



中国池塘养殖的环境影响及生态工程化治理

刘兴国

(中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092)

ENVIRONMENTAL IMPACT AND ECOLOGICAL ENGINEERING MANAGEMENT OF POND AQUACULTURE IN CHINA

LIU Xing-Guo

(Institute of Fishery Machinery and Instruments, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China)



刘兴国, 男, 博士, 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所研究员。农业农村部水产养殖设施工程重点实验室主任, 浙江大学博士研究生导师。主要研究水产养殖工程和渔业水域生态工程等, 主持“十三五”“十四五”国家重点研发计划项目, 国家自然科学基金、国家科技基础平台、现代产业技术体系20余项, 发表学术论文170余篇(其中SCI8/EI 50余篇), 出版专著17部, 获国家发明专利85项, 获省部级一等奖4项。

20世纪50年代以来, 我国水产养殖业发展迅速, 水产养殖产量从1954年的27.8万吨上升到2023年的5809.61万吨^[1, 2], 年均增长超过34.65万吨, 养殖产量占水产品总量的比例也从1954年的12.12%上升到2023年的81.64%。目前中国水产养殖总量已占世界水产养殖总量的60%^[3], 是世界第一水产养殖大国。中国水产养殖的快速发展得益于大规模的池塘建设, 以及在人工繁殖、机械增氧和全价配合饲料等关键领域的技术突破^[4]。据统计, 2020年全国内陆池塘养殖面积已达3938.1万亩(约262.7万 hm^2), 比1955年的525万亩(约35万 hm^2)增加了7.5倍(图 1a), 内陆池塘的单产产量也从1955年的0.91 t/hm^2 上升到2020年的8.68 t/hm^2 ^[1, 2](图 1b)。但限于社会经济发展条件, 我国多数内陆养殖池塘采取“因地制宜、因陋就简、因水而建”的方式进行建设, 养殖生产以经验化管理为主。20世纪90年代以后, 随着人们对养殖产量的盲目追求, 池塘养殖病

害频发、尾水污染及产品质量隐患等问题日益突出, 严重影响了池塘养殖产业的健康可持续发展, 人们开始重视池塘养殖的生态环境问题^[4]。2005年以来, 为解决池塘养殖设施落后和模式粗放等问题, 全国开展了池塘标准化改造建设。2019年, 为推进水产养殖业绿色发展, 农业农村部等十部委联合印发了《关于加快推进水产养殖业绿色发展的若干意见》, 并部署了从2020年起在全国实施包括尾水治理的“五大行动”等计划。在此背景下, 国内研发出了“池塘工程化循环水”“三池两坝”等尾水处理技术, 并建设了池塘生态工程化等养殖模式, 取得了一定的成效。但总体而言, 目前我国池塘养殖发展水平还远远落后于社会发展要求, 亟需分析我国池塘养殖发展中的问题, 提出新途径、建立新模式, 推动池塘养殖高质量发展。

本文梳理了我国池塘养殖的生态环境问题, 分析了池塘养殖尾水处理及现行模式存在的问题, 旨

基金项目: “十四五”国家重点研发计划淡水池塘低碳养殖智慧渔场关键技术与装备(2023YFD2400500); 国家特色淡水鱼产业技术体系养殖设施与设备岗位(CARS-46-22)资助 [Supported by the “14th Five-Year Plan” National Key Research and Development Program: Key technologies and equipment of low carbon smart aquaculture in freshwater pond (2023YFD2400500); Aquaculture Facilities and Equipment Position of National Technical System for Characteristic Freshwater Fish Industry (CARS-46-22)]

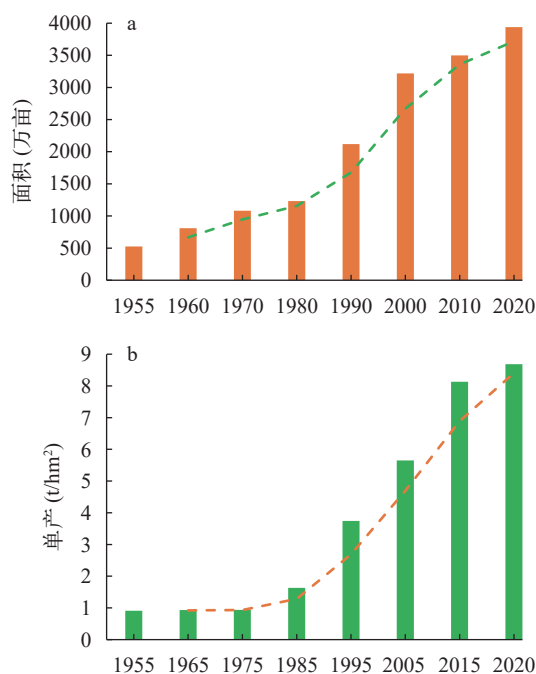


图1 中国池塘养殖面积和产量变化

Fig. 1 Changes and distribution of ponds in China

为推动池塘养殖高质量发展提供参考。

1 池塘养殖的环境影响

池塘养殖是在开放系统内开展的养殖活动, 不仅占用土地、消耗水资源, 还对外部环境产生一定的影响。据研究, 池塘养殖的主要环境影响为污染物排放和温室气体排放, 其中养殖产生的尾水具有富营养化、中低浓度、面源、时空间双重不确定等特点。养殖产生的温室气体主要有二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O), 同时养殖过程还会带来病毒、抗生素、重金属、难降解化合物等新型污染物^[4]。

1.1 水资源消耗情况

池塘养殖的耗水量差异很大。据报道, 全国池塘养殖1 kg鱼的耗水量在3—13.4 m^3 ^[5]。不同养殖种类的耗水量不同, 据报道, 大宗淡水鱼池塘养殖的换水率约300%, 折合每养殖1 kg大宗鱼的耗水量为2.0 m^3 ; 南美白对虾池塘养殖的换水率约200%, 折合每养殖1 kg南美白对虾的耗水量约4.5 m^3 ; 中华绒螯蟹池塘养殖换水率较低, 但由于产量低, 1 kg中华绒螯蟹的耗水量仍达5 m^3 ; 而流水养殖1 kg鳊的耗水量则高达13.4 m^3 ^[6]。按照养殖1 kg水产品平均耗水3 m^3 鱼计算, 2023年全国池塘养殖的年耗水量超过 $7.4 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。

1.2 土地占用情况

2023年我国有内陆池塘养殖面积262.86万 hm^2 ,

养殖产量达2453.2万吨^[2]。池塘标准化建设之前, 我国池塘的占地比例一般约为50%, 即2亩土地开挖1亩水面。2005年以来, 全国开展了池塘标准化建设, 标准化建设后池塘养殖水面的占地比例提升到70%, 据此计算, 全国内陆池塘约占用土地375.5万 hm^2 。按照产量计算, 全国内陆池塘养殖的单位土地产量约为6.77 t/hm^2 , 即每平米土地可生产水产品0.677 kg, 与猪、鸡等畜牧养殖相比, 池塘养殖单位土地的动物蛋白产出率还是很低的^[7]。我国的池塘养殖主要集中在华东(104.5万 hm^2 /37.82%)、华南(37.3万 hm^2 /13.53%)和华中(81.85万 hm^2 /29.63%)等经济发达地区。受土地资源等限制, 这些地区的池塘养殖面积已呈逐年减少的趋势, 其中在2006至2016年十年间, 上海市的池塘养殖面积减少5635 hm^2 , 北京市减少2106 hm^2 , 这种趋势说明内陆池塘养殖的发展空间正在不断压缩并向偏远地区转移。

1.3 温室气体排放情况

水养养殖主要产生 CH_4 与 N_2O 。Yuan等^[8]发现全球淡水养殖业每年 CH_4 和 N_2O 排放量分别为604和3.67万吨, 占全球人为 CH_4 和 N_2O 排放量的1.82%和0.34%。根据Poore等^[9]的研究数据, 每生产100 g养殖鱼类蛋白的碳排放量为5.98 $\text{kg CO}_2\text{-eq}$, 显著低于猪肉蛋白的7.63 $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ 、乳牛蛋白的16.87 $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ 、羊肉蛋白的19.85 $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ 及牛肉的49.89 $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ 。从LCA评估数据来看, 水产养殖的碳排放主要来自饲料生产, 占总排放量的70%以上。按水产养殖对象的温室气体排放排序, 前3位分别为鲤科鱼类(30.59%)、罗非鱼(8.33%)、鲇(6.80%)^[10]。虽然相比于畜牧业18%的排放强度, 水产养殖总体上排放强度较低, 低碳养殖仍是我们需要考虑的重要内容。

1.4 饲料浪费污染情况

饲料是水产养殖水污染的主要来源, 主要在投喂和吸收转化方面。据研究, 由于投喂方式不当, 池塘养殖投放的饲料有10%—20%未被摄食, 直接进入水体形成污染。被鱼类摄入的饲料中也仅有20%—25%的氮(N)和25%—40%的磷(P)用于生长, 其余的75%—80%的N和60%—75%的P则以粪便和代谢物形式排入外界环境^[11]。据调查, 江浙地区大宗淡水鱼池塘养殖每年每公顷N和P的投入量分别约为1550和580 kg ^[5]。养殖1 kg大宗淡水鱼需输入N和P分别为90.24和21 g, 其中20%的N转化为水产品, 15.2%的N随尾水排放, 其余的N转化为其他生物质或沉积到底泥中; 45.2%的P转化为水产品, 9.7%的P随尾水排放, 其余的P转化为其他生物质或沉积到底泥中^[12]。

1.5 养殖沉积物污染情况

池塘养殖产生大量的沉积物,并主要以有机质和N、P等营养物形式存在。刘兴国等^[12]对上海青浦大宗鱼养殖池塘沉积物分析显示,池塘底质中的总氮(TN)、总磷(TP)和有机质含量分别是自然土壤的6.9、1.5和3.9倍。在15 cm以下土层中,随着土层深度增加,土壤中的TP呈增加趋势,而TN则呈下降趋势,池塘底质中的有机质则主要集中在5—10 cm处,养殖池塘底质的N沉积>有机质沉积>P沉积,表明含N有机物是养殖区最主要的沉积污染物。姚宏禄^[13]对江苏养殖池塘底泥研究发现,养殖池塘底泥(风干样)含有机质3%、速效氮0.01%—0.1%、TN 0.2%、TP 0.2%、全钾0.7%—1%,氮磷钾含量比为1:1:3.5,远远高于自然土壤。

1.6 池塘养殖水质

池塘养殖种类多,养殖水质差异大。据对江苏常州地区大宗淡水鱼养殖池塘连续2年(2009—2010)的监测数据显示,养殖池塘的全年氨氮范围0.06—1.10 mg/L,平均值(0.173±0.015) mg/L;硫化氢变化范围0—0.235 mg/L,平均值(0.054±0.003) mg/L;亚硝酸盐范围0.015—1.114 mg/L,平均值(0.255±0.015) mg/L; TN范围0.510—2.652 mg/L,平均值(0.491±0.035) mg/L; TP范围0.030—0.242 mg/L,平均值(0.097±0.004) mg/L;高锰酸钾指数(COD_{Mn})范围6.15—27.12 mg/L,平均值(14.40±0.29) mg/L^[13],表明养殖导致池塘水质处于富营养化状态。刘兴国等^[12]在对上海青浦区4个大宗淡水鱼养殖池塘水质连续调查分析发现,在8、9月份,池塘水体的TN、氨氮、硝态氮和总悬浮物(TSS)平均浓度分别平均为2.44、0.56、7.38和165 mg/L,池塘水体中TN浓度是地表水国家标准V类水指标的1.22倍,水质富营养化严重。

1.7 尾水排放

尾水排放是池塘养殖对环境的最大直接影响之一。据《第一次全国污染源普查公报》,2007年全国水产养殖的主要水污染物排放量为COD 55.83万吨、TN 8.21万吨、TP 1.56万吨、铜54.85吨和锌105.63吨,分别占农业污染的4.22%、3.04%、5.48%、2.24%和2.17%^[14]。2017年全国水污染物排放量中水产养殖业的水污染物排放量为COD 66.60万吨、TN 9.91万吨和TP 1.61万吨,分别占水污染物排放量的3.11%、3.26%和5.1%^[15]。单位水产品养殖的排污强度分别为COD 13.6 kg/吨、TN 2.02 kg/吨和TP 0.33 kg/吨。与2007相比,2017年全国水产养殖COD、TN和TP的排放强度分别降低了20.0%、23.8%和30.7%^[16]。但养殖污染问

题依然严重。据调查,江浙地区大宗淡水鱼成鱼养殖池塘每年向外界直接排放TSS、COD_{Mn}、TN、TP分别约为2280、199、101和5.0 kg/(hm²·a)。其中N、P直接排放比例分别为6.5%和1%左右^[6]。表1是大宗淡水鱼池塘养殖的污染排放情况。

表1 大宗淡水鱼池塘的污染排放情况

Tab. 1 Pollution emission coefficient of traditional fresh water fish ponds aquaculture

测试内容 Test content	范围 Range (mg/L)	均值 mean value (mg/L)	净排放 Net emissions (kg/hm ² ·a)
SS	5—169	116	2280
COD _{Cr}	32—91.8	63.3	999
COD _{Mn}	8—20.3	15.6	199
BOD ₅	4—16.7	10.8	145
NH ₃ -N	0—5.35	1.54	13.5
NO ₃ -N	0—4.08	1.45	12.7
TN	2—9.72	5.5	101
TP	0.1—0.4	0.28	4.95

据统计,2010年全国水产养殖排污系数平均为52.98 g/kg,一般认为当水产品排污系数超过100 g/kg时即存在污染风险。水产养殖虽然总体污染不重,但在养殖集中区及一些品种的养殖污染问题依然需要引起重视。陈秋会等^[17]调查发现,长江流域(四川、湖南、湖北、江西、安徽和江苏)、珠三角地区(广东、广西)和沿海地区(浙江、福建和山东)是中国淡水水产养殖排污强度较高的区域,不仅水产品养殖种类繁多,而且高排污水产品养殖量较大。黄鳝、鳊、乌鳢、鲈、鳊鲶等是高排污系数的水产品。表2是我国主要淡水养殖种类的排放系数。

1.8 外源输入污染

池塘养殖既可能对外界产生富营养化贡献,也受到外界水域污染的影响。据报道,2013年我国富营养湖泊占78.6%,富营养水库占28.8%,省界断面中劣V类水质占17.1%^[18]。至2022年,3119个国控断面中劣V类水占0.4%,重点监测的209个湖泊中劣V类水质湖泊占4.8%^[19],虽然污染状况有所好转,在一些地区地表水的污染问题依然严峻。

除富营养化污染外,2013年在七大流域水体中,均检出多种持久性有机污染物(POPs),其中松花江、淮河、海河和珠江流域较为严重^[20]。一些地区池塘养殖水体中的POPs也呈不断上升趋势,其对人类健康和生态环境的污染风险越来越大^[21]。重金属污染在水产养殖中较为普遍,据调查,安徽泗县的池塘底泥中As的含量在8—26 mg/kg,平均为13.32 mg/kg^[22],河南中牟县万滩养殖池塘底泥中

Cr含量高达53.35 mg/kg, 严重超出《土壤环境质量标准》I类要求^[23]。此外, 在广西地区池塘^[24]、浙江西部池塘^[25]均发现有不同程度的重金属污染和潜在重金属污染风险。

表2 主要淡水养殖种类的综合排污系数

Tab. 2 Comprehensive Pollutant Discharge Coefficient of Major Freshwater Aquaculture Species

种类Species	综合排污系数Comprehensive discharge coefficient			
	总氮 Total nitrogen	总磷 Total phosphorus	化学耗氧量 Chemical oxygen consumption COD	氨氮 Ammonia nitrogen
青鱼	7.662×10^{-3}	1.400×10^{-3}	3.276×10^{-2}	2.978×10^{-3}
草鱼	2.812×10^{-2}	5.869×10^{-3}	4.448×10^{-2}	1.443×10^{-3}
鲢混养*	1.781×10^{-2}	3.086×10^{-3}	2.851×10^{-2}	4.737×10^{-3}
鳙混养*	2.048×10^{-2}	2.314×10^{-3}	2.220×10^{-2}	4.065×10^{-3}
鲤	3.194×10^{-2}	5.882×10^{-3}	4.299×10^{-2}	1.134×10^{-2}
鲫	1.369×10^{-2}	5.650×10^{-3}	2.255×10^{-2}	4.588×10^{-3}
鳊鲂(鳊)	8.301×10^{-3}	6.385×10^{-4}	6.347×10^{-3}	5.364×10^{-4}
泥鳅	8.102×10^{-3}	5.829×10^{-4}	7.309×10^{-2}	6.703×10^{-3}
鳊	3.081×10^{-2}	3.438×10^{-3}	7.424×10^{-2}	3.638×10^{-3}
鲴	3.471×10^{-2}	3.660×10^{-3}	7.212×10^{-2}	2.615×10^{-3}
黄颡鱼	2.661×10^{-2}	3.447×10^{-3}	7.124×10^{-2}	1.439×10^{-3}
鲢	2.177×10^{-2}	4.536×10^{-3}	9.072×10^{-3}	4.536×10^{-3}
鳊	2.168×10^{-2}	4.264×10^{-3}	8.884×10^{-3}	4.264×10^{-3}
河鲢	2.700×10^{-2}	4.154×10^{-3}	7.269×10^{-2}	4.154×10^{-3}
短盖巨脂鲤	1.984×10^{-2}	3.853×10^{-3}	2.851×10^{-2}	6.935×10^{-3}
长吻鮠	1.875×10^{-2}	3.261×10^{-3}	7.703×10^{-2}	4.076×10^{-3}
黄鳝	2.307×10^{-2}	4.190×10^{-3}	2.223×10^{-1}	2.877×10^{-3}
鳊	1.688×10^{-2}	7.793×10^{-3}	7.249×10^{-2}	2.620×10^{-3}
池沼公鱼	1.731×10^{-2}	1.649×10^{-3}	2.226×10^{-2}	3.298×10^{-3}
银鱼	3.894×10^{-3}	4.867×10^{-4}	2.239×10^{-2}	9.734×10^{-4}
鲈	8.517×10^{-2}	1.583×10^{-2}	1.877×10^{-1}	2.203×10^{-2}
乌鳢	7.236×10^{-2}	1.234×10^{-2}	1.745×10^{-1}	2.530×10^{-2}
罗非鱼	3.094×10^{-2}	5.093×10^{-3}	8.939×10^{-2}	1.174×10^{-2}
鲟	1.963×10^{-2}	3.536×10^{-3}	8.957×10^{-3}	4.083×10^{-3}
鳊	3.314×10^{-2}	7.689×10^{-3}	1.773×10^{-1}	4.439×10^{-3}
罗氏沼虾	1.093×10^{-2}	1.132×10^{-2}	1.344×10^{-2}	1.336×10^{-3}
青虾	9.276×10^{-3}	2.484×10^{-3}	2.406×10^{-3}	1.009×10^{-3}
克氏原螯虾	1.293×10^{-2}	3.077×10^{-3}	2.456×10^{-3}	3.214×10^{-3}
南美白对虾	4.477×10^{-3}	4.562×10^{-4}	3.288×10^{-2}	4.990×10^{-4}
河蟹	1.873×10^{-2}	3.791×10^{-3}	5.476×10^{-2}	8.311×10^{-3}
河蚌	5.181×10^{-2}	4.434×10^{-3}	6.089×10^{-2}	6.489×10^{-4}
螺	-1.830×10^{-2}	-5.435×10^{-4}	1.576×10^{-2}	-2.718×10^{-4}
蚬	-1.760×10^{-2}	-4.093×10^{-4}	1.514×10^{-2}	-4.093×10^{-4}
龟	2.291×10^{-2}	3.589×10^{-3}	3.947×10^{-2}	2.760×10^{-3}
鳖	2.301×10^{-2}	3.517×10^{-3}	3.942×10^{-2}	2.755×10^{-3}
蛙	2.301×10^{-2}	3.549×10^{-3}	3.936×10^{-2}	1.613×10^{-3}
淡水珍珠	51.8494	4.4012	60.9500	7.024×10^{-1}

养殖过程中环境激素、抗生素可通过饲料、用药、进水等途径进入池塘养殖环境, 从而影响水生动物和人类健康。梁惜梅等^[26]调查发现, 在珠江口典型水产养殖区水体和沉积物中有3种磺胺类、7种四环素类、1种喹诺酮类抗生素的抗性基因(ARGs), 除四环素耐药基因 $tetW$ 外, 所有其他ARGs在珠江口养殖区中均被检出, 而且养殖时间越长, ARGs的相对含量越高。据李瑞萍等^[27]调查, 湖北宜东平原分散养殖鱼塘水体中磺胺类抗生素(SAs)的浓度范围为23—828 ng/L。

除风险污染物外, 池塘养殖产生的蓝藻水华会释放藻毒素(Microcystin)。藻毒素释放到水体中对水生生物产生危害, 当人们误食了被藻毒素污染的水产品后, 就会产生中毒或过敏症状, 如眼睛或皮肤过敏、腹泻、乏力、厌食、呕吐、嗜睡、口眼分泌物增多等^[28]。

2 池塘生态工程技术

20世纪80年代后期以来, 随着水产养殖病害的不断暴发, 养殖生态环境问题逐步成为人们关注的重点, 并将生态工程技术应用于水产养殖, 开始了基于生态工程的水产养殖模式研究。在国外, 1980年Egna^[29]组织开展了池塘养殖动力学(PD/A CRSP)研究, 建立了提高池塘生产效率的技术方案和经济性生产方式。1998年, Barry等^[30]将水产养殖与湿地系统相结合, 建立了基于湿地净化养殖排放水的养殖系统。2001年, Scoatt^[31]提出了水产养殖工程设计的原则。2002年, Lin等^[32]研究了基于表面流和潜流湿地的循环水养殖系统, 并应用于对虾养殖。同年, David等^[33]将湿地作为生物过滤器用于高密度养虾, 发现系统对鱼池中TSS、TN、TP的去除率分别达到了88%、72%和86%。2004年, Wang等^[34]建立了基于微藻(*Chactoceros.muelleri*)的南美白对虾(*Penaeus vannamei*)工程化循环水养殖系统, 提高了饲料利用率, 减少了养殖污染。2004年, Brune等^[35]开发了分隔式水产养殖系统(PAS), 改变了传统池塘养殖方式。中国有悠久的生态养殖历史, 早在春秋时期在浙江一带就出现了“桑基鱼塘”等生态养殖方式。进入20世纪以来, 中国池塘生态工程化养殖发展很快, 技术水平也在不断提升, 如2001年, 黄国强等^[36]构建了“多池循环水对虾养殖系统”, 将每个池塘构建成具有水处理功能的综合养殖池, 通过池塘间的调控维持了水环境的稳定。王大鹏等^[37]将虾、青蛤和江蓠三元混养, 构建了“对虾池封闭式综合养殖模式”, 综合产量(以等价的对虾计)提高了25.7%, 投入氮的利用率提高了

85.3%。冯敏毅等^[38]通过研究发现,在池塘养殖中任何单独采用一种生物修复都不完善,只有综合调控才能实现池塘环境修复,并在此基础上研发了“多元健康养殖系统”。李谷^[39]将湿地与池塘相结合,研发了复合人工湿地-池塘养殖系统。刘兴国等^[40]提出了池塘生态工程理念,并研发了池塘生态工程化循环水养殖系统。这些研究为池塘养殖生态工程奠定了基础,并在池塘养殖区得到应用。

与传统池塘养殖相比,池塘生态工程养殖有以下优点:(1)提高产量和生产效率;(2)提高成活率;(3)提高饲料消化吸收率;(4)降低单位产量的能耗;(5)提高水资源利用率;(6)提高劳动效率。目前具有代表性的生态工程化养殖模式主要有以下几种:

2.1 池塘生态工程化循环水模式

系统一般由生态沟渠、生态塘、潜流湿地和养殖池塘组成。养殖池塘通过过水设施串联沟通,池塘排水通过水位控制管溢流到生态沟渠,在生态沟渠初步净化后通过水泵将水提升到生态塘,在生态塘内进一步沉淀与净化后自流到潜流湿地进行处理,处理后的水经过复氧池后自流到前端的养殖池塘,形成循环水养殖系统。应用结果显示,在池塘养殖团头鲂密度 $0.20\sim0.82\text{ kg/m}^3$ 和水体日交换量为10%的情况下,池塘养殖水体中的氨氮、亚硝酸盐、TN、TP、 COD_{Mn} 分别低于1.89、0.20、3.27、0.59和 9.0 mg/L ,均低于对照池塘,符合养殖水质标准。与传统池塘养殖相比,应用池塘生态工程化循环水可节水63.6%,COD减排81.9%^[40]。但存在着建设要求高,建造运行成本高等问题。

2.2 池塘“三池两坝”尾水治理模式

一般由养殖池塘与1个沉淀池、2个过滤坝、1个曝气池和1个生态池组成,简称“三池两坝”尾水处理模式。该模式是将传统排水渠升级为生态沟渠,池塘养殖尾水排放至生态沟渠,通过生态沟渠将养殖尾水汇集至沉淀池中进行沉淀处理,使尾水中的悬浮物沉淀至池底。尾水经沉淀后,通过第一道过滤坝过滤,以过滤尾水中的颗粒物。尾水经过滤后进入曝气池,曝气池通过曝气增加水体中的溶解氧,加速水体中有机质的分解,通过添加芽孢杆菌等微生物制剂,进一步加速分解水体中有机质。尾水经曝气处理后再经过第二道过滤坝,进一步滤去水体中细微颗粒物,再进入生物净化池。通过水生植物、微藻吸收利用水体中的氮磷物质,并利用滤食性、草食性水生动物将水生植物和藻类转化为动物蛋白。“三池两坝”对尾水中TSS、COD、TN、TP和氨氮的平均去除率范围分别为48.1%—60.7%、50.4%—60.7%、52.5%—59.2%、64.2%—

71.5%和72.1%—80.5%,应用后可减少养殖污染,改善环境^[41]。但存在净化效率低,二次污染等问题。

2.3 池塘底排污养殖模式

该模式是在养殖池塘底部修建排污设施,将养殖产生的含残饵、粪便等颗粒物的废水排出池塘,经三级固液分离池过滤、鱼菜共生湿地净化等处理后,达到尾水循环利用或达标排放目标。池塘底排污系统一般采用“深挖塘、底排污、固液分离、湿地净化、鱼菜共生、节水循环”方式,充分利用水生植物净化(如种植空心菜、伊乐藻等水生植物,建设人工湿地等)、物理净化(增加过滤网、活性炭)等进行水质改良。应用效果显示,该模式可使池塘水体中氨氮下降 0.046 mg/L 、TP下降 1.35 mg/L 、 COD_{Mn} 下降 1.3 mg/L 、亚硝酸盐下降 0.032 mg/L 。草鱼养殖池塘应用后,平均产量可提高 3600 kg/hm^2 ,鲢、鳙产量提高 673 kg/hm^2 ^[41]。由于养殖水体颗粒物沉淀需要一定的水流场和水力停留时间等,池塘底排污尾水处理技术尚需深入研究。

2.4 池塘流水槽循环养殖模式

池塘流水槽循环水养殖源于美国Clemson大学Brune等^[35]于2004年研发的分区水产养殖系统(Partitioned aquaculture system, PAS)。池塘流水槽循环养殖系统一般是通过传统池塘进行工程化改造,将池塘分隔成小面积的流水槽推水养殖区和大面积的生态净化区,在流水槽养殖区通过增氧和推水设备,形成流水环境,进行高密度养殖。在生态净化区通过放养滤食性鱼类、种植水生植物、安置推水设施等,对水体进行生态净化和大小水体的循环。近年来,宁夏等地将流水槽与稻田、蔬菜种植相结合,体现出了更好的效果,如2018年宁夏对“集中式”和“分散式”两种“流水槽+稻田”进行监测,发现尾水经过稻田净化后,水体中的TN分别下降了28%和40%,氨氮分别下降了72%和70%,亚硝酸盐氮分别降解了70%和69%^[42]。2015年以来,流水槽养殖在我国发展较快,由于缺少针对性的养殖生物学研究,以及缺少投饲、捕捞、集污、污物处理等配套设施设备研发,流水槽养殖出现了一些问题,需要进一步研究优化。

2.5 池塘“零排放”圈养模式

该模式是通过在养殖桶下部设置特殊锥形斗状结构解决养殖固体废弃物移除问题,进行圈养的一种设施化养殖形式。圈养桶一般为圆柱体,内径4.0 m,高3.1 m,平均水深1.8 m,养殖容积约 25 m^3 ,每个圈养桶的鱼产量可达到1吨,池塘内圈养桶的面积一般不超过池塘水面的25%。与传统池塘精养方式相比,圈养模式主要有以下三个方面的优

点: (1) 固废排出率高达90%以上, 显著降低水产品土腥味等异味物质含量, 大幅减少病害发生; (2) 水资源消耗量不足1吨/kg商品鱼, 养殖尾水可实现零排放; (3) 大幅减少用工数量, 利润率为散养池塘的2—4倍。2016年以来, 华中农业大学等单位开始推广池塘圈养模式, 并制订了《池塘绿色高效圈养技术规范(DB4205/T99-2022)》等标准, 可满足大规模推广应用^[43]。但由于系统构建、操作较复杂, 运行成本较高, 在应用过程中仍需不断改进。

2.6 多营养级序批式循环水养殖模式

该模式是将池塘构建成一定比例的养殖区和净化区, 在养殖区建造分阶段养殖池, 按规格放养吃食性鱼类, 在净化区种植水生植物并放养虾蟹贝等用于净化水质。一般情况, 吃食性鱼类养殖区占池塘水面的20%, 分阶段养殖池一般按3阶段设计, 其中小规格苗种、大规格苗种和成鱼养殖区的面积比约为1:2:6。净化区面积占池塘水面的70%, 另外留有10%的水面作为沉积物处理区。据监测, 多营养级序批式循环水养殖系统中的吃食鱼(如大口黑鲈)可利用饵料中30%—40%的N、P, 其余30%左右N、P以养殖废弃物形式进入净化区, 在净化区约有25%左右溶解性N、P被水生植物吸收; 营养级II到营养级VI之间的传递效率显著高于林德曼10%效率^[44]。多营养级序批式养殖模式具有“控制养殖容量, 提高养殖产量”的效果, 有利于实现商品鱼错峰分批上市, 提高养殖效益^[45]。近年来, 分阶段养殖发展很快, 已在对虾、草鱼等养殖中应用。随着技术设备不断完善, 该模式或将成为我国设施养殖的重要发展方向。

2.7 “集装箱+池塘”养殖模式

“集装箱+池塘”养殖是通过采用定制标准集装箱为载体, 综合应用“循环推水、生物净水、鱼病防控、集污排污、物联网智能管理”等技术, 实施控制养殖环境和养殖过程的可控式的养殖方式。一般在岸基搭建集装箱式循环养殖箱进行养鱼, 通过与池塘进行水循环, 实现水体净化和水平衡。据介绍, 该模式具有节地节水、生态环保、质量安全、智能标准、集约高效等优点。与传统池塘养殖方式相比, 可节约土地75%—98%、节水95%—98%、节省劳动力50%以上, 同时还具有减少饲料浪费, 提升饲料利用率的效果^[46]。但由于许多养殖品种不适合在封闭式系统内养殖, 应用该模式前需要了解养殖动物习性及养殖方式, 同时也要注意投资风险。

2.8 陆基圆池养殖模式

这是在陆地上构建圆形养殖池并与水处理系

统或池塘相结合, 进行水处理后形成循环水养殖的一种养殖形式。目前使用的养殖池的材质主要为镀锌板HDPE、PP等, 养殖池直径2—10 m甚至20—30 m不等, 池深1.5—2.5 m。陆基圆池养殖具有占地少、不受地形影响、集约化智能化程度高等优势, 2021年被农业农村部评定为重大引领性农业技术。陆基圆池养殖主要集中在广西、贵州等地, 截至2023年底, 广西已建成超过2万个陆基圆池, 养殖水体达120多万m³, 养殖大口黑鲈、斑点叉尾鲴、乌鳢、黄颡鱼、南美白对虾等, 年产量达4.6万多吨^[47]。陆基圆池养殖虽然有良好的养殖效果, 但也存在集污排污效果不好、受外部水温水质影响大及循环水处理效率不高等问题, 需要深入研究并制订相应标准, 规范养殖技术, 同时还需要研究宜养品种等。

2.9 渔菜共生模式

自1997年维尔京群岛大学的James Rakocy等^[48]研发出了基于深水栽培(Deep water culture)的大型鱼菜共生系统之后, 世界各地相继开展相关大量的研究, 逐步形成了较为成熟的鱼菜综合模式。2021年, 联合国粮农组织把小型鱼菜共生系统作为可持续农业模式向全球推荐。近年来, 针对鱼菜共生系统运行中出现植物养分不足, 蔬菜产量和品质严重下降的现象, 中国农科院蔬菜所开发了基于天然矿物复配基质的鱼菜共生系统, 并在北京三元农场、平谷挂甲峪村等多个鱼菜共生基地开展了示范推广。同期, 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所研发了鱼菜耦合控制、微生物反应器、水环境质量保障等关键技术及配套装备, 构建了鱼菜共生设施大棚模式^[49], 在宁夏、陕西等地进行了示范和推广, 建设鱼菜共生设施大棚60套, 示范推广面积近100亩, 取得了较好的经济效益和生产效益。渔菜共生虽然有诸多优点, 但也存在一些问题, 如投资较大、运营成本较高、水质管理复杂、系统平衡难以维持、病虫害防治困难等。

2.10 渔光互补

自2012年全国首座“渔光互补”光伏电站在江苏建湖并网以来, 我国渔光互补发展迅速。中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所与四川通威股份有限公司是国内最早开展渔光互补研究的单位之一, 早在2013年就开展渔光互补技术研究, 并制订了全国首个团体标准《渔光一体通用建设技术规范TSCFA0001-2020》, 目前通威集团已成为渔光互补上下游贯通的最大企业之一。科学合理的渔光互补具有“渔、电、环保”三丰收的优点, 可提高功率转换效率30%, 降低水体蒸发70%, 节约养殖

用水等特点。按全国光资源状况和养殖水面情况测算,推广渔光互补每年可发电50 MWh,节约标准煤180亿吨,减少二氧化碳排放49.85 Mt,有很大的生态经济价值^[50]。但由于缺少相关标准制约,近年来渔光互补无序建设现象严重,致使许多池塘遭到毁坏,甚至废弃撂荒,必须引起足够重视。

3 展望

21世纪以来,全球水产养殖以年均6.1%的速度增长,重要水产养殖在保障人类食物供应方面的作用更受近海渔业资源衰退及远洋渔业发展的制约,未来水产品的增加将主要通过水产养殖实现。因此,推进中国池塘养殖高质量发展,是当前和今后相当长时间内水产养殖发展的重点。针对水产养殖的环境影响和产业发展需求,应做好以下几个方面的工作:

(1)系统开展养殖生物学研究,建立池塘绿色高效养殖理论技术体系

池塘高效养殖需要建立在对养殖种类生态、生理、行为的系统研究基础之上。对此,应系统开展大宗淡水鱼、特色淡水鱼及虾蟹等主要养殖对象的养殖生物学研究,掌握其行为特征及其环境响应机制等,形成池塘养殖结构、容量、调控等的新理论体系;对应建立养殖水质管理、精准饲喂、病害防控等的养殖技术体系,为池塘高效养殖和设施化发展提供理论技术。

(2)大力开发养殖工程技术与设施装备,健全规范化生产保障体系

现代池塘养殖涵盖多学科内容。应集成生物学、生态工程学、机械工程、智能技术等先进理论技术开发池塘设施、水质调控、病害防控、精准投喂、尾水治理、质量管控等关键技术,研发宜机化、机械化、智慧化的养殖设施与装备,建立规范化的生产技术规程和模式,为池塘高效养殖提供生产保障。

(3)积极推进工业化养殖体系建设,推动池塘养殖高质量发展

水产养殖工业化是运用现代工业技术和管理理念,对养殖过程进行标准化、规模化、集约化和智能化的过程。工业化是池塘养殖发展的方向,对应池塘养殖现状,应研究制订符合中国池塘特色的池塘养殖良好实践管理规范,建立池塘养殖设施化、机械化、智慧化技术体系,对现有池塘养殖方式进行优化升级,推进中国池塘养殖工业化发展。

虽然池塘养殖存在许多问题,但随着相关技术的不断成熟,相信低碳高效的工程化养殖将取代传

统养殖方式,池塘工业化养殖将成为水产养殖发展的新趋势。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] National Aquatic Statistics Data 1949-1985 [R]. <https://www.renrendoc.com/paper/264043885.html>. [全国水产统计资料1949-1985 [R]. <https://www.renrendoc.com/paper/264043885.html>.]
- [2] Fishery Bureau of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs. 2024 China Fishery Yearbook [M]. Beijing: China Agricultural Press. 2024: 37. [农业农村部渔业局. 2024中国渔业年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2024: 37.]
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations, State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue Transformation in Action. Rome <https://dio.org/10.4060/cd0683zh>. [联合国粮食与农业组织, 2024年世界渔业和水产养殖状况: 蓝色转型在行动. 罗马. <https://dio.org/10.4060/cd0683zh>.]
- [4] Liu X G, Che X, Wang X D, *et al.* The technology and method for green and clean pond aquaculture [J]. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2018, **8**(5): 1-8. [刘兴国, 车轩, 王小冬, 等. 池塘绿色清洁养殖的技术途径与方法 [J]. 中国渔业质量与标准, 2018, **8**(5): 1-8.]
- [5] Zhang D D, Zhang X H, Zhang J Q, *et al.* Integrated research and evaluation on nonpoint source pollution in Shanghai suburbs [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 1997, **13**(1): 31-36. [张大弟, 张晓红, 章家骥, 等. 上海市郊区非点源污染综合调查评价 [J]. 上海农业学报, 1997, **13**(1): 31-36.]
- [6] Liu X G. Pond Aquaculture Ecological Engineering [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2018: 70. [刘兴国著. 池塘养殖生态工程 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 70.]
- [7] Liu X G, Shen H Y, Gu Z J, *et al.* The environmental impact and development direction of grass carp, *Ctenopharyngodon idella* [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2023, **54**(5): 1354-1366.
- [8] Yuan J, Xiang J, Liu D, *et al.* Rapid growth in greenhouse gas emissions from the adoption of industrial-scale aquaculture [J]. *Nature Climate Change*, 2019, **9**: 318-322.
- [9] Poore J, Nemecek T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers [J]. *Science*, 2018, **360**(6392): 987-992.
- [10] Food and Agriculture Organization of the United Nations, State of World Fisheries and Aquaculture 2020: Sustainable Development in Action, Rome [R]. [联合国粮食及农业组织, 2020年世界渔业和水产养殖状况: 可持续发展在行动, 罗马 [R].]
- [11] Liu X G, Shao Z Y, Cheng G F, *et al.* Ecological engi-

- neering in pond aquaculture: a review from the whole-process perspective in China [J]. *Review in Aquaculture*, 2021, **13**: 1060-1076.
- [12] Liu X G. Pond Aquaculture Ecological Engineering [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2018: 144. [刘兴国著. 池塘养殖生态工程 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 144.]
- [13] Yao H L. Ecological Study on Comprehensive Aquaculture Ponds in China [M]. Beijing: Science Press, 2010. [姚宏禄. 中国综合养殖池塘生态学研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [14] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2010. Bulletin of the First National Pollution Source Census, 11. [中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部, 2010. 第一次全国污染源普查公报, 11.]
- [15] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2020 Second National Pollution Source Census Bulletin, 9. [中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部, 2020第二次全国污染源普查公报, 9.]
- [16] Wang Y A. Research and Reflection on Pollution Prevention and Control Management System in Aquaculture in China [J]. *China Fisheries*, 2023(1): 65-71. [王亚楠. 我国水产养殖污染防控管理制度的研究思考 [J]. 中国水产, 2023(1): 65-71.]
- [17] Chen Qiuhui, Xi Yunguan, Liu Mingqing, *et al.* Preliminary Study on Pollutant Discharge Zoning in China's Freshwater Aquaculture Industry [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(11): 149-155. [陈秋会, 席运官, 刘明庆, 等. 中国淡水水产养殖业排污分区初步研究 [J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(11): 149-155.]
- [18] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2014 China Ecological Environment Bulletin, 17-28. [中华人民共和国生态环境部, 2014年中国生态环境公报[R]. 17-28.]
- [19] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2023 China Ecological Environment Bulletin, 22-43. [中华人民共和国生态环境部, 2023年中国生态环境公报[R]. 22-43.]
- [20] Yuan X Y, Yang Y Y, Li Q X, *et al.* Pollution status and distribution characteristics of typical persistent organic pollutants (POPs) in freshwater environments in China [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(11): 2072-2081. [员晓燕, 杨玉义, 李庆孝, 等. 中国淡水环境中典型持久性有机污染物(POPs)的污染现状与分布特征 [J]. 环境化学, 2013, **32**(11): 2072-2081.]
- [21] Zang W C, Huang QCF. Status quo and management strategies of persistent organic pollutant pollution in key areas [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014. [臧文超, 黄启飞. 重点区域持久性有机污染物污染现状及其管理对策 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.]
- [22] Xu D S, Huang S L, Li Q. Distribution characteristics and pollution evaluation of As in ponds sediment from Sixian County in Anhui [J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2012, **29**(2): 1233-1237. [许东升, 黄淑玲, 李琦. 安徽省泗县池塘底泥As含量分布特征及污染评价 [J]. 光谱实验室, 2012, **29**(2): 1233-1237.]
- [23] Jiao B Y, Liu H, Jia L, *et al.* Heavy metal pollution assessment in sediments of aquaculture ponds of the Wantan town in Zhongmu, Henan province [J]. *Freshwater Fisheries*, 2015, **45**(2): 15-19. [焦宝玉, 刘慧, 贾砾, 等. 河南中牟县万滩镇养殖池塘底泥重金属污染评价 [J]. 淡水渔业, 2015, **45**(2): 15-19.]
- [24] Pang Y Y, Luo W, Li W H, *et al.* Accumulation and pollution analysis of heavy metals Cu and Zn in surface sediments of freshwater aquaculture ponds [J]. *Fisheries Science and Technology Information*, 2016, **43**(1): 45-49. [庞洋洋, 罗伟, 李文红, 等. 淡水养殖池塘表层沉积物中重金属Cu、Zn含量积累及污染分析 [J]. 水产科技情报, 2016, **43**(1): 45-49.]
- [25] Wei X H, Zhang M, Yao W Z. Heavy metal distribution and pollution characteristics in the sediments of aquaculture ponds [J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2004, **17**(4): 380-383. [韦肖杭, 张敏, 姚伟忠. 养殖池塘沉积物的重金属分布及污染特征 [J]. 宁波大学学报: 理工版, 2004, **17**(4): 380-383.]
- [26] Liang X M, Nie X P, Shi Z. Preliminary studies on the occurrence of antibiotic resistance genes in typical aquaculture area of the Pearl River Estuary [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(10): 4073-4080. [梁惜梅, 聂湘平, 施震. 珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究 [J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 4073-4080.]
- [27] Li R P, Zhang X X, Liu Z, *et al.* Distribution characteristics and relationships of pH, nutrients, chlorophyll-a, and three sulfonamide in pond aquaculture water [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(6): 2582-2588. [李瑞萍, 张欣欣, 刘卓, 等. 池塘养殖水体pH、营养盐、叶绿素a及3种磺胺类抗生素分布特征及其相关性分析 [J]. 环境工程学报, 2015, **9**(6): 2582-2588.]
- [28] Kui L L. Toxic effects of microcystin toxins on fish [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(12): 3304-3310. [隗黎丽. 微囊藻毒素对鱼类的毒性效应 [J]. 生态学报, 2010, **30**(12): 3304-3310.]
- [29] Egna H S. Network analysis of international aquaculture research and development efforts in Rwanda: Tracing the flows of knowledge and technology in a USAID-funded collaborative research support program. [D]. Oregon State University. 1998.
- [30] Barry A. Costa-pierce. Preliminary investigation of an integrated aquaculture-Wetland ecosystem using tertiary

- treated municipal wastewater in Los Angeles County, California [J]. *Ecology engineering*, 1998, **10**(4): 341-354.
- [31] Scoatt D. Bergenetal design principles for ecological engineering [J]. *Ecological engineering*, 2001, **18**(2): 201-210.
- [32] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y, *et al.* Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system [J]. *Aquaculture*, 2002, **209**(1-4): 169-184.
- [33] David, Rogers, Tilley, *et al.* Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture[J]. *Aquacultural Engineering*, 2002.
- [34] Wang, J. K., Hering, T. Continuous cultivation of microorganisms in large open tanks in sunlight. 2004, US, US06673592B1.
- [35] Brune D E, Schwartz G, Eversole A G, *et al.* 19 Partitioned aquaculture systems [M]. *Developments in Aquaculture & Fisheries Science*, 2004, **34**(34): 561-584.
- [36] Huang G Q, Li D S, Dong S L. A new shrimp polyponded recirculating polyculture system [J]. *Marine Science*, 2001, **25**(4): 48-50. [黄国强, 李德尚, 董双林. 一种新型对虾多池循环水综合养殖模式 [J]. 海洋科学, 2001, **25**(4): 48-50.]
- [37] Wang D P, Tian X L, Dong S L, *et al.* Experimental study on the benefit of ternary polyculture of shrimp, clam and *Gracilaria* [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, **36**(S1): 020-026. [王大鹏, 田相利, 董双林, 等. 对虾、青蛤和江蓠三元混养效益的实验研究 [J]. 中国海洋大学学报, 2006, **36**(S1): 020-026.]
- [38] Feng M Y, Ma S, Zheng Z H. Study of biological methods for pollution-control of shrimp ponds [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, **36**(1): 89-94. [冯敏毅, 马甦, 郑振华. 利用生物控制养殖池污染的研究 [J]. 中国海洋大学学报, 2006, **36**(1): 89-94.]
- [39] Li Gu. Characteristics and functions of a composite artificial wetland pond aquaculture ecosystem [D]. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2005. [李谷. 复合人工湿地-池塘养殖生态系统特征与功能 [D]. 中国科学院研究生院, 2005.]
- [40] Liu X G, Liu Z P, Xu H, *et al.* Ecological engineering water recirculating ponds aquaculture system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, **26**(11): 237-244. [刘兴国, 刘兆普, 徐皓, 等. 生态工程化循环水池塘养殖系统 [J]. 农业工程学报, 2010, **26**(11): 237-244.]
- [41] Liu M, Yuan J I, Ni M, *et al.* Treatment of inland pond aquaculture tail water by multi-stage combined process of “three ponds and two dams” [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, **11**(1): 97-106. [刘梅, 原居林, 倪蒙, 等. “三池两坝”多级组合工艺对内陆池塘养殖尾水的处理 [J]. 环境工程技术学报, 2021, **11**(1): 97-106.]
- [42] National Aquaculture Technology Promotion Station, Aquaculture Tail Water Treatment Technology Model [M]. China Agricultural Press, June 2022. [全国水产技术推广总站, 水产养殖尾水处理技术模式 [M]. 中国农业出版社, 2022.6.]
- [43] He X G. “Zero Emission, Green and Efficient Technology for Captive Ponds” [J]. *Scientific Fish Farming*, 2019, **361**(9): 22-23. [何绪刚. 圈养技术池塘“零排放”绿色高效 [J]. 科学养鱼, 2019, **361**(9): 22-23.]
- [44] Wei B C, Liu X G, Zeng X L, *et al.* Analysis of nitrogen and phosphorus budget of *Megalobrama amblycephala* in two kinds of compound culturing ponds [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, **27** (5): 693-702. [魏宝成, 刘兴国, 曾宪磊, 等. 两种复合式池塘养殖团头鲂的氮磷收支分析 [J]. 上海海洋大学学报, **27**(5): 693-702.]
- [45] Liu X G, Gu Z J, Zeng X L, *et al.* New method for ecological and high-profit pond-culture [J]. *Scientific Fish Farming*, 2018(3): 79-80. [刘兴国, 顾兆俊, 曾宪磊, 等. 池塘生态高效养殖新方式-分级序批式养殖试验 [J]. 科学养鱼, 2018(3): 79-80.]
- [46] Chen X Z, Shu R, Xie J, *et al.* Intensive culture of “container+ecological pond” and efficient treatment technology of tail water [J]. *China Fisheries*, 2020(8): 4. [陈学洲, 舒锐, 谢骏, 等. “集装箱+生态池塘”集约养殖与尾水高效处理技术 [J]. 中国水产, 2020(8): 4.]
- [47] Tan Y, Jiang L Y, Zhu J J, *et al.* Analysis and development countermeasures of land-based round pond aquaculture mode in Guangxi [J]. *Journal of Guangxi Agriculture*, 2022, **37**(3): 35-38. [谭芸, 江林源, 朱佳杰, 等. 广西陆基圆池养殖模式分析与发展对策 [J]. 广西农学报, 2022, **37**(3): 35-38.]
- [48] Rakocy J E, Bailey D S, Shultz K A, *et al.* Evaluation of a Commercial-Scale Aquaponic Unit for the Production of Tilapia and Lettuce. 1997.
- [49] Gu C C, Xu Y F, Gao X T, *et al.* Engineering design and performance evaluation of fish-strawberry aquaponics system [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, **39**(26): 147-153. [顾川川, 徐琰斐, 高霞婷, 等. 鱼菜共生系统设计构建及运行效果分析 [J]. 中国农学通报, 2023, **39**(26): 147-153.]
- [50] Zhang J H, Liu X G, Gu Z J, *et al.* Eco-economic characteristics and development direction of the fish-light complementation [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, **46**(8): 1525-1535. [张家华, 刘兴国, 顾兆俊, 等. 渔光互补生态经济特征及其发展方向 [J]. 水产学报, 2022, **46**(8): 1525-1535.]