

电感耦合等离子体质谱法测定再造烟叶中 17种痕量元素

古君平*, 林宝敏, 刘 殷, 王 华

(广东中烟工业有限责任公司, 广州 510385)

摘 要: **目的** 用微波消解结合电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测量再造烟叶中的砷、钡、铍等 17 种痕量元素方法。**方法** 再造烟叶样品经微波消解后, 应用标准模式结合碰撞/反应池技术以及内标法定量进行电感耦合等离子体质谱法的测定, 同时考察碰撞模式及碰撞气流量对测定结果的稳定性与准确性。**结果** 17 种目标元素线性良好, 相关系数 $r > 0.9995$, 检出限为 0.001 ~ 0.065 mg/kg, 加标回收率为 79.3% ~ 123.1%, 相对标准偏差为 1.15% ~ 6.38%。**结论** 该方法具有操作简便、分析时间短、稳定准确等优势, 可满足烟草行业内大批量再造烟叶样品对痕量元素的分析测试。

关键词: 再造烟叶; 痕量元素; 电感耦合等离子体质谱; 微波消解

Simultaneous determination of 17 trace elements in reconstituted tobacco by inductively coupled plasma mass spectrometry

GU Jun-Ping*, LIN Bao-Min, LIU Yin, WANG Hua

(China Tobacco Guangdong Industrial Co., Ltd., Guangzhou 510385, China)

ABSTRACT: Objective To establish a method for determination of 17 trace elements including arsenic, barium, beryllium and others in reconstituted tobacco by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) with microwave digestion **Methods** After sample preparation, 17 elements in analysis solution were analyzed by using standard model and the collision/reaction cell technology with internal standard method for quantitative, and the collision mode and collision gas flow rate were optimized for the stability and accuracy of determination results. **Results** The correlation coefficients of standard curves were all above 0.9995, and the limits of detection were 0.001~0.065 mg/kg. The recoveries were 79.3%~123.1% and the relative standard deviations were 1.15%~6.38%, respectively. **Conclusions** This method is simple, rapid and reliable, which is suitable for the simultaneous determination of multi-elements in reconstituted tobacco samples.

KEY WORDS: reconstituted tobacco; trace elements; inductively coupled plasma mass spectrometry; microwave digestion

基金项目: 广东中烟工业有限责任公司科技项目(粤烟工[2012]科字第 028 号)

Fund: Supported by Science and Technology Project of China Tobacco Guangdong Industrial Co., Ltd. ([2012]028)

*通讯作者: 古君平, 工程师, 主要研究方向为烟草分析。E-mail: gujunping01@126.com

*Corresponding author: GU Jun-Ping, Engineer, China Tobacco Guangdong Industrial Co., Ltd., Guangzhou 510385, China, E-mail: gujunping01@126.com

1 引言

目前,卷烟原料、烟用辅料中的元素分析检测已成为烟草行业研究的工作之一。胡清源等^[1]使用微波消解结合电感耦合等离子质谱技术(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)建立了同时测定烟草中 Be、K、Na、Ti、V 等 27 种元素的分析方法,该方法采用在线加入内标以减小基体效应与信号漂移对结果存在的波动影响,并采用标准模式(No gas 模式,即碰撞池不通气体)作为检测模式结合干扰方程进行测定。王海利等^[2]利用微波消解技术结合动态反应池模式结合电感耦合等离子质谱技术(dynamic reaction cell-inductively coupled plasma mass spectrometry, DRC-ICP-MS)建立了同时测定卷烟烟丝中 Cr、Ni、As、Se、Cd、Cs、Hg、Pb 的分析方法,该技术采用 DRC 模式消除多原子离子对 ⁵²Cr、⁶⁰Ni、⁷⁸Se 测定值的干扰,⁷⁵As、¹¹¹Cd、²⁰⁸Pb 采用干扰方程进行定量。杨远等^[3]采用湿法消解-电感耦合等离子体发射光谱法(inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, ICP-AES)测定烟叶中的 K、Na、Ca、Mg、Pb、Co、Ni、Zn 等 22 种元素,该方法使用 ICP-AES 结合氢化物发生-电感耦合等离子体发射光谱法(hydride generation-inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, HG-ICP-AES)以满足烟草多元素测定及解决烟叶中 As 检测灵敏度问题。

烟草中痕量元素的检测方法有原子吸收光谱法、原子荧光光谱法、高效液相色谱法和电感耦合等离子体原子发射光谱法等^[4-11]。在烟草及烟用辅料多元素同时测定方面,ICP-MS 具有灵敏快速、抗干扰能力强等优势,特别是其碰撞/反应池技术可极大程度地减小多原子离子等对测定结果的影响,目前已获得了广泛的应用^[2,6,12-15]。再造烟叶中多元素同时测定分析的报道鲜见,本研究采用微波消解结合标准模式及碰撞/反应池技术对再造烟叶中的 17 种痕量元素进行 ICP-MS 测定,在线内标法定量。

2 材料与方法

2.1 仪器与试剂

仪器: Agilent 7700x 型电感耦合等离子体质谱仪(美国安捷伦公司); MARS 6 型微波消解仪(美国 CEM 公司); Milli-Q Integral 型超纯水系统(美国 Millipore 公司); 电子天平(德国 Sartorius 公司)。

试剂: 硝酸(65%, 优级纯, 德国 Merck 公司); 过氧化氢(30%, 优级纯, 德国 Merck 公司); As、Ba、Be、Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Se、Tl、U、V 和 Zn 混合标液(10 mg/L, 美国安捷伦公司); 汞(Hg)标液(10 mg/L, 美国安捷伦公司); 硼(B)、锡(Sn)单元素标液(均为 1000 mg/L, 国家标准物质

研究中心); 金(Au)标液(10 mg/L, 国家标准物质研究中心); ⁷²Ge、¹¹⁵In、²⁰⁹Bi 内标混合溶液(10 mg/L, 美国安捷伦公司); 调谐液(Ce、Co、Li、Mg、Tl、Y 混合溶液, 1 μg/L, 美国安捷伦公司)。

2.2 试验方法

2.2.1 溶液配制

分别取 B、Sn 单元素标准溶液各 1 mL, 置于 100 mL PET 塑料容量瓶中, 超纯水稀释定容, 配制成质量浓度为 10 mg/L 的 B、Sn 混合标准溶液。分别取 As、Ba、Be、Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Se、Tl、U、V、Zn 混合标准溶液及 B、Sn 混合标准溶液各 10 mL, 置于 100 mL PET 塑料容量瓶中, 超纯水稀释定容, 配制成质量浓度为 10 mg/L 的一级混合标准溶液; 根据需要使用, 移取适量一级混合标准溶液使用超纯水进行逐级稀释, 得到不同浓度的混合标准工作溶液, 现用现配。Hg 元素按上述方法单独配制标准溶液, 为减少 Hg 的记忆效应^[1], 在各不同浓度的工作溶液中加入少量质量浓度为 10 mg/L 的 Au 溶液。

2.2.2 样品前处理

准确称取 0.2 g 再造烟叶样品, 精确至 0.0001 g, 置于微波消解罐中, 向微波消解罐中依次加入 6.0 mL 65%浓硝酸和 2.0 mL 30%过氧化氢, 密封后装入微波消解仪, 按表 1 消解程序进行消解。消解完毕后消解罐降温至常温, 然后将消解液转移至 50 mL 塑料容量瓶中, 用超纯水冲洗消解罐 2~3 次, 清洗液同样转移至容量瓶中, 然后用超纯水定容至刻度, 摇匀后得测试液。

表 1 样品微波消解程序
Table 1 Microwave digestion procedure

起始温度 (°C)	升温时间 (min)	终点温度 (°C)	保持时间 (min)
常温	5	100	5
100	5	130	5
130	5	190	25

2.2.3 仪器条件

以 1 μg/L 的 Ce、Co、Li、Mg、Tl、Y 的混合标准溶液对仪器参数进行调谐优化。ICP-MS 工作参数: 冷却气流量 14.3 L/min; 辅助气流量 0.63 L/min; 载气流量 0.98 L/min; 雾化室温度: 2.0 °C; 蠕动泵采集转速: 0.1 r/s; 样品提升转速: 0.5 r/s; 射频功率 1550 W; 采样深度: 8.0 mm; 采集点数: 3; 重复次数: 3。待测元素质量数及对应内标元素、积分时间如表 2 所示。

表 2 待测元素、相应内标元素及积分时间
Table 2 Measurement isotopes, internal standard elements and integration time

待测元素	内标元素	积分时间(s)
⁷⁵ As	⁷² Ge	0.9
¹¹ B	⁷² Ge	0.3
¹³⁸ Ba	¹¹⁵ In	0.3
⁹ Be	⁷² Ge	0.3
¹¹¹ Cd	¹¹⁵ In	0.9
⁵⁹ Co	⁷² Ge	0.3
⁵² Cr	⁷² Ge	0.3
⁶³ Cu	⁷² Ge	0.3
²⁰² Hg	²⁰⁹ Bi	0.9
⁶⁰ Ni	⁷² Ge	0.3
²⁰⁸ Pb	²⁰⁹ Bi	0.3
⁷⁸ Se	⁷² Ge	0.9
¹¹⁸ Sn	¹¹⁵ In	0.3
²⁰⁵ Tl	²⁰⁹ Bi	0.3
²³⁸ U	²⁰⁹ Bi	0.3
⁵¹ V	⁷² Ge	0.3
⁶⁶ Zn	⁷² Ge	0.3

2.2.4 结果计算

再造烟叶样品中各元素含量以 X 表示, 按式(1)进行计算:

$$X = \frac{(C - C_0) \times V}{1000 \times m \times (1 - w)} \quad (1)$$

式中: X : 各元素含量(mg/kg);

C : 测试溶液中被测元素的质量浓度($\mu\text{g/L}$);

C_0 : 空白溶液中被测元素的质量浓度($\mu\text{g/L}$);

V : 测试液体积(mL);

m : 再造烟叶样品质量(g);

w : 样品含水率。

3 结果与分析

3.1 待测元素同位素的选择

待测元素同位素的选择主要依据以下几个原则: (1)丰度尽可能大, 以满足测量灵敏度的需要; (2)尽可能避开存在质谱干扰的元素同位素。干扰在 ICP-MS 分析检测过程中, 目标元素的信号常存在质谱因素干扰, 即同量异位素重叠及多原子分子离子干扰将对测量信号产生影响, 如 ⁵⁸Fe 对 ⁵⁸Ni、¹¹⁶Sn 对 ¹¹⁶Cd 等存在同量异位素干扰、⁴⁰Ar⁴⁰Ar 对 ⁸⁰Se 及 ⁴⁰Ar¹³C 对 ⁵³Cr 等存在双原子分子离子干扰、

³⁵Cl¹⁶O¹H 对 ⁵²Cr 及 ⁴⁰Ar¹⁷O¹H 对 ⁵⁸Ni 等存在多原子分子离子干扰。在本研究中, 部分待测元素同位素的选择为硒: ⁷⁸Se、铬: ⁵²Cr、镍: ⁶⁰Ni、砷: ⁷⁵As、镉: ¹¹¹Cd 等。

3.2 内标元素的选择

为了减小非质谱干扰对检测结果的影响, 特别是样品基体中含有的盐类成分使检测信号存在漂移现象, 本研究采用在线加入一定浓度的内标溶液进行校正。由于测定的元素质量数范围覆盖 9~238, 为了选取合适的内标元素而减小测定误差, 分别对 15 种不同的再造烟叶样品进行了 ⁷²Ge、¹¹⁵In 及 ²⁰⁹Bi 共 3 种元素的外标法测定, 结果表明, 3 种内标元素在样品中的含量极低, 换算成分析进样溶液的浓度均不超过 0.01 $\mu\text{g/L}$ 。当在线加入的内标混合溶液的浓度为 200 $\mu\text{g/L}$ 时, 样品本底所含内标元素的影响可忽略不计。

3.3 碰撞模式的选择与碰撞气流量的优化

使用 GBW10016 《生物成分分析标准物质—茶叶》对除元素 Sn 外的 16 种元素进行测定, 目标元素在标准模式(No gas 模式)下的测定结果表明: Cr 与 Se 的测定结果与标准值存在较大的偏差, 分别达到 71.11%与 120.41%, 可能为同量异位素或多原子分子离子的干扰造成, 为此本研究选择碰撞/反应池模式中的 He 碰撞对除元素 B、Be 外的其它元素进行后续实验。

在 ICP-MS 测定过程中, 碰撞气流量影响氧化物产率与仪器灵敏度。当流量增大时, 氧化物(CeO/Ce)产率减小, 仪器对同量异位素或多原子分子离子的抗干扰能力增强, 测定结果更为准确可靠, 但同时造成仪器灵敏度显著下降, 样品重复测定的结果波动性加剧; 反之, 当流量减小时, 仪器灵敏度的提高使样品重复测定的结果更为稳定, 但氧化物(CeO/Ce)产率增大, 仪器的抗干扰能力减弱, 测定结果存在较大的偏差。

在测试过程中发现, 再造烟叶样品中 As 和 Se 2 种元素在 ICP-MS 仪的响应信号强度明显小于其它元素。为此, 本研究使用单 He 作为碰撞气进行了流量优化实验, 结果见图 1 和图 2。

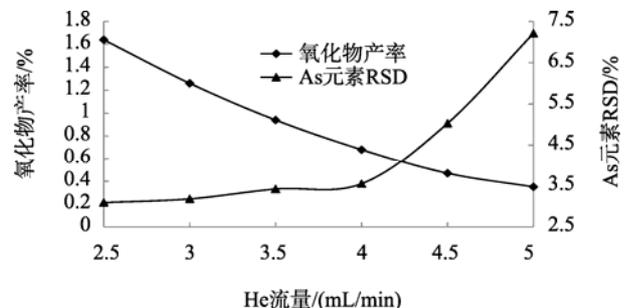


图 1 He 流量对氧化物产率与元素 As 测定重复性的影响
Fig. 1 Effects of helium gas flow rate on the yield of oxides and the repeatability of As determination

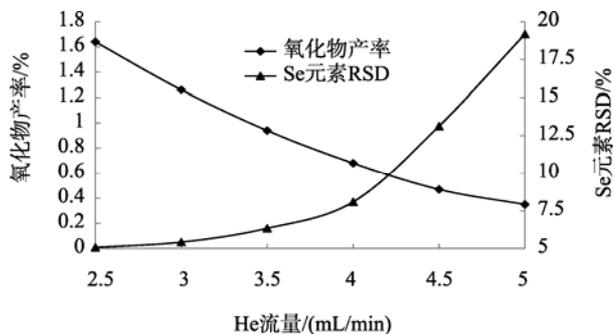


图2 He流量对氧化物产率与元素Se测定重复性的影响

Fig. 2 Effects of helium gas flow rate on the yield of oxides and the repeatability of Se determination

从图1和图2可知,元素As和Se测定重复性结果与碰撞气He流量有关,当He流量为5.0 mL/min时,氧化物产率为0.35%,但2种元素的重复性测定结果的相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)分别为7.21%和19.17%,测定结果存在一定的波动性;当He流量为2.5 mL/min时,2种元素的RSD值均能控制在5.0%以下,但氧化物产率达到1.64%,仪器的抗干扰能力下降,可能导致测定结果的不准确。参考仪器推荐的氧化物产率小于1.0%及控制目标元素测定值的稳定性,He流量取4.0 mL/min。

3.4 工作曲线与检出限

以工作溶液中元素所含浓度为横坐标(X),仪器信号响应值与对应内标信号响应值的比值为纵坐标(Y)进行线性回归,得到各元素的回归方程;对最低点工作溶液连续测定11次,计算标准偏差,获得方法的检出限。上述结果见表3:

3.5 回收率与精密度

按照“2.2.2 样品前处理”的方法进行样品加标回收率试验,每个目标元素添加2个浓度水平并平行6次重复操作,计算方法的回收率与精密度(结果见表4)。从试验结果可知:大部分元素的回收率在85.5%~107.7%范围内,元素B、Be、Tl、U、V等的回收率为79.3%~123.1%;方法的精密度范围为1.15%~6.38%。试验结果说明该方法的准确度与精密度均能满足痕量元素分析测定的要求。

3.6 准确度确证

为确证方法的准确可靠性,按建立的方法对GBW10016《生物成分分析标准物质—茶叶》中除Sn外的16种元素进行了测定(结果见表5)。由试验结果可知,标准物质中的元素测定值与标准值无显著差异,说明方法准确可靠。

3.7 样品分析

按照本研究建立的方法对5种再造烟叶样品进行了分析测定,各元素在样品中的含量结果见表6。

表3 方法的线性关系与检出限($n=11$)
Table 3 Linear relationships and limits of detection of method ($n=11$)

待测元素	线性范围($\mu\text{g/L}$)	线性回归方程	相关系数(r)	检出限(mg/kg)
^{75}As	0.2 ~ 20	$Y=0.0369X+0.0015$	1.0000	0.012
^{11}B	5.0 ~ 200	$Y=0.0149X+0.0081$	0.9996	0.065
^{138}Ba	5.0 ~ 200	$Y=0.0509X+0.0023$	1.0000	0.027
^9Be	0.2 ~ 20	$Y=0.0239X+0.0004$	1.0000	0.002
^{111}Cd	0.2 ~ 50	$Y=0.0129X-0.0007$	0.9999	0.005
^{59}Co	0.2 ~ 20	$Y=0.7259X+0.0003$	0.9999	0.001
^{52}Cr	0.2 ~ 20	$Y=0.3671X-0.0109$	0.9999	0.008
^{63}Cu	5.0 ~ 200	$Y=0.6667X+0.0336$	0.9999	0.016
^{202}Hg	0.2 ~ 20	$Y=0.0273X+0.0035$	0.9995	0.016
^{60}Ni	0.2 ~ 50	$Y=0.2101X-0.0117$	0.9999	0.017
^{208}Pb	0.2 ~ 50	$Y=0.0397X+0.0030$	0.9999	0.012
^{78}Se	0.2 ~ 20	$Y=0.0013X+0.0002$	0.9995	0.010
^{118}Sn	0.2 ~ 20	$Y=0.0185X+0.0013$	0.9999	0.015
^{205}Tl	0.2 ~ 20	$Y=0.0632X-0.0045$	0.9998	0.012
^{238}U	0.2 ~ 20	$Y=0.0839X-0.0192$	0.9996	0.005
^{51}V	0.2 ~ 20	$Y=0.2762X+0.0022$	0.9995	0.005
^{66}Zn	5.0 ~ 200	$Y=0.0732X+0.0105$	0.9998	0.011

表4 回收率与精密度($n=6$)
Table 4 Recoveries and precisions ($n=6$)

待测元素	原含量(mg/kg)	加入量(mg/kg)	测定量(mg/kg)	回收率(%)	RSD(%)
^{75}As	0.71	0.26	0.99	107.7	2.59
		1.08	1.85	105.6	2.68
^{11}B	32.56	31.56	57.59	79.3	3.91
		43.22	77.02	102.9	1.67
^{138}Ba	44.22	31.56	73.64	93.2	3.05
		43.22	85.19	94.8	1.44
^9Be	0.03	0.26	0.32	111.5	6.38
		1.08	0.99	88.9	3.28
^{111}Cd	3.30	0.26	3.58	107.7	2.21
		1.08	4.44	105.6	2.03
^{59}Co	0.49	0.26	0.76	103.8	1.15
		1.08	1.53	96.3	1.43
^{52}Cr	1.04	0.26	1.27	88.5	3.11
		1.08	2.02	90.7	2.56

续表 4

待测元素	原含量 (mg/kg)	加入量 (mg/kg)	测定量 (mg/kg)	回收率 (%)	RSD (%)
⁶³ Cu	9.15	5.28	14.60	103.2	3.07
		10.81	20.34	103.5	1.88
²⁰² Hg	0.01	0.26	0.22	80.8	5.67
		1.08	1.11	101.9	3.38
⁶⁰ Ni	1.11	0.26	1.38	103.8	2.51
		1.08	2.13	94.4	1.80
²⁰⁸ Pb	3.54	5.28	8.87	100.9	1.24
		10.81	14.27	99.3	2.20
⁷⁸ Se	0.17	0.26	0.41	92.3	4.01
		1.08	1.21	96.3	3.35
¹¹⁸ Sn	0.13	0.26	0.40	103.8	5.11
		1.08	1.25	103.7	3.19
²⁰⁵ Tl	0.06	0.26	0.27	80.8	4.46
		1.08	1.09	95.4	3.68
²³⁸ U	0.07	0.26	0.36	111.5	2.38
		1.08	1.09	94.4	3.37
⁵¹ V	0.71	0.26	1.03	123.1	3.05
		1.08	1.85	105.6	3.14
⁶⁶ Zn	55.56	31.56	87.01	99.7	1.22
		43.22	100.01	102.8	2.03

表 5 标准物质(GBW10016)测定值

Table 5 Results of determination of standard reference materials (GBW 10016)

待测元素	标准值	测定值
⁷⁵ As	(0.09±0.01)mg/kg	0.12 mg/kg
¹¹ B	(14±1)mg/kg	14.2 mg/kg
¹³⁸ Ba	(9.6±0.5)mg/kg	9.46 mg/kg
⁹ Be	(10±2)μg/kg	8.1 μg/kg
¹¹¹ Cd	(62±4)μg/kg	66.67 μg/kg
⁵⁹ Co	(0.22±0.02)mg/kg	0.23 mg/kg
⁵² Cr	(0.45±0.10)mg/kg	0.39 mg/kg
⁶³ Cu	(18.6±0.7)mg/kg	18.36 mg/kg
²⁰² Hg	(3.8±0.8)μg/kg	5.04 μg/kg
⁶⁰ Ni	(3.4±0.3)mg/kg	3.55 mg/kg
²⁰⁸ Pb	(1.5±0.2)mg/kg	1.71 mg/kg
⁷⁸ Se	(0.098±0.008)mg/kg	0.109 mg/kg
²⁰⁵ Tl	(50)μg/kg	45.3 μg/kg
²³⁸ U	(10±2)μg/kg	10.67 μg/kg
⁵¹ V	(0.17±0.03)mg/kg	0.14 mg/kg
⁶⁶ Zn	(51±2)mg/kg	52.07 mg/kg

表 6 实际样品测定结果

Table 6 Results of samples

待测元素	样品编号(单位: mg/kg)				
	1#	2#	3#	4#	5#
⁷⁵ As	0.24	0.35	0.23	0.20	0.16
¹¹ B	19.11	23.18	35.67	20.47	30.14
¹³⁷ Ba	20.08	32.19	18.64	27.51	11.14
⁹ Be	未检出	未检出	0.02	未检出	未检出
¹¹¹ Cd	1.35	1.67	0.95	1.73	1.25
⁵⁹ Co	0.21	0.13	0.19	0.10	0.24
⁵² Cr	0.98	1.37	1.66	1.08	0.75
⁶³ Cu	4.32	3.26	3.03	5.19	4.05
²⁰² Hg	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出
⁶⁰ Ni	1.39	0.88	1.07	1.33	0.98
²⁰⁸ Pb	1.25	0.64	1.10	1.59	1.34
⁸² Se	0.03	0.11	0.17	0.08	0.13
¹¹⁸ Sn	0.20	0.13	0.09	0.21	0.03
²⁰⁵ Tl	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出
²³⁸ U	0.07	未检出	未检出	未检出	未检出
⁵¹ V	1.05	0.44	0.81	1.13	0.51
⁶⁶ Zn	12.03	27.85	19.55	20.10	22.32

4 结 论

采用微波消解结合电感耦合等离子体质谱技术对再造烟叶中的 17 种痕量元素进行了研究, 方法选择了合适的目标元素同位素、内标元素及分析模式, 并对碰撞模式中的碰撞气 He 流量进行了优化, 结果表明: 目标元素线性良好, 检出限、重复性、准确度均能满足痕量元素的测定要求, 同时该方法具有操作简便、分析时间短、稳定准确等优势, 可满足烟草行业大批量再造烟叶样品的分析测试。

参考文献

- [1] 胡清源, 李力, 石杰, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法同时测定烟草中 27 种元素[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27 (6): 1210-1213.
Hu QY, Li L, Shi J, *et al.* Determination of 27 elements in tobacco by ICP-MS using microwave digestion for sample preparation [J]. Spectrosc Spectr Anal, 2007, 27 (6): 1210-1213.
- [2] 王海利, 汤建国, 孟昭宇, 等. DRC-ICP /MS 法同时测定卷烟烟丝中 8 种重金属[J]. 烟草科技, 2010, (12): 46-48.
Wang HL, Tang JG, Meng ZY, *et al.* Simultaneous determination of eight heavy metals in cut filler by DRC-ICP/MS [J]. Tobacco Sci Technol, 2010, (12): 46-48.
- [3] 杨远, 邓飞跃, 肖立青, 等. 湿法消解-电感耦合等离子体发射光谱法测定烟叶中 22 种元素[J]. 中国烟草学报, 2013, 19(3): 11-17.
Yang Y, Deng FY, Xiao LQ, *et al.* Determination of 22 elements in leaf tobacco by ICP-AES using wet-digestion sample preparation [J]. Acta Tabacaria Sin, 2013, 19(3): 11-17.
- [4] 张华, 郭国宁, 王娟, 等. 微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法测定烟叶中多种元素[J]. 中国烟草学报, 2009, 15(1): 12-15.
Zhang H, Guo GN, Wang J, *et al.* Determination of inorganic elements in tobacco leaves by microwave digestion-ICP-AES [J]. Acta Tabacaria Sin, 2009, 15(1): 12-15.
- [5] 施红林, 李忠, 杨光宇, 等. 用分光光度法测定烟草中的汞[J]. 烟草科技, 2002, (12): 20-22.
Shi HL, Li Z, Yang GY, *et al.* Determination of mercury in tobacco by spectrophotometry [J]. Tobacco Sci Technol, 2002, (12): 20-22.
- [6] Torrence KM, Mcdaniel RL, Self DA, *et al.* Slurry sampling for the determination of arsenic, cadmium, and lead in mainstream cigarette smoke condensate by graphite furnace-atomic absorption spectrometry and inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Anal Bioanal Chem, 2002, 372(5-6): 723-731.
- [7] Zhang YC, Yang GH, Ling L, *et al.* Simultaneous determination of tin, nickel, lead, cadmium and mercury in tobacco and tobacco additives by microwave digestion and RP-HPLC followed by on-line column enrichment [J]. J Chin Chem Soc. 2004, 51(1): 71-77.
- [8] 管仕栓, 杨明峰, 刘丁伟, 等. 不同消解方法对卷烟烟丝及滤嘴中 Mn 和 Cu 含量的影响[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(8): 1689-1692.
Guan SS, Yang MF, Liu DW, *et al.* Effects of different digestion on the content of Mn and Cu in cigarettes and their filters [J]. Hubei Agri Sci, 2011, 50(8): 1689-1692.
- [9] 古君平, 胡静, 周朗君, 等. 原子吸收光谱法测定烟叶中的重金属总量及形态分析[J]. 分析测试学报, 2015, 34(1): 111-114.
Gu JP, Hu J, Zhou LJ, *et al.* Determination of total amount of heavy metals by atomic absorption spectrometry and their speciation analysis in tobacco [J]. J Instrum Anal, 2015, 34(1): 111-114.
- [10] 罗夏琳, 胡玉斐, 李攻科. 微波辅助消解-电感耦合等离子体原子发射光谱测定烟草中的重金属[J]. 分析科学学报, 2016, 32(2): 249-252.
Luo XL, Hu YF, Li GK. Determination of heavy metals in tobaccos by microwave-assisted digestion-inductively coupled plasma-optical emission spectrometry [J]. J Anal Sci, 2016, 32(2): 249-252.
- [11] 刘秀彩, 陈昱, 郑捷琼, 等. 卷烟中砷、铅、铬、镉、镍的石墨炉原子吸收测定[J]. 中国烟草科学, 2011, 32(1): 71-79.
Liu XC, Chen Y, Zheng JQ, *et al.* Determination of arsenic, lead, cadmium, chromium, nickel in cigarette by graphite furnace atomic absorption spectrometry [J]. Chin Tobacco Sci, 2011, 32(1): 71-79.
- [12] Chang MJ, Naworal JD, Walker K, *et al.* Investigations on the direct introduction of cigarette smoke for trace elements analysis by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Spectrochim. Acta Part B, 2003, 58 (11): 1979-1996.
- [13] 王秀季, 李爱荣, 熊宏春, 等. 微波消解 ICP-MS 测定烟草中痕量稀土元素[J]. 理化检验-化学分册, 2006, 42(7): 553-556.
Wang XJ, Li AR, Xiong HC, *et al.* Determination of trace amounts of rare-earth elements in tobacco by ICP-MS with microwave assisted sample digestion [J]. Phys Test Chem Anal Part B Chem Anal, 2006, 42(7): 553-556.
- [14] 王文元, 夏建军, 段焰青, 等. 电感耦合等离子体质谱仪测定三乙酸甘油酯中 5 种重金属元素的含量[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(1): 195-198.
Wang WY, Xia JJ, Duan YQ, *et al.* Determination of five heavy metal elements in triacetin with inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Guizhou Agric Sci, 2013, 41(1): 195-198.
- [15] 张东豫, 李鹏, 朱琦, 等. 电感耦合等离子体质谱法同时测定口含烟中 7 种重金属元素[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(10): 4179-4186.
Zhang DY, Li P, Zhu Q, *et al.* Determination of 7 kinds of heavy metal elements in oral tobacco products by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. J Food Safe Qual, 2016, 7(10): 4179-4186.

(责任编辑: 姜姗)

作者简介



古君平, 硕士, 工程师, 主要从事烟草化学研究。

E-mail: gujunping01@126.com