

·学科进展与展望·

水文地质研究的关键科学问题及其创新资助策略

Tsang ChinFu* 王焰新†

(* Earth Sciences Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA;

† 中国地质大学环境学院, 武汉 430074)

[摘要] 水文地质学在解决人类面临的众多资源-环境问题中发挥着关键作用,近40年得到快速发展。水文地质研究中带共性的关键科学问题包括:地下水系统中的物理-化学过程、场地评价方法和耦合模拟方法。为加快水文地质研究的创新进程,应当建立三种类型的研究项目平衡资助机制:小型的单个研究者主持的研究项目,多学科项目和多机构项目。

[关键词] 地下水,环境,基础研究,创新,资助

1 水文地质学是地球科学分支中发展最快的学科之一

水文地质学是研究地下水的科学。20世纪60年代以来,水文地质学进入了快速发展时期,在研究主题上,大致可以80年代分野:此前侧重水流的研究,此后越来越重视水质。绝非巧合的是,20世纪80年代以来,环境和可持续发展问题得到世界范围的重视。地下水是人类最主要的供水水源之一和全球水循环的重要环节,开发利用地下水、研究地下水、保护地下水自然就成为地球科学工作者永恒的主题。

我们不妨从国际主流刊物和专利情况来回顾一下近四十年来国际水文地质学翻天覆地的变化。1963年, *Ground Water* 和 *Journal of Hydrology* 创刊;1965年,开始出版 *Water Resources Research*。此后,陆续创刊的欧美主流学术期刊包括:1976年, *Advances in Water Resources* 和 *Journal of Contaminant Hydrology*;1986年, *Hydrologic Processes*;1993年, *Hydrogeology Journal*;1995年, *Journal of Hydrologic Engineering*。在过去40年内,不但期刊的数目大幅增加,每种期刊上论文的数量和长度也显著增加。随着更多的大型期刊的出现,新文献以快于20世纪60年代10倍的速度产生,累积文献的卷数与过去相比已增长了1000倍!

如果我们把视野略微扩大,就会发现,在 *Environmental Science and Technology*、*Chemosphere*、*Applied Geochemistry* 等水文学以外的环境、化学类学科国际主流刊物上,20世纪80年代末以来,每期都会找到研究地下水化学的论文。

2 水文地质学的历史与现实作用

在历史上,地表水供应与人类社会和文明的发展密切相关。实际上,确保充足的用水一直是水文学研究的主要内容。

与地下水有关的科学问题仅仅在近20—30年内才成为研究热点。目前,水文地质学(有时也称为地下水水文学)在解决人类面临的众多资源-环境问题中发挥着关键作用,这些问题均属于国家目标,包括:

(1)水资源和水质管理。在世界上的许多地区,地下水是重要的供水水源,并需考虑最合理的联合调度、使用地下水和地表水。与此相关的是水质问题,因为地下水总是趋向于与含水介质处于化学平衡,其含盐量随深度而增加。当来源不同的地下水流发生混合,或地下水与地表水发生混合时,就需要考虑各种水岩作用。目前已经发现的世界范围的水砷中毒、氟中毒、土壤盐碱化、海水(咸水)入侵淡水含水层等原生或次生环境问题,使得地下水资源管理和保护的重要性成为全世界政府和公众关注的焦

本文于2003年8月13日收到。

点之一。

(2)环境污染及管理。在许多地区,化学物质溢漏或管理不善、过量使用农药和化肥,以及化学物质贮藏容器的泄露等已经导致地下水污染。通常情况下,这种污染场地都具有长期的危险性,需要修复或控制,为此,需要认识污染物进入包气带和含水层后的迁移规律;需要发展修复技术,这些技术常常是高新技术。

(3)液体或固体废物(包括核废物)处置。许多人类活动都会产生废物,如化工生产过程、采矿过程以及核电站。废物处置方法包括填埋、注入深部地层和地下贮存。这些方法的安全评估涉及到作为关键要素的地下水的流动和溶质运移问题。

(4)全球水循环。近年来蓬勃兴起的气候变化、生态地质和全球水循环的研究,离不开水文地质,否则无法得到正确的全球水循环水均衡模型和近地表生态系统演化模型。因此水文地质在较长的时间尺度范围内对全球变化研究有重要意义。

(5)地质灾害防治。绝大多数地质灾害(如滑坡、泥石流、地面沉降等)的发生与地下水密切相关。加强灾害多发区的水文地质研究,有助于深化对地质灾害发生和分布规律的认识,提高地质灾害时空预测的精度和可靠性。

(6)其他涉及到水文地质的问题。这些包括注入地下深部的CO₂的地质隔离(geo-sequestration)、地热资源的开发和石油资源勘探。例如,不仅石油储层动力学与水文地质过程相似,而且石油生产会产生大量的废物,这些废物常常又被注入地下,对于地下水流动系统影响很大。

下面我们将简要探讨上述问题中带共性的关键科学问题。这些问题亟待解决,也应该是国家或国际水文地质研究的重要内容。

3 关键科学问题

3.1 地下水系统中的物理-化学过程研究

在地下水系统中,流体流动、溶质和胶体迁移都涉及到物理-化学过程。研究的几条主线是:

(1)地层的非均质性如何用水文地质参数来刻画。含水介质一般是非均质的,而且存在于不同的空间尺度上:从小范围的渗透性变化,到中等规模的地层中裂隙分布的变化,再到大规模的断层、断裂带以及地层层位变化。通常情况下,不能确切地获取研究区域详细的非均质性信息。非均质性造成的结果之一是水流可能被分成各自独立的水仓,使得同

一研究区的不同部位水头不同。尽管在该领域进行了很多研究,包括使用随机方法,问题也远未得到解决。

(2)地下水系统中的快速流动路径的确定。地下水系统中一些流动路径中的流速远大于流体或羽状水流的平均流速,可高一个数量级。快速流动路径可能因为存在断裂、断层面的薄膜流、两个地质体之间的界面,或因水流找到一个最小阻力的渗流路径。后者我们称之为沟流现象(channeling phenomenon)。

(3)界面上或穿过界面的流动和溶质运移研究。这类研究包括地层界面、裂隙-多孔介质界面或裂隙表面,以及饱水带和非饱和带之间的毛细水带。在较大尺度上研究界面时,大气、地表水和地下水之间的相互作用也需进行研究。

(4)胶体、气体或微生物影响下的水文地球化学过程。在被美国国家研究理事会(2001)列为地球科学基础研究6大机遇之首的“关键带”(Critical zone,即维持着几乎所有陆地生物的生命、包含着岩石-土壤-水-气-生物相互作用的近地表环境)研究^[1]中,凡涉及风化壳、土壤、微生物、地表水和地下水环境,或涉及发生在关键带发生的四个相互影响的主要过程(生物活动、风化作用、流体输运和近地表构造活动),都不可能忽视胶体的作用和影响。近地表低温环境中胶体的地球化学也是纳米科学的重要研究课题^[2]。核素和砷等许多有害组分在地下水系统中的迁移富集明显受胶体的控制。在气体和微生物的影响下,地下水系统中的水-岩相互作用、污染物的地球化学行为会发生许多重要变化。如何精细、定量地刻画地下水系统中的胶体、气体或微生物类型、特征及其对水文地球化学过程的影响,对水文地质研究提出了严峻挑战。

3.2 场地评价方法

与国家目标有关的水文地质问题大多集中于具体的场地。例如,一个特定的场地的污染是否得到了控制?或能否确保位于地下300米深的场地中的废物在将来的1000年内与生物圈隔绝?这些具体的场地问题需要用场地特性描述方法来了解场地的特点和结构以及场地中正在进行(或将来可能发生)的物理-化学过程。

为了正确描述一个场地,我们不能仅仅使用某一两种方法。我们需要一套方法,不仅能识别不同的特征,而且能相互验证,以促进我们对场地的了解程度。使用的方法包括地表地质学和地球物理测

量、钻井记录和监测、钻孔横剖面地球物理成像和雷达断层照相术、瞬时压力测试以及包括各种同位素在内的示踪剂迁移试验。所有的数据可输入地理信息系统(GIS)以便于使场地的结构可视化。

取得场地丰富的数据之后,我们可建立场地概念模型,包括地质结构、特征参数、边界条件以及发生在地域内的物理-化学过程类型。另外,其他的“状态”变量(如压力水头分布和含盐量分布)也需确定。这些可能随着时间变化;例如,场地处于水力学非稳定态,是瞬变的。我们需要证实该概念模型内在的一致性,使得区域中的状态变量分布与边界条件和地质结构相一致。

建立一个概念模型时,需要估计、追踪数据本身及其解译、分析过程存在的不确定性。需要了解这些不确定性是如何影响场地的安全的。经常的情形是,由于数据的不完善,候选(替代)概念模型可很好地满足所有可得到的数据。确定候选(替代)模型及其相关的不确定性的方法还需深入的研究。

此外,为了研究场地的水文地质条件,需要重新考虑现场测定水力学参数的意义。一般而言,测定结果(如对一个岩心的测定)实质上代表空间中一个点的水力特性。抽水试验、压力渗透试验结果可知一定影响范围内的地层水力学特征。在大得多的区域中使用这些水流和输运数据必须十分谨慎,要记住预测的需求和应用的前提条件。例如,预测场地地下水未来的平均压力水头的难度远小于预测下游某地点污染物的最大浓度。

该类研究涉及新的观测技术、新仪器和新材料的研发与应用。但是,在使用任何一种手段之前,我们都需要审慎回顾整个野外观测、分析和模型预测过程及其与该特定场地研究目的的关系。

3.3 耦合模拟方法

属于国家目标且被广为重视的许多问题经常涉及水文地质过程与其他过程(如化学和岩石力学过程)的耦合的影响。例如,所谓的 THM 耦合过程,它综合考虑了热(T)、水文地质(H)和岩石力学(M)的影响,这对存储于断裂岩石中的核废物的安全性评估非常重要^[3,4]。比如,要求建立核废料储存室的地下开挖将会引起储存室周围地区发生力学变形,并使局部渗透性发生变化。核废物的衰变释放的热能会诱发岩石中的热-力学效应,从而引起岩石中的裂隙闭合,降低裂隙的渗透性。

另一个例子是 THC 耦合方法,它综合考虑了 T、H 和 C(化学)作用的影响。该方法在研究将化学废

物注入深部地层进行埋置处理时非常重要。注入废液的温度与深部注入区的温度不同,可与注入地层中的水和矿物成分发生化学反应,使岩石的矿物成分溶解或溶质发生沉淀。这样将改变岩石中空隙的大小,并由此影响水力传导率。如果同时发生相变(例如沸腾和浓缩),这些作用的影响可能意义更大。

水文地质过程和微生物作用的耦合也很常见,但研究仍很薄弱。由于地下水中微生物的活动,会引起水力传导率的变化;由于存在胶体迁移方式,会使得地下的某些污染物发生较快速的迁移。

上面提到的耦合过程仅仅是这种完全开放的研究领域的一些例子,还有大量的研究工作需要进一步开展。

4 关于加快水文地质研究创新进程的资助策略建议

孙枢和李晓波在 2001 年对世界范围内资源与环境学科的发展趋势作了精辟总结:(1)整体观、系统观的研究思路得到加强;(2)跨学科的研究方式和专项计划的组织方式成为主流;(3)研究的突破越来越依赖于长期连续观测资料的积累与分析;(4)模拟与虚拟研究已成为解决资源与环境问题途径的重要手段。这些趋势在过去 40 年水文地质学的快速发展中得到了全面而充分的体现^[5]。

为了解决社会面临的与水文地质有关的大量问题,过去那种单个科学家随机提出和研究自己感兴趣课题的传统办法已经不够。我们需要三种类型的研究项目平衡地进行:小型的单个研究者主持的研究项目、多学科项目和多机构项目。

4.1 小型的单个研究者主持的研究项目

这是传统的项目研究类型,包括一或两个主要研究人员及其几个学生和博士后等。他们通过深入详细地调查物理-化学过程、新观测技术或某项科学议题来进行研究。这种类型研究的优点是其灵活性和取得新发现的潜能。这样的研究结果常成为新知识和新方法的基础,同时也是很多应用研究的基础。例如薄膜流动^[6]和沟流现象^[7,8]。前者是关于在非饱和裂隙岩石中裂隙表面的流体流动,即使是裂隙的缝隙本身大部分被空气充填。尽管通常用非饱和流动理论可预言在这样的低饱和状态下无流动发生,但薄膜流动现象提供了新的流动机制,因此,仍可发生流动和物质迁移。沟流现象涉及在强烈非均质多孔介质或裂隙介质中的水流过程。具有潜在坡度的流动可找到阻滞力最小的流动路径,并将形

成动态的流动沟。计算表明,这些沟中的流体流动速度比用平均水力参数计算得到的平均流动速度高一个数量级。在饱和与不饱和岩石中都发现了这样的沟流现象。

实施这类研究项目的关键是,在评价和接受项目申请时,不能过分依赖研究计划和工作设计(因为水文地质基础研究的创新常常很难预测!),应允许研究过程有足够的灵活性。这类项目的成功应根据研究数据和成果来评价。没有产出,即没有取得新进展潜力的项目应予终止。

4.2 多学科项目

这些中型规模的研究项目涉及到多个不同学科,如水文地质学、化学、地球物理学和岩体力学等,项目组的研究人员可相互合作解决某一问题。这些问题经常涉及特定地质系统,其中所有的过程和几何结构均需要考虑。许多这些过程都是涉及到不同学科的过程的耦合。例如,在研究核废物地质处置安全性评估时需要识别关键的科学问题时,美国能源部组织包括地质学、地质力学、地球物理学、水文地质学和地球化学5个学科的科学家(可来自同一机构),一起来共同研究和评估。通过定期召开讨论会,各组成员相互学习,产生跨学科的研究思路,来解决突出的科学问题,并探索裂缝观测和分析技术。管理这些项目的关键是召集能向其它学科的研究人员学习的优秀研究者,在一个、最好是两个科学家的协调下来共同进行。协调人的作用是把研究组的注意力聚焦到主要问题上去(在该例中是核废物地质处置的安全性评价)。在主要问题的范围内,应该允许研究人员能自主选择他们认为需要重点研究的关键课题。

4.3 多机构项目

这些是大项目,涉及到几个研究机构来解决一个国家或国际上的重要课题。这样的项目可组成研究组,利用每一个参加单位的优势,来解决单个机构本身所不能解决的问题。如上述的 Geo-sequestration (简写 GEO-SEQ)项目,是一个多机构项目,目的是解决地下 CO₂ 隔离的科学和技术问题^[9]。下面对这个不同寻常的项目的进展和执行情况作一详细描述。

(1)政府制定计划:根据科学证据和国际学术界的讨论,美国能源部(DOE)认为 CO₂ 隔离是需要研究和评价的课题。来自7个国家实验室、2所大学和1个私人学会研究中心的优秀科学家聚集在一起,根据研究目的和需要,制定了研究和开发计划。

然后,发出了项目申请通知,其中特别要求多个研究组织的共同申请,包括国家实验室、大学和工业界。根据收到的建议,评审和评估过程选择了几个拟资助的大项目。

(2)GEO-SEQ项目:GEO-SEQ项目是这次项目申请过程中成功的项目之一。它被确定为国立-私立研究和开发合作伙伴项目,来研究安全和高效的地质隔离 CO₂ 所需的技术和信息。该项目的参与者有3个国家实验室、1所大学和3个研究中心,并与6个石油公司合作。项目研究分为4项主要任务,每项主要任务明确规定包括2—3个子任务。每项子任务由来自一个项目参与机构的一个任务负责人领导。总的协调工作由同一个机构的一个或两个在起初的项目申请和后来的项目实施中牵头的项目负责人承担。

(3)项目实施:项目中各个子任务通过每月的电话会议协调,也可通过非正式的电子邮件和电话交流。在年度的项目会议中,要提交所有的任务结果,并进行讨论。建立独立的顾问委员会,参与每年的项目会议和评论研究报告以及论文,并为项目提供评价和建议。项目负责人应通过电子邮件、电话或面谈的方式与资助机构保持密切联系,使资助机构了解项目进程和重要成果。

(4)政府机构对大项目的监控:支持该类项目的政府机构一般批准项目在3—5年的时间内实施,但完成后也可准许再作一个周期研究。该机构每年根据项目成果、顾问委员会评价项目的情况,以及项目符合最初的研究计划的需要情况(上述第一项),对项目进行评价。这样的每年的项目评价将决定来年的预算标准。预算标准水平可能锁定在起初的项目申请,但是也可能根据项目进程和该机构下一年的整个资金盘子进行一定的调整。一般而言,评价项目进展依据两个标准:达到项目目标情况和在最好的广为国际学术界引用的学术期刊上发表文章情况。

5 结束语

水文地质学是一个激动人心的研究领域。目前,它在许多重要的国家和国际问题研究中起着重要的作用。它的研究领域广阔,还有许多突出的科学问题有待解决。在未来的岁月里,还需要进行大量的研究和发展。水文地质研究需要用灵活和有效的方法来进行,以促进基础科学的进步,并满足解决社会中一些重要问题的需要。我们相信,研究工作

应依靠小型的单个研究者主持的项目、中型的多学科项目和大型的多机构项目的3个层次平衡资助体系来保证。国立科学机构在设计框架和程序、使这一切得以实现方面,应发挥关键作用。

最后,在大学和研究生教育中必须重新考虑水文地质教育战略。水文地质学的基础是地质学,必须强化地质基础。但传统的地质教育在定量方面的教学是不足的,数学训练很不够,例如,在解析和数值模拟方面。另一方面,传统的土木工程教育也没有针对有相当大的不确定性和变数的开放的自然地质系统,提供足够的物理思维训练。此外,既然需要进行耦合问题的研究,涉及水文地质学、化学、地球物理、岩体力学和微生物学,学生的知识面也需要拓宽。因此,水文地质教育需要注入新思维和新方法,重视物理思维、数学知识、地质过程、化学和微生物应用、不确定性和风险分析以及系统工程学习。在职人员的培养可以考虑由多个大学联合开设专门设计的课程和暑期学校。实际上,1—2个星期的短期课程和网络学习课程可能对地质学家和工程师非常有用。

在科学界、教育界和管理层的有效的耦合作用下,所有这一切都是可能实现的。

参 考 文 献

[1] National Research Council. Basic Research Opportunities in the Earth

- Sciences. Washington D. C.: National Academy Press, 2001.
- [2] Hochella M F. There's plenty of room at the bottom: Nanoscience in geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66: 735—743.
- [3] Stephansson O, Jing L et al. Mathematical and experimental studies of coupled thermo-hydro-mechanical processes in fractured media – DECOVALEX. *Developments in Geotechnical Engineering Series*. Rotterdam: Elsevier Science Publishers, 1996, 79.
- [4] Tsang C F, Gelhar L et al. Solute Transport in Heterogeneous Media: A Discussion of Technical Issues Coupling Site Characterization and Predictive Assessment. *Advances in Water Resources*, 1994, 17(4): 259—264.
- [5] 孙枢,李晓波. 我国资源与环境科学近期发展战略议. *地球科学进展*, 2001, 16(5): 726—733.
- [6] Tokunaga, Tetsu K, Jiamin Wan et al. Water film flow along fracture surfaces of porous rock. *Water Resources Research*, 1997, 33(6): 1 287—1 295.
- [7] Moreno L, Tsang C F. Flow channeling in strongly heterogeneous porous media: A numerical study. *Water Resources Research*, 1994, 30(5), 1 421—1 430.
- [8] Tsang C F, Neretnieks I. Flow channeling in heterogeneous fractured rocks. *Reviews of Geophysics*, 1998, 36(2), 275—298.
- [9] Benson Sally M, Myer et al. The GEO-SEQ project: A status report. *Greenhouse Gas Control Technologies*, Kyoto, Japan, October 1—4, 2002; LBNL—49688 (abstract), 2002.

KEY SCIENTIFIC ISSUES OF HYDROGEOLOGY AND MANAGEMENT STRATEGIES

Tsang ChinFu* Wang Yanxin†

(* Earth Sciences Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA;

† School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract Hydrogeology plays a critical role in solving many resource-environment related problems of national concern and has developed fast in the past four decades. Key scientific issues in hydrogeology that are common to a range of important problems are discussed under three categories: physico-chemical processes, site characterization methods, and coupled processes. In order to facilitate the innovation process of hydrogeology studies, management strategies of a balanced portfolio of three different types of research projects are needed: small, individual-investigator research projects, multidisciplinary projects, and multi-institutional projects.

Key words ground water, environment, fundamental research, innovation, financial support