

基于生命周期评价(LCA)的2种大菱鲆养殖模式对环境的影响对比研究

王杰^{1,2}, 张延青¹, 孙国祥², 李霓³, 刘鹰^{2*}

(1. 青岛理工大学, 山东青岛 266033; 2. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266071; 3. 中国海洋大学, 山东青岛 266003)

摘要 [目的]评价流水养殖模式与循环水养殖模式对环境的影响。[方法]采用生命周期评价方法,以单尾大菱鲆增重 50 g 为功能单位,将 2 种模式分为饲料生产、电力生产和养殖系统排放 3 个阶段,从能源消耗、全球变暖影响、酸化潜势和富营养化潜势等方面评价 2 种模式对环境的影响。[结果]流水养殖模式的 4 种环境影响类型指数分别为 2.96×10^{-7} 、 1.19×10^{-4} 、 4.62×10^{-5} 和 1.20×10^{-3} ,而循环水养殖模式的 4 种环境影响类型指数分别为 4.43×10^{-7} 、 1.85×10^{-4} 、 7.00×10^{-5} 和 5.05×10^{-4} 。2 种养殖模式的综合指数分别为 0.001 37 和 0.000 76。[结论]循环水养殖模式的环境性能优于流水养殖模式。

关键词 流水养殖模式; 循环水养殖模式; 大菱鲆; 生命周期评价; 环境影响

中图分类号 S965.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)14-04380-04

Life Cycle Assessment (LCA) of Environmental Impact for Two Turbot Culture Types

WANG Jie, LIU Ying et al (Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033; Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266071)

Abstract [Objective] The present study was conducted to compare the potential environmental impacts of two culture types. [Method] Based on the function unit of 50 g weight gain for turbot and with analysis of life cycle assessment (LCA). Two aquaculture models were consisted of three stages: feed production, electricity production and aquaculture waste discharge. The evaluation of environmental impacts is carried out from four aspects: energy use, global warming potential, acidification and eutrophication potential. [Result] The results show that four kinds of environmental impact indexes of flow-through aquaculture were 2.96×10^{-7} , 1.19×10^{-4} , 4.62×10^{-5} and 1.2×10^{-3} . The four kinds of environmental impact indexes of recirculating aquaculture were 4.43×10^{-7} , 1.85×10^{-4} , 7.00×10^{-5} and 5.05×10^{-4} . The comprehensive life cycle environmental impact indexes of the aquaculture models were 0.001 37 and 0.000 76. [Conclusion] The environmental impact of recirculating aquaculture is better than flow-through aquaculture.

Key words Flow-through system; Recirculating aquaculture system; Turbot; Life cycle assessment; Environmental impact

大菱鲆(*Scophthalmus maximus* L.)是原产于欧洲沿海的一种比目鱼,具有适应低水温生活、生长速度快、肉质好等优点,已成为欧洲各国的海水鱼主养品种^[1]。大菱鲆自 1992 年引进我国后,深受消费者欢迎,2005 年我国大菱鲆养殖产量已达到 5 万 t,占世界养殖总量的 87.5%,已成为世界大菱鲆养殖第一大国^[2-3]。随着大菱鲆养殖业的深入发展,传统流水养殖模式的水资源浪费多、环境污染大等负面影响逐渐凸显^[4]。封闭循环水养殖(Recirculating aquaculture system, RAS)的用水率是普通流水养殖的 1/80 ~ 1/25,且污染物通过处理可降低至最小限度,既减少了废物排放,又实现了资源的重复利用^[5],具有非常广阔的发展前景。目前,封闭循环水养殖模式在我国尚处于开拓阶段,养殖关键生产技术与工艺、养殖模式的环境影响评估等还需进一步研究。

生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)是对一个产品某个过程或某个活动生命周期中物质与能量流以及潜在环境影响的汇编与评价,是一种被广泛使用的环境影响评价工具^[6-8]。将 LCA 用于评估水产养殖系统的环境可持续性已有近 10 年的历史,评估层次包括全球性和区域性影响,其中全球性层次评估指标有全球温室效应潜能值(GWP)、能源使用(EU)、占地表面积和净初级产品使用量(NPPU);区域性层次指标包括富营养化潜能值(EP)以及酸化潜势

(AP)^[9]。目前生命周期评价已应用于虹鳟、鲤鱼和罗非鱼研究^[10-11],但关于大菱鲆养殖的生命周期评价尚未见报道。笔者从能源消耗、富营养化潜势、酸化潜势和全球变暖影响 4 个方面对大菱鲆的流水养殖模式和循环水养殖模式进行了 LCA 评价,从而探讨 2 种养殖模式在生命周期过程中对外界环境的影响,以期为大菱鲆养殖生产模式的环境影响评估和优化改进提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 养殖试验 试验于 2013 年 10 ~ 12 月在山东东方海洋科技股份有限公司开发区分公司大菱鲆养殖实验车间进行,共计 80 d。试验采用流水养殖和循环水养殖 2 种模式,试验用鱼均为同一规格[(110.0 ± 5) g]的幼鱼,流水模式的养殖密度为 3.7 kg/m²,循环水模式的养殖密度为(10 ± 0.5) kg/m²。

流水养殖(Flow-through aquaculture)是利用水泵将地下 100 m 深的海水抽到开放式的大菱鲆养殖池内进行养殖,池内不断地补充新水并排放废水,养殖池每天换水 5 次,池内水温维持在 17 ℃左右,溶解氧控制在 6 mg/L 左右。

循环水养殖(Recirculating aquaculture)是一种将系统中的水经过处理后重复使用的养殖模式^[12]。循环水系统的流程如图 1 所示,水温、溶氧等条件与流水养殖基本一致,系统每天循环 24 次。

1.2 生命周期评价方法与范围的确定 此次评价以单尾大菱鲆增重 50 g 为功能单位,分析 2 种养殖模式下单尾大菱鲆增重 50 g 的过程中对环境产生的影响。起始边界为饵料与电力的生产与投入,终止边界为鱼的均重增长 50 g 以及生长

基金项目 国家科技支撑计划课题(2011BAD13B04);公益性行业(农业)科研专项经费项目(201003024)。

作者简介 王杰(1986-),男,山东淄博人,硕士研究生,研究方向:水污染控制技术。* 通讯作者,研究员,博士,博士生导师,从事水产工程及生态学研究。

收稿日期 2014-04-16

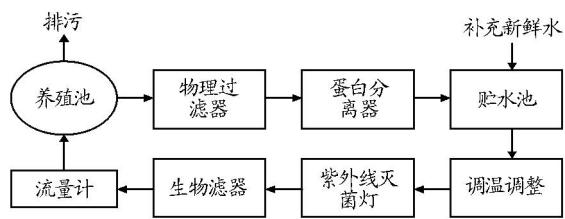


图1 封闭循环水养殖系统流程
过程中的养殖排放。此次评价的系统边界如图2所示。

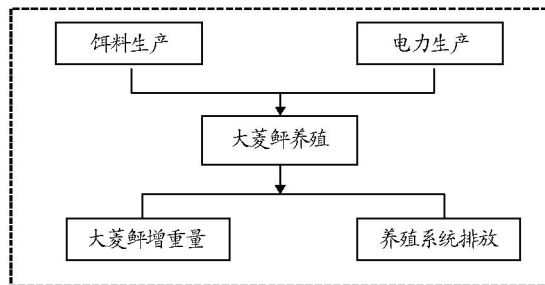


图2 大菱鲆养殖模式生命周期评价的系统边界

1.3 生命周期评价清单分析的数据来源 此次生命周期评价中平均每尾大菱鲆增重 50 g 的物质输入见表 1。试验中测定的数据主要来自饲料生产、电力生产以及养殖系统排放过程中产生的污染物以及能源消耗。饲料生产数据由生产厂商提供,电力生产由养殖阶段统计所得,而生产这些电力对环境造成的能源消耗以及污染物排放数据参照叶小梅等^[13]研究结果,养殖系统排放通过试验测定。测定的水质指标选取总氨氮(Total ammonia nitrogen,TAN)、亚硝酸氮(Nitrite, NO_2^--N)、硝酸氮(Nitrate, NO_3^--N)、磷酸盐(Phosphate, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)、总氮(Total nitrogen,TN)、总磷(Total phosphate,TP)。总氨氮含量的测定采用纳氏试剂法^[14];亚硝酸氮含量的测定参照海洋环境监测规范萘乙二胺分光光度法^[15];磷酸盐含量的测定参照海洋环境监测规范磷钼蓝分光光度法^[15];硝酸盐含量的测定采用紫外分光光度法^[16];总氮和总磷含量的测定采用联合消化方法^[17]。

表1 大菱鲆养殖模式的物质输入

养殖模式	用水量/kg	电能/kW·h	饲料用量/kg
流水养殖	3 139.00	0.864 56	0.053
循环水养殖	65.92	1.345 70	0.051

1.4 生命周期影响评价 影响评价是生命周期评价(LCA)最核心的内容,包括影响分类、特征化、标准化和加权评估4个步骤^[18]。

1.4.1 影响分类。生命周期评价过程中的能源消耗及污染物排放主要由饲料生产、电力生产及养殖系统排放产生,评价指标为全球变暖潜势(Global warming potential,GWP)、能源消耗(Energy use,EU)、酸化潜势(Acidification potential,AP)和富营养化潜势(Eutrophication potential,EP)。

1.4.2 特征化。此次评价采用美国环境保护署(EPA)提出的计算方法和模型,其中全球变暖影响以 CO_2 为参照, CO 、 CH_4 、 NO_x 的相关性系数分别为2、21和320;酸化潜势以 SO_2

为参照, NO_x 、 NH_3 和 H_2S 的相关性系数分别为0.70、1.88和1.88;富营养化潜势以 PO_4^{3-} 为参照, NO_x 、总氮、总磷、 NH_4^+-N 、COD和 NO_3^--N 的相关性系数分别为0.10、0.42、3.06、0.33、0.02和 $0.10^{[19]}$ 。

1.4.3 标准化。标准化主要是建立标准化基准,对各环境影响类型的数值大小提供一个可以比较的标准。此次评价用2000年全球人均环境影响潜力作为环境影响基准^[20]。因此,每种环境影响类型都会有一个对应的基准值,各环境影响类型特征化结果的数值与基准值的比值就是标准化的结果,4种环境影响类型的基准值如表2所示。

1.4.4 加权评估。加权评估的目的是确定各环境影响类型所占的权重,主要方法有专家打分法、目标距离法、模糊逻辑法以及层次分析法(AHP)等。但这些方法有的过于客观,有的针对性不强^[21],此次评价采用属性层次模型法(AHM)。属性层次模型(AHM)是一种球赛模型,其计算分为3个步骤:建立层次结构、构造属性判断矩阵并计算相对属性权和构造属性判断矩阵并计算相对属性权^[22]。经计算得到各环境影响类型的权重结果(表2)。

表2 各环境影响类型指数计算的基准值和权重值

环境影响类型	单位	基准值	权重
能源消耗	kg CO_2 -eq	2 590 457.00	0.076
富营养化潜势	MJ	1.88	0.424
全球变暖影响	kg SO_2 -eq	6 869.00	0.309
酸化潜势	kg PO_4^{3-} -eq	52.26	0.191

2 结果与分析

2.1 特征化结果 影响评价在经过特征化的步骤后得到各环境影响类型的相应的数值化指标,数值的大小反映系统所选择影响类别的负荷状况。

2.1.1 能源消耗。流水养殖模式和循环水养殖模式的能源消耗分别为10.066和15.100 MJ。从表3可以看出,由于能源消耗主要由电力生产引起,饲料生产对能源消耗的贡献度较小,循环水养殖的用电量高于流水养殖,因此循环水养殖的能源消耗高于流水养殖。

2.1.2 全球变暖影响。从表3可以看出,流水养殖模式与循环水养殖模式的全球变暖影响参数分别为2.654 50和4.130 00 kg CO_2 -eq。全球变暖影响主要是由饲料生产和电力生产引起的,电力生产对全球变暖影响的贡献度明显高于饲料生产,导致循环水养殖模式对全球变暖影响的参数高于流水养殖模式。

2.1.3 酸化潜势。流水养殖模式和循环水养殖模式的酸化潜势参数分别为0.012 67和0.019 24 kg SO_2 -eq。从表3可以看出,酸化潜势来自饲料生产和电力生产,其中电力生产对酸化潜势的贡献度高于饲料生产,同样导致循环水养殖模式的酸化潜势参数高于流水养殖模式。

2.1.4 富营养化潜势。流水养殖模式与循环水养殖模式的富营养化潜势参数分别为0.005 34和0.002 24 kg PO_4^{3-} -eq,流水养殖模式的富营养化潜势参数高于循环水养殖。这是由于流水养殖模式的用水量远高于循环水养殖,排放的废水

量多。因此,流水养殖模式的富营养化潜势高于循环水养殖模式。

表3 特征化结果

环境影响类型	流水养殖模式				循环水养殖模式			
	饲料生产	电力生产	养殖系统排放	总计	饲料生产	电力生产	养殖系统排放	总计
能源消耗	0.956 00	9.110 00	0	10.066 00	0.920 00	14.180 00	0	15.100 00
全球变暖影响	0.084 50	2.570 00	0	2.654 50	0.080 00	4.050 00	0	4.130 00
酸化潜势	0.000 67	0.012 00	0	0.012 67	0.000 64	0.018 60	0	0.019 24
富营养化潜势	0.000 28	0.000 56	0.004 5	0.005 34	0.000 27	0.000 87	0.001 01	0.002 24

2.2 标准化结果。经过标准化处理,得到4个环境影响类型的潜力,将各环境影响类型的潜力大小进行比较,各环境影响类型的潜力如表4所示。

表4 生命周期环境影响的潜力

养殖模式	能源消耗 EU//MJ	全球变暖影响	酸化潜势	富营养化潜势
		GWP kgCO ₂ -eq	AP//kgSO ₂ -eq	EU//kgPO ₄ ³⁻ -eq
流水养殖	3.89 × 10 ⁻⁶	3.86 × 10 ⁻⁴	2.42 × 10 ⁻⁴	2.84 × 10 ⁻³
循环水养殖	5.83 × 10 ⁻⁶	6.06 × 10 ⁻⁴	3.68 × 10 ⁻⁴	1.19 × 10 ⁻³

从表4可以看出,2种养殖模式下环境影响类型潜力由高到低分别为:富营养化潜势>全球变暖影响>酸化潜势>能源消耗。由此可见,在4个环境影响类型中富营养化潜势对外界环境的影响最大,由于富营养化潜势主要是由养殖排放产生的,而流水养殖模式的排水量远高于循环水养殖模式,因此流水养殖模式的富营养化潜势的潜力明显高于循环水养殖模式。其他3个环境影响类型中,流水养殖模式的环境影响潜力均要略低于循环水养殖模式。

2.3 加权评估结果 从表5可以看出,流水养殖模式和循环水养殖模式的环境影响综合指数分别为0.001 37和0.000 76,流水养殖模式的环境影响综合指数高于循环水养殖模式。

表5 生命周期环境影响指数

养殖模式	能源消耗 MJ	全球变暖影响	酸化潜势	富营养化潜势	综合指数
		kgCO ₂ -eq	kgSO ₂ -eq	kgPO ₄ ³⁻ -eq	
流水养殖	2.96 × 10 ⁻⁷	1.19 × 10 ⁻⁴	4.62 × 10 ⁻⁵	1.20 × 10 ⁻⁵	0.001 37
循环水养殖	4.43 × 10 ⁻⁷	1.85 × 10 ⁻⁴	7.00 × 10 ⁻⁵	5.05 × 10 ⁻⁵	0.000 76

由表6可知,生命周期中3个过程流水养殖模式的环境影响贡献率由高到低依次为:养殖系统排放>电力生产>饲料生产,三者所占比例分别为74.07%、20.86%和5.07%;养殖系统排在流水养殖系统中对外界环境影响的贡献率最高。循环水养殖模式由高到低依次为:电力生产>养殖系统排放>饲料生产,三者所占比例分别为60.22%、30.76%和9.02%。由于循环水养殖模式的用电量、污水排放量少,因此电力生产在循环水养殖系统中对外界环境影响的贡献

表6 环境影响综合指数贡献率

养殖模式	贡献率//%		
	饲料生产	电力生产	养殖系统排放
流水养殖	5.07	20.86	74.07
循环水养殖	9.02	60.22	30.76

率最高。

3 讨论与结论

采用生命周期评价对2种养殖模式的4种环境影响类型进行分析,富营养化潜势是大菱鲆养殖模式的主要环境影响类型,这也是近年来水产养殖业的共识。在流水养殖模式中,富营养化潜势主要来自养殖排放;在循环水式养殖中,富营养化潜势主要来自养殖排放和电力生产阶段。

流水养殖模式中,养殖排放阶段的环境影响指数高于饲料生产和电力生产阶段。Mungkung等^[10]试验表明将饵料系数(FCR)从2.1降到1.7,富营养化潜势的潜力可以降低22%。Jerbi等^[23]在对黑鲈养殖系统生命周期评价中发现改善黑鲈养殖系统对外界环境影响最重要的方法是通过改进养殖工艺,从而提高饵料利用率。因此,采取降低饵料系数和提高饵料利用率的措施,可以有效减少养殖排放造成的污染。陈德春^[24]试验发现采用科学的投饵标准可以减少残饵量。根据养殖对象,在生长过程中按照水温、溶氧、季节变化、鱼体重,随时调整投饵率和投饵量以及投饵次数和时间,可以有效提高饵料利用率。通过以上方法可以明显降低富营养化对环境造成的影响。

循环水养殖模式中,电力生产阶段的环境影响指数高于饲料生产和养殖排放阶段,因此采取节电处理、避免用电浪费可以有效改善电力生产阶段对环境造成的影响。同时,养殖排放阶段的改进也需要注意。Davidson等^[25]试验发现循环水养殖模式的排污量可缩减至系统总水量的2.6%,这对系统单元的处理能力提出了更高的要求。丁建乐等^[8]提出近年来涌现出的脱硝反应淤泥浓缩技术和臭氧处理等创新技术,使循环水养殖系统的水处理能力提高,用水废物排放和耗能等又有了进一步减少。因此,提高系统单元处理能力,降低排污量,可以减少N、P排放,降低富营养化潜势在环境影响类型中所占的比重。

综上所述,流水养殖模式与循环水养殖模式面临的主要问题是富营养化对环境造成的影响。其中,流水养殖模式对环境的影响更大。将4种环境影响类型进行综合比较,发现流水养殖模式的环境性能高于循环水养殖模式。陈中祥等^[8]在对虹鳟的3种养殖模式的生命周期评价中发现循环水养殖模式对环境造成的影响小于流水养殖模式,这与此次评价的结果是一致的。因此,在对2种养殖模式改进的同时,大力推广循环水养殖工艺是提高环境性能的捷径。

生命周期评价结果表明,流水养殖模式的环境影响综合指数高于循环水养殖。环境影响类型4个方面的环境影响

指数由高到低依次为:富营养化潜势>全球变暖影响>酸化潜势>能源消耗。流水养殖模式3个阶段的环境影响指数贡献率由高到低依次为:养殖系统排放>电力生产>饲料生产。循环水养殖模式3个阶段的环境影响指数贡献率由高到低依次为:电力生产>养殖系统排放>饲料生产。流水养殖模式应采取以降低饵料系数、提高饵料利用率为主,节电为辅的措施改善环境性能;循环水养殖模式应采取以节约用电、缩减排污量的措施改善环境性能。

参考文献

- [1] 方永强,翁幼竹,杨尧等.“大菱鲆引进驯化和养殖”的试验[J].台湾海峡,2001,20(3):356-362.
- [2] 雷霖霖,门强.大菱鲆人工繁殖与养殖技术讲座(Ⅰ)[J].齐鲁渔业,2002,19(9):43-46.
- [3] 雷霖霖,刘新富,关长涛.中国大菱鲆养殖20年成就与展望[J].渔业科学进展,2012,33(4):123-130.
- [4] 刘鹰.欧洲循环水养殖技术综述[J].渔业现代化,2006(6):47-49.
- [5] BLANCHETON J P. Developments in recirculation systems for Mediterranean fish species[J]. Aquacultural Engineering, 2000, 22: 17-31.
- [6] REBITZER G, EKVAL T, FRISCHKNECHT R. Life cycle assessment Part1: Framework goal and scope definition, inventory analysis and applications[J]. Environment International, 2004, 30(5): 701-720.
- [7] ISO 14040. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Frameworks[S]. 2006.
- [8] ISO 14044. Aquacultural Engineering. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirement and Guidelines[S]. 2006.
- [9] 丁建乐,鲍旭腾,梁澄.欧洲循环水养殖系统研究进展[J].渔业现代化,2011,38(5):53-57.
- [10] 陈中祥,曹广斌,韩世成.中国虹鳟养殖模式的生命周期评价[J].农业环境科学学报,2011,30(10):2113-2118.
- [11] MUNGKUNG R, AUBIN J, PRIHADI T H et al. Life Cycle Assessment for environmentally sustainable aquaculture management: a case study of combined aquaculture systems for carp and tilapia[J]. Journal of Cleaner

Production, 2013, 57: 249-256.

- [12] 陈军,徐皓,倪琦.我国工厂化循环水养殖发展研究报告[J].渔业现代化,2009,36(4):1-7.
- [13] 叶小梅,常志州,杜静.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.
- [14] 闰修花,王桂珍,陈迪军.纳氏试剂比色法直接测定海水中的氨氮[J].中国环境监测,2003,19(6):8-10.
- [15] 国家海洋环境监测中心. GB 17378.7—2007. 海洋监测规范[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [16] 王曼,李冬,梁瑜海.紫外分光光度法测定水中硝酸盐氮的试验研究[J].环境科学与技术,2011,34(6G):231-234.
- [17] 邢殿楼,霍堂斌,吴会民.总氮、总磷联合消化的测定方法[J].大连水产学院学报,2006,21(3):219-225.
- [18] 朴文华,陈郁,张树深.基于LCA方法的水泥企业清洁生产审核[J].环境科学学报,2012,32(7):1785-1792.
- [19] BARE J C, PENNINTON D W, JUDO DE HAES H A. Life cycle impact assessment sophistication: international workshop[J]. International Journal of LCA, 1999, 4(5): 299-306.
- [20] HUIJBREGTS M A J, THISSEN U, GUINEE J B. Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate exposure and effects model USES-LCA[J]. Chemosphere, 2000, 4(4): 541-573.
- [21] 赵晶晶.城市污水处理厂生命周期评价体系构建[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [22] 程乾生.层次分析法AHP和属性层次模型[J].AHM系统工程理论与实践,1997(11):25-28.
- [23] JERBI M A, AUBIN J, GARNAOUC K, et al. Life cycle assessment (LCA) of two rearing techniques of sea bass (*Dicentrarchus labrax*) [J]. Aquacultural Engineering, 2012, 46: 1-9.
- [24] 陈德春.投饵式网箱养鱼对水质的影响及保护措施[J].水利渔业,1993(2):23-26.
- [25] DAVIDSON J, GOOD C, WELSH C et al. The effects of ozone and water exchange rates on water quality and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance in replicated water recirculating systems [J]. Aquacultural Engineering, 2011, 44: 80-96.

(上接第4331页)

等级降水日数均为负距平;80年代 ≥ 0.1 mm的降水日数减少明显;90年代 ≥ 0.1 mm和 ≥ 1.0 mm降水日数为负距平;21世纪以来各等级降水日数除 ≥ 0.1 mm降水日数偏少,其余等级降水比较正常。表明降水日数的偏多与降水量偏大相一致。

(4) 佳木斯20世纪50~70年代降雪日数少,80年代以后偏多;但50~70年代积雪时间长,降雪的初终日数也偏多,比90年代至21世纪以来明显偏多20.0 d,降雪初日较早,平均在10月中旬,比90年代和21世纪以来降雪初日平均提前7~8 d,降雪终日仅90年代结束较早,在4月中旬,其余年代基本相同,在4月下旬。

参考文献

- [1] 王英,曹明奎,陶波等.全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J].地理研究,2006,25(6):1031-1041.

- [2] 瞿盘茂,刘静.气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J].中国工程科学,2012,14(9):2355-2163.
- [3] 瞿盘茂,王萃萃,李威.极端降水事件变化的观测研究[J].气候变化研究进展,2007,3(3):144-148.
- [4] 吕新苗,吴绍洪,杨勤业等.全球环境变化对我国区域发展的可能影响评述[J].地理科学进展,2003,22(3):260-269.
- [5] 张军涛,李哲,郝度.温度与降水变化的小波分析及其环境效应解释:以东北牧交错区为例[J].地理研究,2002,21(1):54-60.
- [6] 戴礼云,车涛.1999-2008年中国地区雪密度的时空分布及其影响特征[J].冰川冻土,2010,32(5):861-866.
- [7] 郝成元,赵同谦.中国气候变化敏感区降水量区域对比[J].地理科学进展,2011,30(1):73-79.
- [8] 李栋梁,刘玉莲,于宏敏等.黑龙江省近50a积雪初终日期变化特征分析[J].冰川冻土,2009,31(6):1011-1018.
- [9] 任丽,较玲玲,张桂华等.黑龙江省2009年3次暴雪过程的螺旋度分布特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2011,5(3):21-24.
- [10] 孙欣,蔡罗宁,陈传雷等.“070304”东北特大暴雪的分析[J].气象,2011,37(7):863-870.
- [11] 宗曼华,王晓辉,刘小宁等.地面气象观测规范[S].北京:气象出版社,2003.