DOI: 10.5846/stxb202011223000

赵廷阳,夏成琪,索鑫浩,曹世雄.生态修复项目成本-效益动态评估.生态学报,2021,41(12):4757-4764.

Zhao T Y, Xia C Q, Suo X H, Cao S X. Cost-benefit evaluation of Chinese ecological restoration programs. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (12): 4757-4764.

生态修复项目成本-效益动态评估

赵廷阳¹,夏成琪²,索鑫浩³,曹世雄^{1,*}

1 北京林业大学经济管理学院,北京 100083

2 清华大学环境学院,北京 100084

3 北京林业大学水土保持学院,北京 100083

摘要:生态系统服务价值评估是全球生态学和经济学研究的热点领域,然而,多数学者在开展生态系统服务价值估算时忽略了生态系统在提供服务时所需要的成本或者仅仅计算了部分成本;生态系统服务净价值评估方法虽然对生态系统服务价值评估方法进行了改进,但没有考虑生态修复项目实施前和实施后土地景观变化引起净价值的变化,获得的结果只能反映土地利用的静态效益,不能反映生态修复项目引起土地变更的成本-收益动态变化。因此,构建基于生态系统服务和投入产出相结合的生态修复项目成本-效益动态评估新方法,是生态修复研究领域的重要科学问题。为了弥补这一领域的不足,该研究构建了生态工程成本-效益动态评估新方法,并以三北防护林、天然林保护、退耕还林工程为研究案例,验证了这一评估方法。结果表明,与项目实施前相比,三北防护林、天然林保护、退耕还林工程每年增加的净收益分别为 461.7×10^9 、 2930.5×10^9 、 530.1×10^9 元,收益率分别为 29.3%、328.9%、77.0%。六种典型生态修复措施中退耕地种植经济林、荒地种植经济林和天然植被恢复能够在每个省产生净收益,荒地造林、飞播造林和退耕还林的实施会在部分地区产生损耗。依据成本-效益动态评估方法核算的结果可以帮助政府部门选择最佳土地利用和保护措施,最大限度地提高生态修复项目的生态经济效益。由于不同地区社会经济条件和资源禀赋存在较大差异,尊重区域差异因地制宜的生态修复非常必要。

关键词:土地退化;生态修复;生态系统服务;居民生计;项目管理。

Cost-benefit evaluation of Chinese ecological restoration programs

ZHAO Tingyang¹, XIA Chengqi², SUO Xinhao³, CAO Shixiong^{1,*}

1 School of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

3 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: To mitigate or reverse ecosystem degradation, China has invested huge sums of money since 1978 in ecological restoration projects such as the Three North Shelter Forest Project (TNSFP), Natural Forest Conservation Program (NFCP), and Grain for Green Program (GGP). However, a lack of effective evaluation methods has made it difficult to tell whether these programs were cost-effective. In the present study, we improved the input-output evaluation method to evaluate how the cost-effectiveness of these ecological restoration projects has changed over time. Specifically, we compared the costs and benefits before and after implementing the three restoration programs. The annual net benefits were 461.7×10^9 RMB for the TNSFP, 2930.5×10^9 RMB for the NFCP, and 530.1×10^9 RMB for the GGP. The corresponding net benefits per unit area were 6.5×10^3 , 17.6×10^3 , and 18.2×10^3 RMB $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$, respectively. These values equal 29.3%, 328.9%, and 77.0% of the costs of these investments. Among the six ecological restoration measures, establishing fruit tree

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0501002)

收稿日期:2020-11-22; 修订日期:2021-06-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shixiongcao@126.com

plantations in farmland and degraded land and protecting vegetation to allow natural recovery generated net benefits in every Chinese province. Afforestation of degraded land, aerial seeding afforestation, and afforestation of farmland produced net negative benefits (i. e., losses) in some areas. Due to large differences in socioeconomic conditions and resource endowments among China's diverse regions, it is necessary to respect these differences and design ecological restoration strategies tailored to local conditions. Our improved cost-benefit analysis for ecosystem services can help governments choose better land uses and improve ecological conservation strategies to maximize both their ecological success and their cost-effectiveness.

Key Words: land degradation; ecological restoration; ecosystem services; livelihoods; project management

生态系统是人类赖以生存和发展的基础,其不仅为人类提供直接的生产和生活资料、同时为人类提供各种间接服务^[1]。生态系统服务功能和价值变化与人类的福祉密切相关^[2-3]。随着社会经济发展,人类的一系列活动严重影响了生态系统的结构和功能,威胁到了人类社会经济的可持续发展^[4-5]。相关研究结果表明,工业化以来,全球范围内生态系统的服务价值下降了 63%^[6]。服务价值减少必然会影响到人类未来福祉,对生活在贫困线以下、依靠自然资源生存的大约 11 亿居民的影响尤为严重^[7]。

近半个世纪以来,人们逐渐认识到生态环境保护的重要性,积极实施有效措施,以期增加生物多样性、保护和修复生态环境^[8-9]。1978 年以来,我国政府投入巨额资金开展了三北防护林、天然林保护、退耕还林等一系列生态修复项目。然而,这些工程投入产出是否合理,没有人知道;以往对生态修复项目的评估往往忽略项目成本^[10]和项目实施前后的差异^[11]。因此,构建科学可行的生态修复项目实施效果评价新方法,开展项目成本-效益动态评估,明确项目的实施效果极为紧迫和重要^[12],对我国后续展开生态文明建设有重要理论指导意义,对全球生态修复政策调整、环保项目规划也有重要科学价值。

自从 1997 年 Costanza 等^[13]学者计算了全球生态系统服务价值以来,生态系统服务价值评估成为全球生态学和经济学研究的热点^[14-17]。然而,多数学者在开展生态系统服务价值估算时忽略了生态系统在提供服务时所需要的成本或者仅仅计算了部分成本^[12];传统的农业负效应评估虽然考虑到了水资源消耗的负效应和环境危害(如环境污染、土壤侵蚀等)的负面影响^[18],但忽略了土地等自然资源占用“挤出效应”所导致的机会成本^[19]、环境保护和农业生产投资的直接成本、以及自然灾害造成的其他机会成本^[20]。忽略成本分析(或者成本分析不全面)计算出的生态系统服务价值必然会夸大自然和人工生态系统的服务功能以及维护和恢复生态系统相关措施的经济意义,影响土地规划和环境保护的科学性和可行性^[6,21]。

生态系统服务净价值评估方法^[12]虽然对生态系统服务价值评估方法进行了改进,但没有考虑生态修复项目实施前和实施后土地景观变化引起的净价值变化,获得的结果只能反映土地利用的静态效益,不能反映生态修复项目引起土地变更的成本-收益变化。在环境保护项目实施前和实施后,必须对其进行成本收益评估,只有项目实施后的土地生态经济净收益大于项目实施前土地生态经济净收益,项目实施才有经济价值。但是,由于生态系统服务价值计算方法的缺陷,以前研究从未开展这一方向研究。甄别环保项目土地变更的成本与收益变化十分重要,它有助于管理者了解生态修复项目一系列潜在成本与收益、及其形成的原因,从而提高环境保护项目的效益^[22],实现社会经济发展和生态环境保护的有机结合。构建基于生态系统服务和农业投入产出相结合的生态修复项目成本-效益动态评估新方法,是生态修复研究领域的科学前沿。

1 研究方法

1.1 生态系统收益核算方法

该研究基于《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721—2008)进行生态系统服务价值的评估,评估指标包括涵养水源(调节水量指标和净化水质指标)、保育土壤(固土指标和保肥指标)、固碳释氧(固碳指标

和释氧指标)、养分积累(养分积累指标)、净化大气环境(生产负离子指标、吸收污染物指标、滞尘指标、TSP 吸收指标、PM_{2.5}吸收指标、PM₁₀吸收指标)、生物多样性保护(生物多样性保护指标)、森林防护(防风固沙指标和保护农田指标)共 7 种功能和 16 项指标。

产品价值以 2017 年度市场价格计算项目区对应的粮食、水果(苹果、梨、葡萄、柑橘、橙)及其他林产品(如桐油、树漆、竹子)。因为我国禁止木材砍伐,该项计算不包括木材生产。

$$\sum_1^2 \text{Benefits} = \sum_{n=1}^{16} \text{VES}_i + \sum_{n=1}^l \text{VP}_i \quad (1)$$

式中: $\sum_1^2 \text{Benefits}$ 指生态系统产生的收益,包括 $\sum_{i=1}^{16} \text{VES}_i$ 中的 16 项生态系统服务价值,以及 $\sum_{i=1}^l \text{VP}_i$ 包含以上 5 种主要水果和 3 种主要林副产品的产品价值。

1.2 生态系统净收益核算方法

净收益基于以上生态系统收益(Benefits)核算减去成本获得:

$$\text{NetBenefits} = \sum_1^2 \text{Benefits} - \sum_1^3 C_i \quad (2)$$

式中: $\sum_{n=1}^3 C_i$ 为总成本,包括用于生态保护以及修复的直接投资(包括管护成本)、自然资源占用“挤出效应”所导致的机会成本以及其他外部性成本(包括植物病虫害、自然灾害、土壤侵蚀、环境污染、温室气体排放等)。为了简化计算,该研究将自然资源占用“挤出效应”所导致的机会成本定义为占用土地、水、以及其他自然资源在其他用途上产生的收益或者产生的价值^[12]。其他外部性成本依据历年《林业统计年鉴》自然灾害发生频率的多年平均值计算。

1.3 成本-效益动态评估方法

生态修复项目实施改变了土地的利用方式和生态系统服务功能,如退耕地种植经济林是将陡坡农田变成了经济林、荒地种植经济林是将荒地变成了经济林、荒地造林是将荒地变成了人工林、天然林植被恢复是将退化的森林变成了天然林、飞播造林是将荒地变成了飞播造林地、退耕地造林是将陡坡农田变成了人工林(不含经济林)。

同一块土地在实施生态修复后的净收益减去该地块在项目实施前的净收益即可获得项目的净收益:

$$\text{ProjectNetBenefits} = \sum_1^n \text{NetBenefits}_a - \sum_1^n \text{NetBenefits}_b \quad (3)$$

式中:ProjectNetBenefits指项目实施产生净收益, $\sum_1^n \text{NetBenefits}_a$ 为项目实施后的各项土地累计净收益,

$\sum_1^n \text{NetBenefits}_b$ 为项目实施前的原有土地累计净收益。

1.4 研究案例

为了验证生态工程成本-效益动态评估新方法的可行性,该研究基于三北防护林、天然林保护、退耕还林项目区 183 个生态监测站点(包括中国科学院 44 个监测站点和国家林业总局 139 监测站点)对以上 16 项指标的监测数据,以及林业统计年鉴(1987—2017)的实施面积等数据^[23],通过对工程实施前和实施后生态系统服务价值、产品收入、投入(包括资源占用)成本的评估,计算了项目实施前和实施后生态系统服务的成本与收益及其变化。如表 1 所示,天然林保护和三北防护林包括荒地种植经济林、荒地造林、天然植被恢复、飞播造林四项措施,退耕还林工程包括了退耕地造林(不含经济林)、退耕地种植经济林、荒地造林、天然植被恢复四项措施。

2 研究结果

计算结果显示,南方生态系统产生的收益普遍比北方高,东北地区各类生态系统也有较高的收益,但是

经济林种植在新疆和黄土高原地区收益相对较高(表 2)。人工生态系统的成本在北方较高,因为北方的水热条件较差,人工造林成活率和保存率相对较低,人工种植直接投入和管护成本较高(表 3)。

表 1 2017 年工程主要治理措施实施面积

Table 1 Implementation area of the Three Norths Shelter Forest System Project (TNSFP), Natural Forest Conservation Program (NFCP), and Grain for Green Program (GGP) in 2017

	三北防护林 TNSFP	天然林保护 NFCP	退耕还林 GGP
项目起始年份 The first year	1978	1999	1999
退耕地造林 Afforestation of farmland/($\times 10^6$ hm ²)	-	-	6.58
退耕地种植经济林 Fruit tree plantation in farmland/($\times 10^6$ hm ²)	-	-	4.13
荒地种植经济林 Fruit tree plantation in degraded land/($\times 10^6$ hm ²)	4.64	0.36	-
荒地造林 Afforestation of degraded land/($\times 10^6$ hm ²)	30.99	3.32	15.05
天然植被恢复 Natural vegetation recovery/($\times 10^6$ hm ²)	40.06	144.86	3.31
飞播造林 Aerial seeding afforestation/($\times 10^6$ hm ²)	1.77	3.77	-
总计 Total/($\times 10^6$ hm ²)	77.46	152.31	29.07

天然林保护工程天然植被恢复措施中包含了森林管护面积

表 2 2017 年陡坡农田、荒地和各种林地收益区域间的变化/($\times 10^3$ 元/hm²)

Table 2 Regional variation in benefits of steep slope farmland, degraded land and forests land in 2017

	陡坡农田 Steep slope farmland	荒地 Degraded land	退化森林 Degraded forest	飞播造林 Aerial seeding afforestation land	退耕还林 Returning farmland to forest land	荒山造林 Land of afforested wasteland	天然林 Natural forests	退耕造经济林 Land of fruit trees plantation in farmland	荒地造经济林 Land of fruit t rees plantation in degraded land
北京	38.4	5.1	13.1	-	29.4	29.9	26.1	187.0	-
天津	34.7	5.1	11.7	-	31.5	33.9	23.3	145.3	-
河北	37.9	6.2	25.0	-	33.5	37.8	48.0	116.0	-
山西	37.7	4.8	23.7	28.7	58.9	37.1	44.4	97.4	34.6
内蒙古	37.7	6.5	20.5	28.2	40.2	36.5	36.7	73.2	27.2
辽宁	43.8	7.9	26.2	-	47.8	45.7	42.8	102.2	-
吉林	42.8	11.4	27.5	38.7	56.1	50.1	44.5	96.7	35.4
黑龙江	43.2	10.4	27.1	37.0	60.1	47.9	47.5	95.2	35.2
安徽	38.0	8.9	30.6	-	60.1	51.7	51.3	94.3	-
江西	37.4	7.2	40.5	-	68.3	66.2	77.1	99.3	-
河南	35.6	5.6	28.6	30.7	45.6	39.7	47.6	128.9	54.1
湖北	39.2	6.1	30.5	38.0	69.6	49.2	52.1	88.6	41.8
湖南	38.5	7.3	40.1	-	60.9	57.7	78.4	92.9	-
广西	40.6	7.4	42.8	-	78.2	69.7	79.8	152.5	-
海南	39.4	9.8	40.7	41.2	63.0	53.3	77.1	213.4	134.9
重庆	41.5	9.7	46.2	60.3	79.7	78.0	89.0	129.9	83.6
四川	38.4	9.6	43.8	53.9	76.7	69.8	83.9	124.1	76.1
贵州	39.5	6.7	26.4	51.0	62.0	66.0	49.8	87.5	47.6
云南	41.3	6.7	44.4	44.8	69.2	58.0	88.2	137.3	83.8
西藏	30.6	1.5	5.4	2.7	31.3	3.4	10.0	41.0	31.7
陕西	36.2	4.5	20.2	24.5	42.1	31.7	38.2	173.3	105.3
甘肃	33.9	2.6	23.7	22.2	36.0	28.7	48.0	160.4	56.0
青海	35.3	2.3	8.9	17.3	28.5	22.3	16.8	33.2	11.8
宁夏	37.1	2.9	17.7	27.2	39.3	35.1	34.8	87.0	40.0
新疆	37.5	3.8	11.5	22.2	22.8	28.7	20.7	198.0	64.3

表 3 2017 年陡坡农田、荒地和各种林地的成本在区域间的变化/($\times 10^3$ 元/hm²)

Table 3 Regional variation in costs of steep slope farmland, degraded land and forests land in 2017

	陡坡农田 Steep slope farmland	荒地 Degraded land	退化森林 Degraded forest	飞播造林 Aerial seeding afforestation land	退耕还林 Returning farmland to forest land	荒山造林 Land of afforested wasteland	天然林 Natural forests	退耕造经济林 Land of fruit trees plantation in farmland	荒地造经济林 Land of fruit t rees plantation in degraded land
北京	39.5	4.1	7.2	-	167.3	153.4	14.5	154.8	-
天津	29.5	3.4	5.9	-	37.6	30.7	10.3	102.3	-
河北	39.1	3.5	5.4	-	26.6	17.5	7.3	75.4	-
山西	44.4	3.4	6.0	22.6	58.2	50.4	10.8	70.6	62.8
内蒙古	40.7	2.7	4.3	17.0	43.7	38.1	11.0	51.6	46.0
辽宁	42.4	3.7	6.0	-	43.5	36.6	9.4	71.6	-
吉林	36.7	3.2	6.5	22.2	55.1	49.1	10.2	67.3	61.2
黑龙江	38.5	3.2	7.1	30.8	83.1	77.1	16.3	65.9	59.9
安徽	30.6	5.4	9.0	-	47.8	39.4	13.3	56.4	-
江西	31.4	6.3	9.9	-	30.6	21.9	13.1	51.8	-
河南	28.0	4.8	7.6	14.0	28.3	20.5	10.3	82.6	74.8
湖北	34.1	5.4	8.7	15.2	30.4	21.2	11.5	56.0	46.9
湖南	41.2	5.5	8.7	-	25.5	17.1	11.2	69.4	-
广西	37.3	6.5	10.8	-	47.3	38.2	15.3	66.4	-
海南	33.8	6.4	10.2	17.4	32.7	23.1	13.4	88.1	78.5
重庆	33.1	4.1	6.3	16.1	38.0	28.1	8.3	56.2	46.3
四川	33.0	4.0	6.9	18.2	46.2	34.8	11.4	59.4	47.9
贵州	33.7	5.8	9.3	16.9	30.6	24.7	12.6	45.9	40.0
云南	36.6	5.7	9.0	15.6	24.8	20.9	11.7	57.4	53.5
西藏	24.8	1.1	1.7	10.0	33.2	24.9	3.4	17.6	9.3
陕西	38.5	4.0	6.0	14.4	28.2	22.5	8.4	73.7	68.0
甘肃	43.2	3.3	5.7	19.8	48.6	41.7	9.0	111.3	104.4
青海	36.1	2.4	5.4	32.5	94.2	85.5	12.8	30.0	21.4
宁夏	47.1	3.0	5.1	20.1	52.7	44.3	9.1	55.4	47.0
新疆	42.6	2.6	4.3	21.2	61.6	52.9	6.3	142.4	133.7

六种生态修复措施在不同地区实施的效果不同,除了种植经济林措施能在新疆、黄土高原等北方地区产生较高的净收益以外,其他四种措施在南方的净价值均高于北方(表 4)。退耕地种植经济林、荒地种植经济林、天然植被恢复这三种措施在各个省份均能产生正收益。其余三种措施在部分省份产生了负效益。退耕地造林和荒地造林会对北京、天津、内蒙古、吉林、黑龙江、西藏、甘肃、青海、宁夏、新疆 10 个省区产生负效益;飞播造林会对黑龙江、西藏、青海、新疆 4 个省区产生负效益。

三北防护林、天然林保护、退耕还林工程的实施后,项目区土地收益分别增长了 2035.0×10^9 、 3821.1×10^9 、 1127.8×10^9 元/a,净收益分别增长了 461.7×10^9 、 2930.5×10^9 、 530.1×10^9 元/a,单位面积土地净收益分别增长了 6.5×10^3 、 17.6×10^3 、 $18.2 \times 10^3 \times 10^3$ 元 hm⁻² a⁻¹,收益率分别为 29.3、328.9、77.0%(表 5)。

3 讨论

保护生态环境、提高土地生态系统服务价值、增加人类福祉^[24-26]、以便更好地适应气候变化、促进人类社会可持续发展^[6,27]是当代人类的共识。该研究通过不同生态修复项目实施前和实施后的成本、收益变化进行评估(即生态系统成本-效益动态评估),证明重大生态修复工程能够使土地收益的增加大于成本增加,大型生态修复工程具有潜在的获利能力(表 5)。如果管理者选择适合本地区的生态恢复或保护措施,有望获得更好效果(表 4)。

表 4 2017 年各净收益在区域间的变化/($\times 10^3$ 元/hm²)

Table 4 Regional variation in land's net benefit of produced by afforestation of farmland, fruit tree plantation in farmland, fruit tree plantation in degraded land, afforestation of degraded land, natural vegetation recovery, aerial seeding afforestation in 2017

	退耕地造林 Afforestation of farmland	退耕地造经济林 Fruit tree plantation in degraded land	荒地造经济林 Fruit tree plantation in degraded land	荒地造林 Afforestation of degraded land	天然植被恢复 Natural vegetation recovery	飞播造林 Aerial seeding afforestation
北京	-136.82	33.30	-	-124.48	5.80	-
天津	-11.33	37.82	-	1.48	7.21	-
河北	8.01	41.82	-	17.67	21.01	-
山西	7.41	33.49	-29.65	-14.66	15.99	4.74
内蒙古	-0.51	24.60	-22.60	-5.42	9.43	7.46
辽宁	2.96	29.20	-	4.90	13.26	-
吉林	-5.06	23.31	-34.08	-7.20	13.26	8.27
黑龙江	-27.68	24.58	-31.93	-36.47	11.21	-0.99
安徽	4.90	30.49	-	8.76	16.44	-
江西	31.70	41.53	-	43.34	33.41	-
河南	9.72	38.66	-21.55	18.45	16.27	15.95
湖北	34.09	27.53	-5.73	27.34	18.76	22.23
湖南	38.16	26.26	-	38.83	35.85	-
广西	27.56	82.75	-	30.50	32.59	-
海南	24.62	119.65	52.99	26.77	33.25	20.41
重庆	33.20	65.22	31.74	44.33	40.85	38.55
四川	24.96	59.26	22.67	29.42	35.68	30.18
贵州	25.62	35.81	6.68	40.38	20.02	33.09
云南	39.76	75.17	29.30	36.16	41.06	28.22
西藏	-7.84	17.46	21.98	-21.87	2.93	-7.69
陕西	16.27	101.86	36.83	8.78	15.66	9.65
甘肃	-3.33	58.35	-47.60	-12.17	21.05	3.17
青海	-64.91	3.86	-9.41	-63.04	0.47	-15.00
宁夏	-3.41	41.57	-7.01	-9.10	13.18	7.12
新疆	-33.67	60.73	-70.63	-25.39	7.20	-0.17

表 5 2017 年三北防护林、天然林保护、退耕还林工程每年产生的收益、成本、净收益的增长以及补贴

Table 5 The annual increase in benefits, costs, net benefits and compensation provided by the Three Norths Shelter Forest System Project, Natural Forest Conservation Program, and Grain for Green Program on 2017 data

		收益 Benefits			成本 Cost			净收益 Net benefits			收益率/% Net benefit/cost
		项目后 After	项目前 Before	增长 Increase	项目后 After	项目前 Before	增长 Increase	项目后 After	项目前 Before	增长 Increase	
三北防护林	平均/($\times 10^3$ 元 hm ⁻² a ⁻¹)	42.70	14.06	28.64	26.58	4.44	22.14	16.12	9.62	6.50	29.34
	合计 ($\times 10^9$ 元/a)	3033.57	998.59	2034.98	1888.60	315.29	1573.31	1144.98	683.31	461.67	
天然林保护	平均/($\times 10^3$ 元 hm ⁻² a ⁻¹)	47.93	24.96	22.97	11.08	5.73	5.35	36.85	19.23	17.62	328.91
	合计 ($\times 10^9$ 元/a)	7972.33	4151.22	3821.11	1843.67	953.08	890.59	6128.66	3198.14	2930.52	
退耕还林	平均/($\times 10^3$ 元 hm ⁻² a ⁻¹)	60.17	21.26	38.91	38.8	16.81	21.99	21.92	3.68	18.24	77.02
	合计 ($\times 10^9$ 元/a)	1749.14	617.95	1131.19	1127.79	488.78	639.01	637.16	107.02	530.14	

科学合理的生态修复项目是基于长期净收益最大化的综合结果,而不是追求某个单一指标(比如森林覆盖率)最大化和短期利益最大化。在环境保护项目实施前和实施后,必须对其进行成本收益评估,以避免资金浪费、环境破坏、威胁项目区居民生计,只有这样才能同时实现保护生态环境和促进区域经济发展的双

赢目标^[28]。因此,正确甄别环保项目的成本与收益十分重要^[29],它有助于管理者了解生态修复项目的一系列潜在成本与收益、及其形成的原因,从而提高环境保护项目的效益^[24]。

“青山绿水、就是金山银山”,“资源节约、环境保护”是我国可持续发展战略的核心内容之一。相对以前的生态系统服务价值、林业收益评估和生态系统服务净价值评估方法^[12,22,30],该研究构建的生态系统成本-效益动态评估方法融合了以上评估方法的优点,较全面计算了生态系统的成本(包括直接投资、资源占用、自然灾害、管理费用等)和收益(包括生态系统服务价值、产品价值等)及其变化,较好地实现了社会经济发展和生态环境保护的有机结合,获得了比传统成本收益、生态系统服务价值等评估方法更加可靠的评价结果。生态系统成本-效益动态评估方法站在项目实施和土地景观变化的视角进行投入产出动态评估,更好地比较生态修复项目实施前、后的成本和收益变化,这样的评价结果能使土地利用规划和项目监督管理更加科学合理,为生态修复措施选择提供了方法基础。预期研究结果可为土地管理者、政策制定设计出更加有效的策略,为生态环境保护和社会经济可持续发展提供理论基础。

干旱地区树木生长需要占用大量水资源,人工造林加剧了这些地区水资源短缺危害,造成不必要的经济成本(表4)。即使在湿润地区,人工造林需要消耗大量的人力和物力,成本高昂。如果不是为了获得木材、水果等经济目标,生态修复应尽量通过自然恢复方式推进。相关研究表明,当湿润地区植被覆盖度小于20%时,最好的生态修复措施是通过施肥或者种植豆科牧草的方式改良土壤,从而实现生态恢复^[31],人工造林会进一步加剧土壤养分流失,导致生态系统进一步恶化。干旱地区被覆盖度小于30%时^[32],最好的生态修复措施是增加地表粗糙度,减小地表风速,人工造林会进一步加剧干旱缺水的危害。

由于不同地区社会经济条件和资源禀赋存在较大差异,尊重区域差异设计因地制宜的生态修复策略非常必要。虽然生态恢复工程可以获得巨大收益,但是并不是每一种措施在考虑其成本后在每个地区都能产生正效益^[33-34]。由于生态地理的巨大差异,获得更高分辨率的数据进行评估是生态修复项目规划未来的发展方向。在未来的生态修复规划和实施中,政府部门和相关研究人员需要获取更加翔实的数据进行分析,确保相关措施更加科学合理。不同地区的自然和人文因素差异显著,适宜采取的生态修复措施也不尽相同,因地制宜地选择适合本地区的生态修复措施非常重要。中央政府应尊重地方差异,让不同地区自我选择生态修复措施可以获得更好的效果。

参考文献 (References):

- [1] 傅伯杰, 吕一河, 高光耀. 中国主要陆地生态系统服务与生态安全研究的重要进展. 自然杂志, 2012, 34(5): 261-272.
- [2] 李文华, 张彪, 谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望. 自然资源学报, 2009, 24(1): 1-10.
- [3] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [4] Dobson A P, Bradshaw A D, Baker A J M. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. *Science*, 1997, 277(5325): 515-522.
- [5] Lamb D, Erskine P D, Parrotta J A. Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science*, 2005, 310(5754): 1628-1632.
- [6] Birch J C, Newton A C, Aquino C A, Cantarello E, Echeverría C, Kitzberger T, Schiappacasse I, Garavito N T. Cost-effectiveness of dryland forest restoration evaluated by spatial analysis of ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(50): 21925-21930.
- [7] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*. Washington D C: Island Press, 2003.
- [8] Bullock J M, Aronson J, Newton A C, Pywell R F, Rey-Benayas J M. Restoration of ecosystem services and biodiversity: Conflicts and opportunities. *Trends in Ecology & Evolution*, 2011, 26(10): 541-549.
- [9] 吴绍洪, 罗勇, 王浩, 高江波, 李传哲. 中国气候变化影响与适应: 态势和展望. 科学通报, 2016, 61(10): 1042-1054.
- [10] 姜忆涓, 李加林, 龚虹波, 叶梦姚, 冯佰香, 何改丽, 黄日鹏. 围填海影响下海岸带生态服务价值损益评估——以宁波杭州湾新区为例. *经济地理*, 2017, 37(11): 181-190.
- [11] Ma Z H, Xia C Q, Cao S X. Cost-Benefit analysis of China's natural forest conservation program. *Journal for Nature Conservation*, 2020, 55: 125818.

- [12] 曹世雄, 刘玉洁, 苏蔚, 郑鑫怡, 余中淇. 我国陆地生态系统服务净价值评估. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(3): 331-339.
- [13] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [14] Dai E F, Huang Y, Wu Z, Zhao D S. Analysis of spatio-temporal features of a carbon source/sink and its relationship to climatic factors in the Inner Mongolia grassland ecosystem. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(3): 297-312.
- [15] Bateman I J, Harwood A R, Mace G M, Watson R T, Abson D J, Andrews B, Binner A, Crowe A, Day B H, Dugdale S, Fezzi C, Foden J, Hadley D, Haines-Young R, Hulme M, Kontoleon A, Lovett A A, Munday P, Pascual U, Paterson J, Perino G, Sen A, Siriwardena G, van Soest D, Termansen M. Bringing ecosystem services into economic decision-making: land use in the United Kingdom. *Science*, 2013, 341(6141): 45-50.
- [16] He D, Liu Y L, Pan Z H, An P L, Wang L W, Dong Z Q, Zhang J T, Pan X B, Zhao P Y. Climate change and its effect on reference crop evapotranspiration in central and western Inner Mongolia during 1961-2009. *Frontiers of Earth Science*, 2013, 7(4): 417-428.
- [17] 何浩, 潘耀忠, 朱文泉, 刘旭拢, 张晴, 朱秀芳. 中国陆地生态系统服务价值测量. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1122-1127.
- [18] 杨志新, 郑大玮, 李永贵. 北京市土壤侵蚀经济损失分析及价值估算. 水土保持学报, 2014, 18(3): 175-178.
- [19] 耿香玲. 西藏旅游发展中的负外部效应及其内化研究. 西藏大学学报: 社会科学版, 2012, 27(1): 13-18.
- [20] 王大尚, 郑华, 欧阳志云. 生态系统服务供给、消费与人类福祉的关系. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1747-1753.
- [21] Kareiva P, Tallis H, Ricketts T H, Daily G C, Polasky S. *Natural Capital: Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services*. Oxford: Oxford University Press, 2011.
- [22] Mittermeier R A, Mittermeier C G, Brooks T M, Pilgrim J D, Konstant W R, da Fonseca G A B, Kormos C. Wilderness and biodiversity conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(18): 10309-10313.
- [23] 国家林草局. 中国林业年鉴. 北京: 中国林业出版社, 1987-2017.
- [24] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.
- [25] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [26] Wang B, Gao P, Niu X, Sun J N. Policy-driven China's Grain to Green Program: implications for ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2017, 27: 38-47.
- [27] Sachs J D, Reid W V. Investments toward sustainable development. *Science*, 2006, 312(5776): 1002-1002.
- [28] 曹世雄, 李宇腾, 鲁晨曦. 生态系统服务净价值核算方法及其对北京市人工林项目的评估. 科学通报, 2016, 61(24): 2724-2729.
- [29] Goldstein J H, Pejchar L, Daily G C. Using return-on-investment to guide restoration: a case study from Hawaii. *Conservation Letters*, 2008, 1(5): 236-243.
- [30] Kinzig A P, Perrings C, Chapin III F S, Polasky S, Smith V K, Tilman D, Turner II B L. Paying for ecosystem services—promise and peril. *Science*, 2011, 334(6056): 603-604.
- [31] Cao S X, Chen L, Yu X X. Impact of China's Grain for Green Project on the landscape of vulnerable arid and semi-arid agricultural regions: a case study in northern Shaanxi Province. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46(3): 536-543.
- [32] Sasaki T, Okayasu T, Jamsran U, Takeuchi K. Threshold changes in vegetation along a grazing gradient in Mongolian rangelands. *Journal of Ecology*, 2008, 96(1): 145-154.
- [33] Lu C X, Zhao T Y, Shi X L, Cao S X. Ecological restoration by afforestation may increase groundwater depth and create potentially large ecological and water opportunity costs in arid and semiarid China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 176: 1213-1222.
- [34] Cao S X, Zhang J Z, Su W. Difference in the net value of ecological services between natural and artificial forests in China. *Conservation Biology*, 2019, 33(5): 1076-1083.