

肖金星,王磊,郑刚,等. 硒化多糖对黑鲷存活、免疫力和抗氧化性能的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(9):196-201.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.09.037

# 硒化多糖对黑鲷存活、免疫力和抗氧化性能的影响

肖金星<sup>1</sup>, 王磊<sup>2</sup>, 郑刚<sup>1</sup>, 周凡<sup>4</sup>, 周宇芳<sup>3</sup>

(1. 浙江大学舟山海洋研究中心, 浙江舟山 316021; 2. 浙江大学动物科学学院, 浙江杭州 310058;

3. 浙江省海洋开发研究院, 浙江舟山 316021; 4. 浙江省水产技术推广总站, 浙江杭州 310012)

**摘要:**为了探究饲料中添加硒化多糖对攻毒试验后黑鲷存活、免疫力和抗氧化性能的影响,选用初始体质量为(13.00±0.20) g 黑鲷幼鱼随机分为6组,分别投喂硒含量为0.34、0.52、0.68、0.91、1.08、3.06 mg/kg 的6组等能等氮试验饲料D1~D6,开展为期8周的室内微流水养殖。之后每缸随机选取10尾黑鲷,腹腔注射副溶血弧菌,开展为期10 d 攻毒试验。结果显示,黑鲷血清溶菌酶(LZM)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)的活性随着饲料硒含量的增加而显著升高( $P<0.05$ ),而累积死亡率和血清溶菌酶(MDA)含量随着饲料硒含量的增减而显著降低( $P<0.05$ ),当饲料硒含量超过0.91 mg/kg 时,这些指标趋于平稳。以副溶血弧菌感染后黑鲷的免疫力、抗氧化性能和存活率为评价指标,黑鲷对饲料中硒的最适需求量均为0.91 mg/kg。

**关键词:**黑鲷;硒化多糖;存活率;免疫力;抗氧化性能

**中图分类号:** S965.231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)09-0196-06

硒(Se)已被证明是动物必需的微量元素,在机体的生长、免疫和抗氧化等方面具有重要作用<sup>[1-2]</sup>。硒在硬骨鱼类的新陈代谢中发挥着重要作用,关于硬骨鱼类的硒需求量已开展了大量研究<sup>[3-4]</sup>。膳食硒不足可导致鱼类摄食率降低、生长缓慢、免疫力

降低等,而膳食硒过量会导致饲料效率降低、抑制生长和生物毒性等<sup>[5-7]</sup>,因此,适量的膳食硒对鱼类的生长至关重要。自然界中的硒分为有机硒和无机硒2种形式,与无机硒相比,有机硒具有较高的抗氧化性、硒保留率、消化率和生物可利用度,而且具有较低的毒性<sup>[8-10]</sup>。硒化多糖是一种新型的有机硒,具有较强的抗氧化性能<sup>[11-12]</sup>。研究表明,多糖经过硒化修饰可增强其抗氧化和抗凝血活性<sup>[13]</sup>。然而,目前关于硒化多糖作为水产养殖动物膳食硒源,对水产动物免疫力和抗氧化性能影响的研究较少。

黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*),具有广温、广盐性、抗逆性强、生长迅速、肉质好等优点,是人工养

收稿日期:2019-11-17

基金项目:浙江省重点研发计划(编号:2019C02076);浙江省舟山市科技计划(编号:2017C12030、2018C41027)。

作者简介:肖金星(1986—),男,山东济南人,硕士,工程师,主要从事水产动物营与饲料研究。Tel:(0580)8171365;E-mail:xiaojinxing@yeah.net。

通信作者:周宇芳,硕士,工程师,主要从事水产品加工与利用研究。Tel:(0580)2299220;E-mail:yfzhou@yeah.net。

(*Candia* sp. & *Saccharomyces* sp.) on the population growth of the rotifer *Brachionus plicatilis* [C]. The Second Asian Fisheries Forum, Manila, Philippines, 1990:353-356.

[5] 李磊,朱小明,方芳,等. 几种单胞藻对褶皱臂尾轮虫的营养强化研究[J]. 水产科学,2012,31(2):225-228.

[6] Hirayama, K., Maruyama, Maeda. Nutritional effect of freshwater *Chlorella* on growth of the rotifer *Brachionus plicatilis* [J]. Hydrobiology, 1989(186/187):39-42.

[7] 王金秋,李德尚. 酵母及藻类搭配对蓼花臂尾轮虫饵料效果的研究[J]. 应用生态学报,1998,9(3):301-304.

[8] 王金秋,李德尚,董双林,等. 面包酵母添加光合细菌和维生素C培养轮虫的效果[J]. 水产科技情报,1999,26(1):25-27.

[9] 甘松永,黄锦雄,张敏,等. 利用酵母和芽孢杆菌培养海水轮虫

的技术初探[J]. 当代水产,2017,42(11):98-99.

[10] 邓平,张生元,艾桃山,等. 食物浓度和温度对蓼花臂尾轮虫种群动态的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(1):251-253.

[11] 王爱民,席贻龙,牛翔翔,等. 汀棠湖冬季出现的蓼花臂尾轮虫对水温的适应[J]. 生态学报,2014,34(16):88-95.

[12] Anna K, Aleksandra W, Edyta F, et al. Seasonal changes in the body size of two rotifer species living in activated sludge follow the temperature-size rule [J]. Ecology & Evolution, 2014, 4(24):78-89.

[13] 郑乐云. 温度对超小型轮虫生长、繁殖及营养成分的影响[J]. 福建水产,2010(3):5-9.

[14] 孙迪杰,刘娟然. 温度对褶皱臂尾轮虫寿命和繁殖的影响[J]. 水产科学,1993,12(6):14-17.

殖和沿海增殖放流的优良品种,市场前景广阔<sup>[14-15]</sup>。黑鲟的养殖模式主要以海水网箱养殖和海水池塘养殖 2 种为主,随着黑鲟养殖规模不断扩大、集约化程度不断提高及海水污染日益严重,黑鲟养殖细菌性、寄生虫性、病毒性病害频发<sup>[16]</sup>,给养殖生产造成了极大的经济损失,而鉴于传统药物对食品安全和环境的危害,开发高效的新型安全免疫增强剂成为当务之急。攻毒试验是免疫增强剂效果最直观的反映方式。本试验研究了硒化多糖对攻毒试验后黑鲟存活率、免疫力和抗氧化性能的影响,为黑鲟饲料免疫增强剂的开发提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 攻毒试验设计

试验用黑鲟幼鱼由浙江省海洋水产研究所试验场提供,养殖于浙江省海洋水产研究所西轩岛试验基地室内流水系统中。挑选体质健康、大小均匀、初始体质量为 $(13.00 \pm 0.20)$  g 的黑鲟幼鱼随机分为 6 组,每组 3 个重复,每个重复 25 尾,放入容积为 310 L(水体 260 L)的玻璃纤维缸内微流水式饲养 8 周。海水经沉淀、过滤后使用,流速控制在 2 L/min,平均水温为 $(27 \pm 1)$  °C,盐度 26~29 g/L,溶解氧 $>5.0$  mg/L。养殖试验期间,试验黑鲟分别投喂 6 组饲料(D1~D6),每天投喂 2 次,投喂时间分别为 08:00 和 16:00,每次投喂至眼观饱食状态。

黑鲟经过 8 周的饲养试验,每缸随机选取 10 尾,腹腔注射培养 24 h 的副溶血弧菌液 0.2 mL/尾,菌液浓度为 $5.5 \times 10^8$  CFU/mL,开展为期 10 d 的攻毒试验,攻毒期间正常饲养。每日记录各试验组黑鲟死亡率。

### 1.2 饲料配方

基于笔者所在研究团队前期黑鲟饲料营养需求研究结果,配制 6 组等氮等能饲料(D1~D6)。D1~D6 组试验饲料分别添加硒化多糖,使得试验饲料中外源有机硒的添加量为 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、3.0 mg/kg。硒化多糖由笔者所在实验室自行制备,通过壳寡糖与亚硒酸钠螯合而成,分子量为 50 ku,硒含量的实测值为 17.7 mg/g。饲料原料粉碎过 80 目筛,充分均匀混合后,制成直径为 2.5 mm 的硬颗粒饲料,采用空调抽湿、风扇干燥 72 h,分装标记后置于 $-20$  °C 冰柜中保存备用。测定试验饲料 D1~D6 中硒的含量分别为 0.34、0.52、0.68、0.91、1.08、3.06 mg/kg。各组试验饲料配方组成及

营养成分值见表 1。

### 1.3 样品采集及分析测定

养殖试验结束后,将试验鱼饥饿 24 h 后,采用 MS-222(60 mg/L)麻醉,记录每缸试验鱼数目,测量体长、体质量。所有试验鱼尾静脉取血,置于离心管中, $4$  °C 静置 2 h, $3\,000$  r/min 离心 15 min,取上层血清,立即用液氮快速冷冻,然后保存于 $-80$  °C 冰箱中,待分析用。

血清中溶菌酶(LZM)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)的活力和 MDA 含量,采用南京建成生物工程有限公司试剂盒检测。

### 1.4 数据处理

本试验结果数据均采用“平均数 $\pm$ 标准差”( $\bar{x} \pm s$ )表示,用 SPSS 16.0 软件对试验数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA)后采用 Tukey's 多重比较检验,显著水平 $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 硒化多糖对攻毒试验后黑鲟血清免疫力的影响

由图 1 可知,在给黑鲟注射副溶血弧菌 10 d 后,随着饲料中硒含量的增加,黑鲟血清溶菌酶(LZM)活性呈现升高的趋势,饲料中硒含量为 3.06 mg/kg 的试验组黑鲟血清 LZM 活性最高,显著高于除饲料硒含量为 0.91、1.08 mg/kg 之外的其他各试验组( $P < 0.05$ )。

### 2.2 硒化多糖对攻毒试验后黑鲟血清抗氧化性能的影响

由图 2、图 3 和图 4 可知,在给黑鲟注射副溶血弧菌 10 d 后,随着饲料中硒含量的增加,黑鲟血清超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)的活性均呈现升高趋势,且均在饲料中硒含量为 3.06 mg/kg 的试验组达到最大值,显著高于饲料中硒含量为 0.34、0.52 和 0.68 mg/kg 的试验组( $P < 0.05$ ),但与饲料中硒含量为 0.91、1.08 mg/kg 的试验组没有显著差异( $P > 0.05$ )。

由图 5 可知,在给黑鲟注射副溶血弧菌 10 d 后,随着饲料中硒含量的增加,黑鲟血清丙二醛(MDA)含量呈现降低的趋势,在饲料中硒含量为 3.06 mg/kg 的试验组达到最小值,显著低于除饲料中硒含量为 0.91、1.08 mg/kg 之外的各试验组( $P < 0.05$ )。

表 1 试验饲料原料组成及营养成分含量分析

| 原料         | 饲料组分(g/kg) |          |          |          |        |          |
|------------|------------|----------|----------|----------|--------|----------|
|            | D1         | D2       | D3       | D4       | D5     | D6       |
| 鱼粉         | 150        | 150      | 150      | 150      | 150    | 150      |
| 大豆浓缩蛋白     | 280        | 280      | 280      | 280      | 280    | 280      |
| 酪蛋白        | 150        | 150      | 150      | 150      | 150    | 150      |
| 面粉         | 200        | 200      | 200      | 200      | 200    | 200      |
| 鱼油         | 50         | 50       | 50       | 50       | 50     | 50       |
| 玉米油        | 40         | 40       | 40       | 40       | 40     | 40       |
| 大豆磷脂       | 10         | 10       | 10       | 10       | 10     | 10       |
| 羧甲基纤维素     | 20         | 20       | 20       | 20       | 20     | 20       |
| 磷酸二氢钠      | 20         | 20       | 20       | 20       | 20     | 20       |
| 复合维生素 1    | 2.5        | 2.5      | 2.5      | 2.5      | 2.5    | 2.5      |
| 复合矿物盐 2    | 12         | 12       | 12       | 12       | 12     | 12       |
| 甜菜碱        | 10         | 10       | 10       | 10       | 10     | 10       |
| 植酸酶        | 0.5        | 0.5      | 0.5      | 0.5      | 0.5    | 0.5      |
| 三氧化二钼      | 1          | 1        | 1        | 1        | 1      | 1        |
| 卡拉胶        | 5          | 5        | 5        | 5        | 5      | 5        |
| 蛋氨酸        | 9          | 9        | 9        | 9        | 9      | 9        |
| 精氨酸        | 4          | 4        | 4        | 4        | 4      | 4        |
| 硒化多糖       | 0          | 0.011 8  | 0.023 5  | 0.035 3  | 0.047  | 0.176 5  |
| α-纤维素      | 36         | 35.988 2 | 35.976 5 | 35.964 7 | 35.953 | 35.923 5 |
| 营养成分       |            |          |          |          |        |          |
| 粗蛋白(%)     | 41.57      | 41.57    | 41.57    | 41.57    | 41.57  | 41.57    |
| 粗脂肪(%)     | 13.63      | 13.63    | 13.63    | 13.63    | 13.63  | 13.63    |
| 硒含量(mg/kg) | 0.34       | 0.52     | 0.68     | 0.91     | 1.08   | 3.06     |

注:1 kg 饲料含:α-生育酚 20 mg、二硫氢酸钠维生素 K 5 mg、维生素 B<sub>1</sub> 5 mg、泛酸钙 10 mg、烟碱酸 100 mg、维生素 B<sub>6</sub> 5 mg、叶酸 2 mg、维生素 B<sub>12</sub> 0.05 mg、生物素 0.5 mg、氨基苯酸 50 mg、肌醇 500 mg、氯化胆碱 500 mg、维生素 C 150 mg、维生素 A 10 000 IU、维生素 D<sub>3</sub> 2 000 IU、Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 0.4 mg、CaCO<sub>3</sub> 567.9 mg、NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> · H<sub>2</sub>O 200 mg、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 200 mg、MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 10 mg、MnSO<sub>4</sub> · H<sub>2</sub>O 2 mg、CuCl<sub>2</sub> · 2H<sub>2</sub>O 1 mg、ZnSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 2 mg、FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 2 mg、NaCl 12 mg、KI 0.1 mg、CoCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O 0.1 mg、Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O 0.5 mg、AlCl<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O 1 mg、KF 1 mg。

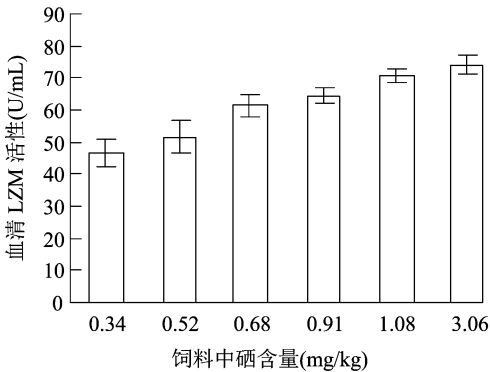


图1 硒化多糖对攻毒试验后黑鲟血清 LZM 活性的影响

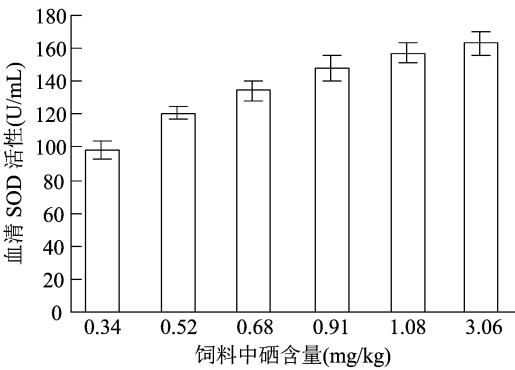


图2 硒化多糖对攻毒试验后黑鲟血清 SOD 活性的影响

2.3 饲料中添加硒化多糖对攻毒试验后黑鲟累积死亡率的影响

由图 6 可知,在给黑鲟注射副溶血弧菌 10 d 后,黑鲟的累积死亡率随着饲料中硒含量的增加呈

现降低的趋势,饲料中硒含量为 1.08、3.06 mg/kg 的试验组黑鲟的累积死亡率最低,显著低于除饲料中硒含量为 0.91 mg/kg 之外的各试验组 ( $P < 0.05$ )。

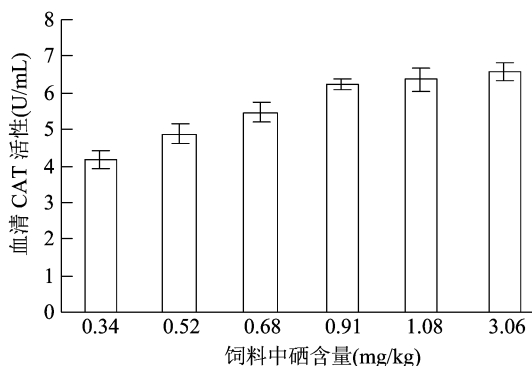


图3 硒化多糖对攻毒试验后黑鲷血清 CAT 活性的影响

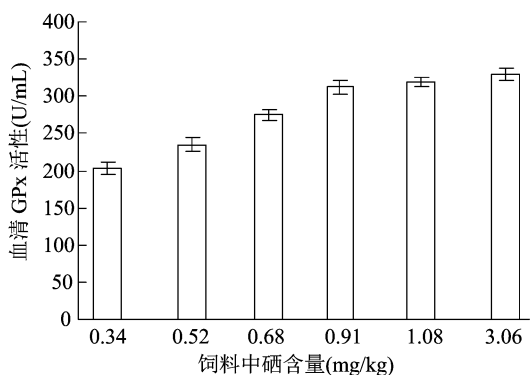


图4 硒化多糖对攻毒试验后黑鲷血清 GPx 活性的影响

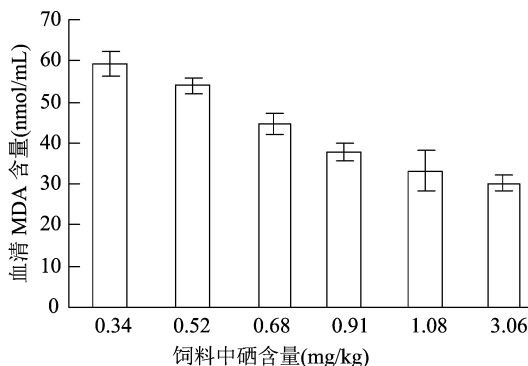


图5 硒化多糖对攻毒试验后黑鲷血清 MDA 活性的影响

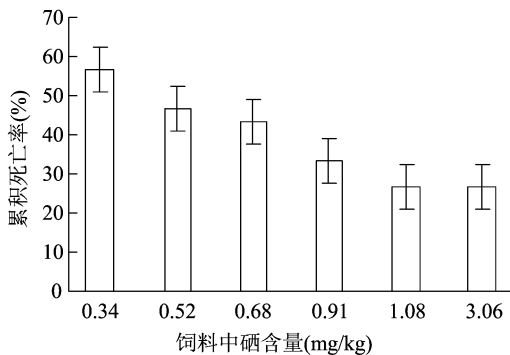


图6 硒化多糖对攻毒试验后黑鲷累积死亡率的影响

### 3 讨论与结论

#### 3.1 饲料中添加硒化多糖对攻毒试验后黑鲷免疫力的影响

鱼类是特异性免疫和非特异性免疫并存的脊椎动物,但与哺乳动物相比,鱼类特异性免疫机制还不完善,在抵御病原微生物时主要依赖非特异性免疫发挥作用<sup>[17]</sup>。溶菌酶通过引发溶菌反应和作为调理素发挥其抗菌活性<sup>[18-19]</sup>,是反映动物非特异免疫功能的重要生理指标。许多研究表明,免疫增强剂可以提高鱼类血清溶菌酶的活力,例如陈兴发研究发现,姜黄素可以提高罗非鱼的血清 LYM 活力<sup>[20]</sup>。宋晓玲等将 0.1% 和 1.0% 2 种浓度的肽聚糖悬液注射入牙鲆体内,测定发现牙鲆血清溶菌酶活性显著提高<sup>[21]</sup>。郭玉娟等研究发现,在饲料中添加 250 ~ 450 mg/kg 的肽聚糖可显著提高彭泽鲫的血清溶菌酶活力<sup>[22]</sup>。硒能增强动物的体液和细胞免疫功能<sup>[23]</sup>,Low 等将丝鳍毛足鲈暴露于含硒 0.5 g/m<sup>3</sup> 的水体 2 周后,发现丝鳍毛足鲈血浆溶菌酶活力升高 33.72%<sup>[24]</sup>。本研究发现,饲料中添加硒化多糖可以显著提高副溶血弧菌感染黑鲷的血清 LYM 活力,当饲料硒含量低于 0.91 mg/kg 时,黑鲷的血清 LYM 活力随着饲料硒含量的增加显著升高 ( $P < 0.05$ ),当饲料硒含量高于 0.91 mg/kg 时,黑鲷的血清 LYM 活力不再显著升高 ( $P > 0.05$ )。这可能是因为饲料硒不足时,补充膳食硒能够提高黑鲷血清 LYM 活力,而膳食硒满足黑鲷需求后,继续补充膳食硒对黑鲷血清 LYM 活力没有显著影响。研究结果表明,硒化多糖能够提高副溶血弧菌感染后黑鲷的免疫力,以增强其对副溶血弧菌感染的抵抗力。以免疫力为评价指标,黑鲷对饲料中硒的最适需求量为 0.91 mg/kg。

#### 3.2 饲料中添加硒化多糖对攻毒试验后黑鲷抗氧化性能的影响

血清中 SOD、CAT 和 GPx 活性以及 MDA 含量是反映血清抗氧化能力的重要指标<sup>[25-27]</sup>。SOD 可以催化超氧阴离子形成 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub><sup>[28]</sup>,随后 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 在 GPx 和 CAT 的作用下分解生成水和氧气<sup>[29-30]</sup>。GPx、SOD 和 CAT 被认为是细胞防御功能的第 1 道防线,GPx 和 SOD 活性以及两者之间的平衡对于抵抗氧化损伤具有重要的保护作用<sup>[31]</sup>。硒是 GPx 的重要组成部分<sup>[32]</sup>,GPx 的活性与机体硒含量密切相关,在异育银鲫<sup>[33]</sup>、鲤鱼<sup>[34]</sup>,饲料中添加硒能显著

增加鱼体 GPx 活力,且 GPx 活力与硒添加量呈正相关关系。MDA 是脂质过氧化的产物,通常被作为检测氧化损伤的重要指标<sup>[35]</sup>。Burhan 等研究发现,适量添加亚硒酸钠能使虹鳟血清 MDA 含量降低<sup>[36]</sup>。本研究中,随着饲料中硒化多糖添加量的增加,当饲料硒含量低于 0.91 mg/kg 时,黑鲷幼鱼血清 SOD、CAT 和 GPx 的活性与饲料硒含量呈现正相关( $P < 0.05$ ),血清中 MDA 含量与饲料硒含量呈现负相关( $P < 0.05$ ),而当饲料硒含量高于 0.91 mg/kg 时,黑鲷幼鱼血清 SOD、CAT、GPx 的活性及 MDA 含量不再显著变化( $P > 0.05$ ),表明饲料中添加硒化多糖可以显著提高副溶血弧菌感染黑鲷的血清抗氧化性能,且血清抗氧化能力与硒的添加量呈现正相关。以抗氧化性能为评价指标,黑鲷对饲料中硒的最适需求量为 0.91 mg/kg。

### 3.3 饲料中添加硒化多糖对攻毒试验后黑鲷累积死亡率的影响

攻毒试验是免疫增强剂效果最直观的反映方式。硒可以影响水生动物的疾病抵抗力,硒缺乏会降低动物的免疫功能,摄食缺硒饲料可使其疾病抵抗力降低,适当补充外源硒可以增强它们的免疫功能,从而增强其疾病抵抗力<sup>[37]</sup>。Wang 等研究表明,斑点叉尾鲷的抗病力与饲料硒水平密切相关,0.20 mg/kg 的硒代蛋氨酸和 0.40 mg/kg 的酵母硒可显著提高斑点叉尾鲷经爱德华氏菌攻毒后的存活率<sup>[38]</sup>。华雪铭等报道,添加剂酵母硒的含量与嗜水气单胞菌对异育银鲫的  $LC_{50}$  密切相关,随着添加剂酵母硒含量的升高, $LC_{50}$  升高,即异育银鲫对嗜水气单胞菌的抵抗力增强<sup>[39]</sup>。本研究中,在给黑鲷注射副溶血弧菌,经过 10 d 的攻毒试验后,饲料中添加硒化多糖可以显著降低黑鲷的累积死亡率,当饲料硒含量低于 0.91 mg/kg 时,黑鲷的累积死亡率随着饲料硒含量的增加显著降低( $P < 0.05$ ),当饲料硒含量高于 0.91 mg/kg 时,黑鲷的累积死亡率不再显著降低( $P > 0.05$ )。研究表明,硒化多糖可以提高黑鲷对副溶血弧菌感染的抵抗能力,提高养殖存活率,这可能是硒化多糖通过提高副溶血弧菌感染黑鲷的血清免疫力和抗氧化性能实现的。以副溶血弧菌感染后黑鲷的存活率为评价指标,黑鲷对饲料中硒的最适需求量为 0.91 mg/kg。

综上所述,饲料中添加硒化多糖可以提高副溶血弧菌感染黑鲷的免疫力和抗氧化性能,提升黑鲷对副溶血弧菌感染的抵抗能力,降低黑鲷感染副溶

血弧菌后的死亡率,提升黑鲷养殖存活率。以副溶血弧菌感染后黑鲷的免疫力、抗氧化性能和存活率为评价指标,黑鲷对饲料中硒的最适需求量均为 0.91 mg/kg。

### 参考文献:

- [1] National Research Council. Nutrient requirements of fish [M]. Washington DC, USA: National Academy Press, 1993: 144.
- [2] Lin Y H, Shiao S Y. Dietary selenium requirements of juvenile grouper, *Epinephelus malabaricus* [J]. Aquaculture, 2005, 250: 356 – 363.
- [3] Zhou X, Wang Y, Gu Q, et al. Effects of different dietary selenium sources (selenium nanoparticle and selenomethionine) on growth performance, muscle composition and glutathione peroxidase enzyme activity of crucian carp (*Carassius auratus gibelio*) [J]. Aquaculture, 2009, 291: 78 – 81.
- [4] Saffari S, Keyvanshokoh S, Zakeri M, et al. Effects of dietary organic, inorganic, and nanoparticulate selenium sources on growth, hemato – immunological, and serum biochemical parameters of common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. Fish Physiol Biochem, 2018, 44: 1087 – 1097.
- [5] Hamilton S J. Review of selenium toxicity in the aquatic food chain [J]. Science of the Total Environment, 2004, 326 (1/2/3): 1 – 31.
- [6] Atencio L, Moreno I, Angeles J, et al. Effects of dietary selenium on the oxidative stress and pathological changes in tilapia (*Oreochromis niloticus*) exposed to a microcystin – producing cyanobacterial water bloom [J]. Toxicon, 2009, 53 (2): 269 – 282.
- [7] Saleh R, Betancor M B, Roo J, et al. Selenium levels in early weaning diets for gilthead seabream larvae [J]. Aquaculture, 2014, 426 – 427: 256 – 263.
- [8] Rayman M P. The importance of selenium to human health [J]. The Lancet, 2000, 356 (9225): 233 – 241.
- [9] Küçükbay F Z, Yazlak H, Karaca I, et al. The effects of dietary organic or inorganic selenium in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) under crowding conditions [J]. Aquaculture Nutrition, 2009, 15 (6): 569 – 576.
- [10] Lin, Y H. Effects of dietary organic and inorganic selenium on the growth, selenium concentration and meat quality of juvenile grouper *Epinephelus malabaricus* [J]. Aquaculture, 2014, 430: 114 – 119.
- [11] Wang L, Wang G, Zhang J, et al. Extraction optimization and antioxidant activity of intracellular selenium polysaccharide by *Cordyceps sinensis* SU – 02 [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86 (4): 1745 – 1750.
- [12] Wang J, Zhao B, Wang X, et al. Synthesis of selenium – containing polysaccharides and evaluation of antioxidant activity *in vitro* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2012, 51: 987 – 991.
- [13] Malinowska E, Krzyckowski W, Herold F A, et al. Biosynthesis of selenium – containing polysaccharides with antioxidant activity in liquid culture of *Hericium erinaceum* [J]. Enzyme and Microbial

- Technology, 2009, 44 (5) : 334 – 343.
- [14] Nip T H M, Ho W Y, Wong C K. Feeding ecology of larval and juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegeli*) and Japanese seaperch (*Lateolabrax japonicus*) in Tolo Harbour, Hong Kong [J]. Environmental Biology of Fishes, 2003, 66 (2) : 197 – 209.
- [15] Shao Q, Ma J, Xu Z, et al. Dietary phosphorus requirement of juvenile Black Sea bream, *Sparus macrocephalus* [J]. Aquaculture, 2008, 277 (1) : 92 – 100.
- [16] 胡王龙, 邵庆均, 王秀英. 池塘养殖黑鲷常见疾病的防治 [J]. 中国水产, 2004 (5) : 51 – 52.
- [17] 李 莉, 李春梅. 鱼类非特异性免疫研究进展 [J]. 河南农业科学, 2012, 41 (2) : 26 – 32.
- [18] Mori K, Nakanishi T, Suzuki T, et al. Defense mechanisms in invertebrates and fish [J]. Tanpakushitsu Kakusan Koso, 1989, 34 (3) : 214 – 223.
- [19] Boman H G, Faye I, Gudmundsson G H, et al. Cell – free immunity in Cecropia. A model system for antibacterial proteins [J]. European Journal of Biochemistry, 1991, 201 (1) : 23 – 31.
- [20] 陈兴发. 姜黄素对罗非鱼生长、抗氧化及脂类代谢的影响 [D]. 广州: 华南农业大学, 2008.
- [21] 宋晓玲, 杨绪彤, 思瀚文, 等. 双歧杆菌细胞壁肽聚糖的分离及其对二种海产动物免疫活性的影响 [J]. 水产学报, 2005, 29 (3) : 350 – 355.
- [22] 郭玉娟, 陈学年. A3 $\alpha$  肽聚糖对彭泽鲫生长及非特异性免疫机能的影响 [J]. 水产科学, 2006, 25 (2) : 65 – 68.
- [23] Sheffy B E, Schultz R D. Influence of vitamin E and selenium on immune response mechanisms [J]. Federation Proceedings, 1979, 38 (7) : 2139 – 2143.
- [24] Low K W, Sin Y M. In vivo and in vitro effects of mercuric chloride and sodium selenite on some non – specific immune responses of blue gourami, *Trichogaster trichopterus* (Pallus) [J]. Fish & Shellfish Immunology, 1996, 6 (5) : 351 – 362.
- [25] Hafeman D G, Hoekstra W G. Protection against carbon Tetrachloride – Induced lipid peroxidation in the rat by dietary vitamin E, selenium, and methionine as measured by ethane evolution [J]. The Journal of Nutrition, 1977, 107 (4) : 656 – 665.
- [26] Omaye S T, Reddy K A, Cross C E. Enhanced lung toxicity of paraquat in selenium – deficient rats [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 1978, 43 (2) : 237 – 247.
- [27] Amstad P, Moret R, Cerutti P. Glutathione peroxidase compensates for the hypersensitivity of Cu, Zn – superoxide dismutase overproducers to oxidant stress [J]. Journal of Biological Chemistry, 1994, 269 (3) : 1606 – 1609.
- [28] Gutteridge J C. Superoxide dismutase inhibits the superoxide-driven Fenton reaction at two different levels; Implication for a wider protective role [J]. FEBS Letters, 1985, 185 (1) : 19 – 23.
- [29] Schrader M, Fahimi H D. Peroxisomes and oxidative stress [J]. Biochimica et Biophysica Acta – Molecular Cell Research, 2006, 1763 (12) : 1755 – 1766.
- [30] Mills G C. Hemoglobin catabolism. I. Glutathione peroxidase, an erythrocyte enzyme which protects hemoglobin from oxidative breakdown [J]. The Journal of Biological Chemistry, 1957, 229 (1) : 189 – 197.
- [31] Gebhardt R. Oxidative stress, Plant – Derived antioxidants and liver fibrosis [J]. Planta Medica, 2002, 68 (4) : 289 – 296.
- [32] Combs G F. The role of selenium in nutrition [J]. Quarterly Review of Biology, 1987, 46 (1) : 124 – 125.
- [33] Wang Y B, Han J Z, Li W F. Effect of different selenium source on growth performances, glutathione peroxidase activities, muscle composition and selenium concentration of allogynogenetic crucian carp (*Carassius auratus gibelio*) [J]. Anim Feed Sci Tech, 2007, 134 : 243 – 251.
- [34] Ashouri S, Keyvanshokoh S, Salati A P, et al. Effects of different levels of dietary selenium nanoparticles on growth performance, muscle composition, blood biochemical profiles and antioxidant status of common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. Aquaculture, 2015, 446 : 25 – 29.
- [35] Esterbauer H, Schaur R J, Zollner H. Chemistry and biochemistry of 4 – hydroxynonenal, malonaldehyde and related aldehydes [J]. Free Radical Biology and Medicine, 1991, 11 (1) : 81 – 128.
- [36] Burhan A, Ibrahim O, Zeliha S T, et al. Effects of sodium selenite on some biochemical and hematological parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum, 1792) exposed to Pb<sup>2+</sup> and Cu<sup>2+</sup> [J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2008, 34 (1) : 53 – 59.
- [37] 罗 辉, 周小秋. 硒与水生动物免疫功能的关系 [J]. 动物营养学报, 2006 (S1) : 378 – 382.
- [38] Wang C, Lovell R T. Organic Selenium sources, selenomethionine and selenoyeast, have higher bioavailability than an inorganic selenium source, sodium selenite, in diets for channel catfish (*Ictalurus punctatus*) [J]. Aquaculture, 1997, 152 (1) : 223 – 234.
- [39] 华雪铭, 周洪琪, 邱小琮, 等. 饲料中添加芽孢杆菌和硒酵母对异育银鲫的生长及抗病力的影响 [J]. 水产学报, 2001, 25 (5) : 448 – 453.