

黄河流域煤炭-煤电-煤化工场地特征精准智能识别方法及应用

董霁红¹, 王立兵^{1,2}, 冯晓彤^{1,2}, 王 蕾³, 刘 峰³, 翟 文⁴, THOMAS Kienberger⁵

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 矿山生态修复教育部工程研究中心, 江苏 徐州 221116; 3. 中国煤炭学会, 北京 100013; 4. 国家能源集团 战略规划部, 北京 100011; 5. Department of Environmental and Energy Process Engineering, Montanuniversität Leoben, A-8700 Leoben, Austria)

摘 要:黄河流域是“能源流域”, 兼具生态环境治理和经济社会发展的重任, 涉煤产业场地类型、数量及特征的精准智能识别是流域能源资源-低碳发展-生态保护的关键基础问题。研究融合多源数据与深度学习算法, 从流域-基地-场地尺度对黄河流域 13 个大型煤电基地的煤基场地特征精准解析, 获得煤电基地高精度、高质量的本底信息, 提出一种实时实景智能识别涉煤产业空间特征的新方法。① 筛选 Google image、GF-6 影像、Sentinel-2 影像等多源数据, 采集 13 个大型煤电基地煤基场地样本, 构建煤炭场地(露天)、煤炭场地(井工)、煤电场地、煤化工场地 4 类数据集, 涵盖 21 种样本类型。按照每种样本六面体设定 6×10 个样本, 共计 1 260 个场地样本, 分析得出最适样本数量-最高识别效率-最优识别模型的置信区间为 80%~86%。② 建立了煤基场地类型量化模型 (Coal-based Site Classification Quantitative Model, CSCQM) 和煤基场地范围特征模型 (Coal-based Site Range Characteristic Model, CSRCM), 模型平均精准度为 0.837。明晰了黄河流域涉煤产业场地本底信息, 提出 Google image 底图叠加场地智能识别模型解算结果的高精度场地智能识别方法。③ 解析了流域神东煤炭-煤电产业集聚区精准本底数据, 依据遥感生态指数 (Remote Sensing Based Ecological Index, I_{RSE}) 分析, 煤基场地分布 2 km 核心区地表生态质量受煤炭、煤电产业影响明显, 5 km 缓冲区则影响不明显, 而 8 km 控制区基本不受煤炭、煤电产业影响, 从而给出了“动态修复”与分区域、分阶段重点治理等低碳路径。④ 解析了流域宁东煤炭-煤电-煤化工产业集聚区精准本底数据, 2022 年煤炭场地 17.81 km²、占比 34.1%, 煤化工场地 22.3 km²、占比 42.6%, 煤电场地 12.2 km²、占比 23.3%, 煤化工场地 > 煤炭场地 > 煤电场地。进而采用 PSR (Pressure-State-Response) 模型得到风险管控综合得分 53.93 分, 较 2003 年提高了 27.2%。划分生态维护区、生产监测预警区、损毁修复重建区、其他调控区的分区管控模式。研究为涉煤产业煤基场地潜在污染控制、场地治理及区域生态修复提供技术方法与实践支撑。

关键词:黄河流域; 煤基场地; 多源数据; AI 模型; 精准智能识别

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)02-1011-14

Precise intelligent recognition method and application of coal-power-chemical industry sites characteristics in Yellow River Basin

收稿日期: 2023-09-27 修回日期: 2023-12-16 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1212

基金项目: 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司企业资助项目 ([2023]016 号); 国家自然科学基金资助项目 (52061135111)

作者简介: 董霁红 (1967—), 女, 山西芮城人, 教授, 博士生导师。E-mail: dongjihong@cumt.edu.cn

引用格式: 董霁红, 王立兵, 冯晓彤, 等. 黄河流域煤炭-煤电-煤化工场地特征精准智能识别方法及应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 1011-1024.

DONG Jihong, WANG Libing, FENG Xiaotong, et al. Precise intelligent recognition method and application of coal-power-chemical industry sites characteristics in Yellow River Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1011-1024.



移动阅读

DONG Jihong¹, WANG Libing^{1,2}, FENG Xiaotong^{1,2}, WANG Lei³, LIU Feng³, ZHAI Wen⁴, THOMAS Kienberger⁵

(1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Engineering Research Center of Mine Ecological Restoration, Ministry of Education, Xuzhou 221116, China; 3. China Coal Society, Beijing 100013, China; 4. Department of Strategic Planning, China Energy Investment Group, Beijing 100011, China; 5. Department of Environmental and Energy Process Engineering, Montanuniversität Leoben, A-8700 Leoben, Austria)

Abstract: The Yellow River Basin is an energy basin that has the dual responsibility of ecological environment governance and economic and social development. The precise and intelligent recognition of the categories, numbers and characteristics of coal-related industrial sites is a key basic issue for energy resources-low carbon development-ecological protection in the basin. This study integrated the multi-source data and deep learning algorithms to precisely analyze the characteristics of coal-based sites in 13 large-scale coal-fired power bases in the Yellow River Basin from the basin-base-site scale, obtained the high-precision and high-quality background information of coal-power bases, and proposed a new method of real-time real-scene intelligent recognition of spatial characteristics of coal-related industries. In this study, ① Multi-source data such as Google image, GF-6 image, Sentinel-2 image, etc. were collected as coal-based site samples from 13 large-scale coal-fired power bases to build four datasets of coal mine sites (open-pit), coal mine sites (underground), coal-power sites, and coal chemical sites, covering 21 categories of samples. According to each type of sample, 6×10 samples were set for each hexagonal cell, totaling 1 260 site samples. The confidence interval of the optimal sample number-highest recognition efficiency-optimal recognition model was 80%–86%. ② A coal-based site classification quantitative model (CSCQM) and a coal-based site range characteristic model (CSRCM) were established. The average accuracy of the models was 0.837. The background information of coal-related industrial sites in the Yellow River Basin were clarified, and a high-precision site intelligent recognition method based on Google image base map overlaying site intelligent recognition model calculation results was proposed. ③ The precise background data of the Shendong coal-power industrial agglomeration area in the basin were analyzed. Analyzed by remote sensing based ecological index (RSEI), the surface ecological quality of the 2 km core area of coal-based sites was significantly affected by coal mine and coal-power industries, while the 5 km buffer zone was not significantly affected, and the 8 km control zone was basically not affected by coal mine and coal power industries. Thus, the low-carbon pathways such as dynamic remediation and key management by region and stage were proposed. ④ The precise background data of the Ningdong coal-power-chemical industrial agglomeration area in the basin were analyzed. In 2022, the area of coal mine sites covered an area of 17.81 km², accounting for 34.1% of the total area, the area of coal chemical sites covered an area of 22.3 km², accounting for 42.6% of the total area, and the area of coal-power sites covered an area of 12.2 km², accounting for 23.3% of the total area. The area ratio was coal chemical sites > coal mine sites > coal-power sites. Then, using the PSR (Pressure-State-Response) model, the comprehensive score of risk management was obtained as 53.93 points, which was 27.2% higher than that in 2003. A zoning management mode of ecological maintenance zone, production monitoring and early warning zone, damage repair and reconstruction zone, and other regulation zone were implemented. The study provided some technical methods and practical support for the potential pollution control, site management and regional ecological restoration of coal-related industrial sites.

Key words: Yellow River Basin; coal-based site; multi-source data; AI model; precise and intelligent identification

黄河流域是我国重要的能源及基础工业基地,在我国经济社会发展和生态安全方面具有重要的地位。2019-09-18 习近平总书记主持召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会并发表重要讲话,明确提出“把黄河流域生态保护和高质量发展纳入国家重大战略”^[1]。黄河流域中上游的晋陕蒙宁甘地区的煤炭产业是该区域的主要经济支柱产业,分布有晋北、晋东、晋中、黄陇、陕北、神东和宁东 7 个国家亿吨级大型

煤炭基地,鄂尔多斯、晋北、晋中、晋东、陕北、宁东 6 个千万千瓦大型煤电基地^[2]。随着煤炭开采、燃煤发电和煤化工产业的快速发展,大量的煤基固废综合利用率低^[3,4]、大量占用土地^[5-7]、严重污染环境^[8],成为制约地区经济社会发展的不利因素,严重影响区域生态文明建设和国家能源战略的实施。2020 年中央经济工作会议要求加快调整优化能源结构,实现减污降碳协同效应。2021 年政府工作报告提出“优化产业

结构和能源结构,推动煤炭清洁高效利用”。因此,大宗煤基固废无害化处置、规模化利用以及大型煤电化基地生态环境治理已成为国家能源与生态安全的重大课题。

煤基场地综合整治是改善涉煤产业集聚区生态环境的重要途径。我国从“十五”到现在相继开展了“燃煤污染防治的基础研究”、“黄河河套地区盐碱地改良及脱硫废弃物资源化利用关键技术与示范”、“工业及城市大宗固废制备绿色建材关键技术与应用”等国家级课题,取得了适用于中西部煤电基地固废资源化的一些成果。随着中西部煤电基地产业开发快速发展和相关环保新要求,以及近期中国2030年“碳达峰”承诺的提出,针对宁、新、陕、蒙及晋等中西部大型煤电基地固废产生量巨大、综合利用率低与生态脆弱的并存问题。根据我国《煤炭工业发展“十三五”规划》,2020年中国产生煤矸石7.95亿t,煤泥1.94亿t,矿井水排放量达60.04亿m³,形成土地沉陷面积6.56万hm²,煤炭开采利用过程中形成的污染源造成了大面积的场地污染^[5]。流域涉煤区域的煤基场地种类数量到底有多少?怎样分级分类低碳净化管控?由此,亟待构建煤基场地样本类型分类标准,建立煤基场地精准识别模型与技术流程,开展多源煤基场地净化调控研究已刻不容缓。

煤基场地精准识别是开展场地治理工作的前提。传统开展涉煤场地信息调查,一般采用现场勘察的方式进行。此方式需耗费大量人力、物力和财力^[6]。使用高空间分辨率影像结合深度学习方法是目前开展场地信息精准识别的主流方法。深度学习中的代表性算法是神经网络,其中卷积神经网络CNN(Convolutional Neural Network)被广泛应用于遥感影像目标识别与分类^[9-10]。具有代表性的算法有Faster R-CNN(Faster Region-based Convolutional Neural Network)^[11]、Mask R-CNN^[12]、YOLO(You Only Look Once-v5)^[13]、U-Net^[14]、DETR^[15]等。然而,遥感图像背景的复杂性和场景的多样性限制了这些算法的通用性和适应性。DETR模型可以直接从输入图像预测物体的类别和边界框,无需复杂的中间步骤,并且DETR模型利用Transformer结构,具有全局的上下文理解能力,可以更准确地识别和定位对象,由于DETR模型可以考虑全局上下文,因此它可以更好地处理遮挡和重叠的对象,DETR模型在预测复杂场景过程中具有一定的优势。近年来,GPT-4^[16](Generative Pre-trained Transformer-4)、Flamingo^[17]和SAM(Segment Anything Model)^[18]等基础模型取得了长足进步。SAM是通过1100万张图像上标注10亿个掩码训练得到的视觉模型。SAM无需额外训练即可分割任何

图像中的任何对象,然而,SAM在输入图像的同时需要提供点、框或掩膜作为提示,并且SAM的识别结果与类别无关。这些局限性使得SAM不适合从遥感图像中全自动识别地物。研究利用常规深度学习算法建立煤基场地目标识别框,将得到的涉煤场地识别框作为提示信息输入SAM,最终得到精准的涉煤场地信息。

从Google image、GF-6影像、GF-2影像等多源数据中筛选出最佳数据,构建黄河流域13个大型煤电基地煤基场地样本数据集。建立融合多源数据与深度学习算法的煤基场地范围特征模型和煤基场地类型量化模型,并对模型进行精度检验。利用模型解析黄河流域13个大型煤电基地高精度、高质量的本底信息。量化流域神东煤炭-煤电产业集聚区和宁东煤炭-煤电-煤化工产业集聚区涉煤场地对生态环境的影响,针对2类典型涉煤产业集聚区分别提出低碳路径和分区管控措施。

1 黄河流域13个大型煤电基地的本底特征

1.1 13个大型煤电基地的本底

大型煤电基地(Coal-fired Power Base/Coal-Electricity Base, CEBs)是在国家能源发展战略行动计划(2014—2020年)中明确的国家能源战略布局和能源安全保障的重要内容。大型煤电基地作为现代煤基能源开发的重要形式,可确定为“根据国家能源战略布局,依托丰富煤炭资源产区和煤矿规模化生产方式,按照煤电一体化生产模式,集中建设一批大型现代化煤矿和先进高效环保机组,形成煤电能集中持续生产和输出能力的区域”。煤电基地指的是以煤、电规模化开发为核心,集人类活动、能源生产、自然资源与区域环境相结合的复杂系统^[19]。

黄河流域是确保国家生态安全、能源安全、粮食安全的战略重地,也是能源产业发展最为集中的区域^[2]。黄河流域覆盖青海、陇东、黄陇、宁东、陕北、神东、晋北、晋中、晋东、豫西、豫东、鲁西和鲁南13个煤电基地(图1),涵盖青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东8省(区),全域共计保有资源量9016.23亿t,全国保有资源量13841.18亿t,占比65.1%。生产、在建煤矿剩余可采储量共计2289.61亿t,主要集中在内蒙古、山西2省(区)^[20-21]。其中,黄陇、宁东、陕北、神东、晋北、晋中、晋东、河南和鲁西为全国亿吨级煤炭基地所在区域。除了煤炭产业开发,黄河流域还有大量煤电和煤化工产业。例如,鄂尔多斯、晋北、晋中、晋东、陕北和宁东属于国家千万千瓦大型煤电基地。黄河流域形成了煤炭-煤电和煤炭-煤电-煤化工2种典型的产业集聚区。

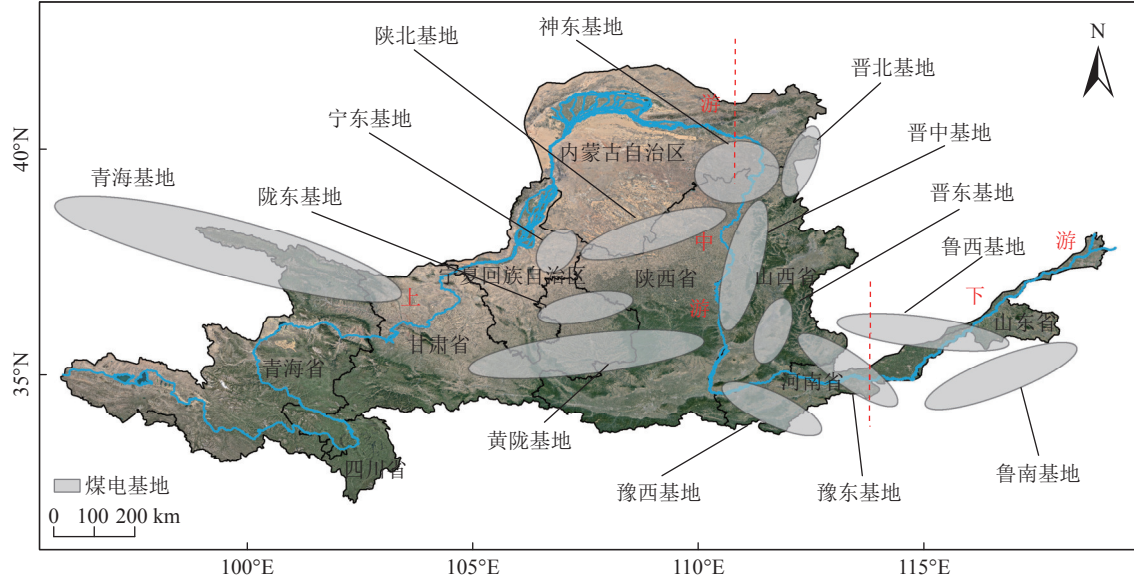


图 1 黄河流域大型煤电基地示意

Fig.1 Schematic diagram of large coal power bases in the Yellow River Basin

表 1 为黄河流域 13 个大型煤电基地的基本情况，数据来源：国家能源局 (NEA) 公布的煤矿批准产能清单、工信部公布的 2012—2015 年 2019 批合格焦炭企业名单 (共 489 家焦化厂)、工信部、国家发改委、生态环境部发布的煤制氨和煤制甲醇装置设施清单、中国石油和化学工业协会对中国所有新型煤化工项目清单、自然资源部公布的矿山名称、实际年产量、采矿权范围等。

表 1 黄河流域煤电基地信息

Table 1 Basic information on coal power bases in the Yellow River Basin

黄河流域煤电基地		流域面积/ 万 km ²	生产情况	主要生态现状	煤基地类型
上游	青海 青海基地	15.04	1940年开始建设，在产， 产能1 109.24万t，电源装机规模393万kW	生态重点保护区，开发强度低 重点开发区域，地下水径流破坏、 地下潜水位下降和地表水减少， 煤炭开采加剧水土流失加速了 该区沙漠化	煤炭场地、煤电场地
	甘肃 陇东基地	14.27	2010年开始建设，在产， 电源装机规模240万kW		煤炭场地、煤电场地
	甘肃 黄陇基地	14.27	2002年开始建设，在产， 产能13 698.68万t		煤炭场地、煤电场地
	宁夏 宁东基地	5.18	2002年开始建设，在产， 产能4 301.53万t，电源装机规模1 600万kW		煤炭场地、煤电场地、 煤化工场地
	陕西 陕北基地	13.29	1996年开始建设，在产， 产能32 706.65万t，电源装机规模4 200万kW		煤炭场地、煤电场地、 煤化工场地
	内蒙古 神东基地	15.51	1985年开始建设，在产， 产能47 198.58万t		煤炭场地、煤电场地
中游	山西 晋北基地	9.77	1949年开始建设，在产， 产能26 585.49万t，电源装机规模1 760万kW	开发时间久，开发强度降低。 长期开采导致地面塌陷严重， 水资源供需矛盾突出	煤炭场地、煤电场地
	山西 晋中基地	9.77	1956年开始建设，在产， 产能25 576.34万t，电源装机规模2 200万kW		煤炭场地、煤电场地、 煤化工场地
	山西 晋东基地	9.77	1958年开始建设，在产，产能22 283.41万t， 电源装机规模3 560万kW		煤炭场地、煤电场地、 煤化工场地
下游	河南 豫西基地	3.91	1990年开始建设，在产， 产能2 160万t	开发时间久，开发强度降低	煤炭场地、煤电场地
	河南 豫东基地	3.91	2004年开始建设，在产， 产能2.65万t		煤炭场地、煤电场地、 煤化工场地
	山东 鲁西基地	2.02	1996年开始建设，在产，产能1 134.38万t， 电源装机规模78.4万kW		煤炭场地、煤电场地
	山东 鲁南基地	2.02	1946年开始建设，在产		煤炭场地、煤电场地

1.2 大型煤电基地场地空间分布

依据基地的区域资料总况^[22-23], 可分为:

(1) 上游。① 青海煤电基地主要集中于海西州, 以小型矿区为主, 大、中型矿区较少, 仅有 2 处大型矿区 (江仓、聚乎更), 1 处中型矿区 (鱼卡)。② 陇东煤电基地位于甘肃省庆阳市, 共有 6 个开发区域, 规划总占地约 4 200 km²。③ 黄陇煤电基地包括彬长 (含永陇)、黄陵、旬耀、铜川、蒲白、澄合、韩城、华亭矿区。④ 宁东煤电基地位于银川东部的灵武, 规划区面积 645 km²。⑤ 陕北煤电基地位于陕西省北部, 是我国重要的煤炭基地, 主要矿区榆神位于神府矿区南部, 面积为 5 500 km², 探明储量 301 亿 t。⑥ 神东煤电基地主要位于鄂尔多斯, 范围包括准格尔旗、鄂托克前旗、鄂托克旗、伊金霍洛旗、杭锦旗、达拉特旗、乌审旗、东胜区及康巴什新区^[24]。

(2) 中游。① 晋北煤电基地位于山西省会太原以北地区, 由大同、平朔、朔南、轩岗、河保偏和岚县等 6 个矿区组成。② 晋中煤电基地地处山西省中部及中西部, 跨太原、吕梁、晋中、临汾、长治、运城 6 个市的 31 个县 (市)。包括太原西山、东山、汾西、霍州、离柳、乡宁、霍东、石隰矿区。③ 晋东煤电基地位于山西阳泉、长治、晋城和晋中等市县境内, 由晋城、潞安、阳泉和武夏等 4 个矿区组成^[24-25]。

(3) 下游。① 豫东基地位于河南省东部和西部。

由鹤壁、焦作、义马、郑州、平顶山、永夏 6 个矿区组成的河南煤炭基地, 已列入国家发改委大型煤炭基地建设规划。② 豫西基地位于河南省西部, 探明煤炭储量达 200 亿 t。其中鹤壁矿区面积 150 km²。③ 鲁西基地范围覆盖兖州、济宁、新汶、枣庄、龙口、淄博、肥城、巨野、黄河北等 9 个矿区。其中兖州矿区拥有兖州和济宁东部 2 块煤田, 矿区总面积 435.44 km²。④ 鲁南煤电基地包括济宁矿区、巨野矿区, 是华东地区重要的煤炭基地。截至 2021 年, 这一区域的煤矿生产能力为 1 808 万 t/a, 电厂装机容量约 210 MW, 年总发电量 10 亿 kWh^[24]。

1.3 数据样本与数据集划分

(1) 研究范围及数据源。

研究范围如图 1 所示, 研究对象为黄河流域 13 个大型煤电基地, 所使用的数据源主要分为遥感数据、POI(Point of Interest) 数据和统计年鉴数据。详细来源见表 2。遥感数据用于黄河流域 13 个煤电基地煤基场地识别, POI 数据用于煤基场地辅助精度验证。统计年鉴数据用于煤炭基地分区分管得分计算。将遥感数据按照影像融合、影像裁剪、影像拼接和影像分块的顺序进行预处理。将 POI 数据进行数据清洗后得到涉煤场地的兴趣点坐标。对统计年鉴数据进行数据筛选, 得到神东煤电基地和宁东煤电基地的统计数据。

表 2 数据来源

Table 2 List of data sources

数据源	获取时间	数据精度/m	数据资源
Sentinel-2	2023年	空间分辨率: 10	https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home
GF-6	2020年	空间分辨率: 2	https://www.chinageoss.cn/aircas/
谷歌影像	2022年、2023年	空间分辨率: < 0.8	https://earth.google.com
POI数据	2023年		地图网站
统计年鉴	2023年		http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/

(2) 样本采集及类型划分。

根据生态-生活-生产“三生”空间特征、黄河流域涉煤产业集聚区本底情况及相关文献, 将样本数据划分归为煤炭场地 (露天)、煤炭场地 (井工)、煤电场地、煤化工场地 4 类数据集, 涵盖 21 种样本类型。① 煤炭场地 (露天) 数据集包括: 露天采场、储煤场、排土场、煤矸石堆放场地、生产辅助设施和其他固体废弃物堆放场地 (废石渣堆、尾矿库、尾矿渣堆等)。② 煤炭场地 (井工) 数据集包括: 工业广场、选煤场所 (选煤车间)、储煤场、输送带、塌陷地和损毁场地 (崩塌、滑坡、泥石流、裂缝、变形、压占)。③ 煤电场地数据集包括: 管理区域、废弃物堆放场地、生产设





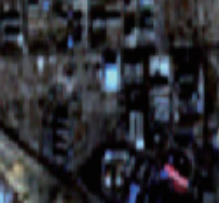









备、粉煤灰和烟囱。④ 煤化工场地数据集包括: 煤化工地面生产管理区、冷凝塔、煤化工场地地面设备和煤化工废弃物堆放场地 (脱硫石膏、煤化工废渣)。21 种样本类型按照每种样本六面体设定 6×10 个样本, 共计 1 260 个场地样本。数据集详细信息见表 3。样本数据来源于 Google、image、GF-6、Sentinel-2, 选择图像质量高、地物边界清晰的数据作为建模与验证的数据源。

2 黄河流域涉煤产业场地智能解析

2.1 场地特征识别模型建立

模型建立过程分为 4 个步骤, 分别是数据筛选、

表 3 样本特征与数据集
Table 3 Sample dataset and datasets

数据集	样本	信息	样本数(6×10)	数据集	样本	信息	样本数(6×10)
煤炭 场地 (露天)	露天采场	呈色调均匀的黑色 或浅黑色，斑块面积 大，边界清晰		煤炭 场地 (露天)	储煤场	呈黑色或浅黑色，形状 规则，纹理较厚实	
	排土场	呈向内凹入的近梯形 或规则近圆形图斑			煤矸石堆放 场地	呈浅灰色，亮度高，斑 块状痕迹明显	
	生产辅助 设施	位于露天采场周围， 呈红蓝色，形状规则			其他固体废弃 物堆放场地 (废石渣堆、尾 矿库、尾矿渣 堆等)	一般呈浅色调斑点 状、正地形为特征	
煤炭 场地 (井工)	工业广场	对开采出的矿产进行 一系列分拣，运输的 场所，伴有矿山建筑		煤炭 场地 (井工)	选/洗场所(选 煤车间、洗煤 车间)	一般分布在交通便利的 区域，具有工业建筑的 特征	
	储煤场	呈黑色或浅黑色，形 状规则，纹理较厚实			输送带	长条状，形状规则	
	塌陷地	地面塌陷坑形状似圆 形或椭圆形，碟状洼 地，纹理粗糙，色调 深浅不一，与周边地 物色调差异明显，植 被呈不均匀分布			损毁场地(崩塌、 滑坡、泥石流、 裂缝、变形、 压占)	崩塌体表面参差不齐且 粗糙，下方时常出现突 兀的巨大石块；由于坡 度较陡，易形成阴影区 域；颜色为浅色或灰白 ，其上无植被发育，与 周围的深色调植被覆盖 形成明显的色调差。滑 坡呈圈椅形，舌形等	
煤电 场地	管理区域	包括煤电厂办公区与 生活居住区，如办公 楼、医院、员工宿 舍等		煤电 场地	废弃物堆 放场地	位于煤电场内，纹理粗 糙，形状不规则	

续表

数据集	样本	信息	样本数(6×10)	数据集	样本	信息	样本数(6×10)
煤电 场地	生产设备	呈红蓝色,形状规则,多为正方形或长方形,集中分布,设备分布整齐		煤电 场地	粉煤灰	呈现灰色或灰黑色,堆积成类小山形状。TM影像中呈淡紫色、蓝色,色调不均匀	
	烟囱	建在煤栈桥附近,建筑上有红白相间的环形条带					
煤化工 场地	煤化工地面 生产管理区	包括煤化工办公区与生活居住区,如办公楼、医院、员工宿舍等		煤化工 场地	冷却塔	黑色圆形区域,高度较高,有明显的阴影,塔体为水泥材料,有明显的高亮度区域	
	煤化工场地 地面设备	呈黑色、亮蓝色,工业设施分布集中,形状规则,边界明显			煤化工废弃物 堆放场地(脱硫石膏、煤化工废渣)	呈灰白色,纹理光滑,堆积物明显	

样本数据集建立、模型训练与精度检验和最优模型建立(图2)。第1,从Google image、GF-6影像、Sentinel-2影像等多源数据中筛选得到最优的数据源。第2,采集13个大型煤电基地煤基场地样本,构建煤炭场地(露天)、煤炭场地(井工)、煤电场地、煤化工场地4类数据集,涵盖21种样本类型。第3,将数据集中的样本作为训练数据输入DETR(Detection Transformer),得到最优煤基场地类型量化模型,并对得到的模型进行精度检验。之后,将煤炭场地(露天)、煤

炭场地(井工)、煤电场地、煤化工场地4类数据集作为单独4类样本输入DETR模型进行训练。第4,将DETR模型的输出结果输入SAM(Segment Anything Model)得到煤基场地范围特征模型。

模型应用过程分为数据获取与预处理、场地类型量化和场地范围识别(图3)。首先,将得到的原始图像进行预处理,包括对影像进行融合、裁剪、拼接和分块,其次,使用煤基场地类型量化模型得到煤基场地的目标框信息,再次,将得到的目标框输入煤基场地

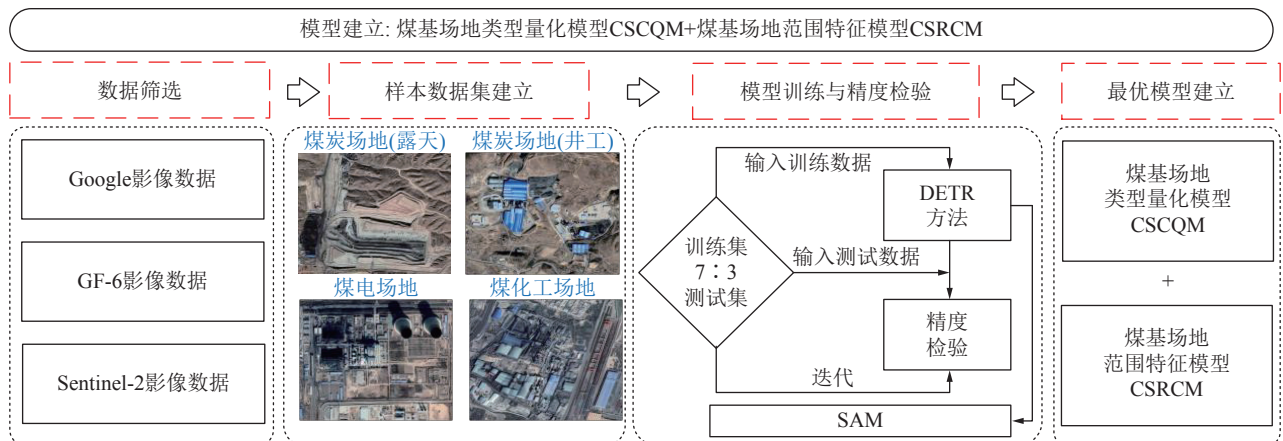


图2 煤基场地类型量化模型+煤基场地范围特征模型建立流程

Fig.2 Process diagram for establishing coal-based site classification quantitative model and coal-based site range characteristic model

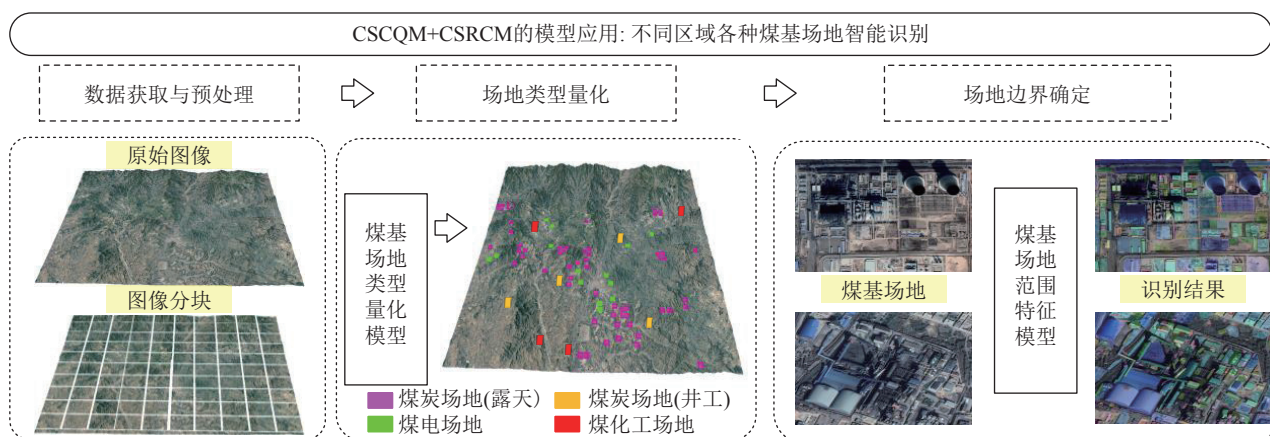


图3 煤基地类型量化模型+煤基地范围特征模型应用流程

Fig.3 Application flowchart of coal-based site classification quantitative model and coal-based site range characteristic model

范围特征模型,得到煤基地的范围信息。模型实现了以识别煤基地边界为基底,使用21种场地样本为判定依据,精准识别煤炭场地(露天)、煤炭场地(井工)、煤电场地、煤化工场地的应用流程。

2.2 深度学习模型的架构与验证

图4(a)为SAM的示意,包括图像编码器、提示词编码器和掩码解码器。SAM原始框架根据所提供

的输入提示(点、框、掩膜)生成相应的对象掩码。但是,这种人工干涉不适合大范围遥感地物目标提取,因此,研究将SAM中需要人工输入的提示使用DETR模型建立的地物目标识别框代替,从而使得SAM可以自动提取遥感图像中的地物。图4(b)为对SAM结构的改进。图4(c)为使用改进的SAM识别煤炭场地(露天)的识别过程。

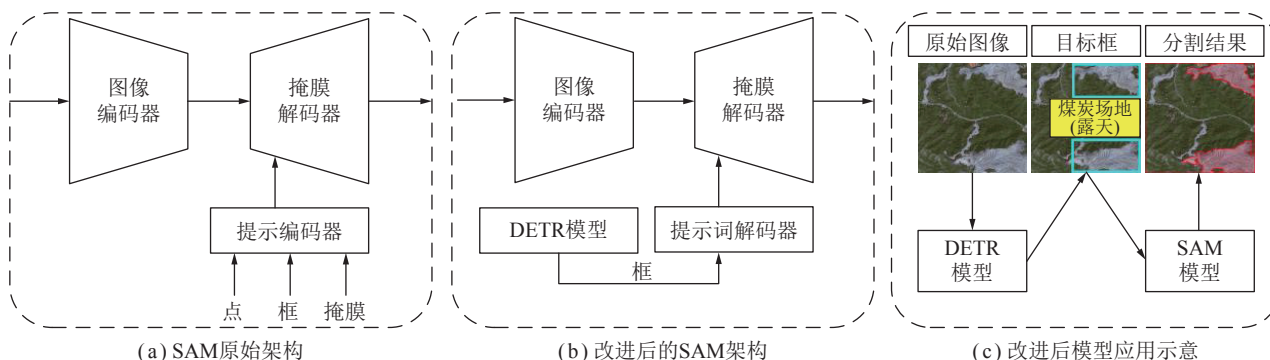


图4 SAM架构及模型改进

Fig.4 SAM architecture and model improvement

为了评价模型的精度,使用了下列指标:精确率(Precision, P)和召回率(Recall, R), P 指在所有被模型预测为正例的样本中实际正例的比例; R 指在所有实际正例的样本中被模型正确预测为正例的比例。计算公式为

$$P = \frac{T_p}{T_p + F_p} \quad (1)$$

$$R = \frac{T_p}{T_p + F_n} \quad (2)$$

式中, T_p 为实际为正被预测为正的样本数量; F_p 为实际为负但被预测为正的样本数量; F_n 为实际为正但被预测为负的样本数量; $T_p + F_p$ 为所有被预测为正的样本数量; $T_p + F_n$ 为实际为正的样本数量。

$$P_A = \int_0^1 P(r)dr \quad (3)$$

式中, $P(r)$ 为 R 与 P 的关系曲线; P_A (Average Precision)为平均精准度。

分类结果和标签之间的重叠程度,使用交集对并集 Intersection over union(IoU)的平均值 m_{IoU} 评估。本研究中使用 P_A 来评价煤基地类型量化模型的精度,使用 m_{IoU} 来评价煤基地范围特征模型的精度。

2.3 DETR模型与SAM模型评价

分析DETR模型与SAM模型在验证数据集上的识别精度,见表4。使用2种模型建立的煤基地类型量化模型和煤基地范围特征模型精度良好,煤炭场地(露天)、煤炭场地(井工)、煤电场地、煤化工场地4类数据集中21种样本类型的 P_A 都在0.8以上。

表 4 DETR 模型、SAM 模型验证精度
Table 4 Validation accuracy of DETR model and SAM model

数据集	样本	P_A (DETR)	m_{IoU} (SAM)
煤炭场地 (露天)	露天采场	0.821	0.814
	煤矸石堆放场地	0.812	0.831
	排土场	0.856	0.824
	储煤场	0.845	0.833
	生产辅助设施	0.856	0.831
	其他固体废弃物堆放场地	0.801	0.804
	总平均值	0.832	0.823
	工业广场	0.843	0.856
	输煤皮带	0.867	0.843
	储煤场	0.810	0.824
煤炭场地 (井工)	选/洗场所	0.842	0.862
	塌陷地	0.814	0.826
	损毁场地	0.803	0.806
	总平均值	0.830	0.836
煤电场地	煤电管理区	0.814	0.856
	粉煤灰	0.801	0.814
	煤电生产设备	0.821	0.836
	废弃物堆放场地	0.823	0.845
	烟囱	0.863	0.859
	总平均值	0.824	0.842
煤化工 场地	煤化工地面生产管理区	0.854	0.835
	煤化工场地地面设备	0.863	0.864
	冷凝塔	0.859	0.865
	煤化工废弃物堆放场地	0.854	0.832
	总平均值	0.858	0.849

煤炭场地 (露天) 数据集的 P_A 平均值为 0.832, m_{IoU} 平均值为 0.823; 煤炭场地 (井工) 数据集的 P_A 平均值为 0.830, m_{IoU} 平均值为 0.836; 煤电场地数据集的 P_A 平均值为 0.824, m_{IoU} 平均值为 0.842; 煤化工场地数据集的 P_A 平均值为 0.858, m_{IoU} 平均值为 0.849。

煤基场地类型量化模型和煤基场地范围特征模型整体平均精度为 0.836 和 0.838。DETR 模型是基于 Transformer 的目标检测模型, 并且 DETR 模型解码器部分不使用自回归, 这使得 DETR 模型的预测过程更加简洁和高效, 因此在进行矿山场景识别过程中, DETR 模型表现出对复杂的矿山场景优异的识别性能。SAM 的目标是建立一个图像分割的基础模型 (Foundation Models)。由于 SAM 优异的泛化能力使得模型在应用过程中获得了良好的结果。

2.4 涉煤产业场地类型识别结果精度

将黄河流域 13 个大型煤电基地样本建立的煤基

场地类型量化模型和煤基场地范围特征模型实践应用于黄河流域典型煤电基地 (神东基地和宁东基地) 煤炭场地 (露天)、煤炭场地 (井工)、煤电场地、煤化工场地特征信息识别, 并使用 POI 数据对模型精度进行验证, 模型精度达到了 86.7%, 最低识别精度为 80.1%, 平均精度为 83.7%, 模型在验证数据集上的精度截图如图 5 所示。

露天采场	0.821	0.814	储煤场	0.845	0.833
煤矸石堆放场地	0.812	0.831	生产辅助设施	0.856	0.831
排土场	0.856	0.824	其他固体废弃物堆放场地	0.801	0.804
工业广场	0.843	0.856	选/洗场地	0.842	0.862
输煤皮带	0.867	0.843	塌陷地	0.814	0.826
储煤场	0.810	0.824	损毁场地	0.803	0.806
煤电管理区	0.814	0.856	废弃物堆放场地	0.823	0.845
粉煤灰	0.801	0.814	烟囱	0.863	0.859
煤电生产设备	0.821	0.836			
煤化工地面生产管理区	0.854	0.835	冷凝塔	0.859	0.865
煤化工场地地面设备	0.863	0.864	煤化工废弃物堆放场地	0.854	0.832

图 5 DETR 模型和 SAM 模型识别涉煤产业场地类型精度 (系统生成)

Fig.5 DETR model and SAM model for coal-related industry site type identification accuracy map(By system)

3 神东基地的煤炭-煤电场地特征及迁移变化

3.1 神东场地样本信息与数据集

神东矿区地处黄河流域中部, 是我国重要煤矿能源基地, 也是黄河流域最大的煤炭、煤电产业集聚区, 基地内的煤炭场地、煤电场地具有一定的代表性。神东基地的煤炭场地 (露天) 数据集 46 个样本、煤炭场地 (井工) 数据集 32 个样本、煤电场地数据集 18 个样本, 共计 3 个数据集、96 个样本。样本空间分布如图 6 所示。

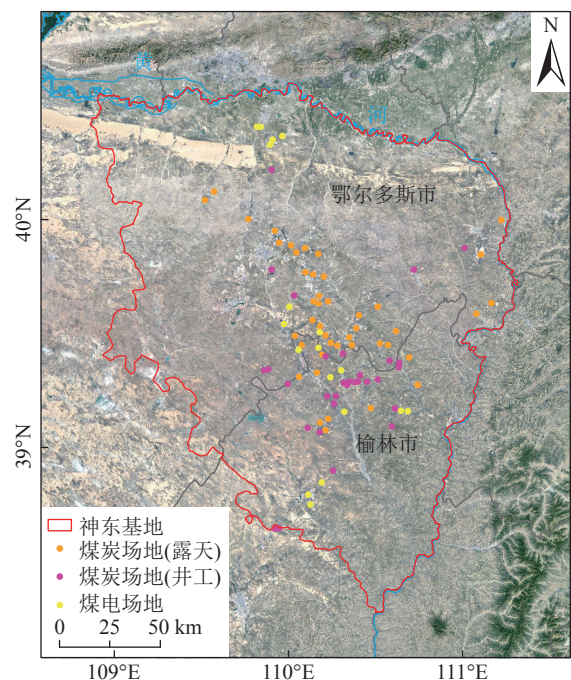


图 6 神东基地样本点位

Fig.6 Sample locations of Shendong base

3.2 场地边界智能识别

应用 CSCQM 和 CSRCM 识别神东基地煤炭-煤电场地结果如图 7 所示。煤炭-煤电场地主要集中分

布于神东基地的中部和南部;煤炭场地(露天)场地主要集中在基地中部;煤炭场地(井工)场地主要集中在基地中部和南部;煤电场地主要分布于基地南部和北部。

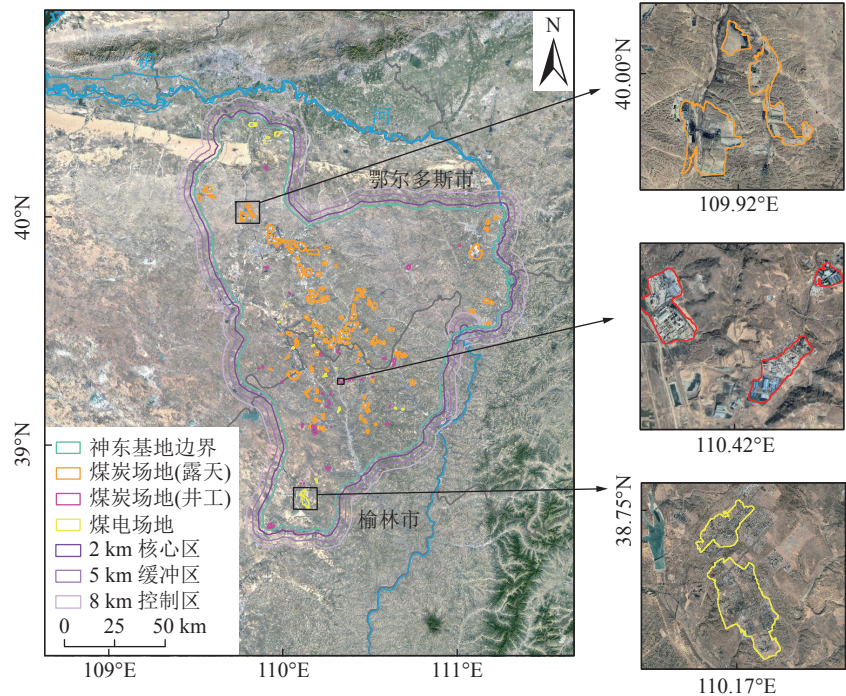


图 7 神东基地煤炭-煤电场地范围识别结果

Fig.7 Coal and coal power site range identification results of Shendong base

根据模型识别得到的精准边界,结合统计分析所得煤炭场地(露天)、煤炭场地(井工)和煤电场地的面积和占比,2022年,煤炭场地(露天)430.84 km²、占比85.4%,煤炭场地(井工)35.68 km²、占比7.1%,煤电场地37.83 km²、占比7.5%,煤炭场地(露天)>煤电场地>煤炭场地(井工),获得了高精度、高质量的神东基地煤炭-煤电场地空间特征本底信息。

3.3 煤炭-煤电场地迁移变化及低碳路径

研究使用神东基地核心区样本和缓冲区样本解算遥感生态指数(Remote Sensing Based Ecological Index, I_{RSE})^[26],确定神东基地的生态环境影响范围。

应用煤基场地类型量化模型与煤基场地范围特征模型解析了神东基地煤炭-煤电场地精准信息,见表5。矿区核心区与2 km范围 I_{RSE} 平均值具有显著

相关性,5 km范围 I_{RSE} 平均值相关性也显著,8 km范围 I_{RSE} 平均值则相关性不显著。相较能够得出:2 km核心区地表生态质量受煤炭、煤电产业影响明显、5 km缓冲区则影响不明显,而8 km控制区基本不受煤炭、煤电产业影响。总体而言,神东基地1 km范围内场地类型特征无显著变化^[27],以1 km为间隔对神东基地进行缓冲带划分,结合 I_{RSE} 的平均值指标,明晰神东基地煤炭-煤电场地与周围区域生态质量的相关性,确定矿区场地类型演变对其周围区域生态质量的影响程度。

“动态修复”策略实施贯穿煤矿全生命周期阶段(规划、建设、投产、达产、丰产、稳产等阶段)。在煤炭开采、燃煤发电和煤化工生产过程中,同步进行矿区生态修复工作,依据生产变化及时调整改变恢复治

表 5 缓冲区 I_{RSE} 相关性

Table 5 Buffer I_{RSE} correlation

缓冲带	I_{RSE} 均值	缓冲带	I_{RSE} 均值
1 km	0.934*	5 km	0.874
2 km	0.927*	6 km	0.864
3 km	0.897*	7 km	0.881*
4 km	0.883*	8 km	0.844

注: *代表0.05水平的显著性。

理规划,有利于绿色矿山建设。以有研究表明,神东基地生态状况呈现波动变化趋势。同时,矿区生态质量空间变化结果显示,煤矿生命周期各阶段矿区场地均存在生态问题,因此,生态修复措施应开始于基地规划建设直至闭矿。时间方面,不同阶段涉煤产业区生态受影响程度不同。目前,神东涉煤产业区发展处于稳定阶段,但生态质量明显低于丰产阶段,需要重视该阶段的生态问题。空间方面,涉煤产业区规划范围内及周边地区生态质量明显下滑,应适当减少负面扰动,如排土场及时复垦、排土场边坡整形、减小工业广场范围等,提高利用率,同时采取相关措施进

行修复。

3.4 实时边界 (Google image) + 范围特征模型 (智能识别) → 煤炭-煤电场地高精度信息 (新方法)

将识别得到的边界与 Google image 结合,可以获得神东煤炭-煤电基地场地的最新边界信息。由于 Google image 通常每年都会更新,通过建立的 CSCQM 与 CSRCM 可以获得神东基地煤炭场地、煤电场地的实时边界信息,将这些边界信息作为标签,再次使用场地范围特征模型对神东基地整体场地进行识别,最终得到神东基地场地高精度的边界信息。识别方法如图8所示。

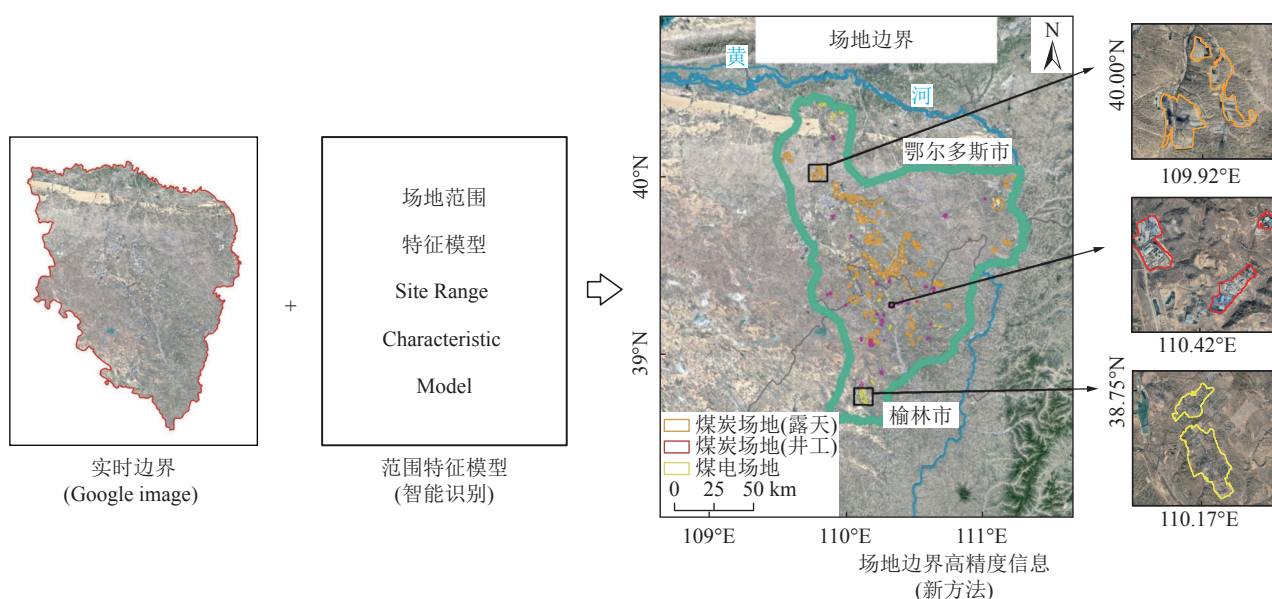


图8 实时边界+范围特征模型→煤炭-煤电场地高精度信息

Fig.8 Real time boundary + range feature model → high-precision information of coal coal-power site

4 宁东基地的煤炭-煤电-煤化工场地特征及迁移变化

4.1 宁东场地样本信息与数据集

宁东基地是我国重要的煤电化基地,也是黄河流域最大的煤炭、煤电、煤化工产业集聚区,基地内的煤炭场地、煤电场地和煤化工场地具有一定的代表性。宁东基地的煤炭场地(露天)数据集5个样本、煤炭场地(井工)数据集20个样本、煤电场地数据集26个样本,煤化工场地数据集20个样本,共计4个数据集、71个样本。样本空间分布如图9所示。

4.2 场地类型范围智能识别

应用煤基场地类型量化模型和煤基场地范围特征模型识别结果如图10所示。煤炭-煤电-煤化工场地主要集中分布于宁东基地的中部和北部:煤炭场地主要集中在基地中部;煤电场地主要分布于基地北部。煤化工场地主要分布于基地北部。

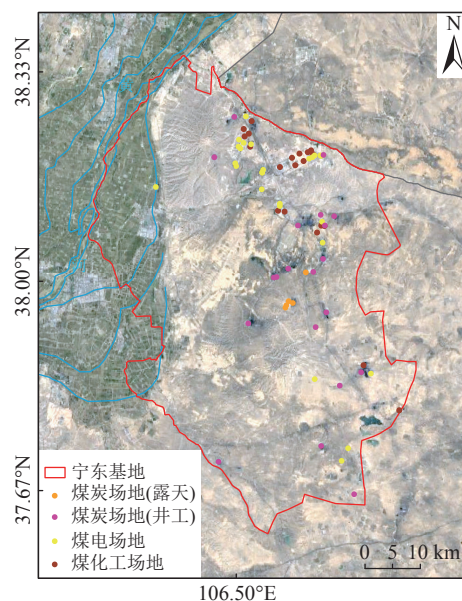


图9 宁东基地样本点位

Fig.9 Sample locations of Ningdong base

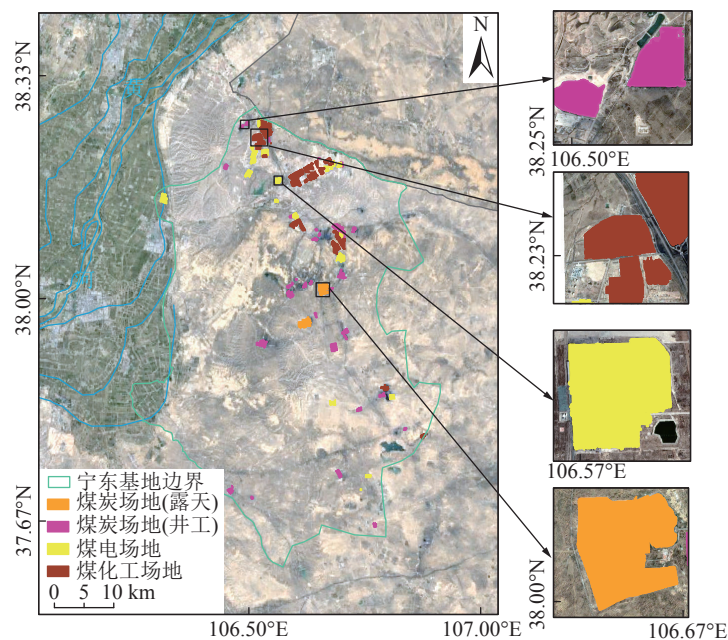


图 10 宁东基地的煤炭-煤电-煤化工场地类型识别结果

Fig.10 Results of identifying coal-coal power-coal chemical sites types in Ningdong base

根据模型识别得到的精准边界,结合统计分析所得煤炭场地(露天)、煤炭场地(井工)、煤电场地和煤化工场地的面积和占比。2022 年煤炭场地 17.81 km²、占比 34.1%,煤化工场地 22.3 km²、占比 42.6%,煤电场地 12.2 km²、占比 23.3%,煤化工场地 > 煤炭场地 > 煤电场地,获得了高精度、高质量的宁东基地煤炭-煤电-煤化工场地空间特征本底信息。

4.3 宁东场地 2003—2022 年风险分析及分区分管

研究利用神东基地煤基场地识别结果,结合压力-

状态-响应模型 (Pressure-State-Response Framework, PSR),从压力、状态、响应 3 方面建立评价体系。依据宁夏统计局发布的国民经济和社会发展统计公报、统计年鉴等资料,得到宁东煤基场地管控评价指标,见表 6。

2003 年宁东煤基场地管控综合得分为 42.41 分,2022 年上升至 53.93 分,结果表明 2003—2022 年宁东基地场地保护取得了一定的成果,煤基场地管控情况不断改善。基于以上结果,提出宁东煤炭-煤电-煤化工产业集聚区划分生态维护区、生产监测预警区、

表 6 PSR 模型角度的宁东基地场地评价指标体系

Table 6 Evaluation index system of Ningdong base site from the perspective of PSR model

目标层	准则层	要素层	指标层
宁东多源煤基场地管控评价指标体系	压力指标(P)	社会经济(P1)	宁夏人口数/人
			采矿业就业人员/人
		生态环境(P2)	一般工业固体废物产生量/万t
			工业废水排放总量/万t
	状态指标(S)	自然状态(S1)	工业废气排放总量/亿m ³
			城镇村及工矿用地采矿用地/ha
		社会经济(S2)	矿产资源储量/亿t
			采矿业固定资产投资额/万元
	响应指标(R)	社会经济(R1)	电力、燃气及水的生产和供应业固定资产投资额/万元
			城镇居民人均家庭总收入/元
		生态环境(R2)	采矿业生产总值/亿元
			电力、燃气及水的生产和供应业生产总值/亿元

损毁修复重建区、其他调控区的分区管控模式。

4.4 实时边界 (Google image) + 类型量化模型 (智能识别) → 煤炭-煤电-煤化工场地高精度信息 (新方法)

将识别得到的边界与 Google image 结合, 可以获

得宁东基地煤炭-煤电-煤化工场地的最新类型信息。通过以宁东基地 Google image 上的实时边界为范围, 利用场地类型量化模型对宁东基地煤炭场地、煤电场地和煤化工场地类型进行识别, 最终得到宁东基地煤基场地类型精准量化识别结果。识别方法如图 11 所示。

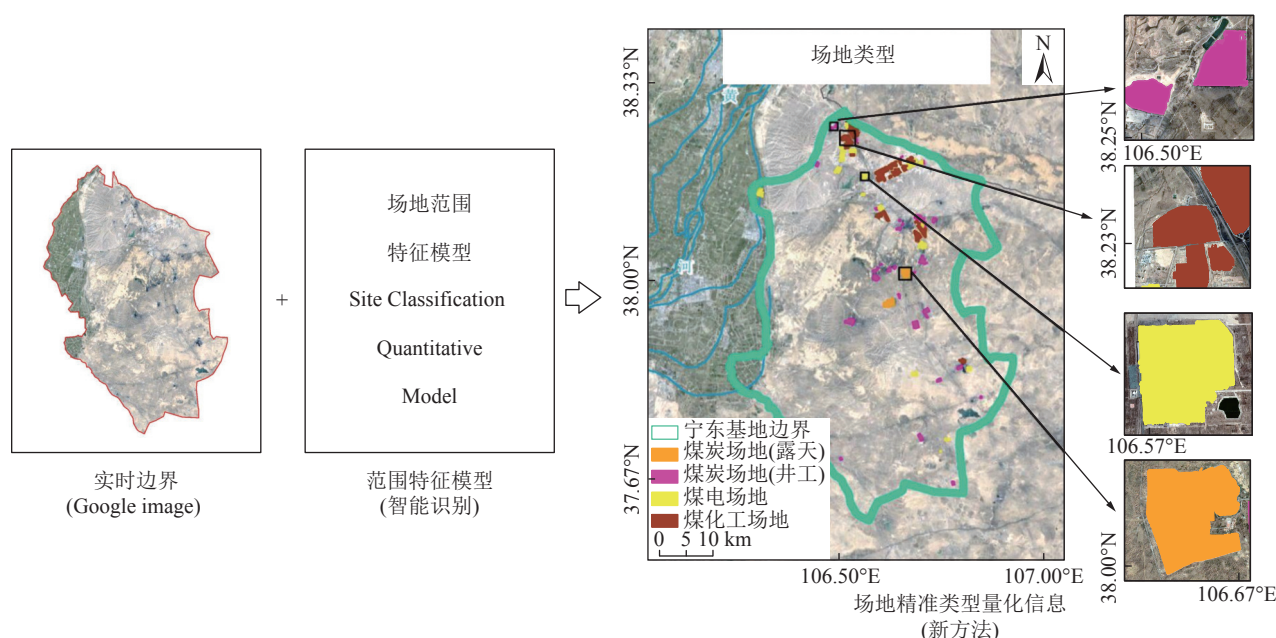


图 11 实时边界 + 类型量化模型 → 煤炭-煤电-煤化工场地高精度信息

Fig.11 Real time boundary + type quantification model → High precision information of coal-power-chemical industry sites

5 结 论

(1) 本文筛选 Google image、GF-6 影像、Sentinel-2 影像等多源数据, 选择 Google image 与 GF-6 影像相结合以确定识别黄河流域大型煤电基地的最优数据。依据现有研究与现实需求, 构建煤炭场地 (露天)、煤炭场地 (井工)、煤电场地、煤化工场地 4 类数据集, 涵盖 21 种样本类型。研究表明, 按照每种样本六面体设定 $6 \times 10 \times 21$ 个样本, 共计 1 260 个场地样本的方法可以满足识别黄河流域涉煤场地的精度, 分析得出最适样本数量-最高识别效率-最优识别模型的置信区间为 80%~86%。采用 4 类数据集样本训练多源煤基场地特征识别模型, 建立了煤基场地类型量化模型 CSCQM 和煤基场地范围特征模型 CSRCM, 模型精度达到了 83.60%、83.80%。使用 Google image 底图叠加场地智能识别模型解算涉煤场地特征信息的方法是创新的、高效的。

(2) 使用煤基场地类型量化模型和煤基场地范围特征模型解析了流域神东煤炭-煤电产业集聚区精准本底数据, 依据场地类型尺度效应分析结果, 给出了“动态修复”与分区域、分阶段重点治理等低碳路径。同时, 解析了流域宁东煤炭-煤电-煤化工产业集聚区

精准本底数据, 宁东基地场地面积煤化工场地 > 煤炭场地 > 煤电场地。进一步综合 PSR 得分提出划分生态维护区、生产监测预警区、损毁修复重建区、其他调控区的分区管控模式。

(3) 对于涉煤产业场地人工智能识别, 样本数据集的选取尤为重要, 在未来的研究中, 建立一定规模和高质量的涉煤产业场地数据库, 是改善涉煤产业场地边界和类型识别模型精度的重要途径。黄河流域煤电基地涉煤产业多源煤基场地的识别与低碳路径的提出, 对于流域高质量发展至关重要。后期可进一步优化涉煤场地的识别方法, 发挥人工智能目标物的类型识别技术方法在广领域、大尺度不同场景解析方面的应用优势, 进一步开展黄河流域煤电基地涉煤场地的有效精准识别, 获得高质量的流域本底数据, 为流域场地治理与生态修复提供技术方法与实践范例。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国中央人民政府.《求是》杂志发表习近平总书记重要文章《在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话》[EB/OL].(2019-10-15)[2023-12-26]. https://www.gov.cn/xinwen/2019-10/15/content_5440016.htm.
- [2] 张春晖, 吴盟盟, 张益臻. 碳中和目标下黄河流域产业结构对生态环境的影响及展望[J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(2): 50-55.

- ZHANG Chunhui, WU Mengmeng, ZHANG Yizhen. Impact and prospect of industrial structure on ecology and environment in the Yellow River Basin under carbon neutrality target[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2021, 46(2): 50–55.
- [3] 袁亮. 我国煤炭资源高效回收及节能战略研究[J]. *中国矿业大学学报: 社会科学版*, 2018, 20(1): 3–12.
- YUAN Liang. Strategies of high efficiency recovery and energy saving for coal resources in China[J]. *Journal of China University of Mining & Technology (Social Sciences)*, 2018, 20(1): 3–12.
- [4] GUAN X, HUANG J, ZHANG Y, et al. The relationship between anthropogenic dust and population over global semi-arid regions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(8): 5159–5169.
- [5] 国家发展改革委. 国家能源局关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知[EB/OL]. (2022–1–29)[2023–12–26]. https://www.gov.cn/xinwen/2019-10/15/content_5440016.htm.
- [6] 央视网. 废物利用的奇葩: 世界各地的“废矿景点”[EB/OL]. (2012–1–23)[2020–11–12]. <https://news.cntv.cn/20120123/115122.shtml>.
- [7] GETTY R, MORRISON-SAUNDERS A. Evaluating the effectiveness of integrating the environmental impact assessment and mine closure planning processes[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2020, 82: 106366.
- [8] BIAN Z, MIAO X, LEI S, et al. The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes[J]. *Science*, 2012, 337: 702–703.
- [9] 史文中, 张敏. 人工智能用于遥感目标可靠性识别: 总体框架设计、现状分析及展望[J]. *测绘学报*, 2021, 50(8): 1049–1058.
- SHI Wenzhong, ZHANG Min. Artificial intelligence for reliable object recognition from remotely sensed data: overall framework design, review and prospect[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(8): 1049–1058.
- [10] 顾小虎, 李正军, 缪健豪, 等. 高分遥感影像双通道并行混合卷积分类方法[J]. *测绘学报*, 2023, 52(5): 798–807.
- GU Xiaohu, LI Zhengjun, MIAO Jianhao, et al. Dual-channel parallel hybrid convolutional neural networks based classification method for high-resolution remote sensing image[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(5): 798–807.
- [11] REN Shaoqing, HE Kaiming, ROSS Girshick, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, 39(6): 1137–1149.
- [12] HE K, GKIOXARI G, DOLLÁR P, et al. Mask r-cnn[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2017: 2961–2969.
- [13] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: Unified, real-time object detection[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016: 779–788.
- [14] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation[C]//Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 5–9, 2015, Proceedings, Part III 18. Springer International Publishing, 2015: 234–241.
- [15] CARION N, MASSA F, SYNNAEVE G, et al. End-to-end object detection with transformers[C]//16th European Conference. Glasgow, UK: Springer, UK, 2020: 213–229.
- [16] OPENAI. Gpt-4 technical report[EB/OL]. [2023–12–26]. <https://openai.com/research/gpt-4>.
- [17] ALAYRAC J-B, DONAHUE J, LUC P, et al. Flamingo: A visual language model for few-shot learning[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2022, 35: 23716–23736.
- [18] KIRILLOV A, MINTUN E, RAVI N, et al. Segment anything[J]. *arXiv Preprint arXiv: 2304.02643*, 2023.
- [19] 张建民, 付晓, 李全生, 等. 大型煤电基地开发生态累积效应及定量分析方法研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(8): 3066–3081.
- ZHANG Jianmin, FU Xiao, LI Quansheng, et al. Ecological cumulative effect and quantitative analysis method of developing large-scale coal and electricity bases[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(8): 3066–3081.
- [20] 魏慎洪, 窦斌, 白雪亮, 等. 黄河流域煤炭资源开发潜力与布局研究[J]. *煤炭经济研究*, 2023, 43(2): 57–61.
- WEI Shenhong, DOU Bin, BAI Xueliang, et al. Research on the development potential and layout of coal resources in Yellow River Basin[J]. *Coal Economic Research*, 2023, 43(2): 57–61.
- [21] 丁国峰, 吕振福, 曹进成, 等. 我国大型煤炭基地开发利用现状分析[J]. *能源与环保*, 2020, 42(11): 107–110, 120.
- DING Guofeng, LÜ Zhenfu, CAO Jincheng, et al. Analysis on status quo of development and utilization of large-scale coal bases in China[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2020, 42(11): 107–110, 120.
- [22] 申艳军, 杨博涵, 王双明, 等. 黄河几字弯区煤炭基地地质灾害与生态环境典型特征[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(6): 104–117.
- SHEN Yanjun, YANG Bohan, WANG Shuangming, et al. Typical characteristics of geological hazards and ecological environment of coal base in the bends area of the Yellow River[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(6): 104–117.
- [23] 李向全, 马剑飞, 付昌昌. 神东煤炭基地 1: 50000 活鸡兔幅矿区水文地质图数据集[J]. *中国地质*, 2018, 45(S2): 13–22, 111–123.
- LI Xiangquan, MA Jianfei, FU Changchang. Dataset of the 1: 50000 Hydrogeological map of the Huojitu Mine Area, Shendong Coal Base[J]. *Geology in China*, 2018, 45(S2): 13–22, 111–123.
- [24] 山东省能源局. 山东省煤矿生产能力情况表[EB/OL]. [2023–08–04]. <http://nyj.shandong.gov.cn/col/col189857/index.html>.
- [25] 中国矿业网. 中国 13 个大型煤炭基地及 98 个矿区[EB/OL] [2023–08–04]. <http://www.chinamining.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=6&id=19250>.
- [26] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(5): 889–897.
- XU Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(5): 889–897.
- [27] 董霁红, 房阿曼, 赵银娣. 干旱、半干旱草原矿区生态累积效应研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2022.