

牡荆素保护 DNA 氧化损伤的活性评价及机制分析

Active evaluation of DNA protection to oxidative damage and its possible mechanisms of vitexin *in vitro*

陈 班 李达欢 李熙灿

CHEN Ban LI Da-huan LI Xi-can

(广州中医药大学中药学院, 广东 广州 510006)

(School of Pharmaceutical Sciences, Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

摘要:采用 DNA 保护能力分析法,测定牡荆素保护 DNA 的能力;运用 Ferrozine 法和紫外可见光谱(UV-Vis)分析牡荆素 Fe^{2+} 络合反应;运用 Cu^{2+} 还原法,测定牡荆素的电子转移(Electron-transfer, ET)能力。在此基础上,探讨牡荆素保护 DNA 氧化损伤的可能化学机制。结果表明:牡荆素在 DNA 保护能力分析法、Ferrozine 法和 Cu^{2+} 还原法中均表现出剂量相关性,其 IC_{50} 值分别为 (919.6 ± 23.6) , (9.3 ± 1.2) , (421.7 ± 29.2) $\mu\text{mol/L}$ 。UV-Vis 光谱分析表明,牡荆素与 Fe^{2+} 混合后,在波长 554 nm 处出现新的吸收峰[摩尔吸光系数 $\epsilon = 2\,680.74 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{cm})$]。总之,牡荆素能保护 DNA 免受羟基自由基($\cdot\text{OH}$)诱导的氧化损伤。其保护机制可能与电子转移 ET 和 Fe^{2+} 络合有关,络合位点可能在 4-羰基-5-羟基之间。

关键词:牡荆素;DNA 氧化损伤;抗氧化;电子转移

Abstract: In order to study the DNA protection and possible mechanisms of vitexin, it was measured by using three spectrophotometric assays, including DNA protection, Fe^{2+} -complexing, and Cu^{2+} reducing. In addition, its Fe^{2+} -complexing reaction was also analyzed using UV-Vis spectra. The results showed that the IC_{50} values of vitexin were (919.6 ± 23.6) , (9.3 ± 1.2) and (421.7 ± 29.2) $\mu\text{mol/L}$, respectively, for DNA protection assay, Fe^{2+} -complexing assay, and Cu^{2+} reducing assay. When mixed with Fe^{2+} , vitexin gave a UV-Vis peak at 554 nm [molar absorptivity $\epsilon = 2\,680.74 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{cm})$]. In conclusion, vitexin can effectively protect DNA from $\cdot\text{OH}$ induced damage. The protective mechanism may include electron-transfer (ET) and Fe^{2+} -complexing, and its Fe^{2+} -complexing site is possibly between 4-carbonyl and 5-hydroxyl groups.

Keywords: vitexin; oxidative DNA damage; antioxidation; electron-transfer

由活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS)引起的 DNA 氧化损伤,可以导致细胞的氧化应激,引起基因突变、癌变以及神经退行性病变^[1]。羟自由基($\cdot\text{OH}$)为 ROS 中最具杀伤力的自由基,既可以进攻 DNA 中的鸟嘌呤碱基,生成 8-羟基-2'-脱氧鸟嘌呤核苷(8-hydroxy-2'-deoxyguanosine, 8-OHdG),也可以进攻脱氧核糖骨架,生成丙二醛(malondialdehyde, MDA)等产物。8-OHdG 与 MDA,均是细胞氧化应激的毒性产物^[2]。所以,8-OHdG 已作为重要生物标识物,用于 DNA 氧化损伤相关疾病的筛查^[3]。而脐带血中的 MDA 含量的检测,可用于判断早产儿的氧化应激状况与 DNA 损伤的水平^[4]。因此,寻找合适的抗氧化剂,保护 DNA 免受氧化损伤,减少相关毒性产物的生成,已成为自由基生物医学研究的一项重要内容。

前期的研究^[5]表明,食用植物中的抗氧化成分主要为多酚类化合物。可食用的多酚主要有黄酮及黄酮苷、类黄酮、双黄酮等,其中以黄酮及黄酮苷最常见。牡荆素(vitexin, apigenin-8-C-glucoside)是一种典型的黄酮类化合物(图 1),存在于山楂等可食用植物中。据文献^[6]报道,山楂叶的牡荆素含量为 0.04~0.06 mg/g。含有牡荆素的山楂叶总黄酮有抗心肌缺血及再灌注损伤、降低血脂等药理活性,这些药理活性与总黄酮的抗氧化性均有直接关联^[7]。

此前,一些零星报道^[8-10]提及牡荆素的抗氧化作用,不过,尚未涉及牡荆素对 DNA 氧化损伤的修复(或保护)活性。本试验拟采用 DNA 保护能力分析法,研究牡荆素的 DNA 保护能力;运用 Ferrozine 法和紫外可见光谱(UV-Vis)法,分析其 Fe^{2+} 络合反应;运用 Cu^{2+} 还原法,测定其电子转移 ET(Electron-transfer)能力。在此基础上,进一步阐释牡荆素保护 DNA 氧化损伤可能的化学机制,为牡荆素应用于 DNA

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:81573558);粤港联合创新项目(编号:2017A050506043)

作者简介:陈班,男,广州中医药大学在读硕士研究生。

通信作者:李熙灿(1970—),男,广州中医药大学教授,博士生导师,硕士。E-mail: lixican@126.com

收稿日期:2017-08-25

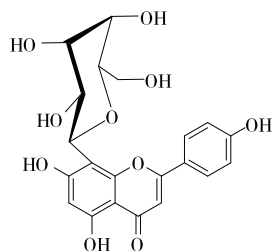


图1 牡荆素结构式

Figure 1 The structure of vitexin

氧化损伤相关疾病的防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

牡荆素(CAS:3681-93-4); HPLC $\geq$ 98%, 四川省维克奇生物科技有限公司;

Trolox(水溶性维生素 E)、BHA(丁基羟基茴香醚)、Ferrozine(菲洛嗪)、Neocuproine(新铜试剂): 分析纯, 西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;

ABTS(2'-联氨-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)、鱼精 DNA 钠盐: 分析纯, 美国 Amresco 公司;

KH₂PO₄、Na₂HPO₄、Na₂EDTA、FeCl₃、CuSO₄、H₂O₂、DMSO(二甲基亚砜)、三氯乙酸、2-硫代巴比妥酸、抗坏血酸、柠檬酸钠、乙酸铵、甲醇、乙醇: 分析纯, 广州化学试剂厂。

1.1.2 主要仪器设备

可见分光光度计: 2100 型, 上海尤尼科仪器有限公司;

电子天平: BS110S 型, 北京赛多利斯科学仪器有限公司;

超声波清洗机: SB3200D 型, 宁波新芝生物科技股份有限公司;

便携式 pH 计: YSI pH100 型, 上海维赛仪器贸易有限公司;

恒温水浴锅: DZKW 型, 北京市永光明医疗仪器厂;

电热恒温鼓风干燥器: DHG-9070A 型, 上海精宏实验设备有限公司。

1.2 方法

1.2.1 DNA 保护能力分析法 参考文献[11]修改如下, 取适量(0, 100, 150, 200, 250, 300 μ L)牡荆素溶液(2 mg/mL, DMSO 溶解)至离心管中, 挥干溶剂, 往其中加入 300 μ L 的 KH₂PO₄/Na₂HPO₄ 缓冲溶液(0.2 mol/L, pH = 7.4)和 100 μ L Na₂EDTA 溶液(0.25 mmol/L)。随后, 依次加入 50 μ L FeCl₃ 溶液(1.6 mmol/L), 75 μ L 的 H₂O₂ 溶液(16.8 mmol/L)和 50 μ L 底物 DNA 溶液(5 mg/mL 鱼精 DNA 钠盐)。再加入 75 μ L 抗坏血酸溶液(33.6 mmol/L), 补加缓冲溶液, 使反应液总体积达到 1 050 μ L, 摇匀, 将该离心管置于 50 $^{\circ}$ C 水浴中 20 min, 取出, 再加入 250 μ L 三氯乙酸溶液(100 mg/mL)和 150 μ L 2-硫代巴比妥酸溶液(50 mg/mL), 于 105 $^{\circ}$ C 烘箱中加热 15 min, 在 532 nm 处测定其吸光度值 A。试验以 Trolox 和 BHA 为阳性对照。按

式(1)计算牡荆素对 DNA 的保护率 R。

$$R = \left(1 - \frac{A}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R——DNA 保护百分率, %;

A₀——未加样品的溶液吸光度;

A——加入样品后溶液的吸光度。

1.2.2 Ferrozine 法 参考文献[11]修改如下: 取 FeCl₂ 溶液(250 μ mol/L) 0.1 mL, 加适量(0, 400, 600, 1 200, 1 600, 2 000 μ L)牡荆素(0.01 mg/mL, DMSO 溶解)溶液, 充分混合后静置 3 min, 再加入 0.8 mL 甲醇, 0.15 mL Ferrozine(500 μ mol/L)溶液, 静置 5 min 后, 在 562 nm 下测定吸光度值 A。按式(2)计算牡荆素对 Fe²⁺ 络合率 C。

$$C = \left(1 - \frac{A}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

C——Fe²⁺ 络合百分率, %;

A₀——未加样品的溶液吸光度;

A——加入样品后溶液的吸光度。

1.2.3 Fe²⁺ 络合产物 UV-Vis 光谱分析 参考文献[12]修改如下: 取样品溶液(1 mg/mL, DMSO 溶解)100 μ L, 加入 100 mg/mL FeCl₂ 溶液 300 μ L, 再加入甲醇水(1:1) 600 μ L。在反应 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 120 min 时进行 UV-Vis 光谱扫描。最后对反应液、样品液和 FeCl₂ 溶液进行颜色对比。

1.2.4 Cu²⁺ 还原法 参考文献[11]修改如下: 取 10 mmol/L CuSO₄ 溶液和 7.5 mmol/L 新铜试剂各 125 μ L 混匀, 依次加入牡荆素溶液(0.5 mg/mL, DMSO 溶解) x μ L (x = 150, 200, 250, 300, 350), 0.1 mol/L 乙酸铵缓冲液(700 - x) μ L, 混合后静置 30 min, 在 450 nm 下测吸光度值 A。按式(3)计算牡荆素对 Cu²⁺ 相对还原率 S。

$$S = \left(\frac{A - A_0}{A_{\max} - A_0}\right), \quad (3)$$

式中:

S——Cu²⁺ 的相对还原百分率, %;

A₀——未加样品液时所测吸光度;

A_{max}——一次测量内最大的吸光度;

A——加入样品液时所测吸光度。

2 结果与分析

2.1 DNA 保护能力及机制

由于 $\cdot$ OH 进攻 DNA 的脱氧核糖部分会生成 MDA 等毒性物质, 从而导致多种疾病的发生^[13-15]。因此, 抑制 MDA 的生成, 可有效保护 DNA 免受氧化损伤。通过检测 MDA 与 2-硫代巴比妥酸形成的硫代巴比妥酸反应产物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)复合物的含量, 可以检测 MDA 的存在。TBARS 在 532 nm 处有最大吸收。如果 A_{532 nm} 值降低, 则表明 MDA 的生成得到了有效抑制, DNA 在一定程度上受到保护。因此, 该模型可用来评估 DNA 氧化损伤的程度。如图 2(a)所示, 在 0~0.6 mg/mL

的浓度范围内,牡荆素的 DNA 保护能力与其浓度呈现出良好的量效关系。从表 1 可以看出,其 DNA 保护能力约为 Trolox 的 2.50 倍。这表明,牡荆素能保护 DNA 免受 $\cdot\text{OH}$ 诱导的氧化损伤。

表 1 各个检测指标下样品和阳性对照的 IC_{50} 值[†]
Table 1 The IC_{50} values of vitexin and the positive controls

检测指标	牡荆素/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	阳性对照			比值
		水溶性维生素 E/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	BHA/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	柠檬酸钠/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	
DNA 保护能力分析法	919.60±23.60 ^a	2 297.60±145.20 ^b	2 580.80±56.01 ^b	N.D.	2.50
Fe ²⁺ 络合法	9.30±1.20 ^a	N.D.	N.D.	9.60±2.80 ^a	1.03
Cu ²⁺ 还原法	421.70±29.20 ^b	350.20±86.00 ^a	414.70±134.90 ^b	N.D.	0.83

[†] IC_{50} 指被测量的拮抗剂的半抑制浓度;同行不同上标字母表示数据有显著差异($P<0.05$);比值指相应指标下水溶性维生素 E 或柠檬酸钠的 IC_{50} 与牡荆素的 IC_{50} 之比;N.D.指不需测。

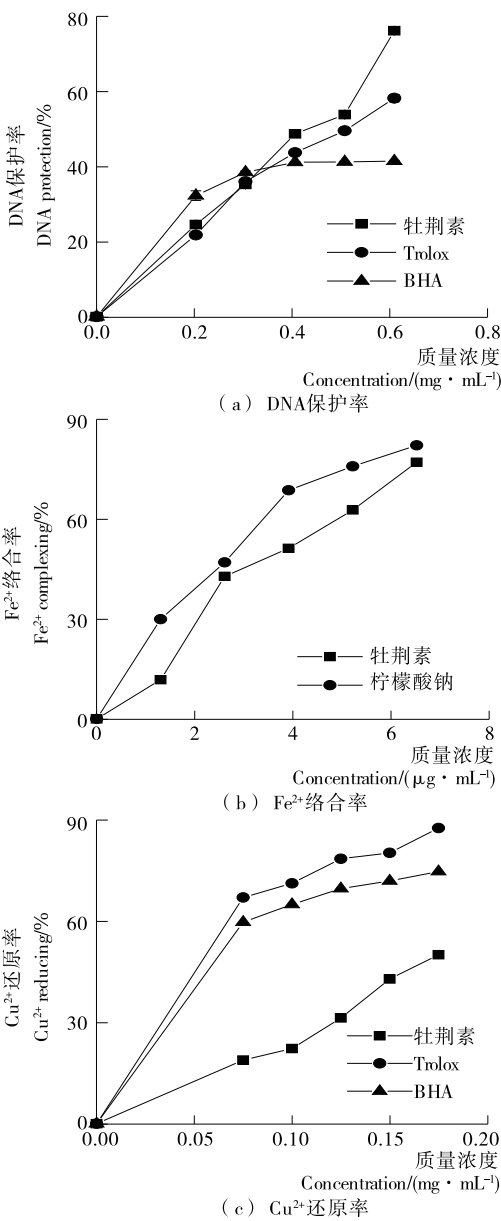


图 2 牡荆素抗氧化作用的量效关系图

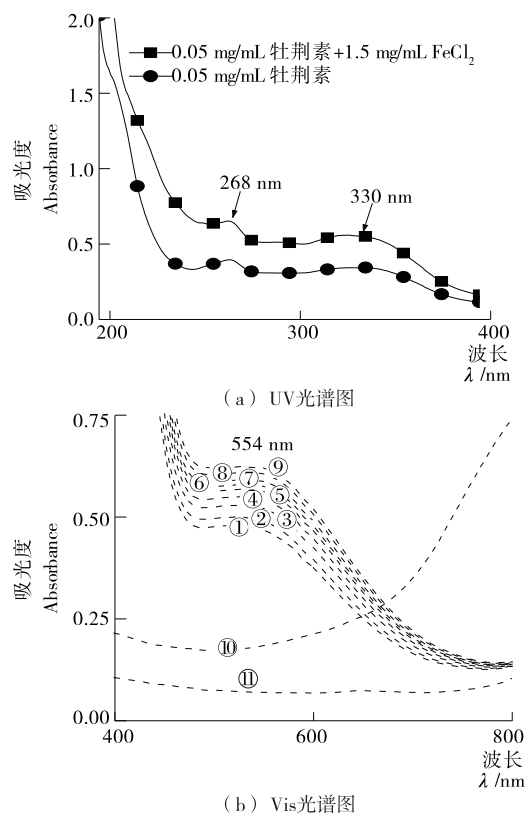
Figure 2 The dose response curves of vitexin in various antioxidant assays

2.2 Fe²⁺ 络合活性及机制

据文献[16]报道,在 H_2O_2 对酒石酸的氧化过程中, Fe^{2+} 可以极大提高反应速率,后通过顺磁共振试验(ESR)证实,在此反应体系中, $\cdot\text{OH}$ 是实际的氧化中间体。在没有金属离子存在时,DNA 能对抗浓度约 10 mmol/L 的 H_2O_2 [17],但只要皮克级的 Fe^{2+} 参与反应,就能够使 H_2O_2 转化成 $\cdot\text{OH}$,从而引起 DNA 的氧化损伤[18]。在细胞中,这种催化作用通过 Fenton 反应($\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \cdot\text{OH} + \cdot\text{OH}^-$)实现[12,19-22]。因此,络合 Fe^{2+} 可以有效地减少 $\cdot\text{OH}$ 的生成,从而保护 DNA 免受 $\cdot\text{OH}$ 诱导的氧化损伤,使细胞能健康成长甚至分化[23]。

从图 2(b)中可以看出,在 0~7 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的浓度范围内,牡荆素对 Fe^{2+} 的络合能力与其浓度呈现剂量相关性。据表 1 可知,牡荆素、柠檬酸钠的铁络合能力的 IC_{50} 值分别为 (9.3 ± 1.2) , (9.6 ± 2.8) $\mu\text{mol}/\text{L}$,二者没有显著的统计学差异,表明两者的铁络合能力相似。从图 3(a)可知,络合产物在 200~400 nm 的波长范围内,其紫外吸收强度有一定程度的增加。从图 3(b)可以看出,牡荆素在与 Fe^{2+} 混合的 60 min 与 120 min 的吸收强度很接近(线条⑧和⑨),说明该反应在 60 min 时已基本达到平衡。而在二者混合的瞬间(0 min),即在 554 nm 处生成新的吸收峰(线条①),其强度已超过 120 min 时(线条⑨)吸收强度的 50%,说明牡荆素的 Fe^{2+} 络合反应是一个快速反应。此时,牡荆素样品溶液由淡黄色变成了黄绿色,其 554 nm 处摩尔吸光系数 $\epsilon=2\ 680.74\ \text{L}/(\text{mol}\cdot\text{cm})$ 。总之,牡荆素对 Fe^{2+} 有一定的络合作用,该络合作用可能是牡荆素保护 DNA 免受氧化损伤的机制之一。

牡荆素络合 Fe^{2+} 的能力,与其分子结构的特点有关。牡荆素分子的 4-羰基和 5-羟基为共平面构型, Fe^{2+} 易在此处构成一个平面的环状结构。因此,牡荆素可能在 4-羰基-5-羟基之间存在一个 Fe^{2+} 络合位点,其络合反应式见图 4。由图 4 可知, Fe^{2+} 在 4-羰基-5-羟基之间形成了一个六元环,由于六元环的角张力最小,所以,其 Fe^{2+} 络合的片段结构是稳定的,与此前的一些报道[18,19,22,24]相吻合。综上,牡荆素的 Fe^{2+} 络合能力得益于其环状的结构。对于一些链状的脂肪酸(如十六酸)而言,则不可能与 Fe^{2+} 络合[25-26];而对于一些



①~⑨ 分别为 0.1 mg/mL 牡荆素与 30 mg/mL Fe^{2+} 络合 0.5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 120 min 后的扫描结果; ⑩ 为 0.1 mg/mL 牡荆素溶液扫描结果; ⑪ 为 30 mg/mL FeCl_2 溶液扫描结果

图 3 牡荆素与 Fe^{2+} 络合产物的 UV 光谱图及 Vis 光谱图
Figure 3 The UV-spectra and Vis-spectra of vitexin binding to Fe^{2+} complexing

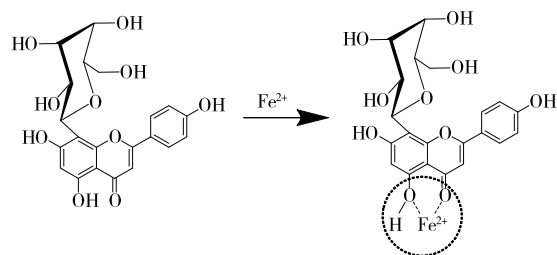


图 4 牡荆素络合 Fe^{2+} 的可能反应

Figure 4 The possible reaction of vitexin complexing with Fe^{2+}

环状的倍半萜内酯(如白术内酯^[27])而言,由于没有环外的羰基或羟基,同样不能表现出 Fe^{2+} 络合活性。这反过来印证了:牡荆素络合 Fe^{2+} 的能力,与分子的环状结构(特别是平面构型的 4-羰基-5-羟基)相关。

2.3 Cu^{2+} 还原活性及机制

由图 2(c)可知,在 0.00~0.16 mg/mL 的浓度范围内,牡荆素对 Cu^{2+} 的还原能力与其浓度呈现出良好的剂量相关性。这表明牡荆素具有一定的 Cu^{2+} 还原能力。而 Cu^{2+} 还原本质是一个电子转移的过程^[16-18],因此,在牡荆素保护 DNA 免受 $\cdot\text{OH}$ 诱导的氧化损伤的过程中,可能涉及到电子转移。

3 结论

牡荆素具有良好的保护 DNA 免受 $\cdot\text{OH}$ 诱导的氧化损伤的能力。其保护机制可能与电子转移及 Fe^{2+} 络合有关。其 Fe^{2+} 络合反应的位点,可能在 4-羰基-5-羟基之间。这些抗氧化化学机制的阐释,将推动牡荆素在 DNA 氧化损伤相关的疾病方面发挥作用。

参考文献

- [1] CADET J, WAGNER J R. DNA base damage by reactive oxygen species, oxidizing agents, and UV radiation[J]. Cold Spring Harbor Perspectives in Biology, 2013, 5(2): a12 559.
- [2] KULMS D, ZEISE E, PÖPPELMANN B, et al. DNA damage, death receptor activation and reactive oxygen species contribute to ultraviolet radiation-induced apoptosis in an essential and independent way[J]. Oncogene, 2002, 21(38): 5 844.
- [3] KARKI K, PANDE D, NEGI R, et al. An Assessment of oxidative damage and non-enzymatic antioxidants status alteration in relation to disease progression in breast diseases[J]. Med Sci (Basel), 2016, 4(4): 17.
- [4] NORISHADKAM M, ANDISHMAND S, ZAVAR REZA J, et al. Oxidative stress and DNA damage in the cord blood of preterm infants[J]. Mutat Res, 2017, 824: 20-24.
- [5] LI Xi-can, CHEN Dong-feng, MAI Ying, et al. Concordance between antioxidant activities in vitro and chemical components of Radix Astragali (Huangqi) [J]. Natural Product Research, 2012, 26(11): 1 050-1 053.
- [6] 王鑫波, 高敏, 童丽姣, 等. 山楂叶提取物中牡荆素鼠李糖苷的含量测定[J]. 中华中医药学刊, 2010, 28(10): 2 098-2 100.
- [7] JURIKOVA T, SOCHOR J, ROP O, et al. Polyphenolic profile and biological activity of Chinese hawthorn (Crataegus pinnatifida BUNGE) fruits [J]. Molecules, 2012, 17 (12): 14 490-14 509.
- [8] KANG Jie, LI Zhi-min, WU Tong, et al. Anti-oxidant capacities of flavonoid compounds isolated from acai pulp (Euterpe oleracea Mart)[J]. Food Chemistry, 2010, 122(3): 610-617.
- [9] ZHANG Xue, XU Dao-hua. Research progress of pharmacological action of vitexin[J]. China Medical Herald, 2013, 35: 41-44.
- [10] NI Qin-xue, LIU Ying-kun, GONG Ling-xiao, et al. Active components in six kinds of ground bamboo leaves and their anti-oxidant activities [J]. Chinese Traditional & Herbal Drugs, 2011, 42(11): 2 317-2 321.
- [11] LI Xi-can, MAI Wen-qiong, LI Wang, et al. A hydroxyl-scavenging assay based on DNA damage *in vitro* [J]. Analytical Biochemistry, 2013, 438(1): 29-31.
- [12] JIANG Qian, LI Xi-can, TIAN Ya-ge, et al. Lyophilized aqueous extracts of Mori Fructus and Mori Ramulus protect mesenchymal stem cells from $\cdot\text{OH}$ -treated damage: bioassay and antioxidant mechanism[J]. BMC Complementary & Alternative Medicine, 2017, 17(1): 242-252.
- [13] LI Xi-can, HU Qiu-ping, JIANG Shu-xia, et al. Flos Chrysanthemi Indici protects against hydroxyl-induced damages to DNA and MSCs via antioxidant mechanism [J]. Journal of Saudi

- Chemical Society, 2015, 19(4): 454-460.
- [14] KIWI J, LOPEZ A, NADTOCHENKO V. Mechanism and kinetics of the $\cdot$ OH-radical intervention during Fenton oxidation in the presence of a significant amount of radical Scavenger (Cl^-) [J]. Environmental Science & Technology, 2000, 34(11): 2 162-2 168.
- [15] PERRON N R, BRUMAGHIM J L. A review of the antioxidant mechanisms of polyphenol compounds related to iron binding[J]. Cell Biochemistry & Biophysics, 2009, 53(2): 75-100.
- [16] LIN Jing, LI Xi-can, LI Chen, et al. Protective effect against hydroxyl radical-induced DNA damage and antioxidant mechanism of [6]-gingerol: A Chemical Study[J]. Bulletin of the Korean Chemical Society, 2014, 35(6): 1 633-1 638.
- [17] LI Xi-can, LIU Jing-jing, LIN Jing, et al. Protective effects of dihydromyricetin against $\cdot$ OH-induced mesenchymal stem cells damage and mechanistic chemistry[J]. Molecules, 2016, 21(5): 604-616.
- [18] LI Xi-can, MAI Wen-qiong, CHEN Dong-feng. Chemical study on protective effect against hydroxyl-induced DNA damage and antioxidant mechanism of myricitrin[J]. Journal of the Chinese Chemical Society, 2014, 61: 383-391.
- [19] LI Xi-can, JIANG Qian, WANG Ting-ting, et al. Comparison of the antioxidant effects of quercitrin and isoquercitrin: understanding the role of the 6''-OH group [J]. Molecules, 2016, 21(9): 1 246-1 256.
- [20] MARINOV N M. A detailed chemical kinetic model for high temperature ethanol oxidation [J]. International Journal of Chemical Kinetics, 2015, 31(3): 183-220.
- [21] XIE Yu-lu, LI Xi-can, XU Jie-ying, et al. Two phenolic antioxidants in Suoyang, enhance viability of $\cdot$ OH-damaged mesenchymal stem cells: comparison and mechanistic chemistry [J]. Chemistry Central Journal, 2017, 11(1): 84-94.
- [22] WANG Ting-ting, ZENG He-ping, LI Xi-can, et al. In vitro studies on the antioxidant and protective effect of 2-substituted-8-hydroxyquinoline derivatives against H_2O_2 -Induced oxidative stress in BMSCs[J]. Chemical Biological Drug Design, 2010, 75(2): 214-222.
- [23] LI Xi-can, LU Han, LI Yun-rong, et al. Protective effect of sinapine against hydroxyl radical-induced damage to mesenchymal stem cells and possible mechanisms[J]. Chem. Pharm. Bull. 64, 319-325.
- [24] WANG Guang-rong, LI Xi-can, ZENG He-ping. Synthesis, antioxidation activity of (*E*)-9-*p*-Tolyl-3-[2-(8-hydroxyquinol-2-yl)vinyl]-carbazole and (*E*)-9-(*p*-Anisyl)-3-[2-(8-hydroxyquinol-2-yl)vinyl]-carbazole and their induction proliferation of mesenchymal stem cells[J]. Acta Chimica Sinica, 2009, 67(9): 974-982.
- [25] CHEN Dong-feng, LI Xi-can, XU Zhi-wei, et al. Hexadecanoic acid from Buzhong Yiqi decoction induced proliferation of bone marrow mesenchymal stem cells [J]. Journal of Medicinal Food, 2010, 13(4): 967-970.
- [26] LI Xi-can, HAN Wei-juan, MAI Wen-qiong, et al. Antioxidant activity and mechanism of tetrahydroamentoflavone in vitro[J]. Natural Product Communications, 2013, 8(6): 787-789.
- [27] LI Xi-can, WEI Gang, WANG Xiao-zhen, et al. Targeting of the Shh pathway by atractylenolides promotes chondrogenic differentiation of mesenchymal stem cells[J]. Biological & Pharmaceutical Bulletin, 2012, 35(8): 1 328-1 335.

(上接第 48 页)

因此,电饭煲烹饪曲线设计时可适当提高吸水阶段的起始温度,并缩短沸腾时间,有利于米粒均匀充分地吸水受热糊化,从而改善米饭的适口性品质。

参考文献

- [1] 周显青, 王学锋, 张玉荣, 等. 米饭食味品质评价技术进展[J]. 粮油食品科技, 2013, 21(1): 56-61.
- [2] 张强. 方便快餐米饭开发与品质控制研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2014: 17-18.
- [3] 李欢欢. 微压蒸煮米饭工艺设计优化及米饭品质研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [4] PEREZ J H, TANAKA F, UCHINO T. Comparative 3D simulation on water absorption and hygroscopic swelling in japonica rice grains under various isothermal soaking conditions[J]. Food Research International, 2011, 44(9): 2 615-2 623.
- [5] LEELAYUTHSOONTORN P, THIPAYARAT A. Textural and morphological changes of Jasmine rice under various elevated cooking conditions[J]. Food Chemistry, 2006, 96(4): 606-613.
- [6] BRIFFAZ A, BOHUON P, MÉOT J M, et al. Modelling of water transport and swelling associated with starch gelatinization during rice cooking[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 121: 143-151.
- [7] LIN Shun-shun, ZHANG Xiao-ming, SONG Shi-qing, et al. Tobacco alkaloids reduction by casings added/enzymatic hydrolysis treatments assessed through PLSR analysis[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2016, 75: 27-34.
- [8] BIZZANI M, FLORES D W M, COLNAGO L A, et al. Non-invasive spectroscopic methods to estimate orange firmness, peel thickness, and total pectin content[J]. Microchemical Journal, 2017, 133: 168-174.
- [9] 李婷, 季宇寒, 张漫, 等. 基于 PLSR 和 BPNN 方法的番茄光合速率预测比较[J]. 农业工程学报, 2015, 31(S2): 222-229.
- [10] TAMURA M, NAGAI T, HIDAKA Y, et al. Changes in histological tissue structure and textural characteristics of rice grain during cooking process[J]. Food Structure, 2014, 1(2): 164-170.
- [11] HORIGANE A K, SUZUKI K, YOSHIDA M. Moisture distribution in rice grains used for sake brewing analyzed by magnetic resonance imaging[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 60(1): 193-201.
- [12] 李维强. 大米食味性影响因素探讨[J]. 粮食加工, 2012, 37(3): 28-31.
- [13] 徐侃. 冷冻米饭生产工艺及其品质特性的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2011: 32-33.
- [14] MOHORIĆ A, VERGELDT F, GERKEMA E, et al. Magnetic resonance imaging of single rice kernels during cooking [J]. Journal of Magnetic Resonance, 2004, 171(1): 157-162.