

基于 NSGA-Ⅱ 和 GeoSOS-FLUS 的喀什地区 土地利用空间多目标优化

王娇娇^{1,2}, 尹小君^{1,2}, 苟贞珍^{1,2}, 刘陕南¹, 王帝盟^{1,2}

(1.石河子大学 信息科学与技术学院, 新疆 石河子 832000; 2.石河子大学 兵团空间信息工程实验室, 新疆 石河子 832000)

摘要: [目的] 对喀什地区进行土地资源的空间优化, 为该区社会和经济的可持续发展提供理论支持。[方法] 设置了粮食安全、经济效益和生态效益(固碳量、产水量和土壤侵蚀)作为算法的多目标函数, 通过 NSGA-Ⅱ 算法能够得到较为科学的土地利用数量结构优化, 再通过 GeoSOS-FLUS 模型根据数量结构优化结果、自然条件和经济因素模拟土地利用空间优化。最后, 通过 Fragstats 4 软件对优化结果进行景观格局分析。[结果] ①在 3 种优化结果下, GDP、固碳量、粮食产量都比未优化前多, 土壤侵蚀有所降低。产水量只有在生态效益优先情况下提高了。②2005—2020 年, 耕地、建设用地都有不同程度的增加, 水域、林地和未利用地都有不同程度的减少。③通过 Fragstats 4 对 2020 年土地利用数据、经济优先、生态优先和生态经济协调发展下优化结果进行分析。相对于优化前, 3 种优化结果下的香浓多样性和散布与并列指数都有所提高, 斑块凝聚度和景观多样性也提高了。[结论] 6 种土地利用类型在景观中呈均衡化趋势分布, 草地过渡型的土地利用类型有所提高。优化后的土地资源能够较好地满足喀什地区生态可持续发展, 其布局更加合理, 为该区未来的土地资源的配置提供辅助决策服务。

关键词: NSGA-Ⅱ; 固碳量; 产水量; 土壤侵蚀; GeoSOS-FLUS; 多目标优化

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)04-0179-09

中图分类号: TP79, F205, F301.2

文献参数: 王娇娇, 尹小君, 苟贞珍, 等. 基于 NSGA-Ⅱ 和 GeoSOS-FLUS 的喀什地区土地利用空间多目标优化[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 179-187. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.023; Wang Jiaojiao, Yin Xiaojun, Gou Zhenzhen, et al. Spatial multi-objective optimization of land use of Kashgar area based on NSGA-Ⅱ and GeoSOS-FLUS [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 179-187.

Spatial Multi-objective Optimization of Land Use of Kashgar Area Based on NSGA-Ⅱ and GeoSOS-FLUS

Wang Jiaojiao^{1,2}, Yin Xiaojun^{1,2}, Gou Zhenzhen^{1,2}, Liu Shannan¹, Wang Dimeng^{1,2}

(1. College of Information Science and Technology, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

2. Corps Geospatial Information Engineering Laboratory, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: [Objective] The spatial optimization of land resources in the Kashgar area was studied to provide theoretical support for sustainable development of the society and economy of the area. [Methods] Food security, economic benefits, and ecological benefits (carbon sequestration, water production, and soil erosion) were set as the multi-objective functions of the algorithm, and the NSGA-Ⅱ algorithm was used to obtain a reasonable optimization of the land use quantity structure. Then the GeoSOS-FLUS model was used to simulate the spatial optimization of land use according to the optimization results of quantitative structure, natural conditions and economic factors. Finally, the spatial optimization of the Kashgar area was analyzed using Fragstats 4 software for landscape pattern analysis. [Results] ① GDP, carbon sequestration, and grain production were all higher under the three optimization strategies than before optimization, and soil erosion was reduced. Water production was only increased when ecological benefits were prioritized. ② From 2005 to 2020, arable land and construction land increased to different degrees. Watershed, forest land, and unused land decreased to different degrees. ③ The optimization results for land use pattern under the economic

收稿日期: 2021-12-25

修回日期: 2022-03-02

资助项目: 国家重点研发计划项目“国土资源与生态环境安全监测系统”子课题“国土资源与生态环境要素变化监测技术”(2017YFB0504203); 石河子大学国际合作项目(GJHZ201905); 兵团社科项目(20YB23)

第一作者: 王娇娇(1996—), 女(汉族), 河南省周口市人, 硕士研究生, 研究方向为生态遥感。Email: junshzu@foxmail.com。

通讯作者: 尹小君(1977—), 女(汉族), 四川省射洪市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事资源环境遥感研究。Email: yinxiaojun2018@163.com。

priority, the ecological priority, and ecological-economic coordinated development, and land use data in 2020 were analyzed by Fragstats 4. Compared with the results obtained prior to optimization, Shannon diversity and dispersion and juxtaposition indices increased under all three optimization strategies, and patch cohesion and habitat diversity also increased. [Conclusion] The six land use types were distributed in the landscape in a balanced manner, and the land use type of grassland transition was increased. The optimized land resources can better meet the ecological sustainable development goals, and their layout was more reasonable, providing auxiliary decision-making services for the future allocation of land resources in Kashgar area.

Keywords: NSGA-II; carbon sequestration; water production; soil erosion; GeoSOS-FLUS; multi-objective optimization; Kashgar area

土地资源是一个地区的重要资源配置,需要满足社会经济的可持续发展,也要符合当地的自然、经济以及社会状况。过度的开发导致生态系统退化,引起环境污染、绿化减少,水土流失和生物多样性降低等问题,导致生态系统脆弱区域面积增多^[1],继而影响经济发展。生态安全和优化日益重要,土地利用变化对生态气候有重要影响^[2-3],优化土地利用空间对实现可持续发展至关重要^[4-5]。土地利用优化需考虑国家政策、生态效益、经济效益等因素,很难得到合理的解决方案。国内外的学者针对土地利用优化的研究主要是土地利用数量结构和空间格局优化。林伊琳^[6]、谢一茹^[7]和刘欣等^[8]采用 Markov 模型、线性规划、灰色预测模型等方法进行土地利用数量结构变化预测。Pan Tingting 等^[9]利用约束多目标遗传算法优化土地利用。向乔妹将遥感(remote sensing, RS)与地理信息系统(geographic information system, GIS)技术和多目标遗传算法相结合,进行土地利用空间优化^[10]。宋戈等^[11]通过改进多智能体粒子群构建空间优化模型。吴丹等^[12-13]将元胞自动机和超级学习相结合进行空间优化。Suppakitpaisarn Vorapong^[14]采用半正定规划和梯度下降算法,结合泰森多边形对土地进行土地利用空间优化。Wu 等^[15]将线性优化模型与 CLUE-S 模型相结合优化和模拟土地利用。杨璐等^[16]利用遗传算法对土地利用数量结构进行优化,再使用 FLUS 模型进行空间优化。综上所述,土地利用空间优化选择多目标算法^[17-21]和算法模型相结合^[16]的方法。但是仅采用算法或模型进行土地利用空间优化,难以考虑到实际的土地适宜性,优化后的结果并不一定符合实际需求。为此,本文以多目标优化土地利用数量结构和多目标计算土地利用适宜性为切入点,选用算法模型相结合的方法进行土地利用多目标空间优化。利用带精英策略的快速非支配排序遗传算法(non dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)进行数量结构优化,可以得到土地利用数量结构优化结果;然后根据自然因素和社会因素,通过 GeoSOS-FLUS 模型的基于人工神经网络算法(artificial neural networks,

ANN)计算出喀什地区的土地适宜性概率,再根据土地利用数量结构优化结果和土地适宜性概率等数据,利用 GeoSOS-FLUS 模型中的基于自适应惯性机制的元胞自动机(cellular automata, CA)模块进行土地利用空间优化模拟;最后,通过 Fragstats 4 软件进行景观格局评估。采用“算法+模型+评估”的方法能更加科学合理地优化土地利用空间。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

喀什地区(东经 71.39'—79.52',北纬 35.28'—40.16')位于欧亚大陆中部,属于绿洲生态区,总面积达 $1.62 \times 10^5 \text{ km}^2$,土地利用类型主要为未利用地,分布较广。其次是草地和耕地,分别位于西部和东部地区。水域和林地占地面积较少。喀什地区四周环绕着天山南脉、帕米尔高原、喀喇昆仑山和塔克拉玛干大沙漠等,地势从西南向东北倾斜,海拔高度差异大。喀什独特的地理环境,形成了暖温带大陆性干旱气候,降水量少、蒸发量大。该地区是典型的水资源短缺地区,且水资源分布不均。喀什地区土地荒漠化严重,位于荒漠化防治生态核心位置,是典型的生态脆弱区之一,也是盐渍化敏感区^[22],自我修复能力较弱。

1.2 数据来源

本文所使用的数据主要是生态自然条件和社会经济要素。生态自然条件数据主要包括 2000—2020 年每隔 5 a 的土地利用遥感影像数据、2020 年气象数据、DEM 数据、NDVI 数据、中国土壤质地空间分布图、中国土壤侵蚀空间分布数据、2010 年中国农田生产潜力数据集和中国流域、河网数据集和参考文献^[23-25]研究成果。社会经济要素包括 2015 年中国人口空间分布公里网格数据集、2000 年中国 GDP 空间分布公里网格数据集。其中气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),其他数据均来自中国资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。在 ArcMap 软件中针对获取的数据进行投影、转换,然

2 研究方法

2.1 基于 NSGA-II 和 GeoSOS-FLUS 的多目标优化模型

本文基于 RS 和 GIS 技术,采用 NSGA-II 算法和 GeoSOS-FLUS 模型相结合的方法,实现喀什土地利用空间优化。将固碳量、产水量和土壤侵蚀作为土地利用数量结构优化的生态方面的目标函数,根据 GDP 得出经济效益的权重,以及粮食产量作为粮食安全的目标函数,实现喀什地区土地利用数量结构优化。然后,根据喀什的自然因素和社会因素,使用 GeoSOS-FLUS 模型进行土地利用空间优化。最后,利用 Fragstats 4 景观分析软件对空间优化结果进行评估反馈。

2.1.1 NSGA-II 优化土地利用数量结构 传统的解决多目标优化问题是通过加权将多目标问题转化为单目标问题来处理,但是权重难以客观科学地选取。遗传算法(genetic algorithm, GA)在解决复杂的多目标优化问题具有就一定的优越性,但是容易陷入局部最优,并且算法的收敛速度有一定的限制。因此选用 NSGA-II 解决多目标优化问题,保持解的多样性,具有较强的全局寻优能力,提高算法的鲁棒性,避免算法陷入局部最优。算法总框架如图 2 所示,其步骤简略概述为:①将 2020 年土地利用遥感影像转为二维矩阵,将数据输入 Matlab 中生成初始种群。②利用 Matlab 计算出关于 3 种目标函数的适宜度值。进行快速非支配排序和拥挤度计算,然后通过竞标赛选择适合繁殖的父代,交叉(简单单点、多点交叉)和变异(多项式变异)获得子代种群。③对子代和父代进行快速非支配排序和拥挤度计算,选择前 $N=60$ 个解,判断是否达到迭代次数。④未达到迭代次数,转到第 2 步。⑤达到收敛条件,从 Pareto 解集中选择最适合的个体,成为土地利用数量结构优化的解决方案。

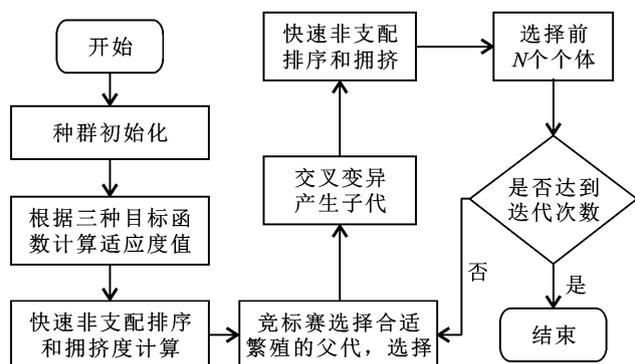


图 2 NSGA-II 优化土地利用数量流程图

排序方式采用快速非支配排序和拥挤算子比较。选择策略采用竞标赛选择和精英保留策略^[26]。将父代保留,与子代一起进行快速非支配排序和拥挤算子比较,能够提高基因的多样性,加快算法的收敛速度^[27]。

2.1.2 NSGA-II 的目标函数

(1) 粮食安全。喀什地区耕地保有量为 $8.00 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占新疆地区耕地保有量的 19%,因此确保喀什耕地保有量,对粮食安全十分重要。根据《国家统计局关于 2020 年粮食产量数据的公告》,新疆单位面积产量为 $7\ 100 \text{ kg/hm}^2$,即 $7.10 \times 10^5 \text{ kg/km}^2$ 。根据喀什地区 2010—2020 年(2005, 2010, 2015 和 2020 年)年土地利用数据和《全国国土规划纲要(2016—2030 年)》,保持耕地保有量。

(2) 经济效益。不同土地利用类型产生的经济效益不同,根据新疆农林牧渔业的产值,归一化得到每个土地利用类型的一个栅格所产生的 GDP,然后归一化求权重。土地利用的经济效益(V_i)计算公式为:

$$V_i = \sum_{i=1}^6 \omega s_i \cdot A_i \quad (i=1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (1)$$

式中: ωs_i 为第 i 类土地利用类型单位面积(km^2)所产生的 GDP 效益; A_i 为第 i 类土地利用类型的面积。

(3) 生态效益。生态效益包括固碳量、产水量、土壤侵蚀,分别通过 InVEST 模型的 Carbon, Water Yield 和 SDR 模块,结合土地利用数据、气象数据、DEM 等驱动因素进行计算,得出各个土地利用类型的产水量、固碳量和土壤侵蚀(表 2)。

①产水量权重。根据 InVEST 模型所得出的每种土地利用类型的产水量,进行归一化可以得出不同土地利用类型的产水能力,产水量 Y 计算公式为:

$$Y = (1 - \frac{1 + \omega R}{1 + \omega R + 1/R}) P \quad (2)$$

式中: Y 为每年的产水量; ω 为植物每年需水量与每年的降水量的比; R 为干燥指数,即每年的潜在蒸发量和降水量的比; P 为每年的降水量。

$$R = \frac{k \times \text{AWC}}{P} \quad (3)$$

式中: k 为作物系数,是作物的蒸散量和潜在蒸散量的比;AWC 为植物有效的可利用水。

$$\omega = Z \frac{\text{AWC}}{P} \quad (4)$$

式中: Z 为 Zhang 系数,结合喀什地区的文献^[23],经过分析验证,当 Z 为 1.25 时,得出的产水量误差最小。

$$\begin{aligned} \text{AWC} = & 54.509 - 0.132 \times \text{SAN} - 0.03 \times \text{SAN}^2 - \\ & 0.055 \times \text{SIL} - 0.006 \times \text{SIL}^2 - 0.738 \times \text{CLA} + \\ & 0.007 \times \text{CLA}^2 + 2.668 \times C + 0.501 \times C^2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中:SAN 为土壤砂砾量;SIL 为土壤粉粒量;CLA 为土壤黏粒量;C 为土壤有机质含量。

表 2 不同土地利用类型生态效益权重

土地利用类型	固碳量权重	产水量权重	土壤侵蚀权重
耕地	0.139 4	0.018 99	-0.044 6
林地	0.230 7	0.005 920	-0.026 8
草地	0.179 6	0.091 28	-0.035 7
水域	0.163 9	0.883 8	0.000 0
建设用地	0.147 5	0.000 0	0.000 0
未利用地	0.138 8	0.000 0	-0.892 9

②固碳量权重。根据喀什不同土地利用类型固碳量,进行归一化可以得到不同土地利用类型的储水能力。固碳量(C)计算公式为:

$$C = \sum_{i=1}^6 C_i = \sum_{i=1}^6 A_i \times (C_{i_above} + C_{i_below} + C_{i_dead} + C_{i_soil}) \quad (6)$$

式中: C_i 为第 i 类土地利用类型的固碳量; A_i 为第 i 类土地利用类型的面积; C_{i_above} , C_{i_below} , C_{i_dead} , C_{i_soil} 为第 i 类土地利用类型的地上碳储量、地下碳储量、枯枝落叶的碳储量以及土壤碳储量。根据碳含量研究的文献^[25,28],选取干旱半干旱地区碳含量作为参数。

③土壤侵蚀权重。采用 InVEST 模型中的泥沙输移比(SDR)模块计算土壤侵蚀量(USLE)。计算公式为:

$$USLE = R \times K \times LS \times C \times P \quad (7)$$

式中; R 为降雨的侵蚀性因子(采用 Wischmeier 的月尺度进行计算); K 为土壤的可蚀性因子(采用选用侵蚀-生产力评价模型进行计算); LS 为坡度的坡长因子(采用 InVEST 模型进行计算); C 为植被覆盖因子(采用蔡崇法学者的 C 因子计算); P 为水土保持的措施因子(水土保持实施前后的土壤侵蚀之比)。

2.2 基于 GeoSOS-FLUS 的土地利用空间优化模拟

GeoSOS-FLUS 模型采用 ANN 计算土地利用适宜性概率,再利用改进的 CA 模拟驱动因子影响下的土地利用情景。

ANN 对多目标非线性问题有较强的处理能力,能够通过多次学习迭代将目标和输入的数据进行拟合。神经网络包括三层:输入层、隐藏层和输出层,该模型算法原理^[29]为:

$$\text{pr}(p, i, t) = \sum_j \omega_{j,s} \times \text{sigmoid}[\text{net}_j(i, t)] = \sum_j \omega_{j,s} \times \frac{1}{1 + e^{-\text{net}_j(i, t)}} \quad (8)$$

式中: $\text{pr}(p, i, t)$ 表示训练时间为 t 时,网格 p 上为第 i 类土地利用类型的发生概率; $\omega_{j,s}$ 是隐藏层和输出层之间的自适应权重; (i, t) 表示在栅格为 i 时并且时间为 t 时,隐藏层神经元 j 接到的数据; $\text{sigmoid}[\text{net}_j(i, t)]$ 为隐藏层到输出层的激励函数。

基于自适应惯性机制的 CA,在多类型土地利用栅格数据的基础上,通过土地利用适宜性概率、各土地利用类型数量、转换成本矩阵和邻域因子参数,模拟土地利用情景。自适应惯性系数公式为:

$$\text{Inertia}_i^t = \begin{cases} \text{Inertia}_i^{t-1} & (|D_i^{t-2}| < |D_i^{t-1}|) \\ \text{Inertia}_i^{t-1} \times \frac{D_i^{t-2}}{D_i^{t-1}} & (D_i^{t-1} < D_i^{t-2} < 0) \\ \text{Inertia}_i^{t-1} \times \frac{D_i^{t-1}}{D_i^{t-2}} & (0 < D_i^{t-2} < D_i^{t-1}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: D_i^{t-1} , D_i^{t-2} 分别表示在 $t-1, t-2$ 时第 i 类土地利用类型的需求和分配数量之差。

转换成本矩阵除了建设用地不能转换为其他土地利用类型之外,其他均可以转换。邻域因子则按照文献^[29]中干旱和半干旱地区取值。

3 结果与分析

3.1 土地利用数量结构优化分析

NSGA-II 算法得出的解,在确保耕地保有量的情况下,生态效益优先选择的是生态效益最大的解,经济效益优先选择的是经济效益最大的解,将粮食安全、经济效益和生态效益分别归一化后相加,值最大的解作为经济生态协调发展的数量结构优化结果。根据数量结构优化的结果(表 3),可以得出优化后的 GDP、固碳量、产水量、土壤侵蚀能力和粮食产量等。如表 4 所示,在 3 种优化结果下,经济优先情况下, GDP 增加最多,提高了 8.8%,粮食产量增长最少,仅增长了 11.2%;生态效益优先情况下, GDP 增长最少,为 6.4%,固碳量和产水量增加最多,分别提高了 1.3%和 0.4%,土壤侵蚀量降低最多,降低了 3.3%,产水量仅在生态效益优先的情况下提高了。经济生态协调发展情况下,粮食产量最高,提高了 11.6%。由表 4 可知,协调发展既能兼顾经济发展和生态保护,优化结果表明能够较好地满足生态持续发展的需要,能够有效地实现喀什地区的持续发展,降低土壤侵蚀的速度,缓解荒漠化的情况。

表 3 喀什地区土地利用数量结构

目标函数	面积比列					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
经济效益优先	0.134 943 817	0.009 569 924	0.296 500 969	0.044 797 067	0.008 017 333	0.506 170 890
生态效益优先	0.136 273 218	0.009 804 528	0.293 835 259	0.044 611 046	0.007 656 196	0.507 819 753
经济生态协调发展	0.136 503081	0.009 663 074	0.292 173 175	0.043 461 732	0.007 956 786	0.510 242 152

表 4 喀什地区生态、经济与粮食安全指标优化结果比较

土地利用目标	GDP/10 ⁸ 元	固碳量/t	产水量/m ³	土壤侵蚀/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	粮食产量/ 10 ⁴ kg
经济效益优先	1 061.049	6 755 927.275	687 369.470	-59 830.210	1 092 264
生态效益优先	1 037.226	6 759 958.060	697 468.290	-59 573.410	1 094 394
经济生态协调发展	1 055.430	6 755 236.278	685 685.050	-59 840.710	1 096 240
2020 年土地利用	974.994	6 750 827.656	694 392.170	-61 617.770	982 569

3.2 土地适宜性分析

GeoSOS-FLUS 模型采用 ANN 计算土地利用适宜性概率,影响土地利用格局优化的驱动因子众多,驱动因子的选取也决定了优化结果的科学性。ANN 输入层输入因子包括:土地利用数据、驱动因子和参数。输入的驱动因子包括自然因素和社会因素,自然因素包括 NDVI,DEM,喀什地区土壤质地空间分布数据、土壤侵蚀空间分布数据、中国流域、河网集数据集、气象数据、生产潜力,社会因素为人口空间分布公里网格数据,GDP 空间分布公里网格数据。喀什地区的耕地和建设用地适宜性较高的区域主要集中于北部,虽然北部降雨量较少,但是海拔低,土层深度较高,又有来自冰山融水,适宜耕地。林地适宜性主要位于东北部,分布位置与耕地类似。林地适宜性较好的区域位于中部,可能是因为该区域土层深度较高,虽然海拔略高但是水资源较多。草地分布大量位于南部,因为南部海拔较高,土层深度较低,水资源较少,耕地和林地难以存在,适宜草地生长。由于喀什地区海拔南高北低,水域的适宜性较高的区域主要分布在喀什南部,可能是由于南部海拔较高,拥有大面积的冰川,如昆仑山冰川,被视为“固体水库”。未利用地主要位于中部和东北部,该区域一直存在大量沙漠和荒地(图 3)。

3.3 土地利用空间优化分析

根据 NSGA-II 得出土地利用数量结构优化结果、基于 ANN 得出的土地适宜性概率图、成本矩阵和邻域因子,通过基于自适应惯性机制的元胞自动机模块,可以得出 3 种情况下的土地利用空间优化(图 4)。

景观指数表明了高度浓缩的景观空间格局方面

的信息,是关于空间结构组成和空间配置特征的定量指标^[30]。根据多目标空间优化结果,通过 Fragstats 4 软件进行景观格局和生态系统服务价值进行评价^[1]。景观指数可以合理地评价该地区的土地利用空间的优劣,不同的景观指数对空间的变化反应存在一定的差异^[31],因此景观指数的选取十分重要,组成结构选择斑块数量和斑块密度,聚散性选择斑块凝聚度、散布与并列指数和分离度,多样性选择香浓多样性。根据景观指数可以更好地理解地区的发展是否合理以及及时调整或规划地区发展,增加地区生态多样性和稳定性。通过 Fragstats 4 模型对经济优先、生态优先和生态经济协调发展的优化结果下土地利用遥感影像进行分析,斑块数量和密度呈现:生态效益优先>经济生态协调发展>经济效益优先的状态,可知经济活动在一定程度上减少了空间的破碎度。斑块凝聚度反映了 6 种土地利用类型的连接程度,并且呈现:生态效益优先>经济效益优先>经济生态协调发展的状态,表明各个土地利用类型连接程度高,在一定程度上有利于生态发展。散布于并列指数对受到环境制约的生态系统反应敏感,喀什地区为干旱半干旱地区,过渡性植被受制于水资源和荒漠化的影响较大,该指数在一定程度上能表明其影响程度。散布于并列指数呈:经济生态协调发展>生态效益优先>经济效益优先,表明协调发展最能缓解过渡性植被的制约问题。3 种优化结果下的香浓多样性都有所提高,表明 6 种土地利用类型在景观中呈均衡化趋势分布。相对于优化前,斑块凝聚度和景观多样性都有所提高。3 种生态效益均是草地林地大于耕地,随着喀什退耕还林等政策的实施,未来喀什地区生态发展更加健康(表 5)。

表 5 喀什地区不同优化模式景观指数比较

土地利用目标	斑块数量	斑块密度	斑块凝聚度	分离度	散布与并列	香浓多样性
经济效益优先	2 902	0.025 7	98.216 5	11.176 7	69.342 3	1.197 0
生态效益优先	3 001	0.026 5	98.371 7	10.106 5	69.345 99	1.198 7
经济生态协调发展	2 951	0.026 5	98.213 1	11.022 8	69.562 6	1.198 7

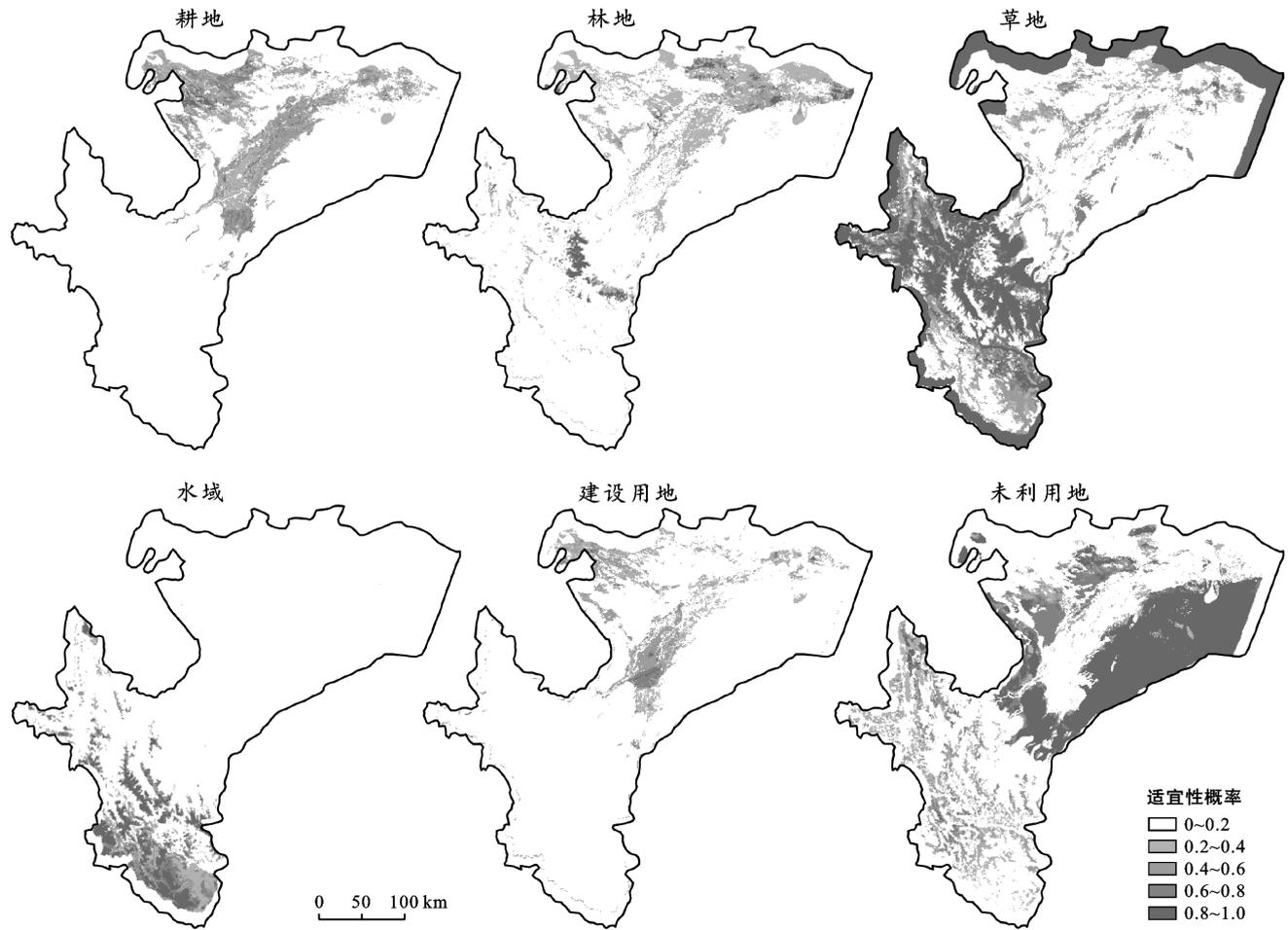


图 3 喀什地区土地适宜性概率

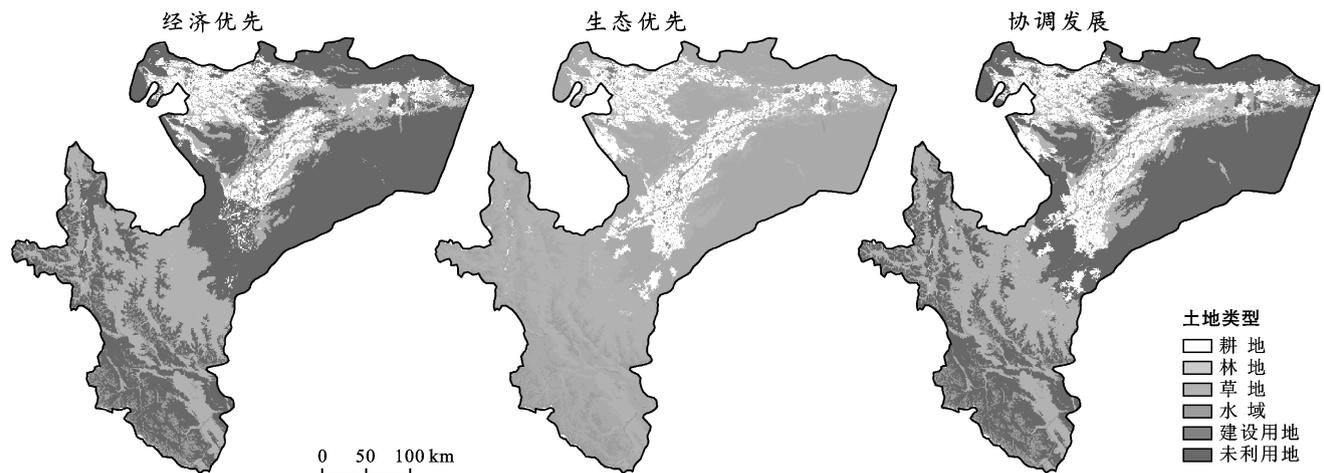


图 4 喀什地区土地利用空间优化结果

4 讨论与结论

4.1 讨论

NSGA-II 算法采用精英保留策略, 加快算法的收敛速度, 又使用快速非支配排序和拥挤算子比较策略, 提高了种群的多样性, 避免算法陷入局部最优, 采

用锦标赛选择子代, 加快算法的收敛速度。基于 Pareto 最优解的 NSGA-II 算法对多目标问题的处理有较好的表现^[32-33]。本文设置了粮食安全、经济效益和生态效益作为目标函数, 针对喀什地区的特点, 生态效益以碳储量、产水量以及土壤侵蚀作为参数, 利用 NSGA-II 算法能够得到较为合理的科学的未来土

地利用数量结构优化,再通过 GeoSOS-FLUS 模型根据数量结构优化结果、自然条件和经济因素等进行空间优化。在 3 种优化结果下,GDP、固碳量、粮食产量都比未优化前多,土壤侵蚀有所降低。降低土壤侵蚀的速度,缓解荒漠化情况,能够较好地满足生态可持续发展的需要,为喀什未来的土地利用提供了一个可持续发展的方案。

但是本研究仍然存在问题,土地利用空间优化涉及的驱动因子众多^[34],是一个多目标复杂的问题,由于喀什地区生态脆弱,土地利用空间优化需要更加全面的考虑,使得经济和生态相辅相成,互相促进。在宏观上考虑每种土地利用类型的数量,在微观上根据土壤、人为干扰、气候等特性进行土地利用空间优化。本文使用了人口和 GDP 空间的分布公里网格数据,未对社会因素进行深入研究分析,由于社会因素具有动态变化和不确定性,很难进行量化分析,合理化社会因素对空间优化的影响以及有机地结合社会因素和自然条件是今后研究方向之一。

4.2 结论

(1) 在多目标效益提高方面,优化后的 GDP、固碳量、粮食产量都比未优化前多,土壤侵蚀有所降低。产水量只有在生态效益优先情况下,提高了 0.4%,在其他情况下均有所降低。

(2) 根据多种驱动因子计算土地利用适宜性,能保证结果的科学性和可实施性。根据土地利用适宜性概率图可知耕地和建设用地主要位于北部,林地主要位于东北部和中部,草地和水域主要位于南部,未利用地主要位于中部和东北部。

(3) 土地利用空间分布方面,在生态效益优先情况下,板块凝聚度最高,景观破碎度降低,生态效益优先和经济生态协调发展情况下香浓多样性提高较高,在经济生态协调发展情况下散布于并列指数最高。

[参 考 文 献]

- [1] 郑博福,黄琼瑶,陶林,等.赣南地区景观格局变化及其对生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2021,41(15):5940-5949.
- [2] 路中,雷国平,郭一洋,等.不同空间尺度松嫩平原土地利用强度变化及其对气候因子的影响[J].生态学报,2021,41(5):1894-1906.
- [3] 郭亚红,阿布都热合曼·哈力克,魏天宝,等.基于土地利用变化的和田地区生态系统服务价值分析[J].生态学报,2021,41(16):1-10.
- [4] 曹茜,于德永,孙云,等.土地利用/覆盖变化与气候变化定量关系研究进展[J].自然资源学报,2015,30(5):880-890.
- [5] Ma Enpu, Cai Jianming, Lin Jing, et al. Explanation of land use/cover change from the perspective of telecoupling [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 421-431.
- [6] 林伊琳,赵俊三,陈国平,等.基于 MCR-FLUS-Markov 模型的区域国土空间格局优化[J].农业机械学报,2021,52(4):159-170.
- [7] 谢一茹,高培超,王翔宇,等.经济发展预期下的粮食产量与生态效益权衡:黑龙江省土地利用优化配置[J].北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(6):873-881.
- [8] 刘欣,赵艳霞,冯晓森,等.基于 CLUE-S 模型的多目标土地利用格局模拟与优化:以河北省廊坊市北三县为例[J].地理与地理信息科学,2018,34(5):92-98.
- [9] Pan Tingting, Zhang Yu, Su Fenzhen, et al. Practical efficient regional land-use planning using constrained multi-objective genetic algorithm optimization [J]. International Journal of Geo-information, 2021,10(2):100.
- [10] 向乔妹.基于遥感与 GIS 技术的土地利用空间优化方法研究[D].安徽 合肥:合肥工业大学,2020.
- [11] 宋戈,王越,刘馨蕊.松嫩高平原土地利用格局优化模式建构研究[J].经济地理,2019,39(9):191-197.
- [12] 吴丹.基于超级学习和元胞自动机模型的国土空间优化研究[D].北京:中国地质大学(北京),2019.
- [13] 曹帅,金晓斌,杨绪红,等.耦合 MOP 与 GeoSOS-FLUS 模型的县级土地利用结构与布局复合优化[J].自然资源学报,2019,34(6):1171-1185.
- [14] Vorapong S, Atthaphon A, Supanut C. A Voronoi-based method for land-use optimization using semidefinite programming and gradient descent algorithm [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2021,35(5):999-1031.
- [15] Wu Changyan, Chen Bowen, Huang Xianjin, et al. Effect of land-use change and optimization on the ecosystem service values of Jiangsu Province, China [J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106507.
- [16] 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.
- [17] 王帝文,李飞雪,陈东.基于 Pareto 最优和多目标粒子群的土地利用优化配置研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(9):2019-2029.
- [18] 黄海.基于改进粒子群算法的低碳型土地利用结构优化:以重庆市为例[J].土壤通报,2014,45(2):303-306.
- [19] 郭小燕,刘学录,王联国.基于混合蛙跳算法的土地利用格局优化[J].农业工程学报,2015,31(24):281-288.
- [20] 马冰滢,黄姣,李双成.基于生态—经济权衡的京津冀城市群土地利用优化配置[J].地理科学进展,2019,38(1):26-37.
- [21] Wei Wei, Xie Yaowen, Wei Xiaoxu, et al. Land use optimization based on CLUE-S model and ecological

- security scenario in Shiyang River basin [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(9): 1306-1315.
- [22] 李路, 孙桂丽, 陆海燕, 等. 喀什地区生态脆弱性时空变化及驱动力分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 277-288.
- [23] 马增辉, 马钢. 喀什地区生态环境现状、问题和生态保护修复措施探索[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(18): 128-130.
- [24] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估: 以太行山淇河流域为例[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 446-459.
- [25] 徐自为, 张智杰. 基于土地利用变更调查的 2010—2016 年新疆尉犁县生态系统碳储量时空变化[J]. 环境科学研究, 2018, 31(11): 1909-1917.
- [26] Cong Rui, Qi Juntong, Wu Chong, et al. Multi-UAVs Cooperative Detection Based on Improved NSGA-II Algorithm [C]. 39th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2020: 1524-1529.
- [27] Fu Jun, Yuan Haikuo, Zhang Depeng, et al. Multi-objective optimization of process parameters of longitudinal axial threshing cylinder for frozen corn using RSM and NSGA-II [J]. Applied Sciences, 2020, 10(5): 1646.
- [28] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估: 以太行山淇河流域为例[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 446-459.
- [29] Liu Xiaoping, Liang Xun, Li Xia, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects [J]. Landscape Urban Plan, 2017, 168: 94-116.
- [30] Yu Huafei, Zhao Yaolong, Fu Yingchun. Optimization of impervious surface space layout for prevention of urban rainstorm waterlogging: A case study of Guangzhou, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(19): 3613.
- [31] 华琳, 黄志霖, 马良, 等. 三峡库区低山丘陵区多尺度景观的指数响应及适宜粒度[J]. 生态学报, 2022(11): 1-15.
- [32] 樊田田, 许蕾, 陈林. 基于多目标优化算法 NSGA-II 推荐相似缺陷报告[J]. 计算机学报, 2019, 42(10): 2175-2189.
- [33] 谢涛, 陈火旺, 康立山. 多目标优化的演化算法[J]. 计算机学报, 2003, 26(8): 997-1003.
- [34] 刘光旭, 王小军, 相爱存, 等. 赣江中上游地区土地利用变化空间分异与驱动因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2545-2554.

(上接第 144 页)

- [14] Lee S J, Park K C, Park C W. Wind tunnel observation about the shelter effect of porous fences on the sand particale movement [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(9): 1453-1463.
- [15] 崔晓宁, 梁柯鑫, 王起才, 等. 新建格库铁路挡沙堤阻沙机理研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(7): 85-92.
- [16] 富宝锋, 王志强, 何艺峰, 等. 沙粒在复合型阻沙措施附近沉积特性数值模拟[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(S1): 438-440.
- [17] 石龙, 李凯崇, 蒋富强, 等. 铁路沿线挡沙堤设计参数优化分析[J]. 铁道建筑, 2017, 57(9): 119-123.
- [18] 王海龙, 刘畅, 孙婧, 等. 沙漠铁路固沙砖设计参数的数值模拟[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(11): 59-64.
- [19] 徐超. 张家口市坝上气候变化特征研究[J]. 农村经济与科技, 2020, 31(6): 6-8.
- [20] 赵小虎, 王新军, 李振山. 风力作用下沙粒冲击起动风速分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(5): 53-57.
- [21] 张凯, 王起才, 张兴鑫, 等. 格库铁路 HDPE 板栅栏有效防护距离[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(5): 105-115.
- [22] 谢虎雄, 马发跃, 武生智. 风沙环境中公路风沙灾害的数值模拟[J]. 中国沙漠, 2019, 39(2): 151-157.
- [23] 辛国伟, 程建军, 景文宏, 等. 来流廓线对风沙流场和风沙堆积影响的数值模拟: 以挡沙墙为例[J]. 干旱区研究, 2016, 33(3): 672-679.
- [24] 张兴鑫, 张凯, 史博源, 等. 流动沙丘区公路路基风沙流场数值模拟及路面沙害形成机制[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1184-1191.
- [25] 石龙, 蒋富强. 斜插板挡沙墙设计参数优化数值模拟[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 666-673.