

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.01.08

综合勘察方法在蒙华铁路石膏矿采空区 选线勘察中的应用

谢 猛

(中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055)

摘要:以蒙华铁路荆沙段石膏矿采空区勘察为例,介绍了采用遥感解译、调查访问、勘探验证相结合的采空区综合勘察方法。针对铁路穿越采空区选线重点关注的问题,提出了采空区勘察的工作思路,阐述了卫片、航片、多时相分析的采空区遥感解译方法,提出采空区调查访问时应重点关注的问题及如何开展综合分析,并提出应根据区域地质条件、采空区发育特征、勘探方法的适用性、场地条件等,合理选择勘探验证方法。最后,通过实例分析,介绍了金陵、宝安石膏矿采空区的综合勘察,可为类似采空区勘察提供借鉴和参考。

关键词:石膏矿;采空区;遥感解译;物探;综合勘察

中图分类号: P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2021)01-0058-07

Application of comprehensive survey methods in the gypsum mine goaf for Mengxi-Huazhong railway route selection

XIE Meng

(China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China)

Abstract: Taking the investigation of the mined-out area of gypsum mine in Mengxi-Huazhong railway Jingmen-Yueyang section as an example, this paper introduces the comprehensive survey method of the mined-out area by the combination of remote sensing interpretation, investigation and visit and exploration verification. In view of the problems of railway route selection through goaf, the working idea of goaf survey is put forward, and the remote sensing interpretation method of goaf based on satellite photograph, aerial photograph and multi-temporal analysis is expounded. This paper puts forward the problems that should be paid attention to in the investigation and visit of goaf and how to carry out comprehensive analysis. It is also proposed that the exploration verification method should be reasonably selected according to the regional geological conditions, the development characteristics of the goaf, the applicability of exploration methods, site conditions and so on. Finally, the comprehensive survey of goaf in Jinling and Baoan gypsum mines is introduced, which can provide reference for similar goaf investigation.

Keywords: gypsum mine; goaf; remote sensing interpretation; geophysical exploration; comprehensive survey

0 引言

蒙华铁路是国家“北煤南运”的重要通道,全长 1 813.5 km,北起内蒙古鄂尔多斯市境内的浩勒报吉南站,途经内蒙古、陕西、山西、河南、湖北、湖南、江西

7 省区,终到京九铁路吉安站。该项目可行性研究阶段,荆州至沙市段线路方案研究区内分布有大面积地下开采的石膏矿采空区,地面塌陷分布广泛,是控制该段线路方案比选的制约因素。常规的采空区勘察方法主要以地面调查、钻探、物探为主,方法较为单一,且具有

收稿日期: 2020-02-26; 修订日期: 2020-04-07

基金项目: 国家铁路局工程建设标准编制计划项目(2015JS005); 中铁工程设计咨询集团有限公司科技研究开发计划课题(研 2013-11)

作者简介: 谢 猛(1983-),男,山西临汾人,硕士,高级工程师,主要从事铁路工程地质灾害遥感调查研究。E-mail: 4778645@qq.com

一定的局限性^[1-2]。本文针对铁路穿越采空区选线重点关注的问题,采用遥感解译、调查访问、勘探验证相结合的采空区综合勘察方法,查明控制线路方案比选的采空区影响边界,为线路方案比选提供可靠的地质依据。

1 区域地质背景

1.1 地形地貌

测区位于新华夏系第二沉降带——江汉盆地的西缘,鄂西山地与江汉平原过渡带,属低缓丘陵地貌区。自然水系不发育,地表水塘、鱼塘广泛分布,丘陵间凹部均为山前洪冲坡积物所覆盖。

1.2 地质构造

测区位于荆门断裂带的中段,荆门大断裂的东侧。荆门大断裂近南北走向,断层面倾向东,倾角 $65^{\circ}\sim 87^{\circ}$,为压扭性断裂,规模较大,控制江汉盆地的西北边缘,受其影响,东盘的子陵段在下降过程中,变为一个平缓的向斜构造,向斜长约4 000 m,宽约2 000 m,核部为下第三系夹马槽组地层,翼部由白垩系上统跑马岗组革集亚组组成,向斜与断裂平行,南北走向,东翼产状 $6^{\circ}\sim 9^{\circ}$,西翼产状 $7^{\circ}\sim 13^{\circ}$,向斜向南端翘起。

1.3 地层岩性

测区内地层从上至下依次为:第四系(Q)残坡积、冲积黏性土、砂类土及砾石;下第三系夹马槽组(E_{jm})砂岩或粉砂岩;白垩系上统跑马岗组(K_{2p})砂岩、泥岩,其中,石膏山段含石膏层;寒武系下统鹿门寺组(ϵ_{1lm})页岩及灰岩;寒武系下统刘家坡组(ϵ_{1l})白云质灰岩夹黄色页岩、粉砂岩;震旦系上统灯影组(Z_{2dn})白云岩;震旦系上统陡山沱组(Z_{2d})泥灰岩及页岩。

2 矿体及采空区发育特征

2.1 矿体特征

测区内石膏矿层主要赋存于白垩系上统跑马岗组(K_{2p})中,分子陵、革集、麻城三个矿区,共划分为10个石膏矿层。全区石膏矿层产状平缓,厚度变化不大,呈层状、似层状产出,主要有含泥石膏、泥膏、块状石膏、粒状石膏、薄层纤维状石膏、含高粉砂质泥岩或含膏泥质粉砂岩组成。按矿石结构构造的不同,可分为纤维状石膏、块状石膏和粒状石膏3种矿石类型,各类型矿石特征如下:

(1)纤维状石膏

俗称“纤膏”,乳白色,少量灰白色,微红色,半透明,呈似层状、脉状产出,纤维状结构,定向构造,石膏纤维沿最大压应力方向生长,一般垂直顶底界面平行排

列,与围岩或泥膏界线清晰,易于剥离。测区内该类型矿石分布较广泛,约占矿体厚度的5%~10%,资源量较少。

(2)块状石膏

俗称“泥膏”,因含泥质多少及其成分不同呈乳白色、深灰色,层状产出,有时呈团块状或结核状产出。巨晶结构或不等粒晶结构,块状构造。团块状产出的石膏矿石,直径5~30 cm,外形不规则,有时相互嵌生,断面为透明,具微玻璃光泽。结核状石膏矿石集合体和星散状集合体间均为黏土质、粉砂质充填。该类型矿石为区内主要矿石类型,各矿层均有产出,约占矿体厚度的20%~30%。

(3)粒状石膏

俗称“花膏”,乳白色,半透明至不透明。团块状、似层状产出,断面粗糙呈砂状,不等粒结构,细粒柱状结构、斑状构造,似定向构造。常呈集合体与泥质镶嵌,块状集合体间为黏土质、粉砂质充填。该类型矿石是区内主要矿石类型,占矿体厚度的60%~70%。

2.2 采空区发育特征

区内石膏矿均采用“浅孔分层房柱法”方式开采,开采深度50~200 m不等,预留矿柱宽度3.5~6 m,矿柱间距5~8 m,采空区高度4~12 m。

矿区岩体属层状软质—半坚硬岩类。矿层顶、底板为泥质粉砂岩和泥岩,抗压强度低,稳定性差,主要原因是泥质岩类的风化和遇水软化。由于石膏层的力学强度较泥质粉砂岩和泥岩高,一般预留上层石膏矿体作为采空区或巷道的顶板,局部泥质粉砂岩暴露,其间夹薄层泥岩,吸水极易软化,凝聚力减弱,力学强度降低,导致采空区及巷道顶板层面或裂隙切割部位形成崩落,此为区内采空区及巷道塌陷的主要原因^[3-4]。

3 采空区勘察方法

3.1 工作思路

铁路穿越采空区的选线重点关注的问题有两个:一是线路是否穿越采空影响区,是否有条件绕避?二是线路压覆矿床及处理采空区需要花费多大的代价?而解决以上两个问题的关键是如何确定采空区的影响边界^[5-6]。为查明方案研究区内石膏矿采空区的影响边界,制定以下工作思路(图1)。

3.2 收集资料

本次工作共收集以下资料:

(1)卫片:Landsat 8 OLI/TIRS,空间分辨率:8波段多光谱30 m,热红外100 m,全色15 m。

(2)航片:全色黑白航片共288张,比例尺:1:20 000,

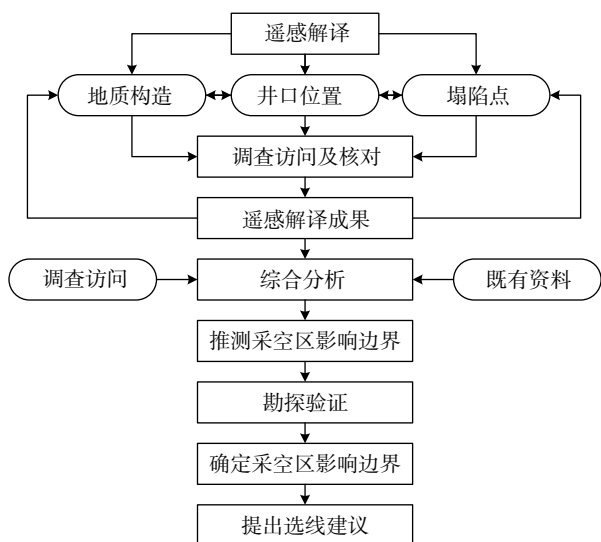


图 1 采空区勘察工作思路

Fig. 1 The working thoughts for goaf survey

相幅大小: 23 cm×23 cm。

(3)Google Earth 多期存档影像。

(4)地形资料: ASTER GDEM 数据(空间分辨率 30 m), 1 : 50 000、1 : 10 000 比例尺地形图。

(5)地质及有关矿产资料

荆门市规划区采矿权示意图(东宝区、掇刀区), 比例尺 1 : 50 000。

钟祥市地质灾害分布及易发程度分区图, 比例尺 1 : 100 000。

钟祥市矿产资源开发利用与保护规划图, 比例尺 1 : 100 000。

区内 28 个石膏矿的采矿许可证及井上下对照图, 比例尺 1 : 2 000。

钟祥福矿产图, 比例尺 1 : 200 000。

3.3 遥感解译

遥感解译的主要对象是与地下采空区有关的地质构造、井口位置和地面塌陷点。地下采空区的边界一般由两方面因素控制, 一是矿权界线, 二是断层、地表水系等自然屏障。对于矿权界线, 可以通过采矿许可证上的拐点坐标获得, 而在实际生产过程中, 越界开采现象时有发生, 因此, 地下采空区的边界应以断层、地表水系等自然屏障作为依据更加科学和合理。

3.3.1 卫片解译

以线性构造、隐伏构造和地表水系为重点突出对象, 对 Landsat 8 遥感数据进行处理^[6-7]。解译时, 结合收集到的矿权界线, 通过对 Landsat 8 遥感图像上的色调、地表呈现的隐伏断裂的微弱信息、周边地质体的地

貌形态、地表水系特征等, 对采空区的边界进行推测^[8-9]。

3.3.2 航片解译

1 : 20 000 比例尺的全色黑白航片是本次遥感解译的主要片种。根据测区内石膏矿的开采方式, 采空塌陷区在航片上呈条带状不规则的“负地形”^[7-8]。但是, 由于测区地处缓丘地带, 且植被发育, 人类耕作痕迹明显, 采空塌陷区呈现的“负地形”大多数被整平或复垦, 且其形态与丘间洼地和谷地也较为类似, 因此, 航片对采空塌陷区的解译难度较大。

解译过程中, 将矿区范围内地表的不规则“负地形”均作为“疑似采空塌陷点”, 现场调查时逐一核对, 并进行航片复判, 通过“初判——现场核对——复判”的解译过程, 建立区内采空塌陷点的航片解译标志:

(1)连续的地貌上突然出现小范围不规则的“负地形”, 色调上略有差异。

(2)与丘间洼地或谷地相比, 采空塌陷区的边界略显凌乱。

此外, 由于区内石膏矿的井口周边均为矿体的堆放场, 场地范围较大, 人类活动痕迹明显, 并且均有通往附近公路的土路或水泥路, 因此, 航片对井口位置的解译较准确, 并能够初步判断井口的开采方向, 对现场调查具有很好的指导作用。

3.3.3 多时相分析

利用 Google Earth 提供的多期存档影像资料, 可以对地下采空区引起的地面塌陷进行动态分析, 推测地面塌陷的发生时间和未来的发展趋势, 进而对其稳定性做出判断^[10]。Google Earth 是美国 Google 公司推出的通过操控卫星影像数据来实现的数字地球平台, 具有以下特点^[10-11]:

(1)集合了多种自由信息数据资源, 包括美国航空航天局、地质调查局提供的多种全球范围的影像和地形资料、部分商业卫星资料, 以及多个公司提供的 POI 及道路信息等。

(2)提供的影像、地形数据均为免费, 且支持互联网下载。

(3)影像的空间分辨率较高, 城市及周边区域一般都有高清图像。

(4)能够提供数据的获取时间信息。

(5)数据能够定期更新, 且支持历史存档数据查看, 可以进行动态分析。

(6)数据传输速度快、方便用户标注地标、可加载用户数据、提供二次开发接口、能加载 Sketch-up 三维模型、支持导航浏览和查询信息。

在使用 Google Earth 开展多时相分析和辅助遥感解译时应注意^[10]：

- (1)未提供传感器参数及成像参数等信息。
- (2)未提供多光谱数据。
- (3)存档影像的成像时间随机,不可选择。

3.4 调查访问

调查访问是采空区勘察的重要方法之一,目的是掌握测区内各个矿的规模、开采现状、地下采空的影响范围及程度。调查访问期间,应在对收集资料充分分析和遥感解译的基础上,利用 1:10 000 地形图及航片开展调查访问工作。对于重要验证点和控制点,应采用 GPS 定位,转绘到 1:10 000 及 1:2 000 地形图上。

此外,现场调查过程中,应以访问为主,考虑到被访者立场的不同,应在大面积调查访问的基础上,对矿上工作人员及周边居民提供的信息进行综合分析,推测采空区的影响边界(表 1)。

表 1 采空区调查访问内容

Table 1 Investigation and interview contents

访问对象	访问内容
矿上工作人员	开采方法 矿体分布特征,包括矿石类型、矿体埋藏深度、倾向、倾角、是否有断层切割、开采厚度等 开采方向 地下采空分布特征及处理方法 抽排地下水情况
附近居民	是否有爆破震动影响 房屋是否有开裂现象 井水是否有减少或干涸现象 地表是否有采空塌陷 耕地灌溉是否有影响

3.5 勘探验证

遥感解译和调查访问的对象主要是以地下采空区反应到地表的间接信息为主,通过捕捉地面塌陷、地裂缝、房屋裂缝等地表间接信息对地下采空进行推测,具有一定的局限性。因此,对于重点区域控制线路方案的采空影响边界,仍需采用进一步的勘探方法确定其具体位置。

验证方法主要包括物探和钻探。鉴于铁路选线重点关注的是采空区的影响边界,应采用以物探为主,钻探为辅的验证方法。目前,可用于地下采空区探测的物探方法很多,主要有电法、电磁法、地震波法等几大类,各种方法都有其适用条件^[12-13]。因此,应根据区域地质条件、采空区发育特征、物探方法的特点和适用条件、场地条件等,合理选择物探验证方法。

4 实例分析

金陵、宝安石膏矿位于荆门市东宝区子陵镇, G207 及既有焦柳铁路西侧。金陵石膏矿矿区面积 0.98 km², 生产规模 1.6×10⁵ t/a; 宝安石膏矿矿区面积 0.32 km², 生产规模 1.0×10⁵ t/a, 目前均处于停产状态。图 2 为金陵、宝安石膏矿与线路方案平面位置示意图。



图 2 金陵、宝安石膏矿与线路方案平面位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Jinling and Baoan gypsum mine and line plan

4.1 遥感解译

4.1.1 卫片、航片解译

解译断裂 3 条, 均为隐伏断裂; 解译“疑似塌陷点”19 处; 解译井口位置 4 处, 并初步判断了开采方向(图 3)。

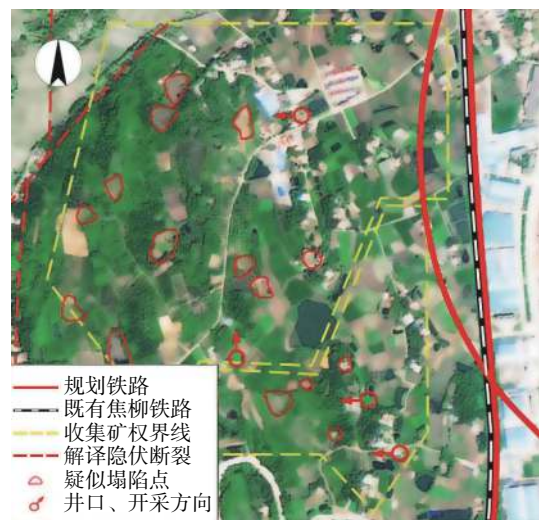


图 3 遥感解译图

Fig. 3 Remote sensing interpretation results

4.1.2 多时相分析

图 4 为宝安石膏矿 2012 年 7 月 28 日和 2012 年 11 月 26 日的 Google Earth 存档影像。图 4(b) 的中上部有一近似圆形的塌陷坑, 该塌陷坑切割平整后的耕地, 边界明显, 坑内耕地的条纹和色调均匀, 判断为整体陷落式的采空塌陷。而图 4(a) 中该区域未见任何塌陷迹象, 因此, 可以判断该塌陷发生的时间在 2012 年 7 月 28 日至 2012 年 11 月 26 日之间。



图 4 宝安石膏矿 Google Earth 影像
Fig. 4 GoogleEarth image of Baohan gypsum mine

另外, 图 4(a) 的中下部有一椭圆形浅色区域, 边界不均匀, 内部色调凌乱, 为地下采空造成的地面塌陷。图 4(b) 中该区域为近似矩形, 内部色调较深, 且边界均匀, 采空地面塌陷的解译标志不明显, 推测为人工对该塌陷坑进行了复垦。复垦等人类活动使地面塌陷的解译标志变得不明显或者消失, 甚至会导致误判或漏判, 此时, 对同一地区进行多时相的遥感解译是防止这种失误的有效措施。

综上所述, 可以判断该区域为采空塌陷的不稳定区域, 在影像的摄影时段以及未来的一段时间内, 该区域仍处于采空塌陷的活跃期。

4.2 调查访问

通过现场调查访问, 了解到由于地下采空导致区内大面积地表塌陷、房屋开裂甚至坍塌。测区内大部分居民已经搬迁, 包括金陵、宝安石膏矿在内的附近 5 家石膏矿均在 2011 年陆续关闭。

现场访问的对象主要以附近居民及矿上的看守人员为主。通过调查访问, 了解到测区内石膏矿层总体呈“反穹窿”状, 四周高, 中间低, 矿体最浅埋深约 50 m, 最深 200 m, 开采方式为“浅孔分层房柱法”。由于测区东侧为既有焦柳铁路, 金陵、宝安石膏矿地下开采均向西。

现场实测金陵石膏矿 2 号、3 号以及宝安石膏矿 1 号、2 号井的开采方向分别为 266°、350°、276°和 262°, 同航片解译的井口开采方向基本吻合。对航片解译的 13 处“疑似塌陷点”进行了核对, 又发现了 1 处新的塌陷(图 5)。据了解, 此处塌陷近一周内发生, 塌陷面积约 5 000 m², 中心最大塌陷深度约 15 m, 周边地裂缝宽 3 ~ 5 m, 深 8 ~ 10 m, 塌陷周边可见“马刀树”, 北侧位于塌陷边缘的一民房坍塌。



图 5 宝安石膏矿地下采空引起的地表塌陷
Fig. 5 The ground collapse of Baohan gypsum mine

4.3 勘探验证

鉴于访问和调查访问的局限性以及地下采空的不确定性, 对推测的采空影响边界开展勘探验证工作。根据掌握的资料, 测区东侧地下石膏矿体埋深 50 ~ 100 m, 因此, 选用高密度电法可满足验证要求。

在遥感解译和调查访问的基础上, 对金陵、宝安石膏矿地下采空区及其东侧影响边界进行推测。在此基础上, 布置了 5 条物探测线(南北方向 2 条, 东西方向 3 条), 对采空区影响边界进行控制, 物探测线平面布置如图 6 所示。

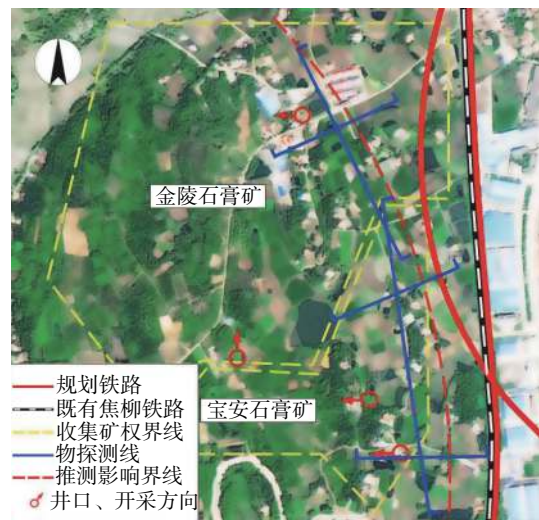


图 6 高密度电法测线平面布置图
Fig. 6 Plane layout of measuring lines by high density electrical method

测区表层为第四系土层,由耕植土、粉质黏土组成,视电阻率值低,一般为 $6\sim 10\ \Omega\cdot\text{m}$;石膏矿层、中风化泥质粉砂岩岩体较完整,视电阻率值一般为 $12\sim 30\ \Omega\cdot\text{m}$ 。理论上,干燥的采空区被空气充填可视为电阻率无穷大,但实际上采空区内空气潮湿,电阻率多在几千至几万 $\ \Omega\cdot\text{m}$,并且随着采空区的湿度及充水程度的增加,电阻率会急剧下降,当采空区全部被水充填时电阻率会变得很小。因此,采空区的物性特征使地层在垂向上有较明显的电性差异,相应的在高密度电阻率等值线剖面图上表现为相对视电阻率的高、低变化^[14-15]。

根据收集到的资料和现场调查成果,将区内的采空区分为三类:Ⅰ类:全部空气充填;Ⅱ类:部分空气部分水充填;Ⅲ类:全部水充填。

Ⅰ类采空区物性特征反映为相对高阻特点;Ⅱ类采空区物性特征反映为高阻和低阻相抵的特点,这类采空区在高密度电法等值线剖面图上反映不明显;Ⅲ类采空区物性特征反映为相对低阻的特点。根据上述采空区的特点,Ⅰ类高阻采空区、Ⅲ类低阻采空区物性特征反映明显。

根据上述分析,对测区内5条测线的高密度电阻率等值线剖面图进行解译,得到探测深度范围内的7处异常点,并对遥感解译和调查访问推测的采空区影响边界做了进一步修正,确定了采空区的影响边界,为方案研究提供了地质依据。

5 结论

针对铁路穿越采空区选线重点关注的问题,采用遥感解译、调查访问、勘探验证相结合的综合勘察方法,查明了控制线路方案比选的采空区影响边界,为线路方案比选提供可靠的地质依据,得出结论:

(1)采用卫片、航片和多时相分析的遥感解译方法,可以快速圈定采空区地面塌陷区域,为地面调查、勘探验证布置工作提供指导,有效提高采空区勘察的效率和质量。

(2)采空区地面调查应对遥感解译圈定的地面塌陷、井口位置和开采方向进行现场验证,掌握矿山规模、开采现状、地下采空的影响范围及程度。调查访问时,应考虑被访者立场的不同,对矿上的工作人员及周边居民提供的信息进行综合分析,推测采空区的影响边界。

(3)采空区影响边界的勘探验证,应以物探为主,钻探为辅,并根据区域地质条件、采空区发育特征、勘探方法的适用性、场地条件等,合理选择勘探验证方法。

参考文献 (References):

- [1] 张立琴,李国和,苗庆库.古窑及近代小型采空区勘察方法选择与应用[J].铁道勘察,2014,40(4):58-60. [ZHANG Liqin, LI Guohe, MIAO Qingku. The surveying methods and application for the ancient and modern small-scale goaf [J]. Railway Investigation and Surveying, 2014, 40(4): 58-60. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 张纪星,师修昌.浅埋采空区大采高条件下覆岩破坏规律[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(5):92-97. [ZHANG Jixing, SHI Xiuchang. Failure of overburden rock under large mining height in shallow buried goaf area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(5): 92-97. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 管永伟,魏义强,杨振江,等.基于数值模拟的房柱式采空区关键层-岩柱系统破坏机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(4):59-63. [GUAN Yongwei, WEI Yiqiang, YANG Zhenjiang, et al. Failure mechanism of the key strata-pillar system in room and pillar goaf based on a numerical simulation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(4): 59-63. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 李国和,李桂芳.采空区铁路工程地质选线研究[J].铁道工程学报,2012,29(10):15-20. [LI Guohe, LI Guifang. Research on railway alignment in goaf [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(10): 15-20. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 邓睿,杜宇本,蒋良文,等.玉磨铁路采空区段地质选线研究[J].铁道工程学报,2017,34(2):21-25. [DENG Rui, DU Yuben, JIANG Liangwen, et al. Research on the geologic route selection in goafs of Yuxi-mohan railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(2): 21-25. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 祝佳.Landsat8卫星遥感数据预处理方法[J].国土资源遥感,2016,28(2):21-27. [ZHU Jia. Analysis of Landsat8 satellite remote sensing data preprocessing [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2016, 28(2): 21-27. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张刚,李忠权,李佳奇,等.基于OLI青海文巴地区遥感图像增强及构造解译[J].矿产勘查,2015,6(5):571-576. [ZHANG Gang, LI Zhongquan, LI Jiaqi, et al. Remote sensing image enhance and structural interpretation based on OLI in the Wenba area, Qinghai [J]. Mineral Exploration, 2015, 6(5): 571-576. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 强建华,于浩.新疆矿山环境遥感监测成果综述[J].中国地质调查,2016,3(5):28-34. [QIANG Jianhua, YU Hao. Review on remote sensing monitoring results of mine geological environment in Xinjiang [J]. Geological Survey of China, 2016, 3(5): 28-34. (in Chinese with English abstract)]

- [9] 陈文平, 范英霞, 韩小明, 等. 中巴资源卫星影像 HR 数据在煤矿矿区地面塌陷调查中的应用 [J] . *测绘与空间地理信息*, 2012, 35(2): 80 - 83. [CHEN Wenping, FAN Yingxia, HAN Xiaoming, et al. Application of CBERS HR image data in investigation of surface collapse in coal mine zone [J] . *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2012, 35(2): 80 - 83. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 国家铁路局. 中华人民共和国铁路运输行业标准: 铁路工程地质遥感技术规程 TB 10041—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018. [Railway & Train Standard of the People's Republic of China: Code for technique on remote sensing of railway engineering geology TB 10041—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.(in Chinese)]
- [11] GORELICK N, HANCHER M, DIXON M, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone [J] . *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18 - 27.
- [12] 王宾, 韩晓南, 王康东. 综合物探方法在采空塌陷区地质灾害勘查中的应用 [J] . *工程地球物理学报*, 2013, 10(5): 725 - 729. [WANG Bin, HAN Xiaonan, WANG Kangdong. The application of integrated geophysical methods to investigating geological hazards in mined-out collapse areas [J] . *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2013, 10(5): 725 - 729. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 房浩, 李巧灵, 雷晓东, 等. 平原区深层隐伏岩溶塌陷主控因子地球物理调查方法适用性分析 [J] . *水文地质工程地质*, 2020, 47(1): 153 - 160. [FANG Hao, LI Qiaoling, LEI Xiaodong, et al. Applicability of geophysical survey methods for the main controlling factors of deep covered karst collapse in plain areas [J] . *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2020, 47(1): 153 - 160. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张淑坤, 张向东, 李永靖. 高速公路下伏老采空区探测及验证技术 [J] . *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(9): 3361 - 3367. [ZHANG Shukun, ZHANG Xiangdong, LI Yongjing. Old goaf detection and verification techniques under highway [J] . *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(9): 3361 - 3367. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张扬, 王璐, 刘智慧, 等. 多物探方法在胶东某金矿采空区勘查中的应用研究 [J] . *地质与勘探*, 2019, 55(3): 809 - 817. [ZHANG Yang, WANG Lu, LIU Zhihui, et al. Application of multi-geophysical methods in exploration of a worked-out area of gold mining in the Jiaodong region [J] . *Geology and Exploration*, 2019, 55(3): 809 - 817. (in Chinese with English abstract)]