

沉积模型和定量地层学

[英] W. 斯瓦尔扎克 著

地质出版社

16406

沉积模型和定量地层学

〔英〕W. 斯瓦尔扎克 著

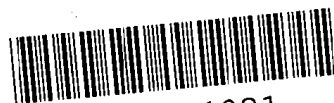
徐 桂 荣 译

刘 绂 堂 校

赵 鹏 大



5435/18



200394821



地质出版社

内 容 提 要

这是国内第一本系统介绍定量地层学的书籍。书中系统总结了数学方法在沉积学和地层学中所取得的成就,不仅对理论和方法有详细介绍,而且有评论,对某些问题指出了研究方向。论述深入浅出,是野外地质工作者的一本好参考书,也是沉积学和地层学研究人员应该学习的材料。

SEDIMENTATION MODELS AND QUANTITATIVE STRATIGRAPHY

W. Schwarzacher

Elsevier Scientific Publishing Company
Amsterdam—Oxford—New York—1975

沉积模型和定量地层学

〔英〕W. 斯瓦尔扎克 著

徐 桂 荣 译

刘绶堂 赵鹏大 校

地质矿产部书刊编辑室编辑

责任编辑:高书平

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: $787 \times 1092^{1/16}$ 印张: $15\frac{1}{8}$ 字数: 347,000

1984年6月北京第一版·1984年6月北京第一次印刷

印数: 1—3,460册 定价: 2.60元

统一书号: 15038·新1024

译 者 的 话

“沉积模型和定量地层学”一书系统地总结了数学方法在沉积学和地层学中应用所取得的成就，它全面地介绍了概率统计、随机过程、时间序列、马尔可夫和半马尔可夫过程等方法，把这些方法融会贯通于沉积学和地层学的领域中，在理论上和方法上都有独到之处。这本书对于从事沉积学和地层学理论研究的学者是一本好的参考书，书中不但对理论和方法有详细的介绍，而且还对各种理论和方法有恰当的评论，并对某些问题指出了研究方向。

本书涉及的沉积学、地层学和数学的理论比较高深，需要一定的基础知识才能深入理解。但本书论述深入浅出，有大学水平的同志只要耐心钻研，是可以弄懂的。

本书由赵鹏大教授指导安排翻译工作，最后由刘绂堂和赵鹏大两老师校译全稿。刘绂堂老师对书中的数学问题作了详细校订，对原书错误之处增加了译注。由于译者水平低，错误之处难免，望读者指正。

译 者

1982年7月30日

序

人类的品行分化为两部份：

第一是自身错误的烙印，

第二是对他人的误解。

——洛达洛达

认识到沉积岩是地球历史的记录这一点，也许是地质学中最重要地发现。地层学，做为研究这种记录的科学，没有沉积学便不可能存在，而大多数沉积学问题没有地层学的体系也不能解决。本书主要讨论沉积作用和地层学之间的这种相互关系。

如果自然界是更为温顺的，那么沉积作用将是一个连续的过程，而且在各种环境中以稳定的速率进行。于是地质事件的年代只要在堆积的沉积物上作简单的测量即可得到。遗憾的是，现实不是这样，沉积记录经常仅提供相对年代，而能提供接近于绝对年代的只有极少数。尽管如此，我们可以考虑建立介于上述理想上的解和现实地质复杂性之间的理论沉积作用体系。研究这种人为的体系可以大大改进对地质过程总的了解，并最终提供研究沉积地层学的更好的方法。

沉积作用和地层学问题理论上的研究必然用到数学，其中有些可能超出地质学家所熟悉的知识之外，例如，微积分学和统计学。以一定的耐心，只要有概率论的基本知识，就可以阅读本书的大部分。对问题的处理完全用“地质学上的准则”，数学基础知识只是在认为对更好地理解理论有必要时才进一步介绍。况且，本书的数学不是初次提出，有很好的教科书可作为任何希望更深入了解这个课题的读者参考。这种书的简单书目列于本序之后。

沉积地层学 数学方法 这一专题的文献还很少，我希望本书不至于漏失任何重要的文献，虽然一些俄国的和法国的著作可能没有像它应该受到的那样被经常引用。

最后，衷心感谢在本书写作中给予帮助的人。感谢贝尔法斯特皇家大学的 E. 莫尔小组和她打字室的同事为手稿的复制所作的细心的帮助。J. 格拉哈姆博士和 J. 格拉哈姆—怀特夫人绘制大部分插图。特别要感谢我妻子，她不仅努力把草稿翻译为英文，而且为初稿抄写。也感谢允许翻印书中插图的所有作者和杂志。

本书写作经常由于爆炸的噪音和不时的无煤气、水和电而停顿。我兄弟的好意使我们在较安静的郊区的长期客居时得以工作和复康。

贝尔法斯特皇家大学
地质系

深造的参考书

本书的地质基础很广，选择阅读书目是困难的。但克伦宾和斯洛斯 (Krumbein and

Sloss, 1963)的“地层学和沉积作用”对本书将讨论的许多问题有初步介绍,哈博和梅里亚姆(Harbaugh and Merriam, 1968)的“地层学研究中的电子计算机应用”及哈博和鲍哈姆—卡特(Harbaugh and Bonham—Carter, 1970)的“地质学中的计算机模拟”对地层学问题的数字处理提供了入门。

下列书籍对了解数学知识可能有益:菲勒(Feller, 1957)的“概率论入门”,考克斯和米勒(Cox and Miller, 1965)的“随机过程”及格朗哥和哈塔那加(Granger and Hatanaka, 1964)的“谱分析”。朱其尔(Churchill, 1958)的“拉普拉斯变换法”在本书将反复应用。

目 录

序

第一章 沉积作用和环境	1
1.1 引言	1
1.2 所研究的岩石和沉积环境之间的关系	2
1.3 环境	3
1.4 环境模型	3
1.5 环境的组织	4
1.6 沉积环境的分类	5
1.7 沉积作用过程	6
1.8 观测和解释	7
1.9 结论	9
第二章 沉积物和时间	10
2.1 导言	10
2.2 叠复原理	11
2.3 沉积层理	12
2.4 沉积速率	15
2.5 地层单位和时间	18
2.6 时间和沉积环境	19
2.7 小结	21
第三章 确定性模型	22
3.1 导言	22
3.2 确定性模型和随机模型	22
3.3 在地层分析中模型的应用	23
3.4 理论的和经验的模型	23
3.5 模型的最优化	24
3.6 模型的评价	26
3.7 剥蚀和沉积模型	27
3.8 下沉盆地中的沉积作用	31
3.9 沉积速率和盆地控制	33
第四章 随机模型	36
4.1 导言	36
4.2 概率论的基本元素	37
4.3 简单随机走动	39

4.4	作为层形成模型的随机走动	42
4.5	层形成的柯尔莫果洛夫模型	43
4.6	泊松过程	46
4.7	其它连续分布	48
4.8	连续变量模型与排队	51
4.9	随机模型在地层学中的应用	52
第五章	马尔可夫链	55
5.1	引言	55
5.2	马尔可夫过程	55
5.3	N 步转移概率	58
5.4	状态的循环和分类	59
5.5	马尔可夫矩阵的特征值	62
5.6	高阶链	63
5.7	转移概率矩阵的估计和马尔可夫性质的检验	64
5.8	为马尔可夫链模型组织地层剖面	67
5.9	用等间隔方法组织剖面	68
5.10	由岩性状态组织剖面	70
5.11	马尔可夫性质和沉积作用	72
第六章	更新过程与半马尔可夫过程	75
6.1	引言	75
6.2	更新过程	76
6.3	作为更新过程的沉积作用	78
6.4	代表等时间间隔的层厚分布	81
6.5	沉积层的厚度分布	84
6.6	半马尔可夫链	87
6.7	作为地层模型的半马尔可夫链	91
6.8	用半马尔可夫模型作剖面分析	93
6.9	沉积—剥蚀过程	97
6.10	结束语	97
第七章	平稳随机过程和时间序列分析	98
7.1	引言	98
7.2	随机变量的描述	99
7.3	简单平稳时间过程	102
7.4	自回归过程	103
7.5	振动和旋回沉积模型	107
7.6	相关图的估计和检验	109
7.7	经验相关图的解释	112
7.8	多重时间序列分析	113
第八章	地质数据的谱分析	116

8.1	导言	116
8.2	周期图	117
8.3	随机过程的谱分析	119
8.4	谱分布的实例和过程的线性运算	122
8.5	功率谱的估计	124
8.6	谱分析的地质应用	126
8.7	对观测功率谱拟合模型	129
8.8	多重时间序列的谱分析	132
第九章	地层趋势分析和数据的修匀	136
9.1	导言	136
9.2	平稳和趋势的检验	137
9.3	趋势拟合的回归方法	137
9.4	用滤子的趋势拟合	138
9.5	趋势的除去	140
9.6	修匀程序	142
9.7	关于地层趋势的一些地质考虑	144
9.8	沉积趋势的一些简单模型	145
9.9	沉积趋势的识别	148
9.10	地层趋势的除去	150
9.11	随机趋势潜在的可能性	151
第十章	沉积旋回	153
10.1	引言	153
10.2	地层学中的沉积旋回	153
10.3	序贯旋回	155
10.4	实际地层学中的序贯旋回	157
10.5	模式旋回和类似的概念	159
10.6	环境事件的循环性	161
10.7	几何循环和时间循环	165
10.8	几何循环的分析	165
10.9	结束语	168
第十一章	沉积旋回和时间	170
11.1	导言	170
11.2	地层年代表	170
11.3	韵律记录的桑德法则	173
11.4	随机模型的沉积—时间关系	174
11.5	模型分析在实例上的应用	177
11.6	沉积旋回中的层数	179
11.7	合成旋回	182
11.8	沉积旋回的起因	184

11.8.1	旋回环境历程的恢复	184
11.8.2	旋回性	185
11.8.3	从合成旋回产生的问题	185
11.8.4	沉积旋回的持续时间	186
11.8.5	沉积旋回在空间和时间上的持续性	187
11.9	构造旋回的一些评论	188
11.10	结束语	190
第十二章	地层对比	192
12.1	导言	192
12.2	岩石地层单位的对比	192
12.3	岩石地层匹配和对比的定量方法	195
12.4	定量对比的进一步的问题	200
12.5	不同垂直比例尺的剖面对比	203
12.6	地层的时间对比	205
第十三章	三维地层分析的某些问题	208
13.1	导言	208
13.2	沉积物的地区变化	209
13.3	地区性趋势的估计	209
13.4	地区分布中的平稳随机过程	211
13.5	地层断面中的岩性变化	213
13.6	模拟地质断面的模型	216
13.7	环境模型	219
参考文献		221
索 引		228

第一章

沉积作用和环境

1.1 引言

本世纪初,精密科学与描述科学之间存在明显的差别。作为精密科学典范的物理学由两个分支组成:实验物理学家从事被认为是无限精确的观测,而理论物理学家用数学的无瑕逻辑解释这种资料。地质学家,像被含蓄地称之为“非精密科学家”的生物学者一样,认定自己所研究的是更加复杂的问题。尽管地质学家和生物学家力求使观测精确,但观测大部是非定量的,或者他们实验的结果变化极大。根据这种材料不可能作数学方法的推演,因此,他们的方法称为描述性的。

统计方法的引入是前进了一大步。沉积学家率先进入这一领域,现在可以用定量测量作岩石的描述。然后,统计判决方法被引入解释各种地层和沉积作用问题。大约自1950年以来,新术语“模型”流行起来,从此这术语在地质学中的应用逐渐增加。模型是把实际的体系简化成易理解和分析的范围。确实,简单的模型能用数学术语公式化。

这期间,真正的精密科学经历了某种革命。转入本世纪时,物理学发现必须发展新的数学方法来支持定量计算。概率论和数理统计突然变成理论物理学家的工具。而且,现代物理学家十分懂得他同样是研究模型,而不是真实世界的现象。概率模型开始用于地质学,并且现在已可能研究那些在数十年前还被认为十分不适合于定量分析的问题。

从这个说明必然清楚地看到:精密和描述科学的根本差别在缩小,然而,若因此就认为地质学已经在变成精密科学的过程中,那也失之过于乐观了。没有根本上的变化,地质学家仍然在研究高度复杂的体系,仍然试图理解他的经验范围之外的过程。新的工作方法——特别是模型概念,允许对地质问题做有限的理论处理,但因为人们所研究的是高度简化的体系,所以其研究结果只能近似于真实。

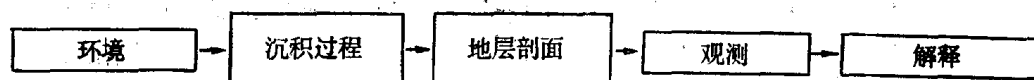
似乎沉积地层学是地质学中最不适合应用数学方法的学科。其它学科如地球化学、岩石学甚至古生物学比大部是形态描述的地层学更多涉及可度量的量。事实上,地层学总是利用地质学各学科所能提供的任何可能的方法去解决地层问题。数学方法也不例外,但为了变得可用,被采用的任何数学方法必须与利用于地层学的地质观察和理论充分地结合起来。为了达到这一点,必须从双方面进行某些调整。当然,数学方法必须适合于所考虑的问题的类型,数学地质学家在不断地注视着新的方法。但是地质资料本身也会稍有变动,要强调某些其重要性不被其它地质学家所注意的学科。不可避免地,相当多的时间要花费在地质概念的定义上。应用于数学中的定义是十分清楚和不混淆的,而在地质学中的概念不总是这样,因此为把两者结合起来,一定的讨论和细致的分析是需要的。这样的应用只能有利于地质学,的确,某些地质学家在本书中可看到地层学从数学方法得到的主要好处。

1.2. 所研究的岩石和沉积环境之间的关系

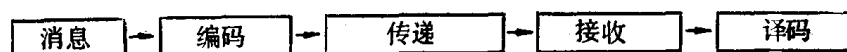
地层剖面的测量是历史地质学的基础，并为过去时期的物理和生物条件的恢复提供原料。剖面使地质学家能得到过去事件的正确顺序，因此使之能追索地球从过去到现在的发展。

自然，成层的沉积岩得到我们最大的注意，因为这些岩石包含地质历史的最多记录。

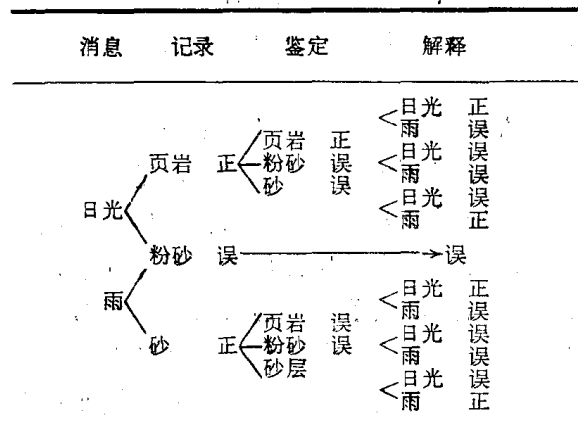
沉积物的性质显然在很大程度上依赖于它所形成的物理条件。地质学家把这表达为环境决定沉积物的面貌。理解为环境内存在着引起沉积过程的某些条件，并且依次留下沉积物作为最终的产物。地层学家试图恢复沉积物形成的环境，用以解释沉积岩。这顺序以图表表示如下：



沉积地层学的整个目的是搜集从过去到现在曾经以某种形式所传递的信息。这类问题尤其为信息论所研究。例如，考虑以无线电电报传递消息的著名问题。这过程包括四个阶段，显示如下：



如系统是完美的，消息会充分接收；如“噪声”在任一阶段进入，信息损失会发生。决定这种系统的效率是信息论的目标，为此，可用定量测定信息的损失来完成。无线电和地层传递问题之间除在实践上的一个重要差别外几乎完全类似。无线电的例子完全是人造的并服从于研究，而地层过程所包括的人类操作只在其后半，第一阶段或传递阶段发生在地质历史时期。第二阶段的信息损失能确定到某种范围。传递阶段的效率至好不过是粗略的估计。



显然更多地了解关于地质过程有关信息损失是极重要的，这能以过细研究的自然实例来说明。设它只承受两类环境，即日光和雨（这两者组成地层学家所要接收的消息）。假定页岩传递日光而砂传递雨，一个无间断的传递系统会产生。如这是真的，那末甚至最无经验的地层学家都能解释砂—页岩序列。若雨或相当于砂或相当于粉砂这一体系仍然是无间断的，但如粉砂既能指示日光又能指示雨则产生相当大的复杂化。用通讯理

论的语言来说，这就是所谓的第一类失败，它是由于符号与消息不是唯一地对应而造成的。这种错误不会与所谓第二类失败——即因符号被错认而发生的失败，即如同当页岩被错误地解释的雨时的失败——相混淆。上面的图表指示在这简单的例子中能产生的各种误解。

图表中增加了鉴定阶段以指示观察的错误是如何进入该体系的。在每阶段后都给予判断，指示它是正确（正）还是错误（误）。当粉砂置放于日光栏内责备自然界产生“错误”的记录似乎是不公正的，但因为记录不是唯一的，所以作了这个判断因此体系内是间断的。正是这些记录错误是很难追索，所以对信息体系的第一阶段作比较详细的讨论是重要的。

1.3 环境

沉积环境定义为物理、化学和生物学条件的综合，在这些条件下沉积物堆积。环境术语本身不是抽象的含义；它不过是地球上或者关系到宇宙中的任一点周围的真实世界。与环境相联系的总有三度空间，在三度空间中发生着各种物理、化学和生物学的过程，并且在时间的每一瞬间存在一套条件，它给空间以充分的描述。构成环境状态的各种条件被命名为环境因子(Twenhofel, 1939)

因为环境在连续地变化着，每一瞬间定义一新环境是很不实用的。实际上，许多环境因子是代表相当长时间内平均观测值的量。典型的例子可以想到气候，它经常用于环境的描述，但气候知识不能由单一的气象学测量获得这是众所周知的。环境描述需要考虑的时间周期有多长的问题将在后面较详细讨论。在这里，权且把环境看成是是一种动态体系，这体系对某种过程的发展持续足够长的时间。某些环境过程，象沉积作用或剥蚀作用，可能相对地较为迅速，其它象地壳下沉或山脉上升则可能比较缓慢。这种过程是否考虑作为环境的一部份完全取决于时间标尺的选择。

承认环境是一种动态体系，意思是环境因子由多种函数关系所连接，这种函数关系可作为环境的附加描述。举典型的例子，剥蚀过程可与地方的水流速度有某种函数关系；流水可以是环境中压力梯度的结果，而后者又可能与某些温差有关等等。在这种动态体系中的关系总是非常复杂，而且没有一种环境变化不是以这种或那种方式与一些其它因子有关的。的确，过程本身就是体系的一部份，它改变着当初引起过程的那些因子。在上述例子中，由流水作用而开始的剥蚀，一旦发生以后它必然又会影响局部的流速。因子和反应过程之间的这种关系被认为是反馈，它们是体系的很重要部分。

1.4 环境模型

乍一想如上定义的环境是如此极端复杂，以至它对任何实践是毫无用处的概念。为了理解环境过程人们必须在范围和尺度两方面对环境加以限制。这可以把动态体系（占据与环境一起的空间）简化为只包含与某一地质过程有关的那些变量的体系而达到。这儿，主要兴趣是沉积作用的过程和称之为沉积体系的有关体系。生态学家、古生物学家或火山学家可以注意不同的过程，因而会考虑不同的体系。

每个体系代表一抽象的环境。沉积作用体系关系到所谓沉积环境模型(Krumbein and Sloss, 1963)，加上模型二字是说明这环境事实上是现实环境的简化。不慎重的用法，人们常把沉积环境模型简单地作为沉积和环境。

现在可以这样定义进行环境研究的范围，即沉积学家将集中注意那些与沉积物的形成有关的地区。例如，沉积物形成的第一阶段通常是风化和剥蚀过程，发生这种过程的地区

一般称为来源区。这地区的环境由处于来源区的各种特征环境所组成。类似的方式人们可以定义沉积区，称在这地区支配的环境为沉积环境。还有许多其它沉积术语可用来划分地理意义的边界。例如，不论是由海底的真正凹陷，或者是由沉积物的构造加厚而成的盆地就是这种有明确地理界线的单位。类似的术语是‘排水系’，‘沙丘带’，‘江口’或‘三角洲’。这些地理单位被认为是沉积作用体系的基本部分，常由较宽的边界所组成，但在特殊情况下，它可以被包括在所讨论的地理单位之内。例如，如果人们希望调查盆地的沉积环境，就必须建立海底每点的环境。为此只须记录在盆地本身以内的所有物理和其它条件，在这种情况下盆地就可被视为自我包含的沉积体系。在许多其它实例中，重要的环境因子是在真正所研究的地理单位的范围以外起作用，因此沉积作用体系必须选择更宽的边界。在研究与海盆反作用和多半从大河系得到供应的三角洲时，把它看成是更大的沉积作用体系的一部分也许更为合适。沉积作用体系的大小在理论上没有限制，但实践上人们试图保持这体系尽可能小，正好大到足够理解环境的基本过程。

体系边界的设立总是人为的，而在体系和它的周围现实世界之间必然会发生某些相互作用。这也是允许的，这可以通过定义外部成分，即影响体系内的变量和过程的因子来考虑。这种外部因子被称之为外因成分，与体系的内因成分相对照(Harbaugh and Merriam, 1968,)。体系的内因成分彼此全部以函数关系相连系，它们的状态能在模型内研究。外因成分不能由该模型确定，它们只能被当作自变量。这概念能使人们更简洁地构成模型，因此更容易理解。例如，考虑小湖的沉积环境；大部分与沉积作用有关的过程包含在湖泊本身之内，以及或许在围绕湖泊的陆地上。可能日光投射到湖面的数量是重要的附加因子。与其加入太阳和地球，可能还有太阳系之间的关系，不如把太阳辐射作为外因成分更为适当。

1.5 环境的组织

在一个环境模型内，把多种环境因子组织为类别能获得一定级别的量。这些类别称之为环境元素(Krumbein and Slass, 1963)。因子的归并仍取决于模型的用途；对于沉积作用和地层问题用到下面四个元素。

几何学元素——沉积环境的几何学包括沉积区的形状和位置及它的结构的基本描述。如水的深度，岸的距离或区域延伸这些因素包括在这类中。

物质元素——物质的因子包括沉积作用的介质（空气、水）和包含在沉积过程中的各种物质的全部描述。

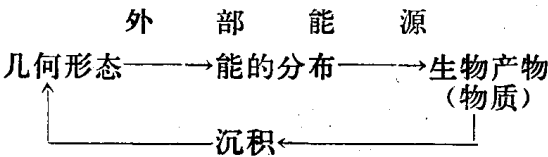
能的元素——能的因子记述环境的动能和潜能的状态。潜能是热能，压差或化学成分的差异的储存。沉积介质的水体或气体及部分固体物质的经常移动状态提供动能。流速，风速或浪的高度是与能有关的因子。

生物学元素——在许多沉积环境中，生物学因子是很重要的。有机体或者提供大量沉积物质，或者它们可通过促进或阻碍剥蚀，通过生物扰动或通过产生特种化学环境而间接影响沉积作用过程。

环境元素像因子一样是互相依赖的，环境过程常为一个以上的元素所连接。下面的例子用以说明环境模型的法。

假设考查一个具有倒锥形的小池圪，虽然这池圪的体系是自我包含的，但有两个外部

因子：常风在池面产生波浪，太阳辐射渗入水中。无沉积物从外部进入这体系，但浮游生物生长在整个池圪中，这提供沉积物的固定来源。波浪作用阻碍沉积物在某一临界深度以上沉淀，沉积作用只发生在这水平之下。太阳辐射维持浮游生物的生长。模型可以图表综合为以下体系：



假设光能的分布决定生长的浮游生物的数量，而生长的浮游生物数量又决定有效地沉积为沉积物的死亡浮游生物的数量。当然，能的分布大多取决于盆地的几何形态。如过程在充分长的时间内持续进行，会产生足够的沉积以使盆地的几何形态最终发生变化。在这种情况下，有反馈的机理存在。但在短时期内可以忽略不计。

为了确定池圪的环境，需要导入光线渗透和盆地几何形态之间的函数关系，从现代观察知道，光能随深度指数地下降。进一步假设，在表面由风产生的波浪能量随深度增加线性地减少。给定这样的信息，池圪底部的环境便能确定，图解表示在图1.1的右边。也可以研究其它位置的环境，池圪表面的条件说明在该图的左边。用以从沉积作用体系展开环境资料的实际方法和从收集环境信息研究沉积作用体系的相反过程，将在下面详细讨论。

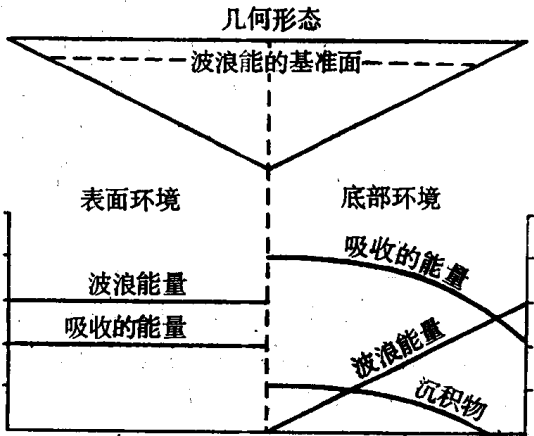


图 1.1 小池塘的沉积作用环境

1.6 沉积环境的分类

如何从地质资料能精确地恢复古环境的问题将在本稍后讨论。显然，地质学家所得到的古环境信息比现代沉积作用体系研究所能到得得要少得多。为了弥补信息的缺失，必须紧紧地依赖于对现代沉积环境所已进行的观察。将古环境与现代相当的环境进行比较，并假设古环境中的因子，以及更为重要的因子之间的关系与现代的相类似。进行这种研究，环境类型的分类有时是有用的。

表 1.1 沉积环境的分类 (据Twenhofel, 1939)

1. 大陆的	陆地的	沙漠的 冰川的
	水区的	河流的 沼泽的 湖泊的
2. 大陆海洋混合的	滨海的 三角洲的 泻湖的 江口的	
3. 海洋的	浅海的...	水深达200米
	半深海的...	水深200—2000米
	深海的...	水深超过2000米

特温霍费尔 (Twenhofel, 1939) 创造沉积环境的系统研究，他提出大陆、混合和海洋类型三类 (表1.1)

每类按地理情况再进一步划分。近年来更加注意现代环境，人们发现若干不一定是

地理的术语。如“高能环境”，“低能环境”，“还原环境”以及其它有关环境因子的类似术语，发展更密切与沉积过程有关的环境分类可能比地理体系更为必要。

1.7 沉积作用过程

沉积过程是环境体系的组成部分，把它们与所有其它环境过程分开处理，只因为它们与沉积物的形成联系十分紧密。人们常常把沉积作用过程与风化、搬运和沉积这三个序贯阶段联系起来。但实际常发现这些阶段不能清楚地分开。风化作用（*halmyrolysis* 等）在搬运阶段继续进行，而搬运阶段本身又常常是一系列彼此相互多次伴随的搬运、沉积、剥蚀阶段。对定量地质学家最头痛的是所谓沉积过程没有一个明确的定义。

逻辑上，沉积作用只不过是搬运的终止，这就不能称为过程。然而，在地质学中的一般用法上，沉积过程是指新沉积物的建造，这可以包括搬运的最后阶段以及每个颗粒已被掩埋的时间。因此，这过程的开始和结束没有明确的界限。

显然，如用数学方法研究这种过程，就需要更精确的定义。任何这种定义必定是人为的，如要求出沉积物质搬运终止并变为沉积下来的沉积物的精确时间的话。沉积学家十分了解，搬运的最后阶段与早期成岩作用常是很难分开的，成岩作用依次可经受各种程度的变质作用。有这样的情况，即甚至在颗粒到达沉积物界面以前可以相当缓慢地下降，但在它进入沉积物之后和在压实过程中仍继续移动。人们可以把沉积定义为颗粒经过沉积介质和沉积物之间的分界面，但必须记住这种分界面在物理上不总是很明确的。必须明确分界面是一个概念，并且常常是人为的界线。在某种情况下，土壤力学的流动极限在定义这种人为的边界时也许有用。在这种情况下，分界面是分开比流动极限含水量更高的沉积物与含水量较低沉积物的一个面。但任何其它事先决定的孔隙度或空隙比率也能用作这种目的，只要它是定义一个明确的参考面。很类似的论证可推广到剥蚀，把剥蚀作为负的堆积处理。

沉积过程本身决定了展布在大范围的沉积物的性质，但这些过程本身反过来又被因子所控制。在这意义上可以把沉积过程看作沉积物和环境之间的扭带。例如，一般承认砂的搬运与流速有关，的确，如果取像粒级这样具体的参数，这关系就能以定量方式表达。犹斯特隆著名的图表（*Hjulström*, 1939）显示，对于每种粒级存在一个发生剥蚀，搬运和下沉的临界速度。另外，发现这种速度不能绝对精确地建立；有时，试验指示，较慢的流速能上举某一大小的颗粒，而有时较快的流水无能力上举同样的颗粒。因此，有能力的流水是一个环境因子，它和搬运阶段的粒级之间的关系不是绝对的。这是只能用统计划分的关系，因为一定粒级的上举能力值围绕平均值波动。

在这个特殊的例子中，比较容易看到，这种波动如何发生，统计又为何进入关系。虽只是能剥蚀一砂粒的力可以围绕颗粒的速度场用数学的精度确定，但因为砂粒附近微环境中的速度变化不易预定所以这种关系不能建立。对于在一定位置控制颗粒的力同样也是真实的；颗粒的重量决定抵抗剥蚀作用的程度，而且亦由多半以随机方法位于它邻近颗粒的状态所决定。活动力的不可预见性不是因为物理法则的失效，而是由于过程复杂，包含许多不能由实验或理论控制的可变因素。这情况很类似物理学中经典例子“气体规律”。在一定温度和压力条件下，气体分子经历热移运动。一个分子的轨道取决于它的能和它与其

它分子及容器壁的无数次的碰撞。像有许多环境因子（每个分子的瞬间位置）一样，单个分子的轨道是不可预测的。气体“规律”必须理解为统计规律，给出已知容积中分子的平均速度。因为分子数量极其多，人们才可能应用这一具有一定确实性的规律，但如众所周知，也发生不规则变化，尤其在极低的温度下。

用统计规律代替确定规律的理由是简单的，统计规律能更好地描述现实世界的复杂过程。对于古环境的解释，这种统计关系的认识有某种很直接的结果。考虑下述假设的例子：在虚构的环境中，温度梯度引起一底流，而温度梯度又多少与水的深度有关。这些因子的函数关系可能有某种信息，而这种关系一定会合并概率元素。可直接推论，沉积物不是由环境因子唯一地决定，因此，环境决不能确切地恢复。

随着包含在讨论中的阶段的数目的增加，不确定性会明显增加。因此，根据给定的粒级，能相当可靠地推断出可带动它的水流，但如果这时还从砂粒大小恢复水深，那么这种关系，如果事实上存在的话，将会是很不严谨的。

在试图恢复沉积作用的较早各阶段时会发生类似的信息损失。沉积本身是最后阶段，而且通常由它产生的沉积物的特征能将其很好地记录下来，而且有很好的标志可供判断沉积是机械的、化学的或是生物的（Sander, 1936）。然而，搬运阶段的辨认更困难得多，因为搬运早期留下的痕迹经常被晚期的搬运所消除。距离最后沉积阶段越远的事件，就越难找到证明其存在的事实。除了搬运的总长度外，通常没有再可估量的东西了。应用风化作用和来源区条件恢复的信息，同样只在如果有特种矿物形成或者当特殊岩石分解时才有可能。

沉积物不能在细节上正确地记录环境，在本章开头称之为“沉积物的记录误差”。现在应承认误差是不可避免的，当然，沉积学研究或在技术上的改进总不能减少误差，因为误差是在地质历史中形成的。

即使消除这误差是不可能的，人们至少能尝试估计它的重要性，虽然这是很困难的任务。某些经验能通过现代环境的研究获得，因为往往发现在环境因子和所产生的沉积物之间的关系毕竟不很严格的。然而，材料稀少，而且许多作者把任何统计的变异性看作难题，而不是把信息的极少看作难题。另一种备择的作用误差估计方法带有更大的推测性。它基于通过沉积物的研究对环境的实际过程做出先验的假设。实验方法将在后面详细讨论。

已经引入环境变量结构中的统计关系，通常并没有使对理解环境过程或沉积物形成的过程变得更为容易。这一步的证明有两点应首先考虑。如已说明的，统计概率的概念允许定量地处理过程，甚至在作很复杂的确定性研究时也是这样。除此之外，任一地质过程具有的某种不确定性直观上似乎是对的，并且在环境中概率元素的观念确实与流行的地质思想不矛盾。还有其它一些可能更具有哲理性的论说被用来证明在地质学中概率理论的应用，（例如，Mann, 1970）。然而，有效的论说必须被每个人所承认。

1.8 观测和解释

在本章开头，把地层学家工作的过程与通讯问题作比较。环境可看作是一种被传入沉积岩中的消息。这种传递由沉积过程来达到，当然不是没有间断。沉积物一旦形成，它变