

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.018

我国矿井水资源化利用现状及前景展望

闫佳伟,王红瑞,赵伟静,曾 萌

(北京师范大学水科学研究院城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室,北京 100875)

摘要:针对现阶段我国在矿井水资源化政策制定、科学研究、人才培养及宣传等方面存在的问题,在总结全国 53 处煤矿矿井水利用率、利用方式、利用价格等现状的基础上,分析了矿井水资源化利用的制约因素,提出了出台落地性政策、加强创新人才建设培养、分质分类利用、加大宣传和发挥行业协会作用等政策方面的建议,指出高质量矿井水的开发、矿井水资源热能利用、产业化和规模化经营、废弃矿矿井水资源化利用等是矿井水热能利用的方向。

关键词:矿井水资源化;矿井水热能;废弃矿矿井水

中图分类号:X752 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)05-0117-07

Current status and prospect of mine water reutilization in China//YAN Jiawei, WANG Hongrui, ZHAO Weijing, ZENG Meng(*Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: To solve the problems in policy making, scientific research, personnel training and publicity when it comes to mine water reutilization in China, restrictive factors of the utilization of mine water resources are analyzed based on summarizing the current situation of mine water utilization rate, utilization mode and utilization price of 53 coal mines across the country. Suggestions including introducing implementable policies, improving training innovative personnel, reutilizing mine water with distinguished qualities and classes, increasing publicity and letting the guilds play their roles are raised. It is pointed out that exploiting high-quality mine water resources, utilizing thermal energy from mine water, industrialization and reutilizing mine water in abandoned coal mines should be the prospect of mine water thermal reutilization.

Key words: mine water reutilization; mine water thermal energy; mine water in abandoned coal mines

2019 年 4 月,国家发展和改革委员会、水利部联合印发了《国家节水行动方案》,指出在缺水地区要加强非常规水利用,强制推动非常规水纳入水资源统一配置,逐年提高非常规水利用比例,并严格考核。随着我国社会经济的高速发展,今后水资源供需矛盾将更为突出^[1-2],包括海水、雨水、矿井水等在内的非常规水源及污水回用逐步引起政府的重视^[3-5]。煤炭作为我国最主要的化石能源,煤炭开采与利用均需要大量的水资源作为支撑,在晋北、晋中、晋东、神东、陕北、黄陇、宁东、鲁西、两淮、云贵、冀中、河南、内蒙古东部、新疆等 14 个亿吨级国家大型煤炭基地中,有 10 个以上的煤炭基地缺水严重^[6]。矿井水资源化利用、发展矿区循环经济,是缓解我国北方地区“富煤贫水”矛盾的重要举措,也

是实现经济社会可持续发展的现实选择^[7]。

近年来,矿井水资源化利用逐渐成为国内学者的研究热点。杨信荣等^[8-9]是较早提出矿井水资源化概念的学者之一,就矿井水资源化的必要性、可行性、矿井水资源化过程中需要注意的问题及对策进行了相关论述。武强等^[10]在矿井水害防治和矿井水资源化利用方面开展了大量的研究,先后提出了“排、供、环保”三位一体及控制、处理、利用、回灌与生态环境保护五位一体优化结合的矿井水资源化方式。莫樊等^[11-13]就我国不同类型矿井水的处理方法及利用途径进行了总结,并通过实例证明矿井水资源化利用可以带来良好的社会效益和经济效益。苗立永等^[14-16]就高矿化度矿井水、酸性矿井水的处理利用开展了大量的研究,为矿井水资源化的落地

基金项目:国家自然科学基金(51879010,51479003)

作者简介:闫佳伟(1995—),男,硕士研究生,研究方向为水资源系统分析和非常规水源。E-mail: yanjw0824@163.com

通信作者:王红瑞(1963—),男,教授,博士,主要从事水资源系统分析和环境规划与评价研究。E-mail: henrywang@bnu.edu.cn

生产提供了技术支持。郭雷等^[17]指出我国矿井水利用的相关研究多集中在技术层面,对于矿井水的管理缺乏系统研究,并就健全矿井水资源化利用相关标准体系等提出了对策建议。此外,何绪文等^[18]就矿井水处理技术的研究进展进行了阐述,并指出了矿井水资源化利用的发展趋势和方向。

我国在矿井水资源化技术方面取得了较多的研究成果,并处于国际领先水平,但在矿井水资源化利用管理及政策方面的研究明显不足。中国煤炭工业协会和中国矿业大学(北京)水污染控制工程研究所曾对我国矿井水资源化利用水平进行了调查,结果表明,2005年,全国煤矿矿井水资源化利用率为26.2%^[19],与发达国家高达80%的矿井水资源化利用率水平有较大的差距,这是一次较为全面、系统地对我国矿井水资源化利用率的评价,之后鲜有相关文献。为摸清我国现阶段矿井水资源化利用情况,探究矿井水资源化的利用方向,本文对我国矿井水资源化利用发展历程进行了回顾,对全国11个主要产煤省份的53个煤矿(煤矿企业)矿井水资源化利用现状进行了调查分析。

1 我国矿井水资源化发展进程及现状

1.1 发展进程

近年来,国家逐渐重视矿井水资源化的利用,2005年《国务院关于促进煤炭工业健康发展的若干意见》指出,按照高效、清洁、充分利用的原则,开展煤矸石、煤泥、煤层气、矿井排放水以及与煤共伴生资源的综合开发与利用。国家发展和改革委员会、国家能源局分别于2006年和2013年出台了《矿井水利用专项规划》《矿井水利用发展规划》等文件,指出国家矿井水资源化利用存在的问题并提出了发展目标,明确指出要逐渐建立完善矿井水资源利用的法律法规体系、宏观管理政策和政策技术体系、创新技术和机制。2013年,国务院发布的《循环经济发展战略及近期行动计划》明确提出要推动矿井水用于矿区补充水源和周边地区生产、生活、生态用水。2015年国务院发布的《水污染防治行动计划》指出,推进矿井水综合利用,煤炭矿区的补充用水、周边地区生产和生态用水应优先使用矿井水,加强洗煤废水循环利用;同年环境保护部(现生态环境部)颁发了《现代煤化工建设项目环境准入条件(试行)》,文件要求,“现代煤化工发展,必须要强化节水措施,减少新鲜水用水量。在具备条件的地区,倡导优先使用矿井疏干水、再生水,禁止取用地下水作为生产用水”。2019年,国家发展和改革委员会、水利部发布了《国家节水行动方案》,要求在缺水地区

加强矿井水等非常规水的利用。近年来,在有矿井水资源的各地市,出台的地方发展规划、循环经济发展规划等均提及要充分利用矿井水资源(矿井疏干水),但专门针对矿井水资源(矿井疏干水)利用的文件并不多,仅有个别省(自治区)市如山西省、榆林市、晋城市、鄂尔多斯市、宁夏回族自治区等出台相关文件。如2008年山西省生态环境厅(原山西省环境保护厅)的《关于加快汾河流域煤矿矿井水处理及回用工程项目实施的通知》;2016年榆林市人民政府的《关于矿井疏干水综合利用的意见》、榆林市发展和改革委员会的《榆林市矿井疏干水综合利用规划》;2018年晋城市煤炭煤层气工业局的《关于推进全市地方煤矿煤矸石矿井水综合利用的通知》和鄂尔多斯市水务局的《鄂尔多斯市矿井疏干水和再生水综合利用方案及分年度方案》;2019年伊金霍洛旗人民政府的《伊金霍洛旗加快推进矿井疏干水综合利用实施意见》、宁东能源化工基地委员会的《宁东基地矿井疏干水利用现状及配置方案》和贵州省能源局的《关于加强煤矿矿井水和煤矸石综合利用调度统计分析工作的通知》。

煤矿开采与水资源的短缺一直为一对矛盾。在近代煤炭规模化开采初期,我国一些缺水的煤矿就意识到要将排放的矿井水加以利用,直接将矿井水用于洗煤、选煤。由于我国大部分煤矿水质较好,仅含有煤粉等杂质,所以经过简单的沉淀过滤后就可以用于洗澡、灌溉。更有部分煤矿将未经污染的矿井水经简单处理后供矿区的生活饮用^[20]。1970年前后,我国逐渐与英、美、日本等国家建交,在煤矿生产等方面学到了不少新技术、新方法,水处理技术进一步提高。1968年北京煤矿设计研究院等相关设计单位在大台煤矿开展了矿井水经深度处理后进行饮用的相关研究,结果表明经处理后的矿井水达到了当时我国矿井水的饮用标准^[21]。

自20世纪80年代以来,中国的一些煤矿已经建立了一些矿山水处理站,如大同、徐州等煤矿高产地区。我国矿井水处理站的数量一直在增加,据不完全统计,我国各地区煤矿矿区矿井水经过净化处理后达到生活饮用水平的处理量已超过50万m³/d。2010年以后,各省市逐步加强矿井水的利用,矿井水资源化利用率逐年提高。

1.2 现状

根据国家能源局的相关数据,截至2017年12月,我国共有煤矿5063处,其中生产煤矿共3907处。由于煤矿数量庞大,加之部分煤矿没有进行矿井水资源化利用的相关统计工作,选取山西、陕西、内蒙古、宁夏、新疆、山东、河南、吉林、安徽、江苏、贵

州等 11 个主要产煤省(自治区)的 53 处煤矿进行问卷调查研究。53 处煤矿主要分布于山西中部、山西北部、新疆北部、陕西北部、内蒙古东部等地区,基本涵盖了我国主要煤矿及矿井水资源化地区。2013 年,53 处煤矿矿井水产生量共计 20 889.8 万 m^3 ,随着国家去产能及采煤保水技术的提高,到 2018 年,煤矿矿井水产量略有所下降,为 19 658.6 万 m^3 ,但矿井水资源化利用量从 2013 年的 9 041.2 万 m^3 增长到 2018 年的 11 440.5 万 m^3 ,矿井水资源化利用率逐年提高,从 2013 年的 43.28% 增长到 2018 年的 58.20%

图 1 为 2013—2018 年煤矿矿井水资源化分行业利用情况。由图 1 可以看出,近几年我国矿井水分行业资源化利用相差不大。矿井水资源化利用中,2018 年工业用水占比达 59%;生态用水次之,为 32%;农业用水最少,仅为 1%;其他年份矿井水资源化利用中工业用水和生态用水也基本占据 80% 以上。工业方面,资源化利用的矿井水主要用于煤炭开采及加工过程中的井下灭火、除尘、防爆、洗煤、消防等;生态方面,矿井水则主要用于生态绿化、河道补水等方面;在民用和农业方面,矿井水主要用于浴室、锅炉用水和灌溉用水。矿井水基本上属于采矿区内部利用。

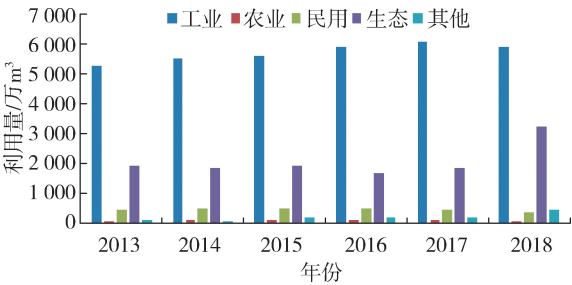


图 1 2013—2018 年煤矿矿井水资源化分行业利用情况
Fig. 1 Industry utilization of water in coal mines from 2013 to 2018

从七大地理分区来看,我国矿井水资源化利用率在分区上有着明显的差异,见图 2。由图 2 可见,华北地区矿井水资源化利用率最高,且从 2013 年开始,矿井水资源化利用率整体呈上升趋势,2018 年超过了 93%,这与华北地区矿井水水质较好(多为洁净矿井水和含悬浮物矿井水)和水资源供需矛盾突出有关。华中、西南、华东地区矿井水资源化利用率近几年来基本保持不变,分别在 75%、60%、60% 左右浮动,矿井水资源化利用率没有进一步突破的原因是这些地区水资源相对较为充足且矿井水水质较差,矿井水利用成本相对偏高。西北地区近几年来矿井水资源化利用率从 59% 上升至 73%,利用率稳步上升,主要原因是地下水库等矿井水就地使用

概念的提出与实际应用。东北地区矿井水资源化利用率近几年来有较大的突破,尤其从 2015 年开始,矿井水资源化利用率大幅上升,这主要与锡林郭勒盟几大露天煤矿矿井水利用率大幅提升有关。

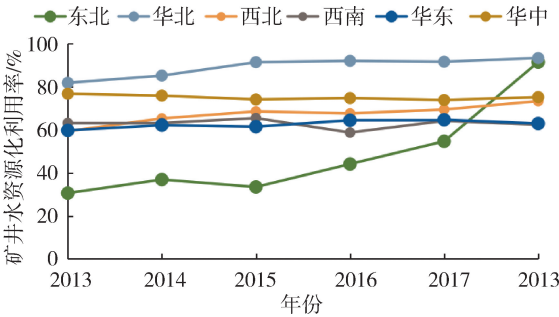


图 2 2013—2018 年我国分区矿井水资源化利用率
Fig. 2 Utilization rate of mine water resources in China from 2013 to 2018

按照煤矿的开采方式,我国煤矿主要分为井工开采和露天开采两种方式。①井工开采煤矿的矿井水资源化利用率基本能反映当地矿井水资源的综合利用率,与矿井水产生量关系不大;②目前露天开采煤矿矿井水基本用于煤矿开采,所以其水资源化利用率与矿井水产生量有较大关系,矿井水产生量较低时,可被全部利用,矿井水产生量较高时,利用率则相对较低。

不同地区、不同煤矿因矿井水资源的性质、处理及利用方式的不同,矿井水资源化的利用成本也有一定的差异。但单位矿井水资源化利用成本在 1~15 元之间,绝大部分处于 1~5 元之间。在调研的 53 个煤矿中,共有 37 个煤矿有矿井水资源化利用成本的相关数据,平均为 4.10 元,相较于常规水源水价,利用成本相对偏高。

2 我国矿井水资源化利用的制约因素

2.1 落地性政策缺失

虽然国家和地方政府出台了众多法规文件,鼓励矿井水资源的循环利用,但这些政策在具体操作时有很大的模糊和不确定性。如矿井水资源如何界定计量、分类使用的水质标准、税收如何优惠、主管部门的确定等问题仍然没有统一的标准,也无相关政策、标准,直接影响了企业利用矿井水资源的积极性。

2.2 矿井水处理成本偏高

我国矿井水资源化利用主要用于工业方面,对水质的要求并不很高,矿井水资源化利用的平均成本已达 5 元/ t ,这在北方干旱缺水、地下水超采、矿井水水质较好的地区可能会被接受,但对于云南、贵州、安徽、江苏、蒙东等水资源相对丰富的煤矿,矿井

水资源化利用成本相对较高,尤其是云贵地区,矿井水多为酸性,处理成本偏高,企业利用矿井水的积极性大幅度降低。此外,矿井水资源化处理工程前期投资少则几千万元,多达几亿元,对于一些规模较小的煤矿来说,前期投资是一个巨大的问题。

2.3 心理认同仍有差距

尽管近年来矿井水逐渐用于生产、生活,但提及矿井水,人们首先想到的是矿井突水造成的安全事故以及矿井水外排造成的环境污染。据报道,2000—2014 年中国因矿井突水造成超过 4 500 人遇难。2009 年以来,山西阳泉发现大量的矿井水流出地表,这类矿井水多为酸性且矿化度高,对山底河流造成了严重的污染。关闭多年的太原西山牛家口老窑水流出高矿化度矿井水,对附近著名景区晋祠公园的水域造成了一定影响。因此大多数人并没有认识到矿井水是一种宝贵的水资源,更无从谈及对矿井水进行资源化利用。此外,再生水、淡化海水利用现今都有专门的组织及机构进行研究及宣传,而关于矿井水资源化再利用宣传的社会组织、宣传平台、信息化系统均处于缺位状态,矿井水资源化利用的宣传工作还远不到位。

2.4 产学研用模式尚未形成

现阶段尽管国家高度重视矿井水资源化利用,但是关于矿井水资源化利用的基础研究还很薄弱,人才培养尚有缺位,校企之间的合作有待加强。在我国现有的煤炭矿业类高校中,如中国矿业大学、中国矿业大学(北京)、山东科技大学、太原理工大学、长安大学等在培养硕、博学生时有关矿井水的研究等较多集中在矿井水害防治方面,关于矿井水资源化利用的文献仅为矿井水害防治的 1/5 ~ 1/4,见图 3 (数据来源于中国知网)。此外,有关于矿井水资源化利用的企业仍然较少,该专业学生实习机会不足。

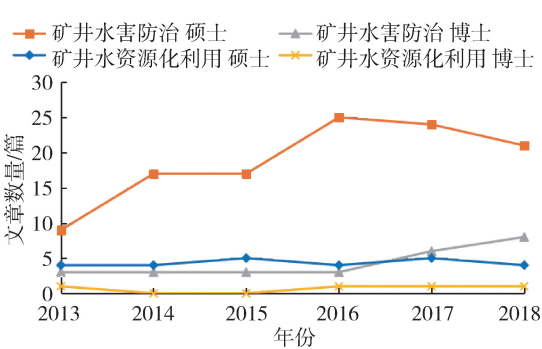


图 3 2013—2018 年煤炭矿业类高校矿井水利用类文章数量

Fig. 3 Number of articles from mine institute about mine water utilization in coal mining from 2013 to 2018

3 我国矿井水资源化利用对策

3.1 出台落地性政策

我国作为法治社会,任何事情必须坚持有法、有规可依。矿井水资源化利用的前提就是要完善矿井水资源化利用的政策法规。对策可以由国家或各地方水利部门牵头^[22],会同发展和改革委员会、生态环境部(厅、局)等,就矿井水资源开发利用过程中的水质、环境保护等方面的问题进行统一研究。

在国家层面,要进一步制定详细的矿井水利用专项规划,明确目标年的矿井水利用目标;考虑将矿井水列入水资源系统进行统一配置^[23];年度对矿井水利用目标进行考核,考核以省(自治区)或基地为单位。

在地方层面,可设置以省(自治区)或基地为单元的管理部门,根据各地实际进一步细化与国家矿井水利用相关的标注规范,制定合理的税收补贴政策等,具体如图 4 所示。在政策制定过程中,要有政府、科研人员、一线工作人员的参与,保证政策在大的框架下稳定,在具体操作方面可行。

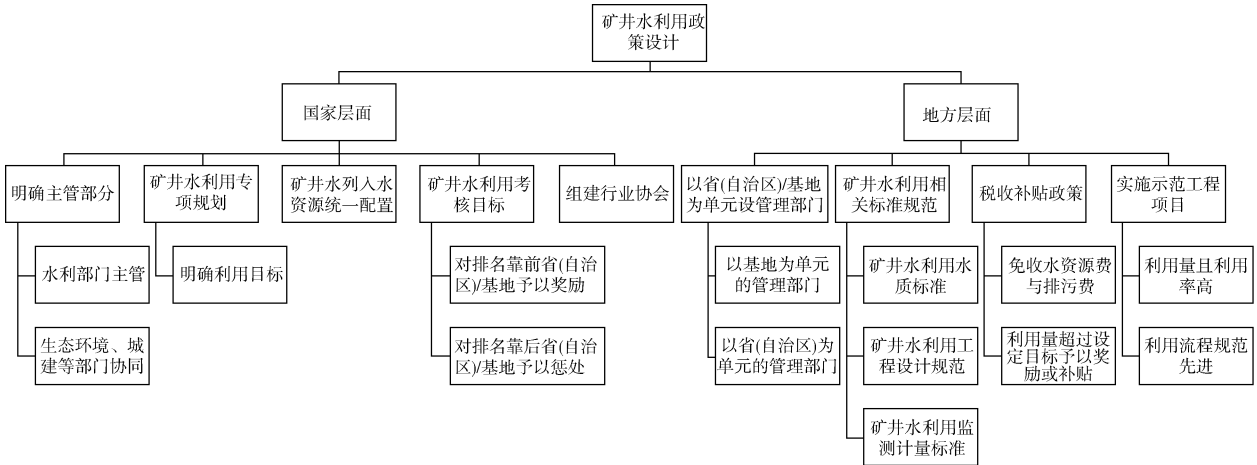


图 4 矿井水利用政策设计

Fig. 4 Mine water utilization policy design

3.2 加强创新人才培养

关于矿井水资源化利用,既是传统的研究,又有创新的研究。在传统研究方面,各类矿井水的化学处理方法较多,研究也相对较为深入,但如何将矿井水以较低成本处理为生活用水或者更高质量的饮用水、矿泉水,目前研究还相对较少。此外,矿井水资源化利用管理方面的政策研究鲜有文献论述。因此,水利或地矿类高校要进行矿井水资源化利用人才的培养,集技术与管理于一身,在培养阶段加强校企合作,积极前往企业实习锻炼,从而有效推动矿井水资源化的利用。

3.3 分质分类利用

按照我国常见矿井水的分类,不同类型的矿井水可根据实际分质分类用于工业、生活、农业、生态等方面。各类矿井水利用方式见图 5。矿井水在进行实际利用时还要考虑多方面的因素,如运输距离、处理成本等。

3.4 加大宣传,发挥行业协会作用

行业协会具有沟通、监督、协调、统计等作用。目前我国还未有以矿井水资源化利用命名的行业协会,与之相关的有“中国煤炭加工利用协会”“昆明市再生水协会”等。在对矿井水资源化利用愈加重视的今天,有必要组建专门的协会,开展我国矿井水资源化利用的统计工作;组织行业会议,加强科研机构与企业之间的沟通;积极协调企业与政府之间的矛盾与需求^[17,24]。此外,在人们尚未完全接受矿井水的情况下,积极开展矿井水可再生利用的公众普及,缩小群众的心理认同差距。

4 我国矿井水资源化利用前景展望

4.1 高质量矿井水的开发

近年来,随着社会经济的发展,人们对饮用水的要求越来越高。现在市面上瓶装纯净水普遍在 2 ~

5 元之间,更有甚者高达几十元。矿井水主要来源于地下水,一些不受污染的矿井水经过简单处理即可成为高质量的饮用水,富含人类所需的多种微量元素。如开滦股份公司范各庄矿将矿井水开发成为弱碱性饮用水,每小时灌装 1000 瓶瓶装水、120 桶桶装水的生产能力,年可节省 830 万元的排水电费、排污费、水资源费等,为企业创造了十分可观的收入。因此,面对国家去产能的大趋势,在煤矿利润有所下降的情况下,开发高质量的矿井水将是大势所趋。

4.2 矿井水热能利用

矿井水除了经过处理作为水资源再生利用外,矿井水所蕴含的热能也引起了相关学者的注意。矿井水的热能恒定,几乎不受外界影响。王力力^[25]分析了唐山矿矿井水余热用于职工洗浴用水加热的可行性,得出该方案环保且可行。李峰等^[26]通过分析水源热泵技术在矿井水余热方面的应用研究,得出矿井水余热在节能减排方面有着明显的效果,具有较高的经济价值。辛嵩等^[27]对矿井水余热利用从理论、技术及经济方面进行可行性分析,得出该技术可以为矿区供暖和降温,同时具有一定的经济效益和环境效益。在日益重视生态文明及循环经济的今天,矿井水资源的热能利用必将成为大势所趋,为节能减排做出贡献。

4.3 产业化和规模化

如今矿井水的资源化利用尚未形成规模,各个矿井之间的矿井水再利用也仅各为其用,很少对外进行供水。在技术与国家政策补贴到位后,矿井水资源化利用的成本将逐步降低,形成具有价格优势的可利用水源。矿井水资源化利用产业化与规模化应以政府引导、企业为主体进行建设,拓宽融资渠道,将矿井水收集、处理、运输、销售等多个环节有机结合起来,进行市场化经营。在保证水质的情况下,逐步扩大供水规模,形成具有竞争力的供水主体。

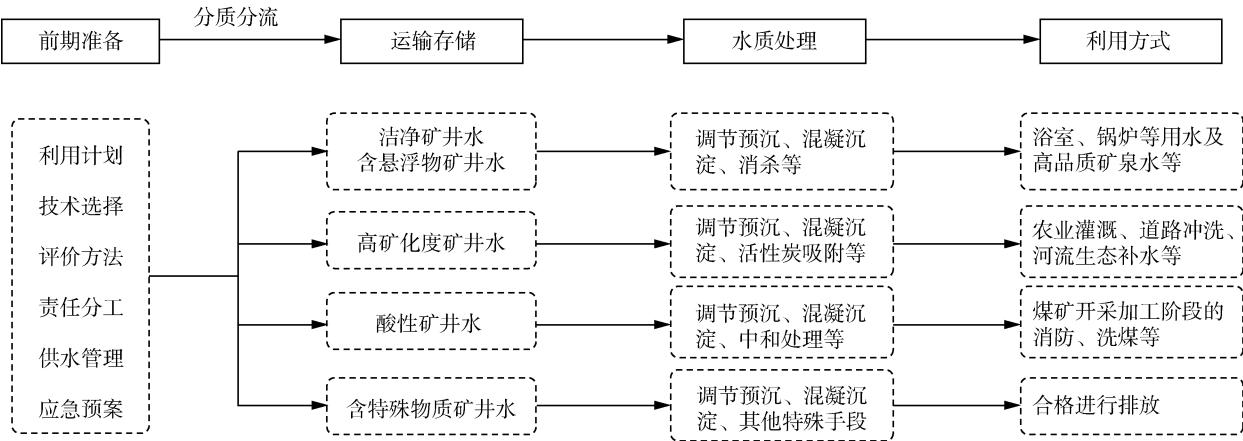


图 5 矿井水综合利用流程
Fig.5 Flow chart of comprehensive utilization of mine water

在产业化和规模化发展前期,政府要制定完善的利用政策、利用标准以及相应的优惠补贴政策,企业则需要做好融资、场地建设、管道铺设及市场的开发;在运营阶段,政府要根据实际运营情况做好政策的完善与监督管理工作,企业则需要做好水质监测和应急预案等的演练。

4.4 废弃矿井水资源化利用

近年来,随着去产能的稳定推进,大量产能较低的煤矿被关闭,主要分布于西南和华北地区。2014—2018年,我国共关闭7281处煤矿,截至2018年,废弃煤矿的矿井水接近48亿 m^3 。弃煤矿产生的矿井水被大量闲置、废弃,不仅导致了水资源的大量浪费、威胁邻近生产矿井的安全、矿井水位回升可能引发地质灾害等问题,还对矿区生态环境造成了一定影响。因此,在水资源日益短缺的今天,加大废弃矿井水资源化的利用,在解决用水紧张的同时也可以进一步提升煤矿开采安全,同时保护矿区的生态环境。废弃矿井水资源可以通过修建地下水库、用于地下发电、作为后备水源以及进一步加工处理后利用^[28]。近年来,废旧煤矿经过开发改造成为工业遗产旅游公园,如唐山开滦煤矿国家矿山公园、晋华宫国家矿山公园、阜新海州露天矿国家矿山公园等。废弃煤矿的矿井水经处理后可用于公园的景观用水及周边河流的生态补水。此外,废弃矿井水资源化利用的前提,是要由政府相关部门对废弃矿井水进行探查、核实、统计,在此基础上对矿井水加以应用。

5 结 语

在水资源日益短缺与环境保护愈加重视的今天,矿井水资源化利用定将成为国家的必然选择。我国矿井水资源化利用正处于发展阶段,加之区域水资源之间存在差异性,利用程度各不相同,与淡水、地下水等水源相比价格优势不突出等现实问题,矿井水开发利用仍存在难点。在未来矿井水资源化产业化进程中,要着重突破矿井水资源化利用各个环节的核心技术,研发高效安全的矿井水资源化全产业链技术;建立完善的政策、标准支持体系,加强矿井水资源化设计运营公司的对外输出;积极开展矿井水资源化利用的试点城市、示范基地等工作。

参考文献:

[1] 王红瑞,洪思扬,秦道清. 干旱与水资源短缺相关问题探讨[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 1-4. (WANG Hongrui, HONG Siyang, QIN Daoqing. Discussion on related issues of drought and water shortage[J]. Water

Resources Protection, 2017, 33(5): 1-4 (in Chinese))

- [2] 孙才志,吴永杰,刘文新. 基于 DPSIR-PLS 模型的中国水贫困评价[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 1079-1088. (SUN Caizhi, WU Yongjie, LIU Wenxin. Application of DPSIR-PLS model to analyze water poverty in China[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5): 1079-1088. (in Chinese))
- [3] 左其享. 我国海绵城市建设中的水科学难题[J]. 水资源保护, 2016, 32(4): 21-26. (ZUO Qiting. Water science issues in sponge city construction[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(4): 21-26. (in Chinese))
- [4] 闰佳伟,王红瑞,朱中凡,等. 我国海水淡化若干问题及对策[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 199-210. (YAN Jiawei, WANG Hongrui, ZHU Zhongfan, et al. Relevant issues and countermeasures of seawater desalination in China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 199-210. (in Chinese))
- [5] 宋进喜,宋令勇,何艳芬,等. 区域性城市雨水资源化利用若干问题的探讨[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2009, 39(6): 1056-1060. (SONG Jinxi, SONG Lingyong, HE Yanfen, et al. Some problems on the regional urban rainfall utilization[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2009, 39(6): 1056-1060. (in Chinese))
- [6] 孙亚军,陈歌,徐智敏,等. 我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 304-316. (SUN Yajun, CHEN Ge, XU Zhimin, et al. Research progress of water environment, treatment and utilization in coal mining areas of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 304-316. (in Chinese))
- [7] 夏青,梁钰. 面向循环经济的矿产资源开发利用模式[J]. 自然资源学报, 2006(2): 288-292. (XIA Qing, LIANG Yu. Model of mine resources development and utilization for cycling economy[J]. Journal of Natural Resources, 2006(2): 288-292. (in Chinese))
- [8] 杨信荣,张明星. 论我国煤矿矿井水资源化[J]. 煤矿环境保护, 1993, 7(1): 2-4. (YANG Xinrong, ZHANG Mingxing. On the water resources of coal mines in China[J]. Coal Mine Environmental Protection, 1993, 7(1): 2-4. (in Chinese))
- [9] 邬象牟. 矿井水回收利用面临的形势与对策[J]. 煤炭工程, 2005, 37(9): 50-52. (WU Xiangmou. Faced situation and countermeasures of mine water recycling[J]. Coal Engineering, 2005, 37(9): 50-52. (in Chinese))
- [10] 武强,王志强,郭周克,等. 矿井水控制、处理、利用、回灌与生态环保五位一体优化结合研究[J]. 中国煤炭, 2010, 36(2): 109-112. (WU Qiang, WANG Zhiqiang, GUO Zhouke, et al. Research on an optimized five-in-one combination of mine water control, treatment, utilization, back-filling and environment friendly treatment[J]. China

- Coal, 2010, 36(2): 109-112. (in Chinese))
- [11] 莫樊, 郁钟铭, 吴桂义. 煤矿矿井水资源化及综合利用[J]. 煤炭工程, 2010, 42(6): 103-105. (MO Fan, YU Zhongming, WU Guiyi. Coal mine water resources and comprehensive utilization [J]. Coal Engineering, 2010, 42(6): 103-105. (in Chinese))
 - [12] 李甲亮, 姜军, 王亚博. 煤矿矿井水资源化与循环经济[J]. 能源环境保护, 2004(1): 20-22. (LI Jialiang, JIANG Jun, WANG Yabo. Recycling on coal mining wastewater resource and circular economy [J]. Energy Environmental Protection, 2004(1): 20-22. (in Chinese))
 - [13] 刘杰, 何为军. 我国矿井水处理的现状及其资源化利用[J]. 煤炭加工与综合利用, 2007(4): 37-40. (LIU Jie, HE Weijun. Current status of mine water treatment in my country and its resource utilization [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2007(4): 37-40. (in Chinese))
 - [14] 苗立永, 王文娟. 高矿化度矿井水处理及分质资源化综合利用途径的探讨[J]. 煤炭工程, 2017, 49(3): 26-28. (MIAO Liyong, WANG Wenjuan. Discussion on treatment and graded comprehensive utilization methods for high-salinity mine water [J]. Coal Engineering, 2017, 49(3): 26-28. (in Chinese))
 - [15] 孙红福, 陈健, 李博, 等. 干旱地区煤矿高矿化度矿井水资源化利用[J]. 煤炭工程, 2015, 47(9): 117-119. (SUN Hongfu, CHEN Jian, LI Bo, et al. Resource utilization of high tds mine water in arid regions [J]. Coal Engineering, 2015, 47(9): 117-119. (in Chinese))
 - [16] 赵曙光, 李福勤, 候明刚, 等. 高矿化度矿井水资源化工程实践[J]. 水处理技术, 2010, 36(7): 129-131. (ZHAO Shuguang, LI Fuqin, HOU Minggang, et al. Resource engineering practice of high mineralized mine water [J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(7): 129-131. (in Chinese))
 - [17] 郭雷, 张璐, 胡婵娟, 等. 我国矿井水管理现状分析及对策[J]. 煤炭学报, 2014, 39(增刊2): 484-489. (GUO Lei, ZHANG Luo, HU Chanjuan, et al. Status analysis and measures taken for mine water management in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(Sup2): 484-489. (in Chinese))
 - [18] 何绪文, 张晓航, 李福勤, 等. 煤矿矿井水资源化综合利用体系与技术创新[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 4-11. (HE Xuwen, ZHANG Xiaohang, LI Fuqin, et al. Comprehensive utilization system and technical innovation of coal mine water resources [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 4-11. (in Chinese))
 - [19] 何绪文, 杨静, 邵立南, 等. 我国矿井水资源化利用存在的问题与解决对策[J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 63-66. (HE Xuwen, YANG Jing, SHAO Linan, et al. Problem and countermeasure of mine water resource regeneration in China [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1): 63-66. (in Chinese))
 - [20] 孙旭东. 中国煤炭工业年鉴[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996: 123-138.
 - [21] 张国辉, 江行久. 矿井水水资源量论证方法研究[J]. 水资源保护, 2006, 22(4): 92-94. (ZHANG Guohui, JIANG Xingjiu. Demonstration of mine water resources quantity [J]. Water Resources Protection, 2006, 22(4): 92-94. (in Chinese))
 - [22] 窦明, 张彦, 赵辉, 等. 我国地下水管理与保护制度体系的构建[J]. 人民黄河, 2015, 37(3): 49-53. (DOU Ming, ZHANG Yan, ZHAO Hui, et al. Building of groundwater management and protection institutional system in China [J]. Yellow River, 2015, 37(3): 49-53. (in Chinese))
 - [23] 王小军, 程继军, 王利平, 等. 北方典型钢铁企业非常规水源综合利用与思考[J]. 中国水利, 2018(15): 32-35. (WANG Xiaojun, CHENG Jijun, WANG Liping, et al. Considerations of using unconventional water sources for typical iron and steel companies in North China [J]. China Water Resources, 2018(15): 32-35. (in Chinese))
 - [24] 倪深海, 彭岳津, 王亨利, 等. 我国矿井水资源利用管理对策研究[J]. 煤炭加工与综合利用, 2020(4): 75-79. (NI Shenhai, PENG Yuejin, WANG Hengli, et al. Research on countermeasures of mine water resources utilization management in China [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2020(4): 75-79. (in Chinese))
 - [25] 王力力. 唐山煤矿矿井水余热资源利用的研究和探讨[J]. 科技创新导报, 2010(5): 125. (WANG Lili. Research and discussion on utilization of mine water waste heat resources in Tangshan Mine [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2010(5): 125. (in Chinese))
 - [26] 李峰, 刘勇, 盛友华, 等. 水源热泵技术在煤矿中的应用[J]. 煤炭技术, 2015, 34(8): 12-14. (LI Feng, LIU Yong, SHENG Youhua, et al. Application of water source heat pump technology in coal mining [J]. Coal Technology, 2015, 34(8): 12-14. (in Chinese))
 - [27] 辛嵩, 张建树, 齐晓峰, 等. 矿井水热能回收利用技术研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(10): 304-307. (XIN Song, ZHANG Jianshu, QI Xiaofeng, et al. Research of mine water heat recycling technology [J]. Coal Technology, 2015, 34(10): 304-307. (in Chinese))
 - [28] 吴涛. 我国废弃煤矿矿井水的分布及开发利用方向探讨[J]. 煤炭与化工, 2020, 43(1): 49-53. (WU Tao. Discussion on the distribution and development direction of mine water in abandoned coal mines in China [J]. Coal and Chemical Industry, 2020, 43(1): 49-53. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-07-10 编辑: 胡新宇)