

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

泥河湾层古环境演变分析模式

岳 军

(中国地质科学院天津地质矿产研究所)

文启忠

(中国科学院贵阳地球化学研究所)



本文以泥河湾古湖小渡口剖面为例,选取指示古环境的特征标志: CaCO_3 、 $\text{C/P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 、pH 值、Eh 值,进行几种统计数学模型分析,以便筛选变量,确定定量性指标。并结合其他因素,探讨其古环境演变特征。通过分析:泥河湾层在冷的气候条件下,往往以还原作用为主,介质 pH 值为偏碱性。第三系、第四系的界线可能在第 13 层,此界线与古地磁的松山反向极性世—高斯正向极性世界线 (M/G 界线) 相一致,年代约 2.48Ma,并与其它项界线大致吻合。地球化学带 I 包括冷带 1;带 II 包括冷带 2、3;带 III 包括冷带 4;带 IV 包括冷带 5。

泥河湾层以它沉积的连续性,地层出露的完整性(早更新世、中更新世、以致可能延续到晚更新世^[1])以及所含生物化石的丰富性而闻名于世,一直被中外有关学者所注重^[2-4]。我们将进行过多学科研究的小渡口剖面(位于河北省阳原县化稍营镇小渡口村南 0.5km,濒临桑干河南岸,该剖面厚约 146.2m,自下而上大致可分 41 层,除 28 层是黄色砂之外,其余各层大多数为杂色粘土质粉砂、粉砂、粉砂质粘土、粘土等交互成层)视为更新世地层的层型剖面。为此,曾以各种方法手段,从不同角度如:古脊椎、微体及软体动物、孢粉、沉积薄片、重砂、粒度 ($\bar{M}_z = 6.47$)、比重 ($\bar{D} = 2.70\text{g/cm}^3$)^[5]、粘土矿物、光谱、化学分析以及磁性地层分析等,对该剖面进行分析研究,为揭示泥河湾层更新世以来的古气候、古环境及其第三系、第四系界线,积累了大量的资料和分析数据,为建立相应的模式(图 1)奠定了基础。现以小渡口剖面为例,选取指示古环境的特征标志,如: CaCO_3 、 $\text{C/P}_2\text{O}_5$ 、pH 值、Eh 值、 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 进行逐步回归分析、聚类分析、最优分割和相关分析^{[5][2]}进而筛选变量,确定定量性指标,试图探讨泥河湾层的古环境,氧化—还原环境和介质酸碱度的演变特征。

1. 逐步回归分析

将 CaCO_3 、 $\text{C/P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 、pH 值、Eh 值分析数据,分别以 CaCO_3 、 $\text{C/P}_2\text{O}_5$ 和 pH 值作因变量进行计算,从而得出相应的回归方程,以便研究分析因变量和自变量的相关关系。

本文 1989 年 7 月收到,1990 年 1 月改回,萧品芳编辑。

1) 天津冶金地质研究院,张伯彦工程师测试。

2) 蒋明耀副研究员协助电算处理。

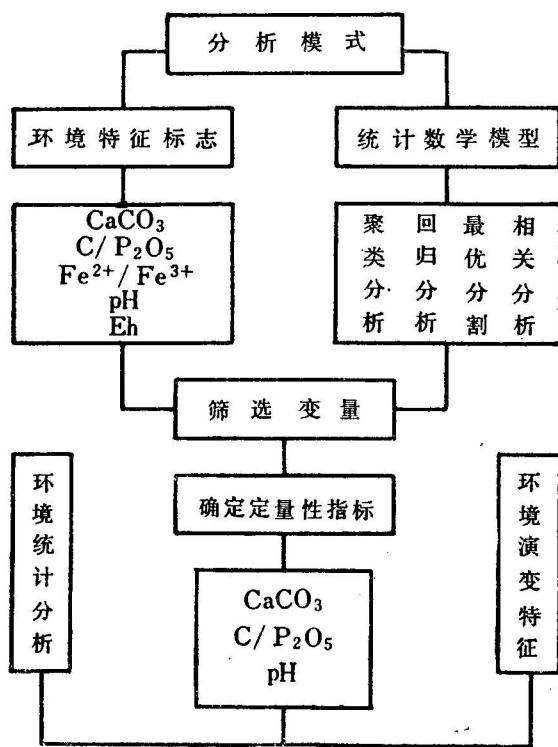


图 1 古环境演变分析模式

Fig. 1 Analytic model of paleoenvironmental evolution

当引入剔除变量的临界值: $F_1 = F_2 = 4$ 时

$$\text{CaCO}_3 \text{ (含量)} = 13.226 + 2.967 \text{ C/P}_2\text{O}_5 \text{ (含量)}$$

$$F_1 = F_2 = 4$$

$$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+} \text{ (含量)} = 43.73 - 0.055 \text{ Eh 值(含量)}$$

当临界值降低到 1.5 时 ($F_1 = F_2 = 1.5$) 才引入 $\text{C/P}_2\text{O}_5$,

$$\text{pH 值} = 8.578 - 0.105 \text{ C/P}_2\text{O}_5 \text{ (含量)}$$

以上 3 个方程式: CaCO_3 与 $\text{C/P}_2\text{O}_5$ 成正相关。 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 与 Eh 值成负相关; pH 值与 $\text{C/P}_2\text{O}_5$ 成负相关。分析出的结果,与地质作用的原理特征基本符合。

2. 聚类分析

本文采用的是 R 型分析,通过每个变量的分析数据,用以研究变量之间的聚类过程。将 CaCO_3 、 $\text{C/P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 、Eh 值, pH 值进行电算,相似指标为相似系数 $\cos \theta$ 。根据谱系图 2,取相似系数 0.117 为阈值。于是,划分出两大类, $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 、Eh 值为一类,相似系数为 0.842。 CaCO_3 、 $\text{C/P}_2\text{O}_5$ 、pH 值为一大类,相似系数为 0.289,虽然其相似系数不大(0.117—0.289),但也不可忽视。对于第四纪复杂多变的地质因素,能够为之提取某些信息,已经客观地反应了它们之间的内在联系及其地质作用,具有一定的分析研究意义。

3. 最优分割分析

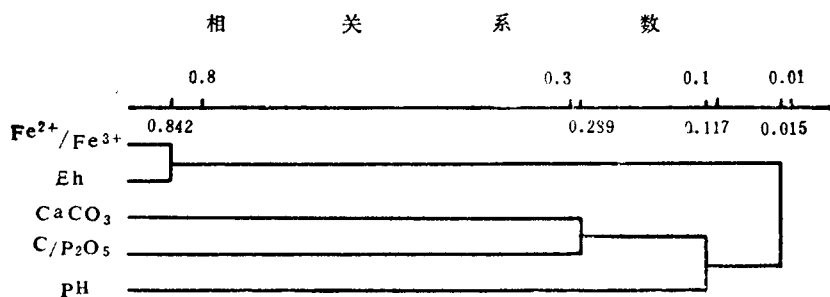


图 2 R-型聚类分析谱系图

Fig. 2 Pedigree chart of R-type cluster analysis

根据逐步回归分析和聚类分析结果,将 CaCO_3 、 $\text{C/P}_2\text{O}_5$ 、 pH 值,分别进行最优分割计算。

(1) CaCO_3 : 许多研究结果表明, CaCO_3 含量变化与古气候之间有密切的关系,即 CaCO_3 含量的增高与气候偏冷有关^[6-14]。为了慎重起见,在应用 CaCO_3 指标的过程中,对于 CaCO_3 的测试方法进行了考证,因为样品测试的准确度,将直接影响应用的效果。比如,样品中可能存在其它形式的钙,如 CaSiO_4 、 CaSO_4 等,为此,采取了“排硅硫方法”¹⁾的测试,基本保证了分析数据的准确性。同时,通过 43 个沉积薄片,研究 CaCO_3 的各种赋存状态,对照分析鉴定的结果证实, CaCO_3 具有古气候标志的意义。为了防止指标的单一性,将指示气候冷暖变化的灵敏指标,古孢粉曲线^[15]与 CaCO_3 含量曲线相对照,从中发现其变化趋势基本一致(图 3)。 CaCO_3 几个突出的含量高值,恰与孢粉曲线中冷的大的波峰相对应。 CaCO_3 含量偏高,反映冷(湿冷)的环境所在层位的孢粉组合,都以云杉(*Picea*)、冷杉(*Abies*)和松(*Pinus*)为主; CaCO_3 含量偏低,反映暖的环境所在的层位落叶阔叶树花粉相对增加。

现将 CaCO_3 含量进行最优分割(2—15 类),取得分割界线(图 3)。将计算出的每一界线内 CaCO_3 含量均值与剖面均值相比较,界线内的含量均值大于剖面均值,相对的为偏冷带;反之为偏暖带。13—17-1 号样为冷带 1。大致对应于南沟冷期^[16]及孢粉带 III^[17]。19-2—20-2, 25-3—26-1, 31-1—34, 38—39-2 号样,分别为冷带 2, 3, 4, 5。38 层虽没有出现界线(以虚线表示为推测界线),但 CaCO_3 含量有增高的趋势(略低于剖面均值,而相对高于其上下带),而孢粉也显示出冷的波动。此层相对应的层位(马兰黄土之下)发现冻融褶曲^[18]。由此将 38—39 层推测为一冷带。从上述分析得出,5 个明显的冷带和相对 6 个暖带(图 3, 上数图例 3 为冷带,图例 4 为暖带)。将 CaCO_3 的分割界线与孢粉的分带界线相对比,基本一致。其中有 5 条界线互相吻合(17-1, 20-2, 26-1, 31-1, 39-2 号样),3 条界线相接近。只有 19-2, 35-1 号样的界线是笔者根据其他相应界线得出的推测界线(以虚线示之)。 CaCO_3 与孢粉划出的冷、暖带大致对应。从孢粉指示气候的可靠性,而验证了 CaCO_3 指标的可信性。因此, CaCO_3 含量变化是古气候演变的重要指示标志,基本

1) 该方法由李克志高级工程师建立。

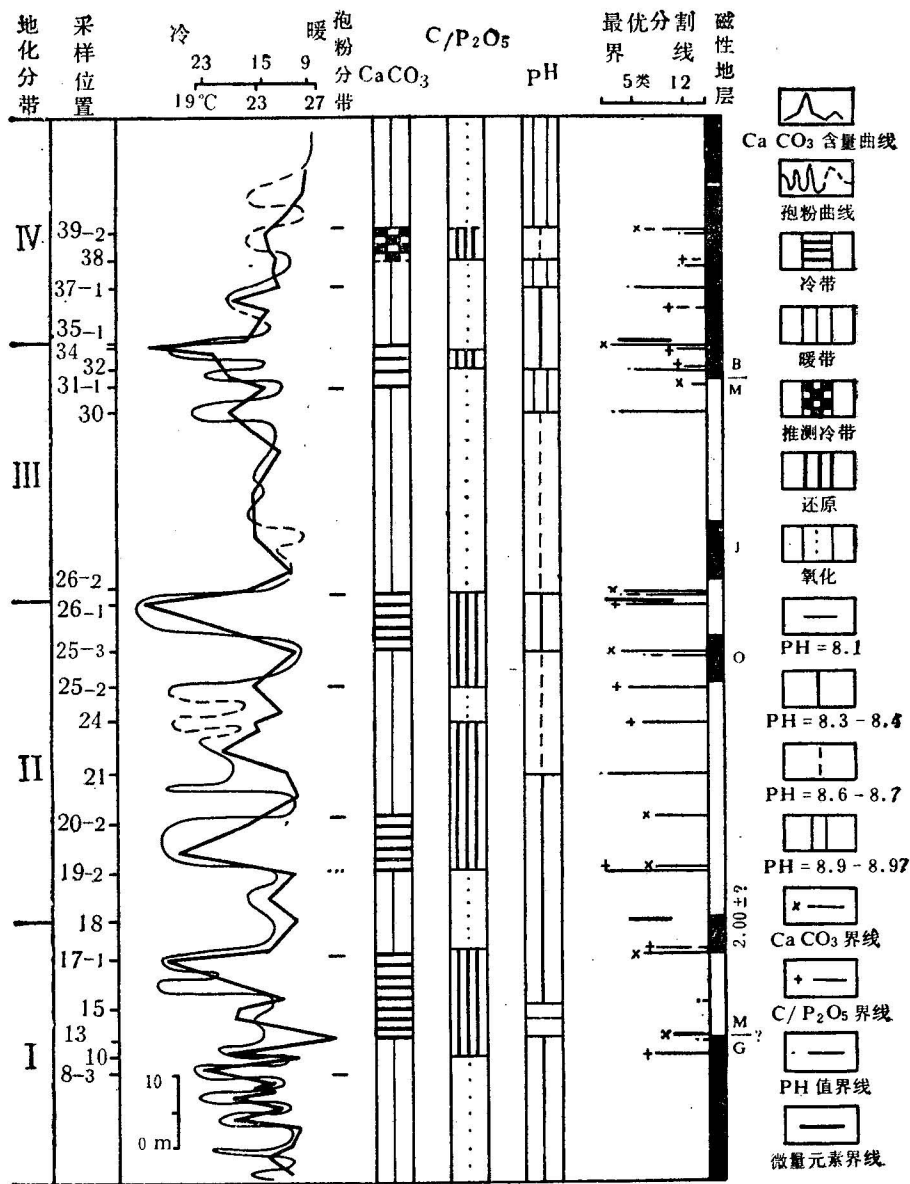


图 3 泥河湾层古环境特征

Fig. 3 Characters of paleoenvironment in Nihewan Beds

可以应用于冷暖气候带的划分。

(2) C/P_2O_5 : 有机碳是表示有机质多少的重要指标。因此,在研究有机质的多少时,往往用有机碳的含量来表示。一般来说,还原环境有利于有机质的保存。P 是有机体中不可缺少的一种元素,是湖水中主要的生物元素之一,它与有机质关系密切。在氧化状态下,5 价的 P 比较稳定, P_2O_5 会沉积到沉积物中,而当还原(缺氧)的状态下, P_2O_5 便会从

沉积物中溶解出来。因此, C/P_2O_5 值可作陆相沉积物中氧化环境与还原环境的一种标志^[19,20]。从泥河湾古湖的实际材料分析中,基本上证实了这一理论的正确性和实用性。

C/P_2O_5 、 Fe^{2+}/Fe^{3+} 、 Eh 值的理论意义是相同的,但是将 Fe^{2+}/Fe^{3+} 、 Eh 值的分析数据进行反复分析,无论逐步回归分析,还是聚类分析都与 C/P_2O_5 无关,和气候指标 $CaCO_3$ 也未能归在一起聚为一类。并且,对 Fe^{2+}/Fe^{3+} 进行最优分割,分析计算后的结果欠佳。因而推测,在测试分析中的某个环节可能存在一定的误差。或许是,很难较为准确分离 FeO 、 Fe_2O_3 在地质作用过程中的含量变化,使得在应用中效果不显著(需要今后进一步研究探索),所以,采用 C/P_2O_5 值⁹⁾。将 C/P_2O_5 值进行最优分割,求得界线内的均值,将界线内的均值与剖面均值相比较,以大于或等于剖面均值为还原环境,界线内的均值小于剖面均值为氧化环境。10—17-2,19-2—24,25-2—26-1,32—34,38—39-2(第39层虽没有出现界线,但 C/P_2O_5 值大于剖面均值,与其他指标对应分析,亦有反应,故此层的界线以虚线示之)号样为还原环境,其余层段为氧化环境。从图3可以看出, $CaCO_3$ (抱粉)的冷、暖带分别与 C/P_2O_5 的还原环境、氧化环境大致相对应。

(3) pH 值:介质的酸碱度 pH 值也是反映沉积物形成时的古环境一种标志^[21]。pH 值用玻璃电极电位法测定,水土比为 5:1,测得的 pH 值为 8.00—9.10⁹⁾,剖面均值为 8.49,属于偏碱性。将 pH 值进行最优分割,计算出各个界线内的均值,将其均值再进行归纳分析,划出了 4 个相对大小的数组: 8.10; 8.30—8.40; 8.60—8.70; 8.90—8.97。使得依次组间级差为 0.2,组内大小级差为 0.1,将 4 个数组分别表示在图3上。1—13, 15—21, 25-3—26-1, 32—37-1号样, pH 值为 8.30—8.40; 21—25-3, 26-1—30, 38—39-2号样, pH 值为 8.60—8.70; 30—32, 37-1—38, 39-2—顶部, pH 值为 8.90—8.97; 13—15号样, pH 值为 8.10。从图3可以看出,按照上述方法划分得出数组的 pH 值界线,与其他各项界线有较大的一致性。其中10条界线有 7 条界线与其他各项界线吻合或接近。从而说明其他环境的变化, pH 值也在其相应的层位随之变化,并同时(或先后)出现界线。因此, pH 值数组间的级差是环境改变的反应。表明了其划分方案的基本可行性。

为了确切指出,界线样品在环境演变中的作用,根据图3,将(样品)各项对应界线的频率进行统计分析(表1),从图3和表1中可以看出,环境标志的变化不是孤立的,也不是互不相关的。各项对应界线频率的增高(表1中第26层,25层,31-1—32,8-3—13,37-1—38,17层以及34—35-1,39-2号样等)是环境重大改变的指示标志,也是层样对于各项界线作用大小的量度。表1的分析结果,为探索古环境改变的趋势性(同时性)界线,提出了量变的方法。

4. 相关分析

为了进一步探索古气候环境与氧化—还原环境的相互关系。将 $CaCO_3$ 、 C/P_2O_5 取得的最优分割界线,分别计算出各个界线内均值,然后进行相关分析。经过上述计算途径和方法上的改变,就使得在聚类分析中相关系数不大的 $CaCO_3$ 、 C/P_2O_5 显示出了密切的相关性。将 $CaCO_3$ 与 C/P_2O_5 进行相关分析, $CaCO_3$ 为自变量, C/P_2O_5 为因变量,相关系数为 0.85,方程为: $C/P_2O_5 = -0.617 + 0.85CaCO_3$ 。由此,为环境指标的统计分析提

1) $C(Corg)$ 数据由李克志高级工程师(及李秀华工程师)测试; P_2O_5 (全)数据由地质实验室测试。

2) 其数据由天津地质矿产局史继东高级工程师测试。

表 1 (样品)各项对应界线频率统计

Table 1 Statistics of boundary frequencies in relation to various items of analysis

项 目	样 品 号 界 线 频 率	8-3	10	13	15	17-1	17-2	18	19-2	20-2	21	24	25-2	25-3	26-1	26-2	30	31-1	32	34	35-1	37-1	38	39-2
CaCO ₃				+		+			+	+				+	+			+		+			+	+
C/P ₂ O ₅			+				+		+			+	+		+				+	+			+	+
pH				+	+						+			+	+		+		+			+	+	+
微 量 元 素								+							+						+			
孢 粉		+				+			+	+			+		+			+				+	+	+
磁 性 地 层				+			+	+						+		+			+					
频 率 数		5	1	4	2	3	2	1	1	5	6	1	5	4	4	(1)	4							

供了线索。

5. 泥河湾层古环境特征的统计分析

环境特征标志的相关性(聚类分析、逐步回归、相关分析),对应界线频率的增高性,及对应界线频率增高的普遍性,是环境特征统计分析的基础。为了探索古环境演变的趋势性特征^[22],根据图3,将分析出的各个冷带,并与其相对应的环境,进行横向数理统计和概率统计,将横向数理统计的结果,再进行纵向数理统计,然后再进行概率统计。综合分析

表 2 泥河湾层古环境特征的统计分析

**Table 2 Statistical analysis of palaeoenvironment characters in the Nihewan
Beds (according to Fig. 3)**

环境特征 冷带 样品频率	还原	氧化	PH				横 向 概 率 统 计					
			8.1	8.3—8.4	8.6—8.7	8.9—8.97	还原	氧化	PH			
									8.1	8.3—8.4	8.6—8.7	8.9—8.97
5	2				2		+				+	
4	2	3		3		2	+	+		+		+
3	1			1			+			+		
2	2			2			+			+		
1	4		2	2			+		+	+		
纵向数理统计	11	3	2	8	2	2	纵横概率统计综合分析 冷—还原—PH (8.3—8.4)					
纵向概率统计	+			+								

纵横概率统计的结果,从而得出:泥河湾层在冷(带)的气候条件下,往往以还原作用为主, pH 值大致在 8.3—8.4 之间(表 2)。

6. 冷带与所处的地层界线及其磁性年代

笔者对小渡口剖面用微量元素曾进行最优分割计算,得出地球化学分带界线作为地层界线^[1]。现与磁性地层界线对照分析如下(图 3,自上而下):第 35 层(35-1 号样)大致接近于古地磁的布容正向极性世与松山反向极性世的界线(B/M 界线),年代约 0.73 Ma。26 层(26-1 号样)大致接近于古地磁的贾拉米洛事件(底界),年代约 0.97 Ma。18 层(18 号样)大致吻合于磁性年代界线的 $2.00\text{Ma} \pm (?)$ ^[23,24]。18 层以下微量元素虽没有出现界线,但在 13 层出现了冷期(冷带 1)。第四纪如果以冷期开始作为更新世底界,同时,将产于泥河湾层下部的含有较多第三纪残余哺乳动物,与共生的“泥河湾动物群”作为第三纪与第四纪的过渡^[75],那么第 13 层可能为第三系—第四系的界线层,磁性地层年代约 $2.48\text{Ma} \pm (?)$,即松山反向极性世与高斯正向极性世的界线(M/G 界线,笔者根据相应磁性地层资料分析)。从图 3 可以看出,地球化学带 I(1—18 号样)包括冷带 1;带 II(18—26-1 号样)包括冷带 2、3;带 III(26-1—35-1 号样)包括冷带 4;带 IV(35-1 至顶部)包括冷带 5。

本文在成文过程中曾得到刘东生、周慕林研究员、秦正永副研究员的指导和帮助,在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] 岳 军、蒋明娟, 1986, 用多元统计分析方法对泥河湾层的划分与对比。海洋地质与第四纪地质, 第 6 卷, 第 2 期, 第 81—94 页。
- [2] Barbour, G. B., 1924, Preliminary observations in the Kalgan area. Bull. Geol. Soc. China, Vol. 3, No. 2, pp. 153—157.
- [3] Barbour, G. B., 1925, The deposits of the Sang Kan Ho valley. Bull. Geol. Soc. China, Vol. 4, No. 1, pp. 53—55.
- [4] Barbour, G. B., Licent, E. and Teilhard, P., 1927, Geological study of the deposits of the Sangkanho basin. Bull. Geol. Soc. China, Vol. 5, No. 3—4, pp. 263—278.
- [5] 於崇文等, 1978, 数学地质的方法与应用。第 69—114 页。冶金工业出版社。
- [6] Arrhenius, G., 1952, Sediment cores from the east pacific. Reports of swedish Deep Sea Expedition, Gotebory. Vol. 5, pp. 5—227.
- [7] Wen Qizhong, Diao Guiyi and Sun Fuqing, 1985, Geochemical characteristics of Loess in Luochan section, Shaanxi province. Loess and the Quaternary, Akademiai Kiado Budapest, pp. 65—77.
- [8] Berger, W. H., 1973, Deep-Sea Carbonates: Pleistocene dissolution cycle. Jour. Foram. Research, Vol. 4, pp. 187—195.
- [9] Borole, D. V., Kameswara Rao, K., Krishnamurthy, R. V. and Somayajulu, B. L. K., 1982, Late quaternary faunal change in coastal Arabian Sea Sediments. Quaternary Research, Vol. 18, No. 2, pp. 236—239.
- [10] Damuth, J. E., 1975, Quaternary climatic changes as revealed by calcium carbonate fluctuations in western equatorial Atlantic sediments. Deep Sea Research, Vol. 22, pp. 725—743.
- [11] Hays, J. D., John Imbrie and Shackleton, N. J., 1976, Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the Ice Ages. Science, Vol. 194, No. 4270, pp. 1121—1132.
- [12] Thompson, P. R. and Sciarriello, J. R., 1978, Planktonic foraminiferal biostratigraphy in the Equatorial pacific. Nature. Vol. 276, No. 2, pp. 29—33.
- [13] 卢演侑, 1981, 黄土地层中 CaCO_3 含量变化与更新世气候旋迴。地质科学, 第 2 期, 第 122—130 页。
- [14] 刘清泗、程志刚, 1985, 根据第四纪沉积物中碳酸钙含量及孢粉组合的变化探讨北京平原地区古气候的演变。中国第四纪冰川冰缘学术讨论会文集, 第 198—203 页。科学出版社。
- [15] 罗宝信、王毓钊, 1984, 河北第四纪孢粉与气候地层的探讨。第二十七届国际交流地质学论文集 1, 第 123—127 页。地质出版社。

- [16] 周昆叔、梁秀龙、严富华、叶永英, 1983, 从泥河湾层花粉分析谈南沟冷期等问题。地质科学, 第1期, 第82—89页。
- [17] 刘金陵, 1980, 泥河湾组的孢粉组合及其地质时代。科学通报, 第25卷, 第4期, 第177—179页。
- [18] 吴子荣、高福清, 1982, 泥河湾组顶部冻融变形的机制分析和时代探讨。史前地震与第四纪地质文集, 第143—148页。陕西科学技术出版社。
- [19] 南京大学地质学系, 1979, 地球化学。第355—357页。科学出版社。
- [20] 中国科学院兰州地质研究所等, 1979, 青海湖综合考察报告。第140—189页。科学出版社。
- [21] 任明达、王乃镗, 1981, 现代沉积环境概论。第70—76页。科学出版社。
- [22] 夏正楷、刘锡清, 1984, 泥河湾层古地理环境的初步认识。海洋地质与第四纪地质, 第4卷, 第3期, 第101—110页。
- [23] 李华梅、王俊达, 1982—1983, 泥河湾层的磁性地层学研究。中国科学院地球化学研究所年报, 第182—184页。贵州人民出版社。
- [24] 陈茅南主编, 1988, 泥河湾层的研究。第117—123页。海洋出版社。
- [25] 汤英俊, 1980, 河北蔚县早更新世哺乳动物化石及其在地层划分上的意义。古脊椎动物与古人类, 第18卷, 第4期, 第314—322页。

ANALYTICAL MODELS FOR THE PALAEOENVIRONMENTAL EVOLUTION IN THE NIHEWAN BEDS

Yue Jun

(Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources)

Wen Qizhong

(Guiyang Institute of Geochemistry, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, the evolutionary characteristics of palaeoclimate and oxidation-reduction conditions as well as acidity-alkalinity environments are discussed by means of the step-regression, cluster, optimal partitioning and correlative analyses of CaCO_3 , $\text{C/P}_2\text{O}_5$, $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, pH values and Eh values, taking the Xiaodukou section in the Nihewan basin as an example. CaCO_3 , $\text{C/P}_2\text{O}_5$ and pH values were calculated respectively by using the optimal partitioning method. Thus five cold zones and six warm zones and five reduction and six oxidation zones have been distinguished; and then the inductive method was used to produce four numerical groups: 8.10, 8.3—8.4, 8.6—8.7 and 8.9—8.97. The above-mentioned results were obtained respectively based on the CaCO_3 content, $\text{C/P}_2\text{O}_5$ and pH values. From Fig. 3 (Table 1) it can be seen (Table 2) that the Nihewan Beds formed mainly under reduction and slightly alkaline environments of the cold zone, with pH values of 8.3—8.4. The Fig. 3 shows that bed 35 is approximately near the boundary of the Brunhes and Matuyama polarity epochs, dated at 0.73 Ma; bed 26 is near the Jaramillo event (base), dated at 0.97 Ma. Bed 18 was dated at 2.00 Ma B. P. (?), coinciding with the magnetostratigraphic age boundary. Bed 13 may be the Pleistocene-Pliocene boundary bed, dated at 2.48 Ma B. P. (?) age. Thus geochemical zones I, II, III and IV include cold zones 1, 2 and 3, 4 and 5, respectively.

作 者 简 介

岳 军,1949 年生。1975 年毕业于长春地质学院水文地质及工程地质系。现任天津地质矿产研究所第四纪研究室助理研究员。多年来主要从事第四纪沉积地球化学的研究。通讯地址:天津市河东区大直沽 8 号路 4 号。