

分析与监测

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.16.023

碳酸钠-碳酸氢钠体系离子色谱法测定水中丙烯酸

杨璟爱, 关玉春, 赵莉, 韩少强, 王记鲁, 陈晨, 张亚尼
(天津市生态环境监测中心, 天津 300384)

摘要: 针对地下水、地表水、生活污水及工业废水等不同类型水样中丙烯酸含量的监测,建立了一种碳酸钠-碳酸氢钠体系离子色谱测定方法。分别优化了采样条件、样品前处理条件、色谱条件以及标准溶液保存条件。利用 IC-Na 柱、IC-Ag 柱、IC-Ba 柱和 C_{18} 柱净化水样,通过碳酸钠-碳酸氢钠淋洗液及 AS22 型色谱柱分离丙烯酸,以电导检测器测定。检出限为 0.008 mg/L;标准曲线线性相关系数 r 为 0.999 9;测定不同类型实际水样的加标回收率在 92.0% ~ 115% 之间;6 次平行测定相对标准偏差在 1.2% ~ 6.5% 之间。该方法具有检出限低、标准曲线线性好、准确度高、精密度好、步骤简单、分析效率高、实验成本低等优点,能够适应不同类型复杂基质水样中丙烯酸的测定,在环境监测领域具有良好的应用前景。

关键词: 丙烯酸; 离子色谱; 碳酸钠-碳酸氢钠体系

中图分类号: TU99 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)16-0130-07

Determination of Acrylic Acid in Water by Sodium Carbonate - Sodium Bicarbonate System Ion Chromatography

YANG Jing-ai, GUAN Yu-chun, ZHAO Li, HAN Shao-qiang, WANG Ji-lu,
CHEN Chen, ZHANG Ya-ni

(Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300384, China)

Abstract: A sodium carbonate - sodium bicarbonate system ion chromatography method was established for detection of acrylic acid in groundwater, surface water, domestic sewage, industrial wastewater and other water samples. Sample collection conditions, sample pretreatment conditions, chromatographic conditions and preservation conditions of standard solution were optimized respectively. The water samples were purified by IC-Na column, IC-Ag column, IC-Ba column and C_{18} column, and acrylic acid was separated by sodium carbonate - sodium bicarbonate eluent and AS22 chromatographic column and finally determined by a conductivity detector. The detection limit was 0.008 mg/L, and the correlation coefficient of the standard curve was 0.999 9. The recovery rates of different types of actual water samples were 92.0% - 115%, and the relative standard deviations of six parallel determinations were 1.2% - 6.5%, indicating that the method had the advantages of low detection limit, good linearity of standard curve, high accuracy, good precision, simple steps, high analysis efficiency and low experimental cost. The method can adapt to acrylic acid determination in different types of water samples

and has a good application prospect in the field of environmental monitoring.

Key words: acrylic acid; ion chromatography; sodium carbonate – sodium bicarbonate system

丙烯酸是一种挥发性有机物,在精细化工领域具有举足轻重的地位,是重要的有机合成原料及合成树脂单体。然而,聚合反应制造工艺可能会导致含有丙烯酸单体的工业废水排入河流以及近岸海域,造成水体污染。丙烯酸排入水中会使水体酸化,导致有根植物、细菌和脊椎动物减少,严重的会导致湖泊、河流中鱼类减少或死亡^[1]。如丙烯酸沾在人的皮肤上,则对皮肤具有腐蚀及刺激性。另外,丙烯酸具有中等毒性,其急性毒性 $L(E)C_{50}$ 值甚至能够达到 0.1 mg/L ^[2]。

目前国内没有测定水中丙烯酸的国标或行标,但现行国标《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)、《石油化学工业污染物排放标准》(GB 31571—2015)以及《合成树脂工业污染物排放标准》(GB 31572—2015)已规定了丙烯酸的标准限值,因此亟待建立一种高效、简便、准确且适用于不同类型水样的丙烯酸测定方法。

当前已有测定方法包括溴滴定-容量分析法、高效液相色谱法、高效液相色谱-质谱法或气相色谱法^[3-6]。其中,溴滴定-容量分析法检出限较高。由于丙烯酸极性较大,在常规 C_{18} 柱上几乎无保留,另外,其测定波长为 210 nm ,此条件下受其他有机物干扰严重,所以高效液相色谱法并不理想^[7]。高效液相色谱-质谱法虽然检出限低且选择性好,但仪器价格昂贵,维护成本高,不利于推广应用^[8]。丙烯酸酸性较强,在气相色谱中需要用极性柱进行分离,响应值较低,检出限较高^[9],而丙烯酸在水中解离较强,采用离子色谱法分离效果好且检出限低,能避免水样中其他有机物的干扰,适用于复杂基质水样中的丙烯酸测定^[3,7,10]。

本研究结合实验条件研究以及多种类型实际水样研究,建立了碳酸钠-碳酸氢钠体系离子色谱法测定地下水、地表水、生活污水及工业废水等不同类型水样中丙烯酸的方法。

1 实验部分

1.1 仪器、试剂与材料

ICS-1100 型离子色谱仪(美国戴安公司); AS-DV型自动进样器(美国戴安公司)。

丙烯酸(纯度 $\geq 98\%$,百灵威科技有限公司);

实验用水均为电阻率 $> 18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 的超纯水。

IC-Na、IC-Ag、IC-Ba、IC-RP 和 C_{18} 型前处理柱(1 g , Thermo Fisher Scientific); 醋酸纤维素、聚醚砜以及尼龙针式微孔滤膜过滤器($0.45 \mu\text{m}$, 天津市津腾有限公司)。

1.2 标准溶液的配制

丙烯酸标准贮备液($1\,000 \text{ mg/L}$):移取 1.020 g 丙烯酸(98%),转移至 $1\,000 \text{ mL}$ 容量瓶中,以实验用水定容,混匀,于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保存 3 个月。

丙烯酸标准中间液(50.0 mg/L):移取 5.00 mL 丙烯酸标准贮备液于 100 mL 容量瓶中,以实验用水定容,混匀,于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保存 1 个月。

丙烯酸标准使用液(5.00 mg/L):移取 10.0 mL 丙烯酸标准中间液于 100 mL 容量瓶中,以实验用水定容,混匀,于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保存 14 d。

1.3 样品的采集和保存

用棕色玻璃瓶采集样品,采样时瓶中不留顶空,于 $4\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷藏避光保存,48 h 内测定。

1.4 样品前处理

活化前处理柱 $10\sim 30 \text{ min}$,以 2 mL/min 以下的速度,将待测样品依次用 IC-Ag 柱、IC-Ba 柱、IC-Na 柱和 C_{18} 柱过滤,弃掉前 3 mL 滤出液,将后续的滤出液用 $0.45 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤,待测。

1.5 色谱条件

AS22 分离柱($4 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$); AG22 保护柱($4 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$);抑制型电导检测器;抑制器电流 20 mA ;进样量 $200 \mu\text{L}$;流速 0.8 mL/min ;柱温 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$;池温 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$;淋洗液浓度 $1.8 \text{ mmol/L CO}_3^{2-} - 1.7 \text{ mmol/L HCO}_3^{-}$ 。

2 结果与讨论

2.1 色谱条件的优化

2.1.1 淋洗液种类的选择

常见检测阴离子的淋洗液包括碳酸钠、碳酸氢钠、氢氧根和四硼酸钠等种类。

碳酸钠淋洗液一般情况下离子强度较强,而丙烯酸属于弱保留离子,离子强度较强的淋洗液会使其迅速洗脱而难以与水样中常见的 F^{-} 分离。另外,由于水样中常见的 SO_4^{2-} 属于强保留离子,若不能将其洗脱, SO_4^{2-} 会对下一针样品的色谱峰产生干

扰。然而离子强度较弱的四硼酸钠、碳酸氢钠和氢氧化根淋洗液短时间内难以洗脱 SO_4^{2-} , 分析效率较低。碳酸钠-碳酸氢钠 ($\text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^-$) 混合溶液离子强度适中, 可用于同时洗脱弱保留离子和强保留离子, 并且当改变碳酸钠和碳酸氢钠的浓度比例时, 可改变淋洗液的强度。

因此最终确定采用碳酸钠-碳酸氢钠淋洗液测定丙烯酸。

2.1.2 淋洗液浓度的选择

在不同淋洗液浓度下, 分别测定丙烯酸、 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 及 SO_4^{2-} 混合标准溶液, 测定结果如图1所示。

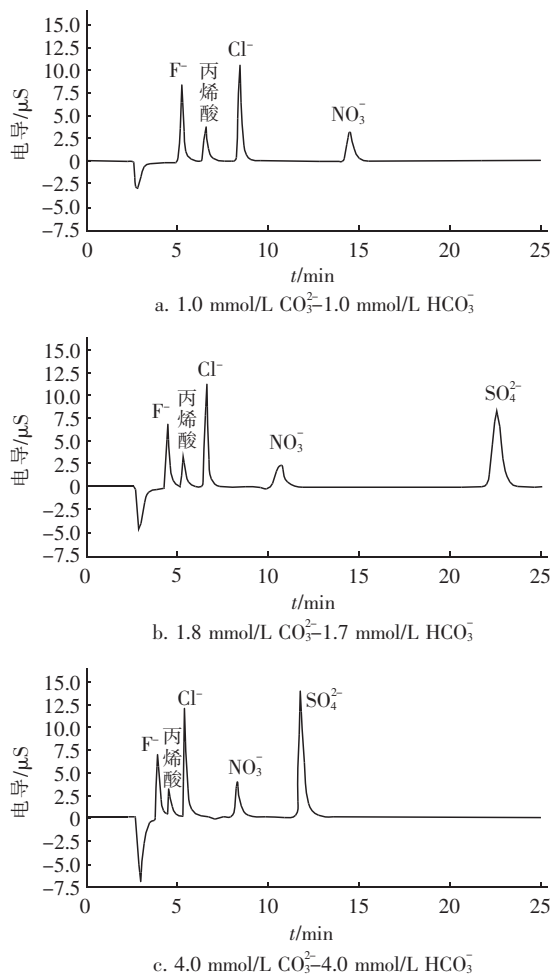


图1 淋洗液浓度条件实验色谱图

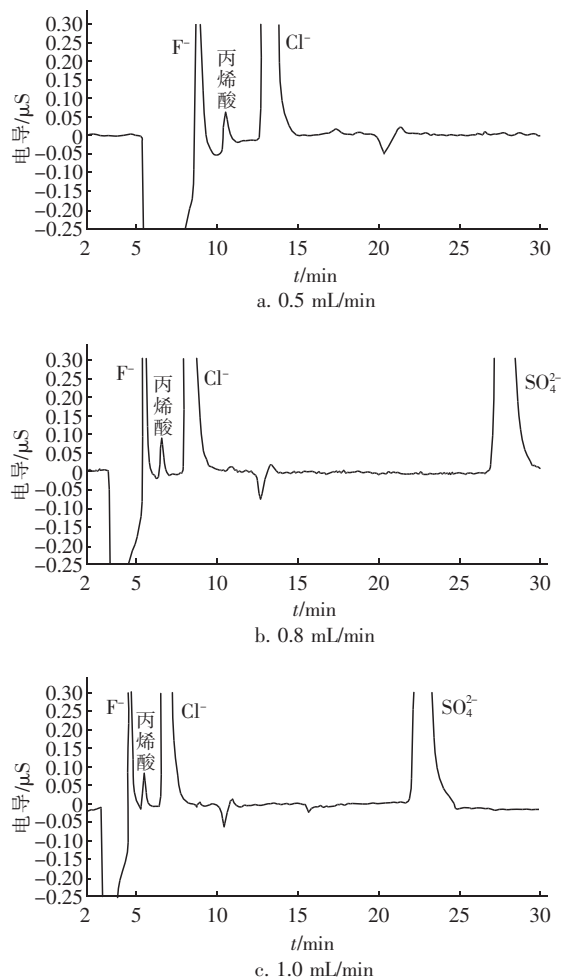
Fig. 1 Chromatogram of eluent concentration experiment condition

由图1可见, 当使用较高浓度 (4.0 mmol/L $\text{CO}_3^{2-} - 4.0$ mmol/L HCO_3^-) 淋洗液时, 丙烯酸与 F^- 分离度较低, 当使用较低浓度 (1.0 mmol/L $\text{CO}_3^{2-} -$

1.0 mmol/L HCO_3^-) 淋洗条件时, 分析时间长, 水样中常见干扰物质 SO_4^{2-} 等强保留离子在 50 min 出峰。当使用中等浓度 (1.8 mmol/L $\text{CO}_3^{2-} - 1.7$ mmol/L HCO_3^-) 淋洗条件时, 分析时间较短, 水样中常见干扰物质 SO_4^{2-} 等强保留离子在 22 min 出峰, 丙烯酸与 F^- 分离度较高, 最终确定采用此淋洗液浓度。

2.1.3 淋洗液流速的选择

在 0.5 ~ 1.5 mL/min 流速下测定实际样品中丙烯酸浓度, 结果如图2所示。可见, 当流速为 0.5 mL/min 时, 丙烯酸以及常见干扰物质 SO_4^{2-} 出峰时间较晚, SO_4^{2-} 保留时间为 44 min, 为保证 SO_4^{2-} 不干扰下一针进样, 需要将其洗脱, 因此导致样品分析时间相对较长; 当流速在 1.0 ~ 1.5 mL/min 时, 系统压力较高, 且丙烯酸与 F^- 分离度较低; 当流速为 0.8 mL/min 时, 丙烯酸与 F^- 分离度最高, 丙烯酸及 SO_4^{2-} 出峰较早, 样品分析时间相对较短, 因此确定流速为 0.8 mL/min。



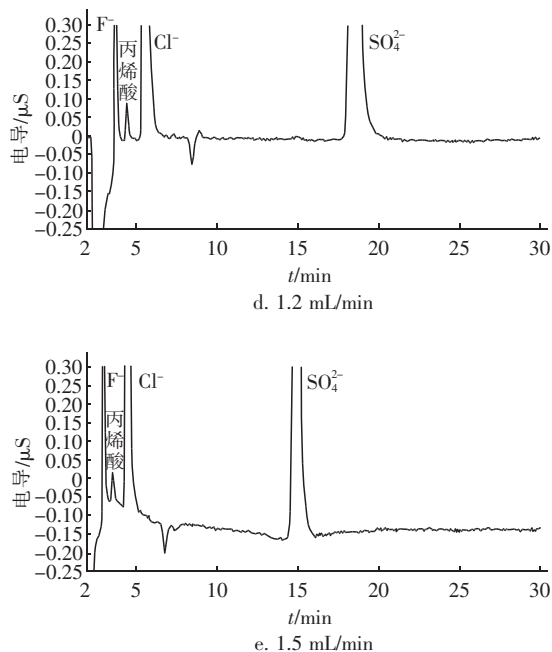


图2 流速条件实验色谱图

Fig. 2 Chromatogram of flow rate condition experiment

2.2 采样及样品保存条件的优化

2.2.1 采样条件的优化

由于丙烯酸具有遇光易自聚的性质,需全程避光保存,故选用棕色瓶采样。另外,丙烯酸属于挥发性有机物,因此采用不易吸附有机物的玻璃材质棕色采样瓶,采样时需要满瓶采样,不留顶上空间。

2.2.2 样品保存时间的选择

取丙烯酸浓度分别为 0.60、1.62、5.16 mg/L 的实际水样,用玻璃瓶在 4 °C 避光保存实际水样,考察 168 h 内保存时间对丙烯酸浓度变化的影响,结果见图 3。

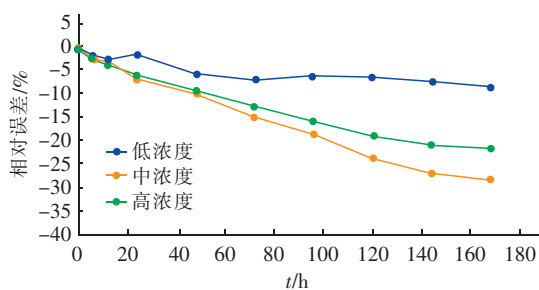


图3 样品保存时间实验结果

Fig. 3 Results of sample storage time experiment

由图 3 可见,保存 168 h 内样品中丙烯酸浓度的相对标准误差在 -8.4% ~ -28% 之间;48 h 内浓度变化为 -5.7% ~ -9.9%。以实际样品浓度变化 $\leq \pm 10\%$ 为依据,确定样品保存期限为 48 h。

2.2.3 样品保存温度的选择

在 4 ~ 40 °C 下用玻璃瓶保存高、中、低浓度实际水样 48 h,考察不同保存温度对实际样品中丙烯酸浓度的影响,结果如图 4 所示。可见,用玻璃瓶在 4 ~ 10 °C 条件下避光保存 48 h 内,丙烯酸浓度变化在 $\pm 10\%$ 以内,因此确定样品保存条件为棕色玻璃瓶于 4 ~ 10 °C 冷藏避光保存 48 h 以内。

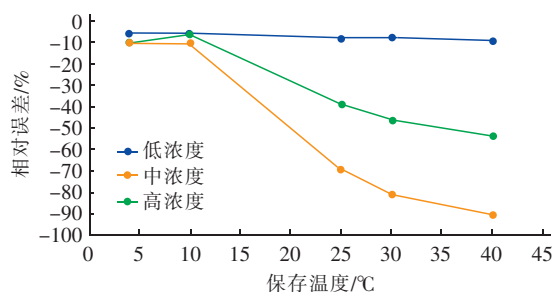


图4 样品保存温度实验结果

Fig. 4 Results of sample storage temperature experiment

2.2.4 样品保存 pH 值条件的选择

取地下水、地表水、生活污水和石化废水的丙烯酸加标水样进行样品保存 pH 值影响实验,丙烯酸浓度分别为 0.50、1.00、5.00 及 18.0 mg/L。分别于酸性、中性、碱性的条件下避光保存样品 48 h,考察各样品中丙烯酸在不同 pH 值下保存的稳定性,结果如图 5 所示。可见,在 pH 值为 2.66 ~ 11.68 的条件下避光保存 48 h 内,各水样丙烯酸浓度变化均在 $\pm 10\%$ 以内,因此样品采集后不需要调节 pH 值,直接在 4 ~ 10 °C 冷藏避光保存 48 h 以内即可。

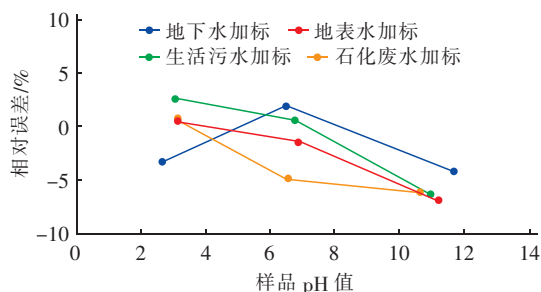


图5 样品保存 pH 值实验结果

Fig. 5 Results of sample storage pH experiment

2.3 前处理条件的优化

2.3.1 滤膜材质的选择

选用醋酸纤维素、聚醚砜以及尼龙等 3 种亲水性好的微孔滤膜材料进行实验,考察过滤速度以及丙烯酸的加标回收率,以检验不同材质微孔滤膜的适用性。实验结果证明醋酸纤维素、聚醚砜以及尼

龙材质的微孔滤膜均可使水样快速过滤且加标回收率在 95% 以上,满足测定要求。

2.3.2 前处理柱的选择

采用不同前处理柱对丙烯酸加标实际水样进行处理,考察丙烯酸的回收率,结果如图 6 所示。可见,用 C_{18} 柱、IC-Na 柱、IC-Ag 柱和 IC-Ba 柱处理后,丙烯酸的加标回收率为 91.3% ~ 98.9%;用 IC-RP 柱处理后,丙烯酸的加标回收率为 82.3%。这是由于使用 IC-RP 柱处理酸性水样后,存在样品中丙烯酸等小分子有机酸的回收率降低的现象。因此采用 C_{18} 柱、IC-Na 柱、IC-Ag 柱和 IC-Ba 柱对样品进行前处理,分别用于去除实际水样中疏水性有机物、重金属和过渡金属以及高浓度的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 。

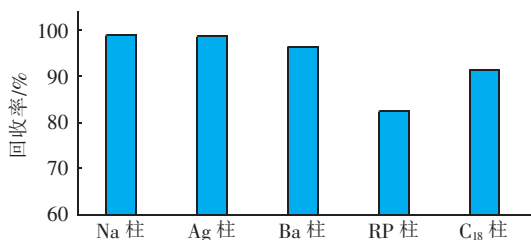
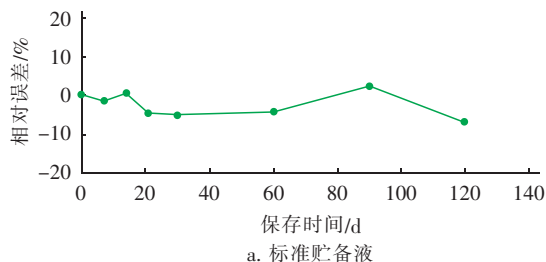


图 6 前处理柱选择实验结果

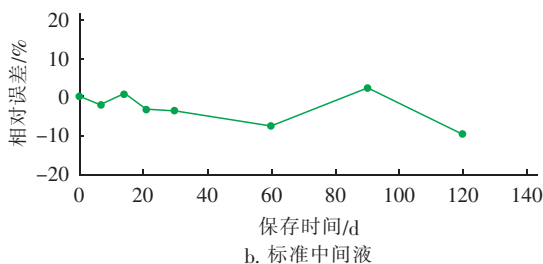
Fig. 6 Results of pretreatment column selection experiment

2.4 标准溶液保存条件的优化

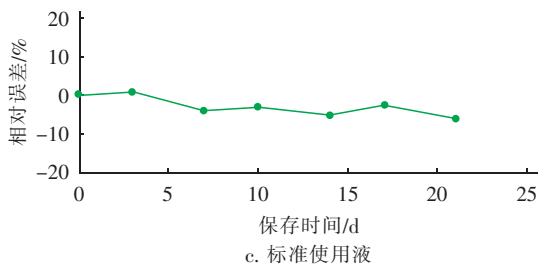
在 4℃ 避光条件下保存丙烯酸标准贮备液、标准中间液和标准使用液,考察保存时间对其浓度变化的影响,结果见图 7。可见,标准贮备液的浓度在 120 d 内相对误差为 -6.8% ~ 2.2%;在 90 d 内相对误差为 -4.9% ~ 2.2%。标准中间液的浓度在 120 d 内相对误差为 -9.2% ~ 2.5%;在 30 d 内相对误差为 -3.6% ~ 0.9%。保存 21 d 内,标准使用液浓度的相对误差为 -6.1% ~ 0.6%;在 14 d 内相对误差为 -4.9% ~ 0.6%。以标准溶液浓度变化在 $\pm 5\%$ 以内为依据,确定标准贮备液保存期限为 3 个月,标准使用液保存期限为 1 个月,标准使用液保存期限为 14 d。



a. 标准贮备液



b. 标准中间液



c. 标准使用液

图 7 丙烯酸标准溶液保存时间实验结果

Fig. 7 Experimental results of storage time of acrylic acid standard solution

2.5 方法性能

配制浓度为 0.010 ~ 1.00 mg/L 的丙烯酸标准系列,得到标准曲线回归方程和相关系数 r ;平行测定 7 次浓度为 0.030 mg/L 的丙烯酸空白加标溶液得到检出限,以 4 倍检出限作为方法测定下限,结果见表 1。实验结果表明,丙烯酸的标准曲线线性良好,测定下限满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)、《石油化学工业污染物排放标准》(GB 31571—2015)及《合成树脂工业污染物排放标准》(GB 31572—2015)的监测要求。

表 1 标准曲线及检出限

Tab. 1 Standard curve and detection limit

项 目	结果
回归方程	$y = 0.232x - 0.000294$
相关系数 r	0.9999
检出限/($mg \cdot L^{-1}$)	0.008
测定下限/($mg \cdot L^{-1}$)	0.032
GB 31571—2015 限值/($mg \cdot L^{-1}$)	5
GB 31572—2015 限值/($mg \cdot L^{-1}$)	5
GB 5749—2006 限值/($mg \cdot L^{-1}$)	0.5

按照优化的实验方法测定丙烯酸浓度在 0.051 ~ 8.28 mg/L 范围的不同类型实际水样,计算 6 次平行测定的相对标准偏差和加标回收率,分别考察方法的精密度和准确度,结果见表 2。由表 2 可见,丙烯酸测定结果的相对标准偏差为 1.2% ~ 6.5%;加标回收率为 95.3% ~ 114%,方法精密度和准确度较高。

表 2 精密度和准确度实验结果
Tab.2 Results of precision and accuracy experiment

项 目		地下水		地表水		生活污水		工业废水	
		原样	加标样	原样	加标样	原样	加标样	原样	加标样
测定结果/ (mg · L ⁻¹)	1	未检出	0.047	未检出	0.107	0.100	0.192	3.64	8.14
	2		0.053		0.100	0.095	0.187	3.67	8.36
	3		0.048		0.094	0.100	0.188	3.80	8.42
	4		0.050		0.095	0.092	0.188	3.76	8.27
	5		0.055		0.090	0.096	0.207	3.81	8.23
	6		0.054		0.092	0.097	0.192	3.72	8.24
相对标准偏差/%		—	6.5	—	6.3	3.2	3.9	1.9	1.2
平均值/(mg · L ⁻¹)		—	0.051	—	0.096	0.967	0.192	3.73	8.28
加标量/(mg · L ⁻¹)		0.050		0.100		0.100		4.00	
加标回收率/%		102		96.0		95.3		114	

2.6 实际样品的测定

分别采集并测定地下水、地表水、生活污水以及工业废水等不同类型实际水样,测定水样中丙烯酸的含量,测定结果如表 3 所示。可见,在电镀、合成

树脂和石化行业废水以及生活污水中均检出了丙烯酸;不同水样的丙烯酸加标回收率在 92.0% ~ 115% 之间,证明方法适用于不同类型水样中丙烯酸的测定。

表 3 实际样品测定结果
Tab.3 Actual sample experiment results

项 目	工业园区监测井地下水	排污河水	生活污水	电镀废水	合成树脂废水	石化废水
实际样品/(mg · L ⁻¹)	未检出	未检出	0.088	0.194	1.62	5.16
加标样品/(mg · L ⁻¹)	0.046	0.048	0.203	0.408	3.53	9.98
加标量/(mg · L ⁻¹)	0.050	0.050	0.100	0.200	2.00	5.00
加标回收率/%	92.0	96.0	115	107	95.5	96.4

3 结论

建立了一种碳酸钠-碳酸氢钠体系离子色谱法快速测定地下水、地表水、生活污水及工业废水等不同类型水样中丙烯酸的方法。该方法检出限低至 0.008 mg/L;标准曲线线性好,相关系数 *r* 达到 0.999 9;方法精密度好,实际水样平行测定相对标准偏差在 1.2% ~ 6.5% 之间;方法准确度高,实际水样加标回收率在 92.0% ~ 115% 之间。该方法对采样、样品保存、标准溶液保存、样品前处理以及色谱条件等进行了优化,具有分析速度快、前处理简单、所用试剂绿色环保等优点,适用于不同类型水样中丙烯酸的测定,为制定环境监测领域水中丙烯酸测定标准提供了有力的数据支撑。

参考文献:

[1] LIU Y,LIU C Y,YANG G P,*et al.* Biogeochemistry of dimethylsulfoniopropionate, dimethylsulfide and acrylic acid in the Yellow Sea and the Bohai Sea during autumn [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 13 (1) : 127 -

139.
[2] SVERDRUP L E,KÄLLQVIST T,KELLEY A E,*et al.* Comparative toxicity of acrylic acid to marine and freshwater microalgae and the significance for environmental effects assessments [J]. *Chemosphere*, 2001,45(4/5):653 - 658.
[3] 赵京田,席宏波,宋广清,等. 石化废水中几种常见有机酸的测定[J]. *工业水处理*,2012,32(9):72 - 74, 80.
ZHAO Jingtian, XI Hongbo, SONG Guangqing, *et al.* Determination of several common organic acids in petrochemical wastewater [J]. *Industrial Water Treatment*,2012,32(9):72 - 74,80(in Chinese).
[4] CASELLA I G, PIERRI M, CONTURSI M. Determination of acrylamide and acrylic acid by isocratic liquid chromatography with pulsed electrochemical detection[J]. *Journal of Chromatography A*,2006,1107 (1/2):198 - 203.
[5] TAYLOR G E, GOSLING M, PEARCE A. Low level determination of *p*-toluenesulfonate and benzenesulfonate esters in drug substance by high performance liquid

- chromatography/mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2006, 1119(1/2): 231–237.
- [6] CZECH Z, PELECH R. Use of pyrolysis and gas chromatography for the determination of acrylic acid concentration in acrylic copolymers containing carboxylic groups[J]. Polymer Testing, 2008, 27(7): 870–872.
- [7] 马丽娜. HPLC 法测定无盐咪唑啉中丙烯酸含量[J]. 日用化学品科学, 2016(7): 34–36.
- MA Lina. Determination of acrylic acid in salt-free imidazoline by high performance liquid chromatography [J]. Detergent & Cosmetics, 2016(7): 34–36 (in Chinese).
- [8] 谢永洪, 郑昌杰, 杨坪, 等. 离子色谱法同时测定水中的甲酸、乙酸、丙烯酸和氯乙酸[J]. 四川环境, 2011, 30(3): 24–28.
- XIE Yonghong, ZHENG Changjie, YANG Ping, *et al.* Simultaneous determination of formic acid, acetic acid, acrylic acid and chloroacetic acid in water by chromatography of ions [J]. Sichuan Environment, 2011, 30(3): 24–28 (in Chinese).
- [9] 吴泽学. 气相色谱法分析丙烯腈反应器流出物中丙烯腈、乙腈、丙烯醛、丙烯酸[J]. 安徽化工, 2019, 45(2): 122–124, 126.
- WU Zexue. Analysis of acrylonitrile, acetonitrile, acrolein and acrylic acid in the effluent of acrylonitrile reactor by gas chromatography [J]. Anhui Chemical Industry, 2019, 45(2): 122–124, 126 (in Chinese).
- [10] 石海宁, 王辉, 陶丽芝, 等. 阴离子交换离子色谱法测定乳酸催化制备的丙烯酸[J]. 色谱, 2010, 28(6): 628–631.
- SHI Haining, WANG Hui, TAO Lizhi, *et al.* Determination of acrylic acid catalyzed by lactic acid by anion exchange ion chromatography [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2010, 28(6): 628–631 (in Chinese).
-
- 作者简介:** 杨璟爱 (1992 –), 女, 天津人, 硕士, 工程师, 主要从事环境样品常规污染物的理化分析以及有机污染物色谱、质谱分析工作。
E-mail: yja216@163.com
收稿日期: 2021–03–14
修回日期: 2021–05–03

(编辑: 孔红春)

(上接第129页)

- [4] 刘凯, 王海燕, 马名杰, 等. 温度对城市污水厂尾水反硝化 MBBR 深度脱氮的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(6): 877–886.
- LIU Kai, WANG Haiyan, MA Mingjie, *et al.* Influence of temperature on nitrogen removal from wastewater treatment plant effluent by denitrification MBBR [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(6): 877–886 (in Chinese).
- [5] 高飞亚, 郭庆英, 余浩, 等. 反硝化深床滤池在一级 A 提标项目中的应用及运行效果[J]. 中国给水排水, 2019, 35(6): 63–66.
- GAO Feiya, GUO Qingying, YU Hao, *et al.* Application and operation performance of denitrification deep-bed filter in upgrading project for first class A level criteria [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(6): 63–66 (in Chinese).
-
- 作者简介:** 郑伟波 (1989 –), 男, 浙江仙居人, 硕士, 工程师, 主要从事工业废水及市政污水处理工程设计、施工及调试工作。
E-mail: huankepp@163.com
收稿日期: 2020–07–21
修回日期: 2020–08–12

(编辑: 衣春敏)