



矿体的地表特征

在找矿勘探中铁帽的评价

在找矿勘探中,必须区分开由硫化物导生的富铁冠岩(“铁帽”)和其它的“氧化铁”。这些氧化铁包括铁砾岩、硅结砾岩、红土、富铁岩石、风化的铁燧岩、碧玉铁质岩和燧石。在那些因各种类型的原岩的风化作用而在地表产生了外表相似的氧化铁的地方,要想将它们区别开是极其困难的。从找矿的目的出发,最好将全部含铁岩石的露头都看成是氧化铁,直到能将它们按类划分开为止。一个真正的铁帽一经确认,接下来的工作就是预测下伏矿化的经济意义。

在浅生蚀变过程中,许多类型的块状硫化物矿体,经过一系列的电化学反应而逐渐氧化了。导电剖面顶部的稳定铁氧化物(铁帽)的形成,是矿石阳极氧化过程中的最终蚀变产物。硫化物变为氧化物(硫化物氧化为硫酸盐),在整个过程中也许是最关键的一步。其结果使得矿石的结构构造遭到部分或完全的破坏,成矿金属和铁(与硫酸盐一起)的不同程度的淋滤,造成铁和二氧化硅的汇集。矿石中金属—硫的比值、母岩的缓冲酸的能力和氧化反应的总动力可能是控制转变的性质的主要因素。可以利用铁帽的残余矿物、结构和地球化学等方面的参数来鉴定母岩硫化物的组合。

最近的一些史例证明,应用地球化学标准可以将铁帽和其它氧化铁分辨开。而且,根据铁帽的地球化学特征,也可以鉴别出由特殊类型的矿床导生的铁帽。用地球化学数据的多元统计分析方法,对已知成因的铁帽和氧化铁进行分类。当积累了大量资料并产生

一定的判别作用(discriminant function)后,就可以用判别作用来检验在找矿过程中所采集的未知成因的标本。在找矿勘探工作中,可用这种方法作为一种例行方法来鉴别铁帽类型。

有时,当铁帽被确认之后,详细地研究矿物学和结构,就能够预测出母岩硫化物矿化的经济意义。部分氧化的硫化物的金属矿相研究表明,许多矿物首先沿特殊的结晶面,特别是解理、裂理和双晶蚀变。甚至在彻底氧化的矿石内,早期形成的针铁矿—二氧化硅蚀变,仍以一种精致的“网格状空隙”保存下来,与铁帽伴生。对外观上不存在肉眼可见的网格状空隙的块状针铁矿和碧玉质铁帽的金属矿相研究还表明,铁帽中硫化物结构的假象保存现象并不罕见。在保留着有硫化物矿物结构的地方,研究铁帽的金属矿相,可揭示地表下硫化物组合的矿物学。

在某些类型的铁帽的地球化学与其母岩矿石之间,显然还存在着一些特殊关系。例如,西澳大利亚的镍矿铁帽,一些固定的元素,如钡和铈,其含量与下伏的硫化物矿床的镍品位有关。根据露头岩石的分析结果,就能够应用这一标准来计算下伏矿体的品位。在找矿勘探中,这是一个有用的辅助手段。

南非铜—锌铁帽的评价

在南非的纳马夸、霍马斯和穆尔奇森三个变质带内,火山成因的层状铜—锌(一铅)硫化物矿床在地表出露有发育良好的铁帽。通常与矿层伴生的富铁喷出岩(exhalite)的变质产物是条带状磁铁矿—石英岩,这些

磁铁矿—石英岩是纳马夸、利姆波波和穆尔奇森变质带盖层内的重要组分。这些变喷出岩的风化作用,有利于铁帽层的浅成富化。浅成硅化作用对于将铁质冠岩鉴别为铁帽也是一种阻碍。

南非铜—锌—铅矿的找矿勘探中,伴生的黄铁矿—磁黄铁矿铁帽和由磁铁矿导生的氧化铁的识别是很重要的。覆盖于有经济价值的硫化物之上的、类似铁帽的其它氧化铁,包括脉状黄铜矿和黄铁矿铁帽、层状黄铁矿质页岩铁帽、块状褐铁矿质喷出岩、富铁岩石、填隙表土和层状铁砾岩;所有这些均使野外问题显得十分复杂。

从野外关系来看,许多富铁岩体和铁砾岩完全可以不算在潜在的铁帽之列,但是由喷出岩导生的氧化铁和硫化铁铁帽都需要进行更详细的分析研究。在南非和西南非,覆盖在块状硫化物矿体上的铁帽的地形表现和航空照片地质显示,既有色调清晰的发育良好的山峰,又有毫无色调特征的一些孤立的小露头。这些特征在很大程度上受到局部地貌和钙质结砾岩的影响。例如,纳马夸省的极稳定的碧玉质铁帽,没有地形特征,而西南非的霍马斯带内的易碎的石英质铁帽却形成清晰可辨的山脊。

铜—锌铁帽的主要矿物最初是微胶体针铁矿和二氧化硅,常常经过脱水而变成赤铁矿—二氧化硅,或形成一种含铁很少的燧石。黄钾铁矾(黄铁矿再生的)、氢氧化锰、滑石和粘土常为伴生矿物。铁帽中丰富的残余硫化物包体的显微镜研究和在某些情况下对各种矿物的计算,可以提供矿石组合中的各个原始含量。诸如重晶石、石膏、石英和各种硅酸盐这样一些残积脉石矿物,对于识别矿石类型,是有帮助的。氧化铜矿物常为碳酸盐和硅酸盐,产于块状硫化物铁帽内,而在矿体的半块状边缘(semi-massive),这些矿物则更为普遍。含有低品位的铜—锌硫化物的半块状黄铁矿体的地表氧化矿物反而

比块状黄铁矿体的地表氧化矿物更发育,这是不大合情理的。采色“褐铁矿”产于少数黄铁矿铁帽中,而在块状硫化物铁帽中则为数更少,但其它一些地方,紧紧地覆盖在矿体之上的暗褐色碧玉质铁帽与来自各种非硫化物沉的许多泥铁矿很相似。

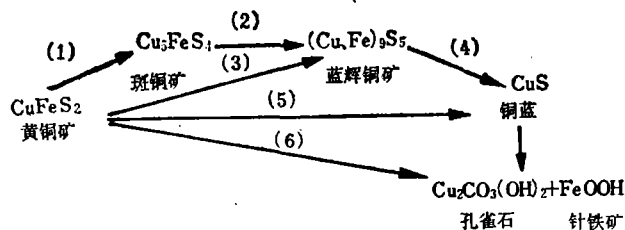
各个不同地区的所有铜—锌铁帽中,都有关于硫化物导生作用的特征结构证据。由于变质作用产生了易于被复型(replication)的粗粒黄铁矿的斑状变晶,所以,从黄铁矿形成的网格状空隙是肉眼可见的最显著和最常见的残余结构。由磁黄铁矿形成的豆状或“鸟眼”状结构罕见,粗粒黄铜矿—闪锌矿的基质极少保存肉眼可见的网格状空隙。各种铁帽的多孔显微结构在其存在的地方均成为一种特征,但矿石基质的黄铜矿和闪锌矿通常都被微胶体的针铁矿—二氧化硅交代,后者未保持基本的复型(replica)形状。细粒黄铁矿或黄铜矿—闪锌矿共生体和集合体的块状假象交代可以通过比较矿石结构而鉴别出来,但它比多孔的复型更精确。

研究原生硫化物的浅生蚀变作用,可以得出在铁帽形成过程中,中间交代结构和浅生硫化物组合对铁帽的微量元素地球化学的影响的重要资料。在一些铜—锌矿体中,如奥奇哈塞、普里斯卡和莱塔巴考帕等,浅生蚀变作用逐渐影响到碳酸盐或石膏脉石、黄铜矿、闪锌矿,最后影响到黄铁矿。闪锌矿和细粒基质黄铁矿是另外的相,可以和黄铜矿一起经受早期蚀变作用。在目前所研究的矿体中,浅生硫化铜表现出一种均匀的蚀变序列(图1)。在原生矿之上,黄铜矿氧化为块状兰辉铜矿 $[(Cu, Fe)_9S_5]$,含有属中间蚀变产物的少量斑铜矿 (Cu_5FeS_4) 。在几个这样的矿体中辨认出了浅生辉铜矿或更可能是djurleite $(Cu_{1.97}S)$,但兰辉铜矿却是最普遍的一种富铜硫化物。黄铜矿和兰辉铜矿氧化为正常的铜兰 (CuS) ,借助沿着黄铜矿解理的原生或浅生阶段的熔蚀作用而确定

了最后的残余结构。铜兰最终被针铁矿(FeOOH)交代,释放出离子铜,沉淀为孔雀石[Cu₂CO₃(OH)₂]。在蚀变作用的前阶段,黄铜矿直接氧化为胶体针铁矿或赤铁矿,这是一种常见的反应;未保留有原始硫化物的结构记录。初期的蚀变反应(1、2、3、5)释放出二价铁离子,氧化为针铁矿或赤铁矿。这些氢氧化铁可以吸收和保存在蚀变反应(4和6)的最初阶段被释放出来的离子铜,或与之共沉淀。闪锌矿的主要蚀变产物是极细粒的正常铜兰,熔蚀了颗粒边缘和解理。闪锌矿内的铁氧化为针铁矿,这是由闪锌矿蚀变成的铜兰的最终蚀变产物。菱锌矿(ZnCO₃)是富含闪锌矿的矿石的一种风化产物,解释了在伴生的铁帽中锌含量异常高的原因。粗粒黄铁矿的斑状变晶的最初氧化作用沿边缘解理进行,而当基质全部蚀变之后,这些黄铁矿依然保存下来。在硫化铁氧化成为针铁矿或赤铁矿的过程中,黄铁矿被正常铜兰交代,这是一个不寻常的中间阶段。胶体二氧化硅的流入破坏和交代了残余多孔的网格状空隙。残余氧化物和硅酸盐及其交代结构,是与一些凝胶针铁矿—二氧化硅伴生的泥铁矿的其它晶族的特征,留下了一个球状多孔的假象网格状空隙。

根据铜—锌—铅铁帽的痕量元素地球化学来鉴别铁帽(有时为一组,多数情况下是单个的),是多方面的和最可信的标准。微量元素组的各种离子被吸附在胶状针铁矿—赤铁矿—二氧化硅、黄钾铁矾、氢氧化锰和粘土上,或与之一起沉淀。矿体铁帽中所保留的铜含量较高(0.1~1.0%Cu)。根据反应机理对含铜量所做的解释可能是对的(如图1所示)。然而,矿化较

弱的矿体上的铁帽内,少量原生铜的硫化物经过风化而保存了同样多的铜,所以,氧化铜的特征更为显著。黄铁矿的氧化作用,在某种程度上也包括闪锌矿,使硫化铜富集,加强了水合三价铁氧化物对离子铜的最终保存。矿体铁帽中的锌含量很不规律,其含量多少主要取决于原始含量,平均含量范围为0.05~0.5%Zn,一般都超过相应的锰含量(0.01~0.1%Mn)。在某些矿体铁帽附近的露头上,保存了一个与氧化铜伴生的锰含量背景值高的弱晕。铅和钡,在浅生环境内最初是比较固定的硫酸盐,在矿体铁帽内形成残余富集或以较高的含量被保存下来。图2示出了铅与钡的各自含量范围,其中钡仅是从部分有机络合物(硫酸盐)提取的。利用诸如砷、锑、铋、和钼等元素作为判别元素的方法尚未被研究过,但这些元素的极低的痕量都可以证明是有意义的。有关铼的初步资料表明,在一些个别的地方,在上伏的



重要的反应

- (1) $\text{CuFeS}_2 + 1.22\text{Cu}^{++} + 0.89\text{H}_2\text{O} \rightarrow 0.45\text{Cu}_5\text{FeS}_4 + 0.22\text{SO}_4^{--} + 0.55\text{Fe}^{++} + 1.78\text{H}^+$
黄铜矿 斑铜矿
- (2) $\text{Cu}_5\text{FeS}_4 + 1.75\text{Cu}^{++} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 0.75\text{Cu}_9\text{S}_5 + 0.25\text{SO}_4^{--} + \text{Fe}^{++} + 2\text{H}^+$
斑铜矿 蓝辉铜矿
- (3) $3\text{CuFeS}_2 + 6\text{Cu}^{++} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cu}_9\text{S}_5 + \text{SO}_4^{--} + 3\text{Fe}^{++} + 8\text{H}^+$
黄铜矿 蓝辉铜矿
- (4) $\text{Cu}_9\text{S}_5 + 4\text{H}_2\text{O} + 7\text{O}_2 \rightarrow 2.5\text{CuS} + 2.5\text{SO}_4^{--} + 6.5\text{Cu}^{++} + 8\text{OH}^-$
蓝辉铜矿 铜兰
- (5) $\text{CuFeS}_2 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CuS} + \text{SO}_4^{--} + \text{Fe}^{++}$
黄铜矿 铜兰
- (6) (a) $\text{CuFeS}_2 + 1.5\text{H}_2\text{O} + 4.25\text{O}_2 \rightarrow \text{FeOOH} + 2\text{SO}_4^{--} + \text{Cu}^{++} + 2\text{H}^+$
黄铜矿 针铁矿
(b) $2\text{Cu}^{++} + 3\text{OH}^- + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CuCO}_3 + \text{Cu}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}$
孔雀石

图1 南非铜—锌矿床中含铜硫化物的浅生蚀变序列

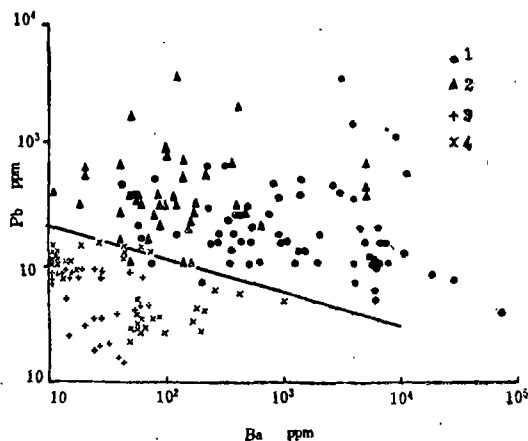


图2 南非各种铁帽和其他氧化铁的对数 Pb—对数Ba的散点图

1. 具有经济价值的Cu—Zn, 块状硫化物铁帽 (2个地点, $n=63$);
 2. 具有次要经济价值的Cu—Zn, 半块状硫化物铁帽 (2个地点, $n=42$);
 3. 黄铁矿铁帽 (2个地点, $n=29$);
 4. 富铁岩石, 由磁铁矿导生的碧玉 (3个地点, $n=39$);
- 注意: Ba 仅是从重晶石中部分提取的

铁帽中保存了相当数量的镓(150ppm)。

由半块状的含铜较少的黄铁矿—磁黄铁矿矿化导生的碧玉质铁帽, 比由块状铜—锌硫化物导生的铁帽中的锰、铜、锌含量高, 而钡含量却低的多。由含铁岩石单元形成的氧化铁的繁多的变种中, 痕量元素的含量都很低 (个别的低于100ppm); 但是其特征是锰含量高, 大大超过了锌 (高达0.5%Zn) 和铜 (高达0.05%Cu) 的清除水平。

提出了一种对不同地点的铁帽地球化学的多元统计解释方法, 初步研究结果表明, 铅和钡是铜—锌铁帽的重要指示元素。对数 Pb—对数Ba的散点图表明, 矿体铁帽、半块状低品位铜—锌矿化的铁帽和会有各种氧化铁的黄铁矿铁帽具有三种不同的种类。有潜在意义的铁帽绝大部分位于图2内线以上的范围。铅和钡之间的显著的逆相关关系主要是由于在分析时重晶石含量增加因而抑制了铅所造成的。

根据铁帽及其它氧化铁矿石的野外关系、矿物学、残余结构和地球化学等一系列完整的调查研究来评价铁帽, 这是南非在碱金属矿床勘探中采用的一种新方法, 该方法还有其它用途。在有喷出岩发育的变质带内, 对氧化铁进行区域地球化学评价及有选择的金属矿相研究, 是一种有效的普查找矿方法。上述划定的不同标准, 不仅表征了这些地质体内铜—锌硫化物铁帽, 而且, 在有利的情况下, 还可用来评价原生矿物、矿石品位和矿体伴生。这样, 在勘探程序的初期, 可以排除假的氧化铁, 节省物探和钻探的经费, 下一步再进行地球化学和矿石结构研究, 就可以对有望靶区和含糊不清的目标作更详细的评价。

镍—铜铁帽的地球化学评价

对西澳大利亚和南非中部半干燥太古代地盾的28个Ni—Cu硫化物矿化伴生的铁帽进行了地球化学研究, 目的是试图根据下伏的硫化物矿化来改进铁帽的评价方法。

对其中17个硫化物矿化的一套有代表性的铁帽样品的地球化学资料进行了初步的统计分析, 所得出的结果是: ①每一种金属含量的分布都是从单一的组合总体中抽取的; ②Fe、Si这两种元素接近正态分布, 而Cu、Mn、Cr、Co和Ti接近对数分布; ③全部含镍铁帽的地球化学数据的多元分析是从一个单一的多元素整体中抽取的。根据这些发现, 可以用更详细的统计方法来帮助研究铁帽与做为其母源的硫化物矿床之间的地球化学的关系。

作为母源的硫化镍矿床的金属含量的分布也接近对数分布, 但与铁帽的金属含量分布相反, 它们显然是多模态的。这一点大约反映出有几种化学亚总体存在, 每一种包含一个或更多的单个硫化物矿床。表1给出了根据65个样品得出的总分布的参数。与之相反, 铁帽的金属含量却表现出更大的变异性

(表 2, 据 147 个样品)。与硫化物的地球化学相比, Ni 和 Co 在氧化期间显然是被强烈地淋滤掉, 而 Cu、Cr、Mn 和 Ti 却趋向于被选择性地保留在铁帽内。淋滤作用还使得化学变异性增大。还研究了元素间的协方差, 因此, 可以用相关矩阵来确定, 元素的有意义的伴生是否可以表征出铁帽的存在。在 Ni、Cu、Mn 和 Co 这一组的所有元素之间存在一种相互的相关关系。对铁帽资料的主成分分析证实了, 由 Ni—Co—Mn—Cu 组成的一个单一的因子说明了铁帽样品组所表现的总变异性的真正比例。这种伴生大概是从母源硫化物组合转变来的。

因此, 设计了一种多线性回归分析的程序来研究铁帽中元素的这种伴生是否直接与母源硫化物组合的品位有关。用块状硫化物的镍和铜平均含量作为应变变量, 而以伴生的铁帽的平均金属含量作为自变量, 就产生了一系列回归方程式。根据铁帽的地球化学, 用这些方程式可以预测块状硫化物的平均镍和铜含量。采用这种方法, 必须用每一地质体中若干合理的铁帽样品来确定平均组份。用无关的露头资料来检验这些方程, 结果证明, 它们可以成功地在 90% 的置信水平上予测出母源硫化物组合内的镍和铜的平均含量。

干燥环境内的斑岩铜矿的地表特征

斑岩铜矿通常在地表显示有广泛的彩色带。岩石分布的不同型式和深成蚀变(矿化分带)造成了色彩的变化, 浅成蚀变的迭加又加强了这种色彩变化。浅生氧化作用促使淋滤盖层发育, 其中, 硫化物变为含有或不含氧化铜矿物的褐铁矿, 硅酸盐部分被交代, 特别是被粘土和绢云母交代。浅成的硅酸盐蚀变通常使岩石更加淡白, 而褐铁矿则形成了红色(赤铁矿), 褐色(针铁矿)和黄色(黄钾铁矾)的斑点。

经受过浅生作用的各种岩石类型和蚀变

带的硫化物和硅酸盐矿物的矿物学, 尤其是黄铁矿含量, 具有特殊的作用。特别是硫化物组分(黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿、辉铜矿)及其比值(黄铁矿:褐铜矿+斑铜矿, 黄铁矿:辉铜矿)指示了褐铁矿中黄钾铁矾、针铁矿和赤铁矿含量和它们的迁移程度。因此, 在干燥环境中, 由于植被极少, 所以, 详细研究蚀变分带和淋滤盖层, 就可以得到有关下伏的硫化物矿化的性质、甚至品位的资料。而且, 在美国西南部、墨西哥北部和中部、安第斯山脉中部和伊朗—巴基斯坦斑岩铜矿区等干燥地区, 在普查阶段, 航空探测寻找彩色带比区域地球物理或地球化学测量效果更好。

矿体的地植物特征

植被反映了许多环境因素(包括与基岩和表层地质共生的因素)相互作用和反作用而产生的特定的产地条件。金属和其它矿物富集的矿体对许多种植物是有害的, 因为在风化作用期间, 这些金属和矿物被大量释放至土壤中。因此可以根据有耐力的异常植物

表 1

	范围 (%)	平均值 (%)
Ni	0.430~5.90	2.97
Cu	0.003~7.99	0.92
Mn	0.008~0.18	0.05
Cr	0.002~0.51	0.05
Co	0.002~1.10	0.12
Ti	0.003~0.32	0.04

表 2

	范围 (%)	平均值 (%)
Ni	0.011~7.12	0.88
Cu	0.002~3.02	0.49
Mn	0.003~1.60	0.05
Cr	0.002~5.36	0.26
Co	0.002~0.24	0.03
Ti	0.003~3.88	0.09

群来圈定矿体。金伯利岩火山筒和磷酸盐矿床等一些矿床,伴生有特殊的植物,反映出源岩释放出的主要元素和/或由风化作用而产生的特殊的水系条件。此外,植被也可以揭示控制矿床位置的地质构造。

指示性植物种类的大小和性质随矿床的性质和环境而变化。有时,一种异常的植物群可以圈定出露头下矿体的位置;有时,又可反映出从一个矿床散发出的迁移的地球化学异常,根据区域地貌的研究就能够发现矿床的位置。与矿床伴生的异常植物群,在具有夏季降雨体系的半干燥地区特别发育(例如在矮树和灌木丛生的草原地区)。这些植物群在毒害很严重的环境内发育,如英国和西欧的热带雨季森林和温带落叶及松柏林地和草地。根据航空测量,在某些情况下甚至根据卫星象片都能鉴别出深部构造的大型地植物异常和地植物特征,而一些小的和零星

的异常则需要进行野外调查才能辨认出。

在澳大利亚昆士兰西部新发现的莱迪洛雷塔和斯奎雷尔希尔斯铅—锌矿床和凯利山铜矿床证明了矿体的地植物表现,1968~1970在西南非和博茨瓦纳圈定的铜矿化也证明了这一点。也曾提到在北威尔士的科迪—布雷宁地区有指示性的植物群。昆士兰西部的莱迪安尼和杜切斯地区的大型磷酸盐矿床和委内瑞拉的塞罗博利瓦尔—圣伊西德罗的铁矿体都有植物表现。在昆士兰西部和博茨瓦纳西部地区还证明了,褶皱构造、断层和其它大型区域断裂线上的地植物表现对指示矿体的重要性。

叶之译自:《Institution of Mining & Metallurgy, Transactions/Section B》, vol.86,1977, pp.165~169

复电阻率法简介

在常规激发极化法(IP)所取得的数据中,实际上还包含有直流电阻率的信息。但如果要求获得的电性信息量达到最大,则必需在额外的交流电频带上测量电阻率的实、虚两个分量。这种测量方法称为复电阻率法,要求对输出和输入波形的振幅和相位进行比较,经过中间变换,频率域和时间域都被采用。这就可以对整个线性地电系统进行研究。

所以,复电阻率(CR)法是一种变频的接地电法,借助于分析大地总电阻率的实分量和虚分量来研究大地的电性。因为这种方法可以得出激发极化的不同参数、电阻率和有关大地的电性和电磁性,区分它们各自的作用,而且把结果显示出来,供观察分析和推断解释,所以在电法勘探中复电阻率法是向前迈进了一大步。如果不采用先进的电

子测量装置和连接的计算机设备,就很难在单个宽的测程内把取得的不同参数分开。虽然现在通用的常规IP测量,今后还可在野外使用若干年,不过电法勘探未来的发展趋势是趋向复电阻率测量这个方向的。

方法的发展史

理解了复电阻率法的工作方法、原理以及可能的应用范围以后,人们对这种方法为什么未能更广泛地使用,会感到奇怪。答案是,设备的发展和理论的理解还赶不上技术的进展。CR法是一种新方法,在地球物理文献首先提到这种方法的是1971年冯沃里斯等人所发表的一篇论文。1967年肯尼科特勘探公司在霍尔默指导下开始研究这个方法。1973年冯沃里斯等人报道了他们的初步研究结果,似乎并没有得出明确的结论。在设备