

of gas fields. On this basis, the palaeokarst reservoirs development controlling factors in eastern Sichuan Basin are analysed and it is put forward that structure, climate, lithology, strata, ancient terrain, hydrogeologic conditions and different karst morphological forms influenced or even controlled the development and regional distribution of palaeokarst reservoirs. So the research findings will provide reliable evidence for the palaeokarst reservoirs evaluation and favorable area optimization.

Key words: karst breccia; palaeokarst landform; minor geomorphic unit; carbonate rock reservoirs; controlling factor; Carboniferous; eastern Sichuan Basin

地下水科学的理论创新问题

姚足金, 秦毅苏^①

中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄, 050803

地下水科学的理论方法, 原初是从开发浅层水的实践中萌生的, 随着当代开采深度大大加深, 一些原本可忽略的地质因素——诸如: 地温, 地压, 含水系统水理性变化, 水分子赋存状态, 水岩相互作用, 区域背景流, 地区背景值等等, 其影响已不宜忽视, 实践在呼唤创新理论。对作为地质学基本指导思想的“将今论古”原则, 提出证伪质疑, 以地下水系统为例, 认为可从剖析“地下水成矿”这一石化了的地下水地质作用(过程), 来作比照、观察、研究, 设想有无可能在这“石化比拟”原则上构建地下水科学的新理论? 作为理论创新的哲学基础, 简单介绍了哥德尔和波普尔的学说: 所有理论都是不完备的。列举现今通行理论中的若干“软肋”, 佐证该学说的不谬, 并凸显创新的必要性。限于篇幅, 仅对“水化学、水同位素工作模型”的不完备性进行了较详细的阐述, 并从中引出用“石化比拟”原则, 取代“将今论古”原则的构想。

1 科研工作的核心价值是理论创新

钱学森(1996)曾把现代科技、人文科学综合为 11 个科学体系(北京大学现代科学与哲学研究中心, 2001), 囊括了自然科学、社会科学、文学艺术等人类文化所有领域, 其中每一个体系都由众多学科分列成三个层面组成, 即: 基础科学、技术科学和工程技术。事实上, 构建体系的每一个次一级的独立学科, 它本身的内部组成同样可细分出类似的三个层面。理论创新, 是指这三个层面上涉及的假说、概念、模式、方法等方面的创新。科学体系这一网状结构, 使理论创新活动和成果在学科之间, 移植、嫁接、相互影响成为可能, 科学体系由之成为有活力的动态体系。

创新, 是一个具有时空意义的判词, 早年评价科研成果水平, 常有国际领先、国内领先之说, 是否是创新成果, 换个参照系就可能不属创新。实际活动中有时能见到, 尽管通过了“档案文献查新”程序, 参照系还是建立在对科学发展前沿或对前人成就未充分掌握的基础上, 由此“创新”, 很可能只是相对于同行小范围或对他自己工作的超越, 至于从西方文献中搬用一些概念术语, 生造一些同行看了都似懂非懂的话语来表述“原有的故事”, 这属“包装”, 不属创新。

知识更新和知识创新是两个内涵不同而又有内在联系的范畴。有一种流传甚广的说法——在信息爆炸的现代, 自然科学知识的更新周期为 10 年左右, 我们不清楚这里的“知

识”是如何界定的, 不清楚是根据哪些指标作出的统计, 但从历史发展的长河定性地看, 知识更新速度是呈加速度越来越快, 知识创新的高速度无疑是其基础。

可以想象, 影响知识更新速度的因素很多, 很复杂, 但似乎不能认为: 一定比较高端、比较复杂的知识, 其更新速度较慢, 反之较快, 我们知道爱因斯坦提出相对论后, 他自己就把其中的宇宙常数否定掉, 近些年有人对光速是否是常数提出质疑, 这一切都在短短几十年内发生。我们来考察地下水科学, 上面提到科学体系网状结构内部学科之间存在互动影响, 如果把相关学科——诸如: 应用数学、数值模拟、计算机技术、同位素技术等——带给地下水学科的影响除开, 剩下的恐怕基本上是 200 年前的知识结构。地下水科学诞生于法国、俄国, 萌芽地的自然背景基本上是地形较缓和的自流盆地, 雨量较丰沛的补给条件, 地质构造活动不剧烈, 由此出发形成的理论、概念, 不可能具有如此强的全球普适性和精确性。地下水学科知识更新速度不快, 是长期以来在理论、方法总体上的创新深度不深所规定的, 除了其它因素外, 或者是和专业人士的哲学思考较弱有关。

科研工作除了理论创新这一核心价值外, 还可以具有其它价值。

2 “创新”的哲学依据

创新, 是对原有理论、概念在某种意义上的否定, 在这里, 我们把对原有理论的“完善”、“修订”、“补充”, 视为另一种形式的否定, 这样就涉及已有理论是否完善, 如何进行判别, 有没有终极真理等哲学思考。

下面先讨论地下水科学研究固有的一些认识论特点, 进而介绍两种学说: “哥德尔证明”——证明所有理论都存在内在的不完备性; “波普尔证伪之维”——理论是靠证伪发展的。

2.1 对地质历史过程的研究, 存在先验的臆测性

地下水的运动、分布和形成, 是一种地质历史过程, 对地质历史过程的研究, 存在先验的臆测性; 在研究的实际操作中忽略了系统本身具有的整体显现性(whole emergence)。

以地质作用、地质过程为对象的科学, 其成果包涵谬误

^① 联系人: 秦毅苏, Email: qinyisu@sina.com.

的风险,远远高于实证科学,由于许多地质作用、过程是发生在深埋的地下,而且时间跨度长,空间尺度大,某些能被直接观测到的,只能算是其“片刻瞬间”和“皮毛碎片”,更令人沮丧的是,人们能观测到的往往只是某种作用或过程发生后的结果,而不是作用(过程)的本身。19世纪初莱伊尔提出“将今论古”原则,使地质学成为现代科学,这一原则影响了一代代地质人的思维模式,主导着人们在专业上的思考方式和方向。众所周知,无论从哲学意义还是科学意义上来说,“今不是古”,地质人在这种尴尬处境中,无可避免地把一些先验的臆测成分夹杂进对自然过程的观察中、测试中和诠释中。

曾经担任过国际地科联主席的著名地质学家,加拿大人法也夫(W. S. Fyfe)讲过,他一直不能理解,巨型逆冲构造如何能有这么大的力量,可以把岩块推行得如此远、如此垂向高度,后来,美国地调局长 Rubby 告诉他,有一次在野外帐篷中,见到火炉上放置的一只金属空饮料罐,在炉面上自行滑动,Rubby 顿悟到:逆冲断层面下有流体存在,流体不光能起润滑作用还能产生上举的气垫效应,从而很小的水平推力就能移动巨大岩块。随后 Rubby 等人通过实验、计算该猜想得到证实,于1959~1965期间,发表了一组论文进行总结,于是全世界地质人都说他们的逆冲断层和推复体也是这样形成的。中国有位力学界权威曾说过,对于像地质体如此巨大而运动如此缓慢的物体,现有的力学理论都不适用,应该有另一套力学体系,他后来没有去创立新的力学体系。但从他这一“想法”,使我们知道地质构造活动还可从别样的力学体系这一物理学方向去重新认识。从这些见地中可以看出,对地质过程、地质作用的观察、诠释,很难不夹杂臆测成分,现存认识不会是唯一解、终极解。

一个系统,总是由若干部分按某种方式整合组成,系统论认为,作为一个整体,它具有各个孤立组分(部件)所不具备的特性、行为和功能,从整体中必定可以发现某些在组分中看不到的属性和特征,即使已知组分的性质和各组分间的相互作用规律,也难以把整体的性质推演出来,这种“整体”才具有,孤立组分或其总和都不具有的特性,称为整体显现性,这有点像“森林”和“树木”的关系。在特殊情况下,当整体与组分具有同质的特性可以进行量的比较时,整体显现性就表现为“整体不等于各组分之和”。在最简单的情况下,整体显现性是一种规模效应,即整体特性与系统的规模大小有关,没有达到必要的规模就不会形成整体效应,而规模大小不同的系统,其整体效应可以出现显著的区别。

在地下水实际问题研究或实验、观测、模拟方案设计中,我们总是选用了整体中的某个“局部”,如何用系统论的原则来评述我们理论的可信度,这成为一个问题。

2.2 哥德尔证明——证明理论内在的不完备性

科学史上有一些伟大发现,它原本是对某个具体学科、具体问题的解答,但当它的哲学意义被发掘出来后,它对人类思想领域的影响和贡献之大似乎大大超过原在的科学领域,热力学第二定律中的熵,是这方面的一个典型例子,数论中的哥德尔证明,是另一个这样的例子。

库尔特·哥德尔(1906~1978,美国数学家)1931年发表了一篇不很长的论文,题目:《论〈数学原理〉及其相关系统的不可判定命题》,这篇论文是逻辑和数学史上的一座里程

碑,对哲学而言,提出了一项具有革命性意义的认识(内格尔等,2008)。两百年来,人们普遍认为,数学思想的每一分支都能找到一组公理,从公理出发就足以系统地推导出在此研究领域无穷无尽的所有真命题,哥德尔论文证明了公理方法具有它固有的局限性,即使是非负整数的性质也不可能全部被公理化,他进而证明了对于许多演绎系统,要确定系统内部逻辑一致性是不可能的。数学研究的对象是事物的抽象形式,把“哥氏证明”还原到实在世界就是——他证明了所有的理论都是不完备的。

《科学美国人》杂志专业撰稿人,约翰·霍根(1997)写道:“…量子力学宣告我们关于微观世界的知识总是不确定的;混沌理论进一步证明,即使不存在量子不确定性,许多现象仍然不可能预测;哥德尔不完备性定理消除了我们对实在建构一个完备、一致的数学描述系统的可能性。”以色列生物学家李·西梅尔说:“爱因斯坦证明了一切都是相对的,而哥德尔证明了没有任何东西能被证明。”

2.3 波普尔的证伪之维

在20世纪的西方世界,科学的确然性,社会的理想观念受到严重冲击,人们的一切活动似乎都失去了理性的根据。卡尔·波普尔(1902~1994,英国科学哲学家)认为,这一切都是由具有严重错误的传统的科学观和理性观所造成的,他在完全否定传统的科学观和归纳方法论的基础上,提出了批判理性主义。

(1)他论证说科学之为科学,不在于它是可证实的,而在于它是可证伪的,可证伪性是科学与非科学的分界标准,他据此把弗洛伊德心理学和占星术一起列为伪科学(王晓林,1998)。

(2)他提出:科学认识不是从个别到一般的归纳过程,也不是从一般到个别的演绎过程,他否认逻辑实证主义者的这种主张,即科学家能通过归纳、反复的经验检验或观察,来证明一个理论,因为即使以往的经验都证明某一理论是有效的,也无法保证下一个观察会给出同样的证明,观察永远不能证明一个理论而只能证伪或证伪它。

(3)古典认识论对确定性的要求,在现代知识论中就转变为对确定性的高概率的寻求,他提出:确定性所具有的逻辑概率值,是与内容的丰满度成反比关系,也就是说,一个理论的确定性概率越大,其内容就越贫乏,例如作为极端例子的“重言式判断”,其概率为1,而其内容丰满度为零。他认为,经验科学把科学目标定在确定性的高概率是荒唐的,应该寻求的是较高的可检验度、可证伪度,这样的理论,具有较丰富的内容,较低的确定性概率。

(4)他提出,科学理论是经历四段图式得到发展的:“问题——猜想(尝试性解决)——反驳、证伪(排除错误)——形成新的问题”,科学的全部历史就是四段图式的不断反复的重演。

(5)科学认识并非传统观念所确信的那样可以获得具有确然性的真理,科学和科学认识之所以具有这样的特性,从根本上说是因为人类的理性并不单纯是逻辑演绎性的,而主要是批判性的,科学发现,是属于心理学的范畴,理论引导了观察,观察渗透着理论,观察与理论的区分也是不存在的,形而上学对科学发展起重要作用。

(6)在他去世之前二年,以 90 高龄接待约翰·霍根采访时谈到:证伪概念是用以区分知识的经验形态(比如说科学)和知识的非经验形态(如哲学)的,证伪本身是绝对非经验的,它不属于科学而属于哲学或元科学,甚至它也不适用于所有的科学。证伪仅仅是一种准则,一种比较粗糙的方法,有时有用,有时没用。他间接表示了:证伪原理本身也可证伪的。

3 地下水科学理论、方法中的一些软肋

地下水科学的某些理论、方法具有实际存在的隐性缺陷和不完备,有些是传统理论本身存在的,有些是我国学界长期以来构建成的。列出这些“软肋”,并不是因为这些问题特别重要,也不意味着就只存在这些,而仅仅是由我们个人的科研经历和科研视野决定的。

3.1 水化学、水同位素工作模型中,忽略了具地域属性的区域背景流和背景值

水化学、水同位素工作模型中,忽略了具地域属性的区域背景流和背景值,与之有联系的是:——在水一岩相互作用体系中,把与水作用的岩石因子当成常量,于是,实际工作的不同项目中,各种有关水化学场(指:水化学组分随空间改变而改变)的表述,往往呈现因失真引起的雷同,并且往往错把这种雷同理解为是某某水化学规律普适的结果;——面对水同位素测值,不推敲流体与围岩间交换作用的影响。

(1)地下水圈是整体的,又是分层、分区的,由于历史时代的局限,传统地下水理论、概念是建立在对水圈表层、浅层的事实和认识基础上的,在我国近几十年来,通常的地下水开采深度可达几百米、上千米,许多地热井深度已超过 4000 m,国外大陆超深钻已达 10 km,我们的研究对象已从低温环境下呈现化学较稳定、溶解反应极缓慢的水岩体系,改变为较高温度、压力环境下,各类化学反应较普遍、化学反应速度较快的水岩体系,这时岩石因子对反应的影响已不可忽略。

决定地下水化学组成的水岩反应体系中,岩石组成带有明显的地域性,大气降水的化学成分同样存在不应忽略的地域性。

(2)云南丽江玉龙雪山山麓从 1987~1993 对大气降水化学组分取样分析结果显示 6 年平均范围值(刘嘉麒等, 1995): pH 4.68~5.18, 电导率 4.4~8.2 $\mu\text{s}/\text{cm}$, Ca^{2+} 0.025%~0.163%, Mg^{2+} 0.0076%~0.042%, K^{+} 0.013%~0.193%, Na^{+} 0.006%~0.033%, NH_4^{+} 0.085%~0.234%, NO_3^{-} 0.198%~0.74%, Cl^{-} 0.066%~0.221%, SO_4^{2-} 0.348%~0.664%, HCO_3^{-} 0.159%~0.401%, $\text{CH}_3\text{COO}^{-}$ 0.095%~0.342% mg/L。大气降水组分在 6 年观测中变化还是较显著的,其中 pH 变幅为 10%左右,电导为 46%~86%,阳离子有一个数量级的变幅,阴离子变幅几近 100 到 200 倍。6 年观测表明,降水酸度值以有机酸总量的贡献最大,相当数量是来自当地植物分解,因此显示出在植物生长旺盛期 6、7、8 月较高; SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 、 K^{+} 、 Na^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等主要来源于青藏高原的大气环流和局地扬尘自然源,由内地传输的影响甚小;从气象卫星观测,其中纬向环流影响约占 3/4,经向环流影响约占 1/4。

丽江观测表明,如果不考虑城市污染影响,那么大气降水的化学组分是其自然地理位置和当地环境所决定的,不同

的位置、环境下,大气降水组分是不同的。

(3)Wood J. R., Hewett T. A. (1982)写了篇《孔隙砂岩中的流体对流、物质传输的理论模式》,论文论证了——在正常地温梯度下(25 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$),饱和水的透水体中,不可能存在静止流体,而总是发生着热力引发的流体的自由对流运动,在设定孔隙率为典型的 0.25,可算出对流胞的长度为 5 km,速度为 1m/a,以百万年计,如此的自由对流运动循环往复为 400 次。毫无疑问,相关参数的改变,会算出另外的尺度规模。在千米尺度的埋深下,含水层中除了通常认为的重力驱动水流运动外,同时存在热力驱动的自由对流运动,两者叠加构成区域背景流,它影响含水层中化学溶解和溶质析出的强度和分布。

(4)近些年,将地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 作为古气候、环境变化的信息源的研究日益增多,一些研究中完全无视地下水围岩的影响,个别文章直接把 $\delta^{18}\text{O}$ 默作为纪年参量。

作者 90 年代初受一文献启发——国外研究非洲某绿洲的地下水补给时,发现第四纪的某次冰期盛行时,正好对应含水层中该时的补给缺失——着手地下水信息提取的研究(姚足金, 1995, 姚足金[●]),选择华北低温地热水,是因为地区研究程度较高。我们利用小汤山温泉区长达一年半的逐月水化学分析成果,论证了 $\delta^{18}\text{O}$ 的动态变化与所有常规化学组分不同,与氩也完全不同,它不受短期水岩作用影响。当把华北地区各个取样点上的 $\delta^{18}\text{O}$ 数据汇集比较时,如何能避开可能因各地不同的水岩反应使数据不存在可比性? 我们用华北各地水样中的碳-14 含量作平面等值线图,发现由碳-14 年龄等值线显示的出热水径流运动方向和前人由矿化度、承压水头显示出的热水径流运动方向,在大的轮廓上是一致的,这不但证明水样碳-14 测值总体上是可信的,更主要的是意味着,华北大盆地地下这股统一的地下径流中,各处水岩反应对 $\delta^{18}\text{O}$ 默的影响程度,在宏观上是等同的、无明显区别的。在这样的论证基础上,我们得出:“华北地热水中的古气候记录曲线”,并指出该曲线完全可与文献中的第四纪冰期、深海沉积、湖泊沉积古气候记录曲线相对比。

很明显,有关华北地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 与围岩的相互作用影响问题,我们的上述研究并未涉及,而是采用论证该影响“在宏观上是相等的”来绕开它。由于这问题在地下水领域的研究成果所见极少,我们把注意力放到地下水成矿学术领域,因为它们“石化了的”地下水水岩作用系统,这有点像——医学是通过解剖死者来了解生命体。我国油田水、地热水文献中,都曾有采用“中国地史学”成果来演绎各“纪”地下水的区域发展史,由于大尺度时空的地史学成果、方法和所要解决的时、空小尺度目标,两者间存在严重不对称,其结果只能是:长篇累牍逐“纪”阐述区域地下水发展史,而看不出它与课题所要探究的具体问题有什么关联。

很久以来国内外矿床学者都在关注浅成热液矿床的围岩氧亏损问题,认为氧亏损大小与矿床规模呈正相关,有人提出:达到矿化的围岩,其氧亏损至少为 3.5%,有人以地下水溶滤形成一定规模的金矿为例,算出围岩氧亏损为 2.2%。大致来说,所有围岩在未发生同位素交换反应时,其 $\delta^{18}\text{O}$ 默高于液相 +5.5%,尤其是在富含石英组成的沉积地层中,围岩氧亏损表现最明显。在水岩比小时,岩石向水中转移的数

量不明显,随着水岩比增大,其转移量增大。水岩比,可以理解成水岩系统存在的寿命期间,进行同位素交换的总水量对总岩石量的数量比,可利用同位素交换前后质量平衡方程算得,海底水岩系统在3~75之间,陆地水岩系统一般小于5。 ^{18}O 从岩石向溶液转移是随温度增大而速度增快。发生流体对流的水岩体系,溶液中的 ^{18}O 浓度要高于静止体系。

通过对石化了的地下水系统——浅层热液矿床、矿点、成矿带的研究,不仅能直接观察到古地下水系统的补径排运动特点和范围,还能直接探究其发生、发育、消亡的具体历程。

3.2 用当今降水记录测算地质时期补给的地下水资源量

用当今(几十年)降水记录,测算地质时期(几千—几一万年)补给的地下水资源量。

现行地下水资源量水均衡法计算中,参数描述的是当今(一般最长不超过30年)的水文气候环境,而地下水年龄通常都在距今 $10^3\sim 10^4\text{a}$ 的数量级,众所周知我国水文气候在这时期曾有不可忽略的干湿冷暖变化。国外研究表明:就地表径流来说,干旱区温度升高 1°C 、降水增加10%,可使径流量增加50%;升温 1°C 、降水减少10%,可使径流量减少50%。气候变化对地下径流无疑应有类似的水文效应。基于水文小周期的现行水均衡法计算,测不准受控于水文大周期的地下水均衡变化。

3.3 含水层、隔水层概念的局限和缺陷

“含水层”、“隔水层”的划分,是基于地层是否含重力水这一水理性标志作出的,这样划分得出的地层含水性概念,从形式逻辑上讲是:内涵确定,外延确定的“白色系统”,于是整个水动力学计算都采用数理方程为工具。张忠胤先生早在60年代(遗著出版于1980)已经指出:地层中的结合水是无所不在的,它与重力水可以相互转化。不久前访美归来的学者讲:美国许多大盆地,在传统的隔水层中开采出大量地下水。张先生的理论,美国的实践都表明:地层含水性概念,在逻辑上它应该属于内涵不确定,外延不确定的“黑色系统”,相应的适宜的数学工具不应是数理方程,也不是模糊数学或灰色数学,而应是随机统计数学。计算工具不同,所得结果随之不同。

3.4 用断裂体系的构造力学属性生套地块的水文属性

我国水文地质界几十年来流行一种认识——压性断层(逆断层)等同于阻水、隔水;张性断层(正断层)等同于透水。这是脱离地质实际,把地质概念作形式化、简单化处理的结果。

众所周知,构造断裂总是以断裂系或断层带出现的,任何一条具体断裂都是归属于某个系或带,稍大规模的系或带,都有较长的地质发育史,在这过程中,它的力学属性往往有所转换;另外,同一带、系中的不同序次的小构造,由于形变时边界条件不同,它们的力学属性可以完全不同,而恰恰是一些小构造的开启性,对地下水的赋存、流动起着决定性作用;再者,地质学家定名的压(张)性断层,指的是地块宏观运动方向,而自然界不可能发生纯粹的压(张)性运动而不伴有一定规模的扭剪运动,这样,从力的分解来说,地层小尺度

的张开(闭合),是不可避免会存在的。断层的构造属性与水理性之间不存在可置换性。

3.5 水文地质过程的数值模拟结果中隐含着不确定性

上面已讨论:对地质过程进行研究必然存在臆测成分;能反映系统“整体显现性”的参数和方法缺陷,这两缺陷都先期地隐含在地质模型的组成中。就模拟本身来说,即使模拟结果能与预测相一致,也不能就此证实其正确性,因为很可能把前提、假设加以变换后,同样能得出相同结果,即模拟结果不存在唯一性,因此,不能用与预测相吻合作为验证模拟的真实;模拟结果表述的只能是“一种趋势”更不是普通的“规律”。

4 结语

建立在地下水圈表层、浅层局部事实基础上的传统地下水理论、概念,在地学相邻科技已在探测整个地下水圈性状的情况下,在地下水实践活动已超越表、浅层的情况下,现行理论、方法中的隐性缺陷已经凸显,列出的五项“软肋”,涉及到地下水科学中的许多分支专业领域,创新不仅仅是时代赋予的使命,亦是理论发展本身的要求,实践在呼唤新理论。

作为地质作用、地质过程的一种客体:地下水系统,它的补、径、排运动,它的发生、发展、消亡历程很难直接观测研究,提出“石化比拟”原则,设想把“地下水成矿”领域的研究成果,嫁接移植到地下水科学领域,有可能由之构建出相关的新理论。

认识到所有理论都存在缺陷,这并不会影响我们追寻真理彼岸的热情,反而能激发出理性批判的科学激情,或许可作这样的譬喻:任何天然晶体都有晶格缺陷,任何大块玉石都存在瑕疵,而高明工匠认清了这点后,能避开这些瑕疵,甚至利用这些瑕疵设计成更精美的作品。

创新无止境,波普尔感慨过:“在广袤的无知面前,我们都是平等的”。

注释 / Note

- ① 姚足金. 2001. 华北平原低温地热化学动态中的环境信息. 见: 香港地质学会, 香港大学地球科学系. 主编. 第三届海峡两岸三地及世界华人地质科学研讨会论文摘要. 香港大学, 397~399.

参考文献 / References

- 北京大学现代科学与哲学研究中心. 2001. 钱学森与现代科学技术. 北京: 人民出版社, 1~473.
- 霍根 J. 1997. 科学的终结. 呼和浩特: 远方出版社, 1~404.
- 刘嘉麒. 等. 1995. 背景降水——中美科技合作全球内陆降水背景值研究. 北京: 中国环境科学出版社, 1~104.
- 内格尔 E, 纽曼 J R. 2008. 哥德尔证明. 北京: 中国人民大学出版社, 1~97.
- 王晓林. 1998. 证伪之维——重读波普尔. 成都: 四川人民出版社, 1~369.
- 姚足金. 1995. 华北地热水3万年以来的古气候记录. 地球科学, 20(4): 383~388.
- 张忠胤. 1980. 关于结合水动力学问题. 北京: 地质出版社, 40~100.
- Wood J R, Hewett T A. 1982. Fluid convection and mass transfer in porous sandstones——a theoretical model. Geochim. et Cosmo. Acta, 46: 1707~1713.