

采煤活动对地下水化学环境的影响及污染防治技术

吴耀国 著



气象出版社

内 容 简 介

基于环境系统分析理论和水环境化学的方法,以山东淄博煤矿区为例,本书系统地研究了采煤活动对地下水化学环境的影响及污染防治技术。该书由两部分组成,共八章。第一部分,主要研究煤矿开采对地下水化学环境影响的特征及其形成机理;第二部分,重点研究煤矿开采活动造成地下水化学环境污染的预防及治理措施。

本书可供从事环境科学、环境工程、水文水资源、采矿工程等专业的工程技术人员、科研人员以及大专院校相关专业的师生使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

采煤活动对地下水化学环境的影响及污染防治技术/吴耀
国著. -北京:气象出版社,2002.1
ISBN 7-5029-3290-9

I. 采… II. 吴… III. ①煤矿开采-影响-地下
水-水化学-地球化学环境②地下水-污染防治
IV. X523

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 087948 号

采煤活动对地下水化学环境的 影响及污染防治技术

吴耀国 著

责任编辑:王桂梅 终审:周诗健

封面设计:沈辉 责任技编:陈红 责任校对:郝玉

* * *

气象出版社出版

(北京市海淀区中关村南大街 46 号 邮编:100081)

北京市兴怀印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

* * *

开本:787×1092 1/16 印张:7.0 字数:180 千字

2002 年 1 月第一版 2002 年 1 月第一次印刷

印数:1~500 定价:16.80 元

ISBN 7-5029-3290-9/X·0061

前 言

煤炭工业是我国的基础产业。在我国的一次性能源消耗中,煤炭约占70%,而且在今后相当长的时间内,这种局面不会有根本性的改变。然而,在开采、加工和使用煤炭的过程中,也造成或加重一系列的环境问题,如酸雨、硫酸烟雾、矿井水污染等。目前,关于酸雨、硫酸烟雾等问题的研究已经进行,并且研究也十分深入。煤炭工业对水环境的影响,最突出的表现是地表水污染,其次才是地下水污染。本质上讲,该地表水的污染主要是由采煤活动过程中矿井水的排放引起的。据不完全统计,在我国,不经处理而外排的矿井水约 $2.2 \times 10^9 \text{m}^3/\text{a}$,这些矿井水中通常悬浮物等污染物的浓度较高,必然造成水环境的污染。这很可能就是目前许多煤矿区地表水污染的主要原因。因此,在人们环境意识不断提高的今天,加之矿区水资源短缺,渴望在对有限水资源进行保护与实现矿井水的资源化等条件下,关于采煤活动所排放矿井水污染的治理开展了较深入的研究,取得了丰硕成果,一些煤矿区的水环境状况也日趋好转。

煤炭工业对水环境的影响,应包括煤炭的开采、加工和使用等全过程对水环境的影响,对矿井水污染的治理属于末段治理,不能从根本上解决煤矿开采对水化学环境的影响,而且很可能不太经济。那么,是否有其它途径既能解决矿井水的污染问题,又可以实现矿井水的资源化?基于上述考虑,作者尝试利用环境系统分析理论和水环境化学的方法,以山东淄博煤矿区为例,系统地研究了采煤活动对地下水化学环境影响及污染防治技术。本书由两大部分组成,共八章:第一部分,主要研究煤矿开采对地下水化学环境影响的特征,分析地下水污染的途径、特征及其形成机理;第二部分,重点研究煤矿开采活动造成地下水化学环境污染的预防及治理措施。值得一提的是,近些年来,由于人们环境意识的不断增强,要求对煤矿开采活动对地下水水质影响及其防治措施进行研究的呼声越来越高。本次对淄博市孝妇河流域地下水污染特征及其形成机理的研究,尽管还有许多不足之处,但无疑是为进一步研究煤矿开采活动对地下水化学环境的影响开了一个好头。

本书是在笔者博士学位论文的基础上加工、修改而成的。本人的博士论文,凝聚着我的导师国务院环境科学与工程评议组成员、中国地质大学(北京)水资源及环境工程系博士生导师沈照理教授,中国地质大学(北京)水资源及环境工程系博士生导师钟佐桀教授和清华大学环境科学与工程系博士生导师李广贺教授的许多心血。从选题、资料收集、分析整理及论文的撰写到最终定稿,都倾注了导师们辛勤的汗水。在3年的博士研究生学习期间,导师们在学习上的言传身教,生活上的备至关怀,使学生终身难忘。借此机会,向我尊敬的导师表示衷心的感谢。

学生荣幸拜师沈照理教授,倾听先生的教诲。在地质大学学习的3年期间,深得

先生的关怀与栽培。先生的学术思想、治学风格及其为人之道深深地感染了我,并得以潜移默化,让学生受益终生。学生的每一点进步,都与先生的关心和爱护是分不开的!这里尤值一提的是,学生曾不幸患病住进医院。在住院期间,先生不顾自己身体不适,多次到医院看望,了解学生的病情,关心学生的康复情况,极大地鼓舞了学生同病魔做斗争的信心与勇气。学生深深地感觉到:先生对学生的爱,胜过了学生的父母……先生,祝您永远健康!

学生有幸师从钟佐燊教授。钟先生严谨的治学风格、周密的思维方式、孜孜不倦的钻研精神,给学生以很大的启迪,并极大地激励学生去解决研究中遇到的难题。先生对待学生的学习是严父似的,对待学生的生活是慈母般的。学生忘不了,先生与学生一起出差期间,与学生促膝谈心,不仅谈学习,而且谈生活,教会学生许多生活技巧;学生忘不了,每当遇到困难,学生的思想出现波动时,先生总是悄悄地出现在学生的身边,循循善诱的帮助学生分析原因,同时鼓励学生去克服困难,稳定学生的思想情绪……真的,钟老师,学生想对您说:好人一生平安!

在做博士论文期间,得到了清华大学环境科学与工程系教授、博士生导师李广贺先生在学习上的指导和生活中的许多帮助。可以想象,假如没有李教授的帮助,不可能有笔者的这篇论文。同时在收集资料的过程中,还得到了如下单位和个人的帮助:淄博市水资源管理办公室、张店区水资源管理办公室、博山水资源管理办公室、淄川区水资源管理办公室、周村区水资源管理办公室、淄博环境水文地质监测站、曹修笏总工程师(高级工程师)、陈继奎科长(高级工程师)、王孝勤科长(高级工程师)、徐品站长(高级工程师)、中国水利科学研究院的王东胜博士后、中国水利规划研究院的任增平博士、中国地质大学的陈亮博士、北京大学张建立博士后。在环境科学系学习的三年时间里,还得到了全国政协资源与环境委员会委员、中国地质大学(北京)博士生导师李慈君教授,陈爱光教授,蒋景诚教授,汤鸣皋副教授,周讯教授,王龄超老师、贾彩萍老师等的指导和帮助。在论文的修改和加工过程中,得到了长安大学水资源及环境工程系主任、教授、博士生导师李云峰先生的指点与帮助。谨将此书献给对所有关心与帮助过我的老师、同学与朋友!

由于本人水平有限,书中存在一些不足之处,敬请您批评指正。

吴耀国

2001年11月于西北工业大学

目 录

前言

1 采煤活动对地下水化学环境影响的研究现状及发展趋势	(1)
1.1 采煤活动对地下水化学环境影响研究的意义	(1)
1.2 采煤活动对地下水化学环境影响的研究现状及存在问题	(2)
1.3 研究技术思路	(5)
2 研究区域自然环境概况	(6)
2.1 自然地理环境条件	(6)
2.2 区域地质环境特征	(7)
2.2.1 地层	(7)
2.2.2 构造	(8)
2.3 矿井水水源及其补充方式	(9)
2.3.1 煤矿分布与开采现状	(9)
2.3.2 煤矿矿井水水源及矿井水动态	(10)
2.4 区域环境水文地质条件	(12)
2.4.1 含水岩组的划分	(12)
2.4.2 地下水位动态	(12)
3 地下水污染特征及污染现状评价	(15)
3.1 地下水化学成分特征及其变化规律	(15)
3.1.1 地下水化学成分特征	(15)
3.1.2 地下水组分的空间分布特征	(17)
3.1.3 地下水组分浓度的时间变化特征	(17)
3.1.4 地下水化学类型	(20)
3.1.5 地下水组分相关关系	(20)
3.2 地下水污染特征及污染范围和程度的评价	(24)
3.2.1 地下水主要污染物及其特征	(24)
3.2.2 地下水污染现状综合评价	(26)
3.3 地下水环境质量评价	(29)
3.3.1 评价参数的确定	(29)
3.3.2 评价标准	(29)
3.3.3 用模糊数学法进行环境质量评价	(31)
3.4 本章小结	(35)
4 地下水系统污染源分析	(36)
4.1 最大的污染源——酸性煤矿矿井水	(36)
4.1.1 矿井水的化学特征	(36)
4.1.2 矿井水化学成分形成原因的分析	(37)

4.1.3	矿井水形成的水化学模拟·····	(38)
4.1.4	模拟结果分析与结论·····	(43)
4.2	孝妇河河水化学组分及其污染特征·····	(44)
4.3	萌山水库水质状况·····	(45)
4.4	工业排放废水·····	(46)
4.5	本章小结·····	(47)
5	裂隙水高浓度硫酸根、高硬度污染的形成机理研究·····	(48)
5.1	裂隙地下水的化学特征·····	(48)
5.1.1	地下水化学组分的空间变化·····	(48)
5.1.2	地下水化学组分的时间变化·····	(49)
5.1.3	水化学类型的变化·····	(50)
5.1.4	硬度·····	(50)
5.1.5	pH 值·····	(50)
5.1.6	裂隙水的化学性状分类·····	(51)
5.2	污染的孝妇河对其沿岸裂隙地下水化学环境的影响·····	(52)
5.3	地下水动力场的变化对裂隙地下水污染贡献的分析·····	(54)
5.3.1	研究区域裂隙地下水水位的变化·····	(55)
5.3.2	水动力场的变化对地下水污染贡献的分析·····	(56)
5.4	本章小结·····	(59)
6	灌溉污水入渗过程中的水-岩相互作用及其试验研究·····	(60)
6.1	第四系孔隙水的水化学特征·····	(61)
6.2	孔隙水污染原因分析·····	(62)
6.3	灌溉污水入渗过程中的水-岩相互作用·····	(65)
6.3.1	原状土柱动态实验模拟研究·····	(67)
6.3.2	灌溉水入渗过程中的水-岩相互作用及其特点·····	(69)
6.3.3	农业污水灌溉对区域孔隙地下水水质影响的分析·····	(76)
6.4	本章小结·····	(78)
7	采煤活动影响地下水污染的预防与治理·····	(79)
7.1	环境条件对流域地下水污染的控制作用及其应用·····	(79)
7.1.1	孝妇河流域地下水污染与环境条件之间的关系·····	(79)
7.1.2	环境条件对流域地下水污染的控制作用及应用·····	(80)
7.2	煤矿酸性矿井水的处理方法·····	(81)
7.2.1	石灰石中和法·····	(81)
7.2.2	石灰中和法·····	(95)
7.2.3	生物化学处理法·····	(98)
7.2.4	湿地生态工程处理法·····	(99)
8	结论与建议·····	(101)
	参考文献·····	(103)

1 采煤活动对地下水化学环境影响的研究现状及发展趋势

1.1 采煤活动对地下水化学环境影响研究的意义

水污染严重,水资源短缺,是当今全球水环境的热点问题,制约着经济的发展,影响着人们生活水平的改善。地下水环境是人类环境的一个重要组成部分,与人类生存密切相关。由于人类活动的长期影响,在全世界范围内,地下水环境均表现出不同的恶化趋势,即在人类活动的影响之下,地下水环境向着非良性的方向发展。

地下水还是一种资源,一种人类生命源泉的资源。随着人类生活质量的不断提高,对其所用的地下水水质的要求越来越高。与地表水相比较,地下水具有时空上分布均匀、稳定、水质优良、易于开采等优点,含水介质还对其具有保护与净化功能,因而世界上许多地方将其作为生活供水水源,如法国生活饮用水水源中约 50% 来自开采的地下水;我国北方许多城市的地下水开采也多属这一类,如沈阳的浑河水源、西安的东北郊和沣河水源、郑州的九五滩地和马滩水源、西宁的塔尔水源和西纳川水源等。正因如此,在人类活动异常活跃的今天,对地下水水质演化及地下水资源保护的研究越来越得到了人们更多的重视:1989 年在德国斯图加特大学召开的地下水污染国际会议,1991 年在我国南京大学召开的地下水流和污染模拟国际学术讨论会,1995 年 6 月 4~10 日在加拿大埃德蒙顿市召开的第二十六届国际水文地质学家协会大会,1996 年在我国首都(北京)召开的第三十届国际地质大会以及 1997 年 9 月 21~29 日在英国诺丁汉召开的第二十七届国际水文地质学家协会大会等,为谋求人类与地球和谐发展,都将地下水水质演化作为其主要的议题。

水,在全球形成一个完整的水圈。据目前估计,水的总储量为 $1.4 \times 10^9 \text{ km}^3$,其中海水约占 97%,淡水储量占水总储量的 2.5%,即 $3.5 \times 10^7 \text{ km}^3$ 。因地球上各地气候条件和地理状况不同,水资源在时间和空间上分布很不均匀。地球上人口数量不断增加,生活质量的不断改变,科技的进步推动工业不断发展,人类活动对水资源的需求量不断增加,世界上的水量为一个定数,然而人类活动却又造成了水环境污染,导致了可利用水资源量的不断减少,必将产生水资源危机,也正如有识之士的预言,继能源危机之后是水资源危机。

防止或减缓水资源危机的发生,可以采用多种方法或多种方法的联合使用。但有一点我们必须面对,地球上水资源总量是一定的,“在水量为自然条件所限定而难以扩大时,水质就成为寻求水资源的重要途径”。而这种通过改善水的质量来满足人类活动对水质和水量要求的途径,必须首先研究水的成分与其环境之间相互作用及其在环境中的运移规律。因而对地下水水质演化的研究具有重大的现实性和迫切性!

山东省淄博市工农业及生活用水基本上完全依赖于地下水。它是以煤炭、陶瓷等为其工业支柱,素有工矿城之称,其矿井排水量非常巨大,且多数排入孝妇河。随着改革开放政策的不断深入,其工农业迅速发展,加之人口的剧增,人类活动的范围和强度不断增加,致使该区地下水

质不断恶化(地下水污染),严重地影响当地人们的工农业生产和生活,甚至人们的健康,对该地区地下水污染的机理进行研究,以便选择科学手段对地下水污染进行修复及保护,已成为迫在眉睫的任务!

根据淄博市特殊的地质、水文地质条件和地貌特征,该地区可以划分为两个水文地质单元:孝妇河流域地下水系统和淄河流域地下水系统。其中,孝妇河流域地下水系统为本文的研究对象。多年的监测资料分析表明,该流域地下水已遭严重污染,其主要污染成分为 SO_4^{2-} ,硬度和总溶解性固体(TDS),其次为 Cl^- , NO_3^- 等。 SO_4^{2-} 和 TDS 是矿井排水的可靠指示组分。煤炭等工业活动中所排出的酸性矿井水(Acid mine drainage,简称为 AMD)对环境的影响,众多学者主要研究的是地表水环境,如 Sullivan 等研究受 AMD 影响下的地表水中的铁、铜、锌等组分的污染;总结 AMD 对日本河流等地表水的影响,很少有研究 AMD 对地下水的影响。众所周知,因人类活动的强度和广度的增大,酸雨的形成已成为公害,加之其它矿山的 AMD 及硫酸厂排出的废水,已构成对地下水威胁的潜在污染源,其特征污染指示因子为 SO_4^{2-} , TDS 和较低的 pH 值,可以直接或间接地进入含水层,导致地下水的污染,如洛阳市后李水源地等。故此,地下水的硫酸盐污染或潜在污染在我国乃至世界范围内都很普遍,故对此问题的研究具有普遍的意义。

1.2 采煤活动对地下水化学环境影响的研究现状及存在问题

地下水水质演化的研究是一个由来已久的课题。早期的环境水文地质工作一般把重点集中在自然作用下地下水化学成分的形成与演化。近些年来,由于人类活动导致地下水水质恶化(地下水污染)的问题日益严重,因此,人类活动影响地下水水质演化的研究越来越受到重视。通过前人的研究成果的总结,我们不难发现:

(1)地下水质的恶化(地下水污染),不能只看作是工农业和公共服务业的废物和药剂污染的结果,原因是多方面的,首先,自然地球化学作用就可以并且常常形成水质差的地下水。

(2)决定地下水质的自然地球化学作用和人为地球化学作用之间有着相当密切的联系。

以上两点事实意味着,要彻底了解地下水质的演化,必须了解地下水演化过程中的各种地球化学作用,而人类活动的水文地球化学是现今环境水文地质学刻不容缓的重要研究方向。

由于当时人类活动的特点和人类认识从简单到复杂的规律决定,早期的环境水文地质工作主要集中研究“点”污染源影响下的地下水环境的变化。然而,人类活动的种类繁多,加之活动范围扩大,那些“点”污染源对地下水化学的影响较难反映区域尺度上划分的不同地下水环境的演化。人类活动或其结果最终最直接作用对象就是土地,这就使得按土地利用形式对人类活动进行划分成为一种可能:按土地利用形式和研究目的可以分为农业土地类型、居民生活土地类型、工业土地类型和采矿活动土地类型等人类活动形式。这样便于总结不同人类活动与地下水之间的关系模式,建立地下水水质预测和管理模型,提高人类对未来地下水化学环境演化趋势的认识,为预防或治理地下水污染而制定相应的调整对策提出科学依据。

关于农业、居民生活和工业土地利用类型的人类活动对地下水化学的影响研究较多,而且较成熟,关于采矿活动对地下水化学环境的影响研究较少。

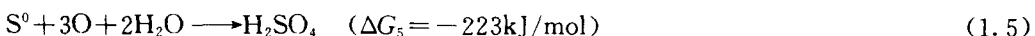
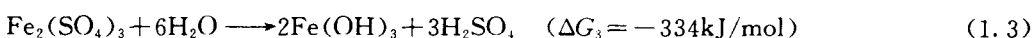
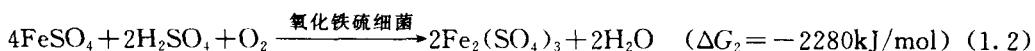
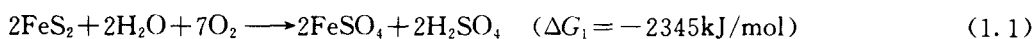
其实,关于煤矿开采活动对地下水环境的影响,已有 Stoner(1983),Lines(1985),Booth(1986),李宽良等(1987),韩宝平(1994),董兆祥等(1997),Zipper(1997)等许多学者对此进行

了研究。虽说他们也是进行“煤矿开采诱发的水文地质效应研究”,甚至有的学者还建立了采矿活动影响下水文地质概念模型,但多集中在煤矿开采活动对地下水水量、水位及其对当地生态环境影响的研究上,而对于煤矿开采活动对地下水水质影响的研究较少,显得相对薄弱。因而王锐(1993)强调,“必须重视矿区环境地质的调研”和“预测开采时矿井排水后,(采矿活动)对地下水资源可能造成的破坏程度和范围”。

煤矿开采活动对地下水化学环境的影响,首先表现在矿井排水的污染,这里所谓矿井排水是指在采煤过程中,所有渗入井下采掘空间的水,有时也称为矿井水。矿井排水本身的水质主要受当地水文地质、气候、地理等自然条件的影响,如我国各成煤地质年代中以石炭纪太原统煤系和晚二叠纪乐平统煤系的平均含硫量为最高,前者为3.5%,后者为4.43%,长江以南纪乐平统煤系分别占各省区全部含煤量的50%~90%,煤中含硫为2%~9%。硫的成分分析表明,硫铁矿占全硫的2/3,因此我国南方许多地方矿井水呈酸性。北方,一些开采海陆交互沉积或浅海相沉积的石炭纪太原统煤层的煤矿,因煤层含硫量高,其矿井水往往也呈酸性,如陕西、宁夏、内蒙古、山东等省(区)的部分矿井。众所周知,煤炭工业是我国的基础产业。在我国的一次性能源消耗中,煤炭约占70%,而且在今后相当长的时间内,这种局面不会有根本性改变。因此可以说,酸性矿井水在我国煤矿中的分布是相当广泛的,而且今后相当长的时间内还会存在。

根据所含污染物的特性,一般可将矿井水划分为:洁净矿井水、含悬浮物矿井水、高矿化度矿井水、酸性矿井水、碱性矿井水及含特殊污染物矿井水。矿井水中对环境危害大又最具普遍性的是酸性矿井排水。

AMD不仅与矿山排水有关,而且与任何硫化物矿的开采加工过程等都有关系。以黄铁矿为例,AMD形成的化学机理已基本清楚,当含硫煤与空气及水接触时,发生如下反应:



上述反应前后标准自由能的变化值都小于零,说明它们均是一种放热过程。因而,这些反应,在通常情况下是自发的,而且自发的程度还比较大。结果生成了硫酸,使得水环境的pH值降低。由于土壤、水体是细菌等微生物的大本营,它们也可能对酸性矿井水的形成有一定的影响,Singer等(1970)、张连瑞等(1992)研究证明确实如此,而且细菌在该过程中起重要的催化作用。表1.1是张连瑞等在我国煤矿现场实测的结果。结果表明,细菌多的测点,pH低、酸度

表 1.1 水源细菌多少对水质的影响

	多细菌水源			少细菌水源	
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5
pH	2.50	2.52	2.54	3.26	3.26
酸度(mg/L)	8575	8323	8272	1516	1482
Fe^{2+} (mg/L)	84	69	58	135	133
Fe^{3+} (mg/L)	1077	1042.1	1037.0	76	71
SO_4^{2-} (mg/L)	13 520	13 211	13 095	3732	3564

大,二价铁含量低,但三价铁含量高,说明细菌在酸性矿井水形成过程中确实起到催化的作用。

AMD 排放时,它们对环境的影响首先引起地表水的污染。故在研究其对环境的影响时,众多学者多集中在 AMD 对地表水影响的研究,如 Johnson 等(1987)和 Sullivan(1988)等研究受 AMD 影响下的地表水中的铁、铜、锌等组分的污染;Powell(1988)总结 AMD 对美国河流等地表水的影响时发现:受煤矿开采活动的影响,东部温带地区的河水的 SO_4^{2-} 、总铁、总锰和 pH 值超过了其各自相应的背景值,成为河流水质受煤矿开采活动影响的污染指示组分,如 Laurel Run 河水质与 Northern Missouri 和 Southern Iowa 地区地表水水质受煤矿矿井水的影响前后的比较见表 1.2 和表 1.3);而干旱的西部,蒸发作用强烈,地表水和潜层地下水含有大量的总溶解性固体(TDS),具有较高的背景值,加之水流梯度大,具有很强的稀释作用,以致于 AMD 对地表水质的影响很小。

表 1.2 美国 Maryland 地区 Laurel Run 河水质受煤矿矿井水的影响前后对比

采样地点	TDS(mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	总铁(mg/L)	总锰(mg/L)	总铝(mg/L)	pH 值
矿井水注入的上游	41	6.2	130	10	3.0	6.7
矿井水注入的下游	239	160	11 000	900	4900	3.3

表 1.3 南 Missouri 和北 Iowa 地区地表水水质受煤矿矿井水的影响前后对比

	矿井水注入的上游		矿井水注入的下游	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值
pH	6.4~8.8	7.7	3.4~8.6	7.4
硫(mg/L)	3~620	88	17~1800	269
总铁($\mu\text{g/L}$)	90~82 000	1550	20~6900	2300
总锰($\mu\text{g/L}$)	50~8500	700	70~2500	1100

我国有着丰富的煤炭资源,在其开采过程和储存中,产生了大量的矿井水,根据 1986 年的不完全统计,全国煤矿年排矿井水约为 $22 \times 10^8 \text{m}^3$,其中不少为酸性矿井水。这些矿井水因受采煤等影响,含有悬浮物等污染物(表 1.4),如山西省许多矿区的矿井水的水质极差,不仅硬

表 1.4 我国部分酸性矿井水的水质特征

矿号	1	2	3	4	5	6	7	8
pH	3.7	4.9	4.4	3.2	2.7	4.0	2.5	2.4
浊度(mg/L)	30.5	65.0	45.0	80.0	55.0	100.0	300.0	480.0
酸度(mg/L)	75.1	3.71	44.7	14.8	41.2			78
COD(mg/L)	35.0	43.0	38.7	54.0	60.8	91.0	87.0	92.7
SS(mg/L)	153.0	168.9	118.3	127.9	124.5	131.9	142.5	139.5
DO(mg/L)	2.1	1.8	1.7	3.1	2.3	1.9	2.0	3.1
Cl^- (mg/L)	98.3	73.0	26.7	27.2	88.0	19.0	60.0	0
SO_4^{2-} (mg/L)	8800.0	3700.0	780.0	3706.0	3467.0	2000.0	570.0	2600.0
Mn^{2+} (mg/L)	16.9	12.4	18.4	9.9	18.8			2.9
$\sum \text{Fe}$ (mg/L)	>10.0	>10.0	508.0	416.0	>100.0	174.0	2.9	2199.0
Ca^{2+} (mg/L)	158.0	150.0	37.0	123.0	46.0	20.5	380.0	582.0
Mg^{2+} (mg/L)	>200.0	13.0	77.0	78.0	103.0	60.8	158.0	64.0
Pb^{2+} (mg/L)	0.5	0.8	101.0	0.05	0.1	0.3	0.1	1.1
Al^{3+} (mg/L)	5.3	1.8	3.1	4.5	1.0		1.8	1.5
K^+ (mg/L)	4.6	7.8	9.2	3.7	10.5	13.4	10.2	13.2

度和 TDS 高,而且还含有毒元素,如晋城古书院、凤凰山矿,阳泉南小矿和太原山德胜矿的砷含量超过国家饮用水标准的 2~8 倍;大同白洞、王树村、汾西柳湾、南关矿,霍县南下庄、辛置矿和晋城古书院、凤凰山、五台铺等矿的汞超标;大同新白洞矿,晋城凤凰山矿、太原山德胜、马兰八一矿的六价铬达标或超标几倍至数百倍;太原山德胜、马兰八一等矿的铜、锌、硒、锰、铁等均超标。这些矿井水一般不经过处理直接排入河道,导致地表水体等周边环境遭受严重污染,如在韩城随处可见乌黑的臭水坑,在湖南恩口矿区昔日甘甜可口小碧河河水今逐变苦涩,其指示因子为 SO_4^{2-} 和 TDS 等等。

关于 AMD 对地下水水质环境的影响研究较少,如 Gray(1996)研究了爱尔兰某矿井排水对区域地下水化学环境的影响,湖南煤田地质勘探公司(1990)开展了恩口煤矿 AMD 对地下水环境的影响等等,都集中在对地下水环境的评价上,很少就 AMD 对地下水环境影响的机理进行研究。在矿井排水的同时,也导致地下含水层疏干,含水空间的物质成分发生变化,也可使地下水污染。另外,利用矿井排水进行灌溉,引起地下水污染。关于后两者的机理的研究几乎没有。

就研究区而言,水文地质研究始于 1955 年,在 20 世纪 80 年代以前,主要集中在水文地质基础工作。80 年代后,开始注意到人类活动对地下水质的影响,在“七五”和“八五”期间开展了一系列地下水水质演化的研究工作,积累了许多资料,多集中在水质监测和环境评价上,发现孝妇河流域地下水已严重污染,可是对于该流域中还有许多问题缺乏明确的认识:

- (1)煤矿开采活动对区域地下水化学环境有无影响?其影响方式又如何呢?
- (2)孝妇河对该流域地下水污染的贡献有多大?
- (3)污染组分到底有哪些?
- (4)污染程度如何?
- (5)采煤活动土地使用形式对地下水质的影响怎样?
- (6)污染物在入渗过程中发生哪些物理化学变化?特点如何?
- (7)水动力场的变化在区域地下水污染中扮演何种角色?
- (8)如何防止采煤活动对地下水化学环境的影响及实现矿井水的资源化?

1.3 研究技术思路

以山东淄博煤矿区为例,研究煤矿开采活动对地下水化学环境的影响及污染防治措施。基于煤矿集中分布的孝妇河流域的环境水文地质问题,结合当前环境水文地质研究特点和发展方向,紧紧抓住“矿井水污染组分的产生、径流”进行追踪,收集资料,分析资料,弄清水文、地质、水文地质等区域环境条件及背景概况,查明煤矿开采活动影响下的地下水污染的主要组分及其时空变化规律和地下水污染特征;分析各种可能的污染源的特征及其对地下水影响的可能途径和相应的污染特点,研判流域地下水污染的原因及主要途径,利用传统的水文地球化学方法和可靠的原状土柱模拟试验研究技术相结合的手段,揭示污染组分在地下水环境中的迁移和转化机理,给出煤矿开采活动引起本流域地下水污染的预防方案及治理措施,为防止其他煤矿开采活动引起地下水污染及实现矿井水的资源化等给予一定的指导。

2 研究区域自然环境概况

2.1 自然地理环境条件

研究区为淄博盆地的一部分(图 2.1)。淄博盆地内的地形是南高北低,东、南、西三面环山,中间低平,向北开阔,呈向北倾伏的箕状。该箕状盆地中间发育着相对较低次一级的低山,形成了不对称的“W”地形。这相对较低次一级的低山,将该盆地分成了两个相对独立的地表水流域:淄河流域和孝妇河流域。本次主要的研究区域为孝妇河流域,其面积约为 120km²。

孝妇河流域南部山地最高山峰海拔 1108.30m(鲁山),北部平原最低海拔约 9m,是一个山地、丘陵、平原等各类地貌景观发育齐全的地区。地貌按其成因可以划分为:构造侵蚀地形、构造剥蚀地形和堆积地形(图 2.2)。构造侵蚀地形主要分布于该研究区的西南部的禹王山、鲁山处,一般海拔高度在 500~1000m 之间;构造剥蚀地形分布在周村,张店以南盆地内的低山带,海拔高度一般在 100~500m 之间;堆积地形分布于低山丘陵前沿及其以北广大地区。

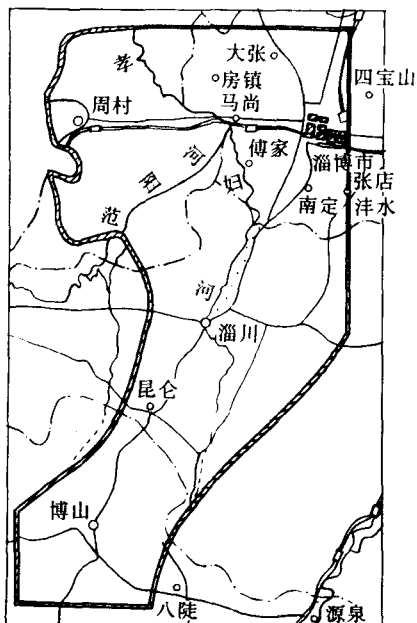


图 2.1 研究区地理位置

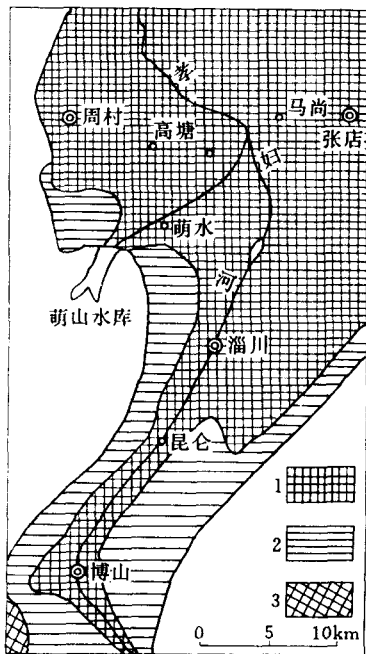


图 2.2 孝妇河流域地貌图

(1 构造侵蚀地形;2 构造剥蚀地形;3 堆积地形)

研究区处于暖湿带大陆型季风气候区。四季分明,冬春寒冷干燥,夏季炎热多雨。多年平均气温为 12.6~13.1℃。年内霜冻期在 120d 左右,冻土层厚度<0.5m。主导风向为 SSW,多年平均降水量为 630.30mm,降水多集中在 6~9 月,年最大降水量为 1454.10mm(1964 年),

年最小降水量为 250.40mm(1989 年)。多年平均蒸发量约为 2008mm。

区内主要河流为孝妇河及其支流范阳河。孝妇河发源于博山南岭,自南向北流经博山、淄川、张店和周村四区,向西北经流而出研究区,最终注入小清河。该河全长 135km,其多年平均径流量 $1.0681 \times 10^8 \text{m}^3$ 。马尚水文监测站的监测资料表明,贾村水库以下孝妇河段已基本干涸,仅在丰水期才有水。

范阳河发源于研究区外而经流注入萌山水库,于河崖头注入孝妇河。由于萌山水库的截流作用,致使该河流成为季节性的河流。

区内另一重要的地表水体是萌山水库。为缓解周村区农业用水的紧张状况,于 1958 年 12 月动工兴建,1966 年 7 月正式竣工。控制流域面积为 288km^2 ,其死库容为 $4.27 \times 10^6 \text{m}^3$ 。设计灌溉面积为 9.68 万亩^①。为扩大其水源,1968 年 11 月至 1970 年 5 月,修建了“引孝(妇河)济范(阳河)水渠”,其首部位位于昆仑镇回村东侧的孝妇河西侧,水渠流经昆仑、二里、黄家铺和萌水四乡镇,于萌水镇张庄村的南部注入萌山水库,全长 17.2km。自 1970 年汛期开始引水,成为萌山水库的重要水源,近期以来,孝妇河水质不断变差,致使萌山水库水质也较差,于 1993 年春停止使用该引水工程,萌山水库水质趋于好转。

2.2 区域地质环境特征

2.2.1 地层

研究区地层上属于华北型,基底是前震旦系古老变质岩,盖层有寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、第三系和第四系(图 2.3)。现由老到新分述如下:

2.2.1.1 太古界

前震旦系泰山群(Art):主要分布于博山城的南部山区。岩性主要为黑云母角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩等,厚度 $>3000 \text{m}$ 。

2.2.1.2 下古生界

(1)寒武系(E):主要分布于博山城的西南部山区,其岩性主要为一套浅海相页岩及碳酸岩地层,总厚度 736m,可分为上、中、下三个统。下统(E_1)以白云质灰岩和页岩为主;中统(E_2)以页岩、领状灰岩夹黄绿色页岩为主;上统(E_3)则以黄绿色页岩、竹叶状灰岩、泥质条带状灰岩为主。各层之间或与奥陶系之间呈整合的接触关系。

(2)奥陶系(O):为一套海相碳酸岩地层,总厚度约为 800m,出露于本区奥陶系,主要为中统马家沟组(O_2),它主要出露于南部的中低山丘

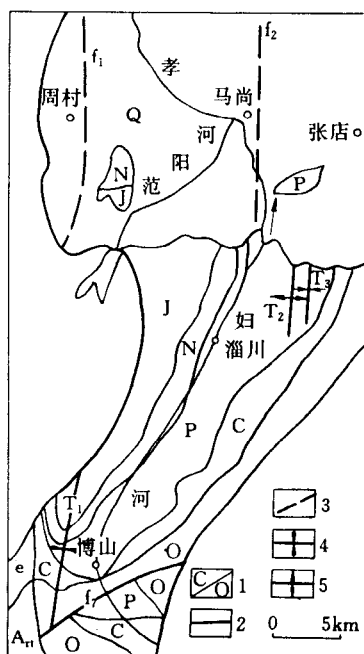


图 2.3 研究区地质图

(1 地层界限;2 断层;3 推测断层;

4 向斜;5 背斜)

① 1 亩 = 666.6m²,下同。

陵区,地层总厚度大致为 729m。按岩性自上而下可以分为六个岩性段($O_2^1 \sim O_2^6$),其中 O_2^1, O_2^3 和 O_2^5 段为泥质灰岩和泥灰质角砾岩,厚度较小; O_2^2, O_2^4 和 O_2^6 三段为中厚度层状质纯石灰岩,厚度大,与石炭系呈假整合接触关系。

2.2.1.3 上古生界

(1)石炭系(C):为海陆交互相沉积层,主要岩性为砂岩、页岩、煤层和薄层石灰岩,间夹 4~10 个可开采煤层,地层总厚度约为 120m,主要出露于淄博向斜轴部及山前地带,与二叠系地层呈假整合关系。

(2)二叠系(P):为一套陆相碎屑岩类所组成,地层总厚度约 590m,分为下统(P_1)和上统(P_2)。下统(P_1)主要有淄川组(P_1^Z)和黑山组(P_1^H),上统主要有万山组(P_2^W)、奎山组(P_2^K)、孝妇河组(P_2^X)和石千峰组(P_2^{Sh})。岩性主要为泥质砂岩、砂质页岩及铝土质粘土岩,主要分布在石炭坞、黑山、安上村、西域城南等地,与三叠系呈假整合接触关系。

(3)三叠系(N):地层在该区域内仅有凤凰山组(N^F),厚度约 160m,主要出露于孝妇河以西的昆仑至二里南一线及西谭附近,呈窄条带状展布,上部为红色砂质页岩,含砾砂岩;下部为暗紫红色砂质页岩及稀砂岩,与侏罗系呈不整合接触关系。

2.2.1.4 中生界侏罗系

侏罗系(J):地层总厚度约 770m,主要出露于淄博向斜轴部两侧,底部为坊子组(J_1^F),含可开采煤层 1~3 层,下部有一层厚 2~3m 的紫红色砾岩与凤凰山组分界;中部为昆仑组(J_2^K),由紫红色砂质、砂页岩组成;上部为三台组(J_3^S),以灰色中粗粒石英砂岩为主,与第三系呈角度不整合接触关系。

2.2.1.5 新生界

(1)第三系(R):主要为玄武岩、粘土岩和砾岩,不整合与侏罗系组或其它老地层之上。据钻探揭露,呈深绿色或灰绿色,坚硬,具有杏仁状气孔构造,内充填方解石和绿泥石。厚度为 70~150m,主要出露面积不大,仅在周村南部黑山脚下有点露头,多隐伏于第四系地层之下。

(2)第四系(Q):广泛分布于北部山前倾斜平原及山地之间谷地,孝妇河河谷地带,地层厚度自南部几米向北逐渐增加,在马尚一带厚 30 多 m。自南向北沉积物颗粒由粗逐渐变细,局部形成粘土夹砾石的透镜体。主要岩性为砂质粘土,粘质砂土,夹数层中粗、含砾中粗砂和中细砂,其中砾石成分主要为灰岩,少量的砂岩,同时在该地层中还含有姜石富集的姜石层。

2.2.2 构造

淄博向斜盆地位于山东马蹄形旋转构造体系的外环东北边缘。该盆地受多期地质作用的影响,形成了区内褶皱、断层等构造。区内断层相对较发育,褶皱则较差。主要的褶皱除淄博向斜(T_1)以外,还有西河向斜(T_2)、洪山向斜(T_3)、洪山背斜(T_4)等;主要的断层有:禹王山断层(F_1)、王母山断层(F_2)、西河断层(F_3)等(图 2.3)。

2.2.2.1 褶皱

(1)淄博向斜(T_1):轴部位于禹城至张家庄一线,走向 $NE5^\circ \sim 8^\circ$,全长 50km,轴部出露侏罗系地层,向斜南端翘起,向北倾伏;东翼开阔,岩层走向 $NE40^\circ \sim 50^\circ$,倾角 $5^\circ \sim 20^\circ$,倾向 NW;西翼断层窄陡,地层走向近 SN,倾向 E,倾角 $15^\circ \sim 25^\circ$,为一不对称的向斜构造。

(2)洪山向斜(T_3)与背斜(T_4):位于洪山镇东北部,轴向 $NE20^\circ$,长度均为 3.5km 左右。向斜在 E,背斜在 W,二者相距约 1.3km,其间发育有断裂。向斜轴部出现二叠系上统,背斜轴部

出露二叠系下统。

2.2.2.2 断层

(1)王母山断层(F_2):走向近 SN,倾向 W,倾角约 75° ,南起西周庄,经过杨寨、付家至马尚,全长约 1.5km。上盘为侏罗系和二叠系上统,下盘为石炭系和二叠系下统,断距 60~600m,且南小北大。

(2)西河断层(F_3):该断层走向 $NE40^\circ\sim 60^\circ$,倾向 SE,倾角 $60^\circ\sim 70^\circ$,西南端起于梯子山,与禹王山断层相接,向北经神头、西河,出研究区域,全长约 27km,除局部被第四系覆盖外,大部分出露较好。

2.3 矿井水水源及其补充方式

淄博以矿产资源丰富而全国闻名,其中以煤炭为最,而淄博煤矿开采活动主要集中于孝妇河流域。为研究采煤活动对地下水化学环境的影响及污染防治技术,有必要研究区域煤矿分布及其开采现状,矿井水水源及其补充方式。

2.3.1 煤矿分布与开采现状

2.3.1.1 淄博煤田

该煤田位于淄博盆地西部,属于华北型石炭—二叠纪煤田,分布于淄博向斜内,含煤层面积 418km^2 。煤层赋存于石炭—二叠系中,自下而上总共有 10 层。二叠系淄川组赋存 1~3 号煤层,均属薄煤层,局部最大厚度为 2.31m。石炭系太原组赋存 4~10 号煤层,其中 4,7,9 和 10 层煤为主采煤层。

向斜东翼开采煤矿有夏庄、西河、龙泉、石谷、北大井、洪山、寨里、双沟、南定矿,西翼开采煤矿有岭子矿等,上述煤矿均属淄博矿务局下属的中型矿井。东、西两翼地方煤矿及乡镇小煤矿有 100 多处。淄博矿务局下属 10 大矿井年总产量为 $5.56\times 10^7\text{t}$,矿井开采水平一般为 -300m,最深开采水平达 -550m。各矿井分布和开采现状,详见表 2.1。

表 2.1 淄博煤田统配煤矿开采现状统计表

矿井名称	井田范围		产 量 ($\times 10^6$ t/a)	最深 水平 (m)	采空厚度(m)及采空面积(km ²)											
	面积 (km ²)	井田边界			1,2 层		3,4 层		5,6 层		7 层		9 层		10 层	
					采厚	采面	采厚	采面	采厚	采面	采厚	采面	采厚	采面	采厚	采面
夏庄煤矿	26.0	东西部以断层为界、 南北以煤层为界	5.0	—430	未采空	未采空	未采空	未采空	未采空	未采空	1.0	46	0.8	1.4	1.5	8.8
西河煤矿	26.5	南西、北东以断层为界,东部以煤层为界,西部人为边界	6.5	—310	未采空	未采空	0.7	2.2	未采空	未采空	1.0	38	0.9	3.2	1.2	5.8
龙泉煤矿	14.3	北东、南东为断层边界,西部人为边界,东部煤层露头为边界	5.5	—140	未采空	未采空	未采空	未采空	未采空	未采空	0.9	4.36	0.8	7.4	0.85	3.9
石谷煤矿	13.26	东南为断层边界,其它为人为边界(与北大井、龙泉分界)	3.0	—430	0.7	4.1	0.65	1.48	未采空	未采空	0.81	1.13	0.8	1.8	未采空	未采空

续表 2.1

矿井名称	井田范围 面积 (km ²) 井田边界	产 量 ($\times 10^5$ t/a)	最深 水平 (m)	采空厚度(m)及采空面积(km ²)											
				1,2 层		3,4 层		5,6 层		7 层		9 层		10 层	
				采厚	采面	采厚	采面	采厚	采面	采厚	采面	采厚	采面	采厚	采面
北大煤矿	东北、西南以断层为界,西部人为边界,东部煤层出露边界	6.5	-350	未采空	未采空	未采空	未采空	未采空	未采空	未采空	未采空	0.8	6.0	0.8	1.8
寨里煤矿	北西、北东以断层为界,北部人为边界,东南煤层出露边界	6.5	-300	基建矿	基建矿	基建矿	基建矿	基建矿	基建矿	基建矿	基建矿	0.8	2.0	0.8	1.6
洪山煤矿	北、西、南部以断层为界,东部煤层边界	5.0	-380	0.8	3.8	0.7	5.7	0.7	0.67	1.0	3.1	未采空	未采空	1.0	3.0
双沟煤矿	北、西、东以断层为界,南部以煤层为界	2.1	-256	未采空	未采空	0.65	1.9	0.7	0.65	未采空	未采空	1.2	0.2	0.28	0.82
南定煤矿	南、东、西以断层为界,北部人为边界	4.5	-300	基建矿	基建矿	基建矿	基建矿	基建矿	基建矿	基建矿	基建矿	基建矿	基建矿	基建矿	基建矿
岭子煤矿	东以断层为界,南部以煤层为界,北、西部人为边界	8.0	-550	未采空	未采空	0.8	3.15	未采空	未采空	0.8	3.6	1.7	2.2	未采空	未采空

2.3.1.2 地方煤矿

淄博煤田内,地方(县或区、镇、村)现开采煤矿及小煤井 120 余个,总生产能力 >200 万 t/a,主要分布于淄博向斜的浅埋煤层区。据统计,规模较大并且资料较全的矿井 20 处,这些矿井主要分布在博山、淄川和张店区,部分详细资料见表 2.2。

表 2.2 孝妇河流域地方煤矿分布及开采现状统计

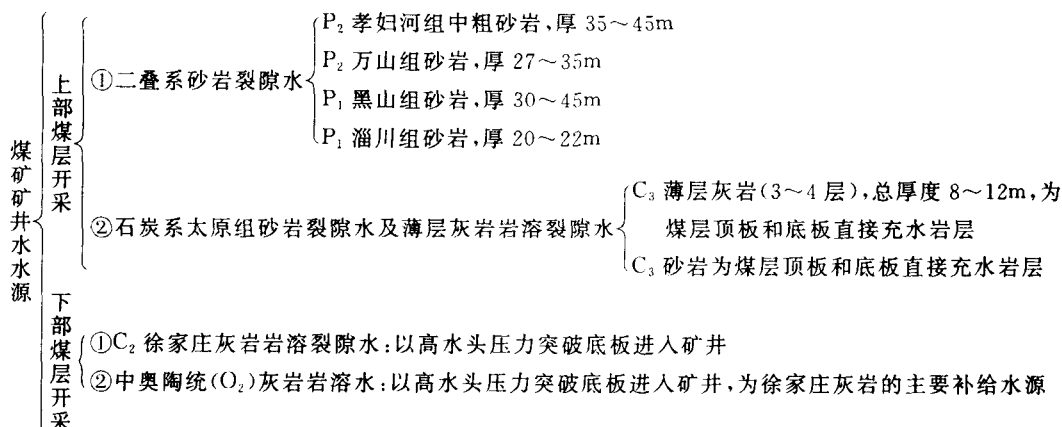
行政区名称	矿山名称	年产量(t)	主要煤层(层)	采深(m)	排水量(m ³ /a)	服务时间(a)
博山区	八陡矿区	17 万	3~10	+140	12 960	10
	域城矿区	3 万	10	+42	1200	6
	大峪口矿区	3 万	10	+120	2592	15
淄川区	西河矿区		7~10	+130	2880	10
	龙泉矿区		7,9,10	+5	3360	20
	昆仑矿区		2,3,4,9	0	1440	20
	寨里矿区		4,5,8,9	0	3120	10
张店区	马尚矿区	5 万	9		4800	
	仇家矿区	2 万	2~10		4000	
	张店矿区	15 万	9		2000	

2.3.2 煤矿矿井水水源及矿井水动态

2.3.2.1 矿井水水源

煤田矿井开采多年的实践表明,开采石炭二叠系上部煤层(1~8 层)时,矿井水的主要水源为石炭一二叠系砂岩裂隙水和石炭系上统(太原组)薄层灰岩岩溶裂隙水;开采下部煤层(9~10 层)时,矿井水的主要水源为石炭系中统徐家庄灰岩岩溶裂隙水及奥陶系灰岩(简称奥

灰)岩溶水,并以突水方式进入矿井。淄博煤田矿井水水源如下:



2.3.2.2 矿井水补充的方式

矿井水补充方式有三种:第一种方式,矿层顶、底板(围岩)充水岩层通过采矿活动,开凿井筒、巷道或露天采场直接揭露含水层,造成矿井涌水;第二种方式,通过采空区冒落带及导水裂隙带,使间接顶板进入矿井内;第三种方式,在采矿裂隙诱导下,底板高压水头突破隔水底板进入矿井内,造成底板突水。第一和第二种方式形成矿井水正常涌水量,第三种方式形成矿井瞬时最大涌水量。

淄博煤田开采实践表明,矿井水水源及涌水方式有下列四种:

(1)开采石炭系上统(太原组)底部 10 层煤(局部 9 层)时,底部徐家庄灰岩及中奥陶统灰岩承压水沿导水构造裂隙及采动裂隙,以底鼓形式涌入矿井。特别是奥陶系灰岩水沿导水断层涌入矿井时,将严重威胁矿井安全,煤矿对其作为一种水害采取各种措施加以治理,如对已经发生底板奥陶系灰岩突水点,采用注浆堵水措施坚决堵住,不令其涌入矿井。对断层处预先探明其导水、储水性质,留设防水煤柱。对于水头压力高、隔水层薄、突水系数大的区段,采取对底板进行注浆加固和改变采煤方法来减少采矿对底板的影响深度等措施,防止其涌入矿井。

(2)石炭二叠煤系的薄层灰岩及砂岩裂隙水是矿井涌水的主要水源,是通过巷道直接揭露而涌入矿井的。矿井正常涌水量主要是该含水层组的水。

(3)煤系地层之上二叠系砂岩裂隙水(如黑山、万山、奎山、孝妇河组砂岩水),通过井筒揭露及最上一层煤的采动,沿顶板导水裂隙涌入矿井,这部分水是矿井正常涌水量的另一个重要水源。

(4)地表水及大气降水,通过大矿和小矿浅部采空区,在雨季涌入矿井,这是浅部矿井涌水量随季节性变化的一个重要原因。

2.3.2.3 矿井水动态特点

分布于淄博向斜东部及南部的洪山矿、夏庄矿,矿井水水量随季节降水量变化而变化,如夏庄煤矿矿井水最小值出现在 5~6 月份,最大值出现在 8~9 月份,最大水量出现在降水后的 10~15d。只要是因为向斜盆地裸露的灰岩及煤系地层露头接受降水补给后,数日后才传输到向斜浅埋区,形成矿井水量的增加。