

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20160269

## 离子膜烧碱生产工艺盐水中微量碘的催化动力学 分析方法研究

廖英, 余晓平, 胡海清, 郭亚飞, 邓天龙

(天津市海洋资源与化学重点实验室, 天津科技大学化工与材料学院, 天津 300457)

**摘要:** 通过对离子膜烧碱生产工艺盐水中碘的砷铈催化动力学分析方法研究, 建立了高盐卤水中微量碘的分析方法. 该法在减少亚砷酸用量及分析时间条件下, 碘标准工作曲线的线性范围可扩展到 1.5 mg/L (相关系数  $r=0.9998$ ), 检出限小于 10  $\mu\text{g/L}$ . 对离子膜烧碱生产工艺中原盐水和精盐水样品进行加标回收实验, 其回收率在 95.0%~104.0% 范围内, 相对标准偏差 (RSD) 小于 5%. 卤水中常见高浓度的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等离子, 以及  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量小于 2% 时, 对碘的测定不产生明显的干扰. 所建立的方法具有操作简单、污染小等优点, 可运用于离子膜烧碱生产工艺盐水和海卤水等复杂基体中微量碘的分析.

**关键词:** 砷铈催化动力学法; 卤水; 碘; 离子膜烧碱

中图分类号: O655.21

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2018)01-0036-05

## Tracing Iodine in the Brine with Catalytic Kinetic Method during Ionic Membrane Caustic Soda Production

LIAO Ying, YU Xiaoping, HU Haiqing, GUO Yafei, DENG Tianlong

(Tianjin Key Laboratory of Marine Resources and Chemistry, College of Chemical Engineering and Materials Science, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** An analytical method of tracing iodine in high salinity brine was established based on As(III)-Ce<sup>4+</sup> catalytic spectrophotometry for determining iodine in the brine during ionic membrane caustic soda production. The consumption of arsenous acid and analysis time was obviously decreased with this method, while the linear range for iodine determination was extended to 1.5 mg/L with correlation coefficient  $r=0.9998$  and the detection limit was no more than 10  $\mu\text{g/L}$ . The recovery rate of iodine into the raw brine and refined brine by using the standard addition method, was 95.0%-104.0%, and the relative standard deviation (RSD) was less than 5%. The interference of normally coexisting ions such as  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  was not found obviously, unless the concentration of  $\text{H}_2\text{O}_2$  was larger than 2%. The proposed method is easy to operate and causes low pollution, so it is suitable for tracing iodine not only in brine during ionic membrane caustic soda production, but also in seawater and other brine samples with complex matrix.

**Key words:** As(III)-Ce<sup>4+</sup> catalytic spectrophotometry; brine; iodine; ionic membrane caustic soda

在离子膜烧碱生产的过程中, 盐水中碘含量超标 ( $\geq 0.2 \text{ mg/L}$ ) 将严重影响离子膜的使用寿命, 从而增加生产成本. 因此, 在生产过程中需要对进入电解槽盐水的碘含量进行适时分析检测. 值得注意的是, 原卤中碘以  $\text{I}^-$  的形式存在, 精盐水中碘以  $\text{IO}_3^-$  的形式存

在, 由于进入离子膜电解槽的精盐水中碘含量通常较低, 且卤水中含有高浓度的  $\text{NaCl}$ , 其对微量碘的测定将产生严重干扰, 目前尚未有卤水中微量碘分析相关的国家标准或行业标准. 此外, 我国有丰富的含碘卤水资源, 在碘的分离提取过程中, 也需要对碘含量进

收稿日期: 2016-07-25; 修回日期: 2016-12-22

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金计划项目 (20140511); 中国博士后科学基金项目 (2016M592828)

作者简介: 廖英 (1992—), 女, 四川内江人, 硕士研究生; 通信作者: 邓天龙, 教授, tldeng@tust.edu.cn

行分析测定. 因此,建立高效、快速、准确的卤水中微量碘的分析方法,对于保障离子膜烧碱生产中离子膜的安全,以及促进卤水中碘资源的开发利用具有重要意义.

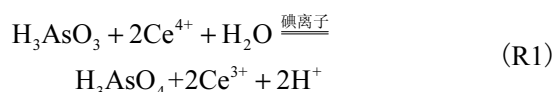
目前,测量碘的方法主要有容量法<sup>[1]</sup>、极谱法<sup>[2]</sup>、分光光度法<sup>[3]</sup>、电化学法<sup>[4]</sup>、色谱法<sup>[5]</sup>、原子发射光谱法<sup>[6]</sup>等. 卤水中常含有高浓度的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等离子,在采用上述方法对碘进行分析时,这些共存离子将会对低含碘卤水中碘的分析测定产生严重影响. 尽管 GB/T 13025.7—2012《制盐工业通用试验方法·碘的测定》<sup>[1]</sup>中规定了可采用硫代硫酸钠直接滴定和氧化还原滴定测定食盐中的碘,但当样品量有限,且卤水中碘含量极低时,该法的使用将会受到限制. 值得注意的是,由于碘离子对很多反应体系都有催化作用,使体系发生褪色或者明显的颜色变化,因此采用催化动力学间接测定痕量碘得到广泛应用,该法具有检出限低、操作简单快速、准确度高等优点.

针对催化动力学法,研究较多的为砷铈催化动力学分光光度法,如在 WS/T 107—2006《尿中碘的砷铈催化分光光度测定方法》<sup>[7]</sup>中,采用砷铈催化动力学分光光度法对尿中碘进行测定. 针对该法中毒性砷用量较大、线性范围窄的缺点,张亚平等<sup>[8]</sup>提出了改进方法,使线性范围拓展至 1.2 mg/L. 此外,陈炳灿等<sup>[9]</sup>利用上述方法测定了酱油中的碘;徐敏等<sup>[10]</sup>测定了水及蔬菜中痕量的碘;金贞淑等<sup>[11]</sup>测定了海带中的碘;乔正道<sup>[12]</sup>和涂建平<sup>[13]</sup>分别测定了食盐中的碘. 上述实验结果均表明砷铈催化动力学法具有较高的准确度和重现性. 但是,上述实验方法需要对样品进行消解,操作较繁琐. 同时,针对高盐度卤水中微量碘的分析,目前还未见相关报道. 此外,卤水中高浓度的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  等对测定的干扰情况需要进行详细考察. 鉴于此,本文详细研究卤水中微量碘的砷铈催化动力学测定方法,并通过线性范围、精密度、回收率等定量分析指标确定方法的可行性.

## 1 材料与方法

### 1.1 基本原理

样品中的碘被还原为碘离子( $\text{I}^-$ )后,碘离子催化砷铈氧化还原反应:



该反应中,若 As(III)浓度远大于  $\text{Ce}^{4+}$ 浓度,则在反应中可将其浓度看作不变, $\text{I}^-$ 作为催化剂参加反应后又恢复原状,因此该反应可看作一级反应,其反应速率可表示为

$$-\frac{d\rho(\text{Ce}^{4+})}{dt} = k\rho(\text{Ce}^{4+}) \quad (1)$$

对上式进行积分可得

$$\ln \rho(\text{Ce}^{4+})_t = kt + \ln \rho(\text{Ce}^{4+})_0 \quad (2)$$

式中: $\rho(\text{Ce}^{4+})_t$ 为  $t$ 时刻  $\text{Ce}^{4+}$ 质量浓度; $\rho(\text{Ce}^{4+})_0$ 为初始时刻  $\text{Ce}^{4+}$ 质量浓度.

由式(2)可知:在相同的反应时间  $t$ 内,反应物  $\text{Ce}^{4+}$ 瞬时质量浓度的对数值  $\ln \rho(\text{Ce}^{4+})_t$ 与  $k$ 成线性关系. 由于  $k$ 与  $\text{I}^-$ 质量浓度呈线性关系,因此  $\ln \rho(\text{Ce}^{4+})_t$ 与  $\text{I}^-$ 质量浓度  $\rho(\text{I}^-)$ 呈线性关系. 由于碘含量越高,式(R1)反应越快,相同时间内  $\text{Ce}^{4+}$ 溶液颜色越浅,因此通过以分光光度计于 400 nm 波长处测定  $\text{Ce}^{4+}$ 的吸光度,并以  $\text{Ce}^{4+}$ 吸光度的负对数为纵坐标,碘元素质量浓度为横坐标作图,可获得  $-\ln A - \rho(\text{I}^-)$ 标准曲线.

### 1.2 溶液的配制

0.038 mol/L 硫酸铈铵溶液:称取 2.40 g 硫酸铈铵溶于 70 mL 2.5 mol/L 硫酸中,用蒸馏水稀释并定容至 100 mL,保存于棕色容量瓶中. 0.05 mol/L 亚砷酸溶液:称取 0.65 g 亚砷酸钠和 2.50 g 氯化钠用少量蒸馏水溶解,缓慢加入 20 mL 2.5 mol/L 硫酸,冷却至室温后稀释至 100 mL,保存于棕色容量瓶中. 1.00 g/L 碘标准储备液:准确称取 0.168 6 g 碘酸钾基准物质于烧杯中,用少量蒸馏水溶解后转入 100 mL 棕色容量瓶中,用蒸馏水定容至刻度. 12.5 mg/L 碘中间液:移取 1.25 mL 1.00 g/L 碘储备液于 100 mL 棕色容量瓶中,用蒸馏水定容至刻度.

### 1.3 测定方法

准确移取 0.1、0.2、0.4、0.8、1.0 mL 12.5 mg/L 碘酸钾标准溶液于 5 个 25 mL 容量瓶中,用蒸馏水定容至刻度,配制成质量浓度分别为 0.05、0.1、0.2、0.4、0.5 mg/L 的系列碘酸钾标准溶液. 分别移取 0.25 mL 上述系列碘酸钾标准溶液和 0.25 mL 经适当稀释的盐水样品于 5 个 5 mL 带盖聚乙烯瓶中,分别加入 1 mL 蒸馏水并混匀. 将聚乙烯瓶按碘元素质量浓度由高到低顺序排列,向各瓶分别加入 2.5 mL 0.05 mol/L 亚砷酸溶液,混匀后在恒温下放置 15 min. 按碘元素质量浓度由高至低每隔 1 min 向各瓶加入 0.3 mL 0.038 mol/L 硫酸铈铵溶液. 从加入第

一瓶开始计时,反应一定时间后,将第一瓶放入 UV-2000 型紫外-可见分光光度计(尤尼克仪器有限公司)中,以水作参比在 400 nm 波长下测其吸光度. 当其吸光度在 0.15 ~ 0.20 范围时,记下数据. 此后,每隔 1 min 按碘元素质量浓度由高至低顺序测定样品吸光度.

## 2 结果与讨论

### 2.1 样品消解

在 WS/T 107—2006 《尿中碘的砷铈催化分光光度测定方法》<sup>[7]</sup>中,由于尿样品中可能含有复杂形态或结合态的碘化物,因此样品需在 100 °C 条件下经过硫酸铵消化后测定. 针对离子膜烧碱工艺中的盐水,由于碘元素存在形态简单,因此考察不对样品消解时的测定效果. 此外,为降低对环境的危害,开展了降低亚砷酸使用量实验. 对比标准系列消解和不消解时的线性关系,结果如图 1 所示.

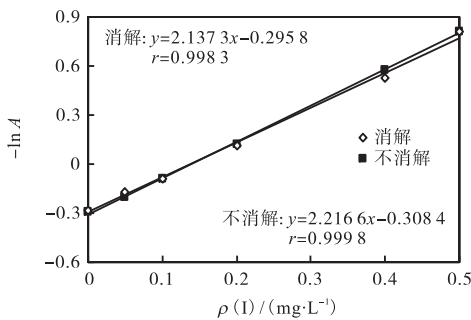


图 1 消解与未消解碘标准曲线对比

Fig. 1 Comparison of iodine standard curves with and without digestion

在样品前处理过程中发现,由于消解温度较高,因此对实验条件控制的要求较为苛刻. 此外,消解过程中样品易挥发损失,造成分析误差和重现性较差. 由图 1 可知:消解和未消解的碘标准曲线的线性相关系数( $r$ )分别为 0.998 3 和 0.999 8,即引入样品消解步骤对分析的线性相关性有一定的影响. 此外,在上述实验过程中,亚砷酸的使用量仅为 WS/T 107—2006 《尿中碘的砷铈催化分光光度测定方法》中的一半,因此减少亚砷酸的用量不会对测定产生显著影响.

### 2.2 标准曲线线性关系

卤水样品中碘含量通常较高,即使在碘含量要求较严格的离子膜烧碱生产工艺盐水中,碘元素质量浓度也通常大于 0.5 mg/L. 值得注意的是,在 WS/T

107—2006 《尿中碘的砷铈催化分光光度测定方法》中,标准曲线质量浓度范围较窄,仅为 0 ~ 0.3 mg/L,因而该标准方法在使用过程中具有一定的局限性. 在标准方法中,由于加入的亚砷酸量较大,碘元素质量浓度高时,反应速率较快,导致在加入硫酸铈铵后,溶液颜色很快消失,因此没有充分的时间进行批量样品测定. 在实验中发现,当减少亚砷酸加入量后,硫酸铈铵褪色速率明显降低. 因此,为拓展标准曲线线性范围,进行了 0 ~ 1.5 mg/L 标准系列溶液的测定,结果如图 2 所示.

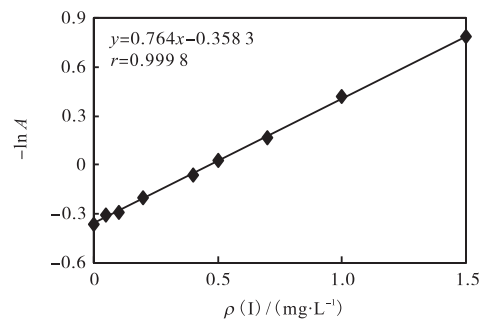


图 2 碘的标准曲线

Fig. 2 Standard curve of iodine

由图 2 可知:即使将碘元素质量浓度拓展到 1.5 mg/L,标准曲线仍具有较好的线性相关性,相关系数  $r$  达到 0.999 8. 当然,在碘元素质量浓度较高时,即使降低亚砷酸用量,硫酸铈铵的褪色速率仍然较快. 若样品数量较少,且碘含量较高时,特别是对于离子膜烧碱生产工艺盐水中碘在 1.5 mg/L 以内的样品,采用上述方法将具有明显的优势. 若样品量较多,通过适当降低标准系列浓度范围,并减少亚砷酸的用量来延缓硫酸铈铵褪色速率,可实现批量样品测定的目的.

### 2.3 加标回收实验

由于没有相关离子膜烧碱生产工艺盐水的标准参考物质,为考察不对盐水样品进行消解时测定的准确性,分别对原盐水和精盐水样品进行加标回收实验,结果见表 1.

表 1 加标回收实验结果

Tab. 1 Results of the determination of standard additions

样品	样品中碘质量/mg	加标量/mg	实测量/mg	回收率/%
原盐水	0.206	0.100	0.301	95.00
		0.200	0.397	95.50
精盐水	0.187	0.100	0.291	104.00
		0.200	0.379	96.00

由表 1 可知:对原盐水和精盐水进行两个浓度梯

度的加标回收实验,其回收率在 95.0% ~ 104.0% 范围内,表明方法具有较好的准确性,满足对微量组分定量分析的要求。

## 2.4 重现性

为了检验砷铈催化动力学法对卤水样品中微量碘测定的重现性,分别配制了低质量浓度(0.05 mg/L)和高质量浓度(0.50 mg/L)的含碘卤水,并进行了 9 次平行测定,结果见表 2。

表 2 方法的精密度实验结果

Tab. 2 Precision of the analytical method

次数	$\rho(\text{I})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	
	低质量浓度	高质量浓度
1	0.045	0.52
2	0.049	0.49
3	0.051	0.49
4	0.052	0.50
5	0.048	0.48
6	0.052	0.48
7	0.047	0.50
8	0.048	0.49
9	0.050	0.51

对表 2 中数据进行计算表明,对低浓度和高质量浓度含碘卤水测量的标准偏差(SD)分别为 0.024 mg/L 和 0.013 3 mg/L,相对标准偏差(RSD)分别为 4.82% 和 2.69%,表明砷铈催化动力学法对卤水中微量碘测定重现性好、精密度高。

## 2.5 检出限

在传统的分光光度法中, $A = k'C + b$ ,其检出限(DL)计算时以扣除空白值后的吸光度为 0.01 相对应的浓度值为检出限<sup>[13]</sup>,即

$$\text{DL} = \frac{(A+0.01)-b}{k'} - \frac{A-b}{k'} = \frac{0.01}{k'} \quad (3)$$

式中: $A$ 为溶液吸光度; $b$ 为分光光度法回归直线的截距; $k'$ 为斜率。

在砷铈催化动力学法中,由于采用吸光度的负对数进行计算,即采用 $-\ln A = k'C + b$ 进行回归计算,因此其检出限计算不能再采用传统的分光光度法检出限计算方法。若仍以扣除空白值后的吸光度为 0.01 相对应的浓度值为检出限时,有

$$\text{DL} = \frac{-\ln(A+0.01)-b}{k'} - \frac{-\ln A - b}{k'} = \frac{\ln \frac{A}{A+0.01}}{k'} \quad (4)$$

当代入空白样品测定的吸光度 1.976 进行计算,且标准曲线斜率取 0 ~ 1.5 mg/L 标准系列的斜率 0.765 6,式(4)的计算结果为 -0.006 6,绝对值为

0.006 6,也即检出限为 0.006 6 mg/L。若以表 2 中对 0.05 mg/L 碘溶液测定的标准偏差进行检出限计算,则 3 倍标准偏差所对应的碘元素质量浓度为 0.009 4 mg/L。由此可见,砷铈催化动力学法对卤水中碘进行测定具有很高的灵敏度,该测定方法满足痕量分析的要求。

值得注意的是,在砷铈催化动力学法中,随着标准系列溶液浓度的增加,其吸光度逐渐降低,采用不同标准系列点的吸光度代入式(4)进行计算,计算结果的绝对值随碘元素质量浓度的增加(吸光度逐渐降低)而明显增加,因此用空白样品测定的吸光度进行检出限计算,其值仅有参考意义。

## 2.6 干扰研究

### 2.6.1 卤水基体对测定的干扰

离子膜烧碱生产工艺的盐水中含有近饱和的 NaCl 和大量的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,为考察主要离子对砷铈催化动力学法测定微量碘的干扰,开展了主要共存离子的干扰研究。实验分别配制了碘含量相同,但 NaCl 和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  质量浓度不同的高、中、低 3 种基体卤水,并采用所建立的方法对碘元素质量浓度进行测定,结果见表 3。

表 3 基体对碘分析干扰实验结果

Tab. 3 Interference of matrix on iodine determination

基体种类	$\rho(\text{NaCl})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Na}_2\text{SO}_4)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{I})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		回收率/%
			真实值	实测值	
低浓度	50	5	0.200	0.197	98.50
中浓度	150	10	0.200	0.194	97.00
高浓度	200	15	0.200	0.191	95.50

由表 3 可知:卤水中 NaCl 和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  对微量碘的分析会产生一定影响,NaCl 和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  质量浓度越高,碘的回收率越低,但对含不同 NaCl 和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  质量浓度的卤水基体中碘进行测定,其回收率均大于 95%,表明卤水中主要共存  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  离子对砷铈催化动力学法测定微量碘的干扰影响不大。

### 2.6.2 $\text{H}_2\text{O}_2$ 对测定的干扰

在离子膜烧碱生产过程中,为消除电解用盐水中碘对离子膜的影响,常需要对碘进行净化。在碘净化时,通常需在原卤水中加入氧化剂将  $\text{I}^-$  氧化为  $\text{I}_2$ ,再采用其他分离技术(如空气吹出法、吸附法等)进行净化。吴刚等<sup>[14]</sup>在专利中公开了一种以  $\text{H}_2\text{O}_2$  等为氧化剂氧化  $\text{I}^-$ ,再采用吸附法净化离子膜烧碱原卤水中微量碘的方法。鉴于此,为考察  $\text{H}_2\text{O}_2$  对砷铈催化动力学法测定碘含量的影响,使用离子膜烧碱工艺原卤水,配制了不同  $\text{H}_2\text{O}_2$  质量分数的样品,并进行微量

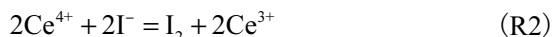
碘的砷铈催化动力学测定,结果见表4.

表4 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>对碘测定干扰实验结果

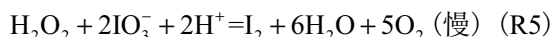
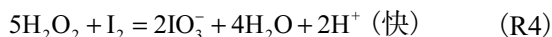
Tab. 4 Interference of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> on the determination of iodine

编号	w(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )/%	$\rho(I)/(mg \cdot L^{-1})$		回收率/%
		真实值	实测值	
1	0	1.54	1.54	100.00
2	0.5	1.53	1.52	99.35
3	1	1.52	1.55	101.97
4	2	1.51	1.60	105.96
5	5	1.46	2.29	156.85
6	10	1.39	3.31	238.13

砷铈催化动力学反应(R1)可拆分成两步反应:



H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>在溶液中可表现出氧化性,也可表现出还原性,在I<sub>2</sub>存在的情况下,存在以下反应:



反应(R4)和反应(R5)的总反应可表示为I<sub>2</sub>被H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>氧化为IO<sub>3</sub><sup>-</sup>,但由于溶液中含过量的H<sub>3</sub>AsO<sub>3</sub>,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>会先与H<sub>3</sub>AsO<sub>3</sub>发生氧化还原反应,导致H<sub>3</sub>AsO<sub>3</sub>的浓度降低,使得反应(R1)和反应(R2)的速率降低,同时也会使式(2)的前提条件不成立.当H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量越高,反应(R2)的反应速率受到抑制越大,溶液褪色越慢,导致计算获得的碘元素质量浓度越低.由表4可知,随着卤水中H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>质量分数的增加,碘的回收率反而逐渐变大,当H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>质量分数等于2%时,碘的回收率达到105.96%.因此,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>对砷铈催化动力学法测定卤水中微量碘的干扰机理,还需进行进一步研究.在实际样品分析过程中,为获得准确的分析结果,卤水样品中H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>质量分数需小于2%.

## 2.7 实际样品测定

运用所建立的方法分别对四川和陕西两地氯碱厂离子膜烧碱生产工艺盐水中微量碘进行了测定,结果见表5.

表5 实际样品中微量碘的测定

Tab. 5 Determining iodine in real samples

厂家	卤水种类	$\rho(I)/(mg \cdot L^{-1})$	
		实验测定值	工厂数据
四川某氯碱厂	原盐水	1.54	1.32 ~ 1.65
	精盐水	1.61	1.56 ~ 1.65
	淡盐水	2.24	2.19 ~ 2.27
陕西某氯碱厂	原盐水	0.61	0.59 ~ 0.63
	精盐水	0.55	0.52 ~ 0.57
	淡盐水	0.46	0.44 ~ 0.48

陕西某氯碱厂的电解用盐水为地下卤水,其碘含量较低.而四川某氯碱厂的电解盐水为地下卤水和原盐进行勾兑后的卤水,其碘含量相对较高.由表5数据可知:取自四川某氯碱厂的卤水中碘含量明显较高,该结果与工厂的原始数据一致,分析结果进一步说明了砷铈催化动力学法对卤水中微量碘分析的准确性.

## 3 结 语

通过对砷铈催化动力学分光光度法的研究,建立了卤水中微量碘的分析方法,在简化了实验操作和降低了环境污染的基础上,获得了快速、准确的微量碘分析方法,其线性范围可拓展至1.5 mg/L,相关系数*r*达到0.999 8.所建立的方法具有较高的灵敏度和准确性,其检出限小于10 μg/L,对离子膜烧碱生产工艺原盐水和精盐水中微量碘测定的回收率在95.0%~104.0%,相对标准偏差(RSD)小于5%.此外,卤水中常见高浓度Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>对测定不会造成显著的干扰,而H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>仅在质量分数高于2%时才会对测定产生明显的正干扰.对具体氯碱企业离子膜烧碱生产工艺盐水中碘的含量进行测定,测定结果进一步揭示了方法的可靠性和实用性.所建立的方法可广泛应用于离子膜烧碱生产工艺盐水(原盐水、精盐水、淡盐水),以及其他海卤水等复杂基体中微量碘的分析.

**致谢:**本研究还受到国家自然科学基金(U14076113)、天津市应用基础与前沿技术研究计划项目(15JCQNJC08300)资助,在此一并致谢!

## 参考文献:

- [1] 全国海湖盐标准化中心. GB/T 13025.7—2012 制盐工业通用试验方法·碘的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [2] 譙斌宗,杨元,陶锐. 痕量碘分析进展[J]. 中国卫生检验杂志,1998,8(5):317-321.
- [3] 李人宇,李咏梅,张成燕. 分光光度法测定食盐中碘含量方法的评述[J]. 中国地方病防治杂志,2008,23(2):105-107.
- [4] 冶保献,王民路,仰蜀薰. 离子缔合富集阴极溶出伏安法测定痕量碘:II. 以十六烷基三甲基溴化铵为离子缔合剂[J]. 分析化学,1991,19(8):955-958.
- [5] 单守尧. 海带碘含量的气相色谱测定[J]. 食品科学,1991(4):46-48.

(下转第65页)

- [J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(8): 183-188.
- [9] 朱齐丹, 荆丽秋, 毕荣生, 等. 最小误差阈值分割法的改进算法[J]. 光电工程, 2015, 37(7): 107-113.
- [10] 杨力, 李东新. 基于遗传算法的图像阈值分割的研究[J]. 信息技术, 2015(11): 116-120.
- [11] 孙丽媛, 杨鸿玉, 王汝梅. 图像形状匹配及特征识别在铁矿石熔点检测中的应用研究[J]. 工业控制计算机, 2010, 23(6): 31-32.
- [12] 卢蓉, 范勇, 陈念年, 等. 一种提取目标图像最小外接矩形的快速算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(21): 178-180.
- [13] 李洋, 李岳阳. 一种快速提取植物叶片最小外接矩形的算法[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2015, 14(3): 273-277.

责任编辑: 常涛

(上接第 40 页)

- [6] 陈治江, 王杏林. 利用碘的挥发性提高 ICP-AES 测定碘的灵敏度[J]. 分析化学, 1989, 17(9): 826-828.
- [7] 卫生部全国地方病寄生虫病标准委员会. WS/T 107—2006 尿中碘的铈铈催化分光光度测定方法[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2006.
- [8] 张亚平, 阎玉芹, 刘列钧, 等. 尿中碘的过硫酸铵消化-铈铈催化分光光度测定方法[J]. 中华地方病学杂志, 2013, 32(1): 95-100.
- [9] 陈炳灿, 唐洪, 王坤. 过硫酸铵消化-铈铈催化分光光度法测定酱油中碘[J]. 河南预防医学杂志, 2005, 16(6): 334-335.
- [10] 徐敏, 郝义. 催化动力学光度法测定痕量的碘[J]. 化学与黏合, 2007, 29(3): 223-225.
- [11] 金贞淑, 赵晔, 张力, 等. 催化动力学光度法测定痕量碘的研究[J]. 分析科学学报, 2002, 18(1): 86-87.
- [12] 乔正道. 简便催化动力学法测定加碘盐中的碘[J]. 中国地方病学杂志, 1990, 9(3): 180-183.
- [13] 涂建平. 催化动力学光度法测定食盐中碘含量[J]. 食品科学, 2002, 23(4): 114-117.
- [14] 吴刚, 李保山, 侯光胜, 等. 离子膜烧碱原料卤水中微量碘离子的脱除: 中国, 1807245A[P]. 2006-07-26.

责任编辑: 周建军

(上接第 60 页)

#### 参考文献:

- [1] Croitoru C, Nastase I, Bode F, et al. Thermal comfort models for indoor spaces and vehicles-Current capabilities and future perspectives[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 44(4): 304-318.
- [2] 谷正气, 申红丽, 杨振东, 等. 汽车空调风道改进及对乘员热舒适性影响分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2013, 36(8): 91-96.
- [3] Marcos D, Pino F J, Bordons C, et al. The development and validation of a thermal model for the cabin of a vehicle[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 66(1/2): 646-656.
- [4] 宋明毅, 吴伟烽, 李直. 汽车空调压缩机气阀运动规律模拟[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(12): 144-150.
- [5] 史文库, 祖庆华, 陈志勇, 等. 汽车空调压缩机怠速噪声诊断及拓扑优化[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2016, 46(3): 725-731.
- [6] 魏名山, 彭发展, 黄海圣, 等. 斜盘式及涡旋式压缩机对电动汽车热泵空调系统制热性能的影响[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(1): 13-18.
- [7] 谢洁飞, 李新华, 张艳来. 新型汽车空调用直线压缩机建模与分析[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (Volume 5). Piscataway: IEEE, 2010: 380-383.
- [8] 李辛沫. 一种低摩擦低泄漏新型旋转式空调压缩机的设计与分析[J]. 润滑与密封, 2007, 32(6): 103-105.
- [9] 田长青, 李先庭, 石文星. 轿车空调用斜盘式变排量压缩机性能研究与技术开发[C]//中国制冷学会 2009 年学术年会论文集. 北京: 中国制冷学会, 2009: 1-8.
- [10] 杨军, 陆平, 张利, 等. 新型全封闭旋转式 CO<sub>2</sub> 压缩机的开发及性能测试[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(3): 426-429.

责任编辑: 常涛