

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2019.03.016

# 沉积物中重矿物 KIM 的找矿方法和意义

丁毅, 杨献忠

(中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016)

**摘要:** 在水系沉积物中进行重矿物取样仍然是寻找以矿体或含矿母岩为目标体的主要手段之一, 但对于金刚石矿干扰体很多。金伯利岩中与金刚石伴生的镁铝榴石、铬铁矿、钛铁矿和透辉石风化后形成以金伯利岩为中心的分散晕, 在水系沉积物中采集 KIM 并进行分析可以有效地排除干扰体, 进而不断地接近真正的目标。

**关键词:** 重砂; 目标体; 沉积物; 金伯利岩; 矿物化学

**中图分类号:** P512.2; P619.241 **文献标识码:** A

## 0 引言

矿物密度  $> 2.86 \text{ g/cm}^3$  的矿物在砂样筛分中称之为重(砂)矿物。重砂矿物在岩体中含量少(体积分数  $< 3\%$ )但其晶格能稳定, 即抗风化能力强, 岩体或矿体被水系切割后, 它们被分离和迁移到下游, 远离岩体或矿体; 根据单位体积样品中重矿物的数量和自形程度, 可以判断距离岩体或矿体的远近。

矿物的抗风化能力是由矿物中 Mg-Fe 含量决定的, 橄榄石、辉石、角闪石等 Mg-Fe 含量较高的矿物抗风化能力弱, 不易被保存; 而锆石(Zircon)、金红石(Rutile)、电气石(Tourmaline)稳定, 经常用它们的组合特征指数(ZRT)来判断距离目标体的远近。然而, 不稳定的矿物也不是没有用的。在重砂样品中不稳定矿物的存在是非常有意义的, 即可判断距离目标体距离不远了; 而稳定的重矿物抗风化剥蚀能力强, 经过多次搬运, 组分和含量变化不大, 分布广, 反而使得追踪变得复杂。因此, 需要综合分析重砂矿物组合、自形程度、单位体积中的颗粒数、分布等因素, 才能判断物源方向, 进而追踪目标体。

前人对判断物源方向进而追踪目标体的研究工作已富有成果。岳艳(2010)<sup>[1]</sup>强调追踪单颗粒重矿物来判定物源方向, 如磁铁矿、锆石等, 一般的规律是: 在顺水流方向上, 距离物源区越远, 稳定重矿物组分所占的比例越高, 不稳定重矿物的含量越少。操应长等(2011)<sup>[2]</sup>强调矿物组合分析, 用聚类分析的数学统计方法成功分析物源区。Morton et al. (2018)<sup>[3]</sup>、OSullivan 等(2018)<sup>[4]</sup>利用单矿物比值判断物源信息。重矿物特征指数有 ATi 指数(磷灰石/电气石)、RZi 指数( $\text{TiO}_2$  矿物/锆石)、GZi 指数[石榴子石(石榴子石/+锆石)]、MZi 指数[独居石(独居石/+锆石)]、CZi 指数(铬尖晶石/锆石)等。

本文作者认为, 在一切重砂工作开展之前, 研究目标体的矿物组合特征是基础的工作, 尤其要重视某些新型目标体的岩矿鉴定成果, 要清楚地知道目标体被风化的重砂矿物组合和颗粒大小。本文以含金刚石的金伯利岩体为目标体, 总结在水系沉积物中采集 KIM 并进行分析的找矿方法和意义。

## 1 重砂取样及 KIM 组合

### (1) 重砂取样

**收稿日期:** 2019-05-30; **改回日期:** 2019-07-04; **责任编辑:** 王传泰

**基金项目:** 中国地质调查局项目“华北和扬子地区金刚石矿产调查”(编号:DD20160059)、“钦杭成矿带武宁—平江地区钨铜多金属矿地质调查”(编号:DD20190153)联合资助。

**作者简介:** 丁毅(1957—), 男, 教授, 从事火山岩和金刚石矿找矿及研究工作。E-mail:dingyi@hgu.edu.cn

**通信作者:** 杨献忠(1962—), 男, 教授级高级工程师, 从事矿产地质调查与研究工作。通信地址:江苏省南京市中山东路534号, 中国地质调查局南京地质调查中心; 邮政编码:210016; E-mail:zyang1010@sina.com

获取重砂样品要有计划有目标地进行,即在进入这项工作之前就已经预判搜寻的目标体的大致范围,在野外获取大致颗粒大小和相同重量的样品,就地进行筛分(避免造成运输的损耗和在城市内筛分的污染)和有条件下的淘洗。在我国南方采样时候避免雨季,在我国北方采样时候避免对干枯河流的轻视。必要时采用人工重砂取样。

### (2) KIM 组合

金伯利岩是火成岩中最为复杂的岩石,上地幔捕虏体、深源包体剥离出来的晶体、金伯利质岩浆在上升通道中捕获的地层岩石碎块、捕虏晶、多世代结晶的各种晶体等使得问题变得非常复杂。把金刚石、镁铝榴石、钛铁矿、铬铁矿、透辉石、橄榄石组合称为金伯利岩指示矿物(kimberlite indicator minerals, KIM);因橄榄石极不稳定,一般不考虑。虽然金伯利岩中金刚石较少,但与之相伴生的镁铝榴石、铬铁矿、钛铁矿和透辉石较多,在金伯利质火山岩管形成时,它们就向四周扩散,随着水系不断地切割这些含有金伯利岩指示矿物的岩体或沉积物中,它们得到多次搬运,距离金伯利岩火山中心越远越少越散,所形成的分散晕也越大,追踪它们至今仍是寻找含金刚石的金伯利质火山岩管的主要手段。

### (3) 排除非目标体干扰

据不完全统计,全球共发现 6 400 多个金伯利岩管 and 岩脉,但是有经济价值的金伯利岩仅占少数;上万个钾镁煌斑岩体,有开采价值的仅仅是澳大利亚的 Argyle 岩体,而且品位很低。包括没有经济意义的金伯利岩、非常低品位的钾镁煌斑岩、榴辉岩、基性-超基性岩(苦橄玢岩等)都可能含有与 KIM 相类似的矿物,它们是寻找金刚石矿的干扰体。

目前经过地学工作者的努力,已从已知金刚石矿中获得 KIM 的化学特征,把它们作为工具、用来排除干扰体,以便寻找真正的目标体——金刚石矿体。因此,当我们将水系沉积物筛分并获得重砂样品后,分析 KIM 矿物组合的种类和数量,并进行矿物化学分析来判断对某一地区目标体的含矿性,显得尤为重要。

## 2 金伯利岩及含矿性判别

### (1) 金伯利岩

金伯利岩是金刚石最主要的载体。金伯利岩是

不含长石的偏碱性超基性浅-超浅成岩——具斑状结构/角砾状构造的云母橄榄岩(角砾云母橄榄岩),因发现于南非的金伯利镇(Kimberley)而故名。其中,以具斑状结构,且富含颗粒粗大橄榄石的金伯利岩,其含金刚石较富;呈显微斑状结构、富含金云母的金伯利岩,其含金刚石贫。

金伯利岩浆来源深度大——深达上地幔,所裹挟的捕虏体是金伯利岩重要的组成部分;金伯利质岩管包括上部的火山口相、中部的火山通道相和深部的浅成相。捕虏体和后期的蚀变使得金伯利岩很复杂,对其命名也复杂。如果命名金伯利岩时不考虑捕虏体,则相对应金伯利岩火山相的岩石学名称为:金伯利质火山碎屑岩、金伯利质火山凝灰岩或金伯利质火山凝灰质角砾岩、金伯利角砾岩,甚至根部的金伯利玢岩;以这种分析岩相学的角度来命名金伯利岩有利于开展野外工作。

金伯利岩呈筒状产出,像个胡萝卜,越往下越细,显示出金伯利岩浆携带大量的  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  上升的速度非常快<sup>[5]</sup>,越接近地表的减压环境其上升并爆破的冲击力越大<sup>[6-10]</sup>。金伯利岩火山口与其它岩性的火山口一样,像一个“碗”,由“碗边”和“碗心”组成,碗边通常由喷发的火山灰和火山碎屑物降落堆砌后形成环带构造。

### (2) 金伯利岩矿物组成

金伯利岩矿物成分复杂,包括原生矿物、地幔地壳矿物、蚀变次生矿物 3 类。原生矿物:橄榄石、金云母、镁铝榴石、钛铁矿、磷灰石、金红石、金刚石等;镁铝榴石是重要的特征矿物——寻找金刚石的指示矿物。地幔地壳矿物:来自上地幔、地壳深处的其它岩石捕虏体或捕虏晶。蚀变次生矿物:如蛇纹石、磁铁矿、绿泥石等。

金伯利岩中的捕虏体是金伯利岩的重要组成部分,也是金伯利岩的价值所在。如果不考虑捕虏体和捕虏晶,金伯利岩本身则由斑晶和基质组成,是典型的火山岩的结构特点。斑晶多为自形一半自形晶。金伯利岩捕虏体中的金刚石是金伯利岩中宝石级金刚石的重要来源。这些捕虏体有方辉橄榄岩、二辉橄榄岩、榴辉岩和二辉岩,它们的比例因金伯利岩形成的位置和年代不同而有差异,例如,博兹瓦纳著名的 Orapa 金刚石矿中,榴辉岩型金刚石较多<sup>[11]</sup>。

幔源捕虏体中的晶体按照颗粒大小分为大晶体(大于 10 mm)、中晶体(0.5~10 mm)两个等级,无论呈集合体或是单晶存在,它们都是捕虏晶<sup>[12-16]</sup>。

其主要为富镁橄榄石、富铬透辉石,少量顽火辉石、金云母、富含铬的镁铝榴石、富镁钛铁矿和铬铁矿。

### (3) 用 KIM 化学判别来确立靶区

当在一个地区发现有 KIM 时,要及时对其组合矿物进行电子探针分析,研究这些 KIM 是否符合含有金刚石的金伯利岩中 KIM 的矿物化学特征<sup>[17-24]</sup>。

在对一个地区是否开展寻找含金刚石金伯利岩工作前,应先辨别 KIM 是否符合含金刚石金伯利岩的矿物化学特征。如果所分析的 KIM 化学特征与含金刚石金伯利岩的 KIM 矿物化学特征相似,可以建立 2~10 km<sup>2</sup> 的金刚石矿“找矿靶区”,并对 KIM 进行追踪;如果这些 KIM 矿物化学特征根本就不符合含金刚石金伯利岩的矿物化学特点,那么就应当综合考虑其它因素,判断是否放弃对这一地区在寻找金伯利岩上的投入。

## 3 含金刚石金伯利岩的 KIM 矿物化学特征

### (1) KIM 获取

金伯利岩在最初的火山喷发形成中,仅有少量物质喷发出地表向四周扩散,散落在同时代沉积物中的指示矿物少之又少。之后经过各个时代的风化剥蚀,最初喷出的和对岩管不断剥离的 KIM,其周而复始地沉积在各个地层中,从而造成散落沉积在各个时代地层中的 KIM 分布的复杂性;距离金伯利岩管位置越远,KIM 越少和越分散。

现代水系能切割这些含有 KIM 的地层,把它们再分离风化出来分布在现代沉积物中,可能最终仅有小部分能够存在河流沙砾中。这些矿物的粒度在 0.5~20 mm 范围内,<2 mm 的为多。因此,大多数情况下可从现代水系的重砂样或古代水系的土壤样品中提取这些矿物,经过粒度分选后,在双目镜下手选出来,制成电子探针薄片,再进行 KIM 矿物化学分析。

### (2) 含矿性金伯利岩的 KIM 矿物化学特征

金伯利岩中的捕虏体、捕虏晶以及金刚石中的包裹体是了解岩浆起源深度最好的信息来源。过去的 30 多年来,地学工作者研究获得了世界金刚石矿中的这些 KIM 的化学特征。在选择寻找金刚石矿的工作靶区时,先分析 KIM 矿物化学特征,然后再与已知金刚石矿的 KIM 矿物化学对比,可以预测靶

区的含矿性。

通常是,含金刚石的金伯利岩中的 KIM 的 Mg 和 Cr 的含量要比不含金刚石矿的金伯利岩和其它超基性岩中相对应的矿物的 Mg 和 Cr 要高。需要指出的是,原生金刚石矿 KIM 矿物形成的多期和多源成因的复杂性导致了 KIM 矿物的复杂性,所以不能仅依赖一种 KIM 矿物的化学特征,需要根据多种 KIM 矿物的化学特征,并且参考其它信息进行综合判断。

#### 1) 金刚石

水系重砂样品选出的金刚石或是捡拾到的金刚石的数量要比其它 KIM 矿物少得多,但是如果有金刚石的出现就意味着这一地区有金刚石矿存在的可能性,特别是发现大颗粒的金刚石,应当是建立金刚石矿靶区的重要信息。金刚石的大小是判断距离金刚石原生矿距离远近的非常重要的数据。

金刚石中的包裹体是提供金刚石矿也是金伯利岩含矿性的重要信息<sup>[11]</sup>。典型的橄榄岩捕虏体中的金刚石的<sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C 同位素比值不同于榴辉岩型捕虏体中金刚石的<sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C 同位素比值,后者具有壳-幔多源性的较宽比值范围,这一事实也是榴辉岩是玄武岩类岩石嵌入地幔再形成观点的证据,这也被榴辉岩捕虏体中金刚石具有较宽的氧同位素数值所佐证<sup>[25]</sup>。钾镁煌斑岩中金刚石也具有宽的<sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C 比值,澳大利亚西北部 Angyle 钾镁煌斑岩中的金刚石  $\delta^{13}\text{C}$  在  $-7.5 \times 10^{-3} \sim -11.1 \times 10^{-3}$  之间<sup>[26]</sup>,不同于橄榄岩型金刚石分布较窄的  $4 \times 10^{-3} \sim 9 \times 10^{-3}$  范围(大多数在  $5 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$ )<sup>[27]</sup>。

#### 2) 镁铝榴石

在 KIM 中,镁铝榴石是目前世界各国科学家研究最成熟的矿物,甚至可以说在 2~20 km<sup>2</sup> 的金刚石找矿靶区内,只要分析一颗镁铝榴石的化学成分即可初步判断该地区的含矿性。Meyer (1968)<sup>[28]</sup> 首先对南非金刚石矿中的镁铝榴石进行研究,此后 Sobolev et al. (1973)<sup>[29]</sup> 对前苏联金刚石矿、Gurney et al. (1973)<sup>[30]</sup> 对南非的金刚石矿进行了研究,认为低钙高铬镁铝榴石不同于壳源的铁铝榴石和钙铝榴石,它是金刚石矿特有的石榴子石。Gurney (1984)<sup>[31]</sup>、Grütter et al. (2004)<sup>[32]</sup> 和 Grütter et al. (2006)<sup>[33]</sup> 先后研究了镁铝榴石的成分,进行过许多数据分析, $w(\text{CaO})-w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$  相关图几经修改,得到图中的分割线公式为: $w(\text{Cr}_2\text{O}_3) = -11.67 + 3.606 \times w(\text{CaO})$ 。将镁铝榴石的化学含量投影到这一图中,可以将方辉橄榄岩型的镁铝榴石与二辉

橄榄岩型的镁铝榴石分开;如果镁铝榴石的 $w(\text{CaO})$ 值含量大于3.5%, $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 值小于2%,那么这一镁铝榴石的寄主岩石将不含金刚石,是壳源岩浆所形成的岩石。在实践中方辉橄榄岩型的镁铝榴石G10干脆就叫“有金刚石”的镁铝榴石,而二辉橄榄岩型的镁铝榴石相应地称作“无金刚石”的镁铝榴石<sup>[19]</sup>。

除了方辉橄榄岩和二辉橄榄岩有可能在深部被金伯利岩浆捕虏外,含有金刚石的榴辉岩也有可能被金伯利岩浆捕虏。当榴辉岩型镁铝榴石的 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量(质量分数)大于0.06%,指示具有这种化学特征的镁铝榴石的榴辉岩含有金刚石<sup>[25,31,34-35]</sup>。Sobolev et al. (1971)<sup>[34]</sup>还注意到,含金刚石的榴辉岩的特征是具有较高的Na含量即 $w(\text{Na}_2\text{O}) > 7\%$ ; McCandless et al. (1989)<sup>[36]</sup>还作了进一步的补充论证。另外,含金刚石的榴辉岩中镁铝榴石含有较高的Ti成分<sup>[37]</sup>。

### 3) 铬铁矿

金伯利岩中的铬铁矿可分为两种:一是以捕虏晶的形式存在,由金伯利岩岩浆形成初期就捕获的,其晶形差,粒径大<sup>[24,38]</sup>;二是原生铬铁矿,由金伯利岩岩浆结晶形成,分布在金伯利岩基质中,粒径小(通常 $< 0.2\text{ mm}$ ),晶形好<sup>[39-40]</sup>。这些自形程度好、直接从岩浆结晶出来的铬铁矿对研究金伯利岩岩浆有理论意义,但是因为其颗粒小,因此即使分离到沉积物中,在实践中也很难获得,其对金伯利岩的金刚石含矿性的指示意义不大;而只有颗粒度大的铬铁矿才有实际的找矿意义,才有评价金伯利岩含金刚石的的可能性<sup>[41-42]</sup>。

Meyer et al. (1972)<sup>[43]</sup>和 Sobolev (1974)<sup>[41]</sup>研究金刚石中的铬铁矿包裹体发现, $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量(质量分数)为58%~70%, $\text{TiO}_2$ 含量小于0.6%, $\text{MgO}$ 含量为11%~17.5%。特别是 Sobolev(1974)<sup>[41]</sup>研究世界各地岩管的720颗金刚石铬铁矿包裹体,其成分特征是: $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量62%~67%之间, $\text{TiO}_2$ 含量小于0.7%, $\text{MgO}$ 含量10%~15.5%之间(图1)。董振信等(1980)<sup>[44]</sup>研究中国常马庄等地区金刚石矿中的铬铁矿得出结论: $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ 值大于80%时,金伯利岩含矿富; $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ 值小于80%时,金伯利岩含矿较贫。

### 4) 钛铁矿

金伯利岩浆在短时间内将金刚石带向地表的高氧低压低温环境,钛铁矿被认为是氧逸度的指示矿物;如果钛铁矿的 $\text{MgO}$ 含量(质量分数)小于5%,

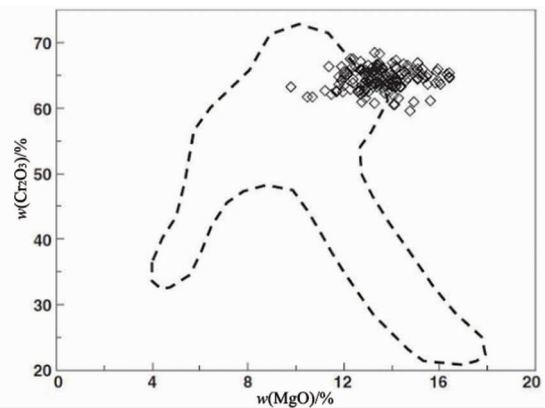


图1 金刚石中以包裹体形式存在的铬铁矿  
 $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ — $w(\text{MgO})$ 相关图

Fig. 1  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ — $w(\text{MgO})$  collection diagrams of chromite inclusions in diamond

(图中投影点高度集中区的铬铁矿的样品来自22个国家和地区的金伯利岩,包括:南非、西非、南美、俄国和中国<sup>[41]</sup>)

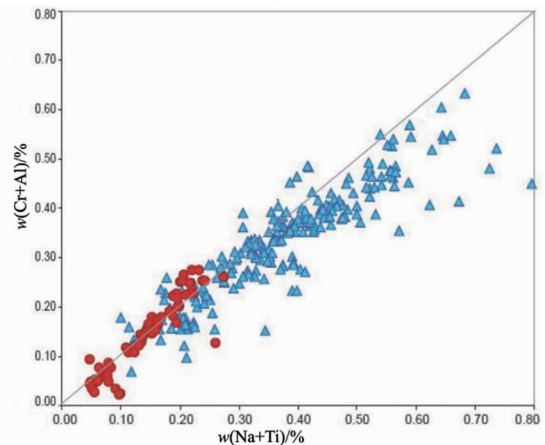


图2 金刚石中的铬透辉石包裹体  $w(\text{Cr}+\text{Al})$ — $w(\text{Na}+\text{Ti})$ 图

Fig. 2  $w(\text{Cr}+\text{Al})$  vs  $w(\text{Na}+\text{Ti})$  plot of chrome diopsides inclusions in diamond

(橄榄岩型透辉石(红圈)相比榴辉岩型透辉石(蓝色三角),少铝和低钠<sup>[49]</sup>)

被认为是高氧逸度环境,金刚石会被溶蚀而尽; $\text{MgO}$ 含量大于12%,有利于金刚石保存<sup>[41,43]</sup>。钛铁矿中 $\text{Mg}$ - $\text{Ti}$ 关系图<sup>[45]</sup>清晰地表明含矿金伯利岩中的钛铁矿具有高镁高钛的特点。

在安哥拉世界著名的Catoca岩体中发现了六种不同结构的钛铁矿,其表明随着热液中 $\text{Mg}/\text{Mn}$ 浓度的变化而产生钛铁矿在成分和结构上的复杂变化;有的钛铁矿晶体的核是由捕虏体分离出来的,有的镁钛铁矿在这一岩体中呈现为一种晚期置换的现象,在岩体的有些部位却缺失钛铁矿,也就是说缺失富镁的钛铁矿并不意味着金伯利岩就不含金刚

石<sup>[46]</sup>。在许多金伯利岩的钛铁矿中常见钛铁尖晶石的出溶现象,因此有部分这样的矿物化学分析会完全落在含金刚石金伯利岩区域图之外<sup>[19]</sup>。故不能用钛铁矿的分析就简单地判断金伯利岩的含矿性,而把这一矿物作为参考,需要结合常规的岩矿鉴定及其矿物结构分析来判断。

#### 5) 透辉石

金刚石中的透辉石主要来自橄榄岩和榴辉岩这两种岩石类型。橄榄岩型金刚石透辉石包裹体相比榴辉岩型金刚石透辉石包裹体更富 Cr 少 Al,以  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含量(质量分数)在 0.5%~4.5%、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量(质量分数)小于 4.0% 为特征<sup>[47-48]</sup>。相比榴辉岩型透辉石,橄榄岩型透辉石少铝低钠<sup>[49]</sup>(图 2)。Quirt(2004)<sup>[50]</sup> 在透辉石方面做了许多工作,用  $\text{Fe}^{2+}$ -Cr-Na 和  $\text{Fe}^{2+}$ -Cr-Ca 阳离子三角图(图 3)可以比较清晰地区分来源于地幔的金伯利岩石中的透辉石和来源于地壳岩浆的其它岩石中的透辉石。

## 4 讨论和结论

(1)在沉积物中采集、筛分和分析重砂矿物是寻找矿体的常规方法。然而在寻找金刚石矿中,需要排除非目标体中含有的与 KIM 类似矿物的干扰,前人的研究为我们提供了许多数据。当在一个地区发现第一颗 KIM 时,首先要做的就是进行矿物化学的

分析,为某一地区金伯利岩的含矿性提供可靠的依据,并综合分析其它信息判断是否进行下一步工作。

(2)在 KIM 组合分析中:如果有含 Cr 高的 G10 镁铝榴石存在,就意味着这一地区有可能是金伯利岩存在的靶区;含金刚石榴辉岩型镁铝榴石的  $\text{Na}_2\text{O}$  含量(质量分数)大于 0.06% 和全岩分析  $\text{Na}_2\text{O}$  含量大于 7%,以区别不含金刚石的榴辉岩;大颗粒高 Cr 铬铁矿的存在,以及透辉石富 Cr 少 Al 的特点,有助于判别一个地区是否存在含矿金伯利岩。橄榄石是高压环境下形成的矿物,在地表环境下容易风化消失,但是如果存在自形晶,将有助于发现目标体。

(3)几乎所有以火山中心机构建造的火山杂岩体都含有矿化体<sup>[51]</sup>,金伯利质岩管是各种火山机构建造中最复杂的岩管。在未来寻找新型矿种时,我们首先要做的是分析原生矿中的重矿物组合,分析水系沉积物重重砂矿物的走向,进而去发现真正的目标体。

#### 参考文献:

- [1] 岳艳. 浅谈重矿物物源分析方法[J]. 科技情报开发与经济, 2010, 20(12): 138-139.
- [2] 操应长, 宋玲, 王健, 等. 重矿物资料在沉积物物源分析中的应用[J]. 沉积学报, 2011, 29(5): 835-841.
- [3] Morton A, McGill P. Correlation of Hydrocarbon Reservoir Sandstones Using Heavy Mineral Provenance Signatures: Examples from the North Sea and Adjacent Areas [J]. Minerals, 2018, 8(12): 564.
- [4] O'Sullivan G, Chew D, Morton A, Mark C, Henrichs I. Integrated apatite geochronology and geochemistry in sedimentary provenance analysis [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2018, 19(4): 1309-1326.
- [5] Jones T J, J K Russell, L A Porritt, R J Brown. Morphology and surface features of olivine in kimberlite: implications for ascent processes [J]. Solid Earth, 2014, 5: 313-326.
- [6] Hawthorne J B. Model of a kimberlite pipe [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1975, 9: 1-15.
- [7] Foulger G R. Plates vs Plumes: A Geological Controversy [M]. Wiley-Blackwell, 2010. (ISBN 978-1-4051-6148-0)
- [8] Francis Don, Patterson Michael. Kimberlites and aillikites as probes of the continental lithospheric mantle [J]. Lithos, 2009, 109(1-2): 72-80.
- [9] David S G Thomas, Goudie Andrew (eds.) The Dictionary of Physical Geography [M]. Oxford: Blackwell, 2000: 301. (ISBN 0-631-20473-3)
- [10] Barnett W, et al. How Structure and Stress Influence Kimberlite Emplacement [C]. In: Pearson D, Graham et al. (editors). Proceedings of 10th International Kimberlite Confer-

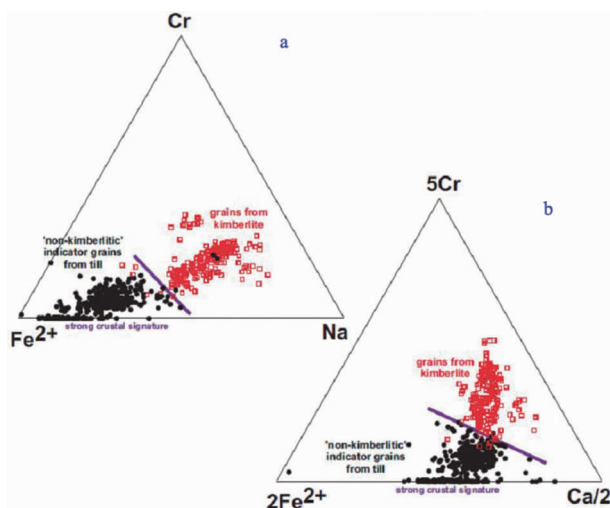


图 3 透辉石  $\text{Fe}^{2+}$ -Cr-Na 关系图(a)、 $\text{Fe}^{2+}$ -Cr-Ca 关系图(b)

Fig. 3  $\text{Fe}^{2+}$ -Cr-Na cation plot (a)

and  $\text{Fe}^{2+}$ -Cr-Ca cation plot of clinopyroxene (b)

(红方框为来自金伯利岩的透辉石,黑实圈为来自非金伯利岩的透辉石,各自的区域明显<sup>[50]</sup>)

- ence, V 2, Springer, 2013; 63. (ISBN 978-81-322-1172-3)
- [11] Tom E Nowicki, Rory O Moore, John J Gurney, Mike C Baumgartner. *Diamonds and Associated Heavy Minerals in Kimberlite: A Review of Key Concepts and Applications* [C] // [Developments in Sedimentology] *Heavy Minerals in Use*, 2007, V 58 || Chapter 46; 1235-1267.
- [12] Kamenetsky V S, Kamenetsky M B, Sharygin V V, Faure K, Golovin A V. Chloride and carbonate immiscible liquids at the closure of the kimberlite magma evolution (Udachnaya East kimberlite, Siberia) [J]. *Chemical Geology*, 2007, 237: 384-400.
- [13] Nielsen T F D, Sand K K. The Majuagaa kimberlite dike, Maniitsoq region, West Greenland: Constraints on an Mg-rich silicocarbonatitic melt composition from groundmass mineralogy and bulk compositions [J]. *Canadian Mineralogist*, 2008, 46: 1043-1061.
- [14] Brett R C, Russell J K, Moss S. Origin of olivine in kimberlite: Phenocryst or impostor [J]. *Lithos* 2009, 112, Supplement 1: 201-212.
- [15] Patterson M, Francis D, McCandless T. Kimberlites: Magmas or mixtures [J]. *Lithos*, 2009, 112: 191-200.
- [16] Arndt N T, Guiteau M, Boullier A M, Le Roex A, Tommasi A, Cordier, Sobolev A. Olivine and the Origin of Kimberlite [J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51: 573-602.
- [17] Edwards C B, Howkins J B. Kimberlites in Tanganyika with special reference to the Mwadui occurrence [J]. *Econ Geol*, 1966, 61: 537-554.
- [18] Clement C R, Skinner E M W. A textural genetic classification of kimberlites [J]. *Transactions of the Geological Society of South Africa*, 1985: 403-409.
- [19] Gurney J J, Zweistra. The interpretation of the major element compositions of mantle minerals in diamond exploration [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1995, 53: 293-309.
- [20] Mitchell R H. *Kimberlites, Orangeites, and Related Rocks* [M]. Boston, MA: Springer US, 1995. (ISBN 1461519934)
- [21] Nixon H. The morphology and nature of primary diamondiferous occurrences [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1995, 53: 41-71.
- [22] Erlich E I, Dan Hausel W. *Diamond Deposits, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration* [M]. 2002; 74-94. (ISBN 0-87335-213-0)
- [23] Lenaz D, Princivale F. The crystal chemistry of detrital chromium spinel from the southeastern Alps and Outer Dinarides: The discrimination of supplies from areas of similar tectonic setting [J]. *The Canadian Mineralogist*, 2005, 43(4): 1305-1314.
- [24] Chalapathi Rao N V, Lehmann B, Mainkar D, Panwar B K. Diamond-facies chrome spinel from the Tokapal kimberlite, Indravati basin, central India and its petrological significance [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2012, 105(3-4): 121-133.
- [25] Claire E Bucholz, Oliver Jagoutz, Jill A VanTongeren, et al. Oxygen isotope trajectories of crystallizing melts: Insights from modeling and the plutonic record [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 207: 154-184.
- [26] Menzies M. Kimberlite Occurrence and Origin: A Basis for Conceptual Models in Exploration [J]. *Mineralogical Magazine*, 1986, 50, issue 357: 544-544.
- [27] Jaques A L, Hall A E, Sheraton J W, Smith C B, Sun S S, Drew R M, Foudoulis C, Ellingsen K. Composition of crystalline inclusions and C isotopic composition of Argyle and Ellendale diamonds [C]. In: Ross J. (Ed.). *Kimberlites and Related Rocks*, 2 Geological Society of Australia, Special Publication, 14 Blackwell Scientific Publications, Perth, 1989: 966-989.
- [28] Meyer H O A. Chrome pyrope: an inclusion in natural diamond [J]. *Science*, 1968, 160: 1446-1447.
- [29] Sobolev N V, Lavrent'yev Y G, Pokhilenko N, Usova L V. Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1973, 40: 39-52.
- [30] Gurney J J, Switzer G S. The discovery of garnets closely related to diamonds in the Finsch pipe, South Africa [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1973, 39: 103-116.
- [31] Gurney J J. A correlation between garnets and diamonds in kimberlites [C]. In: Glover J E, Harris G. (Eds.). *Kimberlite Occurrence and Origin: A Basis for Conceptual Models in Exploration*. Geology Department and University Extension, University of Western Australia, Publication, 8. Blackwell Scientific Publications, Perth, 1984: 143-166.
- [32] Grütter H S, Gurney J J, Menzies A H, Winter F. An updated classification scheme for mantle derived garnet, for use by diamond explorers [J]. *Lithos*, 2004, 77: 841-857.
- [33] Grütter H S, Latti D, Menzies A H. Cr saturation arrays in concentrate garnet compositions from kimberlite and their use in mantle barometry [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47: 801-820.
- [34] Sobolev N V, Lavrent'yev Y G. Isomorphic sodium admixture in garnets formed at high pressures [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1971, 31: 1-12.
- [35] Gurney J J, Moore R O. Geochemical correlations between kimberlitic indicator minerals and diamonds, *Diamonds: Exploration, Sampling and Evaluation* [C]. Proceedings of a short course presented by the Prospectors and Developers Association of Canada, 1993, 147 and 149-171.
- [36] McCandless T E, Gurney J J. Sodium in garnet and potassium in clinopyroxene: criteria for classifying mantle xenoliths [C]. In: Ross J. (Ed.). *Kimberlites and Related Rocks*, 2 Geological Society of Australia, Special Publication, 14 Blackwell Scientific Publications, Perth, 1989: 827-832.
- [37] Danchin R, Wyatt B A. Statistical cluster analyses of garnets from kimberlites and their xenoliths [C]. *Kimberlite Sympo-*

- sium II, Cambridge, U K, 1979; 22 - 27.
- [38] Haggerty Stephen E. The chemistry and genesis of opaque minerals in kimberlites [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1975, 9; 295 - 307.
- [39] Schulze D J. Origins of chromium and aluminous spinel macrocrysts from kimberlites in southern Africa [J]. *The Canadian Mineralogist*, 2001, 39(2); 361 - 376.
- [40] Roeder P L, Schulze D J. Crystallization of groundmass spinel in kimberlite [J]. *Journal of Petrology*, 2008, 49 (8); 1473 - 1495.
- [41] Sobolev N V. Deep-seated inclusions in kimberlites and the problem of the composition of the upper mantle [J]. *Novosibirsk*, 1974, 183; 1 - 38.
- [42] Griffin W L, Ryan C G, Gurney J J, Sobolev N V, Win T T. Chromite macrocrysts in kimberlites and lamproites: Geochemistry and origin [C]. In: Meyer H O A, Leonardos O H. (eds). *Kimberlites, Related Rocks and Mantle Xenoliths*. Brasilia: CPRM, 1994; 366 - 377.
- [43] Meyer H O A, Boyd F R. Composition and origin of crystalline inclusions in natural diamonds [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1972, 36: 1255 - 1273.
- [44] 董振信, 周剑雄. 我国金伯利岩中铬铁矿的标型特征及其找矿意义[J]. *地质学报*, 1980(4): 284 - 301.
- [45] Wyatt B A, Baumgartner M, Anckar E, Grütter H S. Compositional classification of "kimberlitic" and "non-kimberlitic" ilmenite [J]. *Lithos*, 2004, 77; 819 - 840.
- [46] Robles-Cruz S, Watangua M, Isidoro L, Melgarejo J. Contrasting compositions and textures of ilmenite in the Catoca kimberlite, Angola, and implications in exploration for diamond [J]. *Lithos* 2008, 112; 966 - 975.
- [47] Nimis P. The pressures and temperatures of formation of diamond based on thermobarometry of chromium diopside inclusions [J]. *Canadian Mineralogist*, 2002, 40; 871 - 884.
- [48] Nimis P, Alberto Zanetti, Isabel Dencker, et al. Major and trace element composition of chromian diopsides from the Zagadochnaya kimberlite (Yakutia, Russia): Metasomatic processes, thermobarometry and diamond potential [J]. *Lithos*, 2009 112(3-4): 397 - 412.
- [49] Cookenboo H O, Grütter H. Mantle-Derived Indicator Mineral Compositions as Applied to Diamond Exploration [C]. In *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration* edited by B Milkereit, 2007; 183 - 200.
- [50] Quirt D H. Cr-diopside (clinopyroxene) as a kimberlite indicator mineral for diamond exploration in glaciated terrains [C]. In *Summary of Investigations 2004, Volume 2*, Saskatchewan Geological Survey, Sask. Industry Resources, Misc. Re; 2004 - 4.2, CD-ROM, Paper A - 10, 14.
- [51] 丁毅. 宁芜玢岩铁矿成因新论[J]. *矿床地质*, 1992(3): 195 - 202.

## KIM methods of heavy minerals in sediment and the significances to mineral resources prospecting

DING Yi, YANG Xianzhong

(Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Sampling of heavy placer minerals in stream sediments is still one of the main methods for tracing ore bodies or their host rocks. However, there are many interfering bodies in diamond prospecting, such as the dispersed halo of magnesium-aluminite, chromite, ilmenite and diopside, which are associated with diamond in kimberlite, centered on kimberlite. The collection and analysis of KIM in drainage sediments can effectively eliminate interfering bodies, and get closer and closer to the real goal.

**Key Words:** heavy sand; target body; sediment; kimberlite; mineral chemistry