

周凤杰,蒋涤非. 森林资源生态价值评估和生态补偿的系统动力学模型分析[J]. 江苏农业科学,2018,46(20):325-329.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.20.081

森林资源生态价值评估和生态补偿的系统动力学模型分析

周凤杰¹, 蒋涤非²

(1. 重庆青年职业技术学院基础部数学教研室, 重庆 400712; 2. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 云南昆明 650500)

摘要:森林资源随着经济的发展变得日益重要,森林经营、开发与利用的商业价值增加了国民收入。森林的生态价值估计以及生态补偿机制的建立一直是地方政府及理论研究界关注的热点。基于系统动力学理论,以云南省的森林资源生态系统为研究对象,综合考虑森林的生态价值(包含木材及旅游价值、碳储存价值以及涵养水源价值)以及森林的生态损耗(包含自然损耗及经济损耗),建立森林的生态补偿估算方程,同时利用系统动力学模型分析森林生态价值、生态损耗以及生态补偿之间的相互影响关系,利用仿真软件 Vensim 对生态价值评估和生态补偿进行实证分析。分析结果显示,近年来森林的生态价值不断增长,森林的整体生态损耗不断降低,而森林的生态补偿估算值不断增大,符合目前的现实情况。本研究对完善区域的生态补偿机制提供重要参考,有利于推动区域的生态和谐及环境的可持续发展。

关键词:森林;价值评估;生态补偿;系统动力学**中图分类号:** F326.2;S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)20-0325-05

森林是自然界的一部分,对于森林的开发、经营和利用已经成为人类社会生活的重要内容之一。这些年来,随着环境意识的增强和保育森林树木政策的出台,使得维护森林的完整成为一项重要的工作。尤其是近年来,受到严重沙尘暴和泥石流的影响,森林的重要性更加突出。在此背景下,对林木砍伐所造成的森林面积减少和森林环境损耗等问题,便成为了当今人们所关心的课题^[1-3]。

森林资源随着经济的发展而日益重要,森林经营、开发与利用的商业价值增加了国民所得。此外,森林还具有多种生态价值,例如休闲游憩、生态保育、涵养水源及对碳平衡的贡献等价值,这些皆是在衡量森林的经济价值时所需格外考虑到的部分^[4]。目前国内关于森林生态价值的实证研究主要从森林涵养水源的价值、对碳平衡的贡献以及休闲旅游的价值等方面入手^[5-8],通过以上这些研究,可以看到森林显著的生态价值。近年来,国际间开始研究环境资源对整合经济及环境的作用及价值^[9],森林资源属环境资源之一,如何将森林资源效益的实际价值加以反映就显得格外重要。做法上可通过目前在森林资源经济方面的研究,以调查或模拟方式进行合理推估各项森林资源效益价值,为森林生态资源补偿机制提供重要参考^[10]。

本研究的目的在于建立一个可以提供森林资源生态补偿机制政策的分析模型,从而为决策者在执行政策时提供参考价值。为此,本研究以系统动态学的方法,以森林为主体,在

系统完整性及整体性考虑下进行分析,将森林的价值包括木材及休闲旅游价值、涵养水源价值、碳平衡价值3种价值及自然和经济的损耗都纳入到生态补偿中,进而分析森林的市场及非市场价值、环境损耗与生态补偿间的相互影响关系,为目前的森林生态补偿机制提供重要的政策参考。

1 森林生态价值评估模型构建

1.1 生态价值计算模型

本研究的森林生态价值目标函数参照 Cairns(2001)建立的模型为基础^[11],如式(1)所示。

$$\int_0^{\infty} U[C, A(R)] e^{-r(s-t)} ds. \quad (1)$$

式中: R 为环境资产的存量,这里表示森林提供的非商业性自然资源; $A(R)$ 为环境服务,即为森林资源提供的非市场服务,是 R 的函数; r 为常数折现率,即为社会效用; C 表示森林的商业价值。

根据森林生态价值的目标函数,将其转换成当期价值的 Hamiltonian 函数,如式(2)所示。

$$H = U(C, A) + v(I - \delta K) + u[M - \alpha F(K) - \gamma R]. \quad (2)$$

其中资本的变动量为:

$$\dot{K} = I - \delta K. \quad (3)$$

式中: K 为生产的资本存量; I 为投资; \dot{K} 为物理的损耗,即折旧; δ 为折现率。

环境资产的变动量为:

$$\dot{R} = M - \alpha F(K) - \gamma R. \quad (4)$$

式中: M 为改善或维持的程度; $F(K)$ 为总产出,为资本存量的函数; $\alpha F(K)$ 为因经济活动而产生的损耗; γR 为因自然产生的损耗。

收稿日期:2017-04-25

基金项目:重庆青年职业技术学院院级科研项目(编号:CQY2016JXZ03)。

作者简介:周凤杰(1981—),女,四川遂宁人,硕士,讲师,主要从事代数学、数学建模研究。E-mail:jtk93@163.com。

假设这里没有外生的时间变量,那表示在任何期间,折现值的利率会相等。Hamiltonian 函数是在经济体系中,从广义的财富得到的所得函数。透过合理假设可得到客观的计算价值,改写成相似函数,如式(5)所示。

$$H = S(C, A) + C \frac{\partial U}{\partial C} + A \frac{\partial U}{\partial A} + v(I - \delta K) + u[M - \alpha F(K) - \gamma R] \quad (5)$$

这个相似函数跟原本一样,并没有使用泰勒展开式求得的近似值。它包括 $S(C, A)$ (商品及环境服务的消费者剩余)、 $v(I - \delta K) + [M - \alpha F(K) - \gamma R]$ (净投资)、 $\frac{\partial U}{\partial C}$ (可以表示 P , 即消费商品的价格)。

另外假设不同形式的支出表示成消费的形式,整理得到

$$C = F(K) - \phi(I) - \psi(M) \quad (6)$$

将式(5)进行微分后,可以得到如下公式:

$$v = \phi'(I) \frac{\partial U}{\partial C} = \phi'(I) p = p_I; \quad (7)$$

$$u = \psi'(M) \frac{\partial U}{\partial C} = \psi'(M) p = p_M \quad (8)$$

式中: $\phi'(I)$ 为投资的边际效用价值, p_I 为投资的市场价格, $\psi'(M)$ 为维护环境的边际效用价值, p_M 为维护支出的市场价格。通过计算边际的消费及维护环境的支出可得到森林生态的补偿方程,如式(9)所示。

$$NNP = pC + p_I(I - \delta K) + A \frac{\partial U}{\partial A} + p_M[M - \alpha F(K) - \gamma R] \quad (9)$$

传统的森林生态补偿中并没有考虑公式中的后 2 项^[12],

也即 $A \frac{\partial U}{\partial A}$ 和 $p_M[M - \alpha F(K) - \gamma R]$, 这 2 项为环境资源资本提供服务价值可能产生的经济损耗。因此,本研究的森林生态补偿方程就必须考虑森林的生态损耗,即由于森林砍伐等原因造成的资源损耗,为此式(9)也可以改写为:

$$NNP = NNP_R - e_j - n_k \quad (10)$$

式中: NNP_R 为传统的森林生态资源补偿,包含森林的市场价值和非市场价值; e_j 为由于森林经济活动带来的损耗; n_k 为由于自然原因造成的损耗。

上述森林生态价值评估函数以及森林生态补偿计算方程中并没有考虑森林的市场、非市场价值和生态损耗之间的内在影响,因此无法准确地对生态价值进行估算,也就无法准确地对森林进行补偿,为此本研究将系统动力学模型引入计算方程中,从而建立更加准确的森林生态价值估量模型。

1.2 系统动力学模型

1.2.1 模型简介

在进行森林生态价值评估中,往往要从整个生态系统的角度入手。而系统动力学源于 1956 年美国麻省理工学院的 Forrester 教授,主要目的是在解决动态复杂性问题。结合信息回馈与控制理论,该模型可以帮助决策者分析并设计改善动态复杂性的问题。系统的概念与应用非常广泛,在我们日常生活中,如经济系统、生态系统、社会系统等。任何一个系统,为了达到特定目的,都会呈现其特定的行为模式。系统动力学目的,就是希望能深入了解系统表现的现象及原因,从而对问题找出解决之道。目前系统动态已广泛地运用在管理决策行为、生产制造、财务规划、环境资源

等问题中^[13-14]。

1.2.1.1 系统动态的基本元素

Forrester (1968) 认为构成系统动态模式的基本元素包含存量 (stock)、流量 (flow) 与辅助变量 (auxiliary)。含义如下:

存量: 存量表示动态过程中所累积的量,存量变量由流量决定,一个存量变量可以由多个流量来控制,流量又分为流入量和流出量。

流量: 流量是决定存量状态的控制点,即单位时间内存量的该变量,具有一定的方向性,从数学意义来看,存量对时间的微分即为流量值,流量同时表示决策行动的起点。

辅助变量: 辅助变量一般分为 3 种,第 1 种是对特定环境设定的变量常数,第 2 种是对动态系统进行测试用的变量数值,第 3 种是在动态系统信息传输过程中产生的变量数值^[15]。

1.2.2 因果关系与回馈结构

因果关联及其回馈环是系统动态的核心基础。首先,人们可以通过变量间的因果关系从而固定模式的边界。其次,因为所有事件间的关系都遵循一定的逻辑关系,于是通过这种因果关联便可确定模式的结构框架。最后,因果关联是交叉的,从这些交叉的环路中,人们可以找到影响系统行为的主要环路,可以非常方便地处理非线性系统。一般系统内变量间的因果关联可称之为因果连结,许多的因果连结串成链环而封闭就称为因果回馈环。回馈是由一系列的因果连结而成的,可分为 2 种情形,一种情形为正回馈结构,就是因、果变量变动的方向一致,也就是说因变量越大,果变量就越大。另一种情形是负回馈结构,就是因、果变量变动的方向相反,也就是说因变量越大,果变量就越小^[16]。

目前系统动态软件大致可分为 3 类,分别是 Vensim、Ithink、Stella 3 种,各有其优缺点^[17]。本研究则采用 Vensim 这套软件。Vensim 是由美国 Ventana Systems Inc. 所开发,为概念化、文件化、模拟分析与优化动态系统模型的图形接口软件^[18]。Vensim 可以提供一种简易而且弹性的方式,方便建立因果循环、存量与流程图等相关模型,这些因素之间的关系采用多种图形化的连接符号进行描述,并把这种定性关系最终带入方程形成定量关系。

1.2.2 森林生态系统动态模型构建

由于本研究探讨森林的市场、非市场价值以及生态损耗之间的关联性,因此系统动态模型可分为以下子模型:市场价值模型、非市场价值模型(碳储存价值、涵养水源价值)、生态损耗模型(自然的损耗、经济的损耗),如图 1 所示。森林的市场价值主要是木材本身的价值以及休闲旅游带来的价值,森林的非市场价值主要是由碳储存价值、涵养水源价值所组成,森林的生态损耗主要由自然的损耗、经济的损耗所组成。森林的市场和非市场价值对森林生态补偿估算是正向的关系,森林的生态损耗对于森林生态补偿估算是反向的关系,至于生态价值如何改变和回馈生态补偿,目前并无法呈现此效果,所以在经济活动回馈至森林的部分用虚线表示。

详细的模型结构如图 2、图 3 所示,模型中以评估森林的市场、非市场价值以及生态损耗,非市场价值中包含涵养水源价值、碳储存价值,生态损耗则包含了自然及经济损耗。由市场价值和非市场价值减去生态损耗即为生态补偿估量。图 2 为中文的模型结构图,其中碳储存价值为森林蓄积量与森林

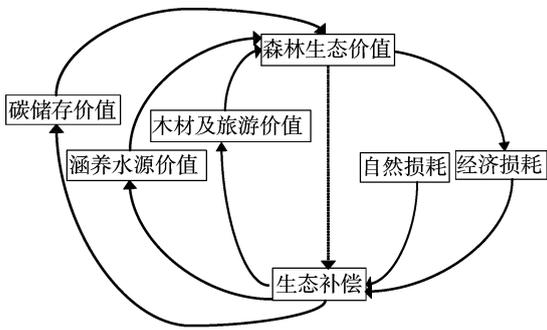


图1 森林生态系统各子模块因果关系

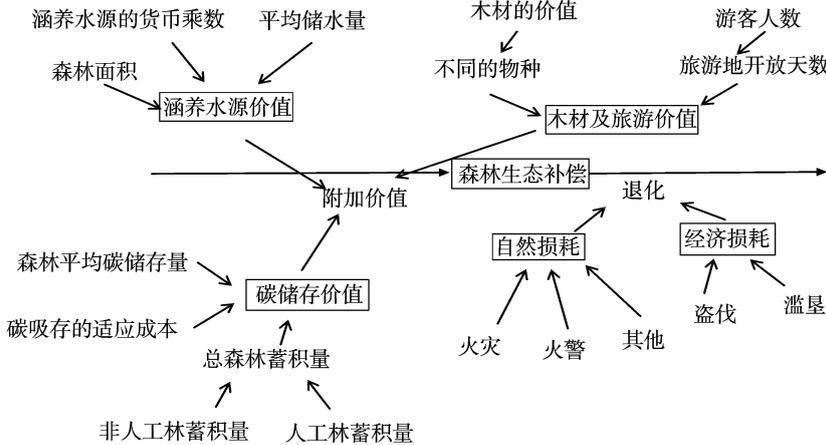


图2 森林生态系统各子模块动态

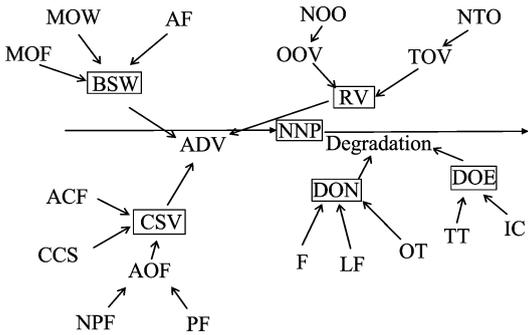


图3 森林生态系统各子模块变量名称

研究,独特复杂多样的自然环境资源,构成云南省复杂的自然生态系统类型。再加上受到26个历史悠久民族的生活、生产系列活动的干扰,使全省生态系统类型更为复杂多样。云南省的生态系统类型主要是陆地生态系统,该生态系统又划分为自然生态系统和人工生态系统。自然生态系统包括森林生态系统和湿地生态系统;人工生态系统包括森林生态系统、农田生态系统和城市生态系统。陆地天然森林生态系统构成云南生态环境的主体,依据森林植被组成、植物地理区系成分、植被群落结构特征以及自然地理环境和地域特点,又分为:(1)北热带森林生态系统;(2)亚热带森林生态系统;(3)高山、亚高山森林生态系统;(4)高山、亚高山草甸生态系统;(5)亚热带山地草场生态系统等5个生态系统类型。其中,草甸和山地草场2种生态系统在云南是由于人类长期干扰下形成的生态系统类型,属于次生性质的生态系统,列入森林生态系统之内。云南湿地生态系统,包括高原湖泊、水库、河流

平均碳储存量和吸存碳之间的适应成本,涵养水源价值为森林面积乘涵养水源之货币乘以平均贮水量,木材价值为不同木种的市场实际价格,休闲旅游价值为游客人数乘以开放天数,生态损耗包含经济损耗和自然损耗,经济损耗为盗伐和盲目开垦,自然损耗为火灾和其他自然灾害造成的损耗。图3为变量名称形成的模型结构图,模型的主要变量如表1所示,内生变量的相关值改变时,会影响森林的生态补偿估算。

2 实证分析结果

2.1 研究资料

本研究以云南省为例,对其区域内的森林生态系统进行

表1 模型变量

模块名称	变量名称	代号	变量类型
森林生态补偿	森林生态补偿	NNP	内生
木材及旅游价值(RV)	不同的物种	OOV	外生
	木材的价值	NOO	内生
	旅游地开放天数	TOV	外生
	旅游人数	NTO	内生
碳储存价值(CSV)	森林平均碳储存量	ACF	外生
	总森林蓄积量	AOF	内生
	非人工林蓄积量	NPF	内生
	人工林蓄积量	PF	内生
	碳吸存的适应成本	CCS	外生
涵养水源价值(BSW)	涵养水源的货币乘数	MOW	外生
	森林面积	MOF	内生
	平均储水量	AF	外生
自然损耗(DON)	火灾	F	内生
	火警	LF	内生
	其他	OT	内生
经济损耗(DOE)	盗伐	TT	内生
	滥垦	IC	内生

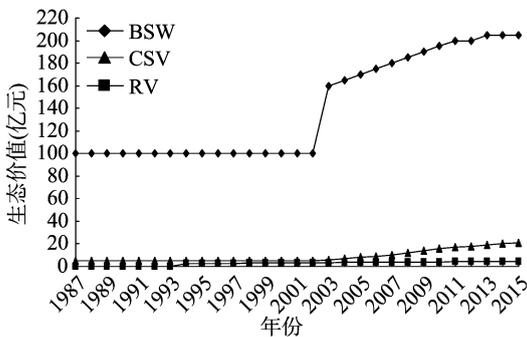
及水塘。由于各自形成条件不同,生态功能、生物多样性差异较大,湿地生态系统又分为高原湖泊生态系统和水库、水塘湿地生态系统2个类型。云南省森林资源丰富,是我国主要林区之一,根据我国第四次森林资源调查结果,云南省目前的森林概况具体数据如表2所示。

2.2 分析结果

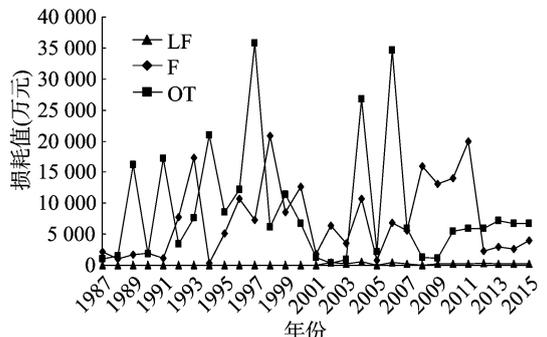
2.2.1 森林的生态价值 森林的生态价值计算如图4所示,

表2 云南省森林面积统计数据

编号	地(市、州)	森林总面积 (万 hm ²)	有林地面积 (万 hm ²)	森林覆盖率 (%)	森林总蓄积量 (万 m ³)	无林地面积 (万 hm ²)
1	全省合计	3 834.27	955.23	24.9	98 859	1 139.33
2	丽江地区	202.63	61.62	30.4	7 474	58.15
3	丽江	72.77	29.04	39.9	3 546	13.75
4	永胜	47.55	9.27	19.5	1 044	17.35
5	华坪	21.66	6.15	28.3	849	9.59
6	宁蒗	20.65	17.16	28.2	2 035	17.47
7	迪庆州	225.75	82.07	36.4	16 526	45.67
8	中甸	106.55	41.09	38.6	10 352	19.85
9	德钦	74.11	23.86	32.2	4 089	16.84
10	维西	45.10	17.12	38.0	2 085	8.98
11	怒江州	162.95	49.45	30.4	9 410	27.13
12	兰坪	43.35	16.19	37.4	1 898	11.71
13	碧江	22.13	6.99	31.6	1 967	0.53



BSW为涵养水源价值, CSV为碳储存价值,
RV为木材及旅游价值
图4 森林生态价值仿真



LF为火警值, F为火灾损失, OT为其他损失
图5 自然损耗模拟

生态资源价值包含了木材及旅游价值(RV)、涵养水源价值(BSW)、碳储存价值(CSV)。涵养水源价值由于森林面积变化不大,因此改变并不多。旅游价值随着游客人数的改变,所得的价值也跟着改变,可以看出,2002年之后森林旅游业逐渐开始盛行,目前涵养水源价值介于100亿至200亿元之间,碳储存价值介于10亿~20亿元之间,木材及旅游价值在2亿~5亿元之间。

2.2.2 森林的生态损耗

2.2.2.1 自然损耗 自然损耗包含了火警(LF)、火灾(F)、其他(OT)。由图5可知,火警值在600万元以下,平均每年损失100万元。火灾损失多数在2亿元以下,平均每年损失3400万元。其他损失在4亿元以下,平均每年损失7400万元。

2.2.2.2 经济损耗 经济的损耗(DOE)包含了盗伐(TT)、滥垦(IC)。由图6可看出,从2008年之后经济损耗呈缓慢递减状态,这是因为在前面假设经济的损耗呈指数性递减的结果。

2.3 森林的生态补偿

综合森林的生态价值和森林的生态损耗,最终可以得到森林的生态补偿趋势曲线。从图7可以看出,随着近年来森林生态价值的不断增长以及森林生态损耗的不断降低,森林的生态补偿估算值不断增大,这也与目前的现实较为符合。

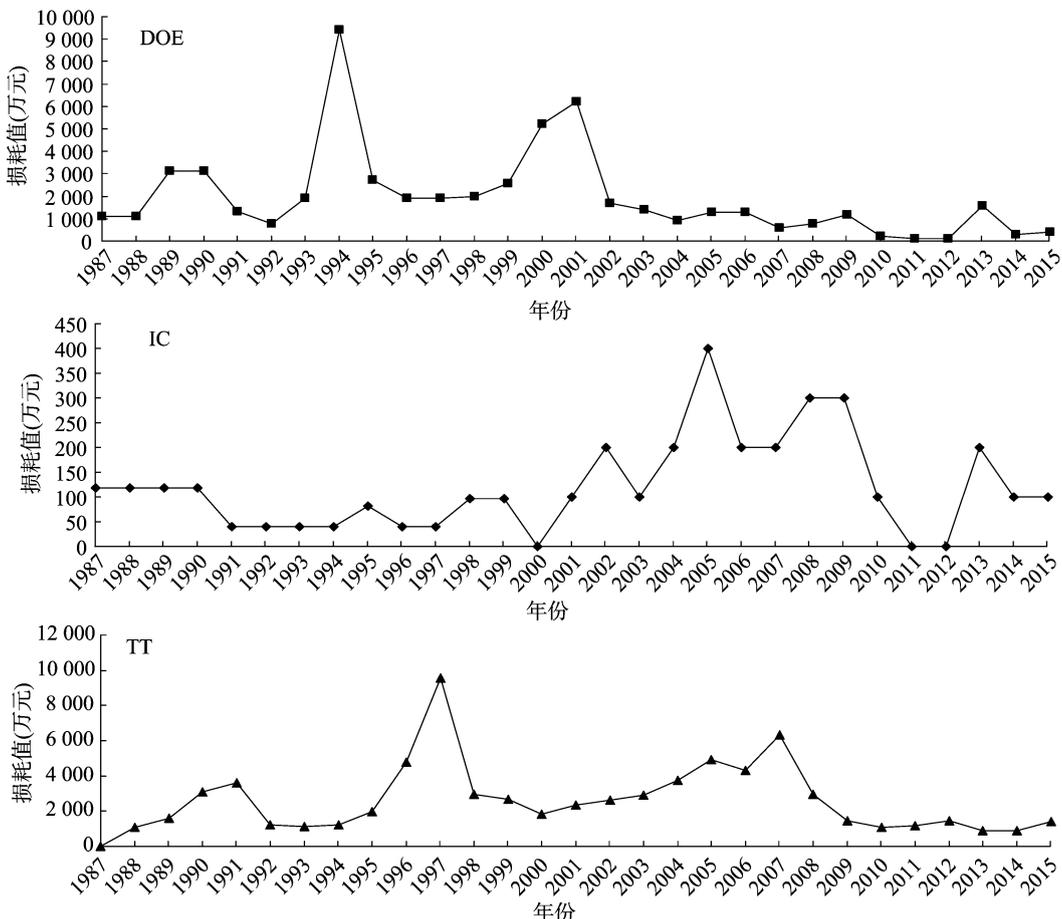
3 结论

本研究以 Cairns(2001)所建立的环境资源价值评估理论

框架为基础,综合考虑森林的生态价值(包含木材及旅游价值、碳储存价值以及涵养水源价值)以及森林的生态损耗(包含自然损耗及经济损耗),建立森林的生态补偿估算方程,同时利用系统动力学模型,分析森林生态价值、生态损耗以及生态补偿之间的相互影响关系,利用仿真软件 Vensim 对云南省的森林资源生态价值评估和生态补偿进行实证分析。实证分析结果显示,近年来森林的生态价值不断增长,特别是森林旅游业的市场价值不断增加。同时随着国家政策法规的不断健全,相关保护措施不断加强,森林的整体生态损耗不断降低,因此森林的生态补偿估算值不断增大,这与目前的现实情况较为符合。本研究为完善区域的生态补偿机制提供重要参考,有利于推动区域的和谐及可持续发展。

参考文献:

- [1]高琼,李月辉,肖笃宁,等. 沈阳市域森林生态系统服务功能价值评估[J]. 东北林业大学学报,2008,36(2):69-72.
- [2]姜立鹏,覃志豪,谢雯,等. 中国草地生态系统服务功能价值遥感估算研究[J]. 自然资源学报,2007,22(2):161-170.
- [3]Amirnejad H, Khalilian S, Assareh M H. Estimating the existence value of north forests of Iran by using a contingent valuation method [J]. Ecological Economics,2016,38(6):19-25.
- [4]赵同谦,欧阳志云,郑华,等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J]. 自然资源学报,2004,19(4):480-491.
- [5]赵同谦,欧阳志云,贾良清,等. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价[J]. 生态学报,2004,24(6):1101-1110.



DOE 为经济损失, TT 为盗伐, IC 为滥垦
图6 经济损失模拟

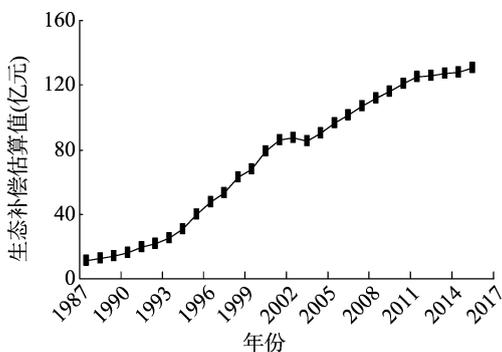


图7 森林生态补偿估计

[6]肖玉,谢高地,安凯. 莽措湖流域生态系统服务功能经济价值变化研究[J]. 应用生态学报,2003,14(5):676-680.

[7]李意德,陈步峰,周光益,等. 海南岛热带天然林生态环境服务功能价值核算及生态公益林补偿探讨[J]. 林业科学研究,2003,16(2):146-152.

[8]高旺盛,董孝斌. 黄土高原丘陵沟壑区脆弱农业生态系统服务评价——以安塞县为例[J]. 自然资源学报,2003,18(2):182-188.

[9]辛琨,肖笃宁. 盘锦地区湿地生态系统服务功能价值估算[J]. 生态学报,2002,22(8):1345-1349.

[10]关文彬,王自力,陈建成,等. 贡嘎山地区森林生态系统服务功能价值评估[J]. 北京林业大学学报,2002,24(4):80-84.

[11]Berry N J,Phillips O L,Lewis S L,et al. The high value of logged tropical forests:lessons from northern Borneo[J]. Biodiversity and Conservation,2010,19(4):985-997.

[12]余新晓,秦永胜,陈丽华,等. 北京山地森林生态系统服务功能及其价值初步研究[J]. 生态学报,2002,22(5):783-786.

[13]吴钢,肖寒,赵景柱,等. 长白山森林生态系统服务功能[J]. 中国科学(C辑:生命科学),2001,31(5):471-480.

[14]肖寒,欧阳志云,赵景柱,等. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例[J]. 应用生态学报,2000,11(4):481-484.

[15]肖寒,欧阳志云,赵景柱,等. 海南岛生态系统土壤保持空间分布特征及生态经济价值评估[J]. 生态学报,2000,20(4):552-558.

[16]陈仲新,张新时. 中国生态系统效益的价值[J]. 科学通报,2000,45(1):17-22.

[17]欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报,1999,19(5):607-613.

[18]薛达元,包浩生,李文华. 长白山自然保护区森林生态系统间接经济价值评估[J]. 中国环境科学,1999,19(3):247-252.