

# 土地开发与生态保护的实物期权模型研究

## ——以三江源地区为例

李静<sup>1,2</sup>, 陆苏怡<sup>1</sup>, 起晓星<sup>3</sup>, 杨海生<sup>1</sup>

1. 中山大学岭南学院, 广东 广州 510275
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519080
3. 中山大学政治与公共事务管理学院, 广东 广州 510275

**摘要:** 基于土地开发过程中的不确定性以及土地转换不可逆的假设, 将生态保护区土地最优开发决策问题转化为一个实物期权理论框架下的最优随机控制模型, 并将开发速度内生, 同时引入单位面积生态效益变量, 运用动态规划原理建立了相应的贝尔曼方程, 推导了方程的适当边界条件, 并采用有限差分法数值求解关键方程, 最后基于三江源地区的数据对土地开发与生态保护的动态最优路径展开数值求解讨论。结果表明, 该模型能确定土地开发过程中的最优转换状态以及不同情形下的开发决策: 1) 土地期权价值与生态用地面积占比并非线性关系, 土地开发过程中存在一个最优转换状态; 2) 农业经济效益增加, 将加速土地转换进程, 且土地最优转换状态中农业生产用地面积增加; 3) 生态系统自身的保护效益弹性变大, 将减缓土地转换进程; 4) 生态价值不确定性变大, 将加速土地转换进程。

**关键词:** 土地开发决策; 三江源地区; 生态保护; 实物期权模型; 有限差分法

**中图分类号:** X37; F830.59 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2021)04-0060-16

## The real option model of land development and ecological protection

### —— A case study of Three Rivers Source Region

LI Jing<sup>1,2</sup>, LU Suyi<sup>1</sup>, QI Xiaoxing<sup>3</sup>, YANG Haisheng<sup>1</sup>

1. Lingnan College, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519080, China
3. School of Government, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

**Abstract:** Based on the uncertainty in the process of land development and the assumption of irreversibility of land conversion, the decision-making problem of land development is transformed into an optimal stochastic control model under the framework of real option theory, while allowing for a feedback between conversion decisions and the conservation benefits. A new variable 'ecological value per unit area' is introduced to establish corresponding Bellman equation using the principle of dynamic programming. The appropriate boundary conditions of the equations derived; and the finite difference method is

\* 收稿日期: 2020-05-28 录用日期: 2020-06-09 网络首发日期: 2021-01-14  
基金项目: 广州市科技计划项目(201904010189); 广东省软科学研究计划项目(2019A101002015, 2016A070706004); 广东省基础与应用基础研究基金(2019A1515012018); 中央高校基本科研业务费专项资金(20wkzd10); 中国博士后科学基金(2019M653240); 国家社会科学基金(19VHQ004)  
作者简介: 李静(1985年生), 女; 研究方向: 资源环境经济学、金融理论与政策; E-mail: lijing246@mail.sysu.edu.cn  
通信作者: 起晓星(1987年生), 男; 研究方向: 土地资源可持续利用; E-mail: qixiaox3@mail.sysu.edu.cn

used to solve the key equation numerically. The dynamic optimal path of land development and ecological protection is discussed numerically based on the relevant data of the Three Rivers Source Region. The results show that: (1) there is a non-linear relationship between the land option value and the proportion of the ecological land area, which leads to an optimal conversion state in the process of land development; (2) the increase of agricultural benefits will accelerate the process of land conversion, and the area of agricultural production land will increase in the optimal conversion state of land; (3) the increasing elasticity of ecosystem protection benefits will slow down the land conversion process; (4) the increasing uncertainty of ecological value will accelerate the land conversion process.

**Key words:** land development decisions; ecological protection; Three Rivers Source Region; real option model; finite difference method

“三江源”是指长江、黄河、澜沧江的发源地,在西部大开发生态环境的治理保护中担负着重要责任,同时也是我国江河中下游生态环境保护以及区域可持续发展的生态保证<sup>[1]</sup>,因此三江源地区生态保护工作具有重要意义。同时,三江源地区又是我国的贫困地区,若只考虑保护而不谈发展,靠回到贫穷来解决生态问题,显然并非明智的选择,因此三江源地区的发展需兼顾生态环境保护和资源开发利用,寻找开发与保护之间的最优决策,这实际上也是我国生态环境资源丰富地区开发建设所面临的重要问题。

针对三江源地区“开发”与“保护”的协调问题,学者们一方面是基于生态的角度开展研究,如退化草地的生态恢复措施、三江源国家公园的生态功能研究以及生物多样性的变化问题等<sup>[2-4]</sup>,另一方面是从生态保护工程角度开展评估研究,如三江源生态保护和建设工程的生态成效评估、生态移民工程与生态系统可持续发展的系统动力学研究、公路网规划中的生态冲突与协调研究、国家公园生态产品价值等<sup>[1, 5-7]</sup>。事实上,“开发”与“保护”的协调本质上是生态保护用地的开发决策问题,学者们结合各地实际对土地开发问题也展开了大量的讨论,相关的研究一方面集中于考察生态用地的历史演变规律,总结自然、经济、社会等因素对生态保护用地的影响,例如运用景观指数、信息熵等方法分析生态保护用地的时空演变规律,从而利用基于历史数据的模拟结果来预测未来用地变化等等<sup>[8-10]</sup>。沿袭这一思路,许茜等详细分析了1980~2015年间三江源土地利用变化特征、规律及影响因素,发现从土地利用变化来看,三江源地区建设用地增加最快,开发程度也最大<sup>[11]</sup>。另一方面也有学者聚焦于转换规则,即通过建立CA模型<sup>[12-14]</sup>、CLUE-S模型<sup>[15]</sup>以及复合

模型<sup>[16]</sup>等等来模拟土地利用变化,这其中虽然没有直接对三江源地区的分析,但也为相关研究提供了一个很好的思路。

然而可以看到,上述研究主要关注于转换规则“是怎样”的,对于三江源地区等生态用地的保护问题而言,转换规则“怎样是最优的”才是更重要的。近年来,国外有学者提出引入实物期权概念来考察“最优转换规则”问题,以确定如何合理配置农业生产用地和生态保护用地。Bulte等<sup>[17]</sup>提出当未来森林保护的利用效益不确定且不断增加时,可采用随机动态规划方法研究原始森林最优保留量,并提出保留原始森林的准期权价值可被列为自然资本投资的一个组成部分。Leroux等<sup>[18]</sup>基于这一思路,以灭绝债务生态机制为例来解决土地不可逆地从保护区转换为生产区的最优转换规则问题,并采用实物期权方法求解。总体来看,现有研究多与上述思路一致,模型的重点在于考虑开发决策的不可逆性以及收益的不确定性,然而,传统的分析多采用两期模型<sup>[19-20]</sup>,此时的转换规则与不确定条件下信息的预期效益有关<sup>[21]</sup>,同时假定土地开发速度为外生变量,尽管后续研究将其拓展为连续时间模型<sup>[17, 22-25]</sup>,但依然沿袭了这一设定,这显然与事实不符<sup>[18]</sup>。毫无疑问,生态保护区土地开发会对生态环境造成影响<sup>[2-3]</sup>,从而带来生态效益的不确定性,并反过来影响土地开发决策,换言之,土地开发速度应为内生变量。

因此,基于现有研究,本文将构建一个生态资源保护区土地开发的连续时间实物期权模型,该模型重点考虑以下问题:首先,模型将比较开发生态保护用地所带来的经济效益和生态价值损失,据此来决定不同用途的土地的分配比例,其中生态保护收益为基于几何布朗运动的扩散过程;

其次,将开发生态保护用地这一过程的不可逆性作为模型的基本假定条件;第三,重点考察开发过程中的不确定性对开发决策的影响,并纳入土地开发与生态环境之间的反馈机制,将土地开发速度设定为内生变量;最后,本文将生态价值变量拓展为单位面积生态价值,此时最优转换状态不再是在土地开发的起点或终点取得,而是存在一个中间均衡,从而得到的土地开发决策更符合现实。本文将结合动态规划原理以及随机控制理论,运用有限差分法求解偏微分方程,最终以三江源地区生态保护用地开发的最优转换决策研究为案例,给出其最优转换状态的数值分析结果以及不同参数对最优转换状态的影响分析。

## 1 生态保护用地开发决策模型

考虑一块固定面积的土地,将之单位化为 1。该土地可作为农业生产用地(为方便计,假定生态保护区开发后的用途为农业用地,事实上,这一设定不影响本文的分析与结论)或是作为生态保护区,且生态保护区可开发为农业生产用地。设  $t$  时刻,农业生产用地和生态保护区面积分别为  $A_t$  和  $R_t$ ,可得  $A_t + R_t = 1$ ,可得土地转换速度为

$$v_t = \frac{dA_t}{dt} = -\frac{dR_t}{dt}, \quad 0 \leq v_t \leq \bar{v}, \quad (1)$$

其中下界  $v_t = 0$  意味着维持现状不变;上界  $v_t = \bar{v}$  代表在现有技术下,将生态保护区开垦为农业用地的最快速度。从土地开发决策者角度来看,土地转换速度即为土地开发速度:要想获取经济效益,需要加速开发;而要保护生态环境,则要尽量推迟开发甚至不开发,因此决策者需要综合考虑生态效益和经济效益的平衡,确定最优开发速度,即最优转换速度。这里,仅考虑土地开发决策,即假定了从生态保护区向农业用地转换不可逆,  $v_t \geq 0$ 。未来将进一步考虑从农业用地向生态保护区的逆转换决策(如退牧还草、退耕还林(草)、人工造林等)。

对于决策者来说,最主要的问题是在任意  $t$  时刻,如何确定最优开发速度  $v_t^*$ 。根据一般文献,假定决策者的效用函数  $\pi$  包含了经济效益、生态效益以及开发成本,并具有如下形式

$$\pi(B_t, R_t, v_t) = \frac{\phi}{1-\gamma} (1-R_t)^{1-\gamma} + B_t - kv_t, \quad (2)$$

其中第 1 项代表土地开发的经济效益,参数  $\phi > 0$  表示单位面积固定收益率,而  $0 < \gamma < 1$  为效用函数的固定弹性系数,表明农业用地边际效益递减,

并且弹性系数越大,边际效益递减越慢。第 2 项  $B_t$  代表土地保护的生态效益,即生态保护区的收益,并假设其与生态保护区的面积成正比。第 3 项  $kv_t$  代表土地开发成本,如劳动力投入、设备使用等成本,其中  $k$  为边际开发成本。

根据文献,通常假定生态保护区的收益  $B_t$  可以表示为如下形式

$$B_t = C_t R_t^m E_t, \quad (3)$$

其中  $C_t R_t^m$  代表物种丰富度,即  $t$  时刻单位面积生态保护区内的物种数量,  $C_t$  为生态系统中特定物种密度,  $R_t$  为生态保护区面积,  $m$  为保护效益弹性系数,  $E_t$  为单位物种的经济价值。这一设定隐含的假设是生态保护区面积越大、区内物种越丰富,其生态收益越大。此外,  $m$  的大小取决于生态保护区的形式,  $m$  越大意味着生态系统越复杂,例如相同面积下,林地的  $m$  会大于草原,热带雨林会大于温带林大于寒带。

传统的研究往往将土地开发速度设为外生变量,仅考虑土地开发的经济效益不确定性带来的开发决策最优化问题。事实上,假设物种密度  $C_t$  的信息是可获得的,并且物种密度的波动性取决于开发速度:开发越快,土地消失越快,物种密度的波动性越大,那么土地开发速度应为内生变量,当继续开发 ( $v_t = \bar{v}$ ) 与停止开发 ( $v_t = 0$ ) 时的土地总价值相等时,达到土地开发的最优停止点。

具体地,生态保护区收益中,保护效益弹性系数  $m$  是确定的,而物种密度  $C_t$  的测量存在一定误差,并且误差程度取决于通过对物种密度的采样信息来获取  $C_t$  的时间量  $N_t$ ,进而  $C_t$  的不确定性由以下随机过程给出,即

$$\frac{dC}{C} = \frac{\sigma_c}{\sqrt{N_t}} dW_c, \quad (4)$$

其中  $\sigma_c$  为生态系统物种密度波动率,  $W_c$  是维纳过程,  $dW_c \sim N(0, dt)$ ,  $N_t$  可表示为

$$N_t = \frac{R_t}{v_t}. \quad (5)$$

一般地,假设单位物种的经济价值  $E_t$  服从随机过程

$$\frac{dE}{E} = \alpha dt + \sigma_E dW_E, \quad (6)$$

其中  $\alpha$  为物种价值增长率,  $\sigma_E$  为物种价值波动率;  $W_E$  为维纳过程,  $dW_E \sim N(0, dt)$  且与  $dW_c$  相互独立。通常情况下,假定价格服从带漂移项的随机

游走, 即生态价值是增长的, 但存在波动。

根据式(5), 如果  $v_t = 0$ , 那么  $N_t \rightarrow \infty$ ,  $C_t$  为常数,  $\sigma_c = 0$ , 这意味着, 如果永远不将生态保护区开垦为农业用地, 那么将有无限多的时间来研究这块土地的生物总数, 从而生态多样性不存在不确定性, 生态保护区价值的波动完全来源于其经济价值的波动。

如果  $v_t = \bar{v}$ , 那么  $N_t = R_t/\bar{v}$ , 此时  $C_t$  的波动最大。这意味着, 如果以最快的速度来开垦生态保护区, 那么用来了解这块土地生物多样性的时间就最少, 因此生态多样性的不确定性最高, 生态保护区价值的波动是其生态多样性的不确定性和其经济价值的波动共同作用的结果。

运用 Ito 引理, 结合前述公式可得到

$$\frac{dB}{B} = \left( \alpha - \frac{mv_t}{R_t} \right) dt + \left( \sigma_E^2 + \frac{\sigma_c^2 v_t}{R_t} \right)^{1/2} dz, \quad (7)$$

其中  $dz \sim N(0, dt)$ , 具体证明过程略。

不难想象, 土地开发决策是选取一个最优转换速度以达到以下目标

$$F(B, R) = \max_v E \int_0^\infty e^{-\rho t} \pi(B_t, R_t, v_t) dt, \quad (8)$$

其中  $F(B, R)$  为本文的目标方程,  $\rho$  为贴现率, 一般选择市场无风险利率。

根据 Dixit 等<sup>[26]</sup> 提出的随机动态规划的一般定理, 可以得到贝尔曼方程 (Bellman equation), 或称最优化基本方程 (fundamental equation of optimality)

$$\rho F(B, R) = \max_v \left\{ \pi(B, R, v) + \frac{1}{dt} E[dF] \right\}. \quad (9)$$

由 Ito 引理展开并整理得

$$\max_v \left\{ \frac{1}{2} \left( \sigma_E^2 + \frac{\sigma_c^2 v}{R} \right) B^2 F_{BB} + \left( \alpha - \frac{mv}{R} \right) BF_B - vF_R - \rho F + \left[ \frac{\phi}{1-\gamma} (1-R)^{1-\gamma} + B - kv \right] \right\} = 0, \quad (10)$$

$$B > 0, \quad 0 < R < 1.$$

记最优转换速度为  $v^*$ , 并代入式(10)得到偏微分方程

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left( \sigma_E^2 + \frac{\sigma_c^2 v^*}{R} \right) B^2 F_{BB} + \left( \alpha - \frac{mv^*}{R} \right) BF_B - v^* F_R \\ & - \rho F + \left[ \frac{\phi}{1-\gamma} (1-R)^{1-\gamma} + B - kv^* \right] = 0, \\ & B > 0, \quad 0 < R < 1. \end{aligned} \quad (11)$$

方程(11)为模型的关键方程, 后文中数值求解过程的主要目标就是基于该方程求解目标方程  $F(B, R)$ 。

## 2 边界条件及模型的解

Majd & Pindyck<sup>[27]</sup> 指出, 由于  $\pi(B, R, v)$ ,  $\frac{1}{dt} E[dF]$  与  $v$  呈线性关系, 故  $v$  的最优解为一个“bang-bang”解, 即

$$v^* = \begin{cases} 0 \\ \bar{v} \end{cases}. \quad (12)$$

故根据  $v^*$  的形式,  $F(B, R)$  的解也分为两部分。其中, 在  $v^* = 0$  的区域, 此时剩余的土地停止向农业生产用地转换, 在  $v^* = \bar{v}$  的区域, 此时土地以最大转换速度向农业生产用地转换。这里为了表达方便, 记  $f$  和  $F$  分别对应于  $v^* = 0$  和  $v^* = \bar{v}$  时的解, 即分别对应方程

$$\frac{1}{2} \sigma_E^2 B^2 f_{BB} + \alpha B f_B - \rho f + \frac{\phi}{1-\gamma} (1-R)^{1-\gamma} + B = 0, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left( \sigma_E^2 + \frac{\sigma_c^2 \bar{v}}{R} \right) B^2 F_{BB} + \left( \alpha - \frac{m\bar{v}}{R} \right) BF_B - \bar{v} F_R \\ & - \rho F + \left[ \frac{\phi}{1-\gamma} (1-R)^{1-\gamma} + B - k\bar{v} \right] = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

为了固定  $v$  的解, 即确定当前决策是应该停止开发还是继续开发, 需要更多的条件。

### 2.1 终止边界条件

终止边界条件发生在  $A(t) = 1$  的时候, 此时全部土地都转换为农业生产用地, 即  $R(t) = 0$ 。此时, 在终止边界上, 有  $F_B = F_{BB} = 0$ , 但此时方程中包含了  $F_B/R$  和  $F_{BB}/R$  这两个奇异项。

对于这两项, 由洛必达法则可得

$$\lim_{R \rightarrow 0} \frac{F_B}{R} = \lim_{R \rightarrow 0} \frac{\partial F_B / \partial R}{\partial R / \partial R} = \lim_{R \rightarrow 0} F_{BR} = 0, \quad (15)$$

$$\lim_{R \rightarrow 0} \frac{F_{BB}}{R} = \lim_{R \rightarrow 0} \frac{\partial F_{BB} / \partial R}{\partial R / \partial R} = \lim_{R \rightarrow 0} F_{BBR} = 0.$$

当  $R(t) = 0$ , 此时的生态价值  $B(t) = 0$ , 且由于没有土地可以转换, 对应于  $v^* = 0$ , 得到的终止边界条件为

$$F(B=0, R=0) = \phi / (\rho(1-\gamma)). \quad (16)$$

### 2.2 下边界条件

根据 Majd 和 Pindyck<sup>[27]</sup> 的定义,  $F_B(B, R)$  存在下边界。当生态价值  $B \rightarrow 0$  时, 土地不再拥有生态价值。因此, 最终状态一定是土地完全转换为农业用地, 但是这种转换不是瞬间完成的, 需要经过时间  $R/\bar{v}$  来完成, 而且在这段时间里,  $B$  的预期增长率为  $\rho - \delta$ , 其中  $\delta = \rho - (\alpha - m\bar{v}/R)$ 。因此, 对于非常小的  $B$ ,  $B$  的一单位价值增量所导致的  $F(B, R)$  的增量等于

$$\begin{aligned} \lim_{B \rightarrow 0^+} F_B(B, R) &= \int_0^{R\bar{v}} \delta \exp((\rho - \delta)t - \rho t) dt \\ &= 1 - \exp\left(\frac{-\delta R}{\bar{v}}\right), \quad \delta = \rho - \left(\alpha - \frac{m\bar{v}}{R}\right). \end{aligned} \quad (17)$$

上述条件体现了如下性质

$$\lim_{B \rightarrow 0^+} F_B \Big|_{R=0} = 0, \quad \lim_{B \rightarrow 0^+} F_B \Big|_{R=1} \in (0, 1). \quad (18)$$

### 2.3 自由边界

直觉表明, 对每一个  $R$  存在一个临界值  $B^*$ , 在  $B^*$  的一端“继续开发 ( $v^* = \bar{v}$ )”是最优的; 另一端“停止开发 ( $v^* = 0$ )”是最优的。显然, 对于较大的  $B$ , “停止开发”相对来说更具有吸引力。对此, 临界值  $B^*$  可作为  $R$  的函数, 而  $B^*$  的图像所构成的曲线称之为“自由边界”。在自由边界上方, “停止开发”为最优选择; 在自由边界下方, “继续开发”是最优选择; 而在自由边界上, Majd & Pindyck<sup>[27]</sup> 指出, 具有“价值匹配”和“高阶联系”两个条件, 分别对应与如下等式

$$F(B^*, R) = f(B^*, R), \quad F_B(B^*, R) = f_B(B^*, R), \quad (19)$$

其中  $B^*(t)$  也是未知的, 可根据自由边界(19)求解。且由自由边界条件(19)和方程(13)~(14)得到  $v^*$  的区域解为

$$v^* = \begin{cases} 0, & F_R > \frac{\sigma_c^2}{2R} B^2 F_{BB} - \frac{m}{R} B F_B - k, \\ \bar{v}, & F_R \leq \frac{\sigma_c^2}{2R} B^2 F_{BB} - \frac{m}{R} B F_B - k. \end{cases} \quad (20)$$

可以看出, 当边际经济效益小于生态价值损失时,  $v^* = \bar{v}$ , 当边际经济效益大于生态价值损失时,  $v^* = 0$ 。

经过数值求解, 基于方程(11)和自由边界上的两个条件(19), 可得到自由边界 (见图1)。

由图1可以确定任意状况下最优开发策略: 在

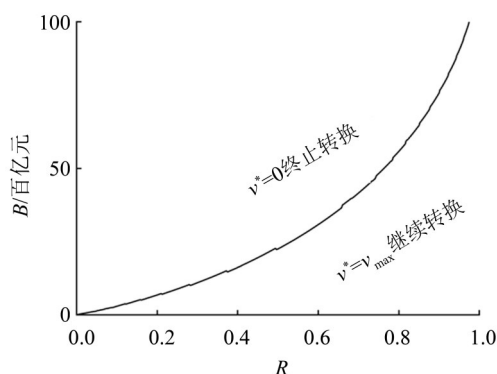


图1 生态价值  $B$  关于生态保护区面积  $R$  的自由边界曲线

Fig. 1 The free boundary of ecological value  $B$  with respect to the area of ecological reserve  $R$

自由边界上方, 生态价值较高, 而生态保护区面积低于边界值, 显然应该“停止开发”; 在自由边界下方, 给定生态价值, 生态保护区面积高于边界值, 那么可以“继续开发”以达到更优状态。

### 2.4 模型的解

这里, 考虑对“ $v^* = 0$ ”区域和“ $v^* = \bar{v}$ ”区域分别求解。

在“ $v^* = 0$ ”停止开发区域, 此时对应方程(13)为一个非齐次常微分方程, 拥有解析解。整理得到最终的完整解为

$$f(B, R) = Z_1(R) B^{\beta_1} + \frac{\phi(1-R)^{1-\gamma}}{\rho(1-\gamma)} + \frac{B}{\rho - \alpha}, \quad (21)$$

其中  $Z_1(R)$  为代求函数, 可由“高阶联系”条件确定。 $\beta_1$  和  $\beta_2$  为方程(22)的两个根, 即

$$\frac{1}{2} \sigma_E^2 \beta(\beta - 1) + \alpha\beta - \rho = 0. \quad (22)$$

在“ $v^* = \bar{v}$ ”继续开发区域, 由于方程(14)目前得不到解析解, 这里可以用有限差分法来求解方程的数值解, 具体证明过程略。

## 3 模型的改进

对上述模型进行数值求解后, 发现效用函数的最优值只可能在  $R = 0$  和  $R = 1$  两点达到 (具体证明过程略)。也就是说, 要么完全不开发生态保护区, 要么就一次性将所有生态保护区完全转换为生产性用地; 而这一情况显然与现实不符。

因此, 本文对模型进行了改进, 引入新的变量生态保护区收益与生态保护区面积之比  $Y = B/R$ 。由于在数值求解上述问题时,  $f$  的解中  $Z(R)$  随  $R$  的变化而变化, 且在自由边界上  $f$  与  $F$  的有限差分递推公式都是非线性的, 这使得数值解的计算在效率和稳定性上都较差, 因此对于改进后的模型, 本文引入新的数值求解方式。

### 3.1 改进后的土地最优决策模型

将生态保护区的面积改写为如下形式

$$R_t^{r;v} = r - \int_0^t v_s ds, \quad (23)$$

其中  $r$  为生态保护区的初始面积, 有  $0 < r < 1$ , 生态保护区的收益  $B(t)$  变为

$$\begin{aligned} B_t^{b,r;v} &= b + \int_0^t \left( \alpha - \frac{mv_s}{R_s^{r;v}} \right) B_s^{b,r;v} ds + \\ &\int_0^t \sqrt{\sigma_E^2 + \frac{\sigma_c^2 v_s}{R_s^{r;v}}} B_s^{b,r;v} dZ_s, \end{aligned} \quad (24)$$

其中  $b$  为生态价值的初始状态,  $Z_s$  是维纳过程,

$dZ_s \sim N(0, dt)$ 。

定义  $Y^{b,r;v} = B^{b,r;v}/R^{r;v}$ , 记  $y$  为单位面积生态价值的初始状态, 这样一来  $Y^{b,r;v}$  满足

$$Y_t^{b,r;v} = y + \int_0^t \left( \alpha - \frac{(m-1)v_s}{R_s^{r;v}} \right) Y_s^{b,r;v} ds + \int_0^t \sqrt{\sigma_E^2 + \frac{\sigma_C^2 v_s}{R_s^{r;v}}} Y_s^{b,r;v} dZ, \quad (25)$$

相应地, 目标方程为

$$F(y, r) = \max_v E \left\{ \int_0^\infty \exp(-\rho t) \left[ \frac{\phi}{1-\gamma} (1-R_t^{r;v})^{1-\gamma} + R_t^{r;v} Y_t^{b,r;v} - kv_t \right] dt \right\}, \quad (26)$$

进而得到相应的关键方程

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left( \sigma_E^2 + \frac{\sigma_C^2 v^*}{r} \right) y^2 F_{yy} + \left( \alpha - \frac{mv^*}{r} \right) y F_y - v^* F_r - \rho F + \left[ \frac{\phi}{1-\gamma} (1-r)^{1-\gamma} + y - kv^* \right] &= 0, \\ y > 0, \quad 0 < r < 1. \end{aligned} \quad (27)$$

### 3.2 相关边界条件

**3.2.1 终止条件和下边界条件** 由于在  $y=0$  处, 偏微分方程会退化, 所以没有必要讨论在  $y=0$  处的边界值。由于在后文中会证明  $F(y, r) \leq \phi/(\rho(1-\gamma))$ , 所以也没有必要讨论  $F(y, r)$  在  $y \rightarrow \infty$  的边界值。

因此仅需考虑  $F(y, r)$  在  $r=0$  处的边界值。由于方程在  $r=0$  处没有意义, 这里考虑通过计算  $r \rightarrow 0$  时  $F(y, r)$  的极限值来逼近  $F(y, 0)$ 。

**步骤一: 极限下界**

固定  $v \equiv 0$ , 可得  $\rho > \alpha$ ,

$$F(y, r) \geq E \left\{ \int_0^\infty \frac{\phi e^{-\rho t}}{1-\gamma} (1-R_t^{r;0})^{1-\gamma} dt \right\} = \frac{\phi}{\rho(1-\gamma)} (1-r)^{1-\gamma}. \quad (28)$$

令  $r \rightarrow 0^+$ , 可得

$$\liminf_{r \rightarrow 0^+} F(y, r) \geq \frac{\phi}{\rho(1-\gamma)}. \quad (29)$$

**步骤二: 极限上界**

考虑构建新的最优控制问题, 记  $\tilde{v} = v/R$ , 状态方程为

$$\begin{aligned} \widetilde{Y}_t^{b,r;\tilde{v}} &= y + \int_0^t \left[ \alpha - (m-1)\tilde{v}_s \right] \widetilde{Y}_s^{b,r;\tilde{v}} ds \\ &+ \int_0^t \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_C^2 \tilde{v}_s} \widetilde{Y}_s^{b,r;\tilde{v}} dZ. \end{aligned} \quad (30)$$

得到相应的目标方程

$$\tilde{F}(y) = \max_{\tilde{v}} E \left\{ \int_0^\infty \exp(-\rho t) \left( \frac{\phi}{1-\gamma} + R^{r;\tilde{v}} \widetilde{Y}_t^{b,r;\tilde{v}} \right) dt \right\}. \quad (31)$$

显然, 当  $y > 0, r > 0$  时, 有  $F(y, r) \leq \tilde{F}(y)$  成立。记

$$\widetilde{B}_t^{b,r;\tilde{v}} = \exp(-\alpha t) R^{r;\tilde{v}} \widetilde{Y}_t^{b,r;\tilde{v}}. \quad (32)$$

整理得

$$F(y, r) \leq \tilde{F}(y) \leq \max_{\tilde{v}} E \left\{ \int_0^\infty e^{-\rho t} \left( \frac{\phi}{1-\gamma} + e^{\alpha t} \widetilde{B}_t^{b,r;\tilde{v}} \right) dt \right\} \leq \frac{\phi}{\rho(1-\gamma)} + \frac{yr}{\rho-\alpha}. \quad (33)$$

令  $r \rightarrow 0^+$ , 可得

$$\limsup_{r \rightarrow 0^+} F(y, r) \leq \frac{\phi}{\rho(1-\gamma)}. \quad (34)$$

综上所述可得

$$F(y, 0) = \frac{\phi}{\rho(1-\gamma)}. \quad (35)$$

**3.2.2 自由边界** 同理, 也存在一个自由边界  $Y^*$ , 在自由边界  $Y^*$  上方, “停止开发” 为最优选择; 在自由边界下方, “继续开发” 是最优选择。参考原自由边界条件(19), 同样在自由边界上具有“价值匹配”和“高阶联系”两个条件, 对应为

$$F(y^*, r) = f(y^*, r), \quad F_y(y^*, r) = f_y(y^*, r). \quad (36)$$

由于  $v^*$  的区域解(20)可以表达为如下形式

$$\begin{cases} v^* = \bar{v}, & F_r \leq \frac{\sigma_C^2}{2r} y^2 F_{yy} - \frac{m}{r} y F_y - k, \\ v^* = 0, & F_r > \frac{\sigma_C^2}{2r} y^2 F_{yy} - \frac{m}{r} y F_y - k. \end{cases} \quad (37)$$

为了统一求解“停止开发”与“继续开发”区域的解, 这里可以把得到的PDE方程表示为

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2} (\sigma_E^2 r + \sigma_C^2 \zeta \bar{v}) y^2 F_{yy} - (\alpha r - (m-1)\zeta \bar{v}) y F_y \\ + \zeta \bar{v} r F_r + \rho r F = \frac{\phi}{1-\gamma} (1-r)^{1-\gamma} + yr^2 - k\zeta \bar{v} r, \end{aligned} \quad (38)$$

其中  $\zeta = \left[ \left( \frac{\sigma_C^2}{2r} y^2 F_{yy} - \frac{m-1}{r} y F_y - F_r - k \right) > 0 \right]$ 。

最终加上边界条件, 可得待解决的系统为

$$\begin{cases} -\frac{1}{2}(\sigma_{er}^2 + \sigma_c^2 \zeta \bar{v})y^2 F_{yy} - (\alpha r - (m-1)\zeta \bar{v})yF_y \\ + \zeta \bar{v}rF_r + \rho rF = \frac{\phi r}{1-\gamma}(1-r)^{1-\gamma} + yr^2 - k\zeta \bar{v}r, \\ 0 < r < 1, y > 0, F(y, 0) = \frac{\phi}{\rho(1-\gamma)}, \\ \zeta = \left[ \left( \frac{\sigma_c^2}{2r} y^2 F_{yy} - \frac{m-1}{r} yF_y - F_r - k \right) > 0 \right]. \end{cases} \quad (39)$$

在求解新的问题时,参考了 Kushner 和 Dupuis<sup>[28]</sup>的做法,具体求解过程略。

## 4 三江源地区案例分析

三江源地区作为我国重要的生态保护区,其开发过程经历了从开发到修复的阶段,自2005年开始,国家在青海三江源地区连续实施生态保护和建设一期、二期工程,先后投资75亿和160亿人民币保护和修复三江源地区生态环境,维持三江源作为“中华水塔”的生态产品供给能力。那么,从理论上来看,在不考虑土地开发过程可逆的情况下,当前的决策应是什么?一是可根据当前状态与自由边界曲线的关系,来判断最优决策是否要停止开发,二是可根据当前状态与最优转换状态之间的关系,判断此时生态保护区是否仍处于过度开发状态,从而为进一步论证继续应推进生态保护建设工程提供依据。更重要的是,反思三江源生态保护区开发建设,开发初期的最优决策是什么?未来其他生态保护区建设工作应如何决策?这些决策受哪些因素的何种影响?这正是本文试图回答的问题。

### 4.1 参数选取

考虑三江源地区的最优土地价值,首先涉及到参数的设定。根据邵全琴等<sup>[1]</sup>建立的三江源生态保护和建设工程生态成效评估指标体系,生态价值的测算可以参考其提出的相关指标。其构建了生态系统质量的衡量指标,包括植被状况和植物物种多样性等。其中植被状况包含指标植被生物量、植被覆盖度( $F_c$ )、植被净初级生产力(NPP)、植被状况变化指数(VCCI),植物物种多样性包括指标物种丰富度、物种重要值( $P$ )、多样性指数( $H$ )、均匀度指数( $J$ )。

**4.1.1 土地规模和单位**  $t$ 时刻生态保护区面积  $R_t$ 可由“植被状况”的“植被覆盖度( $F_c$ )”表示,也可选取“生态系统分类面积”。根据文献,2015年三江源土地利用类型以草地、林地和水域为主,分别占总面积的71.20%、4.28%、5.47%。

由此,生态保护区面积可选用草地与林地之和,由于三江源地区总面积为30.25万 $\text{km}^2$ ,故生态保护区面积为30.25万 $\text{km}^2 \times 75\% = 22.6875$ 万 $\text{km}^2$ ,在模型中单位化为 $L=1$ 。

**4.1.2 经济效益**  $\gamma$ 为弹性系数,体现了农业边际收益效用递减, $\phi$ 为最佳单位土地回报率(=农田最高产的收益 $\times$ 初始生态用地面积 $^{1-\gamma}$ )。由于农业经济效益回报率及弹性系数与土地开发后的具体用途相关,因此,往往通过数值模拟来考察不同用途下产生的影响。由于弹性系数 $\gamma$ 主要是体现农业收益效用递减,故本文参考Leroux等<sup>[18]</sup>将 $\gamma$ 设定为0.887。

此外,可根据 $\frac{\text{青海GDP}}{\text{青海总面积}} \times \text{三江源总面积}$ 得到农业收益AGDP,计算 $\phi = \text{AGDP} \times \text{初始生态用地面积}^{(1-\gamma)} = 17.10$ 百亿元/ $\text{km}^2$ 。

**4.1.3 生态价值** 物种的生态价值( $B$ )可用“植物物种多样性”中的“多样性指标( $H$ )”来表示。

1) 物种密度波动率( $\sigma_c$ ): 由于

$$\frac{dC}{C} = \frac{\sigma_c}{\sqrt{N_t}} dW_c,$$

$C_t$ 代表生态系统所选取的特定物种密度,可用“植物物种多样性”中“均匀度指数( $J$ )”表示,误差的程度取决于通过对物种密度的采样信息来获取 $C_t$ 的时间量 $N_t$ ,可识别得到 $\sigma_c$ 。

2) 物种价值增长率 $\alpha$ 及物种价值波动率 $\sigma_E$ : 由于

$$\frac{dE}{E} = \alpha dt + \sigma_E dW_E,$$

其中,单位物种价值( $E$ )可用“植物物种多样性”中的“物种重要性( $P$ )”表示,并识别得到 $\alpha$ 和 $\sigma_E$ 。

3) 保护效益弹性系数( $m$ ): 由于

$$\text{物种丰富度} = CR^m,$$

其中“植物物种多样性”中有指标“物种丰富度”,故可以根据相关数据计算出 $m$ 。

由于本文未得到三江源地区的详细实际数据,因此设定生态价值相关参数如表1。

**4.1.4 市场决策** 贴现率( $\rho$ ): 市场的无风险利率,通常采用国债利率,本文根据一年期国债利率将 $\rho$ 设定为0.02。

边际转换成本( $k$ ): 转换成本主要包括劳动力投入、设备使用等成本,为简便计算,本文设定 $k$ 为0,并通过数值模拟考察不同情形下对决策的

表1 三江源案例参数表  
Table 1 Input parameters values of the case study

项目	参数	指标	值
土地规模和单位	$L$	总用地面积	1.000
	$\Delta r$	土地增量	0.001
农业经济效益	$\phi$	最佳单位土地收益率 (百亿/ $\text{km}^2$ )	17.10
	$\gamma$	弹性系数	0.887
动态生态价值	$m$	保护效益弹性系数	0.250
	$\alpha$	物种价值增长率	0.010
	$\sigma_E$	物种价值波动率	0.100
	$\sigma_C$	物种密度波动率	0.250
	$\Delta b$	生物值增量	0.012
市场决策	$\rho$	贴现率	0.020
	$k$	转换成本	0.000
	$\bar{v}$	最高转换速度	0.025

影响。

最高转换速度( $\bar{v}$ ): 可以选取为研究数据集中的最高转换速度。由于资料显示, 2005~2015年青海三江源地区生态保护和建设一期工程共完成退牧还草5.65万 $\text{km}^2$ , 这里可以考虑设定 $\bar{v}$ 为0.025, 相当于每年最多转换约为0.53万 $\text{km}^2$ 。

由于无法连续求解, 为考虑在不同的开发比例下的最优决策, 模型求解时将步长土地增量 $\Delta r$ 和生物价值增量 $\Delta b$ 分别设置为0.0010和0.0120。

综上可得参数设定为表1, 并根据上述参数, 得到自由边界曲线为图2。

由图2可以基于当前生态保护区面积及单位面积生态价值判断最优开发决策: 在自由边界上方, 给定单位面积生态价值, 生态保护区面积低于边界, 因而应“停止开发”; 在自由边界下方, 给定单位面积生态价值, 生态保护区面积高于边界, 因而可“继续开发”, 以达到最优转换状态。

对于已经开发的生态保护区, 基于方程(38), 本文考察了土地总价值 $F$ 受单位面积生态价值 $Y$ 和生态保护区面积 $R$ 的影响, 如图3所示, 可以看出, 这一影响并非线性的。表2进一步展示了土地总价值的变化情况。

具体地, 表2计算了不同单位面积生态价值和生态保护区面积比例下的土地价值, 其中加粗的数值表示对固定的 $Y$ 值, 随着生态保护区面积 $R$ 的减小, 土地价值 $F$ 由变大到变小的转折点。可以看出, 对一些 $Y$ 值来说, 土地价值 $F$ 不随 $R$ 单调递增或递减, 也就意味着最大的 $F$ 值并不一定在 $R =$

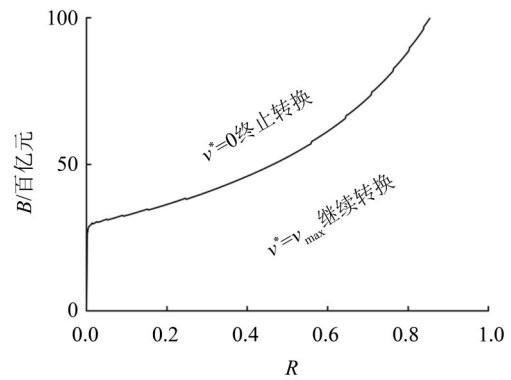


图2 单位面积生态价值 $Y$ 关于生态保护区面积 $R$ 的自由边界曲线

Fig. 2 The free boundary of ecological value per unit area  $Y$  with respect to the area of ecological reserve  $R$

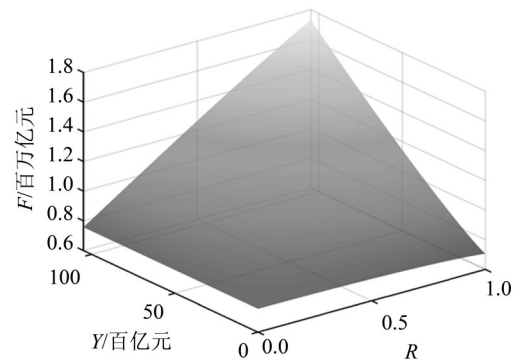


图3 土地总价值 $F(Y, R)$ 变化图

Fig. 3 Land values as a function of ecological value and reserve and area  $F(Y, R)$

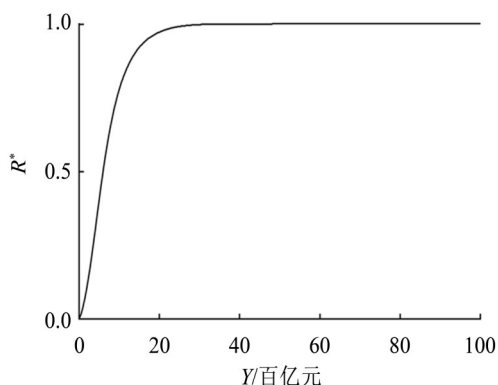
表2 对应于不同生态价值  $Y$  和不同生态保护区面积  $R$  的土地价值  $F$  (百万亿元)

Table 2 Land values in terms of ecological value and reserve land area

$Y$	$R$							
	1	0.9	0.7	0.5	0.4	0.2	0.1	0
119.98	19.054	18.011	15.775	13.474	12.308 0	9.951 9	8.762 6	7.566 4
112.06	18.142	17.189	15.147	13.031	11.955 0	9.776 1	8.674 8	7.566 4
88.44	15.492	14.803	13.301	11.723	10.912 0	9.256 2	8.415 1	7.566 4
72.636	13.785	13.265	12.094	10.861	10.223 0	8.912 6	8.243 3	7.566 4
61.26	12.593	12.189	11.248	10.251	9.734 1	8.667 9	8.121 0	7.566 4
52.476	11.695	11.38	10.612	9.788 3	9.362 2	8.481 0	8.027 4	7.566 4
45.948	11.043	10.791	10.149	9.452 2	9.090 7	8.343 9	7.958 6	7.566 4
40.512	10.509	10.310	9.771 8	9.178 6	8.869 6	8.231 3	7.902 1	7.566 4
36.288	10.102	9.942 2	9.483 8	8.970 3	8.701 5	8.145 4	7.858 8	7.566 4
32.592	9.750 6	9.625 7	9.236 1	8.791 5	8.557 4	8.072	7.821 6	7.566 4
24	<b>8.957 0</b>	8.910 9	8.678 2	8.390 3	8.235 0	7.908 6	7.739 3	7.566 4
18	8.425 3	<b>8.433</b>	8.306 9	8.125 0	8.022 5	7.802 1	7.685 8	7.566 4
15	8.168 2	<b>8.202 2</b>	8.128 3	7.998 1	7.921 2	7.751 7	7.660 7	7.566 4
12	7.918 3	<b>7.978 2</b>	7.955 7	7.875 9	7.824 0	7.703 6	7.636 8	7.566 4
9	7.677 1	7.762 6	<b>7.790 2</b>	7.759 5	7.731 7	7.658 3	7.614 4	7.566 4
6	7.447 4	7.557 7	7.634 1	<b>7.650 6</b>	7.645 7	7.616 6	7.593 9	7.566 4
0	7.057 2	7.213 1	7.377 0	7.475 6	7.509 4	7.552 5	7.562 9	7.566 4

0 或  $R = 1$  处取得, 意即, 土地开发的最优决策是取得生态保护用地与农业用地比例的平衡, 这无疑与现实是相符合的。为了更直观地展示这一性质, 图4给出了最优转换状态下 (即达到土地价值最大化的状态下), 生态保护用地  $R^*$  与单位面积生态价值  $Y$  的关系。

基于图4, 可以根据实际单位面积生态价值  $Y$  以及生态保护区面积占比, 判断当前处于开发不足还是过度开发状态: 当  $Y$  较大时 (图中约大于

图4 最优转换状态  $R^*$  与单位面积生态价值  $Y$  的关系Fig. 4 Relationship between optimal transition state  $R^*$  and ecological value per unit area  $Y$ 

20), 最优状态下  $R^* = 1$ , 此时的决策是保持现有的生态系统不变; 当  $0 < Y < 20$  时, 有  $0 < R^* < 1$ , 且  $R^*$  随  $Y$  的增大而增大, 即当生态价值比较大时, 更多地保护原有的生态系统是更优的决策, 此时若生态保护区面积位于曲线上方则意味着开发不足, 曲线下方则表示已处于过度开发状态, 据此可以为相关决策提供依据。

#### 4.2 相关参数变化对模型的影响

由于模型中相关参数真实值不可得, 为了更直观地展示参数取值的影响, 考察参数  $\phi, m, \alpha, \sigma_E, \sigma_C, k$  不同取值对最优决策的影响。

**4.2.1 农业效益对最优决策的影响** 为考察不同的农地用途, 即最佳单位土地回报率  $\phi$  对模型结论的影响, 分别选取  $\phi = 10, 17.10, 30, 40$ , 得到模型自由边界 (见图5)。由图5可见, 当  $\phi$  变大时, 自由边界上升, 生态保护区更易向农业生产用地转换。这一结论与现实相符合, 即当农业回报率上升时, 人们更乐意开展农业活动, 生态保护区更易被开发为农业生产用地。图6进一步对比了4种情况下解的性质。

由图6中的4小图对比可知, 解的形式几乎未发生改变, 但土地的价值  $F$  会随  $\phi$  的增大而整体增大,

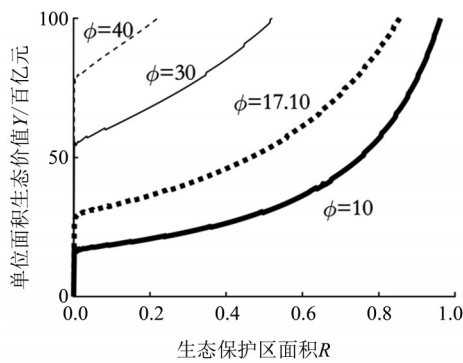


图5 不同农地用途对自由边界曲线的影响

Fig. 5 The impact of different agricultural land uses on the free boundary

意味着农业效益的增加会使土地价值整体上升。

由图7可得, 最优转换状态曲线随 $\phi$ 的增大而下降, 对同一 $Y$ 值,  $\phi$ 值越大,  $R^*$ 越小, 即最优转换状态下生态保护区占比面积越小, 与图5所得结论,  $\phi$ 越大则生态保护区越容易向农业生产用地转换的结论相符合。

**4.2.2 生态保护区性质对最优决策的影响** 由于不同的生态保护区中保护效益弹性系数 $m$ 取值不同, 为了考虑其对模型的影响, 本文分别选取 $m = 0.15, 0.25, 1.0$ , 并分析3种情况所对应的自由边界(图8)。由图8中可以看出, 自由边界随保护效益弹性系数的减小而上升, 意味着生态系统越简单、保护效益弹性系数越小, 则需要更大的单位面积生态价值才能使得最优转换速度为0。换言之, 生态系统越复杂、保护效益弹性系数越大, 土地处于“继续开发”状态的可能性就越小, 体现了保

护效益弹性系数这一参数对生态系统的保护效应。

图9进一步对比了3种情况下解的性质, 来判断土地总价值受影响的情况。由对比可知, 对不同的 $m$ 值, 解的形式同样几乎未发生改变,  $F$ 的价值会随 $m$ 的增大而整体减小, 这意味着保护效益弹性系数的增大会使土地价值整体减小, 但这一变化不明显。

同样地, 图10进一步展示了不同生态保护区性质下的最优转换状态。由图中可得, 最优转换状态曲线随 $m$ 的增大而下降。对同一 $Y$ 值,  $m$ 值越大,  $R^*$ 越小, 即最优转换状态中生态保护区占比面积越小。导致这一结果的原因在于, 若生态系统自身的 $m$ 值变大, 会导致最终土地整体价值变小(见图9), 人们为增加土地的最终价值, 往往会增加农业活动的开展力度, 这也就导致了土地最优转换状态中生态保护区面积占比变小。

**4.2.3 物种经济价值增长率对最优决策的影响** 为考察不同物种价值增长率 $\alpha$ 对模型结论的影响, 本文分别选取 $\alpha = 0.01, 0.012, 0.015, 0.021$ , 得到对应的自由边界曲线, 见图11。由图中可见, 当 $\alpha > \rho$ , 即当物种价值增长率大于贴现率时, 自由边界曲线始终趋向于无穷大。当 $\alpha < \rho$ 时, 自由边界随物种价值增长率的增大而下降, 物种价值增长率增大时, 处于“继续开发”的可能性越小, 此时, 人们更倾向于保留原有的生态系统。

图12进一步对比了4种情况下解的性质, 当 $\alpha < \rho$ 时, 解的形式未发生改变, 解的大小随 $\alpha$ 的增大而整体增大, 物种价值增长率变大会导致土地价值的增长。当 $\alpha > \rho$ 时, 解呈现负值状态。

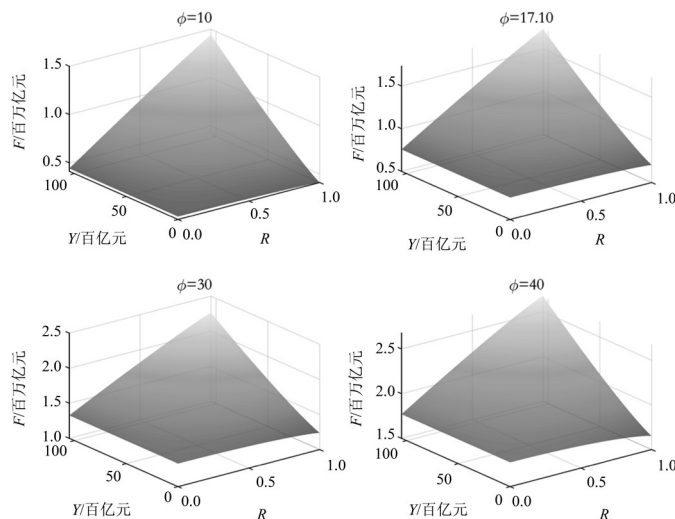


图6 不同农地用途下的土地价值

Fig. 6 The impact on land value of different agricultural land uses

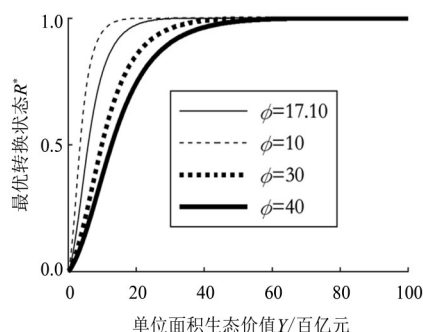


图 7 不同农地用途下的最优转换状态

Fig. 7 The optimal conversion state under different  $\phi$  values

进一步考察 3 种情况下的最优转换状态, 见图 13。由图中可见, 当  $\alpha < \rho$  时, 最优转换状态曲线随  $\alpha$  的增大而上升, 对同一  $Y$  值,  $\alpha$  值越大,  $R^*$  越大, 即最优转换状态中生态保护区占比面积越大, 生态保护区不易向农业生产用地转换。当  $\alpha > \rho$  时, 最优转换状态曲线为 0。

4.2.4 物种经济价值波动率对最优决策的影响  
为考察不同的物种经济价值波动率  $\sigma_E$  对模型结论的影响, 本文分别选取  $\sigma_E = 0.05, 0.1, 0.5$ , 得到

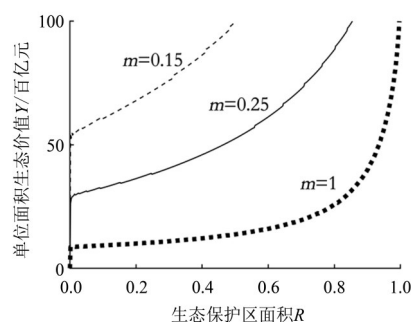


图 8 不同生态保护区性质对自由边界曲线的影响

Fig. 8 The impact of different nature of ecological reserves on the free boundary

对应的自由边界曲线, 见图 14。由图中可见, 自由边界随物种经济价值波动率的增大而下降, 物种经济价值波动率增大时, 处于“继续开发”的可能性越小, 此时, 人们更倾向于保留原有的生态系统。

图 15 进一步对比了 3 种情况下解的性质, 可以看到, 解的形式未发生改变, 解的大小随物种经济价值波动率  $\sigma_E$  的增大而整体增大, 但这一变化并不明显。

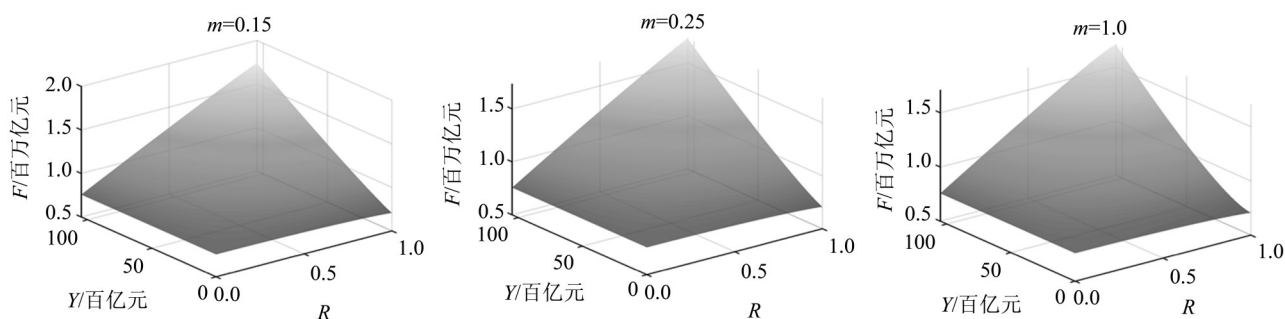


图 9 不同生态保护区性质对土地价值的影响

Fig. 9 The impact of different nature of ecological reserves on land value

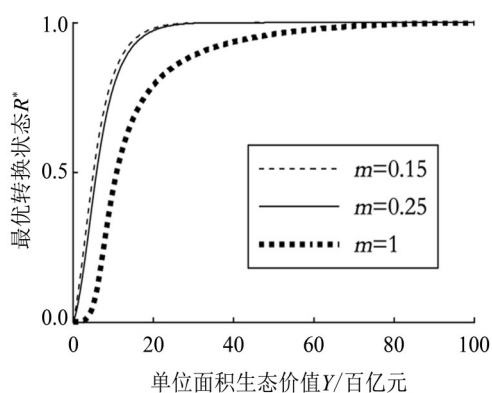


图 10 不同生态保护区性质对最优转换状态的影响

Fig. 10 The optimal conversion state under different nature of ecological reserves

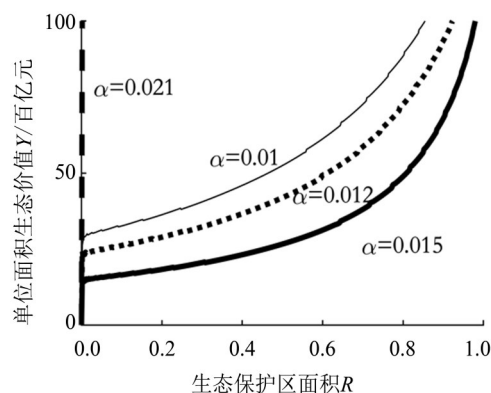


图 11 不同物种价值增长率对自由边界曲线的影响

Fig. 11 The impact of different growth rate of species value on the free boundary

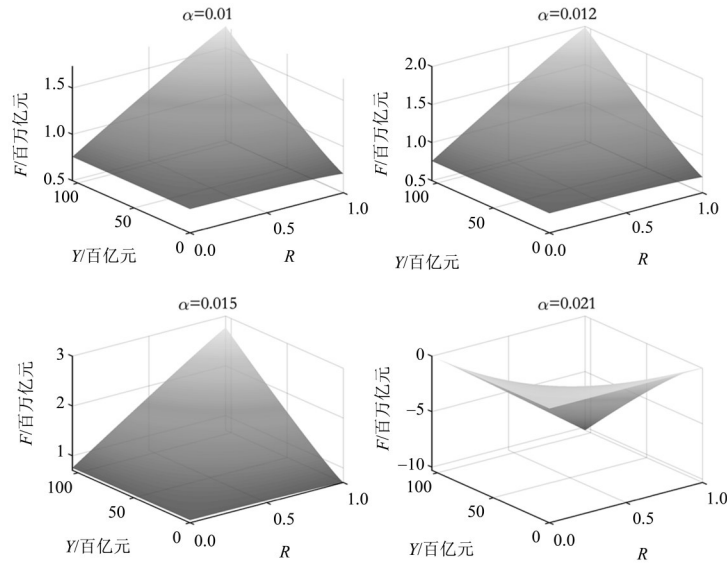


图 12 不同物种价值增长率对土地价值的影响

Fig. 12 The impact of different growth rate of species value on land value

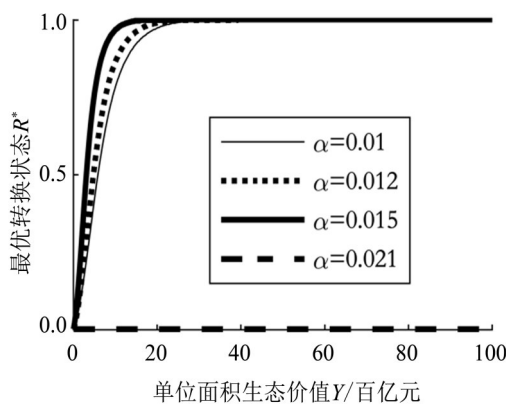


图 13 不同物种价值增长率对最优转换状态的影响

Fig. 13 The optimal conversion state under different growth rate of species value

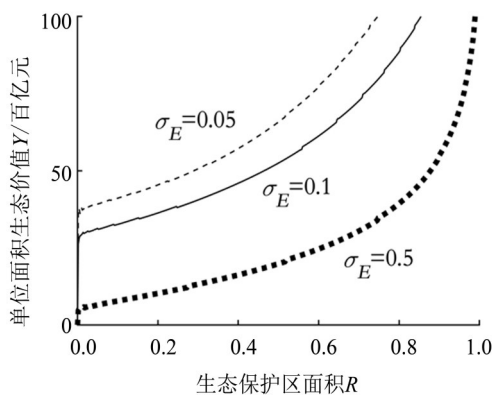


图 14 不同物种经济价值波动率对自由边界曲线的影响

Fig. 14 The impact of different volatility of economic value of species on the free boundary

进一步考察 3 种情况下的最优转换状态, 见图 16。可以看到, 最优转换状态曲线随物种经济价值波动率  $\sigma_E$  的增大而上升, 对同一  $Y$  值,  $\sigma_E$  值越大,  $R^*$  越大, 即最优转换状态中生态保护区占比面积越大, 生态保护区不易向农业生产用地转换。但这一变化同土地价值的整体大小变化类似, 没有明显变化, 一定程度上表明了物种经济价值波动率对土地最终的最优转换状态没有太大的影响。

**4.2.5 物种密度波动率对最优决策的影响** 为考察不同的物种密度波动率  $\sigma_c$  对模型结论的影响, 本文分别选取  $\sigma_c = 0.1, 0.5, 1$ , 得到对应的自由边界曲线, 见图 17。可以看出, 当物种密度的波动率较大时, 自由边界上升, 生态保护区更易向农业生产用地转换。这是由于, 当生态保护区内物种密度波动率大时意味着生态价值不确定性变大, 人们可能更倾向于获取农业收益。

进一步考察 3 种情况下解的性质 (见图 18), 可以看到解的形式和大小几乎未发生改变。

进一步考察 3 种情况下的最优转换状态, 见图 19, 可以看出最优转换状态曲线几乎重合, 这意味着物种密度波动率  $\sigma_c$  对最优土地价值和最优转换状态没有明显影响。

**4.2.6 边际转换成本对最优决策的影响** 为考察不同边际转换成本  $k$  对模型结论的影响, 本文分别选取  $k = 0, 300, 600$ , 得到对应的自由边界曲线, 见图 20。由图中可见, 自由边界随边际转换成本的增大而下降, 边际转换成本增大时, 处于“继续开发”的可能性越小, 此时, 开发土地成本上

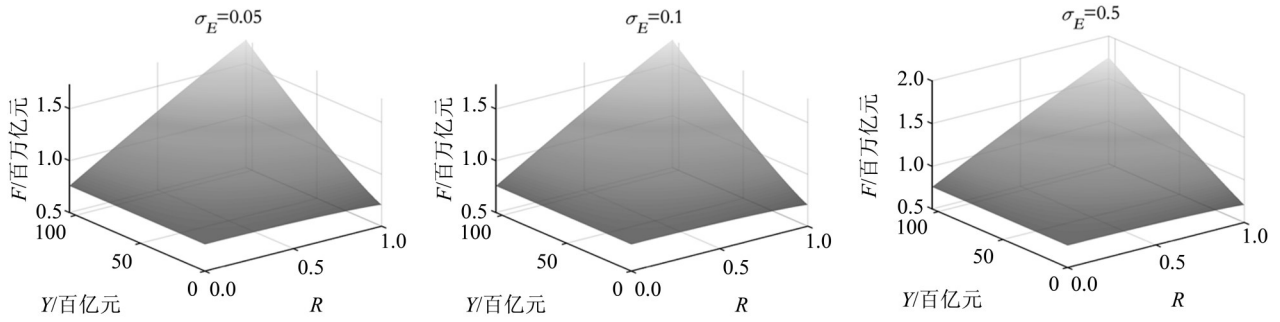


图 15 不同物种经济价值波动率对土地价值的影响

Fig. 15 The impact on land value of different volatility of economic value of species

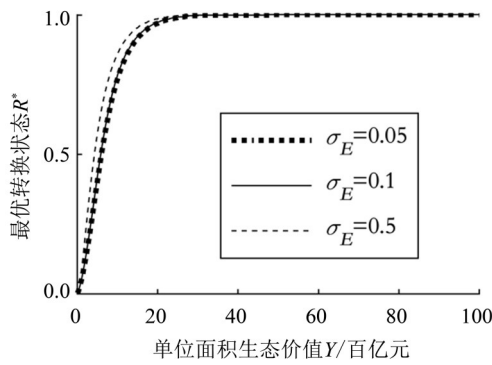


图 16 不同物种经济价值波动率对最优转换状态的影响

Fig. 16 The optimal conversion state under different volatility of economic value of species

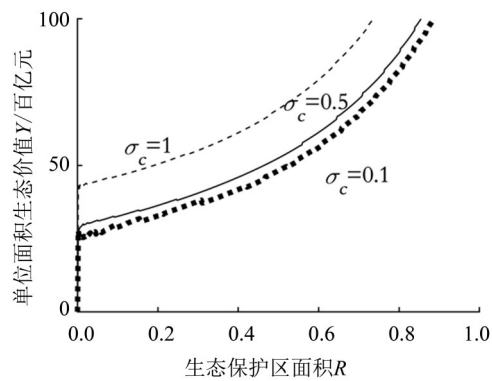


图 17 不同物种密度波动率对自由边界曲线的影响

Fig. 17 The impact of different species density fluctuation rates on the free boundary

升, 人们更倾向于停止土地开发, 并保留原有的生态系统。

图 21 进一步对比了 3 种情况下解的性质, 发现解的形式未发生改变, 解的大小随边际转换成本  $k$  的增大而整体减小, 但这一变化并不明显。

进一步考察 3 种情况下的最优转换状态可以看到 (见图 22), 最优转换状态曲线随边际转换

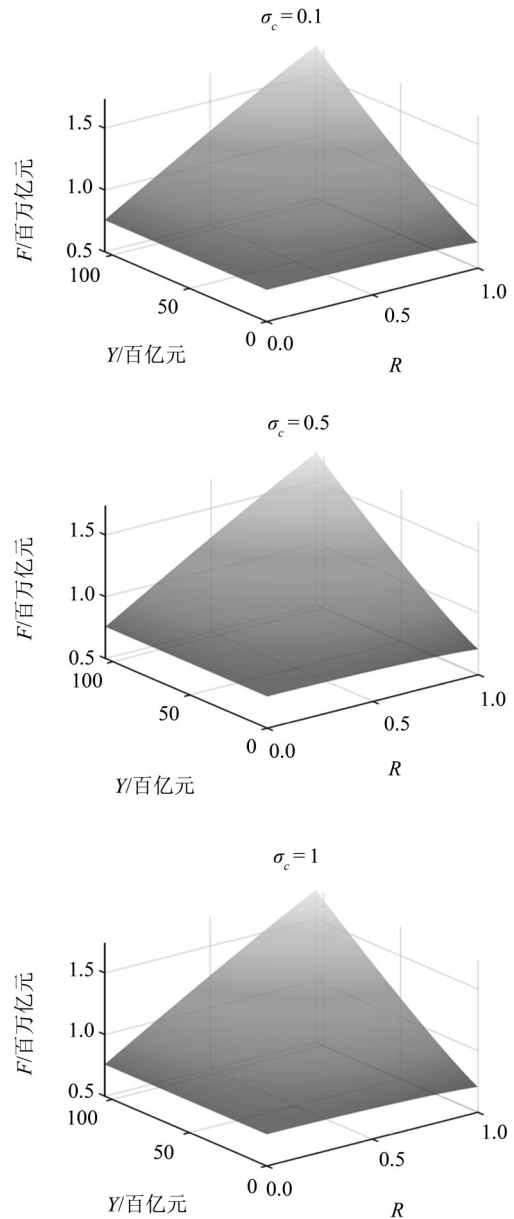


图 18 不同物种密度波动率对土地价值的影响

Fig. 18 The impact on land value of different species density fluctuation rates

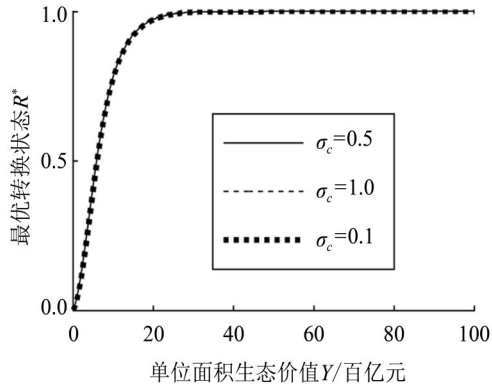


图19 不同物种密度波动率对最优转换状态的影响

Fig. 19 The optimal conversion state under different species density fluctuation rates

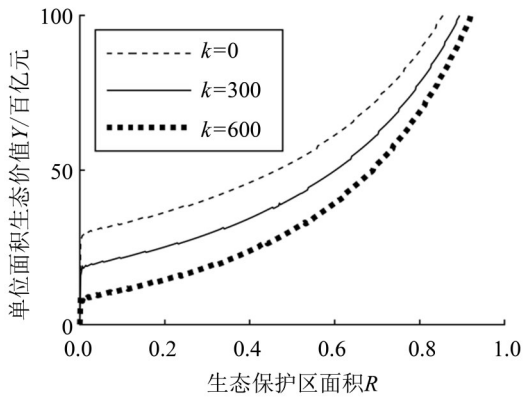


图20 不同边际转换成本对自由边界曲线的影响

Fig. 20 The impact of different marginal conversion cost on the free boundary

成本  $k$  的增大而下降, 对同一  $Y$  值,  $k$  值越大,  $R^*$  越小, 即最优转换状态中生态保护区占比面积越小。且当  $k > 0$  时,  $R^* = 0$  所对应的  $Y$  值大于 0, 意味着, 当边际转换成本增大时, 单位面积生态价值小于一定的正值时, 土地的最优转换状态  $R^*$  就为 0 了, 此时土地应该完全开发为农业生产用地。

### 5 结论

本文针对三江源地区“开发”与“生态保护”的协调问题, 构建了生态保护区土地资源开发最优决策模型, 并在土地开发过程不可逆、开发收益具有不确定性的假设下, 探讨了生态保护用地的最优转换状态。相较现有文献, 本文一是内生土地开发速度, 将土地开发与生态环境之间的反馈机制纳入开发决策模型中, 二是从实物期权角度考察土地开发利用问题, 考察了开发过程中具有不确定性、开发决策取决于土地未来收益这

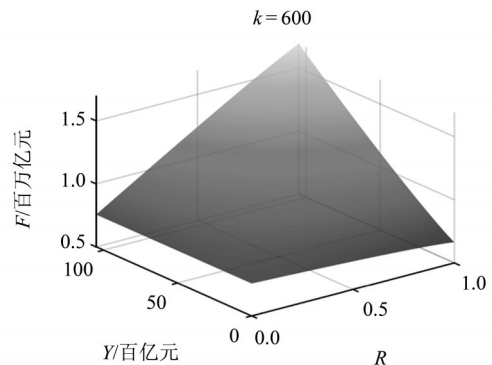
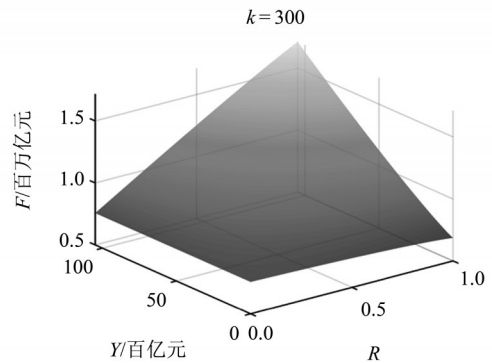
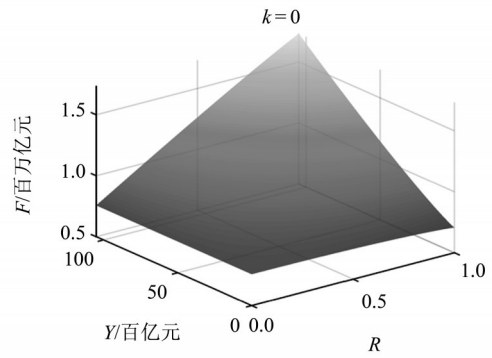


图21 不同边际转换成本对土地价值的影响

Fig. 21 The impact on land value of different marginal conversion cost

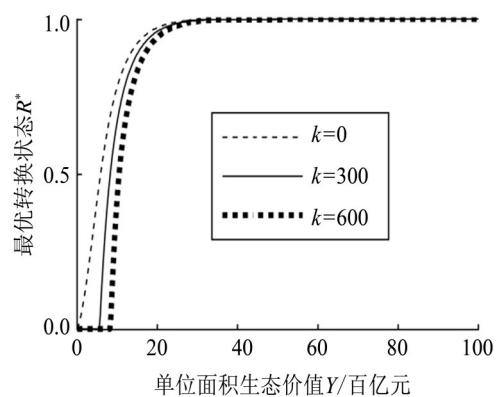


图22 不同边际转换成本对最优转换状态的影响

Fig. 22 The optimal conversion state under different marginal conversion cost

一特征,三是改进了 Leroux, et al<sup>[18]</sup>提出的模型,采用生态价值与生态用地面积的比值作为新变量,并重新推导了相关边界条件,使得模型结论更加符合现实:原模型所对应的最优转换状态只能在土地开发的起点或终点取得,改进后的数值模拟结果则显示,在三江源土地开发过程中存在一个最优转换状态。此外,本文基于改进的模型提出了稳定的数值求解方法,提高了数值计算的效率。模型数值计算结果显示:三江源地区土地开发的最优决策是取得生态保护用地与农业用地比例的平衡,并且随着单位面积生态价值的增加,最优

生态保护用地占比增加,农业效益、保护效益弹性系数、边际转换成本的增加以及物种经济价值波动率的降低会导致最优生态保护用地占比减少,物种经济价值增长率的影响与贴现率的大小有关,物种密度波动率的变动对最优转换状态的影响不明显。

本文的不足之处在于模型基本假设是由生态保护区向农业生产用地的转换过程是不可逆的,未来可以放松这一假设,考察土地转换过程是可逆的情形,从而解决退耕还林等生态保护措施的最优决策问题。

### 参考文献:

- [1] 邵全琴,樊江文,刘纪远,等.三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估[J].地理学报,2016,71(1):3-20.  
SHAO Q Q, FAN J W, LIU J Y, et al. Effects of an ecological conservation and restoration project in the Three-River Source Region, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 71(1): 3-20.
- [2] 张骞,马丽,张中华,等.青藏高寒区退化草地生态恢复:退化现状、恢复措施、效应与展望[J].生态学报,2019,39(20):7441-7451.  
ZHANG Q, MA L, ZHANG Z H, et al. Ecological restoration of degraded grassland in Qinghai-Tibet alpine region: Degradation status, restoration measures, effects and prospects [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7441-7451.
- [3] 曹巍,刘璐璐,吴丹,等.三江源国家公园生态功能时空分异特征及其重要性辨识[J].生态学报,2019,39(4):1361-1374.  
CAO W, LIU L L, WU D, et al. Spatial and temporal variations and the importance of hierarchy of ecosystem functions in the Three-river-source National Park [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): 1361-1374.
- [4] 高红梅,蔡振媛,覃雯,等.三江源国家公园鸟类物种多样性研究[J].生态学报,2019,39(22):8254-8270.  
GAO H M, CAI Z Y, QIN W, et al. Species diversity of birds in the Three-River-Source National Park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(22): 8254-8270.
- [5] 钟水映,冯英杰.生态移民工程与生态系统可持续发展的系统动力学研究——以三江源地区生态移民为例[J].中国人口·资源与环境,2018,28(11):10-19.  
ZHONG S Y, FENG Y J. Research on the system dynamics of ecological migration engineering and ecosystem sustainable development: for example of Three-river-source region ecological migration[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(11): 10-19.
- [6] 朱高儒,赵科,刘杰,等.公路网规划生态冲突与协调研究——以青藏高原三江源地区为例[J].首都师范大学学报(自然科学版),2020,41(4):1-8.  
ZHU G R, ZHAO K, LIU J, et al. Study on ecological conflict and coordination of highway network planning ——A case study of the three-river headwater region of Qinghai-Tibet plateau [J]. Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition), 2020, 41(4): 1-8.
- [7] 刘峥延,李忠,张庆杰.三江源国家公园生态产品价值的实现与启示[J].宏观经济管理,2019(2):68-72.  
LIU Z Y, LI Z, ZHANG Q J. The realization and enlightenment of the value of the ecological products of the Three-River-Source National Park [J]. Macroeconomic Management, 2019(2): 68-72.
- [8] 杨清可,段学军,李平星,等.江苏省土地开发度与利用效益的空间特征及协调分析[J].地理科学,2017,37(11):1696-1704.  
YANG Q K, DUAN X J, LI P X, et al. The spatial pattern and coordination analysis between degree of land development and use benefit in Jiangsu [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(11): 1696-1704.
- [9] 管青春,郝晋珉,石雪洁,等.中国生态用地及生态系统服务价值变化研究[J].自然资源学报,2018,33(2):195-207.  
GUANG Q C, HAO J M, SHI X J, et al. Study on the changes of ecological land and ecosystem service value in China [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(2): 195-207.
- [10] 陈瑜琦,张智杰,郭旭东,等.中国重点生态功能区生态用地时空格局变化研究[J].中国土地科学,2018,32(2):19-26.  
CHEN Y Q, ZHANG Z J, GUO X D, et al. Spatial-

- temporal analysis on ecological land changes in the key ecological functional areas in China [J]. *China Land Science*, 2018, 32(2): 19–26.
- [11] 许茜, 李奇, 陈懂懂, 等. 三江源土地利用变化特征及因素分析[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(11): 1836–1843.  
XU Q, LI Q, CHEN D D, et al. The spatial-temporal characteristic of land use change in Sanjiangyuan Region and its effect factors[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(11): 1836–1843.
- [12] SHU B, BAKKER M M, ZHANG H, et al. Modeling urban expansion by using variable weights logistic cellular automata: a case study of Nanjing, China[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 2017, 31(7): 1314–1333.
- [13] FENG Y, LIU Y, LIU Y. Spatially explicit assessment of land ecological security with spatial variables and logistic regression modeling in Shanghai, China[J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2017, 31(9): 2235–2249.
- [14] 冯永玖, 杨倩倩, 崔丽, 等. 基于空间自回归CA模型的城市土地利用变化模拟与预测[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(5): 37–44+127.  
FENG Y J, YANG Q Q, CUI L, et al. Simulation and prediction of urban land use change with spatial autoregressive model based cellular automata[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2016, 32(5): 37–44+127.
- [15] 彭树宏, 钱静, 陈劲松, 等. 基于CLUE-S模型的干旱区典型绿洲城市土地利用变化时空动态模拟研究——以新疆奎屯河流域为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2018, 34(3): 61–67+129.  
PENG S H, QIAN J, CHEN J S, et al. Spatio-temporal dynamic simulation of land use change of typical oasis cities in arid areas based on CLUE-S Model: A case study of Kuitun river basin in Xinjiang[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2018, 34(3): 61–67+129.
- [16] 朱寿红, 孙玉杰, 舒帮荣, 等. 规划政策影响下区域生态用地演变模拟研究——以南京市溧水区为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(4): 83–90.  
ZHU S H, SUN Y J, SHU B R, et al. Simulation on the evolution of regional ecological land by incorporating planning policies: a case study of Lishui district, Nanjing City[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2019, 35(4): 83–90.
- [17] BULTE E, SOEST D P VAN, KOOTEN G CVAN, et al. Forest conservation in Costa Rica when nonuse benefits are uncertain but rising[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2002, 84(1): 150–160.
- [18] LEROUX A D, MARTIN V L, GOESCHL T. Optimal conservation, extinction debt, and the augmented quasi-option value[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2009, 58(1): 43–57.
- [19] FISHER A C, KRUTILLA J V, CICHETTI C J. The economics of environmental preservation: A theoretical and empirical analysis [J]. *The American Economic Review*, 1972, 62(4): 605–619.
- [20] ARROW K J, FISHER A C. Environmental preservation, uncertainty, and irreversibility, *Classic papers in natural resource economics*: Springer, 1974: 76–84.
- [21] CONRAD J M. Quasi-option value and the expected value of information[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1980, 94(4): 813–820.
- [22] CLARKE H R, REED W J. Land development and wilderness conservation policies under uncertainty: A synthesis [J]. *Natural Resource Modeling*, 1990, 4(1): 11–37.
- [23] CONRAD J M. On the option value of old-growth forest [J]. *Ecological Economics*, 1997, 22(2): 97–102.
- [24] CONRAD J M. Wilderness: options to preserve, extract, or develop [J]. *Resource and Energy Economics*, 2000, 22(3): 205–219.
- [25] SCHEINKMAN J A, ZARIPHOPOULOU T. Optimal environmental management in the presence of irreversibilities[J]. *Journal of Economic Theory*, 2001, 96(1/2): 180–207.
- [26] DIXIT A K, DIXIT R K, PINDYCK R S. *Investment under uncertainty* [M]. Princeton university press, 1994.
- [27] MAJD S, PINDYCK R S. The learning curve and optimal production under uncertainty[R]. National Bureau of Economic Research, 1987.
- [28] KUSHNER H, DUPUIS P G. *Numerical methods for stochastic control problems in continuous time* [M]. Springer Science & Business Media, 2013.

(责任编辑 秦社彩)