

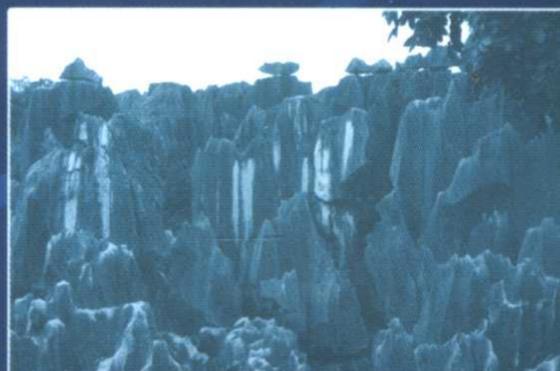
主编 王宇

岩溶找水与开发 技术研究

YANRONG ZHAOSHUI YU KAIFA
JISHU YANJIU

地质出版社

岩溶找水与开发技术研究



ISBN 978-7-116-05096-9



9 787116 050969 >

定 价：26.00 元

岩溶找水与开发技术研究

王 宇 张 贵 李丽辉 吕爱华 李 燕 编著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是一部集水文地质及环境地质学与岩溶水勘查开发技术研究为一体的科技专著。包括：岩溶水资源及地质环境特征、岩溶水开发技术实验、暗河开发的典型经验、岩溶水有效开发技术方案集成等。其中，归纳总结了地貌、含水层组、地质构造等方面的岩溶水富集特征，提炼出了相应的找水标志。包括岩溶水富集的8种地貌形态组合、两大类5个亚类的含水层组以及6种储水构造类型。提出了岩溶水源地分类的新方案、供水意义及开发技术条件，并针对各类岩溶水源地，进行了岩溶水的脆弱性评价。通过“三水”转化过程的分析与水均衡计算，揭示了岩溶水允许开采量的资源潜力。在区域调查和开发实验的基础上，建立了岩溶盆地流域的岩溶水有效开发模式，研究集成了一套适宜于不同类型水源地的岩溶水有效勘查及开发技术方案。经过9项岩溶水开发实验工程的检验，证明是西南岩溶石山地区找水和开发成功率最高的科技成果。

本书可供水利、生态及城乡规划与建设部门采用或参考，也可供从事相关研究的学者、技术人员及研究生参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

岩溶找水与开发技术研究/王宇主编. —北京: 地质出版社, 2007. 1

ISBN 978 - 7 - 116 - 05096 - 9

I. 岩... II. 王... III. 岩溶水-地下开采
IV. P641. 134

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 143948 号

责任编辑: 陈 磊

责任校对: 李 玫

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324565 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京长宁印刷有限公司

开 本: 787 mm × 1092 mm^{1/16}

印 张: 9 彩版: 2 面

字 数: 219 千字

印 数: 1—1300 册

版 次: 2007 年 1 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价: 26.00 元

书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 05096 - 9

(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)

主要作者简介

王宇，男，1960年10月生，教授级高级工程师、博士，主要从事水文、工程、环境地质调查研究。发表学术论文30余篇，专著多部。获省部级科技成果奖10余项，以及国务院政府特殊津贴、云南省有突出贡献优秀专业技术人员奖励。

序

岩溶地质环境的双层结构空间特征，形成了地表和地下双层水文网，通常地下水文网更为发育，致使地表水严重漏失，造成地表严重干旱缺水。但巨大的地下岩溶空间，能够储存大量岩溶水，具有对径流的天然调蓄功能。且岩溶水水质好，水量大，输水距离短，开发工程占地极少。因此，合理有效地开发岩溶水资源是解决岩溶地区严重干旱缺水问题的必然选择。

然而，由于岩溶发育的不均匀性，决定了岩溶水的埋藏分布也具有不均匀的特征，含水层富水性的空间差异极大。岩溶水的不均匀性给岩溶水勘查和开发工作带来了很大的困难，以至于裸露型岩溶石山区的供水勘探孔成井率仍然很低。

要有效地发挥岩溶水资源的优势，核心是解决找水难的问题和因地制宜地采取切实有效的岩溶水开发技术方案。本书的作者通过对岩溶水富集规律以及岩溶水勘查开发技术两个方面的研究，围绕提高岩溶找水成功率及岩溶水开发效益的目标，选择典型岩溶流域开展实验研究，经过充分研究并吸收了前人的成功经验，形成了一部集水文地质及环境地质学与岩溶水勘查开发技术研究于一体的科技专著。

书中所归纳总结的地貌、含水层组、地质构造等方面的岩溶水富集特征及相应的找水标志，提出的岩溶水源地分类方案、供水意义及开发技术条件，针对各类岩溶水源地的岩溶水脆弱性评价，“三水”转化过程与水均衡计算分析，所建立的岩溶盆地流域的岩溶水有效开发模式等，是颇具新意的理论认识和技术成果。综合集成的一整套适宜于不同类型水源地的岩溶水有效勘查及开发技术方案，经过9项岩溶水开发实验工程的检验，证明是可以有效地提高西南岩溶石山地区找水和开发成功率的科研成果。西南岩溶石山地区尚有约1700万人生活用水十分困难，大量耕地严重干旱，这些科技成果对岩溶水资源的有效勘查及开发应用前景广阔，可供从事相关研究的学者及技术工作人员借鉴。

中国科学院院士

袁道先

2006年9月

图版说明及图版



图1 泸西县人民政府向示范项目管理部门
和工作单位赠送锦旗

(执旗者从左至右：中国地质调查局岩溶所所长单海平，国土资源部副部长汪民，云南省国土资源厅地质环境处副处长任坚，云南省地质调查院副院长王宇)



图2 中国地质调查局局长孟宪来（右二）
现场考察指导工作

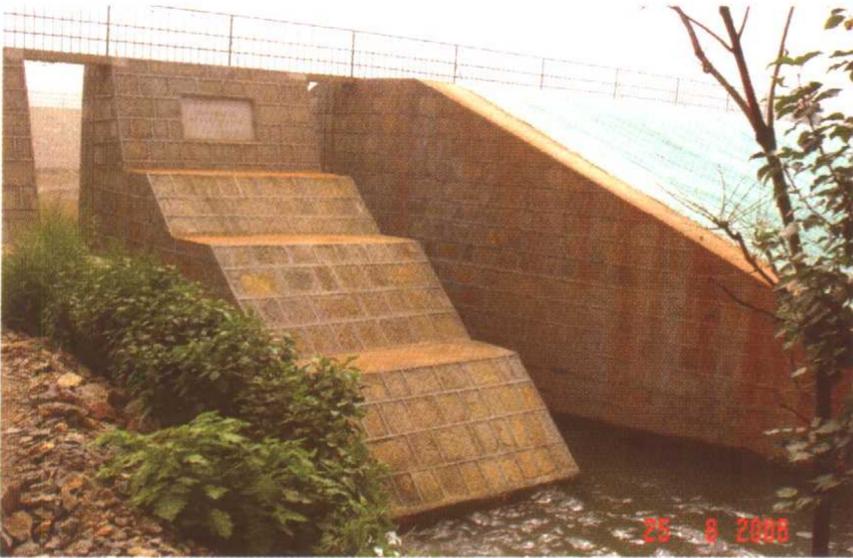


图3 皮家寨岩溶大泉束流调压壅水工程地
上束流调压池
(工程名称由王梓澂书写)

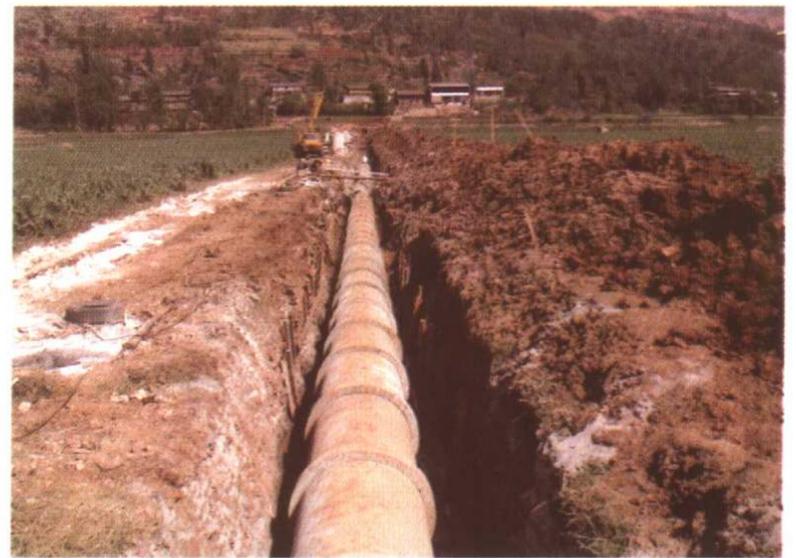


图4 皮家寨岩溶大泉束流调压壅水工程
倒虹吸引水管



图5 湾半孔表层泉蓄引工程的调蓄水池

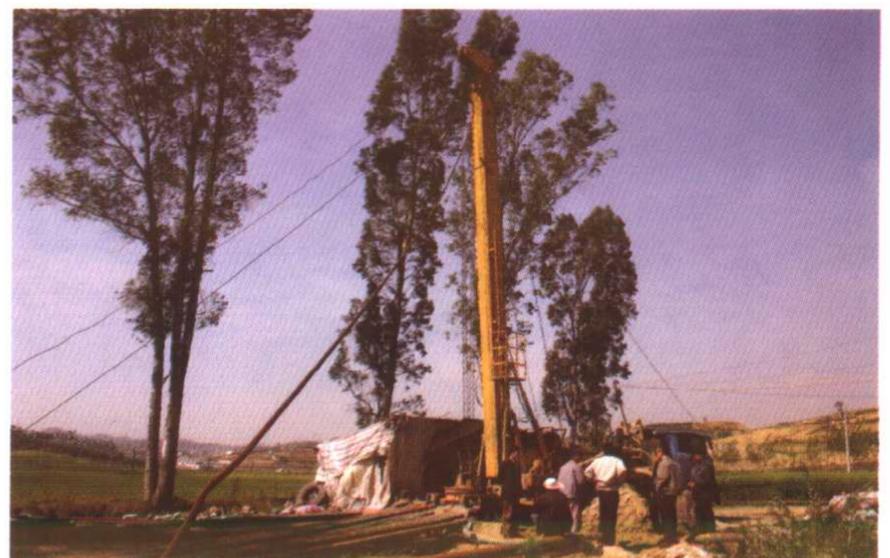


图6 丁合村深井施工现场



图7 大衣村深井调节水池与泵房



图8 大兴堡深井抽水试验



图9 大兴堡深井泵房

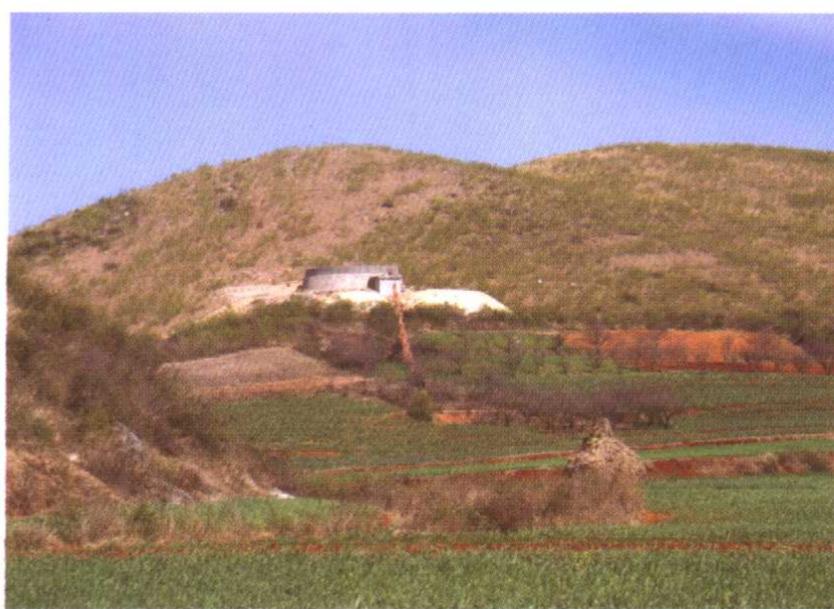


图10 大兴堡深井调节水池



图11 丁合村深井泵房



图12 纳堡村浅井抽水试验

目 录

序

1 绪论	(1)
1.1 研究意义	(1)
1.2 国内外研究现状及动态	(4)
1.3 研究内容及方法	(7)
2 岩溶水资源及地质环境特征	(10)
2.1 岩溶水富集的水文地质特征	(10)
2.1.1 岩溶水富集的地貌形态组合	(10)
2.1.2 岩溶含水层组类型及赋水特征	(22)
2.1.3 岩溶水富集的地质构造因素	(25)
2.2 岩溶水源地类型及开发技术条件	(28)
2.2.1 岩溶水源地分类方案	(28)
2.2.2 天然出露的岩溶水源地	(32)
2.2.3 隐伏的岩溶水源地	(33)
2.3 岩溶水的脆弱性	(34)
2.3.1 岩溶水脆弱性的概念及影响因素	(34)
2.3.2 岩溶水源地的脆弱性	(37)
3 岩溶水开发技术实验	(41)
3.1 实验区概况	(41)
3.1.1 地理地质背景	(41)
3.1.2 岩溶地质环境及水文地质特征	(43)
3.1.3 岩溶水源地的特征	(45)
3.2 实验的布置	(46)
3.2.1 开发实验工程部署原则	(46)
3.2.2 开发实验工程部署	(47)
3.2.3 实验技术方法选择	(48)
3.3 地球物理探测方法技术试验	(50)
3.3.1 引言	(50)
3.3.2 地球物理探测方法组合	(51)
3.3.3 视电阻率测深	(53)
3.3.4 激电测深法	(61)
3.3.5 核磁共振法	(65)
3.3.6 高密度电阻率法	(68)
3.3.7 地质雷达	(72)
3.4 天然出露的岩溶水源地开发实验	(75)

3.4.1	皮家寨岩溶大泉束流调压壅水开发	(75)
3.4.2	湾半孔表层泉蓄引开发	(81)
3.4.3	李子箐表层泉蓄积开发	(84)
3.5	隐伏的岩溶水源地开发实验	(86)
3.5.1	大衣村裸露型饱水带富水块段深井开发	(86)
3.5.2	万亩果园裸露型饱水带富水块段深井开发	(89)
3.5.3	三家村覆盖型饱水带富水块段深井开发	(92)
3.5.4	大兴堡覆盖型饱水带富水块段深井开发	(94)
3.5.5	丁合村埋藏型饱水带富水块段深井开发	(97)
3.5.6	纳堡表层带富水块段浅井开发	(99)
3.6	岩溶盆地流域岩溶水有效开发模式	(101)
3.7	岩溶水开发实验效果评价	(104)
4	暗河开发的典型经验	(107)
4.1	暗河开发利用条件评述	(107)
4.2	岩溶山间河谷区暗河开发的典型工程	(109)
4.2.1	邱北六郎洞暗河地下水库工程	(109)
4.2.2	文山白石岩暗河地下水库与天窗提水工程	(112)
4.3	岩溶峰洼(谷)地区暗河开发的典型工程	(115)
4.3.1	广南珠琳苏都库暗河截流壅水工程	(115)
4.3.2	西畴西洒暗河提水工程	(117)
4.4	岩溶盆地区暗河开发的典型工程	(119)
4.4.1	曲靖水城暗河地表—地下水库工程	(119)
4.4.2	蒙自五里冲盲谷无坝水库工程	(122)
4.5	主要技术经验	(124)
5	岩溶水有效开发技术方案集成	(126)
5.1	岩溶水资源调查与规划	(127)
5.2	岩溶水有效勘查技术方案	(128)
5.2.1	天然出露的岩溶水源地	(128)
5.2.2	隐伏的岩溶水源地	(130)
5.3	岩溶水有效开发技术方案	(132)
5.3.1	天然出露的岩溶水源地	(132)
5.3.2	隐伏的岩溶水源地	(133)
	结语	(135)
	图版说明及图版	

1 绪 论

1.1 研究意义

岩溶水 (karst water) 是赋存于岩溶化岩体中的地下水的总称^[1]。本项目的研究仅限于赋存在碳酸盐岩层的溶蚀洞穴、管道和裂隙中的地下水。在西南岩溶石山区,岩溶含水层一般储水、导水空间规模巨大,赋存着丰富的地下水。因此,岩溶水是最具开发价值的地下水类型。

岩溶地区地表、地下两种岩溶空间的同时存在,是造成岩溶特殊环境的基本原因^[2]。由于岩溶环境的双层结构空间特征,加上岩溶发育的不均匀性及岩溶地区自然环境条件的多样性,决定了岩溶水系统的复杂多变特征,由此也造成了岩溶地区水资源的时空分布不均匀性,地表水严重缺乏,形成了“地下水滚滚流,地表水贵如油”的水资源特征。

我国是世界上岩溶分布面积最广的国家,岩溶面积达 $346 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全球岩溶面积 $2200 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的 15.73%, 碳酸盐岩层主要为中生代及其以前形成的坚硬的碳酸盐岩,容易发育形成不均匀的地下溶洞系统,加之岩溶区人口分布密度很大。因此,干旱缺水问题非常严重。西南岩溶石山地区涵盖以云贵高原为中心的中国南方八省(市、区)范围,包括广西(简称桂,下同)、贵州(黔)、云南(滇)、四川(川)、重庆(渝)、湖北(鄂)、湖南(湘)、广东(粤)八省(市、区)的岩溶连片分布的主要部分,面积约 $76 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[3]。

西南岩溶石山地区聚居着 46 个民族,少数民族大多聚居在石漠化山区。全区人口约 8000×10^4 , 以传统分散的农业经济为主,“老少边贫”落后现状仍未完全改变,是我国西部大开发和扶贫攻坚的重点地区。该地区气候湿润,年平均降雨量超过 1000 mm,但降雨量的 80% 左右集中于雨季,且裸露岩溶区的入渗系数一般在 0.3~0.4,高的可达 0.5~0.6,降水大部分转化为地下径流。加之可溶岩造壤能力低,土壤薄而分散,植被稀疏,保水性差;风大气温高,地面蒸发强烈。所以,雨后不久,这些地区即可出现旱象,进入旱季(1~5月)降雨极少,此时干旱严重^[4]。而地下水资源虽然总量上很丰富,但埋藏分布不均匀,许多地方主要赋存于地下岩溶洞穴管道之中,由于岩溶水赋存空间十分复杂,找水难度很大,总体上呈现出工程性缺水的特点。上述原因造成约 1700×10^4 人生活用水十分困难,仅滇、黔、桂三省区就有 2531×10^4 亩耕地严重干旱。

在云贵岩溶高原地区,一方面各级岩溶高原面或夷平面(海拔 1500~3500 m)上,地形一般较为平缓、开阔,许多大小不一的山间盆地分布其中;另一方面乌江(海拔 400~1000 m)、金沙江(海拔 700~1500 m)、元江(海拔 100~200 m)、西江(海拔 200~1500 m)等江河及其支流所构成的地表水文网,随着上新世以来地壳的强烈抬升而深深地切入各级岩溶高原面或夷平面之下,形成陡峻的河谷,其谷底与各级高原面或夷平面

的高差达 500 ~ 2500 m。在这些水资源集中的河谷内，耕地和人口分布较少，重要城镇和厂矿也不多。以乌江为例，从乌江渡以下到沿河县城，长约 400 km 的干流沿岸，基本上是悬岩陡壁，仅在比较开阔的地段，如思南、沿河等城镇附近，在一些数十米至百余米宽的台地上有耕地，一般高于江面 15 ~ 30 m，由小片出露的碎屑岩风化形成。南盘江与元江沿岸，也基本上是峡谷地形，仅有一些坡地分布。但在它们的谷坡转折点之上，海拔约 1300 m、1600 m、1900 m 或更高的各级岩溶高原面或夷平面上，却分布着数十个耕地面积达数千到上万公顷、居住人口数万至上百万的岩溶断陷盆地和岩溶盆地。主要江河水面大大低于主要耕地分布区、人口聚居区、经济活动区，形成了“水土不配套”的问题。面对这样的客观问题及其背景，随着对岩溶水资源勘查开发的深入，越来越多的人已经认识到，众多岩溶储水构造犹如江河上游天然的一座座调蓄水库，对其进行科学的调查规划、勘查、开发和调度，对解决“水土不配套”的问题，缓解日益紧张的水资源供需矛盾，将发挥非常重要的作用。

岩溶水资源的合理开发利用，提高对地下水资源的调控能力，不仅仅只是解决干旱缺水问题的需要，也是整治石漠化，改善生态环境的基础工作。西南岩溶石山地区，已经查明石漠化面积为 $11.15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。严重的石漠化导致可耕地面积减少，土壤肥力下降，涵养水源能力减弱，旱涝灾害频繁，引起小气候的恶化，毁坏了自然景观，破坏了生物多样性，这严重制约着西南岩溶石山地区的社会经济发展和脱贫致富奔小康的步伐，成了岩溶石山地区危害最大的缓变地质灾害。滇、黔、桂三省区共有 109 个贫困县，其中 73 个分布在石漠化地区，农民年均收入仅为全国平均水平的 55%。由于石漠化，他们无法维持基本口粮，生活用水困难。这一地区近几十年来人口增长过快、森林乱砍滥伐、不合理开发和利用土地及其他自然资源，导致大面积水土流失和生态环境破坏，成为石漠化加剧的主要动力^{[5][6]}。干旱缺水是形成石漠化最主要的自然因素。石漠化使地表植被失去了协调水分的功能，干旱使植被的再生能力减退，生物链（植物链）中断，植被覆盖率降低，导致生态环境脆弱，结果是石漠化极易发生并导致人类生存环境的退化乃至丧失。岩溶石山地区石漠化演变过程主要反映为：地表植被的强烈破坏→地表冲刷加剧、水土流失、表土层破坏→残余植被和土壤种子库丧失恢复和自然更新能力、良性生态循环受阻、大面积石漠化→赋水植被和地质结构遭受破坏，水文、水循环系统特征的改变→水资源系统失衡、变态、变质。这种失衡与变态，既包括了岩溶石山地区内降水的转化形式、径流途径、赋存空间、具体特征数量及其在时间序列上的分配，还包括了水资源质量、功能上的变化^[7]。从而加重了干旱缺水的程度，形成了新的恶性循环。因此，按照德国化学家 J. V. 李比希于 1840 年提出，20 世纪初英国科学家布莱克曼发展完善的环境最小限制律，即：整个环境的质量，不能由环境诸要素的平均状况去决定，而是受环境诸要素中那个与最优状态差距最大的要素所控制^[8]。地表严重干旱缺水问题是石漠化地区生态系统重建的主要限制性因子^[9]，石漠化治理必须优先搞好水资源规划和管理，打破双层径流单层调度的不利局面，加快研究和实施先进适用的岩溶水开发技术及方案，合理有效地开发利用岩溶水资源，配合地表水利工程建设，实现岩溶区地表、地下双层径流联合调度，提高对水资源的调控能力。只有充分发挥岩溶水的生态功能，解决了干旱缺水问题，保证了生态需水，才能有效地进行生态建设^[10~14]，正所谓“山川秀美，关键在水”。

岩溶地区地下具有巨大的储水空间，形成了对径流的天然调蓄功能，起到了对降水在

年内和年际尺度上的调节作用。且地下水水质好，水量保证程度高，输水距离短，开发工程占地极少，对解决严重缺水的岩溶地区分散的农村生产生活用水和林草、耕地抗旱保苗用水，具有得天独厚的优势和不可替代的作用。要有效地发挥岩溶水资源优势，改善岩溶区干旱缺水的面貌，取决于水文地质调查研究程度和对岩溶水赋存规律认识的提高，以及岩溶水勘查开发技术的进步。近年来，有关部门积极探索各种方法来缓解西部地区人畜饮用水短缺状况，如：“水窖工程”、“移民工程”、“引水工程”等。水窖集水简单易行，在正常年份可发挥储水作用，但遇到干旱年份时难以发挥作用。而且水质很差，长期饮用将对人的健康带来危害。移民工程可从根本上解决人畜饮用水问题，但需要巨大的财力、物力，且岩溶地区有限的可耕地、居住地及环境条件，对移民搬迁形成了严重的制约。引水工程适宜解决城镇、工矿等集中供水，但西南岩溶石山地区地形复杂，严重缺水地区村镇居民居住分散，在许多地区，长距离引水既不经济，旱季水源也难以以为继；况且很多地区地表水开发利用已很高，有些流域已引发生态环境问题，地表水体污染严重，水质性缺水问题日益突出，加之岩溶石山地区地表渗漏严重，建库条件差，基础处理费用昂贵，同我国北方平原和南方丘陵区相比，一座亿量级的大型水库造价，在西南岩溶石山地区只能建一座（ $2000 \sim 3000$ ） $\times 10^4 \text{ m}^3$ 的中型水库^[15]，地表水进一步开发的难度越来越大，潜力有限。因此，开展岩溶找水与开发技术的研究，为岩溶水的有效开发利用提供可靠的技术支持，使岩溶找水和开发的成功率和效益大幅度提高，是非常必要和迫切的。

岩溶地区各种地表、地下岩溶空间成为水资源的赋存场所，但由于岩溶发育的不均匀性，给岩溶水的勘查和开发带来了极大的困难^[16]。由岩溶发育的不均匀性所决定，岩溶水的埋藏分布也具有不均匀性，表现为富水性的空间差异和水力联系的各向异性。在岩溶地区的工程实践中，常会碰到下面一些问题：相邻很近的供水水文地质勘探孔，单井出水量相差很大，有的可达每小时几十至上百立方米，有的还不到一立方米；水利工程的帷幕灌浆孔，有的数十米孔段基本上不透水，当揭露到溶洞时，透水性可几十倍以上地增加，有的渗漏通道会分布在相距不到几米的两个钻孔之间；有的矿井，本来涌水量极小，而一旦揭露到暗河通道，巨大水流会即刻突入矿井……。这些现象都是岩溶水分布不均匀性的表现。岩溶水的不均匀性往往给岩溶水勘查和开发工作带来了巨大的困难，以至裸露型岩溶区的供水勘探孔平均成井率仍徘徊在 30% 左右。但事物都是一分为二的，只要弄清了它的性质，确定了不均匀性的程度，掌握了它们的分布规律，就可以加以利用。例如：在开采利用岩溶水时，只要确定了它是呈管道状分布的，并查明了管道的位置，即可用少量的工程堵塞地下河通道，形成调蓄水库，壅高水位，减少提水扬程，甚或自流引水。这对于均匀孔隙、裂隙含水层来说是难于实现的。由于岩溶水的资源潜力、经济社会发展需求和开发效益都是最大的，因此，岩溶水赋存规律及岩溶水有效勘查开发技术的研究，始终是岩溶地区水文地质、工程地质和环境地质研究的主要工作。随着岩溶地质调查研究的深入和探测技术的进步，岩溶水勘查开发的成功率将不断地在各地得到不同程度的提高^[17]。此外，按照可持续发展的要求，在岩溶水开发的同时，必须进行岩溶水的保护。因此，在岩溶找水与开发技术研究中，同时进行岩溶水的脆弱性研究和评价，既为岩溶水资源的合理利用和保护提供科学的依据，也必然推进了环境地质学研究的进步，满足可持续发展的要求。

1.2 国内外研究现状及动态

从全球来看,在中低纬度的岩溶区,如:东亚和地中海地区,尤其是我国的西南岩溶石山地区,坚硬致密的碳酸盐岩层极少或无冰川沉积覆盖,成土缓慢,土壤缺乏,而岩溶双层结构空间发育,新生代地壳上升强烈,水源漏失严重,加上干湿分明的季风气候,导致生态环境脆弱,普遍干旱缺水,石漠化严重^[18]。在俄罗斯西伯利亚平原的岩溶区,广泛覆盖于碳酸盐岩层之上的冰川及河流冲积层,有利于土壤的形成,而下伏碳酸盐岩中的岩溶空隙有利于排除沼泽地区过多的积水,偏碱性的碳酸盐岩也有利于中和酸性环境。因此,高纬度的岩溶区都成了主要的农业基地。而在东南亚、美国东南部和中美洲广泛分布的第三系碳酸盐岩层,具有高达 16%~44% 的孔隙度,含水量很高,干旱缺水和石漠化较弱^[19]。所以,受生态地质环境条件影响和供水需求的带动,欧洲国家和我国都比较重视对岩溶及岩溶水勘查开发技术的研究。而且,我国岩溶不但分布面积广,并且由于一系列地域优势条件所决定,许多岩溶类型在全球有范例性,客观上使得我国的岩溶研究能够依托地域优势,为全球岩溶学科发展作出更大的贡献^[20]。联合国教科文组织国际地质对比计划(IGCP)中有关岩溶的 3 个项目:IGCP299-地质、气候、水文与岩溶形成(1990~1994);IGCP379-岩溶作用与碳循环(1995~1999);IGCP448-全球岩溶生态系统对比(2000~2004),均由我国提出并组织领导,一直由我国科学家袁道先院士担任项目工作组主席。2004 年 2 月,联合国教科文组织 IGCP 执行局第 32 届理事会还通过了世界岩溶研究中心(IRCK)设在中国的提案,充分体现了我国岩溶研究水平在国际学术界的权威地位。

在岩溶水的勘查研究程度方面,目前发达国家对岩溶区都作了系统的水文地质调查,工作的内容和程序与国内基本相似。但对每个岩溶泉或暗河流域投入的勘探、试验工作和所达到的控制程度普遍高于国内。他们对于每一个可能的落水洞与泉、暗河出口或钻孔之间都作了示踪试验,对各个岩溶水径流通道间的联系和展布方向、流速、流域边界掌握很确切。对主要的岩溶暗河、大泉、供水水源地都建立了长期自动监测系统和预报及管理模型,实现了量化的预测预报。而且近些年来,国外地下水模拟软件不论是在数量还是质量上都有了巨大的发展和提高,前后处理的可视化功能日益强大^[21],公益性、基础性的地下水数据库建设也很完善和普及^[22]。

在地下水勘查技术研究与应用方面,地球物理探测技术是主要的技术手段,在半个多世纪的发展历程中,大致经历了三个主要阶段。20 世纪 50~60 年代地球物理方法就已被应用于地下水勘查领域,方法以直流电测深、激发极化法、电测井为主,勘探的目标主要为第四系松散岩类孔隙水,方法成熟简单,目前许多地质勘查单位仍以其为主要勘探手段。70~80 年代期间,找水工作开始面向勘查难度较大的基岩裂隙水、岩溶水,相应的物探技术方法也有了新的发展,如音频大地电场法、甚低频法、放射性法、综合测井等方法的应用,取得了明显的效果,并形成有特色的系列找水技术。从 90 年代至今,由于地下水勘查的内容和范围不断扩大,研究的问题更加深入,更具有针对性,所采用的技术方法通常都以综合物探手段为主,包括常规手段以及先进的电磁法、高分辨率地震技术等。

目前,国外地下水地球物理探测技术发展迅速,电法已经从直流电阻率法发展到仪器

轻便、分辨率高的电磁法，包括频率测深、音频大地电磁测深、瞬变电磁测深、可控源大地电磁测深等高灵敏度方法。美国、俄罗斯、澳大利亚、加拿大等国地球物理技术研究实力和仪器开发能力基础雄厚，工艺先进，先后研制了多系列的电磁法仪器，如美国 Zong 公司研制开发的 GDP 电磁法勘查系列，加拿大 Geonics 公司研制开发的 EM 瞬变电磁系列，加拿大 Phoenix 公司研制开发的 V5、V6 电磁法勘查系列，澳大利亚 Geoinstru Ments 公司研制开发的 Sirotem 电磁勘查系列以及俄罗斯研制的建场测深法系列等。德国、法国、日本等国在非洲、南亚地区有专门从事地下水勘探的地球物理公司，应用的方法主要为电磁剖面法、甚低频法、频率域电磁测深法，瞬变电磁法等^[23]。另外，白俄罗斯和法国生产的核磁共振直接找水技术更是地下水地球物理探测技术的一大进步，其实质也属电磁法勘探范畴。它不仅能直接反映地下含水层的特征，而且还能提供如孔隙度、渗透率、导水性等水文地质参数，是最具发展潜力的一种地下水探测新技术。

我国在地下水地球物理探测方面，也经历了从直流电法到电磁法的发展过程，目前拥有相当数量的上述大型电磁法勘查设备，但均为引进设备，自行研制能力较差，但在应用研究方面成果突出。先后开展了多项专项技术研究，如中国地质调查局组织实施的音频大地电场仪及找水研究、综合物探技术寻找基岩裂隙水应用研究、西北沙漠和黄土地区 EH-4 电导率成像系统勘查地下水技术研究、西北严重缺水地区地下水勘查战略研究等都是以电磁法为主流的应用研究。另外，在应用方面以电磁法为主开展了地质条件复杂、找水难度大、环境恶劣的一些生态地质环境条件下的地下水勘查工作，例如：罗布泊及塔里木盆地的松散岩类孔隙水、西部山地基岩裂隙水、西南岩溶石山地区岩溶水的勘查等，积累了较丰富的实践经验。不难看出，上述国内外地球物理探测技术的发展现状表明：信息量大、分辨率高、勘探深度大的电磁法探测技术已成为地下水地球物理探测技术的主要手段，在地下水资源勘查中发挥着重要的作用^[24]。众所周知，物探结果仅是地层物性层空间分布特性的反映，解释结果是多解性的。如何将具有多解性的物探结果进行合理的地质解译，提高解释精度，这是水文地质和物探工作者必须深入研究的课题之一。实践证明，研究水文地质条件、掌握岩溶发育规律及地层岩性与物性之间的关系，从而建立合理的地质—地球物理模型与解释标准，是解决地质问题的核心。另外，任何一种物探方法都有其独特的优点，但也存在一定的缺陷，国内外的地球物理学家都共同认识到，在岩溶水勘查工作中，不能仅仅依靠某一种物探方法来解决，应该充分考虑实际水文地质条件，研究选择适宜不同地质环境条件和探测对象的方法组合和实施方案，多方法探测和综合解释，才能提高解释精度，取得更为理想的效果。由于我国岩溶面积广阔，岩溶类型多样，条件复杂。所以国内的水文地质和物探工作者，利用传统技术方法与引进的部分新技术设备结合，加强水文地质条件和岩溶发育规律研究，结合自身的经验，在找水的准确性上，也有很大的进步，积累了许多成功的经验，在应用研究的深度和广度方面居于世界前列。

在岩溶水的开发技术方面，国内外引、提、堵、蓄的技术原理都基本上相同。欧洲岩溶水的开发方式，过去曾经以钻井取水为主，实行就地分散供水。20 世纪后期，随着调查研究的深入，水文地质学家认为，一个岩溶泉流系统的各部分存在着密切的水力联系，水流的大部分最终都将汇集到泉口集中排泄，加之泉域面积较小，地形高差不大，在经济允许的情况下，按泉域统一规划和集中开发与调配更有利于岩溶水资源的管理和保护。因此，随着经济的发展，目前开发方式已经逐渐演变为以泉为水源，建设水厂，集中布设管

网供水为主，仅在部分边远的地区还保留着一些分散供水井。在岩溶防渗成库技术上，在欧洲的法国和前南斯拉夫等国的岩溶分布区，自 20 世纪 70 年代或更早的时期，就建设了多个岩溶暗河开发工程和利用岩溶谷地建库建设水电站，解决岩溶区缺水困难和能源短缺问题，取得了岩溶水资源开发和水能开发带动农业、工业和城市发展的成功经验，如法国的拉苏斯城市供水水源地、特里波罗农业区的夏特里赫暗河开发工程、前南斯拉夫的特例比西尼察、涅列特瓦岩溶流域的水能开发等^{[25][26]}。在钻井技术上，国外的技术设备远比国内的先进，能够满足干旱岩溶石山地区无冲洗液钻进的要求，钻进速度和自动化程度都高得多。

我国政府十分重视西部地区地下找水工作，20 世纪 70~80 年代，组织完成了大部分地区 1:20 万的水文地质普查，80~90 年代，又组织开展了部分城市和重要经济区 1:10 万至 1:2.5 万的水文地质普查。之后，在 20 世纪末开展的“西北地区地下水资源特别计划”、“西北地区地下水勘查战略研究”、“西南贫困岩溶石山地区扶贫找水计划”等一系列工作的基础上，中国地质调查局 2001 年组织实施了“西部严重缺水地区人畜饮用水地下水紧急勘查工程”，2002 年实施了“西部严重缺水地区地下水勘查示范工程”。其目的是通过对不同缺水类型地区水文地质条件的野外调查及分析，找出解决农村生活和生产用水困难的找水方向与途径，并通过适量的勘探工作加以验证，取得不同缺水类型区的找水经验，指导当地解决干旱缺水问题。探采结合示范井的实施，不仅获得了找水与取水的先进技术方法及经验，还直接解决部分严重缺水地区的人畜饮用水困难。“九五”期间直到 2002 年西部找水工作施工探采结合井约 400 眼，施工小口径浅井约 3000 眼，直接解决约 120×10^4 人饮用水困难。在岩溶水开发工程技术上，国内如蒙自五里冲这样的工程，也创造了超高防渗帷幕、超高超薄防渗墙、加密高压灌浆技术处理特殊复杂的溶塌堆积体等国际领先技术。还有许多颇具特色的岩溶石山区分散中小型岩溶泉和暗河引、提、堵、蓄工程技术。

现代地下水勘查已成为一项巨大而复杂的工作，其涉及的内容广泛，包括地质学、水文地质学、工程地质、环境地质、地球物理学、数学、计算机等。从单一方法向地质测绘、地面物探和综合测井、“3S”技术等综合方法密切配合方向发展。在不同岩溶水源地类型的勘查中，不断提高岩溶水文地质调查研究程度，加深岩溶水赋存规律的研究，开展地球物理探测技术的优化组合示范研究及应用，使地下水勘查工作达到快速高效之目的，已成为国内主要的研究方向之一。在开发技术上，根据岩溶石山地区的需水特点，大型与中小型工程技术的研究与实践并举，特别是西部大开发及扶贫找水的推动，促使中小型工程的技术研究与应用得到了空前广泛地开展，取得了巨大的进步。目前，急需系统地研究总结和推广。国外的岩溶水探测技术主要朝着进一步提高精度、简便易行的方向发展，开发新的方法和设备，改进已有的设备，开发功能更全面和强大的解译软件。同时不断研究与改进岩溶水开发、水处理的工程技术设备，提高对复杂的岩溶地质环境的实用性和效率。另外，随着岩溶水开发程度的提高，一些地区由于不合理的开发导致发生了岩溶塌陷、泉水疏干、地下水污染等不良环境地质问题，引起了社会对岩溶水资源的合理利用和保护上的关注。因此，对岩溶水的脆弱性、环境监测预报与保护技术的研究，也已成为水文地质及环境地质研究工作的一个主要方向。

1.3 研究内容及方法

本书是作者主持的云南省科研项目：岩溶水有效开发技术方案研究（项目编号：2003PY04），依托国土资源大调查项目：云南典型地区岩溶地下水调查与地质环境整治示范（项目编号：200310400024）完成的研究成果。完成了典型岩溶流域 1:5 万水文地质及环境地质测绘 1100 km²，水文地质及工程地质钻探 3791.94 m，各类物探 4169 点，取岩土水样试验分析 626 件，岩溶水动态监测 18 个点，岩溶水示踪试验 2 组等大量的调查和勘探试验工作。这些工作和成果，为本书的研究提供了翔实的资料，使之能够顺利完成，达到了预期的目的，并检验了研究成果的正确性。同时，本书的研究也为岩溶水的勘查和开发示范提供了理论和技术指导，使开发工程的技术方案设计得到了技术创新，工程取得了显著的经济、社会和环境效益，达到了示范目的。

此外，1999~2002 年，作者参与主持完成的国土资源大调查项目：西南岩溶石山地区地下水资源勘查与生态环境地质调查，也为进行岩溶水有效开发技术研究提供了水文地质与水资源的系统基础资料。在各个参加工作的省市区的示范工作中，也成功地建成了一批暗河及大泉引、提、堵、蓄、富水块段钻井开采工程。这些调查成果和工程实践，为本书的研究打下了坚实的基础，积累了丰富的经验。

本书的研究目的是通过科学技术研究，在岩溶水资源及地质环境特征研究，以及岩溶水开发技术实验研究的基础上，系统地总结适宜于不同的岩溶水源地类型以及不同需求的岩溶水有效勘查和开发技术方案，为岩溶水的有效开发利用提供理论和技术支持，使岩溶水开发的成功率和效益大幅度提高。

为了达到上述目的，本书从以下三个方面开展研究，所采取的研究思路、内容和方法如下：

第一个方面，以现代岩溶学理论为指导，深入研究国家国土资源大调查西南岩溶地区岩溶水资源调查的最新资料。系统地认识岩溶地质环境及水文地质条件以及岩溶水的赋存及运动特征，准确把握岩溶水富集规律，建立确切的找水标志，提高寻找和圈定岩溶水源地的准确性。根据岩溶含水层的埋藏分布、岩溶水出露状态，以及岩溶含水层的导水和赋水空间形态、结构及水动力特征，划分岩溶水源地类型，分析总结各类岩溶水源地岩溶水的开发技术条件，评价其脆弱性，最终掌握各类岩溶水源地对不同的勘查开发技术的适宜性。

第二个方面，引进目前国内外先进的核磁共振、高密度电法、地质雷达等地球物理探测技术，研究这些技术的特点和适用条件，结合常规电法技术和水文地质调查分析方法，选择典型的岩溶流域，结合国家在云南安排的岩溶水开发示范工程建设，针对不同类型岩溶水源地的勘查技术条件，分别选择不同的方法开展野外技术方法试验研究，并对探测和综合分析解释成果进行钻探检验，验证其可靠程度及准确性，优选出适合不同类型岩溶水源地的有效探测技术方法，集成岩溶水有效探测技术方案。

第三个方面，通过调查省内外岩溶水开发工程，考察发达国家岩溶水开发情况，收集国外相关信息，研究其成功的技术和经验，以及其中失败的原因与缺陷。根据各类岩溶水源地的开发技术条件，引出新的技术方案，并选择典型岩溶水源地进行开发实验，根据实