

内蒙古石拐矿区土地覆盖变化驱动力和景观格局分析研究

Research on the Driving Forces of Land Cover Change and Landscape Pattern Analysis in Shiguai Mining Area, Inner Mongolia

魏光普^{1*} 朱治衡¹ 石家成¹ 张文君^{2,3} 于晓燕^{2,3}
WEI Guangpu^{1*} ZHU Zhiheng¹ SHI Jiacheng¹ ZHANG Wenjun^{2,3} YU Xiaoyan^{2,3}

(1. 内蒙古科技大学建筑与艺术设计学院, 包头 014010; 2. 黄河“几字弯”发展研究基地, 包头 014010; 3. 内蒙古科技大学产业信息化与产业创新研究中心, 包头 014010)

(1. School of Architecture and Art Design, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Nei Mongol, China, 014010; 2. Yellow River Jiziwan Development Research Institute, Baotou, Nei Mongol, China, 014010; 3. Research Center of Industrial Informationization and Innovation in Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Nei Mongol, China, 014010)

文章编号: 1000-0283(2024)11-0004-10

DOI: 10.12193/j.laing.2024.11.0004.001

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2024-08-14

修回日期: 2024-09-14

摘要

通过分析内蒙古自治区石拐矿区2003年、2013年及2023年的土地覆盖数据, 探讨土地覆盖及景观格局变化并分析其驱动力。土地覆盖数据使用ENVI遥感软件分析2003年、2013年、2023年Landset 30 m精度卫星图; 采用Fragstats软件计算土地覆盖及景观格局变化。结果表明: 土地覆盖转移主要发生在石拐矿区的西南部, 其中2003–2013年主要是农田和灌草地向建设用地、灌草地向林地的转移; 2013–2023年主要是农田向灌草地、灌草地向未利用地、灌草地向林地的转移。石拐矿区在近20年的土地覆盖变化为: 农田和灌草地不断减少、林地持续增加、未利用土地先减少后增加、水体面积较稳定。石拐矿区灌草地约占整个矿区80%的面积, 是该矿区的主要土地覆盖类型, 灌草地、林地、农田、建设用地及未利用地先碎化后集中, 其中发生转化的是一些小斑块, 而主要的景观斑块并没有受到太大影响, 矿区土地覆盖整体呈现出均衡化和多样化的发展趋势。石拐矿区土地覆盖及景观格局变化受政策影响较大, 例如棚户区搬迁、石拐新区和工业园区建设以及生态修复工程等。研究结果与石拐矿区土地利用总体规划中各类型用地的变化趋势、变化幅度相同, 具有较高的准确性, 可以为该矿区人居环境的高质量建设和可持续发展提供理论依据。

关键词

土地覆盖; 景观格局; 驱动力; 矿区; 内蒙古

Abstract

By analyzing the land cover data of the Shiguai mining area in the Inner Mongolia Autonomous Region in 2003, 2013, and 2023, this paper explores the changes in land cover and landscape pattern and their driving forces. Use ENVI remote sensing software to analyze Landset-30m precision satellite images of land cover data in 2003, 2013, and 2023. The changes in land cover and landscape pattern were calculated using Fragstats software. The results show that from 2003 to 2013, the Shiguai mining area mainly experienced three types of land cover transfers: farmland to construction land, irrigated grassland to construction land, and irrigated grassland to forest land, concentrated primarily on the southwest of the mining area; From 2013 to 2023, there were mainly three types of land cover transfers: farmland to irrigated grassland, irrigated grassland to unused land, and irrigated grassland to forest land, concentrated primarily on the southwest of the mining area. The land cover in the Shiguai mining area has continuously decreased over the past twenty years, with an increase in forest land and a decrease in irrigated grasslands. The water area is relatively stable, and unused land has decreased first and then increased. Shredded grassland is the

魏光普

1986年生/男/内蒙古包头人/博士/副教授/研究方向为矿山生态修复与可持续设计

朱治衡

1999年生/男/浙江台州人/在读硕士研究生/研究方向为人居环境可持续设计

石家成

1996年生/男/内蒙古包头人/硕士/研究方向为人居环境可持续设计

基金项目:

国家自然科学基金项目“低碳约束下黄河流域城市土地利用效率研究: 测度、驱动机理与提升路径”(编号: 42061051); 内蒙古自治区教育厅项目“白云鄂博稀土矿区国土空间生态修复碳效应研究”(编号: 000001); 包钢(集团)公司白云鄂博铁矿横向课题“包钢白云鄂博矿区多功能植物菌根袋新技术产业化中试研究技术服务”(编号: NKDHX2024042); 内蒙古自治区自然科学基金项目“呼包鄂乌城市群能源消耗碳排放差异分析与影响因素研究”(编号: 2022LHMS07004); 内蒙古自治区一流学科科研专项基金“‘植物群落+菌根真菌+根际促生菌’修复白云鄂博矿山土壤污染及可持续设计研究”(编号: YLXKZX-NKD-025); 内蒙古自治区高校人文社会科学重点研究基地基金“白云鄂博稀土矿区国土空间生态修复碳效应研究”(编号: KFSM-KDSK0207)

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: weigp2007@163.com

primary coverage type of the mining area, accounting for about 80% of the entire mining area. Farmland, forest land, irrigated grassland, construction land, and unused land are fragmented and then concentrated, and some small patches transform. The prominent landscape patches are not significantly affected, and the overall landscape patches show diversified and balanced development. The changes in land cover and landscape pattern in the Shiguai mining area are mainly influenced by policy factors, including coal mine closure, shantytown relocation, Shiguai New Area, industrial park, and ecological restoration projects. The research results are consistent with the trend and magnitude of changes in various types of land in the overall land use planning of Shiguai District and have high accuracy. They can provide a theoretical basis for the high-quality construction and sustainable development of the living environment in the mining area.

Keywords

land cover; landscape pattern; drive; mining area; Inner Mongolia

土地覆盖变化研究指的是对特定区域在一定时间内人工和自然斑块的覆盖情况进行空间变化分析,这对于评估该区域的景观格局至关重要。通过研究石拐矿区土地覆盖的变化,可以深入分析景观格局的演变程度和推动因素;而景观格局则关注于研究景观斑块在空间上的分布以及特定区域景观特征的变化^[1],这对于预测矿区未来土地覆盖变化趋势及制定相关土地管理政策具有重要的指导意义。在土地覆盖变化研究方面,赵晓伟等^[2]通过对内蒙古矿区土地覆盖变化的研究,发现矿区开发对土地覆盖产生显著影响,表现为植被退化、土壤侵蚀加剧等问题。在景观格局分析方法方面,国内外学者采用了多种方法对矿区景观格局进行了研究。例如,吴振华^[3]运用景观格局指数对内蒙古某矿区景观格局进行分析,发现矿区景观格局受到人类活动的影响较大,表现为景观破碎化、斑块形状不规则等特点。王让等^[4]通过构建景观格局模型,对矿区景观格局变化进行模拟预测,为矿区生态恢复提供理论依据。当前尽管已有不少研究成果为矿区土地覆盖变化分析提供宝贵的理论依据和实践经验^[5],然而现有研究多关注自然因素和人为因素的单独影响,较少将两者结合起来进行综合分析,这可能导致对土地覆盖变化驱动力认识的片面性,难以全面揭示矿区土地覆

盖变化的内在机制^[6]。同时,当前研究多关注于矿区景观格局的静态描述,而忽视景观格局的动态变化特征^[7]。

石拐矿区坐落于内蒙古自治区,是国家19个资源枯竭型城市转型试验田之一,同时也是“城市生态与功能双重修复”(简称“城市双修”)示范点城市^[8]。自2007年起,随着煤炭资源的逐渐枯竭,石拐矿区政府着手关闭了原有的地下煤矿及相关的工矿企业,并实施了对周边老旧居住区的整体搬迁计划^[9],旨在为石拐矿区在资源枯竭背景下的可持续发展提供策略指导,促进土地资源的优化配置和生态环境的恢复,进而提升当地居民的生活质量。因此,矿区近20年各类土地覆盖变化和景观格局驱动力的研究对当地人居环境的改善和景观生态恢复具有重要实践价值。本研究采用遥感和GIS技术,分析石拐矿区土地覆盖的时空变化特征及其驱动力,揭示该矿区的景观格局演变,并深入分析在煤矿资源耗尽后,政府采取的转型政策对石拐矿区土地覆盖和景观结构变化的影响。

1 研究区概况

内蒙古石拐矿区坐落于阴山山脉的大青山深处,具有多变的地形和地貌,占地面积约761 km² (N 40° 37'—40° 45', E 110° 14'—110° 28')。该地区气候干燥,降水稀少,四

周被山脉环绕,中心地带是黄土丘陵和沟壑交错的地形,整体地势呈现北部平缓、南部陡峭的特点,地域呈狭长形状^[10]。根据国土资源部颁布的《全国土地分类(试行)》规范,充分考虑石拐矿区特殊条件和土地覆盖形态,详细将其划分为6个主要类别:耕地(农田)、森林覆盖区(林地)、灌丛与草地混合带(灌草地)、水域(水体)、城市化用地(建设用地),以及尚未开发的自然区域(未利用地)^[11]。

2 研究方法

分析石拐矿区2003年、2013年和2023年土地覆盖分类图的变化,发现土地覆盖变化过程是动态变化的,因此本文采用土地利用动态度、土地利用程度、土地利用结构多样性和均匀度4个指标对研究区土地覆盖变化进行评价研究,建立该区域土地利用类型的动态转移矩阵,以量化并可视化其变化趋势;再通过评估该区域的景观模式指标,量化分析土地利用的变迁和景观构造的演进过程。研究旨在审视并分析2003—2023年石拐矿区土地覆盖现状演变以及伴随此过程产生的景观格局动态变化轨迹。

采用Kappa系数作为衡量石拐矿区遥感影像分类精度的指标^[12]。基于该系数的计算结果,2003年、2013年和2023年石拐矿区遥感影像分类一致性水平分别为0.87、0.92和0.89,这

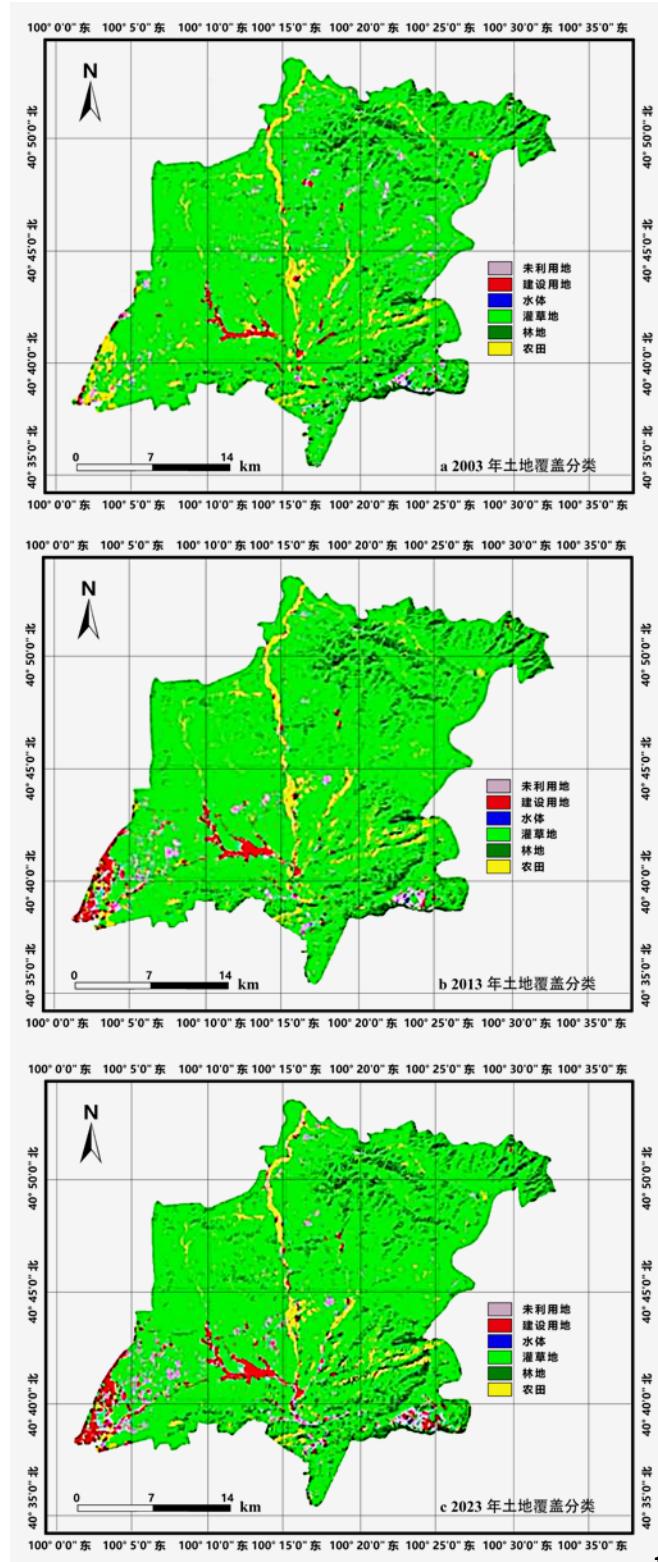


图1 2003年、2013年、2023年石拐矿区土地覆盖分类
Fig. 1 Classification of land cover in Shiguai mining area in 2003, 2013 and 2023

些数值均超过了0.85的阈值，确保了土地覆盖变化和景观格局分析的准确性。

使用2003年、2013年和2023年三年的8月份的LandsatTM 30 m分辨率遥感卫星图将内蒙古石拐矿区的土地进行分类^[13]，综合分析评价土地覆盖变化和景观格局演变，该矿区三个时间的土地利用类型采用ENVI遥感软件支持向量机(SVM)方法获得空间分布，构建土地利用变化的矩阵模型，以监测和记录不同土地用途随时间的转换^[14]。随后，借助FRAGSTATS软件工具，对石拐矿区的景观格局进行量化评估^[15]。评估涵盖双重维度：首先是对单一景观类型的分布特征进行分析，其次是对整个景观的宏观结构进行探讨。这种综合分析揭示了推动矿区景观格局演变的主要因素，为优化土地资源配置和提升景观管理效率提供科学依据。

3 结果分析

3.1 土地覆盖变化分析

采用ENVI软件平台内嵌的支持向量机(SVM)监督分类算法，对石拐矿区跨越多时相的遥感影像数据实施了精细分类处理。分类结果如图1所示，其中灌丛与草地的复合类型构成该矿区最为显著的景观斑块，占据主导地位。农田集中在中部的河谷地区，林地主要覆盖在石拐矿区的东北、东南部，建设用地和未利用土地在西南部集中。土地覆盖转移主要发生在西南部。

2003–2023年间土地覆盖面积变化见表1。农田、灌草地面积逐年下降；林地、建设用地逐年增加；水体面积保持稳定；未利用地面积先减少后增加。

2003–2013年间矿区土地覆盖景观转移矩阵见表2。这一时期内，农田和未利用土地面积有所下降，而灌草地和建设用地面积则相应上升。水体覆盖面积保持相对稳定，变化不大。具体而言，农田和未利用土地的减少与它们向其他土地类型的转换密切相关。灌草地和建设用地的增长，可能是由于土地开发和利用政策的推动。水体覆盖的稳定性表明，在这一时期，该区域的水体资源管理得当，未受显著影响。

2003–2013年，石拐矿区的土地覆盖和景观格局发生显著变化(图2)。在这一时期，农田面积经历874.53 km²的转换，净减少538.56 km²，其中大部分转变为建设用地，面积增加了842.40 km²。这一显著土地利用转变现象集中体现在矿区西南部，其核心诱因可追溯至2007年启动的沉陷区治理工作以及随后在该地域内推行的新区与工业区建设举措，致使大片原有农田被征用或置换。未利用土地面积缩减240.39 km²，主要归因于这些土地向灌草地的转化。这种转变可能是由于生态环境的自然恢复，原有裸露地表逐渐被植被覆盖，促进了灌草地面积的增长。水体覆盖面积在研究期间保持

相对稳定, 仅在误差范围内有轻微增加。在研究期间, 林地面积的增长量达397.98 km², 增长可归因于石拐矿区积极推行的退耕还林政策以及大青山南坡绿化等大规模植树造林项目的有效落地与实施。石拐旧城周边建设用地出现缩减趋势, 这归因于沉陷区搬迁政策的深入执行, 导致部分工矿设施

与住宅区被有序拆除。灌草地的面积累计下降473.13 km², 表现为向林地和建设用地的转变, 尤以矿区西南部地区最为显著。这可能与该区域频繁开发建设活动以及积极植树造林等人为干预措施有关, 它们共同促进土地利用类型的转变与景观格局的重塑。

2003–2013年, 石拐矿区西南部区域经

历了三次主要土地覆盖类型转变: 农田逐渐被改变为建设用地、灌草地被用作建设用地, 以及灌草地转变为林地。这些变化主要是政策导向下的人为活动所驱动。

2013–2023年间矿区土地覆盖景观转移矩阵见表3, 农田和灌草地的面积呈现出净减少的趋势, 林地与未利用地显示出明显净

表1 2003–2023年间石拐矿区土地覆盖变化表
Tab. 1 Land cover change in Shiguai mining area from 2003 to 2023

土地覆盖类型 Land cover type	2003 土地覆盖面积 /km ² 2003 Land cover area	2013 土地覆盖面积 /km ² 2013 Land cover area	2023 土地覆盖面积 /km ² 2023 Land cover area	土地覆盖变化量 /km ² Land cover change amount		
				2003–2013 年 2003–2013 year	2013–2023 年 2013–2023 year	2003–2023 年 2003–2023 year
农田	3 687.3	3 148.47	2 476.89	-538.83	-671.58	-1 210.41
林地	5 171.67	5 571.27	6 725.52	399.60	1 154.25	1 553.85
灌草地	64 828.8	64 355.67	62 111.97	-473.13	-2 243.70	-2 716.83
水体	15.39	17.37	15.75	1.98	-1.62	0.36
建设用地	742.05	1 592.91	2 018.97	850.86	426.06	1 276.92
未利用地	2 612.7	2 372.22	3 708.81	-240.48	1 336.59	1 096.11

表2 2003–2013年间石拐矿区土地覆盖转移矩阵表 (单位: km²)
Tab. 2 Land cover transfer matrix in Shiguai mining area from 2003 to 2013

2013 年 2003 年	农田 Farm land	林地 Wood land	灌草地 Shrub land	水体 Water land	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	2013 年面积 Area in 2013
农田	2 812.77	4.14	316.53	0.00	9.90	5.13	3 148.47
林地	21.69	4 898.61	619.65	0.00	0.36	30.96	5 571.27
灌草地	259.38	261.99	61 885.8	0.18	90.18	1 858.14	64 355.67
水体	0.00	0.00	1.08	14.58	0.00	1.71	17.37
建设用地	568.08	2.25	356.67	0.00	567.90	98.01	1 592.91
未利用地	25.38	4.68	1 649.07	0.63	73.71	618.75	2 372.22
2003 年面积	3 687.3	5 171.67	64 828.80	15.39	742.05	2 612.70	0.00
用地转移面积	874.53	273.06	2 943.00	0.81	174.15	1 993.95	0.00
净增长	-538.56	397.98	-473.13	1.98	842.40	-240.39	0.00

表3 2013–2023年间石拐矿区土地覆盖转移矩阵表 (单位: km²)
Tab. 3 Land cover transfer matrix in Shiguai mining area from 2013 to 2023

2023 年 2013 年	农田 Farm land	林地 Wood land	灌草地 Shrub land	水体 Water land	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	2023 年面积 Area in 2023
农田	2 348.55	1.26	118.08	0	4.50	4.50	2 476.89
林地	18.00	5 172.03	1 523.70	0	3.87	7.92	6 725.52
灌草地	650.70	371.88	60 760.26	0	25.83	303.30	62 111.97
水体	0.00	0.00	0.09	14.04	0.00	1.62	15.75
建设用地	50.58	7.20	234.27	0.81	1 526.13	199.98	2 018.97
未利用地	80.64	18.9	1 719.27	2.52	32.58	1 854.9	3 708.81
2013 年面积	3 148.47	5 571.27	64 355.67	17.37	1 592.91	2 372.22	0.00
用地转移面积	799.92	399.24	3 595.41	3.33	66.78	517.32	0.00
净增长	-671.58	1 154.25	-2 243.70	-1.62	426.06	1 336.59	0.00

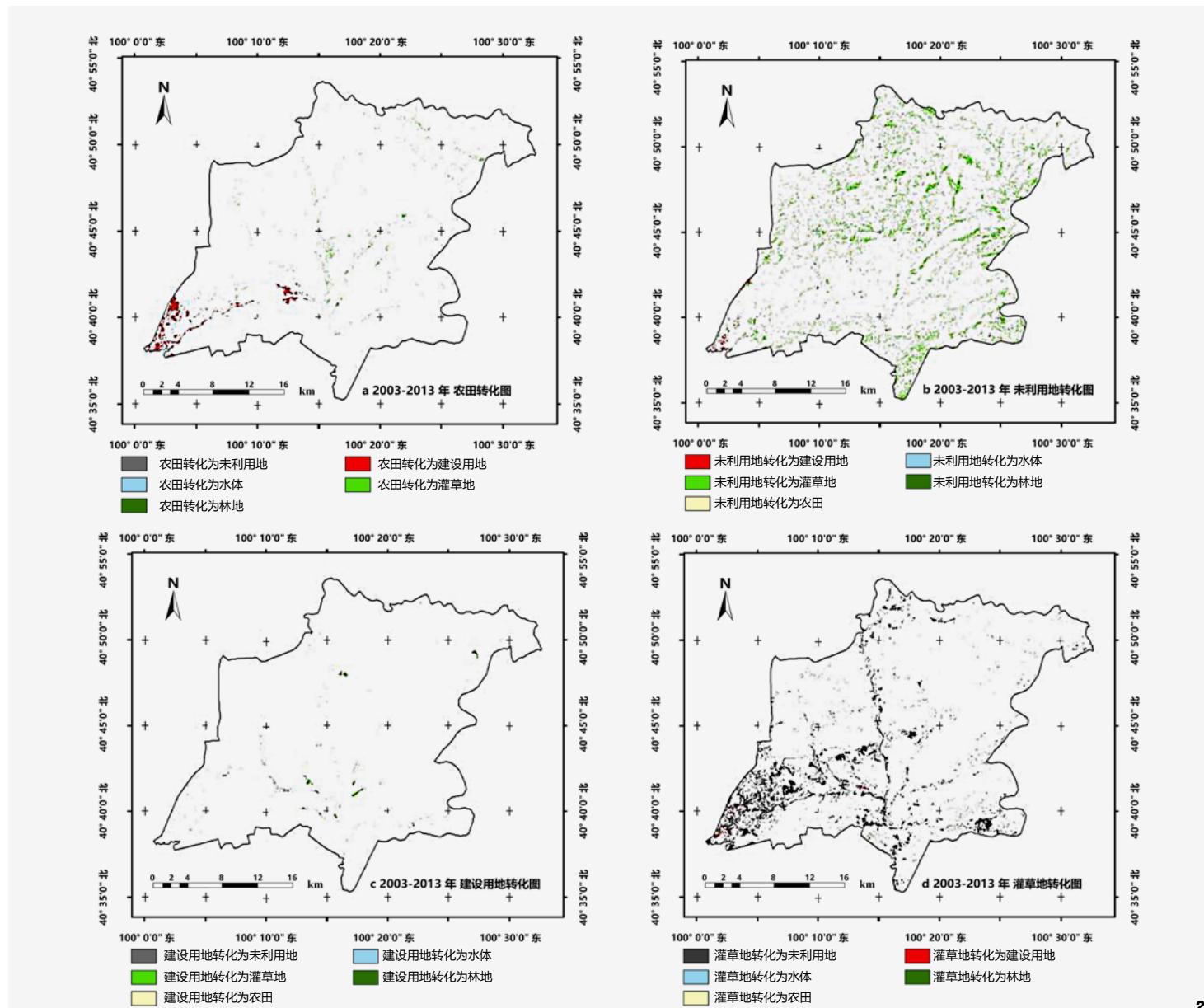


图2 2003—2013年农田、未利用地、建设用地、灌草地转化图
Fig. 2 Conversion map of farm land, unused land, construction land and shrub land from 2003 to 2013

增长趋势,水体与建设用地的覆盖变化相对稳定,其中建设用地实现了净增加。这反映了土地利用结构在保持相对稳定的同时,也经历着特定类型的动态调整与优化。

分析2013—2023年石拐矿区遥感影像土地覆盖变化和景观格局演变(图3)。农田面

积减少,总计减少了671.58 km²,表现为农田向灌草地及建设用地的大规模转变。空间分布上集中于矿区中部河谷地带及其西南部,主要是退耕还林政策的深入贯彻实施与居民点人口流失所导致的农业经济活动衰退,共同作用于可耕地资源的缩减趋势。未利用土

地面积增加,累计增幅达1 154.25 km²,源自矿区西南部原有灌草生态区域的土地功能转变与闲置化现象。环境退化加剧,尤其是由工矿业活动引起的人为因素,是未利用土地面积增加的主要推手。灌草地总面积累计减少2 243.70 km²,主要体现为灌草地向

林地和未利用地的转化。这种变化同样集中在矿区西南部,与该区域工业化开发、建设活动以及生态恢复措施如植树造林等密切相关。建设用地面积增长426.06 km²,主要位于矿区西南部,部分灌草地和未利用地被用于居民区的扩展。水体覆盖面积保持稳定,仅在测量误差范围内有轻微增加。林地面积显著增加,达1 336.59 km²,这主要归功于矿区实施的各类生态修复工程措施,包括大青山南坡绿化和退耕还林等项目。

2013–2023年,石拐矿区西南部的土地覆盖类型出现重要变化,包括农田被用作灌草地,以及灌草地转变为未利用地、林地的过程。这些转变主要是由于该地区人类活动的影响。

3.2 景观格局变化分析

景观格局分析聚焦于研究区域内各类景观斑块的空间配置模式及其组合特性的深入探究。利用Fragstats软件,实现对景观格局动态演变的精确量化分析^[16]。Patch、Class、Landscape软件从三个不同的层次来评估景观指数,选择景观类型(class)和景观格局(landscape)两个级别来进行计算,通过计算景观格局指数,以此来分析和理解研究区域内景观斑块随时间和空间的变化趋势^[17-19]。

3.2.1 景观类型变化分析

石拐矿区2003–2023年间6类主要土地利用类型的动态演变采用景观类型变化分析法进行量化分析^[20]。选择9个量化景观指标,包括:斑块密度(PD)、斑块面积(CA)、斑块个数(NP)、边缘密度(ED)、景观形状指数(LSI)、平均形状指数(SHAPE_MN)、最大斑块指数(LPI)、景观百分比(PLAND)和面积加权分维数(FRAC_AM)^[21-23]。斑块面积(CA)和景观百分比(PLAND)分别量化特定土地利用类型的总面积及其在整个研究区域中所占的比重^[24]。最大斑块指数(LPI)是衡量在特定土地覆盖类型中面积最大的斑块占该类型总面积的比重。斑块数量(NP)与斑块密度(PD)分别提供该土地覆盖类型斑块数量和空间分布密集度的指标。景观形状指数(LSI)用于评估单个斑块的形状复杂度,平均形状指数(SHAPE_MN)通过聚合同一土地覆盖类型内所有斑块的形状复杂度,以得出其平均值。面积加权分维数(FRAC_AM)通过赋予不同大小斑块以相应的面积权重,有效整合斑块大小与形状复杂性的双重信息,综合评估斑块形状的复杂性。边缘密度(ED)则反映不同土地利用类型间边界的总长度,是衡量景观异质性的关键指标^[25-28]。

分析石拐矿区2003–2023年的景观类型变化(表4),结果表明,石拐矿区的农田面积持续缩减,而林地面积则呈现稳定增长。与此同时,作为该区域最主要的土地覆盖类型,灌草地的面积也有所下降,尽管其依然占据矿区总面积的80%以上。水体覆盖面积在观测期间显示出相对的稳定性,未利用土

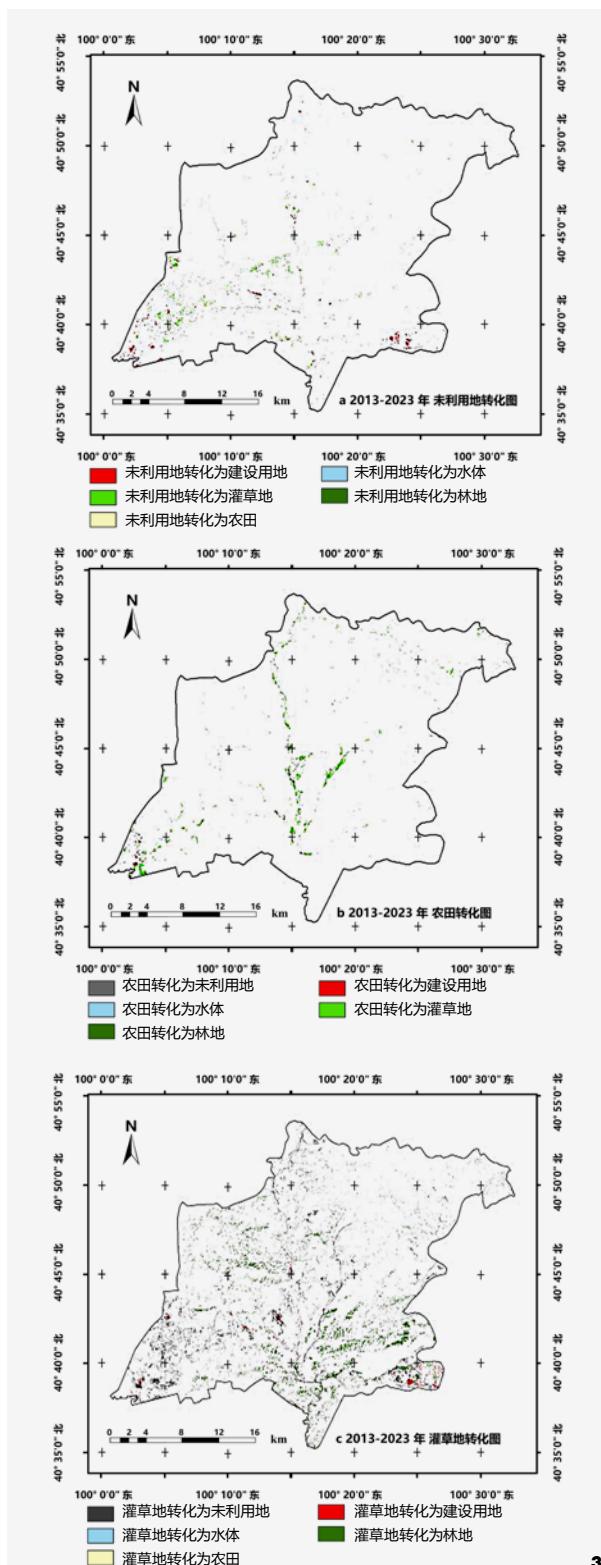


图3 2013–2023年未利用地、农田、灌草地转化图
Fig. 3 Conversion map of unused land, farm land and shrub land from 2013 to 2023

表4 2003–2023年间石拐矿区景观类型变化
Tab. 4 Changes of landscape classes in Shiguai mining area from 2003 to 2023

景观指标 Landscape index	年份 Year	农田 Farm land	林地 Wood land	灌草地 Shrub land	水体 Water land	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
斑块类型面积 (CA) /hm ²	2003	3 687.30	5 171.67	64 828.80	15.39	742.05	2 612.70
	2013	3 148.47	5 571.27	64 355.67	17.37	1 592.91	2 372.22
	2023	2 476.89	6 725.52	62 111.97	15.75	2 018.97	3 708.81
斑块类型所占面积比例 (PLAND)	2003	4.79	6.7118	84.1203	0.02	0.9683	3.3927
	2013	4.09	7.2307	83.5088	0.0225	2.0718	3.0792
	2023	3.11	8.7285	80.6715	0.0204	2.6384	4.8358
斑块数量 NP/ 个	2003	578.00	1 137.00	112.00	7.00	114.00	862.00
	2013	943.00	1 935.00	191.00	9.00	246.00	592.00
	2023	494.00	1 560.00	164.00	7.00	205.00	486.00
斑块密度 (PD) / (个/km ²)	2003	0.7501	1.4755	0.1453	0.0091	0.1479	1.1187
	2013	1.2233	2.5102	0.2478	0.0117	0.3191	0.768
	2023	0.641	2.0243	0.2128	0.0091	0.266	0.6306
最大斑块指数 (LPI)	2003	0.4788	0.2852	83.5866	0.0077	0.3379	0.1688
	2013	0.3856	0.3149	82.7998	0.0084	0.7898	0.3783
	2023	0.3963	0.3160	78.9335	0.0083	0.9628	0.8143
边缘密度 (ED) / (m/hm ²)	2003	12.1758	19.8700	43.3036	0.0763	2.3963	12.8193
	2013	13.1879	25.4897	46.5005	0.0903	4.7662	10.0531
	2023	8.8446	27.5689	44.8310	0.0732	5.2667	13.4016
景观形状指标 (LSI)	2003	39.2272	53.7958	34.4176	3.6296	17.4481	48.8035
	2013	45.5173	66.4016	36.9362	4.1429	24.0337	40.1754
	2023	35.0153	65.3912	36.2183	3.4815	23.5183	42.8698
平均形状指数 (SHAPE_MN)	2003	1.6883	1.5894	1.8629	1.3808	1.6401	1.6249
	2013	1.5422	1.5182	1.6705	1.3660	1.5121	1.6143
	2023	1.6316	1.6532	1.7471	1.3546	1.6221	1.8101
面积加权分维数 (FRAC_AM)	2003	1.1682	1.1385	1.3440	1.0826	1.1685	1.1333
	2013	1.1447	1.1416	1.3494	1.0849	1.2153	1.1688
	2023	1.1483	1.1464	1.3449	1.0723	1.2064	1.2058

地面积经历了初期缩减、后续回升的波动性变化轨迹。实际监测数据与《石拐矿区土地利用总体规划(2009–2020年)》中的土地利用变化趋势和规模的预测结果高度一致, 验证了规划的准确性和前瞻性^[29–31]。由此可知:

(1) 景观百分比(PLAND)和斑块面积(CA)的研究表明石拐矿区的景观优势度, 其中灌草地面积超过80%为该矿区主导景观, 其他景观类型面积占比均不足10%。

(2) 通过斑块密度(PD)、斑块个数(NP)和边缘密度(ED)研究可以表明2003–

2023年间石拐矿区各类型破碎度。2003–2013年, 农田、林地、灌草地、建设用地和未利用地最初经历了破碎化, 通过生态恢复和城市发展措施, 景观破碎度有所降低, 斑块逐渐集中化。

(3) 利用平均形状指数(SHAPE_MN)、景观形状指数(LSI)和面积加权分维数(FRAC_AM), 探究石拐矿区2003–2023年间斑块形态的动态变化特征, 揭示斑块形状复杂性的演变趋势^[27]。其中农田、林地、灌草地、建设用地及水体等景观类型的斑块形态均趋向于简化,

并达到相对稳定的形态结构。未利用地斑块形态经历复杂向简单的演变过程, 反映不同土地利用类型在景观动态中的差异化响应。

3.2.2 景观格局变化分析

通过对景观格局指数的分析, 全面审视研究区域在时空维度上的变化。研究选取7个关键性指标, 以量化评估石拐矿区景观格局的动态变化和演化特征, 包括蔓延度指数(CONTAG)、散布与并列指数(Interspersion and Juxtaposition Index, IJI)、面积加权分维数(Area-

Weighted Fractal Dimension, FRAC_AM)、香农多样性指数 (Shannon's Diversity Index, SHDI)、香农均匀度指数 (Shannon's Evenness Index, SHEI)、最大斑块指数 (Largest Patch Index, LPI) 以及平均形状指数 (Mean Shape Index, SHAPE_MN)^[32]，计算结果见表5可知：

(1) 在过去10年中，石拐矿区主要景观斑块面积显著减少，破碎化程度加剧，景观格局正经历动态调整，突显土地利用管理方面面临的挑战，其根本动因为人类活动对自然环境的强烈干预与影响。

(2) 平均形状指数的先降后升反映斑块经历从破碎到集中的变化。面积加权分布数的小幅波动表明，小规模斑块的转变并未对主要景观斑块造成重大影响。

(3) 景观蔓延度指数的高值显示灌草地作为优势斑块的连通性，有迹象表明其正在经历破碎化。散布和并列指数的逐年上升揭示区域内斑块分布正朝向更加多元化与复杂化的方向演进。

(4) 香农多样性指数持续上升表明石拐矿区景观组成正趋向于更高多样性和分布的均衡性。香农均匀度指数增加同样揭示景观斑块分布的进一步分散化现象。

3.3 土地覆盖变化驱动力分析

3.3.1 自然因素

内蒙古地区的气候特点显著，四季分明，降水分布不均。随着全球气候变暖的趋

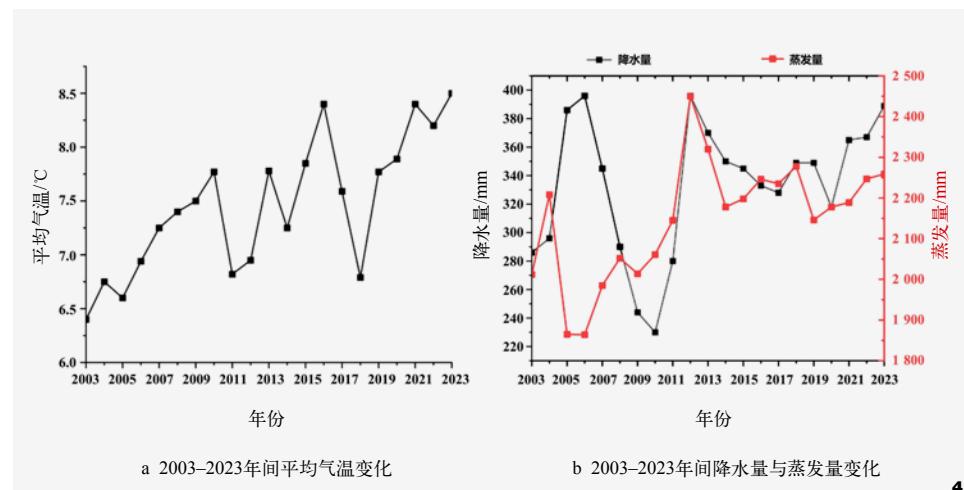


图4 2003–2023年间石拐矿区平均气温、降水量与蒸发量变化
Fig. 4 Annual average temperature, precipitation and evaporation curve in Shiguai mining area from 2003 to 2023

势，石拐矿区的气温可能也在逐渐上升，这会影响到植被的生长周期和分布范围。同时，降水量的变化也会直接影响到土壤的湿度和植被的繁茂程度。降水量的减少可能会导致土壤干旱、植被退化，进而影响到整个土地覆盖的状况。地形地貌也是一个不可忽视的因素。石拐矿区地处内蒙古高原，地形复杂多样，有山地、丘陵、平原等多种地貌类型。这种地形地貌的差异会导致土壤、水分等自然条件分布不均，进而影响到植被的生长和分布。土壤条件也是影响土地覆盖变化的重要因素。土壤的类型、质地、肥力等都会直接影响到植被的生长和发育。石拐矿区由于长期煤炭开采等人类活动，可能会对土壤造成破坏和污染，进而影响到植被的生长和土

地覆盖的变化。

其中气温和降水是主要的限制性因子。通过对石拐矿区2003–2023年的平均气温和降水量进行统计分析发现，研究期间，石拐矿区年平均气温起伏不一，具有显著的波动变化，但整体看来呈现出增加的变化趋势，年平均气温增加0.105°C，具有明显的增温现象。对降水量而言，由于气候暖干化趋势的加剧，气温的上升使得研究区蒸发量较大，且蒸发量远大于降水量，使得土壤持水量下降（图4）。2003年以来石拐矿区降水量呈波段增长，水资源是矿区生态环境的恢复和改善实现可持续发展的动力源泉，是石拐矿区景观格局发生变化的主要自然因素。

表5 2003–2023年间石拐矿区景观格局变化
Tab. 5 Landscape pattern change in Shiguai mining area from 2003 to 2023

年份 Year	最大斑块指数 Largest patch index	平均形状指数 Mean shape index	面积加权分维数 Area-weighted fractal dimension	蔓延度指数 Contag	散布与并列指数 Interspersion juxtaposition index	香农多样性指数 Shannon's diversity index	香农均匀度指数 Shannon's evenness index
2003	83.5866	1.6331	1.3129	74.6764	51.8911	0.6337	0.3536
2013	82.7998	1.5452	1.3176	73.3656	52.6205	0.6605	0.3686
2023	78.9335	1.6781	1.311	71.0192	54.3009	0.7381	0.4119

表6 因子载荷系数表
Tab. 6 Table of factor load factors

指标因子 Index factor	因子载荷系数 Factor loading coefficient			共同度 (公因子方差) Commonality (common factor variance)
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	
总人口	0.957	0.095	0.074	0.930
农作物总播种面积	0.190	0.856	0.339	0.885
粮食产量	0.672	-0.561	-0.255	0.831
第三产值 (万元)	0.697	-0.202	0.657	0.958
工业产值 (万元)	0.796	-0.483	0.260	0.935
GDP (万元)	0.878	0.428	-0.178	0.985
第二产值 (万元)	0.841	0.489	-0.192	0.984
第一产值 (万元)	0.962	-0.059	-0.036	0.991
人均 GDP (元)	0.993	0.105	-0.138	0.955

3.3.2 经济因素

小尺度时间内, 土地覆被景观主要受人类活动影响, 自然因素作用有限。本文基于研究区数据, 选取9项社会经济指标, 通过SPSS主成分分析, 提取关键信息。结果显示, 前两个主成分共解释了93.936%的方差, 其中第1主成分贡献率达69.931%, 第2主成分贡献率为24.087%, 突显了主导因素的强影响力。由表6可知, 主成分1展示最强的载荷系数在总人口、人均GDP、第一产值等变量上均为高度正相关, 特别是人均GDP和总人口, 载荷系数接近1, 表明这一主成分主要反映了石拐矿区经济规模与人口总量的综合性指标。主成分2则在农作物总播种面积上表现出显著的载荷(0.856), 同时与工业产值呈现中等程度的负相关, 暗示该主成分与农业生产活动及其与其他经济产业结构的相对重要性有关。其可能反映农业生产结构及其在经济中的相对地位变化。主成分3的载荷分布较为分散, 尽管第三产值和工业产值在该主成分上呈现正相关, 但其载荷系数并不特别突出, 可能表明这一主成分涉及的是更为复杂或多元化的经济活动组合, 如服务业与

工业之间的某种平衡或相互作用。其总体解释力相较于前两个主成分较弱, 不是数据变异性的主要来源。

3.3.3 政策因素

(1) 露天煤矿的逐步关闭。石拐矿区的煤炭资源趋于枯竭, 促使当地政府出台一系列先关闭石拐矿区中小煤矿, 再逐步关停大型国有煤矿的政策办法。此举有助于减少裸露土地, 促进了自然生态的恢复。

(2) 棚户区改造与新区发展。2003年起, 石拐新区的规划与兴胜镇的特定村落联合开展建设, 占用大量农田用地, 城市建设用地随之增加, 而农业用地相应缩减。棚户区改造过程中, 一部分原本用于农业的土地用途被转变为建设用途。

(3) 生态修复项目的持续开展。石拐矿区已累计投入3.7亿元人民币资金, 用于推进三北防护林工程、天然林资源保护以及大青山南坡绿化项目, 覆盖约114 km²重点林业区域^[33-35]。五当召景区周边、旅游公路沿线和大青山南坡等战略性地区所开展的绿化造林活动, 亦取得积极的成果, 累计绿化面积达

到209.33 km²。与中科院植物研究所合作建成植物资源培育基地, 共试种209种抗旱耐寒苗木, 并在示范种植面积达到8.53 km²^[36-38]。尽管该区域生态环境曾因矿业活动受损, 但在近20年间, 植被覆盖和森林覆盖率均有所提升, 生态环境得到显著改善, 生态承载力增强。

4 结论

2003-2023年, 石拐矿区土地利用景观格局变化显著。农田面积持续缩减, 林地面积稳步增长。灌草地虽仍占据矿区主体, 占比超80%, 但其面积却大幅减少。水体面积则保持相对稳定态势, 而未利用土地则经历了先减后增的波动变化。

石拐矿区土地利用含农田、林地、灌草地、建设用地与未利用地, 初期景观破碎化显著。经策略调整, 土地利用趋向整合集中, 小斑块受影响较大, 大斑块保持稳定, 促使区域景观更加多样均衡。

从土地利用景观格局的驱动因素看, 石拐矿区2003-2013年和2013-2023年土地覆盖变化集中在西南部。自然因素如气温、降水对景观格局有所影响, 而经济因素中, 人口与GDP的综合效应最为显著。农业经济与工业经济呈反向变动, 人类经济活动强度以及政策支持是导致石拐矿区土地覆盖转移的根本因素。

注: 文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] 李玮峰, 欧阳志云, 肖焱. 景观生态学原理在城市土地利用分类中的应用[J]. 生态学报, 2011, 31(03): 593-601.
- [2] 赵晓伟, 储鼎, 吕剑峰, 等. 基于遥感手段监测矿区植被覆盖度变化[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(SI): 133-136.

- [3] 吴振华. 基于3S集成技术的半干旱草原区大型露天煤炭基地景观格局优化研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2020.
- [4] 王让, 徐公权, 武少菁, 等. 矿山生态环境恢复治理中景观修复模式探讨——以焦作红砂岭矿区为例[J]. 能源与环保, 2024, 46(02): 34-39.
- [5] 夏倩柔, 夏楠, 唐梦迎. 新疆伊犁河谷矿集区土地利用时空演变与驱动力分析[J]. 中国矿业, 2023, 32(09): 70-78.
- [6] 孙立颖, 张世文, 董祥林. 采矿扰动下芦岭矿土地利用景观格局分析与预测[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2021, 41(05): 8-15.
- [7] 韩煜, 张裕凤. 资源枯竭型地区土地利用现状分析——以包头市石拐区为例[J]. 西部资源, 2018(05): 180-182.
- [8] 王新军, 穆荣, 张忠生. 浅谈第二次全国土地调查土地利用分类[J]. 测绘与空间地理信息, 2011, 34(04): 13-16.
- [9] 沈文娟, 李明诗. 基于长时间序列Landsat影像的南方人工林干扰与恢复制图分析[J]. 生态学报, 2017, 37(05): 1438-1449.
- [10] 麻菁, 谷康. 基于灰色关联度分析的龙岩市景观格局动态变化及驱动力研究[J]. 园林, 2022, 39(07): 82-89.
- [11] 崔洁, 许浩, 刘伟. 近20年徐州都市圈蓝绿空间景观格局演变分析[J]. 园林, 2022, 39(07): 75-81.
- [12] 许自力, 马一菲, 王梦瑶. 粤港澳大湾区水上文化景观及其空间分布特征[J]. 风景园林, 2024, 31(06): 125-132.
- [13] 巩杰, 谢余初, 高彦净, 等. 1963-2009年金塔绿洲变化对绿洲景观格局的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(03): 603-612.
- [14] 杨柳琪, 周燕, 罗佳梦, 等. 基于时空演变分析的武汉市城市蓝绿系统空间格局及其与城市发展的协同关系研究[J]. 园林, 2022, 39(07): 66-74.
- [15] 张浪, 仲启铖, 张桂莲, 等. 基于ArcGIS Engine的城市绿地生态网络智能规划系统研发与实证[J]. 园林, 2024, 41(01): 20-27.
- [16] ZHOU Z J, PLAUBORG F, PARSONS D, et al. Potato Canopy Growth, Yield and Soil Water Dynamics Under Different Irrigation Systems[J]. Agricultural Water Management, 2018(202): 9-18.
- [17] 牛萌, 刘华, 穆晓红. 城市生态空间受损识别与评价研究——以北京海淀北部新区、亦庄新城为例[J]. 园林, 2024, 41(01): 48-57.
- [18] 张莹莹, 蔡晓斌, 杨超, 等. 1974-2017年洪湖湿地自然保护区内景观格局演变及驱动力分析[J]. 湖泊科学, 2019, 31(01): 171-182.
- [19] 郑璐璐, 李晓燕, 龙翠玲. 不同地域4种常用树种滞尘和吸滞重金属能力比较研究[J]. 地球与环境, 2020, 48(02): 268-278.
- [20] 王延吉, 神祥金, 吕宪国. 1980-2015年东北沼泽湿地景观格局及气候变化特征[J]. 地球与环境, 2020: 1-10.
- [21] 陆凤连, 王新闻, 张合兵, 等. 1980-2015年焦作矿区景观格局演变及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(04): 237-243.
- [22] 郭少壮, 白红英, 孟清, 等. 1980-2015年秦岭地区景观格局变化及其对人为干扰的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4080-4088.
- [23] 李晓娜, 邓忠坚, 王秋华, 等. 1986-2015年滇西北地区土地利用类型时空动态研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学版), 2019, 39(06): 137-145.
- [24] 高杰, 高敏, 赵志红, 等. 1987-2015年七里海潟湖湿地景观格局变化及驱动力分析[J]. 水生态学杂志, 2018, 39(04): 8-16.
- [25] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 等. 1989-2015年海口城市热环境与景观格局的时空演变及其相互关系[J]. 中国环境科学, 2019, 39(04): 1734-1743.
- [26] 夏威夷, 李玲, 雷孝章. 1990-2014年岷江上游流域景观格局变化及驱动力分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(11): 119-124.
- [27] 范丽娟, 田广星. 1995-2015年上海市土地利用及其景观格局变化[J]. 水土保持通报, 2018, 38(01): 287-292.
- [28] 杨尊尊, 段渊古, 高天, 等. 1999-2017年西咸新区景观格局变化及驱动力研究[J]. 西部林业科学, 2020(01): 99-106.
- [29] 裴志方, 杨武年, 吴彬, 等. 2000-2016年宁夏植被覆盖景观格局遥感动态分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(01): 215-219.
- [30] 孟超, 王计平, 支晓蓉, 等. 基于GIS的县域森林景观空间格局等级特征研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 187-194.
- [31] 宁建杨, 唐红. 基于GIS的张掖市山丹县域土地利用及景观格局分析[J]. 园林, 2021, 38(09): 76-83.
- [32] 卢晓宁, 黄玥, 洪佳, 等. 基于Landsat的黄河三角洲湿地景观时空格局演变[J]. 中国环境科学, 2018, 38(11): 4314-4324.
- [33] WIJESINGHA J, MOECKEL T, HENSGEN F, et al. Evaluation of 3D Point Cloud-based Models for the Prediction of Grassland Biomass[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 78: 352-359.
- [34] LUO J, ZENG J, FU J, et al. Aircraft Target Recognition in Remote Sensing Images Based on Saliency Maps and Invariant Moments[C]// ICGG 2018-Proceedings of the 18th International Conference on Geometry and Graphics, 2019.
- [35] 文武, 任超群, 张志杰, 等. 基于生态系统服务供需的重庆市主城区生态安全格局构建[J]. 园林, 2022, 39(03): 30-38.
- [36] 张丽, 赵丹丹, 刘吉平, 等. 近30年吉林省景观格局变化及气候效应[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(01): 265-272.
- [37] 吕金霞, 蒋卫国, 王文杰, 等. 近30年来京津冀地区湿地景观变化及其驱动因素[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4492-4503.
- [38] 魏雯, 林军, 李瑞敏. 近20年昆明盘龙江流域土地利用及景观格局演变研究[J]. 园林, 2022, 39(02): 100-106.