

内蒙古煤矿地面塌陷表现形式及遥感响应特征研究

张勇

(内蒙古自治区地质调查研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

[摘要] 大规模、高强度的煤炭资源开发不可避免地引发了大量的矿山环境问题,其中地面塌陷问题较为突出,不仅严重扰动和破坏土地资源,同时威胁人民生命财产安全。本文在全面总结内蒙古地面塌陷类型和分布的基础上,系统阐述了煤矿地面塌陷的表现形式和遥感响应特征,分析和构建了影响地面塌陷遥感响应的因素体系。通过对煤矿地面塌陷遥感响应研究,可有效弥补传统实地调查周期长、数据更新慢、工作量大等劣势,为煤矿地面塌陷的科学防治提供技术依据和参考。

[关键词] 地面塌陷; 表现形式; 遥感响应; 影响因素

[中图分类号] TP79 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2025)02-0093-08

DOI:10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.02.014

0 引言

内蒙古煤炭资源丰富,是全国重要的原煤生产基地。长期高强度的煤炭资源开采引发了诸多矿山地质环境问题,其中分布区域广、表现类型多的地面塌陷是最突出的问题之一。据统计,全区地面塌陷破坏土地资源的面积占矿业开发活动破坏土地面积的17.4%。随着煤矿资源的持续开采,综采采煤技术、垮落法顶板管理方法的推广应用,地面塌陷不断发生,影响将持续存在^[1]。为了满足矿山地质环境保护和治理的管理需求,充分利用遥感技术宏观监测、清晰可视的优势,开展内蒙古煤矿地面塌陷遥感响应研究,对于地面塌陷的识别、监测和防治具有重要意义。

1 地表变形类型及地面塌陷表现形式

1.1 地表变形类型

地面塌陷是煤层采出后采空区周边原有的应力平衡状态被破坏,引起上覆岩层和周边岩层的变形与移动,根据地表破碎程度可分为破裂型变形和连续型变形^[2](表1)。

破裂型变形特点是采空区上覆岩体以地面垮塌、地表陷落为主,塌陷后地表不连续,地表水平位移和垂直位移量大。塌陷区对原始地形地貌破坏较大,受其影响土地基本失去原始用途,通常出现道路断陷、房屋倒塌、林地损毁、农田毁坏等问题。连续型变形特点是采空区上覆岩体以地面下沉为主,塌陷后地表多连续,沉陷盆地延伸方向为开采巷道,地表水平位移和垂直位移小,塌陷区内多发育规模较小的地裂缝。其垂直走向的切面形状近似抛物线,最大垂直位移位于开采中心点。连续型变形对地表植被、道路破坏影响较小,塌陷稳定后与原始地形地貌差异较小。根据地表变形的类型、规模、变化趋势、危害大小等特征,处于不稳定状态的塌陷,宜采取监测、示警及临时工程措施;达到稳沉状态的塌陷,宜采取防渗处理、削高填低、灌浆夯实、回填整平、植被恢复等综合治理措施。

[收稿日期] 2024-09-27

[作者简介] 张勇(1987—),男,从事资源与环境遥感应用研究、矿山生态保护与修复、绿色矿山建设等工作。

[引用格式] 张勇. 内蒙古煤矿地面塌陷表现形式及遥感响应特征研究[J]. 绿色矿冶, 2025, 41(2): 93-100.

ZHANG Yong. Study on the forms of ground subsidence of coal mines in Inner Mongolia and its remote sensing response characteristics [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(2): 93-100.

表1 内蒙古煤矿地面塌陷类型及主要分布矿区

地表变形类型	表现形式	东北地质环境区	华北地质环境区	西北地质环境区
		松辽平原区、呼伦贝尔高原区、大兴安岭山地区	河套平原区、鄂尔多斯高原区、阴山山地区	蒙古高原区
破裂型变形	塌陷坑	宝日希勒矿区、扎鲁特矿区、拉布大林矿区、大杨树矿区	平庄矿区、元宝山矿区、乌尼特矿区、玛尼图矿区、锡林浩特矿区、石拐矿区	—
	台阶状塌陷区	—	准格尔矿区、东胜矿区	—
	塌陷槽	—	—	桌子山矿区、乌达矿区、古拉本矿区
	长条状塌陷区	扎赉诺尔矿区、牙克石矿区	—	—
连续型变形	地裂缝	与其他地面塌陷类型伴生		
	沉陷盆地	大雁矿区、五九矿区、牯牛海矿区、金宝屯矿区	—	—

1.2 地面塌陷表现形式

1.2.1 塌陷坑

塌陷坑是内蒙古广泛分布的塌陷类型,分布范围包括海拉尔含煤盆地群、大兴安岭含煤盆地群、二连含煤盆地群和阴山含煤盆地群,在平原、低山和低

山丘陵地区最为直观(图1)。塌陷坑发育规模不一,形状多为近圆形或椭圆,直径小者多为数米,少数直径可达百米,剖面形状有长方形或漏斗形等,塌陷深度多为3~20 m。塌陷坑发育范围一般与采空区范围基本一致,极少单坑孤立存在。



图1 塌陷坑实地照片

1.2.2 台阶状塌陷区

台阶状塌陷区表现为垂直开采走向方向发育多级台阶状平台,集中在鄂尔多斯(北缘)含煤盆地群,在低山丘陵地区中最为直观。塌陷台阶地表特

征受地形坡度影响较大(图2),如在地形相对平缓区,塌陷台阶高差多为0.2~2 m,地裂缝宽度多为0.1~3 m;在沟谷纵横、地形坡度大于30°的区域易发生滑塌现象^[3],山体破坏面积较大。

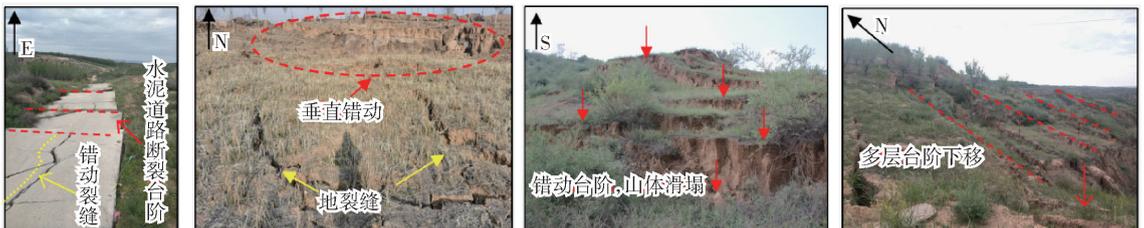


图2 台阶状塌陷区实地照片

1.2.3 塌陷槽

塌陷槽主要分布在阴山含煤盆地群、鄂尔多斯(北缘)含煤盆地群桌子山煤田,在低山、低山丘陵地区中最为直观。在煤炭埋藏较浅地区、上覆岩层较软、覆盖层节理发育的地区较为发育,尤其是急倾斜煤层开采区。随着煤体线性开采后,上覆岩体破

裂、冒落后,在地表呈现出深浅不一致、线性走向的塌陷槽^[4](图3)。

1.2.4 长条状塌陷区

长条状塌陷区主要分布在海拉尔含煤盆地群,在平原、高平原地区中发育最为直观。塌陷深度多为1~5 m,积水后形成季节性、长条状水面(图4)。

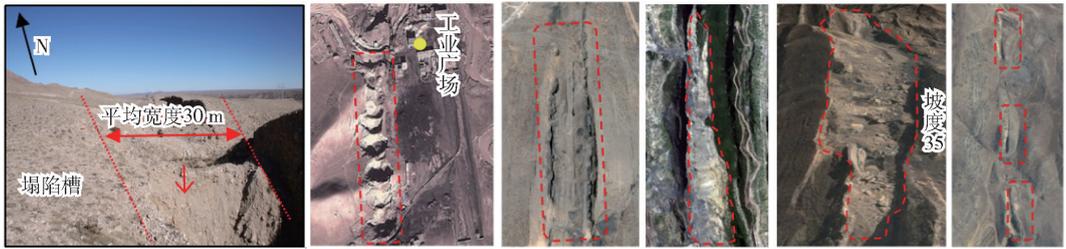


图3 塌陷槽遥感影像特征及实地照片

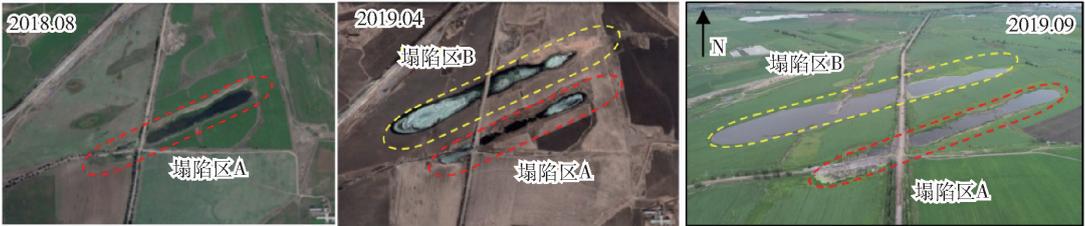


图4 长条状塌陷区遥感影像特征及实地照片

塌陷长度与煤层走向一致,其长度和宽度与采煤工作面密切相关。因预留煤柱的影响,塌陷区之间存在未变形区域。

1.2.5 地裂缝

地裂缝伴生发育在塌陷范围内,出现在地表初期剧烈变形、中期缓慢变形、晚期相对稳定的全过程,地裂缝的宽度、长度、深度在塌陷初期和中期有明显变化^[5]。发育形式包括平面位移为主的张拉裂缝(图5(a)(b))和垂直位移为主的台阶裂缝

(图5(c)(d))。

1.2.6 沉陷盆地

沉陷盆地分布范围包括海拉尔含煤盆地群和大兴安岭含煤盆地群,在高平原和低山丘陵地区发育最为直观。沉陷盆地呈现中部低、外围高的特点,常有小范围积水。地裂缝平行展布在开采边界(图6),宽度多为0.01~0.10m,个别为0.2~0.4m,长度与采煤工作面长度有关。

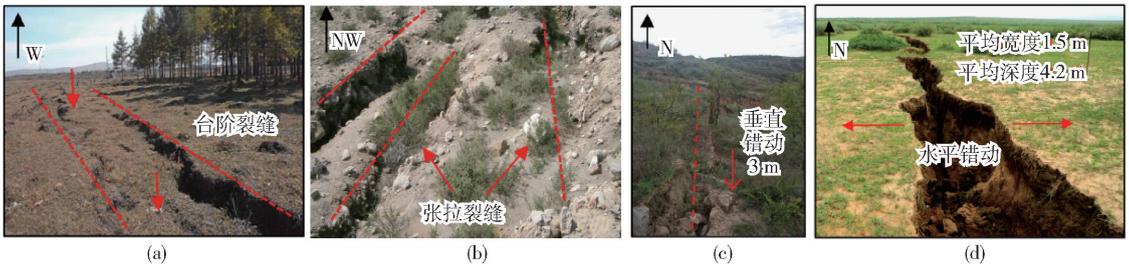


图5 地裂缝实地照片

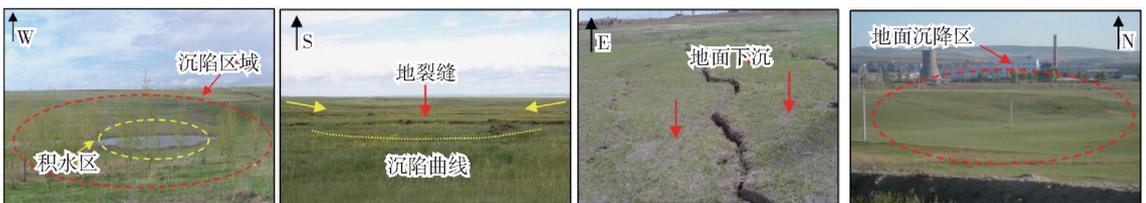


图6 沉陷盆地实地照片

2 地面塌陷遥感响应特征影响因素

地面塌陷遥感响应特征主要受地面塌陷的地质

环境背景条件、开发利用方法等因素的影响和控制(图7)。系统总结内蒙古地区地质环境背景、开发利用方法和方式,对于地面塌陷的识别和分析具有

重要意义。

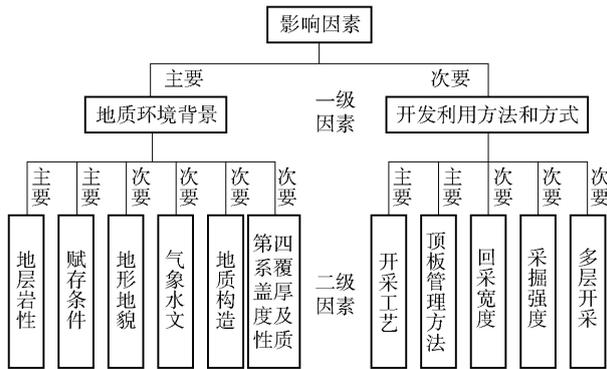


图7 地面塌陷的遥感响应特征控制因素体系图

2.1 地质环境背景

地质环境背景是影响地面塌陷遥感响应特征的主要因素。

2.1.1 地层岩性

地层岩性是地质环境背景中的主要影响因素。上覆岩层强度较高,岩层变形破坏的速率较慢,塌陷区内多见地裂缝;上部岩层强度较低,易发生岩体突然失稳,出现破裂性变形。如石拐矿区的河滩沟煤矿,煤层上覆地层属于较硬岩石,在采空区范围内未发生大范围的塌陷,仅出现少量的塌陷坑。

2.1.2 赋存条件

赋存条件包括采深采厚比和煤层产状。其中,采深采厚比是影响塌陷的重要因素。相对埋藏较深的煤层,开采造成的岩体变形传导至地表时间相对较长,变形比较平缓均匀。浅部煤层开采容易造成岩体的快速陷落,传导至地表时间相对较短,地表变化速率快,多表现为破裂型变形。例如,牙克石胜利煤矿采深采厚比平均为42.5,3层煤开采叠加中心最大沉降值仅为4.3 m;呼伦贝尔金源煤矿煤层采深采厚比平均为4.2,塌陷坑发育强烈,最大塌陷深度达10.2 m。采深采厚比越小,破坏程度越强烈,在遥感影像上塌陷与周边原始地形地貌差异越大。

不同产状的煤层地表变形有所差异,近水平煤层、缓倾煤层开采塌陷多表现为沉陷盆地,而同条件的急倾煤层表现为台阶状塌陷区、塌陷槽等不均匀变形。例如,白云煤矿煤层均为急倾斜煤层,塌陷槽在遥感影像上呈现为近南北向分布,宽20 m、长600 m的变形区域,平均塌陷深度为5.5 m,塌陷槽边缘呈扁平弧形,有暗色调的纹理特征,槽内有较大面积的

阴影区。

2.1.2 地形地貌

不同地形地貌条件下的地面塌陷遥感影像表现差异较大,如鄂尔多斯东部丘陵山地塌陷形式以滑塌为主,鄂尔多斯中西部高原塌陷形式以地裂缝发育为主^[6]。此外,全区范围内塌陷形式也呈现不同特点,如内蒙古东部平原、低山地貌主要发育塌陷坑、长条状塌陷区和沉陷盆地;中部黄土丘陵地貌主要发育台阶状塌陷区;西部的中低山、低山地貌主要发育塌陷坑和塌陷槽类型。

2.1.3 气象水文

地面塌陷因降水而加速变形,在遥感影像上可见塌陷积水情况。例如内蒙古东部地区塌陷区内多积水,在遥感影像上表现为内部纹理细腻、色调较深的面状区域。此外,塌陷和地裂缝导致地表水和土壤水的渗漏,直接导致塌陷区内树木、灌木枯死^[7],在遥感影像上反映为植被覆盖率(NDVI)降低。

2.1.4 地质构造

断层、褶皱、节理及岩浆侵入等地质构造会改变岩土体结构和强度、应力分布及水文条件,在一定程度上破坏了岩层稳定性,加剧塌陷程度或突发异常变形。断层是岩层破碎和薄弱区域,开采后易造成断层活化,引发岩体位移;褶皱会破坏轴部的应力平衡,加剧拉张压力。例如,东山煤矿一号井采区内有一条张扭性正断层贯穿33号煤层顶板和底板,在井田内延伸730 m,落差20~35 m,其塌陷区整体沉陷后对地表破坏较小,但在正断层发育的上覆地表存在多处线状地裂缝,纹理不连续,遥感影像的色调有突变。实地调查发现,沉陷区平均塌陷深度为4.51 m,但是在正断层走向塌陷平均深度6.19 m。

2.1.5 第四系覆盖层厚度及性质

第四系覆盖层主要组成类型包括砂砾、黏土、黄土等,结构相对松散,孔隙率高且抗变形能力弱,受人为扰动后颗粒流失和结构变化大。第四系覆盖层厚度越大,相对抗变形能力强,地表变形程度越轻。如鄂尔多斯东部的黄土丘陵区,黄土和粉砂厚度一般为20~50 m,地表变形形式以台阶状塌陷区为主;鄂尔多斯西部的毛乌素沙地,黄土和风积沙厚度为10~60 m,地表变形形式以沉陷区和地裂缝为主,沉陷稳定后地裂缝会被风积沙自动填充。

2.2 开发利用方法和方式

开发利用方法和方式是影响地面塌陷遥感响应特征的次要因素。

2.2.1 开采工艺

不同的开采工艺会产生不同塌陷类型。例如呼伦贝尔东煤矿采用长臂式开采工艺,在遥感影像上表现为多条平行展布、长1 000 m、宽百米的塌陷区。而与之条件相近的宝日希勒小煤窑开采区采用房柱式开采,在遥感影像上表现为密集分布的圆形塌陷坑。

2.2.2 顶板管理方法

目前内蒙古煤矿顶板管理方法多以垮落法为主,煤柱支撑法较少。例如阿刀亥煤矿属于倾角为 80° 的急倾斜特厚煤层,其塌陷区在遥感影像上呈近东西向展布,塌陷坡面长度约150 m,塌陷区北侧可见大量不连续的线状地裂缝。遥感影像整体呈现亮色调,内部纹理粗糙,有颗粒感。

2.2.3 回采宽度

回采宽度直接影响塌陷区的范围和面积。如扎赉诺尔矿区铁北煤矿回采宽度大,预留保护煤柱较窄,该矿区的多个塌陷区已基本贯通,形成一个类四边形形状的塌陷区。在遥感影像上表现为深色调、块状图型,内部纹理细腻。

2.2.4 采掘强度

煤炭采掘强度与开采时间对地面塌陷的发生规模、发生速度以及地表形态都有影响。如果煤炭采掘速度过快、开采强度过大,则地表变形越快。例如,宝日希勒矿区始建于20世纪70年代,在近百平方千米的范围内小煤窑多达数百家,地面塌陷影响面积约 20 km^2 ,在遥感影像上表现为近圆形面状的地物,整体呈现斑点图型结构。

2.2.5 多层开采

多层开采直接对上覆地层造成多次破坏,会对已稳定的塌陷区造成干扰,使塌陷范围继续扩大,破坏程度持续加重(图8)。例如,平庄一元宝山矿区前期上部煤层采用房柱式开采工艺,后期下部煤层采用综采方式,地面变形具有整体塌陷和塌陷坑的叠加特征。在遥感影像上表现为塌陷区边缘多杂乱、密集分布的地裂缝,总体为深色调线状特征;塌陷区内多面状、有阴影的塌陷坑,塌陷坑边界不连续,纹理粗糙,色调有突变。

3 地面塌陷影像响应特征

目前矿山遥感监测工作技术方法日趋成熟,可有效支撑和服务矿山管理工作。为了可持续开展地面塌陷监测工作,选择国产高分系列卫星数据作为



图8 多次开采造成的塌陷坑遥感影像图

首要数据源,其他高分辨率商业卫星可作为补充适时使用。根据地面塌陷的分布情况,可按单个矿山或集中矿区处理,在正射校正、影像融合、匀色镶嵌、影像配准、影像裁剪后提交3A级数据产品。数据融合后主要获取真彩色合成图像,满足后续人机交互解译工作需要。为增加遥感识别的准确性,可采用多时相、多季节、长序列的遥感影像比对,尤其是识别缓慢变形或地表破裂程度小的地面塌陷区,这种方法将更为有效。从遥感影像中分析和判断地面塌陷的依据主要是色调、颜色、阴影、形状、纹理、大小、位置、图型和相关布局等响应特征^[7],同时也要参考采空区的空间分布,因此矿山采掘数据是重要的辅助资料。

3.1 塌陷坑

在遥感影像上塌陷坑多呈现灰白色、灰黑色、土黄色等近圆形、椭圆形的面状地物,与周边原始地表颜色差异较大(图9(a)(b))。内部纹理不平滑,有断断续续的特点。此外,密集塌陷区多呈现斑点状的图型特点,图型中部有黑色阴影(图9(c)(d))。

3.2 台阶状塌陷区

台阶状塌陷区在遥感影像中表现分为两类:一类是以地裂缝线状特征为主的塌陷区(图10(a)(b)),表现为多条走向一致、断断续续的暗色线条,与周边自然环境差异较小,无明显阴影特征;另一类是以滑塌块状特征为主的塌陷区,在遥感影像中表现为亮色调的圆弧状、扇形状、长舌状等块状地物,颜色以灰白色、土黄色为主,与原始地表颜色差异较大(图10(c)(d))。

3.3 塌陷槽

塌陷槽与台阶状塌陷区最大的区别在于单条槽

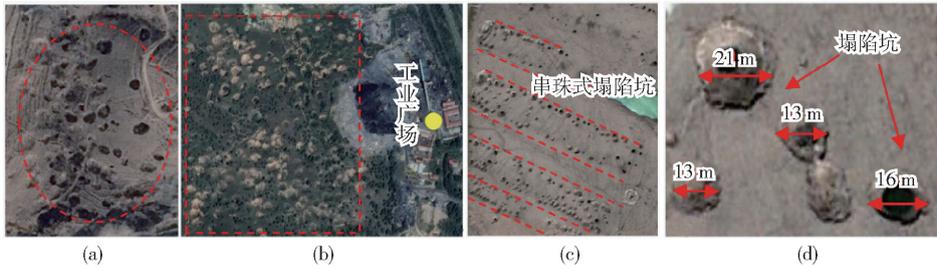


图9 塌陷坑遥感影像图

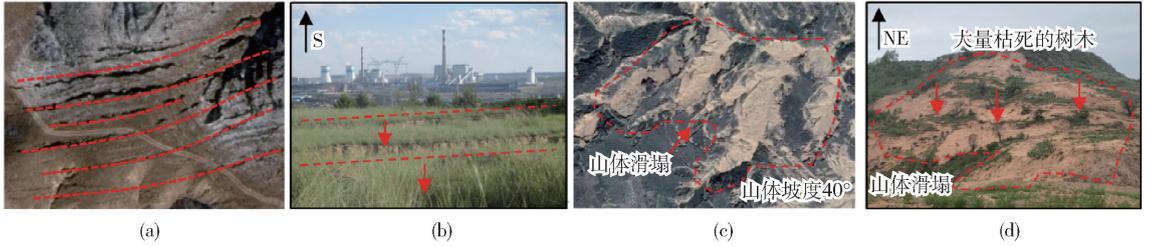


图10 台阶状塌陷区遥感影像图及实地照片

状特征特别明显,地表变形严重。在遥感影像上塌陷槽呈现近直线展布,单条或多条排列、走向一致(图11)。色调亮暗相间,内部有阴影。塌陷槽形状

以规则的长条状、块状、椭圆状为主,塌陷边界不连续、呈锯齿状。

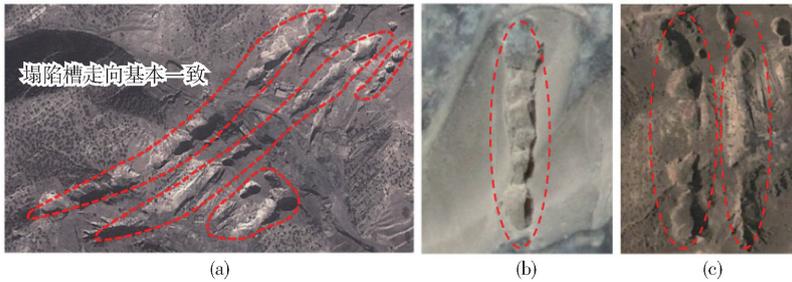


图11 塌陷槽遥感影像图

3.4 长条状塌陷区

在遥感影像上长条状塌陷区与周边地表明显不同,色调较深,呈现深蓝色、黑色,无阴影(图12(a))

(b)。形状以规则的长条状、块状为主,塌陷区内纹理细腻、平滑。多条塌陷区规则排列,具有相近的色调、颜色、形状和纹理特征,走向基本一致(图12(c)(d))。

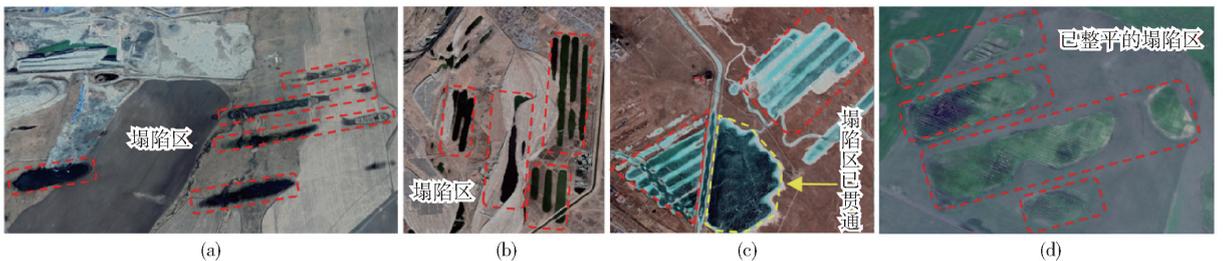


图12 长条状塌陷区遥感影像图

3.5 地裂缝

在遥感影像上,单条地裂缝总体呈现暗色调线状特征,裂缝宽度越大,色调越深。地裂缝多发育在

采空区的边缘,走向与开采方向一致,多与其他塌陷形式关联存在。与人工线性地物相比,在遥感影像中多条地裂缝是多条呈现类平行状、蠕虫状并存,方

向基本一致;单条形态常见为弧形、直线形(图13(a)(b)(c)(d))。随着塌陷区从缓慢变形到加速变形变化,地裂缝的影像特征也会随着塌陷区的现状有所改变,如在沉陷盆地外围可形成环形地裂缝(图13(e))。此外,地裂缝在高分辨和植被覆盖较少的遥感影像中较易分辨。

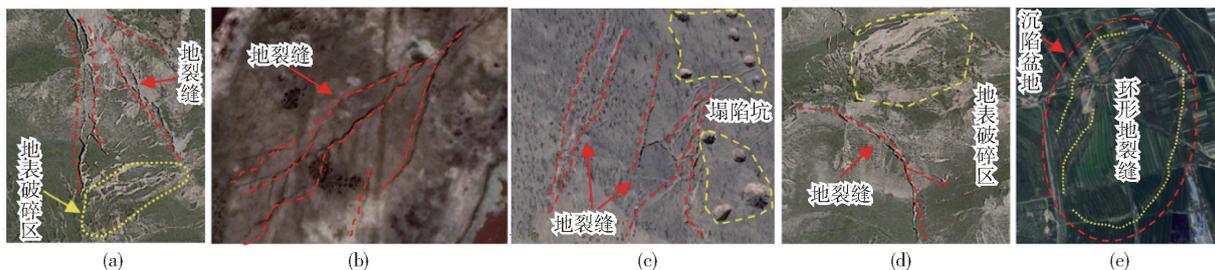


图13 地裂缝遥感影像图

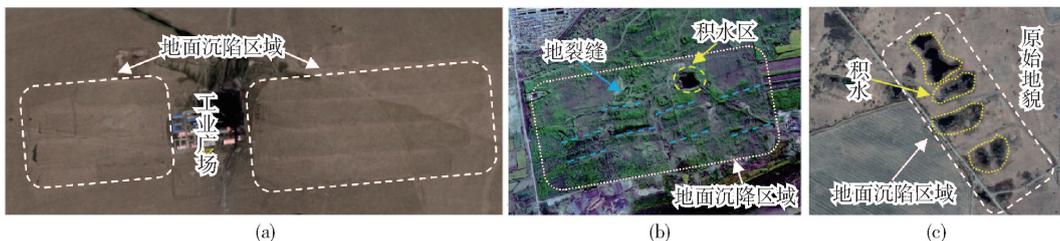


图14 沉陷盆地遥感影像图

4 结束语

按照表现形式,内蒙古煤矿地面塌陷主要分为塌陷坑、沉陷盆地、台阶状塌陷区、塌陷槽、长条状塌陷区和地裂缝等6类。受煤层所处的地质环境、开发利用方法等因素的影响,地面塌陷在高分辨率遥感影像上有着不同响应特征。本文在分析内蒙古地区地面塌陷的类型和表现形式的基础上,系统总结了地面塌陷在遥感影像上的响应特征,不仅有助于准确判别地面塌陷的类型和范围,而且也在地面塌陷问题的防治提供科学依据。

[参考文献]

[1] 黄琨,陈伟,温挨树,等. 内蒙古煤矿采空区地面塌陷类型及影响因素研究[J]. 工程勘察, 2016, 44(12): 13-19.

3.6 沉陷盆地

在遥感影像上,沉陷盆地与周边原始地表颜色差异较小,内部纹理不平滑,有断断续续的特点。沉陷区中常有呈深蓝色、黑蓝色的水体,在沉陷边缘、内部分布线性特征的地裂缝(图14)。

[2] 刘宏磊. 煤炭资源开采沉陷地质环境响应研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2015.

[3] 白光宇,张德强,张进德,等. 山区开采沉陷地表移动变形规律[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(7): 684-688.

[4] 范立民,马雄德,李永红,等. 西部高强度采煤区矿山地质灾害现状与防控技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 276-285.

[5] 侯恩科,张杰谢,晓深,等. 无人机遥感与卫星遥感在采煤地表裂缝识别中的对比[J]. 地质通报, 2019, 31(S1): 443-448.

[6] 邓锟. 神府矿区采空区塌陷 IKONOS 遥感影像特征[J]. 能源环境保护, 2016, 30(3): 54-56.

[7] 李海欣,雷少刚,申艳琴. 煤矿开采沉陷地裂缝对植被覆盖的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(2): 195-199.

Study on the Forms of Ground Subsidence of Coal Mines in Inner Mongolia and Its Remote Sensing Response Characteristics

ZHANG Yong

(Geological Survey Academy of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010020, China)

Abstract: Large-scale and high-intensity exploitation of coal resources inevitably leads to a large number of mine environmental problems, in which the ground collapse is more prominent, not only seriously disturbed and destroyed the land resources, it also threatens the safety of people's lives and property. On the basis of summing up the types and distribution of ground subsidence in Inner Mongolia, this paper systematically expounded the forms and remote sensing response characteristics of coal mine ground subsidence, and analyzed and constructs the factor system of influencing the remote sensing response of ground subsidence. Through the study of remote sensing response to coal mine ground subsidence, the disadvantages of traditional field survey such as long period, slow data updating and heavy workload can be effectively compensated, it provides the technical basis and reference for the scientific prevention and control of the coal mine ground subsidence in Inner Mongolia.

Key words: ground subsidence; forms; remote sensing response; influencing factors