

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20191223002

http://www.yykxjz.cn/

秦传新, 潘莞倪, 于刚, 左涛, 席世改, 朱文涛, 马鸿梅. 水生生物环境丰容技术及其应用研究进展. 渔业科学进展, 2020, 41(5): 185-193

Qin CX, Pan WN, Yu G, Zuo T, Xi SG, Zhu WT, Ma HM. Review on environmental enrichment for aquatic organisms. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(5): 185-193

水生生物环境丰容技术及其应用研究进展*

秦传新^{1①} 潘莞倪^{1,2} 于刚¹ 左涛¹
席世改¹ 朱文涛^{1,2} 马鸿梅¹

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所 国家渔业资源环境大鹏观测实验站
农业农村部南海渔业资源环境科学观测实验站 中国水产科学研究院海洋牧场技术重点实验室
广东省渔业生态环境重点实验室 广州 510300; 2. 上海海洋大学 上海 201306)

摘要 水生生物作为人类生活的重要组成部分,其在养殖、运输以及展示等过程中福利水平低下现象层出不穷,寻求合适的方法来解决水生生物福利低下的问题,成为保障并提升水生生物福利的一大重要工作。环境丰容作为一项能够通过圈养动物生存环境进行优化,提升圈养动物福利水平,使得圈养动物获得生理和心理的健康,展示其自然行为的技术,成为保障和提升水生生物福利的一个重要手段。目前,与国外相比,国内对水生生物环境丰容技术的研究还处于起步阶段,如何利用环境丰容技术改善水生生物的生存环境,保障并提升水生生物福利水平日益成为研究热点。为此,本文综述了环境丰容的定义、发展历程、环境丰容与动物福利的关系以及在水生生物中的4种主要环境丰容技术。同时,就水生生物环境丰容技术存在的问题进行讨论并提出建议,以为水生生物环境丰容提供更多方案参考和理论支撑。

关键词 环境丰容; 动物福利; 水生生物

中图分类号 S953 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2020)05-0022-09

随着渔业技术的不断发展,生活水平的不断提高,人们对水生生物的需求量逐渐增加,无论是从经济价值、观赏价值以及教育意义层面上看,水生生物已逐渐成为人类生活中不可或缺的一部分。然而,在水生生物(尤其是鱼类)养殖、运输、展示等过程中,仍然存在水生生物的福利水平低下的问题,具体体现为存活率低下,疾病、焦虑以及刻板行为出现、侵略行为加强等(Corcoran, 2015; Huntingford *et al*, 2014),寻求合适方法解决水生生物福利低下问题,已迫在眉睫。

环境丰容(Environmental enrichment)作为其中一项提升圈养动物福利的技术手段,是指通过向圈养动物的生活环境加入一定的刺激因素,改善圈养动物的生活条件,提升圈养动物的福利,最终使圈养动物拥有正常的生理和心理的健康,展示其自然行为的过程(Swaigood *et al*, 2005)。目前,环境丰容技术在哺乳动物、鸟类及其他动物中已得到了广泛的应用,成为现代动物园的一种新型管理方式(杨阳等, 2019; 陈昞等, 2016; 毛杰等, 2010; 吴海丽等, 2015)。但是,与

* 国家重点研发计划蓝色粮仓科技创新专项(2018YFD0900905)和中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2019ZD1101)共同资助 [This work was supported by National Key Research and Development Plan Blue Granary Technology Innovation Project (2018YFD0900905), and Special Fund for Basic Scientific Research Business Fees of the Central Public Welfare Research Institute of the Chinese Academy of Fishery Sciences (2019ZD1101)]

① 通讯作者: 秦传新, 副研究员, E-mail: qincx@scsfri.ac.cn

收稿日期: 2019-12-23, 收修改稿日期: 2020-01-06

国外相比,国内对于水生生物环境丰容技术相关的研究仍处于起步阶段。本文通过围绕环境丰容技术在国内外水生生物中的研究进展和主要技术应用进行综述,对环境丰容技术存在的问题进行讨论并提出建议,以期水生生物环境丰容提供更多方案参考和理论基础。

1 环境丰容

1.1 定义

环境丰容可以通过多种方式来定义,它通常涉及对动物生境进行改造,对动物实施一定程度的保护,使其身心状态免受不必要的痛苦,从而保障动物的福利水平(Williams *et al.*, 2008)。环境丰容通常被认为是一种动态的工程,通过一系列的构建和改变圈养动物的生活环境,允许动物表现出正常的行为,获得更多的选择机会(张恩权, 2006; 田秀华等, 2007)。

1.2 发展历程

国际上,环境丰容这一概念的提出和应用,最早可以追溯到人们开始将动物圈养到动物园的时期(Mellen *et al.*, 2001)。早在1925年, Robert Yerkes发现为灵长类动物提供一定的运动和戏玩的设施后,其饲养状况得到改善,让当时的群众意识到环境丰容对圈养动物的健康生长具有重要作用,因此, Robert Yerkes的观点被认为是“环境丰容”概念的雏形(杜浩, 2014)。1982年, Markowitz(1983)在美国波特兰动物园开展环境丰容工作,成为史上开展环境丰容工作最具影响力的人物之一。1981年,美国国会举行专门的听证会,并于1985年完成了对动物福利行动计划案的修订。这次修订制定了有关于狗类锻炼和灵长类心理健康的相关制度,并将“环境丰容”概念写入草案。1993年,美国华盛顿动物园首次举办了关于环境丰容的学术研讨会,初步提出了环境丰容的理论框架,并着手开展环境丰容的相关工作(Shepherdson *et al.*, 1998)。

目前,环境丰容及饲养驯化已经成为圈养动物日常管理工作中不可分割的部分,也成为过去 30 多年里动物园和水族馆所采取的主要工作措施(Mellen *et al.*, 1996)。在我国,北京动物园在 1995 年首次接触这一概念并尝试开展对猩猩馆的环境丰容工作(李华等, 2005)。1996 年,成都卧龙大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)研究所也开展了环境丰容方面的相关实验工作。2002 年,北京动物园在我国首次承办了由中国动物园协会和华盛顿动物园联合举办的以环境丰容为主题的研讨会,2005 年成都动物园开展了对大

熊猫环境丰容的相关工作(杨秀梅等, 2008)。2006 年,上海动物园承办了国内第 2 次环境丰容研讨会,并对狒狒、鸟类和马来熊(*Helarctos malayanus*)等动物进行环境丰容的相关实验工作(田秀华等, 2007)。其后,其他动物园也相继开展环境丰容的相关工作(黄潇航等, 2018; 刘冰许等, 2016; 张轶卓, 2014)。

1.3 环境丰容与福利

环境丰容技术作为一项有效提升动物福利水平的手段,应得到合理、有效的利用。尽管人们意识到保障动物福利对动物健康的重要性,但在具体如何定义福利水平和实施环境丰容问题上,科学家和哲学家之间开展了大量的讨论(Williams *et al.*, 2008)。为此,英国农渔食品部农场动物福利委员会(Farm Animal Welfare Council, FAWC)(1993)颁布了关于陆生动物的 5 种福利自由,经常被用作环境丰容技术设计和实施的参考依据,主要内容为(1)拥有免受饥渴的自由;(2)拥有免于不适的自由;(3)拥有免受疼痛、伤害或疾病的自由;(4)拥有表达正常行为的自由;(5)拥有免受恐惧和痛苦的自由。相应地, Mellor 等(2001)针对 5 项“自由”提出 5 项福利水平低下的表现,即(1)营养不良;(2)环境不适;(3)出现疾病、损伤和功能障碍;(4)行动受限;(5)出现精神和身体上痛苦。

由于水生生物所生活环境的复杂性,为水生生物环境丰容的设计、实现和评估带来了一定的技术难题,但可以依据 FAWC(1993)提出的要求和 Mellor 等(2001)的观点,以保障动物福利为基本原则,对水生生物环境丰容技术进行提升,并进行有效评估,合理利用环境丰容技术,切实提升水生生物福利水平。

2 水生生物环境丰容技术研究现状

由于人们对于水生生物的生活史、行为习惯、神经调节等理论知识背景的了解相对匮乏,且对于水生生物而言,尤其是对于鱼类到底能不能感知痛觉、是否存在认知能力等问题上一直存在争议(Corcoran, 2015; Huntingford *et al.*, 2014; Williams *et al.*, 2008)。因此,相对而言,环境丰容在水生生物中的研究进展较慢。环境丰容技术在水生生物生长、繁殖中的应用研究,主要开展以观赏(Ploeg, 2007; Stevens *et al.*, 2017; Sullivan *et al.*, 2015; Anderson *et al.*, 2001)、实验(Lee *et al.*, 2019; Collymore *et al.*, 2015; Volgin *et al.*, 2018; Schroeder *et al.*, 2014; Kistler *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2018)、增养殖或增殖放流(Braithwaite *et al.*, 2014; Kihlslinger *et al.*, 2006; Brockmark *et al.*, 2007; Hammenstig *et al.*, 2014)为主要目的的水生生物环境

丰容研究,且主要研究对象为鱼类(张宗航等,2018)。本文根据环境丰容技术的性质不同,在归纳前人研究基础上将水生生物环境丰容技术划分为四大类,分别为栖息地丰容技术、饵料丰容技术、社会丰容技术和感官丰容技术(王志永等,2010;刘霞利,2013;赵雨梦等,2018)。

2.1 栖息地丰容技术

栖息地丰容技术,又称为生境丰容技术,是指对水生生物的栖息地或其生境中的水流、光照、底质等因素进行优化,减少动物的压力,增加其自然行为,获得身心健康,以此提高水生生物福利水平的一项技术(Swaigood *et al*, 2005; 王志永等, 2010),具体可分为结构丰容、水流丰容和光照丰容等。目前,已有相关的环境丰容技术在水生生物中应用,并取得一定成效。Batzina 等(2012)探究海水再循环系统水缸中蓝色、红棕色和绿色底质对金头鲷(*Sparus aurata*)的影响,发现添加蓝色和红棕色底质可视为一种可行的环境丰容方法。杜浩(2014)通过对达氏鲟(*Acipenser dabryanus*)进行水流丰容和极端光周期丰容,发现水流丰容组达氏鲟的游泳能力得到明显提高;极端光周期对达氏鲟的视觉发育影响显著。北京动物园仿照大鲵(*Andrias davidianus*)栖息地原生环境造景,进行环境丰容实验,极大改善了大鲵的生活质量和福利水平(陈昶等,2018)。

水生生物对环境具有一定的偏好性,如金鱼(*Carassius auratus*)(Sullivan *et al*, 2015)、斑马鱼(*Danio rerio*)(Schroeder *et al*, 2014; Kistler *et al*, 2011)等对于水环境中添加底质、植物或其他结构的环境存在明显的偏好。Braithwaite 等(2014)研究表明,大多数养殖鱼类在远离自然的条件下,很可能导致急性或慢性胁迫,致使养殖鱼类的福利水平降低。通过结构丰容,与对照组相比,斑马鱼的焦虑行为有所减少(Lee *et al*, 2019; Collymore *et al*, 2015),虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的应激后不良反应也相应减少(Pounder *et al*, 2016),大西洋鲑(*Salmo salar*)吃得更多,对自然捕食的适应速度更快(Roberts *et al*, 2014)。且当进行简单的空间学习任务测试时,来自复杂饲养处理的椰子深鰕虎鱼(*Bathygobius cocosensis*)的个体比在较简单的环境(海草)和同质环境(砂基质)中饲养的个体更快地达到学习标准(Carbia *et al*, 2019)。因此,通过适当的添加底质、庇护所、植物等结构增加栖息地复杂性,进行环境丰容,可以减少水生生物在环境中的焦虑、不良行为,提升水生生物的环境适应性,并提高其存活率。

环境丰容对鱼类的“胆量”影响显著。Sneddon (2003)根据个体在实验水槽空白区域停留时间的长短,对鱼类的“胆量”进行定义,停留时间越长,“胆量”越大,反之,则“胆量”越小;且张宗航等(2018)研究认为,鱼类行为是其“胆量”的外在表现。Castanheira 等(2017)指出,被动的、胆小的个体虽然竞争能力较弱,但因其具有较强的行为和神经可塑性,使其能够更好地适应复杂多变的水生环境。Kihlslinger 等(2006)研究表明,在一个简单的早期养殖环境中,添加天然底物可以塑造幼年鲑鱼的行为和神经表型的表达。张宗航等(2018)通过分别选用不同规格的人工鱼礁模型和海藻模型,对增殖放流鱼种许氏平鲈(*Sebastods schlegelii*)进行低水平、高水平环境丰容,发现低水平的环境丰容能有效地增强许氏平鲈的趋礁行为、减少幼鱼的“胆量”,在一定程度上有利于提高增殖放流幼鱼在野外的存活率。有研究表明,在进行环境丰容后,鳕鱼(*Gadus morhua*)(Salwanes *et al*, 2005)、鲑鱼(Roberts *et al*, 2011)的“胆量”变小,在庇护所停留的时间更长,并显示出更强的反捕食行为。各项环境丰容技术之间并非是绝对独立的,它们相互交叉、相互融合、相互协调,以求达到更好的丰容效果。Brockmark 等(2010)结合栖息地丰容技术和社会丰容技术对褐鳟(*Salmo trutta*)进行环境丰容,研究发现,在自然密度下饲养的鱼苗在迷宫中找到猎物的速度更快,且该密度养殖的幼鱼吃新型饵料的速度更快,并表现出比在更高密度下饲养的鱼更有效的反捕食行为;以低密度饲养的鳟鱼幼鱼在溪流中生存的可能性是以高密度饲养幼鱼的2倍。

然而,由于物种间的差异、环境丰容的方式以及丰容水平等的不同,环境丰容可能并不能显著提升水生生物的福利水平,甚至可能带来负面影响。通过栖息地丰容技术和饵料丰容技术的结合, Persson 等(2014)研究发现,庇护所的存在能使低水平饵料组的大西洋鲑的鱼鳍受损率降低,但会对其存活率带来消极影响。有研究发现,在进行结构丰容后,与在孵化场典型的贫瘠环境中饲养相比,放流后的褐鳟(Watz, 2019)在天然河流中的运动减少,虹鳟(Lee *et al*, 2008)、黄鳍结鱼(*Tor putitora*)(Ullah *et al*, 2017)的“胆量”增大了,不利于其在野外的生存和发展。杜浩(2014)研究发现,卵石底质养殖对达氏鲟生长表现出明显的负面效应,达氏鲟的养殖成活率低。有研究发现,丰容的孵化环境不会对斑马鱼的生长状况、生殖能力以及攻击行为产生显著影响(Lee *et al*, 2018),也不会改善放流后大西洋鲑(Brockmark *et al*, 2007)和虹鳟(Tatara *et al*, 2009)的生长或生存。Solås(2019)等

采用结构丰容技术进行环境丰容发现,单独的结构丰容不足以改善孵化后养殖鱼类的长期存活率,其他因素可能会影响放流后的存活率。且有学者认为,环境丰容之所以能降低巴西珠母丽鱼(*Geophagus brasiliensis*)的攻击性是由于栖息地复杂性的增加降低了能见度,使得鱼类之间的相互作用降低(Kadry *et al.*, 2010)。

可见,采取适当的环境丰容技术在某种程度上能够提升水生生物的福利,但仍需要根据物种的特异性进行环境丰容设计、规划,探究适合的环境丰容手段,调整环境丰容水平,以期更大程度地提高实验鱼的福利水平。

2.2 饵料丰容技术

饵料丰容技术,则是对水生生物的食物种类、投喂量、大小、颜色、位置、输送方式、获取的难易程度等进行改变和优化,使得水生生物福利水平得到提升的技术手段(Swaisgood *et al.*, 2005; Williams *et al.*, 2008; 王志永等, 2010)。

水生野外环境复杂多变,能对新型的、陌生的饵料进行摄食,有利于水生生物在环境中的生存和发展,这对水生生物是否能在增殖放流后适应环境,提高存活率至关重要。通过使用生物饵料进行饵料丰容,与人工饵料饲养组相比,生物饵料的喂养更有利于达氏鲟在自然环境中对陌生饵料的摄食选择(杜浩, 2014)。

饵料丰容技术方法多样、水平各异,与其他丰容技术的结合可能会取得更佳的效果,但也有可能与理想效果相悖。通过饵料丰容技术和栖息地丰容技术相结合,环境丰容组饲养的达氏鲟获得了更好的反捕食训练效果(杜浩, 2014),鲑鱼(*Gadus morhua*)获得了更灵活的行为特征(Braithwaite *et al.*, 2005),大西洋鲑的鱼鳍受损率也有所降低,但大西洋鲑在增殖放流后的存活率有所降低(Persson *et al.*, 2014)。

2.3 社会丰容技术

社会丰容,实际上可理解为增加水生生物与同物种或非同物种之间的相互作用,调整社会条件,调动其社会属性的过程,在实施过程中,需要考虑物种的密度、规格、种类等问题(Swaisgood *et al.*, 2005; Williams *et al.*, 2008; 王志永等, 2010)。

通过调整饲养密度,改变水生生物的社会条件进行社会丰容,能够在不同程度上改善放流后水生生物在野外的存活率和适应能力。且在与其他丰容技术相结合的时候,对于提高水生生物的福利水平,社会丰

容技术可能发挥着更大的作用。通过结合社会丰容技术和栖息地丰容技术, Brockmark 等(2007)对 0 龄大西洋鲑进行环境丰容,发现在育苗场,保持低密度和结构丰容的鲑鱼比传统饲养的鲑鱼生长得更快。在成熟时,保持在低密度饲养的鲑鱼比在标准密度饲养的具有更高水平的胰岛素样生长因子 I; 低密度组死亡率低于高密度组;同时,低密度饲养的大西洋鲑的背鳍受损程度低于标准密度。因此, Brockmark 等(2007)研究认为,降低饲养密度可能比结构复杂性更重要,可以应用此技术提高大西洋鲑幼鱼的放流存活率。Brockmark 等(2010)研究发现,对褐鳟进行结构丰容并没有取得明显的效果,认为降低饲养密度可以促进圈养动物的行为生活技能的发展,从而增加它们对自然生产的贡献。通过结合社会丰容和饵料丰容技术, Hammenstig 等(2014)对适用于增殖放流的大西洋鲑进行环境丰容,发现降低的饲养密度比降低的膳食脂肪水平更为重要。

除了同种间的社会作用,非同一物种间的社会丰容技术,如“抖动鱼”(Dither fish)的使用、捕食者的引入,对水生生物进行训练以及水生生物与人的相互作用等社会丰容技术都能在不同程度上改善水生生物的福利水平,达到较好的丰容效果,实现环境丰容的目的(Williams *et al.*, 2008; 杜浩, 2014; Brydges *et al.*, 2009)。有研究表明,使用“抖动鱼”进行社会丰容,即加入体格较小鱼群作为体格更大的神经紧张的鱼群的伴侣,能够减缓体格更大的鱼群的压力,这可能对一个物种的多个生命阶段的社会互动和学习具有重要作用(Williams *et al.*, 2008)。杜浩(2014)通过引入捕食者对达氏鲟进行反捕食训练,有效提高达氏鲟在增殖放流后的反捕食能力;相关研究表明,通过训练可以使得锦鲤进行较低压力捕获,并使它们习惯于处理。也可以通过对鲨鱼、鳐等进行训练,在手术期间缓解它们的压力,减少防御行为的出现,更容易实现对它们的安全控制(Corcoran, 2015);且与普通的水族箱相比,在具备观察窗的水族箱的巨型太平洋章鱼逃跑的次数要少得多(Anderson *et al.*, 2001)。

2.4 感官丰容技术

感官丰容技术,是指通过对水生生物听觉、视觉、嗅觉、味觉等感官给予一定的刺激,改善水生生物的生活环境,从而提升水生生物福利水平的一种技术手段(Swaisgood *et al.*, 2005; Williams *et al.*, 2008; 王志永等, 2010)。

通过改变饲养环境的背景、底质等颜色进行环境丰容,对水生生物的健康发展有所帮助。Batzina 等

(2012)通过探究海水再循环系统水缸中蓝色、红棕色和绿色底质的存在对金头鲷的影响,发现添加蓝色和红棕色底质可视为一种可行的环境丰容方法。基于之前的研究(Batzina *et al*, 2012), Batzina 等(2014)在不同社会条件下(较低的 4.9 kg/m^3 和较高的 9.7 kg/m^3 密度)饲养金头鲷时发现,这种丰容仍然有益,且蓝色底质能够促进金头鲷的生长发育,抑制其攻击行为,并降低脑血清素活性。Barcellos 等(2009)在探究颜色背景和遮蔽物可用性是否影响克林雷氏鲶(*Rhamdia quelen*)中皮质醇对胁迫的反应时,发现提升克林雷氏鲶福利水平的最佳选择是带蓝色墙壁并提供庇护所的养殖箱。Papoutsoglou 等(2015)研究发现,与其他声音(罗曼萨、巴赫、白噪声)相比,莫扎特音乐的传播能够使金头鲷产生放松影响,减少焦虑,达到最大的生长速度、体重,同时,肯定了金头鲷听觉对音乐刺激的敏感性,并指出白噪声的存在可能对金头鲷有特殊影响。

3 水生生物环境丰容研究存在问题

3.1 研究基础薄弱

水生生物的福利水平具体体现在拥有健康的身心 and 自然的行为(Swaisgood *et al*, 2005),因此,水生生物生活史、行为习惯、神经调节等理论知识背景的研究成为水生生物环境丰容技术的基础。

然而,目前国内外对于该方面的基础研究较为薄弱,使得环境丰容技术、福利的定义、评估尚未有统一的标准,对于什么才是水生生物的“自然”行为,仍无法做出准确判断,环境丰容技术在水生生物中的研究仍相对有限,水生生物环境丰容技术的进一步发展面临困难(Corcoran, 2015; Huntingford *et al*, 2014; Williams *et al*, 2008)。

3.2 技术缺乏系统性、针对性

由于现阶段对于环境丰容技术在水生生物中的研究应用较少,相关应用仍处在初期探索阶段,仍无法建立一套系统的水生生物环境丰容技术体系,无法加以广泛应用。且对于已有的研究,若将其技术直接应用,则容易缺乏针对性和特异性,导致丰容效果不佳。

3.3 技术实施难度大

环境丰容技术并不是有百利而无一弊的。在使用各项环境丰容技术的时候,会发现环境丰容技术在改善水生生物福利水平的同时,很可能对某些物种带来一些隐患和负面影响,如通过利用“抖动鱼”进行社会

丰容,能够减缓体格更大鱼的压力(Williams *et al*, 2008),但“抖动鱼”也有可能引入疾病和寄生虫,面临被捕食的风险,且多物种混养很可能使研究或实验条件复杂化(Williams *et al*, 2008; Brydges *et al*, 2009),使得因该技术的引进而产生安全、卫生、健康等问题;同时,进行低水平的环境丰容能有效增强许氏平鲷的趋礁行为、减少幼鱼的“胆量”,但高水平的环境丰容很可能会产生不良影响(张宗航等, 2018),因而产生因物种、环境丰容技术及环境丰容水平差异导致的丰容效果不佳等问题。研究表明,降低饲养密度对水生生物福利水平的提高至关重要(Brockmark *et al*, 2007; Hammenstig *et al*, 2014; Brockmark *et al*, 2010),但对于养殖渔业而言,为追求经济效益,通常采取集约化养殖,养殖密度较大、养殖环境较差,若将环境技术加以应用,有可能会增加养殖成本,使得环境丰容技术在以增养殖为目的的水生生物中的实施难度较大。

4 建议与展望

基于环境丰容技术在哺乳动物、鸟类等动物中的成功应用,作者有理由相信水生生物环境丰容技术具有良好的前景,具有很大的发展空间。环境丰容技术作为一项能够切实提高水生生物福利水平的技术手段,人们可以利用其对水生生物中的经济生物、保护生物、观赏生物开展福利提升的一系列相关实验,以期为社会带来更大的经济、文化、社会价值。针对环境丰容技术在水生生物应用中存在的问题,提出以下建议:

4.1 基础研究是推动环境丰容技术发展的基石

人们需要提高对水生生物基本生物学知识的科学认识和理解,加大对水生生物基础科学以及环境丰容技术的科学实验和研究,丰富水生生物行为学、营养学、神经学、病理学等学科内容,完善环境丰容的技术支撑体系,建立多角度评估体系,加快水生生物环境丰容技术的发展。

4.2 针对不同物种开发关键技术研究

由于提升福利水平对象的物种、生命阶段、生活特性等存在差异,在设计、制定环境丰容方法时,需要考虑由于物种间的差异、环境丰容的方式以及丰容水平等的不同带来的影响,针对物种特异性,选择有效的丰容计划,以期达到更好的丰容效果,减少水生生物刻板行为和其他异常行为,实现水生生物福利水平的切实保障和提高,切不可生搬硬套(Corcoran,

2015; Huntingford *et al*, 2014; Williams *et al*, 2008; 张宗航等, 2018)。

4.3 综合开发提高推广应用效率

单一的环境丰容技术可能效果不佳, 可以考虑多种环境丰容技术相互结合, 同时, 尽量避免环境丰容技术本身带来的不良影响, 如进行饵料丰容产生的疾病、寄生虫等问题, 减少在丰容技术实施过程中对水生生物的伤害; 加大对环境丰容技术和成功经验的推广, 实现环境丰容技术在更多水生生物物种中的实践应用。同时, 拓展应用领域。水生生物环境丰容技术目前仅在小生境中应用较广, 如水族馆、动物园和实验室中, 也可将该技术进行推广应用到大环境中。如今, 海洋牧场已经成为引领低碳潮流的海洋生物资源可持续发展利用的重要载体(李波, 2012; Qin *et al*, 2019; 段丁毓等, 2019; 莫宝霖等, 2017; 杨红生等, 2019)。因此, 可以利用水生生物环境丰容技术与海洋牧场相结合, 尤其是对于水生生物中的经济生物, 可以开展相应的环境丰容实验工作, 如利用结构丰容技术对一些具有趋礁习性的物种进行环境丰容, 使用人工鱼礁作为结构丰容的材料, 结合增殖放流, 响应我国“蓝色粮仓”号召(方琼玖等, 2018; 杨红生, 2019; 许强等, 2018; 段丁毓等, 2020), 在实现水生生物福利提升的同时, 为我国渔业更好的发展提供技术支持和理论基础。

总之, 环境丰容技术的发展与水生生物福利水平的进一步提升密切相关, 进一步构建、完善水生生物环境丰容技术体系将为我国渔业的发展带来新的契机, 有助于我国渔业实现更好、更稳健地发展。

参 考 文 献

- Anderson RC, Wood JB. Enrichment for giant Pacific octopuses: Happy as a clam? *Journal of Applied Animal Welfare Science*, 2001, 4(2): 157–168
- Barcellos LJG, Kreutz LC, Quevedo RM, *et al*. Influence of color background and shelter availability on jundiá (*Rhamdia quelen*) stress response. *Aquaculture*, 2009, 288(1–2): 51–56
- Batzina A, Dalla C, Papadopoulou-Daifoti Z, *et al*. Effects of environmental enrichment on growth, aggressive behaviour and brain monoamines of gilthead seabream *Sparus aurata* reared under different social conditions. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 2014, 169: 25–32
- Batzina A, Karakatsouli N. The presence of substrate as a means of environmental enrichment in intensively reared gilthead seabream *Sparus aurata*: Growth and behavioral effects. *Aquaculture*, 2012, 370–371: 54–60
- Braithwaite VA, Ebbesson LOE. Pain and stress responses in farmed fish. *Revue Scientifique et Technique (International Office of Epizootics)*, 2014, 33(1): 245–253
- Braithwaite VA, Salvanes AGV. Environmental variability in the early rearing environment generates behaviourally flexible cod: Implications for rehabilitating wild populations. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, 272(1568): 1107–1113
- Brockmark S, Adriaenssens B, Johnsson JI. Less is more: Density influences the development of behavioural life skills in trout. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 277(1696): 3035–3043
- Brockmark S, Neregård L, Bohlin T, *et al*. Effects of rearing density and structural complexity on the pre- and postrelease performance of Atlantic salmon. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2007, 136(5): 1453–1462
- Brydges NM, Braithwaite VA. Does environmental enrichment affect the behaviour of fish commonly used in laboratory work? *Applied Animal Behaviour Science*, 2009, 118(3–4): 137–143
- Carbia PS, Brown C. Environmental enrichment influences spatial learning ability in captive-reared intertidal gobies (*Bathygobius cocosensis*). *Animal Cognition*, 2019, 22: 89–98
- Castanheira MF, Conceição LEC, Millot S, *et al*. Coping styles in farmed fish: Consequences for aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 2017, 9(1): 23–41
- Chen Y, Li XG, Wang SB. The design of Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) in Beijing Zoo. *Xiandai Horticulture*, 2018(1): 114–115 [陈旸, 李晓光, 王树标. 北京动物园大鲵展示环境丰容设计. *现代园艺*, 2018(1): 114–115]
- Chen Y, Qiao YL, Wang SB, *et al*. Amphibian and reptile display and plant landscaping and maintenance in Beijing Zoo. *Chinese Horticulture Abstracts*, 2016, 32(2): 132–135 [陈旸, 乔轶伦, 王树标, 等. 北京动物园两栖爬行动物展示与植物造景及维护. *中国园艺文摘*, 2016, 32(2): 132–135]
- Collymore C, Tolwani RJ, Rasmussen S. The behavioral effects of single housing and environmental enrichment on adult zebrafish (*Danio rerio*). *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science*, 2015, 54(3): 280–285
- Corcoran M. Environmental enrichment for aquatic animals. *Veterinary Clinics of North America: Exotic Animal Practice*, 2015, 18(2): 305–321
- Du H. Conservation aquaculture of Dabry's sturgeon *Acipenser dabryanus*: Fitness for survival of the fingerlings and juveniles from enriched rearing environment. Doctoral Dissertation of Huazhong Agricultural University, 2014 [杜浩. 达氏鲟的保护养殖: 丰容环境中仔幼鱼的生存适应性. 华中农业大学博士研究生学位论文, 2014]
- Duan DY, Qin CX, Zhu WT, *et al*. Ecological classification of marine ranching based on landscape ecology: A case study of Zhelin Bay marine ranching. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(2): 1–10 [段丁毓, 秦传新, 朱文涛, 等. 海洋牧

- 场景生态分类研究:以柘林湾海洋牧场为例. 渔业科学进展, 2020, 41(2): 1-10]
- Duan DY, Qin CX, Zhu WT, *et al.* Research on landscape structure and pattern of marine ranching in Zhelin Bay, east Guangdong. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1981-1992 [段丁毓, 秦传新, 朱文涛, 等. 粤东柘林湾海洋牧场景观结构与格局的分析研究. 水产学报, 2019, 43(9): 1981-1992]
- Fang QW, Cai DM. How does the "blue granary" move from light blue to dark blue? The first Guangdong Ocean Ranch Expert Forum was held in Guangzhou. *Ocean and Fishery*, 2018(8): 18-19 [方琼玫, 蔡冬梅. "蓝色粮仓"如何从浅蓝迈向深蓝? 广东首届海洋牧场专家论坛在广州举行. 海洋与渔业, 2018(8): 18-19]
- FAWC. Report on priorities for animal welfare: research and development. UK Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, 1993, 5-19
- Hammenstig D, Sandblom E, Axelsson M, *et al.* Effects of rearing density and dietary fat content on burst-swim performance and oxygen transport capacity in juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Journal of Fish Biology*, 2014, 85(4): 1177-1191
- Huang XH, Xu BZ, Zhang L, *et al.* On the form of wildlife abundance under the guidance of animal welfare in China. *Hubei Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2018, 39(3): 16-17 [黄潇航, 许必钊, 张龙, 等. 我国动物福利思想指导下野生动物丰容形式浅谈. 湖北畜牧兽医, 2018, 39(3): 16-17]
- Huntingford FA, Kadri S. Defining, assessing and promoting the welfare of farmed fish. *Revue Scientifique et Technique*, 2014, 33(1): 233-244
- Kadry VO, Barreto RE. Environmental enrichment reduces aggression of pearl cichlid, *Geophagus brasiliensis*, during resident-intruder interactions. *Neotropical Ichthyology*, 2010, 8(2): 329-332
- Kihlslinger RL, Nevitt GA. Early rearing environment impacts cerebellar growth in juvenile salmon. *Journal of Experimental Biology*, 2006, 209(3): 504-509
- Kistler C, Hegglin D, Würbel H, *et al.* Preference for structured environment in zebrafish (*Danio rerio*) and checker barbs (*Puntius oligolepis*). *Applied Animal Behaviour Science*, 2011, 135(4): 318-327
- Lee CJ, Paull GC, Tyler CR. Effects of environmental enrichment on survivorship, growth, sex ratio and behaviour in laboratory maintained zebrafish *Danio rerio*. *Journal of Fish Biology*, 2019, 94(1): 86-95
- Lee CJ, Tyler CR, Paull GC. Can simple tank changes benefit the welfare of laboratory zebrafish *Danio rerio*? *Journal of Fish Biology*, 2018, 92(3): 653-659
- Lee JSF, Berejikian BA. Effects of the rearing environment on average behaviour and behavioural variation in steelhead. *Journal of Fish Biology*, 2008, 72(7): 1736-1749
- Li B. A study on China marine ranching construction. Master's Thesis of Ocean University of China, 2012 [李波. 关于中国海洋牧场建设的问题研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2012]
- Li H, Pan WJ, Liu DQ, *et al.* The effects of environmental enrichment to captive chimps. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2005, 41(4): 410-414 [李华, 潘文婧, 刘东强, 等. 环境丰容对圈养黑猩猩行为的影响. 北京师范大学学报(自然科学版), 2005, 41(4): 410-414]
- Liu BX, Guo SL, Ye SY, *et al.* Impact of environmental and food enrichment on time distribution of captive black bears. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2016(11): 230-233 [刘冰许, 郭书林, 叶淑英, 等. 环境与食物丰容对圈养黑熊活动时间分配的影响. 黑龙江畜牧兽医, 2016(11): 230-233]
- Liu XL. Preliminary study on ecologicalization of zoo buildings. *Chinese Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2013(2): 111-112 [刘霞利. 浅谈动物园馆舍的生态化. 畜牧兽医科技信息, 2013(2): 111-112]
- Mao J, Zuo ZL, Yang XY, *et al.* Environmental enrichment and behaviors of impressed tortoise in captivity. *Chinese Journal of Wildlife*, 2010, 31(4): 197-200 [毛杰, 左智力, 杨小仪, 等. 凹甲陆龟人工饲养环境丰容及行为观察实验. 野生动物, 2010, 31(4): 197-200]
- Markowitz H. Behavioral enrichment in the zoo. *Biological Society*, 1983, 54(3): 164-165
- Mellen J, MacPhee MS. Philosophy of environmental enrichment: Past, present, and future. *Zoo Biology*, 2001, 20(3): 211-226
- Mellen JD, Ellis S. *Animal learning and husbandry training*. Chicago: University of Chicago Press, 1996
- Mellor DJ, Stafford KJ. Integrating practical, regulatory and ethical strategies for enhancing farm animal welfare. *Australian Veterinary Journal*, 2001, 79(11): 762-768
- Mo BL, Qin CX, Chen PM, *et al.* Preliminary analysis of structure and function of Daya Bay ecosystem based on Ecopath model. *South China Fisheries Science*, 2017, 13(2): 9-19 [莫宝霖, 秦传新, 陈丕茂, 等. 基于 Ecopath 模型的大亚湾海域生态系统结构与功能初步分析. 南方水产科学, 2017, 13(2): 9-19]
- Papoutsoglou SE, Karakatsouli N, Psarrou A, *et al.* Gilthead seabream (*Sparus aurata*) response to three music stimuli (Mozart-"Eine Kleine Nachtmusik," Anonymous-"Romanza," Bach-"Violin Concerto No. 1") and white noise under recirculating water conditions. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2015, 41(1): 219-232
- Persson L, Alanärä A. The effect of shelter on welfare of juvenile Atlantic salmon *Salmo salar* reared under a feed restriction regimen. *Journal of Fish Biology*, 2014, 85(3): 645-656
- Ploeg A. The volume of the ornamental fish trade. *Ornamental Fish International*, 2007, 48-61
- Pounder KC, Mitchell JL, Thomson JS, *et al.* Does environmental enrichment promote recovery from stress in rainbow trout? *Applied Animal Behaviour Science*, 2016, 176: 136-142

- Qin CX, Zhu WT, Ma HM, *et al.* Are habitat changes driving protist community shifts? A case study in Daya Bay, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 227
- Roberts LJ, Taylor J, Gough PJ, *et al.* Silver spoons in the rough: Can environmental enrichment improve survival of hatchery Atlantic salmon *Salmo salar* in the wild? *Journal of Fish Biology*, 2014, 85(6): 1972–1991
- Roberts LJ, Taylor J, Leaniz CGD. Environmental enrichment reduces maladaptive risk-taking behavior in salmon reared for conservation. *Biological Conservation*, 2011, 144(7): 1972–1979
- Salwanes AGV, Braithwaite VA. Exposure to variable spatial information in the early rearing environment generates asymmetries in social interactions in cod (*Gadus morhua*). *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2005, 59(2): 250–257
- Schroeder P, Jones S, Young IS, *et al.* What do zebrafish want? Impact of social grouping, dominance and gender on preference for enrichment. *Laboratory Animals*, 2014, 48(4): 328–337
- Shepherdson DJ, Mellen JD, Hutchins M. *Second nature: Environmental enrichment for captive animals*. Washington, DC: Smithsonian Institution Press, 1998
- Sneddon LU. The bold and the shy: Individual differences in rainbow trout. *Journal of Fish Biology*, 2003, 62(4): 971–975
- Solås MR, Skoglund H, Salwanes AGV. Can structural enrichment reduce predation mortality and increase recaptures of hatchery-reared Atlantic salmon *Salmo salar* L. fry released into the wild? *Journal of Fish Biology*, 2019, 95(2): 575–588
- Stevens CH, Croft DP, Paull GC, *et al.* Stress and welfare in ornamental fishes: What can be learned from aquaculture? *Journal of Fish Biology*, 2017, 91(2): 409–428
- Sullivan M, Lawrence C, Blache D. Why did the fish cross the tank? Objectively measuring the value of enrichment for captive fish. *Applied Animal Behaviour Science*, 2015, 174: 181–188
- Swaigood RR, Shepherdson DJ. Scientific approaches to enrichment and stereotypies in zoo animals: What's been done and where should we go next. *Zoo Biology*, 2005, 24(6): 499–518
- Tatara CP, Riley SC, Scheurer JA. Growth, survival, and habitat use of naturally reared and hatchery steelhead fry in streams: Effects of an enriched hatchery rearing environment. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2009, 138(3): 441–457
- Tian XH, Zhang LY, Wang C. Environmental enrichment technique of zoos and methods of estimation. *Chinese Journal of Wildlife*, 2007, 28(3): 64–68 [田秀华, 张丽烟, 王晨. 动物园环境丰容技术及其效果评估方法. *野生动物*, 2007, 28(3): 64–68]
- Ullah I, Zuberi A, Khan KU, *et al.* Effects of enrichment on the development of behaviour in an endangered fish mahseer (*Tor putitora*). *Applied Animal Behaviour Science*, 2017, 186: 93–100
- Volgin AD, Yakovlev OV, Demin KA, *et al.* Understanding the role of environmental enrichment in zebrafish neurobehavioral models. *Zebrafish*, 2018, 15: 5
- Wang ZY, Zhou ZJ, Wang WH, *et al.* Technology and design of habitat enrichment of wildlife in captivity. *Chinese Journal of Wildlife*, 2010, 31(5): 276–279 [王志永, 周正军, 王万华, 等. 圈养野生动物的栖息地丰容技术及其设计. *野生动物*, 2010, 31(5): 276–279]
- Watz J. Structural complexity in the hatchery rearing environment affects activity, resting metabolic rate and post-release behaviour in brown trout *Salmo trutta*. *Journal of Fish Biology*, 2019, 95(2): 638–641
- Williams TD, Readman GD, Owen SF. Key issues concerning environmental enrichment for laboratory-held fish species. *Laboratory Animals*, 2008, 43(2): 107–120
- Wu HL, Sha BF, Zhu JQ, *et al.* Improve the welfare of captive animals by environmental enrichment. *Chinese Journal of Wildlife*, 2015, 36(4): 463–467 [吴海丽, 沙炳福, 朱建青, 等. 通过环境丰容提高圈养野生动物福利. *野生动物学报*, 2015, 36(4): 463–467]
- Xu Q, Liu W, Gao F, *et al.* Development of marine ranching at tropical island area in south China sea—advantages, status and prospects. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(5): 173–180 [许强, 刘维, 高菲, 等. 发展中国南海热带岛礁海洋牧场——机遇、现状与展望. *渔业科学进展*, 2018, 39(5): 173–180]
- Yang HS, Zhang SY, Zhang XM, *et al.* Strategic thinking on the construction of modern marine ranching in China. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(4): 1255–1262 [杨红生, 章守宇, 张秀梅, 等. 中国现代化海洋牧场建设的战略思考. *水产学报*, 2019, 43(4): 1255–1262]
- Yang HS. Development ideas and implementation approaches of blue granary scientific and technological innovation in China. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(1): 97–104 [杨红生. 我国蓝色粮仓科技创新的发展思路与实施途径. *水产学报*, 2019, 43(1): 97–104]
- Yang XM, Li F. Problems in development of wildlife parks in China and strategies of their sustainable development. *Chinese Journal of Wildlife*, 2008, 29(3): 152–156, 159 [杨秀梅, 李枫. 中国野生动物园发展中的突出问题及可持续发展对策. *野生动物*, 2008, 29(3): 152–156, 159]
- Yang Y, Zhang S, Liu QX, *et al.* Influence of environmental enrichment on space utilization by captive red panda. *Chinese Journal of Wildlife*, 2019, 40(2): 300–306 [杨阳, 张姝, 刘群秀, 等. 环境丰容对圈养小熊猫室内展区空间利用的影响. *野生动物学报*, 2019, 40(2): 300–306]
- Zhang EQ. Ex-situ conservation of amphibians and reptiles. *Chinese Journal of Wildlife*, 2006, 27(6): 41–43, 34 [张恩权. 两栖爬行动物的异地保护. *野生动物*, 2006, 27(6): 41–43, 34]
- Zhang YZ. Research status and development prospects of

environmental enrichment in Chinese zoos. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2014(22): 243–246 [张铁卓. 中国动物园环境丰容的科研现状和发展前景. *现代农业科技*, 2014(22): 243–246]

Zhang ZH, Dong JY, Zhang XM, *et al.* Effects of environmental enrichment on the distribution of *Sebastes schlegelii* in early developmental stages. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(22): 8223–8233 [张宗航, 董建宇, 张雪梅, 等. 环境丰容对早

期发育阶段许氏平鲈趋礁行为的影响. *生态学报*, 2018, 38(22): 8223–8233]

Zhao YM, Yin JN, Peng TT, *et al.* Behavioral responses of the greater flamingo(*Phoenicopterus roseus*) to the environment and food enrichment in Harbin Northern Forest Zoo. *Chinese Journal of Wildlife*, 2018, 39(4): 917–921 [赵雨梦, 尹江南, 彭彤彤, 等. 北方森林动物园大红鹤对环境和食物丰容的行为反应. *野生动物学报*, 2018, 39(4): 917–921]

(编辑 马璀璨)

Review on Environmental Enrichment for Aquatic Organisms

QIN Chuanxin^{1①}, PAN Wannan^{1,2}, YU Gang¹, ZUO Tao¹, XI Shigai¹, ZHU Wentao^{1,2}, MA Hongmei¹

(1. *South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, National Agricultural Experimental Station for Fishery Resources and Environment, Dapeng, Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources and Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P.R. China, Key Laboratory of Marine Ranching Technology, CAFS, Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangzhou 510300*; 2. *Shanghai Ocean University, Shanghai 201306*)

Abstract With the development of fishery technology and people's improving living standards, the demand for aquatic organisms has gradually increased. Whether in terms of economic value, ornamental value and educational significance, aquatic organisms have gradually become an indispensable part of our lives. However, aquatic organisms especially fish still have a low level of welfare in the process of the breeding, transportation and display. Finding a suitable method to solve the problems of low welfare of aquatic organism has become an important issue for improving aquatic organism welfare. As one of the technical means to improve the welfare of captive animals, environmental enrichment can increase the living conditions and welfare of captive animals by adding some stimulating factors to the captive environment, so as to make the captive animals have normal psychological and physiological health and show their natural behaviors. At present, compared with foreign countries, domestic researches on environment enrichment of aquatic organisms is still in its infancy. Using environmental enrichment technology to improve the living conditions, ensure and enhance the level of welfare of aquatic organisms has become a research hotspot. Therefore, based on the review of the research progress and application of environmental enrichment technology in aquatic organisms at home and abroad, this paper divided the environmental enrichment technology of the aquatic organisms into four categories, discussed the existing problems of environmental enrichment technology and put forward some suggestions, in order to provide more scheme reference and theoretical basis for environmental enrichment technology of aquatic organisms.

Key words Environmental enrichment; Animal welfare; Aquatic organisms

① Corresponding author: QIN Chuanxin, E-mail: qincx@scsfri.ac.cn