

国家自然科学基金项目 (40373044,21146005) 资助
江苏高校优势学科建设工程资助项目

四氯化碳 在复杂岩溶含水系统中的 运移规律研究

韩宝平 朱雪强 袁涛 裴宗平 刘喜坤 梁峙 著

非外借

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金项目 (40373044,21146005) 资助
江苏高校优势学科建设工程资助项目

四氯化碳 在复杂岩溶含水系统中的 运移规律研究

韩宝平 朱雪强 袁涛 裴宗平 刘喜坤 梁峙 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

内 容 提 要

四氯化碳是一种具有“三致”作用的有机污染物,本书作者是国内首先开展岩溶地下水中四氯化碳运移规律研究的团队。依托两项国家自然科学基金和多项省市治理项目的资助,自2000年以来,对国内发现的第一个大型四氯化碳污染场地进行了系统全面的研究,其成果在国内外有重要影响,多次受邀在国际和国内重要学术会议上做报告,并获得2012年江苏省科学技术奖。本书全面总结了团队16年的系统研究成果,对国内外类似污染场地治理与修复有重要的参考价值。本书内容包括序言(介绍国内外研究进展)、污染场地背景概况、复合含水介质研究、四氯化碳污染羽时空演化特征、四氯化碳在松散层中的迁移与转化、四氯化碳在岩溶水中的迁移、四氯化碳迁移的数值模拟、四氯化碳生物降解研究、零价铁还原降解四氯化碳的实验研究、四氯化碳污染场地治理与修复等,含相关照片彩页12页。

本书适合环境科技工作者、高校教师、环境专业本科生、研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

四氯化碳在复杂岩溶含水系统中的运移规律研究
/韩宝平等著. —徐州:中国矿业大学出版社,2016.12
ISBN 978-7-5646-3414-8

I. ①四… II. ①韩… III. ①四氯化碳—研究 IV.
①O623.21

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第317845号

书 名 四氯化碳在复杂岩溶含水系统中的运移规律研究
著 者 韩宝平 朱雪强 袁 涛 裴宗平 刘喜坤 梁 峙
责任编辑 潘俊成
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 14.75 插页 16 字数 390 千字
版次印次 2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷
定 价 56.00 元
(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前言

近些年来,土壤和地下水有机污染问题已成为国际学术界关注的热点问题,相关研究成果也很丰硕,但四氯化碳污染方面的研究主要集中在土壤和松散含水层中,徐州市七里沟水源地四氯化碳污染是国内外报道岩溶水四氯化碳污染的第一例。我和我的研究团队开展了系统研究,对七里沟四氯化碳污染区已进行了连续监测研究 16 年,使之成为国际上对一个污染场地连续监测研究最长的场地之一,多次受邀在国际相关学术会议上做报告,并受邀与 Margarita Stoytcheva 教授等人联合出版了 *Pesticides in the Modern World—Risks and Benefits* (InTech, 2011) 一书。

作为第一个大型岩溶水四氯化碳污染场地,有必要在此回顾一下其研究历程:由于发展阶段和技术进步的时代关系,在 2000 年之前,四氯化碳在水质监测中不是必须连续检测的指标。2000 年 10 月,徐州市自来水公司购进一台美国产气相色谱仪,11 月对自来水公司的水井进行水质测试时,发现位于七里沟盆地的 3 口井水中四氯化碳超标,引起了市自来水公司和环保局的高度重视。我参加了污染源的调查工作,并提供了水文地质图件,在随后 2001 年的应急处理中,我作为技术专家组组长参与了处理方案的论证和实施,市政府拨专款进行了紧急抽出处理。我当时在中国矿业大学环境与测绘学院工作,为了掌握矿业大学文昌校区内 5 口岩溶水自备井的水质资料,经争取中国矿业大学设立了一个 6 万元的水质监测基金,利用此基金我的团队开始了系统研究工作。2004 年和 2012 年两次获得国家自然科学基金资助,据此开展了国际合作研究,聘请了 PRB 技术专利发明者、加拿大滑铁卢大学的 R. W. Gillham 教授、美国新泽西理工学院的 J. N. Meegoda 教授、法国阿尔比矿业学院的 A. Nzihou 教授等多名国际知名学者作为合作者。在研究的过程中,市政府给予了很大支持,多年设立专项基金用于治理七里沟四氯化碳污染。本项工作还得到了江苏省水利厅的大力支持,2010 年“七里沟岩溶水源地四氯化碳污染修复技术”获得江苏省水利厅资助,其成果获得 2011 年江苏省水利厅“科技优秀成果二等奖”。依托上述各方支持,我们团队连续 16 年对七里沟水源地水质变化进行监测,每年丰水和枯水季节各统测一次水位、水质(40~60 口井),典型井每周测一次(大约 15 口井),2001~2004 年雨季,对于几口污染重的井暴雨

后则每天测一次水位、水质。依托各类项目培养了多名博士和硕士研究生,共发表中、英文论文 20 余篇,综合成果 2012 年获得“江苏省科学技术三等奖”。

本专著是我们研究团队多年研究的系统总结,是相关项目研究报告和我指导的博士学位论文的集成,撰写分工如下:总体思路与章节框架、前言由韩宝平完成;绪论由朱雪强、韩宝平完成;第二章由韩宝平、朱雪强、裴宗平完成;第三章由朱雪强、韩宝平、刘喜坤完成;第四章由裴宗平、袁涛完成;第五章由袁涛完成;第六章由梁峙完成;第七章由朱雪强完成;第八章由刘喜坤、朱雪强完成;结论和建议由朱雪强、韩宝平完成;附图除两张外均由韩宝平拍摄。书稿由朱雪强初步编辑统稿,最终由韩宝平统稿完成。

韩 宝 平

2016 年 11 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 研究背景与意义	1
第二节 国内外研究现状	2
第三节 七里沟岩溶水源地四氯化碳污染概况	4
第四节 研究内容	5
第二章 含水介质特征研究	6
第一节 自然地理与地形地貌	6
第二节 含水岩组及其富水性	6
第三节 岩溶发育的总体特征	8
第四节 岩溶主导运移路径研究	13
第五节 本章小结	16
第三章 岩溶水中四氯化碳时空演化特征	18
第一节 七里沟污染区四氯化碳污染特征	18
第二节 四氯化碳污染影响因素分析	41
第三节 四氯化碳在岩溶含水层中运移的模式	53
第四节 本章小结	54
第四章 松散层中四氯化碳污染特征研究	55
第一节 现场钻探及土样采集	55
第二节 污染源区松散层中四氯化碳污染特征	56
第三节 四氯化碳在松散层中垂向迁移实验模拟研究	62
第四节 松散层中四氯化碳的淋溶试验	70
第五节 四氯化碳在松散层中垂向迁移的数值模拟研究	76
第六节 本章小结	80
第五章 基于双重介质理论的岩溶含水层中四氯化碳运移规律研究	82
第一节 地下水运动和污染物运移数值模拟	82
第二节 双重介质理论及数学模型	83
第三节 双重介质的程序模块的创建	87
第四节 研究区水文地质概念模型	88

第五节	模型的识别与检验	96
第六节	四氯化碳运移的数学模拟	102
第七节	溶质运移模型的识别与检验	104
第八节	本章小结	112
第六章	七里沟水源地四氯化碳生物降解研究	113
第一节	四氯化碳降解菌种的分离、筛选和鉴定	113
第二节	白腐真菌培养条件及生长特性研究	118
第三节	白腐真菌对四氯化碳的生物降解特性研究	128
第四节	白腐真菌生长代谢及降解动力学模型研究	135
第五节	静态条件下污染土壤环境中白腐真菌对四氯化碳的降解特征 模拟研究	144
第六节	动态条件下污染土壤环境中白腐真菌对四氯化碳的降解特征 模拟研究	152
第七节	本章小结	158
第七章	零价铁还原降解四氯化碳的实验研究	159
第一节	零价铁去除氯代烃类的作用机理	159
第二节	零价铁降解四氯化碳的影响因素研究	161
第三节	双金属强化零价铁降解四氯化碳的研究	179
第四节	本章小结	186
第八章	七里沟水源地四氯化碳污染修复工程实践	187
第一节	四氯化碳污染场地综合修复技术体系	187
第二节	四氯化碳污染曝气—吹脱—回用示范工程实践	188
第三节	示范工程运行效果分析	190
第四节	本章小结	198
第九章	结论与建议	199
第一节	结论	199
第二节	建议	202
参考文献		204

第一章 绪 论

第一节 研究背景与意义

地下水作为全球水资源的重要组成部分,是供水水源、生态系统的重要支撑和维持水系统良性循环的重要保障,全世界超过 15 亿人主要以地下水作为饮用水^[1],地下水提供了 25%~40% 的饮用水^[2]。地下水对于我国国民经济和社会发展、安全供水保障更是具有十分重要的作用,2014 年全国地下水供水量 1 117 亿 m^3 ,约占总供水量(6 095 亿 m^3)的 18.3%,其中北方省份地下水供水量占有相当大的比例,河北、河南、北京、山西和内蒙古 5 个省(自治区、直辖市)地下水供水量约占总供水量一半以上^[3]。地下水是我国经济和社会发展以及人民生活所必需的、不可替代的重要资源。但是随着社会经济的快速发展,近些年来,我国地下水质量呈现恶化趋势。对京津冀、长江三角洲、珠江三角洲、淮河流域平原区等地区地下水中有有机污染调查表明,主要城市及近郊地区地下水中普遍检测出有毒微量有机污染指标,其中氯代烃类是检出率较高的有机污染物,在华北平原^[4]、珠江三角洲^[5]、长江三角洲^[6]等地区地下水中均检出三氯乙烯(TCE)、四氯化碳(CCl_4 ,CT)、三氯甲烷(氯仿,CF)等。国外亦是如此,美国地质调查局对美国 5 000 多口井在 1985~2002 年间的 55 种挥发性有机化合物的连续监测调查表明,在浓度超过 0.20 $\mu\text{g/L}$ 的污染物检出率排名中,氯仿、四氯乙烯、三氯乙烯、1,1,1-三氯乙烷、四氯化碳分别占据第 1、3、4、5 和 28 位;在浓度超过污染物最大限制浓度(MCLs)的 24 种挥发性有机物(VOCs)的检出率排名中,PCE、TCE、1,1-二氯乙烯、顺式 1,2-二氯乙烯和氯乙烯分别占据第 1、2、7、8 和 10 位^[7]。在美国 1 689 个国家优先控制名录(NPL)中的 1 022/924 个场地检测出 TCE/PCE^[8]。

氯代烃类作为最常见的土壤—地下水污染物和可疑致癌物,被美国环境保护署(EPA)列入“129 种优先控制污染物”名单^[9]和我国“69 种水中优先控制污染物”黑名单^[10]。氯代烃类如四氯乙烯(PCE)、TCE、 CCl_4 、1,1,1-三氯乙烷(1,1,1-TCA)、CF 等作为清洗剂、脱脂剂等而被广泛使用。它们是重质非水相液体(DNAPLs),在地下环境中可以多种状态存在,如溶解相(溶解于地下水或土壤水)、蒸气相(土壤气体)、吸附相(吸附于地层介质上)和 DNAPL 相等。国内外研究表明,氯代烃类一旦扩散至地下环境介质中就很难监测和消除,因此土壤和地下水氯代烃污染及其修复问题近些年来受到了国内外学术界的广泛关注。表 1-1 为氯代有机溶剂的物理化学特性^[11]。

表 1-1 常见氯代有机溶剂的物理化学特性

物种		分子式	分子量 /(g/mol)	密度 /(g/mL)	溶解度 /(mg/L)	亨利常数 /(10 ⁻³ atm· m ³ /mol)	Log(K _{ow})	Log(K _{oc})	MCL /(mg/L)
氯代 甲烷	CT	CCl ₄	153.8	1.59	800	28.9	2.64	1.9	0.005
	CF	CHCl ₃	119.4	1.49	8 200	3.8	1.97	1.52	0.10
	DCM	CH ₂ Cl ₂	84.9	1.33	13 200	1.7	1.25	—	0.005
	CM	CH ₃ Cl	50.5	0.92	5 235	9.6	0.91	—	NR
氯代 乙烷	HCA	C ₂ Cl ₆	236.7	2.09	50	—	3.93	—	NR
	PCA	C ₂ HCl ₅	202.3	1.68	500	2.5	2.89	—	NR
	1122-TeCA	C ₂ H ₂ Cl ₄	167.9	1.60	2 962	0.44	2.39	1.9	NR
	1112-TeCA	C ₂ H ₂ Cl ₄	167.9	1.54	1 100	2.4	—	—	NR
	111-TCA	C ₂ H ₃ Cl ₃	133.4	1.35	1 495	14.5	2.49	2.25	0.2
	112-TCA	C ₂ H ₃ Cl ₃	133.4	1.44	4 394	0.96	2.38	—	0.005
	12-DCA	C ₂ H ₄ Cl ₂	99.0	1.25	8 606	1.2	1.48	1.52	0.005
	11-DCA	C ₂ H ₄ Cl ₂	99.0	1.17	4 676	6.2	1.79	—	NR
	CA	C ₂ H ₅ Cl	64.5	0.90	5 700	1.8	1.43	—	NR
氯代 乙烯	PCE	C ₂ Cl ₄	165.8	1.63	150	26.3	2.88	2.29	0.005
	TCE	C ₂ HCl ₃	131.4	1.46	1 100	11.7	2.53	1.53	0.005
	cis-DCE	C ₂ H ₂ Cl ₂	96.9	1.28	3 500	7.4	1.86	—	0.07
	trans-DCE	C ₂ H ₂ Cl ₂	96.9	1.26	6 260	6.8	1.93	—	0.1
	11-DCE	C ₂ H ₂ Cl ₂	96.9	1.22	3 344	23.0	2.13	—	0.07
	VC	C ₂ H ₃ Cl	62.5	0.91	2 763	79.2	1.38	—	0.002

注:NR表示未作规定。

裂隙岩溶水是我国北方许多城市的供水水源(如徐州、枣庄、济南等),但裂隙岩溶含水层非均质性较强,使得污染物在此类含水介质中的运移特征和修复技术等与孔隙含水介质具有显著的差异,因此非均质裂隙岩溶含水层污染及修复是水资源领域所面临的极富挑战性课题,是一个世界性难题。本团队在国家自然科学基金项目(40373044、21146005)、江苏省水利科技重点项目(2007006、2009007)、徐州市科技合作计划项目(XM12B099)、徐州市政府水污染专项治理资金等资助下,以徐州市七里沟岩溶水源地四氯化碳污染场地为研究对象,采用实验室研究与现场试验、实验测试与数值模拟、机理研究与技术研究相结合的技术路线,综合运用水文地质学、环境科学、数学模型与数值计算、环境微生物学等学科的理论和方法,系统研究了非均质岩溶含水层中四氯化碳的污染机理、迁移规律及其修复技术。

第二节 国内外研究现状

一、地下水四氯化碳污染现状

四氯化碳是一种无色透明挥发液体,具有特殊的芳香气味。分子量为 153.8,常温常压

下密度为 1.595 g/cm^3 , 沸点为 76.8°C , 蒸气压为 $15.26 \text{ kPa}(25^\circ\text{C})$, 蒸气密度为 5.3 g/L 。微溶于水, 易溶于多数有机溶剂, 辛醇/水分配系数的对数值为 2.64 。四氯化碳是常用的灭火剂, 也是脂肪、油漆、树脂、橡胶等物质的优良溶剂, 在实验室及工业上多用做溶剂或萃取剂。四氯化碳早在 20 世纪初就被用做化学生产原料, 距今已有 100 多年历史, 20 世纪 70 年代的生产量为 12 亿 t 左右, 达到历史顶峰。过去几十年, 由于其毒性不断被人们所认识, 产量也在逐年减少。四氯化碳凭借其特性较易进入自然环境, 是地下水中最常见的污染物^[12], 属于 B2 类致癌物质, 被美国毒物与疾病登记署列入优先整治的有害物质之一^[13]。作为一种危险的致癌物质, 四氯化碳可以在地下水中长期存在, 威胁饮用者的身体健康。美国 and 我国的饮用水质标准均要求饮用水中四氯化碳含量不超过 $3 \text{ }\mu\text{g/L}$ (GB 5749—85); 我国卫生部最新颁布并于 2006 年 9 月 1 日起实施的《生活饮用水卫生规范》中规定 CCl_4 的最高浓度不得超过 $2.0 \text{ }\mu\text{g/L}$ 。

自 20 世纪 60 年代以来, 国内外地下水 CCl_4 污染的事例屡见不鲜。1992 年对西班牙 La Coruna、Ferrol 等 7 个城市的检测分析表明, 供水系统中 CCl_4 浓度达到了 $1.5 \sim 39.5 \text{ }\mu\text{g/L}$ ^[14]。1992 年芬兰 Kajaani 镇的 6 个地下水厂和 1 个地面水厂的饮用水中都发现有 CCl_4 污染物^[15]。1999 年, 绿色和平组织对印度博帕尔农药厂遗址北边的三口井中地下水分析发现, CCl_4 浓度高达 $200 \sim 3\,400 \text{ }\mu\text{g/L}$ ^[16]。美国 Livermore 地区的地下水监测发现, 有毒有害垃圾的堆放导致 CCl_4 污染物的产生, 有毒物质渗滤液中 CCl_4 的浓度高达 $500 \text{ }\mu\text{g/L}$ ^[17]。1986 年, 加利福尼亚地下水检测中发现 38 口井受到了 CCl_4 污染, 浓度达 $5.0 \text{ }\mu\text{g/L}$ ^[18]。美国阿贡国家实验室的 Alvarado 和 Lorraine 2006 年调查了 Nebraska 和 Kansas 州的 47 处地下水 CCl_4 污染点, 其地下水中 CCl_4 浓度最高达 $7\,000 \text{ }\mu\text{g/L}$ ^[19]。汉福德是美国华盛顿南部重要的原子能研究中心, 从 1955 年到 1973 年, 共有 $1\,000 \text{ t}$ CCl_4 倾倒在附近的三个地方, 使得其西部 200 号地区遭到 CCl_4 严重污染, 地下水中 CCl_4 平均浓度达 $1\,000 \sim 2\,000 \text{ }\mu\text{g/L}$ ^[20]。中国山东小清河沿岸的浅层地下水中四氯化碳浓度最高达 $380 \text{ }\mu\text{g/L}$, 受污染面积达 80 km^2 ^[21]。华北某污染场地地下水中四氯化碳浓度最高达 $9.31 \text{ }\mu\text{g/L}$ ^[22]。

二、氯代烃类污染地下水修复技术

在监测数据的基础上, 针对地下水污染物的特性, 选择合适的修复处理技术恢复含水层功能是国际上流行的做法。地下水污染处理修复技术与地表水有相似之处, 归纳起来主要有物理处理法、抽出处理法、水动力控制法与原位处理法等四种。

1992 年以前, 地下水污染修复技术以抽出处理法 (Pump-and-Treat, 简称 PT 法) 为主, 但该技术费用高且效果缓慢 (平均抽水处理系统操作维持约 18 年)^[23], 而且往往不能实现修复目标, 如美国用此技术的 77 个污染场地中有 69 个未实现修复目标^[24], 因此, 至 2005 年美国利用抽出处理技术进行治疗的场地数量已减至全部修复场地的 20% 以下。经过 30 多年的发展, 地下水氯代烃污染的修复方法已从传统的抽出处理技术发展 to 渗透性反应墙 (PRB)、原位化学氧化 (ISCO)、强化生物降解、基于监测的自然衰减技术等, 详见表 1-2。

表 1-2

氯代烃污染的修复目标、策略及适用的修复技术^[11]

目标	策略	可能的处理技术
源控制	物理屏障	地下连续墙
		隔离板桩
	水力屏障	地下水抽提与回注
源修复	污染物移除	土壤移除
		助溶剂或表面活性剂淋洗
		汽提法
		原位热脱附
	原位破解	原位化学氧化还原
		原位生物修复
污染羽运移控制	反应墙	化学还原
		生物修复
	水力控制	异位处理
		原位曝气
		原位化学修复
		原位生物修复
污染羽去除	物理法	抽出处理
		曝气(水平井或垂直井)
	化学法	化学氧化
	生物法	原位生物修复
		自然生物修复(监测的自然衰减)

第三节 七里沟岩溶水源地四氯化碳污染概况

七里沟地下水源地位于徐州市区东南部,南至铜山区三堡一带,北以京杭运河为界,西沿中山路一线,东至潘塘、大黄山一带,贯穿铜山新区、市主城区和经济开发区,水源地面积 221.70 km²,岩溶地下水可采资源量 20 万 m³/d,为特大型水源地。该水源地是徐州市最早开发利用的水源地,早在 20 世纪 30 年代抗日战争期间就开始开采岩溶地下水作为生活饮用水,20 世纪 90 年代初水源地开采总量达到最大(18 万 m³/d)。主开采区为水源地富水区三官庙至铜山新区一带,多年来由首创水务公司、铜山自来水公司平均开采,供水约 10 万 m³/d。七里沟水源地被列入 2010 年《江苏省第二批集中式饮用水源地名录》;2012 年徐州市政府发布了《徐州市重要生态功能保护区规划》,其中划定了七里沟水源地为地下水饮用水源保护区,一级、二级、准保护区总面积共 88 km²。2013 年,江苏省政府下发了《省政府关于印发江苏省生态红线区域保护规划的通知》,其中确定的徐州市生态红线区域包括七里沟地下水饮用水水源保护区,将七里沟水源地一级保护区划定为一级管控区,包括水源地补给区在内的二级、准保护区划定为二级管控区。

徐州市 2000 年 11 月首次对地下水开展四氯化碳含量监测,发现南郊七里沟水源地内

有 3 口水井受到了污染,污染源为铜山区某农药厂。至 2001 年 5 月,已有 53 口岩溶地下水水井受到了污染,面积达 17.5 km^2 。水中四氯化碳最高浓度达 $3\,909.2 \mu\text{g/L}$,超过当时的国家饮用水标准 $1\,954.6$ 倍。据监测,该农药厂生产废水中四氯化碳的浓度最高达 $2\,584.4 \mu\text{g/L}$,严重超过国家排放标准。历时十余年的监测表明,岩溶含水层中四氯化碳衰减较缓慢,目前污染区内许多水井中四氯化碳浓度仍远高于国家标准。

第四节 研究内容

本课题在国家及省等重点计划的支持下,经过十余年系统监测和调查,对非均质裂隙岩溶含水层中四氯化碳的迁移规律、演变机制及修复技术等进行了深入研究,在探索松散层—岩溶含水介质二元复合系统四氯化碳污染机理及控制方面取得了突破,本项研究主要包括下列内容:

- (1) 岩溶含水介质特征研究。
- (2) 四氯化碳在岩溶含水层中的运移、转化规律和影响因素。
- (3) 四氯化碳在污染区松散层中的迁移、降解特征及其控制因素。
- (4) 基于双重介质理论的岩溶含水层中四氯化碳运移规律研究。
- (5) 四氯化碳高效降解菌的筛选及其降解机理研究。
- (6) 零价铁还原降解四氯化碳的实验研究。
- (7) 岩溶含水层四氯化碳污染处理修复技术与工程实践及其效果评估。

第二章 含水介质特征研究

第一节 自然地理与地形地貌

徐州市位于江苏省的西北部,为苏、鲁、豫、皖四省交界处,素有“五省通衢”之称。由丰县、沛县、睢宁县、邳州市、新沂市等五县(市)及五区(贾汪、云龙、鼓楼、泉山、铜山)和金山桥、高新两个经济开发区组成。地理坐标东经 $116^{\circ}22'$ ~ $118^{\circ}40'$,北纬 $33^{\circ}43'$ ~ $34^{\circ}58'$,全市东西长约 210 km,南北宽约 140 km,总面积 11 258 km²。

研究区七里沟盆地地处徐州市区东南部,为一系列北东走向的链状山丘所围成的复向斜盆地,面积约 120 km²。盆地内山丘高程约 200 m,最高为 265 m,盆地中心区域地面标高 30~40 m。地表主要河流为北—南流向的奎河与西—东流向的废黄河。

研究区属徐州丘陵山区的一部分,中间为北东—南西向狭长状山间低地,两侧翼为低山丘陵,基岩裸露区由寒武系和奥陶系碳酸盐岩地层组成,山体低矮,呈浑圆状,沿北东向展布。东侧有洞山、阎山、段山,山顶标高 130.0~144.0 m;西侧有凤山、大牛山、双山等,山顶标高 79.0~178.0 m。山间低地的基底主要由奥陶系碳酸盐岩地层组成,上覆第四系坡、洪、冲积物。三官庙至后二堡一带,地面标高 30.1~31.9 m,北部为废黄河漫滩,地势较高,地面标高 37.0~41.0 m,形成北部地表水分水岭;后二堡到吴楼村一带地势缓升,吴楼村、铜山农药西厂附近地面标高达 34.0 m。纵观山间低地地势特点,在吴楼村以北,地势从西、北向东、东南微倾斜。

研究区地形地质如图 2-1 所示。

第二节 含水岩组及其富水性

按含水介质的岩性条件,研究区内地下水可划分为第四系孔隙含水岩组和碳酸盐岩裂隙溶洞(岩溶水)含水岩组两种类型。

按地层沉积顺序自上而下简述如下:

(1) 第四系冲积层含水岩组及其富水性

该层广泛分布在研究区的山前和平原区,厚度 1.0~30.49 m,平均为 15.95 m,向斜盆地外缘薄、中间厚,与下伏基岩呈不整合接触。浅部的砂质土、含砂礓砂质黏土、埋藏孔隙潜水,水位呈季节性变化;下部砂礓、砾石黏土埋藏孔隙水,具承压性,透水性不均一。第四系冲积层孔隙水富水性弱,属极弱的含水层,单井水量小于 50.0 m³/d,可作为当地村民生活用水水源。

(2) 太原组—本溪组灰岩含水岩组及其富水性

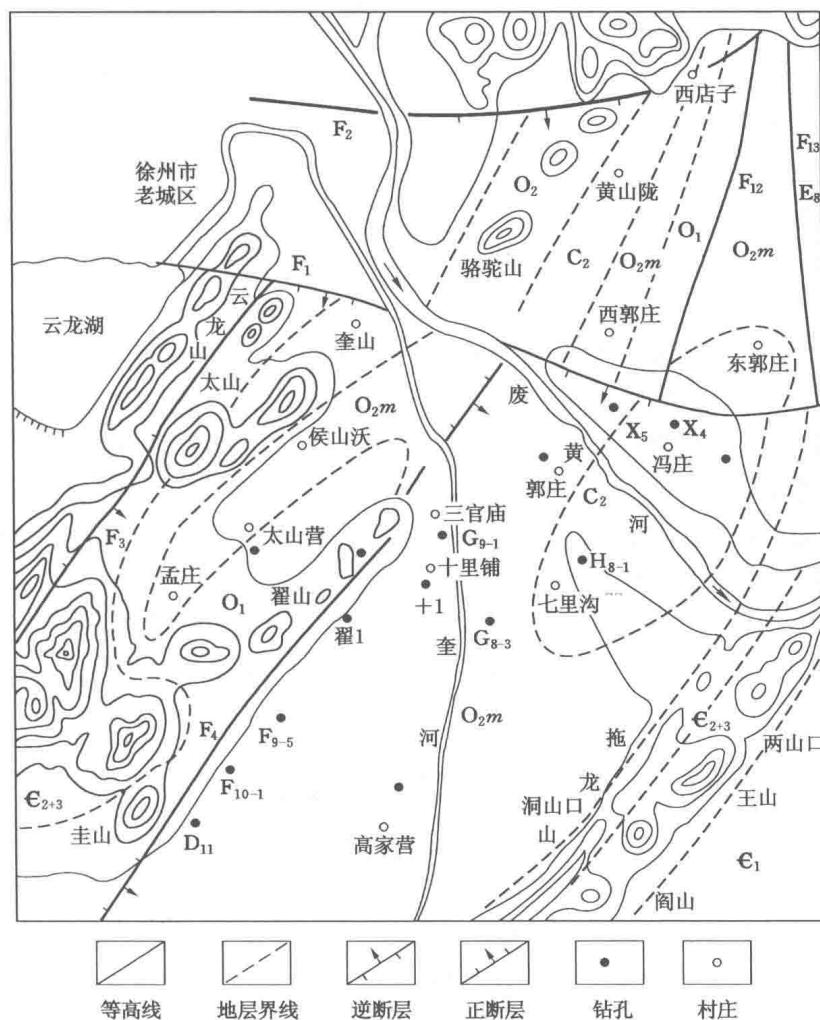


图 2-1 研究区地形地质图

上石炭统太原组(C_2t), 地层厚约 145.0 m, 属海陆交替相沉积, 岩性由砂岩、泥岩、灰岩及煤层相间组成。该组赋存十多层薄层灰岩, 其中以 3、4、10、12 层灰岩裂隙溶洞发育, 区内姚庄村、冯庄村、郭庄机场等单位打井开采该层岩溶地下水, 单井出水量 500.0~1 000.0 m^3/d , 属富水性中等的含水层。

(3) 阁庄组—萧县组灰岩含水岩组及其富水性

本岩组由中奥陶统阁庄组(O_{2g})、下奥陶统马家沟组(O_{1m})和萧县组(O_{1x})组成, 按其岩性分为上、中、下三部分。上部地层厚 70.0 m, 以厚层白云岩为主, 夹中薄层灰岩及白云质灰岩; 中部地层厚 200.0 m, 以厚层豹皮状灰岩为主, 夹含燧石条带灰岩、白云岩及薄中层含泥质或白云质灰岩; 下部地层厚 250.0 m, 为中厚层(含角砾)灰岩、白云岩、夹薄层泥质白云岩。岩石质地较纯, 岩溶化程度较高。在裸露区常形成溶丘、溶沟、溶槽、溶洞等溶蚀地貌, 研究区现有资料揭示蜂窝状溶孔、裂隙溶洞具有较好的连通性, 岩溶发育强烈部位主要在褶皱核部和断裂带附近。本岩组地下水富集程度受岩溶发育程度、地质构造的控制, 表现出明显的不均一性, 从勘探与开采井出水量分析, 出水量悬殊, 干井有之, 一般单井出水量达

1 000.0~5 000.0 m³/d。三官庙、七里沟井(群)达到 1.5 万~2.0 万 m³/d,属于强含水层。

(4) 贾汪组—崮山组灰岩含水岩组及其富水性

本组可分为上、下两段。上段由贾汪组(O_{1j})、三山子组(O_{1s})和凤山组(Є_{3f})组成,岩性以白云岩、含泥质的白云质为主,夹灰岩、白云质灰岩;下段由长山组(Є_{3c})和崮山组(Є_{3g})组成,以中至薄层灰岩、泥质灰岩为主,夹鲕状灰岩。本岩组裂隙、溶洞不甚发育,富水性受构造控制,水量较小,成井率低。研究区的西部中段,分布有崔庄井、东樵村井及铜水 22[#]井,单井开采量 500.0~1 000.0 m³/d,属富水性中等的含水层。

(5) 张夏组灰岩(Є₂)含水岩组及其富水性

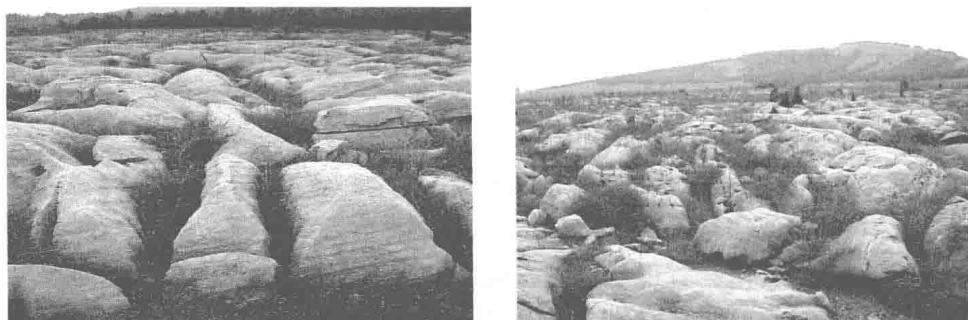
该组厚 200.0 m 左右,岩性以厚层鲕状灰岩及豹皮斑状灰岩为主,夹中薄层泥质灰岩或泥质白云岩,岩石出露在本向斜两翼,组成低山丘陵,形成地下水的分水岭。本岩组裂隙溶洞发育,岩溶水富集程度较高,出水量较大的井(孔)多分布在背斜核部、断裂带附近。该组岩溶地下水是徐州地区仅次于奥灰岩溶水的第二个供水水源层位。分布在研究区的开采井有坡里井、汪庄井及北部边界的骆驼山三号井、里湖井等,单井开采量 500.0~1 000.0 m³/d,属于富水性中等至强的含水层。

第三节 岩溶发育的总体特征

一、岩溶含水介质的宏观特征

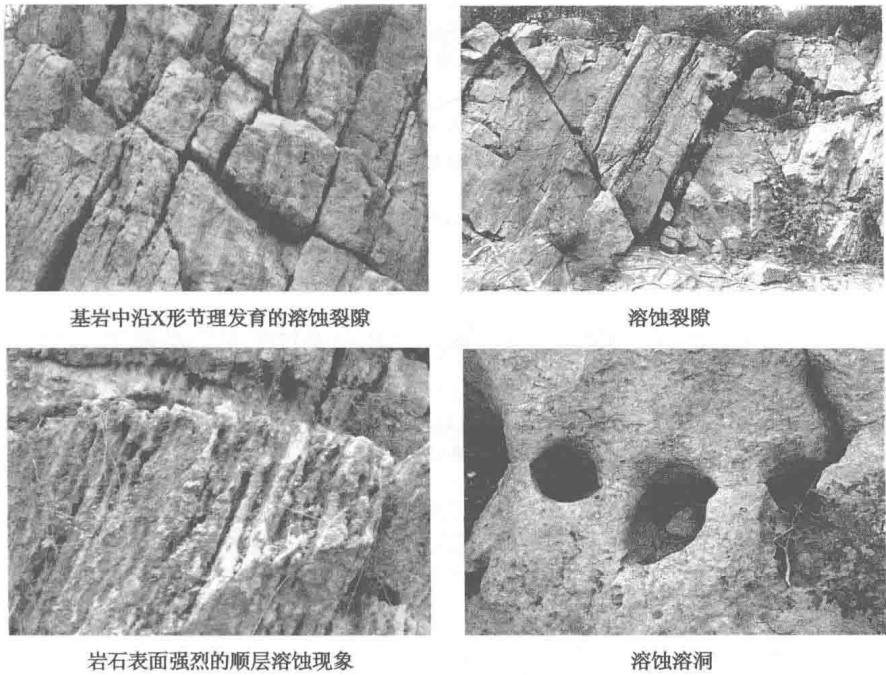
现场地表调研发现,七里沟含水盆地两翼的裸露区,常见的岩溶形态有溶隙、溶洞和裂隙等。由于近代地壳升降运动的韵律性和地质结构面分布的等距性,岩溶发育程度和溶洞层高差在垂直方向也经常表现出韵律性变化,如部分地表露头发育部分裂隙呈现“等距性”特征;部分地区呈现“X”节理发育的岩溶裂隙,裂隙交错存在,含水介质表现为双重介质,由溶孔、溶隙和相互连通的管道二者交错组成,其中前者是岩溶水的主要储集空间,后者是岩溶水快速流动的主要通道。

研究区内裸露区的地表岩溶形态,对大气降水及地表水入渗补给极为有利,也成为污染物的运移通道(见图 2-2 与所附彩页)。由图片可以看出,岩溶发育具有明显的分层性且埋深不一致,主要的储水空间为蜂窝状溶孔、溶洞及溶蚀裂隙,快速的运动空间为管道状的裂隙介质。



向斜盆地两翼溶蚀裂隙、孔洞发育,是降雨的入渗补给通道

图 2-2 七里沟盆地裸露区岩溶溶蚀现象



续图 2-2 七里沟盆地裸露区岩溶溶蚀现象

本研究收集了区内 62 口水井的钻孔资料,进行综合分析研究,结果表明本区岩溶含水介质储水空间主要为蜂窝状溶孔、溶洞及溶蚀裂隙,其中沿断裂破碎带发育的溶蚀管道是地下水集中汇水和运动的主要通道。部分井孔水文地质资料见表 2-1,部分岩芯岩溶发育情况如图 2-3 和所附彩页所示。

表 2-1 研究区典型井(孔)水文地质资料表

井(孔)号	孔深 /m	冲积层 厚度/m	含水 层位	含水层岩溶发育特征及其富水性	涌水量 /(m ³ /h)
铜水 9# (X-38)	186.0	9.20	O _{1x}	9.4 m 处全漏水;15.4~29 m 蜂窝状溶蚀发育;52~106 m 为强含水层,其中 97~104 m 蜂窝状溶蚀发育	84.02~ 161.93
铜水 10# (X-42)	153.0	14.80	O _{1x}	50~54 m 较破碎;67 m、75 m、85 m、89 m 四处蜂窝状溶蚀发育;137~144 m 蜂窝状溶蚀	59.62~ 126.0
铜水 14# (X-43)	181.0	13.80	O _{1x}	20.5 m、36.4~44 m 溶蚀裂隙发育,24 m 处全漏水;88 m、90 m、97~100 m 三处溶蚀明显,富水性好	112.79
三官庙 2#	131.5	12.17	O ₁	偶见蜂窝状溶洞,113 m 处见一 0.9 m 溶洞	299.88
三官庙 4# (X-29)	163.2	14.50	O ₁	34.4~35.2 m 见 ϕ 8 cm 孔洞,49.8~50.7 m 呈网格状及蜂孔,129.5~141.8 m 零星小孔洞,141.8~143.6 m 蜂孔发育	$\geq$ 370.0
聋校 1#	113.13	17.34	O ₁	21 m 处漏水;50 m 左右裂隙内充填方解石,97.59 m 为豹皮状灰岩,裂隙稍发育,100~113.13 m 见少量溶孔、溶洞	74.99
聋校 2#	139.84	17.31	O ₁	41.85 m 处漏水;86 m 处溶孔溶洞发育;103 m 发现漏水层;106~108 m 发现溶孔溶洞,孔洞内充填方解石小晶体;124 m 发现小溶洞;132 m 漏水;138 m 岩芯破裂	130.0

续表 2-1

井(孔)号	孔深 /m	冲积层 厚度/m	含水 层位	含水层岩溶发育特征及其富水性	涌水量 /(m ³ /h)
葺校 3# (X-26)	218.7	22.06	O ₁	35 m 处漏水,24~50 m 裂隙断续发育,62 m、102 m 见蜂孔溶孔,113~163 m 裂隙断续发育,182~183 m 溶洞 ϕ 3~5 cm	
七里沟 1# (X-24)	179.1	26.54	O ₁	38 m、52 m、60 m、107~113 m、150~158 m、172~179 m 有小溶洞蜂孔溶孔,51.8 m 处溶洞 ϕ 0.7 m,138 m 溶洞 5×1.5 cm	63.07
七里沟 8#	187.79	27.92	O ₁	36.28~57.3 m、81.3~89.5 m、97.2~103.4 m、119~120 m、145~147 m 岩溶发育,39.4 m 漏水,181~182.9 m 溶隙较发育,有溶孔	84.02
矿大 4#	172.0	9.2	O ₁	48.5~62.8 m 岩溶裂隙发育,漏水;85.4~123.5 m、142.8~168 m 岩溶裂隙发育,漏水	180.0
矿大北井 (X-25)	180.07	15.33	O ₁	41.97 m 溶蚀严重,136.0~150.0 m ϕ 10~20 cm 蜂窝状小溶洞发育,为主要含水层段,178 m 岩芯破碎	37.1
煤建学院 南井(X-37)	148.4	4.40	O _{1m}	18 m 漏水,27.55 m 全漏,30~32 m 小溶洞发育,64.7~75.5 m 岩溶发育为泥质充填,95 m、109 m、122 m 处偶见溶孔隙	84.24
溶剂厂井 (X-17)	158.8	30.00	O ₁	44~51 m 溶洞发育,95~97.5 m、119~119.4 m、129.4~130.7 m 为密集型溶孔洞 ϕ 1~5 m/m 被黄泥充填,122.4 m 水蚀裂隙	117.0
铜山农药西 厂井(X-49)	140.0	6.80	O _{1x}	24~27 m、32~41 m、65~73 m、126~130 m 四段溶蚀,蜂窝状,小溶洞发育	25.14
铜山油脂 厂井(X-46)	131.0	14.00	O _{1x}	见基岩破碎漏水,32~33 m 夹泥,43 m、70 m 蜂窝小溶洞,80~90 m 岩溶发育差,130 m 破碎带	29.02
国家粮库井 (X-44)	151.5	17.60	O ₁	24.5 m 全漏水,24.5~25.0 m、57~57.5 m 溶蚀较发育,孔底部裂隙发育,但被方解石脉充填	38.05~ 75.82
热电厂井 (X-59)	154.3	11.25	O ₁	11.25~24 m 灰色辉绿岩,下部破碎;29 m 溶蚀发育;90 m 网格状溶蚀发育;103~107.2 m、109~111.2 m 蜂窝状溶蚀发育	77.0
江苏师范 大学井	197	6		6~13 m,有较大溶洞;13~41 m,裂隙发育,41 m 漏水严重;61 m 漏失量大;84~110 m 岩芯破裂,裂隙发育;110~140 m,裂隙岩溶不发育;140~169 m,裂隙岩溶发育,岩芯不完整,为第Ⅲ段含水层;169~197 m,致密,裂隙不发育,岩芯完整	
医药中专井	179.22	8.40	O _{1m} O _{1x}	10.0~10.70 m,岩溶发育,54.50~54.70 m 岩溶发育,溶孔直径约为 1 cm;116.11 m 处有火成岩侵入,厚约 40 cm;162.58~163.08 m 岩溶发育,含许多豆状小溶孔,该处掉钻约 20 cm	118.0
航空压 铸厂井	195.95	6.86	O ₁	6.86~60.56 m 上部溶洞发育,下部裂隙较发育,均被泥质充填;112.8~119.4 m 见小溶孔、洞,151.8~159.3 m 见三个溶洞发育	
凤凰山 3# 井 (X-23)	201.20	14.40	O	20.47~31.38 m 发育岩溶,31.38 m 处漏水;106.15~143.58 m 有零星孔洞发育	36.97
铸本井	110.00	11.70	O	42.0~46.0 m,以厚层白云质灰岩为主,岩溶发育;60.0~69.0,厚层灰岩,岩溶发育	56.0