

吴爱民 陆书南 周绍智 著

岩溶水开发与水环境演化

——山东双村强渗透开放岩溶水系统典型研究

地震出版社

国土资源部环境地质开放研究试验室

岩溶水开发与 water 环境演化

——山东双村强渗透开放岩溶水系统典型研究

吴爱民 陆书南 周绍智 著

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

岩溶水开发与水环境演化: 山东双村强渗透开放岩溶水系统
典型研究/吴爱民等著. —北京: 地震出版社, 2003.7

ISBN 7 - 5028 - 2302 - 6

I. 岩 ... II. 吴 ... III. 岩溶水 - 地下开采 - 关系 - 水
环境 - 研究 - 山东省 IV. P614.134

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 048263 号

岩溶水开发与水环境演化

——山东双村强渗透开放岩溶水系统典型研究

吴爱民 陆书南 周绍智 著

责任编辑: 李小明

责任校对: 王花芝

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467972

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: scis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印厂

版 (印) 次: 2003 年 7 月第一版 2003 年 7 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 180 千字

印张: 7

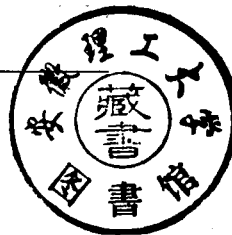
印数: 001 ~ 900

书号: ISBN 7 - 5028 - 2302 - 6/P·1170 (2879)

定价: 25.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)



前 言

本书以具有强渗透开放性特征的山东双村岩溶水系统为例,研究了岩溶水开发与水环境系统演化之间的相互关系。全书共分八章,重点探讨了强渗透开放性岩溶水系统的特征,岩溶水动力系统与岩溶水化学系统的开采激励效应及其研究方法,铀同位素技术在岩溶水环境演化研究中的应用等。其主要特色表现为:①以可持续发展思想为指导,探讨了人与自然的相互作用,从水动力、水化学、水环境等方面,探讨了岩溶水开采对水资源环境的影响;②提出了降水补给函数概念,实现了降水补给非线性问题的数值模拟,比较精确地模拟、刻划、再现了水动力系统的开采激励效应;③运用三角形面积坐标原理,实现了三元补给地下水系统混合比的计算,取得了水文地质条件新认识;④从水资源可持续利用的角度出发,提出了岩溶水资源可持续利用的原则与评价指标。

山东双村岩溶水系统的勘查研究工作经历了近 30 年的历史,相继投入了大量野外调查、钻探、物探、抽水试验、采样测试、动态监测、数值模拟等工作,累积投入的勘查研究经费近 2000 万元,分别于 1977 年、1985 年、1989 年、1996 年和 2000 年提交了 5 份不同勘查阶段、不同研究精度的水文地质勘查研究报告,每次勘查研究都有新的进展。先后参与勘查研究的技术人员有近百人,其中,按照参与工作阶段的先后顺序,起骨干作用的主要人员有李传谟、梁文康、李新勇、吴爱民、施治金、陆书南、周绍智等。

本书作者相继作为项目负责人(吴爱民、陆书南)和单位总工程师(吴爱民、周绍智)分别主持完成和组织领导了 1988~1989 年、1994~1996 年、1999~2000 年的勘查工作和 1988 年至今的监测研究工作。本著作就是在以往工作基础上,以国土资源部环境地质开放研究试验室资助的“双村岩溶水系统水质演化与水岩作用研究”课题为依托,以吴爱民 2000 年完成的博士学位论文《强渗透开放岩溶水系统开采激励效应研究》为蓝本,经过进一步研究、修订完善而成的。从某种意义上讲,本著作既是作者长期积累、潜心研究的个人成果,同时,也饱含着许多工程技术人员的集体劳动。在此,我向所有参与过双村岩溶水系统勘查研究的人们表示深深的谢意!没有他们的前期劳动、没有他们的密切协作,也就不会有本研究成果。

同时，我要感谢我的博士导师、前国际水文地质学家副主席、中国地质科学院水文地质工程地质研究所所长费瑾研究员和我的副导师伍兆聪研究员、朱延华研究员，他们的严谨学术作风和渊博学术知识影响着我，他们从各个侧面、全方位地指导了我，使得博士学位论文达到了比较高的研究水平；我要感谢与山东大学孙讷正教授、梁文康教授的长期合作，在他们提供的数值计算基础软件基础上，作者开展了进一步开发；我要感谢由张宗祜院士为主任委员，段永侯教授、李慈君教授、任福弘研究员、焦淑芹研究员、张光辉研究员、徐军祥教授级高工组成的博士论文答辩委员会，他们对论文给予高度评价，评定为优秀博士论文，并且提出了宝贵意见和建议，使得本书的学术价值进一步提高。

最后，我还要感谢山东省地质矿产勘查开发局和国土资源部环境地质开放研究实验室。没有山东地矿局的支持，作者就不会有长期从事岩溶水研究和进一步学习深造的机会；没有环境地质开放研究实验室的资助，作者就不可能顺利完成博士学位论文。

由于作者水平有限，书中缺点错误难免，敬请读者批评指正。

吴爱民

2002年6月于济南

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 课题依据与研究意义	(1)
1.1.1 课题依据	(1)
1.1.2 强渗透开放岩溶水系统及其研究意义	(1)
1.2 国内外研究现状、存在问题及与本研究的关系	(3)
1.2.1 岩溶形成作用与碳循环	(3)
1.2.2 岩溶含水介质与岩溶水资源模型	(3)
1.2.3 地下水环境演化与水资源可持续利用	(4)
1.3 技术路线、研究内容与方法	(5)
1.4 研究特色与创新性评述	(5)
第 2 章 研究区地理地质背景	(7)
2.1 自然地理概况	(7)
2.1.1 研究区位置	(7)
2.1.2 地形地貌	(8)
2.1.3 气象水文	(8)
2.2 区域地质概况	(8)
2.2.1 地层	(9)
2.2.2 构造	(9)
第 3 章 山东双村强渗透开放岩溶水系统及其开采激励效应	(11)
3.1 双村岩溶水系统的天然特征	(11)
3.1.1 双村岩溶水系统概念的提出	(11)
3.1.2 边界系统特征	(11)
3.1.3 含水系统特征	(12)
3.1.4 流动系统特征	(14)
3.2 双村岩溶水系统的水资源特点与岩溶水开采状况	(16)
3.2.1 双村岩溶水系统的水资源特点	(16)
3.2.2 岩溶水开采状况	(16)
3.3 双村岩溶水系统的开采激励效应	(17)
3.3.1 开采激励效应的概念	(17)
3.3.2 水动力系统的开采激励效应	(17)
3.3.3 水循环系统的开采激励效应	(20)
3.3.4 水化学系统的开采激励效应	(23)

3.4	双村岩溶水系统的强渗透开放性特征	(28)
3.4.1	双村岩溶水系统的强渗透性	(28)
3.4.2	双村岩溶水系统的开放性	(29)
3.5	本章小结	(30)
第4章	开采激励下的岩溶水动力系统数值模拟研究	(31)
4.1	模拟模型与求解	(31)
4.1.1	水文地质概念模型	(31)
4.1.2	双村岩溶水系统水文地质数值模拟与资源评价回顾	(32)
4.1.3	双层拟三维水流模型的数学描述	(32)
4.1.4	模拟模型的建立与求解	(34)
4.2	模拟模型的调试与技术处理	(38)
4.2.1	原始模型拟合效果与误差成因分析	(38)
4.2.2	降水入渗补给的非线性性质及其模拟	(40)
4.2.3	水动力模拟模型的主要参数	(43)
4.3	岩溶水动力系统演化模拟结果及其讨论	(45)
4.3.1	模拟结果	(45)
4.3.2	模拟结果的讨论	(45)
4.4	本章小结	(50)
第5章	开采激励下的岩溶水文地球化学研究	(52)
5.1	区域水化学成分的形成作用	(52)
5.1.1	区域水化学形成演化模式	(52)
5.1.2	岩溶水水化学成分的形成作用及其开采激励效应	(53)
5.2	水源地水化学成分的开采演化与形成作用	(55)
5.2.1	水源地分布及其在双村岩溶水系统中的位置	(55)
5.2.2	水源地水化学演化特征与形成作用	(55)
5.3	深井碳酸盐溶蚀实验及其意义	(58)
5.3.1	实验方法与条件	(58)
5.3.2	实验结果	(59)
5.3.3	实验揭示的问题讨论	(60)
5.4	岩溶水系统的水化学平衡模拟计算	(61)
5.4.1	模拟计算中的 pH 校正	(61)
5.4.2	水化学平衡模拟计算结果及讨论	(62)
5.5	本章小结	(67)
第6章	岩溶水开采激励效应研究的铀同位素方法	(68)
6.1	铀放射系不平衡的基本原理	(68)
6.1.1	铀的天然分布与铀同位素分馏	(68)
6.1.2	地下水铀同位素研究的适用条件	(69)
6.2	地下水三元补给体系混合比的面积坐标算法	(69)
6.2.1	面积坐标的概念	(69)

6.2.2	面积坐标与混合比的对应关系·····	(70)
6.3	铀同位素在双村岩溶水系统开采激励效应研究中的应用·····	(70)
6.3.1	铀同位素采样测试·····	(70)
6.3.2	地下水混合比计算结果与环境演化特征分析·····	(72)
6.4	本章小结·····	(73)
第7章	开采激励效应在岩溶水可持续利用研究中的应用·····	(74)
7.1	岩溶水环境演化模式分析与环境影响评价·····	(74)
7.1.1	双村岩溶水系统演化模式·····	(74)
7.1.2	岩溶水开采激励效应的环境影响评价·····	(74)
7.2	岩溶水系统演化趋势预测·····	(76)
7.2.1	水动力系统演化趋势预测·····	(76)
7.2.2	水化学系统演化预测·····	(76)
7.3	岩溶水资源综合评价与合理开发·····	(77)
7.3.1	岩溶水资源评价与岩溶水可持续利用原则·····	(77)
7.3.2	双村岩溶水系统的岩溶水资源综合评价·····	(80)
7.3.3	岩溶水可持续利用的对策建议·····	(82)
7.4	本章小结·····	(83)
第8章	结论与建议·····	(84)
参考文献	·····	(86)
英文摘要	·····	(91)

插图目录

- 图 2-1 研究区位置图
- 图 2-2 区域地质构造图
- 图 3-1 双村岩溶水系统略图
- 图 3-2 准天然状态岩溶水流场图 (1985 年)
- 图 3-3 岩溶水开采量变化图
- 图 3-4 开采状态岩溶水流场图 (1997 年)
- 图 3-5 双村水源地岩溶水水位变化曲线图
- 图 3-6 岩溶水、孔隙水、白马河水年平均水位关系图
- 图 3-7 河水渗漏对岩溶水位的间接影响图
- 图 3-8 1976 年水化学成分分布图
- 图 3-9 1996 年水化学成分分布图
- 图 3-10 1976 年水化学聚类谱系图
- 图 3-11 1996 年水化学聚类谱系图
- 图 4-1 双村岩溶水系统水文地质概念模型图
- 图 4-2 数值模拟网格剖分图
- 图 4-3 直角坐标中的三角形单元图
- 图 4-4 节点专有子区域多边形棱柱图
- 图 4-5 计算流程框图
- 图 4-6 原始模型典型观测孔拟合效果图
- 图 4-7 华北平原孔隙水降水入渗系数曲线图
- 图 4-8 羊庄盆地岩溶水降水入渗系数曲线图
- 图 4-9 降水补给函数调控图
- 图 4-10 裸露岩溶区降水入渗系数调试曲线图
- 图 4-11 典型比较节点水位拟合曲线图
- 图 4-12 岩溶水开采激励效应模拟结果图
- 图 4-13 孔隙水开采激励效应模拟结果图
- 图 5-1 双村岩溶水系统水化学类型图
- 图 5-2 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 关系图
- 图 5-3 主要离子浓度关系图
- 图 5-4 双村水源地岩溶水主要水化学成分演化图
- 图 5-5 黄路屯地段岩溶水主要水化学成分演化图
- 图 5-6 钻孔井内溶蚀实验示意图

- 图 5-7 钻孔井内溶蚀实验结果图
- 图 5-8 岩溶水饱和指数等值线图
- 图 5-9 黄路屯地段岩溶水饱和指数变化曲线图
- 图 6-1 面积坐标与直角坐标关系示意图
- 图 6-2 U 含量— ^{234}U 过剩关系图
- 图 7-1 开采引起的水环境变化框图
- 图 7-2 不同岩溶水开采方案的计算水位曲线图

插 表 目 录

表 3-1	双村岩溶水系统岩溶水开采量表
表 3-2	水位动态多元回归分析回归参数表
表 3-3	双村岩溶水系统岩溶水循环量、循环速度表
表 3-4	主要水化学成分对比表
表 3-5	双村大型群孔抽水试验水位影响时间表
表 4-1	水文地质参数识别结果表
表 4-2	降水入渗系数模拟结果表
表 4-3	开采激励下的岩溶水均衡量表
表 4-4	开采激励下的孔隙水均衡量表
表 5-1	钻孔井内容蚀实验结果表
表 5-2	溶蚀实验与水质测试成果对比表
表 5-3	水化学测试成果对比表
表 5-4	1976 年水化学成分与饱和指数表
表 5-5	1996 年水化学成分与饱和指数表
表 5-6	黄路屯水源地水化学成分与饱和指数表
表 6-1	双村岩溶水系统典型水样铀同位素测试结果表
表 6-2	双村岩溶水系统典型水样混合比计算结果表
表 7-1	岩溶水开采激励效应的生态环境影响表
表 7-2	岩溶水水化学成分预测表
表 7-3	不同岩溶水开采方案计算结果表
表 7-4	岩溶水资源评价表

CONTENTS

Chapter 1 Preface	(1)
1.1 Reasons and significance for the study	(1)
1.1.1 Basis for the research	(1)
1.1.2 Significance of researching a highly permeable open karst water system	(1)
1.2 Brief introduction to the current status for the study at home and abroad	(3)
1.2.1 On karst and carbonate cycle	(3)
1.2.2 On karst media and karst water resources	(3)
1.2.3 On evolution of groundwater environment and sustainable utilization of water resources	(4)
1.3 Technical rules, contents and methods followed in the study	(5)
1.4 Characteristics and new viewpoints possessing in the study	(5)
Chapter 2 Background of the studied area in geography and geology	(7)
2.1 Geography	(7)
2.1.1 Location of studied area	(7)
2.1.2 Landform and geomorphology	(8)
2.1.3 Meteorology and hydrology	(8)
2.2 Geology	(8)
2.2.1 Stratigraphy	(9)
2.2.2 Geological structure	(9)
Chapter 3 Shuangcun karst water system and its stimulation effect by exploitation	(11)
3.1 Natural characters of the Shuangcun karst water system	(11)
3.1.1 Raising of the Shuangcun karst water system	(11)
3.1.2 Boundary conditions	(11)
3.1.3 Water-bearing systems	(12)
3.1.4 Flow systems	(14)
3.2 Water resource characters and exploited status in the Shuangcun karst water system	(16)
3.2.1 Water resource characters in the Shuangcun karst water system	(16)
3.2.2 Exploited status of the karst water resource	(16)
3.3 Stimulation effect by exploitation in the Shuangcun karst water system	(17)
3.3.1 Concept of the stimulation effect by exploitation	(17)

3.3.2	Stimulation effect by exploitation in the hydrolic system	(17)
3.3.3	Stimulation effect by exploitation in the hydro-cycle system	(20)
3.3.4	Stimulation effect by exploitation in the hydro-chemical system	(23)
3.4	Properties of the Shuangcun karst water system as a highly permeable open karst water system	(28)
3.4.1	Properties of the Shuangcun karst water system as a highly permeable system	(28)
3.4.2	Properties of the Shuangcun karst water system as an open system	(29)
3.5	Summary	(30)
Chapter 4	Numerical simulation of the Shuangcun karst water system under stimulation by exploitation	(31)
4.1	A simulating model and its solution	(31)
4.1.1	Concept of the Shuangcun karst water system	(31)
4.1.2	Review on the numerical simulation and water resource assessment in the Shuangcun karst water system	(32)
4.1.3	Mathematical expression of the double-layer quasi-three-dimension flow model	(32)
4.1.4	Establishment and solution of the simulating model	(34)
4.2	Trials and technical processes of the simulating model	(38)
4.2.1	Results of the original model and analyses of its errors	(38)
4.2.2	No-linear properties of rainfall infiltration recharge and its numerical simulation	(40)
4.2.3	Main parameters of the hydro-simulating model	(43)
4.3	Simulated Results of the groundwater hydrological system	(45)
4.3.1	Results	(45)
4.3.2	Discussions	(45)
4.4	Summary	(50)
Chapter 5	Karst water hydrogeochemistry under stimulation by exploitation	(52)
5.1	Formation of chemical composition of the groundwater	(52)
5.1.1	Model forming the regional chemical composition	(52)
5.1.2	Chemical actions of forming the regional chemical composition and their stimulation effect by exploitation	(53)
5.2	Formation and evolution of chemical composition of groundwater in the well fields	(55)
5.2.1	Distribution and location of the well fields	(55)
5.2.2	Characters and chemical actions of hydro-chemical evolution in the well fields	(55)
5.3	Dissolution experiment for in a deep well and its significance	(58)
5.3.1	Conditions and methods for the experiment	(58)

5.3.2	Results	(59)
5.3.3	Discussion on questions revealed in the experiment.....	(60)
5.4	Simulation and calculation for hydro-chemical equilibria in the Shuangcun karst water system.....	(61)
5.4.1	Revision of pH in the hrdro-chemical simulation and calculation.....	(61)
5.4.2	Results and discussion of the hrdro-chemical simulation and calculation.....	(62)
5.5	Summary	(67)
Chapter 6 Uranium methods for studying the stimulation effect by karst water exploitation		
		(68)
6.1	Basic principles of the uranium radioactive unequilibria.....	(68)
6.1.1	Natural distribution of uranium and its isotope fractionation	(68)
6.1.2	Applicability of the uranium method for groundwater studies.....	(69)
6.2	Triangular coordinate method for calculating mixing ratios of a three-source system.....	(69)
6.2.1	Concept of triangular coordinates.....	(69)
6.2.2	Relations between triangular coordinates and mixing ratios.....	(70)
6.3	Application of the triangular coordinate method in the Shuangcun karst water system.....	(70)
6.3.1	Collection and test of water samples of uranium isotopes.....	(70)
6.3.2	Calculation of groundwater mixing ratios and analyses of groundwater environment evolution.....	(72)
6.4	Summary	(73)
Chapter 7 Sustainable development and utilization of karst water under consideration of the stimulation effect by exploitation		
		(74)
7.1	Analyses on models of karst water evolution and their environmental effect assessment.....	(74)
7.1.1	Evolution models of the Shuangcun karst water system	(74)
7.1.2	Environmental effect assesement to stimulation effect by exploitation	(74)
7.2	Forecast to evolution trend of the Shuangcun karst water system.....	(76)
7.2.1	Forecast of the hydro-dynamic system evolution.....	(76)
7.2.2	Forecast of the hydro-chemical system evolution.....	(76)
7.3	Integrated assessment of karst water resource and their rational development.....	(77)
7.3.1	Rules for assessment and sustainable utilization of karst water resource	(77)
7.3.2	Integrated assessment of karst water resource of the Shuangcun karst water system.....	(80)

7.3.3	Contermeasures and suggestions to sustainable utilization of karst water resource.....	(82)
7.4	Summary	(83)
Chapter 8	Conclusions	(84)
References		(86)
Abstract		(91)

LIST OF FIGURES IN THE BOOK

- Figure 2-1 Location of the studied area
- Figure 2-2 Sketch map of the regional geological structure
- Figure 3-1 Sketch map of the Shuangcun karst water system
- Figure 3-2 Contour map of karst water levels in the sub-nature state
- Figure 3-3 Regime of the karst water exploitation
- Figure 3-4 Contour map of karst water levels in the exploitation state
- Figure 3-5 Fluctuation of the karst water level in the Shuangcun well field
- Figure 3-6 Relation among water levels of the karst water, the pore water and the Baiba river
- Figure 3-7 Indirect effect of the karst water caused by leakage of the river water
- Figure 3-8 Distribution of chemical composition of the karst water in 1976
- Figure 3-9 Distribution of chemical composition of the karst water in 1996
- Figure 3-10 Clustering tree of the chemical composition of the karst water in 1976
- Figure 3-11 Clustering tree of the chemical composition of the karst water in 1996
- Figure 4-1 Conceptual model of the Shuangcun karst water system
- Figure 4-2 Grid map for the numerical simulation
- Figure 4-3 A triangular element in the right coordinates
- Figure 4-4 A polygonal prism for the specialized sub-area of a node of grids
- Figure 4-5 Flow framework for the numerical simulating calculations
- Figure 4-6 Simulated effect of typical water levels in the original model
- Figure 4-7 A curve of rainfall infiltration coefficient for pore water in the North China plain
- Figure 4-8 A curve of rainfall infiltration coefficient for karst water in the Yangzhuang basin
- Figure 4-9 Regulation and control of rainfall recharge function
- Figure 4-10 Tested curve of rainfall infiltration coefficient of the karst water in the exposed area
- Figure 4-11 Simulated effect of typical water levels in the improved model
- Figure 4-12 Simulated results in the karst water aquifer on stimulation effect by exploitation
- Figure 4-13 Simulated results in the pore water aquifer on stimulation effect by exploitation
- Figure 5-1 Distribution of hydro-chemical types
- Figure 5-2 Relations among Ca^{2+} , Mg^{2+} and SO_4^{2-}
- Figure 5-3 Relations among main ion concentrations
- Figure 5-4 Evolution of main chemical composition in the Shuangcun well field
- Figure 5-5 Evolution of main chemical composition in the Huanglutun water-abundance zone
- Figure 5-6 Schematic diagram for the dissolution experiment in the deep well

- Figure 5-7 Results of the dissolution experiment in the deep well
- Figure 5-8 Contour map for the saturation index of karst water
- Figure 5-9 Fluctuation curves of the saturation index of karst water at Huanglutun
- Figure 6-1 Schematic diagram showing relations between right coordinates and area coordinates
- Figure 6-2 Relations between U-contents and ^{234}U -excess
- Figure 7-1 Framework showing changes of the water environment caused by exploitation
- Figure 7-2 Curves showing calculated groundwater levels in different exploitation schemes