

烟草中痕量金属元素分析方法的研究进展

王文元, 者为, 范多青, 段焰青, 夏建军, 蒋举兴

(红云红河烟草(集团)有限责任公司技术中心, 云南 昆明 650202)

摘要: 综述了近年来烟草中痕量金属元素分析方法的研究进展; 探讨了分析方法中样品的前处理技术, 并对原子光谱法、分子光谱法、离子色谱法等进行了归纳和评述; 并对烟草中痕量金属元素分析方法未来的研究方向和发展前景进行了展望。

关键词: 烟草; 痕量金属元素; 分析方法

中图分类号: S572 S143.7⁺2 文献标志码: A 文章编号: 1004-3268(2012)06-0009-06

Research Progress of Analytical Method of Trace Metal Element in Tobacco

WANG Wen-yuan, ZHE Wei, FAN Duo-qing, DUAN Yan-qing, XIA Jian-jun, JIANG Ju-xing

(Technology Center of Hongyunhonghe Tobacco Group, Kunming 650202, China)

Abstract: A review of recent research progresses of analytical method of trace metal element in tobacco was presented and summed up in the present paper. The sample pretreatment technology was discussed and the recent research developments in the atomic spectroanalysis, molecular spectroanalysis, and ion chromatography analysis were summarized and reviewed. Furthermore it also discussed development trends and application perspectives of analytical method of trace metal element in tobacco in the future.

Key words: tobacco; trace metal element; determination method

烟草作为嗜好性消费品, 是世界上最广泛种植的商业性非食物叶用经济作物, 烟草产业的发展在许多国家的财政收入中占有重要的地位。在世界贸易竞争日益激烈的今天, 烟草行业虽然不断遭到危害健康的谴责, 但烟草的消费量依然稳定在一定水平上。烟草中含有多种金属元素, 除了对烟草植株生长起重要作用的常量和微量营养元素外, 还含有重要的微量和痕量重金属元素。例如, 铜是烟草中铜氧化酶的成分, 对减缓烟叶生长期具有重要作用, 而且铜离子能使烟叶成熟稳定, 增加烟叶身份, 减少干旱季节由于炎热而导致晒伤的可能性^[1]; 烟叶中铁、锰或锌的含量过高, 会导致灰色叶; 缺硼会使烟叶中氨基酸含量增加^[2], 缺铝时致使幼叶出现坏死斑, 老叶失绿发白; 较少量的镉可促进植株生长^[3]。锡、汞、铅等重金属在烟草植株内蓄积, 可通过人的

吸食过程经呼吸道进入人体, 对人体造成较大毒害^[4]。越来越多的研究证实, 吸烟已成为烟民体内某些重金属, 尤其是镉的主要来源之一^[5-6]。因此, 准确测定这些元素的含量对于判断烟株养分的丰缺情况、鉴别烟叶品质及安全性均具有重要意义。近年来, 烟草中金属元素含量分析方法的研究报道较多, 其分析技术也得到不断发展, 方法日益成熟。在此, 对近年来烟草中痕量金属元素分析方法的研究进展进行了综述, 探讨和评述了样品的前处理方法和分析方法, 并展望了烟草中痕量金属元素分析方法未来的研究方向和发展前景, 以期为烟草中痕量金属元素分析方法的进一步完善和发展提供参考。

1 烟草样品的前处理方法

烟草中痕量金属元素分析方法的样品前处理方

收稿日期: 2011-12-15

基金项目: 红云红河集团科技项目(HYHH2012HX01)

作者简介: 王文元(1980-), 男, 贵州遵义人, 工程师, 硕士, 主要从事烟草化学研究工作。E-mail: wwy13202@sohu.com

法主要包括干灰化法、湿消化法、微波消解、超声波提取、固相萃取及悬浮液直接进样法等。

1.1 干灰化法、湿消化法

干灰化法利用高温除去样品中的有机质,剩余的灰分用酸溶解,作为样品待测溶液。该法适用于食品和植物样品等有机物含量多的样品测定,不适用于土壤和矿质样品的测定。大多数金属元素含量分析适用于干灰化,但在高温条件下,由于汞、铅、镉、锡、硒等易挥发损失而不适用。该法主要优点是能处理较大样品量、操作简单、安全。如林雪飞等^[7]采用干灰化法,建立了原子吸收光谱法连续测定烟叶中的铜和铁。

湿消化法在烟草行业中得到了一定的应用^[8-10]。湿消化法是在适量的样品中加入氧化性强酸,加热破坏有机物,使待测的无机成分施放出来,形成不挥发的无机化合物,以便进行分析测定。该法耗费时间长,步骤繁琐,消化过程中易产生大量的有害气体,危险性较大,且试剂用量多,易使空白值偏高。

1.2 微波消解法和超声波提取法

微波消解通常是指利用微波加热封闭容器中的消解液(各种酸、部分碱液以及盐类)和试样,从而在高温增压条件下使各种样品快速溶解的湿消化法。密闭容器反应和微波加热这 2 个特点决定了其完全、快速、低空白的优点。用微波法消解样品,简便、快速、彻底,精密度高,样品污染少,试剂用量小,国内科学工作者已利用该方法进行了这方面的部分研究工作^[11-13]。

超声波提取(也称为萃取)以其提取温度低、提取率高、提取时间短的独特优势被应用于中药材和各种动、植物有效含量的提取,是替代传统剪切工艺方法实现高效、节能、环保式提取的现代高新技术手段。如 Borkowska-Burnecka 等^[14]研究发现,超声波浸提时添加表面活性剂,可使标准烟样中的磷、锰回收率明显提高。

1.3 固相萃取和悬浮液直接进样法

固相萃取是近年发展起来的一种样品预处理技术,由液固萃取和柱液相色谱技术相结合发展而来,主要用于样品的分离、纯化和浓缩,与传统的液液萃取法相比较可以提高分析物的回收率,更有效地将分析物与干扰组分分离,减少样品预处理过程,操作简单、省时、省力。近年来在烟草行业已有应用^[15-16]。

悬浮液进样技术不需要对样品进行任何化学处

理、不污染环境,可以直接进样测定,更为简便、快速和实用。刘敏^[17]、高芸等^[18]采用琼脂作为悬浮剂,考查了烟草中钾、钙火焰原子光谱法的含量分析。

2 烟草痕量金属元素分析方法

2.1 原子光谱法的应用

2.1.1 火焰原子吸收光谱法(FAAS) FAAS 是分析烟草样品中痕量金属元素最常用的方法之一,在分析样品时往往要对样品中的金属元素先分离富集,以提高方法的灵敏度和选择性。Tuzena 等^[19]采用铜(II)-二苄基二硫代氨基甲酸对样品进行分离富集,建立了火焰原子吸收光谱法测定痕量铅、镉、铬、镍、锰的方法,将该法应用于烟草、红茶、自来水样品中 5 种金属元素的测定,获得满意结果。Citak 等^[20]提出了火焰原子吸收光谱法测定咖啡、鱼、烟草、绿茶等样品中的铅、钴、铜、镉、铁、镍元素的新方法,此法利用氢氧化锆对样品进行分离富集。这一方法的加标回收率为 95%~100%,线性范围为 0.27~2.50 $\mu\text{g/L}$,相对标准偏差小于 8%。Luciana 等^[21]采用胶束介质对烟草样品进行萃取分离,建立了火焰原子吸收光谱法测定镉的分析方法,其检测限为 0.9 $\mu\text{g/L}$,线性范围为 0.9~2.9 $\mu\text{g/L}$ 。

在使用 FAAS 测定烟草中的痕量金属元素时,根据对样品进行分离富集的方法,主要可分为灰化法、微波制样法、悬浮制样法。杨忠乔等^[22]对香烟烟丝采用灰化法-盐酸消解,建立了火焰原子吸收光谱法快速测定香烟烟丝中 13 种金属离子含量的方法;样品处理过程为:将准确称取的烟丝样品于瓷坩埚中,炭化,移入马弗炉中,于 400 $^{\circ}\text{C}$ 下灰化 4 h,冷却至室温,用 1% 硝酸溶解灰分,直至完全溶解,转移至 25 mL 容量瓶中,用少量蒸馏水多次洗涤瓷坩埚,洗液合并于容量瓶中,用 1% 硝酸定容至刻度,摇匀备用。吴名剑等^[23]建立了火焰原子吸收光谱法测定烟草中钙的新方法,相对标准偏差(RSD)为 0.914%~1.413%,平均加标回收率为 99.5%,将该法用于烟草中钙的检测,与偶氮胂-D 光度法测定结果相一致。林雪飞等^[24]采用火焰原子吸收光谱法在同一体系中连续测定烟叶中金属元素铜、铁、锰的含量,RSD 为 0.56%~3.12%,回收率为 97.62%~103.42%。

卢红兵等^[25]将悬浮液进样技术和火焰原子吸收法联用,成功地测定了烟草中的钾。即以琼脂为悬浮剂,将烟草样品均匀稳定地悬浮于琼脂溶胶中,然后直接喷入空气-乙炔火焰中,测量波长为 766.5

nm 的单色光被吸收的程度,用标准曲线和标准加入法研究了烟草试样中钾含量的定量测定。该法用于测定烟草中的钾,方法简单、快速,与标准加入法相结合,获得满意结果。高芸等^[18]也报道了采用悬浮液进样技术-火焰原子吸收光谱法测定烟草中钙的方法,样品处理过程为烟叶样品在 60 °C 下烘干,粉碎过孔径为 0.096 mm 筛,准确称取 0.2 g 左右的样品于 25 mL 的具塞比色管中,用 0.15% 的琼脂溶液定容,振荡使样品浮起,再振荡 5 min,静置待用。该法已成功应用于烤烟、香料烟、晒烟、白肋烟中金属元素钙的测定。

此外,孙贤军等^[26]利用盐酸为浸提剂,报道了超声波提取空气-乙炔火焰原子吸收光谱法测定烟叶样品中的微量钙、镁的方法,测定了国家烟草标准样品 GBW08514 和 GBW08515 中钙、镁的含量,其结果与标准值相符。该法与传统的预处理技术对比表明,采用酸提取技术具有较高的提取效率,方法简便、快速。刘敏^[17]采用悬浮液进样方式,建立了火焰原子光谱法测定烟叶中的钾。

2.1.2 石墨炉原子吸收光谱法(GFAAS) 近年来,石墨炉原子吸收光谱法在烟草及烟草制品分析中得到充分利用。选择合适的基体改进剂,提高被测物的灰化温度,减少被测物的挥发损失,增加基体的挥发性,消除干扰,提高方法灵敏度等是目前该方法中需解决的主要问题。李峰等^[27]采用硝酸-过氧化氢体系微波消解,以磷酸二氢铵作化学改进剂,利用塞曼自动扣除背景,提出了石墨炉原子吸收法测定烟草中痕量铅的分析方法,其中铅的检出限为 0.28 $\mu\text{g/L}$,回收率为 92.0%~102.0%,RSD<3.0%。该法简便快速,适用于批量烟草样品中铅的测定。廖惠云等^[28]运用湿法消解-石墨炉原子吸收光谱法,定量检测烟用香精中重金属铅和砷,铅和砷定量曲线的相关系数分别为 0.999 7 和 0.999 9,检出限分别为 1.068 $\mu\text{g/L}$ 和 0.394 $\mu\text{g/L}$,RSD 分别为 3.83% 和 3.79%,回收率分别为 85.27%~95.83% 和 89.93%~91.93%。该法成功应用于 28 个国产烟用香精中的铅和砷含量的测定。徐媛媛^[29]以硝酸镍-酒石酸作为砷的基体改进剂,结合微波消解样品处理技术,建立了石墨炉原子吸收法测定香烟样品中痕量砷的新方法,该法的检出限为 0.18 $\mu\text{g/L}$,回收率为 90.4%~104.2%,RSD<5.0%。

2.1.3 原子发射光谱法(AES) 近年来,原子发射光谱法在烟草及烟草制品分析测试中得到了一定的

应用。尤其是电感耦合等离子体光源(ICP)具有的检出限低、基体效应小、精密度高、线性范围宽等优点,使 ICP-AES 得到越来越广泛的应用,成为成分分析中发展最快的测试手段之一。固态阵列检测器 ICP 光谱仪相继研究成功,逐渐取代光电倍增管型 ICP 光谱仪。采用 CID(电荷注入)检测器或 CCD(电荷耦合)检测器的全谱 ICP-AES 发展得很快。张华等^[30]采用微波消解前处理样品,并对样品前处理、酸度及烟草中共存元素干扰的影响等因素进行了探讨,建立了微波消解-电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)测定不同产地、不同等级、不同品种烟叶中金属元素铬、锰、镍、铜、锌、砷、镉、铅、钾、钙、镁、钠的含量,RSD 为 0.5%~5.1%,加标回收率为 91.0%~108.4%,结果令人满意。Sapkota 等^[31]报道了利用硝酸-双氧水消解样品,测定烟叶中 11 种金属元素的 ICP-OES 方法。此外,胡清源等^[32]、黄旭等^[33]、索卫国等^[34]、Sharma 等^[35]、Kaiser 等^[36]均采用电感耦合等离子体原子发射光谱结合质谱的方法,利用微波消解前处理样品技术对烟草中痕量金属元素进行检测分析,获得了较好的结果。

2.1.4 原子荧光光谱法(AFS) AFS 也是测定痕量金属元素的重要手段,目前主要有氢化物-原子荧光光谱法和微波消解-原子荧光光谱法 2 种。夏振远等^[37]利用硝酸-高氯酸混合酸消解烟样,建立了氢化物发生-原子荧光光谱法(HG-AFS)测定烟草中的砷、铋等重金属,对前处理酸的用量,样品介质(盐酸)、预还原剂等进行了试验研究;检测的线性范围砷为 0.0~60.0 $\mu\text{g/L}$,铋为 0.0~8.0 $\mu\text{g/L}$,用于烤烟和杀青烟叶中砷、铋的测定,获得满意结果。吴玉萍等^[38]、Zhang 等^[39]均采用 HNO_3 - H_2O_2 体系微波消解烟样,提出了氢化物发生-原子荧光光谱法(HG-AFS)测定烟草中痕量汞、砷的分析方法。邹莹等^[40]报道了原子荧光光谱法测定微量硒的新方法,该法已成功应用于白肋烟、烤烟等烟草样品中痕量硒的测定。此外,Wu 等^[41]研究了在线富集流动注射技术,建立了原子荧光光谱法测定痕量汞的新方法。该法具有快速、灵敏度高、选择性高的优点,可进行大批量烟草样品中汞的测定。

2.2 分子光谱法的应用

光度分析因具有仪器便宜、操作简便、灵敏快速等诸多优点,在烟草样品微量金属元素测定方法中占有一定的地位。丁宗庆^[42]根据痕量镍离子在醋酸-醋酸钠缓冲介质中对过氧化氢氧化丁基罗丹明

B(BRB)褪色反应有催化作用的原理,建立了测定卷烟中痕量镍的催化光度法。在 $0.32 \sim 12.0 \mu\text{g/L}$ 线性浓度范围内,该方法检出限为 $0.078 \mu\text{g/L}$, RSD 为 $2.2\% \sim 4.2\%$,回收率为 $97.3\% \sim 102.7\%$ 。该方法应用于卷烟烟丝样品中痕量镍的测定,结果与原子吸收光谱法相吻合。羊波等^[43]、张承明等^[44]分别报道了测定烟草样品中痕量镁的分光光度法;前者主要基于 4-(2-羟基-4-硝基苯偶氮)-1-苯基-3-甲基甲基吡唑啉酮(HNAPMP)与镁的络合显色反应,后者主要是利用偶氮氯膦-I 与镁反应生成 1:1 稳定的络合物。阮琼等^[45]基于活化剂吐温-80 存在下,对磺酸基苯基亚甲基若丹宁(SBDR)与汞反应生成 2:1 稳定的络合物,采用 Waters Sep-Pak-C18 固相萃取小柱萃取络合物,用无水乙醇进行洗脱,建立了测定烟草中痕量汞的分光光度法。此外,黄庆斌等^[46]提出了一种烟草中钙元素测定的分光光度法,刘红等^[47]报道了分光光度法测定烟草中痕量铁的新方法,Nohut 等^[48]建立了测定烟草中痕量铜的萃取分光光度法。刘学芝等^[49]依据被测成分在烤烟烟叶中的存在状态,对常规方法(分光光度法)的前处理条件进行了改进:用 H_2SO_4 提取烟碱、钾和氯的同时,用活性炭脱去被溶出的色素,建立同一待测液,同时测定烟叶样品中烟钾的含量。结果表明,该方法精密度和准确度均符合检测要求,与常规方法相比,不仅能缩短测定时间,提高测定效率,还可节约费用,操作简便,便于普及应用。

2.3 离子色谱法(IC)的应用

离子色谱法作为一种新的分析方法以其具有的检出限低、重现性好、选择性强等优点在烟草分析领域被广泛应用。夏炳乐等^[50]采用稀硝酸浸提、离子色谱法(IC)进行了烟草中钾的快速分析。该法制样简便、测定快速,2 种物质的标准曲线线性关系良好。回收率为 $92.7\% \sim 106.7\%$,整个分析过程仅需 5 min,样品测试结果较理想。郭紫明等^[51]以 5% 盐酸为提取剂,超声提取 30 min, Dionex CS12A 阳离子交换柱作分离柱, IonPa CG12A 为保护柱, 20.0 mmol/L 甲磺酸溶液为流动相,流速 0.25 mL/min ,采用离子色谱法同时测定了烟叶样品中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 NH_4^+ 。结果表明,该法的 $\text{RSD} < 6.22\%$,回收率为 $90.9\% \sim 109.9\%$,适合批量烟样中这 5 种离子的快速分析。此外,王金平^[52]采用 US 693 型阳离子色谱柱,采用离子色谱法测定了 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等 4 种金属离子,各离子分离良好,测定结果的 RSD 为 $0.14\% \sim 1.24\%$ 。

该法应用于烟草样品中 4 种金属离子的检测,结果与行业标准方法相一致。

2.4 其他检测方法

Li 等^[53]研究了以 2-(2-喹啉偶氮)-5-二乙氨基酚(QADEAP)为柱前衍生试剂,甲醇(内含 0.2% 的醋酸)和 pH 值为 5.0 HAc-NaAc 溶液梯度洗脱为流动相, Nova-Pak C18 液相色谱柱分离,二极管矩阵检测器检测,高效液相色谱法同时测定铁、钴、镍、铜、锌、锰的方法。各金属离子的检测限分别为:铁 $8.5 \mu\text{g/L}$, 钴 $7.2 \mu\text{g/L}$, 镍 $6.4 \mu\text{g/L}$, 铜 $5.0 \mu\text{g/L}$, 锌 $11 \mu\text{g/L}$, 锰 $13 \mu\text{g/L}$, 该方法相对标准偏差为 $1.6\% \sim 3.8\%$,标准回收率为 $92\% \sim 108\%$,该方法用于烟草中痕量铁、钴、镍、铜、锌、锰的测定,获得满意结果。胡群等^[54]利用 2-(2-喹啉偶氮)-5-二甲氨基酚(QADMAP)为柱前衍生试剂, 72% 的甲醇(内含 0.5% 的乙酸)为流动相,建立了微柱高效液相色谱法测定烟草样品中铁、钴、镍、铜、锌、锰的方法。

3 发展趋势

近年来,烟草中痕量金属元素的分析方法得到了迅速发展,尤其是样品的在线分离富集和联用技术大大提高了烟草中金属元素分析的选择性和灵敏度,简化了分析过程。原子吸收光谱法在烟草中痕量金属元素分析中将继续保持最常使用的地位;在分光光度法基础上发展起来的催化动力学光度分析,因具有操作简单、仪器价廉、灵敏度高、分析成本低、便于推广应用等优点而得到了高度的重视和研究^[55-57]。因此,样品在线分离富集和联用技术的结合以及催化动力学光度法在烟草中痕量金属元素测定的研究,将是今后烟草中痕量金属元素测定方法中最具前景的研究方向。

参考文献:

- [1] 王瑞新. 烟草化学[M]. 北京:中国农业出版社,2003:150-151.
- [2] 金闻博,戴亚. 烟草化学[M]. 北京:清华大学出版社,1993.
- [3] 左天觉. 烟草的生产、生理和生物化学[M]. 朱尊权,孙瑞申,骆启章,等,译. 上海:上海远东出版社,1993:222-263.
- [4] 谢涛,黄泳彤,徐旻. 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.
- [5] Bush P G, Mayhew T M, Abramovich D R, et al. A quantitative study on the effects of maternal smoking

- on placental morphology and cadmium concentration [J]. Placenta, 2000, 21(2-3): 247-256.
- [6] dell'Omo M, Muzi G, Piccinini R, *et al.* Blood cadmium concentrations in the general population of Umbria, Central Italy [J]. Sci Total Environ, 1999, 226(1): 57-64.
- [7] 林雪飞, 杨思娅, 林坚, 等. 原子吸收光谱法连续测定烟叶中的铜和铁 [J]. 曲靖师范学院学报, 2003, 22(3): 14-16.
- [8] 朱志国, 王桂贤, 程静华. 用火焰原子吸收法测定十种香烟中钾、钙、锰、铬和镉 [J]. 光谱学与光谱分析, 1999, 19(2): 4-5.
- [9] 朱志国, 谷梅, 王桂贤. 十七种香烟中九种金属元素的含量分析 [J]. 广东微量元素科学, 1999, 6(11): 2-7.
- [10] 贺与平, 崔娅, 王淑华, 等. ICP-AES 法同时测定烟草中 16 种元素 [J]. 理化检验: 化学分册, 2001, 37(11): 510-512.
- [11] 张承聪, 吴玉萍, 杨金辉, 等. 烟草中多种元素的 ICP-AES 分析 [J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2000, 22(6): 453-456.
- [12] 梁颂捷, 朱其清, 林伟杰, 等. 微波辅助湿法消解烟叶样品在测定烟叶矿质元素含量中的应用研究 [J]. 烟草科技, 2000(11): 24-25.
- [13] 殷海成. 沂河流域不同来源鸭组织中硒和重金属元素的测定分析 [J]. 河南农业科学, 2004(8): 86-88.
- [14] Borkowska-Burnecka J, Jankowiak U, Zyrcnicki W, *et al.* Effect of surfactant addition on ultrasonic leaching of trace elements from plant samples in inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry [J]. Spectrochimica Acta Part B, 2004, 59(4): 585-590.
- [15] Li Z, Yang G Y, Wang B X, *et al.* Determination of transition metal ions in tobacco as their 2-(2-quinolinylazo)-5-dimethylaminophenol derivatives using reversed-phase liquid chromatography with UV-VIS detection [J]. Journal of Chromatography A, 2002, 971(1-2): 243-248.
- [16] 张承明, 董学畅, 古昆, 等. 8-羟基喹啉啉固相萃取光度法测定烟草中的铁 [J]. 云南民族学院学报: 自然科学版, 2002, 11(4): 225-227.
- [17] 刘敏. 火焰原子光谱法测定烟叶钾的预处理方法及其比较 [J]. 现代农业科技, 2009(12): 169-170.
- [18] 高芸, 朱晓兰. 悬浮液进样-火焰原子吸收光谱法测定烟草中的钙 [J]. 光谱实验室, 2007, 24(2): 218-220.
- [19] Tuzena M, Soylak M. Multi-element coprecipitation for separation and enrichment of heavy metal ions for their flame atomic absorption spectrometric determinations [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 162(2-3): 724-729.
- [20] Citak D, Tuzen M, Soylak M. Simultaneous coprecipitation of lead, cobalt, copper, cadmium, iron and nickel in food samples with zirconium(IV) hydroxide prior to their flame atomic absorption spectrometric determination [J]. Food and Chemical Toxicology, 2008, 47(9): 2302-2307.
- [21] Luciana M C, Marco A Z A. Preconcentration procedure using cloud point extraction in the presence of electrolyte for cadmium determination by flame atomic absorption spectrometry [J]. Spectrochimica Acta Part B, 2005, 60(5): 743-748.
- [22] 杨忠乔, 虞爱旭, 徐子刚. 火焰原子吸收法快速测定烟草中的 13 种金属离子 [J]. 中国卫生检验杂志, 2005(15): 935-936.
- [23] 吴名剑, 高艺, 蒋新宇, 等. 火焰原子吸收光谱法测定烟草中的钙 [J]. 光谱实验室, 2004, 21(4): 796-799.
- [24] 林雪飞, 杨思娅, 孙成科, 等. 烟叶中 Cu, Fe, Mn 的 FAAS 连续测定分析方法 [J]. 光谱实验室, 2004, 21(1): 186-188.
- [25] 卢红兵, 钟科军, 邓俊芳, 等. 悬浮液进样-火焰原子吸收分光光度法测定烟草中的钾 [J]. 湖南文理学院学报, 2004, 16(4): 34-36.
- [26] 孙贤军, 吴名剑, 冷海兰, 等. 超声波-酸浸-火焰原子吸收光谱法测定烟叶中微量钙和镁 [J]. 光谱实验室, 2005, 22(3): 491-493.
- [27] 李峰, 胡静, 张优茂, 等. 微波消解石墨炉原子吸收法测定烟草中的铅含量 [J]. 烟草科技, 2007(9): 38-39.
- [28] 廖惠云, 张映, 庄亚东. 烟用香精中重金属铅和砷的分析研究 [J]. 中国烟草学报, 2008, 14(4): 8-11.
- [29] 徐媛媛. 微波消解石墨炉原子吸收法测定香烟中的铅和砷 [J]. 广东化工, 2008, 35(180): 77-79.
- [30] 张华, 郭国宁, 王娟, 等. 微波消解-电感耦合等离子体原子发射光谱法测定烟叶中多种元素 [J]. 中国烟草学报, 2009, 15(1): 12-14.
- [31] Sapkota A, Krachler M, Scholz C, *et al.* Analytical procedures for the determination of selected major (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, and Ti) and trace (Li, Mn, Sr, and Zn) elements in peat and plant samples using inductively coupled plasma-optical emission spectrometry [J]. Analytica Chimica Acta, 2005, 540(2): 247-256.
- [32] 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.
- [33] 黄旭, 徐子刚. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法同时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.
- [34] 索卫国, 胡清源, 陈再根, 等. 电感耦合等离子体质谱

- 法同时测定成品烟烟丝中 7 种微量元素[J]. 分析试验室, 2008, 27(6): 81-83.
- [35] Sharma N C, Sahi S V, Jain J C. Sesbania drummondii cell cultures: ICP-MS determination of the accumulation of Pb and Cu[J]. Microchemical Journal, 2008, 81(1): 163-169.
- [36] Kaiser J, Galiová M, Novotny K, *et al.* Mapping of lead, magnesium and copper accumulation in plant tissues by laser-induced breakdown spectroscopy and laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Spectrochimica Acta Part B, 2009, 64(1): 67-73.
- [37] 夏振远, 雷丽萍, 吴玉萍. 氢化物发生-原子荧光光谱法检测烟草中痕量砷和铋[J]. 光谱实验室, 2006, 23(5): 992-994.
- [38] 吴玉萍, 夏振远, 雷丽萍. 烟草中痕量汞的检测及烟株中汞的分布[J]. 分析试验室, 2007, 26(11): 85-87.
- [39] Zhang W B, Gan W E, Lin X Q. Development of a new electrochemical hydride generator with tungsten wire cathode for the determination of As and Sb by atomic fluorescence spectrometry[J]. Talanta, 2006, 68(4): 1316-1321.
- [40] 邹莹, 李青诚, 廖晓玲, 等. 原子荧光光谱法测定烟草中的硒[J]. 烟草科技, 2006(8): 29-31.
- [41] Wu H, Jin Y, Han W Y, *et al.* Non-chromatographic speciation analysis of mercury by flow injection on-line preconcentration in combination with chemical vapor generation atomic fluorescence spectrometry[J]. Spectrochimica Acta Part B, 2006, 61(7): 831-840.
- [42] 丁宗庆. 催化光度法测定卷烟中的痕量镍[J]. 烟草科技, 2009(1): 50-53.
- [43] 羊波, 刘飞, 溥江, 等. 4-(2-羟基-4-硝基苯偶氮)-1-苯基-3-甲基吡唑啉酮光度法测定烟草中镁[J]. 光谱实验室, 2004, 21(1): 191-193.
- [44] 张承明, 古昆, 王保兴, 等. 微波消化-分光光度法测定烟草中的镁[J]. 光谱实验室, 2004, 21(1): 181-182.
- [45] 阮琼, 胡秋芬, 杨光宇, 等. 新试剂 SBDR 固相萃取光度法测定烟草中汞[J]. 理化检验: 化学分册, 2006, 42(1): 12-14.
- [46] 黄庆斌, 李明, 李海涛, 等. 分光光度法测定烟草样品中的钙[J]. 光谱实验室, 2004, 21(4): 766-768.
- [47] 刘红, 黄亚励. 表面活性剂增敏光度法测定烟草中铁的含量[J]. 贵州农业科学, 2005, 33(4): 53-54.
- [48] Nohut S, Karaböcek S, Güner S, *et al.* Extraction and spectrophotometric determination of copper(II) with S,S-bis(2-aminophenyl) oxalate[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 1999, 20(1-2): 309-314.
- [49] 刘学芝, 韩富根, 李高, 等. 烟叶中烟碱、钾、氯常规法测定前处理的改进初探[J]. 河南农业大学学报, 2004, 38(3): 267-269.
- [50] 夏炳乐, 郑一新, 时亮, 等. 烟草中氮、钾组分的离子色谱法快速分析[J]. 色谱, 2001, 19(4): 378-379.
- [51] 郭紫明, 度苏行, 吴名剑, 等. 离子色谱法同时测定烟叶中的 K^+ 、 Mg^{2+} 和 NH_4^+ [J]. 烟草科技, 2007(7): 42-43.
- [52] 王金平. 离子色谱法测定烟草中的 10 种阴、阳离子[J]. 化学分析计量, 2006, 15(3): 30-32.
- [53] Li Z, Yang G Y, Wang B X, *et al.* Determination of transition metal ions in tobacco as their 2-(2-quinolinylazo)-5-dimethylaminophenol derivatives using reversed-phase liquid chromatography with UV-VIS detection[J]. Journal of Chromatography A, 2002, 971(1-2): 243-248.
- [54] 胡群, 邱晔, 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): 235-236.
- [55] 郑怀礼, 李方, 王文元. 催化动力学光度法测定痕量铁[J]. 光谱学与光谱学报, 2003, 23(6): 1217-1219.
- [56] 王文元. 现代光度分析法测定食品中痕量铅的研究与应用[J]. 食品与药品, 2008, 10(3): 72-74.
- [57] 刘荣森. 烟草中重金属检测方法[J]. 现代农业科技, 2011(5): 55-57.