

# 黄河中上游区土地使用结构与布局复合优化

童海燕<sup>1</sup>, 董晓<sup>1,2\*</sup>, 刘加平<sup>3</sup>, 高伟铭<sup>1</sup>

(1. 长安大学建筑学院, 西安 710061; 2. 西安长安大学工程设计研究院有限公司, 西安 710064;  
3. 西安建筑科技大学建筑学院, 西安 710000)

**摘要:** 黄河中上游地区生态环境脆弱, 空间发展问题突出, 探索该区域土地使用结构和布局优化配置是实现黄河流域生态保护和高质量发展的有效途径。该研究以黄河中上游地区为研究对象, 基于该区域土地使用、社会经济等数据, 运用多目标规划 (multi-objective programming, MOP) 和 PLUS 模型模拟了惯性发展、生态保护、经济优先和生态-经济均衡 4 种情景下研究区未来土地格局和变化趋势, 并在平衡生态与经济的目标下提出最优土地使用结构和布局方案。结果表明: 1) 4 种情景下, 土地使用比例结构存在较大差异; 2) 均衡情景下的区域土地使用结构和空间布局方案为最优, 其综合效益值最高且达到 19 481.00 亿元, 与生态保护情景相比其经济效益 (12 223.88 亿元) 增长了 4.07%, 与经济优先情景相比其生态价值 (7 257.12 亿元) 增长了 2.32%; 经济优先情景下综合效益值为 20 273.96 亿元, 是 4 种情景下最高的。研究可为黄河中上游区域未来土地使用规划编制和土地可持续利用规划提供依据。

**关键词:** 土地使用; 优化; 空间布局; MOP 模型; PLUS 模型; 黄河中上游地区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202401220

中图分类号: S29

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-09-0252-11

童海燕, 董晓, 刘加平, 等. 黄河中上游区土地使用结构与布局复合优化[J]. 农业工程学报, 2024, 40(9): 252-262. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202401220 <http://www.tcsae.org>

TONG Haiyan, DONG Xiao, LIU Jiaping, et al. Composite optimization of land use structure and layout in the middle and upper reaches of the Yellow River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(9): 252-262. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202401220 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

土地资源具有非再生的属性, 其数量结构、空间分布的变化会对区域经济发展和环境质量产生不同程度的影响。对区域土地使用进行优化配置是有效提升土地资源应用效率的途径之一, 即在兼顾土地的生态与经济两者效益的情况下, 对土地进行数量结构和空间布局的优化, 来实现土地资源的可持续利用<sup>[1-3]</sup>。黄河中上游地区是中国重要的生态屏障和经济地带, 近年来面临诸多资源短缺、环境退化和生态破坏问题<sup>[4-5]</sup>, 社会经济与农牧业可持续发展均受到严重的影响, 如何理清区域开发与保护关系, 在发展与保护之间寻求平衡点是该区域当前研究的关键命题<sup>[6-7]</sup>, 而土地使用优化配置是寻求经济与生态平衡点的重要途径之一。此外黄河中上游地区作为典型的生态脆弱区, 存在土地资源匮乏、土地使用结构欠合理等问题, 在该地区进行土地使用优化配置研究可为极具迫切性的现实问题提供解决思路和建议。

国内外学者常用的土地优化配置方法包括模型法、综合法和多情景分析法<sup>[8-11]</sup>。土地使用数量结构的预测模型有马尔科夫 (Markov)<sup>[12-13]</sup>、灰色线性规划 (gray

forecast model, GM)<sup>[14]</sup>、系统动力学 (system dynamics, SD)<sup>[15-16]</sup>、多目标规划 (multi-objective programming, MOP)<sup>[17-19]</sup> 等。其中 Markov 模型、GM 模型往往忽略驱动因子的影响, 仅从数理统计的角度出发研究未来土地数量结构; SD 模型虽然考虑了多个驱动因子与土地使用的相互作用, 但模型构建过程过于繁杂, 在解决土地优化配置的时适配度并不高。相比之下, MOP 模型不仅构建相对简单, 可以较为快速地推断出土地使用优化配置方案, 而且兼具 SD 模型的正反馈特征和目标函数多维性的突破, 这意味着 MOP 模型不仅能够考虑到不同因素之间的相互作用, 还能够同时优化经济效益和生态效益。此外, 遗传算法被广泛认为是解决多目标优化问题最适用的方法之一<sup>[20]</sup>, 其全局优化的特性能够高效地解决土地使用数量结构的优化配置问题。

空间格局预测模型有 Patch-Logistic (CA) 模型<sup>[21]</sup>、多智能体 (ABM/MAS) 模型<sup>[22-23]</sup>、Fore-SCE 模型<sup>[24]</sup>、CLUE-S 模型<sup>[25-26]</sup>、FLUS 模型<sup>[27]</sup> 等。上述模型在景观动态变化模拟策略和转化规则挖掘策略两个方面都存在一定的不足。在精细尺度下较难模拟不同类型土地斑块的演变, 也不能实现特定模拟时段内土地使用变化机理的分析, 而 2021 年中国地质大学提出的 PLUS 模型结合了 TAS 和 PAS 的优势并克服了其缺点<sup>[28]</sup>, 集成了基于多类型随机种子机制的 CA 模型和基于土地扩张分析的规则挖掘方法, 实现了土地扩张时驱动因子及其贡献率的挖掘, 并实现更准确的地类斑块级演变预测。

收稿日期: 2024-01-28 修订日期: 2024-03-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3802803-04)

作者简介: 童海燕, 博士生, 研究方向为城乡土地使用。

Email: 2022041004@chd.edu.cn

※通信作者: 董晓, 博士, 副教授, 研究方向为国土空间规划。

Email: dongx@chd.edu.cn

将数量结构预测模型和空间格局预测模型进行结合组成土地优化配置复合模型, 可以从比例结构和空间分布双重层面对区域土地使用进行复合调控, 提升综合效益。而探究两者间互馈机制, 揭示各组成要素的互动路径, 可以提升土地利用合理性。因此, 本文以均衡黄河中上游地区经济发展与生态保护两者关系为目标, 设置4种发展情景, 首先基于MOP模型, 利用多目标遗传算法, 分析研究区多情景(生态保护、经济发展优先、生态-经济均衡)下的土地使用数量结构, 其次, 引入人口、植被指数等15个驱动因子, 利用PLUS模型中的CARS

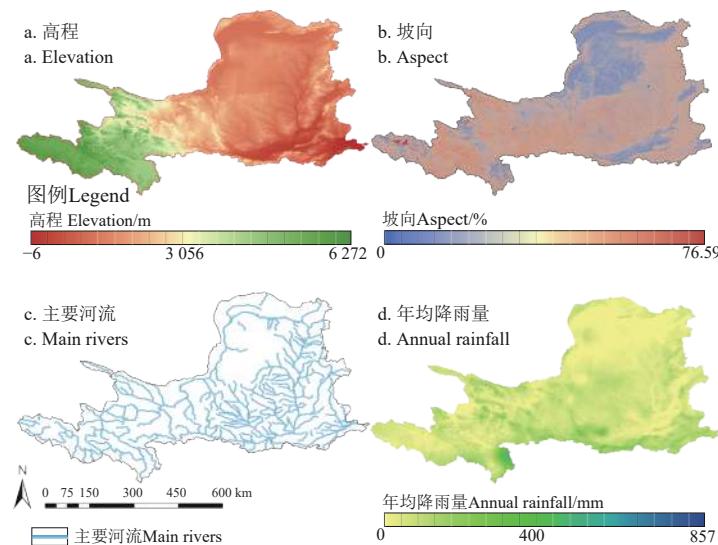


图1 研究区概况  
Fig.1 Overview of the research area

该区域地貌类型复杂, 横跨青藏、黄土、内蒙古三大高原, 属于生态安全高度威胁区<sup>[5-7]</sup>; 范围内用地大多位于山地高原, 山地面积约占2/3, 地形起伏度大, 建设用地约束性强; 且大多土地位于黄土高原范围内, 沟壑密度较高(约为35 km/km<sup>2</sup>), 用地破碎化明显; 区域内总降雨少, 年均降雨量(375 mm)低于全国水平, 且分布差异大, 主要集中在7—8月, 处于干旱半干旱地区; 区域水资源总量(744亿m<sup>3</sup>, 占全国的2%, 占长江流域的7.7%)短缺, 干流径流量较小, 平均径流量397.75亿m<sup>3</sup>, 仅为长江干流的4.1%, 整个区域受水资源约束大。同时, 黄河中上游地区处于中国“两屏三带”生态安全格局的重点位置, 是国家重要的生态屏障<sup>[5]</sup>。

## 1.2 数据来源及处理

本文涉及数据包括土地使用数据、人口经济数据、可达性数据及自然条件数据(表1)。其中土地使用数据来源于武汉大学团队中国土地覆被及动态数据集, 年份为2000—2020年, 共获取2期土地数据。应用GIS中重分类工具, 将流域的土地使用从二级分类整合为一级分类, 包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6类; 限制转换数据来源于国家保护区平台和中国生态系统评估与生态安全格局数据库; 人口经济数据包

工具对多情景下的土地使用优化格局进行空间落位。最后, 讨论土地数量结构与空间布局的实时互馈路径, 佐证土地复合优化方案的有效性。以期为黄河中上游区土地规划、土地资源可持续开发提供方法借鉴和决策参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

黄河中上游地区(图1)包括青、川、甘、宁、内蒙古、陕、晋、豫8个省区、46市。区域内常住总人口7930万人, 国土面积108.90万km<sup>2</sup>。

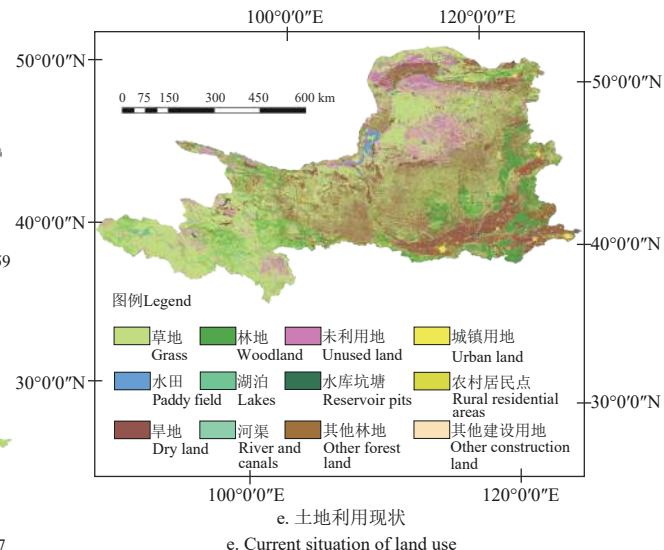


图1 研究区概况

括流域人口和GDP公里网格数据集, 来源于全球变化科学数据出版系统; 铁路等数据来源于Open Street Map; 土壤等数据来源于国家青藏高原科学数据中心; 高程、坡度和坡向数据来自于地理空间数据云平台。收集各类数据的空间分辨率尺度包括30 m、300 m和1 km, 通过GIS栅格处理中重采样工具对栅格像元进行改变, 统一分辨率为300 m。

## 2 研究方法

### 2.1 研究思路

本文耦合多目标模型和PLUS模型对黄河流域中上游地区进行土地使用优化配置, 研究思路(图2)包括土地使用结构优化和土地使用布局优化两个模块。土地使用结构优化模块是基于不同的发展目标, 设置4种发展情景。首先构建以生态保护、经济发展优先、经济-生态均衡3种情景为目标函数, 以土地总面积、耕地保有量、生态环境保护等为约束条件的多目标优化模型, 得到前3种情景下的土地使用结构数据。其次, 利用Markov Chain与多期土地使用数据, 预测得到惯性发展情景下的土地使用结构数据; 土地使用布局优化模块是利用PLUS模型进行4种发展情景的土地空间落位, 即土地使用空间优化布局。

表 1 数据来源  
Table 1 Data Sources

类型	数据名称	年份	分辨率	数据来源
Variety	Data name	Year	Resolution/m	Data sources
土地使用数据	土地使用数据	2010、2020	30	( <a href="https://doi.org/10.5281/zenodo.4417810">https://doi.org/10.5281/zenodo.4417810</a> ) 保护区平台
	国家自然保护区	2020	30	( <a href="http://www.papc.cn/html/holder/13100752-1.htm">http://www.papc.cn/html/holder/13100752-1.htm</a> )
限制转换区域数据	高度敏感区 <sup>[28]</sup>	2020	1000	中国生态系统评估与生态安全格局数据库 <a href="http://www.ecosystem.csdb.cn/">http://www.ecosystem.csdb.cn/</a>
	人口	2020	1000	( <a href="https://landscan.ornl.gov/">https://landscan.ornl.gov/</a> ) 全球变化科学研究中心数据出版系统
人口经济数据	GDP	2020	1000	<a href="http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/doi.aspx?Id=125">http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/doi.aspx?Id=125</a>
	到铁路距离	2020	300	
可达性数据	到快速路距离	2020	300	Open Street Map
	到主干道距离	2020	300	<a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a>
	到次干道距离	2020	300	/
	到城市中心距离	2020	300	ArcGIS 欧氏距离分析
	土壤类型	2000	300	国家青藏高原科学数据中心 <a href="http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/">http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/</a>
自然环境因素	到河流距离	2020	300	Open Street Map <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a>
	NDVI	2020	300	<a href="https://search.earthdata.nasa.gov/search">https://search.earthdata.nasa.gov/search</a>
	年平均温度	2000—2020	1000	WorldClim <a href="https://worldclim.org/data/index.html">https://worldclim.org/data/index.html</a>
	年平均降雨	2000—2020	1000	
	高程	/	300	地理空间数据云
坡度	坡度	/	300	<a href="http://www.gscloud.cn/sources/accessdata/310?pid=1">http://www.gscloud.cn/sources/accessdata/310?pid=1</a>
	坡向	/	300	

## 2.2 MOP 模型

MOP 即为多目标规划模型，多被用于土地使用优化

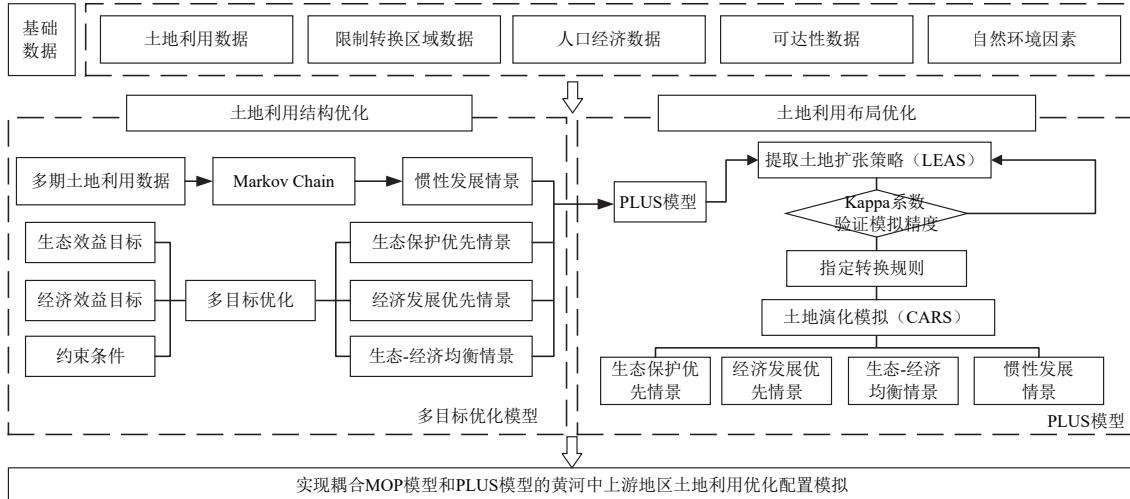


图 2 研究技术路线图  
Fig.2 Research technology roadmap

同时采用中国生态系统服务价值当量因子表<sup>[7]</sup>来估算生态系统服务价值系数  $d_j$ ，并应用修正系数<sup>[8-9]</sup>进行验证（表 2），具体步骤为：以 2010—2020 年黄河中上游地区平均粮食单产 5 517.67 kg/km<sup>2</sup> 作为基准，取 2002—2010 年国家退耕还林补助标准 1.4 元/kg 为粮食单价<sup>[10]</sup>，设定全国粮食平均单价是一个纯自然生态系统（无人力投入）所产生的经济价值量的 7 倍<sup>[10]</sup>。

相关研究，通常包含目标函数、决策变量、约束条件 3 个部分。该模型旨在多个具有相同约束条件优化的目标当中寻找合适的变量，帮助决策者在多个目标之间找到最佳平衡点，以支持土地使用规划和决策的制定。

### 1) 目标函数和决策变量

$$F_1(x) = \max_{\sum_{j=1}^n c_j x_j} \quad (1)$$

$$F_2(x) = \max_{\sum_{j=1}^n d_j x_j} \quad (2)$$

$$\text{s.t.} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = (\geq, \leq) b_j, \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\ x_j \geq 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n) \end{array} \right. \quad (3)$$

式中  $F_1$  表示研究区的经济效益 (万元)， $F_2$  则为生态效益 (万元)； $x_j$  表示第  $j$  类土地使用面积 ( $j=1, 2, \dots, 6$ )，其中  $x$  表示决策变量，即土地使用面积 ( $\text{km}^2$ )， $j$  为用地类型索引，包括 6 种不同的土地使用类型，即  $x_1$  耕地， $x_2$  园地， $x_3$  林地， $x_4$  草地， $x_5$  建设用地， $x_6$  其他用地； $c_j$  为各类土地使用类型的经济效益系数 (万元/ $\text{km}^2$ )； $d_j$  为各类土地使用类型的生态价值系数 (万元/ $\text{km}^2$ )；约束条件 s.t. 中， $a_{ij}$  为第  $i$  个约束条件中第  $j$  个变量对应的系数； $b_j$  为约束值。

2010—2020 逐年经济效益系数是通过计算 2010—2020 年研究区各个县（旗）的不同土地使用类型对应的产值与其面积之比（农业产值/耕地面积、林业产值/林地面积、牧草业产值/草地面积、渔业产值/湿地面积、二产+三产产值/建设用地面积），而未利用地的经济效益可以忽略，接着引入 GM (1,1) 灰色预测模型来测算目标年份 2030 年研究区的经济效益系数  $c_j$ （表 2）。

表 2 土地使用类型对应的经济效益系数  $c_j$ 、生态价值系数  $d_j$   
Table 2 Economic benefit coefficient( $c_j$ ) and ecological value coefficient( $d_j$ ) corresponding to land use type 万元· $\text{km}^{-2}$

项目	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
Item	Cultivated land $x_1$	Wood land $x_2$	Grass $x_3$	Water $x_4$	Construction land $x_5$	Bare $x_6$
$c_j$	5.58	34.32	4.41	1 509.78	10 182.27	0.00
$d_j$	1 118.96	5 482.01	4 086.01	144 744.07	0.00	1 898.33

## 2) 发展情景设定

基于经济与生态效益相均衡的目标原则, 同时考虑到黄河流域的区域特殊性和生态脆弱性, 本文以2030年为目标年, 设定惯性发展、生态保护、经济发展、生态-经济均衡4种发展情景, 并在参考现有文献<sup>[1]</sup>的基础上, 采取德尔菲法<sup>[19]</sup>且综合专家意见确定了4种情景下生态和经济效益各自所占权重比例。其中惯性情景下各类用地应顺应自然演变规律, 对其生态和经济效益目标不设权重; 经济优先情景下应以经济建设为目标, 提高区域土地使用强度, 优化土地使用结构, 提升土地使用效能, 从而有效推动城镇化进程。该情景下生态和经济效益目标所

占权重比为1:4; 生态保护情景下应以生态文明建设为目标, 关注山、湖、林、田、草地的保护, 防止建设用地和城市边界的无限扩张, 该情景下生态和经济效益目标所占权重比为4:1; 均衡情景下应关注生态保护和社会经济的协调发展, 在不侵占生态保护用地的情况下大力促进经济建设, 该情景下生态和经济效益目标所占权重比为1:1。

## 3) 约束条件

依据黄河中上游地区各县(旗)的相关规划文本、惯性情景下的2030年土地使用需求数据(基于Markov Chain预测), 并结合灰色预测模型对研究期内土地使用的变化状况来制定多目标模型的约束条件(表3)。

表3 约束条件设置

Table 3 Constraint setting

约束类型 Constraint type	约束条件 Constraint condition	说明 Illustrate
土地总面积 $T$	$T=781\ 480$	各类土地面积 $x_i$ 的总和应等于黄河中上游地区的总面积 $781\ 480\ km^2$
决策变量非负约束	$x_i \geq 0, i=1,2,3,4,5,6$	各决策变量应为非负值
耕地保有量 $x_1$	$188\ 984 \geq x_1 \geq 169\ 808$	$x_1$ 不应低于2020年现状耕地面积, 最大不应超出惯性发展情景下的 $x_1$ 需求数据上调10%的量 <sup>[10]</sup>
林地规模 $x_2$	$108\ 947 \geq x_2 \geq 94\ 970$	$x_2$ 最小不应低于2020年现状规模; 最大不应超出惯性发展情景下的 $x_2$ 需求数据上调10%的量
草地面积 $x_3$	$461\ 158 \geq x_3 \geq 452\ 026$	$x_3$ 的增减受到降雨量和人类活动双重影响, 且 $x_3$ 占比面积最大, 其增减幅度不应超过惯性发展情景下 $x_3$ 需求数据 $\pm 1\%$ 的量 <sup>[19]</sup>
水域面积 $x_4$	$6\ 510 \geq x_4 \geq 5\ 166$	$x_4$ 最小不应低于2020年现状规模; 最大不应超出惯性发展情景下的 $x_4$ 需求数据上调10%的量
建设用地规模 $x_5$	$23\ 484 \geq x_5 \geq 18\ 739$	$x_5$ 最小不应低于2020年现状规模; 最大不应超出惯性发展情景下的 $x_5$ 需求数据上调10%的量
未利用地规模 $x_6$	$28\ 192 \geq x_6 \geq 24\ 095$	$x_6$ 最小不应低于惯性发展情景下的 $x_6$ 需求数据下调10%的量, 最大不应超出2020年现状规模
生态环境保护	$x_2 \geq 101\ 302$ $x_4 \geq 5\ 840$	仅针对生态保护情景, $x_2$ 、 $x_4$ 最小不应低于: 取2005—2020年内每5a为间隔, 共4期数据为基础, 应用灰色模型预测的2030年 $x_2$ 、 $x_4$ 面积 <sup>[10]</sup>

注: 面积单位为  $km^2$ 。

Note: The area unit is  $km^2$ .

## 2.3 PLUS模型

PLUS模型是在FLUS模型的基础上构建的一种新的改进的CA模型, 其耦合了一种新的用地扩张分析策略和基于多类随机斑块种子的CA模型, 一方面可以更好地挖掘各类土地使用变化的诱因, 另一方面也可以更好地模拟多类土地使用斑块级的变化。

### 1) 土地扩张分析策略

土地扩张分析策略(land expansion analysis strategy, LEAS)不仅能避免多地类分析时的复杂计算, 而且可以在一定时间段内分析土地使用变化机理。其将各地类转换规则的挖掘转化成一个二元分类问题, 探索各地类扩张与多驱动因子关系、获取各地类发展概率及驱动因子贡献率。本文从自然、社会经济维度选取了GDP、人口等15个驱动因子。

### 2) 土地演化模拟

土地演化模拟是对多种地类斑块演化进行模拟, 采用基于阈值下降的多类型随机斑块种子机制。模型参数设置如下:

①用地需求: 用地需求表示模拟年份不同土地使用类型的栅格数量, 主要包括两种模拟方法分别为线性回归法和马尔科夫链法。本研究运用马尔科夫链法预测2030年惯性情景下各土地使用类型的栅格数量, 其计算结果如表4所示。

②领域权重: 邻域权重参数代表着不同用地类型的扩张强度, 反映了各地类在空间驱动因子影响下的扩张

能力, 本文基于前人经验, 依据研究时段各地类斑块总面积变化量设定, 计算式如下:

$$X_i = \frac{\Delta T_{Ai} - \Delta T_{Amin}}{\Delta T_{Amax} - \Delta T_{Amin}} \quad (4)$$

式中  $X_i$  某一地类  $i$  的邻域权重参数,  $T_A$  为用地面积,  $\Delta T_{Ai}$  为研究时段内该地类  $T_A$  的变化量,  $\Delta T_{Amax}$ 、 $\Delta T_{Amin}$  分别为研究时段内  $T_A$  的最大、最小变化量。表5为邻域权重参数表。

表4 各情景下各地类斑块2030年土地需求面积预测

Table 4 Prediction of land demand area for various types of patches in various scenarios by 2030  $km^2$ 

情景 Scenarios	耕地 Cultivated land	林地 Forest	草地 Grass	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Bare
惯性发展	171 804	99 043	456 593	5 918	21 350	26 772
生态保护	171 318	103 025	454 437	6 011	20 366	26 324
经济优先	172 603	97 972	455 711	6 011	21 672	27 543
均衡发展	172 613	97 879	455 734	6 011	21 640	27 572

表5 邻域权重参数表

Table 5 Neighborhood weight parameters table

项目 Item	耕地 Cultivated land	林地 Forest	草地 Grass	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Bare
$\Delta T_A$	-43 699	75 236	-78 558	7 448	47 788	-8 215
权重	0.29	1.29	0.01	0.72	1.06	0.59

③转移矩阵: 转移矩阵表示不同土地使用类型之间的转换规则, 主要依靠历史土地使用数据和经验设定。具体规则为: 当一种土地使用类型不能转换为另一种土地使用类型时, 其矩阵中对应值为0, 反之则为1(图3)。

图例Legend  
☒ 1 可以转换 Convertible  
☒ 0 不可转换 Unconvertible

	耕地 Cultivated land	林地 Wood land	草地 Grass land	水域 Waters	建设用地 Construction land	未利用用地 Bare land
耕地	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 0	☒ 1
林地	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 0	☒ 1
草地	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 0	☒ 1
水域	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 1
建设用地	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 1	☒ 1
未利用用地	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 0	☒ 1
耕地	☒ 1	☒ 0	☒ 0	☒ 0	☒ 0	☒ 1
林地	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 1
草地	☒ 1	☒ 0	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 1
水域	☒ 1	☒ 0	☒ 0	☒ 1	☒ 0	☒ 1
建设用地	☒ 1	☒ 0	☒ 0	☒ 0	☒ 1	☒ 1
未利用用地	☒ 1	☒ 0	☒ 0	☒ 0	☒ 0	☒ 1
耕地	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 0	☒ 1
林地	☒ 0	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 0	☒ 1
草地	☒ 0	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 0	☒ 1
水域	☒ 0	☒ 0	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 1
建设用地	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 1
未利用用地	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 0	☒ 1
耕地	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 0	☒ 1
林地	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 1
草地	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 0	☒ 1
水域	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 1
建设用地	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 1
未利用用地	☒ 1	☒ 1	☒ 1	☒ 0	☒ 0	☒ 1

图 3 各情景土地使用转换成本矩阵

Fig.3 Cost matrix for land use conversion in various scenarios

④模型精度验证：本文使用 Kappa 系数评估模型模拟准确性，计算式如下：

$$\text{Kappa} = \frac{P_0 - P_c}{P_p - P_c} \quad (5)$$

式中  $P_0$  为模拟正确的栅格占比， $P_p$  为理想状态下模拟正确比例， $P_c$  为随机状态下模拟正确比例。Kappa 值判断标准为：当 Kappa 系数值分别介于  $0\sim 0.2$ 、 $>0.2\sim 0.4$ 、 $>0.4\sim 0.6$ 、 $>0.6\sim 0.8$  和  $>0.8\sim 1$  之间时，其模拟效果分别判定为低、较差、中等、较高和高。

### 3 结果与分析

#### 3.1 PLUS 模型各参数运行结果

##### 3.1.1 驱动因子及其贡献率

根据驱动因子的选取原则<sup>[25]</sup>，本研究选取了 15 个能作用于土地使用变化的驱动因子（图 4）。包括：人口、植被指数（NDVI）、GDP、到铁路的距离、到高速公路的距离、到主干道的距离、至次干道距离、到市中心的距离、土壤类型、到河流的距离、年平均气温、年平均降雨量、DEM、坡度、坡向。按照 PLUS 模型测度要求对驱动因子进行了标准化处理，且要求各驱动因子栅格数据的单元格大小和数目均保持一致。

2010—2020 年黄河中上游地区各类用地扩张因子均方根误差 RMSE 均低于 0.14，效果较好。如图 5 所示，土地与驱动因子之间的连线越粗，即表示该驱动因子对于该类土地演化预测的贡献度越高。

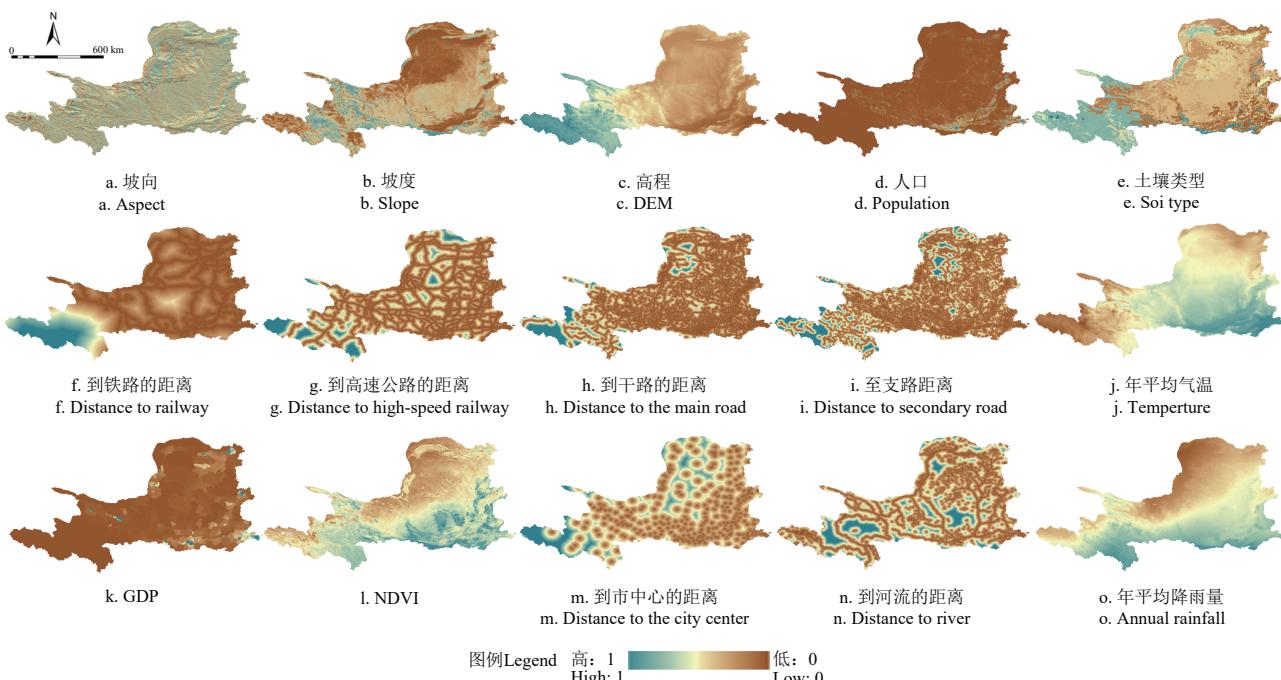


图 4 驱动因子归一化结果

Fig.4 Normalization results of driving factors

从综合角度而言，贡献度最高的几项因子为 DEM、植被指数、GDP、年平均气温。其中对耕地扩张影响度最高的驱动因子是 DEM，对林地扩张影响度最高的是植被指数，对草地扩张影响度最高的是年平均气温，对建设用地扩张影响度最高的是 DEM 和人口。

##### 3.1.2 土地使用时空变化

通过分析可知，2010—2020 年黄河中上游地区地类变化中，草地 ( $-6408.81 \text{ km}^2$ )、林地 ( $6771.24 \text{ km}^2$ )、建设用地 ( $4300.92 \text{ km}^2$ ) 与耕地 ( $-3932.91 \text{ km}^2$ ) 总量变化依次最多，草地、耕地、林地、未利用地依次向

其他类用地转换最多(图6), 其中草地转换为耕地、未利用地的面积较多, 占比分别为5.05%和1.51%; 耕地向草地、林地转出最多, 占比分别为13.39%和0.82%; 林地向草地、耕地转出最多, 占比分别为8.25%和1.64%。

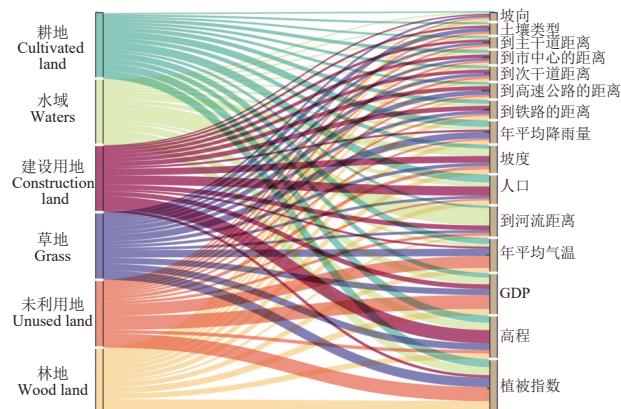


图5 各类用地扩张驱动因子贡献度

Fig.5 Contribution of driving factors in the expansion of various types of land use

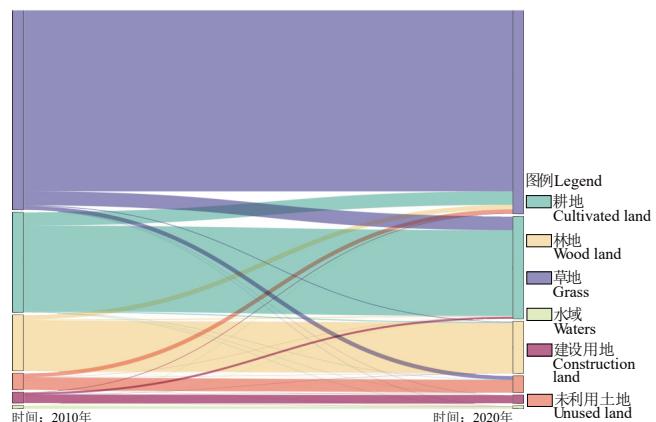


图6 土地使用类型转换 Sankey 示意图

Fig.6 Schematic diagram of Sankey for land use type conversion

### 3.1.3 模型精度验证

本文以2010年的土地使用数据为基础, 通过PLUS模拟得到2020年的土地使用情形, 将其与2020年的真实的土地使用格局进行对比验证(图7), 得知各类用地中水域的模拟精度最高, 草地模拟精度最低。运行PLUS验证其Kappa系数为0.86, 总体精度为91.04%, 则可知模型的各项参数设置合理, 模拟精度比较高。

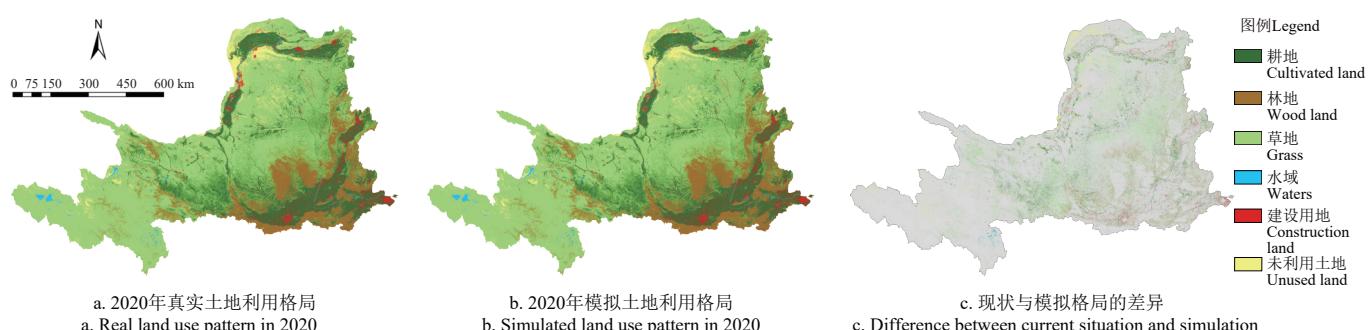


图7 2020年黄河中上游地区土地使用模拟与真实情况对比

Fig.7 Comparison of land use simulation and real situation in the research area in 2020

### 3.2 研究区土地使用数量结构方案

运用PLUS软件中马尔科夫链模型测算惯性发展情景下的2030年研究区的土地使用结构方案, 运用多目标遗传算法测算得到余下3种情景下的土地使用结构方案

(表6)。4种情景下各类土地的比例结构存在较大差异, 水域、建设用地和林地相较于2020年现状用地变化比例较大, 因此对于生态效益和经济效益具有直接显著的影响。

表6 黄河中上游地区多种模拟情景下土地使用面积及变化比例的对比分析

Table 6 Comparative analysis of land use area and change proportion under various simulation scenarios

情景 Scenarios	项目 Item	耕地 Cultivated land	林地 Forest	草地 Grass	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Bare
现状 current	面积/km <sup>2</sup>	169 808.40	94 970.34	464 603.85	5 166.45	18 739.17	28 192.68
惯性发展 Inertial development	面积/km <sup>2</sup>	171 804.23	99 043.01	456 592.83	5 918.34	21 349.98	26 772.49
生态保护 Ecological protection	变化比例/%	1.18	4.29	-1.72	14.55	13.93	-5.04
经济优先 Economic priority	面积/km <sup>2</sup>	171 318.20	103 025.12	454 436.52	6 011.01	20 366.02	26 324.00
均衡发展 Balanced development	变化比例/%	1.65	3.16	-1.91	16.35	15.65	-2.31
	面积/km <sup>2</sup>	172 603.00	97 972.00	455 711.00	6 011.00	21 672.02	27 543.00
	变化比例/%	1.65	3.06	-1.91	16.35	15.48	-2.20

如表6所示, 惯性发展情景下, 2030年黄河中上游区域的耕地、林地、水域和建设用地面积呈现增长趋势, 草地和未利用地面积呈现减少趋势, 其中水域和建设用

地的增长比例最高, 达到14.55%和13.93%, 未利用地的面积减少比例最高达到5.04%。黄河中上游地区属于生态脆弱区, 生态类用地的增加有利于研究区的生态建

设与保护，同时经济类用地的增加，有利于经济水平的提高。多目标模型设置的三类情景下，经济优先情景下的建设用地面积增加的比例最高，达到  $2932.85 \text{ km}^2$  (15.65%)，生态优先情景下的林地和水域面积增加比例最高，分别为  $8054.78 \text{ km}^2$  (8.48%) 和  $844.56 \text{ km}^2$  (16.36%)。该用地变化的趋势符合情景设置的初衷。

### 3.3 研究区土地使用空间分布格局

研究通过 PLUS 模型对 2030 年 4 种情景下的黄河中上游地区土地使用空间格局进行空间落位（图 8）。建

设用地在惯性发展、经济优先和均衡发展 3 种情景下的空间格局变化幅度明显，扩张发生的位置大多处在研究区的西北部，在生态情景下的空间格局变化幅度较小，仅增长了  $1626.87 \text{ km}^2$ 。草地在生态情景下的空间格局变化幅度较大，呈现增长趋势，主要分布在研究区中部和南部，草地在其他 3 种情景下的空间格局变化幅度较小（图 9）。水域在 4 种情景下的空间格局变化幅度是 6 类用地中最小的，而耕地、未利用地、林地的格局形态有着较大幅度变化，其中未利用地变化始终保持减少趋势。

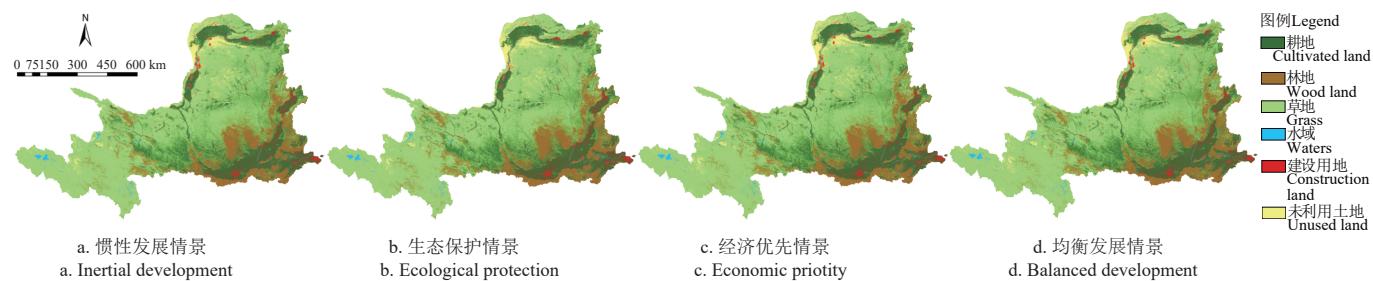


Fig.8 Land use distribution under different simulation scenarios in the study area by 2030

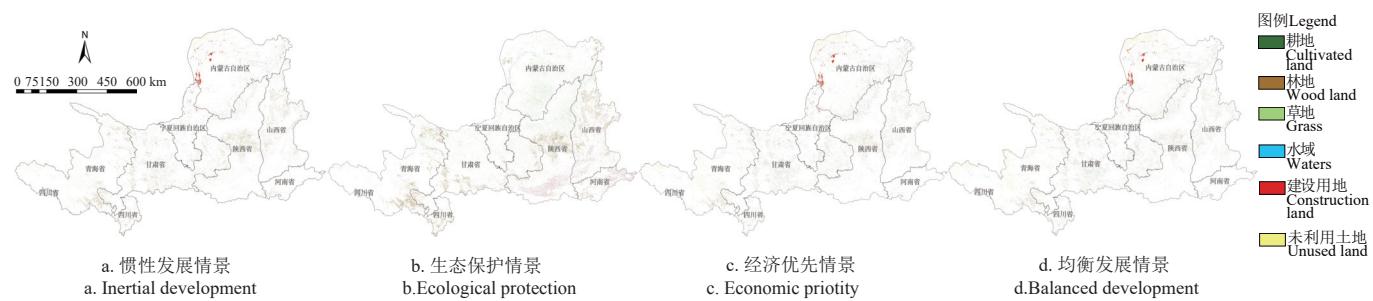


Fig.9 Extraction of land use differences in the study area under different simulation scenarios in 2030 and 2020

1) 惯性发展情景下，各类用地变化面积从大到小依次为草地、林地、建设用地、耕地、未利用地、水域，草地变化幅度最大。各区域用地面积均发生了不同程度的增长和收缩，差异主要分布在研究区北部，其中内蒙古收缩最为明显。林地主要在南部、中部出现增长，其中山西、陕西、甘肃和青海省的增长较多。建设用地和耕地面积扩张主要位于北部和中部，其中大多处在内蒙古、宁夏、甘肃和山西范围内。各区域未利用地均有不同程度的减少。水域受到保护，极少向其他土地类型转换。

2) 生态保护情景下，各类用地变化面积从大到小依次为草地、林地、未利用地、建设用地、耕地、水域，耕地和水域的空间分布格局无明显的变化，仅有少量增长和消退。建设用地在研究区的东南部出现增长，主要位于山西、陕西和河南省范围内。生态类用地即草地和林地大量在研究区北部的内蒙古、陕西、青海和甘肃范围内发生大幅扩张，林地在青海省南部、四川省范围内增幅最多。

3) 经济优先情景下，各类用地变化面积从大到小依

次为草地、建设用地、林地、耕地、未利用地、水域，经济类用地即建设用地和耕地扩张明显，尤其是研究区北部的内蒙古增长最多。草地和未利用地在大部分区域（研究区南部、东部）发生了收缩和消退，草地大多向耕地和林地进行了转换，同时在少数地区出现少许增长现象。

4) 生态-经济均衡发展情景下，各类用地变化面积从大到小依次为草地、林地、建设用地、耕地、水域、未利用地，草地在研究区北部、中部发生了扩张，包括内蒙古、甘肃省范围，在研究区西部、南部发生少量收缩，尤其是青海省和陕西省。建设用地在研究区北部（内蒙古省范围）扩张幅度较大，且主要延展方式为边缘式和填充式。耕地和林地在研究区内大致均匀扩张，主要由草地类型转换而来。

上述结果表明，生态-经济均衡情景下的各类土地空间分布的格局更加合理，其中建设用地布局最为紧凑；耕地有向四周蔓延的趋势，表现为边缘式扩张；林地和水域更侧重填充式和飞地式扩张，主要填充的类型是原有的草地和未利用地，从而实现更高的生态价值。

### 3.4 研究区土地使用方案效益分析

本研究通过 MATLAB2021b 中的 MUGA 模块进行迭代运算, 直到算法运行满足停止准则, 搜索到的 Pareto 非劣解前端大体呈曲线分布(图 10), 可以得到 2030 年 4 种情景下研究区的经济效益值与生态效益值(表 7)。

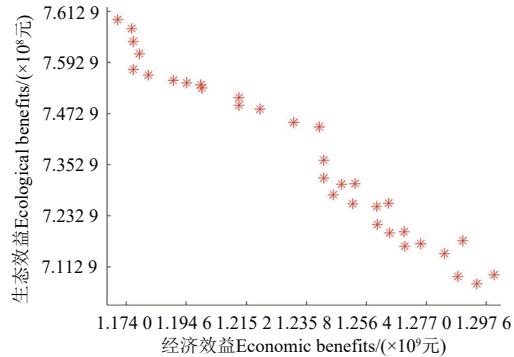


图 10 基于双目标函数的帕累托非劣解前端分布

Fig.10 Front end distribution of Pareto non inferior solutions based on dual objective function

表 7 多情景下经济、生态效益对比分析

Table 7 Comparative analysis of economic and ecological benefits under multiple scenarios

项目 Item	惯性发展 Inertial development	生态保护 Ecological protection	经济优先 Economic priority	均衡发展 Blanced develpnat
经济效益/ $\times 10^8$ 元	11 999.82	11 745.89	13 181.04	12 223.88
生态效益/ $\times 10^8$ 元	7 166.68	7 606.28	7 092.92	7 257.12
经济效益变化比例/%	2.16	0.00	12.22	4.07
生态效益变化比例/%	1.04	7.24	0.00	2.32

注: 经济效益变化比例是以生态保护情景为基准计算, 生态效益变化比例是以经济优先情景为基准计算。

Note: The proportion of economic benefits change is calculated based on the ecological protection scenario, while the proportion of ecological benefits change is calculated based on the economic priority scenario.

由表 7 可知, 经济优先情景下研究区的经济效益显著, 预测 2030 年达到 13 181.04 亿元, 但生态效益不佳且为最低, 仅有 7 092.92 亿元, 综合效益 20 273.96 亿元。该情景不利于生态文明建设。在生态保护情景下, 经济效益仅为 11 745.89 亿元, 而生态效益达到了 4 种情景下最高, 为 7 606.28 亿元, 该情景对经济发展不利。上述两种情景均可能导致区域发展失衡, 不利于两者协调发展。此外, 惯性发展情景下生态与经济效益相对平衡, 但其综合效益(19 166.50 亿元)不及均衡发展情景(19 481.00 亿元), 且与生态保护情景相比均衡发展情景下的经济效益增幅达到 4.07% (大于惯性情景的 2.16%); 与经济优先情景相比, 其生态效益增幅达到 2.32% (大于惯性情景的 1.04%)。即生态-经济均衡情景所提出的土地使用方案能够支持区域发展效益最大化, 有利于促进地区可持续发展。

## 4 讨论

### 4.1 土地利用结构与布局的互馈机制

从数量结构、空间布局方面调控土地利用一直是土地复合优化配置的核心<sup>[28]</sup>, 阐明两者互馈路径是黄河中

上游区高质量发展的关键, 也是建立两者紧密耦合关系的基础(图 11)。土地空间布局是数量结构的平面体现, 数量结构则反映空间布局的三维构成。土地总量和各类型的分配状况受到多个因素影响, 城市化不断推进有效提升了土地盈利的能力, 拔高地价的同时对建设用地的需求显著增强。该场景下经济优先发展, 但会引起土地结构中建设用地比例过高, 耕地等生态用地减少, 此时基本农田保护、生态红线保障政策出台, 保护林、草、耕地, 促进土地良性流转, 实现土地格局的优化, 进而回馈经济、推进新型城镇化建设, 则土地结构与布局的第一条互馈路径完成闭环, 该组互馈关系反映经济蓬勃发展, 但生态要素受到制约; 土地格局破碎、斑块细碎度高会制约经济发展, 造成产业结构失衡、绿地萎缩、环境污染加重, 需践行退耕还林等生态保护政策去优化土地空间布局。则形成第二条互馈路径。该路径重视生态保护, 关注经济发展较少; 人口变化意味着需要更多(少)住房等经济建设用地, 引起土地需求的调整或结构失衡, 此时将未利用地作为弹性空间进行管制, 可优化土地结构、平衡生态关系, 达到土地与人口匹配的状态, 再结合城市规划的刚性管制指标, 可以实现数量结构与空间格局复合优化的局面, 则使第三条互馈路径闭环。该组互馈关系平衡了经济与生态的关系。三组互馈路径的作用过程能有效佐证均衡发展情景优于生态或经济单一保护情景。

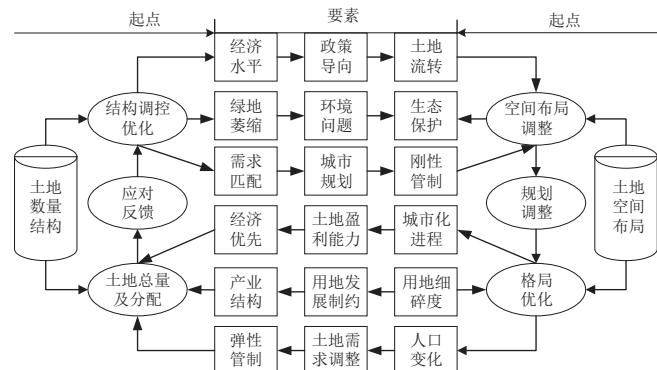


图 11 土地利用数量结构与空间布局互馈路径

Fig.11 The mutual feedback path between land use quantity structure and spatial layout

### 4.2 研究区土地复合优化的建议

黄河中上游地区是典型的生态脆弱区, 当前出现了土地利用总量和分配比例相对失调、经济和生态发展亟需平衡、土地空间分布不尽合理等问题, 迫切需要对土地可持续发展提供参考建议。本文设置的 4 种情景方案, 可以了解未来不同情景下土地数量结构与空间布局的状态。惯性情景下草地和未利用地大幅降低, 建设用地相应增大, 与主流规划要求不符, 远期应对建筑用地的快速扩张进行遏制。生态保护和经济优先情景基本显露了区域未来土地利用的潜在矛盾, 不符合高质量发展的要求。均衡情景既能有效约束建设用地的增长, 又能使生态用地的变化维持在合理范围, 在未来建设中, 建议依

照该情景下的土地数量结构与空间布局的复合优化方案进行土地规划。

相较于普遍应用的 CLUE-S 模型、FLUS<sup>[21,27,29-30]</sup>, 本文应用的 PLUS 模型构建了一个灵活的处理多类土地使用斑块变化的机制, 可以更精确地模拟黄河中上游地区土地使用空间分布情况。同时以往研究在 PLUS 模型的参数设置的调试过程中, 对于限制转换区的设置比较单一<sup>[31-32]</sup>, 多以自然保护区为主, 而本文立足于生态脆弱区的地域特点, 在生态保护情景下的将高脆弱区作为限制转换区域, 增强了模拟过程的科学性。存在不足是受制于收集到的规划文本数据有限, 在多目标模型约束条件构建过程中以惯性情景下的土地使用数据、2020 年现状数据作为参照对演变趋势做出边界控制, 导致了少量主观判断的引入。在后续研究中应不断补充约束条件, 扩充数据来源, 使土地优化配置更加客观。

## 5 结 论

本文构建了黄河中上游地区生态保护、经济优先和生态-经济均衡多目标土地使用优化模型, 并引用遗传算法求解, 得到 3 种情景的土地使用结构优化配置的方案, 从而对该区域内的土地使用结构进行优化, 再应用 PLUS 模型中的 CARS 板块, 模拟 2030 年黄河中上游地区空间格局的优化配置。主要结论如下:

1) 得到一组使综合效益达到较优水平的 Pareto 非劣解方案。利用多目标遗传算法对生态保护、经济优先与生态-经济均衡 3 项不同目标的土地使用结构优化配置问题进行求解, 得到了一组 Pareto 非劣解方案。该结果从一定程度上为决策人预案提供多种选择方案, 并通过与空间落位模型 PLUS 相结合, 实现对权衡不同发展目标的土地使用结构及格局分布的情景模拟。

2) 4 种发展情景下, 土地使用比例结构存在较大差异。与 2020 年现状相比, 耕地在经济优先情景下、林地在惯性发展情景下、草地和未利用地在生态保护情景下、水域和建设用地在均衡发展情景下的变化是最大的。

3) 4 种情景中的生态-经济均衡情景提供的优化配置方案更为合理。从土地使用比例结构、空间格局和总体效益 3 个角度进行模拟比较, 得知均衡情景的总体优于另外 3 种情景。该方案可为黄河中上游地区未来的生态保护、经济建设和土地优化配置提供参考建议。

## [参 考 文 献]

- [1] 陆军辉, 梅志雄, 赵书芳, 等. 土地利用配置的混沌蚁群优化算法研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(8): 1026-1035.  
LU Junhui, MEI Zhixiong, ZHAO Shufang, et al. Land use optimization allocation based on chaos ant colony algorithm[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(8): 1026-1035. (in Chinese with English abstract)
- [2] 喻丹, 董晓华, 彭涛, 等. 基于减沙效益和经济效益的流域退耕还林方案优化[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(13): 260-270.  
YU Dan, DONG Xiaohua, PENG Tao, et al. Optimization of grain for green program based on sediment reduction and economic benefits[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(13): 260-270. (in Chinese with English abstract)
- [3] XUE D, YUE L, AHMAD F, et al. Empirical investigation of urban land use efficiency and influencing factors of the Yellow River basin Chinese cities[J]. *Land Use Policy*, 2022, 117(10): 6117.
- [4] 高伟, 李欣悦, 张远, 等. 长江流域生态系统服务价值时空演变与预测[J]. 生态学报, 2023, 43(15): 6203-6211.  
GAO Wei, LI Xinyue, ZHANG Yuan, et al. Evolution and prediction of ecosystem service values of the Yangtze River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(15): 6203-6211. (in Chinese with English abstract)
- [5] 金凤君, 马丽, 许蝶, 等. 黄河流域产业发展对生态环境的胁迫诊断与优化路径识别[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 127-136.  
JIN Fengjun, MA Li, XU Dun. Environmental stress and optimized path of industrial development in the Yellow River Basin[J]. *Resource Science*, 2020, 42(1): 127-136. (in Chinese with English abstract)
- [6] 梁鑫源, 金晓斌, 孙瑞, 等. 粮食安全视角下的土地资源优化配置及其关键问题[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(12): 3031-3053.  
LIANG Xinyuan, JIN Xiaobin, SUN Rui, et al. Optimal allocation of land resources and its key issues from a perspective of food security[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(12): 3031-3053. (in Chinese with English abstract)
- [7] LIU C C, DENG C X, LI Z W, et al. Optimization of spatial pattern of land use: Progress, Frontiers, and prospects[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(10): 5805.
- [8] 邹亚锋, 罗锋, 饶钰飞, 等. 要素配置与流动视角下农牧交错带农村居民点空间布局优化[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(11): 245-255.  
ZOU Yafeng, LUO Feng, RAO Yufei, et al. Optimizing the spatial layout of rural settlements in Farming-pastoral Zone under factor endowment and mobility[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(11): 245-255. (in Chinese with English abstract)
- [9] 姜昕彤, 翟石艳, 王铮, 等. 基于未来土地利用模拟模型的郑州市“三生空间”模拟及生态环境效应分析[J]. 生态学报, 2023, 43(15): 6225-6242.  
JIANG Xintong, ZHAI Shiyan, WANG Zheng, et al. Simulating the production-living-ecological space and analyzing eco-environmental effects based on FLUS model in Zhengzhou, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(15): 6225-6242. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘菁华, 李伟峰, 周伟奇, 等. 权衡城市扩张、耕地保护与生态效益的京津冀城市群土地利用优化配置情景分析[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4341-4350.  
LIU Jinghua, LI Weifeng, ZHOU Weiqi, et al. Scenario simulation balancing multiple objectives for optimal land use allocation of the Beijing-Tianjin-Hebei megaregion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4341-4350. (in Chinese with English abstract)
- [11] YE S J, REN S Y, SONG C Q, et al. Spatial pattern of

- cultivated land fragmentation in mainland China: Characteristics, dominant factors, and counter measures[J]. *Land Use Policy*, 2024, 139(10): 7070.
- [12] 游和远, 张津榕, 夏舒怡. 面向碳排放效率的多目标土地利用结构与布局优化研究——以杭州市萧山区为例[J]. 中国土地科学, 2023, 37(6): 74-83.
- YOU Heyuan, ZHANG Jinrong, XIA Shuyi. Structure and layout optimization of multi-objective land use based on carbon emission efficiency: A case study of Xiaoshan District in Hangzhou City[J]. *China Land Science*, 2023, 37(6): 74-83. (in Chinese with English abstract)
- [13] WANG H, HU Y F, LIANG Y T. Simulation and spatiotemporal evolution analysis of biocapacity in Xilingol based on Ca-Markov Land Simulation[J]. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2021, 11(10): 0136.
- [14] 杜际增, 王根绪, 李元寿. 基于马尔科夫链模型的长江源区土地覆盖格局变化特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(1): 195-203.
- DU Jizeng, WANG Genxu, LI Yuanshou. Changes of land cover pattern in the source region of Yangtze River based on Markov process[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(1): 195-203. (in Chinese with English abstract)
- [15] 胡森林, 焦世泰, 张晓奇. 中国城市旅游发展的时空演化及影响因素——基于动态空间马尔科夫链模型的分析[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(4): 854-865.
- HU Senlin, JIAO Shitai, ZHANG Xiaoqi. Spatiotemporal evolution and influencing factors of China's tourism development: Based on the non-static spatial Markov chain model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(4): 854-865. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王丽萍, 金晓斌, 杜心栋, 等. 基于灰色模型-元胞自动机模型的佛山市土地利用情景模拟分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 237-242.
- WANG Liping, JIN Xiaobin, DU Xindong, et al. Land use scenarios simulation of Foshan city based on gray model and cellular automata model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(3): 237-242. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李秀霞, 徐龙, 江恩赐. 基于系统动力学的土地利用结构多目标优化[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(16): 247-254.
- LI Xiuxia, XU Long, JIANG Enci. Multi-objective optimization of land use structure in western Jilin province based on system dynamics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(16): 247-254. (in Chinese with English abstract)
- [18] 梁友嘉, 徐中民, 钟方雷. 基于 SD 和 CLUE-S 模型的张掖市甘州区土地利用情景分析[J]. 地理研究, 2011, 30(3): 564-576.
- LIANG Youjia, XU Zhongmin, ZHONG Fanglei. Land use scenario analyses by based on system dynamic model and CLUE-S model at regional scale: A case study of Ganzhou district of Zhangye city[J]. *Geography Research*, 2011, 30(3): 564-576. (in Chinese with English abstract)
- [19] 包蕊, 刘峰, 张建平, 等. 基于多目标线性规划的甲积峪小流域生态系统服务权衡优化[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 812-828.
- BAO Rui, LIU Feng, ZHANG Jianping, et al. Multi-objective linear programming-based trade-off and optimization of the ecosystem services in Jiajiyu small watershed in the Loess Plateau, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 812-828. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王昊煜, 高培超, 谢一茹, 等. 基于改进型 NSGA-II 算法的西宁市土地利用多目标优化[J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(6): 84-89.
- WANG Haoyu, GAO Peichao, XIE Yiru, et al. Multi-objective optimization of land use in Xining City based on improved NSGA-II[J]. *Geography and Geographic Information Science*, 2020, 36(6): 84-89. (in Chinese with English abstract)
- [21] 杨露, 颜耀文, 宗乐丽, 等. 基于多目标遗传算法和 FLUS 模型的西北农牧交错带土地利用优化配置[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 568-579.
- YANG Lu, JIE Yaowen, ZONG Leli, et al. Land use optimization configuration based on multi-objective genetic algorithm and FLUS model of agro-pastoral ecotone in Northwest China[J]. *Journal of Earth Information Science*, 2020, 22(3): 568-579. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王昊煜, 高培超, 谢一茹, 等. 基于遗传算法的土地利用优化: NSGA-II 和 NSGA-III 的对比研究[J]. 生态学报, 2023, 43(2): 639-649.
- WANG Haoyu, GAO Peichao, XIE Yiru, et al. Land-use optimization based on genetic algorithm: A comparison between NSGA-II and NSGA-III[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(2): 639-649. (in Chinese with English abstract)
- [23] 何丹, 金凤君, 周璟. 基于 Logistic-CA-Markov 的土地利用景观格局变化——以京津冀都市圈为例[J]. 地理科学, 2011, 31(8): 903-910.
- HE Dan, JIN Fengjun, ZHOU Jing. The changes of land use and landscape pattern based on Logistic-CA-Markov Model—A case study of Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region[J]. *Geographic Science*, 2011, 31(8): 903-910. (in Chinese with English abstract)
- [24] 石云, 朱晓雯, 李建华, 等. 基于多智能体的黄土高原沟壑区农村居民点优化布局[J]. 经济地理, 2023, 43(7): 170-178.
- SHI Yun, ZHU Xiaowen, LI Jianhua, et al. Optimal layout of rural settlements in gully areas of the Loess Plateau based on multi-agent bodies[J]. *Economic Geography*, 2023, 43(7): 170-178. (in Chinese with English abstract)
- [25] 宋世雄, 梁小英, 陈海, 等. 基于多智能体和土地转换模型的耕地撂荒模拟研究——以陕西省米脂县为例[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 515-525.
- SONG Shixiong, LIANG Xiaoying, CHEN Hai, et al. The simulation of cropland abandonment based on multi-agent system and land transformation model: A case study of Mizhi County, Shanxi Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(3): 515-525. (in Chinese with English abstract)
- [26] 金一诺, 黄银洲, 尤凤, 等. 基于 Markov-PLUS 模型的石羊河流域土地利用及生态系统服务价值模拟[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(5): 130-139.
- JIN Yinuo, HUANG Yinzhou, YOU Feng, et al. Simulation of land use and ecosystem service value in Shiyang River Basin based on Markov-PLUS model[J]. *Resources and Environment in Arid Areas*, 2024, 38(5): 130-139. (in Chinese with English abstract)
- [27] 戴声佩, 张勃. 基于 CLUE-S 模型的黑河中游土地利用情景模拟研究——以张掖市甘州区为例[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(2): 336-348.
- DAI Shengpei, ZHANG Bo. Land use change scenarios

- simulation in the middle reaches of the Heihe River Basin based on CLUE-S model—A case of Ganzhou District of Zhangye City[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(2): 336-348. (in Chinese with English abstract)
- [28] 刘军会, 邹长新, 高吉喜, 等. 中国生态环境脆弱区范围界定[J]. 生物多样性, 2015, 23(6): 725-732.
- LIU Junhui, ZOU Changxin, GAO Jixi, et al. Location determination of ecologically vulnerable regions in China[J]. Biodiversity, 2015, 23(6): 725-732 (in Chinese with English abstract)
- [29] 顾汉龙, 马天骏, 钱凤魁, 等. 基于 CLUE-S 模型县域土地利用情景模拟与碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 288-296.
- GU Hanlong, MA Tianjun, QIAN Fengkui, et al. County land use scenario simulation and carbon emission effect analysis using CLUE-S model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(9): 288-296. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王游, 程文仕. 基于 FLUS 模型的景泰县土地利用动态变化与趋势预测[J]. 国土与自然资源研究, 2023(5): 11-15.
- WANG You, CHENG. Dynamic change and trend prediction of land use in Jingtai County based on FLUS model[J]. Land and Natural Resources Research, 2023(5): 11-15. (in Chinese with English abstract)
- [31] TAO Y, TIAN L, WANG C, et al. Dynamic simulation of land use and land cover and its effect on carbon storage in the Nanjing Metropolitan Circle under different development scenarios[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2023, 11(11): 02015.
- [32] 智菲, 周振宏, 赵铭, 等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的合肥市生态系统碳储量时空演变特征[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 205-215.
- ZHI fei, ZHOU Zhenhong, ZHAO Ming, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of carbon storage in Hefei Ecosystem based on PLUS and InVEST models[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 205-215. (in Chinese with English abstract)

## Composite optimization of land use structure and layout in the middle and upper reaches of the Yellow River

TONG Haiyan<sup>1</sup>, DONG Xiao<sup>1,2\*</sup>, LIU Jiaping<sup>3</sup>, GAO Weiming<sup>1</sup>

(1. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. Xi'an Chang'an University Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710064, China; 3. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** Spatial development is ever prominent in the middle and upper reaches of the Yellow River in recent years, due mainly to the fragile ecological environment. This article aims to explore the optimization and allocation of land use structure and layout for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. The middle and upper reaches of the Yellow River were taken as the research object. The land use, socio-economic, and natural environment datasets were collected from 2010 and 2020. A composite optimization was carried out on the land use structure and layout using multi-objective programming (MOP) and PLUS models. Firstly, a multi-objective model was constructed with three scenarios as objective functions: ecological protection scenario (economic benefit to ecological benefit target ratio of 1:4), economic development priority scenario (economic benefit to ecological benefit target ratio of 4:1), and economic ecological balanced development scenario (economic benefit to ecological benefit target ratio of 1:1). The total land area, cultivated land ownership, and ecological environment protection were used as the constraints, in order to obtain land use structure data under these three scenarios; Secondly, plugin Markov Chain of the PLUS model was utilized to predict the land use structure data for 2030 under the inertial development scenario; Finally, 15 driving factors were selected, including population, vegetation index (NDVI), GDP, distance to railways, distance to highways, distance to main roads, distance to secondary roads, distance to city center, soil type, distance to rivers, annual average temperature, annual average rainfall, DEM, slope, and aspect. High sensitivity areas under national nature reserves and ecological priority scenarios were set as the limiting conversion conditions. The PLUS model was used to spatially position the future land use patterns, and then adjust the trends in the study area under four scenarios. The optimal configuration scheme of regional land use structure and layout was proposed to balance the ecological protection and economic development. The results indicate that: 1) There were significant differences in the proportion structure of land use among the four development scenarios; 2) There was a more reasonable configuration of regional land use structure and spatial layout under the ecological economic equilibrium scenario, compared with the rest scenarios. The overall equilibrium scenario was superior to the rest from the perspectives of land use proportion structure, spatial pattern, and overall benefits. The comprehensive benefit value was 1 948.100 billion yuan, and the economic benefit (1 222.388 billion yuan) increased by 4.07%, compared with the ecological protection scenario. The ecological value (725.712 billion yuan) also increased by 2.32%, compared with the economic priority scenario; 3) The comprehensive benefit value was 2 027.396 billion yuan under the scenario of prioritizing economic development, indicating the highest among the four. The finding can provide the theoretical basis and decision-making to optimize the land use structure and pattern prediction in the middle and upper reaches of the Yellow River.

**Keywords:** land use; optimization; PLUS model; spatial layout; MOP model; the middle and upper reaches of the Yellow River region