

典型平原采煤塌陷区景观格局时空动态变化特征及驱动力分析 ——以淮北市临涣矿为例

范小双, 吴艳兰*, 刘紫涵, 王 杰

(安徽大学资源与环境工程学院, 安徽省地理信息工程中心, 合肥 230601)

摘 要: 为了给淮北市临涣矿区的矿产资源开发、土地资源可持续利用和采煤塌陷区的生态环境修复与重建提供参考。采用临涣矿塌陷区 2004 年的 IKONOS 影像和 2014 年的 WorldView-3 影像, 结合 eCognition 分类技术和景观指数分析方法, 研究景观格局时空动态变化, 并对其驱动力进行了分析。结果表明, 2004—2014 年临涣矿塌陷区不同景观类型间的转化主要表现为耕地面积净减少 43.7%, 其中约有 236 hm² 的耕地转化为塌陷区、126 hm² 耕地用于堆放粉煤灰与煤矸石和 359 hm² 耕地转化为工业用地与居民区等; 塌陷区的面积由 2004 年的 96 hm² 变成 2014 年的 443 hm², 大幅增加了 246.6%。该矿区景观格局时空动态变化的主要驱动力因子是煤矿开发、农业发展和生态治理政策。这些驱动因子互相影响、互相制约, 共同影响矿区景观格局的动态变化。

关键词: 塌陷区; eCognition; 景观格局; 时空动态变化; 驱动力

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)01-0094-08

Analysis of the landscape pattern and driving force of the spatio-temporal dynamic change in a typical plain coal mining subsidence area: A case study of Linhuan mining area

FAN Xiaoshuang, WU Yanlan, LIU Zihan, WANG Jie

(School of Resources and Environment Engineering, Anhui University; Engineering Center for Geographic Information of Anhui Province, Hefei 230601)

Abstract: This study aimed at providing a reference for the exploitation of mineral resources, sustainable utilization of land resource and restoration and reconstruction of the ecological environment in a coal mining subsidence area. The dynamic change of the landscape spatial pattern and its driving mechanism in Linhuan mining area in Huaibei City, Anhui Province was analyzed by adopting IKONOS image in 2004 and WorldView-3 image in 2014, based on eCognition classification technology and landscape index analysis method. The results showed that the transitions between different landscape types of the mine subsidence area from 2004 to 2014 were mainly farmland, reduced by 43.7% and of which 236 hm² farmland was converted to a subsidence area, 126 hm² farmland was used for piling up coal ash and gangue, and 359 hm² farmland was transformed into industrial land and residential areas. Simultaneously, the subsidence area was increased by 246.6% from 96 hm² in 2004 to 443 hm² in 2014. The main driving factors for the dynamic changes of the landscape spatial pattern in this mining area were coal mine exploitation, agricultural development and ecological management policy. These driving factors interacted and restricted each other and they jointly affected the dynamic change of the landscape pattern in the mining area.

Key words: subsidence area; eCognition; landscape pattern; spatiotemporal dynamic change; driving forces

作为景观生态学研究核心内容之一的景观格局动态变化, 是自然与人文因子相互制约、相互影响的结果^[1-2], 景观格局动态变化主要表现为土地利用

和土地覆盖变化, 其实质上是土地利用格局动态变化^[3]。土地利用格局动态变化是人类为满足社会经济发展需要, 不断调配各种土地利用的过程, 反映

收稿日期: 2016-03-15

基金项目: 安徽省自然科学基金面上项目(1608085MD83, 1308085MD52)资助。

作者简介: 范小双, 硕士研究生。E-mail: 541291873@qq.com

* 通信作者: 吴艳兰, 教授, 博士生导师。E-mail: wylmq@sina.com

了人类利用土地进行生产、生活的发展趋势。景观格局研究中,通过对不同时期景观格局及其驱动力影响因子进行动态分析,对掌握该区域景观的变化规律、尽早提出调控景观格局变化方向的措施,实现区域生态修复和保证资源的可持续利用具有重要意义^[4]。

随着驱动机制量化分析方法以及 3S 技术应用的引入等,我国景观动态变化研究取得了一系列的成果^[5-6],但是研究区域主要分布在西北、东北平原区和经济相对发达的东南地区^[7],而针对中部地区矿产资源开发区的景观格局及驱动机制研究相对薄弱^[8]。随着煤矿资源的大规模开采,形成的洼地景观——采煤塌陷区对周围环境也带来多方面的破坏,煤矿所在地的生态、景观和经济等各方面都会受到塌陷区的影响^[9-11]。通过观察塌陷区景观格局的变化,并进行驱动力的分析,对提出塌陷区景观规划方法和恢复措施具有现实意义。丁晓英采用分辨率为 10 m 的 SPOT5 高清影像数据源,利用 eCognition 软件进行分割分类的方法,对深圳市铁岗水库附近区域进行了景观动态变化检测^[12],考虑到高分辨率影像更适用于城市景观格局分析,且分辨率越高景观分类的准确性越高,因此本研究以高空间分辨率的 IKONOS (全色产品分辨率为 1 m) 和 WorldView-3 (全色产品空间分辨率为 0.34 m) 多光谱影像作为数据来源。由于传统的遥感图像分类法处理高分辨率图像存在分类精度降低、空间数据大量冗余等问题,本研究基于 eCognition 软件面向对象的分类原理进行采煤塌陷区景观信息提取,有效提高了空间分辨率数据的自动识别精度^[12]。并结合 RS、GIS 等相关技术,对淮北市临涣矿区 2004—2014 年的景观格局变化及其驱动力进行了研究,为高速城市化的淮北市平原矿区及周边生态环境的动态监测、环境影响评估和生态修复提供重要理论依据^[13]。

1 研究区域概况

临涣煤矿位于安徽省淮北市西南,属濉溪县管辖,介于 33°14'~33°16' N, 116°23'~116°25'E 之间,属于暖温带半湿润季风气候,四季分明,年平均温度 14.5℃,气温年较差 27.6℃,年平均降雨量 852.4 mm (多集中在 6—9 月),雨水适中,气候温和。矿区于 1985 年投产,设计年生产能力 180 万 t,实际年生产能力 300 万 t,设计服务年限为 121 a^[14]。

2004—2014 年是淮北市矿产资源迅速开发利用的 10 年,全市境内主要有濉萧、临涣 2 个矿区,

矿产地 49 处,其中大中型矿产地 23 处,是淮北基地十大矿区之一。临涣矿在煤矿产业十年飞速发展的带领下,经济发展迅速,同时也带来了许多环境问题,对空气、植被、水和土地都有不同程度的破坏。矿区土壤类型主要有潮土和砂礓黑土两大类型。矿区的原生植被基本不复存在,人工植被主要为农田、城市绿地和各种树木等。由于常年地下开采,临涣矿塌陷区的最大塌陷区域已有 1.6 km×1.1 km,面积约为 17.6 km²。

根据塌陷区现状,结合当地自然地理要素和人为活动情况,确定本研究区域为塌陷区及附近地区共 49.47 km²,此区域内基本包含临涣矿的所有塌陷区,土地利用类型包括了塌陷区、粉煤灰、煤矸石、耕地、居民及工矿用地等 10 类。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

随着遥感技术的快速发展,高空间分辨率遥感影像 (QuickBird、IKONOS 和 WorldView 等) 已经成为遥感应用发展的总体趋势^[15],国内外学者先后利用高空间分辨率遥感影像在不同领域对面向对象的影像分类方法进行了应用研究^[16-17],因此通过对高分辨率遥感影像的分类进行塌陷区研究,理论上是可行的。影像选择包括 2004 年的 IKONOS 多光谱影像和 2014 年的 WorldView-3 多光谱影像。IKONOS 卫星可采集 1 m 分辨率全色和 4 m 分辨率多光谱影像;WorldView-3 能够提供 0.3 m 全色图像和 1.24 m 分辨率的 8 波段多光谱图像外。IKONOS 和 Worldview-3 主要技术指标如下表 1 所示。

以 IKONOS 和 Worldview-3 遥感影像为基础数据源。为了保证 2 期来源不同的数据具有可比性,将 IKONOS 影像和 WorldView-3 影像进行对比分析,结合野外调查照片,利用 ArcGIS 与经过配准的 Google Earth 图像进行叠加对比,在 ENVI 将两幅高清影像进行大气辐射校正和几何校正后,对影像进行颜色增强,最终获得利于 eCognition 软件分割分类的遥感影像数据集。

2.2 基于 eCognition 的影像分类与精度评价

土地利用分类中常用到的遥感技术一般是计算机分类和目视解译分类^[17]。传统的计算机分类算法常常忽视了空间信息的问题,而目视解译虽精度相对较高,但具有很大的主观性^[18]。针对高分辨遥感数据的特点,一些学者根据邻域、距离与位置的概念提出一种以对象为基本实体的面向对象方法^[19]。eCognition 作为一款基于面向对象理论智能化影

像分析软件，采取决策专家系统支持的模糊分类算法，大大提高空间分辨率数据的自动识别精度^[15]。

本研究利用 eCognition 软件的规则集模式对影像进行分割和分类，该模式提供了多种分类方式，通过对各种分类方法结果的精度评价进行对比，并结合研究区高清影像的具体特征，选择对于基于像素分类与面向对象分类的分类精度都很高的 CART

决策树分类方法。鉴于本研究区域的地理特征及景观类型特殊性，选择分割尺度为 150 的多尺度分割方法^[20]，并引入光谱差异分割法将光谱差异值小于 5 的小斑块进行合并，在此基础上采用监督分类中的 CART 决策树分类方法解译图像，并通过目视解译的方法对分类错误及不精确的斑块进行修正，以提高分类的准确性。

表 1 IKONOS 和 Worldview-3 主要技术指标

Table 1 Main technical indicators of IKONOS and Worldview-3

项目 Item	IKONOS	Worldview-3
星下点分辨率 Resolution at nadir	0.82 m	0.31 m
产品分辨率 Spatial resolution	全色: 1 m	全色: 0.34 m
轨道周期 Orbital period	98 min	97 min
成像波段 Bands	全色, 3 波段多光, 近红外	全色, 8 波段多光谱, 8 波段短波红外

2.3 临涣矿景观类型分类

本研究在构建矿区景观生态系统类型空间数据集与采煤塌陷区分布数据集的过程中，以校正后的高清 Google Earth 影像和临涣矿区土地复垦报告等相关资料为主，并结合野外调查进行资料验证，实现矿区景观类型的识别、分析和判定。

土地利用分类系统需要兼顾国内外现有的分类系统和所研究区域的土地利用特征，因此在参照《土地利用动态遥感监测规程》^[21]和我国现行的《土地利用现状分类》（2007 年 9 月发布）^[22]的基础上，

结合临涣矿区的景观格局特征与现有文献中的矿区景观类型分类等因素，将塌陷区、粉煤灰和矸石山单独进行分类对比，这对于临涣矿 10 年景观动态变化与塌陷区的变化有直观的认识，且采煤塌陷区反映在影像上是不规则的区域，浅灰色的粉煤灰堆积成的小山和白色矸石山都很容易在影像上辨别。综合将研究区所分成的 8 个一级和 16 个二级景观类型^[5,23]，合并整理为具有临涣矿区研究特色的 10 种景观类型：绿地、耕地、工矿用地、粉煤灰、矸石山、居民区、道路、河流、塌陷区和裸地（表 2）。

表 2 临涣矿景观类型的划分

Table 2 Classification of landscape types in Coal Mining Areas, Linhuan

序号 No.	I 级分类 One-level classification	代码 Code	II 级分类 Two-level classification	指标 Index	本研究分类 Classification of this article
1	草地	30	草地	自然或半自然草本植被	绿地
2	林地	31	有林地	树木郁闭度 ≥ 0.2 的乔木林地	
		33	其他林地	树木郁闭度 ≥ 0.1 且 < 0.2 的疏林地	
3	耕地	51	水田	种植水稻、莲藕等水生农作物的耕地	耕地
		52	旱地	无需灌溉，靠天然降水生长的耕地	
4	工矿仓储用地	61	工业用地	工业生产及其附属用地	工矿用地
		63	仓储用地	用于工业物资储备或者中转的场所	粉煤灰
		62	采矿用地	采矿、采石、采砂（沙）场等地及尾矿堆放地	矸石山
5	住宅用地	71	城镇住宅用地	城镇用于生活居住的小区、别墅等场地	居民区
		72	农村宅基地	农村用于生活居住的场地	
6	交通运输用地	101	铁路用地	铁路、轻轨、场站等用地	道路
		102	公路用地	国道、省道、公路等公路道路	
		104	农村道路	公路用地以外的田间道路	
7	水域及水利设施用地	111	河流水面	天然或者人工的常水位岸线之间的水面	河流
		114	坑塘水面	天然或人工开挖的蓄水量 < 10 万 m ³ 的坑塘	塌陷区
8	其他用地	127	裸地	表层为土质，基本无植被覆盖地	裸地

2.4 景观格局指数选取

由于多数景观格局指标之间是高度相关或重复

的，而且此区域的分类结果是通过目视解译合并的小斑块，所以在此不探讨斑块水平指数（patch

level), 至此根据前人研究成果^[24]并结合临涣矿塌陷区的自身特点, 排除高度重复的景观指数, 本研究在几百种景观指数中只选取了 17 个评价分析指数、2 种相关性关系进行划分: (1) 斑块类型水平指数(class-level): 斑块数(NP)、景观类型百分比(PLAND)、景观形状指数(LSI)、板块结合度指数(COHESION)、斑块密度(PD)、景观类型面积(CA)和最大斑块指数(LPI); (2) 景观水平指数: 景观形状指数(LSI)、斑块个数(NP)、最大斑块指数(LPI)、平均斑块分维数(FRAC_MN)、蔓延度指数(CONTAG)、斑块聚合度指数(AI)、散布与并列指数(IJI)、香浓多样性指数(SHDI)、香浓均匀度指数(SHEI)和聚集度(AI)。

17 个评价分析指数确定之后, 首先利用 ArcGIS 软件将 2 期遥感影像的景观类型图数据进行格式转化, 通过计算 Fragstat4.2 软件模块下 17 个评价分析指数, 得到 2004—2014 年间的矿区景观类型变化的特征和变化规律。

2.5 景观格局变化驱动因子选取

在景观格局变化研究中, 驱动力问题一直占据着重要地位^[7,15]。2004—2014 年这 10 年间淮北市临涣煤矿景观格局发生了很大的变化, 这是自然因素和人为因素综合作用的结果^[25]。尽管自然因素是景观格局变化的基础条件且具有累积性, 但其往往在大的时空范围内影响景观格局的变化, 以 10 年作为时间跨度, 经主成分分析得出: 淮北市作为平原地区, 温度、降水、日照等自然因素在年际变化上并

未产生明显变化, 对景观动态变化的影响几乎为 0。鉴于研究区淮北市临涣矿区的面积仅为 49.47 km² (非行政区划), 针对该区域的时空特征, 本研究更多地集中在人为因素的探讨^[26]; 此外, 选取的因子在一定层面上也要反映出农业发展、城市化、煤矿开发、政策调整等对景观格局的影响^[27-29]。

本研究共选取了 8 个驱动因子作为代表: X₁, 耕地面积(km²); X₂, 居民建设用地面积(km²); X₃, 绿地面积(km²); X₄, 国民生产总值(万元); X₅, 总人口(万人); X₆, 煤矿年产量(万 t); X₇, 粮食产量(t·亩⁻¹); X₈, 固定资产投资(万元)。

3 结果与分析

3.1 基于 eCognition 的影像分类精度评价

以 eCognition 软件中的基于野外检查点作为精度评价标准(样本点均来自野外收集), 根据以上的分类方法, 每个分类均选取 3~5 个样本点, 这些样本点均匀分布在整个研究区域, 在多次基于 TTA 掩膜的误差矩阵算法中得到 2014 年遥感影像的总分分类精度为 88%, Kappa 指数为 0.905, 满足分析要求, 根据 2014 年的结果, 在 2004 年的高清影像上选取相同位置、相同数量的样本点, 得出 2004 年的总分分类精度为 81%, Kappa 指数为 0.823, 也满足分析要求。最终获得 2004 与 2014 年二期临涣矿区土地利用分类图和临涣矿塌陷区分布图(图 1 和图 2)。同时也利用 ArcGIS 统计出 2004—2014 年临涣矿景观生态系统分布与构成转移矩阵(表 3)。

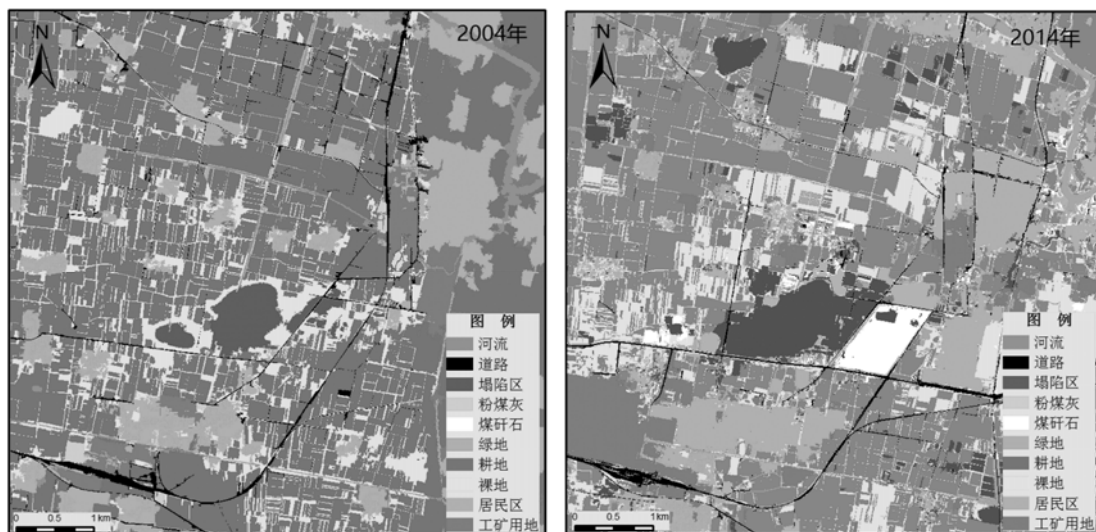


图 1 2004 年和 2014 年临涣矿区土地利用分类图

Figure 1 Classified land use map of Linhuan Coal Mining Areas in 2004 and 2014, respectively

3.2 主要景观类型转移变化分析

从图 1 和图 2 可以看出, 2004 年与 2014 年临

涣矿的景观类型的道路、河流及绿地等景观类型的面积没有显著变化, 而景观类型的转变主要以耕

地、工矿用地与居民地、塌陷区等景观类型为主。由表 3 可知,耕地的变化最为明显,10 年间景观变化导致了矿区的耕地总面积净减少 43.7%,这其中约有 236 hm² 的耕地转化为塌陷区、126 hm² 耕地用于堆放粉煤灰与煤矸石、359 hm² 耕地转化为工业用地与居民区、其他耕地退耕为绿地及转变为人工表面。粉煤灰与矸石山面积共增加了 219 hm²,主要由耕地、工矿用地及裸地转变而来,这与煤矿开采强度的增大关系密切。工矿用地及居民区的面积

积显著增加,主要由耕地及裸地转变而来,工矿用地的增加往往是区域经济快速增长与城市化加速的重要标志。塌陷区的面积由 2004 年的 96 hm² 变成 2014 年的 443 hm²,大幅增加了 246.6%,主要由 85 hm² 的裸地,40 hm² 居民地以及 237 hm² 的耕地转变而来,塌陷区面积相对于其他景观类型明显增多,因传感器原因,2004 年的影像右侧 1/4 的区域有模糊,通过监督分类后主要由目视解译完成其分类。

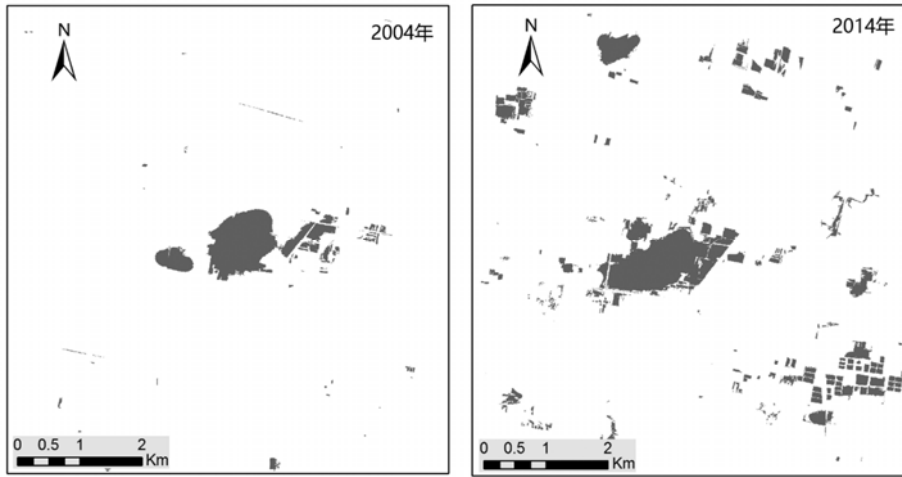


图 2 2004 年和 2014 年临涣矿塌陷区分布

Figure 2 The distribution of subsided areas in Linhuan Coal Mining Areas in 2004 and 2014, respectively

表 3 2004—2014 年临涣矿景观类型转移矩阵

Table 3 Transition matrix of the landscape types in Linhuan Coal area from 2000 to 2014

景观类型 Landscape type	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
I	68.33309				21.93610		10.04319	86.21485	43.51151	
II		108.46640								
III			16.72436				9.13511			
IV				6.11065			2.14158			
V	56.16971		57.16079	68.66089	1 633.90100		221.41010	138.32670	336.36920	236.8307
VI						40.65902				
VII			21.37589	4.39239	30.19205		89.28519	38.56135		
VIII	49.13161				91.42914		55.26423	287.23900	62.67902	39.86152
IX	39.18106			33.34868	234.38040		47.03078	63.70061	117.08020	84.92224
X			4.20929	8.90360						81.36273

I. 绿地 Greenbelt; II. 道路 Road; III. 粉煤灰 Coal ash; IV. 矸石山 Gangu; V. 耕地 Farmland; VI. 河流 River; VII. 工矿用地 Industrial land; VIII. 居民区 Residential area; IX. 裸地 Bare land; X. 塌陷区 Subsidence area.

2004—2014 年临涣矿耕地、居民地及工矿用地景观系统的变化主要发生在中部、西南部与东北部,这与该地区人类活动强度大及煤矿开采强度增大有密切的关系。而塌陷区面积的变化主要是以中部 104 hm² 的塌陷区为中心,四周均匀塌陷,从转移结果看出 2004—2014 年临涣矿北部地区耕地、居民地

及工矿用地景观系统的变化主要发生在中部、西南部与东北部,这与该地区人类活动强度大及煤矿开采强度增大有密切的关系。而塌陷区面积的变化主要是以中部 104 hm² 的塌陷区为中心,四周均匀塌陷,北部与东部较为严重,这与煤矿开采的地理位置有密切关系。

表 4 2004 年临涣矿景观类型格局指数

Table 4 Mine landscape indices of Linhuan Coal in 2004

景观类型 Landscape type	CA hm ²	PLAND	NP	PD	LPI	LSI	COHESION
耕地 Farmland	2 970.7330	59.7101	76	1.5276	34.8802	25.7179	99.5931
绿地 Greenbelt	288.7472	5.8037	321	6.4519	0.4696	27.5082	86.3439
居民区 Residential area	604.7776	12.1557	262	5.2661	2.3054	18.6477	91.7381
道路 Road	121.2848	2.4378	452	9.0849	0.3199	25.1013	71.8009
裸地 Bare land	614.9696	12.3605	1051	21.1245	1.2811	40.6124	83.6313
河流 River	67.1104	1.3489	126	2.5325	0.8557	12.1186	90.0994
工矿用地 Industrial land	181.6528	3.6511	86	1.7286	0.9376	11.2062	91.9154
塌陷区 Subsidence area	101.1360	2.0328	44	0.8844	1.5758	5.6111	94.5987
粉煤灰 Coal ash	18.4240	0.3703	14	0.2814	0.1481	4.7742	82.1193
煤矸石 Gangue	6.4288	0.1292	1	0.0201	0.1292	1.8421	89.3114

表 5 2014 年临涣矿景观类型格局指数

Table 5 Mine landscape indices of Linhuan Coal in 2014

景观类型 Landscape type	CA hm ²	PLAND	NP	PD	LPI	LSI	COHESION
耕地 Farmland	2 069.923	41.8679	427	8.6368	19.9799	29.9142	98.8779
绿地 Greenbelt	228.4686	4.6212	837	16.9298	0.2005	35.2321	71.7940
居民区 Residential area	638.6769	12.9184	656	13.2688	2.7869	25.6330	91.9677
道路 Road	120.2121	2.4315	466	9.4257	0.3097	25.9756	72.0941
裸地 Bare land	765.3042	15.4797	1296	26.2140	1.4908	39.2146	89.4112
河流 River	105.0489	2.1248	342	6.9176	0.7741	19.7632	82.8923
工矿用地 Industrial land	410.9373	8.3120	296	5.9871	3.2602	16.0795	93.4969
塌陷区 Subsidence area	354.3669	7.1677	212	4.2881	3.0464	14.8143	92.3147
粉煤灰 Coal ash	107.2359	2.1690	385	7.7873	0.4129	18.4935	71.7179
煤矸石 Gangue	143.7588	2.9078	518	10.4775	1.1324	20.4045	73.6351

表 6 近 10 年临涣矿景观格局指数对比

Table 6 Contrast of Linhuan Coal Mine landscape pattern indices in recent 10 years

年份 Year	NP	PD	LSI	FRAC_MN	CONTAG	IJI	SHDI	SHEI	AI
2004	2 433	48.9019	28.5595	1.0470	53.8723	61.4156	1.3657	0.5931	78.4262
2014	5 435	109.9327	37.2457	1.0338	37.7072	83.6610	1.8136	0.7876	72.4905

3.3 景观格局指数分析

3.3.1 斑块类型水平指数分析 通过景观指数计算软件 Fragstats 4.2, 得到临涣矿区 2004 年和 2014 年的景观格局指数, 结果(表 4 和表 5)显示, 各景观类型的面积均有了不同程度的变化。斑块个数(NP)作为描述景观异质性的值, 反映了临涣矿区由于不断的煤矿开发, 耕地减少, 建设用地增加, 大片的景观均有不同程度的破碎化。从斑块密度(PD)来看, 耕地、绿地和居民区等的密度都有所增加, 这与该地区采煤塌陷区塌陷和建设用地扩大导致零星分布的耕地与裸地增加有关。

耕地的 LPI 值由 2004 年的 34.8802 降低到了 2014 年的 19.9799, 而塌陷区、粉煤灰和矸石山的 LPI 指数均在不断增加, 因为主塌陷区面积巨大, 造成其右侧的矸石山与粉煤灰用来填补塌陷区面积增大。塌陷区、粉煤灰和矸石山的 LSI 值分别由 2004 年的 5.6111、4.7742 和 1.8421 增加到了 2014

年的 14.8143、18.4936 和 20.4045, 这表明在人类的不断开采与发展下, 这 3 种类型的景观面积更为广阔, 小斑块的塌陷区也逐渐融合为大片的塌陷区, 斑块的分布趋于聚集化。

3.3.2 景观水平指数分析 同样通过景观指数计算软件 Fragstats 4.2, 可以得到近 10 年临涣矿景观格局指数变化特征(表 6), 从表 6 中可以看到, 近 10 年间整个研究区域的总斑块数从 2433 个增加到 5435 个, PD 增幅也超过 1 倍, 伴随着 LSI 指数呈缓慢增加的趋势, 说明研究区内的景观分布受人为的开发影响较大, 多数景观在人为因素的干扰下逐渐趋于分离。FRAC_MN 指数和 CONTAG 指数都在减少, 而 IJI 指数却明显增加, 表明煤矿开采与农业发展导致区域内的景观分布更加广泛及聚集度明显降低。与此同时, SHDI 指数和增 SHEI 指数的增加分别在 0.5 和 0.2 左右, 说明 10 年间景观类别所占的比例差距也有所增加。当整体景观异质性上

升后，区域总体上出现了更加均衡化发展的趋势。

3.4 景观格局变化的驱动力分析

将收集到的8个影响因子的原始数据进行标准

化处理，使用SPSS软件的主成分分析方法，计算出8个驱动力因子的特征值及主成分贡献率（表7）和主成分载荷矩阵（表8）。

表7 特征值及主成分贡献率

Table 7 Eigenvalue and contribution rate of the principal components

主成分序列 Principal component sequence	相关矩阵特征值 Correlation matrix eigenvalue			因子提取结果 Factor extraction result		
	特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累积贡献率/% Cumulative contribution rate	特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累积贡献率/% Cumulative contribution rate
1	5.587	69.844	69.844	5.587	69.844	69.844
2	1.076	13.456	83.300	1.076	13.456	83.300
3	0.599	7.486	90.786	—	—	—
4	0.469	5.865	96.651	—	—	—
5	0.191	2.391	99.042	—	—	—
6	0.063	0.785	99.828	—	—	—
7	0.009	0.116	99.944	—	—	—
8	0.004	0.056	100.000	—	—	—

表8 主成分载荷矩阵

Table 8 Matrices of principal component loadings

变量 Variable	第一主成分 The first principal component	第二主成分 The second main component
耕地面积	-0.969	-0.188
居民建设用地面积	0.808	0.220
绿地面积	-0.552	0.764
人均GDP	0.982	0.046
总人口	0.815	0.332
煤矿年产量	0.804	0.172
粮食亩产量	-0.686	0.515
固定资产投资	0.972	-0.040

表7为从大到小排列的各个因子的特征值及因子提取结果，最终提取出的第一、第二主成分的特征值分别为5.587、1.076，累计贡献率达83.3%，说明这两个主成分可以认为是导致临涣矿区景观格局发生变化的驱动力。从表8可以看出，第一主成分与房屋面积、人均GDP、总人口、煤矿年产量和固定资产投资有较大的正相关性，载荷最小为0.804，与绿地面积、粮食亩产量有负相关性，载荷均不小于0.552；第二主成分与绿地面积、粮食亩产量成正相关性，载荷为0.515，与耕地面积成负相关性，载荷为0.188。

因为选择的因子中包含了耕地、居民建设用地、绿地等，构成第一主成分的因子主要反映了煤矿开发、农业发展和城市化的影响，第二主成分的因子主要反映了政策调整的影响。因此可以将临涣矿的景观动态变化驱动力概括为以下两个方面。

3.4.1 煤矿开发、农业发展及城市化 2004—2014

年间，耕地、绿地面积的不断减少，主要是因为煤矿的不断开发占用耕地与裸地等，也造成塌陷区面积的不断增长及粮食产量的减少。固定资产投资不断增加，国民生产总值增长了1.7倍，城市化水平及居民消费水平的增加等也成为影响景观格局的重要因素。工矿建设用地及城市居民地的增加往往也是经济快速发展与快速城市化的重要标志，所以煤矿的不断开发是导致临涣矿景观动态变化的最根本因素。2004年粉煤灰与煤矸石的面积分别为18.3 hm²和6.7 hm²，而2014年达到了105.1 hm²和138.5 hm²，矿区10年的煤矿采井、粉煤灰与煤矸石的堆放、挖损压占面积约为265.6 hm²，同比增长约85%。

2004—2014年临涣矿开展了2次工矿废弃地，土地复垦政策计划，部分耕地面积得到恢复，工矿用地也经过了合理的调整。随着我国的平原矿区城市化也进入快速增长期，城市的不断扩张及工矿用地的增加也成为临涣矿土地利用类型不可忽略的驱动力因子。

3.4.2 政策因子

近年来，淮北市作为典型平原煤矿城市开展了多次关于塌陷区生态修复的工程，临涣矿也单独开展了3次针对矿区土地复垦工程，对于主要塌陷区域的水域、煤矸石和粉煤灰也做了相应的隔离处理。

综合以上分析结果，煤矿开发、农业发展及城市化是导致矿区景观格局改变的主要人文驱动因子，平原矿区的生态系统的治理与保护必须要协调好经济、社会发展与环境保护以及资源利用间的关系，而矿区土地复垦及塌陷区生态修复工程是改善生态格局的主要驱动力^[30]。

4 结论

2004—2014 年, 临涣煤矿的景观变化主要表现为耕地、塌陷区、工矿居民地、煤矸石与粉煤灰的面积变化。耕地面积显著减少, 主要转化为塌陷区及工矿、居民用地等; 耕地、工矿用地及裸地不断的转化为煤矸石与粉煤灰, 导致堆放面积不断增大, 而增幅最快的为塌陷区的面积, 10 年面积增幅近 2.5 倍; 同时, 工矿及居民地面积也在显著增加, 其他斑块平均面积变化不大。2004—2014 年, 临涣矿区的生态系统受到严重的人文因素干扰, 个别景观类型的面积变化巨大, 景观斑块数量不断增加, 破碎化程度增加。

临涣矿区景观格局变化的最主要驱动力主要来自于近年来煤矿产业的不断开发及大力发展农业的政策, 加上不断膨胀的城市化进程, 这些因素将会持续导致生态环境系统的恶化。政府针对塌陷区的生态修复工程及矿区土地复垦工程的推动, 都对于恢复景观生态格局具有改善与推动的作用。10 年间临涣矿区因兴建工人村及扩大煤矿开采规模, 在经济迅速增长的同时, 塌陷区面积增大, 粉煤灰与煤矸石堆积面积越来越大, 绿地面积也相应减少。因此, 临涣矿作为典型的平原矿区, 应协调好社会经济发展、自然生态系统与矿区开发之间的关系。

参考文献:

- [1] 孙凤云, 刘淼, 胡远满, 等. 基于多种方法的景观格局动态变化综合分析—以辽宁省铁岭市为例[J]. 生态学报, 2013, 32(8): 2163-2171.
- [2] SCHRÖDER B, SEPPELT R. Analysis of pattern-process interactions based on landscape models-Overview, general concepts, and methodological issues[J]. *Ecol Model*, 2006, 199(4): 505-516.
- [3] HUANG J, LIN J, TU Z. Detecting spatiotemporal change of land use and landscape pattern in a coastal gulf region, southeast of China[J]. *Environ Dev Sust*, 2010, 12(1): 35-48.
- [4] XIE Y, GONG J, SUN P, ET AL. Oasis dynamics change and its influence on landscape pattern on Jinta oasis in arid China from 1963a to 2010a: Integration of multi-source satellite images[J]. *Int J Appl Earth Obs*, 2014, 33(12): 181-191.
- [5] 朱君君, 胡远满, 刘淼, 等. 浑河太子河流域景观变化及其驱动力[J]. 生态学报, 2011, 30(1): 112-118.
- [6] GUO A, LI X. Analysis on dynamical change of landscape pattern in Tangshan mining subsidence area based on RS and GIS[C]// *Geoscience and Remote Sensing (IITA-GRS)*, 2010 Second IITA International Conference on. IEEE, 2010: 555-558.
- [7] 于磊, 赵彦伟, 张远, 等. 基于最佳分析粒度的大辽河流域湿地景观格局分析[J]. 环境科学学报, 2011, 31(4): 873-879.
- [8] 张兵, 金凤君, 董晓峰. 甘肃中部地区景观生态格局与土地利用变化研究[J]. 地理科学进展, 2005, 24(3): 34-43.
- [9] 夏海山, 王凌绪, 夏正伟. 采煤塌陷区规划的景观策略与方法—以山西司马矿景观生态规划为例[J]. 城市规划, 2007, 31(10): 57-62.
- [10] SHI T, QI S, ZHANG M. Landscape pattern change in coal mining subsidence area of Shandong Province, China[C]// *Management and Service Science (MASS)*, 2011 International Conference on. IEEE, 2011: 1-3.
- [11] 朱明, 濮励杰, 李建龙. 遥感影像空间分辨率及粒度变化对城市景观格局分析的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2753-2763.
- [12] 丁晓英. eCognition 在土地利用项目中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2005, 28(6): 116-117.
- [13] 程琳, 李锋, 邓华锋. 淮北市经济与生态环境的动态协调发展研究[J]. 城市环境与城市生态, 2010, 23(4): 6-8.
- [14] 中经网统计数据库综合年度库 1980—2008[EB/OL]. (2011-02-09). <http://202.112.118.59:82/scorpio/aspx/main.aspx?width=1430&height=840>.
- [15] 蒋好忱, 任宏权, 秦先锋, 等. eCognition 影像自动解译及精度评价[J]. 测绘通报, 2015(10): 81-84.
- [16] 程滔, 刘若梅, 周旭. 基于高分辨率遥感影像的地理国情普查水体信息提取方法[J]. 测绘通报, 2014(4): 86-89.
- [17] 刘萍, 李园园. 基于 RS 和 GIS 的乌鲁木齐市城市绿地景观评价研究[J]. 华南农业大学学报, 2007, 28(4): 56-59.
- [18] 秦其明. 遥感图像自动解译面临的问题与解决的途径[J]. 测绘科学, 2000, 25(2): 21-24.
- [19] 江华. 基于 eCognition 面向对象技术的高分辨率遥感影像土地利用分类—以福州琅岐岛为例[J]. 海峡科学, 2014(8): 12-17.
- [20] 陈云, 戴锦芳, 李俊杰. 基于影像多种特征的 CART 决策树分类方法及其应用[J]. 地理与地理信息科学, 2008, 24(2): 33-36.
- [21] 中华人民共和国国土资源部. 土地利用动态遥感监测规程: TD/T 1010-1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [22] 中华人民共和国国土资源部. 土地利用现状分类: GB/T 21010-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [23] 高翔, 蔡雄飞, 王济, 等. 贵州典型矿区 10 年景观格局变化及驱动力分析[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(11): 168-174.
- [24] 何鹏, 张会儒. 常用景观指数的因子分析和筛选方法研究[J]. 林业科学研究, 2009, 22(4): 470-474.
- [25] 吴孟根巴根, 张翼飞, 陶赛希雅拉图. 基于 GIS 的煤矿区景观格局时空变化分析—以呼伦贝尔市某煤矿为例[J]. 环境与发展, 2014, 26(1): 99-102.
- [26] 阳文锐. 北京城市景观格局时空变化及驱动力[J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4357-4366.
- [27] SEABROOK L, MCALPINE C, FENSHAM R. Cattle, crops and clearing: Regional drivers of landscape change in the Brigalow Belt, Queensland, Australia, 1840-2004[J]. *Landsc Urban Plan*, 2006, 78(4): 373-385.
- [28] 郝兴明, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河流域近 50 年来生态环境变化的驱动力分析[J]. 地理学报, 2006, 61(3): 262-272.
- [29] 郭丽英, 刘彦随, 任志远. 生态脆弱区土地利用格局变化及其驱动机制分析[J]. 资源科学, 2005, 27(2): 128-133.
- [30] 刘晓, 李卫忠, 张伐伐, 等. 基于 RS/GIS 的乡级土地利用/覆盖变化及驱动力研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(7): 118-122.