

养殖密度对鱼类福利影响研究进展

刘宝良, 雷霖霖, 贾睿, 刘滨

(中国水产科学研究院黄海水产研究所, 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室, 青岛市海水鱼类种子工程与生物技术重点实验室, 山东青岛 266071)

[摘要] 水产养殖密度是现代集约化养殖生产过程中十分重要的生产管理要素, 不合理的养殖密度易使鱼类长期处于应激胁迫之中, 从而影响到鱼类福利水平, 增大养殖管理风险。目前国际上对鱼类福利养殖的密度问题十分重视并广泛开展研究。本文将重点阐述鱼类表现现象, 如生长状况、健康状态、应激反应和行为特征等指示因子, 对养殖鱼类福利进行密度评估, 以探讨最佳养殖密度和向生产者提供有实际参考意义的技术理论。

[关键词] 养殖密度; 鱼类福利; 集约化养殖; 生长; 健康状态; 应激反应

[中图分类号] Q17 **[文章标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)09-0100-06

1 前言

水产品被誉为是人类优质蛋白质的重要来源, 而受到特别重视。据联合国 Food and Agriculture Organization (FAO) 统计报告, 2012 年全球可食用水产品总量达到 $1.575\ 254 \times 10^8$ t, 其中养殖产量达 $6.663\ 33 \times 10^7$ t, 自 2000 年以来, 水产养殖对世界水产品的贡献率已由 25.7% 增长至 2012 年的 42.2%^[1], 水产养殖业将是未来动物源性食品增长最快的领域之一。我国是水产大国, 也是唯一一个养殖产量超过捕捞产量的国家。2013 年全国水产品养殖总量为 4.542×10^7 t, 约占世界水产养殖总产量的 65.3%, 水产养殖业为我国国民经济的发展和人民生活水平的提高做出了重要贡献^[2]。

当今水产养殖业快速发展, 对社会和经济的影响力不断增大, 尤其在集约化养殖条件下, 动物福利日益为人们所关注^[3,4]。所谓动物福利主要是指

在养殖生产过程中动物应享有免于饥渴、病痛、不适和恐惧的自由, 同时还享有表达天性的自由, 目前关于动物福利的研究尚处于初级阶段, 主要集中于陆生动物, 对水产动物的相关研究因具有特殊性而进展较为缓慢, 更缺乏通用的福利养殖定义和准则^[5]。当前, 在 FAO 登记的水产养殖品种有 567 种, 其中鱼类是世界水产养殖产量的主要贡献者, 也是发展中国家重要的高品质食物来源^[1]; 鱼类属于水产动物中相对高等的脊椎动物, 已有研究证明其对外部不适环境具有感知、应对和记忆的能力^[6-8], 因此对水产动物福利研究多集中在鱼类养殖方面^[9]。

随着社会经济的不断发展, 渔业生产空间不断受到挤压, 传统的渔业生产已经无法满足人类对水产蛋白高速增长的需求。以封闭循环水养殖模式 (recirculating aquaculture system, RAS) 为代表的现代工厂集约化养殖具有高产、高效、资源节约、环境

[收稿日期] 2014-07-01

[基金项目] 国家自然科学基金(31240012); 山东省博士后创新基金(201101009); 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-50)

[作者简介] 雷霖霖, 1935 年出生, 男, 福建宁化县人, 中国工程院院士, 研究员, 博士生导师, 主要从事海水鱼类生态、系列和增殖理论与技术研究; E-mail: lejll@ysfri.ac.cn

友好等诸多优点,是现代渔业发展的必然趋势^[10]。在集约化养殖过程中存在一些影响鱼类福利的潜在因素,例如分级、转运、捕捉、饵料供给、高密度养殖等^[11]。其中养殖密度是集约化养殖生产过程中最基本的生产管理因素,增加养殖密度是提高单位水体产量最常用的方法,然而养殖密度过高,将影响鱼类生长,增大养殖风险,而养殖密度过低,既降低了资源利用率也不利于鱼类群体行为的形成^[12],因此众多学者和倡导保障养殖动物福利的公益组织一致认为不适宜养殖密度是养殖生产过程中影响鱼类福利的最基本因素,其对鱼类影响程度要远大于陆生养殖动物^[13,14]。

由于养殖鱼类种类繁多,物种间生物学特性差异显著,诸如表观生长状况、死亡率、健康状态、应激反应、行为等通用的鱼类生物学特征均可作为反映鱼类福利状态的指示因子^[5]。本文将围绕现代工厂化养殖过程中养殖密度这一重要因素,全面回顾其对鱼类福利的影响。

2 养殖密度对鱼类福利影响

2.1 生长

表观生长状况是反映不同生长条件下鱼类福利状态的重要指标,因此关于养殖密度对鱼类生长影响的研究开展较多,其中已有研究证明高密度能够对大西洋鲑(*Salmo salar*)、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)、美洲红点鲑(*Salvelinus fontinalis*)、银大麻哈鱼(*Oncorhynchus chuskisutch*)、史氏鲟(*Acipenser schrenckii*)、鲤鱼(*Cyprinus carpio*)等多种鱼类摄食、饵料转化效率等方面产生负面影响从而影响其生长状况^[15-21];此外也有研究表明诸如北极红点鲑(*Salvelinus alpinus*)、欧鲈(*Dicentrarchus labrax*)等鱼类在低养殖密度养殖条件下摄食率低,饵料系数相对较高,生长率显著低于高密度组^[22,23]。尽管如此,仍有部分学者通过研究不同密度下大西洋鲑和虹鳟生长表现,认为养殖密度对鱼类生长并无直接影响,而是通过密度的改变,对养殖水质产生影响从而间接影响鱼类生长^[24-26]。

另一方面,除物种间差异外,相同物种不同生理阶段的差异也使得养殖密度对鱼类生长影响的程度和方式不同,如大西洋庸鲈(*Hippoglossus hippoglossus*)幼鱼阶段放养于高密度养殖条件下生长情况优于成鱼;大菱鲂(*Scophthalmus maximus*)幼

鱼在高密度养殖条件下生长率受到抑制,但养殖密度的增加对大菱鲂成鱼生长率无显著影响;同鲟鲈类鱼相似,非洲鲶鱼(*Clarias gariepinus*)也存在不同生长阶段对养殖密度的适应能力存在差异的特点^[27-31]。

2.2 应激反应

鱼类在面临外界环境中不稳定的刺激或胁迫时会发生一系列生理反应或行为变化以保护自身,此类反应被广义的定义为应激反应,被认为是鱼类的一种自适应策略,以应对外界胁迫,达到一种动态平衡,并常被用来反映鱼类的福利状态^[32]。研究表明鱼类的应激反应分为三级响应。第一级响应是机体神经内分泌活动的变化,包括神经内分泌反应,其中涉及儿茶酚胺的释放和激活下丘脑-垂体-肾间质(HPI)轴;第二级响应是由第一阶段引起的一系列生理、生化、免疫反应等的变化;第三级响应是在第二级响应的生理基础上,鱼类的行为出现变化、生长速率减慢、抗病力降低等^[33]。随着鱼淋巴细胞糖皮质激素受体的发现,以及鱼类在慢性应激后白细胞和淋巴组织中的糖皮质激素受体能够发生相应变化得到证实^[34],皮质醇一般被认为是反映鱼类福利状态的重要指示因子,但鱼类皮质醇水平变化相对灵敏,例如经一个短暂的刺激,其血浆皮质醇水平快速升高后能在几小时内恢复正常^[35]。此外皮质醇也能够反映鱼类所遭受的长期环境胁迫,研究表明不适宜养殖密度是一种可以导致皮质醇水平升高的慢性胁迫。例如,金头鲷(*Sparus aurata*)在高养殖密度条件下(40.8 kg/m³)时体内皮质醇水平是低密度组(10 kg/m³)的4倍;塞内加尔鲷(*Sole asenegalensis*)在初始放养密度为30 kg/m²条件下养殖40天后,其体内皮质醇水平是7 kg/m²养殖条件下的45倍;同样,大鳞大麻哈鱼、大西洋鲑等鲑科鱼类在高密度养殖条件下,其体内皮质醇含量也出现显著升高^[36,37]。尽管如此,也有研究表明养殖密度并不能影响鱼体内皮质醇水平,其中欧鲈体内皮质醇水平在10 kg/m³、40 kg/m³和100 kg/m³以及21 kg/m³、45 kg/m³等养殖条件下无显著差异。笔者推测物种间差异是导致上述研究结论相左的主要原因^[38]。

2.3 健康状态

鱼类处于健康的生理条件下才能获得良好的生长状态,已有研究表明养殖密度能够影响鱼类的健康状况,相关指标可以用来衡量鱼类福利水平^[39]。

2.3.1 机械损伤

随着养殖密度的增加,拥挤胁迫愈发明显,易导致鱼类机械损伤增加。由于鳍存在伤害感受器,既能够表现出对疼痛的反应,又是拥挤胁迫条件下易损器官,故而鳍损伤常被当成衡量鱼类福利的指标^[40]。鳍损伤的评估主要通过监测鳍长度与鱼体之间的比例或者主观定义损伤程度来判断,包括臀鳍、胸鳍、腹鳍、背鳍、尾鳍和脂鳍,其中胸鳍最易受到损伤^[41]。高密度条件下鱼鳍损伤程度及比例增加的具体原因仍不清楚,但在集约化养殖模式下,鱼鳍磨损的比例和程度与养殖密度之间的关系已有研究,其中北极红点鲑、大西洋鲑和虹鳟等随着密度的增长,鳍磨损程度加剧^[42-44]。

2.3.2 免疫力水平

鱼类长期处于不适宜养殖密度慢性胁迫条件下,免疫系统受到抑制,进而抵御病原入侵的能力下降,引起鱼类疾病的发生甚至导致死亡^[45]。由于非特异性免疫系统并不针对特定疾病,其对病原胁迫的响应范围较广,故而非特异性的免疫因子常被选为监测鱼类的免疫力状态的指示因子。在高密度养殖条件下,金头鲷血清替代补体(ACP)活力和凝集素活性均出现显著降低,真鲷(*Pagrosomus major*)血清溶血和溶菌酶活性、免疫球蛋白含量、外周血淋巴细胞数量均出现下降,塞内加尔鲷Hsp70和hepcidin抗菌肽(HAMPs)在肝脏和肾脏的表达水平受到明显抑制。此外,鲑科鱼类在高密度养殖条件下也存在上述类似的生理反应。上述研究结果显示养殖密度可以显著影响鱼体非特异性免疫应答水平^[39,46,47]。

2.3.3 死亡率

死亡率或存活率是一种反映鱼类对环境适应能力的重要指示因素。研究表明高养殖密度能够导致鱼体损伤甚至死亡^[48],然而亦有研究证明在高密度养殖条件下虹鳟、欧鲈、真鲷、非洲鲶鱼和罗非鱼等死亡率并没有显著升高^[27,41,49]。分析上述研究结论,除物种间差异导致不同鱼类对密度胁迫适应能力不同外,各实验间密度设置标准不一,所选择的养殖密度不足以对鱼类产生致死影响或者密度胁迫程度未能导致鱼类死亡也是造成上述研究结论不一致的主要原因。

2.4 行为特征

鱼类行为不是简单的运动,而是鱼体对内在和外在环境的一种适应。在现代渔业生产过程中,养

殖密度是影响鱼类生态行为学特征的重要因素,通过对鱼类行为的研究,有助于加深对其生存状态和福利水平的了解^[5]。养殖密度能够影响鱼类的空间分布和游泳行为,在高密度养殖条件下大西洋鳕底栖空间竞争加剧,泳动行为和上浮现象明显增多。低密度养殖条件下虹鳟存在相对水流静止和昼夜差异的游泳行为特征,随着养殖密度的增大,此类行为特征消失,呈现全时群体游动的行为,造成能量代谢增加^[50,51]。

诸多研究已证实鱼类多存在社会行为,社会行为的形成易对鱼类形成慢性胁迫,造成其攻击性行为 and 个体差异增加、摄食和饵料利用率降低、免疫功能下降、能量代谢模式发生改变等,而养殖密度是促使鱼群出现社会行为的首要影响因素^[52]。目前关于鱼群社会行为的研究主要聚焦于在集约化养殖条件下如何通过养殖技术的革新来减小或消除社会行为对鱼类造成的胁迫^[53]。在定量投喂条件下,养殖密度对虹鳟的竞食活力和摄食率影响显著,但在扩大饵料投放范围和超量投喂情况下,其各密度组间竞食行为显著降低^[54]。此外不同密度条件下鱼群行为也因物种差异存在显著不同,北极红点鲑在高密度条件下用于主动交互和学习行为的时间要明显少于中、低密度,而非洲鲶鱼在中密度养殖条件下攻击行为显著低于高密度和低密度组^[55,56]。研究表明,鱼类群体行为受神经内分泌系统调节,鱼群中处于低等级鱼类体内高含量的皮质醇能够抑制多巴胺(DA),提高DA等单胺类神经递质的含量或活性可以降低其攻击行为、泳动以及竞食活力,通过人为调节此类神经递质的含量,能够有效地减少群体行为对鱼类福利的影响,提高养殖效率^[57,58]。

2.5 最适养殖密度

据以往的研究证明,不同鱼类对养殖密度的适应范围差异巨大,但养殖生产过程中应尽量避免养殖密度过低,这是因为除考虑生产效益外,过低的养殖密度会导致鱼类的攻击性增强,易促使鱼类种群内部竞争加剧产生等级分化,从而影响鱼类的整体生长状况,例如,虹鳟放养密度不应低于 10 kg/m^3 ^[12,27]。关于最适养殖密度的研究主要基于养殖鱼类福利考量,目前此类研究主要以大西洋鲑为主,世界养殖动物福利协会(Compassion in World Farming)建议网箱中大西洋鲑最大养殖密度为 10 kg/m^3 ,英国农业动物福利协会(Farm Animal

Welfare Council)则建议大西洋鲑网箱养殖最适密度为 15 kg/m³。Turnbull 等(2006)将肥满度、鳍指数、皮质醇、血糖等反映鱼类福利状态的指示因子以不同分值量化,利用多元数据分析最终拟合出一个分值来反映鱼类福利水平,得出大西洋鲑最适养殖密度为 22 kg/m³[46]。以大西洋鲑为例,尽管围绕养殖密度这一科学问题已开展了诸多研究,但仍未得出能让业内普遍认可的科学合理的最佳养殖密度。

3 结语

养殖密度是影响鱼类福利的重要因素,然而由于物种和环境的差异,影响养殖密度的因素错综复杂,目前尚无一种规模化养殖鱼类有统一的放养密度标准,因此如何选择适宜的养殖密度仍是水产养殖业亟待解决的基本问题之一。工厂化循环水养殖系统是依托现代工业技术基础建立起来的,集工程化、工厂化、设施化、规模化、规范化、标准化、数字化和信息化之大成于一体的现代化养殖生产新模式,具有养殖装备先进,管理高效,养殖环境可控,养殖生产不受地域空间限制,养殖密度与单位产量高,产品质量安全有保障,社会、经济和生态效益良好等特点,故被国际公认为现代海水养殖产业的重要发展方向之一[59]。上述诸多研究表明,通过调整养殖水质条件和投喂方法等生产管理策略,可以有效改善不适宜养殖密度对鱼类福利影响的程度,然而养殖环境及生产管理策略高度可控,正是循环水养殖系统的主要特点和优势。因此综合开展循环水养殖系统中鱼类福利与养殖密度、系统水质净化和调控能力、苗种质量、投喂策略、水流速度、光控调节等主要影响因素的关联性研究,优先建立适用于工厂化养殖的重要经济鱼类的高密度、标准化生产模式,无疑是当前和长远实施水产福利养殖研究的重要任务。对于各种养殖鱼类而言,因种类差异很大,首先探讨单一品种的合理养殖密度至关重要,故建议今后应当尽快立项进行专题研究,将对未来实现“一品一产业”,走工业化、规模化、标准化养殖道路,提高养殖鱼类福利水平,提升养殖产品品质,确保安全生产和实现水产养殖业健康可持续发展,定会产生十分重要的作用。

参考文献

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations.FAO global aquaculture production volume and value statistics data-

base updated to 2012 [DB]. Rome: Food and Agriculture Organization Fisheries and Aquaculture Department, 2014.

[2] 农业部渔业局.中国渔业统计年鉴[M].北京:农业出版社,2014.

[3] 雷霖霖,黄滨,刘滨,等.构建基于水产福利养殖理念的高端养殖战略研究[J].中国工程科学,2014,16(3):14-20.

[4] Council F A W, Britain G, Spedding C R W. Report on the Welfare of Farmed Fish[M]. UK: Farm Animal Welfare Council, 1996.

[5] Ashley P J. Fish welfare: Current issues in aquaculture[J]. Applied Animal Behaviour Science, 2007, 104(3): 199-235.

[6] Sneddon L U. The evidence for pain in fish: The use of morphine as an analgesic[J]. Applied Animal Behaviour Science, 2003, 83(2): 153-162.

[7] Chandroo K P, Duncan I J H, Moccia R D. Can fish suffer? perspectives on sentience, pain, fear and stress[J]. Applied Animal Behaviour Science, 2004, 86(3): 225-250.

[8] Arlinghaus R, Cooke S J, Schwab A, et al. Fish welfare: A challenge to the feelings based approach, with implications for recreational fishing[J]. Fish and Fisheries, 2007, 8(1): 57-71.

[9] Meijboom F L B, Bovenkerk B. Fish Welfare: Challenge for science and ethics—why fish makes the difference[J]. Journal of Agricultural and Environmental Ethics, 2013: 1-6.

[10] Cressey D. Future fish[J]. Nature (London), 2009, 458(7237): 398-400.

[11] CIWF. Compassion in world farming briefing[J].UK: The Welfare of Farmed Fish, 2008.

[12] Jørgensen E H, Christiansen J S, Jobling M. Effects of stocking density on food intake, growth performance and oxygen consumption in Arctic charr (*Salvelinus alpinus*) [J]. Aquaculture, 1993, 110(2): 191-204.

[13] Dawkins M S. A user's guide to animal welfare science[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2006, 21(2): 77-82.

[14] Council F A W, Britain G, Spedding C R W. Report on the Welfare of Farmed Fish[M]. UK: Farm Animal Welfare Council, 1996.

[15] Leatherland J F. Stocking density and cohort sampling effects on endocrine interactions in rainbow trout[J]. Aquaculture International, 1993, 1(2): 137-156.

[16] Soderberg R W, Meade J W, Redell L A. Growth, survival, and food conversion of Atlantic salmon reared at four different densities with common water quality[J]. The Progressive Fish-Culturist, 1993, 55(1): 29-31.

[17] Ellis T, North B, Scott A P, et al. The relationships between stocking density and welfare in farmed rainbow trout[J]. Journal of Fish Biology, 2002, 61(3): 493-531.

[18] Larsen B K, Skov P V, McKenzie D J, et al. The effects of stocking density and low level sustained exercise on the energetic efficiency of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared at 19° C[J]. Aquaculture, 2012, 324: 226-233.

[19] Abou Y, Fiogbé E D, Micha J C. Effects of stocking density on growth, yield and profitability of farming Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L., fed Azolla diet, in earthen ponds[J]. Aquaculture Research, 2007, 38(6): 595-604.

[20] Li D, Liu Z, Xie C. Effect of stocking density on growth and serum concentrations of thyroid hormones and cortisol in Amur sturgeon, *Acipenser schrenckii*[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2012, 38(2): 511-520.

[21] 张磊,樊启学,赵志刚,等.慢性拥挤胁迫对鲤生长及血液生化指标的影响[J].大连水产学院学报,2008,22(6):465-469.

[22] Jørgensen E H, Christiansen J S, Jobling M. Effects of stocking

- density on food intake, growth performance and oxygen consumption in Arctic charr (*Salvelinus alpinus*) [J]. *Aquaculture*, 1993, 110(2): 191–204.
- [23] 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.
- [24] Bagley M J, Bentley B, Gall G A E. A genetic evaluation of the influence of stocking density on the early growth of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture*, 1994, 121(4): 313–326.
- [25] North B P, Turnbull J F, Ellis T, et al. The impact of stocking density on the welfare of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture*, 2006, 255(1): 466–479.
- [26] Hosfeld C D, Hammer J, Handeland S O, et al. Effects of fish density on growth and smoltification in intensive production of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) [J]. *Aquaculture*, 2009, 294(3): 236–241.
- [27] Greaves K, Tuene S. The form and context of aggressive behaviour in farmed Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.) [J]. *Aquaculture*, 2001, 193(1): 139–147.
- [28] Howell B R. The effect of stocking density on growth and size variation in cultured turbot, *Scophthalmus maximus*, and sole, *Solea solea* [J]. *ICES CM*, 1998, 50: 10.
- [29] Irwin S, O' halloran J, FitzGerald R D. Stocking density, growth and growth variation in juvenile turbot, *Scophthalmus maximus* (Rafinesque) [J]. *Aquaculture*, 1999, 178(1): 77–88.
- [30] Hossain M A R, Beveridge M, Haylor G S. The effects of density, light and shelter on the growth and survival of African catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) fingerlings [J]. *Aquaculture*, 1998, 160(3): 251–258.
- [31] Van de Nieuwegiessen P G, Boerlage A S, Verreth J A J, et al. Assessing the effects of a chronic stressor, stocking density, on welfare indicators of juvenile African catfish, *Clarias gariepinus* Burchell [J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2008, 115(3): 233–243.
- [32] Iwama G K. The welfare of fish [J]. *Diseases of Aquatic Organisms*, 2007, 75(2): 155–158.
- [33] FSBI. Fish Welfare: Briefing Paper 2, Fisheries Society of the British Isles, Grant Information Systems [M]. 82A High Street, Sawston, Cambridge: Fisheries Society of the British Isles, 2002.
- [34] Maule A G, Schreck C B. Stress and cortisol treatment changed affinity and number of glucocorticoid receptors in leukocytes and gill of coho salmon [J]. *General and Comparative Endocrinology*, 1991, 84(1): 83–93.
- [35] Pickering A D, Pottinger T G. Stress responses and disease resistance in salmonid fish: Effects of chronic elevation of plasma cortisol [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 1989, 7(1–6): 253–258.
- [36] Salas-Leiton E, Anguis V, Martín-Antonio B, et al. Effects of stocking density and feed ration on growth and gene expression in the Senegalese sole (*Solea senegalensis*): Potential effects on the immune response [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2010, 28(2): 296–302.
- [37] Schreck C B. Accumulation and long-term effects of stress in fish [J]. *The Biology of Animal Stress*, 2000: 147–158.
- [38] Sammouth S, d'Orbcastel E R, Gasset E, et al. The effect of density on sea bass (*Dicentrarchus labrax*) performance in a tank-based recirculating system [J]. *Aquacultural Engineering*, 2009, 40(2): 72–78.
- [39] Wedemeyer G A. Effects of rearing conditions on the health and physiological quality of fish in intensive culture [C] // Seminar Series-society for Experimental Biology. UK: Cambridge University Press, 1997, 62: 35–72.
- [40] Sneddon L U, Braithwaite V A, Gentle M J. Do fishes have nociceptors? Evidence for the evolution of a vertebrate sensory system [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 2003, 270(1520): 1115–1121.
- [41] Bosakowski T, Wagner E J. Assessment of fin erosion by comparison of relative fin length in hatchery and wild trout in Utah [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1994, 51(3): 636–641.
- [42] Person-Le Ruyet J, Le Bayon N. Effects of temperature, stocking density and farming conditions on fin damage in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) [J]. *Aquatic Living Resources*, 2009, 22(03): 349–362.
- [43] Turnbull J, Bell A, Adams C, et al. Stocking density and welfare of cage farmed Atlantic salmon: Application of a multivariate analysis [J]. *Aquaculture*, 2005, 243(1): 121–132.
- [44] European Food Safety Authority. Scientific opinion of the panel on animal health and welfare on a request from the European commission on animal welfare aspects of husbandry systems for farmed Atlantic salmon [J]. *The EFSA Journal*, 2008, 736: 1–122.
- [45] Di Marco P, Priori A, Finoia M G, et al. Physiological responses of European sea bass *Dicentrarchus labrax* to different stocking densities and acute stress challenge [J]. *Aquaculture*, 2008, 275(1): 319–328.
- [46] Caipang C M A, Berg I, Brinchmann M F, et al. Short-term crowding stress in Atlantic cod, *Gadus morhua* L. modulates the humoral immune response [J]. *Aquaculture*, 2009, 295(1): 110–115.
- [47] Håstein T. Animal welfare issues relating to aquaculture [C] // OIE Global Conference on Animal Welfare. 2004: 219–227.
- [48] CIWF. Compassion in world farming briefing [N]. UK: The Welfare of Farmed Fish, Briefing Paper, 2009.
- [49] Laiz-Carrión R, Viana I R, Cejas J R, et al. Influence of food deprivation and high stocking density on energetic metabolism and stress response in red porgy, *Pagrus pagrus* L. [J]. *Aquaculture International*, 2012, 20(3): 585–599.
- [50] Kristiansen T S, Fernö A, Holm J C, et al. Swimming behaviour as an indicator of low growth rate and impaired welfare in Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.) reared at three stocking densities [J]. *Aquaculture*, 2004, 230(1): 137–151.
- [51] Bégout-Anras M L, Lagardère J P. Measuring cultured fish swimming behaviour: first results on rainbow trout using acoustic telemetry in tanks [J]. *Aquaculture*, 2004, 240(1): 175–186.
- [52] Schreck C B, Olla B L, Davis M W. Behavioural response to stress [M] // Iwama G, Pickering A, Sumpter J, Schreck C. *Fish Stress and Health in Aquaculture*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 145–170.
- [53] Andrew J E, Noble C, Kadri S, et al. The effect of demand feeding on swimming speed and feeding responses in Atlantic salmon *Salmo salar* L., gilthead sea bream *Sparus aurata* L. and European sea bass *Dicentrarchus labrax* L. in sea cages [J]. *Aquaculture Research*, 2002, 33(7): 501–507.
- [54] Boujard T, Labbé L, Aupérin B. Feeding behaviour, energy expenditure and growth of rainbow trout in relation to stocking density and food accessibility [J]. *Aquaculture Research*, 2002, 33(15): 1233–1242.
- [55] Kaiser H, Weyl O, Hecht T. The effect of stocking density on

- growth, survival and agonistic behaviour of African catfish[J]. *Aquaculture International*, 1995, 3(3): 217–225.
- [56] Brown G E, Brown J A, Srivastava R K. The effect of stocking density on the behaviour of Arctic charr (*Salvelinus alpinus* L.) [J]. *Journal of Fish Biology*, 1992, 41(6): 955–963.
- [57] Winberg S, Øverli Ø, Lepage O. Suppression of aggression in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) by dietary L-tryptophan [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(22): 3867–3876.
- [58] Hseu J R, Lu F I, Su H M, et al. Effect of exogenous tryptophan on cannibalism, survival and growth in juvenile grouper, *Epinephelus coioides*[J]. *Aquaculture*, 2003, 218(1): 251–263.
- [59] 刘 鹰,刘宝良.我国海水工业化养殖面临的机遇和挑战[J]. *渔业现代化*. 2012, 39(6):1–4.

A review: The influence of stocking density on fish welfare

Liu Baoliang, Lei Jilin, Jia Rui, Liu Bin

(Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Qingdao Key Laboratory for Marine Fish Breeding and Biotechnology, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao, Shandong 266071, China)

[Abstract] Stocking density is widely recognized as a critical husbandry factor in modern intensive aquaculture, and inappropriate stocking density is a potential source of chronic stress that may affect the welfare of farmed fish and increase breeding risk. So far the effect of stocking density on the fish welfare was studied widely. In order to provide reference for selecting suitable stocking density and further researching, this review will focus on the fish welfare indicator such as growth performance, health status, stress response and behavior, to explore how stocking densities affect fish welfare.

[Key words] stocking density; fish welfare; intensive aquaculture; growth; health status; stress response