

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20180105001

http://www.yykxjz.cn/

王丽丽, 李宝山, 王际英, 孙永智, 韩秀杰, 王雅平, 郝甜甜, 王世信. 维生素D₃对仿刺参幼参生长、体组成及抗氧化能力的影响. 渔业科学进展, 2019, 40(1): 110–118

Wang LL, Li BS, Wang JY, Sun YZ, Han XJ, Wang YP, Hao TT, Wang SX. Effects of dietary vitamin D₃ on growth performance, body composition, and antioxidant capacity of the juvenile sea cucumber. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(1): 110–118

维生素 D₃ 对仿刺参幼参生长、体组成及 抗氧化能力的影响*

王丽丽^{1,2} 李宝山² 王际英^{2①} 孙永智²
韩秀杰^{1,2} 王雅平^{1,2} 郝甜甜² 王世信²

(1. 上海海洋大学水产与生命学院 水产科学国家级实验教学示范中心 农业农村部鱼类营养与环境生态研究中心 水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心 上海 201306; 2. 山东省海洋资源与环境研究院 山东省海洋生态修复重点实验室 烟台 264006)

摘要 为研究维生素 D₃ 对仿刺参(*Apostichopus japonicus*)幼参生长、体组成及抗氧化能力的影响, 在基础饲料中分别添加 0(D1)、250(D2)、500(D3)、1000(D4)、2000(D5)、3000(D6) IU/kg 的维生素 D₃(实测值: 95、334、570、1076、2063、3081 IU/kg), 制作 6 组等氮等能的实验饲料, 饲喂初始体重为(15.43±0.14) g 仿刺参幼参 56 d。结果显示, 1) 维生素 D₃ 对仿刺参存活率(SR)无显著影响($P>0.05$), 显著提高了增重率(WGR)和特定生长率(SGR), D1 组均显著低于其他组($P<0.05$); D3、D4、D5 组肠体比(IWR)显著高于其他 3 组($P<0.05$), 但 3 组之间差异不显著($P>0.05$)。2) 维生素 D₃ 对体壁水分、粗蛋白和粗脂肪含量无显著影响($P>0.05$); 粗灰分含量随添加量的增加呈先升后降趋势, D5 组达到最高值; 羟脯氨酸含量呈先下降后上升趋势, D4 组达到最低值; 维生素 D₃ 显著提高了体壁 Ca 含量($P<0.05$); 体壁维生素 D₃ 的沉积量呈先上升后下降趋势, D4 组达到最高值, 显著高于其他组($P<0.05$)。P 含量呈先上升后平稳趋势; Mg 含量呈上升趋势, D1 组显著低于其他组($P<0.05$); Fe 含量呈先升后降趋势, D5、D6 组显著低于其他组($P<0.05$); Mn 含量呈下降趋势, 但各组间差异不显著($P>0.05$)。3) 随着维生素 D₃ 添加量的增加, 肠道碱性磷酸酶(AKP)及总超氧化物歧化酶(T-SOD)活力呈先上升后下降趋势, 丙二醛(MDA)含量呈下降趋势, 各组间总抗氧化能力(T-AOC)及过氧化氢酶(CAT)活力均无显著性差异($P>0.05$)。研究表明, 以增重率为评价指标, 一元二次线性回归分析表明, 初始体重为 15.43 g 的仿刺参对维生素 D₃ 的最适需求量为 1587.5 IU/kg。

关键词 仿刺参; 维生素 D₃; 生长; 体成分; 抗氧化能力

中图分类号 S963 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2019)01-0110-09

维生素 D₃ 为脂溶性类固醇衍生物, 是水生动物的生长所必需的营养素(黎德兵等, 2015)。水生动物自

* 山东省现代农业产业技术体系-刺参创新团队建设项目(SDAIT-22-06)、山东省重点研发计划(2016GSF115005)和海洋公益性行业科研专项(201505022)共同资助 [This work was supported by Modern Agricultural Industry Technology System of Shandong Province-Innovative Team of Sea Cucumber (SDAIT-22-06), and Key Research and Development Project of Shandong Province (2016GSF115005), and Research Project of Marine Public Welfare Industry (201505022)]. 王丽丽, E-mail: liliwang10192013@163.com

① 通讯作者: 王际英, 研究员, E-mail: ytwjy@126.com

收稿日期: 2018-01-05, 收修改稿日期: 2018-02-07

身不能合成或者合成量不能满足机体的需要,必需从食物中获取足量的维生素 D₃ 来满足机体生理生化功能的需要(彭翔等, 2010; Yanik *et al*, 2016)。已有研究表明, 维生素 D₃ 能够促进肠道黏膜上皮细胞 Ca 结合蛋白的形成, 促进 Ca、P 的吸收, 调节体内 Ca、P 平衡(李爱杰, 1996)。此外, 维生素 D₃ 还参与协调提高机体的免疫(付京花等, 2006)及抗氧化能力(Martinez-Álvarez *et al*, 2005)。目前, 有关水生动物对维生素 D₃ 最适需求量的研究主要集中在鲤鱼(*Cyprinus carpio*)(张桐等, 2011), 黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*) (段鸣鸣等, 2014), 鲈鱼(*Lateolabrax japonicus*)(张璐等, 2016), 草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)(蒋明等, 2009)等鱼类, 有关仿刺参(*Apostichopus japonicus*)幼参对维生素 D₃ 的最适需求量未见报道。

仿刺参具有较高保健功效及经济价值, 是我国渤海和黄海水域的重要海水养殖种类(张德瑞等, 2016)。目前, 维生素在仿刺参饲料中的应用研究较少, 仅见维生素 C(Luo *et al*, 2014)和维生素 E(汪将, 2014)对仿刺参生长和免疫特性影响的研究。因此, 本研究通过在饲料中添加不同水平的维生素 D₃, 研究其对仿刺参幼参生长、消化酶活力及免疫能力的影响, 以期为仿刺参对饲料中维生素 D₃ 的需求量提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验设计与饲料制备

实验分为 6 个处理组, 每个处理组 3 个重复, 每个重复 30 头仿刺参[(15.43±0.14) g]。实验所用维生素 D₃ 含量为 500000 IU/g(浙江新维普添加剂有限公司)。以鱼粉和发酵豆粕为蛋白源, 鱼油和大豆卵磷脂为脂肪源, 配制粗蛋白含量为 22%, 粗脂肪含量为 4%的基础饲料, 在基础饲料中分别添加 0、250、500、1000、2000、3000 IU/kg 的维生素 D₃, 配制成 6 种实验饲料, 命名为 D1、D2、D3、D4、D5、D6。固体原料超微粉碎过 200 目标准筛, 按配比称重, 加入新鲜鱼油及适量的蒸馏水混匀, 用小型颗粒饲料挤压机制成直径为 0.3 cm、厚度为 0.05 cm 的片状饲料, 60℃烘干备用。实验饲料配方及营养组成见表 1。

1.2 实验用参及实验管理

养殖实验在山东省海洋资源与环境研究院东营实验基地循环水养殖系统中进行, 实验用仿刺参幼参购自山东蓬莱安源水产有限公司。挑选大小均匀、健康无病的仿刺参于养殖系统中暂养 15 d, 期间投喂基

础饲料。待其完全适应饲养条件后, 随机分为 6 个处理组, 每个处理组 3 个重复, 每个重复 30 头仿刺参, 平均体重为(15.43±0.14) g, 随机放养于 18 个圆柱形养殖桶(70 cm×80 cm)中, 控制水深为 60 cm, 实验周期为 56 d。每桶放海参养殖筐 2 个, 内嵌波纹板 20 张, 每隔 30 d 更换养殖筐 1 次。养殖期间, 控制水温为 17~19℃, 水流速为 2 L/min, 盐度为 26~28, pH 为 7.6~8.2, 溶解氧>5.0 mg/L, 氨氮(NH₄-N)和亚硝酸盐(NaNO₂)<0.05 mg/L。每天 08:00 换水, 换水量为 1/3, 每天 16:00 投饵 1 次, 初始投喂量占体重的 2%, 每天观察仿刺参的摄食情况及时调整投喂量, 并记录水温及死亡情况。每 3 d 吸底 1 次, 用虹吸法将残饵及粪便吸出, 养殖实验在弱光环境下进行。

1.3 样品采集与处理

养殖实验结束后, 控食 48 h, 统计各桶仿刺参的数量并称重, 用于存活率(Survival rate, SR, %)、增重率(Weight gain rate, WGR, %)、特定生长率(Specific growth rate, SGR, %/d)及肠体比(Ratio of intestine weight to body weight, IWR, %)的计算。每桶随机取 8 头置于洁净的泡沫板上, 用滤纸轻轻将仿刺参体表的水分吸干后分别称重。去除体腔液后, 置冰盘上分离肠道和体壁。肠道去除内容物, 用定性滤纸擦净后分别称重, 将肠道样品和体壁放在-20℃条件下冷冻保存, 待测。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 生长指标

$$WGR = (W_t - W_0) \times 100 / W_0;$$

$$SGR = (\ln W_t - \ln W_0) \times 100 / d;$$

$$SR = (\text{实验末参数} / \text{实验初参数}) \times 100;$$

$$IWR = (W_i / W_t) \times 100。$$

式中, W_0 为实验初仿刺参体重, W_t 为实验末仿刺参体重, d 为实验天数, W_i 为实验末仿刺参肠道重量。

1.4.2 饲料及体壁基本营养成分的测定 饲料及体壁水分采用 105℃烘干至恒重法(GB/T6435-2014); 粗蛋白采用凯氏定氮法(GB/T6432-2006); 粗脂肪采用索氏抽提法(GB/T6433-2006); 粗灰分采用 550℃马弗炉灼烧法(GB/T6438-2007); Ca 采用乙二胺四乙酸二钠络合滴定法(GB/T6436-2002)、总磷采用分光光度法(GB/T6437-2002)。饲料能量采用燃烧法(IKA, C6000, 德国); 饲料维生素 D₃ 在通标标准技术(青岛)有限公司采用高效液相色谱法-皂化提取法(GB/T 17818-2010)测定。测定步骤: 称取样品进行皂化,

表1 实验饲料配方及营养成分(干物质%)
Tab.1 Formulation and proximate composition of experimental diets (Dry matter %)

原料 Ingredients	组别 Groups					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
鱼粉 Fish meal	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
发酵豆粕 Fermented soybean meal	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00
虾粉 Shrimp meal	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00
藻粉 Algae powder	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
小麦粉 Wheat flour	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
α -淀粉 α -Starch	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
鱼油 Fish oil	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
大豆卵磷脂 Soybean lecithin	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
维生素预混料 Vitamin premix ^a	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
维生素 D Vitamin D (IU/kg)	0.00	250.00	500.00	1000.00	2000.00	3000.00
矿物质预混料 Mineral premix ^b	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
海泥 Sea mud	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00
总计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
成分分析 Proximate composition						
粗蛋白 Crude protein	22.69	22.49	22.42	22.82	22.52	22.17
粗脂肪 Crude lipid	4.06	4.46	4.72	4.05	4.04	4.28
粗灰分 Crude ash	44.16	44.30	44.30	44.14	44.07	44.10
能量 Energy (kJ/g)	14.15	14.21	14.18	14.35	14.33	14.46
钙 Calcium	2.43	2.32	2.53	2.51	2.48	2.51
磷 Phosphorus	0.85	0.83	0.85	0.82	0.83	0.81
维生素 D ₃ Vitamin D ₃ (IU/kg)	95.00	334.00	570.00	1076.00	2063.00	3081.00

^a 维生素预混料(mg/kg 饲料): 维生素 A, 38.0; α -生育酚, 210.0; 硫胺素, 115.0; 核黄素, 380.0; 盐酸吡哆醇, 88.0; 泛酸, 368.0; 烟酸, 1030.0; 生物素, 10.0; 叶酸, 20.0; 维生素 B₁₂, 1.3; 肌醇, 4000.0; 抗坏血酸, 500.0

^b 矿物质预混料配方组成见文献(王际英等, 2014)

^a Vitamin premix (mg/kg diet): vitamin A, 38.0; alpha-tocopherol, 210.0; thiamin, 115.0; riboflavin, 380.0; pyridoxine HCl, 88.0; pantothenic acid, 368.0; niacin acid, 1030.0; biotin, 10.0; folic acid, 20.0; vitamin B₁₂, 1.3; inositol, 4000.0; ascorbic acid, 500.0

^b Same contents of mineral premix as reference Wang *et al* (2014)

将皂化液转移到分液漏斗中进行提取, 最后将提取液进行蒸干浓缩, 加入甲醇溶解, 进行过滤, 得到待测液, 用高效液相色谱仪(Agilent 1200, 美国)检测; 体壁 Mg、Fe、Mn 采用浓硝酸微波消解后用电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7700, 美国)测定; 体壁羟脯氨酸采用南京建成生物工程研究所试剂盒进行测定; 体壁维生素 D₃ 含量采用上海酶联生物科技有限公司 ELISA 试剂盒测定, 具体测定步骤参照试剂盒说明书。

1.4.3 抗氧化酶活力的测定 取肠道样品, 剪碎, 加入 9 倍体积冰冷的生理盐水(0.9%), 制成 10%的匀浆, 在 4℃条件下, 8000 r/min 离心 10 min, 取出上清液, 分装于 2 ml 的离心管中, 保存于-80℃冰箱,

待测。

碱性磷酸酶(Alkaline phosphatase, AKP)、总超氧化物歧化酶(Total superoxide dismutase, T-SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)、丙二醛(Malondialdehyde, MDA)以及总抗氧化能力(Total antioxidant capacity, T-AOC)均采用南京建成生物工程研究所试剂盒测定, 碱性磷酸酶活力单位转化为国际单位, 其他酶活定义及具体测定步骤参照试剂盒说明书。

1.5 数据统计分析

采用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 当处理之间差异显著($P < 0.05$)时, 用 Duncan's 检验进行多重比较分析。统计数据以平均

值±标准误(Mean±SE)表示。

2 结果与分析

2.1 维生素 D₃ 对仿刺参幼参生长性能的影响

饲料维生素 D₃ 对仿刺参的 SR 无显著影响($P>0.05$), 随着饲料维生素 D₃ 含量的增加, WGR 及 SGR 呈先上升后下降的趋势, 均在 D4 组达到最高值, D1 组显著低于其他组($P<0.05$)。D3、D4、D5 组 IWR 显著高于其他 3 组($P<0.05$), 但 3 组之间差异不显著($P>0.05$)(表 2)。

以 WGR 为评价指标, 经一元二次回归分析得出, 初始体重为 15.43 g 的仿刺参对饲料中维生素 D₃ 的最适需求量为 1587.5 IU/kg(图 1)。

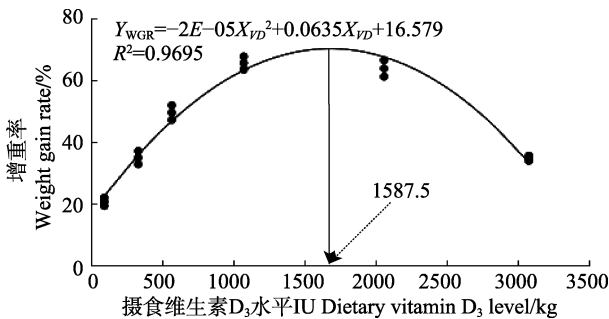


图 1 维生素 D₃ 水平与仿刺参增重率的相关性分析
Fig.1 Relationship between dietary vitamin D₃ level and weight gain rate (WGR) of *A. japonicus*

2.2 维生素 D₃ 对仿刺参幼参体组成的影响

饲料维生素 D₃ 显著影响了仿刺参体壁粗灰分、Ca、P、Mg、Fe 及羟脯氨酸含量($P<0.05$), 但对水分、粗蛋白、粗脂肪及 Mn 含量影响不显著($P>0.05$)。随

着饲料维生素 D₃ 含量的增加, 粗灰分含量呈上升趋势, D3、D4、D5 组无显著性差异($P>0.05$), D1、D2、D6 组显著低于 D4、D5 组($P<0.05$), 与 D3 组无显著性差异($P>0.05$); 羟脯氨酸含量呈先降后升的趋势, D4 组达到最低值, D1、D6 组无显著性差异, 显著高于其他 4 组($P<0.05$); 仿刺参体壁维生素 D₃ 沉积量与羟脯氨酸呈相同趋势, 但 D4 组显著高于其他组($P<0.05$), D4、D5、D6 组显著高于 D1、D2 组($P<0.05$), D5、D6 组与 D3 组间无显著性差异($P>0.05$)(表 3)。

饲料维生素 D₃ 显著提高了仿刺参体壁 Ca 含量, 各组显著高于 D1 组($P<0.05$); 随着饲料维生素 D₃ 含量的增加, P 含量呈先上升后平稳的趋势, D1、D2 组无显著性差异($P>0.05$), D4、D5、D6 组显著高于 D1、D2 组($P<0.05$), 且 3 组间无显著性差异($P>0.05$), D3 组显著高于 D1 组($P<0.05$), 与其他 4 组间无显著性差异($P>0.05$); Mg 含量呈上升趋势, D1 组显著低于其他组($P<0.05$); Fe 含量呈先升后降趋势, D5、D6 组显著低于其他组($P<0.05$), D5、D6 组间无显著性差异($P>0.05$); Mn 含量呈下降趋势, 但各组间差异不显著($P>0.05$)(表 4)。

2.3 维生素 D₃ 对仿刺参幼参肠道抗氧化酶活力的影响

随着饲料维生素 D₃ 含量的增加, 仿刺参肠道 AKP 及 T-SOD 活力均呈先上升后下降的趋势, AKP 活力在 D4 组达到最高值, D1 组显著低于其他各组($P<0.05$); D1、D6 组 T-SOD 活力显著低于其他各组($P<0.05$), D1、D6 组间无显著性差异($P>0.05$), D5 组达到最高值。MDA 含量随着饲料维生素 D₃ 含量的增加呈下降趋势; CAT 活力及 T-AOC 受饲料维生素 D₃ 含量的影响不显著($P>0.05$)(表 5)。

表 2 饲料维生素 D₃ 对仿刺参幼参生长性能及形体指标的影响

Tab.2 Effects of dietary vitamin D₃ on growth performance and physical indices of juvenile sea cucumber *A. japonicus*

生长性能 Growth performances	组别 Groups					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
初体重 Initial body weight (g)	15.41±0.10	15.44±0.10	15.48±0.02	15.40±0.08	15.45±0.13	15.41±0.11
终体重 Final body weight (g)	18.97±0.34 ^a	21.54±0.28 ^b	23.10±0.22 ^c	25.41±0.31 ^d	25.49±0.16 ^d	20.85±0.03 ^b
存活率 SR (%)	91.33±2.69	86.44±2.79	88.67±2.40	86.67±1.93	86.22±3.47	91.78±0.97
增重率 WGR (%)	20.55±0.78 ^a	34.85±1.24 ^b	49.41±1.38 ^c	65.43±1.23 ^d	63.70±1.54 ^d	34.6±0.51 ^b
特定生长率 SGR (%/d)	0.32±0.01 ^a	0.49±0.00 ^b	0.67±0.02 ^c	0.84±0.01 ^d	0.82±0.02 ^d	0.50±0.01 ^b
肠体比 IWR (%)	2.70±0.08 ^a	2.73±0.01 ^a	3.38±0.06 ^b	3.37±0.06 ^b	3.70±0.13 ^b	2.75±0.16 ^a

注: 表格中同行肩标相同小写字母或无字母表示差异不显著($P>0.05$), 不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 下表同

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

表3 饲料维生素 D₃ 对仿刺参幼参体壁基本成分的影响Tab.3 Effects of dietary vitamin D₃ on body wall composition of juvenile sea cucumber *A. japonicus*

体组成 Body composition	组别 Groups					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
水分 Moisture (%)	91.56±0.22	91.60±0.27	91.22±0.18	91.52±0.33	91.29±0.47	91.60±0.28
粗蛋白 Crude protein (%*)	45.88±0.02	45.68±0.00	45.73±0.13	46.01±0.24	45.59±0.12	45.57±0.12
粗脂肪 Crude lipid (%*)	3.67±0.14	3.77±0.17	3.47±0.12	3.46±0.08	3.42±0.07	3.51±0.12
粗灰分 Crude ash (%*)	35.82±0.06 ^a	36.23±0.58 ^a	36.48±0.05 ^{ab}	37.89±0.97 ^b	38.06±0.20 ^b	36.07±0.38 ^a
羟脯氨酸 Hydroxyproline (μg/g)	1000.23±7.96 ^c	923.15±3.18 ^d	659.22±13.78 ^b	488.18±4.96 ^a	816.70±11.90 ^c	984.81±2.23 ^e
维生素 D ₃ Vitamin D ₃ (μg/kg)	224.95±4.73 ^a	223.59±10.12 ^a	232.89±1.96 ^{ab}	273.90±3.95 ^c	245.35±4.32 ^b	240.03±7.33 ^{ab}

*: 粗蛋白、粗脂肪、粗灰分为干基含量

*: Contents of crude protein, crude lipid, crude ash are based on dry basis

表4 饲料维生素 D₃ 对仿刺参体壁矿物元素含量的影响Tab.4 Effects of dietary vitamin D₃ on mineral contents of the body wall of *A. japonicus*

体组成 Body composition	组别 Groups					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
钙 Ca (mg/g*)	12.39±0.05 ^a	13.29±0.01 ^{bc}	13.50±0.17 ^{cd}	13.71±0.12 ^{cd}	13.89±0.06 ^d	13.20±0.29 ^b
磷 P (mg/g*)	9.07±0.01 ^a	9.12±0.01 ^{ab}	9.25±0.09 ^{bc}	9.28±0.02 ^c	9.36±0.01 ^c	9.34±0.08 ^c
镁 Mg (mg/g*)	8.74±0.17 ^a	9.95±0.20 ^b	10.46±0.44 ^{bc}	10.86±0.35 ^{cd}	11.36±0.14 ^d	12.17±0.11 ^e
铁 Fe (mg/kg*)	41.28±0.18 ^b	48.63±1.67 ^c	50.40±2.42 ^c	48.12±2.77 ^c	29.45±0.08 ^a	30.06±1.11 ^a
锰 Mn (mg/kg*)	5.42±0.37	5.46±0.01	5.28±0.28	5.05±0.23	5.12±0.15	5.16±0.25

*: 钙、磷、镁、铁、锰为干基含量

*: Contents of calcium, phosphorus, magnesium, iron and manganese are based on dry basis

表5 饲料维生素 D₃ 对仿刺参肠道抗氧化酶活力的影响Tab.5 Effects of dietary vitamin D₃ on antioxidant enzyme activities of intestine of juvenile sea cucumber *A. japonicus*

免疫指标 Immune parameters	组别 (Groups)					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
碱性磷酸酶 AKP (U/g prot)	2.58±0.02 ^a	3.06±0.01 ^b	3.90±0.00 ^c	5.16±0.00 ^d	3.88±0.12 ^c	3.80±0.05 ^c
总超氧化物歧化酶 SOD(U/mg prot)	186.46±3.31 ^a	218.52±8.06 ^b	229.71±2.06 ^b	231.73±5.96 ^b	284.40±6.71 ^c	221.83±4.61 ^a
丙二醛含量 MDA (nmol/mg prot)	4.48±0.17 ^c	4.24±0.03 ^c	3.92±0.12 ^b	3.88±0.03 ^b	2.95±0.03 ^a	2.91±0.07 ^a
过氧化氢酶 CAT (U/mg prot)	41.32±0.27	42.67±0.66	41.80±0.69	41.26±1.29	40.82±1.27	41.31±0.58
总抗氧化能力 T-AOC (U/mg prot)	0.33±0.00	0.33±0.02	0.33±0.01	0.34±0.03	0.33±0.01	0.32±0.02

3 讨论

3.1 饲料中添加维生素 D₃ 对仿刺参幼参生长性能的影响

关于维生素 D₃ 促进动物生长的研究报道已有很多, 维生素 D₃ 可从激素、细胞及分子水平上影响动物的生长和 Ca 结合蛋白的形成(Maalouf, 2008), 适量添加可促进动物生长, 但过量添加会抑制动物的生长, 甚至产生毒性。本研究中, 随着饲料中维生素 D₃ 含量的增加, 各组仿刺参 SR 没有显著性差异, WGR 和 SGR 呈先升后降的趋势, D4 组达到最高值, 当饲料维生素 D₃ 含量为 3000 IU/kg 时, 仿刺参 WGR

和 SGR 明显下降, 与在中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*) (孙新瑾, 2009)、凡纳滨对虾(*Penaeus monodon*) (He *et al*, 1992)、皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*) (周歧存等, 2004) 研究结果一致。仿刺参体腔液中 Ca 含量比较丰富, 适量的维生素 D₃ 能够促进甲状腺激素的分泌, 进而提高仿刺参的生长速度(张璐等, 2016); 而高水平的维生素 D₃ 对维生素 A 和维生素 E 的吸收有拮抗作用, 这在一定程度上会降低动物的生长速度(陈娟等, 2010)。随着饲料维生素 D₃ 含量的增加, 仿刺参的 IWR 呈先升后降趋势, 说明适量的维生素 D₃ 能够促进肠道的发育, 提高仿刺参的生长性能。以 WGR 为评价指标时, 经一元二次回归分析得出, 仿

刺参幼参对维生素 D₃ 的最适需求量为 1587.5 IU/kg。

3.2 饲料中添加维生素 D₃ 对仿刺参幼参体成分的影响

养殖动物的体成分随配合饲料组成的不同而发生变化, 包括粗蛋白、粗脂肪、水分、粗灰分等。本研究中, 仿刺参体壁水分含量不受饲料维生素 D₃ 含量的影响, 这与蒋明等(2009)对草鱼的研究结果一致, 表明不同含量的维生素 D₃ 对仿刺参体壁干物质的积累程度无显著影响; 仿刺参的生长性能及体壁粗蛋白含量与饲料蛋白水平有关(王庆吉等, 2014; 赵斌等, 2016), 而本研究各组仿刺参体壁粗蛋白含量差异不显著, 表明当饲料中蛋白质含量一致时, 体壁粗蛋白含量并不能真实的反映仿刺参的生长情况。随着维生素 D₃ 含量的增加, 各组仿刺参体壁粗脂肪含量无显著性差异, 这与虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*) (Barnett *et al*, 1982)及皱纹盘鲍(周歧存等, 2004)的研究结果不一致, 仿刺参自身对脂肪的需求量与鱼类相比较低, 因此维生素 D₃ 对仿刺参的脂肪代谢可能影响不大。羟脯氨酸是胶原蛋白的主要成分之一, 是反映胶原蛋白数量的常见指标。本研究中, 随着饲料维生素 D₃ 含量的增加, 仿刺参体壁中羟脯氨酸含量呈先降后升的趋势, D4 组为最低值。骨骼的主要成分为骨盐(钙盐和磷酸盐)和有机基质(I 型胶原), 从仿刺参体壁中提取的胶原蛋白氨基酸组成与 I 型胶原蛋白的氨基酸组成相似(崔凤霞等, 2006), 当摄食饲料中维生素 D₃ 缺乏和过多时, 会导致仿刺参体壁骨盐减少、I 型胶原含量上升, 从而使体壁中羟脯氨酸含量升高; 仿刺参体壁中维生素 D₃ 的沉积量随着饲料维生素 D₃ 含量的增加呈先升后降的趋势, 说明维生素 D₃ 在促进动物生长的同时增加了自身在机体内的沉积量。

维生素 D₃ 对骨骼矿化以及 Ca、P 的沉积作用是浓度依赖型, 在适宜浓度范围内, 维生素 D₃ 含量的增加能够促进骨骼矿化和 Ca、P 沉积, 过高或过低均会导致骨骼矿化异常。本研究发现, 饲料维生素 D₃ 含量显著影响了仿刺参体壁粗灰分及 Ca、P 含量, 当含量为 1000、2000 IU/kg 时, 仿刺参体壁粗灰分、Ca、P 含量显著高于 D1 组, 添加量为 3000 IU/kg 时, 粗灰分及 Ca 含量呈下降趋势, 但 P 含量趋于稳定。仿刺参生活在含 Ca 丰富的海水中, 可以从海水中吸收 Ca 满足机体的生理代谢需要。饲料中适量的维生素 D₃ 能够促进矿物质在体壁中的积累, 粗灰分及 Ca 含量上升; 但过量的补充维生素 D₃ 则抑制矿物质沉积(Graff *et al*, 2015), 粗灰分及 Ca 含量下降; 而海水中 P 含量较低, 体壁中的 P 主要来源于饲料, 因此, 饲料维生素 D₃ 含量过高时, 同样能够促进 P 的吸收;

Mg 在细胞代谢及骨骼发育过程中起着重要的作用, 在体内, Mg 与 Ca 的代谢密切相关, 本研究仿刺参体壁 Mg 含量随饲料维生素 D₃ 含量的增加而增加, D1 组显著低于其他组, Ca 与 Mg 结构相似, 在一定范围内, 维生素 D₃ 能够促进 Mg 的吸收。Fe 是各种动物必需的矿物元素, 是动物营养中最重要的微量元素之一, 是生物机体生长发育不可缺少的条件(张佳明, 2007), 随着维生素 D₃ 含量的增加, 仿刺参体壁 Fe 含量呈先升后降趋势, 说明机体在维生素 D₃ 促进 Fe²⁺ 吸收的同时受其他阳离子的影响。Mn 是骨正常形成所必需的元素, 机体对 Mn 的吸收利用受很多因素的影响(王秋梅, 2007), 本研究随着维生素 D₃ 含量的增加, 各组仿刺参体壁 Mn 含量无显著性差异, 表明机体对 Mn 的吸收不受维生素 D₃ 含量的影响, 与在肉鸡上的研究结果不一致(张淑云等, 2010), 可能与养殖对象的种类有关。

3.3 饲料中添加维生素 D₃ 对仿刺参幼参肠道抗氧化酶活力的影响

仿刺参缺乏特异性的免疫系统, 只有体壁和体内防御机制共同组成的非特异性免疫体系(白阳等, 2016)。仿刺参体内的免疫主要分为细胞免疫和体液免疫, 二者之间密切相关, 相辅相成。仿刺参肠道免疫及抗氧化酶活力的高低可以间接地反应机体的健康状况(常杰等, 2011)。

碱性磷酸酶(AKP)是一种含 Zn 对底物专一性较低的磷酸单脂水解酶, 在体内直接参与磷酸基团的转移和代谢, 与机体的 Ca、P 代谢有关(Haussler *et al*, 1970; Norman *et al*, 1970)。本研究中, 随着饲料维生素 D₃ 含量的增加, 仿刺参肠道 AKP 活力呈先上升后下降的趋势, D4 组达到最高值, 与斑节对虾(*Penaeus monodon*)研究结果一致(Shiau *et al*, 1994)。AKP 存在于骨、肠道等组织中, 在生理剂量范围内, 维生素 D₃ 促进了肠道对 Ca、P 的吸收, AKP 活力上升, 当维生素 D₃ 含量过高时, 抑制了肠道对 Ca、P 的吸收, AKP 活力下降。实验结果显示, 维生素 D₃ 与 AKP 活力存在良好的相关性。

抗氧化酶系统被认为是免疫系统的一部分, 是细胞抵御氧化损伤的主要武器。总超氧化物歧化酶(T-SOD)、过氧化氢酶(CAT)和总抗氧化能力(T-AOC)等组成的抗氧化酶系统可以清除过多的自由基, 保护机体免受活性氧基团(ROS)的损伤。T-SOD 和 CAT 活力的高低间接地反应了机体清除氧自由基的能力。本研究中, 随着饲料维生素 D₃ 含量的增加, 肠道 T-SOD 活力呈先上升后下降的趋势, 并在 D5 组

达到最高值,表明维生素 D₃对 T-SOD 的生成有较强的诱导能力,增强机体的抗氧化能力。CAT 具有重要的生理功能,在细胞内与产生 H₂O₂ 的需氧脱氢酶类同时存在,可以催化 H₂O₂ 分解为 H₂O 和 O₂,和 SOD 协同完成细胞内的抗氧化作用。本研究仿刺参肠道 CAT 活力受饲料中维生素 D₃ 含量影响不显著,这与在黄颡鱼(段鸣鸣等, 2014)的研究结果不一致,仿刺参是无脊椎动物,缺少脊椎动物所具有的特异性免疫器官,与 SOD 相比,较高含量的维生素 D₃ 才能最大限度地提高 CAT 活力。总抗氧化能力(T-AOC)可以反映机体的抗应激能力(Rengpipat *et al*, 2000),随着维生素 D₃ 含量的增加,各实验组肠道 T-AOC 无显著性差异,而张淑云等(2010)研究发现,随饲料维生素 D₃ 含量的增加,肉鸡血清和肝脏中 T-AOC 呈上升趋势,与本研究结果不一致,这与动物种类及实验条件不同有关(Mourente *et al*, 2002)。丙二醛(MDA)是脂质过氧化反应链式终止阶段产生的小分子产物,其含量可以间接反映自由基的产生情况和机体组织细胞的脂质过氧化程度(Onderci *et al*, 2003)。本研究,随着饲料维生素 D₃ 含量的增加,肠道中 MDA 的含量呈下降趋势,添加量为 3000 IU/kg 时,MDA 含量最低。与在肉鸡(陈娟等, 2010)和蛋雏鸭(解俊美等, 2012)上研究结果一致,说明维生素 D₃ 在提高仿刺参抗氧化能力方面具有一定的积极作用。

4 结 论

以 WGR 为评价指标,经一元二次线性回归分析可知,初始体重为 15.43 g 的仿刺参对饲料中维生素 D₃ 的最适需求量为 1587.5 IU/kg。饲料中适量的添加维生素 D₃ 能够提高仿刺参的生长性能,对仿刺参体壁组成产生一定的影响。饲料维生素 D₃ 含量对仿刺参肠道蛋白酶、淀粉酶及脂肪酶活力无显著性影响,但是适量的维生素 D₃ 能够提高机体的抗氧化能力。

参 考 文 献

- Bai Y, Xu W, Wang DF, *et al*. The effect of dietary chitosan with different molecular weights on the growth and immunity of *Apostichopus japonicus* Selenka. *Progress in Fishery Science*, 2016, 37(1): 93–99 [白阳, 徐玮, 汪东风, 等. 不同分子量壳聚糖对仿刺参(*Apostichopus japonicus* Selenka)生长和免疫功能的影响. *渔业科学进展*, 2016, 37(1): 93–99]
- Barnett BJ, Cho CY, Slinger SJ. Relative biopotency of dietary ergocalciferol and cholecalciferol and the role of and requirement for vitamin D in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Journal of Nutrition*, 1982, 112(11): 2011–2019
- Chang J, Niu HX, Zhang WB. Research advance in immune system of *Apostichopus japonicus* Selenka and its immunostimulants. *China Feed*, 2011(6): 8–12 [常杰, 牛化欣, 张文兵. 刺参免疫系统及其免疫增强剂评价指标的研究进展. *中国饲料*, 2011(6): 8–12]
- Cui FX, Xue CH, Li ZJ, *et al*. Extraction and the physical and chemical characterization of collagen in *Apostichopus japonicus*. *Journal of Fisheries of China*, 2006, 30(4): 549–553 [崔凤霞, 薛长湖, 李兆杰, 等. 仿刺参胶原蛋白的提取及理化性质. *水产学报*, 2006, 30(4): 549–553]
- Chen J, Wang A, Zhang SY, *et al*. Effects of dietary calcium and vitamin D₃ levels on growth, slaughter performance and meat quality of broilers. *Journal of Animal Nutrition*, 2010, 22(6): 1544–1550 [陈娟, 王安, 张淑云, 等. 饲料钙和维生素 D₃ 水平对肉仔鸡生长性能、屠宰性能和肉品质的影响. *动物营养学报*, 2010, 22(6): 1544–1550]
- Duan MM, Wang CF, Xie CX. Effects of dietary vitamin D₃ on antioxidant and immune capacity of juvenile *Pelteobagrus fulvidraco*. *Freshwater Fisheries*, 2014, 44(3): 80–84 [段鸣鸣, 王春芳, 谢从新. 维生素 D₃ 对黄颡鱼幼鱼抗氧化能力及免疫功能的影响. *淡水渔业*, 2014, 44(03): 80–84]
- Fu JH, Zhang WB, Mai KS, *et al*. Effects of dietary vitamin D on growth and antioxidant response of abalone *Haliotis discus hannai* Ino. *High Technology Letters*, 2006, 16(12): 1306–1311 [付京花, 张文兵, 麦康森, 等. 维生素 D 对皱纹盘鲍生长和体组织抗氧化反应的影响. *高技术通讯*, 2006, 16(12): 1306–1311]
- Graff IE, Hoie S, Totland GK, *et al*. Three different levels of dietary vitamin D₃ fed to first-feeding fry of *Atlantic salmon* (*Salmo salar* L.): Effect on growth, mortality, calcium content and bone formation. *Aquaculture Nutrition*, 2015, 8(2): 103–111
- Haussler MR, Nagode LA, Rasmussen H. Induction of intestinal brush border alkaline phosphatase by vitamin D and identity with Ca-ATPase. *Nature*, 1970, 228(5277): 1199–1201
- He HQ, Lawrence AL, Liu RY. Evaluation of dietary essentiality of fat-soluble vitamins, A, D, E and K for penaeid shrimp (*Penaeus vannamei*). *Aquaculture*, 1992, 103(2): 177–185
- Jang M, Wu F, Wen H, *et al*. Effects of dietary vitamin D₃ supplementation on growth and body composition of juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*). *Freshwater Fisheries*, 2009, 39(5): 38–42 [蒋明, 吴凡, 文华, 等. 饲料中添加不同水平的维生素 D₃ 对草鱼幼鱼生长和体成分的影响. *淡水渔业*, 2009, 39(5): 38–42]
- Li AJ. *Aquatic Animal Nutrition and Feed Science*. Beijing: China Agricultural University Press, 1996: 50–53 [李爱杰. *水产动物营养与饲料学*. 北京: 中国农业出版社, 1996: 50–53]
- Li DB, Shao SS, Zhang GW, *et al*. Effects of vitamin D₃ supplemental level on growth performance and immune function of *Monopterus albus*. *Journal of Animal Nutrition*, 2015, 27(4): 1145–1151 [黎德兵, 邵珊珊, 张龚炜, 等. 饲料中维生素 D₃ 添加水平对黄鳝生长性能及免疫功能的影响. *动物营养学报*, 2015, 27(4): 1145–1151]
- Luo ZY, Wang BJ, Liu M, *et al*. Effect of dietary supplementation of vitamin C on growth, reactive oxygen species, and antioxidant enzyme activity of *Apostichopus japonicus* (Selenka) juveniles exposed to nitrite. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(4): 749–763

- Maalouf NM. The non-calcitropic actions of vitamin D: Recent clinical developments. *Current Opinion in Nephrology and Hypertension*, 2008, 17(4): 408–415
- Martínez-Álvarez RM, Morales AE, Sanz A. Antioxidant defenses in fish: Biotic and abiotic factors. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2005, 15(1–2): 75–88
- Mourente G, DiAz-Salvago E, Bell JG, *et al.* Increased activities of hepatic antioxidant defence enzymes in juvenile gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) fed dietary oxidised oil: Attenuation by dietary vitamin E. *Aquaculture*, 2002, 214(1–4): 343–361
- Norman AW, Mircheff AK, Adams RH, *et al.* Studies on the mechanism of action of calciferol III. Vitamin D-mediated increase of intestinal brush border alkaline phosphatase activity. *Biochimica et Biophysica Acta: General Subjects*, 1970, 215(2): 348–359
- Onderci M, Sahin N, Sahin K, *et al.* Antioxidant properties of chromium and zinc. *Biological Trace Element Research*, 2003, 92(2): 139–149
- Peng X, Shao QJ. Studies on vitamin D in aquatic animals. *Feed Industry*, 2010, 31(22): 47–49 [彭翔, 邵庆均. 维生素 D 在水产动物中的研究进展. *饲料工业*, 2010, 31(22): 47–49]
- Rengpipat S, Rukpratanporn S, Piyatiratitivorakul S, *et al.* Immunity enhancement in black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) by a probiont bacterium (*Bacillus* S11). *Aquaculture*, 2000, 191(4): 271–288
- Shiau SY, Hwang JY. The dietary requirement of juvenile grass shrimp (*Penaeus monodon*) for vitamin D. *Aquaculture*, 1994, 124(12): 2445–2450
- Sun XJ. Dietary vitamin A, D₃ and K₃ requirement of juvenile Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*. Master's Thesis of East China Normal University, 2009, 40–44 [孙新瑾. 中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)幼蟹对脂溶性维生素 A、D₃ 和 K₃ 的营养需要研究. 华东师范大学硕士研究生学位论文, 2009, 40–44]
- Wang J. Effects of vitamin E on growth and immunity of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) under environmental stresses. Doctoral Dissertation of Dalian University of Technology, 2014, 1–104 [汪将. 维生素 E 对环境胁迫下刺参生长和免疫的影响. 大连理工大学博士研究生学位论文, 2014, 1–104]
- Wang JY, Song ZD, Li PY, *et al.* Effects of dietary galactomannan oligosaccharides on growth, digestion, body wall nutritional composition and immunity of juvenile sea cucumber (*Apostichopus japonicus*). *Journal of Fishery Sciences of China*, 2014, 2(2): 310–319 [王际英, 宋志东, 李培玉, 等. 饲料添加半乳甘露寡糖对刺参幼参生长、体壁营养组成及免疫力的影响. *中国水产科学*, 2014, 21(2): 310–319]
- Wang QJ, Tang W, Luo YJ, *et al.* Effect of protein level in diet on the growth and immunity of *Apostichopus japonicus*. *Feed Industry*, 2014, 35(22): 32–36 [王庆吉, 唐薇, 罗亚军, 等. 日粮中蛋白质含量对刺参生长和免疫的影响. *饲料工业*, 2014, 35(22): 32–36]
- Wang QM. Application of trace element manganese in poultry production. *Livestock and Poultry Industry*, 2007(12): 12–14 [王秋梅. 微量元素锰在家禽生产中的应用. *畜禽业*, 2007(12): 12–14]
- Xie JM, Wang A. Effects of dietary vitamin D level on immune and antioxidant functions of egg-type ducklings. *Journal of Animal Nutrition*, 2012, 24(9): 1819–1824 [解俊美, 王安. 饲料维生素 D 添加水平对蛋雏鸭免疫及抗氧化功能的影响. *动物营养学报*, 2012, 24(9): 1819–1824]
- Yanik S, Aras MH, Erkilic S, *et al.* Histopathological features of bisphosphonates related osteonecrosis of the jaw in rats with and without vitamin D supplementation. *Archives of Oral Biology*, 2016, 65: 59–65
- Zhang DR, Zhang LM, Ma JJ, *et al.* Effect of dietary dried distiller's grains with solubles (DDGS) on the growth, body composition, and immune enzymes activities of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*). *Progress in Fishery Science*, 2016, 37(6): 115–122 [张德瑞, 张利民, 马晶晶, 等. 配合饲料中添加玉米 DDGS 对刺参(*Apostichopus japonicus*)生长、体组成及免疫指标的影响. *渔业科学进展*, 2016, 37(6): 115–122]
- Zhang JM. Studies on nutritional physiology of zinc and iron for Japanese seabass, *Lateolabrax japonicus*, and large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* R. Master's Thesis of Ocean University of China, 2007 [张佳明. 鲈鱼和大黄鱼微量元素—锌、铁的营养生理研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2007]
- Zhang L, Li J, Mai KS, *et al.* Effects of different dietary vitamin D contents on growth performance, calcium and phosphorus metabolism of juvenile Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*). *Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(5): 1402–1411 [张璐, 李静, 麦康森, 等. 饲料中不同维生素 D 含量对鲈鱼幼鱼生长性能和钙磷代谢的影响. *动物营养学报*, 2016, 28(5): 1402–1411]
- Zhang SY, Wang A. Effects of calcium and vitamin D on immune and antioxidant functions in growing broilers. *Journal of Animal Nutrition*, 2010, 22(3): 579–585 [张淑云, 王安. 钙和维生素 D 对生长肉鸡免疫及抗氧化功能的影响. *动物营养学报*, 2010, 22(3): 579–585]
- Zhang T, Xu QY, Xu H, *et al.* Effects of dietary vitamin D₃ supplementation on body composition and activity of alkaline phosphatase in the serum of juvenile mirror carp (*C. carpio* Songpu mirror carp). *Journal of North China Agricultural University*, 2011, 26(S1): 258–263 [张桐, 徐奇友, 许红, 等. 饲料中维生素 D₃ 对松浦镜鲤幼鱼体成分和血清碱性磷酸酶的影响. *华北农学报*, 2011, 26(S1): 258–263]
- Zhao B, Hu W, Li CL, *et al.* The nutritional effects of two feedstuffs from sweet potato on feeding and growth of sea cucumber *Apostichopus japonicus*. *Progress in Fishery Science*, 2016, 37(1): 80–86 [赵斌, 胡炜, 李成林, 等. 两种甘薯饲料原料的营养成分及其对仿刺参(*Apostichopus japonicus*)摄食与生长的影响. *渔业科学进展*, 2016, 37(1): 80–86]
- Zhou QC, Mai KS. Studies on the nutritional requirement of vitamin D for *Haliotis discus hannai* Ino. *Journal of Fisheries of China*, 2004, 28(2): 155–160 [周歧存, 麦康森. 皱纹盘鲍维生素 D 营养需要的研究. *水产学报*, 2004, 28(2): 155–160]

Effects of Dietary Vitamin D₃ on Growth Performance, Body Composition, and Antioxidant Capacity of the Juvenile Sea Cucumber

WANG Lili^{1,2}, LI Baoshan², WANG Jiyong^{2①}, SUN Yongzhi²,
HAN Xiujie^{1,2}, WANG Yaping^{1,2}, HAO Tiantian², WANG Shixin²

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Center for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Collaborative Innovation for Aquatic Animal Genetics and Breeding, Shanghai 201306; 2. Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Shandong Key Laboratory of Marine Ecological Restoration, Yantai 264006)

Abstract A feeding trial was conducted to evaluate the effects of vitamin D₃ (VD₃) on growth performance, body composition, and antioxidant capacity of the juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*. Six isonitrogen and isoenergetic diets were formulated by adding 0 (D1), 250 (D2), 500 (D3), 1000 (D4), 2000 (D5), or 3000 (D6) IU/kg VD₃ into the basal diet (measured value: 95, 334, 570, 1076, 2063, and 3081 IU/kg). Juvenile sea cucumbers with initial body weights of (15.43±0.14) g were fed for 56 days. Results showed that VD₃ had no effect on survival rate ($P>0.05$) of the sea cucumber. Further, both the weight gain rate and specific growth rate were significantly improved, and those of the D1 group were significantly lower than the other groups ($P<0.05$). The ratios of intestine weight to body weight of the D3, D4, and D5 groups were significantly higher than that of the other three groups ($P<0.05$), but there were no differences among them ($P>0.05$). With increasing VD₃, moisture, crude protein, and crude lipid contents of the body wall were not affected significantly ($P>0.05$), but crude ash contents of the body wall increased and thereafter declined, reaching the maximum in the D5 group. The contents of hydroxyproline of the body wall decreased initially and then increased, reaching the minimum in the D4 group ($P<0.05$). The deposition amount of VD₃ in the body wall increased initially and then decreased. The D4 group showed the highest value. VD₃ significantly increased the contents of calcium in the body wall ($P<0.05$). Additionally, the phosphorus content increased at first and was maintained. The contents of phosphorus of the D4, D5, and D6 groups were significantly higher than that of the D1 group ($P<0.05$), but there were no differences among them ($P>0.05$). The contents of magnesium in the body wall increased in all groups by dietary VD₃, and all experimental groups had significantly higher magnesium contents than that in the D1 group ($P<0.05$). The contents of iron increased initially and then decreased, and the contents in the D5 and D6 groups were significantly lower than those in the other groups ($P<0.05$). The contents of manganese decreased, but the difference between each group was not significant ($P>0.05$). With increases in dietary VD₃ level, both the activities of alkaline phosphatase and total superoxide dismutase in the intestines of the experimental groups first increased and then declined, while the contents of malondialdehyde decreased. The total antioxidative capacity and catalase activity in the intestines of all groups were not significantly affected ($P>0.05$) by VD₃. In conclusion, analysis by a WGR linear regression equation indicated that the optimal demand for VD₃ in the sea cucumber (initial body weight 15.43 g) was 1587.5 IU/kg.

Key words Sea cucumber (*Apostichopus japonicus*); Vitamin D₃; Growth performance; Body composition; Antioxidant capacity

① Corresponding author: WANG Jiyong, E-mail: ytwjy@126.com