

地质学的定量化问题

赵鹏大 孟宪国

(数学地质遥感地质研究所)

摘 要 本文从定性向定量的转变是科学进展的标志这一观点出发,论述了地质学定量化的必要性和定量地质学的基本要求,突破地质学定量化的方法途径,并强调了非线性科学的重要作用。

关键词 定量地质学,数学地质,非线性科学。

地质学传统地属于定性的、推理的、历史的科学。有人甚至认为:“地质学家是概念和模型定量化的最强烈的反对者”^[1]。在地质学中应用数学方法的主要困难被认为一方面是由地质现象的性质所决定的,例如露头零散稀少以及对过去事件的观测的局限等,另一方面传统地质学的研究方法大多数是非数学的。阻碍应用定量方法的另一种认识是,我们现在所观测的地质现象是经过漫长地质历史而缓慢进行的地质作用的最终产物,因而很早以前就认为,建立大多数模型,例如一个地区的地质图,最重要的是理解导致所观察到的地质现象的起因。一个公认的事实是:一幅地质图在经过若干年后就可能陈旧过时,这并非是由于所观测的特征发生了变化,而是由于地质概念发生变化的结果。加拿大地质调查所的 Harrison^[2]以加拿大地盾一个地区相距 30 年前后两次所填地质图的差别为例来说明这一情况。两张图的差异反映了两个时代基本地质概念的变化,1928 年填绘的第一张图,是在北美地区花岗岩岩浆成因说处于顶峰时期,而 1958 年的第二张图则反映了由于超变质作用而产生花岗岩化的野外证据,并认为富角闪石和辉石岩石是由钙质沉积物转化而来的。这类问题似乎非定量地质学所能解决。

Jeletzky^[3]讨论了生物年代或生物地层对比是否可以定量化的问题。他指出:“不可能用数字来反映一种化石在生物年代对比中的有用程度。它只能用诸如优、良、较好、较差之类的名词来表示,而难以使用数字尺度。最有价值的资料——标准化石,其本质是定性的和非统计性的,这决定了生物年代对比的任何定量化企图都是困难的”。

既使在和数据打交道最多的矿产勘查领域是否能够有效地使用概率统计以及其它数学方法也一直是本世纪 30 年代以来争议颇大的问题。

然而,情况在逐渐发生变化。一方面,社会经济和生产的发展,要求对可再生和不可再生资源进行更精确的定量评价;政府和社会对环境和资源的关注要求更准确和慎重地预报诸如滑坡、地震、泥石流等灾害,要求提出发现新矿床的概率。这些方法都要求有数学模型、计算机处理以及成果的精确直观表达。不仅如此,这些方法的有效应用要求更高度的自动化,交互作用以及新的制图方法。情况变化的另一方面是当今已经具有强有力的分析工具,先进的方法和技术,例如遥感技术、地理信息系统及数据库管理等。可以说,在地质学中定量化要求的进一步提

高不仅是客观的需要,而且也具备了必要的条件。

如果从地质学研究对象本身的特性来分析,所得出的结论不仅不应否定定量化的必要性,恰恰相反,在地质学中建立并应用数学模型的必要性正是由地质研究对象本身特点所决定的^[6]。(1)迄今为止,地质学中的大多数假说、准则、理论是不可证明的,大多数实验结果是不可能准确地重复或再现的,很多推断预测的成果是多解的,不少名词术语是一词多解或同物异名的,因而造成地质学研究中的某些困难。(2)发生在漫长时间、广阔空间和复杂介质中的地质过程及其产物在大多数情况下不可能被全面观测或直接研究,由于时间、空间和其它条件的限制,我们只能观察其极为有限的局部或片断,我们只能采用抽样观察的方法,并由这种局部来推断总体,由片断来推断全面。(3)地质过程和地质现象在大多数情况下具有随机过程或随机事件的性质,在一定条件下,某种事件或现象可能发生,也可能不发生,因而受概率法则支配,我们只能研究某种地质事件在一定条件下发生的概率。(4)地质过程受多种因素控制和影响,但这诸多因素的作用大小和方向、参考程度和范围都不相同,如何较全面地估计各种因素的影响又不致增加更多的工作量,如何删除或忽略次要因素又不致过多地损失信息量就具有重要意义。(5)地质学的主要内容是地球,主要是地壳物质组成分析,结构构造分析,成因过程分析,类型异同分析,发展演化历史分析等;地质学的方法有相似类比法,预测推断法,比较评价法和综合归纳法等,如何正确进行分析,如何恰当使用方法是非常重要的。(6)地质体的预测特征是各种地质过程长期作用的最终产物这一事实不应是反对地质学定量化的理由,恰恰相反,正是需要应用数学模型对地质体的统计特征进行分析,评价其为单一成因总体或系多成因混合总体,若属后者,则可利用相应数学方法对各成因总体进行分解并进行单独评价和认识,这是传统地质方法所难及的。(7)任何地质体的基本特征具有空间变异性,这种变异性表现在地质空间上任意点的观测值可以视为由受系统性或规律性变化因素影响的趋势分量、受局部性变化因素影响的异常分量和受随机因素影响的偶然误差等三部分组成,应用数学模型可以根据研究目的和工作需要分解并提取所需要的组成部分。

凡此种种,说明地质研究对象本身的特点和性质进一步强调了定量地质学的必要性,更何况定性向定量的转变本身就是科学进展的重大标志。

根据以上特点,作为定量地质学,最基本的要求应体现在以下几个方面^[6]:(1)准确地定义地质体或地质现象,由于地质学的描述性质,许多地质体或地质现象缺乏严格定义,有时甚至因概念含糊不清造成理解上因人而异,这给地质分析、对比和解释带来很大困难,从地质学的定量化角度来看,统一名词术语并给以准确严格的定义是十分必要的,当然,这项工作是非常艰巨的,但却是不可回避的。(2)在解决各类地质问题中,给出数量的准则,例如,科学找矿中的“定量预测”准则,正是现代成矿预测所追求的目标,在预测成果形式上包括“四定”:定成矿远景区空间位置、定矿产资源个数、定矿产质量和定矿产资源量,有时,为了更加完善,还应要求定找矿概率及定控矿地质因素和找矿标志最有利成矿和找矿的数值区间,其它如在解决分类、对比、判别等性质的问题中也都应有数量的准则。(3)通过建立数学模型,检验地质理论和假说,有人认为地质理论和假说是“无法检验的”,从地质科学未来的发展来看,这种看法未必正确,地质科学与数学的进一步结合将有可能使地质理论和假说建立在更可靠,而且是可以检验的基础上,数学模型的最大用处在于此,例如,苏联数学地质学家维斯捷利乌斯在1972年提出“理想花岗岩”概念,他应用Or—Ab—Q 3种矿物组分在实验系统中结晶的可靠基础,计算

穿过矿物集合体任意直线上的颗粒转移概率,证明 Or、Ab 及 Q 三相必定具有一种简单的马尔科夫性质,然后用实际花岗岩样品所测颗粒转移的经验数据与之进行比较,从而判断或检验花岗岩的各种成岩假说。(4) 正确处理地质数据. 地质数据不仅在数量上很大,而且多属于多元数据. 另外,大多数地质数据具有噪音强、混合性强、区域性强等特点. 正确地处理地质数据,并从中发掘最有用的信息,恰为定量地质学的最重要任务之一。(5) 模拟地质过程. 沉积盆地形成和发展历史的数学模拟是近年来在地质学量化发展中的重大突破性进展,它集沉积过程、构造过程、热过程、有机物地球化学过程及油气与其它矿产成矿过程的模拟于一体,尽管初始条件和边界条件的确定具有很大难度,但定量研究地质历史是一种十分值得重视的方向。(6) 正确地解释、预测和控制地质对象. 建立数学模型不只是为了正确认识 and 解释地质现象,而且应有预测、进而做到具有控制的功能. 但在目前的科技条件下,做到准确预测地质现象还很困难,欲行控制地质现象几乎是不可能的。

定量地质学的发展经历了一个漫长的过程. Merriam^[6] 在“定量地质学之根”一文中将其发展划分为四个阶段: 第一阶段(1833 ~ 1895) 为形成阶段,如结晶学中三角几何的应用; 确定年龄及热流中的计算. 第二阶段(1895 ~ 1941) 为开发阶段,应用一元和二元统计方法解决地质问题,作为一种可利用的技术为地质学各领域的发展准备了基础. 数学的应用,特别是在地球物理中的应用得到继续发展. 第三阶段(1941 ~ 1958) 为发展阶段,多元统计分析的应用使其扩展到地质学的各个领域,迅速发展了用于解决实际问题的概率方法. 第四阶段(1958 ~ 现今) 为自动化阶段,标志是计算机的地质应用. 同时,法国学派地质统计学的发展,大容量数据集地质问题的解决,模型研究和模拟的发展,特别是含有时间维模型的发展等,都是这一阶段的产物。

现在,人们倾向于将 1958 年即计算机地质应用开始之时作为定量地质学独立学科的代表——“数学地质”诞生之时^[7],但今年在日本京都召开的第 29 届国际地质大会所设的“地质学史”学科组下设的一个专题命名为“数学地质 50 年——金岁纪念”. 显然会议组织者将 1941 年,也即多元统计分析地质应用之始作为数学地质形成独立学科之时。

数学地质是一门地质与数学相交叉的边缘学科,它以地质为基础,以数学为工具,以计算机为手段,以解决地质问题为目的. 可以说以地质始并以地质终,所以数学地质是一门地质学科。

几乎所有的数学方法,包括近年来发展和兴起的一些新的数学分支学科,如数学形态学、模糊数学、分形几何学、稳健统计学等等都被用于研究和解决地质问题. 但正如前国际数学地质协会主席、美国的 Whitten 教授在第 27 届国际地质大会上发表的题为“数学地质的任务”一文所指出的:“为了在下个四分之一世纪使数学地质取得长足进步和实际效果,必须改变数学地质的研究方法. 主要的不应在现有地质资料基础上去试验各种数学方法,而应该努力对地质过程和地质对象作出数学的表达”^[7]. 一旦这个目的达到,数学地质就将成为地球科学中一个具有世界意义的重要学科,也即成为地质学中有决定意义的因素,而不是象现在这样停留在起某种锦上添花作用的水平上。

世界上的事物或现象可分为规则的、随机的和介于二者之间的带有某种规律性或趋势性的. 数学地质所使用的数学模型也相应的有确定性数学模型、随机数学模型和介于二者之间的随机函数模型或时间序列和空间序列模型,如地质统计学模型、马尔科夫过程模型等等. 应该强调的是,地质学研究的对象,无论是各种地质体或地质现象以及各种地质观测结果,都普遍

地受概率法则支配和影响。前苏联学者 Vistelus 曾提出：“地质对象是由一些单个单元联合起来的，这种联合是遵循概率法则的”。正因为如此，概率论和数理统计以及多元统计分析目前仍是数学地质的基本理论之一和重要的方法技术。但是，人们越来越重视作为空间数据（或时间序列数据）的地质观测值的自相关特征或结构性，人们称这种空间数据为区域化变量，地质统计学应用变异函数这一有力工具研究这类地质现象已取得重要成效。现在，地质统计学已成为类似于矿产资源定量预测和评价那样重要的数学地质分支。

这里特别值得重视的是非线性科学在地质科学中的应用问题。定量地质学的发展不能不考虑非线性问题。众所周知，只有找到了定量化的规律，我们才会有精确的认识，才会有有力的工具，因而自然规律需要有数学的表述。过去，人们常用的是线性模型，但自然界存在的事物大量的非线性，因为在线性的规律中往往忽略了相互作用，忽略了二次以上的因素。非线性现象是指那些专门科学中所出现的线性规律所不能解释的现象。混沌是其典型代表，象天气变化、晶体生长、物质裂缝的发展等都与之有关。非线性科学研究的是蕴含于个性中的共性，共性也有多种多样，这就引出了“普适类”的概念。人们从每个普适类的研究中，找出事物的更深刻的内在规律^[8]。近 20 年来发展起来的可积系统和孤立子理论，近 10 多年发展起来的混沌和分形理论，就是普适类的典型代表。

在地质学中应用非线性科学，确定性和概率性之关系是一个不可回避的问题。以牛顿 1687 年出版《自然哲学之数学原理》为标志，直到本世纪 20 年代，决定论长期占据主导地位，十八世纪的法国数学家拉普拉斯甚至说，如果已知宇宙中每一粒子的位置和速度，他就可以预测宇宙的整个未来。虽然人们认为实现拉普拉斯的目标有许多实际困难，但很长时期内并不怀疑他在原则上是正确的。尽管人们逐渐接受了概率观念，但直到最近一个时期之前，人们还没有理由可以怀疑精确的预测能力从原则上讲是可以实现的，只是为了达到这种能力，需要收集并处理足够的信息。

科学上的惊人发现无情地推翻了上述观点，确定性和随机性之间存在着一种以前未注意到的关系：仅仅几个因素的简单确定性系统也会产生复杂的随机行为，这种随机性并不能因收集和更多的信息而趋于消失，并且对初始条件极为敏感。这就是混沌现象的基本特征，自然界的从本质上讲是一个混沌过程，地质演化也应是一个混沌过程。对于这种既非确定性又非纯随机性的关系，必须以非线性科学的眼光来认识。事实上，在数学地质中早已注意到了确定性和随机性并存于地质过程中这一现象。例如，将地质数据分为趋势值和异常值，在地质统计学中强调地质数据既有结构性又有随机性等，只是未认识到二者关系的本质。我们似应接受这样一种观点：自然界既不是确定性的，也非完全随机的，基于有限性原则的混沌论才能更真实地表述客观世界^[9]。混沌现象一方面意味着预测能力受到了新的限制，另一方面它固有的确定性表明许多随机现象比过去更能较准确地预测。这就是将非线性科学应用于地质学定量研究的一个重要基础。

当然，非线性科学远未达到完善的程度，还不能解决许多实际问题，但它所揭示的普遍性规律正预示着科学上的重大突破，包括地质学在内的整个科学领域正面临着挑战。地球科学在非线形科学的形成和发展过程中起了重要作用，作为分形经典例子的海岸线问题，作为混沌过程典型代表的气象问题等，都是地球科学的基本问题。

定量地质学所使用的传统统计方法是在模型假说的基础上建立的，其中大多基于正态分布

假设。但是,有人认为,在自然界,目前还未找到充分证明正态分布存在的证据^[9]。广大数学地质工作者在实际工作中也注意到了许多地质现象和地质数据并不服从正态分布这个问题。有时候,为了满足统计方法的前提,把不服从正态分布的数据转换为正态分布,然而,这种转化有什么科学依据?这从一个侧面说明了引入非线性科学的重要性。例如,数学地质的基本任务之一是查明地质体的数学特征,建立地质体的数学模型。地质体的数学特征是指地质体各种属性的数量规律性,只有当揭示出地质体的数量规律性或当各种数学特征能反映地质体的本质特征和总体特征时,才能称其为地质体的数学特征^[11]。由于地质体本身是混沌动力学演化结果,用基于纯随机假设的传统统计方法是难以全面揭示其数学特征的。对此,可以考虑引入描述地质体数学特征的新参量——分维和多标度分形谱,这样既有可能揭示其复杂程度,又可以在一定程度上反映其成因特征。同样,针对地质体的概率数学模型和确定性数学模型可以建立其分形模型。针对地质演化,可以考虑应用非线性科学于定量地质学的两个途径,即一是地质历史状态的分形重建,二是地质演化过程的混沌重演。当然,由于我们在直观观察地质现象方面尚存在许多困难,还有着艰苦的工作要做。

其它一些新技术和方法,诸如模式识别和图象处理;遥感技术和人工智能;信息合成技术和地理信息系统等等都为地质学的发展提供了强有力的工具和手段,为地质信息的充分发掘和有效利用创造了不可缺少的条件。

量化推动了地质学的发展,地质学正在走向量化。

参 考 文 献

- 1 Fabbri A G. Quantification and geology: methods of pattern defection and of integrating multi-disciplinary knowledge. Netherlands: Enschede, 1990. 1
- 2 Harrison J M. Nature and significance of geological maps. Cambridge: Addison-Wesley, 1963. 225 ~ 232
- 3 Jeletzky J A. Is it possible to quantify biochronological correlation? J. Paleontology, 1965, 39(1): 135 ~ 140
- 4 赵鹏大. 进一步加强数学地质在基础地质学科领域中的应用. 见: 定量岩石地层学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991
- 5 赵鹏大等. 矿床统计预测. 北京: 地质出版社, 1983
- 6 Merriam D F. Roots of quantitative geology. Syracuse Univ. Geology Contribution 8, 1981, 9
- 7 Whitten E H T. Twenty five years of mathematical geology: a new threshold. J. International Assoc. Math. Geol., 1983, 15: 237 ~ 243
- 8 谷超豪. 非线性科学的崛起. 科技日报, 1991.12.08
- 9 郝柏林. 世界是必然的还是偶然的——混沌现象的启示. 科学, 1991, 43(9)
- 10 Philip G M and Watson D F. Probabilism in geological data analysis. Geo. Mag., 1981, 124(6)
- 11 赵鹏大等. 地质勘探中的统计分析. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990

QUANTIFICATION AND GEOSCIENCES

Zhao Pengda Meng Xianguo

(*China University of Geosciences, Wuhan 430074*)

Abstract

From the point of view that change from qualitative description to quantification is the trend and mark of development of natural sciences, this paper discusses the necessity of quantification in geosciences and the basic requirement of quantitative geology. Some methodological approaches of quantification in geology are given in this paper. In this aspect the important role of non-linear methods are stressed.

Key words quantitative geology, mathematical geology, non-linear science.