

文章编号: 1000-0615(2019)10-2084-09

DOI: 10.11964/jfc.20190911981

· 综述 ·

水产动物肌酸营养的研究进展

廖艳琴, 张春晓*

(集美大学水产学院, 农业农村部东海海水健康养殖重点实验室,
厦门市饲料检测与安全评价重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 肌酸(creatine, Cr)又称为N-甲基胍乙酸或肌肉素, 是一种含氮有机酸。已广泛应用于改善人类健康, 尤其用于促进肌肉生长。本文综述了肌酸在动物体内的合成、转运和储存规律, 以及肌酸在肌肉和肝脏能量代谢中的作用, 分析了饲料补充肌酸对动物生长和屠宰性能的影响, 并从肌肉pH、系水力和肉色角度综述了肌酸对肉品质影响的研究进展, 最后对肌酸在水产动物中的应用前景进行了展望, 以期对肌酸在水产动物营养中的研究和在饲料中的应用提供参考。

关键词: 肌酸; 能量代谢; 肉品质; 鱼类; 营养与饲料

中图分类号: S 963

文献标志码: A

肌酸最早由法国科学家Chevreul于1832年在牛肉中发现, 分子式为 $C_4H_9N_3O_2$, 是动物体内天然存在的物质。动物体的肌酸可通过摄食动物蛋白获得, 也可通过机体自身的内源性作用经由胍基乙酸(guanidinoacetic acid, GAA)合成, 胍基乙酸是动物体内肌酸合成的唯一前体物质^[1]。肌酸在细胞能量代谢过程中扮演重要角色, 尤其是在肌肉和脑细胞中^[2]。肌酸在体内主要以磷酸肌酸(phosphocreatine, PCr)的形式存在, 磷酸肌酸作为高能磷酸盐的动态储存库, 为ADP提供一个高能磷酸键生成ATP, 从而维持体内ATP的平衡。肌酸和磷酸肌酸(Cr/PCr)在体内组成磷酸盐系统, 在骨骼肌中, Cr/PCr系统对维持能量平衡起着重要作用^[3]。

肌酸广泛应用于改善人类健康, 如配合大剂量维生素C, 能提高病毒性心肌炎患儿的心功能及细胞免疫功能^[4]; 可用于制备治疗心脏病和呼吸功能不全的药物^[5]; 补充肌酸能增强老年人的肌肉力量, 提高运动能力^[6]。因此, 它在动物生产中的应用研究也受到广泛关注。本文综述了肌酸的合成和代谢过程, 以及肌酸对动物生长性能、能量代谢和肉品质的影响, 以期对肌

酸在水产动物营养中的研究和在饲料中的应用提供参考。

1 肌酸的合成与代谢

1.1 肌酸的合成

在肌酸的整个合成代谢过程中, 需要3种氨基酸和3种酶, 分别为L-精氨酸、甘氨酸和蛋氨酸, L-精氨酸甘氨酸脒基转移酶(L-arginine: glycineamidinotransferase, AGAT)、胍基乙酸N-甲基转移酶(guanidinoacetate N-methyltransferase, GAMT)以及蛋氨酸腺苷转移酶(methionine adenosyltransferase, MAT)^[2]。

肌酸分子的合成需要整个甘氨酸分子、精氨酸的脒基以及S-腺苷蛋氨酸的甲基。通过对陆生动物的研究发现, 肌酸的内源性合成主要分两步完成: 第一步主要在肾脏线粒体膜间隙中进行, 小部分在其细胞质中发生, 即L-精氨酸在L-精氨酸甘氨酸脒基转移酶的作用下将脒基转移至甘氨酸, 形成L-鸟氨酸和胍基乙酸; 第二步主要在肝脏中发生, 即蛋氨酸和ATP在蛋氨酸腺苷转移酶的作用下生成S-腺苷蛋氨酸, S-腺苷蛋

收稿日期: 2019-09-20 修回日期: 2019-09-27

资助项目: 现代农业产业技术体系专项(CARS-47); 国家自然科学基金(31972804, 31572625)

通信作者: 张春晓, E-mail: cxzhang@jmu.edu.cn

酸作为甲基供体, 在胍基乙酸N-甲基转移酶的作用下, 通过甲基化将甲基转移至胍基乙酸, 生成肌酸和S-同型半胱氨酸^[7]。胍基乙酸内源性合成肌酸是机体内甲基的主要消耗过程, 占机体

总甲基化反应的40%^[7]。然而, 在虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)上的研究表明, 鱼类肌酸的主要合成部位可能是肌肉组织^[8]。因此, 肌酸的代谢在不同物种间可能存在差异^[9](图1)。

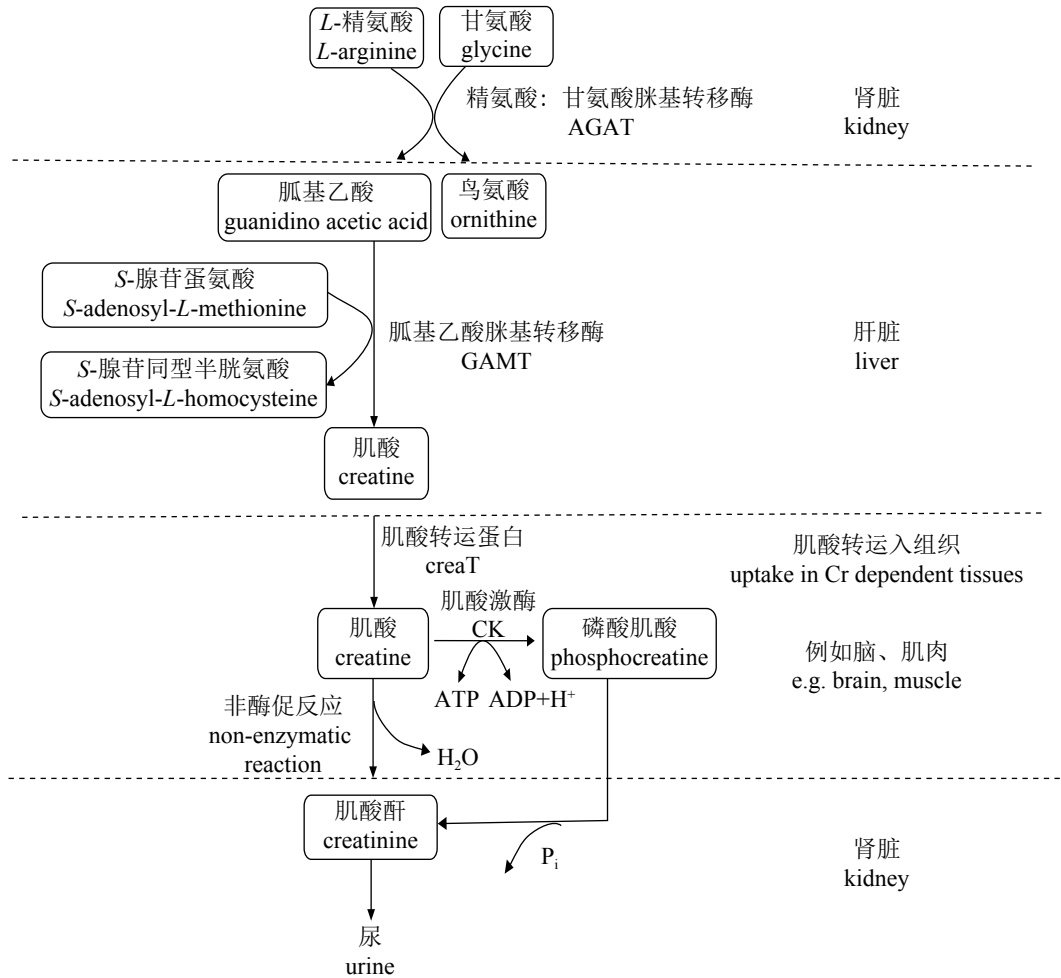


图 1 肌酸的合成和代谢^[10]

Fig. 1 synthesis and metabolism of creatine^[10]

1.2 肌酸的转运

合成的肌酸由血液转运至全身, 通过特殊的肌酸转运蛋白(creatine transporter, CreaT)进入细胞。在细胞内, 肌酸通过肌酸激酶(CK)作用磷酸化为磷酸肌酸, 此过程可逆^[11]。肌酸转运蛋白是一种特异性的Na⁺/Cl⁻依赖性的转运蛋白, 包括CreaT1和CreaT2两种亚型, 而CreaT1在肌酸转运过程中发挥主要作用^[12]。当细胞能量需求高时, 肌酸激酶将磷酸基团从PCr转移到ADP生成ATP, 直接为机体供能, 维持能量内稳态。与此同时, 肌酸转运蛋白也受到细胞内和细胞外肌酸水平的调节, 当细胞内游离的肌酸水平增加

时, 可能会激活腺嘌呤核糖核苷酸(AMP)依赖性蛋白激酶(AMPK)的信号通路, 从而降低肌酸转运蛋白基因的表达^[13]。内源性合成肌酸受多种因素调节, 其中, L-精氨酸甘氨酸脒基转移酶水平是一个主要的调节因素, 而高水平的中间产物和终产物, 即鸟氨酸和肌酸含量均会对L-精氨酸甘氨酸脒基转移酶产生负反馈。机体内低水平的肌酸会刺激L-精氨酸甘氨酸脒基转移酶活性增加, 促进胍基乙酸的合成, 但当肌酸升高到一定浓度时, L-精氨酸甘氨酸脒基转移酶的表达会受到抑制, 进而导致胍基乙酸的合成速率降低, 因此胍基乙酸的合成过程是肌酸合成的限

速步骤^[11]。

1.3 肌酸的储存

机体内约95%的磷酸肌酸储存于骨骼肌中,小部分储存于大脑、肝脏、肾脏和睾丸等组织中。体质量为70 kg的年轻男性体内约含120 g总肌酸(包括肌酸和磷酸肌酸),肌酸和磷酸肌酸可以进行非酶促脱水和环化反应形成肌酸酐,每天大约有1.7%的肌酸/磷酸肌酸不可逆的转化成肌酸酐,肌酸酐自由扩散出细胞,大约有2 g随着尿液排出体外^[14]。由于食物中的肌酸主要存在于动物蛋白中,因此素食者往往会缺乏肌酸^[15]。

大量研究发现,外源补充肌酸可以增加肌肉和血浆中的肌酸和磷酸肌酸含量。门小明等^[16]和韩剑众等^[17]的研究显示,饲料中添加一水肌酸(creatine monohydrates, CMH)能提高育肥猪背最长肌和半膜肌肌酸储备量。在杜浙猪上的研究显示相似的结果,一水肌酸使其背最长肌肌酸含量、磷酸肌酸储备量显著增加^[18]。Lindahl等^[19]和Young等^[20]研究同样发现,饲料中添加一水肌酸可显著提高杜洛克猪肌肉中磷酸肌酸含量,但Young等^[20]对长白猪的研究发现一水肌酸增加了血浆中磷酸肌酸含量,但不影响肌肉中磷酸肌酸含量。Lahučký等^[21]对家猪(*Sus scrofa domestica*)的研究也发现,添加一水肌酸可以使其血浆中肌酸含量增加。在禽类上的研究也有类似结果。程灵豪^[22]和吴娟^[23]在肉鸭(*Anas platyrhynchos*)上的研究发现,饲料中添加一水肌酸不仅增加了肌肉中肌酸含量,且使血浆中肌酸含量上升。肌肉中肌酸和磷酸肌酸含量的升高,有助于提高肌细胞中的能量储备,改善骨骼肌的能量代谢,延缓宰后肌肉糖酵解的发生。然而,对虹鳟幼鱼的研究发现,饲料中添加或鱼体注射肌酸对静息时虹鳟肌肉中总肌酸含量无显著影响^[24]。Tong等^[25]的研究表明,肌酸对肉鸡(*Gallus gallus domesticus*)腿肌和胸肌中总肌酸含量影响不同。由于肉鸡胸肌肌肉由IIb型纤维组成,而大腿肌由I型、IIa型和IIb型纤维组成^[26],因此肌酸对动物肌肉中肌酸含量的影响不一致,这可能是由于不同的肌纤维类型在肌酸代谢方面存在差异。今后在相关研究中,应选用相同部位的肌肉组织,以提高研究结果的可比性。

1.4 肌酸与能量代谢

肌酸在细胞中作为能量缓冲剂发挥重要作用

用^[27]。ATP是细胞中的主要能量来源,但其浓度相对较低,这使得肌肉的收缩运动只能持续短暂的时间。肌酸、磷酸肌酸和肌酸激酶在大量消耗ATP的细胞中组成一个能量缓冲系统。机体补充肌酸后,通过肌酸激酶途径经由磷酸肌酸降解供能,可在短时间内为细胞补充ATP。有研究表明,日粮中添加一水肌酸可显著提高育肥猪背最长肌和半腱肌中ATP含量,但对ADP和AMP含量无显著影响^[28]。夏伟光等^[29]对肉鸡的研究表明,饲料中不同水平的一水肌酸对肉鸡胸肌中ATP、ADP和AMP含量均无显著影响,但添加250 mg/kg一水肌酸则显著提高了腿肌ATP和AMP含量。Mcfarlane等^[24]对静息时虹鳟幼鱼研究发现,饲料中添加或鱼体注射肌酸对虹鳟肌肉中ATP含量无显著影响,这可能是由于静息状态下肌肉对ATP的需要量降低的原因。在ADP转化成ATP的过程中,需要肌酸激酶将磷酸肌酸上的一个磷酸基团转移到ADP上,因此肌酸激酶在肌酸能量代谢过程中起着重要作用,可能影响肌肉中ATP的含量。在尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)的研究中也证实了这一点,由雷氏普罗威登斯氏菌(*Providencia rettgeri*)引起的肌酸激酶活性降低破坏了鳃能量平衡,降低了鳃中ATP的可利用性^[30]。研究发现,摄入肌酸补充剂能提高足球运动员肌肉中肌酸激酶活性^[31];在育肥猪饲料中添加一水肌酸可以显著提高背最长肌中肌酸激酶活性^[16,28];在肉鸡中,肌酸处理能显著促进腿肌中肌酸激酶活性^[32]。由于肝脏中没有肌酸激酶,因此,肌酸在肝脏中无法通过肌酸激酶发挥其经典的能量代谢作用,但肝脏肌酸具有调节肝脂代谢的作用。Da Silva等^[33]通过对大鼠(*Rattus norvegicus*)肝细胞的研究发现,肌酸可通过刺激肝细胞脂肪酸氧化和甘油三酯分泌来减少其脂质积累。进一步研究表明,在高脂肪饲料中添加肌酸,可以显著改善大鼠的脂蛋白分泌速率和线粒体功能,减少肝脏脂肪的积累^[34]。

2 肌酸与动物生长性能

由于肌酸参与动物肌肉能量代谢,且已作为改善人体肌肉生长和性能的营养补剂,因此,国内外众多学者研究了一水肌酸作为饲料添加剂对动物生长性能的影响。李蛟龙^[28]对育肥猪的研究发现,饲料中添加0.8%的一水肌酸可以显著提高平均日采食量(ADFI)和平均日增重(ADG),

但对饲料系数无显著影响。对杜洛克猪和长白猪的研究同样发现, 补充一水肌酸使其体质量均有所增加^[35]。相似的结果在邵明丽^[36]、韩新燕等^[37]对育肥猪的研究中也有报道。同样, 吴昊^[38]对肉鸡的研究发现, 饲料中添加0.4%~1.6%的一水肌酸可显著提高肉鸡的平均日增重、胸肌率以及腿肌率。另外, 也有研究显示, 饲料中补充一水肌酸能提高育肥猪眼肌面积, 改善其屠宰性能^[36-37, 39]。然而有学者报道了与上述不一致的研究结果, 门小明等^[16]、Berg等^[40-41]、James等^[42]的研究发现, 饲料中添加一水肌酸对生长育肥猪平均日增重无显著影响, 同时也不影响育肥猪的屠宰率、瘦肉率和眼肌面积等屠宰指标。吴娟^[23]发现, 添加一水肌酸对樱桃谷鸭胸肌率和腿肌率无显著影响。而韩剑众等^[17]对育肥猪的研究发现, 添加500 g/d 一水肌酸时, 料重比显著下降。除此之外, 肌酸在水产动物中的应用也显示不同的结果。Burns等^[43]对眼斑拟石首鱼(*Sciaenops ocellatus*)的研究发现, 在基础饲料中分别添加0.5%、1%、1.5%、2%和4%一水肌酸使其增重率、饲料效率及存活率均有显著提高, 且添加量在1.98%时增重率达到最大。Lourenco^[27]研究发现, 向基础饲料中分别添加2%、5%和8%一水肌酸, 可使金头鲷(*Sparus aurata*)肥满度升高, 但对增重率无显著影响。而在虹鳟幼鱼上的研究显示, 不论是饲料中添加肌酸或是向鱼体注射肌酸, 对特定生长率均无显著影响, 且注射肌酸的实验鱼增重率有下降的趋势^[24]。上述研究结果的差异, 可能与动物种类、试验饲料配方、养殖条件、动物生长阶段等的不同有关。动物的运动情况也是影响肌酸发挥作用的重要因素。对人体的研究表明, 将肌酸补充和高强度训练结合, 能增加肌核浓度、卫星细胞数和I型、II型肌纤维面积, 以及I型和II型肌球蛋白重链(mhc)mRNA转录和蛋白质含量^[44-47]。另外, 不同动物的肌细胞类型不同, 这也可能是导致研究结果不同的原因^[27]。对鱼类的研究表明, 生长潜力高低与小纤维数量高低相关^[48-49], 主要依赖于肌源性祖细胞(MPC)或卫星细胞的增殖与分化。成肌细胞决定因子(myoD)是肌源性祖细胞增殖和分化过程中的主要转录因子^[50], 参与成肌细胞的增殖形成MPC群体。而添加肌酸会影响肌肉中成肌细胞决定因子等相关转录因子的表达^[27], 进而可能改善鱼类肌肉细胞的增殖与分化。

3 肌酸与肉品质

影响肉品质的因素有很多, 主要包括遗传因素、营养因素和环境因素。随着人们生活水平的提高, 对肉品质的要求也越来越高。常用肉品质评定指标包括肉色、pH、嫩度、系水力等。屠宰前, 动物机体的供能方式为有氧化供能, 此时糖、脂肪、蛋白质等完全被氧化生成CO₂、H₂O和ATP。肌酸可维持肌肉中ATP的平衡, 减少蛋白质和糖类的分解, 从而改善肉的品质。

3.1 肌肉pH值

动物屠宰后, 由于血液循环的停止, 供氧也会随之停止, 此时动物机体的供能途径将会由有氧的糖酵解转变为通过糖原或葡萄糖的无氧糖酵解。随着无氧供能的进行, 肌肉中糖原酵解产生乳酸, 释放出氢离子, 乳酸和氢离子累积从而使pH值降低, 而pH值对肉色、系水力等均会产生影响^[51]。对大西洋鳕(*Gadus morhua*)的研究发现, 屠宰压力和宰前运动均会降低大西洋鳕肌肉中pH, 过低的pH会使鱼肌肉肉质软化, 影响肉品质^[52]。肌肉中的磷酸肌酸是ATP的主要来源, 磷酸肌酸含量的升高可能延缓宰后肌肉糖酵解的发生, 降低乳酸含量。在陆生动物上的研究表明, 添加肌酸能使宰后肌肉pH升高。祁晶等^[53]对宰前运输应激北京鸭的研究发现, 与对照组(饲喂基础饲料, 静置2 h)和T组(饲喂基础饲料, 运输2 h)相比, T+CMH₁₄₀₀组(饲料添加1 400 mg/kg的一水肌酸, 运输2 h)胸大肌糖原含量有上升趋势, 乳酸含量降低。吴娟^[23]在肉鸭上的研究也发现, 添加一水肌酸能延缓乳酸的堆积。门小明等^[16]在育肥猪上的研究同样显示, 添加一水肌酸能够提高肌肉糖原含量, 降低乳酸生成。对鱼类的研究发现, 饲料中补充肌酸或鱼体注射肌酸使静息时虹鳟幼鱼鱼体的糖原含量显著升高, 但对乳酸含量无显著影响^[24]。也有研究认为, 补充肌酸能够促进腺嘌呤核糖核苷酸(AMP)依赖性蛋白激酶的激活, 使糖原合成酶的表达升高, 进而促进糖原合成^[54]。

3.2 肌肉系水力

系水力是评价肉品质的一项重要指标, pH值的高低会直接影响蛋白质所带电荷数量。pH值较高时, 蛋白质分子自身所带静电荷较

大, 有利于肌肉保持水分; pH值较低时, 蛋白质分子所带负电荷减少, 蛋白质分子发生紧缩, 系水力下降。有研究发现, 斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)的肌肉系水力受到养殖水体盐度的影响, 并随着盐度的增加而降低^[55]。韩新燕等^[37]研究发现, 育肥猪饲喂添加0.25%一水肌酸的饲料, 可使育肥猪宰后24 h背最长肌和半膜肌的pH显著提高, 滴水损失明显降低; James等^[41]的研究同样发现, 添加一水肌酸能降低育肥猪背最长肌失水率。吴昊^[38]在肉鸡基础饲料中分别添加0.4%、0.8%、1.6%的肌酸, 饲喂10 d发现, 随着肌酸添加量的增加, 宰后45 min胸肌pH值呈升高趋势, 滴水损失呈下降趋势。而对樱桃谷鸭的研究也发现, 添加一水肌酸能提高樱桃谷鸭胸肌宰后45 min和宰后24 h pH值, 减少滴水损失。因此, 饲料中添加肌酸可能通过延缓宰后肌肉pH降低, 从而提高系水力。

3.3 肉色

肉色主要取决于肌肉中血红蛋白和肌红蛋白的含量, 而肌肉pH对二者的亲氧能力会产生影响, 进而影响肉色^[28]。Stahl等^[39]、Young等^[35]研究发现, 饲料中添加一水肌酸提高了猪肉的亮度并降低红色度。门小明等^[16]对生长育肥猪的研究同样发现, 一水肌酸能显著提高猪背最长肌肉色亮度和黄度值, 显著降低红色度值。Young等^[56]的研究发现, 添加一水肌酸能增加肉鸡肌肉的亮度, 降低其红色度。对肉鸭的研究同样发现, 添加一水肌酸能使肉鸭胸肌亮度和黄色度显著增加, 红色度降低, 而对腿肌则不同, 其红色度和黄色度显著增加, 亮度却显著降低^[57]。但有学者对育肥猪^[18, 26, 39, 54]的研究结果显示, 饲料中添加一水肌酸对猪的肉色没有影响, 而会显著降低氟烷基基因型猪腿肌、半腱肌及半膜肌的亮度^[58]。

4 展望

肌酸作为肌肉能量代谢过程中的关键分子, 在动物的运动和肌肉的生长过程中发挥重要作用。而由于肌酸主要存在于动物蛋白中, 植物蛋白缺乏肌酸, 因此在当前水产饲料中大量使用植物蛋白的背景下, 肌酸的营养作用以及对肌肉品质的影响值得关注。今后, 应开展水产动物肌酸的合成和代谢方面的基础研究,

以此推动肌酸在不同水产动物饲料中的应用研究, 以期水产养殖业由数量型向质量型发展提供理论和技术支持。

参考文献:

- [1] Michiels J, Maertens L, Buyse J, *et al*. Supplementation of guanidinoacetic acid to broiler diets: effects on performance, carcass characteristics, meat quality, and energy metabolism[J]. *Poultry Science*, 2012, 91(2): 402-412.
- [2] Wyss M, Kaddurahdaouk R. Creatine and creatinine metabolism[J]. *Physiological Reviews*, 2000, 80(3): 1107-1213.
- [3] Marques E P, Wyse A T S. Creatine as a neuroprotector: an actor that can play many parts[J]. *Neurotoxicity Research*, 2019, 36(2): 411-423.
- [4] 谢颖, 谭卫群, 刘琮. 小儿病毒性心肌炎应用磷酸肌酸钠配合大剂量维生素C的治疗价值分析[J]. *中国医药科学*, 2019, 9(10): 50-52.
Xie Y, Tan W Q, Liu C. Therapeutic value of sodium creatine phosphate combined with high-dose of vitamin C in children with viral myocarditis[J]. *China Medicine and Pharmacy*, 2019, 9(10): 50-52(in Chinese).
- [5] 王强. 磷酸肌酸治疗小儿先天性心脏病并发肺炎和心力衰竭的疗效观察[J]. *中国处方药*, 2019, 17(4): 65-66.
Wang Q. Observation on the curative effect of creatine phosphate for treatment of congenital heart disease with pneumonia and heart failure in children[J]. *Journal of China Prescription Drug*, 2019, 17(4): 65-66(in Chinese).
- [6] 姜玉兴, 王戊楼, 高前进. 老年骨骼肌能量代谢与肌酸补剂的影响[J]. *北京体育大学学报*, 2011, 15(50): 9473-9476.
Jiang Y X, Wang X L, Gao Q J. Effects of creatine supplementation on skeletal muscle energy metabolism in old adults[J]. *Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research*, 2011, 15(50): 9473-9476(in Chinese).
- [7] Brosnan J T, da Silva R P, Brosnan M E. The metabolic burden of creatine synthesis[J]. *Amino Acids*, 2011, 40(5): 1325-1331.
- [8] Borchel A., Verleih M., Rebl A, *et al* Creatine metabolism differs between mammals and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *SpringerPlus*, 2014.
- [9] Borchel A, Verleih M, Carsten K, *et al*. Evolutionary

- expression differences of creatine synthesis-related genes: implications for skeletal muscle metabolism in fish[J]. *Scientific Reports*, 2019.
- [10] Nabuurs C I, Choe C U, Veltien A, *et al.* Disturbed energy metabolism and muscular dystrophy caused by pure creatine deficiency are reversible by creatine intake[J]. *The Journal of Physiology*, 2013, 591(2): 571-592.
- [11] Curt M J C, Voicu P M, Fontaine M, *et al.* Creatine biosynthesis and transport in health and disease[J]. *Biochimie*, 2015, 119(5): 146-165.
- [12] Snow R J, Murphy R M. Creatine and the creatine transporter: a review[J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2001, 224(1-2): 169-181.
- [13] Schoch R D, Willoughby D, Greenwood M, *et al.* The regulation and expression of the creatine transporter: a brief review of creatine supplementation in humans and animals[J]. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 2006, 3(1): 60-66.
- [14] Juhn M S, Tarnopolsky M. Oral creatine supplementation and athletic performance: a critical review[J]. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 1998, 8(4): 286-297.
- [15] Burke D G, Candow D G, Chilibeck P D, *et al.* Effect of creatine supplementation and resistance-exercise training on muscle insulin-like growth factor in young adults[J]. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 2008, 18(4): 389-398.
- [16] 门小明, 邓波, 陶新, 等. 一水肌酸及其组合添加物对生长育肥猪胴体组成与肉质相关指标的营养调控研究[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(01): 285-293.
Men X M, Deng B, Tao X, *et al.* Nutritional regulation of creatine and its combination additives on carcass composition and meat quality related indices of growing-finishing pigs[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(01): 285-293(in Chinese).
- [17] 韩剑众, 顾振宇, 吴劲松, 等. 一水肌酸对肥育猪胴体组成和肉质的影响及机理研究[J]. *中国粮油学报*, 2007, 22(3): 101-106.
Han J Z, Gu Z Y, Wu J S, *et al.* Effects and mechanism: creatine monohydrate on carcass characteristics and meat quality of finishing swine[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2007, 22(3): 101-106(in Chinese).
- [18] 门小明, 邓波, 陶新, 等. 一水肌酸对杜浙猪肉质性状、肌肉磷酸原代谢、纤维类型特征及蛋白质溶解度的影响[J]. *动物营养学报*, 2015, 27(5): 1527-1533.
Men X M, Deng B, Tao X, *et al.* Effects of creatine monohydrate on meat quality, phosphagen metabolism, myofiber types and protein solubility in longissimus muscle of duroc × Zhong bai (DZ) crossed pigs[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, 27(5): 1527-1533(in Chinese).
- [19] Lindahl G, Young J F, Oksbjerg N, *et al.* Influence of dietary creatine monohydrate and carcass cooling rate on colour characteristics of pork loin from different pure breeds[J]. *Meat Science*, 2006, 72(4): 624-634.
- [20] Young J F, Bertram H C, Theil P K, *et al.* *In vitro* and *in vivo* studies of creatine monohydrate supplementation to Duroc and Landrace pigs[J]. *Meat Science*, 2007, 76(2): 342-351.
- [21] Lahučký R, Bučko O, Haščík P, *et al.* Effects of creatine and vitamin E on muscle energetic metabolism, antioxidant stability and meat quality of pigs[J]. *Acta Univ. Agric. Silv. Mendelianae Brun*, 2012, 60: 151-160.
- [22] 程灵豪. 一水肌酸对肉鸭生产性能、胴体组成以及肉品质的影响研究[D]. 南京农业大学, 2010.
Cheng L H. Study on the effect of creatine monohydrates on growth performance, carcass composition and meat quality in meat ducks[D]. Nanjing Agricultural University, 2010 (in Chinese).
- [23] 吴娟. 一水肌酸对肉鸭胴体组成、肉品质及宰后肌肉能量代谢的影响研究[D]. 南京农业大学, 2011.
Wu J. Study on the effect of creatine monohydrates on carcass composition, meat quality and energy metabolism of postmortem muscle in duck[D]. Nanjing Agricultural University, 2011(in Chinese).
- [24] Mcfarlane W J, Heigenhauser G J F, McDonald D G. Creatine supplementation affects sprint endurance in juvenile rainbow trout[J]. *Comparative Biochemistry & Physiology Part A- Molecular & Integrative Physiology*, 2001, 130(4): 857-866.
- [25] Tong Y, Zhao M M, Li J L, *et al.* *In ovo* feeding of creatine pyruvate alters energy metabolism in muscle of embryos and post-hatch broilers[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2019, 32(6): 834-841.
- [26] Zhang L, Yue H Y, Zhang H J, *et al.* Transport stress in

- broilers: I. blood metabolism, glycolytic potential, and meat quality[J]. *Poultry Science*, 2009, 88(10): 2033-2041.
- [27] Ramos-Pinto L, Lopes G, Sousa V, *et al.* Dietary creatine supplementation in gilthead seabream (*Sparus aurata*) increases dorsal muscle area and the expression of myod1 and capn1 genes[J]. *Frontiers in Endocrinology*, 2019.
- [28] 李蛟龙. 一水肌酸和胍基乙酸对育肥猪肉质的影响及其作用机制研究[D]. 南京农业大学, 2015.
Li J L. Effect of creatine monohydrate and guanidinoacetic acid supplementation on meat quality of finishing pigs and mechanisms involved[D]. Nanjing Agricultural University, 2015 (in Chinese).
- [29] 夏伟光, 左建军, 冯定远. 肉鸡饲料中添加一水肌酸对骨骼肌肌酸吸收和代谢的影响[J]. *动物营养学报*, 2013, 25(2): 372-381.
Xia W G, Zuo J J, Feng D Y. Effects of diets supplemented with creatine monohydrate on creatine uptake and metabolism in skeletal muscle of broilers[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2013, 25(2): 372-381(in Chinese).
- [30] Baldissera M D, Souza C F, Descovi S N, *et al.* Impairment of branchial energy transfer pathways in disease pathogenesis of *Providencia rettgeri* infection in juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*): remarkable involvement of creatine kinase activity[J]. *Aquaculture*, 2019, 502: 365-370.
- [31] Atashak S, Jafari A. Effect of short-term creatine monohydrate supplementation on indirect markers of cellular damage in young soccer players[J]. *Science & Sports*, 2012, 27(2): 88-93.
- [32] 张勇. 丙酮酸、肌酸及丙酮酸肌酸对肉鸡氨基酸谱的影响及相关酶活性的研究[D]. 南京农业大学, 2010.
Zhang Y. Effect of pyruvate, creatine and creatine-pyruvate on profile of amino-acids and relevant enzyme activity in broiler chickens[D]. Nanjing Agricultural University, 2010 (in Chinese).
- [33] da Silva R P, Kelly K B, Leonard K A, *et al.* Creatine reduces hepatic TG accumulation in hepatocytes by stimulating fatty acid oxidation[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular and Cell Biology of Lipids*, 2014, 1841(11): 1639-1646.
- [34] da Silva R P, Leonard K A, Jacobs R L. Dietary creatine supplementation lowers hepatic triacylglycerol by increasing lipoprotein secretion in rats fed high-fat diet[J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2017, 50: 46-53.
- [35] Young J F, Bertram H C, Rosenvold K, *et al.* Dietary creatine monohydrate affects quality attributes of Duroc but not Landrace pork[J]. *Meat Science*, 2005, 70(4): 717-725.
- [36] 邵明丽. 一水肌酸对肥育猪生长性能、胴体组成和肉质的影响及其作用机理的探讨[D]. 浙江大学, 2003.
Shao M L. The effect and mechanism of creatine monohydrate on growth performance, carcass composition and meat quality of finishing pigs[D]. Zhejiang University, 2003 (in Chinese).
- [37] 韩新燕, 许梓荣, 邵明丽, 等. 一水肌酸对肥育猪胴体组成及肌肉系水力的影响[J]. *动物营养学报*, 2007, 19(4): 401-406.
Han X Y, Xu Z R, Shao M L, *et al.* Effects of creatine monohydrate on carcass composition, drip loss and approach to its mechanism in finishing pigs[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2007, 19(4): 401-406(in Chinese).
- [38] 吴昊. 一水肌酸对肉鸡生产性能的影响及作用机理的研究[D]. 吉林大学, 2013.
Wu H. The effect and mechanism of creatine monohydrate on growth performance in broilers[D]. Jilin University, 2013 (in Chinese).
- [39] Stahl C A, Berg E P. Growth parameters and meat quality of finishing hogs supplemented with creatine monohydrate and a high glycemic carbohydrate for the last 30 days of production[J]. *Meat Science*, 2003, 64(2): 169-174.
- [40] Berg E P, Allee G L. Creatine monohydrate supplemented in swine finishing diets and fresh pork quality: I. a controlled laboratory experiment[J]. *Journal of Animal Science*, 2001, 79(12): 3075-3080.
- [41] Berg E P, Maddock K R, Linville M L. Creatine monohydrate supplemented in swine finishing diets and fresh pork quality: III. evaluating the cumulative effect of creatine monohydrate and alpha-lipoic acid[J]. *Journal of Animal Science*, 2003, 81(10): 2469-2474.
- [42] James B W, Goodband R D, Unruh J A, *et al.* Effect of creatine monohydrate on finishing pig growth performance, carcass characteristics and meat quality[J].

- Animal Feed Science and Technology*, 2002, 96(3-4): 135-145.
- [43] Burns A F, Gatlin D M. Dietary creatine requirement of red drum (*Sciaenops ocellatus*) and effects of water salinity on responses to creatine supplementation[J]. *Aquaculture*, 2019, 506: 320-324.
- [44] Volek J S, Kraemer W J, Bush J A, *et al.* Creatine supplementation enhances muscular performance during high-intensity resistance exercise[J]. *Journal of the American Dietetic Association*, 1997, 97(7): 765-770.
- [45] Volek J S, Duncan N D, Mazzetti S A, *et al.* Performance and muscle fiber adaptations to creatine supplementation and heavy resistance training[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1999, 31(8): 1147-1156.
- [46] Willoughby D S, Rosene J. Effects of oral creatine and resistance training on myosin heavy chain expression[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2001, 33(10): 1674-1681.
- [47] Olsen S, Aagaard P, Kadi F, *et al.* Creatine supplementation augments the increase in satellite cell and myonuclei number in human skeletal muscle induced by strength training[J]. *The Journal of Physiology*, 2006, 573(2): 525-534.
- [48] Valente L M P, Moutou K A, Conceição L E C, *et al.* What determines growth potential and juvenile quality of farmed fish species[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2013, 5(s1): S168-S193.
- [49] Canada P, Engrola S, Mira S, *et al.* Larval dietary protein complexity affects the regulation of muscle growth and the expression of DNA methyltransferases in Senegalese sole[J]. *Aquaculture*, 2018, 491: 28-38.
- [50] Watabe S. Myogenic regulatory factors[J]. *Fish Physiology*, 2001, 18(01): 19-41.
- [51] Hultmann L, Phu T M, Tobiassen T, *et al.* Effects of pre-slaughter stress on proteolytic enzyme activities and muscle quality of farmed Atlantic cod (*Gadus morhua*)[J]. *Food Chemistry*, 2012, 134(3): 1399-1408.
- [52] Kristoffersen S, Tobiassen T, Steinsund V, *et al.* Slaughter stress, postmortem muscle pH and rigor development in farmed Atlantic cod (*Gadus morhua*)[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2006, 41(7): 861-864.
- [53] 祁晶, 张亚茹, 施尧, 等. 一水肌酸对宰前运输应激北京鸭鸭血液指标和肉品质的影响[J]. *中国家禽*, 2017(2): 43-47.
- Qi J, Zhang Y R, Shi Y, *et al.* Effects of creatine monohydrate on plasma variables and meat quality of pekin ducks subjected to preslaughter transport stress[J]. *China Poultry*, 2017(2): 43-47(in Chinese).
- [54] Ju J S, Smith J L, Oppelt P J, *et al.* Creatine feeding increases GLUT4 expression in rat skeletal muscle[J]. *American Journal of Physiology Endocrinology & Metabolism*, 2005, 288(2): E347-E352.
- [55] 张世勇, 邵俊杰, 陈校辉, 等. 盐度对斑点叉尾鲷幼鱼生长性能、肌肉持水力和营养组成的影响[J]. *生物学杂志*, 2018, 35(3): 57-61.
- Zhang S Y, Shao J J, Chen X H, *et al.* Effects of salinities on growth, water binding capacity and nutrients of in channel catfish fingerlings[J]. *Journal of Biology*, 2018, 35(3): 57-61(in Chinese).
- [56] Young J F, Karlsson A H, Henckel P. Water-holding capacity in chicken breast muscle is enhanced by pyruvate and reduced by creatine supplements[J]. *Poultry Science*, 2004, 83(3): 400-405.
- [57] 吴娟, 程灵豪, 高峰, 等. 一水肌酸对肉鸭胴体组成及肉品质的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2011, 34(4): 100-104.
- Wu J, Cheng L H, Gao F, *et al.* Effects of creatine monohydrate on carcass composition and meat quality in ducks[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2011, 34(4): 100-104(in Chinese).
- [58] Maddock R J, Bidner B S, Carr S N, *et al.* Creatine monohydrate supplementation and the quality of fresh pork in normal and halothane carrier pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 2002, 80(4): 997-1004.

Research progress of nutritional effects of creatine on aquatic animals

LIAO Yanqin , ZHANG Chunxiao *

(Key Laboratory of Healthy Mariculture for the East China Sea, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xiamen Key Laboratory for Feed Quality Testing and Safety Evaluation, Fisheries College of Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Creatine (Cr) is an amino acid derivative, also known as *N*-methylphthalic acid or musclin. It has been widely used to improve human health, especially for promoting muscle growth. This paper reviewed the synthesis, transport and storage of creatine in animals, and the role of creatine in energy metabolism in muscle and liver. We analyzed the effects of dietary creatine supplementation on animal growth and slaughter performance, and reviewed the studies for the effects of dietary creatine on meat quality, including muscle pH, water holding capacity and flesh color. Finally, the prospects of further research on application of creatine in aquatic animals were discussed.

Key words: creatine; energy metabolism; meat quality; fish; nutrition and feeding

Corresponding author: ZHANG Chunxiao. E-mail: cxzhang@jmu.edu.cn

Funding projects: China Agriculture Research System (CARS-47); National Natural Science Foundation of China (31972804, 31572625)