

# 便携式锂钾分析仪在钾盐资源现场勘查中的应用

刘 晓, 袁继海, 孙东阳, 樊兴涛, 詹秀春\*

国家地质实验测试中心, 北京 100037

**摘 要:** 钾盐矿作为农业三大肥料中钾肥的主要原料, 是国家粮食安全的重要保障, 也是我国紧缺的七大矿产资源之一。当前可供开发利用的主要是可溶性钾盐资源, 现场勘探和开采急需相关仪器和快速分析技术的支持。项目组采用自主研发的便携式锂钾分析仪, 在对钻探钾盐样品采用超声波技术进行消解的基础上, 选择 K 的分析谱线波长为 766.49 nm, 建立了测定钾盐样品中水溶性 K 的快速分析方法, 并在钻探现场得到示范应用。在最佳工作条件下测得 K 的检出限为 9.0  $\mu\text{g/L}$ , 方法的精密度(RSD) < 2%。对钾盐样品进行加标回收实验, 加标回收率均在 94.5%~106.7%范围内。钾盐现场分析结果与实验室 ICP-AES 测量结果的一致性良好, 现场快速分析方法的准确度高, 可满足地质调查和资源勘查的要求, 为实时指导钾盐资源现场勘查与开采提供了科学信息与技术支撑。

**关键词:** 便携式; 锂钾分析仪; 钾盐; 现场分析

中图分类号: O657.39 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.103001

## On-site Application of Portable Li-K Analyzer in the Exploration of Potash Resources

LIU Xiao, YUAN Ji-hai, SUN Dong-yang, FAN Xing-tao, ZHAN Xiu-chun\*

National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037

**Abstract:** Sylvine, as the main raw material of potash fertilizer among the three major agricultural fertilizers, is an important guarantee for national food security and one of the seven scarce bulk strategic mineral resources in China. Currently, soluble potash resources are mainly available for exploitation and utilization. It is urgent to support on-site exploration and exploitation by using relevant instruments and rapid analytical technology. On the basis of ultrasonic digestion of drilling potash samples, the wavelength of characteristic spectral line of K was set at 766.49 nm, and a rapid analytical method for determination of water soluble K in potassium salt samples was established by self-developed portable Li-K analyzer, which was demonstrated and applied in drilling site. Under the optimum operating conditions, the detection limit of K was 9.0  $\mu\text{g/L}$  and the measured precision (RSD) was better than 2%. The standard addition recovery experiments of potassium salt samples were all within the range of 94.5%~106.7%. The on-site analytical results of potassium salt samples agreed well with those by laboratory ICP-AES measurements, which shows that the accuracy of rapid field analytical method is good and can meet the requirements of geological survey and resource exploration. This work has laid a practical foundation for real-time guidance of on-site exploration and exploitation of potassium salt resources by providing scientific information and technical support.

**Key words:** portable; Li-K analyzer; potassium salt; on-site analysis

本文由国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0600605)和基本科研业务费项目(编号: JYYWF20181701)联合资助。

收稿日期: 2020-09-06; 改回日期: 2020-10-21; 网络首发日期: 2020-11-02。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 刘晓, 女, 1991 年生。实习研究员。主要从事地质样品分析检测工作。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: lx761609253@126.com。

\*通讯作者: 詹秀春, 男, 1961 年生。硕士, 研究员。主要从事 X 射线荧光、激光烧蚀等离子体质谱技术应用研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: zhanxiuchun2012@126.com。

钾盐矿是一种重要的战略性矿产资源,是农业三大肥料中钾肥的主要原料,也是我国紧缺的七大宗矿产资源之一(赵元艺等, 2010; 牟思宇等, 2018; 郑绵平等, 2018)。世界钾盐资源储量丰富但分布极不均衡,我国已探明的钾盐储量仅占世界总储量的2.2%(商朋强等, 2019)。钾盐资源主要分为可溶性钾盐以及难溶性含钾岩石两种类型,主要分布在新疆、青海、西藏、四川、云南等偏远地区,当前可供开发利用的主要是可溶性钾盐资源(赵元艺等, 2010; 张苏江等, 2015; 商朋强等, 2019)。随着社会经济快速发展,我国对钾盐消费需求快速增长,亟需地质调查队伍开展钾盐资源勘探工作。由于找矿勘查工作区主要在偏远地区,采样后运送至实验室进行分析,既浪费财力、物力,而且不能及时得到分析结果,严重影响了勘探工作的进展。因而急需建立针对钾盐矿中水溶性 K 含量的快速、准确的现场分析方法,以节约成本,提高分析效率,实时指导资源勘查与找矿行动的顺利实施。

目前,钾元素的分析方法主要有电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)(陈辉和魏振宏, 2010)、原子吸收光谱法(AAS)(王伟等, 2007)、火焰原子发射光谱法(FAES)(陈立华等, 2012)等,而这些大型仪器设备都需要载气、燃气和助燃气等气流条件,同时无法小型化,仅限于在实验室内使用;而传统分析方法中的重量法、容量法等,因操作繁琐,测定周期长,达不到快速分析的目的。便携式能量色散 X 射线荧光光谱法(P-XRF)是野外现场分析的首选技术(焦距等, 2016),但分析固体样品时基体效应明显,同时缺乏校准用的标准物质,分析准确度不能得到保障;分析液体样品时,样品室只能放入一个样品,分析速度降低,且无法检测伴生的锂元素。

始于 20 世纪 90 年代初发展起来的大气压液体阴极辉光放电发射光谱仪(SCGD-AES)作为一种新型的检测技术越来越受到分析学者的亲睐(Mezei and Cserfalvi, 2007; Webb et al., 2007; Wang et al., 2013)。液体阴极辉光放电光谱仪可在大气压环境下运行,无需载气、燃气、助燃气和真空环境,不需要雾化装置,因而作为便携装置具有极大的优越性,已应用于环境、医学、食品安全等多个领域金属离子的检测(Mottaleb et al., 2001; Shekhar et al., 2010; 郑培超等, 2015)。目前,大气压液体阴极辉光放电发射光谱仪多为实验室大型仪器,也没有作为野外现场分析的先例。结合资源勘查对现场分析技术的需求,项目组自主研发了基于 CCD(Charge Coupled Device)检测器的便携式大气压液体阴极辉光放电光谱仪,简称便携式锂钾分析仪(Liu et al., 2017; Zu

et al., 2018)。在已研发原理样机的基础上,通过改进设计电动注射进样系统,进样稳定流畅,保证了等离子体放电更稳定。本仪器体积小,重量仅为 10 kg,携带方便,可作为野外现场分析钾盐矿中多种元素的小型化仪器。本文建立了便携式锂钾分析仪分析钾盐矿中水溶性 K 元素的分析方法,在勘查钻探现场开展了现场分析技术示范应用,为钻探现场提供了快速数据支撑与钻探实施决策的依据。

## 1 实验部分

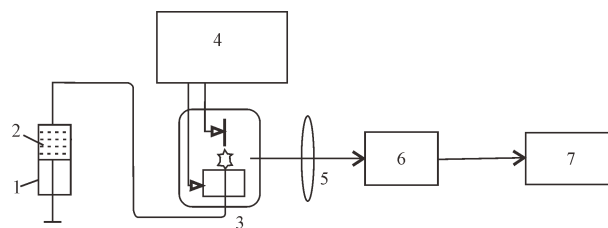
### 1.1 便携式锂钾分析仪简介

本实验采用自主研发的便携式锂钾分析仪,主要由电动注射进样系统,液体阴极辉光放电系统,CCD 检测系统和数据处理系统组成,图 1 是其示意图。样品溶液由注射器引入,在刚玉管顶端溢出后与石墨电极接触构成液体阴极。在钨阳极和液体阴极间施加高压并产生辉光放电区,溶液中的金属离子进入辉光放电区后被激发并发出特征光谱,经过聚焦透镜后,由 CCD 检测器检测,经过谱图处理计算得到待测元素的浓度(Liu et al., 2017)。

该仪器体积小,重量轻,12 V 直流电源供电,野外现场可采用磷酸铁锂蓄电池或者折叠式太阳能板供电,功耗约为 50 W;采用电动注射进样系统,进样稳定流畅;采用半封闭式一体化原子化器,减少了外部脉动气流对放电电弧的扰动,使得测定更加稳定;采用 CCD 检测器与带通滤光片相结合,有效减小了仪器体积,消除了高浓度 Na 对 K 元素响应信号及背景信号的影响。

### 1.2 仪器装置及工作条件

便携式锂钾分析仪采用的 CCD 检测系统是 Ocean Optics 公司生产的 HR4000 光谱系统,波长响应范围为 200 ~ 1100 nm,分辨率为 0.3 nm,谱图处理软件为 SpectraSuite Software。其他工作参数为:积分时间 100 ms,平均次数 10 次,去除暗噪声,工作电压 800 V,样品流速 3.0 mL/min。K 元素分析谱线波长为 766.49 nm。



1—注射器; 2—样品溶液; 3—液体阴极辉光放电原子化器;  
4—高压电源; 5—聚焦透镜; 6—CCD 检测系统; 7—数据处理系统。  
1—syringe; 2—sample solution; 3—SCGD cell; 4—high voltage;  
5—focus lens; 6—CCD spectrometer; 7—data process.

图 1 便携式锂钾分析仪结构原理示意图

Fig. 1 The schematic diagram of portable Li-K analyzer

Auto Science AS3120A 超声波清洗机(天津奥特赛恩斯仪器有限公司); 花潮高科 HC3003VG 电子天平(300 g/0.001 g, 上海花潮电器有限公司); Brand HandyStep 电动连续分液器(普兰德(上海)贸易公司)。

### 1.3 主要试剂和样品

K 标准储备溶液(1000 mg/L, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); HCl(优级纯, 北京化工厂), 实验用水为蒸馏水(电阻率约为  $18\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ )。

钾盐岩心样品均来自于钾盐勘查钻探现场。

### 1.4 溶样时间的确定

《岩石矿物分析》(第四版)中关于岩盐样品实验室常规水溶方法为: 称取 2.000 g 样品于 250 mL 烧杯中, 加入 150 mL 蒸馏水, 盖上表面皿, 置于电热板上加热至微沸, 并保持 20 min, 取下, 冷却至室温后定容至 200 mL 容量瓶中, 摇匀备用。

考虑到野外现场样品溶解的可操作性与便携性, 本次实验采用超声波技术消解样品。为了考察超声波技术溶样效果并确定最佳溶解时间, 选取预先采取的 2 个钾盐样品, 分别利用超声波技术和实验室加热两种方法进行溶解, 超声波溶样时间分别为 0.5 h、1.0 h、2.0 h、3.0 h、4.0 h、5.0 h。将溶解好的样品适当稀释后采用 ICP-AES 测量, 测量结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 当溶样时间超过 1 h 时, K 元素测量结果基本不变, 且与实验室常规溶解方法的测量结果基本吻合。为简化溶样流程, 保证分析结果的准确度, 提高分析效率, 本次野外现场选择采用超声波技术进行样品溶解, 溶样时间为 1 h。

## 2 结果和讨论

### 2.1 仪器条件优化

#### 2.1.1 酸度的选择

酸的种类和 pH 值对元素的谱线强度有明显影响(盖荣银等, 2014)。在前期实验(Liu et al., 2017)的

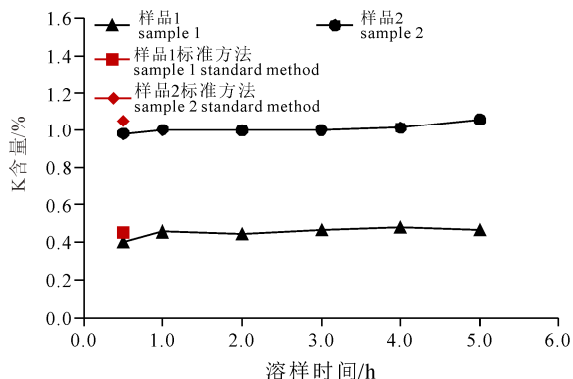


图 2 超声波溶样时间对 K 含量测量结果的影响  
Fig. 2 The effect of ultrasonic dissolution time on determination results of K

基础上, 综合考虑野外现场用酸安全问题, 选择 HCl 作为本次实验待测溶液的介质。为考察 HCl 对 K 信号强度的影响, 分别试验了体积分数为 1.0%、1.5%、2.0%、2.5% 盐酸介质的 K 标准溶液(1.0 mg/L), 实验结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 盐酸体积分数在 1.0% ~ 2.5% 范围内增加时, K 信号强度呈增大的趋势。但在实验过程中发现, 当盐酸体积分数为 2.0% 时, 等离子体放电不稳定, 且随着盐酸浓度越高, 等离子体放电越不稳定。因此, 本实验最终选择体积分数为 1.5% 的盐酸作为稀释剂。

#### 2.1.2 电压优化

图 4 是当溶液为 1.5% 盐酸介质的 K 标准溶液(1.0 mg/L)时, 在不同电压下 K 信号强度的变化趋势图。当电压低于 850 V 时, 随着电压的增加, K 信号强度有较大的增强, 这主要是由于电压升高, 使得等离子体区域元素激发更充分; 当电压高于 850 V 时, 随着电压的增加, K 信号强度呈降低的趋势。

但是当电压为 850 V 时, 便携式锂钾分析仪的阳极钨棒过热, 从而导致阳极寿命缩短。综合考虑, 本实验选择最佳工作电压为 800 V。

#### 2.1.3 流速优化

为考察样品流速对元素谱线强度的影响, 分别

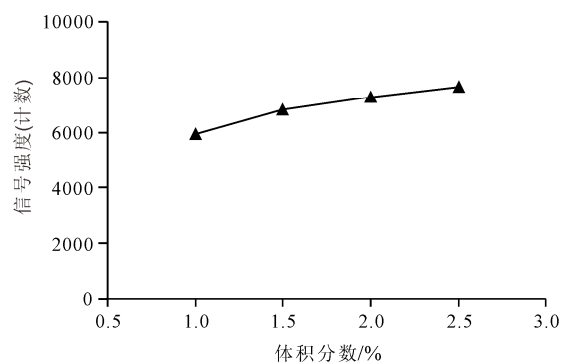


图 3 盐酸体积分数对 K 信号强度的影响  
Fig. 3 The effect of volume fractions of hydrochloric acid on signal intensity of K

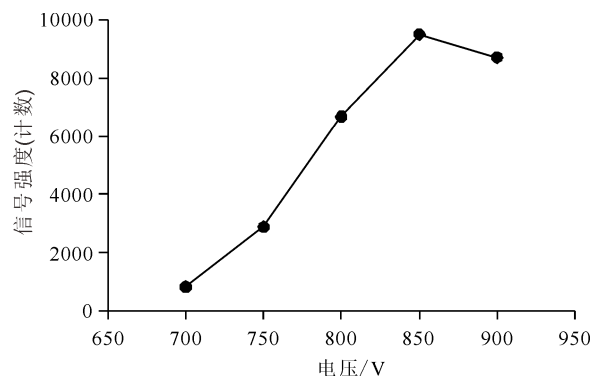


图 4 电压对 K 信号强度的影响  
Fig. 4 The effect of voltage on signal intensity of K

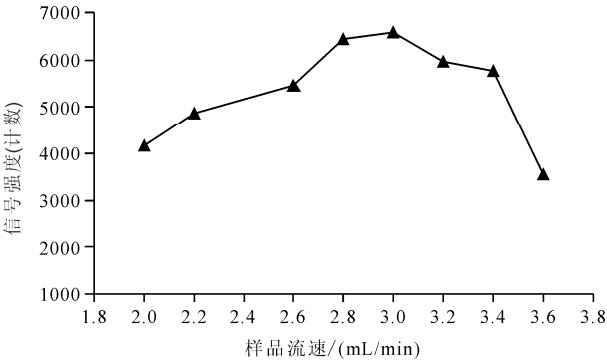


图 5 样品流速对 K 信号强度的影响  
Fig. 5 The effect of sample flow rate on signal intensity of K

试验了样品流速为 2.0 mL/min、2.2 mL/min、2.6 mL/min、2.8 mL/min、3.0 mL/min、3.2 mL/min、3.4 mL/min、3.6 mL/min 的 1.5%盐酸介质的 K 标准溶液(1.0 mg/L), K 信号强度的变化趋势如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,当样品流速在 2.0~3.0 mL/min 时, K 信号强度随着样品流速的增大而增强;当样品流速在 3.0~3.6 mL/min 时, K 信号强度随着样品流速的增大而呈现减弱的趋势。因此,本实验选择样品流速为 3.0 mL/min。

2.2 标准曲线、检出限、精密度

分别以 1.5%盐酸为介质配制 K 浓度依次为 0 mg/L、0.05 mg/L、0.1 mg/L、0.2 mg/L、0.5 mg/L、1.0 mg/L、2.0 mg/L、5.0 mg/L 的标准溶液,在最佳仪器工作条件下测量,以 K 特征谱线的净响应信号强度对标准溶液浓度绘制标准曲线,所得标准曲线的方程  $y=5412.6x-229.82$ , 线性相关系数  $R^2=0.999$ 。其中,  $y$  为发射强度,  $x$  为 K 标准溶液浓度。

对试剂空白(1.5%盐酸溶液)进行 11 次平行测定,

得到仪器的检出限为 9.0  $\mu\text{g/L}$ 。

对 K 标准溶液(2.0 mg/L)进行精密度试验( $n=11$ ),方法的相对标准偏差(RSD)为 1.26%,满足准确分析的要求。

2.3 现场分析

2.3.1 钾盐样品前处理

准确称取 1.000 g 钾盐样品于 100 mL 塑料瓶中,加入 50 mL 蒸馏水,盖上瓶盖,将塑料瓶放入装有适量水的超声波清洗机中,调节好功率,启动超声波清洗机。待溶解 1 小时后,将塑料瓶取出冷却至室温,用蒸馏水定容至 100 mL,摇匀,备用。

2.3.2 样品分析

取经前处理的待测样品溶液 1.0 mL 于 10 mL 离心管中,加入 150  $\mu\text{L}$  浓盐酸,用蒸馏水稀释至 10 mL,此时待测样品的总稀释倍数为 1000 倍,待测样品溶液中盐酸体积分数为 1.5%,摇匀后利用便携式锂钾分析仪进行测量。对 K 含量较高的样品来说,其特征谱线信号响应饱和,无法进行定量测定,需根据谱线强度进行重新稀释与测量。最后采用标准曲线法计算待测样品中 K 元素的含量。

为考察分析数据的可靠性,选取不同 K 含量、不同溶解状态的 15 个样品进行加标回收实验。依据钾盐样品中 K 元素的含量,加标量尽可能等于样品含量,加标回收率在 94.5%~106.7%,见下表 1。

为进一步验证锂钾分析仪测量结果的准确性,将钾盐现场分析结果与室内实验室 ICP-AES 测量结果相对比,相对偏差基本均小于 10%,可满足野外现场快速分析的需求。见表 1,表中仅列出部分

表 1 钾盐样品中 K 含量的锂钾分析仪测量值与 ICP-AES 测量值对比  
Table 1 Comparison of determination of K in potassium salt samples by Li-K analyzer and ICP-AES measurements

| 样品编号 | 稀释倍数   | 测定值 w/% |               | 相对偏差/% | 加标回收率/% |
|------|--------|---------|---------------|--------|---------|
|      |        | ICP-AES | Li-K analyzer |        |         |
| D 01 | 1 000  | 0.11    | 0.10          | -6.2   | 106.7   |
| D 02 | 10 000 | 0.96    | 0.95          | -1.3   | 102.3   |
| D 03 | 5 000  | 0.27    | 0.26          | -5.2   | 96.3    |
| D 04 | 10 000 | 0.92    | 0.96          | 4.4    | 99.5    |
| D 05 | 1 000  | 0.03    | 0.03          | 2.2    | 98.7    |
| D 06 | 5 000  | 0.65    | 0.61          | -6.8   | 94.5    |
| D 07 | 5 000  | 0.69    | 0.65          | -5.5   | 95.3    |
| D 08 | 10 000 | 2.73    | 2.54          | -7.0   | 101.0   |
| D 09 | 20 000 | 4.68    | 4.92          | 5.1    | 101.5   |
| D 10 | 20 000 | 5.52    | 5.83          | 5.7    | 98.4    |
| D 11 | 20 000 | 7.22    | 7.27          | 0.7    | 99.7    |
| D 12 | 1 000  | 0.07    | 0.07          | 2.0    | 98.6    |
| D 13 | 20 000 | 6.04    | 6.02          | -0.5   | 98.6    |
| D 14 | 5 000  | 0.57    | 0.60          | 4.2    | 96.7    |
| D 15 | 5 000  | 0.25    | 0.24          | -3.3   | 99.4    |

注: 相对偏差=(锂钾分析仪测量值-ICP-AES 测量值)/ICP-AES 测量值 $\times 100\%$ 。

样品的对比数据。

与 ICP-AES、AAS 等技术相比, 便携式锂钾分析仪不需要燃气、助燃气等气流条件, 分析钾元素的检出限、精密度与 ICP-AES 等技术相近甚至更优(陈辉和魏振宏, 2010), 可采用蓄电池或折叠太阳能板供电, 成本低, 体积小, 重量仅为 10 kg, 携带方便, 非常适用于野外现场的快速分析。我国的钾盐矿床大部分分布在西部偏远地区, 便携式锂钾分析仪在钾盐资源勘查、开采现场快速提供数据方面, 在钻探现场提供决策依据方面, 具有独特的技术优势。此外, 该仪器还可以分析测量 Li、Rb、Cs 等元素, 未来也能在这些关键性矿产资源勘探中提供现场技术支撑。

### 3 结论

本文采用一种新的样品前处理方法——超声波技术溶解钾盐样品, 利用便携式锂钾分析仪建立了钾盐矿中水溶性 K 的现场快速分析方法。该方法检出限低、精密度好、准确度高, 分析速度快, 样品前处理流程简单快速, 方法技术指标满足地质调查与资源勘探的需求, 非常适用于钾盐样品中水溶性 K 含量的野外现场快速分析。通过便携式锂钾分析仪在钻探现场的分析应用示范, 证明了方法的有效性, 也为水溶性钾盐资源勘查工作提供了现场技术支撑。

### Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0600605), and Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. JYYWF20181701).

### 参考文献:

- 陈辉, 魏振宏. 2010. ICP-AES 测定岩盐中钾、钠、钙和镁的含量[J]. 光谱实验室, 27(3): 1221-1222.
- 陈立华, 陆小娟, 王敏蕾, 张颖, 迟爱玲. 2012. 火焰原子发射光谱法测定矿石中的钾和钠[J]. 有色矿冶, 28(5): 45-47.
- 盖荣银, 汪正, 贺岩峰, 李青, 邹慧君, 张国霞. 2014. 液体阴极辉光放电原子发射光谱法分析硅酸钇镨中痕量杂质元素[J]. 分析化学, 42(11): 1617-1622.
- 焦距, 詹秀春, 樊兴涛, 刘晓, 郭澍. 2016. 能量色散 X 射线荧光光谱法现场测定钾盐钻井泥浆中的钾、溴、锶[J]. 分析试验室, 35(9): 1111-1116.
- 牟思宇, 沙景华, 闫晶晶, 刘全文. 2018. 中国钾盐供应安全的主成分-灰色关联分析[J]. 中国矿业, 27(3): 27-31, 38.
- 商朋强, 祁才吉, 焦森, 熊先孝, 关炳庭, 张杨. 2019. 中国钾盐矿产预测评价模型和资源潜力分析[J]. 地质通报, 38(10):

1758-1767.

- 王伟, 王赫男, 马旭红. 2007. 火焰原子吸收光谱法测定长石中钾钠[J]. 冶金分析, 27(11): 72-74.
- 张苏江, 崔立伟, 高鹏鑫, 姜爱玲, 李建波. 2015. 中国钾盐资源形势分析及管理对策建议[J]. 无机盐工业, 47(11): 1-6.
- 赵元艺, 焦鹏程, 李波涛, 钱作华. 2010. 中国可溶性钾盐资源地质特征与潜力评价[J]. 矿床地质, 29(4): 649-656.
- 郑绵平, 张永生, 商雯君, 邢恩袁, 仲佳爱, 桂宝玲, 彭渊. 2018. 川东北普光地区发现新型杂卤石钾盐矿[J]. 中国地质, 45(5): 1074-1075.
- 郑培超, 张斌, 王金梅, 王晓蒙, 刘红弟, 杨蕊. 2015. 大气压液体阴极辉光放电发射光谱检测水体中的铅[J]. 光谱学与光谱分析, 35(7): 2012-2016.

### References:

- CHEN Hui, WEI Zhen-hong. 2010. Determination of K, Na, Ca and Mg in rock salt by ICP-AES[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 27(3): 1221-1222(in Chinese with English abstract).
- CHEN Li-hua, LU Xiao-juan, WANG Min-lei, ZHANG Ying, CHI Ai-ling. 2012. Determination of potassium and sodium in ores by flame atomic emission spectrometric method[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 28(5): 45-47(in Chinese with English abstract).
- GAI Rong-yin, WANG Zheng, HE Yan-feng, LI Qing, ZOU Hui-jun, ZHANG Guo-xia. 2014. Determination of trace metals in lutetium-yttrium orthosilicate by solution-cathode glow discharge-atomic emission spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 42(11): 1617-1622(in Chinese with English abstract).
- JIAO Ju, ZHAN Xiu-chun, FAN Xing-tao, LIU Xiao, GUO Shu. 2016. On-site determination of K, Br and Sr in sylvite drilling mud by energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 35(9): 1111-1116(in Chinese with English abstract).
- LIU X, YANG X, ZHAN X, YUAN J, FAN X, JIAO J. 2017. Rapid determination of lithium in brine by a portable solution cathode glow discharge based on charge coupled device detector[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 37(3): 971-977.
- MEZEI P, CSERFALVI T. 2007. Electrolyte cathode atmospheric glow discharges for direct solution analysis[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 42(6): 573-604.
- MOTTALEB M A, WOO Y A, KIM H J. 2001. Evaluation of open-air type electrolyte-as-cathode glow discharge-atomic emission spectrometry for determination of trace heavy metals in liquid samples[J]. Microchemical Journal, 69(3): 219-230.

- MOU Si-yu, SHA Jing-hua, YAN Jing-jing, LIU Quan-wen. 2018. Principal component and gray correlation analysis of potash supply safety in China[J]. China Mining Magazine, 27(3): 27-31, 38(in Chinese with English abstract).
- SHANG Peng-qiang, QI Cai-jie, JIAO Sen, XIONG Xian-xiao, GUAN Bing-ting, ZHANG Yang. 2019. Potash assessment models and resource potential analysis in China[J]. Geological Bulletin of China, 38(10): 1758-1767(in Chinese with English abstract).
- SHEKHAR R, KARUNASAGAR D, DASH K, RANJIT M. 2010. Determination of mercury in hepatitis-B vaccine by electrolyte cathode glow discharge atomic emission spectrometry (ELCAD-AES)[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 25(6): 875-879.
- WANG Wei, WANG He-nan, MA Xu-hong. 2007. Determination of potassium in feldspar by flame atomic absorption spectrometry[J]. Metallurgical Analysis, 27(11): 72-74(in Chinese with English abstract).
- WANG Z, SCHWARTZ A J, RAY S J, HIEFTJE G M. 2013. Determination of trace sodium, lithium, magnesium, and potassium impurities in colloidal silica by slurry introduction into an atmospheric-pressure solution-cathode glow discharge and atomic emission spectrometry[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 28(2): 234-240.
- WEBB M R, ANDRADE F J, HIEFTJE G M. 2007. Use of electrolyte cathode glow discharge (ELCAD) for the analysis of complex mixtures[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 22(7): 766-774.
- ZHANG Su-jiang, CUI Li-wei, GAO Peng-xin, JIANG Ai-ling, LI Jian-bo. 2015. Analysis on development situation of potash ore resources and recommended management strategies in China[J]. Inorganic Chemicals Industry, 47(11): 1-6(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yuan-yi, JIAO Peng-cheng, LI Bo-tao, QIAN Zuo-hua. 2010. Geological characteristics and resource potential of soluble potash in China[J]. Mineral Deposits, 29(4): 649-656(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, ZHANG Yong-sheng, SHANG Wen-jun, XING En-yuan, ZHONG Jia-ai, GUI Bao-ling, PENG Yuan. 2018. Discovery of a new type of polyhalite potassium ore in Puguang region, northeastern Sichuan[J]. Geology in China, 45(05): 1074-1075(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Pei-chao, ZHANG Bin, WANG Jin-mei, WANG Xiao-meng, LIU Hong-di, YANG Rui. 2015. Detection of lead in water by electrolyte cathode atmospheric glow discharge emission spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 35(7): 2012-2016(in Chinese with English abstract).
- ZU W, YANG Y, WANG Y, YANG X, LIU C, REN M. 2018. Rapid determination of indium in water samples using a portable solution cathode glow discharge-atomic emission spectrometer[J]. Microchemical Journal, 137: 266-271.