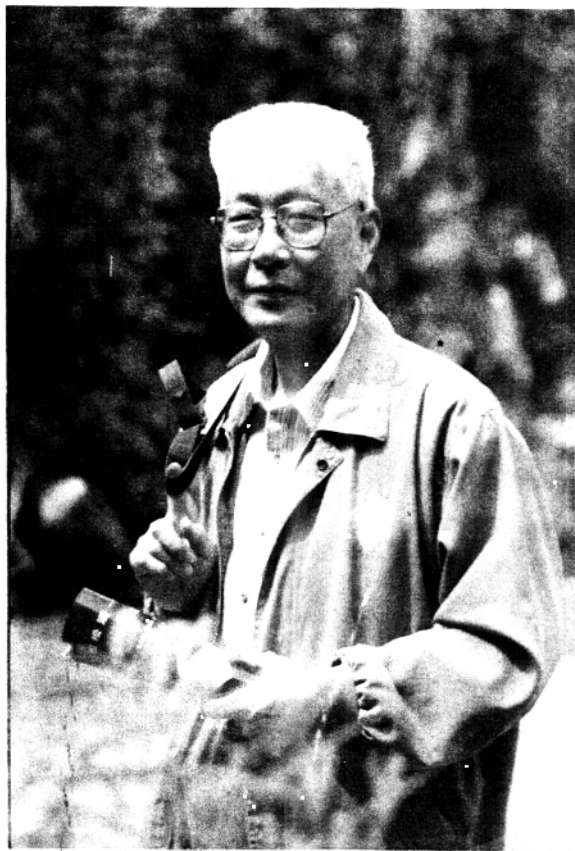


地质环境研究

主编 吴 勇 蒋良文



成都科技大学出版社



踏遍青山

——任天培教授

(李圣堡摄影, 1996年8月于锦城)



进藏科考
(西藏太昭, 1952)



共同研究教案 (1959 年)



野外教学指导
(四川盐亭, 1976 年)



同王大纯教授在一起
(北京香山, 1964)



川中红层找水
(遂宁, 1983 年)



同美国专家一起考查红层地下水
(四川资阳, 1984)



隆昌矿泉水调查
(四川隆昌, 1988 年)



室内指导研究生科研
(成都, 1990 年)



四川省科技顾问团部分成员在乐山考查
(1990, 10)



国际地热会议期间
(西藏那曲, 1992)



任天培教授 70 寿诞合影
(1997.3)

任天培教授培养的部分学生：



徐永新(硕士)



郑春苗(博士)



胡晓农(博士)



卢国平(博士)



颜诗树(硕士)



叶艳妹(硕士)



申红霞(硕士)



王文斌(博士)



朱 琰(硕士)



钟大钧(硕士)



吴 勇(硕士)



赵建明(硕士)



蒋良文(博士)



李自停(硕士)



余振国(硕士)



谢春庆(硕士)



彭卫平(硕士)



肖学红(学士)

目 录

研究综述与新认识

1. 水文地质学的回顾与展望 《地质环境研究》编委会 (1)
2. 水动力弥散理论模型在实际应用中的局限性分析 蒋良文 钟沛林 等 (19)
3. 渗流场与应力场耦合理论 research 现状 徐则民 杨立中 等 (23)
4. 浅谈有限元计算中的构模 申红霞 (32)

地下水环境研究

5. 四川巴子病区环境水文地质研究 钟大钧 吴 勇 等 (36)
6. 贵州赤水旺隆场卤水回注层水文地质特征研究 王文斌 吴 勇 等 (45)
7. 长江三峡工程库区地球化学与生态环境研究 颜诗树 任天培 (56)
8. 浙江省矿泉水研究 朱 琰 赵建明 等 (61)
9. 四川黄龙自然风景区碳酸盐沉淀及其水化学控制作用过程 卢国平 郑春苗 (67)
10. 贵州赤水旺隆场卤水的水化学特征及成垢机理研究 王文斌 武晓青 等 (74)
11. 水文地球化学热力学在地下水环境评价中的应用研究 谢春庆 张秋香 等 (85)
12. Nonlocal Reactive Transport with Physical, Chemical and Biological Heterogeneity
..... Bill X. Hu et al. (90)
13. Spreadsheet model interpretation of dye tracer experiment under pumping condition
with an example from Beaufort West Y Xu et al. (109)
14. An EC dilution experiment in a Karoo aquifer in Bloemfontein Y Xu et al. (118)

污染物迁移模拟及处理研究

15. 污水处理方法试验装置研究设计 吴 勇 任天培 (126)
16. 包气带废物处置淋溶迁移实验统计模型的方法途径探索 蒋良文 姜 凌 等 (136)
17. 砂土中 NH_4^+ 迁移曲线的数学解析方法 谢春庆 张秋香 等 (145)
18. 低中放核素在大亚湾处置场水岩体系中的吸附与迁移机理研究
..... 余振国 连会青 等 (150)
19. Dealing with Uncertainties in Contaminant Transport Modeling Chunmiao Zheng (158)

岩溶水研究

20. 岩溶地下水系统灰色预测模型灰参数研究 王文斌 武晓青 (171)
21. 岩溶水耦合模型及数值解 彭卫平 林立相 (177)

地质灾害与岩体稳定

22. 四川溪口滑坡形成机制研究 李自停 孙先锋 (183)

23. 断裂构造体系的研究与地震预报 曹运江 蒋良文 等(192)
24. 四川雅江县城地质灾害综述 郑万模 晏鄂川 等(200)
25. 龙门山构造带区域稳定性研究 余 团 曹运江(205)
26. 王家岭煤矿平硐工程地质研究 苏生瑞 彭建兵(210)
27. 岩体力学参数评价方法研究 符文熹 任光明 等(216)
28. 结构面网络模拟在岩体强度研究中的应用 左三胜 任光明 等(223)

岩土工程

29. 岩溶地区工程地质特征及桩基础施工技术探讨 邱希平 谢嘉琼(231)
30. 建筑地基评价实例分析 肖学红 彭卫平(235)
31. 岩土工程勘察计算绘图管理系统总体设计 申红霞(241)

农业地质

32. 土壤地质条件分析对县级土地利用总体规划的作用和意义 叶艳妹(246)
33. 试析农地细碎化与农地适度集中 叶艳妹(249)

其它研究

34. 时间及时间计量单位体制 李自停(255)

编后语 《地质环境研究》编委会(260)

水文地质学的回顾与展望

《地质环境研究》编委会*

〔摘 要〕 本文简要地回顾了水文地质学的发展历程、现状并对它的未来发展进行了探讨。

〔关键词〕 水文地质学 回顾 展望

0 引言

水文地质学是研究地下水的科学。地下水系指埋藏和运动于地表以下不同深度的土层和岩石空隙中的水。地下水是地球上数量丰富、分布广泛的淡水资源,对人们生活和从事工农业生产有着重要意义。我国许多重要的城市如北京、天津、上海、西安、成都等的工业及生活供水都取用了地下水,其中北京总供水量的三分之二系取自地下水。在农业生产上,我国仅北方 17 个省市自治区,每年从地下抽取的水量即达 $4 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 以上,约相当于黄河全年的总水量,灌溉着达 $11 \times 10^6 \text{ ha}$ 以上耕地。我国南方也在广泛地开采利用地下水。例如四川省,仅盆地中部丘陵地区,即已钻凿机井近万眼,供应着旱区三百余万农村人口的生活用水和六十多万公顷耕地的灌溉用水。

目前,我国年总用水量约 $4 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。其中地下水开采量 $5.5 \times 10^{10} \text{ m}^3$,约占全国总用水量的 14%,占全国地下水总储量的 6.9%。根据我国国民经济的发展速度和到 2000 年实现工业总产值翻两番的要求,预计本世纪末全国总用水量可能突破 $7 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。在未来的供水计划中,毫无疑问,地下水资源必将进一步发挥更大的作用。

深层地下水往往含有较多的盐分和多种稀有元素或者具有较高的温度,是重要的矿产资源,可以从中提取有用的工业原料。如我国四川自贡地区,开采利用深部地下水——卤水,已有近两千年历史,过去从中提炼食盐,供应着我国西南数省的食用需要,现在还从中提取钾盐及溴、碘、硼、锶、钡等工业原料,在工农业生产的发展中起着重要作用。温度高的地下水可用来发电、取暖及用于发展养殖业等。温度高或含有某些特殊成分的地下水还可以用于医疗事业。

从上述不难看出,地下水是一种宝贵的自然资源,对人类的生活和从事生产具有重要意义。但是,在另一方面,在某些情况下,地下水又是发展工农业生产和建设的障碍。

在气候干旱或半干旱地区,当地下水埋藏不深时,由于强烈蒸发作用的结果,含在地下水中的盐分便不断累积于地表,造成土壤盐渍化,不利于农业生产的发展。

在采矿过程中,由于地下水大量涌入矿山坑道,往往使施工复杂化和采矿成本增高,严重时甚至威胁矿山工程和人身安全。我国的许多煤矿以及南方岩溶地区的金属矿山,坑道涌水问题均较突出。例如我国湖南某煤矿,平均每采出 1 t 煤,需要抽出地下水 133 m^3 。国外某些矿山矿坑涌水问题同样也很突出。例如匈牙利尼拉德铝土矿,需要抽出 210 m^3 的地下水才能采出 1 t 铝土。

在工程建设中,地下水常常会对建筑物的修建、正常运用和安全造成严重的危害。例如建筑在阿尔卑斯山脉下面的辛普森隧道,在工程进行中,地下水以每分钟 60 m^3 的速度涌入,使工程不得不停顿了 6 个星期。又如在 1959 年发生崩溃的法国马尔帕塞特拱坝,就是因为库水从地下的节理裂隙中渗透进入坝基下方的一层粘土之内,使粘土的性质变化,引起滑动而崩溃。美国加利福尼亚州的圣佛朗西斯坝,在水库修成蓄水以后,于 1928 年失事,高约 70 m 的混凝土大坝被

* 本文在任天增教授指导下,由吴勇、蒋良文整理成文。

冲垮,事后研究认为,也是地下水的渗透引起的,渗透水流对坝基红色砂砾岩中的粘土和石膏进行掏蚀冲刷,引起大坝滑移溃决。据美国发表的资料,在破坏的土石坝中,有40%是由于坝基土和坝体土渗透变形所造成的。由于地下水对可溶性岩石的溶蚀作用,形成洞穴管道系统,引起岩溶渗漏,则是在碳酸盐岩地区修建水工建筑物常常会遇到的问题。例如西班牙的蒙特-哈克水库,由于通过石灰岩溶洞发生岩溶渗漏,致使水库修成后从未蓄满过水。美国的赫尔斯·巴尔重力坝,高25m,建成后漏水量达 $50\text{m}^3/\text{s}$,并威胁到大坝的安全。我国碳酸盐岩分布面积达 $130\text{万}\text{km}^2$,约占全国总面积的七分之一,特别是西南地区,如川东、川南、滇东、贵州和广西的大部分,地表广泛分布着碳酸盐岩。开发这些地区的丰富水利资源,对岩溶渗漏问题必须进行认真的研究工作。岩溶地区修建其它工程也会遇到地下水问题。例如开挖隧洞、地下厂房等也会突然涌水,造成施工困难或使隧洞结构复杂化。在岩溶地区进行工程建设施工排除地下水时,还会产生地面塌陷、下沉、开裂等现象,对工程建筑物及工农业生产造成不良的影响。例如襄渝铁路隧道施工通过岩溶地区时,由于隧道施工排水发生地面塌陷,造成房屋倒塌、农田破坏、交通受阻等情况,致使农业生产及人民生活遭受巨大损失。

本世纪以来,国内外一些大城市发生的地面沉降问题,也是由地下水所引起的。由于过量开采地下水,使地下水位大幅度下降,降低了土体中的空隙水压力,造成软土层压缩,因而引起地面沉降。由于过量开采地下水引起的地面沉降,以美国加利福尼亚州的圣华金流域、墨西哥的墨西哥城和日本的东京等地最为突出,最大沉降量东京为4.23m,墨西哥城为7.5m,圣华金流域达8.55m。我国上海市区的地面沉降是1930年前后发现的。1956年以后,随着地下水开采量的增加,地面下沉逐渐加剧,到1965年,最大沉降量已达2.37m。1966年以后,由于采取了人工回灌及其它措施,上海市区的地面沉降才基本上得到了控制。地面沉降已经成为现代许多大城市的重要公害问题,它对当地的工业生产、市政建设、交通运输以及人民生活都有很大的影响,有时还会造成巨大的损失。例如日本的东京、大阪和新泻,美国的长滩市,中国的上海市等,由于地面沉降的发展,已有部分地区的标高降低到低于或接近于海平面高程。这些地区经常遭受海水的侵袭,有些地区甚至长期积水,对当地人民的生产和生活有着严重的威胁。在一些地面沉降强烈的地区,例如美国长滩,伴随着地面垂直沉降还会发生较大的水平位移,往往会对地面和地下建筑物如地表的路面、铁轨桥墩和大型建筑物的墙、支柱以及油井和其它管道等,造成严重的破坏。

1 水文地质学的发展历程

17世纪以前,人们对地下水的认识仅停留于经验及臆测阶段,也是水文地质的萌芽期。

迄今为止,我国发现的最古老的水井是浙江余姚河姆渡井,根据树年轮校正的 ^{14}C 年代测定资料,为公元前3710 $\pm$ 125年,即距今约5700年。河姆渡井是个结构精巧的用圆木衬护的井。可以推知,更原始形态的井出现得还要更早些。《管子·地员篇》指出:“庚泥(指泥沙混合沉积)不可得泉”。这已经对岩土性质与地下水的关系有了初步看法。汉代为采卤水在四川的三叠系的坚硬岩层中开凿了深达100m以上的自流井,比12世纪法国和意大利出现自流井要早一千多年。这说明,当时我国的打井技术及对地下水的认识增多已达到相当高的水平。在明代的《农政全书》中,徐光启写道:“井与江河地脉贯通,其水浅深,尺度必等。今问凿井应深几何?宜度天时旱潦,河水所关,酌量加深几何,而为之度。”明确指出了地下水和河水的相互补给关系,实际上提出了地下水渗入起源说的雏形。

古雅典在纪元前数百年即已开始打井取水。古波斯时期在德黑兰附近修建了规模宏大的坎儿井,最大深度距地表约150m,长达26km。

在长期利用井、泉作为水源的过程中,人们提出了有关地下水起源的看法。普莱西(B.

Palissy)(1509~1589)解释了井泉和河水的关系,并指出井、泉的水起源于降水。珀劳尔特(P. Perrault)(1608~1680)和马里奥特(Mariotte)(1602~1684)证明,泉的流量随降水而变化,因之泉和井水均来自大气降水。

19世纪,水文地质学等开始建立,其标志为1856年法国水力学家达西(Henry Darcy)建立的实验达西定律,和1863年裘布依(J. Dupuit)等人结合利用与排除地下水的实际问题,完善并发展了地下水稳定流动的理论。

20世纪初叶,对地下水的起源及其化学组分有了进一步认识。

1902年,鸠斯(E. Suess)提出了初生说,认为地下水来源于岩浆的冷凝。1908年,莱恩(A. C. Lane)和戈登(W. C. Gordon)提出埋藏水(封存水)的存在;认为水成岩沉积时颗粒间便充满水,在岩层固结时,水被压入含水层中。1907~1913年间,列别捷夫(А. Ф. Лебедев)提出了凝结说,即水汽冷凝形成液态地下水。

1930年,伊里茵(В. С. Ильин)得出了苏联潜水化学分布带规律。随后,伊格纳托维奇(Н. К. Игнатович)提出了自流盆地的水化学分带。

在一些苏联学者研究的基础上,奥弗琴尼柯夫(А. М. Овчинков)等建立了水文地球化学这一分支。

凯尔哈克(K. Keilhack)在1912年进行了地下水和泉的分类,迈因策尔(O. E. Meinzer)于1923年对美国地下水作了总结性描述。至此,对地下水的起源、运动及水量与水质的变化,都有了较为系统的理论和研究方法,水文地质学开始确立为地质学的一个分支学科了。

20世纪30~60年代,水文地质进入迅速发展阶段。1935年,泰斯(C. V. Theis),利用热传导理论提出了地下水流向井的非稳定流公式,把地下水的定量计算大大推进了一步。40年代到60年代,雅可布(C. E. Jacob)及汉图什(M. S. Hantush)等对承压含水层的越流现象进行了研究。60年代,华尔顿(W. C. Walton)等首次应用电子计算机进行水文地质计算,数值法被引入。30年代以来,出现了应用砂槽、窄缝槽模拟地下水渗流以及电模拟方法(连续介质模拟及电网络模拟),这些都属于物理模拟。运用电子计算机求解数学模型,则属数学模拟。

近30年来,出现了地下水枯竭、地面沉降、海水入侵、次生盐渍化、地下水污染等问题,据此建立了地下水资源规划等概念。

2 我国水文地质研究概况

我国解放后党和政府十分重视水文地质工作。50~60年代,在全国范围内开展了大量的水文地质调查工作和水文地质技术人材的培养,促进了我国水文地质科学理论和调查技术的迅速发展。如进行大中城市的供水水文地质工作;水文地质普查和农田及矿区水文地质调查工作;建立了各地地下水动态观测站(网);出版了一些小比例尺的全国性水文地质图幅。在东部几个大平原上还开展了农田供水和土壤改良的水文地质工作;在西北牧区缺水草场进行了找水工作;开展了基岩山区的水文地质调查工作;对许多大水矿床进行了水文地质勘探工作;编制出版了各种“勘探规范”和“图系”;出版了一些结合我国实际的水文地质教材和专著。

但是60年代后期开始的那场“动乱”,给我国的水文地质事业造成了难以估量的损失。

70年代以来,由于国内水文地质生产项目激增,科学研究工作的加强和采用新技术方法,再次使我国水文地质科学的理论与实践诸方面得到了腾飞:

在水文地质普查方面,全国三分之二以上地区已完成了1:200 000~1:500 000比例尺的水文地质普查工作。部分地区采用了“航、卫片解译”新手段。还在一些城市及工农业供水源地、矿产开采区、热、矿水分布区,石油产地等,进行了1:50 000比例尺的水文地质调查工作。

在水文地质勘探与试验方面,加强了深部水文地质钻探和各项物探工作,取得良好效果;供水和疏干的成井工艺更加完善。在一些项目中,进行了大口径、大流量、大面积、大降深和长时间的孔组抽水试验,较好地解决了复杂条件下的水量计算问题。一些地区应用同位素技术开展了人工补给地下水的研究以及合理开发和科学管理地下水的研究。

在水文地质计算方面,广泛应用了电子计算机技术,采用了非稳定流的数值法,建立了各种地下水物理模型与数学模型。在大面积地下水和局部浅层地下水资源评价地下水盆地管理等方面,取得了丰富的成果,并总结出我国的评价原则和方法。

在地下水长期观测方面,70年代开始,各省区就陆续地恢复和新建了地下水动态观测站或环境水文地质站,全国性的地下水动态观测网已初具规模。一些地区进行了多年的地下水位、水质和水量的全面观测,有些地区已对大气水、地表水和地下水的动态均衡、相互转化及水资源评价进行了统一研究,还有不少地区重视了包气带水(土壤水)的观测和试验研究。

在裂隙水与岩溶水的形成理论与探勘方法的研究方面,也取得了明显的成就。因此,在缺水的北方干旱地区与南方岩溶区内都开发出大量的地下水,在岩溶大水矿床的勘探与治理、类型划分等方面,也取得了较好成果。

重视了环境水文地质工作,部分地区导致环境恶化的水文地质条件得以控制,不良的环境有所改善;某些地方病的水土病因研究有所前进,改水防病也取得了明显的效果。

其他如在油田水文地质、水化学找矿、含水层蓄能、地下热水开发、地下水预报地震等方面的理论与实践上,也取得明显的成就。

在水文地质专业教育和科学研究方面,也得到相应的发展,人才和成果质量有较大的提高。但岩溶与裂隙水的运动规律与研究方法,粘性土中水的渗透机理与研究方法,包气带中水分运移的研究,高原、沙漠、森林、高山地区水文地质调查的技术方法,弥散理论与水质模型,三水统一管理模型,地壳深部水的形成理论与探测技术,人工补给的研究,同位素技术的应用,人为影响下环境水文地质问题的研究,全国动态网的调整及成井工艺等等都尚待进一步发展。

3 水文地质学理论体系

水文地质学发展至今已产生了若干分支学科。如地下水动力学、水文地球化学、基岩水文地质学、岩溶水文地质学、同位素水文地质学、环境水文地质学等,现就它们的产生、发展、现状及趋势概述如下。

3.1 地下水动力学理论的去与未来

在19世纪中叶,由于法国水力事业的发展,促使法国水力学家开始研究地下水的运动特征及规律。1856年,法国水力学者达西根据在砂柱中水的渗透实验,第一个总结出水在孔隙介质中运动的渗透规律,提出了渗透系数的概念。尔后,另一位法国水力学者裘布依于1857年把渗透定律进一步应用到天然含水层中,得出了著名的裘布依微分方程。1904年,布西涅斯克又提出了潜水非稳定流微分方程。上述一个定律、两个微分方程,奠定了地下水动力学的理论基础。

在此基础上,19世纪末和20世纪初各国学者相继发展了地下水动力学理论,提出了许多具体的计算公式。例如,裘布依提出了水平埋藏含水层的潜水平面运动和地下水向完整井运动的公式;德国福尔海默提出了地下水向干扰完整井运动的理论及计算非完整井的经验公式;前苏联的巴甫洛夫斯基提出了地下水在倾斜含水层中的运动理论;卡明斯基提出了非均质含水层中地下水的稳定流运动理论,建立了潜水稳定运动的有限差分方程;维里金又用汇点和汇线的概念完成了非完整井理论的研究,提出了维里金公式等等。

由于水利工程的蓬勃兴建,各国学者运用流体力学的方法解决了坝下、灌渠、排水渠的地下

水平运动的一系列问题,发展了各种计算方法和近似方法。伴随石油和天然气的开发,1921年列宾松研究了油、气、水的混合渗透问题,为石油和天然气的开采作出了理论贡献。

20世纪30年代前,受生产实践的深度和广度所限,地下水开发利用的规模比较小,和天然补给量相比,开采量仅是一个很小的数值,地下水的变化较小还未引起人们的注意。人们往往将地下水极其缓慢的非稳定运动近似看作稳定运动来描述。因此,以裘布依公式为基础的稳定流理论发展较快。虽然非稳定流理论已提出,但发展缓慢。随着地下水开采规模扩大,不少地区地下水位发生明显的下降,地下水的运动呈现明显的非稳定特征。用稳定流理论已难以描述地下水从一个状态发展到另一个状态的过程,于是该问题再一次推动了地下水动力学向新的高度发展。在美国,由于要在大面积干旱与半干旱地区发展农业,于20世纪30年代对地下水需求量剧增,从而促进了非稳定流理论的发展。1935年,美国学者泰斯使用30年代初期温策尔和迈因策尔两位学者通过抽水试验获得的潜水含水层和承压含水层中地下水非稳定过程分别与含水层疏干和弹性释放有关的实际材料,采用热传导方程第一次提出了实用的非稳定井流公式,即著名的泰斯公式。泰斯公式的出现使地下水动力学的发展进入到一个新的阶段,其特点是不仅把含水层视为导水层,同时也视为贮水层,是一个近似的弹性体,为非稳定流理论的发展奠定了基础。

1935年后,一些学者又针对各种偏离泰斯公式理想条件的情况,导出了不同条件下的新公式,扩大了泰斯公式的应用范围。50年代,雅可布、汉图什等学者又提出了越流补给条件下的非稳定井流公式,它使人们从以往研究单一含水层的井流中解脱出来,从含水层间相到联系与相的制约中研究非稳定井流。稍后又出现了考虑潜水含水层滞后疏干效应及非完整井的非稳定流公式,使得非稳定井流公式的应用更加广泛。地下水运动的非稳定流理论,既可研究地下水运动状态随时间变化而变化的过程,还可以把以往的稳定流理论作为非稳定流理论在某些条件下的特例来研究。

以泰斯公式为代表的非稳定流公式,难以描述非均质含水层中和复杂条件下的地下水运动规律。对于大面积空间上分布不均匀的含水层,地下水动态的预测就只有求助于各种近似解。40年代至60年代,以有限差分理论为基础同的近似解,主要靠模拟计算机来解算。具有代表性的有水电模拟方法、电阻-电阻模拟方法及电阻-电容模拟方法。60年代中期以来,随着快速、大容量电子计算机的出现和广泛使用,数值算法(主要为有限差分法与有限单元法)在地下水计算中得到推广,解决了非稳定流解析法计算中难以解决的复杂条件下的水文地质计算问题。

我国人民很早就有开发利用地下水资源的经验。尧时击壤歌中就有“掘井而饮”的词句,说明当时已有掘井取水的经验。远在两千年前,我国盐都自贡就有利用盐井汲取卤水的丰富经验,但是未能总结成系统的理论。解放前,我国没有地下水动力学这门学科。解放后,各地地质院校的有关专业陆续开出《地下水动力学》课程,并在近20多年中得到了迅速发展。但对喀斯特介质中地下水运动规律问题,深层热卤水运动规律问题,黄土塬地区地下水运动规律问题,非饱和带渗流理论及弥散理论问题等,有的还没有解决,有的尚未完全解决,都需要进一步研究。

地下水运动特征及规律的研究是以数学、物理及水力学等学科的成就为基础,应用数学分析和模拟试验等一系列的研究方法进行的。由于地下水的运动因素和条件复杂,为此,要抓住主要矛盾将其模型化,即把在一个具体的水文地质实体中运动着的地下水流原型概化抽象为一个物理模型,进而进行数学描述,构成与之相对应的数学模型。这种数学模型既要反映水文地质实体的主要特点,又要考虑到解算的可能性。求解地下水运动的数学模型,即得出相应的计算公式或数值,以资对地下水进行定量分析和评价。

3.2 基岩裂隙水的研究概况

在基岩裂隙水的研究方面,从过去对成因类型及裂隙的半定量描述到用现代化手段对基岩裂隙水系统从微观的定量分析概化为数学模型进行研究,可分为非连续介质系统和连续介质体

两类。

非连续介质的研究着重从含水裂隙的空间状态特征(包括裂隙的长、宽、方位、频率间距)进行概率统计。对裂隙含水介质的研究,取决于遥感、地表、深部和微观四方面的进展。遥感方面强调 ERST 卫片与航片相结合与相互补充,配合红外航测,并通过光学自动滤波进行仪器判读,研究各向异性的裂隙介质,并注意裂隙随深度变化的规律。通过千米深孔的详细观测,采用 BRGM 钻孔岩芯定向测量装置,认为陡倾角裂隙比缓倾角裂隙受深度的影响要小些,P. Berthier 研究法国中央高原深孔,认为在 3000m 深处仍然可存在含水的张裂隙。P. Crochet 从深孔岩芯观测结果,专门论及裂隙宽度、隙间距的对数——正态分布规律。对于微裂隙(隙宽在 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ m)虽然从理论上认为过水能力很小,但从实验结果(M. Gottis)认为,含微裂隙岩体的渗透性比致密块状的岩体大几个数量级。微裂隙对溶质的运移和可溶岩的溶解仍然起重大作用。

对于裂隙介质概化模式,继 60 年代 PoMM 用单位矢量表达均质各向异性裂隙组, Snow 用概率统计方法,以渗透张量矩阵方式表达多裂隙组的总渗透率,并可作为连续介质计算裂隙水流。到 70 年代后期 V. Halok 等考虑到单个裂隙几何特征和水力特征,建立等价于斜交裂隙网络的管道网,根据克希霍夫定律,认为进出管道交点的水量代数和为零,建立起每个结点的水头关系(隐式)方程后联立求解。Halok 吸取 Wittke 的求裂隙水线性元素思路,此法是把裂隙岩石分割为 3 种不同型式的岩块单元(即裂隙交汇结点几个;裂隙包围的线索色体 m 个;顺水流方向的条形块 r 个)每个线单元可列一个方程,解 $n+m+r$ 个方程组,可以研究一个裂隙含水实体的水流特征。此外,对于单裂隙导水所形成的流场,Gringarten 和 D. N. Jenkins 分别导出均质各向异性介质迳向流和非迳向流的解析解。

Witherspoon 等注意到含水张裂隙在不同压力下隙宽变化,是影响裂隙水流的重要因素,提出一种能阐明可变形裂隙在正应力作用下水动力特性的“凹凸模型”,并探求这种裂隙变化的凹凸函数。

将裂隙系统作为连续介质研究,自 60 年代初 Баренцлам-Кочина 等提出双重介质模型以来,这方面有较大的进展。

美 Warren-Root 提出,沿主渗方向的正交裂隙系统模型,是前述双重介质模型、系统渗流的偏微分方程耦合的结果。

该模型虽然在裂隙组的配置方面作了一些假设,具有较大的局限性,但不同裂隙组的隙宽和间距可以不相同,体现出裂隙岩层渗透性的各向异性的特点。

70 年代后期,Streltsova-Boulton 改进了前两种模型,不仅考虑到不同两种介质系统之间的压力差引起的水量交换,而且还注意到由于压差引起孔隙水系统弹性(或重力)释放的滞后给水问题。Streltsova-Boulton 模型在裂隙系统的配置方面,也比前者提出的假设较合理,认为裂隙系统是一系列无限延伸的强透水的平坦裂隙,以及被裂隙分隔水平产出的含水孔隙岩块两个子系统所组成的双重介质系统。Deswam 吸取 Warren-Root 与 Streltsova-Boulton 两种模型的优点,提出了混合模型(Hybrid model)。对于非均质的裂隙介质到多大程度就不能用连续介质方法,长期以来未解决。80 年代以来,J. Long 和 Witherspoon 等提出用多孔介质等价于非连续裂隙网络的理论。其基本思路是将被测量的不连续裂隙网络的岩体体积增大至一定范围后,若其渗透度变化得很小,这时测得的称等价渗透性。将渗透性中止变化时的岩样体积定义为典型容积单元(也称表征体元)简称 REV。当裂隙密度随测量面积增加而增大,裂隙宽度变化较小,但裂隙方向有一定变化(非高度定向集中),这样就可能找到一定体积的 REV,这类的裂隙岩体就可以用多孔介质来等效(描述)。

裂隙水的另一进展是我国田开铭教授等对裂隙水交叉流特征的发现,他通过对交叉型板状裂隙装置进行模拟实验,得出水流过角度相交的裂隙后有①偏向②水流阻力逆向不等③偏流(包

括网络偏流和条件偏流)3种水力性质,并得出偏流的流量表达式。交叉水流所引起的水力效应的发现,有助于解决存在的裂隙水流的现象和机制,以及有关某些岩溶水的运动和溶蚀规律问题,也为裂隙(非连续)介质水动力学及有关裂隙水资源评价的进展开拓了新的路子。

3.3 岩溶水研究概述

在岩溶水介质及水动力特征研究方面:

岩溶水介质是可溶岩在原生孔隙和次生裂隙基础上,被溶蚀改造形成各种含水的岩溶空间。在原生孔隙较大,或次生裂隙发育较均匀的承压含水层,可能形成相对均匀的岩溶含水介质,即使这类含水层中存在局部的溶洞,但总体来说,还属于多孔-裂隙介质类型。

但由于差异溶蚀作用,特别致密碳酸盐岩处于水循环条件“畅排”状态,往往发育为管道(非连续)介质类型。形成一套溶洞-管道岩溶水系统。

对于洞穴系统的形成理论,前苏联 Аублянский 近年对 500 多篇国际有关岩溶问题论著统计,大部份作者都主张岩溶系统的形成与 D. C. Ford 提出的:渗流(包气)带;饱水(水平和虹吸循环)带;季节变动(水面波动)带有关。但学者们已注意到了不但要从成因类型和形态规模等方面,而且应着重对不同的岩溶介质所产生的水流特征进行“系统”的研究。即孔隙(溶隙)-裂隙含水介质系统和溶洞-管道系统。这两种系统可能单独存在,也可以同时存在,由此而形成的岩溶水系统。

法国 A. Mangin 根据试验的研究成果,提出岩溶水系统分下渗带和充水带两个亚系统。下渗带的顶部存在一个表层岩溶含水带,起着调节降水下渗补给的作用。下渗水通过大裂隙以快速补给,小的裂隙以缓慢下渗两种形式向充水带运动,或小裂隙向大的溶隙和通道汇集后再快速下渗。在充水带亚系统,又存在由主通道构成的集中排水带和由细小裂隙构成的缓慢排泄的两个子系统,整个充水带的水最后都由集中的排水通道向岩溶中系统总出口排泄。两套子系统产生相应的快速流和慢速流。

我国 70~80 年代对裂隙水快速流、慢速流在整个水流中的分配进行了研究。在岩溶水的两种补给类型也作了较多研究,其补给一段分配服从线性渗溶定律。

此外,学者们已注意到高速流场以及岩溶水系统对降水反应迅速的现象存在,岩溶水压力梯度场存在波状等压力面,在旱季期快速流的通道呈凹槽状,雨季洪峰期则呈凸脊。在同一时期,岩溶通道在不同断面由于流速差异引起压力变化,也产生波状压力面。快速流的存在,在雨季洪峰期水位瞬变,溶道中发生气水压力交替——气爆现象,以及快速流对含水介质的冲蚀、溶蚀和冲塌等综合动力作用。

利用快速的水力特点,可以采用瞬时放水和闸水的脉冲示踪方式来求得岩溶水有关的水力参数和通道体积。P. Milanovic 等用多期亚动态衰变方程分析岩溶泉水动态,得出岩溶通道口径与衰变系数的函数关系,认为直径为米、厘米级的通道,衰减系数分别为 $n \times 10^{-1}$ 至 $n \times 10^{-3}$,并可用亚动态段水量体积计算不同含水介质的空间体积。T. C. Atkinson 引用陆地水文学方法对岩溶泉流量过程线进行分割,得出英国 Cheddar 泉水流量中快速流占 57% 的结论。应用系统理论方法,将有效降水作为岩溶水“系统”的输入脉冲,泉水流量作为“系统”的输出反应,用反卷积求得“系统”的特征函数(线性核),然后用多年降水机率统计作为输入信息,通过“系统”可预测岩溶水的动态变化。80 年代以来,应用系统理论方法,将有效降水作为岩溶水“系统”的输入脉冲,泉水流量作为“系统”的输出反应,用反卷积求得“系统”的特征函数(线性核),然后用多年降水机率统计作为输入信息,通过“系统”可预测岩溶水的动态变化。S. J. Dreis 针对岩溶水对降雨的快速反应的特点,还在泉水长期动态观测资料中选择出典型的暴雨(孤立的场雨)作为输入脉冲,用泉水的相应变化为反应波,以最优化方法求出“系统”的核函数,将泉域补给区大小作为约束条件,可以反求出泉水的补给区,并获得较满意的结果。看来,采用集中性参数模型和随机模型,针对岩

溶水集中排泄的特点,模拟泉水动态过程,对岩溶水作“系统”识别,然后用电子计算机处理和分析动态信息将是研究岩溶水介质和水流特征值得重视的方向。

地下水数值模拟是从实践中来,结合物理学和计算技术发展起来的,从中可以解决人脑手无法完成的大规模计算工作,但是,当前存在一个误区,即将现场的资料取得后,在室内调参以达到与现场一致或近似的结果,成为一种解释现象的工具。无疑,这是一个不小的进步,但是,模拟技术应该是在室内资料不全的局限条件下,利用现有的理论及计算手段,通过模拟来找出拟研究问题的主要影响因素(子),以在现场重点查明这些因素,来解决实际问题。

3.4 水文地球化学

3.4.1 水文地球化学的发展概况及基本研究内容

水文地球化学作为一门独立的学科,是近三、四十年来才逐步建立和形成的。初期主要是围绕阐明区域水文地质条件,查明矿水的埋藏条件及形成和制定水文地球化学找矿方法等开展研究。50年代以后,已建立起较完整的有关淡水、矿水的形成理论和普查勘探方法,区域水文地球化学规律,地下水化学分带和分类,水文地球化学找矿原理和方法等。

60年代末,水文地质工作密切注意探索地下水在地壳层中所起的地球化学作用。这在水文地球化学研究史上是个突破,因为这样就明确与扩大了研究的对象与范围。

70年代以来,随着地质及水文地质学多学科综合研究日益向纵深发展,水文地球化学越来越显示出特殊意义,取得了新的进展。在应用水文地球化学方法寻找隐伏矿床方面取得了一定成效,前苏联就已将该方法列为1:5万综合地质测量的规范之一。在地热勘探中,水文地球化学得到广泛应用,如估算地下热储层的温度,判断热储类型和性质,确定地下热水的循环时间及年龄等。

与水文地球化学关系极为密切的是地球化学,后者是前者发展的基础之一。地球化学工作者把研究地下水的那一部分称为地下水地球化学在更广泛的范围内,即包括大气水及地表水在内,称为水圈地球化学。这表明从出发点、服务对象以及研究方法等诸方面,水文地质工作者与地下水地球化学工作者之间是有区别的。

地下水化学成分的形成条件与地表水有明显的不同,它经常受地质及水文地质因素的控制。

地下水埋藏在地壳中,它在漫长的地质历史时期中循环着,并不断与周围介质(大气、地表水,岩石)相互作用着。随着分析技术的不断提高,地下水中发现的组分越来越多。人们认识到地下水中有某些组分是由周围岩石溶滤得来的。其化学成分反映了该地区的地质发展历史。

水文地球化学是水文地质学的一部分。应用现代水文地质学的研究成就,进行水文地球化学研究时,应该首先明确某些基本观点:①不应该把地下水看作为互相孤立、互不联系的,而应该把地下水看作是运动着的流体矿床,因此,必须与地下水动力学结合起来研究;②在研究地下水的形成作用时,必须考虑到地下水(盆地)的地质发展历史,必要时应该对地下水(盆地)进行古水文地质条件的分析。

地壳上部的岩石圈、水圈、生物圈、大气圈是地球表部环境的主要单位,它们之间进行着极为复杂的物质运动与转移。这部分地球化学作用归为外生循环。与此相区别,将地壳下部及地幔中进行的地球化学作用归为内生循环。在地壳表层各带中进行着各种不同的自然-地质作用;在地壳上部进行着风化、冲刷、淋滤、成壤、岩溶、成岩、成盐、表生成矿等作用;在深部进行着岩浆、变质、内生成矿、成岩等作用。在各种作用中都有地下水参与。在这里,地下水本身是一种地质营力,起着各种不同的影响。

概括起来,当前水文地球化学研究的主要课题有:1)地下水化学成分形成的理论研究,包括地下水起源,各种物质在水中存在状态及迁移特征,地下水成分形成中微生物及有机物的作用,水-岩平衡的热力学效应;2)区域水文地球化学规律;3)勘探水文地球化学,包括金属、非金属矿床、