不同宰前断水时间对肉鸭食用品质及能量代谢的影响

鲁耀彬[1,2]，吴文锦[1]，李新[1]，熊光权[1]，王海滨[2]，乔宇[1]，王俊[1]，廖李[1]，汪兰[1]
（1.湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所/湖北省农业科技创新中心农产品加工研究分中心,湖北武汉 430064）（2.武汉轻工大学食品科学与工程学院，湖北武汉 430023）

摘要：本研究以38日龄肉鸭的胸肉为研究对象，研究了不同宰前断水时间（0 h、1 h、3 h、5 h）对肉鸭食用品质及能量代谢相关限速酶活力与产物的影响，包括pHi（初始pH值）、pHu（最终pH值）、色泽、蒸煮损失率、加压失水率、剪切力、肌糖原、乳酸、ATP、ADP、AMP、IMP、己糖激酶、丙酮酸激酶、肌酸激酶、乳酸脱氢酶等，并对结果进行相关性分析。研究结果表明，断水处理过的肉鸭，其鸭胸肉的丙酮酸激酶活力与ATP含量呈显著负相关；己糖激酶活力与肌糖原含量有良好的正相关性；5 h断水组的IMP水平最低，ATP含量也维持在较高水准，肌糖原含量最高；经过5 h断水后的肉鸭，其鸭胸肉的pHi显著低于3 h内断水组，使其肉质下降。综上可得，对肉鸭进行不超过5 h的短时间宰前断水处理，其食用品质、能量代谢指标处于相对较好的水平，易最大程度缓解应激，并保持肉质最佳。

关键词：肉鸭；断水；食用品质；能量代谢
文章篇号：1673-9078(2015)7-183-190 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.7.029

Effect of Pre-slaughter Water Deprivation Time on Quality and Energy Metabolism of Duck Meat

LU Yao-bin[1,2], WU Wen-jin[1], LI Xin[1], XIONG Guang-quan[1], WANG Hai-bin[2], QIAO Yu[1], WANG Jun[1], LIAO Li[1], WANG Lan[1]
(1.Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear-agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences/ Farm Products Processing Research Sub-center of Hubei Innovation Center of Agriculture Science and Technology, Wuhan 430064, China) (2.College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: To determine the effect of pre-slaughter water deprivation for different periods (0, 1, 3, and 5 h) on meat quality and energy metabolism, the initial pH (pHi), final pH (pHu), color, cooking loss, pressurized water-holding capacity, and shear force values were determined in this study. In addition, the muscle glycogen, lactic acid, adenosine triphosphate (ATP), adenosine diphosphate (ADP), adenosine monophosphate (AMP), inosine monophosphate (IMP), hexokinase, pyruvate kinase, creatine kinase, and lactate dehydrogenase levels of 38-day-old ducks were analyzed. Possible correlations between results were analyzed. The results revealed a negative correlation between pyruvate kinase activity and ATP content in the duck meat. The hexokinase activity showed a pronounced positive correlation with muscle glycogen content. The 5-h water deprivation group showed the highest muscle glycogen content, lowest IMP content, while ATP content remained at a high level. The pHi of the 5-h water deprivation group was significantly lower than that of the 3-h water deprivation group, which may result in deterioration of meat quality. It was concluded from the results that depriving the ducks of water for no more than 5 h before slaughter helped preserve the meat quality and energy metabolism parameters at a good level and minimized stress in the birds.

Key words: duck; water deprivation; meat quality; energy metabolism

收稿日期：2014-10-31
基金项目：公益性行业（农业）科研专项经费项目（201303083）
作者简介：鲁耀彬（1990-），男，硕士研究生，研究方向为肉禽深加工机理与技术
通讯作者：汪兰（1981-），女，博士，副研究员，研究方向为农产品加工和天然产物化学

宰前断水是指屠宰前让动物停止进水，并在在相对安静的环境中休息以缓解运输等应激的宰前管理措施[1]。屠宰前应对家禽进行断水，而断水时间过短，禽类会因在运输过程中排泄过多的水而湿透羽毛，在冬季可使禽类冻死，并且使羽毛结冰，在浸烫时很难掌握水温，使浸烫处理不好，脱毛困难，甚至局部残

留羽毛；而屠宰前断水时间过长时，会使家禽严重脱水，血液黏稠，宰杀放血不良，影响屠体品质。养殖户应根据季节采取适宜的断水时间[2]。

已有研究表明，一定时间的禁食或断水会引起家禽血浆中生长相关激素水平的改变[3]，从而减少动物应激。以禁食、断水为代表的宰前管理措施，旨在减少动物应激，从而影响到宰后肉的成熟，并最终达到提高肉质的目的，减少 PSE 肉的发生率。尽管目前已经开展了许多围绕宰前管理对肉质影响的研究，然而宰前管理对宰后肌肉的品质影响机制仍然不清楚。

无氧糖酵解是动物宰后僵直过程中占主导地位的能量代谢形式，宰前的管理对畜禽屠宰后的糖酵解进程有较大影响，进而影响到宰后僵直过程中的肉质变化。因此，本研究以樱桃谷鸭为研究对象，研究不同宰前断水时间对刚屠宰的鸭胸肉的食用品质、相关能量代谢产物及糖酵解代谢中的重要限速酶活力的影响，并分析各指标间的相关性。重点从糖酵解途径入手，探讨宰前断水与鸭肉品质的关系，揭示肉鸭的能量代谢的内在规律，并为宰前管理的调控提供科学依据，从而达到缓解肉鸭的应激，提高鸭肉的品质的目的。

1 材料与方法

1.1 材料

樱桃谷肉鸭，湖北鸿翔农业有限公司提供。

1.2 试剂

肌糖元测试试剂盒、丙酮酸激酶（PK）测试试剂盒、乳酸（LD）测试试剂盒、乳酸脱氢酶（LDH）测试试剂盒、己糖激酶（HK）测试试剂盒、肌酸激酶（CK）测试试剂盒均购自于南京建成生物工程研究所。ATP、ADP、AMP 钠盐标准品，IMP 标准品购自于美国 Sigma 公司。牛血清蛋白、考马斯亮蓝 G250、高氯酸、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、无水乙醇、磷酸均为分析纯，甲醇为色谱纯。

1.3 仪器与设备

CR-10 色差计（日本柯尼卡美能达公司）；数显恒温水浴锅 HH-6（国华电器有限公司）；便携式 pH 计 FG2-B（梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司）；钢环式膨胀压缩仪（湖南湘仪实验室仪器开发有限公司）；C-LM3 型数显式肌肉嫩度仪（北京朋利驰科技有限公司）；3802UV/VIS 紫外可见分光光度计(上海尤尼克（UNICO）仪器有限公司)；722G 可见分光光度计（上海精密科学仪器有限公司）；Agilent 1200 LC 液相色谱仪（美国 Agilent 公司）；HPLC 高压泵 P-905（美国 Agilent 公司）；UV-900 紫外吸收检测器（美国 Agilent 公司）；IKA T18 basic 均质机（德国 IKA 公司）；LXJ-IIB 高速离心机（上海安亭科学仪器厂）；XMTD-8222 型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司)；PL-2002 电子天平（梅特勒-托利多（上海）仪器有限公司）；HH-6 数显恒温水浴锅（国华电器有限公司）；

1.4 试验设计

根据实际生产情况，设置 4 个断水组，每组分别在屠宰前断水 0 h、1 h、3 h、5 h，每批次处理 30 只肉鸭，在运输过程中，每笼装肉鸭 5 只，运输距离 40 km，环境温度为 18~20 ℃。在待测肉鸭群体（群体数量不少于 30 只公鸭、30 只母鸭）中随机抽取 6 只公鸭、6 只母鸭，测定值均为公母鸭均值。每个样品另取 2~3 g 鸭肉存于 1.8 mL 冻存管中，每组样共存 4 管，迅速保存在液氮中，作糖酵解能量代谢相关限速酶和代谢产物分析用[4]。

1.5 试验方法

1.5.1 pH 值

采用便携式 pH 计进行测定。将电极插入到鸭胸肉中，让电极与肌肉中的组织液充分接触，待 pH 计读数稳定后记录，每个样品测定 5 次，取平均值。肉鸭屠宰后 30 min 所测得的 pH 值为 pHi（初始 pH 值），屠宰后 24 h 所测得的 pH 值为 pHu（最终 pH 值）。

1.5.2 肉色

采用便携式色差计分别在鸭胸肉表面各测定 5 次，得出 L*、a*和 b*值，取平均值。

1.5.3 加压失水率

采用经 Farouk 等[5]改进的加压滤纸法。沿肌纤维垂直方向取 5 cm^2、厚度为 1 cm 的肉样，用双层纱布和 18 层滤纸包裹，在 35 kg 压力下保持 5 min 的水分损失量，加压前后分别称重，记录加压前质量（W_b）和加压后质量（W_a），则加压条件下的保水性可以用加压失水率表示，用下式计算：

$$\text{加压失水率}\ (\%)=\frac{w_b-w_a}{w_b}\times 100\%$$

1.5.4 蒸煮损失率

取形状一致的鸭胸肉，修去外部脂肪和结缔组织，称重后装袋，将温度计插入肉的中心位置，扎紧袋口，然后将肉块放入 80 ℃水浴中加热，至肉块中心温度达 70 ℃时取出，用吸水纸吸干表面水分，自

然冷却至中心温度为室温，称重。

蒸煮损失率（%）=（蒸煮前肉重-蒸煮后肉重）/蒸煮前肉重×100%。

1.5.5 剪切力

取宰后鸭胸肉进行肌肉嫩度测试。从每块肉样中顺肌纤维方向切取长×宽×高为2 cm×1 cm×1 cm的肉块，每个样品做5组平行，每组平行做3次重复。将切得的每块肉样用塑料薄膜袋装好系紧，然后将系好的肉块放入80 ℃水浴中加热30 min，取出，在空气中冷却至中心温度为室温，用吸水纸吸干表面水分。用嫩度仪测剪切力值，测时使切刀与肉样垂直，将肉样切断，最大用力值即为剪切值。

1.5.6 高效液相色谱法测定样品ATP、ADP、AMP、IMP的含量

1.5.6.1 样品处理

将装有鸭胸肉样品的冻存管从液氮中取出，每管取1g鸭肉研磨成粉末装入离心管中，加入0.3 mol/L的$HClO_4$溶液6 mL，用均质器充分匀浆后取上清液静置10 min，然后以3000 r/min转速离5 min，取出上清液，用0.5 mol/L KOH调节pH至7.6~7.7。再以3000 rpm转速离心5 min，上清液取出放入液氮中保存。

1.5.6.2 标准曲线的绘制

准确称取ATP、ADP、AMP、IMP标准品各20 mg，超纯水定容至100 mL，再用超纯水逐渐稀释为2、5、10、25、50、200 mg/L的不同浓度的腺苷酸混标溶液，分装至进样瓶中。以浓度（mg/L）横坐标，以峰面积（mAU）为纵坐标，绘制标准曲线（如图1，2）。

1.5.6.3 高效液相色谱条件

本实验用到的高效液相色谱条件是根据贾鹏禹等[6]的色谱条件略微调整所得的。色谱柱为Agilent C18柱（5 μm，250 mm×4.6 mm）。流动相为60 mmol/L磷酸二氢钾和60 mmol/L磷酸氢二钾两者等比例混合，用KOH将pH值调至6.68，流速为0.8 mL/min，紫外检测波长为259 nm。

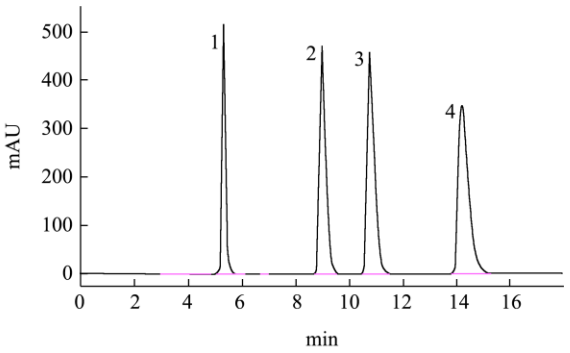


图1 ATP、ADP、AMP和IMP标准品混合物色谱图

Fig.1 Chromatograph of a mixed sample of standard ATP, ADP, AMP, and IMP

注：1号峰IMP（t_R=5.306min），2号峰ATP（t_R=8.982min），3号峰ADP（t_R=10.758min），4号峰AMP（t_R=14.192min）。

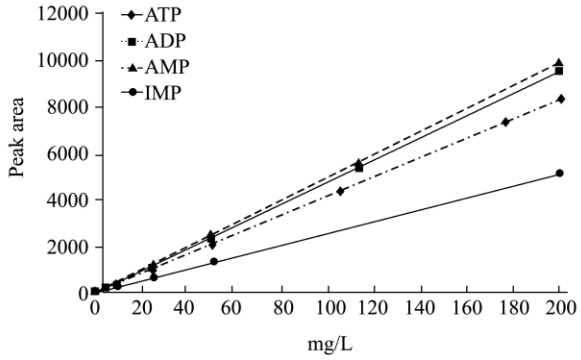


图2 ATP、ADP、AMP、IMP标准曲线

Fig.2 Standard curves of ATP, ADP, AMP, and IMP

表1 ATP、ADP、AMP和IMP的线性关系与灵敏度

Table 1 Linear relationship and sensitivity of ATP, ADP, AMP, and IMP

项目	回归方程	相关系数 R	线性关系 Range/(μg/mL)	检测限 LOD/(μg/mL)
ATP	Y=41.792814X+8.198766	0.999961	2-200	0.04
ADP	Y=47.822008X+7.214796	0.999970	2-200	0.04
AMP	Y=49.713521X+4.291681	0.999974	2-200	0.04
IMP	Y=25.629557X+7.462913	0.999953	2-200	0.04

1.5.7 肌糖原含量的测定

采用南京建成生物工程研究所提供的肌/肝糖原测试盒测定。

1.5.8 乳酸含量的测定

采用南京建成生物工程研究所提供的乳酸（LD）测试盒测定。

1.5.9 己糖激酶活力的测定

采用南京建成生物工程研究所提供的己糖激酶（HK）测试盒测定。

1.5.10 乳酸脱氢酶活力的测定

采用南京建成生物工程研究所提供的乳酸脱氢酶（LDH）测试盒测定。

1.5.11 丙酮酸激酶活力的测定

采用南京建成生物工程研究所提供的丙酮酸激

酶（PK）测试盒测定。

1.5.12 肌酸激酶活力的测定

采用南京建成生物工程研究所提供的肌酸激酶（CK）测试盒测定。

1.5.13 样品中可溶性蛋白质含量的测定

采用考马斯亮蓝 G-250 法测定鸭胸肉组织匀浆液中可溶性蛋白质含量[7]。BSA 标准曲线，以标准蛋白质浓度为横坐标，以吸光度为纵坐标作标准曲线。公式为 y=0.6474x+0.0047，R^2=0.99921（如图 3）。

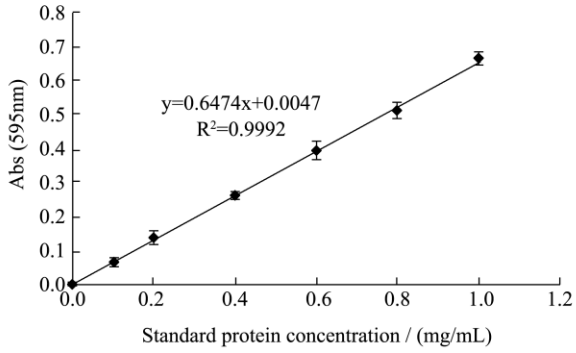


图 3 牛血清蛋白标准曲线

Fig.3 Standard curve of bovine serum albumin

1.5.14 数据处理

用 SPSS17.0 统计分析软件对结果进行方差分析和相关性分析。在进行显著性差异分析时，采用最小显著极差方法（Duncan's Multiple Range Test，SNK）进行所有处理均数间的相互比较[8]。

2 结果与讨论

2.1 不同宰前断水时间处理下鸭胸肉食用品质的变化

pH 值是判断禽肉食用、卫生、感官品质的重要评价指标，一般认为是与宰前宰后处理所产生的应激、肌肉糖原储备与各种生理反应综合有关[9]。如表 2 所示，控制组与 1 h、3 h 断水组的肉鸭 pHi 之间无显著差异（P>0.05），5 h 断水组的 pHi 显著（P<0.05）低于前三组；然而，不同宰前断水时间处理下，肉鸭的 pHu 差异不显著（P>0.05），控制组与 1 h、3 h 断水组的 pHi 均大于 pHu，而 5 h 断水组的 pHi 小于 pHu。说明，肉鸭在宰前断水 3 h 以内时，pHi 与 pHu 变化均不显著（P>0.05），而 5 h 断水则有可能显著降低鸭胸肉的 pHi，导致肉质裂化。由表 2 可得，不同宰前断水时间处理下，鸭胸肉的 a*（红度）与 b*（黄度）均无显著差异，而 5 h 断水组的 L*（亮度）显著地大于控制组与 3 h 断水组；5 h 断水组的加压失水率显著地小于 1 h、3 h 断水组；3 个断水组的蒸煮损失率之间无显著差异，而控制组显著地小于断水组。

表 2 不同宰前断水时间处理下肉鸭食品品质指标的比较

Table 2 Comparison of duck meat quality parameters after different periods of pre-slaughter water deprivation

食用品质指标	宰前断水时间/h				
	控制组	断水 1h	断水 3h	断水 5h	P-value
pHi	5.87±0.13^{b}	5.88±0.16^{b}	5.87±0.13^{b}	5.70±0.04^{a}	<0.001
pHu	5.80±0.02	5.85±0.09	5.81±0.08	5.80±0.05	0.069
L*	45.8±2.62^{a}	48.85±1.27^{ab}	45.75±3.22^{a}	51.07±1.06^{b}	0.014
a*	14.15±0.93	15.02±1.10	14.92±1.00	16.15±0.91	0.087
b*	7.68±1.25	9.05±1.46	9.45±2.23	11.04±0.5	0.62
加压失水率/%	37.40%±1.16%^{ab}	39.34%±1.59%^{b}	38.20%±1.69%^{b}	35.79%±1.04%^{a}	0.024
蒸煮损失率/%	17.21%±1.91%^{a}	24.61%±2.12%^{b}	24.84%±1.13%^{b}	22.89%±2.65%^{b}	<0.001
剪切力/kg	2.24±0.564	2.654±0.734	2.623±0.791	2.764±0.107	0.258

注：数据表述为平均值±标准偏差（n=30），每行不同上标字母表示差异显著（P<0.05）。

2.2 不同宰前断水时间处理下鸭胸肉肌糖原含量的变化

肌糖原和肝糖原是动物无氧糖酵解途径的原料[10]。动物屠宰后，由于氧气的减少，肌肉细胞主要通过糖酵解来提供能量[11]。如表 3 所示，不同宰前断水时间处理下，肉鸭的肌糖原含量差异不显著（P>0.05）。然而，1 h、3 h、5 h 断水处理组的肌糖原含量均大于控制组，并随着断水时间的延长有增大的趋势。肉鸭屠宰前的断水处理，可能会一定程度上阻碍糖酵解的进程，使肌糖原含量的上升。通过宰前断水处理过的动物，其血清中皮质醇、促肾上腺皮质激素水平显著降低[12]，宰前的 3h 内的断水处理使动物的应激得到了缓解，降低了应激对机体的损伤。由于在断水期间，并未停止进食，使得肌糖原的含量增加，从而防止宰

后肌肉 pH 值下降过快，降低鸭肉品质。

2.3 不同宰前断水时间处理下鸭胸肉乳酸（LD）含量的变化

乳酸是动物无氧糖酵解途径的最终产物[13]，糖酵解将糖原转化为乳酸，而产生的乳酸又被反馈给丙酮酸用来参加三羧酸循环，如果氧气不足或线粒体过少，乳酸会被运送到肌肉纤维外[14]，使肌肉 pH 下降，从而导致肌肉持水力下降、汁液流失，肉质变差，可能导致 PSE 肉（Pale Soft Exudative Mect）的产生。因而，肌肉中乳酸含量常与肌糖原含量一起来评价肌肉无氧糖酵解程度与肉品质。如表 3 所示，宰前断水 3 h 处理组的乳酸含量较控制组和 1 h 断水组有显著的增加（P<0.05），说明肉鸭断水约 3 h 时，血糖和部分肌糖原开始更多的参与无氧糖酵解代谢，产生了最终产物乳酸，但由于并未禁食，糖原含量下降的并不显著。5 h 断水组的乳酸含量较 3 h 断水组略有下降，与控制组、1 h 断水组差异并不显著（P>0.05），原因可能是，长时间的断水造成糖酵解代谢增速达到饱和，由于有氧呼吸此时仍占主导地位，因此累积产生的乳酸依旧可以重新参与代谢，造成乳酸含量一定程度的下降，这与李新等[15]报道的结果一致，断水处理后，动物肌肉宰后的初始 pH 值（pHi）虽暂时的下降，但是由于肌糖原的总量被消耗，因此最终 pH 值（pHu）依旧要大于控制组。

2.4 不同宰前断水时间处理下鸭胸肉丙酮酸激酶（PK）活力的变化

丙酮酸激酶是无氧糖酵解途径中的关键限速酶，它能够催化磷酸烯醇式丙酮酸转化为丙酮酸[16]，因此丙酮酸激酶的活力对糖酵解速率有重要影响。如表 3 所示，3 h 断水组的丙酮酸激酶活力显著地小于（P<0.05）1 h、5 h 断水组，而 5 h 断水组的丙酮酸激酶活力却显著地大于（P<0.05）控制组。研究发现动物宰后出现的PSE 肉中的丙酮酸激酶活力的最高值是普通肉的 10 倍[17]，丙酮酸激酶的活力对无氧糖酵解速率有重要限制性作用，因此鸭胸肉中丙酮酸激酶的活力可作为判断鸭胸肉肉质的关键因素。说明断水对丙酮酸激酶活力的影响在 3 h 会到达拐点，3 h 内的断水可能有助于肉鸭的静养，而超过 5 h 的断水反而可能加重肉鸭的应激。

2.5 不同宰前断水时间处理下鸭胸肉己糖激酶（HK）活力的变化

己糖激酶是无氧糖酵解途径中的第一个限速酶，它能将葡萄糖磷酸化转化为 6-磷酸葡萄糖[18]。在血糖正常的情况下时，6-磷酸葡萄糖的含量和己糖激酶活力对肌肉细胞消耗葡萄糖的能力有重要的影响[18~19]。实验结果表明（如表 3），3 h、5 h 断水处理组的己糖激酶活力显著（P<0.05）大于控制组与 1 h 断水组，断水可能会一定程度阻碍糖酵解进程，实验肉鸭并未停止进食，血糖浓度上升，肌肉中葡萄糖含量上升，从而激活己糖激酶。

2.6 不同宰前断水时间处理下鸭胸肉肌酸激酶（CK）活力的变化

肌酸激酶是肌肉细胞中能量代谢的关键酶，它能将 Pi（高能磷酸键）迅速的转移到 ADP 生成 ATP 以保证运动时肌肉收缩的能量供应[20]，对动物屠宰后肌肉的能量代谢有着重大作用[21]。实验结果表明（如表 3），控制组与断水处理组的肌酸激酶活力差异不显著（P>0.05），而整体呈下降趋势。肉鸭在经过短时间的断水处理后，应激得到缓解，ATP 消耗速率减缓，导致 ADP 的累积，导致肌酸激酶 CK 活力的增大。

2.7 不同宰前断水时间处理下鸭胸肉乳酸脱氢酶（LDH）活力的变化

乳酸脱氢酶 LDH 是反映动物肌肉中糖酵解水平的一个关键的指标，有 LDH_1-LDH_5 总共 5 种同工酶形式。乳酸脱氢酶 LDH 在有氧条件下，将乳酸转化成丙酮酸，进而促进整个机体的代谢过程；在无氧条件下，催化丙酮酸还原成乳酸，从而完成葡萄糖的无氧酵解过程[22]。如表 3 所示，断水 1 h，肉鸭的乳酸脱氢酶活力变化不显著，而 3 h 断水组的乳酸脱氢酶活力显著低于 1 h 断水组，5 h 断水组的乳酸脱氢酶活力较 3 h 断水组略有上升但不显著。说明断水 3 h，鸭胸肉的乳酸含量增加，在有氧条件下，一定程度上抑制了乳酸脱氢酶 LDH 的活力。

2.8 不同宰前断水时间处理下鸭胸肉腺苷酸含量的变化

如表 3 所示，1 h 断水组的 ATP 含量显著大于其他组，5 h 断水组 IMP 含量最低；5 h 断水处理组的 ADP 含量显著低于其他 3 组；各组间 AMP、IMP 含

量差异不显著（P>0.05）。断水 3 h 内，由于肌糖原被消耗，三羧酸循环产能小于 ATP 消耗，导致 ATP 含量降低。宰前断水超过 5 h，随着应激得到缓解，肉鸭机体有氧代谢占主导地位，三羧酸循环速率大于 ATP 的消耗，导致 ATP 含量增加。

表 3 不同宰前断水时间处理下肉鸭能量代谢指标的比较

Table 3 Comparison of duck meat energy metabolism parameters after different periods of pre-slaughter water deprivation

能量代谢指标	宰前断水时间/h				
	控制组	断水 1 h	断水 3 h	断水 5 h	P-value
肌糖原/(mg/g)	2.16±0.07	2.28±0.31	2.36±0.21	2.40±0.16	0.328
乳酸/(mmol/g prot)	3.68±0.04^{a}	3.68±0.05^{a}	3.75±0.01^{b}	3.70±0.04^{ab}	0.03
丙酮酸激酶 PK/(U/g prot)	1094.33±26.77^{ab}	1183.4±115.93^{bc}	1046.97±76.99^{a}	1223.19±37.77^{c}	0.006
己糖激酶 HK/(U/g prot)	87.18±5.54^{a}	92.84±5.19^{a}	130.52±7.30^{b}	128.80±9.52^{b}	<0.001
肌酸激酶 CK/(U/mg prot)	48.73±5.48	48.79±4.76	47.97±2.40	46.37±3.55	0.86
乳酸脱氢酶 LDH/(U/g prot)	79263.3±2505.8^{ab}	81645.9±1160.7^{b}	70245.6±1127.2^{a}	77706.9±1410.4^{ab}	0.09
ATP/(μmol/g)	0.079±0.01^{ab}	0.097±0.007^{c}	0.075±0.009^{a}	0.087±0.007^{bc}	0.003
ADP/(μmol/g)	0.117±0.011^{b}	0.114±0.013^{b}	0.124±0.023^{b}	0.087±0.008^{a}	0.019
AMP/(μmol/g)	0.109±0.009	0.123±0.016	0.106±0.014	0.113±0.022	0.405
IMP/(μmol/g)	1.371±0.091	1.377±0.233	1.481±0.211	1.192±0.226	0.667

注：数据表述为平均值±标准偏差（n=30），每行不同上标字母表示差异显著（P<0.05）。

2.9 相关性分析

表 4 不同宰前断水时间处理后鸭胸肉能量代谢有关指标的相关性 (n=15)

Table 4 Correlation of duck meat quality parameters after different periods of pre-slaughter water deprivation (n = 15)

	pHi	pHu	L*	a*	b*	加压失水率	蒸煮损失率	剪切力	肌糖原	LD	PK	HK	CK	LDH	ATP	ADP	AMP
pHu	0.637**	1															
L*	-0.603*	-0.01	1														
a*	-0.027	0.003	0.607*	1													
b*	-0.093	0.011	0.796**	0.553	1												
加压失水率	0.157	0.283	0.247	0.45	0.294	1											
蒸煮损失率	0.422	0.483	-0.214	-0.292	-0.446	0.138	1										
剪切力	-0.400	-0.436	0.357	0.099	0.356	0.248	-0.281	1									
肌糖原	-0.038	-0.057	0.234	0.509*	0.412	0.555*	-0.207	0.350	1								
LD	-0.368	-0.295	-0.244	-0.238	0.046	0.373	0.078	0.248	-0.577*	1							
PK	-0.36	-0.261	0.481	0.281	0.356	-0.051	-0.561*	0.501*	0.096	-0.253	1						
HK	-0.198	-0.178	0.219	0.563*	0.399	0.363	-0.313	0.355	0.585*	0.283	0.045	1					
CK	0.348	0.276	0.102	0.051	0.224	0.05	0.249	-0.075	0.292	-0.231	0.009	-0.118	1				
LDH	0.358	0.32	0.279	0.352	0.056	-0.268	-0.123	-0.274	-0.245	-0.965**	0.217	-0.212	0.156	1			
ATP	-0.081	0.248	0.636*	0.143	0.214	0.132	0.267	0.093	-0.103	-0.449	-0.472*	-0.253	0.124	0.242	1		
ADP	0.263	-0.256	-0.542	-0.111	-0.225	-0.194	0.399	-0.130	-0.007	0.083	-0.518*	-0.259	0.182	-0.027	-0.049	1	
AMP	-0.048	0.195	0.343	0.036	0.026	0.391	0.13	0.044	0.251	-0.224	-0.070	-0.190	0.135	0.207	0.630**	-0.141	1
IMP	0.181	-0.095	-0.162	0.17	-0.02	-0.068	0.259	0.084	-0.261	-0.177	-0.190	0.178	-0.157	0.209	0.021	0.389	-0.116

注：*P<0.05；**P<0.01。

由表 4 可知，在不同宰前断水时间处理后的鸭胸肉中，肌糖原含量与乳酸含量呈显著负相关

（R=-0.577，P<0.05），说明了断水过程中有糖原被消耗并参与了无氧糖酵解代谢，由于此时有氧代谢仍占主导地位，并且三羧酸循环并未停止，因而糖原含量升高程度不显著。己糖激酶 HK 活力与肌糖原含量呈显著正相关（R=0.585，P<0.05）。该结果与王广宇[23]所报道的一致，当葡萄糖浓度较高时，己糖激酶 HK 活力将被激活，催化葡萄糖转化为 6-磷酸葡萄糖，肌糖原含量与己糖激酶 HK 呈现极显著负相关。a*与肌糖原含量（R=0.509，P<0.05）和己糖激酶 HK 活力（R=0.563，P<0.05）呈显著正相关，说明肌糖原的消耗速率可能与肉色有关联。乳酸含量与乳酸脱氢酶 LDH 活力呈极显著负相关（R=-0.965，P<0.01），说明了两者的关联性，乳酸脱氢酶 LDH 在有氧条件下，将乳酸转化成丙酮酸，进而促进整个机体的代谢过程；在无氧条件下，催化丙酮酸还原成乳酸，完成葡萄糖的无氧酵解过程。丙酮酸激酶 PK 活力与 ATP 含量呈显著负相关（R=-0.472，P<0.05）。该结果与郭蔼光[24]的结论一致，ATP 是丙酮酸激酶的抑制剂，ATP 的存在抑制了磷酸烯醇式丙酮酸转化为丙酮酸。

3 结论

肉鸭的宰前断水处理会显著的影响鸭胸肉的加压失水率、蒸煮损失率、L*等指标；断水处理过的肉鸭的鸭胸肉的丙酮酸激酶活力水平呈先降后增的趋势，并与 ATP 含量呈显著负相关；己糖激酶活力与肌糖原含量有良好的正相关性，断水 3 h时，其活力最大；5 h断水组的 IMP 水平最低，ATP 含量也维持在较高水准，肌糖原含量最高，HK 活力在断水 3 h、5 h 时水平较高；由经过 5 h断水后的肉鸭，其鸭胸肉的 pHi 显著低于 3 h 内断水组，使其肉质下降。综上可得，对肉鸭进行不超过 5 h 的短时间宰前断水处理，其食用品质、能量代谢指标处于相对较好的水平，易最大程度缓解应激，并保持肉质最佳。

参考文献

[1] 张岩,黄继超,孙皓,等.运输和静养时间对肉鸡应激程度及肌肉品质的影响[J].南京农业大学学报,2013,36(5):83-87
ZHANG Yan，HUANG Ji-chao，SUN Hao, et al. Effects of time in transport and lairage rest onstress level and meat quality in broiler [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2013, 36(5): 83-87

[2] 于奇,李巍.浅谈屠宰畜禽的宰前管理[J].畜牧兽医科技信息,2014,2:41-41
YU qi, Li wei. Discussion on the pre-slaughter management on the slaughter of livestock [J]. Animal Husbandry and Veterinary Science and Technology Information, 2014, 2: 41-41

[3] Beccavin C, Chevolier B, Simon J, et al. Circulating insulin-like growth factors (IGF-I and IGF-II) and IGF bindingproteins in divergently selected fat or lean chickens [J]. Effect of Prolonged Fasting. Growth Horm IGF Res., 1999, 9(3):187-194

[4] 汪兰,吴文锦,李新,等.运输密度对肉鸭屠宰品质的影响[J].中国家禽,2013,35(19):30-33
WANG Lan, WU Wen-jin, LI Xin, et al. Effect of Transport Density on Meat Quality of Duck [J]. China Poultry, 2013, 35(19): 30-33

[5] 武书庚,齐广海.肉品风味的形成及其影响因素[J].中国畜牧杂志,2001,3: 53-55
WU Shu-geng, QI Guang-hai. The formation and influencing factors of meat flavor [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2001, 3: 53-55

[6] 贾鹏禹,孙蕊,俞龙浩,等.反相高效液相色谱法检测鱼肉中的 ATP 关联物[J]. 肉类研究,2012,4:24-27
JIA Peng-yu, SUN Rui, YU Long-hao, et al. Determination of ATP-Related Compounds in Fish by RP-HPLC [J]. Meat Research, 2012, 4: 24-27

[7] Candiano G, Bruschi M, Musante L, et al. Blue silver: a very sensitive colloidal Coomassie G−250 staining for proteome analysis [J]. Electrophoresis, 2004, 25(9): 1327-1333.

[8] 鲁耀彬,王海滨,何旭东,等.低钠盐多味花生的质构特性与感官评价相关性分析[J].武汉轻工大学学报,2014,33(6):8-12
LU Yao-bin, WANG Hai-bin, HE Xu-dong, et al. Textural properties and sensory evaluation correlationanalysis of low sodium salt multi-flavored peanut [J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2014, 33(6): 8-12

[9] Van de Perre V, Permentier L, Bie S D, Verbeke G, Geers R. Effect of unloading, lairage, pig handling, stunning and season on pH of pork [J]. Meat Science, 2010, 86(4): 931-937.

[10] Ryu Y C, Choi Y M, Kim B C. Variations in metabolite contents and protein denaturation of the longissimus dorsi muscle in various porcine quality classifications and metabolic rates [J]. Meat science, 2005, 71(3): 522-529.

[11] Schiaffino S, Reggiani C. Myosin isoforms in mammalian skeletal muscle [J]. Journal of Applied Physiology, 1994, 77(2): 493-501

[12] 柴进,彭健,熊琪,等.宰前休息方式对猪福利,血液成分及肉质的影响[J].畜牧兽医学报,2009,40(11):1645-1650

CHAI Jin, PENG Jian, XIONG Qi, et al. The Influence of Lairage Conditions for Finishing Pigs on Mental Performance, Blood index and Meat Quality[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2009, 40(11): 1645-1650.

[13] King L M, Opie L H. Glucose and glycogen utilisation in myocardial ischemia-changes in metabolism and consequences for the myocyte [M]. Cardiac Metabolism in Health and Disease. Springer US, 1998: 3-26.

[14] Tranulis M A, Dregni O, Christophersen B, et al. A glucokinase-like enzyme in the liver of atlantic salmon (Salmo salar) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology, 1996, 114(1): 35-39

[15] 李新,吴文锦,汪兰,等.宰前静养时间对鸭肉物理特性的影响[J].湖北农业科学,2013,52(21):5264-5267
LI Xin, WU Wen-jin, WAN Lan, et al. The Influence of Pre-slaughter Rest Time on Physical Characteristics of Duck Meat[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(21): 5264-5267

[16] Shen Q W, Jones C S, Kalchayanand N, et al. Effect of dietary α-lipoic acid on growth, body composition, muscle pH, and AMP-activated protein kinase phosphorylation in mice [J]. Journal of animal science, 2005, 83(11): 2611-2617

[17] Schwägele F, Lopez P, Haschke C, et al. Rapid pH drop in PSE-muscles. Enzymological investigations into the causes [J]. Fleischwirtschaft (Germany), 1994

[18] Kashiwaya Y, Sato K, Tsuchiya N, et al. Control of glucose utilization in working perfused rat heart [J]. Journal of Biological Chemistry, 1994, 269(41): 25502-25514

[19] Manchester J, Kong X, Nerbonne J, et al. Glucose transport and phosphorylation in single cardiac myocytes: rate-limiting steps in glucose metabolism [J]. American Journal of Physiology-Endocrinology And Metabolism, 1994, 29(3): E326

[20] Ledward D A. Post-slaughter influences on the formation of metyyoglobin in beef muscles [J]. Meat Science, 1985, 15(3): 149-171.

[21] Bekhit A E D, Farouk M M, Cassidy L, et al. Effects of rigor temperature and electrical stimulation on venison quality [J]. Meat Science, 2007, 75(4): 564-574.

[22] 李望,胡盛寿,魏英杰,等.心肌梗死对大鼠心肌能量代谢途径中关键酶的影响及意义[J].中国分子心脏病学杂志,2008,8(5):277-280
LI Wang, HU Sheng-shou, WEI Ying-jie, et al. Effects and significance of myocardial infarction on myocardial key enzymes of energy metabolism in rats [J]. Molecular Cardiology of China, 2008, 8(5): 277-280

[23] 王广宇,刘波,谢骏,等.鱼类糖代谢几种关键酶的研究进展[J].上海水产大学学报,2008,17(3):377-383
WANG Guang-yu, LIU Bo, XIE Jun. Research progress of several carbohydrate metabolic key enzymes in fish [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2008, 17(3): 377-383

[24] 郭蔼光.基础生物化学[M].高等教育出版社,2001
Ge Hong-guang. Biochemistry [M]. Higher Education Press, 2001