

定量岩石地层学

QUANTITATIVE LITHOSTRATIGRAPHY

张光前 李继英



矿产勘查与定量评价丛书
SERIES ON MINERAL
EXPLORATION AND
QUANTITATIVE
ASSESSMENT

中国地质大学出版社

定量岩石地层学

张光前 李继英

责任编辑 蒋良朴

责任校对 熊华珍

★

中国地质大学出版社出版

中国地质大学出版社印刷厂印刷 湖北省新华书店经销

★

开本 787×1092 1/16 印张 10.625 插页5 字数 270 千字

1991年10月第1版 1991年10月第1次印刷

ISBN 7-5625-0541-1/P·181

印数 1—1500册 定价：5.95元

QUANTITATIVE LITHOSTRATIGRAPHY

Zhang Guangqian Li Jiying

进一步加强数学地质在基础 地质学科领域中的应用

(代序)

由中国地质大学(武汉)数学地质遥感地质研究所张光前副教授等编著的“定量岩石地层学”专著,是数学地质在基础地质学科中应用取得的一项重要成果。本书介绍的内容,将有助于我国广大读者了解国外定量地层学发展现状,定量岩石地层学在解决实际地层学问题中的作用、优点及其基本方法。本书的出版将进一步推动我国数学地质在地层学研究中的应用。

数学地质是研究如何建立、解释和应用地质过程、地质产物及地质方法最优数学模型的科学。在地质学中建立并应用数学模型的必要性主要取决于以下诸因素:

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一些困难。

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是不可能被全面观测或直接研究的。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. 地质过程是受很多种因素控制和影响的,但这诸多因素的作用大小和方向,参与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现实意义。

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;地质学的方法是相似类比法、预测推断法、比较评价法及综合归纳法等。如何正确进行分析,如何恰当使用方法是非常重要的。

以上因素或特点使得在地质学中建立并应用数学模型具有特殊重要的意义和作用。

地层学研究中建立和应用数学模型构成了数学地质的一个新分支:定量地层学。它把地层学,数学和计算机科学紧密结合解决地层学研究中的问题。国际地质界于1987年建立了“定量地层学委员会”(C. Q. S.)。本世纪70年代以来,定量生物地层学方法在分析和解决地层学问题中得到了广泛应用。80年代出版了一些重要专著,如《第四纪孢粉分析中的数值法》(H. J. B. Birks及A. D. Gordon, 1985);《定量地层对比》(J. M. Gubitt及R. A. Reyment, 1982);《定量地层学》(Gradstein等, 1985)。1988年Thomas等在《定量生物地层文献及索引》的报告中收集编辑的有关文献目录达637篇之多。可以认为,定量地层学已成为数学地质学科中最重要和最活跃的分支之一。

值得注意的是:数学地质在基础地质学科中的应用至今还是很不平衡的,某些学科刚刚起步,某些领域甚至还鲜有报导。我们期待着数学地质在各分支地质学科的应用能有一个明显的加强。到那时,整个地球科学向量化方向的发展将会大大前进一步。从这个意义上说,本书的出版也是有重要意义的。

赵鹏大

1991年10月22日于武汉

序 言

地层学、岩石学和构造地质学始终是构成地质学主要骨架的三大基础分支学科。近百年来,由于地质学的发展在上述三个方面积累了大量的实际资料,发表和出版了众多的论文和专著,涌现了很多的学术观点和学派。这三个方面的发展和水平实际上主宰着地质学的基本学科内容。近20年来,随着数学地质的产生和发展,数学地质的理论和方法逐渐渗透到地质学的各个分支学科领域,陆续出现了地质学各分支学科的一些新的定量研究方向。例如定量岩石学、定量地层学等相继产生,并得到了迅速发展。

在国际上,比较系统的定量地层学研究开始于国际地质对比计划(IGCP)第148项(1976—1986年)。该项目的目的为:建立以计算机为基础的关于地质资料处理的数学理论和分析方法,实现地层的自动对比。在项目进行期间,在加拿大著名数学地质学家F. P. Agterberg教授主持下,开展了大量工作,并于1979年8月在加拿大的达特茅斯和于1980年2月在加拿大的渥太华召开了两次定量地层相关技术的专题讨论会。在这以后,也还召开了一系列的定量地层学学术会议。这都对推动定量地层学研究的发展起了很大作用。

F. P. Agterberg教授主持的研究主要侧重于定量生物地层学,例如:生物地层学的定量研究方法,新生代有孔虫地层的定量研究,标准化石的概念及其在定量地层学中的应用,化石组合带的多元分析,秩评定法在生物地层事件、微古生物、侏罗纪放射虫等研究中的应用,勘察微古生物中的定量对比等。但是,上述研究对定量岩石地层学方面的内容涉及较少。

应数学地质界对定量岩石地层学出版物的需求,中国地质大学(武汉)数学地质研究室张光前副研究员和李继英同志共同撰写了这部专著。本书是作者十余年来从事定量岩石地层学工作的总结。作者在地层数据的数学特征及地层变量构置,地层序列和旋回分析,地层定量对比,岩相和沉积环境分析等方面均有相当深刻的研究和阐述,提出了一些新的研究方法和思路,值得国内同行借鉴参考。

张光前同志地质基本功扎实,工作刻苦,善于根据所研究的地质问题选择或建立合适的数学模型,定量地研究和解决地质问题,这是一种从事数学地质研究的正确的方法和途径。在数学地质研究中,一定要非常重视地质基础,不能单纯地追求数学上的新奇,也不要将不合适的数学模型往地质问题上生搬硬套。本书在地质和数学结合方面作出了良好示范。张光前同志学风严谨,工作方法符合数学地质研究的客观规律,因而成效显著并导致本书的问世。本书的出版是我国老、中、青数学地质工作者值得共同庆幸的一件事。

希望我国的中青年数学地质工作者写出更多的专著,为我国数学地质的发展作出更大贡献。

刘承祚

1990年11月

前 言

几年来,我们一直想写这样一本书——定量岩石地层学,因为感到它既重要又可能。说它重要是因为在地质找矿特别是沉积矿产的找矿工作中岩石地层学起着很重要的作用,定量岩石地层学是其中非常重要的一个分支。它的研究在国外开展较早,出版过一些定量地层学方面的专著,而国内只开展了一些零散的研究,系统的研究较少,目前还没有一本专门系统地介绍定量岩石地层学方面的书籍;说它可能是因为:一有计算机技术的普及,为定量处理地层学问题提供了条件,二有前人在定量岩石地层学方面的大量研究成果,为它的编著提供了基础,加上笔者多年的研究,为编著这样一本书积累了丰富的素材。鉴于以上,时刻在促使我们,应该尽快编著一本较为系统的《定量岩石地层学》,以此为地质学科,特别是地层学的发展尽微薄之力。

随着计算机技术的蓬勃发展,随着地层资料信息量的迅猛增加,地层学研究中的量化与自动化越来越显示出它的重要性和必要性。各种数学模型的大量引入地层学,为地层学的发展开辟出一个崭新的局面,并展示出广泛的前景。作为数学地质工作者,特别是从事地层学研究的人员有必要为此付出艰辛的劳动,为把握住地层形成过程中的定量规律,揭示沉积作用的历史与地壳演化,从而为地层学的发展,为寻找与沉积作用有关的各种矿产资源作出贡献。

定量岩石地层学是通过对组成地层的岩石的物理、化学等特性,以定量的方法来进行地层学方面研究的一门学科。它的研究内容很广,定量方法颇多,要想在一本书里面面面俱到地作很全面的介绍是难以实现的。本书的编著目的在于形成定量岩石地层学的系统,对每一项研究内容,就目前较为成熟的定量方法作简要介绍。就是这样,对各项内容的定量研究也不完全局限于书中所提到的一些方法。更何况,随着科学的发展,不断会有新的方法产生。这里要特别强调的是,所有定量方法的应用是以研究对象的地质资料为背景的,方法的有效与否也同样要受到地质实践的验证。因此说,任何离开地质实际滥用数学方法的作法是错误的甚至是有害的。

本书从介绍地层学和沉积岩石学的一般知识入手,以地层学的研究内容为红线,从地层数据的数学特征、地层的划分和对比、沉积旋回分析,到沉积岩相和沉积环境的研究,较为系统地介绍定量岩石地层学方面的有关知识和方法,并佐以大量的实例加以说明。对于其中一些常用的数学方法,如各种多元统计分析方法等,只作了一般性介绍,重点在于实例的分析和结果解释。而对于适合于地层学研究的较为专门的方法,从数学原理、计算过程到实际应用等各方面作了较详细的叙述,以利于读者对方法的充分理解和恰当应用。在本书最后附有笔者数年来所研制的定量岩石地层学方面的14个子程序,以方便读者的使用。要说明的是,所列出的子程序仅仅是基于基本计算方法的程序,读者可根据要解决的具体实际问题灵活运用和修改补充,以完全适合于具体问题的解决。

在许多著作和杂志中有关定量岩石地层学的研究方法很多,本书并未作全面的收集、整理和编入。这里主要考虑了方法的适用性、有效性和可行性。笔者在平常的研究工作中,对许多方法曾用具体实例作过一些尝试,只是把一些较为常用,实践证明效果较为显著的方法纳

入本书，并试图加以推广。就是书中所介绍的方法也并非完美无缺、无可挑剔的，在应用中同样需要谨慎。

本书所面对的读者是从事地质工作，特别是从事地层学工作的科技工作者以及地质类高等院校的学生、研究生和教师。只要具有一般的地质知识和数学知识的地质工作者都能读懂该书。这样也就增加了该书的实用性，从而达到普及和提高定量岩石地层学研究的目的，使地层学的定量研究在科研和生产中普遍开展、推广。

本书的第二章为李继英编写，其余部分均由张光前编写，全书由张光前统稿。中国地质大学（武汉）赵鹏大教授、中国科学院地质研究所刘承祚副研究员对该书初稿分别进行了评审，提出了宝贵的修改意见，并为该书作了序。在此，我们对两位数学地质界的长辈和老师表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限，时间仓促，书中难免有不妥和错误之处，敬请读者指正。

编著者

1990.10.16于武汉

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 定量岩石地层学的概念及研究内容.....	(1)
第二节 定量岩石地层学的研究现状和发展.....	(2)
第二章 地层序列	(4)
第一节 地层的形成.....	(4)
一、沉积物及沉积作用.....	(4)
二、沉积速率与压实作用.....	(5)
三、沉积间断与剥蚀作用.....	(8)
第二节 沉积岩的特征.....	(10)
一、成分.....	(10)
二、结构.....	(15)
三、构造.....	(15)
四、颜色.....	(17)
第三节 地层序列类型.....	(17)
第三章 地层数据的数学特征及地层变量的构置	(20)
第一节 定性地层数据的定量化.....	(20)
一、数据类型概述.....	(20)
二、定性数据的状态表示.....	(21)
三、定性数据的逻辑数值表示.....	(22)
第二节 定量地层数据及其离散化.....	(23)
第三节 碎屑岩粒度与地层厚度的统计分布.....	(25)
一、碎屑岩粒度的统计分布特征.....	(26)
二、地层厚度的统计分布特征.....	(27)
第四节 副变质岩地层的原岩恢复.....	(28)
第四章 地层序列分析与地层对比	(35)
第一节 地层的相似性对比.....	(35)
第二节 地层划分的最优分割法.....	(39)
一、最优分割法的原理.....	(39)
二、最优分割.....	(40)
三、最优分割的计算步骤.....	(42)
四、最优分割划分地层的应用实例.....	(44)
五、最优分割划分地层时应注意的问题.....	(45)
第三节 地层划分的阶梯函数分析.....	(45)
一、阶梯函数分析方法.....	(46)

二、胶东招远—西泥牛庄剖面的阶梯函数分析·····	(48)
第四节 地层对比中的时间-趋势分析·····	(51)
第五节 地层对比中的调和趋势分析·····	(52)
第五章 地层序列的旋回分析及地层对比·····	(59)
第一节 马尔柯夫链的基本概念·····	(59)
第二节 转移概率分析·····	(64)
第三节 沉积旋回性质的研究·····	(66)
一、熵的概念·····	(66)
二、地层序列中熵的意义·····	(67)
三、熵与旋回性质的关系·····	(68)
第四节 沉积旋回类型分析·····	(73)
一、环流分解的基本原理·····	(74)
二、环流分解的计算·····	(76)
三、实例分析·····	(77)
第五节 地层序列模拟与地层对比·····	(80)
第六节 高阶马尔柯夫链在沉积旋回分析中的应用·····	(85)
一、沉积模型·····	(85)
二、马尔柯夫模型·····	(86)
三、主要的沉积趋势·····	(87)
第六章 岩相分析·····	(89)
第一节 相序和相关系图·····	(89)
第二节 D 函数岩相图·····	(92)
第三节 熵函数岩相图·····	(93)
第七章 沉积环境研究·····	(97)
第一节 数理统计在沉积环境分析中的应用·····	(97)
一、砾岩的成因环境分析·····	(97)
二、碎屑岩粒度统计分布的环境意义·····	(97)
第二节 多元统计分析在沉积环境研究中的应用·····	(102)
第三节 沉积环境的定量研究·····	(110)
第八章 含磷岩系的岩相及沉积环境分析·····	(116)
第一节 地质背景·····	(116)
第二节 岩相和沉积环境分析·····	(117)
一、方法说明·····	(117)
二、岩相和沉积环境的具体分析·····	(119)
第三节 结论·····	(125)
附录 主要的计算机程序·····	(127)
一、粒度分析子程序 (GRAIN)·····	(127)
二、相似性对比子程序 (SIMIL)·····	(128)
三、最优分割子程序 (PART)·····	(130)
四、阶梯函数分析子程序 (STEP)·····	(132)

五、转移频数子程序 (FREQ)	(137)
六、转移概率子程序 (PROB)	(138)
七、极限概率子程序 (LIMIT)	(139)
八、熵分析子程序 (ENTRO)	(140)
九、系统熵子程序 (SYSEN)	(141)
十、环流分解子程序 (CYC)	(141)
十一、剖面模拟子程序 (SIMUL)	(143)
十二、高阶马尔柯夫链子程序 (HIMA)	(145)
十三、相序分析子程序 (FACIES)	(150)
十四、最可预测面子程序 (MPS)	(151)
主要参考文献	(155)
英文摘要与英文目录	

第一章 绪 论

地层学作为地质学的一门最基础的学科已有悠久的发展历史，其研究之深入，内容之全面，作用之重要是地学界人所共知的。地层学主要研究地层的层序、时代及其地理分布，地层分类、划分、对比以及各种岩石（包括沉积岩、火成岩和变质岩）之间的相互关系，地层形成时的古地理环境、岩相以及与沉积矿产的关系等。地层学的研究在地质学的基础理论方面对阐明地壳乃至地球的发展过程（包括地壳构造运动及海陆变迁等），使人们正确认识地球，了解掌握地质发展历史有非常重要的作用；在地质勘探与普查找矿方面，特别是对勘查煤、石油、天然气、油页岩、铁、锰、石盐、石膏、大理石以及各种金属砂矿等沉积矿产具有很大的指导意义。

广义的地层学包括岩石地层学、生物地层学和年代地层学。近年来，又发展起来了磁地层学和地震地层学。

生物地层学是运用生物进化的不可逆性和阶段性来研究地层的学科。它根据地层中古生物事件或分带的记录，进行生物地层的划分和对比，以及研究生物与环境、化石带与岩相的关系。由于生物的进化是不可逆的，某一种属的生物其产生、发展和灭绝在某一地质历史时期中完成，因此，对于地层层序的确定和划分，对于小区域地层剖面的对比以至各洲之间地层时代的对比，都能提供重要依据。当然，它的前提是地层中有古生物事件的发生。

年代地层学是按年代关系（地质历史的相对年龄或绝对年龄）从老到新把地层划分成若干年代地层单位，从而说明地质历史的学科。近代由于放射性测量学的发展，对年代地层学起着重要的促进作用，岩石的同位素绝对年龄测定为地层的划分对比奠定了基础。

磁地层学基于地球发展过程中，地轴的方向不断发生变化引起地史上地磁场的倒转、偏移和间断，据此来判断地层的时代。它与生物地层学的紧密结合，成为地层对比的强有力的工具。

岩石地层学是最老的分支学科，地震地层学是其中的一种特殊类型。它们都是利用岩石的物理化学特性来判断地层，对于不含或少含生物事件的地层的研究尤为重要。本书将从定量的角度对岩石地层学进行系统的探讨与研究，故称之为定量岩石地层学。

第一节 定量岩石地层学的概念及研究内容

随着现代科学的不断进步，60年代以来，计算机技术蓬蓬勃勃地发展起来，并迅速地渗透到各个学科领域，促进了各个学科更迅速的发展。定量地层学就是在这样一种形势下产生和发展起来的。

地质学是一门古老的学科，由于种种原因，至今还基本处于定性的描述性阶段，地层学也不例外。作为地层学所研究的对象——地层是自然界地质过程中地质作用的产物，它同样遵循着自然界的发展规律，其中也包括数量的规律，因此研究地层发展的定量规律就成为自

然；又由于现代地质工作中获取各种各样的地层资料的手段越来越多和越来越先进，所积累的地层资料越来越丰富繁多，一方面全面系统的资料处理越来越困难，另一方面资料处理工作越来越繁重，这使得地层学的定量研究成为必须；速度快、容量大、计算精度高的计算机的问世与发展，不仅使繁多的地层资料处理成为轻而易举，而且还可以用计算机来模拟地质过程，这就使得地层学的定量研究成为可能。因此，我们认为，定量地层学是地层学、数学地质学与计算机科学紧密结合的必然产物，它的产生与发展势在必行。

定量岩石地层学的研究以岩石地层学的研究内容为内容。众所周知，岩石地层学的主要研究内容是，根据岩石特性（物理的和化学的）进行地层的划分和对比，研究地层的岩性、岩相与古地理、古气候的关系，阐明沉积岩层（包括沉积矿产）的沉积规律、沉积环境以及地层的形成与构造环境的关系。这一切都是定量岩石地层学所要研究的内容。所不同的是，两者在研究手段上、分析处理问题的方法上有所差别。

岩石地层学，在广泛获取地层资料的基础上，进行定性的描述、分析，结合地质工作者所掌握的地层学知识和经验进行定性的处理分析，得出结论。由于资料来源的不同和资料尺度的差异，加上研究人员知识和经验的程度差别，不可避免地会带有片面性和主观性，从而可能得出不尽相同甚至完全相反的结论，这种情况是屡见不鲜的。

定量岩石地层学，强调地层资料的代表性、系统性以及资料水平的一致性。首先从分析这些资料的数学特征（着重于统计上的特征）出发，然后结合地层资料实际和所要研究的主要内容，根据定量原理，选用适合于地层研究的数学模型进行定量处理和分析，从而得出数量上的结论，最后结合地层学的有关知识和地质实际进行地质解释。这在一定程度上有效地克服了岩石地层学研究过程中出现的片面性和主观性。另外，定量岩石地层学的整个研究过程，包括资料整理、计算、成图等均可由计算机来完成，这将大大促进地质工作的自动化程度。

定量岩石地层学是近20年发展起来的一门新兴的边缘学科，还远没有达到系统、完善的程度。从目前情况看，定量岩石地层学大致可以分为两大类定量分析方法：第一类是数据分析方法，它包括各种单元和多元统计模型，其主要用于地层资料的数据处理、分类、类比及形态分析等。第二类是过程分析方法，通过有关的过程模型（如马尔柯夫过程等）模拟沉积过程，研究沉积规律。这里应该强调的是，数学地质的各种方法都可程度不同地应用于定量岩石地层学的研究。关键的问题是所用的方法必须适合于地层学的研究目的和内容，紧密结合地层资料，得出有效的令人信服的结论。切忌滥用数学模型，玩弄数学游戏，导致得出错误的结论，造成工作的失误。

第二节 定量岩石地层学的研究现状和发展

60年代以来，随着电子计算机技术的高速发展，随着人类对能源资源（如石油、天然气、煤）和固体矿产资源（如黑色金属和有色金属矿产等）需求量的大大增加，随着地层资料信息量的猛增，定量地层学应运而生，而且迅速地发展起来。

国外有不少地质工作者从事这方面的研究，特别是著名数学地质专家，如 F.P. Agterberg、W. Schwarzacher、W.C. Krumbein、D.F. Merriam、J.W. Harbaugh、F.M. Gradstein 等，已做了大量奠基性的工作，为定量地层学的创立和发展作出了很大的贡献。他们应用各种多元统计方法、时间序列分析、谱分析、马尔柯夫过程等数学方法，研究了单个或多个地

层序列的地层划分和对比以及其他的地质问题。1975年, W. Schwarzscher 著有《Sedimentation Models and Quantitative Stratigraphy》一书, 系统地总结了数学方法在沉积学和地层学中的应用所取得的成就。1976年联合国教科文组织把“定量地层对比”作为148号项目的重要内容之一进行专门研究。1982年, J. M. Cubitt和R. A. Reymont发表了《Quantitative Stratigraphic Correlation》一书, 1985年联合国教科文出版了F. M. Gradstein、F. P. Agterberg、J. C. Brower和W. Schwarzscher 合写的《Quantitative Stratigraphy》一书。这些书除了以较大的篇幅讨论了定量生物地层学和定量年代地层学的有关问题外, 还讨论了定量岩石地层学特别是定量地层对比的有关内容, 在理论上和方法上都有独到之处, 为定量地层学的发展作出了重要贡献。

70年代后期以来, 定量地层学的研究引起了我国许多数学地质学家的关注和重视。如长春地质学院的景毅、王世称、苑清扬, 成都气象学院的王柏钧, 中国地质科学院的余金生, 地质矿产部资料局的李裕伟以及地质矿产部、能源部的许多地质工作者, 都在某些方面做了大量的工作, 取得了一定的成绩。笔者以中国南方晚震旦世含磷岩系为例, 采用一套适合于研究岩石地层学的数学方法, 在地层数据处理、地层的划分与对比、沉积旋回分析、相分析、沉积环境分析以及沉积矿产的成矿规律及其评价预测等方面对定量岩石地层学进行了初步的较系统的探索和研究, 取得了一定的成果(张光前, 1988)。

从国内外定量地层学的研究情况看, 大量的工作主要是定量生物地层学研究, 而对于定量岩石地层学的研究相对较少。在定量岩石地层学研究中主要集中于地层序列的划分和对比方面, 其它诸如岩相分析、沉积环境分析、盆地模拟等方面的研究工作成果并不突出。就是地层序列分析, 也远没有达到完善的程度, 仍处在摸索阶段。因此, 有待于从事这方面工作的地层学界、数学地质学界的人士携手共进, 为定量岩石地层学的不断发展、完善作出贡献。

笔者认为, 定量岩石地层学的进一步研究应朝着以下几方面努力:

1. 地层资料的量化

地层序列是由各种岩性层组成的, 除了对岩性本身及各种定性数据进行定量处理外, 凡与此有关的各种定量数据(如物探、化探、测井等)要经过一定方式的处理, 使数据离散化, 以利于地层序列的分析对比及有关的各种研究。

2. 数学模型的系统化

数学模型是自然规律的高度抽象概括。什么样的数学模型适合于岩石地层学的研究, 需要进行不断的摸索和试验。针对岩石地层学的研究内容系统地提出一些卓有成效的数学模型。某一项内容用一套特定的数学模型来研究, 同时指出某一个数学模型的应用条件, 所能解决的问题, 可能得出的结论以及存在的问题和缺陷; 以便在应用中各模型之间能得到相互验证和补充。

3. 处理过程的计算机化

从资料的收集、整理到数学模型的选择, 从具体计算到结果输出, 全部实现计算机化。其中包括地层的各种数据库、方法库和模型库以及地层学专家系统的建立。

4. 结果表示的图表化

岩石地层学的研究, 无论是地层的划分和对比、旋回分析, 还是岩相和沉积环境分析, 用图表最能直观地和有效地反映成果。因此要建立岩石地层学中主要内容的规范化系列图件, 并且全部图表由计算机完成。

以上四点中最基础的是第一点, 最关键和最主要的是第二点。若这两点能迅速发展和完善起来, 那么定量岩石地层学将会有广阔的发展前景。

第二章 地层序列

地层序列是地层学研究的主要对象，它的形成、发展及其所具有的各种特征是最基础的研究内容。无论要进行地层划分对比，还是岩相古地理分析；无论做定性研究，还是定量分析，都必须首先认识、了解、分析地层序列。因此简述地层的知识，了解地层的形成、发展过程，掌握地层的各种定性和定量的特征，为进一步作地层序列分析打下基础。

第一节 地层的形成

一、沉积物及沉积作用

地层是由一层或一组沉积岩组成的。沉积区中既有沉积作用，又有剥蚀作用，当沉积起主导作用时，从沉积区周围搬运来的沉积物便可堆积下来，当沉积物不断地被新的沉积物埋藏后，经成岩作用固结成岩，这就是沉积岩。沉积物的来源主要为各种母岩的风化产物，其次为火山物质和生物物质。此外，尚有微量的宇宙尘埃物质。

在地球表面，由于地壳运动及其它地质营力作用，早先在地表形成的火成岩、变质岩和沉积岩，经物理风化与化学风化作用，会发生机械破碎、化学分解，形成大小不等的碎屑物以及真溶液和胶体溶液，它们在水、风、冰、生物等介质的作用下被搬运、迁移。当介质的强度和性质发生变化时，就会在适当的沉积区沉积下来。在搬运与沉积过程中，沉积物本身及介质的性质，是能否沉积的决定因素。

碎屑颗粒的大小、相对密度、形态以及介质的密度、粘度、流速，都对沉积物的沉积与否起控制作用。在一个多种因素作用下的系统中，情况将会是很复杂的。但在一般情况下，碎屑颗粒的大小与介质流速是决定碎屑物质搬运与沉积的主要因素。图2-1是在水深1m的平底河床中作的实验。由图可见，中等粒度的砂粒是最容易被水流从静止开始搬动的（一般在20—50cm/s的水流速度下就能被搬动）。粘土有明显的凝聚作用，砾石却又颗粒粗大，它们都需要较高的水速才能起动。

碎屑颗粒在搬运过程中，随着介质流速的减小，由于机械分异作用的影响，它们将按质量的大小依次沉积下来（图2-2）。图a表示当碎屑颗粒的相对密度相差不大时的粒度分异情况。图b表示当碎屑相对密度相差悬殊时的分异情况。在这种情况下，沉积地层中将会出现高相对密度的细碎屑与低相对密度的粗碎屑物共生在一起的现象。

真溶液的搬运与沉积主要决定于溶液本身的溶解度和介质的溶解能力，只有当浓度达到过饱和时才能发生沉积。图2-3表示了各种不同溶解度的物质的化学分异，图中氧化物的溶解度最小，最先出现沉淀；卤化物和碳酸盐的溶解度最大，最后才沉淀。

胶体的质点大于真溶液，质点粒度一般在1—100 μm 之间，具有极大的表面比，能吸附离子而带电。常见的正胶体有： Al_2O_3 的水化物、 Fe_2O_3 的水化物、 Cr_2O_3 的水化物、 TiO_2 的水化物、 CaCO_3 、 MgCO_3 、 CaF_2 及Zr、Ce、Cd的氢氧化物等；常见的负胶体有： SiO_2 、泥

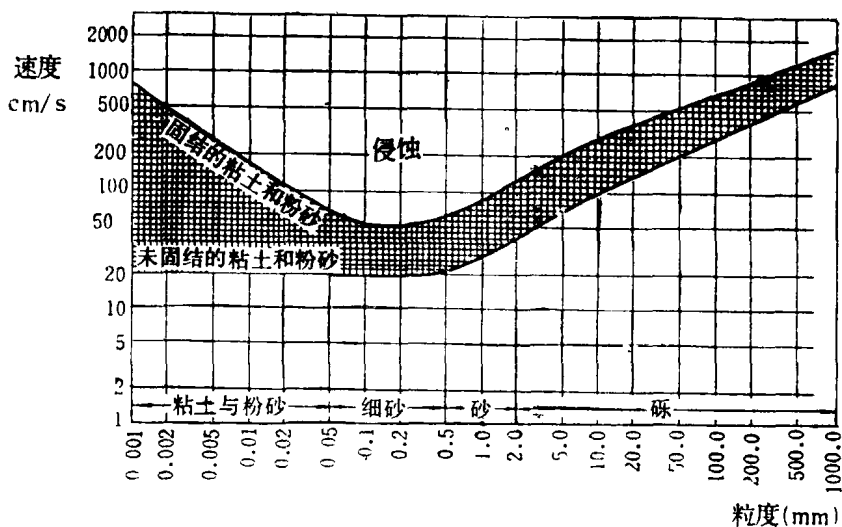


图2-1 被搬运颗粒大小与水流速度的关系
(据Sandberg 1936 资料修改)

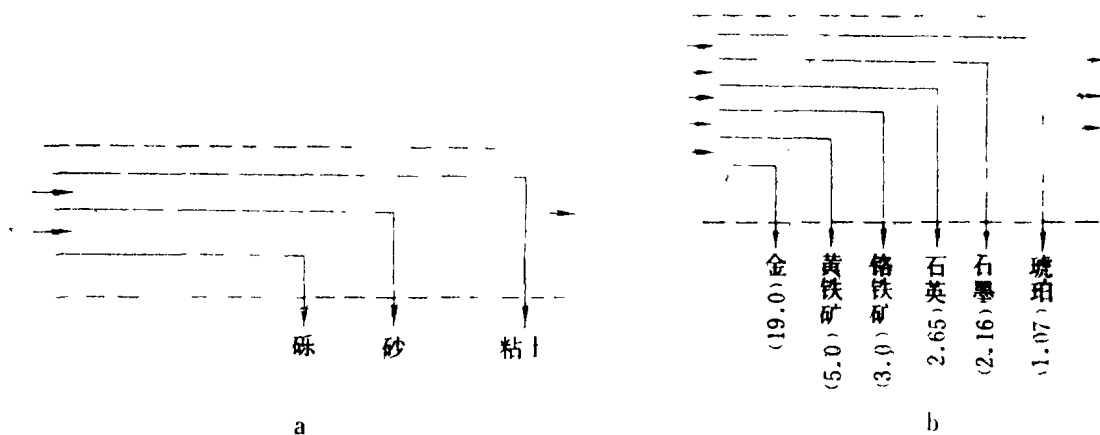


图2-2 碎屑沉积物的机械分异
(据Пустовалов, 1940)
a—粒度分异; b—相对密度分异

质胶体、 MnO_2 、 S 、 V_2O_5 、 SnO 及 Pb 、 Cu 、 Cd 、 As 、 Sb 的硫化物等。当胶体进入海洋后，由于海水中 pH 、 Eh 值的改变，生物的作用以及电异性离子或正、负胶体的中和作用，使得胶体较快地沉淀下来。

沉积盆地是一个多因素的复杂系统，最终停积下来的沉积物是多种因素综合作用的产物，只是在不同环境下、不同地区内，会以某一种沉积作用为主。因此在对沉积物进行分析时，必须综合考虑各种可能的因素，从定量分析角度，即尽可能多地选取变量，然后通过再分析，找出其中主要的变量（起主要作用的因素），从而全面重点地分析沉积环境。

二、沉积速率与压实作用

国外许多学者曾对沉积物在沉积盆地中的沉积速率作过许多工作，试图从岩层的厚度来

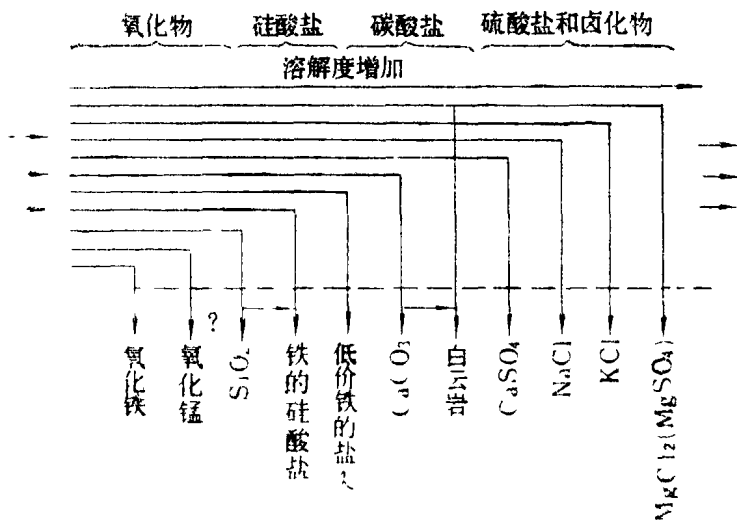


图2-3 几种主要物质的化学分异
(据Пустовалов 1940 资料修改)

推测沉积过程的时间。有一点是肯定的，即如果在连续沉积面未遭受剥蚀的前提下，沉积物的厚度（ h ）与沉积速率（ R ）有如下的关系：

$$h = Rt, \quad (2-1)$$

为沉积过程的时间。但是，自然界沉积物的堆积，必然会受到小至季节性的气候变化、大至地壳构造运动等各种各样因素的影响，一般绝非简单的连续沉积。

一些学者对现代沉积进行了观测（表2-1），得出了一些很有说服力的数据。内陆淡水湖、近岸浅海、海湾的沉积速率一般在 $1000-5000\mu\text{m/a}$ ，在这些沉积环境中主要沉积的是碎屑颗粒，其物质来源充足，加上由于介质性质与沉积环境的变化使碎屑物易于沉积，因此沉积速度较大。而在深海环境下，由于搬运距离大，水深、水流动能减弱，水体中多为颗粒非常细小的漂浮物和真溶液，因此深海沉积物软泥、硅质等的沉积速度极慢，一般为 $10\mu\text{m/a}$ 左右。布勃诺夫（1950）对古代地层的沉积物的沉积速率进行过研究（表2-2）。由表2-2可见，古代沉积物的沉积速率主要与构造运动有关。由于造山运动作用，隆起区形成的山脉为沉积物提供了丰富的来源，而迅速沉降的地区又为沉积物提供了沉积场所（盆地）。就欧洲的情况看，沉积高速率值主要集中在加里东、华力西和阿尔卑斯等造山运动时期。

孟祥化（1981）对各种岩石类型和各种不同沉积环境的沉积速率进行了如下总结。

各种岩石类型的沉积速率（单位未标明者为 cm/ka ）

（1）自生成因。

Mn结核瘤	0.0003	其中石膏	5—20
石灰岩结核	0.4—2	石盐	1000
蒸发岩	500		

（2）有机质和生物成因

有机磷	2000—4000	藻礁	200—700
珊瑚礁	33—4000	叠层石	1.1mm/d

（3）碎屑沉积

河流	30—80cm/a	长岛、沙坝	65cm/a
----	-----------	-------	--------

Sandhook spit	12cm/a	Pleerd coat spit	10cm/a
(4) 泥炭-煤.	30—50m/ka		
各种沉积环境中其沉积物的沉积速率 (cm/ka)			
(1) 冲击相.			
Nile冲积平原	900	Chio冲积平原	450
(2) 湖泊相			
里曼湖 (瑞典)	120	山间湖	10000
赛陆登湖 (美)	500—1400		
(3) 三角洲			
Crinloco三角洲	1000	密西西比 (美)	6000—45000
Tama (日本)	3000—6000		
(4) 河口、海湾			
哈姆顿 (美)	100—230	大湾河口	160—780
James (美)	150—300		
(5) 海洋			
红粘土	0.1—0.4	硅质沉积	0.2—2
风成沉积砂	0.06	钙质沉积	1—4
(6) 泻湖、海湾.			
佛罗里达湾	46	加利福尼亚湾	60—100
(7) 潮坪.			
Snabian (德国)	150—180	潮坪 (英)	1000—2000
Peatbays (美)	550		
(8) 内陆海 (陆表海)			
Adriatia海	1	地中海	10—20
黑海	5—40	Baltic海	20—200

表2-1 现代沉积速率

地 区	速率 ($\mu\text{m/a}$)
维瓦尔德斯坦特湖 ^①	3500—500淡水
鲁兹湖 ^①	1800
罗尼三角洲	700三角洲
尼尔三角洲	660
克莱德湖 ^② (浅水)	5000大部陆相
挪威峡湾 ^②	1500
加利福尼亚湾 ^②	1000
摩洛哥斯 ^② (火山灰)	700
特尔汉思海 ^②	100—500内陆海
黑海	200
巴哈马 ^③	33.8碳酸盐环境
佛罗里达沙洲 ^③	80
佛罗里达内礁区(被陆想物质污染)	220
抱球虫软泥 ^②	8—14深海
红色粘土区 ^②	7—13

注：①引自斯瓦尔泽气 (Schwarzacher, 1946) ,
 ②引自库宁 (Kuenen, 1950) ,
 ③斯托克曼等 (Stockmann etal., 1967) .

表2-2 古代的沉积速率 ($\mu\text{m/a}$)

时 代	间期 (Ma)	美国 最大值	欧洲 最大值	有效 最大值	陆棚
寒武纪	100	86	55	40	15
奥陶纪	60	147	77	66	25
志留纪	40	49	154	113	30
泥盆纪	50	78	314*	160	32
早石炭纪	40	51	88	50	13
晚石炭纪	40	188	210	150	13
二叠纪	45	62	224*	100	23
三叠纪	45	178	140	67	43
侏罗纪	45	152	111	67	33
白垩纪	65	354	230*	230	43
早第三纪	45	236	224	133	31
晚第三纪	23	533	533*	226	47
加权平均		160.9	171.5	108.9	27.7

注 *为加里东, 华力西和阿尔卑斯造山运动期.

沉积速率的测定是一件很困难的事, 特别是对古代沉积物。古沉积物的沉积速率, 由于