

文章编号:1671-6833(2026)03-0010-09

# 面向森林生态系统服务功能保障的区域生态补偿

孟钰<sup>1,3</sup>, 李林林<sup>1</sup>, 管新建<sup>1</sup>, 张文鸽<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 3. 河南省煤炭学会, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 针对森林生态补偿中非市场性服务功能考虑较少及补偿控制阈值界定不够明确的问题, 提出面向森林生态系统服务功能保障的生态补偿机制, 基于能值分析理论, 融合多学科方法, 构建森林生态系统服务功能能值量化方法体系; 应用 M-K 与 Pettitt 法对功能效益年际序列进行双重突变检验, 确定补偿控制阈值; 建立人类-自然复合能值系统, 解析系统内外生态经济流轨迹, 确定补偿标准(单位森林资源价值), 进而解析功能效益阈值判别下人类与森林补偿主客体的价值补偿定量关系, 为森林生态补偿研究提供一种新思路。将上述理论与方法应用在河南洛阳, 结果表明, 洛阳市 2010—2021 年的森林功能总能值呈现逐年增长趋势(增幅 0.37%), 突变年份为 2016 年, 补偿控制阈值为 5.11E+22 sej, 低于阈值的 2010—2015 年需进行补偿, 补偿价值呈现波动减少趋势, 由 2010 年的 3 770.7 万元减少至 2015 年的 1 264.3 万元。补偿价值主要由功能效益低于阈值的削减量决定, 而功能效益与森林关键生态要素丰度密切相关, 因此, 持续推进森林保护与可持续经营, 是实现人与自然和谐共生的关键所在。

**关键词:** 森林生态补偿; 生态系统服务功能; 能值分析理论; 补偿控制阈值; 单位森林资源价值; 河南洛阳

中图分类号: X321; TV213.4

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2026.03.011

城市现代化、科技数字化等变革引领着人类社会进入新的发展阶段, 但随之而来的土地变化与资源紧缺等问题也愈加凸显, 人类施加给生态系统的各种压力已逐渐打破生态韧性, 若持续恶化, 则会导致生态系统发生不可逆转的损害<sup>[1]</sup>。习近平总书记在党的二十大报告中, 部署了推进生态文明建设的战略任务和重大举措, 指出要“提升生态系统多样性、稳定性、持续性”<sup>[2]</sup>。顺应《2030 年可持续发展议程》与《联合国森林战略规划(2017—2030 年)》等的国际政策需求, 联合国粮农组织(FAO)开展了 2025 年全球森林资源评估活动, 其中, 亚洲的森林净增长率最高, 中国大规模植树造林工程得到全球认可, 同时, 中国在森林生态补偿、可持续经营等方面的成果, 也为全球提供了可复制经验。

森林生态补偿是一种保护森林健康与维持生态效益的价值补偿措施, 将森林资源视为可再生的绿色能源, 明确人类与森林生态系统之间的利益关系,

通过经济手段与资金补偿促进森林资源的可持续利用<sup>[3]</sup>。早期国内外森林补偿的依据主要考虑森林资源的实物形态, 例如森林面积、蓄积量、木材和林副产品等<sup>[4]</sup>。随着森林生态保护理念的发展, 滥采滥伐行为得到有效控制, 补偿依据也逐渐转变为森林能够产生的有形或无形的生态效益<sup>[5]</sup>。森林生态系统服务功能是生态效益的主要表征, 包括原材料供给、固碳释氧、涵养水源、气候调节、生物多样性维持、养分循环、土壤保持等供给、调节与支撑类功能<sup>[6-7]</sup>。此外, 有学者专门针对森林的碳汇功能, 探究森林碳汇效益补偿机制<sup>[8]</sup>。

森林生态效益测算是衡量森林与人类之间价值转化与补偿的基础。常用的方法包括物质量、价值量与能值理论。物质量法主要有 InVEST 模型、生态足迹模型、CITYgreen 模型、VER 模型等, 但其测算的生态效益为直观的物质产出, 例如碳储量、水源涵养能力等, 各项功能难以进行综合补偿<sup>[9]</sup>。价值

收稿日期: 2025-12-30; 修订日期: 2026-02-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3211302); 河南省重点基金资助项目(232300421138); 河南省科协“科创中原”行动项目; 河南省青年人才托举工程(2025HYTP048)

作者简介: 孟钰(1988—), 女, 河南南阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事河流生态水文学研究, E-mail: mengyu8@zzu.edu.cn。

通信作者: 张文鸽(1975—), 女, 河南巩义人, 黄河水利委员会正高级工程师, 博士, 主要从事生态学及资源管理研究, E-mail: zhangwenge@yeah.net。

引用本文: 孟钰, 李林林, 管新建, 等. 面向森林生态系统服务功能保障的区域生态补偿[J]. 郑州大学学报(工学版), 2026, 47(3): 10-18. (MENG Y, LI L L, GUAN X J, et al. Regional ecological compensation for forest ecosystem service function security[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2026, 47(3): 10-18.)

量法包括费用分析法、市场价值法、影子价格法、机会成本法、碳税法等,直接将生态效益测算为货币形式,但大多为替代理论,涉及功能的物理机理较少,且受到市场需求和支付意愿的影响<sup>[10-11]</sup>。能值理论以能值转换率为媒介,能够将各类物质、能量、价值等转换为以能值为统一度量的生态经济流,进而实现物质质量与价值量的有效融合<sup>[12]</sup>。但是,基于能值分析理论测算森林生态系统服务功能,需考虑各项功能形成的内在机理,将其与可获取的能值转换率相结合,提出针对性量化方法。此外,当前关于森林生态补偿的研究大多探讨空间层面区域间的补偿关系,通过各区域功能效益大小,采用聚类、自然间断、区域对比的方式划分补偿区与受偿区<sup>[13-14]</sup>,鲜有针对生态系统稳定性控制阈值的补偿研究。

综上,本文提出面向森林生态系统服务功能保障的生态补偿机制。首先,基于能值分析理论,融合生态学、经济学、管理学等多学科方法,构建森林生态系统服务功能能值效益量化方法体系;其次,以森林功能效益表征森林系统稳定状态,对功能总效益年际序列进行双重突变检验,获取突变年及对应的补偿控制阈值;最后,建立人类-自然复合能值系统,解析系统资源投入与经济效益产出关系,确定补偿控制阈值(单位森林资源补偿价值),结合需求强度,推算功能效益阈值控制下的生态补偿价值,为森林生态补偿研究提供一种新思路。

## 1 理论与方法

### 1.1 生态补偿总体框架

以保障森林生态系统稳定性与绿色能源可持续性为出发点,将人类作为补偿主体,森林生态系统作为补偿客体,视森林生态系统服务功能为绿色效益的表现形式,基于能值分析理论,融合多学科方法,提出森林生态系统服务功能能值量化方法体系,分析功能效益序列变化下的生态系统稳态变化规律及其突变特征,获取补偿控制阈值。解析人类-自然复合能值系统的生态经济流关系,核算能值货币比率、森林资源贡献率与单位森林资源价值(补偿标准),结合补偿控制阈值,推求补偿价值。基于上述,明确补偿主客体、补偿控制阈值、补偿标准、补偿价值之间的响应关系,建立面向森林生态系统服务功能保障的区域生态补偿框架,如图 1 所示。

### 1.2 森林生态系统服务功能

森林作为“绿色 GDP”的核心要素,森林生态系统产生的功能效益是区域可持续发展的重要支撑。森林生态系统服务功能是指森林生态系统与生态过

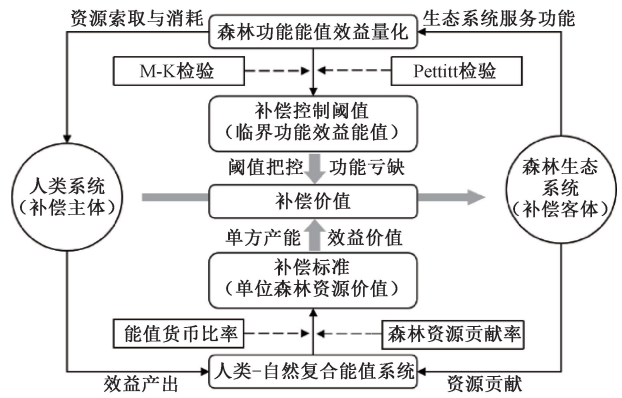


图 1 面向森林生态系统服务功能保障的区域生态补偿框架  
Figure 1 Regional ecological compensation framework for securing forest ecosystem service functions

程中直接或间接为人类社会发展和自然环境维持所提供的各种有益的服务效用<sup>[15-16]</sup>。针对森林生态的保护目标,以服务于自然的循环调节与环境支撑两大类功能为绿色效益的表征,各分项功能的量化方法如下。

#### 1.2.1 循环调节类功能

(1) 释氧能值( $EM_F^{OR}$ )。森林植物茂盛的根系与枝叶可以释放氧气。

$$EM_F^{OR} = \beta_F^{OR} (FP_F S_F + FS_F \eta_F^{FS} \tau_F^{FS}) \alpha_F^{OR} \quad (1)$$

式中: $\beta_F^{OR}$ 为植物进行光合作用产生干物质时释放氧气的系数; $FP_F$ 为林木生产力, $g/hm^2$ ; $S_F$ 为森林面积, $hm^2$ ; $FS_F$ 为林木蓄积量, $m^3$ ; $\eta_F^{FS}$ 为林木蓄积量的折算系数, $g/m^3$ ; $\tau_F^{FS}$ 为林木蓄积量的年增长率, $\%$ ; $\alpha_F^{OR}$ 为释氧的能值转换率, $sej/g$ 。

(2) 涵养水源能值( $EM_F^{WC}$ )。森林通过林冠截流、凋落物层持水以及土壤蓄水来达成涵养水源的目的,森林植被总持水量则为涵养水量。

$$EM_F^{WC} = \rho S_F R \lambda_F^{RW} \alpha_F^{WC} \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为水的密度, $g/mL$ ; $R$ 为径流深, $mm$ ; $\lambda_F^{RW}$ 为雨水的热力学转换系数, $J/g$ ; $\alpha_F^{WC}$ 为涵养水源能值转换率,取地表水与地下水的平均能值转换率, $sej/J$ 。

(3) 养分循环能值( $EM_F^{NC}$ )。森林生态系统能量转换速度和次生物质循环活性显著旺盛,其植物根系和土壤之间进行着周而复始的物质循环与能量流动。

$$EM_F^{NC} = LF_F S_F \sum_j^n \varphi_L^{NCj} \alpha_F^{NCj} \quad (3)$$

式中: $LF_F$ 为森林生态系统的年凋落物量, $t/(hm^2 \cdot a)$ ; $\varphi_L^{NCj}$ 为凋落物中第  $j$  种养分的含量, $\%$ ; $\alpha_F^{NCj}$ 为各类养分对应的能值转换率, $sej/g$ 。

(4) 固碳能值( $EM_F^{FC}$ )。森林通过光合作用把

二氧化碳和水分转化成生物质并释放出氧气,同时吸收大量二氧化碳,从而达到固碳的效果。

$$EM_F^{FC} = \beta_F^{FC} (FP_F S_F + FS_F \eta_F^{FS} \tau_F^{FS}) \alpha_F^{FC} \quad (4)$$

式中:  $\beta_F^{FC}$  为植物进行光合作用产生干物质时需要吸收  $CO_2$  量的系数;  $\alpha_F^{FC}$  为固碳的能值转换率,  $sej/g$ 。

(5) 净化大气能值 ( $EM_F^{AP}$ )。森林生态系统可通过自身植被优势吸收、过滤、阻断各类大气污染物,显著的有氮氧化物、 $SO_2$ 、粉尘等。

$$EM_F^{AP} = AN_F S_F \alpha_F^{NO} + AS_F S_F \alpha_F^{SO_2} + DC_F S_F \alpha_F^{DC} \quad (5)$$

式中:  $AN_F$  为森林生态系统对氮氧化物的平均吸收能力,  $kg/hm^2$ ;  $AS_F$  为森林生态系统对  $SO_2$  的平均吸收能力,  $kg/hm^2$ ;  $DC_F$  为森林生态系统滞尘能力,  $t/hm^2$ ;  $\alpha_F^{NO}$ 、 $\alpha_F^{SO_2}$ 、 $\alpha_F^{DC}$  分别为吸收有害气体氮氧化物、 $SO_2$  及滞尘的能值转换率,  $sej/g$ 。

### 1.2.2 生境维持类功能

(1) 栖息地维持能值 ( $EM_F^{HM}$ )。森林生态系统可为众多生物提供巨大的栖息环境,为人类有序、安定生活的实现提供支持。

$$EM_F^{HM} = S_F \alpha_F^{HM} \quad (6)$$

式中:  $\alpha_F^{HM}$  为森林生态系统栖息地维持的能值转换率,  $sej/m^2$ 。

(2) 生物多样性维护能值 ( $EM_F^{BM}$ )。森林生态系统繁殖能力强,生物多样性功能突出,对保育生物资源和提升人类福祉具有重要作用。

$$EM_F^{BM} = SN_F \alpha_F^{SN} S_F / S_{GL} \quad (7)$$

式中:  $SN_F$  为森林生态系统生物种类数,种;  $\alpha_F^{SN}$  为生物物种能值转换率,  $sej/种$ ;  $S_{GL}$  为全球面积,  $km^2$ 。

(3) 固土保肥能值 ( $EM_F^{SC}$ )。森林植被根系错综复杂、树冠体量庞大,能够固持土壤、减少土壤侵蚀,另外,根系营养物质丰富,可以保持土壤肥力,供养人类社会。

$$EM_F^{SC} = \omega d S_F (\xi_F^{TS} \alpha_F^{SF} + \sum_j \varphi_F^{NCj} \alpha_F^{NCj}) \quad (8)$$

式中:  $\omega$  为现实与潜在土壤侵蚀模数之差与现实土壤侵蚀模数的转换系数;  $d$  为现实土壤侵蚀模数,  $t/km^2$ ;  $\xi_F^{TS}$  为植被表土层的折能系数,  $J/g$ ;  $\varphi_F^{NCj}$  为植被土壤第  $j$  类养分含量,%;  $\alpha_F^{SF}$  为固土的能值转换率,  $sej/J$ ;  $\alpha_F^{NCj}$  为第  $j$  类养分元素的能值转换率,  $sej/g$ 。

### 1.3 补偿控制阈值

根据 1.2 小节森林生态系统各项服务功能的能值量化方法,逐项计算并加和后得到功能总效益。森林生态系统服务功能由森林规模、蓄积量、生产能力、生物多样性等关键要素转换计算得到,能够表征

森林的健康状况与生态效益。对森林功能总效益年际连续变化序列进行 Mann-Kendall (M-K) 与 Pettitt 双重突变检验,当发生突变时,表明森林生态系统受到一定程度的干扰和影响,其稳定状态发生变化,视功能效益突变值为系统稳态的转折点,即为补偿控制阈值,低于阈值则表明森林功能因外在压力而发生较大衰减,需进行补偿<sup>[17-18]</sup>。

(1) M-K 突变检验法。M-K 法是一种时序检验的非参数方法,用于分析一组数据中的突变年份和变化趋势<sup>[19]</sup>。对于具有  $T$  个样本量的功能效益时间序列  $EM_t^{COM} = \{EM_1^{COM}, EM_2^{COM}, \dots, EM_T^{COM}\}$ , 基于符号函数  $sgn$  构建秩序列:

$$S_k = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{j-1} sgn(EM_j^{COM} - EM_i^{COM}) \quad (9)$$

在时间序列随机独立的假定下,定义统计量:

$$\begin{cases} UF_k = [S_k - E(S_k)] / \sqrt{Var(S_k)}; \\ E(S_k) = k(k-1)/4, k=1, 2, \dots, T; \\ Var(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72. \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $E(S_k)$ 、 $Var(S_k)$  分别为累计数  $S_k$  的均值和方差,  $UF_1 = 0$ , 按时间序列逆序,重复上述过程,令  $UB_k = -UF_k$  且  $UB_1 = 0$ 。若  $UF_k$  和  $UB_k$  曲线在置信区间内有交点,该交点即为突变点。

(2) Pettitt 突变检验法。Pettitt 检验法是由一种直接利用秩序列进行突变点识别的非参数检验方法<sup>[20]</sup>,使用 Mann-Whitney 的统计量  $U_{i,T}$  来检验同一个总体  $\{EM_t^{COM} | t = 1 \sim T\}$  的两个样本  $\{EM_1^{COM}, EM_2^{COM}, \dots, EM_t^{COM}\}$  和  $\{EM_{t+1}^{COM}, EM_{t+2}^{COM}, \dots, EM_T^{COM}\}$ , 定义统计量  $U_{i,T}$  为

$$U_{i,T} = U_{i-1,T} + \sum_{j=1}^T sgn(EM_i^{COM} - EM_j^{COM}) \quad (11)$$

显著突变点  $t$  时刻对应的  $U_{i,T}$  最大值为

$$K_t = \max_{1 \leq i \leq T} |U_{i,T}| \quad (12)$$

计算  $t$  时刻的显著性水平  $P_t$  为

$$P_t = 2 \exp\left(\frac{-6K_t^2}{T^3 + T^2}\right) \quad (13)$$

一般认为当  $P_t$  小于显著性水平 0.05 时,满足显著性要求。

### 1.4 补偿标准:单位森林资源价值

#### 1.4.1 人类-自然复合能值系统

以区域行政区划为空间边界,构建人类-自然复合能值系统。投入包括可更新资源、不可更新资源、进口及外来资源、废弃物、出口商品及对外投资等,产出包括出口与产业产值。人类-自然复合能值系统分项量化方法如表 1 所示<sup>[7,12]</sup>。

表1 人类-自然复合能值系统细分项量化集

Table 1 Quantitative set of breakdown items for the human-natural composite emergy system

项目	能值计算公式	描述
1 可更新资源投入	$M_{RR} = M_{11} + M_{12} + M_{13} + M_{14} + M_{15} + M_{16}$	主要量化了太阳能、风能、人类用水、森林、草地和农田等资源投入的能值总和
1.1 太阳能	$M_{11} = S_U RI \cdot \alpha_{SE}$	$S_U$ 为行政区面积, $m^2$ ; $RI$ 为年均太阳辐射强度, $J/m^2$ ; $\alpha_{SE}$ 为太阳能能值转换率, $sej/J$
1.2 风能	$M_{12} = S_U \rho_A HA_F \varphi_c \kappa \cdot \alpha_{WE}$	$\rho_A$ 为空气的密度, $kg/m^3$ ; $HA_F$ 为气流的高度, $m$ ; $\varphi_c$ 为涡流扩散的系数, $m^2/s$ ; $\kappa$ 为风速梯度, $s$ ; $\alpha_{WE}$ 为风能的能值转换率, $sej/J$
1.3 人类用水	$M_{13} = WC_H \cdot \alpha_{WN}^W$	$WC_H$ 为人类用水量, $m^3$ ; $\alpha_{WN}^W$ 为水资源的能值转换率, $sej/J$
1.4 森林资源投入	$M_{14} = (FP_F S_F + FS_F \eta_{FS} \tau_{ES}) \xi_T \alpha_T + LF_F S_F \xi_{OM} \alpha_{OM}$	$\xi_T$ 为林木的折能系数, $J/g$ ; $\alpha_T$ 为林木的能值转换率, $sej/J$ ; $\xi_{OM}$ 为有机物折能系数, $J/g$ ; $\alpha_{OM}$ 为有机物的能值转换率, $sej/J$ ; 其他符号同式(1)和式(3)
1.5 草地资源投入	$M_{15} = HY_C S_C \xi_{HO} \alpha_{HO} + \sum AH_C \xi_{AH} \alpha_{AH}$	$HY_C$ 为干草生物量, $g/m^2$ ; $S_C$ 为草地面积, $m^2$ ; $\xi_{HO}$ 为干草折能系数, $J/g$ ; $\alpha_{HO}$ 为干草能值转换率, $sej/J$ ; $AH_C$ 为各项畜牧产品产量, $kg$ ; $\xi_{AH}$ 为各项畜牧产品的折能系数, $J/kg$ ; $\alpha_{AH}$ 为对应畜牧产品的能值转换率, $sej/J$
1.6 农田资源投入	$M_{16} = \sum CP_F \xi^{CP} \alpha^{CP}$	$CP_F$ 为各项农产品产量, $kg$ ; $\xi^{CP}$ 为各项农产品的折能系数, $J/kg$ ; $\alpha^{CP}$ 为对应农产品的能值转换率, $sej/J$
2 不可更新资源投入	$M_{NR} = M_{21} + M_{22} + M_{23} + M_{24} + M_{25} + M_{26} + M_{27} + M_{28} + M_{29} + M_{210}$	主要包含原煤、原油、天然气、钢等不可更新资源项的能值总和
2.1 原煤	$M_{21} = Q_{MC} \xi_{MC} \alpha_{MC}$	$Q_{MC}$ 为使用原煤量, $t$ ; $\xi_{MC}$ 为原煤折能系数, $J/g$ ; $\alpha_{MC}$ 为原煤能值转换率, $sej/J$
2.2 原油	$M_{22} = Q_{MO} \xi_{MO} \alpha_{MO}$	$Q_{MO}$ 为使用原油量, $t$ ; $\xi_{MO}$ 为原油折能系数, $J/g$ ; $\alpha_{MO}$ 为原油能值转换率, $sej/J$
2.3 天然气	$M_{23} = Q_{NG} \xi_{NG} \alpha_{NG}$	$Q_{NG}$ 为使用天然气量, $m^3$ ; $\xi_{NG}$ 为天然气折能系数, $J/m^3$ ; $\alpha_{NG}$ 为天然气能值转换率, $sej/J$
2.4 钢	$M_{24} = Q_{ST} \alpha_{ST}$	$Q_{ST}$ 为使用钢类量, $t$ ; $\alpha_{ST}$ 为钢的能值转换率, $sej/t$
2.5 铝	$M_{25} = Q_{AL} \alpha_{AL}$	$Q_{AL}$ 为使用铝量, $t$ ; $\alpha_{AL}$ 为铝的能值转换率, $sej/t$
2.6 氮肥	$M_{26} = Q_{NF} \alpha_{NF}$	$Q_{NF}$ 为使用氮肥及复合肥量, $t$ ; $\alpha_{NF}$ 为对应的能值转换率, $sej/t$
2.7 磷肥	$M_{27} = Q_{PF} \alpha_{PF}$	$Q_{PF}$ 为使用磷肥量, $t$ ; $\alpha_{PF}$ 为磷肥的能值转换率, $sej/t$
2.8 农药	$M_{28} = Q_{PC} \alpha_{PC}$	$Q_{PC}$ 为使用农药量, $t$ ; $\alpha_{PC}$ 为农药的能值转换率, $sej/t$
2.9 塑料	$M_{29} = Q_{PS} \alpha_{PS}$	$Q_{PS}$ 为使用塑料量, $t$ ; $\alpha_{PS}$ 为塑料的能值转换率, $sej/t$
2.10 水泥	$M_{30} = Q_{CM} \alpha_{CM}$	$Q_{CM}$ 为使用水泥量, $t$ ; $\alpha_{CM}$ 为水泥的能值转换率, $sej/t$
3 进口及外来资源	$M_{II} = M_{31} + M_{32} + M_{33}$	包括进口商品、外商投资和旅游外汇收入效益的能值
3.1 商品	$M_{31} = TA_{MI} R_{E/U}$	$TA_{MI}$ 为商品进口总值, $\$$ ; $R_{E/U}$ 为美元的能值转换率, $sej/\$$
3.2 外商投资	$M_{32} = FDI \cdot R_{E/U}$	$FDI$ 为外商投资额, $\$$
3.3 旅游外汇收入	$M_{33} = TFEE \cdot R_{E/U}$	$TFEE$ 为旅游外汇收入, $\$$
4 出口	$M_{EV} = M_{41} + M_{42}$	包括出口商品和对外投资效益的能值
4.1 商品	$M_{41} = TA_{ME} R_{E/U}$	$TA_{ME}$ 为出口商品总额, $\$$
4.2 对外投资	$M_{42} = LS \cdot R_{E/U}$	$LS$ 为对外投资总额, $\$$
5 废弃物	$M_{WL} = M_{51} + M_{52}$	包括废水和固体废物的排放产生的负效益
5.1 废水	$M_{51} = W_L \alpha_{LW}$	$W_L$ 为废水排放量, $t$ ; $\alpha_{LW}$ 为废水的能值转换率, $sej/t$
5.2 固体废物	$M_{52} = W_S \alpha_{SW}$	$W_S$ 为固体废物排放量, $t$ ; $\alpha_{SW}$ 为固体废物的能值转换率, $sej/t$
6 产业产值	$M_{IO} = M_{61} + M_{62} + M_{63}$	主要量化了第一产业产值、第二产业产值和第三产业产值的能值
6.1 第一产业	$M_{61} = OV_1 R_{E/G}$	$OV_1$ 为第一产业产值, 元; $R_{E/G}$ 为能值货币比率, $sej/\text{元}$
6.2 第二产业	$M_{62} = OV_2 R_{E/G}$	$OV_2$ 为第二产业产值, 元
6.3 第三产业	$M_{63} = OV_3 R_{E/G}$	$OV_3$ 为第三产业产值, 元
系统能值总投入	$M_{RR} + M_{NR} + M_{II} + M_{WL} - M_{EV}$	
系统能值总产出	$M_{EV} + M_{IO}$	

1.4.2 单位森林资源价值

根据人类-自然复合能值系统的投入、产出关系计算能值货币比率,衡量森林资源贡献率,进而推求单位森林资源价值,并将其作为补偿标准。

(1)能值货币比率。能值货币比率( $R_{E/G}$ )是指单位货币相当的能值,为人类系统投入能值与产出能值的差值与经济产出与污染损失价值差值的比值,经变化后,采用式(14)计算。

$$R_{E/G} = \frac{M_{RR} + M_{NR} + M_{II} + M_{WL} - M_{EV}}{OV_1 + OV_2 + OV_3} \quad (14)$$

(2) 森林资源贡献率。森林资源贡献率( $WCR_F$ )为森林的供给能值占人类系统投入总能值的比值,能够反映森林资源对人类系统的支撑程度。

$$WCR_F = \frac{M_{I4}}{M_{RR} + M_{NR} + M_{II} + M_{WL} - M_{EV}} \quad (15)$$

(3) 单位森林资源价值。单位森林资源价值是指单位蓄积量森林资源的经济价值。

$$V_F = \frac{UM_F}{R_{E/G}} = \left[ \frac{(M_{EV} + M_{I0})WCR_F}{FS_F} \right] \frac{1}{R_{E/G}} \quad (16)$$

式中: $V_F$ 为单位森林资源价值,即补偿标准,元/ $m^3$ ; $UM_F$ 为单位蓄积量森林资源能值,sej/ $m^3$ 。

### 1.5 补偿价值

(1) 森林补偿资源量。补偿生态资源量是指经判别后,补偿年份中需补偿的生态系统能值对应的生态资源量。采用下式计算。

$$CF = \begin{cases} 0, EM^i \geq TV; \\ \frac{TV - EM^i}{UM_F}, EM^i < TV. \end{cases} \quad (17)$$

式中: $CF$ 为森林生态系统补偿生态资源量, $m^3$ ; $EM^i$ 为森林生态系统在序列号*i*时的生态功能效益,sej; $TV$ 为补偿控制阈值,sej。

(2) 需求强度系数。结合生态系统服务的生态经济价值和地区经济水平,引入衡量地区的生态经济综合发展水平的优先指数,获取社会-自然生态耦合发展状况,从而表明该区域对于补偿的需求强度。

$$\delta_F = \frac{EM}{M_{I0} \cdot R_{E/G}}; \quad (18)$$

$$DI = \frac{2 \arctan \delta_F}{\pi} \quad (19)$$

式中: $EM$ 是森林生态系统服务功能总能值效益,sej; $\delta_F$ 为生态补偿优先级; $DI$ 为森林生态系统的需求强度系数。

(3) 森林生态补偿价值。考虑生态、经济、社会等多个方面的因素,结合制定的补偿标准和需求强度系数,制定以货币形式表达的生态补偿价值( $CV$ )的量化方法。

$$CV = V_F \cdot CF \cdot DI \quad (20)$$

## 2 研究区与数据

洛阳市位于河南省西部( $110^{\circ}08'E \sim 112^{\circ}59'E$ ,  $33^{\circ}39'N \sim 35^{\circ}35'N$ ),地跨黄河、淮河、长江三大流域。地形地貌复杂多样,造就了多样的生态类型。地属暖温带大陆性季风气候,四季分明,年降水在528~800 mm,具备良好的植被生长条件。西南部山区林木覆盖率较高,以阔叶林为主,而东北部是洛阳的主城区及市辖区,森林覆盖率相对较低。洛阳以局部森林生态优势带动整体绿色可持续发展,森林健康与功能保障尤为重要。本文以洛阳市行政范围作为空间边界,根据《河南省林地保护利用规划(2010—2020年)》期限,选取时间边界为2010—2021年,探究洛阳市森林生态系统功能效益的变化过程与补偿情况,主要数据来源见表2。

表2 数据来源汇总表

Table 2 Summary of data sources

数据名称	数据来源	获取路径
土地利用数据	数据共享服务系统	<a href="https://data.casearth.cn/">https://data.casearth.cn/</a>
森林面积、蓄积量、生产力等生态要素; 人类-复合系统投入产出要素等	《洛阳年鉴》 《洛阳统计年鉴》 《洛阳市水资源公报》 《河南统计年鉴》 《洛阳生态环境状况公报》	购买及政府官网
各类能值转换率	已发表文献	详见参考文献[21-22]

## 3 结果与讨论

### 3.1 森林生态功能效益

根据1.2小节森林生态系统服务功能能值量化方法体系,开展洛阳市2010—2021年各项功能计算,结果如图2所示。除2011年外,其余年份的森林功能总效益呈现逐年增长趋势,2010—2021年的增幅为0.37%。以2021年为例分析各项功能占比,

森林的生境维持类功能尤为突出,生物多样性维护与固土保肥占总能值效益的90%以上,充分体现出森林在生命网络系统中的重要支撑地位,而这两项功能与森林面积关系密切。洛阳市森林资源丰富,注重森林可持续开发与保护,森林覆盖率由2010年的45%增长至2021年的45.8%,在保持森林生态系统稳定的前提下,确保其服务功能与生态效益的稳步增长。

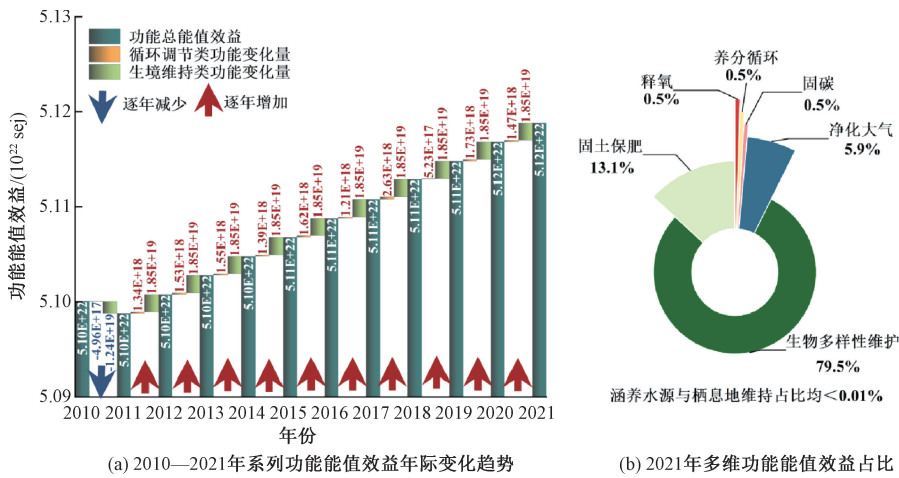


图 2 森林生态系统功能能值效益年际变化趋势及 2021 年功能能值效益占比

Figure 2 Interannual trend of forest ecosystem functional energy benefits and the share of functional energy benefits in 2021

### 3.2 森林生态系统的补偿控制阈值

采用 M-K 与 Pettitt 法对森林功能总能值年际序列进行双重突变检验,结果如图 3 所示,均得到突变年份为 2016 年,M-K 法通过统计数据的正逆序列关系判断突变存在性,Pettitt 法则基于秩统计量进行突变定位,得到相同结论,表明突变信号在统计上具有可靠性。2016 年对应的功能效益为  $5.11 \times 10^{22}$  sej,即为补偿控制阈值。

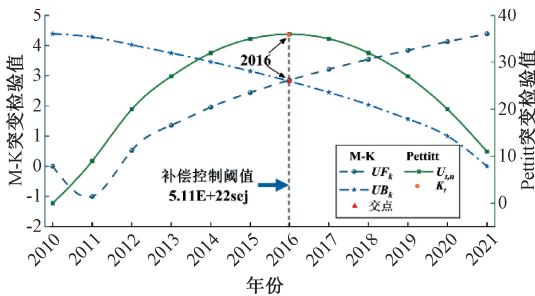


图 3 森林生态系统功能能值效益序列突变检验

Figure 3 Mutation test of the energy benefits sequence of forest ecosystem functions

自 2010 年洛阳市加强林地资源保护以来,森林生态系统功能效益呈现逐年增长趋势,2016 年的功能效益出现突变,表明逐年功能效益的量变增长取得了生态系统稳态优化的质变突破。2016 年河南省人民政府出台了《关于健全生态保护补偿机制的实施意见》(豫政办〔2016〕184 号),明确了河南省森林生态补偿的重要任务,也标志着生态补偿机制进入全面推进阶段。同时,2016 年作为“十三五”开局之年,省政府印发的《关于切实做好“十三五”期间年森林采伐限额管理工作的通知》,将森林覆盖率、蓄积量等多项指标列入考核体系,严格控制采伐量,极大提高森林保护力度。因此,通过趋势检验分

析出 2016 年为突变年,表明森林生态进入更优质的稳定状态,与政策发展及实际情况相符。

### 3.3 补偿标准与价值

#### 3.3.1 补偿标准

建立洛阳市人类-自然复合能值系统,核算表 1 各分项能值,解析 2010—2021 年系统能量流动关系,系统投入总能值和产出总能值的年际变化整体呈现先增后减趋势(图 4(a)),能值货币比率呈现波动减小趋势(减幅 63.84%),森林资源贡献率呈现波动增加趋势(增幅 15.88%),基于此推求补偿标准,由 2010 年的 129.8 元/m<sup>3</sup> 波动增长至 2021 年的 379.3 元/m<sup>3</sup>,增幅为 192.18%(图 4(b))。分析结果可知,人类对森林资源的依赖度增加,并且需要支付的资源成本也在增加,间接促进了资源节约与高效利用,表明了人类对森林从“低成本掠夺式开发”转向“高成本保护性利用”,森林资源价值的凸显也是生态文明建设成效的重要体现。

#### 3.3.2 补偿价值

基于洛阳市年际功能总能值、补偿控制阈值与补偿标准,根据式(17)~式(20)计算补偿年份的补偿价值,结果如图 5 所示。2010—2015 年的功能总效益低于阈值  $5.11 \times 10^{22}$  sej,需补偿。2017—2021 年资源量富余,不补偿。2010—2015 年的补偿资源量呈现先增后减趋势(2010 年至 2015 年的减幅为 77%),而补偿标准呈波动增加趋势(增幅 49%),补偿价值受补偿资源量的影响更大,变化趋势亦呈先增后减趋势,由 2011 年最高值 4 513.4 万元减少至 2015 年的 1 264.3 万元。

补偿资源量是低于补偿阈值的森林生态功能效益的削减量,存在削减则表明在系列内该阶段的功

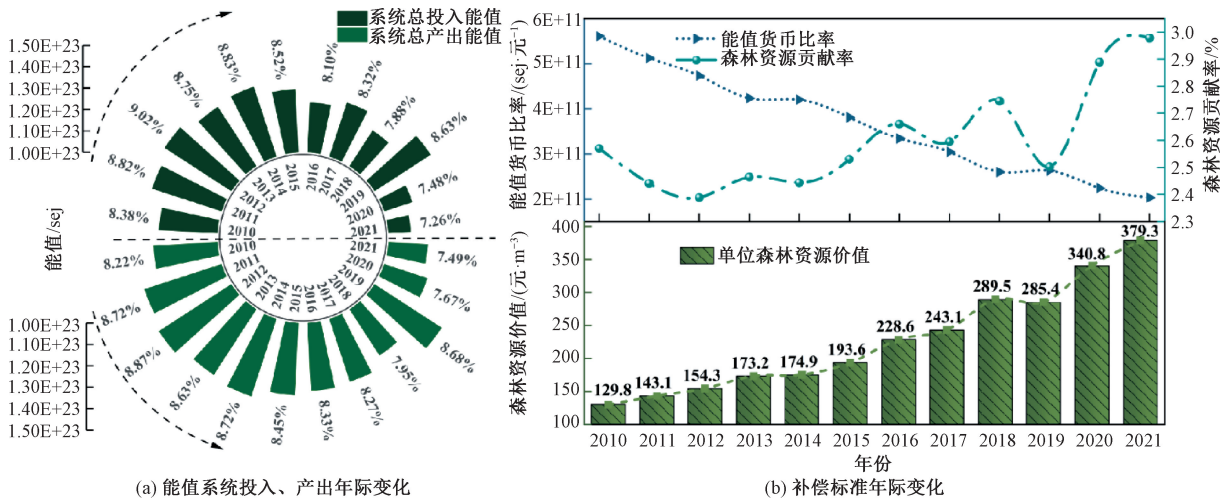


图4 人类-自然复合能值系统投入、产出及补偿标准年际变化

Figure 4 Interannual change of inputs, outputs, and compensation standards of the human-natural composite energy system

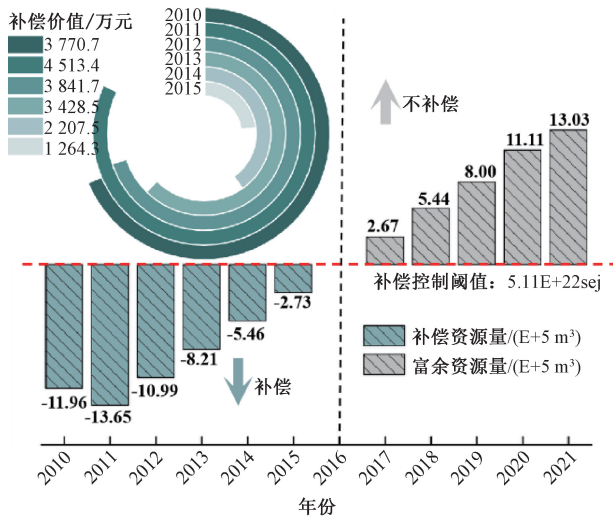


图5 洛阳市森林生态系统补偿价值变化趋势

Figure 5 Trend of compensation value of the forest ecosystem in Luoyang City

能效益偏低,而功能效益与森林面积、蓄积量、覆盖率、生产力等关键生态要素的丰度密切相关,生态补偿能够通过经济手段将森林具有公共属性的生态效益转换为经济价值,促进森林覆盖率提高,林地结构优化,推动林地利用从粗放低效向集约高效转变,促使森林生态系统能够充分发挥其服务功能,形成“补偿—保护—增效”的良性循环。

### 4 结论

本文提出了一种面向森林生态系统服务功能保障的生态补偿理论与方法体系,结合河南洛阳实例研究,具体结论如下:

(1) 基于能值分析理论,并融合多学科方法,提出森林多维功能能值效益量化方法体系,应用 M-K

与 Pettitt 法对功能总能值年际序列进行双重突变检验,确定补偿控制阈值。洛阳市森林功能总能值呈现逐年增长趋势,由 2010 年的  $5.10E+22$  sej 增长至 2021 年的  $5.12E+22$  sej (增幅 0.37%)。突变年份为 2016 年,对应的补偿控制阈值为  $5.11E+22$  sej,确定低于阈值的 2010—2015 年需进行补偿。

(2) 建立人类-自然复合能值系统,解析系统内外各项投入、产出的生态经济流轨迹,核算能值货币比率与森林资源贡献率,进而推求补偿标准(单位森林资源价值)。洛阳市补偿标准呈现出波动增加趋势,由 2010 年的  $129.8$  元/ $m^3$  增长至 2021 年的  $379.3$  元/ $m^3$ ,增幅为 192.18%,表明森林资源的重要性愈发凸显,其价值意义随着生态文明的推进而不断深化。

(3) 结合补偿资源量、补偿标准、需求强度,提出阈值控制下的补偿价值量化方法。洛阳市补偿年份 2010—2015 年对应的补偿价值呈现先增后减趋势,由 2010 年的 3 770.7 万元减少至 2015 年的 1 264.3 万元,主要受补偿阈值下的补偿资源量的影响。森林扩增与质量优化能够提升生态系统服务功能,进而减少生态效益损失与降低补偿成本,成为推动绿色可持续发展的重要力量。

(4) 本文提出了面向森林生态系统功能保障的补偿机制,解析了功能效益阈值控制下人类与森林补偿主客体之间的价值补偿关系,为区域森林生态补偿提供新思路。以洛阳市为实例开展应用研究,主要数据来源于政府网站与年鉴等,可获取性高,理论与方法可推广应用至其他区域。本文对森林生态系统稳态变动的定量描述主要依据突变检验理论,未来可进一步研究森林生态复杂网络在气候、物种、

水文、立地等多要素驱动下的稳态阈值确定方法,为森林生态补偿提供更可靠的判别标准。

## 参考文献:

- [1] ZHANG Y Y, YANG Y J, CHEN Z X, et al. Multi-criteria assessment of the resilience of ecological function areas in China with a focus on ecological restoration [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 119: 106862.
- [2] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗:在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告 [M]. 北京:人民出版社, 2022.
- XI J P. Hold high the great banner of socialism with Chinese characteristics and strive in unity to build a modern socialist country in all respects: report to the 20th National Congress of the Communist Party of China [M]. Beijing: People's Publishing House, 2022.
- [3] 张仕超, 刘竞宇, 冉龙池, 等. 基于提高森林覆盖率目标的跨区县横向生态补偿与供需对接:以重庆市为例 [J]. *生态学报*, 2023, 43(11): 4651-4663.
- ZHANG S C, LIU J Y, RAN L C, et al. Cross-county horizontal ecological compensation and supply-demand docking to increase forest coverage: a case study of Chongqing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4651-4663.
- [4] SOLIÑO M, OVIEDO J L, CAPARRÓS A. Are forest landowners ready for woody energy crops? preferences for afforestation programs in Southern Spain [J]. *Energy Economics*, 2018, 73: 239-247.
- [5] STAPP J, NOLTE C, POTTS M, et al. Little evidence of management change in California's forest offset program [J]. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4: 331.
- [6] 管新建, 石悸锋, 孟钰, 等. 洛阳市生态系统服务功能价值量化及空间分异研究 [J]. *人民黄河*, 2023, 45(9): 111-117.
- GUAN X J, SHI J F, MENG Y, et al. Study on the value quantification and value space differentiation of ecosystem service function [J]. *Yellow River*, 2023, 45(9): 111-117.
- [7] GUAN X J, XU Y J, MENG Y, et al. Emergy benefit and radiation effect of multi-dimensional service function of vegetation ecosystem [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 911: 168493.
- [8] 于鲁冀, 张亚慧, 樊雷, 等. 河南省森林固碳量与碳汇价值评估 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2024, 45(3): 7-13.
- YU L J, ZHANG Y H, FAN L, et al. Evaluation of carbon sequestration and carbon sink value of forests in Henan Province [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2024, 45(3): 7-13.
- [9] GARCÍA-ONTIYUELO M, ACUÑA-ALONSO C, VALE-RO E, et al. Geospatial mapping of carbon estimates for forested areas using the InVEST model and Sentinel-2: a case study in Galicia (NW Spain) [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 922: 171297.
- [10] 许骞骞, 曹先磊, 孙婷, 等. 中国森林碳汇潜力与增汇成本评估:基于 Meta 分析方法 [J]. *自然资源学报*, 2022, 37(12): 3217-3233.
- XU Q Q, CAO X L, SUN T, et al. Assessment of carbon sequestration potential and the cost of increasing carbon sequestration in China: based on meta-analysis method [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(12): 3217-3233.
- [11] CRAGO C L, FEYZOLLAHI M, HARPER R W. Solar power or forests? a cost-benefit analysis of forest land conversion in the northeastern United States [J]. *Land Use Policy*, 2025, 158: 107679.
- [12] 王慧亮, 吴泽宁, 郭溪, 等. 基于生态环境损失的农业生态系统能值分析 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2016, 37(6): 92-96.
- WANG H L, WU Z N, GUO X, et al. Emergy analysis of agricultural ecosystem based on ecological environment loss [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2016, 37(6): 92-96.
- [13] DA ROCHA S J S S, COMINI I B, MORAIS J V T M, et al. Ecological ICMS enables forest restoration in Brazil [J]. *Land Use Policy*, 2020, 91: 104381.
- [14] 潘鹤思, 柳洪志. 跨区域森林生态补偿的演化博弈分析——基于主体功能区的视角 [J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4560-4569.
- PAN H S, LIU H Z. The evolutionary game analysis of cross-regional forest ecological compensation—based on the perspective of the main functional area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12): 4560-4569.
- [15] ARSHAD A. Linking forest ecosystem processes, functions and services under integrative social-ecological research agenda: current knowledge and perspectives [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 892: 164768.
- [16] EDWARDS P D, TOBIAS A J, SHEIL D, et al. Maintaining ecosystem function and services in logged tropical forests [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2014, 29(9): 511-520.
- [17] 王田野, 王平, 吴泽宁, 等. 干旱胁迫下植被生态韧性研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2023, 38(8): 790-801.
- WANG T Y, WANG P, WU Z N, et al. Progress in the study of ecological resilience of vegetation under drought stress [J]. *Advances in Earth Science*, 2023, 38(8): 790-801.
- [18] 徐驰, 王海军, 刘权兴, 等. 生态系统的多稳态与突变 [J]. *生物多样性*, 2020, 28(11): 1417-1430.
- XU C, WANG H J, LIU Q X, et al. Alternative stable states and tipping points of ecosystems [J]. *Biodiversity Science*, 2020, 28(11): 1417-1430.

- [19] GÜÇLÜ Y S. Improved visualization for trend analysis by comparing with classical Mann-Kendall test and ITA[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 584: 124674.
- [20] RYBERG K R, HODGKINS G A, DUDLEY R W. Change points in annual peak streamflows: method comparisons and historical change points in the United States [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124307.
- [21] 杨青, 刘耕源. 森林生态系统服务价值非货币量核算: 以京津冀城市群为例[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(11): 3747-3759.  
YANG Q, LIU G Y. Non-monetary accounting on forest ecosystem services value: case study of forests in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(11): 3747-3759.
- [22] 杨婷, 张代青, 沈春颖, 等. 基于能值分析的流域生态系统服务功能价值评估: 以东江流域为例[J]. *水生态学杂志*, 2023, 44(1): 9-15.  
YANG T, ZHANG D Q, SHEN C Y, et al. Valuation of river basin ecosystem services based on emergy analysis: a case study of Dongjiang River Basin [J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(1): 9-15.

## Regional Ecological Compensation for Forest Ecosystem Service Function Security

MENG Yu<sup>1,3</sup>, LI Linlin<sup>1</sup>, GUAN Xinjian<sup>1</sup>, ZHANG Wenge<sup>2</sup>

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China; 3. Henan Provincial Coal Society, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** Addressing the issues of insufficient consideration for non-market ecosystem services and unclear definition of compensation control thresholds in forest ecosystem compensation, in this paper a regional ecological compensation mechanism oriented toward securing forest ecosystem service functions was proposed. Based on emergy analysis and integrated with multidisciplinary methods, a quantitative evaluation framework for forest ecosystem service functions was established. The M-K and Pettitt methods were jointly applied to the interannual sequence of functional benefits to identify abrupt changes and determine the compensation control threshold. A coupled human-nature emergy system was constructed to trace ecological and economic flows within and beyond the system, compensation standards (i. e., the unit emergy value of forest resources) was defined, and the value compensation relationship between humans and forest systems was quantified with the constraint of functional benefit thresholds. This study provided a new perspective for forest ecological compensation research. The proposed theoretical framework and methodology were applied to Luoyang City in Henan Province. Results showed that the total emergy benefits of forest ecosystem functions exhibited a steady upward trend from 2010 to 2021, with a cumulative increase of 0.37%. The year 2016 was identified as the mutation point, with a compensation control threshold of  $5.11\text{E}+22$  sej. The years 2010—2015, during which the functional benefits were below the threshold, required compensation. During this period, the total compensation value showed a fluctuating decline, decreasing from 37.71 million yuan in 2010 to 12.64 million yuan in 2015. The compensation value was primarily driven by the magnitude of functional benefit reduction below the threshold, which was closely linked to the abundance of key ecological elements within the forest system. Therefore, continuously enhancing forest protection and sustainable management was essential to realize the goal of harmonious coexistence between humans and nature.

**Keywords:** forest ecological compensation; ecosystem service functions; emergy analysis theory; compensation control threshold; unit value of forest resources; Luoyang, Henan