

卷烟抽吸前后重金属元素迁移分析方法研究

李登科¹, 范国樑², 范学忠¹, 张春涛¹, 李莉霞¹, 马立超¹, 邢立霞^{1*}

(1. 上海烟草集团有限责任公司技术中心天津工作站, 天津 300163; 2. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300072)

摘要 [目的] 研究卷烟产品抽吸前后重金属元素的迁移量和迁移规律, 为降低卷烟产品危害性提供参考。[方法] 分别采用微波消解与酸液萃取 2 种前处理方法对卷烟产品抽吸后灰分、主流烟气总粒相物 (TPM) 和滤嘴进行处理, 对比 2 种方法下重金属元素的检测结果。[结果] 试验发现, 微波消解法对 TPM 中重金属的测定结果优于酸液萃取法, 而灰分和滤嘴中的结果则不及后者。考察卷烟产品抽吸前后重金属迁移规律, 发现大部分随侧流烟气逸出, 介于 66.89% ~ 95.48%, Hg 元素则基本全部随侧流烟气逸出。除 Hg 元素外, 其他重金属元素在灰分、TPM 和滤嘴中都有所迁移。Cr、Ni、As 与 Se 元素大部分残留在灰分中, 其次为 TPM, 滤嘴截留最少, 而 Cd 和 Pb 元素则滤嘴截留量最高, TPM 次之, 灰分中含量最少。在重点关注的 TPM 中, 重金属迁移率一般低于 5%, 部分元素迁移率介于 5% ~ 10%。[结论] 卷烟产品中重金属绝大部分随侧流烟气逸出, 残余在灰分中或被滤嘴截留, 而迁移至主流烟气中的量极低。

关键词 卷烟; 重金属; 迁移率; 主流烟气总粒相物; 灰分

中图分类号 S572 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)22-063-05

Migration Analysis Method of Heavy Metal Elements Before and After Cigarette Smoking

LI Deng-ke¹, FAN Guo-liang², FAN Xue-zhong¹, XING Li-xia^{1*} et al (1. Tianjin R&D Center of Shanghai Tobacco Group Co., Ltd., Tianjin 300163; 2. College of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract [Objective] To research the transfer volume and law of heavy metal before and after cigarette smoking, and to provide references for reducing the damage of cigarette products. [Method] Two pretreatment methods of microwave digestion and acid extraction were used to process the ash content, total particulate matter of mainstream smoke (TPM) and cigarette filter rod. Detection results of heavy metal elements were compared by the two methods. [Result] The microwave digestion method was better than acid solution extraction method on analysis of TPM, but not so good on analysis of ash and filter rod. Meanwhile, the migration amount and migration rate were studied, which showed that most heavy metal elements were escaped with lateral flow, which was between 66.89% - 95.48%. and Hg was mostly escaped with lateral flow. Except Hg, other heavy metal elements were separately found in ash, TPM and filter rod. Cr, Ni, As and Se were mostly residual in ash, followed with TPM. And filter rod was the least, while Cd and Pb were just in the reverse order. Normally, 5% or less of the heavy metal elements were transferred to TPM, only a small part of which could reach 5% - 10%. [Conclusion] Most of the heavy metal elements are taken by lateral flow, ash and filter rod, while the migration amounts of mainstream smoke are extremely low.

Key words Cigarette; Heavy metal; Migration rate; Total particulate matter (TPM); Ash

卷烟中的重金属元素作为卷烟有害成分之一^[1], 可能在卷烟燃烧过程中作为烟气气溶胶的组成部分被吸入体内, 而排出是一个很缓慢的过程, 随着时间的积累, 人体内重金属元素就会慢慢堆积, 影响人体健康, 因此有必要对卷烟燃烧过程重金属的迁移展开研究。目前国内外的研究工作主要集中在烟叶 (烟丝)^[2-4]、烟用材料 (烟用香精香料、卷烟纸和接装纸等)^[5-13]、卷烟烟气^[14] 中重金属元素的分析方法及卷烟抽吸过程中重金属元素向主流烟气中的转移率^[15-16] 等方面。刘海伟等从烟草重金属的来源、烟草中重金属的分配积累及影响因素、卷烟和烟气中重金属的迁移 3 个方面对重金属迁移分配研究进展进行了细致分析^[17], 但针对样品前处理方法没有系统阐述。针对卷烟产品燃烧后重金属在主流烟气粒相及气相^[18]、滤嘴^[19-20]、灰分和侧流烟气^[21-23] 等中的分布也已有研究。

微波消解法和酸液萃取法是卷烟产品抽吸过程的常用样品前处理方法。王绍坤等利用微波消解-ICP-MS 法测定了 4 个等级烟叶燃吸后 6 种重金属在灰分、滤嘴、其他、主流烟气气相和粒相中的转移率和残留量, 发现重金属残留量一般随着重金属加入量的增加而增加^[24]。黄海涛等利用酸液萃取-原子吸收光谱法/原子荧光法测定了主流烟气总粒相

物中 5 种重金属元素的转移量, 同时发现重金属元素向主流烟气总粒相物和滤嘴中的转移具有一定的饱和度, 但方法未能实现多种重金属元素的同时测定^[25]。不同样品前处理方法, 其研究结果的差异性较大, 因此针对方法的科学性有必要进行对比考察。笔者对比研究了上述 2 种样品前处理方法下测定的重金属含量结果, 对方法进行了客观评价, 同时选取 3 款市售卷烟产品对抽吸前后的重金属迁移量展开了研究, 对于卷烟抽吸过程中重金属迁移规律有了更加准确的分析。

1 材料与方法

1.1 材料 原料及主要试剂: 市售 3 款具有代表性的卷烟产品。高纯氩气、高纯氮气, 天津威斯特气体; Cr、As、Ni、Cd、Pb、Se、Hg 标准溶液 (10 mg/L), 美国安捷伦公司; 金标准溶液 (100 mg/L), 美国 Agilent 公司; 内标溶液: 100 mg/L 的⁶Li、⁴⁵Se、⁷²Ge、⁸⁹Y、¹⁰³Rh、¹¹⁵In、¹⁵⁹Tb、¹⁶⁵Ho、²⁰⁹Bi 混合溶液以 5% 硝酸溶液稀释至 1 mg/L; 65% 硝酸 (分析纯)、30% 双氧水 (分析纯)、37% 盐酸 (分析纯)、40% 氢氟酸 (分析纯), 天津科密欧。

主要仪器: 7700x 型电感耦合等离子体质谱联用仪, 美国安捷伦公司; Milli-Q 超纯水仪, 美国 Millipore 公司; XS204 电子天平 (0.000 1 g), 瑞士 Mettler 公司; SM450 直线型吸烟机, 英国 Cerulean 公司; 恒温恒湿箱, 德国 3M 公司; 微波消解仪, 美国 CEM 公司。

作者简介 李登科 (1988-), 男, 山东枣庄人, 工程师, 硕士, 从事烟草及烟气化学研究。* 通讯作者, 工程师, 从事烟草化学研究。

收稿日期 2016-06-12

1.2 样品前处理与分析方法

1.2.1 卷烟抽吸前烟丝、滤嘴及卷烟纸样品制备。卷烟产品烟丝取出后采用重金属专用研磨机研磨样品,过40目筛,置于恒温恒湿箱中[温度(22±1)℃,相对湿度(60±3)%]平衡48 h后取出。称取约0.2 g(精确至0.000 1 g)烟末样品至PFA消解罐中,加入7 mL HNO₃,1 mL H₂O₂,按照表1中的微波消解程序进行样品消解。结束后待冷却至40℃,定容至50 mL,进行ICP-MS上机检测。

分别取一支卷烟去除烟丝的滤嘴及卷烟纸部分,称重后置于PFA消解罐中,加入7 mL HNO₃和1 mL H₂O₂,按照表1程序进行样品消解。结束后待冷却至40℃,定容至50 mL,进行ICP-MS上机检测。

表1 微波消解升温程序

Table 1 Heating procedure of microwave digestion

起始温度 Initial temperature ℃	升温时间 Heating up time//min	终点温度 Final temperature ℃	保持时间 Retention time//min
室温 Room temperature	5	100	5
100	5	130	5
130	5	160	5
160	10	190	20

1.2.2 卷烟抽吸后样品制备。将卷烟样品按照GB/T 16447—2004规定的条件下进行平衡,挑选平均重量±0.02 g和平均吸阻±49 Pa的卷烟为样品卷烟,在YC/T 29规定的条件下进行抽吸,每个孔道抽吸4支烟。用44 mm剑桥滤片捕集主流烟气总粒相物(TPM),滤片使用前用5.0%(V/V) HCl和2.5%(V/V) HNO₃双蒸硝酸淋洗,再用超纯水浸泡1 h后置于超净工作台晾干后使用。用20 mL 1% HNO₃捕集主流烟气气相,用特制的烟灰板收集每个孔道抽吸后产生的灰分,每支烟抽吸结束后将烟蒂熄灭后振去浮灰和未燃烧的烟丝部分,用PET小瓶收集。

表4 电感耦合等离子体质谱仪测定条件

Table 4 ICP-MS determination conditions

项目 Item	测定条件 Determination condition	项目 Item	测定条件 Determination condition
射频功率 Radio-frequency power	1 500 W	蠕动泵采集转速 Peristaltic pump acquisition speed	0.1 r/s
载气流速 Flow rate of carrier gas	0.80 L/min	蠕动泵快速提升转速 Rapid increase speed of peristaltic pump	0.3 r/s
获取模式 Acquisition mode	全定量分析	蠕动泵快速提升时间 Rapid increase time of peristaltic pump	30 s
重复次数 Repetition times	3	蠕动泵稳定时间 Steady time of peristaltic pump	30 s

2 结果与分析

2.1 卷烟产品抽吸前重金属分布 根据烟丝样品中重金属含量测定结果,计算得到每支卷烟中参与燃烧的部分烟丝的重金属含量,结果如表5,其分布规律见图1。可以看出,卷烟产品总量中不同重金属元素的含量有较大差异,Ni、Cd、Pb含量相对较高,一般在1.9~4.3 μg/支,而Cr、As、Se与Hg元素含量相对较低,一般低于1.0 μg/支。而在重金属元素总量中,烟丝贡献了其中的大部分,占据了90.11%~92.34%,卷烟纸中重金属含量在2.73%~5.40%,滤嘴中重

捕集后的滤片、灰分和滤嘴分别采用微波消解和酸液萃取2种方法进行处理。方法1:将捕集后的滤片、灰分和滤嘴分别置于PFA消解罐中,参照表2中的加酸量添加酸液,预消解30 min后,按照表1中的消解程序进行样品消解。消解后定容至50 mL,进行ICP-MS上机分析。同时做空白对照试验。方法2:将捕集后的滤片、灰分和滤嘴分别置于60 mL PET小瓶中,分别加入40、20和40 mL 1% HNO₃溶液,用超声波振荡仪振荡萃取30 min,静置后取上清液,经过膜处理得到待测液,进行ICP-MS上机分析。

表2 样品消解酸体系

Table 2 Sample digestion acid system

样品 Sample	酸体系 Acid system//mL			
	HNO ₃	H ₂ O ₂	HCl	HF
滤片 Filter disc	7	2	1	1
滤嘴 Filter rod	7	1	0	0
灰分 Ash content	7	2	1	1

1.2.3 重金属元素分析方法。利用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)测定重金属元素,元素测定质量数、内标元素、积分时间等参数见表3,仪器条件见表4。配制较宽浓度范围的系列标准溶液,确保样品测定结果均在线性范围内。采用在线加内标的方法检测分析过程的稳定性。

表3 元素测定质量数、内标元素、积分时间

Table 3 Element mass, ISTD and integration time

元素 Element	质量数 Mass	内标元素 ISTD	积分时间 Integration time//s
铬 Cr	53	锗-72	0.3
镍 Ni	60	锗-72	0.3
砷 As	75	锗-72	1.0
硒 Se	78	铟-115	2.0
镉 Cd	111	铟-115	0.5
汞 Hg	202	铋-209	2.0
铅 Pb	208	铋-209	0.3

金属含量在2.26%~7.17%。

2.2 采用微波消解法分析重金属迁移规律 基于“1.2.2”中的“方法1”对卷烟产品抽吸后灰分、TPM及滤嘴进行微波消解,并利用ICP-MS进行重金属含量测定。文献研究表明,重金属基本不会向主流烟气气相中迁移^[26],因此研究过程更关注的是在TPM中的重金属含量。3种卷烟产品中重金属元素在灰分、TPM、滤嘴及侧流烟气中的迁移率见图2。由图2可知,除Hg元素外,重金属向灰分、TPM及滤嘴中都有所迁移,其余部分通过侧流烟气逸出而不进入人体,且侧流

烟气中重金属的量占据了大部分,介于 66.89% ~ 95.48%; 而 Hg 元素由于其沸点低、挥发性好而很少被捕集,

表 5 烟丝、卷烟纸及滤嘴中重金属元素含量

Table 5 The content of heavy metal elements in tobacco, cigarette paper and filter rod

ng/支

品牌 Brand	项目 Item	测定值 Determination result						
		Cr	Ni	As	Se	Cd	Hg	Pb
A	烟丝	764.22	3 870.29	429.02	191.79	2 244.30	88.43	2 175.98
	卷烟纸	105.23	92.14	43.08	9.85	5.29	0	39.76
	滤嘴	673.38	79.56	7.82	2.45	0.43	0	12.89
	总计	1 542.83	4 041.99	479.92	204.08	2 250.03	88.43	2 228.62
B	烟丝	504.53	3 444.38	416.19	340.93	2 792.07	77.74	1 864.83
	卷烟纸	176.18	103.68	36.25	10.85	0.10	0	78.91
	滤嘴	121.08	46.28	9.04	3.46	11.28	0	44.35
	总计	801.79	3 594.34	461.48	355.24	2 803.45	77.74	1 988.09
C	烟丝	505.42	4 156.08	409.05	248.72	2 423.72	94.17	1 841.11
	卷烟纸	200.10	135.94	125.59	10.71	20.12	0	73.97
	滤嘴	144.76	53.58	9.23	1.83	1.59	0	25.89
	总计	850.28	4 345.60	543.88	261.26	2 445.43	94.17	1 940.96

注:表中烟丝与卷烟纸中重金属测定结果均为参与燃烧的部分重金属含量结果。

Note: Detection results of heavy metal in tobacco and cigarette paper were heavy metal content participated in burning.

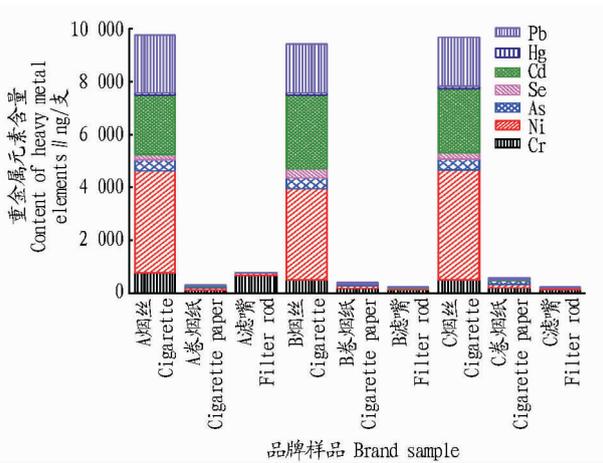


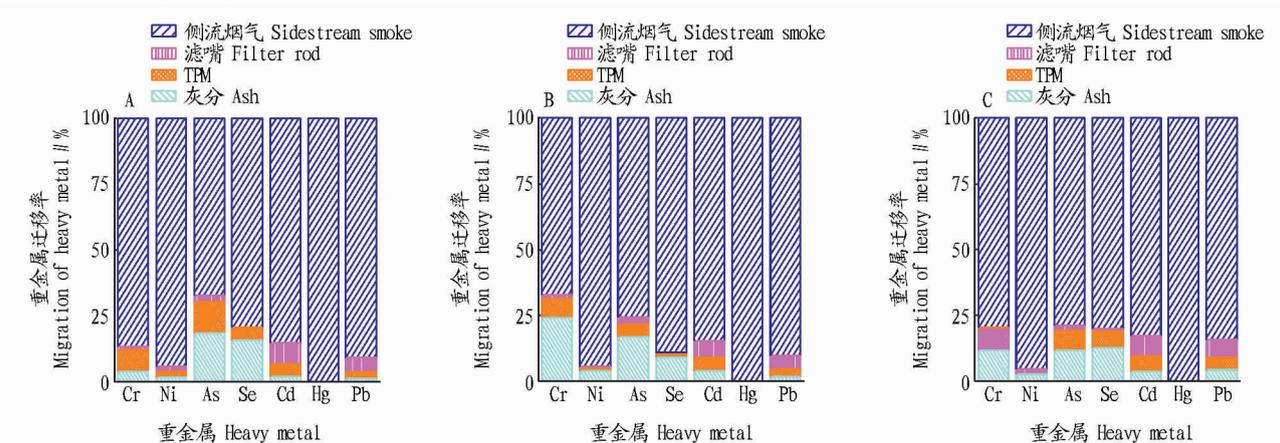
图 1 3 种卷烟产品重金属含量及分布

Fig. 1 Contents and distribution of the heavy metal elements in three cigarette products

几乎全部通过侧流烟气逸出。

采用微波消解法处理抽吸后样品,重金属元素在灰分、TPM 及滤嘴中的含量具体见表 6。由表 6 中数据可以看出,不同重金属元素其迁移特性也有所差别。在试验过程中被捕集的重金属元素中,Cr、Ni、As 与 Se 元素大部分残留在灰分中,最高达到 82.61%;其次为 TPM,一般介于 11.77% ~ 35.88%,而滤嘴中截留的量较少,大都低于 10%。对于 Cd 和 Pb 元素,滤嘴截留的部分最多,分别占 38.92% ~ 53.63% 和 43.48% ~ 61.04%,其次为 TPM 中的含量,分别占 32.96% ~ 34.55% 和 22.32% ~ 30.21%,其余部分则残余在灰分中。

2.3 采用酸液萃取方法分析重金属迁移规律 基于“1.2.2”中“方法 2”对卷烟产品抽吸后灰分、TPM 及滤嘴进行酸液萃取,并利用 ICP-MS 进行重金属含量测定。3 种卷烟产品中重金属元素在灰分、TPM、滤嘴及侧流烟气中的迁移率见图 3。



注:A、B、C 依次为 A、B、C 3 个品牌卷烟样品。

Note: A, B and C were cigarette samples of three brands.

图 2 卷烟产品抽吸后重金属在各部分的迁移率(微波消解法)

Fig. 2 The migration rate of heavy metal elements in each part after cigarette combustion (by microwave digestion method)

与采用微波消解方法的结果对比,发现其规律比较接近。侧流烟气中重金属含量占卷烟产品重金属总量的 57.76% ~ 92.19% (除 Hg 外),而利用酸液萃取方法,能够在灰分及滤

嘴中检测到含量极少的 Hg 元素存在,而 TPM 中没有检测到 Hg 元素的存在。

采用酸液萃取法处理抽吸后样品,重金属元素在灰分、

TPM及滤嘴中的含量具体见表7。与采用微波消解法测定的结果对比发现,酸液萃取法针对TPM中重金属萃取效果不及前者,而针对灰分和滤嘴中的重金属萃取效果则优于前者。从测定的重金属总量来看,酸液萃取法测定的总量高于微波消解法。卷烟产品抽吸过程中重点关注的是重金属迁

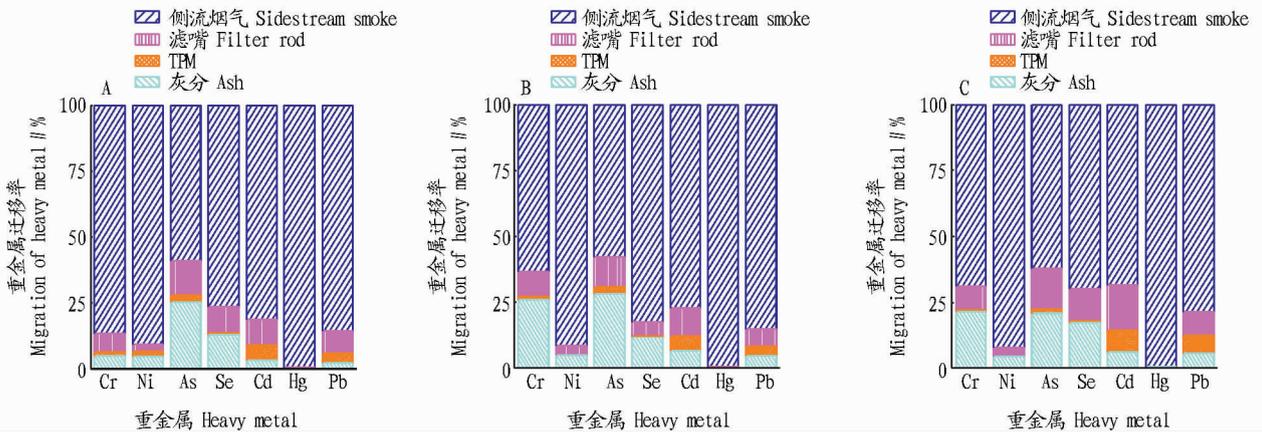
移到主流烟气部分的含量,分析结果表明,采用酸液萃取法测定的重金属总量要低于微波消解法,尤其含量相对较高的Cr、Ni和As元素,后者的测定结果要高于前者至少79%,但对于Cd和Pb元素,前者的测定结果要略高于后者。2种方法下均未在TPM中检测到Hg元素。

表6 重金属元素在灰分、TPM及滤嘴中的含量(微波消解法)

Table 6 The heavy metal elements contents in ash, TPM and filter rod (by microwave digestion method)

ng/支

品牌 Brand	项目 Item	测定值 Determination result						
		Cr	Ni	As	Se	Cd	Hg	Pb
A	灰分	64.12	73.12	89.34	32.64	45.34	0	34.91
	TPM	125.00	87.00	56.00	9.06	111.43	0	46.84
	滤嘴	19.50	82.68	13.55	1.14	181.33	0	128.10
	总计	208.62	242.80	158.89	42.84	338.10	0	209.85
B	灰分	193.24	145.23	78.34	32.16	112.67	0	32.67
	TPM	59.00	24.00	22.23	5.66	146.69	0	59.04
	滤嘴	10.37	34.65	12.39	1.11	165.26	0	103.75
	总计	262.61	203.88	112.96	38.93	424.62	0	195.46
C	灰分	99.12	103.53	63.34	32.85	87.22	0	83.23
	TPM	70.00	13.70	40.80	17.08	142.20	0	89.89
	滤嘴	5.01	78.99	9.56	1.64	190.44	0	133.18
	总计	174.13	196.22	113.70	51.57	419.86	0	306.31



注:A、B、C依次为A、B、C3个品牌卷烟样品。

Note: A, B and C were cigarette samples of three brands.

图3 卷烟产品抽吸后重金属在各部分的迁移率(酸液萃取法)

Fig. 3 The migration rate of heavy metal elements in each part after cigarette combustion (by acid solution extraction method)

表7 重金属元素在灰分、TPM及滤嘴中的含量(酸液萃取法)

Table 7 Contents of heavy metal elements in ash, TPM and filter rod (by acid solution extraction method)

ng/支

品牌 Brand	项目 Item	测定值 Determination result						
		Cr	Ni	As	Se	Cd	Hg	Pb
A	灰分	75.51	176.25	121.00	26.40	70.92	0.27	50.70
	TPM	19.50	82.68	13.55	1.14	131.33	0	78.10
	滤嘴	111.76	105.75	62.00	20.31	214.77	0.13	185.25
	总计	206.77	364.68	196.55	47.85	417.01	0.40	314.04
B	灰分	207.04	175.97	129.99	42.04	180.84	0.33	87.23
	TPM	10.37	0.04	12.39	1.11	165.26	0	73.75
	滤嘴	75.87	129.54	52.53	18.97	298.48	0.13	131.41
	总计	293.28	305.55	194.91	62.11	644.58	0.46	292.39
C	灰分	183.05	186.73	113.00	45.93	158.24	0.63	109.91
	TPM	5.01	0	9.56	1.64	190.44	0	133.18
	滤嘴	76.00	152.75	84.00	31.07	425.38	0.17	176.91
	总计	264.06	339.48	206.56	78.64	774.07	0.81	419.99

对卷烟产品抽吸过程向 TPM 的迁移进行重点关注,其迁移率分析见图 4。由图 4 可见,大部分重金属元素向 TPM 的迁移率均小于 5%,少部分重金属元素向主流烟气的迁移率介于 5%~10%,仅有 A 产品的 As 元素向 TPM 迁移率达到了 11.67%,但由于该产品中 As 元素本身含量较低,因此迁移至 TPM 中的绝对含量也较低。纵向对比,Cr、Cd 与 As 元素向 TPM 迁移率略高,Ni、Se 和 Pb 元素次之,Hg 元素则几乎不向主流烟气中迁移。

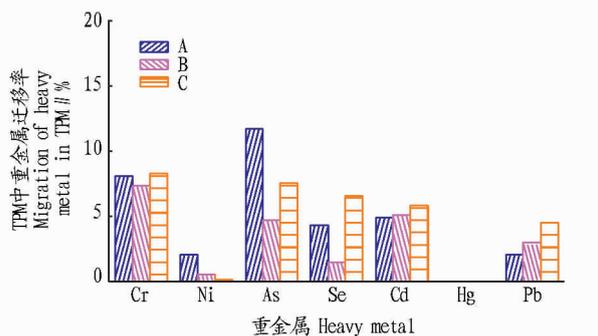


图 4 卷烟产品抽吸后重金属向 TPM 迁移率

Fig. 4 The migration rate of heavy metal elements of TPM after cigarette combustion

3 结论与讨论

根据该试验的研究结果,表明微波消解法在对 TPM 中重金属含量的测定优于酸液萃取法,而对于灰分和滤嘴中重金属的测定则不及后者。对卷烟产品抽吸前后重金属的迁移规律进行了分析,结果表明,卷烟产品重金属转移至主流烟气中的量极少。

卷烟产品中超过 90% 的重金属元素来源于烟丝,其中以 Ni、Cd、Pb 含量相对较高,一般在 1.9~4.3 $\mu\text{g}/\text{支}$,而 Cr、As、Se 与 Hg 元素含量相对较低,一般低于 1.0 $\mu\text{g}/\text{支}$ 。而对于抽吸后的样品中重金属元素测定中,采用微波消解法针对 TPM 中重金属元素含量的测定更为准确,其中 Cr、As 和 Cd 元素含量最高,占到了总量的 4.82%~11.67%,而其他元素则一般低于 5%。借助于酸液萃取法,可以相对准确地测定灰分和滤嘴中重金属的残留量和截留量,尤其含量相对较高的 Cr、Ni 和 As 元素,酸液萃取的测定结果要高于微波消解法至少 79%。分析重金属元素总量迁移规律,发现大部分重金属元素随侧流烟气逸出,其余部分在灰分、TPM 与滤嘴中都有所迁移。其中向 TPM 中迁移率较低,一般低于 5%,部分元素迁移率在 5%~10%。

卷烟产品本身重金属含量较低,而其向主流烟气的迁移率也很低,因此其可能进入人体的含量是极低的,这一研究结果更加客观真实地反映了卷烟产品的危害性。同时借鉴于该研究方法以及其他相关研究报道,可以拓展研究卷烟滤

嘴、接装纸、卷烟纸等性能的变化对重金属迁移规律的影响,乃至通过产品设计、工艺参数调整等降低卷烟抽吸后迁移至主流烟气的重金属含量,进而推进卷烟产品减害降焦、加强产品质量安全管理,都具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 谢涛,黄泳彤,徐旸. 用 ICP-MS 法测定卷烟烟气中的重金属元素[J]. 烟草科技,2003(1):27-29.
- [2] 朱书秀,陆明华,斯文,等. 动态反应池-电感耦合等离子体质谱法测定烟草中的砷[J]. 理化检验(化学分册),2015,51(9):1260-1262.
- [3] 黄旭,徐子刚. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定烟草中的重金属元素[J]. 浙江大学学报(理学版),2007,34(6):658-660.
- [4] 胡群,邱华,马静,等. 微柱高效液相色谱法测定烟草样品中铁钴镍铜锌锰[J]. 理化检验(化学分册),2005,41(4):235-237.
- [5] 于明芳,李荣,雷樟泉,等. 烟用香精香料中重金属和砷的控制[J]. 烟草科技,1998(6):28-30.
- [6] 贺兵,王璐,苏钟璧,等. 微波灰化-原子荧光光谱法测定卷烟纸中 As 含量[J]. 安徽农业科学,2011,39(11):280-282.
- [7] 李力,黄馨,胡清源,等. 电感耦合等离子体质谱法测定卷烟用纸中铜、砷、钼、镉、铊和铅[J]. 理化检验(化学分册),2011(2):163-165.
- [8] 黄海涛,李忠,陈章玉,等. 固相萃取富集-高效液相色谱法测定烟草和烟草添加剂中的重金属元素[J]. 理化检验(化学分册),2004,40(5):251-254.
- [9] 庞永强,李雪,罗彦波,等. 接装纸和成型纸透气度对卷烟中元素迁移行为的影响[J]. 烟草科技,2015(6):34-37.
- [10] 韩云辉,孙兰成,宋继烟,等. 接装纸中汞、砷、铅等 8 种元素的分析研究[J]. 中国烟草学报,2001,7(4):1-6.
- [11] 索卫国,胡清源,陈再根,等. ICP-MS 法同时测定卷烟纸中元素铬、镍、铜、砷、硒、镉、铊和铅[J]. 应用化学,2008,25(2):208-211.
- [12] 黄海涛,施红林,金永灿,等. 卷烟纸和接装纸性质对主流烟气中重金属元素释放量的影响[J]. 中国烟草学报,2010,16(4):1-4.
- [13] 王瑞,祁争健,王宏义. 香烟烟气中水溶性重金属含量的测定[J]. 光谱实验室,2004,21(2):321-323.
- [14] 李银科,贺宾,金永灿,等. 电感耦合等离子体质谱法测定卷烟烟气中重金属元素[J]. 理化检验(化学分册),2009(8):913-915.
- [15] 李辉,吴建伟,李滢芳,等. ICP-MS 法同时测定卷烟主流烟气中的 7 种痕量元素[J]. 中国测试,2015,41(4):46-49.
- [16] 巴金莎,杜咏梅,侯小东,等. 烟叶中重金属铅向主流烟气中的迁移分析[J]. 中国烟草科学,2010,31(6):1-4.
- [17] 刘海伟,石屹,梁洪波. 烟草和卷烟中重金属迁移分配的研究进展[J]. 中国农业科技导报,2013(2):153-158.
- [18] PAPPAS R S, POLZIN G M, ZHANG L, et al. Cadmium, lead, and thallium in mainstream tobacco smoke particulate[J]. Food & chemical toxicology an international journal published for the british industrial biological research association, 2006, 44(5):714-723.
- [19] 韩敏. 卷烟滤嘴对卷烟主流烟气有害成分截留效率研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
- [20] 姜兴益,罗彦波,朱凤鹏,等. 滤棒吸阻和滤嘴长度对卷烟烟气中 6 种元素迁移率的影响[J]. 烟草科技,2015(8):45-48.
- [21] 李雪,庞永强,朱凤鹏,等. 卷烟侧流烟气中 6 种重金属元素的 ICP-MS 测定[J]. 烟草科技,2015(3):34-36.
- [22] 蔡君兰,赵明月,杨军. 卷烟侧流烟气研究进展[J]. 烟草科技,2002(7):22-25.
- [23] WAGNER K A, MCDANIEL R, SELF D. Collection and preparation of sidestream cigarette smoke for trace elemental determinations by graphite furnace atomic absorption spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Journal of AOAC international, 2001, 84(6):1934-1940.
- [24] 王绍坤,罗华元,程昌新,等. 卷烟中 6 种重金属的燃吸转移率与分布研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学版),2011,26(5):656-661.
- [25] 黄海涛,天建华,耿永勤,等. 卷烟抽吸过程中重金属元素的转移量及转移率研究[J]. 云南大学学报(自然科学版),2010(S1):139-142.