

# 水—岩相互作用研究的回顾与展望

沈照理<sup>1</sup>, 王焰新<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学水资源与环境工程系, 北京 100083; 2. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074)

**摘要:**总结了 20 世纪 50 年代末以来的水—岩相互作用研究历史, 初步划分为 3 个阶段: 第一阶段, 50 年代末—70 年代初; 第二阶段, 70 年代初—80 年代末; 第三阶段, 80 年代末至今。近年来, 环境问题在水—岩相互作用研究中占的比重越来越大, 也使水—岩相互作用研究获得了更大、更持续的发展空间。简要回顾了地下水成因和地壳中水的地球化学循环, 控制水的化学成分地球化学过程, 以及水—岩相互作用与地质灾害等方面的重大研究成果。认为有望取得创新成果领域包括: 地下水地质作用及其资源环境效应, 地下水环境演化与全球变化, 和极端条件下的水—岩相互作用研究。

**关键词:** 水—岩相互作用; 地质流体; 地下水; 水文地质; 环境。

中图分类号: P641

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2002)02-0127-07

**作者简介:** 沈照理(1932—), 男, 教授, 博士生导师, 1952 年毕业于清华大学, 1961 年毕业于莫斯科地质勘探学院, 获矿物—地质学副博士学位, 长期从事水文地质和环境工程教学和研究工作。E-mail: envir@cugb.edu.cn

水—岩相互作用(water-rock interaction, 以下简称 WRI)这一术语由水文地球化学学科的奠基人之一、前苏联 A. M. Овчинников 于 20 世纪 50 年代提出。1974 年, 国际地球化学与宇宙化学协会成立 WRI 工作组, 在捷克召开了第一届国际 WRI 学术会议。此后, 每 3 年开一届, 到 2001 年在意大利召开的已经是第 10 届了。WRI 发展至今, 实际的研究内容已成为水—岩(土)—气—有机物相互作用了。从地球表层到地球深部, 这些作用无处不在、无时不在。水作为强大的地质营力, 参与了各种地质作用和生态—环境过程, 整个地球的历史, 可以说就是一部 WRI 的历史。“没有一种自然物质, 在影响基本的、最壮观的地质作用的进程方面, 能够与水相提并论”<sup>[1]</sup>。因此, 不难理解, 20 世纪中叶以来, 固体地球科学和环境地球科学都越来越重视 WRI 研究。这一热点和前沿领域研究, 吸引了来自水文地质学、地球化学、岩石学、工程地质学、地热学、矿床学、环境化学等众多学科的学者。通过开展 WRI 研究, 大大促进了相关学科的发展。对水文地质而言, 过去以地下

水为主要研究对象, 而把地质体仅视为含水介质对待。如果从 WRI 角度研究, 很多情况下, 问题(作用)要复杂得多<sup>[2]</sup>。

水—岩相互作用研究成果汗牛充栋, 不可能在一篇论文中加以全面总结。因此, 在本文中, 我们试图划分 WRI 研究的几个阶段, 简要回顾若干重大研究成果, 最后展望可能取得创新成果的一些研究领域。我们相信, WRI 研究必将为地球科学工作者在解决人类面临的资源、环境和可持续发展问题中提供新的理论和技术支撑。

## 1 研究发展阶段初步划分

WRI 研究有 2 个主要分支: 一支侧重水化学, 探讨地球中水的起源、水质时空分布规律及其影响因素、地球中水的地球化学演化, 分析不同条件下 WRI 的地球化学特征、过程动力学及其地质效应(如成岩、成矿、成油)、环境效应(加剧或减轻污染)等; 另一支侧重水动力学, 研究地质环境中水动力场与地应力场相互作用的时空分布规律、类型、规模及其环境效应, 如岩土体稳定性、地质灾害的发生等。限于篇幅和作者研究领域, 本文仅对前一支的研究

究历史作一简要回顾。

从研究内容和研究方法的发展来看,我们认为,可以把 20 世纪 50 年代末以来的 WRI 研究历史初步划分为 3 个阶段:第一阶段,50 年代末—70 年代初;第二阶段,70 年代初—80 年代末;第三阶段,80 年代末至今。各阶段的主要特征可概括如下:

第一阶段(50 年代末—70 年代初):WRI 研究起步时期。研究工作侧重天然条件下 WRI,对大陆地壳浅部各类地下水水质(侧重宏量组分)的时空分布规律、分类和影响因素取得了大量数据和理论成果,同位素(主要为氢、氧、硫)方法开始使用,水—岩反应地球化学模拟的理论模型基本形成,并积累一些实验数据,其中具有开创意义的几项成果是:Garrels 等<sup>[3]</sup>建立的 25 °C 和 1 个大气压条件下海水离子络合模型;Garrels 等<sup>[4]</sup>利用水的成分数据,建立了描述花岗岩风化作用的模型,奠定反向地球化学模拟之基础;Helgeson<sup>[5]</sup>提出了正向地球化学模拟的理论框架,随后 Helgeson 等<sup>[6]</sup>于 1969 年发表了第 1 个正向地球化学模拟的研究实例。

第二阶段(70 年代初—80 年代末):WRI 研究的框架基本形成时期。除注重天然条件下 WRI,开始涉及污染、废物地质处置、全球变化等环境问题;同位素和微量元素地球化学方法被大量使用;开始涉及 WRI 中有机物质和气体的作用和分布规律;由于计算机技术的进步,水—岩反应的正向和反向地球化学模拟技术迅猛发展,前者的代表性软件是 EQ3/6, PHREEQE, SOLMINEQ88 等,后者的代表性软件是 BALANCE;对于地球中水的成因、地下水的地质作用、水文地球化学过程、盆地流体和成矿规律、成矿流体的多来源等重大理论问题取得实质性进展;为了评价和治理地下水污染,需要精确描述污染物在地下的分布规律,多水平(multilevel)或定深取样(level-determined or depth-specific sampling)技术在 80 年代得到快速发展,这些技术运用于天然条件下的水文地球化学过程研究,大大丰富了浅层地下水系统中溶质运移理论;运用于核废料处置场地的水文地球化学研究,则大大深化了对结晶岩裂隙介质中水—岩反应机理的认识。

第三阶段(80 年代末至今):WRI 研究快速、全面发展时期。环境问题占的比重越来越大;新的同位素方法不断应用;水—岩反应的地球化学模拟技术进一步完善,推出了 NETPATH, PHREEQC, MINTEQA2 等功能强大的软件,并在温度场—化

学场—地应力场—水动力场耦合模拟、反应性溶质运移模拟方面取得重要进展;多水平或定深取样技术趋于成熟;进一步重视 WRI 中有机物质和气体的作用和分布规律研究。特别值得注意的是,与人类日益关注的环境问题紧密结合,使 WRI 研究获得了更大、更持续的发展空间。从 1986 年的第 5 届 WRI 学术会议到 2001 年的第 10 届 WRI 学术会议,会议的主题和大会发言中除了 WRI 学术会议传统的“沉积盆地”、“地热系统”、“变质环境”、“热液矿床”、“稳定与放射性同位素”和“地球化学模拟”等内容外,增加了环境污染、地表水与浅层地下水环境、全球变化、灾害等内容,从论文数量分布看,1986 年,会议论文集收录的 178 篇论文中有关环境的论文只有 9 篇,而到 2001 年,会议论文集所收录的 380 篇论文中半数以上涉及污染、废物处置和 WRI 中的生物地球化学和有机地球化学作用,表明 WRI 研究在解决人类面临的环境污染和生态安全问题方面正在发挥着越来越重要的作用。

## 2 若干重大研究成果简要回顾

### 2.1 地下水成因和地壳中水的地球化学循环

地球内部水的成因和起源问题是地球科学的重大研究课题。经过近 50 年的探索,水文地球化学工作者在解决这一问题的过程中取得了重要进展。20 世纪 80 年代,依据水的水化学、同位素和微量元素地球化学证据(表 1),White<sup>[7]</sup>和 Пиннекер<sup>[8]</sup>分别提出了地下水成因类型划分方案。White<sup>[7]</sup>在第五届国际 WRI 学术会议上,发表了题为“不同起源的地下水”的论文,给出了他的“1986 年版”地下水成因分类:(1)雨水成因的(meteoric),来自大气,与松散沉积物共生。如果热梯度和渗透性足够高,可深循环至 10 km。(2)大洋成因的(oceanic)及其非海相成因的等同物,是经历蒸发作用的在地下循环的雨水成因的产物。(3)演化的同生水(evolved connate water),起源于大洋成因的水与沉积物和火山岩的水—岩相互作用,但并不总是形成于中等的温度和压力条件下;包括各种有机和无机反应;成岩水(diagenetic water)可与这类成因的水重叠,或者是这类成因的水与变质水的过渡。(4)变质水(metamorphic water),经历变质脱水反应的岩石所含的水或从中驱替出来的水。取决于游离水的析出速率和析出通道的渗透性,变质水经受的超高压可至岩静压力梯

表 1 第 5、7、10 届 WRI 学术会议的主题和大会发言题目对比

Table 1 Keynote talks and themes of the fifth, the seventh and the tenth WRI symposium

时间(届)	地点	主题	大会发言题目
1986(5)	冰岛	矿物-流体界面地球化学;活动的地热系统;变质环境;稳定与放射性同位素;沉积盆地;地球化学模拟;热液矿床	与海水入侵有关的地下水混合作用的地质意义;大陆淡水中锂的迁移和循环;Salton Sea 钻探项目;加州科罗拉多河三角洲活动地热系统的调查;大洋热泉的化学和同位素系统研究;地热系统中甲烷成因的同位素证据;玄武岩热液蚀变过程中金的迁移;瑞典 Stripa 核废料处置场地花岗岩-水相互作用起源的卤素及其放射性同位素环境酸化中的地球化学缓冲;不同起源的地下水
1992(7)	美国	矿物-流体界面地球化学;地球化学模拟;有机地球化学;自然灾害与环境污染;全球过程;地表水和地下水中的氧化还原反应;风化过程与地表水环境;盐湖与蒸发盐矿床;非饱和带环境;地下水环境;稳定与放射性同位素;沉积盆地;地热系统;变质环境;热液矿床;海水-大岩石相互作用	溶解与沉淀动力学;实验和野外结果;矿物-流体界面化学研究进展;铝的水解;矛盾的模型和铝地球化学的解释;水-岩相互作用地球化学模拟;过去、现在和未来;显生宙时期大气 CO <sub>2</sub> ;流体-矿物系统稳定同位素交换;老问题,新解法;沉积盆地中咸的建造水;同生的或成岩的?;沉积物中的早期成岩作用;全球的观察;作为构造背景函数的地热和火山系统中气体的成分;犹他州 Oquirrh 和 Wassatch 矿床:大规模水-岩相互实例;洋中脊中水-岩相互作用的结果
2001(10)	意大利	地球化学循环,全球变化与自然灾害;水岩相互作用模拟;热力学,动力学与实验地球化学;矿物表面与风化作用;地下水环境;沉积盆地;岩浆作用,变质作用与成矿作用;火山与地热过程;微量元素迁移;污染与修复;一般问题;污染与修复;矿山环境,废物储放与处置;生物地球化学与有机成络作用;水岩相互作用研究中的稳定与放射性同位素	泥岩和类似低渗透性材料中水-岩相互作用;利用宏量元素、微量元素和同位素示踪剂解释地下水-矿物相互作用的动力学;利用多示踪剂方法降低同位素研究中的模糊性;沉积盆地含水层系统中地球化学标志物的意义;冰川下火山活动引发的相互作用过程;具有全球意义的局部现象;水-岩相互作用的逆向模拟;热水条件下水/岩/有机/微生物相互作用;查明中东地区盐度的来源;约旦河流域的水文学、地球化学和同位素综合研究

第 5 届未列主题和大会发言,主题是我们根据会议论文进行分类,大会发言则根据论文作者的影响力和论文学术重要性确定。

度。超变质水(ultrametamorphic water)可以在很高的温度下存在,以致于出现岩石的部分熔融。(5)岩浆水(magmatic water),赋存于或来源于熔融的岩石中的水,包括本分类方案中的各种类型的水,因此,起源是多种多样的。(6)初生水(juvenile water)或真正的原生水(primary water),自从地球形成以来,从未参与大气循环的水。这种水即便存在,也是极其稀少的。我们甚至没有直接的证据说明这种水存在过,就已知的高温条件下的同位素交换反应和单个水分子的非恒定性而言,尤为如此。这一分类方案与 Пиннекер<sup>[8]</sup>将地下水按成因划分为渗入成因、沉积成因、变质成因和火山-岩浆成因等四大类的方案在本质上是相似的。20 世纪 90 年代以后,各种新的微量元素和同位素数据不断证实,他们的地下水成因分类是成立的。

Шварцев<sup>[9]</sup>把不同成因的地下水置于地质循环的框架中,总结出了“地壳中水的地球化学循环”模型。这一概念指的是从表生带的风化作用开始,在沉积-变质作用有次序有方向的发展中,在岩石、有机物和气体经历的地球化学改造中,导致水的直接参与,产生水的分解和合成等作用 and 现象的总和。由这一模型得出的几点结论十分重要:(1)岩石不仅仅是地下水储存和运动的场所,而且是活泼的化学反应剂,能使水分子不断的离解,并使离解出来的氢和氧

固定在新形成的矿物中。(2)在深部变质带中,产生水的合成。(3)水与岩石和矿物相互作用的初期,水中的组分基本与岩石中的组分相同。相互作用的时间越长,或所处的环境变化越大,水中的组分与原始岩石组分间的差异越大,当水中大量出现岩石中含量很少的元素时,表明有其他来源,是水的地球化学循环的结果。

## 2.2 控制水的化学成分地球化学过程

查明地下水水质时空分布规律、形成作用和影响因素始终是 WRI 研究的主干学科—水文地球化学的基本任务。近 30 年来,大量野外和室内观测数据的积累,使水文地球化学理论得到突飞猛进的发展,并集中体现在有关控制水的化学成分地球化学过程研究成果上。

地下水的化学成分是多变量的复杂函数,这些变量包括:补给水的成分,地下岩石的成分,岩石的水文地质特征等等。地下岩石成分的影响集中体现在溶解—沉淀作用上。Шварцев<sup>[10]</sup>总结出了在水-岩系统演化过程中分散和富集元素相互关系原则图(图 1)。从 A 点到 I 点,不同的化学元素总在经历各种分散或富集作用。当地下水流速较大,补给区与排泄区的距离较小时,WRI 时间较短,水-岩系统演化常常处于初期阶段(如 B, C),此时,形成的次生相只有 A 和 B,而水的 TDS 较低。随着 WRI 时间的

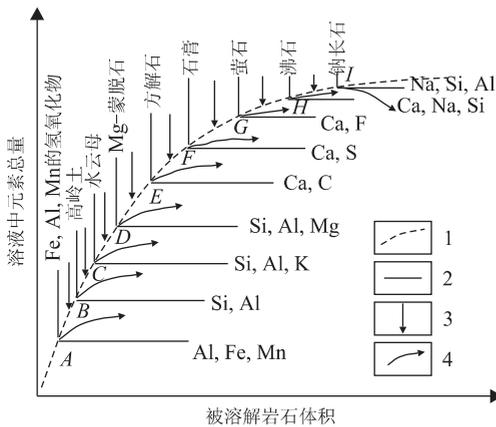


图 1 水—岩系统演化过程中分散和富集元素相互关系原则<sup>[10]</sup>

Fig. 1 Principle plot of relationship between disseminated and concentrated elements in evolution of water-rock system

A—I 为新生相形成的起点。1. 水中元素累积曲线；2. 次生相富集的元素；3. 与岩石接触的水可能进入的带；4. 水—岩相互作用可能结束处

增加,不断形成新的次生相,而水的 TDS 不断增加。当然,实际的情形常常十分复杂,很难遇到图 1 所示的全部次生相组合,地壳中的水溶液有着复杂的地质历史,不同的成因、埋深和成分。实际的水—岩系统常常不会始于 A 点,图 1 所示的早期次生相也常常缺失。但这一模型仍不失为水—岩系统演化研究的重要理论成果,为水文地球化学研究提供了新的思路 and 原则。

地下水系统中氧化还原过程研究是 WRI 研究中进展较快、理论和应用成果较丰的领域。归纳起来,近 30 年来取得的重要进展包括:(1)已经建立一套野外和室内精细描述氧化还原反应的方法体系,其中的关键技术包括定深取样、现场微宇宙(in-situ microcosm)和不稳定及痕量组分现场快速测试技术等。方法上的突破,使得氧化还原过程机理研究得以不断突破。(2)识别了氧化还原作用的分带性,发现了无机和有机组分氧化还原作用的耦合现象,并发现:这些作用常常在空间上重叠,即多种氧化还原反应常常同时发生<sup>[11]</sup>。(3)建立了一系列氧化还原过程动力学模型。由于理论研究的不断创新,污染场地的修复技术有了学术支持,而最近 20 年的污染场地修复尤其是有机污染物、变价重金属和氮、磷污染物的治理技术的快速发展,又反过来对氧化还原理论不断提出了新的课题,真可谓是理论与应用

表 2 沉积环境的氧化还原分类<sup>[12,13]</sup>

Table 2 Redox conditions of sedimentary environments

环境	特征相
富氧环境, $c(\text{O}_2) > 30 \mu\text{mol/L}$	赤铁矿, 针铁矿, 水铁矿, $\text{MnO}_2$ 类型相, 无有机质
次富氧环境, $c(\text{O}_2) \geq 1 \mu\text{mol/L}, < 30 \mu\text{mol/L}$	赤铁矿, 针铁矿, 水铁矿, $\text{MnO}_2$ 类型相, 少量有机质
缺氧环境, $c(\text{O}_2) < 1 \mu\text{mol/L}$	共三类: 硫化物
环境 $c(\text{H}_2\text{S}) \geq 1 \mu\text{mol/L}$ ;	黄铁矿, 白铁矿, 菱锰矿, 有机质
无硫化物环境, $c(\text{H}_2\text{S}) < 1 \mu\text{mol/L}$	
后富氧环境	低温 $\text{Fe(II)}-\text{Fe(III)}$ 硅酸盐, 菱铁矿, 蓝铁矿, 菱锰矿, 无硫化物, 少量有机质
甲烷环境	菱铁矿, 蓝铁矿, 菱锰矿, 较早形成的硫化物, 有机质

相得益彰、比翼双飞。在众多的相关成果中,我们觉得特别值得一提的是关于沉积环境的氧化还原分类<sup>[12,13]</sup>(表 2),这一分类对多学科均有指导意义,并不断得到数据的支持。

矿物—水界面地球化学从一开始就是 WRI 研究的重点领域,其中吸附作用研究又是重中之重。研究表明,经典的等温吸附模型和离子交换模型无法真实模拟复杂和多变的自然环境,当吸附剂是微量、痕量离子组分(低于  $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ mol/kg}$ ),或吸附质的表面电荷与 pH 相关时,尤为如此。20 世纪 70 年代末以来,开始形成表面络合模型(或静电吸附模型)理论,大量的野外和实验数据显示,这类模型能够更真实地刻画许多污染物的吸附行为。如马腾<sup>[14]</sup>成功建立了用于描述复杂系统行为的表面络合模型—扩散层模型(DLM),开展我国南方某铀矿水冶尾矿库附近浅层地下水系统中  $\text{U}^{6+}$  的反应—迁移数值模拟研究,  $\text{U}^{6+}$  计算值与实验数据拟合得很好(图 2)。

### 2.3 水岩相互作用与地质灾害

很多地质灾害,如滑坡、泥石流、岩溶塌陷、水库诱发地震、地面沉降等,其本质上都是水量、流速、水力坡度、水化学成分等的变化,引发 WRI 类型、速度或规模的改变,导致岩土体失去与其周围环境的平衡,发生灾变。

在国家自然科学基金重点项目的资助下,王士天等<sup>[15]</sup>开展了大型水域水岩相互作用及其环境效应研究。他们归纳了水库区 WRI 的类型及特征(表 3)。其研究成果表明,在水利水电建设、特别是大型水库的建设和营运过程中,这类由 WRI 导致的灾变地质作用,有时不仅是强度高,而且时空尺度较大。

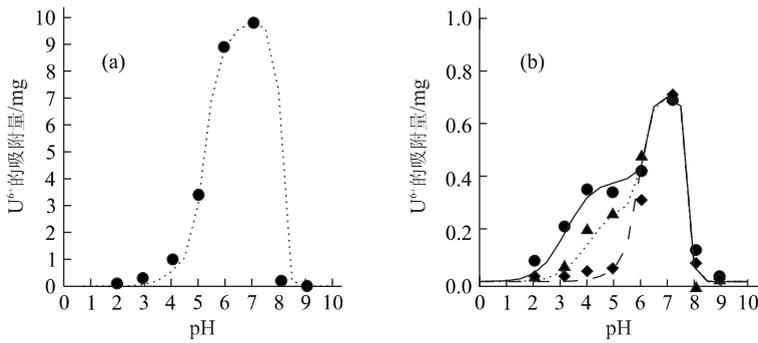


图 2  $U^{6+}$  的 DLM 模型计算值与吸附实验数据的对比

Fig. 2 Simulation of  $U^{6+}$  sorption experimental data with computed values from DLM model

a.  $c=4.3 \times 10^{-4}$  mol/L, 实圆点表示第 1 组实验数据点, 点线表示模型的拟合曲线; b.  $c=4.3 \times 10^{-3}$  mol/L, 实圆点、上三角形和菱形块分别表示第 2、3 和 4 组的实验数据点, 实线、点线和短连线分别表示在这 3 种实验条件下的模型计算值

表 3 水库区水岩作用的类型及特征<sup>[15]</sup>

Table 3 Types and characteristics of water-rock interaction in reservoir areas

水库的部位	水岩作用类型	作用特征
库岸及枢纽区浅部岩体	软化及泥化作用	通过提高土石的含水性而降低其强度的物理作用
	干缩、湿胀与崩解	通过改变土石的含水性而恶化其性质的物理作用
	渗透变形	通过水流带走土石中的细小颗粒而降低其承载能力的物理作用
	冰冻膨胀作用	通过水冻结成冰, 产生体积膨胀而使裂隙劈裂的物理作用
	化学潜蚀与溶蚀	通过带走土石中的可溶性成分, 而恶化其工程性质的化学作用
	动水压力(或渗透压力)作用	通过水的渗流对土体施加一定推力的力学作用
	空隙水压力效应	通过减小岩土体在破坏面上的有效正应力而降低其强度的力学性质
坝下游边坡及河岸	水力冲刷作用	通过强力的水流冲击而使岩土体破坏的力学作用
	雨雾浸润导致的软化、泥化及空隙水压力效应	
库盘较深部岩体	荷载作用	是一种库水以面荷载的方式作用于库盘的力学作用
	空隙水压力效应	
	水热与汽化膨胀作用	地表水渗透到地下深处与高温岩体接触而产生的吸热膨胀或汽化膨胀
	应力腐蚀作用	承载的硅酸盐岩遇水后, 岩体内原有裂隙端部的拉应力集中, 会使其硅-氧键发生加速的水化作用, 并使其强度随之而降低

### 3 创新领域展望

#### 3.1 地下水地质作用及其资源环境效应

地球中水的地质作用类型和过程复杂多样, 蕴藏着无限的研究机会. 就成矿作用而言, 从地壳深部到表生带, 多来源的成矿流体、多来源的成矿物质和多样式的成矿环境, 决定了矿床成因和矿床分布规律的复杂性, 水-岩(土)-气-有机物相互作用研究和古水文地质学研究在解决这些复杂性问题中的关键作用应当给予更大的关注. 就油气的生成、运移和保存而言, 沉积盆地内地下水运动、水文地球化学环境和经历的 WRI 往往是决定的. 大力开展从盆地尺度到空隙尺度的 WRI 研究, 查明天然和人类活动影响下的油气田地区的地下水环境演化规律, 可能

有助于提升石油地质理论, 并在油气勘查方面取得新突破. 就成岩作用而言, 变质成因水的形成分布规律及其地质作用至今仍为薄弱领域, 地质学的某些前沿问题, 如超高压变质岩形成机理, 深部流体的来源、性质和运移规律起到什么作用, 亟待新理论模型的解释和新技术、新数据的支撑. 就表生作用而言, 环境污染和地质灾害问题将是很长一段时期内 WRI 研究的主要领域; 随着观测手段越来越精细和精确, 必将使我们对于污染物在地下介质中经历的复杂的 WRI 有更深入的理解; 利用地质材料修复被污染的场地, 是一个极具前景的领域<sup>[16]</sup>, 为 WRI 研究提供了新的发展空间; 目前, WRI 对于地质灾害的发生和时空分布规律的影响研究仍较为薄弱, 与此相关的地质灾害预测预报的水文地质和地球化学信息的获取和解译也常常被忽视.

### 3.2 地下水环境演化与全球变化

地下水是地球水圈的重要组成部分,也是各圈层物质和能量交换的载体,因此,地下水系统中蕴藏着环境变化的丰富信息。地下水系统的次生沉积物(如石笋和泉钙化)作为全球变化研究的重要信息载体,其微量元素和同位素组成可作为重要的气候代用指标,近几年引起高度重视<sup>[17~19]</sup>,所提供的有关全球变化信息之丰富不亚于黄土、冰心和大洋沉积物。地下水的流速和 WRI 的速率使得地下水本身也适合作为探测天然和人为环境变化的介质。Edmunds<sup>[20]</sup>总结了地下水系统中快速环境变化的标志,这些标志大多对应某种或某些 WRI: 饱和带包括水位,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $^3\text{H}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , DOC, Si,  $\text{SI}_{\text{方解石}}$  等主要离子,  $E_h$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}/\text{Ca}$ ,  $\delta(^{18}\text{O})$ ,  $\delta(^2\text{H})$ ,  $\text{Br}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ , K, 杀虫剂, B 等指标; 非饱和带包括  $\text{Cl}^-$ , pH,  $\text{NO}_3^-$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ , Al 和碱金属离子。如何在此基础上,系统构建地下水系统的全球变化指标体系,值得开展更深入、系统地研究和总结。

人类活动作为新的强大的地质营力,已经并且正在加速改变全球环境,张宗祜等<sup>[21]</sup>在华北平原的工作表明,人类活动已成为现今控制某些地区地下水环境演化的主导力量,地下水演化已进入到由量变到质变的新阶段。有必要科学地认识地球系统的自然行为与人类扰动的响应,在更广阔的视野和可持续发展的战略思想上去发展水文地质学科。

可以相信,地下水系统中蕴藏的环境变化信息将不断被提取,WRI 过程对全球变化的响应将不断被识别并量化,相应的全球变化指标体系、理论和模拟技术将不断完善。

### 3.3 极端条件下的水-岩相互作用

到目前为止,WRI 研究极少涉及极端温度、压力、酸碱条件,地球深部的 WRI 研究仍然薄弱。随着社会、经济和科技的发展,对这些条件下的 WRI 研究提出了新的需求。比如,如何在超临界条件下将有害物质固定到某种材料(如水泥)中,使之得到安全处置;如何精细、在线观测极端环境条件下的生物地球化学和气体地球化学过程;如何进一步开展超高压变质流体的形成、组成、与围岩的相互作用及其成岩成矿效应研究;如何加强目前仍十分薄弱的永久冻土地区的 WRI 及其对水资源和环境的影响研究;某些矿坑水的 pH 值极低甚至为负值<sup>[22]</sup>,对水溶液酸碱理论、pH 值测量方法都提出了挑战。开展这些研究,将加深和拓展我们对地球内部和表层所发生

的复杂多样的 WRI 的了解,发展系统地球科学理论和方法体系。

### 参考文献:

- [1] Вернадский В И. Избр соч Т IV [M]. кн 2 — М: Изд — во АН СССР, 1960.
- [2] 沈照理. 应该重视水-岩相互作用的研究[J]. 水文地质工程地质, 1991, 18(2): 1.  
SHEN Z L. More attention should be paid to water-rock interaction studies [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1991, 18(2): 1.
- [3] Garrels R M, Thompson M E. A chemical model for sea water at 25 °C and one atmospheric total pressure [J]. Amer Jour Sci, 1962, 260: 57—66.
- [4] Garrels R M, Mackenzie F T. Origin of the chemical compositions of some springs and lakes [A]. In: Gould R F, ed. Equilibrium Concepts in Natural Water Systems [C]. Advances in Chemistry, 1967, 67: 222—242.
- [5] Helgeson H C. Evaluation of irreversible reactions in geochemical processes involving minerals and aqueous solutions. I. Thermodynamic reactions [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1968, 32: 853—877.
- [6] Helgeson H C, Garrels R M, Mackenzie F T. Evaluation of irreversible reactions in geochemical processes involving minerals and aqueous solutions. II [J]. Applications Geochim Cosmochim Acta, 1969, 33: 455—481.
- [7] White D E. Subsurface waters of different origins [A]. In: Extended Abstracts of Fifth International Symposium on Water-rock Interaction [C]. Reykjavik: Orkusstofnun, 1986. 629—632.
- [8] Пиннекер(отв ред) Е В. Общая Гидрогеология [M]. Новосибирск: Наука, 1980.
- [9] Шварцев(отв ред) С Л. Гидрогеохимия [M]. Новосибирск: Наука, 1982.
- [10] Шварцев С Л. Рудогенерирующие процессы в эволюционном развитии системы вода-порода [J]. Геология рудн м-ний, 1994, 36(3): 261—270.
- [11] Christensen T H, Kjeldsen P, Bjerg P L, et al. Biogeochemistry of landfill leachate plumes [J]. Applied Geochemistry, 2001, (16): 659—718.
- [12] Berner R A. A new geochemical classification of sedimentary environments [J]. J Sed Petrol, 1981, 51: 359—365.
- [13] Langmuir D. Aqueous environmental geochemistry [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [14] 马腾. 淋滤作用影响下放射性核素在浅层地下水系统

- 中迁移的反应—运输耦合模拟——以南方核工业某尾矿库为例[D]. 武汉:中国地质大学,2000.
- MA T. Coupled modeling of reactive transport of radionuclides in shallow groundwater systems [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2000.
- [15] 王士天,刘汉超,张倬元,等. 大型水域水岩相互作用及其环境效应研究[J]. 地质灾害与环境保护,1997, 8(1): 69—88.
- WANG S T, LIU H C, ZHANG Z Y, et al. Water-rock interaction in large-scale reservoir areas [J]. Geohazards and Environmental Protection, 1997, 8(1): 69—88.
- [16] 王焰新. 去除废水中重金属的低成本吸附剂:生物质和地质材料的环境利用[J]. 地学前缘,2001, 8: 301—307.
- WANG Y X. Low-cost sorbents for heavy metal removal from wastewaters; the environmental application of biomass and geomaterials [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8: 301—307.
- [17] 袁道先. 岩溶与全球变化研究[J]. 地球科学进展, 1995, 10(5): 471—474.
- YUAN D X. Karst and global change studies [J]. Advances in Earth Science, 1995, 10(5): 471—474.
- [18] Hu C, Huang J, Yang G, et al. Climate history of the middle reach of the Yangtze River over the past 9 000 years; a speleothem isotopic record from Za cave, Hu-bei, China [J]. Science in China (Series E), 2001, 44: 119—122.
- [19] Li Y, Wang Y, Deng A. Paleoclimate record and paleohydrogeological analysis of travertine from the Nian-ziguan karst springs, Northern China [J]. Science in China (Series E), 2001, 44: 114—118.
- [20] Edmunds W M. Geological indicators in the groundwater environment of rapid environmental changes [A]. In: Chudaev, ed. Proceedings of the Eighth International Symposium on Water-rock Interaction [C]. Balkema: Rotterdam, 1995.
- [21] 张宗祜,沈照理,薛禹群,等. 华北平原地下水环境演化[M]. 北京:地质出版社,2000.
- ZHANG Z H, SHEN Z L, XUE Y Q, et al. Evolution of groundwater environment of the Northern China Great Plain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.
- [22] Nordstrom D K, Alpers C N, Ptacek C J, et al. Negative and extremely acidic mine waters from Iron Mountain, California [J]. Environ Sci and Technol, 2000, 34: 254—258.

## Review and Outlook of Water-Rock Interaction Studies

SHEN Zhao-li<sup>1</sup>, WANG Yan-xin<sup>2</sup>

(1. Department of Water Resources and Environmental Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The history of water-rock interaction studies since the 1950s' is divided into three periods: the first (late 1950s' — early 1970s'), the second (early 1970s' — late 1980s') and the third (late 1980s' — present). In recent years, environmental problems become increasingly important for water-rock interaction studies and provide more opportunities for the greater and sustainable development of water-rock interaction studies. Some important advances in the following aspects are briefly reviewed in this paper: the genesis of groundwaters and the geochemical cycle of water in the earth's crust; geochemical processes controlling the chemical compositions of water, and water-rock interaction and geohazards. Perspectives concerning the following research fields where innovative results may occur are discussed: the geological role of groundwaters and the resource-environmental effects; groundwater environment evolution and global change; water-rock interaction studies under extreme conditions.

**Key words:** water-rock interaction; geofluids; groundwater; hydrogeology; environment.

# 山西省奇村地热田超采引起的热水动态变化

邓安利<sup>1</sup>, 孙和平<sup>2</sup>

(1. 山西省水利建设开发中心, 山西太原 030002; 2. 奇村地热站, 山西忻州 034400)

奇村地热田位于山西省忻州市忻府区西北方向, 处于奇村镇与南高村之间, 地热田面积 2.5 km<sup>2</sup>, 属中低温热水, 其水温最高达 70 °C, 平均 55 °C. 该地热田于 1972 年被意外发现.

奇村地热田的水化学特征自地热田中心向周围呈明显的变化规律(表 1). 从表中可以看出, 地热田由中心向外围水化学特征呈现明显的规律性. 硬度、碱度由地热田中心向外围逐渐增大, 水温、矿化度由中心向外围逐渐变小等. 正是奇村地热田的水化学特征明显, 特别是地热水中含有对人体有益的硼、铬、锶等微量元素存在, 其水疗价值相当明显.

表 1 奇村热水化学基本特征

Table 1 Basic characteristics of hydrothermal chemistry in Qicun County

位置	地热田中心	地热田附近	地热田边界	地热田外围
水温/°C	61.7	51.2	38	13~17
矿化度	0.75~0.96	0.63~0.72	0.22~0.41	0.15~0.29
pH 值	7.5~8.7	7.5~7.8	7.3~7.9	7.5
硬度	50.1~96.6	44.0~123.2	68.6~117.1	120.6~235.7
碱度	41.5~85.1	71.6~92.6	99.1~121.1	127.6~199.7
水化学类型	Cl·SO <sub>4</sub> -Na	Cl-Na	Cl·HCO <sub>3</sub> -Na	HCO <sub>3</sub> -Ca·Na

奇村地热田初勘范围为 2.5 km<sup>2</sup>. 到了 20 世纪 80~90 年代, 随着温泉开发力度的不断加大, 各家争先恐后地建疗养院, 从热水上大做文章, 据统计, 温泉内日开发水量从 500 t, 增加到 2 000 t, 特别到了每年的疗养旺季, 对地热水的开发达到非常无序的地步, 各疗养院从各自的自备井中大量开采地下水(表 2), 使有限的地热水资源出现衰竭趋势.

从地下水动态来看, 地下水埋深持续下降, 地热水温下降明显, 水化学特性出现变化, 更为严重的是地热田面积出现萎缩现象, 据勘测, 现在地热田面积为 2.18 km<sup>2</sup>, 比初勘时减少了 0.32 km<sup>2</sup>.

表 2 奇村地热田 1992—1999 年实际开采量统计

Table 2 Practical exploration quantity of terrestrial heat field in Qicun from 1992 to 1999

时间	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
开采量	31.4	43.9	52.5	56.6	59.5	69.3	84.8	84.3

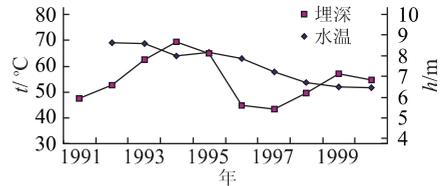


图 1 1991—2000 年奇村地热站地下水埋深及水温变化  
Fig. 1 Groundwater depth and temperature change of Qicun terrestrial heat station from 1991 to 2000

地下水的动态与降水量及季节开采息息相关, 奇村地热水的开发从动态特征上看, 已印证了这一点. 从观测记录上可以得出, 地下水的总体趋势是持续下降的, 年下降速率 0.3 m/a, 最大年下降值达 4.7 m, 已出现了严重的超采现象, 这与奇村温泉保护区的管理不善有关, 在地热田内, 除了疗养开采热水以外, 当地农灌开采也相当巨大, 其日开采量达 2 000 m<sup>3</sup> 以上, 与热田可开采量 1 300 m<sup>3</sup> 相比, 净超采 700 m<sup>3</sup>, 是可开采量的 54%. 其动态埋深曲线见图 1.

地热水的动态不但表现在水位埋深的变化上, 还表现在水温、水化学的变化上. 从奇村多数热水井井温的长观资料显示, 呈逐渐降低趋势, 基本与地下水位的升降相一致, 即地下水位下降期, 外围冷水回灌, 井中水温下降. 分析原因与地下水的开采量息息相关, 特别是无序地施凿新井, 常使潜水与承压水相互沟通, 使原地质构造形成的热储层发生变化, 造成承压水水温下降.

从近年来监测结果看, 热水的水化学成分也发生了较大变化. 与 20 世纪 80 年代相比, 地热田中心

(下转 208 页)