

中国虹鳟养殖模式的生命周期评价

陈中祥, 曹广斌*, 韩世成

(中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 哈尔滨 150070)

摘要:本文以黑龙江省和北京市虹鳟养殖为例,应用生命周期评价方法,将虹鳟养殖生命周期划分为饵料生产、电力生产、化学品生产和养殖污染排放 4 个阶段,考虑了全球变暖潜势、能源消耗、酸化潜值和富营养化潜值 4 种环境影响类型,以获得 1 t 养殖增重量为评价的功能单位,对虹鳟网箱养殖模式、工厂化流水养殖模式和工厂化循环水养殖模式的潜在环境影响进行了评价比较。结果表明,我国虹鳟养殖模式的环境影响从高到底依次是富营养化潜值、全球变暖潜势、酸化潜值和能源消耗;网箱养殖模式的环境影响指数分别为 53.963、0.939、0.717 和 0.017,工厂化流水养殖模式的环境影响指数分别为 35.213、4.827、2.896 和 0.049,工厂化循环水养殖模式的环境影响指数分别为 7.404、5.545、3.305 和 0.055;富营养化潜值是虹鳟养殖的主要环境影响类型,其主要来自养殖污染排放。3 种虹鳟养殖模式的环境影响综合指数分别为 6.69、5.52 和 2.02,我国虹鳟养殖模式的环境性能从高到低依次为工厂化循环水养殖模式>工厂化流水养殖模式>网箱养殖模式。减少养殖污染排放、降低电能消耗和提高饵料利用率是提升我国虹鳟养殖模式环境友好性的关键。

关键词:虹鳟养殖;生命周期评价;养殖模式;中国

中图分类号:X820.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)10-2113-06

Life Cycle Assessment of Rainbow Trout Aquaculture Models in China

CHEN Zhong-xiang, CAO Guang-bin*, HAN Shi-cheng

(Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Harbin 150070, China)

Abstract: The environmental impacts of rainbow trout aquaculture models were studied by the case study of rainbow trout aquaculture in Heilongjiang Province and Beijing City. Life cycle assessment methodology was applied to quantify and compare the potential environmental impacts of cage aquaculture model, industrial flow-through aquaculture model and industrial recirculating aquaculture model through the following indicators: Global Warming Potential, Energy Use, Acidification Potential and Eutrophication Potential. Based on the functional unit by one-ton weight gain, the life cycle assessment covered the following processes: Feed production, electricity production, chemical production and pollution discharge. The results were as follows: The potential environmental impacts significance of the three aquaculture models all followed by eutrophication potential, global warming potential, acidification potential and energy use. The impact indexes were 53.963, 0.939, 0.717 and 0.017 in cage aquaculture model, 35.213, 4.827, 2.896 and 0.049 in industrial flow-through aquaculture model, 7.404, 5.545, 3.305 and 0.055 in industrial recirculating aquaculture model respectively. The eutrophication potential was the major environment impact indicator and mainly came from the culture pollution emission. The aggregate life cycle environmental impact indexes of the three rainbow trout aquaculture models were 6.69, 5.52 and 2.02, respectively. The results indicated that the environmental performances of the three aquaculture models were in the order of industrial recirculating aquaculture model, industrial flow-through aquaculture model and cage aquaculture model. Therefore, decreasing aquaculture pollution discharge, reducing Electricity consumption and improving feed efficiency were the key to promote the environmental friendly characteristics of rainbow trout aquaculture models in China.

Keywords: rainbow trout aquaculture; life cycle assessment; aquaculture model; China

收稿日期: 2011-04-06

基金项目: 国家农业科技成果转化基金项目(2009GB23260451); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(201105)

作者简介: 陈中祥(1979—), 男, 江苏大丰人, 助理研究员, 从事渔业生态环境方面的研究。E-mail: chenzhongx@126.com

* 通讯作者: 曹广斌 E-mail: laocao@hotmail.com

虹鳟(Rainbow trout)是硬骨鱼纲、鲑形目、鲑科、鲑属动物。其肉质细嫩、含脂量高、营养丰富,因而广受欢迎。2000 年的全球虹鳟总产量为 448 000 t,是仅次于大西洋鲑的鲑科鱼类养殖品种。虹鳟从上世纪 50 年代引入中国,现年产量已达 15 000 t,主要分布在东北、西北、华北和西南等冷水资源丰富的地区,在农业结构调整、农民增收以及促进当地经济发展等方面发挥着积极的作用^[1]。

在提供大量优质蛋白和创造可观经济效益的同时,传统的虹鳟池塘流水养殖和网箱养殖模式因为养殖污染的直接排放加剧了水体富营养化;现代化的虹鳟工厂化养殖模式通过降低饵料系数节约了资源,其中的循环水养殖模式通过水体的处理循环重复利用,避免了养殖污染的排放又节约了水资源,但是工厂化养殖模式的高能耗一直是被诟病的对象。目前,一个很迫切的问题就是需要从生命周期角度全面分析我国虹鳟养殖模式的资源消耗和环境影响,为低能耗、低污染、低排放的可持续虹鳟养殖提供科学依据。

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是对一个产品系统的生命周期中物质能量输入、输出及潜在环境影响的汇编和评价,是目前一种被广泛使用的环境影响评价工具^[2-3]。2004 年, Papatryphon^[4]第一次将 LCA 用于鲑鳟鱼饲料的环境影响评价,拉开了 LCA 在水产养殖领域应用的序幕。其后, Mungkung^[5]将 LCA 应用于泰国虾养殖的环境影响评价; Aubin^[6]、Pelletier^[7]、Orbcaster^[8]等陆续进行了鲑科鱼类生命周期评价。然而,国内这方面的研究进展缓慢,仅有李君^[9]进行了海洋贝类利用模式的生命周期评价研究。

本研究运用 LCA 的方法,建立我国虹鳟养殖系统的全生命周期影响评价体系,比较我国 3 种主要虹鳟养殖模式的能源消耗和环境影响,旨在探究我国虹鳟养殖系统的能源消耗和环境影响,识别养殖环节中的环境影响关键点,针对性地提出改进措施,为资源节约型、环境友好型的虹鳟养殖产业发展奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 我国虹鳟主要养殖模式

1.1.1 网箱养殖模式

网箱养殖模式(Cage Aquaculture Model)是将网固定在支架上形成不同大小和形状的封闭式养殖设施,沉入较大水面(湖泊、水库)水中,进行虹鳟养殖的

一种模式。

1.1.2 工厂化流水养殖模式

工厂化流水养殖模式(Industrial Flow-through Aquaculture Model)是借助水位差、引流或截流设施及水泵等,在开放式流水鱼池内进行的虹鳟养殖模式。

1.1.3 工厂化循环水养殖模式

工厂化循环水养殖模式(Industrial Recirculating Aquaculture Model)是依托一定的养殖工程和水处理设施与设备,对水质、水温、水流、溶氧、光照及饲料等各方面实行全人工控制,循环使用养殖水体的虹鳟养殖模式。

1.2 生命周期评价目的和范围的确定

本研究以我国 3 种主要虹鳟养殖模式为研究对象进行评价,以获得 1 t 虹鳟养殖增重量为评价的功能单位,分析我国 3 种主要虹鳟养殖模式生命周期的资源和能源投入、产出及对环境造成的影响,目的是比较 3 种养殖模式的环境表现,识别不同养殖模式对环境的影响的关键点,以便采取改进措施,降低虹鳟养殖的资源消耗,及其对环境的影响,最终建立资源节约型、环境友好型的可持续虹鳟养殖产业。

评价的起始边界为饵料生产、电力生产、化学品生产开始,终止边界为养殖成鱼在养殖场大门与销售渠道的对接。养殖场内的基础设施、渔业机械以及运输所产生的环境影响在本研究中没有涉及。本次评价涉及的系统边界如图 1 所示。

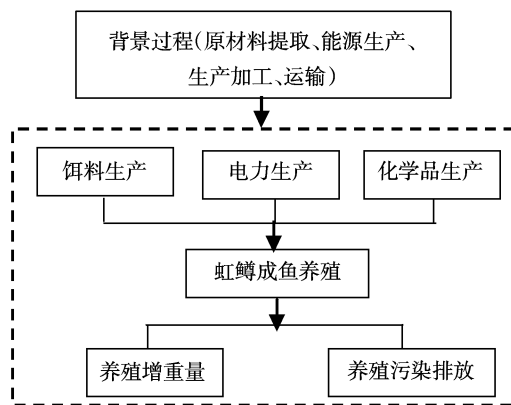


图 1 虹鳟养模式生命周期评价的系统边界

Figure 1 LCA system boundary of rainbow trout aquaculture models

1.3 生命周期清单数据来源

生命周期清单分析是指生命周期评价中对所研究产品整个生命周期中输入和输出进行汇编和量化的阶段,是生命周期评价的核心环节。

网箱养殖模式的数据来自对黑龙江宁安市钻心湖虹鳟鱼场和黑龙江省齐齐哈尔市金三角鱼场调查和现场取样的监测,从2007年10月到2008年7月,周期为264 d;工厂化流水养殖模式的数据来自对黑龙江水产研究所渤海冷水性鱼类试验站虹鳟养殖车间和北京长圆虹鳟鱼养殖场调查和现场取样的监测,从1月到7月,周期为196 d;工厂化循环水养殖模式的数据来自黑龙江水产研究所工厂化养殖试验车间,从2008年10月到2009年5月,周期为227 d。此外,参考了课题组前期关于虹鳟工厂化循环水养殖实验^[10-11]和其他相关资料^[12-14]。

饵料生产采用Pelletier^[7]的相关数据,电力生产采用文献[15]中提供的相关数据,化学品生产采用Ayer^[16]相关数据,养殖污染排放根据物料衡算法来进行。

1.4 生命周期影响评价

生命周期影响评价是指生命周期评价中理解和评价产品系统在产品整个生命周期中的潜在环境影响的大小和重要性的阶段。包括分类和特征化、标准化和加权评估3个步骤^[17-18]。

1.4.1 分类和特征化

分类和特征化是对评价对象的资源、能源消耗和环境排放清单进行分类,并计算其环境影响潜力的过程。本研究仅考虑全球性的影响类型参数全球变暖潜势(Global Warming Potential, GWP)和能源消耗(Energy Use, EU),以及区域性的影响类型参数酸化潜值(Acidification Potential, AP)和富营养化潜值(Eutrophication Potential, EP)。

全球变暖潜势以CO₂为参照,CO、CH₄和NO_x的当量系数分别为2、21和320;酸化潜值以SO₂为参照,NO_x和NH₃的当量系数分别为0.7和1.88;富营养化潜值以PO₄³⁻为参照,NO_x、总氮和总磷的当量系数分别为0.1、0.42和3.06^[19]。

1.4.2 标准化

本研究采用2000年全球人均环境影响潜力作为环境影响基准^[20],计算我国虹鳟养殖模式生命周期环境影响参数。

1.4.3 加权评估

本研究采用王明新^[21]研究中的权重指数对各类环境影响参数进行综合,得到环境影响综合指数,使得在各类环境影响类型直接比较的基础上能够全面地比较3种养殖模式的能源消耗和环境影响。各种环境影响指数计算的基准值和权重如表1

表1 各种环境影响指数计算的基准值和权重

Table 1 Normalization values and weighs for different environmental impact categories

环境影响类型	单位	基准值	权重
全球变暖潜势	kg CO ₂ -eq·a ⁻¹	6 869	0.12
能源消耗	MJ·a ⁻¹	2 590 457	0.15
酸化潜值	kg SO ₂ -eq·a ⁻¹	52.26	0.14
富营养化潜值	kg PO ₄ ³⁻ -eq·a ⁻¹	1.88	0.12

所示。

2 结果与讨论

2.1 生命周期清单分析

以获得1 t养殖增重量为评价的功能单元,3种养殖模式的输入和输出见表2。

表2 虹鳟养殖模式生命周期的输入和输出

Table 2 Inputs and outputs of life cycle of rainbow trout aquaculture models

养殖模式	输入			输出	
	饵料/kg	电能/kW·h ⁻¹	小苏打/kg	总氮/kg	总磷/kg
网箱养殖	1 700	1 170	0	197.211	20.887
流水养殖	1 400	9 680	0	39.006	11.811
循环水养殖	1 200	11 250	400	0.000	0.000

网箱养殖模式的平均饵料系数为1.7,1 t养殖增重量的饵料使用量为1 700 kg;电能的消耗主要是因为增氧机和投饵机的使用;总氮和总磷的排放是根据饵料和生物体的物料衡算。

工厂化流水养殖模式的平均饵料系数为1.4,1 t养殖增重量的饵料使用量为1 400 kg;电能的消耗主要是因为增氧设备、投饵机和水泵的使用;总磷和总氮的排放是根据饵料和生物体的物料衡算,以及第一次全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数手册^[22]。

工厂化循环水养殖模式的平均饵料系数为1.2,1 t养殖增重量的饵料使用量为1 200 kg;电能的消耗主要是增氧设备、水泵等机械设备的使用;养殖水体经处理循环再利用,因此没有总氮和氮磷的排放。

2.2 环境影响评价

以获得1 t养殖增重量为评价的功能单元,3种养殖模式环境影响的特征化结果及各阶段的贡献率如表3所示。

2.2.1 全球变暖潜势

全球变暖潜势是评价各种温室气体对气候变化影响相对能力的参数。

表 3 环境影响的特征化结果及各阶段的贡献率

Table 3 The characterization results of environmental impacts and the attributions of any sections

项目	全球变暖潜势		能源消耗		酸化潜值		富营养化潜值	
	GWP/kg CO ₂ -eq	贡献率/%	EU/MJ	贡献率/%	AP/kg SO ₂ -eq	贡献率/%	EP/kg PO ₄ ³⁻ -eq	贡献率/%
网箱养殖								
饵料生产	2 710.85	42.04	30 658.12	71.32	21.32	56.87	9.03	8.90
电力生产	3 738.03	57.96	12 328.52	28.68	16.17	43.13	0.76	0.75
化学品生产	0	0	0	0	0	0	0	0
养殖排放	0	0	0	0	0	0	91.66	90.35
合计	6 448.88	—	42 986.64	—	37.49	—	101.45	—
工厂化流水养殖								
饵料生产	2 232.47	6.73	25 247.87	19.84	17.56	11.60	7.43	11.22
电力生产	30 926.63	92.27	102 000.10	80.16	133.80	88.40	6.25	9.44
化学品生产	0	0	0	0	0	0	0	0
养殖排放	0	0	0	0	0	0	52.52	79.34
合计	33 159.10	—	127 247.97	—	151.36	—	66.20	—
工厂化循环水养殖								
饵料生产	1 913.54	5.03	21 641.03	15.10	15.05	8.71	6.37	45.76
电力生产	35 942.63	94.36	118 543.50	82.73	155.50	90.35	7.27	52.23
化学品生产	233.88	0.61	3 113.19	2.71	2.16	0.92	0.28	2.01
养殖排放	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	38 090.05	—	143 297.72	—	172.71	—	13.92	—

比较 3 种虹鳟养殖模式的全球变暖潜势,从高到低依次为工厂化循环水养殖模式>工厂化流水养殖模式>网箱养殖模式,三者比值为 5.91:5.14:1。生命周期各阶段对虹鳟养殖全球变暖潜势的贡献分析表明,3 种养殖模式全球变暖潜势的差别主要源于养殖模式电力消耗的不同。养殖所需电力和饵料的生产所导致的 CO₂、CO、CH₄ 和 NO_x 等温室气体排放是虹鳟养殖全球变暖潜势的主要原因。

2.2.2 能源消耗

能源消耗是反映评价对象对不可再生资源的消耗情况的参数。

3 种虹鳟养殖模式的能源消耗从高到低顺序是:工厂化循环水养殖模式>工厂化流水养殖模式>网箱养殖模式,三者比值为 3.33:2.96:1。生命周期各阶段对虹鳟养殖能源消耗的贡献分析表明,3 种养殖模式能源消耗的差别主要源于养殖模式电力消耗和饵料消耗的不同。虹鳟养殖模式的能源消耗主要源于养殖所需电力和饵料的生产所消耗的资源。

2.2.3 酸化潜值

酸化潜值衡量的是评价对象的污染排放对导致酸性降雨的作用和贡献。

比较 3 种虹鳟养殖模式的酸化潜值,从高到低顺序仍然是工厂化循环水养殖模式>工厂化流水养殖模

式>网箱养殖模式,三者比值为 4.61:4.04:1。分析虹鳟养殖生命周期各阶段对虹鳟养殖酸化潜值的贡献,结果显示,养殖所消耗电力的生产是虹鳟养殖酸化潜值的主要贡献者。虹鳟养殖所需电力和饵料的生产所导致的 SO₂、NO_x 和 NH₃ 的排放是虹鳟养殖酸化潜值的主要原因。

2.2.4 富营养化潜值

富营养化潜值衡量的是评价对象的污染排放对导致水体富营养化的作用和贡献。

3 种虹鳟养殖模式的富营养化潜值从高到低顺序是网箱养殖模式>工厂化流水养殖模式>工厂化循环水养殖模式,三者比值为 7.29:4.76:1。生命周期各阶段对虹鳟养殖富营养化潜值的贡献分析结果表明,3 种养殖模式富营养化潜值的差别主要源于养殖污染排放阶段总氮和总磷的排放。

工厂化流水养殖模式,相对于网箱养殖模式,主要改进是将饵料系数由 1.7 降低到 1.4,其富营养化潜值降低了 34.75%,说明提高饵料利用率是控制富营养化潜值的有效手段。

工厂化循环水养殖模式除了降低了饵料系数,还通过对养殖水体的循环再利用,杜绝了养殖污染排放,其富营养化潜值比网箱养殖模式和工厂化流水养殖模式分别降低了 86.28%和 78.97%,说明降低养殖

污染排放是控制富营养化潜值的关键。

2.2.5 标准化和加权评估

3 种虹鳟养殖模式环境影响的标准化和加权评估结果如表 4 所示。

分析 3 种养殖模式环境影响的标准化结果可以看出 3 种虹鳟养殖模式的环境影响潜值从高到低的顺序是一致的,依次是富营养化潜值、全球变暖潜势、酸化潜值和能源消耗。网箱养殖模式的环境影响指数分别为 53.963、0.939、0.717 和 0.017; 工厂化流水养殖模式的环境影响指数分别为 35.213、4.827、2.896 和 0.049; 工厂化循环水养殖模式的环境影响指数分别为 7.404、5.545、3.305 和 0.055。

富营养化潜值是水产养殖的主要潜在环境影响类型,这与以往对水产养殖污染的认识是一致的。

3 种虹鳟养殖模式的环境影响综合指数分别为 6.69、5.52 和 2.02, 可以看出 3 种虹鳟养殖模式中环境性能最高的是工厂化循环水养殖模式,其次是工厂化流水养殖模式,最后是网箱养殖模式。

虹鳟养殖生命周期中饵料生产、电力生产、化学品生产和养殖污染排放等阶段对虹鳟养殖模式环境影响综合指数的贡献分析如表 5 所示。

比较生命周期各阶段对虹鳟养殖环境影响的贡献率, 网箱养殖模式中从高到低依次是养殖污染排放>饵料生产>电力生产>化学品生产;工厂化流水养殖模式中从高到低依次是养殖污染排放>电力生产>饵料生产>化学品生产; 工厂化循环水养殖模式中从高到低依次是电力生产>饵料生产>化学品生产>养殖污染排放。

对于网箱养殖模式,改进其环境效应的主要措施是提高饵料利用率、减少养殖污染的排放,以及控制

饵料生产阶段的环境影响。

改善工厂化流水养殖模式环境效应的主要措施是减少养殖污染的排放、降低电力消耗和控制电力生产阶段的环境影响。

工厂化循环水养殖模式虽然是 3 种养殖模式中环境性能最高的,但其高电力消耗使得工厂化循环水养殖模式的全球变暖潜势、能源消耗和酸化潜值在 3 种养殖模式中都是最高的,降低电力消耗是进一步提升其环境性能的主要途径。

在饵料生产和电力生产中实施清洁生产,提高资源利用率、减少污染排放将显著降低虹鳟养殖的全球变暖潜势、能源消耗和酸化潜值。

综上所述,可以看出,在虹鳟养殖中减少养殖污染排放、降低电能消耗和提高饵料利用率是提升我国虹鳟养殖模式环境友好性的关键。主要的改进措施包括:通过微生物处理,或生态养殖综合利用等方法降低养殖污染排放;对养殖模式中的工艺进行改进,降低能耗;改进饵料配方,加强饵料保管和投喂的科学化来提高饵料利用率等。

3 结 论

(1)富营养化潜值是我国虹鳟养殖的主要潜在环境影响类型。我国 3 种虹鳟养殖模式的潜在环境影响从高到低依次是富营养化潜值、全球变暖潜势、酸化潜值和能源消耗。

(2)我国虹鳟养殖模式的环境性能从高到低依次为工厂化循环水养殖模式>工厂化流水养殖模式>网箱养殖模式。

(3)在饲料生产和电力生产中施行实施清洁生产,在虹鳟养殖中减少养殖污染排放、降低能源消耗

表 4 环境影响潜值的标准化和加权结果

Table 4 Results of normalization and weighting of environmental impact potentials

环境影响类型	全球变暖潜势	能源消耗	酸化潜值	富营养化潜值	加权结果
网箱养殖模式	0.939	0.017	0.717	53.963	6.69
工厂化流水养殖模式	4.827	0.049	2.896	35.213	5.52
工厂化循环水养殖模式	5.545	0.055	3.305	7.404	2.02

表 5 环境影响综合指数的贡献率分析

Table 5 Contribution analysis for the aggregate life cycle environmental impact indexes

养殖模式	贡献率/%			
	饵料生产	电力生产	化学品生产	养殖污染排放
网箱养殖模式	10.16	2.39	0.00	87.45
工厂化流水养殖模式	10.73	24.90	0.00	64.37
工厂化循环水养殖模式	23.76	75.25	0.99	0.00

和提高饵料利用率是提升我国虹鳟养殖模式环境友好性的关键。

参考文献:

- [1] 孙大江, 王炳谦. 鲑科鱼类及其养殖状况[J]. 水产学杂志, 2010, 23(2): 56–63.
SUN Da-jiang, WANG Bing-qian. Aquaculture of salmonids in China[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2010, 23(2): 56–63.
- [2] ISO 14040—2006. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Frameworks[S].
- [3] ISO 14044—2006. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirement and Guidelines[S].
- [4] Papatryphon E, Petit J, Kaushik S J, et al. Environmental impact assessment of salmonid feeds using Life Cycle Assessment (LCA)[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2004, 33(6): 316–323.
- [5] Mungkung R. Shrimp aquaculture in Thailand: Application of life cycle assessment to support sustainable development[D]. England: 2005.
- [6] Aubin J, Papatryphon E, Van der Werf H M G, et al. Characterisation of the environmental impact of a turbot (*Scophthalmus maximus*) re-circulating production system using Life Cycle Assessment [J]. *Aquaculture*, 2006, 261(4): 1259–1268.
- [7] Pelletier N, Tyedmers P. Feeding farmed salmon: Is organic better[J]. *Aquaculture*, 2007, 272(1): 399–416.
- [8] d'Orbecastel E R, Blancheton J P, Aubin J. Towards environmentally sustainable aquaculture Comparison between two trout farming systems using Life Cycle Assessment[J]. *Aquacultural Engineering*, 2009, 40(1): 113–119.
- [9] 李 君, 孙恢礼, 吴园涛, 等. 海洋贝利利用模式生命周期评价方法研究[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(4): 70–75.
LI Jun, SUN Hui-li, WU Yuan-tao, et al. A study on life cycle assessment method of marine shellfish utilization model[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, 26(4): 70–75.
- [10] 陈中祥, 曹广斌, 刘 永, 等. 低温工厂化养殖水体氨氮处理微生物的初步研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 132–136.
CHEN Zhong-xiang, CAO Guang-bin, LIU Yong, et al. Preliminary study on ammonia nitrogen treatment of microorganism in industrialized culture water at cold temperature[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(8): 132–136.
- [11] 曹广斌, 蒋树义, 刘 永, 等. 双层浮球生物滤器设计及其水产养殖水处理性能试验[J]. 水产学报, 2005, 29(4): 578–582.
CAO Guang-bin, JIANG Shu-yi, LIU Yong, et al. Study on design and performance of two-layer floating bead biofilter for recirculating aquaculture system[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2005, 29(4): 578–582.
- [12] 张延青, 王 森, 刘 鹰. 利用竹球作为曝气生物滤池填料处理高浓度含氮海水的实验研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1287–1291.
ZHANG Yan-qing, WANG Sen, LIU Ying. Treatment of high concentration nitric seawater using bubbling air biofilter with a bamboo sphere substrate[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1287–1291.
- [13] Crab R, Avnimelech Y, Defoirdt T, et al. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production[J]. *Aquaculture*, 2007, 270(1): 1–14.
- [14] Kuhna D D, Drahos D D, Marsha L, et al. Evaluation of nitrifying bacteria product to improve nitrification efficacy in recirculating aquaculture systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2010, 43(1): 78–82.
- [15] 叶小梅, 常志州, 杜 静, 等. 水葫芦能源利用的生命周期环境影响评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2450–2456.
YE Xiao-mei, CHANG Zhi-zhou, DU Jing, et al. Life cycle assessment of electricity production from water hyacinth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12): 2450–2456.
- [16] Ayer N W, Tyedmers P H. Assessing alternative aquaculture technologies: Life cycle assessment of salmonid culture systems in Canada[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2008, 17(3): 362–373.
- [17] 王明新, 夏训峰, 刘建国, 等. 太湖地区高产水稻生命周期评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 420–424.
WANG Ming-xin, XIA Xun-feng, LIU Jian-guo, et al. Life cycle assessment of high-yielding rice in Taihu region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2): 420–424.
- [18] 梁 龙, 陈源泉, 高旺盛, 等. 两种水稻生产方式的生命周期环境影响评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1992–1996.
LIANG Long, CHEN Yuan-quan, GAO Wang-sheng, et al. Assessment of the environmental impacts of two rice production patterns using life cycle assessment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1992–1996.
- [19] Stranddorf H K, Hoffmann L, Schmidt A. Update on impact categories, normalisation and weighting in LCA[R]. Denmark: The Danish Environmental Protection Agency, 2005.
- [20] Sleeswijk A W, Van Oers L F C M, Guinée J B, et al. Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000[J]. *Science of the Total Environment*, 390(1): 227–240.
- [21] 王明新, 包永红, 吴文良, 等. 华北平原冬小麦生命周期环境影响评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1127–1132.
WANG Ming-xin, BAO Yong-hong, WU Wen-liang, et al. Life cycle environmental impact assessment of winter wheat in North China Plain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1127–1132.
- [22] 第一次全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数手册[R]. 北京: 全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数测算项目组, 2008.
Handbook on pollutant generation and discharge coefficients of aquaculture in the first national census of pollution sources[R]. Beijing: Pollutant Generation and Discharge Coefficients Calculation Team in the National Census of Aquaculture Pollution Sources, 2008.