	1.870	0.302	0.310	2.650
弹性 Springiness/mm	8.466	7.256	14.30	8.163	8.426	3.220	7.879	7.251	7.970
咀嚼性 Chewiness/mJ	13.61	13.94	2.42	12.65	12.70	0.395	10.48	10.51	0.286

EV 表示实验得出的数据,SV 表示神经网络的预测数据。

EV: Experiment values, SV: Simulated values.

3 结论与讨论

所建立的评价方法对测试样品豆腐指标预测结果的相对误差大小不一,但每个大豆品种的豆腐指标中的多数预测相对误差较小($< 5\%$),特别是神经网络对吉小 6 的豆腐指标的预测相对误差均小于 5%,咀嚼性预测相对误差小于 1%;对吉小 6 的得率和硬度指标相对预测误差和 GY08Y66 的咀嚼性指标预测相对误差均小于 1%。说明网络模型的预测结果误差在可接受范围内,基本建立了基于神经网络法的对原料大豆加工特性的预测模型,意味着借助神经网络方法预测大豆原料特性具有可行性。由于本实验仅采用了神经网络中的经典算法,即误差函数梯度下降法寻找最优解,网络的收敛速度降低,只是寻找到局部极小点,无法继续调整权值和阈值^[20],故导致部分预测结果出现了较大的相对误差(如中黄 39 的弹性和保水性)。

随着神经网络技术的发展,以后可利用先进算法(如 Gauss-Newton 法,交替迭代算法和 Levenberg-Marquardt 算法等^[21])对神经网络算法适当修正和

改进,提升神经网络的预测准确性,显著降低预测相对误差。另外,由于大豆理化指标的测定是复杂而繁琐的过程,给评价方法的建立增加了工作量,不利于简单有效的评价方法的建立。因此,应寻找可简便测定并能代表原料大豆加工特性的指标,简化已建立的评价方法。

参考文献

- [1] Poysa V, Woodrow L. Stability of soybean seed composition and its effect on soymilk and tofu yield and quality[J]. Food Research International, 2002, 35: 337-345.
- [2] Bhagsari A S, Rao M, Sapra V T, et al. Yield and quality of soymilk and tofu made from soybean genotypes grown at four locations[J]. Crop Science, 1999, 39: 401-405.
- [3] 章晓波, 盖钧镒. 大豆地方品种豆腐产量与有关加工性状遗传变异的初步研究[J]. 大豆科学, 1994, 13(3): 208-215. (Zhang X B, Gai J Y. A preliminary study on genetic variation of tofu yield and related processing characters of soybean landraces[J]. Soybean Science, 1994, 13(3): 208-215.)
- [4] Mujoo R, Trinh D T, Ng P K W. Characterization of storage proteins in different soybean varieties and their relationship to tofu yield and texture[J]. Food Chemistry, 2003, 82: 265-273.

- [5] Fukushima D. Structures of plant storage proteins and their functions[J]. Food Reviews International, 1991, 7:353-381.
- [6] Murphy P A, Chen H P, Hauck C C, et al. Soybean protein composition and tofu quality[J]. Food Technology, 1997, 51:86-88.
- [7] Poysa V, Woodrow L. Stability of soybean seed composition and its effect on soymilk and tofu yield and quality[J]. Food Research International, 2005, 25:337-345.
- [8] Guo S T, Tomotada O, Masayuki M. Incorporation of soy milk lipid into protein coagulum by addition of calcium chloride[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47:901-905.
- [9] Poysa V, Woodrow L, Yu K. Effect of soy protein subunit composition on tofu quality [J]. Food Research International, 2006, 39 (3):309-317.
- [10] Saio K, Koyama E, Yamazaki S, et al. Protein-Calcium-Phytic acid relationship in soybean. Part III: Effect of phytic acid on coagulative reaction in tofu-making[J]. Agricultural Biology and Chemistry, 1969, 33:36-42.
- [11] Lim B T, Deman J M, Deman L, et al. Yield and quality of tofu as affected by soybean and soymilk characteristics. Calcium sulfate coagulant[J]. Journal of Food Science, 1990, 55:1088-1092.
- [12] 袁俊杰, 臧剑士, 胡芑, 等. 植酸的制备和性质[J]. 中国食品添加剂, 1999(1):34-38. (Yuan J J, Zang J S, Hu P, et al. Preparation and characters of phytic acid[J]. China Food Additives, 1999 (1):34-38.)
- [13] Cheryan M, Rackis J J. Phytic acid interactions in food systems [J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 1980, 13:297-335.
- [14] Toda K, Ono T, Kitamura K, et al. Relationships of the contents of protein and phytic acid in soybeans to the consistency of tofu[C]. Brazilian Agricultural Research Corporation, National Soybean Research Center, 2004.
- [15] Guo S T, Tsukamoto C, Takahasi K, et al. Incorporation of soymilk lipid into soy protein coagulum by the addition of calcium chloride [J]. Journal of Food Science, 2002, 67:3215-3219.
- [16] Ren C, Tang L, Zhang M, et al. Structural Characterization of heat-induced protein particles in soy milk [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57:1921-1926.
- [17] Puppo M C, Anon M C. Structural properties of heat-induced soy protein gels as affected by ionic strength and pH [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46:3583-3589.
- [18] 闻新. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (Wen X. Application and design of MATLAB[M]. Beijing: Science Press, 2001.)
- [19] Fraser H, Pugh R, Kennedy R, et al. A comparison of backpropagation and radial basis function, in the diagnosis of myocardial infarction[M]// Ifeachor E, Rosen K. (Eds) International conference on neural networks and expert systems in medicine and healthcare, 1994:76-84.
- [20] 潘昊, 王晓勇, 陈琼, 等. 基于遗传算法的 BP 神经网络技术的应用[J]. 计算机应用, 2005, 25(12):2777-2779. (Pan H, Wang X Y, Chen Q, et al. Application of BP neural network based on genetic algorithm [J]. Computer Applications, 2005, 25 (12):2777-2779.)
- [21] 闫滨. 大坝安全监控及评价的智能神经网络模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. (Yan B. Study of intelligent neural network model for dam safety monitoring and safety evaluation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.)

(上接第 92 页)

- [14] Mello G C, Oliva M L, Sumikawa J T, et al. Purification and characterization of a new trypsin inhibitor from *Dimorphandra mollis* seeds[J]. Journal of Protein Chemistry, 2001, 20(8):625-631.
- [15] Rackis J J, Anderson R L. Isolation of four soybean trypsin inhibitors by DEAE-Cellulose chromatography[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 1964, 15:320-335.
- [16] Pusztai A, Grant G, Stewart J C, et al. Isolation of soybean trypsin inhibitors by affinity chromatography on anhydrotrypsin-sepharose 4B[J]. Analytical Biochemistry, 1988, 172:108-112.
- [17] Bhattacharyya A, Babu C R. Purification and biochemical characterization of a serine proteinase inhibitor from *Derris trifoliata* Loir. seeds: insight into structural and antimalarial features [J]. Phytochemistry, 2009, 70:703-712.
- [18] Johnson R, Narraez J, An G, et al. Expression of proteinase inhibitors I and II in transgenic tobacco plants. Effects on natural defense against *Manduca sexta* larvae[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1998, 86 (24):9871-9875.
- [19] 胡琼英, 狄溯, 裴理, 等. 生物化学实验[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008:45-48. (Hu Q Y, Di L, Nie L, et al. Biochemical experiments[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008:45-48.)
- [20] 汪家政, 范明. 蛋白质技术手册[M]. 北京: 科学出版社, 2000:192-196. (Wang J Z, Fan M. Protein technical manual[M]. Beijing: Science Press, 2000:192-196.)
- [21] Rackis J J, Sasame H A, Mann R K, et al. Soybean trypsin inhibitors: isolation, purification and physical properties[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1962, 98(3):475-477.
- [22] 王长良, 张永忠, 孙志刚. Bowman-Birk 型大豆胰蛋白酶抑制剂研究进展[J]. 大豆科学, 2007, 26(5):757-760. (Wang C L, Zhang Y Z, Sun Z G. Progress on the research of Bowman-Birk soybean trypsin inhibitor [J]. Soybean Science, 2007, 26 (5):757-760.)
- [23] Birk Y. Purification and properties of a highly active inhibitor of trypsin and chymotrypsin from soybeans[J]. Journal of Biochemistry, 1961, 54:378-381.
- [24] 于炎湖. 饲料中胰蛋白酶抑制剂的研究状况[J]. 饲料工业, 2001, 22(6):1-4. (Yu Y H. Research status of trypsin inhibitor in feed[J]. Feed Industry, 2001, 22(6):1-4.)
- [25] 康庄, 王竞, 张年辉, 等. 菠菜种子胰蛋白酶抑制剂的分离纯化与部分性质研究[J]. 天然产物研究与开发, 2005, 17(2):143-146. (Kang Z, Wang J, Zhang N H, et al. Purification and some properties of a trypsin inhibitor from *Spinacia oleracea* L. seeds [J]. Natural Product Research and Development, 2005, 17 (2):143-146.)