

评述与进展

气相色谱-微波诱导等离子体原子发射光谱的应用进展

王清清* 顾明松

(北京军事医学科学院毒物药物研究所,北京 100850)

摘 要 气相色谱-微波诱导等离子体原子发射光谱(GC-MIP-AES)是一种具有显著特点的分离-检测方法,可进行多元素检测并具有较高的元素选择性。本文综述了 GC-MIP-AES 的原理、特点及其近年在非金属和金属有机化合物检测方面的应用,评述了 GC-MIP-AES 中元素响应因子的化合物无关性校正用于经验公式计算和非同一标准品定量分析的进展。引用文献 56 篇。

关键词 气相色谱-微波诱导等离子体原子发射光谱,评述

1 引 言

由于单一的分离检测方法往往难以满足复杂的样品分析检测要求,分离与检测技术的联用可以发挥各自的优势,气相色谱-傅里叶变换红外光谱的联用(Gas Chromatography-Fourier Transform Infrared Spectroscopy,GC-FTIR),气相色谱-质谱的联用(Gas Chromatography-Mass Spectroscopy,GC-MS)等应运而生,它们已被广泛应用到许多研究领域。而气相色谱-原子发射光谱(Gas Chromatography-Atomic Emission Spectrometry,GC-AES 或 GC-AES)结合了气相色谱的分离能力和原子发射光谱的元素检测能力,是一种很有特色的联用技术。

1965 年 McCormack 等^[1]第一次成功地实现微波诱导等离子体原子发射光谱(Microwave-Induced Plasma Atomic Emission Spectrometry,MIP-AES)和气相色谱(GC)联用,自 20 世纪 70 年代和 80 年代商品化仪器问世以来,由于 MIP 具有高的电离、放电管死体积小、能与 GC 低载气流速兼容并且与 ICP 相比耗气量少等独特优势,在石化、环保、医药和食品工业等领域得到了广泛应用^[1]。

2 GC-MIP-AES 的原理和特点

2.1 GC-MIP-AES 原理

混合物样品经气相色谱柱分离后进入 4000 ~ 6000 K 的等离子体炬中,待测物被原子(离子)化,这些原子(离子)的外层电子被激发到高能级的激发态,当激发态的电子跃迁回到基态时所吸收的能量以光的形式释放,经分光 and 光电转换装置(或其它光电二极管阵列分光计器)检测发射光的波长和强度。仪器的工作框图如图 1 所示。根据发射光的波长和强度作定性和定量分析。

2.2 GC-MIP-AES 的特点

GC-MIP-AES 结合了气相色谱的分离能力和原子发射光谱的多元素检测能力,具有通用性好、选择性高、检测限低、精密度高、基体干扰小等优点,GC-AES 与其它气相色谱检测器的比较如表 1。具体特点如下^[2]:(1) 可进行元素组成和比例的检测。以氦为工作气体的微波等离子体发射光谱检测器可检测元素周期表中除氦以外的任何一种元素,可获得待测物元素组成的信息;结合分子量信息可推测待测物的分子式;(2) 集通用性和选择性于一体。通用性体现在可检测所有元素,若检测 C、H,AES 即为有机物通用性检测器,且灵敏度高于 FID。选择性体现在可检测指定元素,且其选择性高于 ECD、FPD、NPD 等气相色谱检测器;(3) 可用于非同一标准品定量分析。由于化合物在等离子体炬(4000 ~ 6000 K)

2002-12-01 收稿;2003-05-12 接受

中完全解离,因此各种元素的响应信号与其原化合物的结构无关,因而可选择合适的非同一标准品对待测物进行定量分析,即 CIC (Compound-Independent Calibration); (4) 可检测同位素标记物。

2.3 MIP-AES 的发展概况

为与气相色谱相匹配, AES 的等离子体光源要求体积小、激发能高、耗气量小,这与常规的电感耦合等离子体 (Inductively Coupled Plasma, ICP) 光源有很大区别。目前与气相色谱联用的理想的等离子体光源主要是微波诱导等离子体 (MIP)。20 世纪 60 年代中期, Surfatron 谐振腔问世^[3], 此谐振腔的激发结构具有较好的对称性, 可以产生更高的激发能量。

1976 年, Beenakker^[4] 发明的 TM_{010} 谐振腔实现了常

压下氦等离子体原子发射光源, 使大多数元素的检出限提高了一个数量级。80 年代, 一种专门为与气相色谱联用而设计的 Reentrant 谐振腔的出现^[5], 大大减少了放电管中可能发生的反应, 从而提高了分离效果, 具有稳定性好, 干扰小, 原子化效率高的特点。此后, 微机化的光电二极管阵列 (PDA) 检测器的应用^[6], 又使 AES 能有条件地同时检测多种元素, 并可实时校正光谱背景干扰。

表 1 各种气相色谱检测器的特征

Table 1 General characteristics of GC detectors

检测器名称 Name	类型 Type	检测物 Analyte	检出限 Limit of detection ($S/N=2$)	线性范围 Linear dynamic range
氢火焰离子检测器 FID	选择性 Selective	可在氢火焰中离子化的物质 Materials that ionize in air/ H_2 flame	5 pg C/s	10^7
热导检测器 TCD	通用性 Universal	热导系数不同于载气的物质 Anything with thermal cond. dif- ferent from carrier	400 ng/L carrier	10^6
电子捕获检测器 ECD	选择性 Selective	电负性化合物 Gas-phase electrophorus	2 pg Cl/s	10^4
光离子化检测器 PID	选择性 Selective	能被紫外光电离的物质 Compound ionized by UV	2 pg C/s	10^7
氮磷检测器 NPD	选择性 Selective	含氮或磷原子的物质 N, P, heteroatoms	0.4 pg N/s 0.2 pg P/s	10^4 10^4
火焰光度检测器 FPD	特异性 Specific	含 P 或 S 的物质 P, S	20 pg S/s 0.9 pg P/s	10^3 10^4
傅里叶红外检测器 FTIR	通用性或特异性 Selective or specific	有红外吸收的物质 Molecular vibrations	对强吸收物质达 1000 pg	10^3
质谱检测器 MSD	通用性或特异性 Selective or specific	几乎任何物质 Tunable for any species	10 pg ~ 10 ng	10^5
原子发射光谱检测器 AES	通用性或特异性 Selective or specific	几乎任何元素 Tunable for any element	0.1 pg ~ 1 ng	10^3

FID: flame ionization detector; TCD: thermal conductivity detector; ECD: electron capture detector; PID: photoionization detector; NPD: nitrogen phosphorous detector; MSD: mass spectrometric detector

3 GC-MIP-AES 的应用进展

3.1 非金属元素检测 天然水和工业流出物中微量的有机污染物直接影响到人类的健康。1990 年美国环保局就对 11 种有毒害作用的酚类化合物制定了相关的法令, 目前的分析方法尚无法直接测定该法令规定水平下饮用水中的酚类化合物。Turnes 等^[7]用石墨化的碳萃取柱预富集样品, 不需通过衍生化的方法就可用 GC-MIP-AES 检测饮用水中浓度低于 $0.5 \mu\text{g/L}$ 的氯酚, 分别得到 2-氯酚 (2CP)、2,4-二氯酚 (24DCP)、4-氯-3-甲基氯酚 (4C3MP)、2,4,6-三氯酚 (246TCP) 和五氯酚的定量限和回收率。

Boukraa 等^[8]用 GC-MIP-AES 和 ^{13}C 同位素示踪法检测咖啡因的代谢产物, Zorn 等^[9]用同样方法测定 ^{13}C 标记的 L-苯基丙氨酸和 $1-^{13}\text{C}$ 葡萄糖的转化产物, 从而证明 GC-MIP-AES 是一种用于复杂基质中

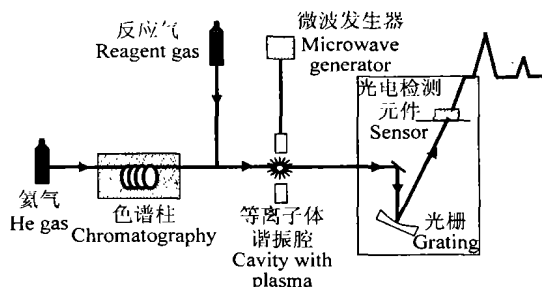


图 1 GC-AES 系统

Fig. 1 Schematic of gas chromatography-atomic emission spectrometric (GC-AES) system

元素或/和同位素分子筛选的有效方法。

在化学战剂方面,周黎明等^[10]研究了水中微量路易氏剂水解产物的测定方法,分别在 480.192, 181.379 和 189.042 nm 波长下检测了衍生物的 N、S 和 As 元素的发射信号,最低检测量为 0.1 mg/L,回收率为 87.2%~97.4%。Mazurek 等^[11]用 GC-MIP-AES 及 GC-MS 定量分析了海底石块中的芥子气和它的水解产物,检测到 50 种化合物,确证了 30 种,定量测定的相对标准偏差(RSD)为 4.4%~14.3%。Brickhouse 等^[12]用 GC-MIP-AES 为辅助方法结合 GC-IR-MS、LC-MS 及 NMR 检测美国一山路旁可疑的黄色液体,共测出 6 种含磷化合物,其中 O,O,S-三甲基硫代磷酸酯为胆碱酯酶抑制剂,证明此黄色液体为化学战剂模拟剂。

农药残留物检测是近年受到广泛的关注。GC-MIP-AES 能选择性地检测 N、Cl、P、S、Br、F 等杂原子,成为农药残留物分析的有力的辅助工具。Haj Zlov á等^[13]定量分析了生物基质中的多氯联苯化合物(PCB)。对 Cl(Cl-479 nm)的检出限为 0.54 pg/s,对于每种联苯化合物在 0.5~10 ng 都呈现出良好线性,最低浓度重复进样的 RSD 为 10.5%~34.4%,结果与 ECD 相比无显著性差别。Bushway 等^[14]对 278 种蔬菜和水果中的有机磷杀虫剂二嗪农和泰尔登进行检测,分别为 1.9%~17%和 1.9%~11%;回收率分别为 78%~114%和 82%~123%。Cook 等^[15]对蔬菜水果中 S、N、P、Cl 元素的检测作为第一步筛选,再结合 GC-MS,保留时间及数据库确证了可能的农药残留物。Semb 等^[16]用氯通道(Cl-479 nm)检测生物样品中氯苯乙烷(DDT)和它的代谢产物,得到定量限为 20 ng/g,检出限为 6 ng/g。Olsson^[17]测定了水中含氮的除草剂,样品处理用美国环保局第 507 号方法及采用小体积提取,大体积进样的修改方法,得到两种方法的回收率分别为 82%~107%,50%~112%,对 N、S、Cl 检测的相对标准偏差低于 5.43%。Stan 等^[18]通过自动化大体积进样、程序化升温、溶剂导出技术和优化辅助气、反应气流速的方法,仅用 12.5 μ L 的进样量获得了 385 种农药的检出限,证明了用 GC-MIP-AES 筛选分析植物食品中低于 10^{-8} 的农药残留物的可行性。

样品的前处理在很大程度上影响着 GC-AES 的定性、定量分析结果的准确性。对复杂基质中如土壤、油、食物、生物体液中样品的提取,仅依靠液-液萃取已不能达到要求,固相萃取和固相微萃取已被用来简化从复杂基质中提取有机农药的繁琐过程。Onaka 等^[19]用固相萃取法分离和浓缩由微生物引起的双苯并噻吩的直接脱硫产物,并用 GC-MS、GC-AES 和 NMR 检测。结果表明,这种由微生物引起的直接脱硫反应是通过特殊的碳硫键发生的,而此碳硫键的键能受甲基位置的影响。固相微萃取法结合 GC-AES 的联用也有多篇文献报道^[13,14]。另外,许多有机化合物包括工业和商业中比较重要的有机化合物都是含氧化合物,如石油化学中的有机化合物(醇类、醛类、酯类、醚类、羧酸类等)和天然有机化合物等。由于气相中的大部分检测器对 O 检测的选择性和灵敏度不高,但 AES 却是很实用的 O 选择性检测器^[20]。

3.2 金属有机化合物的检测

GC-MIP-AES 对金属杂原子化合物可以实现高灵敏、高选择性检测。但由于气相色谱对金属有机化合物挥发性的要求的限制,主要应用仅限于 Pb、Sn 和 Hg 的检测^[21]。

有机铅化合物是普遍存在于空气、水和沉积物中的污染物,作为汽油添加剂在许多国家已被禁止使用,但由于有机铅的转化反应,尤其是与其它金属离子的转烷机化反应使其引起的污染物仍不断出现。GC-MIP-AES 可在 261.418 nm 和 405.783 nm 检测铅的发射光,但后者更灵敏而使用较多^[22,23]。Hempel^[24]用 GC-AES 和 HPLC-AFS 检测出土壤中高达 46 μ g/g 的已基汞和 27 μ g/g 的甲基汞,阐明了有机铅化合物和有机汞化合物的反应机理,对环境污染的评价有十分重要的意义。

环境样品中(水样、沉积物、空气样品)有机锡化合物通常是人为因素造成的,其中三丁基锡是油漆的防污剂会造成内分泌系统的紊乱^[25],双丁基锡和双辛基锡是聚合物如聚氯乙烯的稳定剂,可通过管道释放至水中,具有高毒性。Sadiki 等^[26]对加拿大 45 个市政府的饮用水中有机铅和有机锡进行检测,还测定饮用水中有机氯乙烯材料带来的有机锡化合物,检测到甲基烯和二甲基烯的浓度分别为 0.5~257 ng/L 和 0.5~6.5 ng/L^[27]。Folsvik 等^[28]定量分析了海洋腹足动物中的有机锡。Suzukr 等^[29]测定了码头沉淀物中的有机锡化合物并结合 GC-MS 进行了结构确证。Allan 等^[30]对空气中的氯化丁基

锡用溴化戊烷镁衍生化后的产物进行了测定并与用二乙基二硫代氨基甲酸钠作为螯合剂的结果作了比较。Tutschku^[31]用固相微萃取法处理样品,测定了海洋生物组织中的丁基锡和甲基汞,检测值分别为 10~100 ng/kg 和 1~2 mg/kg。

甲基汞和二甲基汞是危险的环境污染物极易在食物链的末端富集,研究甲基汞和其他有机汞的浓度和动力学特征可预测它们对人类和生态系统的影响^[32]。Madson 等^[33]测定了食物中的甲基汞,得到定量限为 0.63 pg,检出限为 0.24 pg,回收率为 70.0%~114.0%。研究生物样品和环境样品中甲基汞化合物的还有 Lansens 等^[34]、Bulska 等^[35,36]、Carro-Diaz 等^[37]。Cai 等^[38]用四乙基硼酸钠和四苯基硼酸钠将甲基汞和乙基汞衍生化后用 GC-MIP-AES 测定, Palmieri 等^[39]也用四苯基苯酸钠衍生化法测定了鱼组织中的甲基汞,得到对于 0.08 g 鱼粉定量限为 0.6 μg/g,对 0.1 g 新鲜样品定量限为 0.1 μg/g。Qian 等^[40]用两种溶剂提取方法测定了土壤中的甲基汞,回收率为 87.5%,丁基化方法的检出限为 0.1 ng/g,20 次的相对标准偏差为 5%。不同基质中甲基汞的检出限和样品处理方法如表 2。

表 2 不同基质中甲基汞的检测限和样品处理方法

Table 2 The lowest detection limit and sample preparation of methylmercury in differencet matrices

基质 Matrices	检测限 Determination limit	样品处理 Sample preparation	参考文献 Ref.
土壤 Soil	0.1 ng/g	四乙基硼酸钠和四苯基硼酸钠衍生化 Ethylation (NaB Et ₄) and phenylation (NaB Ph ₄)	39
鱼组织 Fish tissue	0.4pg	碱性消化 (KOH-MeOH) + Derivatization (HCl-CH ₂ Cl ₂ - NaB Ph ₄)	40
土壤和沉积物 Soil ,Sediment	0.1 ng/g	格林试剂衍生化 Derivatization (grignard reagent)	41
金枪鱼、蚌、狗鲨 Tuna fish ,mussel ,dogfish	0.04 pg	四苯基硼酸钠衍生化 Phenylation (NaB Ph ₄)	42

4 元素响应因子的化合物无关性校正

从理论上讲,AES 检测的是原子外层电子被激发后再回到基态发出的特定波长的光强,由于化合物在检测前已原子化,元素的响应值只与等离子体中元素的浓度有关,而与化合物的结构以及可能由样品或色谱柱带来的其他共存物无关。近年来,人们开始关注原子发射光谱中元素响应因子的“化合物无关性校正”(Compound-Independent Calibration,CIC)问题,即将元素的摩尔响应的独立性用于经验公式的计算和以非同一物质作为标准品对待测物质定量分析。不同的文献中常有相互矛盾的结论^[43]。Hankemeier 等^[44]报道在 9 种研究的元素中 C 与其他 5 种元素的响应因子与化合物的结构无关;Pedersen 等^[45]却有相反的报道。Stevens 等^[46]报道了不分流进样会引起挥发度不同的化合物间出现样品歧视问题,从而影响 C、N、H 等元素的响应因子;在 Pedersen 等^[47]的研究中却未出现此问题。这些对于 CIC 矛盾的报道可能是因为实验中使用了不同挥发度的化合物从而导致色谱的重现性不同。若如文献报道,化合物的挥发度会影响元素的响应因子,那么实用的解决方法是在实验中使用不同挥发度的内标^[43]。表 3 中列出近年来文献报道的用 CIC 进行定量分析的部分实例。

表 3 样品定量分析中化合物无关性校正

Table 3 Example of application to real-world samples of quantification by compound-independent colibration (CIC)

样品和基质 Samples and matrix	元素 Elements	参考文献 Ref.
土壤 Soil	S,Cl	48
汽油中的硫化物 Sulfur compounds in gasoline	S	49
鱼组织中多溴化联苯醚和多氯化联二苯 chlorodibenzen (PCB) in fish	Br ,Cl	50
含氯杀虫剂和联苯化合物 Chlorinated pesticides and biphenyls	C ,Cl	42
鸟组织中的杀虫剂 Pesticides in birds	C ,H ,C I ,S	40
含氯氟烃 Chlorofluorocarbons	C ,H ,F ,Cl	17
药物 Drugs	C ,N ,H ,O	51 ,52 ,53
磺酰胺类抗生素 Sulfonamide antibiotics	C ,S ,N	54

AES 中 CIC 的特点十分有利于复杂基质中未知化合物的元素组成和元素比例的确证。在线形范围内测定各元素和碳元素响应值的比值,并通过公式计算即可得出化合物中元素的比例。计算公式为: $N_{x,u}/N_{c,u} = A_{x,u}/A_{x,r} \times A_{c,u}/A_{c,r} \times N_{x,r}/N_{c,r}$, $N_{x,u}/N_{c,u}$ 为未知化合物中 X 元素与 C 元素的比值, $A_{x,u}(A_{c,u})$ 为未知化合物中 X 元素(C 元素)的响应值, $A_{x,r}(A_{c,r})$ 为参照物中 X 元素(C 元素)的响应值, $N_{x,r}/N_{c,r}$ 为参照物中元素 X 和 C 的数目之比。从一些报道中可以看出,通常一些元素比另一些元素的计算值更接近实际值。如 Hardas 等^[55]研究中发现含氯氟烃中 Cl/C 和 H/C 的比值比 F/C 的比值更接近实际值。Stuff 等^[56]用 3 种校正物研究化学战剂的元素组成的结果表明, H、P、O、F 原子个数的计算值分别为实际原子数 ± 3 、 ± 0.5 、 ± 1 和 ± 0.9 。

5 结 语

GC-MIP-AES 提供了一种通用性和选择性兼顾的分析方法,可同时检测多种元素,由于它的高选择性、元素响应因子的化合物无关性,GC-MIP-AES 在化合物的结构确证中已成为 GC-MS 很好的辅助技术,在那些难找到标准品的化合物的定量分析中显示出巨大的潜能。但目前对于元素的 CIC 的通用性仍存在争议,参照物的化学结构、浓度和保留时间要在何种程度上接近检测物尚需要深入研究。

References

- 1 Huang Yeru(黄业茹), Yu Weile(俞惟乐). *Spectroscopy* (光谱), **1991**, 9(3): 141 ~ 148
- 2 Wu Liejun(吴烈钧). *The detecting Methods of Gas Chromatography* (气相色谱检测方法). Beijing(北京): Chemical Industry Press(化学工业出版社), **2000**: 237 ~ 238
- 3 McCormack J, Tong S C, Cooke W D. *Analytical Chemistry*, **1965**, 37(12): 1470 ~ 1476
- 4 Beenakker C I M. *Spectrochimica Acta*, **1976**, 31B: 483 ~ 486
- 5 Hubert J, Moisan M, Ricard A. *Spectrochimica Acta*, **1979**, 33B: 1 ~ 10
- 6 Ceulemans M, Adams F C. *LC-GC Int.*, **1994**, 7: 694 ~ 697
- 7 Turnes M I, Rodriuez I, Mejuto M C, Cela R. *J. Chromatogr. A*, **1994**, 683: 21 ~ 29
- 8 Boukraa M S, Deruaz D, Bannier A, Desage M, Brazier J L. *J. Pharmaceutical & Biomedical Analysis*, **1994**, 12(2): 185 ~ 194
- 9 Zorn H, Fischer-Zorn M, Berger R G. *Appl Environ Microbiol*, **2003**, Jan, 69(1): 367 ~ 372
- 10 Zhou Liming(周黎明), Qu Ganglian(曲刚莲), Gu Huifen(顾惠芬). *Chinese J. Anal. Chem.* (分析化学), **1996**, 24(2): 125 ~ 129
- 11 Mazurek M, Wirkiewicz Z, Popiel S, Sliwakowski M. *J. Chromatogr. A*, **2001**, 919(1): 133 ~ 145
- 12 Brickhouse M D, Creasy W R, Williams B R, Morrissey K M, O Connor R J, Durst H D. *J. Chromatogr. A*, **2000**, 883(1-2): 185 ~ 198
- 13 Hajlov Á, Cuhra P, Kempny M, Poustka J, Holadov Á K, Kocourek V. *J. Chromatogr. A*, **1995**, 699: 231 ~ 239
- 14 Bushway R J, Fan Z. *J. Food Prot.*, **1998**, 61(6): 708 ~ 711
- 15 Cook J, Engel M, Wylie P, Quimby B. *J. AOAC Int.*, **1999**, 82(2): 313 ~ 326
- 16 Semb S I, Brevik E M. *Pedersen Bjergaard S. Chemosphere*, **1998**, 36(2): 213 ~ 214
- 17 Olson N L, Carrell R, Cummings R, Rieck R, Reimer S. *J. AOAC Int.*, **1995**, 78(6): 1464 ~ 1473
- 18 Stan H J, Linkerhagner M. *J. Chromatogr. A*, **1996**, 750: 369 ~ 390
- 19 Onaka T, Kobayashi M, Ishii Y, Okumura K, Suzuki M. *J. Chromatogr. A*, **2000**, 903(1-2): 193 ~ 202
- 20 Bradley C, Carnahan J W. *Anal. Chem.*, **1988**, 60: 858
- 21 Uden P C. *J. Chromatogr. A*, **1995**, 703: 393 ~ 416
- 22 Heisterkamp M, Adams F C. *Fresenius J. Anal. Chem.*, **1998**, 362: 489 ~ 493
- 23 Baena J R, C ádenas S, Gallego M, Valc ácel M. *Anal. Chem.*, **2000**, 72: 1510 ~ 1517
- 24 Hempel M, Kuballa J, Jantzen E. *Fresenius J. Anal. Chem.*, **2000**, 366(5): 470 ~ 475
- 25 Takeuchi M, Mizuishi K, Hobo T. *Anal. Sci.*, **2000**, 16: 349 ~ 359
- 26 Sadiki A, Williams D T. *Chemosphere*, **1996**, 32(10): 1983 ~ 1992
- 27 Sadiki A, Williams D T. *Chemosphere*, **1996**, 32(12): 2389 ~ 2398

- 28 Folsvik N, Berge J A, Brvik E M, Walday M. *Chemosphere*, **1999**, 38(3): 681 ~ 691
- 29 Suzuki T, Kondo K, Uchiyama M, Murayama M. *J. Agric. Food. Chem.*, **1999**, 47(9): 3886 ~ 3894
- 30 Allan L M, Verma D K, Yang F, Chau Y K, Maguire R. *J. AIHAJ*, **2000**, 61(6): 820 ~ 824
- 31 Tutschku S, Schantz M M, Wise S A. *Anal. Chem.*, **2002**, 74(18): 4694 ~ 4701
- 32 Horvant M, Wilken R D. *Fresenius J. Anal. Chem.*, **2000**, 366: 415 ~ 416
- 33 Madson M R, Thompson R D. *J. AOAC Int.*, **1998**, 81(4): 808 ~ 816
- 34 Lansens P, Laino C C, Meuleman C, Baeyens W. *J. Chromatogr.*, **1991**, 586: 329 ~ 340
- 35 Bulska E, Bazter D C, French W. *Analytica Chimica Acta*, **1991**, 249: 545 ~ 554
- 36 Bulska E, Emteborg H, Douglas C B, French W, Ellingsen D, Thomassen Y. *Analyst March*, **1992**, 117: 657 ~ 663
- 37 Carro-Diaz A M, Lorenzo-ferreira R A, Cela-Torrijos R. *J. Chromatogr. A*, **1994**, 683: 245 ~ 252
- 38 Cai Y, Monsalud S, Rudolf J, Jones R D. *J. Chromatogr. A*, **2000**, 876: 147 ~ 155
- 39 Palmieri H E L, Leonel L V. *Fresenius J. Anal. Chem.*, **2000**, 366(5): 466 ~ 469
- 40 Qian J, Skyllberg U, Tu Q, Bleam W F, French W. *Fresenius J. Anal. Chem.*, **2000**, 367(5): 467 ~ 473
- 41 Rodil R, Carro A M, Lorenzo R A, Abuin M, Cela R. *J. Chromatogr. A*, **2002**, Jul 19; 963(1 - 2): 313 ~ 323
- 42 Abu h M, Carro A M, Lorenzo R A. *J. Chromatogr. A*, **2000**, 889: 185 ~ 193
- 43 Andersson J T. *Anal. Bioanal. Chem.*, **2002**, 373: 344 ~ 355
- 44 Hol H G J, Hankemeier T, Brinkman U T. *LC-GC Int.* **1999**, 12: 108 ~ 114
- 45 Pedersen B S, Asp T N, Greibrokk T. *Anal. Chim. Acta*, **1992**, 265: 87 ~ 92
- 46 Steven N A, Borgerding M F. *Anal. Chem.*, **1998**, 70: 4223 ~ 4227
- 47 Pedersen B S, Semb S I, Brevik E M. *J. High Resol. Chromatogr.*, **1997**, 20: 47 ~ 49
- 48 Gurka D F, Pyle S, Titus R. *Anal. Chem.*, **1997**, 69: 2411 ~ 2417
- 49 Stumpf A, Tolvaj K, Juház M. *J. Chromatogr. A*, **1998**, 819: 67 ~ 74
- 50 Johnson A, Olson N. *Arch Environ Contam Toxicol.*, **2001**, 41(3): 339 ~ 44
- 51 Gu Mingsong(顾明松), Feng Suiling(冯翠玲), Luo Yi(罗毅). *Chinese J. Chromatogr. (色谱)*, **1996**, 14(1): 33 ~ 36
- 52 Gu Mingsong(顾明松), Huo Xiumin(霍秀敏), Jin Zhiyun(靳志云). *Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis(药物分析杂志)*, **1997**, 17(4): 221 ~ 224
- 53 Jin Zhiyun(靳志云), Gu Mingsong(顾明松), Luo Yi(罗毅). *Acta Pharmaceutica Sinica(药理学报)*, **1997**, 32(11): 865 ~ 868
- 54 Chiavarino B., Crestoni M E, Di Marzio A, Fornarini S J. *Chromatogr. B. Biomed Sci. Appl.*, **1998**, 706(2): 269 ~ 277
- 55 Hardas N R, Uden P C. *J. Chromatogr. A*, **1999**, 844: 271 ~ 281
- 56 Stuff J R, Creasy W R, Rodriguez A A, Durst H D. *J. Microcolumn Sep.*, **1999**, 11: 644 ~ 651

Recent Progress on the Study and Application with Gas Chromatography-Microwave Induced Plasma-Atomic Emission Spectroscopy

Wang Qingqing*, Gu Mingsong

(Institute of Pharmacology and Toxicology, Beijing 100850)

Abstract Atomic emission spectroscopy (AES) can be used as simultaneous multielement specific detector with high selectivity. This paper reviews the principle and the characteristics of gas chromatography (GC) coupled with microwave induced plasma (MIP)-AES, summarizes the applications of the technique in the area of non-metal and metal heteroatomic compounds. The progresses in empirical formulae calculation and compound-independent calibration are prospected. 56 references are cited.

Keywords Gas chromatography-microwave induced plasma atomic emission spectroscopy, review

(Received 1 December 2002; accepted 12 May 2003)