



数学地质

复杂变质岩区岩层划分 和构造模式的建立

——用阶梯函数统计分析法研究剖面

武汉地质学院勘探教研室数学地质组

我国前寒武纪复杂变质岩系广泛分布，其中蕴藏着丰富的矿产资源。近年来，变质岩区的地质研究工作有很大发展。但由于这种岩层一般都经受了长期剧烈的地质作用，原有地质构造形迹遭到多次改造，致使现在所呈现的变质岩区岩层走向、倾向和组合很不稳定，紧密同斜褶皱广泛发育，因而地层层序和厚度很难确定。在同一地区，不同的地质工作者常常得出差别很大的结论。近年来，在古老变质岩区应用统计分析方法建立地层和构造模式等工作日益引起人们的重视。本文结合某些实例，介绍其中的一种所谓“阶梯函数”分析法*。

阶梯函数分析法，是基于把经过复杂构造变动的岩层顺序看成是一个随机过程。为了查明剖面上的岩性结构统计规律性和选择相应的数学模型，可将剖面看作数学上的数轴，不同岩性接触的分界面可看作数轴上的点子序列，而不同岩性在剖面上出现的厚度则可视作点在数轴上出现的区间大小。这种点子的随机序列可称为随机质点流。如果在任意两个不相交（或不重叠）的区间点子出现的个数各自是统计独立的，则称这个序列具有“马尔科夫性”。而在单位间隔内，点子出现的概率相等（即点子出现的密度在统计意义上相同）时，则称此序列具有“平稳性”。符合以上特性的点子统称为“平稳普阿松流”。平稳普阿松流的事件间隔（本例是岩层可见厚度）服从指数分布律，这可用频率直方图进行初步的统计检验。当剖面

中的不同岩石类型岩层分布符合上述特征时，这种岩层序列就是平稳随机过程序列。这样，就可把复杂变质岩岩层剖面以随机函数的形式进行研究。

本次工作是对河北迁安地区K剖面和江西某地板溪群A剖面的研究成果，现分述如下。

河北迁安地区前震旦纪变质岩系大面积出露，广泛分布着规模不等的沉积变质铁矿，其岩性、地层、构造等除具有复杂变质岩区的共同特点外，还叠加了强烈的混合岩化作用。本次工作是根据首钢地质勘探公司普查队测制的五千分之一的K剖面原始记录进行的。出露的岩石类型（包括混合岩类）可达28种。应当指出，如果岩石类型划分过细，可能掩盖其统计规律性。反之，如果划分过粗，也就没有规律可言了。所以，我们将混合岩按残留体恢复的原岩，再根据暗色矿物的含量归并为五大类：①暗色麻粒岩类，②变粒岩、麻粒岩类，③辉石角闪岩类，④磁铁石英岩类，⑤浅粒岩类。并将①、②、③、④、⑤依次作为相应岩石类型的代码进行统计。

一 统计计算方法

(1) 沿剖面一定方向（K剖面由北西至南东）统计岩性及其相应厚度（表1）并制作岩性分布柱状图（图1）。

(2) 对五类岩性分别作厚度分布频数直方图。视其是否服从指数分布律以检验被分别研究的五个流（五类岩性）是否服从普

*Оргенберг Н.А. Изв. ВУЗ, Геол. и разв., 1972, No 10

K 剖面岩性厚度统计表

表 1

层序	厚度 (米)	岩性 代码	层序	厚度 (米)	岩性 代码									
1	215	①	23	15	④	45	1	④	67	8	④	89	15	③
2	140	②	24	330	②	46	246	②	68	10	②	90	10	②
3	3	①	25	115	⑤	47	15	③	69	8	④	91	10	③
4	77	②	26	1	②	48	21	②	70	10	②	92	15	①
5	20	④	27	174	⑤	49	19	④	71	2	④	93	10	③
6	55	②	28	28	②	50	92	②	72	44	②	94	20	①
7	1	④	29	8	④	51	10	①	73	1	④	95	80	②
8	55	②	30	2	②	52	17	⑤	74	119	②	96	20	①
9	1	④	31	9	④	53	42	②	75	17	④	97	10	④
10	30	②	32	1	②	54	1	④	76	15	②	98	20	①
11	35	④	33	1	④	55	61	⑤	77	20	①	99	135	②
12	55	②	34	1	②	56	115	②	78	0.8	⑤	100	20	①
13	5	④	35	2	④	57	5	⑤	79	10	②	101	92	②
14	91	②	36	66	②	58	5	②	80	15	①	102	50	①
15	0.2	③	37	45	③	59	6	⑤	81	1	⑤	103	55	②
16	50	②	38	42	②	60	1	②	82	63	②	104	55	①
17	5	③	39	8	④	61	3	③	83	25	①	105	55	②
18	3	②	30	160	②	62	10	②	84	20	②	106	74	⑤
19	1	③	41	10	④	63	27	④	85	20	①	107	13	②
20	31	②	42	30	②	64	10	②	86	20	②	108	3	④
21	35	④	43	30	④	65	8	④	87	33	①	109	175	②
22	536	②	44	50	②	66	10	②	88	50	②			

阿松律。本例通过作图可认为岩层分界点符合普阿松分布假设。

(3) 计算五类岩性间所有可能的成对接触的频数和频率, 以及每类岩性在整个剖面上出现的相对和绝对厚度(表 2)。

(4) 计算每种可能的岩性类型序列(如 512345, 123451, …… 213452, 134521, ……等)所对应的频率总和。其中

最大频率和所对应的序列就是剖面中最可能出现的序列, 并称为岩性阶。计算全部方案是很繁重的任务: 5 类岩性要计算 5! 即 120 次, 6 类岩性要计算 6! 即 720 次, 但计算时按一定次序(有一定规律可循)可节省一些工作量。K 剖面中具最大频率和的是封闭序列 315243, 即 $\sum P_i = P_{31} + P_{15} + P_{52} + P_2 + P_{43} = 0.376$, 这样就把 15243 作为岩性阶,

不同岩石类型接触频率及厚度

表 2

岩石类型	①	②	③	④	⑤	小 计
①	×	9/0.802	1/0.009	1/0.009	3/0.028	14/0.128
②	10/0.092*	×	8/0.073	27/0.248	5/0.046	50/0.46
③	2/0.018	7/0.064	×	○	○	9/0.082
④	1/0.009	25/0.229	○	×	1/0.009	27/0.248
⑤	○	9/0.082	○	○	×	9/0.082
小 计	13/0.119	50/0.46	9/0.082	28/0.257	9/0.082	109/1.00
绝对厚度	538	3412	1042	290	493.8	4838
相对厚度	0.11	0.71	0.02	0.06	0.10	1.00

*10/0.092 指 ② 和 ① 类接触的“频数/频率”。

它反映了岩性在剖面上变更的基本规律。每个别流的轴线相对位置由此而定。

(5) 按下列公式计算轴距, 并绘制阶梯函数图形。

$$Y_1 = - \sum_{j=2}^n \left(VM_j + \frac{W}{\sqrt{P_{1j}}} \right)$$

$$Y_i = \sum_{j=1}^{i-1} \left(VM_j + \frac{W}{\sqrt{P_{ij}}} \right)$$

$$- \sum_{j=i+1}^n \left(VM_j + \frac{W}{\sqrt{P_{ij}}} \right)$$

..... (i = 2, 3, n - 1)

$$Y_n = \sum_{j=1}^{n-1} \left(VM_j + \frac{W}{\sqrt{P_{nj}}} \right)$$

式中: n—岩性类型数目, i, j—均为岩性类型在岩性阶中的序号,

P_{ij}—第i和第j岩性类型间接触的

频率,

M_j—第j类岩性的相对厚度, W, V—与图形比例尺有关的任意常数,

Y_i—第i流的纵座标值。

K剖面 n = 5, 取 W = 0.2, V = 20, 应用上式计算得 Y_i 值为:

$$Y_1 \text{ (①类岩性)} = -24,$$

$$Y_2 \text{ (⑤类岩性)} = -14,$$

$$Y_3 \text{ (②类岩性)} = 1.6,$$

$$Y_4 \text{ (④类岩性)} = 22.6,$$

$$Y_5 \text{ (③类岩性)} = 22,$$

以不同 Y 值作为纵座标平行于沿轴向给定的零值分别作平行线, 将图 1 岩性分布柱状图中的五种岩性分别投影在相应的水平轴上, 得阶梯函数图形。这就是所谓绝对不连续的随机普阿松过程, 它是剖面的准确的数学模型, 并允许作随机函数的分析处理。

(6) 为了排除岩性交替上的随机干扰而查明变化趋势, 要对阶梯函数进行线性滤波或平差。所得的平差函数称为一阶函数。

在本文中, 一阶函数是用阶梯函数作滑动窗平差后得出的。滑动窗口为 100 米, 步长为 50 米, 计算公式为:

$$Y(X_k) = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^m K_i P_i$$

式中: Y(X_k)—窗口横座标中值位置 (k 点) 的平差值, k = 1, 2, (点序号),

i—窗口内出现的岩性类型, 共 m 种, i = 1, 2, m, m ≤ n,

K_i—窗口内第 i 类岩性的长度,

P_i—第 i 类岩性的轴距。

将计算的结果作于图 1 一阶曲线。一阶函数的导数称为二阶函数, 它是用下式对一阶函数进行解析微分所得。

$$Y'(X_k) = 0.2 \sum_{i=-1}^1 i Y(X_{k+i})$$

式中, Y'(X_k)—k 点的二阶函数值,

Y(X_{k+i})—k+i 点的一阶函数值,

计算结果见图 1 中的二阶曲线。

二 地质解释

不连续的阶梯函数图形及一、二阶的连续曲线, 反映了剖面上岩层产出的地质特征。阶梯函数包含了不同岩石类型的顺序以及地质构造作用的全部信息, 因而概括了趋势性、周期性及随机性。经过数据处理后的一阶函数反映了剖面上岩石分布密度的主要规律性, 二阶函数则主要提供了岩石变更“速度”的概念。它们可能把厚度小、接触点多的岩层滤掉, 即去掉局部变化和随机干扰, 使厚度大接触点少的岩层更为突出, 从而把规律性显示出来, 它反映了地质作用的总趋势。

分析一、二阶连续函数曲线, 揭示岩层结构规律性的信息, 就可能客观地对剖面进行岩层和构造模式分析。

首先, 要在一阶曲线中查明大的周期性 (实际上由于各种因素影响如岩层的尖灭、相变、褶皱的加厚和变薄以及其它随机干扰使曲线只具有拟周期性), 它可能是断裂构

造使层序重覆的结果。K剖面中一阶曲线未见有周期性，因而似无这种断裂存在。

其次，要在一阶曲线中寻找对称性（实际也是拟对称性），它是由褶皱造成层序对称重覆的结果。一阶函数是偶函数决定了它的导数的非偶性。因此，一阶曲线上对称的同名极值，在二阶曲线上表现为异名极值。所以在一阶曲线上查明对称时，可结合二阶曲线较准确地确定对称轴的位置及对称范围。一阶曲线的对偶性是轴向两边同样岩性（统计意义上）在地表对称出露的结果，而二阶函数的非偶性是翼部相反岩层变更序列的反映。

K剖面通过同名极值和异名极值等点的分析，明显地反映出四个对称体（见表3，并参见图1）。

K剖面中的四个对称体 表3

对称名称	轴位置的层序号	对称范围
C-S-C'	26层	25~27
A-O-A'	43层	28~50
B-P-B'	55层	46~74
D-T-D'	89层	82~99

A-O-A'和B-P-B'对称，在第46—50层段是重迭的。此层段既是A-O-A'对称的东翼，又是B-P-B'对称的西翼。以该层段作为对比层，再根据地层自下而上由基性到酸性的喷发沉积旋回特点，可用上述四个对称体勾画出背向形的轮廓模式（见图2）除上述背向形外，由二阶曲线所提供

的次级对称轴位置的信息（层序号）计有37、40、46、49、65、85、95、99，它们是次级同斜紧密褶皱的反映。

第三，从曲线中除去对称的一翼，根据剩下部分编制正制岩性剖面结构的一阶和二阶函数曲线，再根据曲线编制正常岩性柱状图。用二阶曲线来划分柱状剖面图较为合适，因为岩性柱状图内岩层的划分原则是把相对均一部分划为一层，使其内部岩石分布密度及更替“速度”是比较均匀的变化。层与层的区别在于其岩性和更替特点不同，这样把二阶曲线的全波（周期）所对应的岩层作为一层，层间分界点由二阶曲线的极小值来划分最为明显清晰。

K剖面由于次级褶皱强烈发育，因此选取层较薄的一翼作岩层柱状图，由新到老分别选取：26—27层（对应有25、26及层55、60层），

28—43层（对应有43—50层及61—74—80层），

82—92层（对应有93—105层）。

编制正常岩层柱状图（图3），可划分为四层，由上到下为：

（4）层，由26—38层组成，厚400米。主要岩性为黑云浅粒岩、黑云变粒岩，夹0.5米紫苏暗色麻粒岩以及多层辉石磁铁矿石岩和磁铁石英岩。

（3）层，由39—43层组成，厚240米。岩性以黑云变粒岩为主，其次为紫苏暗色麻粒岩，夹磁铁石英岩数层。

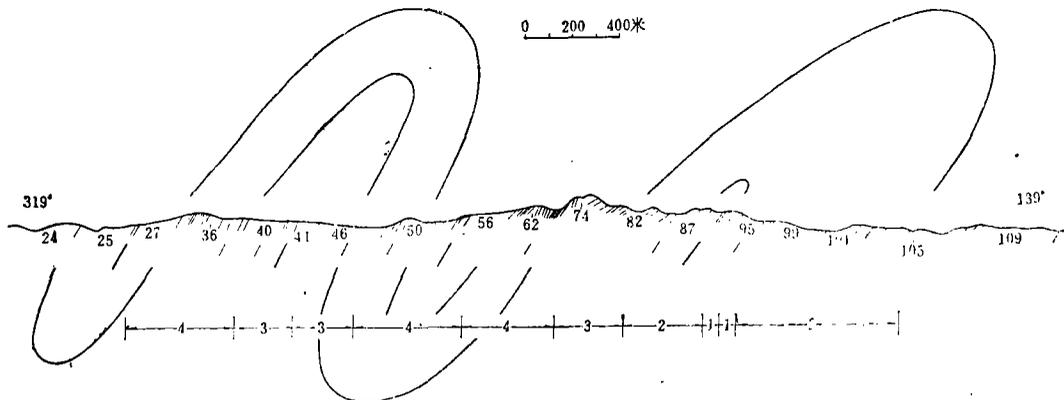


图2 剖面统计构造模式图

(2)层, 由82—88层组成, 厚240米。岩性为紫苏黑云变粒岩和紫苏暗色麻粒岩。

(1)层, 由89—92层组成, 厚度大于60米。岩性有二辉斜长角闪岩、二辉角闪暗色麻粒岩、紫苏斜长角闪岩和紫苏角闪暗色麻粒岩。

上述四层由下至上清晰地反映了一个较为完整的自基性到中酸性的旋回。

用上述方法在江西某地元古界板溪群A剖面(1:2000)划分岩层和建立构造模式。计算结果如下:

岩性阶: dbca。a为变质细砂岩, b为变质粉砂岩, c为千枚状粉砂岩, d为砂质千枚岩。

$$Y \text{轴: } Y_1(d) = -21$$

$$Y_2(b) = -10$$

$$Y_3(c) = 4.5$$

$$Y_4(a) = 16$$

一、二阶函数值为:

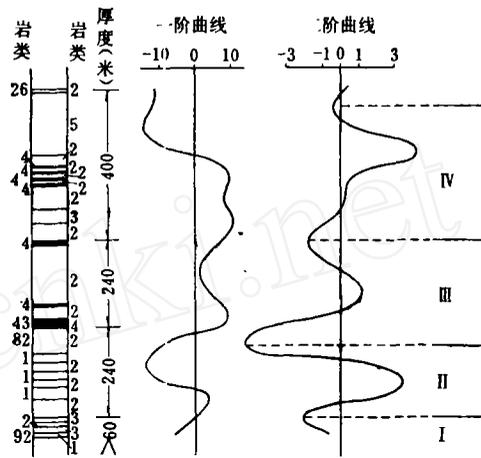


图3 岩层柱状图

岩性: IV. 黑云母浅粒岩、黑云变粒岩夹紫苏暗色麻粒岩, 夹多层辉石磁铁矿层、磁铁矿层。
 III. 黑云变粒岩为主, 其次为紫苏暗色麻粒岩, 夹磁铁矿层。
 II. 紫苏黑云变粒岩和紫苏暗色麻粒岩。
 I. 二斜辉长角闪岩、紫苏斜长角闪岩, 二辉角闪暗色麻粒岩, 紫苏角闪暗色麻粒岩。

点序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
一阶函数	6.5	3.05	1.95	-8.3	-18.8	-16.6	-16.6	-21	-21	-11.05	3.43	4.9	-4.2	-9.1	-3.3	5.65	2.95
二阶函数	-0.68	0.91	-2.27	-4.15	-1.66	0.44	-0.88	-0.88	1.99	4.89	3.19	-1.53	-2.8	0.18	2.95	1.25	-0.23
点序号	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
一阶函数	4.5	4.5	4.5	4.5	9.68	15.43	16	13.4	0.4	1.7	8.2	-2.05	-2.02	5.93	8.5	-0.9	-4.2
二阶函数	0.31	0	0	1.04	2.19	1.06	-0.41	-3.12	-2.34	1.56	-0.75	-2.04	1.6	2.1	-1.37	-2.54	1.71
点序号	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49		
一阶函数	7.45	4.45	-3.05	-2.75	-7.1	-10	-10	-5.65	-2.75	-7.1	-8.7	4.3	16	16	8		
二阶函数	1.73	-2.14	-1.44	-0.81	-1.45	-0.58	0.97	1.45	-0.29	-1.19	2.28	4.94	2.34	0	-1.6		

将上述结果绘制成阶梯函数和一、二阶函数曲线(图4)。

统计结果的地质解释如下:

(1)在一阶曲线中未见有周期性重覆, 其地质意义是指没有造成大段地层重覆的断裂存在。在野外实测剖面时, 发现有较大的F断层, 故可判断它在A剖面上造成的结果是地层的缺失, 进而根据产状可分析其断层性质。

(2)分析一、二阶曲线, 可见有两个明显的对称体和若干次级小对称体。两个对称体为A—O—A'和P—O—P', 轴位置的层

序为36层和30层, 对称体范围分别为33—39层和25—33层。它们反映剖面上存在两个褶曲, 对称轴的位置即为褶曲轴的位置。根据产状判定A—O—A'对称体为一开阔的向斜, P—O—P'为一近于平卧的紧密褶曲。它们的褶曲轴面近于正交(见图5)。这两个不同类型的褶曲反映了本区至少经历过两次构造变动: 第一次形成了紧密的同斜(平卧褶皱)、第二次又迭加了开阔的背向斜。但这仅是从一条剖面分析得到的信息。二次褶皱的存在与否, 还有待于野外工作和进一步用统计分析证实。

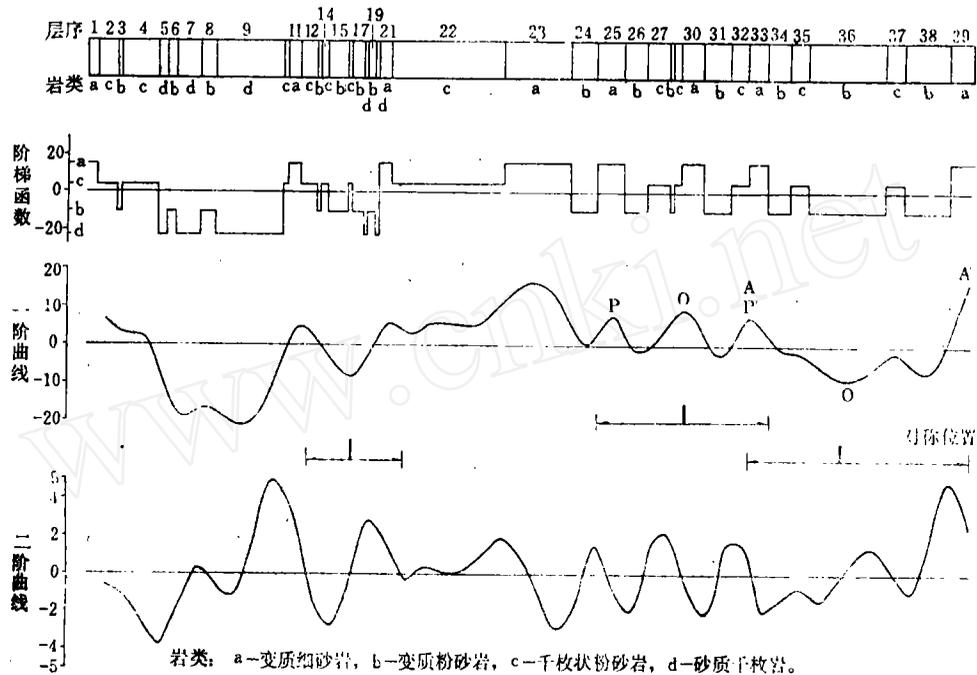


图4 A剖面编录图线

(3) 基于上述构造模式的认识, 从二阶曲线中可除去对称一翼曲线, 然后在其余部分找出曲线的极小值, 并用它来划分岩层, 以建立正常的岩层柱状图。A剖面可分为四层(图6)。每层都基本上反映了岩性由粗到细的趋势性韵律。现由上到下列述于下:

(4)层: 由5—16层组成, 厚102米。上部以砂质千枚岩为主, 夹有变质粉砂岩薄层。下部为变质粉砂岩与千枚状粉砂岩互层, 夹少量变质细砂岩。

(3)层: 由16—23层组成, 厚约120米。上部为千枚状粉砂岩。下部为变质细砂岩。

(2)层: 由33—36层组成, 厚约50

米。由上往下为千枚状粉砂岩、变质粉砂岩和变质细砂岩。

(1)层: 由30—33层组成, 厚约32米。由上往下为千枚状粉砂岩、变质粉砂岩和变质细砂岩。

应该指出, 上述统计分析的地质结论与野外实测剖面时的地质认识基本一致, 而且揭示了隐藏在杂乱现象中的信息。在A剖面实测过程中, 由于露头不太好, 岩性变化大(剖面中肉眼可分的就有6—7种), 统计时已归纳为四种), 小褶皱发育, 致使对产状、岩性变化感到杂乱而分不清局部与整体, 更认不清多次褶皱形态。但在统计构造模式图上即能较为清楚地识别出来。当然, 统计分析的结论还应到野外验证和充实。

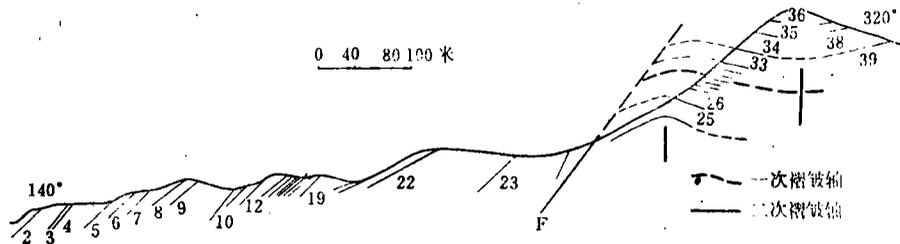


图5 A剖面统计构造模式图

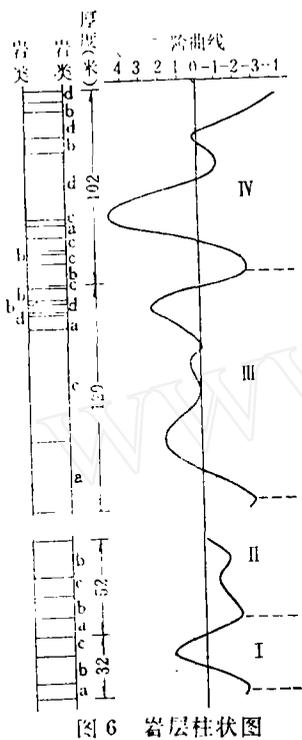


图6 岩层柱状图

用阶梯函数在复杂变质岩系中建立构造模式和划分岩层的方法虽能比较客观地反映

岩性剖面的结构规律性，但是方法本身也有不足之处。例如，从一阶、二阶函数曲线中分析对称元素或周期元素时，因为它们不是绝对对称，所以可能有多解性。又如，对称性或周期性的成分也不能说一定是分别由褶皱或断裂造成的。原始沉积的韵律周期也可以具有周期性，应结合野外观察具体分析。又如，地层柱状图的上下顺序无法从阶梯函数中求得，必须根据地质特征来分析判断。总之，运用阶梯函数进行统计分析时，其效果和结论的可靠程度主要决定于野外原始岩性剖面测制的精度，包括岩石划分的详细程度和对岩石识别的统一性，以及对研究区地质构造特征的了解深度。如果在这两地区进一步作相平行的若干条剖面，就可以进行全区的岩层对比和划分，建立全区的构造模式。

这次工作是初步尝试，主要是探讨这种方法的可能性和有效性。由于我们水平不高，一定有很多不足之处，有待今后进一步提高。工作中得到首钢地质勘探公司和江西冶金勘探公司七队同志们的大力协助，在此深表感谢！

(胡旺亮 李紫金执笔)

作为金属矿床指示元素的碲



研究美国五个金属矿区碲的分布特征查明，矿床周围发育的碲晕主要是由其化学性所引起的。碲化物离子(2.21Å)与硫化物离子(1.84Å)的半径相差很大，因而硫化物中的硫与碲不可能发生类质同象置换。地壳中硫原子的数量比碲原子含量高 1.2×10^6 倍。这个比例看来很大程度上也保持于含矿溶液。有色金属(铜、铅、镍)主要与硫结合，贵金属(金、银)与碲结合。这种情况在所研究的矿床内硫化物与碲化物的堆积顺序上得到了反映，由于碲在氧化环境中活动性小，它能置换氢氧化铁中的OH⁻离子，同时溶解度也比硫酸盐小，所以碲化物富集于风带化。

凯尔达冷银矿为前寒武系岩石组成的一系列北西走向的矿带。含有方铅矿、黝铜矿、闪锌矿的脉状矿体，从白垩纪石英二长岩侵入体呈弧形向南西倾斜。侵入体周围见有碲、铋、砷、铅、硫和钨晕。决定碲分散特征和形态的矿化，是在两个阶段形成的：最先形成的是含矿带的主要矿床，然后侵入了石英二长岩，再一次富集碲和其他元素，从而形成了分散晕。

鲁宾逊斑岩型铜矿产于第三纪二长斑岩岩株及其有关的古生代沉积岩中的蚀变带内。矿化带边缘碲含量最高。发育于矿床上部的铁帽内，碲的含量增高(2克/吨)。蒙特楚马矿区是科罗拉多矿带的一部分。石英二长斑岩岩株及岩脉产于前寒武纪岩石中的区域柔被带内。侵入体周围见有围岩蚀变带和银—铅—锌矿脉。碲分散晕和蚀变带一样，形态非常复杂。矿床周围碲的含量最高。远离矿脉碲含量减少，但总的来说在可见蚀变岩石范围之外，碲的分布是相当稳定的。在岩株中部，土壤中的碲含量比基岩露头含量高100倍。

克拉特尔—克里克铜—银—铅—金矿床，晕在空间上与矿脉周围狭长的强烈蚀变岩石带相吻合。

克利普—克里克里克矿区，金、银、碲分散晕与第三纪碎屑岩和火山岩中的裂隙地段是一致的。

作者认为，研究碲晕适合于寻找浸染状矿石(鲁宾逊、蒙特楚马)，而不适合于克拉特尔—克里克这样的脉状矿脉。

(摘译自：《Geochem. Expl》，vol. 8, №1/2, 1977, P. 31~48)