

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.06.024

基于DE-PSO模型的土地资源优化配置研究

王世东¹ 李立¹ 张游游^{1,2} 余洋^{1,3}

(1. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454000; 2. 河南省地质物探测绘技术有限公司, 郑州 450016;
3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 以丹江流域(河南段)2008、2018年Landsat遥感影像数据为主要数据源,采用差分演化算法对研究区2028年的土地利用结构进行优化,并对优化结果进行分析验证,然后将得到的土地利用结构优化结果作为数量约束条件嵌入粒子群算法,设置基本栅格、空间集聚度、土地类型转换、地形坡度规则等多种约束条件进行粒子更新优化,构建了土地资源优化配置的DE-PSO模型。研究结果表明,优化后的2028年土地利用空间格局与研究区实际相符合,且优化后的土地利用空间集聚程度增加,土地利用空间格局在总体上趋于合理;水域面积由406.61 km²增长到448.07 km²,主要表现为丹江口库区扩容扩大,其发展趋势符合丹江口水库调水规划和水源地相关政策;模型总体精度为89.54%,Kappa系数为0.8593,说明建立的模型具有良好的性能。研究结果可为研究区土地资源可持续利用、水源地保护与管理、生态环境保护提供科学依据。

关键词: 土地资源优化配置; 差分演化算法; 粒子群优化算法; DE-PSO模型

中图分类号: P208 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)06-0226-11 **OSID:** 

Optimal Allocation of Land Resources Based on DE-PSO Model

WANG Shidong¹ LI Li¹ ZHANG Youyou^{1,2} YU Yang^{1,3}

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China
2. Henan Geological Geophysical Surveying and Mapping Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China
3. China Geological Environmental Monitoring Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: Taking Landsat remote sensing image data of 2008 and 2018 in Danjiang River Basin (Henan Section) as the main data source, differential evolution algorithm was used to optimize the land use structure of the study area in 2028, and the optimization results were analyzed and verified. Then, the obtained land use structure optimization results were embedded into particle swarm optimization algorithm as quantitative constraints. The DE-PSO model for optimal allocation of land resources was constructed by setting various constraints such as basic grid, spatial agglomeration degree, land type conversion and terrain slope rule. The results showed that the optimized spatial pattern of land use in 2028 was consistent with the actual situation of the study area, and the degree of spatial agglomeration of land use after optimization was increased, and the overall spatial pattern of land use tended to be reasonable. The water area was increased from 406.61 km² to 448.07 km², which was mainly reflected by the expansion of the storage capacity of Danjiangkou reservoir, and its development trend was in line with the water diversion planning and water source related policies of Danjiangkou reservoir. The overall accuracy of the model was 89.54%, and the Kappa coefficient was 0.8593, indicating that the established model had good performance. The research results can provide scientific basis for the sustainable utilization of land resources, water source protection and management, and ecological environment protection in the study area.

Key words: optimal allocation of land resources; differential evolution algorithm; particle swarm optimization algorithm; DE-PSO model

收稿日期: 2021-11-18 修回日期: 2022-01-21
基金项目: 国家自然科学基金项目(41801318)、河南省科技攻关重点项目(222102320005)、河南省高等学校重点科研项目(22A420002)、河南省国土资源科研项目(豫政采(2)20190450-7、豫财招标采购-2019-379-7)和河南理工大学博士基金项目(B2015-22)
作者简介: 王世东(1978—),男,教授,博士,主要从事资源环境遥感、土地利用与土地复垦研究,E-mail: wsd0908@163.com
通信作者: 余洋(1987—),男,高级工程师,博士,主要从事自然资源开发利用和国土空间生态修复研究,E-mail: yuyang2005@139.com

0 引言

土地资源优化配置是一个包含多层次、多目标,需要持续拟合与决策的复杂系统工程。优化内容主要包括两方面,一是对宏观土地利用数量结构进行优化的配置模型,二是对微观土地利用空间格局进行优化的配置模型^[1],以此提高土地资源的可持续利用率,保持土地环境生态系统的相对平衡^[2]。但是,在大多数发展中国家中,随着城市化建设进程的加速,将经济增长放在首位的土地利用结构将损害土地资源的环境生态功能。特别是在一些快速发展的地区,政府经常诉诸行政手段来干扰土地资源的分配,旨在保护区域的生态和环境资源,鉴于此,诸多学者展开了土地资源优化配置研究。CHUVIECO^[3]将线性规划模型作为地理空间建模的工具与GIS相结合,以农村失业率最低为目标函数对西班牙地中海沿岸地区进行研究,实现了土地利用最优化。MA等^[4]利用粒子群算法,使用真实数据集模拟土地利用空间结构优化过程,结果表明,粒子群优化模型具有数量和空间结构的优化能力。雷鸣等^[5]通过综合运用多元优化模型及遗传算法对黄淮海平原区土地利用结构进行了优化,并与优化目标年自然演化所形成的土地利用结构进行了对比分析。曹帅等^[6]选取常州市金坛区为研究区,通过MOP(多目标规划)模型进行土地利用结构优化,在此基础上,利用GeoSOS-FLUS模型实现了土地利用布局优化。当前土地资源优化配置多偏重于土地利用结构优化或者空间格局优化^[7-14],将两者相结合的研究相对较少,虽然做了一定的探索,但还是缺少切实有效的技术手段和方法。

丹江流域(河南段)作为南水北调中线工程主要水源地^[15],其核心工程丹江口水库始建于1958年,2003年南水北调中线工程正式开工,2005年丹江口大坝开始实施加高加固,正常蓄水位由157 m提升至170 m,库容由 $1.745 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 扩至 $2.905 \times 10^{10} \text{ m}^3$,同时,输水工程也开始兴建。自2014年底,南水北调中线工程正式通水以来,调水累计超过 $3.26 \times 10^{12} \text{ m}^3$,是当前我国正在实现和推进优化自然界淡水生态资源配置的一项重大战略性淡水基础设施建设工程。由于其库区土地利用变化而引起的一系列严重影响生态环境效应的问题已经受到社会的广泛关注。调水工程改变了丹江流域水资源的自然地理分布,同时,受人类活动影响,丹江流域的土地开发利用方式的改变、环境资源过度消耗等也对其土地利用结构和空间布局产生深远影响^[16]。为确保南水北调中线工程平稳安全运行,结合研究区

实际情况与土地利用存在的问题和特点,对丹江流域(河南段)进行土地资源优化配置,其对流域水质保护和生态环境建设具有重要意义^[17-21]。

本文以丹江流域(河南段)为研究区,从土地资源优化配置角度出发,以Landsat遥感数据、土地利用现状数据、社会经济统计等相关数据为基础,采用差分演化(Differential evolution, DE)算法对土地利用结构进行优化,然后将得到土地利用结构优化结果作为数量约束条件嵌入粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)算法进行土地利用空间格局优化,从而建立土地资源优化配置的DE-PSO模型,制定适合研究区的土地资源优化配置方案,为研究区土地可持续利用、水质保护和生态建设提供决策参考。

1 研究区概况

丹江流域(河南段)作为南水北调中线工程主要水源地,位于河南省西南部,研究区主要涉及的区域包括南阳市中西部的淅川、西峡二县,少部分地区位于洛阳市栾川县西南山区和三门峡卢氏县东南平原地带,地形和景观类型复杂多样,具有典型的流域特征。地理坐标为 $111^{\circ}35' \sim 111^{\circ}58'E$, $33^{\circ}30' \sim 34^{\circ}01'N$,研究区总面积为 $8\,411.57 \text{ km}^2$,丹江干流自淅川县荆紫关入境,汇水总面积占整个研究区的3.11%,研究区西部和北部与伏牛山麓相邻,东部地区从北向南地势呈现不断降低趋势,区域内海拔为112~2 107 m,整体地形起伏较大,依次表现为山地、丘陵、垄岗、平原,其地理位置如图1所示。

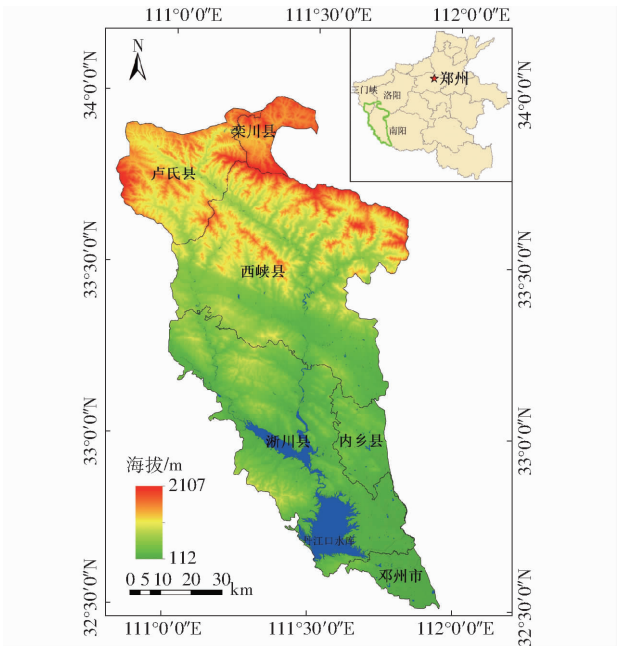


图1 研究区地理位置图

Fig.1 Geographical location map of study area

研究区整体地势呈西北高、东南低的特征,具有亚热带向暖温带过渡的季风性气候特征^[22-23]。研究区内土地利用类型主要包括林地、草地、耕地、水域、建设用地和裸地。林地主要分布在研究区的北部山区和西部丘陵地区,耕地主要分布在东南部的平原地带,草地主要分布在中部盆地和垄岗地带,而水域则主要分布于西南部淅川县境内的丹江口库区。作为南水北调中线工程主要水源地,保证丹江口水库及周边河流的水质质量与安全已成为维护中线工程长期稳定安全运行的首要目标,库区及其周边地区科学合理的土地利用结构和空间格局配置,是水源地生态环境保护的重要基础;因此,开展丹江流域(河南段)土地资源优化配置研究对水源地保护意义重大。

2 研究方法

2.1 数据来源与预处理

选用2008年9月1日Landsat TM和2018年9月29日Landsat OLI两期遥感影像,研究选取时间间隔为10年,区域植被生态势最佳的9月,成像质量好且对地观测时相一致的影像,能够很好地满足不同土地利用类型面积的提取。数字高程模型数据主要用于分析研究区地形因素的影响。土地利用规划数据来源于研究区各县(市)自然资源部门,包括《各县(市)土地利用总体规划(2006—2020)》、

《各县(市)发展总体规划(2018—2035)》,主要用于研究区土地利用结构优化数量约束条件设置。研究所涉及的2008、2018年社会经济数据主要来源于《各县(市)统计年鉴》,部分数据来源于《各县(市)国民经济和社会发展公报》和《全国农产品成本收益资料汇编2018》,主要为土地资源优化配置目标函数的建立提供数据支持。

为了尽可能真实有效地表现影像上地物的各种特征,彻底消除或者减轻图像灰度失真所带来的影响,遥感影像数据预处理主要包括辐射定标、大气校正、影像配准和裁剪、波段选取等步骤^[24]。通过研究区DEM数字高程数据提取高程和坡度数据。参照全国第二次土地利用调查分类标准,根据获取的研究区2008、2018年遥感影像数据以及土地利用特征(图2),构建研究区土地利用分类体系,将研究区土地利用类型分为林地、草地、耕地、水域、建设用地和裸地。利用ENVI 5.3软件,采用监督分类中支持向量机分类法作为遥感影像的解译方法,实现对研究区土地利用类型信息的提取。为保证分类结果的准确性,采用混淆矩阵计算分类后精度,经过计算发现,2008年和2018年总体精度分别为91.79%和94.36%,Kappa系数分别为0.83和0.85,两期影像的解译结果均满足分类精度的要求,分类效果比较好,为后续进行土地利用动态变化分析和优化配置提供数据基础。

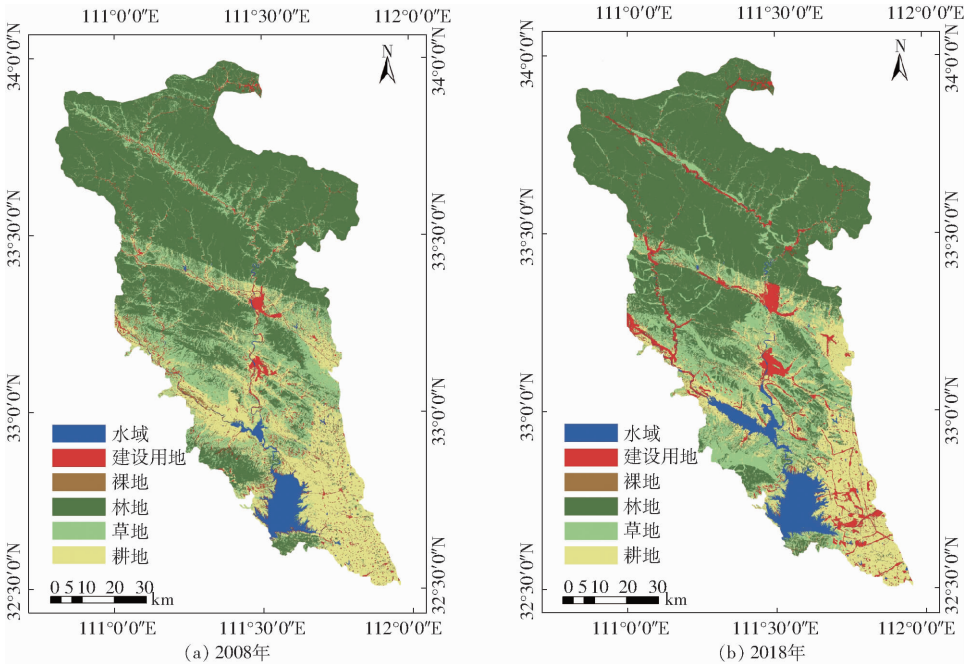


图2 研究区土地利用分类图
Fig.2 Land use status maps of study area

2.2 差分演化算法

差分演化(DE)算法是由STORN等^[25]提出的一种基于实数编码的演化算法,作为演化算法获得

了优异成绩^[26]。该算法具有机理简单、收敛速度快、设置参数少,具有很好的普遍性等优点,引起了诸多国内外研究者的关注与重视,并通过多个领域

验证了算法的有效性和稳定性^[27]。差分演化算法的基本原理是从任意随机产生的初始种群开始,通过变异、交叉、选择操作,不断迭代更新,剔除劣等个体,保存优等个体,使搜索向着最优解逼近^[28]。标准 DE 算法的基本流程如下:

(1) 初始化种群

首先确定 DE 算法的基本参数,包括空间维数 N 、种群大小 N_p 、迭代次数 G 、变异因子 F 、交叉因子 C_R 、搜索空间的下限 $x_{i,j}^{\min}$,以及搜索空间的上限 $x_{i,j}^{\max}$ 。随后初始种群在 $[x_{i,j}^{\min}, x_{i,j}^{\max}]$ ($i = 1, 2, \dots, N_p; j = 1, 2, \dots, N$) 中随机产生^[29],具体表达式为

$$x_{i,j}^0 = x_{i,j}^{\min} + \text{rand}(0,1)(x_{i,j}^{\max} - x_{i,j}^{\min}) \quad (1)$$

式中 $x_{i,j}^0$ ——第 0 代的第 i 个个体的第 j 维分量

$\text{rand}(0,1)$ ——区间 $[0,1]$ 上均匀分布的随机数

(2) 变异操作

对种群中的每个个体 $\mathbf{x}_{ij}$ ($i = 1, 2, \dots, N_p; j = 1, 2, \dots, N$) (称为目标矢量),通过将种群中任意两个个体之差加到另一个个体产生变异后代 $\mathbf{v}_i^{g+1}$,具体表达式为

$$\mathbf{v}_i^{g+1} = \mathbf{x}_{r_3}^g + F(\mathbf{x}_{r_1}^g - \mathbf{x}_{r_2}^g) \quad (2)$$

式中 $\mathbf{v}_i^{g+1}$ ——生成的变异矢量

$\mathbf{x}_{r_1}^g, \mathbf{x}_{r_2}^g, \mathbf{x}_{r_3}^g$ ——群体中随机选择的 3 个个体

r_1, r_2, r_3 ——区间 $[1, N_p]$ 中随机数,且 $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$

F ——变异因子,控制差分矢量 $(\mathbf{x}_{r_1}^g - \mathbf{x}_{r_2}^g)$ 缩放幅度

(3) 交叉操作

为保持种群多样性,将变异后代 $\mathbf{v}_i^{g+1}$ 和目标矢量 $\mathbf{x}_i^g$ 进行交叉产生后代 $\mathbf{u}_i^{g+1}$ (称为试验矢量),具体计算公式为

$$\mathbf{u}_i^{g+1} = \begin{cases} \mathbf{v}_i^{g+1} & (r_j \leq C_R \text{ 或 } j = j_{\text{rand}}) \\ \mathbf{x}_{ij}^g & (r_j > C_R \text{ 或 } j \neq j_{\text{rand}}) \end{cases} \quad (3)$$

式中 r_j ——区间 $[0,1]$ 内均匀分布的随机数

j_{rand} ——随机整数,取 $1, 2, \dots, N$

在交叉算子中, $j = j_{\text{rand}}$ 保证试验矢量 $\mathbf{u}_{ij}^{g+1}$ 至少在一个分量上与目标矢量 $\mathbf{x}_{ij}$ 不同,维护了种群的多样性。

(4) 选择操作

基本原理为比较目标矢量与试验矢量,如果试验矢量的适应度优于目标矢量的适应度,则在下一代中用试验矢量取代目标矢量,否则仍保存目标矢量,具体表达式为

$$\mathbf{x}_i^{g+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_i^{g+1} & (f(\mathbf{u}_i^{g+1}) \leq f(\mathbf{x}_i^g)) \\ \mathbf{x}_i^g & (f(\mathbf{u}_i^{g+1}) > f(\mathbf{x}_i^g)) \end{cases} \quad (4)$$

式中 $f(\mathbf{u}_i^{g+1}), f(\mathbf{x}_i^g)$ ——个体 $\mathbf{u}_i^{g+1}$ 和 $\mathbf{x}_i^g$ 的适应度

2.3 粒子群算法

粒子群算法又称微粒群算法,由 JAMES 等^[30]在 1995 年提出的一种基于总体的优化策略。粒子群算法源于对鸟群捕食行为的研究,能对多维非连续决策空间进行并行处理分析,具有优化机理、容易理解、参数少、易使用的特点,对高维非线性、多峰值问题均具有较强的优化能力。粒子群算法的基本原理是要求在解空间随机布点(粒子),粒子通过历史最优值和全局最优值在权重的控制下不断更新自己的位置和速度来搜寻最优解^[31],粒子位置通常通过给定目标函数的适应度来衡量,通过多次迭代来寻找搜索空间内的最佳粒子位置,即待求解问题的最优解^[32]。标准 PSO 算法的基本流程如下:

(1) 初始化粒子群

初始化粒子的种群规模 P ,优化问题的维数 D ,迭代次数 T ,搜索空间下限 $x_{\min}$ 以及搜索空间上限 $x_{\max}$ 。随后初始种群在 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 中随机产生,以及对每个粒子的位置 $\mathbf{x}_i^j$ 和速度 $\mathbf{v}_i^j$ 随机初始化 ($i = 1, 2, \dots, P; j = 1, 2, \dots, D; P$ 表示粒子个体, j 表示优化问题维数),具体公式如下

$$\mathbf{x}_i^j = x_{\min} + \text{rand}(0,1)(x_{\max} - x_{\min}) \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_i^j = v_{\min} + \text{rand}(0,1)(v_{\max} - v_{\min}) \quad (6)$$

式中 $\mathbf{x}_i^j$ ——第 i 个个体的第 j 维分量

(2) 速度与位置更新

假设第 i 个粒子在第 t 次迭代时的位置和速度分别为 $\mathbf{X}_i(t) = (x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^D(t))$ 和 $\mathbf{V}_i(t) = (v_i^1(t), v_i^2(t), \dots, v_i^D(t))$,截止到第 t 代,粒子 i 搜索到最优位置记为 $\mathbf{P}_i(t) = (p_i^1(t), p_i^2(t), \dots, p_i^D(t))$,将其适应度与历史所经历过的最好位置适应度作比较,若优于,则将该位置替换为当前最优位置,也称局部历史最佳位置,记为 $Pbest_i(t)$,具体公式为

$$Pbest_i(t) = \min\{p_i^1(t), p_i^2(t), \dots, p_i^D(t)\} \quad (7)$$

对于每个粒子,将其适应度与群体所经历过的最好位置的适应度进行比较,若较好,则将该位置作为当前的全局最优位置,群体中所有粒子经历过的全局最优位置记为 $Gbest(t)$,具体公式为

$$Gbest(t) = \min\{Pbest_1(t), Pbest_2(t), \dots, Pbest_p(t)\} \quad (8)$$

当算法迭代到下一代即 $t+1$ 代时,该粒子 i 在 $t+1$ 时刻的速度和位置更新公式为

$$\mathbf{v}_i^j(t+1) = w\mathbf{v}_i^j(t) + c_1r_1(Pbest_i^j(t) - \mathbf{x}_i^j(t)) + c_2r_2(Gbest^j(t) - \mathbf{x}_i^j(t)) \quad (9)$$

$$\mathbf{x}_i^j(t+1) = \mathbf{x}_i^j(t) + \mathbf{v}_i^j(t+1) \quad (10)$$

式中 w ——惯性系数

c_1 ——向自身经验学习的系数
 c_2 ——向群体经验学习的系数
 $r_1、r_2$ —— $[0,1]$ 范围内的均匀随机数

式(9)表示的粒子速度分为 3 部分:第 1 部分为惯性部分,反映粒子运动习惯。第 2 部分为自学习部分,表示粒子向自身的历史经验学习,表现为粒子有向自身历史最佳位置飞行的趋势。第 3 部分为群体学习部分,表示粒子向群体的历史经验学习,表现为粒子有向群体历史最佳位置飞行的趋势^[33]。

(3) 迭代停止条件

判断迭代过程是否达到终止条件,如果未达到终止条件,则返回步骤(2),重新计算粒子适应度,直到满足终止条件。若是满足结束条件,输出得到粒子全局最优值,具体表达式为

$$x_i^j(t+1) = \begin{cases} x_i^j(t+1) & (f(x_i(t+1)) \leq f(x_i(t))) \\ x_i^j(t) & (f(x_i(t+1)) > f(x_i(t))) \end{cases} \tag{11}$$

$$v_i^j(t+1) = \begin{cases} v_i^j(t+1) & (f(x_i(t+1)) \leq f(x_i(t))) \\ v_i^j(t) & (f(x_i(t+1)) > f(x_i(t))) \end{cases} \tag{12}$$

式中 $f(x_i(t+1))、f(x_i(t))$ ——个体 $x_i(t+1)$ 和 $x_i(t)$ 的适应度

2.4 DE-PSO 模型构建

2.4.1 模型概述

由于 PSO 模型在土地利用空间格局优化方面具有优势,其自身在优化过程中生成最优土地利用数量结构的能力较为欠缺。因此,为了弥补 PSO 模型这一不足,本文建立一种新的 DE-PSO 模型,采用差分演化算法进行土地利用数量结构优化,然后将得到的结果作为数量约束嵌入 PSO 模型进行土地利用空间格局优化。这种土地资源优化配置模型确保了土地利用数量结构优化与空间格局优化的有机结合。

运用 PSO 算法基于土地利用类型栅格数据进行空间格局优化的实质是围绕优化目标,通过粒子速度和位置的更新来实现整个区域土地利用空间格局的优化。土地利用类型之间的转换受多种因素的影响。在优化模型中加入一系列约束条件来控制优化过程,使粒子的更新转换能按照假设的方向进行,从而实现区域土地利用空间格局优化。

在粒子寻优转换过程中,粒子受基本栅格约束、空间集聚度约束、土地类型转换约束、地形坡度规则等多种约束条件的制约,而粒子能否发生转换还由前面利用 DE 模型优化得到的数量约束控制指标来决定,在 PSO 模型运行过程中,每次迭代结束后检

查迭代结果即各土地利用类型面积是否达到了数量约束控制指标,如果没有达到,则继续运行;否则,PSO 模型停止运行,最终得到研究区土地利用空间格局优化结果。其模型技术流程如图 3 所示。

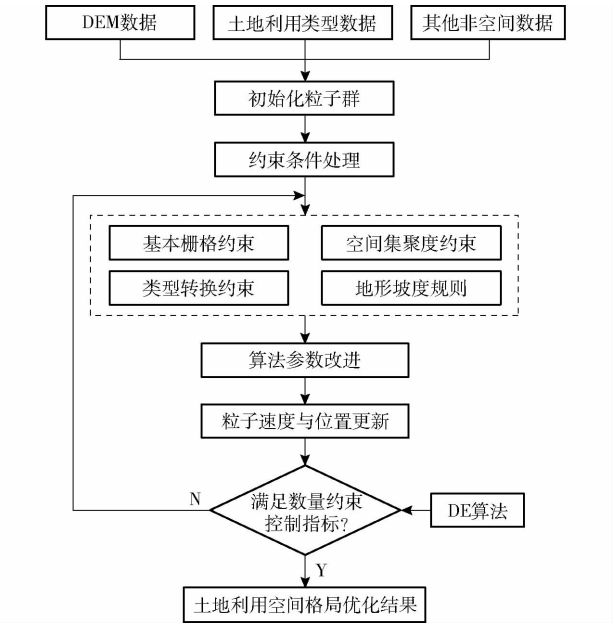


图 3 DE-PSO 模型技术流程图
Fig. 3 Technological process of DE-PSO model

2.4.2 模型构建步骤

2.4.2.1 土地利用类型数量约束确定

利用建立的 DE-PSO 模型进行土地资源优化配置时,首先采用差分演化算法进行土地利用数量结构优化,得到各土地利用类型优化后的面积,以此构建优化过程中土地利用数量约束条件。包括:林地面积约束 ($X_1 \geq 4\,494.30\text{ km}^2$)、草地面积约束 ($1\,401.92\text{ km}^2 \leq X_2 \leq 1\,589.71\text{ km}^2$)、耕地面积约束 ($X_3 \geq 1\,408.20\text{ km}^2$)、水域面积约束 ($406.61\text{ km}^2 \leq X_4 \leq 448.07\text{ km}^2$)、建设用地面积约束 ($493.12\text{ km}^2 \leq X_5 \leq 637.61\text{ km}^2$) 和裸地面积约束 ($21.72\text{ km}^2 \leq X_6 \leq 33.59\text{ km}^2$)。

2.4.2.2 数据格式转换

模型优化的基础数据包括研究区 2008 年和 2018 年土地利用分类数据,以及基于 DEM 数据进行坡度分析后运用 ArcGIS 10.3 对坡度等级进行重分类,将研究区坡度等级分为 $0^\circ \sim 25^\circ$ 和 25° 以上两个等级的研究区坡度分布数据。运用基于 DE-PSO 模型进行土地利用空间格局优化时采用 Matlab 软件,该软件对于导入数据的格式要求严格,需要具备两个条件:土地利用分类数据和坡度分布数据须保证具有相同的坐标系统、相同大小的栅格单元和相同的行列数;栅格数据导入 Matlab 软件之前必须转换为 ASCII 的 txt 格式。

首先,在 ArcGIS 中利用投影栅格工具将研究区坡度分布数据投影成与土地利用结果一致的坐标系统,参考土地利用分类结果,将其栅格单元设置为 30 m×30 m 的空间单元;其次利用转换工具将栅格数据转换为 ASCII 的 txt 格式;最后在 Matlab 软件中将其转换为一个 3 630×5 489 的矩阵数据形式。

2.4.2.3 约束条件建立

(1)基本栅格约束。规定每个土地利用空间单元上只存在一种土地利用类型。

(2)空间集聚度约束。为了避免土地利用空间格局分布过于零散而导致空间集聚度降低,在配置过程中应尽可能促使具有相同土地利用类型的用地集聚在一起,减轻破碎化程度。鉴于此,约束各土地利用空间单元在其 8 邻域内至少要有 1 个土地利用空间单元与之相同。

(3)土地利用类型转换约束。受土地利用现状和南水北调中线工程的影响,根据研究区土地利用动态变化分析结果及规律,某些土地利用类型现状在未来一定时期内不会发生改变,比如南水北调中线工程水源地丹江口水库作为水域用地类型不转换,建设用地一般也较难转换为其他类型用地。

(4)地形坡度规则:地形坡度起伏过大既会给土地耕作增加一定的难度,又不利于水源地水污染防治和水土保持,按照“退耕还林”和“水土保持”政策要求,坡度大于 25°的耕地转变为林地,以避免过度开垦造成植被破坏,水土流失。

2.4.2.4 模型构建结果

建立的 DE-PSO 土地资源优化配置模型,主要包括两部分,其中,土地利用数量优化部分采用 DE 算法实现,土地利用空间格局优化部分采用 PSO 模型实现。

DE 算法运用 Visual Studio 2010 软件编写优化模型代码进行求解。求得符合研究区实际情况的不同生态系统的单位面积生态服务价值和六类用地的单位经济产出,用生态系统服务价值表征生态效益,国内生产总值(GDP)表征经济效益,以生态和经济的综合效益最大化为目标函数,根据相应的土地利用规划设置约束条件,建立基于差分演化算法的土地利用结构优化模型,计算出研究区最优的土地利用结构和各土地类型面积。

PSO 模型采用 Matlab 软件编写优化模型代码来实现。首先输入格式转换之后的土地利用现状底图进行粒子初始化,然后通过约束条件进行粒子更新转换和迭代运算,当新矩阵满足各种土地利用类

型的数量约束条件,直到最后满足整个优化期的土地利用数量约束方案,即实现该目标下土地利用格局空间优化。

3 结果与分析

3.1 土地资源优化结果

在前面数据处理的基础上,利用建立的 DE-PSO 模型,对研究区 2018 年和 2028 年进行土地资源优化配置,结果如图 4 所示。其中,2018 年优化结果是在 2008 年土地利用现状的基础上运行得到,迭代终止条件是从遥感图像分类图上统计得到的 2008—2018 年土地利用数量约束指标;2028 年优化结果是在 2018 年土地利用现状的基础上运行得到,并以 2028 年利用 DE 算法得到的土地利用数量结构优化结果作为迭代终止条件,经过多次迭代,得到优化结果。各地类间相互转换的情况采用马尔科夫转移矩阵来描述,由表 1、表 2 以及图 4 可以看出,优化结果呈现出以下特点:

(1)由图 4c 可知,建设用地和水域面积大幅增加,耕地、草地、林地和裸地面积呈现不同程度减少。其中,增加的建设用地主要分布在已有建设用地的周围;增加的水域主要分布在水源地丹江口大坝加高蓄水后淹没的耕地和草地;减少的耕地主要转换为建设用地和水域,主要分布在建设用地与耕地和水域交界地带;减少的草地主要转换为林地和耕地,主要分布在研究区中部岗地和盆地地带;减少的林地主要转化为草地,主要分布在丹江口库区周围;减少的裸地主要转换为耕地和建设用地。这些土地类型的转换符合现实情况,各种土地利用类型的空间布局与 2018 年土地利用现状图的总体格局基本相似。

(2)由图 4d 可知,建设用地和水域面积较大幅度增加,耕地面积小幅度增加,草地和裸地面积不同程度减少,林地面积未发生变化。其中水域面积在优化结果中呈现扩大趋势,主要分布在南水北调中线工程水源地丹江口库区;建设用地在优化结果中呈显著增加趋势,主要表现为建设用地向外扩充加大占用耕地;耕地在优化结果中呈现小幅度增加趋势,主要分布在研究区东南部地区,以及少部分分布在中部地区,表现为适宜耕种的建设用地周围和平缓的东南部地区的草地转变为耕地;草地面积在优化结果中呈现小幅度减少趋势,主要分布在研究区中部岗地和盆地地带,减少的草地主要转变为耕地;林地面积在优化结果没有变化,主要分布在北部山区和西部丘陵地区,与 2018 年分布格局相比变化不大,少部分坡度较大的耕地转换为林地,与研究

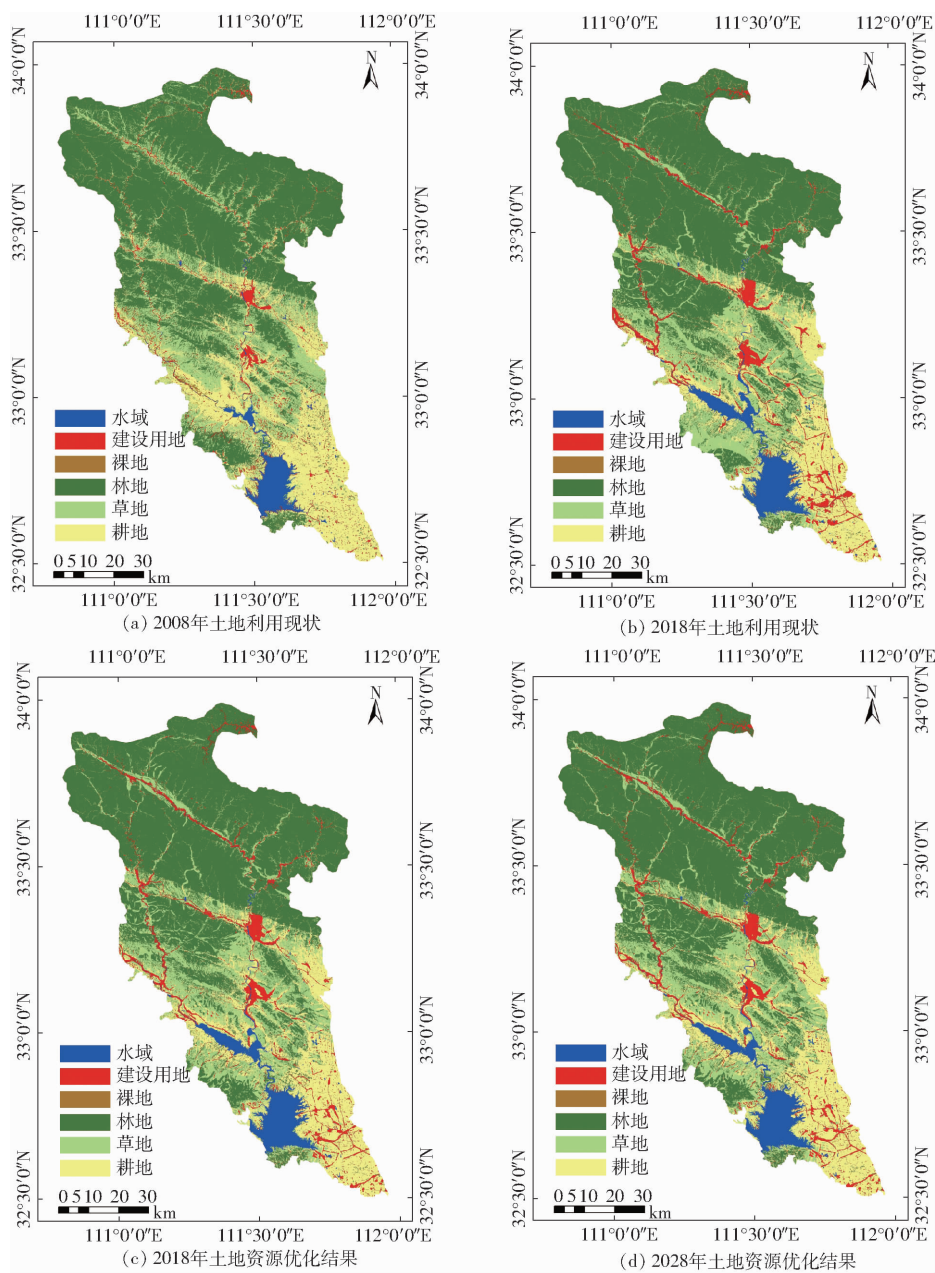


图 4 研究区土地利用现状和优化结果

Fig.4 Land use status maps and optimized configuration results in study area

表 1 研究区 2008—2018 年土地利用转移矩阵

Tab.1 2008—2018 land use transfer matrix in study area

		2018 年						合计
年份	类型	水域	建设用地	裸地	林地	草地	耕地	
2008 年	水域	246.96	3.50	0.08	0.59	1.35	1.62	254.12
	建设用地	23.42	147.76	2.55	16.62	81.92	44.19	316.48
	裸地	7.38	8.38	2.10	4.59	8.83	11.22	42.53
	林地	3.08	25.38	1.61	3 969.08	429.21	58.33	4 486.71
	草地	27.16	102.65	13.97	411.15	800.10	285.46	1 640.52
	耕地	98.59	205.40	13.25	91.84	268.23	993.72	1 671.05
	合计	406.61	493.10	33.59	4 493.89	1 589.66	1 394.56	8 411.41

区实际情况相符合;裸地面积在优化结果中呈现小幅度减少趋势,主要转变为建设用地和耕地。这些土地类型的转换符合现实情况,各种土地利用类型

的空间布局基本合理,说明本文建立的优化模型具有良好的性能。

以上得到的优化结果综合考虑了土地利用数量

表 2 研究区 2018—2028 年土地利用转移矩阵

Tab.2 2018—2028 land use transfer matrix in study area km²

年份	2028 年							
	类型	水域	建设用地	裸地	林地	草地	耕地	合计
2018 年	水域	406.60	0	0	0.01	0	0	406.61
	建设用地	1.43	491.12	0	0	0	0.55	493.10
	裸地	0.34	9.27	19.90	3.71	0.06	0.31	33.59
	林地	1.70	3.38	0.92	4 451.17	28.80	7.92	4 493.89
	草地	29.54	50.93	0.90	38.32	1 336.92	133.05	1 589.66
	耕地	8.45	82.91	0.00	0.82	36.14	1 266.23	1 394.56
	合计	448.07	637.61	21.72	4 494.03	1 401.92	1 408.07	8 411.41

结构与空间格局优化,该优化结果基本满足了研究区土地资源优化配置的要求,可以为国土空间规划编制提供参考,并为土地可持续利用提供科学合理的决策依据。

3.2 模型精度分析

以图 4a 为基期数据,对研究区 2018 年已知土地利用类型进行优化,分析其与 2018 年实际土地利用类型的结果差异。

为有效说明模型的可行性,以图 4b 作为地面真实数据,与图 4c 进行精度分析。利用 ENVI 5.3 软件,计算得总体精度为 89.54%, Kappa 系数为 0.859 3,优化结果具有较好的一致性,说明本文构建的 DE-PSO 模型在土地资源优化配置方面具有较好的合理性和可行性。

3.3 结果合理性分析

为了综合评价最终优化结果的合理性,从两方面进行对比分析,一是从景观格局视角来分析研究区优化前后土地利用空间格局的差异;二是将优化结果与实际空间格局对比来整体分析优化结果的合理性。本文从景观格局视角对研究区优化前后土地利用空间格局进行分析,通过运用 Fragstats 4.2 软件计算景观指数,并结合各指标的生态学意义分析丹江流域(河南段)景观格局的变化特征,并与优化初期的实际分类结果进行对比,结果见表 3、4。

由表 3、4 可以看出,2018 年和 2028 年土地资源优化配置结果与相应的基期年土地利用现状图相比,斑块数量和密度整体上呈下降趋势,说明优化后各地类景观破碎化程度降低;但是耕地、林地和裸地的斑块凝聚度指数降低和分离度指数上升说明斑块之间连通度降低,受外界干扰较强,土地利用空间结构趋于复杂化,反映了人类活动对土地利用景观格局干扰程度的加深。优化后的建设用地、水域和草地斑块凝聚度指数上升和分离度指数降低,说明这几种类地在土地利用空间格局上呈片状分布,空间集聚程度增加,符合研究区未来的发展规划和社会经济发展要求。另外,表征土地类型丰富度的香农

表 3 研究区优化结果与土地利用现状类型水平指数对比

Tab.3 Comparison of optimization results of study area and current land use type level index

	景观格局指数	水域	建设用地	裸地	林地	草地	耕地
斑块数量	2008 年现状	830	8 671	4 198	14 856	23 347	13 019
	2018 年优化	1 240	8 551	4 253	6 389	22 178	8 966
	2018 年现状	1 304	7 613	4 550	7 075	25 314	18 486
	2028 年优化	1 261	8 391	2 835	15 242	20 365	10 534
斑块密度	2008 年现状	0.09	1.03	0.49	1.76	2.77	1.54
	2018 年优化	0.14	1.01	0.50	0.80	2.63	1.06
	2018 年现状	0.15	0.90	0.54	0.84	3.00	2.19
	2028 年优化	0.14	0.99	0.33	1.81	2.42	1.25
斑块凝聚度指数	2008 年现状	99.70	94.61	83.93	99.88	99.00	99.70
	2018 年优化	99.70	98.49	73.97	99.97	98.95	99.41
	2018 年现状	99.61	98.51	75.64	99.90	98.83	99.30
	2028 年优化	99.73	98.98	75.55	99.88	99.05	99.17
分离度指数	2008 年现状	0.52	1.65	5.90	0.12	0.44	0.37
	2018 年优化	0.41	0.87	9.20	0.12	0.44	0.34
	2018 年现状	0.42	0.87	10.20	0.08	0.43	0.30
	2028 年优化	0.36	0.66	11.24	0.13	0.36	0.38

表 4 研究区优化结果与土地利用现状景观水平指数对比

Tab.4 Comparison of optimization results of study area and current land use landscape level index

景观格局指数	蔓延度指数	景观分割指数	香农多样性指数	香农均匀度指数
2008 年现状	55.644 0	0.852 8	1.251 0	0.687 0
2018 年优化	55.395 0	0.857 0	1.379 5	0.814 1
2018 年现状	55.278 2	0.917 8	1.282 5	0.715 8
2028 年优化	54.960 0	0.853 9	1.300 0	0.725 5

多样性指数和反映斑块分配均匀程度的香农均匀度指数均呈增加趋势,这表明各土地类型所占比例差别趋于减小,说明优势地类不断减弱,各土地类型呈均衡化趋势分布,景观异质性增高。土地利用变得更加合理,可以满足土地利用的规模化与集约化的用地要求,各土地利用类型的空间布局与 2018 年土地利用现状图的总体格局基本相似,各土地类型的变化符合现实情况。整体来看,丹江流域(河南段)

在人类活动和自然演替共同作用下,土地利用空间格局在总体上趋于合理化。

另外,为了从整体空间格局来分析优化结果的合理性,本文将 2018 年优化结果和 2028 年优化结果与研究区实际空间分布的用地格局进行对比分析发现:①2008—2018 年优化期内,建设用地在空间分布上,受人类活动扩张,主要围绕已有建设用地扩展和沿道路发展;水域面积的增加主要表现为丹江口水库库容扩大,自 2003 年底南水北调中线工程开工以来,多次对丹江口大坝进行加高加固处理,直至 2014 年库区面积全面提高,水域面积增大。耕地的减少主要分布在建设用地周围和道路两侧,一方面是退耕还林还草和城乡建设用地的增加使得耕地面积减少,另一方面是南水北调中线工程的实施,丹江口大坝的加高加固处理导致大量耕地被淹没,耕地面积减少;草地的减少主要分布在研究区中部岗地和盆地地带;林地的增加主要分布在南部丹江口库区,主要受该阶段“退耕还林还草”政策的影响。裸地的减少主要转变为建设用地和耕地。②2018—2028 年优化期内,建设用地面积在优化结果中增加显著,主要表现为建设用地向外扩展加大占用耕地,区域之间连通性更好,这与社会经济的快速发展以及现代化进程的加快密不可分,建设用地面积增加是必然的发展趋势;水域面积呈现扩大趋势,这与南水北调中线工程未来发展规划有直接关系,随着后期调水量的增大,必然会多次提高丹江流域(河南段)丹江口水库蓄水位来扩大库容,这符合南水北调中线工程水源地丹江流域(河南段)国土空间规划;耕地的增加主要表现为适宜耕种的建设用地周围和平缓的东南部地区的草地转变为耕地,主要是因为国家对基本农田的保护;草地的减少主要分布在研究区中部岗地和盆地地带,减少的草地主要转变为耕地;林地面积在优化过程中没有变化,主要分布在北部山区和西部丘陵地区;裸地的减少主要转变为建设用地和耕地,这符合国家提出的开垦宜耕未利用地,提高南水北调中线工程水源地丹江流域(河南段)土地利用效益的政策。以上结果表明,研究区土地利用类型的转换规律基本符合实际情况,用地布局基本合理。

综合以上两方面,可看出本文建立的优化模型具有较好的科学性和可靠性。

4 讨论

本文分析了研究区土地利用时空动态变化特

征,揭示了土地利用变化规律,建立了研究区的土地资源优化配置方案。土地资源优化配置的研究大多受时间或空间的限制,优化结果针对的是某一特定时间或某个区域,且大多数集中于宏观土地利用数量结构优化,而忽略了空间格局优化。本文以丹江流域(河南段)为研究区,以 Landsat TM/OLI 遥感影像为主要数据源,采用 DE 算法对研究区 2028 年的土地利用数量结构进行优化,然后将优化后的各地类面积作为数量约束条件嵌入 PSO 算法,通过设置基本栅格、空间集聚度、土地类型转换、地形坡度规则等多种约束条件,进行土地利用空间格局优化,构建基于 DE-PSO 模型的土地资源优化配置方案。

基于差分演化算法进行的土地利用结构优化结果虽然能够满足研究区发展要求,但优化问题的规模和复杂程度都不算太大,对算法的收敛性、参数选取和计算复杂度等需进一步研究。此外,从图 4c、4d 可以看出,由于 PSO 模型初始化粒子群的随机性,会在优化结果中生成一些不合理的地块。因此,在后续的工作中需要对模型进行进一步的研究和完善,以确保优化结果的科学性和准确性。总体来说,利用本文建立的 DE-PSO 模型进行优化后的土地利用空间格局具有较好的合理性,且优化后的土地利用格局各地类空间分布与研究区地形地貌特征相符合,这与研究区国土空间规划方案 and 实际相符,充分说明该方法和思路的可行性。

5 结论

(1)研究区土地利用类型以林地、草地、耕地为主,其面积占研究区总面积的 90% 以上。

(2)土地利用结构优化结果表明,建设用地、水域和耕地面积持续增加,建设用地增幅最大,相对面积变化比例为 1.71%,由于丹江口库区建设和南水北调中线工程的实施,水域面积由 406.61 km² 增长至 448.07 km²,林地和裸地面积变化不大,草地减少幅度最大,相对面积变化比例为 -2.23%。

(3)土地利用空间格局优化结果表明,研究区土地集约利用程度有所提升,土地利用空间格局在总体上趋于合理化,且优化后的土地利用空间分布与研究区地形地貌特征相符合,说明本文建立的优化模型具有良好的性能,研究结果可为水源地土地资源可持续利用、水资源保护和管理、生态环境保护以及南水北调中线工程调水安全等方面提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] 郑荣宝,董玉祥,陈梅英. 基于GECM与CA+ANN模型的土地资源优化配置与模拟[J]. 自然资源学报, 2012,27(3): 497-509.
ZHENG Rongbao, DONG Yuxiang, CHEN Meiyang. Simulation on optimized allocation of land resource based on GECM and CA+ANN model [J]. Journal of Natural Resources, 2012,27(3): 497-509. (in Chinese)
- [2] MARULL J, PINO J, TELLO E, et al. Social metabolism, landscape change and land-use planning in the Barcelona Metropolitan Region[J]. Land Use Policy, 2010,27(2): 497-510.
- [3] CHUVIECO E. Integration of linear programming and GIS for land-use modelling[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 2012,7(1): 71-83.
- [4] MA S, HE J, LIU F, et al. Land-use spatial optimization based on PSO algorithm[J]. Geo-spatial Information Science, 2011, 14(1): 54-61.
- [5] 雷鸣,孔祥斌. 水资源约束下的黄淮海平原区土地利用结构优化[J]. 中国农业资源与区划, 2017,38(6): 27-37.
LEI Ming, KONG Xiangbin. Optimization of land use structure in Huang-Huai-Hai plain under water resources constraint [J]. China Agricultural Resources and Regional Planning, 2017,38(6): 27-37. (in Chinese)
- [6] 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.
CAO Shuai, JIN Xiaobin, YANG Xuhong, et al. Coupled MOP and GeoSOS-FLUS models research on optimization of land use structure and layout in Jintan District [J]. Journal of Natural Resources, 2019,34(6): 1171-1185. (in Chinese)
- [7] 田晓宇,徐霞,江红蕾,等. 退耕还林(草)政策下土地利用结构优化研究——以内蒙古太仆寺旗为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2018,28(增刊2): 25-30.
TIAN Xiaoyu, XU Xia, JIANG Honglei, et al. Optimization of land use structure under grain for green project: a case study in Taibus Banner in Inner Mongolia [J]. China Population, Resources and Environment, 2018,28(Suppl. 2): 25-30. (in Chinese)
- [8] 唐丽静,王冬艳,杨园园. 基于“多规合一”和生态足迹法的土地利用结构优化[J]. 农业工程学报, 2019,35(1): 243-251.
TANG Lijing, WANG Dongyan, YANG Yuanyuan. Optimization of land use structure based on multi-plan integration and ecological footprint method[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(1): 243-251. (in Chinese)
- [9] 宁珊,张正勇,周红武,等. 基于生态服务价值的玛纳斯河流域土地利用结构优化[J]. 生态学报, 2019,39(14): 5208-5217.
NING Shan, ZHANG Zhengyong, ZHOU Hongwu, et al. Optimization of land use structure based on ecological service value in Manas River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(14): 5208-5217. (in Chinese)
- [10] LI X, PARROTT L. An improved Genetic algorithm for spatial optimization of multi-objective and multi-site land use allocation [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2016,59: 184-194.
- [11] 莫致良. 基于蚁群算法的可扩展多目标土地利用优化配置[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
MO Zhiliang. Scalable multi-objective optimal allocation of land use based on ant colony algorithm [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [12] 张骏杰,高延利,蔡玉梅,等. 基于“多规合一”的市级国土空间优化方法——以烟台市为例[J]. 地理科学进展, 2018,37(8): 1045-1054.
ZHANG Junjie, GAO Yanli, CAI Yumei, et al. Spatial optimization on the municipal level based on “multiple planning integration”: a case study of Yantai City [J]. Progress in Geography, 2018,37(8): 1045-1054. (in Chinese)
- [13] 陈红,史云扬,柯新利,等. 生态与经济协调目标下的郑州市土地利用空间优化配置[J]. 资源科学, 2019,41(4): 717-728.
CHEN Hong, SHI Yongyang, KE Xinli, et al. Spatial optimization of land use based on the objective of coordinated ecological protection and economic development in Zhengzhou City [J]. Resources Science, 2019,41(4): 717-728. (in Chinese)
- [14] 刘耀林,郝弘睿,谢婉婷,等. 基于生态系统服务价值的土地利用空间优化[J]. 地理与地理信息科学, 2019,35(1): 69-74.
LIU Yaolin, HAO Hongrui, XIE Wanting, et al. Spatial optimization of land use based on ecosystem service value [J]. Geography and Geo-information Science, 2019,35(1): 69-74. (in Chinese)
- [15] 刘远书,高文文,侯坤,等. 南水北调中线水源区生态环境变化分析研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015,24(3): 440-446.
LIU Yuanshu, GAO Wenwen, HOU Kun, et al. Analysis and research on ecological environment change of water source area in Middle Route of South-to-North Water Transfer [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015,24(3): 440-446. (in Chinese)
- [16] 申怀飞,侯刚,魏庆伟,等. 南水北调中线水源区土地利用/覆被空间格局特征分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(6): 209-212.

- SHEN Huaifei, HOU Gang, WEI Qingwei, et al. Analysis of land use/cover spatial pattern in the middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013,20(6): 209–212. (in Chinese)
- [17] 刘克, 甘宇航, 张涛, 等. 南水北调中线工程核心水源区土地利用空间格局动态变化研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2019,42(4): 4–8.
- LIU Ke, GAN Yuhang, ZHANG Tao, et al. Study on the dynamic change of land use spatial pattern in the core water source region of the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Geomatics and Spatial Geographic Information, 2019, 42(4): 4–8. (in Chinese)
- [18] 马仲阳. 南水北调水源区流域生态环境可持续发展研究[J]. 河南水利与南水北调, 2018,47(2): 31–32.
- MA Zhongyang. Study on sustainable development of watershed ecological environment in the source region of South-to-North Water Diversion Project[J]. Henan Water Resources and South-to-north Water Transfer, 2018, 47(2): 31–32. (in Chinese)
- [19] 张帆, 任冲锋, 蔡宴朋, 等. 基于复合多目标方法的灌区水资源优化配置[J]. 农业机械学报, 2021,52(11): 297–304.
- ZHANG Fan, REN Chongfeng, CAI Yanpeng, et al. Optimal allocation of water resources in irrigation area based on compound multi-objective method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 297–304. (in Chinese)
- [20] 路昌, 韩笑, 韩会芹. 山东省土地利用转型与生态服务功能交叉敏感性研究[J]. 农业机械学报, 2020,51(10): 223–231.
- LU Chang, HAN Xiao, HAN Huiqin. Research on land use transition and ecological service function in Shandong Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 223–231. (in Chinese)
- [21] 申怀飞, 田庆久, 吴国玺. 南水北调中线水源区土地利用时空变化分析[J]. 水土保持研究, 2015,22(2): 204–208.
- SHEN Huaifei, TIAN Qingjiu, WU Guoxi. Spatial-temporal change of land use in water source region of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(2): 204–208. (in Chinese)
- [22] 王世东, 冯正英, 余洋, 等. 基于改进稳定映射法的土地利用/覆被变化轨迹分析[J]. 农业机械学报, 2020,51(8): 152–162.
- WANG Shidong, FENG Zhengying, YU Yang, et al. Land use/cover change trajectory analysis based on improved stable mapping method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 152–162. (in Chinese)
- [23] 王勇, 王世东. 基于 RSEI 的生态质量动态变化分析——以丹江流域(河南段)为例[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(3): 57–65.
- WANG Yong, WANG Shidong. Dynamic change of ecological quality based on RSEI: a case study of Danjiang River Basin (Henan Section)[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(3): 57–65. (in Chinese)
- [24] 游佩佩. 基于机器学习的江苏滨海湿地植被变化遥感监测[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- YOU Peipei. Remote sensing monitoring of vegetation change in Jiangsu coastal wetland based on machine learning[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2020. (in Chinese)
- [25] STORN P, RPICE K. Differential evolution a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341–359.
- [26] STORN P, RPICE K. Minimizing the real functions of the ICEC96 contest by differential evolution[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1996: 842–844.
- [27] 毕超超, 范勤勤, 王维莉. 基于策略自适应的多目标差分进化算法及其应用[J]. 计算机应用研究, 2020,37(7): 2016–2021.
- BI Chaochao, FAN Qinqin, WANG Weili. Multi-objective differential evolution algorithm based on strategy adaptive and its application[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(7): 2016–2021. (in Chinese)
- [28] 肖鹏, 邹德旋, 张强. 一种高效动态自适应差分进化算法[J]. 计算机科学, 2019, 46(增刊1): 124–132.
- XIAO Peng, ZOU Dexuan, ZHANG Qiang. An efficient dynamic adaptive differential evolution algorithm[J]. Computer Science, 2019, 46(Supp. 1): 124–132. (in Chinese)
- [29] 董宁, 王宇平. 求解约束优化问题的引导多目标差分进化算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(2): 569–575.
- DONG Ning, WANG Yuping. Guided multi-objective differential evolution algorithm for constrained optimization problems[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(2): 569–575. (in Chinese)
- [30] JAMES K, RUSSELL E. Particle swarm optimization[J]. IEEE International Conference on Neural Networks, 1995(4): 1942–1948.
- [31] 马世发, 何建华, 俞艳. 基于粒子群算法的城镇土地利用空间优化模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 321–326.
- MA Shifa, HE Jianhua, YU Yan. Spatial optimization model of urban land use based on particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 321–326. (in Chinese)
- [32] 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.
- WANG Diwen, LI Feixue, CHEN Dong. Optimization of land use allocation based on Pareto optimization and multi-objective particle swarm optimization[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(9): 2019–2029. (in Chinese)
- [33] 彭金金. 基于空间化粒子群算法的土地利用优化配置研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- PENG Jinjin. Research on optimal allocation of land use based on spatialized particle swarm optimization algorithm[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese)