

分析与监测

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2023. 12. 025

离子色谱法同时测定水中6种可溶性阳离子含量

柳 玲, 赵 倩, 张 毅

(陕西省环境科学研究院, 陕西 西安 710061)

摘 要: 为准确测定水中可溶性阳离子含量,对流动相配比、流速及进样量等离子色谱仪色谱条件进行了优化改进。利用 Dionex ICS-1100 离子色谱仪,选择亲水性强的 Ion Pac CS12A 阳离子交换柱(250 mm×4 mm)作为分离柱,采用 22.0 mmol/L 甲基磺酸为流动相,流速为 1.0 mL/min,进样量为 25 μ L,可快速准确地同时测定水中 Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等阳离子含量,在 13 min 内能够快速完成检测,分析效率较常规离子色谱法提高了 28%。优化后的方法线性相关性好($r>0.999$),检出限低(0.01~0.02 mg/L),精密度高(RSD 为 0.2%~3.2%),加标回收率范围为 90.0%~107.3%,有证标准物质测定结果在其置信区间之内,相对误差范围为 2.4%~6.2%,测定结果准确,适合批量样品中阳离子的检测。

关键词: 离子色谱法; 可溶性阳离子; 水质样品; 改进优化

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)12-0149-06

Ion Chromatography for Simultaneous Determination of 6 Kinds of Soluble Cations in Water

LIU Ling, ZHAO Qian, ZHANG Yi

(Shaanxi Academy of Environmental Sciences, Xi'an 710061, China)

Abstract: To accurately determine the content of soluble cations in water, the testing conditions of ion chromatograph such as ratio of mobile phase, flow velocity and injection volume were optimized. The contents of the cations such as Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} in water could be rapidly and accurately determined simultaneously by Dionex ICS-1100 ion chromatograph under the following testing conditions: Ion Pac CS12A cation exchange column (250 mm×4 mm) with strong hydrophilicity as the separation column, methyl sulfonic acid with concentration of 22.0 mmol/L as the mobile phase, flow velocity of 1.0 mL/min and injection volume of 25 μ L. The detection was completed within 13 min, and the analytical efficiency was improved by 28% compared with conventional ion chromatography. The optimized method had good linear correlation ($r>0.999$), low detection limit (0.01–0.02 mg/L) and high precision (RSD 0.2%–3.2%). The recovery rates ranged from 90.0% to 107.3%. The determination results of certified reference substances were within the confidence interval, and the relative error range was 2.4%–6.2%, indicating that the method was accurate and suitable for detection of cations in batch samples.

Key words: ion chromatography; soluble cation; water sample; improvement and optimization

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF05-10)

水质分析是环境监测中的重要部分,地表水、地下水、工业废水、生活污水、饮用水和海水等样品中无机阴阳离子和有机酸都可用离子色谱法(IC)测定^[1-4]。阳离子(Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+})的测定方法除了IC法之外,钾、钠、钙、镁金属离子的国标检测方法还有火焰原子吸收光度法(FAAS)、电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)、滴定法和重量法等^[5];铵盐的测定方法还有光度法;锂的测定还有电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)和ICP-OES等。FAAS不能同时测定多种金属离子,而且分析过程要加入金属化合物掩蔽剂,ICP-OES和ICP-MS虽然能同时测定多种组分但是使用和维护成本较高^[6-7];滴定法、重量法和分光光度法分析过程复杂耗时、易受干扰,而且所用试剂具有一定的低毒性,对人体健康有害,也容易造成环境二次污染。因此,建立并推广快速高效、绿色环保的阳离子检测方法十分重要。IC法具有操作方便、选择性好、灵敏度高和准确度好等优点,但目前仍存在共存离子干扰无法定性、检出限不理想、无法达到EPA推荐的限量质量浓度($1.0 \mu\text{g/L}$)等问题^[8-9]。

本研究选用Ion Pac CS12A阳离子分离柱, Ion Pac CS12A保护柱,采用甲基磺酸(MSA)溶液等度淋洗,优化离子色谱分析条件,以实现不同浓度范围水样中阳离子的高精度检出。建立的检测方法可同时快速测定不同水质中6种阳离子,该方法适用范围广、前处理简单、多组分同时测定、灵敏度高、检测速度快、费用低、废液无二次污染,是水质阳离子分析的首选方法。

1 材料与方法

1.1 仪器及试剂

Dionex ICS-1100离子色谱仪, Ion Pac CS12A阳离子分离柱($250 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$), Ion Pac CS12A保护柱($50 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$), CERS 500自身再生抑制器, AS-DV自动进样器,淋洗液自动发生器; Milli-Q Reference超纯水仪。

Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 多元素标准溶液(Accustandard Inc), Li^+ (205205), Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 标准物质(202617,生态环境部标准物质研究所); IC-RP预处理柱、IC-Ag预处理柱、 C_{18} 预处理柱(Thermo Fisher)。国产10 mL一次性医用注射器, $0.45 \mu\text{m}$ 水相过滤头。

1.2 离子色谱条件

以22.0 mmol/L甲基磺酸(MSA)为淋洗液等度洗脱,流速为1.0 mL/min,通过电化学自身再生抑制器(抑制电流为59 mA)降低背景电导,利用抑制电导检测器检测,进样量为25 μL ,柱温30 $^{\circ}\text{C}$,柱压1 320~1 468 psi(1 psi=6 895 Pa)。

1.3 样品前处理

对较洁净的地表水、地下水和饮用水样品,用0.45 μm 水相过滤头过滤后直接进样;对生活污水水样,采用IC-RP预处理柱去除有机大分子物质,再用0.45 μm 水相过滤头过滤后进样分析;对工业废水水样,需先判定废水特征污染物,水样经稀释后再选择IC-Ag和 C_{18} 预处理柱处理,不同的预处理柱可以串联处理后再用0.45 μm 水相过滤头过滤后进样分析。IC-RP预处理柱使用前需用甲醇活化处理,再用纯水清洗^[10]。所有样品均用聚乙烯瓶于4 $^{\circ}\text{C}$ 以下冷藏,避光保存。

1.4 样品的测定

使用市售有证标准物质按比例稀释配制离子色谱专用标准混合使用液,用标准使用液按比例稀释配制离子色谱专用不同浓度梯度标准工作液(0.1、0.5、1.0、2.5、5.0、10.0、25、50 mg/L)。用标准溶液的浓度对相应的测量响应值绘制标准工作曲线,待各元素校准曲线的相关系数 $r \geq 0.995$ 时,将经过前处理的样品分别装入AS-DV自动进样管中,启动色谱仪,待基线平稳后进样分析。定量方法采用外标法,各离子色谱峰的保留时间与对应离子标准物质的保留时间对照定性;用峰面积定量。同时用超纯水(电阻率18.25 $\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$)做空白实验。

2 结果与分析

2.1 色谱柱的选择

Ion Pac CS12A柱($250 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$)属于填充弱酸功能基的阳离子交换分离柱,也是一种中等容量的羧酸官能化的阳离子交换柱,可实现复杂样品的高效、快速分离,同时该柱一次进样可在多种复杂基质中实现碱金属和碱土金属阳离子、 NH_4^+ 的快速分离,有利于高浓度样品的检测,应用范围比较广泛^[11-12]。因此选择亲水性强的Ion Pac CS12A阳离子交换柱作为分离柱。

2.2 淋洗液浓度的优化

实验先后对流动相配比、流速及进样量等色谱

条件进行改进优化,采用22.0 mmol/L 甲基磺酸为流动相,流速为1.0 mL/min,进样量为25 μ L时,可使6种可溶性阳离子完全分离。流动相甲基磺酸与纯水的配比对分析结果影响较大。实验先采用20.0 mmol/L 甲基磺酸作为淋洗液,在柱温30 $^{\circ}$ C、淋洗液流速1.0 mL/min时,18 min内完成6种阳离子(Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+})多元素混合标准溶液的全分析,但 Na^+ 和 NH_4^+ 两种离子不能完全分离(呈M型), Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 分离度也不是很理想,并且出现峰形前倾,基线噪声较大,影响分析结果。在不改变其他参数条件下,采用22.0 mmol/L 甲基磺酸为淋洗液,阳离子 Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的保留时间分别为3.604、4.230、4.797、5.864、9.480和11.730 min,在13 min内可使6种阳离子的标准物质色谱峰有效分离,达到准确定量的效果(见图1),比常规标准方法(分析时间18 min)的分析效率提高28%。

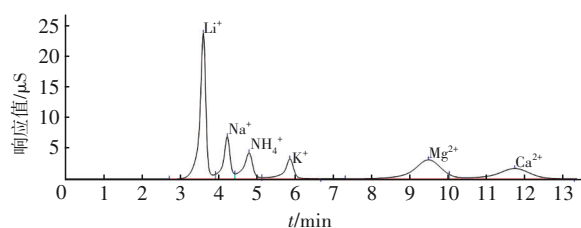


图1 6种阳离子标准色谱图

Fig.1 Standard chromatograms of the 6 kinds of soluble cations

2.3 水质样品前处理方法的选择

前处理方法的选择对分析结果影响很大,甚至决定实验成败。复杂的样品有可能损坏仪器或者污染离子色谱柱,导致目标离子保留时间缩短、色谱峰畸形、分辨率和重现性较低以及基线不稳定等问题,从而影响样品测定结果的准确性、降低分析方法的灵敏度,甚至无法进行色谱分析,同时缩短色谱柱和抑制器等部位的寿命^[13-14]。样品前处理技术一直是离子色谱中比较薄弱的环节,主要原因是IC对常见离子的高灵敏度及选择性。因此,针对不同的样品寻找简单、快速、高效的前处理方法,已成为目前IC分析的前沿课题和重要研究方向之一。IC的前处理方法包括膜处理法、固相萃取法、分解处理法、浸出法以及特定样品前处理法等^[15]。固相萃取是应用最广泛的一种方法^[16-17],对不同溶液中的污染物,可以分别利用反相、离子交换、螯合树脂

等处理,也可以利用常规的固相萃取法和固相微萃取法,固相微萃取法用于离子色谱中更为方便,而且一个固相微萃取柱可以多次使用,降低分析成本。一般情况下,对于清洁水样只需0.22~0.45 μ m滤膜过滤去除颗粒物后简单处理或者不用处理直接进样分析^[18]。对于未知浓度水样需要稀释100~1 000倍并进行前处理后进样分析。当复杂基体的稀释水样中其他离子质量浓度大于1 mg/L时,用固相萃取(SPE)小柱进行处理可以达到保护色谱体系的目的。样品中疏水性化合物尤其是不饱和化合物和芳香化合物可用IC-RP预处理柱进行处理;过渡金属离子和碳酸根离子可用IC-H和 C_{18} 预处理小柱进行处理;氯离子可用IC-Ag预处理柱进行处理;硫酸根离子可用IC-Ba预处理柱进行处理^[19]。

2.4 方法评价

2.4.1 相关系数及检出限

将混合标准使用液用纯水稀释成不同质量浓度的标准系列,在已优化的色谱分离条件下进行分析,以各阳离子的质量浓度为横坐标,对应的峰面积响应值为纵坐标绘制标准曲线,结果见表1。可见,6种阳离子中标准曲线方程相关系数 r 最小的为 K^+ (0.999 3),符合离子色谱标准方法曲线相关系数 $r \geq 0.995$ 的要求。由于 NH_4^+ 多原子离子的特殊性,在数据处理时 NH_4^+ 曲线拟合方式选择平方类型更理想一些,其相关系数能够满足标准方法要求,其他离子曲线拟合方式选择线性类型能够满足标准要求。

依据《环境监测分析方法标准制订技术导则》(HJ 168—2020),空白试验中未检出目标物质时,对于多组分的分析方法以5倍的方法检出限浓度加标,对加标浓度为0.1 mg/L的样品平行测定9次,根据公式方法检出限(MDL)= $t \times S$, $t=2.896$,计算方法检出限和测定下限,结果见表1。可见,优化后的方法检出限范围为0.01~0.02 mg/L,测定下限范围为0.04~0.08 mg/L,与《水质 可溶性阳离子(Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})的测定 离子色谱法》(HJ 812—2016)标准方法检出限(0.01~0.03 mg/L)和测定下限(0.04~0.12 mg/L)相比,优化后的方法有更低的检出限和测定下限范围。这主要是因为优化后的检测方法各阳离子洗脱时间缩短,相邻峰之间分离度变小,基线波动对测定样品总峰面积的影响较小^[20]。

表 1 可溶性阳离子相关系数及检出限
Tab.1 Correlation coefficient and detection limit of soluble cations

阳离子	线性方程	拟合类型	相关系数 r	优化方法检出限/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	优化方法测定下限/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	标准方法检出限/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	标准方法测定下限/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
Li^+	$y=0.896\ 1x+0.018\ 4$	线性	0.999 9	0.01	0.04	0.01	0.04
Na^+	$y=0.310\ 6x+0.009\ 6$	线性	0.999 5	0.02	0.08	0.02	0.08
NH_4^+	$y=0.211\ 1x^2+0.040\ 9$	平方	0.999 5	0.02	0.08	0.02	0.08
K^+	$y=0.216\ 3x-0.122\ 0$	线性	0.999 3	0.01	0.04	0.02	0.08
Ca^{2+}	$y=0.323\ 3x+0.034\ 5$	线性	0.999 8	0.01	0.04	0.03	0.12
Mg^{2+}	$y=0.546\ 5x-0.057\ 0$	线性	0.999 8	0.01	0.04	0.02	0.08

2.4.2 精密度

采用优化后色谱条件对低 (0.25 mg/L)、中 (2.50 mg/L)、高 (10.0 mg/L) 三种浓度的标准样品分别平行测定 6 次, 计算测定结果的平均值、相对标准偏差(RSD), 以验证方法精密度。结果表明, 6 种阳离子的空白加标 RSD 范围为 0.2%~3.2%, 与标准方法 HJ 812—2016 中 RSD 范围 0.1%~7.0% 相比,

优化后的方法测定结果的精密度更高。

2.4.3 方法准确度

取 50 mL 的实际工业废水水样进行加标回收实验, Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 加标溶液的浓度均为 500 mg/L。同时对有证标准物质 Li^+ (205205) 和 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} (202617) 平行测定 6 次, 考察方法准确度, 结果见表 2。

表 2 加标回收率及有证标准物质测试结果
Tab.2 Recovery rates and the results of certified reference substances

阳离子	试样测定均值/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	加标体积/mL	加标量/ μg	加标试液浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	加标样品测定值/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	回收率/%	标准方法回收率/%	标准物质测定均值/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	真值/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	置信区间/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	相对误差/%
Li^+	2.46	0.26	130	2.6	5.03	98.8	89.1~102.7	1.67	1.74	1.66~1.82	4.5
Na^+	5.93	0.60	300	6.0	12.0	101.2	84.0~104.4	1.45	1.36	1.25~1.47	6.2
NH_4^+	3.29	0.30	150	3.0	6.51	107.3	75.7~110.1				
K^+	2.62	0.25	125	2.5	5.15	101.2	90.2~112.2	0.794	0.799	0.762~0.836	2.4
Ca^{2+}	10.08	1.00	500	10.0	19.10	90.0	81.7~107.4	1.92	1.99	1.89~2.09	4.3
Mg^{2+}	4.51	0.50	250	5.0	9.10	91.8	89.7~112.9	0.418	0.405	0.383~0.427	4.7

由表 2 可知, 采用优化后的方法测定 6 种阳离子实际样品的加标回收率范围为 90.0%~107.3%, 标准方法 HJ 812—2016 中回收率范围为 75.7%~112.9%, 优化后的方法回收率均不小于 90.0%。有证标准物质的测定结果均在置信区间范围内, 相对误差范围为 2.4%~6.2%, 表明优化后的方法测定结果准确可靠。

2.5 实际样品中阳离子含量分析

分别采集地表水、地下水、生活污水和工业废水 4 种类型的实际水样, 按照样品前处理方法进行处理, 采用优化后的分析方法对 4 种水样中 6 种可溶性阳离子进行了定性与定量分析。由测定结果可知, 4 种实际水样中 6 种可溶性阳离子均得到了很好的分离, 6 种可溶性阳离子保留时间的 RSD 为 0.14%~0.36%, 小于 5%, 表明优化后的色谱条件分

析不同水质 6 种阳离子比较稳定, 此方法重复性好, 适用于不同类型水样中 6 种可溶性阳离子的分析。地表水、地下水和生活污水中除 Li^+ 和 NH_4^+ 未检出之外, 其他 4 种阳离子均被检出, 其检出浓度趋势为 $\text{Ca}^{2+}>\text{Mg}^{2+}>\text{Na}^+>\text{K}^+$ 。生活污水中的 Ca^{2+} 浓度最高, 其次为地表水, 工业废水中 Ca^{2+} 浓度最低。工业废水中 6 种阳离子均被检出, 除 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 外, 其他 4 种离子的浓度相对较高, 因此, 分析工业废水等复杂基体样品时需要做好样品前处理, 以免污染色谱柱。

3 结论

建立了离子色谱法同时快速测定水中 6 种阳离子含量的方法, 测定结果精密度和准确度高, 前处理和操作步骤更加简便, 可有效降低仪器受污染的可能并延长色谱柱使用寿命, 分析过程更加快速,

可在13 min内完成分析,对大批量水质样品的分析极具优势,具有较好的实用和推广价值。

参考文献:

- [1] 宋卫得,杨立明,李兆杰,等. 电导抑制-梯度淋洗离子色谱法同时测定啤酒中多种有机酸和阴离子[J]. 化学研究与应用,2018,30(3):426-431.
SONG Weide, YANG Liming, LI Zhaojie, *et al.* Simultaneous determination of various organic acids and anions in beer by gradient elution ion chromatography with suppressed conductivity detection [J]. Chemical Research and Application, 2018, 30 (3) : 426-431 (in Chinese).
- [2] 柳玲,郑海,高晓庆,等. 离子色谱法同时测定地下水中多种阴离子含量的研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014,25(3):237-240.
LIU Ling, ZHENG Hai, GAO Xiaoqing, *et al.* Study on measuring anions content in underground water by use of ion-chromatography [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25 (3) : 237-240 (in Chinese).
- [3] 宋卫得,许美玲,高尧华,等. 离子色谱法同时测定果汁中20种有机胺、生物胺和阳离子[J]. 分析试验室, 2020,39(5):590-595.
SONG Weide, XU Meiling, GAO Yaohua, *et al.* Simultaneous determination of twenty organic amine, biogenic amines and cations in fruit juice by ion chromatography [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2020,39(5):590-595(in Chinese).
- [4] 闫春辉,徐凌云,钱文虎,等. 离子色谱法测定不同地区家庭饮用井水中的阴、阳离子[J]. 理化检验(化学分册),2015,51(2):211-214.
YAN Chunhui, XU Lingyun, QIAN Wenhui, *et al.* IC determination of anions and cations in household drinking well water from different regions [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2015,51(2):211-214(in Chinese).
- [5] 殷丽,张飞,唐溢浩,等. 大气降水中钾钠钙镁测定方法的比对[J]. 环境监测管理与技术,2013,25(5):60-62.
YIN Li, ZHANG Fei, TANG Yitian, *et al.* Method comparison of the determination of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} in atmospheric precipitation [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2013, 25 (5) : 60-62(in Chinese).
- [6] 陈金发. NexION 350X电感耦合等离子体质谱仪的使用及故障处理[J]. 冶金分析,2021,41(1):92-97.
CHEN Jinfa. Use and fault handling of NexION 350X inductively coupled plasma mass spectrometer [J]. Metallurgical Analysis, 2021, 41 (1) : 92-97 (in Chinese).
- [7] 罗全迁,霍世欣. 离子色谱法同时测定高纯试剂中痕量甲胺、二甲胺、三甲胺和6种阳离子[J]. 化学分析计量,2022,31(3):48-52.
LUO Quanjian, HUO Shixin. Simultaneous determination of trace monomethylamine, dimethylamine, trimethylamine and six cations in high purity reagents by ion chromatography [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2022, 31 (3) : 48-52 (in Chinese).
- [8] 张运衡,林昀. 离子色谱法测定水中六种可溶性阳离子及注意事项[J]. 化工设计通讯,2022,48(2):42-43,96.
ZHANG Yunheng, LIN Yun. Determination of six soluble cations in water by ion chromatography and points for attention [J]. Chemical Engineering Design Communications,2022,48(2):42-43,96(in Chinese).
- [9] 黄雨榴,李小倩,方玲,等. 改进离子色谱法测定水样中高氯酸盐、氯酸盐和亚氯酸盐[J]. 环境科学与技术,2017,40(5):126-130.
HUANG Yuliu, LI Xiaoqian, FANG Ling, *et al.* An improved ion chromatography method for determination of perchlorate, chlorate and chlorite in water [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40 (5) : 126-130(in Chinese).
- [10] 袁宏宇,王欣泽,沈剑,等. 固相萃取-微波衍生化-GC-MS法同时测定水中6种雌激素物质[J]. 化工环保,2020,40(2):218-224.
YUAN Hongyu, WANG Xinze, SHEN Jian, *et al.* Simultaneous determination of six kinds of estrogens in water by SPE-microwave derivatization-GC-MS [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2020, 40 (2):218-224(in Chinese).
- [11] 张良雨,王小兵,李启艳,等. 离子色谱法测定中药保健酒中锰的含量[J]. 理化检验(化学分册),2018,54(7):813-815.
ZHANG Liangyu, WANG Xiaobing, LI Qiyang, *et al.* IC determination of manganese in traditional Chinese medicine health wine [J]. Physical Testing and Chemical Analysis(Part B: Chemical Analysis), 2018, 54 (7): 813-815(in Chinese).

- [12] 程琛,刘佳俊,林曼利,等. 离子色谱法测定家庭饮用水中阴阳离子[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2018,34(5):1-6.
CHENG Chen, LIU Jiajun, LIN Manli, *et al.* Determination of anions and cations in household drinking water by ion chromatography [J]. Journal of Hebei North University (Natural Science Edition), 2018, 34(5):1-6(in Chinese).
- [13] SLINGSBY R, KISER R. Sample treatment techniques and methodologies for ion chromatography [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2001, 20 (6/7) : 288-295.
- [14] 李进. 离子色谱分析中样品预处理方法[J]. 四川化工, 2014, 17(2):40-43.
LI Jin. Sample preparation methods for ion chromatographic analysis [J]. Sichuan Chemical Industry, 2014, 17(2):40-43(in Chinese).
- [15] 丁晓静,牟世芬. 离子色谱中的样品前处理新技术[J]. 环境化学, 2001, 20(5):507-516.
DING Xiaojing, MOU Shifen. Recent advances of sample pretreatment techniques in ion chromatography [J]. Environmental Chemistry, 2001, 20 (5) : 507-516 (in Chinese).
- [16] HENDERSON I K, SAARI-NORDHAUS R, ANDERSON J M. Sample preparation for ion chromatography by solid-phase extraction[J]. Journal of Chromatography A, 1991, 546:61-71.
- [17] SAARI-NORDHAUS R, NAIR L M, ANDERSON J M. Elimination of matrix interferences in ion chromatography by the use of solid-phase extraction disks [J]. Journal of Chromatography A, 1994, 671:159-163.
- [18] JACKSON P E. Ion chromatography in environmental analysis [J]. Encyclopedia of Analytical Chemistry, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a0835>.
- [19] 杨璟爱,关玉春,韩少强. 固相萃取—离子色谱法测定多种水样中丙烯酸[J]. 化工环保, 2022, 42(1): 101-106.
YANG Jing' ai, GUAN Yuchun, HAN Shaoqiang. Determination of acrylic acid in various water sample by solid phase extraction-ion chromatography [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2022, 42 (1):101-106(in Chinese).
- [20] 张晓明. 离子色谱法同时测定复方电解质眼内冲洗液中不同阳离子含量[J]. 应用化工, 2019, 48(3): 736-739.
ZHANG Xiaoming. Simultaneous determination of different cations content of inorganic salt in compound electrolyte intraocular irrigating solution by ion chromatography [J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(3):736-739(in Chinese).

作者简介:柳玲(1982-),女,宁夏隆德人,硕士,高级工程师,主要从事环境监测与环境工程研究工作,曾获陕西省第三届环境监测大比武个人三等奖、陕西省环境保护科学技术三等奖2项,及“陕西省环境监测技术标兵”和“巾帼建功标兵”称号。

E-mail: nxliuling@126.com

收稿日期:2022-04-08

修回日期:2022-04-25

(编辑:孔红春)

加强水土保持, 打造绿水青山