

第四纪沉积环境重建中多元统计方法的应用 ——以周口店新发现的更新世洞穴堆积为例*

赵志中

(地质矿产部地质力学所, 北京 100081)

田明中 曹伯勋 陈莲芳

(中国地质大学)

【摘要】粒度分析是沉积环境分析的重要手段, 其中样品预处理及粒度分析实验方法的选择是粒度分析资料整理成功的关键因素。粒度分析资料的常规整理是沉积环境分析的基础, 而粒度分析的多元统计法整理是计算机时代沉积环境分析的必然。太平山北坡东地点为周口店近年来新发现的最为完整的早更新世晚期洞穴堆积剖面, 对该剖面沉积物的粒度特征进行因子分析, 不仅探讨了该区第四纪早期沉积环境, 而且为沉积环境分析由定性走向定量提供一个良好实例。

关键词 周口店, 早更新世, 太平山北坡洞, 沉积环境, 多元统计
分类号 O 213: P534.631

1 太平山北坡洞穴剖面及其粒度分析

1.1 洞穴堆积剖面

太平山北坡东地点洞穴剖面是周口店地区出露较好的早更新世晚期洞穴堆积剖面, 含丰富哺乳动物化石, 代表化石为艾克氏变异仓鼠 (*Ailocricetus ehiki*), 沉积较连续, 剖面厚 10 m (未见底)。据剖面岩性特征、生物化石和古地磁年代测定资料, 1~3 层属中更新统, 4~13 层属下更新统“太平山组”(Q_{1d})^[1]。据地层特征, 13~12 层为洞穴堆积阶段, 11~9 层为半开放洞穴阶段, 8~1 层为开放洼地阶段 (图 1)。

1.2 洞穴堆积物粒度分析

洞穴堆积物共 13 层, 除 12 层及 4 层各采二个样外, 其余每层各采 1 个样。样品的预处理 (胶结颗粒离解) 是粒度分析实验结果真实与否的决定因素。本剖面堆积物钙质胶结较强, 依据一般教科书的盐酸离解法^[2], 经镜下检查有 10%~30% 的颗粒为未离解的假颗粒。经反复实验, 针对这种钙质胶结堆积物摸索出了一套行之有效的沉积颗粒离解办法: (1) 将样品烘干后, 马上加入冷水, 浸泡一夜, 加少量洗涤剂以加速半固结样品崩解; (2) 加入浓度 0.5 N 的偏磷酸钠溶液 10 mL, 并加热; (3) 加入 10% 的双氧水, 1 N 盐酸并搅动, 继续加双氧水至不再起泡, 加热至 70 °C; (4) 加 2 N 盐酸 5 mL, 搅拌并加热; (5) 加 10 mL 偏磷酸钠溶液, 进一步离解; (6) 加足量温水稀释, 样品悬浮后, 过 0.063 mm 湿筛; (7) 大于 0.063 mm

* 1998-01-16 收稿。

国家计委资助第 30 届国际地质大会项目。

第一作者简介: 赵志中, 男, 31 岁, 硕士, 副研究员, 第四纪地质与环境学专业。

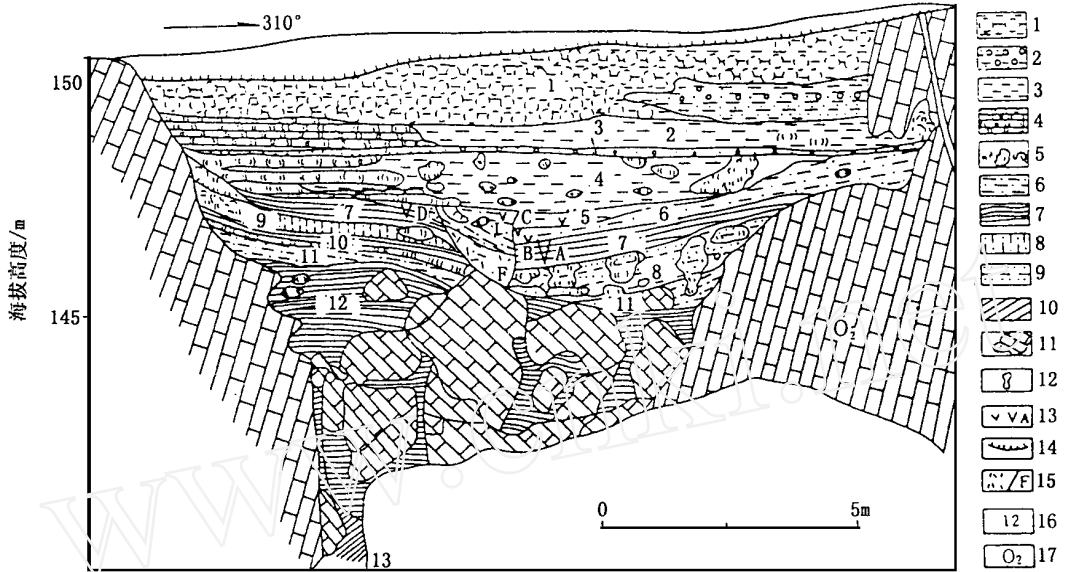


图 1 东洞洞穴堆积物实测剖面图

Fig. 1 The eastern cave section at the Taipingshan north-slope

- 1. 红粘土及团块状钙质结核; 2. 砂砾; 3. 亚粘土; 4. 层状钙质层; 5. 钙质结核; 6. 亚沙土; 7. 灰色粘土层; 8. 黄色亚粘土; 9. 砂与亚粘土互层; 10. 红粘土; 11. 灰岩块砾; 12. 哺乳动物化石; 13. 古冰楔;
- 14. 现代土壤; 15. 断层及角砾; 16. 地层分层编号; 17. 奥陶系灰岩

部分烘干后做筛析实验, 小于 0.063 mm 部分做移液管分析实验。上述方法处理的样品, 在双目镜下检查只有极少量假颗粒, 粒度分析实验所得结果如下表 (表 1)。

2 粒度资料的因子分析

在粒度分析资料整理中, 引用粒度分析全部原始资料进行整理, 其结果客观地反映了粒度的分布规律。因子分析据研究对象的不同分为 Q 型和 R 型, Q 型分析着重研究样品间的相互关系, R 型分析则研究各变量间的相互关系。笔者利用 Q 型分析对剖面沉积水动力进行了半定量研究, 用 R 型分析来研究剖面沉积物的搬运方式, 现讨论如下。

2.1 Q 型因子分析的运用

由表 1 中的 15 个样品 12 个粒径段可组成一个 15 × 12 阶矩阵, 其中任一元素可写成 X_{ij} , 代表第 i 个样品第 j 个变量 (即粒径段)。在此矩阵基础上, 首先对原始数据进行标准化处理。每个样品是由其粒级的分量组成的矢量所代表, 矢量位置确定后即可计算各矢量间的夹角余弦值, 以了解各样品间的相似性, 求出样品间相似系数矩阵 (省), 其计算过程如下:

$$\cos \theta_{kl} = \left[\sum_{j=1}^n X_{kj} X_{lj} \right] / \left[\sum_{j=1}^n (X_{kj})^2 \sum_{j=1}^n (X_{lj})^2 \right]^{1/2}$$

式中 k 和 l 为比较的两个样品, $k, l = 1, 2, \dots, N$ (样品数); $j = 1, 2, \dots, n$ (变量数)。

由相似系数矩阵求出特征值 $\lambda (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$, 理论上可求出 N 个 λ 值, 但有意义的通常是 M 个 λ 值, 当 $M \ll N$, 而 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$ 代表的地质意义叫做第一个主因素 (F_1), 第二个主因素 (F_2), ..., 第 M 个主因素 (F_M), λ 值的大小代表各因素的方差在总方差中所占权重, 亦即方差项献, 这样每个样品可用 M 个主因素的线性数学模型来代表:

表 1 太平山北坡东地点样品粒度分析
Table 1 The size analysis data on the eastern cave at the Taipingshan north-slope

层号	样品编号	粒度分配数量百分数												沉积物	
		砾石			砂			粉砂				粘土			
		2~1φ	1~0φ	0~1φ	1~2φ	2~3φ	3~4φ	4~5φ	5~6φ	6~7φ	7~8φ	8~9φ	9~10φ		>10φ
4~2mm	2~1mm	1~0.5mm	0.5~0.25mm	0.25~0.125mm	0.125~0.0635mm	0.063~0.032mm	0.032~0.016mm	0.016~0.008mm	0.008~0.004mm	0.004~0.002mm	0.002~0.001mm	<0.001mm			
1	A14	1.735	2.322	2.141	1.081	2.428	2.252	7.335	64.173	2.497	1.570	0.895	1.476	9.376	粉砂含粘土砂
2	A13	0.454	1.044	1.155	0.657	1.758	1.935	11.595	58.663	9.753	1.291	1.273	4.323	6.009	粉砂含粘土砂
3	A12	11.378	14.003	15.283	6.724	4.667	2.656	5.482	23.394	2.698	1.007	2.322	3.076	7.271	粉砂含粘土
4	A11	0.039	0.625	0.737	1.075	1.658	1.737	14.640	58.180	6.481	1.078	1.949	1.812	99.88	粘土粉砂质砂
4	A10	0	0	0.049	0.065	0.393	0.920	19.380	75.232	1.542	2.026	1.498	4.045	12.240	含粘土粉砂
5	A9	0	0.107	0.303	0.695	1.317	1.501	8.097	48.837	27.150	5.111	1.543	3.391	1.948	含粘土粉砂
6	A8	0	1.368	3.012	4.192	5.784	4.593	20.391	50.023	1.066	0.301	0.310	3.753	5.308	砂质粉砂
7	A15	0	0.850	0.340	0.460	0.640	0.580	5.180	19.010	70.820	0.030	0.370	0.370	1.370	粉砂(细)
8	A7	1.040	0.744	0.814	0.732	1.521	1.726	6.714	75.109	0.660	3.480	0.676	3.975	2.804	粉砂含粘土
9	A6	0	0	0.023	0.280	0.076	1.133	27.882	55.164	7.061	1.783	0.509	0.237	5.423	粉砂含粘土
10	A5	0	0.098	0.125	0.168	0.215	0.326	10.153	19.695	58.387	0.802	0.541	3.994	5.495	含粘土粉砂
11	A4	0	0	0.042	0.109	0.417	0.478	9.558	72.807	1.638	0.335	1.513	0.862	12.205	含粘土粉砂
12	A3	0	0.010	0.004	0.008	0.041	0.112	18.926	76.254	0.124	0.249	0.089	0.834	3.318	粉砂
12	A2	0	0	0.006	0.029	0.290	0.023	0.867	10.267	82.691	0.757	0.016	3.485	1.817	含粘土粉砂
13	A1	0	0.190	0.150	0.280	0.620	1.600	15.500	67.290	5.770	2.560	2.470	2.080	1.930	含粘土粉砂

φ log₂d (d 为颗粒直径/mm)。

$$X_i = A_{i1}F_1 + A_{i2}F_2 + \dots + A_{ip}F_p + \dots + A_{iM}F_M$$

式中 i 为样品数, $i = 1, 2, \dots, N$; p 为主因素数, $p = 1, 2, \dots, M$; A_{ip} 为各主因素系数, 表明第 i 个样品第 p 个因素 (F_p) 所占权重, 即因素载荷^[3]。以各因素的方差在总方差中累积百分比达 85% 以上来取 M 个主因子。据计算, 太平山东地点洞穴剖面沉积取前三个主因素, 即达 85.168%, 因此前三因素足以代表原始资料绝大部分信息。

求得初始因素负荷矩阵 ($A_N \times n$)。因素负荷表明主因素在样品中所占比重, 但它用于沉积水动力解释中有困难。为使样品的矢量位置安排合理, 常用方差极大法旋转因素轴 (Kaiser, 1959), 求得方差极大因素负荷矩阵 (表 2)。

表 2 方差极大因素负荷矩阵
Table 2 Three factors in variance analysis

层号	因素 I	因素 II	因素 III	层号	因素 I	因素 II	因素 III	层号	因素 I	因素 II	因素 III
1	0.5153	0.1191	0.8264	5	0.6393	0.4167	0.4193	10	0.3870	0.8844	0.1438
2	0.8666	0.3192	0.6066	6	0.3457	0.1107	0.7820	11	0.8849	0.0960	0.2376
3	0.0012	0.0524	0.8935	7	0.1191	0.8981	0.1460	12	0.8593	0.0065	0.0173
4	0.7696	0.1884	0.5459	8	0.6775	0.2215	0.5675	12	0.0660	0.9909	0.0398
4	0.7512	0.2505	0.3721	9	0.8565	0.1429	0.1156	13	0.8694	0.1937	0.3318

求标准化因素分量。因素分量即为每个因素载荷平方, 一个样品各因素载荷的平方和即为公共因素方差, 用因素分量除公共因素方差即得标准因素分量, 这样就强化了较高的载

荷^[3]。三因素的端元样品: 因素 I 的端元样品为 A 3 样 (12 层样品); 因素 II 的端元样品为 A 2 样 (12 层样品); 因素 III 的端元样品为 A 12 (3 层样品)。据三端元样品概率累积曲线, A 2 样的 ϕ 值中位数最小, A 3 的 ϕ 值中位数次之, A 12 样的 ϕ 值中位数最大, 端元样品 ϕ 值中位数由 A 2 A 3 A 12 表现出中位数稳定变粗, 岩性由含粘土粉砂粉砂 砂砾土, 其沉积水动力相应由弱中等 强。除端元样品外的其余 12 个样品可看作这三个样的混合, 依据其标准化因素分量投点作三角图 (图 2)。图 2 说明, 太平山北坡剖面沉积 1 层和 6 层样品投点接近端元样品 A 12, 指示其为沉积水动力强的沉积; 第 13、11、9、8、5、4、2 层样品共 8 个样的投点接近端元样品 A 3, 指示这 8 个样品为水动力中等的沉积; 第 7、10 层样品投点接近端元样品 A 2, 为水动力极弱的沉积。从而将剖面沉积水动力强弱作了半定量的分析, 总的趋势是太平山北坡洞穴剖面由下至上沉积水动力由弱至强。

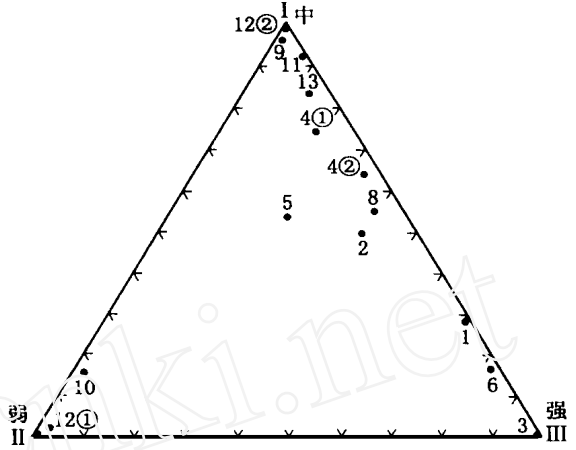


图 2 太平山北坡沉积物粒度分析标准化分量投点图
Fig. 2 Triangular diagram of size analysis arrangement

2.2 R 型因子分析的应用

典型环境的搬运方式 V isher 等精辟地讨论过, 太平山剖面沉积颗粒细, 除第 3 层外其余 14 个样品累积概率曲线均为三段式, 但其毫米中值较典型环境小, 故不能简单套用 V isher 等概括的搬运方式的模式^[4]。本文应用 R 型因子分析解释搬运方式, 其过程如下:

首先对原始粒度资料组成的矩阵 $A_N \times n$ 进行 R 型分析运算, 计算的前三个因素占 77.73%。A llen 认为前三个因素足能解释粒级的 75%, 其余 25% 作为随机组分^[3], 故取前三因素求得因子载荷矩阵。

其次对三因素作因素载荷剖面图 (图 3)。由图 3 可见, 因素 I 载荷剖面 (粗黑线) 表现出特别与大于 3.7ϕ 的粒度有关, 最大载荷在 1.5ϕ 处, 载荷量为 0.977, 从 3.7ϕ 起, 载荷急速降低, 并且由正值变为负值, 颗粒粒径说明因素 I 代表砂及细砾; 因素 III (细黑线) 特别与小于 7ϕ 粒径有关, 最大载荷在 7.5ϕ 处, 颗粒粒径说明因素 III 代表粘土和少量细粉砂级颗粒。因素 II (虚线) 介于上二因素之间 ($3.7 \sim 7\phi$), 指示剖面沉积物具 6ϕ 间断, 许多粒度分析实验都揭示了某种沉积物具有一定粒径颗粒缺乏的规律, 图中因素 II 分为二个亚组, 一组为

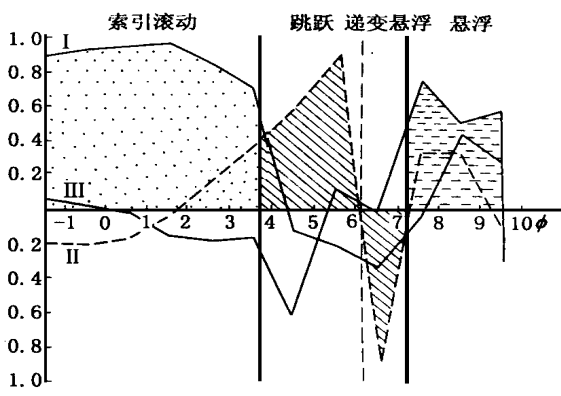


图 3 三因素载荷剖面图
Fig. 3 Three factors distribution section

3. 7~ 6 ϕ 最大载荷在 5.5 ϕ 处, 另一组为 6~ 7 ϕ 最大载荷在 6.5 ϕ 处。Allen 认为因素 I 指示了牵引总体, 因素 III 指示悬浮总体, 而因素 II 中靠近牵引总体的亚组指示了跳移总体, 靠近悬浮总体的亚组指示了递变悬浮总体。

最后求得正交因子得分矩阵 (表 3), 其指示了三因素在各样品中所占比重, 得分绝对值愈

表 3 正交因子得分矩阵及沉积环境

Table 3 Quadrature component matrix

层号	因素 I	因素 II	因素 III	搬运方式	水动力
1	0.6093	- 0.1746	- 0.1306	滚动牵引为主	强
2	- 0.4242	0.0456	0.5222	滚动与悬浮共存	中
3	3.6105	- 0.2479	0.06539	滚动牵引为主	强
4	0.3681	0.3762	- 0.2633	三种方式共存	中
4	- 0.8490	0.2419	1.8228	悬浮为主, 少量流动	中
5	- 0.5223	0.0239	2.7683	均匀悬浮为主	中
6	- 0.8959	- 0.0652	- 0.8362	滚动与悬浮共存	强
7	- 0.6339	- 1.3243	- 1.0444	悬浮为主	弱
8	- 0.2746	1.1762	0.9787	跃移与悬浮为主	中
9	- 0.4638	0.4838	- 1.8441	跃移与悬浮为主	中
10	- 0.1469	- 2.1474	0.4046	跃移与悬浮	弱
11	1.0972	0.0946	- 0.7597	滚动与悬浮为主	中
12	- 1.3186	0.8662	- 1.6695	滚动与悬浮共存	中
12	- 0.1519	- 2.2269	0.2122	悬浮为主, 少量跃移	弱
13	- 0.1042	2.8829	- 0.2269	滚动与悬浮	中

大, 则指示该样品愈趋向该因素相应的搬运方式, 据此在表上列出了各层沉积物搬运方式。

总之, 因子分析应用于粒度资料整理使沉积环境分析走向定量化, 在大批资料处理中更显其优越性, 在一些与典型环境模式有别的沉积环境分析中利用因子分析整理资料是相当有效的。图 4 中据三主因素载荷所作的曲线, 由其值变化半定量地探讨了东洞各层沉积水动力强弱; R 型分析将各层沉积搬运方式进行了科学而简洁的探讨。

3 指数法分析的应用

指数法分析用于粒度资料整理为法国地质学家 Riviere 创立, 方念乔教授在研究恒河沉积扇时应用过这种方法^[6], 这种方法适合于细碎屑岩(物)分析。该方法核心是实测累积曲线逼近拟合幂函数 $Y = AX^N + B$ 表示的理论曲线, 以计算过程中所沿用的特征值 N 、 A 、 B , 来评价沉积物沉降时的水动力条件, 其中指数 N 、 B 是决定曲线形态最重要的参数。当 $N > 0$ 时表示载体速度和紊度降低时, 超负荷形成并沉降的沉积; 当 $N = 0$ 时, 表示水流条件趋于缓和的产物, 代表载体卸载过程的残余阶段沉积^[6]。据表 1, 在 BM PC/XT 机上进行曲线回归分析, 求得 N 值, 各样品曲线拟合度均达到 90% 以上, 故拟合曲线可靠。所计算剖面沉积物的 N 值绝大多数大于零, 说明剖面沉积为一种超负荷沉降形成的沉积, 其特征为漫洪、片流沉积。剖面第 12 层下部黑色淤泥层 N 值近于零, 为载体卸载过程的残余阶段沉积, 第 12 层沉积时处地下洞穴阶段, N 值特征指示其为漫洪沿隙贯入地下洞穴后的残余沉积, 反映低能环境。指数法分析侧重于分析沉积过程, 此方法与因子分析法相结合, 对沉积环境分析有一个全面的讨论, 充分显示了多元统计方法在沉积环境重建中的前景。本文应用此法, 由于样品

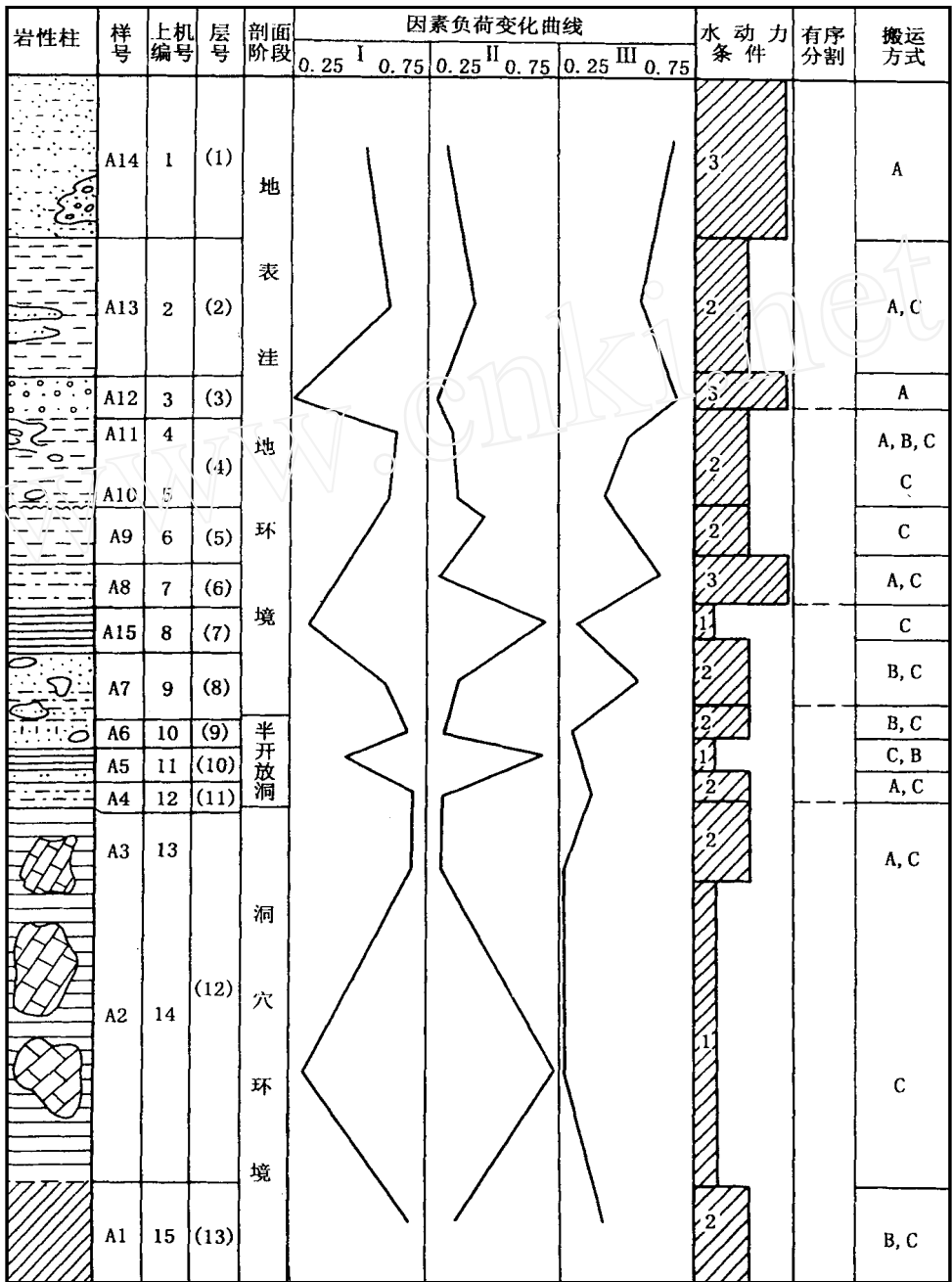


图 4 太平山北坡东洞沉积环境变化图

Fig. 4 The sedimentary environment diagram of the eastern cave at the Taipingshan north-slope

A. 滚动牵引搬运; B. 跳跃搬运; C. 悬浮搬运, 1. 水动力弱; 2. 水动力中等; 3. 水动力强

太少, 物源及沉积类型单一, 所求 N 值差距不太大, 但所解释的沉积过程与前面因子分析法分析的结果互相印证, 这说明其应用的有效性和意义。

4 太平山剖面沉积环境及演变

太平山北坡东地点洞穴堆积, 经以上多元统计法对粒度分析资料的整理, 综合剖面宏观沉积特征^[7], 剖面由下至上共分五段。第一段为第 13 层至第 12 层下部, 为漫洪静水沉积, 水能较弱; 第二段为第 12 层上部至第 9 层, 为片流洗刷夹滞留静水沉积, 水能中等偏弱; 第三段为第 8 层至第 7 层, 下部为冲沟沉积, 上部为沼地沉积, 水能由强变弱; 第四段为第 6 层至第 4 层, 为片流沉积, 水能中等偏强; 第五段为第 3 层至第 1 层, 为片流-暴流沉积, 水能较强的沉积。其中 1~2 段为洞穴环境 (13~9 层), 3~5 段属洼地环境 (9~1 层)。地下洞穴阶段又分封闭洞穴阶段 (13~12 层) 和半开放洞穴阶段 (11~9 层)。洼地阶段又分为沼地阶段 (8~5 层) 和碳酸盐沉积阶段 (4~1 层)。太平山东地点洞穴堆积, 由封闭洞穴环境演变为开放洼地环境, 剖面由下至上碳酸钙沉积比重加大, 沉积水动力由弱变强。由太平山东地点洞穴沉积环境分析可见, 多元统计应用于粒度分析资料整理, 使沉积环境分析走向量化, 弥补常规分析的不足, 为沉积环境分析开阔了良好的前景, 是一种行之有效的办法。

参 考 文 献

- 1 曹伯勋, 等 北京周口店地区发现距今 73~90 万年地层初步研究 中国区域地质, 1988, (4)
- 2 戴东林, 等 沉积岩(物) 粒度分析及其应用 北京: 地质出版社, 1976
- 3 任明达, 王乃梁 现代沉积环境概论, 北京: 科学出版社, 1981
- 4 方念乔 恒河深海扇东北区域第四纪气候和海平面变化对沉积作用的控制 现代地质, 1990, 4 (1)
- 5 曹伯勋, 田明中, 等 北京周口店地区新发现晚更新世洞穴地层 中国区域地质, 1988, (1)

APPLICATION OF THE MULTIFACTORIAL STATISTICS TO THE RECONSTRUCTION OF THE QUATERNARY SEDIMENTARY ENVIRONMENT

Zhao Zhizhong

Tian Mingzhong, Cao Boxun, Chen Lianfang

(Institute of Geomechanics, CAS)

(China University of Geosciences)

Abstract The size analysis is an important method in discussing sedimentary environment. There are two important factors in arranging the size information. One is to preprocess samples, and the other is to choose the experiment method. The general arrangement of the information is the basis of analyzing the sedimentary environment, and now the arrangement by a multifactorial statistical method is necessary. The eastern cave at the Taipingshan north-slope is the most complete early Pleistocene cave section in Zhoukoudian. The sedimentary character is analyzed according to the size analysis method. Not only the early Quaternary sedimentary environment in the area is discussed accurately, but also one good example in quantitative sedimentary environment analysis is presented.

Key words Zhoukoudian; Early Pleistocene; Taipingshan north-slope cave; sedimentary environment; multifactorial statistics