

沉积环境的定量化研究 ——以我国南方晚震旦世含磷建造为例

张光前 刘承祚

(中国科学院地质研究所)

内容提要 本文介绍一种定量研究沉积环境的新方法——最可预测面方法。众所周知,一些地质变量(如岩性)与地理变量(如地理座标)之间是密切相关的。从这种关系出发,可以建立一个数学模型来研究某个地区的沉积环境及其变化规律。

主题词 地层序列 沉积环境 含磷岩系 最可预测面方法

第一作者简介 张光前 男 43岁 讲师 数学地质

各种不同的沉积地层及沉积矿产都是在特定的沉积环境中形成的。虽然沉积物的沉积与其来源和搬运历史有关,但重要的控制因素是沉积环境。对大多数沉积矿产的找矿来说,沉积环境分析具有直接的意义。

地质工作者在研究某个地质时代的沉积环境时,一般用大量地质上的随机变量,如岩性及其厚度、各种相标志特征、古生物特征等作出各种图件,然后凭着各人的专业知识和工作经验恢复当时的沉积环境,并进行各种地质解释。这样就存在着两个问题:一是地质工作者本身的知识与经验的丰富程度;二是所用资料的代表性。往往由于这两个原因的差别而造成所得结果的差异,这种情况在平常的研究中是屡见不鲜的。

为了克服这种经验性和片面性的状况,本文介绍一种“最可预测面”方法(简称MPS方法),并以我国南方晚震旦世含磷建造为例具体对其沉积环境进行定量研究。

一、最可预测面方法的数学推导及其地质含义

MPS方法是由几个地质随机变量组成一个面,并利用这个面来作为一个模型表示研究地区的内在模式,以此来作各种所需要的解释。

考虑本文所选实例,决定采用岩性状态的厚度建立一个数学模型:

$$U = \sum_{i=1}^p a_i z_i$$

式中 z_i 为第 i 个岩性状态的厚度,

a_i 为第 i 个岩性状态的个数,

p 为岩性状态的系数。

对各个地质剖面统一划分岩性状态之后,各个岩性状态在剖面中的厚度是已知的。关键问题是如何得到各岩性状态的系数 a 。有了各个岩性状态的厚度和系数,就能求得某个剖面的一个 U 值。研究区内有 n 个剖面,便可得到 n 个 U 值,所有的 U 值形成一个曲面,这个面就是所需要的“预测面”。

为了求系数 a ,下面介绍MPS方法的数学推导。

设 Z 为地质随机变量的列向量, W 为地理变量的列向量,

$$Z' = (Z_1, Z_2, \dots, Z_p) = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1p} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{n1} & t_{n2} & \dots & t_{np} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$W' = (X, Y, X^2, XY, \dots) = \begin{pmatrix} x_1 y_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & \dots \\ x_2 y_2 & x_2^2 & x_2 y_2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n y_n & x_n^2 & x_n y_n & \dots \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中 p 为岩性状态数, n 为剖面数, t_{ij} 为第 i 个剖面中第 j 个岩性状态的厚度(由于厚度数据一般服从于对数正态分布,故采用厚度的对数值), x_i 、 y_i 分别表示第 i 个剖面的横坐标和纵坐标。 W' 中的变量数(列数)必须大于或等于 p 。

随机变量列向量 Z' 可用下式进行正规化:

$$t_{ji}^* = \frac{t_{ji} - \bar{t}_j}{s_j}, \quad (3)$$

式中 \bar{t}_j 为第 j 个随机变量的样品平均值,

s_j 为第 j 个随机变量的样品标准离差,

t_{ji} 为第 j 个随机变量的第 i 个观测值。

向量 W' 可用下式进行标准化:

$$x_i^* = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}), \quad (4)$$

$$y_i^* = (y_i - y_{\min}) / (y_{\max} - y_{\min}), \quad (5)$$

式中 x_{\min} 、 y_{\min} 、 x_{\max} 和 y_{\max} 分别为图幅中样品点的 x 、 y 座标的最小值与最大值。

设 S 为 Z 与 W 的样品协方差矩阵,即

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

其中 S_{11} 为 Z 的协方差矩阵,即

$$S_{11} = ZZ', \quad (7)$$

S_{22} 为 W 的协方差矩阵,即

$$S_{22} = WW', \quad (8)$$

S_{12} 、 S_{21} 是 Z 与 W 之间的协方差矩阵,且有

$$S_{12} = S_{21} = ZW'。$$

则U和V定义为

$$U = A' Z,$$

$$V = B' W,$$

式中 $A' = (a_1, a_2, \dots, a_p),$

$$B' = (b_1, b_2, \dots, b_q).$$

并且 $p=q,$ 同时A和B必须满足

$$E(V^2) = B' S_{22} B = 1, \quad (11)$$

$$A' A = 1. \quad (12)$$

由矩阵运算可以证明, U和V的协方差是

$$\begin{aligned} E(U, V) &= \text{COV}(UV) + E(U)E(V) \\ &= A' S_{12} B \end{aligned} \quad (13)$$

为了求出A和B, 使(13)最大化, 并且服从(11)和(12)式, 设

$$\Phi = A' S_{12} B - \frac{1}{2} \mu (A' A - 1) - \frac{1}{2} \lambda (B' S_{22} B - 1), \quad (14)$$

式中 λ 和 μ 为拉格朗日乘数。

求 Φ 对于随机变量A和B的偏微分, 并令导出的向量等于0, 矩阵代数的运算将证明:

$$\lambda = \mu = A' S_{12} B, \quad (15)$$

$$\text{且} \quad (S_{12} S_{22}^{-1} S_{21} - \lambda^2 I) A = 0. \quad (16)$$

λ_j 的最大或然估计量即为方程

$$|S_{12} S_{22}^{-1} S_{21} - \lambda^2 I| = 0 \quad (17)$$

的特征值, 向量A为对应于 λ 的特征向量。

为求出B, 则有

$$B = S_{22}^{-1} S_{21} A / \lambda. \quad (\lambda \neq 0) \quad (18)$$

考虑U的趋势变化, 可令

$$U_i = C + D V_i, \quad (19)$$

式中

$$D = \frac{n \sum_i (U_i V_i) - \sum_i V_i \sum_i U_i}{n \sum_i V_i^2 - \left(\sum_i V_i \right)^2}, \quad (20)$$

$$C = \frac{\sum_i V_i^2 \sum_i U_i - \sum_i (U_i V_i)}{n \sum_i V_i^2 - \left(\sum_i V_i \right)^2}. \quad (21)$$

当求出A之后, 根据(9)式便可求出各个剖面的U值。 a_i 的大小表示第*i*个岩性状态在空间上的变化强度。 a_i 的绝对值越大, 表明该状态的变化越大; 反之, 表明该状

态的变化越小。 a 的符号表示各岩性状态之间的相关关系,符号相同的地质变量之间为正相关,符号相异的变量组之间为负相关。 U 值则决定于地质随机变量 Z 和它们的系数 A , U 值不代表一个特殊的岩性状态,而是综合地表示各种岩性状态的组合关系。由于一个地层序列的岩石组合是沉积环境的反映,从这个意义上说, U 值正是定量地表示了这种关系,达到对沉积环境定量化的目的。相同的 U 值表示有相同的岩石组合特征,即表示有相同的沉积环境。这样, U 值等值线的形状代表了沉积环境的形态,等值线的密度反映了沉积环境变化的程度,等值线密的地区说明其环境变化剧烈,反之,说明其环境较稳定。

二 晚震旦世含磷建造沉积环境的定量分析

我国南方晚震旦世含磷建造主要由粘土岩(包括黑色页岩、页岩、泥岩等)、磷块岩和各种磷质岩、碳酸盐岩(包括白云岩、白云质灰岩、泥灰岩等)及硅质岩组成。其下为早震旦世的冰水沉积,即南沱冰碛泥砾岩组,分布较广,岩性稳定,是一很好的地层对比标志层;其上为下寒武统粘土岩,以产丰富的多门类小壳动物化石和微古植物化石与其下的含磷岩系相区别。故此套含磷岩系的顶底界面易于确定。含磷岩系本身,即以陡山沱组底部到灯影组顶部为连续沉积。下部为泥岩、页岩等粘土岩,中上部为碳酸盐岩,少数地区为硅质岩,磷矿层多位于粘土岩与碳酸盐岩之间或位于碳酸盐岩之中。根据这套含磷岩系的岩性以及它们与沉积环境的关系,可确定出如下五种岩性状态:

1.粗内碎屑岩(A)由磷块岩及砾屑、砂屑白云岩组成,为强水动力条件下的产物。

2.中或中细内碎屑岩(B)由白云质磷质岩及粉屑白云岩组成,形成于较强的水动力条件下。

3.泥晶白云岩(C)包括泥晶白云岩、泥质或硅质泥晶白云岩,形成于较弱的水动力条件之下。

4.粘土质岩(D)包括粘土岩和泥质磷质岩,为静水盆地的沉积,水动力条件很弱。

5.硅质岩(E)形成时水动力条件与粘土质岩差别不大,只是物质成分不同。

从A到E反映了水动力条件由强到弱的沉积环境下各种不同的产物。在各级能量条件下均有磷块岩或磷质岩的生成,但其富集程度、成分和矿石的结构构造各有差别。

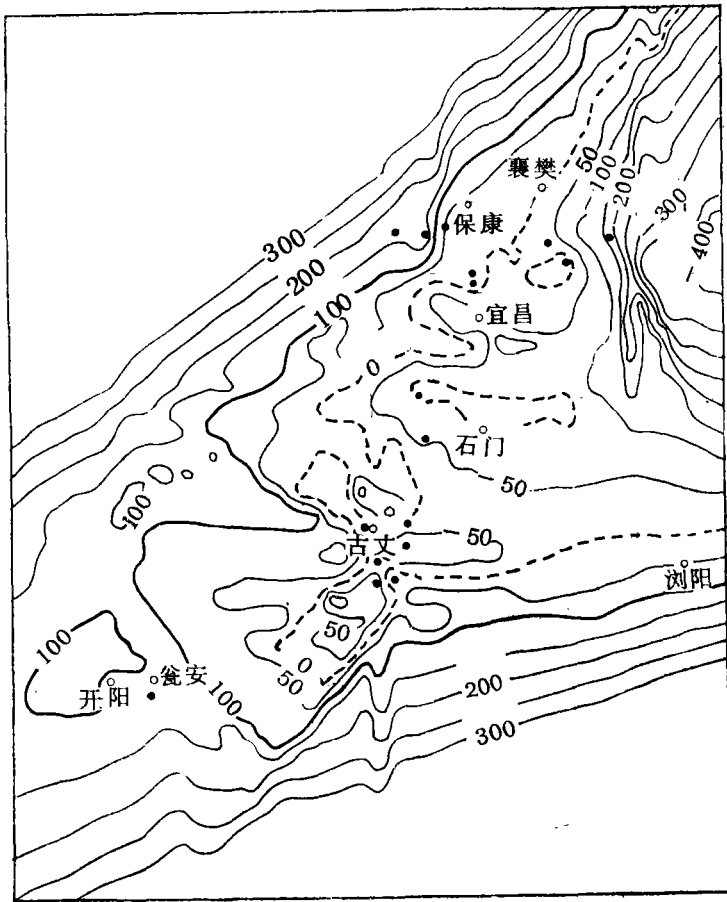
全区共利用149个地层剖面,对每个剖面按以上五个岩性状态进行具体划分。同时,以晚震旦世早期到末期确定出五个旋回(旋回的划分本文不作介绍),应用MPS方法分旋回期作出其定量的沉积环境图,以此来分析各个旋回期的沉积环境以及整个晚震旦世沉积环境的演化特点。

按照MPS方法的计算步骤,分五个旋回进行计算,得到表1所示的结果。然后根据表中各旋回期的数学模型计算出 U 值,绘制出五个旋回期的定量沉积环境图(图1-5)。图中 U 值等值线的轮廓是该区沉积环境形态的直观反映。根据岩性状态及 U 值的地质意义,正的 U 值代表碳酸盐台地环境(为明显起见, U 值为100的线用粗实线标出),负的 U 值代表浅海盆地环境, U 值等值线密集处表示环境变化较剧烈的部位。 U 值为0

表 1 MPS 计算结果表
Table 1 The value of MPS

旋 回	$U = \sum_{i=1}^5 a_i Z_i$	典型相关系数
I	$U = 0.04A + 0.15B + 0.31C - 0.91D - 0.24E$	0.69
II	$U = 0.43A + 0.32B + 0.82C + 0.17D + 0.09E$	0.70
III	$U = 0.32A + 0.28B + 0.83C - 0.25D + 0.26E$	0.70
IV	$U = 0.36A + 0.46B + 0.70C - 0.27D - 0.31E$	0.67
V	$U = 0.26A + 0.41B + 0.68C + 0.11D - 0.54E$	0.90

的等值线（图中粗断线）及其附近地区为上述两种环境相互过渡的部位。下面按旋回进行分析。



- 线储量大于300m%的剖面
- 线储量为100—300m%的剖面
- 线储量小于100m%的剖面

（注：图 1—5 图例相同）

图 1 晚震旦世 I 旋回期沉积环境图

Fig. 1 The sedimentary environment of Late Sinian epoch I cycle.

I 旋回期

全区149个剖面中只有47个剖面有该旋回地层，即大多数地区缺乏此套地层。这47个剖面主要分布在图幅北东—南西方向的中部地区，如图1所示，整个I旋回时期，从贵州西南部经湘西到鄂中，为一南西-北东向的海湾，向东开阔成中广海，海水逐渐变深。其他地区由于地层剖面中未沉积有该旋回的地层，故难确定其环境，但根据大地构造运动的发展继承性，这些地区应为剥蚀区。此时期的几个磷矿区，如湘西的古丈、怀化，湖北的保康、宜昌、荆襄等均属于浅海盆地环境。这些磷矿的特点是矿层层数多而薄（小于1米），主要为泥质磷质岩， P_2O_5 含量为15%左右，规模不大。

II 旋回期

从晚震旦世初期开始，地壳大面积下沉，该地区广泛发生海侵，成为浅海环境，在I旋回的基础上更广泛地接受沉积，形成II旋回期的基本沉积格架（图2）。东南部和北部边缘地区为较深水的浅海，其他地区形成了许多水下碳酸盐台地。

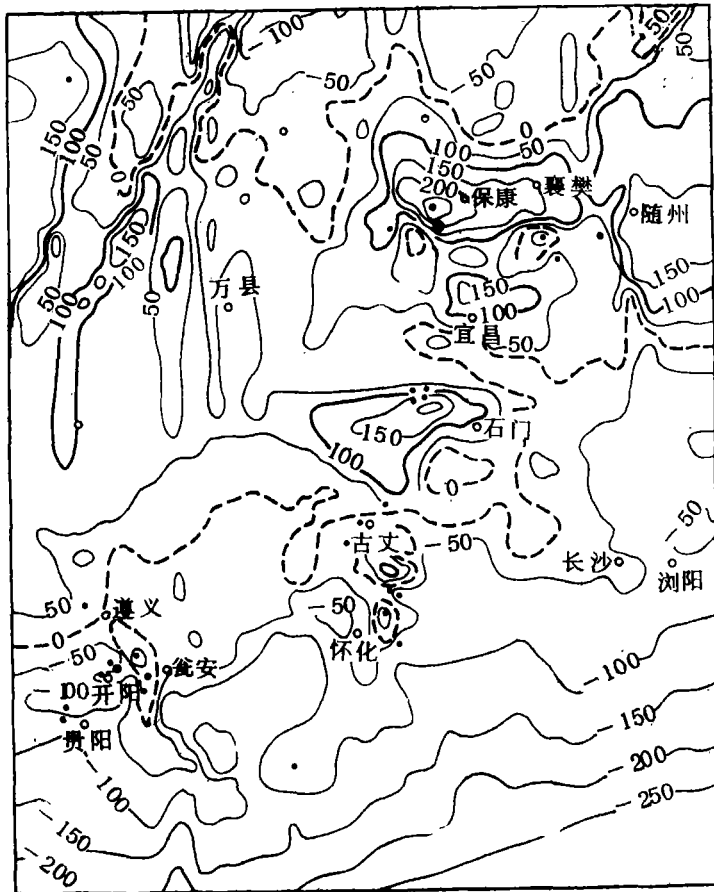


图2 晚震旦世I旋回期沉积环境图

Fig. 2 The sedimentary environment of Late Sinian epoch I cycle.

湖北的宜昌、襄樊、保康所在的范围内，存在一个凹陷地带，北面为东西向延伸的

保康台地，南面为东西延伸的宜昌台地，东部为随州台地。这个时期的磷矿床就分布在这个洼地的周围，即沉积环境变化较剧烈的部位。此时期是这个地区，特别是保康一带较重要的成磷时期。

湘西北存在一个石门台地，其北部为一向东开放的低洼地带，其南、东部为广阔的浅海。东山峰磷矿就分布在该台地的北缘。湘西地区在该时期为浅海盆地的边缘，其中有两个很小的水下碳酸盐台地，台地周围有一些小的矿点或矿床。

贵州中部，除了有几个小的水下隆起以外，不存在大的碳酸盐台地，南部面临广海，向北逐渐抬升。除了在小隆起的边缘有磷矿产出外，其他地区由于岩性较稳定，环境变化不大，水动力条件不强，未形成大的磷矿床。

Ⅱ 旋回期

该时期的沉积环境（图 3）在Ⅱ旋回的基础上发生了较大的变化。东南部仍保持浅海盆地环境，北部地壳抬升，由盆地转变为碳酸盐台地，保康台地与宜昌台地联为一体，西南部形成贵阳台地，中部地区地壳下降成为浅海盆地环境。

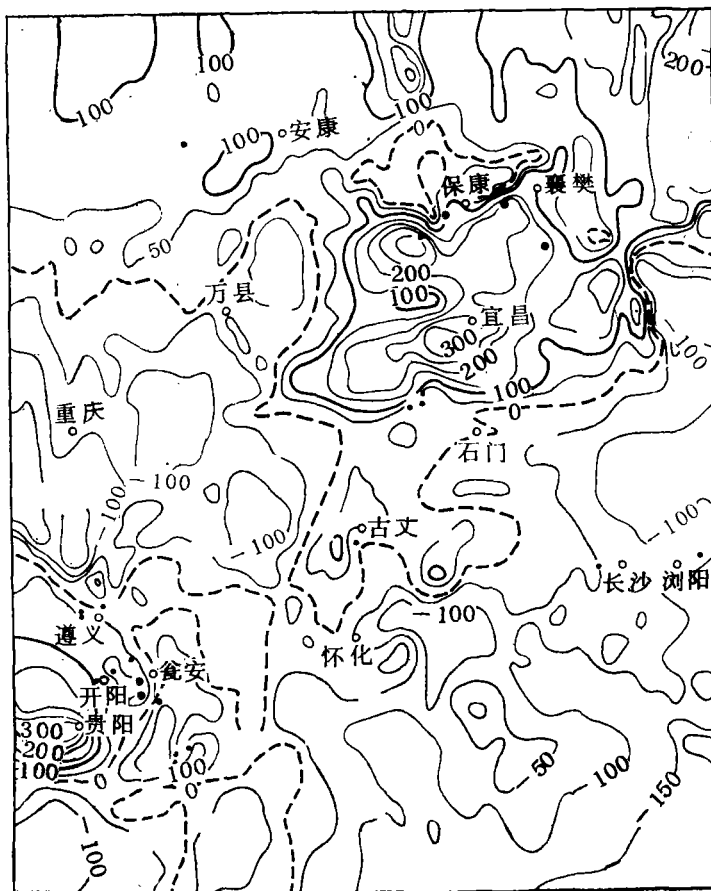


图 3 晚震旦世Ⅱ旋回期沉积环境图

Fig. 3 The sedimentary environment of Late Sinian epoch II cycle.

在保康宜昌大台地的北和东北边缘形成了较封闭的台地间的低洼小盆地，在台地与小盆地的过渡部位由于环境变化较剧烈，形成了较富的磷矿床。原石门台地所在的位置，南部下降为盆地境环，北部上升成为保康宜昌台地的一部份。在台地南缘出现一个小的海湾，由于环境变化剧烈故继续有磷矿的生成。

黔中一带，由于形成了一个新的贵阳台地，其东部为一较大的半封闭水下海湾，故在海湾向台地过渡的部位形成了品位高厚度大的磷矿床，即开阳、瓮安磷矿。

在碳酸盐台地内部或浅海盆地中的水下小隆起地区，虽然也有一些零星矿点存在，但由于环境不利，大多数矿点不具经济意义。

IV 旋回期

该旋回期的沉积环境仍保持南东部为广阔的浅海盆地，北西部为碳酸盐台地的基本趋势（图4）。宜昌、保康等地的碳酸盐台地之中有一北东-南西向的封闭小盆地。安康、万县以西地壳下沉形成半封闭的水下盆地，贵阳台地下降而遵义一带抬升形成遵义台地。

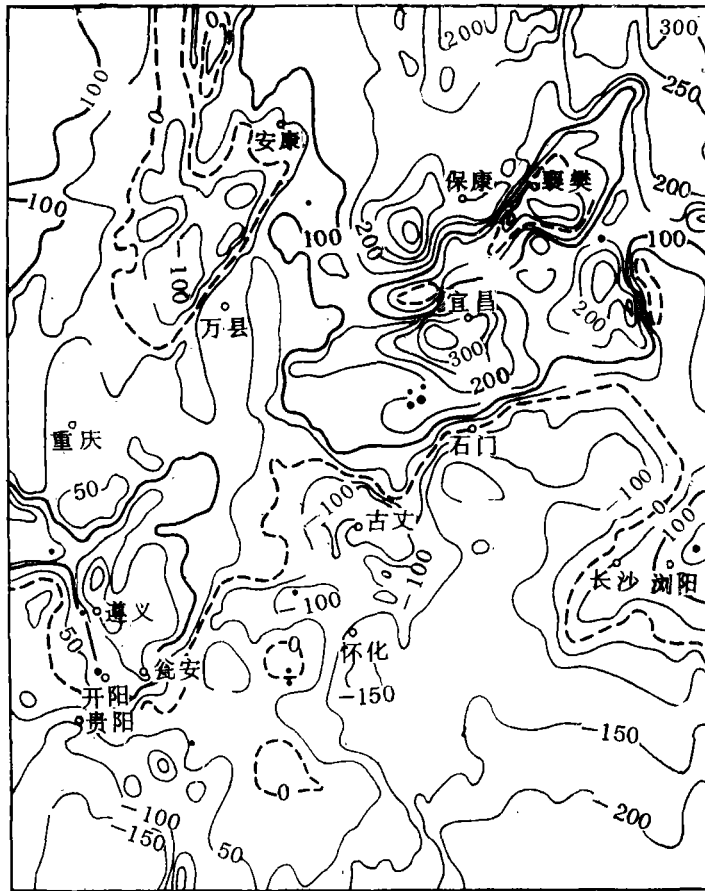


图4 晚震旦世旋IV回期沉积环境图

Fig.4 The sedimentary environment of Late Sinian epoch IV cycle.

此时期与前一旋回时期相比，沉积环境的改变不很大，按理来说应该有许多磷矿形成，但由于沉积物性质、成分发生了较大的变化，海水中硅质增加，粘土质、磷质减少，故未形成较大的磷矿床。

V 旋回期

如图 5 所示，进入 V 旋回期后，沉积环境的基本轮廓与 IV 旋回期相比没有大的变化。只是台地和盆地的界线具体位置有一些不同。安康以南，襄樊东南仍存在两个小的盆地，其具体位置与 IV 旋回期相比发生了一些变化。可见这两个时期的沉积环境逐渐趋

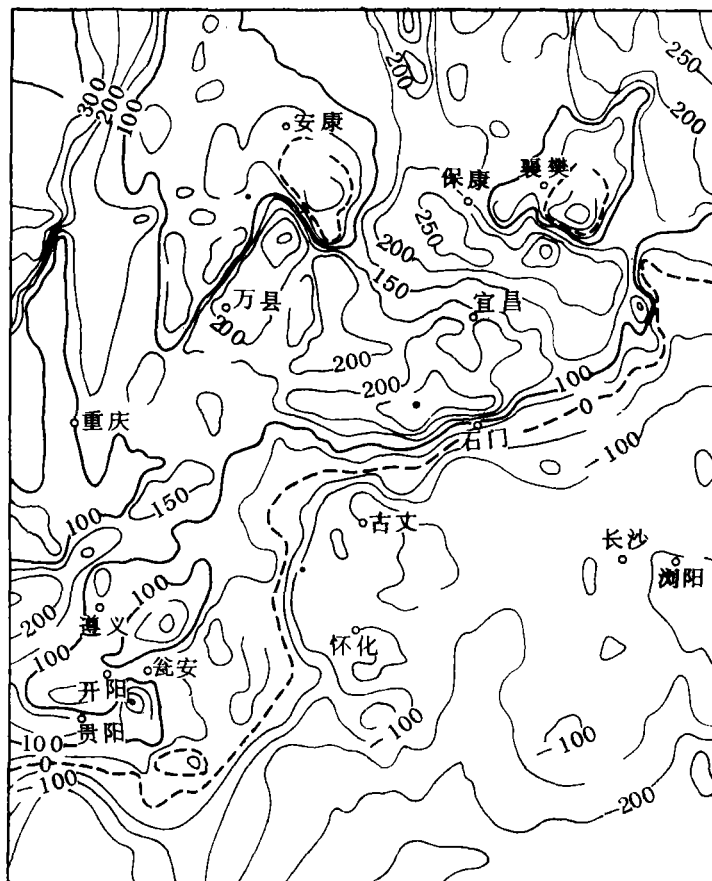


图 5 晚震旦世 V 旋回期沉积环境图

Fig. 5 The sedimentary environment of Late Sinian epoch V cycle.

稳定。由于沉积物性质进一步发生变化，泥质与磷质很少，硅质大量增加，此时期很少见磷矿的生成。

通过以上对各个旋回期沉积环境的分析，可以了解到它们的环境特点以及整个晚震旦世沉积环境的变化情况。以全区大面积接受沉积开始到晚震旦世末期，沉积环境的基本格架是比较稳定的。黔西南—黔东北—湘西北—鄂中一带为浅海盆地环境与碳酸盐台地环境的过渡地带，此带西北面基本上为碳酸盐台地环境东南面为浅海盆地环境。这两

种环境相互过渡的地带,由于环境的急剧变化,沉积物性质和水动力条件随之发生频繁的变化。成为成磷的有利部位。特别是当台地边缘或内部存在封闭或半封闭的水下盆地或海湾环境时,更有利于磷矿的形成。其他环境虽然也有磷矿的形成,但相比之下,所形成的磷矿的规模、厚度、含磷品位都不如前述环境中所形成的磷矿床。

三、结 语

通过对我国南方晚震旦世含磷建造的沉积环境的研究,对各个旋回期的沉积环境特点及其演化情况有了进一步的定量认识,并且了解到沉积环境与磷矿形成之间的密切关系,即从盆地环境向碳酸盐台地环境过渡的部位是有利的成磷环境。但由于影响矿床形成的因素是多种多样的,如岩相特征、岩性组合关系、海水性质及物质来源等等,故并非在有利的环境中就必定有磷矿的形成。

最可预测面方法利用地质变量(本文采用各种岩性的厚度数据)和地理座标变量之间的关系,来揭示沉积地层和沉积矿产形成时的沉积环境,给环境以定量表示,使之能客观地、形象地反映出来,给环境分析带来方便,同时能取得比较全面客观的效果。

最可预测面方法的应用,关键的问题是一组地质变量的选取。各个地质变量必须与其形成环境密切关联,即各个地质变量的地质形成意义必须明显。从已掌握的地质资料与地质知识考虑,这一组地质变量中,哪几个变量与这种环境有关,哪几个变量与那种环境有关,只有地质变量的地质形成意义明确,才能得到满意的效果。至于如何选取地质变量,其方法是多样的,可以从地质意义上去选取,也可以用多元统计方法去选取,随着要解决的问题性质的不同,选取不同的地质变量。

本文曾得到孟祥化教授的审评,在此表示感谢。

收稿日期1986年9月29日

参 考 文 献

- 叶连俊、孙枢等,1982,华南晚震旦世磷块岩沉积与成因,地质科研成果选集(1),文物出版社。
- 孟祥化,1979,沉积建造及其共生矿床分析,地质出版社。
- 於崇文,1978,数学地质的方法与应用,冶金工业出版社。
- 张光前,1982,宜昌,荆襄两磷矿含磷地层的对比,磷酸盐矿床及其研究,化工部地质研究所出版。
- Lee, P.J., 1981, Bulletin of Canadian Geology, Vol.29, No. 2, p.224-240.

QUANTITATIVE STUDY ON SEDIMENTARY ENVIRONMENT

Zhang Guangqan Liu Chengzuo

(Institute of Geology, Academia Sinica)

Abstract

This paper introduces a new method, the Most Predictable Surface, which is used for quantitative study on sedimentary environment. It is known that some geological parameters and the geographical parameters are closely related. For the purpose of quantitative study on sedimentary environment the following mathematical model is set up:

$$U = \sum_{i=1}^M a_i Z_i$$

Where Z_i is a value of the i th geological parameter, and a_i is a coefficient of the i th geological parameter which depends on the geographical parameters and characterizes the relationship between two groups of parameters. So U means a value of quantification of sedimentary environment. The coefficients (a_i) may be obtained by means of the mathematical processing. As soon as Z and a are determined, we can get U in each section. Many values of U can be linked and formed contour map of quantitative sedimentary environments. Same values of U show the same properties of lithological paragenetic association, that is the same sedimentary environments. The form of contours shows the outlines of the sedimentary environments. The density of distribution of the contours means the degree of variation of the sedimentary environments. The denser contours in a region shows acute sedimentary environments changing, on the other hand, the steadier.

The sedimentary environments are researched in this paper as an example of the Upper Sinian Epoch phosphate bearing sequence in the South of China. The sequence consists of the phosphate rocks, dolomite rocks, clay and silica rocks. Depending on the relation between lithologies and sedimentary environments, the following five lithological states, five geological parameters, are determined, i.e., coarse-grained intraclastic rock (A), medium or medium fine grained intraclastic rock (B), micritic dolomite rock (C), clay rock (D), and silica rock (E). Therefore, the lithologies from (A) to (E) are the different products deposited in the different sedimentary environments that the hydrodynamical conditions are changed from strong to weak. The mathematical model is set up depending on the five geological parameters determined and the geographic positions,

geographic parameters, in each section. The maps of the quantitative sedimentary environments, the contour maps of U , are made for the five sedimentary cycles in all period respectively. Depending on these maps the sedimentary environments of each cyclic period and the changing of the environments are researched.

The researches show that the regions with positive values of U indicate a carbonate platform under the water, but the regions with negative values of U show a shallow sea basin, and the regions with dense U contours show the regions where the environments change acutely. The regions with zero contour and its neighbouring regions show the regions where two environments mentioned above transfer each other.

In the study area, from beginning deposits in the wide area to the end of Upper Sinian Epoch, the basic framework of sedimentary environments is steady. The zones, i.e., Southwest Guizhou-Northeast Guizhou--Northwest Hunan-middle Hubei, are the transitional zones between the carbonate platform and the shallow-sea basin, and the carbonate platform distributes mainly in the region to the northwest of the zones, but the shallow-sea basin distributes mainly in the region to the east/south of the zones. In the transitional zone between two environments that is the favourable environment for P -deposits, because the environments change acutely in this zone, and the properties of the deposits and the hydrodynamical conditions change frequently with the change of environments. Specially, as there are closed or semi-closed basin or "gulf" under the water in the platform or in its borderland, it is more favourable environments where P -deposits are deposited. However, the size, thickness and P -bearing grade of the P -deposits in the other environments can not be compared with those of P -deposits in the environments mentioned above.

The results of this research have demonstrated that the Most Predictable Surface method is useful for quantitative study on sedimentary environments.