

张羽菲,刘虹萍,王丽,等.腹腔注射茶多酚对鳜脱氨和糖脂代谢的影响[J].华中农业大学学报,2025,44(6):241-252.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.06.024

腹腔注射茶多酚对鳜脱氨和糖脂代谢的影响

张羽菲,刘虹萍,王丽,吴崇铭,刘立维,梁旭方

华中农业大学水产学院/华中农业大学鳜鱼研究中心/
长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心,武汉 430070

摘要 为探究茶多酚对鳜氨代谢及糖脂代谢的调控作用,将初始体质量(35.40 ± 1.90)g的健康驯化翘嘴鳜360尾随机分为4组,经腹腔注射0(空白对照,TP0)、25(TP25)、50(TP50)、100(TP100)mg/kg茶多酚溶液,检测注射后6、12、24、48 h鳜各组织及血清代谢指标变化。结果显示,与对照组相比,注射48 h后,各茶多酚注射组鳜血清谷草转氨酶、谷丙转氨酶活性及总蛋白含量显著下降,肝脏 gdh 基因表达显著下调。在糖脂代谢方面,各茶多酚注射组鳜血液葡萄糖和肝糖原含量降低,肌糖原含量升高,肝脏糖酵解关键酶基因(gk, pk)表达量增加,糖异生限速酶基因($pepck$)表达量降低。各茶多酚注射组脂肪合成基因($acca, fas, srebp1$)表达量显著降低,脂肪转运基因($cpt1$)表达量显著增加。其中,TP25组血清高密度脂蛋白、低密度脂蛋白、总胆固醇和甘油三酯含量显著降低。此外,各茶多酚注射组AMPK信号通路关键基因($lkb1, eef2$)表达量显著增加。以上结果表明,茶多酚注射组抑制鳜 gdh 基因表达,减少氨基酸脱氨;通过激活糖酵解与脂肪分解供能,降低蛋白质分解需求,缓解鳜肝脏脂质蓄积;同时通过激活AMPK信号通路抑制糖异生,减少鳜氨基酸消耗。

关键词 茶多酚; 鳜; 氨排泄; 糖代谢; 脂代谢

中图分类号 S965.199; TS272 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)06-0241-12

茶多酚(tea polyphenols, TP),是茶叶的主要化学成分,也是茶叶中多酚类物质的总称^[1]。儿茶素是茶多酚的主要成分^[2],占比高达80%^[3]。表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG)是茶多酚中最有效的活性成分,属于儿茶素,不仅含量最高^[4],还是谷氨酸脱氨酶(glutamate dehydrogenase, GDH)的可逆抑制剂^[5]。GDH和腺苷酸脱氨酶(AMP deaminase, AMPD)是鱼类主要的脱氨酶。GDH主导肝脏中氨基酸的联合转运脱氨,催化谷氨酸生成 α -酮戊二酸并释放氨,其活性直接调控鱼类的氨排泄水平^[6];而AMPD通过水解一磷酸腺苷(AMP)生成一磷酸肌苷(IMP)和氨,在肌肉中参与嘌呤核苷酸循环,进行脱氨供能^[7]。氨基酸的分解代谢(尤其是脱氨基作用)是硬骨鱼类产生氨的主要途径,同时在鱼体的能量代谢中也发挥着关键作用。

作为天然抗氧化剂,茶多酚在畜牧和水产养殖领域备受关注。研究表明,茶多酚不仅能提升水产动物生长性能^[8]与免疫力^[9],还可调节糖脂代谢^[10]。

同时作为糖苷酶抑制剂,还能延缓多糖分解并降低血糖水平^[11]。此外,茶多酚对糖尿病小鼠肝脏糖异生的抑制作用及糖酵解的促进作用亦被证实^[12]。然而,目前关于茶多酚调控鱼类氨基酸代谢与糖脂代谢的研究仍相对较少。腹腔注射茶多酚可规避消化道降解作用,更精准评估其生物学效应。现有腹腔注射茶多酚研究多集中于家禽和鼠类,剂量范围常为25~300 mg/kg^[13-15],且代谢终产物可在给药后6~48 h经排泄物检出^[16]。

鳜(*Siniperca chuatsi*),隶属鲈形目、鮨科、鳜属,俗称桂花鱼、花鲫鱼,为典型肉食性底栖鱼类,终生以活鱼虾为食^[17]。目前人工配合饲料驯养鳜已获突破,但植物性原料引发的高氨排泄问题仍未有效解决。鉴于茶多酚主要成分EGCG可抑制GDH活性,减少脱氨反应,同时兼具促进脂肪分解和血糖调控功能,本研究通过腹腔注射方式探究茶多酚对鳜脱氨及糖脂代谢的影响,旨在为茶多酚在鳜低氨排放养殖中的应用提供理论支撑。

收稿日期: 2025-01-08

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(31802318);中央高校基本科研业务费专项(2662021SCPY005)

张羽菲, E-mail: 1256741593@qq.com

通信作者: 刘立维, E-mail: liuliwei@mail.hzau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 供试鱼和养殖条件

试验用翘嘴鲌来自华中农业大学鳜育种创新基地,暂养4周后选择大小均匀、体格健壮、无损伤、摄食活跃并具有活力的(35.40±1.90)g 鳜360尾,随机分到12个循环系统式圆柱状的实验缸(养殖水体体积:0.3 m³)中,每个实验缸放置30尾,其中每3个缸为重复缸。养殖条件控制溶氧7~8 mg/L,水温19~24℃,pH 7.8~8.1。在暂养期间,每日10:00和17:00以适口营养饲料正常喂养。

1.2 试验设计

正式试验开始前一天,于10:00以适口营养饲料饲喂鳜,禁食24 h后开始腹腔注射试验。茶多酚(含量98%)购自广州康本生物科技有限公司,用无菌生理盐水配制成茶多酚溶液备用。鳜用150 mg/L MS-222(Sigma, USA)麻醉后逐一捞出进行腹腔注射。试验设置4个组,其中1组为空白对照组,标记为TP0,其余3组为茶多酚注射组,分别注射25、50、100 mg/kg 剂量的茶多酚溶液1 mL,依次标记为TP25、TP50、TP100。

1.3 样品采集

分别在鳜注射茶多酚6、12、24、48 h后,每个重复缸中随机选取6尾鳜,麻醉后进行静脉取血,室温放置1~2 h后3 000 r/min 离心15 min,收集上清,制得血清样品,于-80℃冻存,用于检测血清生化指标及血糖含量。然后在冰浴条件下取肝脏、背部肌肉组织置于无菌EP管中,-80℃保存待测。

1.4 样品分析

采用全自动生化分析仪(Selectra-XL, VITAL-AB)测定血清总蛋白(total serum protein, TP)、白蛋白(albumin, ALB)、甘油三酯(triglyceride, TG)、总胆固醇(total cholesterol, TCHO)、高密度脂蛋白(high density lipoprotein, HDL)、低密度脂蛋白(low density lipoprotein, LDL)、谷草转氨酶(aspartate aminotransferase, AST)、谷丙转氨酶(alanine transaminase, ALT)和碱性磷酸酶(alkaline phosphatase, AKP)水平,具体操作如下:将冻存血清样本解冻后,按照中生北控生物科技股份有限公司试剂盒说明书配制工作液,每个贝克曼杯中加入200 μL样品,将工作液与样品放置于仪器内进行检测。

血糖与组织中糖原含量分别采用南京建成生物工程研究所试剂盒(货号A154-2-1、A043-1-1)进行

测定。血糖通过己糖激酶法检测,组织中糖原含量通过蒽酮比色法检测,具体操作严格遵循试剂盒说明书进行。

使用Trizol试剂(Invitrogen, USA)提取各组织总RNA,经多功能酶标仪(Bio Tek, Winooski, USA)检测260 nm和280 nm吸光度值,检测总RNA浓度后,-80℃保存样品。采用Evo M-MLV反转录预混型试剂盒(艾科瑞,湖南)进行逆转录合成cDNA,产物于-20℃保存备用。根据GenBank数据库中已公布的鳜序列,按照以下原则设计引物:引物长度为18~27 bp;扩增长度为80~200 bp;避免在引物的3'端使用碱基A;引物序列的GC含量一般为40%~60%;上、下游引物的退火温度相差不应大于5℃。具体引物序列见表1,由生工生物工程有限公司合成。使用Light Cycle 480 II PCR仪(Roche, Germany)进行实时荧光定量反应。每个反应体系20 μL,包含:2×ChamQ Universal SYBR qPCR Master Mix 10 μL,上、下游引物(浓度为10 mmol/L)各0.4 μL,cDNA模板1 μL,ddH₂O 8.2 μL。反应程序设置为:95℃ 30 s, 95℃ 5 s, 60℃ 30 s, 40个循环,溶解曲线(从65℃以0.5℃/s速率逐渐升到95℃,每隔6 s采集1次数据信号),每个样本设置3个技术重复。以rpl13a基因为内参基因,采用2^{-ΔΔCt}法量化目的基因的相对表达量^[18]。

1.5 数据分析

试验中所有数据均以平均值±标准误(mean±SE)表示。数据统计分析前,用SPSS 25.0软件进行单样本t检验(one sample t-test)剔除偏离总体平均值的样本数据。各组数据之间的比较采用单因素方差分析(one-way ANOVA)。运用Duncan's检验法进行多重比较, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 腹腔注射茶多酚后鳜血清生化指标的变化

由表2可知,腹腔注射茶多酚6 h后,TP50组ALB、HDL、LDL、TCHO均为最低,且显著低于其他3组($P<0.05$);TP25组和TP100组TG显著高于其他2组($P<0.05$);AST、ALT、总蛋白TP和AKP各组之间均无显著差异($P>0.05$)。12 h后,对照组ALT显著高于其他3组;TP25组TP显著高于对照组和TP50组;TP25组ALB、LDL、TCHO、TG和AKP均显著高于其他3组($P<0.05$)。24 h后,对照

表1 鱊荧光定量引物序列

Table 1 Real-time primer sequence for Chinese perch

基因名称 Gene	引物 Primer	引物序列 Primer sequence(5'-3')	退火温度/°C Temperature
谷氨酸脱氢酶 Glutamate dehydrogenase	sc-gdh-F sc-gdh-R	GACGACGACCCCAACTTCT GACCCGCTTCCTCTCTGC	58
腺苷酸脱氢酶 Adenosine monophosphate deaminase	sc-ampd-F sc-ampd-R	CATTCCCTCCCGTGT TCTGTCTGCGGAGTTGGT	58
磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶 Phosphoenolpyruvate carboxykinase	sc-pepck-F sc-pepck-R	CGTGCTGGACTGGATGTT CCAAGCCCTGGAGGTTCA	57.5
核糖体蛋白 L13A Ribosomal protein L13A	sc-rpl13a-F sc-rpl13a-R	CACCCATGACAAGAGGAAGC TGTGCCAGACGCCAAG	59
葡萄糖激酶 Glucokinase	sc-gk-F sc-gk-R	AAGGTGGAGACCAAGAAC TGCCCTTGTCAATGTCC	58
丙酮酸激酶 Pyruvate kinase	sc-pk-F sc-pk-R	CGCCCTCGCTGCCTATT TGCGGAAGTTGACCCTGTT	57
乙酰辅酶α羧化酶 Acetyl-coA carboxylase alpha	sc-acca-F sc-acca-R	TATGCCCACTTACCCAAATGC TGCCACCATAACCAATCTCGTT	58
脂肪酸合酶 Fatty acid synthase	sc-fas-F sc-fas-R	ATGAAATCACCCCTGTAATCTT CTTATCTGACTACGGAATGAATCG	57
胆固醇调节元件结合蛋白 Sterol regulatory element binding protein 1	sc-srebp1-F sc-srebp1-R	CTCCCTCCTTCTGTCGGCTC TCATTGCTGGCAGTCGTGG	58
肉碱棕榈酰转移酶 1 Carnitine palmitoyltransferase 1	sc-cpt1-F sc-cpt1-R	ATGGTGTATTGGCTGGAGTCT CTGTGTGGTAGGTTTCCTTGAT	57.5
肝激酶 B1 Liver kinase B1	sc-lkb1-F sc-lkb1-R	GACGGGGCACTTAAATC GTGTTACTCCAGCAGACCAA	58
真核延长因子 2 Eukaryotic elongation factor 2	sc-eef2-F sc-eef2-R	TCTGCTGTTATCCCGCCT TCGCACACTCCTCCTCT	58

组 HDL、LDL 和 TCHO 均显著低于其他 3 组; ALT 随着注射茶多酚剂量的增加呈现下降趋势, TP100 组含量最低; 其中 AST、TP、ALB 和 AKP 各组之间均无显著差异 ($P>0.05$)。48 h 后, 对照组 AST、ALT 和 TP 均显著高于其他 3 组; TP25 组 HDL、LDL、TCHO 和 TG 均显著低于其他 3 组, 其中 ALB、AKP 显著低于对照组 ($P<0.05$)。此外还发现, 随着注射后时间的增加, 同一组别的各指标也发生了显著变化。各组的 ALT 活性均在 48 h 时显著最高, 12 h 时显著最低。随着注射时间增加, 对照组 AST、TP 均无显著差异 ($P>0.05$), 而 TP25 组和 TP100 组 AST 活性呈现降低趋势, 且在 48 h 时活性最低; TP25、TP50 和 TP100 组的 TP 含量均在 48 h 时最低 ($P<0.05$), 而 12 h 与 24 h 时无显著差异 ($P>0.05$)。对照组 HDL、LDL 和 ALB 含量均在 12 h 时最低 ($P<0.05$), 48 h 时显著最高, 而在不同注射组之间, 这些指标的变化趋势有所不同。其中, TP25 组 HDL、LDL、TCHO、TG 和 AKP 含量均随着注射时间增加呈现先上升后下降的趋势, 在 12 h 时最高、48 h 时最低 ($P<0.05$); 但 ALB 含量在 48 h 时最低

($P<0.05$), 而在 6、12 和 24 h 时均无显著差异 ($P>0.05$)。TP50 组和 TP100 组 HDL、LDL、ALB、TCHO 和 TG 含量均为 24 h 时最高 ($P<0.05$)。

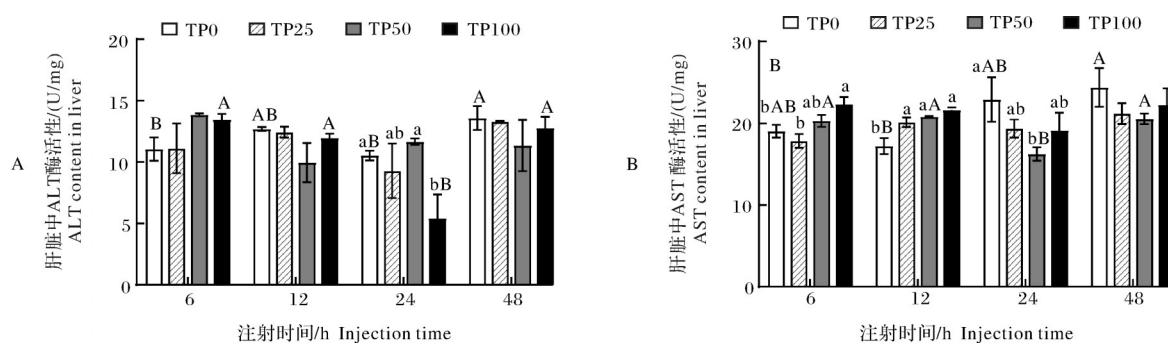
2.2 腹腔注射茶多酚后鱊肝脏转氨酶活性分析

如图 1A 所示, 在腹腔注射茶多酚 24 h 后, TP100 组的肝脏 ALT 活性显著低于其他 3 组 ($P<0.05$), 而在 6、12 和 48 h 时各组间均无显著差异 ($P>0.05$)。此外, 对照组的肝脏 ALT 活性随时间增加呈波动趋势, 在 6 h 和 24 h 时酶活性最低、48 h 时酶活性最高 ($P<0.05$)。TP100 组的 ALT 活性呈现先下降后上升趋势, 24 h 时酶活性最低 ($P<0.05$), 而 TP25 组和 TP50 组在不同注射时间之间均无显著差异。由图 1B 可知, 与对照组相比, TP100 组的肝脏 AST 活性在 6 h 时最高 ($P<0.05$)。在 12 h 时所有注射组 AST 活性均显著上调。在 24 h 时 AST 活性呈现下降趋势, 而在 48 h 时各组间均无显著差异 ($P>0.05$)。对照组的 AST 活性呈现先下降后上升的趋势, 48 h 时的酶活性显著高于 12 h ($P<0.05$)。TP50 组的 AST 活性在 24 h 时显著低于其他时间点 ($P<0.05$)。

Table 2 Analysis of serum biochemical indexes of Chinese perch after intraperitoneal injection of tea polyphenols

注射时间/h Injection time	组别 Group	谷草转氨酶/ (U/L) AST		谷丙转氨酶/ (U/L) ALT		总蛋白/(g/L) TP		白蛋白/(g/L) ALB		高密度脂蛋白/ (mmol/L) HDL		低密度脂蛋白/ (mmol/L) LDL		总胆固醇/ (mmol/L) TCO		甘油三酯/ (mmol/L) TG		碱性磷酸酶/ (U/L) AKP	
		6	TP0	61.23±6.50	5.94±0.55B	24.52±4.40	8.67±0.60aA	10.38±0.93aA	6.25±0.56B	0.21±0.02cC	0.49±0.05aB	0.31±0.01bB	1.52±0.02bB	4.18±0.10abA	3.65±0.06bB	46.30±7.65	43.82±5.47B		
12	TP25	90.51±10.23A	6.67±0.14AB	29.91±4.60A	10.38±0.93aA	10.38±0.93aA	6.20±1.21AB	23.05±1.21AB	6.25±0.56B	0.25±0.01bcB	1.39±0.01bD	2.47±0.23ab	4.54±0.17ab	5.96±0.26aA	41.39±6.40				
	TP50	75.63±9.19	7.58±0.62A	27.39±2.36b	9.20±0.71aB	25.31±2.65AB	6.20±0.70B	27.39±2.36b	6.18±0.44cB	0.19±0.01cC	1.06±0.01bC	3.92±0.01bB	3.51±0.16cC	4.25±0.30bB	65.94±10.88				
	TP100	77.43±7.64AB	7.04±1.19aB	28.45±3.89aA	12.61±0.67aA	2.87±0.49bC	81.34±6.10A	38.45±3.89aA	12.61±0.67aA	0.86±0.04aA	4.39±0.28aA	6.04±0.18aA	3.69±0.03cB	3.77±0.14abB	50.28±6.18b				
	TP0	74.41±8.67	3.21±0.12bC	28.08±3.01bA	7.96±0.85cAB	3.80±0.43bC	98.68±11.50A	30.42±3.51abA	10.36±0.85bAB	0.30±0.03bBC	0.31±0.04bB	1.49±0.19bB	1.62±0.07bC	4.39±0.18aA	7.11±0.57aA	86.23±9.65aA			
24	TP0	87.02±9.46	7.37±1.29aB	25.82±2.44	9.13±0.71A	32.15±2.18A	76.20±8.28AB	5.44±0.57abB	10.86±1.43A	0.32±0.02cAB	0.47±0.09bB	1.82±0.20cAB	4.08±0.11bcB	4.81±0.13bAB	49.82±0.22b				
	TP25	77.97±4.41	5.86±0.48abB	30.08±3.25A	10.72±0.65A	4.32±0.63bC	81.10±12.42AB	4.32±0.63bC	33.73±2.61A	10.83±0.99A	0.51±0.01abA	2.83±0.04aA	4.22±0.15bB	4.32±0.16bC	55.99±6.46b				
	TP50	86.51±10.19a	10.68±0.70aA	26.77±1.84a	9.41±0.96aA	8.03±0.43bA	51.89±8.67bB	16.57±1.79bB	4.90±0.71bB	0.37±0.03aA	0.65±0.01aA	3.12±0.01aA	4.26±0.08aA	4.55±0.57abAB	61.94±6.11				
	TP100	86.51±10.19a	10.68±0.70aA	26.77±1.84a	9.41±0.96aA	8.03±0.43bA	51.89±8.67bB	16.57±1.79bB	4.90±0.71bB	0.37±0.03aA	0.65±0.01aA	3.12±0.01aA	4.26±0.08aA	4.55±0.57abAB	61.94±6.11				
48	TP0	49.81±6.98b	8.27±0.41bA	19.17±2.37bB	9.12±1.62aAB	8.53±0.30bA	17.22±1.84bB	7.77±0.65abB	9.12±1.62aAB	0.38±0.06aB	1.80±0.21aB	1.89±0.09abB	1.26±0.04ab	4.25±0.15abB	4.43±0.04abAB	39.46±6.03b			
	TP25	50.20±7.58bB	8.53±0.30bA	17.22±1.84bB	7.77±0.65abB	8.53±0.30bA	17.22±1.84bB	7.77±0.65abB	9.12±1.62aAB	0.38±0.06aB	1.80±0.21aB	1.89±0.09abB	1.26±0.04ab	4.25±0.15abB	4.43±0.04abAB	39.46±6.03b			
	TP50	50.20±7.58bB	8.53±0.30bA	17.22±1.84bB	7.77±0.65abB	8.53±0.30bA	17.22±1.84bB	7.77±0.65abB	9.12±1.62aAB	0.38±0.06aB	1.80±0.21aB	1.89±0.09abB	1.26±0.04ab	4.25±0.15abB	4.43±0.04abAB	39.46±6.03b			
	TP100	50.20±7.58bB	8.53±0.30bA	17.22±1.84bB	7.77±0.65abB	8.53±0.30bA	17.22±1.84bB	7.77±0.65abB	9.12±1.62aAB	0.38±0.06aB	1.80±0.21aB	1.89±0.09abB	1.26±0.04ab	4.25±0.15abB	4.43±0.04abAB	39.46±6.03b			

注:同列数据标不同小写字母表示同一注射时间不同组别之间差异显著($P<0.05$),标不同大写字母表示同一组别不同注射时间之间差异显著($P<0.05$),无字母或相同学母表示差异不显著($P>0.05$)。Note: Different superscript lowercase letters in the same column of the list indicate significant differences between different groups at the same injection time ($P<0.05$), different superscript uppercase letters indicate significant differences between different injection times in the same group ($P<0.05$), and no letter or the same letter indicates that the differences are not significant ($P>0.05$)。



A:ALT; B:AST。不同小写字母表示同一注射时间不同组别之间差异显著($P<0.05$)，不同大写字母表示同一组别不同注射时间之间差异显著($P<0.05$)；下同。A: ALT; B: AST. Different lowercase letters indicate significant differences between groups at the same injection time ($P<0.05$) , and different uppercase letters indicate significant differences between groups at different injection times ($P<0.05$) ; the same as below.

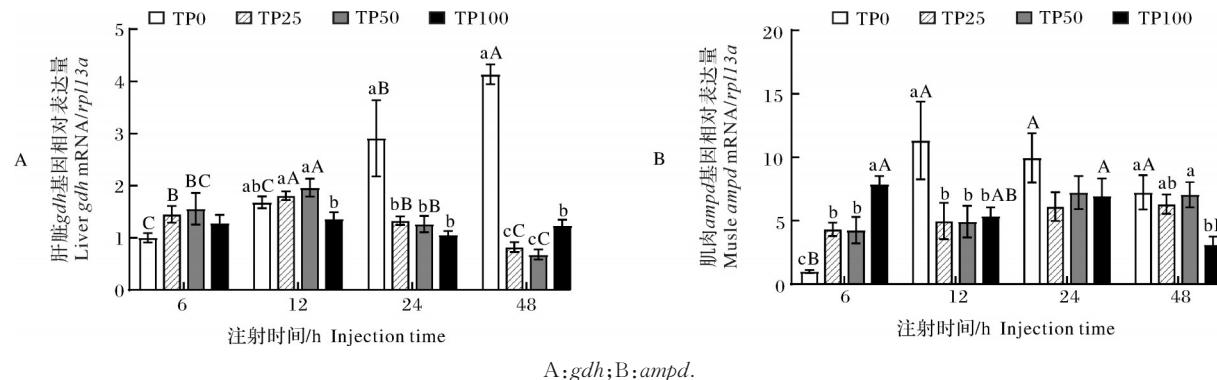
图1 腹腔注射茶多酚后鱊肝脏转氨酶活性

Fig. 1 Liver transaminase activity in Chinese perch after intraperitoneal injection of tea polyphenols

2.3 腹腔注射茶多酚后鱊脱氨关键基因表达量的变化

检测鱊肝脏组织脱氨相关基因表达量(图2A)发现,注射组的 gdf 基因相对表达量在24、48 h时均显著低于对照组($P<0.05$)。此外,随着时间增加,对照组的 gdf 基因相对表达显著上调,在48 h时达到最高;而注射组中,TP25组和TP50组的 gdf 基因相对表达量均呈现先升高再下降的趋势,在48 h时达到最低($P<0.05$)。检测鱊肌肉组织 $ampd$ 基因的

相对表达量(图2B),发现6 h时,注射组的 $ampd$ 基因相对表达量呈现升高趋势;12 h时,注射组的 $ampd$ 基因相对表达量显著低于对照组($P<0.05$);24 h时,各组之间无显著差异($P>0.05$);48 h时TP100组的 $ampd$ 基因相对表达量显著低于其他3组($P<0.05$)。此外,随着时间增加,对照组的 $ampd$ 基因相对表达量显著上调,6 h时显著最低;而TP100组的 $ampd$ 基因相对表达量在48 h时最低($P<0.05$)。



A: gdf ; B: $ampd$.

图2 腹腔注射茶多酚后鱊脱氨相关基因相对表达量

Fig. 2 Gene expression related to deamination in Chinese perch after intraperitoneal injection of tea polyphenols

2.4 腹腔注射茶多酚后鱊血糖和肝肌糖原的变化

由图3A可知,在注射组中,鱊血糖含量随着注射浓度的增加呈现下降趋势,TP100组的血糖含量最低($P<0.05$)。此外,随着时间增加,对照组的血糖含量呈现上升趋势,在24和48 h时的含量显著高于6和12 h($P<0.05$)。图3B显示,在腹腔注射后12、24和48 h,对照组的肝糖原含量均显著高于TP100组($P<0.05$);48 h时,TP50组和TP100组的

肝糖原含量显著低于其他2组($P<0.05$)。并且随着时间增加,各组肝脏糖原含量均呈现先上升后下降的趋势,对照组在6 h时含量最低,而注射组在48 h时含量最低($P<0.05$)。图3C显示,在腹腔注射24 h和48 h时,鱊肌肉中糖原含量随着注射浓度增加呈现上升趋势,对照组的肌糖原含量显著低于其他3组($P<0.05$)。此外,随着时间增加,注射组在24和48 h时肌糖原含量均显著高于6和12 h($P<0.05$)。

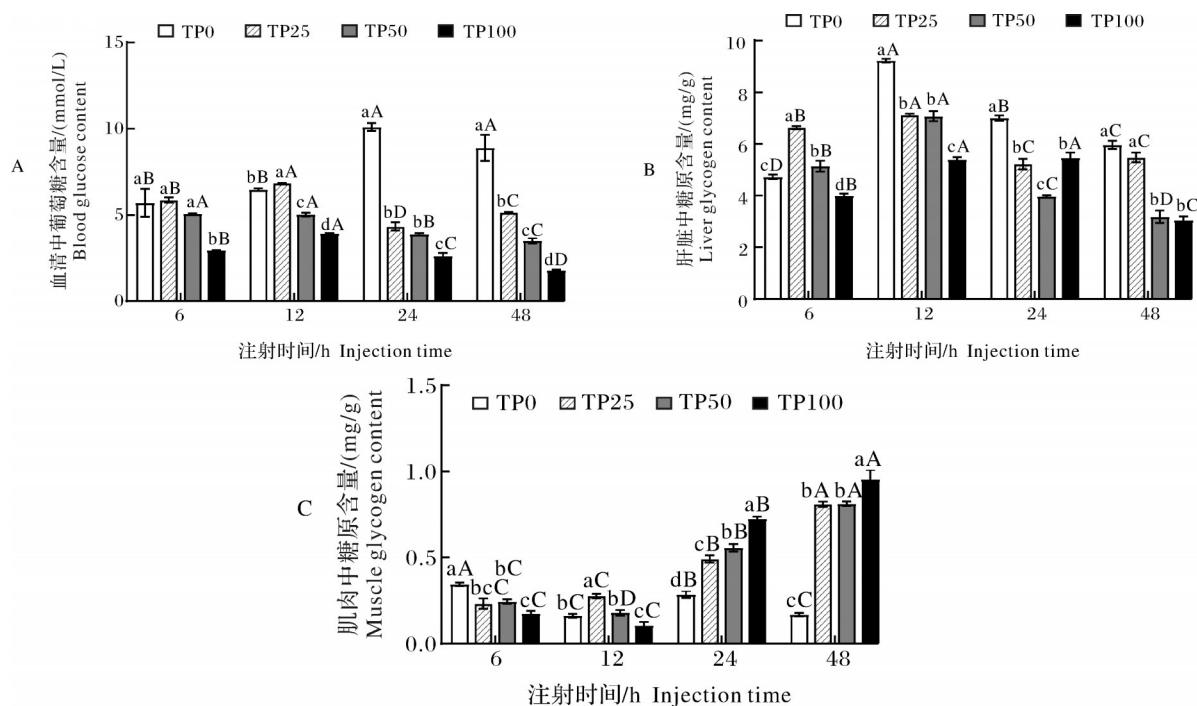


图3 腹腔注射茶多酚后鱊血清中葡萄糖(A)、肝糖原(B)和肌糖原(C)含量

Fig. 3 Glucose in serum (A), liver (B) and muscle (C) glycogen concentrations from intraperitoneal injection of tea polyphenols

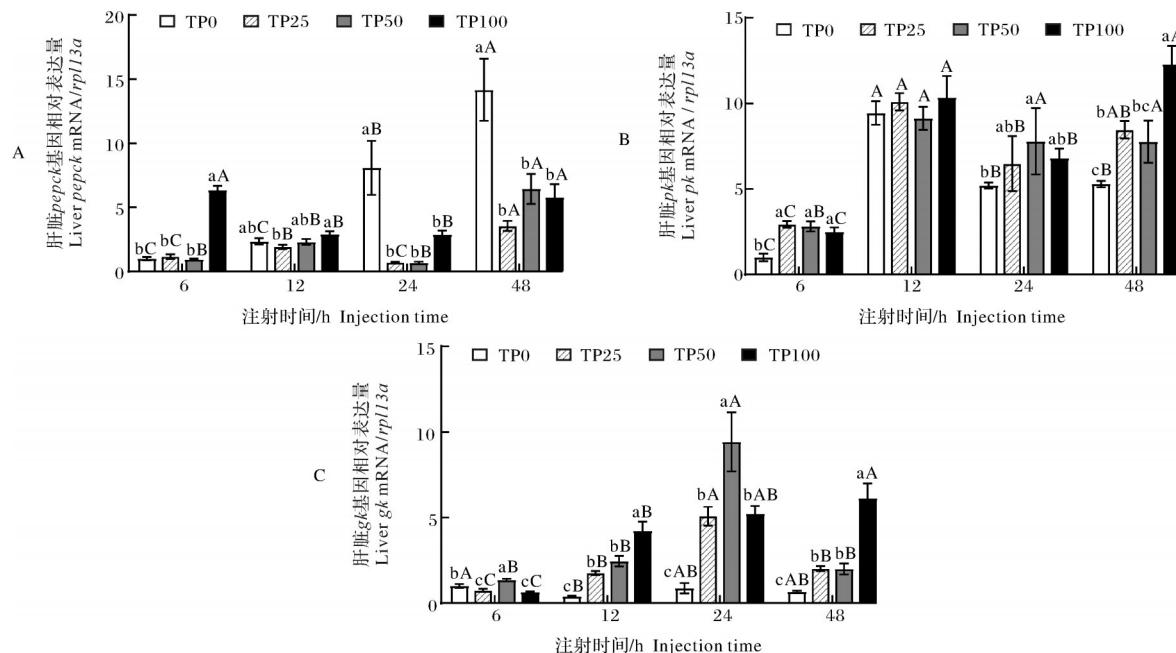


图4 腹腔注射茶多酚后鱊肝脏糖代谢相关基因相对表达量

Fig. 4 Gene expression related to liver glucose metabolism in Chinese perch after intraperitoneal injection of tea polyphenols

2.5 腹腔注射茶多酚后鱊糖代谢关键基因表达量的变化

检测鱊肝脏组织糖异生关键基因(图4A)和糖酵解关键基因(图4B、C)表达量发现,在腹腔注射茶多

酚24和48 h后,对照组的pepck基因相对表达量显著高于其他3组($P<0.05$);而在6和12 h时,TP100组的pepck基因相对表达量最高。此外,随着时间增加,对照组的pepck基因相对表达量呈现上升趋势。

注射组的 *pepck* 基因相对表达量均在 48 h 时最高, 但仍显著低于对照组 ($P < 0.05$)。在腹腔注射 6、24 和 48 h 后, 对照组的 *gk*、*pk* 基因相对表达量均显著低于其他 3 组 ($P < 0.05$)。TP50 组的 *gk* 基因相对表达量在 24 h 时最高。TP100 组的 *gk* 基因相对表达量在 48 h 时最高。随着时间增加, 对照组、TP25 组和 TP50 组的 *gk* 基因相对表达量均呈现先上升后下降的趋势, 12 h 时最高、6 h 时最低 ($P < 0.05$)。TP100 组的 *pk* 基因相对表达量在 12 和 48 h 时显著高于其他 3 组 ($P < 0.05$)。并且随着注射时间增加, TP100 组的 *pk* 基因相对表达量呈现上升趋势, 48 h 时最高 ($P < 0.05$)。

2.6 腹腔注射茶多酚后鱊脂代谢关键基因表达量的变化

检测鱊肝脏组织脂肪合成相关基因(图 5A~C)

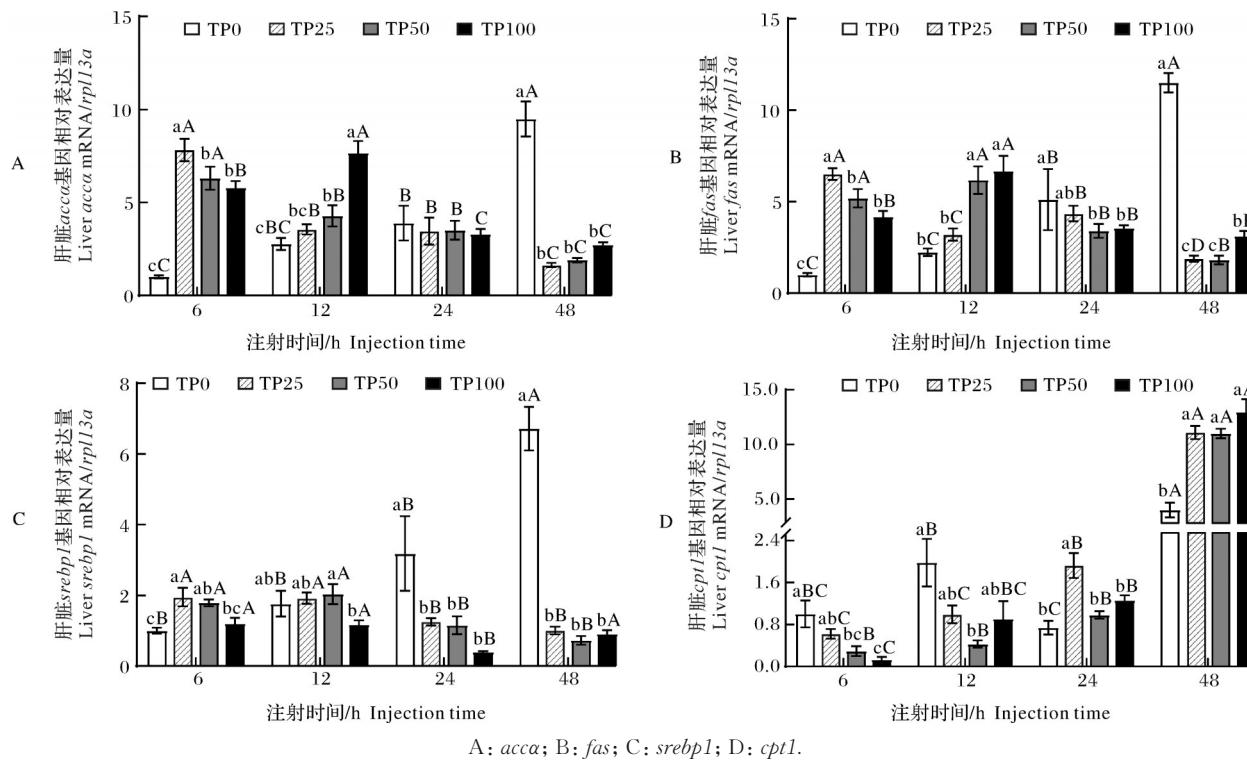


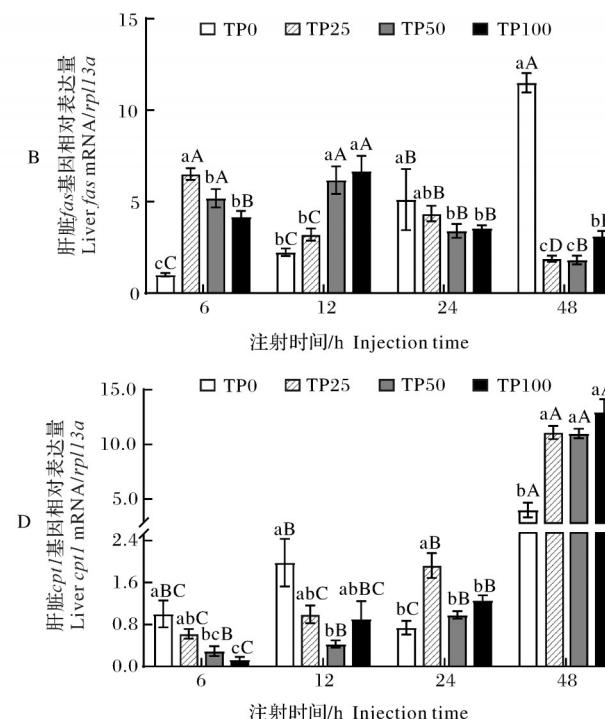
图 5 腹腔注射茶多酚后鱊肝脏脂代谢相关基因相对表达量

Fig. 5 Gene expression related to liver lipid metabolism in Chinese perch after intraperitoneal injection of tea polyphenols

2.7 腹腔注射茶多酚后鱊 AMPK 信号通路关键基因表达量的变化

由图 6A 可知, 在腹腔注射茶多酚 24 h 和 48 h 后, 注射组鱊的 *lkb1* 基因相对表达量均高于对照组, 且 48 h 时随着注射浓度增加呈现上升趋势。随着注射时间增加, 各组 *lkb1* 基因相对表达量均呈现上升趋势, 且在 48 h 时表达量达到最高 ($P < 0.05$)。图 6B

和脂肪分解相关基因(图 5D)相对表达量发现, 在腹腔注射茶多酚 6 h 后, 对照组的 *accα*、*fas* 基因相对表达量均显著低于其他 3 组 ($P < 0.05$), 且随着注射浓度增加呈现下降趋势; 对照组的 *srebp1* 基因相对表达量显著低于 TP25 组和 TP50 组 ($P < 0.05$)。48 h 时, 对照组的 *accα*、*fas*、*srebp1* 基因相对表达量均显著高于其他 3 组 ($P < 0.05$), 且注射组之间 *accα*、*srebp1* 基因相对表达量无显著差异 ($P > 0.05$)。在腹腔注射茶多酚 6 h 后, *cpt1* 基因相对表达量呈现下降趋势 ($P < 0.05$), 24 h 时 TP25 组显著高于其他 3 组 ($P < 0.05$), 48 h 时, 对照组显著低于注射组 ($P < 0.05$)。此外, 随着注射时间增加, 48 h 时注射组的 *accα*、*fas*、*srebp1* 基因相对表达量均最低, 而 *cpt1* 基因相对表达量最高 ($P < 0.05$)。



显示, 在腹腔注射茶多酚 6 h 后, TP25 组的 *eef2* 基因相对表达量显著高于其他 3 组 ($P < 0.05$); 48 h 时, 注射组的 *eef2* 基因相对表达量均显著高于对照组 ($P < 0.05$)。随着注射时间增加, 对照组、TP50 组和 TP100 组的 *eef2* 基因相对表达量均呈现上升趋势, 且在 48 h 时表达量达到最高 ($P < 0.05$)。

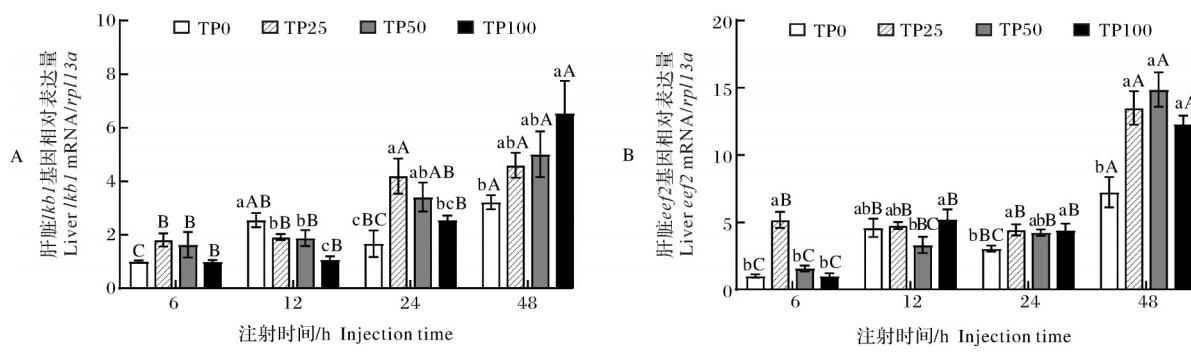


图6 腹腔注射茶多酚后鱲肝脏AMPK信号通路相关基因相对表达量

Fig. 6 Gene expression related to liver AMPK signaling pathway in Chinese perch after intraperitoneal injection of tea polyphenols

3 讨 论

血清生化指标是评估鱼类生理和免疫健康的重要参数,能够反映机体功能损伤程度^[19]。其中,TCHO和TG是监测肝脏脂代谢是否正常运转的重要指标^[20],HDL和LDL则构成胆固醇双向转运体系^[21]。本研究发现,TP50组在注射6 h及TP25组在注射48 h时,鱲血清HDL、LDL和TCHO含量显著降低,表明茶多酚通过促进鱼体的内源性脂肪运输来调节脂质代谢。同时还发现TP25组各脂质指标在注射12 h时含量最高,而TP50组和TP100组在24 h时含量最高,这表明低浓度茶多酚可以快速调节脂质代谢,而高浓度茶多酚在长时间内更有助于脂肪代谢。这一发现与Ahmed等^[22]关于茶多酚通过降低TCHO和LDL改善动物脂质代谢的结论相符。血清TP是鱼体内环境稳态的关键调节因子^[23],直接影响蛋白质的消化吸收^[24]。孙旋辉等^[25]研究发现,鱼体加速蛋白质分解供能会导致TP浓度下降。本研究中,注射组TP在注射48 h时均显著低于对照组,表明茶多酚会加速机体蛋白分解代谢。血清中AST、ALT是衡量动物应激的敏感指标^[26],当应激导致肝脏受损时血清中其活性会升高^[27]。本研究结果表明,注射组鱲ALT在24和48 h时均显著低于对照组,且随着注射浓度的增加呈现下降趋势,此外48 h时,注射组AST也显著降低,表明茶多酚可以降低肝脏细胞代谢,从而减缓肝脏损伤。这与茶多酚对尼罗罗非鱼^[28]和虹鳟^[29]生化指标的影响结果相似,即茶多酚具有保护肝脏的作用。此外,AKP是肝脏损伤敏感性指标^[30],本研究中注射组AKP均未出现显著变化,表明本试验剂量茶多酚未对肝脏造成代谢压力。

AST、ALT还是氨基酸代谢中的关键酶,其活

性水平反映氨基酸代谢程度的强弱^[31]。本研究中,TP100组在注射24 h时鱲ALT活性最低($P<0.05$),表明茶多酚可能通过抑制转氨酶来影响氨基酸代谢。GDH介导的联合脱氨作用是鱼类氨基酸分解代谢的主要方式^[32],其也被认为是蛋白质利用和氨排泄的重要标志因子^[33]。本研究发现,gdh基因表达在茶多酚处理组呈现剂量和时间依赖性抑制,即TP100组在12 h时便出现gdh基因表达下调,而TP25组和TP50组在24 h时才显现显著下降。同时对照组gdh基因表达随着时间增加呈现上升趋势,表明正常状态下,鱲机体脱氨作用逐渐增强。而注射茶多酚后脱氨受到抑制,这一结果与Li等^[5]关于EGCG特异性抑制GDH的研究结果一致。此外,TP100组鱲肌肉ampd基因表达量在48 h显著降低,表明高浓度茶多酚同时也会抑制AMPD调控的脱氨反应。

血糖水平是衡量糖代谢的重要指标^[34]。葡萄糖在血液中被各组织吸收,发挥其关键功能。其中一部分葡萄糖通过氧化作用为机体新陈代谢供应能量,剩余部分则转变为糖原或脂肪^[35]。肝糖原的主要作用是维持血糖稳定。目前鱲仍然不能很好地利用饲料中的糖分,这可能会导致高血糖现象^[36]。本研究中,注射组血糖含量在24和48 h时均显著低于对照组,与Wang等^[37]研究中体内注射茶多酚可以降低小鼠血糖含量的发现一致,表明茶多酚也可有效降低鱲血糖。Kobayashi等^[38]研究还表明茶多酚可通过抑制葡萄糖转运,降低餐后血糖。注射组肝糖原含量在12 h后均显著低于对照组,这可能是因为当血糖下降时,肝糖原在糖原分解酶的催化下分解成葡萄糖^[39]。并且随着注射时间增加,TP50组和TP100组鱲肝糖原含量显著降低,表明时间越长,高

浓度茶多酚越促使机体肝糖原分解供能。值得注意的是,尽管肌糖原也可以分解供能,但注射组肌糖原含量在24和48 h时显著高于对照组,这可能是由于肝糖原分解维持血糖稳态后,肌肉组织对过剩的葡萄糖进行糖原合成,为机体后续生长储备能量^[40]。

糖酵解和糖异生是调节体内葡萄糖稳态的重要代谢通路^[41],其中 gk 、 pk 是糖酵解关键基因, $pepck$ 为糖异生关键基因。本研究中,注射组 $pepck$ 基因表达在24和48 h时显著下调,而注射组 gk 、 pk 基因表达均显著上调,表明茶多酚抑制鱗肝脏糖异生,促进肌糖原合成和糖酵解,并且TP100组 gk 、 pk 基因在48 h时表达量最高($P<0.05$)。这与余江勤等^[42]、Li等^[43]研究结果相似,茶多酚可通过抑制蛋白激酶A(PKA)信号通路,降低肝细胞中的糖产生,调节体内葡萄糖稳态。肝激酶B1(lkb1)是AMPK信号通路的核心调控因子,真核延伸因子2(EEF2)通过促进特定蛋白质的合成,间接影响AMPK信号通路^[44]。本研究中,注射组 $lkb1$ 和 $eef2$ 基因表达高于对照组,表明茶多酚可能通过调节AMPK信号通路来进一步调控糖代谢,维持机体能量平衡。此外,EGCG还通过介导Ca(2+)/calmodulin依赖的蛋白激酶(CaMKK)激活AMPK信号通路来抑制PEPCK的表达,进而抑制肝糖异生^[45]。并且还有研究发现绿茶多酚也可上调 $ampk$ 基因的表达^[46]。

肝脏是机体进行脂质合成与代谢的器官^[47],肝细胞内脂质沉积是一个涉及脂质运输、摄取、合成与分解代谢的复杂过程^[32]。本研究发现注射组在48 h时显著影响了脂代谢相关基因的表达,其中脂质合成关键基因 $acc\alpha$ 、 fas 及转录因子 $srebp1$ ^[48]表达量均显著低于对照组,而脂肪酸β氧化限速酶 $cpt1$ 表达量则显著增加。这种“抑制合成-促进分解”的双重调控模式,从分子层面表明茶多酚具有缓解肝脏脂质沉积的作用机制,与王素敏等^[8]研究中“茶多酚可以通过抑制脂质吸收与合成,或调节肠道微生物菌群结构等实现降脂效果,从而减缓肝脏脂肪肥大变性”的发现一致。

综上所述,茶多酚注射组通过显著抑制鱗肝脏 gdh 基因的表达,有效减少脱氨作用;同时通过下调鱗肝脏 $pepck$ 基因表达,抑制糖异生并促进肌糖原合成,从而降低鱗血糖水平并增强糖酵解代谢。茶多酚注射组还显著降低鱗 $acc\alpha$ 、 fas 、 $srebp1$ 基因表达量,增加 $cpt1$ 基因表达量,从而减少脂肪酸合成并促进

脂肪酸β氧化,有效缓解鱗肝脏脂肪蓄积。此外,腹腔注射100 mg/kg茶多酚48 h后,其抑制鱗脱氨和促进糖酵解作用效果最为显著。基于上述结果,本研究推测茶多酚通过促进脂肪分解与糖酵解,同时抑制脱氨与糖异生过程,从而提高鱗对饲料蛋白质的利用率。

参考文献 References

- [1] TIAN B, WANG Y X, WANG T J, et al. Structure and functional properties of antioxidant nanoemulsions prepared with tea polyphenols and soybean protein isolate [J]. Journal of oleo science, 2019, 68(7):689-697.
- [2] ZHANG L, HO C T, ZHOU J, et al. Chemistry and biological activities of processed *Camellia sinensis* teas: a comprehensive review [J]. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2019, 18(5):1474-1495.
- [3] HIGDON J V, FREI B. Tea catechins and polyphenols: health effects, metabolism, and antioxidant functions [J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2003, 43(1):89-143.
- [4] HUANG H T, CHENG T L, LIN S Y, et al. Osteoprotective roles of green tea catechins [J/OL]. Antioxidants, 2020, 9(11): 1136 [2025-01-08]. <https://doi.org/10.3390/antiox9111136>.
- [5] LI M, ALLEN A, SMITH T J. High throughput screening reveals several new classes of glutamate dehydrogenase inhibitors [J]. Biochemistry, 2007, 46(51):15089-15102.
- [6] YANG R, LIU X G, LIU Y, et al. Dissolved oxygen and ammonia affect ammonia production via GDH/AMPK signaling pathway and alter flesh quality in Chinese perch (*Siniperca chuatsi*) [J]. Fish physiology and biochemistry, 2024, 50(3): 1237-1249.
- [7] LI J, ZHANG Y P, LIANG X F, et al. mTOR-Mediated protein synthesis by inhibiting protein catabolism in Chinese perch (*Siniperca chuatsi*) [J]. Biochemical and biophysical research communications, 2020, 533(1):23-29.
- [8] 王素敏,徐欢欢,黄业伟,等.茶多酚的降脂作用及其机制研究进展[J].食品研究与开发,2016,37(10):219-224. WANG S M, XU H H, HUANG Y W, et al. Review on the effect of tea polyphenols in hypolipidemic and its mechanism [J]. Food research and development, 2016, 37(10):219-224 (in Chinese with English abstract).
- [9] YOUSAF S, BUTT M S, SULERIA H R, et al. The role of green tea extract and powder in mitigating metabolic syndromes with special reference to hyperglycemia and hypercholesterolemia [J]. Food & function, 2014, 5(3):545-556.
- [10] 王芬,裴会敏,陈志,等.茶多酚功能及代谢机理研究进展[J].现代食品,2020,26(14):21-22. WANG F, PEI H M, CHEN Z, et al. The research progress on the function and metabolic

- mechanism of tea polyphenols[J].Modern food, 2020, 26(14): 21-22 (in Chinese with English abstract).
- [11] 郑科勤.茶多酚的药理作用探讨[J].福建茶叶, 2018, 40(1): 33-34. ZHENG K Q. Discussion on pharmacological effects of tea polyphenols[J]. Tea in Fujian, 2018, 40(1): 33-34 (in Chinese).
- [12] REN Z K, YANG Z Y, LU Y, et al. Anti-glycolipid disorder effect of epigallocatechin-3-gallate on high-fat diet and STZ-induced T2DM in mice[J]. Molecular medicine reports, 2020, 21(6): 2475-2483.
- [13] LV J R, XUE R L, ZHAO J, et al. An optimal dose of tea polyphenols protects against global cerebral ischemia/reperfusion injury[J]. Neural regeneration research, 2013, 8(9): 783-791.
- [14] 张梁,陈欣,陈博,等.茶多酚体内吸收、分布、代谢和排泄研究进展[J].安徽农业大学学报, 2016, 43(5): 667-675. ZHANG L, CHEN X, CHEN B, et al. Research progress in the absorption, distribution, metabolism and excretion of tea polyphenols *in vivo*[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2016, 43(5): 667-675 (in Chinese with English abstract).
- [15] 冯文娟,谢皓然,陈爽直,等.茶多酚通过mTOR/PINK1线粒体自噬信号通路改善衰老2型糖尿病大鼠肾脏足细胞损伤[J].营养学报, 2024, 46(3): 255-262. FENG W J, XIE H R, CHEN S Z, et al. Tea polyphenols improve kidney podocyte injury in aged type 2 diabetes rats via mTOR/PINK1 mitophagy signaling pathway[J]. Acta nutrimenta sinica, 2024, 46(3): 255-262 (in Chinese with English abstract).
- [16] 吴文华,吴镇洲.茶多酚在机体内的代谢[J].蚕桑茶叶通讯, 2004(2): 36-37. WU W H, WU Z Z. Metabolism of tea polyphenols in the body[J]. Newsletter of sericulture and tea, 2004 (2): 36-37 (in Chinese).
- [17] 牛树辉,李红燕,潘厚军,等.鲜活饵料和人工配合饲料对鱊肌肉营养成分和质构特性的影响[J].水生生物学报, 2023, 47(1): 37-44. NIU S H, LI H Y, PAN H J, et al. Effects of live prey fish and artificial diet on nutrient compositions and texture properties in the muscle of Mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) [J]. Acta hydrobiologica sinica, 2023, 47(1): 37-44 (in Chinese with English abstract).
- [18] LIVAK K J, SCHMITTGEN T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta CT}$ method[J]. Methods, 2001, 25(4): 402-408.
- [19] FAZIO F. Fish hematology analysis as an important tool of aquaculture: a review[J]. Aquaculture, 2019, 500: 237-242.
- [20] CHEN Y J, TIAN L X, YANG H J, et al. Effect of protein and starch level in practical extruded diets on growth, feed utilization, body composition, and hepatic transaminases of juvenile grass carp, *Ctenopharyngodon idella* [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2012, 43(2): 187-197.
- [21] HOSSEINI S M, NOURMOHAMMADI R, NAZARIZADEH H, et al. Effects of lysolecithin and xylanase supplementation on the growth performance, nutrient digestibility and lipogenic gene expression in broilers fed low-energy wheat-based diets [J]. Journal of animal physiology and animal nutrition, 2018, 102(6): 1564-1573.
- [22] AHMED S T, LEE J W, MUN H S, et al. Effects of supplementation with green tea by-products on growth performance, meat quality, blood metabolites and immune cell proliferation in goats[J]. Journal of animal physiology and animal nutrition, 2015, 99(6): 1127-1137.
- [23] ALEXANDER C, SAHU N P, PAL A K, et al. Haemato-immunological and stress responses of *Labeo rohita* (Hamilton) fingerlings: effect of rearing temperature and dietary gelatinized carbohydrate[J]. Journal of animal physiology and animal nutrition, 2011, 95(5): 653-663.
- [24] CHOI D G, HE M, FANG H, et al. Replacement of fish meal with two fermented soybean meals in diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Aquaculture nutrition, 2020, 26 (1): 37-46.
- [25] 孙旋辉,邴旭文,丁炜东,等.高温应激对鱊幼鱼血清生化指标及肝脏sod基因和热休克蛋白基因表达的影响[J].南方农业学报, 2022, 53(12): 3539-3547. SUN X H, BING X W, DING W D, et al. Effects of high-temperature stress on serum biochemical indexes, liver *sod* gene and heat shock protein gene expression of juvenile *Siniperca chuatsi* [J]. Journal of southern agriculture, 2022, 53 (12): 3539-3547 (in Chinese with English abstract).
- [26] LU X, PENG D, CHEN X R, et al. Effects of dietary protein levels on growth, muscle composition, digestive enzymes activities, hemolymph biochemical indices and ovary development of pre-adult red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) [J/OL]. Aquaculture reports, 2020, 18: 100542 [2025-01-08]. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100542>.
- [27] XIE M X, ZHOU W, XIE Y D, et al. Effects of *Cetobacterium somerae* fermentation product on gut and liver health of common carp (*Cyprinus carpio*) fed diet supplemented with ultra-micro ground mixed plant proteins[J/OL]. Aquaculture, 2021, 543: 736943 [2025-01-08]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736943>.
- [28] DANIEL P C. 茶多酚(TP)饲料添加剂对尼罗罗非鱼生长、体成分、血液生化、抗氧化和免疫能力的影响[D].南京:南京农业大学, 2021. DANIEL P C. The effects of tea polyphenol (TP) feed additive on growth, body composition, plasma parameters, antioxidant responses, and immunity capacity of genetically improved farmed tilapia (GIFT) (*Oreochromis niloticus*) [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [29] 徐奇友,李婵,许红,等.茶多酚对虹鳟生长性能、生化指标和非特异性免疫指标的影响[J].动物营养学报, 2008, 20(5): 547-553. XU Q Y, LI C, XU H, et al. Effects of tea polyphenols on growth performance, blood biochemical indices and non-specific immune indices of rainbow trout (*Oncorhynchus*

- mykiss) [J]. Chinese journal of animal nutrition, 2008, 20(5) : 547-553 (in Chinese with English abstract).
- [30] KIM J H, KANG J C. Changes in hematological parameters, plasma Cortisol, and acetylcholinesterase of juvenile rockfish, *Sebastes schlegelii* supplemented with the dietary ascorbic acid [J]. Aquaculture reports, 2016, 4:80-85.
- [31] 王香丽,麦康森,徐玮,等.蛋氨酸对瓦氏黄颡鱼幼鱼肝脏及血浆中谷草转氨酶和谷丙转氨酶活力的影响[J].中国海洋大学学报,2015,45(9):49-53. WANG X L, MAI K S, XU W, et al. Influence of dietary methionine on the activity of liver and plasma glutamic-pyruvic and glutamic oxalacetic transaminases of juvenile darkbarbel catfish (*Pelteobagrus vachelli*) [J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(9) : 49-53 (in Chinese with English abstract).
- [32] LEE W H, OH J Y, MAENG P J. The NADP⁺-dependent glutamate dehydrogenase Gdh1 is subjected to glucose starvation-induced reversible aggregation that affects stress resistance in yeast [J]. Journal of microbiology, 2019, 57 (10) : 884-892.
- [33] YANG R, LIU X G, LIU Y, et al. Dissolved oxygen and ammonia affect ammonia production via GDH/AMPK signaling pathway and alter flesh quality in Chinese perch (*Siniperca chuatsi*) [J]. Fish physiology and biochemistry, 2024, 50 (3) : 1237-1249.
- [34] 杨儒,张冬,吴璐瑶,等.谷氨酸和 α -酮戊二酸对鱥生长、脱氨及糖代谢的影响[J].水生生物学报,2024,48(3):384-392. YANG R, ZHANG D, WU L Y, et al. Glutamate and α -ketoglutarate on the growth, deamination, and glucose metabolism of Chinese perch (*Siniperca chuatsi*) [J]. Acta hydrobiologica sinica, 2024, 48 (3) : 384-392 (in Chinese with English abstract).
- [35] ROJAS P, ALBALAT A, SANTIGOSA E, et al. Dietary effects on insulin and glucagon plasma levels in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and gilthead sea bream (*Sparus aurata*) [J]. Aquaculture nutrition, 2009, 15(2):166-176.
- [36] REN M C, AI Q H, MAI K S, et al. Effect of dietary carbohydrate level on growth performance, body composition, apparent digestibility coefficient and digestive enzyme activities of juvenile cobia, *Rachycentron canadum* L. [J]. Aquaculture research, 2011, 42(10):1467-1475.
- [37] WANG L, ZENG B H, LIU Z W, et al. Green tea polyphenols modulate colonic microbiota diversity and lipid metabolism in high-fat diet treated HFA mice [J]. Journal of food science, 2018, 83(3):864-873.
- [38] KOBAYASHI Y, SUZUKI M, SATSU H, et al. Green tea polyphenols inhibit the sodium-dependent glucose transporter of intestinal epithelial cells by a competitive mechanism [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2000, 48(11):5618-5623.
- [39] 宋银都,赵亮亮,马晨夕,等.池塘溶氧昼夜变化对鱥葡萄糖代谢和血糖含量的影响[J].渔业科学进展,2023,44(3):124-132. SONG Y D, ZHAO L L, MA C X, et al. The effect of diel variation of dissolved oxygen content in a pond on the glucose metabolism and plasma glucose level of *Siniperca chuatsi* [J]. Progress in fishery sciences, 2023, 44(3) : 124-13 (in Chinese with English abstract).
- [40] KATZ A. A century of exercise physiology: key concepts in regulation of glycogen metabolism in skeletal muscle [J]. European journal of applied physiology, 2022, 122(8):1751-1772.
- [41] LI X Y, ZHENG S X, JIA S C, et al. Oxidation of energy substrates in tissues of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. Amino acids, 2020, 52(6):1017-1032.
- [42] 余江勤,赵振新.茶多酚的理化特性及在水产养殖中的应用研究[J].安徽农业科学,2023,51(19):5-11. YU J Q, ZHAO Z X. Study on the physicochemical properties and application of tea polyphenols in aquaculture [J]. Anhui agricultural science, 2023, 51(19):5-11 (in Chinese with English abstract).
- [43] LI X P, CHEN Y M, SHEN J Z, et al. Epigallocatechin gallate inhibits hepatic glucose production in primary hepatocytes via downregulating PKA signaling pathways and transcriptional factor FoxO1 [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2019, 67(13):3651-3661.
- [44] WONG A K F, HOWIE J, PETRIE J R, et al. AMP-activated protein kinase pathway: a potential therapeutic target in cardiometabolic disease [J]. Clinical science, 2009, 116 (8) : 607-620.
- [45] WEI S N, LI W, YU Y, et al. Ginsenoside compound K suppresses the hepatic gluconeogenesis via activating adenosine-5' monophosphate kinase: a study *in vitro* and *in vivo* [J]. Life sciences, 2015, 139:8-15.
- [46] 吴神群,李玉壬,陈春凤,等.茶多酚与肠道微生物的相互作用及其对人体健康的影响[J].华中农业大学学报,2022,41(5):41-49. WU S Q, LI Y R, CHEN C F, et al. Interaction between tea polyphenols and intestinal microorganism and their effects on human health [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(5) : 41-49 (in Chinese with English abstract).
- [47] 李全杰,朱昊俊,强俊,等.饲料中添加刺五加对吉富罗非鱼脂质沉积、抗氧化能力及肠道消化酶和微生物的影响[J].水生生物学报,2023,47(9):1396-1407. LI Q J, ZHU H J, QIANG J, et al. Fat deposition, antioxidant capacity, digestive enzymes, and gut microbiome associated with diets containing *Siberian ginseng* in genetically improved farmed tilapia (GIFT, *Oreochromis niloticus*) [J]. Acta hydrobiologica sinica, 2023, 47 (9) : 1396-1407 (in Chinese with English abstract).
- [48] SHEARER G C, SAVINOVA O V, HARRIS W S. Fish oil: How does it reduce plasma triglycerides? [J]. Biochimica et physica acta (BBA) : molecular and cell biology of lipids, 2012, 1821(5):843-851.

Effects of intraperitoneal injection of tea polyphenols on deamination and gluconeogenesis processes in Chinese perch (*Siniperca chuatsi*)

ZHANG Yufei, LIU Hongping, WANG Li, WU Chongming, LIU Liwei, LIANG Xufang

College of Fisheries/Chinese Perch Research Center, Huazhong Agricultural University/
Engineering Research Center of Green Development for Conventional Aquatic Biological
Industry in the Yangtze River Economic Belt, Ministry of Education, Wuhan 430070, China

Abstract To investigate the effects of tea polyphenols on deamination and glycolipid metabolism in Chinese perch, healthy and well-trained fish with an initial body weight of (35.40 ± 1.90) g were intraperitoneally injected with different doses of tea polyphenol solution (0, 25, 50, and 100 mg/kg), designated as TPO (blank control group), TP25, TP50, and TP100 groups, respectively. Metabolism-related indices in tissues and serum were measured at 6 h, 12 h, 24 h, and 48 h after injection. The results showed that, compared to the control group, serum levels of AST, ALT, and TP were significantly reduced in the tea polyphenol-injected groups, and the expression of the liver *gdh* gene was significantly downregulated after 48 h. Regarding glycolipid metabolism, blood glucose and liver glycogen levels decreased in all tea polyphenol-injected groups, while muscle glycogen content increased. The expression of key liver glycolysis enzyme genes (*gk*, *pk*) was upregulated, whereas the expression of the gluconeogenesis-limiting enzyme gene (*pepck*) was downregulated. Additionally, the expression of fat synthesis genes (*accα*, *fas*, *srebp1*) was significantly reduced, while the expression of the fat transporter gene (*cpt1*) was significantly increased in all tea polyphenol-injected groups. Among these, the TP25 group exhibited significant reductions in serum levels of high-density lipoprotein (HDL), low-density lipoprotein (LDL), total cholesterol (TCHO), and triglyceride (TG). Furthermore, the expression of key genes in the AMPK signaling pathway (*lkb1*, *eef2*) was significantly upregulated in all tea polyphenol-injected groups. In summary, the tea polyphenol injection group directly inhibited the expression of the *gdh* gene, thereby reducing amino acid deamination. It also decreased the demand for protein catabolism by activating glycolysis and lipolysis to supply energy, which alleviated the accumulation of liver lipids. Additionally, it inhibited gluconeogenesis through the AMPK signaling pathway, reducing amino acid consumption. The results of this study indicate that tea polyphenols regulate low ammonia emissions through multiple pathways, providing a theoretical basis for the development of efficient and healthy breeding practice in Chinese perch.

Keywords tea polyphenols; *Siniperca chuatsi*; ammonia excretion; glucose metabolism; lipid metabolism

(责任编辑:边书京)