科学通报 2017 年 第 62 卷 第 1 期: 79 ~ 89
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

雷达图在地球科学研究中的应用及其意义

张旗[1*], 袁方林[2], 焦守涛[1], 刘欣雨[2], 张成立[2]

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
2. 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069
* 联系人, E-mail: zq1937@126.com

2016-06-21 收稿, 2016-08-13 修回, 2016-08-15 接受, 2016-12-08 网络版发表
中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室项目(81300001)和西北大学大陆动力学国家重点实验室自主研究课题资助

摘要 雷达图(radar chart)是多元统计图表常用的方法, 它将评价对象的指标状况投影到二维平面上, 因与导航雷达显示屏上的图像十分相似而得名. 雷达图已广泛应用于公司业绩、财务报表、人力资源以及风险评估等方面, 但在地球科学领域内应用较少, 而在岩石学、地球化学、矿床学、构造学、地球物理学等方面几乎是空白. 本文尝试探讨了将雷达图应用于玄武岩构造环境判别、蛇绿岩识别、A型花岗岩鉴别、含矿岩体和不含矿岩体的识别、成矿物源区示踪、碎屑沉积岩构造环境判别、热水沉积识别、河流黏土矿物对物源区的示踪、南黄海沉积物微量元素对比以及页岩不同矿物组合对比等方面, 取得了初步的效果. 研究表明, 雷达图在地球科学领域的用途范围广泛, 它所表达的方式比较符合地球科学的学科特点. 它不仅可以表示地球化学数据, 也可以表示其他岩石学、矿物学、构造学等方面的要素; 而且要素可以是不同的, 可依需要而定; 每个轴的计量可以灵活选用, 既可以是定性的, 也可以是有连续的数据的. 当然, 雷达图也不是万能的, 有一定的局限性. 它只是一个方法, 目的是方便观察, 解决问题.

关键词 雷达图, 地球科学, 多元统计, 地球化学, 判别图

雷达图(radar chart)是多元统计图表常用的一种方法, 它将评价对象的指标状况投影到二维平面上, 因与导航雷达显示屏上的图像十分相似而得名. 综合评价方法作为一种重要的分析方法在社会实践过程中得到广泛的应用. 雷达图最早是从企业的生产性、安全性、收益性、成长性和流动性等几方面对企业财务状态和经营现状进行直观、形象地综合分析与评价的图形, 目前已广泛应用于公司业绩、财务报表、人力资源以及风险评估等方面, 但在地球科学领域内应用较少, 仅在测井、煤田、化探、沉积、裂变径迹定年等方面有一些应用[1~6], 而在众多地球科学领域(如岩石学、地球化学、矿床学、构造学、地球物理学)几乎是空白.

1 雷达图的原理和方法

1.1 原理

在综合分析过程中, 多维数据的可视化是一个比较好的方法, 与聚类分析、因子分析、判别分析、主成分分析等一般的数理统计方法相比, 雷达图最大的优点就在于实现了多变量的可视化过程, 它可以把高维数据投影到二维空间, 并且在投影过程中不会过多损失原有信息, 具有直观、形象、易于操作等特点. 在雷达图中, 每个数据都有独立的单一数轴, 坐标呈辐射状分布在中心周围, 且通过处理可以实现每个坐标轴的数据范围不同, 是一种能够用定量指标反映定性问题的模型工具[7]. 相比单一的数据

引用格式: 张旗, 袁方林, 焦守涛, 等. 雷达图在地球科学研究中的应用及其意义. 科学通报, 2017, 62: 79–89
Zhang Q, Yuan F L, Jiao S T, et al. The application of radar chart in geoscience and its significance (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 79–89, doi: 10.1360/N972016-00722

© 2016《中国科学》杂志社

分析法, 数形结合的方法使得评价的结果更加综合、客观且兼具定量和定性的功能. 研究表明, 分析指标在3~7维时, 雷达图的使用可以提高分析的可信度, 且基于重心特征分类的雷达图比一般利用数理统计分类的雷达图结果准确度更高[8~10].

1.2 方法

在绘制雷达图之前首先要确定能够实现分析目的的最优指标组合, 不同的指标或不同的指标排列顺序都必然会导致雷达图几何特征的改变. 可利用专业的因子分析程序计算出检验值来挑选和排列各项指标[8], 也可按各项数据的权重大小来挑选和排列指标项目[11], 还有更复杂的利用样本之间的类内距离、马氏距离等分析方法实现最优指标的挑选[9]. 本文几个实例所选择的指标都是根据地球科学领域研究的成果确定的, 希望能够对判别分析起到良好的约束作用.

在具体操作中为了避免数据本身范围或量级的不同带来的影响, 作图之前需要对数据进行预处理或标准化, 最后进行投图的实际是每个指标的比重. 预处理的方法根据具体问题的差异也会不同, 本文采取的处理步骤为: (1) 按已有知识基础规定每个指标的数量范围; (2) 将研究样品的各项指标除以范围计算出指标比重; (3) 将换算后的数值用Excel软件进行雷达图成图.

雷达图的评价方法有多种, 例如重心特征法[9,11,12]、面积周长法[8,13]、特征向量法[14]等, 根据具体问题的不同可以选择不同的评价分析方法. 本文主要采取数值与几何特征相结合的方法, 通过观察数值范围和雷达图的几何形状达到分类的目的.

2 雷达图方法在地球科学领域的应用

地质研究中很多内容是确定或区分研究对象的不同性质, 例如, 玄武岩判别构造环境, 区分是否蛇绿岩, 花岗岩分类, 区别含矿岩体和不含矿岩体, 追踪沉积物物源和指示沉积环境, 变质岩原岩恢复等. 上述研究大多采用二元或三元判别图. 一个物质与另一个物质的区别, 可能有几种因素, 有4种、5种、6种或更多. 这时, 二元或三元图解就无能为力了, 需要利用更多的图解来实现. 例如A型花岗岩的识别, 不同作者有不同的见解, 提出了不同的识别标志, 如FeO^*/MgO, 10000Ga/Al, Zr+Nb+Ce+Y, Zr[15], Sr和Yb的含量, REE分布, 负铕异常大小等[16]. 上述可能都是有道理的或在大多数情况下是可能的. 如果能够综合考虑上述各种因素, 得出的结论可能比较可靠、扎实. 再比如, 在判断蛇绿岩时, 需要考虑岩石组成、地球化学指标、构造变形、混杂现象、堆晶岩序列、地幔岩出露与否、是否存在深海沉积等因素, 仅靠玄武岩判别图一种方法是无法决定的. 这时, 采用雷达图方法即可方便适用地解决上述问题. 本文的雷达图以五元和六元为主, 少数可能为八元、九元, 如果用三元和四元能够说清楚的, 就不需考虑更多元了. 如花岗岩分类, 三元或四元即可.

雷达图的每一个轴或坐标, 都是经过详细研究总结出来的, 许多是前人研究的总结或某个地区的总结或大数据研究的结论. 厘定某种物质的关键属性, 然后确定其在雷达图中的表现, 以此为依据, 采用类比的方法, 即可探求未知物质的属性. 雷达图可以采用三分法, 个别二分, 也可以是一定数据范围内的连续变化. 三分即强中弱、高中低、大中小; 如果是二分, 则取强和弱、大和小、高和低, 有些二分的指标可能存在过渡的情况, 也可采用三分法予以表示. 例如I和S型花岗岩, 有时几个不同指标的对比可能存在I和S型花岗岩之间过渡的情况, 则仍然归入三分法. 雷达图还有一个方便之处是, 不同作者可以按照自己的认识去独立构思雷达图. 雷达图说到底, 也只是一个方法, 它可以因人而异, 是有助于表达人们认识的一种表现形式. 因此, 雷达图不是固定不变的, 它的创造力是无限的, 可以不拘一格, 可应用于不同的领域, 解决不同的问题.

不同于岩石学研究中的一些判别图, 雷达图具有综合研究的功能, 它的各个轴不仅可以代表数据, 也可以指示地质现象和背景. 各个轴指标的选择和排列可以是不同的, 在这方面需要不断地探索, 探索的目的是使雷达图的效果达到最佳并便于推广. 雷达图是各种指标的综合, 在这方面, 它类似大数据的思维方式. 雷达图具体数据的作图方法在网络上可以查到, 可以随机作图, 操作灵活.

3 雷达图应用举例

3.1 玄武岩构造环境判别雷达图

玄武岩判别图是大家熟悉的, 我们的数据挖掘表明, 许多文献中常用的判别图实际上很难判别不

同类型的玄武岩，仅部分判别图可能仍然有效[17,18]. 根据最新统计的全球MORB，IAB和OIB的平均值和中位数所作的蛛网图(图1)，上述3类玄武岩最主要的区别可能在下述几个指标上.

(1) La_N/Yb_N. 即球粒陨石标准化的La/Yb比值，总的来说，OIB是强烈富集LREE的，La_N/Yb_N可能接近100; IAB是中等富集LREE的，La_N/Yb_N通常大于10; MORB是亏损LREE的，La_N/Yb_N<1. 本文将La_N/Yb_N指标从图中心向外按对数指标设定为0.1, 1, 10和100，小于1为LREE亏损的.

(2) Th/Ta. IAB的Th明显大于Ta，因此，这个比值可以把IAB与MORB和OIB区分开来；但是，无法区分开MORB和OIB，因为，它们的Th/Ta比值近似相等. 本文将Th/Ta比值设定为1, 3, 10, Th/Ta=1左右是MORB和OIB的特征，IAB的Th/Ta至少>3，大多>10，超过10的，不论超过多少，均出图表示.

(3) Yb_N. IAB的球粒陨石标准化的Yb_N是比较低的，OIB也比较低，但是，MORB的Yb_N是最高的. 利用这个指标可以区分开MORB和OIB，IAB. 本文将Yb_N指标设定为5，10和20，Yb_N小于5是玻安岩的特征，IAB和OIB的Yb_N在10左右，MORB的Yb_N可能超过20，超过20的也出图表示.

(4) Sr_N/Nd_N. Sr_N/Nd_N这个指标文献很少应用，全体数据研究表明，这个指标可能是有意义的. 从图1看，IAB明显富集Sr，显示Sr的正异常，而OIB和MORB没有很高的Sr，并不显示Sr明显亏损或富集的特征. Sr富集可能主要是从板块消减带来的. 本文将Sr_N/Nd_N指标从图中心向外设定为0，1，3，5，小于1是亏损的，大于1是富集的.

(5) Pb_N/Ce_N. 在原始地幔标准化的蛛网图中，IAB明显富集Pb，而MORB和OIB则亏损Pb，说明Pb是典型的壳源元素，在地幔中很少. Pb含量高，指示玄武岩中可能有来自消减带的陆壳物质，在某些情况下还可能指示玄武岩经历了陆壳混染作用，可用以解释大陆溢流玄武岩中Pb含量高的原因. 本文Pb_N/Ce_N的指标同Sr_N/Nd_N，不再赘述.

按照上述5个指标厘定的(五元)雷达图(图2)，MORB，IAB，OIB处于不同的位置：MORB以强烈富集Yb_N和亏损其他4项指标为特征，为一指向右上角的尖棱状图形；OIB具有高的La_N/Yb_N和Ti/Y值，尖角向上和向右下角；IAB具有高的Th/Ta和Pb_N/Ce_N值，为位于雷达图左侧的近似方形的图形. 因此，在考虑未知地区玄武岩的构造环境时，将玄武岩的上述数据投在该雷达图中，根据雷达图的形状即可大致判断玄武岩属于哪种类型(图2). 作为对比，图2还展示

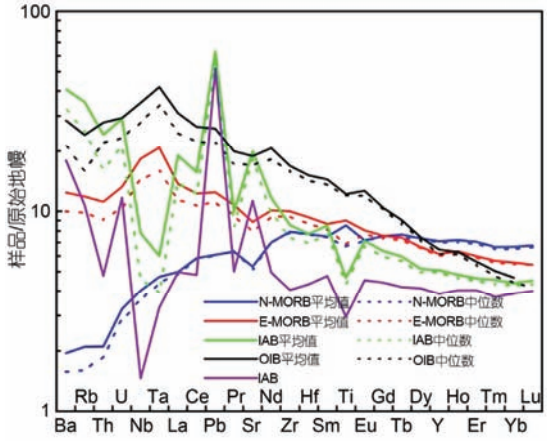


图 1 N-MORB, E-MORB, OIB, IAB原始地幔标准化的蛛网图(据文献[18])

Figure 1 Primitive mantle-normalized trace element diagram of N-MORB, E-MORB, OIB, IAB [18]

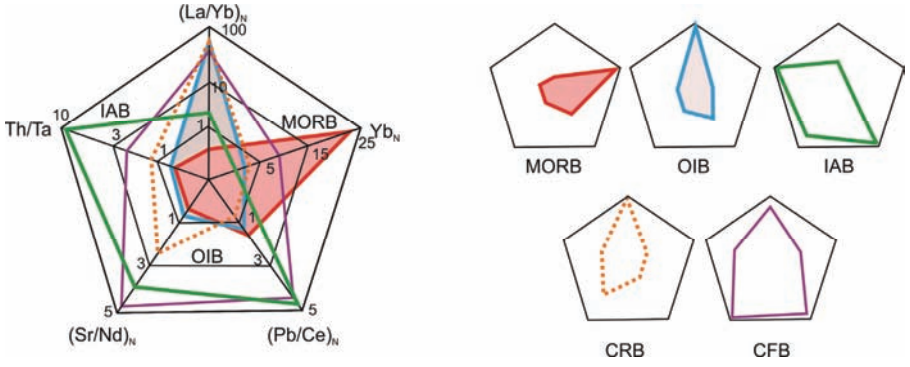


图 2 玄武岩构造环境判别的五元雷达图

Figure 2 Five-dimension radar chart of basalt discrimination

了大陆裂谷玄武岩(CRB, 棕色虚线)和大陆溢流玄武岩(CFB, 紫色实线)的图形. CRB的图形大体类似于OIB, 而CFB的Sr_N/Nd_N和Pb_N/Ce_N值特别高, 表明CFB既不同于IAB(Th/Ta比值不够高), 也不同于OIB(有明显高的Pb_N/Ce_N值), 可能有陆壳混染的明显影响.

图2没有定量的概念, 只表示大体的性质和可能的趋势, 这是研究玄武岩构造环境必须明了的. 因为, 即使是同一个构造背景的玄武岩, 由于各种各样的原因, 其指标是有相当大的变化范围的, 早先的判别图只考虑了典型地区的情况, 是比较理想的, 是不具备代表性的, 全体数据的研究大大扩展了判别图的范围, 这才是真正有意义的.

3.2 蛇绿岩识别雷达图

蛇绿岩识别是一个重要的问题, 有些蛇绿岩很容易识别, 有些不怎么容易. 蛇绿岩如何识别? 学术界是有不同认识的. 笔者认为, 是否蛇绿岩, 下面几个标志比较关键: (1) 是否存在大洋? 鉴别是否蛇绿岩的主要构造意义即鉴别是否存在一个大洋. 蛇绿岩在大洋内, 板块弧后盆地. (2) 是否存在深海沉积? 大洋必然是深水的, 当然, 深水不一定是大洋. (3) 是否存在洋壳? 蛇绿岩, OIB, IAB, 硅质岩, 海山碳酸盐岩等都是洋壳. 有人认为洋壳即蛇绿岩是不妥的, 蛇绿岩是洋壳的一部分, 是形成于板块扩张脊的洋壳(包括弧后盆地扩张脊、岛弧扩张脊、弧前扩张脊等).

如果用雷达图来表示上述概念, 可以尝试采用三分法: 即肯定是蛇绿岩的标志, 可能是蛇绿岩的标志和不可能是蛇绿岩的标志(图3). 上述标志具有一票否决和一票肯定的作用, 即只要出现这个标志出现, 即可一票肯定或一票否决. 例如, 具有不对称冷凝边的辉绿岩岩墙群是蛇绿岩独一无二的标志, 任何其他地质体都不可能出现这个标志, 即一票肯定. 又如玄武岩是蛇绿岩的重要组成, 如果一个蛇绿岩连玄武岩都没有, 或玄武岩很少, 而是以安山岩和流纹岩为主, 则一票否决; 蛇绿岩必定是深海的, 如果一个蛇绿岩只有浅海或陆相沉积的记录, 也一票否决.

蛇绿岩的识别需要考虑很多因素, 岩石组合是其中之一, 但不是唯一的、也不是最重要的因素; 相反, 野外构造背景和深海沉积是不可忽略的因素. 本文尝试厘定的蛇绿岩识别的雷达图采用下述标志.

(1) 玄武岩的标志. 夹有深海硅质岩薄层或透镜体的MORB和IAT, 肯定是蛇绿岩. 富钾的玄武岩、与陆相或浅海相沉积岩呈互层或呈夹层的玄武岩不是蛇绿岩的成员; 没有玄武岩或安山岩、流纹岩为主, 玄武岩为辅的组合不是蛇绿岩; 强烈陆壳混染的玄武岩不是蛇绿岩的成员. MORB和IAB可能是蛇绿岩的组合, 但是, 具有MORB和IAB特征的玄武岩不一定统统是蛇绿岩, 也可以产出在其他构造背景. OIB一般出现于洋岛, 不是蛇绿岩的组合, 但最近的研究表明[19], 蛇绿岩中也可以出现具有OIB特征的玄武岩. 由于玄武岩是地幔部分熔融形成的, 应当是富钠的, Na/K比值较大; 如果玄武岩侵位在大陆上, 玄武岩的Na/K也可能很高(如果与陆壳没有发生混合或混染作用), 也可能是低的(如果与陆壳发生了混合或混染作用).

(2) 辉绿岩的标志. 有辉绿岩岩墙群、且具不对称冷凝边的肯定是蛇绿岩. 围岩是沉积岩、变质岩、花岗岩的辉绿岩岩墙群不是蛇绿岩的成员. 呈岩脉侵入辉长岩的辉绿岩可能是蛇绿岩的成员.

(3) 硅质岩的标志. 深海硅质岩可能是大洋的标志, 但是, 只有那些夹在玄武岩中的薄层或透镜体状的深海硅质岩才可能与蛇绿岩有关. 与玄武岩呈互层的或硅质岩层厚度较大的, 不一定是与蛇绿岩有关的. 浅海的硅质岩, 与砂岩有关的硅质岩可能不是大洋的标志.

(4) 混杂现象. 蛇绿混杂岩是蛇绿岩独有的, 是缝合带的重要标志. 这是蛇绿岩的岩石组合与陆壳岩石强烈构造混杂作用造成的. 在这里, 有没有蛇绿岩的岩石组合是关键. 构造变形强烈或构造破碎强烈是常见的现象, 如果没有蛇绿岩的岩石成员, 则不一定与蛇绿岩有关.

(5) 蛇绿岩岩石组合和层序标志. 底部出现地幔岩, 向上为堆晶岩、辉长岩、玄武岩、硅质岩的组合是蛇绿岩无疑. 无地幔岩, 仅有堆晶岩、玄武岩、硅质岩的组合可能是深海的, 不一定是蛇绿岩; 有地幔岩、堆晶岩、辉长岩, 但伴生的沉积岩是浅海或陆相的, 不是蛇绿岩的组合(如义敦型组合[20]).

上述指标展示在图3中. 以日喀则为例, 几个指标均符合蛇绿岩的标志. 达拉布特的各项指标也符合蛇绿岩的标志, 仅辉绿岩岩墙群不发育, 是被肢解的蛇绿混杂岩. 安徽歙县是否是蛇绿岩存在争论, 虽然有地幔岩出露, 有辉长岩出露, 但是只有很少玄武岩, 出露的火山岩主要是安山岩和流纹岩, 与之相伴

的是浅海沉积物，故歙县镁铁-超镁铁岩不是蛇绿岩. 黑龙江饶河是否蛇绿岩也有不同的见解，饶河玄武岩具OIB的特征，有堆晶岩，有深海沉积岩，代表洋盆环境；但是，由于缺少其他蛇绿岩标志，因此，饶河不是蛇绿岩(是洋岛).

图3讨论了蛇绿岩鉴别的5个标志，唯独没有玄武岩的地球化学标志，不是说明地球化学不重要，而是在蛇绿岩的鉴别上，地球化学不是关键因素.

蛇绿岩各种识别标志的比较表明，日喀则和达拉布特是蛇绿岩，歙县和饶河不是蛇绿岩.

3.3 A型花岗岩的鉴别

对于A型花岗岩的鉴别(图4)，标准主要有：(1) FeO^*/MgO是否大于10；(2) 10000Ga/Al是否超过下限值2.6；(3) Zr+Nb+Ce+Y是否大于350×10^{-6}以及Zr含量是否大于250×10^{-6}；(4) (Na_2O+K_2O/CaO)是否大于29. 同时，由于A型花岗岩形成的特殊构造环境，高的Zr饱和温度也常常被用作判断A型花岗岩的指标之一[15]. 笔者认为，还可以增加下列指标：(5) 强烈亏损Sr(<100×10^{-6})；(6) 明显的负铕异常(Eu/Eu^*<0.3). 实际上，较高的Yb也是一个重要的指标，但是，Yb变化大也是存在的，这里暂且忽略之[16].

3.4 含矿岩体与不含矿岩体的区分

含矿岩体和不含矿岩体的区分是矿床学研究中一个从理论到实践一直争论不休的问题. 但是，含矿岩体的存在是肯定的，如何识别它们是一个很困难的问题，许多矿区情况不同，很难有一个一致的有效的标志. 例如，对于钨锡来说，南岭(A)型花岗岩是有利于成矿的，埃达克岩和喜马拉雅型是不利的；相反，对于金铜来说，埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩是有利的，而南岭型和浙闽型是不利的. 埃达克岩有利于金铜成矿，但是，也不是所有的埃达克岩都是有利于的，因此，埃达克岩也有含矿和不含矿之分. 这里仅举一个河南金堆城钼矿含矿岩体与碌毒沟不含矿岩体的实例[21](图5).

3.5 成矿物源区示踪

成矿物源区探讨是追踪成矿物质来源的一个重要方法，例如马东升等人[22]对湘中与金(锑)成矿作用有关的物源区的研究(图6)，展示了该区基底岩系和寒武系地层的板岩中若干元素的丰度情况. 看来，湘中Au在基底岩系中含量较高；Sb, Hg, As在寒武系地层含量较高.

3.6 碎屑沉积岩构造环境判别

按照板块构造观点，碎屑岩可以分布在大洋弧、大陆弧、活动陆缘和被动陆缘4种构造背景. 产于上述不同构造背景的砂岩成分是不一样的，Bhatia[23]利用上述差异厘定了碎屑岩构造环境判别图，目前仍然被学术界大量使用. 根据上述判别图的标志可以转化为雷达图(图7). 其中，图7(a)以氧化物及其比值为指标，是五元的；图7(b)以微量元素含量及其比值为指标，是九元(当然，还可以根据数据设计不同元的雷达图). 从图7来看，大洋弧以富集右侧元素及其比值、亏损左侧元素和比值为特征，被动陆缘则 相反.

3.7 热水沉积的识别

热水喷流沉积矿床是近代成矿理论的重大发展，该类矿床分布广泛、规模巨大、具有重要的价值. 硅质热水沉积的地球化学标志很多，许多很有用，因此，该雷达图是多元的(图8).

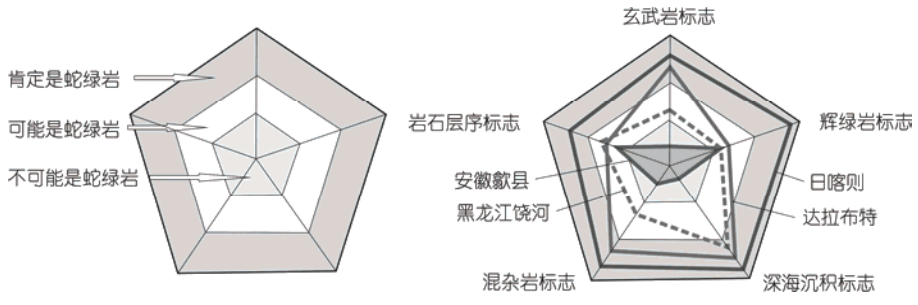


图 3 蛇绿岩识别雷达图

Figure 3 Radar chart of ophiolite identification

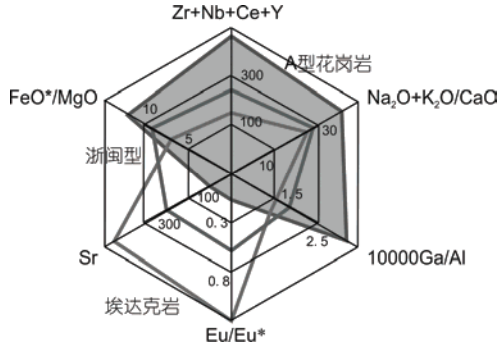


图 4 A型花岗岩雷达图

Figure 4 Radar chart of A-type granulite

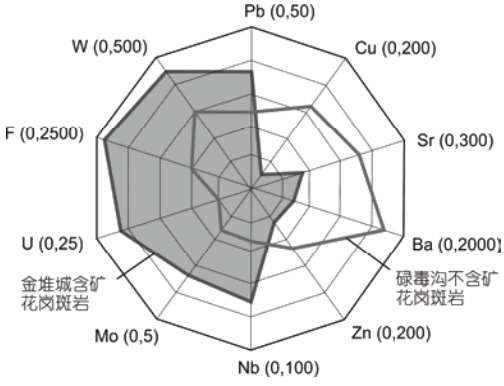


图 5 含矿岩体(金堆城花岗斑岩)和不含矿岩体(碌碡沟花岗斑岩)雷达图. 括号内的数字表示微量元素含量($\times10^{-6}$)的变化范围

Figure 5 Radar chart of ore-bearing rock body (Jinduicheng granitic porphyry) and ore-forming mother rock body (Ludugou granitic porphyry). Numbers in brackets represent the trace elements level ($\times10^{-6}$)

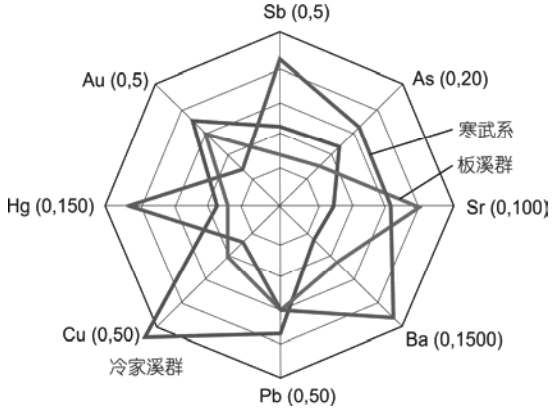


图 6 湘中冷家溪群、板溪群和寒武系地层中元素丰度雷达图[22]

Figure 6 Radar chart of the elemental abundance values of Lengjiaxi Group, Banxi Group and the stratigraphy of Cambrain in Xiangzhong[22]

(1) Al/(Al+Fe+Mn)比值低. Boström等人[24,25]提出用海相沉积物中的Al/(Al+Fe+Mn)比值作为判断热水组分参与沉积作用的指标，在热水沉积中该比值低(<0.4)[26].

(2) Fe/Ti比值高. 热水沉积该比值>20，并随着热水沉积物比例的增加而增加[27].

(3) As, Sb含量高. Marchig等人[28]指出，As和Sb的富集可以作为区分热水含金属沉积物、深海沉积物和成岩含金属沉积物的标志. 在热水含金属沉积物中, As的含量大于100×10^{-6}, Sb为7×10^{-6}左右，而后两者As和Sb的含量分别为10×10^{-6}及2×10^{-6}~3×10^{-6}.

(4) Cu, Co, Ni含量低. 热水沉积物元素地球化学的另一特征是富Fe, Mn和贫Cu, Co, Ni, 其原因是热水沉积物堆积速率高，没有充分与海水作用，因而亏损Cu, Co, Ni等元素[27,29].

(5) Y含量低. Marchig等人[28]指出，深海沉积物中大部分磷呈生物成因的骨骸残余物产出，并伴有Y及稀土元素的富集. 但在热水沉积物中，磷因热水活动而活化迁移富集，但Y并没有随之富集，P与Y之间不存在相关关系. 因此，深海沉积物、成岩含金属沉积物与热水含金属沉积物在P_2O_5-Y关系图上各有明显的集中区，尤其是热水沉积物与其余二者之间的区分更为明显，热水沉积的Y含量低(参见文献[30]中图5~11).

(6) U/Th>1. 由于水成及深海沉积物的沉积速度特别慢，因而能从海水中吸取较多的Th, 因此在大多数沉积岩及其他地质体中Th>U. 但热水沉积物由于有较高的沉积速率，抑制了海水对Th的吸收，使之相对富集U, 因而U>Th. 因此，在热水沉积物中U/Th>1，而水成沉积物中U/Th<l[29,31].

(7) 负Ce异常. 稀土元素含量特征也是热水沉积和非热水沉积的重要标志. Shimizu和Masuda[32]发现，热水成因硅质岩δCe为负异常，平均0.29; 而浅水陆源非热水成因硅质岩的δCe为正异常，平均为1.2. Marehig等人[28]及Fleet[33]指出，热水含金属沉积物具有稀土总量低，明显的负Ce异常以及HREE富集的特征.

(8) $\delta^{13}C_{PDB}$为负值. 国内外对热水沉积岩的C-O同位素组成进行了大量的研究，取得了一系列重要的研究成果[34]. 在$\delta^{13}C$-$\delta^{18}O$关系图中，热水沉积岩的$\delta^{13}C_{PDB}$为负值[35].

上述指标综合在图8中，为八元雷达图. 热水沉积的特点是富Fe, Sb, As, U, 亏损Ti和Th, 还亏损Al/(Al+Fe+Mn), Y, δCe, $\delta^{13}C_{PDB}$以及Cu+Co+Ni等，故在雷达图中热水沉积偏向右侧(图8).

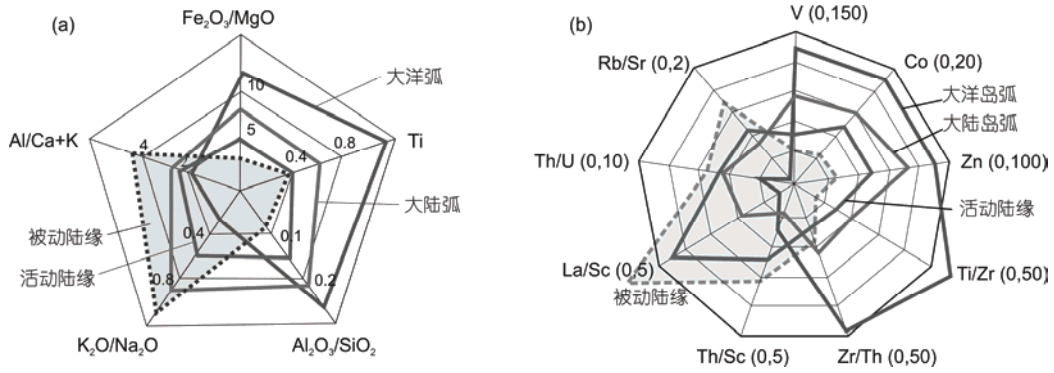


图 7 碎屑岩构造环境判别雷达图. (a) 氧化物及其比值指标, 不同构造环境碎屑岩在每个轴上的大体指标标示在各个轴上; (b) 微量元素及其比值指标, 各个指标的最小和最大指标标示在括弧内(资料据文献[23])

Figure 7 Radar chart of clastic rock discrimination. (a) The probable scope of clastic rocks in different tectonic settings using their oxide data and ratio as index (figures are marked on the number axis); (b) the possible range of clastic rocks in different tectonic settings using their trace element data and ratio as index (the maximum and minimum figure of each axis are shown in the brackets) [23]

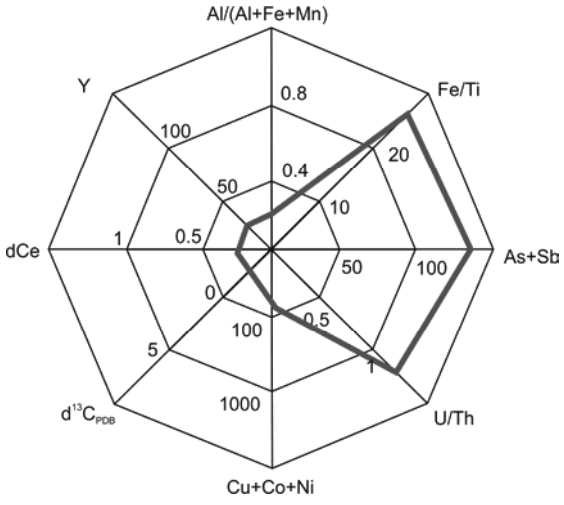


图 8 热水沉积雷达图

Figure 8 Radar chart of hot-water sediment

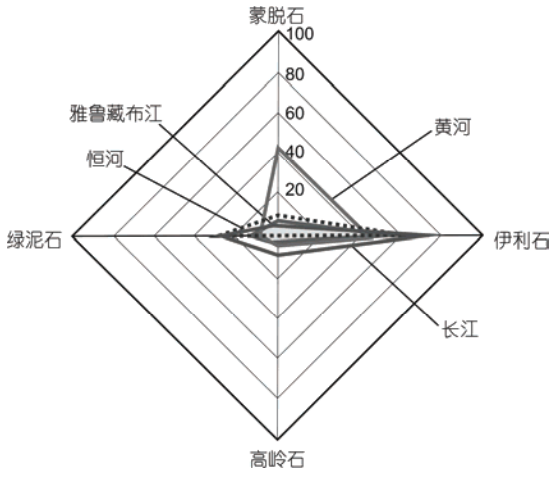


图 9 发源于青藏高原的河流的黏土矿物组合雷达图(据文献[36])

Figure 9 Radar chart of clay mineral assemblies of rivers originated from Tibet Plateau [36]

3.8 河流黏土矿物示踪物源区

Borges等人[36]对发源于青藏高原东部河流(黄河、长江、红河、湄公河及怒江)的研究发现, 这些河流沉积物均表现出与大陆上地壳相似的特征, 沉积物组成均受源岩控制. 它们的黏土矿物组合大体一致, 均以伊利石为主, 绿泥石和高岭石次之, 蒙脱石含量最少(图9). 黄河除外, 黄河黏土矿物组合中蒙脱石含量较高, 可能与黄河源区分布大量的黄土相关.

3.9 南黄海沉积物微量元素对比

长江、黄河、韩国的锦江和荣山江汇入黄海, 对南黄海的表层沉积物组成产生影响. 对上述河流沉积物微量元素的研究表明, 长江带来的Pb, V, Ni, Cu, Cr, Co等元素的含量最高; 黄河最少, 但是, 黄河的Sr含量是最高的; 锦江的Pb较高, 荣山江的Rb较高(图10).

3.10 页岩不同矿物组合对比

邓昆等人[2]采用雷达图方法对鄂尔多斯盆地中奥陶统平凉组页岩进行了研究, 指出可以根据矿物组合将其分为两类: 一类是石英+方解石+伊利石组合, 石英是主要的; 另一类是石英+方解石+伊利石+绿泥石组合, 方解石、绿泥石、伊利石占有更多的份额, 而石英相对较少. 上述结论在雷达图上(图11)显示得非常清楚.

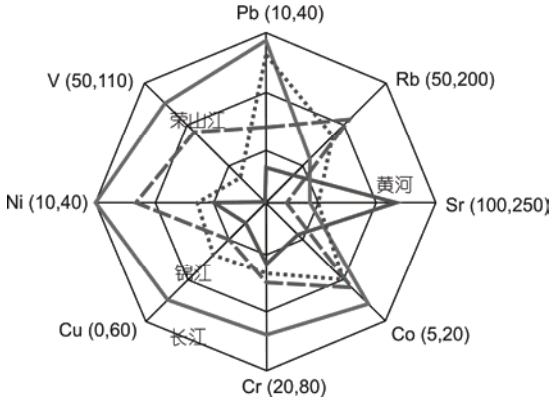


图 10 中韩河流沉积物微量元素对比雷达图(据文献[37])

Figure 10 Radar chart of river sedimentary trace element contrast in China and Korea [37]

4 结语

雷达图应用的实例还可以举出很多，上述实例表明:

(1) 雷达图是多用途的，可应用于地球科学的许多领域，本文列举的几个实例仅是冰山一角.

(2) 雷达图不仅可以表示地球化学数据，也可以表示其他岩石学、矿物学、构造学等方面的要素，相比判别图，这是它的优势.

(3) 雷达图的应用范围广泛，既可以是全球范围内资料的总结，也可以是一个局部地区资料的总结.

(4) 雷达图的要素可以是不同的，少的3个即可，多的可超过10个，依需要而定.

(5) 雷达图的每个轴的计量可以灵活应用，既可以是定性的(如: 高中低、大中小)，也可以是有连续的数据的.

总之，雷达图没有固定的限制，可以灵活应用. 雷达图一个重要的特点是具有丰富的想象力和创造力，不同作者可以根据自己的认识设计各种各样的雷达图，解决各种各样的问题. 当然，雷达图也不是万能的，它有一定的局限性. 雷达图只是一个方法，目的是方便观察，解决问题.

笔者认为，雷达图方法可能是值得在地球科学领域推广的，因为，它所表达的现象可能是比较符合地球科学的学科特点的. 本文厘定的许多雷达图是尝试性的习作，不一定合适，希望有助于更多学者的思考和创新.

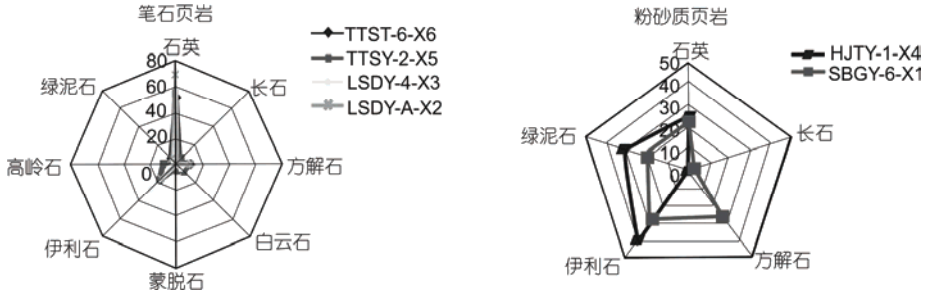


图 11 鄂尔多斯平凉组页岩全岩矿物分析雷达图[2]

Figure 11 Radar chart of whole rock mineral analysis of Pingliang Formation shale in Erdos[2]

致谢 研究中与中国科学院地质与地球物理研究所孙枢、郭正堂、翟明国、朱日祥、吴福元等院士以及王二七研究员，北京矿产地质研究所梅友松、河南省国土资源科学研究院卢欣祥等高级工程师进行探讨，得到许多很好的建议与鼓励，在此表示衷心的感谢.

参考文献

1 Xie G L, Liu S G, Shen Y L, et al. Reservoir-forming conditions and favorable areas evaluation of shale gas reservoir in Hetang formation, northeastern Jiangxi area (in Chinese). J China Univ Min Technol, 2015, 44: 704–713 [谢国梁, 刘水根, 沈玉林, 等. 赣东北荷塘组页岩气成藏条件及有利区评价. 中国矿业大学学报, 2015, 44: 704–713]

2 Deng K, Zhou W, Deng H C, et al. Geological conditions for accumulation of shale gas in Middle Ordovician Pingliang Formation of Ordos Basin, China (in Chinese). J Chengdu Univ Tech-Sci Tech Ed, 2013, 40: 595–602 [邓昆, 周文, 邓虎成, 等. 鄂尔多斯盆地平凉组页岩气富集地质条件. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2013, 40: 595–602]

3 Ye Y G, Liu Q P, Shi Y H, et al. An interpretation method of cloud model and radar-chart of mud logging in marine formation (in Chinese). Nat Gas Expl Dev, 2012, 35: 40–42 [叶应贵, 刘乔平, 石元会, 等. 海相地层录井雷达图和云模型解释方法研究. 天然气勘探与开发, 2012, 35: 40–42]

4 Cheng D J. The study of strata sequence and sedimentary fades based on well logging data in Su-Bei Basin (in Chinese). Master Dissertation. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2008. 1–90 [程道解. 苏北盆地测井层序与沉积相研究. 硕士学位论文. 青岛: 中国石油大学(华东), 2008. 1–90]

5 Kang Y. Yingcheng group volcanic rock reservoir characteristic research and exploration target selection in Shengping gas field (in Chinese). Master Dissertation. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2008. 1–63 [康冶. 升平地区营城组火山岩储层特征研究及勘探目标选择. 硕士学位论文. 大庆: 大庆石油学院, 2008. 1–63]

6 Jing J, Xu B. Mazhuangshan gold deposit and its metallogenic geochemical conditions (in Chinese). Xinjiang Geol, 1997, 15: 327–341 [靖军, 徐斌. 马庄山金矿地质特征及成矿地球化学条件. 新疆地质, 1997, 15: 327–341]

7 Wang D Q, Wan Y B, Wang X, et al. Improved radar chart based on principal component and its application in comprehensive evaluating (in Chinese). J Appl Stat Manag, 2010, 29: 883–889 [王德青, 万永波, 王翔, 等. 基于主成分的改进雷达图及其在综合评价中的应用. 数理统计与管理, 2010, 29: 883–889]

8 Gao C W, Gan H L. Nonparametric regression method for growth curve model (in Chinese). Master Dissertation. Shanghai: East China Normal University, 2013. 655–665 [高采文, 甘华来. 增长曲线模型的非参数估计. 硕士学位论文. 上海: 华东师范大学, 2013. 655–665]

9 Wang J J, Li J, Li X, et al. Feature ordering in feature extraction of star plot (in Chinese). J Yanshan Univ, 2008, 32: 421–428 [王金甲, 李静, 李昕, 等. 雷达图图形特征提取中的特征排序. 燕山大学学报, 2008, 32: 421–428]

10 Fu Y, Fang D Y. Application of radar chart method in comprehensive evaluation (in Chinese). Stat Decis, 2007, (24): 176–178 [付赟, 方德英. 雷达图法在综合评价中的应用研究. 统计与决策, 2007, (24): 176–178]

11 Ding J M, Li W B. Visualization representation and feature analysis of radar-map-based multi-dimensional data (in Chinese). Mod Electron Tech, 2010, 33: 24–26 [丁杰敏, 李伟波. 基于雷达图的多维数据可视化表示及特征分析. 现代电子技术, 2010, 33: 24–26]

12 Zhu J M, Zhao X. Improvement of radar chart method for financial analysis (in Chinese). Financ Account Mon, 2008, (3): 45–46 [朱建梅, 赵息. 财务分析雷达图法的改进. 财会月刊, 2008, (3): 45–46]

13 Zheng H L, Liu C, Zhai D N. Comprehensive evaluating method based on radar-graph (in Chinese). J Nanjing Univ Posts Telecommun-Nat Sci, 2001, 21: 75–79 [郑惠莉, 刘陈, 翟丹妮. 基于雷达图的综合评价方法. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2001, 21: 75–79]

14 Chen Y, Chen X K, Li Z Y, et al. Method of radar chart comprehensive evaluation with uniqueness feature (in Chinese). Trans Beijing Inst Technol, 2010, (12): 1409–1412 [陈勇, 陈潇凯, 李志远, 等. 具有评价结果唯一性特征的雷达图综合评价法. 北京理工大学学报, 2010, (12): 1409–1412]

15 Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contrib Mineral Petrol, 1987, 95: 407–419

16 Zhang Q, Wang Y, Xiong X L, et al. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity (in Chinese). Beijing: China Land Press, 2008. 1–344 [张旗, 王焰, 熊小林, 等. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇. 北京: 中国大地出版社, 2008. 1–344]

17 Yang J, Wang J R, Zhang Q, et al. Back-arc basin basalt (BABB) data mining: Comparison with MORB and IAB (in Chinese). Adv Earth Sci, 2016, 31: 66–77 [杨婧, 王金荣, 张旗, 等. 弧后盆地玄武岩(BABB)数据挖掘: 与 MORB 及 IAB 的对比. 地球科学进展, 2016, 31: 66–77]

18 Ewart A, Collerson K D, Regelous M, et al. Geochemical evolution within the Tonga-Kermadec-Lau arc-back-arc systems: The role of varying mantle wedge composition in space and time. J Petrol, 1998, 39: 331–368

19 Wang J R, Chen W F, Zhang Q, et al. MORB data mining: Profound consideration of the basalt discrimination diagram (in press) (in Chinese). Geotecton Metall, 2017 [王金荣, 陈万峰, 张旗, 等. MORB 数据挖掘: 玄武岩判别图反思(待刊). 大地构造与成矿学, 2017]

20 Zhang Q, Zhou G Q. Chinese Ophiolite (in Chinese). Beijing: Science Press, 2001. 1–182 [张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩. 北京: 科学出版社, 2001. 1–182]

21 Wang X. Identification of two classes of porphyry in Jinduicheng molybdenum mining area (in Chinese). Master Dissertation. Xi'an: Northwest University, 2001. 1–56 [王新. 金堆城钼矿区两类斑岩的识别. 硕士学位论文. 西安: 西北大学, 2001. 1–56]

22 Ma D S, Pan J Y, Xie Q L, et al. Ore source of Sb (Au) deposits in central Hunan: I. Evidences of trace elements and experimental geochemistry (in Chinese). Miner Deposit, 2002, 21: 366–376 [马东升, 潘家永, 解庆林, 等. 湘中锑(金)矿床成矿物质来源——Ⅰ.微量元素及其实验地球化学证据. 矿床地质, 2002, 21: 366–376]

23 Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. J Geol, 1983, 91: 611–627

24 Boström K, Kraemer T, Gartner S. Provenance and accumulation rates of opaline silica, Al, Ti, Fe, Mn, Cu, Ni and Co in Pacific pelagic sediments. Chem Geol, 1973, 11: 123–148

25 Boström K, Peterson M N A. The origin of aluminum-poor ferromanganoan sediments in areas of high heat flow on the East Pacific Rise. Mar Geol, 1969, 7: 427–447

26 Yamamoto K. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes. Sediment Geol, 1987, 52: 65–108

27 Boström K. Genesis of ferromanganese deposits-diagnostic criteria for recent and old deposits. In: Rona P A, Boström K, Laubier L, eds. Hydrothermal Processes at Seafloor Spreading Centers. New York: Springer, 1983. 473–489

28 Marchig V, Gundlach H, Möller P, et al. Some geochemical indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments. Mar Geol, 1982, 50: 241–256

29 Rona P A. Criteria for recognition of hydrothermal mineral deposits in oceanic crust. Econ Geol, 1978, 73: 135–160

30 Li Y. Metallogenic regularity and prospecting direction of hotwater sedimentary deposits, Guangxi, China (in Chinese). Doctor Dissertation. Changsha: Central South University, 2007. 1–229 [李毅. 广西热水沉积矿床成矿规律及找矿方向研究. 博士学位论文. 长沙: 中南大学, 2007. 1–229]

31 Boström K, Rydell H, Joensuu O. Langban: An exhalative sedimentary deposit? Eur J Pharmacol, 1990, 183: 599

32 Shimizu H, Masuda A. Cerium in chert as an indication of marine environment of its formation. Nature, 1977, 266: 346–348

33 Fleet A J. Hydrothermal and Hydrogenous Ferro-Manganese Deposits: Do They form a Continuum? The Rare Earth Element Evidence in Hydrothermal Processes at Seafloor Spreading Centers. New York: Plenum Press, 1983. 535–555

34 Savin S M, Epstein S. The oxygen isotopic compositions of coarse grained sedimentary rocks and minerals. Geochim Cosmochim Acta, 1970, 34: 323–329

35 Zhang Y, Duan L Z, Gong X J. The research on hydrothermal sedimentation relics and reformation metallogenic mechanism of the Fengtai Pb-Zn-Au polymetallic ore field in Shaanxi (in Chinese). Northwestern Geol, 2015, (4): 20–29 [张阳, 段立志, 龚先洁. 陕西凤太铅锌金多金属矿田热水沉积遗迹改造成矿作用机理研究. 西北地质, 2015, (4): 20–29]

36 Borges J B, Huh Y, Moon S, et al. Provenance and weathering control on river bed sediments of the eastern Tibetan Plateau and the Russian Far East. Chem Geol, 2008, 254: 52–72

37 Yang S Y, Li C X, Jung H S, et al. Geochemistry of trace elements in Chinese and Korean river sediments (in Chinese). Mar Geol Quat Geol, 2003, 23: 19–24 [杨守业, 李从先, Jung H S, 等. 中韩河流沉积物微量元素地球化学研究. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23: 19–24]

Summary for “雷达图在地球科学研究中的应用及其意义”

The application of radar chart in geoscience and its significance

ZHANG Qi[1*], YUAN FangLin[2], JIAO ShouTao[1], LIU XinYu[2] & ZHANG ChengLi[2]

[1] *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*
[2] *State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China*
* Corresponding author, E-mail: zq1937@126.com

The radar chart method is a very common method among all the multi-statistic charts that can project the status of each index to the two-dimensional plane, and it gets its name for its similarity with the images shown on radar navigation screens. Now, although the radar chart method has already been broadly used in evaluating company performance, financial situations, human resources, risk and so on, it is seldom applied in the geosciences, especially petrology, minerology, geochemistry, structural geology, and geophysics. Compared with traditional basalt discrimination diagrams, the radar chart has advantages in comprehensive analyses, for each of its axes can represent not only data information but also geological phenomena and geological background information. Radar charts can combine all kinds of different indicators, which means they share a same thinking mode with the prevalent analytical method called Big Data analytics. Radar charts can represent not only data information but also other scientific factors, such as observations and geological records, which give it more advantages in composite analyses. The scope of the application of radar charts is scalable, meaning they can be used to analyze global statistical information or just evaluate the data of a particular region. The number of factors of every radar chart varies but usually ranges from three to ten or more. The practical uses of radar charts cannot be fully illustrated, thus, only a few geological examples are presented in this paper in an effort to explain their priority in classification. The research shows that radar charts can simplify the usage of different diagrams in the geosciences by considering the most typical indicators of different problems. For example, when discriminating the tectonic settings of the basalts, a five-dimensional radar chart containing the factors of La_N/Yb_N, Th/Ta, Yb_N, Sr_N/Nd_N, and Pb_N/Ce_N can clearly discriminate the tectonic settings of the basalts into MORB, OIB, IAB, CRB and CFB. A radar chart containing the factors of FeO^*/MgO, 10000Ga/Al, Zr+Nb+Ce+Y, Na_2O+K_2O/CaO, Sr, and Yb can also easily distinguish A-type granites from other types, and a radar chart containing the typical ore-forming elements can separate ore-bearing rocks from normal rocks. Meanwhile, the superiority of radar charts is also shown in their ability to simplify the discriminative process of the tectonic settings of clastic rocks and hot-water deposition characteristics according to their different features (i.e., major elements, trace elements, and their ratios), They can also be used to trace the mineral sources of ore-deposit and fluvial sediments, make comparisons between trace elements of the south Yellow Sea, contrast the differences in the mineral assemblages of shales, and identify ophiolites based on their trace elements and mineral assemblage features. However, all the factors used in the radar charts are picked based on the knowledge that has already been accepted by experts in geological field. Overall, radar charts have no fixed limitations, and they can be used flexibly. One of the significant features of radar charts is that they allow for boundless imagination and creativity, which means different researchers can design their unique radar charts based on different scientific issues. The radar chart method is just a simple method aimed at simplifying complicated scientific issues and making it easy to observe and solve problems. Although radar charts also have drawbacks (e.g., the data materials should be normalized to a certain scale and the user should possess comprehensive knowledge about the specific field), they still have promising prospects in the geosciences field and are worth being popularized.

radar chart, geoscience, multivariate statistics, geochemistry, discrimination diagram

doi: 10.1360/N972016-00722