

基于岩石元素含量确定岩石矿物组分的方法^{*}

徐吉丰¹, 尹太举^{1**}, 韩雅坤¹, 钱文滔¹, 张娟¹, 杜晓峰², 官大勇²

(1 长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 2 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452)

摘要 岩石中矿物组分和含量对岩性划分、沉积环境判断及物源方向分析等方面均有非常重要的意义。岩石中各元素百分含量与矿物组成和演化有着密切的关系, 通过确定元素含量与矿物含量之间的转换系数, 依托转换系数这一桥梁, 可以将元素含量转换成矿物含量。文章结合岩芯元素含量结果及全岩测试数据资料, 通过对比“逐级分离”法计算结果与全岩计算结果, 其结果表明: ① 转换系数具有一定的专一性; ② 该方法与多元回归方法相比, 该方法可以依据较少的数据确定该地区的转换系数; ③ 利用“逐级分离”法获得的计算结果, 较符合该地区的转换系数, 可以应用于岩性识别与分类。

关键词 地质学; 元素含量; 矿物含量; 转换系数; 矿物组分特征

中图分类号: P585.3

文献标志码: A

Method for determining rock mineral composition based on element content

XU JiFeng¹, YIN TaiJu¹, HAN YaKun¹, QIAN WenDao¹, ZHANG Juan¹, DU XiaoFeng² and GUAN DaYong²

(1 School of Earth Sciences, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China; 2 Tianjin Branch, CNOOC, Tianjin 300452, China)

Abstract

The mineral composition and content in the rock are of great significance to lithological division, sedimentary environment judgment, and source direction analysis. The percentage content of each element in the rock is closely related to the mineral composition and evolution. By determining the conversion coefficient between the element content and the mineral content, relying on the bridge of the conversion coefficient, the element content can be converted into the mineral content. This paper combines the results of core element content and whole rock test data to compare the calculation results of the "gradual separation" method with those of the whole rock. The results are as follows: ① Conversion coefficients have some specificity; ② Compared with the multiple regression method, this method can determine the conversion coefficient of the region based on less data; ③ By using the "gradual separation" method to calculate the results, the conversion coefficients in the region can be more suitable and can be applied to lithologic identification and classification.

Keywords: geology, element content, mineral content, conversion coefficient, mineral component characteristics

岩石由各种矿物组成, 矿物由多种元素构成。尽管岩石成分中常由多达几十种矿物组成, 但碎屑岩中的矿物组成多为石英、长石、黏土矿物等十几种

常见矿物(孙建孟等, 2014)。确定岩石中矿物组分的方法有许多, 其大致可分为定性识别和定量分析(焦距等, 2016)。定性识别主要有肉眼识别法和薄

^{*} 本文得到国家自然科学基金(编号: 41672119)和国家科技重大专项(编号: 2016ZX05024-003, 2016ZX05058-001)联合资助

第一作者简介 徐吉丰, 男, 1996年生, 硕士研究生, 主要研究沉积学相关工作。Email: 1632449873@qq.com

^{**} 通讯作者 尹太举, 男, 1971年生, 教授, 长期从事沉积储层、层序地层学、油气地质开发和沉积成岩模拟研究工作。Email: yin-taij@yangtzeu.edu.cn

收稿日期 2020-01-05; 改回日期 2020-04-27。张绮玲编辑。

片观察法等,定量分析主要有差热法、红外光谱法(杜谷等,2014)、X射线衍射法(庞小丽等,2009)、X荧光光谱法(张勤等,2004)、扫描电镜法等。元素测井技术不仅在油藏开发(袁祖贵等,2003)、储层评价(刘绪纲等,2005)和成岩演化(李舟波等,1998)方面有着广泛的应用,而且在确定矿物含量及矿床成因亦有着一定作用(孙建孟等,2014;张晓琪等,2010)。

元素分析不仅在沉积环境分析与判定有着较成熟的应用(李俊花等,1993),此外,其还对于矿物的形成与元素的迁移有着一定的指导,白云母中的类质同象作用(邓苗等,2006)、电气石的元素组成(夏传波等,2018)、高岭石化作用、硅灰石的结构分析(罗明荣,2007)、黏土矿物的元素组成与迁移(傅平秋等,1982)、钴结壳的丰度评价(李强等,2013)、页岩脆性评价(黄锐等,2014)都与元素分析有关;更为重要的是元素分析在对矿物组成的恢复方面亦有着重要作用(耿元生等,1984)。

文章将元素测量结果进行分析讨论,采用“逐级

分离”定量法,以此确定岩石中各矿物的转换系数,从而确定岩石中矿物的含量,其继承了观察的便捷性,同时也保持了光谱法的准确与客观性。与运用大量数据采用多元回归的方法不同(Herron,1986),文章基于少量数据采用“逐级分离”的方法确定转换系数,多元回归在多数数据处理上有着较成熟的应用,但对于已知数据量较少的区域无法较准确的确定转换系数。研究以渤海湾盆地东部蓬莱19-3油田馆陶组元素分析数据结果为基础,对砂泥岩中元素测量结果采用“逐级分离”法分析矿物组分,为该地区分析岩石矿物组分提供了一种新方法。

1 岩石元素测量及岩石矿物组分确定

1.1 地质背景与数据采集

研究区所在的渤海湾盆地为发育在华北克拉通之上的陆内裂陷-拗陷盆地(任健等,2019),其位于渤海湾盆地东部渤南低凸起东侧(图1),馆陶组时期

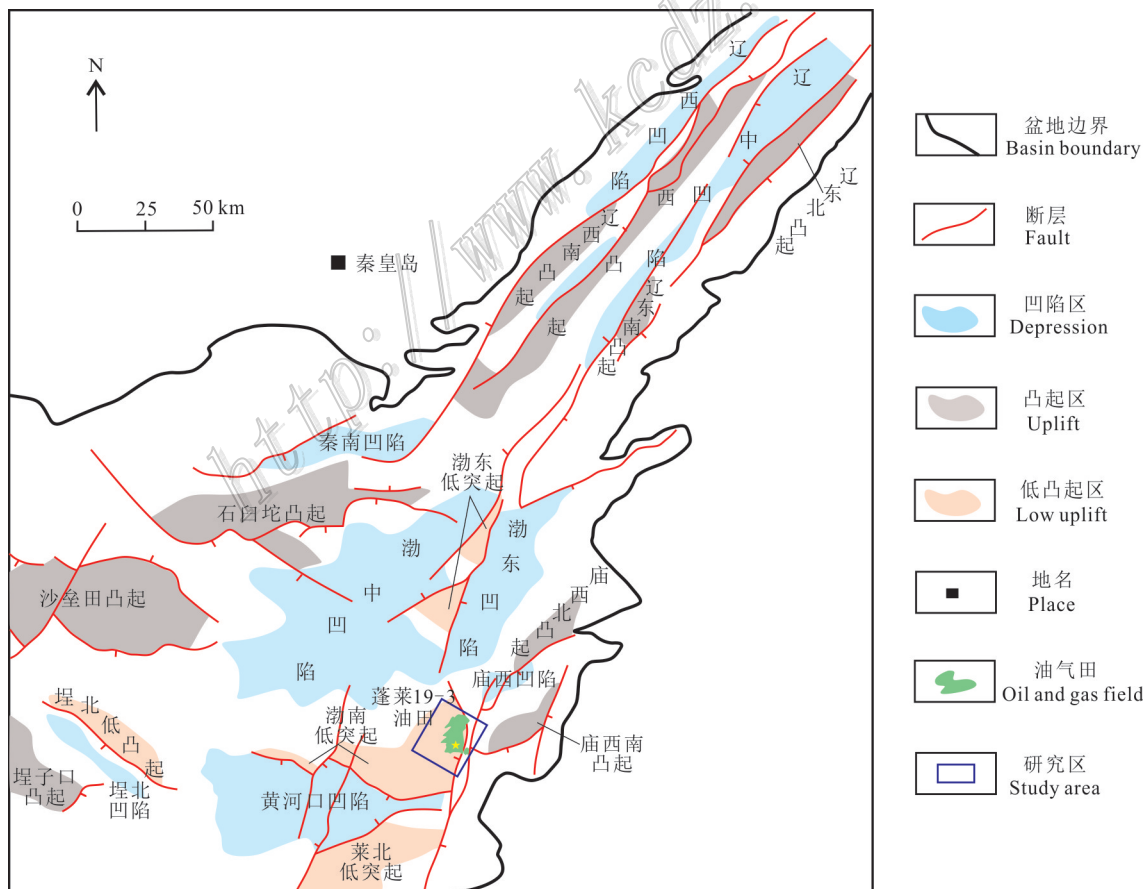


图1 研究区构造位置图

Fig. 1 Location of the study area

为拗陷时期,主要发育河流-湖泊交互体系。早中新世,渤海湾盆地进入裂后拗陷演化阶段,裂陷活动减弱,拗陷活动增强,形成了馆陶组-明化镇组以河湖相互体系为特征的沉积组合(何仕斌等,2001)。研究区馆陶组湖盆整体构造稳定,但断裂极其发育、沉降缓慢并且盆大水浅、地形平缓,湖盆宽浅,湖面进退频繁但升降幅度不大,主要表现在还原色泥岩(灰绿色)和氧化色泥岩(棕色)的频繁交替,主体上呈现出一种河湖交互沉积的现象。

笔者采用型号为Explore 3000便携式荧光元素测量仪(XRF)对岩芯直接进行(仪器探头紧贴岩芯表面)元素测量,测量前将岩芯表面擦净之后再行测量。仪器测量范围为一直径为8 mm的圆形区域,探测深度在1 mm左右,仪器主要测量结果为岩芯表面的元素含量,由于仪器测量的范围有限,在测量时可能由于岩屑中矿物的分选差,导致测量的元素含量仅仅代表某一矿物的特征而无法反映该段岩性特征,特别是在分选较差的砾岩中该现象尤为明显。鉴于此,本研究重点对分布均匀的细砂岩、粉砂岩和泥岩进行测量。

测试分析数据来自于渤海湾东部蓬莱19-3油田A井馆陶组113个砂泥岩样点,该井在馆陶组主要采取2段岩芯,分别为馆上段1040~1065 m和馆下段1307~1346 m,本次测量数据为馆上段,其岩性以灰白色、灰色细砂岩、粉砂岩和灰色泥岩为主(图2),砂岩中以长石岩屑砂岩和岩屑砂岩发育较广,偶见长石砂岩。测得主要元素为Si、Al、K、Ca、Mg、Fe共6种元素。其中Si与Al 2种元素为研究区中已测的6种元素的主要元素(砂泥岩主要为硅铝酸盐组成,因此其主要元素为Si、Al、O,但本次测量并未测量O元素的含量,因此主要元素为Si和Al),其质量分数占90%左右。在113个测试样点中,测量的 $w(\text{Si})$ 最小值为30.75%,最大值为88.45%,平均值为57.93%;测得的 $w(\text{Al})$ 最小值为6.18%,最大值为54.73%,平均值为33.57%。

1.2 基本方法

国外Herron(1986)等人结合大量井壁取心的中子活化分析数据和X射线衍射数据分析,采用多元回归方法,提出元素含量与矿物含量之间的关系,可

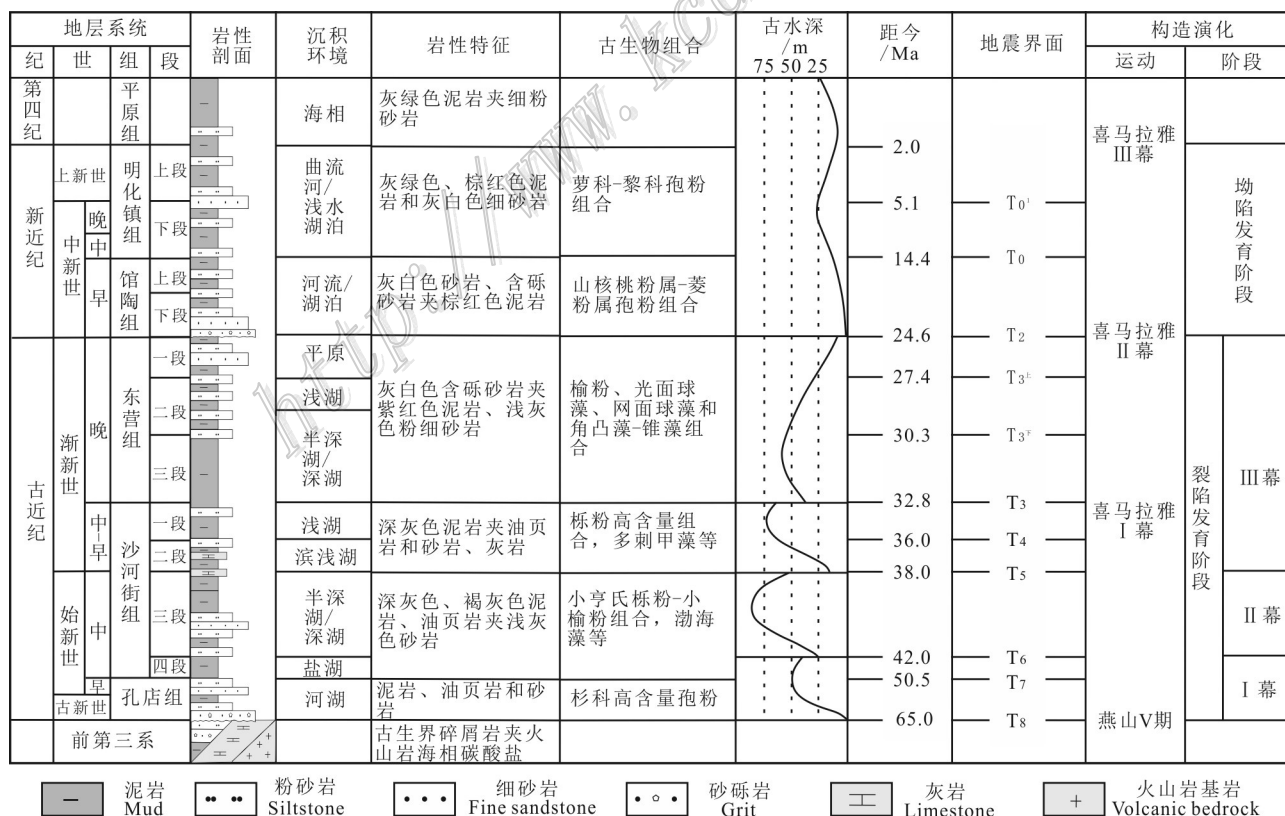


图2 研究区层序综合柱状图(据何仕斌等,2001修改)

Fig. 2 Comprehensive histogram of sequence in the study area(modified after He et al., 2001)

用矩阵表示为(Herron, 1986):

$$[E_i] = [C_{ij}][M_j]$$

式中 $[E_i]$ 为元素质量分数(%)构成的矩阵, i 为矩阵中元素的个数; $[M_j]$ 为矿物质量百分含量构成的矩阵, j 为矩阵中矿物的个数; $[C_{ij}]$ 为转换系数, C_{ij} 指第 j 个矿物中的第 i 个元素的含量。当 E_i 和 M_j 给定时, C_{ij} 的解有3种情况:① $i=j$ 时,有唯一解;② $i>j$ 时,有无穷解;③ $i<j$ 时,无解。在求解过程中,若出现后2种情况,则进行条件增减,使 $i=j$ 。

表1是Herron(1986)等人给出的转换系数,其中XSFe表示剩余铁, $w(\text{H}_2\text{O})_{\min}$ 表示矿物中的水含量。由于各区域地层的矿物组成有所差异,因此各地区的转换系数也有所差异。文章在Herron(1986)、孙建孟等(2014)的转换系数基础上,通过全岩测试数据进行修正,得到符合研究区的转换系数。

1.3 基本步骤

文章与Herron(1986)等人确定转换系数不同,由于研究区没有大量的测试数据进行多元回归拟合,因此采用“逐级分离”方法进行求取,其原理为,在线性关系相关性条件下,当一个或多个自变量(矿物M)对应一个或多个因变量(元素E)时,确定其对应系数的方法,如钾长石($\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$)中为一个“一对多”的关系,即钾长石的含量会影响K、Al、Si三种元素的含量(本次研究未测得O元素含量),确定其之间的转换系数,从而可通过K、Al、Si三种元素的含量反演出钾长石含量。

其具体步骤为:

(1) 测量并收集待测区域的元素结果(XRF,便携式荧光元素测量仪测定)及全岩矿物百分含量(XRD, X射线衍射分析),了解该区域矿物基本分布;

(2) 根据步骤(1)中全岩矿物,得到该区域矿物组成及各矿物的化学式,并得到该区域各种元素测量结果,区域矿物包含矿物 M_1 、矿物 M_2 、矿物 M_3

……矿物 M_i (矿物 M_1 、矿物 M_2 、矿物 M_3 ……矿物 M_i 称为区域矿物集合M);测量的元素结果包含元素 E_1 、元素 E_2 、元素 E_3 ……元素 E_n (元素 E_1 、元素 E_2 、元素 E_3 ……元素 E_n 称为区域元素集合E);

(3) 在区域元素集合E中筛选出特征元素 f_1 、 f_2 、 f_3 …… f_j 和特征矿物 F_1 、 F_2 、 F_3 …… F_j , j 为1、2、3……且 $j \leq n$ (特征元素只存在一种特征矿物中,如研究区Ti为金红石的特征元素),其中,特征元素 f_1 、 f_2 、 f_3 …… f_j 集合称为特征元素集合 f ;特征矿物 F_1 、 F_2 、 F_3 …… F_j 集合称为特征矿物集合 F ;

计算特征矿物 F_j 的质量分数(%)为:

$$w(F_j) = w(f_j) \times n(F_j) / (n(f_j) \times N) \quad (1)$$

其中, $w(F_j)$ 为特征矿物 F_j 的质量分数; $w(f_j)$ 为特征元素 f_j 的质量分数; $n(F_j)$ 为特征矿物 F_j 的摩尔数; $n(f_j)$ 为特征元素 f_j 的摩尔数; N 为元素 f_j 在矿物 F_j 中化学式中的个数; j 为1、2、3……且 $j \leq N$;通过 j 的不同取值,可计算出特征矿物 F_1 、 F_2 、 F_3 …… F_j 的百分含量 $w(F_1)$ 、 $w(F_2)$ 、 $w(F_3)$ …… $w(F_j)$ 。转换系数 C_{ij} 为 $n(f_j) \times N / n(F_j) \times 100\%$,转换系数的精度为0.1(文章选择0.1,可依据实际情况精度做具体调整),步长为0.1,调整转换系数使得计算结果与实际结果误差最小(回归平方和最小)。

(4) 区域元素集合E除去特征元素集合 f ,得到残差元素集合;区域矿物集合M除去特征矿物集合 F ,得到残差矿物集合;

(5) 判断步骤(4)中的剩余集合元素中是否存在新的特征元素,若存在新的特征元素,则重复步骤(3),继续求出新的特征元素和新的特征矿物,直至步骤(4)中得到的残差元素中不存在特征元素;

(6) 根据步骤(5),得到的最终残差元素集合称为剩余元素集合 r ,得到的最终残差矿物集合称为剩余矿物集合 R ,对剩余元素集合 r 按照其百分含量从大到小进行排序,得到 r_1 、 r_2 …… r_k ($k \leq n$), r_1 、 r_2 …… r_k 序列称

表1 不同矿物与元素转换系数表

Table 1 Conversion factors for different minerals and elements

矿物	Al	Si	Fe	K	Ti	S	Ca	XS Fe	$w(\text{H}_2\text{O})_{\min}/\%$
长石	10.1	30.0	0	10.0	0	0	1	0	-3.5
石英	0.1	47.0	0	0.1	0	0	0	0	-
方解石	0	0	0.2	0	0	0	40.0	0	3.7
高岭石	19.0	22.0	0.8	0.4	0.9	0	0.1	0	14.0
伊利石	12.0	24.0	8.0	4.0	0.8	0	0.2	0	8.0
蒙脱石	8.5	21.1	1.0	0.5	0.2	0	0.2	0	32.0
黄铁矿	0	0	47.0	0	0	53.0	0	0	24.7
金红石	0	0	0	0	60.0	0	0	0	21.8
菱铁矿	0	0	47.0	0	0	0	0	47.0	21.2

为剩余元素集合序列 r^* , 剩余矿物集合 R 中含有矿物为 $R_1, R_2, \dots, R_m (m \leq i)$;

(7) 在剩余元素集合序列 r^* 中, 根据步骤(6)中的排序, 依次计算元素 $r_1, r_2, \dots, r_k$ 所对应的各矿物的百分含量, 若元素 r_1 在矿物 A_1 、矿物 A_2 、矿物 $A_3, \dots$ 矿物 $A_p (p \geq 2, \text{且 } p \leq n)$ 存在, 矿物 A_1 、矿物 A_2 、矿物 $A_3, \dots$ 矿物 A_p 称为元素 r_1 的矿物集合 A ;

(8) 根据步骤(1)全岩含量, 确定各矿物的质量分数(%), 得剩余集合矿物 R 中各矿物的质量分数(%)为 α , 即矿物 $R_1, R_2, \dots, R_m$ 质量分数(%)分别为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$, 进一步可得元素 r_1 在矿物集合 A 中的质量分数 β (%), 即元素 r_1 在矿物 $A_1, A_2, \dots, A_p$ 的质量分数(%)分别为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$;

矿物 A 的质量分数(%)为:

$$w_A = w_r \times \beta_A \times n_A / (n_r \times N) \quad (2)$$

w_A : 矿物 A 的质量分数(%);

w_r : 测得的元素 r 的质量分数(%);

β_A : 指元素 r 在该岩样中在矿物 A 中的质量分数(%);

n_A : 矿物 A 的摩尔数;

n_r : 元素 r 的摩尔数;

N : 元素 r 在矿物 A 中化学式中的个数。

其中, 转换系数 C_{ij} 为 $n_r \times N / (n_A \times \beta_A) \times 100\%$, 与步骤3一样, 保证计算的矿物含量与全岩结果误差最小;

(9) 重复步骤(8), 按照序列 r , 依次确定其他转换系数。

此外, 由于在求解每个转换系数时会产生一定误差, 因而最后计算的转换系数误差会累计, 导致其偏离准确值, 因此, 通过顺序计算来弥补这一不足, 即对研究重要的元素和矿物优先计算, 本次研究主要对于岩性的判断, 因而主矿物较为重要, 从而采用含量值从大到小进行依次计算。

2 系数矫正

文章以研究区 A 井为例, 首先以 Herron(1986)、孙建孟等(2014)的转换系数对研究区的元素测量结果进行转换, 然后结合研究区全岩分析数据, 对转换系数进行校正。由于该地区确定的元素与矿物的对应关系较少, 无法较好的采用多元回归的方法, 继而此次研究主要以逐级分离对该区域进行系数的矫正。

此次研究由于测量数据只有 Si、Al、K、Ca、Mg、Fe 共 6 种元素, 因此将 Herron(1986)等人的转换系

数初步校正为 5 种元素对应 5 种矿物的转换系数(表 2)。结合元素测量结果, 通过表 2 的转换系数对部分深度进行计算并得到相关结果(表 3)。

从表 3 中可看出, 大部分的结果均为负值或主要矿物出现极小值, 导致数据严重失真, 因此某一地区的转换系数可能仅适用于该地区或相似区域, 对其他区域适用性较差, 具有一定的专一性。由于该转换系数无法满足元素和矿物之间的转换关系, 因此, 此次研究结合全岩分析数据, 对转换系数再次进行校正。通过“逐级分离”法, 并结合元素测量数据和全岩分析结果, 分别对转换系数进行校正。文章选取了 9 个样品点进行校正, 并平均化处理, 表 4 为 7 种矿物的转换系数表。由于 7 种矿物只有 6 种元素与之对应, 因此, 此次研究

表 2 5 种元素和 5 种矿物转换关系表

元素	长石	石英	高岭石	伊利石	蒙脱石
Al	10	0.1	19	12	8.5
Si	30	47	22	24	21
Fe	0	0	0.8	8	1
K	10	0.1	0.4	4	0.5
Ca	1	0	0.2	0.2	0.2

注: 转换系数值对应 C_{ij} 矩阵中各行列, 无量纲。

表 3 部分计算结果表

深度/m	长石	石英	高岭石	伊利石	蒙脱石
1474.66	-0.07%	-3.07%	-4.78%	-0.72%	15.53%
1474.96	-0.16%	-0.99%	2.53%	0.19%	-2.34%
1475.10	0.21%	0.24%	1.90%	-0.04%	-0.04%
1475.60	-0.01%	0.61%	1.87%	-0.03%	-0.25%
1476.10	-0.22%	-1.76%	-1.33%	0	8.00%
1476.40	-0.24%	-2.35%	-3.65%	0.50%	11.31%
1476.90	-0.15%	-0.05%	1.20%	0.44%	1.18%
1477.10	-0.10%	0.28%	1.85%	0.82%	-0.87%
1477.40	-0.01%	1.02%	2.51%	0.13%	-1.98%
1477.80	-0.02%	0.29%	1.34%	-0.14%	1.15%

注: 深度为该点至井口的垂直深度; 矿物含量计算结果为计算所得, 负号代表该种矿物计算时所对应的元素含量不足(如石英在 1474.66 m 处, 计算结果为 -3.07%, 即代表该点 Si 元素和石英的转换系数有误), 即转换系数需要进行调整。

表 4 7 种元素和 7 种矿物转换系数表

Table 4 Conversion factors for 7 elements and 7 minerals

元素	石英	钾长石	斜长石	绿泥石	蒙脱石	伊利石	高岭石
Si	46.7	34.1	27.8	10.1	24.8	25.2	4.8
K	0	15.9	0	0	0	7.5	0
Al	0	11.0	8.9	6.5	6.0	15.7	32.5
Ca	0	0	13.2	0	0	0	0
Mg	0	0	0	14.4	5.3	1.5	0
Fe	0	0	0	33.6	0	0	0
RAI	0	0	0	0	20	20	0

新增1个剩余AI项(RAI)使其具有唯一解(表4)。

3 实例应用

本次研究测试的各样点数据采用 Explore 3000

便携式荧光元素测量仪,通过“逐级分离”法确定该区域的转换系数,进而计算出各样点的矿物百分含量。并与钻采工程研究院渤海实验中心关于X射线衍射(XRD)结果(全岩分析)进行对比,将测试结果分为石英、钾长石、斜长石和黏土矿物4类(图3)。

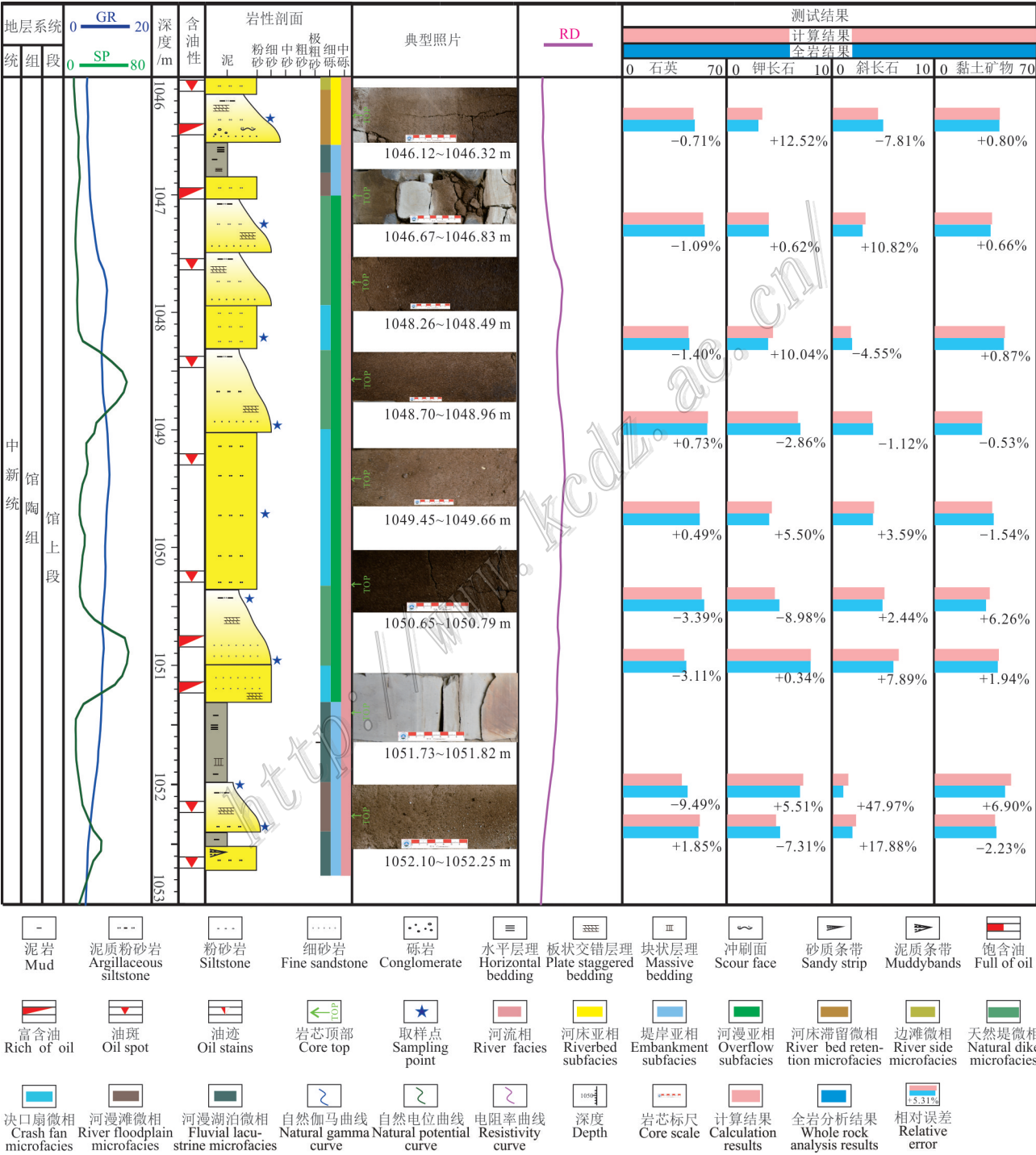


图3 计算结果分析图
Fig. 3 Calculation result analysis chart

其中偏离度为 $Z = (\text{荧光仪器测量值} - \text{X射线测量值}) / \text{X射线测量值} \times 100\%$, 在9个样点对比中, 石英最大偏离度为 -9.49% (“+”为正偏, “-”为负偏), 最小偏离度为 0.49% , 平均偏离度为 -1.79% ; 钾长石最大偏离度为 12.52% , 最小偏离度为 0.34% , 平均偏离度为 1.71% ; 斜长石最大偏离度为 47.97% , 最小偏离度为 -1.12% , 平均偏离度为 8.57% ; 黏土矿物大偏离度为 6.90% , 最小偏离度为 -0.53% , 平均偏离度为 1.45% 。可以看出, 石英与黏土矿物的偏离度较小, 基本在 10% 以内, 大致与 X 射线衍射结果一致; 但由于钾长石与斜长石的质量分数在岩石中所占百分含量较小, 且全岩中结果均为整数, 但计算结果为4位有效数, 导致误差偏离较大, 误差偏离基本在 10% 以内。总体而言, 该方法计算结果与全岩分析结果较吻合, 结合岩芯位置及照片, 可看出计算结果与岩芯特征较吻合。

由于不同岩性的矿物组分各有差异, 而不同矿物的元素含量不尽相同。本次研究通过不同元素的质量分数在各岩性的反映, 得出元素的质量分数可表明不同岩性。通过 Si-K 关系图可大致反映出岩性特征(图4), 其中泥岩与长石岩屑砂岩区分度较

大, 基本无重合部分, 因此可以根据 Si-K 关系图进行区分; 岩屑砂岩与泥岩和长石岩屑砂岩均有一定的重合区, 因此根据 Si/K 比值无法完全区分; 长石砂岩较少, 此次研究仅2个样点, 这里不做分析。计算结果表明, 泥岩的 $w(\text{Si})$ 在 $50\% \sim 66\%$ 之间, $w(\text{K})$ 在 $0 \sim 14\%$ 之间, 主要在 $Y = 3.667X - 224.000$ 和 $Y = 0.7X - 37.1$ 曲线的左侧; 长石岩屑砂岩的 $w(\text{Si})$ 在 $65\% \sim 80\%$ 之间, $w(\text{K})$ 在 $0 \sim 6\%$ 之间, 主要集中分布在 $Y = 3.667X - 224$ 、 $Y = 0.7X - 37.1$ 曲线右侧和 $Y = 0.545X - 34.364$ 曲线左侧; 岩屑砂岩的 $w(\text{Si})$ 在 $60\% \sim 73\%$ 之间, $w(\text{K})$ 在 $0 \sim 12\%$ 之间, 在 $Y = 0.545X - 34.364$ 曲线左侧。此外, 通过 Si/Al 比值也可反映砂岩与泥岩的差异。研究区泥岩的 Si/Al 比值在 $0.9 \sim 2.2$ 之间, 长石岩屑砂岩 Si/Al 比值在 $2.1 \sim 5.4$ 之间。

4 结 论

(1) 通过建立元素与矿物的之间的转换关系, 将元素测量结果转换为各矿物的质量分数(%), 为解决地质问题提供了一种手段。

(2) 本次研究的方法, 在传统以大量数据多元

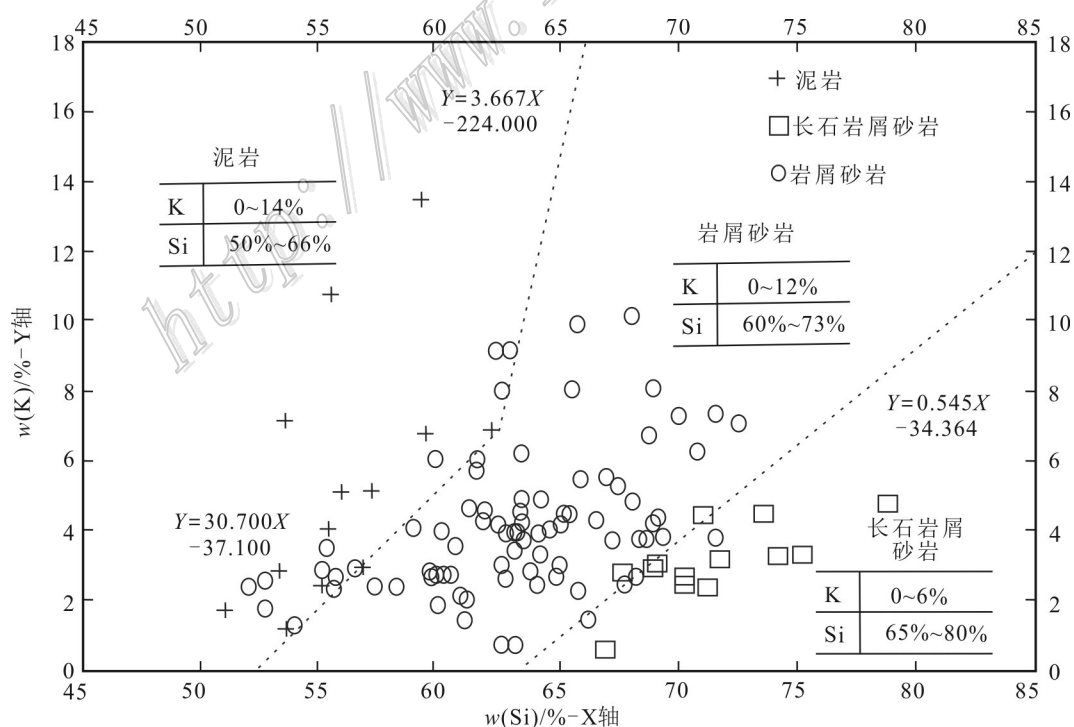


图4 岩性与K、Si元素含量关系图

Fig.4 Relationship between lithology and K and Si element contents

回归的基础上,提出一种以少量的已有数据进行对转换系数的求取,通过对实际井的对比,得到了理想的效果,说明该方法有一定的可行性。

(3) 本次研究“逐级分离”的方法,可根据某一地区的地质研究加深,数据的增多,对新数据采用同样的方法,对原有转换系数进行调整,以确定最新转换系数表。进一步对不同区块不同层段分区处理,得到适应一个层段一个区块的转换系数关系表。

(4) 采用“多元方程组”法能较好的根据元素测量结果得出各矿物的质量百分含量,与岩芯和全岩分析结果基本一致,泥岩的Si/Al比值在0.9~2.2之间,长石岩屑质石英砂岩的Si/Al比值在2.1~5.4左右。

(5) 由于本次研究只测得Si、Al、K、Ca、Mg、Fe共6种元素,因此建立转换系数表时新增了一项RAI,但该方法不限于此,若测得其他元素含量值,亦可将数据采用同样的方法进行计算。

References

- Deng M, Wang L and Lin J H. 2006. X-ray powder crystal diffraction analysis of western Sichuan microcrystalline muscovite[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 26(2): 131-136(in Chinese with English abstract).
- Du G, Wang K Y and Ran J. 2014. Infrared spectroscopy / scanning electron microscope and other modern large-scale instrument rock mineral identification technology and its application[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 33(5): 625-633(in Chinese with English abstract).
- Fu P Q and Ni J Z. 1982. Advances in mineralogy in China in the past 32 years[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1(1): 1-12(in Chinese with English abstract).
- Geng Y S, Wu J S and Jin L G. 1984. Restoring the original rock properties of Fuping Group by quantitative mineral reconstruction[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 3(2): 104-112(in Chinese with English abstract).
- Herron M M. 1986. Mineralogy from geochemical well logging[J]. *Clay and Clay Minerals*, 34(2): 204-213.
- He S B, Zhu W L and Li L X. 2001. Sedimentary evolution and Upper Tertiary reservoir combination analysis in Bozhong Depression[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 38-43(in Chinese with English abstract).
- Huang R, Zhang X H and Qin L M. 2014. Method for evaluation of shale mineral components and brittleness on basis of element content[J]. *China Petroleum Exploration*, 19(2): 85-90(in Chinese with English abstract).
- Jiao J, Zan X C, Yang X T, Fan X T and Liu X. 2016. Status and progress of rapid detection of potassium in the field[J]. *Mineral Deposits*, 35(6): 1309-1310(in Chinese with English abstract).
- Li Q and Zhang X H. 2013. Determination of manganese iron cobalt nickel copper zinc in cobalt-rich crust samples by handheld X-ray fluorescence spectrometer[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 32(5): 724-728(in Chinese with English abstract).
- Li J H, Bai G Y and Zhang Y L. 1993. Distribution characteristics and sedimentary environment of trace elements in the upper section of Guantao Formation of Upper Tertiary in Gudong oilfield[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 17(3): 114-117(in Chinese with English abstract).
- Li Z B and Wang Z W. 1998. Element logging technology in scientific drilling[J]. *Earth Science Frontiers*, 5(1/2): 119-130(in Chinese with English abstract).
- Liu X G, Sun J M and Guo Y F. 2005. Application of element capture spectrum logging in comprehensive reservoir evaluation[J]. *Well Logging Technology*, 29(3): 236-239(in Chinese with English abstract).
- Luo M R. 2007. X-ray fluorescence spectrum analysis of wollastonite[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 26(3): 245-247(in Chinese with English abstract).
- Pang X L, Liu X C and Xue Y. 2009. Application of powder crystal X-ray diffraction in petrology and mineralogy[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(5): 452-456(in Chinese with English abstract).
- Ren J, Lü D Y and Chen X P. 2019. Oblique tension of existing structures in Eastern Bohai Sea and its petroleum geological significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 46(3): 530-541(in Chinese with English abstract).
- Sun J M, Jiang D and Yin L. 2014. A method for determining mineral content by formation element logging [J]. *Natural Gas Industry*, 34(2): 42-47(in Chinese with English abstract).
- Xia C B, Cheng X H and Zhang H T. 2018. Melt preparation-X-ray fluorescence spectrometry for determination of 12 major and minor elements in tourmaline[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 37(1): 36-42(in Chinese with English abstract).
- Yuan Z G and Chu Z H. 2003. Application of a new logging method (ESC) in Wangzhuang Heavy oil reservoir[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 23(5): 417-423(in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Fan S Z and Pan Y. 2004. Simultaneous determination of major and minor trace components in multi-target geochemical survey samples by X-ray fluorescence spectroscopy[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 23(1): 19-24(in Chinese with English abstract).
- Zhang X Q, Zhang J F, Yuan P, Song X Y, Guan J X and Deng Y F. 2010. The significance of mineral composition to the genesis of Panzhihua V-Ti-magnetite deposit, Sichuan Province[J]. *Mineral Deposits*, 29(23): 127-128(in Chinese).

附中文参考文献

邓苗, 汪灵, 林金辉. 2006. 川西微晶白云母的X射线粉晶衍射分

- 析[J]. 矿物学报, 26(2): 131-136.
- 杜谷, 王坤阳, 冉敬. 2014. 红外光谱/扫描电镜等现代大型仪器岩石矿物鉴定技术及其应用[J]. 岩矿测试, 33(5): 625-633.
- 傅平秋, 倪集众. 1982. 三十二年来我国矿物学研究进展[J]. 矿物学报, 1(1): 1-12.
- 耿元生, 伍家善, 金龙国. 1984. 利用定量矿物再造法恢复阜平群的原岩性质[J]. 岩石矿物及测试, 3(2): 104-112.
- 何仕斌, 朱伟林, 李丽霞. 2001. 渤中坳陷沉积演化和上第三系储层组合分析[J]. 石油学报, 22(2): 38-43.
- 黄锐, 张新华, 秦黎明. 2014. 基于元素含量的页岩矿物成分及脆性评价方法[J]. 中国石油勘探, 19(2): 85-90.
- 焦距, 詹秀春, 杨啸涛, 樊兴涛, 刘晓. 2016. 野外快速检测钾元素的技术现状与进展[J]. 矿床地质, 35(6): 1309-1310.
- 李强, 张学华. 2013. 手持式X射线荧光光谱仪测定富钴结壳样品中锰铁钴镍铜锌[J]. 岩矿测试, 32(5): 724-728.
- 李俊花, 白光勇, 张谊理. 1993. 孤东油田上第三系馆陶组上段微量元素分布特征及沉积环境分析[J]. 石油大学学报(自然科学版), 17(3): 114-117.
- 李舟波, 王祝文. 1998. 科学钻探中的元素测井技术[J]. 地学前缘, 5(1/2): 119-130.
- 刘绪纲, 孙建孟, 郭云峰. 2005. 元素俘获谱测井在储层综合评价中的应用[J]. 测井技术, 29(3): 236-239.
- 罗明荣. 2007. 硅灰石的X射线荧光光谱分析[J]. 岩矿测试, 26(3): 245-247.
- 庞小丽, 刘晓晨, 薛雍. 2009. 粉晶X射线衍射法在岩石学和矿物学研究中的应用[J]. 岩矿测试, 28(5): 452-456.
- 任健, 吕丁友, 陈兴鹏. 2019. 渤海东部先存构造斜向拉伸作用及其石油地质意义[J]. 石油勘探开发, 46(3): 530-541.
- 孙建孟, 姜东, 尹璐. 2014. 地层元素测井确定矿物含量的新方法[J]. 天然气工业, 34(2): 42-47.
- 夏传波, 成学海, 张会堂. 2018. 熔融制样-X射线荧光光谱法测定电气石中12种主次量元素[J]. 岩矿测试, 37(1): 36-42.
- 袁祖贵, 楚泽涵. 2003. 一种新的测井方法(ESC)在王庄稠油油藏中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 23(5): 417-423.
- 张勤, 樊守忠, 潘宴. 2004. X射线荧光光谱法同时测定多目标地球化学调查样品中主次痕量组分[J]. 岩矿测试, 23(1): 19-24.
- 张晓琪, 张加飞, 袁鹏, 宋谢炎, 官建祥, 邓宇峰. 2010. 矿物成分对四川攀枝花钒钛磁铁矿床成因的指示意义[J]. 矿床地质, 29(增刊3): 127-128.