

DOI: 10.20103/j.stxb.202404050729

胡潇月, 邓晓红, 李宗省. 生态保护与乡村振兴双赢生态补偿标准的模拟与分析——以祁连山国家公园为例. 生态学报, 2024, 44(19): 8751-8763.
Hu X Y, Deng X H, Li Z X. Simulation and analysis of eco-compensation for a 'win-win' situation between ecological protection and rural revitalization: a case study of Qilian Mountain National Park. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8751-8763.

生态保护与乡村振兴双赢生态补偿标准的模拟与分析 ——以祁连山国家公园为例

胡潇月¹, 邓晓红^{1,*}, 李宗省²

¹ 兰州大学经济学院, 兰州 730000

² 中国科学院西北生态环境资源研究院, 干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室, 祁连山同位素生态水文与国家公园观测研究站, 兰州 730000

摘要: 生态补偿作为建设生态文明的重要制度保障和推进乡村振兴的重要机制, 是实现国家公园生态保护与乡村振兴“双赢”目标的重要途径。其中, 补偿标准的制定是实施“双赢”生态补偿机制的关键环节。以祁连山国家公园为例, 将生态补偿标准纳入生态保护-乡村振兴复杂系统之中, 通过构建系统动力学模型, 将不同的发展情景和补偿标准相结合, 仿真模拟生态保护-乡村振兴系统未来发展趋势, 甄选更适合祁连山国家公园“双赢”目标实现的发展路径和生态补偿标准。研究发现: (1) 通过发展路径规划和补偿标准优化, 祁连山国家公园能够实现生态保护和乡村振兴“双赢”。在不同的发展情景中, 综合协调情景为祁连山国家公园实现生态保护和乡村振兴“双赢”发展的最优方案, 该情景能兼顾各子系统之间协调发展的同时, 使生态环境和乡村振兴指数达到最大值。(2) 综合协调情景下, 当补偿标准区间为 129.84—149.24 元/hm², 为“双赢”目标实现下制定生态补偿标准的相对最优方案。(3) 经济优先情景下, 当补偿标准维持现状(128.55 元/hm²) 不变时, 为制定生态补偿标准的相对最优方案。(4) 延续现状和生态优先情景下, 当补偿标准区间为 131.12—173.01 元/hm², 为制定生态补偿标准的相对最优方案。从系统视角剖析祁连山国家公园“双赢”的演化路径, 在一定程度上可以避免做出片面的发展决策, 研究结果不仅为祁连山国家公园体制建设和生态补偿政策实施提供行动指南, 其研究思路和方案设计对其他国家公园实现“双赢”目标具有一定的借鉴意义。

关键词: 生态补偿; 乡村振兴; 生态保护; 系统动力学; 祁连山国家公园

Simulation and analysis of eco-compensation for a 'win-win' situation between ecological protection and rural revitalization: a case study of Qilian Mountain National Park

HU Xiaoyue¹, DENG Xiaohong^{1,*}, LI Zongxing²

¹ School of Economics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

² Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Observation and Research Station of Eco-Hydrology and National Park by Stable Isotope Tracing in Qilian Mountains, Lanzhou 730000, China

Abstract: As an important institutional guarantee for building an ecological civilization in China and an important mechanism for promoting rural revitalization, eco-compensation is an important way to achieve the 'win-win' goals of ecological protection in national parks and rural revitalization. Among them, the formulation of eco-compensation standards is a key link in the implementation of the 'win-win' eco-compensation mechanism. The paper takes Qilian Mountain

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42271288); 国家自然科学基金区域发展联合基金重点项目(U22A20592); 中国科学院青年交叉团队项目(JCTD-2022-18)

收稿日期: 2024-04-05; 网络出版日期: 2024-07-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dengxg@lzu.edu.cn

National Park as an example, incorporates the eco-compensation standard into the complex system of ecological protection and rural revitalization, and simulates the future development trend of ecological protection and rural revitalization system by constructing the system dynamics (SD) model and combining different development scenarios and compensation standards, so as to select the development paths and eco-compensation standards that are more suitable for the Qilian Mountain National Park to achieve the goal of 'win-win' and select a more suitable eco-compensation mechanism. The study found that: (1) Qilian Mountain National Park can achieve 'win-win' development in ecological protection and rural revitalization through development path planning and eco-compensation standard optimization. Among the different development scenarios, the comprehensive coordination scenario is the optimal solution for Qilian Mountain National Park to realize the 'win-win' development of ecological protection and rural revitalization, which can take into account the coordinated development of various subsystems and at the same time, make the ecological environment and rural revitalization index reach the maximum value. (2) Under the comprehensive coordination scenario, when the eco-compensation standard range is 129.84—149.24 yuan/hm², it is the relative optimal solution for the eco-compensation standard under the 'win-win' goal. (3) Under the economic priority scenario, when the eco-compensation standard maintains the status quo (128.55 yuan/hm²) unchanged, it is the relatively optimal solution for setting the eco-compensation standard. (4) Under the continuation of the status quo and ecological priority scenario, when the compensation standard range is 131.12—173.01 yuan/hm², it is the relatively optimal plan for setting the eco-compensation standard. The paper analyzes the evolution path of 'win-win' in Qilianshan National Park from a systemic perspective, to a certain extent, it can avoid making one-sided development decisions, and the results of the study not only provide a guide for the institutional construction of Qilianshan National Park and the implementation of eco-compensation policy, but also a reference point for the other national parks to achieve the goal of 'win-win' in the research and program design. The results of the study not only provide guidelines for the construction of Qilian Mountain National Park and the implementation of eco-compensation policy, but also the research ideas and program design for other national parks to achieve the goal of 'win-win' has a certain reference.

Key Words: eco-compensation; rural revitalization; ecological protection; system dynamics; Qilian Mountains National Park

构建以国家公园为主体的自然保护地体系是我国新时代背景下生态文明制度建设的重要内容。然而,我国国家公园大都位于相对偏远的农村地区,园区内部及周边社区居住着大量相对贫困的农村人口,面临着严峻的生计发展与生态保护冲突^[1]。作为以经济手段解决生态环境问题的有效工具,生态补偿已成为后脱贫时代推进生态保护与乡村振兴“双赢”发展的重要机制^[2],在解决国家公园建设过程中的生态环境保护与社会经济发展失衡问题上被寄予厚望。

生态补偿又称生态系统服务付费(Payments for ecosystem services, PES),是一种将外在的、非市场化的环境价值转化为对环境保护者财政激励的手段,其首要目标是提供生态系统服务价值,协调区域之间、发展与保护之间的利益均衡,促进人与自然和谐共生^[3-6]。自生态补偿政策实施以来,学者们对其能否实现“双赢”、如何实现“双赢”等问题展开热烈探讨。就生态保护而言,现有文献相关研究多聚焦于流域、草原、森林、耕地、大气等领域^[7-11],一致证实生态补偿政策具有正向的环境效应,能够改善受偿区生态环境质量,加强公众环保意识,保证生态系统的稳定性和可持续性^[12-13]。就生态补偿的经济效应而言,学者们的研究结论有所分歧。大多学者认为生态补偿能通过改善农村贫困人口的生活状况与生计水平^[14],拓宽农牧民收入,促进农村剩余劳动力再就业^[15],带动区域经济增长^[16-20]。就实现二者“双赢”而言,部分学者认为生态补偿兼容生态保护与反贫困双重目标,在增加生态保护区内民众经济收入的同时,调动其参与生态环境保护的积极性,实现生态与生计的“双赢”^[21-24]。也有学者对“双赢”目标实现提出相应的担忧。吴乐等认为,生态补偿政策对贫

困户增收的效果不明显,甚至会对农户的长期收入造成负向影响^[25]。李国平等认为生态补偿政策实施过程中,容易产生“改善民生”目标挤出“保护生态环境”目标的问题^[26]。还有学者认为生态补偿政策的减贫目标不能“喧宾夺主”,如果刻意做到两样兼顾,反而会使生态补偿制度失效^[27-29]。当前,有关国家公园生态补偿的研究尚处于破题阶段,主要集中在补偿主体、补偿标准、补偿方式、补偿绩效评估、补偿支付意愿等方面^[30-34]。其中,补偿标准的制定是实施生态补偿机制的关键环节,但鲜有研究从系统视角出发,对国家公园“双赢”目标下实现路径和生态补偿标准同时开展研究,使得我国国家公园构建双赢生态补偿机制的步伐较为缓慢。事实上,国家公园生态保护-乡村振兴系统的变动情况具有复杂性,不仅各子系统之间存在相互作用和影响的关系,同时来自生态补偿政策的外部冲击也将对各子系统运行造成影响,任何一个要素的变化都受制于其他要素,也影响着其他要素,这使得国家公园生态补偿机制不是坚实的结晶体,而是一个能够变化并且经常处于变化过程中的机体^[35]。因此,如何设计合理的生态补偿标准,使国家公园内生态保护与乡村振兴实现良性互动,让生态环境为乡村发展提供可持续发展的资源支持和发展优势,实现生态保护与乡村振兴的“双赢”目标,是当前大力推动国家公园建设面临的艰巨挑战。

系统动力学(System Dynamics, SD)强调用系统、整体的视角,模拟、分析和解决复杂多系统问题。相较传统数学模型,SD模型更能充分反映系统的非线性结构和动态变化趋势,并且着眼于系统整体的最佳目标,为“双赢”目标的实现提供了可行方法^[36]。祁连山国家公园是我国首批设立的10个国家公园体制试点之一,是我国西部重要的生态安全屏障^[37]。当前,祁连山生态环境保护已由生态环境问题集中整治修复转入常态长效保护监管的新阶段,建立健全生态补偿机制是完善其常态化监管机制的必然要求。

鉴于此,本文以祁连山国家公园为例,针对实现生态保护与乡村振兴“双赢”目标建立系统动力学模型,通过将不同的发展情景和补偿标准相结合,仿真模拟祁连山国家公园生态保护-乡村振兴系统未来发展趋势,并基于模型结果研判实现“双赢”的可能性,同时甄选更适合祁连山国家公园“双赢”目标实现的发展路径和补偿标准,以期为建立健全国家公园生态补偿机制和常态长效监管机制,巩固原住民脱贫成果、推动实现乡村振兴,建设人与自然和谐共生的国家公园提供有益启示和决策支持。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

祁连山国家公园地处甘肃和青海两省的交界处,是我国首批设立的10个国家公园体制试点之一,总面积约为5.02万km²。试点区涉及14个县(市、区)45个乡(镇)的246个行政村(牧委会)(图1)。根据2019年国土三调结果,试点区草原面积283.66万公顷,占总面积的56.46%,是其主要土地利用类型,国家在该区域普遍实施了草原补奖政策以进行草原生态保护。受自然条件等因素影响,该区域生态环境脆弱,经济发展水平低,农户主要从事传统的畜牧业、种植业等生计活动,草原补奖政策的实施给当地农户带来了巨大的减畜、生计转型压力。作为生态与贫困问题交织的典型区域,祁连山国家公园协同生态保护与乡村振兴的任务更为艰巨紧迫。由于草原是当地主要的土地利用类型,其生态生产双重属性明显。因此,如何实现草原生态保护的同时促进农牧民增收致富,是实现祁连山国家公园“双赢”目标实现的重点和难点。基于此,文章选择草原生态保护补奖政策作为祁连山国家公园生态补偿政策的典型类型,开展后续仿真研究。

1.2 数据来源与处理

选取祁连山国家公园试点区涉及的14个县(市、区)为研究对象,所涉及的社会经济数据主要源自历年《中国县域统计年鉴》、甘肃省、青海省及研究区各县(市、区)统计年鉴及国民经济和社会发展统计公报、祁连山国家公园管理局官网等国家和地方公开发布的统计资料,个别缺失数据采用插值法和相邻年份替代法补全。鉴于数据完整性与可得性,选择的环境质量数据源自国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(www.geodata.cn)发布的中国历史高分辨率生态环境质量数据集(2001—2021年),空间分辨率500m,

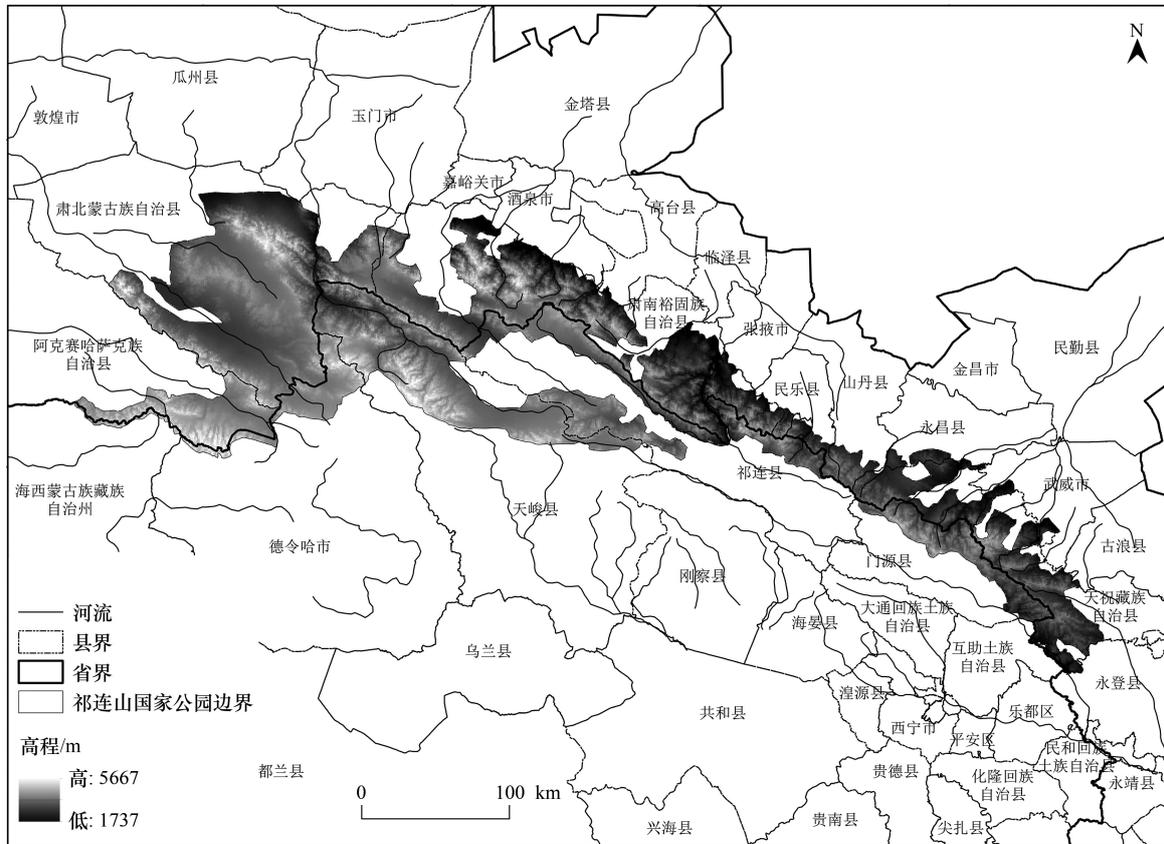


图 1 研究区区位图

Fig.1 Location of the study area

归一化植被指数(NDVI)数据来源于美国国家航空航天局(NASA)发布的 MOD13A3 全球地理信息数据产品,空间分辨率为 1km,植被固碳数据来源于中国碳核算数据库(CEADs, www.ceads.net),PM_{2.5}数据选择达尔豪斯大学大气成分分析工作组发布的 PM_{2.5}数据集,以上栅格数据提取与解析均在 ArcGIS 10.2 软件中进行操作,并进行分区统计处理。

2 研究方法

2.1 乡村振兴指数测度

乡村振兴是乡村全面发展和振兴的综合性概念,是对乡村产业、经济、生态、文化、治理的整体性提升。因此,本文借鉴前人的研究成果^[38-40],在遵循科学性、可行性、可测性和数据可获取性等原则的基础上,构建包含产业兴旺、生态宜居、乡风文明、治理有效和生活富裕五个准则层(子系统),27 个具体指标的祁连山国家公园乡村振兴评价指标体系(表 1)。在此基础上,采用熵值法计算指标权重^[41],计算祁连山国家公园乡村振兴综合指数及五个子系统指数,数值用于后续系统动力学中历史数据的方程拟合。

2.2 系统动力学模型构建

2.2.1 系统边界设定

运用系统动力学的专业软件 Vensim_PLE 进行建模,系统中的空间边界设定为祁连山国家公园,考虑到第一轮草原生态保护补助奖励政策从 2011 年起开始实施,因此将模型时间边界设定为 2011—2035 年,仿真步长为 1 年。其中 2011—2020 年为历史数据年,用于检验模型的科学性和可靠性,2021—2035 年为仿真模拟年,用于模拟祁连山国家公园生态保护-乡村振兴系统未来的发展趋势和“双赢”路径预测。

表 1 乡村振兴评价指标体系

Table 1 Evaluation Index System for Rural Revitalization

子系统 Subsystem	维度 Dimension	具体指标 Specific indicators
产业兴旺 Thriving businesses	农业生产能力	农业机械化水平(U_1)
		粮食生产能力(U_2)
	农业生产效率 产业融合水平	农业劳动生产率(U_3)
		农业从业人数占比(U_4)
		非农产值占总产值比重(U_5)
生态宜居 Pleasant living environment	乡村自然环境	生态环境质量指数(U_6)
		绿化覆盖率(U_7)
		化肥使用强度(U_8)
	乡村生产污染 乡村生活污染	卫生厕所普及率(U_9)
		生活垃圾无害化处理率(U_{10})
		对生活污水集中处理的行政村占比(U_{11})
乡风文明 Social etiquette and civility	文化硬件设施	乡村文化馆数量(U_{12})
		乡村图书馆数量(U_{13})
	文化传播途径	广播覆盖率(U_{14})
		有线电视覆盖率(U_{15})
	文化消费水平 文化教育程度	农村居民教育文化娱乐支出占比(U_{16})
		乡村居民平均受教育年限(U_{17})
治理有效 Effective governance	基层自治参与水平	已编制村庄规划的行政村占比(U_{18})
	基层组织建设水平	政务信息公开率(U_{19})
		法治宣传教育普及率(U_{20})
		农村居民人均可支配收入(U_{21})
生活富裕 Prosperity	农民收入水平	城乡居民收入比(U_{22})
		农民消费结构
	基本公共服务保障水平	农村居民恩格尔系数(U_{24})
		新型农村养老保险参保率(U_{25})
		养老保险参保率(U_{26})
		医院、卫生院床位数(U_{27})

2.2.2 系统结构划分

祁连山国家公园生态保护-乡村振兴系统是一个庞大且复杂的系统,涉及产业、经济、人口、社会、环境、民生、政策等领域,通过解构要素之间复杂的因果循环关系,综合考虑将其划分为经济子系统、社会子系统、环境子系统和民生子系统,各子系统变量选取如图 2 所示。

2.2.3 系统方程构建

如图 2 所示,基于代表性、重点性、可获得性、精简性等原则,选取相关变量,利用 Vensim_PLE 软件绘制系统流量存量图,量化各变量的参数值,建立结构方程并输入系统动力学模型,方程以原始数据为基础,参数的初始值利用表函数、算术平均法、趋势外推法、回归分析法、灰色预测模型^[42]等分析拟合得到,主要变量方程如表 2 所示。

3 情景模拟及结果分析

3.1 模型检验

在采用 SD 模型进行实际模拟预测前,选择历史仿真检验对模型进行有效性检验,检验结果如表 3。检验结果显示,2011—2020 年间关键变量的相对误差均介于-4%—4%之间,相对误差较小,通过检验^[43]。从各个变量的历史检验结果来看,模拟的结果与研究区实际社会、经济、生态发展的历史数据基本一致,判定模型能够相对准确地反映祁连山国家公园的现实发展情况。

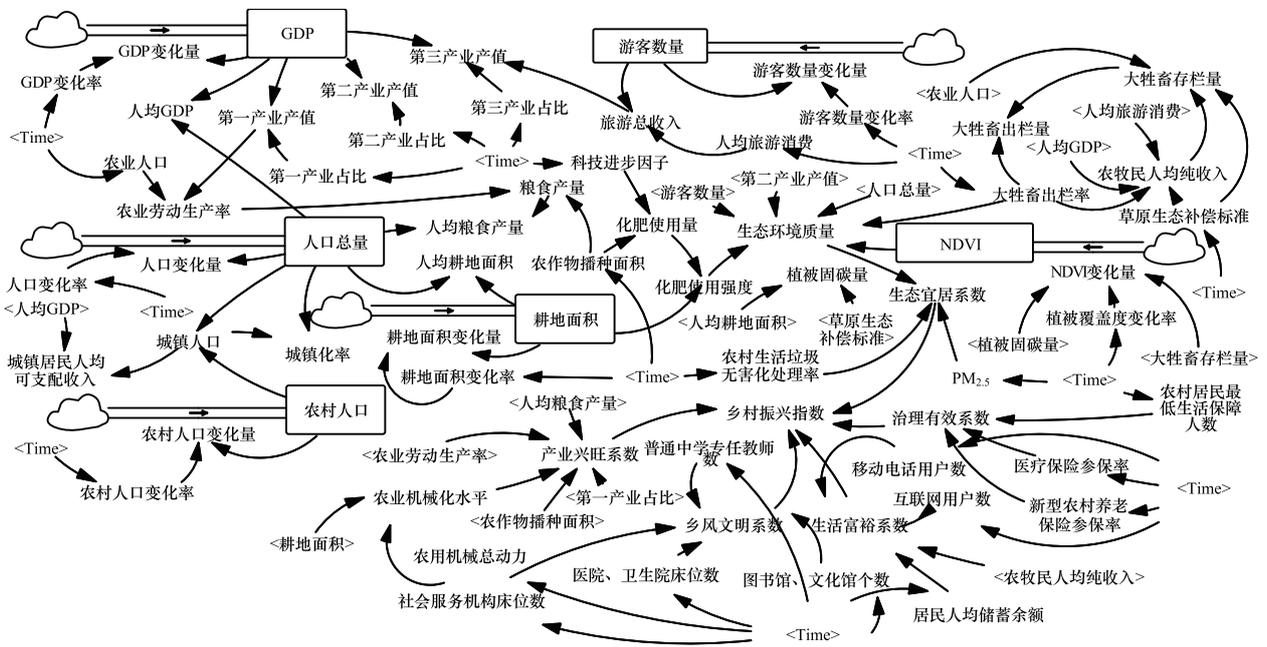


图2 生态保护-乡村振兴系统流量存量图

Fig.2 Inventory flow diagram of "Ecological Protection-Rural Revitalization" system

表2 SD模型主要变量方程式

Table 2 Main variables and their equations of the SD model

变量类型 Variable type	主要变量 Main variables	方程式 Equation	单位 Unit
状态变量 State variable	GDP	$y = \text{INTEG}(\text{GDP 变化量}, 479.39)$	亿元
	耕地面积	$y = \text{INTEG}(\text{耕地面积变化量}, 33.47)$	万 hm^2
	人口总量	$y = \text{INTEG}(\text{人口变化量}, 219.14)$	万人
	NDVI	$y = \text{INTEG}(\text{NDVI 变化量}, 0.391)$	—
速率变量 Rate variable	GDP 变化量	$y = \text{GDP} \times \text{GDP 变化率}$	万元
	耕地面积变化量	$y = \text{耕地面积} \times \text{耕地面积变化率}$	万 hm^2
	人口变化量	$y = \text{人口总量} \times \text{人口变化率}$	万人
辅助变量 Auxiliary variable	人均 GDP	$y = \text{GDP} / \text{人口总量}$	元
	第一产业产值	$y = \text{GDP} \times \text{第一产业占比}$	亿元
	粮食产量	$y = 30347.1 \times \text{农业劳动生产率} + 2789.01 \times \text{农作物播种面积} + 485836$	t
	人均粮食产量	$y = \text{粮食产量} / \text{人口总量} / 10$	kg/人
	城镇化率	$y = \text{城镇人口} / \text{人口总量}$	%
	化肥使用强度	$y = \text{化肥使用量} / (\text{耕地面积} \times 10)$	kg/ hm^2
	大牲畜存栏量	$y = 0.015 \times \text{农牧民人均纯收入} - 53.73 \times \text{草原生态补偿标准} + 2.438 \times \text{农业人口} + 1062.49$	万只
	农牧民人均纯收入	$y = 0.346 \times \text{人均 GDP} + 5.632 \times \text{人均旅游消费} + 18815.2 \times \text{大牲畜出栏率} + 606.83 \times \text{草原生态补偿标准} - 17389.7$	元/人
	植被固碳量	$y = -81.522 - 1.444 \times \text{草原生态补偿标准}^2 + 27.201 \times \text{草原生态补偿标准} + 313.646 \times \text{人均耕地面积}$	万 t
	产业兴旺系数	$y = -0.119 + 0.026 \times \text{农业劳动生产率} + 0.169 \times \text{第一产业占比} + 0.001 \times \text{农业机械化水平} + 0.001 \times \text{农作物播种面积} + 7.8 \times 10^{-5} \times \text{人均粮食产量}$	—
	治理有效系数	$y = -0.005 \times \text{农村居民最低生活保障人数} + 0.846 \times \text{医疗保险参保率} + 0.655 \times \text{新型农村养老保险参保率} + 0.179$	—
	生态宜居系数	$y = 0.29 \times \text{农村生活垃圾无害化处理率} - 0.003 \times \text{PM}_{2.5} + 0.939 \times \text{生态环境质量} + 0.562$	—
	乡村振兴指数	$y = 0.2 \times \text{乡风文明系数} + 0.2 \times \text{产业兴旺系数} + 0.2 \times \text{治理有效系数} + 0.2 \times \text{生态宜居系数} + 0.2 \times \text{生活富裕系数}$	—

表 3 SD 模型历史检验结果

Table 3 Historical simulation results of the SD model

年份 Year	GDP/亿元 GDP			第一产业总产值/亿元 Primary industry output value			粮食产量/万 t Grain yield		
	真实值	仿真值	误差/%	真实值	仿真值	误差/%	真实值	仿真值	误差/%
2011	479.39	479.39	0.00	85.05	85.04	-0.01	152.01	152.10	0.06
2015	634.23	634.25	0.00	127.30	127.30	0.00	165.27	160.69	-2.78
2020	812.02	811.84	-0.01	197.04	197.06	0.01	167.90	166.17	-1.03
年份 Year	人口总量/万人 Total population			大牲畜存栏量/万只 Large livestock inventory			化肥使用强度/(kg/hm ²) Fertilizer usage intensity		
	真实值	仿真值	误差/%	真实值	仿真值	误差/%	真实值	仿真值	误差/%
2011	219.14	219.14	0.00	926.96	917.43	-0.01	440.43	440.43	0.00
2015	217.57	217.56	-0.01	987.82	966.32	-0.02	434.15	430.92	-0.74
2020	191.76	191.75	0.00	1028.85	1000.07	-0.03	278.70	278.64	-0.02
年份 Year	归一化植被指数(NDVI) Normalized difference vegetation index			生态环境质量 Ecological environment quality			乡村振兴指数 Rural revitalization index		
	真实值	仿真值	误差/%	真实值	仿真值	误差/%	真实值	仿真值	误差/%
2011	0.390	0.390	0.00	0.396	0.394	-0.59	0.253	0.254	0.40
2015	0.406	0.404	-0.34	0.399	0.409	2.44	0.294	0.284	-3.51
2020	0.413	0.410	-0.56	0.420	0.419	-0.38	0.332	0.330	-0.60

由于关联“双赢”目标的 SD 模型复杂,子系统内部涉及变量众多,故选取 GDP、第一产业总产值等九个关键指标进行历史仿真检验,检验年份为 2011—2020 年

3.2 仿真情景与参数设定

在通过仿真模型检验的基础上,选取 GDP 变化率、第三产业占比、人口变化率、农作物播种面积、科技进步因子等 9 个变量作为模型的调控参数,从未来经济结构、人口迁移形势、生态政策落实、科技助力发展等方面设计延续现状、经济优先、生态优先和综合协调 4 类发展情景,在每种情景下设置 3 种补偿方案,将其与 4 类发展情景进行排列组合,共得到 12 种补偿情景方案。对多种情景方案下祁连山国家公园生态保护—乡村振兴系统 2021—2035 年的发展趋势进行模拟分析,甄选祁连山国家公园实现生态保护和乡村振兴“双赢”目标的最佳发展方案,并以此为依据得到兼顾祁连山国家公园“双赢”目标实现的草原生态补偿标准。

假设草原生态补偿标准仅由禁牧补助和草畜平衡补贴两种补贴组成,由于祁连山国家公园内各县(市、区)草原生态补偿额度视其草原类型、草原面积、草原质量等各不相同,经过测算取其平均值代表现状补偿标准,即 128.55 元/hm²。与此同时,考虑到我国草原生态保护补助奖励资金是国家为实施草原生态保护补助奖励机制,转变畜牧业发展方式,促进农牧民持续增收,维护国家生态安全而设立的专项资金,以 5 年为一个实施周期,实行专款专用,结合实际用于支持草原生态修复和保护。当前,国家正不断健全补偿标准动态调整机制,不失一般性,将草原生态补偿标准设定为维持基准标准不变、平均每年增长 1%(补偿区间为 129.84—149.24 元/hm²)、平均每年增长 2%(补偿区间为 131.12—173.01 元/hm²) 三种补偿方案。其余参数根据甘肃省、青海省《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纲要》以及《“十四五”林业和草原发展规划》、《祁连山国家公园体制试点实施方案》等规划方案,结合相关文献^[44-45]确定,具体参数设置见表 4。

3.3 仿真结果与分析

3.3.1 延续现状情景及补偿方案选择

延续现状情景是对当前祁连山国家公园发展状态的进一步延伸,对模型中相关变量参数的发展趋势不加干预,得到的模拟结果。从图 3 可知,如果产业结构保持不变,人均 GDP 将呈现稳步上升趋势,2035 年将达到 129128 元/人,城镇化率将达到 58.76%,在四种情景模式中排名第二,验证了现有发展模式的相对可持续性。按照现有的耕地保护措施,耕地面积将呈现持续下降的趋势,但由于科技进步推动,人均粮食产量稳步上升。相较 2020 年,2035 年人均粮食产量增长了 45.1%,为 1236.34 kg/人。随着祁连山国家公园生态保护工

作有序开展,化肥使用强度逐年降低,2035 年降低至 231.27 kg/hm²,较 2020 年下降 66.25 kg/hm²。

表 4 不同补偿情景方案下核心变量参数设置

Table 4 Setting of core variable parameters under different eco-compensation scenarios

变量 Variable	延续现状情景 Current situation			经济优先情景 Economic priority scenario			生态优先情景 Ecological priority scenario			综合协调情景 Comprehensive coordination scenario		
GDP 变化率 GDP change rate	0.065			0.078			0.052			0.07		
第一产业占比 The proportion of primary industry	0.2432			0.2675			0.2008			0.2554		
农业人口 Agricultural population	53.24			55			50.58			54.83		
农作物播种面积 Crop sowing area	375.9			377.9			371.9			375.9		
第三产业占比 The proportion of the tertiary industry	0.5058			0.5311			0.4886			0.521		
游客数量变化率 Tourist numbers change rate	0.1			0.12			0.08			0.1		
人口变化率 Population change rate	-0.0084			-0.001			-0.012			-0.009		
耕地面积变化率 Cultivated land area change rate	0			-0.007			0.014			0.0046		
科技进步因子 Technological progress factor	0.2696			0.3			0.268			0.2696		
草原生态补偿标准 Grassland PES standards	不变	+1%	+2%	不变	+1%	+2%	不变	+1%	+2%	不变	+1%	+2%
情景方案编号 Scenario plan number	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12

如图 4 所示,在延续现状情景下设置三种不同的草原生态补偿方案,植被固碳量均实现增加,NDVI 均呈现先上升后下降的态势,当补偿标准以 2% 的增长率逐年提升时,2029 年 NDVI 数值达到峰值 0.421,后缓慢下降至 2035 年的 0.415,在三种方案中较为理想。同样当补偿标准以 2% 的增长率逐年提升时,2035 年生态环境质量和乡村振兴指数达到最大,分别为 0.433 和 0.504,农牧民人均纯收入也达到 54140.8 元/人,实现大幅提升。说明在延续现状情景下,当补偿标准以 2% 的年增长率提升时,为该情景下制定生态补偿标准的相对最优方案。延续现状情景虽能一定程度上反映祁连山国家公园生态保护-乡村振兴系统稳定向好发展的态势,但草原生态环境存在恶化的可能,因此该情景仍需进一步优化。

3.3.2 经济优先情景及补偿方案选择

由图 3 可知,此情景下 2035 年祁连山国家公园第一产业产值将达到 790.14 亿元,人均 GDP 为 137601 元/人,乡村经济发展迅速。但是耕地面积快速下降,2035 年人均耕地面积仅为 0.164 hm²/人,间接影响了祁连山地区的粮食产量,人均粮食产量在四种模式中排名最后,严重威胁到粮食安全。在经济快速增长的同时,也给祁连山国家公园的生态环境带来了巨大压力,相较其他三种模式中化肥使用强度均大幅下降的良好发展趋势,经济优先情景下化肥使用强度不降反增,不利于祁连山国家公园生态保护修复。

如图 4 所示,在经济优先情景下设置三种不同的草原生态补偿方案,植被固碳量均呈现下降态势。当补偿标准维持现状不变时,降幅最低。NDVI、生态环境质量曲线呈现先上升再下降的趋势,后期下降幅度相较其它情景而言最为明显。而乡村振兴指数在所有情景方案中也仅超过生态优先情景,当草原生态补偿标准维持 128.55 元/hm²不变时,2035 年农牧民人均纯收入将达到最大值,为 56186.2 元/人。此时乡村振兴指数在三种补偿方案中也最为理想,2035 年其数值将达到 0.495。说明在经济优先情景下,当补偿标准维持现状不

变时,为该情景下制定生态补偿标准的相对最优方案。经济优先情景下虽然能带动经济大幅增长,但经济一味高速增长反而会制约祁连山国家公园“双赢”目标实现,威胁系统的可持续发展。

3.3.3 生态优先情景及补偿方案选择

由图 3 可知,相较其他情景,生态优先情景下城镇化率和第一产业产值排名最后,由于技术进步相对较为缓慢,粮食产量增长的优势也尚不明显。但是耕地资源得到了有效保护,2035 年人均耕地面积将达到 0.253 hm²/人,化肥使用强度也实现大幅减少,2035 年其数值仅为 157.69 kg/hm²,相较 2020 年下降了 47%。

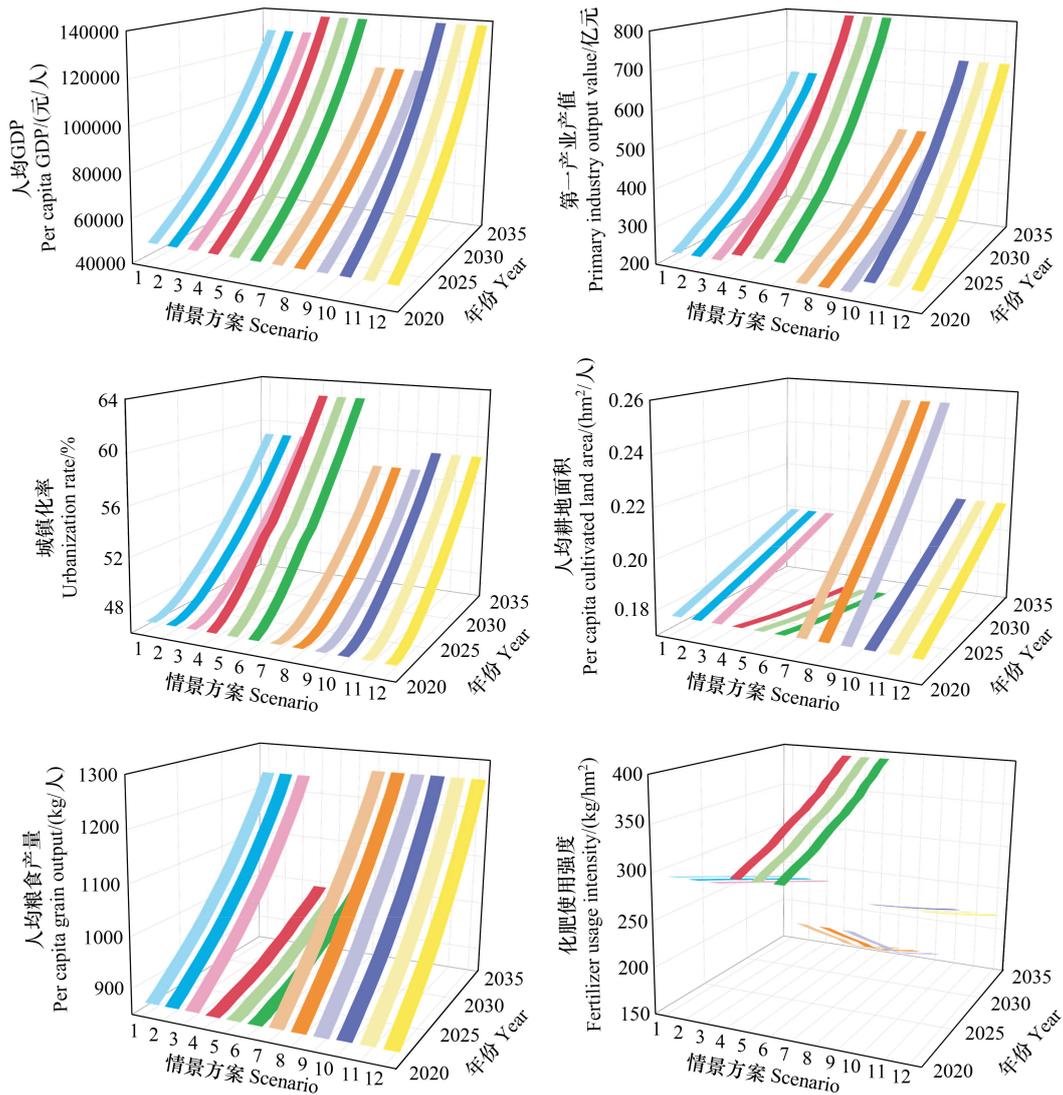


图 3 不同发展情景下祁连山国家公园生态保护-乡村振兴系统主要变量变化趋势

Fig.3 Trends in major variables of the “Ecological Protection-Rural Revitalization” system in Qilian Mountain National Park under different development scenarios

如图 4 所示,在生态优先情景下设置三种不同的草原生态补偿方案,植被固碳量曲线均呈现上升趋势,其上升幅度高于其他 9 种情景方案。NDVI 曲线依然呈现先上升后下降的发展态势,说明过度保护环境反而会... 生态环境质量指数和乡村振兴指数均呈现缓慢上升趋势,同样当补偿标准以 2% 的增长率逐年提升时,2035 年生态环境质量和乡村振兴指数达到最大,分别为 0.435 和 0.468,农牧民人均纯收入也将达到 54013.4 元/

人。说明在生态优先情景下,当补偿标准以 2% 的年增长率提升时,为该情景下制定生态补偿标准的相对最优方案。生态优先情景虽然能有效保护祁连山国家公园生态环境,但较低的粮食产量、城镇化率和经济增长水平无法满足人民日益增长的物质文化需求,乡村振兴指数在所有情景中排名最后,不利于实现祁连山国家公园“双赢”目标。

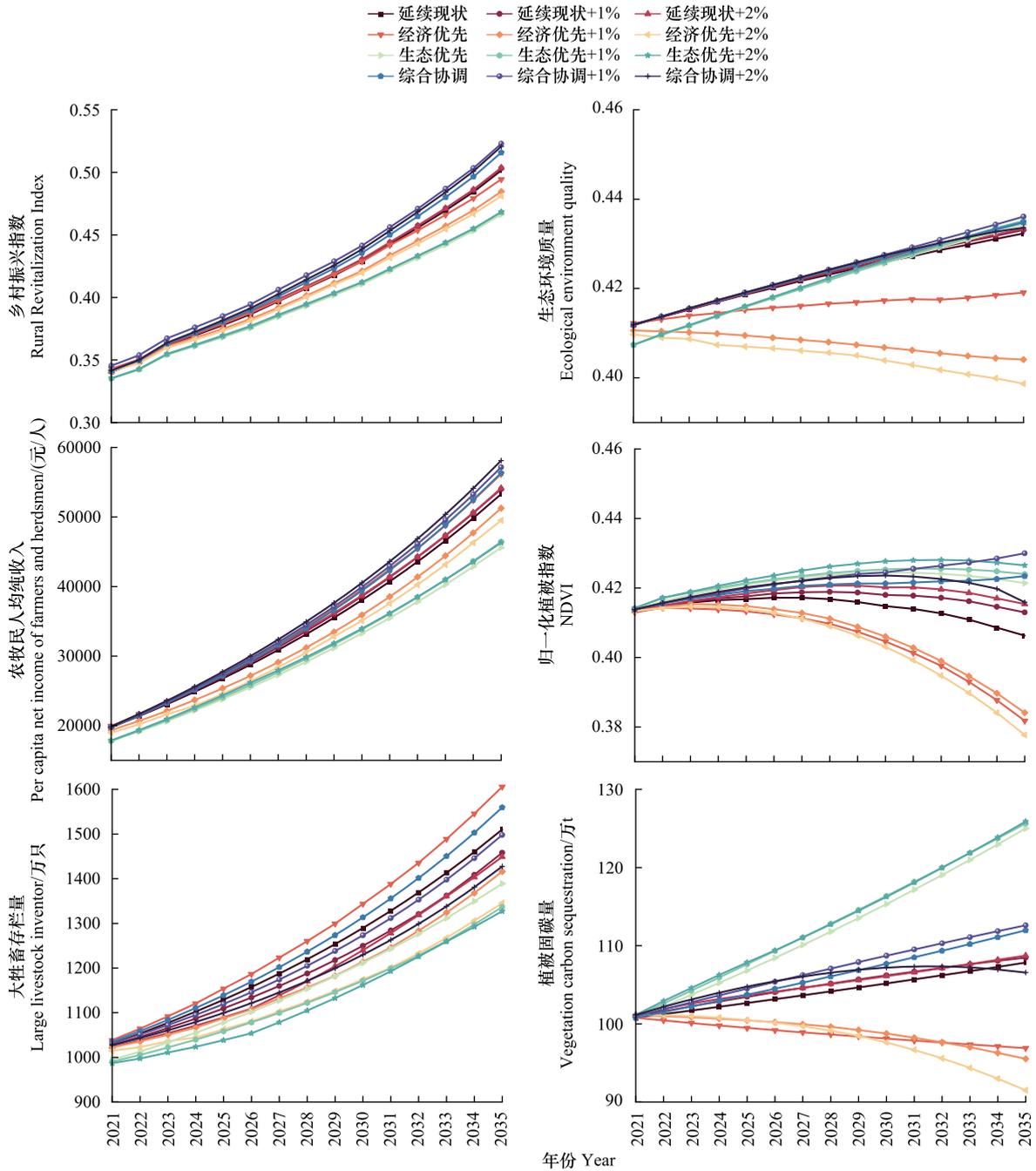


图 4 不同补偿情景方案下祁连山国家公园生态保护-乡村振兴系统主要变量变化趋势

Fig.4 Trends in major variables of the “Ecological Protection-Rural Revitalization” system in Qilian Mountain National Park under different eco-compensation scenarios

3.3.4 综合协调情景及补偿方案选择

对照我国到 2035 年基本实现现代化的远景目标和要求,通过加强产业结构转型升级、优化生态政策、加

大科研投入等设计综合协调情景方案。从图 3 可知,该情景下 2035 年祁连山国家公园城镇化率为 58.28%,第一产业产值为 679.39 亿元,人均 GDP 为 137880 元/人。其中,人均 GDP 将在 2030 年反超发展经济情景,排名上升到第一。2035 年,祁连山国家公园 GDP 为 2020 年的 2.9 倍,人均 GDP 为 2020 年的 2.26 倍,有望如期实现经济总量或人均收入“翻一番”目标。同时,人均粮食产量在四种发展情景中最高,能够较好地保障当地居民的口粮需求和国家粮食安全。在综合协调情景下,耕地面积不仅实现缓慢增加,化肥使用强度也实现逐年大幅下降,其程度仅次于生态优先情景。

从 NDVI、植被固碳量和生态环境质量 3 个指标可以看出,综合协调情景给生态环境子系统带来的压力最小。如图 4 所示,在发展情景与补偿标准结合的 12 种补偿情景方案中,仅有综合协调情景下的 2 种方案使得草地 NDVI 呈现不断上升趋势,上升幅度为补偿标准+1%年增长率>补偿标准不变。而当补偿标准以 2%的年增长率提升时,与其他 10 种情景方案一样,NDVI 呈现先上升后下降的发展态势,即并不是补偿标准越高越有利于草原生态系统恢复。当补偿标准以 1%的年增长率提升时,植被固碳量曲线上升幅度最大,生态环境质量和乡村振兴指数也将于 2035 年分别达到 0.436 和 0.523,优于其余补偿方案。说明在综合协调情景下,当补偿标准以 1%的年增长率提升时,为兼顾“双赢”目标实现下制定生态补偿标准的最优方案。总体而言,在所有发展情景模式下,仅有综合协调情景在实现乡村振兴的同时有效保护生态环境,真正实现“双赢”目标。

4 讨论与结论

4.1 讨论

通过协调生态保护和乡村振兴系统的各要素,在实施合理的生态补偿标准下,祁连山国家公园生态补偿政策能够促进区域实现生态保护与乡村振兴“双赢”。文章研究结果显示(图 4),不论在何种补偿情景方案下,农牧民人均纯收入和大牲畜存栏量曲线都呈现上升趋势。虽然禁牧封育政策的推广使得祁连山国家公园片区总体牲畜头数减少了,但由于优质绒山羊、高产奶牛存栏数持续增加、大力发展规模养殖,促进传统畜牧业向现代畜牧业发展方式转变,农牧民人均纯收入和大牲畜存栏量都取得了不升反降的良好成效。在乡村振兴战略背景下,祁连山国家公园坚持以“两山”理念为指导,乡村振兴指数在所有情景方案下稳步上升,为实现“双赢”目标提供有力支撑。同样也能清晰地看到,在四种发展情景模式下,仅有综合协调情景在实现乡村振兴的同时能够有效保护生态环境,真正实现“绿水青山就是金山银山”。因此,祁连山国家公园可参考综合协调情景中各项参数设置,通过优化生态补偿标准、加强产业结构转型升级、加大科研投入等举措,进一步推动“双赢”目标实现。并不是补偿标准越高越有利于草原生态系统恢复,相关学者的研究也证明了这一点^[46-47]。随着生态移民工程和生计不断转型,祁连山国家公园从事畜牧业的农牧民数量不断减少,如果不断提高生态补偿标准,农牧民则会彻底脱离草原,导致草原被“撂荒”,长期禁牧反而会导致草地质量退化。因此,在实际政策制定时,在不同的发展目标下制定差异化补偿标准则显得尤为重要。

通过对祁连山地区农牧民开展问卷调查,发现当地农牧民对补偿方式倾向于现金补偿,实物补偿中的粮食补偿、家畜精饲料、地膜种子等生产资料补偿,项目补偿中的增加工作机会以及智力补偿中的无偿的技术咨询与指导。基于仿真结果,结合区域以生态环境保护优先、兼顾社会和经济发展的特殊发展目标,建议祁连山国家公园片区(1)适度提高草原生态补偿标准,结合保护优先度、不同牧区草地生态恢复难度以及农牧民受偿意愿,确定差异化补偿标准,精准施策。(2)依托祁连山国家公园独特的自然禀赋,构建以生态农业、生态畜牧业、生态旅游为支撑的生态产业体系,推进农牧民群众开展民俗文化体验、牧家乐、家庭旅馆等特许经营活动,提升可持续生计水平。(3)加强科技攻关力度,逐步推进生态补偿机制管理决策平台建设。采用虚拟化和云计算技术,建设省级云基础数据中心及省、市、县三级应用平台,综合展现生态环境资源本底信息、生态补偿资金计算分配基础数据及相关指标等信息,为建立健全祁连山国家公园生态补偿机制提供决策依据。

文章旨在为高质量推进祁连山国家公园建设,寻求生态保护与乡村振兴协同共生的“双赢”模式提供参考。研究构建的生态保护-乡村振兴系统动力学模型模拟结果与历史数据的误差小、拟合程度高,具有良好

的模拟性和稳定性,能够较好地反映祁连山国家公园真实发展情况,是实现多目标协同优化的可行方法。从系统的角度剖析祁连山国家公园生态保护与乡村振兴的发展路径与规律,在一定程度上可以避免做出片面的发展决策。随着后续数据获取渠道的拓展,未来需要收集研究区生态保护、产业发展、乡村反贫风险户及乡村振兴情况等更为全面的社会经济数据和更高精度的影像数据,将其纳入文章构建的系统动力学模型中,就各区县之间的差异性进行深入探讨,并且检验模型的普适性,为其他国家公园探索实现“双赢”目标提供新思路。

4.2 结论

本研究将生态补偿标准纳入祁连山国家公园生态保护-乡村振兴复杂系统之中,通过构建系统动力学模型,将不同的发展情景和补偿标准相结合,对祁连山国家公园生态保护与乡村振兴“双赢”目标实现路径进行模拟分析,并以此为依据得到兼顾“双赢”目标实现的草原生态补偿标准。主要结论如下:(1)通过发展路径规划和补偿标准优化,祁连山国家公园能够实现生态保护和乡村振兴“双赢”。在不同的发展情景中,综合协调情景为祁连山国家公园实现生态保护和乡村振兴“双赢”发展的最优方案,该情景能兼顾各子系统之间协调发展的同时,使生态环境和乡村振兴指数达到最大值。(2)在综合协调情景中,当补偿标准区间为129.84—149.24元/hm²,2035年生态环境质量和乡村振兴指数将分别达到0.436和0.523,为兼顾“双赢”目标实现下制定生态补偿标准的相对最优方案。(3)经济优先情景下,当补偿标准维持现状(128.55元/hm²)不变时,2035年生态环境质量和乡村振兴指数将分别达到0.419和0.495,为该情景下制定生态补偿标准的相对最优方案。(4)延续现状和生态优先情景下,当补偿标准区间为131.12—173.01元/hm²,2035年生态环境质量将分别达到0.433和0.435,乡村振兴指数将分别达到0.504和0.468,为上述两种情景下制定生态补偿标准的相对最优方案。研究结果能够为祁连山国家公园实现乡村振兴战略的路径选择、以及优化制定国家公园生态补偿标准提供参考依据,其研究思路和方案设计可以推广到其他国家公园实现“双赢”目标的管理和决策之中。

参考文献(References):

- [1] 赵雪雁,苏慧珍.国家公园可持续生计研究框架及关键议题.自然资源学报,2023,38(9):2217-2236.
- [2] Deng X H, Yan S L, Song X Y, Li Z X, Mao J H. Spatial targets and payment modes of win-win payments for ecosystem services and poverty reduction. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108612.
- [3] 赖力,黄贤金,刘伟良.生态补偿理论、方法研究进展.生态学报,2008,28(6):2870-2877.
- [4] 李文华,刘某承.关于中国生态补偿机制建设的几点思考.资源科学,2010,32(5):791-796.
- [5] 欧阳志云,郑华,岳平.建立我国生态补偿机制的思路与措施.生态学报,2013,33(3):686-692.
- [6] 邓晓红,宋晓瑜,祁元,王宏伟,徐中民.区域高环境风险行业生态补偿对象及补偿标准分析.中国人口·资源与环境,2019,29(2):34-42.
- [7] 马军旗,乐章.黄河流域生态补偿的水环境治理效应——基于双重差分方法的检验.资源科学,2021,43(11):2277-2288.
- [8] Pagiola S. Payments for environmental services in Costa Rica. *Ecological Economics*, 2008, 65(4): 712-724.
- [9] 邓远建,肖锐,严立冬.绿色农业产地环境的生态补偿政策绩效评价.中国人口·资源与环境,2015,25(1):120-126.
- [10] 龚心语,黄宝荣,邓冉,黄凯,孙晶,张丛林.自然保护区退牧还草生态补偿标准——以向海国家级自然保护区为例.生态学报,2021,41(12):4694-4706.
- [11] 涂振宇,踪家峰.生态补偿能改善城市空气质量吗?中国人口·资源与环境,2021,31(10):118-129.
- [12] 李影,李宝林,祁佳丽,袁焯城,蒋育昊,刘岩,刘海江.国家重点功能区转移支付对生态系统格局变化的县域对比分析.生态学报,2022,42(11):4369-4378.
- [13] 秦炳涛,俞勇伟,葛力铭.水环境区域补偿的改善效应及机制研究——基于江苏省的准自然实验.华东经济管理,2022,36(2):21-31.
- [14] 吴乐,靳乐山.生态补偿扶贫背景下农户生计资本影响因素研究.华中农业大学学报:社会科学版,2018(6):55-61,153-154.
- [15] 李坦,徐帆,祁云云.从“共饮一江水”到“共护一江水”——新安江生态补偿下农户就业与收入的变化.管理世界,2022,38(11):102-124.
- [16] Kinzig A P, Perrings C, Chapin F S 3rd, Polasky S, Smith V K, Tilman D, Turner B L 2nd. Sustainability. Paying for ecosystem services—promise and peril. *Science*, 2011, 334(6056): 603-604.
- [17] 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.

- [18] Wünscher T, Wunder S. Conservation tenders in low-income countries: opportunities and challenges. *Land Use Policy*, 2017, 63: 672-678.
- [19] 蒋振, 高雅罕, 靳乐山. 牧户的草原生态补偿政策满意度与支持度——基于 CSI 框架和 SEM 的检验. *生态学报*, 2024, 44(1): 196-208.
- [20] 李一花, 李佳. 生态补偿有助于脱贫攻坚吗? ——基于重点生态功能区转移支付的准自然实验研究. *财贸研究*, 2021, 32(5): 23-36.
- [21] 王曙光, 王丹莉. 减贫与生态保护: 双重目标兼容及其长效机制——基于藏北草原生态补偿的实地考察. *农村经济*, 2015(5): 3-8.
- [22] Bremer L L, Farley K A, Lopez-Carr D, Romero J. Conservation and livelihood outcomes of payment for ecosystem services in the Ecuadorian Andes: what is the potential for 'win-win'? *Ecosystem Services*, 2014, 8: 148-165.
- [23] 李新, 勾晓华, 王宁练, 盛煜, 金会军, 祁元, 宋晓谕, 侯扶江, 李育, 赵长明, 邹松兵, 王宏伟, 郑东海, 陈莹莹, 牛晓蕾. 祁连山绿色发展: 从生态治理到生态恢复. *科学通报*, 2019, 64(27): 2928-2937.
- [24] 吴凤平, 邵志颖, 季英雯. 新安江流域横向生态补偿政策的减排和绿色发展效应研究. *软科学*, 2022, 36(9): 65-71.
- [25] 吴乐, 孔德帅, 靳乐山. 生态补偿有利于减贫吗? ——基于倾向得分匹配法对贵州省三县的实证分析. *农村经济*, 2017(9): 48-55.
- [26] 李国平, 汪海洲, 刘倩. 国家重点生态功能区转移支付的双重目标与绩效评价. *西北大学学报: 哲学社会科学版*, 2014, 44(1): 151-155.
- [27] Adams W M, Aveling R, Brockington D, Dickson B, Elliott J, Hutton J, Roe D, Vira B, Wolmer W. Biodiversity conservation and the eradication of poverty. *Science*, 2004, 306(5699): 1146-1149.
- [28] Wunder S. Payments for environmental services and the poor: concepts and preliminary evidence. *Environment and Development Economics*, 2008, 13(3): 279-297.
- [29] Muradian R, Arsel M, Pellegrini L, Adaman F, Aguilar B, Agarwal B, Corbera E, Ezzine de Blas D, Farley J, Froger G, Garcia-Frapolli E, Gómez-Baggethun E, Gowdy J, Kosoy N, Le Coq J F, Leroy P, May P, Méral P, Mibielli P, Norgaard R, Ozkaynak B, Pascual U, Pengue W, Perez M, Pesche D, Pirard R, Ramos-Martin J, Rival L, Saenz F, Van Hecken G, Vatn A, Vira B, Urama K. Payments for ecosystem services and the fatal attraction of win-win solutions. *Conservation Letters*, 2013, 6(4): 274-279.
- [30] 刘伟玮, 李爽, 付梦娣, 任月恒, 朱彦鹏, 曹恒健. 基于利益相关者理论的国家公园协调机制研究. *生态经济*, 2019, 35(12): 90-95, 138.
- [31] 刘某承, 王佳然, 刘伟玮, 杨伦, 桑卫国. 国家公园生态保护补偿的政策框架及其关键技术. *生态学报*, 2019, 39(4): 1330-1337.
- [32] 武萍, 张慧. 三江源国家公园生态补偿适度标准评估——基于生态系统服务价值供给的视角. *青海社会科学*, 2022(1): 50-58.
- [33] 徐大伟, 李斌. 基于倾向值匹配法的区域生态补偿绩效评估研究. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(3): 34-42.
- [34] 胡欢, 章锦河, 刘泽华, 于鹏, 陈敏. 国家公园游客旅游生态补偿支付意愿及影响因素研究——以黄山风景区为例. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(12): 2012-2022.
- [35] 丘水林, 黄茂兴. 系统观视域下国家公园生态补偿机制构建. *中国国土资源经济*, 2024, 37(1): 20-28.
- [36] 孙才志, 周舟, 赵良仕. 基于 SD 模型的中国西南水—能源—粮食纽带系统仿真模拟. *经济地理*, 2021, 41(6): 20-29.
- [37] 汪孝贤, 张秀霞, 李旺平, 程小强, 凌晴, 周兆叶, 郝君明, 林庆润, 陈璐. 基于遥感生态指数(RSEI)改进模型的祁连山国家级自然保护区生态环境质量评价. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(7): 853-863.
- [38] 徐雪, 王永瑜. 新型城镇化与乡村振兴耦合协调发展的时空格局及影响因素. *统计与决策*, 2023, 39(5): 50-55.
- [39] 徐雪, 王永瑜. 中国乡村振兴水平测度、区域差异分解及动态演进. *数量经济技术经济研究*, 2022, 39(5): 64-83.
- [40] 毛锦凰. 乡村振兴评价指标体系构建方法的改进及其实证研究. *兰州大学学报: 社会科学版*, 2021, 49(3): 47-58.
- [41] 杨宇. 多指标综合评价中赋权方法评析. *统计与决策*, 2006(13): 17-19.
- [42] 赵莎, 胡最, 郑文武. 中国“胡焕庸线”东西两侧能源消耗空间格局的系统动力学模拟. *地理科学进展*, 2021, 40(8): 1269-1283.
- [43] 彭昕杰, 成金华, 方传棣. 基于“三线一单”的长江经济带经济-资源-环境协调发展研究. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(5): 163-173.
- [44] 郑子潇, 胡保安, 韩海荣, 康峰峰, 程小琴. 基于 SD 模型的晋北退耕还林工程与社会经济互馈关系研究. *生态学报*, 2023, 43(10): 3984-3994.
- [45] 马历, 龙花楼. 中国乡村地域系统可持续发展模拟仿真研究. *经济地理*, 2020, 40(11): 1-9.
- [46] 任小玢, 张东海, 俞鸿千, 徐洁, 蒋齐, 王占军, 吴旭东. 气候变化和人为活动在宁夏草地变化中的相对作用. *生态学报*, 2022, 42(19): 7989-8001.
- [47] 侯彩霞, 周立华, 文岩, 陈勇. 生态政策下草原社会-生态系统恢复力评价——以宁夏盐池县为例. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(8): 117-126.