

DOI: 10.12264/JFSC2022-0090

工厂化养殖密度对黄条鰺生长和生理特性的影响

姜燕, 王维鑫, 徐永江, 柳学周, 崔爱君, 王滨, 周鹤庭

中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛海洋科学与技术试点国家实验室深蓝渔业工程联合实验室, 山东 青岛 266071

摘要: 养殖密度是水产养殖管理中一项非常重要的参数, 适宜的养殖密度能够降低养殖动物的应激胁迫水平, 促进其健康、快速生长。为探究黄条鰺(*Seriola lalandi*)在陆基工厂化养殖条件下的最适密度, 本研究对 1 龄黄条鰺[(565.83±70.22) g]开展为期 60 d 的养殖实验, 共设置 10 尾/m³(低密度组)、20 尾/m³(中密度组)和 30 尾/m³(高密度组) 3 个密度组。实验过程中测量并计算包括增重率、特定生长率、肥满度和肝体指数在内的生长指标, 并检测血液生理、血清生化、肝脏和肾脏组织的非特异性免疫酶活性等指标。结果表明, 中、高密度组黄条鰺的增重率、特定生长率在第 60 天时均显著低于低密度组对应的数值($P<0.05$); 在 3 个密度组中, 低密度组的特定生长率在 60 d 时显著高于 30 d 的数值($P<0.05$), 中密度组的特定生长率在 60 d 与 30 d 之间差异不显著($P>0.05$), 高密度组的特定生长率在 60 d 时低于 30 d 的数值, 说明高密度养殖对黄条鰺的生长产生了胁迫。整个实验过程中, 血清中肾上腺素和皮质醇等的含量在 30 d 和 60 d 时均随养殖密度的增加而显著升高($P<0.05$), 生长激素和类胰岛素生长因子 I 的含量呈相反趋势; 肝脏和肾脏中超氧化物歧化酶、溶菌酶、谷丙转氨酶、谷草转氨酶、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶和丙酮酸激酶的活性在 30 d 和 60 d 时整体呈现随养殖密度的增加而显著升高的趋势($P<0.05$), 说明高密度养殖对黄条鰺的生理造成了胁迫。由此可见, 从生长、生理和生产实践角度综合评价, 中密度(20 尾/m³)是 1 龄黄条鰺工厂化养殖的适宜密度, 相关研究结果将为黄条鰺工厂化养殖技术进一步完善提供参考。

关键词: 黄条鰺; 养殖密度; 生长; 生理生化; 胁迫

中图分类号: S967

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)09-1290-10

黄条鰺(*Seriola lalandi*)属于鲈形目(Perciformes), 鲆科(Carangidae), 鰺属, 是一种在全球海洋中上水层水域广泛分布的大洋性经济鱼类, 在我国黄海、渤海和东海均有分布, 具有生长速度快、肉质鲜美、营养丰富、经济价值高等优点, 适宜于工厂化循环水、深水抗风网箱等多种生产模式, 是我国发展深远海养殖的优良鱼种^[1]。近年来, 随着黄条鰺人工繁育技术的突破, 其养殖规模也随之扩大。在水产绿色健康养殖不断推进的过程中, 控制养殖水体的水质、养殖密度等极易对养殖动物造成胁迫的环境因子尤其重要^[2-5]。

在养殖生产中, 较高的养殖密度会导致饵料利用率降低、鱼体能量消耗增多, 致使机体营养积累缓慢, 进一步抑制养殖鱼类生长和养殖效益的提升^[6-9]。另外, 已有研究表明, 较高的养殖密度易对鱼类造成应激, 使机体分泌的皮质醇、肾上腺素等激素进入血液循环。血液中皮质醇、血糖等水平短时间内的升高有利于缓解机体的应激状态, 但较长时间处于较高水平则会影响机体正常的免疫功能。同时, 较高的密度使鱼类的新陈代谢加速、耗氧量增加, 从而导致血液中红细胞、血红蛋白等水平相应提高, 以提升其携氧能力,

收稿日期: 2022-03-18; **修订日期:** 2022-04-07.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0900901, 2020YFD0900605); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项经费项目(20603022021011); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2020TD47); 财政部和农业农村部现代农业产业技术体系项目(CARS-47).

作者简介: 姜燕(1985-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向为海水鱼类健康养殖. E-mail: jiangyan@ysfri.ac.cn

通信作者: 徐永江, 研究员, 研究方向为海水鱼类增殖技术. E-mail: xuyj@ysfri.ac.cn

维持机体正常的生理功能^[10-12]。然而, 在对循环水养殖系统中宝石鲈(*Scortum barcoo*)适宜养殖密度的研究中发现, 较低的养殖密度抑制了鱼体的生长性能^[13], 这可能与养殖的鱼种、生活习性、养殖模式等密切相关。因此, 适宜的养殖密度是提高养殖动物福利和提升养殖效益的重要因素。

目前, 关于养殖密度对黄条鰺生理健康影响的研究尚未见相关报道。本研究以黄条鰺为对象, 从生长、血液生理生化指标、肝脏和肾脏组织生化指标等方面, 探究工厂化养殖条件下不同养殖密度对黄条鰺生长性能和生理特性的影响, 探明工厂化条件下黄条鰺的适宜养殖密度, 为制定黄条鰺的健康养殖生产操作技术规范提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验鱼与养殖管理

本实验在大连富谷食品有限公司工厂化养殖车间开展, 黄条鰺为人工繁育苗种养殖而成的1龄鱼, 挑选规格相近、体色正常、健康活泼的作为实验用鱼。将这些鱼随机分布于有效水体积约3 m³的圆形玻璃钢水桶中进行驯养, 驯养期间黄条鰺的放养密度按养殖场正在使用的养殖密度(15尾/m³)进行设定, 采用流水、持续充氧的方式养殖, 日换水率约400%以上, 按鱼体重的3%~5%投喂冰冻玉筋鱼(*Ammodytes personatus*), 每天投喂2次并记录投喂与摄食情况。实验鱼在玻璃钢水桶中驯养2周后, 连续3 d的摄食量基本稳定, 然后按照实验设计将驯养过的健康活泼鱼体进行筛选与重新随机布桶, 并开始正式实验, 鱼体规格为: 平均体长(33.12±0.83) cm, 平均体重(565.83±70.22) g。正式实验期间的养殖管理操作与驯养阶段的相同, 驯养与正式实验过程中养殖水温为22~27℃, 盐度为29~32, 溶解氧含量不低于6 mg/L。

1.2 实验设计与样品采集

实验设置3个密度处理组, 分别为高密度组(30尾/m³)、中密度组(20尾/m³)和低密度组(10尾/m³), 每个处理组设置2个平行。养殖实验周期为60 d, 实验开始前(0 d)、30 d和60 d时分别进行生长指标测量, 每次从每个平行组随机挑选9尾鱼(每个处理组18尾), 经MS-222充分麻

醉后, 进行体长、体重指标的测量与记录。同时, 分别在实验第30天和60天于黄条鰺尾静脉处抽取一定量的血液, 其中每次每个处理组中的12尾样品鱼采用1 mL普通一次性注射器抽取, 并在4℃冰箱中静置4 h后于4℃、4000 r/min条件下离心15 min, 吸取上清液作为血清样品, 再将每个处理组中的12个血清样品等量吸取并随机混为3个平行样, 用于血清激素和葡萄糖等指标的检测分析。每个处理组剩余的6尾鱼使用内壁涂有肝素钠(100 IU/mL)的一次性采血管抽取, 再从每个血液样品中等量吸取并随机混为3个平行样, 用于血常规分析。随后将样品鱼进行解剖, 分离肝脏组织并称重, 分别采集每条样品鱼的肝脏、肾脏组织样本, 每次每个处理组的肝脏/肾脏组织样品的平行组处理方式同血清样品, 采用5 mL冻存管于-80℃中保存, 用于组织生化指标分析。

1.3 生长指标测定

按照下式计算实验过程中黄条鰺的增重率(weight gain rate, WGR)、特定生长率(specific growth rate, SGR)、肥满度(condition factor, K)和肝体指数(hepatosomatic index, HSI):

$$\text{增重率(WGR, \%)} = 100\% \times (W_t - W_0) / W_0$$

$$\text{特定生长率(SGR, \% / d)} = 100\% \times (\ln W_t - \ln W_0) / t$$

$$\text{肥满度(K, g / cm}^3\text{)} = 100 \times W_B / L^3$$

$$\text{肝体指数(HSI, \%)} = 100\% \times W_L / W_B$$

式中: W_0 、 W_t 分别为实验初始和各取样时间点鱼的平均体重(湿重, g); t 为各取样时间点对应的养殖时间(d); W_B 为鱼体体重(湿重, g), L 为体长(cm), W_L 为同一尾鱼的肝脏重(湿重, g)。

1.4 生理生化指标的测定

本实验检测的血常规指标包括: 白细胞数(white blood cell number, WBC)、红细胞数(red blood cell number, RBC)、中性粒细胞数(neutrophil number, NEU)、淋巴细胞数(lymphocyte number, LYM)、中性粒细胞百分比(neutrophil percentage, NEUP)、淋巴细胞百分比(lymphocyte percentage, LYMP)、血红蛋白(hemoglobin, HGB)、红细胞压积(hematocrit, HCT)、平均红细胞体积(mean corpuscular volume, MCV)、血小板(platelet, PLT)、平均血小板体积(mean platelet volume, MPV), 采用

BC-30S 全自动血液分析仪(迈瑞, 中国)进行检测。

将肝脏和肾脏组织样本按 1 : 9 (*W/V*)的比例加入适当的预冷匀浆液, 冰浴条件下采用 T10 Basic S25 (IKA, 德国)组织匀浆机匀浆, 在 4 ℃、5000 r/min 条件下离心 30 min, 取上清液作为粗酶提取液, 分别按照南京建成生物工程研究所的超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、碱性磷酸酶(alkaline phosphatase, AKP)、酸性磷酸酶(acid phosphatase, ACP)、谷丙转氨酶(alanine aminotransferase, ALT)、谷草转氨酶(aspartate aminotransferase, AST)、丙酮酸激酶(pyruvate kinase, PK)、溶菌酶(lysozyme, LZM)检测试剂盒说明书测定其活性。皮质醇(cortisol)、肾上腺素(epinephrine)、生长激素(growth hormone, GH)、类胰岛素生长因子(insulin-like growth factor I, IGF-1)等血清激素指标均按照 ELISA 试剂盒说明书进行检测, 血清葡萄糖(glucose)按照南京建成生物工程研究所试剂盒说明书测定。

1.5 数据处理

在处理体长、体重等相关生长指标时, 将每

个处理组所有样品鱼分别作为平行样品。采用 SPSS 24.0 软件对实验数据进行单因素方差分析(one- way ANOVA), 利用 Duncan 氏检验对每一取样时间点的 3 个密度组间的差异显著性进行多重比较, 采用 *T*-test 检验对同一个密度组的 2 个取样时间点间进行差异显著性分析, 显著性水平为 $P<0.05$ 。所有数值均采用平均值±标准误($\bar{x} \pm SE$)表示。

2 结果与分析

2.1 工厂化养殖密度对黄条鲮生长的影响

随着养殖密度的升高, 在工厂化条件下经 60 d 养殖, 黄条鲮增重率、特定生长率均呈现显著下降趋势($P<0.05$), 肥满度呈现下降趋势(表 1)。

同一养殖密度条件下, 随着实验的进行, 终末体质量、增重率、特定生长率、肥满度、肝体指数等生长指标值整体呈现上升趋势; 除高密度组的终末体重和特定生长率、中密度组的特定生长率、低密度组的肝体指数外, 其余指标均为 30 d 的值显著低于 60 d 的($P<0.05$)(表 1)。

表 1 不同养殖密度对黄条鲮生长指标的影响
Tab. 1 Effects of different stocking densities on the growth indices of *Seriola lalandi*

$n=18; \bar{x} \pm SE$

指标 indicator		低密度 low density	中密度 medium density	高密度 high density
初始体重/g initial body weight	0 d	573.5±44.36	532.675±17.33	591.325±40.61
	30 d	636.33±36.88 ^b	586.67±23.46 ^b	656.83±38.50
增重率/% WGR	60 d	891.07±43.46 ^{Aa}	753.30±43.04 ^{ABa}	700.20±57.83 ^B
	30 d	13.64±1.38 ^b	11.80±1.94 ^b	15.01±2.87 ^b
特定生长率/% SGR	60 d	56.22±3.83 ^{Aa}	33.32±1.39 ^{Ba}	28.42±2.97 ^{Ba}
	30 d	0.43±0.04 ^b	0.28±0.06	0.46±0.08
肥满度/(g/cm ³) <i>K</i>	60 d	0.74±0.04 ^{Aa}	0.48±0.02 ^B	0.42±0.04 ^B
	30 d	1.33±0.04 ^{Ab}	1.20±0.02 ^{Bb}	1.30±0.05 ^{ABb}
肝体指数/% HSI	60 d	1.70±0.03 ^a	1.70±0.03 ^a	1.67±0.03 ^a
	30 d	0.95±0.06 ^A	0.58±0.03 ^{Bb}	0.66±0.02 ^{Bb}
	60 d	0.81±0.04	0.78±0.04 ^a	0.86±0.03 ^a

注: 不同大写字母代表同一取样时间不同养殖密度间存在显著差异($P<0.05$), 不同小写字母表示同一养殖密度不同取样时间存在显著差异($P<0.05$).

Note: Values with different capital letters represented significant differences among farming densities at the same sampling time ($P<0.05$). Values with different lowercase letters represented significant differences between the two sampling times in the same farming density ($P<0.05$).

2.2 工厂化养殖密度对黄条鲮血液生理生化的影响

低密度组黄条鲮的中性粒细胞数、淋巴细胞百分比、血红蛋白、血小板和平均血小板体积等

血液参数指标在养殖 30 d 时均显著低于中密度组和高密度组($P<0.05$), 中密度组和高密度组间差异不显著($P>0.05$); 高密度组黄条鲮的白细胞

数在 60 d 时显著高于低、中密度组($P<0.05$) (表 2)。

随着实验的开展, 3 个密度组肾上腺素、皮质醇、类胰岛素生长因子、生长激素、葡萄糖等水平都逐渐升高, 且 60 d 时的水平显著高于 30 d 的 ($P<0.05$) (图 1)。在同一取样时间点, 肾上腺素、皮质醇、葡萄糖水平均随着密度的升高而逐渐升高, 并且各密度间差异显著($P<0.05$); 类胰岛素生长因子、生长激素水平随着密度的升高而逐渐下降, 各密度组间差异显著($P<0.05$)。

表 2 不同养殖密度对黄条鲮血液参数的影响

Tab. 2 Effects of different stocking densities on blood physiological parameters of *Seriola lalandi*

指标 indicator	30 d			60 d		
	低密度组 low density	中密度组 medium density	高密度组 high density	低密度组 low density	中密度组 medium density	高密度组 high density
白细胞数/($10^9/L$) WBC	7.9±0.94	9.74±0.90	7.30±0.37	7.52±0.76 ^b	8.10±0.88 ^b	13.56±0.83 ^a
红细胞数/($10^{12}/L$) RBC	5.13±0.27	6.22±0.37	5.74±0.58	6.57±0.29	6.56±0.20	6.73±0.30
中性粒细胞数/($10^9/L$) NEU	3.15±0.52 ^b	6.35±0.30 ^a	4.03±0.54 ^b	7.40±0.66	6.85±0.73	6.13±0.30
淋巴细胞数/($10^9/L$) LYM	5.28±0.12	5.00±0.94	4.50±0.72	6.23±0.79	6.62±1.25	7.03±0.67
中性粒细胞百分比/% NEUP	31.44±2.58	33.94±2.83	29.98±2.24	38.60±3.07	39.72±2.43	31.18±2.50
淋巴细胞百分比/% LYMP	37.40±1.35 ^b	59.80±3.33 ^a	52.06±5.96 ^a	61.55±4.94	48.44±4.81	57.60±6.15
血红蛋白/(g/L) HGB	99.45±3.91 ^b	132.40±1.75 ^a	132.60±11.88 ^a	140.18±11.92	145.12±2.15	128.35±8.71
红细胞压积/% HCT	31.50±2.57 ^b	41.40±3.17 ^a	39.40±1.83 ^{ab}	41.22±2.09	40.72±2.71	39.48±1.61
平均红细胞体积/FL MCV	54.32±2.64	61.70±2.89	57.94±3.55	59.30±2.74	58.02±2.57	63.80±1.03
血小板/($10^{12}/L$) PLT	369.17±23.33 ^b	598.25±65.77 ^a	500.20±66.78 ^{ab}	382.50±49.63	443.53±64.14	479.60±40.29
平均血小板体积/FL MPV	4.00±0.15 ^b	5.52±0.21 ^a	6.12±0.50 ^a	4.68±0.41	4.32±0.57	5.02±0.46

注: 不同小写字母代表同一取样时间不同养殖密度间存在显著差异($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters represented significant differences among different farming densities at the same sampling time ($P<0.05$).

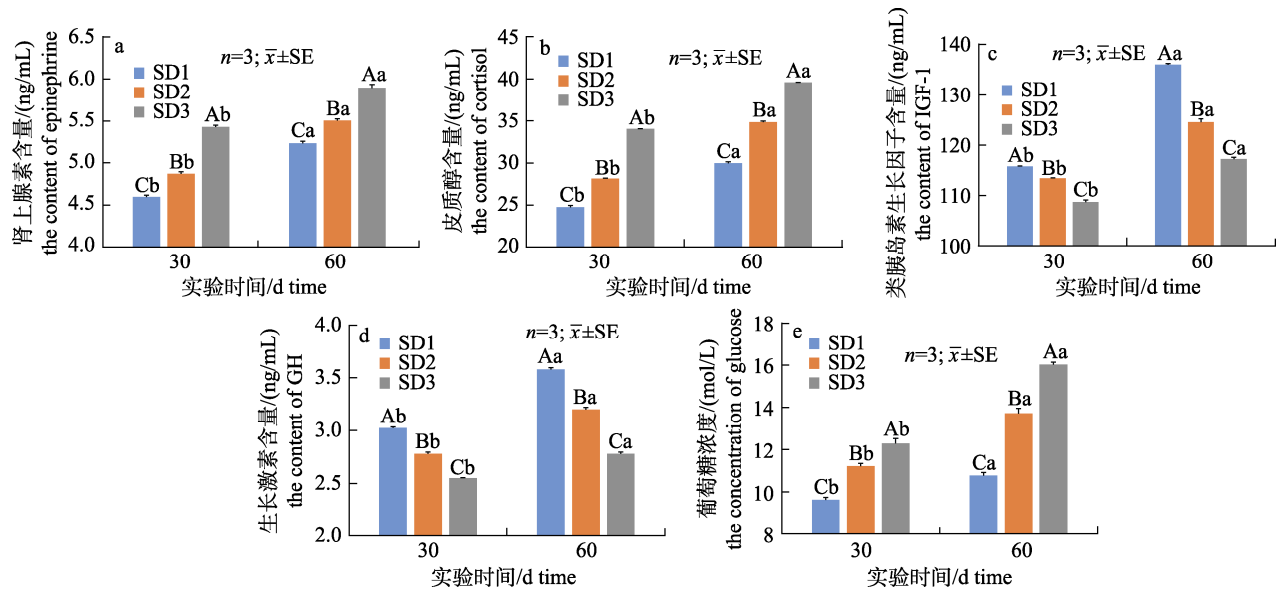


图 1 不同养殖密度对黄条鲮血清激素和葡萄糖的影响

不同大写字母代表同一取样时间不同养殖密度间存在显著差异($P<0.05$), 不同小写字母表示同一养殖密度不同取样时间存在显著差异($P<0.05$). SD1、SD2、SD3 分别表示低、中、高密度组。

Fig. 1 Effects of different farming density on serum hormones and glucose of *Seriola lalandi*

Different capital letters represented significant differences among different farming densities at the same sampling time ($P<0.05$). Different lowercase letters represented significant differences between the two sampling times in the same farming density ($P<0.05$). SD1, SD2 and SD3 represented low density group, medium density group and high density group, respectively.

2.3 工厂化养殖密度对黄条鰺组织生化指标的影响

在整个实验过程中,黄条鰺肝脏中 SOD、LZM、ALT、AST、AKP、ACP、PK 等酶活性水平整体呈现随密度的升高而升高的趋势,且高密度组的酶活性均显著高于低密度组($P<0.05$)。

随着实验的进行,低、中、高密度组黄条鰺肝脏中 SOD、LZM、ALT、AST、AKP、ACP、PK 等酶活性水平均逐渐升高,仅有 30 d 时低密度组的 LZM、ALT、ACP、PK 及中密度组的 ALT、PK 活性与 60 d 的差异显著($P<0.05$),其余差异均不显著($P>0.05$) (图 2)。

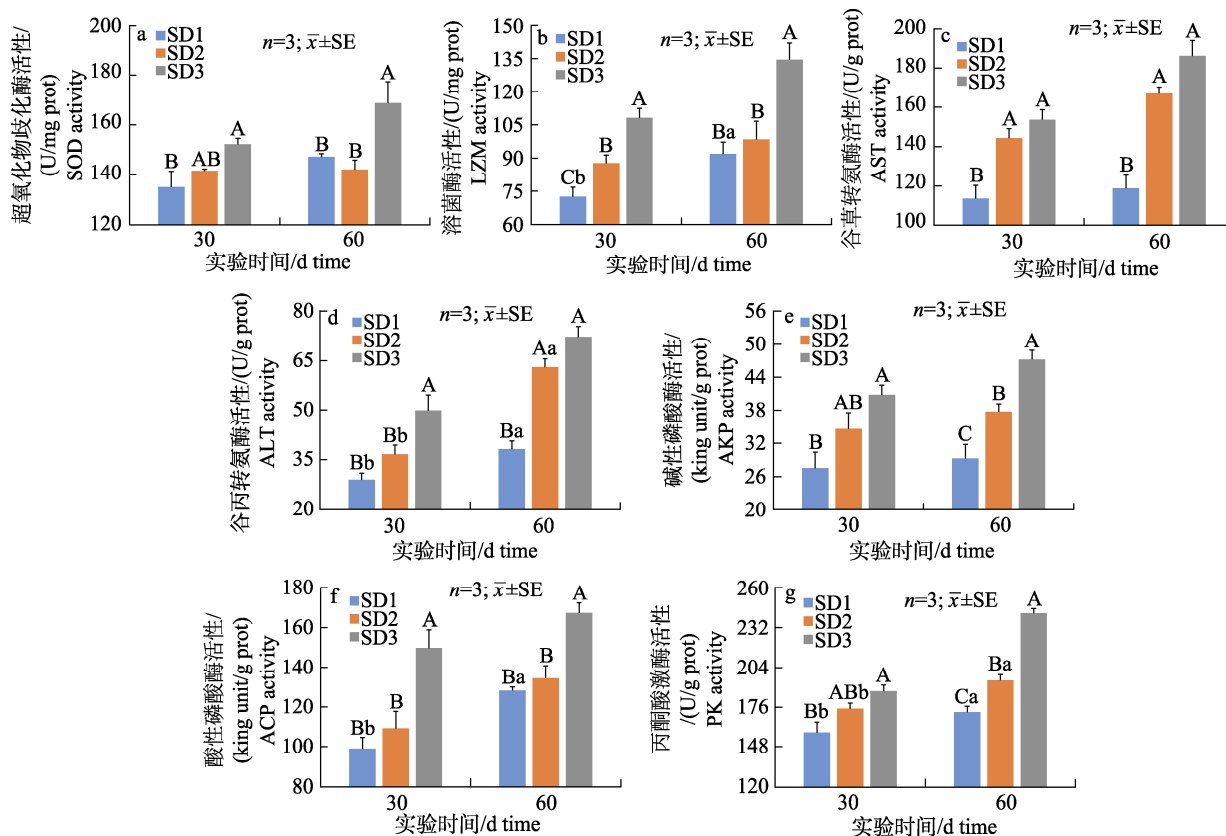


图 2 不同养殖密度对黄条鰺肝脏组织生化指标的影响

不同大写字母代表同一取样时间不同养殖密度间存在显著性差异($P<0.05$),不同小写字母表示同一养殖密度不同取样时间存在显著性差异($P<0.05$).SD1、SD2、SD3 分别表示低、中、高密度组。

Fig. 2 Effects of different farming density on biochemical indices of *Seriola lalandi* liver tissue

Different capital letters represented significant differences among different farming densities at the same sampling time ($P<0.05$). Different lowercase letters represented significant differences between the two sampling times in the same farming density ($P<0.05$). SD1, SD2 and SD3 represented low density group, medium density group and high density group, respectively.

同一取样时间,黄条鰺肾脏中 SOD、LZM、ALT、AST、AKP、ACP、PK 等酶活性整体呈现随密度的升高而升高的趋势,除 30 d 时的 LZM、AST 和 60 d 时的 SOD 活性差异不显著外($P>0.05$),其余取样时间点的酶活性均为高密度组显著高于低密度组($P<0.05$)。

随着实验的开展,低、中、高密度组黄条鰺肾脏中 SOD、LZM、ALT、AST、AKP、ACP、PK 等

酶活性均逐渐升高,仅有 30 d 时低密度组的 SOD、ALT、ACP、PK 及中、高密度组的 ACP 活性与 60 d 的差异显著($P<0.05$),其余差异均不显著($P>0.05$) (图 3)。

3 讨论

3.1 工厂化养殖密度对黄条鰺生长的影响

适宜的养殖密度对维持鱼类的健康生长与正

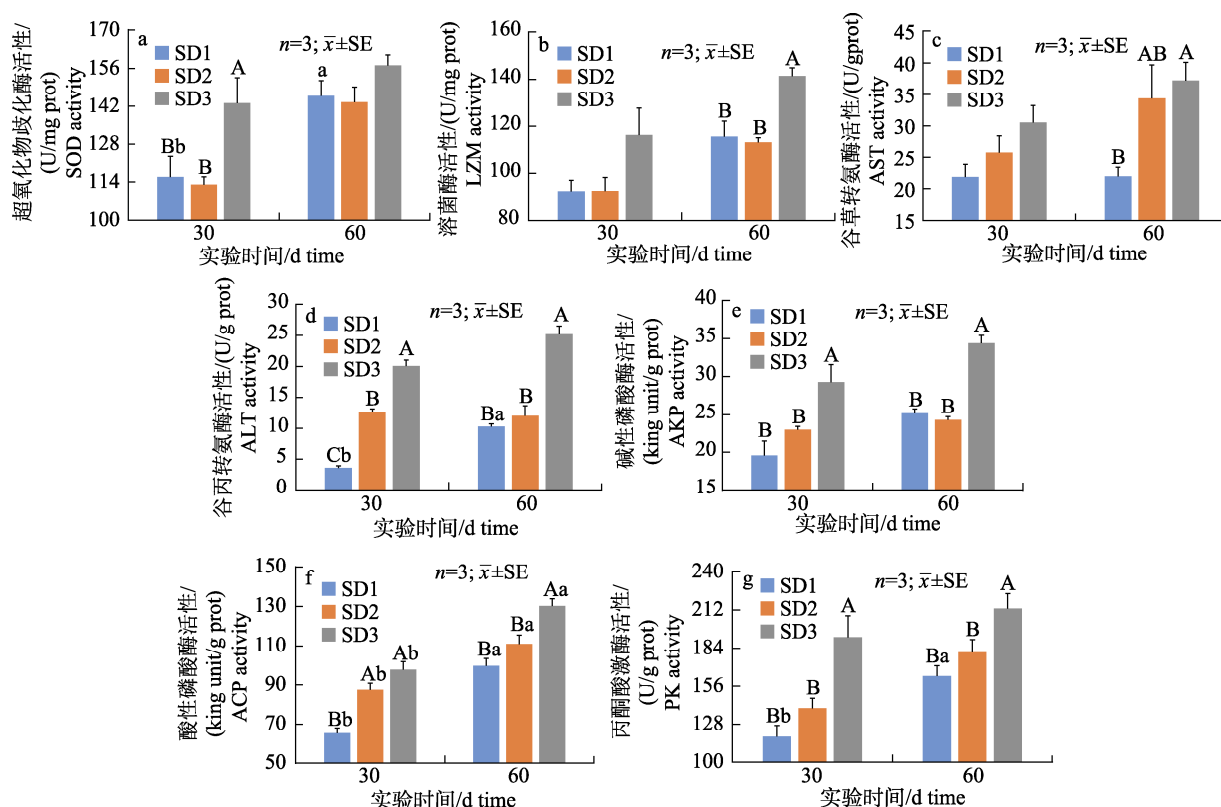


图3 不同养殖密度对黄条鲷肾脏组织生化指标的影响

不同大写字母代表同一取样时间不同养殖密度间存在显著性差异($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一养殖密度不同取样时间存在显著性差异($P < 0.05$). SD1、SD2、SD3 分别表示低、中、高密度组。

Fig. 3 Effects of different farming density on biochemical indices of *Seriola lalandi* kidney tissue

Different capital letters represented significant differences among different farming densities at the same sampling time ($P < 0.05$). Different lowercase letters represented significant differences between the two sampling times in the same farming density ($P < 0.05$). SD1, SD2 and SD3 represented low density group, medium density group and high density group, respectively.

常的生理活动至关重要, 同时也有助于提高单位水体的产量和经济效益。具有集群行为的鱼类行动活泼、摄食积极、生长快, 利于生殖、索饵和越冬。有研究显示, 将具有集群特点的鱼种采用较低密度的方式进行养殖, 实验鱼出现食欲下降、生长缓慢等不良现象^[14]。本研究中, 在实验 30 d 时, 各密度组生长指标均无显著差异, 但高密度组表现出较好的生长优势。这与北极红点鲑 (*Salvelinus alpinus*)^[15]、点篮子鱼 (*Siganus guttatus*)^[16]等的研究结果相似。推测这可能与黄条鲷的集群生活习性有关。在实验的 60 d 时, 通过增重率、特定生长率相关指标可以看出低密度组黄条鲷的生长性能逐渐突显, 并优于高密度组, 从生长角度说明高密度养殖对黄条鲷产生了胁迫。这与乌鳢 (*Channa argus*)^[17]、红鳍东方鲀 (*Takifugu rubripes*)^[18]幼鱼的养殖密度对增重率没

有显著影响不同, 可能与实验鱼的种类、实验条件的设置有关。也有学者研究发现, 随着养殖密度的升高, 欧洲舌齿鲈 (*Dicentrarchus labrax*)^[19]、大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*)^[20]、双锯鱼 (*Amphiprion percula*)^[21]、施氏鲟 (*Acipenser schrenckii*)^[22]、大西洋鲑 (*Salmo salar*)^[23]、中国明对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*)^[9]等的增重率会出现明显下降的趋势。这可能是较高的养殖密度对养殖动物消化、吸收营养物质的水平产生负面影响, 不利于能量的有效积累, 从而影响机体的生长^[6-9]。另外, 养殖密度较高会增加鱼类对空间、食物等的竞争, 导致机体能量消耗增加, 从而造成生长缓慢。

3.2 工厂化养殖密度对黄条鲷血液生理生化的影响

血液生理生化指标是机体感知自身健康状况

和应答外界环境胁迫的重要监测信号,当鱼体处于应激状态时,血液生理生化指标的变化是机体生理状态最直观的反应,且极易被检出^[24-26]。本研究中,黄条鰺养殖 30 d 后,低密度组红细胞数、淋巴细胞百分比、血红蛋白、平均血小板体积等血液指标明显低于中密度组和/或高密度组,这与杂交鲟[西伯利亚鲟 *A.baerii*(♀)×施氏鲟(♂)]血液中血红蛋白水平随养殖密度的增加而升高^[3]、欧洲舌齿鲈^[19]、杂交鳢(*C. maculata*×*C. argus*)^[27]红细胞数随养殖密度增大而显著增多等研究结果相似。推测这可能与实验初期较高的养殖密度增加了黄条鰺对空间、食物等的竞争,使其对高耗能状态下运输氧的能力要求提高相关。随着实验的逐渐开展,黄条鰺血液白细胞水平的变化反映了高密度组实验鱼长期受到复杂生理胁迫,使鱼体免疫功能受到一定程度的抑制,导致机体血液生理指标水平下降。

皮质醇的短期升高是有益的,能够加速蛋白质分解、脂肪消耗、血糖合成;而当皮质醇长时间处于较高水平时,则会导致鱼体生长减缓,影响水产品质量。本研究中,高密度组的鱼体长期处于拥挤胁迫状态,导致高密度组皮质醇、肾上腺素、葡萄糖水平均显著高于低、中密度组,并且在整个养殖周期内都维持在较高水平,这与对虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[28]、大菱鲆^[29]、大西洋鲑^[23]的研究结果相似,也是高密度组鱼体伴随实验开展其生长受到胁迫并逐渐趋于缓慢的主要原因之一。生长激素、类胰岛素生长因子是衡量鱼体生长性能的两个重要的激素指标,在 30 d 时二者数值的变化可能是前期黄条鰺逐渐适应低密度集群效应的一个综合表现,也与生长激素、类胰岛素生长因子基因表达情况相关。今后,本实验室将从分子水平、生理生化、表型特征等相结合的方式对黄条鰺适应养殖密度的生理机制进行深入探讨。

3.3 工厂化养殖密度对黄条鰺组织生化指标的影响

非特异性免疫因子常被用作监测鱼类免疫能力的指示因子^[4,30],其中,ALT、AST 是肝功能的指示物,AKP 是肾功能的指示物^[3,31],而 ACP、

PK、LZM 等也是非特异性免疫系统中重要的免疫应激酶。正常情况下,这些非特异性免疫酶活性相对较低且恒定,当机体受到胁迫或肝脏组织受损时,血清中相关酶活性将明显升高。本研究中,肝脏、肾脏组织中 SOD、AKP、ACP、PK、LZM 活性随着养殖密度和养殖时间的增加而增加,并且工厂化养殖黄条鰺 30 和 60 d 时,高密度组明显高于低密度组,这与 Demers 等^[28]对虹鳟的研究结果相一致,表明黄条鰺肝脏、肾脏组织对密度胁迫的应答机制相似。ALT、AST 通常被用来衡量肝脏代谢功能,工厂化养殖黄条鰺 30 和 60 d 时,低密度组黄条鰺的肝脏、肾脏组织 ALT、AST 活性均显著低于高密度组,这与对银鲟(*Pampus argenteus*)幼鱼^[5]、青石斑鱼(*Epinephelus awoara*)^[32]、施氏鲟^[33]AST 活性随着养殖密度的增大而显著升高的结论相同。说明本研究中的高密度组已经对黄条鰺造成了拥挤胁迫,并随着养殖时间的持续一直存在。

4 结论

综上所述,从较长时间的养殖实验可以看出,高密度养殖显著降低了黄条鰺的增重率、特定生长率;同时,改变了黄条鰺的血液生理特性,使血清皮质醇含量长期处于较高水平,而与生长相关的 GH、IGF-1 水平降低;并导致肝脏、肾脏中非特异性免疫相关酶活性始终处于较高水平,说明高密度养殖对黄条鰺的生长与生理产生胁迫。因此,按照本研究的结果,综合养殖生产过程的投入产出比以及经济效益,本研究认为工厂化条件下 1 龄黄条鰺的适宜养殖密度为 20 尾/m³。

参考文献:

- [1] Liu X Z, Xu Y J, Li R, et al. Analysis and evaluation of nutritional composition of the muscle of yellowtail kingfish (*Seriola aureovittata*)[J]. Advances in Fisheries Science, 2017, 38(1): 128-135. [柳学周, 徐永江, 李荣, 等. 黄条鰺(*Seriola aureovittata*)肌肉营养成分分析与评价[J]. 渔业科学进展, 2017, 38(1): 128-135.]
- [2] Pickering A D, Stewart A. Acclimation of the interrenal tissue of the brown trout, *Salmo trutta* L., to chronic crowding stress[J]. Journal of Fish Biology, 1984, 24(6): 731-740.
- [3] Cheng J J, Li J F, Wen H S, et al. Effect of stocking density

- on growth, muscle composition and blood parameters of hybrid sturgeon juveniles[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(3): 433-441. [程佳佳, 李吉方, 温海深, 等. 养殖密度对杂交鲟幼鱼生长、肌肉组分和血液生理生化指标的影响[J]. 中国水产科学, 2015, 22(3): 433-441.]
- [4] Wang Y B, Hu C S, Hu Z H, et al. Effects of different stocking densities on growth performance and non-specific immunity of juvenile *Nibea japonica*[J]. Marine Fisheries, 2017, 39(1): 51-57. [王跃斌, 胡成硕, 胡则辉, 等. 养殖密度对日本黄姑鱼幼鱼生长及非特异性免疫的影响[J]. 海洋渔业, 2017, 39(1): 51-57.]
- [5] Ni J H, Zhu X J, Ji Y P, et al. Effects of breeding density on the growth, metabolic enzyme activity and related gene expression level of juvenile *Pampus argenteus*[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2020, 39(2): 54-64. [倪嘉豪, 朱晓静, 季益平, 等. 养殖密度对银鲳幼鱼生长、代谢酶活力及其相关基因表达的影响[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(2): 54-64.]
- [6] Shi X T, Li D P, Zhuang P, et al. Effects of rearing density on juvenile *Acipenser schrenckii* digestibility, feeding rate and growth[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(8): 1517-1520. [石小涛, 李大鹏, 庄平, 等. 养殖密度对史氏鲟消化率、摄食率和生长的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1517-1520.]
- [7] Lu S W, Liu Z P, Yu Y. Effects of density stress on growth and metabolism of juvenile *Epinephelus malabaricus*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(2): 322-328. [逮尚尉, 刘兆普, 余燕. 密度胁迫对点带石斑鱼幼鱼生长、代谢的影响[J]. 中国水产科学, 2011, 18(2): 322-328.]
- [8] Marchand F, Boisclair D. Influence of fish density on the energy allocation pattern of juvenile brook trout (*Salvelinus fontinalis*)[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1998, 55(4): 796-805.
- [9] Zhang H E, He Y Y, Li J, et al. Effects of different stocking densities on the growth and energy metabolism of *Fenneropenaeus chinensis*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(5): 70-76. [张海恩, 何玉英, 李健, 等. 不同养殖密度对中国明对虾生长和能量代谢的影响[J]. 渔业科学进展, 2021, 42(5): 70-76.]
- [10] Cao Y, Li E C, Chen L Q, et al. Effects of stocking density on growth, physiological and immune responses in juvenile Russian sturgeon[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2014, 38(5): 968-974. [曹阳, 李二超, 陈立侨, 等. 养殖密度对俄罗斯鲟幼鱼的生长、生理和免疫指标的影响[J]. 水生生物学报, 2014, 38(5): 968-974.]
- [11] Huang Y, Zhu X M, Xie S Q, et al. Compensatory growth in *Acipenser baerii*, following feed deprivation at high temperature: Temporal patterns in growth, feed intake and body composition[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2010, 34(6): 1113-1121. [黄莹, 朱晓鸣, 解绶启, 等. 西伯利亚鲟在高温下饥饿后的补偿生长[J]. 水生生物学报, 2010, 34(6): 1113-1121.]
- [12] Tian Z H, Xu S G, Wang W, et al. Effects of acute thermal stress on hsp70 mRNA, physiology and nonspecific immunity in Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2013, 37(2): 344-350. [田照辉, 徐绍刚, 王巍, 等. 急性热应激对西伯利亚鲟 HSP70 mRNA 表达、血清皮质醇和非特异性免疫的影响[J]. 水生生物学报, 2013, 37(2): 344-350.]
- [13] Sun D C, Tan H X, Luo G Z, et al. Effect of stocking density on growth and blood biochemical parameters of *Scortum barcoo*[J]. Fishery Modernization, 2009, 36(2): 12-15. [孙大川, 谭洪新, 罗国芝, 等. 养殖密度对宝石鲈生长性能和血液生化指标的影响[J]. 渔业现代化, 2009, 36(2): 12-15.]
- [14] Li D P, Zhuang P, Yan A S, et al. The influences of illumination, water current and stocking density on feeding, behavior and growth in juveniles *Acipenser schrenckii*[J]. Journal of Fisheries of China, 2004, 28(1): 54-61. [李大鹏, 庄平, 严安生, 王明学, 章龙珍. 光照、水流和养殖密度对史氏鲟稚鱼摄食、行为和生长的影响[J]. 水产学报, 2004, 28(1): 54-61.]
- [15] Jørgensen E H, Jobling M. Feeding in darkness eliminates density-dependent growth suppression in Arctic charr[J]. Aquaculture International, 1993, 1(1): 90-93.
- [16] Zou X, Zhang L Z, Zhang T, et al. Effect of stocking density on growth of speckled spinefoot *Siganus guttatus*[J]. Fisheries Science, 2013, 32(10): 601-604. [邹雄, 章龙珍, 张涛, 等. 养殖密度对点篮子鱼生长性能的影响[J]. 水产科学, 2013, 32(10): 601-604.]
- [17] Yuan J L, Guo J L, Liu M, et al. Comparison of growth performances and nutritional quality of muscle in snakehead *Channa argus* fed different diets at different stocking densities[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2017, 32(5): 534-543. [原居林, 郭建林, 刘梅, 等. 不同饲料类型和放养密度对乌鳢生长特性及营养品质的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2017, 32(5): 534-543.]
- [18] Zhang X, Liang M Q, Wei Y L, et al. Effects of dietary protein content and stocking density on growth performance, nitrogen excretion, and relevant biochemical parameters of juvenile *Takifugu rubripes*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(1): 74-83. [张晓, 梁萌青, 卫育良, 等. 饲料中蛋白质含量及养殖密度对红鳍东方鲀幼鱼生长性能、氮排泄及相关生化指标的影响[J]. 渔业科学进展, 2021, 42(1): 74-83.]

- [19] Papoutsoglou S E, Tziha G, Vrettos X, et al. Effects of stocking density on behavior and growth rate of European Sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles reared in a closed circulated system[J]. Aquacultural Engineering, 1998, 18(2): 135-144.
- [20] Li X, Liu Y, Blancheton J P. Effect of stocking density on performances of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*) in recirculating aquaculture systems[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2013, 31(3): 514-522.
- [21] Chambel J, Severiano V, Baptista T, et al. Effect of stocking density and different diets on growth of percula clownfish, *Amphiprion percula* (Lacepede, 1802)[J]. SpringerPlus, 2015, 4: 183.
- [22] Ren Y Y, Wen H S, Li Y, et al. Effects of stocking density on lipid deposition and expression of lipid-related genes in Amur sturgeon (*Acipenser schrenckii*)[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2017, 43(6): 1707-1720.
- [23] Wang Y F, Chi L, Liu Q H, et al. Effects of stocking density on the growth and immunity of Atlantic salmon *Salmo salar* reared in recirculating aquaculture system (RAS)[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2019, 37(1): 350-360.
- [24] Song Z F. The influence of stocking density on the growth performance, physiological and biochemical indices and nonspecific immunity of juvenile Russian sturgeon in flowing water cultivation[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. [宋志飞. 养殖密度对流水养殖系统中俄罗斯鲟幼鱼生长、血液生理生化以及非特异性免疫的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.]
- [25] Chang Z C, Wen H S, Zhang M Z, et al. Effects of dissolved oxygen levels on oxidative stress response and energy utilization of juvenile Chinese Sea bass (*Lateolabrax maculatus*) and associate physiological mechanisms[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(7): 20-28. [常志成, 温海深, 张美昭, 等. 溶解氧水平对花鲈幼鱼氧化应激与能量利用的影响及生理机制[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(7): 20-28.]
- [26] Xie T, Gao Y T, Li M Y, et al. Effect of three different anticoagulants on blood cell morphology, anticoagulation and hematological parameters in turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. Progress in Fishery Sciences, 2022. DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20210813001 [谢婷, 高云涛, 李明月, 等. 3 种抗凝剂对大菱鲈血液抗凝效果、血细胞形态和血液生理生化指标影响[J]. 渔业科学进展, 2022. DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20210813001.]
- [27] Wu X Q, Ma H J, Gao S N, et al. Physiological responses of hybrid snakehead (*Channa maculata* × *C. Argus*) to different stocking densities[J]. Fisheries Science, 2017, 36(5): 557-562. [吴晓清, 马卉佳, 高胜男, 等. 养殖密度对杂交鳢生长和生理指标的影响[J]. 水产科学, 2017, 36(5): 557-562.]
- [28] Demers N E, Bayne C J. The immediate effects of stress on hormones and plasma lysozyme in rainbow trout[J]. Developmental & Comparative Immunology, 1997, 21(4): 363-373.
- [29] Liu B L, Jia R, Zhao K F, et al. Stocking density effects on growth and stress response of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*) reared in land-based recirculating aquaculture system[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 36(10): 31-38.
- [30] Liu B L, Lei J L, Jia R, et al. A review: The influence of stocking density on fish welfare[J]. Engineering Sciences, 2014, 16(9): 100-105. [刘宝良, 雷霖霖, 贾睿, 等. 养殖密度对鱼类福利影响研究进展[J]. 中国工程科学, 2014, 16(9): 100-105.]
- [31] Yao Q H, Yan S N, Guo Q X, et al. Effects of stocking density on growth performance and parameters of *Pelteobagrus vachelli* juveniles[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2018, 33(7): 670-675. [姚清华, 颜孙安, 郭清雄, 等. 养殖密度对瓦氏黄颡鱼幼鱼生长品质和生化指标的影响[J]. 福建农业学报, 2018, 33(7): 670-675.]
- [32] Zhang X W, Wu Y, He R J, et al. The effects of stocking density on growth and physiological indices of grouper *Epinephelus awoara* in recirculating aquaculture[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2012, 27(6): 518-522. [张曦文, 吴垠, 贺茹靖, 等. 循环水养殖模式下养殖密度对青石斑鱼生长及生理指标的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(6): 518-522.]
- [33] Ren Y Y. Effects of stocking density on growth performance and blood physiological and biochemical components in large-sized juvenile Amur sturgeon[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. [任源远. 养殖密度对施氏鲟大规格鱼种生长性能及血液生理生化组分的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.]

Effects of industrial stocking density on the growth and physiological characteristics of *Seriola lalandi*

JIANG Yan, WANG Weixin, XU Yongjiang, LIU Xuezhou, CUI Aijun, WANG Bin, ZHOU Heting

Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Joint Laboratory for Deep Blue Fishery Engineering, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China

Abstract: The yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*) is a globally distributed pelagic migratory fish species. It is considered a promising species for the aquaculture industry worldwide because of its high flesh quality and fast growth. Therefore, the demand for yellowtail kingfish has increased in recent years, which has caused overfishing and a drastic decline in natural resources. Large-scale farming started in 2017 as seedlings production technology was established in China. Practice has proved that farming this species is suitable in both net cages and industrial farming systems. With the growth of the scale of farming, it is urgent to determine the key parameters, including the suitable stocking density and other factors, to establish an efficient technology for industrial farming. The stocking density of marine animals is a critical parameter in aquaculture management. A suitable density could reduce the stress level of the farmed animals, which will be beneficial to good health and rapid growth. To investigate the optimal density of yellowtail kingfish in land-based industrial farming, this study was conducted in 6 circular glass buckets for 60 d. The effective water volume of each circular glass bucket was 3 m³, and these buckets were divided equally into three density groups: 10 fish/m³ (low-density group), 20 fish/m³ (medium-density group), and 30 fish/m³ (high-density group). After domestication, healthy 1 year old yellowtail kingfish [(565.83±70.22) g] were distributed into three density groups according to the density rule. The water temperature was 22–27 °C, salinity was 29–32, and the dissolved oxygen was higher than 6 mg/L during the experiment. During this experiment, the growth performance indicators, including weight gain ratio (WGR), specific growth ratio (SGR), condition factor (*K*), and hepatosomatic index (HIS) were measured and calculated, and indicators, such as blood physiology (e.g., white cell number, red cell number, hemoglobin), serum biochemistry (e.g., epinephrine and cortisol content), and the non-specific immune enzyme activity of the liver and kidney tissues [e.g., activities of superoxide dismutase (SOD) and lysozyme (LZM)] were detected. The results showed that the WGR and SGR of yellowtail kingfish in medium and high-density groups were significantly lower than those in the low-density group at 60 d ($P<0.05$). The SGR of the low-density group at 60 d was significantly higher than that at 30 d ($P<0.05$). However, there was no significant difference in the SGR of the medium-density group between 60 d and 30 d ($P>0.05$). Moreover, the SGR of high-density group at 60 d was lower than that at 30 d. The changes in these growth performance indices indicated that the higher stocking density had been stressful to the growth of yellowtail kingfish. During the entire experiment, the contents of epinephrine and cortisol in the serum increased significantly at 30 d and 60 d with the increase of stocking density ($P<0.05$), whereas the contents of growth hormone (GH) and insulin-like growth factor I (IGF-I) in serum showed the opposite trend. The activities of SOD, AZM, ALT, AST, ACP, AKP, and PK exhibited a trend of increasing significantly at 30 d and 60 d with the increase of stocking density ($P<0.05$). The changes in these physiological and biochemical indicators showed that the higher stocking density created stress on the physiology of yellowtail kingfish. Therefore, from the perspective of growth, physiology, and production practice, the low-density group (20 fish/m³) is the appropriate density for the industrial farming of 1 year old yellowtail kingfish. The relative results provide a basic reference for further improvement of industrial farming technology for yellowtail kingfish.

Key words: *Seriola lalandi*; stocking density; growth; physiology and biochemistry; stress

Corresponding author: XU Yongjiang. E-mail: xuyj@ysfri.ac.cn