

基于演化博弈的流域生态补偿标准研究

——以湘江流域为例

胡东滨 刘辉武¹

【摘要】：流域生态补偿作为生态补偿政策实施的主要领域，是保护流域生态资源、改善区域经济发展质量的重要举措。本文从演化博弈基本分析出发，建立引入“奖励-惩罚”机制的演化博弈模型，对流域生态补偿上下游各利益主体之间的利益相关决策行为进行剖析，使用湘江流域的水质数据，通过建立参数回归数学模型和利用局部线性回归方法，获得在不同区间内的奖励和惩罚经济成本，结果显示：水质下降时，应惩罚 92.55 万元，水质上升时应奖励 122.728 万元，水质明显恶化时，应严惩 508.76 万元。

【关键词】：演化博弈 生态补偿标准 湘江流域

【中图分类号】：F061.5 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1009-5675(2019)03-114-07

一、引言

随着经济社会的持续发展，经济社会与自然环境之间的矛盾日益加剧，自然生态系统逐渐受到侵蚀，生态价值日趋降低。流域生态系统作为自然系统和人类社会的主要连接载体，承载的社会人口最大，系统周边的经济活动强度最高。2016 年，国务院又在草原、流域和水资源及土壤生态补偿等领域开展了相关工作，确立了“谁获益、谁补偿”的准则^[1]。生态补偿作为一种涉及环境生态学、经济学和人类社会学三种学科的政策制度，是协调上下游地区和周边环境经济主体的社会经济利益关系的补偿政策^[2]。而博弈论的逻辑是通过“看得见的手”建立合理的“激励-约束”机制，促使博弈双方利益达到一个平衡稳定状态^[3]。演化博弈双方会根据动态的趋势、所处环境的稳定程度等因素持续地改进策略，最终获取到自身利益最大化的最优策略。生态补偿机制通过特定的行政手段实行生态保护外部性的内部化，让生态保护成果“受益方”赔付一定的费用，而让生态产品或服务的供给者获得合理费用^[4]。

本文将从流域上下游利益分析和具体的流域水质数据出发，运用演化博弈来研究湘江流域上下游地区在生态补偿政策执行过程中的博弈过程，根据博弈双方的利益收支矩阵和动态复制方程理论，获取该情景下最优策略存在的条件。最后采用实证分析方法，来探索我国流域生态补偿政策中标准制定的相关理论问题。

二、文献综述

目前流域生态补偿标准的研究主要集中在补偿依据的确定以及补偿依据的量化上。补偿依据主要在成本费用、支付意愿、生态系统服务价值、环境资源容量、水质水量等几类。近年除了采用某单一依据之外，也有不少研究人员综合考虑多种依据，运用不同方法进行生态补偿标准的研究。

在成本费用方面，Tan 等从森林生产服务、生态服务和社会服务等方面分析每项服务价值的贡献，对成本和收益进行单独核算，

¹作者简介：刘辉武，中南大学商学院硕士研究生，湖南长沙，410083；
胡东滨，中南大学商学院教授、博士，湖南长沙，410083。

估算补偿标准实施期,并建议区域决策者采用动态补偿方法,通过多种方式提高补偿标准^[5]。Dandan 等根据限制开发和节水损失相关的机会成本,计算生态补偿标准,并提出计算和实施的改进建议以消除生态补偿实施的缺陷^[6]。在支付意愿方面,Xie 等通过对实施休耕政策的湖南省和尚未实施的江西省的实地调查,使用估值法测量接受补偿意愿(WTA),构建生态补偿标准测算模型^[7]。Bienabe 等通过对哥斯达黎加流域的居民和国外支付意愿问卷调查和 CE 分析,以此为据构建了数学回归模型^[8]。Yu 等认为水电开发的生态补偿应将水电项目及其相关水库湿地移民安置项目的人为和环境损失的外部成本内部化。在此背景下,他建立了基于人类福利变化的水电移民生态补偿核算方法,通过选择实验与随机效用模型的整合,识别和评估受访者对环境,社会和文化属性的偏好^[9]。Ana-villarroya 等的研究表明西班牙流域测算出来的生态补偿标准远小于因环境破坏而带来的损失^[10]。在生态系统服务价值方面,Costanza 将地球生态系统功能分类为 17 种功能,基于此测算整个地球生物圈每年产生的生态服务价值^[11]。He 等采用表面积测量湖北省 103 个县的生态补偿标准,通过确定各个地区土地和山地资源量级,测算出各个地区的(生物质碳储存),进而计算出各个区域的生态补偿标准额度^[12]。在环境资源容量方面,XGuan 等给出了基于污染物总量控制的生态补偿标准^[13]。在水质水量方面,陈艳萍等提出在构建流域生态补偿模型时,应综合考虑流域水文指标的动态调整对补偿标准造成的影响^[14]。GYang 等基于 SWAT 模型,从绿水管理角度给出了生态补偿标准^[15]。在综合性的标准研究方面,Robert 发现若流域范围内的经济情况差距较大,生态补偿所支付的费用接近于该区域内的对应服务的机会成本,则总补偿费用将无法弥补总支出成本^[16]。

目前国内外对于生态补偿标准的研究已有一定基础,也取得了不少成果。但大多研究只从某一个角度基于单一理论进行计算,并未全面考虑与补偿有关的所有因素。本研究把约束和奖励两个重要因素同时包含在内,计算出更准确的生态补偿最优策略存在条件,为生态补偿标准的制定提供科学依据。

三、生态补偿演化博弈理论模型构建

(一)情景设定和假设

本文演化博弈情境的设置包含两个利益相关主体即流域上游区域人民群众与流域下游区域人民群众,考虑到生态补偿的实际执行情况,在此使用政府代表该地区人民群众利益主体。为了便于分析,本文做如下假设:

H₁:在省级政府的多元政策宏观调控和协调下,上下游两级政府基本达成协议。

H₂:对于上下游政府,上下游地区对流域生态环境进行治理和维护并承担其经济成本和机会成本,并对管辖区域内的水环境质量变化直接负责。

H₃:对于省级政府规定的检测指标发生超标的情况,上下游地区将受到包括货币补偿但不限于这一种方式的经济惩罚。

假设上游区域为保护本区域内生态环境而损失的机会成本为 C,上游区域因为保护本区域内环境而获得的生态收益总价值为 S,流域下游区域补偿给上游区域的总价值为 P,下游区域因上游区域采取保护环境的策略而获得的总收益为 Q₁,下游区域因上游区域采取不保护环境策略而获得的总收益为 Q₂,上级政府对于已采取保护策略的上游区域政府及下游区域政府奖励 J,对于未采取保护策略的上游区域政府与下游区域政府惩罚 F,则可构建流域上下游区域的收益支付矩阵如表 1 所示。

表 1 上下游政府双方的收益支付矩阵

上游区域	下游区域	
	保护	不保护
保护	(P+S-C+J, Q ₁ -P+J)	(S-C+J, Q ₁ -F)
不保护	(C+P-S-F, Q ₂ -P+J)	(C-S-F, Q ₂ -F)

(二) 静态博弈分析

在静态博弈中, 上下游双方对于对方可能的策略和当前所处的形势是完全理性自主的, 博弈过程中的收益函数均可在收益支付矩阵中获知, 但双方作出决策时双方都是互相透明的。对于上游地区政府来说, $2(S-C)+J+F>0$ 或者 $J+F+2(S-C)>0$ 时, 采取保护策略是它的较优决策策略。同理对于下游政府来说, 当 $Q_1 < Q_2$ 时, 采取保护策略是它的较优决策策略。因此组成这些收益的部分发生变化时, 最优策略也将随之发生改变, 将影响博弈策略平衡点发生偏移, 无法实现社会利益最大化, 因此需要上一级政府进行宏观调控和协调, 促使上下游地区政府均选择保护环境的最优组合策略。

(三) 构建“奖励-惩罚”机制下的流域生态补偿演化动态博弈分析

本研究设定 x 表示上游区域做出“保护”决策策略的比重, 则做出“不保护”决策的比重是 $1-x$ 。当 x 取 1 时, 此时上游区域政府均做出决策“保护”; 当 x 取 0 时, 上游区域政府均做出决策“不保护”。 y 表示下游区域做出“补偿”决策的比重, 则做出“不补偿”决策的比重是 $1-y$ 。当 y 取 1 时, 此时下游区域政府均做出决策“补偿”; 当 y 取 0 时, 下游区域政府均做出决策“不补偿”。上游地区政府采用“保护”决策治理和保护流域环境所得的期望获益值是 U_{11} , 而采用“不保护”决策情况下的期望获益值是 U_{12} , 流域上游地区政府的平均获益值为 \overline{U}_1 。则有:

$$U_{11} = y(P + S - C + J) + (1 - y)(S - C + J) \quad (1)$$

$$U_{12} = y(C + P - S - F) + (1 - y)(C - S - F) \quad (2)$$

$$\overline{U}_1 = xU_{11} + (1 - x)U_{12} = x(1 - x)(U_{11} - U_{12}) \quad (3)$$

因此, 上游地区政府保护流域环境的决策策略动态复制方程为:

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(U_{11} - \overline{U}_1) = x(1 - x)(yF + 2(s - c) + J) \quad (4)$$

其函数图像上表现为如下图 1, 可知在当 x 处于 0 或者 1 时函数有零点, 体现在上游政府在选择保护策略和不保护策略时均是两种较稳定状态, 但函数的趋势性趋向于不保护策略, 在 x 为 1 时, 整个主体利益系统处于更加平衡稳定的状态。

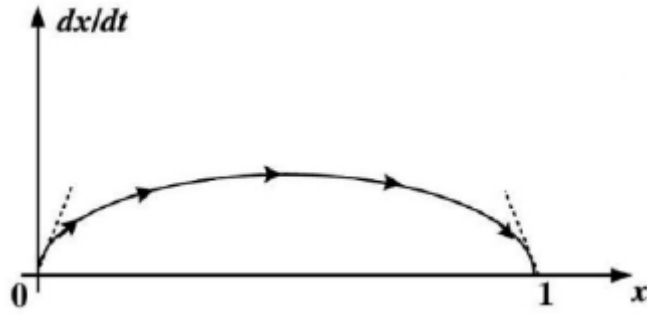


图 1 决策策略动态复制函数

$$\begin{aligned} \text{此外, 令 } \frac{dF(x)}{dx} &= (1-2x)(yF + 2(s-c) + J) \\ < 0 & \quad (5) \\ \text{当 } x \in (0.5, 1) \text{ 时, } &(yF + 2(s-c) + J) > 0 \end{aligned}$$

可得到 $y > \frac{2(c-s) - J}{F}$, 当因此上游地区政府采取保护决策可能性较大时, 下游地区政府采取保护决策的概率要大于 $\frac{2(c-s) - J}{F}$, 可知当 F 和 J 变大, 即奖惩力度加大时, 此时下游地区政府采取保护策略的概率随之增大, 此时上下游地区政府博弈朝着(保护, 保护)方向移动。

同样下游政府采取保护的决策时所获得的期望获益是 U_{21} , 采用不保护决策策略时所获得的期望获益是 U_{22} , 下游地区政府平均期望获益为 \overline{U}_2 。

$$U_{21} = x(Q_1 - P + J) + (1-x)(Q_2 - P + J) \quad (6)$$

$$U_{22} = x(Q_1 - F) + (1-x)(Q_2 - F) \quad (7)$$

$$\overline{U}_2 = yU_{21} + (1-y)U_{22} = y(1-y)(U_{21} - U_{22})$$

因此, 流域下游地区使用保护的决策策略动态复制方程如式(9)。

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(U_{21} - \overline{U}_2) = y(1-y)(xF - p + J) \quad (9)$$

令 $F(y)=0 \Rightarrow y=0, 1$, 同理可知在 $0, 1$ 时有稳定状态。此外, 令

$$\frac{dF(y)}{dy} = (1 - 2y)(xF - p + J) < 0 \quad (10)$$

当 $y \in (0.5, 1)$, $(xF - p + J) > 0$ 时, 可得到 $x > \frac{p - J}{F}$, 当 F 影响作用大于 J 时, 即惩罚力度较大时, $\frac{p - J}{F}$ 趋于变小, 当 J

影响作用大于 F 时, 即奖励力度较大时, $\frac{p - J}{F}$ 趋于变大, 因此奖励因素对于促进博弈朝着 (保护, 保护) 策略组合有着较积极的影响, 当 F 和 J 处于合理状态时, 组合策略可以接近甚至达到社会效益最优状态。

使用 Friedman 提出的雅克彼 (Jacobi) 矩阵系统局部均衡点的平衡分析方法, 上下游政府复制动态方程构成了演化博弈的复制动态系统, 其雅可比矩阵 B 为:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - 2x)(yF + 2(s - c) + J) & x(1 - x)F \\ y(1 - y)F & (1 - 2y)(xF - p + J) \end{bmatrix} \quad (11)$$

B 的行列式为:

$$\det(B) = (1 - 2x)(1 - 2y)(yF + 2(s - c) + J)(xF - p + J) - xyF^2(1 - x)(1 - y) \quad (12)$$

B 的迹为:

$$\text{tr}.B = (1 - 2x)(yF + 2(s - c) + J) + (1 - 2y)(xF - p + J) \quad (13)$$

依据 Friedman 的理论, 如果对于决策 (x, y) 是稳定均衡策略, 则其雅可比矩阵 B 有 $\det.B > 0$, $\text{tr}.B < 0$ 。若最优策略要达到一个较为稳定状态, 此时有 x 和 y 均取值为 1, 并且应当满足如下条件:

$$\begin{cases} \det.B = (F + 2(s - c) + J)(F - p - J) > 0 \\ tr.B = F + 2(s - c) + 2J - p > 0 \end{cases} \\ \Rightarrow \begin{cases} F + J > p \\ F + J > 2(c - s) \end{cases} \quad (14)$$

从上述两个方程便可得出处罚金额和奖励金额之和的较小临界值。此值是上下游地区通过利益博弈之后采取最优化策略的存在条件临界值,能够为生态补偿标准设计提供前项依据,亦可为生态补偿效果鉴定提供后项评估参考。同时也说明生态补偿标准的制定中,奖惩分明将实际的影响上下游地区的决策策略,进而影响生态补偿政策的实施效果。

四、湘江流域的实证分析

(一)湘江流域和其生态补偿现状

湘江流域位于我国中南部地区,主要流经区域为湖南省,2018年城镇化率超过70%。但随着经济社会的持续进步,缺乏科学标准的工业布局造成了湘江流域面临着严重的水体重金属污染问题,生态系统服务价值急剧降低,生态环境的受损严重地制约了湘江流域社会经济的健康发展。湘江流域是典型的下游(长株潭地区及岳阳市)经济社会发展比上游(郴州市和永州市)发达的类型,此种生态补偿的模式符合“下游获益上游受损”的流域生态补偿模式。2014年湖南省在湘江流域内启动了横向流域生态补偿探索,对湘江流域跨市、县断面进行水量、水质目标考核奖罚,2015和2016年奖惩相加均达到六千万元的资金规模^[17]。从湘江流域生态补偿效益评分来看,2014年的综合效益最佳^[18],可知政府新政颁布之后,湘江流域的生态补偿效益显著提升。

本文将对湘江流域2005-2016年的水质监测数据和部分经济指标数据进行分析,从环境和经济的成本转换关系中计算不同水质情景下的经济成本,根据不同水质区间的二者关系计算出采用奖励还是惩罚的措施以及对应措施的量度。

(二)参数局部回归参数计量数学模型

为了便于分析,采用综合评价法将水质评价类别量化,按照现有水质计算方法中水质越好水质监测值越小的原则将五种水质类别分别赋权(权重如表2),依据湘江流域2005-2016年的水质监测数据,计算出上游地区的季度平均水质WQ并测算该地区的水质变化情况,如图2,可知近年湘江流域水质呈现快速上升的态势,并且上升速度逐年加快,尤其2015和2016年水质同比增长率均大幅增加。而2014年正是湖南省出台生态补偿具体执行办法的元年,充分表明新规办法对湘江流域水质提升产生了显著正向影响。

表2 水质类别赋权

水质类别	I类水	II类水	III类水	IV类水	V类水
权重	1	2	3	4	5

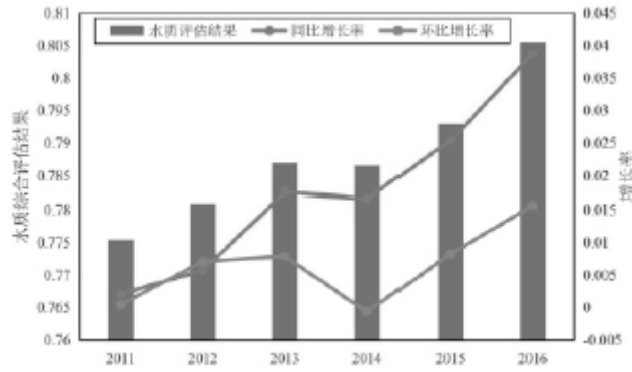


图 2 湘江流域上游部分区域水质变化趋势

假若参数回归计量模型中只包含一个基本变量, 那么其数学模型的基本解析式为:

$$G = f(x) + \varepsilon$$

基于此, 在本研究中, 可建立水质与 GDP 的参数回归模型如下:

$$G = f(WQ) + \varepsilon$$

根据目前对于经济社会和环境污染研究的成果发现, 我国的经济社会发展和生态环境污染水平大体符合“倒 U 型”, 本研究并且通过采用不同拟合函数对数据的拟合优化测算发现, 三次函数的拟合效果最佳, 为便于研究分析, 因此本文采用三次函数对其关系进行拟合, 其数学模型如下:

$$G=f(WQ)=aWQ^3+bWQ^2+cWQ+d+\delta \quad (a, b, c, d \text{ 为系数, } \delta \text{ 为误差参数})$$

式中 $G=f(WQ)$ 为上游地区(郴州和永州)2005 年到 2016 年的每季度 GDP 之和, 为此函数的因变量。 WQ 为上游地区(郴州和永州)对应季度平均水质, 为此函数的自变量, 其函数图像拟合后大致符合图 3。 $G=f(WQ)$ 与 WQ 的关系强度是通过其边际效应来体现的, 主要反映水质代表的环境指标和 GDP 代表的经济指标之间的代价关系, 因此本文基于机会成本的思想, 采用局部线性回归的方法求出平均水质 WQ 对于上游地区每季度 GDP 之和的边际效应, 以此来确定湘江水质量与该区域经济发展指标的关系。

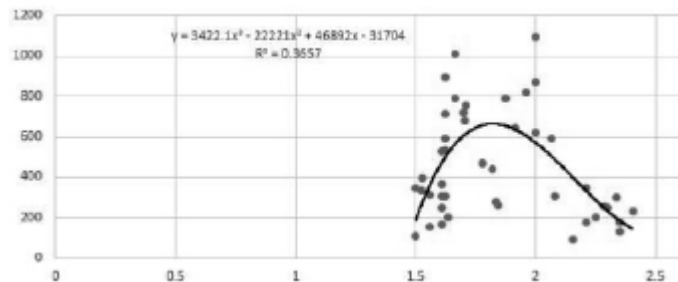


图 3f (WQ) 函数图像

(三) 湘江流域生态补偿模型回归结果数据分析

湘江流域上游地区监测点达 10-20 个, 为更加准确的体现在某个水平上平均水质 WQ 对于 GDP 的边际效用, 先通过对于数据样本点逐个计算其边际效应值, 然后对监测点样本全体数据边际效应值取平均值。根据拟合函数图像可知, 平均水质在不同的区间与 GDP 的关系呈现不同的方向和强度。整体来说, (0, 3) 区间其边际效应值应为其因降低水质分数所付出的经济成本, 也便是下降一个水质类别的惩罚金额。具体细分区间来说, 当 WQ 处于 (1, 2) 区间时, 水质较为优秀, 奖励因素影响最大。分别在 (1, 2)、(2, 3)、(0, 3) 等区间使用不同的核函数求其边际效应值。而 (2, 3) 区间因水质相对较差, 主要进行超标惩罚, 其边际效用值为超标处罚金额。

表 3 不同区间平均水质对于 GDP 的边际效应

水质区间	边际效应值(万元)
(1, 2)	122. 728
(2, 3)	-508. 76
(0, 3)	-92. 55

从表 3 可以看出, 平均水质对于 GDP 的边际效应值为 92. 55 万元, 即降低一个单位的平均水质, 上游地区将因为对水体的保护或者治理而损失 92. 55 万元的 GDP, 也是在此区间内对水体进行保护或者治理所要承担的机会成本。而从细分区间来看, 当平均水质处于 (1, 2) 时, 降低一个单位的平均水质, 上游地区将因为对水体的保护或者治理而损失 122. 728 万元的 GDP, 从表 3 亦可看出, 边际效应值为正, 此时奖励因素对决策影响程度较大。而在当平均水质处于 (2, 3) 时, 边际效应值为负, 降低一个单位的平均水质, 上游地区将因为对水体的保护或者治理而损失 508. 76 万元的 GDP, 此时超标惩罚水质恶化因素对于决策影响程度较大。根据湖南省最新湘江干流按月度核算的奖罚标准补偿规定, 对于平均水质处于 (1, 2) 时, 其奖励金额 50 万元低于本研究的理论奖励金额; 对于出境监测断面平均水质质量较入境监测断面平均水质质量提高一个层级, 奖励 100 万元, 若降低一个等级, 则惩罚 150 万元, 可以看出该惩罚和奖励力度均大于本研究理论奖励补偿金额 92. 55 万元; 若对于水质恶化等级幅度较大, 从水质较好区间降至水质较差区间, 三个等级幅度惩罚 500 万元, 与本研究中水质从一般开始恶化所对应的 (2, 3) 区间边际效用值基本接近, 据此可推测该政策的奖励约束行为效果更佳, 除了在优秀水质区间内奖励力度稍微欠缺, 其他区间奖惩力度基本与本研究实验结果一致。

五、结论与政策建议

湘江生态环境的保护和湘江流域生态补偿政策的实施都是一个系统工程, 生态环境的保护依赖于各种政策的实行, 生态补偿政策作为目前政府绿色制度体系中的重要一环, 应该更加注意以下几点:

1. 对于上下游地区的保护和治理的成效需要合理的考核, 针对考核结果较差的地区, 上级政府需要对其进行经济惩罚, 惩罚方式可使用不同的惩罚手段的组合。而对于表现较好考核结果较优的地区, 则需要采取经济措施对其进行奖励, 这种“奖励-惩罚”组合协调补偿机制, 对于有效促进上下游地区推进生态补偿政策的积极性和促进社会公平有着重要意义。

2. 根据对于湘江流域 2010-2016 年水质质量和对应年份国民生产总值 GDP 的拟合函数分析, 得出在简单区间下, 不同区间的奖惩具体金额与当前湖南省生态补偿标准的细则基本接近, 其中与目前湖南省湘江流域补偿政策中差距较大的一项是在达到二类水质, 即处于较优水质区间的奖励 50 万元, 本研究计算的均衡稳定点是 122. 728 万。总体来讲, 湖南省的补偿效果目前处于较良好的水平, 但仍有进步空间, 尤其对于水质较好的区域奖励力度有较大的提升空间, 奖励因素在生态补偿政策推行过程中的作

用力还可进一步放大。对于全国流域生态补偿项目实践来说,根据本研究结果,可采取上级政府定期考核下级管辖区域水质状况的方式,若水质改善一个类别,则奖励 122.728 万元;若水质下降一个类别,则惩罚 92.55 万元;若水质由良好水平降至恶化状态,则惩罚 508.76 万元。

3. 生态补偿研究是一个较为严谨复杂工程,是人类社会系统和自然环境系统的交叉系统研究,涉及到经济、社会成本、环境等不同角度。上下游区域的补偿标准的确定涉及面甚广以及补偿方式的选择也形式多样。因此本文还可以引入其它可能影响到生态补偿标准的其他因素进行进一步研究,优化生态补偿标准理论模型,实证分析的因变量可以更加丰富,使生态补偿标准更有效、公平和合理。

参考文献:

[1] 杜倩倩,张瑞红,马本. 生态系统服务价值估算与生态补偿机制研究——以北京市怀柔区为例[J]. 生态经济,2017(11):146-152+176.

[2] 徐大伟,常亮,侯铁珊等. 基于 WTP 和 WTA 的流域生态补偿标准测算——以辽河为例[J]. 资源科学,2012(7):1354-1361.

[3] 李昌峰,张雯英,赵广川,莫李娟. 基于演化博弈理论的流域生态补偿研究——以太湖流域为例[J]. 中国人口、资源与环境,2014(01):171-176.

[4] 孔凡斌. 中国生态补偿机制:理论、实践与政策设计[M]. 北京:中国环境科学出版社,2010.

[5] Tan L, Qingguo Z, Ying Z. Modelling a Compensation Standard for a Regional Forest Ecosystem: A Case Study in Yanqing District, Beijing, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018(4):565.

[6] Dandan Y, Yicheng F, Biu L, et al. Theoretical Study of Watershed Eco-Compensation Standards[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018: 301.

[7] Xie, X., Xie, H., Shu, C., Wu, Q., & Lu, H. (2017). Estimation of Ecological Compensation Standards for Fallow Heavy Metal-Polluted Farm land in China Based on Farmer Willingness to Accept. Sustainability[J]. 2017(10). doi: 10.3390/su9101859

[8] Biénabe E, Hearne R R. Public preferences for biodiversity conservation and scenic beauty within a framework of environmental services payments[J]. Forest Policy & Economics, 2006(4):335-348.

[9] Yu B, Xu L, Wang X. Ecological compensation for hydropower resettlement in a reservoir wetland based on welfare change in Tibet, China[J]. Ecological Engineering, 2016.

[10] Villarroya, Ana, E - mail: avillarroya @alumni.unav.e. Ecological compensation and Environmental Impact Assessment in Spain[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2010(1):3-21.

[11] Costanza R, D' Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1999(15):253-260.

-
- [12]He Q , Zeng C , Xie P , et al. An assessment of forest biomass carbon storage and ecological compensation based on surface area: A case study of Hubei Province, China[J]. *Ecological Indicators*, 2018: 392-400.
- [13]Guan X, Liu W, Chen M. Study on the ecological compensation standard for river basin water environment based on total pollutants control[J]. *Ecological Indicators*, 2016: 446-452.
- [14]陈艳萍, 周颖. 基于水质水量的流域生态补偿标准测算——以黄河流域宁夏回族自治区为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2016(4): 119-126.
- [15]Yang G, Huang J, Li J, et al. Study on ecological compensation standard of green water management based on SWAT model[J]. *水利学报*, 2016(6): 809-815.
- [16]Robert N, Stenger A. Can payments solve the problem of undersupply of ecosystem services?[J]. *Forest Policy & Economics*, 2013(4): 83-91.
- [17]王丽, 刘通. 洞庭湖生态保护补偿研究[J]. *中国经贸导刊(理论版)*, 2017(35): 15-17.
- [18]田雅翔, 戴宇. 流域生态补偿机制绩效评价研究——以湘江为例[J]. *商*, 2016(28): 104-105.