

离子色谱技术特点及其在环境与食品领域的应用

乐胜锋¹, 王尉^{1,2}, 高峡^{1,2}, 赵新颖^{1,2*}

- (1. 北京市理化分析测试中心, 有机材料检测技术与质量评价北京市重点实验室, 北京 100089;
2. 北京市科学技术研究院分析测试技术重点实验室, 北京 100089)

摘要: 离子色谱技术作为绿色化学技术的代表之一, 具有灵敏度高、选择性好、同时测定多组分和环境友好等优点。本文介绍了离子色谱技术的3个主要特点, 接着对国内环境与食品领域离子色谱技术相关国家标准进行分类总结。最后, 结合实例介绍了离子色谱技术通过环境监控、水质分析、食品成分分析、药物杂质确认等领域的广泛应用, 已成为复杂基体中超痕量离子态化合物分析的有效工具。但是, 离子色谱技术仍需不断深入和拓宽其应用领域, 加快技术标准化工作, 进一步凸显其特殊的应用价值。

关键词: 离子色谱技术; 环境; 食品; 技术标准

Characteristics of ion chromatography technology and its application in environmental and food fields

LE Sheng-Feng¹, WANG Wei^{1,2}, GAO Xia^{1,2}, ZHAO Xin-Ying^{1,2*}

- (1. Beijing Centre for Physical and Chemical Analysis, Beijing Key Laboratory of Organic Materials Testing Technology & Quality Evaluation, Beijing 100089, China; 2. Beijing Academy of Science and Technology Key Laboratory of Analysis and Testing Technology, Beijing 100089, China)

ABSTRACT: Ion chromatography, as one of the representatives of green chemical technology, has advantages of high sensitivity, good selection, simultaneous determination of multicomponent and environment friendliness. This paper presented the characteristics of ion chromatography and classified and summarized its domestic application standards in environmental and food fields. Then, it illustrated that it had become an effective tool for the analysis of super trace compound in complex matrixes, introduced the wide application of ion chromatography with some living samples in related areas, such as environmental monitoring, water quality analysis, food component analysis and drug impurity confirmation. However, ion chromatography technology still needs to continuously deepen and broaden its application fields, accelerate the technical standardization work, so as to further highlight its special application value.

KEY WORDS: ion chromatography; environment; food; technical standard

1 引言

离子色谱(ion chromatography, IC)技术作为液相色谱

技术的分支, 始于1947年 Spedding 和 Powell 的稀土金属元素分离应用工作。随着1975年 Small 等^[1]成功解决了用抑制电导检测器连续检测柱流出物的难题, 开创了真正意

基金项目: 北京市科学技术研究院萌芽计划项目(2016-01)

Fund: Supported by Embryonic Program from the Beijing Academy of Science and Technology (2016-01)

*通讯作者: 赵新颖, 博士, 副研究员, 主要研究方向为生物医药分析。E-mail: zhaoxinying_123@sina.com

*Corresponding author: ZHAO Xin-Ying, Ph.D, Associate Researcher, Beijing Academy of Science and Technology Key Laboratory of Analysis and Testing Technology, Beijing 100089, China. E-mail: zhaoxinying_123@sina.com

义上的离子色谱技术,离子色谱法开始独立于液相色谱法,成为一门新的色谱分离技术。1979年,Gjerde等^[2]用弱电解质作流动相,因流动相本身的电导率较低,不必用抑制柱就可以用电导检测器直接检测。这种不使用抑制柱的离子色谱法称作单柱离子色谱法(single column IC)或非抑制型离子色谱法(non-suppressed IC)。而使用抑制柱的离子色谱法称作双柱离子色谱法(double column IC)或抑制型离子色谱法(suppressed IC)^[3]。目前,狭义上的离子色谱法是指以低交换容量的离子交换树脂为固定相对离子性物质进行分离,用电导检测器连续检测流出物电导变化的一种色谱方法。随着检测技术的发展,安培检测器、紫外检测器等多种检测器相继应用于离子色谱分析,其定义也在与时俱进。本文简述了离子色谱技术分类,并对其在主要的环境与食品两个应用领域相关国家标准进行了归纳总结。此外,对离子色谱技术在实际工作的应用情况进行了总结。

2 离子色谱技术分类

目前,按照分离方式的不同,离子色谱法分为离子交换色谱、离子排斥色谱和离子对色谱3类。其中应用最多的为离子交换色谱。离子交换色谱主要用于无机阴离子(卤素离子、卤氧化合物、含氧磷化合物、含硫化合物、含氮氟化合物、硅化合物、硼化合物、非金属含氧阴离子、金属含氧阴离子)、有机酸(羧酸、芳香酸、氨基酸)和糖类(单糖、寡糖、糖醇、糖聚合度)、阳离子(碱金属、碱土金属、胺类、重金属和过渡金属)的分离^[4]。

除离子交换色谱外,有机弱酸以及无机含氧酸根如硼酸根、碳酸根和硫酸根中的有机酸等主要采用离子排斥色谱^[5,6]。它通常采用高交换容量的磺化H型阳离子交换树脂为填料,以稀盐酸为淋洗液。可与离子交换色谱联用,可实现强酸中弱有机酸的分离检测^[4]。

此外,离子对色谱也是离子色谱技术的一种^[7]。用于阴离子分离的对离子是烷基胺类如氢氧化四丁基铵、氢氧化十六烷基三甲烷等,用于阳离子分离的对离子是烷基磺酸类,如己烷磺酸钠,庚烷磺酸钠等。对离子的非极性端亲脂,极性端亲水,其烷基键越长则离子对化合物在固定相的保留越强,在极性流动相中,往往加入一些有机溶剂,以加快淋洗速度。此法主要用于分离多种分子量大的阴、阳离子,特别是带局部电荷的大分子(如表面活性剂)和疏水性的阴、阳离子(如大分子量的脂肪酸、烷基磺酸盐、水可溶性维生素和金属氟化物配合物等)^[8,9]。

3 离子色谱技术特点

离子色谱技术特点之一是可以使用在线淋洗液发生器来产生淋洗液,即只加水的离子色谱^[10]。迄今为止能够在线产生的淋洗液有6种,包括LiOH、NaOH、KOH、

K₂CO₃、KHCO₃/K₂CO₃以及甲烷磺酸MSA。通过控制电流和流速,可产生准确而具有重现性的淋洗液,改善等度和梯度淋洗的实验结果的重现性,在不同的实验室,由不同的人员操作仪器,可以得到完全重现的结果。

离子色谱技术特点之二是搭配了选择性较广的检测系统,除传统的电导检测器外,还有可用于糖类和氨基酸类有机化合物测定的积分安培检测器^[11-13],以及可用于过渡金属、稀土元素和环境中有有机污染物检测的紫外可见光检测器^[14,15]和荧光检测器^[16,17]。

离子色谱技术特点之三是可与其他技术联用,如电感耦合等离子体原子发射光谱法(inductive coupled plasma emission spectrometer-atomic emission spectrometer, ICP-AES)^[18-20]、电感耦合等离子体质谱法(inductive coupled plasma emission spectrometer-mass spectrometry, ICP-MS)^[21,22]、质谱法(mass spectrometry, MS)^[23,25]等,可以发挥其选择性好的优势,消除基体干扰,提高检测灵敏度,是复杂基体中超痕量有害离子分析的有效工具^[26]。

4 环境与食品领域的离子色谱技术标准现状

环境和食品检测分析是离子色谱技术的两大传统应用领域。迄今为止,国际官方公布的有关环境部分离子色谱标准分析方法中,美国国家环保局(EPA)标准15项,美国国家职业安全卫生研究所(NIOSH)标准10项,美国材料与试验协会(ASTM)标准8项,职业安全与健康标准8项,美国水和废水标准分析方法(SMEWW)2项,国际标准(ISO)1项,美国分析化学家协会(AOAC)标准2项。此外,有关食品部分离子色谱标准分析方法为美国分析化学家协会(AOAC)标准5项。上述标准主要用于水中常见阴阳离子的分析测试。

国内方面,环境和食品领域离子色谱技术标准共计30项,环境标准17项,食品标准13项。环境领域标准略多于食品领域,这一趋势也符合离子色谱技术的发展规律。从技术标准归口分类来看,国家标准4项,环境行业标准9项,农业行业标准3项,检验检疫行业6项,地方标准8项。相比离子色谱技术的基础应用,其相关标准的制定进程还需要不断加快,以适应不断变化的检测需求。而且,这些标准多数方法仍使用进口离子色谱柱进行分析,离子色谱技术标准化也为国内离子色谱柱开发领域的发展提供了机遇和挑战。国内环境与食品领域中离子色谱技术标准分布情况见表1。

5 目前的工作

目前为止,离子色谱技术测试平台为环境监控、水质分析、食品成分分析、药物杂质确认等领域提供了准确的样品测试服务,测试样品共计200余个,检测项目涵盖常规阴离子、铵根离子、有机酸、糖类化合物、生物胺等。

5.1 环境领域测试应用

5.1.1 环境水体水质监测

环境水体中常见无机阴阳离子是常规环境监测的重要内容, 离子色谱法是其检测的首选方法。可用于饮用水、地下水、工业废水、生活污水和海水等样品的分析(见图 1)^[27]。分析检测目标物有常见阳离子(锂离子、铵离子、钠离子、

钾离子、镁离子、钙离子和钡离子)、常见阴离子(氟离子、氯离子、溴离子、硝酸根、亚硝酸根、磷酸根、硫酸根)、溴酸盐、亚氯酸盐、氯酸盐、卤代乙酸、硫离子、氰化物、多聚磷酸盐等(见图 2)。测试分析的样品只需经过滤和稀释等简单前处理, 一次进样同时测定多种成分, 同时避免使用有毒试剂污染环境。其检测限最低可达微克级, 准确度高。

表 1 国内环境与食品领域中离子色谱技术标准分布情况
Table 1 Distribution of ion chromatography standards in environment and food fields in China

序号	标准分类	名称
1	国家标准	GB/T 11733-1989 居住区大气中硫酸盐卫生检验标准方法 离子色谱法
		GB 13580.5-1992 大气降水中氟, 氯, 亚硝酸盐, 硝酸盐, 硫酸盐的测定离子色谱法
		GB/T 20188-2006 小麦粉中溴酸盐的测定 离子色谱法
		GB/T 21533-2008 蜂蜜中淀粉糖浆的测定 离子色谱法
		HJ 549-2009 环境空气和废气 氯化氢的测定 离子色谱法(暂行)
		HJ 544-2016 固定污染源废气 硫酸雾的测定 离子色谱法
		HJ 669-2013 水质 磷酸盐的测定 离子色谱法
2	环境行业标准	HJ 688-2013 固定污染源废气 氯化氢的测定 离子色谱法(暂行)
		HJ 769-2015 煤中全硫的测定 艾士卡 - 离子色谱法
		HJ 778-2015 水质 碘化物的测定 离子色谱法
		HJ 779-2015 环境空气 六价格的测定 柱后衍生离子色谱法
		HJ/T 83-2001 水质 可吸附有机卤素(AOX)的测定 离子色谱法
		HJ/T 84-2001 水质 无机阴离子的测定 离子色谱法
		NY/T 2277-2012 水果蔬菜中有机酸和阴离子的测定 离子色谱法
3	农业行业标准	NY/T 2279-2012 食用菌中岩藻糖、阿糖醇、海藻糖、甘露醇、甘露糖、葡萄糖、半乳糖、核糖的测定 离子色谱法
		NY/T 2796-2015 水果中有机酸的测定 离子色谱法
		SN/T 3138-2012 出口面制品中溴酸盐的测定 柱后衍生离子色谱法
4	检验检疫行业标准	SN/T 3151-2012 出口食品中亚硝酸盐和硝酸盐的测定 离子色谱法
		SN/T 3850.1-2014 出口食品中多种糖醇类甜味剂的测定 第 1 部分: 液相色谱串联质谱法和离子色谱法
		SN/T 3931-2014 出口食品中甲酸及其盐类的测定 离子色谱法
		SN/T 4041-2014 出口食品中氟化物、溴化物含量的测定 离子色谱法
		SN/T 4049-2014 出口食品中氯酸盐的测定离子色谱法
		DB22/T 1672-2012 酱油中乙二胺四乙酸铁钠的测定 离子色谱法
		DB22/T 1810-2013 食品中硼酸及硼酸盐的测定 离子色谱法
5	地方标准	DB22/T 1811-2013 食品中亚硫酸盐的测定 离子色谱法
		DB22/T 2105-2014 聚乳酸制品中聚乳酸含量测定 离子色谱法
		DB37/T 1555-2010 土壤中氯离子的测定 离子色谱法
		DB37/T 1897-2011 土壤硝态氮的测定 离子色谱法
		DB45/T 1152-2015 制糖生产过程中间制品中亚硫酸根离子、磷酸根离子含量的检测 离子色谱法
		DB46/T 339-2015 蔬菜水果乙烯利残留检测 离子色谱法

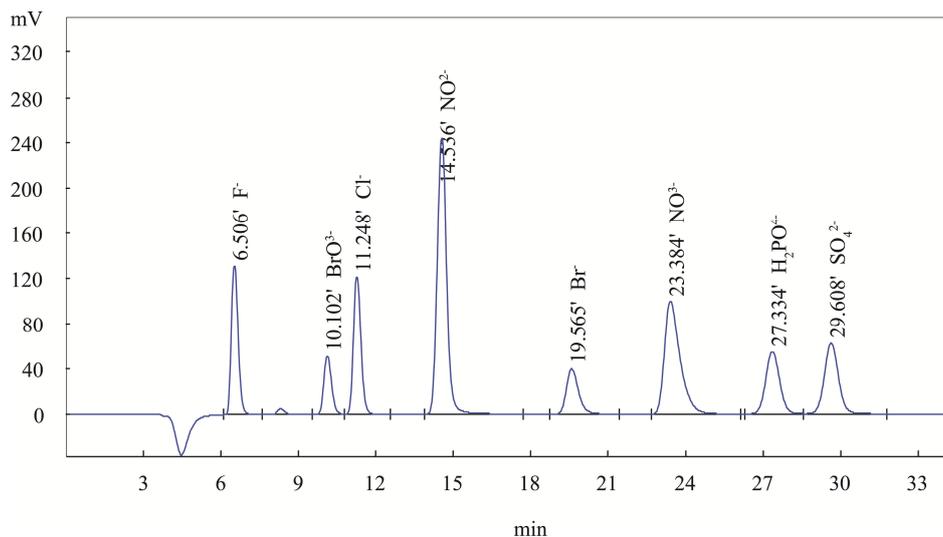


图1 水中常规阴离子离子色谱图

Fig. 1 Ion chromatogram of conventional anion in water

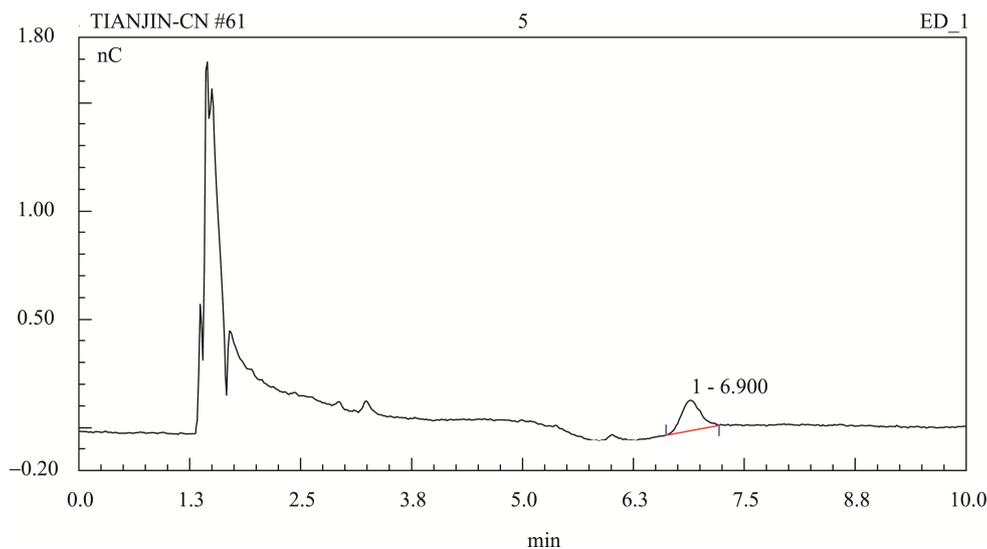


图2 环境水样中氰化物离子色谱图

Fig. 2 Ion chromatogram of cyanide in environmental water

5.1.2 大气监测

离子色谱技术可以用于检测大气空气与降水中的常规阴阳离子(见图 3)、大气颗粒物中的离子^[28]等。在应用过程中需要将目标物捕获于碱性吸收液中,再进行上机测定。

5.1.3 环境水体中生物胺的测定

生物胺(biogenic amine, BA)是一类具有生物活性、低分子量的含氮有机化合物的总称。微量生物胺是生物体(包

括人体)内的正常活性成分,在生物细胞中具有重要的生理功能。但当人体摄入过量的生物胺(尤其是同时摄入多种生物胺)时,会引起诸如头痛、恶心、心悸、血压变化、呼吸紊乱等过敏反应,严重的还会危及生命^[29]。生物体死亡后,在细菌等微生物的作用下,分解产生生物胺,其进入环境水体后不断积累,造成水体污染。通过选用合适的色谱柱,可一次分离分析腐胺、尸胺、组胺、亚精胺和精胺(见图 4),检验结果稳定、准确。

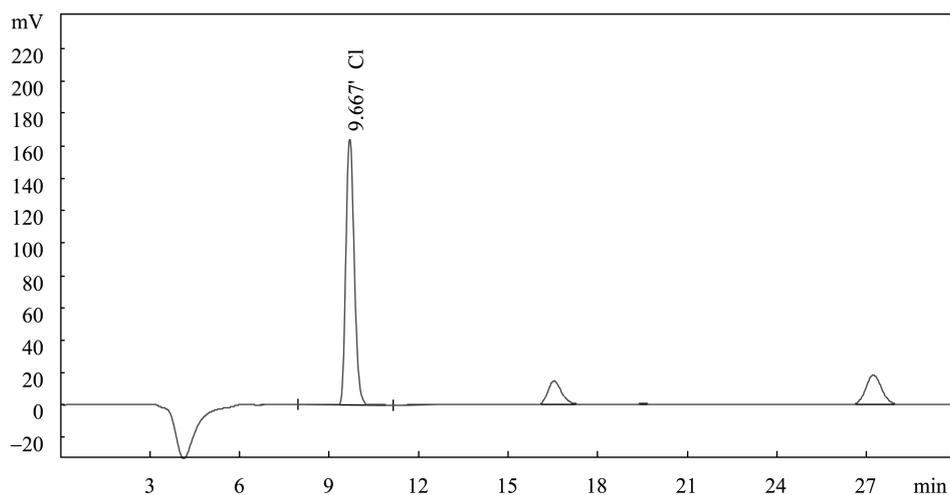


图 3 空气吸收液中氯离子离子色谱图

Fig. 3 Ion chromatogram of chlorine ion in air absorbing liquid sample

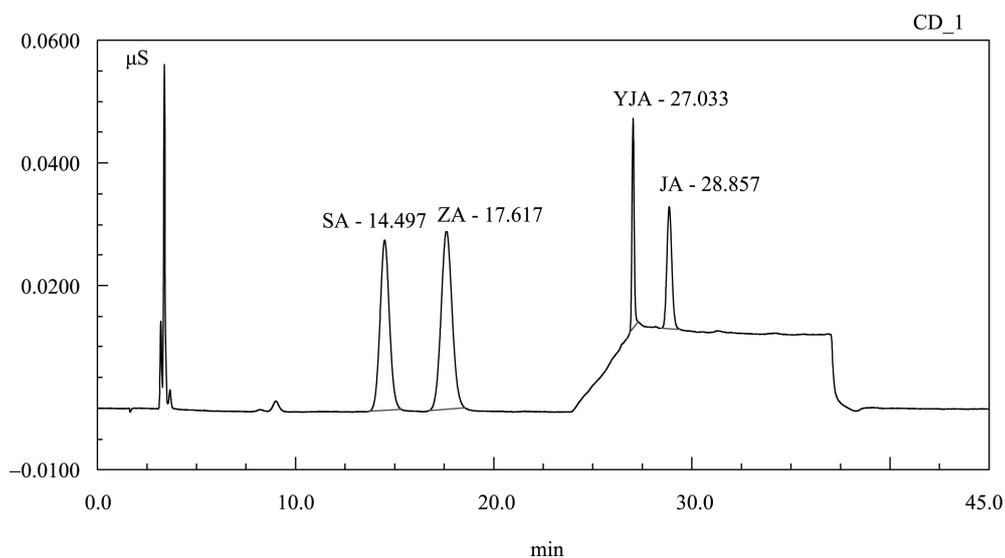


图 4 水体中 4 种生物胺的离子色谱图

Fig. 4 Ion chromatogram of 4 types of biogenic amines in water

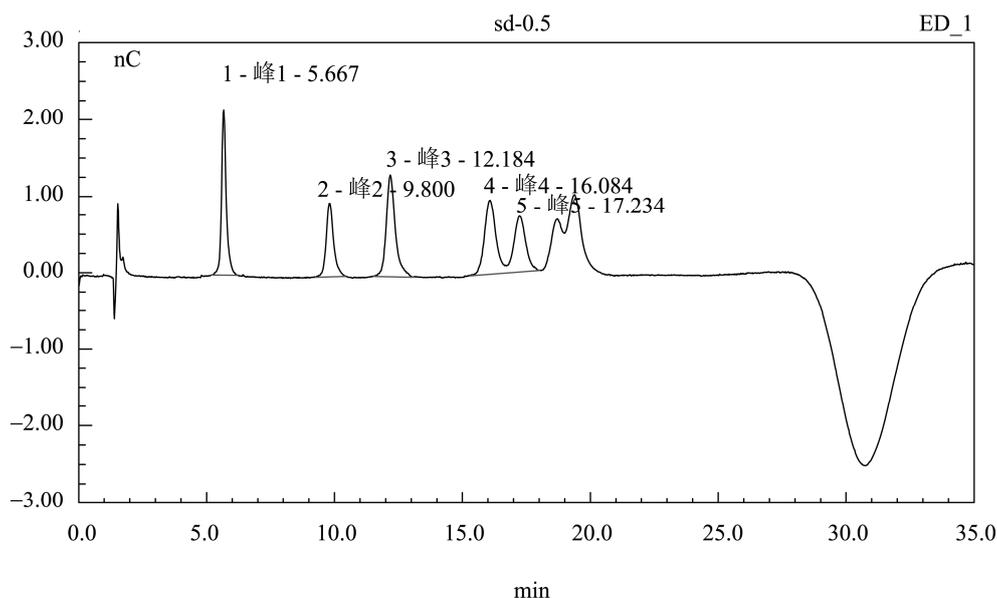
5.2 食品领域测试应用

离子色谱可以用于面粉和面制品中的溴酸盐、食品中的亚硫酸盐、食品中的硝酸盐和亚硝酸盐、水产品中的多聚磷酸盐、味精中硫离子、蜂蜜中的有机酸(乙酸、丙酸、甲酸、草酸、苯甲酸、柠檬酸)、白酒中的有机酸(甲酸、乙酸、丙酸、丁酸、戊酸、己酸、乳酸)、烟草中的有机酸(甲酸、乙酸、丙酸、丁酸)、生物胺、胆碱、食品中的糖及糖醇(山梨糖醇、甘露糖醇、葡萄糖、木糖醇、果糖、甘露糖、鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、核糖、蔗糖、麦芽糖)(见

图 5)、烟草中半乳糖醛酸、糖胺类物质(葡萄糖胺、N-乙酰葡萄糖胺)、氯化蔗糖、发酵液中的低聚糖、聚糖聚合度、烟草淀粉、黄酒中氨基酸和糖等目标物的检测。

5.3 其他测试应用

目前, 离子色谱在药学领域已成为重要的分析手段之一, 2010 年 10 月正式颁布实施的中国药典载入了离子色谱分析法, 同时在各章中增加了有关离子色谱的检测项目。药物中阴离子、有机酸, 中药材中的二氧化硫、肝素钠杂质、帕米磷酸二钠, 蛋白药物中的三氟乙酸, 药物中柠



1.岩藻糖; 2.鼠李糖; 3.阿拉伯糖; 4.半乳糖; 5.葡萄糖
1.fucose; 2.rhamnose; 3.arabinose; 4.galactose; 5.glucose
图5 多糖水解样品中单糖成分离子色谱图

Fig. 5 Ion chromatogram of monosaccharide separation in polysaccharide hydrolysis solution

柠檬酸和磷酸、水杨酸、氯磷酸二钠、阿仑膦酸钠、叠氮化物、常见阳离子、胆碱、6-氨基酰甲胆碱、抗组胺药减充血剂中的阳离子等均是离子色谱的检测对象。另外，化妆品亚硝酸盐^[30]、溴酸盐^[31]、巯基乙酸^[32]；石油化工工业用水中的常见阴离子、阳离子^[33]、铵根、石油水中阴离子^[34]；混凝土外加剂中的氯离子^[35]、工业循环冷却水中的阴离子（氟离子、氯离子、磷酸根、亚硝酸根、硝酸根和硫酸根）、偶氮染料中的氯离子^[36]、离子液体中的阴离子^[37]、碳酸氢钠等化学试剂中氯离子等均需要通过离子色谱技术进行定性定量分析。

6 结 语

虽然离子色谱技术测定对象中的阳离子分析已有了几种快速而灵敏的分析方法，如原子吸收、高频电感耦合等离子体发射光谱和 X 射线荧光分析法等，但是离子色谱技术作为绿色化学技术的代表之一，因为具有灵敏度高、选择性好、同时测定多组分和环境友好的优点，正在逐步替代经典的容量法、重量法和光度法等一些步骤繁琐、污染较为严重的传统分析技术，极大地提高了检测效率，为分析测试提供了新的解决方案。如果说高频电感耦合等离子体发射光谱-质谱是目前同时测定多元素的快速、灵敏而准确的分析方法的话，那么同时测定多种阴离子的快速、灵敏而准确的分析手段当首推离子色谱法。

参 考 文 献

- [1] Small H, Stevens TS, Bauman WC. Novel ion exchange chromatographic method using conductimetric detection [J]. *Anal Chem*, 1975, 47(11): 1801-1809.
- [2] Gjerde DT, Fritz JS, Schmuckler G. Anion chromatography with low-conductivity eluents [J]. *J Chromatogr A*, 1979, 186(DEC): 509-519.
- [3] 常业谛. 离子色谱法 第五讲 双柱离子色谱[J]. *分析测试学报*, 1987, (6).
Chang YD. Ion Chromatography: Chapter 5 Double column IC [J]. *J Instrum Anal*, 1987, (6).
- [4] 牟世芬, 刘克纳, 丁晓静. 离子色谱方法与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
Mu SF, Liu KN, Ding XJ. Application of ion chromatography [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [5] 田鹏, 徐焯, 李莹, 等. 离子排斥色谱法测定十二种有机酸的研究[J]. *分析科学学报*, 2001, 17(6): 483-485.
Tian P, Xu Y, Li Y, et al. Determination of twelve kinds of organic acids by ion exclusion chromatography [J]. *J Anal Sci*, 2001, 17(6): 483-485.
- [6] 丁明玉. 离子色谱原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
Ding MY. Principle and application of ion chromatography [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [7] 谢光华. 离子对色谱[J]. *化学试剂*, 1979, (2): 65-67
Xie GH. Ion pair chromatography [J]. *Chim Reagent*, 1979, (2): 65-67
- [8] 朱岩, 陈晓梧, 徐素君. 离子色谱对表面活性剂的分析[J]. *化学世界*, 1992, (11): 511-512.
Zhu Y, Chen JW, Xu SJ. Analysis of surfactant by ion chromatography [J]. *Chem World*, 1992, (11): 511-512.

- [9] 苑春莉. 环境水体中脂肪醇聚氧乙烯醚及烷基硫酸钠类表面活性剂检测方法的研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013.
Wan CL. The research of testing methods on AEOs and sodium alkyl surfactants in environmental water [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2013.
- [10] 牟世芬, 梁立娜. 离子色谱的最新进展和几个热点应用[J]. 现代科学仪器, 2006, 1(1): 35-39.
Mou SF, Liang LN. Update development and several hot applications of ion chromatography [J]. Mod Sci Instrum, 2006, 1(1): 35-39.
- [11] 刘玉峰, 唐华澄, 李东. 离子色谱法在糖和糖醇分析检测中的应用研究[J]. 食品科学技术学报, 2010, 28(4): 61-64.
Liu YF, Tang HC, Li D. Determination of sugars and sugar alcohols in foods by ion exchange chromatography [J]. Food Sci Technol, 2010, 28(4): 61-64.
- [12] 曹莉. 单糖的离子色谱法分离及检测[J]. 中国医药导刊, 2012, (10).
Cao L. Separation and detection of monosaccharide by ion chromatography [J]. Med Guide, 2012, (10).
- [13] 李仁勇, 梁立娜, 牟世芬. 离子色谱法-脉冲安培检测食品中糖的国内外应用进展[C]. 离子色谱学术报告会, 2010.
Li RR, Liang LN, Mou SF. Application progress of sugars determination in foods by ion chromatography with pulse ampere detection [C]. Ion Chromatography Symposium, 2010.
- [14] 杨兰玲, 许爱华, 许美玲, 等. “皮革奶”的克星 离子色谱与紫外检测器联用技术测定牛奶中六价铬[J]. 中国计量, 2012, (10): 83-84.
Yang LL, Xu AH, Xu ML, *et al.* Determination of Cr⁶⁺ in milk by ion chromatography with UV-detector [J]. China Metrol, 2012, (10): 83-84.
- [15] 赵新颖, 张经华, 焦露, 等. 离子色谱-紫外检测法测定牛奶中的三聚氰胺[J]. 现代仪器与医疗, 2009, 15(5): 48-50.
Zhao XY, Zhang JH, Jiao X, *et al.* Determination of melamine in liquid milk by ion chromatography with ultraviolet detection [J]. Mod Instrum, 2009, 15(5): 48-50.
- [16] 刘俊俊, 鄢爱平, 王晓芬, 等. 阴离子交换色谱-荧光检测法测定人体血清中酪氨酸及其代谢产物[J]. 分析科学学报, 2016, 32(2): 173-177.
Liu JJ, Yan AP, Wang XF, *et al.* Determination of tyrosine and its metabolites in human serum by anion exchange chromatography-fluorescence detection [J]. Anal Sci, 2016, 32(2): 173-177.
- [17] 冯蕾, 马雅倩, 谭婷, 等. 超高效液相色谱-荧光检测法测定人体尿液中酪氨酸、对羟基苯乳酸和对羟基苯乙酸[J]. 分析科学学报, 2015, 31(3): 333-338.
Feng L, Ma YQ, Tan T, *et al.* Determination of tyrosine, 4-hydroxyphenyllactic acid and 4-hydroxyphenylacetic acid in human urine by ultra-performance liquid chromatography coupled with fluorescence detection [J]. Anal Sci, 2015, 31(3): 333-338.
- [18] Heitkemper DT, Kaine LA, Jackson DS, *et al.* Practical applications of element-specific detection by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy and inductively coupled plasma mass spectrometry to ion chromatography of foods [J]. J Chromatogr A, 1994, 671(1-2): 101-108.
- [19] Seubert A. A critical comparison of on-line coupling IC-ICP-(AES, MS) with competing analytical methods for ultra trace analysis of microelectronic materials [J]. Fres J Anal Chem, 1999, 364(5): 404-409.
- [20] Coffey MJ, Jickells TD. Ion Chromatography-Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry (IC-ICP-AES) as a Method for Determining Trace Metals in Estuarine Water [J]. Est Coast Shelf Sci, 1995, 40(4), 379-386.
- [21] 李林林, 朱英存. 离子色谱-电感耦合等离子体质谱联用(IC-ICP-MS)测定水体中的砷形态[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(2): 280-284.
Li LL, Zhu YC. Determination of arsenic species in water by ion chromatography with inductively coupled plasma mass spectrometry (IC-ICP-MS) [J]. Asian J Ecotoxicol, 2013, 8(2): 280-284.
- [22] 黄先亮, 吴彦蕾, 李红, 等. 应用 HPLC-ICP-MS 与离子色谱测定包装饮用水中溴酸盐的对比研究[J]. 质谱学报, 2015, 36(4): 380-384.
Huang XL, Wu YL, Li H, *et al.* Comparing study of BrO³⁻ in packing drinking water by HPLC-ICP-MS and ion chromatography [J]. Chin Mass Spectr Soc, 2015, 36(4): 380-384.
- [23] 张萍, 史亚利, 蔡亚岐, 等. 离子色谱-质谱联用测定牛奶中的高氯酸盐、溴酸盐和碘离子[J]. 分析测试学报, 2007, 26(5): 690-693.
Zhang P, Shi YL, Cai YQ, *et al.* Analysis of perchlorate, bromate and iodide in milk using ion chromatography-electrospray tandem mass spectrometry [J]. J Instrum Anal, 2007, 26(5): 690-693.
- [24] 史亚利. 离子色谱与 API2000(IC/MS/MS)联用分析食品和饮料中的高氯酸盐[J]. 环境化学, 2006, 25(1): 117-120.
Shi YL. Analysis of perchlorate in foods and drinks by ion chromatography with API2000(IC/MS/MS) [J]. Environ Chem, 2006, 25(1): 117-120.
- [25] 刘肖, 牟世芬. 离子色谱-串联电喷雾四级杆质谱联用技术对不同消毒工艺处理后饮用水中痕量卤代乙酸的监测[J]. 离子色谱学术报告会, 2006.
Liu X, Mou SF. Determination of trace haloacetic acid in drinking water after different disinfection process by ion chromatography-electrospray tandem mass spectrometry [C]. Ion Chromatography Symposium, 2006.
- [26] 刘勇建, 牟世芬. 离子色谱-质谱联用技术在饮用水分析中的应用(续)[J]. 环境化学, 2003, 22(3): 309-310.
Liu YJ, Mou SF. Application of ion chromatography in drinking water analysis. [J]. Environ Chem, 2003, 22(3): 309-310.
- [27] 李亚男, 王宇新. 离子色谱技术在环境监测中的应用及预处理技术[J]. 环境科学与管理, 2005, 30(4): 105-106.
Li YN, Wang YX. The application of IC technique in environmental monitoring and pretreatment [J]. Environ Sci Manag, 2005, 30(4): 105-106.
- [28] 殷华. 离子色谱法测定大气颗粒物中水溶性阴离子提取方法的研究[J]. 环境研究与监测, 2016, 29(2):25-28.
Yin H. Ion chromatography determination of water-soluble anion extraction method research in atmospheric particulate matter [J]. Environ Study Monit, 2016, 29(2):25-28.
- [29] 赵新颖, 焦露, 夏敏, 等. 离子色谱法同时测定水源水中的 5 种生物胺[J]. 色谱, 2009, 27(4): 505-508.
Zhao XY, Jiao X, Xia M, *et al.* Determination of five biogenic amines in source water by ion chromatography [J]. Chin J Chromatogr, 2009, 27(4): 505-508.
- [30] 廖树伟, 熊震球, 王维亚, 等. 离子色谱法测定几类化妆品中亚硝酸盐的含量[J]. 广州化工, 2013, 41(5): 144-145.
Liao SW, Xiong ZQ, Wang YW, *et al.* Ion chromatographic determination of the content of several types of cosmetics of nitrite [J]. Guangzhou Chem Ind, 2013, 41(5): 144-145.
- [31] 杜达安, 钟志雄, 姚敬. 化妆品等健康相关产品中 BrO³⁻、IO³⁻和 NO²⁻

- 的离子色谱测定法[J]. 环境与健康杂志, 2006, 23(2): 168-171.
- Du DA, Zhong ZX, Yao J. Determination of bromate, iodate, nitrite in cosmetics and foods by ion chromatography [J]. Environ Health, 2006, 23(2): 168-171.
- [32] 钟志雄, 杜达安, 梁春穗, 等. 离子色谱法测定化妆品中巯基乙酸的研究[J]. 卫生研究, 2004, 33(4): 491-493.
- Zhong ZX, Du DA, Liang CH, *et al.* Study on analysis of thioglycolic acid in cosmetics by ion chromatography [J]. Hyg Res, 2004, 33(4): 491-493.
- [33] 肖慧鹰. 离子色谱法在石化工业废水分析中的应用[J]. 石油化工环境保护, 2006, 29(2): 46-50.
- Xiao HY. Analysis of waste of water of petrochemical industry by ion chromatography [J]. Environ Prot Petrochem Ind, 2006, 29(2): 46-50.
- [34] 苟天华. 含硫油气田水中阴离子色谱分析的前处理技术[J]. 石油与天然气化工, 1993, (2): 131-134.
- Gou TH. Pretreatment technology of anion chromatographic analysis of sour gas fields water [J]. Chem Eng Oil Gas, 1993, (2): 131-134.
- [35] 张瑞艳, 梅一飞, 丁建军. 离子色谱法测定混凝土外加剂中的氯离子[J]. 中国建材科技, 2010, (1): 7-9.
- Zhang RY, Mei YF, Ding JJ. Determination of chloridion in the concrete additives by IC [J]. China Build Mater Sci Technol, 2010, (1): 7-9.
- [36] 胡忠阳, 潘广文, 叶明立. 谱睿在线样品前处理-离子色谱法测定染料中的氯和硫酸根[C]. 离子色谱学术报告会, 2010.
- Hu ZY, Pan GW, Ye ML. Determination of chloride and sulfate in the dye by ion chromatography with Pre technology [C]. Ion Chromatography Symposium, 2010.
- [37] 胡忠阳, 潘广文, 叶明立. 离子色谱法同时测定离子液体中六氟磷酸根及痕量杂阴离子[J]. 色谱, 2009, 27(3): 337-340.
- Hu ZY, Pan GW, Ye ML. Simultaneous determination of hexafluorophosphate and other trace impurity anions in ionic liquids by ion chromatography [J]. Chin J Chromatogr, 2009, 27(3): 337-340.

(责任编辑: 杨翠娜)

作者简介



乐胜锋, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为离子色谱技术应用开发和离子色谱柱填料制备研究。

E-mail: leshengfeng706@163.com



赵新颖, 博士, 副研究员, 主要研究方向为生物医药分析。

E-mail: zhaoxinying_123@sina.com