

DOI: 10.5846/stxb202211273426

薛智超,甄霖,闫慧敏.基于土地多功能的黄土丘陵沟壑区生态保护与发展情景评估及多主体模拟.生态学报,2023,43(15):6081-6098.

Xue Z C, Zhen L, Yan H M. The scenario assessment of ecological protection and development in the Loess Hilly and Gully area based on land use functions and agent-based modelling. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6081-6098.

# 基于土地多功能的黄土丘陵沟壑区生态保护与发展情景评估及多主体模拟

薛智超<sup>1,2</sup>, 甄霖<sup>2,3,\*</sup>, 闫慧敏<sup>2,3</sup>

1 北京工商大学国际经管学院, 北京 100048

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

3 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**黄土高原丘陵沟壑区生态环境脆弱,近几十年生态保护工程的实施带来显著的生态恢复效果,也对农户的生计策略与区域粮食安全产生了影响。刻画生态脆弱区人-地系统复杂响应过程,可以为区域可持续的土地利用管理模式提供依据。研究从土地多功能出发,着眼于黄土丘陵沟壑区河谷川地、梁峁区域、黄土塬地、土石山地以及城郊区域等不同的典型地貌类型与代表区域,采用多层次利益相关者参与式的评估框架,以农户的耕地利用行为及生态工程影响与未来发展为切入点,设置惯性发展情景、发展优先兼顾生态情景、农业优先兼顾生态情景以及生态优先兼顾发展情景,构建多智能体模型对区域土地利用与土地多功能的时空变化开展模拟。主要结果表明:(1)生态优先兼顾发展情景综合影响最高且对各维度影响相对均衡,而农业优先兼顾生态情景对区域土地的经济维度的功能和社会维度具有更为明显的提升效应;(2)根据土地多功能空间变化模拟结果,区域土地利用破碎化明显且耕地的撂荒对全域土地多功能均表现出明显的限制作用,农业优先兼顾生态情景中土地功能发生下降的面积最少;(3)发生土地功能下降的区域主要分布在土地质量较差、坡度处于5—15°范围内、地形起伏度较大以及距离道路较远的区域;本研究刻画了黄土丘陵沟壑区不同典型地貌区域的差异化土地利用系统特征,为生态保护工程实施背景下的土地管理与区域可持续利用发展提供参考。

**关键词:**土地多功能;多利益相关者;多主体模型;黄土丘陵沟壑区

## The scenario assessment of ecological protection and development in the Loess Hilly and Gully area based on land use functions and agent-based modelling

XUE Zhichao<sup>1,2</sup>, ZHEN Lin<sup>2,3,\*</sup>, YAN Huimin<sup>2,3</sup>

1 School of International Economics and Management, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

2 Institute of Geographic Resources and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The hilly and gully areas of the Loess Plateau have been affected by natural disasters such as soil erosion and drought for thousands of years. The implementation of ecological protection projects in recent decades has brought significant ecological restoration effects, but also affected the farmers' livelihood strategies, which furtherly threatened the regional food security, ecological security, and sustainable development. In order to describe the complex response process of the human-land system, this study selected the different typical landform types in the Loess Hilly and Gully area and focused on the land use functions (LUFs) with a multi-level stakeholder participatory evaluation framework. We analyzed the farmland

**基金项目:**中国科学院战略性先导科技专项(XDA20010202);国家自然科学基金(42201332)

**收稿日期:**2022-11-27; **采用日期:**2023-04-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenl@igsnrr.ac.cn

using behavior of farmers, the impact of ecological restoration project, and further development strategies. Four scenarios were set, including business as usual scenario, development priority scenario, agricultural development priority scenario, and ecological protection priority scenario. A multi-agent model was constructed to predict the spatio-temporal changes of regional land use and land use functions under different scenarios. The main results show that: (1) the ecological priority scenario has the highest comprehensive impact and has a relatively balanced beneficial impact on each dimension, while the agricultural development priority scenario has a more obvious effect on the economic and social dimensions of LUFs; (2) According to the simulation results of spatial change of LUFs, regional land use fragmentation is obvious and the abandonment of cultivated land shows a significant restriction on the LUFs in the whole area. The agricultural development scenario has the least LUFs declined area; (3) The area where the land function declines distributed mainly in areas with poor land quality, a slope within the range of 5—15°, the great the terrain undulation, and away from the road. This study describes the differentiated land use characteristics of different typical landforms in Loess Hilly and Gully area, and provides a specified reference for land management and regional sustainable development in the context of balancing the ecological protection and local development.

**Key Words:** land use function; multi-stakeholder; agent-based modelling; Loess Hilly and Gully area

人类对有限土地资源的压力随着人口增长和经济发展而日益增加。全球已有 60% 以上的土地发生了不同程度的退化<sup>[1]</sup>, 威胁着土地资源的可持续管理<sup>[2-3]</sup>。深入理解土地利用变化对可持续发展带来的影响是当前决策者和科学界共同关注的议题<sup>[4-5]</sup>。2015 年联合国提出的全球可持续发展目标 (Sustainable Development Goals, SDGs) 中, 消除贫穷、零饥饿、清洁饮水和卫生设施、产业创新和基础设施、可持续城市和社区、水下生物和陆地生物等主要目标均与土地可持续利用相关<sup>[6]</sup>。全球土地计划 (Global Land Programme, GLP) 在土地科学实施计划报告中指出<sup>[7]</sup>, 应当在充分理解土地多功能与土地功能的空间分离策略的基础上, 开展更加细致的、多尺度的评估, 以提出适应未来情景的土地利用方案。基于土地多功能的研究通过合理界定区域土地功能并设定土地利用管理政策情景开展可持续性评估, 以充分认识土地资源价值, 推动土地资源的合理利用和区域的可持续发展<sup>[8]</sup>。土地多功能研究框架已经被广泛用于欧洲、中国和其他一些发展中国家, 为土地资源的可持续管理与政策制定提供决策支持<sup>[9-10]</sup>。

黄土高原是世界上水土流失最为严重的地区之一, 也是我国生态环境最为脆弱的地区之一。黄土丘陵沟壑区是黄土高原水土流失的主要来源区, 具有坡陡沟深、地表破碎等地貌特点<sup>[11]</sup>, 大面积坡耕地的开垦是引起区域水土流失的主要原因之一。为有效改善区域生态环境, 自 1999 年起, 政府组织实施了三北防护林工程、退耕还林还草工程、天然林保护工程等一系列生态保护和恢复工程, 黄土高原的植被覆盖度由 1999 年的 31.6% 增加到了 2018 年的 63%, 黄河的年输沙量已由 1999 年的 16 亿 t 减少到了 2021 年的 1.7 亿 t 左右。然而, 大面积的退耕同样使得山区以及梁峁坡面地区农民的人均耕地大幅度减少, 土地资源约束增强, 影响着区域的农户生计和粮食安全<sup>[12-13]</sup>。目前针对梁、塬、峁等黄土丘陵沟壑区不同地貌类型的土地利用与农户生计差异的关注较少, 而开展地貌和村落尺度的分类研究与系统的诊断, 深入刻画不同地貌区域土地资源自然-生态-经济社会的综合体特征, 可以为在生态环境脆弱的黄土丘陵沟壑区探索平衡生态环境保护与农村经济发展的可持续路径提供精准化支撑。

土地利用系统是人与自然交互作用的复杂系统, 受内生因素和外生因素的共同影响, 具有非线性的多重稳定状态<sup>[14-15]</sup>。寻找可持续的土地资源管理策略, 需要将区域利益相关者对发展的认知及其影响因素纳入管理。农户土地利用行为受气候等自然条件和土地利用政策等社会因素影响, 农户的适应性决策是缓解或加深土地利用问题的主要因素之一<sup>[16]</sup>。通过利益相关者的参与来探究区域可持续发展方式的转变<sup>[14, 17]</sup>, 探究农户及区域土地利用相关主体对自然和社会环境变化的感知和调整机制, 可以充分认识和全面分析区域生态系统与社会系统之间的相互作用与响应, 并为不同的目标群体制定建议, 对区域土地利用决策的调整、适应性

行为的引导及粮食安全的保障具有重要意义<sup>[14, 18-19]</sup>。聚焦剖析人-地关系的土地利用变化模拟研究经历了从传统数据方法或经验统计模型,到复杂适应系统和过程仿真模拟的发展过程。结合多利益相关者的评估有利于对关键政策问题提供支持,也有助于面向现实需求的模型构建<sup>[20]</sup>。基于主体的建模或多智能体模型(ABM)因其从主体自治性与适应性的独特分析视角出发,以充分体现人类主观能动性改造自然的能力而越来越受到学者的重视<sup>[21]</sup>。ABM将真实世界的复杂系统抽象化表达,通过整合各种社会和环境因素,模拟个体、政策和生态系统内部相互作用<sup>[22-24]</sup>,尤其在面对不确定性活动对区域的影响评估中,ABM通过预测不同决策可能带来的后果而被广泛应用于基于社会-生态系统情景的决策支持中<sup>[25-27]</sup>。

本研究以黄土丘陵沟壑区土地可持续利用为背景,从土地多功能出发,构建多层次利益相关者参与式的评估框架,选取黄土丘陵沟壑区典型地貌村落,以农户的耕地利用行为为切入点,以农户行为与社会-生态系统相互作用为核心,构建多智能体模型模拟区域土地利用与土地多功能的时空变化,实现基于土地利用主体行为的自下而上的多尺度时空变化模拟,从而探究土地功能在不同土地管理情景模式下的变化,为脆弱区土地可持续利用与管理提供决策支持。

## 1 研究区概况与典型区选择

### 1.1 研究区概况

固原市位于宁夏南部黄土丘陵沟壑区,地处东经 105°19'—106°57'、北纬 35°14'—36°31',海拔在 1320—2928 m 之间,具有沟壑纵横,梁峁交错,山多川少,塬、梁、峁交错的地理特征(图 1)。固原市地处暖温带半干旱气候区,是典型的大陆性季风气候,年平均降水量 492.2 mm。全市的耕地主要以旱地为主,灌溉难度大,耕地质量较差,耕地产出率低。2015 年末固原市农用地为  $8.9 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,占全市土地总面积的 84.67%,而大约有 41.64%位于坡度大于 15°的坡地。以家庭农业生产中的玉米为例,尽管人均粮食产量在逐步提高,但仍仅占全区平均水平的 65.29%(2019 年)<sup>[28]</sup>。自 2002 年退耕工程在固原市全面启动以来,固原市完成退耕还林  $3.1 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,其中退耕造林  $1.7 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 、荒山造林  $1.4 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。全市林草植被大面积恢复,森林覆盖率由退耕前的 12.8%增加到 22.2%,草原植被覆盖度由退耕前的 35%提高到 73%<sup>[29]</sup>。

2021 年,固原全年实现生产总值 375.13 亿元。2021 年末,固原市常住人口为 114.8 万人,乡村人口占比 55.57%<sup>[30]</sup>。固原市农村居民外出劳动力就业比例呈现逐年上升的趋势,根据宁夏调查总队对农村居民家庭住户抽样调查的结果,抽样住户中外出就业劳动力从 2010 年 360 人波动上升到 2016 年的 479 人,外出就业劳动力在家庭常住人口中的占比从 18.5%增加到 22.3%。2021 年全市共完成劳务输出 33.65 万人,比上年增长 1.54%<sup>[30]</sup>。2021 年农村居民家庭可支配收入为 13086.0 元,为全国平均水平的 69.13%。根据国家统计局宁夏调查总队的调查数据,农村家庭中农业收入占比在逐年下降,由 2010 年的 41%下降到 2016 年的 23%。

### 1.2 典型村落自然与社会经济特征

综合考虑对黄土丘陵沟壑区典型地貌类型的代表性,选择五个代表性村落进行深入考察与调研(图 1,表 1)。原州区杨郎村为典型的河谷川地区域村落,彭阳县夏塬村代表塬地村落,西吉县马营村代表梁峁区村落,泾源县胜利村代表土石山地村落,并选择原州区大马庄村代表城郊村。随着社会经济发展以及劳动力转移就业等政策的引导,固原从事农业耕作的劳动人员趋于老龄化,耕地破碎且多位于陡坡,耕地撂荒现象明显。据调研中地方部门专家估算,目前在北部 4 县域(除南部以土石山地为主的泾源县),约有近 20%—30%的耕地均已经发生了不同程度的撂荒。5 个典型村落的选择便于从不同地貌类型的角度开展区域耕地管理限制因素及不同区域农户认知与意愿的比较性研究,从而为土地管理决策制定提供更加精准的自下而上的参考信息。

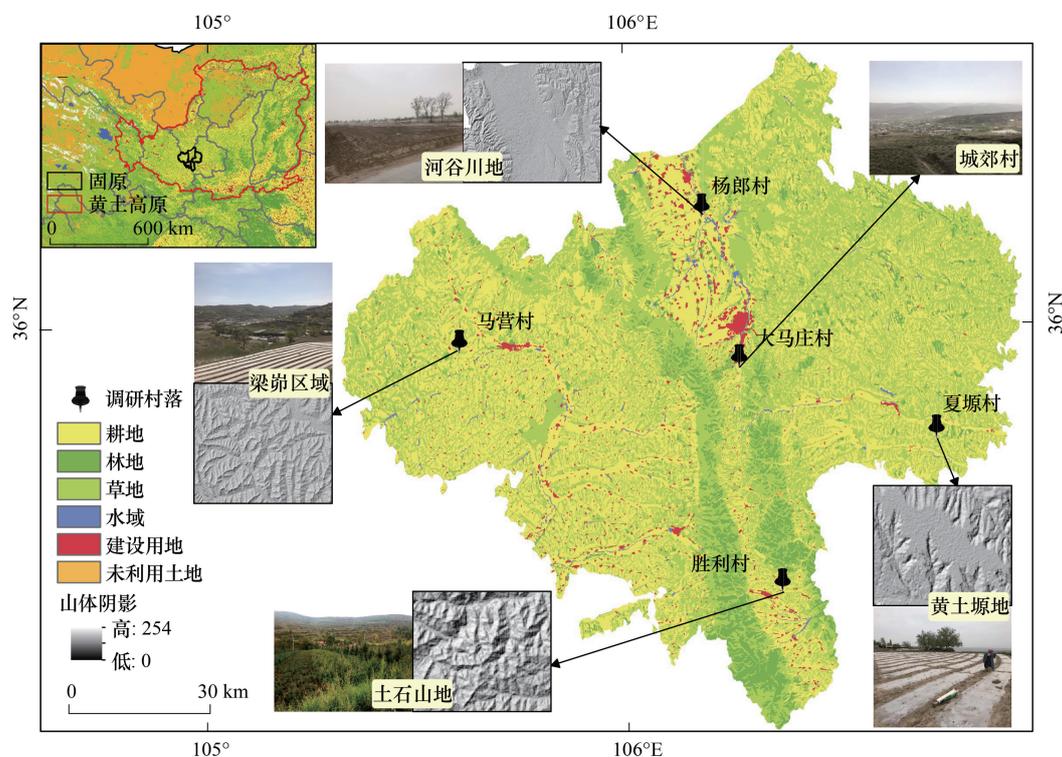


图1 调研村落地貌及实景特征图

Fig.1 The landform and scenes of typical study sites

表1 典型村落代表地貌及土地利用基本特征

Table 1 Land use and landform characters of representative villages

村落 Village	代表类型 Type	地形特征 Landform	农户生计 Livelihood	退耕还林 SCLP	土地流转 Land transform	耕地撂荒 Land abandonment
杨郎村	河谷川地	耕地均处于河谷平原地区;村落约99.60%耕地坡度均小于5°	务工为主	占村落耕地面积5.00%	占村落耕地面积97.92%	流转前14.29%,流转后0.00%
马营村	梁峁区域	地表切割破碎,多陡坡地;72.60%的耕地坡度大于25°	种植业,养殖业,外出务工	占村落耕地面积2.63%	占村落耕地面积26.92%	约为10%,呈增加趋势
夏塬村	黄土塬地	坡顶平的黄土高地,周围为沟谷深切;64.60%的耕地坡度小于15°	务农和养殖为主,兼职务工	占村落耕地面积34.47%	占村落耕地面积20.00%	退耕还林前约20.00%;退耕还林后约14.30%
胜利村	土石山地	约有65.80%耕地坡度大于15°	务工为主	占村落耕地面积76.67%	占村落耕地面积12.82%	退耕还林前约13.30%;退耕还林后没有撂荒地
大马庄村	城郊地区	约有62.40%耕地坡度小于5°	务工为主	占村落耕地面积32.78%	占村落耕地面积37.21%	退耕还林前约50.00%;退耕还林后约15.00%

## 2 研究方法

多层次利益相关者参与式的土地多功能评估与模拟过程,通过结合在不同时空尺度上与土地利用相关的农户、管理者、政策制定者及专家等利益相关者的共同参与,充分发掘研究区土地利用特征与问题,同时促进

政策制定者对区域土地利用措施影响的深入了解。本研究中通过利益相关者参与式的研究方法确定区域的土地功能与评估指标、未来土地利用情景、以及不同利益相关者的土地利用决策特征,提取黄土丘陵沟壑区不同地貌背景下土地利用主体与空间环境作用特征构建多主体模型,结合参与式评估过程得到的情景与指标响应,开展不同情景下土地多功能时空变化模拟(图 2)。

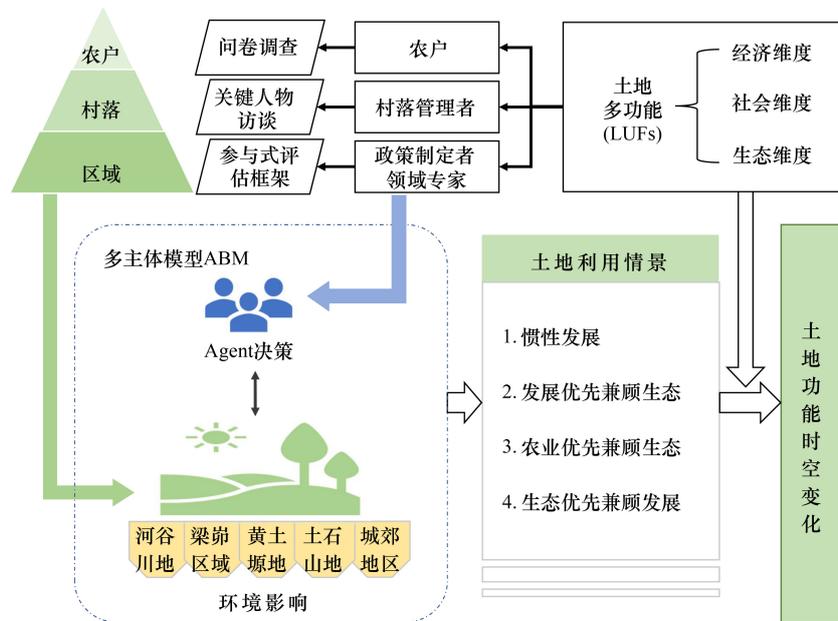


图 2 研究方法与思路设计

Fig.2 The conceptual framework of the methodology

## 2.1 利益相关者参与式调研

### 2.1.1 参与式评估

参与式评估(Framework of Participatory Impact Assessment, FoPIA)的开展共分为 3 个阶段<sup>[31]</sup>:准备阶段、评估阶段和结果分析与政策建议阶段。准备阶段主要通过机构专家研讨会以及文献阅读与综述,就固原目前面临的土地利用问题做出判定与讨论,确定固原主要的土地功能和对应指标草稿。参与式评估阶段于 2017 年 5 月在固原市开展。共有来自不同的学科背景(经济、社会和生态)的 10 名成员参与,包含 5 位政策制定者、2 位固原市研究人员和 3 位相关领域研究人员,政策制定者和当地的研究人员至少已有 9 年相关工作经验。评估过程包括:(1)确定研究区土地多功能、对应的指标及评估情景;(2)开展两轮制的土地多功能权重打分;(3)针对每个情景分别开展两轮制的情景对土地多功能的影响打分。

#### (1) 情景设定

根据准备阶段研讨会得到的区域重点土地利用问题与政策,讨论与确定本研究中拟开展评估的 4 个土地利用情景:1)惯性发展情景。固原市土地按照当前的利用方式照常发展。土地流转主要仍以当前速率按照自发的形式进行,耕地撂荒仍旧在随着经济的发展和年轻人就业择业观的转变而不断加剧。2)发展优先兼顾生态情景。由于农户撂荒的耕地一般均选择偏远且耕地地力条件差、生产效益差的土地,农户为追求更高的经济效益而放弃低效益土地对管理等资源的占用,而适当的撂荒一定程度上有利于区域实现不宜耕种土地的生态恢复。因此,情景假设除固原市南部土石山区大力发展苗木种植外,将有更多的低质量耕地被撂荒。3)农业优先兼顾生态情景。将位于缓坡、远离居民区或灌溉设施不足的潜在撂荒耕地集中管理,改善相关基础设施配置,缓解因为劳动力不足带来的撂荒。4)生态优先兼顾发展情景。强调一方面巩固退耕还林成果,对已经开展了退耕还林区域的林地进行补植补播,维持退耕还林工程的生态环境效果;另一方面是大力发展

林下经济,衍生退耕还林地的新产业链,例如,林下养殖蜜蜂、山地鸡等。

## (2) 两轮参与式评估

参与者对土地多功能开展两轮重要性打分,分数范围为0—5,功能对区域的重要性随分数递增。收集每位专家第一轮打分的结果后,按照式(1)现场快速计算并展示各个土地功能所有专家给出的平均得分,专家对照结果展示图讨论各个指标打分结果的考虑因素,意见交流后将专家打分表返回对应的专家手中,进行第二轮打分,与会的各位专家可以选择在讨论的基础上更改或者维持原有打分结果。第二轮结果收集后同样快速计算并展示平均的得分结果并讨论,打分循环直到结果得到所有专家的认可。

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (1)$$

式中,  $w_i$  为第  $i$  ( $i = 1—9$ ) 个土地功能本轮的重要性得分,  $n$  为参与打分专家的数量。  $j$  为第  $j$  位专家,  $w_{ij}$  为第  $j$  位专家在本轮给出的第  $i$  个土地功能的分数。

针对每个情景对区域各土地功能的影响开展两轮评估。评估分数范围为(-3—3),数字绝对值代表影响的大小,绝对值越大,影响越大。正值代表具有积极促进的正面影响,负值代表具有消极抑制的负面影响,0代表没有影响。按照式(2)计算最终综合的情景影响评估结果。

$$f_{ki} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n f_{kij} \quad (2)$$

式中,  $f_{ki}$  为第  $i$  个土地功能在情景  $k$  ( $k = 1—4$ ) 的评估值,  $f_{kij}$  是  $k$  情景下  $j$  专家在最后一轮中给出的评估值。为方便不同利益相关者群体开展比较,将情景影响评估的结果按照土地功能的经济、社会、生态3个维度进行综合。综合公式如下:

$$F_{ki} = w_i \times f_{ki}, \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

$$F_{k,d} = \begin{cases} F_{k,eco} = \sum_{i=1}^3 (w_i \times f_{ki}), & (k = 1, 2, 3, 4) \\ F_{k,soc} = \sum_{i=4}^6 (w_i \times f_{ki}), & (k = 1, 2, 3, 4) \\ F_{k,ecg} = \sum_{i=7}^9 (w_i \times f_{ki}), & (k = 1, 2, 3, 4) \end{cases} \quad (4)$$

$$F_k = \sum_{i=1}^9 (w_i \times f_{ki}), \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (5)$$

式中,  $F_{k,d}$  即  $k$  情景对  $d$  维度的土地功能的影响值,  $F_{k,eco}$ ,  $F_{k,soc}$ ,  $F_{k,ecg}$  分别是  $k$  情景对经济、社会和生态维度的影响。  $F_k$  是情景  $k$  对区域土地多功能带来的综合影响值。

### 2.1.2 问卷调查

本研究中对农户这一利益相关者群体采取一对一访谈问卷调查的方式。调查问卷主要包含3大部分内容。第一部分为农户家庭基本情况;第二部分为农户对村落土地多功能变化的认识与感知;第三部分为根据FoPIA讨论结果考察农户目前的退耕还林状况、土地撂荒状况和土地流转意愿。其中,第一部分调查的重点内容包括家庭成员的性别、年龄、主要职业、工作地点和文化程度等。用于了解农户基本信息、工作状况以及家庭结构,为土地多功能评估分析与模型模拟时的用户主体特征提取做准备。第二部分的主要内容为农户对近10年来土地各项功能变化的感知。根据FoPIA中判定的固原各项土地多功能指标,采访农户对于指标变化的感知,并与专家的认知做对比。第三部分内容主要包括:对于退耕还林的满意度和退耕意愿;弃耕地数量、质量和弃耕原因;个人土地流转的现状、意愿及原因。这部分内容是对FoPIA中的政策情景从农户角度开展调查与分析,一方面通过文本分析与FoPIA中专家认知的结果做比较,另一方面,通过定量提取土地利用行为的驱动指标以及意愿驱动因素,为土地多功能模拟模型的参数输入做准备。每份问卷需要大约50分钟。农户的选择遵循随机的原则,每个村落样本量的确定参考村落土地管理者的建议,并要求样本数量不低于本村常住户数的10%,以确保其可信度和代表性。调研5个村落最终收集到有效问卷202份。

### 2.1.3 关键人物及机构访谈调研

研究组在固原典型村落开展关键人物访谈以获取典型村落的环境条件、农户生活状况和种植意愿等基本状况与趋势,每个村落调研搜集 3 份关键人物访谈资料。主要针对村落中代表性利益相关者群体——村干部与村落带头人展开。选择关键人物时考虑:(1)每个典型村落的关键人物必须至少包含一位村落管理者(即村干部)和一位村落带头人;(2)村落管理者需要至少有 5 年以上的工作经验,并且对村落土地利用具有宏观且直接的管理工作经验;(3)村落带头人需要至少在村中有 10 年以上的生活经验,直接从事家庭的土地种植与管理工作,不应当是经常外出打工的年轻人或者是主要从事家庭内部工作的人员等。

访谈内容主要包括两大部分,第一部分是半结构式访谈问卷,包括:过去 20 年间村落土地利用变化状况及主要原因;目前的土地撂荒状况、趋势及原因;村民对土地流转政策实施的理解和意愿等。第二部分是针对调研村落土地多功能的重要性排序,从而与 FoPIA 中的结果进行对比,了解不同利益相关者群体间认知的差异。

### 2.2 土地多功能指标

本研究中根据 FoPIA 准备阶段的专家讨论结果、文献综述对土地多功能的分类与界定以及固原的社会经济与土地利用背景,结合土地多功能和指标确定的原则<sup>[32]</sup>,从平衡区域可持续发展的经济、社会和生态 3 个维度出发构建黄土丘陵沟壑区土地多功能的评估框架,综合反映土地利用变化对区域可持续发展的影响。通过 FoPIA 界定得到的固原土地多功能与指标如表 2 所示。土地多功能的表征指标为专家开展评估的基础,情景对区域的影响落实到具体的指标上,使专家对区域土地多功能的感知更为具体,评估更为准确。

表 2 固原土地多功能与表征指标

Table 2 LUFs and corresponding indicators in Guyuan

维度 Dimension	功能 Function	概念界定 Concept	功能说明 Function description	指标选取背景与参考指标 Regional relevance and reference indicators
经济 Economic	提供居住家园	土地提供的城乡居民居住用地和工业、服务业等建筑用地。	土地所提供的供人类集中开展居住、社会活动和生产活动的空间。这部分的土地利用方式往往对土地本身产生不可逆的改变。	根据功能的概念界定以及数据的可获得性,选取研究区的建设用地面积所占比例表征区域土地能够提供的居住家园功能。建设用地面积主要包括居住用地、商业服务业设施用地、工业用地等保证居民日常生活的主要地类。
	支撑基础设施	土地为社会生产和居民生活提供公共服务的物质工程设施。	土地支撑道路、公共交通设施、公共灌溉设施等公共空间服务的能力。根据其用途通常也对土地产生不可逆的改变。	交通基础设施建设和道路的通达性影响着固原尤其是偏远农村的经济发展。选用每 km <sup>2</sup> 所拥有的道路里程数,表征土地为区域基础设施建设提供服务的能力,以反映道路基础设施对居民生活与出行便利程度的影响。
	土地生产	从土地中直接获取的人和家畜所需粮食、草料和部分林产品等。	不对土地施加不可逆的利用方式,土地提供的生产活动空间,也即直接从土地中获取的产品。包括农产品、林产品等。	第一产业是固原的基础产业。固原有 44.7% 的土地为耕地,44.9% 的土地为草地,农业人口占总人口的 74.4%。第一产业产值主要包括农、林、牧、渔业等主要直接获取自耕地、林地、草地等的产业产值。
社会 Social	提供就业	土地所能承载的就业类型,如耕地提供种植业生产从业人员,草地提供畜牧业从业人员,建设用地提供建筑业就业机会等。	直接基于土地资源的就业机会。	固原以草畜、马铃薯等为支柱产业,农村人口比重高(74.2%,2014 年),农业用地占比面积在 98.5% 以上(2013 年),且农业从业人员数量与地类直接相关,因此以从事农业为主的从业人员比例指标衡量就业功能。
	保障生活质量	土地提供的服务于保障居民生活质量的服务。以生活水平为基础,更侧重于对人的精神文化等需求满足程度。	土地保障生活质量功能体现在耕地、林地、草地综合提高居民生活水平的能力,一方面创造经济收入,另一方面构造愉悦的生活环境。	人均公用绿地面积表示区域全部林草地、水域和公共服务地类的人均占有量。选用这一指标量化区域居民对生态休闲与景观娱乐用地的资源占有使用情况,反映居民生活环境与精神文化。

续表

维度 Dimension	功能 Function	概念界定 Concept	功能说明 Function description	指标选取背景与参考指标 Regional relevance and reference indicators
生态 Ecological	保障粮食安全	土地提供能够满足人们需求和营养充足粮食的能力。	包含两方面的含义,一方面是满足基本的粮食数量上的需求,另一方面是保证营养的充足与人体的健康。这一功能对当地社会经济可持续发展目标至关重要,是社会稳定的最基本保障。	结合数据可得性与指标量化的目标,选取区域人均粮食产量作为保障粮食安全功能的指标。已有研究指出中国人均粮食消费量 400 kg 即可达到营养安全(封志明等., 2008)。区域每年粮食产出的人均占有量,反映了粮食保障程度以及区域人口增长和土地粮食产量的均衡关系。
	非生物资源供给	土地调节水、空气和土壤矿物质的供给和质量的能力。	土地作为生态系统的一部分参与区域水、空气和土壤矿物质的循环流动过程,也即可以提供调节这类非生物资源数量与质量的服务。	水土资源是可持续发展的资源基础。对于干旱半干旱地区的固原市来说,水资源更为重要且更具象,选取区域的人均水资源量表征土地非生物资源供给功能。
	生物性资源供给	土地为生物提供生境和生物多样性的能力。	土地从生物多样性和生境多样性等方面均对区域的生物资源供给起到调节与支撑作用。	研究区内林地和草地对这一功能的关系权重最大,当地林草地作为多种生物载体,直接影响生态环境和社会经济发展。
	生态过程维持	土地利用在调节自然过程和生态支持方面的功能。	土地在调节生态系统过程方面的作用,例如,水循环、营养物质循环、土壤成土等过程的支持功能。	位于黄土丘陵沟壑区的固原是自然灾害多发和水土流失敏感的地区之一。不同土地利用类型带来的土壤保持功能对当地的可持续发展显得尤为重要。

数据来源: FoPIA 专家研讨会

### 2.3 多主体模型构建

本研究选取 Repast J 包搭载 Eclipse 平台使用 JAVA 编程语言开展建模。在本研究中采用的模型在耕地利用模型<sup>[33]</sup>基础上,搭建固原耕地利用变化模拟过程,扩充土地多功能变化子模型,实现了黄土丘陵沟壑区土地多功能模拟多智能体模型。模型具体布局过程中,构建了 Model、Space 和 Agent 3 个主要的模块。Model 模块实现了模型的构建(buildModel),模型运行的控制(buildSchedule)以及模型结果的展示(buildDisplay)。具体实现了外部数据的读入、地块数据的重新存储与归类、主体的状态的转变与土地利用决策判断的接口、模拟结果输出中地块利用的空间展示以及统计图表展示等。Agent 模块实现了主体的基本状态转变与活动,包括主体的出生、死亡、移动、职业、年龄和教育程度等,并赋予其土地租入租出或撂荒的意愿偏好等。Space 模块读取栅格地图形式的 Agent 的活动空间,并以 GRID 和矩阵的形式存储。土地利用类型、DEM、坡度、道路、NPP 等环境与空间信息导入该模块,并标记每个点的坐标,使得主体与地块以及地块的空间属性均实现对应,为模拟主体活动与决策做准备。

本研究将从农户的角度自下而上的模拟土地利用决策,模型设计的概念框架如图 3 所示。模型有个体、农户、农户组和政府四类主体,包括 5 个子模型,分别为:个人状态转换子模型,农户分类子模型,空间环境配置子模型,农户耕地利用决策子模型和土地功能变化子模型。

模型中,随着时间的推移,个体年龄发生增长,在个体状态转换子模型中完成职业的转换与选择;随着个体状态的转换,农户主体的属性发生变化,即家庭构成根据个体状态的转换而改变,家庭中务农人员所占比例进而决定农户所属的农户组类型,该过程在农户分类子模型中实现。农户组的类型包括非农业兼业户、农业兼业户、农业户和非农业户四大类,不同的农户组类型会有不同的土地耕作能力,面对政府主体制定的不同土地利用与管理决策,会因家庭结构条件做出不同的土地利用决策,在农户耕地利用决策子模型中实现。在某一时间步,当所有农户完成土地利用行为的决策(自种、租出、租入和撂荒)后,耕地在空间上同时呈现出自种、流转和撂荒三种表现形式。不同的土地利用类型,对每一个土地功能的贡献度均不同,而同一土地利用类型针对同一功能在不同的区域贡献度也不相同。本研究中,不同地类的空间功能贡献度矩阵表由 FoPIA 中参

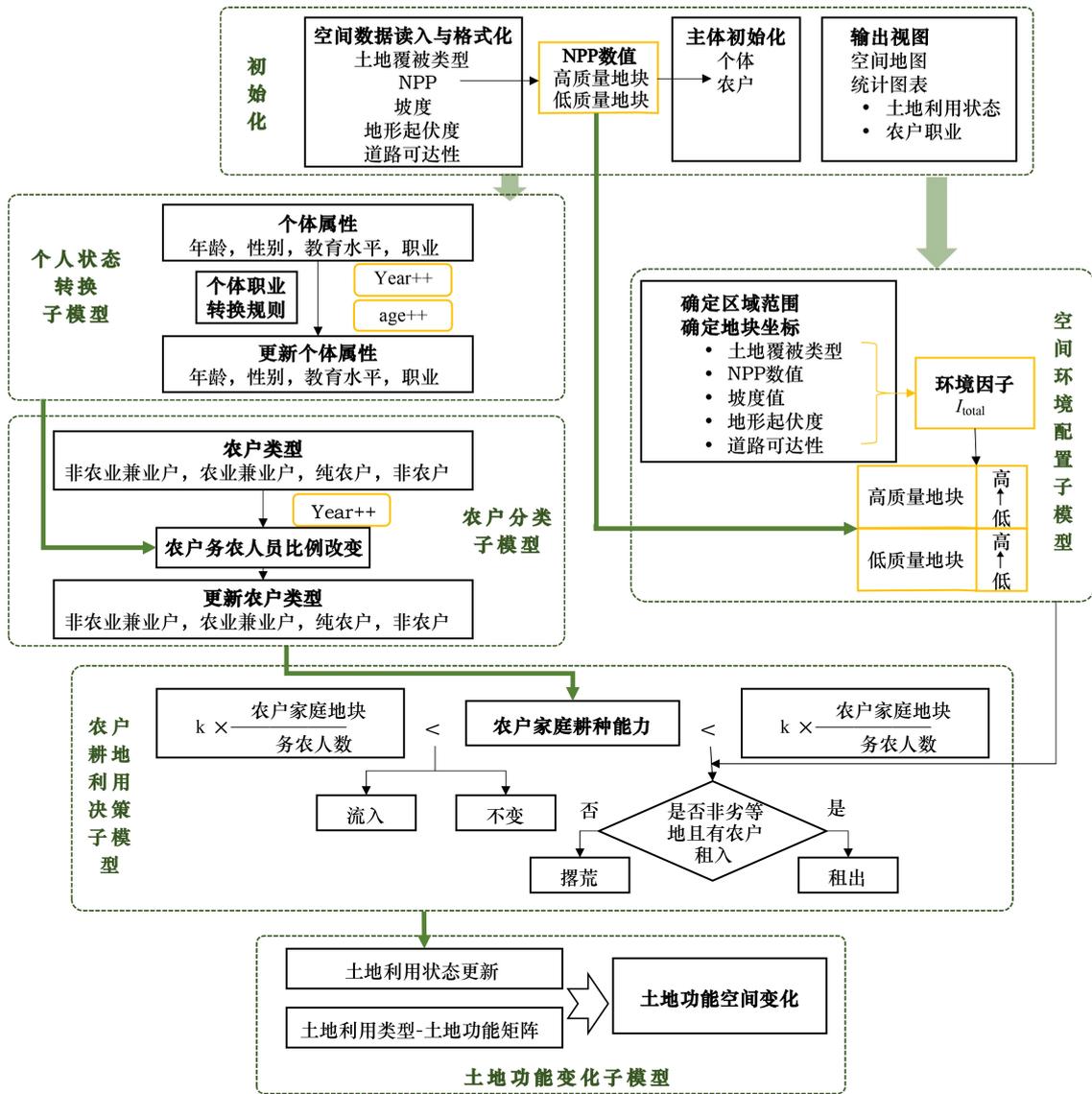


图3 土地多功能性变化模型模拟概念框架图

Fig.3 Conception framework of LUFs' change simulation

与的当地政府部分工作者与专家根据固原土地利用以及社会经济发展特点而制定,在土地功能变化子模型中实现土地功能的空间变化模拟。个体状态转换机制,农户决策机制以及政府主体的决策制定均为从典型村落问卷与关键人物访谈搜集到的资料与信息中提取。模型中的随机性机制在实现的过程应用蒙特卡洛方法实现。其中各环境影响因子的计算方式分别如下:

(1) 土地质量因子(NPP)

土地的质量因子(NPP)越高,土地生产能力越高。模型运行初始年份为2015年,取2015年的NPP值代表土地质量,NPP范围为 $0-680 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。采用标准差分类方式对区域内NPP值范围进行划分,研究假设选取区域内1倍标准差的上下限作为土地质量因子影响边界值,分别约为 $150 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $230 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。即,正常情况下,农户会优先租入高于区域土地平均水平0.5倍标准差质量的耕地;而当政策促进土地流转的发生,则对于低于区域土地质量平均水平0.5倍的耕地同样有机会被流转。此外,使用区域NPP最大值对NPP值进行归一化(6),得到区域土地质量因子。

$$I_{\text{npp}} = \frac{\text{NPP}}{\text{NPP}_{\text{max}}} \quad (6)$$

式中,  $\text{NPP}_{\text{max}}$  为区域最大 NPP 值, 这里取  $681 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。  $I_{\text{npp}}$  为土地质量因子。

### (2) 坡度因子

基于固原 90 m 分辨率的 DEM 数据计算得到固原土地坡度范围为  $0\text{—}54.47^\circ$ 。坡度越高, 坡地越陡峭, 耕地越难以被耕种。根据调研, 当坡度小于  $5^\circ$  时, 没有农户会选择放弃耕种; 当坡度大于  $5^\circ$  且小于  $15^\circ$  时, 最多有 5% 的农户会选择放弃耕种; 当坡度大约  $15^\circ$  且小于  $25^\circ$  时, 最多有 18% 的农户会选择放弃耕种; 当坡度大于  $25^\circ$  时, 最多有 45% 的农户会选择放弃耕种。因此, 本研究中将坡度因子做如下提取:

$$I_{\text{slope}} = \begin{cases} 1.00 & 0 \leq \text{Slope} \leq 5 \\ 0.95 & 5 < \text{Slope} \leq 15 \\ 0.82 & 15 < \text{Slope} \leq 25 \\ 0.55 & \text{Slope} \geq 25 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $I_{\text{slope}}$  为坡度因子, Slope 为坡度值。  $I_{\text{slope}}$  越高, 地块越不容易被放弃耕种。

### (3) 地形起伏度

以固原 90 m 分辨率的 DEM 数据为基础, 采用窗口分析法计算区域地形起伏度因子  $I_{\text{relief}}$ 。具体过程为, 将 ArcGIS 加载 Spatial Analysis 模块, 在 Spatial Analysis 下使用栅格邻域计算工具 Block Statistics 计算邻域最大值 (maximum), 邻域的类型为矩形, 邻域的大小为  $3 \times 3$ , 得到最大值层面 A; 按照最小值 (minimum) 进行邻域计算, 即可得到 DEM 数据的最小值层面 B; 将层面 A 与 B 求差得到区域的地形起伏度范围为  $0\text{—}220$ 。根据区域农户调研结果, 对于地形起伏度因素, 最少的情况下有 47% 的农户不会撂荒; 最多情况下有 98% 的农户不会受到影响; 一般情况下, 按照固原市的平均地形起伏度因素, 会有 74% 的农户可以承受。因此, 结合地形起伏度与水土流失特征分析<sup>[34]</sup> 的划分标准, 我们将固原地形起伏度划分为 3 个等级, 本研究将地形起伏度因子进行如下提取:

$$I_{\text{relief}} = \begin{cases} 0.98 & 0 \leq \text{Relief} \leq 30 \\ 0.75 & 30 < \text{Relief} \leq 75 \\ 0.47 & 75 < \text{Relief} \leq 220 \end{cases} \quad (8)$$

式中, Relief 为窗口分析法得到的区域地形起伏度。  $I_{\text{relief}}$  越高, 地块价值越不容易被放弃耕种。

### (4) 道路因子

本研究中按照获取的固原省道、国道、铁路和高速公路的道路信息, 以 1 km、3 km、5 km 和 10 km 分别为缓冲距离形成缓冲区。距离道路越近, 耕地条件越好 (易于抵达, 方便农户开展机器耕种等)。由于研究中没有详细的耕地地块道路信息, 因此按照距离道路的远近提取道路产生的隐形因子  $I_{\text{road}}$ , 其计算公式如下:

$$I_{\text{road}} = \frac{1}{\text{Road}_{\text{dis}}} \quad (9)$$

式中,  $\text{Road}_{\text{dis}}$  为提取的到主干道路的距离, 单位为 km。  $I_{\text{road}}$  越高, 地块价值越高。

## 3 结果分析

### 3.1 土地多功能及不同情景的影响

从情景的综合影响来看, 生态优先兼顾发展情景 (29.57) > 农业优先兼顾生态情景 (26.98) > 惯性发展情景 (16.19) > 发展优先兼顾生态情景 (5.71)。综合影响最高的为生态优先兼顾发展情景 (29.57), 这一情景对土地的社会、经济和生态 3 个维度的功能均实现了相对均衡的有益影响 (图 4), 退耕还林的继续推进和林下经济的发展, 既保证了生态环境的恢复和稳定, 也增加了农民在土地上的工作机会和经济产出, 综合提高土地的生态、社会和经济效益。

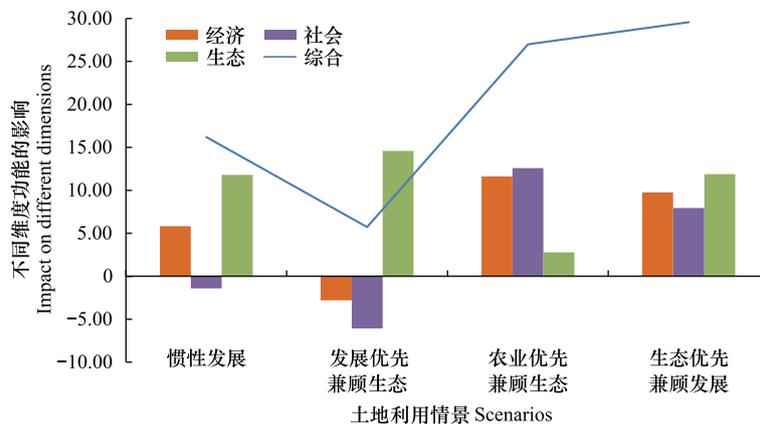


图4 不同情景对固原土地多功能的影响

Fig.4 Scenarios' impact on LUFs in Guyuan

在经济维度,农业优先兼顾生态情景可以显著提升土地产出功能,情景中耕地的流转与土地集约化利用,一方面提高土地质量,另一方面提升了产品的经销方式,避免因为农户个人对市场判断的失误而带来的损失。例如,在杨郎村,根据关键人物访谈获得的信息,土地流转已经在该村开展了较好的试点实施,土地流转使得村内的水浇地比例从 50.0% 提升到流转后的 86.1%,撂荒地比例从流转前的 13.9% 下降到流转后的 4.0%,并且使得改良后的土地产量相比之前的旱地提升了至少一倍。

在社会维度,惯性发展情景和发展优先兼顾生态情景均对社会维度的功能产生消极负面的影响。其中最重要的原因即为农户对土地依赖性的日益下降。而造成这一现象的重要影响因素为农村劳动力转移就业收入的提升。据统计资料,固原市 2003 年农村劳动力转移就业年收入为  $0.64 \times 10^9$  元,到 2015 年已经增长到  $4.62 \times 10^9$  元,增长率达到 51.8%<sup>[35]</sup>,是参加劳动力转移就业农户可支配收入的主要来源。因此尤其是对于主要农用地在陡坡、干旱且道路条件差区域的农户,艰难的耕作条件和微薄的土地产出使得农户越来越趋向于选择外出务工,而放弃自己的耕地种植。此外,农村教育条件的缺失也是劳动力流失的重要影响因素。根据在村中关键人物访谈,固原市所有的中学(67 座)均位于城镇<sup>[36]</sup>,为了使适龄儿童接受到更好的教育,越来越多的父母选择在城镇中兼职务工陪同子女上学。在农业优先兼顾生态情景中,流转后的土地采用机器进行规模化耕作,农户可以选择继续留在自己的土地上从事耕种管理工作,可以获得租金和耕作两份收入。因此,土地流转在一定程度上保留了土地提供就业的功能,同时提高了保障生活质量和食物安全功能。而土地的流转对土地提供就业功能的影响具有不确定性。一方面是机械化种植对劳动力需求的减少<sup>[37]</sup>,另一方面农户同样对于耕地的依赖性减弱。

在生态维度,惯性发展情景和发展优先兼顾生态情景的积极影响主要获益于退耕还林等生态工程和生态系统自然恢复带来的生态环境效益。根据统计资料,自 2000 年以来,退耕还林使得固原的森林覆盖率从 35% 提升到了 73%,草地面积增加了  $3.11 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ ,将草地覆盖率从 12.8% 提升到 22.2%。与此同时,发展优先兼顾生态情景中的撂荒土地也一定程度上促进了生态系统过程的维持<sup>[38]</sup>。然而,土地流转对区域土地生态维度功能带来的影响具有不确定性。一方面是因为土地流转往往意味着大片土地的集约化规模化种植和同质化而使得生态系统过程的维持具有不确定性,另一方面也影响了重新利用的撂荒土地的生态功能<sup>[39]</sup>。

### 3.2 不同情景下土地多功能空间变化

#### 3.2.1 惯性发展情景土地多功能空间变化

从土地功能的空间变化来看(图 5),随着时间的推移,全域的土地多功能整体出现功能减弱的现象,功能出现下降的区域范围内占 40.17%。相对功能增加的区域主要分布在中轴线两侧林地较为集中的区域,全区功能增加的范围为 59.83%。分维度观察可知,惯性发展情景下,由于撂荒耕地范围的不断扩大,土地的经济

和社会维度的功能出现明显的下降, 分别有 40.17% 和 90.57% 的区域出现了不同程度的功能下降, 而生态维度的功能呈现升高趋势, 有 99.59% 的土地均出现了不同程度的生态功能的增加。经济功能较高的区域为中心区域。其次是中轴的北部区域和东南区域, 主要是由于部分流转土地带来的土地生产功能提升。社会功能整体较低, 是由于惯性发展情景下, 耕地的撂荒现象依然严重, 因此耕地提供的区域农民的社会功能(例如提供就业功能)减低, 而撂荒地有助于区域生态自然恢复带动了生态功能的增加。

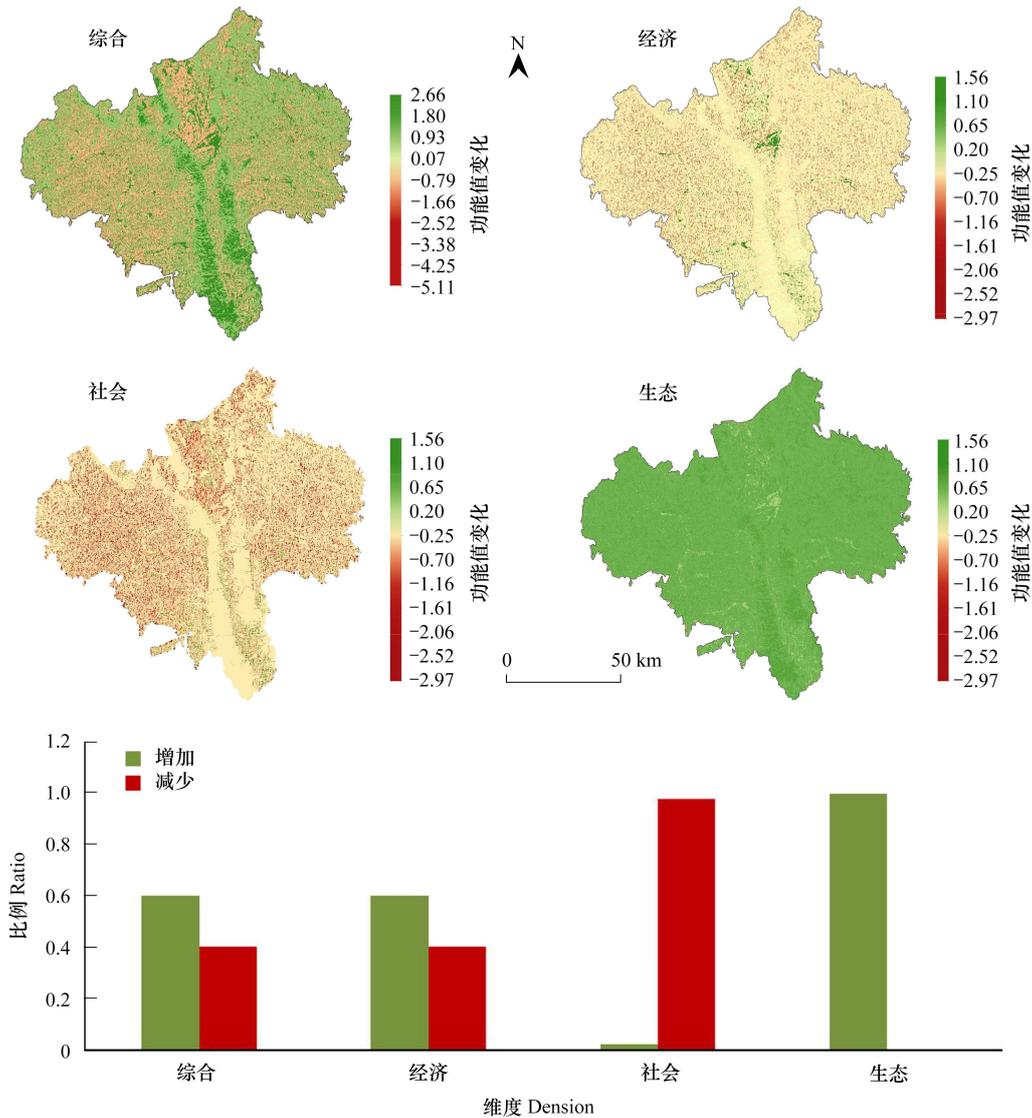


图 5 惯性发展情景土地多功能变化

Fig.5 Land use functions change in spatial under business as usual scenario

### 3.2.2 发展优先兼顾生态情景土地多功能空间变化

与土地利用现状相比, 土地多功能的减弱范围与程度更为明显(图 6)。固原全域有 40.21% 的土地功能出现了下降。

土地分维度的空间变化中, 土地功能下降幅度最大的是经济维度, 大约有 96.77% 的土地均出现了不同程度的经济维度功能的下降; 而功能下降范围最广的是社会维度的功能, 下降土地占比为 98.54%, 而生态维度中, 有 99.59% 的区域均出现了不同程度的生态维度土地功能上升的现象。主要是由于在发展优先兼顾生态情景中, 劳动力转移就业带来的劳动力不足现象更为明显和普遍, 也使得土地撂荒范围更广。撂荒地的土地

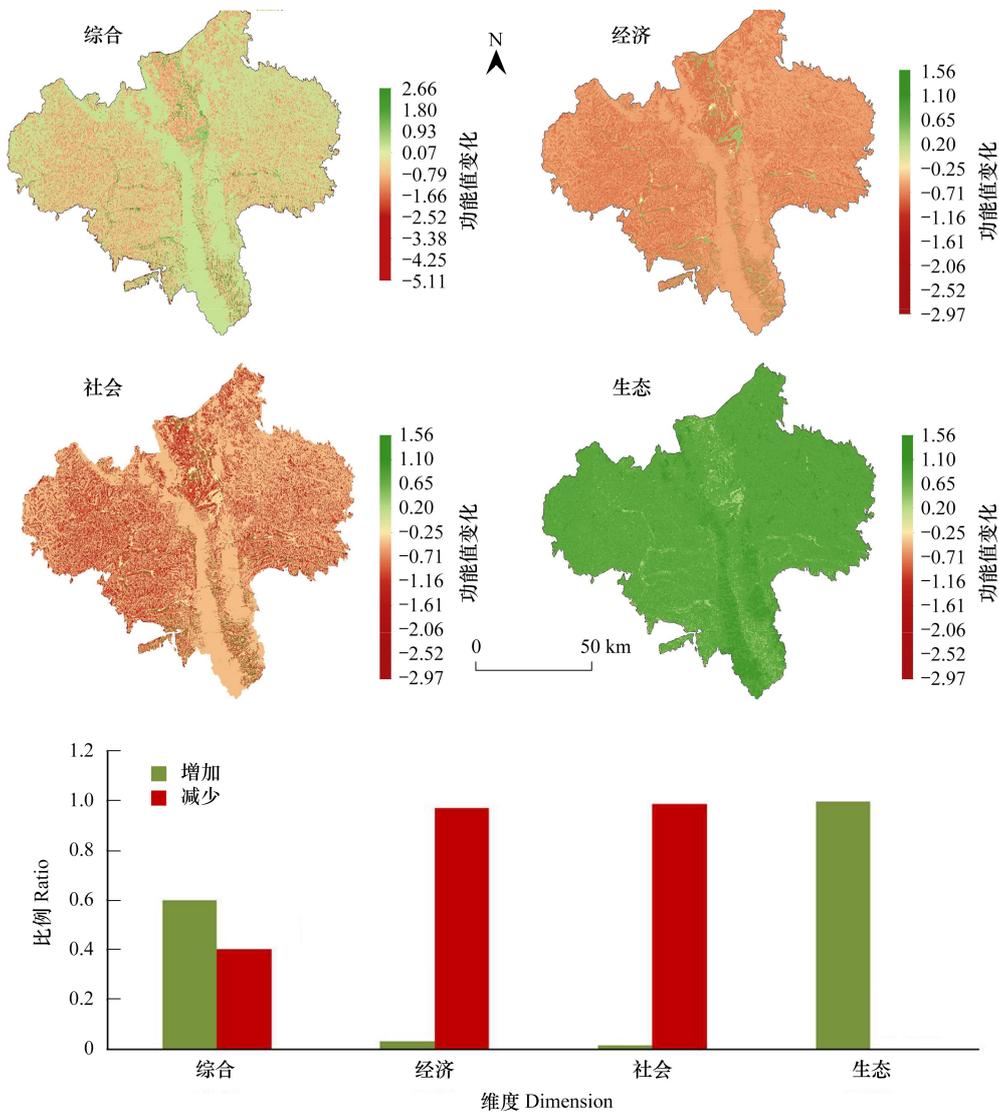


图 6 发展优先兼顾生态情景土地多功能变化

Fig.6 Land use functions change in spatial under development oriented scenario

a 图为土地各维度功能的空间变化,显示该情景下功能变化情况的的空间分布,图例显示功能变化值表征;b 图为土地各维度功能呈现增加与减少的面积比例,以进行数量上的直观对比

多功能降低幅度为 28%。因此,撂荒地的广泛分布尽管使得区域生态功能有所增加,但综合经济和社会维度功能的下降而带来区域整体功能的降低。功能增加的区域仍为中轴线区域,主要得益于建设用地和林地等地块的经济功能。

### 3.2.3 农业优先兼顾生态情景土地多功能空间变化

农业优先兼顾生态情景下,全域的土地多功能有明显的提升(图 7),土地多功能增加的区域占比为 93.45%,且土地多功能增加的区域其相应的经济维度的功能和社会维度的功能也呈现增加趋势。从分维度功能变化空间图可知,功能提升最为明显的是经济维度的功能,其次是社会维度。而对于生态维度,空间统计表明,有 99.59%的区域均出现了不同程度的生态维度功能的增加,但增加幅度很小。主要是由于在农业优先兼顾生态情景中,土地的规模化种植程度提高,而流转土地对生态维度影响具有不确定性,因此对于生态维度土地功能的影响也没有明显的变化。而土地流转带来的撂荒耕地比例的下将(由惯性发展情景的 21.17%下将为 13.14%),使得在经济维度主要表现在自种耕地对土地生产的保证和流转土地对土地产量的提高,而社

会维度主要表现在自种耕地和流转耕地对农户就业和区域粮食安全的保证,并进一步提高区域农户的生活质量。

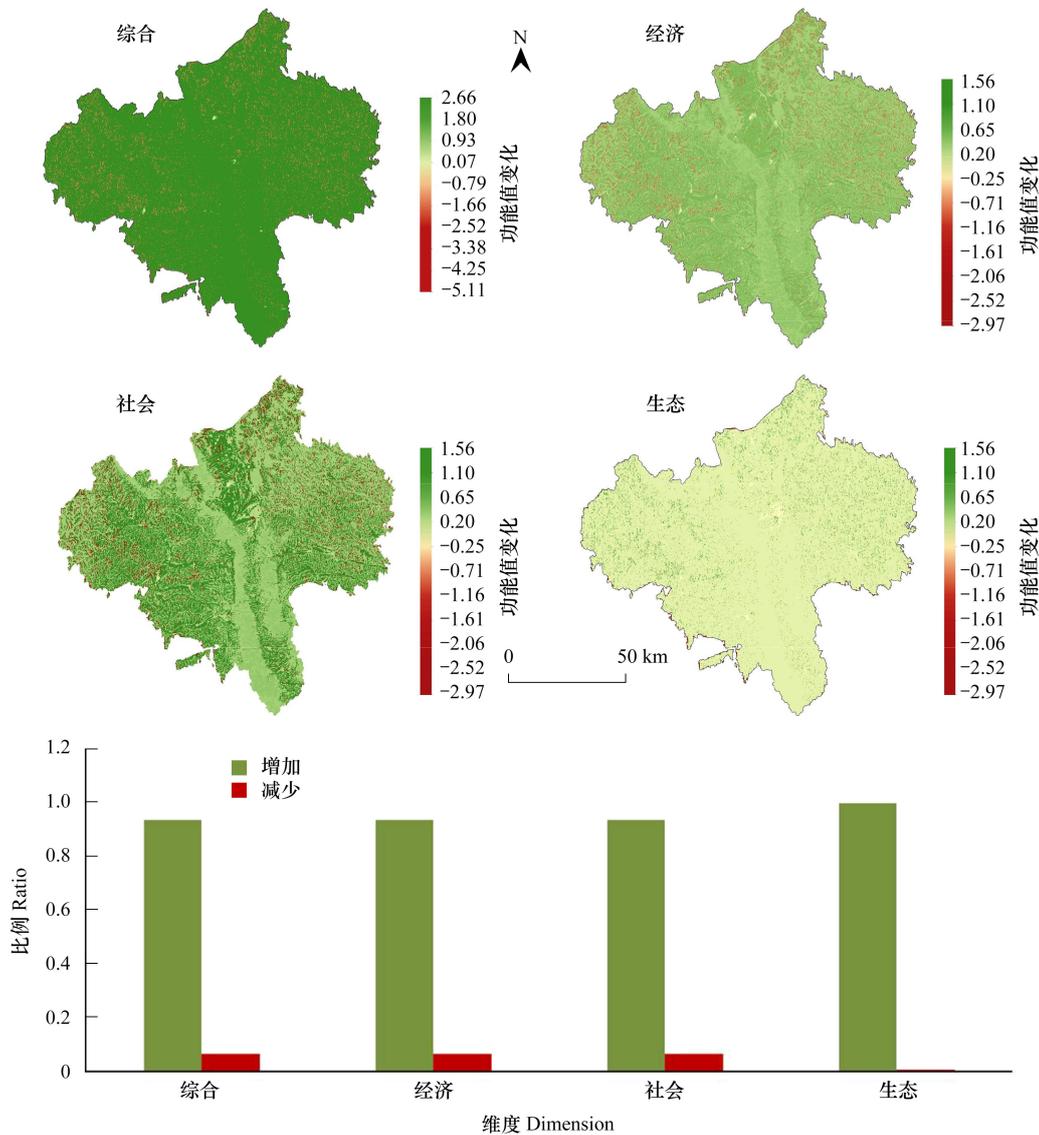


图 7 农业优先兼顾生态情景土地多功能变化

Fig.7 Land use functions change in spatial under agricultural development oriented scenario

土地各维度功能的空 间变化图,显示该情景下功能变化情况的空 间分布,图例显示功能变化值表征;坐标图 为土地各维度功能呈现增加与减少的面积 比例,以进行数量上的直观对比

### 3.2.4 生态优先兼顾发展情景土地多功能空间变化

生态优先兼顾发展情景中,区域土地多功能整体呈现增加趋势(图 8),有 59.83%的土地多功能得到了提升。而在经济维度、社会维度和生态维度中,分别有 90.97%、90.97%和 99.59%的土地功能是表现为提升的。相对于惯性发展情景,由于退耕还林的继续实施,尽管发生耕地转换为林地或草地的区域面积范围不明显,但退耕地的林下经济发展优势逐渐凸显,尤其是土地生产功能得到了明显提升。林地地区的土地多功能提升幅度为 13%,因此不论从综合功能的角度还是经济功能的角度,都有效地提升了区域土地多功能。但退耕还林对于耕地撂荒现象没有起到很好的控制作用,东西两翼等区域由于土地质量差仍然存在着撂荒地增加的趋势,而使得其经济维度和社会维度包括土地生产、提供就业、区域粮食安全以及生活质量的提高等功能均相应

的呈现减弱趋势。

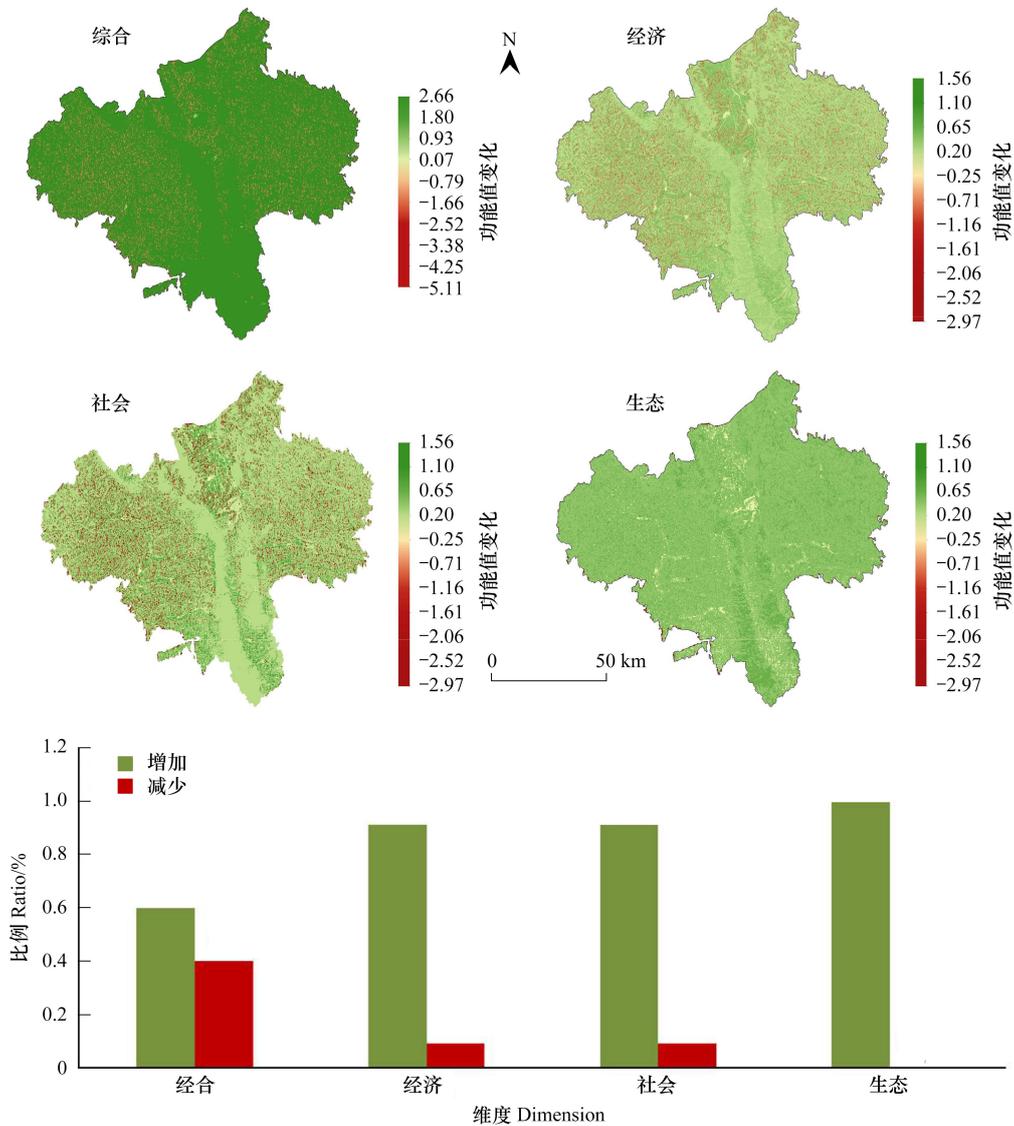


图 8 生态优先兼顾发展情景土地多功能变化

Fig.8 Land use functions change in spatial under ecological protection oriented scenario

土地各维度功能的空变化图,显示该情景下功能变化情况的空分布,图例显示功能变化值表征;坐标图为土地各维度功能呈现增加与减少的面积比例,以进行数量上的直观对比

### 3.3 土地多功能降低区域的空间分析

从土地质量(植被净初级生产力)、坡度、地形起伏度以及道路可达性等因素分别分析发生土地多功能降低区域的空间分布特点(图9)。总体而言,发生土地功能下降的区域在土地质量较好的区域明显减少。对于惯性发展情景和发展优先兼顾生态情景,主要是净初级生产力小于 150 gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>的耕地发生了功能的下降。而在农业优先兼顾生态情景中,土地质量的差异最为明显,净初级生产力小于 150 gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>的土地中 34.63%均发生了功能的下降,这一比例分别是净初级生产力在 150—315 gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>和大于 315 gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>范围的 5.14 倍和 4.96 倍。在生态优先兼顾发展情景中,净初级生产力在 315 gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>以上的土地均没有发生功能的下降。

按照耕地所处的坡度统计综合各维度发生土地多功能下降的耕地占该坡度范围内所有耕地的比例

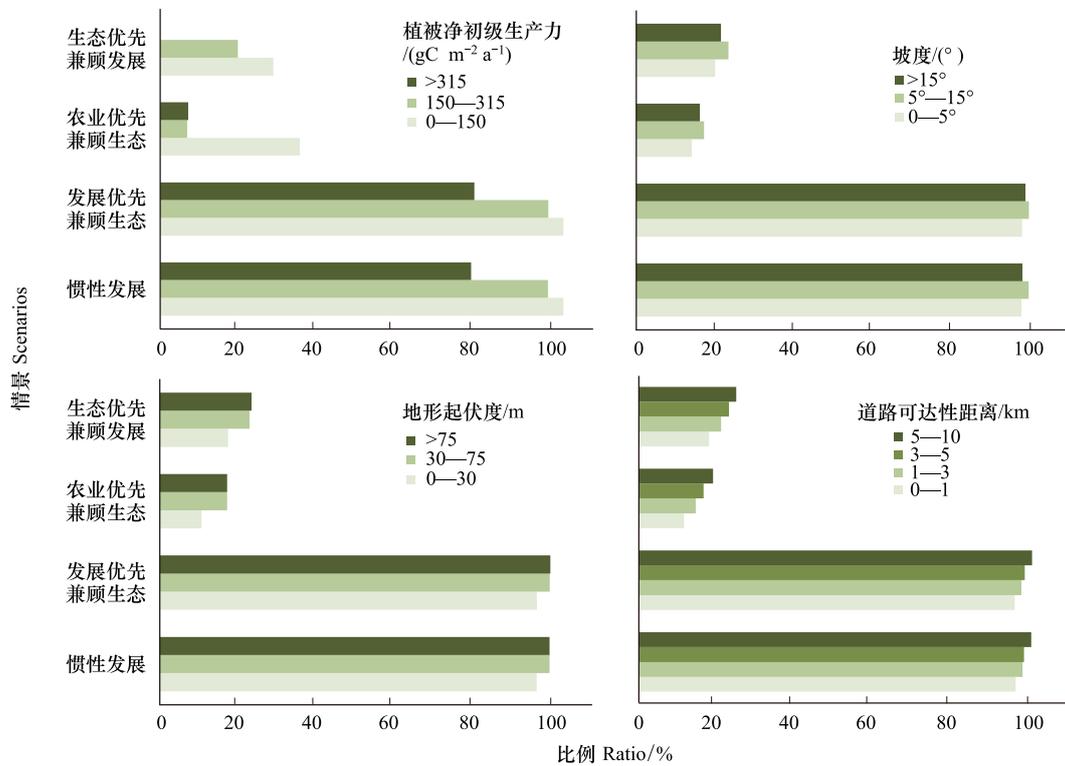


图9 不同土地质量、坡度、地形起伏度及道路可达性范围内土地多功能降低面积比例

Fig.9 Portion of the decreased land use functions in different land quality, slope, relief and road accessibility range

(图9)可知,在四种发展情景中,耕地多功能下降比例最大的为坡度处于5—15°范围内的耕地,其次是15°以上的耕地区域。在惯性发展情景、发展优先兼顾生态情景、农业优先兼顾生态情景和生态优先兼顾发展情景中5—15°范围内的耕地出现多功能下降的比例分别为97.05%、97.12%、16.73%和22.81%。一方面是因为有62.78%的耕地处于5—15°的范围内,而大于15°的耕地在区域耕地的占比仅为3%,因此多数农户家庭中坡度最大的耕地为5—15°范围内的耕地,优先发生的撂荒使得这一范围内的耕地的土地多功能发生下降。而对于惯性发展情景和发展优先兼顾生态情景,不论处于何种坡度范围内的耕地,均有至少95.27%的耕地发生了不同程度的功能下降,主要是由于这两种情景中撂荒地的大量增加与广泛分布。

从地形起伏度角度来看,发生土地多功能下降的区域范围均呈现按照地形起伏度为0—30、30—75、75m以上的范围依次变多。在惯性发展情景、发展优先兼顾生态情景、农业优先兼顾生态情景以及生态优先兼顾发展情景中,地形起伏度在75m以上而发生多功能下降的土地占比分别为96.93%、97.12%、16.75%和22.85%。发展优先兼顾生态情景由于撂荒范围最大而功能发生下降的范围最广,而农业优先兼顾生态情景由于土地流转在地力条件较好区域的有效推广而使得在地形起伏度为30°以下的区域发生功能下降的比例最小,约为10.40%。在4个情景中,土地功能发生下降的土地比例在距离道路1 km、3 km、5 km和10 km范围内逐渐增多。

#### 4 结论

本研究着眼于黄土丘陵沟壑区不同的典型地貌类型土地多功能的差异,采用多层次利益相关者参与式的评估框架,通过构建土地多功能空间变化模拟机理,研究实现了空间地块以及耕地内部不同利用状态下土地多功能的变化模拟与分析。主要结果表明:

从情景的综合影响来看,生态优先兼顾发展情景综合影响最高,对土地的社会、经济和生态3个维度的功

能均实现了相对均衡的有益影响。而农业优先兼顾生态情景对区域土地的经济维度的功能和社会维度具有更为明显的提升效应,规模化的土地管理有助于提升土地质量,增加耕地对农户的吸引力,但对区域土地生态功能的影响具有不确定性。

根据土地多功能空间变化模拟结果,研究区土地利用破碎化现象明显;耕地撂荒表现出影响全域土地功能的下降,而土地流转与规模种植鼓励措施的实施,也使得土地多功能在全域得到了较好的提升。退耕还林政策的影响的空间范围变化不大,但有效促进了区域土地多功能尤其是经济维度功能的提升。

发生土地功能下降的区域随着土地质量的提升而明显减少;耕地下降比例最大的为坡度处于 5—15°范围内的耕地;地形起伏度越大,功能下降越明显;距离道路越远,土地多功能的下降亦越明显。

黄土丘陵沟壑区不同的地貌类型下有着不同的自然环境和人文背景。本研究综合探索了不同区域环境特征和不同利益相关者群体中,土地利用与生态保护工程的影响现状、存在的问题及未来可能的发展情景,可以为开展更加具有针对性的区域可持续土地管理利用政策提供有效支撑。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] FAO. The state of the world's land and water resources for food and agriculture; managing systems at risk. London: Earthscan, 2011.
- [ 2 ] Liniger H, Studer R M, Moll P, Zander U. Making sense of research for sustainable land management. Germany: Centre for Development and Environment (CDE), University of Bern and Helmholtz-Centre for Environmental Research GmbH-UFZ, 2017.
- [ 3 ] Orr B, Cowie A, Sanchez V, Chasek P, Walter S. Scientific conceptual framework for land degradation neutrality. Bonn: United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), 2017.
- [ 4 ] Fürst C, Helming K, Lorz C, Müller F, Verburg P H. Integrated land use and regional resource management-A cross-disciplinary dialogue on future perspectives for a sustainable development of regional resources. *Journal of Environmental Management*, 2013, 127: S1-S5.
- [ 5 ] GLP (Global Land Project) Global Land Project: Science Plan and Implementation Strategy. IGBP Report No. 53/IHDP Report No.19. Stockholm: IGBP Secretariat, 2005.
- [ 6 ] United Nations. The sustainable development goals report 2016. New York: United Nations, 2016.
- [ 7 ] GLP, Science Plan and Implementation Strategy 2016-2021. Bern: Centre for Development and Environment, University of Bern, 2016.
- [ 8 ] Xue Z C, Zhen L. Impact of rural land transfer on land use functions in Western China's Guyuan based on a multi-level stakeholder assessment framework. *Sustainability*, 2018, 10(5): 1376.
- [ 9 ] Wiggering H, Müller K, Werner A, Helming K. The Concept of Multifunctionality in Sustainable Land Development. Helming K, Wiggering H. *Sustainable Development of Multifunctional Landscapes*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003: 3-18.
- [ 10 ] Xue Z C, Zhen L, Miah M G, Shoyama K. Impact assessment of land use functions on the sustainable regional development of representative Asian countries-A comparative study in Bangladesh, China and Japan. *Science of the Total Environment*, 2019, 694: 133689.
- [ 11 ] 汤国安, 杨玮莹, 秦鸿儒, 余松涛. GIS 技术在黄土高原退耕还林草工程中的应用. *水土保持通报*, 2002, 22(5): 46-50.
- [ 12 ] 张轩畅, 刘彦随, 李裕瑞, 郭远智, 曹智. 黄土丘陵沟壑区乡村生态产业化机理及其典型模式. *资源科学*, 2020, 42(7): 1275-1284.
- [ 13 ] 刘彦随, 陈宗峰, 李裕瑞, 冯巍仑, 曹智. 黄土丘陵沟壑区饲料油菜种植试验及其产业化前景——以延安治沟造地典型项目区为例. *自然资源学报*, 2017, 32(12): 2065-2074.
- [ 14 ] Verburg P H, Crossman N, Ellis E C, Heinimann A, Hostert P, Mertz O, Nagendra H, Sikor T, Erb K H, Golubiewski N, Grau R, Grove M, Konaté S, Meyfroidt P, Parker D C, Chowdhury R R, Shibata H, Thomson A, Zhen L. Land system science and sustainable development of the earth system: a global land project perspective. *Anthropocene*, 2015, 12: 29-41.
- [ 15 ] Gunderson, L.H., *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems*. Washington, D.C: Island press, 2001.
- [ 16 ] 刘珍环, 杨鹏, 吴文斌, 李正国, 唐鹏钦, 李志鹏, 余强毅, 夏天, 唐华俊. 自然环境因素对农户选择种植作物的影响机制——以黑龙江省宾县为例. *中国农业科学*, 2013, 46(15): 3238-3247.
- [ 17 ] The Agricultural European Innovation Partnership. EIP-AGRI Brochure Agricultural Knowledge and Innovation Systems. 2014; Available from: [https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/eip-agri\\_brochure\\_knowledge\\_systems\\_2018\\_en\\_web.pdf](https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/eip-agri_brochure_knowledge_systems_2018_en_web.pdf).
- [ 18 ] Liniger, H., et al., *Making sense of research for sustainable land management*. 2017, Leipzig, Germany: Centre for Development and Environment (CDE), University of Bern, Switzerland and Helmholtz-Centre for Environmental Research GmbH - UFZ.
- [ 19 ] The Agricultural European Innovation Partnership. EIP-AGRI Brochure Horizon 2020 multi-actor projects. 2014; Available from: [https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/eip-agri\\_brochure\\_multi-actor\\_projects\\_2017\\_en\\_web.pdf](https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/eip-agri_brochure_multi-actor_projects_2017_en_web.pdf).

- [20] Sarofim M C, Smith J B, St Juliana A, Hartin C. Improving reduced complexity model assessment and usability. *Nature Climate Change*, 2021, 11(1): 1-3.
- [21] 余强毅, 吴文斌, 唐华俊, 杨鹏, 陈仲新, 陈佑启. 复杂系统理论与 Agent 模型在土地变化科学中的研究进展. *地理学报*, 2011, 66(11): 1518-1530.
- [22] Chen X D, Lupi F, An L, Sheely R, Viña A, Liu J G. Agent-based modeling of the effects of social norms on enrollment in payments for ecosystem services. *Ecological Modelling*, 2012, 229: 16-24.
- [23] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, Shi W Y, Song Y, He X H. Balancing green and grain trade. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 739-741.
- [24] Yan H M, Pan L H, Xue Z C, Zhen L, Bai X H, Hu Y F, Huang H. Agent-based modeling of sustainable ecological consumption for grasslands: a case study of Inner Mongolia, China. *Sustainability*, 2019, 11(8): 2261.
- [25] Xue Z C, Zhen L. Simulating spatiotemporal changes in land-use functions in Guyuan, China, using an agent-based model dependent on multi-level stakeholder participation. *APN Science Bulletin*, 2019, 9(1).
- [26] An L, Grimm V, Turner B L. Editorial: meeting grand challenges in agent-based models. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2020, 23(1): 1-13.
- [27] Grêt-Regamey A, Huber S H, Huber R. Actors' diversity and the resilience of social-ecological systems to global change. *Nature Sustainability*, 2019, 2(4): 290-297.
- [28] 宁夏回族自治区统计局. 宁夏统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [29] 固原市林业局. 固原市退耕还林情况汇报. 固原: 固原市林业局, 2016.
- [30] 固原市统计局. 固原市 2021 年国民经济和社会发展统计公报. 固原: 固原市统计局, 2022.
- [31] Morris J B, Tassone V, de Groot R, Camilleri M, Moncada S. A framework for participatory impact assessment: involving stakeholders in European policy making, a case study of land use change in Malta. *Ecology and Society*, 2011, 16: art12.
- [32] Pérez-Soba M, Petit S, Jones L, Bertrand N, Briquel V, Omodei-Zorini L, Contini C, Helming K, Farrington J H, Mossello M T, Wascher D, Kienast F, de Groot R. Land use functions — a multifunctionality approach to assess the impact of land use changes on land use sustainability. Helming K, Pérez-Soba M, Tabbush P. *Sustainability Impact Assessment of Land Use Changes*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 375-404.
- [33] 白雪红. 多主体建模在耕地利用变化研究中的应用--以内蒙古农牧交错区为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [34] 刘新华, 杨勤科, 汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用. *水土保持通报*, 2001, 21(1): 57-59, 62.
- [35] 固原市人力资源与社会保障局. 2016 年劳动力转移就业统计. 固原: 固原市人力资源与社会保障局, 2017.
- [36] 固原市统计局. 2015 年度固原市情数据手册. 固原: 固原市统计局, 2016.
- [37] Wang X B, Yamauchi F, Huang J K. Rising wages, mechanization, and the substitution between capital and labor: evidence from small scale farm system in China. *Agricultural Economics*, 2016, 47(3): 309-317.
- [38] Zhang C, Liu G B, Xue S, Wang G L. Changes in rhizospheric microbial community structure and function during the natural recovery of abandoned cropland on the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2015, 75: 161-171.
- [39] Keenleyside C, Tucker G M. Farmland abandonment in the EU: an assessment of trends and prospects. report prepared for WWF. London: Institute for European Environmental Policy, 2010.