

文章编号:0253-9950(2011)06-0321-07

高矿化度水样中微量铀的测定

白静^{1,2}, 赵梁², 范芳丽¹, 吴晓蕾¹, 丁华杰¹,
雷富安¹, 田伟¹, 秦芝^{1,*}, 郭俊盛¹

1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要:通过系统对比实验,建立了一种适合于盐湖、晶间卤水等高矿化度液体样品中微量铀的测定方法——紫外荧光法。在确定仪器测量稳定性的基础上,给出紫外荧光法测定铀的最佳条件为样品 pH=2~12, 荧光增强剂用量为 500 μL 。为减少杂质离子对铀测定的干扰,分别采用直接稀释荧光法及 TBP 萃取荧光法进行铀的测定,确定了 TBP 萃取荧光法测量高矿化度水样中微量铀的步骤,实验测得铀的萃取-反萃回收率约为 85%。利用上述两种方法分析盐湖和晶间卤水样品中铀的质量浓度,所得结果与电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定结果无显著差别,说明该法可用于高矿化度水样中微量铀的测定。

关键词:微量铀; 荧光法

中图分类号: TL212.5 **文献标志码:** A

Trace Uranium Determination in High Salinity Brine

BAI Jing^{1,2}, ZHAO Liang², FAN Fang-li¹, WU Xiao-lei¹, DING Hua-jie¹,
LEI Fu-an¹, TIAN Wei¹, QIN Zhi^{1,*}, GUO Jun-sheng¹

1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: With the development of nuclear power industry in our country, the needs for uranium will increase drastically. But as the uranium resource in uranium mines are very limited, much attention has been paid on the uranium recovery from other resources, such as sea water and high salinity brine. Accurate determination of uranium concentration is very important, if uranium recovery was performed on this complicate water. Trace uranium determination in high salinity brine, for instance, salt lake and intercrystalline bittern samples, was studied in present work by using ultraviolet fluorescence method. As the instrument is stable, the optimal conditions for uranium determination are found to be: pH=2-12, added fluorescence-enhancing agent amount of 500 μL ; to reduce the negative effect of impurity ions on uranium determination, both direct dilution and TBP extraction fluorescence methods are investigated. The procedure used for TBP extraction fluorescence method is confirmed by employing different solvents as TBP diluent, and the uranium recov-

收稿日期:2011-01-24; 修订日期:2011-04-06

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KJ CX2-YW-N49-2, KJ CX2-YW-N50-3)

作者简介:白静(1981—),女,河南巩义人,硕士,助理研究员,放射化学专业

* 通信联系人:秦芝(1966—),男,研究员, qinzh@impcas. ac. cn

ery rate is determined to be 85%. Under the optimal conditions, both methods mentioned above were used for analyzing uranium concentration in salt lake and intercrystalline bittern samples. The obtained results were compared with those measured by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) method. Good consistency among the results is founded, which clearly shows that the method can be used for uranium determination in high salinity brine.

Key words: trace uranium; fluorescence method

随着我国国民经济的迅速发展,对能源的需求与日俱增,我国对核能给予了越来越高的重视,核电发展方针已经由“适度发展”调整为“积极发展”。2020年,核电运行装机容量将达到7000万千瓦,占电力总装机比例的5%以上。但是,目前我国铀资源的现状是储量有限,并且已探明的铀矿床均具有规模小、品位低的特征。今后,随着我国核电事业的发展,对铀的需求量将会剧增,我国铀资源紧缺的状况也将日渐突出。

铀主要有陆地矿石、海水和盐湖卤水3个来源。陆地矿石资源有限,日趋贫乏;海水中铀的含量极低($3\ \mu\text{g/L}$)^[1],其开发利用成本是陆地贫铀矿的几倍甚至更高;盐湖卤水中铀的提取日趋受到人们的重视。我国是世界上盐湖众多的国家之一,铀在我国内陆盐湖中具有一定的富集。据调查,柴达木盆地盐湖卤水中铀的含量可从痕量到 $480\ \mu\text{g/L}$,而一些晶间卤水中的铀含量甚至高达 $40\ \text{mg/L}$,与目前人们广泛关注的海水铀相比,盐湖卤水铀的含量是海水的几十甚至上万倍。由此可见,开展盐湖卤水提铀工作更有实际意义。但是盐湖卤水成分复杂,除含有铀外,还含有丰富的Rb、Cs、Br、I等元素,同时卤水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等离子的浓度也很高^[2]。这势必给盐湖卤水中铀的分析测定带来一定困难。因此,快速、准确地分析高矿化度盐湖卤水体系中的微量铀是盐湖卤水提铀工作的重要基础和关键一步。

微量铀的分析方法主要有电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)^[3]、等离子体光谱法^[4]、分光光度法^[5]、荧光法^[6]等,目前,电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)及等离子体光谱法均是测定痕量到微量铀的理想方法,但是这两种方法的共同缺点是仪器价格昂贵且体积庞大,操作及日常维护需专业人员负责,而从盐湖卤水中提铀经常需要在野外或现场直接、快速测定样品中铀的含量,因

此,其应用有一定的局限性。分光光度法测量水中铀的浓度范围为 $2\sim 100\ \mu\text{g/L}$,方法简单,但其抗干扰的能力差,对杂质含量较高的样品,需处理后才能进行铀的测量^[7]。荧光法是测定水样品中微量甚至痕量铀的有效手段,也是国标推荐的测定环境样品中微量铀的主要方法^[8]。但此方法最初以激光作为光源来激发荧光,激光管长期在高压状态下工作,故障发生率较高、寿命短,这给分析工作带来很大不便。紫外脉冲荧光法是在激光荧光法基础上发展出来的一种测量环境样品中痕量铀的新方法,它以脉冲紫外光作为光源,大大提高了仪器的使用寿命。其对铀的检测范围为 $0.02\sim 20\ \mu\text{g/L}$,并可通过适当稀释样品将检测范围提高到 mg/L 量级,灵敏度高、检出限低,对部分成分不是十分复杂的环境样品,无需处理就可准确测量铀的浓度,并且操作简单快捷。本工作拟将直接稀释荧光法与TBP萃取荧光法结合,建立一个适合盐湖、晶间卤水等高矿化度水样中微量铀的分析方法。

1 方法原理

向含有铀的液态样品中加入荧光增强剂,在一定pH范围内,加入的荧光增强剂与样品中铀酰离子可形成稳定的络合物,根据文献^[9]推测可能是焦磷酸盐与铀酰离子形成的络合物。该络合物受紫外光脉冲照射,会产生波长为 500 、 522 、 $546\ \text{nm}$ 的荧光。铀含量在一定范围内,该荧光强度与铀含量成正比,根据荧光强度即可计算得到所测样品中铀的含量。但是当样品中存在有机物时,有机物被紫外光照射,产生峰值波长为 $447\ \text{nm}$ 的荧光,此荧光会干扰铀的荧光。但因其荧光寿命短,仅为数毫秒,而铀酰荧光的寿命为几百微秒。在电路上采用延时方法,在紫外脉冲光产生几十微秒后再进行测量,就能消除有机物对测量的干扰,得到样品中铀酰的荧光强度。从而利用波长选择和时间延迟两种方法实现痕量铀的测定。

2 实验部分

2.1 主要试剂和仪器

所用试剂除另有说明外,均为符合国家标准的分析纯化学试剂,实验用水为新制备的去离子水。其他等级的试剂只要预先确定其具有足够高的纯度,使用时不降低测定准确度即可使用。荧光增强剂,购买微量铀分析仪时的自带试剂,可从仪器公司购买得到;铀标准溶液,符合国家规定标准的标准试剂,质量浓度为1 mg/L;硝酸溶液,由浓硝酸稀释得到,浓度5 mol/L;氢氧化钠溶液,利用分析纯氢氧化钠配制;20%的TBP溶液,以环己烷或四氯化碳为稀释剂,按20%的体积比配制得到;EDTA溶液,利用EDTA二钠盐配制,浓度0.1 mol/L。

WGJ-III型微量铀分析仪,杭州大吉光电仪器有限公司;7230分光光度计,上海精密仪器有限公司;所有玻璃仪器均用EDTA溶液洗涤后再使用。

2.2 实验方法

2.2.1 样品的预处理 将采集到的样品静置12 h后,取20 mL,用0.45 μm的滤膜过滤至干净玻璃容器中,备用。

2.2.2 铀质量浓度的测定 移取5 mL待测样品加入石英比色皿中(比色皿规格23 mm×13 mm×42 mm),把比色皿放入样品暗室中进行测量,得荧光读数 F_0 ,取出比色皿,向内加入0.5 mL铀荧光增强剂,并用玻璃棒搅拌均匀,把

比色皿放入样品暗室中测得读数 F_1 ;再次取出比色皿,并用微量注射器向内加入微量已知质量浓度(1 mg/L)的铀标准溶液,然后用玻璃棒搅拌均匀,最后把比色皿放入样品暗室,测得读数 F_2 。样品中铀的含量可由式(1)得到:

$$\rho = \frac{F_1 - F_0}{F_2 - F_1} \times \frac{\rho_s V_s}{V_1} \quad (1)$$

式中, ρ ,待测样品中铀的质量浓度,μg/L; V_1 ,样品体积,mL; ρ_s ,加入标准溶液的质量浓度,1 mg/L; V_s ,加入标准溶液的体积,μL。

2.2.3 直接稀释荧光法测定铀 当样品中铀含量在仪器检测范围内时,用移液管移取过滤好的样品5 mL,采用标准加入法进行铀的质量浓度测定。对于部分铀含量过高、超出仪器检测范围的样品,测量时需进行适当稀释。样品中铀的质量浓度即为测定值和稀释倍数的乘积。

2.2.4 TBP-萃取荧光法测定铀 当样品中杂质含量过高,对微量铀测定影响较大时,需将铀预纯化后再进行测量。本研究中采用TBP萃取法实现铀的纯化。因在浓度为5 mol/L硝酸体系中,TBP对铀的萃取效率最高^[10],而实际样品的pH往往接近中性。所以,在萃取工作开始前,需对样品进行处理,具体方法为:取10 mL待测样品,于电炉上加热至近干后,用5 mol/L的硝酸溶解,并定容到10 mL的容量瓶中,所得溶液即为萃取前样品。将萃取前样品按照图1所示萃取-反萃流

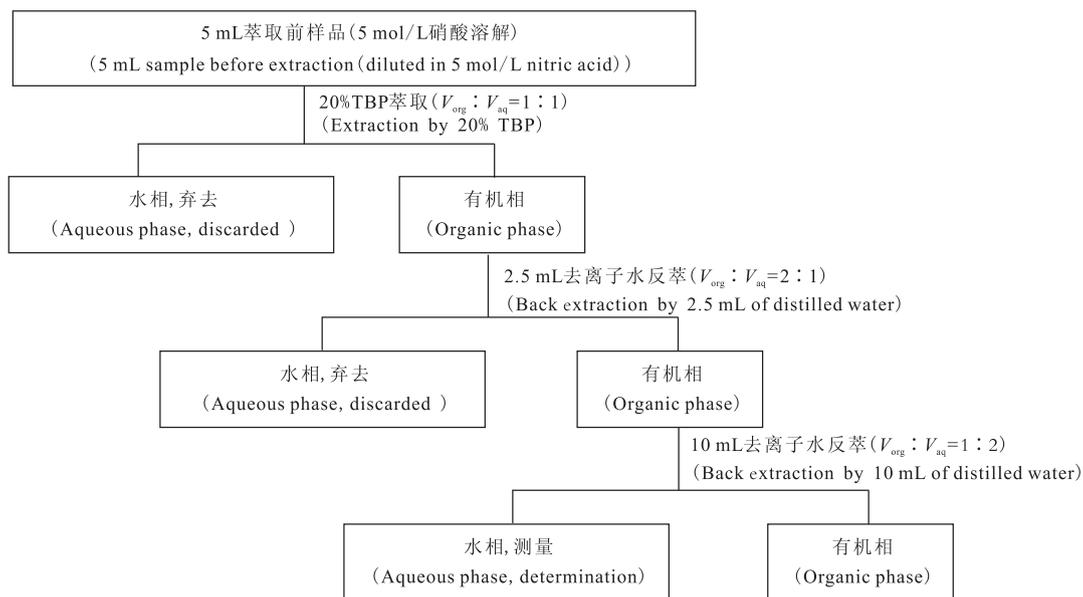


图1 样品的萃取-反萃流程

Fig. 1 Extraction and back extraction process of the sample

程,进行铀的纯化,取 5 mL 二次反萃水相测量铀的质量浓度。因在高酸度条件下进行萃取,造成二次反萃水相酸度过高,进而影响铀的测定。因此,对二次反萃水相进行铀质量浓度测量前,需用氢氧化钠溶液调节酸度,使其 pH 在 6~7 范围内。

3 结果与讨论

3.1 仪器稳定性测试

配制质量浓度为 1 $\mu\text{g/L}$ 的铀标准溶液,待仪器预热 1 h 后,按照标准加入法每隔 0.5 h 测量一次样品中铀的质量浓度,连续测 4 h,结果列入表 1。测量结果相对标准偏差(s_r)由式(2)求得:

$$s_r = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, x_i 为第 i 个结果的测量值; \bar{x} 为 n 个测量结果的平均值。由表 1 可知,质量浓度为 1 $\mu\text{g/L}$ 的铀标准溶液,经过 9 次测量后,所得结果平均值为 0.99 $\mu\text{g/L}$,测量结果相对标准偏差为 4.19%,满足仪器使用稳定性要求($s_r \leq 6\%$),可以保证后续条件实验及样品测试结果的可靠性。

表 1 仪器稳定性测试结果

Table 1 Stability of the determined results

t/h	$\rho(\text{U})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	t/h	$\rho(\text{U})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$
0.0	0.99	2.5	0.95
0.5	1.05	3.0	0.99
1.0	1.08	3.5	0.96
1.5	0.99	4.0	0.99
2.0	0.95		

注(Note): $\bar{\rho}(\text{U})=0.99 \mu\text{g/L}$, $s_r=4.19\%$

3.2 测量条件的选择及方法检出限确定

本研究所用仪器主要依赖铀酰离子与荧光增强剂形成的络合物,在紫外光的照射下激发并产生荧光来进行铀的测定。外界因素对铀测量的干扰主要表现为对样品荧光的增强或淬灭。测量条件的选择主要考察加入荧光增强剂后,不同外界条件对样品荧光增强量($F_1 - F_0$)及测量结果标准偏差 s (计算方法见参考文献[11])的影响,进而确定合适的铀测定条件。

3.2.1 pH 值对铀测定的影响 配制质量浓度

1 $\mu\text{g/L}$ 、pH 值不同的铀标准溶液,采用标准加入法测量其质量浓度,考察样品 pH 值对铀测定的影响,结果示于图 2。由图 2 可看出,当 pH=2~12 时,样品荧光增强量($F_1 - F_0$)基本保持恒定。测量结果标准偏差的最大值为 0.02 $\mu\text{g/L}$,相对于标准值 1 $\mu\text{g/L}$,相对标准偏差仅为 2%,在仪器要求测量精密度 5% 的范围以内。可以确定,当样品 pH=2~12 时,均可进行铀的质量浓度测定,结果精密度高。因实际环境样品 pH 常趋于中性^[12],为保证测定条件一致,所有样品在测量前均需将 pH 调节到 6~7 后再测量。

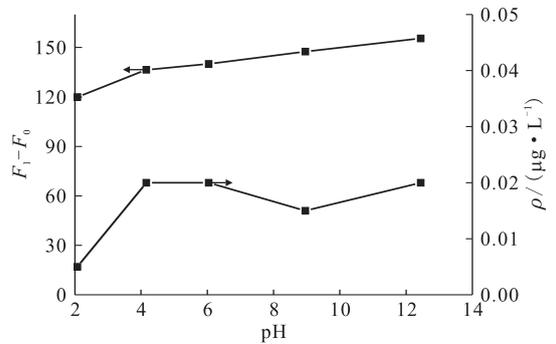
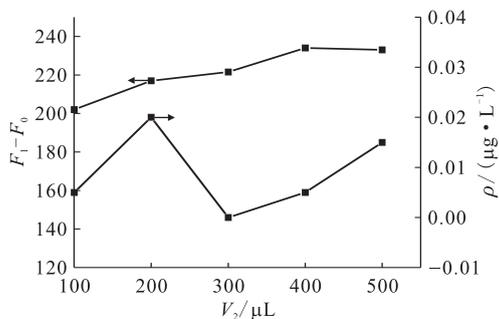


图 2 待测样品 pH 对铀测定的影响

Fig. 2 Effect of the sample pH on uranium determination

3.2.2 荧光增强剂加入量对铀测定的影响 考察了 pH=6~7、铀质量浓度恒定为 1 $\mu\text{g/L}$ 时,样品荧光增强量及测量结果标准偏差随荧光增强剂加入量(V_2)的变化,结果示于图 3。由图 3 可知,样品荧光增强量随荧光增强剂加入量的增加而增大,但增大程度并不明显。测量结果的标准偏差随荧光增强剂用量的变化呈现一定波动,但均小于 0.02 $\mu\text{g/L}$ 。由此可知,荧光增强剂加入量对样品测定无影响。在进行铀浓度分析时,为了取样方便,选择加入 500 μL 荧光增强剂。

3.2.3 方法检出限 方法的检出限(MDL)以空白值的 3 倍标准偏差计算。平行 10 次测定空白样品的铀质量浓度,所得结果分别为 0.02、0.02、0.03、0.04、0.02、0.03、0.01、0.03、0.02、0.02 $\mu\text{g/L}$,计算其平均值为 0.024 $\mu\text{g/L}$,标准偏差 $s=0.008 \mu\text{g/L}$,则由空白值 3 倍标准偏差计算得 $\text{MDL}=0.008 \times 3=0.024 \mu\text{g/L}$,所以,紫外脉冲荧光法测定铀的检出限为 0.024 $\mu\text{g/L}$ 。

图3 荧光增强剂加入量(V_2)对铀测定的影响Fig. 3 Effect of the added fluorescence-enhancing agent(V_2) on uranium determination

3.3 萃取过程 TBP 稀释剂的选择

为了确定合适的 TBP 稀释剂,需逐步测量过程的萃取及反萃效率。但文献调研及实验发现,用紫外脉冲荧光法测定铀的质量浓度时,大量 NO_3^- 的存在,会对荧光增强剂的增强效果产生不利影响^[13-14],进而给铀的测定带来较大误差,而分光光度法测定铀^[15]时却不会出现上述现象。因此,决定使用高浓度的铀溶液,通过分光光度法测

定过程的萃取及反萃效率。具体操作如下:取一定体积的 1 g/L 铀储备液(利用硝酸铀酰自行配制)烘干后,用适量 5 mol/L HNO_3 溶解,得到质量浓度分别为 50 mg/L 及 100 mg/L 的铀溶液,分别以四氯化碳及环己烷作为 TBP 的稀释剂,采用图 1 所示的萃取-反萃步骤进行操作,得到实验过程中的萃取及反萃效率,结果列于表 2。从表 2 可以看出,以四氯化碳为稀释剂,TBP 对铀的萃取效率在 91% 以上;以环己烷为稀释剂,TBP 对铀的萃取效率达到 94% 以上,可见 TBP 对铀萃取效率高。反萃时,以去离子水为反萃液进行一次反萃实验时,四氯化碳稀释剂体系的反萃效率大于 73%,环己烷稀释剂体系的反萃效率仅为 5% 左右,但是因一次反萃液中 H^+ 和 NO_3^- 浓度过大,无法利用紫外脉冲荧光法准确测定铀的浓度,需将其弃去。在此条件下,弃去四氯化碳体系的一次反萃溶液,铀的损失过大。利用去离子水对环己烷体系的铀进行二次反萃时,反萃效率达到 87% 以上,铀的反萃基本发生在二次反萃过程。因此,选择 TBP-环己烷体系进行铀的萃取。

表2 TBP 稀释剂对铀萃取及反萃效率的影响

Table 2 Effect of TBP dilutions on uranium extraction and back extraction ratio

$\rho(\text{U})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	稀释剂 (Diluent)	萃取效率 (Extraction ratio)/%	一次反萃效率 (First time back extraction ratio)/%	二次反萃效率 (Second time back extraction ratio)/%
50	四氯化碳 (Tetrachloromethane)	91.3	73.3	27.5
	环己烷 (Hexamethylene)	94.7	5.5	89.5
100	四氯化碳 (Tetrachloromethane)	91.7	78.7	28.5
	环己烷 (Hexamethylene)	96.3	5.3	87.2

本研究中采用两次反萃操作,一方面是为了更充分的反萃有机相中的铀;另一方面一次反萃可作为有机相的洗涤步骤,将其弃去后可明显降低二次反萃液中 H^+ 和 NO_3^- 的浓度,从而减小其对铀测定的干扰,提高测量结果的准确性。

3.4 铀的加标回收率测定

在确定萃取稀释剂及萃取-反萃具体操作步骤基础上,为准确推断待测溶液中铀的质量浓度,

需确定样品萃取-反萃过程回收率。回收率由式(3)计算:

$$\text{回收率}(\%) = \frac{\text{测得铀质量浓度} \times \text{全过程稀释倍数}}{\text{样品实际铀质量浓度}} \times 100\% \quad (3)$$

配制铀质量浓度分别为 50、20、10 $\mu\text{g/L}$ 的溶液,用 TBP 萃取荧光法平行 6 次测量铀的质量浓

度,得到萃取-反萃过程回收率列于表 3。由表 3 结果可知,不同初始铀质量浓度下,萃取-反萃过程的回收率约为 85%。造成回收率相对较低的主要原因是萃取及一次反萃时铀的损失。对浓度未知的待测样品,实际浓度可由测得的质量浓度根据式(3)计算得到。

3.5 实际样品分析结果

采用直接稀释荧光法及 TBP 萃取荧光法分别对实际盐湖、晶间卤水及不同浓缩倍数且带有结晶的卤水样品进行分析,并将部分结果与 ICP-MS 法测定结果对比(表 4)。紫外脉冲荧光法测得的样品铀含量数据均是 3 次测定的平均值。

由表 4 数据可见,直接稀释荧光法及 TBP 萃取荧光法,均可用来测定高矿化度盐湖及晶间卤水样品中的微量铀。直接稀释荧光法测定结果的相对标准偏差明显高于 TBP 萃取荧光

法。这是因为直接稀释荧光法测定铀时,为了降低杂质离子的干扰,需将样品稀释足够大的倍数,在计算样品实际浓度时,测得结果乘以稀释倍数也相当于将误差扩大了相应倍;而萃取荧光法测定铀时,萃取过程对样品中的铀进行了纯化,无需过度的稀释就可实现铀的测定,结果误差较小。

将部分样品测量结果与 ICP-MS 法(样品由外单位测量,美国 Finnigan MAT 公司 ICP-MS 质谱仪)测定结果对比,并用 t 检验法中两组测量数据平均值的比较^[11]评定两种方法测量结果间的一致性,所得 t 值示于表 4。假定置信度为 99%,查 t 值表得 $t_{表}=4.03$ 。除湖水 1 测定结果 t 值略大于 $t_{表}$ 外,湖水 3 及溪水 4 测定结果 t 值均远小于 $t_{表}$,可见两种方法测量结果显著性差异不大,本研究所提出的测量方法可用于高矿化度水样中微量铀的测定。

表 3 不同铀质量浓度下萃取-反萃过程回收率

Table 3 Recovery ratios of the extraction-back extraction process at different uranium mass concentrations

$\rho(\text{U})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	回收率(Recovery ratio)/%						平均(Average)/%
	1	2	3	4	5	6	
10	85.0	87.0	86.0	82.0	84.0	88.0	85.3
20	86.0	83.0	89.0	85.0	80.0	83.0	84.3
50	84.8	85.2	84.5	86.4	83.9	85.2	85.0

表 4 盐湖及晶间卤水样品中铀质量浓度的测定结果及其与 ICP-MS 测定结果对比

Table 4 Uranium mass concentration results of salt lake and intercrystalline bittern samples and their inter-comparison with ICP-MS method

样品 (Samples)	$\rho/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$			t 值 (t value)
	直接稀释荧光法 (Direct dilution fluorescence method)	TBP 萃取荧光法 (Extraction fluorescence method)	ICP-MS	
湖水 1(Lake water 1)	203.5±5.5	204.3±1.70	222.9	4.33
晶间卤水 2(Inter-crystalline bittern 2)	308.7±22.9	292.2±14.6		
湖水 3(Lake water 3)	89.8±2.7	87.6±0.8	90.7	0.82
溪水 4(Stream 4)	82.3±2.7	83.6±0.1	81.9	0.50
U-1-L	690.0±40.0	682.4±25.9		
U-2-L	900.0±63.6	917.6±70.8		
U-10-L	8 766.7±917.7	8 835.3±364.7		

注(Note): U-1-L、U-2-L、U-10-L 分别为不同浓缩倍数的卤水样品(U-1-L, U-2-L, U-10-L are brine samples with different cycle of concentration, respectively); $n=3$

4 结 论

在确定仪器测量稳定性基础上,考察了样品酸度及荧光增强剂加入量对铀测定的影响,得到紫外脉冲荧光法测定铀的条件:pH=2~12,荧光增强剂加入量为500 μL 。利用配制的标准铀溶液,根据TBP萃取荧光法测定铀的步骤,得到萃取-反萃过程铀的回收率约为85%。采用直接稀释荧光法及TBP萃取荧光法分别对实际盐湖、晶间卤水及不同浓缩倍数且带有结晶的卤水样品进行分析,并将部分结果与电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定结果对比,数据间显著性差异不大,证实该法可用于高矿化度水样中微量铀的测定。

参考文献:

- [1] 金可勇,俞三传,高从阶.从海水中提取铀的发展现状[J].海洋通报,2001,20(2):78-82.
- [2] 安世武,吴志坚.从柴达木盆地油田水和盐湖卤水中分离提取铀的可行性分析[J].盐湖研究,2007,15(1):55-62.
- [3] Tagami K, Uchida S. Rapid Uranium Preconcentration and Separation Method From Fresh Water Samples for Total U and $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ Isotope Ratio Measurements by ICP-MS[J]. Anal Chim Acta, 2007, 592: 101-105.
- [4] 吴涛,康厚军,张东.水中铀的电感耦合等离子体发射光谱法测定[J].分析测试学报,2007,26(6):845-846.
- [5] Khan M H, Warwick P, Evans N. Spectrophotometric Determination of Uranium With Arsenazo-III in Perchloric Acid[J]. Chemosphere, 2006, 63: 1 165-1 169.
- [6] Koroba R O, Nuño G A B. A Simple Method for the Absolute Determination of Uranium Enrichment by High-Resolution γ Spectrometry[J]. Appl Radiat Isotopes, 2006, 64: 525-531.
- [7] 应敏,陈贻文. DMPAQ 分光光度法测定岩石中微量铀[J].核化学与放射化学,1997,19(1):59-63.
- [8] 国家环境保护总局. GB6768—86 水中微量铀的分析方法[S]. 1986.
- [9] 高良才,董灵英,向华,等.氯化铀酰-焦磷酸四钠溶液的拉曼光谱研究[J].光谱学与光谱分析,1989,9(2):12-17.
- [10] 罗晓清,朱利明,曹正白.双亚砷与TBP对铀(VI)萃取行为的比较[J].核化学与放射化学,2002,24(2):100-104.
- [11] 武汉大学.分析化学[M].北京:高等教育出版社,2000:241-253.
- [12] 王水云,谢水波,李仕友,等.啤酒酵母菌吸附废水中铀的研究进展[J].铀矿冶,2008,27(2):98-101.
- [13] 裴玲云,张乃昌.紫外脉冲荧光微量铀分析仪及其应用[J].铀矿地质,2003,19(4):242-245.
- [14] 徐永源,邱孙泰.铀荧光增强剂 YZ-I 和 YZ-II 及其在激光荧光法测定痕量铀中的应用[J].核化学与放射化学,1983,5(1):38-44.
- [15] 白静,秦芝,王菊芳,等.粘红酵母对铀的吸附研究[J].光谱学与光谱分析,2009,29(5):1 218-1 221.