

阳离子交换树脂分离-电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)法测定盐湖卤水中偏硅酸含量

王 洋^{1,2} 张露露^{3*} 王木荣¹ 徐红印¹ 张延芳⁴

(1. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101; 2. 河北农业大学 理学院, 河北 保定 071001;
3. 兰州交通大学 化学化工学院, 兰州 730000; 4. 青海盐湖工业股份有限公司, 青海 格尔木 816000)

摘 要 由于盐湖卤水中盐分浓度不同且盐度较高, 采用常规分析方法很难准确测定。通过对阳离子交换树脂加入量、阳离子交换树脂交换时间、pH 值对交换效率的影响、内标元素校正的考察, 建立了阳离子交换树脂分离-电感耦合等离子体发射光谱法测定盐湖卤水中偏硅酸含量的方法。将盐湖卤水稀释 5 倍, 加入 6 g 阳离子交换树脂, 静态交换 1.5 h, 除去卤水中的大量阳离子后, 选择 Si 251.611 nm 为分析谱线, 以 Y 371.030 nm 谱线作为内标进行信号漂移校正, 用电感耦合等离子体发射光谱仪能有效测定卤水中偏硅酸的含量。结果表明, 校准曲线的线性范围为 0.50~200 mg/L, 所得回归方程的线性关系良好($r \geq 0.9994$), 检出限为 0.16 mg/L, 结果相对标准偏差(RSD, $n=12$)为 1.8%~4.6%, 加标回收率为 96.3%~102%。同时采用紫外-可见分光光度法对偏硅酸含量进行方法比对, 两种测试结果不存在显著性差异, 表明所建立的方法具有良好的准确度。为提高盐湖资源的综合利用提供了可靠的数据支撑。

关键词 阳离子交换树脂; 电感耦合等离子体发射光谱仪; 盐湖卤水; 偏硅酸

中图分类号: O657.31 TH744.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1035(2023)08-0857-06

Determination of Metasilicic Acid Content in Salt Lake Brine by Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry with Cation Exchange Resin Separation

WANG Yang^{1,2}, ZHANG Lulu^{3*}, WANG Murong¹, XU Hongyin¹, ZHANG Yanfang⁴

(1. Geological Research Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Beijing 100101, China;

2. College of Science, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China;

3. School of Chemistry and Chemical Engineering of Lanzhou Jiao Tong University, Lanzhou, Gansu 730000, China;

4. Qinghai Salt Lake Industry Co., Ltd., Golmud, Qinghai 816000, China)

Abstract Due to the different concentration and high salinity of salt in salt lake brine, it is difficult to determine accurately by conventional analysis methods. By investigating the addition amount of cation

收稿日期: 2023-02-07 **修回日期:** 2023-05-03

基金项目: 青海省科技计划项目(2021-ZJ-773)

作者简介: 王洋, 男, 工程师, 主要从事岩石矿物分析及盐湖卤水分析方向研究。E-mail: 1527077069@qq.com

*** 通信作者:** 张露露, 女, 工程师, 主要从事无机化学及资源环境化学分析方向研究。E-mail: wjxzlwy@163.com

引用格式: 王洋, 张露露, 王木荣, 等. 阳离子交换树脂分离-电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)法测定盐湖卤水中偏硅酸含量[J]. 中国无机分析化学, 2023, 13(8): 857-862.

WANG Yang, ZHANG Lulu, WANG Murong, et al. Determination of Metasilicic Acid Content in Salt Lake Brine by Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry with Cation Exchange Resin Separation[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(8): 857-862.

exchange resin, the exchange time of cation exchange resin, the influence of pH value on exchange efficiency, and the correction of internal standard elements, the determination of metasilicate in salt lake brine by cation exchange resin separation and inductively coupled plasma emission spectrometry was established. In this method, salt lake brine is diluted five times, 6 g cation exchange resin is added, and the static exchange is 1.5 h. After removing a large number of cations in the brine, Si 251.611 nm is selected as the analytical spectral line, and Y 371.030 nm spectral line is used as the internal standard for signal drift correction. The content of metasilicic acid in the brine is determined by inductively coupled plasma emission spectrometer. The calibration curve is tested under the optimum conditions, and the linear range of the calibration curve is 0.50—200 mg/L, and the linear relationship of the regression equation obtained is good ($r \geq 0.9994$). The detection limit of this method is 0.16 mg/L, the relative standard deviation (RSD, $n=12$) is 1.8%—4.6%, and the recovery of standard addition is 96.3%—102%. At the same time, UV-visible spectrophotometry is used to compare the content of metasilicic acid, and there is no significant difference between the two test results, indicating that the method has good accuracy. Through this method, the content of metasilicic acid in salt lake brine can be determined quickly and accurately, providing reliable data support for improving the comprehensive utilization of salt lake resources.

Keywords cation exchange resin; ICP-OES; salt lake brine; metasilicic acid

我国盐湖自然资源丰富,不仅有盐类沉积资源、卤水资源,也有盐湖生物资源和旅游资源。盐湖是一种咸化水体,通常是指湖水含盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}}) > 3.5\%$ (大于海水平均盐度) 的湖泊,也包括表面卤水干涸、由含盐沉积与晶间卤水组成的干盐湖(地下卤水湖)^[1-3]。盐湖卤水中的偏硅酸对人体有保健抗衰老等健康功效,并且盐湖又是重要的旅游资源和康养生态资源^[4-7]。因此,准确分析盐湖卤水中偏硅酸的含量,对加快盐湖资源综合利用开发十分重要。

谢永红^[8]采用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)法同时测定矿泉水界限指标偏硅酸,栾燕等^[9]采用 ICP-AES 法测定矿泉水中偏硅酸、锶的含量,姜莹等^[10]建立了采用全谱直读等离子体光学发射光谱(ICP-OES)法测定饮用天然矿泉水中偏硅酸(H_2SiO_3)的新方法,而测定盐湖卤水中偏硅酸含量的文章鲜有报道。目前,在盐湖卤水中偏硅酸含量的测定尚未有国家标准方法,大多数实验室在测定此项目多参考《海洋监测规范》(GB 17378.4—2007)第 4 部分:海水分析偏硅酸的测定硅钼黄分光光度法。但是此方法运用于盐湖卤水测定有一定不足,海水分析采集的水样盐度基本一致,而盐湖卤水采集的水样盐度变化很大,单纯的通过人工配制一定盐度基体,无法满足盐湖卤水不同盐度基体的要求。分光光度法测定海水中硅操作步骤繁琐,耗时较长,此方法需要用到大量化学试剂,并且该方法易受到环境温度、显色时间、酸度等情况的干扰,而影响测定结果的准确性。

随着大型仪器的发展,电感耦合等离子体发射光谱仪以具有灵敏度高、检出限低,精密度好、线性范围广等优点,被广泛应用于地质、环境、冶金等行业^[11-13]。而通过电感耦合等离子体发射光谱仪在测定矿石中二氧化硅含量的方法已经很成熟^[14],因此借鉴此方法,尝试采用强酸性阳离子交换树脂进行卤水基体交换,除去卤水样品中的金属阳离子,降低基体和盐度,通过电感耦合等离子体发射光谱仪测定盐湖卤水中偏硅酸含量。

1 实验部分

1.1 试剂及材料

实验所有试剂均为优级纯,氯化钠、氯化镁(北京化工厂,优级纯,500 g),浓硫酸、浓硝酸(天津市科密欧化学试剂有限公司,GR,3 000 mL)。实验用水均为超纯水(电阻率 $\geq 18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$),二氧化硅储备溶液(1 000 mg/L)购自国家有色金属及电子材料分析测试中心。732 钠型阳离子交换树脂,颗粒度($\Phi 0.3 \sim 1.2 \text{ mm}$, 国药集团化学试剂有限公司)。实际卤水样品采集于中国青海省柴达木盆地察尔汗盐湖,用于实际样品测试。

1.2 仪器及工作参数

ICAP 6300 型电感耦合等离子体发射光谱仪(赛默飞世尔科技有限公司)。采用中阶梯光栅设计及电荷注入式装置(CID)固态检测器进行元素分析,玻璃同心雾化器,蠕动泵进样。仪器工作条件见表 1。

表 1 电感耦合等离子体发射光谱仪器条件
Table 1 Conditions of inductively coupled plasma
emission spectroscopy instrument

参数	设定值	参数	设定值
RF 功率/W	1 150	积分时间/s	5
辅助气流量/ (L·min ⁻¹)	1.0	蠕动泵转速/ (r·min ⁻¹)	50
冷却气流量/ (L·min ⁻¹)	12	垂直观测高度/mm	13
雾化器压力/MPa	0.20	冲洗时间/s	15
重复测量次数/次	2	进样速度/ (mL·min ⁻¹)	1.2

1.3 强酸性阳离子交换树脂制备

由于市售的 732 阳离子交换树脂为钠型,因此需要用硫酸把树脂交换为氢型。具体操作步骤为用水浸泡阳离子交换树脂,清洗数遍后,将树脂装入直径约为 1.5 cm、长约为 30 cm 的玻璃柱中,顶端与梨型分液漏斗衔接,于分液漏斗中加入 150 mL 硫酸(体积比为 6%),以约为 1.5 mL/min 的流速流经交换柱,流毕,用水以同样流速流经交换柱,直至流出液无硫酸根,树脂真空抽滤,装瓶备用。

1.4 分析步骤

由于盐湖卤水中钠离子的含量约 3 000 ~ 160 000 mg/L,镁离子的含量约 300~100 000 mg/L^[15],为减少阳离子交换树脂的加入量,需提前将盐湖卤水稀释 5 倍。准确移取盐湖卤水样品 20.00 mL 至 100 mL 容量瓶中,用去离子水定容至刻度。准确移取稀释后的盐湖卤水样品 10.00 mL 于 30 mL 塑料烧杯中,向其中加入 6 g 预先处理好的强酸性阳离子交换树脂。每 20 min 摇一次烧杯,静态交换 1.5 h,交换完毕后,将溶液倾倒入 10 mL 比色管中,同时随样品做两个过程空白实验,进行空白对照,选择 Si 251.611 nm 为分析谱线,以 Y 371.030 nm 谱线作为内标进行仪器漂移校正,通过外接三通将内标和溶液进行混合,用电感耦合等离子体发射光谱法测定卤水中偏硅酸的含量,交换过的溶液同时采用硅钼黄分光光度法进行仪器比对实验。

2 结果与讨论

2.1 阳离子交换树脂加入量选择

通过配制一定盐度的人工卤水,改变阳离子交换树脂的加入量,来查看阳离子交换树脂合适的加入量。称取 127.0 g 氯化钠和 1.239 g 氯化镁,于 500 mL 烧杯中,加入蒸馏水,溶解完全后,倒入 500 mL 容量瓶,用蒸馏水定容摇匀。配制成 Na⁺ 的浓度约 100 000 mg/L、Mg²⁺ 的浓度约为 1 000 mg/L。准确移取人工配制的卤水样品 10 mL 于 30 mL 塑料

烧杯中,向其中加入 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、8.0、10.0 g 预先处理好的强酸性阳离子交换树脂,每 20 min 摇一次烧杯,静态交换 90 min。交换完毕后,将溶液倾倒入 10 mL 比色管中,通过电感耦合等离子体发射光谱仪测定钠镁离子的含量。

由图 1 的测试结果可知,随着树脂加入量的增加,钠镁离子的吸附率增大,当阳离子交换树脂加入量在 6.0 g 时,溶液中钠离子交换率为 96.25%、镁离子交换率为 97.83%因此确定加入阳离子交换树脂的量为 6.0 g。

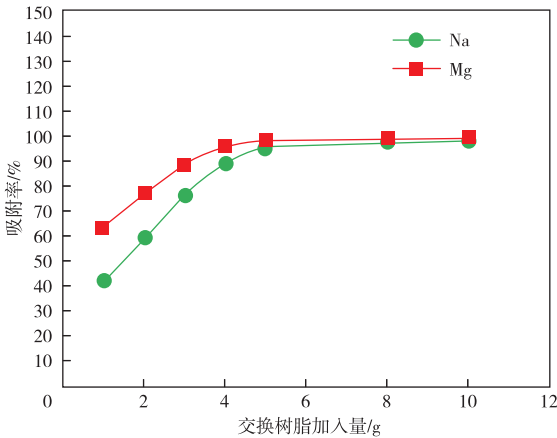


图 1 树脂加入量对 Na、Mg 吸附的影响
Figure 1 Effects of resin addition on
adsorption rate of Na, Mg.

2.2 阳离子交换树脂交换时间选择

准确移取稀释的人工配制卤水样品 10.00 mL 于 30 mL 塑料烧杯中,向其中加入 6.0 g 预先处理好的强酸性阳离子交换树脂,每 20 min 摇一次烧杯,动态交换 10、20、40、60、100、120 min。交换完毕后,将溶液倾倒入 10 mL 比色管中,通过电感耦合等离子体发射光谱仪测定卤水中钠镁离子的含量(图 2)。

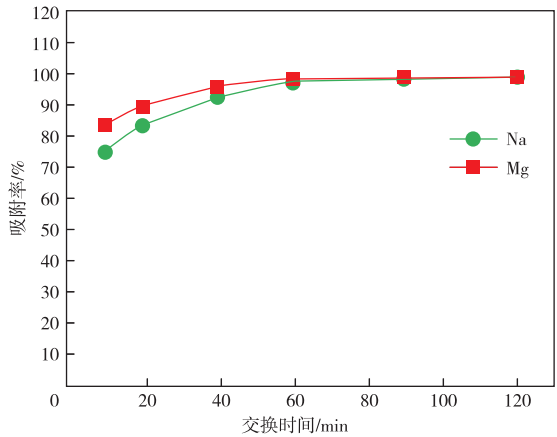


图 2 阳离子交换树脂交换时间对 Na、Mg 吸附的影响
Figure 2 Effects of exchange time of cation exchange
resin on adsorption rate of Na, Mg.

由图 2 的测试结果可知,当交换时间增加到 90 min 时,溶液中剩余的钠离子含量 150 mg/L、镁离子含量约为 0.35 mg/L,吸附率分别为 98.25%、98.85%,说明溶液中阳离子已经吸附的比较完全。因此确定阳离子交换的时间为 90 min。

2.3 pH 值对交换效率的影响

准确移取人工配制卤水样品 10.00 mL 于 30 mL 塑料烧杯中,向其中加入 6.0 g 不同流出液 pH 值的强酸性阳离子交换树脂(水洗交换柱的终点流出液 pH 值分别为 2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0)。每 20 min 摇一次烧杯,动态交换 90 min,交换完毕后,将溶液倾倒入 10 mL 比色管中,通过电感耦合等离子体发射光谱仪测定溶液中阳离子的含量(图 3)。

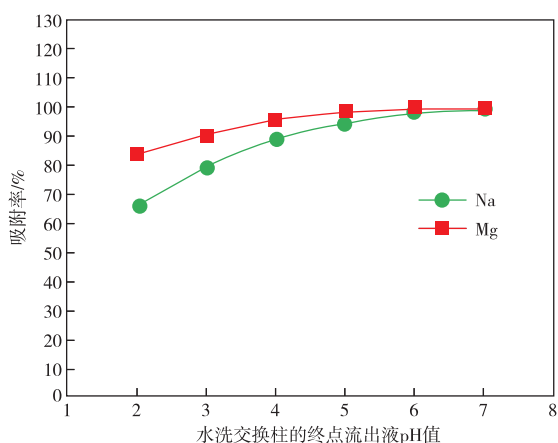


图 3 交换树脂的 pH 值对 Na、Mg 吸附的影响

Figure 3 Effects of pH value of exchange resin on adsorption rate of Na, Mg.

由图 3 的测试结果可知,当阳离子交换树脂越接近中性时,阳离子交换树脂的交换效率越高,吸附效果越好,因此水洗交换柱的终点流出液应为近中性。

2.4 内标元素校正

内标元素的选择要求是内标元素与待测元素应具有相近的电离能、激发电位和原子或离子半径。钪(Sc)、钇(Y)、铟(In)为 ICP 测定中常用的内标元素。内标元素的加入可降低基体效应,并且在克服基体效应的同时补偿由于仪器操作条件不稳定等原因造成的信号漂移^[15-16]。由于盐湖卤水中的基体成分比较高,虽然经过阳离子交换树脂除去了大量阳离子,但为防止出现交换的不彻底以及仪器漂移,仍需要通过内标进行校正。在含有 10 mg/L 的内标溶液中加入已知量的标准溶液,测试其回收率。

因此由表 2 可见,采用 Y 作为内标进行校正, Si 的回收率最高,有效补偿由于仪器操作条件不稳定等原因造成的信号漂移,大大提高了检测结果的准确性和精密性。

表 2 钪、钇、铟 3 种内标物校正结果

Table 2 Calibration results of scandium, yttrium and indium internal standards

元素	内标物	加标量/ (mg · L ⁻¹)	测定值/ (mg · L ⁻¹)	回收率/%
SiO ₂	无	45.00	41.41	92.0
	Sc	45.00	42.28	94.0
	Y	45.00	44.09	98.0
	In	45.00	43.16	95.9

2.5 方法检出限

按照实验步骤制备 12 份空白溶液,将仪器调至最佳实验条件,对 12 份空白溶液进行测定,以结果的 3 倍标准偏差对应的浓度作为方法检出限(IDL),则测得方法检出限见表 3。该方法的检出限为 0.16 mg/L。

表 3 方法检出限

Table 3 Method detection limit (n=4)

/(mg · L⁻¹)

成分	测定值	平均值	标准偏差	检出限
SiO ₂	0.021	0.053	0.096	0.021
	0.067	0.027	0.045	0.163
	0.075	0.085	0.182	0.038

2.6 方法精密度

对盐湖卤水水样-1(Y1)、卤水水样-2(Y2)、卤水水样-3(Y3)、卤水水样-4(Y4)、卤水水样-5(Y5),按照实验步骤对每一个水样进行 7 次分析,分别计

算每个水样的测定值与平均值之间的相对标准偏差(RSD)。分析方法的精密度见表 4。由表 4 可以看出,该方法的精密度在 1.8%~4.6%,有良好的精密度。

表 4 方法精密度

Table 4 Method precision($n=7$)

样品	测定值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)							平均值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	RSD/%
卤水 Y1	3.85	4.19	4.23	3.95	4.12	4.35	3.89	4.08	4.6
卤水 Y2	10.61	10.92	11.03	11.00	10.95	10.68	11.69	10.98	3.2
卤水 Y3	17.71	17.32	17.53	16.88	16.99	17.29	16.57	17.18	2.3
卤水 Y4	35.45	34.28	34.29	35.67	35.92	33.67	33.39	34.67	2.9
卤水 Y5	60.87	59.25	59.14	58.26	60.23	61.34	60.24	59.90	1.8

2.7 方法加标回收实验

采用盐湖卤水实际样品进行加标回收来验证方法准确度。在样品中加入一定当量的二氧化硅标准溶液,按实验步骤进行测试。加标回收率见表 5。本方法的加标回收率为 96.3%~102%,说明方法准确度高。

表 5 加标回收实验

Table 5 Recovery of spiking

样品	本底含量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	加标量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	加标后测定值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	回收率/ %
卤水 Y1	3.82	3	6.71	96.3
卤水 Y2	10.58	10	20.52	99.4
卤水 Y3	17.18	20	37.56	102
卤水 Y4	34.67	30	64.47	99.3
卤水 Y5	59.76	60	120.78	102

2.8 方法比对

将经过阳离子交换树脂交换过的溶液采用《海洋监测规范》(GB 17378.4—2007)第 4 部分:海水分析 偏硅酸的测定 硅钼黄分光光度法进行比对。电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)法和分光光度(UV)法测定结果的相对偏差在 0.21%~3.4%,不存在显著性差异(表 6)。

表 6 紫外分光光度法比对

Table 6 Comparison of UV spectrophotometry

样品	ICP-OES 法/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	UV 法/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	RSD/ %
卤水 Y1	3.82	4.05	2.9
卤水 Y2	10.58	11.32	3.4
卤水 Y3	17.18	18.00	2.3
卤水 Y4	34.67	35.61	1.3
卤水 Y5	59.76	60.01	0.21

3 结论

通过强酸性阳离子交换树脂进行溶液交换,以除去盐湖卤水中的金属阳离子,降低盐度和基体的干扰,选择 Si 251.611 nm 为分析谱线,以 Y 371.030 nm 谱线作为内标进行仪器漂移校正,用电感耦合等离子体发射光谱法测定卤水中偏硅酸的含量。该方法能够快速准确测定盐湖卤水中偏硅酸的含量,解决了

硅钼黄分光光度法基体盐度不匹配,测定结果准确度差、精密度低、测试样品耗时长、工作效率低的问题。同时无需人工进行盐度基体配制,无需用大量化学试剂,绿色环保,步骤简单,操作周期短,大大提高了工作效率,适合批量盐湖卤水样品的分析测定工作。采用此方法能准确快速地测定出盐湖卤水中偏硅酸的含量,为加快盐湖资源的综合开发利用,提高盐湖资源附加值,提供可靠的数据支撑。

参考文献

[1] 黄西平. 国内外盐湖(地下)卤水资源综合利用综述[J]. 海洋技术, 2002(4):66-72.
HUANG Xiping. Summary of comprehensive utilization of salt lake (underground) brine resources at home and abroad[J]. Marine Technology, 2002(4):66-72.

[2] 郑绵平. 开拓我国海相地层找钾和硼锂前景[J]. 地球科学, 2022, 47(1):1.
ZHENG Mianping. Developing prospects for potassium and boron lithium in marine strata in China [J]. Geoscience, 2022, 47 (1):1.

[3] 郑绵平, 张永生, 刘喜方, 等. 中国盐湖科学技术研究的若干进展与展望 [J]. 地质学报, 2016, 90 (9): 2123-2166.
ZHENG Mianping, ZHANG Yongsheng, LIU Xifang, et al. Some advances and prospects of scientific and technological research on salt lakes in China[J]. Journal of Geology, 2016, 90 (9):2123-2166.

[4] 贾亮亮, 田晓华. 雄县地下水多组分含量分析及水质评价[J]. 中国无机分析化学, 2021, 11(5):91-96.
JIA Liangliang, TIAN Xiaohua. Multi-component content analysis and water quality evaluation of groundwater in Xiongxin county[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2021, 11 (5):91-96.

[5] 韦日荣, 蒋慧, 黄江平, 等. 2020 年广西城乡生活饮用水偏硅酸、钙、镁监测结果分析[J]. 应用预防医学, 2022, 28(6):539-541.
WEI Rirong, JIANG Hui, HUANG Jiangping, et al. Analysis of monitoring results of metasilicic acid, calcium and magnesium in urban and rural drinking water in Guangxi in 2020 [J]. Applied Preventive

- Medicine, 2022, 28(6): 539-541.
- [6] 龚磊, 王新峰, 宋绵, 等. 江西兴国县潜在偏硅酸矿泉水水化学特征及水质健康功能评价[J]. 岩矿测试, 2021, 40(6): 894-906.
- GONG Lei, WANG Xinfeng, SONG Mian, et al. Chemical characteristics of potential metasilicic mineral water in Xingguo county, Jiangxi province and evaluation of water quality health function[J]. Rock and Mineral Testing, 2021, 40 (6): 894-906.
- [7] 何锦, 马雪梅, 邓启军, 等. 河北省张北县新生代玄武岩偏硅酸矿泉水化学特征及成因[J/OL]. 中国地质: 1-20 [2023-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20210111.1113.004.html>.
- HE Jin, MA Xuemei, DENG Qijun, et al. Chemical characteristics and genesis of metasilicate mineral water of Cenozoic basalt in Zhangbei county, Hebei province[J/OL]. Geology of China: 1-20 [2023-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20210111.1113.004.html>.
- [8] 谢永红. 电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)法同时测定矿泉水界限指标中的4种元素[J]. 中国无机分析化学, 2021, 11(1): 36-38.
- XIE Yonghong. Simultaneous determination of four elements in the boundary index of mineral water by inductively coupled plasma emission spectrometry (ICP-OES)[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2021, 11 (1): 36-38.
- [9] 栾燕, 张玉黔, 张长立, 等. ICP-AES法测定矿泉水中偏硅酸、锶的含量[J]. 中国卫生检验杂志, 2002(6): 710.
- LUAN Yan, ZHANG Yuqian, ZHANG Changli, et al. Determination of metasilicic acid and strontium in mineral water by ICP-AES[J]. China Journal of Health Inspection, 2002(6): 710.
- [10] 姜莹, 张世涛, 邵文军. 饮用天然矿泉水中偏硅酸(H_2SiO_3)的测定[J]. 饮料工业, 2005(6): 38-41.
- JIANG Ying, ZHANG Shitao, SHAO Wenjun. Determination of metasilicic acid (H_2SiO_3) in drinking natural mineral water[J]. Beverage Industry, 2005(6): 38-41.
- [11] 黄登丽, 刘彤彤, 程帆. 电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定炭质板岩样品中铬、钒方法探究[J]. 中国无机分析化学, 2023, 13(1): 105-110.
- HUANG Dengli, LIU Tongtong, CHENG Fan. Determination of chromium and vanadium in carbonaceous slate by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES)[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13 (1): 105-110.
- [12] 江荆, 吴雪英, 魏雅娟, 等. 微波消解-电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定含铜污泥中多种重金属[J]. 中国无机分析化学, 2023, 13(4): 356-362.
- JIANG Jing, WU Xueying, WEI Yajuan, et al. Determination of heavy metals in copper containing sludge by microwave digestion inductively coupled plasma atomic emission spectrometry[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(4): 356-362.
- [13] 安中庆, 毛莹博, 范兴祥, 等. 碱熔分解-沉淀富集分离-电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定含铱废料中铱[J]. 中国无机分析化学, 2023, 13(2): 160-164.
- AN Zhongqing, MAO Yingbo, FAN Xingxiang, et al. Determination of iridium in iridium containing waste by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry with alkaline melting precipitation enriching [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(2): 160-164.
- [14] 赵永莉, 骆坤, 李金宝. 电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定石灰中二氧化硅和磷含量[J]. 中国无机分析化学, 2018, 8(5): 51-52.
- ZHAO Yongli, LUO Kun, LI Jinbao. Determination of silicon dioxide and phosphorus in lime by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES)[J]. China Inorganic Analytical Chemistry, 2018, 8(5): 51-52.
- [15] 李志伟, 付振海, 张志宏, 等. 察尔汗盐湖卤水蒸发速度影响因素的量化研究[J]. 盐湖研究, 2022, 30(1): 57-67.
- LI Zhiwei, FU Zhenhai, ZHANG Zhihong, et al. Quantitative study on the factors affecting the evaporation rate of brine in Chaerhan Salt Lake[J]. Salt Lake Research, 2022, 30 (1): 57-67.
- [16] 马超, 孟策, 张彩霞, 等. 电感耦合等离子体发射光谱法测定右旋糖酐铁中重金属元素时的基体效应和内标校正方法研究[J]. 药物评价研究, 2017, 40(8): 1098-1102.
- MA Chao, MENG Ce, ZHANG Caixia, et al. Study on matrix effect and internal standard correction method for the determination of heavy metals in iron dextran by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry [J]. Drug Evaluation Research, 2017, 40 (8): 1098-1102.