

DOI: 10.5846/stxb201903310621

赵素芹, 孙翔, 侯东林, 朱焱. 应对畜禽养殖跨界污染的流域水资源生态补偿量研究——以国家生态补偿示范区九洲江流域为例. 生态学报, 2020, 40(10): 3247-3257.

Zhao S Q, Sun X, Hou D L, Zhu Y. Ecological compensation for cross-boundary pollution control of livestock and poultry: a case study of Jiuzhou River Basin in national ecological compensation demonstration area. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3247-3257.

应对畜禽养殖跨界污染的流域水资源生态补偿量研究 ——以国家生态补偿示范区九洲江流域为例

赵素芹¹, 孙翔^{1,*}, 侯东林², 朱焱¹

¹ 广西大学资源环境与材料学院, 南宁 530004

² 生态环境部环境与经济政策研究中心, 北京 100029

摘要: 生态补偿标准研究是国内外流域生态补偿领域研究的热点话题。以国家生态补偿试点区九洲江流域为例, 围绕生猪养殖跨界污染问题, 以 COD、TP、TN 为目标控制污染物, 计算水环境容量约束下的污染物削减目标量。设置禁养区关闭拆迁养猪场、高架床养殖模式改造、养殖粪尿废水集中处理 3 种典型控制方式, 以污染物削减目标量为约束条件, 构建线性规划模型求算不同治理情景下用于水污染控制的投入成本, 从而求算最小生态补偿量。在此基础上以取水量、供水量、GDP 为主要约束条件, 建立中央、广东、广西政府生态补偿投入资金分担比例模型, 明确中央、广东及广西政府各自分摊的生态补偿金额。此外, 考虑到模型参数不确定性对生态补偿量的影响, 对模型参数进行了蒙特卡罗模拟和灵敏度检验, 求算高架床养殖容积比(k_1)、限养区污水入河系数(k_2)、高架床养殖模式日排水量(k_3)及传统养殖模式日排水量(k_4)不确定条件下生态补偿量的所有可能值及模型参数方差贡献率。结果显示: (1) 在 90% 保证率水质达标下, 流域水环境 COD、TP、TN 污染物削减总量目标分别为 378752.98 t、2161.60 t 和 13951.70 t; (2) 基于成本核算法得到生态补偿量为 15.03 亿元, 中央、广西、广东政府分摊金额分别为 3.76、3.31、7.96 亿元; (3) 95% 置信水平下, 两种情景下生态补偿量置信区间分别为 [12.51 亿元, 17.42 亿元]、[9.34 亿元, 21.93 亿元]; (4) 利用参数灵敏度分析得到情景一生态补偿策略下模型参数 k_1 、 k_2 、 k_3 方差贡献率分别为 79.50%、18.90%、1.60%, 情景二生态补偿策略下模型参数 k_2 、 k_4 方差贡献率依次为 88.80% 和 11.20%。

关键词: 生态补偿标准; 畜禽养殖污染; 流域生态补偿

Ecological compensation for cross-boundary pollution control of livestock and poultry: a case study of Jiuzhou River Basin in national ecological compensation demonstration area

ZHAO Suqin¹, SUN Xiang^{1,*}, HOU Donglin², ZHU Yi¹

¹ School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China

² Center for Environmental and Economic Policy Research, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China

Abstract: Research on ecological compensation standard is a challenging topic in the field of river basin management. We estimated the cross-boundary pollution caused by pig breeding in Jiuzhou River Basin as a case study, and calculated the total amount of pollutant reduction based on pollutants control targets of COD, TP, and TN. In the estimation process, we set up three typical control scenarios, which included: closing pig farms in forbidden breeding areas, transforming bed breeding mode, and central treating of wastewater. Considering the pollutant reduction target as the principal constraint, a

基金项目: 2017 年教育部人文社会科学研究青年基金 (17YJCZH153); 广西大学人才项目 (XGZ150300)

收稿日期: 2019-03-31; **网络出版日期:** 2020-04-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunxiangphd@gxu.edu.cn

linear programming model was conducted to calculate the input cost of water pollution control under different treatment scenarios; we also modelled the minimum ecological compensation based on these scenarios. Taking the water consumption, water supply and GDP as the main constraints, we established a compensation analysis with the certain proportion of investment from central government, local government of Guangdong and Guangxi province; therefore, the ecological compensation amount of each side was determined based on their investment. In this research, Monte Carlo simulation and sensitivity analysis was applied to estimate the uncertainty of parameters while modelling compensation. All possible values and variance contribution rates to ecological compensation under uncertain model parameters were calculated, these parameters included breeding volumetric ratio (k_1), wastewater discharge to river basin in forbidden zone (k_2), and daily wastewater discharge amount with loft-bed (k_3) and daily wastewater discharge amount under traditional breeding case (k_4). Our results show that: (1) the reduction amount of total pollutants for COD was 378752.98 t, 2161.60 t for TP reduction and 13951.70 t for TN reduction under 90% guarantee rate of water quality standard; (2) total amount of ecological compensation was 1.503 billion based on the cost accounting method, and the allocation amount of the central government, local government of Guangxi and Guangdong province was 376 million, 331 million and 796 million, respectively; (3) under the confidence intervals level of 95%, the ecological compensation values in two different scenarios were calculated as 1.25—1.74 billion and 0.93—2.19 billion. (4) referring to the sensitive analysis of parameters, the variance contribution rates of parameters k_1 , k_2 and k_3 was 79.50%, 18.90% and 1.60%, separately in scenario 1, and 88.80% of parameter k_2 and 11.20% for 44 in scenario 2.

Key Words: eco-compensation standard; livestock and poultry pollution; basin ecological compensation

随着九洲江流域生猪等养殖业的迅猛发展,畜禽养殖污染日趋严重,对当地流域水环境造成巨大压力,畜禽养殖业成为流域污染的主要来源之一。流域水资源生态补偿是平衡上下游发展与保护关系、解决跨区域污染的有效途径,亦是环境经济学、环境管理学领域研究的热点问题。自 20 世纪 90 年代末生态补偿理论被引入到流域管理领域,国内外专家、学者对流域生态补偿进行了积极的研究探索^[1-3]。目前,国内外学者针对流域生态补偿的研究主要集中在生态补偿理论内涵^[4-6]、补偿模式^[7-9]、补偿标准^[10-13]、支付意愿^[14-19]等方面。流域生态补偿机制理论的研究主要从跨省流域生态补偿、省内跨市流域生态补偿、市域内跨县流域生态补偿等 3 个层次展开,剖析涵义、原则、标准、驱动力与障碍、政策服务等^[20]。在补偿模式与途径设计方面,主要提出政府主导型和市场交易型模式,且提出了各自应用的条件与准则,剖析了现有模式的局限问题,建立了生态补偿制度选择和操作范式^[21]。现阶段,流域生态补偿标准的测算主要从投入成本、环境效益、补偿意愿等角度切入^[22],主要方法包括条件价值法、机会成本法、价值和费用分析法等^[23],这些核算方法为流域生态补偿标准的确定提供依据。而有关养殖污染主控流域管理方面研究主要集中在养殖污染治理成本效益、养殖户偏好、管理模式、养殖模式、受偿意愿等^[24-26]。有些学者探讨了畜禽养殖治理和管理模式优化相结合的定量研究^[27];孙若梅^[28]探讨了畜禽养殖业生态补偿内涵的界定,并提出具体的生态补偿措施;张郁等^[29]分析了生态补偿情景下家庭资源禀赋对养猪户的环境行为影响;宾慕容等^[24]以湘江流域 367 位生猪养殖户的实地调查数据为基础,对农户生猪养殖污染治理意愿的影响因素及层次结构进行了分析;昌苗苗和陈洋^[30]对九洲江流域生态补偿实践进展进行了介绍;王西琴等^[31]以九洲江为研究区域,计算了限制生猪养殖的机会成本与环境效益,建立了基于畜禽养殖模式转变的生态补偿空间优化模型;唐溧等^[32]以九洲江流域生猪养殖户为研究对象,采用意愿调查法分别给出禁养与升级改造受偿意愿。这些理论与实践成果为本研究的开展奠定了很好的方法学基础,但在养殖污染主控流域水资源生态补偿量的分析框架与技术方法上仍有较大的发展空间。本文以国家生态补偿示范区九洲江流域作为典型案例,基于Ⅲ类水质目标要求计算污染物削减目标量,设置禁养区关闭拆迁养猪场、高架床养殖模式改造、养殖粪尿废水集中处理三种典型控制方式,以污染物削减目标为约束条件,基于费效比构建线性规划模型,求算用于水污染控制的最小政府补偿总额,并以取水量、用水量、

GDP 为主要约束条件,建立上下游地方政府及中央政府生态补偿金额分配模型。以期为流域生态补偿政策的制定提供参考和借鉴,对其他流域生态补偿量的确定提供方法学参考。

1 研究区域概况

九洲江是一条跨粤桂两省(区)的独流入海河流,发源于广西陆川县沙坡镇秦镜村的文龙径,流经广西玉林市陆川、博白两县共 10 个镇进入广东湛江市的鹤地水库,最后注入北部湾,全长 168 km,总集雨面积 3396 km²。鹤地水库位于湛江廉江市河唇镇,是九洲江流域下游湛江市重要的饮用水源地,水面面积共 122 km²。近年来,以生猪养殖主控的畜禽养殖业是流域上游广西玉林市的主要发展产业,养殖源成为九洲江流域水体污染的主要来源,养殖污染排放中化学需氧量、氨氮、总氮、总磷占总量比例分别为 60.69%、57.83%、66.00%、78.51%^[25]。粤桂两省(区)党委、政府和社会各界高度重视九洲江流域水环境安全,2015 年 3 月,粤桂两省联合出台《九洲江流域水环境补偿实施方案》;同年 9 月,中共中央、国务院明确将九洲江流域环境综合治理列为国家《生态文明体制改革总体方案》跨地区生态补偿三个试点之一。2016 年 3 月,两省签订《九洲江流域上下游横向生态补偿协议》,在两省及中央的共同努力下,流域水环境已经得到初步改善。基于流域各乡镇生猪养殖现状,欲通过 3 个方面进行流域畜禽污染治理工作(图 1):一是根据《粤桂两省九洲江水污染防治规划》,划定禁养区(干流沿岸 500 m 及支流沿岸 200 m 范围内)、限养区(干流 500—2000 m 及支流沿岸 200—2000 m 范围内)及适养区(其他区域),实施生猪养殖精细化分区管理;二是推广生态养殖新模式,实现高架床养殖;三是进行养殖废弃物处理设施建设,实现废弃物集中处理。因此,如何用最小的生态补偿稳定达到水质要求,取得环境效益目标的同时兼顾九洲江上游广西玉林片区为保护水质所作的经济牺牲,是九洲江流域畜禽养殖污染治理和生态补偿政策制定面临的重要问题。

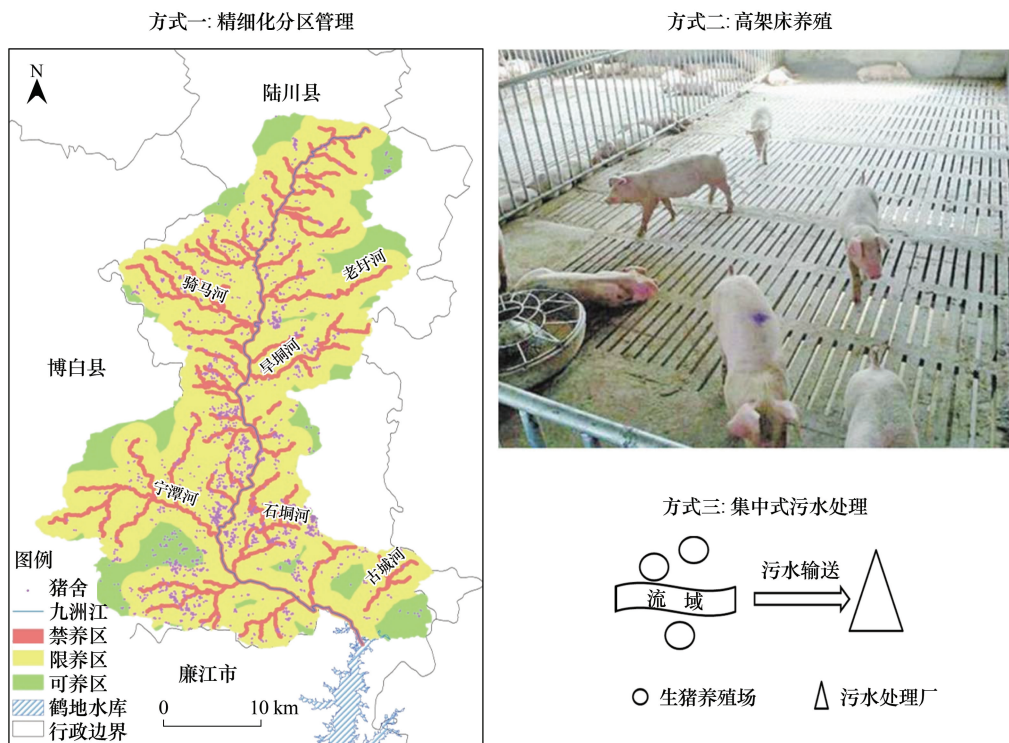


图 1 九洲江流域养殖区域划分及主要污染处理管控方式

Fig.1 Spatial distribution of pig farms, and major pollution treatment methods for livestock and poultry in Jiuzhou River Basin

2 流域生态补偿量计算方法

流域生态补偿额度的研究,从最初定性确定补偿理论机制,到定量研究具体补偿量,方法逐渐明确科学,也更加具有合理性。当前,投入、效益、补偿意愿等 3 方面是绝大多数流域生态补偿额度测算的主题方向。在投入方面,通过计算为保护或改善水资源环境状况,所进行的各项投入,包括保护环境而丧失的机会成本。主要方法包括机会成本法^[33]、生态重建成本分摊法^[34]、损失价值核算法^[35]等;在效益方面,通过估算保护环境投入在经济、社会、生态等方面产生的外部效应来确定补偿值,主要有生态系统服务价值法、水质水量法、污染权等^[36]方法;在补偿意愿方面,通过对消费者进行直接调查和询问,了解消费者的对于改善或保护环境的支付意愿,主要有条件价值法、博弈法等^[37-38]。

补偿资金额度的测算是实现生态补偿的前提,也是生态补偿的关键环节。基于现有研究成果,本研究基于水质水量的跨界区域生态补偿量计算方法,结合九洲江流域的主要特点,建立上下游地区及中央生态补偿标准,推动流域生态补偿具体实施与贯彻执行。

2.1 水环境目标约束下的流域生态补偿量

2.1.1 流域水环境污染削减目标总量计算

水环境容量是在特定水环境目标约束下,综合考虑水体自净能力下能够容纳的最大排污量^[34-35]。模型选取 COD、总磷、总氮为指标,在Ⅲ类水质要求下,基于水环境容量为约束条件计算畜禽污染物削减目标总量。以下为削减目标总量模型函数:

$$Q_{\text{削}} = Q_{\text{入河}} - W \tag{1}$$

$$Q_{\text{入河}} = 365 C_i q_1 (T_1 r_1 + T_2 r_2) \tag{2}$$

$$W = Q_0 (C_s - C_0) + KV C_s \tag{3}$$

式中, $Q_{\text{削}}$ 为污染物削减目标量; $Q_{\text{入河}}$ 为畜禽养殖污染物现状排放入河量; W 为水环境容量; C_i 为畜禽污水污染物浓度(见表 1),mg/L; T_1 、 T_2 为禁养区、限养区生猪存栏量,头; q_1 为传统养殖模式日排水量,0.03 t 头⁻¹ d⁻¹(实地养殖场调研求均值所得,方差 δ^2 为 0.001); r_1 、 r_2 为禁养区、限养区污染物入河系数(根据文献查阅^[39-41],流域内禁养区范围污染物入河系数在 0.60—0.70,限养区范围内污染物入河系数在 0.30—0.60。基于九洲江流域实地调查(图 2),禁养区范围内养殖密度大,取最大入河系数 0.70,限养区范围内取均值 0.50); Q_0 为流域多年平均径流量,9.28 亿 m³/a; C_s 为污染物的环境标准值(Ⅲ类); C_0 为污染物的环境背景值,这里忽略本底值的影响,假设 $C_0 = 0$; V 为流域水资源体积,11.05 亿 m³; K 为降解系数,根据文献现有研究^[42-43],确定 COD 降解系数为 0.20 d⁻¹; TP、TN 降解系数为 0.10 d⁻¹。

2.1.2 污染物削减分配优化模型构建

在污染物削减目标确定的基础上,总削减量的分配采取整型规划及优先次序递推法,禁养区内禁养清拆为第一步;限养区处理方式第二步,并设高架床养殖模式改造和污染物集中处理两种情景。按照先后顺序对禁养区、限养区进行可削减量估算,比较总目标削减量和各部分可削减量,若禁养区可满足总削减量要求,则完成削减目标;若禁养区不能满足总削减量要求,则递推至限养区,直到累积可削减量达到总目标削减量值为止^[44](图 3)。

2.1.3 生态补偿量计算

限养区内有两种畜禽养殖污染治理方案,不同治理方案的治理成本存在差异,因此本文基于限养区不同污染治理方案设置不同成本计算情景,从而选取最小生态补偿量。根据玉林市环保局出台的《粤桂两省九洲

表 1 生猪养殖废水中污染物质量浓度

Table 1 Pollutant mass concentration of pig contaminant sewage	
污染物 Contaminant	浓度 Concentration/(mg/L)
COD	21600.00
TP	127.00
TN	805.00

备注:数据来源于《畜禽养殖业污染治理工程技术规范(HJ497—2009)》; COD:化学需氧量, Chemical Oxygen Demand; TP: 总磷, Total Phosphorus; TN: 总氮, Total Nitrogen

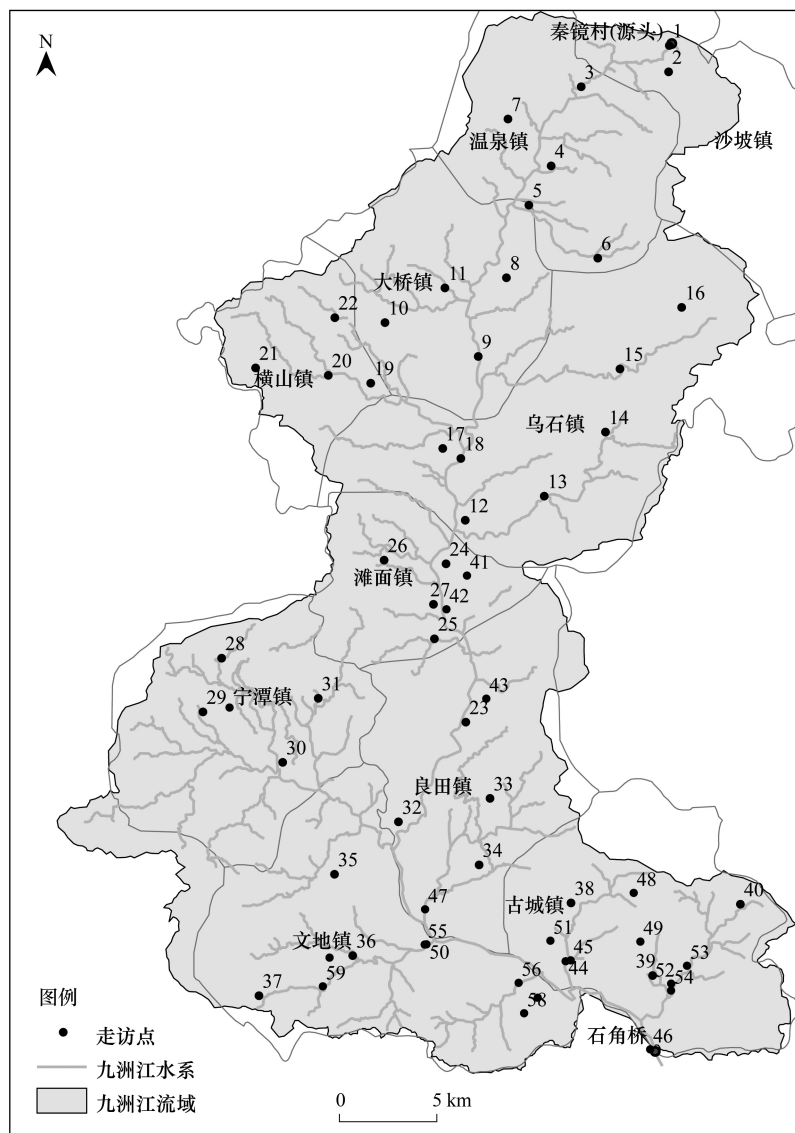


图2 九洲江流域调研路线图

Fig.2 Survey roadmap in Jiuzhou River Basin

江水污染防治规划》,其限养区污染治理分高架床养殖模式改造、养殖粪污集中式处理点建设两种方案,因此生态补偿成本计算可设置两种情景,即“禁养+高架床生态养殖改造”为情景一,“禁养+集中式处理设施建设”为情景二,以最小生态补偿金额为目标函数,以污染物削减目标量为主要约束条件,得到目标函数如下:

$$\text{Min} Y = \{Y_1, Y_2\} \quad (4)$$

$$\text{情景一: } Y_1 = F_1 T_1 + \frac{Q_{\text{削}} - Q_{\text{禁}}}{Q_{\text{高架床}}} M F_2 \quad (5)$$

$$\text{情景二: } Y_2 = F_1 T_1 + (Q_{\text{削}} - Q_{\text{禁}}) F_3 / C_i \quad (6)$$

$$Q_{\text{禁}} = 365 T_1 q_1 C_i r_1 \quad (7)$$

$$Q_{\text{高架床}} = 365 (q_1 - q_2) C_i r_2 \quad (8)$$

式中, Y 为最小目标生态补偿量,元; Y_1 、 Y_2 为不同情景下的生态补偿成本,元; $Q_{\text{禁}}$ 为禁养区内可削减污染物量,t; $Q_{\text{高架床}}$ 为高架床养殖模式改造可削减污染物量,t 头⁻¹ a⁻¹; M 为高架床养殖模式猪舍容积比,1.10 m²/头(两次实地调研取均值所得,方差 δ^2 为0.11); q_2 为高架床养殖模式下生猪养殖排水量,0.0018 t 头⁻¹ d⁻¹(两次

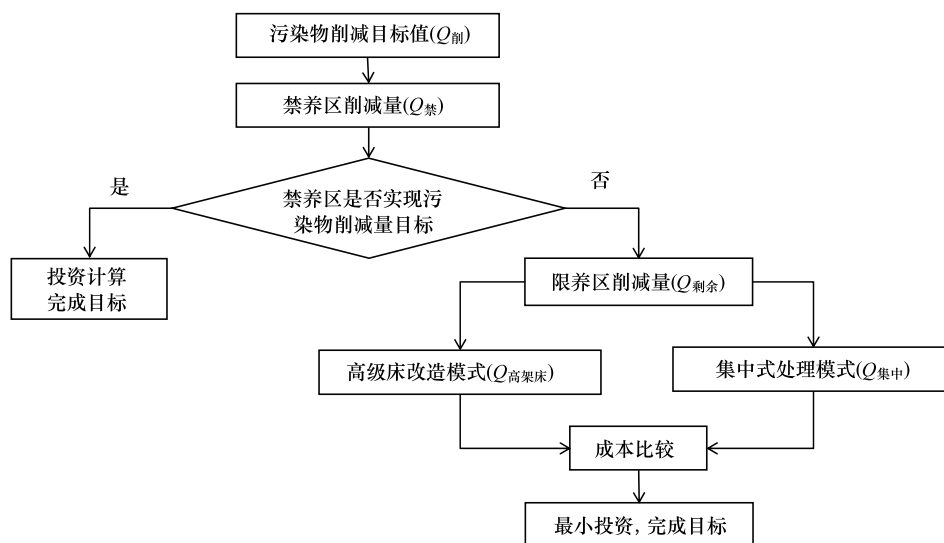


图3 污染物削减量分配模型

Fig.3 Optimization model of pollutant reduction allocation

调研取均值所得,方差 δ^2 为0.0002); F_1 、 F_2 分别为禁养区内清拆禁养、限养区内高架床养殖改造治理策略下的补偿金额,分别为500.00、440.00元/ m^2 ,数据参考于当地政府治理规划文本报告^[45],且实地调查进行验证; F_3 为集中式养殖粪污处理模式下补偿金额,100.00元/t,数据来自博世科陆川县固废新能源项目实地考察,此项目是流域上游地区唯一的养殖粪污资源化处理的项目点,数据参考于当地政府对此项目的补偿标准。

2.2 九洲江流域生态补偿量分担模型构建

围绕九洲江水环境污染的现状和特点,粤桂双方多次协商。2014年8月,广东省人民政府和广西壮族自治区人民政府联合签署《九洲江流域跨界水环境保护合作协议》;2016年3月21日,在环保部、财政部的指导下,广东、广西两省区在福建省签订了《九洲江流域上下游横向生态补偿协议》。两省虽有较好的合作基础,然而九洲江流域上下游及中央补偿比例还是存在纷争。本研究结合流域上下游用水量以及经济承受能力,引入中央政府财政纵向转移支付,建立地区及中央生态补偿成本分摊模型,以期九洲江养殖水污染生态补偿的实施提供科学建议。具体模型如下:

$$Y_{\text{中央}} = \frac{1}{4}Y \quad (9)$$

$$Y_{\text{广西}} = \left(Y - \frac{1}{4}Y_{\text{中央}}\right) \left(50\% \frac{Q_{\text{上游}}}{Q_{\text{供水量}}} + 50\% \frac{G_{\text{上游}}}{G_{\text{上下游}}}\right) \quad (10)$$

$$Y_{\text{广东}} = Y - Y_{\text{中央}} - Y_{\text{广西}} \quad (11)$$

式中, Y 为流域生态补偿量,元; $Y_{\text{中央}}$ 为中央政府纵向财政转移支付,元; $Y_{\text{广西}}$ 为广西省生态补偿成本分摊量,元; $Y_{\text{广东}}$ 为广东省生态补偿成本分摊量,元; $Q_{\text{广西}}$ 为上游广西取水量, m^3 ; $Q_{\text{供水量}}$ 为九洲江流域供水量, m^3 ; $G_{\text{上游}}$ 为广西玉林市GDP总值(2016年),亿元; $G_{\text{上下游}}$ 为上下游(广西玉林、广东湛江)GDP总值,亿元。

2.3 参数灵敏度计算

考虑到模型参数的取值容易受到外界环境的影响,且具有不确定性。本文利用Crystal Ball软件进行模型参数的灵敏度分析。首先采用蒙特卡罗模拟方法对模型参数的概率分布函数进行大量的重复抽样,代入式(2)、式(3)、式(5)、式(6)建立生态补偿量的分布函数,从而获得模型中重要的数学特征,如数学期望、方差、区间估计等。在此步骤基础上,利用方差分析法对参数进行方差分析,根据参数输入对生态补偿量输出的秩相关系数的平方归一化后所占的比例来确定参数的灵敏度^[46]。具体公式如下所示:

$$\gamma_k = \frac{\alpha_{k0}^2}{\sum_{k=0}^n \alpha_{k0}^2} \times 100\% \quad (12)$$

$$\alpha_{k0} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R_{ik} - R_{i0})^2}{n(n^2 - 1)} \quad (13)$$

式中, γ_k 为 k 参数变量的方差贡献率; α_{k0} 表示 k 参数变量对生态补偿量的秩相关系数; n 表示样本数; R_{ik} 表示参数变量 k 第 i 次抽样在样本中的排序; R_{i0} 表示第 i 次抽样对应的生态补偿量的结果排序。

3 结果分析

3.1 污染物削减目标总量

根据公式(3)计算可知, COD、TP、TN 水环境容量分别为 20682.00、186.93、934.65 t/a。2016 年九洲江流域生猪养殖头数为 311.00 万头, 其中禁养区范围内有 66.90 万头, 限养区生猪存栏量为 244.10 万头。在Ⅲ类水质要求下, 流域 COD、TN、TP 污染物削减目标总量分别为 378752.98、13951.70 t 和 2161.60 t。

3.2 生态补偿量及分摊比例

根据公式(5)、(6)计算可知, 其情景一(“禁养+高架床生态养殖改造”模式)测算出生态补偿金额为 15.03 亿元; 情景二(“禁养+集中式污水处理设施建设”模式)测算出生态补偿金额为 15.55 亿元。按照成本最小化补偿原则确定流域生态补偿量为 15.03 亿元。九洲江流域多年平均总供水量为 13.97 亿 m^3 , 其向广西、广东境内供水量分别为 3.00 亿 m^3 和 10.97 亿 m^3 。据 2016 年统计公报显示, 广西玉林市 GDP 为 1553.91 亿元, 广东湛江市 GDP 为 2584.78 亿元。经计算, 中央、广西、广东分担率分别为 0.25、0.22 和 0.53, 中央、广西、广东生态补偿分担金额分别为 3.76、3.31、7.96 亿元。

3.3 参数灵敏度分析

本文采用 Crystal Ball 软件进行蒙特卡罗模拟和灵敏度分析, 模型的输入设置了高架床养殖容积比(k_1)、限养区污水入河系数(k_2)、高架床养殖模式日排水量(k_3)及传统养殖模式日排水量(k_4)等 4 个参数变量。预测变量为生态补偿量。采用蒙特卡罗法进行 5000 次重复抽样, 得到生态补偿量预测值得直方图。95% 置信区间水平下, 情景一生态补偿量置信区间为 12.51—17.42 亿元, 平均值为 14.95 亿元(图 4); 情景二生态补偿量置信区间为 9.34—21.93 亿元, 平均值为 15.53 亿元(图 4)。生态补偿量预测值的置信区间包含了上述计算结果, 代表了 4 个模型参数不确定条件下的所有可能结果。情景一下的生态补偿量大于 15.00 亿元的确定性内概率为 45.95%; 情景二下的生态补偿量大于 15.00 亿元的确定性内概率为 52.66%(图 5)。说明情景一下的流域水污染治理在大部分情况下较情景二的方案更为经济, 与本文上述生态补偿量具体化计算结果一致。

情景一下引起生态补偿量变化的灵敏参数为高架床养殖容积比(k_1)、限养区污水入河系数(k_2)、高架床养殖模式日排水量(k_3), 方差贡献率分别为 79.50%、18.90% 和 1.60%; 情景二下引起生态补偿量变化的灵敏参数为限养区污水入河系数(k_2)、传统养殖模式日排水量(k_4), 方差贡献率依次为 88.80%、11.20%(图 6)。总体来看, 情景一下的高架床养殖容积比(k_1)参数对流域生态补偿量最敏感, 其余参数影响较少。情景二模型中涉及两个参数, 其限养区污水入河系数(k_2)为主要影响生态补偿量的参数因子。

综上所述, 不同流域水污染治理方案的选择下, 其需要的生态补偿成本存在差异, 影响其生态补偿成本的参数贡献率也各有不同。本文通过模拟计算不确定条件下的生态补偿量的所有可能值以及进行模型参数灵敏度分析, 为决策者提供了更全面的信息。

4 结论与展望

4.1 结论

流域生态补偿是一个跨行政区域的综合生态环境问题。生态补偿量的计算和测定是流域生态补偿的前

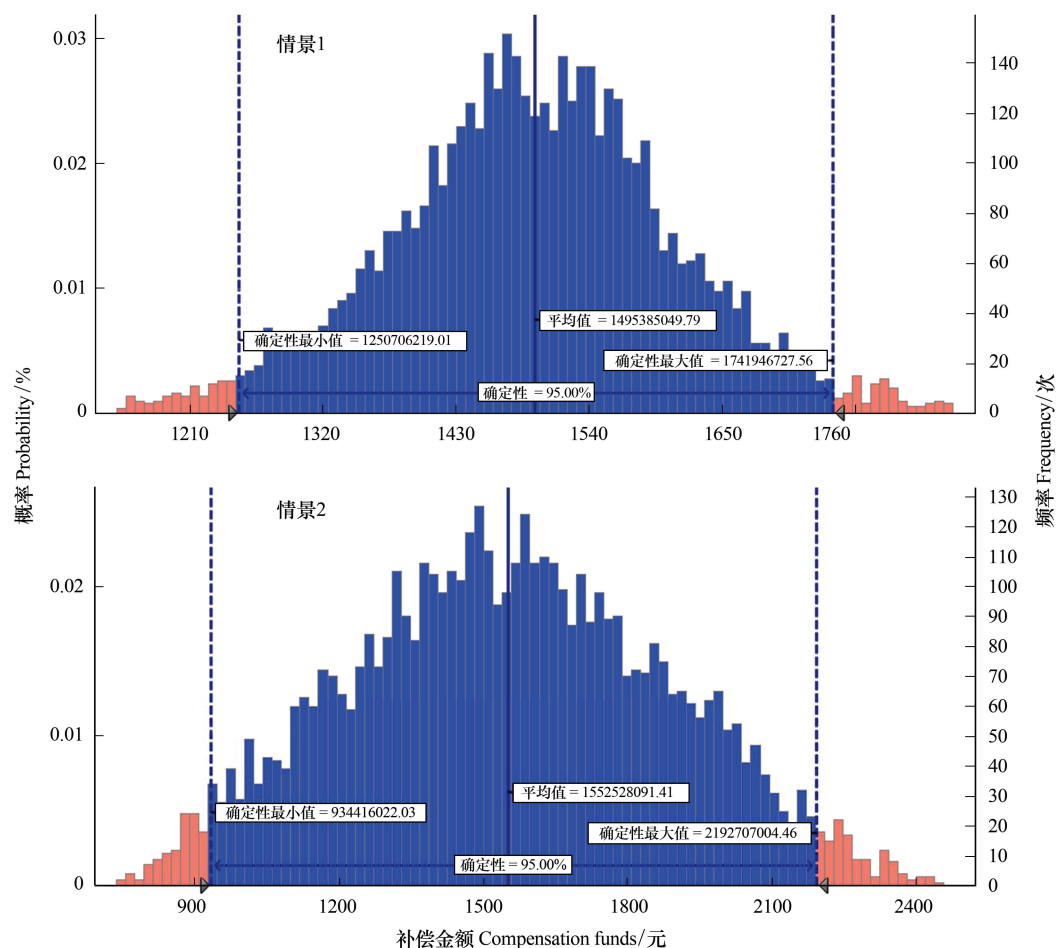


图4 蒙特卡罗模拟生态补偿量直方图

Fig.4 The histograms of ecological compensation by Monte Carlo simulation

提,也是决定能否顺利实施补偿的关键环节。针对九洲江流域水生态补偿政策的问题与不足,本文尝试构建以水质达标为前提的、以最小投入为目标的、兼顾责任与公平的跨区域流域上下游政府水环境资源生态补偿量计算模型,主要结论如下:

在Ⅲ类水质目标要求下,计算得出水环境治理生态补偿资金最小投入为 15.03 亿元。其禁养区内生猪养殖拆迁补偿为 3.35 亿元,限养区内高架床生态养殖模式改造补偿为 11.68 亿元。中央及广西广东地方政府生态补偿分摊金额分别为 3.76、3.30 亿元及 7.96 亿元。此外,模型参数的蒙特卡罗模拟和灵敏度分析结果显示,95%置信水平下,情景一生态补偿量置信区间为 12.51—17.42 亿元,平均值为 14.95 亿元;情景二生态补偿量置信区间为 9.34—21.93 亿元,平均值为 15.53 亿元。情景一模型中高架床养殖容积比(k_1)、限养区污水入河系数(k_2)、高架床养殖模式日排水量(k_3)等参数对生态补偿量具有一定的影响,方差贡献比分别为 79.50%、18.90%和 1.60%;情景二模型中限养区污水入河系数(k_2)参数对生态补偿量最敏感,方差贡献率达到 88.80%,其传统养殖模式日排水量(k_4)参数对生态补偿量影响较小,方差贡献率为 11.20%。可见灵敏度分析结果代表了模型中参数不确定条件下生态补偿量的所有可能值,为决策者提供了更全面的信息。

4.2 不足与展望

通过上文研究分析可以看出,该文以保持水质投入的成本为补偿金额,构建了基于水质水量的生态补偿量测算模型,使得补偿量得到了合理量化,但如何形成一整套完备的评价理论、指标体系、实施原则与计算方法等许多科学问题依然存在模糊和不确定性,生态补偿成本构成方面仍然有待更深入的探讨和分析,以避免

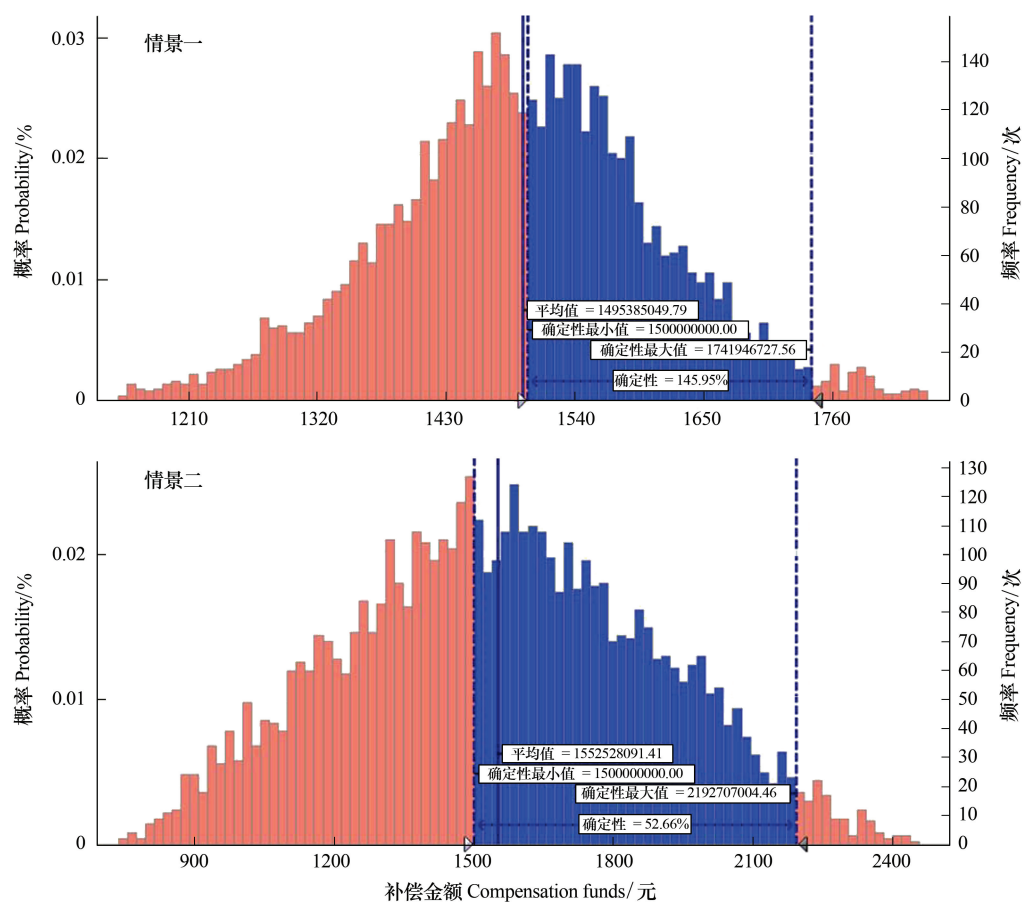


图5 两种情景下生态补偿成本对比图

Fig.5 Contrast figure of ecological compensation with two scenarios

统计的不完全。此外,养殖规模,养殖空间差异等也是生态补偿研究中重要内容,生态补偿标准在不同地区,不同养殖规模与方式存在差异性,与地区养殖特点有一定的相关性,在今后补偿标准制定中还应考虑到此异质性。

对于未来还可开展的研究工作,一方面,本文未考虑生态补偿方式的可行性,本文生态补偿模式是资金的纵向转移和横向支付,由于存在诸多的制度限制与障碍,现实中单一的资金补偿模式无法满足实际需要,也不容易操作,因此,还可考虑到补偿方式的不同,采取多种方式优势互补,将产业扶持、生态旅游、绿色农业等新式产业纳入到生态补偿机制中。另一方面,畜禽养殖过程中会使用到一定比例的抗生素药剂,畜禽粪便污水中会携带一部分抗生素残留,未来的生态补偿研究还应适当的考虑到抗生素等难降解污染物的控制。因此该研究的生态补偿模型根据实际情况还需要进一步的修正。建立适合我国流域的生态补偿还需各利益相关方的共同参与,各种制度的完善,还有待进一步的研究。

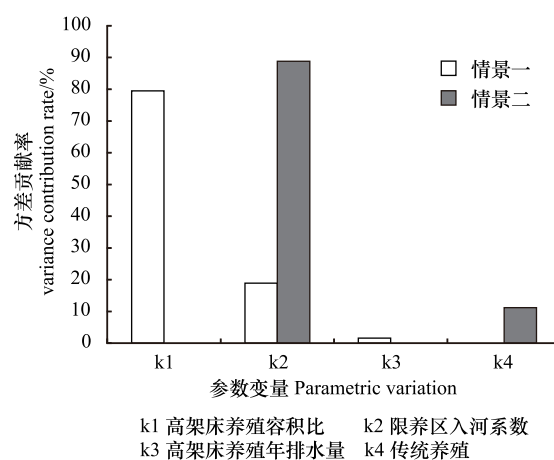


图6 参数敏感性分析

Fig.6 The Monte Carlo sensitivity analysis for parameters

参考文献 (References):

- [1] 陈能汪, 王龙剑, 鲁婷. 流域生态系统服务研究进展与展望. 生态与农村环境学报, 2012, 28(2): 113-119.
- [2] 张军. 流域水环境生态补偿实践与进展. 中国环境监测, 2014, 30(1): 191-195.
- [3] 乔旭宁, 杨永菊, 杨德刚. 流域生态补偿研究现状及关键问题剖析. 地理科学进展, 2012, 31(4): 395-402.
- [4] Engel S, Pagiola S, Wunder S. Designing payments for environmental services in theory and practice: An overview of the issues. *Ecological Economics*, 2008, 65(4): 663-674.
- [5] Herzog F, Dreier S, Hofer G, Marfurt C, Schüpbach B, Spiess M, Walter T. Effect of ecological compensation areas on floristic and breeding bird diversity in Swiss agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 108(3): 189-204.
- [6] 王金南, 王玉秋, 刘桂环, 赵越. 国内首个跨省界水环境生态补偿: 新安江模式. 环境保护, 2016, 44(14): 38-40.
- [7] 曲富国, 孙宇飞. 基于政府间博弈的流域生态补偿机制研究. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(11): 83-88.
- [8] Yang W, Chang J, Xu B, Peng C H, Ge Y. Ecosystem service value assessment for constructed wetlands: a case study in Hangzhou, China. *Ecological Economics*, 2008, 68(1/2): 116-125.
- [9] Fu Y C, Du X, Ruan B Q, Liu L S, Zhang J. Agro-ecological compensation of watershed based on emergy. *Water Science and Technology*, 2017, 76(10): 2830-2841.
- [10] 程滨, 田仁生, 董战峰. 我国流域生态补偿标准实践: 模式与评价. 生态经济, 2012, (4): 24-29.
- [11] 饶清华, 邱宇, 王菲凤, 许丽忠, 张江山. 闽江流域跨界生态补偿量化研究. 中国环境科学, 2013, 33(10): 1897-1903.
- [12] 王军锋, 侯超波. 中国流域生态补偿机制实施框架与补偿模式研究——基于补偿资金来源的视角. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(2): 23-29.
- [13] Guan X J, Liu W K, Chen M Y. Study on the ecological compensation standard for river basin water environment based on total pollutants control. *Ecological Indicators*, 2016, 69(10): 446-452.
- [14] Guan X J, Chen M Y, Hu C H. An ecological compensation standard based on emergy theory for the Xiao Honghe River Basin. *Water Science & Technology*, 2015, 71(10): 1463-1470.
- [15] 车越, 吴阿娜, 赵军, 杨凯. 基于不同利益相关方认知的水源地生态补偿探讨——以上海市水源地和用水区居民问卷调查为例. 自然资源学报, 2009, 24(10): 1829-1836.
- [16] 徐大伟, 郑海霞, 刘民权. 基于跨区域水质水量指标的流域生态补偿量测算方法研究. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(4): 189-194.
- [17] Siew M K, Yacob M R, Radam A, Adamu A, Alias E F. Estimating willingness to pay for wetland conservation: a contingent valuation study of Paya Indah Wetland, Selangor Malaysia. *Procedia Environmental Sciences*, 2015, 30(10): 268-272.
- [18] Tyllianakis E, Skuras D. The income elasticity of Willingness-To-Pay (WTP) revisited: A meta-analysis of studies for restoring Good Ecological Status (GES) of water bodies under the Water Framework Directive (WFD). *Journal of Environmental Management*, 2016, 182(182): 531-541.
- [19] Chatterjee C, Triplett R, Johnson C K, Ahmed P. Willingness to pay for safe drinking water: a contingent valuation study in Jacksonville, FL. *Journal of Environmental Management*, 2017, 203(8): 413-421.
- [20] 李浩, 黄薇. 跨区域调水生态补偿模式研究. 水利发展研究, 2011, 11(4): 28-31.
- [21] 张志强, 程莉, 尚海洋, 李延梅. 流域生态系统补偿机制研究进展. 生态学报, 2012, 32(20): 6543-6552.
- [22] 蒋毓琪, 陈珂. 流域生态补偿研究综述. 生态经济, 2016, 32(4): 175-180.
- [23] 刘力, 冯起. 流域生态补偿研究进展. 中国沙漠, 2015, 35(3): 808-813.
- [24] 宾幕容, 覃一枝, 周发明. 湘江流域农户生猪养殖污染治理意愿分析. 经济地理, 2016, 36(11): 154-160.
- [25] Xu L Y, Yu B, Li Y. Ecological compensation based on willingness to accept for conservation of drinking water sources. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2015, 9(1): 58-65.
- [26] Xiong K, Kong F B. The analysis of farmers' willingness to accept and its influencing factors for ecological compensation of Poyang Lake wetland. *Procedia Engineering*, 2017, 174(10): 835-842.
- [27] 路国彬, 王夏晖, 高彦鑫, 杜立新. 苕溪流域畜禽养殖污染防治优先区域识别. 家畜生态学报, 2016, 37(7): 73-77.
- [28] 孙若梅. 畜禽养殖业生态补偿的研究——以山东省烟台市为例. 生态经济, 2017, 33(3): 29-33.
- [29] 张郁, 齐振宏, 孟祥海, 张董敏, 邹兰娅. 生态补偿政策情境下家庭资源禀赋对养殖户环境行为影响——基于湖北省 248 个专业养殖户(场)的调查研究. 农业经济问题, 2015, 36(6): 82-91.
- [30] 昌苗苗, 陈洋. 九洲江流域生态补偿试点实践进展. 环境保护, 2017, 45(7): 28-30.
- [31] 王西琴, 高佳, 陆俊肖. 广西九洲江流域限制生猪养殖的机会成本与环境效益分析. 环境污染与防治, 2019, 41(2): 252-256.
- [32] 唐溧, 尹晴, 王西琴. 九洲江流域生猪养殖生态补偿标准研究. 中国物价, 2019, 32(4): 66-68.

- [33] 饶清华,林秀珠,邱宇,陈芳.基于机会成本的闽江流域生态补偿标准研究.海洋环境科学,2018,37(5):655-662.
- [34] 胡熠,李健建.闽江流域上下游生态补偿标准与测算方法.发展研究,2006,36(11):95-97.
- [35] 万军,张惠远,王金南,葛察忠,高树婷,饶胜.中国生态补偿政策评估与框架初探.环境科学研究,2005,18(2):1-8.
- [36] 谢高地,张彩霞,张昌顺,肖玉,鲁春霞.中国生态系统服务的价值.资源科学,2015,37(9):1740-1746.
- [37] 肖加元,潘安.基于水排污权交易的流域生态补偿研究.中国人口·资源与环境,2016,26(7):18-26.
- [38] 胡振华,刘景月,钟美瑞,洪开荣.基于演化博弈的跨界流域生态补偿利益均衡分析——以漓江流域为例.经济地理,2016,36(6):42-49.
- [39] 冯帅,李叙勇,邓建才.太湖流域上游河网污染物降解系数研究.环境科学学报,2016,36(9):3127-3136.
- [40] 朱梅,吴敬学,张希三.海河流域畜禽养殖污染负荷研究.农业环境科学学报,2010,29(8):1558-1565.
- [41] 苏保林,袁军营,李卉,罗运祥,张倩.赣江下游平原圩区农村生活污染入河系数研究.北京师范大学学报:自然科学版,2013,49(2/3):256-260.
- [42] 张亚丽,申剑,史淑娟,韩丽琼,姚志鹏.淮河支流污染物综合降解系数动态测算.中国环境监测,2015,31(2):64-67.
- [43] 陈轶.九龙江流域漳州河段污染物降解系数测算研究.化学工程与装备,2011,48(11):215-218.
- [44] 孟伟,张远,郑丙辉.水环境质量基准、标准与流域水污染物总量控制策略.环境科学研究,2006,19(3):1-6.
- [45] 玉林市九洲江流域养殖业发展规划(2013-2020). (2014-07-30). <http://www.ylxmsh.com/xmsh/519.html>.
- [46] 曾勇,王西琴.浙江苕溪水环境容量模型与参数灵敏度分析.中国环境科学,2010,30(12):1627-1632.