



两种多糖对齐口裂腹鱼生长、血清抗氧化指标及组织镉积累量的影响

李彦红¹, 张飞飞¹, 石艳平¹, 廖茂雯¹, 刘 涵¹,
李 麟¹, 王永佳², 邬应龙^{1*}

(1. 四川农业大学食品学院, 农产品加工及贮藏工程省重点实验室, 四川 雅安 625014;

2. 雅安市农产品质量监测检验中心, 四川 雅安 625014)

摘要: 为研究 0.40% 硫酸软骨素 (CS) 和酸解氧化魔芋葡甘露聚糖 (AOKGM) 对齐口裂腹鱼生长、抗氧化及镉胁迫之后抗氧化性能和组织中 (肝脏、肾脏和鳃) 镉积累量的影响, 实验选取 450 尾初始体质量为 (98.00±8.54) g 的齐口裂腹鱼分为 3 组 (对照组、AOKGM 组和 CS 组), 进行为期 8 周的养殖实验, 然后每个实验组选取 120 尾齐口裂腹鱼暴露在镉环境中, 进行 15 d 的镉胁迫实验 (镉浓度分别为 0、0.10、0.25 和 1.00 mg/L), 分别对 2 种多糖在齐口裂腹鱼生长及抗氧化性能方面进行相关研究, 以及分析镉胁迫后 2 种多糖的抗氧化性能和组织中镉的积累量。结果显示, 与对照组相比, 2 种多糖显著提高了齐口裂腹鱼的特定生长率、脾体指数和头肾指数; 粗脂肪、灰分和粗蛋白质相对于对照组也有显著影响。CS 和 AOKGM 均显著提高血清超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、总蛋白 (TP) 和一氧化氮 (NO) 含量, 降低葡萄糖 (GLU) 含量; CS 能显著提高血清谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-Px) 活性和胆固醇 (TC) 含量, 降低丙二醛 (MDA) 含量。结果显示, 与镉浓度 0 mg/L 相比, MDA 含量在镉浓度为 1.00 mg/L 时最高, SOD 活性在镉浓度为 1.00 mg/L 时最低, GSH-Px 活性在镉浓度为 0.25 和 1.00 mg/L 时显著降低, NO 含量在镉浓度为 0.25 和 1.00 mg/L 时显著升高。镉胁迫实验中, 与对照组相比, 2 种多糖组的 SOD 活性显著提高, MDA 含量降低; NO 含量在镉浓度 0.10~1.00 mg/L 胁迫时显著降低; CS 显著提高镉浓度 0.10、0.25 mg/L 胁迫下的 GSH-Px 活性, AOKGM 组 GSH-Px 活性在镉浓度为 0.25、1.00 mg/L 时显著高于对照组。与无镉组对比, 齐口裂腹鱼肝脏、肾脏和鳃镉的积累量在各镉浓度下显著增加; 而 CS 和 AOKGM 均能够降低机体组织镉含量。研究表明, 在饲料中添加 0.40% 的 2 种多糖均能提高齐口裂腹鱼生长、抗氧化性能, 降低镉胁迫下鱼体肝脏、肾脏和鳃中镉的积累量, 缓解镉对齐口裂腹鱼造成的氧化损伤, 为齐口裂腹鱼饲料的开发提供新的理论依据。

关键词: 齐口裂腹鱼; 硫酸软骨素; 酸解氧化魔芋葡甘露聚糖; 生长; 抗氧化; 镉积累量

中图分类号: S 963.73

文献标志码: A

收稿日期: 2019-10-19 修回日期: 2020-06-24

资助项目: 四川省科技厅重点研发项目 (2019YFN0048); 四川农业大学“211”工程双支计划 (2016)(03571650)

第一作者: 李彦红 (照片), 从事食品营养与健康研究, E-mail: 2258110641@qq.com

通信作者: 邬应龙, E-mail: wuyinglong99@163.com



齐口裂腹鱼 (*Schizothorax prenanti*) 隶属于鲤科 (Cyprinidae), 裂腹鱼属 (*Schizothorax*), 是一种硬骨鱼, 主要分布于长江上游, 因其肉质鲜美、营养丰富, 富含必需氨基酸和不饱和脂肪酸而受到广大消费者的喜爱, 所以它是一种具有开发潜力的冷水鱼^[1-2]。随着人类和工业活动的发展, 重金属的污染和集约化养殖都会给渔业带来巨大的经济损失, 并严重影响人类的健康。多糖, 一般聚合度大于 10, 分子质量为数万至数百万, 因为其具有提高免疫、抗病毒、抗癌、抗氧化、降糖调脂等多种功能而广泛应用于人类生产和生活当中^[3-4]。目前国内外就多糖对鱼类的影响已有研究, 如黄芪多糖、壳聚糖、褐藻多糖等被应用于鲤 (*Cyprinus carpio*)^[5-6]、虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)^[7]、黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 等^[8]。研究表明不同的多糖成分差异比较大, 对鱼类的抗氧化性能的影响不一。

硫酸软骨素 (chondroitin sulfate, CS) 是一种硫酸化糖胺聚糖, 由 D-葡萄糖醛酸和 N-乙酰-D-氨基半乳糖以 1,3 糖苷键连接形成二糖, 而二糖单位之间以 β -1,4 糖苷键连接而成, 平均分子质量为 5~50 ku, 主要存在于人和动物软骨组织中, 具有良好的抗炎抗氧化活性, 能够降血脂血糖、调节免疫、清除自由基, 并且食用安全^[9-10]。目前, 富含 CS 的营养保健品和药品已得到深入开发和应用。但是关于 CS 抗氧化性能方面的研究主要集中于以大鼠为模型动物, 如倪睿等^[11] 研究认为 CS 对慢性酒精中毒导致大鼠机体氧化损伤具有一定的保护作用, 其抗氧化功能可能通过增强大鼠体内抗氧化酶活性, 改善肝脏组织病理损伤来实现。魔芋葡甘露聚糖 (konjac glucomannan, KGM) 是魔芋块茎中的活性多糖, 具有促进动物生长发育、提高机体抗氧化及免疫的功能^[12]。酸解氧化魔芋葡甘露聚糖 (acidolysis oxidated konjac glucomannan, AOKGM) 是将 KGM 进行氧化酸解反应后所制得的, 其溶胶黏度和分子量降低, 提高了应用范围^[13]。目前已有研究表明在饲料中添加 AOKGM 能够提高齐口裂腹鱼抗氧化能力和免疫应答能力^[14]。但是关于 AOKGM 在镉胁迫后齐口裂腹鱼抗氧化性能方面的影响还未见报道。

基于此, 本研究以齐口裂腹鱼为动物模型, 研究了 CS 和 AOKGM 对鱼体生长和抗氧化性能的影响, 并且通过镉胁迫实验进一步了解这 2 种多糖在齐口裂腹鱼抗氧化性能和组织镉积累方

面的影响, 为研究饲料中多糖对鱼类营养和健康的作用提供新思路。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

AOKGM 和 CS(鸡) 由四川农业大学食品学院实验室自制^[15-16], 鱼粉、豆粕、麸皮、多维+胆碱、矿物质、磷酸二氢钙购自四川农业大学动物营养所; 菜油、面粉、淀粉购自雅安市雨城区农贸市场; 齐口裂腹鱼 450 尾 [(98.00±8.54) g] 购自雅安市雅鱼公司同一批鱼种; 丙二醛 (malondialdehyde, MDA)、谷胱甘肽过氧化物酶 (glutathione peroxidase, GSH-Px)、超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、总蛋白 (total protein, TP)、一氧化氮 (nitric oxide, NO)、白蛋白 (albumin, ALB)、胆固醇 (cholesterol, TC)、甘油三酯 (triglyceride, TG)、葡萄糖 (glucose, GLU) 购自南京建成生物工程研究所; 冰醋酸、盐酸、无水乙醇等均为分析纯; 1 g/L 镉母液配制: 称取 2.031 6 g 的 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5 \text{H}_2\text{O}$ 溶于 1 L 的蒸馏水中, 待完全溶解后, 避光保存备用。

1.2 仪器与设备

SANYO-MLS3750 高压灭菌锅 (西海联化玻仪器化工有限公司); 03A-4 恒温培养箱 (申贤恒温设备厂); SW-CJ-IF 净化工作台 (苏州净化设备有限公司); SZ-1 型旋涡混匀器 (金坛市晶玻实验仪器厂); pHs-3C 型精密 pH 计 (北京赛多利斯仪器系统有限公司); Flash 全波长扫描式多功能酶标仪 (芬兰 Thermo scientific 公司); 低温冷冻离心机 (德国 Eppendorf 公司); 7500 电感耦合等离子体质谱仪 (7500 ICP-MS, 美国 Agilent Technologies 公司)。

1.3 饲料投喂及分组

所有原料过 40 目筛, 按 Chen 等^[14] 和 Zheng 等^[15] 饲料配方表制备基础饲料 (表 1); 向基础饲料中分别添加 0.40% AOKGM^[13]、0.40% CS^[17], 分别标记为 AOKGM 组、CS 组, 对照组为不添加多糖组。将 3 组饲料配制成等氮等能实验饲料, 多糖与饲料充分混合后加工成直径为 1.00 mm 的颗粒状饲料, 烘干后保存于 -20°C 冰箱中。

1.4 饲养管理

将同一批鱼种用 20 mg/L 的 KMnO_4 消毒

表1 饲料配方和营养水平表(干重)

Tab. 1 Composition and nutrient of the experimental diets (dry weight)

成分 content	饲料 diets		
	对照组 control	AOKGM	CS
原料/% ingredient			
鱼粉 fish meal	42.00	42.00	42.00
面粉 wheat flour	25.40	25.40	25.40
豆粕 soybean meal	21.00	21.00	21.00
淀粉 starch	4.60	4.20	4.20
酸解氧化魔芋葡甘露聚糖 AOKGM	0.00	0.40	0.00
硫酸软骨素 CS	0.00	0.00	0.40
菜油 rapeseed oil	3.00	3.00	3.00
麸皮 bran	1.00	1.00	1.00
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1.50	1.50	1.50
胆碱与鱼用多维 ^a vitamin premix+choline ^a	1.00	1.00	1.00
矿物质 ^b mineral premix ^b	0.50	0.50	0.50
营养水平 nutrition level			
粗蛋白/% crude protein	36.40	36.40	36.40
粗脂肪/% crude lipid	5.10	5.10	5.10
总能/(MJ/kg) TE	16.53	16.46	16.46

注: 以上含量以干基计; a. 每千克饲料含各种维生素量为VA 6 000 IU, VB₁ 0.72 mg, VB₂ 5.76 mg, VB₆ 4.212 mg, VC 55.8 mg, VD 1 000 IU, VE 30 mg, VK 30.46 mg, 尼克酸 27.72 mg, 泛酸 27 mg, 生物素 0.16 mg; 每千克饲料含各种胆碱量为肌醇 58.8 mg, 氯化胆碱 700 mg。b. 每千克饲料含各种矿物质质量为锌 30 mg, 锰 10 mg, 铜 3 mg, 铁 60 mg, 硒 0.2 mg, 碘 1 mg

Notes: the above content is based on dry basis, a. vitamin content per kilogram of feed, VA 6 000 IU, VB₁ 0.72 mg, VB₂ 5.76 mg, VB₆ 4.212 mg, VC 55.8 mg, VD 1 000 IU, VE 30 mg, VK 30.46 mg, niacin 27.72 mg, pantothenic acid 27 mg, biotin 0.16 mg, various choline contents per kg of feed, inositol 58.8 mg, choline chloride 700 mg; b. content of various minerals per kg of feed, Zn 30 mg, Mn 10 mg, Cu 3 mg, Fe 60 mg, Se 0.2 mg, I 1 mg

15 min, 均匀分配至鱼缸中并饲喂基础饲料驯养 14 d 后, 按照实验设计将鱼种随机分为 3 个组(每组 3 个重复, 每个重复 50 尾), 分别为对照组(control)、AOKGM 组和 CS 组。每天以每缸鱼总重量的 1.3% 投喂饲料, 平均分为 3 等份, 分别于 10:00、15:00、20:00 投喂饲料, 并且于 8:00 和 18:00 对鱼缸进行换水, 清除缸内饲料残留物和粪便, 每隔 2 天对缸体进行擦拭清洗。实验期间水温为 13~20 °C, pH 值为 7.4~7.6。饲养时间为 8 周, 24 h 不间断充氧, 保持微流水。正常养

殖实验结束, 从各个实验组中各选择 120 尾健康的齐口裂腹鱼暴露在镉浓度分别为 0、0.10、0.25 和 1.00 mg/L 的水体环境中, 每个镉浓度设为 1 个组, 每组设有 3 个重复, 每个重复 10 尾鱼, 进行为期 15 d 的镉胁迫实验, 正常饲喂各实验组饲料, 环境条件同正常养殖实验。

1.5 生长指标测定

饲养结束后, 鱼体饥饿 24 h, 测定其体质量、体长、体宽, 解剖后取其腹腔脂肪、肝脏、脾脏、肠道、头肾, 用无菌生理盐水清洗, 然后将脏器用滤纸进行吸水处理, 称取质量, 其生长及生物学指标计算方法^[18]:

特定生长率 (specific growth rate, SGR, %/d) = $(\ln W_t - \ln W_0) / t \times 100\%$

肥满度 (condition factor, CF, g/cm³) = $W / BL^3 \times 100$

腹脂率 (intraperitoneal fat ratio, IPF, %) = $W_m / W \times 100\%$

肝体比 (hepatosomatic index, HSI, %) = $W_h / W \times 100\%$

脾体指数 (spleen index, SI, %) = $W_s / W \times 100\%$

肠体指数 (intestine weight index, IWI, %) = $W_i / W \times 100\%$

头肾指数 (head kidney index, HKI, %) = $W_k / W \times 100\%$

式中, W_t 为终末均体质量 (g), W_0 为初始均体质量 (g), t 为养殖实验天数 (d), W 为鱼体质量 (g), BL 为鱼体长 (cm), W_m 为肠系膜脂肪重 (g), W_h 为肝脏重 (g), W_s 为脾脏重 (g), W_i 为肠重 (g), W_k 为头肾重。

1.6 鱼肉组成指标测定

将齐口裂腹鱼进行解剖, 沿侧线分成背部肌肉(背脊)和腹部肌肉(腹肌)去除头尾和鱼皮, 将鱼脊椎两边的肌肉全部剃下, 无骨无刺, 置于 -20 °C 保存, 进行鱼肉组成指标测定。水分测定参照 GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》恒温干燥法 (105 °C); 灰分测定参照 GB 5009.4—2016《食品中灰分的测定》高温灼烧法 (550 °C); 粗蛋白质测定参照 GB 5009.5—2016《食品中蛋白质的测定》凯式定氮法; 粗脂肪测定参照 GB 5009.6—2016《食品中脂肪的测定》索氏抽提法。

1.7 血清制备及其指标测定

每尾鱼进行尾静脉取血, 将血液装入 2 mL 的无菌无酶的 EP 管中, 4 °C 条件下静置 30 min, 离心 10 min (3 000 r/min, 4 °C), 收集上清液于新的无菌无酶 EP 管中, 放入 -80 °C 的冰箱中保存。参照南京建成生物工程试剂盒说明书测定血清中的 MDA (硫代巴比妥酸法)、GSH-Px (比色法)、SOD (羟胺法)、TP (考马斯亮兰法)、NO (硝酸还原酶法)、ALB (溴甲酚绿法)、TC (COD-PAP 法)、TG (GPO-PAP 法)、GLU (葡萄糖氧化酶-过氧化物酶法)。

1.8 肝脏、肾脏和鳃中镉含量的测定

将齐口裂腹鱼进行解剖, 取其肝脏、肾脏和鳃冷冻干燥 24 h, 准确称取 0.5 g 用硝酸进行消解, 使用 7500 电感耦合等离子体质谱仪测定镉的含量。

1.9 数据分析

采用 SPSS 20.0 软件对数据进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 和多重比较, 用 Duncan 氏法分析实验数据, 实验数据用平均值±标准差 (mean±SD) 表示, 差异显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 两种多糖对齐口裂腹鱼生长性能的影响

与对照组对比, 2 种多糖均显著提高了齐口裂腹鱼的特定生长率、脾体指数和头肾指数 ($P < 0.05$), 而对肥满度无影响 ($P > 0.05$)。饲料中添加 CS 能显著提高齐口裂腹鱼腹脂率、肝体比、肠体指数 ($P < 0.05$), AOKGM 组肠体指数显著降低, 腹脂率和肝体比无显著性变化 ($P > 0.05$) (表 2)。

2.2 两种多糖对齐口裂腹鱼肌肉成分的影响

与对照组对比, AOKGM 和 CS 均能显著增加齐口裂腹鱼的粗脂肪、粗蛋白质和灰分含量, 在粗脂肪和粗蛋白质方面, CS 组显著优于 AOKGM 组 ($P < 0.05$)。在灰分方面, AOKGM 组效果优于 CS 组 ($P < 0.05$)。日粮添加 2 种多糖对齐口裂腹鱼水分含量方面的影响无显著性差异 ($P > 0.05$) (表 3)。

2.3 两种多糖对齐口裂腹鱼血清生化指标的影响

与对照组对比, AOKGM 能显著提高齐口

表 2 两种多糖对齐口裂腹鱼生长性能的影响

Tab. 2 Effects of AOKGM and CS levels on growth of *S. prenanti*

指数 index	饲料 diets		
	对照组 control	AOKGM	CS
初始均体质量/g W_0	95.90±2.56	95.87±0.49	94.86±0.45
终末均体质量/g W_t	116.11±2.70 ^a	123.78±0.56 ^b	124.62±0.97 ^b
特定增长率/(%/d) SGR	0.27±0.01 ^a	0.36±0.01 ^b	0.38±0.02 ^b
肥满度/(g/cm ³) CF	1.49±0.02	1.52±0.03	1.58±0.05
腹脂率/% IPF	1.26±0.07 ^{ab}	1.15±0.27 ^a	1.89±0.22 ^c
肝体比/% HSI	1.23±0.11 ^a	1.49±0.06 ^{ab}	1.53±0.00 ^c
脾体指数/% SI	0.11±0.01 ^a	0.14±0.01 ^b	0.14±0.00 ^b
肠体指数/% IWI	2.22±0.02 ^b	1.84±0.04 ^a	2.46±0.03 ^c
头肾指数/% HKI	0.05±0.00 ^a	0.06±0.00 ^b	0.07±0.00 ^c

注: 同行数据肩标无字母或相同小写字母表示差异不显著 ($P > 0.05$), 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同

Notes: in the same row, values with no or the same letter superscripts mean no significant difference ($P > 0.05$), while with different small letter superscripts mean significant difference ($P < 0.05$), the same below

表 3 两种多糖对齐口裂腹鱼肌肉成分的影响

Tab. 3 Effects of AOKGM and CS levels on muscle ingredients of *S. prenanti* %

成分 content	饲料 diets		
	对照组 control	AOKGM	CS
粗脂肪* crude lipid	1.49±0.00 ^a	1.58±0.01 ^b	1.62±0.01 ^c
粗蛋白质* crude protein	15.68±0.05 ^a	17.10±0.08 ^b	20.82±0.35 ^c
灰分* ash	1.27±0.00 ^a	1.32±0.00 ^c	1.30±0.01 ^b
水分 moisture	80.26±0.02	80.49±0.09	80.63±0.19

注: *干物质中含量

Notes: * the content in dry matter

裂腹鱼血清 TP 和 ALB 含量 ($P < 0.05$), CS 对 ALB 含量的影响无显著性差异 ($P > 0.05$); 2 种多糖均显著降低了血清 GLU 含量 ($P < 0.05$); AOKGM 显著降低了 TC 和 TG 含量 ($P < 0.05$); CS 显著增加了齐口裂腹鱼血清 TC 含量 ($P < 0.05$), 对 TG 含量无显著性影响 ($P > 0.05$) (表 4)。

2.4 两种多糖对齐口裂腹鱼血清抗氧化指标的影响

与对照组对比, CS 显著降低齐口裂腹鱼血清 MDA 含量, 显著提高血清 SOD 和 GSH-Px 活性 ($P < 0.05$); AOKGM 显著提高齐口裂腹鱼血清

表 4 两种多糖对齐口裂腹鱼血清生化指标的影响

Tab. 4 Effects of AOKGM and CS levels on serum biochemical indicators of *S. prenanti*

成分 content		饲料 diets		
		对照组 control	AOKGM	CS
总蛋白/(g/L)	TP	29.31±0.71 ^a	35.39±1.24 ^b	36.68±0.39 ^b
白蛋白/(g/L)	ALB	16.38±0.23 ^a	23.81±0.09 ^c	16.09±0.03 ^a
葡萄糖/(mmol/L)	GLU	5.46±0.08 ^c	4.95±0.12 ^b	4.34±0.15 ^a
胆固醇/(mmol/L)	TC	13.63±0.10 ^b	11.36±0.13 ^a	21.77±0.47 ^c
甘油三酯/(mmol/L)	TG	3.70±0.05 ^b	2.50±0.08 ^a	3.45±0.13 ^b

SOD 活性 ($P<0.05$), 对 GSH-Px 活性和 MDA 含量无显著性影响 ($P>0.05$); 而 2 种多糖均提高了齐口裂腹鱼 NO 含量 ($P<0.05$) (表 5)。

表 5 两种多糖对齐口裂腹鱼血清抗氧化指标的影响

Tab. 5 Effects of AOKGM and CS levels on antioxidant indexes of *S. prenanti*

成分 content		饲料 diets		
		对照组 control	AOKGM	CS
丙二醛/(nmol/mL)	MDA	9.62±0.07 ^b	9.54±0.08 ^b	8.89±0.10 ^a
超氧化物歧化酶/(U/mL)	SOD	99.75±0.47 ^a	104.92±0.23 ^b	103.16±1.01 ^b
谷胱甘肽过氧化物酶/(U/mL)	GSH-Px	233.60±3.49 ^a	241.51±1.51 ^a	275.74±4.25 ^b
一氧化氮/(μmol/L)	NO	112.77±4.47 ^a	136.46±2.50 ^b	154.40±2.89 ^c

2.5 两种多糖对镉胁迫齐口裂腹鱼血清 MDA 含量和 SOD 活性的影响

随着镉浓度的增加, 所有组的血清 MDA 含量均呈现上升的趋势, 镉浓度 1.00 mg/L 时, 所有组的 MDA 含量与镉浓度 0 mg/L 时对比显著升高 ($P<0.05$); 在镉胁迫期间, 2 种多糖组血清 MDA 含量在各镉浓度下显著低于对照组 ($P<0.05$)。血清 SOD 活性随着镉浓度的增加呈现先升高后降低的趋势, 并且在镉浓度为 0.10 mg/L 时达到最高, 呈现诱导状态, 当镉浓度达到 1.00 mg/L 时, 对照组 SOD 活性显著低于其他镉浓度处理组 ($P<0.05$); 在镉胁迫期间, AOKGM 组和 CS 组血清 SOD 活性在各镉浓度下均显著高于对照组 ($P<0.05$) (图 1)。

2.6 两种多糖对镉胁迫齐口裂腹鱼血清 GSH-Px 活性和 NO 含量的影响

随着镉浓度的增加, 血清 GSH-Px 活性呈现

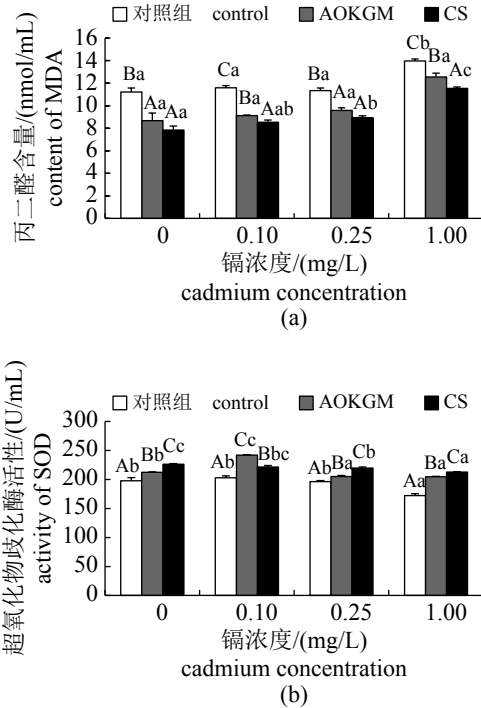


图 1 不同浓度镉胁迫对齐口裂腹鱼血清 MDA 含量 (a) 和 SOD 活性 (b) 的影响

不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 大写字母表示相同镉浓度不同组别间的显著性, 小写字母表示相同组别不同镉浓度之间的显著性, 下同

Fig. 1 Effects of serum MDA content (a) and SOD activity (b) of *S. prenanti* under the stress of different concentrations of cadmium

different letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$), capital letters indicate the significance of the same Cd concentration between different groups, lowercase letters indicate the significance of different Cd concentrations in the same group, the same below

降低趋势, 对照组在镉浓度为 0.25 和 1.00 mg/L 时, GSH-Px 活性与镉浓度 0 mg/L 相比均显著降低, 且在镉浓度为 1.00 mg/L 时达到最低 ($P<0.05$); 在镉胁迫期间, 镉浓度为 0.25 mg/L 时, AOKGM 组和 CS 组血清 GSH-Px 活性均显著高于对照组, CS 组血清 GSH-Px 活性在镉浓度为 0.10 mg/L 时显著高于对照组 ($P<0.05$), AOKGM 组血清 GSH-Px 活性在 1.00 mg/L 时显著高于对照组 ($P<0.05$)。随着镉浓度的增加, 血清 NO 含量呈现上升趋势, 对照组 NO 含量在镉浓度为 0.25 和 1.00 mg/L 时, 与 0 mg/L 相比均显著升高; 在镉胁迫期间, 2 种多糖组血清 NO 含量在镉浓度为 0.10~1.00 mg/L 时均显著低于对照组, CS 组血清 NO 含量在镉浓度为 0 mg/L 时显著高于对照组 ($P<0.05$) (图 2)。

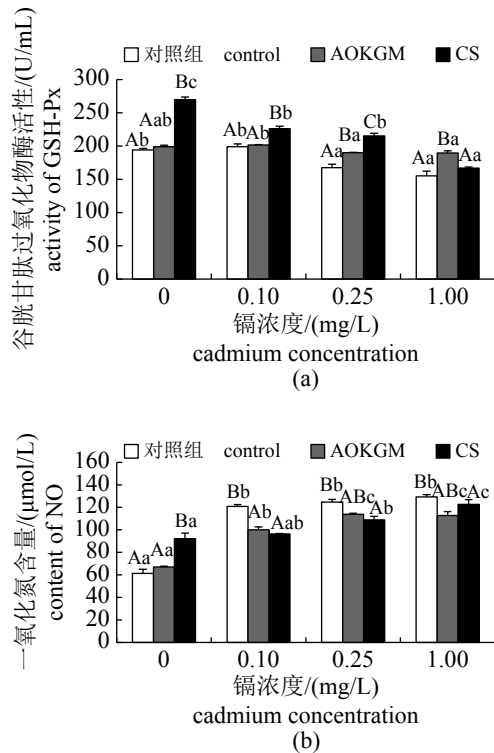


图 2 不同浓度镉胁迫对齐口裂腹鱼血清 GSH-Px 活性 (a) 和 NO 含量 (b) 的影响

Fig. 2 Effects of serum GSH-Px activity (a) and NO content (b) of *S. prenanti* under the stress of different concentrations of cadmium

2.7 两种多糖对齐口裂腹鱼肝脏、肾脏和鳃中镉积累量的影响

随着镉浓度的增加, 在肝脏、肾脏和鳃中, 所有组的组织中镉含量均呈现上升的趋势, 且与镉浓度为 0 mg/L 相比, 其他镉浓度胁迫组镉含量均显著提高, 在 1.00 mg/L 时镉含量达到最大 ($P < 0.05$)。在镉胁迫期间, 在肝脏中, AOKGM 和 CS 能显著降低镉浓度为 0.10~1.00 mg/L 时的镉积累量 ($P < 0.05$)。在肾脏中, AOKGM 能显著降低镉浓度为 0.25 和 1.00 mg/L 的镉积累量 ($P < 0.05$), CS 能显著降低镉浓度为 0.10~1.00 mg/L 的镉积累量 ($P < 0.05$); 在鳃中, AOKGM 和 CS 均能显著降低镉浓度为 0.10~1.00 mg/L 的镉积累量 ($P < 0.05$) (图 3)。

3 讨论

3.1 两种多糖对齐口裂腹鱼生长性能的影响

有研究表明, 8~16 g/kg 的氧化魔芋葡甘露聚糖 (oxidized konjac glucomannan, OKGM) 能够促

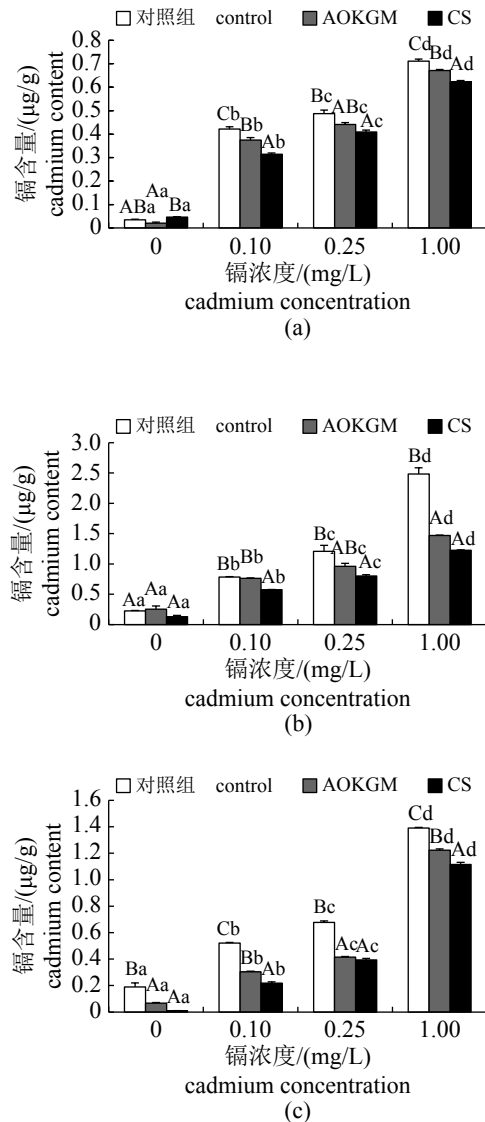


图 3 齐口裂腹鱼在不同浓度镉胁迫下肝脏 (a)、肾脏 (b) 和鳃 (c) 中镉积累量的变化

Fig. 3 Changes of liver (a), kidney (b) and gill (c) cadmium accumulation in *S. prenanti* under the stress of different concentrations of cadmium

进齐口裂腹鱼的生长^[19]。茅力等^[17]研究表明饲料中添加 0.25% 和 1.00% CS 可以显著提高大鼠的增重率, 在一定程度上提高大鼠的生长性能。于艳梅等^[20]研究发现 KGM 添加量为 0.1%、0.2%、0.3% 时均能促进黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 的生长发育。本实验中, 2 种多糖均显著提高了齐口裂腹鱼的特定生长率、脾体指数和头肾指数, 表明 2 种多糖均能在一定程度内提高齐口裂腹鱼的生长性能。鱼肉营养成分中最重要的是蛋白质和脂肪, 它们主要分布在鱼的肌肉中, 其

分布和含量直接影响着鱼肉的营养价值^[21]。本实验中, 2种多糖均显著增加了齐口裂腹鱼粗蛋白质和粗脂肪含量, 这与Chen等^[13]在齐口裂腹鱼饲料中添加0.4% AOKGM的研究结果一致。鱼的生长主要依靠蛋白质的积累来实现^[22], 本实验的饲料中添加2种多糖可能影响了齐口裂腹鱼的蛋白质合成和脂肪沉积能力, 进一步促进机体的生长发育。

3.2 两种多糖对齐口裂腹鱼血清生化指标及抗氧化性能的影响

血清生化指标能够反映鱼类的健康状态和营养水平, 其中血脂血糖水平与机体的代谢和营养水平有密切的关系, 这些物质的动态平衡对机体的健康非常重要^[23]。TC是细胞膜的主要成分, 调节膜流动性和渗透性, 是其他类固醇的前体分子, 包括胆汁盐、类固醇激素和维生素D^[24]。AOKGM显著增加了齐口裂腹鱼血清TP和ALB含量, 降低了GLU、TC、TG含量。与吕珍珠等^[25]研究AOKGM能够降低齐口裂腹鱼血清TC、TG含量的结果一致。Meyer等^[26]和Kaplan等^[27]认为CS能够与脂蛋白结合, 从而起到调节血脂水平的作用。孙丰梅等^[28]研究用羊软骨素作为饲料添加物饲喂小鼠, 研究表明CS能降低高脂饮食小鼠血清低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)、TG及TC含量。本实验中, CS显著增加了血清TP含量, 显著降低了GLU含量, 对TG含量无显著性影响, 可能是CS对不同机体的影响存在一定的差异导致。

机体中的SOD是一种酶, 它能够催化超氧化物阴离子自由基歧化为 H_2O_2 和 O_2 , 其活性越高, 自由基清除能力越强^[29]。GSH-Px是机体内广泛存在的一种重要的过氧化物分解酶, 可以使有毒的过氧化物还原成无毒的羟基化合物, 同时促进 H_2O_2 的分解, 从而保护细胞膜的结构及功能不受过氧化物的干扰和损害^[30]。MDA是自由基引发的脂质过氧化作用的最终分解产物, 可以间接反映活性氧自由基含量以及组织细胞氧化损伤的程度^[31]。NO是一个普遍存在的影响多种生理病理过程的信号分子, 在宿主的免疫应答中扮演着重要的角色, 而NO的适量升高会增强机体的免疫功能^[32-34]。Zhang等^[35]报道8 g/kg OKGM能显著提高齐口裂腹鱼血清中SOD的活性, 1~8 g/kg OKGM都能显著降低血清中MDA

含量。陈建红等^[36]研究表明KGM能提高小鼠血浆和肝脏SOD、GSH-Px的活性。Lee等^[37]研究表明CS能够提高机体SOD、过氧化氢酶(CAT)、GSH-Px活性, 降低MDA含量, 在 CCl_4 诱导的氧化应激中起到预防作用。本实验中, 与对照组对比, AOKGM和CS均能不同程度提高齐口裂腹鱼血清SOD和GSH-Px活性, 降低血清MDA含量。这与以往的实验结果一致, 表明2种多糖均能较好地清除超氧阴离子自由基以及羟基自由基, 提高齐口裂腹鱼的抗氧化能力。

3.3 两种多糖对镉胁迫齐口裂腹鱼血清抗氧化指标的影响

镉是一种有毒的重金属, 可导致鱼类镉积累, 产生氧化应激, 进而诱发组织学病变、代谢紊乱和免疫失调^[38-39]等。Orun等^[40]研究表明, 鲤暴露在 $2.5 \mu\text{mol/L}$ 镉溶液中, 头肾中SOD、GSH-Px的活性显著降低, MDA的含量显著增加。类似的, 对于镉诱导脂质过氧化, 产生多种活性氧自由基, 引起机体的氧化损伤在舌齿鲈(*Dicentrarchus labrax*)^[41]、鲫(*Carassius auratus*)^[42]、虹鳟^[43]、爪哇青鳞(*Oryzias javanicus*)^[44]等鱼类中也有报道。Mehrpack等^[6]研究表明, 给受 0.2 mg/L 镉胁迫鲤的日粮中添加 1000 mg/kg 的壳聚糖饲喂21 d后, 鲤肝脏MDA的含量显著降低, CAT的活性显著增加。Chen等^[14]研究发现, 氧化魔芋葡甘露聚糖硫酸酯(OKGMS)能显著增加齐口裂腹鱼血清SOD活性, 降低MDA的含量, AOKGM可以显著增强齐口裂腹鱼血清中GSH-Px的活性。王纯等^[45]和王胜远等^[46]研究认为CS对慢性氟中毒脑损害的大鼠有保护作用。熊双丽等^[47]研究发现猪喉CS清除超氧阴离子自由基活性可能与其硫酸根和羧基相关。本实验中, 与镉浓度 0 mg/L 相比, MDA含量在镉浓度为 1.00 mg/L 时显著升高, 而SOD活性最低, GSH-Px活性在镉浓度为 0.25 和 1.00 mg/L 时显著降低, NO含量在镉浓度为 0.25 和 1.00 mg/L 显著升高。镉胁迫实验中, 与对照组对比, 2种多糖组的血清SOD活性显著提高, MDA含量降低; 2种多糖组血清NO含量在镉浓度 $0.10\sim 1.00 \text{ mg/L}$ 胁迫时显著降低; 同时, CS能够显著提高镉浓度 0.10 、 0.25 mg/L 胁迫下的血清GSH-Px活性, 而AOKGM组在镉浓度为 0.25 和 1.00 mg/L 时显著高于对照组。表明镉浓度的上升产生了大量的NO和 H_2O_2 等活性

氧自由基,同时产生大量有毒物质如MDA,造成了氧化应激,而2种多糖能提高机体抗氧化系统能力,降低活性氧自由基对机体造成的氧化损伤。

3.4 两种多糖对齐口裂腹鱼肝脏、肾脏和鳃中镉积累量的影响

多糖的生理活性及功能与其特定结构有关,其具有调节脂质代谢、抗病毒、抗氧化等多种生物活性,对重金属有较好的吸附效果^[48-50]。李莹馨等^[12]研究发现KGM对镉染毒后的细胞有一定的保护作用。Ren等^[7]在虹鳟的饲料中添加3%壳聚糖组相较于无壳聚糖组,镉的积累量减少25%~40%。Muller等^[51]研究表明,CS能与多种金属离子(铜、铁)进行螯合,抑制体内的脂类产生过氧化等一系列反应。此外,研究表明CS中的羧基能与金属离子发生配位作用^[52]。本实验研究表明,与镉浓度0 mg/L组相比,其他镉浓度处理组镉积累量均显著提高,在镉浓度为1.00 mg/L时,机体镉积累量达到最大。与镉对照组对比,2种多糖显著降低肝脏和鳃中镉的积累量。在镉浓度为0.25和1.00 mg/L的胁迫中,2种多糖显著降低肾脏中的镉积累量。研究表明2种多糖能在体内发挥作用,缓解镉在齐口裂腹鱼体内的富集,降低镉的积累量,通过清除活性氧自由基,缓解其对细胞造成的氧化损伤,从而提高机体的抗氧化能力。

4 结论

综上所述,日粮中添加0.40%的AOKGM和CS能改善齐口裂腹鱼的生长及抗氧化性能,并且降低机体组织中镉的积累量,对镉胁迫产生的氧化应激具有一定的改善作用,可能为齐口裂腹鱼饲料的开发提供新的理论依据。

参考文献 (References):

- [1] Zheng Q R, Wu Y L, Xu H L, *et al.* Immune responses to *Aeromonas hydrophila* infection in *Schizothorax prenanti* fed with oxidized konjac glucomannan and its acidolysis products[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2016, 49: 260-267.
- [2] 谢佳燕. 我国齐口裂腹鱼的研究现状[J]. *安徽农业科学*, 2010, 11(25): 13721-13722, 13726.
- [3] Xie J Y. Research advances on *Schizothorax prenanti* in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 11(25): 13721-13722, 13726(in Chinese).
- [4] Jiang M, Li H, Shi J S, *et al.* Depolymerized konjac glucomannan: preparation and application in health care[J]. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 2018, 19(7): 505-514.
- [5] Wu Y F, Wang X S, Shen B, *et al.* Extraction, structure and bioactivities of the polysaccharides from fructus corni[J]. *Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture*, 2013, 5(1): 57-61.
- [6] 贾睿, 曹丽萍, 杜金梁, 等. 水飞蓟素对四氯化碳致鲫鱼(细胞)损伤的保护和抗氧化作用[J]. *中国水产科学*, 2013, 20(3): 551-560.
- [7] Jia R, Cao L P, Du J L, *et al.* *In vitro* and *in vivo* hepatoprotective and antioxidant effects of silymarin against carbon tetrachloride-induced hepatocyte damage in crucian carp *Carassius auratus*[J]. *Journal of Fisheries Sciences of China*, 2013, 20(3): 551-560(in Chinese).
- [8] Mehrpak M, Banaee M, Haghi B N, *et al.* Protective effects of vitamin C and chitosan against cadmium-induced oxidative stress in the liver of common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. *Iranian Journal of Toxicology*, 2015, 9(30): 1360-1367.
- [9] Ren H F, Jia H J, Kim S, *et al.* Effect of Chinese parsley *Coriandrum sativum* and chitosan on inhibiting the accumulation of cadmium in cultured rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*[J]. *Fisheries Science*, 2006, 72(2): 263-269.
- [10] Yang Q, Yang R, Li M, *et al.* Effects of dietary fucoidan on the blood constituents, anti-oxidation and innate immunity of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2014, 41(2): 264-270.
- [11] Mikami T, Kitagawa H. Biosynthesis and function of chondroitin sulfate[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, 2013, 1830(10): 4719-4733.
- [12] Nunes C S, Rufato K B, Souza P R, *et al.* Chitosan/chondroitin sulfate hydrogels prepared in [Hmim][HSO₄] ionic liquid[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 170: 99-106.
- [13] 倪睿, 刘坤, 高华, 等. 硫酸软骨素对慢性酒精损伤大鼠抗氧化作用研究[J]. *中国海洋药物*, 2011, 30(1): 36-

39. Ni R, Liu K, Gao H, *et al.* Antioxidant effect of chondroitin sulfate on chronic alcoholic injury in rats[J]. Chinese Journal of Marine Drugs, 2011, 30(1): 36-39(in Chinese).
- [12] 李莹馨, 原茜, 王震宇, 等. 魔芋葡甘露聚糖对镉所致的LO2细胞毒性损伤的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(8): 1918-1923.
- Li Y X, Yuan Q, Wang Z Y, *et al.* Effect of konjac glucomannan on LO2 cell line with cadmium poisoning[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(8): 1918-1923(in Chinese).
- [13] Chen M R, Wu Y L, Yan Q P, *et al.* Growth performance, lipid deposition and hepatic lipid metabolism related gene expression in *Schizothorax prenanti* fed with dietary acidolysis-oxidized konjac glucomannan supplementation[J]. Journal of Aquaculture, 2018, 9(1): 1000519.
- [14] Chen M R, Wang H J, Yan Q P, *et al.* Effects of dietary oxidized konjac glucomannan sulfates (OKGMS) and acidolysis-oxidized konjac glucomannan (A-OKGM) on the immunity and expression of immune-related genes of *Schizothorax prenanti*[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2016, 56: 96-105.
- [15] Zheng Q R, Wu Y L, Xu H L, *et al.* The effects of dietary oxidized konjac glucomannan and its acidolysis products on the immune response, expression of immune related genes and disease resistance of *Schizothorax prenanti*[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2015, 45(2): 551-559.
- [16] 史敏娟, 熊双丽, 卢飞, 等. 鸡胸软骨硫酸软骨素的制备及其稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(12): 328-332.
- Shi M J, Xiong S L, Lu F, *et al.* Preparation and stability study of chondroitin sulfate from chicken sternal cartilage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(12): 328-332(in Chinese).
- [17] 茅力, 吕志宏, 陈景衡, 等. 鲨鱼软骨粉对大鼠机体过氧化脂质水平的影响[J]. 南京医科大学学报, 1998, 18(1): 15-17.
- Mao L, Lü Z H, Chen J H, *et al.* Influence of pulverized shark cartilage on lipid peroxidation in rats[J]. Acta Universitatis Medicinalis Nanjing, 1998, 18(1): 15-17(in Chinese).
- [18] Wang X F, Li X Q, Leng X J, *et al.* Effects of dietary cottonseed meal level on the growth, hematological indices, liver and gonad histology of juvenile common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. Aquaculture, 2014, 428-429: 79-87.
- [19] 周成, 邬应龙, 夏晓杰, 等. 日粮氧化魔芋葡甘露聚糖对齐口裂腹鱼生长、血脂和脂肪代谢酶活性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(9): 250-255.
- Zhou C, Wu Y L, Xia X J, *et al.* Effect of dietary oxidized konjac glucomannan on growth performance, blood lipid and lipid metabolism enzymes activities in *Schizothorax prenanti* Tchang[J]. Food Science, 2014, 35(9): 250-255(in Chinese).
- [20] 于艳梅, 吴志新, 陈孝煊, 等. 魔芋甘露寡糖对黄颡鱼非特异性免疫功能及生长的影响[J]. 华中农业大学学报, 2010, 29(3): 351-355.
- Yu Y M, Wu Z X, Chen X X, *et al.* Effect of konjac mannan oligosaccharides on non-specific immune function and growth of *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2010, 29(3): 351-355(in Chinese).
- [21] Zhao F, Zhuang P, Song C, *et al.* Amino acid and fatty acid compositions and nutritional quality of muscle in the pomfret, *Pampus punctatissimus*[J]. Food Chemistry, 2010, 118(2): 224-227.
- [22] Rønnestad I, Thorsen A, Finn R N. Fish larval nutrition: a review of recent advances in the roles of amino acids[J]. Aquaculture, 1999, 177(1-4): 201-216.
- [23] Kraugerud O F, Penn M, Storebakken T, *et al.* Nutrient digestibilities and gut function in Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed diets with cellulose or non-starch polysaccharides from soy[J]. Aquaculture, 2007, 273(1): 96-107.
- [24] Brown D A, London E. Structure and function of sphingolipid- and cholesterol-rich membrane rafts[J]. Journal of Biological Chemistry, 2000, 275(23): 17221-17224.
- [25] 吕珍珍, 邬应龙, 何梅, 等. 改性魔芋葡甘露聚糖对齐口裂腹鱼脂质代谢及相关基因表达的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(7): 758-763.
- Lü Z Z, Wu Y L, He M, *et al.* Effect of modified konjac glucomannan on lipid metabolism and related gene expression of *Schizothorax prenanti*[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2018, 37(7): 758-763(in Chinese).

- Chinese).
- [26] Meyer B J, Duvillard L, Owen A, *et al.* Fractionation of cholesteryl ester rich intermediate density lipoprotein subpopulations by chondroitin sulphate[J]. *Atherosclerosis*, 2007, 195(2): e28-e34.
- [27] Kaplan M, Aviram M. Macrophage plasma membrane chondroitin sulfate proteoglycan binds oxidized low-density lipoprotein[J]. *Atherosclerosis*, 2000, 149(1): 5-17.
- [28] 孙丰梅, 李兰会, 李育峰, 等. 硫酸软骨素降血脂保健功能的研究[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2006, 22(4): 46-51.
- Sun F M, Li L H, Li Y F, *et al.* Research of the Chondroitin sulfate on its healthy function in blood lipid reduction[J]. *Journal of Hebei North University (Natural Science Edition)*, 2006, 22(4): 46-51(in Chinese).
- [29] Muñoz M, Cedeño R, Rodríguez J, *et al.* Measurement of reactive oxygen intermediate production in haemocytes of the penaeid shrimp, *Penaeus vannamei*[J]. *Aquaculture*, 2000, 191(1-3): 89-107.
- [30] 秦洁芳, 陈海刚, 蔡文贵, 等. 邻苯二甲酸二丁酯对翡翠贻贝抗氧化酶及脂质过氧化水平的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1878-1884.
- Qin J F, Chen H G, Cai W G, *et al.* Effects of di-n-butyl phthalate on the antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation level of *Perna viridis*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(7): 1878-1884(in Chinese).
- [31] Khalili J, Biloklytska H F. Salivary malondialdehyde levels in clinically healthy and periodontal diseased individuals[J]. *Oral Diseases*, 2008, 14(8): 754-760.
- [32] Eddy F B. Role of nitric oxide in larval and juvenile fish[J]. *Comparative biochemistry and physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2005, 142(2): 221-230.
- [33] Schmetterer L, Polak K. Role of nitric oxide in the control of ocular blood flow[J]. *Progress in Retinal and Eye Research*, 2001, 20(6): 823-847.
- [34] Murakami A. Chemoprevention with phytochemicals targeting inducible nitric oxide synthase[J]. *Forum of Nutrition*, 2009, 61: 193-203.
- [35] Zhang L, Wu Y L, Wang L, *et al.* Effects of oxidized konjac glucomannan (OKGM) on growth and immune function of *Schizothorax prenanti*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2013, 35(4): 1105-1110.
- [36] 陈建红, 周海燕, 吴永尧. 魔芋葡甘低聚糖抗氧化性初步研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2006, 18(5): 713-716.
- Chen J H, Zhou H Y, Wu Y Y. Studies on the antioxidative ability of konjac oligosaccharides[J]. *Natural product research and development*, 2006, 18(5): 713-716(in Chinese).
- [37] Lee J Y, Lee S H, Kim H J, *et al.* The preventive inhibition of chondroitin sulfate against the CCl₄-Induced oxidative stress of subcellular level[J]. *Archives of Pharmacological Research*, 2004, 27(3): 340-345.
- [38] Zhu H H, Ai H L, Cao L W, *et al.* Transcriptome analysis providing novel insights for Cd-resistant tall fescue responses to Cd stress[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 160: 349-356.
- [39] Yuan S S, Lv Z M, Zhu A Y, *et al.* Negative effect of chronic cadmium exposure on growth, histology, ultrastructure, antioxidant and innate immune responses in the liver of zebrafish: preventive role of blue light emitting diodes[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 139: 18-26.
- [40] Orun I, Talas Z S, Ozdemir I, *et al.* Antioxidative role of selenium on some tissues of (Cd²⁺, Cr³⁺)-induced rainbow trout[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, 71(1): 71-75.
- [41] Roméo M, Bennani N, Gnassia-Barelli M, *et al.* Cadmium and copper display different responses towards oxidative stress in the kidney of the sea bass *Dicentrarchus labrax*[J]. *Aquatic Toxicology*, 2000, 48(2-3): 185-194.
- [42] Shi H H, Sui Y X, Wang X R, *et al.* Hydroxyl radical production and oxidative damage induced by cadmium and naphthalene in liver of *Carassius auratus*[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2005, 140(1): 115-121.
- [43] Shekh K, Tang S, Kodzhahinchev V, *et al.* Species and life-stage specific differences in cadmium accumulation and cadmium induced oxidative stress, metallothionein and heat shock protein responses in white sturgeon and rainbow trout[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 673: 318-326.
- [44] Kim Y J, Lee N, Woo S, *et al.* Transcriptomic change as evidence for cadmium-induced endocrine disruption in

- marine fish model of medaka, *Oryzias javanicus*[J]. *Molecular & Cellular Toxicology*, 2016, 12(4): 409-420.
- [45] 王纯, 王胜远, 刘明海, 等. 慢性氟中毒大鼠脑组织Erk激酶、AMPA受体亚基GluR1和GluR2的表达及硫酸软骨素的保护作用[J]. *中华地方病学杂志*, 2019, 38(6): 446-452.
- Wang C, Wang S Y, Liu M H, *et al.* Expression of Erk kinase, AMPA receptor subunits GluR1 and GluR2, and protection of chondroitin sulfate in brain of rats with chronic fluorosis[J]. *Chinese Journal of Endemiology*, 2019, 38(6): 446-452(in Chinese).
- [46] 王胜远, 邱志伟, 官志忠, 等. 硫酸软骨素对实验性慢性氟中毒脑损害大鼠的保护作用及机制研究[J]. *中华地方病学杂志*, 2018, 37(4): 271-277.
- Wang S Y, Qiu Z W, Guan Z Z, *et al.* Protective effect and mechanism of chondroitin sulfate on brain injury induced by experimental chronic fluorosis in rats[J]. *Chinese Journal of Endemiology*, 2018, 37(4): 271-277(in Chinese).
- [47] 熊双丽, 李安林, 金征宇. 猪喉软骨硫酸软骨素体外超氧阴离子自由基清除机理探讨[J]. *食品科学*, 2008, 29(2): 362-365.
- Xiong S L, Li A L, Jin Z Y. Properties of *in vitro* superoxide free radical-scavenging mechanism of chondroitin sulfate from pig laryngeal cartilage[J]. *Food Science*, 2008, 29(2): 362-365(in Chinese).
- [48] Choma A, Nowak K, Komanięcka I, *et al.* Chemical characterization of alkali-soluble polysaccharides isolated from a *Boletus edulis* (Bull.) fruiting body and their potential for heavy metal biosorption[J]. *Food Chemistry*, 2018, 266: 329-334.
- [49] Wu F C, Tseng R L, Juang R S. A review and experimental verification of using chitosan and its derivatives as adsorbents for selected heavy metals[J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(4): 798-806.
- [50] Behera S S, Ray R C. Konjac glucomannan, a promising polysaccharide of *Amorphophallus konjac* K. Koch in health care[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 92: 942-956.
- [51] Muller A J, Letelier M E, Galleguillos M A, *et al.* Comparison of the antioxidant effects of synovial fluid from equine metacarpophalangeal joints with those of hyaluronic acid and chondroitin sulfate[J]. *American Journal of Veterinary Research*, 2010, 71(4): 399-404.
- [52] 熊双丽, 金征宇. 硫酸软骨素与铜离子的配位特性研究[J]. *食品科学*, 2008, 29(4): 54-57.
- Xiong S L, Jin Z Y. Binding property of chondroitin sulfate and cupric ion[J]. *Food Science*, 2008, 29(4): 54-57(in Chinese).

Effects of two kinds of polysaccharides on growth, serum antioxidant indices and tissue cadmium accumulation of *Schizothorax prenanti*

LI Yanhong¹, ZHANG Feifei¹, SHI Yanping¹, LIAO Maowen¹, LIU Han¹,
LI Lin¹, WANG Yongjia², WU Yinglong^{1*}

(1. Provincial Key Laboratory of Agricultural Product Processing and Storage Engineering,
College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China;

2. Ya'an Agricultural Product Quality Monitoring and Inspection Center, Ya'an 625014, China)

Abstract: The present study aimed to determine the effects of dietary 0.40% chondroitin sulfate (CS) and 0.40% acidolysis oxidated konjac glucomannan (AOKGM) added to feed for 8 weeks on growth, antioxidant indices and tissues (liver, kidney and gill) cadmium accumulation of *Schizothorax prenanti*. A total of 450 healthy *S. prenanti* individuals with similar body weight (98.00±8.54) g were randomly assigned to three groups with three replicates per group and 50 fish per replicate. After 8 weeks, the growth and the serum antioxidant indices of *S. prenanti* were determined. In addition, the cadmium stress test was carried out for 15 days (0, 0.10, 0.25, 1.00 mg/L), and the serum antioxidant indices and tissues cadmium accumulation of fish under cadmium stress were determined. The results were as follows: compared with the control group, specific growth rate (SGR), spleen index (SI) and head kidney index (HKI) were increased when the diets were supplemented with CS and AOKGM. Additionally, the crude lipid, crude protein and ash content of muscles were significantly increased when both polysaccharides were added. Compared with the control group, the serum superoxide dismutase (SOD) activity, total protein (TP) and nitric oxide (NO) content of the fish were significantly increased, and glucose (GLU) content of fish was significantly decreased when diets were supplemented with both polysaccharides. The glutathione peroxidase (GSH-Px) activity and cholesterol (TC) content of fish were significantly increased, and malondialdehyde (MDA) content of fish was significantly decreased when CS was added to the diet. Compared with 0 mg/L cadmium, MDA content was the highest and SOD activity was the lowest at 1.00 mg/L cadmium, GSH-Px activity was significantly decreased and NO content was significantly increased at 0.25 and 1.00 mg/L cadmium. Compared with 0 mg/L cadmium, the SOD activity significantly increased, and MDA content significantly decreased, while NO content significantly decreased at 0.10-1.00 mg/L cadmium when diets were supplemented with both polysaccharides. CS significantly increased GSH-Px activity at 0.10 and 0.25 mg/L cadmium. AOKGM significantly increased GSH-Px activity at 0.25 and 1.00 mg/L cadmium. Compared with 0 mg/L cadmium, the cadmium accumulation in liver, kidney and gill of fish significantly increased at different cadmium concentrations, while CS and AOKGM decreased the cadmium content of tissues. Taken together, the results showed that 0.40% CS and AOKGM had certain effects on the growth and antioxidant capacity of *S. prenanti*, and it reduced the cadmium accumulation in tissues. This study provides a new theoretical basis for the development of nutritional feed for *S. prenanti*.

Key words: *Schizothorax prenanti*; chondroitin sulfate; acidolysis oxidated konjac glucomannan; growth; antioxidant; cadmium accumulation

Corresponding author: WU Yinglong. E-mail: wuyinglong99@163.com

Funding projects: Key Research and Development Project of Sichuan Science and Technology Department (2019 YFN0048); Sichuan Agricultural University "211" Project (2016) (03571650)