

李阔宇,潘鲁媛,孙永华. 斑马鱼鱼房和养殖系统建设标准 [J]. 中国比较医学杂志, 2020, 30(6): 121–127.

Li KY, Pan LY, Sun YH. Standards for constructing zebrafish houses and breeding systems [J]. Chin J Comp Med, 2020, 30(6): 121–127.

doi: 10.3969/j.issn.1671-7856. 2020.06.018

斑马鱼鱼房和养殖系统建设标准

李阔宇,潘鲁媛,孙永华*

(中国科学院水生生物研究所,淡水生态与生物技术国家重点实验室,国家斑马鱼资源中心,武汉 430072)

【摘要】 斑马鱼是一种重要的脊椎动物模式生物,被广泛地应用到发育生物学等研究领域。随着斑马鱼研究的快速发展,斑马鱼实验动物标准化的问题日益凸显。斑马鱼鱼房作为斑马鱼养殖的场所,是实现其标准化的关键。本文系统地探讨了斑马鱼鱼房的标准化建设,包括斑马鱼自动化养殖系统,斑马鱼鱼房的规划与设计,以及室内配套工程。斑马鱼养殖系统利用现代工业自动化技术,为斑马鱼生长繁殖提供安全适宜的生长繁殖环境。同时,介绍了斑马鱼鱼房的结构设计和相应的室内配套工程建设等相关内容。

【关键词】 斑马鱼鱼房;建设;标准

【中图分类号】 R-33 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-7856(2020) 06-0121-07

Standards for constructing zebrafish houses and breeding systems

LI Kuoyu, PAN Luyuan, SUN Yonghua*

(China Zebrafish Resource Center, State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology,
Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)

【Abstract】 As an important vertebrate model organism, zebrafish are widely used in research fields such as developmental biology. With the rapid development of zebrafish research, experimental zebrafish housing must be standardized and should facilitate zebrafish husbandry. Here, we systematically discuss the construction of zebrafish facilities, including the automatic breeding system and the building design and renovation. The zebrafish breeding system uses modern industrial automation technology to provide a safe and suitable environment for zebrafish growth and breeding. Suitable zebrafish facilities should integrate the breeding system with the building structure.

【Keywords】 zebrafish facility; construction; standardization

近三十年来,斑马鱼因具有诸多生物学优势,例如性成熟周期短、产卵量大、体外受精、胚胎透明和体外发育等,已经发展成为一种重要的脊椎动物模式生物,在发育生物学、遗传学、环境毒理学和水产遗传育种工程等众多的研究领域得到了广泛地应用,被誉为水中小白鼠^[1-3]。根据国际斑马鱼信息中心网站数据,全球已有超过 1300 多个活跃的斑

马鱼实验室^[4]。随着斑马鱼研究实验室数量的快速增长,斑马鱼养殖标准化的问题日益凸显。国内外目前仍然没有制定关于斑马鱼模式生物养殖标准化的规章制度。

斑马鱼的生物学特征以及生长繁殖环境已经得到了深入且系统的研究^[5-14]。这些研究结果对实现斑马鱼的人工标准化养殖具有极高的参考价值。

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31671501,39970774,31672378)。

【作者简介】 李阔宇(1977—)男,国家斑马鱼资源中心实验师,研究方向:斑马鱼资源开发保藏与利用。E-mail:kyli@ihb.ac.cn

【通信作者】 孙永华,男,研究员,博士生导师,研究方向:鱼类发育与生物技术学。E-mail:yhsun@ihb.ac.cn

斑马鱼作为一种模式生物,其实验室的人工养殖没有像实验动物,例如小白鼠等,建立了完整的和系统的实验动物标准。国内外的许多实验室多参考国际斑马鱼资源中心所推荐养殖标准,进行实验室人工养殖。我国的斑马鱼研究工作者在积极探讨斑马鱼的实验动物标准化。2015 年,广东省实验动物监测所和中国科学院水生生物研究所(国家斑马鱼资源中心)等单位开展合作,开展斑马鱼遗传、营养、环境、病原等质量控制的国家标准化工作。鉴于斑马鱼的实验室养殖缺乏标准化,导致其养殖基础设施的建设也存在建设标准化的问题。目前,斑马鱼的实验室人工养殖基础设施建设呈现多样化,有些实验室通过自行设计和搭建的方式,建设个性化的养殖基础设施。有些实验室通过与商业的斑马鱼养殖基础设施生产商合作的方式,建设斑马鱼养殖基础设施。对于新成立的斑马鱼实验室来说,如何合理地规范地建设斑马鱼养殖系统,即斑马鱼鱼房,是所面临的第一个重要问题。关于斑马鱼鱼房建设的相关报导较少。Kim 等^[15]通过传统的手工工艺,组建了简易的斑马鱼养殖系统。其优点是低成本,系统简单和便于日常维护。但是,该系统不具备自动化功能,不能为斑马鱼生长繁殖提供稳定的养殖环境;养殖规模小,且不能扩容,增加养殖

容量。因此,该方法不易推广和借鉴。McNabb 等^[16]讨论了斑马鱼鱼房的结构和养殖环境要求等内容。但是,对于如何建设新的斑马鱼鱼房却没有涉及。斑马鱼鱼房作为维持斑马鱼养殖正常运转和开展斑马鱼实验所必需的基础条件,不仅为斑马鱼的健康生长和繁殖提供了适宜的 and 稳定的养殖环境,而且也可以满足研究人员的研究需要,为斑马鱼的实验动物标准化奠定了坚实的基础。

本文系统地阐述了斑马鱼鱼房的建设,包括斑马鱼规模化自动养殖系统,以及相配套的鱼房结构规划和室内配套装修工程等相关内容。帮助斑马鱼研究人员规范地和合理地建设斑马鱼鱼房。

1 大型斑马鱼中央循环养殖系统

大型斑马鱼中央循环系统由多个结构和功能不同的模块构成。如图 1 所示,该系统具体包括供水纯化模块,纯水水质自动化调控模块,斑马鱼养殖水净化模块,养殖水动力循环模块,养殖水自动化控制即自动化养殖安全模块,和斑马鱼养殖模块。该系统具有自动化运行,养殖容量大和运行成本低等诸多优点。其最大养殖容量可达近 3 万尾成年斑马鱼(5 尾/升养殖密度计)。适用于科研院所大型斑马鱼养殖共享平台的建设。

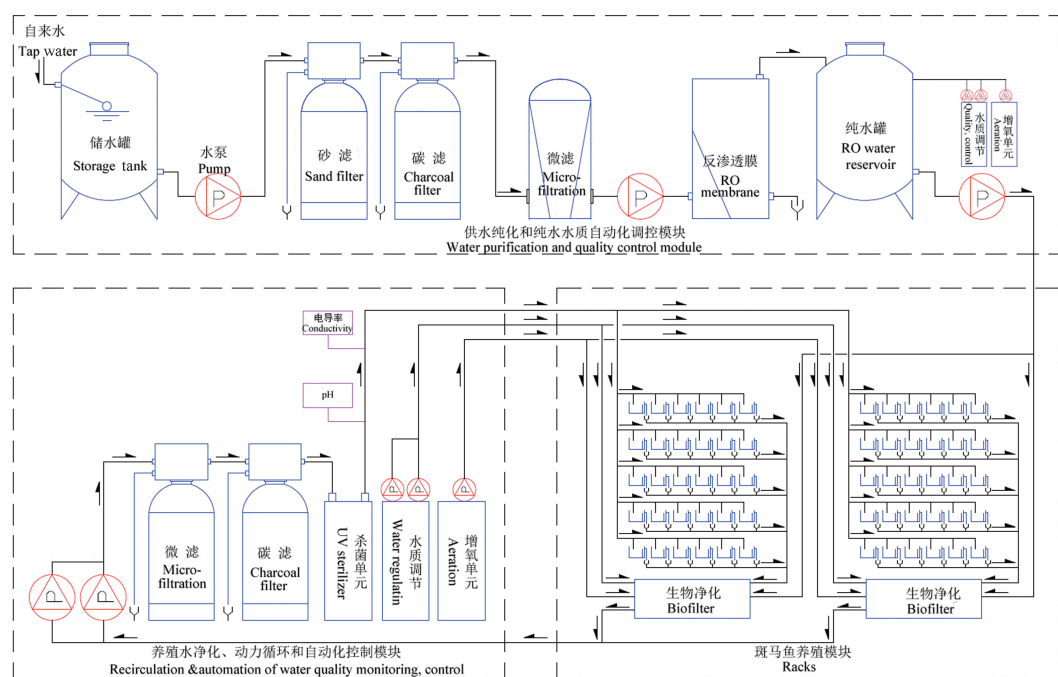


图 1 大型斑马鱼中央循环系统结构图

Figure 1 Schematic structure of zebrafish central circulation system

1.1 供水纯化模块

斑马鱼养殖用水来源于市政供水。自然界水源经过沉淀、过滤、消毒杀菌等工艺处理后达到国家生活饮用水标准^[17-18]。市政生活饮用水含有微量的无机物、有机物、微生物等杂质^[19]。对斑马鱼生长繁殖存在潜在的不利影响。供水纯化模块通过物理过滤(微滤棉和石英砂)、活性炭吸附和反渗透膜过滤,可对市政饮用水进行二次纯化,去除水中可能含有的泥沙、铁锈、细菌、悬浮物、藻类、微量重金属元素,和大分子有机物等多种有害物质。经过供水纯化模块纯化后的水质达到如下标准^[20]:

脱盐(salt rejection)95%~98%

有机分子截留(organic rejection)>150 MW

除菌(bacteria rejection)99%

除颗粒物(particle rejection)99%

电导率(conductivity)<30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

1.2 纯水水质自动化调控模块

供水纯化模块纯化后的水在温度、酸碱度(pH)、硬度和渗透压等方面不适宜于斑马鱼的生长繁殖,需要经过纯水水质自动化调控模块的调整。使水质符合斑马鱼生长繁殖的要求。水质调控模块是利用工业自动化的技术实现水质的调控。具有自动化、数字化和程序化等功能。用户根据斑马鱼养殖需要,编写或修改水质调控模块。模块会按照用户所上载的程序,自动调整纯水的温度、pH、溶氧度、渗透压和硬度等。同时,水质调控模块具有实时在线检测水体的温度、pH、溶氧度、渗透压和硬度等水质参数的功能。用户可以通过互联网远程登陆访问纯水水质自动化调控模块。

1.3 斑马鱼养殖水净化模块

食物残屑和斑马鱼排泄物是引起斑马鱼养殖系统水质恶化的主要原因。养殖水体中的氨氮是导致斑马鱼疾病和死亡的主要化合物。水体中的有机废物的不仅导致细菌的大量滋生,而且会导致水体中氨氮浓度的升高,以及溶氧度和 pH 的降低^[21]。斑马鱼养殖水净化模块通过物理、化学和生物的方法,有效地去除养殖水体中的颗粒悬浮有机废物和可溶性物质,降低氨氮浓度,以及抑制水体中细菌大量滋生,具有净化养殖水质的功能。该模块按结构和功能包括物理过滤单元、生物净化单元和杀菌抑菌单元。

1.3.1 物理过滤单元

物理过滤单元可以有效地去除养殖水体中的

悬浮颗粒及其它有害废弃物。该单元由固定过滤筛和活性炭过滤筛组成。在斑马鱼养殖中,鱼类的粪便及其所食饵料的 20%~60%最终以固体废弃物的形式进入养殖循环水体中。其中,约一半以上是悬浮性固体颗粒物,是养殖水体污染物的主要来源。固定过滤筛网能够有效过滤水体中直径 $\geq 50 \mu\text{m}$ 的固体颗粒。活性炭过滤筛能够有效地将养殖水体中的可溶性有机杂质吸附到活性炭颗粒内,从而达到去除有机物质的目的。但是,活性炭的吸附能力会随着使用时间不同程度地减弱,吸附效果也随之下降。养殖水质混浊,有机物含量高,则活性炭短时间内丧失过滤功能。活性炭颗粒的大小对吸附能力也有影响,活性炭颗粒越小,吸附表面积就越大。粉末状的活性炭总面积最大,吸附效果最佳。然而,粉末状的活性炭易随水流入水族箱中,难以控制,很少采用。颗粒状的活性炭因颗粒成形不易流动,水中有机物等杂质在活性炭过滤层中也不易阻塞,其吸附能力强,已广泛地应用于斑马鱼循环养殖系统。

1.3.2 生物净化单元

斑马鱼养殖过程中,所产生的的氨氮可以通过生物净化单元,即生物膜反应器去除。在溶氧充足的水体中,有机废物在氨化细菌的作用下,进行有机氮化合物的脱氨基作用,生成氨态氮,即氨化作用;氨氮在亚硝化单胞菌和硝化单胞菌的作用下,使氨氮转化成亚硝酸盐再转化成硝酸盐的过程,即硝化作用^[22]。目前,常用的脱氨方法是在生物过滤器上附着生物膜进行脱氨。生物膜是一稳定的、多样的微生物生态系统。悬浮于液相中的有机污染物及微生物移动并附着在载体的表面上;然后附着在载体上的微生物对有机物进行降解,并发生代谢、生长、繁殖。生物膜反应器分为固定床和流化床两类。斑马鱼循环养殖系统中最常用的是固定床生物滤器。在固定床中生物膜载体固定不动,在反应器内的相对位置基本不变;在流化床中生物膜载体不固定,在反应器内处于连续流动的状态。

1.3.3 杀菌单元

斑马鱼循环养殖系统通常使用紫外灯杀菌。紫外灯发射波长在 200~300 nm 范围的紫外线,都有杀菌能力。其中以 265~266 nm 的杀菌力最强,在波长一定的情况下,紫外线的杀菌效率与强度和时间的乘积成正比。可以穿透细菌的细胞膜,被细胞核吸收,对细菌 DNA 造成损伤,抑制了 DNA 的复

制,破坏了菌体的繁殖能力,从而达到了杀菌的目的。但是紫外线杀菌需要穿透水层才能起作用,因为污水中的悬浮物、浊度等都会干扰紫外光的传播。所以养殖水的水质是保证紫外线消毒的先决条件^[23]。

1.4 养殖水动力循环模块

养殖水动力循环模块能够为斑马鱼养殖水体的循环提供基本的动力。该模块核心组件循环水泵采用三相电驱动,能够为养殖水在系统内周而复始地循环提供动力。大功率循环水泵(>15 kw)在启动过程中,会对电控网产生冲击,同时出现水锤效应,易损坏养殖系统和缩短系统的寿命。因此,循环水泵的启动一般采用软启动、降压启动或者变频启动多的方式,避免对系统产生不利影响^[24]。动力循环模块在结构设计上需采用水流旁路,能够在不关闭主水泵情况下进行系统维护(例如更换 UV 灯管,清洁 pH 探头和更换过滤器等);循环水泵提供的水循环速率应满足每个养殖缸的水被更换次数不少于每小时 5 次;该模块宜采用双循环水泵,一用一备。在主水泵不能工作时,备用水泵能够立刻自动工作;循环水泵有减震设计。

1.5 自动化养殖安全模块

自动化养殖安全模块利用现代工业自动化技术为斑马鱼养殖提供适宜的生长环境,是斑马鱼养殖健康和安全的核心模块。水质调控单元具有实时监测和调控斑马鱼养殖水的理化性质。调控的基本项目有:溶氧量、盐度、温度、pH 值。保证这些水质指标都控制在养殖对象的适应范围内。一般要求斑马鱼养殖水体的溶氧不低于在 6.0 mg/L 之间,pH 值在 7~8 之间,电导率在 500~800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。养殖系统对于以上指标应能够实时自动监测,发现某个指标异常,须即时自动调整。同时,该模块具有实时监控报警功能。当养殖系统中仪器不能正常工作,或者养殖系统水质超出设定范围时,能够自动报警;当养殖系统中仪器不能正常工作时,自动化控制单元能够自动启动备用仪器。

1.6 斑马鱼养殖模块

斑马鱼养殖模块主要包括斑马鱼养殖架和养殖缸。养殖架的制作采用坚固和耐腐蚀 316 L 材质不锈钢。架体底部设计有水平调节的底脚调节螺丝。机架可根据斑马鱼房地面坡度进行调节;养殖架整体及各层都能实现养殖水流量控制。给排水管道(含阀门)易于维修和更换。

斑马鱼养殖缸多采用优质塑料(例如聚碳酸酯,聚砜树脂)一次性注塑成型,耐高温($\leq 121^\circ\text{C}$)消毒,抗摔性强。缸体为无色透明,盖板及插板为蓝色。盖板表面有喂食孔、水管卡孔。插板与养殖槽底部留有缝隙,缸底的有机沉淀物可有效地通过虹吸作用被清除,避免缸内水质腐化,危害斑马鱼生长。针对斑马鱼不同的生长阶段,养殖缸配备相应的插板。当养殖斑马鱼幼鱼时,需要使用不同孔径的幼鱼插板。幼鱼专用插板底部与水槽贴合无缝隙,水流从幼鱼专用插板的尼龙滤网处流出,防止幼鱼被水流冲走。每个养殖缸的供水单独可控;每排养殖缸的供水单独可控。

2 斑马鱼鱼房的规划设计

2.1 斑马鱼房选址

斑马鱼房选址应避开自然疫源地;宜环境安静,远离铁路、码头、飞机场、交通要道等有严重震动或噪声污染的区域;宜环境空气质量较好,远离散发大量粉尘和有害气体的工厂、仓库、堆场;应远离易燃、易爆物品的生产和储存区,并远离高压线路及其设施;宜建设在建筑物的底层。

2.2 斑马鱼房基础设施的建筑要求

货物出入口应设置坡道或卸货平台,坡道坡度不应大于 1/10。应充分考虑空调机、通风机等设备的面积需求,并对噪音和震动进行处理。楼层在二层以上的斑马鱼房设施宜设置货梯。楼梯宽度不宜小于 1.2 m,走廊净宽不宜小于 1.5 m,门宽度不宜小于 1.0 m,高度不低于 2.1 m。楼层高不宜小于 3.5 m。室内净高不宜低于 2.4 m,并应满足设备对净高的需求。

墙面和顶棚的材料应易于清洗消毒、耐腐蚀、不起尘、不开裂、无反光、耐冲击、光滑防水,防霉。地面要求防水处理,且地面整体向地漏处倾斜。地面材料应防滑、耐磨、耐腐蚀、无渗漏,踢脚不应突出墙面。潮湿地区的地面垫层应做防潮构造。斑马鱼养殖区地面承重荷载不小于 650 kg/m^2 。地面设置地漏或排水沟,且应做防水处理。房门宜为防潮门,应有良好的密闭性和不透光。封闭斑马鱼养殖区域的窗户,保证养殖区统一的光周期。应有防止昆虫、鼠等动物进入的措施。斑马鱼养殖区安装防潮,耐腐蚀实验台面。

2.3 斑马鱼鱼房结构设计规划

斑马鱼鱼房的规划设计与斑马鱼养殖系统有

机整合,确保其正常运行及保证各项指标符合相关要求。如图 2 所示,斑马鱼房规划设计应包括外源斑马鱼检疫隔离养殖区、斑马鱼内部养殖区、养殖系统电气设施区(设备间)和显微注射区等重要的功能区域。

2.4 外源斑马鱼检疫隔离养殖区

斑马鱼鱼房建设之初以及在日常运行过程中,需要从其它斑马鱼鱼房引进斑马鱼鱼种。这类外源的斑马鱼可能携带导致鱼病的微生物或者病毒,对鱼房内部养殖的斑马鱼健康造成安全隐患。因此,外源斑马鱼或者胚胎严格养殖在检疫隔离区。外源斑马鱼繁殖的胚胎经消毒和病原菌检测合格后^[25],可以转移至斑马鱼内部养殖区。检疫隔离区在空间上完全与斑马鱼内部养殖区隔离。同时,隔离区内的斑马鱼养殖系统也严格与内部养殖区隔离,不共用养殖水和所有养殖用品,防止鱼病扩散。

2.5 斑马鱼内部养殖区

斑马鱼内部养殖区用于斑马鱼的集中饲养及繁殖的区域,是鱼房核心养殖区。该区域又可以细分为成年斑马鱼养殖区,斑马鱼幼鱼养殖区和斑马鱼食物准备区。斑马鱼养殖架的放置间距不下于 700 mm。配套有实验台面及大容积水槽。墙壁加装置物架,便于存放养殖用品。房间要求温度维持在 26℃~29℃。室内照明自动化控制,且具有通风换气系统。根据斑马鱼的生长特性,对于未性成熟(<3 个月)的斑马鱼幼鱼,可以集中放置在内部养殖区统一区域养殖。丰年虫是斑马鱼养殖中常用的饵料。一般以休眠卵的方式存储。在使用前,需要在适宜的温度(不低于 28℃),爆气和连续光照的

条件下孵化,收集孵化的丰年虫后,喂食斑马鱼。丰年虫孵化器的遮光,避免自带照明系统干扰斑马鱼内部养殖区的光周期。

2.6 养殖系统电气设施区(设备间)

温湿度对电气自动化设备的影响大。高温潮湿环境易导致设备受潮生锈,设备短路和跳闸等现象发生,严重的会使设备损坏,降低设备使用寿命^[26]。斑马鱼养殖系统包括大量的电气设备,均需要放置在干燥低温的环境下。因此,养殖系统电气设施区(设备间)要与斑马鱼养殖区物理隔离,避免养殖区恒温潮湿影响电气组件运行安全和寿命。设备间室温不高于 25℃ 为宜,便于大功率电气组件散热。另外,由于霉菌等在温度 25℃~30℃,环境湿度 75%~95%的环境下,会大量滋生,造成绝缘材料的击穿,霉菌会分泌一种酸性物质,能够与绝缘材料发生化学反应,进一步降低设备的绝缘性能。设备间相对湿度不高于 60%。可根据现场情况,加装抽湿机和通风换气系统。保证斑马鱼养殖系统的安全运行。

3 斑马鱼鱼房室内配套工程

3.1 斑马鱼房温控系统和通气换气系统

温控系统的设计应充分考虑斑马鱼房所在地的自然气候。能够维持养殖区域温度在 25℃~29℃ 间。对于冬季气温过低的城市,可考虑安装辅助加热设施,例如燃气取暖等,保证养殖区域温度维持在 25℃~29℃ 间。温控系统的安装便于日常的维修工作。宜自动控制功能和节能运行。其中,空调设备等具有抽湿功能。通气换气系统具除尘净化、除



图 2 斑马鱼鱼房建设平面规划图(中国国家斑马鱼资源中心鱼房结构图)
Figure 2 Layout of zebrafish facility (Layout of China Zebrafish Resource Center)

湿(湿度不高于 70%)功能。具有自动控制功能和节能运行。换气效率 10~15 倍养殖区域体积/小时。通风换气系统所铺设的管道应防潮和耐腐蚀。斑马鱼检疫隔离区域应安装有独立的温控系统和通风换气系统。

3.2 给排水系统

3.2.1 给水

供水应符合国家标准 GB 5749《生活饮用水卫生标准》的要求。给水管道,应选用不生锈、耐腐蚀和连接方便可靠的管材。管道外表面可能结露时,应采取有效的防结露措施。管径 DN25,供水量宜大于 $4\text{ m}^3/\text{h}$,水温 $15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$,供水压力大于 0.1 Mpa,小于 0.4 Mpa;接口设置阀门。斑马鱼检疫隔离区域应独立给水。

3.2.2 排水

净水供水单元设备排水地漏 DN80,最大排水量大于 $4\text{ m}^3/\text{h}$ 。循环单元排水地漏 DN50,最大排水量大于 $2\text{ m}^3/\text{h}$ 。养殖单元排水地漏 DN50,最大排水量大于 $2\text{ m}^3/\text{h}$ 。给水管道应选用不生锈、耐腐蚀和连接方便可靠的管材。斑马鱼检疫隔离区域排水宜与建筑生活排水分开设置。排水管道应采用不易生锈、耐腐蚀的管材。

3.3 电气

配电:斑马鱼鱼房养殖区域用电负荷不宜低于 2 级,宜设置备用电源。总供电在配电时应考虑用电平衡,空调供电、水体循环单元设备供电、插座供电每一路供电安装独立的断路器。斑马鱼养殖区所使用的开关、插座、空开和配电箱等设备的安全等级不低于 IP65。设置专用配电柜,配电柜宜设置在通风干燥的房间。如供电电压/电流不稳定,宜加装稳压设备。斑马鱼养殖区域设施的电气管线应暗敷,设施内电气管线的管口,应采取可靠的密封措施。配电管线宜采用金属管,穿过墙和楼板的电线管应加套管,套管内应采用不收缩、不燃烧的材料密封。水体循环单元设备供电设 $380\text{ V}(\pm 5\%)$, 50 Hz。三相五线制电源,线径不小于 10 mm^2 ;安装四极漏电保护断路器,零线排、地线排。净水供水单元设备供电设 $380\text{ V}(\pm 5\%)$, 50 Hz。三相五线制电源,线径不小于 10 mm^2 ;安装四极漏电保护断路器、地线排、零线排。独立养殖单元供电 $220\text{ V}(\pm 5\%)$, 50 Hz, 10 A 插座。食物培养器供电 $220\text{ V}(\pm 5\%)$, 50 Hz 10 A 插座。

3.4 照明

照明灯具应采用密闭洁净灯,安全等级不低于 IP65。斑马鱼养殖区照明系统可自动化控制,可定时开关独立控制。安装应急照明系统。

3.5 消防

新建斑马鱼鱼房建筑的周边宜设置环形消防车道,或必须沿建筑的两个长边设置消防车道。基础设施的耐火等级不应低于二级,或设置在不低于二级耐火等级的建筑中。斑马鱼房吊顶空间较大的区域,其顶棚装修材料应为不燃材料且吊顶的耐火极限不应低于 0.5 h。吊顶内可不设消防设施。应设置火灾事故照明。疏散走道和疏散门均应设置灯光疏散指示标志。火灾事故照明和疏散指示标志可采用蓄电池作备用电源,但连续供电时间不应少于 20 min。宜设火灾自动报警装置。不应设置自动喷水灭火系统。斑马鱼养殖区宜配置对斑马鱼无毒和对养殖设备无损害的灭火设备。应设置消火栓系统且应保证两个水枪的充实水柱同时到达任何部位。

4 结论与展望

综上所述,在斑马鱼鱼房建设之初,需要充分考虑斑马鱼养殖系统和基础设施的特点。根据斑马鱼养殖系统的结构性能,合理规划设计与之相配套的鱼房结构和室内配套装修工程,从而使斑马鱼系统与基础设施有机整合。保证设施良性稳定运转、为实验用斑马鱼质量和实验活动开展所需要的支撑保障条件。同时,斑马鱼鱼房的标准化建设将会促进斑马鱼实验动物化的发展,推动斑马鱼科学研究的蓬勃发展。

参考文献:

- [1] Vargas RA, Sarmiento K, Vásquez IC. Zebrafish (*Danio rerio*): a potential model for toxicological studies [J]. Zebrafish, 2015, 12(5): 320-326.
- [2] Holtzman NG, Iovine MK, Liang JO, et al. Learning to Fish with Genetics: a primer on the vertebrate model *danio rerio* [J]. Genetics, 2016, 203(3): 1069-1089.
- [3] Grunwald DJ and Eisen JS. Headwaters of the zebrafish - emergence of a new model vertebrate [J]. Nat Rev Genet, 3(9): 717-724.
- [4] Search for labs. ZFIN [EB/OL]. [2020-05-11]. <http://zfin.org/action/profile/lab>.
- [5] Lamason RL, Mohideen MA, Mest JR, et al. SLC24A5, a putative cation exchanger, affects pigmentation in zebrafish and humans [J]. Science, 2006, 310(5755): 1782-1786.

- [6] Randall DJ, Tsui TKN. Ammonia toxicity in fish [J]. Mar Pollut Bull, 2002, 45(1-12): 17-23.
- [7] McClure MM, McIntyre PB, McCune AR. Notes on the natural diet and habitat of eight danioin fishes, including the zebrafish *Danio rerio* [J]. J Fish Biol, 2006, 69(2): 553-570.
- [8] Brand M, Granato M, Nüsslein-Volhard C. Keeping and raising zebrafish. In: Nüsslein-Volhard, C, Dahm, R (Eds.), Zebrafish: a practical approach [M]. Oxford: Oxford University Press; 2002.
- [9] Chen YY, Lu FI, Hwang PP. Comparisons of calcium regulation in fish larvae [J]. J Exp Zool A Comp Exp Biol, 2003, 295(2): 127-135.
- [10] Sawant MS, Zhang S, Li L. Effect of salinity on the development of zebrafish *Brachydanio rerio* [J]. Curr Sci, 2001, 81(10): 1347-1350.
- [11] Helfman GS, Collette B, Facey DE, et al. The diversity of fishes [J]. Copeia, 1998, 1998(2): 536-538.
- [12] Sales J, Janssens GPJ. Nutrient requirements of ornamental fish [J]. Aquat Living Resour, 2003, 16(6): 533-540.
- [13] Carvalho AP, Araujo L, Santos MM. Rearing zebrafish (*Danio rerio*) larvae without live food: evaluation of a commercial, a practical, and a purified starter diet on larval performance [J]. Aquac Res, 2006, 37(11): 1107-1111.
- [14] Pullin RSV, Lowe-McConnell RH. The biology and culture of tilapias. The International Center for Living Aquatic Resources Management (ICLARM) Conference Proceedings [C]. ICLARM, Manila, Philippines, 1982. 7.
- [15] Kim S, Carlson R, Zafreen L, et al. Modular, easy-to-assemble, low-cost zebrafish facility [J]. Zebrafish, 2009, 6(3): 269-274.
- [16] McNabb A, Scott K, Ochsenshtein EV, et al. Don't be afraid to set up your fish facility [J]. Zebrafish, 2012, 9(3): 120-125.
- [17] 麦智强. 关于市政供水水处理技术的研究 [J]. 科技创新导报, 2013, 16: 128.
- [18] 中华人民共和国卫生部. 生活饮用水卫生标准 GB5749-2006 [S]. 2006.
- [19] 郑和辉, 卞战强, 田向红, 等. 中国饮用水标准的现状 [J]. 卫生研究, 2014, 43(1): 166-169.
- [20] Wimalawansa SJ. Purification of contaminated water with reverse osmosis: effective solution of providing clean water for human needs in developing countries [J]. Int J Emerg Technol Adv Eng, 2013, 3(12): 75-89.
- [21] Buttner JK, Soderberg RW, Terlizzi DE. An introduction to water chemistry in freshwater aquaculture [J]. NRAC Fact Sheet, 1993, 170: 1-4.
- [22] Meiklejohn J. The nitrifying bacteria: a review [J]. Eur J Soil Sci, 2006, 4(1): 59-68.
- [23] Gibson J, Drake J, Karney B. UV disinfection of wastewater and combined sewer overflows. In: Ahmad S. (eds) Ultraviolet light in human health, diseases and environment. advances in experimental medicine and biology [M]. Springer Cham, 2017, 996: 267-275.
- [24] 刘亮喜. 工业循环水泵高压变频调速节能应用实例 [J]. 上海节能, 1996, 5(6): 10-13.
- [25] Kent ML, Buchner C, Barton C, et al. Toxicity of chlorine to zebrafish embryos [J]. Dis Aquat Organ, 2014, 107(3): 235-240.
- [26] 于昊颖, 陈虎顺. 电气自动化控制设备的可靠性 [J]. 电子技术与软件工程, 2017, 20: 114.

[收稿日期] 2019-12-04