

鱼菜共生立体高效生产系统研究进展

刘星, 刘艳, 虎治军, 穆晓国, 周娟, 高登国, 薛小龙, 叶林* (宁夏大学农学院, 宁夏银川 750021)

摘要 鱼菜共生系统是多学科交叉融合的一种循环水种养模式, 是基于自然生态循环理念为基础, 将水产养殖和水耕栽培有机结合的复合型生产系统, 该技术不仅是一种高效生产技术, 而且也是绿色的生态型农业技术。鱼菜共生整个系统呈现立体状态, 在同一空间、不同层次, 高效产出 2 种产物, 更符合现代农业集约高效的需求, 随着该技术的日趋成熟, 逐步向植物工厂、家庭园艺、城市景观及休闲农业中扩展和应用。针对鱼菜共生系统的概念、国内外研究现状、鱼菜共生立体生产系统类型、特点及应用前景等方面进行了简要概述, 同时, 针对鱼菜共生系统目前存在的问题, 提出解决对策, 为鱼菜共生技术现代农业发展提供科学参考。

关键词 鱼菜共生系统; 研究现状; 类型; 特点; 应用前景

中图分类号 S964.9 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)15-0014-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.15.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress of Symbiotic Three-dimensional and Efficient Production System of Aquaponics

LIU Xing, LIU Yan, HU Zhi-jun et al (School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021)

Abstract Aquaponics system is a kind of recirculating water cultivation model with interdisciplinary integration. It is a compound production system that organically combines aquaculture and hydroponics and cultivation based on the concept of natural ecological circulation. This technology is not only an efficient production technology, but also a green ecological agriculture technology. The whole aquaponics system presents a three-dimensional state, producing two products efficiently in the same space at different levels, which is more in line with the intensive and efficient requirements of modern agriculture. With the gradual maturity of this technology, it is gradually extended and applied to plant factories, home gardening, urban landscape and leisure agriculture. This paper gave a brief overview of the concept, research status at home and abroad, types, characteristics and application prospects of the aquaponics system. At the same time, it proposed solutions to the existing problems of the aquaponics system, so as to provide scientific reference for the development of modern agriculture of aquaponics system technology.

Key words Aquaponics system; Research status; Types; Characteristics; Application prospects

全球人口迅速增长, 不仅使粮食安全面临巨大压力, 同样也使动物蛋白质的需求量逐步增加, 而作为主要动物蛋白之一的水产品, 其需求量也大增^[1]。随着我国社会经济的不断提高, 人们对饮食的要求趋向健康化、营养化, 消费方式也从数量导向型转向质量导向型, 水产品因其具有较高的营养价值和特殊的健康功能, 被越来越多的消费者所选择, 促使水产品在我国膳食结构比例中的位置逐渐提高^[2-3]。受供求关系的影响, 水产养殖业迅猛发展, 生产者一味地追求产量从而忽略了生态问题, 大量的养殖废水未经有效处理, 直接排放到环境中, 严重污染了生态环境^[4]。将鱼类养殖和蔬菜栽培相结合的鱼菜共生立体模式, 不仅具有高效的特点, 还具有绿色健康和可持续的特点, 近年来, 随着鱼菜共生系统的发展, 研究方向也从实现商业化运营向鱼菜共生系统设备在家庭园艺和城市景观中的应用转变。笔者针对鱼菜共生系统的概念、国内外研究现状、鱼菜共生系统类型、特点、应用前景等进行了简要概述, 同时, 针对鱼菜共生系统目前存在的问题, 提出解决对策, 为我国鱼菜共生技术及现代农业发展提供科学参考。

1 鱼菜共生系统的概念

鱼菜共生系统是多学科融合的一种循环水产养殖新模式, 是基于自然生态循环理念为基础, 将水产养殖和无土栽

培互利结合的复合型生产系统, 同时也是具有绿色健康、可持续性等特点的生态型农业技术^[5-7]。鱼菜共生系统主要原理是鱼类消化鱼饲料产出排泄物以及残留饲料, 在养殖水体中产生氨氮, 通过需氧微生物将氨氮先转化为亚硝酸盐, 此时的亚硝酸盐对鱼类具有毒性, 亚硝酸盐再通过好氧微生物, 最终转化成植物可以吸收利用的硝酸盐, 此时的硝酸盐对鱼类毒害最弱, 水体中的硝酸盐被植物通过固氮作用同化吸收后, 再作为养殖水体循环流入鱼池使用, 形成鱼菜共生的氮循环, 由此产生了营养物质再循环的鱼菜共生系统^[8-9]。鱼菜共生系统与作为 2 个独立系统运行时不同, 将水产养殖和无土栽培相结合, 水下水上不同层次整个系统呈现立体状态, 在有限的空间里, 这种组合实质上最大限度地减少了对养分的输入以及废物的输出, 相对于单一的种养而言, 同样的养分输入, 同样的空间, 通过整个系统立体的生产模式, 却可同时高效生产出 2 种经济产物。

2 鱼菜共生系统的国内外研究现状

鱼菜共生系统虽然在近几年变得很流行, 但是传统的鱼菜共生早在 1 500 多年前在农耕社会生产中就已经存在, 例如在中国南方以及东南亚等地区的稻田养鱼、桑基鱼塘等养殖模式, 都是在依托当地环境资源自然条件下形成的生态循环养殖模式^[10-14]。鱼菜共生系统的研究始于 20 世纪 70 年代, 其相关研究非常广泛, 过去 30 年来, 大量科研人员对鱼菜共生的结合种类以及试验方案的设计进行了反复研究^[5]。20 世纪 70 年代, 现代鱼菜共生最早出现在美国, 科研人员将养殖罗非鱼的养殖废水, 用来灌溉沙地番茄床, 这是第一个鱼菜共生系统^[15-17]。20 世纪 80 年代中期, 北卡罗莱纳州立

基金项目 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2018BBF02009, 2019BBF02005, 2018BBF03001); 宁夏自然科学基金项目(NZ17012)。

作者简介 刘星(1996—), 女, 陕西汉中, 硕士研究生, 研究方向: 设施园艺与蔬菜逆境生理生态。*通信作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事设施园艺与蔬菜逆境生理生态研究。

收稿日期 2020-12-31

大学的 Mark McMurtry 博士开发了鱼菜共生系统 (the North Carolina State University System, 简称 NCSU 系统)^[18]。90 年代末,国际学术界提出了“*Aquaponics*”一词,即现代鱼菜共生技术,并沿用至今。目前现代鱼菜共生项目已遍布全球 40 多个国家或地区^[19]。

丁永良等^[20]通过对鱼菜共生系统的水质和环境等相关研究,明确了鲫鱼和茼蒿可以构建鱼菜共生系统。张明华等^[9]探索了不同阶段系统中氨氮、酸碱度、溶解氧、温度等因子对鱼菜共生系统的影响。蔡淑芳等^[21-22]研究了鱼菜共生系统中不同植物密度对氮素转化、水质和鱼菜生长的影响。邹艺娜等^[23]研究了鱼菜共生系统中氮素迁移转化和优化,结果表明,鱼菜共生系统中的氨氮在微生物的作用下转化成亚硝酸盐和硝酸盐,被植物吸收利用,提高了氮的利用效率。饶伟等^[8]对鱼菜共生系统水体溶解氧时空变化规律及其影响因素进行了研究,研究结果为鱼菜共生系统溶解氧研究提供了一定的理论依据。丁小涛等^[24]研究表明生态水培技术是结合水产养殖和水培种植蔬菜特点的一种资源节约、环境友好、可循环的生产模式,符合低碳农业和可持续发展的规律。宋红桥等^[25]在水培植物净化对循环水养殖系统研究中表明,水培植物是循环水养殖系统净水技术的选择方向之一。王兴等^[26]研究鱼腥草生态浮床,结果表明,水环境的改善使鱼菜精养模式下的吉富罗非鱼表现出较高的消化能力,可以适当地增加投喂量或投喂次数,以获得高产。刘爽等^[27]则具体详细地概括了现代鱼菜共生技术研究进展与展望,为我国鱼菜共生技术发展提供了科学参考。徐琰斐等^[28]则详细地概括了鱼菜共生系统的发展历史,将发展历史分为理念起源、萌芽、拓展和快速发展 4 个阶段,并提出了多条具有发展意义的建议。邱楚雯等^[29]则从鱼菜共生系统中植物根系微生物及氮转化影响因素等方面进行了研究,重点研究了鱼菜共生系统中根系微生物群落的结构和作用、氮转化的影响因素和微生物群落研究技术手段的研究进展等,并提出了多个有关鱼菜共生系统中植物根系微生物的研究方向。

最近 10 年,鱼菜共生领域的研究一直处于发展的趋势,国外大量科研人员对其进行了研究^[30]。Palm 等^[31]研究了关于鱼菜共生的历史和分类;Junge 等^[30,32]研究了共生系统的种类和技术特性;Lennard 等^[33-34]研究了鱼菜共生系统中鱼类的养殖密度,植物生长所需的营养物质中,至少 80% (通常更多)来源于鱼类排泄物,然而鱼类排泄物的多少取决于鱼类的养殖密度。Villaruel 等^[35]提出在欧洲的鱼菜共生设施中种植多种蔬菜作物,主要作物为叶菜类植物。Liang 等^[36]研究表明随着光照时间的延长和摄食频率的增加,鱼和植物的产量都有所增加。Wilson 等^[37-38]在研究鱼菜比例中提出,在鱼菜共生系统中,植物与鱼类的比例对改善养殖水质以及鱼菜共生系统内营养物质的转化利用起着关键作用;鱼菜比例不合适,将会对鱼菜共生系统营养物质的循环利用造成一定的影响,若比例较高,则会因为水体营养过多,导致系统循环中养分浪费,甚至会产生水体富营养化;若比例较低,则会因为营养物质不足,导致蔬菜和鱼类减产,造成经济效益损

失。Bittsánszky 等^[39-40]研究了鱼菜共生营养动力学和养分需求量;Forchino 等^[41-42]从鱼菜共生系统的可持续性评估方面进行了研究;Goddek 等^[43-44]研究了鱼菜共生系统所面临的挑战;Joly 等^[45-46]研究了鱼菜共生政策需求等方面。Tilley 等^[47]在研究鱼菜共生系统中提出,鱼菜共生同时具有较高的科技含量和较强的自我调节功能,是生态型、集约化的综合性生产模式,是今后农业发展的必由之路。

3 鱼菜共生立体生产系统的类型

整个立体生产系统,根据水上部分蔬菜水培方式的不同,主要类型包括以下几种:

(1)深水栽培式鱼菜共生系统 (deep water culture technique aquaponics)。又称直接漂浮法,蔬菜被固定在如泡沫板定、植板等浮体上,直接放置在养殖水域面上进行水培的一种方法,而水下养鱼。这种方法水量恒定、结构简单、投资较少、便于操作、易于清洁,但需水量大,需额外添加单独的生物滤池以及采取一些保护蔬菜根系的额外措施^[6]。这种模式常栽培叶菜类植物,适用于南方温带地区,与池塘养鱼相结合,一般在室外,光照充足,栽培面积较大,但是易遭受自然灾害,病虫害较多,产量较低。该模式也可在北方温室内进行,室内的鱼菜共生系统环境可控,蔬菜病虫害较少,但投资较南方相比较较大。

(2)基质栽培式鱼菜共生系统 (media bed technique aquaponics)。也叫分离滴灌栽培法。将养殖鱼类产生的养殖废水直接连接到蔬菜栽培容器中,经过由基质固定蔬菜的栽培区吸收过滤后,又循环回到养殖区,形成一个循环的水产养殖系统,基质种类繁多,如陶粒、蛭石、砾石、火山石、麦饭石等都可作为鱼菜共生系统的基质。这种方法拥有大量的微生物群落,生物过滤和固体基质双重过滤,同时生长床中还具有矿化作用。不足之处需要大量重型基础设施组件、投资较大、管道易于堵塞、维护清洁困难等,是目前小型鱼菜共生系统比较流行的一种栽培方法^[43]。这种模式常用于室内,无需考虑环境因子,南北方皆可采用,常栽培果菜类等株形或根系较大的植物。

(3)营养液膜栽培式鱼菜共生系统 (nutrient film technique aquaponics)。这是一种溶液栽培法,该模式一般采用立体式栽培,最大限度地节省了空间。这种模式通常采用 PVC 管作为种植载体,根据蔬菜大小不同,在 PVC 管道上设置了大小不同的小孔,将蔬菜定植在 PVC 管道的小孔里,植物通过根系吸收过滤流入 PVC 管道中营养丰富的养殖废水,供蔬菜生长。这种模式主要用于叶类蔬菜,该系统需要较小的水量、水流恒定、使用方便、维护简单,一般采用植物工厂管理,其出产的经济产物一年四季均可正常上市,经济效益稳定,适合大型的鱼菜共生系统^[48]。

(4)气雾栽培 (aeroponics)。这是近几年逐渐兴起的一种栽培模式,直接将养殖产生的废水经过人工雾化后,喷洒到植物的根系,制作成“A”字型或柱状“蔬菜墙”,既可以做到营养物的二次利用,以达到营养充分吸收的目的,又可以最大程度地做到节省水资源。这种模式也主要用于叶类蔬

菜,基于鱼菜共生的众多优点,鱼菜共生结合气雾栽培将成为未来农业发展的重要方向^[46]。

鱼菜共生系统类型灵活多样,可繁可简,可大可小,生产者可以因地制宜,选择适合的鱼菜共生系统模式。其栽培植物和养殖鱼类也多种多样,可根据不同的需求选择合适的蔬菜品种和鱼类品种,使其产生最大的经济或生态效益。

4 鱼菜共生立体高效生产系统的特点

水产养殖废弃物的处理是具有挑战性的,悬浮污染物可通过沉淀或过滤等物理分离方法进行去除,可是大量溶解在水中的污染物却难以净化。鱼菜共生是为数不多的能够有效去除养殖过程中产生氨氮的技术之一,巧妙地通过植物来去除养殖废水中的污染物。在整个养殖过程中,通过科学指导、良好管理、有效控制,可以做到养鱼不换水、种菜不施肥、防病不喷药,同时双丰收。但是鱼菜共生系统也有一定的弊端,在生产过程中需要注意和解决。

鱼菜共生系统的优势:①占地面积小,通常在有限的空间里,通过合理的设计,做到最大的空间利用;②用水量少,水体循环使用,提高水体利用率,节约水资源;③排放养殖废水废物较少,对环境污染小;④经济效益高,在同一时间和空间,可同时产出2种商品,并且生产过程受外界环境影响较小,生长周期短,可实现周年生产,持续供应市场,产生长期的经济效益;⑤对土地资源要求低,无土壤病害,不存在连作障碍,减少土壤污染;⑥生产过程中省去了中耕、除草、追肥等工作,减少了劳动量,可省去大量劳动力的支出;⑦生态效益好,观赏价值高,整个系统还可做观光旅游和科普教育;⑧鱼饲料的利用率较高,生产过程不喷施任何化肥和农药,生产的商品绿色健康、口感好、品质高^[49]。

鱼菜共生系统的弊端:①整个系统生产过程中不添加任何肥料,系统中的植物可能出现缺素症;②生产过程不能使用化学防治,采用生物防治或物理防治成本较高,植物病虫害控制有一定难度;③较单一的渔业养殖和无土栽培相比,设备较多,一次性投资较大;④系统结构复杂,运行过程中使用水电,一旦发生漏电现象,对鱼对人都会造成严重伤害;⑤整个系统管理需更加仔细认真,一旦任何一个环节出现问题,鱼和菜都将产生巨大损失。

5 应用前景及展望

近年来,发达国家的政策指令越来越严格,其政府采取了一些相应的措施来改善水产养殖对环境污染的情况,这给水产养殖业带来了严重的影响,但是对循环水产养殖系统(RAS)的发展是积极的,大多数发达国家都将该系统作为进一步发展水产养殖可能解决问题的方案和机会之一^[46,48-51]。西方发达国家,近年来都在向生态型的鱼菜共生系统的模式发展和转变,在系统模式和蔬菜配置上也越来越多样化^[52]。

在我国,鱼菜共生系统最早出现在渔业养殖方面,以直接漂浮法为主,将蔬菜直接放置在养殖水域面上进行水培,后期建立鱼菜共生温室以及家庭园艺版鱼菜共生等模式,但大多属于初级阶段。随着人们对绿色无公害农产品的日趋

重视,推动了鱼菜共生系统都市农业的发展,提高了鱼菜共生系统的技术和水平。研究表明,该技术在以后可能朝着2个方向发展:一方面朝着低技术解决方案发展,主要是在发展中国家和爱好者中,例如阳台鱼菜共生、桌面摆件、创意家庭园艺、微景观等;另一方面是发展高效的高科技设施,例如大型植物工厂鱼菜共生系统,主要在发达国家,并与专业或者商业合作伙伴合作^[30]。

Ngo等^[34]研究表明,在水资源有限的地区,将鱼菜共生系统应用于水产养殖系统是可行的,所得结果代表了水产养殖业节约用水的环境观点,也对水产养殖业和获得最低经济支持的农民做出了重要贡献。鱼菜共生系统不仅实现了养殖废水的净化,还使污水中的营养物质再次循环利用,因此被认为是一种可持续性的绿色生产模式^[8]。鱼菜共生在任何阶段都不使用杀虫剂或抗生素,鱼体分泌的废液具有抑制菜虫害发生的作用,而植物根系分泌出的有机酸,能有效地抑制鱼病的发生,因此,也被视为有机农业的一部分^[53]。联合国粮食及农业组织在2014年提出详细的鱼菜共生系统比传统农业和渔业更适合当前农业的发展,是今后农业发展的必由之路^[47]。

鱼菜共生系统具有多学科融合、绿色健康、可持续发展、零排放等特征。最近几年,科研人员对鱼菜共生的研究日益增长,包括系统设计、水培组件、养殖鱼类、栽培蔬菜、微生物、经济可行性等方面。虽然鱼菜共生系统受到广泛关注,发展已经较为成熟,并且作为可持续粮食生产系统来说,变得越来越重要。但是,该系统还有许多其他挑战需要解决^[30],在鱼菜共生系统中,关于鱼菜共生系统生产总体可行性的许多关键问题仍未得到解答,今后可以从以下几个方面进行研究:①鱼菜共生系统在户外和热带地区操作简单,生产成本相应较低,但是在室内和干旱地区则需要增加大量支出来稳定共生系统正常运行,可以考虑结合新能源作为系统运行动力来减少开支,并且在鱼菜共生机电设备的基础上,可开发利用相关的智能管控装备和装置,增强系统的“高端化、绿色化、智能化、融合化”,从而增强鱼菜共生系统的可调控性和稳定性。②大量的研究表明,系统内氨氮转换存在一个波动的过程,鱼饲料是该系统唯一的营养来源,同时也是污染水质的来源,改变鱼饲料营养物质的配比,从而改善水质是一个需要解决的挑战,除此以外,还可以采取混养以及轮作的方式,来保证共生系统营养物质的稳定性、水环境的健康性以及商品产出的可持续性。③鱼菜共生系统经济投入和回报一直备受争议,可以尝试将该系统发展名贵花卉和优特观赏鱼类方面,通过提高共生系统的观赏价值和经济价值,从而提高经济回报。并且根据当地的市场条件,鱼菜共生系统需要制定明确的水产品标准以及一套完整高效的供应链,将新鲜的产品送到消费者的餐桌,以帮助建立一个更为成熟的鱼菜共生系统。

参考文献

- [1] 联合国粮农组织. 2018世界渔业和水产养殖现状-续发展目标[R]. 2018.
- [2] 许伟,胡水川. 中国水产品价格波动研究:基于消费棘轮与渔业转型的

- 背景因素分析[J]. 价格理论与实践, 2019(2): 72-75.
- [3] 张珉, 赵露. 中美水产品消费需求对比研究及其启示[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2018(5): 77-84.
- [4] 韩建华. 水产养殖废水污染危害及其处理技术探析[J]. 农业与技术, 2018, 38(12): 103, 156.
- [5] RAKOCY J E, HARGREAVES J A. Integration of vegetable hydroponics with fish culture: A review[M] // WANG J K. Techniques for modern aquaculture. St. Joseph, Michigan, USA: American Society of Agricultural Engineers, 1993: 112-136.
- [6] 宋红桥, 管崇武. 鱼菜共生综合生产系统的研究进展[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(20): 63-65.
- [7] YEP B, ZHENG Y B. Aquaponic trends and challenges-A review[J]. J Clean Prod, 2019, 228: 1586-1599.
- [8] 饶伟, 杨卫中, 位耀光, 等. 鱼菜共生水体溶解氧时空变化规律及其影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(S1): 374-380.
- [9] 张明华, 丁永良, 杨菁, 等. 鱼菜共生技术及系统工程研究[J]. 现代渔业信息, 2004, 19(4): 7-12.
- [10] GODDEK S, DELAIDE B, MANKASINGH U, et al. Challenges of sustainable and commercial aquaponics[J]. Sustainability, 2015, 7(4): 4199-4224.
- [11] 管鲜. 鱼菜共生系统的成本效益研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- [12] 张和顺. 工厂化蔬菜气雾栽培技术[J]. 中国农业信息, 2017(6): 90-91.
- [13] 洋进明. 基于水草共生生态原理的循环流水水产养殖系统植物滤器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [14] 周晴. 清末民国时期珠江三角洲的桑基鱼塘与生态经济环境[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2013, 12(3): 142-150.
- [15] MCMURTRY M R, SANDERS D C, PATTERSON R P, et al. Yield of tomato irrigated with recirculating aquacultural water[J]. J Prod Agric, 1993, 6(3): 428-432.
- [16] MCMURTRY M R, SANDERS D C, CURE J D, et al. Efficiency of water use of an integrated fish/vegetable co-culture system[J]. J World Aquac Soc, 1997, 28(4): 420-428.
- [17] GOODMAN E R. AQUAPONICS: Community and economic development [D]. Arizona: Arizona State University, 2011.
- [18] 蔡淑芳, 刘现, 王涛, 等. 鱼菜共生系统经济可行性研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(5): 5-8.
- [19] LOVE D C, FRY J P, GENELLO L, et al. An international survey of aquaponics practitioners[J]. PLoS One, 2014, 9(7): 1-10.
- [20] 丁永良, 张明华, 张建华, 等. 鱼菜共生系统的研究[J]. 中国水产科学, 1997, 4(5): 70-75.
- [21] 蔡淑芳, 陈永快, 陈敏, 等. 鱼菜共生系统中植物密度对水质及鱼菜生长的影响[J]. 渔业现代化, 2018, 45(5): 19-25.
- [22] 蔡淑芳, 陈敏, 陈永快, 等. 种植密度对鱼菜共生系统氮素转化的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 132-137.
- [23] 邹芝娜, 胡振, 张建, 等. 鱼菜共生系统氮素迁移转化的研究与优化[J]. 环境工程学报, 2015, 9(9): 4211-4216.
- [24] 丁小涛, 张兆辉, 姜玉萍, 等. 鱼菜共生技术在城市家庭中的应用前景[J]. 上海农业学报, 2015, 31(6): 150-153.
- [25] 宋红桥, 管崇武, 李月, 等. 水培植物对循环水养鱼系统的水质净化研究[J]. 渔业现代化, 2013, 40(4): 18-22.
- [26] 王兴, 李文笙, 孙彩云. 鱼菜共生养殖模式对吉富罗非鱼生长和消化酶活性的影响[J]. 广东农业科学, 2017, 44(1): 135-142.
- [27] 刘爽, 安诗琦, 严子微, 等. 现代鱼菜共生技术研究进展与展望[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(3): 160-166.
- [28] 徐琰斐, 张宇雷, 顾川川, 等. 鱼菜共生发展历史、典型模式与发展趋势[J]. 渔业现代化, 2020, 47(5): 1-7.
- [29] 邱楚雯, 王韩信, 施永海. 鱼菜共生系统中植物根系微生物及氮转化影响因素研究进展[J]. 复旦学报(自然科学版), 2021, 60(1): 124-132.
- [30] JUNGE R, KÖNIG B, VILLARROEL M, et al. Strategic points in aquaponics[J]. Water, 2017, 9(3): 1-9.
- [31] PALM H W, KNAUS U, APPELBAUM S, et al. Towards commercial aquaponics: A review of systems, designs, scales and nomenclature[J]. Aquac Int, 2018, 26(3): 813-842.
- [32] RAKOCY J E, MASSER M P, LOSORDO T M. Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics-integrating fish and plant culture[J]. SRAC publication, 2006, 454: 1-16.
- [33] LENNARD W A. A nutrient dynamic process and the relationship to fish feeds[J]. World Aquac, 2015, 9: 20-23.
- [34] NGO THUY DIEM T, KONNERUP D, BRIX H. Effects of recirculation rates on water quality and *Oreochromis niloticus* growth in aquaponic systems[J]. Aquac Eng, 2017, 78: 95-104.
- [35] VILLARROEL M, JUNGE R, KOMIVES T, et al. Survey of aquaponics in Europe[J]. Water, 2016, 8: 1-7.
- [36] LIANG J Y, CHIEN Y H. Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia-water spinach raft aquaponics system[J]. Int Biodeterior Biodegrad, 2013, 85: 693-700.
- [37] WILSON L. Aquaponic system design parameters; Fish to plant ratios (feeding rate ratios) fact sheets [R]. Victoria, Australia, 2012.
- [38] PAUDEL S R. Nitrogen transformation in engineered aquaponics with water celery (*Oenanthe javanica*) and koi carp (*Cyprinus carpio*): Effects of plant to fish biomass ratio [J/OL]. Aquaculture, 2020, 520 [2020-09-25]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734971>.
- [39] BITTSÁNSZKY A, UZINGER N, GYULAI G, et al. Nutrient supply of plants in aquaponic systems[J]. Ecocycles, 2016, 2(2): 17-20.
- [40] MAUCIERI C, NICOLETTO C, JUNGE R, et al. Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review[J]. Ital J Agron, 2018, 13: 1-11.
- [41] FORCHINO A A, LOURGUIOUI H, BRIGOLIN D, et al. Aquaponics and sustainability: The comparison of two different aquaponic techniques using the Life Cycle Assessment (LCA) [J]. Aquac Eng, 2017, 77: 80-88.
- [42] KÖNIG B, JUNGE R, BITTSÁNSZKY A, et al. On the sustainability of aquaponics[J]. Ecocycles, 2016, 2(1): 26-32.
- [43] GODDEK S, DELAIDE B, MANKASINGH U, et al. Challenges of sustainable and commercial aquaponics[J]. Sustainability, 2015, 7(4): 4199-4224.
- [44] YAVUZCAN YILDIZ H, ROBAINA L, PIRHONEN J, et al. Fish welfare in aquaponic systems: Its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces-A review[J]. Water, 2017, 9(1): 1-17.
- [45] JOLY A, JUNGE R, BARDOCZ T. Aquaponics business in Europe: Some legal obstacles and solutions[J]. Ecocycles, 2015, 1(2): 3-5.
- [46] HOEVENAARS K, JUNGE R, BARDOCZ T, et al. EU policies: New opportunities for aquaponics[J]. Ecocycles, 2018, 4(1): 10-15.
- [47] TILLEY D R, BADRINARAYANAN H, ROSATI R, et al. Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture[J]. Aquac Eng, 2002, 26(2): 81-109.
- [48] HLAVÁČ D, MÁŠLKO J, ANTON-PARDO M, et al. Compound feeds and cereals as potential tools for improved carp *Cyprinus carpio* production[J]. Aquacult Environ Interact, 2016, 8: 647-657.
- [49] BADIOLA M, MENDIOLA D, BOSTOCK J. Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges[J]. Aquac Eng, 2012, 51: 26-35.
- [50] MCHUNU N, LAGERWALL G, SENZANJE A. Aquaponics in South Africa: Results of a national survey[J]. Aquac Rep, 2018, 12: 12-19.
- [51] MARTINS C I M, EDING E H, VERDEGEM M C J, et al. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability[J]. Aquac Eng, 2010, 43(3): 83-93.
- [52] 丁永良, 兰泽桥, 张明华. 工业化封闭式循环水养鱼污水资源化——生态循环经济的典范“鱼菜共生系统”[J]. 中国渔业经济, 2010, 28(1): 124-130.
- [53] RAKOCY J E. The status of aquaponics: Part 2[J]. Aquaculture magazine, 1999, 25: 64-70.

(上接第 13 页)

- [57] MOUTINHO S, PEDROSA R, MAGALHÃES R, et al. Black soldier fly (*Hermetia illucens*) pre-pupae larvae meal in diets for European seabass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles: Effects on liver oxidative status and fillet quality traits during shelf-life[J/OL]. Aquaculture, 2021, 533 [2020-11-20]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736080>.
- [58] 刘馨桢. 视觉系统在亮斑扁角水虻生殖调控中的作用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 8-9.
- [59] 四川中地油科技有限公司. 一种黑水虻成虫用补光灯: CN 201921874640. X [P]. 2020-06-23.
- [60] 河南恩赛姆生物科技有限公司. 一种黑水虻养殖的监测调节一体化装置: CN201920042519. 4 [P]. 2020-04-10.