

新时代区域地质调查中 AFS 测试工作流程的优化与实践

赵耀

吉林省区域地质矿产调查所，吉林 长春 130028

DOI:10.61369/EAE.2025040008

摘要：随着“双碳”战略推进与新兴产业崛起，区域地质矿产调查工作呈现出资源与环境并重、浅深部协同、数据与智能驱动的新特征。原子荧光光谱法（AFS）作为Hg、As、Sb、Bi、Se、Te等元素的关键分析技术，其角色已从单一资源评价转向支撑综合地质应用。本文分析了新时代对AFS测试提出的更精准、高效、智能与综合的新要求，并针对样品量大、预算有限的现实约束，提出通过管理创新优化流程、智能技术强化质控、深化数据解译，构建高效、高质量、低成本的新工作模式，以期为实验室转型升级提供参考。

关键词：区域地质调查；原子荧光光谱；实验测试；流程优化；成本控制；绿色发展

Optimization and Practice of the AFS Testing Workflow in Regional Geological Survey for the New Era

Zhao Yao

Jilin Institute of Regional Geological and Mineral Survey, Changchun, Jilin 130028

Abstract : With the advancement of the "Dual Carbon" strategy and the rise of emerging industries, regional geological and mineral survey work has demonstrated new characteristics—equal emphasis on resources and environment, integration of shallow and deep exploration, and data- and intelligence-driven approaches. As a key analytical technique for elements such as Hg, As, Sb, Bi, Se, and Te, Atomic Fluorescence Spectrometry (AFS) has evolved from solely supporting resource evaluation to enabling comprehensive geological applications. This paper analyzes the new requirements of the modern era for AFS testing—greater precision, efficiency, intelligence, and integration—and proposes, under constraints of large sample volumes and limited budgets, a new working model that is efficient, high-quality, and low-cost. This model emphasizes process optimization through management innovation, quality control enhancement via intelligent technology, and in-depth data interpretation, providing a reference for laboratory transformation and upgrading.

Keywords : regional geological survey; atomic fluorescence spectrometry; experimental testing; workflow optimization; cost control; green development

引言

区域地质矿产调查在我国经济发展中有着先行性、基础性的基石作用，能切实有效地保障国家能源资源的安全。面对全球格局重构、“双碳”战略深化及战略性新兴产业崛起的宏观形势，此项工作的战略价值被推向新高度，并步入深刻的转型阶段，被赋予了全新的时代使命。其内涵已超越传统找矿，演进为资源与环境并重、浅部与深部协同、多维数据与智能技术驱动的新型工作模式，服务范围广泛拓展至能源资源安全保障、生态文明建设及城乡安全维护等诸多领域^[1]。

这一综合性、立体化的发展趋势，对地矿实验测试工作提出了更高要求，也带来了新的机遇。原子荧光光谱法（AFS）已成为地矿实验室的关键分析工具，这得益于其对As、Sb、Bi、Hg、Se等一系列关键元素所具备的高灵敏度、低检出限和较低操作成本的综合性优势。面对新形势，AFS技术已从单一的资源评价手段，转变成为支撑关键矿产勘查、生态地球化学评价、深部隐伏矿预测与绿色矿山建设等多项任务的综合性技术支撑^[2]。然而，当前调查工作不再局限于元素总量测定，而是要求测试数据具备更丰富的维度和更深入的地质解释意义；同时，实验室普遍面临样品数量大、工作强度高、测试预算受限的现实压力。因此，AFS测试工作亟需实现从理念到实践的全面革新，推动自身由被动的“数据产出者”向主动的“地质问题解决方案提供者”转型。本文旨在系统分析新时代对AFS测试提出的新要求，并重点探讨在地矿实验室现实约束下实现转型升级的可行路径与方法。

一、区域地质调查在新时代的重要作用

首先，它是国家战略安全的“保障者”。在复杂的国际形势下，锂、钴、稀土、磷、锗等关键矿产的稳定供应已成为国家安全的核心要素。区域地质调查作为矿产资源“增储保供”的最前端和基础性环节，肩负着摸清这些战略性矿产家底的根本使命^[3]。

其次，它是绿色低碳发展的“支撑者”。此项工作已超越传统“找矿”范畴，转向系统性“认识环境”。通过开展大规模、高精度的地球化学填图，能够精准掌握重金属等污染元素的分布特征与背景值，从而为国土空间规划、土壤污染防治与土地质量评价提供不可或缺的科学本底数据，直接支撑生态文明建设[3]。

最后，它也是深部找矿与科技创新的“实践者”。面对浅部资源日益枯竭的现状，找矿重心必须向覆盖区深部和复杂构造区转移。这驱动地质调查方法向精细化、立体化和智能化革新，而地气法、电地球化学等深部穿透性地球化学探测技术所依赖的关键指标，正需要原子荧光光谱（AFS）等高灵敏度分析技术提供支撑^[4]。

二、对原子荧光光谱测试的新要求

基于上述重要性，新时代的区域地质调查工作对原子荧光光谱（AFS）测试技术提出了以下四个方面的具体新要求：

（一）信息维度需从“总量”迈向“形态”

当前的调查工作已不再满足于获取砷（As）、汞（Hg）等元素的总含量数据，而是进一步要求 AFS 技术能够提供其化学形态信息，例如 As(III)、As(V) 和甲基汞等。不同化学形态的元素在环境中的毒性、迁移能力和生物有效性存在显著差异，因此，准确测定特定形态是精确评估生态风险、并科学指导污染场地修复的关键依据^[5]。

（二）分析能力需从“常规”迈向“关键”

AFS 技术需显著提升对碲（Te）、硒（Se）等关键战略性矿产中共生关键元素的检测能力。这些元素通常含量极低、赋存状态复杂，对分析方法的抗基质干扰能力和仪器检出限提出了前所未有的苛刻要求，以适应关键矿产综合评价的需求。

（三）工作模式需从“精准”迈向“高效且精准”

面对样品数量急剧增加、项目周期普遍缩短的现实压力，AFS 测试工作必须在坚决保障数据准确性与可靠性的前提下，大幅提升检测通量与分析效率，有效降低单个样品的测试成本与时间成本，以满足快速资源评价与高效管理决策的迫切需求。

（四）成果输出需从“数据”迈向“信息”

新的工作要求测试人员不能仅停留在提供分析数据的层面，还应具备初步的地球化学解译能力。能够结合样品的地理位置、地质背景等多元信息，对检测出的异常值进行初步研判，例如区分该异常是源于矿化作用还是人为污染，从而为地质学家提供融合“数据 - 信息 - 初步建议”的增值服务，实现从被动提供数据到主动参与解译的角色转变。

三、符合新要求的新工作流程构建

为应对新要求与低成本运行的双重挑战，实验室的出路并非仅依赖于采购全自动化设备，而在于对传统工作流程进行系统性再造。新流程以数字化为纽带，以流程优化为手段，旨在实现“标准化、模块化、智能化”的目标。本文据此提出以“管理创新 + 流程再造 + 低成本技术赋能”为核心的全新工作模式。具体构建如下：

（一）样品数字化与任务分配（“中枢神经”）

利用现有电脑与移动设备构建内部网络系统，实现样品数字化管理。系统根据接收时间、数量及送样单位自动生成唯一性编号（如 2025-DZ001-0001）。

项目负责人可在线创建任务并按需分配，实现样品全程可追溯、任务分配清晰透明，有效杜绝混淆。

（二）精细化分组与前处理（“解放人力”）

打破“一人包干”模式，设立“样品制备组”、“前处理组”、“上机组”。推行“小组流水线”并行协作，提升工作熟练度，提高工作效率，将高技术人员从重复性劳动中解放出来。样品制备组：负责拆包、粗磨、使用定容式分量器（开口式缩分器）进行快速、半定量分样。前处理组：在批量消解过程中，可以应用 8 通道移液器或重复加液器来取代传统操作中单通道移液模式。并设计批量消解管架（盘），实现一次处理多个样品。上机组：负责样品测试，并通过模板化办公软件形成报告。

（三）智能化分析与质控（“杜绝差错”）

数据自动采集：通过将 AFS 仪器电脑接入内部网络，并把结果输出文件夹设置为共享目录，实现了分析数据的自动采集与集中存储，有效避免了人工传送可能导致的延误与错误，显著节省了操作时间。

智能质控：开发统一的 Excel 智能质控模板，模板内预设含量计算公式、条件格式规则及数据有效性检查功能。分析人员粘贴原始数据后，模板可自动完成结果计算，并依据预设标准（如相对偏差在 5%-10% 间标黄提示，> 10% 自动标红）对标准物质和重复样进行实时合格判定，实现“事中质控”。同时，模板能自动筛选出需复检的样品编号，从源头阻止错误数据录入，避免批次性返工，从而大幅降低质量成本。

（四）数据解译与报告生成（“价值增值”）

报告模板化：通过预先定义包含样品信息、结果、质控数据及异常说明的标准化 Word 模板，并利用其“邮件合并”功能链接至结构化的 Excel 数据源，可实现一键自动生成报告初稿。显著提升编制报告的时间，从以小时计变为以分钟计。

初步地质解译：为提升数据解释的标准化与实用性，建议系统收集典型矿区的地球化学资料，建立包含元素背景值范围、常见异常模式及成因模型的案例库。在测试报告模板中增设“备注 / 建议”栏目，由经验丰富的技术人员参考案例库对异常结果进行标注和初步解读，例如注明“Hg 异常显著，建议排查辰砂矿化或潜在污染源”。该机制不仅强化了数据与地质背景的关联，也为后续工作提供了直接参考，推动实验室由单纯的“数据生产者”向

“数据 - 信息 - 建议”一体化服务提供方转型，增强成果的决策支持价值。

(五) 对于“形态分析”新要求

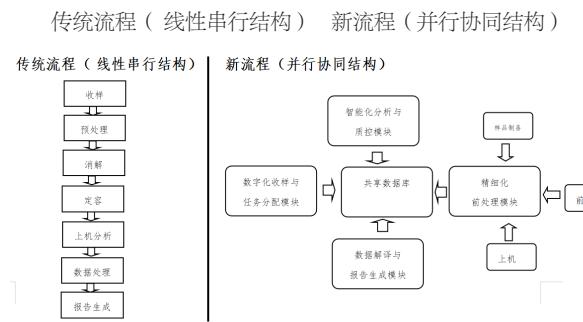
可采用批次处理、集中攻坚的模式。积累一定数量的形态分析样品后，由技术骨干组成临时小组，利用 HPLC 与 AFS 联用，进行集中处理和分析，通过集约化操作控制成本^[1]。

(六) 持续改进机制

建立周例会与月评估制度。周例会旨在复盘本周问题并共商改进措施，以持续优化流程细节；月评估则审议效率、质量、成本等关键指标，通过历史数据对比衡量改进成效，为后续优化提供数据支撑。

四、新旧工作流程对比与总结

(一) 新旧 AFS 测试工作流程对比图



(二) 传统工作流程成本效益瓶颈

高度依赖个人经验的传统工作，存在明显局限性。效率低下，易引入人为误差，质量控制滞后，且数据分散形成信息孤岛，难以满足大批量样品及形态分析等新指标的测试需求。此外，专业分析化学师需耗费大量时间从事移液、定容等重复性体力劳动，造成高技能人力资源的严重浪费，隐性成本巨大。

(三) 新旧工作流程量化对比表

对比维度	传统流程	优化流程	优势总结
组织模式	单人负责制	小组流水线制	效率提升 30% 以上 人力成本优化
人为误差率	约 5%	<1%	降低 80%
试剂消耗	基准	减少 30%	显著节约

对比维度	传统流程	优化流程	优势总结
数据管理	手工记录 信息孤岛	自动采集 集中共享	缩短 87.5%
质控时效性	事后检查 滞后被动	事中实时预警 主动控制	大幅降低返工成本 质量风险可控
成果输出	原始数据表格 仅提供“总量”数据	数据 + 初步解译 信息 + 标准化报告	服务价值提升 支撑决策能力增强
成本投入	低（初始）	极低（主要为管理优化）	以最小成本实现最大效益

五、总结与展望

新时代区域地质矿产调查的转型对原子荧光光谱（AFS）测试工作提出了全方位、多维度的新要求。本文系统分析表明，应对这些挑战的有效策略并非完全依赖于巨额投资购置高端设备，而应更加注重向内挖掘潜力，立足现有条件，通过管理模式的创新、工作流程的精细化再造和低成本数字化工具的赋能，实现一场“内涵式”的升级。本文所构建的新工作流程，核心在于通过管理创新优化整体测试流程设计，通过智能驱动加强全过程质量控制，并通过技术赋能深化数据的地质与环境解译。实践表明，这一模式能够在实验室不显著提升成本的条件下，有效解决传统工作模式在效率、质量和成本方面的核心痛点，使 AFS 技术能够更好地满足新时代多元化的需求，更全面地服务于关键矿产勘查、生态环境评价和深部找矿等重大国家战略。

展望未来，地矿实验测试领域的智能化与高效化发展前景广阔。随着实验室信息管理系统（LIMS）的逐渐普及、便携式 AFS 及联用技术的持续发展以及人工智能（AI）数据解译模型的深入应用，AFS 技术的应用潜力将得到进一步释放，地矿实验测试工作必将迈向更加智能化、高效化的新阶段。但必须强调的是，无论技术如何演进，地矿实验室的核心竞争力将始终根植于以地质问题为核心、以国家战略需求为导向、不断优化流程管理的根本理念。这一理念是持续推动技术创新、价值提升的动力之源。后续改革将继续深挖工艺流程，探索智能化技术的应用与实践，以达到为实现地矿实验室的全面转型升级提供更坚实的支撑和可借鉴的范例。

参考文献

- [1] 周飞飞. 为保障矿产资源安全提供“深部方案” [N]. 中国自然资源报, 2024-04-04(007).
- [2] 张永双, 孙璐, 殷秀兰, 等. 中国环境地质研究主要进展与展望 [J]. 中国地质, 2017, 44(5): 901-912.
- [3] 武春林, 王瑞廷, 丁坤, 等. 中国土壤质量地球化学调查与评价的研究现状和进展 [J]. 西北地质, 2018, 51(3): 240-252.
- [4] 徐小娟. 氢化物发生-原子荧光光谱法在化探样品测试中的应用进展 [J]. 安徽化工, 2020, 46(02): 12-16.
- [5] 杜丽娜. 寒冷地区土壤中微量元素的形态分析、分布特征及其影响因素 [D]. 西北农林科技大学, 2020.
- [6] 范俊楠, 田文娟, 张钰, 等. 高效液相色谱-原子荧光光谱法测定土壤中 4 种有效砷形态 [J]. 分析科学学报, 2022, 38(02): 185-190.
- [7] 刘恒, 赵威, 韩媛, 等. 人工智能与大数据分析在新一轮找矿突破战略行动中的应用与挑战 [J]. 科技创新与应用, 2024, 14(2): 20-23.
- [8] 刘玖芬, 陆海川, 刘晓煌, 等. 检验检测实验室数字化建设与实践探索 [J]. 中国检验检测, 2024, 32(3): 63-68, 43.