

天然林资源保护工程综合效益评估

杨师帅^{1,2}, 逯 非^{1,3}, 张 路¹

- (1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 京津冀区域生态环境变化与综合治理国家野外科学观测研究站, 北京 100085)

摘 要:天然林资源保护工程(以下简称“天保工程”)是全球最大的生态工程之一,文章从公共工程建设的角度,核算了天保工程的生态、社会和经济效益及投资效率,为我国进一步生态保护和修复工程布局和实施提供重要依据。本研究构建了天然林资源保护工程综合效益评估指标体系,采用生态系统服务物质量和价值量核算方法,对比无工程情景核算天保工程综合效益以及效益费用比。结果表明:与2000年相比,工程区内2015年生态系统服务均有不同程度提升,其中水源涵养提升1.07%、土壤保持提升1.91%、养分固持提升1.69%、固碳释氧提升1.33%和木材资源保有服务提升44.8%,为我国生态安全做出巨大贡献;2000~2015年全国天保工程综合效益总计 2.18×10^{12} 元,生态效益、社会效益和经济效益分别占26%、25%和49%。其中,四川省天保工程综合效益最高,达 4044×10^8 元;全国尺度上,天保工程总体效益费用比为10.7,工程处于盈利状态。重庆市天保工程的效益费用比为全国最高,达38.07。全国和各省天保工程实施状况良好,综合效益远超工程投资,实现了生态、社会、经济效益三者协同增长和森林可持续发展。

关键词:生态工程综合效益;效益费用比;生态系统服务;天然林资源保护工程

中图分类号: X171

文献标志码: A

DOI: [10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2021040002](https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2021040002)

Comprehensive benefit assessment of natural forest protection project

YANG Shishuai^{1,2}, LU Fei^{1,3}, ZHANG Lu¹

- (1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Beijing-Tianjin-Hebei National Observation and Research Station for Eco-Environmental Change and Integrated Management, Beijing 100085, China)

Abstract: Natural Forest Protect Project (NFPP) is the largest ecological project in the world. This paper calculated the comprehensive benefit and investment efficiency of NFPP from the aspect of public project construction, aiming to provide an instructive basis for the planning and implementing ecological protection and restoration projects in China. An integrated index system for the comprehensive benefit assessment of NFPP was established. This paper employed the evaluation methods of physical quantities and monetary value of ecosystem services, and subsequently assessed the comprehensive benefit (CB) and benefit-cost ratio (BCR) of NFPP. Results showed that from 2000 to 2015, water conservation, soil retention, and nutrient retention of the forest ecosystem in the NFPP area were improved by 1.07%, 1.91%, and 1.69%, respectively. Carbon sequestration and oxygen release were improved by 1.33%, and the wood resource conservation were improved by 44.8%. All these enhancements of ecosystem services greatly contributed to China's ecological security. From 2000 to 2015, the comprehensive benefit of NFPP reached 2.18 trillion yuan. Ecological, social and economic benefits accounted for 26%, 25% and 49% of the aggregate benefit, respectively. Among all of the provincial regions, NFPP in Sichuan brought the highest comprehensive benefit of 404.4 billion yuan. On the national scale, the BCR of the NFPP was 10.7, indicating that the project was in a profitable state. The highest provincial BCR of NFPP was 38.07, happened in Chongqing. NFPP ran in good condition both on national scale and province scale. The comprehensive benefit of NFPP far exceeded the project's investments. China achieved a coordinated growth of ecological, social and economic benefit and reached a sustainable forest development due to the implementation of NFPP.

收稿日期: 2021-04-02

基金项目: 国家自然科学基金委员会面上项目(71874182); 国家重点研发计划项目课题(2016YFC0503403); 中国科学院青年创新促进会(2013030)

作者简介: 杨师帅(1994-),男,硕士研究生。研究方向: 区域生态学。E-mail: yss940331@outlook.com

通信作者: 逯 非(1981-),男,研究员。研究方向: 区域生态学。E-mail: feilu@rcees.ac.cn

引用格式: 杨师帅, 逯 非, 张 路. 天然林资源保护工程综合效益评估[J]. 环境保护科学, 2022, 48(5): 18-26.

Keywords: comprehensive ecological project benefit; benefit-cost ratio; ecosystem services; natural forest protect project
CLC number: X171

全球 60% 的生态系统处于退化或不可持续状态,严重威胁到人类的生态安全^[1-2]。针对天然林资源长期过度消耗造成的森林退化,1998 年我国开始试点天保工程。天保工程成效及综合影响一直饱受争议,天保工程对生态恢复做出贡献,也有研究表明严苛的“限伐、禁伐”措施加剧了生态保护与当地社会经济发展之间矛盾,限制了工程实施区域的林业经济的发展,产生负面的社会经济影响^[3-5]。天保工程成效和生态、社会、经济影响的评价研究一直是热门,相关研究经历了从定性研究到定量分析,评价指标体系从单指标到多指标、从生态成效到生态-社会-经济综合效益的发展^[6-10]。目前,我国的天保工程效益评估研究依然存在以下问题:在评估手段上,效益评估指标体系、评价方法、定价系统尚未形成统一标准,导致研究间差异大、可比性较低^[10-11];在评估内容上,有关生态效益的研究较多,社会和经济效益的研究较少难以反映工程带来的综合效益^[2];在评估目标上,天保工程是一项生态系统保护和修复工程,而不是生态系统重建工程,对其效益评估应围绕“生态系统服务功能提升量”展开,但目前大多数研究围绕“生态系统服务产出”展开。

近年中国先后发布《天然林保护修复制度方案》和《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》,我国天然林资源保护和修复即将从区域重点保护进入全面保护阶段。为给后续天然林保护和修复行动开展、制度完善提供科学依据,我们亟需建立一套完备的生态、社会、经济综合效益评估体系对天保工程综合效益进行核算。本研究基于生态系统服务功能量和价值量核算理论,从公共建设项目角度,通过确定天保工程区实施范围、构建天然林资源保护工程综合效益评估体系、对比有工程情景较无工程情景各指标的增量核算 2000~2015 年全国天保工程的生态、社会、经济效益,并采用效益费用比对工程投资效率、工程可行性展开分析,以期进一步为天然林资源保护成效监测和评估提供方法,推动工程综合效益核算纳入生态工程绩效评价体系,完备生态工程建设体系,并为深入探讨生态工程的生态产品价值实现提供数据支持。

1 研究方法数据来源

1.1 数据来源

本研究使用的数字高程模型(DEM)数据来自全球科学院计算机网络信息中心,分辨率为 90 m×90 m;降雨数据来自中国生态系统研究网络数据共享平台;地上生物量数据和生态系统分类数据来自中国科学院遥感与数字地球研究所,分辨率为 90 m×90 m;土壤容重、土壤碱解氮含量、土壤速效磷含量和土壤速效钾含量数据来自国家青藏高原科学数据中心^[12];生态系统服务功能量和价值量核算以及天保工程社会和经济效益评估的相关数据和参数来自前人研究和统计年鉴,将在下文介绍估算方法时详细说明。其中,涉及货币单位的指标均利用各年消费者物价指数转为 2010 年价格^[13]。

1.2 天保工程区确定

大量生态保护和修复工程实践导致各生态工程范围的重叠,重复计算影响综合效益评估^[14]。避免重复计算成为生态工程综合效益评估的一个重要问题。参考 LU et al^[15] 的研究,利用遥感解译分析生态分类图变化划定天保工程范围,并排除天保工程区内退耕还林工程的干扰。通过 2000、2010 和 2015 年生态系统分类图,将 2000~2010 及 2010~2015 年生态系统类型变化分为 3 类:持续为森林(封山育林);农田转森林(退耕还林);其他转森林(人工造林、飞播造林等)。本研究认为在天保工程期间内始终为森林的土地和从其他非农林地转为林地的土地为天保工程的实施区,并在该区域展开综合效益评估。

1.3 天然林资源保护工程综合效益评价指标体系

本研究从水源涵养、土壤保持、养分固持、固碳释氧和物种保育 5 个方面对工程生态效益进行核算,用森林游憩对工程社会效益进行核算,用木材资源保有对工程经济效益进行核算。这里需要注意的是林木经济价值和其他价值存在权衡关系,木材砍伐后进入市场变现,随后其生态和社会价值也随之消失,为避免重复计算,在这里强调本文讨论的经济效益是潜在经济效益。基于科学性、可价值化和数据可获得性 3 个原则,采用 3 个一级指标、7 个二级指标和 11 个三级指标构建了天保工程综合效益评估指标体系,见表 1。

表 1 天然林资源保护工程综合效益评价体系

一级指标	二级指标	三级指标
生态效益	水源涵养	水量调节
		水质净化
		洪水调蓄
	土壤保持	减少泥沙淤积
		减少土地荒废
	养分固持	养分固持 (N、P、K)
	固碳释氧	固碳 释氧
社会效益	物种保育	物种保育
	森林游憩	森林游憩
经济效益	木材资源保有	木材资源保有

1.4 天保工程综合效益评估方法

1.4.1 天保工程效益的定义和评估方法 效益是生态系统服务产能因工程投资而增加的部分,即较无工程情景下服务供给增加量,其中包括生态、社会、经济效益 3 部分。基于美国环境保护局(EPA)^[16]和王效科等^[17]对生态效益的定义,我们提出生态工程效益的定义为“生态工程引起生态系统功能或过程改变带来人类福祉的变化”。此处“变化”是实施和未实施工程之间的差异,即有无工程情景下各指标价值量的差值是天保工程的效益,生态效益、社会效益和经济效益三者之和是天保工程综合效益。

森林资源清查数据显示我国天然林资源动态呈“V”形,上世纪后期我国天然林资源处于退化状态,直至 2000 年各大生态工程的兴建才出现转折点^[19]。因此我们可以合理推断“若未实施天保工程现有工程区内的林地至少不会增加”,因此在本文中我们合理假设“若未实施天保工程,这些林地及其产生的生态效益是一个定量,无年际间变化”。我们假设:1)无工程情境中 2000~2015 年每年的生态系统服务功能量和价值量均为一个定值,等于 2000 年的生态系统服务功能量和价值量;2)在大尺度上森林的变化是线性的,森林的面积、蓄积和生态系统服务的变化均为线性过程。我们基于 2000、2010 和 2015 年 3 年数据通过线性插值核算 2000~2015 各年数据以及累积量,降低时间跨度过大带来的误差。基于天保工程实施情景与无工程情景比较的功能量增量以及生态系统服务价值核算方法

评估天保工程的生态、社会和经济效益,见式(1):

$$CB = B_{eco} + B_s + B_{econ} = BWC + BSR + BFM + BCO + BSC + BFR + BWRC \quad (1)$$

式中: CB 为天保工程综合效益,元; B_{eco} 为天保工程生态效益,其中包括 BWC 水源涵养服务效益、 BSR 土壤保持服务效益、 BFM 养分固持服务效益、 BCO 固碳释氧服务效益、 BSC 物种保育服务效益,元; B_s 为天保工程社会效益,其中包括 BFR 森林游憩服务效益,元; B_{econ} 为天保工程经济效益,其中包括 $BWRC$ 木材资源保有服务效益,元。

1.4.2 指标功能量和价值量的核算方法 (1)水源涵养服务功能量和价值量

水源涵养服务功能量采用水量平衡法,调节水量服务价值量采用替代工程法,净化水质价值量服务采用市场价格法,洪水调蓄价值量采用替代成本法,见式(2~3):

$$WC = A \times (P - ET - C) \quad (2)$$

$$VWC = VWR + VWP + VFC = WC \times CRB + WC \times PW + WC \times LF \quad (3)$$

式中: WC 为水源涵养服务功能量, m^3/a ; A 为工程区内森林面积, m^2 ; P 为平均降雨量, mm ; ET 为生态系统蒸散量, mm ; C 为地表径流量, mm 。 VWR 为调节水量服务价值量, 元/ a ; VWP 为水质净化服务价值量, 元/ a ; VFC 为洪水调蓄服务价值量, 元/ a , CRB 为水库单位库容造价^[19], 元/ m^3 , PW 为居民用水价格^[20], 元/ m^3 ; LF 为单位水量平均洪涝灾害经济损失^[10], 元/ m^3 。

(2)土壤保持服务功能量和价值量

土壤保持服务功能量采用 USLE 通用水土流失方程,减少泥沙淤积服务价值量采用替代工程法,避免土壤荒废服务价值量采用机会成本法,见式(4~5):

$$SR = A \times R \times K \times L \times S \times (1 - C) \quad (4)$$

$$VSR = VRS + VDC = SR \times [a \times CRB + OC / (bd \times st)] \quad (5)$$

式中: SR 为土壤保持服务功能量, t/a ; R 为降雨侵蚀力因子, $MJ \cdot mm / (hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 为土壤可蚀性因子, t/hm^2 ; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为植被覆盖因子。 VSR 为土壤保持服务效益, 元/ a ; VRS 为减少泥沙淤积服务效益, 元/ a ; VDC 为减少土地荒废服务效益, 元/ a ; a 为泥沙滞留系数, 取 0.5^[21]; OC 为土

地机会成本, 元/km², 采用 2010 年我国 3 种粮食平均每亩现金收益^[22]; bd 为土壤容重, t/m³; st 为土壤厚度, 取 0.5 m。

(3) 养分固持服务功能量和价值量

养分固持服务功能量和价值量参考《森林生态系统服务评估规范》^[23], 本研究仅核算以水解氮、速效磷、速效钾形式存在的养分, 见式(6~7):

$$N_iR = SR \times N_i \quad (6)$$

$$VFM = \sum N_iR \times p_i \quad (7)$$

式中: N_iR 为养分 i 固持服务功能量, t/a; N_i 为土壤中养分 i 含量, %; VFM 为养分固持服务价值量, 元/a; p_i 为养分 i 化肥的价格^[24], 元/t;

(4) 固碳释氧服务功能量和价值量

固碳服务功能量采用固碳速率法^[15], 释氧服务功能量采用光合作用方程法, 固碳服务价值量采用碳税法, 释氧服务价值量采用市场价格法, 见式(8~10):

$$CS = A \times CSR \quad (8)$$

$$OR = 32/12 \times CS \quad (9)$$

$$VCO = VCS + VOR = CS \times (44/12 \times PC + 32/12 \times PO) \quad (10)$$

式中: CS 为固碳服务功能量, t/a; OR 为释氧服务功能量, t; CSR 为森林固碳因子^[15], kgC/(hm²·a); VCO 、 VCS 、 VOR 分别为固碳释氧、固碳和释氧服务价值量, 元/a; PC 为碳配额交易平均价格^[25], 元/t; PO 为医用氧气价格^[26], 元/t。

(5) 物种保育服务价值量

物种保育价值量采用当量因子法^[27], 见式(11):

$$VSC = VEFSC \times A \quad (11)$$

式中: VSC 为物种保育服务效益, 元/a; $VEFSC$ 为森林生态系统单位面积物种保育价值当量因子, 元/(hm²·a), 参考王兵等^[29]对我国各省森林生态系统物种保育价值评估的结果。

(6) 森林游憩服务价值量

森林游憩服务价值量采用当量因子法^[27], 见式(12~13):

$$VFR = ARNP \times A \times \beta \quad (12)$$

$$ARNP = INP/ANP/IRCL/100 \quad (13)$$

式中: VFR 为森林游憩服务效益, 元/a; $ARFR$ 为单位面积森林公园年收入, 元/(m²·a); β 为森林开发系数, 根据国家对保护区的有关规定^[29], “大型森林生

态保护核心区的面积要超过保护区总面积的 50%”, 因此在此处本研究认为工程的森林游憩服务发生在 50% 的森林面积上, β 取 0.5。 INP 为森林公园年收入^[30], 元/a; ANP 为森林公园面积^[30], m²; $IRCL$ 为特定年份居民消费水平指数, 查阅《中国统计年鉴》^[31] 可得, 本研究认为森林游憩收入的增加主要包括社会影响的提升和居民生活水平的提高两方面, 利用居民消费水平指数 $IRCL$ 剔除后者对森林游憩收入的影响。

(7) 木材资源保有服务功能量和价值量

木材资源保有服务功能量依据森林生物量和蓄积量之间存在线性关系^[32], 木材资源保有服务价值量采用市场价格法, 见式(14~15):

$$WRC = AGB_{nftp}/AGB_{province} \times FSV_{province} \times Or \quad (14)$$

$$VWRC = WRC \times PT \quad (15)$$

式中: WRC 为木材资源保有量, m³; AGB_{nftp} 工程区内森林生物量, t; $AGB_{province}$ 为全省森林生物量, t; $FSV_{province}$ 为全省森林蓄积, m³; Or 为出材率, 取 70%^[33-35]; $VWRC$ 为木材资源保有服务效益, m³; PT 为原木价格, 取 604 元/m³^[36]。

1.4.3 指标功能量增量和效益评估方法 除木材资源保有指标外, 各指标的功能量增量和效益的计算, 见式(16~17):

$$AES = \text{average}(ES_{2000} + ES_{2010}) \times 11/2 + \text{average}(ES_{2010} + ES_{2015}) \times 6/2 - ES_{2010} \quad (16)$$

$$BES = \text{average}(VES_{2000} + VES_{2010}) \times 11/2 + \text{average}(VES_{2010} + VES_{2015}) \times 6/2 - VES_{2010} \quad (17)$$

木材资源保有指标的功能量增量和效益的计算, 见式(18~19):

$$AES = ES_{2015} - ES_{2000} \quad (18)$$

$$BES = VES_{2015} - VES_{2000} \quad (19)$$

式中: AES 为各指标功能量增量, 单位同各功能量; ES_{2000} 、 ES_{2010} 、 ES_{2015} 为 2000、2010、2015 各指标的功能量; BES 为各指标的效益, 元; VES_{2000} 、 VES_{2010} 、 VES_{2015} 为 2000、2010、2015 各指标的价

1.5 天保工程效益费用比评估方法

效益费用比 (BCR) 常用在资本预算 (Capita Budgeting) 中, 反映一项工程的获利能力, $BCR > 1$ 表明在当前预算投资下项目可为投资者带来正净收益。本研究中利用 BCR 作为衡量天保工程获利

能力的指标,并用来探索工程收益和工程投资之间的相对关系。当 $BCR > 1$ 时,表示 2000 ~ 2015 年天保工程的效益超过了投资,净效益为正,见式(20):

$$BCR = CB/IEF \quad (20)$$

式中: BCR 为天保工程的效益费用比; IEF 为天保工程投资额,数据来源《中国林业统计年鉴 2000—2015》^[30]。

2 结果与分析

2000 年全国天保工程区内有林地 $1.12 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 2015 年增加到 $1.14 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 共增加 $157.65 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 增长率为 1.4%。各省份(市、自治区)天保工程区内林地面积均呈增长趋势。其中,内蒙古工程区内林地面积增加 $118.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 远超其他省份,占全国工程区林地增长量的 75.24%, 增长率远

高于其他各省,较 2000 年增长 8.5%。天保工程通过限伐、禁伐减少天然林利用,并依靠自然恢复和人工辅助天然林恢复,工程区内天然林资源保持增长但增长速率存在地域差异,相较内蒙古其他工程区内森林面积增长较慢,见表 2。

2000 ~ 2015 年,天保工程区累计涵养水源 $30\,180 \times 10^8 \text{ m}^3$, 固土 $6\,951 \times 10^8 \text{ t}$, 固持碱解氮 $116.3 \times 10^8 \text{ t}$, 固持速效磷 $4.34 \times 10^8 \text{ t}$, 固持速效钾 $100.6 \times 10^8 \text{ t}$, 固碳 $11.45 \times 10^8 \text{ t}$, 释氧 $30.54 \times 10^8 \text{ t}$, 森林蓄积增长到 $81.48 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。与无工程情景相比,工程区水源涵养服务增加 $169.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 土壤保持服务量增加 38.07×10^8 , 氮固持服务增加 $0.48 \times 10^8 \text{ t}$, 磷固持服务增加 $200 \times 10^4 \text{ t}$, 钾固持服务增加 $5\,300 \times 10^4 \text{ t}$, 固碳服务增加 $496.1 \times 10^4 \text{ t}$, 释氧服务增加 $1\,323 \times 10^4 \text{ t}$, 森林蓄积增加 $25.17 \times 10^8 \text{ m}^3$, 见表 3。

表 2 2000 ~ 2015 a 天然林资源保护工程生态系统服务功能量及增量

省(市、自治区)	水源涵养		土壤保持		固氮		固磷		固钾		固碳		释氧		木材资源保有	
	2000 ~ 2015*/ 10^{10} mm^3	增量**/ 10^8 m^3	2000 ~ 2015 $/10^9 \text{ t}$	增量 $/10^7 \text{ t}$	2000 ~ 2015 $/10^8 \text{ t}$	增量 $/10^5 \text{ t}$	2000 ~ 2015 $/10^6 \text{ t}$	增量 $/10^4 \text{ t}$	2000 ~ 2015 $/10^8 \text{ t}$	增量 $/10^5 \text{ t}$	2000 ~ 2015 $/10^7 \text{ t}$	增量 $/10^4 \text{ t}$	2000 ~ 2015 $/10^7 \text{ t}$	增量 $/10^5 \text{ t}$	2015 $/10^7 \text{ mm}^3$	增量 $/10^7 \text{ mm}^3$
山西	2.9	1.3	26.9	25.2	2.9	20.5	10.8	10.1	3.6	34.3	2.1	0.3	5.6	0.1	8.9	4.7
内蒙古	7.5	22.3	24.8	30.5	7.2	68.5	25.3	22.4	4.6	49.4	10.5	184.1	28.1	49.1	128.7	38.6
吉林	8.9	1.3	24.6	2.8	8.0	8.1	24.8	2.6	3.9	4.2	16.0	18.2	42.7	4.8	70.9	15.5
黑龙江	10.5	2.5	27.9	8.5	9.5	29.5	31.4	10.6	5.2	17.2	37.2	110.5	99.3	29.5	120.5	35.2
河南	2.6	0.1	11.1	5.4	1.5	6.2	6.0	2.8	1.4	7.0	1.9	0.2	5.1	0.1	7.2	4.4
湖北	26.9	21.2	29.3	9.0	4.1	11.9	15.0	4.1	3.7	10.8	7.0	10.6	18.6	2.8	20.9	12.0
海南	1.3	0.9	17.8	7.1	2.0	7.1	7.0	2.7	1.6	5.7	1.9	7.9	5.1	2.1	13.8	7.6
重庆	24.5	24.0	32.4	27.2	3.4	27.1	14.8	12.5	3.7	29.9	0.9	0.2	2.4	0.1	18.4	11.1
四川	102.0	18.1	179.3	55.9	32.9	75.4	122.5	28.7	26.6	70.8	4.6	0.4	12.3	0.1	175.4	36.8
贵州	26.6	45.1	38.0	22.0	4.3	24.6	20.2	11.0	5.7	30.0	1.3	2.1	3.5	0.5	26.9	15.1
云南	54.6	3.1	135.5	36.1	19.3	45.0	72.0	17.8	19.0	48.2	2.9	1.1	7.8	0.3	113.7	36.8
西藏	3.1	<0.1	3.0	1.0	0.8	3.0	3.0	1.0	0.6	1.8	0.1	<0.1	0.4	<0.1	7.8	<0.1
陕西	24.2	16.0	108.7	88.9	14.2	75.9	58.7	40.1	15.3	120.3	13.0	12.0	34.7	3.2	45.4	16.5
甘肃	2.1	6.4	28.7	52.1	4.5	63.8	17.1	29.4	4.6	82.1	6.4	90.6	17.1	24.2	22.6	7.9
青海	1.4	0.6	5.2	5.5	1.3	11.3	3.4	3.4	0.9	8.6	3.6	8.6	9.5	2.3	4.4	1.1
宁夏	0.2	0.8	1.1	3.1	0.1	2.2	0.8	1.8	0.3	5.9	0.5	6.6	1.3	1.8	0.8	0.4
新疆	2.4	6.0	0.9	0.5	0.2	0.9	0.6	0.3	0.1	0.7	4.5	42.8	11.9	11.4	28.6	8.3
合计	301.8	169.7	695.1	380.7	116.3	480.7	433.6	201.3	100.6	526.9	114.5	496.1	305.4	132.3	815.1	252.0

注: *, 2000~2015年累计功能量; **, 较无工程情景服务功能量的增量。

表 3 2000 ~ 2015 a 天然林资源保护工程综合效益及效益费用比

省（市、自治区）	生态效益/10 ⁹ 元	社会效益/10 ⁹ 元	经济效益/10 ¹⁰ 元	综合效益/10 ¹⁰ 元	投资/10 ⁹ 元	效益费用比
山西	23.6	2.1	2.0	4.6	4.4	10.3
内蒙古	102.0	26.4	16.3	29.2	27.6	10.6
吉林	7.8	24.1	6.6	9.8	17.4	5.6
黑龙江	31.0	7.3	14.9	18.7	65.9	2.8
河南	5.4	2.1	1.9	2.6	1.1	23.7
湖北	21.3	110.0	5.1	18.2	4.8	38.0
海南	6.9	0.0*	3.2	3.9	1.3	30.8
重庆	34.5	105.53	4.7	18.7	4.9	38.1
四川	67.0	182.10	15.5	40.4	26.2	15.4
贵州	45.5	52.07	6.4	16.1	5.6	28.6
云南	41.2	9.15	15.5	20.6	13.3	15.5
西藏	1.9	<0.1	<0.1	0.2	1.3	1.6
陕西	90.8	15.64	7.0	17.6	12.6	14.0
甘肃	74.6	0.0*	3.3	10.7	9.0	11.9
青海	10.3	0.86	0.5	1.6	3.6	4.3
宁夏	4.7	<0.1	0.2	0.7	1.4	4.8
新疆	9.0	0.5	3.5	4.5	3.3	13.6
合计	577.3	537.8	106.5	218.0	203.7	10.7

注：*，因工程社会效益不可能为负，这里认为天保工程在海南省、甘肃省产生社会效益为0。

工程区内每年提供大量生态系统服务, 2000 ~ 2015 年除木材资源保有服务外, 各服务因工程实施带来的增量占总服务的比例均低于 0.6%。人类的保护和恢复行动带来的服务提升仅占自然本身提供的小部分。

2000 ~ 2015 年天保工程综合效益合计 26 370×10⁸ 元, 生态效益合计 5 773×10⁸ 元, 社会效益合计 5 378×10⁸ 元, 经济效益合计 10 650×10⁸ 元, 见表 3。其中, 经济效益占比 49%, 构成了工程综合效益的主要部分, 得益于森林得到保护后蓄积的高增长和原木价格相较其他生态产品单价较高。生态效益略高于社会效益, 占比 26%, 社会效益占比 25%。2000 ~ 2015 年天保工程累计投入资金合计 2 036×10⁸ 元, 效益费用比达 10.7。天保工程开展情况良好, 整体呈收益的状态。天保工程区效益费用比也均>1, 天保工程均呈盈利状态。其中, 重庆市效益费用比最高达 38.07, 湖北省次之为 37.98。效益费用比南方工程区普遍高于北方工程区。天保工程综合效益的结构组呈现出地域分异, 按照综合效益的主要组成部分可将工程区分为 3 种类型, 见表 4。

表 4 天然林资源保护工程综合效益结构

经济效益主体型	生态效益主体型	社会效益主体型
内蒙古、黑龙江、吉林、河南、湖北、海南、云南、贵州、新疆	山西、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏	重庆、四川

经济效益主体型: 包括内蒙古、黑龙江、吉林、河南、湖北、海南、云南、贵州和新疆; 生态效益主体型: 包括山西、西藏、陕西、甘肃、青海和宁夏; 社会效益主体型: 包括重庆、四川。经济效益主体型的工程区, 除内蒙古、新疆外, 地处水热条件较好湿润半湿润区域, 较好的气候为森林生长创造了条件, 林木增长迅速, 林木资源保有效益较突出。其中, 内蒙古、新疆由于工程区内新增森林较多导致的经济效益突出。生态效益主体型工程区大多位于我国中部、西北部干旱半干旱区域, 因环境的恶劣使得这些地方森林生长受到限制, 森林游憩也未得到充分开发, 生态效益更突出。社会效益主体型工程区只有 2 个省(市)份重庆和四川, 其生态效益大、森林旅游开发较充分、森林蓄积增长量高, 是

工程实施的范例。天保工程区间综合效益的结构差异只是暂时的,经济效益增长速度较生态和社会效益慢,随着工程持续实施各省生态和社会效益占比会逐渐增加构成综合效益的主体。

3 结论与讨论

我们运用生态系统服务理论和生态工程效益的概念,结合天保工程的目标和前人的研究成果,构建了天然林资源保护工程综合效益评价指标体系和各指标评估及综合效益计算方法,对全国天然林资源保护工程综合效益和效益费用比进行评估研究。研究结果显示,2000~2015 年天保工程综合效益高于总投资,工程呈盈利状态。四川综合效益最高,重庆市效益费用比最高。综合效益结构组

成、投入产出比表现出了地域差异。全国尺度上,天保工程经济效益高于生态效益、高于社会效益。在省级尺度上,又表现出了地域分异性,形成了以经济效益>生态效益>社会效益在内的共 4 种效益结构。本研究通过工程区实际生态系统服务价值减去无工程情景天保工程区内服务价值得到生态工程实施带来的综合效益,以反映生态工程实际成效和效率,结果得出天保工程综合效益占工程区总服务价值的 1.5%,生态效益占生态系统服务总价值的 0.4%,工程带来的服务提升占比较低。天保工程综合效益评估一直是学术界的研究热点,生态学家开展了大量研究评估工程效益,不同研究间因评估对象、指标体系、核算方法和工程区界定间的差异,导致工程评估结果差距较大,见表 5。

表 5 天然林资源保护工程效益评估

研究区	t/a	评估对象	效益类型	主要指标*	主要结果	参考文献
中国	1999~2017	生态系统服务价值	生态	积累营养物质、净化大气环境等	2017年效益为79 723.2×10 ⁸ 元/a	MA et al ^[37]
吉林(局部)	2004~2015	生态系统服务价值	生态	积累营养物质、净化大气环境等	2015年效益为1 553.99×10 ⁸ 元/a	王慧等 ^[38]
新疆	1998~2010	生态系统服务价值	生态	积累营养物质、净化大气环境等	2015年效益为174.09×10 ⁸ 元/a	兰洁等 ^[39]
山西	2016	生态系统服务价值	生态	积累营养物质、净化大气环境等	2016年工程区内生态效益为940.46×10 ⁸ 元/a	范琳等 ^[40]
			社会	森林生态补偿资金、林业职工收入	2016年工程区内社会效益为22.35×10 ⁸ 元/a	
			经济	林木产品价值、林副产品价值、林业产业价值	2016年工程区内经济效益为230.21×10 ⁸ 元/a	
山西	2010~2015	特定年份较基准年生态系统服务价值增量	生态	积累营养物质、净化大气环境等	2015年效益为319.41×10 ⁸ 元	李娜娜等 ^[41]
			经济	林木产品效益、林副产品效益、职工年均收入等	2015年效益为96.6×10 ⁸ 元	
甘肃(局部)	2000~2010	特定年份较基准年生态系统服务价值增量	生态	涵养水源、保育土壤、固碳释氧等	2015年效益为174.85×10 ⁸ 元/a	郭生祥等 ^[42]
中国西南	1998~2008	特定年份较基准年生态系统服务价值增量	生态	涵养水源、保育土壤、固碳释氧等	2015年工程区内生态效益为21 106.2×10 ⁸ 元/a	国政等 ^[43]
中国	2000~2015	工程期内有无工程情景间生态系统服务价值增量	生态	涵养水源、保育土壤、固碳释氧等	2015年效益为1 266.16×10 ⁸ 元	本文
			社会	森林游憩	2015年效益为554.35×10 ⁸ 元	
			经济	木材资源保有	2015年效益为1 430.15×10 ⁸ 元	

注: *为体现研究间的差异,该列主要列取了其他研究于本研究有差异的指标。

根据评估对象可将现有研究分为 2 大类,一是对特定年份生态系统服务价值的评估,二是对特定年份较基准年生态系统服务价值增量的评估,通过对比表 5 中的研究,可以发现前者的评估结果显著大于后者,文献 [37] 研究结果是本文的 62 倍,在吉林、西南、山西和新疆的研究也高于本研究对应的

区域,山西的两项研究之间差异也非常显著。将“工程区内特定年份生态系统服务”作为工程效益,忽略了未开展天保工程的林地虽然有可能退化,但仍可产生客观的生态系统服务,将自然本底和工程增益混为一谈会导致高估工程效益。保护性生态工程综合效益评估与修复性生态工程的差别也在

此,退耕还林等以生态重建为主要手段的生态工程,原土地利用方式生态系统服务供给能力弱,工程的效益近似等于生态系统服务;而保护为主的这类生态工程在本无工程情景下也依然可以供给可观的生态服务,我们需要在效益评估中考虑这两类生态工程的差异。在工程效益结构上,本研究认为经济效益>生态效益>社会效益,而范琳、国政等人研究认为生态效益>经济效益>社会效益,这也是对效益认识不同造成的,对2000~2015年间天保工程区各种服务价值总量(而非效益)的结构进行讨论也可以得到和他们一样的结论如表3,生态系统服务价值结构为生态属性服务价值占主体(占总服务价值96%),以木材资源保有为主的经济属性服务价值次之(3%),以森林游憩为主的社会属性服务价值最低(1%)。

在指标体系构建上本文与前人研究存在差异,我们认为消减粉尘、滞纳污染物、调节气候等被生态系统服务最终产品:1)提高生物栖息地质量,保护生物多样性;2)提高森林游憩吸引力,增强森林旅游对游客的吸引力。我们为避免重复计算未对上述常用评价指标单独进行核算。在经济效益核算中,我们认为保护和恢复工程区内森林带来的蓄积增长是工程主要可核算的经济效益,但是森林资源一旦转为经济效益,其它调节功能也将随之消失,所以本文讨论的经济效益是一种潜在经济效益。

本研究主要的不确定性来源是无工程情景构建相对简单,即基于我国历史天然林变化趋势对无工程情景上限模拟(研究中为评估基准年2000年),认为无工程情况下工程区森林基本保持原状。但实际情况,森林生态系统恢复力可能高于或低于人类利用压力。当无工程情景中恢复力高于利用压力,森林生态系统处于恢复状态,本研究高估了工程效益;相反,本研究则低估了工程效益。本文还缺乏气候因素对工程效益影响的讨论,有研究指出工程区生态恢复成效实际受生态工程和气候变化两方面的影响^[44],并以我国三江源地区为例厘定气候因素对工程效益的贡献达30%。如何更准确设定无工程情景、厘定气候对工程效益影响,进一步对工程效益进行更加准确地评价,将是今后研究的一个重点。

我国生态工程投资来源单一、投入不足、资金配置依赖中央投入、地方和社会资金配置占比低、

工程投资相对工程效益较少等问题^[45-46]。充足的资金对生态工程的持续性尤为重要,大量研究呼吁应加大投资力度、多元化资金渠道^[3,9,47]。在2020年《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》和2021年《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》中均对新时期生态保护和修复提出新的要求,要刺激社会资本进入生态保护与生态修复,建立和健全生态产品价值化途径。天保工程具有强公益性和外部性,生态产品实现方式主要为政府付费^[48],未建立起多元投入机制。2019年国家出台《天然林保护修复制度方案》明确提出要完善财政支持政策和多元投入机制,将外部环境成本内部化,避免市场机制失灵,激发工程参与者积极性。本研究通过效益评估帮助定位工程区可提供的生态产品及其价值,为确定生态产品利益相关者、进一步通过“使用者、受益者、污染者向保护者付费”付费模式构建生态产品交易平台和机制、生态工程的生态产品价值实现提供科学依据,保证工程实施、工程资金来源的持续性和保护者的积极性。本研究对天保工程效益核算从公共工程角度进行重新定义,评估结果相较于前人对付费者更公平和容易接受,可依据本研究结果为工程综合效益建立交易平台、政府进行生态补贴提供更合理的依据,为未来天保工程的进一步规划实施提供科学根据。

参考文献

- [1] CHOPRA K, LEEMANS R, KUMAR P, et al. Ecosystems and human well-being: policy responses[M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [2] 王聪, 伍星, 傅伯杰, 等. 重点脆弱生态区生态恢复模式现状与发展方向[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7333-7343.
- [3] WEYERHAEUSER H, WILKES A, KAHRL F. Local impacts and responses to regional forest conservation and rehabilitation programs in china's northwest Yunnan province[J]. *Agricultural Systems*, 2005, 85(3): 234-253.
- [4] XU M, QI Y, GONG P. China's new forest policy[J]. *Science*, 2000, 289(5487): 2049-2050.
- [5] ZHAO G, SHAO G. Logging restrictions in China: a turning point for forest sustainability[J]. *Journal of Forestry*, 2002, 100(100): 34-37.
- [6] 王希义, 彭淑贞, 徐海量, 等. 大型输水工程的生态效益与社会经济效益评价——以塔里木河下游为例[J]. *地理科学*, 2020, 40(2): 308-314.
- [7] 国家林业局. 退耕还林工程生态效益监测国家报告[M]. 北京:

- 中国林业出版社, 2014.
- [8] FERRARO P J, PATTANAYAK S K. Money for nothing? a call for empirical evaluation of biodiversity conservation investments [J]. *PLOS Biology*, 2012, 4(4): e105.
- [9] LIU J, LI S, OUYANG Z, et al. Ecological and socioeconomic effects of china's policies for ecosystem services[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(28): 9477 – 9482.
- [10] 宋昌素, 欧阳志云. 面向生态效益评估的生态系统生产总值 GEP 核算研究——以青海省为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(10): 3207 – 3217.
- [11] 周鹏, 周婷, 彭少麟. 生态系统服务价值测度模式与方法[J]. *生态学报*, 2019, 39(15): 5379 – 5388.
- [12] SHANGGUAN W, DAI Y J, LIU B Y, et al. A china data set of soil properties for land surface modeling (EI)[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2013, 5(2): 212 – 224.
- [13] 王雅晴, 谭德明, 张佳田, 孟楠, 韩宝龙, 欧阳志云. 我国城市发展与能源碳排放关系的面板数据分析[J]. *生态学报*, 2020, 40(21): 11.
- [14] 杨武, 陆巧玲, 周婷. 生态保护项目绩效评估的技术方法体系[J]. *生态学报*, 2020, 40(5): 1779 – 1788.
- [15] LU F, HU H, SUN W, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16): 4039 – 4044.
- [16] OWENS N, IOVANNA R, LOVELL S, et al. Ecological benefits assessment strategic Plan [M]. Washington DC: EPA, 2006.
- [17] 王效科, 杨宁, 吴凡, 等. 生态效益及其特性[J]. *生态学报*, 2019, 39(15): 5433 – 5441.
- [18] WU Q B, DUAN X N, DENG L B, et al. Carbon sequestration and its potential by forest ecosystems in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 517 – 524.
- [19] 张文, 王孝康, 刘波, 等. 四川三十年森林资源动态变化分析 (1979 年~2007 年)[J]. *四川林勘设计*, 2013(1): 7 – 12.
- [20] 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所. 森林生态系统服务功能评估规范[S]. 北京: 国家林业局. 2020: 28.
- [21] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴. 1991[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1991.
- [22] 中国物价年鉴编委会. 中国物价年鉴[M]. 北京: 《中国物价年鉴》编辑部, 2011.
- [23] 汪树生, 杨光道. 安徽省林业重点工程效益评价[J]. *安徽农业科学*, 2003, 31(5): 781 – 783.
- [24] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [25] 国家统计局国际统计信息中心. 世界经济运行报告[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [26] 北京市碳排放权电子交易平台. 北京市碳排放权交易周报[EB/OL]. (2015-01-19)[2021-02-19]. <http://images.bjets.com.cn/www/201501/20150119104654138.pdf>.
- [27] 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所. 森林生态系统服务功能评估规范[S]. 北京: 国家林业局, 2008.
- [28] 王兵, 郑秋红, 郭浩. 基于 Shannon-Wiener 指数的中国森林物种多样性保育价值评估方法. 林业科学研究[J]. 2008(2): 268 – 274.
- [29] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740 – 1746.
- [30] 国家林业局. 中国林业统计年鉴 2000—2015[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000 – 2015.
- [31] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [32] 国家林业局. 自然保护区工程项目建设标准: 试行[M]. 北京: 自然保护区工程项目建设标准: 试行, 2002.
- [33] 王红彦, 左旭, 王道龙, 等. 中国林木剩余物数量估算[J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(2): 29 – 38.
- [34] 张春利, 田志叶, 刘吉, 等. 林业剩余物资源量测算方法初探[J]. *国际木业*, 2020, 50(5): 46 – 49.
- [35] 刘曼红. 林业“三剩物”的开发利用现状和前景概述[J]. *林业调查规划*, 2010, 35(3): 62 – 63.
- [36] 中国环境与发展国际合作委员会. 中国自然资源定价研究[M]. 北京: 环境科学出版社, 1997.
- [37] MA Z, XIA C, CAO S. Cost-Benefit Analysis of China's Natural Forest Conservation Program[J]. *Journal for Nature Conservation*, 2020, 55: 125818.
- [38] 王慧, 王兵, 牛香, 等. 长白山森工集团天保工程生态效益动态变化[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(5): 86 – 93.
- [39] 兰洁, 张毓涛, 师庆东, 等. 新疆天然林生态系统服务功能价值评估[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(4): 289 – 296.
- [40] 范琳. 山西省天然林保护工程综合效益评价[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(3): 265 – 272.
- [41] 李娜娜. 山西省天保二期工程中期综合效益评价 [D]. 山西: 山西农业大学, 2017.
- [42] 郭生祥, 汪有奎, 张建奇. 甘肃祁连山国家级自然保护区天然林保护工程生态效益初步评价分析[J]. *甘肃林业科技*, 2012, 37(1): 21 – 25.
- [43] 国政, 聂华, 臧润国, 等. 西南地区天然林保护工程生态效益评价[J]. *内蒙古农业大学学报 (自然科学版)*, 2011, 32(2): 65 – 72.
- [44] 刘璐璐, 邵全琴, 曹巍, 等. 基于生态服务价值的三江源生态工程成本效益分析[J]. *草地学报*, 2018, 26(1): 30 – 39.
- [45] JINTAO XU, RUNSHENG YIN, ZHOU LI, et al. China's ecological rehabilitation: unprecedented efforts, dramatic impacts, and requisite policies[J]. *Ecological Economics*, 2006, 57(4): 595 – 607.
- [46] 龚晓君, 刘萍. 基于项目管理视角的天保工程资金短缺问题探讨[J]. *林业资源管理*, 2010(6): 32 – 35.
- [47] 朱洪革, 付玉竹, 张少鹏. 天保工程转移支付的森林生态效益及其影响机制[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2663 – 2670.
- [48] 高晓龙, 林亦晴, 徐卫华, 等. 生态产品价值实现研究进展[J]. *生态学报*, 2020, 40(1): 24 – 33.