

中国关闭/废弃矿井的分类利用与等级评价

冯飞胜^{1,2,3}, 张继强¹, 王于¹

1. 安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 淮南 232001

2. 合肥综合性国家科学中心能源研究院, 合肥 230088

3. 国家能源集团煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 100011

摘要 针对关闭/废弃矿井分类利用和等级评价, 使用 Adaboost 迭代算法, 建立了一个关闭/废弃矿井利用的可能性等级模型, 总结得出关闭/废弃矿井分类利用可分为: 关闭/废弃矿井生态文明开发, 关闭/废弃矿井地下空间开发利用, 关闭/废弃矿井遗留媒体资源开发利用, 关闭/废弃矿井地下水资源开发利用, 关闭/废弃矿井气油水光互补能源开发利用。确立了 20 项分类指标进行关闭/废弃矿井等级评价, 初步构建出国内关闭/废弃矿井资源数据库, 提出关闭/废弃矿井智能精准开发科学构想, 构建了关闭/废弃矿井绿色资源评价技术体系, 推动关闭/废弃矿井精准智能开采以及城市转型发展。

关键词 关闭/废弃矿井; 分类利用; 等级评价

随着国家推进去产能和产业升级, 存在着大量的关闭/废弃矿井, 在 2020 年数量已达 12000 处, 到 2030 年数量将达到 15000 处^[1-2]。中国资源型城市约占城市数量的 1/5, 其中煤矿城市又占资源型城市的 1/5, 当前大批矿井面临资源枯竭^[3]。尽管短期内国内能源结构仍以煤炭为主导, 但在煤炭工业高质量发展背景下, 主动淘汰落后产能, 矿井关闭或废弃将成为常态, 关闭/废弃矿井的分类利用和等级评价也势在必行。

关闭/废弃矿井的科学转型和分级利用, 需要

地面资源与地下空间统筹一体化、可持续化开发利用, 保证国家战略安全, 国家和区域经济、社会发展统筹部署^[4-6]。每个关闭/废弃矿井都有其独特的情况和用途, 关闭/废弃矿井的可持续分类利用的基础是详细评价关闭/废弃矿井的潜力和限制因素(例如污染和其他危害)^[7]。

目前, 关闭/废弃矿井资源开发利用的三大方向: 能源化利用(主要针对煤炭、煤层气、新能源), 资源化利用(主要针对矿井水), 功能化利用(主要针对地下空间和地上空间)^[8]。国内外关闭/废弃矿

收稿日期: 2021-07-16; 修回日期: 2022-07-27

基金项目: 山西省揭榜招标项目(20191101016); 国家重点研发计划项目(2019YFC1904)

作者简介: 冯飞胜, 副教授, 研究方向为废弃矿井资源开发利用、固废充填绿色开采, 电子信箱: fsfeng21@qq.com

引用格式: 冯飞胜, 张继强, 王于. 中国关闭/废弃矿井的分类利用与等级评价[J]. 科技导报, 2022, 40(22): 105-112; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.22.011

山分类利用模式集中在建设矿山地质公园、开发井下空间、伴生资源开发^[9]。芬兰、波兰、德国等主要产煤国有尝试建设主题公园的设想;美国、比利时、德国等国家利用关闭/废弃矿井建设储气库,1963年,美国利用科罗拉多 Denver 附近的 Leyden 煤矿建成世界首座废弃矿井地下储气库,形成 1.4 亿 m³ 储气能力;1967 年,德国利用废弃盐矿处置低中放废物^[10],英国对高瓦斯废弃矿井中残留在煤柱内的瓦斯进行二次抽采利用;荷兰海伦市大力开发了废弃矿井地热资源,建成地热发电站;加拿大在 1990 年对乐佩克坎艾姆(Ropak Can Am)煤矿的地下热能进行了利用。在中国,金坛地区成功改造 3 口关闭老腔,形成近 5000 万 m³ 的工作气量;安徽省含山石膏矿计划利用去产能矿山采空区改建储油库,建成后预计可形成 500 万 m³ 的储油量;全国共有 61 处获得国家矿山公园建设资格的单位和被正式授予国家矿山公园称号的公园^[11]。目前国内关闭/废弃矿井分类开发开始起步,但主要研究利用停留在基础研究阶段,深度开发利用有待进一步研究。

针对关闭/废弃矿井的分类开发利用,谢和平等^[12]提出了煤矿地下水库、矿井水循环利用与抽水蓄能发电一体化技术构想,充分利用煤炭开采过程中形成的巨大的地下空间,实现储水、蓄能发电、矿井水循环利用和新能源开发等多重目标。武强等^[13]评价了废弃矿井对当地社会经济、生态环境等方面的发展情况,提出了相对应的措施避免出现新的负生态环境效应等问题。任辉等^[14]通过集钻探、物探、遥感、计算机等勘查技术于一体的综合勘探体系,总结了其在关闭煤矿资源有效开发利用的地质保障作用,并从资源、环境、技术体系及数据库等 7 个方面提出关闭煤矿资源开发利用地质保障工作建议。谢友泉等^[15]梳理了中国废弃矿井可再生资源开发利用现状及存在的问题,分析了废弃矿井可再生资源开发利用模式,评价了废弃矿井可再生资源开发利用前景,提出了废弃矿井可再生资源开发利用的发展建议。王婷婷等^[16]重点从矿洞抽水蓄能的站址选择、动能估算、工程布置 3 个方面进行了工程技术可行性分析。黄侃^[17]分析了矿井报废空间作为工业废弃物安全处理场所的可行性,并

就报废空间类型与地质条件、排放技术与装备、经济效益及法规进行了探讨。Li 等^[18]在对采矿记录、水文地质条件和岩土数据进行严格评估的基础上,对深部废弃煤矿作业所代表的 CO₂ 封存能力进行了定量评估。

面对数量众多的关闭/废弃矿井,主要采用模糊数学法、数值模拟法和迭代法进行等级评价。李庭等^[19]分析了废弃矿井污染地下水的主要途径,同时选择合理的评价指标,在 NET 平台上利用数据库技术 C# 语言,采用迭置指数法构建出污染评价模型,设计出废弃矿井地下水污染风险评价系统。Feng 等^[20]聚焦于 Hongshan 矿区矿井关闭后对地下水的影响,提出了矿山生命周期不同阶段地下水系统破坏风险分析(GSDR)和社会经济生态脆弱性分析(SEEV)。在国外,Sebei 等^[21]利用序列分级和地质统计制图评价突尼斯北部一个废弃铅锌矿的重金属污染。Guo 等^[22]通过建立得分函数获得了定量指标的得分标准,采用模糊层次分析法(FAHP)获得评估指标的权重,提出了一种采用叠加法和指标法的稳定性评价模型,将所建立的模型用于评价乌云高速公路施工现场的稳定性。Sechman 等^[23]评估上西里西亚煤盆地(USCB)南部选定区域中煤层气和二氧化碳向地表的可能迁移以及由近地表气体迁移产生的危害。Guo 等^[24]根据废弃矿井的开采空间体积和顶板岩石强度计算了裂隙的体积和空间分布,采用 TOUGH2 模拟器的多重相互作用连续统一体(MINC)方法建立了三维裂隙模型,对废弃煤矿的地热潜力进行了评估。

鉴于目前国内没有完整的关闭/废弃矿井的分类利用和等级评价体系,且短期内国内能源结构仍以煤炭为主导,在煤炭工业高质量发展背景下,主动淘汰落后产能,矿井关闭或废弃将成为常态,本研究将使用 AdaBoost 算法对收集的多个十分适合和十分不适合关闭/废弃矿井开发城市的数据进行模型构建处理,构建出适合于中国的关闭/废弃矿井绿色资源量评价技术体系。同时建立完整的关闭/废弃矿井分类利用和评价体系将有助于中国资源的合理化、高效化、绿色化应用,减少环境污染和其他危害,推动关闭/废弃矿井精准智能开采以及

城市转型发展。

1 关闭/废弃矿井分类利用与等级评价体系及模型

1.1 关闭/废弃矿井分类利用与等级评价方法

目前,鲜有专门针对关闭/废弃矿井分类利用与等级评价方法,可用于此的风险评价方法包括过程迭代法、数值模拟法和模糊数学方法等^[25]。

数值模拟法是用计算机程序来求解数学模型的近似解;模糊数学方法采用模糊数学模型,首先需要进行单项指标的评价,然后分别对各单项指标给予适当的权重,最后应用模糊矩阵复合运算的方法得出综合评价的结果^[26]。

迭代法也称辗转法,是一种不断用变量的旧值递推新值的过程,跟迭代法相对应的是直接法(或者称为一次解法),即一次性解决问题^[27]。迭代法广泛应用于金融大数据分析^[28]、停车检测^[29]、有害

气体检测^[30]等领域。选置指数法由于操作性强、方法简单,在实际生活中得到广泛应用。选置指数法要明确各个指标的评分值与评分区间,根据实际资料对研究区评价指标进行评分,把各评分值根据权重进行迭加,从而得到其风险类型。同时,选置指数法还能够对关闭/废弃矿井危险性、地下水危害性及污染通道风险性等进行综合考虑与评价,从而对关闭/废弃矿井地下水污染风险有全方位的了解和掌握,以便做出有效的预防和解决对策^[31]。

AdaBoost 是一种迭代算法,是机器学习算法里一种可以将弱分类器提升为强分类器的常用集成学习算法^[32],算法流程图如图 1 所示。它已成功应用在遥感分类、人脸识别、地质灾害评价、水质评价、医学图像识别、金融的大规模数据分析、图像分割、模式识别和光谱分析等领域。因此,本研究尝试使用机器学习中 AdaBoost 算法来建立一个废弃矿井利用的可能性等级模型。

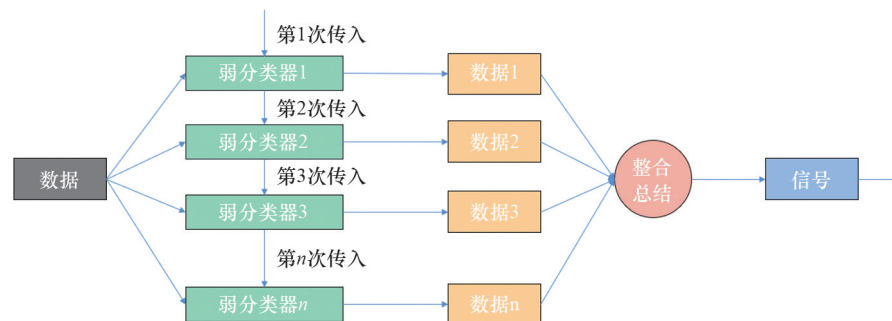


图1 废弃矿井利用的可能性等级模型

1.2 评价指标筛选

在进行关闭/废弃矿井分类利用与等级评价方法中发现,关闭/废弃矿井分类利用可以分为以下5个方面:关闭/废弃矿井生态文明开发,关闭/废弃矿井地下空间开发利用,关闭/废弃矿井遗留媒体资源开发利用,关闭/废弃矿井地下水资源开发利用,关闭/废弃矿井气油水光互补能源开发利用。

1) 关闭/废弃矿井生态文明开发。主要可归纳为景观型开发模式、功能型开发模式和区域转型发展模式三大类。英国 1998 年开建的伊甸园项

目,罗马尼亚 1992 年的图尔达盐矿改建项目以及德国著名的鲁尔工业区转型等分别证明了关闭/废弃矿井生态文明开发的可行性,并为国内的关闭/废弃矿井生态文明相关设计开发提供思路和经验。

2) 关闭/废弃矿井地下空间开发利用。包括地下储气库型开发,将天然气重新注入地下,可以为应急供应、调峰供气服务,也可以作为能源战略储备。主要有枯竭油气田和岩穴储气等方式,根据国际燃气联盟(IGU)数据,目前全球地下储气库达 672 处,其中废弃油气田储气库达 498 处,盐穴地下

储气库 90 多座, 2019 年中国地下储气库达 27 座, 调峰供气能力超过 102 亿 m^3 , 大幅增长 44%, 创历史新高, 可见地下储气库是地下空间开发的一种重要模式。

地下原油存储是近年来兴起的一种新兴石油储备方式, 但地下储油库选址前需要重点考虑区域围岩稳定性、顶板稳定性及地下水条件, 如地下储油洞库围岩易变形破坏, 长期时效稳定问题更为严峻; 地下洞库与地下水密切相关, 因此地下空间储油对渗透性更加严格。相比于地面金属罐储存, 地下储库具有安全性高、运行成本低、火灾风险低、气

温恒定等诸多优势, 如图 2 所示, 美国、加拿大、法国和瑞典等国家都开展过相关研究(表 1)。

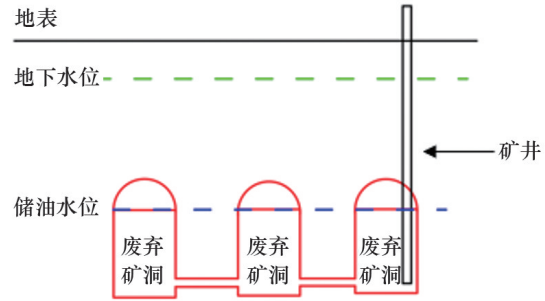


图2 利用废弃石膏矿储存原油示意

表1 废弃矿井储油项目示例

国家	矿井名称	矿种	储存量	备注
美国	Iconton 矿(俄亥俄州)	石灰石	2100 万桶原油	概念研究
	Central Rock 矿(肯塔基州)	石灰石	1400 万桶原油	概念研究
	Lime field 矿(纽约州)	石灰石	—	—
	Kleer 矿(得克萨斯州)	盐矿	3000 万桶原油	概念研究
	Weeks Island 矿(路易斯安那州)	盐矿	8900 万桶原油	1994 年退役
	Cote Blanche 矿(路易斯安那州)	盐矿	2700 万桶原油	概念研究, 可能未实现
加拿大	Wabana 矿(纽芬兰)	铁矿	原油	概念研究
法国	May-Sur-Ome 矿	铁矿	500 万 m^3 空间储存石油	—
瑞典	Harabacka 矿	萤石矿	100 万 m^3 空间储存石油	1948 年启用

核废料处置场地型开发: 核废料处置的核心是阻止放射性同位素逃逸到空气或者水中, 确保环境安全及人类健康。利用废弃矿井储存核废料模式主要是将废弃物处置与采矿充填开采工艺相结合, 利用开采后的工作面空间充填核废料, 可以满足长期稳定封存的需要。

地下实验室型开发: 关闭/废弃矿井地下实验室主要集中在废弃金矿和铀矿, 以开展深地科学实验为主, 如寻找暗物质、研究中微子和宇宙射线实验等。另外, 储存普通物资、开发大型办公地点和储存重要物资、封存 CO_2 、井下培训、开发地下竞技场都是关闭/废弃矿井地下空间的有效利用方式。

3) 关闭/废弃矿井遗留煤体资源开发利用。遗留煤炭资源开采目前主要集中于遗留煤柱和遗留边角煤的开采, 目前主要可行方式是充填置换开

采和地下气化, 需要解决好关闭/废弃矿井遗煤充填开采“遗留煤柱-充填体-顶板岩层”的耦合承载机制, 以及多场耦合条件下地下煤炭气化对煤柱、围岩、覆岩及地表沉降特征的影响等多项关键技术问题。

4) 关闭/废弃矿井地下水资源开发利用。矿井关闭后, 随着矿井排水系统停止, 矿井采空区水位上升, 矿井水将被井巷中的污染物污染, 特别是金属矿山矿井水残留的重金属如铁、铜以及煤矿关闭后的矿井富含的有机物质和酸性物质, 被污染的矿井水通过采动裂隙、断层、封闭不良钻孔污染上部各含水层, 且溢出地表造成大面积地表水的严重污染, 并引起区域地下及地表水化学场的变化, 关闭/废弃矿井水如何利用主要取决于其化学和物理性质是否达到饮用水或灌溉水标准, 此外从高浓度

酸性水中置换回收金属和有机物也是关闭/废弃矿井地下水利用途径之一。

5) 关闭/废弃矿井气油水光互补能源开发利用。利用关闭/废弃矿井内的瓦斯、油、压缩空气、地下水、地热能和太阳能等资源进行发电,根据各自的运行特点,研究在气油水光协调互补运行模式下,满足电网发电要求,以最大限度地利用关闭/废弃矿井的气油水光资源等。

1.3 评价指标分级

考虑到关闭/废弃矿井资源利用是一种全新的开发模式,在进行评价指标分级过程中,严格遵循以下优先值来选取:首先根据研究内容的相关性,寻求行业标准中相同或者类似的指标参数;其次根据行业经验值确定;最后借助同行专家评议确定。通过对以上五大研究内容确定了20项分类指标,分别为:当地人口总量,地区人口流动量,国内生产总值(GDP),旅游业经济生产总值,能源产业经济生产总值,煤炭产业经济生产总值,煤矿数量,煤炭的新增产能总量,新增煤矿数量,煤炭的关闭产能产量,关闭矿井的数量,煤炭固定资产投资,能源工业的总投资,煤炭产量,石油产量,天然气产量,煤炭、石油、天然气三者当地输入与输出量,炭、石油、天然气以外的所有能源(如核能、水电、风能等)产量,地下水资源量、降雨量、蒸发量,植被指数(ND-VI)等20项指标。

其中,当地人口总量、GDP、能源产业经济生产总值反映的是一个城市的基本面。

煤炭产业经济生产总值、能源工业的总投资、煤炭固定资产投资、煤矿数量、煤炭产量、石油产量、天然气产量反映的是一个城市煤炭产值的绝对体量以及占城市发展的相对体量。

地区人口流动量、煤炭的新增产能总量、新增煤矿数量、煤炭的关闭产能产量、关闭矿井的数量、煤炭、石油、天然气三者当地输入与输出量,以上指标的变化反映出煤炭型城市发展趋势,这些指标决定了关闭/废弃矿井利用潜力的大小。

旅游业经济生产总值、核能、水电、风能产量、地下水资源量、降雨量、蒸发量、植被指数(NDVI)

反面了当地在旅游业,核能、光伏发电、风能发电等方式的潜力,这些指标决定了关闭/废弃矿井利用方面的不同。

1.4 评价指标权重赋值

关闭/废弃矿井资源利用评价体系中,评价因子权重反映了废弃矿井可利用潜力以及利用类别,如前文所述,采用AdaBoost算法,训练过程中首先输入训练样本: $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_N, y_N)\}$ 。训练得到 T 个分类器,最初每一个训练样本权重相同,计算当前错误率最低的弱分类器在 D_t 上的误差以及在最终分类器上的权重,依据每个分类器的错误率更新分类器的权重,最终通过符号函数 sign 的作用得到一个强分类器,具体流程如图3所示。

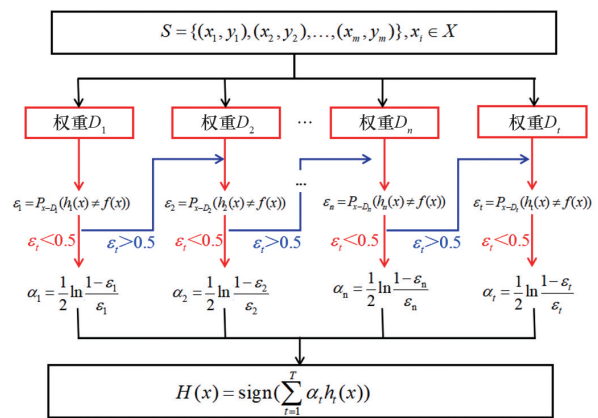


图3 关闭/废弃矿井资源利用因子权重评价流程图

2 关闭/废弃矿井分类利用与等级评价方法

2.1 构建国内关闭/废弃矿井资源数据库

依据煤炭资源禀赋特征,将国内关闭/废弃矿井分布区域划分成五大区:东北区域、西北区域、南部区域、黄河以南和长江流域(安徽段),如图4所示。调研五大分区当地人口总量、地区人口流动量等20项主要分类数据指标;并重点调研阜新市、抚顺市等14个城市的上述数据;初步掌握中国主要产煤区域关闭/废弃矿井分布特征和功能性分类利用模式,初步构建中国关闭/废弃矿井资源数据库。

2.2 中国关闭/废弃矿井绿色资源量评价技术体系

将上述20项分类数据指标作为AdaBoost算法建模的自变量,关闭/废弃矿井利用可能性的等级作为因变量 S ;使用AdaBoost算法对收集的多个十分适合和十分不适合关闭/废弃矿井开发城市的数据进行模型构建,通过专家及同行评议,认定每个城市的 S ,代入模型机器学习算出各项参数权重,并验证模型的准确性;将构建好的模型对其他城市的关闭/废弃矿井利用可能性进行等级评价,提出适合中国的关闭/废弃矿井绿色资源量评价技术体系。具体流程如图4所示。同时,中国应完善关闭/

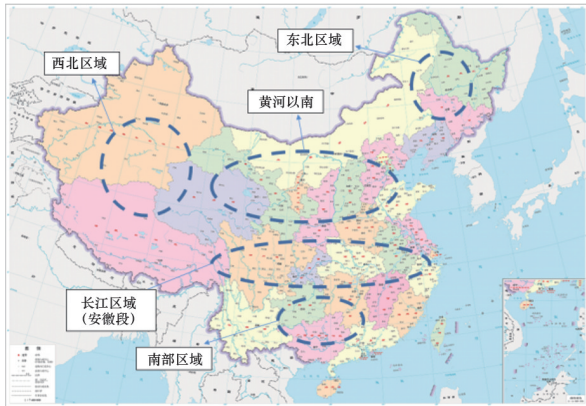


图4 中国关闭/废弃矿井分布区域
(审图号:GS(2021)5448号)

废弃矿井法规法律,在矿井关闭或废弃前进行适当考虑和改造,出台相应政策并加大自主研发,开展示范项目建设,形成关闭/废弃矿井再利用的新局面^[33]。

2.3 开展经济新常态下关闭/废弃矿井智能精准开发科学构想与城市转型发展战略研究

根据关闭/废弃矿井绿色资源量评价技术体系研判结果,结合关闭/废弃矿井自身特点和现代社会发展需求方向,提出关闭/废弃矿井智能精准开发科学构想与城市转型发展战略研究,具体如图5所示。

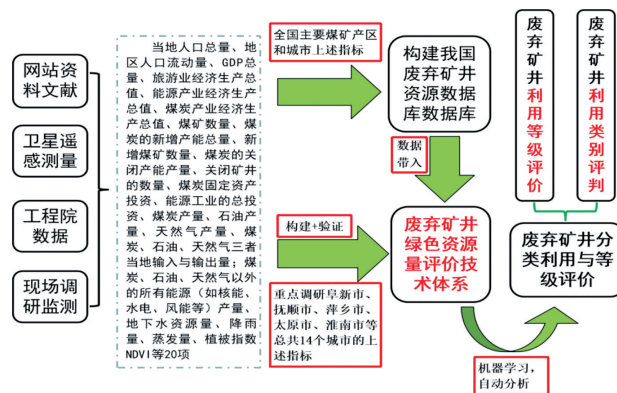


图5 关闭/废弃矿井绿色资源量评价技术体系

3 结论

矿业开发活动遗留下的井筒、坑道等潜在危险场所、未经修复的土地和污染性矿井水排放等问题,会对公众健康、人身安全和生态环境构成潜在威胁,在这种无序的状态下,这些潜在威胁会进一步恶化,引发一系列问题。

1) 对开展关闭/废弃矿井资源精准开发利用研究进行系统性科学分类,主要包括:生态文明开发、地下空间开发利用、遗留媒体资源开发利用、地下水资源开发利用和油气水光互补能源开发利用。

2) 在系统性分类基础上,根据行业经验值确

定,最后借助同行专家评议评定,提出关闭/废弃矿井资源精准开发利用可能性等级分类指标体系,构建国内关闭/废弃矿井资源数据库,提出关闭/废弃矿井分类利用与等级评价方法;

3) 对收集的多个关闭/废弃矿井开发城市的数据进行模型构建,结合机器学习的AdaBoost算法,把大数据资源同区域性关闭/废弃矿井资源进行整合,提出适合中国的关闭/废弃矿井绿色资源量评价技术体系,延长相关矿井开采使用年限,打造关闭/废弃矿井转型利用的新途径,助力区域性的关闭/废弃矿井遗留资源合理、高效、绿色利用,推动资源枯竭型城市转型发展。

参考文献 (References)

- [1] 袁亮. 我国需开展废弃矿井资源开发利用战略研究[N]. 中国煤炭报, 2019-11-21(4).
- [2] 袁亮, 姜耀东, 王凯, 等. 我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 14-20.
- [3] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 547-556.
- [4] 霍冉, 徐向阳, 姜耀东. 国外废弃矿井可再生能源开发利用现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 267-273.
- [5] 任辉, 吴国强, 张谷春, 等. 我国关闭/废弃矿井资源综合利用形势分析与对策研究[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(2): 1-6.
- [6] 谢和平, 侯正猛, 高峰, 等. 煤矿井下抽水蓄能发电新技术: 原理、现状及展望[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 965-972.
- [7] Kivinen S. Sustainable post-mining land use: Are closed metal mines abandoned or re-used space[J]. Sustainability, 2017, 9(10): 1705.
- [8] 袁亮. 废弃矿井资源综合利用助力实现“碳达峰、碳中和”目标[J]. 科技导报, 2021, 39(13): 1.
- [9] 刘峰, 李树志. 我国转型煤矿井下空间资源开发利用新方向探讨[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2205-2213.
- [10] 武晓娟, 何英. 煤炭业须以转型求发展: 专访全国人大代表、山西煤矿安监局局长卜昌森[N]. 中国能源报, 2017-03-13(3).
- [11] 袁亮. 推动我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用研究[J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(5): 1.
- [12] 谢和平, 高明忠, 高峰, 等. 关停矿井转型升级战略构想与关键技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1355-1365.
- [13] 武强, 李松营. 闭坑矿山的正负生态环境效应与对策[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 21-32.
- [14] 任辉, 吴国强, 宁树正, 等. 关闭煤矿的资源开发利用与地质保障[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(6): 1-9.
- [15] 谢友泉, 高辉, 苏志国, 等. 废弃矿井资源的可再生能源开发利用[J]. 可再生能源, 2020, 38(3): 423-426.
- [16] 王婷婷, 曹飞, 唐修波, 等. 利用矿洞建设抽水蓄能电站的技术可行性分析[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(1): 195-200.
- [17] 黄侃. 井下废弃空间安全处置工业垃圾研究[J]. 中国矿业, 2000, 9(5): 66-68.
- [18] Li W, Ren T W, Su E L, et al. Is the long-term sequestration of CO₂ in and around deep, abandoned coal mines feasible?[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2018, 232(1): 27-38.
- [19] 李庭, 冯启言, 周来, 等. 废弃矿井地下水污染风险评估价系统开发[J]. 能源环境保护, 2014, 28(2): 13-16, 8.
- [20] Feng H B, Zhou J W, Chai B, et al. Groundwater environmental risk assessment of abandoned coal mine in each phase of the mine life cycle: A case study of Hongshan coal mine, North China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(33): 42001-42021.
- [21] Sebei A, Chaabani A, Abdelmalek-Babbou C, et al. Evaluation of pollution by heavy metals of an abandoned Pb-Zn mine in northern Tunisia using sequential fractionation and geostatistical mapping[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(35): 43942-43957.
- [22] Guo Q B, Guo G L, Li Y M, et al. Stability evaluation of an expressway construction site above an abandoned coal mine based on the overlay and index method[J]. Sustainability, 2019, 11(19): 5163.
- [23] Sechman H, Kotarba M J, Kędzior S, et al. Fluctuations in methane and carbon dioxide concentrations in the near-surface zone and their genetic characterization in abandoned and active coal mines in the SW part of the Upper Silesian Coal Basin, Poland[J]. International Journal of Coal Geology, 2020, 227: 103529.
- [24] Guo P Y, Zheng L G, Sun X M, et al. Sustainability evaluation model of geothermal resources in abandoned coal mine[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 144: 804-811.
- [25] 马丽丽, 田淑芳, 王娜. 基于层次分析与模糊数学综合评判法的矿区生态环境评价[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(3): 165-170.
- [26] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 4版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2013.
- [27] Bruaset A M. A survey of preconditioned iterative methods[M]. New York: CRC Press, 2018.
- [28] 王晓斌, 卢福军, 孙挺, 等. 迭代计算与金融大数据分析[J]. 信息通信技术, 2017, 11(4): 47-52.
- [29] 刘海, 谭中慧. 基于OpenCV和机器学习的违法停车检测算法[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2018, 41(2): 65-70.
- [30] Tang K, Qin M, Fang W, et al. Simultaneous detection of atmospheric HONO and NO₂ utilising an IBBCEAS system based on an iterative algorithm[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2020, 13(12): 6487-6499.
- [31] 冯启言. 废弃矿井地下水污染风险评估与控制技术[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [32] Chang L Q, Bian Z F. Research and implementation of pattern recognition based on adaboost algorithm[J]. Sen-

sors & Transducers, 2013, 159(11): 7-12.
[33] 郝宪杰, 陈泽宇, 张通, 等. 中国关闭/废弃矿井地下空

间储物环境稳定性保障: 现状、评价及改造[J]. 科技导报, 2021, 39(13): 29-35.

Classified utilization and grade evaluation of closed/abandoned mines in China

FENG Feisheng^{1,2,3}, ZHANG Jiqiang¹, WANG Yu¹

1. Anhui University of Science and Technology, State Key Laboratory of Deep Coal Mine Mining Response and Disaster Prevention and Control, Huainan 232001, China
2. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230088, China
3. State Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 100083, China

Abstract With the transformation of the national energy strategy, a large number of closed/abandoned mines generate under the background of overcapacity reduction, mines closure/abandoning and the demand of high-quality development in the coal industry. In view of the fact that there is currently no complete system of classification utilization and grade evaluation for closed/abandoned mines in China, and the domestic energy structure is still dominated by coal in the short term, aiming at the classified utilization and grade evaluation of closed/abandoned mines, using the Adaboost iterative algorithm, a probability level model for the utilization of closed/abandoned mines was established. It was found that the classified utilization of closed/abandoned mines can be divided as follows: closed/abandoned mines ecological civilization development, underground space development and utilization, remaining media resources development and utilization, groundwater resources development and utilization, complementary energy (gas, oil, water and light) development and utilization. 20 classification parameters are selected as grade evaluation indicators for closed/abandoned mines, and a preliminary database of closed/abandoned mine resources in China is constructed. The closed/abandoned mine green resources evaluation technology system is established, and the scientific concept of intelligent and precise development of closed/abandoned mines is proposed. The research can promote the accurate and intelligent mining of closed/abandoned mines and the urban transformation and development.

Keywords closed/abandoned mine; classified utilization; grade evaluation ●



(责任编辑 刘志远)