

DOI: 10.20103/j.stxb.202403260629

王 韧, 王嘉睿, 颜建军, 贾云, 郜晨, 张秋泓. 基于遗传算法-PLUS 模型的黄河流域景观生态脆弱性多情景模拟. 生态学报, 2025, 45(2): 567-585.

Wang R, Wang J R, Yan J J, Jia Y, Gao C, Zhang Q H. Multi-scenario simulation of landscape ecological vulnerability in the Yellow River Basin based on GA-PLUS model. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(2): 567-585.

基于遗传算法-PLUS 模型的黄河流域景观生态脆弱性多情景模拟

王 韧¹, 王嘉睿², 颜建军^{3,*}, 贾 云¹, 郜 晨¹, 张秋泓⁴

1 湖南工商大学财政金融学院, 长沙 410205

2 湖南工商大学理学院, 长沙 410205

3 湖南工商大学经济与贸易学院, 长沙 410205

4 南京农业大学人工智能学院, 南京 211800

摘要:黄河流域生态保护和高质量发展是党中央作出的重大战略决策, 如何科学谋划、统筹构建黄河流域土地利用和生态系统新格局极具现实意义。从多情景下景观生态脆弱性预测这一较为新颖的研究视角切入研究, 在分析黄河流域 1995—2020 年土地利用类型转移情况的基础上, 针对流域自然发展、生态保护、经济发展、生态保护与经济发展兼顾的协调发展 4 种不同发展目标, 耦合 Genetic Algorithm(GA)优化算法与 Patch-generating Land Use Simulation(PLUS)模型, 对土地利用类型转移概率进行优化, 进而模拟 2030 年土地利用格局、盐碱地和湿地空间分布; 在土地利用模拟的基础上计算景观格局指数和景观生态脆弱度, 据此分析黄河流域生态脆弱性演变特征。主要结论如下: (1) 在 2030 年土地利用多情景模拟中, 林地、草地和水域面积在四种情景下均有一定程度的增加, 生态系统修复效果明显; 协调发展情景下水域扩张程度最大, 建设用地扩张率大幅低于自然发展和经济发展情景; (2) 相较于 2020 年, 2030 年盐碱化程度增加, 自然发展情景情况最为严峻; 湿地生态系统修复效果明显, 协调发展情景下恢复程度最大; (3) 黄河流域 2030 年林地、草地、水域和建设用地破碎化程度减弱, 耕地和未利用地则相反; 流域整体景观破碎度较 2020 年有所降低, 土地利用的丰富性和多样性提升; (4) 相较于 2020 年, 黄河流域 2030 年的景观生态脆弱性仍有加剧趋势。生态保护情景下恶化程度较缓, 协调发展情景对于流域上游水系风蚀区的水土保持和中部平原地区生态平衡的效果十分显著。研究结果为黄河流域国土空间规划和生态保护治理提供了新的理论基础和实践证据。

关键词:土地利用; 多情景模拟; 遗传算法-PLUS 模型; 景观生态脆弱性; 黄河流域

Multi-scenario simulation of landscape ecological vulnerability in the Yellow River Basin based on GA-PLUS model

WANG Ren¹, WANG Jiarui², YAN Jianjun^{3,*}, JIA Yun¹, GAO Chen¹, ZHANG Qiuhong⁴

1 School of Finance, Hunan university of Technology and Business, Changsha 410205, China

2 School of Science, Hunan university of Technology and Business, Changsha 410205, China

3 School of Economics and Trade, Hunan university of Technology and Business, Changsha 410205, China

4 College of Artificial Intelligence, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China

Abstract: The ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin is a major strategic decision made by the Party Central Committee, and the scientific construction of a new pattern of land use and ecosystem in the Yellow River Basin is of great practical significance. This study starts from a relatively novel research perspective of landscape ecological vulnerability prediction in multiple scenarios, based on the analysis of land use type transfer in the

基金项目:国家社会科学基金项目(22BJY108); 湖南工商大学“数智+”学科交叉研究项目(2023SZJ03)

收稿日期:2024-03-26; **网络出版日期:**2024-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yan751225@163.com

Yellow River Basin from 1995 to 2020, for the four different development objectives of natural development, ecological protection, economic development, and coordinated development with ecological protection and economic development, the Genetic Algorithm (GA) optimization algorithm is coupled with the Patch-generating Land Use Simulation (PLUS) model to optimize the transfer probability of land use types, then simulate the spatial distribution of land use patterns, saline alkali land and wetlands in 2030, and calculated the landscape index and landscape ecological vulnerability on the basis of Land Use and Land Cover Change, and the evolution of ecological vulnerability characteristics of the Yellow River Basin were analyzed accordingly. The results showed that: (1) in the multi-scenario simulation of the LUCC in 2030, the forestland, grassland and water have increased to some extent in the four scenarios, and this demonstrates the effectiveness of ecosystem restoration; compared with other three scenarios, water expand the most in the coordinated development scenario, and the expansion rate of construction land is substantially lower than that of the natural development and economic development scenarios; (2) compared with 2020, salinization increases in 2030, with the most severe situation in the natural development scenario; the wetland ecosystem restoration effect is obvious, with the greatest degree of recovery in the coordinated development scenario; (3) the fragmentation of forestland, grassland, water and construction land in the Yellow River Basin in 2030 is weakened, while the opposite is true for cropland and unused land; compared to 2020, the overall landscape fragmentation of the basin has decreased, and the richness and diversity of land use has increased; (4) Compared with 2020, the landscape ecological vulnerability in the Yellow River Basin will continue to increase in 2030. The degree of deterioration is slower in the ecological protection scenario, and the coordinated development scenario is very effective for soil and water conservation in the wind-eroded areas of the upper watershed system and for ecological balance in the central plains. The results of this study provide a new theoretical foundation and practical evidence for land space planning and ecological protection in the Yellow River Basin.

Key Words: land use; multi-scenario simulation; GA-PLUS model; landscape ecological vulnerability; the Yellow River Basin

黄河流域是我国重要的生态屏障和经济地带,然而,受自然生态本底脆弱、水资源匮乏等因素的硬约束,流域内长期面临着水土流失、土壤侵蚀、盐碱化和湿地萎缩等问题^[1];以经济增长为目的开发建设活动和土地粗放利用模式,更对其生态环境保护造成了胁迫和危害。习总书记在深入推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上强调,“十四五”是推动黄河流域生态保护和高质量发展的关键时期。如何在保护中开发,促进黄河流域经济和生态环境高质量可持续发展,已成为学术界密切关注、亟待解决的重要课题。

生态脆弱性是指生态环境受到外界干扰超出自身的调节范围,而表现出对干扰的敏感程度^[2]。目前,相关学者对生态脆弱性的研究主要是通过模糊评价法^[3]、指标体系综合评价法^[4-7]、景观格局法^[8-10]等对研究区域脆弱性现状的时空演变格局及影响因素进行分析。随着研究区域内人类活动和自然环境的相互作用,未来的生态系统会呈现怎样的发展趋势、会面临怎样的环境压力和威胁,不仅依赖于对现有情况的定性分析,更需要研究人员做出量化预测。部分学者对生态环境脆弱性的未来发展趋势进行了探索,如贺小荣等^[11]利用灰色预测模型对长江经济带各省市的旅游-经济-生态系统脆弱性数值进行预测;Wu 等^[12]、茹少峰和马茹慧^[13]利用 CA-Markov 模型,对研究区域未来生态环境脆弱性的空间分布特征进行模拟。另外,鉴于土地利用与土地覆盖变化(Land Use and Land Cover Change, LUCC)对生态系统的结构和功能会产生直接影响,因此,对 LUCC 的精确模拟对于生态脆弱性的准确预测具有重要意义^[14-15]。在 LUCC 模拟的研究中,Liang 等^[16]在近年来常用的 CA-Markov 模型^[17-19]、FLUS 模型^[20-22]等基础上,提出了基于随机森林算法的 Patch-generating Land Use Simulation(PLUS)模型,该模型提升了土地利用斑块变化的模拟性能,能更好地实现空间优化。在将 PLUS 模型应用于 LUCC 多情景模拟时,杨润佳和叶艳妹^[23]、王子尧等^[24]将该模型耦合多目标优化模型求解不同情景下的各土地利用类型面积,该方法在一定程度上解决了 PLUS 模型依赖自身转换规则、在定量优化上存在不足的问题^[25]。

上述成果为生态脆弱性预测研究提供了有价值的参考,但仍存在进一步探索的空间:第一,已有研究多从

自然环境和社会经济等方面选取指标构建评价体系,对研究区生态脆弱性进行模拟。区别于相关研究^[11-13],本文从景观格局视角出发,探究景观生态脆弱性未来时空演变特征。景观生态脆弱性评价是通过典型反应生态环境脆弱性属性(敏感性、适应性)的景观指数构建的评价方法^[8],其通过剖析景观格局信息与生态环境脆弱性之间的关联性,能够建立具有生态学内涵的指标体系,为区域生态脆弱性评价提供新的思路^[26]。考虑到黄河流域严峻的水土流失和土壤侵蚀问题,将标准化后的土壤侵蚀模数引入上述指数构建中,通过对原有景观脆弱度指数的改进,使其更符合研究区域特点,也使得黄河流域景观生态脆弱性分析更具综合性与实际性。第二,当下发展政策的实行对生态环境有着重要影响,且不同发展目标下生态系统的演变也存在一定差异。本文将黄河流域退耕还林还草、水源涵养能力建设等现有政策对生态环境的影响纳入考量,从自然发展、生态保护、经济发展、生态保护与经济发展兼顾的协调发展这 4 种情景视角出发,探究不同发展目标下流域未来景观生态脆弱性的时空分异格局。该方法不仅能够量化政策实施的长期效果,全面评估生态环境在差异化目标下的空间异质性,而且能够识别潜在发展路径和风险,为制定更具针对性和可持续性的发展政策具有一定的实践指导意义。第三,在运用 MOP 模型优化地类面积时,由于各情景下的面积约束条件相同,不同发展目标下的数值解有时会出现相同的结果,无法对不同情景进行准确的区分。对此,本文考虑对土地转移概率设置约束条件,运用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)求解其在不同发展目标下的值,再根据转移矩阵计算各地类面积,并进一步利用 PLUS 模型模拟各情景下的未来土地利用格局。相较于直接优化地类面积,对土地转移概率进行优化能够更深入地揭示多个土地类型之间的动态演变,在探究政策措施对土地利用格局的长期影响效果时,有助于体现多情景下结果的区分度和差异性,使研究过程更严谨,结果更精准。

据此,本文在相关研究的基础上,针对黄河流域当前生态环境仍存在的突出困难和问题^[27],从多情景下景观生态脆弱性预测这一较为新颖的视角切入研究,针对黄河流域不同发展目标,拟分别设置自然发展、生态保护、经济发展、协调发展 4 种情景,基于 GA-PLUS 耦合模型对流域 2030 年各情景下的土地利用格局、盐碱地与湿地空间分布进行模拟,根据土地利用模拟结果计算得到景观脆弱度指数,并据此分析流域各发展目标下生态脆弱性的空间分异格局,以期为黄河流域未来国土空间规划和生态保护治理工作提供新的理论基础和实践证据。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域概况

黄河流域位于 96°—119°E, 32°—42°N 之间,总面积约 80.88 万 km²,发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 9 个省区,最后于山东省东营市垦利区注入渤海。黄河流域地势西高东低(图 1),自西向东跨越三级阶梯,不同地区气候差异显著,生态系统类型多样,地貌复杂,矿产资源丰富,是中国重要的生态屏障和重要的经济地带^[28]。

1.2 数据来源及预处理

参考文献^[29-30]中对多情景模拟驱动因子的设置,本文选取如下数据:(1) 1995—2020 年每 5 年一期的共 6 期土地利用遥感监测数据集来自中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>),一级分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六类;(2) 社会经济数据:中国人口空间分布公里网格数据、中国 GDP 空间分布公里网格数据和夜间灯光数据来自中国科学院资源环境科学数据中心,距一级道路距离、距市县区距离、距铁路距离等路网数据来自 OpenStreetMap(<https://openmaptiles.org/>);(3) 气候和环境数据:土壤类型、年均气温、年均降水和植被指数来自中科院资源环境科学数据中心,DEM 数据来自中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),坡度和坡向基于 DEM 提取。鉴于土地利用数据与路网数据坐标系不一致,且多类数据空间分辨率未统一,运用 ArcGIS 进行坐标系变换、裁剪、重分类、重采样等操作对齐数据,最终统一坐标系为 Krasovsky_1940_Albers,分辨率为 500m×500m,并导出为 TIFF 格式。绘制部分驱动因子空间分布图,如图 2 所示。

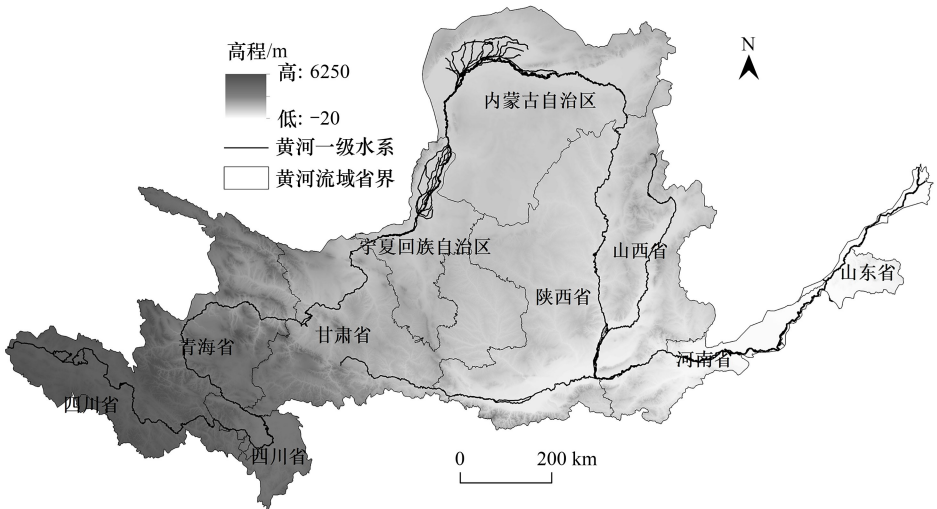


图1 研究区域示意图

Fig.1 Diagram of the study area

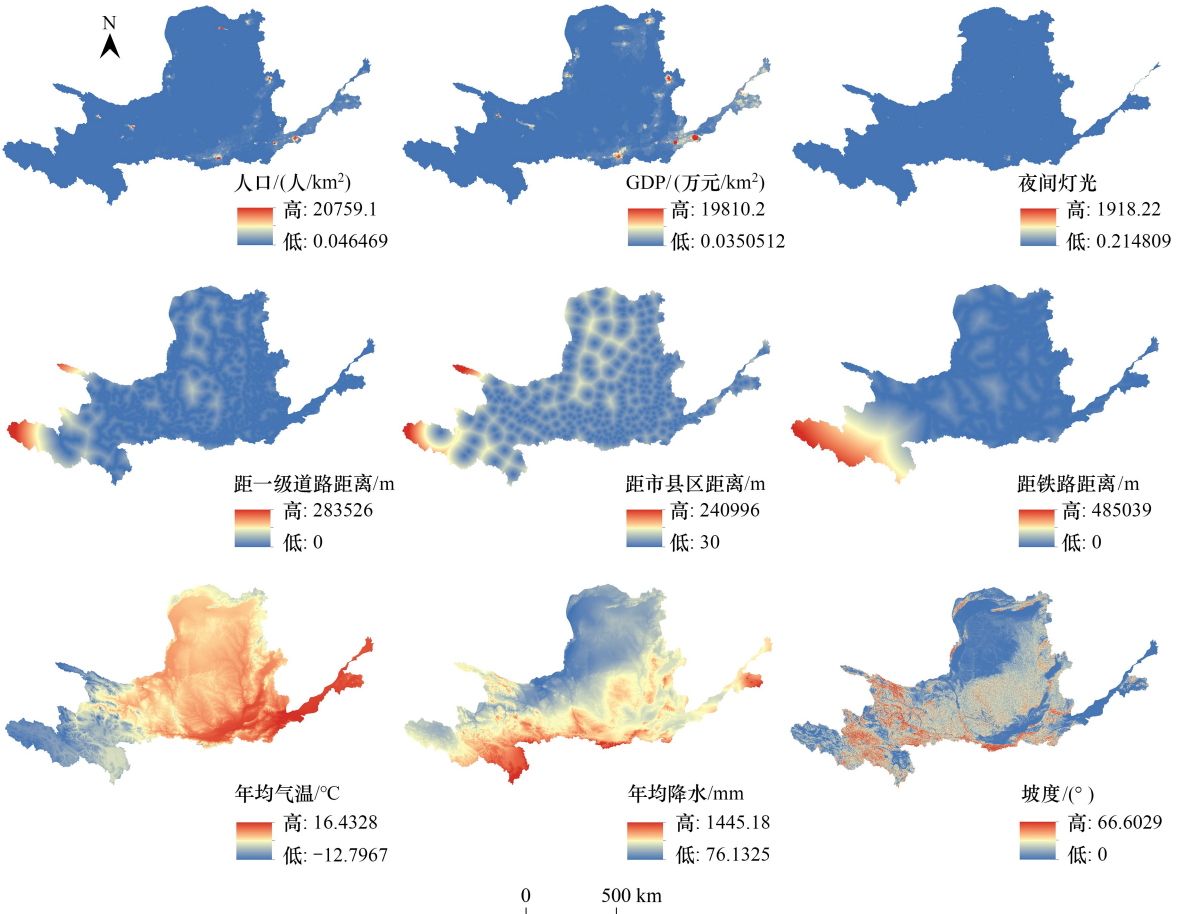


图2 驱动因子空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of driving forces

2 研究方法

考虑到土地变化具有长期性,且《黄河流域生态环境保护规划》^[31]中将规划期设置为2030年,因此本文

对黄河流域 2030 年的景观生态脆弱性进行预测。研究思路为:首先分析 1995—2020 年土地利用类型转移情况,在此基础上,依据相关政策文件设置 2030 年多个发展情景下土地转移概率的目标函数和约束条件,通过 GA-PLUS 耦合模型模拟黄河流域 2030 年土地利用空间分布、盐碱地与湿地空间分布,根据 LUCC 结果计算景观脆弱度指数,分析流域内景观生态脆弱性时空演变情况。

2.1 土地利用转移分析

通过土地利用转移矩阵描述不同时间点土地利用类型的转换情况,有助于了解土地利用演变过程^[32]。在土地利用转移矩阵中,矩阵的行和列分别代表基年的土地利用类型和目标年份的土地利用类型,每个元素表示从基年的土地利用类型转换到目标年份的数量或比例。

2.2 基于 GA-PLUS 模型的土地利用多情景模拟

2.2.1 马尔可夫链与 GA 模型

本文参考前人研究^[23—24,30],根据黄河流域现状和相关发展政策规划,分别设置自然发展情景(Natural Development, ND)、生态保护情景(Ecological Protection, EP)、经济发展情景(Economic Development, ED)、生态保护与经济发展兼顾的协调发展情景(Coordinated Development, CD)。其中,ND 情景是在不进行约束的情况下,利用马尔可夫链预测土地利用自然演变情况;EP、ED、CD 三种情景下的演变情况则是根据相关数据和政策文件对土地转移概率设置优化目标和约束条件,运用在变量维度较高且变量值相差较大的情况下求解结果更加稳定的遗传算法(Genetic Algorithm, GA)进行求解,再计算各土地类型的面积。四种情景设置的具体情况如下:

(1) ND 情景

按照研究区域历史发展趋势,在对地类转换没有限制、不考虑政策和规划的影响下,根据 2010 年至 2020 年的土地利用转换规律使用 Markov 模型模拟 2030 年土地利用情况。将耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地分别记为 1 至 6,则 Markov 模型计算出的 2030 年土地利用转移概率矩阵为:

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{61} & \cdots & p_{66} \end{pmatrix} \quad (1)$$

(2) EP 情景

该情景下以生态价值最大化作为目标求解 2030 年各土地利用类型面积。其中生态价值数据来源于中科院资源环境科学数据中心的中国陆地生态系统服务总价值数据集,导入 ArcGIS 中提取各地类生态系统服务总价值数据,作为生态效益目标函数对应的系数。生态效益目标函数 $\max h(x)$ 设置如下:

$$\max h(x) = \max \sum_{j=1}^6 e_j \sum_{i=1}^6 x_{ij} S_i \quad (2)$$

$$h(x) = 2.64 \sum_{i=1}^6 x_{i1} S_i + 7.19 \sum_{i=1}^6 x_{i2} S_i + 3.40 \sum_{i=1}^6 x_{i3} S_i + 11.66 \sum_{i=1}^6 x_{i4} S_i + 1.48 \sum_{i=1}^6 x_{i5} S_i + 2.10 \sum_{i=1}^6 x_{i6} S_i \quad (3)$$

式中, $h(x)$ 表示黄河流域生态效益价值函数(万元), x_{ij} 表示 2020 年第 i 类土地利用类型转移为 2030 年第 j 类土地利用类型的概率, e_j 为第 j 类地类的生态效益值(万元/ 10^{-2}km^2), S_i 为 2020 年各地类面积。

(3) ED 情景

该情景以经济效益最大化为目标求解 2030 年各土地利用类型面积,其中经济效益数据来源于中科院资源环境科学数据中心的中国 GDP 空间分布公里网格数据集,导入 ArcGIS 中提取各地类 GDP 空间分布数据,作为经济效益目标函数对应的系数。经济效益目标函数 $\max g(x)$ 设置如下:

$$\max g(x) = \max \sum_{j=1}^6 c_j \sum_{i=1}^6 x_{ij} S_i \quad (4)$$

$$g(x) = 14.82 \sum_{i=1}^6 x_{i1} S_i + 6.97 \sum_{i=1}^6 x_{i2} S_i + 4.18 \sum_{i=1}^6 x_{i3} S_i + 12.55 \sum_{i=1}^6 x_{i4} S_i + 79.09 \sum_{i=1}^6 x_{i5} S_i + 2.70 \sum_{i=1}^6 x_{i6} S_i \quad (5)$$

式中, $g(x)$ 表示黄河流域经济发展效益函数(万元), c_j 为第 j 类地类的经济发展效益值(万元/ 10^{-2}km^2), S_i 为 2020 年各地类面积。

(4) CD 情景

该情景下利用线性加权求和思想, 将生态保护与经济协调作为发展目标。参考相关文献, 设置 $w_1=0.5, a_1=0.927, w_2=0.5, a_2=0.073$, 耦合协调目标函数 $\max f(x)$ 设置如下:

$$\max f(x) = w_1 \times a_1 \times h(x) + w_2 \times a_2 \times g(x) \tag{6}$$

$$f(x) = 1.76 \sum_{i=1}^6 x_{i1} S_i + 3.59 \sum_{i=1}^6 x_{i2} S_i + 1.73 \sum_{i=1}^6 x_{i3} S_i + 5.86 \sum_{i=1}^6 x_{i4} S_i + 3.57 \sum_{i=1}^6 x_{i5} S_i + 1.07 \sum_{i=1}^6 x_{i6} S_i \tag{7}$$

式中, $f(x)$ 为耦合协调综合函数(万元), S_i 为 2020 年各地类土地面积。

本文结合《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》^[28](以下简称《纲要》), 在考虑土地利用现状和 Markov 预测结果的基础上, 设置 2020 年至 2030 年土地利用转移概率的约束条件, 如表 1 所示。

表 1 遗传算法约束条件
Table 1 Constraints of the genetic algorithm model

约束类型 Constraint type	约束条件及说明 Constraints and description	
总面积 Total area	$\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 x_{ij} S_i = 808844.25, 0 \leq x_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^6 x_{ij} = 1$	
耕地 Cropland	$160305.60 \leq \sum_{i=1}^6 x_{i1} S_i \leq 200382$	考虑到退耕还林、还草等政策对耕地面积减小的影响, 因此以马尔科夫模型预测的 2030 年耕地面积作为上限, 以马尔科夫模型预测结果的 80% 作为下限。
	$0.8 p_{11} \leq x_{11} \leq p_{11}$	$p_{12} \leq x_{12}$ $p_{13} \leq x_{13}$
	$p_{14} \leq x_{14}$	$0.5 p_{15} \leq x_{15}$ $0.5 p_{16} \leq x_{16}$
林地 Forestland	$107269.75 \leq \sum_{i=1}^6 x_{i2} S_i$	由于加强黄河流域重要生态功能区保护与修复, 因此以马尔科夫模型预测的 2030 年林地面积作为下限。
	$0.5 p_{21} \leq x_{21}$	$p_{22} \leq x_{22} \leq 0.99$ $0.5 p_{23} \leq x_{23}$
	$0.5 p_{24} \leq x_{24}$	$0.5 p_{25} \leq x_{25}$ $0.5 p_{26} \leq x_{26}$
草地 Grassland	$386668.75 \leq \sum_{i=1}^6 x_{i3} S_i$	由于大力实施林草保护政策, 故以马尔科夫模型预测的 2030 年草地面积作为下限。
	$0.5 p_{31} \leq x_{31}$	— $p_{33} \leq x_{33} \leq 0.99$
	$0.5 p_{34} \leq x_{34}$	$0.5 p_{35} \leq x_{35}$ $0.5 p_{36} \leq x_{36}$
水域 Water	$15899 \leq \sum_{i=1}^6 x_{i4} S_i$	由于加强水源涵养能力建设, 故以马尔科夫模型预测的 2030 年水域面积作为下限。
	$0.5 p_{41} \leq x_{41}$	— —
	$p_{44} \leq x_{44}$	$0.5 p_{45} \leq x_{45}$ $0.5 p_{46} \leq x_{46}$
建设用地 Construction land	$30968 \leq \sum_{i=1}^6 x_{i5} S_i \leq 35620.25$	由于推动城市减量增效, 为建设高质量城市群, 因此以 2020 年建设用地面积作为下限, 以马尔科夫模型预测面积作为上限。
	$p_{51} \leq x_{51}$	$p_{52} \leq x_{52} \leq 1.2 p_{52}$ $p_{53} \leq x_{53} \leq 1.2 p_{53}$
	$p_{54} \leq x_{54} \leq 1.2 p_{54}$	$0.8 p_{55} \leq x_{55} \leq p_{55}$ $x_{56} \leq p_{56}$
未利用地 Unused land	$37802.70 \leq \sum_{i=1}^6 x_{i6} S_i \leq 63004.50$	考虑到实施盐碱地治理, 未利用地面积下降速度高于当前下降速率, 故以马尔科夫模型预测的 2030 年未利用地面积为上限, 以预测结果的 60% 作为下限。
	$p_{61} \leq x_{61} \leq 1.5 p_{61}$	$p_{62} \leq x_{62} \leq 1.5 p_{62}$ $p_{63} \leq x_{63} \leq 1.5 p_{63}$
	$p_{64} \leq x_{64} \leq 1.5 p_{64}$	$p_{65} \leq x_{65} \leq 1.5 p_{65}$ $0.7 p_{66} \leq x_{66} \leq p_{66}$

$i, j = 1, 2, \dots, 6, 1$ 至 6 分别代表耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地; x_{ij} : 土地利用转移概率 land use transfer probability; S_i : 土地利用类型面积 Land use type area/ km^2 ; p_{ij} : 自然发展情景下土地利用转移概率 land use transfer probability in the natural development scenario

2.2.2 GA-PLUS 模型

在上述求解数值结果的基础上,运用 PLUS 模型模拟各情景下的土地利用空间分布格局。首先对 PLUS 模型精度进行检验。分别以 2010 年和 2020 年土地利用情况作为初始和目标状态,按照模型要求与常规标准设置模型参数,进行调整可得 2020 年土地利用预测情况,并与真实值比较。计算 Kappa 系数为 0.907827,总体精度为 93.7134%,模型验证模块中的 Figure of Merit (FoM) 系数为 0.815315,证明模拟效果良好,可以对 2030 年土地利用情况进行预测。模型的主要参数设置包括:限制转化区域依据《纲要》中对水域和自然保护区的限制划定,邻域范围、斑块生成阈值、扩散系数、随机种子比例参照精度验证的优化参数进行设定^[23]。

2.2.3 盐碱地与湿地空间分布模拟

盐碱化与湿地萎缩是生态系统退化的信号,反映出生态环境在自然和人为因素影响下的脆弱性。《纲要》中对黄河流域盐碱地治理与湿地保护修复做出了规划,为探究生态恢复效果,在上述四种发展情景下分别对盐碱地与湿地空间分布进行模拟。具体来说,在盐碱地模拟中,将土地利用数据中未利用地的二级分类盐碱地单独提取出来,对土地利用数据重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地和盐碱地共 7 类,通过 GA-PLUS 模型模拟 2030 年盐碱地空间分布情况。在湿地模拟中,根据《中华人民共和国湿地保护法》中的湿地分类系统,将土地利用数据中的水域与未利用地二级分类中的沼泽地归为湿地,对土地利用数据重分类为耕地、林地、草地、湿地、建设用地和未利用地共 6 类,通过 GA-PLUS 模型模拟 2030 年湿地空间分布情况。

2.3 景观生态脆弱性

2.3.1 景观格局指数

参考相关文献^[33],并结合黄河流域景观特征,选取如表 2 所示的景观格局指数分析流域景观格局变化特征。在斑块级别指数的选取上,从密度大小和差异指数、形状指数、聚散性指数中共选取 4 个指数进行度量;在景观级别指数的选择中,在上述指数的基础上加入多样性的 2 个指数进行分析。上述指数能够从多方面描述景观格局变化特征,评价结果较为全面。

表 2 景观格局指数信息

Table 2 Information of landscape indexes

景观属性 Landscape properties	指数名称 Index name	说明 Description
密度大小和差异指数 Density and contrast index	斑块数量 NP /个 斑块密度 PD /(个/ km^2)	景观中斑块总个数, NP 大则破碎度高。 单位面积内的斑块数量, PD 大则破碎度高。
形状指数 Shape index	景观形状指数 LSI	$LSI \in (0,1)$, LSI 接近 0 时,斑块形状趋于规则的圆形,边界曲线相对简单。
聚散性指数 Aggregation index	斑块内聚力指数 $COHESION$	较高的值表示斑块内部具有较好的连续性和完整性。
多样性指数 Diversity index	Shannon 多样性指数 $SHDI$ Shannon 均匀度指数 $SHEI$	$SHDI$ 值越大,景观类型越多,破碎化程度也越高。 $SHEI \in (0,1)$, $SHEI$ 越接近 1,表示各斑块类型均匀分布,多样性越大。

NP : 斑块数量 Number of patches; PD : 斑块密度 Patch density; LSI : 景观形状指标 Landshape shape index; $COHESION$: 斑块内聚力指数 Patch cohesion index; $SHDI$: Shannon 多样性指标 Shannon diversity index; $SHEI$: Shannon 均匀度指标 Shannon evenness index

2.3.2 景观脆弱度指数构建

参考相关学者的研究^[9,34],并结合黄河流域当前生态环境突出问题,选择景观敏感度指数、适应度指数、土壤侵蚀模数来构建景观脆弱度指数,指数介绍与计算方法如下:

(1) 景观敏感度指数 (LSI) 是指在受到外界干扰时自身的反映程度,它取决于外界干扰因素的强弱及景观变化方向。 LSI 主要由景观干扰度指数 (U_i) 和景观易损度指数 (V_i) 构成,景观干扰度指数一般用来表示景观内部由单一、规则、均质和连续的整体向破碎、零散、异质和不连续的破碎斑块变化;景观易损度指数反映了各景观类型在外界干扰下的损失程度。

(2) 景观适应度指数 (LAI) 是景观在外界干扰下的适应和恢复能力,用于评估生态系统的适应性和稳定性。

该指数由斑块丰富密度指数 (PRD)、Shannon 多样性指数 (SHDI) 和 Shannon 均匀度指数 (SHEI) 乘积构成。

(3) 土壤侵蚀模数 (A) 是单位时段内单位水平投影面积上的土壤侵蚀总量。本文采用修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 对 A 进行估算, 方程中包含降雨侵蚀力因子 (R)、土壤可蚀性因子 (K)、坡长因子 (L)、坡度因子 (S)、植被覆盖措施因子 (C) 和水土保持措施因子 (P), 能够反映水土流失和土壤侵蚀的严重程度。保持 R 、 K 、 L 、 S 不变, 以 2030 年 LUCC 模拟结果为基础, 计算不同发展目标下的 C 和 P ^[35-36], 得到土壤侵蚀模数预测值后, 对其标准化, 使其成为无量纲形式, 更适用于统计分析。

(4) 景观脆弱度指数 (LVI): LVI 能够在一定程度上定量反映研究区域景观格局的脆弱状况。一般来说 LVI 值越大表示该区域的生态系统景观脆弱性越高。计算公式如下:

$$LVI = LSI \times (1 - LAI) + A \tag{8}$$

3 结果与分析

3.1 1995—2020 年黄河流域土地利用转移分析

黄河流域 1995—2020 年土地利用转移矩阵如表 3 所示。可以看出, 草地是其最主要的土地利用类型, 占比达 48% 左右, 在 25 年间共减少约 6948.85 km²; 其次是耕地和林地, 分别占流域内面积的 26% 和 13% 左右; 未利用地、建设用地和水域面积占比均较小, 其中, 建设用地是所有土地类型中变化最大的, 2020 年较 1995 年增加了 1.29 万 km²。1995—2020 年间, 黄河流域转出土地主要源自草地、耕地和未利用地, 其转出面积分别占总转出面积的 39.92%、29.51% 和 16.97%; 而转入地类则为草地、耕地和建设用地, 转入面积占比分别为 34.16%、20.55% 和 13.39%。

表 3 1995—2020 年黄河流域土地利用转移矩阵/km²
Table 3 Land use transfer matrix in the Yellow River Basin from 1995 to 2020

		2020 年							转出面积
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计	
1995 年	耕地	181380.57	4560.88	17580.22	1726.44	10661.18	949.52	216868.35	35478.24
	林地	3014.46	87658.96	6299.42	207.32	601.96	204.60	97999.49	10327.76
	草地	16267.87	13548.55	344691.51	1679.78	3705.98	12793.44	392723.57	47995.63
	水域	1380.53	125.46	609.27	10154.14	300.42	360.05	12943.18	2775.73
	建设用地	2505.19	106.54	337.86	216.92	14826.05	77.66	18071.11	3244.17
	未利用地	1536.27	754.45	16240.46	1045.10	828.80	49823.58	70238.55	20405.08
	总计	206095.04	106761.73	385774.72	15031.83	30926.45	64215.97	808844.25	120226.59
转入面积		24704.33	19095.88	41067.24	4875.56	16098.33	14385.25	120226.59	

3.2 基于 GA-PLUS 模型的黄河流域土地利用多情景模拟

3.2.1 土地转移概率矩阵优化结果

运用遗传算法对土地利用转移概率进行优化, 过程重复进行 50 次, 取均值作为最终结果, 在 95% 置信水平下按照正态分布计算三种情景的边际误差, 最大值分别为 0.0208、0.0048、0.0194, 均较小, 说明模拟结果具有一定的稳定性。根据转移概率矩阵求解结果和 2020 年各地类面积, 计算得到 2030 年四种情景各地类的面积, 如表 4 所示。绘制不同情景较 2020 年变化率的柱形图, 如图 3 所示。

整体来看, 四种情景下的土地利用变化呈现出耕地和未利用地面积减小, 林地、草地、水域和建设用地面积增加的趋势。具体而言, EP 情景下, 耕地、林地、草地变化最大, 且建设用地扩张程度最小; 水域、未利用地在 CD 情景下变化最大, 建设用地扩张也明显低于 ND 情景和 ED 情景下 15% 的扩张程度。

表 4 四种情景下 2030 年土地利用情况/km²

Table 4 Land use in four scenarios in 2030

情景 Scenario	耕地 Cropland	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
2020 年现状 Status in 2020	206049.75	106869.00	385631.25	15013.50	30968.00	64312.75
自然发展情景 Natural development scenario	200382.00	107269.75	386668.75	15899.00	35620.25	63004.50
生态保护情景 Ecological protection scenario	190715.82	118660.38	386668.81	16867.81	33974.79	61956.64
经济发展情景 Economic development scenario	200287.63	107613.83	386649.28	16399.84	35595.38	62298.29
协调发展情景 Coordinated development scenario	190923.57	117600.13	386646.79	17486.57	34279.27	61907.93

3.2.2 多情景土地利用格局演变

模拟四种情景下的土地利用格局演变情况,结果参见图 4—图 7。

在 ND 情景下(图 4),建设用地 10 年间变化率高达 15.0228%,在所有地类中扩张程度最大,表明在无外加条件影响时,建设用地随着人类活动加剧而快速增长。图 4 显示出扩张区域主要集中在流域中下游的陕西省西安市、山西省太原市、河南省郑州市和洛阳市、山东省济南市和泰安市等地;且扩张区域很大一部分来自于耕地。

ED 情景下的土地利用变化情况与 ND 情景类似,但生态用地变化率更大。这是因为虽然 ED 情景下以经济效益最大化为目标求解转移概率,但在约束条件设置的时候仍考虑到现有退耕还林还草、水源涵养政策的影响,对转移概率进行了约束,因此,ED 情景生态用地面积涨幅更大,例如水域扩张具体表现在内蒙古自治区巴彦淖尔市、宁夏回族自治区银川市和石嘴山市、山西省运城市等区域内的黄河水系附近(图 5)。

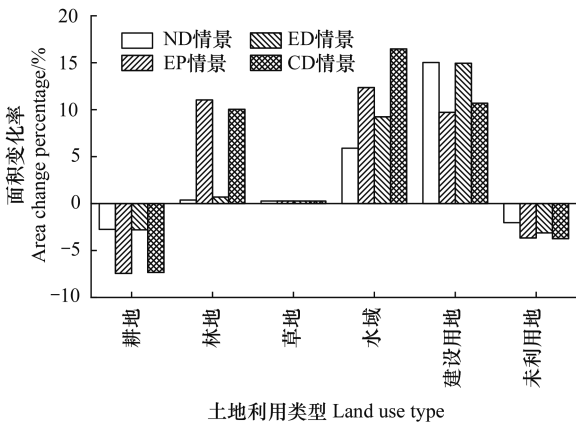


图 3 四种情景较 2020 年土地利用类型面积变化率
Fig.3 Area change percentage of land use type in four scenarios compared to 2020

ND:自然发展情景 Natural development scenario; EP:生态保护情景 Ecological protection scenario; ED: 经济发展情景 Economic development scenario; CD: 协调发展情景 Coordinated development scenario

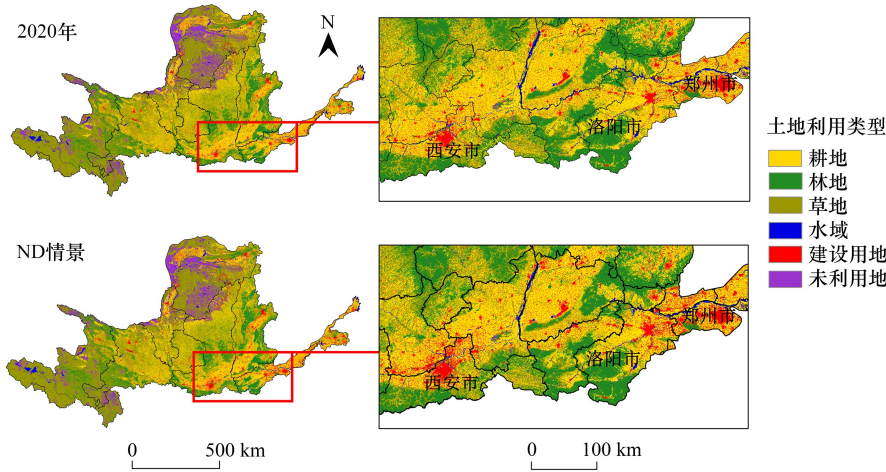


图 4 黄河流域 2020 年与 2030 年自然发展情景土地利用格局对比

Fig.4 Comparison of land use in the Yellow River Basin between 2020 and 2030 natural development scenario

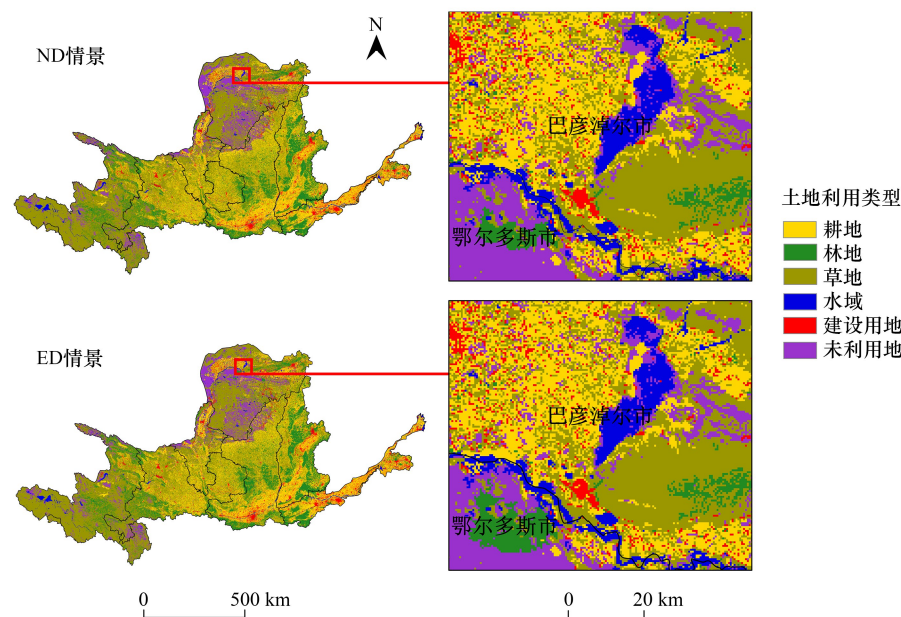


图 5 黄河流域 2030 年自然发展情景与经济发展情景对比土地利用格局对比

Fig.5 Comparison of land use between natural development scenario and economic development scenario in the Yellow River Basin in 2030

在 EP 情景下,生态用地面积显著增加。水域增加面积主要位于河源段以及主支流,林地扩张集中在甘肃省甘南藏族自治州和定西市内的秦岭西段、甘肃省庆阳市和陕西省延安市内的黄龙山、西安市和渭南市内的秦岭北麓、山西省吕梁山和太岳山、河南省洛阳市和三门峡市的熊耳山等山脉附近(图 6)。

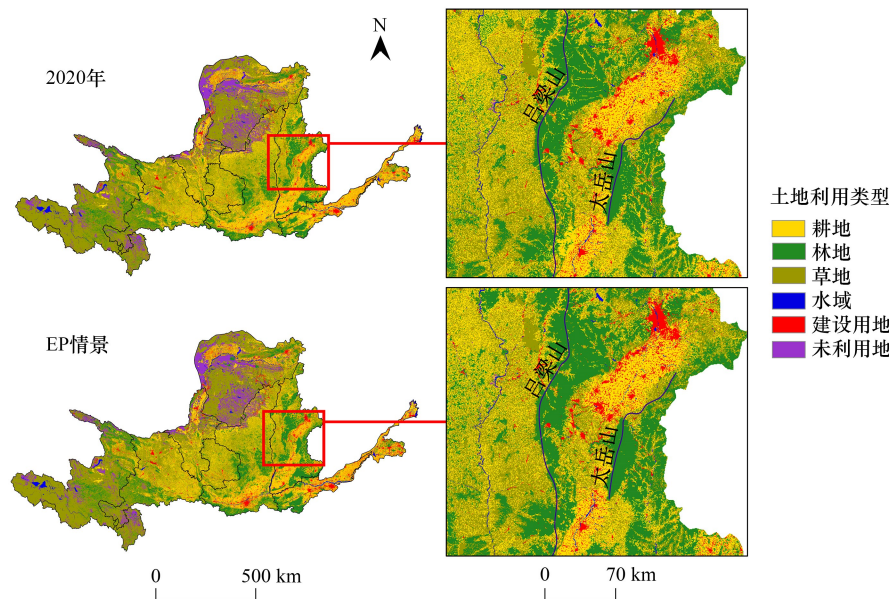


图 6 黄河流域 2020 年与 2030 年生态保护情景土地利用格局对比

Fig.6 Comparison of land use in the Yellow River Basin between 2020 and 2030 ecological protection scenarios

CD 情景下的土地利用变化情况与 EP 情景类似,耕地和林地变化率仅次于 EP 情景,水域和建设用地变化率高于 EP 情景。水域面积增长主要体现在黄河干流;建设用地扩张具体表现在甘肃省兰州市、山西省太原市和晋中市、河南省郑州市、山东省济南市等地(图 7),且扩张幅度明显低于 ND 和 ED 情景。

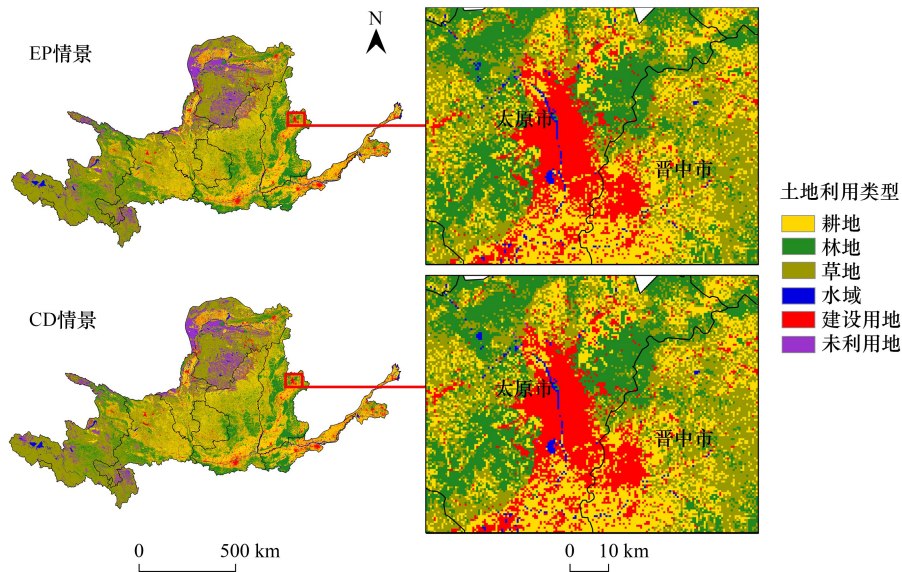


图7 黄河流域 2030 年生态保护情景与协调发展情景对比土地利用格局对比

Fig.7 Comparison of land use between ecological protection scenario and coordinated development scenario in the Yellow River Basin in 2030

3.2.3 盐碱地与湿地空间分布模拟

对盐碱地历史面积进行计算,1995—2020 年每隔 5 年的盐碱地面积分别为 3543.60 km²,4779.81 km²,4787.84 km²,3162.66 km²,3193.14 km²,4171.83 km²。根据盐碱地土地利用模拟结果计算 2030 年四种情景下的盐碱地面积分别为 5023.22 km²,4733.72 km²,4463.47 km²,4613.47 km²,其空间分布如图 8 所示。盐碱地主要分布在河套平原区的内蒙古自治区鄂尔多斯市,另外也有少部分位于内蒙古自治区巴彦淖尔市、呼和浩特市、包头市,宁夏回族自治区吴忠市、陕西省榆林市等地。

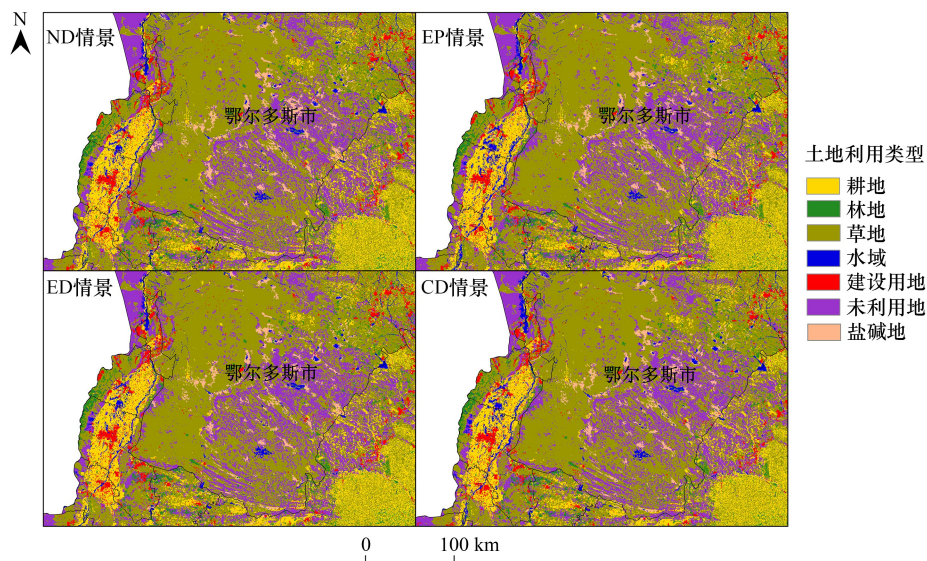


图8 黄河流域 2030 年盐碱地空间分布

Fig.8 Spatial distribution of saline alkali land in the Yellow River Basin in 2030

对湿地历史面积进行计算,1995—2020 年每隔 5 年的湿地面积分别为 21398.38 km²,21329.84 km²,

21853.68 km², 22777.19 km², 22950.93 km², 23647.66 km²。根据湿地土地利用模拟结果计算 2030 年四种情景下的湿地面积分别为 24485.60 km², 32209.30 km², 27005.83 km², 32245.55 km², 其空间分布如图 9 所示。湿地主要分布于三江源地区和主支流附近, 除水域部分之外, 沼泽地主要分布在青海省果洛藏族自治州、黄南藏族自治州、海西蒙古族藏族自治州, 四川省阿坝藏族羌族自治州, 甘肃省甘南藏族自治州等地; 少部分位于内蒙古自治区鄂尔多斯市和巴彦淖尔市等地。ND 情景和 ED 情景的湿地分布情况与 2020 年较相似, 而 EP 情景和 CD 情景下的湿地则有明显扩张, 增加区域主要分布在黄河一级水系附近, 如甘肃省白银市、宁夏回族自治区银川市和石嘴山市、内蒙古自治区阿拉善盟、陕西省渭南市等地。

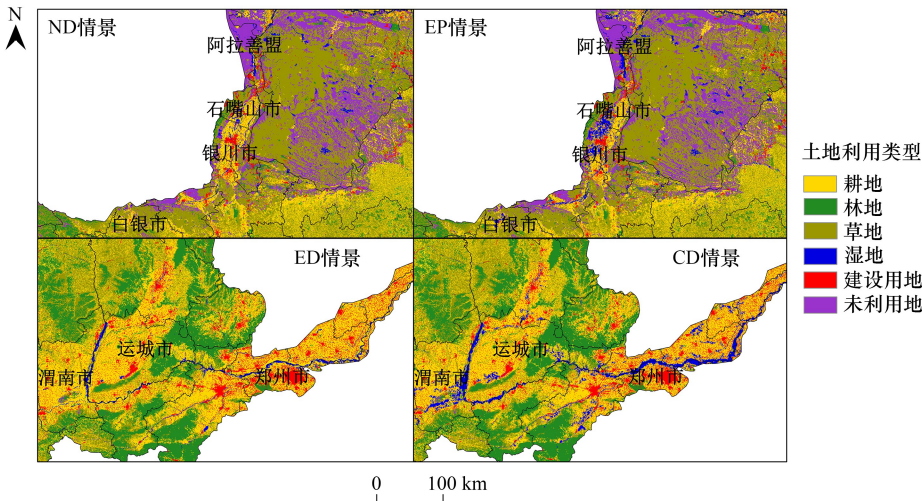


图 9 黄河流域 2030 年湿地空间分布

Fig.9 Spatial distribution of wetlands in the Yellow River Basin in 2030

3.3 景观生态脆弱性分析

3.3.1 景观格局指数分析

根据 2030 年 LUCC 模拟结果, 借助景观格局软件 Fragstats 计算得到黄河流域 2020 年和 2030 年四种情景下的斑块级别指数和景观级别指数, 如表 5 和表 6 所示。

表 5 显示, 相较于 2020 年, 2030 年整体上耕地和未利用地的 *NP*、*PD*、*LSI* 值均有所增加, 斑块破碎程度上升, 地块形状更加不规则, 地块分布趋于零散化; 内聚力指数 *COHESION* 值有一定程度的下降。林地、草地、水域和建设用地的情况则呈现相反变动情况, *NP*、*PD*、*LSI* 值均减小, 而 *COHESION* 值提高。相比于 ND 情景和 ED 情景, CD 情景下生态用地的 *NP*、*PD*、*LSI* 值更小, 意味着其破碎化程度更小, 而耕地、建设用地和未利用地的破碎度增加。

表 5 2030 年多情景下各景观要素斑块级别指数

Table 5 Patch level indexes of landscape elements in multiple scenarios in 2030

景观类型 Landscape type	年份 Year	斑块数目/个 Number of patches	斑块密度/(个/km ²) Patch density	形状景观指数 Landscape shape index	斑块内聚力指数 Patch cohesion index
耕地 Cropland	2020 年	33095	0.0409	344.9080	99.4329
	ND 情景	34247	0.0423	351.2312	99.4149
	EP 情景	34489	0.0426	360.9891	99.3752
	ED 情景	34357	0.0425	351.3601	99.4142
	CD 情景	34591	0.0428	360.3076	99.2534
林地 Forestland	2020 年	33044	0.0409	243.4411	97.5556
	ND 情景	32890	0.0407	243.0801	97.5776

续表

景观类型 Landscape type	年份 Year	斑块数目/个 Number of patches	斑块密度/(个/km ²) Patch density	形状景观指数 Landshape shape index	斑块内聚力指数 Patch cohesion index
草地 Grassland	EP 情景	30559	0.0378	234.8664	97.7829
	ED 情景	32815	0.0406	243.0944	97.5663
	CD 情景	30663	0.0379	234.6869	97.8102
	2020 年	28213	0.0349	325.7307	99.9067
	ND 情景	27811	0.0344	325.1069	99.9081
水域 Water	EP 情景	27783	0.0343	325.1596	99.9077
	ED 情景	27749	0.0343	325.1535	99.9078
	CD 情景	27744	0.0343	325.1849	99.9141
	2020 年	12455	0.0154	123.2200	83.5306
	ND 情景	12255	0.0152	123.1881	85.1794
建设用地 Construction land	EP 情景	12031	0.0149	123.6115	87.1576
	ED 情景	12241	0.0151	123.1755	85.4558
	CD 情景	11905	0.0147	123.6585	88.2818
	2020 年	39180	0.0484	208.8196	75.7113
	ND 情景	35352	0.0437	209.4623	84.3897
未利用地 Unused land	EP 情景	36554	0.0452	210.4864	81.5214
	ED 情景	35310	0.0437	209.4093	84.9381
	CD 情景	36204	0.0448	210.4318	82.9048
	2020 年	13507	0.0167	163.1379	97.5975
	ND 情景	13754	0.0170	165.2915	97.5257
	EP 情景	13863	0.0171	167.8394	97.5095
	ED 情景	13886	0.0172	166.8458	97.5236
	CD 情景	13870	0.0171	168.0161	97.6271

ND:自然发展情景 Natural development scenario; EP:生态保护情景 Ecological protection scenario; ED:经济发展情景 Economic development scenario; CD:协调发展情景 Coordinated development scenario

表 6 显示,整体而言,2030 年四种情景下的 *NP*、*PD*、*COHESION* 值均有一定程度的下降,*LSI* 值提高,斑块复杂程度增加;*SHDI*、*SHEI* 值均有一定程度的提升,土地利用的丰富性和多样性提升。

表 6 2030 年多情景下景观级别指数

Table 6 Landscape level indexes in multiple scenarios in 2030

情景 Scenario	斑块数目 Number of patches/个	斑块密度 Patch density/(个/km ²)	形状景观指标 Landshape shape index	斑块内聚力指数 Patch cohesion index	Shannon 多样性指数 Shannon diversity index	Shannon 均匀度指数 Shannon evenness index
2020 年现状 Status in 2020	159494	0.1972	297.2676	99.7355	1.3692	0.7641
自然发展情景 Natural development scenario	156309	0.1932	299.5032	99.7345	1.3800	0.7702
生态保护情景 Ecological protection scenario	155279	0.1920	300.4942	99.7307	1.3855	0.7733
经济发展情景 Economic development scenario	156358	0.1933	299.7273	99.7337	1.3796	0.7700
协调发展情景 Coordinated development scenario	154977	0.1916	300.4066	99.7361	1.3873	0.7743

3.3.2 景观脆弱度分析

对黄河流域 2030 年景观脆弱度空间分布有更直观的认识,使用 ArcGIS 构建渔网,计算景观生态脆弱性指数,并将其值赋给各渔网小区的中心点,利用克里金插值法生成相应空间分布图^[8],按照相同的分类界

限将研究区域划分为低脆弱区、较低脆弱区、中脆弱区、较高脆弱区和高脆弱区五类,如图 10 所示,并根据分区结果计算各情景下每类脆弱区所占面积比例,绘制条形图如图 11 所示。

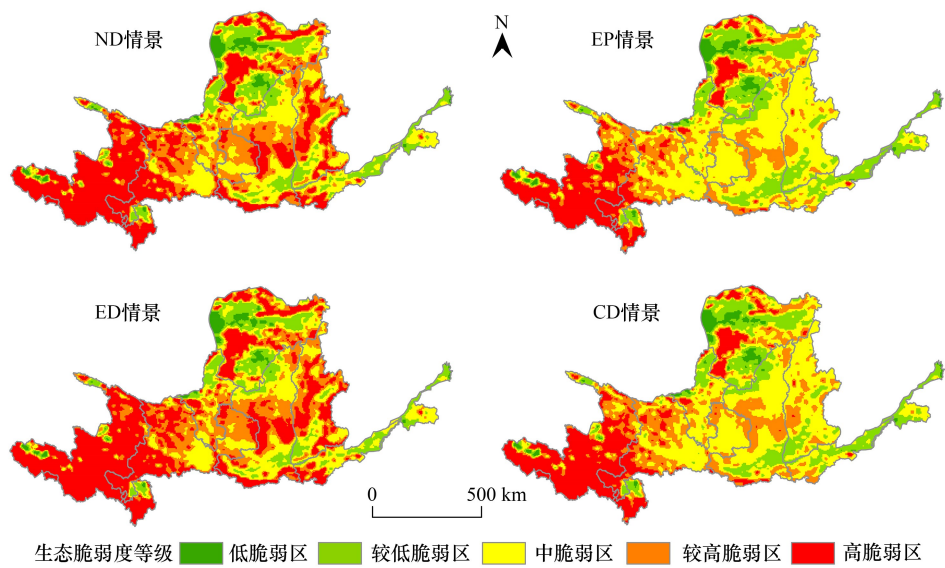


图 10 黄河流域 2030 年四种情景下景观生态脆弱度指数空间分布图
Fig.10 Spatial distribution of landscape ecological vulnerability index in four scenarios in the Yellow River Basin in 2030

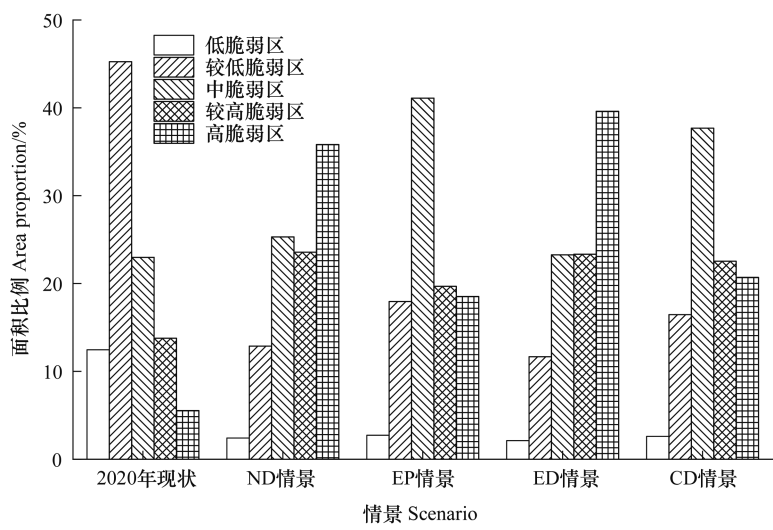


图 11 脆弱性分区面积比例
Fig.11 Area proportion of vulnerability zoning

整体而言,2030 年四种情景下生态脆弱性的空间分布较为相似,高脆弱区主要集中在流域西部的青海省、四川省,以及北部内蒙古自治区鄂托克旗,而内蒙古其他区域与陕西省渭南市、河南省、山东省等下游地区则主要为低脆弱区。较高脆弱区主要位于西部的甘肃省兰州市、中部的陕西省延安市和山西省临汾市等地;而甘肃省、宁夏回族自治区、陕西省和山西省大部分地区呈现中等脆弱程度。EP 情景下的生态脆弱性程度最轻,ED 情景的生态脆弱性程度最为严重;相比于 ND 情景和 ED 情景,CD 情景整体脆弱性明显降低,特别是前两种情景下甘肃、陕西和山西等地的高脆弱区在 CD 情景下均有降级和面积缩减的情况。图 11 也印证了上述结论。

计算四种情景下的景观生态脆弱度指数与 2020 年指数的差,以对比研究区域脆弱性变化情况,结果如图 12 所示,并绘制 2020 年脆弱性各分区与 2030 年分区转移矩阵的桑基图如图 13 所示。

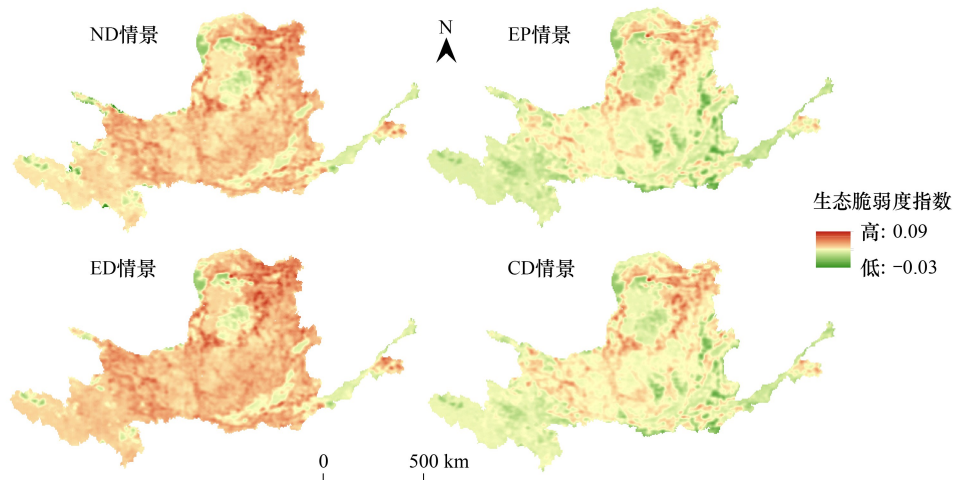


图 12 四种情景景观生态脆弱度指数相较于 2020 年变化量空间分布图

Fig.12 Spatial distribution of changes of landscape ecological vulnerability index in four scenarios compared to 2020

可以看出,ND 情景与 ED 情景生态脆弱性空间分布类似,但后者脆弱性程度更为严重;由图 13 也可看出,ED 情景下,2020 年各分区向更脆弱一级转移面积更大。EP 情景下,流域整体脆弱性恶化情况明显减弱,CD 情景的整体生态脆弱性介于 ND 情景和 EP 情景之间。图 13 也印证了上述结论。

4 讨论与结论

4.1 讨论

黄河流域作为我国重要的生态安全屏障和经济发展区域,其最大的问题是生态脆弱。流域内生态脆弱区分布广、类型多,上游的高原冰川、草原草甸和三江源、祁连山,中游的黄土高原,下游的黄河三角洲等都极易发生退化,恢复难度极大且过程缓慢^[28],这也与本文图 10 研究结果一致,黄河流域仍然面临着突出的生态环境问题。据此,本文探究不同发展目标下黄河流域景观生态脆弱程度的未来演变趋势,能为政策落地提供一定的理论指导。

景观生态脆弱性分析以土地利用数据为前提,因此,准确模拟 LUCC 空间分布格局对于生态脆弱性预测具有重要意义。本文首先对不同发展目标下的土地转移概率进行优化,再计算各地类面积,利用 PLUS 模型模拟土地利用格局。为验证上述方法是否能有效解决 LUCC 多情景模拟中常规地类面积优化结果相似的问题,采用文献^[23—25]中对约束条件的限制,分别使用序列二次规划算法与遗传算法求解 2030 年各地类面积,结果如表 7 所示。相较于表 4 在不同情景下的明显差异,使用序列二次规划算法时,四种情景结果多次出现相同值;对遗传算法进行 50 次重复试验,其平均值在多情景下也呈现出相近结果,无法准确区分不同发展目标,进一步影响到后续运用 PLUS 模型进行 LUCC 模拟。因此,本文通过考虑土地利用类型转移情况求解地类面积,不仅能细化考虑到土地利用类型之间的动态演变,也能差异化体现出不同发展目标下地类变动的情况,对于 LUCC 多情景模拟具有一定的实践意义。

此外,对上述优化问题采用了具有高效全局搜索能力的遗传算法进行求解。为具体探究不同算法对优化结果的影响,分别运用遗传算法、序列二次规划算法、内点法求解多情景下的转移概率,计算三种方法下 EP、ED、CD 情景与 ND 情景转移概率的差值平方和。由于求解变量为数据值较小的概率值,因此当求解结果与 ND 情景差异过大时,说明转移概率出现了较大变动,可能超出土地利用类型演化的正常界限,结果存在较大

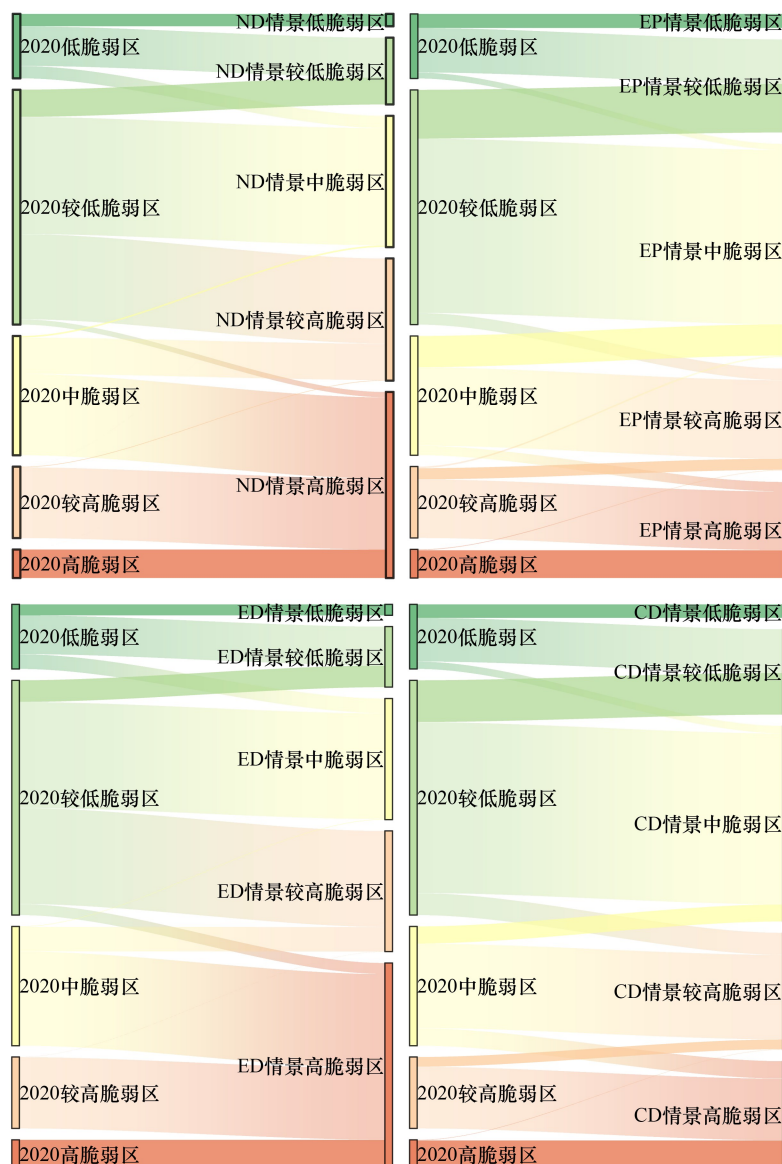


图 13 2030 年四种情景较 2020 年脆弱性分区转移面积桑基图

Fig.13 Sankey diagram of area shifted by vulnerability zones in four scenarios in 2030 compared to 2020

误差。计算得到遗传算法的差值平方和为 0.0073、0.0011、0.0063, 序列二次规划算法的结果为 0.0762、0.0077、0.0766, 内点法的结果为 0.0746、0.0062、0.0794。因此, 采用遗传算法对转移概率优化问题求解具有较高的可信度和稳健性, 能够使土地利用变化模拟更加符合实际情况。

预测结果中, ND 情景的地类变化符合近年来的变动趋势, 且建设用地在所有地类中扩张程度最大, 并呈现以省会城市为中心向外扩散的态势。EP 情景的结果显示在黄河源区水源涵养政策、自然保护区建设, 以及山西省“十四五”“两山七河一流域”生态保护、陕西省秦岭北麓保护修复项目等工程的实施下, 生态保护工作取得了明显成效。CD 情景与杨润佳等^[23]研究结果具有一定的相似性, 相较于 2020 年, 该情景下耕地面积减少, 生态用地面积增加, 城市建设扩张虽不可避免, 但是相较于不加限制的发展, 其增长趋势已明显收敛, “蔓延式”扩张局势得到了有效遏制。经济发展与生态保护实现良性互动, 耦合协调目标达成。

1995—2020 年黄河流域盐碱化程度呈现先增后减又增加的趋势, 对 2030 年的预测也符合当前现状, 河套平原区土地盐碱化问题仍十分突出。ND 情景下盐碱化程度更为严峻, 在结合《纲要》对流域发展进行限制

后,盐碱化有一定程度缓解。然而,EP 情景下的盐碱地面积反而比 ED 情景更大,推测可能是由于生态保护下对农业活动的限制影响到土壤的盐碱平衡,或是植被变化未能起到改善土壤条件的效果。因此,在生态环境治理中不能一味追求生态效益目标,更需要综合考虑政策实施的结果,遵循因地制宜的原则^[37]。湿地面积近年来呈现先减后增的特征,在生态补水等工程的实施下,湿地生态系统修复效果明显^[38],但仍未恢复至 1980 年以前的水平^[27]。对 2030 年的预测也符合现有趋势,且 EP 情景和 CD 情景下的湿地扩张面积明显高于 ND 情景和 ED 情景,这也与各情景发展目标一致。当前,需进一步深化执行《纲要》中对湿地保护做出的明确规定,加大甘南、若尔盖等主要湿地的修复力度,推进黄河流域下游湿地和生态治理,逐步改善黄河流域生态脆弱现状。

表 7 两种算法求解 2030 年土地利用结果/km²

Table 7 Results of two algorithms to solve for land use in 2030

土地利用类型 Land use type	序列二次规划算法 Sequential quadratic programming				遗传算法 Genetic algorithm		
	ND 情景	EP 情景	ED 情景	CD 情景	EP 情景	ED 情景	CD 情景
耕地 Cropland	200382.00	200382.00	200382.00	200382.00	187624.96	200205.97	187284.13
林地 Forestland	107269.75	107269.75	107269.75	107269.75	107280.71	107540.13	107287.16
草地 Grassland	386668.75	386668.75	386668.75	386668.75	397888.33	411172.62	397804.06
水域 Water	15899.00	20551.25	15899.00	20551.25	31120.73	16153.79	31722.75
建设用地 Construction land	35620.25	30968.00	35620.25	30968.00	31000.78	35620.25	31017.15
未利用地 Unused land	63004.50	63004.50	63004.50	63004.50	53928.74	38151.49	53728.99

在 LUCC 多情景模拟结果的基础上,计算景观格局指数,分析景观破碎度变化情况。2030 年,耕地与建设用地的斑块变化情况与图 4 一致,经济高速发展下建设用地需求扩张,耕地面积受到挤压,人地关系矛盾仍是当前工作的重点。要加强建设用地节约集约利用^[39],高质量建设沿黄城市群^[40],推进城市生态基础设施建设^[41],大力盘活存量建设用地,减少低效闲置用地,避免因耕地面积减少和破碎化程度加深影响农业生产效率。在黄河流域生态治理工作的推进下,生态用地的破碎化程度有所缓解,自然连通度提升,这对于流域水源涵养、土壤保持以及提高生态系统的恢复力和抵抗力具有重要作用,EP 情景和 CD 情景下效果更为明显。整体上看,2020 年至 2030 年这十年间,黄河流域景观破碎化呈下降趋势,受到人类活动的影响,流域内土地利用空间异质性更高,景观类型向均衡趋势发展。然而,进一步对景观生态脆弱度指数的分析却显示出流域 2030 年景观生态脆弱性仍有恶化的趋势,青海省果洛藏族自治州和黄南藏族自治州、宁夏回族自治区吴忠市和固原市、陕西延安市和榆林市等地均有不同程度的脆弱性加剧情况,推测可能是由于生态恢复存在一定滞后性,或是生态用地并未得到合理的保护和利用,这也再次警醒职能部门在落实生态治理行动前,需要加强前瞻性思考和全局性谋划,综合考虑到景观敏感性和景观适应度,并结合黄河流域水土流失、土壤侵蚀、盐碱化、湿地萎缩等突出问题,制定适宜的生态环境保护举措。相较于 ND 情景,EP 情景下的生态脆弱性有明显缓和,这与该情景下的发展目标相符,西部和中部的较高脆弱区和高脆弱区有向下一级缓解的情况,这可能是由于上述区域生态用地占比大,在以生态效益最大化为目标时,这些地区受林草保护政策和水资源管理政策的影响更大。CD 情景与 EP 情景分布情况相似,特别是山西省太原市和吕梁市、陕西省延安市、甘肃省庆阳市和甘南藏族自治州周围的高脆弱区明显缓解,并逐渐向中心区域缩小,体现出太原市“一泓清水入黄河”攻坚行动方案、黄河水保生态工程庆阳蒲河项目、甘南黄河上游水源涵养区修复工程等环境治理工作成效显著。虽然 CD 情景没有 EP 情景生态脆弱性缓解程度大,但其对于流域上游水系风蚀区的水土保持和中部平原地区生态平衡的效果仍十分显著,这体现出合理利用自然资源能够实现双赢效应^[42],未来要坚定不移地走生态优先、绿色低碳的高质量发展之路^[43]。

未来景观生态脆弱性的研究可进一步关注以下问题:在土地利用多情景模拟中,优化模型的约束条件设置通常参考历史经验、相关文献和政策文件等,其范围通常由主观而定,很少有准确数字参考,基于政策规划

文件中的相关文字信息设置约束条件具有很大的主观性和不确定性,如何进行合理准确地量化仍有待进一步深入;此外,土地利用模拟中限制转化区域的设置也有待结合研究区域和政策要求进一步细化,这对于提高模拟的准确性和真实性具有重要意义。

4.2 结论

(1)黄河流域 2020 年土地类型占比由高到低分别为草地、耕地、林地、建设用地、未利用地和水域;1995—2020 年间,转出土地主要来源于草地、耕地和未利用地,转入地类主要是草地、耕地和建设用地。

(2)2030 年土地利用多情景模拟结果符合近年来变动趋势,生态用地在四种情景下均有一定程度的增加,表明当前生态保护政策对环境修复工作具有积极作用。EP 情景下林地和草地的扩张程度最大、建设用地扩张程度最小,符合生态保护发展目标;CD 情景下水域扩张程度最大、未利用地缩减程度最大,且建设用地扩张程度明显低于 ND 情景和 ED 情景,城市“摊大饼”式无序扩张局势得到有效控制。

(3)相较于 2020 年,2030 年盐碱化程度增加,ND 情景下情况最为严峻,ED 情景恶化程度较缓;2030 年湿地生态系统修复效果明显,CD 情景恢复程度最大,ND 情景扩张面积较小。

(4)相较于 2020 年,2030 年四种情景的林地、草地、水域和建设用地破碎化程度均有所减弱,空间连接度提升,耕地和未利用地则情况相反。EP 情景和 CD 情景下生态用地破碎化程度更低,耕地、建设用地和未利用地则相反。流域整体景观破碎程度均有所降低,土地利用的丰富性和多样性提升。

(5)相较于 2020 年,黄河流域 2030 年景观生态脆弱性仍有恶化的趋势。相较于 ND 情景和 ED 情景,EP 情景下的生态脆弱性有明显缓和;CD 情景的脆弱度介于 ND 情景和 EP 情景之间,其对于流域上游水系风蚀区的水土保持和中部平原地区生态平衡的效果十分显著。

参考文献 (References):

- [1] 汪芳,安黎哲,党安荣,韩建业,苗长虹,王静,张广汉,赵勇. 黄河流域人地耦合与可持续人居环境. 地理研究, 2020, 39(8): 1707-1724.
- [2] 王小丹,钟祥浩. 生态环境脆弱性概念的若干问题探讨. 山地学报, 2003, 21(B12): 21-25.
- [3] 吴春生,黄翀,刘高焕,刘庆生. 基于模糊层次分析法的黄河三角洲生态脆弱性评价. 生态学报, 2018, 38(13): 4584-4595.
- [4] 李云帆,李彩霞,贾翔,吴晶,张晓丽,梅晓丽,朱若柠,王冬. 乌梁素海流域生态脆弱性时空变化及其成因分析. 地球信息科学学报, 2023, 25(10): 2039-2054.
- [5] 徐灵芝,潘继征,李勇,华跃洲,李清濯,阳振,何尚卫,杜成栋. 1980—2020 年滇池生态脆弱性评价及主要驱动因子. 湖泊科学, 2023, 35(5): 1682-1693.
- [6] Liu L M, Chen J F, Wang C B. Spatiotemporal evolution and trend prediction of regional water-energy-food-ecology system vulnerability: a case study of the Yangtze River Economic Belt, China. Environmental Geochemistry and Health, 2023, 45(12): 9621-9638.
- [7] 李子辉,苏湘媛,田甜,张亚,陈庆松,朱康文,宋丹,张艳军,巴永,陈伟志,董春风,杨梦娇,侯征. 基于格局-质量-功能的高寒草甸区生态脆弱性分析——以云南迪庆为例. 中国环境科学, 2024, 44(4): 2273-2288.
- [8] 田鹏,李加林,姜忆涓,史小丽,王丽佳,刘瑞清,童晨,周子靖,邵姝遥. 海湾景观生态脆弱性及其对人类活动的响应——以东海区为例. 生态学报, 2019, 39(4): 1463-1474.
- [9] 黄木易,仲勇,冯少茹,张嘉晖. 1970s 以来巢湖流域水环境保护区景观生态脆弱性时空特征及驱动解析. 湖泊科学, 2020, 32(4): 977-988.
- [10] 何梦真,张乐涛,魏仪媛,郑泽豪,王清源. 黄河中游不同地貌分区景观格局脆弱性及其驱动力. 环境科学, 2024, 45(6): 3363-3374.
- [11] 贺小荣,彭坤杰,许春晓. 长江经济带旅游-经济-生态系统脆弱性时空演变及趋势预测. 生态学报, 2022, 42(2): 487-499.
- [12] Wu X Y, Zhu C L, Yu J B, Zhai L, Zhang H X, Yang K J, Hou X L. Ecological vulnerability in the red soil erosion area of changting under continuous ecological restoration: spatiotemporal dynamic evolution and prediction. Forests, 2022, 13(12): 2136.
- [13] 茹少峰,马茹慧. 黄河流域生态环境脆弱性评价,空间分析及预测. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1722-1734.
- [14] 崔旺来,蔡莉,奚恒辉,杨帆,陈梦圆. 基于土地利用/覆盖变化的浙江大湾区生态安全评价及多情景模拟分析. 生态学报, 2022, 42(6): 2136-2148.
- [15] 张宇硕,吴殿廷,吕晓. 土地利用/覆盖变化对生态系统服务的影响: 空间尺度视角的研究综述. 自然资源学报, 2020, 35(5): 1172-1189.
- [16] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, Liu S S, Wang B Y, Yao Y. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85: 101569.
- [17] 张剑,许鑫,隋艳晖. 海洋经济驱动下的海岸带土地利用景观格局演变研究——基于 CA-Markov 模型的模拟预测. 经济问题, 2020,

- 487(3): 100-104.
- [18] Fu F, Deng S M, Wu D, Liu W W, Bai Z H. Research on the spatiotemporal evolution of land use landscape pattern in a county area based on CA-Markov model. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 80: 103760.
- [19] Beroho M, Briak H, Cherif E K, Boulahfa I, Ouallali A, Mrabet R, Kebede F, Bernardino A, Aboumaria K. Future scenarios of land use/land cover (LULC) based on a CA-Markov simulation model: case of a Mediterranean watershed in Morocco. *Remote Sensing*, 2023, 15(4): 1162.
- [20] 魏乐, 周亮, 孙东琪, 唐相龙. 黄河流域城市群扩张的时空格局演化及情景模拟——以呼包鄂榆城市群为例. *地理研究*, 2022, 41(6): 1610-1622.
- [21] Liu X Y, Wei M, Li Z G, Zeng J. Multi-scenario simulation of urban growth boundaries with an ESP-FLUS model: a case study of the Min Delta region, China. *Ecological Indicators*, 2022, 135: 108538.
- [22] Li H Z, Fang C Y, Xia Y, Liu Z Y, Wang W. Multi-scenario simulation of production-living-ecological space in the Poyang Lake area based on remote sensing and RF-Markov-FLUS model. *Remote Sensing*, 2022, 14(12): 2830.
- [23] 杨润佳, 叶艳妹. 基于土地资源优化配置的国土整治修复潜在区域识别——以黄河流域为例. *资源科学*, 2022, 44(5): 886-898.
- [24] 王子尧, 孟露, 李惊, 徐昉, 林箐. 低碳发展背景下北京市土地利用与生态系统服务多情景模拟研究. *生态学报*, 2023, 43(9): 3571-3581.
- [25] 张波, 潘佩佩, 王新云, 温佳昱, 任佳璇, 刘苗苗. 基于 GMOP-PLUS 耦合模型的京津冀土地利用变化多情景模拟及功能关系分析. *地理与地理信息科学*, 2023, 39(5): 8-16.
- [26] 王丽婧, 席春燕, 付青, 苏一兵. 基于景观格局的三峡库区生态脆弱性评价. *环境科学研究*, 2010, 23(10): 1268-1273.
- [27] 王尧, 陈睿山, 郭迟辉, 夏子龙. 近 40 年黄河流域资源环境格局变化分析与地质工作建议. *中国地质*, 2021, 48(1): 1-20.
- [28] 中华人民共和国中央人民政府官网. 中共中央国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》. (2021-10-08) [2023-10-10]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/08/content_5641438.htm.
- [29] 乔治, 蒋玉颖, 贺瞳, 卢应爽, 徐新良, 杨俊. 土地利用变化模拟研究进展. *生态学报*, 2022, 42(13): 5165-5176.
- [30] 陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰. 中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估. *环境科学*, 2023, 44(8): 4655-4665.
- [31] 中华人民共和国中央人民政府. 关于印发《黄河流域生态环境保护规划》的通知. (2022-06-11) [2023-10-17]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/30/content_5698491.htm.
- [32] 厉静文, 董锁成, 李宇, 杨洋, Boldanov Tamir. 中蒙俄经济走廊土地利用变化格局及其驱动因素研究. *地理研究*, 2021, 40(11): 3073-3091.
- [33] 王颖慧, 丁建丽, 李晓航, 张钧泳, 马国林. 伊犁河流域土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响——基于强度分析模型. *生态学报*, 2022, 42(8): 3106-3118.
- [34] 孙才志, 闫晓露, 钟敬秋. 下辽河平原景观格局脆弱性及空间关联格局. *生态学报*, 2014, 34(2): 247-257.
- [35] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 黄丽, 张光远. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 19-24.
- [36] 谢怡凡, 姚顺波, 丁振民, 侯孟阳, 邓元杰, 刘广全. 退耕还林和地理特征对土壤侵蚀的关联影响——以陕西省 107 个县为例. *生态学报*, 2022, 42(1): 301-312.
- [37] 张婕, 古明敏, 王陈. 基于共享视角的黄河流域综合生态补偿机制. *中国人口·资源与环境*, 2024, 34(3): 192-204.
- [38] 水利部黄河水利委员会. 黄河三角洲生态补水创历史新高 我国暖温带最完整湿地生态系统良性修复加速. (2020-07-29) [2024-7-10]. http://www.yrcc.gov.cn/xwdt/hhyw/202312/t20231227_405640.html.
- [39] 程开明, 王桂梅. 城镇化、产业结构升级与经济高质量发展——基于空间杜宾模型的中介效应检验. *系统工程理论与实践*, 2023, 43(3): 648-666.
- [40] 柴建, 侯亚敏, 寇红红, 何鹏, 刘洪涛. 环境规制下民间投资对省域经济高质量发展的空间溢出和门槛效应研究. *系统科学与数学*, 2023, 43(4): 870-885.
- [41] 颜建军, 冯君怡, 陈彬. 中国城市生态基础设施对碳排放量的影响. *生态学报*, 2024, 44(2): 637-650.
- [42] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 吴协保, 肖峻, 祁向坤, 张伟, 杜虎. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应. *生态学报*, 2019, 39(20): 7432-7440.
- [43] 刘丁蓉, 孙仕, 杨新辉. 数字经济如何赋能生态韧性——基于中介效应与调节效应的实证分析. *商学研究*, 2023, 30(6): 14-30.