



辛安泉域地表水—地下水 相互作用的水文地球化学研究

© 武鹏林 靳建红 孙等平 杨锁林 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

辛安泉域地表水—地下水 相互作用的水文地球化学研究

© 武鹏林 靳建红 孙等平 杨锁林 著

内 容 提 要

本书共 10 章, 在分析整个辛安泉区域的地表水、地下水系统及对水环境进行评价的基础上, 在三维空间内开展含水层结构分析, 并以三维立体图与三维剖面图的形式来展现区域孔隙水系统的结构特征; 对辛安泉岩溶泉流量进行动态分析, 采用时间序列分析方法对泉流量的变化过程及控制因素进行分析; 从地质与地下水位特征入手, 分析孔隙水—岩溶水的补排关系; 利用微量元素差异判别孔隙水—岩溶水、地表水—地下水的来源、渗漏特征及其相互关系和水化学演化趋势; 利用水化学同位素特征进一步论证地表水—地下水的相互作用; 在分析煤炭开采对地下水的破坏机理、开采塌陷的形成机制的基础上, 对采煤排水的时空变化规律及造成的环境影响进行研究。

本书可供从事环境科学、环境工程、水文与水资源、采矿工程等专业的工程技术人员、科研人员及相关专业院校的师生使用和参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

辛安泉域地表水 : 地下水相互作用的水文地球化学研究 / 武鹏林等著. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2011.8
ISBN 978-7-5084-8945-2

I. ①辛… II. ①武… III. ①地面水—水文地球化学—研究—长治市②地下水水文学—水文地球化学—研究—长治市 IV. ①P343②P641.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第172864号

书 名	辛安泉域地表水—地下水相互作用的水文地球化学研究
作 者	武鹏林 靳建红 孙等平 杨锁林 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 20.5 印张 486 千字
版 次	2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷
印 数	001—500 册
定 价	60.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本书是以中国地质大学（武汉）与山西省地质调查院共同承担的国家地质调查局项目“山西六大盆地地下水资源及其环境问题专题研究（200310400008）”为依托，结合“山西省长治市第二次水资源评价”研究课题加工、修改而成的。

地表水—地下水的相互作用是自然界中普遍存在的一种自然现象，是陆地水循环研究中的热点、重点和难点问题，也是目前地质环境研究领域的前沿。深入理解地表水—地下水的相互作用，对于水资源的评价、开发利用和管理及生态环境保护具有重要意义。为了有效地进行水资源合理开发利用、预测自然和人类活动影响下的水环境变化，研究半干旱地区流域地表水—地下水相互转化是关键。基于上述考虑，作者尝试环境系统分析理论和水文地球化学方法，研究辛安泉域地表水—地下水相互作用的机理。

辛安泉域是一个完整的水文地质单元，具有独立的补、径、排系统，在地理位置上覆盖了长治市的绝大部分。辛安泉出露于潞城市、平顺县、黎城县交界处的浊漳河河谷中，泉水多年平均流量（1957~2000年）为 $9.64\text{m}^3/\text{s}$ 。随着长治市工农业生产的不断发展，研究区对水资源的需求量逐年增加，地下水开采量相应呈上升趋势，形成了区域性的地下水位下降；同时，区内的大规模采矿活动在破坏地质环境的同时，也破坏了浅、中、深层地下水原有的补给、径流与排泄条件，造成含水层疏干、地表水断流。本书的研究工作对于揭示辛安泉域（包括泉域内孔隙水集中分布的长治盆地）地下水环境问题的驱动因素、推动盆地的地下水演化与环境地质研究具有积极的理论意义，并可为合理有效地开发煤炭资源、保护水资源、促进生态环境的改善和区域经济的可持续发展提供决策依据。

本书主要由4部分内容组成，共10章。第1部分在摸清泉域的地形、地貌、地质和植被等条件的基础上，主要对泉域地表水、地下水系统的时空分布进行分析，查明水环境系统的演化规律。第2部分开展了长治盆地孔隙介质结构的三维可视化分析，以期在时间和空间上把握区域孔隙地下水系统的整体格局。第3部分通过地质、水位和水化学理论，对孔隙水与岩溶水之间的相互关系及是否存在补排关系进行判断；以水化学与同位素分析为研究手段，

对地下水的补给来源和地表水—地下水相互转化关系展开进一步的系统分析，查明地下水系统与地表水、周边裂隙水、岩溶水的关系。第4部分采煤活动对水资源—环境的综合影响是研究的最后一个主要内容。由于煤矿的大规模开采，研究区已形成了严重的地质环境问题，导致裂隙水大量疏干排出，地下水位下降，在开采高峰期由于矿坑排水使地表水径流量增大；另一方面采空塌陷及新增地下储水空间（采空区）使得地下水含水系统的补、径、排特征发生改变。

本书由武鹏林、靳建红、孙等平、杨锁林等合作完成，其中第1章、第4章的4.1~4.4节、第7章由武鹏林执笔；第2章、第3章、第4.5节、第9章由孙等平执笔；第5章、第8章由靳建红执笔；第6章、第10章由杨锁林执笔。

在本书编写过程中，参阅并引用了大量的文献和资料，且得到了多位同仁的支持和帮助，在此谨向有关作者和单位表示衷心的感谢。研究生白静、刘萍、冯艳、李新华、杜开云、薛晓云、何霞丽、范越新、车岳、郭卫参加了书稿的整理和内容的讨论，并对全稿进行了校对，因此本书也倾注了他们的辛勤劳动和对水资源环境的挚爱。现代水环境的有关理论研究和技術方法正在不断完善和发展，本书仅仅是其中粗浅的认识和实践。限于学识水平和工作经验，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

著者

2011.4

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 选题依据	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 研究方法、研究内容及技术路线	9
1.4 研究成果及创新点	11
第 2 章 区域自然环境概况	12
2.1 形成历史	12
2.2 自然地理	12
2.3 地质概况	19
2.4 水文地质特征	24
2.5 地下水补给、径流、排泄条件	29
2.6 地下水天然水化学特征	32
2.7 地下水污染概况	33
2.8 经济社会概况	33
2.9 主要环境问题	35
第 3 章 地表水系统分析	37
3.1 降水	37
3.2 水面蒸发	48
3.3 河川径流	51
3.4 河川径流量衰减原因分析	63
第 4 章 孔隙水系统分析	68
4.1 盆地孔隙介质结构的三维可视化	68
4.2 孔隙水水位动态特征	75
4.3 地下水补径排特征	87
4.4 地下水系统划分	89
4.5 地下水资源评价	90
第 5 章 岩溶水系统分析	103
5.1 泉域地下水分区	103
5.2 岩溶泉水动态特征	103
5.3 辛安泉水资源量特征	112

5.4	地下水资源量评价	135
5.5	地下水开发利用状况	138
5.6	地下水开发利用程度及潜力分析	144
5.7	地下水开发引起的生态环境问题	146
5.8	辛安泉流量变化的控制因素分析	147
5.9	人类活动对地下水资源的影响	150
第6章	水环境质量评价	153
6.1	水环境污染源	153
6.2	入河排污口评价	156
6.3	地表水资源质量评价	163
6.4	河流水质状况	170
6.5	大型水库水质状况	177
6.6	地表水水质变化趋势分析	180
6.7	孔隙地下水资源质量评价	187
6.8	分区地下水质量评价	195
6.9	岩溶水水质评价	201
6.10	煤矿矿坑水水质评价	208
6.11	地下水污染概况	215
第7章	地表水—地下水转化研究	219
7.1	孔隙水—岩溶水补排关系分析	219
7.2	地表水—地下水相互作用的水文地球化学特征	227
7.3	地表水—地下水相互作用的环境同位素分析	265
第8章	采煤对水环境影响研究	276
8.1	煤炭资源分布及水文地质特征	276
8.2	采煤对水资源破坏的机理研究	278
8.3	矿井排水影响因素的分析	282
8.4	采煤造成的各种危害	289
8.5	岩溶地下水的污染	293
8.6	结论	298
第9章	采煤活动对水环境污染的预防与治理	299
9.1	煤矿水污染综合治理的意义	299
9.2	煤矿排水的综合利用	303
9.3	煤矸石的综合利用	305
9.4	煤矿水环境治理的措施	307
第10章	结论与建议	309
10.1	结论	309
10.2	建议	312
	参考文献	313



第 1 章 绪 论

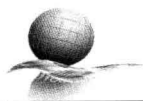
1.1 选 题 依 据

本书以中国地质大学（武汉）与山西省地质调查院共同承担的国家地质调查局项目“山西六大盆地地下水资源及其环境问题专题研究”为依托，结合“山西省长治市第二次水资源评价”研究课题完成。

辛安泉是一个完整的水文地质单元，具有独立的补、径、排系统及辛安泉岩溶水系统。系统内主要包括山西省长治市的城区、长治市郊区、潞城市、武乡县、襄垣县、沁县、黎城县、平顺县、壶关县、长子县、屯留县、长治县和晋中市的榆社县等行政区，属于我国北方的半干旱地区，该区域又是山西省重要的农业、工业和能源重化工基地，区域内水资源需求量极大，水资源的供需矛盾由来已久。按 2000 年人口（312.21 万人）和包括入境水量的水资源总量（18.88 亿 m^3 ）计算，全区人均水资源占有量为 604.7m^3 ，约为山西全省人均占有量的 1.6 倍，在山西省内属于水资源相对丰富的地区（常反堂，2006）。但是按照联合国“国际人口行动”提出的人均水资源低于 1000m^3 作为缺水指标，该系统涉及地区属于缺水地区，并且接近人均 500m^3 的严重缺水界限。随着经济、人口的增长，水资源需求不断增加，该区域的水资源呈日益衰减的趋势，所以研究区域内的水资源存在着潜在的危机，形势不容乐观。

区域的大部分辖于山西省长治市，长治矿产资源极其丰富，尤以煤炭为最，国营、地方、个体煤矿遍布全市各地，全市含煤总面积 8407km^2 ，占全市总面积的 60.5%；1000m 以上的含煤面积 3854km^2 ，已探明的含煤面积 2708km^2 ，分别占含煤面积的 45.84% 和 32.21%。长治的煤炭开采对山西省乃至全国的经济建设作出了重要贡献。

地表水与地下水的相互作用是自然界中普遍存在的一种自然现象，也是陆地水文循环的一个重要组成部分。1993 年 7 月，国际人与生物圈（MAB）在法国里昂召开了“国际地下水与地表水交错带学术研讨会”。1974~2001 年联合国教科文组织实施了五个阶段的国际水文计划（IHP），第六阶段（2002~2007 年）的研究目标是“水的相互作用：来自风险和社会挑战的体系”，其中主要研究方向是地下水与地表水的相互作用。联合国环境规划（UNDP）、联合国教科文组织（UNESCO）、国际水文地质学家联合会（IAH）、国际地下水基金会（IGF）、美国环境保护局（USEPA）、美国地质调查局（USGS）、联合国环境规划署（UNEP）等组织和机构都将地表水与地下水的相互作用作为目前研究的重点和热点及前沿课题。正确分析地下水与地表水之间的相互关系，准确计算两者之间的转



化量,研究地下水和地表水相互作用和在水量和水化学两方面的时空变化规律,对于水资源评价和合理开发利用,水污染的防治与预测,保护地下水与地表水交错带的生态环境等均具有重要的理论和实践意义。

地表水—地下水相互作用也是陆地水循环研究中的热点、重点和难点问题。深入理解地表水—地下水的相互作用,对于水资源的评价、开发利用和管理以及生态环境保护具有重要意义。为了进行有效的水资源合理开发利用、预测自然和人类活动影响下的水环境变化,研究半干旱地区流域地表水—地下水相互转化是关键。

地下水是全球水循环系统中的重要组成部分,是联系岩石圈、生物圈与大气圈的纽带,是地球表层各种物理、化学、生物作用过程的活跃介质。岩石圈与大气圈及各圈层间的物质与能量交换作用中,地下水又是重要的传输媒介。因此,地下水系统中蕴涵着地质环境演变的丰富信息,中国北方典型地下水循环系统表明(张天增,1985),地下水系统是地质环境变迁的产物,而地下水流的运动特性又使其成为环境变化信息的重要载体;在全球变化的研究中开展地下水环境演化的研究是一项十分重要的内容,通过此项研究,不仅可以准确认识到当前地下水环境的优劣状况、污染程度、污染成因、污染途径,还能预报地下水水质发展趋势,为生态环境预测、充分地利用自然资源提供科学依据,并能科学地指导人类活动,使人类与自然和谐发展。

煤炭开采对水资源的破坏主要表现为:严重改变了地下水自然流场及补给、径流、排泄条件,打破了地下水原有的自然平衡,地下水位大幅度下降,形成以矿井为中心的大面积降落漏斗,改变了降水、地表水、地下水“三水”的转化关系。煤炭资源的开发会对矿区及流域水资源造成严重损耗。矿区的水资源主要以地表水(河流、池塘、水库)和地下水(孔隙水、裂隙水和岩溶水)为主。同时,矿业开发需要损耗大量的水资源。据统计,全国平均采煤耗水比为 10m^3 水/t 煤(牛仁亮,2003)。事实上,一方面严重短缺的水资源本身难以保证矿业大规模开发的用水需求;另一方面这些地区十分珍贵的含水层又会因地下开采而遭受严重损耗和污染,二者矛盾十分尖锐,进而导致地表水体严重污染,使原本清澈的河水变得污浊并富含有毒有害元素。煤炭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,这里所谓的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%,长江以南乐平统煤系分别占各省区全部煤量的 50%~90%,煤中含硫为 2%~9%(吴耀国,2002)。随着社会和经济的发展,水资源安全问题尤其是水环境污染问题进一步加重。由于矿井污水处理费用很高,相当一部分矿井污水未加处理就直接被就近排掉。污水大量排放,造成许多河段地表水无法利用,也使部分地下水遭到污染。合理有效地开发煤炭资源,保护水资源,促进生态环境的改善和区域经济的可持续发展,是煤炭资源开发全过程中必须贯彻的方针。

应该指出,在天然因素与人为因素相互作用的条件下,研究地表水—地下水相互作用问题也是目前水环境科学领域的的前沿。要研究以上地表水—地下水相互作用、地下水位下降、矿坑排水、水污染等问题,科学地认识研究区域地下水的流动、赋存规律,分辨天然因素与人为因素在不同时间尺度内对区域内地下水化学现状形成的贡献是必要的基础。正



确分析地下水与地表水之间的相互关系,准确计算两者之间的转化量,研究地下水和地表水相互作用和在水量和水质两方面的时空变化规律,对区域内各类天然成因、天然—人为成因、人为成因的地下水位下降、地下水污染来源、存在形态、形成机制进行研究。因此,本书的研究工作对于揭示辛安泉域地下水环境问题的根源、推动区域的地表水—地下水作用与环境地质研究具有积极的理论意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 降雨入渗补给

降雨入渗补给是地下水的主要来源。降水或灌溉水进入土壤共包括入渗和再分布两个过程。入渗是指地面供水期间,水进入的运动和分布过程;再分布是指地面水层消失后,已进入土内的水分的进一步运动和分布过程(吴昌勇,2000;Juan P F,2004)。研究表明(李保庆,1987),地下水补给量的70%~80%来源于大气降水。雨水落到地面后,一部分以地表径流的方式流出,另一部分入渗地下称之为入渗量,但这部分水量并非全部补给了地下水,而是在入渗过程中被土壤的蒸发和植物的蒸腾作用所消耗,有的附着于土壤颗粒的表面,余下的一部分才真正补给地下水,形成入渗补给量。下渗到土壤内的雨水,受重力作用,由上部逐渐向深部移动,形成包气带土壤水,只有在大于田间最大持水量和最大毛管持水量时,才能产生重力水补给地下水。降水对地下水的补给,受到多种因素影响。在地下水开采过程中,降水入渗条件也可能发生变化,影响其变化的主要因素包括土壤颗粒结构、地面坡降、土壤理化性质、地下水埋深、降雨量及降水形式、雨强、植被等,而降水入渗补给系数是这些因素的综合反映。按地面径流、蒸发和入渗三部分进行分配,其比例取决于降雨量、降雨强度、地面坡度、土壤吸水渗水性能及地面和天气情况等(Eagle J D,1983;吴发起,2003;李雪峰,2004;温全来,2001)。

目前,在研究降雨入渗补给时采用的方法有系数法、实测动态资料统计法、 $Pr \sim P$ 相关法、水量平衡法、水文学法等(沈冰,1995;李裕元,2001;Rubin J,1966;Juan P F,2004;余新晓,1991),这些方法中以系数法最为常用。

1.2.2 灌溉水—土壤水—地下水—排水之间的相互转化

自1907年白金汉(Buckingham)提出了毛管势的理论,1931年理查德(Richards)导出非饱和流方程,将数学物理方程方法引入土壤水的研究,土壤水研究取得了极大进步。广大学者针对作物发育阶段、灌溉制度、土体结构等不同条件,进行了一系列试验和研究,并对不同灌溉条件,不同田间处理、不同耕作方式和不同作物种植条件下土壤水分的运移规律进行试验和模拟,并将结果应用于指导田间灌溉(Hillel et al.,1977;Feddes et al.,1978,1988;雷志栋等,1988;李卫东等,1996;王桂芬,1996;Unger et al.,2000;尹美娥,2000;吕殿青,2000,2001;程先军,2001;汪丙国,2002)。在理论研究方面,雷志栋等(1988)编著的《土壤水动力学》、张蔚榛(1996)主编的《地下水与土壤水动力学》全面概括了不同补排条件下的一维土壤水运动机制。许兆义(1993)



利用试验研究了包气带水的横向渗流机制问题,结果表明,支持毛细水能传递静水压力,与饱水带构成统一的渗流场,进行着垂向渗流和横向渗流。靳孟贵等(1999)以地下水流动系统理论为基础,提出了土壤水流动系统的概念,以系统的观点探讨土壤水的时空分布特征。

目前,田间土壤水分运动的研究主要有以下两种方法。

(1) 建立在水动力学基础上的非饱和土壤水分运移模型。它将农田不同状态的水分作为一个统一的系统,采用水动力学方法建立模型,通过研究各种要素的变化来模拟土壤水的运移状态。在20世纪50年代,大多数非饱和流动问题需要解析法求解。随着非饱和水流理论的发展以及近代物理学、数学的融入,土壤水分运动的数值模拟得到了迅速发展。随着有限差分法、有限单元法、边界单元法、元体平衡法等数值方法的发展以及计算机技术的进步,一些复杂的非稳定流问题得以解决(Silliman, 1995; Heij, G J, 1999; Beliaev, 2001)。数值模拟在我国土壤水分运动研究中被广泛应用,许多学者对不同田间情况下的土壤水盐运移进行了模拟(雷志栋, 1998; 木拉提, 2001; 尚宗波, 2002),而且计算不同补排条件下的一维土壤水分运动数值模拟已从实验室走向田间,非饱和条件下的二维土壤水流运动模拟也得到了迅速发展(郑耀泉, 1997; 虎胆, 2002)。

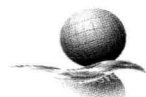
(2) 农田水均衡法。在确定的时空条件下,研究水分均衡要素的动态规律。该模型在用于剖面土壤水分转化模拟时,简单方便。该模型用于区域水均衡研究时,避开了一些土壤水分物理参数(如导水率等),但是某些分量难以确定,因而精度不高。Hearn 等(1981)建立了反映植被根层水分状况的土壤水分平衡模型。龚元石和李保国(1996)利用农田水量均衡模型,计算了土壤水的渗漏量。侯琼和郝文俊(2000)根据多年实际观测资料,利用初始土壤有效水分储存量、降水量和实际蒸散量三要素,建立了基于农田土壤水分均衡的土壤水分动态预测模式,对农田土壤墒情进行了评估。

1.2.3 地表水—地下水相互关系

地下水资源量中,地表水体(河道、渠系、渠灌等)入渗补给量约占11%~12%(张彦增, 2002),是地下水资源的一项重要的补给项。地表水—地下水之间的相互作用,主要是河水与地下水的相互作用,既与地形、地貌、含水层岩性等许多因素有关,又随季节发生变化,二者在时空上相互转化,是一个不可分割的整体,在水量交换的同时,水质也发生交换,二者在水力梯度作用下运动,携带的污染质也随着水流迁移(winter, 1995)。

傍河水井开采往往能够获得河流补给的增量或排泄量的减少量,容易形成稳定井流,增大了允许开采量。此外,河流的存在还对矿坑突水、基坑降水等存在重要的影响。因此,正确的刻画和处理河流与地下水的补排关系及其交换量对水资源的正确评价具有重要的意义。河流与地下水相互作用的研究主要有以下几个方面:①傍河水井开采或矿坑降水量的确定;②河流与地下水的污染物交换;③计算灌渠入渗;④计算地下水对河流的补给量(即基流量);⑤河流对地下水的补给量等。

地表水与地下水之间关系的研究,国外的研究始于1941年,研究方法包括解析法和数值法。对于河水与地下水相互发生补排关系,最基本的原因是由于河水与地下水存在水



位差。解析解大致包括 Theis、Hantush、Hunt、zlotnik 和 Huang 以及 Butler 和 zlotnik 5 个基本类型(刘延峰, 2004)。Wallace (1990) 研究了周期性抽水的解析解等。地表水体与地下水“脱节”现象具有普遍性, 如 Rassam D (2003) 在明尼苏达 Belle Taine 湖底部发现了一个从湖岸向湖中心延伸约 20m 的楔形非饱和带。用解析法研究这类问题具有一定的困难, 于是近年来数值法在研究河流与含水层之间水量交换中得到广泛的应用, Dillon 和 Liggett (1983) 利用边界元法簇拟了剖面二维季节性河流与地下水在“脱节”与“非脱节”情况下的相互关系; spalding 和 Khalcel (1991) 在利用二维饱和流数值模拟 (AQUIFEM-1) 模型并进行评价评价。

相比之下, 国内地下水与河水相互作用的研究相对较少。钱会等 (1999) 以非完整河旁完整并列抽水的理想化实际模型为基础, 建立起该模型的三维稳定渗流数学模型, 采用有限差分法求解了各种不同情况下此模型的数值解, 认为在非完整河旁抽取地下水会产生越河渗流问题, 河流的宽度、河流的完整性以及河底弱透水层的渗透性都会对越河渗流问题产生重要的影响, 对这类问题的求解应采用三维渗流数学模型。对于同时考虑地表水—地下水的耦合模型, 我国的研究只是个别的, 探讨性的。李致家等 (1998) 从河道水流—一维不稳定流 (扩展的圣维南方程组) 有限差分的迭代方程和地下水的有限元数值方法出发, 通过河道四周地下水流与河道水流的交换流量把两个模型数值计算的矩阵方程从理论上耦合起来。蒋业放等 (1999) 运用动态水量交换机制, 将河水模型和二维地下水模型进行耦合, 分别用欧拉法和三角网格差分法来求解。崔亚莉等 (2001) 通过建立地下水模拟模型 (地下水流动模型、地下水概念模型、地下水数学模型) 研究了玛纳斯河流域地表水与地下水转化关系。

传统的含水层结构分析往往是在二维平面内进行的, 其结果也往往以剖面图的形式来体现。20 世纪 80 年代, 三维可视化技术在数字化日渐成为人类解释客观世界的重要方式的新形势下应运而生。在地学领域中, 研究对象大都具有空间特征, 研究者常常需要在三维环境中对这些空间地学特征进行精确的定量描述。但是, 在许多情况下, 地球科学家们很难获得完整的、连续的信息, 他们所获得的只能是一个点、一条线、一个剖面等离散信息, 而通常地学现象和规律都是隐藏在这些不完整的数据中。这样, 地学家们必须借助于强大的模拟与可视化工具从中提取和挖掘有用的信息。而在水文地质科学领域, 三维可视化技术并不仅仅是描述和表达已知水文地质现象及其特征的工具, 更为重要的是, 三维可视化模型可用于提取有意义的水文地质信息, 从而实现对某种水文地质过程的深入认识, 发现常规方法所不能揭示的水文地质规律和特征 (郭华明, 2002; 郭清海, 2005)。

目前, 地下水与河水的相互作用主要的研究有以下方法。

(1) 野外实验和室内实验方法。地下水与河水的相互作用也可以通过野外实验方法研究, 通过流量仪可以直接测定河水与地下水的转化量, 使用压力仪测定水位的变化, 应用地下水与河水的温度数据来分析河水对地下水的补给范围, 确定河水向地下水补给的渗透速度和渗漏量 (Belanger TV., RB. Walker, 1990)。通过测定含水层的电导率, 分析地下岩层和地质构造, 进而分析河水与地下水的转化途径 (仵彦卿等, 2000), 也可以进行连续介质电模拟实验, 在单井、多井抽水的情况下, 研究越河渗流现象, 但由于电模型的不灵活性, 未涉及到河流宽度、河流的不完整性及河底渗透性对越河渗流的影响问题 (郭



东屏, 1993)。近年来, 正在研究的应用交错带中的微生物和有机物来区分地下水与河水, 是一种较为有效的方法。

(2) 动态资料分析法。应用地下水和河水的水文动态资料, 了解地下水与河水的水位、流量、水温和化学成分随时间的变化规律, 初步分析两者的转化关系。根据河流上下游流量资料, 求得河段与地下水的补排量, 然后结合流量过程线进行对照分析, 一些学者发现河水水位与河水渗透速度成线性相关 (Heij, G J, 1989)。斯拜尔丁和卡利尔 (Spalding, Khalee, 1991) 在分析水文数据的基础上, 用数值模拟法进行计算, 结果相差 20%~45%, 原因在于没有考虑河水部分切割含水层以及河底弱透水层的影响。

(3) 基流切割法。通过流量过程线切割基流, 确定地下水向河水排泄量, 该方法有逐日平均流量过程线切割法和枯季径流法。日平均流量过程线切割法, 计算精度相对较高, 但要求有较长系列的日流量资料。枯季径流法主要以年内枯季几个月径流量的平均值, 换算成年径流量, 即为地下水对河水的补给量。基流切割法一直广泛使用, 随着计算机技术的发展, 该方法在精度和计算速度上也有突飞猛进的进展 (Rutledge AT, 1992)。

(4) 水化学方法。河水与地下水的关系表现为水质的不同, 因此, 水化学方法在研究两者相互关系方面应用广泛, 通过分析河水与地下水中的成分, 进行定性判别两者的转化关系 (Payne BR, 1988)。根据保守性离子的示踪作用, 用质量守恒定律可大致判断地下水中河水的比例 (吴耀国等, 2002)。用河水与地下水中的同位素数据, 可以分析不同含水层与河水的水力联系、地下水的补给来源、各种来源水的比例、以及随地点和季节变化的迁移转化规律 (Mathieu RT, 1996)。顾慰祖等 (2002) 在乌兰布和沙漠北部, 测得了地下水和周围可能有补给关系的其他水点的 ^{18}O 、氡和 ^{14}C 含量, 识别出两类承压水的 3 个补给源和潜水的三个补给源, 并估算了各补给源的组成和变幅。

(5) 地下水动力学方法。它是计算河水与地下水相互转化量的基础。1856 年, 达西通过实验提出了水在空隙介质中渗透的线性渗透的达西定律。随后, 裘布衣 (Dupuit) 以达西定律为基础, 研究了单向和平面径向稳定运动, 奠定了地下水稳定流理论的基础。随着开采量的增加和水资源的短缺, 地下水运动呈现出明显的不稳定性。1935 年, 泰斯提出了泰斯公式。20 世纪 50 年代雅柯布 (Jacob)、汉土什 (Hautush) 等人研究了有越流补给的情况, 接着出现了潜水含水层迟后反应、非完整井等条件下的解析解 (Theis, 1941)。该方法一般需要通过抽水实验, 测定渗透系数、水力坡度等水文地质参数, 在对实际水文条件进行概化的基础上, 选择适宜的方法求解。

(6) 数值模拟法。对于完整河, 可以作为已知水头边界进行刻画。但对于非完整河, 河流与地下水相互转化机理比较复杂, 而且转换量的大小, 除与河床岩性结构有关之外, 还与两者水位差有关, 不能直接概化为已知水头边界 (蒋业放, 1994)。因此, 对于河流与地下水相互作用应采用三维流进行模拟 (陈崇希, 1999)。目前常见的河流—地下水系统模拟方法主要有: Illangaselkare 等 (1982) 用河流损失函数描述河流与含水层间的水量交换, 提出的算法形式繁杂, 较难实现。蒋业放等 (1999) 运用动态水量交换机制, 将河水模型和二维地下水模型进行耦合, 分别用欧拉法和三角网格差分法求解。Barlow 等 (2000) 采用解析分步响应函数和叠加原理研究含水层系统对河流水位及区域补给变化的响应。



(7) 孔隙介质结构可视化方法。由于研究区地下介质分布的各向异性与不均匀性影响与控制着地下水的流动、赋存及水质迁移规律,近年来,借助于目前先进的计算机技术,开展地下水系统结构的可视化分析,将地下介质的分布规律高精度、全方位、直观地在三维空间显示出来,对分析研究区各种地下水环境问题的成因有重要意义。此外,地下水系统结构可视化还有利于政府职能部门和公众更直观地了解地下水及相关环境问题,加强地下水科学研究成果的公益性和普及性(郭清海,2005)。

1.2.4 水化学同位素

在第33届国际水文地质大会上,国际原子能机构的 L. Gourcy 和 P. Aggrarawl 做了标题为“同位素水文学和国际原子能机构的作用”的报告,其中论述了同位素技术作为地下水研究的一种有力工具,正在成为水文调查的重要组成部分,某些情况下成为唯一的工具(韩再生,中国地质环境信息网)。有人研究充分利用($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)、氯(^{36}Cl)、硫(^{34}S)、硼(^{11}B)、氮(^{14}N)、碳(^{13}C)同位素体系对地下水系统地球化学过程和物质的来源及迁移转换进行了示踪研究(Aberg, 1989; Armstrong, 1998; Bain, 1994; Chae, 2004; Chae, 王焰新, 1997)。用锶同位素作为研究地下水水-岩相互作用的手段之一也得到广泛应用(李思亮, 2005)。

水化学-同位素联用方法研究地表水-地下水相互作用目前还未见报道。

1.2.5 地下水环境问题

地下水是生态环境系统中最活跃的因素之一。作为水环境系统的子系统,地下水环境是赋存于地下的所有水体及其相互关系的总称。地下水环境问题是指由于自然或人为的原因使地下水环境向不利于人类生存和发展方向发生的变异。近年来,长治盆地内的地下水开发利用及其他人类活动(如煤矿资源开采、化工及生活污水的排放)使地下水环境不断恶化,一系列环境地质问题随之出现,其中最普遍的包括水资源量减少、地下水位下降、水环境污染、地面沉降等。本书将重点对盆地最典型的地下水环境问题——地下水位、采煤排水、地下水质异常与地下水污染等开展研究工作。

1.2.5.1 地下水位

由于地下水位动态预测模型是解决在地下水研究工作中遇到的资料不完整、给分析工作带来困难此类问题的较好方法,因此模型对地下水位动态预测资料的拟合及预测精度将直接影响地下水分析及研究成果的质量。一个结构简单而预测精度高的确定型数学通式,具有以下特点。

(1) 因模型将自变量因子的系数及指数同时作为建模的待定参数,有效拓宽了该模型的适用条件和范围。同时,由于将河道水位(或流量)及降雨量因素通过指数形式对模型主函数进行修正,并且利用指数值的大小间接体现河道水位(或流量)及降雨量影响权重的大小,比较客观地反映了各因素对地下水位的影响效应。

(2) 对于某一特定区域,由于多年之间的各月、季及年的平均气温及蒸发量的变差系数一般均较小,尽管在某一年当中局部时段内气温及蒸发量可能发生特殊情况,但对月、季的平均或累计气温、蒸发量影响并不大。因此用时间作为综合主因子替代气温及蒸发量



因素是符合客观实际的。国内外一些实例分析也进一步证明了这一重要关系。

(3) 由于用时间因子取代了气温及蒸发量等其他周期变化的影响因素,避免了在建模前必须完成对各种时段气温、蒸发量等因素的统计及分析工作,使建模工作更加简捷,物理含义更加清晰,便于推广应用。

(4) 根据国内外一些实例(刘俊民,1993;赵辉,2003;CasdagliM,1989;DorffnerG,1996),地下水位动态预测模型较适合于具有变幅稳定、周期明显,随机干扰较小的地下水位动态预测;而且利用参数模型进行分析和预测,引入图解法确定主值函数参数初值不失为一种简单、快速的建模最优方法。

1.2.5.2 采煤排水

煤炭资源开发和利用过程中对环境的损害是难以避免的。这种损害的主要表现形式为地表的移动和变形、建筑物和构筑物的破坏、水资源的流失和水质劣化、大气环境的污染、噪声的影响以及居住环境恶化对人心理的不良影响等。近几年来,国内外围绕这一问题做了一些理论研究及实际工作,主要集中在以下方面:苏联学者 B. 斯列萨列夫在以静力学理论为基础研究煤层底板突水机理的基础上,将煤层底板视作两端固定的承受均布载荷作用的梁,并结合强度理论,推导出底板理论上的安全水压值公式(杨成田,1981);匈牙利学者以静力学理论为基础结合地质因素,研究煤层底板突水机理,提出了相对隔水层厚度(B. H. Brown)。以泥岩抗水压的能力为标准隔水层厚度,将其他不同岩性的岩石换算成泥岩厚度,称换算后的岩层厚度为等效厚度。Sheik. A. K 和 Pariseau. W. G (2001) 在实验中分析了在煤矿开采过程中岩体应力、应变及位移的变化和水压力及流速的变化的相互关系,他们认为在矿井围岩稳定性的研究中,水是矿井围岩稳定的主要决定因素,在研究中应充分考虑高吸水率的问题,裂隙岩体的水力传导系数,也应该在实验结果前得到准确的确定。此外,(Geir. et. al, 1992)在考虑地下水的影响中,采用了一个不受岩体采动影响的渗流模型,并对岩体变形与流体流动的耦合模型进行了应用。Schmelte 和 Pariseau. w. G (1992) 认为在岩体一流体的问题中,流体的压缩系数应该被考虑进去,Pariseau 和 Forster, Pariseau (1996) 在岩体—液体的复合作用方面也做了很多的研究工作。

国内学者陈明智等(1996)总结了我国煤矿矿井水净化和资源化现状,根据不同情况分别介绍了矿井水资源化的途径和适用技术,认为矿井水弃之为害,用之为宝,因矿制宜、因水制宜实现矿井水资源化,合理利用天然水资源,消除矿井排水对环境的影响,是煤炭工业持续、稳定发展的重要保证。张发旺等(2000)阐述矿业开发环境地质链的控制方法和模型,在一定程度上为今后利用环境地质链控制的新方法和新思想解决矿山环境地质问题、实现矿业开发的可持续发展提供了理论和实践依据。当前,我国在采煤排水方面的主要研究成果有:煤炭科学研究总院西安勘探分院在考虑了矿压破坏的情况下,根据多年的突水资料提出了突水系数(郭惟佳,1989)的概念。利用突水系数法,预测和判断承压底板的突水危险性;根据现场大量的实测资料和在实验室试验中所获得的研究成果,山东矿业学院提出了“下三带”理论(李白英,1992);北京开采所的王作宇等根据矿区现场观测资料,提出了底板移动的原位张裂和零位破坏理论(王作宇,1992);煤科院北京开采所的天泉,张金才(1997)等提出了底板岩层由采动导水裂隙带和底板隔水带组成



的概念, 并采用半无限体上一定长度上受均匀竖向载荷的弹性解, 结合 Coulomb - Mohr 强度理论和 Griffith 强度理论分别求得了底板受采动影响的最大破坏深度 (1997); 中国矿业大学黎良杰 (白晨光, 1995) 在对煤层底板破断机制及其平衡关系的研究后, 提出了底板关键层理论。

综合各个学者见解, 共同的结论是: 矿产资源开发与水资源保护并重, 影响矿产资源合理开发利用的因素较多, 必须纳入社会经济系统中, 运用多学科知识, 采用定性与定量结合、宏观与微观结合、发展与保护结合、当前与长远结合、社会与经济效益结合、理论分析与计算机模拟结合等方法全方位地对该问题进行系统分析与模拟, 只有这样才能寻找出旨在使资源环境效益、社会经济效益整体最优的开发开采模式。而新技术的引入应用, 特别是现代空间信息技术的应用, 有望给这项研究带来新的变化。

1.2.5.3 地下水污染

地下水中的铬污染主要来源于工业排放的含铬废水和铬渣。铬是电镀、制革、印染、摄影、陶瓷、玻璃、防腐和其他工业领域常用的基本原料 (兰铁刚等, 2000; 王振东等, 2001; 王桂山等, 2001; 罗道成等, 2002; Blowes, 2002), 其中制革、印染、镀铬等工业排放的废水、废渣中所含的 Cr^{6+} 和 Cr^{3+} 尤为丰富, 渗入地下便可能造成地下水污染。铬在地下水中的迁移主要与地下水系统中的氧化还原条件、有机质含量及酸碱度有关 (贺玉晓等, 2003)。在含水层介质处于碱性、弱碱性及氧化条件的情况下, CrO_4^{2-} 与 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 可大量形成, 它们在地下水中的溶解度大, 迁移能力较强, 有利于铬元素的富集 (曾昭华, 1999)。

鉴于 Cr^{6+} 对人体健康的巨大危害性, 保护地下水资源免遭铬污染, 并采取有效措施治理已受铬污染的地下水已成当务之急, 且具有重要的社会意义与实用价值。国外相关研究中涉及的地下水铬污染处理方法包括利用含水层的天然自净能力降低地下水中的铬浓度 (Palmer 等, 1994) 或通过原位处理系统修复已被铬污染的地下水 (Hocking 等, 2000; Blowes 等, 2000)。国内学者提出的地下水铬污染处理方法则包括抽水截流法、硫酸亚铁还原法、电化学去除法、地下连续墙技术处理法、垃圾堆肥处理铬污染法等。(傅金升等, 1993; 刘光生等, 1995; 范懋功, 1996; 丛蒿森, 1997; 黄启飞等, 2001)。

纵观世界各国地下水的发展过程, 普遍遵循一个共同的规律 (Burkart M. R., 1999; Blowes D. W., 2000; Doerfliger N., 1999; Geelhoed J. S., 2002; Helena B et al, 1999; Person M et al, 2000; Sadek M. A., 2001; Secunda S., 1998; Sikdar P. K., 2001; Smith E., 1999; Varsányi I., 1997; Sracek O., 2004; 张宗祜, 2000; 沈照理, 2002; 陈宗宇, 1995)。初期, 为了解决地下水位大幅度下降所带来的严重后果, 而被动地采取弥补措施。随着对地下水自然属性的不断深入认识, 地下水的巨大资源与环境效益愈来愈被重视, 并不断地加大对地下水研究的投入和对地下水的综合利用, 对水资源合理利用产生了日益显著的效益。

1.3 研究方法、研究内容及技术路线

研究区域是山西省社会经济发展程度最高, 人类活动最强烈、地下水开发利用程度也



最高的地区,区内曾开展过大量的地下水调查研究工作。早在20世纪50年代末到60年代初,北京地质学院会同当地水文地质调查部门在长治盆地完成了1/20万的地质与水文地质测绘工作;60年代中后期,水利部门和地质部门在长治盆地开展了一系列农田供水水文地质勘察和填图工作;70年代后期到80年代初,“山西省第一次水资源评价”完成了长治盆地的1/20万综合水文地质调查和编图工作,取得了当时最为系统完善的基础资料。20世纪80年代后期至今,盆地内没有进行大规模的区域水文地质调查研究工作,但在各行政区域和一定流域范围内,进行了许多专题性调查工作。以上研究初步查明了工作区的水文地质特征,获取了一批可靠的基础资料,为研究提供了坚实的研究基础。

按照研究内容的不同,本书将辛安泉域作为一个系统,采用野外调查、原位试验、理论分析与室内数值仿真模拟相结合,运用水文地质学、水文地球化学、地下水动力学、多孔介质理论、现代计算数学与计算技术等多学科交叉的研究方法进行研究。

地表水系统、孔隙水系统和岩溶水系统是开展地表水与地下水相互作用研究的基础。其中孔隙水和岩溶水系统分析为本次研究的重点内容。具体研究内容包括以下几点。

- (1) 摸清区域的自然地理、地质与水文地质情况和当前存在的主要问题。
- (2) 依据资料,系统分析整个区域的地表水系统,对地表水资源进行评价。
- (3) 在三维空间内开展含水层结构分析,并以三维立体图与三维剖面图的形式来展现长治盆地孔隙水系统的结构特征。对孔隙水资源量进行评价。
- (4) 对地表水渗漏的形式进行总结,并对渗漏量进行了定量计算。
- (5) 对辛安泉岩溶泉流量进行动态分析,采用时间序列分析方法对辛安泉流量的变化过程及控制因素进行分析。对岩溶水资源量进行评价。
- (6) 从地质与地下水位特征入手,分析孔隙水—岩溶水的补排关系。利用微量元素差异判别孔隙水—岩溶水、地表水—地下水的来源、渗漏特征、及其相互关系和水化学演化趋势。
- (7) 利用水化学同位素特征进一步论证地表水—地下水的相互作用。
- (8) 在分析煤炭开采对地下水的破坏机理、开采塌陷的形成机制的基础上,对采煤排水的时空变化规律以及造成的环境影响进行评价研究。

本选题拟采用的技术路线分述如下。

(1) 孔隙地下水系统的结构特征与演化规律研究。利用物探资料、钻孔资料编制盆地基底与前第三纪以来各地质年代地层底板的空间分布图,分析盆地孔隙介质的地质演化过程;根据钻孔资料将盆地孔隙介质概化为卵石、砾砂、粗砂、中砂、细砂、粉砂、亚砂土、亚黏土、黏土等岩性,利用GMS软件的三维可视化模块完成盆地200m深度之内孔隙介质的立体显现及结构特征分析。

(2) 孔隙水系统分析。分析了各种模式的水动力特征,分析孔隙水位动态分析;孔隙水资源评价。

(3) 岩溶水系统分析。在分析岩溶泉流量、评价岩溶水资源的基础上,建立泉流量模型,分析其控制因素。

(4) 区域内地表水与地下水的转化关系研究。探讨地表水渗漏后的主要去向及对地下水的影响和可能发生的水文地质化学作用。根据水化学同位素特征,进一步论证地表水—