

科学钻探岩芯低损耗成分测试 和物性测量的探索与实践



段壮^{1, 2)}, 龚晶晶^{1, 2)}, 李磊^{1, 2)}, 李振焕³⁾, 王增祥³⁾, 杨剑洲^{1, 2)}, 李勇^{1, 2)},
胡树起^{1, 2)}, 唐世新^{1, 2)}, 弓秋丽^{1, 2)}, 谢昌丽^{1, 2)}, 高健翁^{1, 2)}, 付燕刚^{1, 2)}

- 1) 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 深地探测与矿产勘查全国重点实验室, 天津, 300309;
2) 国家现代地质勘查工程技术研究中心, 天津, 300309;
3) 自然资源实物地质资料中心, 河北三河, 065200

内容提要:科学钻探岩芯是地球科学研究的宝贵实物资料,它直接反映了地球深部的结构、物质组成和地质历史,对于地质学、地球物理学、地球化学、材料科学、信息科学等多学科领域的研究均具有相当的重要性和独特价值。本研究聚焦于科学钻探岩芯的低损耗成分测试和物性测量方法的探索与实践,旨在通过技术创新与流程优化,以实现珍贵科钻岩芯资源的保护与高效利用。笔者等首先从样品布设与采集方案的科学设计入手,对取样位置与数量进行系统规划,确保数据的代表性与可靠性。随后详细阐述了物性测量取样流程,针对不同规格样品开展波速、密度、磁性和电性测量,为深部地质特征研究提供了基础物性数据。在岩芯化学成分分析方面,提出了低损耗测试策略,包括优先确保单次分析用量、选择性分析微量元素以及特殊岩芯状态(如松散或碎裂)的灵活处理方法。此外,研究还强调了样品归位及余样保存的重要性,确保岩芯资源的可追溯性与可持续利用。通过项目实施,笔者等提出的“科学钻探岩芯低损耗成分和物性测量”工作方法已初步验证其可行性与应用效果,为科学钻探岩芯的保护与高效利用提供了技术支撑与实践范例。

关键词:科学钻探岩芯;低损耗测试;物性测量;化学成分分析;岩芯保护

习近平总书记在2016年全国科技创新大会上指出:“向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”,号召全国地质工作者要强化地质科技战略引领作用,不断提高重要能源资源安全保障能力,满足国内经济社会发展对能源资源的重大战略需求。地球深部蕴藏着无尽的科学之谜,是维系万物生存的物质根本、能量基础。为深入了解地壳内部结构和物质组成,解决全球性或区域性地球系统科学难题或重大地质问题,全球科学家相继组织实施了包括国际大陆科学钻探计划(ICDP)、国际大洋发现计划(IODP)等一批科钻项目。我国政府和科学家除积极参与上述工作外,还组织实施了地壳探测工程先导计划——深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe)、国家重点研发计划深地资源勘查开采

重点专项等多个重大科学计划,产生了一批重要的科钻岩芯。这些科钻岩芯由于具有科学目标论证充分、钻探选址特殊、钻深大、取芯连续等特征,常常被誉为“深入地球内部的望远镜”(Dong Shuwen et al., 2013; 许志琴等, 2023; 余子莹等, 2024; 王成善等, 2024),是十分珍贵的科技资源。同时,获取的科学钻探岩芯基础测试数据则是目前验证地球深部信息最直接的证据之一,是科研人员在研究地球深部构造及演化、流体及作用、盆地演化、成矿理论、地震成因、火山喷发机理、地质灾害预警等方面实现一系列科学突破的基础(Xu Zhiqin et al., 2009; 王焕等, 2017; 刘仲强等, 2022; 魏海珍等, 2023; 林彬等, 2024)。

科学钻探岩芯基础测试数据的获取主要包括无

注:本文为科技基础资源调查专项(编号:2022FY101800)、国家自然科学基金资助项目(编号:42002105)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(编号:AS2022J11)的成果。

收稿日期:2025-01-14; 改回日期:2025-04-10; 网络首发:2025-04-20; 责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.04.021

作者简介:段壮,男,1990年生,博士,高级工程师,主要从事矿床学和矿产勘查研究;Email: zduan_geology@163.com。通讯作者:龚晶晶,男,1989年生,高级工程师,主要从事勘查地球化学研究;Email: gjingjing@mail.cgs.gov.cn。通讯作者:李勇,男,1980年生,博士,正高级工程师,主要从事勘查地球物理学研究;Email: cgslyong@mail.cgs.gov.cn。

损和有损分析两种途径。近年来,岩芯数字化技术由于具有无损、连续、快速及大数据分析应用优势,得到了科技工作者的高度重视,发展飞速,逐渐实现了由单一图像向图像、光谱矿物、元素、结构等多参数方向发展(李建国等,2018;史维鑫等,2020;杨璠等,2020;Zhang Shitao et al., 2020;刘合等,2024)。尽管如此,利用传统有损的成分和物性测量分析获取科学钻探岩芯高精度的化学组成及物性参数,依然是科学家探索地球深部物质组成和物性特征的不可或缺的基础数据来源(张森等,2024)。目前,关于岩芯保护和利用的规范或标准多对岩芯取样方法及注意事项有所描述,但尚未对科学钻探岩芯化学成分和物性测量方法提出更为针对性、细节性的表述。例如,国际地质科学联合会(IUGS)和国际标准化组织(ISO)是制定岩芯取样国际标准的权威机构,其中ISO标准中涉及石油和天然气工业设备的岩芯取样规范,仅提出对岩芯进行精确标记和分层记录,以支持后续的地球化学分析和资源评估;在我国石油行业,GB/T 29172-2012《岩芯分析方法》规定了岩芯样品的采集、制备、测试和分析等环节,只涵盖了孔隙度、渗透率及流体饱和度等参数测定工作;此外,2024年自然资源部印发的《实物地质资料管理办法》也仅对实物地质资料的汇交、保管、数字化和利用提出宏观指导。因此,科学钻探岩芯资源具有基础性、战略性和稀缺性,是极为珍贵的科技实物资源,为避免有限的科钻岩芯因有损实验测试造成资源浪费,亟需开展更为细化的岩芯低损耗成分测试和物性测量的探索,充分保护好、利用好这批极为珍贵的科技实物资源。由于成分测试和物性测量的样品加工及分析技术存在明显差异,因此,笔者等依托国家科技基础资源调查专项“我国代表性科学钻探岩芯科学数据库建设”项目,制定了“科学钻探岩芯低损耗成分测试和物性测量”工作方法。此工作方法需以科钻岩芯高效利用和最小损耗为原则,科学细化样品布设和采集方案,按序先后进行物性测量和化学成分分析,并尽量保证物性和成分测量数据的配套性,最后对余样/副样进行分类保存管理。笔者等提出的“科学钻探岩芯低损耗成分和物性测量”工作方法在项目实施过程中予以实践,初步取得了应用效果,对于推动科学钻探岩芯保护及高效利用具有十分重要的意义。

1 样品采集方案制定

在详细整理科钻岩芯实物资料和编录资料的基

础上,全面兼顾科学钻探的科学目标、主要成果、岩性分段及科钻揭示的主要目标层位或地质体等科学信息,以支撑基础研究、高效利用、最小损耗为原则,在科钻柱状图上完成布样工作,绘制取样设计柱状图。样品布设需关注科钻岩芯的关键层位,做到“重点岩芯段加密、非重点岩芯段放稀”,在重点和非重点岩芯段根据各自取样密度实施等距布样,同时保证成分和物性测量样品取样位置布设保持一致。然而,考虑到现场取样过程中会遇到岩芯破碎、不易钻取柱塞样等客观问题,无法满足物性测量要求,可于相邻相似岩性且致密处取样进行物性测量;若此类岩芯连续出现,仅开展化学成分分析即可。取样位置调整需记录,以形成实际取样布设柱状图。

笔者等以南岭科学钻探金属异常验证孔(SP-NLSD-2)为实例,利用上述方法开展科钻布样设计。首先通过资料总结及专家指导,明确此科钻的科学目标为验证南岭于都—赣县矿集区内通过地球物理深部探测发现的矿化异常,验证赣南钨矿“五层楼+地下室”成矿模式。其主要成果认识包括:①揭露了赣南盘古山矿集区深部三层地壳结构。上部的泥盆系与震旦系的不整合接触界线位于孔深721.9 m,深部隐伏岩体与震旦系地层的接触界线处在孔深约1287.9 m。②确认了该区深部存在作为成矿母岩的隐伏岩体,该岩体位于孔深1287 m以下,岩性为中细粒花岗岩,初步判断其与该区的钨钼铋矿成矿作用相关。③验证了深部探测技术方法提出的深部隐伏岩体位置以及大地电磁异常推测的三层地壳结构特征。④揭露大量深部的隐伏厚大钨多金属矿体。⑤新发现了岩体外接触带的破碎蚀变岩型钨矿化和岩体内接触带的钼矿化及钨矿化,验证了“地下室”矿化存在的设想,为整个南岭东段的钨矿深边部找矿提出了新线索。然后通过钻孔编录信息,详细梳理出南岭科钻SP-NLSD-2揭露的地层主要为泥盆系地层和震旦系地层,岩浆岩主要为盘古山矿区隐伏花岗岩。详细分段情况如下:0~4.10 m,第四系残坡积层;4.10~721.87 m,泥盆系地层,岩性主要为中细粒长石石英砂岩、细粒长石石英砂岩、粉砂岩、硅化细粒石英砂岩,泥盆系地层中见少量石英细脉和线脉;721.87~1287.86 m,震旦系地层,主要岩性为变质细砂岩、变质粉砂岩、粉砂质板岩,震旦系地层中见少量石英细脉和线脉;1287.86 m起为矿区隐伏花岗岩岩基,不同程度发生了绢英岩化和钾化(图1和表1)。基于上述信息,笔者等总结出此科钻的重点层位为深部的隐伏花岗岩体和

表 1 南岭科钻 SP-NLSD-2 低损耗成分测试和物性测量的取样布设计表

Table 1 Statistical table of sampling design for low-loss chemical composition analysis and physical property measurement of the Scientific Drilling SP-NLSD-2 in Nanling Mountains

编号	起/止 (m)	厚度 (m)	岩性划分	编号	起/止 (m)	厚度 (m)	重点岩芯段岩性特征	重点岩芯段布样数量 (个)	其他岩芯段布样数量 (个)
1	0~4.1	4.1	第四系残坡积层						
2	4.1~721.87	717.77	泥盆系中细粒长石石英砂岩	1	659~671	12	上泥盆统地层中含钼石英脉矿化	6	25
3	721.87~1287.86	565.99	震旦系变质细砂岩、变质粉砂岩	2	805~953.6	148.6	震旦系地层中含钼石英脉矿化及钨矿化破碎蚀变带	74	0
				3	1027.9~1048.1	20.2		10	
4	1287.86~1325	37.14	云英岩化花岗岩,局部可见含钼石英脉	4	1290~1303	13	花岗岩顶部含钼石英脉矿化	6	5
5	1325~1540	215	钾质自交代花岗岩,局部可见含钼石英脉						10
6	1540~1831	291	绢英岩化花岗岩、钾质自交代花岗岩,局部可见含钼石英脉	5	1580~1600	20	花岗岩中含钼石英脉矿化	10	10
7	1831~1873	42	钾质自交代花岗岩						10
8	1873~1925	52	原生钾长花岗岩						10
9	1925~2006.12	81.12	钾质自交代花岗岩						10

W—Mo 矿化,即位于震旦系和上泥盆统的含钨石英脉、位于花岗岩顶部的含钼石英脉和赋存于震旦系碎屑岩中的钨矿化破碎蚀变带,其中最发育的矿化位于孔深 659~671 m、805~953.6 m、1290~1303 m 和 1580~1600 m。因此,针对南岭科钻,笔者等在揭露隐伏花岗岩体和 W—Mo 矿化的重点岩芯段加密布样,泥盆系和震旦系地层中未矿化的岩芯段放稀取样,其重点岩芯段和其他岩芯段分别布样 106 件和 90 件,取样前布样情况如图 1 和表 1 所示。

2 岩芯物性测量

获取岩矿石物性数据的方法有野外露头观测、标本(样品)测定、物理场观测反演计算、井中观测等,其中,标本(样品)测定方法是较直接、易控制、较高精度、单解的物性数据获得方法,同时赋有明确的地质信息。本研究将较为成熟的岩矿石标本(样品)物性测定方法加以改进,并成功应用于科钻岩芯物性测量工作。下文将针对科钻岩芯波速、密度、磁性和电性测量方法进行详细描述。物性测量工作执行的相关标准主要为 2021 年由自然资源部颁布实施的《岩矿石标本物性测量技术规程》(DZ/T 0368-2021)。

2.1 波速测量

准备工作:首先根据布样方案,在科钻岩芯上做

好样品切割、指示岩芯摆置方向和钻取位置的标识,如图 3 显示的岩芯上红色标记。添加此类标识是为确保样品在加工和测量完成后准确归位,尽量减少对科钻样品的破坏。然后将摆放整齐、有序的岩芯沿红色标记 A 截取为两端平整、平滑、平行且长度不小于 30 cm 的岩芯段,确保样品高径比为 2.0~8.0。若测定面凹凸不平应给予打磨处理,沿样品整个高度的直径允许偏差为 ± 0.3 mm、两端不平行度误差允许偏差为 ± 0.05 mm、端面不平整度误差允许偏差为 ± 0.02 mm、端面应垂直轴线允许偏差为 $\pm 0.25^\circ$ 。之后测定合格样品的长度(两个测定面之间)。在仪器方面,岩石超声波检测仪(如 Pundit Lab+岩石波速测试仪)需开机预热,设置仪器的发射脉冲电压(如 125 V、250 V、350 V、500 V、自然)、调节信号幅度增益(如 1 \times 、10 \times 、100 \times 、自动)、确定示波器采样精度(如 0.1 μ s),检查仪器发射/接收频率与换能器频率是否相符,用标准有机质样品进行校准测定,直到仪器测定的传导时间与标准有机质样品的标准值一致,使仪器系统达到声波零延时。

波速测定:样品长度输入仪器;首先在纵波换能器涂上薄而均匀的耦合剂,并与样品的测定面耦合,精细调节接收波形幅度、测取纵波传播时间,仪器显示纵波速度。然后用纸或者布彻底清除样品表面的耦合剂,在横波换能器上涂少量的横波耦合剂,利用

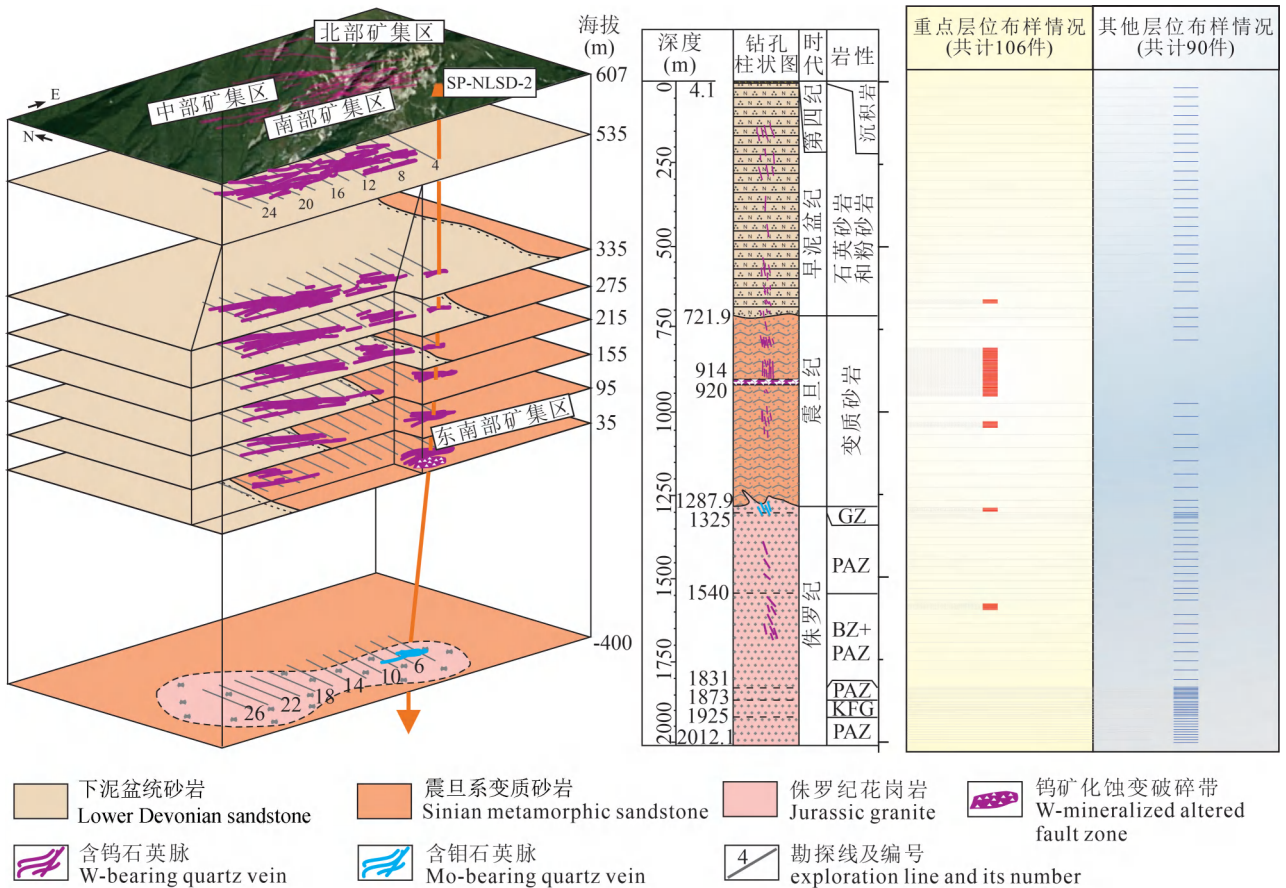


图1 南岭科钻 SP-NLSD-2 低损耗成分测试和物性测量的取样布设方案(岩芯柱状图修改自 Fang Guicong et al., 2018)

Fig. 1 Sampling plan for low-loss chemical composition analysis and physical property measurement of the Scientific Drilling SP-NLSD-2 in Nanling Mountains (The core column chart modified from Fang Guicong et al., 2018)

GZ—云英岩化花岗岩; PAZ—钾质自交代花岗岩; BZ—绢英岩化花岗岩; KFG—原生钾长花岗岩

GZ—greisenized granite; PAZ—potassium autometasomatic granite; BZ—sericitized granite; KFG—primary K-feldspar granite

夹具将样品夹在两个横波换能器之间,适当加压,当接收横波波清晰时,测取横波传播时间,测读横波速度。最后把样品上的耦合剂清除干净后归位。一批样品第一测定完成,应随机抽取样品进行随机检查测定。计算抽检率与测定误差,如合乎要求,此批样品测定完成。否则应重新测定。

记录内容与测定报告内容:记录内容主要为样品号、测定面间的长度、纵波速度、横波速度以及数据对应的钻孔深度(测量岩芯段的中点位置)。同时应有测定者、检查者、测定时间等内容。测定报告应含测定报告封面、测定责任表、测定说明、测定质量检查计算表、测定成果表等。

2.2 密度、磁性和电性测量

科钻岩芯的密度、磁性和电性参数是通过测量相同规格的柱塞样而获得,而且这类物性参数测量也为近无损的测量方式(图2)。本研究采用的密

度、磁性和电性测量方式描述如下。

准备工作:首先利用金刚石钻头和锯片,在测量波速的岩芯段标记位置 B 钻取直径 25 mm 的柱塞样,并将柱塞样切割加工为直径 25 mm 高 22 mm 的标准化圆柱状样品。加工过程均需保持水冷却,严禁标本受热而发生物理变化。磁性标本应尽可能避免剧烈敲击、与磁性材料摩擦、置于强磁场中,以避免样品被磁污染。同时,样品的表面应光滑、平整,内部应没有天然的或者因机械加工而产生的裂缝。

密度测量:固结的样品在容器中用清水饱和 24 h 以上。电子密度仪调平、开机预热,用砝码校正清零;软布擦干水饱和和样品表面的水,测定样品在空气中的质量,再测定样品在清水中的质量,读(求)取样品的密度;视电子密度仪的稳定性能,始、终及每隔一段时间再相应的砝码重新校正、验证。一批样品第一次测定完毕后随机抽取样品再进行检查测

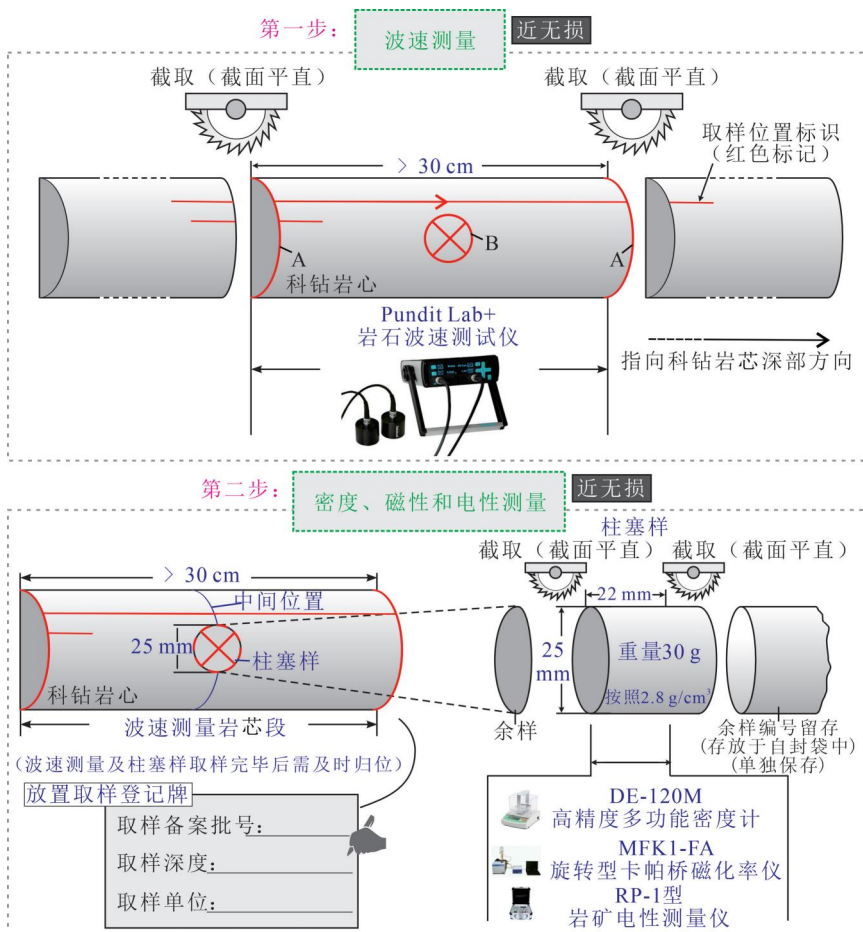


图 2 科学钻探岩芯物性测量样品加工及数据采集示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sample processing and data acquisition for physical property measurement of scientific drilling cores

定。计算抽检率与测定误差,如合乎要求,此批样品测定完成。否则应重新测定。样品密度测定的记录内容主要为样品号,样品在空气中的质量(总质量)、水中的质量(总体积),密度值。

电性测量:测量前用游标卡尺测得样品的长度 L 与直径(长方体的长度、宽度及高度),并计算得到样品横截面积 S 。测量时将水饱和后的样品擦干,并用绝缘胶带将其外侧缠紧(可防止样品侧向漏电的同时,又保持了其水分不易挥发),放置于电极架上夹持并保持接触良好。然后电性测量仪开机,并启动控制软件设置相关参数及所测样品信息(包括:样品号、样品长度与直径、供电电压、充放电时间)后,开始供电测定。采用正反向供电方式,通过采集已知电阻上的正反向电压值,进而采集样品 MN 两端的正反向供电及放电后的电压值,据此计算岩矿石样品的电阻率和极化率。每次测定期间,注意样品架与所夹持的样品耦合状况,保证样品与

接触端充分接触,并使用纯铜或纯铁质样品进行样品架接触电阻测定,记录接触电阻值的变化,如接触电阻过大,需对样品架接触面进行清洁。测定电性参数记录内容主要为样品号、直径与高度、电阻率、极化率。同时应有测定者、检查者、测定时间等内容。使用样品法测定时,还应记录一次场电位,二次场电位,电流等数据。

磁性测量主要包括磁化率仪测定磁化率、旋转式磁力仪测定剩磁强度及方向两个方面。磁化率仪测定磁化率的测定步骤如下:①仪器应安放在磁场状态稳定环境,测定用桌椅不应使用铁质材料,保持室内温度稳定,避免铁磁和电磁性干扰;②仪器开机预热,启动仪器控制程序,使用标准样品对磁化率仪进行标定,合格后开始测定工作;③输入样品编号开始测定,测定时样品要放入样品架中心,经仪器读取、计算得到样品磁化率;④测定期间需检查样品架是否污染,并保持清洁。旋转式磁力仪测定剩磁强度

及方向的测定步骤如下:①仪器开机预热,启动仪器控制程序,测定标准样品,满足要求开始工作,不满足时应对线圈等进行调整,直到满足要求;②根据仪器的要求,给仪器输入相关参数。对样品进行不同方位的剩磁测量,直到仪器输出总磁矩(剩余磁化强度)及偏角、倾角;③根据样品的定向方法,计算剩磁矢量的磁偏角、磁倾角;④一批样品测定完成,应随机抽取样品进行检查测定。计算抽检率与测定误差,如合乎要求,此批样品测定完成。否则应重新测定。

测定记录应根据测定方法记录完整、系统的原始数据。测定报告应含测定报告封面、测定责任表、测定说明、测定质量检查计算表、测定成果表等。

3 岩芯化学成分分析

科钻岩芯化学成分分析为有损测试,需将岩石样品加工为粉末并混合均匀,因此,在分析测试过程

中需充分考虑科钻研究需求、分析元素选择及样品加工耗损等问题,综合评估有损成分分析的样品用量,以达到对科钻岩芯高效利用和最小损耗的目的。

目前,国内多数权威的化学分析实验室可开展近 70 个元素的测试。笔者等以中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所实验测试中心(自然资源部地球化学勘查检测中心)分析测试方法为例,细化讨论科钻岩芯化学成分分析的低损耗测试策略。物化探所实验测试中心对岩芯样品采用无污染加工方案进行加工和制备,由于化学分析用样为科钻岩芯物性测量后直径 25 mm 高 22 mm 的柱塞样和余样,样品尺寸较小,可直接使用行星式球磨机加工至-200 目,避免了样品在颚式破碎机中粗碎的损耗。此外,该实验室以 X 射线荧光光谱仪(XRF)、电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES)、电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)为主体,结合原子吸收光谱仪(AAS)、原子荧光光谱仪(AFS)及其它多项专用分析技术开展岩石样品 77 项指标配套分析(表 2;白金峰等,2022),并严格执行《岩石和矿石化学分析方法 总则及一般规定》(GB/T 14505-2010)等国家和行业标准。若利用 12 种测试方法完成岩芯样品的 77 项指标全套分析,样品粉末用量需达 100 余克(包括单次分析样、重复样和副样三部分)。然而,以岩石平均密度 2.8 g/cm³ 计算,用于物性测量的柱塞样(直径 25 mm、高 22 mm)重量约 30 g,而考虑到碎样损耗,加工后的实际粉末重量则更小,故物

性测量柱塞样(<30 g)无法满足化学分析用量需求(>100 g),难以实现对科钻岩芯的高效利用和充分保护,也会影响岩芯物性测量和成分分析数据的配套性。因此,笔者等提出“优先确保单次分析用量”和“选择性分析微量元素”的两种策略以保证物性测量柱塞样满足化学分析用量,缩减科钻样品损耗。基于科钻研究目标及岩性特征,分析方案可对“Au 和铂族元素(PGE)含量分析”这两种样品用量最大且测试方法独立的分析进行合理调减。例如,罗布莎科钻 LSD-02 中分布有大量的基性岩—超基性岩(熊发挥等,2015),则可以合理开展 PGE 含量分析;甲玛科钻 JMKZ-01 的实施服务于甲玛—驱龙铜多金属资源基地深部勘查与增储示范(Lin Bin et al., 2024),故可考虑开展 Au 元素分析。本方案中岩芯样品元素含量分析的粉末用量分为以下 3 种情况:①岩芯样品需分析 70 项指标,不含 Au 和 PGE,共需岩芯粉末 27.9 g,其中单次分析用量 9.3 g;②岩芯样品需分析 76 项指标,含 Au 或 PGE,共需岩芯粉末 57.9g,其中单次分析用量 19.3 g;③岩芯样品需分析 77 项指标,含 Au 和 PGE,共需岩芯粉末 87.9 g,其中单次分析用量 29.3 g(图 3)。如果化学分析涵盖元素较多,可以优先保证单次分析样和检查样即可。因此,物性测量的柱状样基本能够满足多数样品的分析用量,而针对需要选择性开展 Au 和 PGE 分析的样品而言,则需要补充利用前期加工物性测量样品产生的余样以满足分析需求。

表 2 科学钻探岩芯低损耗化学成分测试配套分析方法

Table 2 Supporting analysis methods for low-loss chemical composition analysis of scientific drilling cores

序号	分析方法	项数	测定元素或指标	单次分析用量 (g)
1	X 射线荧光光谱法 (XRF)	19	Ba、Br、Cl、Cr、Ga、Hf、Mn、Nb、P、Rb、Sr、Ti、V、Zr、 SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 、TFe ₂ O ₃ 、CaO、K ₂ O	4.00
2	电感耦合等离子体发射光谱法 (ICP-OES)	6	Be、Li、S、Zn、MgO、Na ₂ O	0.50
3	电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)	33	Ag、Bi、Cd、Co、Cs、Cu、In、Mo、Ni、Pb、Sc、Ta、Te、Th、U、W、La、 Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y、Tl、Ge	0.50
4	半熔—泡塑富集—等离子体质谱法 (ICP-MS)	1	Re	2.00
5	原子荧光光谱法 (AFS)	4	As、Sb、Hg、Se	0.50
6	发射光谱法 (ES)	2	B、Sn	0.20
7	离子选择性电极法 (ISE)	1	F	0.50
8	催化—分光光度法 (COL)	1	I	0.50
9	氧化燃烧—气相色谱法 (GC)	2	N、TC	0.10
10	泡塑吸附—石墨炉原子吸收光谱法 (GF-AAS)	1	Au	10.00
11	火试金—电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)	6	Pt、Ru、Rh、Pd、Os、Ir	10.00
其他指标分析方法				
12	重量法 (GR)	1	LOI	1.00
	合计	77		29.30

注:以中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所实验测试中心分析测试方法为例。

若布设的物性和化学测量取样位置的科钻岩芯呈松散、碎裂或碎块状,无法满足物性测量取样要求的情况下,则按横向偏移原则,在相邻 30 cm 位置选择岩性相似、结构致密的岩芯段进行切割和钻取样品,以确保物性测量数据的准确性和代表性;若松散、碎裂或碎块状岩芯在预设取样位置连续出现,且无法找到相邻且合适的致密替代区域,则建议仅开展化学成分分析,而暂不进行物性测量。上述取样位置的调整应在实际操作过程中详细记录,包括调整原因、替代位置的选择依据及取样方法等。最终,结合原始取样方案 and 实际调整情况,绘制实际取样布设图,明确标注各取样点的位置、岩性特征及测试类型。

4 样品归位及余样保存

样品归位和余样保存是科钻岩芯数据采集过程

中保护实物地质资料的重要一环。科钻岩芯柱状样取样完成后,需将切割后的岩芯按照标记归位(图 4),放置登记有取样备案批号、取样深度及取样单位等信息的取样牌,并详细记录采集人、采集时间、采集方法及样品重量等,确保信息的完整性和可追溯性。此外,物性测量柱状样加工后产生的余样和化学分析后产生的副样应按类别和编号分类存放,建立详细的样品存储档案,以备后续对余样和副样再利用。科钻岩芯余样和副样的再利用不仅能够有效减少多次取样对科钻岩芯的破坏、降低勘探成本,还能通过多学科交叉研究揭示新的地质规律。例如,自然资源实物地质资料中心参与了“国际大陆科钻计划:松辽盆地大陆深部科学钻探工程项目(松科二井)”岩芯的全流程管理工作,科学保管了 10 余口国内外科学钻探岩芯,科钻余样被广泛用于

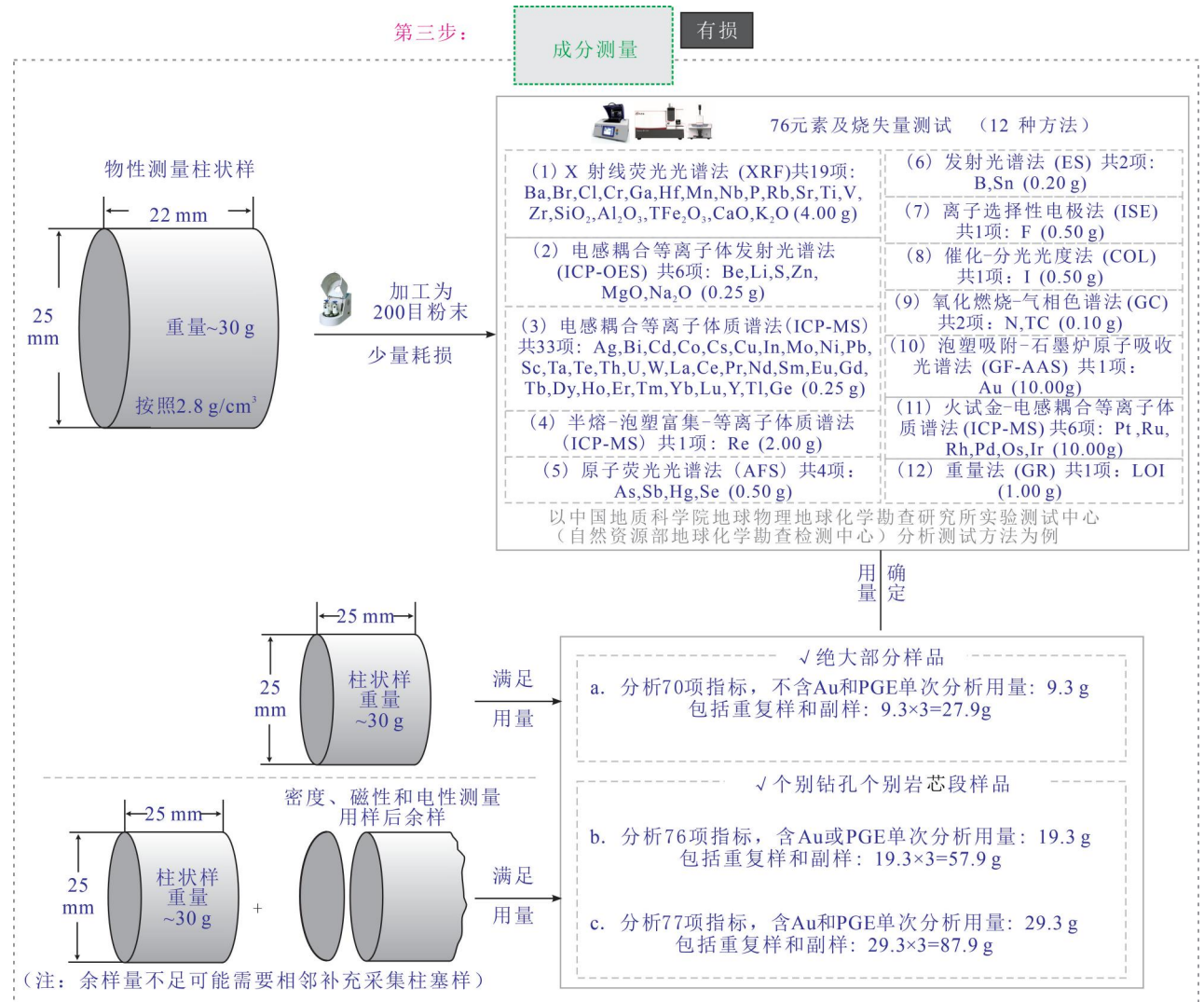


图 3 科学钻探岩芯低损耗化学成分测试中样品用量选取示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sample quantity selection in low-loss chemical composition analysis of scientific drilling cores

古气候重建、构造演化分析等研究,实现了地质数据的多学科共享与应用。余样、副样等实物样品以及获取的科钻数据均极为珍贵,需统一汇交到国家级实物地质资料馆藏机构,支撑我国科学钻探资料的共建共享。

5 结语

科学钻探岩芯是地球科学研究中不可或缺的珍贵实物资料,其基础测试数据是验证地球深部信息最直接的证据之一。尽管无损岩芯数字化技术近年来得到了广泛应用,但传统有损的成分和物性测量分析仍是获取高精度化学组成及物性参数的重要手段。因此,本研究提出了一套系统化的方法体系,创新性地将离散技术整合为“取样—分析—管理”的全链条解决方案,主要包括科学合理的样品布设与采集方案、针对不同规格样品的波速、密度、磁性和电性测量流程、低损耗的化学成分分析策略(如优先确保单次分析用量、选择性分析微量元素)、样品归位与余样保存措施,以及数据管理和共享机制。通过实践验证,本研究提出的“科学钻探岩芯低损耗成分和物性测量”方法已初步展现出应用效果,为科学钻探岩芯的保护和高效利用提供了重要支持,并为地球科学研究提供了有力的数据保障。未来,随着分析技术的不断发展,应继续优化低损耗测试策略,进一步推动科学钻探岩芯资源的保护与可持续利用。

致谢:笔者等在科钻岩芯取样方案制定过程中,得到自然资源实物地质资料中心崔立伟和邓昂高级工程师的协助;在科钻岩芯化学成分分析方案制定过程中,得到中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所白金峰正高级工程师和张灵火高级工程师的协助;审稿专家对笔者等提出宝贵修改意见。在此一并致以诚挚的谢意!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

白金峰,杜雪苗,郭心玮,徐进力,李小莉,陈卫明,陈海杰,李可,张勤. 2022. 应用地球化学样品分析测试技术进展. 物探化探计算技术, 44(6): 842~853.

李建国,金若时,张博,苗培森,杨凯,里宏亮,魏佳林,奥琮,曹民强,张红亮,朱强. 2018. 松辽盆地西南部上白垩统姚家组原生黏土矿物组合特征及其找铀意义. 地球学报, 39(3): 295



图4 南岭科钻 SP-NLSD-2岩芯取样后样品归位对照图

Fig. 4 Post-sampling sample repositioning reference diagram for the scientific drilling core SP-NLSD-2 in Nanling Mountains

~305.

林彬,唐菊兴,唐攀,王梦蝶,李发桥,傅渊慧,杨征坤,孙渺,祁婧,王志超,徐书慧. 2024. 超大型斑岩成矿系统浅部岩浆储库时空结构——来自西藏甲玛矿区 3000 m 科学深钻的证据. 矿床地质, 43(6): 1360~1379.

刘合,任义丽,李欣,朱如凯,胡延旭,刘茜,苏乾潇,吴建平,李彬. 2024. 岩心智能识别技术内涵与展望. 石油学报, 45(8): 1296~1308.

刘仲强,索艳慧,杜晓东,蔡国富,程昊峰,王光增,周洁,刁一笑,付新建,李三忠. 2022. 南海北部陆缘大陆架科学钻探选址: 珠江口盆地沉积源汇启示. 地质学报, 96(8): 2775~2787.

史维鑫,高鹏鑫,回广骥,张弘,张海兰,高卿楠,孙东洵. 2020. 中国典型矿床实物地质资料波谱数据库及其服务系统建设建议. 中国矿业, 29(1): 176~181.

王成善,高远,王璞琨,吴怀春,吕庆田,朱永宜,万晓樵,邹长春,黄永建,高有峰,席党鹏,王稳石,贺怀宇,冯子辉,杨光,邓成龙,张来明,王天天,胡滨,崔立伟,彭诚,余恩晓,黄河,杨柳,毋正轩. 2024. 松辽盆地国际大陆科学钻探: 白垩纪恐龙时代陆相地质记录. 地学前缘, 31(1): 412~430+511~534.

王焕,李海兵,乔秀夫,司家亮,何祥丽. 2017. 龙门山造山带早期断裂活动的古地震制约——来自汶川科钻(WFSD)岩心的证据. 岩石学报, 33(12): 3973~3988.

魏海珍,李伟强,高建国,魏广祚,罗祥龙,环淳,左达昇,朱文斌,许志琴. 2023. 川西甲基卡伟晶岩型锂矿科学钻探(JSD-1)岩芯 Li—B—Fe—Nd 同位素对稀有金属成矿作用的指示意义. 地质学报, 97(10): 3147~3167.

熊发挥,杨经绥,徐向珍,来盛民,张岚,郭国林,陈艳虹,赵慧. 2015. 雅鲁藏布江缝合带蛇绿岩中铬铁矿的前景讨论. 中国地质, 42(5): 1535~1558.

许志琴,朱文斌,郑碧海,李广伟,魏海珍,章荣清,车旭东,李伟强,王国光,高建国,闫浩瑜. 2023. 川西甲基卡伟晶岩型锂矿的“多层次穹状花岗岩席”控矿新理论——记“川西甲基卡锂矿科学钻探”创新成果. 地质学报, 97(10): 3133~3146.

杨璿,侯贺晟,符伟,国瑞,潘宗栋,张交东,张慧滔. 2020. 松科二井深层沙河子组泥岩三维显微 CT 成像及对深部油气预测的启示. 地质通报, 39(7): 1006~1014.

- 余子莹, 王鑫, 陈发虎. 2024. 科学钻揭示塔克拉玛干沙漠腹地现代沙漠景观形成于距今 30 万年前. 科学通报, 69(35): 5072~5075.
- 张森, 王楠, 赵艳军, 鞠楠, 程银行, 李宝民, 高鹏鑫, 史维鑫, 蒋磊, 夏浩东, 景洁, 张彦文. 2024. 实物地质资料在新一轮找矿突破战略行动中的集成研究与应用浅析. 地质论评, 70(5): 1~10. (2024-11-20). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DZLP20241118007&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- Bai Jinfeng, Du Xuemiao, Guo Xinwei, Xu Jinli, Li Xiaoli, Chen Weiming, Chen Haijie, Li Ke, Zhang Qin. 2022&. Advancement of sample analysis and testing technologies in applied geochemistry. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 44(6): 842~853.
- Dong Shuwen, Li Tingdong, Lü Qingtian, Gao Rui, Yang Jingsui, Chen Xuanhua, Wei Wenbo, Zhou Qi. 2013. Progress in deep lithospheric exploration of the continental China: A review of the SinoProbe. Tectonophysics, 606: 1~13.
- Fang Guicong, Zhao Zheng, Chen Yuchuan, Chen Zhenghui, Krapez B, Mao Jingwen. 2018. Genetic relationship between granitic magmatism and W mineralization recorded in the Nanling Scientific Drilling (SP-NLSD-2) in the Pangushan W mining district, South China. Ore Geology Reviews, 101: 556~577.
- Li Jianguo, Jin Ruoshi, Zhang Bo, Miao Peisen, Yang Kai, Li Hongliang, Wei Jialin, Ao Cong, Cao Minqiang, Zhang Hongliang, Zhu Qiang. 2018&. Characteristics of primary clay minerals in the Upper Cretaceous Yaojia formation of southwest Songliao basin and their significance. Acta Geoscientica Sinica, 39(3): 295~305.
- Lin Bin, Tang Juxing, Tang Pan, Beaudoin G, Laflamme C, Li Faqiao, Zheng Wenbao, Song Yang, Qi Jing, Sun Miao, Cao Huawen, Leng Qiufeng, Zhou A, Zou Bing, Wall C J, Yang Chao. 2024. Multipulsed magmatism and duration of the hydrothermal system of the giant Jiama porphyry Cu system, Tibet, China. Economic Geology, 119(1): 201~217.
- Lin Bin, Tang Juxing, Tang Pan, Wang Mengdie, Li Faqiao, Fu Yuanhui, Yang Zhengkun, Sun Miao, Qi Jing, Wang Zhichao, Xu Shuhui. 2024&. Temporal—spatial structure of shallow magma reservoir of giant porphyry metallogenic system—Evidence from 3000 m scientific deep drilling at Jiama deposit, Xizang. Mineral Deposits, 43(6): 1360~1379.
- Liu He, Ren Yili, Li Xin, Zhu Rukai, Hu Yanxu, Liu Xi, Su Qianxiao, Wu Jianping, Li Bin. 2024&. Connotation and prospect of intelligent recognition technology for cores. Acta Petrolei Sinica, 45(8): 1296~1308.
- Liu Zhongqiang, Suo Yanhui, Du Xiaodong, Cai Guofu, Cheng Haohao, Wang Guangzeng, Zhou Jie, Diao Yixiao, Fu Xinjian, Li Sanzhong. 2022&. Scientific drilling sites of the northern South China Sea margin; Insights from sediment source-to-sink in the Pearl River Mouth basin. Acta Geologica Sinica, 96(8): 2775~2787.
- Shi Weixin, Gao Pengxin, Hui Guangji, Zhang Hong, Zhang Hailan, Gao Qingnan, Sun Dongxun. 2020&. Suggestions on construction of spectrum database and service system of cores and samples from Chinese typical deposits. China Mining Magazine, 29(1): 176~181.
- Wang Chengshan, Gao Yuan, Wang Pujun, Wu Huaichun, Lü Qingtian, Zhu Yongyi, Wan Xiaoqiao, Zou Changchun, Huang Yongjian, Gao Youfeng, Xi Dangpeng, Wang Wenshi, He Huaiyu, Feng Zihui, Yang Guang, Deng Chenglong, Zhang Laiming, Wang Tiantian, Hu Bin, Cui Liwei, Peng Cheng, Yu Enxiao, Huang He, Yang Liu, Wu Zhengxuan. 2024&. International continental scientific drilling project of the Songliao basin; Terrestrial geological records of the Cretaceous dinosaur age. Earth Science Frontiers, 31(1): 412~430+511~534.
- Wang Huan, Li Haibing, Qiao Xiufu, Si Jialiang, He Xiangli. 2017&. Early fault activities of the Longmen Shan orogen constrained by paleoearthquakes: Evidence from the WFSO drilling cores. Acta Petrologica Sinica, 33(12): 3973~3988.
- Wei Haizhen, Li Weiqiang, Gao Jianguo, Wei Guangyi, Luo Xianglong, Huan Chun, Zuo Dasheng, Zhu Wenbin, Xu Zhiqin. 2023&. Insights of Li—B—Fe—Nd isotopes in the Jiajika granitic pegmatite type lithium deposit scientific drill core (JSD-1) to the metallogenesis of rare metals in eastern Tibetan Plateau. Acta Geologica Sinica, 97(10): 3147~3167.
- Xiong Fahui, Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Lai Shengmin, Zhang Lan, Guo Guolin, Chen Yanhong, Zhao Hui. 2015&. The prospects of chromitite in ophiolite of Yarlung Zangbo suture zone, Tibet. Geology in China, 42(5): 1535~1558.
- Xu Zhiqin, Yang Wencai, Ji Shaocheng, Zhang Zeming, Yang Jingsui, Wang Qin, Tang Zheming. 2009. Deep root of a continent—continent collision belt: Evidence from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) deep borehole in the Sulu ultrahigh-pressure (HP—UHP) metamorphic terrane, China. Tectonophysics, 475(2): 204~219.
- Xu Zhiqin, Zhu Wenbin, Zheng Bi Hai, Li Guangwei, Wei Haizhen, Zhang Rongqing, Che Xudong, Li Weiqiang, Wang Guoguang, Gao Jianguo, Yan Haoyu. 2023&. New ore-controlling theory of “multilayered domal granitic sheets” of the Jiajika pegmatite-type lithium deposit; The major discoveries of the “Jiajika Pegmatite-type Lithium Deposit Scientific Drilling Project (JSD)”. Acta Geologica Sinica, 97(10): 3133~3146.
- Yang Jin, Hou Hesheng, Fu Wei, Guo Rui, Pan Zongdong, Zhang Jiaodong, Zhang Huitao. 2020&. 3D microscopic CT imaging and significance of SK-2 deep mudstone of Shahezi Group. Geological Bulletin of China, 39(7): 1006~1014.
- Yu Ziyang, Wang Xin, Chen Fahu. 2024. Scientific drilling reveals the modern desert landscape in the hinterland of the Taklimakan Desert formed 300000 years ago. Chinese Science Bulletin, 69(35): 5072~5075.
- Zhang Sen, Wang Nan, Zhao Yanjun, Ju Nan, Cheng (Yin) (HangXing), Li Baomin, Gao Pengxin, Shi Weixin, Jiang Lei, Xia Haodong, Jing Jie, Zhang Yanwen. 2024&. Integrated research and application of physical geological data in the new round of strategic action of prospecting breakthrough. China Industrial Economics, : 1~10. (2024-11-20). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DZLP20241118007&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- Zhang Shitao, Chu Gaobin, Cheng Jiamin, Zhang Yu, Tian Jing, Li Jianping, Sun Siqun, Wei Ketao. 2020. Short wavelength infrared (SWIR) spectroscopy of phyllosilicate minerals from the Tonglushan Cu—Au—Fe deposit, Eastern China: New exploration indicators for concealed skarn orebodies. Ore Geology Reviews, 122: 103516.

Exploration and practice of low-loss chemical composition analysis and physical property measurement for scientific drilling core

DUAN Zhuang^{1, 2)}, GONG Jingjing^{1, 2)}, LI Lei^{1, 2)}, LI Zhenhuan³⁾, WANG Zengxiang³⁾,
YANG Jianzhou^{1, 2)}, LI Yong^{1, 2)}, HU Shuqi^{1, 2)}, TANG Shixin^{1, 2)}, GONG Qiuli^{1, 2)},
XIE Changli^{1, 2)}, GAO Jianwong^{1, 2)}, FU Yangang^{1, 2)}

1) *State Key Laboratory of Deep Earth and Mineral Exploration, Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Tianjin, 300309;*

2) *National Center for Geological Exploration Technology, Tianjin, 300309;*

3) *The Cores and Samples Center, Ministry of Land and Resources, Sanhe, Hebei, 065200*

Abstract: Scientific drilling cores are valuable physical materials for earth science research. They directly reflect the deep structure, material composition, and geological history of the Earth. These cores hold considerable importance and unique value for research in multiple disciplines including geology, geophysics, geochemistry, materials science, and information science. This study aims to explore and practice methods for low-loss chemical composition analysis and physical property measurement of scientific drilling cores to achieve the protection and efficient utilization of precious scientific drilling core resources. The paper proposes a scientific plan for sample layout and collection, then elaborates on the sampling process for physical property measurements, conducting wave speed, density, magnetic, and electrical measurements on different specifications of samples. For the chemical composition analysis of cores, a low-loss testing strategy is proposed, including ensuring single-analysis dosage, selectively analyzing trace elements, and handling special cases. Finally, the importance of sample repositioning and preservation of surplus samples is emphasized. The "low-loss chemical composition analysis and physical property measurement" method for scientific drilling cores proposed in this paper has been practiced during project implementation and has achieved preliminary application results. It holds significant importance for promoting the protection and efficient use of scientific drilling cores.

Keywords: scientific drilling core; low-loss analysis; physical property measurement; chemical composition analysis; core protection

Acknowledgements: This paper is supported by the Science & Technology Fundamental Resources Investigation Program (No. 2022FY101800), the National Natural Science Foundation of China (No. 42002105), and the National Nonprofit Institute Research Grant (No. AS2022J11)

First author: DUAN Zhuang, male, born in 1990, Ph. D., senior engineer, mainly engaged in ore deposit studies and mineral exploration; Email: zduan_geology@163.com

Corresponding author: GONG Jingjing, male, born in 1989, senior engineer, mainly engaged in exploration geochemistry research; Email: gjingjing@mail.cgs.gov.cn

Corresponding author: LI Yong, male, born in 1980, Ph. D., professor-level senior engineer, mainly engaged in exploration geophysics research; Email: cgslyong@mail.cgs.gov.cn

Manuscript received on: 2025-01-14; Accepted on: 2025-04-10; Published online on: 2025-04-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.04.021

Edited by: LIU Zhiqiang