

文章编号: 0254-5357(2009)02-0113-06

国土资源地质大调查分析测试技术专刊

高分辨连续光源原子吸收光谱法测定植物中的磷

汪雨, 刘晓端

(国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘要: 利用连续光源原子吸收光谱法, 通过测定磷元素在乙炔-空气火焰条件下形成的 PO 双原子分子的吸光度, 从而确定植物样品中磷含量。实验研究了乙炔-空气比例和燃烧器高度对 PO 分子吸光度的影响及其他共存元素的光谱干扰和化学干扰。通过对植物标准物质中磷的测定比对证明: 利用连续光源原子吸收光谱法, 在乙炔-空气火焰条件下以 PO 分子测定植物样品中的磷是一种简单、快速、有效的方法。

关键词: 高分辨连续光源; 原子吸收光谱法; 磷; 植物

中图分类号: O657.31; O613.62 **文献标识码:** A

Determination of Phosphorus in Plants Using High Resolution Continuum Source-Atomic Absorption Spectrometry

WANG Yu, LIU Xiao-duan

(National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract: A method for the determination of phosphorus (P) by molecular absorption of phosphorus monoxide (PO) using a high resolution continuum source-atomic absorption spectrometer and an air-acetylene flame has been developed. The factors affecting the determination such as instrumental conditions and parameters, spectral interferences and chemical interferences from coexistent elements and etc. were studied. The method has been applied to the determination of phosphorus in plant materials, such as leaves. Comparing with the other methods, this method provides the advantages of easy and simple of operation, more efficiency and is suitable for determination of phosphorus in plant samples.

Key words: high-resolution continuum source; atomic absorption spectrometry; phosphorus; plant

磷是地球上分布较为广泛的非金属元素,也是生物体中构成蛋白质和核酸的组成元素之一。磷是植物所需的三大主要元素之一,磷参与植物的光合作用、细胞分裂等植物生理生化过程。因此,植物体内的磷对植物生长及农业生产起着非常重要的作用。

磷的检测方法很多,如比色法^[1-2]、磷钼酸分光光度法^[3-4]、(石墨炉/间接火焰)原子吸收光谱法(AAS)^[5-8]、原子发射光谱法^[9-10]、流动注射分析法^[11]、激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICPMS)^[12]和 ICP-MS^[13],以及其他分析方法^[14-17]。虽然磷的分析方法很多,但是都有其自身

收稿日期: 2008-08-27; 修订日期: 2008-11-05

基金项目: 国土资源地质大调查项目资助(1212010660406)

作者简介: 汪雨(1979-),男,浙江湖州市人,在读博士研究生,地球化学专业。E-mail: wyrain68@163.com。

的不足:由于磷的共振线(178 nm)位于紫外真空区,无法用火焰原子吸收光谱法直接测定,只能利用间接法进行测定^[6];利用 ICP-MS 测定磷时, $^{14}\text{N}^{16}\text{O}^+\text{H}^+$ 、 $^{15}\text{N}^{16}\text{O}^+$ 等离子会对分析产生干扰^[18]。虽然早期有研究利用含磷分子(PO 和 HPO)的吸收或发射光谱测定磷,但是需要特定的实验条件,或存在严重的干扰,灵敏度差^[19-23]。

连续光源原子吸收光谱法(Continuum Source Atomic Absorption Spectrometry, CS-AAS)是近年来原子吸收光谱发展的一项新技术,已有相关的研究和应用报道^[24-28]。CS-AAS 光谱仪主要由3部分构成:高压短弧氙灯、由中阶梯光栅和棱镜组成的双单色器分光系统及线阵(或阵列)电荷耦合器件(CCD)检测器。CS-AAS 与通常的锐线光源原子吸收光谱法(Line Source-AAS, LS-AAS)最大的区别在于采用高压短弧氙灯代替传统的元素空心阴极灯。高压短弧氙灯是一个气体放电光源,其能量比一般氙灯高 10~100 倍且较为稳定。高压短弧氙灯所辐射的波长范围为 189~900 nm,不仅覆盖了周期表中可用 AAS 测定元素的谱线,而且可以选择此波长范围内的任意波长;双单色器分光系统能实现对邻近谱线进行有效分离,并能达到较高的光谱分辨率,CCD 检测器提供了可视化的谱线测定结果^[29]。由于谱线的可任意选择性和较高的谱线分辨能力,使 CS-AAS 测定一些分子吸收(如 F、Cl、S 元素等)成为可能^[25,30-31]。

在适宜比例的乙炔-空气火焰中,P 可产生 PO 双原子分子,虽然分子吸收大多为带状谱,不适合使用原子吸收光谱法进行测定,但在 PO 分子吸收谱线中,部分吸收谱线轮廓与原子吸收谱线轮廓大小相似,再结合光源谱线的选择性和分光系统的高分辨率,可以用其进行 P 含量的有效测定^[31-32]。本文主要就乙炔-空气火焰 CS-AAS,利用 PO 分子测定植物中的磷含量进行研究。

1 实验部分

1.1 仪器与主要试剂

contr AA 300 连续光源原子吸收光谱仪(德国耶拿仪器股份公司,仪器配置和参数见表1)。

聚四氟乙烯消解烧杯。

$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ (高纯,天津市光复精细化工研究所); HNO_3 、 H_2O_2 、HCl 均为 MOS 级(北京化学试剂研究所)。实验用水均为去离子水。

表1 contr AA 300 原子吸收光谱仪的主要配置及参数

Table 1 Instrumental configurations and parameters of the applied continuum source spectrometer

主要配置	参数
光源	高压短弧氙灯(GLE, Berlin, Germany) 波长范围:190~900 nm
双单色器系统	石英棱镜(顶角 25°) 中阶梯光栅(每毫米刻线数 75, 闪耀角 76°, 面积 270 mm×60 mm), 分辨率 140 000
检测器	线阵 CCD 检测器

1.2 样品制备

称取 1 g(精确至 0.0001 g)风干并粉碎至粒度小于 0.420 mm(40 目)的植物样品于聚四氟乙烯消解烧杯中,滴入适量的去离子水润湿后,加入 10 mL HNO_3 ,加盖过夜后逐渐升温至 150℃,在此条件下消解至黄色烟雾消退;取下冷却后,加入 10 mL HNO_3 和 3 mL H_2O_2 于 150℃消解至固体全部溶解(若此过程中酸蒸发至干,再补加适量 HNO_3),样品完全消解后,取下冷却,用去离子水冲洗盖子,在 150℃蒸发至近干,用 $\varphi=2\%$ (体积分数,下同)的 HNO_3 定容后测定。

2 结果与讨论

2.1 PO 分子吸收谱线的选择

由于存在不同的电子跃迁,PO 分子有较多的分子吸收谱线^[29,32]。从 $X^2\Pi$ 基态跃迁至 $A^2\Sigma^+$ 态的波长分布范围为 228~264 nm;从 $X^2\Pi$ 基态跃迁至 $B^2\Sigma$ 态的波长分布范围在 326 nm 左右。在这些分子吸收谱线中,各个波长的谱线吸收强度、谱线轮廓均有所不同。虽然在分子吸收中多数为带状谱,但是在适宜乙炔-空气火焰条件下 PO 分子的某些吸收谱线轮廓很窄,这与原子吸收谱线的轮廓大小相似,而且还具有一定的吸收强度,因此可以用原子吸收光谱法进行测定。实验选择了 3 条吸收强度相对较强的 PO 分子吸收谱线(246.40 nm、247.62 nm 和 246.26 nm)进行研究。

2.2 仪器条件优化

测定磷元素的关键是 PO 双原子分子在乙炔-空气火焰中的形成,而决定 PO 分子形成的是乙炔/空气的比例。实验比较了 PO 分子的两个吸收波长(246.40 nm、247.62 nm)在不同乙炔/空气比例下,其吸收强度的变化情况。图1的结果表明,乙炔/空气

比例对 PO 分子的吸收影响较为明显,当乙炔/空气比例为 0.11~0.15 时,上述两条 PO 分子吸收谱线的吸收强度相对较强;不同的乙炔/空气比例对不同吸收波长的影响略有不同,如 PO 246.40 nm 波长的最大吸收强度较其他两条吸收谱线所需火焰的乙炔流量更大。结合不同 PO 分子吸收谱线检出限,实验选择 PO 分子波长谱线 246.40 nm 用于定量分析。

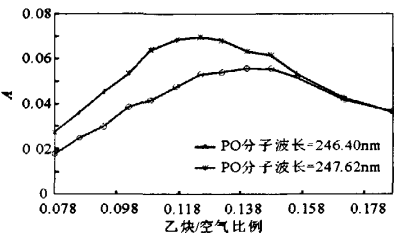


图 1 乙炔/空气比例对 PO 分子吸光度的影响
Fig.1 Influence of the different ratio of acetylene/air on the PO absorption signal at 246.40 nm and 247.62 nm

由于乙炔-空气混合气燃烧时在火焰中形成不同的温度区域,而在各温度区域中所形成的 PO 双原子分子的数量有很大的区别,PO 分子的数量直接影响吸收强度,所以燃烧器的高度会影响 PO 双原子分子的吸收强度。实验对比了不同燃烧器高度对 PO 双原子分子吸光度的影响情况,结果见图 2。

实验采用均匀设计方案对乙炔/空气混合气比例和燃烧器的高度进行了优化比较,确定了乙炔/空气比例为 0.125,燃烧器高度为 9 mm。

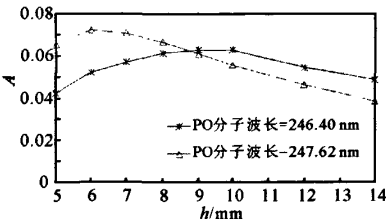


图 2 燃烧器高度对 PO 分子吸光度的影响
Fig.2 Influence of the burner height on the PO absorption signal at 246.40 nm and 247.62 nm

2.3 消解溶剂的选择

对比 3 组不同混合酸 (HNO_3 , $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ 、 $\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{O}_2$) 对 GBW 07603 和 GBW 07605 两种植物标准物质的消解测定结果(仪器条件见 2.2 节),表 2 结果表明,对于实验选择的两种植物标准物质,使用

$\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{O}_2$ 混合酸消解比其他两种混合酸消解有较好的测定结果,更能接近参考值,故本实验采用 $\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{O}_2$ 混合酸消解样品和标准物质。

表 2 不同混合酸消解标准物质 CS AAS 的测定结果
Table 2 Analytical results of phosphorus in Standard Reference Materials by CS AAS with different mixed acid digestion

标准物质	测定值			参考值
	HNO_3	$\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$	$\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$	
GBW 07603	801	780	830	1000 ± 40
GBW 07605	2532	2580	2650	2840 ± 90

2.4 干扰元素

利用 PO 分子测定 P 的含量时,植物中所含金属元素可能会对测定结果存在干扰;但与土壤相比,干扰元素的种类相对少,含量相对低。一般来说,植物中 Al、Ca、K、Mg、Na 等元素的含量相对较高。本文研究了 Al、Ca、Co、Cu、Fe、K、Mg、Na、Ni、Pb 等多种元素对测定 P 时的干扰情况。

2.4.1 光谱干扰

在本研究选择的 PO 分子吸收谱线中,存在与其他金属元素吸收谱线波长相近的情况,如 Co、Fe、Ni、Pb,但从表 3 可以看出,这些金属元素的吸收谱线与 PO 吸收谱线的光谱分辨率($\Delta\lambda$) 均在 0.015 nm 以上(仪器的 $\Delta\lambda$ 为 0.002 nm);虽然 Fe 246.265 nm 吸收谱线与 PO 246.26 nm 吸收谱线仅相差 0.005 nm,但在测定 PO 分子吸收谱线的条件下 Fe 246.265 nm 的灵敏度很低,在较高浓度时也不会产生显著的谱线干扰;如果在含高浓度的 Fe 基质中测定 PO 分子时,可以避免使用 246.26

表 3 在 PO 分子吸收谱线附近的金属元素吸收谱线的波长
Table 3 Absorption lines of four metallic matrix around the PO absorption band heads

基质元素	吸收谱线波长 λ/nm		
	246.40 nm	246.26 nm	247.62 nm
Co	246.378 246.461	246.378	247.664
Fe	246.265 246.374 246.515	246.218 246.265	247.666
Ni	246.526		247.688
Pb			247.642

nm 吸收谱线,而选择其他的谱线进行测定。因此,利用 PO 分子测定 P 元素含量时,可能存在的光谱干扰是可以得到解决的。

2.4.2 化学干扰

使用火焰原子吸收测定 Ca 时, PO_4^{3-} 是产生化学干扰的一个重要因素;同样,当测定 P 时, Ca 也是产生化学干扰的一个主要因素。 Ca^{2+} 与 PO_4^{3-} 在火焰中会产生难以离解的 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, 导致火焰中产生的 PO 分子数量减少,从而降低了灵敏度。实验表明(见图3),随着 Ca 浓度的增大,火焰中产生 PO 分子逐渐减少,导致 PO 的灵敏度逐渐降低;当 Ca/P 浓度比达到一定数量时,几乎不产生 PO 分子的吸收。而 Mg 的干扰情况与 Ca 的干扰略有不同,随着 Mg 浓度的增大, Mg 元素开始对 PO 分子的产生有抑制作用;但是当 Mg 浓度到达一定数值时,这种抑制作用又会逐渐减弱。这可能和 Mg^{2+} 在火焰中与 PO_4^{3-} (及 PO_4^{3-} 与 H^+ 形成的各种离子)存在化学平衡有关,还可能与 Mg 自身产生的氧化物等相关。此外,从实验结果来看, Mg 元素对 PO 的抑制程度也略小于 Ca 元素的抑制程度,这可能与 Ca、Mg 两元素与 PO_4^{3-} 在火焰中形成的盐类离解时所需要的能量大小不同有关。

本研究还考察了不同的酸度对 PO 分子吸收的影响情况。结果表明,在不同浓度的 HCl、 HNO_3 条件下(体积分数 0% ~ 5%), PO 分子的吸收情况并不会受到显著影响。

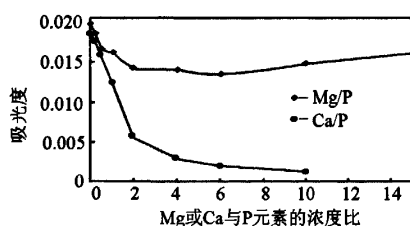


图3 Ca 和 Mg 元素对 PO 分子吸光度的影响

Fig. 3 Influence of Ca and Mg on the PO absorption signals

2.4.3 钙和镁化学干扰的排除

实验研究了多种抑制 Ca、Mg 化学干扰的方法,如使用 EDTA、 SO_4^{2-} 等均不能完全抑制 Ca、Mg 的干扰。通过文献[31]方法及实验发现, Ti 对 Ca、Mg 的干扰均有抑制作用,这主要是 Ca、Mg 在火焰中能与 Ti 结合,并且比 PO_4^{3-} 的结合能力强。

Ti 对 Ca 干扰的消除结果如图4所示,在含 P、Ti、Ca 的混合溶液中,随着 Ti 浓度的增加, Ca 的浓度逐渐降低,而 PO 分子的吸收强度逐渐增加。结果显示,当 Ti 浓度为 Ca 浓度的 2 倍时,溶液中的 Ca 几乎都与 Ti 结合,此时 Ti 对 Ca 干扰 PO 分子已经有效地抑制了。Ti 对于 Mg 干扰 PO 分子的排除如图5所示,在含 P、Ti、Mg 的混合溶液中,当 Ti/Mg 浓度比为 0.5 时, Mg 对 PO 分子的干扰就能被有效地排除。

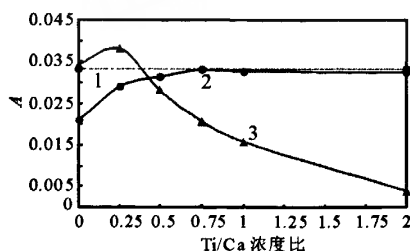


图4 不同 Ti/Ca 浓度比例对 PO 分子在 246.40 nm 波长处吸光度的影响

Fig. 4 Influence of the different Ti/Ca concentration ratios on the PO absorption signals at 246.40 nm

- 1—表示没有 Ti、Ca 时 PO 的吸光度;
2—表示加入 Ti、Ca 后 PO 的吸光度;
3—表示 Ca 239.86 nm 的吸光度。

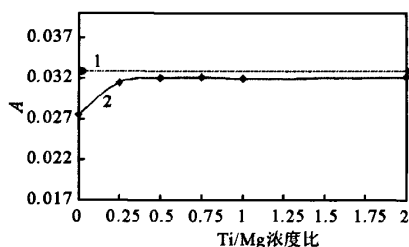


图5 不同 Ti/Mg 浓度比例对 PO 分子在 246.40 nm 波长处吸光度的影响

Fig. 5 Influence of the different Ti/Mg concentration ratios on the PO absorption signal at 246.40 nm

- 1—没有 Ti、Mg 时 PO 的吸光度;
2—加入 Ti、Mg 后 PO 的吸光度。

2.5 检出限和线性范围

利用 P 含量近似空白的溶液进行 11 次重复测定,根据其 3 倍标准偏差计算检出限。实验评估了利用本方法测定 P 的检出限。结果表明,各吸收谱线的检出限大小有所不同, PO 246.40 nm 的检出限

为 20 mg/L,PO 247.62 nm 的检出限为 31 mg/L,故此实验选择 PO 246.40 nm 波长用于定量测定。此外,高压短弧氙灯的强度和测定时间都能影响检出限。实验获得了 P 浓度在 0~1000 mg/L 的校准曲线(见图 6),结果显示 PO 分子的吸收谱线具有较宽的线性范围,可满足 P 含量变化较大的样品的测定。

用 GBW 07603 植物标准物质考察方法的精密度,对该标准物质按照上述的消解方法和仪器条件重复 11 次测定,测定值均在参考值范围内,11 次测定的精密度(RSD)为 6%。

以 HNO₃-H₂O₂ 混合酸消解,在上述优化的仪器条件下测定两种植物标准物质和 4 种植物样品中的磷含量,结果见表 4。

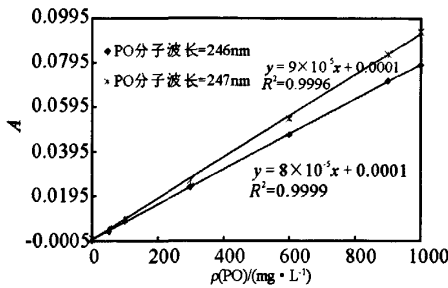


图 6 PO 分子在 246.40 nm 和 247.62 nm 的校准曲线
Fig.6 Calibration curves generated for solutions of PO band heads at 246.40 nm and 247.62 nm

表 4 植物标准物质和样品中磷的测定

Table 4 Analytical results of phosphorus in phant National Standard Materials and practical samples

植物标准物质(样品)	w(P)/(μg·g ⁻¹)	
	测定值 ^①	参考值
GBW 07603	830	1000 ± 40
GBW 07605	2650	2840 ± 90
杨树叶	952	-
菠菜	1240	-
芹菜	2681	-
茶叶	2015	-

① 测定值为 3 次测定的平均值。

3 结语

实验评估了利用高分辨连续光源原子吸收光谱法,以乙炔-空气火焰中形成的 PO 分子测定植物中磷的含量,并通过植物标准物质确证,表明方法相对简单、快速、有效。虽然,利用分子吸收测定

磷的检出限相对较高,但是此方法可以广泛应用于农业肥料、土壤、植物中磷的测定。此外,利用高分辨连续光源原子吸收光谱法对 PO 分子吸收的有效测定,也为其测定其他非金属的分子吸收提供了理论和实践的依据。

4 参考文献

[1] Wolf A M, Baker D E. Colorimetric method for phosphorus measurement in ammonium oxalate soil extracts [J]. *Soil Chemistry and Physics*, 1990, 21: 2257 - 2263.

[2] Pollman R M. Atomic absorption spectrophotometric determination of calcium and magnesium and colorimetric determination of phosphorus in cheese; collaborative study[J]. *J Assoc Off Anal Chem*, 1991, 74(1): 27 - 31.

[3] YS/T 581.9—2006, 氟化铝化学分析方法和物理性能测定方法;第 9 部分:钼蓝分光光度法测定五氧化二磷含量[S].

[4] GB/T 3257.17—1999, 铝土矿石化学分析方法钼蓝光度法测定五氧化二磷量[S].

[5] 范健, 罗重庆, 盛泽元. 利用偏最小二乘法及间接原子吸收光谱法同时测定合金中磷和硅[J]. *分析试验室*, 1993, 12(2): 34 - 36.

[6] 张海燕. 间接原子吸收测定痕量磷的研究及其应用[J]. *云南冶金*, 2000, 19(4): 55 - 57.

[7] Curtius A J, Schlemmer G, Welz B. Determination of phosphorus by graphite furnace atomic absorption spectrometry. Part 1. Determination in the absence of a modifier[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 1986, 1: 421 - 427.

[8] Curtius A J, Schlemmer G, Welz B. Determination of phosphorus by graphite furnace atomic absorption spectrometry. Part 2. Comparison of different modifiers [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 1987, 2: 115 - 124.

[9] GB/T 6730.63—2006, 铁矿石铝、钙、镁、锰、磷、硅和钛含量的测定;电感耦合等离子体发射光谱法[S].

[10] Rowland A P, Haygarth P M. Determination of total dissolved phosphorus in soil solutions [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26: 410 - 415.

[11] Estela J M, Cerda V. Flow analysis techniques for phosphorus: An overview [J]. *Talanta*, 2005, 66: 307 - 331.

[12] Hayashi H, Ohe I, Tanaka T, Hiraide M. Determination of traces of phosphorus in steels by laser

- ablation/low-pressure helium-ICP-MS [J]. *Analytical Sciences*, 2002, 18: 1387 - 1389.
- [13] Becker J S, F Boulyga S, Pickhardt C, Becker J, Buddrus S, Przybylski M. Determination of phosphorus in small amounts of protein samples by ICP-MS [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2003, 375(4): 561-566.
- [14] Hou Shengjie, Ding Mingyu, Zhu Jiang. Simultaneous determination of silicon and phosphorus in soil and plants by reversed-phase ion-pair chromatography [J]. *Talanta*, 2008, 75(1): 178 - 182.
- [15] Rao Ji Long, Berner R A. Development of an electron microprobe method for the determination of phosphorus and associated elements in sediments [J]. *Chemical Geology*, 1995, 125: 169 - 183.
- [16] Hight S C, Bet-Pera F, Jaselskis B. Differential pulse polarographic determination of orthophosphate in aqueous media [J]. *Talanta*, 1982, 29(9): 721 - 724.
- [17] Udnan Y, McKelvie I D, Grace M R, Jakmunee J, Grudpan K. Evaluation of on-line preconcentration and flow-injection amperometry for phosphate determination in fresh and marine waters [J]. *Talanta*, 2005, 66(2): 461 - 466.
- [18] 李冰, 杨红霞. 电感耦合等离子体质谱原理和应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2005: 244.
- [19] Dagnall R M, Thompson K C, West T S. Molecular-emission spectroscopy in cool flames. Part II. The behaviour of phosphorus-containing compounds [J]. *Analyst*, 1968, 93: 72 - 78.
- [20] Aldous K M, Dagnall R M, West T S. The flame-spectroscopic determination of sulphur and phosphorus in organic and aqueous matrices by using a simple filter photometer [J]. *Analyst*, 1970, 95: 417 - 424.
- [21] Haraguchi H, Fuwa K. Determination of phosphorus by molecular absorption flame spectrometry using the phosphorus monoxide band [J]. *Analytical Chemistry*, 1976, 48(4): 784 - 786.
- [22] Skogerboe R K, Gravatt A S, Morrison G I. Flame spectrophotometric determination of phosphorus [J]. *Analytical Chemistry*, 1967, 39(13): 1602 - 1605.
- [23] Cheung Y Y, Kirkbright I G F, Snook R D. The determination of sulphur and phosphorus by cool-flame chemiluminescence emission spectrometry with an electrothermal atomiser for sample introduction [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1982, 140(1): 213 - 219.
- [24] 汪雨. 高分辨连续光源原子吸收光谱仪检测饮用矿泉水中的金属离子 [J]. 岩矿测试, 2007, 26(6): 485 - 489.
- [25] Huang M D, Becker-Rossa H, Florek S, Heitmann U. Determination of halogens via molecules in the air-acetylene flame using high-resolution continuum source absorption spectrometry: Part I. Fluorine [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2006, 61: 572 - 578.
- [26] Welz B. High-resolution continuum source AAS: The better way to perform atomic absorption spectrometry [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2005, 381: 69 - 71.
- [27] Harnly J M, Smith C M M, Radziuk B. Extended calibration ranges for continuum source atomic absorption spectrometry with array detection [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 1996, 51: 1055 - 1079.
- [28] Huang M D, Becker-Ross H, Florek S, Heitmann U. Determination of halogens via molecules in the air-acetylene flame using high-resolution continuum source absorption spectrometry. Part II: Chlorine [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2006, 61: 959 - 964.
- [29] Welz B, Becker-Ross H, Florek S, Heitmann U. High-resolution continuum source AAS [M]. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2003: 31 - 53.
- [30] Huang M D, Becker-Ross H, Florek S, Heitmann U. Determination of sulfur by molecular absorption of carbon monosulfide using a high-resolution continuum source absorption spectrometer and an air-acetylene flame [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2006, 61(2): 181 - 188.
- [31] Huang M D, Becker-Ross H, Florek S, Heitmann U. Determination of phosphorus by molecular absorption of phosphorus monoxide using a high-resolution continuum source absorption spectrometer and an air-acetylene flame [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2006, 21: 338 - 345.
- [32] Pearse R W B, Gaydon A G. The Identification of Molecular Spectra [M]. John Wiley & Sons, 1976: 272 - 276.