

元素地化—数理统计法在松南 陆相沉积盆地分析中的应用

王璞瑁 刘招君 刘万洙 杜小弟

(长春地质学院能源系)

提要 对松辽盆地南部的 W3 井和 SN-15 井的三百余块泥岩样品的 11 种常量元素及 16 种微量元素进行了分析。对测得结果进行数理统计处理,用以划分地层、分析沉积旋回和研究沉积相。分层结果与岩屑录井及电测曲线分层结果相互验证,互为补充。结论认为泉四段顶部的绿色泥岩实应归属青一段,并确定姚家组中段一套红绿互层的泥质岩为浅湖泥坪环境沉积产物。

关键词 元素地球化学 数理统计 地层划分 沉积旋回 沉积相

第一作者简介 王璞瑁 男 30岁 讲师 分析化学学士 沉积学硕士

本文试图用岩石(岩心、岩屑均可)的成分分析结果,经计算机统计处理后研究地下地质情况——划分地层、分析沉积韵律旋回性和研究沉积相。并希望由此能拓宽岩屑资料的应用范围。

一、元素地球化学指标的选择

1、划相指标的选择

J₃-K₁期中酸性、中基性火山岩是松辽盆地拗陷期的重要沉积物源。基于这一特点并结合实际应用效果,本文着重选择那些在内生条件下密切共生、在表生条件下地球化学性质不同而发生分异的元素对的比值,做为划分沉积相的指标。因为两元素的初始比值一定以及某一沉积时期同一沉积区的物源特点相同,所以元素比值的横向变化就主要是由沉积环境不同所引起的。例如, Mn 与 Fe 的地球化学参数相近,是典型的类质同象对,在内生岩石中呈同步消长关系。在各类岩浆岩中 Mn/Fe 值分别为:超基性岩 0.016;基性岩 0.023;中性岩 0.021;酸性岩 0.02 (刘英俊等, 1984)。可见,从基性岩到酸性岩 Mn/Fe 值变化很小,以此做为指相参数可较好地克服母岩岩性的干扰。另一方面, Mn 与 Fe 在表生条件下表现出很不相同的地球化学性质,从而导致它们在不同沉积相带的分异。图 1 是模拟自然条件下 Fe 与 Mn 由于沉积介质的物理化学条件不同而发生分异的示意图。相似地,本文选取了 Ti/V、Ni/Co、Sr/Ba、Mg/Al、Ca/Mg、Mg/Fe 等元素对比值做为指相参数。

2、划分地层及沉积旋回指标的选择

岩石化学成份不仅可以反映岩性而且可以反映沉积环境。因此,恰当地选取元素地化参数来划分地层,所得结果比纯岩性分层或测井曲线分层结果更合理更客观。本文采用变量筛选法选择分层及划分沉积旋回的指标。具体做法是:选取 50 个已知岩性和沉积环境(应用现有沉积相研究成果)的样品,测算其中 11 种常量元素、16 种微量元素,以及上述 7 个划

相指标 (Si、Al、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、Ti、Mn、Ca、Mg、Na、K、P; Ba、Be、Cd、Co、Cr、Cu、La、Mo、Ni、Pb、Sr、V、Y、Zn、S、C; 以及 Mn/Fe、Ti/V、Ni/Co、Sr/Ba、Mg/Al、Ca/Mg、Mg/Fe), 用以上参数的各种组合形式 (变换剔除部分变量) 进 Q 型聚类分析, 选取其中实际情况吻合最好的一组参数作为分层和划分沉积旋回的指标 (此时相同岩性、相同沉积环境的样品聚到一类), 最后确定用 Al、Fe、Ca、Mg、Mn、P、Ti、Ba、Co、Cr、Cu、Ni、Sr、V、Y、Zn、S、C、及 Mn/Fe、Ti/V、Ni/Co、Sr/Ba、Mg/Al 等 23 个参数作为分层和划分沉积旋回的指标。

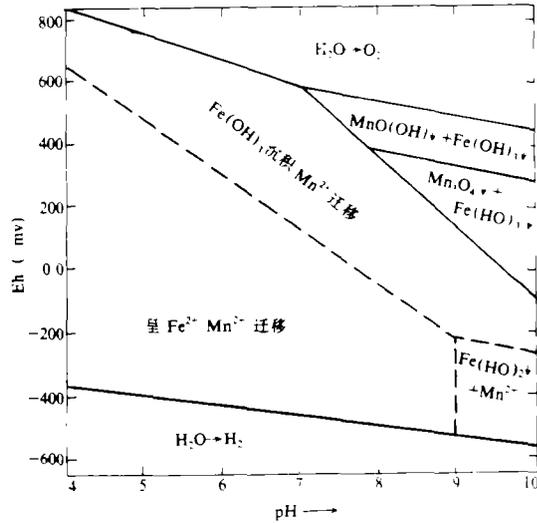


图1 Fe、Mn 随介质条件变化分别沉积与溶解示意图 (据靳恩, 1968, 修改)

Fig.1 Migration or precipitation of Fe and Mn under different sedimentary medium
(from Jin, 1968, modified)

二、划分地层

1. 方法概述

现以 W3 井为实例加以说明, 沿该井整个钻探剖面自上而下系统采样 (等距离加密采样, 样距在 5m 以内), 测算各样品的上述 23 个分层指标, 用计算机对这 23 个参数变量进行样品间的 (Q 型) 聚类分析统计计算结果得到 8 种基本 (岩石) 类型, 它们分别为:

- A. 半深、深湖相灰色、褐色泥岩、页岩
- B. 深湖相深灰、灰黑色泥岩、油页岩
- C. 滨浅湖相斑杂色粉砂质泥岩
- D. 浅湖泥坪相紫红—灰绿色泥岩
- E. 滨湖相紫灰、灰紫色泥质粉砂岩
- F. 冲泛平原相紫红色粉砂岩
- G. 滨浅湖相灰绿色粉砂质泥岩
- H. 滨浅湖相杂色泥岩

根据这 8 种岩性在地层剖面中出现的次序可计算出马尔柯夫链式转移矩阵 (景毅等, 1984) 表 1。

表 1 马尔柯夫链式转移矩阵

Table 1 Markov chain transition matrix

		到							
		A	B	C	D	E	F	G	H
从	A	.00	.04	.03	.01	.02	.01	.03	.00
	B	.05	.00	.03	.00	.00	.02	.00	.00
	C	.02	.03	.00	.04	.04	.00	.01	.03
	D	.00	.02	.03	.02	.03	.01	.00	.04
	E	.04	.00	.05	.01	.00	.00	.00	.04
	F	.00	.00	.00	.02	.00	.00	.02	.03
	G	.01	.00	.01	.00	.01	.02	.00	.00
	H	.01	.02	.02	.04	.04	.00	.02	.03

转移矩阵中出现一些小概率值, 它们代表地质历史中出现的小概率事件, 代表该地层剖面中一种少见的转移关系。作者认为它们所指示的是一些较大的区域性地质事件, 如沉积间断, 沉积环境的显著变化、沉积补偿关系改变等等。所以应以此作为地层分层界线。据此, 该钻井剖面应有 9 个分层界线。它们在地层中的转移关系分别为: A→D、A→F、C→G、D→F、E→D、G→A、G→E、H→A。

2. 分层结果

表 2 为本法分层结果与岩心录井及测井曲线分层结果的对比。由表 2 可见, 本法分层结果多数与岩心录井及电测曲线法分层结果相吻合。从而可以说明, 元素地化—数理统计法可以作为一种独立的划分地层的方法。本法所得青山口组与泉头组的界线比原界线下移二十多米, 把泉口段顶部以灰绿色为主的泥质岩石划归到青一段, 作者由此认为, 从岩石化学的角度, 以往常称之为泉四段顶部的“绿帽子” (绿色泥岩) 实应归属青一段。

三、分析沉积旋回

1. 方法简述

根据聚类分析的计算结果, 依照沉积层序自下而上各种基本 (岩石) 类型的叠置关系, 建立起可能概率矩阵 E_{ij} (刘宝措等, 1985) 和转移概率矩阵 P_{ij} (前述马尔柯夫链式转移矩阵的转置矩阵), 两矩阵相减得到差数数值矩阵 (矩阵形式同表 1)。

差数数值矩阵中的概率值, 是沉积层序中各种基本岩性间实际出现的转移概率与理论上应出现的概率值之差。负值表示实际出现的频率小于理论值。正值表示实际频率大于理论概率值, 说明这种地层转移关系是该沉积层序中经常出现的事件, 地层出现了有规律的重复, 即具有韵律性或旋回性特征。故应以差数数值矩阵中的正极大值来划分沉积韵律及沉积旋回。

表2 元素地化法分层与其它方法分层结果对比

Table 2 Comparison of stratigraphic division results of element geochemistry with other methods

组	段	岩芯录井 分层界线 (m)	电测曲线 分层界线 (m)	本法分层界线	
				转移关系	井深 (m)
嫩江组	N ₂	73.5	未分	G→E	60-70*
	姚家组			H→A	132.5-133
N ₁		133	136.5	E→D	209-212
	Y ₂	235	未分	C→G	334-335
Y ₁	口青 组山	334.5	335	G→B	393.5-402
	Q ₂ ³	399	400	G→A	454.7-462
	Q _n ²	未分	455	A→D	523.8-526.8
Q _n ¹	泉头组	495.5	500	D→F	570-580
	Q ⁴	586.2	583	A→F	857-869
	Q ³		未分		

2. 沉积旋回分析结果

在上述差数数值矩阵中, 选取概率值 > 0.1 的差减数值作马尔柯夫式相关结构图。图 2 为相关结构图及其相应的沉积旋回分析图。图中示出该沉积层序中的主要沉积韵律为 A = B 型, 它相当于暗色泥岩的频繁互层, 主要沉积旋回为 F → G → A → B → C → E 型, 相应的岩性旋回为: 由紫红色为主的粉砂质岩石到暗色泥岩韵律层到紫红色粉砂质岩石。W3 井钻穿层位自下而上为泉头组 → 青山口组 → 姚家组 → 嫩江组, 正好相当于松辽盆地拗陷期的两个二级复合水进 → 水退沉积旋回 (钟其权等, 1985)。上述沉积旋回的分析结果正反映了这种沉积特征: 即下部紫红色粉砂质岩石为旋回下部的水进沉积层序, 其上的暗色泥岩韵律层反映最大水进期的稳定沉积, 顶部红色调为主的粉砂质岩石相当于二级复合旋回上部水退过程沉积产物。由此也说明, 用元素地化-数理统计法分析沉积层序的韵律旋回性可以得到符合客观实际的结果。

姚家组 泉头组

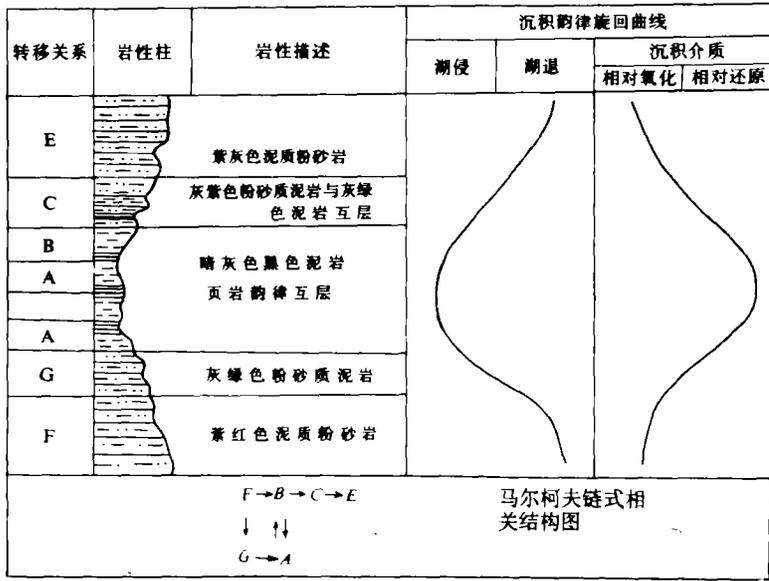


图 2 相关结构图及沉积旋回解释图

Fig.2 Diagrams of the correlation pattern and sedimentary cycle interpretation

四、划分沉积相

元素地化法划分沉积相的首要条件是指相参数的分布规律必须主要受沉积环境控制，但事实上，沉积岩中元素的分布规律与岩石形成过程中的每个环节都密切相关。即从母岩性质、风化强度、搬运作用，沉积条件直至成岩后生作用的每一过程都会使岩石中各元素含量发生相对变化。然而，不同元素的地球化学性质不同，各环节对其影响的程度也就不同。所以合理选择地化指标，并适当加以处理，会强化沉积环境因素的影响进而达到划相的目的。本文选用元素对比值克服母岩岩性干扰；全部用泥质岩作为分析对象以降低风化强度的影响；选择成岩后生作用弱的井段以克服成岩后生变化使元素再分配的影响（此处成岩作用弱的主要标志是砂岩无再生加大结构、泥岩 $R^0 < 0.5$ ）。在参数数值的处理上，以往多用元素含量或其比值的绝对值或平均值来表示。本文对所选用的参数数值进行数理统计处理，然后用以划相。其结果的确定性有所提高，可以将各相带区别开来（表 3、表 4）。

长期以来人们似乎自觉地接受了这样一个传统观念，即红色岩类形成于汇水盆地以上，绿色岩石沉积于水下环境。姚家组中段发育了一套红绿互层的泥岩，按上述观点就很难确定其沉积相。针对这个问题，作者对姚家组中段的红色泥岩和绿色泥岩分别进行了系统采样分析，并对分析数据分别加以数学处理，表 5 列出了其中的主要结果。将表 5 与表 4 和表 3 对比可以看出，无论是绿色泥岩还是红色泥岩其元素地化特征主要与浅湖相的特征一致，个别参数（如 Sr / Ba-Mg 相关性等）具滨湖特征。表 5 红、绿层系之间的对比可以看出，它们

的主要区别在于: 绿层中 Mn 和 Sr 含量高, 而红层中 Sr 含量低 Ba 含量高。根据上述元素地化特征, 作者认为, 该红绿互层岩系均形成于浅湖泥坪环境。它们间的差异主要是二者沉积时的水介质条件稍有不同所致。绿色泥岩沉积时水介质的 pH 值高, CO₂ 含量高; 红色泥岩沉积时水介质的 pH 值和 CO₂ 浓度均较低。因为当水介质 pH 值高 CO₂ 含量高时, Mn 易形成 Mn₃O₄、MnOOH、MnO₂ 等难溶物沉积富集 (见图 1); Fe 易形成 Fe(OH)₂, 这些沉积物均呈绿色和褐色, 所以使岩石呈灰绿、褐灰色。由于 pH 值高, C₂ 浓度高, 使绿色泥岩中相对富 Sr 而贫 Ba, 因 Sr 在 CO₂ 高的介质中比 Ba 更易沉积 ($K_{sp}SrCO_3 = 1.1 \times 10^{-10}$; $K_{sp}BaCO_3 = 5.9 \times 10^{-9}$), 所以绿色泥岩中 Sr 和 Mn 相对富集。

表 3 各沉积相带元素分布特征

Table 3 Element distribution characteristics of different sedimentary facies

参 数	范 围		均 值								
	范围	均值	河流相	三角洲相	滨湖相	浅湖相	半深湖相	深湖相			
		偏差 σ									
Ti V	60-70		42-58		40-60		35-70		40-50		25-45
	X=63		X=55		X=50		X=50		X=45		X=35
	$\sigma=6.1$		$\sigma=11.1$		$\sigma=13.1$		$\sigma=5.5$		$\sigma=6.2$		$\sigma=7.2$
Sr Ba	0.37-0.7		0.3-0.7		0.3-0.75		0.33-0.81		0.35-0.82		0.5-1.2
	X=0.47		X=0.46		X=0.55		X=0.60		X=0.65		X=0.80
	$\sigma=0.07$		$\sigma=0.11$		$\sigma=0.15$		$\sigma=0.15$		$\sigma=0.19$		$\sigma=0.20$
$\frac{MgO}{TFe_2O_3}$	0.12-0.19		0.13-0.23		0.12-0.2		0.13-0.26		0.15-0.25		0.17-0.43
	X=0.17		X=0.178		X=0.17		X=0.02		X=0.21		X=0.22
	$\sigma=0.03$		$\sigma=0.04$		$\sigma=0.02$		$\sigma=0.03$		$\sigma=0.04$		$\sigma=0.04$
$\frac{MnO_2}{TFe_2O_3}$.007-.03		.01-.058		.012-.088		.013-.03		.011-.062		.012-.051
	X=0.015		X=0.022		X=0.034		X=0.02		X=0.024		X=0.021
	$\sigma=0.01$		$\sigma=0.02$		$\sigma=0.024$		$\sigma=0.007$		$\sigma=0.016$		$\sigma=0.008$
Ni Co	1.8-2.33		2.0-2.3		2.0-2.3		2.0-3.7		2.3-3.3		1.6-3.5
	X=2.1		X=2.1		X=2.3		X=2.5		X=2.7		X=2.4
	$\sigma=0.19$		$\sigma=0.14$		$\sigma=0.32$		$\sigma=0.42$		$\sigma=0.36$		$\sigma=0.62$

表 4 各沉积相带化学参数间的相关关系

Table 4 Correlations among the geochemical parameters of different sedimentary facies

相带 相关性 及回归曲线		滨湖相	浅湖相	半深湖—深湖相
变量 X	Y			
Ti / V-Co		强负相关*	不相关	负相关
CaO Mg-Ba		正相关	正相关	不相关
CaO MgO-FeO		强负相关	负相关	不相关—正相关
Sr / Ba-CaO		强正相关	正相关—不相关	不相关—正相关
$\frac{MnO}{TFe_2O_3} - Cu$		不相关—弱正相关	不相关	强负相关
Sr / Ba-MgO		正相关	不相关	正相关—不相关
$\frac{MnO}{TFe_2O_3} - Al_2O_3$		不相关	负相关	负相关—不相关

$|r'| > |t_{0.01}|$ 为强相关; $|r'| > |t_{0.05}|$ 为不相关;

$|r'| = |t_{0.01}| - |t_{0.05}|$ 为相关; $|r'| \approx |t_{0.05}|$ 为弱相关

五、结果讨论

1. 地化参数—统计分析法划分地层、分析沉积旋回, 在大段泥岩区具有独特作用 (此时测井曲线均呈低平状)。尤其在其它方法的分层结果有疑议时该方法应成为一种有效的补充手段。

2. 元素地球化学参数划相法是研究沉积相的一种有效方法。但应注意结合工作区的实际情况选用多个指相参数, 并以数理统计为基础。单凭个别几个数值就试图定出某某沉积相是很不可取的。

3. 与物探法相比, 元素地化法是直接获取地下地质信息的方法。虽说这种方法目前尚不十分成熟, 比如分层结果受所选分类参数的影响很大, 计算结果缺乏足够的稳定性, (划分沉积旋回结果的稳定性较好), 但本文意在起到抛砖引玉的作用。作者深信, 若将来能在这方面投入足够的精力和经费, 其效果定能与物探法相媲美。

表5 姚家组中段红色泥岩与绿色泥岩元素地化特征对比

Table 5 Comparison of elemental geochemical characters between the red and the green mudstones of the middle member of Yaojia Formation

地化特征 X	岩性 Y	绿色泥岩	红色泥岩
	Sr · Ba-Mg		正相关
Ca · Mg-Fe		负相关	负相关
C · M-Ba		正相关	正相关
Mg · Al-Cr		不相关	负相关
Sr · Ba-Ca		不相关	弱正相关
Fe ₂ O ₃ %		4.5	4.9
MnO ₂ /Fe ₂ O ₃		0.032	0.021
Ni · Co		2.7	2.5
Mn (ppm)		722	622
Sr · Ba		0.73	0.59

本文撰写过程中得到王东坡教授的悉心指导，并在经费等各方面得到他的全力支持和帮助，特此志谢。感谢高福红和张维亮同志在收集资料方面的帮助。

收稿日期 1989年10月4日

参 考 文 献

- (1) 王衡鉴、曹文富, 1981, 石油与天然气地质, 2卷3期, 277-342页。
- (2) 刘英俊等, 1984, 元素地球化学, 科学出版社。
- (3) 景毅等, 1984, 马尔柯夫过程在地质学中的应用, 地质出版社。
- (4) 刘宝措等, 1985, 岩相古地理基础和工作方法, 地质出版社。
- (5) 钟其权、马力、石宝珩, 1985, 论松辽盆地的演化和构造格局对沉积建造的控制, 松辽陆相盆地石油地质, 石油工业出版社, 26-34页。

The Application of Element Geochemistry—Statistics Method to Continental Basin Analysis of Southern Songliao Basin

Wang Pujun Liu Zhaojun Liu Wanzhu Du Xiaodi

(Department of Energy Resources, Changchun College of Geology)

Abstract

This paper describes the application of element geochemistry—statistics method to sedimentary basin analysis. Over 300 samples of mudstone were systematically collected from the two fully cored wells (W3 and SN15 wells) of southern Songliao Basin. 11 main elements and 16 trace elements were analyzed for each sample. After the geochemical data are computerized with the models of group analysis, relation analysis, regression analysis and Markov transition matrix, the authors applied these results to stratigraphic division, sedimentary cycle analysis and the study of sedimentary facies. The following are the conclusions:

1. The green mudstone sequence, which is generally considered to be the upper unit of the fourth member of Quantou Group, should belong to the lower Qingshankou Group.
2. The interbedded red—green mudstones of Yaojia middle member should be interpreted as the sequence deposited in shallow lacustrine flat environment.
3. The results of stratigraphic division and sedimentary cycle analysis obtained from this method should be more reliable than those from well logging for the unique thick mudstone sequence.
4. Element geochemistry is a good way to study sedimentary facies, but some cares should be taken, such as the consideration of sedimentary derivation in the working area, the choice of multi—sedimentary facies only depending on a few elemental geochemical data.
5. The element geochemistry—statistics method can well enlarge the application scope of well debris.