

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.022.

杜洲, 牛健植, 樊登星, 等. 基于 PLUS 模型的黄河中游多沙粗沙区土地利用变化模拟及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 309-318.

Du Zhou, Niu Jianzhi, Fan Dengxing, et al. Simulation and Driving Force Analysis of Land Use Change in the Sandy and Coarse Region of the Middle Reaches of the Yellow River Based on PLUS Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 309-318.

基于 PLUS 模型的黄河中游多沙粗沙区 土地利用变化模拟及驱动力分析

杜洲¹, 牛健植^{1,2,3,4}, 樊登星¹, 张卓佩¹, 杨智勇¹

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;

2.林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083; 3.水土保持与荒漠化防治国家林业局重点实验室,

北京 100083; 4.北京林业大学 林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083)

摘要: [目的] 分析黄河中游多沙粗沙区土地利用演变规律及其驱动因素, 探究不同情景下区域土地利用变化趋势, 以期为保障区域生态安全及未来土地利用合理规划提供依据。[方法] 基于 2000 年、2010 年、2020 年 3 期土地利用数据, 进行黄河中游多沙粗沙区土地利用变化特征及驱动力分析, 并结合多情景设定, 利用 PLUS 模型预测了 2030 年 3 种不同情景下区域土地利用空间格局。[结果] 2000—2020 年研究区土地利用变化总体趋势体现为耕地持续减少, 林地、草地先增加后减少, 水域和未利用地先减少后增加, 建设用地持续增加; PLUS 模型对 2000—2020 年区域土地利用变化的驱动力挖掘效果较好, 其中建设用地的扩张受距县政府距离、GDP 和距铁路距离等社会经济因子影响为主; 自然发展情景下, 耕地、林地和草地面积有所下降, 水域、建设用地和未利用地的面积上升, 经济建设情景下, 建设用地大幅增加, 对其他各类用地侵占作用显著, 生态保护情景下, 建设用地扩张得到有效约束, 主要转入草地, 面积缩减。林地、草地和水域面积明显上升, 区域生态用地显著增加。[结论] 不同发展情景下, 黄河中游多沙粗沙区土地利用格局变化差异显著, 区域未来土地利用规划应以可持续发展方式为导向, 结合具体发展目标制定政策, 注重典型生态脆弱区生态保护与经济建设的协调发展。

关键词: PLUS 模型; 土地利用变化; 多情景模拟; 多沙粗沙区

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0309-10

Simulation and Driving Force Analysis of Land Use Change in the Sandy and Coarse Region of the Middle Reaches of the Yellow River Based on PLUS Model

Du Zhou¹, Niu Jianzhi^{1,2,3,4}, Fan Dengxing¹, Zhang Zhuopei¹, Yang Zhiyong¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing 100083, China; 3.Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Beijing 100083, China; 4.Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to analyze the pattern of land use evolution and its driving factors in the sandy and coarse region of the middle reaches of the Yellow River, to explore the trend of regional land use change under different scenarios, and to provide a basis for guaranteeing regional ecological security and rational land use planning in the future. [Methods] Based on three phases of land use data in 2000, 2010 and 2020, the characteristics and driving forces of land use change in the sandy and coarse region

收稿日期: 2023-12-04

修回日期: 2024-01-05

资助项目: 国家重点研发计划项目“风水复合侵蚀产沙模拟与治理措施优化配置技术”(2022YFF1300804)

第一作者: 杜洲(1998—), 男, 内蒙古包头人, 硕士研究生, 研究方向为森林水文与土壤侵蚀。E-mail: 442780205@qq.com

通信作者: 牛健植(1974—), 女, 吉林四平人, 博士, 教授, 主要从事森林水文与土壤侵蚀研究。E-mail: nexk@bjfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

of the middle reaches of the Yellow River were analyzed. Combined with multi-scenario setting, the PLUS model was used to predict the regional land use spatial pattern in 2030 under three different scenarios. [Results] The general trend of land use change in the study area during 2000—2020 was that cultivated land continued to decrease, forestland and grassland increased first and then decreased, water area and unused land decreased first and then increased, and construction land continued to increase. The PLUS model had a good effect on the driving force of regional land use change from 2000 to 2020, and the expansion of construction land was mainly affected by social and economic factors such as distance from county government, GDP and distance from railway. Under the natural development scenario, the area of cultivated land, forest land and grassland has decreased, while the area of water area, construction land and unused land has increased; under the economic construction scenario, construction land has increased significantly, which has a significant effect on the encroachment of other types of land; under the ecological protection scenario, the expansion of construction land has been effectively restricted, and the area is mainly transferred to grassland. The area of forestland, grassland and water area increases significantly, and the regional ecological land area increases significantly. [Conclusion] Under different development scenarios, the changes of land use pattern in the sandy and coarse region of the middle reaches of the Yellow River are significantly different. The future regional land use planning can refer to the research results and formulate policies according to the specific regional development goals, so as to ensure the ecological security and sustainable development of typical ecologically fragile areas.

Keywords: PLUS model; land use change; multi-scenario simulation; sandy and coarse region

土地利用/覆被变化(LUCC)是全球性的重要议题,直接关系到人类的生存和发展^[1]。土地利用/覆被变化直接影响到土地资源的数量、质量和利用方式,进而影响到人类的生活质量和发展速度。其次,土地利用方式的变化会对土壤、水资源、生物多样性等产生直接的影响。开展土地利用模拟预测研究,可以针对不同的土地利用目标,探索不同的配置方案,分析其对生态环境及社会经济带来的影响,从而寻找最佳的土地利用策略,更好地规划和管理土地资源,提高土地利用效率,以实现可持续发展。

目前,国内外学者利用不同土地利用模拟模型进行了大量研究,常见的土地利用模拟模型主要有系统动力学模型(SD)^[2]、GeoSoS 模型^[3]、CLUE 模型^[4]、FLUS^[5]模型等。然而,传统的土地利用预测模型通常采用统计模型和计算机模型等方法,难以充分考虑土地利用变化的复杂性和动态性。PLUS 模型是一种基于栅格数据的未来土地利用变化模拟模型,主要用于模拟和预测土地利用/覆被变化^[6]。与传统的土地利用预测模型相比,PLUS 模型可以利用栅格数据自动生成斑块,具有更高的预测精度和更广泛的适用范围,并可以通过深度学习和神经网络等技术,更好地模拟和预测土地利用变化的复杂过程。

黄河中游多沙粗沙区作为全国典型生态脆弱区,其生态安全问题在整个黄河流域的发展格局中占据着重要地位^[7]。如何在该区域未来土地利用规划中,

避免建设用地对于生态用地的急剧侵占,不断改善生态环境,满足其持续向良向优发展的需求,是该区域未来土地利用发展规划所面临的主要问题。目前,已有学者在该区域相继进行土地利用/覆被变化分析^[8-10]。但已有文献的研究时段多集中于 2000 年之前,且使用较新的土地利用模拟模型进行该区域未来土地利用变化多情景预测的研究还未见报道。基于此,本研究通过 2000—2020 年黄河中游多沙粗沙区土地利用现状,探究区域土地利用时空变化规律,并通过 PLUS 土地利用预测模型分析各类驱动因素贡献度,进行土地利用模拟精度验证以及未来多情景预测及分析,以期为黄河中游多沙粗沙区未来土地利用资源合理配置提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河中游多沙粗沙区(35°54′—40°15′N,106°57′—111°58′E)位于河口镇至龙门区间及泾河、洛河上游地区^[9]。根据水利部黄河水利委员会所发布的黄河中游多沙粗沙区区域界定原则,将粗泥沙粒径 ≥ 0.05 mm、粗泥沙模数 $\geq 1\ 300$ t/km²及多年平均输沙模数 $\geq 5\ 000$ t/km²作为多沙粗沙区界定指标,界定黄河中游多沙粗沙区总面积为 7.86 万 km²,区域范围涉及陕西、山西、内蒙古、宁夏、甘肃 5 省(自治区)^[11]。地处半干旱气候区,降雨空间分布不均且多集中于 7—9

月份,多以暴雨形式出现,年降雨量约 400 mm;区域高程介于 400~2 000 m,主要地貌特征为黄土丘陵沟壑和黄土高原沟壑,地表土质疏松,抗侵蚀能力差,风沙堆积与土壤侵蚀在年内交互进行且相互促进,水土流失情况严重,是黄河中下游沉积泥沙的主要来源。区域生态环境脆弱,是黄河及黄土高原水土保持与生态治理的关键区域。

1.2 数据来源与处理

黄河中游多沙粗沙区 3 期(2000 年、2010 年、2020 年)土地利用数据来自于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 30 m,土地利用类型主要为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地 6 类。研究区矢量边界来源于黄河上中游管理局所发布的黄河中游多沙粗沙区基础数据集(<http://www.ncdc.ac.cn/>)^[12]。参考相关研究,结合研究区概况以及数据可获取性与时效性,共选取驱动因子 11 类,其中自然因子主要包括:DEM、坡度、土壤类型、年平均温度、年平均降水和距水域距离;社会经济因子主要包括:人口、国民生产总值(GDP)、距主要道路距离、距铁路距离、距县政府距离。DEM 来源于 Google earth engine (GEE) (<https://earthengine.google.com/>)中的 SRTM 全球地形数据集,坡度数据在其基础上提取获得;人口、GDP、年平均温度、年平均降水及土壤类型等数据均来自于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>);铁路、道路、水域、县政府驻地等数据均来自于全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>),并通过 ArcGIS 中的欧式距离工具进行处理得到距离数据。根据 PLUS 模型运行需求,以上所有数据均以土地利用数据为基准统一坐标系及分辨率。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用变化分析

(1) 单一动态度。单一土地利用动态度可以较

好地表征各土地利用类型在不同时间段的变化速度和幅度^[13]。表达式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{t} \quad (1)$$

式中: K 为某土地利用类型的单一动态度; U_a 和 U_b 分别为研究初期和末期该土地利用类型的面积; t 为研究时长。

(2) 土地利用转移矩阵。土地利用转移矩阵既可以定量描述一定时间序列下土地利用类型的数量变化,还可以体现其结构特征及变化方向^[14]。表达式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: n 为土地利用类型数量; i, j 分别为研究时段土地转移始末的土地利用类型 ($i, j = 1, 2, \dots, n$); S_{ij} 为 i, j 地类的转换面积量。

1.3.2 PLUS 模型

(1) 模型介绍。PLUS 是一种基于栅格数据的未来土地利用变化模拟模型^[6]。其中,LEAS 模块负责从两期土地利用数据中提取各类用地扩张特征,并运用随机森林算法挖掘各土地利用类型的发展概率及驱动力因素,CARS 模块则以发展概率和 Markov 链预测未来土地利用的像元总量为约束条件,对未来土地利用变化进行斑块级模拟^[15]。

(2) 土地利用模拟多情景设置。参考前人经验,本研究中土地利用模拟的多情景设置主要通过限制各用地类型转移规则及调整各类用地转移概率实现^[16-18]。为探究黄河中游多沙粗沙区在不同发展目标下的土地利用变化特征,结合已有研究及研究区实际情况,共设定自然发展情景、生态保护情景和经济发展情景 3 个发展目标。各情景转移成本矩阵见表 1。

表 1 各情景土地利用转移成本矩阵

Table 1 Land use transfer cost matrix for each scenario

土地利用 类型	自然发展情景						生态保护情景						经济发展情景					
	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆
L ₁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0
L ₂	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
L ₃	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
L ₄	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1
L ₅	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
L ₆	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注:L₁, L₂, L₃, L₄, L₅, L₆ 分别代表耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,其中 0 表示不允许转移,1 表示允许转移,矩阵内行表示转出,列表示转入。

邻域权重用于表示不同土地利用类型的扩张能力。本研究邻域权重利用研究区 2010—2020 年的土

地利用类型面积变化量的无量纲值计算得到(表 2)。

(3) 模型精度检验。Kappa 系数可以揭示景观

空间信息的变化情况,适用于两幅图件的相似性评价,其判断标准见表 3^[19]。计算公式如下:

$$\text{Kappa}=\frac{P_o-P_c}{P_p-P_c}$$

(3)

式中: P_o 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。

表 2 邻域权重参数

Table 2 Weight of neighborhood

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
邻域权重	0.37	0.08	0.51	0.01	0.02	0.01

表 3 Kappa 系数模拟效果对应表

Table 3 Correspondence of Kappa coefficient to the simulation effect

Kappa 系数	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1
模拟效果	极低	一般	中等	较高	高

表 4 2000—2020 年黄河中游多沙粗沙区土地利用面积占比及单一土地利用动态度

Table 4 Land use area proportion and single land use dynamic degree in the sandy and coarse region of the middle reaches of the Yellow River from 2000 to 2020

土地利用类型	2000 年		2010 年		2020 年		2000—2020 年 单一土地利用 动态度/%
	土地利用 面积/km ²	占比/%	土地利用 面积/km ²	占比/%	土地利用 面积/km ²	占比/%	
耕地	32821.13	41.77	29711.65	37.81	29277.48	37.26	−0.54
林地	4891.22	6.22	5986.13	7.62	5931.46	7.55	1.06
草地	38927.22	49.54	40745.01	51.85	40419.41	51.44	0.19
水域	813.69	1.04	755.85	0.96	792.60	1.01	−0.13
建设用地	377.22	0.48	778.26	0.99	1371.30	1.75	13.18
未利用地	751.57	0.96	605.14	0.77	785.93	1.00	0.23

利用 ArcGIS 软件分析黄河中游多沙粗沙区 2000—2020 年土地利用数据,制作土地利用转移矩阵(表 5)。由表可知,2000—2020 年,研究区转出土地主要来源于耕地、草地和林地,分别占转出面积的 60%,29%,8%;转入地类主要是草地、林地、耕地和建设用地,分别占转入面积的 48%,21%,16%,

2 结果与分析

2.1 土地利用变化特征分析

由表 4 可知,2000—2020 年,黄河中游多沙粗沙区土地利用类型以农业用地(耕地)和生态用地(林地、草地)为主,3 种地类占比超过 96%;其中草地占比最多,平均占比 50.94%,其次是耕地,平均占比 38.95%。与社会经济关系最为紧密的建设用地,平均占比为 1.07%。2000—2020 年研究区土地利用变化总体趋势为:耕地持续减少;林地、草地先增加后减少;水域、未利用地先减少后增加;建设用地持续增加;其中,建设用地增幅最大,达 263.53%;耕地降幅最大,降幅为 10.80%。2000—2010 年,耕地面积变化量最大,共减少 3 109.48 km²;2010—2020 年,建设用地面积变化量最大,共增加 593.04 km²。

13%。其中,64%的林地转入面积来源于耕地,35%来自草地;52%的建设用地转入来自于草地,38%来自于耕地;在耕地的转出面积中,草地、林地及建设用地占比分别为 69%,22%,8%,该情况体现出生态保护政策中退耕还林还草以及区域城市发展对于耕地的侵占作用。

表 5 2000—2020 年黄河中游多沙粗沙区土地利用面积转移矩阵

Table 5 Land use area transfer matrix in the sandy and coarse region of the middle reaches of the Yellow River from 2000 to 2020

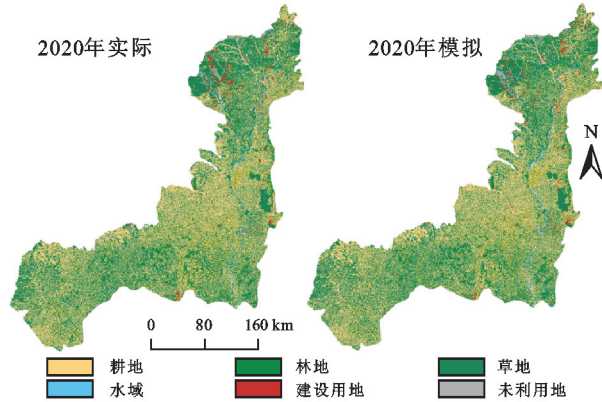
年份	用地类型	2020 年							转出面积 km ²
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计	
2000 年	耕地	28003.74	1068.88	3307.01	24.94	390.74	25.55	32820.86	4817.12
	林地	118.13	4250.92	456.57	6.90	53.76	4.91	4891.18	640.27
	草地	1109.38	593.33	36570.02	33.08	526.25	94.07	38926.13	2356.11
	水域	29.09	7.95	30.40	724.89	15.25	3.66	811.23	86.35
	建设用地	10.35	1.63	12.14	1.08	351.47	0.53	377.21	25.74
	未利用地	6.78	8.74	43.27	1.71	33.83	657.22	751.55	94.33
	总计	29277.48	5931.46	40419.41	792.60	1371.30	785.93	78578.17	8019.92
转入面积		1273.74	1680.54	3849.39	67.71	1019.83	128.71	8019.92	

2.2 PLUS 模型精度验证

为验证所构建 PLUS 模型的模拟精度,采用黄河中

游多沙粗沙区 2010 年土地利用数据,结合研究区 2020 年实际土地利用数量,模拟 2020 年研究区土地利用情况

(图 1)。将模拟结果与实际情况进行精度验证,计算 Kappa 系数与总体精度。得到 Kappa 值为 0.88,总体精度为 0.929,说明模型精度达到模拟要求,PLUS 模型适用于黄河中游多沙粗沙区土地利用变化模拟。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2022)4312 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 黄河中游多沙粗沙区 2020 年模拟与实际土地利用空间对比

Fig. 1 Comparison of simulated and actual land use in the sandy and coarse region of the middle reaches of the Yellow River in 2020

2.3 土地利用变化驱动力分析

将 2000—2020 年黄河中游多沙粗沙区土地利用面积变化情况作为因变量,自然环境因子及社会经济因子作为自变量,运用 PLUS 模型中的 LEAS 模块求得各影响因子对用地扩张的贡献度(图 2)。

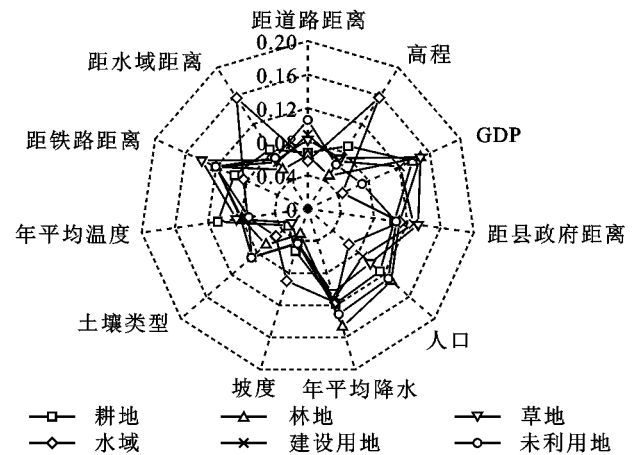


图 2 2000—2020 年各用地扩张驱动因子贡献度

Fig. 2 Contribution degree of each land use expansion driver from 2000 to 2020

通过分析可知,耕地、林地和草地的扩张主要受到 GDP 的影响,在 GDP 偏低的区域相对集中;水域的扩张主要受到高程的影响,分布在低海拔地区;建设用地的扩张主要受到距县政府距离的影响,扩张集中分布在城镇附近;未利用地扩张的主导因素为年平均降水,主要分布在年降水量较小的区域。扩张面积最大的草地,贡献度最高的驱动因子依次是 GDP、距铁路距离和距县政府距离;扩张速率最快的建设用地,其贡献度最高的驱动因子依次是距县政府距离、GDP 和距铁路距离。各用地类型驱动因子贡献度见图 3。

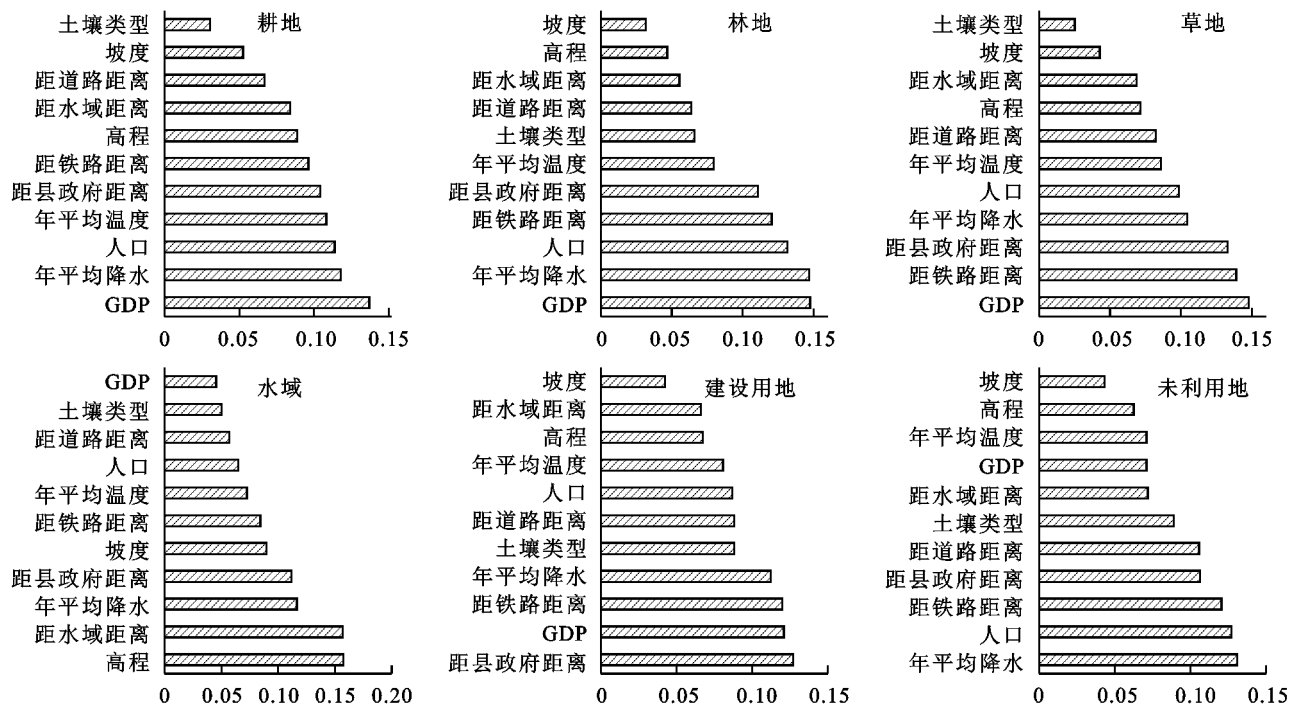


图 3 黄河中游多沙粗沙区土地利用面积扩张驱动因子贡献度

Fig. 3 Contribution degree of driving factors of land use area expansion in the sandy and coarse region of the middle reaches of the Yellow River

2.4 未来多情景预测下黄河中游多沙粗沙区土地利用分析

2.4.1 多情景设置 基于 PLUS 模型,以 2010—2020 年为基准期,通过模型中的 LEAS 模块得到 6 种土地利用类型的发展概率。以 2020 年土地利用现状数据为基准,利用 PLUS 模型中的 CARS 模块,对 2030 年黄河中游多沙粗沙区 3 种情景下土地利用变化情况进行模拟,以探究不同发展情景下研究区的土地利用面积变化及空间分布格局。3 种目标情景的具体参数设置如下:

- (1) 自然发展情景。设定以基准期土地利用发展趋势保持不变作为自然发展情景,并以未经调整的 2030 年 Markov 链各类土地利用数量预测结果作为需求值,通过 CARS 模块模拟 2030 年黄河中游多沙粗沙区土地利用情况。
- (2) 生态保护情景。2022 年实施的《中华人民共和国黄河保护法》特别针对砒砂岩区、多沙粗沙区以及水蚀风蚀交错区等关键区域提出了明确的保护与管理要求。因此,在制定生态保护情景转移规则

时,严格限制林地、草地和水域的转出,并允许建设用地向生态用地(林地、草地)进行转化。以研究区湖泊、水库及双线河流为范围,共同组成限制区。将林地和草地向建设用地转移的概率降低 50%,耕地向建设用地转移概率降低 30%,将耕地和草地向林地转移的概率提升 30%。

(3) 经济建设情景。黄河中游多沙粗沙区是我国“西电东送”工程的重要起点和“北煤南运”的核心源地,还是国家级能源化工基地。在国家经济建设中,该区域具有重要的战略地位^[20]。耕地和建设用地作为重要的经济地类,分别代表着研究区第一产业和第二、三产业,因此在情景设定中,限制耕地向除建设用地外的其他地类进行转移,并限制建设用地向其他地类转移。将耕地、林地和草地向建设用地转移的概率提高 20%,并将建设用地向其他地类(除耕地外)转移的概率降低 30%。

基于 Markov 链预测结果,根据调整后的转移概率重新计算不同情景下各类土地利用的未来预测需求量(表 6)。

表 6 2030 年 3 种情景下土地利用需求预测
Table 6 Forecast of land use demand in 2030 under three scenarios

年份及情景类别	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2020 年	32530530	6590511	44910452	880666	1523669	873251
2030 年自然发展	32106413	6543821	44621190	926300	2050077	1061278
2030 年生态保护	32147382	6659180	44811962	926582	1701637	1062337
2030 年经济建设	32066490	6516507	44482786	922430	2267942	1052924

2.4.2 多情景模拟下土地利用格局变化特征 从图 4 可以看出,输入设定好的土地利用需求数量、各类土地利用转移成本矩阵及邻域权重,通过 PLUS 模

型进行模拟预测,得到黄河中游多沙粗沙区 2030 年自然发展情景、生态保护情景和经济建设情景下的土地利用格局。

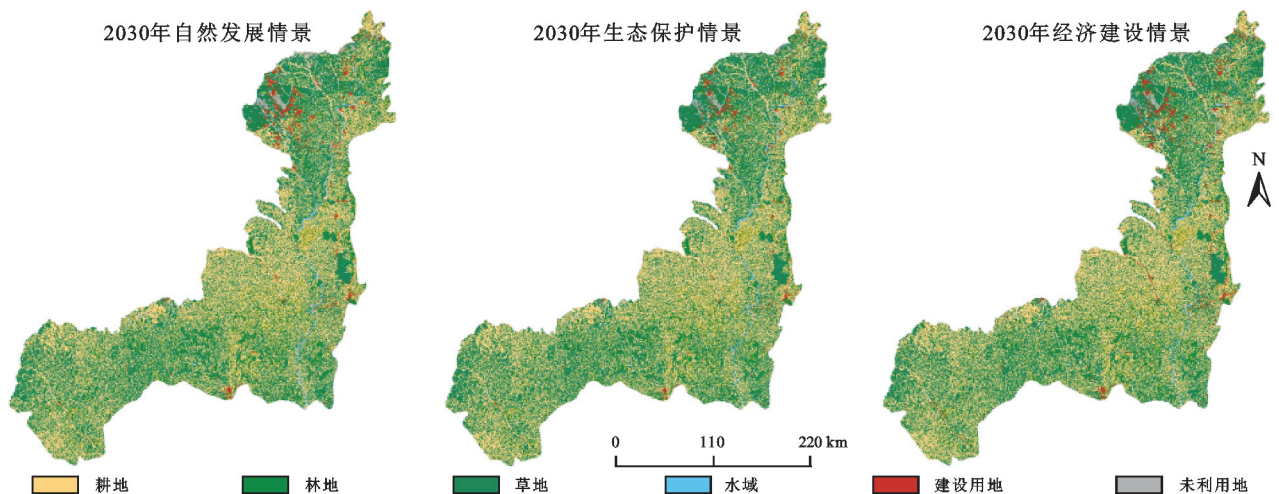


图 4 3 种情景下黄河中游多沙粗沙区土地利用模拟空间分布
Fig. 4 Spatial distribution map of land use simulation in the sandy and coarse region of the middle reaches of the Yellow River under three scenarios

3 种情景下各类土地利用面积变化特征见表 7。自然发展情景下,与 2020 年相比,耕地、林地和草地

面积呈下降趋势,水域、建设用地和未利用地的面积呈上升趋势,该变化特征与基准期土地利用变化趋势

相同。其中,耕地作为转出面积最大的地类,共转出 381.71 km²,主要转入草地和建设用地,分别占耕地转出面积的 96.6%和 2.5%;扩张最为明显的建设用地,共增加面积 473.77 km²,其主要转入来源为草地、未利用地、耕地和水域,分别占转入面积的 83.8%,5.4%,4.8%和 4.6%,这说明在未受政策影响的发展条件下,受到经济发展和人为活动的影响,建设用地会在一定程度上侵占其他用地类型,对环境保护和生态安全形成一定威胁。

生态保护情景下,与 2020 年相比,林地、草地和水域面积均呈上升趋势,耕地、建设用地及未利用地面积呈下降趋势,耕地的下降幅度与自然发展情景相

比有所缓和,建设用地的扩张幅度明显缩小。其中,建设用地主要转入草地和林地,分别占其转出面积的 97.8%和 2.2%,该情景限制了研究区建设用地对生态用地的侵占,起到了保护生态的作用。

经济建设情景下,与 2020 年相比,除建设用地之外,其他用地类型面积均呈下降趋势。建设用地增加 669.85 km²,耕地、水域和草地分别占其转入面积的 82.4%,5.3%和 4.9%,表明在该情景下,以经济发展为重心,建设用地快速增长,对其他用地侵占作用显著,对区域环境安全及生态稳定有较大影响。此外,作为区域第一产业代表用地,耕地较自然发展情景下增加 363.58 km²。

表 7 黄河中游多沙粗沙区 2020 年与 2030 年不同情景下土地利用类型面积对比
Table 7 Comparison of land use type area between 2020 and different scenarios of 2030
in the sandy and coarse region of the middle reaches of the Yellow River

		km ²					
年份	情景	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2020 年		29277.48	5931.46	40419.41	792.60	1371.30	785.93
	自然发展	28895.77	5889.44	40159.07	833.67	1845.07	955.15
2030 年	生态保护	28932.64	5993.26	40777.11	833.92	1330.40	710.83
	经济建设	29259.34	5864.86	40034.51	684.88	2041.15	693.43
2020—2030 年 变化量	自然发展	−381.71	−42.02	−260.34	41.07	473.77	169.22
	生态保护	−344.83	61.80	357.70	41.32	−40.90	−75.10
	经济建设	−18.13	−66.60	−384.90	−107.71	669.85	−92.49

2.4.3 多情景模拟下土地利用空间转移特征 通过将 PLUS 模型模拟得到的 3 种发展情景下土地利用图层与 2020 年土地利用进行叠加,得到 3 种情景下

不同地类的转入转出情况(图 5),从而可以在空间尺度上更加直观地表征不同发展情景下各地类空间转移情况。

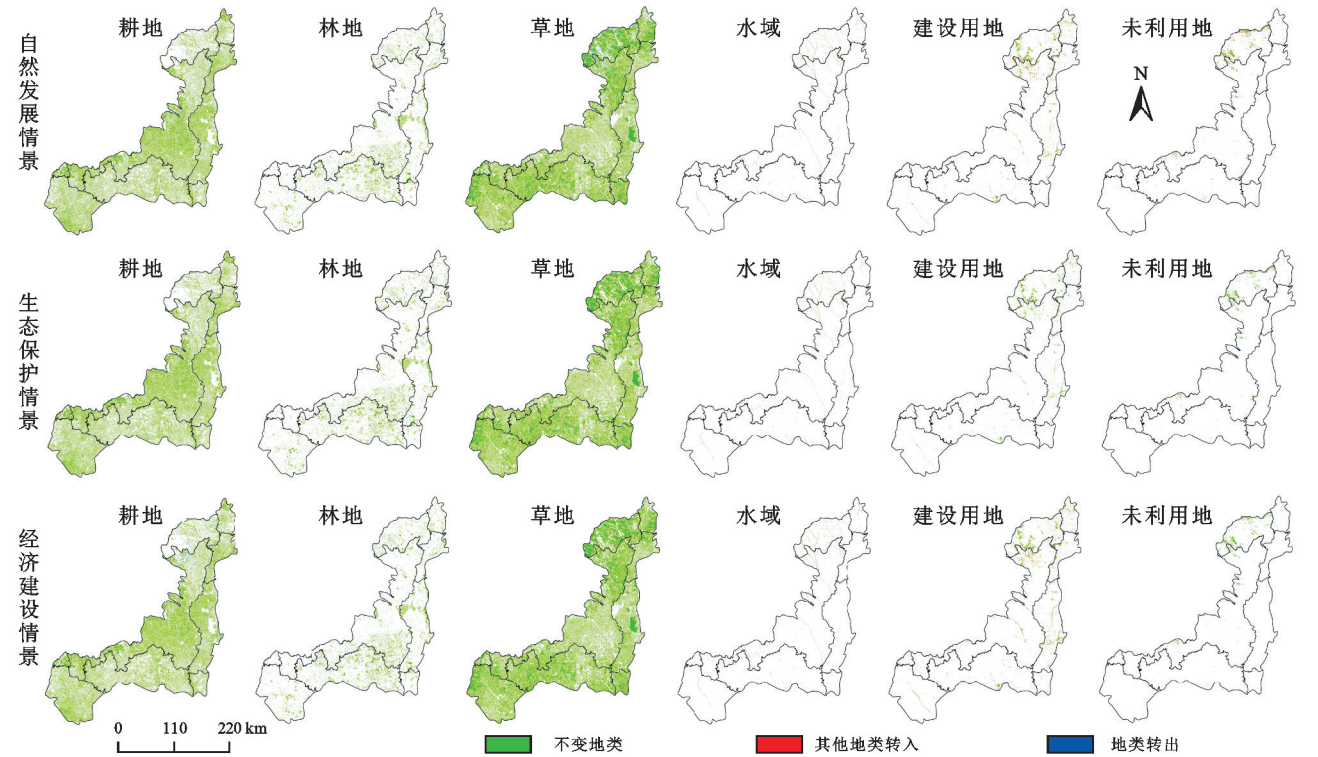


图 5 2020—2030 年黄河中游多沙粗沙区不同情景地类转移空间变化
Fig. 5 Spatial changes of land use transfer in different scenarios in the sandy and coarse region of the middle reaches of the Yellow River from 2020 to 2030

由图可知,自然发展和生态保护两种情景下,耕地的转入转出情况在研究区各省市内较为均匀,体现为在原有耕地的基础上呈散点式变化,经济建设情景下,耕地以各地政府驻地为中心呈外延式转出,同时在榆林市北部及鄂尔多斯市市内转出较为集中,主要转入建设用地;林地在自然发展和经济建设两种情景下均无明显转入,转出情况较为均匀,在生态保护情景下,由于限制了林地向其他用地类型转化,并提高了其他地类向林地转移的概率,林地转入明显增加,且在榆林、吕梁等城市内均有不同程度的集中性转入;自然发展情景下,草地的转出呈团块状分布,变化剧烈区域集中在研究区北部边缘以及鄂尔多斯市与榆林市接壤部分,主要向建设用地转入;水域变化较小,主要体现为在原有水域的基础上一定程度的扩张或收缩;自然发展情景下,建设用地主要表现为扩张态势,集中分布在鄂尔多斯市与榆林市接壤地区,以侵占生态用地(林地、草地)为主;经济建设情景下,建设用地扩张程度明显增加,对全区域其他各地类都有不同程度的侵占,同时以各地县政府驻地为中心呈外延式扩张;生态保护情景下,建设用地对生态用地的侵占大幅降低,在全区域各城市内呈散点式缩减,且在呼和浩特市和忻州市市内较为密集;未利用地的变化主要集中在研究区北部边缘,在自然发展和生态保护两种情景下分别以转入和转出为主,主要表现为与草地的相互转化。

3 讨论

3.1 土地利用类型转移分析

黄河中游多沙粗沙区土地利用类型以耕地、林地和草地为主,2000—2020 年土地利用转移变化也集中在此 3 种地类以及建设用地上。其中,耕地面积持续减少,主要转向林地和草地,这是由于 1999 年起该区域实行退耕还林还草政策,使大量耕地转化为林地和草地^[8]。然而,随着经济发展需求提升及人口数量不断增加,区域建设用地面积激增,部分林地和草地向耕地及建设用地转化,面积有所下降,这与安文举等^[21]在陕北多沙粗沙区所得到的结论相近。与林地和草地的变化趋势相反,未利用地的面积变化呈现先减少后上升的趋势,这可能是由于一部分未利用地在荒地开垦、植树种草和用地开发的过程中,转化为其他用地类型。此外,“三北”防护林等生态防护工程所建设的林带、林网等措施,都对该区域的沙漠化防治起到了明显作用^[10]。但同时,随着区域建设活动不断进行,矿物开采、道路建设以及城镇发展等人为活动又促进了区域的土地沙化,一部分的耕地撂荒也导

致其重新转化为未利用地。

3.2 驱动因素对土地利用变化的影响

研究使用 PLUS 模型分析了 2000—2020 年人口、GDP、年平均温度、年平均降水等 11 类驱动因素对于黄河中游多沙粗沙区土地利用变化的贡献度。研究发现,耕地、林地和草地的扩张受 GDP 的影响较高,在 GDP 的低值区相对集中,这可能是由于在经济快速发展的地区,城镇化和工业化往往会导致较为激烈的人为扰动并消耗大量自然资源,不利于农业和生态用地的扩张^[22]。此外,耕地和林地的扩张在年平均降水量高的区域相对集中,体现出自然条件对于植物生长的影响^[23];水域面积的增加主要受到高程和距水域距离的影响,这主要与水域扩张常常发生在低海拔地区,同时与该地类自身分布位置有关,表明水域的扩张主要在已有水域的条件上进行,这与牛统莉等^[19]在长江流域所得到的结论相近;建设用地的扩张受距县政府距离、GDP 以及距铁路距离的影响较大,这说明经济、交通以及与中心城镇的距离等社会经济因素,是影响其变化的主要驱动力。建设用地通常在与政府和铁路距离较近的区域发生扩张,说明城镇中心的快速发展与交通的便利性,都会促进其他地类向建设用地转化^[19,24]。

3.3 多情景土地利用模拟结果与分析

使用 PLUS 模型模拟得到的不同情景土地利用格局表现了不同目标导向下的土地利用变化趋势。在自然发展情景下,区域土地利用变化导向为延续基准期发展趋势,体现为城镇化程度与社会经济不断发展,建设用地面积稳步扩张,持续对区域农业用地(耕地)和生态用地(林地、草地)造成侵占;经济建设情景下,区域发展目标主要为推进城市建设及社会经济发展,体现为促进了中国“能源金三角”的核心区域——晋陕蒙三省接壤地区以及各政府驻地附近的建设用地扩张,但对其他用地的侵占作用较自然发展情景也更为严重,在提升发展的同时对该区域生态环境破坏较大,此外,考虑到经济发展情景下人口数量的提升以及第一类产业对于区域经济发展的重要性,在该情景设置中将耕地考虑为研究区第一类产业代表用地,耕地面积较自然发展情景下有所提升,表明该情景的设置对于耕地有一定的保护作用;生态保护情景下,区域发展目标主要为在限制建设用地大幅扩张的同时加强生态建设力度,提升区域生态质量。从模拟结果可以看出,只有该情景下的区域生态用地(林地、草地)面积由缩减变为扩张,同时有效控制了建设用地的扩张态势。由于黄河中游多沙粗沙区为我国典型生态脆弱区,提升该区域生态质量,控制水土流失,保

障黄河区域生态安全应为该区域首要发展目标^[20]。因此在该目标导向下,生态保护情景下的土地利用变化模拟对于黄河中游多沙粗沙区的土地利用格局综合规划应具有重要意义。

4 结论

(1) 黄河中游多沙粗沙区土地利用类型以草地、耕地和林地为主,3种地类占比超过96%;2000—2020年研究区土地利用变化总体趋势为:耕地持续减少;林地和草地先增加后减少;水域和未利用地先减少后增加;建设用地持续增加。转出土地主要来源于耕地、草地和林地,转入地类主要为草地、林地、耕地和建设用地。20年间建设用地单一土地利用动态度最高,为13.18%。

(2) PLUS模型对2000—2020年黄河中游多沙粗沙区各类用地扩张驱动力分析效果较好。建设用地的扩张受距县政府距离、GDP和距铁路距离等社会经济因子影响为主;耕地、林地和草地面积的扩张主要受GDP的影响;高程对水域面积的扩张贡献度最高;未利用地扩张的主导因素为年平均降水。

(3) 2030年黄河中游多沙粗沙区土地利用模拟在自然发展、生态保护和经济建设3种情景下存在不同程度的差异。与2020年相比,自然发展情景下,耕地、林地和草地面积呈下降趋势,水域、建设用地和未利用地的面积呈上升趋势,建设用地扩张最为显著;经济建设情景下,建设用地大幅增加,涨幅48.8%,其他地类面积均有不同程度的缩减;生态保护情景下,林地、草地和水域面积明显上升,区域生态用地得到有效保护,建设用地由扩张转为缩减态势,向草地等生态用地转入增多。

参考文献(References):

- [1] 刘纪远,宁佳,匡文慧,等.2010—2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J].地理学报,2018,73(5):789-802.
- [2] 何春阳,史培军,李景刚,等.中国北方未来土地利用变化情景模拟[J].地理学报,2004,59(4):599-607.
- [3] 陶伟,刘译泽,孙清,等.基于 GeoSOS 模型的金华市土地利用变化动态模拟[J/OL].浙江师范大学学报:自然科学版,2024,47:1-8. <https://doi.org/10.16218/j.issn.1001-5051.2024.020>.
- [4] 李媛洁,叶长盛,黄小兰.基于 CLUE-S 模型的南昌市“三生”空间时空演变及情景模拟研究[J].水土保持研究,2021,28(5):325-332.
- [5] Zhang Y, Yu P H, Tian Y S, et al. Exploring the impact of integrated spatial function zones on land use dynamics and ecosystem services tradeoffs based on a future land use simulation (FLUS) model[J]. Ecological Indicators, 2023,150:110246.
- [6] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021,85:101569.
- [7] 高素娟,王占礼,黄明斌,等.黄河中游多沙粗沙区坡面薄层水流水动力学特性[J].水土保持通报,2010,30(4):11-16.
- [8] 李滚,梁伟,杨勤科.黄河中游多沙粗沙区土地利用格局变化分析[J].中国水土保持科学,2009,7(3):52-58.
- [9] 赵米金,杨勤科,梁伟.黄河中游多沙粗沙区土地利用与覆盖变化分析[J].水土保持通报,2005,25(3):41-43,48.
- [10] 梁伟,杨勤科.基于 RS 的黄河中游多沙粗沙区土地利用变化分析[J].水土保持研究,2006,13(5):90-92.

- [11] 徐建华, 吕光圻, 甘枝茂. 黄河中游多沙粗沙区区域界定[J]. 中国水利, 2000(12): 37-38, 4.
Xu J H, Lu G X, Gan Z M. Definition of coarse silt and silty area in the middle reach of the Yellow River [J]. China Water Resources, 2000(12): 37-38, 4.
- [12] 李素雅, 马红斌, 李红星, 等. 黄河中游多沙粗沙区基础边界数据集[J]. 中国科学数据, 2021, 6(3): 151-157.
Li S Y, Ma H B, Li H X, et al. The boundary dataset of high and coarse sediment yield in the middle reaches of the Yellow River[J]. China Scientific Data, 2021, 6(3): 151-157.
- [13] 肖红克, 李洪忠, 王莉, 等. 粤港澳大湾区土地利用及生态系统服务价值的变化: 以广佛肇为例[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 290-297.
Xiao H K, Li H Z, Wang L, et al. Changes of land use and ecosystem service value in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area: A case study of Guangzhou-Foshan-Zhaoqing[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 290-297.
- [14] 王亚欣. 2003—2015 年哈尔滨市道里区土地利用变化分析[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2021, 37(1): 75-80.
Wang Y X. Analysis of land use change in Daoli district, Harbin City from 2003 to 2015[J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2021, 37(1): 75-80.
- [15] 陈竹安, 刘子强, 张立亭, 等. 南昌市 LUCC 多情景模拟和生境质量时空演变与预测[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 170-180.
Chen Z A, Liu Z Q, Zhang L T, et al. Multi-scenario simulation of LUCC and spatio-temporal evolution and prediction of habitat quality in Nanchang City [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 170-180.
- [16] 杨朔, 苏昊, 赵国平. 基于 PLUS 模型的城市生态系统服务价值多情景模拟: 以汉中市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(10): 86-95.
Yang S, Su H, Zhao G P. Multi-scenario simulation of urban ecosystem service value based on PLUS model: A case study of Hanzhong City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(10): 86-95.
- [17] 李琛, 高彬斌, 吴映梅, 等. 基于 PLUS 模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(1): 84-94.
Li C, Gao B P, Wu Y M, et al. Dynamic simulation of landscape ecological risk in mountain towns based on PLUS model[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(1): 84-94.
- [18] 谢向东, 林孝松, 王莹, 等. 基于 PLUS 模型的重庆市南川区土地利用多情景模拟[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(6): 86-92, 113.
Xie X D, Lin X S, Wang Y, et al. Multi-scenario simulation of land use in Nanchuan district of Chongqing based on PLUS model[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(6): 86-92, 113.
- [19] 牛统莉, 熊立华, 陈杰, 等. 基于 PLUS 模型的长江流域土地利用变化模拟与多情景预测[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2024, 57(2): 129-141, 151.
Niu T L, Xiong L H, Chen J, et al. Land use simulation and multi-scenario prediction of the Yangtze River Basin based on PLUS model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(2): 129-141, 151.
- [20] 王敏, 刘志刚, 张攀, 等. 黄河中游多沙粗沙区水土流失治理面临的关键问题与发展对策[J]. 中国水利, 2023(10): 42-45.
Wang M, Liu Z G, Zhang P, et al. Key issues and development strategies of soil and water loss control in the abundant and coarse sediment area of the middle Yellow River[J]. China Water Resources, 2023(10): 42-45.
- [21] 安文举, 鱼亦凡, 郝姗姗, 等. 基于土地利用变化的陕北多沙粗沙区生境质量演变及响应分析[J]. 干旱区地理, 2024, 47(3): 474-484.
An W J, Yu Y F, Hao S S, et al. Evolution and response analysis of habitat quality in more sediments and coarse sediments region of northern Shaanxi based on land use change[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(3): 474-484.
- [22] 陈俊梁, 史欢欢, 林影, 等. 城镇化对经济增长影响的路径分析: 基于长三角城市群的研究[J]. 经济问题, 2022(4): 49-57.
Chen J L, Shi H H, Lin Y, et al. Path analysis of the impact of urbanization on economy growth: Based on the study of Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. On Economic Problems, 2022(4): 49-57.
- [23] Li W J, Wang N, Liang C, et al. Regional peculiarities in the importance of precipitation and temperature on mid-to-late Holocene arboreal degradation on the eastern Tibetan Plateau[J]. Global and Planetary Change, 2023, 229: 104252.
- [24] Tian L, Tao Y, Fu W X, et al. Dynamic simulation of land use/cover change and assessment of forest ecosystem carbon storage under climate change scenarios in Guangdong Province, China [J]. Remote Sensing, 2022, 14(10): 2330.