



三角图的原理、快速绘制以及在砂岩分类中的应用

单云鹏, 王红军, 张良杰, 白振华, 苏朋辉, 赫英旭, 孟维康, 刘航宇, 程木伟

引用本文:

单云鹏, 王红军, 张良杰, 白振华, 苏朋辉, 赫英旭, 孟维康, 刘航宇, 程木伟. 三角图的原理、快速绘制以及在砂岩分类中的应用[J]. 沉积学报, 2022, 40(4): 1095-1108.

SHAN YunPeng, WANG HongJun, ZHANG LiangJie, BAI ZhenHua, SU PengHui, HE YingXu, MENG WeiKang, LIU HangYu, CHENG MuWei. The Principle and Fast Drawing of Ternary Plots and Their Application in Sandstone Classification[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(4): 1095-1108.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

河控三角洲生长的动力和沉积模式

Dynamic and Sedimentary Models of River-dominated Delta Growth

沉积学报. 2021, 39(2): 374-382 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.029>

陆相湖盆大型扇三角洲沉积特征与演化规律——以准噶尔盆地玛湖凹陷西斜坡区三叠系百口泉组为例

Sedimentary Characteristics and Evolution Law of a Lacustrine Large-scale Fan Delta: A case study from the Triassic Baikouquan Formation on the west slope of Mahu Sag

沉积学报. 2020, 38(5): 923-932 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.089>

利用成像测井资料分析砂砾岩沉积特征——以徐家围子断陷安达地区下白垩统沙河子组为例

Using FMI Data to Analysis the Sedimentary Characteristics of Glutenite: A case study from the lower Cretaceous Shahezi Formation in the Anda area, Xujiaweizi fault depression, NE China

沉积学报. 2018, 36(3): 584-595 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.033>

中国东部箕状断陷湖盆扇三角洲与辫状河三角洲对比研究

Contrastive Research of Fan Deltas and Braided River Deltas in Half-graben Rift Lake Basin in East China

沉积学报. 2015, 33(6): 1170-1181 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.06.010>

准噶尔盆地西北缘玛北地区百口泉组扇三角洲沉积模式

Fan Delta Depositional Model of Triassic Baikouquan Formation in Mabei Area, NW Junggar Basin

沉积学报. 2015, 33(3): 607-615 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.03.019>

三角图的原理、快速绘制以及在砂岩分类中的应用

单云鹏¹,王红军¹,张良杰¹,白振华¹,苏朋辉¹,赫英旭²,孟维康³,刘航宇⁴,程木伟¹

1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083

2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院,天津 300459

3. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司,天津 300452

4. 北京大学地球与空间科学学院,北京 100871

摘要 三角图广泛用于砂岩分类,但个别高引用率文献论证公式的过程繁琐甚至推导出现错误。为系统阐述三角图的原理与制作,在确定三角图的读图规则后,进行平面几何推导,指出并修正了前人推导过程中的逻辑性错误,最后使用Excel成图与商业软件Origin及Grapher的三角图进行对比。结果表明,等边三角形与等腰三角形的投点方式存在差异,但两种图版可以进行变形操作而相互转化,三角形的侧边能否作为坐标轴以及纵坐标的绝对长度能否代表石英的含量取决于三角形的形态。商业软件的图版难以满足需求,建议以Excel使用等腰三角形的投点方式,结合地质绘图软件进行制图。为降低工作量,可以使用本文所编写的VBA代码,快速绘制砂岩分类三角图。

关键词 三角图读值规则;三角图投点公式;砂岩分类图版;Excel与Origin及Grapher成图对比;VBA编程代码

第一作者简介 单云鹏,男,1992年出生,博士研究生,油气成藏与含油气系统,Email: shan_yunpeng@petrochina.com.cn

通信作者 王红军,男,教授级高级工程师,Email: whj@petrochina.com.cn

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

三角图的散点分类效果显著,三角图中某一点三个组分含量之和为1或100%,一般某个点距离最近的角,其所对应的组分所占权重较大,可以快速直观表述受三个影响因素事物的相似程度及分类结果。三角图在各学科中已有普遍应用^[1-7],如地理科学中工厂选址的三个影响因素比重:市场需求、交通运输以及矿产资源;有机地球化学中判断沉积环境的三环萜烷指标^[8]: C_{19+20} TT、 C_{21} TT与 C_{23} TT,判断油气来源的 C_{27} - C_{28} - C_{29} 规则甾烷^[9-12];无机地球化学中判断玄武岩成因的指标^[13]: MnO 、 TiO_2 与 P_2O_5 ;地质学中判别岩石的各种矿物组分^[14-18],砂岩类型的三端元组成:石英、长石与岩屑^[19-22]等。但由于各专业特点不同,三角图内部的区域划分以及投点读值方法不尽相同,本研究仅关注三角图最广泛的用法以及在砂岩分类中的应用。

砂岩的分类方案众多,Krynine^[23]在1948年提出

第一个普遍应用的砂岩三端元分类体系,三端元分别为:石英+硅质岩(代表成分成熟度);长石+高岭石(代表母岩性质);云母+绿泥石(代表构造变动强度),这个分类体系仅注重沉积岩中的矿物组分,而没有考虑沉积岩中不可忽略的岩屑组分,不管是从科学角度,还是油气田实际应用出发,今天都不再适用。随后Gilbert^[24]在1954年引入“杂砂岩”与“净砂岩”的概念,形成了“三端元四组分”划分方案的理论雏形,在进行砂与砂岩分类之前,先依据杂基含量将其划分开,杂基小于15%的为“净砂岩”,杂基大于15%的为“杂砂岩”。同年,Folk^[25]提出一个三角图砂岩分类方案,三端元分别为:石英+燧石(代表沉积来源);长石+岩浆岩屑(代表火成来源);云母+变质岩屑(代表变质来源)。1964年Dott^[26]根据Gilbert引入的概念,以棱柱图的方式进行表示,兼顾了成分成熟度与结构成熟度的表达,三端元分别为石英+“燧石类”;长石;不稳定碎屑。其中,燧石类包括如去玻化的酸性玻璃等硅质火山物质,显然,这种并非稳定的

收稿日期:2021-09-16;收修改稿日期:2021-12-08

基金项目:中国石油天然气集团公司技术攻关项目(2021DJ33)[Foundation: Technology Research Project of China National Petroleum Corporation, No. 2021DJ33]

硅质火山碎屑与稳定石英划分为一组是有失妥当的。1968年,Folk^[27]对自己提出的三角图进行了修改,将燧石归入到岩屑单元,以石英作为三角形单独的一个端元,另外两个单元为长石+火成岩屑+片麻岩屑以及其它岩屑+燧石。Folk的砂岩分类强调结构成熟度概念,需要依据砂岩中黏土含量、颗粒磨圆以及分选性等,将砂岩结构成熟度划分为若干等级。曾允孚、夏文杰在1986年的主编的《沉积岩石学》教材中,在总结了前人研究以及1978年成都地质学院(现成都理工大学)岩石教研室编制的砂岩分类方案的基础上提出一种三端元四组分分类方案,与Dott相同,使用棱柱图的方式进行表达,杂基含量作为棱柱,反映细砂级以上砂岩的水动力作用,三端元分别为:石英(代表成分成熟度);长石(代表深层来源);岩屑(代表表层来源),其中岩屑包括燧石、石英岩以及其它硅质岩屑。因为燧石和石英岩的耐磨性与化学稳定性与石英相比,还是弱一些,并且成分成熟度高的海滩相中,燧石与硅质碎屑少见,故燧石等成分归于岩屑比较合理。其中三端元的三角图,为目前国内各大油气田常用的砂岩分类三角图,即是本文探讨制作的重点。这种分类方案分区数目适中,且属于脆性矿物的石英、长石含量分别作为单独的端元,在致密砂岩这类非常规储层评价中^[28-29]依然适用,体现了该分类方案的优势。本文在阐述了前人的疏漏以及三角图的基本原理后,以同一组数据分别利用Excel、Origin以及Grapher绘制三角图进行相互验证与对比。并采用对计算机运行环境要求相对较低的VBA编程分别提供国内油气田常用的,以及

划分更加详细的砂岩分类图版。

1 两种形态划分与读值规则

一般来讲,三角图最常呈现的形状为等边三角形;在国内,各大油气田与高校最常用的砂岩分类三角图则是底边与底边上的高长度相等的等腰三角形^[30-40],而这种特殊的等腰三角形在形态上与等边三角形十分相似,在尺度较小的时候难以分辨其形态,加上分类图版中会添加一些辅助线,导致科研人员忽略了这两者的区别,造成了三角图概念与使用不清晰的情况。

等边三角形有三个坐标轴,读值是以三角形的每条边作为一个做坐标轴,如图1a,每一个坐标轴代表一个组分的含量由0~100%,常以逆时针方向增大。判断其中某一点A的数值,通过A点分别做三角图三条边的平行线,取三条平行线增大的方向与三角图边的交点为A点该组分的含量。

等腰三角形读值以底边上的高为Y轴,含量为0~100%;以与平行于底边的三角图内部的某一条线段为X轴,含量为0~100%。判断其中某一点B的数值,如图1b,首先读取其Y值,这个Y值为B点的石英(Q)组分在石英+长石+岩屑中的含量;再通过B点做与底边平行的线段,分别交两条边于B₁和B₂点,B₁与B₂两点分别代表0与100%,而这条边上的数值代表岩屑(R)组分在长石+岩屑中的百分含量。而理论上不同的砂岩样品中石英的含量有无数个数值,所以线段B₁B₂的位置就有无数可能,即等腰三角形中有无数X轴。

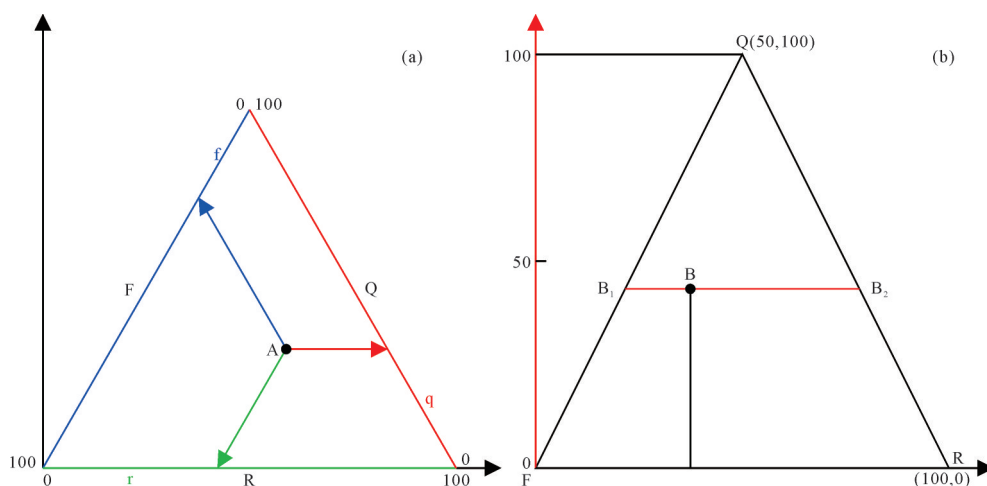


图1 两种三角形态与读值规则图

Fig.1 Two types of triangle shape plots and reading rules

2 投点规则

由于两种三角形的读值规则不同,必然其相应的投点规则也就不同。实际上就是将三组数据(X,Y,Z)相加等于100%的数据经过不同的公式变换,形成在直角坐标系中的两组数据(X,Y)进行投点。前人有过高引用率的探索和推导^[41-42],但遗憾的是,文献[42]中等边三角形与等腰三角形的推导都具有逻辑性错误,下面将对前人的错误进行论证。

2.1 前人错误的证明

为方便读者进行考证对比,图2中关键的交点命名、直线命名以及各矿物含量的取值符号将与文献[42]中的图2保持完全一致,进行推导和证明,并在表1中将推导过程中的错误点进行总结。图2中两种三角形的F点与坐标系的原点重合,底边与坐标系的横坐标重合,即取点F(0,0)、R(100,0),在等边三角形中取Q(50, 50√3),在等腰三角形中取Q(50,100)。

2.1.1 等边三角形的错误

文中虽然在等边三角形推导的开始的描述阶段,规定了三条边长度相等,即QF=FR=RQ=100,见图2a,但是在其“直线方程推导原理”以及“相似三角形推导原理”的推导过程中,第一步就将P₁点的纵坐

标推导为Y=P₁C₁=Q,出发点就出现错误。假设极端情况下,某砂岩样品长石F与岩屑R的含量为0,石英Q的含量为100%,这一点在三角图中应该是三角形的石英顶点Q;而按照文中的投点公式,这一点横坐标值为50,坐标值为Y=100,见图2a点Q',三边长度均为100的等边三角形,底边上的高仅仅为(√3)/2×100,该点在三角图中的投点已经溢出三角形的范围。也就是说,这种推导仍然是按照底边=底边上的高=100的等腰三角形进行的,已经不是等边三角形,而造成这种推导错误的原因是没有正确认识两种三角形图版读值的本质区别。

2.1.2 等腰三角形的错误

首先是直线方程的推导,如图2b,直线L₂为经过等腰三角形中任意一点P₂(X,Y)的平行于底边的直线,直线L₂的解析方程为Y=Q,即P₂点纵坐标为这一点的石英含量Q_{P2};经过P₂点与Q点的直线M₂与底边相交于B₂,B₂的坐标值为(X₀,0),作者根据投点规则,推导:

$$X_0 = \frac{100R_{B_2}}{(F_{B_2} + R_{B_2})}$$

再通过B₂(X₀,0)与Q(50,100)以两点式的方式列出来M₂的直线方程:

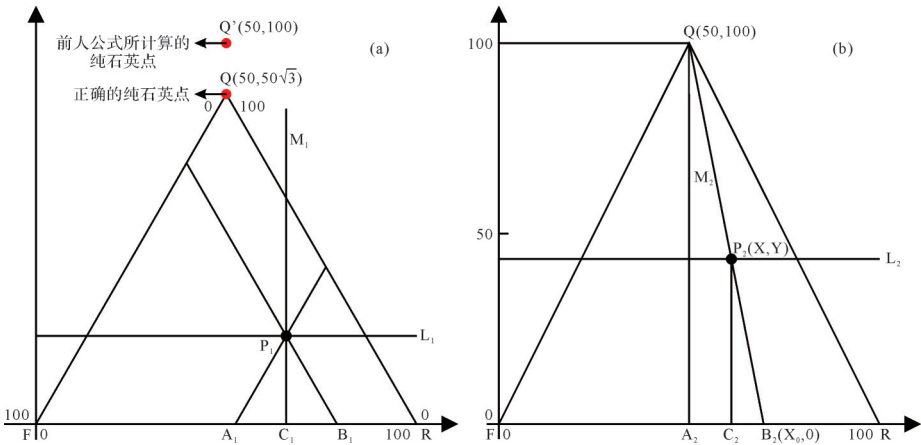


图2 前人使用的推导图(据文献[42]修改)
Fig.2 Derivation plots used by predecessors (modified from reference [42])

表1 前人推导过程中的错误总结

三角形形态与推导方式	错误点
等边三角形(解析+平面几何推导)	推导过程中,以y=q的方式投点,理论上,含量100%的纯石英在图中投点将溢出三角形边框范围
等腰三角形(解析几何推导)	忽略方程(1)中不同两点B ₂ 与P ₂ 点的角标,将不同两点的同一参数进行化简,强行推导
等腰三角形(平面几何推导)	忽略方程(6)中不同两点B ₂ 与P ₂ 点的角标,将不同两点的同一参数进行化简,强行推导

$$\frac{Y-100}{X-50} = \frac{0-100}{X_0-50}$$

由于要求取的是直线 M_2 上 P_2 点的横坐标值, 则代入 $Y=Q_{P_2}$ 可得

$$(Q_{P_2} - 100) \left(\frac{100R_{B_2}}{F_{B_2} + R_{B_2}} - 50 \right) = -100(X - 50)$$

又由于各个点的三端元组分相加均为 100, 所以 $Q_{P_2} - 100 = -(F_{P_2} + R_{P_2})$, 即 X 的取值方程化简为:

$$(F_{P_2} + R_{P_2}) \left(\frac{100R_{B_2}}{F_{B_2} + R_{B_2}} - 50 \right) = 100(X - 50) \quad (1)$$

由于 P_2 点与 B_2 点石英含量是不同的, 所以两点的长石与岩屑的含量之和一定是不相等的, 即

$$(F_{P_2} + R_{P_2}) \neq (F_{B_2} + R_{B_2}) \quad (2)$$

求取 P_2 点横坐标的方程无法继续进行化简。但在文中, 作者忽略了 P_2 点与 B_2 点的差别, 当隐去(1)式中两点的下标, 继续推导, 就可以得到

$$X = R + \frac{Q}{2} \quad (3)$$

接下来是相似三角形的推导, 如图 2(b), C_2 点为过等腰三角形中任意一点 $P_2(X, Y)$ 做底边的垂线, 与底边的交点。可知 P_2 点的横纵坐标值为

$$X = FC_2 = FB_2 - C_2B_2 = \frac{100R_{B_2}}{(F_{B_2} + R_{B_2})} - C_2B_2 \quad (4)$$

$$Y = P_2C_2 = Q_{P_2}$$

由于 $\triangle P_2C_2B_2 \sim \triangle QA_2B_2$, 则

$$\frac{C_2B_2}{A_2B_2} = \frac{P_2C_2}{QA_2}$$

可得

$$C_2B_2 = \left(\frac{Q_{P_2}}{100} \right) \left(\frac{100R_{B_2}}{(F_{B_2} + R_{B_2})} - 50 \right)$$

即

$$C_2B_2 = \frac{Q_{P_2}R_{B_2}}{(F_{B_2} + R_{B_2})} - \frac{Q_{P_2}}{2} \quad (5)$$

将方程(5)代入到方程(4)中得

$$X = \frac{100R_{B_2}}{(F_{B_2} + R_{B_2})} - \frac{Q_{P_2}R_{B_2}}{(F_{B_2} + R_{B_2})} + \frac{Q_{P_2}}{2}$$

即

$$X = \frac{R_{B_2}(100 - Q_{P_2})}{(F_{B_2} + R_{B_2})} + \frac{Q_{P_2}}{2}$$

由于任意一点的三端元组分之和为 100, 则

$$X = \frac{R_{B_2}(F_{P_2} + R_{P_2})}{(F_{B_2} + R_{B_2})} + \frac{Q_{P_2}}{2} \quad (6)$$

由于方程(2)的存在, 方程(6)无法再继续进行化简。而在文中, 作者仍然忽略两点石英含量不同的差别, 可以看到, 在隐去两点下标, 方程(6)即可化简为方程(3)。

在等腰三角形中的推导中, 由于其坐标转换的结论是“正确”的, 很多读者会忽略这看似正确的推导过程, 而没有注意到其中的逻辑性错误。

2.2 等边三角形投点规则

首先规定三条边的顶点分别为 QFR , 使 F 点做为直角坐标系的原点, 如图 3a 所示, 等边 $\triangle QFR$ 的三条边长度分别为 100, 按照逆时针方向增大, 底边代表岩屑(R)含量, 右侧边代表石英(Q)含量, 左侧边代表长石(F)含量。经过三角形中任意一点 A , 分别做三条边的平行线, 且经过 A 点做 X 轴的垂线, 交点分别

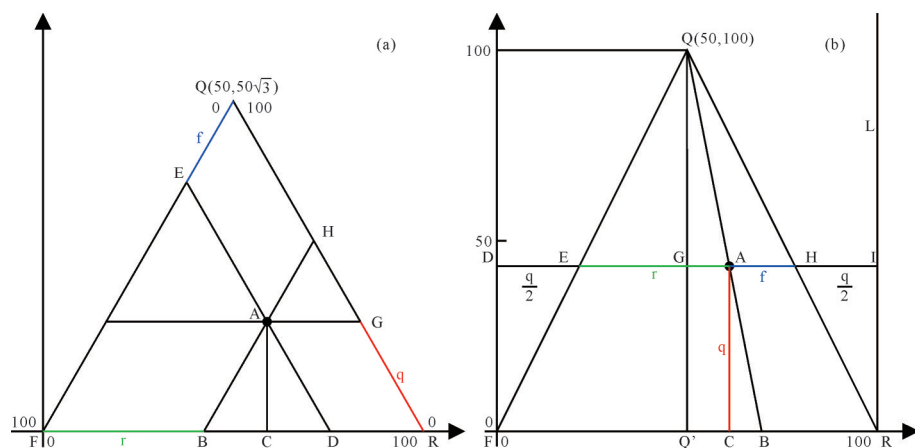


图3 两种三角形投点原理图

Fig.3 Projection principle plots for two triangles

标在图中,三个组分的数值分别为石英(Q):RG=q;
长石(F):EQ=f;岩屑(R):FB=r。

推导X值:由平面几何关系,易知AD=GR=q,又
△ABD为等边三角形,则

$$X = FC = FB + BC = r + \frac{q}{2}$$

推导Y值:△ABD是边长为q的等边三角形,则

$$Y = AC = \frac{\sqrt{3}}{2} AD = \frac{\sqrt{3}}{2} q$$

2.3 等腰三角形投点规则

建立直角坐标系,定点F(0,0),Q(50,100),R(100,0),规定等腰三角形三条边的顶点分别为QFR,QF=QR为腰,过Q点做底边FR的垂线,交于Q',如图3b所示,可知FR=QQ'=100。经过三角形中任意一点A,连接QA,并延长至FR边,与FR边交于B点;经过A点做FR边的垂线,与FR边交于C点;过R点做Y轴的平行线L,经过A点做FR边的平行线,与Y轴、两条侧边、QQ'以及L分别交于D、E、G、H、I点;三个组分的数值分别为石英(Q):q;长石(F):f;岩屑(R):r。

对于A点,坐标系的Y轴即为其Y轴,直线EH即为其X轴,EA在EH上的长度占比代表岩屑组分在岩屑+长石组分中的百分比。

推导Y值:由投点规则易知,A点的纵坐标值Y=AC=q;

推导X值:

GQ'=AC=q,则QG=100-q;又△QFR~△QEH,且QFR为底边与底边上的高相等的等腰三角形,所以EH=QG=100-q;

又DE+EH+HI=DI,且DI=FR=100,则DE+HI=

100-EH=q;

且△DEF≌△IHR,DE=IH,则

$$DE = \frac{q}{2}$$

由读值规则知

$$\frac{EA}{EH} = \frac{r}{(f+r)}$$

又由于EH=100-q,且q+f+r=100,即EH=f+r;则

$$EA = EH \frac{r}{(f+r)} = r \quad (7)$$

$$AH = DI - DE - HI - EA = f$$

最终可得

$$X = FC = DE + EA = \frac{q}{2} + r$$

至此,可以证明,等边三角形与等腰三角形在坐标转换时的横坐标转换公式相同,均为X=r+q/2,但这其中却反应着不同的读值思维,有质的差别。且可以发现,线段EA、AH、AC的绝对长度,分别为A点岩屑、长石、石英的含量,可以使用三条线段的绝对长度快速读值判断三端元的含量。

3 图版建立

等边三角形的三角图没有特别的图版,一般为方便读值,作图者会在三角形内部画出分别与三条边平行的辅助线,如图4a。

对于等腰三角形,国内油气田常用的图版会划分出r/(f+r)=25%,r/(f+r)=50%,r/(f+r)=75%三条辅助线,分别对应r/f=1:3,r/f=1:1,r/f=3:1,这几条辅助线不都呈特殊的角度,下面证明划分出来的区域符合砂岩分类的区间要求:

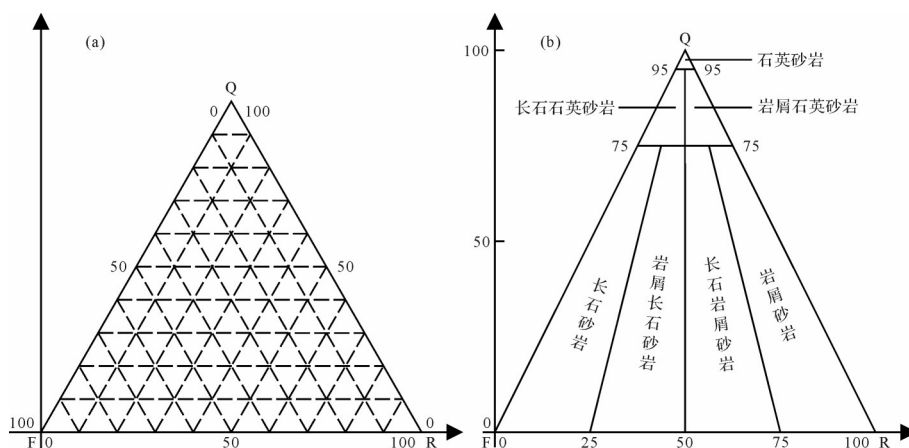


图4 等边三角形及国内油田常用三角图版

Fig.4 Equilateral triangle plot and plot commonly applied in domestic oilfields

在图3b中, $\triangle QEA \sim \triangle QFB$; $\triangle QAH \sim \triangle QBR$; 则

$$\frac{EA}{FB} = \frac{QA}{QB} = \frac{AH}{BR}$$

设 $EA=m$, $AH=n$, $FB=M$, $BR=N$, $EA/FB=QA/QB=AH/BR=\alpha$; 可知

$$\frac{EA}{EH} = \frac{EA}{(EA+AH)} = \frac{m}{(m+n)}$$

$$\frac{FB}{FR} = \frac{FB}{(FB+BR)} = \frac{M}{(M+N)}$$

又 $m=\alpha M$ 且 $n=\alpha N$, 则可以推出:

$$\frac{EA}{EH} = \frac{FB}{FR} \quad (8)$$

公式(8)说明等腰三角形内经过顶点Q的与底边FR相交的任意一条直线上的点的岩屑在其长石+岩屑的组分中的含量百分比是相等的, 即这条直线上的所有点, 其 $r/(f+r)$ 或 r/f 都是相等的。

在等腰三角形中, 连接Q点与FR边上的25%与75%两点, 并截去石英含量 $q>75\%$ 以上的部分; 通过Q点做FR边上的垂线, 并截去石英含量 $q>95\%$ 以上的部分, 即是国内油气田最常用的砂岩分类图版, 如图4b。

4 等边三角形的进阶拓展应用

4.1 “两边一高”砂岩分类图版

在明确两种三角形的读值与投点规则后, 可以将两种三角形的思维结合起来使用。朱筱敏主编的《沉积岩石学》教材(2008)中, 倡导了一种在华东石油学院(现中国石油大学(华东))于1975年编制的砂岩分类方案基础上改进的分类方案, 如图5a, 虽然使用广泛程度不如等腰三角形, 但近年来也有学者在

使用^[43-44], 这种三角图使用了3个坐标轴, 可将其形象地称为“两边一高”砂岩分类三角图。其投点与读值规则仍为等边三角形的相应规则, 但进行了一些等价变换。在图5b中, 梯形QFBH为等腰梯形, 即 $QH=FB=r$, 以QF边作为判断长石含量的坐标轴, 以QR边作为判断岩屑含量的坐标轴, 将底边FR上的高QQ'作为判断石英含量的坐标轴, $AD=GR=q$, 由于 $\triangle ADC \sim \triangle QRQ'$, 则 $AD/QR=AC/QQ'$, 可知AC在QQ'中的所占百分比即为石英的含量, 即

$$q = \frac{AC}{QQ'} \times 100\% \quad (9)$$

为读值方便, 可以把将QQ'看做100%, AC相对于QQ'的长度为石英的含量q。等边三角形的投点是按照绝对长度进行的, 而石英的读值则是取的AC边在QQ'边上的相对占比, 这也是前人推导出现错误的原因。

4.2 “三边一高”砂岩分类图版

另外, 文献[45-47]使用了文献[48]提出的砂岩分类方案, 如图6a, 这种分类方式相对来讲是最复杂的一种, 一共使用了4个坐标轴, 可以称为“三边一高”砂岩分类三角图, 投点与读值规则仍为等边三角形的规则。与图5b的变换规则相似, 见图6b, 以QF边作为判断长石含量的坐标轴, 以QR边作为判断岩屑含量的坐标轴, 将底边FR上的高QQ'作为判断石英含量的坐标轴; 对于三角形内任意一点A, 连接QA并延长至FR边与FR边交于B点; 通过A点做FR边的垂线, 交于C点; 通过A点做三条边的平行线, 与三边的交点如图6b所示, 由等边三角形的平面几何关系, 易知 $EA=r$, $AH=f$, 与等腰三角形的公式(7)相同; 继续借鉴公式(8)的证明过程, 可以说明直线QB上

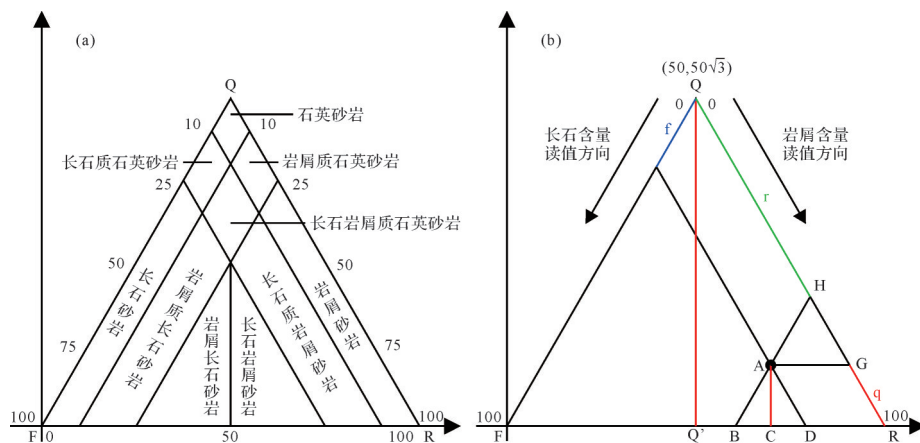


图5 “两边一高”砂岩分类三角图

Fig.5 Ternary plots for sandstone classification with two side axes and one high axis

的点,其 $r/(f+r)$ 的值或者 r 与 f 的相对比例关系是相同的。在图6a中,连接Q在FR边上的25%与75%两点,分别截去 $f<25\%$ 与 $r<25\%$ 的部分;通过Q点做FR边上的垂线,截去 $q>90\%$ 的部分以及 $50\%<q<75\%$ 的部分,即是“三边一高”砂岩分类图版。

5 实例验证与作图对比

5.1 Excel作图

以 $F(0,0)$, $Q(50,50\sqrt{3})$, $R(100,0)$ 绘制图7a的边框,将Q点换成 $Q(50,100)$,绘制图7b的边框。利用国外某油田的砂岩产层数据进行投点验证。由投点规则的推导知,等边三角形与等腰三角形在X轴上投点公式相同,在Y轴上的投点相差一个系数 k ,即 $\frac{\sqrt{3}}{2}$ 。在Excel中保持这两种投点公式的X轴绝对长

度相同,调整纵向的尺度,使其均呈现等边三角形的形态,图7a中,纵向与横向的绝对长度相同,即纵向1个单位的绝对长度=横向1个单位的绝对长度,而图7b中,纵向与横向的绝对长度使不相同的,即纵向1个单位的绝对长度=横向 $\frac{\sqrt{3}}{2}$ 个单位的绝对长度。

当将图7a中的纵向坐标系重新分配,以Q点的纵坐标高度为100,即为图7b。这里需要注意的是,图7b中是按照等腰三角形的投点经过拉伸压缩变换成等边三角形的,成为等边三角形后,其三条边的绝对长度代表三端元组分的含量;某一点纵向的绝对长度并不是石英的含量,而其在纵向坐标轴上的占比才是石英的含量,即公式(9)所表达的含义。

在两类三角形图版中分别添加表2中的国内油田常用砂岩分类图版中的辅助线,经过拉伸压缩变换,可以分别形成等边三角形砂岩分类图版以及等

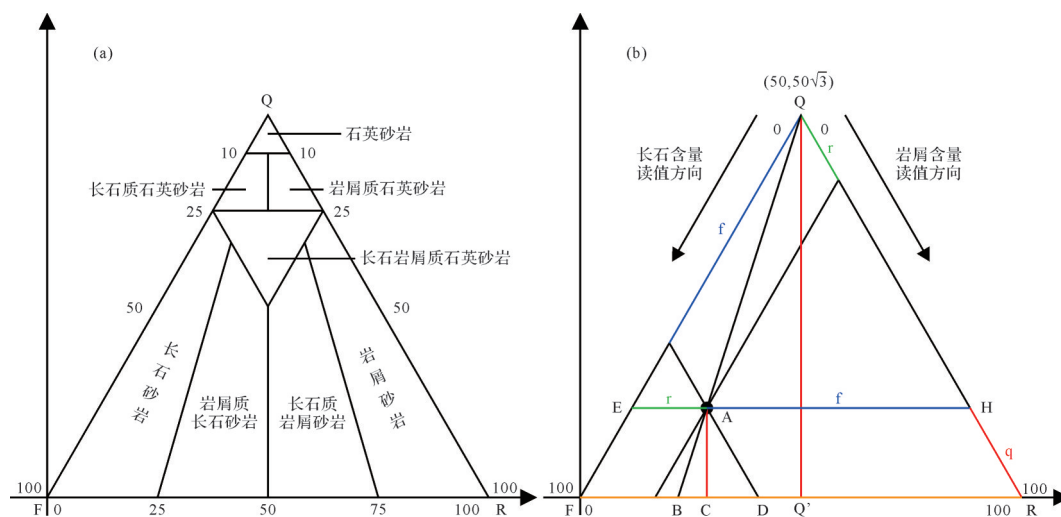


图6 “三边一高”砂岩分类三角图

Fig.6 Ternary plots of sandstone classification with three side axes and one high axis

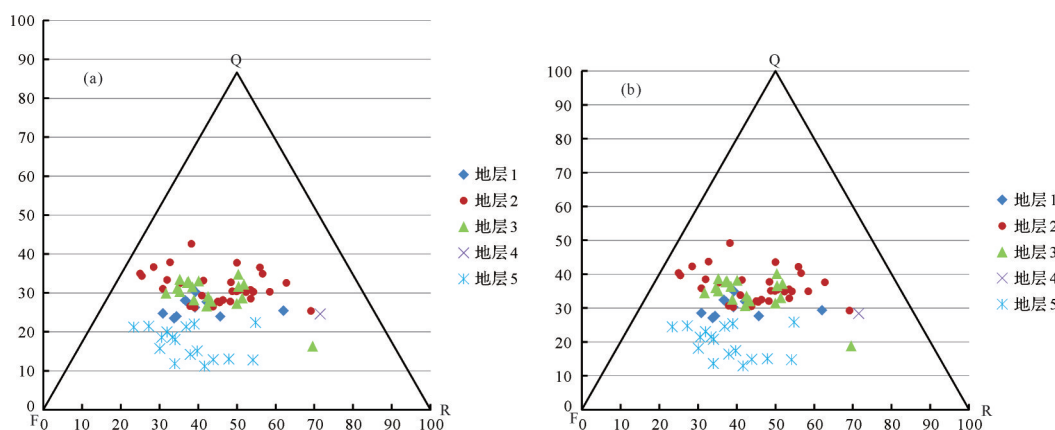


图7 Excel绘制等边三角形

Fig.7 Mapping equilateral triangles using Excel

腰三角形砂岩分类图版。由图7可知,不管采用哪种投点方式,三角形形态均可以相互转化。为方便对比,直接取等腰三角形的投点方式进行调整成图(图8)。可以看到,两个图版的投点分类结果是一致的,在图4b划分出来的各个区域中,图8a与图8b完全相同,而不同的是它们的读值规则与相应的坐标轴,图8a的读值规则遵循传统等边三角形的规则,三条边即为坐标轴,通过某一点分别作三条边的平行线进行读值;图8b遵循等腰三角形的规则,并且经过2.3节的推导,某一点的高值为石英含量,通过这点与x轴平行且与三角形侧边相交的线段,以该点为分界点,左右两条线段分别为岩屑、长石的含量。而使用者在应用的过程中,有时没有明确区分两类三角形的形状,需要读者们自行注意两类三角形的读值区别。并且,笔者提倡在使用国内油田常用的砂岩分类图版时,采用等腰三角形的方式,因为等腰三角形的读值规则为水平或垂直的方式,更符合传统直角

坐标系的使用习惯;而等边三角形的读值规则中,石英、长石、岩屑的读值分别需要采用0°、120°、60°的线段进行辅助,在实际使用中,不够直观。

5.2 Origin 与 Grapher 作图

使用同一组数据,分别使用Origin 与 Grapher 软件进行三角图绘制,如图9所示。可以看到,绘制出的三角图与 Excel 的成图完全一致,虽然无法知晓这两种软件的后台程序代码,但可以确定其投点方式与理论推导出来的方程一致,无论是用等边三角形的方程还是等腰三角形的方程投点,三条边的坐标轴都是要经过均一化的处理,保持三条边的绝对长度相等。

两款软件的成图优点就是快速便捷。描述碎屑岩的矿物顺序一般为“石英—长石—岩屑”,这种排序会出图错误。需要注意的操作问题是 Origin 在成图前,先要设置好三条轴,即岩屑为 x 轴、石英为 y 轴、长石为 z 轴;而 Grapher 是在成图后,重新设置并对应坐标轴。

表2 国内油田常用的砂岩分类图版中辅助线节点坐标

Table 2 Coordinates of auxiliary line nodes in sandstone classification charts commonly used in domestic oilfields

矿物含量			等边三角形内部框线		等腰三角形内部框线	
石英 Q	长石 F	岩屑 R	$x=r+\frac{q}{2}$	$y=q\times\frac{\sqrt{3}}{2}$	$x=r+\frac{q}{2}$	$y=q$
95	5	0	47.5	82.27	47.5	95
95	0	5	52.5	82.27	52.5	95
75	25	0	37.5	64.95	37.5	75
75	0	25	62.5	64.95	62.5	75
75	18.75	6.25	43.75	64.95	43.75	75
0	75	25	25	0	25	0
95	2.5	2.5	50	82.27	50	95
0	50	50	50	0	50	0
75	6.25	18.75	56.25	64.95	56.25	75
0	25	75	75	0	75	0

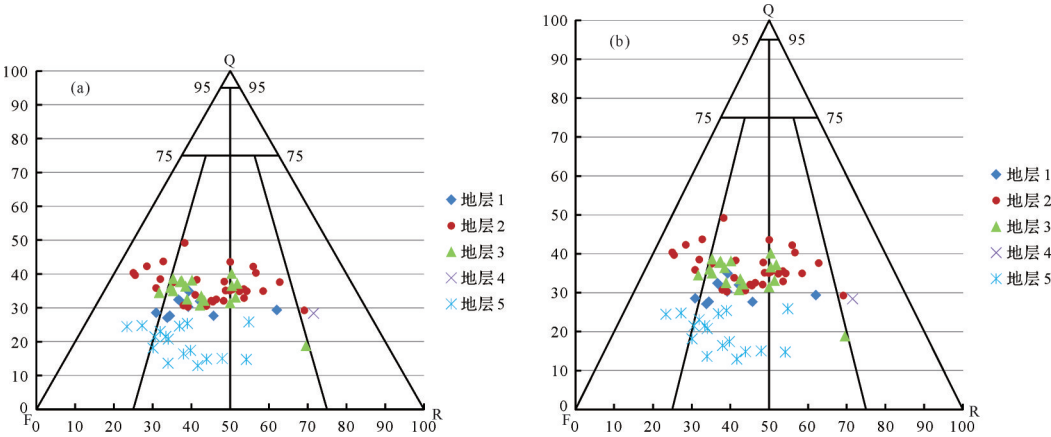


图8 Excel 绘制国内油田常用的等边三角形和等腰三角形两类图版

Fig.8 Mapping equilateral and isosceles ternary plots using Excel, commonly used in domestic oilfields

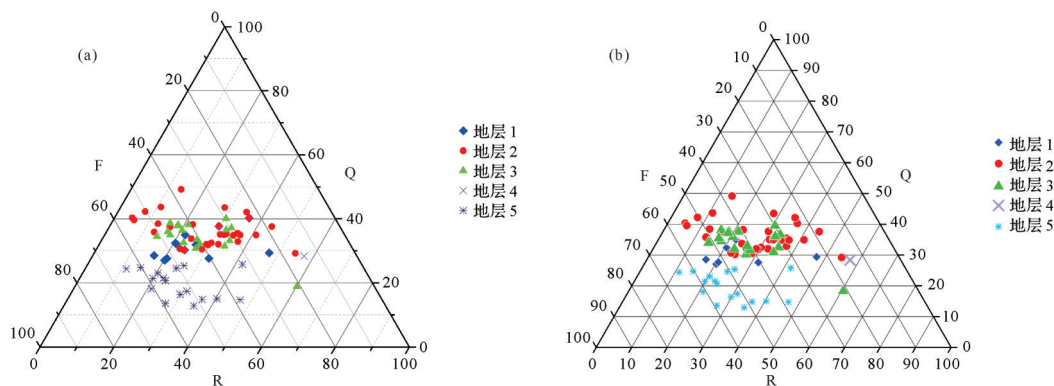


图9 Origin (a)与 Grapher (b)三角图对比
Fig.9 Comparison of (a) Origin, and (b) Grapher ternary plots

软件成图的缺点是只能按照设定好的模板对三角图内部平行于三条边的辅助线进行调整,各种地质图所需要的内部框线无法在软件中直接绘制出来;两款软件中的三角图不能实现不等比例的拉伸变换,其三角图只能保持等边三角形的状态,无法根据实际需要自定义三角形的形态。

6 分类图版及操作过程

6.1 手动生成图版

为计算方便,采用等腰三角形的计算投点方式,对每个点的x与y值进行计算。按照(100,0)、(0,0)、(50,100)、(100,0)的顺序在Excel中插入“带直线的散点图”,即可生成三角形边框。分别以两点为一组的方式添加表2中等腰三角形的内部框线或表3中“三边一高”三角图的内部框线,可形成“国内常用”或“三边一高”砂岩分类图版。在图版中按照地层顺序添加矿物含量数据点,拉伸调整好三角形的形态,复制矢量图,在CorelDraw中进行辅助信息的添加,即可完成砂岩的分类投点。

如前所述,“国内常用”图版既可以是等腰,也可以是等边的形态,读值规则会有差别,但“三边一高”图版应保持等边三角形的形态,因为其两条侧边在读值时起到坐标轴的作用。

6.2 自动生成图版

当需要反复多次进行三角图绘制,手动绘制工作量较大,为方便作图者快速完成砂岩分类工作,笔者对“国内常用”以及划分更为详细的“三边一高”砂岩分类图版进行了VBA编程,两类图版代码将在国家冰川冻土沙漠科学数据中心发表,读者下载后可以直接复制运行,快速绘制。

本代码适用于准备采用“国内常用”或“三边一高”图版进行分类的砂岩地层,且各个散点已经按照石英+长石+岩屑=100%的规则将砂岩的三端元组分数据进行归一化处理,分类目的既可以通过砂岩类型的变化来表征某一体系域内水动力的变化,也可以是常规的砂岩储层性质描述,还可以是不同含油气盆地砂岩储层类型的对比等。代码需要在Excel 2016及以上的版本中运行,否则可能会出现无

表3 “三边一高”砂岩图版中内部框线

矿物含量			内部框线		矿物含量			内部框线	
石英Q	长石F	岩屑R	x	y	石英Q	长石F	岩屑R	x	y
90	10	0	45	90	75	0	25	62.5	75
90	0	10	55	90	50	25	25	50	50
75	25	0	37.5	75	0	75	25	25	0
75	0	25	62.5	75	66.67	25	8.33	41.67	66.67
90	5	5	50	90	0	50	50	50	0
75	12.5	12.5	50	75	50	25	25	50	50
75	25	0	37.5	75	0	25	75	75	0
50	25	25	50	50	66.67	8.33	25	58.33	66.67

法编译的情况。操作过程如下:

(1) 创建Excel文档,一般情况下,直接创建的文档为不开启宏的状态。点击文件—选项—自定义功能区—在主选项卡中勾选开发工具,Excel工具栏中出现开发工具选项;再点击信任中心—信任中心设置—宏设置—启用所有宏,点击确定。将文件另存为启用宏的工作簿(即xlsm格式)。

(2) 以图10中的表格结构对石英、长石、岩屑数据进行整理,程序中给出了10套地层的自动投点,每一套地层可以容纳4997个点,如需增加,可以修改代码。这里需要注意的是,表格的结构框架必不可少,与图10中完全一致,即从第四行开始是数据,投点列依次为DE、IJ、NO、ST、XY……第十套地层的投点列应为AW与AX。

(3) 点击开发工具—Visual Basic—插入—模块—插入—模块,在模块1中粘贴“国内常用”代码,在模块2中粘贴“三边一高”代码,关闭Visual Basic界面。

(4) 点击开发工具—插入按钮(窗体控件)—在Excel表格区域创建两个按钮—分别指定宏指令。

(5) 分别点击按钮,即可自动投点生成两类三角图(图10)。本程序给定的诸如框线粗细、坐标轴显示以及各分组中散点的形状与颜色等各种属性的默认值可能不符合作图者的需求,作图者可以在成图

后对三角图的这些属性进行修改。

7 结论

三角图版对于相加等于1或100的三组分的划分十分合理,在地质专业中应用最广泛的当属砂岩分类三角图,种类繁多,各种辅助线纵横交错,但基本的读值投点规则是一致的。如果是三边绝对长度相等的等边三角形,其三条边就可以作为读取数值的坐标轴,经过推导变换,可以将两条侧边作为长石与岩屑的坐标轴,可以将底边上的高作为石英的坐标轴,但“高”的绝对长度并不是石英的含量,某点高值在底边上的高的占比才是石英的含量;如果是底边与高值相等(100)的等腰三角形,其两条侧边则不能作为坐标轴,某点的高值的绝对长度即为石英的含量,通过这一点的平行于X轴的与三角形相交的内部线段可以作为判断岩屑与长石含量的坐标轴,这条线段上以这一点为分界点,两段长度分别为两种矿物的含量。

前人对于两种三角形的推导的逻辑性错误是由于没有明确分清两种三角图的读值规则区别,投点方式也并非完全一样。此外,按照等边三角形的投

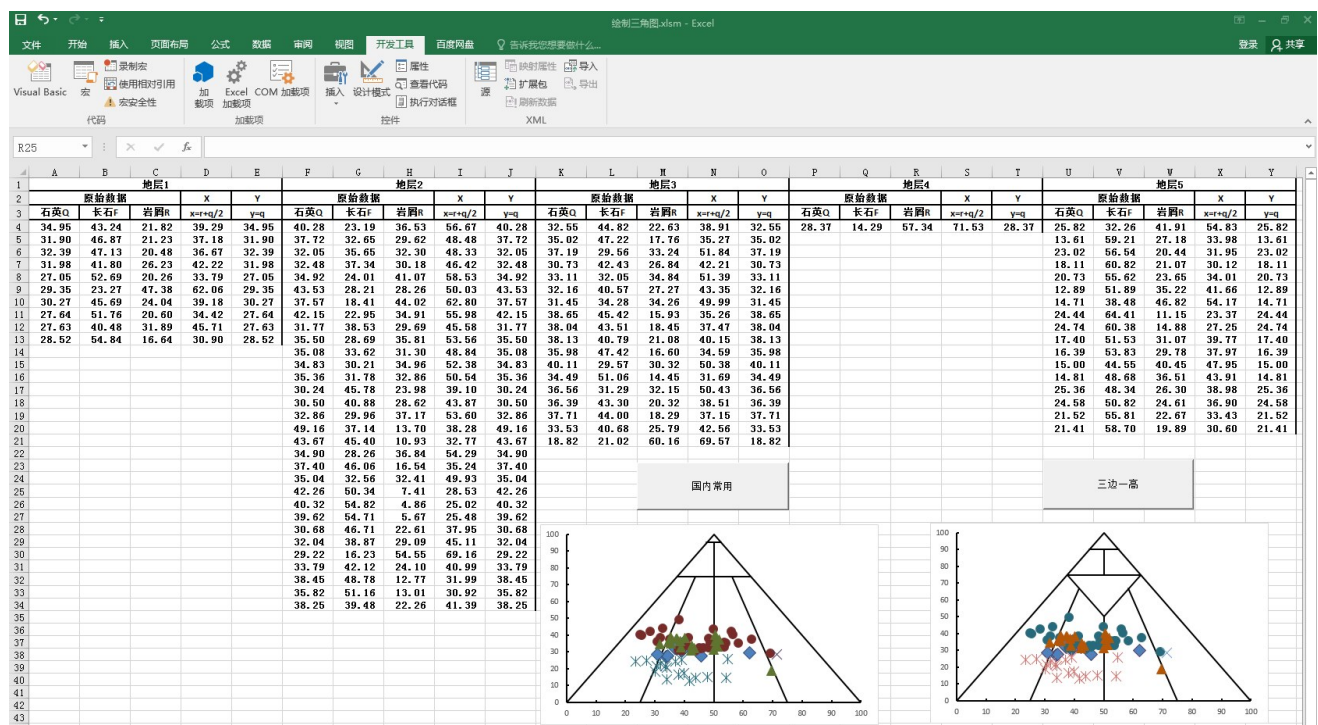


图10 Excel结构框架与VBA程序运行效果图

Fig.10 Excel structure frame and VBA program running effect chart

点方式拉伸调整成等腰三角形=等腰三角形投点方式的等腰三角形,或者按照等腰三角形的投点方式拉伸调整成等边三角形=等边三角形投点方式的等边三角形这两种容易混淆的转化,使得前人得出“无论是哪种三角形形态,投点规则都是一致的”结论。

Origin 与 Grapher 软件可以快速绘制三角图,在没有特别需求的情况下,推荐使用。但涉及到三角形内部的特殊分隔线段、不规则分区、坐标轴标题位置转变以及添加文本描述等情况时,则需要使用 Excel 结合地质绘图软件如 CorelDraw 等进行绘图。如果需要进行多次绘制三角图版,可以采用本文所附录的 VBA 程序代码,简化制图过程。

致谢 感谢审稿专家及编辑部工作人员提出的宝贵意见,使论文质量进一步提高。本文所涉及的 VBA 编程代码可通过国家冰川冻土沙漠科学数据中心获取 <http://www.ncdc.ac.cn/portal/magazine>。

参考文献(References)

- [1] 张立强,纪友亮. 羌塘盆地侏罗系低渗透砂岩储层成因分类及有利储层预测[J]. 石油大学学报(自然科学版),2001,25(5): 6-10. [Zhang Liqiang, Ji Youliang. Genesis types of low-permeability Jurassic sandstone reservoirs and prediction of favorable reservoirs in Qiangtang Basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2001, 25(5): 6-10.]
- [2] 林景晔,林铁锋,施立志. 油气藏三元分类方法的探讨[J]. 大庆石油地质与开发,2007,26(3): 18-21. [Lin Jingye, Lin Tiefeng, Shi Lizhi. Research on ternary classification of oil and gas reservoir[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(3): 18-21.]
- [3] 陈宇航,朱增伍,贾鹏,等. 重力流沉积砂岩的成因、改造及油气勘探意义[J]. 地质科技情报,2017,36(5): 148-155. [Chen Yuhang, Zhu Zengwu, Jia Peng, et al. Genetic mechanism and rework of deep-water sedimentary sand and its significance for petroleum exploration[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(5): 148-155.]
- [4] Atwah I, Sweet S, Pantano J, et al. Light hydrocarbon geochemistry: Insight into Mississippian crude oil sources from the Anadarko Basin, Oklahoma, USA[J]. Geofluids, 2019, 2019: 2795017.
- [5] 于娟,易立文,谢炳庚,等. 青海卡而却卡铜多金属矿床矿石矿物化学成分特征研究[J]. 地质学报,2020,94(12): 3776-3789. [Yu Juan, Yi Liwen, Xie Binggeng, et al. Study of chemical composition characteristics of ore mineral in the Kaerqueka copper-polymetal deposit, Qinghai province[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(12): 3776-3789.]
- [6] 魏巍,朱筱敏,朱世发,等. 二连盆地额仁淖尔凹陷下白垩统湖相云质岩优质储层特征及控制因素[J]. 地学前缘,2021,28(1): 214-224. [Wei Wei, Zhu Xiaomin, Zhu Shifa, et al. Characteristics and control mechanism of high quality reservoir of lacustrine dolomitic rocks from the Lower Cretaceous of the Eren-naoer Sag, Erlian Basin, northeastern China[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 214-224.]
- [7] 王婷灏,汪新伟,毛翔,等. 沧县隆起北部地区地热资源特征及开发潜力[J/OL]. 中国地质,2021-02-22. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210222.1056.002.html>. [Wang Tinghao, Wang Xinwei, Mao Xiang, et al. Characteristics and development potential of geothermal resources in northern Cangxian uplift[J/OL]. Geology in China, 2021, 02-22. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210222.1056.002.html>.]
- [8] 肖洪,李美俊,杨哲,等. 不同环境烃源岩和原油中C₁₉~C₂₃三环萜烷的分布特征及地球化学意义[J]. 地球化学,2019,48(2): 161-170. [Xiao Hong, Li Meijun, Yang Zhe, et al. Distribution patterns and geochemical implications of C₁₉-C₂₃ tricyclic terpanes in source rocks and crude oils occurring in various depositional environments[J]. Geochimica, 2019, 48(2): 161-170.]
- [9] Liu B, Zhang G Y, Mao F J, et al. Geochemistry and origin of Upper Cretaceous oils from the Termit Basin, Niger[J]. Journal of Petroleum Geology, 2017, 40(2): 195-207.
- [10] Gao G, Zhang W W, Ma G F, et al. Mineral composition and organic geochemistry of the Lower Cretaceous Xigou Formation source rock from the Qingxi Sag, Jiuquan Basin, Northwest China[J]. Petroleum Science, 2018, 15(1): 51-67.
- [11] El-Sabagh S M, El-Naggar A Y, El Nady M M, et al. Distribution of triterpanes and steranes biomarkers as indication of organic matters input and depositional environments of crude oils of oilfields in Gulf of Suez, Egypt[J]. Egyptian Journal of Petroleum, 2018, 27(4): 969-977.
- [12] Fang R H, Littke R, Zieger L, et al. Changes of composition and content of tricyclic terpane, hopane, sterane, and aromatic biomarkers throughout the oil window: A detailed study on maturity parameters of Lower Toarcian Posidonia Shale of the Hils Syncline, NW Germany [J]. Organic Geochemistry, 2019, 138: 103928.
- [13] Mullen E D. MnO/TiO₂/P₂O₅: A minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1983, 62(1): 53-62.
- [14] Flemming B W. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams[J]. Continental Shelf Research, 2000, 20(10/11): 1125-1137.
- [15] 袁晓冬,姜在兴,张元福,等. 滦平盆地白垩系陆相页岩油储层特征[J]. 石油学报,2020,41(10): 1197-1208. [Yuan Xiaodong, Jiang Zaixing, Zhang Yuanfu, et al. Characteristics of the Cretaceous continental shale oil reservoirs in Luanping Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(10): 1197-1208.]
- [16] 董大忠,邱振,张磊夫,等. 海陆过渡相页岩气层系沉积研究进展与页岩气新发现[J]. 沉积学报,2021,39(1): 29-45.

- [Dong Dazhong, Qiu Zhen, Zhang Leifu, et al. Progress on sedimentology of transitional facies shales and new discoveries of shale gas[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 29-45.]
- [17] 金德时, 凤永刚, 雷如雄, 等. 陕西丹凤富铀伟晶岩中褐钨铋矿矿物学及地球化学特征[J]. *地质学报*, 2021, 95(2): 493-505. [Jin Deshi, Feng Yonggang, Lei Ruxiong, et al. Mineralogy and geochemistry of fergusonite-(Y) from Rb-rich pegmatites in Danfeng, Shaanxi province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(2): 493-505.]
- [18] 张妮, 武毅, 张霞, 等. 辽河坳陷大民屯凹陷古近系沙河街组三段地球化学特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 2021, 95(2): 517-535. [Zhang Ni, Wu Yi, Zhang Xia, et al. Geochemical characteristics and its implications of the third member of Paleogene Shahejie Formation from the Damintun Sag, Liaohe Depression[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(2): 517-535.]
- [19] 夏文杰. 关于砂岩分类问题[J]. *地质地球化学*, 1979(7): 15-45. [Xia Wenjie. Issue about sandstone classification[J]. *Geology-geochemistry*, 1979(7): 15-45.]
- [20] 何杰, 王华, Garzanti E. 砂岩(砂)的岩相分析和分类标准[J]. *地球科学*, 2020, 45(6): 2186-2198. [He Jie, Wang Hua, Garzanti E. Petrographic analysis and classification of sand and sandstone[J]. *Earth Science*, 2020, 45(6): 2186-2198.]
- [21] 伍劲, 刘占国, 朱超, 等. 库车坳陷依奇克里克地区中一下侏罗统深层砂岩储层特征及其物性主控因素[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(6): 58-67. [Wu Jin, Liu Zhanguo, Zhu Chao, et al. Characteristics of deep tight sandstone reservoirs of Middle-Lower Jurassic and the main controlling factors in the Yiqikelike area, Kuqa Depression [J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(6): 58-67.]
- [22] 王永诗, 高阳, 方正伟. 济阳坳陷古近系致密储集层孔喉结构特征与分类评价[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(2): 266-278. [Wang Yongshi, Gao Yang, Fang Zhengwei. Pore throat structure and classification of Paleogene tight reservoirs in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 266-278.]
- [23] Krynine P D. The megascopic study and field classification of sedimentary rocks[J]. *The Journal of Geology*, 1948, 56(2): 130-165.
- [24] Gilbert C M. Sedimentary rocks[M]//Williams H, Turner F J, Gilbert C M. Petrography. San Francisco: Freeman, 1954: 406.
- [25] Folk R L. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature[J]. *The Journal of Geology*, 1954, 62(4): 344-359.
- [26] Dott R H. Wacke, graywacke and matrix; What approach to immature sandstone classification?[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1964, 34(3): 625-632.
- [27] Folk R L. Petrology of sedimentary rocks[M]. Austin: Hemphill Publishing, 1968: 170.
- [28] 操应长, 蕙克来, 刘可禹, 等. 陆相湖盆致密砂岩油气储层储集性能表征与成储机制: 以松辽盆地南部下白垩统泉头组四段为例[J]. *石油学报*, 2018, 39(3): 247-265. [Cao Yingchang, Xi Kelai, Liu Keyu, et al. Reservoir properties characterization and its genetic mechanism for tight sandstone oil and gas reservoir in lacustrine basin: The case of the Fourth member of Lower Cretaceous Quantou Formation in the southern Songliao Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(3): 247-265.]
- [29] 袁勇, 陈建文, 梁杰, 等. 南黄海崂山隆起二叠系砂岩储层特征及其油气勘探前景[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(5): 181-193. [Yuan Yong, Chen Jianwen, Liang Jie, et al. Characteristics and hydrocarbon prospects of the Permian sandstone reservoirs of the Laoshan uplift, South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(5): 181-193.]
- [30] 明晓冉, 刘立, 刘娜娜, 等. 鄂尔多斯盆地JX井延长组砂岩固碳潜力分析[J]. *沉积学报*, 2015, 33(1): 202-210. [Ming Xiaoran, Liu Li, Liu Nana, et al. Carbon sequestration potential of Yanchang Formation sandstone of JX well, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 202-210.]
- [31] 宋士顺, 马锋, 刘立, 等. 大庆长垣扶余油层砂岩中方解石胶结物的碳、氧同位素特征及其成因[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(2): 255-261. [Song Tushun, Ma Feng, Liu Li, et al. Features and genesis of carbon-oxygen isotopes in calcite cement from sandstone in oil-bearing Fuyu layer of Daqing placanticline[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(2): 255-261.]
- [32] 周巨标. 基于核磁共振技术的储层微观特征分类评价: 以王龙庄油田阜宁组为例[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(2): 8-15. [Zhou Jubiao. Reservoir characteristics and classification evaluation based on NMR technology: An example of Funing Formation in Wanglongzhuang oilfield [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2016, 35(2): 8-15.]
- [33] 万璐璐, 李仲东, 彭超, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田山二段致密砂岩储层特征及评价[J]. *矿物岩石*, 2016, 36(3): 106-114. [Wan Yanglu, Li Zhongdong, Peng Chao, et al. Reservoir characteristics and evaluation of low porosity and permeability sandstone of member II of Shanxi Formation in Daniudi gas field, Ordos Basin [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2016, 36(3): 106-114.]
- [34] 郭臣业, 张迪, 王彪, 等. 永川煤矿延深区须六段砂岩储层特征及致密气储量估算[J]. *中国矿业*, 2016, 25(10): 110-113. [Guo Chenye, Zhang Di, Wang Biao, et al. Reservoir characteristics and estimating reserves of T3X6 dense sandstone in Yongchuan coal mine [J]. *China Mining Magazine*, 2016, 25(10): 110-113.]
- [35] 任大忠, 张晖, 周然, 等. 塔里木盆地克深地区巴什基奇克组致密砂岩储层敏感性研究[J]. *岩性油气藏*, 2018, 30(6): 27-36. [Ren Dazhong, Zhang Hui, Zhou Ran, et al. Sensitivity of tight sandstone reservoir of Bashijiqi Formation in Keshen ar-

- ea, Tarim Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30 (6): 27-36.]
- [36] 潘星,王海红,王震亮,等. 三角洲平原砂岩差异成岩及其对储层分类的控制作用:以鄂尔多斯盆地西南部殷家城地区延安组为例[J]. *沉积学报*, 2019, 37(5): 1031-1043. [Pan Xing, Wang Haihong, Wang Zhenliang, et al. Differential diagenesis of delta plain sandstone and its control on reservoir classification: A case study on Yan'an Formation in Yinjiacheng area, southwestern Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(5): 1031-1043.]
- [37] 孙东权,李文浩,卢双舫,等. 塔北隆起英买力地区舒善河组储层特征与控制因素[J]. *东北石油大学学报*, 2020, 44(6): 82-93. [Sun Dongquan, Li Wenhao, Lu Shuangfang, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of Shushanhe Formation in Yingmaili area of Tabei uplift [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020, 44(6): 82-93.]
- [38] 张大智,初丽兰,周翔,等. 松辽盆地北部徐家围子断陷沙河子组致密气储层成岩作用与成岩相特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(1): 22-34. [Zhang Dazhi, Chu Lilan, Zhou Xiang, et al. Diagenesis and diagenesis facies of tight gas reservoir of Shahezi Formation, in Xujiaweizi fault depression of north Songliao Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(1): 22-34.]
- [39] 孙海涛,钟大康,王威,等. 四川盆地马路背地区上三叠统须家河组致密砂岩储层成因分析[J]. *沉积学报*, 2021, 39(5): 1057-1067. [Sun Haitao, Zhong Dakang, Wang Wei, et al. Origin analysis of a tight sandstone reservoir for the Xujiahe Formation of the Upper Triassic at the Malubei area in the Sichuan Basin, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(5): 1057-1067.]
- [40] 王爱,钟大康,刘忠群,等. 深层致密砂岩储层特征及物性控制因素:以川东北元坝西地区须二下亚段为例[J]. *沉积学报*, 2022, 40 (2): 410-421. [Wang Ai, Zhong Dakang, Liu Zhongqun, et al. Characteristics of deep tight sandstone reservoirs and their controlling factors of physical properties: A case study of the Xu-2 member in the western Yuanba area of the northeastern Sichuan Basin, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(2): 410-421.]
- [41] 黄思静,黄喻. 用Microsoft Excel在砂岩的三角分类图上完成碎屑成分投点[J]. *成都理工学院学报*, 2002, 29(2): 213-216. [Huang Sijing, Huang Yu. Composition plots in a triangle for the classification of sandstones by Microsoft Excel [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2002, 29(2): 213-216.]
- [42] 张萌,黄思静,冯文新,等. 巧解砂岩分类三角图[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2005, 32 (4): 423-429. [Zhang Meng, Huang Sijing, Feng Wenxin, et al. Further calculating plots in a triangle for the classification of sandstones [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2005, 32(4): 423-429.]
- [43] 毛凤军,刘邦,刘计国,等. 尼日尔Termit盆地上白垩统储层岩石学特征及控制因素分析[J]. *岩石学报*, 2019, 35(4): 1257-1268. [Mao Fengjun, Liu Bang, Liu Jiguo, et al. The reservoir characteristics and controlling factors of the Upper Cretaceous sandstones in the Termit Basin, Niger [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(4): 1257-1268.]
- [44] 尤丽,范彩伟,吴仕玖,等. 莺歌海盆地乐东组储层碳酸盐胶结物成因机理及与流体活动的关系[J]. *地质学报*, 2021, 95 (2): 578-587. [You Li, Fan Caiwei, Wu Shijiu, et al. Genesis of carbonate cement and its relationship with fluid activity in the Ledong area, Yinggehai Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(2): 578-587.]
- [45] 朱筱敏,葛家旺,吴陈冰洁,等. 珠江口盆地陆丰凹陷深层砂岩储层特征及主控因素[J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊1): 69-80. [Zhu Xiaomin, Ge Jiawang, Wu Chenbingjie, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of deep sandstone in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 40(Suppl. 1): 69-80.]
- [46] 张琴,朱筱敏,毛凌,等. 苏北盆地金湖凹陷古近系戴南组孔隙演化及次生孔隙成因分析[J]. *地学前缘*, 2021, 28(1): 190-201. [Zhang Qin, Zhu Xiaomin, Mao Ling, et al. Pore evolution and genesis of secondary pores in the Paleogene Dainan Formation, Jinhu Sag, Subei Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(1): 190-201.]
- [47] 曹江骏,王茜,范琳,等. 深水致密砂岩储层特征及成岩相分析:以鄂尔多斯盆地西峰地区长7油层组为例[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(1): 80-94. [Cao Jiangjun, Wang Xi, Fan Lin, et al. Deep water tight sandstone reservoir characteristics and diagenetic facies analysis: A case study of Chang 7 oil-bearing formation in Xifeng area, Ordos Basin, NW China [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(1): 80-94.]
- [48] 雷卞军,阙洪培. 砂岩分类新方案[J]. *西南石油学院学报*, 2002, 24(5): 11-14. [Lei Bianjun, Que Hongpei. A review and new proposal of sandstone classification [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2002, 24(5): 11-14.]

The Principle and Fast Drawing of Ternary Plots and Their Application in Sandstone Classification

SHAN YunPeng¹, WANG HongJun¹, ZHANG LiangJie¹, BAI ZhenHua¹, SU PengHui¹, HE YingXu², MENG WeiKang³, LIU HangYu⁴, CHENG MuWei¹

1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China

2. Bohai Petroleum Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC, Tianjin 300459, China

3. Engineering Technology Branch of Energy Development Co., Ltd., CNOOC, Tianjin 300452, China

4. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: The ternary plot method is widely used in geological industries, especially in sandstone classification. However, many researchers do not appear to have a deep understanding of its principle. Demonstrations of the technique in individual much-cited publications are cumbersome, and even wrongly derived in some cases. This study systematically derives the principle of ternary plots from plane geometry, and how to read them. The errors of logic in the derivation by previous authors are pointed out and corrected. Finally, a comparison of ternary plots generated by Excel, Origin and Grapher software shows distinctions in the projection methods using an equilateral triangle or an isosceles triangle, and demonstrates that the plots transform each other if incorrectly operated. The shape of the triangle determines whether the side of the triangle is viewed as the ordinate axis, and whether the absolute length of the ordinate represents the quartz content. Templates provided by Origin or Grapher do not satisfy oilfield requirements. The isosceles triangle projection method in Excel is recommended, combined with geological mapping software for mapping. To reduce the workload, the VBA code written in this paper can be used to quickly draw a ternary plot for sandstone classification.

Key words: ternary plot reading rules; ternary plot projection principle; sandstone classification plot; comparison of Excel, Origin and Grapher; VBA programming code