

基于蜣螂算法优化的投影寻踪生态环境评价方法构建

刘英^{1,3}, 范雅慧¹, 衡文静¹, 许萍萍¹, 岳辉^{1,3}, 毕银丽^{2,3}, 牛鸿波⁴, 田少国⁴,
祖鹏举⁵, 曹满红⁵, 董起广⁵

(1. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 3. 西安科技大学 西部矿山生态环境修复研究院, 陕西 西安 710054; 4. 陕西省煤层气开发利用有限公司, 陕西 西安 710119; 5. 陕西生态产业有限公司, 陕西 西安 710061)

摘要: 矿山开采会破坏和占用大量土地资源, 对生态环境造成持久的负面影响, 因此评价矿区生态环境质量变化迫在眉睫。为了准确监测矿区生态环境质量, 以陕煤集团张家峁矿区 2000—2023 年 24 期逐年的 Landsat 影像为基础数据, 通过计算绿度 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、湿度 (Humidity Index, WET)、热度 (Land Surface Temperature, LST)、干度 (Normalized Differential Build-up and bare Soil Index, NDBSI) 4 项生态指标, 并采用基于果蝇优化算法的投影寻踪 (Fruit Fly Optimization Algorithm-Projection Pursuit Clustering, FOA-PPC)、基于粒子群优化算法的投影寻踪 (Particle Swarm Optimization-Projection Pursuit Clustering, PSO-PPC)、基于灰狼优化算法的投影寻踪 (Grey Wolf Optimizer-Projection Pursuit Clustering, GWO-PPC) 和基于蜣螂优化算法的投影寻踪 (Dung Beetle Optimizer-Projection Pursuit Clustering, DBO-PPC) 4 种种群智能优化算法构建矿区生态环境质量评价方法, 并利用平均相关度进行精度验证。结果表明: ① DBO-PPC 模型的平均相关度和类内聚集度均高于 PSO-PPC 模型、FOA-PPC 模型和 GWO-PPC 模型, 且与 EI 指数更接近, 表明 DBO-PPC 能更好的评估研究区生态环境; ② 基于 DBO-PPC 模型的张家峁矿区 2000—2023 年生态环境质量均值为 0.4, 生态环境质量以差和较差等级为主, 面积占比约 55.94%, 空间上呈西部差东部好, 常家沟水库的生态环境在研究期内表现为优等级, 矿区东北部和中部区域的生态环境较好, 植被覆盖较多; ③ 矿区发生沉陷面积占比为 81.28%, 沉陷最大值达 -0.15 m; 采区发生沉陷现象面积占比明显高于矿区, 占采区面积的 89.56%, 生态环境质量以 -0.000 4 的速率下降, 表明采矿活动使得研究区的地表发生了沉陷, 进而影响到生态环境。综上所述 DBO-PPC 模型在监测评价矿区生态环境质量方面具有较强的合理性, 从而为矿区生态环境可持续发展提供技术手段。

关键词: 种群智能优化算法; 投影寻踪; DBO-PPC; 生态环境评价

中图分类号: X87 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)06-2799-12

Ecological environment quality evaluation of Zhangjiamao mining area based on DBO-PPC model

LIU Ying^{1,3}, FAN Yahui¹, HENG Wenjing¹, XU Pingping¹, YUE Hui^{1,3}, BI Yinli^{2,3}, NIU Hongbo⁴, TIAN Shaoguo⁴,
ZU Pengju⁵, CAO Manhong⁵, DONG Qiguang⁵

收稿日期: 2023-12-15 修回日期: 2024-04-15 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.XH23.1696

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFF1303300); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目 (2023-JC-YB-266); 陕西煤业化工集团科研资助项目 (2022SMHKJ-B-J-54)

作者简介: 刘英 (1982—), 女, 山东滨州人, 副教授。E-mail: liuying712100@163.com

通讯作者: 岳辉 (1983—), 男, 山东淄博人, 讲师。E-mail: 13720559861@163.com

引用格式: 刘英, 范雅慧, 衡文静, 等. 基于蜣螂算法优化的投影寻踪生态环境评价方法构建[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2799-2810.

LIU Ying, FAN Yahui, HENG Wenjing, et al. Ecological environment quality evaluation of Zhangjiamao mining area based on DBO-PPC model[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2799-2810.



移动阅读

(1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Institute of Ecological Environment Restoration in Mine Areas of West China, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 4. Shannxi Coalbed Methane Development Co., Ltd., Xi'an 710119, China; 5. Shannxi Ecological Industry Co., Ltd., Xi'an 710061, China)

Abstract: Mining will destroy and occupy a large amount of land resources and cause lasting negative impact on ecological environment, so it is urgent to evaluate the change of ecological environment quality in mining area. In order to accurately monitor the ecological environment quality of the mining area, this study took 24 annual Landsat images of the Zhangjiamao Mining area from 2000 to 2023 as the basic data, and calculated four ecological indicators of NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), WET (Humidity Index, WET), LST (Land Surface Temperature, LST) and NDBSI (Normalized Differential Build-up and bare Soil Index, NDBSI). In addition, four population intelligent optimization algorithms including the Fruit Fly Optimization Algorithm-Projection Pursuit Clustering (FOA-PPC), the Particle Swarm Optimization-Projection Pursuit Clustering (PSO-PPC), the Grey Wolf Optimizer-Projection Pursuit Clustering (GWO-PPC) and the Dung Beetle Optimizer-Projection Pursuit Clustering (DBO-PPC) were used to derive the ecological environment quality evaluation method in the mining area, and the average correlation was used to verify the accuracy. The results showed that: ① The average correlation and intra class aggregation of the DBO-PPC model are higher than those of the PSO-PPC model, FOA-PPC model, and GWO-PPC model, and are closer to the EI index, indicating that the DBO-PPC model can better evaluate the ecological environment of the study area; ② Based on the DBO-PPC model, the average ecological and environmental quality of the Zhangjiamao mining area from 2000 to 2023 is about 0.4, and the ecological and environmental quality is mainly poor or relatively poor, accounting for about 55.94% of the total area. In terms of space, the ecological environment of the Changjiagou Reservoir is superior during the study period. The ecological environment in the northeastern and central areas of the mining area is better, with more vegetation coverage. ③ The proportion of subsidence area in the mining area is 81.28%, and the maximum subsidence is -0.15 m. Subsidence in the coal extraction area is significantly higher than that in the whole mining area, accounting for 89.56% of the coal extraction area, and the ecological environment quality decreases at a rate of -0.000 4, indicating that mining activities cause surface subsidence in the study area, which further affects the ecological environment. To sum up, the DBO-PPC model has a strong rationality in monitoring and evaluating the ecological environment quality in the mining areas, so as to provide technical means for the sustainable development of ecological environment in the mining areas.

Key words: Swarm intelligent optimization algorithm; projection pursuit; DBO-PPC; ecological environment evaluation

煤炭作为我国最主要的化石能源之一, 为我国的能源安全和社会稳定发展做出了巨大的贡献。神东煤田是我国已探明的最大煤田, 占全国探明储量的 15%, 相当于 50 个大同矿区、100 个抚顺矿区, 与俄罗斯的顿巴斯煤田和库兹巴斯煤田、德国的鲁尔煤田、美国的波德河煤田和阿巴拉契亚煤田、波兰的西里西亚煤田并称世界七大煤田。神东煤炭基地实际产能占全国总产能 15.85%^[1]。煤炭资源大规模的开发利用带来一定的经济价值的同时也造成了日趋严重的环境污染问题, 如: 煤炭开采导致的地表塌陷、土地开挖; 矿石提取导致的土地资源的破坏; 废渣和尾矿通过雨水或地下水的渗透造成的水资源的污染等, 加剧了对生态环境的破坏。如何快速准确地获取生态环境信息, 为绿色矿山建设提供数据支撑, 成为当前迫切需要解决的关键问题之一^[2]。因此准确监测、评价

矿区生态环境质量状况及其变化趋势, 对于加强环境治理和实现区域可持续发展目标至关重要^[3-6]。

目前广泛使用的生态环境质量评价方法主要有主成分分析法、层次分析法、人工神经网络、综合指数法等。陆施佳^[7]利用主成分分析法进行降维, 得到城市生态系统健康评价体系, 对北京市生态系统的健康和发展做出全面评估并提出针对建议; 李汉卿等^[8]基于自然环境和经济社会实体经济、环境污染综合治理 3 个不同维度, 采用层次分析法建立了环境评价衡量指标体系, 并对淮南市的生态环境质量进行了动态评价; 王富武等^[9]利用径向基神经网络模型定量评价了乌裕尔河流域的生态环境质量, 评价结果可作为该流域生态系统保护和恢复治理的依据; 郭少东等^[10]以植被覆盖度、叶面积指数、总初级生产力、表面温度和湿度 5 项指标, 耦合构建生态综合指数, 并结合主

成分分析与空间自相关方法分析陕西省沿黄地区生态质量时空变化特征。但该类方法的评价结果大多受到人为主观影响,难以实现对生态环境的客观、准确评价。

近年来,随着遥感技术的发展和广泛应用,利用遥感手段监测矿区生态环境质量也较为成熟。ZHU等^[11]考虑到评价单元与周围特征之间的关系,提出了基于移动窗口的遥感生态指数 MW-RSEI(Moving Window-based Remote Sensing Ecological Index),并将其应用到河南省的露天矿中;笔者^[12]在 RSEI(Remote Sensing Ecological Index, RSEI)的基础上引入了煤尘指数、盐度指标和土地退化指数,构建了适合于新疆五彩湾矿区的干旱煤矿生态指数 ACMEI(Arid Coal Mine Ecological Index);以上方法都是在 RSEI 的基础上进行构建指数,而 RSEI 在计算矿区生态环境时是选取第 1 主成分进行计算,但第 1 成分只集中了 70%~80% 的信息量,剩下的 20%~30% 信息则被舍弃,因此该指数不能完全反映干旱矿区的生态环境质量状况。桑潇等^[13]探索研究了矿区煤炭开采活动在不同阶段对各类型土地利用类型的影响和特征,利用强度分析理论对煤炭开采的矿区土地利用变化特征进行分析;刘立等^[14]为得到 2017 年湘西花垣铅锌矿区尾矿库基础数据,前序工作通过采取 BJ-2 号卫星遥感数据调查了花垣铅锌矿区尾矿库,并明确点评了尾矿库存在的主要隐患以及针对该问题提出相应的参考决议。

投影寻踪聚类(Projection Pursuit Clustering, PPC)是一种将高维数据投影到低维空间中,通过找到能够最大程度突出原始高维数据特征的一维数据的最优投影向量的方法。该方法对每个指标的变化相对敏感,可以通过比较预测值的大小来确定评估结果;克服了传统评估方法评价权重过于主观,指标对总目标的贡献及其正负方向不明确的问题。因其具有较好的鲁棒性、抗干扰性、可操作性以及精度高的优点,被广泛应用于各个领域。2021 年,OUYANG 等^[15]应用 PPM(Projection Pursuit Model)消除冗余指标,评估了江西省的生态环境情况,证明了采用投影寻踪方法进行生态环境质量评估的可行性;董朕等^[16]从经济系统、社会系统、环境系统、公共服务系统 4 个维度构建汉江生态经济带生态文明建设水平评价指标体系,基于汉江生态经济带 14 个城市的指标数据,运用投影寻踪模型对 14 个城市的生态文明建设水平进行测度,但该方法以数值表征研究区的生态环境情况,并不能从空间上反映研究区的生态环境分布情况。为进一步优化投影寻踪聚类评价生态环境质量的可行性,一

些学者也采用群智能算法对投影聚类进行优化,该类算法具备极强的适应性,能够将求解问题的目标函数量化为生物个体对环境的适应能力,针对工程优化问题建立目标函数,并使用适应度值和有效的个体更新指导信息,在整个解空间上不断向最优解的方向进行搜寻,具有较强的鲁棒性,被学者们进行了广泛的研究及应用。岳佳乐等^[17]结合胡家河矿区 2013—2020 年 8 期逐年 Landsat-8 影像数据,通过计算植被覆盖度和景观格局指数,建立了矿区生态环境质量指标评价体系,并基于多智能体遗传算法的投影寻踪聚类(Multi-Agent Genetic Algorithm-Projection Pursuit Clustering, MAGA-PPC)模型对该矿区的生态环境质量进行了评价,分析了矿区地下开采对生态环境的影响。然而现有的群智能优化投影寻踪聚类方法在评价矿区生态质量方面,仅局限在数值上的分析,缺少矿区生态环境质量在空间上的直观分布。

综合以上,笔者选择粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)、灰狼优化算法(Grey Wolf Optimizer, GWO)、果蝇优化算法(Fruit Fly Optimization Algorithm, FOA)以及蜣螂优化算法(Dung Beetle Optimizer, DBO)4 种基于自然界动物群体的启发式优化算法来实现群体智能的搜索和优化。以张家峁矿区为例,构建一种优于粒子群优化算法的投影寻踪的生态环境评价方法,并利用平均相关度进行验证,结合研究区特殊的地理环境对其生态环境质量进行评价,选取精度最高的方法进行生态环境评估,该方法不仅能够数值上分析矿区生态环境质量变化,且能够实现矿区生态环境质量在空间上的分布,因此本研究的目的是提供一种更加准确客观的区域内评估生态环境质量的方法,这项研究的结果可以为矿区环境监测治理和科学控制人类活动提供资料依据,为矿区的可持续发展和合理开采提供技术参考。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

张家峁矿区位于陕西省榆林市神木县北部,距神木县城约 36 km,行政区划隶属神木县店塔镇管辖,东部为煤层露头,南部与红柳林和吃开沟煤矿邻近,西部和柠条塔煤矿接壤,北部是以地方煤矿的整合区为界,整个矿区南北长约为 6.9 km,东西宽约为 10.0 km,矿区面积约为 51.98 km²。张家峁煤矿的矿区地面工程主要包含工业场地以及生活区、风井场地、二号风井场地、老炸药库、新炸药库、场外道路、供电工程以及新、老排矸场等,煤矿地面工程的总占地面积约为 44.60 hm²,包含永久用地面积约 34.85 hm² 和临时用

地面积 9.75 hm², 张家崙矿区于 2006 年 12 月开工建设, 2010 年 2 月投产, 多为井工开采方式, 生产规模为 6.0 Mt/a, 至今已开采 14 a, 并且根据其煤矿开发利用方案与最新核定储量显示煤矿剩余设计可开采储量约为 487.2 Mt^[18]。区内地貌分为风沙滩地区、河谷区及黄土丘陵沟壑区 3 种类型, 以单家阿包、贺家窑至常家沟水库一线为界, 西及西南为风沙滩地区, 东

与东北为黄土梁峁丘陵区, 河谷区位于井田中部的常家沟谷地段。区内地表被松散沙层覆盖, 地势相对较为平坦, 矮丘状固定沙丘和新月形半固定沙丘呈波状起伏。植被以沙地植被为主 (沙蒿、沙柳), 并有少量幼杨林, 生长季短, 休眠期长, 覆盖率低, 抗干扰能力弱。综上所述, 生态环境保护与煤炭资源开发是目前最主要的矛盾。研究区概况如图 1 所示。

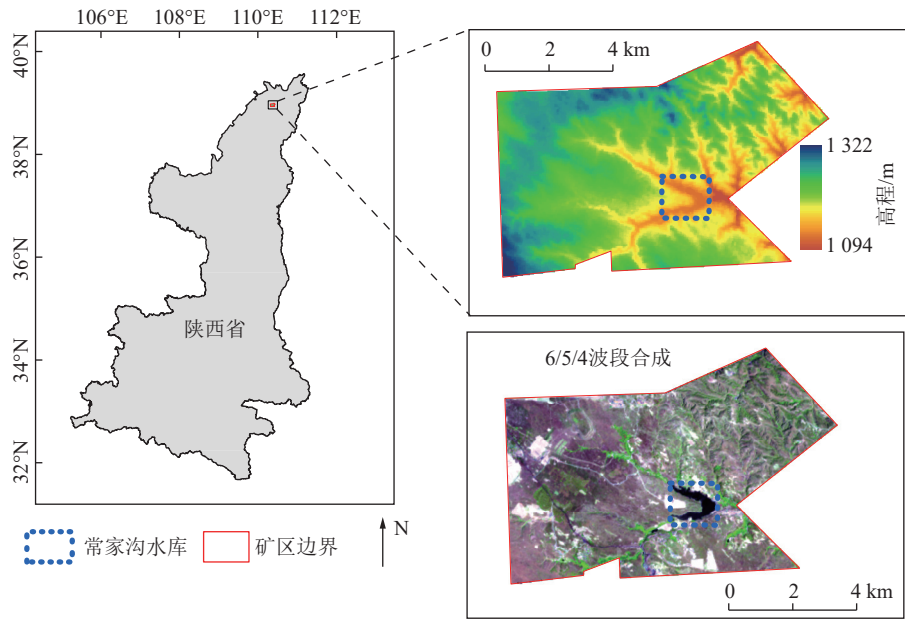


图 1 研究区概况

Fig.1 Summary of the study area

1.2 数据来源及预处理

本研究选择 2000—2023 年空间分辨率为 30 m 的 Landsat 数据, 共 24 景遥感影像数据, 其来源于美国地质调查局 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。每年优选植被长势好的 6、7、8 三月份, 云量小于 10% 的影像 (表 1)。Landsat 影像数据预处理包括: 辐射定标、大气校正、裁剪及对 Landsat7 影像进行条带修复等。对比现有 Landsat 影像可以发现张家崙矿区自

2009 年开始进行采矿, 则认定 2009 年以前为采矿活动发生前、2009 年以后为采矿活动发生后。

2 研究方法

归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 是生态环境评价中的重要指标。该指数可以有效地反映植被的生长情况与植被覆盖度等重要的物理性质, 能够较为真实的展现区域的地表空间变化规律, 是最为常用的植被指数且应用十分广泛; 干度指标 (NDBSI) 表示地表的干化程度, 土地的干化程度会使植物的根系吸收的水分变少, 但叶片的蒸腾作用不会减少或停止, 致使植被体内的水分收支失衡, 进而影响到植被的生长, 最终导致生态环境的恶化; 地表湿度 (Wetness Component, WET) 可以反映土壤等下垫面的湿度状态, 土壤湿度在气候、环境、生态等研究与应用方面起着重要作用, 土壤湿度的高低能够很好地反映区域的生态环境质量状况, 是监测地表环境的重要指标; 热度指标由地表温度 (Land Surface Temperature, LST) 来表示, 地表温度通常被称为地层表面的温度, 是表示地表能量平衡的一个重要参

表 1 影像来源

Table 1 Image information

数据源	获取日期	分辨率
Landsat5 TM	2000-08-24、2001-06-24、2002-06-11、 2003-08-17、2004-09-20、2005-06-03、 2006-09-10、2007-06-25、2008-06-27、 2009-06-30、2010-10-07、2011-08-07	30 m×30 m
Landsat7 ETM+	2012-09-18	
Landsat8 OLI	2013-08-12、2014-08-15、2015-07-01、 2016-09-21、2017-09-08、2018-07-25、 2019-09-30、2020-05-11、2021-08-02、 2022-06-18、2023-07-23	

数,也是生态环境评价中的重要指标。

因此笔者首先对 NDVI、WET、NDBSI 和 LST 四个评价指标进行预处理,并结合粒子群优化算法、果蝇优化算法、灰狼优化算法和蜣螂优化算法 4 种群智能优化算法来分别确定最佳投影方向,再利用投影寻踪聚类方法对张家岭矿区生态环境质量进行评估,并利用平均相关度进行精度验证,最后对评估结果进行归一化,将归一化后的生态环境评估结果分为 5 类:差 (0~0.2)、较差 (0.2~0.4)、中 (0.4~0.6)、良 (0.6~0.8)、优 (0.8~1),最终形成面向区域的张家岭矿区生态环境结果图。技术路线如图 2 所示。

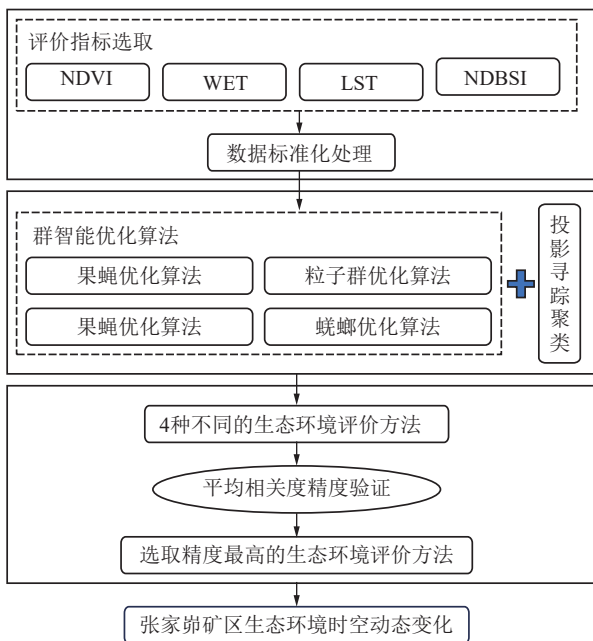


图2 技术路线

Fig.2 Technical route

2.1 群智能优化算法投影寻踪模型的建立

2.1.1 指标计算及预处理

笔者利用影像计算了 NDVI、WET、NDBSI 和 LST 四个指标,并利用该指标计算 2000—2023 年张家岭矿区的生态环境情况。为避免评价指标间量纲的影响,需对 NDVI、WET、NDBSI 和 LST 四个指标进行标准化处理^[19]。

效益性指标:

$$x_{ij} = (x_{ij}^0 - x_{jmin}) / (x_{jmax} - x_{jmin}) \quad (1)$$

成本性指标:

$$x_{ij} = (x_{jmax} - x_{ij}^0) / (x_{jmax} - x_{jmin}) \quad (2)$$

其中, x_{ij}^0 为样本 i 的第 j 个指标值; x_{jmax} 和 x_{jmin} 为第 j 个评价指标中的最大值和最小值。效益型指标的数值越大越好,成本性指标的数值越小越好。

2.1.2 群智能算法优化投影指标函数

寻找最优投影向量 \mathbf{a} 为投影寻踪的一个关键问题,当各指标样本集给定时, $Q(\mathbf{a})$ 只随投影向量 \mathbf{a} 变化,当 \mathbf{a} 取得最优时, $Q(\mathbf{a})$ 便取得其最大值,于是,将寻找最优投影方向问题转化为式 (3) 的优化问题,笔者采用 PSO、FOA、GWO、DBO 四种种群智能优化算法进行求解,公式为

$$\begin{cases} \max Q(\mathbf{a}) \\ \|\mathbf{a}\| = 1 \end{cases} \quad (3)$$

2.1.3 投影寻踪算法 (Projection Pursuit Clustering, PPC)

设投影方向为 $a_j (j=1, 2, \dots, m)$, 则第 i 个样本的一维投影特征值为

$$Z_i = \sum_{j=1}^m a_j x_{ij} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

通过最大化投影值 Z_i 的标准差 $s(\mathbf{a})$ 和类内密度 $d(\mathbf{a})$ 来寻找最优投影方向^[20-21], 投影指标 $Q(\mathbf{a})$ 函数表达式为

$$Q(\mathbf{a}) = s(\mathbf{a})d(\mathbf{a}) \quad (5)$$

最优投影方向为

$$\max \{Q(\mathbf{a}) = s(\mathbf{a})d(\mathbf{a})\} \quad (6)$$

$$\text{st} \sum_{i=1}^n a_i^2 = 1 \quad (7)$$

$s(\mathbf{a})$ 和 $d(\mathbf{a})$ 的计算公式为

$$s(\mathbf{a}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2} \quad (8)$$

$$d(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n [(R - r_{ik})u(R - r_{ik})] \quad (9)$$

式中, \bar{Z} 为序列 $\{Z(i) | i = 1, 2, \dots, n\}$ 的平均值; r_{ik} 为两方案投影值间的距离 $r_{ik} = |Z_i - Z_k|$; $u(R - r_{ik})$ 为单位阶跃函数, 当 $R > r_{ik}$ 时, $u(R - r_{ik}) = 1$, 否则, $u(R - r_{ik}) = 0$; R 的取值范围为 $\frac{\max(r_{ik})}{5} \leq R \leq \frac{\max(r_{ik})}{3}$ 。

因此,笔者基于 PSO、FOA、GWO、DBO 四种种群智能优化算法与 PPC 结合,构建了 PSO-PPC、FOA-PPC、GWO-PPC、DBO-PPC 生态环境评价方法。

2.2 精度验证

笔者采用平均相关度、类内和类间分散度和与已有生态环境评价方法的对比对本文构建的方法进行验证。

2.2.1 平均相关度

相关度具有反映不同变量之间相互关系的特点,

相关系数计算方法为通过对原有不同变量进行主成分分析,利用所生成的新指数与原有的变量之间的线性相关生成相关矩阵。平均相关度表示的是不同事物之间关系的密切程度,平均相关度越接近于1,其相关程度越高^[22]。相关系数的数值在0~1范围,数值为0代表变量间无相关性,数值为1代表变量间完全相关。相关系数数值越高,说明所生成的改进的遥感生态指数表征研究区域的生态环境质量越好。其中平均相关度是生成评价指标与分量指标之间的相关系数值之间的绝对值平均数,其计算公式为

$$C_{\text{mean}} = \frac{|C_a| + |C_b| + \dots + |C_n|}{n-1} \quad (10)$$

式中, C_{mean} 为该指标的平均相关度,分式 $|C_a| + |C_b| + \dots + |C_n|$ 为各参数与计算指标的相关系数值。

2.2.2 类内和类间分散度

使用信息熵来测量类内和类间投影点的离散度^[23]。

(1) 类内聚集度。计算第 g 类中投影点的信息熵,

$w(g) = \sum_{v=1}^5 z(g, v)$, $p(g, v) = z(g, v)/w(g)$, ($v=1, 2, \dots, 5$) 并且类内投影点的信息熵定义为

$$H(g) = - \sum_{v=1}^5 p(g, v) \log_2 p(g, v) \quad (11)$$

$$H_D = \sum_{v=1}^5 H(g) \quad (12)$$

其中, $H(g)$ 为类内的投影点的聚合度。当类内的投影点更集中时, $H(g)$ 就更大。对所有类别的熵值求和,即当 H_D 较大时,投影点更集中在局部。

(2) 全局分散度。类之间的信息熵可以定义为

$$H_S = - \sum_{v=1}^5 p(g) \log_2 p(g) \quad (13)$$

其中, H_S 为类之间投影点的离散性。当投影点更加分散时,

H_S 较小。其中, $\bar{w}(g) = \frac{1}{5} \sum_{v=1}^5 z(g, v)$, $p(g) = \bar{w}(g) / \sum_{v=1}^m \bar{w}(v)$ 。

2.2.3 与已有生态环境评价方法的对比

笔者将构建的4种生态环境评价方法与徐涵秋提出的RSEI^[24]以及生态环保部提出的生态指标EI进行对比。

2.3 趋势分析

为了动态的反映矿区生态环境的空间变化趋势,笔者利用一元线性回归模型进行分析。将结果分为退化区域、无变化区域和改善区域。计算公式为

$$S_{\text{lope}} = \frac{n \sum_{u=1}^n (u, M_{\text{RSEL}, u}) - \sum_{u=1}^n \sum_{u=1}^n (u, M_{\text{RSEL}, u})}{(n-1) \sum_{u=1}^n u^2} \quad (14)$$

式中,变量 u 为年序号; $M_{\text{RSEL}, u}$ 为第 u 年的生态环境情况。

若 $S_{\text{lope}} \leq -0.001$, 则表明生态环境质量变差; 若 $-0.001 < S_{\text{lope}} \leq 0.001$, 则表明生态环境基本无变化; $S_{\text{lope}} > 0.001$ 表明生态环境改善。进一步对 S_{lope} 影像进行显著性检验,并将最终结果分成7类: 极显著改善 ($S_{\text{lope}} > 0.001, P \leq 0.01$)、显著改善 ($S_{\text{lope}} > 0.001, 0.01 < P \leq 0.05$)、轻微改善 ($S_{\text{lope}} > 0.001, 0.05 < P \leq 0.1$)、无明显变化 ($-0.001 < S_{\text{lope}} \leq 0.001$)、轻微退化 ($S_{\text{lope}} \leq -0.001, 0.05 < P \leq 0.1$)、显著退化 ($S_{\text{lope}} \leq -0.001, 0.01 < P \leq 0.05$)、极显著退化 ($S_{\text{lope}} \leq -0.001, P \leq 0.01$)。

3 结果分析

3.1 精度验证

3.1.1 平均相关度

通过计算DBO-PPC模型、PSO-PPC模型、FOA-PPC模型和GWO-PPC模型4种算法2000—2023年的平均相关度(表2),发现DBO-PPC模型和PSO-PPC模型、FOA-PPC模型和GWO-PPC模型计算的24a的平均相关度中大部分年份的平均相关度一致,DBO-PPC模型和PSO-PPC模型的平均相关度在2002年、2003年、2010年、2012年不一致,其余年份的平均相关度均一致;FOA-PPC模型和GWO-PPC模型的平均相关度在2000年、2001年、2023年不一致,其余年份均一致。DBO-PPC模型、PSO-PPC模型、FOA-PPC模型和GWO-PPC模型的均值分别为0.771 3、0.770 4、0.701 6、0.717 2,优于分指标的平均相关度;且DBO-PPC模型的平均相关度高于其他3种算法的平均相关度,表明DBO-PPC模型相较于其他算法能更好的评估研究区的生态环境。

3.1.2 聚类方法内部指标的比较

为了进一步验证DBO-PPC的合理性,利用信息熵计算了4种算法的类内聚集度和全局分散度,类内聚集度越大,全局分散度越小,代表模型越好。由表3可知,DBO-PPC的类内聚集度最大,全局分散度最小,说明该模型优于其余3种。

3.1.3 与EI、RSEI的对比

根据陕西省生态环境厅发布的生态环境状况公报中神木县2019—2022年的EI数据,将DBO-PPC归

表 2 不同指标和 4 种算法的平均相关度
Table 2 The average correlation between different metrics and the four algorithms

年份	分指标				生态环境评价方法			
	LST	NDBSI	NDVI	WET	DBO-PPC	FOA-PPC	GWO-PPC	PSO-PPC
2000	0.711 4	0.723 1	0.702 4	0.694 6	0.800 2	0.364 0	0.738 4	0.800 2
2001	0.391 2	0.324 6	0.154 8	0.297 1	0.535 8	0.511 0	0.511 2	0.535 8
2002	0.557 3	0.516 0	0.480 0	0.604 7	0.692 6	0.606 3	0.606 3	0.692 2
2003	0.752 3	0.799 2	0.761 8	0.746 3	0.855 3	0.810 9	0.810 9	0.848 0
2004	0.719 2	0.657 9	0.715 1	0.695 7	0.819 2	0.761 8	0.761 8	0.819 2
2005	0.585 4	0.600 2	0.524 6	0.586 4	0.708 0	0.630 7	0.630 7	0.708 0
2006	0.712 9	0.700 5	0.672 9	0.703 5	0.814 7	0.757 4	0.757 4	0.814 7
2007	0.663 7	0.579 1	0.587 9	0.673 2	0.771 9	0.695 8	0.695 8	0.771 9
2008	0.726 6	0.749 8	0.665 9	0.714 6	0.820 1	0.764 1	0.764 1	0.820 1
2009	0.606 3	0.612 0	0.578 6	0.579 6	0.723 5	0.638 8	0.638 8	0.723 5
2010	0.614 9	0.478 8	0.516 2	0.572 9	0.717 0	0.632 6	0.632 6	0.705 7
2011	0.727 2	0.760 7	0.696 7	0.713 8	0.849 1	0.813 4	0.813 4	0.849 1
2012	0.262 1	0.148 5	0.169 4	0.259 3	0.481 6	0.496 5	0.496 5	0.480 8
2013	0.765 8	0.820 2	0.709 8	0.740 2	0.868 4	0.843 7	0.843 7	0.868 4
2014	0.807 5	0.846 9	0.730 1	0.797 1	0.893 6	0.876 3	0.876 3	0.893 6
2015	0.668 8	0.757 6	0.530 7	0.646 0	0.817 2	0.793 4	0.793 4	0.817 2
2016	0.655 5	0.664 9	0.608 4	0.670 5	0.784 6	0.729 2	0.729 2	0.784 6
2017	0.363 4	0.631 9	0.458 8	0.538 3	0.640 0	0.436 5	0.436 5	0.640 0
2018	0.727 5	0.793 9	0.668 2	0.735 8	0.864 3	0.843 0	0.843 0	0.864 3
2019	0.726 0	0.757 6	0.606 0	0.713 1	0.837 4	0.806 6	0.806 6	0.837 4
2020	0.639 8	0.633 3	0.605 4	0.689 1	0.781 9	0.722 3	0.722 3	0.781 9
2021	0.678 0	0.773 8	0.578 1	0.714 2	0.823 1	0.791 4	0.791 4	0.823 1
2022	0.614 1	0.749 8	0.604 8	0.739 1	0.806 8	0.762 1	0.762 1	0.806 8
2023	0.628 4	0.746 8	0.584 1	0.738 8	0.804 2	0.751 6	0.751 5	0.804 2
平均	0.637 7	0.659 5	0.579 6	0.648 5	0.771 3	0.701 6	0.717 2	0.770 4

表 3 算法类内聚集度和全局分散度比较
Table 3 Comparison of clustering degree and global dispersion degree within the algorithm class

算法	DBO-PPC	FOA-PPC	GWO-PPC	PSO-PPC
类内聚集度	66.488 7	66.401 0	66.375 6	66.485 7
全局分散度	2.072 6	2.075 9	2.075 0	2.074 6

到 0~100,并将其与 EI 进行对比。由表 4 可知,RSEI 与 EI 值相差较大;2019 年,DBO-PPC 和 PSO-PPC 离 EI 更近;2020 年和 2022 年 DBO-PPC 和 PSO-PPC 的计算结果均在 EI 范围内;2021 年,虽然 FOA-PPC 和 GWO-PPC 离 EI 更近,但 DBO-PPC 和 PSO-PPC 的计算结果与 FOA-PPC 和 GWO-PPC 相差较小。综上所述,FOA-PPC 和 GWO-PPC 的计算结果与 EI 更接近。

表 4 4 种算法与 EI 指数的对比
Table 4 Comparison between four algorithms and EI index

项目	2019年	2020年	2021年	2022年
EI	30~40	30~40	40~55	40~55
DBO-PPC	41.92	37.71	39.11	46.76
PSO-PPC	41.92	37.71	39.11	46.76
GWO-PPC	42.12	40.30	39.40	45.99
FOA-PPC	42.11	40.29	39.40	45.99
RSEI	45.99	37.22	34.97	47.48

3.2 矿区生态环境质量时空分析

基于 DBO-PPC 模型评估的张家崙矿区生态环境不同等级面积占比情况,如图 3 所示。张家崙矿区生态环境质量以差和较差等级为主,平均占比分别为 29.44% 和 26.05%,总和约为 55.49%,约占矿区将近

一半的面积;中等和良好的面积占比平均占比分别为 19.98% 和 13.07%,优等级面积占比最少,约为 11.45%;变化幅度方面,差等级面积在采矿前波动幅度较小,2009 年发生采矿活动后随着开采力度加强 2010—2020 年差等级面积呈现逐步上升的趋势,2020 年差等级面积占比达到最大约为 35.88%,之后差等级面积逐步下降,这可能与矿区生态环境保护措施有关;较差等级面积变化幅度波动较小,采矿前后面积占比分别约为 25.99% 和 26.09%;中等面积变化幅度较大,面积占比由 2000 年 14.25% 上升至 2023 年 27.71%,其中 2011 年、2014 年和 2022 年面积占比达 25% 以上;良好和优等变化幅度较为稳定,面积占比大约保持在 10% 左右。

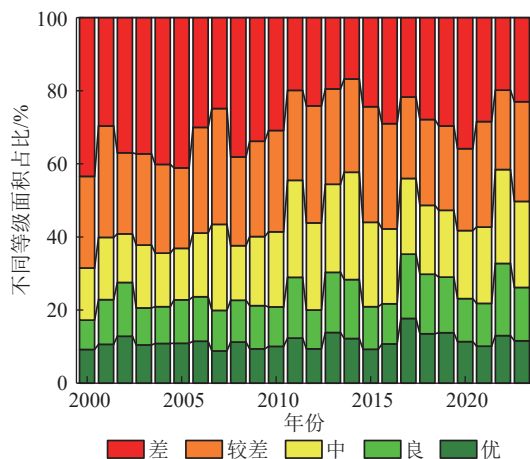


图 3 DBO-PPC 模型生态环境质量不同等级面积占比变化

Fig.3 Change of area proportion of different grades of ecological environmental quality in DBO-PPC model

由图 4 可知,2000—2023 年矿区生态环境质量整体表现为上升趋势,2000—2008 年采矿前研究区生态环境质量在 0.3~0.4 波动,以每年 0.002 9 速率呈急速上升趋势,研究区生态环境变化浮动较大;2010—2023 年采矿活动发生后研究区生态环境质量均值在 0.2~0.4 波动,采矿活动发生后生态环境质量整体以每年 0.001 5 速率呈缓慢上升趋势,整体趋于稳定,这可能与矿区边开采边复垦有关,以确保矿区生态稳定发展。

DBO-PPC 模型评估的研究区生态环境质量状况在空间分布上如图 5 所示,研究区的生态环境情况整体上呈西部差东部好的趋势,常家沟水库的生态环境在研究期内表现为优等级,矿区东北部和中部区域的生态环境较好,植被覆盖较多。随着矿区内煤炭的开采,2000—2013 年生态环境较差,在 2014—2023 年,与研究区生态环境较优的东北部区域相比,西部生态环境普遍较差,但是其生态环境在这几年中呈变好趋

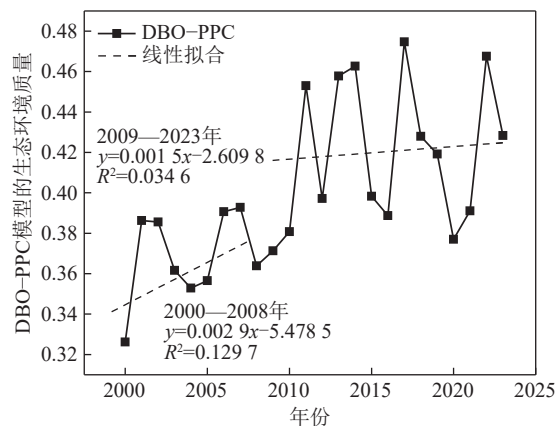


图 4 DBO-PPC 模型生态环境质量变化趋势

Fig.4 Change trend of ecological environment quality in DBO-PPC model

势。在 2016—2023 年中随着研究区采矿规模的加大,矿区生态环境又开始变差。

3.3 采矿活动对生态环境的影响

3.3.1 矿区地表形变的影响

笔者采用 ENVI 中 SARscape 做张家岭矿区 2017—2023 年的地表形变情况,如图 6(a) 所示,地表形变小于 0 为沉陷区。从矿区整体角度出发,张家岭矿区 2017—2023 年发生沉陷面积占比为 81.28%,主要集中在矿区的中北部区域,整个矿区发生上升面积占比为 18.72%,主要集中在矿区的中部区域,其中,上升最大达 0.11 m,沉陷最大达 -0.15 m,均值为 -0.024 m,矿区整体出现轻微下沉,这可能是由于沉陷导致土壤退化、植被破坏等原因所引起,而常家沟水库所处区域发生了上升形变且生态环境质量较好。由图可知,采区 1、采区 2、采区 3 以及采区 4 的周围均存在沉陷严重区,表明采矿活动会使得地表发生沉陷;矿区西部的沉陷可能与研究区的气候原因有关,研究区常年多风沙,土壤松散,易发生风蚀。

从采区角度出发,采区发生沉陷现象占比明显高于矿区,占采区整体地表形变面积的 89.56%,采区 1 回采时间在 2012—2015 年,但由于并未采取治理措施,故沉陷现象依旧较为严重,占采区 13.76%,其所在区域自 2015 年停止回采后,生态环境质量较为波动,但整体相对较好;采区 2 回采时间在 2010—2022 年,回采时间较长,沉陷发生程度较深,范围较大,占采区整体面积的 55.8%,但其西部和东部地区因受到了人为治理,发生沉陷面积明显低于其中部地区,另外,采区 2 东部区域生态环境质量呈现先变坏再变好趋势而西部及中部区域一直处于较差状态;采区 3 回采时间在 2020—2022 年,且被治理面积已超过 1/4,故沉陷发生情况较少,占采区整体面积的 12.02%,生态环

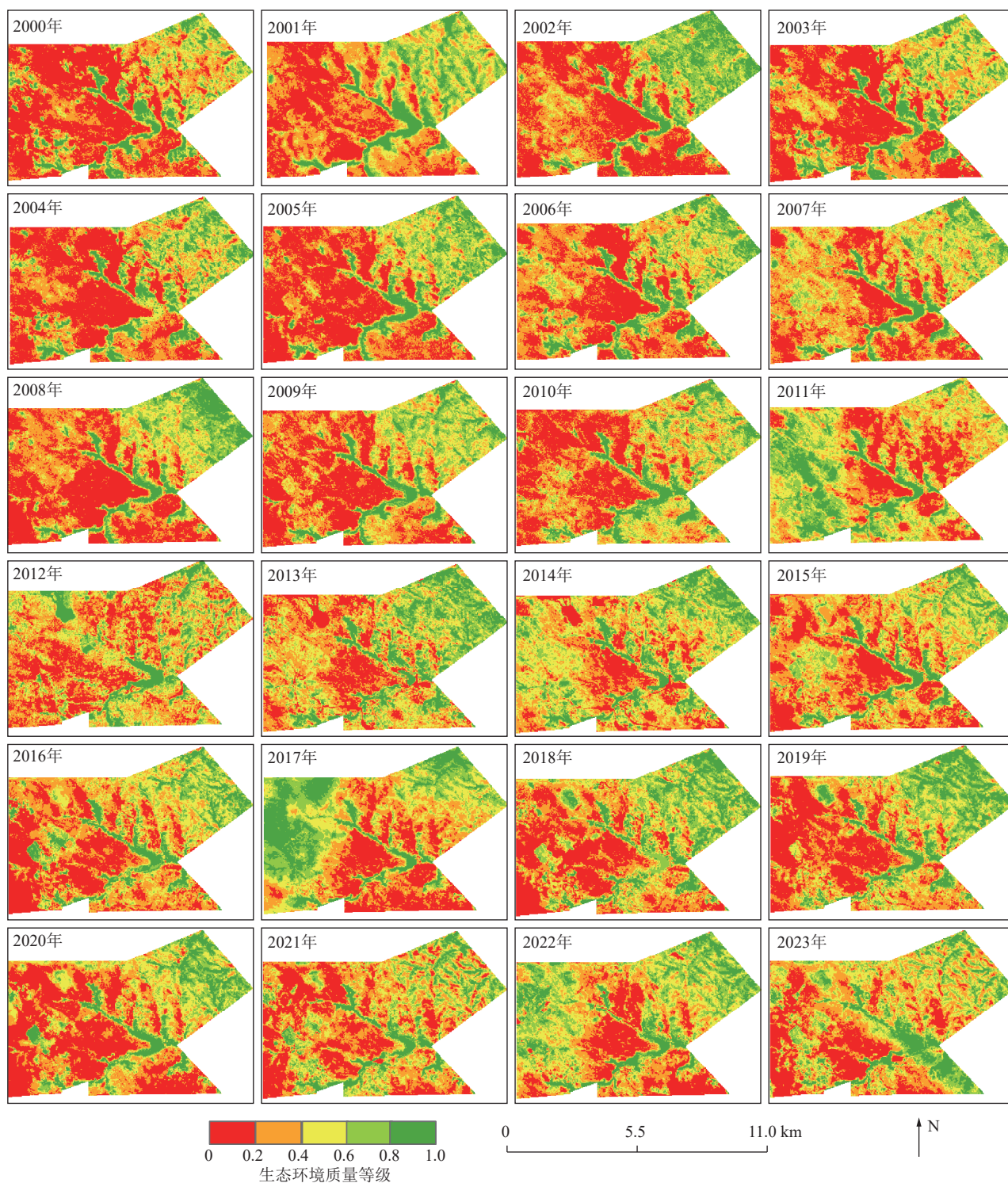


图 5 DBO-PPC 模型生态环境质量时空分布

Fig.5 Spatial and temporal distribution of ecological environmental quality of DBO-PPC model

境质量在 2020 年整体较差, 然后于 2021—2023 年发生轻微好转现象; 采区 4、5 发生沉陷面积占比不足百分之十, 但采区 4 的东北部区域下方发生了较为集中的沉陷现象。采区 4 生态环境除 2018 年表现较好外, 2019—2023 年间一直处于较差状态, 而采区 5 因在 2023 年才进行回采, 故生态环境质量相对较好。

如图 6(b) 所示, 笔者采用 Slope 趋势检验分析张

家岭矿区 2000—2023 年的基于 DBO-PPC 模型的生态环境时空演变格局, 进一步说明研究区生态环境质量变化情况。

从 24 a 总体来看, 张家岭矿区生态环境无明显变化区域占比 59%, 有 31% 的区域得到了改善, 其中显著改善占比 16%, 主要分布在矿区西北部 and 东南部, 其中, 相比采区 1、采区 2, 发生沉陷较少的采区 3、4、

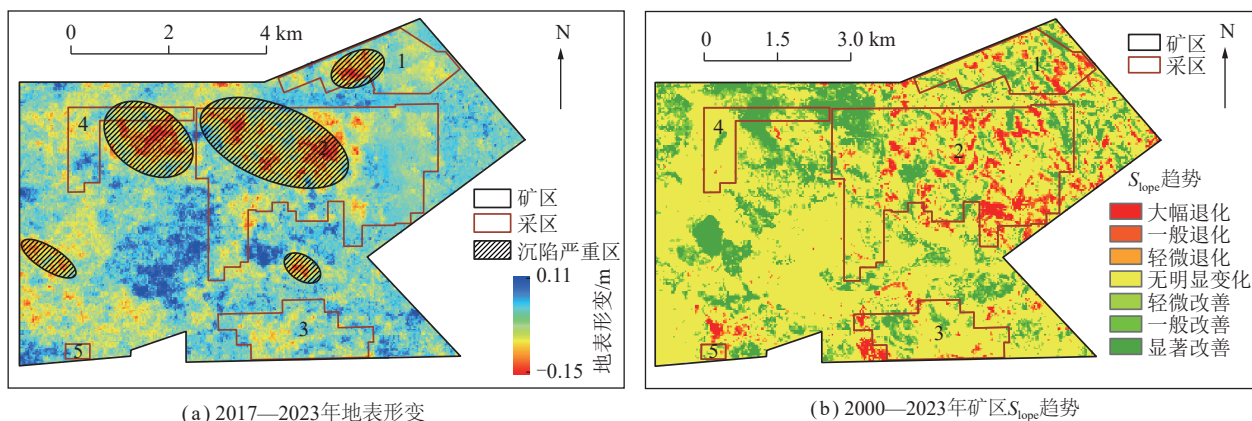


图6 2017—2023年地表形变及2000—2023年矿区 Slope 显著性检验

Fig.6 2017–2023 Surface deformation map and 2000–2023 Slope significance test of mining area

5 整体呈现改善趋势,而采区 1、2 则发生了大量退化,采区 1 发生退化区域也相应存在较多沉陷现象,采区 2 退化区域主要集中在其中部区域,东部及西部东区相对较好,与沉陷分布现象较为一致。

3.3.2 采区与非采区生态环境质量差异分析

图 7 为 2000—2023 年基于 DBO-PPC 模型的矿区整体、采区及非采区生态环境质量趋势,24 a 间,矿区和非采区生态环境质量都整体呈现上升趋势而采区生态环境质量趋势较为波动。其中,2000—2010 年(采矿前),矿区和非采区上升趋势相对平稳,速率分别为 0.002 3 和 0.003 7,而采区整体生态环境质量以 -0.000 4 的速率缓慢下降。但由于采区主要分布在研究区东部植被覆盖度较高区域,故采区生态环境质量明显高于非采区和矿区整体生态环境质量;2010—2023 年(采矿后),采区和非采区生态环境质量变化趋势波动较大,矿区和采区整体呈现上升趋势,均值速率分别为 0.000 2 和 0.001,而非采区均值速率为 -0.000 2。2010—2012 年采区 2 开始回采,采区生态

环境质量明显下降,且由高于非采区及矿区整体转为低于非采区及矿区整体;2012—2015 年随着采矿活动的推进,矿区治理行为也开始同步进行,故采区生态环境质量整体又恢复到高于非采区及矿区的状态;2015—2016 年采区 1 回采结束采区生态环境质量发生了一个短暂的小幅度提升;2016—2018 年,除采区 2 外,并未加入其他采区的采矿活动,而采区 2 在开采的同时持续加大生态环境的人为恢复,故采区生态环境质量呈上升趋势;2018—2023 年,采区 4、采区 3 和采区 5 依次开始进行采矿活动,故采区整体生态环境质量又出现明显下滑。表明人为开采行为对矿区生态环境产生负面影响,但可通过一系列治理措施来恢复。

4 讨 论

蜣螂优化算法则是一种基于蜣螂在滚球过程中寻找最佳路径的启发式优化算法。相较于 PSO、FOA、GWO, DBO 具有以下优势:通过模拟蜣螂在滚动粪球过程中的行为能够调整移动速度和转向角等参数来确定权重,利用了自然界中生物的智能特征,提高了算法的适应性和鲁棒性;该算法受到了蜣螂在复杂环境中寻找最佳路径和应对不同障碍的启发,使其在确权的过程中会更加注重局部搜索能力,有助于处理复杂问题,避免陷入局部最优解并加速全局搜索;蜣螂之间通过信息传递和社会性的行为来调整自身状态,该算法将其应用于确定权重的过程中,有助于加强群体内部的合作和协同进化,从而提高算法的搜索效率;DBO 中可能存在针对特定情况下的动态权重调整策略,这使得算法能够更好地应对不同问题的变化。故蜣螂优化算法在确定权重的机理方面通过借鉴蜣螂的行为特征和社会性,结合探索性、适应性以及动态调整等优势,能够更有效地应用于复杂优化问题的求

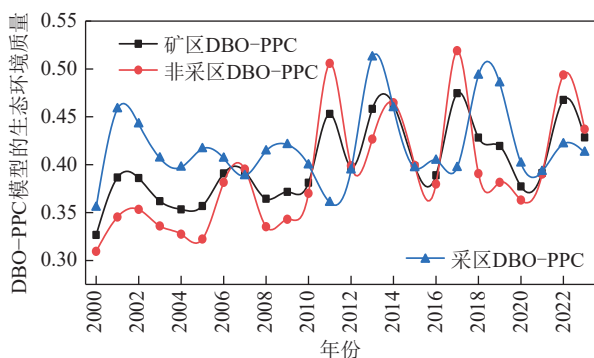


图7 2000—2023年基于 DBO-PPC 模型的矿区整体、采区及非采区生态环境质量趋势

Fig.7 Ecological and environmental quality trends of the whole mining area, mining area and non-mining area based on the DBO-PPC model from 2000 to 2023

解, 提高算法的搜索效率和全局收敛性。因此, 笔者文选取 DBO-PPC 进行生态环境的评估; 但 PPC 算法在每一步迭代中都需要进行计算密集型的矩阵运算, 计算成本较高, 需采用较高配置的设备。

5 结 论

(1) 通过 4 种不同方法构建的指数与 EI 进行比较, 以及计算平均相关度、类内聚集度和全局分散度, 发现基于蜣螂优化算法的投影寻踪计算结果更优, 相较于其他算法能更好的评估研究区的生态环境。

(2) 基于 DBO-PPC 模型评估的张家峁矿区 2000—2023 年生态环境质量均值为 0.4, 生态环境质量以差和较差等级为主, 面积占比约 55.94%, 整体上呈西部差东部好的分布, 常家沟水库的生态环境在研究期内表现为优等级, 矿区东北部和中部区域的生态环境较好, 植被覆盖较多。

(3) 张家峁矿区 2017—2023 年发生沉陷面积占比为 81.28%, 整体出现轻微下沉现象, 采区 1、2 沉陷现象较为严重, S_{lope} 趋势分析呈退化趋势, 3、4、5 相对较好, 整体呈现改善趋势。

参考文献(References):

- [1] 陈静. 神东矿区生物多样性的保护与恢复[J]. 煤炭工程, 2023, 55(S1): 182–187.
CHEN Jing. Conservation and restoration of biodiversity in Shendong mining area[J]. Coal Engineering, 2023, 55(S1): 182–187.
- [2] 李晶, 李生财, 郭伟, 等. 基于改进遥感生态指数的山西省及煤炭矿区生态环境分析[J]. 金属矿山, 2023(1): 30–39.
LI Jing, LI Shengcai, GUO Wei, et al. Ecological environment analysis of Shanxi Province and coal mining areas based on modified remote sensing ecological index[J]. Metal Mine, 2023(1): 30–39.
- [3] 李嘉琪, 赵艳玲, 任河, 等. 自燃煤矸石山的遥感识别——基于 Landsat 8 热红外波段地表温度反演数据[J]. 金属矿山, 2022(3): 205–212.
LI Jiaqi, ZHAO Yanling, REN He, et al. Remote sensing recognition of spontaneous combustion gangue dump: Based on landsat 8 thermal infrared band land surface temperature inversion data[J]. Metal Mine, 2022(3): 205–212.
- [4] 刘艳慧, 杨晓宇, 包妮沙, 等. 基于 Worldview-3 与 Sentinel-1 SAR 数据的草原矿区复垦植被生物量反演方法研究[J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 219–228.
LIU Yanhui, YANG Xiaoyu, BAO Nisha, et al. Estimating biomass of reclaimed vegetation in prairie mining area: Inversion method based on Worldview-3 and Sentinel-1 SAR data[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(4): 219–228.
- [5] 钟琪, 胡晋山, 康建荣. 基于像元二分法的大宁矿区植被覆盖度研究[J]. 金属矿山, 2021(11): 197–203.
ZHONG Qi, HU Jinshan, KANG Jianrong. Study on vegetation coverage in Daning mining area based on pixel dichotomy[J]. Metal Mine, 2021(11): 197–203.
- [6] 董军, 王慧, 秦胜, 等. 兖州煤田采矿影响下水环境演变研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(6): 127–132.
DONG Jun, WANG Hui, QIN Sheng, et al. Evolution of water environment under the influence of mining in Yanzhou Coalfield[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(6): 127–132.
- [7] 陆施佳. 基于主成分分析法的北京市城市生态系统健康评价研究[J]. 智能城市, 2023, 9(2): 53–57.
LU Shijia. Beijing urban ecosystem health evaluation study based on the principal component analysis method[J]. Intelligent City, 2023, 9(2): 53–57.
- [8] 李汉卿, 陈立强, 竹涛. 基于层次分析法的煤炭资源型城市生态环境质量动态评价[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(6): 53–57.
LI Hanqing, CHEN Liqiang, ZHU Tao. Dynamic valuation on eco-environmental quality of coal resource-based cities based on analytical hierarchy process[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(6): 53–57.
- [9] 王富武, 张玉红. 流域尺度的景观破碎化分析及生态环境质量评价[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(1): 67–75.
WANG Fuwu, ZHANG Yuhong. Landscape fragmentation analysis and eco-environmental quality assessment at the catchment scale[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(1): 67–75.
- [10] 郭少东, 王晓军, 王宁, 等. 山西省沿黄地区生态综合指数评价及时空变化[J]. 应用生态学报, 2023, 34(12): 3385–3392.
GUO Shaodong, WANG Xiaojun, WANG Ning, et al. Evaluation and spatial-temporal variations of ecological comprehensive index along the Yellow River of Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(12): 3385–3392.
- [11] ZHU D Y, CHEN T, ZHEN N, et al. Monitoring the effects of open-pit mining on the eco-environment using a moving window-based remote sensing ecological index[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(13): 15716–15728.
- [12] 刘英, 许萍萍, 毕银丽, 等. 新疆戈壁煤矿露天开采对生态环境扰动定量分析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 959–974.
LIU Ying, XU Pingping, BI Yinli, et al. Quantitative analysis of coal mining disturbance on environment in Xinjiang Gobi Open-pit mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 959–974.
- [13] 桑潇, 张成业, 李军, 等. 煤炭开采背景下的伊金霍洛旗土地利用变化强度分析[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 148–155.
SANG Xiao, ZHANG Chengye, LI Jun, et al. Application of intensity analysis theory in the land use change in Yijin Holo Banner under the background of coal mining[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(3): 148–155.
- [14] 刘立, 李长安, 贺秋华, 等. 基于 BJ-2 号卫星数据的花垣尾矿库遥感研究[J]. 地理空间信息, 2020, 18(5): 29–32, 6.
LIU Li, LI Chang'an, HE Qiuhua, et al. Remote sensing study on Huayuan tailing ponds based on BJ-2 satellite data[J]. Geospatial Information, 2020, 18(5): 29–32, 6.
- [15] OUYANG X H, WANG J B, CHEN X, et al. Applying a projection pursuit model for evaluation of ecological quality in Jiangxi Province, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 133: 108414.
- [16] 董朕, 邓诣凡, 武婷婷, 等. 基于投影寻踪模型的汉江生态经济带生态文明建设评价研究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(20): 239–244.

- DONG Zhen, DENG Yifan, WU Tingting, et al. Research on ecological civilization construction of Hanjiang Eco-economic Belt based on projection pursuit model[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(20): 239–244.
- [17] 岳佳乐, 胡晋山, 酆嘉辉, 等. 基于 MAGA-PPC 模型的胡家河矿区生态环境质量评价[J]. 金属矿山, 2023(4): 236–244.
- YUE Jiale, HU Jinshan, LI Jiahui, et al. Ecological environment quality evaluation of hujiahe mining area based on MAGA-PPC[J]. Metal Mine, 2023(4): 236–244.
- [18] 丁慧. 陕北大采高煤矿沉陷区土地复垦与生态修复治理研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(3): 32–33.
- [19] 毕卫华, 钱倬珩, 王辉, 等. 基于 RSEI 模型的平朔矿区生态环境变化研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(4): 62–70.
- BI Weihua, QIAN Zhuojun, WANG Hui, et al. Study on ecological environment change in Pingshuo Mining Area based on RSEI model[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(4): 62–70.
- [20] 楼文高, 乔龙. 投影寻踪分类建模理论的新探索与实证研究[J]. 数理统计与管理, 2015, 34(1): 47–58.
- LOU Wengao, QIAO Long. New theory exploration of projection pursuit clustering model and its positive research[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2015, 34(1): 47–58.
- [21] 袁满, 刘耀林. 基于多智能体遗传算法的土地利用优化配置[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 191–199.
- YUAN Man, LIU Yaolin. Land use optimization allocation based on multi-agent genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(1): 191–199.
- [22] 刘亚静, 刘红健, 闫超群, 等. 基于改进遥感生态指数的矿区生态环境质量动态监测[J/OL]. 金属矿山, 1–14 [2024–06–04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20230717.1415.002.html>.
- LIU Yajing, LIU Hongjian, YAN Chaoqun, et al. Dynamic Monitoring of Ecological Environment Quality in Mining Area Based on Improved Remote Sensing Ecological Index[J/OL]. Metal Mine, 1–14[2024–06–04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20230717.1415.002.html>.
- [23] PEI W, HAO L, FU Q, et al. Study on agricultural drought risk assessment based on information entropy and a cluster projection pursuit model[J]. Water Resources Management, 2023, 37(2): 619–638.
- [24] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7853–7862.
- XU Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853–7862.