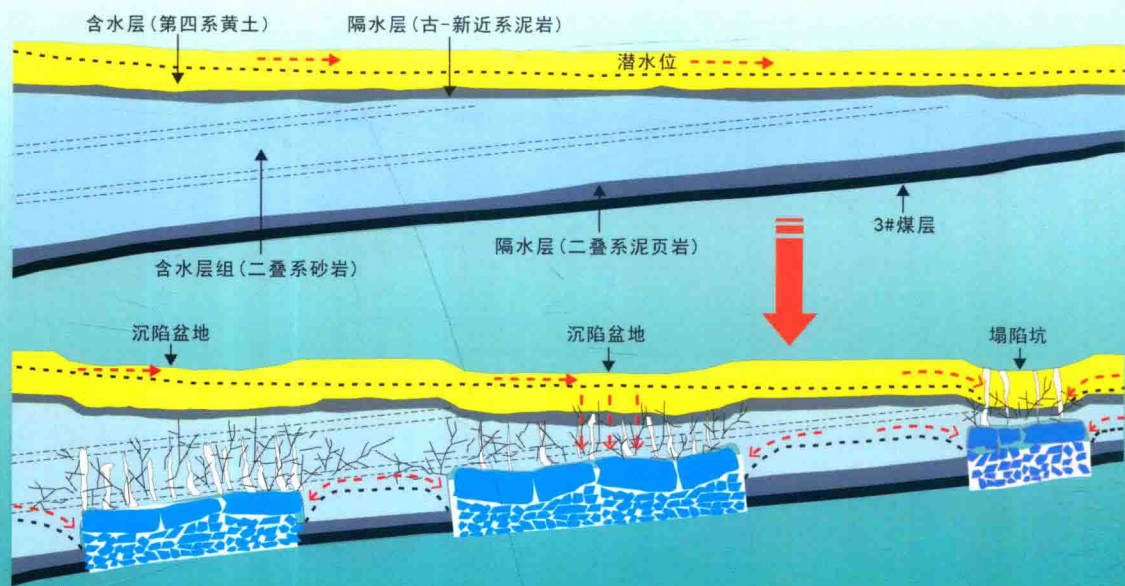


国家自然科学基金重点项目 ( 编号: 41130637 )

“群矿采煤驱动下含水层结构变异对区域水循环影响机制研究” 系列成果

# 含水层结构变异对区域 地下水循环影响数值模拟

● 代锋刚 张发旺 王 滨 么红超 著



地质出版社

国家自然科学基金重点项目(编号: 41130637)

“群矿采煤驱动下含水层结构变异对区域水循环影响机制研究”系列成果

# 含水层结构变异对区域地下水 循环影响数值模拟

代锋刚 张发旺 王 滨 么红超 著

地 质 出 版 社

## 内 容 提 要

煤炭开采造成含水层结构变异,尤其是群矿开采导致区域含水层空间结构非均质演化,已经严重影响了区域地下水循环演化态势,是矿区地下水资源短缺和破坏的根本原因。本书围绕水文地质结构演化与地下水循环模式耦合效应这个关键问题,开展群矿采煤驱动下盆地范围含水层空间结构非均质演化特征、含水层空间结构非均质对区域水循环影响、采煤驱动下盆地范围地下水资源演化趋势3方面的研究工作,揭示煤层开采后地下水资源再分布特点、变化规律,对矿区地下水资源的可持续利用和采煤保水具有重要的科学价值和现实意义。

本书可供水文与水资源工程、地下水科学与工程、地质工程等专业的科研、教学、管理人员参考使用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

含水层结构变异对区域地下水循环影响数值模拟 /  
代锋刚等著. —北京:地质出版社, 2017. 8  
ISBN 978-7-116-10527-0

I. ①含… II. ①代… III. ①含水层-变异-影响-  
地下水-水循环-数值模拟-研究 IV. ①P641.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 205526 号

Hanshuiceng Jiegou Bianyi Dui Quyue Dixiashui Xunhuan Yingxiang Shuzhi Moni

---

责任编辑:李莉 关会梅 李华

责任校对:韦海军

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京市海淀区学院路31号,100083

电 话:(010) 66554653 (邮购部); (010) 66554629 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554629

印 刷:北京地大彩印有限公司

开 本:787 mm × 1092 mm 1/16

印 张:7.5

字 数:200千字

版 次:2017年8月北京第1版

印 次:2017年8月北京第1次印刷

定 价:30.00元

书 号:ISBN 978-7-116-10527-0

---

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

“群矿采煤驱动下含水层结构变异对区域水循环  
影响机制研究”系列成果

编撰委员会

主 编：张发旺

副主编：陈 立 么红超 代锋刚 王 滨 韩占涛

委 员：郭晓静 万敬敏 许柏青 侯新伟 李敏巍

马 荣 郝彦珍 张 娟 任 硕 许 伟

胡博文 田红宇 钱 龙 蒋承超 陈 亮

张 威 李玉静 卢 蓉 丁艳青

# 前 言

煤炭开采对地下水资源的破坏是限制煤矿区经济与环境可持续发展的主要瓶颈，煤炭资源开采与水资源保护的矛盾将日益加剧。群矿开采导致区域含水层空间结构变异，已经严重影响了区域地下水循环演化态势，这是煤矿区地下水资源短缺的根本原因。大规模的煤层开采活动给区域地下水系统造成严重影响并可能导致灾难性后果，迫切需要加强含水层结构变异对地下水循环影响机制研究。由于采动裂隙介质强烈的非均质性和多尺度性，量化其水流模式一直是水文地质界的难题。笔者以山西路安矿区为研究对象，结合理论分析和数值模拟对群矿开采条件下含水层结构变异对区域地下水循环机制影响进行了系统研究，为矿区地下水资源的可持续利用和采煤保水规划设计提供参考依据。重点开展了以下研究：

1) 基于含水介质隔水和导水性质相互转化机制研究，利用 FLAC<sup>3D</sup> 建立典型矿区采煤影响范围含水层结构变异模型，揭示煤层开采引起的含水层结构变异规律。研究表明，采空区上方导水裂隙带发育规律是两边略高中间略低的马鞍形，两边发育高度为 105.7m，中间发育高度为 97.5m。模拟值与实测拟合效果较好，可以有效预测采煤后含水层空间结构变化。

2) 根据地质钻孔的地层岩性数据统计分析，利用 TPROGS 建立含水介质模拟的马尔科夫转移概率地统计模型，揭示研究区含水层空间结构非均质演化规律和趋势。研究表明，开采煤层厚度与渗透系数变异带发育高度基本呈近似线性关系，采厚越大，渗透系数变化幅度越大。该模型能够较准确地预测岩石的渗透系数  $K$ ，其计算精度要远远高于以往的经验公式。

3) 根据地下水系统中含隔水层、煤层赋存关系，结合导水裂隙、地表拉伸裂隙、开采沉陷等含水层结构变异受控因素，建立变参数变结构的地下水系统数值模拟模型。利用模型分析预测研究区不同开采情景下的地下水流场演变，揭示了群矿采煤驱动下盆地尺度地下水循环模式和水资源演化规律。研究表明，煤层开采形成采动裂隙发育基本限制在完整基岩内，使得隔水底板粘土岩发生弯曲变形，承压含水层水位下降形成人为“上层滞水”，对第四系潜水含水层结构破坏影响甚微；隔水层有效厚度变薄的局部地区，由于采动裂隙切穿隔水岩层，导致该区潜水含水层消失；同时采煤造成的人为“溯源侵蚀”，引发原本隔离的地下水系统间的地下水袭夺现象，矿井水补给量适当增加。

4) 开展采煤过程中和煤层开采后地下水资源演化趋势与再分布的研究。结果表明,采空区影响范围内出现不同规模的地面裂隙或裂缝,降水入渗补给由活塞式转变为捷径式。同时采空塌陷使得原有砂岩、页岩含隔水系统被破坏,裂隙水被大量疏干排出,地下水位下降,由于矿坑排水使补给量增加;采空塌陷及采空区增加了地下水储水空间,改变了补径排特征,天然基流量减少转化为矿坑水,改变了地下水系统对径流的调蓄作用,地表径流不仅受降水、地下水调蓄作用控制,还受到矿坑疏排水影响,使得水资源时空分布不均加剧。

5) 群矿开采驱动下含水层结构变异是长治盆地地下水补径排循环模式改变的主导因素,煤层开采对地下水系统的破坏是永久不可逆的,破坏程度还在不断加剧。即使煤矿关闭后,不开采不排水并不代表停止破坏地下水资源,被破坏的地下水系统基本无法恢复,尽管不排水,仍有较大水量涌入矿井采空区成为被污染的老窑水。

本书的完成和出版得到了国家自然科学基金重点项目(编号:41130637),中国地质科学院水文地质环境地质研究所重点实验室开放基金(编号:KF201605)、河北省水文学及水资源重点学科、河北省水资源可持续利用与开发重点实验室的支持和资助,在此表示感谢!由于研究者水平和时间所限,尚有许多内容还有待进一步深入研究,书中存在不足之处在所难免,恳请同行专家批评指正。

笔者

2017年1月

# 目 录

## 前 言

第1章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 国内外研究进展	2
1.3 研究内容	6
1.4 研究方法和技术路线	6
1.5 创 新 点	6
第2章 研究区概况	8
2.1 研究区概况	8
2.2 自然地理概况	10
2.3 地 质 概 况	12
2.4 水文地质条件	18
2.5 小 结	22
第3章 含水层结构变异及地下水循环模式	23
3.1 含水层结构变异及地下水循环模式	23
3.2 典型矿区含水层结构变异的数值模拟研究	25
3.3 数值模拟结果分析	30
3.4 小 结	34
第4章 研究区含水层结构变异转移概率地统计模拟	35
4.1 基于 Markov Models 的转移概率地统计学原理	35
4.2 转移概率计算方法	37
4.3 基于 Markov 模型的水文地质参数提取	42
4.4 小 结	47
第5章 区域地下水数值模拟模型	49
5.1 水文地质概念模型	49
5.2 地下水数学模型	52

5.3	地下水补、排要素概化计算·····	53
5.4	地下水数值模型·····	60
5.5	小 结·····	70
<b>第6章</b>	<b>群矿开采驱动下含水层结构变异对区域水循环影响模拟</b> ·····	<b>71</b>
6.1	地下水补径排模式和循环特征·····	71
6.2	采矿环境设置与预测方案·····	74
6.3	研究区现状水均衡分析·····	75
6.4	研究区各矿区开采对地下水循环影响预测·····	76
6.5	数值法预测结果分析·····	83
6.6	小 结·····	89
<b>第7章</b>	<b>采煤驱动下地下水资源演化规律与再分布特征</b> ·····	<b>90</b>
7.1	采煤驱动下地下水资源演化规律·····	90
7.2	采煤活动条件下地下水资源再分布特征·····	96
7.3	成果质量评述·····	100
7.4	小 结·····	101
<b>第8章</b>	<b>结论与建议</b> ·····	<b>103</b>
8.1	结 论·····	103
8.2	建 议·····	104
<b>参 考 文 献</b>	·····	<b>105</b>



# 图表索引

图 1.1	研究技术路线图	7
图 2.1	研究区范围	9
图 2.2	研究区地形影像图	10
图 2.3	研究区水系图	12
图 2.4	研究区地质构造纲要图	16
图 2.5	研究区主要含水层结构示意图	19
图 3.1	含水层结构变异示意图	23
图 3.2	群矿开采条件下地下水循环模式示意图	24
图 3.3	群矿开采条件下地下水资源演化规律示意图	25
表 3.1	钻孔岩性柱状信息表	26
图 3.4	FLAC <sup>3D</sup> 计算模型及网格剖分图	27
图 3.5	模拟结果对比图	28
表 3.2	岩体物理力学参数表	29
图 3.6	距离煤层顶板 27.65m 的最大主应力云图	30
图 3.7	工作面向前推进时的最大主应力云图	31
图 3.8	工作面向前推进时的垂直应力云图	31
图 3.9	采空区上方岩层的垂直位移等值线图	32
图 3.10	煤层顶板以上不同距离处的位移云图	33
图 3.11	两个工作面开采时煤柱的应力场位移场分布规律	33
图 4.1	垂向四种地质类型转移概率矩阵图	38
表 4.1	各介质侧向与垂向平均长度比值	39
图 4.2	a 组转移概率模拟结果	40
图 4.3	b 组转移概率模拟结果	40
图 4.4	c 组转移概率模拟结果	40
图 4.5	d 组转移概率模拟结果	41
图 4.6	a 组转移概率模拟结果剖面图	41
图 4.7	b 组转移概率模拟结果剖面图	41
图 4.8	c 组转移概率模拟结果剖面图	42
图 4.9	d 组转移概率模拟结果剖面图	42
表 4.2	松散岩石渗透系数参考值	43
表 4.3	矿区相同深度含水层渗透系数参考值(m/d)	43

图 4.10	渗透系数 $K$ 剖面位置 .....	45
图 4.11	a 组转移概率模拟结果提取渗透系数 A - A' 剖面图 .....	46
图 4.12	b 组转移概率模拟结果提取渗透系数 A - A' 剖面图 .....	46
图 4.13	c 组转移概率模拟结果提取渗透系数 A - A' 剖面图 .....	46
图 4.14	d 组转移概率模拟结果提取渗透系数 A - A' 剖面图 .....	46
图 4.15	a 组转移概率模拟结果提取渗透系数 B - B' 剖面图 .....	46
图 4.16	b 组转移概率模拟结果提取渗透系数 B - B' 剖面图 .....	47
图 4.17	c 组转移概率模拟结果提取渗透系数 B - B' 剖面图 .....	47
图 4.18	d 组转移概率模拟结果提取渗透系数 B - B' 剖面图 .....	47
图 5.1	数值模型计算区范围与剖分图 .....	49
图 5.2	含水层结构概化示意图 .....	50
图 5.3	含水层三维空间结构图及剖面图 .....	51
表 5.1	浅层孔隙水地下水蒸发强度统计表 .....	54
表 5.2	浅层孔隙水灌溉回渗系数表 .....	54
表 5.3	典型地区降水量理论频率计算成果表 .....	55
图 5.4	研究区降雨量均值曲线图 .....	55
表 5.4	模型区大气降水入渗补给系数取值一览表 .....	56
图 5.5	大气降水入渗补给系数平面分区图 .....	56
表 5.5	研究区降水入渗补给量计算表 .....	57
表 5.6	研究区河流渗漏补给量计算表 .....	57
表 5.7	研究区多年平均地下水均衡分析表 .....	59
图 5.6	模拟区地面高程等值线 .....	60
图 5.7	第四系含水岩组底板高程等值线图 .....	61
图 5.8	K10 含水岩组底板高程等值线图 .....	61
图 5.9	K8 含水岩组底板高程等值线图 .....	62
图 5.10	潜水含水层初始等水位线图 .....	62
图 5.11	第一承压含水层初始等水位线图 .....	63
图 5.12	第二承压含水层初始等水位线图 .....	63
图 5.13	地下水位长观孔位置 .....	65
图 5.14	潜水含水层参数 $K$ 分区 .....	66
图 5.15	第一承压含水层参数 $K$ 分区 .....	66
图 5.16	第二承压含水层参数 $K$ 分区 .....	67
图 5.17	第四系潜水含水层——第一承压含水层越流系数分区图 .....	67
图 5.18	第一承压含水层——第二承压含水层越流系数分区图 .....	68
图 5.19	第四系潜水含水层流场拟合图 .....	68
图 5.20	第一承压含水层流场拟合图 .....	69
图 5.21	第二承压含水层流场拟合图 .....	69

图 6.1	研究区煤层开采前地下水流系统循环模式图	72
图 6.2	研究区煤层开采后地下水流系统循环模式图	73
表 6.1	各矿区首采区顶板冒落特征取值表	74
表 6.2	研究区现状水均衡分析表	76
表 6.3	研究区各矿特征一览表	76
表 6.4	各矿首采区涌水量表	77
表 6.5	厚煤层分层开采的冒落带高度计算公式	78
表 6.6	厚煤层分层开采的裂隙带高度计算公式	78
图 6.3	潜水含水层变异范围分布图	82
图 6.4	含水层 K10 变异范围分布	82
图 6.5	含水层 K8 变异范围分布图	83
图 6.6	方案 1 潜水含水层水位等值线	84
图 6.7	方案 1 第一承压含水层水位等值线	85
图 6.8	方案 1 第二承压含水层水位等值线	85
图 6.9	方案 2 潜水含水层水位等值线	86
图 6.10	方案 2 第一承压含水层水位等值线	86
图 6.11	方案 2 第二承压含水层水位等值线	87
图 6.12	方案 3 潜水含水层水位等值线	87
图 6.13	方案 3 第一承压含水层水位等值线	88
图 6.14	方案 3 第二承压含水层水位等值线	88
图 7.1	各矿区降水量时空分布图	90
图 7.2	各矿区涌水量时空分布图	91
图 7.3	各矿区含水系数时空分布图	92
图 7.4	各矿区采空区面积时空分布图	92
图 7.5	各矿区采煤量时空分布图	93
图 7.6	2015 年群矿开采驱动条件下计算的剖面水头分布图	94
图 7.7	2020 年群矿开采驱动条件下计算的剖面水头分布图	95
图 7.8	2030 年群矿开采驱动条件下计算的剖面水头分布图	95
图 7.9	2015 年群矿开采驱动条件下地下水资源影响分区	97
图 7.10	2020 年群矿开采驱动条件下地下水资源影响分区	98
图 7.11	2030 年群矿开采驱动条件下地下水资源影响分区	98
图 7.12	研究区地下水资源再分布图	100

# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

煤炭开采对地下水资源的破坏是限制煤矿区经济与环境可持续发展的主要瓶颈,世界各国的煤炭基地建设和发展过程中,都曾经因为地下水资源的破坏而产生水资源短缺、水污染和各种用水纠纷。我国富煤地区主要分布在华北和西北,仅山西、内蒙古、陕西和新疆4省(区)煤炭查明资源储量就占全国的73.1%,这些富煤地区多是地下水资源相对贫乏的地区,据2007年统计资料,全国86个重点矿区缺水的占71%,严重缺水的占40%,而煤矿开采对地下水资源的严重破坏加剧了矿区的水资源短缺矛盾,这一问题在能源大省山西尤为突出。1949~2009年,山西省因采煤引起地下水资源破坏 $276 \times 10^8 \text{t}$ ,经济损失高达386亿元,占山西近20年GDP总量的3.11%;山西省已经有14座地级城市、42个县城、496万农村人口不同程度地受到采煤造成的缺水影响,几千处泉水干涸,严重影响了矿区经济、资源和环境可持续发展。究其根本原因,在于煤炭开采造成地下水资源的破坏,使地下水资源由原来可供开采的优质水源变为被污染的矿坑水而排走,破坏了地下水的补径排,破坏了水文下垫面条件,破坏了地表水循环。由于采煤引起含水层结构变化,进而影响了区域地下水循环态势。

采煤过程中,围岩破坏使隔水层与含水层骨架发生变化,加上矿井水的大量疏排,导致地下水流场向采煤状态下的地下水循环模式演化。煤矿闭坑后,已被采矿扰动了的矿区地下水流场和赋存环境再次发生变化。原已疏干的含水层及采矿扰动裂隙空间被重新充水淹没,水化学环境也同时发生明显的变化,形成采煤后地下水环境循环演化的新模式。

这种采煤过程中和采煤后地下水循环模式的演化具有时空四维动态演化性、非线性和复杂性。以往的研究工作多是从单个煤矿采动裂隙连通的导水性和采矿突水机理的角度开展研究,对于采动裂隙时空动态演化对含水层结构变异的影响机制,以及从群矿采煤驱动的角度研究含水层空间结构非均质演化对区域地下水循环演化轨迹和演化趋势研究不够,而这是揭示采煤引起地下水资源再分布规律和阐明采煤条件下区域地下水循环演化真实模式的关键,也正是本书的重点研究内容。

在群矿采煤条件下,广大区域内的地下水资源遭到破坏,地下水环境恶化,揭示采煤后区域水循环演化的真实规律是实现水资源的调控和优化配置技术基础,也是实现矿区经济、资源和环境协调发展的关键问题。

另外,本书重点揭示煤层开采后区域含水层空间结构变异规律,基于变化的水文地质条件对区域地下水循环模式开展深入研究,查明采煤过程中和采煤后地下水资源再分布的真实状态,进一步发展含水层空间结构变异下的地下水系统演化新理论,并丰富变化环境

下的区域水循环研究；揭示群矿采煤驱动下地下水循环演化特征和地下水资源再分布规律，一定程度上实现含水层空间结构变异对地下水循环演化影响机制研究的特色创新和理论突破；本研究的开展不仅对煤矿采区经济、资源和环境的可持续发展具有重要现实意义，而且对群矿采煤条件下地下水循环演化领域的研究具有重要科学价值。

## 1.2 国内外研究进展

当前世界煤炭开采主要集中在中国、澳大利亚、美国、俄罗斯、加拿大、英国、印度、印度尼西亚、南非等国。欧洲等发达国家的煤炭勘查和环境整治已近尾声，其煤炭开采水文地质效应方面的研究大多为开采后的水害防治和监测、矿井水资源化等 (Wolkersdorfer et al., 2004)，而对于开采过程中的含水层介质和地下水资源演化研究主要集中于中国、澳大利亚、美国、印度、南非等现在的采煤大国。

纵观国内外关于煤炭开采对水资源影响的研究，可以得出如下结论：

1) 采动裂隙演化引起的含水层结构变异的研究有了成熟的理论和方法，群矿采煤引起盆地范围的含水介质空间结构非均质演化研究已取得一些定性成果，但在定量研究和系统研究方面还有待提升。

岩层因采动而变形、移动和破坏，导致煤层顶底板裂隙的时空演化与分布伴随着采煤全过程以至煤层开采后很长一段时期，是煤层开采导致岩层阻透水性质转化和含水层结构变异的重要原因。刘天泉院士 (1995) 等对我国煤矿开采岩层破坏与导水裂隙分布作了大量的实测和理论研究，对采场岩层移动破断与采动裂隙分布规律提出了“横三区”、“竖三带”的总体认识，得出计算导水裂隙带高度的经验公式，唐春安等 (2003) 针对岩体损伤破裂和非均匀性开发出了岩体破裂失稳分析系列软件 RFPA，实现了对采煤过程中裂隙发育过程的较好模拟和预测 (Yang et al., 2007)。已经有了多种研究采动裂隙演化引起的含水层结构变异的观测和参数获取方法，如抽水试验和 Packer 系统监测相结合原位探测渗透系数 (Booth et al., 1992)，相似材料模拟模型观测采动过程中的围岩破裂过程 (马岳谭等, 2009)，用钻孔彩色电视系统实地监测采动过程中覆岩裂隙带范围内裂隙的分布形态 (张玉军等, 2009)，现场实测、实验室相似材料模拟和计算机数值模拟相结合探测综放开采采动裂隙分布规律及演化特征 (杨科等, 2009)，地下水位持续监测和孔中摄像监测相结合探测煤层顶板含水层的破裂和再造过程 (Zhang Stonehenge, 2011) 等。利用高密度电阻率成像探测充水地层 (Krishnamurthy et al., 2009)，以及在巷道中施工探测钻孔，通过压水试验，观测注水压力的方法确定了采煤掘进过程中煤层底板渗透性的变化规律等 (Zhang Jincai, 2005)。

2) 由于群矿采煤引起盆地范围的含水介质空间变异的随机性及其水力性质的尺度效应，含水介质非均质性的多尺度描述和如何影响地下水循环模式仍然是目前地下水领域非常重要的前沿问题。

群矿采煤引起的地面塌陷、地面沉降、裂隙发育等在空间上使大范围的含水介质组成和空间结构发生演化，原来的隔水层中发育了导水裂隙，塌陷堆积体形成了高渗透性的含水层。前人对于这一点关注和研究比较少，主要关注单矿开采引起的含水介质变化。例

如,美国阿巴拉契亚煤田长壁采煤(高倾地层)的水文地质效应从20世纪70年代开始研究。伊利诺斯煤田(缓倾地层)的水文地质效应20世纪80年代开始研究,Stoner等(1983,1987),Lines(1985),Booth(1986,1992,2002,2006)论述了采煤引起的含水层性质变化。他们认为,地下开采都会疏干连通的含水层,但采煤引起的地面沉降和地层移动也会独立地影响地下水系统,它们通过改变裂隙导水性质和渗透性改变水力梯度和地下水位,他们的研究实例中也有群矿开采的情况,但没有专门研究。李建新等(2006)指出义煤集团老矿井尤其是小煤窑开采使新采区水文地质条件复杂化,增加了突水危险。吴有信(2005)用综合物探方法探测了乌兰煤矿群矿采煤引起的含水介质空间结构变化情况。另外,关于区域上的群矿采煤水文地质效应的研究大多限于对地下水位和水质变化的研究,未见到对含水介质空间结构变化的研究。如1979年,为评价分布于怀俄明、蒙大拿和北达科他州的露天煤矿对蒙大拿州南部北夏安族印第安人聚居地的影响,Woessner等通过对采动岩体的化学分析和淋滤实验,并建立物质平衡模型预测了露天采矿区对区域地下水质的影响。1981年Moran等应用地下水流动方程一维解析解预测了美国北达科他州西部的露天煤矿开采引起的地下水位下降。Oteri(1981)在英格兰的Tilmanstone应用地电调查方法研究了采矿污水造成的白垩纪含水层盐分污染问题。Jeffery等(1989)应用原位钻孔试验、数据分析等方法研究了英国典型煤矿的矿坑涌水特征。总之,前人研究也有关于群矿开采引起含水介质空间结构变化的定性描述,但还没有将群矿开采作为专门类型进行系统研究。Freeze(1975)统计分析了大量渗透系数 $K$ 和孔隙度空间变异性,认为渗透系数 $K$ 可以用对数正态分布来描述,孔隙度可以用正态分布来描述。与渗透系数 $K$ 相比,孔隙度的空间变异性相对较小。Dagan(1986)建立非均质性模拟尺度关系时,提出可以将尺度分为实验室尺度、局部尺度和区域尺度。Gelhar(1993)给出了由分子尺度到孔隙尺度,非均质现场尺度,再到含水层,以及全球尺度的划分标准,各尺度之间通过流体连续介质的势能平衡的平均化过程实现。

3) 转移概率地统计具有较多优势,许多学者也进行了大量地下水随机模拟方面的研究,并得到了一定程度的应用,但其仍然存在一些亟待解决的问题,如垂直方向到侧向转移概率的推算方法适应性较差,无法真正实现多尺度含水介质模拟等。

在模拟实践中通常利用确定性模型或随机模型来描述将含水介质的水力性质。确定性模型是传统方法,根据水文地质条件进行参数分区,并认为同一分区内使用相同的水文地质参数。事实上,含水介质在不同的时间尺度的沉积过程中形成了空间非均质性。Dagan和Gelhar等将随机理论应用于非均质含水介质的非均质研究中。基于地统计学的含水介质研究中,对于水力性质连续性研究方法有蒙特卡罗-马尔可夫链方法、蒙特卡罗方法、模拟退火法、序贯高斯模拟等方法。然而如果含水介质作为离散型岩性进行模拟,常用的方法有转移概率地统计、指示克里金方法和序贯指示模拟等。其中转移概率地统计和传统克里金方法相比,能反映地层分布的非对称性,地层沉积往往具有趋势性。另外,转移概率地统计作为一种随机模拟方法,可以产生很多样本并统计出地层类型出现的概率。由于TPROGS优势明显,因此在含水介质的模拟中得到广泛的应用。

1996年,Carle和Fogg使用转移概率替代交叉变异函数或者协方差实现指示地统计,

其使用的转移概率体现了地层属性比例、平均长度和毗邻规律等信息，并考虑其对称性。Carle (1999) 利用 T-PROGS 软件实现了基于马尔可夫性质的含水介质转移概率地统计，即根据钻孔岩性数据实现地质岩性三维空间分布的随机模拟。Sivakumar 等 (2005) 使用转移概率地统计进行非均质含水层中溶质运移时间的分形研究。Rubin 等 (2006) 使用转移概率地统计研究了河流沉积物的空间变异性。Zhang 等 (2006) 使用基于马尔可夫地统计模型去量化含水层的空间变异性，并结合地下水流模型和随机运移模型计算含水层溶质运移时间概率密度函数。Lee 等 (2007) 利用序贯高斯模拟和转移概率指示两种地统计模拟方法，模拟渗透系数场并应用于现场的抽水试验的地下水模型模拟中，结果表明每个地统计模型的连通性和高渗透系数介质的空间连通性一致，利用协方差模型能实现很好的拟合。Blessent 等 (2011) 使用转移概率和马尔可夫链建立基于随机理论裂隙岩相模型。在国内，王荣 (2006) 和董英 (2006) 利用 TPROGS 对华北平原地下水流模拟开展了研究。靳萍等 (2009) 基于 TPROGS 建立供水水源地的三维模型，并结合水文地质单元进行水源地开发利用方案的预测。郭飞等 (2012) 采用马尔可夫链对南京市河西地区的新近系地层进行了地质建模。

总之，尽管转移概率地统计优势很多并作了大量的研究，取得一定程度的广泛应用，但其仍然存在一些亟待解决问题，如垂直方向到侧向转移概率的推算方法的适应性较差；无法真正实现多尺度含水介质模拟和海量钻孔数据模拟；而且在确定性和随机性耦合模拟方面的研究也较少。

4) 基于含水层空间结构非均质演化对水循环的轨迹影响研究已取得一些成果，但在群矿开采驱动下区域水循环构成和链式效应研究方面还处于起步阶段。

含水介质的非均质性是影响地下水流模拟和计算精度的主要障碍。Moreno (1994) 和 Tsang (2003) 提出含水介质的非均质性还会引起地下水的沟道式流动，使得地下水流和溶质运移模拟更加困难。在数学方法上，各国科学家已经探索出了一些有效解决各向异性介质问题的方法。如 Berkowitz 等 (2001) 研究了连续时间随机走动理论 (CTRW) 在各向异性孔隙介质中的流动理论中的应用，结果证明，CTRW 理论对于解释空间尺度和不确定性的相互关系十分有效。Fokker (2001) 应用有效介质理论来计算各向异性介质中的有效渗透性，计算结果与解析解和相似的各向同性介质中的计算结果十分相似。Hunt (2006) 讨论了各向异性系统中尺度增加引起的流动状态从一维变为三维的情况，这种变化可以用来实现在连续流理论中应用随机裂隙理论。Degan 等 (2008) 采用积分分析和尺度分析方法确定了数值模拟中的渗透系数，Jacob Bear 等 (2010) 讨论了材料对称性对各向异性介质中流体运动地影响。

如果把这些理论和方法应用于采煤条件下的含水层结构非均质性和各向异性研究，有可能实现对区域性各向异性含水层中地下水流的较好模拟。在大区域的研究实例上，Wu Qiang 等 (2006) 总结了我国北方煤盆地含水层空间分布和矿坑充水的概念模型。Tonder 等 (2007) 研究了南非 Sigma 煤田群矿开采闭坑后采空区水位的上升情况。其研究利用开采过程中的长期水位监测和钻孔探测资料，建立了区域含水层系统模型，通过一定的概化和简化进行了参数赋值，用 MODFLOW 建立了煤矿区的地下水流数值模型，预测了闭坑后的矿坑水位上升和溢出情况。廖秋林等 (2005) 的研究表明，在工程设计中广泛应

用的 ANSYS 和 FLAC<sup>3D</sup> 软件可克服专门地下水模拟软件对于含水介质非连续性刻画的不足,实现对复杂客体中地下水流的较好模拟。丁金华等(2015)指出地下水多场耦合模拟研究具有一定进展,主要集中在浅部地层工程建设领域,深部地层地下水多场耦合模拟研究仅在高放废物处理领域有少量报道(张玉军等,2015),群矿采煤驱动下深部地层地下水多场耦合模拟亟待深入研究(武强等,2011)。总之,前人研究为塌陷稳定后的采空区地下水流动轨迹研究提供了很好的经验,但对区域水循环构成和群矿采空区之间的链式效应方面的探索还不够。

5) 盆地范围的水资源再分布研究已取得一些共识,但系统的研究成果还较少。Hawking 等(2007)研究了美国宾夕法尼亚州 Cambria 郡一个 14672 英亩<sup>①</sup>的废弃复合型煤矿的充水后的水文地质特征。研究表明,采矿后的沉降使地层的有效孔隙度减小到平均 11%,因此,煤矿区含水层的储水量比预期少很多,这对于矿井水资源化的管理有重要意义。

随着我国煤炭开采引起水资源问题的凸显,20 世纪 90 年代后,我国许多学者对地下水受煤炭开采影响从不同方面作了大量的研究。韩宝平等(1994)以重庆南桐矿区为例,对煤矿地下开采活动所引发的水文地质效应进行了系统分析,计算了采煤后地下水资源量,分析了水质变化的原因。武强等(2000)讨论了解决中国北方聚煤盆地中排水、供水和生态-环境保护之间矛盾的优化方法。张发旺等(2002)、王洪亮等(2002)研究了神木大柳塔地区煤矿开采对地下水分布的影响,吴玉生等(2004)对山西沁水煤田开采后地下水资源数量和质量进行了分析。杨策等(2006)研究了煤炭开采引起平顶山市石龙区贫水化的原因。李振拴(2007)采用动储量破坏及静储量破坏评价方法来计算被破坏的水资源量,为合理利用山西省水资源提出了合理化建议及相应措施。

国内其他专家也提出过这样的观点,如刘俊杰等(2003)在地下开采条件下水资源流失机理与环境影响的研究中提到矿井水资源化问题,认为矿井水在矿井废弃多年无排水的情况下,成为天然地下水库,形成另一种类型的、潜在的水资源。范立民等(2006)认为采空区顶板岩层破裂后,形成类似于烧变岩的地下水储存空间,经过一定时期的含水层再造,将形成新的含水盆地,并提出要重视水资源的再分布对经济社会产生重要影响的研究。张发旺等(2002)也先后发表论著,针对采煤条件下含水层结构变化的问题,提出含水层再造概念,并详细讨论了如何控制“含水层再造”的“度”以更好的解决“保水采煤”的重要课题,并提出要高度重视含水层结构变异后地下水资源重新分布和利用问题。

综上所述,从国内外研究成果来看,采动裂隙演化引起含水层空间结构变异研究已经取得了一些重要成果,本次研究是在以往研究基础上的继承研究;前人研究对群矿采煤引起盆地范围的含水介质空间结构非均质演化研究方面还缺乏定量和系统的研究,对群矿采煤驱动下盆地范围的水资源再分布研究已取得一些共识,但系统的研究成果还较少。笔者针对前人研究中的不足,开展对区域含水介质非均质性动态过程尤其是群矿开采条件下区域含水介质非均质性演化的放大效应的研究,揭示含水介质非均质性动态演化引起的区域地下水循环演化响应模式和链式效应,在此方面寻求进一步理论突破。本书揭示采煤过程中地下水演化和重新分布的动态过程,建立采煤驱动下区域水资源评价的模式,为采煤过程中和闭坑后的水资源调控和优化利用提供技术支撑。

① 1 英亩≈4046.86m<sup>2</sup>。



## 1.3 研究内容

1) 采动裂隙时空演化对区域含水层结构变异影响研究。通过开展典型矿区采煤影响范围内覆岩结构变形、破坏和采动裂隙的时空分布特征及动态演化过程的研究,取得含水介质埋藏深度、厚度、边界条件性质的变化,含水介质孔隙和裂隙率的变化,新含水介质的组合特征信息和数据,阐明采煤影响范围内含水介质非均质性演化特征;通过含水介质隔水和导水性质相互转化机制的研究,进而揭示煤层开采引起的含水层结构变异规律,建立典型矿区采煤影响范围含水层结构变异模型。

2) 群矿开采驱动下含水层结构变异对区域水循环影响效应模拟研究。在深入研究群矿采煤引起区域含水层空间结构非均质演化特征和演化趋势的基础上,获取采煤后区域地下水的最新补、径、排信息和数据,探讨区域地下水流模式在采煤过程中的变化规律,开展群矿采煤驱动下水文地质结构演化与地下水流模式耦合效应研究,揭示含水层空间结构非均质演化对区域水循环影响机制,建立群矿采煤驱动下区域地下水循环演化模式。

3) 采煤驱动下区域地下水资源演化趋势与再分布研究。利用群矿采煤驱动下区域地下水循环演化研究成果,开展采煤过程中和煤层开采后地下水资源演化趋势与再分布的研究,建立开采条件下的水资源评价模式,进行盆地范围水资源综合评价,揭示煤层开采后地下水资源重新分布后的状况、特点、变化规律和可利用程度。

## 1.4 研究方法和技术路线

本书从群矿开采驱动下采动裂隙发育、含水层结构变异等方面入手,在资料综合分析的基础上,采用野外调查、野外监测、室内模拟、计算机模拟的方法,运用水文地质学原理、随机理论研究了采煤引起含水层结构变异厚度以及其中渗透性变化特征、地下水循环影响效应等;根据上述成果,研究群矿开采驱动下区域地下水资源演化规律与再分布特征,为变化环境下矿区地下水循环机理和水资源再分布态势提供技术理论依据,为区域地下水开发利用、采煤保水实践提供技术支持。技术路线如图 1.1 所示。

## 1.5 创新点

1) 利用 FLAC<sup>3D</sup>建立的含水层结构变异模型,并与实测数据有较好的拟合效果,可以有效预测采煤后含水层空间结构变化。

2) 构建的 Markov 转移概率地统计模型能够较准确预测岩石的渗透系数  $K$ ,其计算精度要高于以往的经验公式,Markov 转移概率地统计模型可以用于研究区含水层渗透系数计算,能够为水循环机制研究提供基础数据。

3) 建立变参数变结构的地下水系统数值模拟模型,改进了传统的确定性地下水模型,提高模拟的可靠性和准确性。利用模型分析预测研究区不同开采情景下的地下水场演变,揭示了群矿采煤驱动下盆地尺度地下水循环模式和水资源演化规律,为地下水资源合理开发、科学管理及环境保护提供技术依据。