

DOI: 10.5846/stxb201804180891

蒙吉军,王雅,江颂.基于生态系统服务的黑河中游退耕还林生态补偿研究.生态学报,2019,39(15): - .

Meng J J, Wang Y, Jiang S. Study of ecological compensation of the Grain for Green program in the middle reaches of Heihe River based on ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): - .

基于生态系统服务的黑河中游退耕还林生态补偿研究

蒙吉军*, 王 雅, 江 颂

北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871

摘要:退耕还林工程是迄今为止世界上最大的生态建设工程,对我国生态恢复发挥了重要作用,而生态补偿机制构建则是保障该工程顺利实施的关键。以黑河中游为研究区,评估了区域水源涵养、土壤保持和气体调节等生态系统服务及其退耕还林增量;利用最小数据法耦合机会成本和服务增量,推导退耕还林补偿曲线;通过政策目标设定 3 种情景,比较不同情境下的补偿标准、退耕比例和范围以及生态系统服务增量。结果表明:① 退耕还林有助于提高生态系统服务的能力,单位面积水源涵养、土壤保持和固碳三种生态系统服务增量分别为 8.87 mm/m²、105.67 kg/m²和 43.16 g/m²;② 如不实施生态补偿,仅有 1.42%的耕地愿意实施退耕还林;当补偿标准达到 4381.35 元/hm²时,可实现 5.17%耕地退耕,且全部属于高度适宜和适宜还林的耕地;而当补偿金额达到 7500 元/hm²时,可实现退耕比例 13.98%,且多数属于宜林的地块;当补偿标准为 2803.06 元/hm²时,退耕比例仅为 2.55%,但全部适宜林地生长;③ 最小数据法可求得理论上相对高效和经济的补偿标准,目前实施的 7500 元/hm²的政策标准在合理的补偿范围内。研究结果为完善黑河中游生态补偿机制、提高生态补偿效率提供科学指导。

关键词:生态补偿;生态系统服务;退耕还林;最小数据法;黑河中游

Study of ecological compensation of the Grain for Green program in the middle reaches of Heihe River based on ecosystem services

MENG Jijun*, WANG Ya, JIANG Song

Key Laboratory of Earth Surface Processes of Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: The Grain for Green program is the largest ecological construction project in the world thus far and has played an important role in ecological restoration in China. Taking the middle reaches of Heihe River as the study area, we evaluated ecosystem services, such as water conservation, soil conservation, and gas regulation, and calculated their increment after returning farmland to forest. After combining opportunity cost and service increment, the minimum data approach was used to deduce the compensation curve for returning farmland to forest. According to the three scenarios of policy objectives, we compared the compensation standard, proportion and scope of returning farmland, and the increment in ecosystem services in different situations. The results are as follows: ① Conversion of farmland to forest contributes to improving the capacity for ecosystem services. The ecosystem increment of water conservation, soil conservation, and carbon sequestration per unit area was 8.87 mm/m², 105.67 kg/m², and 43.16 g/m², respectively. ② If ecological compensation is not carried out, only 1.42% of farmland would be returned to forest. When the compensation standard reaches 4,381.35 yuan/hm², 5.17% of farmland plots could be returned to forest, all of which are suitable for forest growth. When the compensation amount is 7,500 yuan/hm², 13.98% of farmland can be returned, and most of the plots are suitable for forest growth. If the compensation standard is 2,803.06 yuan/hm², the proportion of returned farmland is only 2.55%, but all are suitable for

基金项目:国家自然科学基金项目(41871074)

收稿日期:2018-04-18; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jijunm@pku.edu.cn

forest growth. ③ The minimum data method, in theory, can provide a relatively efficient and economic compensation standard. The current policy standard of 7,500 yuan/hm² is in the reasonable range of compensation. These results can provide scientific guidance for improving ecological compensation mechanisms and ecological compensation efficiency in the middle reaches of Heihe River.

Key Words: Ecological compensation; ecosystem service; the Grain for Green; minimum data approach; the middle reaches of Heihe River

我国自 1999 年开始的退耕还林工程,是迄今为止政策性最强、投资量最大、涉及面最广、群众参与程度最高的一项生态建设工程^[1]。退耕还林工程的实施,改变了中西部地区垦荒种粮的传统耕作习惯,对区域生态建设及社会经济发展产生了深远影响。在退耕还林工程实施中,生态补偿作为经济手段发挥了重要作用。对生态系统服务价值的科学界定,则是生态补偿机制的理论依据。生态系统服务包括了人类从生态系统获得的各种直接或间接收益,有供给服务、调节服务、文化服务和支持服务^[2]。但是,除了能被直接利用的部分供给服务外,大多数其他服务都具有公共物品性和外部性,其价值无法依靠传统的市场经济体现,市场调控对其往往也是无效的^[3]。生态补偿是以保护和可持续利用生态系统服务为目的,根据生态系统服务价值、生态保护成本、发展机会成本,以经济手段为主调节利益相关者利益关系,促进补偿活动、调动生态保护积极性的公共制度^[4]。由于生态补偿可以有效地将生态系统服务外部的、非市场的价值转化为经济或其他动力,成为解决生态系统服务负外部性的关键手段,也是增加生态系统服务供给、促进区域生态恢复的重要保障。

近年来,围绕补偿标准的确定,学者们探索出了成本法、意愿法和价值当量法三类计算方法^[5]:① 成本法按生态保护与建设的投入和机会成本确定补偿标准,在实践中应用较广。孔凡斌等^[6]运用“成本-效益分析法”和“工业发展机会成本法”测算出东江源流域生态补偿总额。但生态建设投入不一定能带来等量的生态效益,成本补偿难以实现利益分配的公平。② 意愿法根据效用最大化原理,在市场条件下直接调查人们对区域环境改善、资源保护的支付意愿,或对环境破坏、资源损失的受偿意愿^[7]。张志强等^[8]通过调查黑河流域居民对恢复张掖地区生态系统服务的支付意愿,计算出恢复该地区生态系统服务的每年经济补偿总额。该方法调查资料容易获取,可操作性强,但受主观因素影响大,且难以协调支付意愿和接受意愿的不对称问题。③ 价值当量法以生态系统服务价值当量为基础,计算生态保护过程提供的补偿。刘春腊等^[9]结合国内外学者对不同生态系统服务价值的判断,提出了基于生态价值当量的中国省域生态补偿额度测算思路与计算模型。但生态服务价值当量是区域和生态系统的平均水平表征,难以体现区域差异和生态系统内部差异。因此,单纯地只考虑机会成本、参与意愿或生态服务当量来确定生态补偿标准具有片面性^[10]。最小数据法耦合了机会成本和生态系统服务供给,通过机会成本空间分布推导新增生态系统服务的供给曲线,可以更加科学灵活地确定生态补偿标准^[11]。

黑河中游地处河西走廊中段,绿洲较为集中,人类活动密集,生态环境脆弱。近年来该地区生境质量、水源涵养、气体调节等多种生态系统服务供给显著减少^[12]。黑河中游的生态系统服务供给和生态环境质量对全流域、甚至西北地区都至关重要,为保障区域生态安全,张掖市一直十分注重完善生态补偿机制,大力推进退耕还林还草生态建设工程。本文以黑河中游为研究区,通过评估退耕还林的水源涵养、土壤保持和气体调节的服务增量和农民机会成本,利用最小数据法推导补偿价格与退耕还林比例的关系曲线。在需要退耕的范围内,构建黑河中游林地适宜性评价指标体系,依据林地适宜性高的耕地优先还林的原则进行退耕还林空间识别,从而模拟不同补偿情景下的预期退耕比例和区域,为黑河中游退耕还林工程和生态补偿实践提供科学参考。

1 研究区概况和数据来源

黑河是中国第二大内陆河,莺落峡至正义峡之间为中游,流程 185 km,介于 E96°42'—102°04'、N37°45'—

42°40′之间,行政上包括甘肃省张掖市的山丹、民乐、甘州、临泽、高台以及肃南明花区,总面积 19578 km²,是古丝绸之路和居延古道的交汇点。区域南邻高耸的祁连山,北依龙首山和合黎山,南北两山之间为走廊平原,绿洲、荒漠、戈壁、沙漠断续分布。黑河中游属于典型的温带大陆性干旱气候,区域年降水量仅 54.9—436.2 mm,且年内分布不均,大多集中在 6—9 月,全年蒸发总量高达 1700 mm。区域内近 70%的土地为未利用地,且在西北部地区连片分布;耕地面积 3018.58 km²(占总面积的 15.4%),集中分布在黑河干流贯穿的中部走廊平原和祁连山山麓地带;林地总面积仅为 525.34 km²(占总面积的 2.68%),主要分布在南部的祁连山和东部的焉支山。黑河中游自 2002 年开始实施退耕还林工程,至 2014 年累计完成 7.64×10⁴ hm²,发放补助资金 10.5 亿元,受惠退耕人口近 20 万人。退耕工程区主要分布在祁连山、大黄山天然林区的陡坡耕地和中部绿洲边缘地带的沙化耕地。通过退耕还林工程的实施,区域生态环境得到初步改善,已有 80%的退耕面积成林,森林覆盖率提高了 1.21%;带动了林果、草畜产业的发展,农业产业实现了粮—经二元结构向粮—经—林(草)三元结构的转变。

本研究所用基础地理信息数据(包括行政区划、居民点、道路、水系、灌渠等)来源于中国科学院寒区旱区科学数据中心的“黑河计划数据管理中心”(http://westdc.westgis.ac.cn/heihe/)。DEM 数据来源于美国马里兰大学全球土地覆被数据库,分辨率为 30 m×30 m。2014 年土地利用数据源于 USGS(http://earthexplorer.usgs.gov/)提供的 Landsat8 影像,利用 ENVI4.7 进行人机交互式目视解译获得,解译精度为 88.76%,并根据研究目的和区域特征,将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类。气象数据来源于中国气象数据共享网(http://cdc.nmic.cn/home.do)地面气象站日值数据;土壤数据来源于 FAO 基于世界土壤数据库(HWSD)中国土壤数据集^[13];黑河中游沙地、盐碱地和戈壁的空间数据来源于中科院寒旱所的《中国 1:10 万沙漠分布图》;地下水埋深通过张掖市水务局提供的张临高平原监测井的地下水位监测数据空间插值与地图资料数字化相结合的方式获得;FPAR 数据来源于美国国家航空航天局 MODIS 网站(http://modis.gsfc.nasa.gov/)的 MOD15A2。农民人均纯收入增长率、农业家庭经营性收入占农民人均纯收入的比例来源于《张掖市统计年鉴(2014)》。张掖市新一轮退耕还林还草的申报面积、资金预算等数据来源于《张掖市新一轮退耕还林还草总体方案(2014)》。

2 研究方法

2.1 生态补偿的理论依据

假设土地利用方式为林地和耕地时土地所有者获得的收益分别为 A 和 B(B>A)(图 1)^[14],林地转换为耕地时造成的生态系统服务损失为 C。由于生态系统服务的公共物品特性,在没有生态补偿的情况下,土地所有者会选择获利更大的耕地利用方式。如果对土地所有者进行一定的生态补偿 D(0<D<C),使得补偿后的林地收入大于耕地,即 A+D>B,则土地所有者就会愿意保留林地利用方式,用较小的补偿避免了较大的生态系统服务损失,而生态补偿的核心问题就是如何确定科学经济的补偿 D。

2.2 退耕还林生态系统服务增量估算

退耕还林后,生态系统服务主要体现在水源涵养、土壤保持和固碳能力三个方面,取林地和耕地对应生态系统服务的差值,即为退耕还林生态系统服务增量。

(1) 水源涵养

本文利用 InVEST 模型中的 Water Yield 产水模块进行产水量估算。这是一种基于 Budyko 曲线^[15]和年平均降水的水量平衡估算方法,不考虑地表水与地下水的交互作用,认为某栅格单元的降水量减去没有上游径流补给时蒸散发的水量即为产水量^[16]。栅格单元在某种特定植被类型下的年平均产水量计算公式为:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

式中, Y_{xj} 为栅格单元 x 中植被类型为 j 的年产水量; AET_{xj} 为栅格单元 x 中植被类型为 j 的实际蒸散量; P_x 为栅

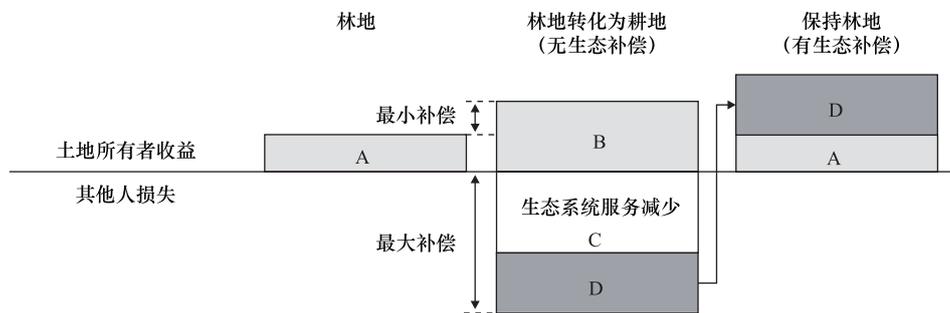


图1 生态补偿理论框架

Fig.1 The theoretical framework of ecological compensation

格单元 x 的年平均降水量。 AET_x 可由潜在蒸散量推算,根据 Penman-Monteith 公式^[17] 计算黑河中游及其周边 12 个气象站 2014 年均潜在蒸散,再利用 ArcGIS 克里金插值得到中游年均潜在蒸散。其他参数设置参考模型说明及已有研究^[18]。

(2) 土壤保持

本文采用通用土壤侵蚀方程来计算土壤侵蚀量^[19],通过比较假设无植被覆盖和实际植被条件下的土壤侵蚀差异来表征土壤保持功能,其大小与土壤条件、气候、地形、植被以及人类活动(如农业耕作、水坝建设等)密切相关。该方程为:

$$USLE_x = R_x \cdot K_x \cdot LS_x \cdot C_x \cdot P_x \quad (2)$$

式中, $USLE_x$ 表示 x 的土壤侵蚀量; R_x 表示降水侵蚀力,反映了区域降水对土壤侵蚀的潜在作用; K_x 为土壤可侵蚀性因子; LS_x 为坡长坡度因子; 作物管理因子 C_x 是在相同土壤、坡度和降雨条件下,特定作物或植被情况时的土壤流失量与耕种过后连续休闲地的土壤流失量的比值。水土保持措施因子 P_x 是采取水保措施后,土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量的比值。

(3) 固碳能力

NPP 是扣除植物自身呼吸消耗后,真正用于植物生长和生殖的光合产物量或有机碳量^[20],可表征生态系统的固碳能力。本文采用 CASA 模型^[21] 进行 NPP 估算:

$$NPP_{casa} = APAR \times \varepsilon \quad (3)$$

式中, APAR 表示植被所吸收的光合有效辐射, ε 表示光能转化率。其中, APAR 取决于太阳总辐射和植被光合有效辐射(FPAR)的吸收比例。

2.3 机会成本

生态系统服务供给的机会成本指为提供某种生态系统服务而放弃的其他收益^[22],退耕还林的机会成本即为耕地转化为林地后农民经济收益的损失。本文假设退耕还林后,农民在短期内无法获得林地的经济收益,则耕地收益即可表征退耕还林的机会成本。以黑河中游 47 个乡镇单位面积耕地收入为样本,利用 SPSS 进行正态性检验:峰度为 -0.688,偏度为 0.514,二者绝对值均小于 1;单样本 k-s 检验的显著性检验值为 0.200,大于 0.05。因此,黑河中游退耕还林的单位面积机会成本服从正态分布,均值为 14015.29 元/hm²,标准差为 6391.2 元/hm²。且单位产水量、土壤保持量和固碳量的机会成本也服从正态分布,均值分别为 158.01 元/m³、13.26 元/t、32.47 元/kg。

2.4 生态补偿标准

本研究采用最小数据法耦合机会成本和服务增量,求取生态供给曲线和生态补偿标准。假设农户在某地块 s 上可以做出两种利用决策,即 a 和 b 。 a 表示耕地,单位面积耕地的生态系统服务供给量记作 0; b 表示林地,并假设单位面积林地的生态系统服务供给量为 e 。这种假设并不失一般性,因为考虑的是退耕还林生态系统服务价值的变化情况, e 即为退耕还林后单位面积土地所能提供的生态系统服务供给目标。最小数据法

推导过程^[4,23]如图 2。

假如农户对某地块的利用决策是以自身利益最大化为目标的,假设其在单位面积土地上所期望得到的收益为 $v(p,s,z)$,其中 p 表示土地利用产出的价格参数; s 表示地块; $z=a,b$ 表示耕地或林地。若 $w(p,s) = v(p,s,a) - v(p,s,b) \geq 0$,则耕地收益大于林地,农户会选择土地利用方式 a ,反之选 b 。将所有土地单元上的 $\omega(p,s)$ 排序,确定概率密度函数 $\varphi(\omega)$,则可计算出采用土地利用方式 b 的土地单元的比例为 $r(p)$:

$$r(p) = \int_{-\infty}^0 \varphi(\omega) d\omega, 0 \leq r(p) \leq 1 \quad (4)$$

总面积为 H 的土地,在私人均衡下生态系统服务供给的期望值 $s(p)$:

$$s(p) = r(p) \cdot H \cdot e \quad (5)$$

现实施退耕还林补偿,单位生态系统服务价值支付费用 p_e 。当 $z=a$ 时,可获得收益 $v(p,s,a)$;当 $z=b$,可获得收益 $v(p,s,b) + ep_e$ 。当 $\omega(p,s) \geq 0$,且 $\omega(p,s) - ep_e < 0$,农户会选择退耕还林,此时新增生态系统服务机会成本小于生态补偿费,即 $\varphi\left(\frac{\omega}{e}\right) = \frac{\omega(p,s)}{e} < p_e$ 。由此可以推出从 a 转变为 b 的面积比例 $r(p,p_e)$ 和生态系统服务供给总量 $s(p,p_e)$:

$$r(p,p_e) = \int_0^{p_e} \varphi\left(\frac{\omega}{e}\right) d\left(\frac{\omega}{e}\right) \quad (6)$$

$$s(p,p_e) = s(p) + r(p,p_e) \cdot H \cdot e \quad (7)$$

2.5 退耕还林情景设置及空间识别

(1) 退耕还林情景设置

根据规划目标和条件,设置三种情境进行模拟分析。

情景 1:2014 年 6 月,国务院批准《张掖市新一轮退耕还林还草总体方案》,全市申报耕地退耕还林面积 $1.56 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占总耕地面积的 5.17%,故设定情景 1 的目标为实现退耕还林比例 5.17%,相应补偿标准为 4381.35 元/ hm^2 。

情景 2:2015 年 12 月,国家 8 部门联合下发了《关于扩大新一轮退耕还林还草规模的通知》。通知明确指出,国家按照每公顷 22500 元进行退耕还林补助,分三次下发。据此设定情景 2 为每公顷耕地退耕还林每年补助 7500 元,即补偿标准为 7500 元/ hm^2 。

情景 3:根据各乡镇耕地收入统计,黑河中游耕地纯收入均值为 14015.29 元/ hm^2 。在实地调研中发现,研究区坡耕地、沙化耕地及盐碱化耕地等的收益均低于耕地平均机会成本,约为 1500—3000 元/ hm^2 。在此基础上,结合土地适宜性分级的基本方法^[24],以耕地平均机会成本的 20%作为坡耕地、沙化耕地及盐碱化耕地等的平均收益。据此设定情景 3 的补偿标准为 2803.06 元/ hm^2 。

(2) 退耕还林空间识别

① 退耕范围识别。在张掖市《新一轮退耕还林还草总体方案》中,将陡坡耕地、沙化耕地及盐碱地作为退耕对象。因此本研究利用 DEM 数据计算坡度,并基于《中国 1:10 万沙漠分布图》,提取研究区 15° 以上的坡耕地及沙化、盐碱化耕地作为退耕范围。

② 还林空间识别。选取地形(包括海拔、坡度和坡向)、气候(包括年均降水量、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温和太阳总辐射)、土壤(包括有效土层厚度、有机碳含量和土壤质地)和水源(包括地下水埋深和距灌渠距离)四类指标

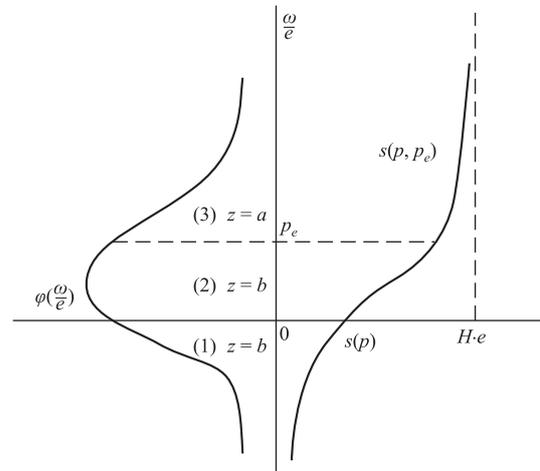


图 2 生态系统服务供给推导

Fig.2 Derivation of ecosystem services supply

11 个因子,通过林地生态适宜性评价进行还林空间识别,指标权重由熵权法获得。利用自然断裂法将评价结果分为 5 类:高度适宜、适宜、较适宜、较不适宜和不适宜。

3 研究结果

3.1 退耕还林后生态系统服务增量

黑河中游不同土地利用类型的生态系统服务供给能力均值如表 1。可以看出,林地在土壤保持和固碳方面均具有最高的供给能力,耕地在水源涵养和土壤保持方面的供给能力均较低。退耕还林后,单位面积水源涵养、土壤保持和固碳三种生态系统服务增量分别为 8.87 mm/m^2 、 105.67 kg/m^2 和 43.16 g/m^2 。

表 1 黑河中游不同土地利用类型的生态系统服务能力

Table 1 Ecosystem service capacity of different land use types in the middle reaches of Heihe River

土地利用类型 Land use type	水源涵养 Water conservation/ (mm/m^2)	土壤保持 Soil conservation/ (kg/m^2)	固碳 Carbon sequestration/ (g/m^2)
耕地 Farmland	28.87	9.59	294.73
林地 Forest	37.74	115.26	337.89
草地 Meadow	60.80	104.35	166.63
水域 Water	7.99	10.32	101.01
建设用地 Construction land	31.78	6.24	97.47
未利用地 Unused land	47.19	28.98	55.97

3.2 补偿标准和退耕还林比例曲线

黑河中游单位耕地机会成本的概率密度分布函数如图 3。在概率密度分布函数基础上,根据公式(4)积分可求得在不进行生态补偿时退耕还林的比例为 1.42%,此时可以增加产水量 $3.8 \times 10^5 \text{ m}^3$,土壤保持量 $4.53 \times 10^6 \text{ t}$,固碳量 $1.85 \times 10^6 \text{ kg}$ 。当实施生态补偿时,根据单位耕地机会成本概率密度分布和公式(6),利用 MATLAB 推出单位耕地补偿价格与退耕比例的关系曲线(图 4)。

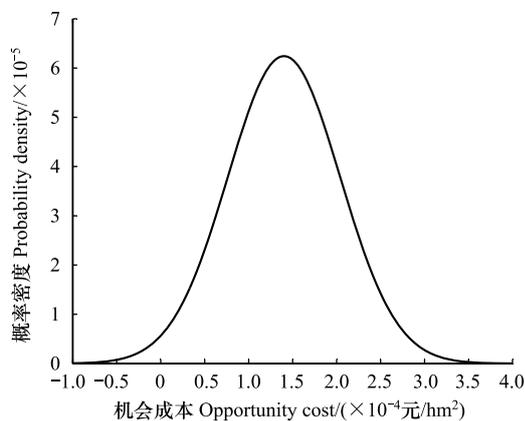


图 3 单位耕地机会成本概率密度函数

Fig.3 The probability density function of opportunity cost Per area of farmland

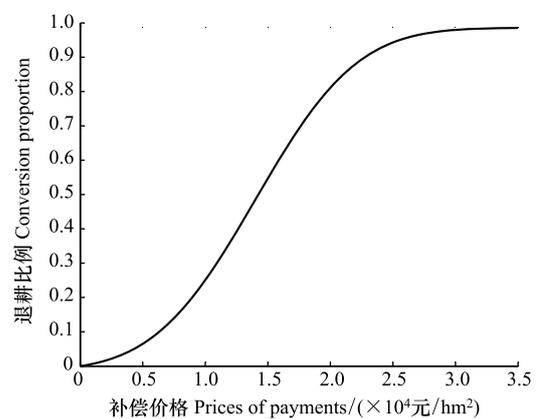


图 4 单位耕地补偿价格与退耕还林比例关系

Fig.4 The relationship between the prices of payments and the area proportion of returning farmland to forest

根据补偿标准与退耕比例关系曲线和单位面积生态系统服务增量,计算出 3 种情景下的补偿标准、退耕比例和生态系统服务供给增量(表 2)。

由表 2 可知,根据最小数据法的计算结果,若要实现《新一轮退耕还林还草总体方案》目标,完成退耕比例 5.17%,耕地补偿标准需达到 4381.35 元/hm^2 ,需要总金额 0.68 亿元。补偿金额与退耕比例为非线性关系,

当补偿标准达到目前政策标准 7500 元/hm²,可实现退耕比例达 13.98%,预计退耕还林补偿总额为 3.16 亿元,而张掖市新一轮退耕还林工程总投资 5.61 亿元,因此新一轮退耕还林的计划投资金额可以满足当前补偿标准下的退耕还林目标。如果以单位坡耕地、沙化耕地及盐碱化耕地退耕还林的机会成本 2083.06 元/hm²为补偿标准,仅能实现 2.55%的耕地退耕,需总金额 0.22 亿元。

表 2 情景模拟结果

Table 2 Results of the scenario simulation

情景 Scenario	情景 1 Scenario1	情景 2 Scenario2	情景 3 Scenario3
补偿标准 Compensation standard/(yuan/hm ²)	4381.35	7500.00	2803.06
退耕比例 Conversion proportion/%	5.17	13.98	2.55
产水增量 Water yield increment/(10 ⁶ m ³)	1.38	3.74	0.68
土壤保持增量 Soil conservation increment/(10 ⁷ t)	1.65	4.46	0.81
固碳增量 Carbon sequestration increment/(10 ⁶ kg)	6.74	18.21	3.32
总金额 Aggregate amount/(10 ⁸ yuan)	0.68	3.16	0.22

3.3 退耕范围确定及林地适宜性分析

黑河中游退耕范围如表 3 和图 5。黑河中游耕地面积为 3018.58 km²,15°以上坡耕地、沙地、戈壁及盐碱地等初步退耕范围为 612.09 km²,占耕地总面积的 20.28%。目前,需退耕的坡耕地面积很小,集中分布在祁连山山前地区,其中 15°—25°耕地面积为 11.30 km²,25°以上坡耕地仅为 1.61 km²,由此可见上一轮的退耕还林工程中,坡耕地的退耕效果显著。沙化耕地、盐碱地和戈壁是退耕还林的主要区域,主要分布在绿洲与未利用地的过渡区域。其中沙化耕地超过退耕范围总面积的 50%,尤其集中分布在中部黑河支流干涸河谷周边。盐碱化的耕地集中于西北部地区,而戈壁则多分布于耕地的边缘地带。

表 3 退耕范围内土地利用类型面积统计

Table 3 Area of the land types in the scope of returning farmland

类型 Type	15°—25°耕地 15°—25° farmland	25°以上耕地 Farmland above 25°	沙化耕地 Desertification farmland	戈壁 Gobi	盐碱地 Saline-alkali soil	退耕范围 Return range	耕地 Farmland
面积 Area/km ²	11.30	1.61	346.06	173.55	79.57	612.09	3018.58

黑河中游退耕范围内的林地适宜性评价结果如表 4 和图 6。山丹县的退耕地林地适宜性最强,其次为临泽县,并且呈现从临泽县向东南和西北两侧适宜性减小的空间分布规律。由表 4 看出,在 612.09 km²的退耕范围内,66.12%耕地适宜退耕还林,其中高度适宜还林的耕地仅有 9 km²,主要是山丹县的一些坡耕地。适宜和较适宜林地生长的面积接近 390 km²,主要分布在临泽县及甘州区和高台县北部靠近黑河干流的区域。不适宜和较不适宜还林的耕地面积为 204.26 km²,占退耕范围总面积的 33.88%,主要分布在民乐县、肃南县及高台和甘州的南部地区。

表 4 黑河中游退耕范围内林地适宜性统计

Table 4 Statistics of forest land suitability in the middle reaches of Heihe River

适宜性 Suitability	高度适宜 Very suitable	适宜 Suitable	较适宜 More suitable	较不适宜 Less suitable	不适宜 Unsuitable
面积 Area/km ²	9.00	183.87	205.81	162.11	42.15
占退耕范围比例 Proportion of returned farmland/%	1.49	30.50	34.13	26.89	6.99

3.4 退耕还林空间识别

针对无生态补偿、情景 1、情景 2 和情景 3 四种情况,根据退耕范围内的林地适宜性评价结果和对应的退

耕比例,基于林地适宜性高的耕地优先退耕的原则,利用 ArcGIS 选取相应的退耕单元,从而识别四种情况下的退耕还林空间分布(图 7 和表 5)。

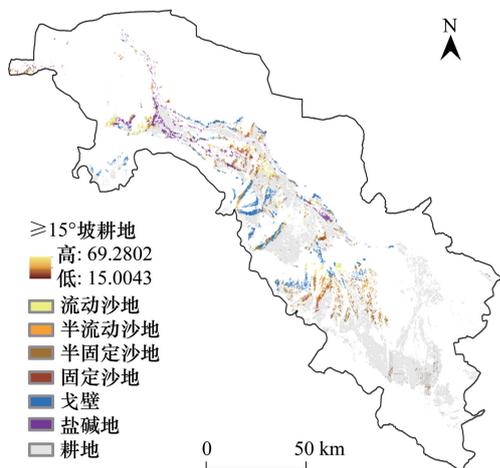


图 5 黑河中游退耕范围

Fig.5 The scope of returning farmland in the middle reaches of Heihe River

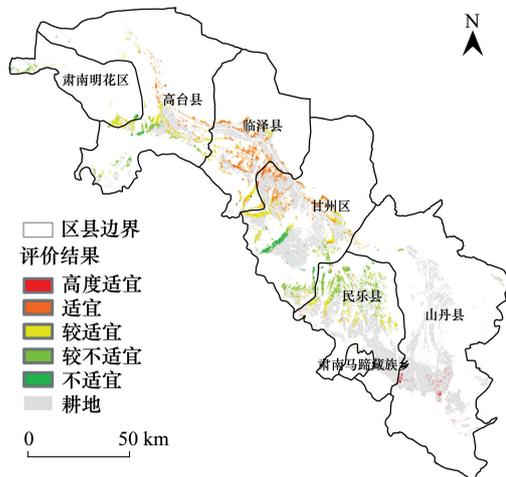


图 6 黑河中游林地适宜性评价结果

Fig.6 The result of forest land suitability evaluation in the middle reaches of Heihe River

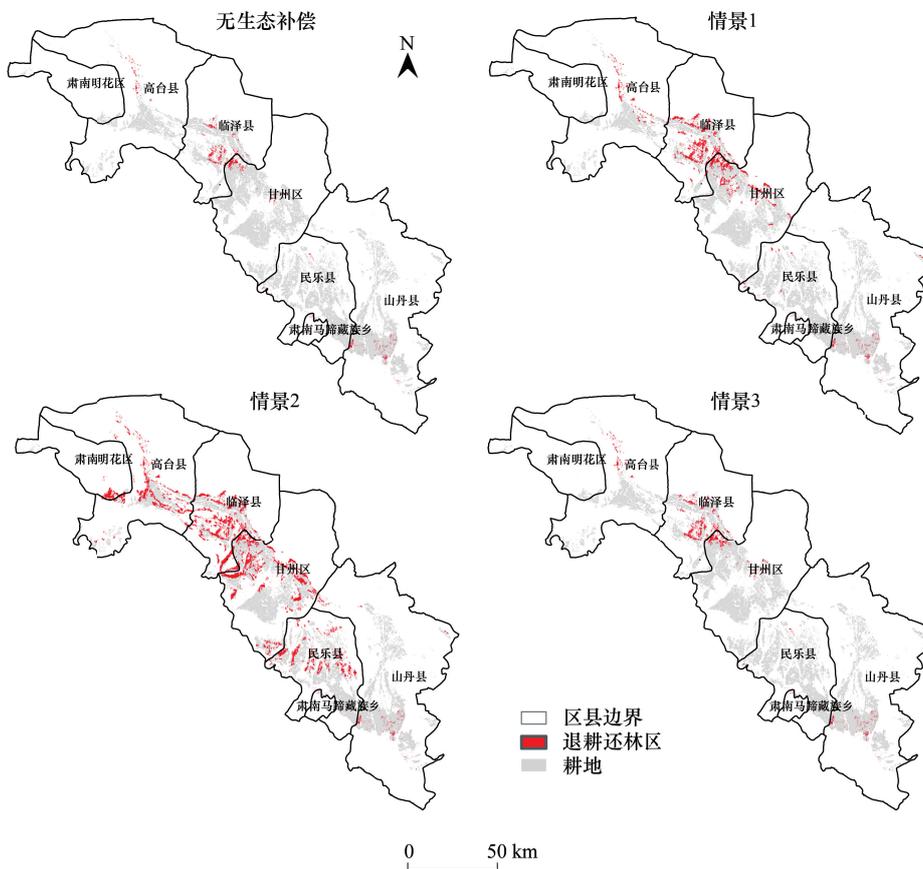


图 7 黑河中游不同情景下的退耕还林空间分布

Fig.7 The spatial distribution in different scenarios in the middle reaches of Heihe River

表 5 黑河中游不同情景下退耕还林统计

Table 5 The statistics table of different scenarios of the Grain for the Green in the middle reaches of Heihe River

类别 Type	无生态补偿 No eco-compensation		情景 1 Scenario 1		情景 2 Scenario 2		情景 3 Scenario 3	
	面积	比例	面积	比例	面积	比例	面积	比例
	Area/km ²	Proportion/%	Area/km ²	Proportion/%	Area/km ²	Proportion/%	Area/km ²	Proportion/%
高度适宜 Very suitable	9.00	21.00	9.00	5.77	9.00	2.13	9.00	11.69
适宜 Suitable	33.86	79.00	147.06	94.23	183.87	43.57	67.97	88.31
较适宜 More suitable	—	—	—	—	205.81	48.77	—	—
较不适宜 Less suitable	—	—	—	—	23.32	5.53	—	—
不适宜 Unsuitable	—	—	—	—	—	—	—	—

由图 7 和表 5 可知,如不实施生态补偿工程,仅有 42.86 km²(1.42%)的耕地愿意实施退耕还林,退耕区域的林地适宜性为高度适宜和适宜类,且退耕还林的地块主要位于走廊平原的临泽县和甘州区,以及地形条件极好的山丹县。

情景 1:根据张掖市实际申报退耕还林面积设定的退耕比例 5.17%。超过 90%的退耕还林地块集中分布于临泽县、甘州区和高台县,尤其是距黑河干流较近的沙化耕地,水源条件较好,全部为高度适宜和适宜类,有利于林地的成活和生长。因此,《张掖市新一轮退耕还林还草方案》中规划实现 5.17%的退耕还林目标具有科学性和可行性,可保障较高的生态效益。

情景 2:根据目前国家的补偿标准 7500 元/hm²设定的退耕还林目标。基于最小数据法的计算,在现行补偿标准下可实现退耕还林面积为 4.22×10⁴ hm²,远超过目前申报的 1.56×10⁴ hm²。空间识别结果显示,临泽县和高台县依旧是主要的还林区域,占总体退耕还林面积的 60%以上。还林耕地中,包含了全部适宜林地生长的地块,仅剩 5.53%的林地适宜性为较不适宜,因此可以基本保障退耕后的林地生长,实现较高的生态收益。

情景 3:根据黑河中游坡耕地、沙化耕地及盐碱化耕地的机会成本 2803.06 元/hm²设定的补偿标准。退耕区域主要分布在临泽县、甘州区、高台县及山丹县,且全部适宜林地生长。但退耕总面积仅有约 0.77×10⁴ hm²,可作为退耕还林资金较少时的备选方案。

4 结论与讨论

黑河中游总体生态系统服务供给能力一般,区域差异较大,呈现东南部能力强,西北部能力弱的空间分布特征。土壤保持和固碳能力最强的均为林地,退耕还林后,单位面积水源涵养、土壤保持和固碳三种生态系统服务增量分别为 8.87 mm/m²、105.67 kg/m²和 43.16 g/m²,表明退耕还林有助于提高生态系统服务的能力。在退耕范围内,66.12%耕地适宜退耕还林,其中高度适宜还林的主要是山丹县的一些坡耕地,适宜和较适宜林地生长的耕地主要分布在黑河干流周边。如果不实施生态补偿工程,仅有 42.86 km²(1.42%)的耕地愿意实施退耕还林;当补偿标准达到 2803.06 元/hm²时,退耕的 76.97 km²(2.55%)地块全部适宜林地生长;当补偿标准达到 4381.35 元/hm²时,可实现 5.17%耕地退耕,且全部为高度适宜和适宜还林的耕地;当补偿金额达到 7500 元/hm²时,可实现退耕比例 13.98%,且多数属于宜林的地块,可基本保障退耕后的林地生长。

随着退耕还林比例从 1.42%到 13.98%的逐渐增加,还林耕地按照林地适应性从高到低逐步增加。退耕还林的空间分布以临泽县为中心,向四周扩张,同时存在以北部耕地和未利用地交界处为基线,由北向南逐步推进扩张的变化趋势。退耕还林的初衷是为了增加生态系统服务供给,促进生态系统平衡,同时帮助农民脱贫致富。但是由于黑河中游干旱的自然地理条件和尖锐的水资源供需矛盾,退耕还林的实施需要科学谨慎,避免盲目退耕导致还林后林木难以成活、水资源矛盾深化等问题。本研究充分考虑这一实际情况,根据不同实施情况构建 3 种退耕还林情景,基于林地适宜性评价结果针对不同情景确定的退耕还林空间单元可以科学指导退耕还林工程实施,保障退耕还林的可行性,实现退耕还林初衷,促进生态系统服务增加。

最小数据法是一种耦合生态系统服务供给与机会成本,利用数学模型推导生态补偿标准与生态系统服务供给曲线的方法。如果实现 5.17% 的耕地退耕还林,利用最小数据法求得每年补偿标准为 4381.35 元/hm²,略小于目前 7500 元/hm² 的补偿标准。因此,利用最小数据法可以求得理论上相对高效和经济的补偿标准。但是,最小数据法并没有考虑退耕还林实际推行过程中的农民意愿、地域文化等其他现实阻力。且退耕还林工程一旦实施,农民将长期无法从耕地中获得收益,而生态补偿是一种短期的资金补助。如果不能将解放出来的生产力创造新的价值,那么从长远角度来看,生态补偿项目难以持续推进。因此针对生态补偿机制的研究,在寻找科学方法确定合理经济补偿标准的同时,需要进一步研究如何建立配套的长效机制,鼓励并帮助失地农民就业致富,这样才能提高农民参与积极性,促进生态补偿项目的可持续发展,最终实现区域生态环境改善,构建生态文明的美丽中国。

参考文献 (References):

- [1] 退耕还林工程. (2015-07-01). http://www.hprc.org.cn/gsgl/dsnb/zdsj/200912/t20091230_39594.html.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment. Washington, DC: Island Press, 2003.
- [3] 徐建英, 刘新新, 冯琳, 桓玉婷. 生态补偿权衡关系研究进展. 生态学报, 2015, 35(20): 6901-6907.
- [4] 徐中民, 李兴文, 赵雪雁, 钟方雷. 甘肃省典型地区生态补偿机制研究. 北京: 中国财政经济出版社, 2011.
- [5] 赖敏, 吴绍洪, 尹云鹤, 潘韬. 三江源区基于生态系统服务价值的生态补偿额度. 生态学报, 2015, 35(2): 227-236.
- [6] 孔凡斌. 江河源头水源涵养生态功能区生态补偿机制研究——以江西东江源区为例. 经济地理, 2010, 30(2): 299-305.
- [7] 周颖, 周清波, 周旭英, 甘寿文, 杨雪萍. 意愿价值评估法应用于农业生态补偿研究进展. 生态学报, 2015, 35(24): 7955-7964.
- [8] 张志强, 徐中民, 程国栋, 苏志勇. 黑河流域张掖地区生态系统服务恢复的条件价值评估. 生态学报, 2002, 22(6): 885-893.
- [9] 刘春腊, 刘卫东. 中国生态补偿的省域差异及影响因素分析. 自然资源学报, 2014, 29(7): 1091-1104.
- [10] 韩洪云, 喻永红. 退耕还林生态补偿研究——成本基础、接受意愿抑或生态价值标准. 农业经济问题, 2014, 35(4): 64-72.
- [11] 韦惠兰, 宗鑫. 禁牧草地补偿标准问题研究——基于最小数据方法在玛曲县的运用. 自然资源学报, 2016, 31(1): 28-38.
- [12] 王雅, 蒙古军. 黑河中游土地利用变化对生态系统服务的影响. 干旱区研究, 2017, 34(1): 200-207.
- [13] Fischer G, Nachtergaele F, Prieler S, van Velthuisen H T, Verelst L, Wiberg D. Global Agro-Ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008). Rome, Italy: IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, 2008.
- [14] Pagiola S, Platais G. Payments for Environmental Services: From Theory to Practice. Washington, DC: World Bank, 2009.
- [15] Budyko M I. Climate and Life. New York: Academic Press, 1974.
- [16] Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, Wood S A, Sharp R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim CK, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Glowinski K, Chaumont N, Perelman A, Lacayo M, Mandle L, Hamel P, Chaplin-Kramer R, Vogl A L. (InVEST) 3.1.0 User's Guide. Stanford: The Natural Capital Project, 2014.
- [17] 王永东, 邱永志, 许波, 张忠良, 李生宇. 参考作物蒸散量计算方法在极端干旱区的适用性. 干旱区研究, 2014, 31(3): 390-396.
- [18] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 刘玉洁. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化. 应用生态学报, 2013, 24(1): 183-189.
- [19] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1978, 537: 1-58.
- [20] 张德铨, 祁威, 周才平, 丁明军, 刘林山, 高俊刚, 摆万奇, 王兆锋, 郑度. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异. 地理学报, 2013, 68(9): 1197-1211.
- [21] 张福平, 冯起, 李旭谱, 魏永芬. 黑河流域 NPP 遥感估算及其时空变化特征. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1657-1664.
- [22] 段靖, 严岩, 王丹寅, 董正举, 代方舟. 流域生态补偿标准中成本核算的原理分析与方法改进. 生态学报, 2010, 30(1): 221-227.
- [23] 宋晓谕, 徐中民, 祁元, 尹小娟, 葛劲松. 青海湖流域生态补偿空间选择与补偿标准研究. 冰川冻土, 2013, 35(2): 496-503.
- [24] 蒙古军. 土地评价与管理(第二版). 北京: 科学出版社, 2011: 113-115.