

猪宰后肌肉 SOD 与 MDA 的变化及其对肉质特性的影响

李 华¹, 曾勇庆^{1*}, 魏述东², 陈其美¹, 宋一萍¹, 钱 源¹, 董 彬¹, 崔志锋¹

(1. 山东农业大学动物科技学院, 泰安 271018; 2. 山东省莱芜市畜牧兽医技术推广中心, 莱芜 271100)

摘 要: 以莱芜猪(24 头)、鲁莱黑猪(24 头)和大约克夏猪(12 头)共 60 头去势公猪为试验对象, 研究宰后肌肉 SOD 活性与 MDA 含量的变化及其对肉质特性的影响。结果表明: ①猪宰后肌肉随贮存时间的延长, 肌肉 SOD 活性逐渐下降, MDA 含量则逐渐上升; 不同品种猪间的 SOD 活性和 MDA 含量, 除 MDA_{5d} 差异不显著外 ($P > 0.05$), 其余均具有极显著的差异 ($P < 0.01$), 并且 SOD 活性始终是莱芜猪 > 鲁莱黑猪 > 大约克夏猪, MDA 含量则是莱芜猪 < 鲁莱黑猪 < 大约克夏猪。②在肉质特性方面, 不同品种猪间的肉色、滴水损失、系水率、烹饪损失、肌内脂肪(IMF)和多不饱和脂肪酸(PUFA)含量具有极显著的差异 ($P < 0.01$), 与大约克夏猪相比, 莱芜猪和鲁莱黑猪肌肉具有鲜红的肉色、良好的持水性能、较丰富的 IMF 含量和较低的 PUFA 含量。③猪宰后肌肉 SOD、MDA 与持水性能、肉色、嫩度等重要肉质性状间存在不同程度的显著相关, 证明 SOD 活性越高和 MDA 含量越低的肌肉, 其系水力越高、肉色越鲜艳, 并且肉质越细嫩。研究结果提示: 猪宰后肌肉 SOD 通过消除或降低氧自由基而抑制脂质氧化, 参与调控了肉质特性的形成。

关键词: 猪; SOD 活性; MDA 含量; 脂质氧化; 肉质

中图分类号: S828

文献标识码: A

文章编号: 0366-6964(2010)03-0257-05

Changes of Superoxide Dismutase Activity and Malondialdehyde Level in Postmortem Muscle and Their Association with Meat Quality in Pigs

LI Hua¹, ZENG Yong-qing^{1*}, WEI Shu-dong², CHEN Qi-mei¹, SONG Yi-ping¹,
QIAN Yuan¹, DONG Bin¹, CUI Zhi-feng¹

(1. College of Animal Science and Technology, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. Laiwu Center for Animal Science and Veterinary Technology Promotion, Laiwu 271100, China)

Abstract: Laiwu ($n=24$), Lulai Black ($n=24$) and Yorkshire ($n=12$) castrated boars were used to analyze the changes of superoxide dismutase (SOD) activity and malondialdehyde (MDA) level in postmortem muscle and their association with meat quality. The results showed as follows: ① As storage prolonging, SOD activity in postmortem muscle tended to decrease, but MDA level tended to increase. The breeds had significant effects on SOD and MDA ($P < 0.01$), except for MDA_{5d} ($P > 0.05$). For different pig breeds, the order of SOD activity was Laiwu > Lulai Black > Yorkshire, but MDA level was Laiwu < Lulai Black < Yorkshire. ② For meat quality, different breeds had significant effects on meat color, drip loss, water holding percentage, cooking loss, intramuscular fat (IMF), polyunsaturated fatty acids (PUFA) ($P < 0.01$). Compared with Yorkshire, Laiwu and Lulai Black pigs were bright red in meat color, higher in water holding capacity (WBC) and content of IMF, but lower in content of PUFA. ③ SOD activity and MDA level in postmortem muscle, to some extent, were highly correlated to WBC, meat color and shear force. It proved that the muscle with higher SOD activity and the lower MDA level had the

收稿日期: 2009-03-06

基金项目: 国家高新技术研究发展计划(863)重点项目(2008AA101008); 山东省农业良种工程重大项目(2009LZ012); 国家生猪现代产业技术体系的研究与建立项目; 山东省自然科学基金项目(Y2008D32)

作者简介: 李 华(1982-), 男, 山东沂源人, 硕士, 主要从事动物遗传育种学研究, E-mail: lihua20021794@126.com

* 通讯作者: 曾勇庆, E-mail: yqzeng@sdau.edu.cn

better meat color, WBC and tenderness. It implied that SOD decided the characters of meat quality by quenching oxygen free radicals and inhibiting lipid oxidation in muscle.

Key words: pigs; SOD activity; MDA level; lipid oxidation; meat quality

猪肉的质量及其调控近年来受到猪肉生产者和消费者的广泛关注,其重要性逐渐得到提高。现代肉质概念由丹麦学者 Anderson 归纳为五种属性,其中肉品的食用品质如色泽、风味、嫩度和多汁性为影响猪肉消费的重要因素,技术质量则主要由肉的系水力、抗氧化能力等构成^[1]。肌肉丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量和超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性在很大程度上反映出肉的食用品质及技术质量。MDA 含量作为肉类食品在贮藏过程中氧化变质程度和安全性的指标,在西方国家普遍使用,常用于生肉鲜度测定。肌肉在货架期的氧化以脂质氧化为主,自由基对肌肉中的多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA)具有很高的亲和力,可引发脂质氧化,形成不稳定的氢过氧化物(ROOH),并迅速降解成 MDA 等物质^[2]。宰后肌肉的脂质氧化速度和程度取决于动物机体的抗氧化能力,SOD 可以阻止脂质氧化反应的进行,改善肉质,延长肉食品的货架期^[2-3]。动物屠宰后,由于体内防护性抗氧化剂如 SOD 等活性的下降,致使不饱和脂肪酸被迅速氧化,造成正常生物膜结构和功能的破坏,导致肉品滴水损失的增加^[4]。已有的研究表明:肌肉 MDA 含量和 SOD 活性与品种、性别、肌肉肌内脂肪(Intramuscular fat, IMF)、PUFA 含量、蛋白质碱性基团、肌肉贮存时间等因素有关^[5-8],并在很大程度上影响肉品的系水力^[4, 9]、嫩度^[10]等食用品质和技术质量。

莱芜猪是我国优良的地方猪种,鲁莱黑猪是在莱芜猪基础上培育而成(含 50% 大约克夏猪血缘),研究表明,莱芜猪具有肉质细嫩、色泽鲜艳、系水力强、肉味香浓等优良种质特性^[11-12],是当前生产优质肉猪应予重视的宝贵种质。但是长期以来对于地方猪种良好的食用质量和技术质量缺乏深入的研究。为此,本文以莱芜猪、鲁莱黑猪和大约克夏猪为研究对象,研究宰后肌肉 SOD 活性和 MDA 含量的变化及其对肉质特性的影响,旨在探索地方猪种优良肉质特性的形成和调控机制,为地方猪种资源的开发利用和优质猪肉的生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验猪分组

以莱芜猪(24 头)、鲁莱黑猪(24 头)和大约克夏

猪(12 头)去势公猪为试验对象,为使测定结果具有可比性,3 个品种的试验猪是在同样的饲养管理条件下由 25 kg 饲喂至国际常采用的 114 kg 体质量,考虑到莱芜猪和鲁莱黑猪成熟较早,因此,试验设计对莱芜猪加设 80 kg 体质量组,对鲁莱黑猪则加设 90 kg 体质量组。在饲喂至相应体质量时,每组均屠宰 12 头,共 60 头试验猪。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 取样及肉样处理 试验猪屠宰后 1 h 内,在胸腰椎结合处分离背最长肌,于胸段背最长肌取样 50 g 左右,0~4 °C 保存,每隔 24 h 取样 2~5 g,测定 SOD 活性和 MDA 含量;取样 400 g 左右在 0~4 °C 保存 24 h,测定肉色、系水率、烹饪损失、拿破率、滴水损失、嫩度;取样 50 g 左右匀浆,-20 °C 保存,用于 IMF、PUFA 含量测定。腰段背最长肌在 15 °C 保存 24 h 后,转移到 0~4 °C 保存 48 h,用于嫩度测定。

1.2.2 SOD 活性与 MDA 含量测定^[13] 用南京建成生物工程研究所试剂盒测定宰后 1、2、3、5 d 的肌肉 SOD 活性和 MDA 含量。SOD 活性测定是通过黄嘌呤及黄嘌呤氧化酶反应系统产生氧自由基,自由基氧化羟胺形成亚硝酸盐,在显色剂的作用下呈紫红色,用分光光度计测其吸光度。MDA 含量测定是通过其与硫代巴比妥酸(TBA)缩合形成红色产物,在 532 nm 处有最大吸收峰,用分光光度计测其吸光度。

1.2.3 肉质性状测定^[11,14-16] 肌肉肉色是对照美制的 NPPC 比色板(由 1 分的灰白肉色至 5 分的暗红肉色 5 级分制)进行评定。肌肉系水力的测定按统一方法执行,其中,滴水损失采用吊挂处理法测定;系水率采用压力法测定;烹饪损失采用蒸煮法测定;拿破率采用腌制和加热处理法测定,取 100 g 肉样切成 1 cm³ 大小的肉丁,与 20 g 腌制液(含 12% 的 NaCl 和 0.07% 的 NaNO₂)混合,在 4 °C 条件下腌制 24 h,然后进行 10 min 沸水浴,水浴后的样本静置 2.5 h 任渗出液排出后再称重测定。嫩度采用剪切测定法,测定前肉样经标准化处理,用 C-LM3 型肌肉嫩度计测量肌肉的剪切值。IMF 含量采用索氏醚浸提法测定。PUFA 含量用气相色谱法测定。

1.3 结果统计分析

试验数据运用 SAS(8.0)软件的 GLM 程序进行统计分析,对不同品种猪宰后肌肉的 SOD 活性、MDA 含量及肉质性状进行最小二乘分析,分析模型: $Y = \mu +$

品种效应+随机残差,其中, Y 为表型观测值, μ 为群体均值;运用 PROC CORR 程序对肌肉 SOD 活性、MDA 含量与肉质性状间进行相关性分析。

2 结 果

2.1 不同品种猪宰后肌肉 SOD 活性和 MDA 含量

不同品种猪宰后肌肉 SOD 活性和 MDA 含量测定结果见表 1。由表可见,不同品种猪宰后肌肉在 0~4 °C 保存,随保存时间的延长,肌肉 SOD 活性逐渐下降,在第 5 天时达到最低值。MDA 含量则呈逐渐上升趋势,并且是由保存第 3 天至第 5 天,其数值的升高最为明显。

不同品种猪间宰后各保存时间所测定的 SOD

活性和 MDA 含量,除 MDA_{5 d} 差异不显著外($P>0.05$),其余均具有极显著的差异($P<0.01$)。不同品种猪 114 kg 屠宰后各保存时间所测定的肌肉 SOD 活性和 MDA 含量的变化较为规律,其中,SOD 活性总体上表现为莱芜猪>鲁莱黑猪>大约克夏猪,MDA 含量则表现为莱芜猪<鲁莱黑猪<大约克夏猪。研究结果表明,地方猪种莱芜猪与引进猪种大约克夏猪相比,屠宰后肌肉中始终保持较高的 SOD 活性,能够有效遏制肌肉中的脂质氧化。

体质量间比较(表 1),大体质量的莱芜猪和鲁莱黑猪(114 kg)分别与大体质量的莱芜猪(80 kg)和鲁莱黑猪(90 kg)相比,总体上表现出 SOD 活性较高,而 MDA 含量则相应较低的变化趋势。

表 1 不同品种猪宰后肌肉 SOD 活性和 MDA 含量

Table 1 SOD activity and MDA content in postmortem muscle of different pig breeds

品种 Breed	SOD 活性/(U · mg ⁻¹ protein)				MDA 含量/(nmol · mg ⁻¹ protein)			
	SOD activity				MDA content			
	SOD _{1 d}	SOD _{2 d}	SOD _{3 d}	SOD _{5 d}	MDA _{1 d}	MDA _{2 d}	MDA _{3 d}	MDA _{5 d}
114 kg Laiwu	17.34±0.71 ^a	13.86±0.56 ^a	10.95±0.46 ^a	6.87±0.27 ^a	0.26±0.01 ^c	0.32±0.02 ^c	0.50±0.02 ^c	0.92±0.03
114 kg Lulai	15.93±0.74 ^{ab}	12.12±0.58 ^b	8.59±0.48 ^{bc}	5.42±0.29 ^b	0.26±0.01 ^c	0.41±0.02 ^b	0.58±0.02 ^b	0.97±0.02
114 kg Yorkshire	13.56±0.74 ^c	10.27±0.59 ^c	7.71±0.47 ^c	4.51±0.28 ^c	0.34±0.01 ^a	0.45±0.01 ^a	0.64±0.01 ^a	1.03±0.01
80 kg Laiwu	16.68±0.71 ^{ab}	12.90±0.56 ^{ab}	9.54±0.46 ^b	6.45±0.27 ^a	0.27±0.01 ^{bc}	0.35±0.01 ^c	0.53±0.02 ^c	0.94±0.02
90 kg Lulai	15.15±0.77 ^{bc}	11.69±0.61 ^{bc}	8.60±0.50 ^{bc}	4.77±0.30 ^{bc}	0.29±0.01 ^b	0.43±0.02 ^{ab}	0.62±0.02 ^{ab}	0.96±0.02
F value	4.09 ^{**}	5.54 ^{**}	6.98 ^{**}	13.32 ^{**}	11.70 ^{**}	26.96 ^{**}	13.24 ^{**}	1.75 ^{ns}

表中数值为最小二乘均值±标准误;ns. 表示差异不显著($P>0.05$);*. 表示差异显著($P<0.05$);**. 表示差异极显著($P<0.01$)。同一列各平均数间具有不同标记字母的表示差异显著($P<0.05$)。Laiwu. 莱芜猪;Lulai. 鲁莱黑猪;Yorkshire. 大约克夏猪。下表同

The data are expressed as least square mean±standard error. ns. $P>0.05$; *. $P<0.05$; **. $P<0.01$. Values with the different superscripts within the same column differ significantly ($P<0.05$). The same as below

2.2 不同品种猪的肉质特性

不同品种猪的肉质特性比较结果表明(表 2),除肌肉剪切值(嫩度)和拿破率无显著差异外($P>0.05$),其余所测肉质性状均具有极显著的差异($P<0.01$)。总体上,莱芜猪的肉质特性明显优于大约克夏猪,其中肉色评分、滴水损失、系水率、烹饪损失、IMF 和 PUFA 含量表现为差异显著($P<$

0.05)。鲁莱黑猪也表现出良好的肉质特性,其中滴水损失、系水率、IMF 和 PUFA 含量与大约克夏猪相比具有显著差异($P<0.05$)。莱芜猪与鲁莱黑猪相比,肌肉的滴水损失、系水率、烹饪损失和 IMF 含量存在显著差异($P<0.05$)。研究结果表明,莱芜猪具有肉色鲜艳、系水力强和肌肉脂肪沉积丰富等优良肉质特性。

表 2 不同品种猪的肉质特性

Table 2 Meat quality properties of different pig breeds

品种 Breed	MC	DL/%	WHP/%	CL/%	NY/%	SF/N	IMF/%	PUFA/%
114 kg Laiwu	2.83±0.15 ^{ab}	0.69±0.30 ^c	80.18±1.26 ^a	16.83±1.05 ^c	73.19±1.65	37.55±1.25	12.78±1.02 ^a	5.63±0.07 ^b
114 kg Lulai	2.50±0.16 ^{bc}	1.81±0.31 ^b	73.76±1.32 ^b	26.85±1.10 ^{ab}	74.55±1.72	38.95±1.31	7.27±1.26 ^b	5.61±0.04 ^b
114 kg Yorkshire	2.18±0.16 ^c	2.87±0.32 ^a	67.88±1.35 ^c	29.57±1.11 ^a	71.04±1.71	37.49±1.32	1.15±0.07 ^c	9.72±0.03 ^a
80 kg Laiwu	3.04±0.15 ^{ab}	0.96±0.30 ^{bc}	81.55±1.26 ^a	17.81±1.05 ^c	71.59±1.65	34.80±1.25	10.45±0.97 ^a	5.34±0.04 ^c
90 kg Lulai	3.15±0.17 ^a	1.24±0.33 ^{bc}	74.59±1.38 ^b	25.98±1.15 ^b	69.13±1.80	38.23±1.37	7.15±1.21 ^b	5.34±0.02 ^c
F value	6.29 ^{**}	7.82 ^{**}	18.01 ^{**}	28.42 ^{**}	1.41 ^{ns}	1.52 ^{ns}	18.09 ^{**}	94.03 ^{**}

MC. 肉色;DL. 滴水损失;WHP. 系水率;CL. 烹饪损失;SF. 剪切值;NY. 拿破率;IMF. 肌肉脂肪;PUFA. 多不饱和脂肪酸。下同

MC. Meat color score; DL. Drip loss; WHP. Water holding percentage; CL. Cooking loss; SF. Shear force; NY. Napole yield; IMF. Intramuscular fat; PUFA. Polyunsaturated fatty acids. The same as below

2.3 肌肉 SOD 活性、MDA 含量与肉质性状的相关分析

肌肉 SOD 活性、MDA 含量与肉质性状的相关性分析表明(表 3),肌肉 SOD 活性除与拿破率相关不显著外($P>0.05$),分别与滴水损失、烹饪损失、PUFA($P<0.01$)和剪切值($P<0.05$)呈显著的负

相关,与肉色、系水率($P<0.01$)和 IMF($P<0.05$)呈显著正相关。

肌肉 MDA 含量与肉色、拿破率($P<0.05$)和系水率($P<0.01$)呈显著负相关,与滴水损失($P<0.05$)、烹饪损失、IMF 和 PUFA($P<0.01$)呈显著的正相关,与剪切值相关不显著($P>0.05$)。

表 3 肌肉 SOD 活性、MDA 含量与肉质性状的相关分析

Table 3 Correlation analysis between SOD activity, MDA content and meat quality properties

	MC	DL	WHP	CL	NY	SF	IMF	PUFA
SOD	0.35**	-0.46**	0.48**	-0.46**	-0.11	-0.22*	0.25*	-0.63**
MDA	-0.30*	0.26*	-0.49**	0.63**	-0.25*	0.15	0.45**	0.78**

3 讨论

3.1 品种因素对猪宰后肌肉抗氧化性能的影响

商品肉猪屠宰后,其肉品在加工、贮存、运输和销售等过程中,机体代谢会产生氧自由基,从而引发脂质过氧化作用,形成脂质过氧化物,并进一步降解成 MDA 等产物。MDA 是一种致癌和致突变的物质,它的存在会对食品的安全性构成威胁^[2]。SOD 可以清除自由基,阻止脂质氧化反应的进行。但是宰后肌肉随着 SOD 活性的降低,肌肉组织抗氧化平衡体系被破坏,促使肌肉组织内产生大量氧自由基,引发 MDA 的大量产生。由此可见,选择和培育高 SOD 活性的猪种资源,对于提高肉类食品的质量和安全性具有十分重要的意义。

本研究通过对莱芜猪、鲁莱黑猪和大约克夏猪的研究,揭示出随贮存时间的延长,肌肉中的 SOD 活性逐渐减弱,MDA 的含量则逐渐增加。在贮存到第 5 天时肌肉氧化程度达到最高峰,从而体现出肌肉食品质量最差。有研究认为在猪屠宰后 4℃ 贮存 1~5 d 的肌肉 MDA 含量变化总体上呈持续上升趋势^[6,8],本研究结果与其基本一致。Hernandez 等^[5]研究了 Pietrain、Landrace、Large White、Iberian、Iberian × Duroc 5 个猪种肌肉中抗氧化酶的活性,结果表明 SOD 在品种间差异较大。本研究结果证明了品种间的差异,莱芜猪肌肉抗氧化能力明显优于大约克夏猪,宰后肌肉含有较高活性的 SOD,在加工贮运过程中能有效防止肌肉氧化败坏,这充分说明在开发优质安全肉类食品方面,地方猪种具有独特的资源优势。

3.2 肌肉 SOD 活性、MDA 含量变化与肉质特性的关系

本研究表明,猪宰后肌肉 SOD 活性和 MDA 含

量与持水性能、肉色、嫩度等重要肉质性状间存在不同程度的显著相关,证明 SOD 活性越高、MDA 含量越低的肌肉,其系水力越高、肉色越鲜艳,并且肉质越细嫩。动物宰后肌肉成熟过程中,机体代谢所产生的氧自由基会受到 SOD 清除能力的限制而产生过剩,从而使生物膜中 PUFA 等生物大分子发生过氧化反应而出现交链或断裂,导致细胞结构和功能的破坏^[4];过氧化产物 MDA 等对膜的流动性、交叉联结、结构功能等都会带来不利影响,导致膜的孔隙扩大,通透性增加,细胞脆性增加,从而使细胞内水分易于渗出,表现出肌肉滴水损失和烹饪损失增加,系水率和拿破率降低的肉质特性。

宰后肌肉颜色的形成很大程度上取决于肌肉中肌红蛋白的含量和其化学形态,肌红蛋白(Mb)、氧合肌红蛋白(MbO₂)、高铁肌红蛋白(MetMb)3 种形态的相互转化,可导致肉色变化。宰后肌肉贮存期间,氧自由基可能会攻击肌红蛋白中卟啉环上铁离子外层电子的跃变,从而破坏了高铁肌红蛋白还原酶(MetMbase),血红素铁从亚铁(Fe²⁺)被氧化为正铁(Fe³⁺)产生褐色,脂质过氧化产物的增加也会加速鲜红色的氧合血红蛋白氧化为棕色的高铁血红蛋白,因而肉色也能变为暗褐色^[17-19];此外,滴水损失增加会使肉色变得更差,因为肌肉表面水分渗出多,肌肉收缩,光线被肌肉吸收的少而反射的多,而使肌肉呈苍白色^[20-21]。

Rowe 等^[10]研究表明,氧化能可逆地抑制宰后肌肉中蛋白质降解酶及其它蛋白质水解酶的活性,降低肌肉嫩度;而肌肉的 SOD 和 MDA 等指标,可以评价肉品的抗氧化能力。本研究对莱芜猪、鲁莱黑猪和大约克夏猪的研究结果进一步证实了这种关系的存在,即宰后肌肉 SOD 活性越高和 MDA 含量越低的肌肉,

肌肉的抗氧化能力越强,其肉质越为细嫩。

通常,肉品在贮存和加工过程中,其中的脂类尤其是 PUFA 含量较高的脂类易氧化酸败,从而对肉的口感风味构成不利的影响^[16]。本研究发现,地方猪种莱芜猪肌肉脂肪沉积明显高于引进猪种大约克夏猪,而脂肪中的 PUFA 含量却明显低于大约克夏猪。丰富的肌肉脂肪一方面使肉的质地和坚实性得到改善,另一方面也相应提高了肌肉的系水力、嫩度及其多汁性^[11];较低的 PUFA 含量又直接降低了过剩的氧自由基对其攻击而形成 MDA 等过氧化产物的可能^[2]。以上关联分析的结果,也许可作为地方猪种莱芜猪优良肉质特性形成的内在本质。

4 结 论

猪宰后肌肉随贮存时间的延长,肌肉 SOD 活性逐渐下降,MDA 含量逐渐上升;但地方猪种莱芜猪宰后肌肉的抗氧化性能始终高于大约克夏猪。肌肉的抗氧化性能越强,其系水力越高、肉色越鲜艳、肉质越细嫩。研究表明,猪宰后肌肉 SOD 通过抑制脂质氧化,参与调控了肉质特性的形成。

致谢:本研究在试验猪屠宰和肉质性状测定中,得到安徽农业大学张伟力教授、南京农业大学王林云教授、东北农业大学陈润生教授、中国农业大学陈清明教授、扬州大学动物科技学院经荣斌教授的现场指导,在此表示诚挚的感谢!

参考文献:

- [1] ANDERSON H J. What is pork quality[C]//In: Quality of meat and fat in pigs as affected by genetic and nutrition. EAAP Publication, 2000, 100:15-16.
- [2] FERNANDEZ J, PEREZ-ALVAREZ J A, FERNANDEZ-LOPEZ J A. Thiobarbituric acid test for monitoring lipid oxidation in meat[J]. *Food Chemistry*, 1997, 59(3): 345-353.
- [3] CARINE D, ANNE V C, NATHALIE A, et al. Proliferation and wound healing of vascular cells trigger the generation of extracellular reactive oxygen species and LDL oxidation[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2003, 35(12): 1589-1598.
- [4] 杨明升,刘红林,王林云.导致猪肉系水力下降的主要因素及防控措施[J]. *畜牧与兽医*, 2002, 34(7): 14-15.
- [5] HERNANDEZ P, ZOMENO L, ARINO B, et al. Antioxidant, lipolytic and proteolytic enzyme activities in pork meat from different genotypes[J]. *Meat Science*, 2004, 66(3): 525-529.
- [6] 霍晓娜,李兴民.猪腿肉脂肪酸组成及脂肪氧化的研究[J]. *食品科学*, 2006, 27(1): 101-103.
- [7] SOTIRIOS K, MICHAEL H G. Antioxidant properties of annatto carotenoids [J]. *Food Chemistry*, 2003, 83(4): 523-529.
- [8] 刘显军,陈 静,边连全,等.不同品种猪肌肉中 R 值和丙二醛含量变化趋势的比较研究[J]. *西北农业学报*, 2007, 16(5): 7-10.
- [9] 陈代文,张克英,胡祖禹.猪肉品质特征的形成原理 [J]. *四川农业大学学报*, 2002, 20(1): 60-66.
- [10] ROWE L J, MADDOCK K P, LONERGAN S M, et al. Oxidative environments decrease tenderization of beef steaks through inactivation of μ -calpain [J]. *Journal of Animal Science*, 2004, 82: 3254-3266.
- [11] 曾勇庆,王根林,魏述东,等.莱芜猪肌肉胶原蛋白的发育性变化及其与肉质的相关性分析[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(2): 619-624.
- [12] 曾勇庆,孙玉民,张万福,等.莱芜猪肌肉组织学特性与肉质关系的研究[J]. *畜牧兽医学报*, 1998, 29(6): 486-492.
- [13] 刘永祥,刘艳丽,黄炎坤,等.日粮中添加天门冬氨酸镁对肉仔鸡肝脏和腿肌脂质过氧化状态的影响 [J]. *畜牧兽医学报*, 2008, 39(10): 1349-1354.
- [14] 曾勇庆,王根林,魏述东,等.含不同比例莱芜猪血缘杂交猪胴体品质及肉质特性的研究[J]. *遗传*, 2005, 27(1): 65-69.
- [15] 张伟力.猪肉系水力测定方法[J]. *养猪*, 2002, (3): 25-26.
- [16] 杨海玲,曾勇庆,魏述东,等.莱芜猪肌肉脂肪酸组成的发育性变化及其对肉质特性的影响[J]. *中国畜牧杂志*, 2006, 42(5): 18-21.
- [17] 占秀安,许梓荣.不同硒源对肥育猪鲜肉肉色和滴水损失的影响[J]. *畜牧兽医学报*, 2004, 35(5): 505-509.
- [18] 王 玮,汤祥明,金邦荃.高铁肌红蛋白含量和高铁肌红蛋白还原酶活性与冷鲜肉肉色稳定性关系的研究[J]. *食品科学*, 2008, 29(7): 94-97.
- [19] SATOH Y, SHIKAMA K. Autoxidation of oxymyoglobin. A nucleophilic displacement mechanism[J]. *Biology Science*, 1981, 256: 10272-10275.
- [20] WALLACE W J, HOUTCHENS R A, MAXWELL J C, et al. Mechanism of autooxidation for hemoglobins and myoglobins. Promotion of superoxide production by protons and anions[J]. *Biology Science*, 1982, 257: 4966-4977.
- [21] SCHAEFER D M, LIU Q, FAUSTMAN C. Supra-nutritional administration of vitamins E and C improves oxidative stability of beef [J]. *Nutrition*, 1995, 125: 1792-1798.