

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2011.01202

中国综合水产养殖的发展历史、原理和分类

董双林

中国海洋大学 海水养殖教育部重点实验室, 山东 青岛 266003

摘要: 综合水产养殖是水产养殖的重要类型, 它既包括同一水体水生生物的混养, 也包括水产养殖与同一水体或邻近区域进行的其他生产活动的结合。中国的稻田养鱼始于 1 800 年前, 大规模的海水综合养殖始于公元 1975 年。目前中国开展的综合养殖模式有近百种, 其依据的生态学原理主要有 3 个: 通过养殖生物间的营养关系实现养殖废物的资源化利用; 利用技术措施、养殖种类、养殖系统间功能互补或偏利作用平衡水质; 养殖水体资源(时间、空间和饵料等)的充分利用。综合养殖系统可分为技术措施综合、养殖种类综合和系统综合三大类, 其中系统综合类又可再分为水基系统综合和水基与陆基系统综合两个亚类。

关键词: 综合水产养殖; 历史; 原理; 分类; 中国

中图分类号: S96

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2011)05-1202-08

综合水产养殖(integrated aquaculture, 下称综合养殖)既包括同一水体水生生物的混养, 也包括水产养殖与同一水体或邻近区域进行的其他生产活动的结合^[1-2]。综合养殖具有资源利用率高、环保、产品多样、持续供应市场、防病等优点^[1], 因此, 被普遍认为是一种可持续的养殖模式。

2009 年 FAO 组织出版了《综合海水养殖: 全球综述》的技术报告^[1], 其目的是指导世界海水养殖的发展。但是, 由于作者缺乏对中国相关信息的了解, 致使该报告反映中国综合养殖的内容较少^[2-3]。中国是世界上开展综合养殖历史最悠久、经验最丰富、养殖种类和模式最多的国家, 因此, 没有足够的中国信息就不可能真实反映世界综合养殖的理论和实践。为了让世界了解中国综合养殖的状况, 同时也为指导中国综合养殖活动的健康发展, 本文简要总结、归纳了中国综合养殖的历史沿革、原理、分类, 并展望了其前景。

1 中国综合水产养殖的历史沿革

中国是世界上开展综合养殖最早的国家。《魏

武四时食制》(公元 220-265 年)就记载, “郟县子鱼黄磷赤尾(鲤), 出稻田, 可以为酱”^[4]。这表明, 此时就有稻田养鲤了。刘恂在唐昭宗时代(公元 889-904 年)所著《岭表录异》记载, “伺春雨丘中贮水, 即先买鲢鱼子散水田中, 一二年后, 鱼儿长大, 食草根并尽, 即为熟田又收鱼利”。这是中国历史上最早的稻田养草鱼的记录, 同时其还初步阐明了稻和草鱼综合养殖中的互利关系。

南宋的《嘉泰志》(公元 1201-1204 年)记载, “会稽、诸暨以南, 大家多凿池养鱼为业。每春初, 江洲有贩鱼苗者, 买放池中, 辄以万计”, “其间多鱮、鲢、鲤、鲩、青鱼而已”。此处记载的正是鱼类混养。明代徐光启著的《农政全书》(公元 1639 年)中还介绍了鲢和草鱼混养的比例及其营养关系。

《农政全书》(公元 1639 年)的江西养鱼法记载, “作羊栏与塘岸上, 安羊, 每早扫其粪于塘中, 以饲草鱼, 而草鱼之粪又可饲鲢鱼, 如是可损入打草, 但鱼略有微滞耳”。这表明那时已存在鱼畜综合养殖。清代屈大均的《广东新语》(约公元 1700 年)详细记载了流行于珠江三角洲区域的基

收稿日期: 2011-05-28; 修订日期: 2011-07-07.

基金项目: 国家支撑计划课题(2011BAD13B03); 海洋公益性行业科研专项(200905020).

作者简介: 董双林(1956-), 博士, 教授, 主要从事水产养殖生态学与生态养殖研究工作. E-mail: dongsl@ouc.edu.cn

塘养殖。

1959 年中国政府组织众多水产养殖和水生生物学专家, 总结中国传统的淡水养殖经验, 编写了《中国淡水鱼类养殖学》^[4]。该书将中国传统的淡水养鱼技术归纳为“水、种、饵、密、混、轮、防、管”八字精养法。其中“混(养)”和不同种类的“轮(捕轮放)”都属于综合养殖的技术范畴。

中国规模化的综合海水养殖始于 1975 年在山东蓬莱开展的海带、贻贝间养^[5]。几乎与此同时, 福建福鼎在海带养殖区套养贻贝也获得良好效果^[6]。1984 年山东长岛县发展海水“立体养殖” $1\ 333\ \text{hm}^2$ ^[7], 经济效益十分显著。

海水池塘综合养殖较早的报道是 1979 年在江苏赣榆开展的对虾与梭鱼混养^[8]。朱耀光^[9]也于 1980 在江苏省启东开展了对虾与文蛤混养, 效益良好。现在由于对虾 WSSV 病还在流行, 对虾与贝类、蟹类、鱼类、藻类的池塘混养十分盛行。

2 综合水产养殖的生态学原理

2.1 通过养殖生物间的营养关系实现养殖废物的资源化利用

Edwards 等^[10]认为, 综合养殖的原理是养殖废物再利用。多营养层次综合养殖(IMTA)是西方学者十分推崇的综合养殖模式^[11], 也是综合养殖的一种重要类型, 其主要原理就是将一种养殖生物排出的废物变为另一种养殖生物的食物(营养)^[2]。中国早在 1 100 年前开始的稻田养草鱼, 就是通过水稻和草鱼间的营养关系实现养殖废物资源化利用的范例。草鱼食杂草, 减少了杂草与水稻的营养竞争, 鱼的粪便又对水稻起到了施肥作用。中国传统的草鱼与鲢混养也具有这样的功能, 以草喂草鱼, 草鱼残饵和粪便肥水养鲢。目前流行的许多养殖模式, 如滤食性鱼类与吃食性鱼类混养、鱼-鸭、鱼-畜、鱼-菜、对虾-缢蛭、对虾-文蛤、海带-扇贝-海参、海带-海参-鲍等综合养殖等都基本是依据此原理。尽管上述这些综合养殖类型多样, 但它们的基本原理相同, 即通过不同营养生态位生物间的组合, 使进入养殖系统的(营养)物质得到多次或反复利用, 从而使系统

内能量和物质的利用效率得到提高。

诚然, 利用养殖生物间的营养关系建立的综合养殖模式是最重要的综合养殖类型, 但依据其他生态关系和经济目的建立的综合养殖模式在中国也十分重要且普遍。

2.2 利用技术措施、养殖种类、养殖系统间功能互补或偏利作用平衡水质

改善、稳定养殖水体的水质也是综合养殖的重要功能。熊邦喜等^[12]的研究表明, 配养于养鲤网箱外的鲢可起到改善水质、提高养殖水体负荷力的作用。综合养殖中改善、稳定养殖水质的技术途径有两种: 一种是利用养殖生物或养殖系统间的互补或偏利作用, 另一种是综合利用两种具有互补功能的技术措施。

2.2.1 养殖生物或系统功能间的互补作用 Chopin 等^[13]将水产养殖生物分为投喂性养殖种类(fed species)和获取性养殖种类(extractive species, 如滤食性动物、大型海藻)2 类。这 2 类生物的混养(综合)可减轻污染、提高资源利用效率。董双林等^[14]依据养殖生态系统运转的代谢类型或驱动因素将水产养殖系统分为 2 类, 即自养型养殖系统和异养型养殖系统。前者主要靠太阳辐射直接提供能源, 如海带养殖系统等; 后者则主要靠人工投饲来提供能源, 如对虾池塘养殖系统、吃食性鱼类网箱养殖系统等。这两类养殖系统在生态学上有很多互补性(表 1), 它们的复合可提高养殖水体的养殖容量。

滤食性贝类养殖在生产管理上属于获取性养殖种类, 在生态学上则是异养型养殖系统。滤食性贝类养殖可以从水体中净提取氮、磷、碳等物质, 但又会因为生物沉积作用(粪便或假粪的沉积)而在养殖区下部形成能量和物质的蓄积, 造成养殖区局部自身污染; 滤食性贝类在养殖过程中会从水中吸收溶解氧, 排出二氧化碳和氨等。与贝类间养的大型藻类可以吸收贝类排出的二氧化碳和氨, 并为贝类提供更多的氧气。正因为这些互补作用, 才使得贝藻间养在山东桑沟湾收到较好的生产效果^[15]。

2.2.2 技术措施的互补作用 合理利用具有互补

表 1 自养养殖系统和异养养殖系统的特性
Tab. 1 Characteristics of autotrophic and heterotrophic cultural systems

项目 item	自养型 autotrophic	异养型 heterotrophic
例子 example	海带养殖系统 kelp culture	鱼类网箱养殖系统 cage culture of fed fish
能量来源 energy source	阳光辐射 solar radiation	主要是饲料 pellet feeds
O ₂	生产 produce	消耗 consume
CO ₂	吸收 uptake	排放 exhale
营养盐 inorganic nutrient	吸收 absorb	释放 excrete
富营养化 eutrophication	延缓 delay	加速 accelerate

效果的技术措施是综合养殖的重要形式。例如, 在水中投饲养殖网箱中的鲤, 同时施化肥养殖箱外的鲢就属于此形式^[16]。1988 年山东省冶源水库开展了投饲、施化肥培育鲢、鳙鱼种实验, 获得了良好效果^[17]。人工饲料投入养殖水体后一部分被养殖动物摄食, 另一份散失在水体中, 散失的饲料和鱼类粪便的生态学作用相当于有机肥。有机肥作用速度慢, 其分解可使水体的 pH 值、溶解氧(DO)、氧化还原电位(Eh)下降, CO₂ 增加; 施化肥的作用恰与有机肥的效果相反(图 1)。综合使用投饲和施化肥可以有效地发挥这两种技术的生态互补效应, 达到稳定水质、提高养殖产量的目的。

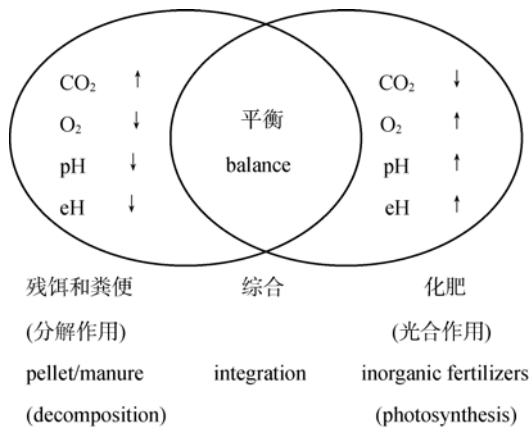


图 1 综合投饲和施化肥的生态学效果

Fig.1 Ecological effects of integration of pellet feeding and chemical fertilizer applying

以投饲和施有机肥为主的养殖水域和以施化肥为主的养殖水域, 都会发生水环境失衡情况, 但其具体表现则恰巧相反(图 1)。前者表现为自养生物光合作用过弱, 异养生物分解作用过强, 易产生缺氧“泛塘”现象。后者则表现为自养生物活

动过强, 分解作用过弱, 时常会因溶氧或 pH 值过高而导致鱼类气泡病或碱病^[18-19]。综合利用施化肥和施有机肥或投饲这两种技术就可以平衡光合作用和分解作用, 避免“泛塘”和气泡病或碱病的发生。

2.3 养殖水体资源的充分利用

养殖水体的资源主要包括各种饵料、空间和时间。综合养殖是充分利用养殖水体的各种资源、发挥养殖水体鱼产潜力的重要途径。

充分利用养殖水体的空间资源, 就是在一个水体同时放养不同水层的养殖生物, 使养殖水体的垂直空间都得到很好的利用, 以提高水体的养殖容量。中国淡水池塘养殖经常是上层鱼类(鲢、鳙)、中下层鱼类(草鱼、鳊、鲂等)和底层鱼类(青鱼、鳊、鲤、鲫等)混养。合理地选择栖息于不同水层的鱼类混养在一个池塘中可以增加单位面积的放养量, 从而提高池塘鱼产量。

养殖水体中有各种天然饵料, 通过养殖不同食性的动物才可充分利用养殖水体的各种饵料资源。如在池塘或水库同时放养滤食性(鲢、鳙)、草食性(草鱼、鳊、鲂)、底栖动物食性(青鱼、鲤、鲫)等鱼类, 就可以充分利用水体的各种天然饵料资源, 提高养殖水体的鱼产量。

上述鱼类混养在一起, 它们既分享了不同水层也分享了不同的饵料资源。同时, 有些鱼类间还存在一定的营养关系, 如草鱼与鲢的关系。

充分利用养殖水体的时间资源就是尽可能延长一年中养殖水体的利用时间, 轮养就是其中的一种。例如, 江苏省在高温的 5-10 月份养殖凡纳滨对虾, 而在 10 月至次年 5 月养殖冬季仍然摄食、生长的鳊^[20]。

以上是中国综合养殖依据的主要生态学原理, 依据此原理建立的综合养殖模式或类型都具有对投入的资源利用率高、对环境副作用小、经济效益较高的特点。然而, 目前也有些综合养殖类型是出于其他的经济或技术目的, 例如对虾与河鲃混养则为的是生态防病^[21]。

3 综合养殖系统的分类

综合养殖是多种水产养殖模式中的重要一类。为了更好地理解综合养殖和从生态系统水平上考察水产养殖生产活动, 有必要首先依据水产养殖生态系统的基本特点对水产养殖系统进行重新分类。

3.1 水产养殖系统的分类

人们常依据水体的盐度将水产养殖分为海水养殖、淡水养殖、半咸水养殖, 还依据水体的类别分为池塘养殖、稻田养鱼、水库(湖泊)养殖等。当然, 还可以依据养殖生物的种类、养殖对象的发育阶段、养殖设施的类别等将其作另外的分类。上述这些分类都基本上是从养殖生产的角度进行的分类, 如从生态学的角度, 特别是从制约养殖水体生产力的角度, 则可把水产养殖系统分为以下 5 种基本类型:

3.1.1 营养盐制约型 本型包含水生经济植物的养殖, 如海藻栽培等。该养殖系统的主要制约因子是营养盐, 有时也表现为光照、温度等共同制约。

3.1.2 饵料制约型 本型包括利用天然饵料养殖经济水生动物的各种方式, 该养殖系统的主要制约因子是天然饵料的量和质。此型可再分为 3 类, 即粗放养殖类、施化肥养殖类以及有机肥或有机肥和无机肥混合施肥养殖类。

3.1.3 溶氧制约型 本型养殖方式下养殖动物被提供足量的人工饲料, 因此水体的溶解氧状况就成为提高养殖产量的主要制约因子。此类型可再分为投饲不增氧养殖类、增氧养殖类和室外设施养殖类这 3 类。

3.1.4 多因子制约型 该型主要涉及室内设施养殖或称工厂化养殖, 其显著特点是对养殖过程中

多种环境因子的控制。这一养殖方式使养殖动物处在适宜的养殖环境中, 其营养得到充分满足, 生长基本不受季节限制, 因此, 该类型产量更高。

另外, 现在人们正在研究生物絮团系统养殖, 其显著特点是异养过程强烈。上述养殖类型主要是按单种类养殖进行划分的, 多种类混养则属于综合养殖类型。

3.1.5 综合养殖型 该类型既包括同一水体内水生物的混养, 也包括水产养殖与同一水体或邻近水体/陆地进行的其他生产活动的结合。该类型中多种技术、种类或系统间耦合的程度影响或制约其生产效率。

3.2 综合水产养殖系统的分类

刘焕亮等^[22]将综合养鱼系统分为渔-桑、渔-蔗、渔-果、渔-花、渔-草和渔-菜等 6 类, 他们并没有将水生生物同水体混养视为综合养殖。Troell^[2]将综合海水养殖系统分为 4 类, 即混养系统、分池环联系统、轮养系统和鱼-红树林综合系统。中国是世界上综合养殖技术应用最为广泛、类型最为多样的国家, 如果在中文的百度网(www.baidu.com)上搜索“水产混养”, 即可获得百万条以上的信息。这些综合养殖的形式既有两种具有互补功效的技术(如综合投饲和施肥)的合理应用, 还有不同生产系统之间的合理配置, 更多的是在一个养殖水体内进行的两种或两种以上水生生物的混养。

3.2.1 技术综合型(technical integration) 此型是在同一水体中综合运用两种具有互补作用的技术措施的养殖类型。例如, 在水体中将投饲网箱养鲤与施化肥养殖箱外的鲢相结合^[16-17]。再如, 施有机肥与施化肥结合养殖罗非鱼^[23-24]。这两种技术措施可以在水体产生生态互补效应。

3.2.2 养殖种类综合型(species integration) 此型是在同一水体中利用两个或多个养殖种类在营养关系、食性、生活空间、养殖时间等方面的差异进行合理混养的养殖方式。该型又可分为以下 5 类:

(1) 营养层次综合或多营养层次综合养殖(trophic integration/IMTA) 本类综合养殖是在同

一水体混养或间养不同营养层次的生物。这些养殖生物间存在一定的营养关系。有些西方学者习惯于用多营养层次综合养殖(IMTA)表述这类综合养殖类型^[3, 11]。事实上, 此类综合养殖模式在中国和其他亚洲国家早已存在且类型很多。过去, 亚洲国家多用混养(polyculture or co-culture)一词表述多种水生生物同时养殖在同一水体, 其中包括不同营养层次种类的混养。一些西方学者或许是为区分不同食性鱼类的混养, 或认为亚洲的混养模式过于粗放, 而将有藻类的或集约化程度更高的混养称为 IMTA^[2, 25]。IMTA 是综合养殖中最重要的一类, 该术语在学术上更量化且更具科学本质。笔者认为, 营养层次综合一词在系统分类上更恰当。

(2) 不同水层混养(spatial integration) 此种类型是将生活于不同水层(食性也可能有所不同)的动物养殖在同一水体中, 以合理利用养殖空间和不同水层的天然饵料资源, 充分利用水体的养殖容量。

(3) 轮捕轮放(rotary stocking and harvesting) 此处的轮捕轮放是混养多种生物, 分不同时间捕捞。例如, 中国江浙一带就有多种鱼类混养, 夏、秋季先捕鲢、鳙和草鱼, 年底再捕鳊、鲂、鲫等鱼类^[4]。现在流行的海水池塘虾、蟹混养也属此类^[26]。

(4) 轮养(temporal integration) 此种养殖方式是在同一水体不同的时间段养殖不同的种类, 以达到时间上充分利用养殖水体资源, 实现高产、高效的目的。例如, 江苏省池塘凡纳滨对虾与鳊轮养^[20]。

(5) 多功能综合养殖(multi-function integration) 此种方式是将多种生物混养在同一水体, 利用这些混养生物间的多种关系以达到充分利用水体的空间、时间和饵料资源的目的。例如山东省荣成好当家集团在池塘实行刺参、海蜇、对虾以及扇贝的混养, 这就是典型的多功能的综合养殖, 其结合了 IMTA、不同水层综合、轮捕轮放和轮养的功能。

(6) 其他 除上述综合养殖类型外, 生产实

践中还有其他一些综合养殖方式。例如, 对虾与河鲀混养就是为了防病。鳊与鲢、鳙等鱼苗同池混养是为鳊提供活饵料鱼。在家鱼亲鱼培育池中混养凶猛的鳊, 以抑制与家鱼亲鱼争饵料的小杂鱼。

3.2.3 系统综合型(systems integration) 此类型是将两种或两种以上的生产系统有机结合在一起, 使系统间产生互利作用或更好地利用空间资源, 达到高效、高产的目的。此类型又可分为水基系统综合和水基与陆基系统综合两亚型。

(1) 水基系统综合(integration of aquatic systems) 此类型是将在水体开展的两种或多种不同的生产活动有机结合在一起, 或在一个水体既开展水产养殖活动又开展其他生产活动的综合养殖方式。主要包括以下几种方式。

分池环联(partitioned aquaculture systems or sequential integration) 此综合养殖方式是将两个或多个不同种类的养殖池塘环联在一起, 以达到更好的生态和经济效果。例如, 广东湛江开展的罗非鱼-对虾-牡蛎-江蓠池塘分池环联养殖^[27]就是其典型实例。这样环联的池塘中, 对虾、罗非鱼、牡蛎和江蓠都在一个良好的环境中生长, 池水封闭循环, 可以很少排污。

鱼-粮综合(aquaculture and agriculture integration) 此综合养殖方式是在同一水体内同时进行水产养殖和农业生产活动。养殖的动物与种植的植物之间存在互利或偏利(对一方有利且对另一方无害)的关系, 从而使整个水体的生态效益和经济效益倍增。稻田养鱼是开展最为普遍的鱼-粮综合养殖的范例。有些地区还在稻田中养殖河蟹、克氏原螯虾、蛙等。

鱼-菜综合(aquaponics) 此养殖方式是在水面种植蔬菜, 水中放养鱼类的综合方式, 也称鱼菜共生系统。水生的蔬菜可以吸收水体的营养盐, 降低水体营养负荷。但与混养大型海藻不同的是, 该类水生蔬菜不从水体吸收 CO₂, 也不向水体释放氧气。鱼藕混养在中国较为普遍。

鱼-水禽综合(aquaculture and waterfowl integration) 此养殖方式是在同一水体进行鱼类和鸭、鹅养殖。这是目前在中国广泛开展的一种综

合养殖模式。鸭、鹅可搅动水体,有利于改善鱼塘生态系统的营养环境,鸭、鹅粪既可被滤食性鱼类摄食,还是良好的有机肥。

鱼和两栖、爬行动物综合养殖(fish, amphibian and reptile integration) 在中国鱼鳖混养非常流行,另外,一些地方还有鱼蛙混养等。

鱼-红树林综合(aquasilviculture) 这是将水产养殖与红树林结合的养殖方式。如深圳将红树种植与美国红鱼和星洲红鱼养殖结合在一起。红树改善了水质,鱼类生长较快^[28]。中国南方还有些地区开展红树林与对虾、红树林与牡蛎种植养殖在一起的综合养殖方式。

其他(others) 在中国还有其他一些类型的综合养殖形式,例如,池塘中套养网箱。另外,养虾池塘中用网隔离混养罗非鱼可避免罗非鱼抢食优质的对虾饲料,又可发挥罗非鱼对水质的调控作用,从而获得对虾、罗非鱼双丰收^[29-30]。

(2) 水基与陆基系统综合(integration of aquatic and land systems) 这种综合养殖的类型是将养殖水体与其周边土地上的生产活动相结合。例如,在池塘四周的土地上种植作物、养殖牲畜等。养殖水体与四周的土地通过某些方式相联系,使养殖水体和土地的生产效率和生态效率更高。这种类型又可分为土地上种植植物或养殖动物两类。

鱼-家畜或家禽综合养殖(integration of pond and livestock breeding) 这种综合养殖方式是在池塘中开展水产养殖,在周边土地上养家畜,如猪、羊、鸡等。池塘可为家畜提供水源,家畜的粪便可以肥水。罗非鱼-猪养殖模式是此种综合养殖方式的典型代表。少量发酵猪粪可以肥水,有利于罗非鱼生长。此类养殖方式生产的水产品的卫生安全已引起人们的关注,但如果发酵后再施用这些粪肥就比较安全了。

鱼-植物种植(integration of aquaculture and agriculture systems) 这种综合养殖方式是在池塘中开展水产养殖,在周边土地上种植植物,如种粮、草、水果等。淡水池塘的淤泥是周边植物的良好肥料,塘水也是这些植物的水源。种植的草除可作为牲畜的饲料外还可能成为草鱼的饲料。

桑基鱼塘虽形式上是鱼-植物综合养殖方式,但其中间又增加了养蚕的环节,是三者的有机结合。塘泥可以肥桑,蚕沙可以喂鱼,种桑、养蚕、养鱼有机结合。

其他(others) 水基与陆基系统综合的养殖方式还有一些其他形式,例如,利用热电厂排放的热水在池塘养殖罗氏沼虾、革胡子鲶、鲍、参等。过去也曾有城镇生活污水养鱼形式,现在出于食品安全的考虑这种养殖方式已很少见。

4 展望

在中国古代,人们对自然的认识深受老子的影响。他的著名论点包括“反者道之动”,即在自然界和人类社会的任何事物,发展到了一个极端,就反向另一个极端。这一论点之一也是儒家所解释的《易经》的主要论点之一。《系辞传》说,“日盈则仄,月盈则食”。这个理论也为中国传统哲学思想中庸之道提供了主要论据^[31]。受这种思维模式的影响,古代中国人民发明了稻田养草鱼这种综合养殖模式。在这种养殖模式中,水稻与草鱼既对立又统一的关系发挥得淋漓尽致。在山东桑沟湾开展的鱼类-扇贝-海带(江蓠)-鲍-刺参多层次综合养殖是国际推崇的现代水产养殖的范例^[11]。

中国的水产养殖业面临着养殖污染、能耗增大、鱼粉制约等问题的挑战^[32-33],但中国同时也面临着人口增长、耕地减少和全球气候变化的压力,因此,中国的水产养殖业不可能回头走低碳低效的粗放养殖的发展模式,也不应该走一些西方国家在工业化过程中走过的先污染后治理、高效高碳的发展模式。水产养殖业分担着 2030 年前到来的中国 14.5 亿峰值人口^[34]食物安全的责任,同时,该产业的发展还要履行中国政府 2020 年 CO₂ 减排的承诺^[35],因此发展高效低碳的养殖模式是水产养殖业发展的必由之路。水产养殖生产应兼顾相关社会系统和生态系统的可持续发展和现时需求,将养殖系统视为一个统一的整体,发展生态系统水平的水产养殖和碳汇渔业^[36]。

综合养殖是中国传统哲学思维在生产实践中的应用,是生态系统水平水产养殖的典范。综合

养殖遵循的基本原理主要是养殖废物的资源化利用、养殖种类或养殖系统间功能的互补。其思路传承了中国传统的辩证思维模式,以对立事物的转化达到自养和异养两个过程的平衡(中庸)。在综合水产养殖系统中存在投喂性养殖种类与获取性养殖种类、自养型养殖与异养型养殖、施化肥与施有机肥等似乎对立的事物,将它们以一定的比例综合就可实现两个相反过程的平衡。

尽管综合养殖是从粗放式的水产养殖系统产生的,但综合养殖决不是低生产力的粗放型生态养殖的代名词。发展综合养殖更不意味着回头走低碳低效的粗放养殖之路,而是依据综合养殖的原理构建、发展高效低碳的养殖模式。低碳低效的粗放式综合养殖与高效高碳的高密度单养也是一对矛盾,发挥它们的优势、克服它们的劣势是构建高效低碳综合养殖生产模式的主要原理。

开放水域的多营养层次综合养殖(IMTA)是一种高效低碳的养殖模式^[11],研究、发展高效低碳的准精养水平的陆基综合养殖模式是中国水产养殖工作者今后的重要责任。

致谢:感谢中国海洋大学李德尚教授和审稿人提出的多项建设性意见。

参考文献:

- [1] Soto K. Integrated mariculture: A global review[R]/FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No. 529. Rome: FAO, 2009: 183.
- [2] Troell M. Integrated marine and brackishwater aquaculture in tropical regions: research, implementation and prospects [R]/Soto D. Integrated mariculture: A global review. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No. 529. Rome: FAO, 2009: 47-131.
- [3] Barrington K, Chopin T, Robinson S. Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine temperate waters[R]/Soto D. Integrated mariculture: A global review. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No. 529. Rome:FAO, 2009: 7-46.
- [4] 中国淡水养鱼经验总结委员会. 中国淡水鱼类养殖学[M]. 北京: 科学出版社, 1961.
- [5] 解承林. 贝藻间养经济效益高[J]. 中国水产, 1981 (5): 5.
- [6] 傅溥. 养海带套养贻贝[J]. 海洋渔业, 1979 (1): 20.
- [7] 骆文, 王民. 长岛县采取有力措施发展海水“立体养殖”[J]. 中国水产, 1984(7): 14-15.
- [8] 吴从道, 唐天德, 林重先, 等. 对虾与梭鱼混养[J]. 海洋渔业, 1980 (3): 11.
- [9] 朱耀光. 对虾养殖池中兼养文蛤[J]. 海洋渔业, 1981(2): 25.
- [10] Edwards P, Pullin R S V, Gartner J A. Research and education for the development of integrated crop-livestock-fish farming systems in the tropics [C]. ICLARM Stud Rev, 1988, (16), 53.
- [11] Chopin T, Robinson S M C, Troell M, et al. Multi-trophic integration for sustainable marine aquaculture [C]// Jørgensen S E, Fath B D. The Encyclopedia of Ecology. Ecological Engineering (Vol. 3). Oxford: Elsevier, 2008: 2463-2475.
- [12] 熊邦喜, 李德尚, 李琪, 等. 配养滤食性鱼对投饵网箱养鱼负荷力的影响[J]. 水生生物学报, 1993, 17(2): 131-144.
- [13] Chopin T, Buschmann A H, Halling C, et al. Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: a key towards sustainability [J]. J Phycol, 2001, 37: 975-986.
- [14] 董双林, 李德尚, 潘克厚. 论海水养殖的养殖容量[J]. 青岛海洋大学学报, 1998, 28(2): 245-250.
- [15] Fang J G, Sun H L, Yan J P, et al. Polyculture of scallop *Chlamys farreri* and kelp *Laminaria japonica* in Sungo Bay[J]. Chin J Oceanol Limnol, 1996, 14(4): 322-329.
- [16] 李德尚. 论大水域综合养鱼[J]. 水利渔业, 1986(2): 28-32.
- [17] 孙秉义, 鲍广栋, 楚昭明, 等. 网箱区施化肥培育大规格鲢、鳙鱼种技术研究[J]. 水利渔业, 1990 (4): 7-10.
- [18] 史为良. 谈鱼类气泡病[J]. 科学养鱼, 1998(6): 23-24.
- [19] 张井增. 北方盐碱池塘 pH 过高原因分析与对策[J]. 齐鲁渔业, 2008, 27(8): 42.
- [20] 沈伟芳, 张斌. 南美白对虾与鳊鱼轮养模式[J]. 中国水产, 2004, (6): 41-42.
- [21] 刘刚, 丁增明, 李长波. 池塘混养中国对虾和红鳍东方鲀试验[J]. 2007, 28(2): 1-2.
- [22] 刘焕亮, 黄樟翰. 中国水产养殖学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [23] Boyd C E, Tucker C S. Pond aquaculture water quality management [M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1998.
- [24] 杨红生, 李德尚, 董双林, 等. 中国对虾与罗非鱼施肥混养的基础研究[J]. 中国水产科学, 1998, 5(2): 35-29.
- [25] Chopin T. Integrated Multi-Trophic Aquaculture. What it is and why you should care and don't confuse it with polycul-

- ture [J]. *N Aquacult*, 2006, 12 (4): 4.
- [26] 李文敏, 宋学章, 孙玉华, 等. 三疣梭子蟹和日本对虾高效混养技术[J]. *中国水产*, 2010, (7): 46–47.
- [27] 申玉春, 熊邦喜, 王辉, 等. 虾-鱼-贝-藻养殖结构优化试验研究[J]. *水生生物学报*, 2007, 31(1): 30–38.
- [28] 余忠明, 林俊雄, 彭友贵, 等. 红树林与水产养殖系统初步研究[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(7): 837–840.
- [29] 介子林. 盐碱地池塘鱼虾混养模式的基础理论研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [30] Sun W M, Dong S L, Zhao X D, et al. Effects of zooplankton refuge on the growth of tilapia (*Oreochromis niloticus*) and plankton dynamics in pond[J]. *Aquacult Int*, 2010, 18: 647–655.
- [31] 冯友兰. 中国哲学简史 [M]. 天津社会科学院出版社, 2008.
- [32] 董双林. 系统功能视角下的水产养殖业可持续发展[J]. *中国水产科学*, 2009, 16(5): 798–805.
- [33] 徐皓, 张祝利, 张建华, 等. 我国渔业节能减排研究与发展建议[J]. *水产学报*, 2010, 35(3): 472–480.
- [34] UN Population Division, Department of Economic and Social Affairs, UN Secretariat. *World Population Prospectus: The 2004 revision* [R]. 2005.
- [35] Shi M J, Li N, Zhou, S L. et al. Can China realize CO₂ mitigation target toward 2020?[J]. *J Res Ecol*, 2010, 1(2): 145–154.
- [36] 唐启升. 碳汇渔业与又好又快的发展现代渔业[C]. 北京: 中国工程院第 109 场工程科技论坛: “碳汇渔业与渔业低碳技术”论文集, 2010: 1–2.

History, principles, and classification of integrated aquaculture in China

DONG Shuanglin

Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

Abstract: Integrated aquaculture is defined as the polyculture of multiple aquatic species in a waters or culture of aquatic species within, or together with, the undertaking of other productive activities. Examples of the integrated culture of rice and fish have existed in China since 1800 B.C. More recently, large scale integrated mariculture was initiated in 1975. At present, there are several dozen types of integrated aquaculture in China that offer several ecological benefits, including waste reclamation through trophic relationship, maintenance of ecological balance by complementary or commensalisms of farmed species or production systems, optimization of resource use (time, space and food), and disease prevention. Integrated aquaculture can be divided into three forms: technical integration, species integration, and system integration, which consists of two sub-groups (integration of aquatic systems and integration of aquatic and land systems).

Key words: integrated aquaculture; history; principle; classification