

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20241024002

http://www.yykxjz.cn/

董宣, 黄健. 生物安保保障水产养殖绿色高质量发展: 回顾与展望. 渔业科学进展, 2025, 46(1): 161–182

DONG X, HUANG J. Ensuring the sustainable and high-quality development of aquaculture through biosecurity: A review and prospects. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(1): 161–182

生物安保保障水产养殖绿色高质量发展: 回顾与展望*

董宣 黄健^①

(海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室(中国水产科学研究院黄海水产研究所)

青岛海洋科技中心海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 农业农村部海水养殖病害防治重点实验室

青岛市海水养殖流行病学与生物安保重点实验室 山东 青岛 266071)

摘要 本文综述了生物安保在水产养殖业中的重要性及其对推动产业绿色高质量发展的作用。生物安保作为一种基于风险分析的战略性综合方法,其核心目标在于防控疫病风险,保障行业健康和可持续发展。文章首先阐述了生物安保的概念和发展历史,讨论了这一概念与生物安全、疫病防控和健康养殖、动物卫生等概念的联系与差别,并提出生物安保、动物卫福和生态干预构成动物卫生三要素,探讨了生物安保体系构建的六大要素和生物安保计划的实施流程。随后,概述了生物安保概念所涉及的关键科学技术问题,介绍了国内外相关科技和政策领域的研究发展现状。接下来,文章讨论了全球和区域性组织在推动水产养殖生物安保战略中的作用,以及不同国家和地区在水产养殖生物安保法规体系构建方面的实践,特别介绍了联合国粮食及农业组织(FAO)和世界动物卫生组织(WOAH)等国际组织重视运用生物安保理念来推动水产养殖的可持续发展。文章进一步讨论了水产养殖企业生物安保分级及其技术内容,以无特定病原(SPF)虾苗培育为例介绍了国外企业生物安保的发展,描述了水产养殖企业生物安保体系构建方法和在对虾育苗场的实践。最后,文章重点指出了中国在水产养殖生物安保方面的挑战和机遇,展望了生物安保战略的发展方向,包括构建国家生物安保中长期发展战略的路线图、强化生物安保相关的研究与教育普及,优先发展种业生物安保,构建高标准生物安保水平上的种业体系,以保障中国水产养殖业的绿色高质量发展。

关键词 生物安保; 水产养殖; 疫病防控; 绿色发展

中图分类号 S966.9 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2025)01-0161-22

疫病的发生与流行是制约养殖业健康可持续发展的主要障碍。除了人们普遍认识到疫病会造成养殖动物的发病死亡和防控成本上升外,近年来,越来越多的病原感染导致养殖动物生长缓慢或停滞(Dong *et al.*, 2021),其危害也造成了严重的生产损失。产业

中滥用药物控制传染性疫病导致微生物抗生素耐药性加剧,像人畜共患病一样,带来了潜在的公共卫生风险(Schar *et al.*, 2021; WHO, 2023)。动物产品中的药物残留也成为食品安全的危害因素,随着养殖废水和废弃物的排放,还造成了环境危害的风险(Wu *et al.*,

* 国家重点研发计划(2023YFD2402200)、泰山学者工程、中国水产科学研究院基本科研业务费(2023TD42)和国家虾蟹产业技术体系(CARS-48)共同资助。董宣, 研究员, Email: dongxuan@ysfri.ac.cn

① 通信作者: 黄健, 研究员, Email: huangjie@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2024-10-24, 收修改稿日期: 2024-10-24

2024)。患病养殖动物及其产品的跨境贸易会因为疫病检疫而受到影响,动物疫病的直接损害及其防控药物在产品中的残留,也让产品的质量受到显著影响,带来巨大的贸易风险(Kappes *et al*, 2023)。养殖动物与野生动物之间的病原交互传播导致病原致病力适应性突变的扩大,还可能引发严重的生态风险(He *et al*, 2022)。所有上述问题导致行业预防开支增加,收益受损,产业面临广泛的负面舆论和投资下降,最终严重制约着养殖业的绿色高质量发展(COFI SCA, 2010)。

中国自古就有“治未病”的理念,就是强调了疾病控制重在预防。约2500年前的《黄帝内经》指出“是故圣人不治已病治未病,不治已乱治未乱,此之谓也。夫病已成而后药之,乱已成而后治之,譬犹渴而穿井,斗而铸锥,不亦晚乎”。这一论述实际上是一种风险管理的意识,超出了通常对特定疫病的防治的概念。采用风险分析的理念对疫病开展防控,就是生物安保(biosecurity)的核心逻辑,目前已经成为国际动物卫生领域推行的重要战略之一(WOAH, 2024a; FAO, 2023a; Subasinghe *et al*, 2023)。多国已通过实施生物安保战略在农业领域取得了显著成就,有效地保障了行业的健康发展,提升了相应产业的国际竞争力。

1 生物安保的概念及其架构

1.1 生物安保的概念

“安保”是指确保系统安全的行动,与“保安”这一侧重于指代安全保障工作人员的含义不同。该词最早出现在中国四大古典名著之一,元末明初罗贯中的《三国演义》第四十三回:“若不待气脉和缓,便投以猛药厚味,欲求安保,诚为难矣”。这里,“安保”是指保全身健康,与现代“保障整体安全”的含义相近,表明中国在明代之前就使用了“安保”这一概念,而且它从一开始就与健康相联系了。

生物安保的概念可以追溯到大约100年前,指在牲畜卫生管理方面的农业实践(Burnette, 2021)。联合国粮食及农业组织(FAO)早期将生物安保定义为一种战略性综合方法,它包括政策和管理框架,旨在分析和管理与人类、动物、植物的生命与健康相关的风险,包括环境风险(FAO, 2007)。这一定义涵盖了食品安全、人畜共患病、动植物疫病、有害生物的入侵、改性活生物体(LMO)及其产品(如转基因生物)的传入和释放、以及外来入侵物种的引入(FAO, 2007)。FAO定义的生物安保范围较广,预防和控制传染病的传播

和发生风险是生物安保的核心领域。近年来,生物安保的概念更多地集中到这一核心领域的应用。世界动物卫生组织(WOAH)对生物安保的定义则专注于动物卫生领域,它指的是为了降低病原传入动物群体、在群体中传播或从群体中释出的风险而采取的一系列管理和技术措施(WOAH, 2024a)。FAO在最新对水产养殖生物安保递进式管理途径(PMP/AB)的发展中,进一步明确了水产养殖生物安保的概念,即采取在企业、地方、行业、国家和国际各层级共同分担公私责任的策略,以成本效益的方式管理病原对水产养殖造成的风险(FAO, 2023a)。这一定义有助于从管理、责任和可操作性的角度更好地理解生物安保。

1.2 生物安保与生物安全的差别

“安保”(security)与“安全”(safety)两个词常被混用,但他们的含义是有差别的。“安全”通常指的是主体自身的保护状态,而“安保”则是指该主体涉及的整个系统的保护状态。例如,在食品安全(food safety)和粮食安全(food security)这两个概念中,食品安全关注的是食物本身的安全问题,而粮食安全则更广泛,它关注的是食物供应对社会安全的潜在影响。在中文语境中,粮食安全常常被理解为主粮的充足性问题,但国际上对food security的理解更为全面,它包括了食物的充足性、可获得性、可利用性和来源稳定性4个维度,覆盖了食物的供应量、安全和营养质量(FAO, 1996)。如果用“食物安保”这样的概念,也许更有利于中文语境对这4个维度的理解。

生物安全(biosafety)是指为了防止意外暴露于生物制剂或其意外释放而采取的封闭原则、技术和做法(WHO, 2020)。这主要关注的是生物材料和微生物自身的安全,这一概念的含义早已被广泛认可(Burnette, 2021)。相比之下,biosecurity在不同领域有着不同的含义。在生物材料领域,它指的是保护和控制生物材料及其相关设备、技能和数据的原则、技术和做法,以防止未经授权的访问、丢失、盗窃、滥用、转移或释放(WHO, 2020)。这与biosafety非常相似,以至于国内有学者将二者的区别解释为被动与主动,或非故意与故意的差异(王子灿, 2006)。然而,新冠疫情的暴发让国际社会意识到了biosecurity在全球卫生中的重要性,并认识到需要通过重新定义这一概念以解决其模糊性(Burnette, 2021)。

在中文语境中,safety和security的混淆在生物安全领域尤为明显,前述生物材料领域中biosafety和biosecurity的难以区分加剧了这种混淆。因此,在中国的预防医学和兽医领域,生物安全变成了一个广

泛的概念, 涵盖了 biosafety 和 biosecurity, 包括微生物对人类或动物的安全性、微生物安全管理、动物卫生、外来物种入侵、转基因生物、生物多样性等方面。中国在 2020 年通过了《中华人民共和国生物安全法》(Biosecurity Law of the People's Republic of China) (http://en.npc.gov.cn.cdurl.cn/2020-10/17/c_703568.htm), 适用范围覆盖了 biosafety 和 biosecurity 两个方面。但生物安全一词的模糊性导致了国际交流中的含义混淆, 它有时被翻译为 biosafety law (Zhou *et al*, 2023), 有时为 biosafety/biosecurity law (Cao, 2021), 这在学术和国际交流中造成了混乱。这种混淆可能导致公众对疫病防控策略误解, 带来不当的政策导向、社会舆论和国际争端, 在应对新冠疫情中表现尤甚 (http://us.china-embassy.gov.cn/eng/zmgxss/202111/t20211107_10445198.htm) (Ahmad *et al*, 2020; Shi *et al*, 2021; Al Shehri *et al*, 2022; Rutjes *et al*, 2023)。

与生物安全概念上的混淆不同, 生物安保仅特指 biosecurity。根据上述 FAO 或 WOA 的定义, 生物安保不涉及微生物或生物材料对人类或动物的安全性及其安全管理, 而是关注生物的安全性对整个系统的风险, 在畜禽和水产领域特指动物卫生。区分生物安全和生物安保有助于避免将养殖场的生物安保分级与高致病性微生物实验室的生物安全分级混淆, 例如区分生物安保 4 级种苗场与生物安全 IV 级实验室。

FAO 在 2010 年的渔业委员会(COFI)水产养殖分委员会上形成的中文官方文件将 biosecurity 表述为生物安保, 并对其概念和内容进行了详细的说明。中国科学技术协会官方公布的 2020 年中国科技期刊卓越行动计划高起点新刊入选项目名单中, Journal of Biosafety and Biosecurity 入选, 这本期刊的中文名为《生物安全与生物安保杂志》, 也将 biosecurity 翻译成了生物安保。本文主张在动植物卫生领域用生物安保来表达 biosecurity, 以便将之与生物安全这个在中文语境里含义模糊的概念明确区分出来。

1.3 生物安保与疫病防控和健康养殖的区别

在生物安保概念得到广泛关注之前, 疫病防控早已在医学和养殖业中得到了广泛应用。随着人们对健康的关注, 健康养殖也成为了可持续发展的重要策略。然而, 在动物卫生领域, 生物安保的理念与疫病防控和健康养殖在核心思想上存在显著差异, 这导致了他们解决问题的方法也不尽相同。在核心思路, 疫病防控是围绕疫病主线展开, 健康养殖则以养殖主线为重点, 而生物安保则以风险主线为核心。在应用范围上, 疫病防控和健康养殖主要针对养殖企业, 生物安保则覆盖了从国际到地区、国家、地方乃至企业

的各个层级。在工作对象上, 疫病防控重点关注特定疫病, 健康养殖主要针对特定品种, 而生物安保则涉及整个养殖系统。在最高目标上, 疫病防控旨在有效防病, 健康养殖追求养殖成功, 生物安保则是实现无疫。在实施路线上, 疫病防控是预防为主、防治结合, 健康养殖注重良好养殖操作规范, 生物安保则包括生物安保计划及标准操作规程(SOP)。在效果判断时, 疫病防控依据疫病发生与否及其损害程度, 健康养殖以养殖效益为依据, 生物安保则依据监测计划的实施获得的流行病学数据来评估。在战略战术上, 疫病防控侧重于具体技术的实施, 健康养殖是根据养殖计划选择养殖管理技术措施, 生物安保则强调相关技术措施支持的系统性生物安保策略。在整体性上, 疫病防控一般不强调整体集成, 健康养殖部分强调, 生物安保则高度强调整体集成(表 1)。

总的来说, 生物安保是一种更为全面和系统的风险管理方法, 它不仅包括了疫病防控和健康养殖的元素, 还扩展了更广泛的内容, 涵盖了从宏观到微观的各个方面, 以确保对整个养殖系统的疫病风险实现有效管控。

1.4 生物安保与动物卫生的关系

疫病的发生通常由宿主、病原与环境三大因素相互作用决定, 这一关系可以通过三元模型图(图 1a)直观展示。当易感宿主在适当的环境条件下接触到病原时, 疫病便可能发生(Snieszko *et al*, 1974; Engering *et al*, 2013; Raman *et al*, 2013; Bernardo-Cravo *et al*, 2020; 林鑫等, 2016; 于永翔等, 2023)。这种关系也被称为“疫病三角(disease triangle)”(Stevens *et al*, 1960; Scholthof, 2007), 一种疫病三角的表示方式是用三角形的角表示宿主易感性、病原致病性和环境条件, 在三角形中心疫病的影响最强烈(Stevens *et al*, 1960); 另一种是将三角形的边的长度表示这 3 个因素, 2 条可活动边的交点代表疫病, 交点越远代表疫病程度越重, 这种表示可以一定程度地进行量化分析(Scholthof, 2007)。

尽管这些模型有助于理解疫病发生的因素, 但暗示的没有疫病的“健康”是被动的健康状态。相比之下, “动物卫生(animal health)”是一个更为主动的概念, 它涉及到维护、恢复或提升动物健康状态的各种努力, 预防与控制传染性疫病是其核心内容。

传染性疫病三大因素在具体疫病的发生过程中, 可能由病原的致病性主导, 也可能由宿主易感性主导, 还可能由环境条件主导。生物安保的重点是从控制病原来降低疫病风险, 在动物卫生领域发挥着关键

表1 生物安保与疫病防治和健康养殖的区别

Tab. 1 Differences between biosecurity and disease control and health management

| 属性项目 Attribute items | 疫病防控 Disease control | 健康养殖 Health management | 生物安保 Biosecurity |
|---------------------------------|---|--|--|
| 核心思路 Ideological basis | 疫病主线 Disease based | 养殖主线 Aquaculture based | 风险主线 Risk based |
| 适用范围 Application area | 养殖企业 Farms | 养殖企业 Farms | 国家与企业 Countries and enterprises |
| 工作对象 Target object | 特定疫病 Diseases | 特定品种 Farmed species | 养殖系统 Farm systems |
| 最高目标 Ultimate goal | 有效防病 To prevent disease | 养殖成功 To obtain farmed products | 实现无疫 To achieve disease free status |
| 实施路线 Practical approach | 预防为主, 防治结合 Prevention and treatment of disease | 良好养殖操作规范 Good aquaculture practices | 生物安保计划及标准操作规程 Biosecurity plan and SOPs |
| 判断依据 Criteria for assessment | 发病情况 Disease occurrence | 养殖效益 Farming benefit | 监测计划 Surveillance plan |
| 战略战术 Strategy & technology | 技术性强 Emphasis of technology | 技术+战略 Technology and strategy | 战略+技术 Strategy and technology |
| 整体集成 Holistic integration | 不强调 Not emphasized | 部分强调 Partially emphasized | 高度强调 Highly emphasized |

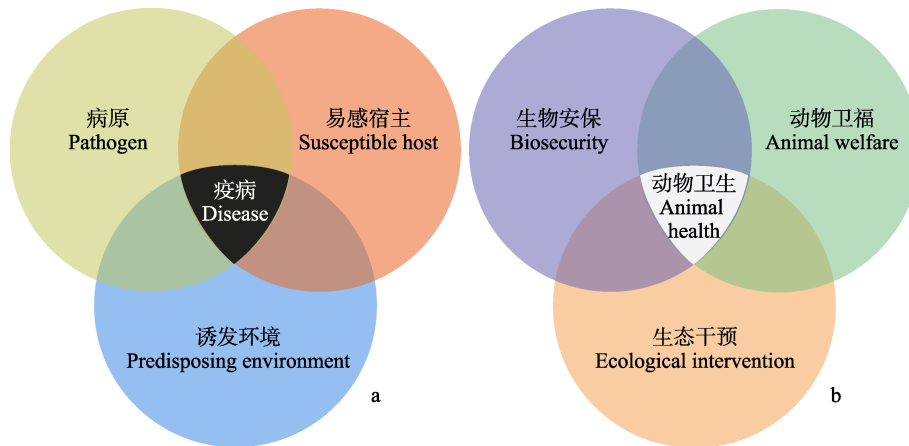


图1 疫病发生的三大因素和动物卫生的三大途径

Fig. 1 The three major factors of disease occurrence and the three major approaches to animal health

a: 疫病发生是由病原、易感宿主和诱发环境的共同作用而导致的结果;

b: 动物卫生是由生物安保、动物卫福与生态干预三大途径综合管理的结果。

a: Disease occurrence results from the interaction of pathogens, susceptible hosts, and predisposing environment; b: Animal health results from comprehensive management of three approaches: Biosecurity, animal welfare, and ecological intervention.

作用(崔治中, 2012; Pinto Jimenez *et al*, 2023)。这包括确定病原的危害程度, 基于成本效益需求评估可控性, 选择有效的控制措施, 有选择性地关注重点病原(Lotz *et al*, 1995; Bondad-Reantaso *et al*, 2022)。针对性地实施监测、风险评估和风险管理措施。这些生物安保措施构成了动物卫生的重要组成部分。

对于因宿主抗病力降低、菌群失调或条件致病菌感染等所致的疾病(孙静等, 2019; Huang *et al*, 2020;

Wang *et al*, 2020), 生物安保措施虽能在一定程度上防控, 但可能效果不理想或付出过高的代价。这时, 提高动物自身的抗病力和改善环境健康水平变得至关重要。

决定人类与动物自身抗病力的要素包括遗传决定因素、饲养条件的舒适性、营养满足性及饲料安全性、应激、遭受的病痛等众多状况, 这些都可归于 welfare, 即“福利”。本文建议将这一概念翻译为“卫

福”, 因为 welfare 的本意是为护卫福祉(well-being)而采取的行动(Lindenmayer *et al*, 2021), 而且福利是经济学术语, 非动物卫生领域的人常常会存在一些理解困难, “卫福”不仅在读音上与 welfare 相近, 而且不含“利”这个误导性的经济学含义, 而是含有“卫”这个卫生学含义, 能暗示“护卫福祉”的直观理解, 符合 welfare 的原意。为了与福利区分, 人类卫福还采用 biological welfare (生物卫福)这一术语(Burnham *et al*, 2023; Shimomura *et al*, 2013), 也能用在所有生物的范围。动物卫福是 WOA 的工作重点之一, 它强调科学地尊重动物, 让其在生存和死亡过程中处于良好的身体和精神状态的行动, 包括“五免”, 即免于饥饿/营养不良与干渴、免于恐惧与痛苦、免于暑寒或身体不适、免于伤痛与疫病和免于不能表达正常行为模式(WOA, 2024b)。此外, 卫福的概念也开始在植物界受到关注, 是指对植物生存和繁衍及其免受伤害的保护行动, 包括植物可获得的阳光、水、营养、气候、授粉和免于病虫害等(UOY, 2014; 米世雄, 2019; 赵天歌等, 2023)。植物卫福也应包含在 WOA、FAO 和 WHO 推动的人类卫福、动物卫福和环境保护构成的“同一卫福”(One Welfare)的体系下。同一卫福强调人类行动需要尊重生命和自然, 从生命的自身需求构建其生理和精神的保障, 成为 WHO、FAO 和 WOA 共同推动的“同一健康”(One Health)的延伸(Pinillos *et al*, 2016; Lindenmayer *et al*, 2021)。

生态干预(ecological intervention)是指通过对人类或动植物所处的环境和生态系统中的理化指标和生物群落(包括微生物群落)进行干预的措施来降低病原或条件致病微生物的丰度、控制中间宿主的传播、恢复有益群落平衡等消除诱发疾病的环境生态风险的做法(Smith *et al*, 2005; Sokolow *et al*, 2019)。将疫病置于生态系统中考虑, 开发和应用疫病的系统生态学模型, 能大大增强对病原与环境之间相互作用的理解, 为生态干预提供关键参数(Hassell *et al*, 2021)。生态干预与生物安保的互动构成了生态系统卫生(ecosystem health), 这是 WHO、FAO 和 WOA 共同推动的“同一健康”的组成部分, 其中包括稳定的气候、清洁的空气、充足的净水、环境和个体清洁、化学品的安全使用、免受辐射、健康安全的场所、健全的农业实践、有利于健康的环境和无危害的生态及微生物生态系统, 这些都是构成健康的先决条件(Dakubo, 2011; O'Brien *et al*, 2016; Zinsstag *et al*, 2023)。生态干预措施在控制养殖对虾病毒病和急性肝胰腺坏死病、筏式养殖扇贝病毒病和植物感染性疫病等方面都

发挥了有效作用(Wang *et al*, 2021; Tran *et al*, 2014; Sajali *et al*, 2019; Wang *et al*, 2023; 杨彩霞等, 2013)。

综上所述, 整体的动物卫生应该通过生物安保、动物卫福和生态干预三大途径综合实现(图 1b), 这正好与疫病发生的三大因素相对应, 构成了保障动物生命与健康, 防控动物疫病风险, 实现动物卫生的整体框架。这一框架也适用于人类卫生及植物卫生。

1.5 生物安保体系和生物安保计划

生物安保体系是确保生物安保计划有效执行的综合系统, 包括生物安保计划的责任主体、实施对象、策略计划、标准规范、行动成效和信息交流六大要素。生物安保体系基于风险分析原理(WOA, 2024a; Bondad-Reantaso, 2019)来设计和运作(FAO, 2007), 还借鉴了 HACCP 的危害分析与关键控制点方法(FAO, 2023b)。生物安保计划是指特定责任主体在实施对象内确定病原传入、传播及释出的潜在途径并说明为降低风险需采取措施的文件。生物安保计划的实施首先要确定养殖系统中的疫病种类和危害程度, 对病原进行分级, 并通过疫病监测评估其传入、传播和释出的风险, 查找风险控制点, 并结合养殖管理, 建立有针对性的技术措施来控制病原的传播。生物安保计划的实施效果通过可追溯体系进行审查(黄健等, 2016)。

生物安保计划的实施对象可以是不同范围的社群或动植物群体, 包括全球、区域、国家、地方、社区和养殖场等多个层级(WOA, 2024a)。在不同层级上, 生物安保体系各要素也具有不同属性(图 2)。例如, 动物卫生领域的全球层级, 生物安保体系的责任主体是 WOA 或 FAO 等政府间国际组织。WOA 的实施对象主要是全球贸易中的动物及其产品的卫生检疫, FAO 的实施对象主要是可通过国际协调、合作与交流来改善的各国养殖业及其行业管理政策。策略计划包括全球发展战略和行动计划等, 例如 WOA 的全球水生动物卫生战略(<https://bulletin.woah.org/?panorama=1-2-2023-2-editorial-2#>), FAO 的国际动物卫生战略(<https://www.fao.org/4/v8180t/v8180T0d.htm#>)。标准规范包括相关的国际标准、准则及技术指南等, 例如 WOA 的《水生动物卫生法典》(简称《水生法典》)(WOA, 2024a)和《水生动物诊断手册》(简称《水生手册》)(WOA, 2024c), FAO 的《生物安保工具箱》(FAO, 2007)和《PMP/AB 应用指南》(FAO, 2023a)。行动成效包括所实施的国际培训、国际援助及国际合作项目, 例如 FAO 主办的水生动物卫生管理与生物安保活动(<https://www.fao.org/>

in-action/aquatic-health-management-biosecurity/event s/en)、“应对罗非鱼湖病毒的加强生物安保(政策和养殖场层级)治理”技术合作项目(TCP/INT/3902)等。信息交流包括各国向 WOAAH 提交的疫情报告和 WOAAH 发布的世界动物卫生信息系统(WAHIS)动物卫生状况(<https://wahis.woah.org/#/home>), FAO 动物卫生应急预防系统(EMPRES-AH)发布的动物卫生相关信息更新(<https://www.fao.org/animal-health/situation-updates/en>)等。

上述 6 个要素决定了生物安保体系的完整性和实施能力。责任主体的决策权和技术能力对于构建生物安保体系和实施生物安保计划尤为关键。实施对象

(例如特定的养殖系统)的可管理性是生物安保计划实施的基石,国家层级的实施对象是政府依法管理的整个养殖业,省或地方层级是由省或地方预防控机构管理的辖区养殖业,在企业层级就是企业的全部或部分养殖场。生物安保计划实施时,责任主体需明确生物安保计划实施的对象或范围,将生物安保作为持续的健康保障策略,为此制定政策和工作计划,建立和完善针对性的技术标准、规范或操作程序,采取实际行动开展计划实施,并评估实施效果,调整工作计划和技术程序,以提高生物安保的成效,同时加强内部及外部培训、记录、交流、报告和信息共享。

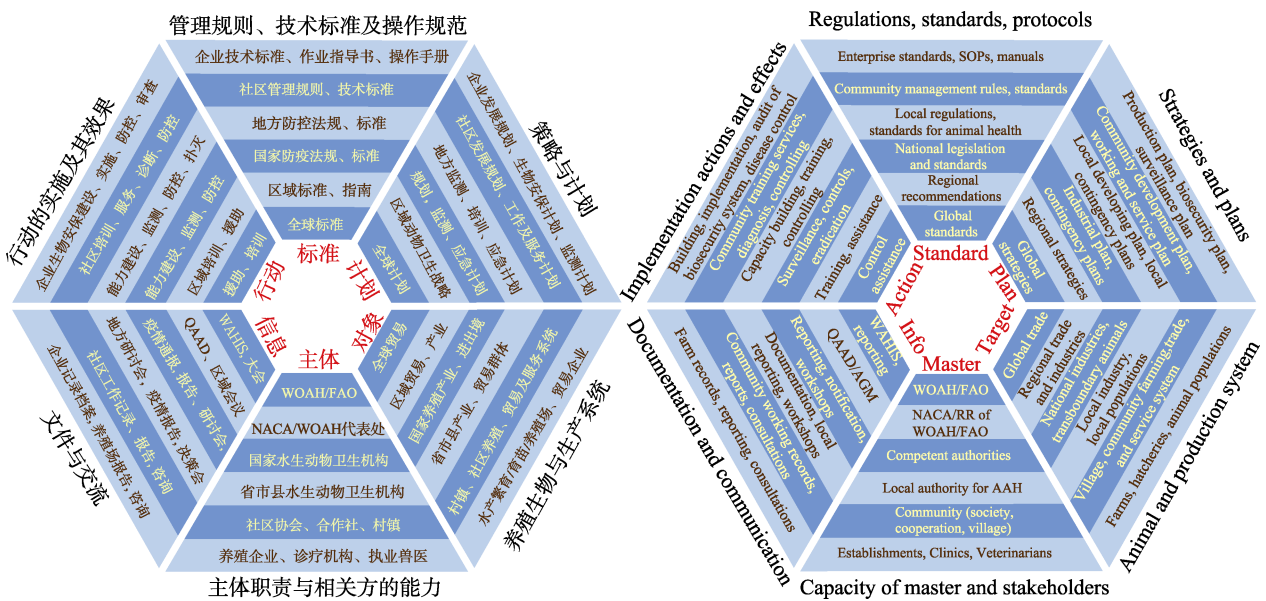


图 2 全球、区域、国家、地方、社区和企业层级的生物安保体系六大要素框架

Fig. 2 Six-element framework of biosecurity systems at global, regional, country, local, community, and farm levels

2 生物安保涉及的关键科学技术问题及其研究发展

2.1 生物安保涉及的关键科学问题

由于生物安保是基于风险分析原理的方法(FAO, 2007),部分学者片面理解这一概念属于软科学领域。实际上,风险分析本身就需要以数据为基础,阐明危害的本质,采用科学方法对各种潜在风险开展科学分析(FAO, 2007)。因此,生物安保是一门多学科交叉的新领域(MacLeod *et al*, 2020),它是涉及农学、畜牧学、水产养殖学、流行病学、预防医学、兽医学、微生物学、分子生物学、数学、统计学、法学、社会学和管理学等多学科知识的综合运用。

生物安保作为养殖业可持续发展的重要战略和

整体方案,根据不同的关注方向,可覆盖不同的关键科学问题,例如生物安保的基本理论、病原传播途径与机制、养殖系统内疫病流行机制、新发疫病的起源与风险、疫病风险的要素及其途径、养殖过程对疫病风险途径的影响、疫情监测与预警的有效性及其数学模型、疫病风险的关键控制点的形成机制、疫病防控策略的实施对疫病流行风险消减的作用机制等。解决这些科学问题对于制定和实施有效的生物安保措施至关重要,通过在生物安保领域开展跨学科的研究与合作,能够更好地理解和应对养殖业中疫病风险的挑战。为养殖业健康发展提供坚实的科学依据,从而提升产业的质量和效率。

2.2 生物安保的方法学及其关键技术

生物安保是一个相对较新的领域,其理论创新和

技术构建对于该领域的发展至关重要。加强这一领域的研究将为预防医学与动植物卫生的发展提供创新的理论与技术, 为中国在该新兴学科和标准领域中参与国际行动并发挥影响提供支持。研究方向应包括生物安保的方法与步骤、疫病监测方案、监测数据对风险途径的预测、风险评估理论与方法、关键控制点的确定及其控制措施、风险管理效果和影响机制、生物安保 SOP 体系以及基于生物安保体系的智能化平台等。在技术层面, 先进的病原检测技术, 如全基因组技术(Shi *et al*, 2022)、环境 DNA (eDNA)技术(Ardura *et al*, 2024)、计算病理学技术(Chen *et al*, 2024)等的应用将为生物安保提供更快速、准确、灵敏的现代化检测手段。生态系统易感物种中病原分布和流行动态调查能为生物安保提供病原生态学数据。疫病流行病学研究对生物安保非常重要, 通过探讨疫病传播模式、风险因素分析以及建立疫情预测模型, 可以指导防控策略的制定。防控药物与疫苗开发应用也是提高生物安保水平的关键。在信息化管理方面, 信息技术的应用, 如疫病监测预警系统、大数据分析在疫情风险评估中的作用以及人工智能技术在生物安保系统中的实施, 将有助于降低疫病传播风险, 推动养殖业向绿色高质量发展方向迈进(黄健等, 2016)。

2.3 国内外生物安保相关的科技政策研究发展

生物安保从近 100 年的初步概念到当今得到医学、动物卫生以及种植业领域的全面关注, 很多发达国家投入了大量资金开展生物安保研究。例如美国卫生与人类服务部于 2005 年成立了国家生物安保科学咨询委员会(NSABB), 为联邦政府提供生物安保问题的建议。2009 年, 美国总统签署了《加强美国实验室生物安保》行政命令(EO) 13486, 成立了负责生物制剂的生物安保国家政策专门工作组(<https://www.phe.gov/s3/BioriskManagement/biosecurity/Pages/History.aspx>)。美国农业部下属的国家粮食与农业研究所(NIFA)自 2001 年以来重点开展农业生物安保项目, 聚焦于检测诊断、法规体系支持和新的生产与保护技术及管理系统 3 个重点领域, 以帮助美国粮食与农业系统对病虫害的威胁开展预防、准备、发现、应对和恢复, 从而建立一个协调的国家转化和应用科学框架, 以保护美国的植物、动物和粮食生产系统, 促进美国农业的可持续性, 并最大限度地减少对商业和贸易的严重干扰(<https://www.nifa.usda.gov/grants/programs/agricultural-biosecurity>)。美国农业部于 1984 年开始支持夏威夷海洋研究所(Oceanic Institute)、亚利桑那大学(University of Arizona)、瓦德尔海水养殖中心

(Waddell Mariculture Center)、德克萨斯农工大学(Texas A&M University)、密西西比湾岸研究实验室(Gulf Coast Research Laboratory)和塔夫斯大学(Tufts University)等实施联邦海产对虾养殖计划(USMSFP), 联合开展无特定病原(SPF)对虾苗种培育研究, 该项目成为最早开展水产种业生物安保研究的典范(Lotz, 1997; Browdy, 1998)。澳大利亚土著管理员生物安保计划(IRBP)帮助保护超过 810 亿美元的农业产业, 提供增强的生物安保能力(<https://www.agriculture.gov.au/biosecurity-trade/policy/australia/indigenous-ranger-biosecurity-program>)。全球藻类学家最近呼吁重视藻类养殖的生物安保(Cottier-Cook *et al*, 2021、2022)。中国已逐渐认识到了生物安保的重要性, 2024 年在国家重点研发计划“海洋农业与淡水渔业科技创新”重点专项指南中对海水网箱大规格苗种、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)和对虾等的疫病防控都明确提出了生物安保及无特定病原苗种培育的核心研究内容和关键技术指标的要求。

3 水产养殖生物安保战略、政策与法规的发展

生物安保在水产养殖业的应用通过各层级间的战略、政策与法规的互动和实施而发挥作用(董宣等, 2016; Palić *et al*, 2015)。在全球和区域层级, 政府间国际组织为全球或区域的水产养殖生物安保提供政策和规范的指南。WOAH 建立了国际水生动物卫生标准, FAO 制定了水产生物安保指南。区域性国际组织如欧盟委员会(EC)和亚太水产养殖中心网(NACA)也制定了相应的区域性法规和政策指南。

在国家层级, 水产养殖生物安保的工作重点包括制定和执行国家水生动物卫生政策、法规和标准、建立卫生体系、确定水生动物疫病名录、组织全国性的疫病监测和防控、划定无疫区和认证无疫隔离场、实施进出境水生动物卫生检疫, 并向 WOA 或区域组织报告水生动物疫情。

地方水生动物卫生主管部门及监测机构根据国家政策法规实施水生动物疫情测报、专项监测、应急响应及产地检疫, 并向国家层级报告疫情和工作进展。

在企业层级, 水生动物诊疗机构和执业兽医接受国家和地方主管机构的认证和监管, 按照相关政策、法规和标准开展水产养殖疫病防控, 并向地方水生动物卫生主管部门报告疫情; 水产种苗与养殖企业在国家和地方政策和标准的支持下建立生物安保体系, 实施企业水产养殖生物安保计划。

通过在各层级实施水产养殖生物安保计划,可以提升水生动物卫生体系的整体效能,提高养殖质量和效率,引导产业向绿色和可持续方向转型。

3.1 FAO 主导的水产养殖生物安保递进式管理途径 (PMP/AB)

FAO 将水产养殖生物安保视为一个系统性的疫病风险分析和管理过程。为了帮助各国逐步建立国家和企业层级的生物安保体系,FAO 近年来倡导实施水产养殖生物安保递进式管理途径(PMP/AB)(FAO, 2023a)。PMP/AB 是 FAO 与合作伙伴通过多方会议讨论和技术工作组努力后推动的一项创新举措。它侧重于通过自下而上和自上而下相结合的方法建立管理能力,并在利益攸关者的参与下,将生产者的风险管理作为国家政策的一部分。

PMP/AB 是一种基于风险的、合作性的(涉及管理当局、产业界和学术界)和按 4 个阶段逐步递进的方法(图 3),旨在加强区域、国家、地方部门和企业各层级的水产养殖生物安保能力。该方法的建立基于现有的体制、法律框架、能力和适当的工具,采用基于风险分析的方法,强调公私合作伙伴关系,注重加强系统薄弱环节的恢复能力。其目标是实现可持续的疫病负担消减效果,提高国家和企业 2 个层级的卫生水平,最大化控制水生生物疫病的全球传播,优化水产养殖的社会经济效益,吸引水产养殖投资,最终实现同一健康目标(FAO, 2023a)。

PMP/AB 可以根据不同国家和地区的水产养殖及动物卫生条件灵活应用,适用于以下 4 种情境:一是已有或刚刚开始水产养殖业,但缺乏水生动物卫生和生物安保策略的国家;二是已实施一定程度的水生

动物卫生或水产养殖生物安保战略的国家;三是已全面实施先进的水生动物卫生或水产养殖生物安保战略的国家;四是与邻国有共享水体、流域或海岸线,水生动物卫生或水产养殖生物安保战略取决于邻国的生物安保状况,需要制定区域或次区域水产养殖生物安保战略的国家(FAO, 2023a)。

PMP/AB 的应用指南对 4 个阶段进行了明确规定(图 3):

第 1 阶段:生物安保风险确定——阶段目标是在企业、地方和国家层级制定水生动物卫生或水产养殖生物安保战略,以减少病原和疫病的影响,针对在全国或地区内流行的疫病制定应对疫病暴发的实用性应急响应计划。这一阶段需要识别水产养殖业的所有关键利益攸关者,并登记不同的水产养殖生产系统。确定关键薄弱环节,包括对水产养殖生产、野生种群、生态系统或周边人类健康的可能威胁。构建有利于关键利益攸关者间合作与风险缓解能力建设的条件。列出国家的重要水生生物病原和疫病。对价值链中风险最高的环节(生物安保最薄弱的地方)进行初步风险评估。

第 2 阶段:生物安保体系启动——重点是启动第 1 阶段制定的生物安保战略,检查其实施成效。对已经进行风险评估并被列为国家关注的水生生物病原和疫病进行监测以掌握其存在情况。国家或地方组织水产卫生专业能力建设,并开展水产养殖生物安保计划的实施。通过加强公立和私营机构的合作和增强国家层级的风险管理能力,进一步发展有利于生物安保计划实施的条件。根据对第 1 阶段制定的战略的评估结果的评估,进一步修订和加强这些战略。

第 3 阶段:生物安保体系和应急能力增强——执

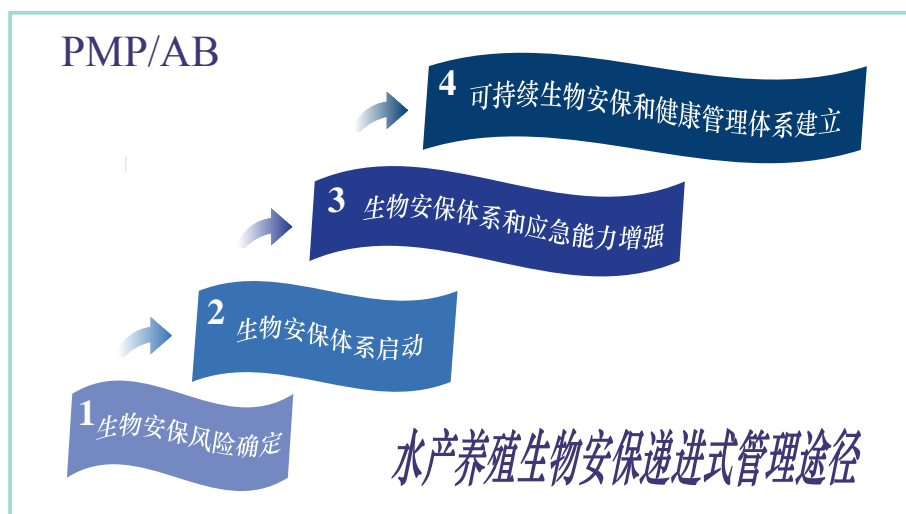


图 3 PMP/AB 的 4 个阶段(翻译自 FAO, 2023a)

Fig. 3 The four stages of the PMP/AB (translated from FAO, 2023a)

行修订后的水生动物卫生或水产养殖生物安保战略。发展足够的能以支持可持续的水产养殖,并保护国家免受收录的疫病以及新发疫病的威胁。通过测报和监测,证明疫病得以有效预防或控制。通过立法框架,加强有利于生物安保战略实施的条件,并增强从事安全贸易的能力。通过发展诊断和研究能力,确保准备好迅速检测和应对紧急情况的能力和条件。公共和私营机构及国际利益攸关者通过各种必要的努力,支持水产养殖生物安保体系的有效运行。

第 4 阶段: 可持续生物安保和健康管理体系统建立——最终目标是取得国家和国际利益攸关者对该国水产养殖的信心, 以实现可持续生产和安全贸易, 并保持健康的生态系统。这一阶段需要全面且持续地实施水生生物卫生或水产养殖生物安保战略。利益攸关者坚守承诺, 持续支持水生生物、人类和生态系统卫生。随着管理实践的改进和公立与私营机构伙伴关系的成熟, 证明生物安保体系是可持续且不断发展的。风险沟通机制已完全建立, 确保透明和可审计的生物安保计划在所有利益攸关者中有效实施(FAO, 2023a)。

3.2 WOA 主导的全球水生动物卫生标准体系

成立于 1924 年的 WOA 是世界贸易组织(WTO)承认的为《实施卫生与植物卫生措施协定》(SPS 协定)(WTO, 1995)提供动物卫生标准的全球性政府间国际组织, 目前有 183 个成员国(地区)。自 20 世纪 60 年代后期起, WOA 的工作范围扩展到水生动物, 目前涵盖鱼类、甲壳类、贝类和两栖类动物卫生。WOA 的水生动物卫生标准委员会(AAC)负责起草和修订水生动物卫生标准, 为国际贸易提供《水生法典》和《水生手册》等国际标准。前者主要包括管理规范, 后者则是技术标准。WOA 还为成员国(地区)提供水生动物卫生体系效能评估工具(PVS Tool-Aquatic) (<https://pvs.woah.org/documents>)。WOA 的水生动物卫生管理机制是一个全球范围的水生动物生物安保体系。

《水生法典》详细规定了水生动物卫生管理规则和特定疫病的贸易规则。第 1 部分规定了成员国(地区)向 WOA 通报水生动物疫病及新发疫病的责任, 建立了水生动物疫病收录标准及其名录。建立国家监测计划的指导原则以确定是否符合无疫国(地区)的生物安保条件。2014 年还新增了确定特定疫病易感宿主的标准(WOA, 2014a)。第 2 部分建立了进口风险分析的规范。第 3 部分涉及水生动物卫生体系

(Aquatic Animal Health Services, AAHS)质量及交流原则。

第 4 部分聚焦疫病防控措施, 对亚洲国家具有重要的指导价值。但 10 年前, 这一部分的内容较单薄。本文作者在任 AAC 副主席期间, 提出了这一部分应将生物安保作为水生动物疫病防控的重要举措。因此 2014 年《水生法典》新增了生物安保概念定义(WOA, 2014b)。AAC 于 2016 年启动了第 4 部分的修订, 增加水产养殖场生物安保的内容, 并在区划(zoning)和隔离场划(compartmentalization)的相关章节中包含生物安保计划。2021 年 WOA 《水生法典》正式采用了水产养殖场生物安保这一新篇章(WOA, 2021)。经过 10 年的努力, 第 4 部分从 2012 年的 6 章扩展到了 9 章, 涵盖了水产养殖场生物安保、区划和隔离场划、隔离场申请、消毒、应急计划、休养和饲料中病原控制等多个方面, 其中生物安保概念得以显著增强。

第 5 部分关注水生动物的贸易措施、进出口程序和健康认证, 为水生动物及其产品的安全和健康贸易提供了一套全面的生物安保指导方针和程序。该部分概述了与健康认证相关的一般义务, 确立了评估水生动物商品安全性的标准, 还涉及与水生动物运输相关的健康风险控制, 提供了水生动物及其产品国际贸易的健康证书模型。抗生素耐药性是生物安保中涉及同一健康主题的内容, 《水生法典》第 6 部分专注于水生动物中抗菌药物的使用问题, 提供了一套全面的指导原则和建议, 以促进水生动物养殖业中抗菌药物的合理使用, 减少耐药性的发展, 并保护公共卫生。动物卫福是 WOA 的重要工作领域, WOA 水生动物卫福标准目前只涉及鱼类, 《水生法典》的第 7 部分的养殖鱼类卫福包括养殖鱼类卫福的一般原则, 覆盖了运输过程、为消费的屠宰和为疫病控制目的宰杀的卫福措施, 但没有包括鱼类养殖的卫福措施, 据了解 WOA 正在考虑补充这一关键内容。

《水生法典》第 8~11 部分针对不同水生动物的特定疫病, 规定了贸易中的卫生措施及需要满足的基本生物安保条件(basic biosecurity conditions)。其内容包括贸易措施应用到的易感宿主名录, 无需考虑出口地的疫病状况的产品类型, 自我宣告为无疫国(无疫区或无疫隔离场)的条件, 保持无疫状态的要求, 从自我宣告无疫的国家(区或隔离场)进口的卫生证书要求, 从非无疫国(区或隔离场)进口用于不同目的的风险评估和 risk 消减措施, 以及为人类消费的零售而进口或转口而无需考虑出口地的疫病状况的产品形式及风险评估与消减措施。

《水生手册》首先规定了诊断实验室的质量管理要求和诊断方法的验证原理与方法,随后采用固定的模板着重系统介绍各收录疫病的诊断技术,包括疫病的基本信息(病原、宿主、疫病模式、生物安保与控制策略)、样品采运与处理(群体与个体选择、组织器官选择、不适于检测的样品、非致死采样、样品保存、并样)、诊断方法(适用性、临床症状、压片观察、组织学和细胞学方法、病原分离培养、核酸扩增、测序、原位杂交、免疫组化、生物分析、抗体或抗原检测等)、用于对表观健康群体监测以证明无疫的方法、确诊标准(不同健康状况的动物的确诊、各方法的诊断敏感性和特异性)。

需要注意的是,WOAH的《水生法典》和《水生手册》是不断更新的国际规范,AAC每年都会根据成员国(地区)的反馈进行修订,修订版在年度全球代表大会采纳后成为正式规范并在互联网公开发布,因此需要持续关注WOAH标准的更新。

3.3 NACA推动的亚太水产养殖生物安保战略发展

NACA自1990年成立以来,作为区域性政府间专业性国际组织,一直致力于协调各成员国及区域间的水产养殖合作与交流,推动该地区的水产养殖业可持续发展。过去20多年中,NACA通过水生动物卫生主题项目,在本地区水生动物卫生领域做出了显著贡献,包括组织年度水生动物卫生顾问组会议,建立本地区疫病名录,以及开展季度水生动物疫病报告(QAAD),推荐新发疫病应急响应措施等。

本文作者在2019—2024年担任NACA总干事期间,主导了NACA战略计划的修订,将原水生动物卫生(Aquatic Animal Health)主题项目扩展为卫生与生物安保(Health & Biosecurity)主题项目,增强了对生物安保的直接关注。NACA与FAO、WOAH以及成员国(地区)合作,推动水产养殖生物安保,包括在第4届全球水产养殖大会上回顾水产养殖生物安保发展(Subasinghe *et al.*, 2023)、推动藻类养殖生物安保(Cottier-Cook *et al.*, 2021)、倡导PMP/AB-Seaweeds(Cottier-Cook *et al.*, 2022),以及与WOAH合作开展成员国(地区)的水产养殖生物安保政策法规调研,此外,NACA还与合作伙伴联合举办生物安保国际研讨会和培训班,向成员国(地区)及国际社会广泛宣讲水产养殖生物安保的理念和技术途径等。

2022年,NACA与FAO合作,在PMP/AB框架下通过对15个成员国(地区)的水生动物卫生体系效能自评和态势分析(SWOT),建立了区域水生生物卫生战略(RAOHS)(图4)。该战略在2023年的第32届NACA

理事会上获得一致同意,成为PMP/AB在本地区实施的纲领性文件。在FAO的支持下,NACA成立了区域技术工作组,研讨和推动RAOHS实施的技术方案和优先事项。

RAOHS包含17个项目和40项活动计划,明确了各活动计划的实施内容、期限、与PMP/AB的对应关系和责任主体。这17个项目中,病原清单、疫病诊断、风险分析、养殖场生物安保与健康、应急准备与应急计划、边检卫生证书与检疫、监测/观测与报告、区划与隔离场划、兽药使用与避免抗生素耐药性和交流与信息系统等10个项目内容属于生物安保工作,水生生态系统卫生和生物福利则分别属于生态干预和福利管理工作,这12项与卫生三大途径(图1b)相对应,构成了水生生物卫生的技术基础,而政策/立法及执法、人力资源与机构能力、机构架构、研究与发展和区域与国际合作这5个项目则是支撑水生生物卫生的体制基础。这一项目架构强调了生物安保对于国家和区域水生生物卫生的重要性。

在FAO与中国水产科学研究院和NACA联合于2024年5月在青岛召开的PMP/AB国际研讨会和FAO于2024年6月在罗马召开的国际渔业-兽医对话会(Fish-Vet Dialogue)上,NACA通报了RAOHS战略计划,鼓励相关政府、组织和合作伙伴动员资源加以实施。这标志着NACA在推动区域水产养殖生物安保方面迈出了重要一步,为提升区域水生动物卫生水平和促进水产养殖业的可持续发展提供了有力支持。

3.4 国家水产生物安保法规体系

(1)发达国家水产养殖生物安保法规体系

挪威的生物安保法律法规体系由《水产养殖法》《食品法》和《动物福利法》构成,确保养殖业的可持续发展。《水产养殖法》规定了养殖许可证制度,明确了养殖场布局、规模、鱼病控制等要求,为水产生物安保奠定基础。《食品法》关注食品安全和质量,适用于养殖生产和加工,强调价值链的管理。《动物福利法》保障养殖鱼类福利,提高健康水平。新建养殖场需遵循《生物多样性法》《计划和建设法》以及《水产养殖法》,确保环境和生物的安全。养殖许可证数量和规模受严格限制,政府可能适度调整商业养殖场或育苗场许可证数量(Myklebust, 2016);这些限制有效地控制了养殖业的发展,保障了养殖环境的整体良好状态,有效防止了疫病传播。挪威的法规管理机构明确分工,兽医局负责养殖场检疫和疫病控制,卫生部负责用药管理,环境部负责养殖场环

了“国家-省-市-县-点”的水生动物防疫技术支撑机构。2023年《无规定水生动物疫病苗种场评估管理办法》(试行)发布实施,相应的评估工作已正式启动,截至2024年5月,共有10个省份的22家水产苗种场提出申请,已有9家鱼类和虾类苗种场通过了评审(http://www.yyj.moa.gov.cn/gzdt/202405/t20240507_6454943.htm)。

由于生物安保概念及其体系发展较晚,中国水产养殖行业在顶层设计和系统性管理方面仍缺乏对生物安保重要性的认识。在行政管理、学术研究、专业教育以及产业发展中,对生物安保体系的构建、生物安保计划的制定与实施等方面的了解也存在不足。疫病防控研究中流行病学研究被忽视,对行业管理和养殖过程的风险分析方法的系统运用能力不足,水产育种到养殖技术发展缺少生物安保理念的应用。面对约占57%全球水产养殖规模的中国水产养殖行业的发展,我们面临着病害成为行业可持续发展的瓶颈、病原多样性及其风险未受重视、疫病防控管理与生产需求脱节、水产种业忽视生物安保、水产诊疗制剂的生产和应用亟待提升和规范等诸多现实问题(黄捷等,2016)。需要在行业发展中明确生物安保对国家生态安全战略的重要性,强化行业管理与基层养殖行业的有效互动与衔接,改善兽医和渔业在水生动物卫生的协调机制,改进相关管理法规和技术标准对产业实际的适用性,提升相关利益方对法规和标准的接受度和执行效率。

4 水产养殖企业生物安保体系框架和实施流程

水产养殖企业作为开展水产养殖生产的主体,是实施生物安保措施、提升产业生物安保水平的关键。企业的管理者及其组建的生物安保团队是实施生物安保计划的责任主体。强有力的企业管理能力有助于责任主体构建生物安保体系,推动生物安保计划的实施。国际规范、国家及行业标准和生物安保专家为企业开展基于风险的水产养殖疫病防控、建立无规定疫病或无特定病原(SPF)苗种场提供技术指南与指导。

4.1 WOAH 水产养殖场生物安保规范

WOAH于2021年在《水生法典》的第4部分增加了水产养殖场生物安保一章,为全球水产养殖场(包括半开放、半封闭和封闭系统的各类水产养殖系统)提供了生物安保体系构建的技术建议。该章节涵盖了生物安保计划的原则、生产系统分类、区域管理、风险

降低措施、风险分析应用和生物安保计划制定方法。

企业实施生物安保计划的原则强调了管理和物理措施的重要性,以降低养殖场内水生动物的感染风险。企业需要识别风险和考虑成本效益,并实施适当的措施以实现生物安保目标。生产系统根据水体处理和生物控制能力被分为4类:开放系统、半开放系统、半封闭系统和封闭系统,从而在生物安保计划中予以区别对待。技术指导提供了区域管理、传播风险降低措施、风险分析和生物安保计划制定等方面的建议。其中,区域管理指出共享水体中近距离的半开放式或半封闭式养殖场,应协调形成共同的生物安保措施。传播风险降低措施应识别所有潜在的传播途径,这对于制定有效的生物安保计划至关重要。养殖场可以应用的风险分析流程包括危害识别、风险评估和风险管理3个步骤,这是评估疫病威胁和制定缓解措施的公认方法。生物安保计划的关键组成部分包括SOP、人员培训、文件和记录保持、应急程序、健康监测、审查和审计。生物安保计划应每年至少审查一次,或根据养殖运营变化、新疫病风险识别或生物安保事件发生等情况进行针对性的审查。应记录生物安保事件和采取的补救措施,以便重新评估SOP(WOAH,2024a)。

企业生物安保对于国家或区域实施有效生物安保至关重要,通过实施企业生物安保,可以改善水生动物的健康和卫福,提高养殖产品市场准入,增强生产力以及减少兽药使用,降低生产成本和抗菌素耐药性风险。全面开展水产养殖场生物安保体系建设是提升整个国家或区域生物安保水平,保障行业健康绿色发展的基础。

4.2 企业生物安保计划的分级

WOAH将动物的健康状况分为有疫和无疫2种状态,这2种状态是一种结果性的分类,目的是便于国际贸易风险管理。但水产养殖生产及其价值链的多样性并不一定要求所有水产养殖场都要达到无疫水平,也不是所有水产养殖场都能做到无疫目标。正如FAO定义和WOAH企业生物安保指导方案中所指出的,生物安保应是成本效益的实践(FAO,2023a;WOAH,2024a),允许不同条件的养殖场根据自身条件实施差异化的生物安保计划,有利于整个社区乃至国家提升水产养殖健康水平。

学术界对水产养殖生物安保的关注促成了2009、2011年在挪威举办的2次国际水产养殖生物安保大会和国际水产兽医生物安保联盟(IAVBC)的成立,制定了水产养殖生物安保计划的首个整体实施方案(Palić *et al.*, 2015)。

该方案采用“分级”方式实现无规定疫病养殖场目标(Palić *et al*, 2015)。这一分级方式旨在划分实现无规定疫病养殖场目标的过程, 属于阶段分级, IV期之前的各阶段措施不能自成体系, 因此无法用于实施差异化水产养殖生物安保计划。本文作者提出了 5 级生物安保分级方案(图 5): 生物安保 1 级(依诊施治), 侧重于局部防控, 包括临床评估、疫病诊断和应急防控计划, 但缺乏疫病监测和风险评估; 生物安保 2 级(预防为主), 实施一定程度的监测计划, 初步评估风险点, 通过设施和管理水平的改善实施预防性整体防控; 生物安保 3 级(风险防控), 实施较系统的监测计划, 通过有针对性的风险分析, 确定风险点, 形成较全面的整体防控, 尽管可追溯体系不十分完善; 生物安保 4 级(全面安保), 全面实施有效的风险分析和疫病监测计划, 拥有完善的应急计划, 全面实施最佳管理实践(BMP), 通过建立可追溯体系使生物安保实施达到可审核, 实现全面生物安保基础上的无疫状态; 生物安保 5 级(无疫认证), 通过进一步完善生物安保实施的稳定性和持续性, 加强可追溯体系来进一步保

障可审核性, 实现无疫状态的可持续性, 通过国家的无疫隔离场评估。这一分级方案根据生物安保计划实施程度进行分级, 结合疫病诊断、监测、防控等综合实施, 并与相应养殖管理规范结合, 还可允许相邻级别之间的中间层级, 这样通过不断加强实施的程度, 能逐级提升生物安保体系的水平(董宣等, 2016; Bondad-Reantaso *et al*, 2022)。

各生物安保级别的具体技术实施方案也是逐级递增, 例如对虾养殖或育苗企业可以实施的技术方案, 包括疫病风险清单、清池消毒、生态控制或生态屏障、疫病诊断和报告、应急计划、水体屏障、针对性预防、监测计划、无疫种苗、关键控制点分析和控制措施、风险防控措施、全家系无疫筛查和可追溯审核体系等, 随着生物安保计划的级别提升, 实施的技术内容的项数及各项的实施力度也相应增加(表 2)。

4.3 无特定病原(SPF)虾苗支持的凡纳对虾养殖业

美国无特定病原(SPF)对虾培育成为水产种业生物安保的典范(Lotz, 1997), 并形成了国际公认的对虾

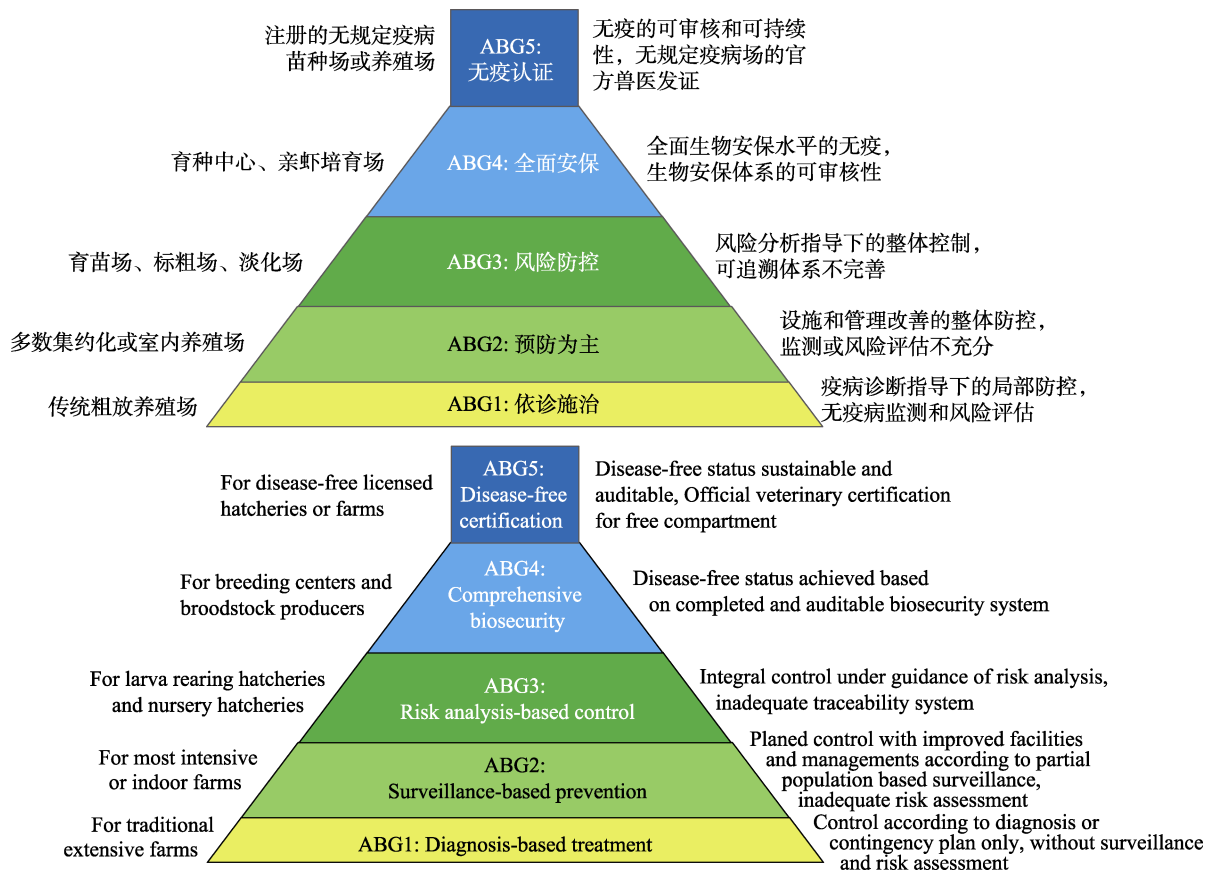


图 5 生物安保计划实施的分级方案
Fig. 5 Hierarchical scheme for the implementation of biosecurity plans

ABG: 生物安保级别。
ABG: Aquaculture biosecurity grade.

表2 对虾养殖/育苗企业实施不同级别生物安保计划的技术差异

Tab. 2 Technical differences in implementing biosecurity plans at different biosecurity grades for shrimp farms/hatcheries

| 技术内容 Technical contents | ABG0 | ABG1 | ABG2 | ABG3 | ABG4 | ABG5 |
|---|------|------|------|------|------|------|
| 疫病风险清单 Disease risk inventory | -/+ | ++ | ++ | +++ | +++ | +++ |
| 清池消毒 Pond cleaning and disinfection | -/+ | ++ | ++ | +++ | +++ | +++ |
| 生态控制/生态屏障 Ecological control and barriers | -/+ | ++ | ++ | +++ | +++ | +++ |
| 疫病诊断和报告 Disease diagnosis and reporting | - | +++ | +++ | ++ | ++ | ++ |
| 应急计划 Emergency plan | - | +++ | +++ | ++ | ++ | ++ |
| 水体屏障 Water barriers | - | - | +++ | +++ | +++ | +++ |
| 针对性预防 Targeted prevention | - | - | +++ | ++ | ++ | ++ |
| 监测计划 Surveillance plan | - | - | + | ++ | +++ | +++ |
| 无疫种苗 Disease-free seedlings | - | - | + | ++ | +++ | +++ |
| 关键控制点分析与控制 Critical control points | - | - | + | +++ | +++ | +++ |
| 风险防控措施 Measures based on risk analysis | - | - | + | ++ | +++ | +++ |
| 全家系无疫筛查 Disease-free screening for all families | - | - | - | - | +++ | +++ |
| 可追溯审核体系 Traceability audit system | - | + | ++ | ++ | +++ | +++ |

注：ABG：生物安保级别，“-”代表没有相关技术内容实施，“-/+”代表可能有部分实施，“+”代表相关技术内容需要初步实施，“++”代表相关技术内容需要中度实施，“+++”代表需要全面实施。

Note: ABG: Aquaculture biosecurity grade, "-" indicates no relevant technical content implemented, "-/+" indicates partial implementation may be possible, "+" indicates the relevant technical content needs initial implementation, "++" indicates a moderate implementation is required, "+++ indicates a comprehensive implementation is needed.

种苗培育规范。美国农业部支持的 USMSFP 主张应以 SPF 为基础来确保虾类养殖业的长期健康发展,该计划提出将虾类养殖业分为 SPF 繁育、高健康虾苗(HHS)培育和商业养成生产(CP) 3个阶段。SPF 阶段主要依靠夏威夷的 SPF 对虾核心培育中心(NBC)。HHS 阶段由生产商品虾苗的育苗场组成, CP 阶段是养成部分。

该计划首先将病原根据其对产业的影响程度、致病性、可诊断性和净化的难易程度分为3个等级:第3级病原种类最少,包括对虾类养殖业全部3个阶段都构成威胁的病原;第2级包括第3级病原以及对CP阶段威胁较小,但对SPF和HHS阶段影响较大的病原;第1级则包括所有第3级和第2级病原以及一些影响小但应当从NBC中净化的病原(Lotz *et al.*, 1995)。

SPF 状态通过对初始种群的第1级病原进行严格监测和检疫培育来实现。初始种群的检疫包括2级过程,野生亲虾经过亲虾到苗期的2~5个月的初级检疫和养成期的5~12个月的二级检疫。筛选合格的亲虾才能进入NBC,成为SPF虾的初始种群,确保初始种群的F₁代达到SPF状态。在后续遗传选育和扩繁过程中,主要技术流程还包括建立独立的母系家系、病原监测计划的建立和持续执行、病原风险消除和传播途径切断措施的实施、各家系遗传多样性测定、充

足基因池建立、配偶选择和交配组合控制、生物安保的全可控生活周期构建。疫病监测和检疫在每一代核心种群累代培育过程中需持续坚持,出现第1级病原风险的群体需实施无害化处理。HHS 阶段由多家独立的育苗场组成,覆盖亲体繁殖、成熟和幼体孵化过程。由于动物流量大,只能通过有限的监控范围涵盖对经济影响大且易于检测的第2级病原。CP阶段的规模比HHS阶段更大,只包括对最危险的第3级病原的监控。

USMSFP 的 SPF 繁育计划成功后,美国佛罗里达对虾改良系统公司(SIS)采用了该生物安保体系的核心路线,获得美国联邦动植物监督局认可并用于对相关NBC进行年度核查以发放SPF证书。SIS随后分别在夏威夷、新加坡、印度等地设立子公司,在全球范围扩大SPF繁育规模,带动凡纳对虾(*Penaeus vannamei*)遗传选育和种质繁育的蓬勃发展,使凡纳对虾成为全球性养殖且产量最大的品种(黄捷等, 1998)。

4.4 水产养殖企业生物安保体系框架及其在中国的对虾育苗场的实践

水产养殖企业生物安保体系框架是在企业层级建立的管理体系,旨在减少病原传入、传播和释出的风险,提高养殖成功率和保障可持续收益。我们根据畜禽种业生物安保实践(崔治中, 2012)、美国SPF对

虾种苗培育方案(Lotz, 1995; 黄捷等, 1998)和中国水产养殖企业的实际, 提炼了水产养殖企业生物安保体系的框架, 包括场区规划与建设、人员培训、可追溯体系、疫病监测计划、生物风险评估、消毒措施、进排水处理、种苗引入管理、饲料及投入品管理、养殖管理、疫病诊断与防控和应急计划等。根据 FAO 的 PMP/AB 指导方案, 梳理了生物安保体系构建的建议时间表(表 3)。自 2017—2022 年, 作者及其团队在海南中正水产科技有限公司和浙江宏野海产品有限公司开展对虾育苗企业生物安保体系构建示范。通过与企业负责人充分沟通, 了解企业需求, 确定工作目标, 组建了工作团队并制定相关培训制度, 协助企业确定

了生物安保计划的责任主体, 通过培训确保团队具备必要的专业能力。随后, 我们与企业责任团队共同对养殖场状况进行全面分析, 包括养殖场类型、养殖种类、企业能力、外部环境生态、场地及设施条件、养殖历史、生产规划、主要挑战等方面。通过现场考察、交流和分析, 确定可能危害养殖对象的病原及危害程度, 明确养殖场可控制的病原种类。接下来开展风险评估工作, 通过交流和调研评估病原传入、传播和释出的风险, 明确风险点。根据评估结果, 制定相应的风险管理方案, 确定了可实施的生物安保等级及其主要措施。进一步指导企业开展疫病监测工作, 确定监测疫病种类和方法, 由企业责任团队实施监测, 及时

表 3 养殖场生物安保体系构建的建议时间表

Tab. 3 Proposed timetable for the construction of the farm-level biosecurity system

| 年份 Year | 责任主体 Master | 实施对象 Target | 策略计划 Plan | 标准规范 Standard | 行动成效 Action | 信息交流 Info |
|-----------------|--|---|---|--|---|---|
| 1 st | 企业与生物安保专家建立联系 Contact between farm & AB experts | 确定水产养殖系统 and 风险 Define the AS & risk in facilities | 调研生产与发展计划 Investigate production & development plan | 调研水产养殖系统的规则和标准 Investigate the rules & standards in AS | 一般生物安保体系培训、应急响应 General training for AB & ER | 调研文件和交流状况 Investigate D&C status |
| 2 nd | 确定企业生物安保缺陷, 建立负责生物安保计划的团队 Define the gap of capability of farm on AB, setup team in charge of AB plan | 修复水产养殖系统的主要风险点 Fix significant risk points in AS | 根据生物安保需求设置和完善计划 Improve and set up plans according to AB needs | 确定水产养殖系统需优先发展的规则和标准 Identify the gaps and priority of rules & standards to be developed | 生物安保技术培训, 关键预防与控制行动 Technical training for AB, critical P&C | 改善主要的文件和交流体系 Improve major D&C system |
| 3 rd | 改善企业生物安保能力和团队工作 Develop the capability of farm on AB & improve team works | 修复水产养殖系统次要的风险点 Fix minor risk points in AS | 根据生物安保和生产进一步完善计划 Refine plans according to AB & production | 起草主要的标准操作规程(SOP) Draft important SOPs | 生物安保计划起草和培训、系统性预防与控制 AB drafting & tech training, systemic P&C | 使用文件和交流体系 Use D&C system |
| 4 th | 增强企业生物安保能力 Enhance the capability of farm on AB | 系统性强化水产养殖系统 Systemically enhance AS | 根据实施生物安保来强化计划 Enhance plans according to implementation | 通过 SOP 实施反馈来完善 SOP Monitor SOPs' implementation to refine SOPs | SOP 培训和实施的监管 SOP training & implementation monitoring | 基于文件和交流体系的应用来强化 Enhance D&C system based on usage |
| 5 th | 企业能力巩固 Solidify the capability | 水产养殖系统的巩固 Solidify AS | 巩固计划与行动的相互作用 Solidify interaction of plan & action | 通过实施巩固 SOP Solidify SOPs by implementation | 巩固培训与生物安保实施的习惯 Solidify training & implementation | 巩固文件和交流体系, 申请证书 Solidify D&C system, apply for certification |

注: AB: 水产养殖生物安保; AS: 水产养殖系统; ER: 应急响应; D&C: 文件和交流; P&C: 预防与控制; SOP: 标准操作程序。

Note: AB: Aquaculture biosecurity; AS: Aquaculture system; ER: Emergency response; D&C: Documentation and communication; P&C: Prevention and control; SOP: Standard operation protocol.

发现和应对潜在风险。指导企业完善操作规程,这是至关重要和耗时的步骤。企业责任团队对所有与生物安保相关的生产流程进行审核、修订和完善,形成SOP。随后,企业进行SOP培训和实施,并根据监测数据评估风险控制措施的效果,进一步完善SOP,逐步提高生物安保等级。与此同时,指导企业建立质量控制和可追溯体系,确保生产过程的质量和安。最终,这2家育苗场经过5年的构建和运行,生物安保水平得以显著提高,在2023年向农业农村部渔业渔政管理局提交了无规定疫病种场的官方认证申请,主管部门根据《无规定疫病种场评估管理办法》的规定,进行了文件审核和现场检查,2024年5月,上述2家企业成为首批通过农业农村部评估的凡纳对虾无规定疫病种场(中华人民共和国农业农村部公告第792号)。

5 水产养殖生物安保发展战略的建议与展望

生物安保是一个新兴的、基于风险分析的系统性概念,它代表了国际前沿的疫病防控思维。新冠大流行之后,国际社会对生物安全和生物安保在公共卫生和动植物卫生领域的重要性有了更深刻的认识。目前,国际组织如FAO、WOAH和NACA等正在积极推动生物安保战略,各国政府的认识也在不断深化。同时,各国正在加强生物安保法规体系的建设和实施,学术界对生物安保的研究在不断深入,企业在实施生物安保方面也取得了初步成果,并获得了显著的经济效益。近20年来,生物安保已经从人类健康扩展到动植物疫病防控,从全球战略落实到企业生产实践,从发达国家推广到发展中国家,其理念的接受程度和战略实施程度都在经历着全面的跨越式发展。类似于信息技术革命,这种发展势头对人类和动植物卫生行业产生了全面而深刻的影响。

作为全球最大的水产养殖国家,中国面临着诸多挑战,包括病原种类多、疫病传播广泛以及由此带来的巨大生产损失。中国水产养殖每年因病害导致的损失约500亿元(农业农村部渔业渔政管理局等,2024)。重要水生动物疫病的全国专项监测数据进一步揭示了种苗带毒现象,这是水产养殖疫病频发的重要风险源头(农业农村部渔业渔政管理局等,2016a、2016b、2017、2018、2019、2020)。这一问题不仅对水产养殖业的健康发展带来了重大风险,也限制了水产种苗的出口。引进的养殖物种,例如凡纳对虾、罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)、大西洋鲑(*Salmo salar*)等,已形成巨大的养

殖规模,某些物种在中国甚至成为全球最大的养殖种类,但其种苗的来源在很大程度上依然依赖进口。严重的疫病风险导致水产养殖者药物滥用和抗生素耐药性问题突出,产品中的药物残留问题导致的水产品质量安全忧患,不断给行业带来的负面舆论,严重影响了水产品的市场信誉和产品出口。

为了推动水产养殖业的绿色发展和全面升级,中国应在生物安保战略的发展中采取引领性行动,才能树立水产养殖健康可持续发展的全球标杆,实现从水产养殖大国向水产养殖强国跨越。为此,我们可在以下优先领域开展行动,强化水产养殖生物安保战略。

5.1 构建国家生物安保中长期发展战略的路线图,为稳步提升水产养殖生物安保水平确定方向

生物安保战略是国际社会在人类和动植物卫生领域中高度关注的重点,也是中国实施《中华人民共和国生物安全法》,维护国家的关键组成部分,制定这一战略对于推动行业的绿色健康发展至关重要。国际组织如FAO、WOAH和NACA在推动生物安保战略方面发挥了重要作用,中国作为这些组织的成员国,有权利应用和实践它们的战略指南、建议方案和指导意见等成果。

FAO提供了水生生物卫生体系效能自评问卷,而WOAH开发了兽医体系效能评估工具-水生动物版(PVP Tool-Aquatic)。这些工具可用于自我评估或外部评估,在不同层级建立周期性的效能评估机制,以完善水生生物卫生体系,强化水产养殖生物安保的责任主体。根据FAO的PMP/AB指导意见、WOAH的《水生法典》以及NACA的《区域水生生物卫生战略》,我们可以构建一个全面的国家水生生物卫生战略,使水产养殖生物安保的长期发展有明确的路线图,从而让全国及重点省市建立水产养殖生物安保的递进式管理途径,为中国水产养殖生物安保水平的稳步提升提供中长期战略指导。

5.2 强化生物安保相关的研究发展与教育普及,推广生物安保理念的应用

生物安保为水生动物卫生领域带来了创新理念和模式,为行业的创新升级和结构调整提供了新的思路,以生物安保为核心,我们可以引领水生动物卫生和养殖业的结构调整,从国家、省市、地方乃至企业层级制定行业发展规则,维护健康发展秩序,实现产业的可持续健康发展。

国家应增加对生物安保领域的公益性科技投入,开展关键领域的研究,包括生物安保体系运行机制、

重要与新发疫病的流行病学、风险分析及预警方案、早期测报及应急响应、关键风险点控制技术、病原风险消减和净化技术等。这些研究将推动生物安保相关战略、政策、标准和技术的更新和升级。

在水产高等教育中,应加入生物安保主题的相关课程与实践,培养具备生物安保知识和能力的高等人才。同时,坚持政、产、学、研紧密结合,引导和鼓励行业管理和企业运营中运用生物安保体系的理论与技术。

此外,应以技术推广、病害防治、执业兽医、诊疗机构和科技服务组织为主体,建立生物安保科技推广体系。这一体系有助于将生物安保的理念和实践更广泛地应用于实际生产中,提升整个行业的生物安全水平。

值得补充的是,在同一健康理念的框架下,国家应考虑建立跨部门的生物安保协调机制,确保不同领域和层级的生物安保战略和政策能够协同一致,形成合力。同时,加强对公众的生物安保教育,提高社会对生物安保重要性的认识,为生物安保措施的实施创造良好的社会环境。

5.3 优先发展种业生物安保,构建高标准生物安保水平上的种业体系,推动中国种业国际化

水产种业是水产养殖业的核心,种苗的健康对整个产业的可持续发展至关重要。提升水产种业的生物安保水平是实现无规定疫病水产种业的关键(黄健等, 2016; 董宣等, 2016)。《无规定疫病水产苗种场评审管理办法(试行)》的颁布标志着中国对水产种业疫病传播风险的积极应对和水产种业生物安保行动的启动。该管理办法实施一年来,已有 9 家水产种苗场通过评审,表明该管理办法具有可实施的基础。值得注意的是,生物安保强调规则的可实施性,在该管理办法试行期间,应加强对通过评审的企业的疫病监测、跟踪检查和行业评价,及时更新和纠正评审中或评审后不符合规范的问题,完善评估技术规范 and 评审过程管理。审查评审管理的科学性、规范性、透明性和准确性,确保这一办法成为推动中国水产种业健康发展的核心机制。

此外,应制定科学有效的种业生物安保体系标准,优先在国家级和省级原良种场实施生物安保计划,带动商业化育苗场和中间培苗场实施生物安保计划,建立认证门槛,执行原良种场疫病监测计划和种苗检疫措施,严格审查原良种场的生物安保能力,让无规定疫病苗种场的技术标准成为国家级和省级原良种场的进入门槛,并鼓励其他高级别企业成为无规

定疫病原良种场,引领养殖业绿色高质量发展。

无特定病原的种苗是国际贸易的基础,按照 WOAHP 标准建设的无疫隔离场(compartment, 兽医称为生物安全隔离小区)获得政府认可后,可通过政府向 WOAHP 自宣告无疫隔离场,从而在国际贸易中争取优先地位,促进水产种业产品与技术的国际贸易和高质量发展。这将改变中国水产种苗引进远多于输出的局面。积极实施符合 FAO 和 WOAHP 等国际组织规范的生物安保计划,将为其他国家提供示范,通过产业技术和经济合作,可能形成新的国际合作机制,推进“一带一路”战略的实施。

6 结语

为应对全球在 2030 年向着 85 亿人口快速增长所面临的粮食安全挑战,FAO 提出了渔业和水产养殖的蓝色转型倡议。其核心目标之一是在未来 5~10 年,通过鼓励创新与投资,实现可持续水产养殖的扩大化和集约化(FAO, 2024)。行业的转型将鼓励以质量、规模、效益、科技和人才为特征的生产模式发展,以满足对更高的生产力和更稳定性产出的需求。生物安保作为一项基于风险的综合性健康管理策略,在确保实现这些目标中扮演者至关重要的角色(Campbell *et al*, 2022; Osborn *et al*, 2019; Christison, 2019; Chong *et al*, 2019; Moss *et al*, 2012; Cottier-Cook *et al*, 2022)。

在从国家到企业的各层级实施生物安保,可以升级行业管理实践、增进行业抗风险能力、降低疫病传播风险、保障产业健康发展、提升养殖生产效益、提高养殖产品质量、改善养殖生态环境。这不仅是行业转型升级的必然选择,也是实现扩大化和集约化方向的关键。特别对于水产种业这一核心领域,无规定疫病的水产种苗是水产养殖业的基础,种业健康对于整个养殖业的可持续发展至关重要。因此,将水产种业的生物安保作为优先领域是早日实现无规定疫病水产种业的全面发展的关键,对中国水产养殖业的绿色高质量发展和国际竞争力的提升具有重大意义(黄健等, 2016; 董宣等, 2016)。

参 考 文 献

- AHMAD T, HAROON, DHAMA K, *et al*. Biosafety and biosecurity approaches to restrain/contain and counter SARS-CoV-2/COVID-19 pandemic: A rapid-review. Turkish Journal of Biology, 2020, 44(3):132-145
- AL SHEHRI S A, AL-SULAIMAN A M, AZMI S, *et al*. Bio-safety and bio-security: A major global concern for

- ongoing COVID-19 pandemic. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2022, 29(1): 132–139
- ARDURA A, FERNANDEZ S, PLANES S, *et al.* Environmental DNA for the surveillance of biosecurity threats in Mediterranean lagoons. *Marine Environmental Research*, 2024, 199: 106601
- BERNARDO-CRAVO A P, SCHMELLER D S, CHATZINOTAS A, *et al.* Environmental factors and host microbiomes shape host–pathogen dynamics. *Trends in Parasitology*, 2020, 36(7): 616–633. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2020.04.010>
- BONDAD-REANTASO M G, MACKINNON B, HAO B, *et al.* The progressive management pathway for improving aquaculture biosecurity (PMP/AB): Relevance and potential application to the shrimp aquaculture sector. In: ALDAY-SANZ V (Ed.). *The shrimp book II*, 446–462. 5m Books Ltd, Essex, UK, 2022
- BONDAD-REANTASO M G. Risk analysis in aquaculture. In: TENDENCIA E A, DE LA PEÑA L D, DE LA CRUZ J M V (Eds.). *Aquatic emergency preparedness and response systems for effective management of transboundary disease outbreaks in Southeast Asia: Proceedings of Asean Regional Technical Consultation. 20–22 August 2018, Centara Grand Central Ladprao, Bangkok, Thailand, 2019*, 85–91. <http://hdl.handle.net/10862/3470>
- BROWDY C L. Recent developments in penaeid broodstock and seed production technologies: Improving the outlook for superior captive stocks. *Aquaculture*, 1998, 164(1/2/3/4): 3–21
- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center. *Analysis of major aquatic animal diseases of China in 2014*. Beijing: China Agriculture Press, 2016a [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站. 2014 年我国水生动物重要疫病病情分析. 北京: 中国农业出版社, 2016a]
- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center. *Analysis of major aquatic animal diseases of China in 2015*. Beijing: China Agriculture Press, 2016b [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站. 2015 年我国水生动物重要疫病病情分析. 北京: 中国农业出版社, 2016b]
- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center. *Analysis of major aquatic animal diseases of China in 2016*. Beijing: China Agriculture Press, 2017 [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站. 2016 年我国水生动物重要疫病病情分析. 北京: 中国农业出版社, 2017]
- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center. *Analysis of major aquatic animal diseases of China in 2017*. Beijing: China Agriculture Press, 2018 [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站. 2017 年我国水生动物重要疫病病情分析. 北京: 中国农业出版社, 2018]
- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. *2019 analysis of major aquatic animal diseases in China*. Beijing: China Agriculture Press, 2019 [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2019 我国水生动物重要疫病状况分析. 北京: 中国农业出版社, 2019]
- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. *2020 Analysis of major aquatic animal diseases in China*. Beijing: China Agriculture Press, 2020 [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2020 我国水生动物重要疫病状况分析. 北京: 中国农业出版社, 2020]
- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center. *2024 Aquatic animal health in China*. Beijing: China Agriculture Press, 2024 [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站. 2024 中国水生动物卫生状况报告. 北京: 中国农业出版社, 2024]
- BURNETTE R N. Redefining biosecurity by application in global health, biodefense, and developing technologies. In: BURNETTE R N (Eds.). *Applied Biosecurity: Global health, biodefense, and developing technologies. Advanced Sciences and Technologies for Security Applications*. Springer, Cham, 2021
- BURNHAM T C, PHELAN J. Biological welfare economics: A natural science critique of normative economics. *Journal of Bioeconomics*, 2023, 25: 1–33
- CAMPBELL I, MATEO J, RUSEKWA S B, *et al.* An international evaluation of biosecurity management capacity in the seaweed aquaculture industry. *Journal of Environmental Management*, 2022, 304: 114112
- CAO C. China's evolving biosafety/biosecurity legislations. *Journal of Law and the Biosciences*, 2021, 8(1): Isab020
- CHEN R J, DING T, LU M Y, *et al.* Towards a general-purpose foundation model for computational pathology. *Nature Medicine*, 2024, 30(3): 850–862
- CHONG C M, LOW C F. Synthetic antibody: Prospects in aquaculture biosecurity. *Fish and Shellfish Immunology*, 2019, 86: 361–367
- CHRISTISON K. Building a sustainable aquaculture industry in South Africa: The role of biosecurity. *Revue Scientifique et Technique*, 2019, 38(2): 589–600
- COFI SCA. *Aquatic biosecurity: A key for sustainable aquaculture development*. Phuket: CoFI Sub-Committee on Aquaculture, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2010
- COTTIER-COOK E J, CABARUBIAS J P, BRAKEL J, *et al.* A new progressive management pathway for improving seaweed biosecurity. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 7401

- COTTIER-COOK E J, NAGABHATLA N, ASRI A, *et al.* Ensuring the sustainable future of the rapidly expanding global seaweed aquaculture industry — A vision. United Nations University Institute on Comparative Regional Integration Studies and Scottish Association for Marine Science Policy Brief, 2021. ISBN 978-92-808-9135-5. <https://cris.unu.edu/gsstarpolicybrief>
- CUI Z Z. Establishment of biosecurity to prevent and control animal epidemics. *China Poultry*, 2012, 34(19): 1–4 [崔治中. 预防控制动物疫病必须建立生物安全大环境. *中国家禽*, 2012, 34(19): 1–4]
- DAKUBO C Y. Exploring the linkages between ecosystems and human health. In: *Ecosystems and Human Health*. 2011, Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0206-1_1
- DONG X, LIANG Y, HUANG J. Global biosecurity strategy and enlightenments from worldwide practice. *Strategic Study of CAE*, 2016, 18(3): 110–114 [董宣, 梁艳, 黄健. 全球水产生物安保战略及其国外经验的启示. *中国工程科学*, 2016, 18(3): 110–114]
- DONG X, WANG G H, HU T, *et al.* A novel virus of Flaviviridae associated with sexual precocity in *Macrobrachium rosenbergii*. *mSystems*, 2021, 6(3): e00003-21
- ENGERING A, HOGERWERF L, SLINGENBERGH J. Pathogen–host–environment interplay and disease emergence. *Emerging Microbes and Infections*, 2013, 2(2): e5
- FAO. FAO biosecurity toolkit. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO(9)/B616, Rome, 2007, xi: 128
- FAO. Introduction to hazard analysis and critical control point (HACCP). FAO good hygiene practices (GHP) and hazard analysis and critical control point (HACCP) toolbox for food safety. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2023b
- FAO. The Progressive management pathway for aquaculture biosecurity—Guidelines for application. Food and Agriculture Organization of United Nations, Fisheries and Aquaculture Technical Paper, No.689. Rome, 2023a. <https://doi.org/10.4060/cc6858en>. rep no 1053
- FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2024 — Blue transformation in action. Food and Agriculture Organization of United Nations, Rome, 2024. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- FAO. World food Summit: Rome declaration on world food security and world food summit plan of action. Food and Agriculture Organization of United Nations, Rome, 1996
- HASSELL J M, NEWBOLD T, DOBSON A P, *et al.* Towards an ecosystem model of infectious disease. *Nature Ecology and Evolution*, 2021, 5: 907–918
- HE W T, HOU X, ZHAO J, *et al.* Virome characterization of game animals in China reveals a spectrum of emerging pathogens. *Cell*, 2022, 185(7): 1117–1129(e8)
- HUANG J, XIANG J H. Breeding technology of specific pathogen free (SPF) shrimp. In: ZENG T K, XIANG J H (Eds). *Marine biotechnology*. Jinan: Shandong Scientific and Technological Press, 1998, 261–268 [黄健, 相建海. 无特定病原(SPF)虾的培育技术. 曾呈奎, 相建海, 主编: 《海洋生物技术》. 济南: 山东科学技术出版社, 1998, 261–268]
- HUANG J, ZENG L B, DONG X, *et al.* Trend analysis and policy recommendation on aquatic biosecurity in China. *Strategic Study of CAE*, 2016, 18(3): 15–21 [黄健, 曾令兵, 董宣, 等. 水产生物安保发展趋势与政策建议. *中国工程科学*, 2016, 18(3): 15–21]
- HUANG Z, ZENG S, XIONG J, *et al.* Microecological Koch's postulates reveal that intestinal microbiota dysbiosis contributes to shrimp white feces syndrome. *Microbiome*, 2020, 8: 32
- KAPPES A, TOZOONEYI T, SHAKIL G, *et al.* Livestock health and disease economics: A scoping review of selected literature. *Frontiers in Veterinary Science*, 2023, 10: 1168649
- LIN L, ZHAO L J, CHEN W J. Adopt three sets of ring theory to prevent and control aquatic diseases. *Scientific Fish Farming*, 2016(1): 59–60 [林鑫, 赵丽娟, 陈文捷. 采用三套环理论防控水产疾病. *科学养鱼*, 2016(1): 59–60]
- LINDENMAYER J M, KAUFMAN G E. One health and one welfare. In: STEPHENS T (Ed). *One welfare in practice: The role of the veterinarian*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2021, 3. <http://www.routledge.com/9780367904067>
- LOTZ J M, BROWDY CL, CAR W H, *et al.* USMSFP suggested procedures and guidelines for assuring the specific pathogen status of shrimp broodstock and seed. In: BROWDY C L, HOPKINS J S. *Swimming through troubled waters*. Proceedings of the Special Session on Shrimp Farming. Baton Rouge, LA: World Aquaculture Society, 1995, 66–75
- LOTZ J M. Viruses, biosecurity and specific pathogen-free stocks in shrimp aquaculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 1997, 13: 405–413
- MACLEOD A, SPENCE N. Biosecurity: Tools, behaviours and concepts. *Emerging Topics in Life Sciences*, 2020, 4(5): 449–452
- MI S X. Improving plant welfare to build ecological civilization. *Plant Doctor*, 2019, 32(1): 7–8 [米世雄. 提高植物福利 建设生态文明. *植物医生*, 2019, 32(1): 7–8]
- MIDTLYNG P J, GRAVE K, HORSBERG T E. What has been done to minimize the use of antibacterial and antiparasitic drugs in Norwegian aquaculture? *Aquaculture Research*, 2011, 42: 28–34
- MOSS S M, MOSS D R, ARCE S M, *et al.* The role of selective breeding and biosecurity in the prevention of disease in penaeid shrimp aquaculture. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2012, 110(2): 247–250
- MYKLEBUST I E. Aquaculture law and administration in Norway, challenges due to fragmented management.

- University of Bergen, 2016
- NACA. Regional aquatic organism health strategy. Network of aquaculture centres in Asia-Pacific, adopted during the 32nd NACA Governing Council meeting, in Chiang Mai, Thailand, on 7–9 August 2023, 2023
- O'BRIEN A, TOWNSEND K, HALE R, *et al.* How is ecosystem health defined and measured? A critical review of freshwater and estuarine studies. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 722–729
- OSBORN A, HENRY J. The role of aquaculture farm biosecurity in global food security. *Revue Scientifique et Technique*, 2019, 38(2): 571–587
- PALIĆ D, SCARFE A D, WALSTER C I. A standardized approach for meeting national and international aquaculture biosecurity requirements for preventing, controlling, and eradicating infectious diseases. *Journal of Applied Aquaculture*, 2015, 27: 185–219
- PINILLOS R G, APPLEBY M C, MANTECA X, *et al.* One Welfare — A platform for improving human and animal welfare. *Veterinary Record*, 2016, 179(16): 412–413
- PINTO JIMENEZ C E, KEESTRA S, TANDON P, *et al.* Biosecurity and water, sanitation, and hygiene (WASH) interventions in animal agricultural settings for reducing infection burden, antibiotic use, and antibiotic resistance: A One Health systematic review. *Lancet Planet Health*, 2023, 7(5): e418–e434
- RAMAN R P, PRAKASH C, MAKESH M, *et al.* Environmental stress mediated diseases of fish: An overview. In: GOSWAMI N C (Ed). *Advances in fish research*. Narendra Publishing House, Delhi, India, 2013(V): 141–158
- RUTJES SA, VENNIS IM, WAGNER E, *et al.* Biosafety and biosecurity challenges during the COVID-19 pandemic and beyond. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2023, 11: 1117316
- SAJALI USBA, ATKINSON N L, DESBOIS A P, *et al.* Prophylactic properties of biofloc- or Nile tilapia-conditioned water against *Vibrio parahaemolyticus* infection of whiteleg shrimp (*Penaeus vannamei*). *Aquaculture*, 2019, 498: 496–502
- SCHAR D, ZHAO C, WANG Y, *et al.* Twenty-year trends in antimicrobial resistance from aquaculture and fisheries in Asia. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 5384
- SCHOLTHOF K B G. The disease triangle: Pathogens, the environment and society. *Nature Reviews Microbiology*, 2007, 5: 152–156. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1596>
- SHI M, ZHAO S, YU B, *et al.* Total infectome characterization of respiratory infections in pre-COVID-19 Wuhan, China. *PloS Pathogens*, 2022, 18(2): e1010259
- SHI Z L. Origins of SARS-CoV-2: Focusing on science. *Infectious Diseases and Immunity*, 2021, 1(1): 3–4
- SHIMOMURA Y, KATSUURA T. Sustaining biological welfare for our future through consistent science. *Journal of Physiological Anthropology*, 2013, 32(1): 1
- SMITH K F, DOBSON A P, MCKENZIE F E, *et al.* Ecological theory to enhance infectious disease control and public health policy. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005, 3(1): 29–37
- SNIESZKO S F. The effects of environmental stress on outbreaks of infectious diseases of fishes. *Journal of Fish Biology*, 1974, 6(2): 197–208
- SOKOLOW S H, NOVA N, PEPIN K M, *et al.* Ecological interventions to prevent and manage zoonotic pathogen spillover. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2019, 374: 20180342
- STEVENS R B, Chapter 10 - Cultural practices in disease control. In: HORSFALL J G, DIMOND A E (Eds). *Plant pathology, an advanced treatise, Vol III*. New York: Academic Press, 1960, 357–429
- SUBASINGHE R, ALDAY-SANZ V, BONDAD-REANTASO M G, *et al.* Biosecurity: Reducing the burden of disease. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2023, 54(2): 397–426
- SUN J, WAN X Y, YANG Q, *et al.* Case studies: Pathogenic agent and microbiome analysis for zoea of *Litopenaeus vannamei* suffering from an unknown disease. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(5): 134–144 [孙静, 万晓媛, 杨倩, 等. 病例研究: 未知病因的凡纳滨对虾蚤状幼体的病原和微生物组分析. *渔业科学进展*, 2019, 40(5): 134–144]
- TANG Q S. The past and future of sustainable development of Chinese modern fisheries. *Progress in Fishery Sciences*, 2023, 44(6): 1–6 [唐启升. 中国式现代渔业可持续发展的过去和未来. *渔业科学进展*, 2023, 44(6): 1–6]
- TRAN L H, FTIZSIMMONS K M, LIGHTNER D V. Tilapia could enhance water conditions, help control EMS in shrimp ponds. *Global Aquaculture Advocate*, 2014, 17(1): 11–12
- UOY. Plant welfare is improved by fungi in soil. University of York, ScienceDaily, 2014. <https://www.sciencedaily.com/releases/2014/05/140512101404.htm>
- WANG G Z, BURRILL H M, PODZIKOWSKI L Y, *et al.* Dilution of specialist pathogens drives productivity benefits from diversity in plant mixtures. *Nature Communications*, 2023, 14: 8417
- WANG H L, WAN X Y, XIE G S, *et al.* Insights into the histopathology and microbiome of Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei*, suffering from white feces syndrome. *Aquaculture*, 2020, 527: 735447
- WANG M H, CHEN Y G, ZHAO Z, *et al.* A convenient polyculture system that controls a shrimp viral disease with a high transmission rate. *Communications Biology*, 2021, 4: 1276
- WANG Z C. Biosafety and biosecurity: Two different words one conceptual framework. *Wuhan University Journal (Philosophy and Social Science)*, 2006, 59(2): 254–258 [王子灿. Biosafety 与 Biosecurity: 同一理论框架下的两个不

- 同概念. 武汉大学学报(哲学社会科学版), 2006, 59(2): 254–258]
- WHO. Antimicrobial resistance. World Health Organization, 2023. Retrieved from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance>
- WHO. Outbreak preparedness and resilience (Laboratory biosafety manual, fourth edition and associated monographs). World Health Organization, Geneva, 2020. ISBN 978-92-4-001137-3, Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO
- WOAH. Aquatic animal health code. World Organisation for Animal Health, Paris: WOAH, 2024a. <https://www.woah.org/en/what-we-do/standards/codes-and-manuals/aquatic-code-online-access/>
- WOAH. Final report of the 82nd general session of the world assembly of delegates. World Organisation for Animal Health, 25 to 30 May 2014, Paris, 2014a. https://former.woah.org/eng/Session2015/pdf/A_FR_2014_public.pdf
- WOAH. Final report of the 88th general session of the world assembly of delegates. World Organisation for Animal Health, 24 to 28 May 2021 by videoconference, Paris (France), 2021. <https://www.woah.org/app/uploads/2021/06/a-88sg-final-report-2021.pdf>
- WOAH. Manual of diagnostic tests for aquatic animals. World Organisation for Animal Health, Paris, 2024c. <https://www.woah.org/en/what-we-do/standards/codes-and-manuals/aquatic-manual-online-access/>
- WOAH. Report of the meeting of the OIE Aquatic Animal Health Standards Commission. World Organisation for Animal Health. Paris (France), 29 September–3 October 2014b. https://www.woah.org/fileadmin/Home/eng/International_Standard_Setting/docs/pdf/Aquatic_Commission/A_AAC_Sept_Oct_2014.pdf
- WOAH. Terrestrial animal health code. World Organisation for Animal Health, Paris, 2024b. <https://www.woah.org/en/what-we-do/standards/codes-and-manuals/terrestrial-code-online-access/>
- WTO. WTO agreement on sanitary and phytosanitary measures (SPS Agreement). Geneva: WTO, 1995
- WU X, NAWAZ S, LI Y, *et al.* Environmental health hazards of untreated livestock wastewater: Potential risks and future perspectives. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2024, 31(17): 24745–24767
- YANG C X, LI Y, WANG C M, *et al.* Comparative analysis of scallop *Chlamys farreri* infected by acute viral necrosis virus (AVNV) in two areas. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(10): 1579–1584 [杨彩霞, 李赞, 王崇明, 等. 两个海区栉孔扇贝感染 AVNV 的比较分析. *水产学报*, 2013, 37(10): 1579–1584]
- YU Y X, WANG Y G, CAI X X, *et al.* The occurrence of AHPND in pond cultured *Litopenaeus vannamei* and its influence on environment, pathogen and immune factors. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, 47(1): 1–10 [于永翔, 王印庚, 蔡欣欣, 等. 环境、病原、免疫因子三要素与池塘养殖对虾 AHPND 发生的关联性. *水生生物学报*, 2023, 47(1): 1–10]
- ZHAO T G, MENG X Y, GUO T M, *et al.* Environmental ethical analysis of plant protection. *Ecological Environment and Protection*, 2023, 6(3): 4–7 [赵天歌, 孟星尧, 郭佟铭, 等. 植物保护的环境伦理学分析. *生态环境与保护*, 2023, 6(3): 4–7]
- ZHOU C, WU W. The legislative paradigm of China's Biosafety Law and its positive significance for the SARS-CoV-2 prevention and control. *Biotechnology Law Report*, 2023, 42(3): 132–139
- ZINSSTAG J, KAISER-GROLIMUND A, HEITZ-TOKPA K, *et al.* Advancing one human-animal-environment health for global health security: What does the evidence say? *Lancet*, 2023, 401(10376): 591–604

(编辑 马璀璨)

Ensuring the Sustainable and High-Quality Development of Aquaculture Through Biosecurity: A Review and Prospects

DONG Xuan, HUANG Jie^①

(State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao Marine Science and Technology Center; Key Laboratory of Maricultural Organism Disease Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Qingdao Key Laboratory of Mariculture Epidemiology and Biosecurity, Qingdao 266071, China)

Abstract This article reviews the importance of biosecurity in aquaculture and its role in promoting sustainable and high-quality development. As a strategic and comprehensive method based on risk analysis, the core objective of biosecurity is to prevent and control disease risks, which ensures the health and sustainable development of the industry. This article elaborates on the concept and historical development of biosecurity, distinguishing it from biosafety, disease prevention, aquaculture, and animal health while exploring the connections and differences between these concepts. The authors proposed that animal health needs three approaches, including biosecurity, animal welfare, and ecological intervention. Six elements for constructing a biosecurity system and implementing the biosecurity plan are identified. Subsequently, the article outlines the key scientific and technological issues involved in the biosecurity framework and introduces the current state of research and development in the fields of science, technology, and policy, both internationally and domestically. Furthermore, this article discusses the role of global and regional organizations in promoting aquaculture biosecurity strategies and the practices of different countries and regions in constructing aquaculture biosecurity regulatory systems. In particular, it introduces how international organizations such as the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and the World Organization for Animal Health (WOAH) emphasize the application of the biosecurity concept to promote the sustainable development of aquaculture. This article also discusses the evaluation of biosecurity in aquaculture enterprises and its technical content. Using the cultivation of specific pathogen-free (SPF) shrimp seedlings as an example, this article introduces the development of biosecurity in international enterprises and the practices employed by the authors in shrimp hatcheries. Finally, this article highlights the challenges and opportunities for China in the field of aquaculture biosecurity and discusses the future direction of biosecurity strategies. This includes constructing a roadmap for the long-term development strategy of the national biosecurity plan; strengthening research, education, and awareness of biosecurity; prioritizing the development of biosecurity for the aquatic seed industry; and building an aquatic seed industry system with a high standard of biosecurity to ensure the sustainable and high-quality development of aquaculture industry in China.

Key words Biosecurity; Aquaculture; Prevention and control of epidemics; Sustainable development

① Corresponding author: HUANG Jie, Email: huangjie@ysfri.ac.cn