

专论与综述

纳米材料在痕量重金属离子测定中的应用

丁宗庆^{1,2}, 吕丽丽², 徐晖²

(1. 鄱阳师范高等专科学校化学系, 湖北 丹江口 442700;

2. 华中师范大学化学学院农药与化学生物学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430079)

摘要: 介绍了纳米材料的吸附性能, 评述了影响其分离富集重金属离子效果的主要因素, 综述了纳米金属氧化物、碳纳米管及其他纳米材料在痕量重金属离子测定中的应用进展, 提出提高纳米吸附材料的选择性和稳定性, 开发便携式商品化的纳米材料萃取小柱是今后的发展方向。

关键词: 纳米材料; 重金属; 分离; 富集

中图分类号: X132; O652.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-2209(2009)02-0014-04

Review of Progress on the Applications of Nanometer Material in
Determination of Trace Heavy Metal IonsDING Zongqing^{1,2}, LV Lili², XU Hui²

(1. Department of Chemistry, Yunyang Teachers College, Danjiangkou, Hubei 442700, China;

2. Key Laboratory of Pesticide & Chemical Biology, Ministry of Education, College of Chemistry,
Central China Normal University, Wuhan, Hubei 430079, China)

Abstract The absorptive function of nanometer materials was described. It was observed that principal factors affected separation and enrichment of heavy metal ions. The progress of application was summarized in determination of trace heavy metal ions with metal oxide nanomaterials, carbon nanotube and other nanometer materials. It was suggested to improve selectivity and stability of nanometer materials in order to develop portable cartridge of extraction for commercialization.

Key words Nanometer material; Heavy metals; Separation; Enrichment

重金属元素对人体健康和生态环境有很大危害, 环境中的重金属可通过食物链在生物体内富集, 对机体的多个系统造成损害^[1]。建立高灵敏度、准确度的痕量重金属离子测定方法, 在环境监测、生态保护等方面具有重要意义。随着环境样品中重金属离子测定要求的提高, 常需测定痕量、超痕量组分或重金属元素的不同形态^[2], 分析样品日益复杂多样, 基体干扰严重, 使用常规的仪器分析方法往往难以得到准确结果。因此, 必须对样品分离富集, 使方法检出限、精密度和准确度获得改善。

固相萃取因具有富集倍数高、选择性好、有机溶剂消耗少、可重复使用富集材料等优点^[3], 已成为测定重金属离子常用的分离富集技术, 在环境分

析中得到了广泛应用^[4-6]。固相萃取的核心部分是固相萃取材料的选择。纳米材料是近年来受到广泛重视的一种新兴功能材料^[7], 纳米粒子粒径为 1 nm~100 nm, 具有一系列特殊的物理、化学性质, 随着粒径减小, 其表面原子数迅速增大, 表面积、表面能和表面结合能也迅速增大。由于其表面原子能与其他金属离子以静电作用相结合, 因而纳米材料对许多重金属离子具有很强的吸附能力, 在较短时间内即可达到吸附平衡^[8], 同时由于比表面积大, 相对于一般的吸附材料有更大的吸附容

收稿日期: 2008-08-19 修订日期: 2009-02-05

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (20070420923)

作者简介: 丁宗庆 (1979), 男, 湖北丹江口人, 实验师, 硕士, 从事痕量分析研究。

量, 是一种较为理想的固相萃取吸附材料。

1 影响分离富集效果的因素

纳米材料分离富集重金属离子的操作步骤与普通固相萃取相似, 无须使用专门仪器。操作步骤为: 取样 y 调节酸度 y 加入纳米材料 (或通过纳米材料小柱) y 离心分离 y 洗脱 y 测定。为了达到定量分离和高富集倍数, 试验条件必须优化。

1.1 操作方式

纳米材料分离富集重金属离子主要有分散法^[9]和过柱法^[10]两种方式。分散法是将一定量纳米材料直接加入待测溶液, 振荡使其充分分散和接触溶液, 一定时间后离心分离, 用适当溶剂洗脱后测定。其特点是方便、快速, 但只适用于小体积样品的测定, 且材料不能重复利用。过柱法是将纳米材料填充在聚四氟乙烯或石英小柱中, 柱两端用玻璃纤维堵塞, 使用前用适当溶剂活化小柱, 使用时将待测溶液以一定流量过柱, 然后用水洗涤, 并以合适试剂洗脱后收集洗脱液测定。过柱法可以富集大体积样品, 并能与恒流泵联用, 使操作自动化, 萃取柱可重复使用, 但萃取时间长, 对柱装填技术要求较高。

1.2 pH 值

pH 值对重金属离子在纳米材料上的吸附起着重要作用。纳米粉体的电性由其表面的荷电离子如 H^+ 、 OH^- 等决定^[11], 粉体表面的荷电性直接影响颗粒表面对离子的吸附作用。以纳米 ZrO_2 为例, 在 $NaCl$ 介质中, 其等电点 (IEP) 为 $4.8^{[12]}$, 当溶液 pH 值高于等电点时, ZrO_2 表面被 OH^- 覆盖而带有负电荷, 可以吸附金属阳离子, 反之则表面吸附 H^+ 而带正电荷, 可以吸附金属含氧酸根阴离子。喻德忠^[11]研究表明, $W(VO_3)_3$ 在 pH 值 $0 \sim 2.0$ 范围内可被纳米 ZrO_2 定量吸附, 而 $Cu(VO_3)_2$ 则在 pH 值 $9.0 \sim 12.0$ 范围内被定量吸附。

1.3 振荡时间和样品流量

对于分散法操作, 振荡时间是影响富集效率的重要因素。很多研究表明^[9], 在适当的酸度条件下, 在 10 min 之内, 纳米材料对多种重金属离子的富集效率可达 95% 以上。由此可见, 分散法是一种高效快速的方法。对于过柱法操作, 样品流量影响离子与吸附材料表面发生吸附作用的接触时间。流量越低, 接触时间越长, 吸附效果越好, 但通常要

求能在短时间内达到尽可能多的吸附, 以节省分析时间。在条件优化中, 应根据样品体积和富集效率来选择合适的流量。

1.4 洗脱剂

一般根据吸附剂与被测元素的性质来选择洗脱剂。在强酸性条件下, 金属阳离子在纳米材料上的吸附率低, 可用 HCl 或 HNO_3 等无机酸将其洗脱; 在强碱性条件下, 可用 $NaOH$ 溶液洗脱。

2 在痕量重金属离子测定中的应用

随着纳米科技几十年的发展, 纳米金属氧化物和碳纳米管的制备、表征技术已相当成熟, 而且这两类材料对许多重金属离子均表现出较好的吸附能力。因此, 应用于分离富集重金属离子的纳米材料多采用纳米金属氧化物和碳纳米管。

2.1 纳米金属氧化物

2.1.1 纳米 TiO_2

纳米 TiO_2 制备方法简单, 具有表面活性强、稳定、再生性能好、价廉易得等优点, 因而成为研究最多的吸附剂。杨兰浩等^[13]用等离子体原子发射光谱法 (ICP-AES) 研究了不同晶型和粒径的 TiO_2 微粉对重金属离子的吸附行为, 结果表明, 当 TiO_2 粒径大小相近时, 晶型对吸附容量有很大影响, 金红石型明显优于锐钛矿型; 当晶型相同时, 纳米级粉体优于微米级粉体。Hang 等^[14]利用 ICP-AES 法研究了纳米 TiO_2 材料对 $Cu(VO_3)_2$ 、 $Mn(VO_3)_2$ 、 $Cd(VO_3)_2$ 、 $Ni(VO_3)_2$ 的吸附性能, 并应用于环境样品分析, 检出限分别为 0.08 ng 、 0.11 ng 、 0.24 ng 、 0.32 ng 。

单一纳米 TiO_2 颗粒细微, 在水溶液中易凝聚失活, 不易沉降, 难以回收再利用, 因而限制了其应用。将纳米 TiO_2 负载在稳定的载体表面, 可以大大增强其稳定性, 解决吸附材料难以回收的问题。Li 等^[15]采用溶胶-凝胶法将纳米 TiO_2 固定在硅胶载体上, 制备的负载型纳米 TiO_2 颗粒均匀, 牢固性好, 采用 ICP-AES 法研究了其对 $Cd(VO_3)_2$ 、 $Cr(VO_3)_3$ 、 $Cu(VO_3)_2$ 、 $Mn(VO_3)_2$ 的吸附性能, 并应用于环境样品分析。负载型纳米 TiO_2 不仅保持了纳米材料对金属离子的吸附性能, 而且增强了稳定性, 易重复利用, 是一种有发展前景的固相吸附材料。

纳米 TiO_2 分离富集重金属离子的应用见表 1。

表 1 纳米 TiO₂ 分离富集重金属离子的应用

重金属离子	富集方法	pH 值	检测手段 ¹	检出限 Q/(ng# L ⁻¹)	样品	文献
Zn(Ⅱ)、Cd(Ⅱ)	分散	5.0	FAAS	1 800、3 000	水样	[9]
Pb(Ⅱ)	过柱	5.0	GFAAS	9.5	水样	[10]
Cd(Ⅱ)	分散	5.0~6.0	GFAAS	4.46	水样	[16]
Cd(Ⅱ)、Pb(Ⅱ)	过柱	5.0	ICP- AES	380、1 720	食品、水样	[17]
Hg(Ⅱ)	分散	8.0	CVAAS	5.0	水样	[18]
Au(Ⅲ)	过柱	8.0	FAAS	210	水样、人造海水	[19]
Sb(Ⅲ)、Sb(V)	分散	3.0	HGAAS	50、60	水样	[20]
W(VI)	分散	3.0	UV- VIS	1 200	水样、沉积物	[21]
Au(Ⅲ)、Ag(N ⁺), Pd(Ⅱ)	过柱	5.0	ICP- AES	16、6、12	地质样品	[22]

¹ FAAS指火焰原子吸收光谱法; GFAAS指石墨炉原子吸收光谱法; CVAAS指冷原子吸收光谱法; HGAAS指氢化物发生原子吸收光谱法; UV- VIS指紫外- 可见分光光度法。

2.1.2 纳米 Al₂O₃

Hu等^[23]将纳米介孔 Al₂O₃ 涂覆在熔融石英毛细管微柱内壁,同时分离富集 Co(Ⅱ)、Ni(Ⅱ)、Cd(Ⅱ),采用等离子体- 质谱法 (ICP- MS)测定,检出限分别为 0.33 ng/L、1.5 ng/L、1.4 ng/L,毛细管微柱可重复使用 20 次,且萃取效率不降低。熊文明等^[24]研究了纳米 Al₂O₃ 对 Pd(Ⅱ)的吸附行为,结果表明其静态饱和吸附容量为 92.78 mg/g,高于同等试验条件下色谱用 Al₂O₃ 和硅胶的吸附容量,回收率 > 95.0%。

为了提高纳米颗粒的吸附选择性,可对其进行表面修饰,将纳米颗粒作为载体,负载一定量的某些重金属分析的特效试剂,可以从复杂基体中更有效地分离待测元素。熊文明等^[25]用对二甲氨基亚苄基罗丹宁负载纳米 Al₂O₃,采用流动注射- FAAS 法测定了铜标样中的痕量银,检出限为 1.7 Lg/L,方法具有良好的选择性。Pu等^[26]将 C- 巯丙基三甲氧基硅烷 (C- MPIMS)负载在纳米 Al₂O₃ 上,用 ICP- MS 法研究了该材料对 Hg(Ⅱ)、Cu(Ⅱ)、Au(Ⅲ)、Pd(Ⅱ)的吸附性能,吸附容量分别达到 10.4 mg/g、16.3 mg/g、15.3 mg/g、17.4 mg/g,检出限分别为 0.49 ng/L、0.006 ng/L、0.46 ng/L、0.26 ng/L。Ramesh等^[27]用表面涂有变色酸的纳米 Al₂O₃ 分离富集、ICP- AES 法同时测定了 Cd(Ⅱ)、Cr(Ⅲ)、Cu(Ⅱ)、Fe(Ⅲ)、Mn(Ⅱ)、Ni(Ⅱ)、Pb(Ⅱ)、Zn(Ⅱ)等 8 种元素,方法快速高效,材料可重复使用 15 次以上。

2.1.3 其他金属氧化物材料

其他金属氧化物纳米材料应用较少。Suleiman等^[28]用纳米 ZrO₂ 固相微柱分离富集、电感耦合等离子体发射光谱法 (ICP- OES)测定了环

境和生物样品中痕量 Mn(Ⅱ)、Cu(Ⅱ)、Cr(Ⅲ)、Zn(Ⅱ)、Ni(Ⅱ)、Co(Ⅱ),检出限分别为 12 ng/L、58 ng/L、24 ng/L、2 ng/L、7 ng/L、36 ng/L。喻德忠等^[29]采用溶胶- 凝胶法合成了纳米氧化铁,并研究了其对 Cr(Ⅲ)的吸附性能,最大吸附量达 398.3 Lg/g。

2.2 碳纳米管

碳纳米管是一种新型吸附材料,具有化学性质稳定、比表面积大等优点,已作为吸附材料用于有机污染物的分析^[30],近年来也有用于测定痕量金属离子的报道。Stafiej等^[31]用硝酸氧化法处理后的碳纳米管分离富集 Cu(Ⅱ)等 7 种离子,FAAS 法检测,对 Cu(Ⅱ)的检出限达 2.1 Lg/L。Tuzen等^[32]在试样中加入吡咯烷二硫代甲酸铵溶液,使其和待测离子形成螯合物,再用多壁碳纳米管 (MWNTs)分离富集- FAAS 法测定了食品、水样中 Cu(Ⅱ)等 6 种离子。Liang等^[33]以 MWNTs 为吸附材料,用 ICP- AES 法测定了水样中 7 种稀土元素,检出限在 3 ng/L~ 57 ng/L 之间。Gil等^[34]用 MWNTs 固相萃取- 流动注射- 电热原子吸收法分析了水样中钒的形态。

2.3 其他纳米材料

纳米钛酸锶钡 (NBST)是一种新出现的可用于分离富集重金属离子的材料,NBST 粉体与纳米金属氧化物相比,由于引入了碱土金属,使其在吸附性能上有明显不同。张东等^[35]用草酸盐共沉淀法制备了高纯 NBST 粉体,对其结构进行了表征,并用 FAAS 法研究了其对水中 Cr(Ⅲ)和 Cr(Ⅵ)的吸附性能,静态吸附量分别为 1.23 mg/g 和 2.44 mg/g,检出限分别为 0.29 ng/L 和 4.6 ng/L,可用于水样中铬的形态分析。

3 展望

纳米材料由于其特殊的物理、化学性质, 对许多重金属离子具有良好的吸附性能, 吸附容量远大于已报道的一些固相萃取富集剂, 是一种性能优良的吸附材料, 在环境分析领域有广阔的应用前景。由于纳米材料对金属离子的吸附是广泛性吸附, 选择性较差, 且在水中易团聚失活, 因而发展新型的纳米吸附材料, 并对其表面修饰以提高选择性, 以及对纳米材料进行负载, 提高其稳定性将是今后研究的重点。目前的应用研究仅处于实验室阶段, 开发便携式商品化的纳米材料萃取小柱, 使其适应野外现场采样, 能大大扩展纳米吸附材料的应用范围, 将是今后的发展方向。

[参考文献]

- [1] 曾丽璇, 陈桂珠, 余日清, 等. 水体重金属污染生物监测的研究进展 [J]. 环境监测管理与技术, 2003 15 (3): 12- 15.
- [2] CAMSW R L, RANALDO M, HENNEBELLE R, et al Speciation analysis of mercury in seawater from the lagoon of Venice by on-line preconcentration HPLC - ICP - MS [J]. Analytica Chimica Acta 2008 622 (1 - 2): 62- 69.
- [3] 李攻科, 胡玉玲, 阮贵华. 样品前处理仪器与装置 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 12- 20
- [4] SOYLAK M, TUZEN M. Diaion SP2850 resin as a new solid phase extractor for preconcentration/separation of trace metal ions in environmental samples [J]. Journal of Hazardous Materials B, 2006 137 (3): 1496- 1501
- [5] GHAEDIM, NIKNAM K, SHOKROLLAH IA, et al Flame atomic absorption spectrometric determination of trace amounts of heavy metal ions after solid phase extraction using modified sodium dodecyl sulfate coated on alumina [J]. Journal of Hazardous Materials 2008 155 (1 - 2): 121- 127
- [6] PUZIO B, MKULA B, FEIST B. Preconcentration of Cd (II) and Cu (II) by solid phase extraction on cyanopropyl modified silica columns using 1, 10, 20-phenanthroline as the complexing agent [J]. Microchimica Acta 2008 160 (1 - 2): 197- 201
- [7] 薛群基, 徐康. 纳米化学 [J]. 化学进展, 2000 12 (4): 431 - 444
- [8] 常钢, 江祖成, 彭天右, 等. 溶胶 - 凝胶法制备高比表面积的纳米氧化铝及其对过渡金属离子吸附行为的研究 [J]. 化学学报, 2003 61 (1): 100- 103
- [9] LIANG P, SHI T Q, LI J. Nanometer size titanium dioxide separation/preconcentration and FAAS determination of trace Zn and Cd in water sample [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry 2004, 84 (4): 315- 321
- [10] LIU R, LIANG P. Determination of trace lead in water samples by graphite furnace atomic absorption spectrometry after preconcentration with nanometer titanium dioxide immobilized on silica gel [J]. Journal of Hazardous Materials 2008, 152 (1): 166 - 171
- [11] 喻德忠. 金属氧化物纳米材料在污染物处理及环境分析中的应用研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004: 68- 88
- [12] 艾德生, 戴遐明, 李庆丰. 纳米 ZnO_2 粉的表面电性研究 [J]. 中国粉体技术, 2001, 74 (4): 34- 37.
- [13] 杨兰浩, 胡斌, 江祖成, 等. 不同晶型和粒径的二氧化钛微粉对金属离子的吸附行为 [J]. 中国稀土学报, 2004, 22 (5): 704- 707
- [14] HANG Y, QIN Y. Separation and preconcentration of trace heavy metal ions with nanometer size titanium dioxide (anatase) and determination by fluorination assisted ET-2 ICP-AES with slurry sampling [J]. Journal of Analytical Chemistry 2003, 58 (11): 1049- 1053.
- [15] LU Y, LIANG P, GUO L. Nanometer titanium dioxide immobilized on silica gel as sorbent for preconcentration of metal ions prior to their determination by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry [J]. Talanta 2005 68 (1): 25 - 30.
- [16] QIAN S H, LI X Q, LIN H, et al Preconcentration of ultra-trace cadmium with nanometer size TiO_2 colloid and determination by GFAAS with slurry sampling [J]. Chinese Chemical Letters 2006 17 (7): 933- 936.
- [17] LIAN N, CHANG X J, ZHENG H, et al Application of dithionite-modified TiO_2 nanoparticles in the preconcentration of trace chromium and lead from sample solution and determination by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry [J]. Microchimica Acta 2005 151 (1 - 2): 81- 88.
- [18] MA X G, HUANG B, CHENG M Q. Analysis of trace mercury in water by solid phase extraction using dithionite-modified nanometer titanium dioxide and cold vapor atomic absorption spectrometry [J]. Rare Metals 2007, 26 (6): 541- 546
- [19] LIU R, LIANG P. Determination of gold by nanometer titanium dioxide immobilized on silica gel packed microcolumn and flame atomic absorption spectrometry in geological and water samples [J]. Analytica Chimica Acta 2007, 604 (2): 114- 118
- [20] ZHENG F Y, QIAN S H, LI S X, et al Speciation of antimony by preconcentration of Sb (III) and Sb (V) in water samples onto nanometer size titanium dioxide and selective determination by flow injection hydride generation atomic absorption spectrometry [J]. Analytical Sciences 2006 22 (10): 1319- 1322
- [21] LI S X, DENG N S, ZHENG F Y, et al Spectrophotometric determination of tungsten (VI) enriched by nanometer size titanium dioxide in water and sediment [J]. Talanta 2003 60 (6): 1097- 1104.
- [22] QIN Y C, HANG Y P, WAN J AUL R, et al Adsorption behavior of noble metal ions (Au, Ag, Pd) on nanometer size titanium dioxide with ICP-AES [J]. Analytical Sciences 2003 19 (10): 1417- 1420.

(下转第 25 页)

相应点的文字链接, 浏览器将向监控中心发送信息, 请求实际电子地图的浏览。

½ 从 Web 服务器返回的 GIS 网页中包含的 JavaScript 在浏览器端运行, 该 JavaScript 代码调用 Google Earth API 向位于 Google 公司内部的 GIS 服务器请求 Google Earth 卫星地图, 同时请求中还包 括从油烟监控系统的监控中心得到的所请求监控 点的经纬度信息。

¾ Google 的 GIS 服务器在接收到该请求后, 将 接收的经纬度和 Google Earth 卫星影像地图匹配, 在卫星地图上定位出监测点的位置, 然后将匹配好 的卫星地图返回给浏览器, 这样用户就可以在浏览 器中的 Google Earth 卫星地图上看到带有定位信 息油烟监测点。

4 结语

该研究设计的远程油烟监控系统将信号检测 与处理、GPRS 传输控制、J2EE 和 Web GIS 技术有 效结合起来, 实现了在线监测与地图定位浏览的油

烟污染监管的新方式, 为当前油烟污染的防治提供 了一套实用的解决方案。B/S 结构、第三方 Web GIS 地图引擎与 GPRS 流量收费的特点, 大大降低 了系统开发、维护的难度及使用的成本。该系统可 移植性好, 可方便用作其他对象的监测。

[参考文献]

[1] 徐敏, 喻义勇. 饮食业油烟监测方法比较 [J]. 环境监测管理 与技术, 2004 16(3): 34- 35.

[2] 文志成. 通用分组无线业务))) GPRS[M]. 北京: 电子工业 出版社, 2004

[3] 胡亚明, 金焱. 浅论 Web GIS 的结 构 [J]. 测绘与空间地理信 息, 2005 28(3): 57- 58

[4] 施元庆. 基于 J2EE 的企业 MIS 实现技术研究 [D]. 南京: 南 京航空航天大学, 2003

[5] 陈能成, 龚健雅, 朱欣焰, 等. 基于 J2EE 的分布式 GIS 研究 [J]. 测绘学报, 2003, 32(2): 158- 163

[6] MAR NCSCU F. EJB 设计模式 [M]. 饶若南, 陈昊鹏, 张保稳, 译. 北京: 机械工业出版社, 2004

本栏目责任编辑 薛光璞

(上接第 17 页)

[23] HU W L, HU B, JIANG Z C. On2line preconcentration and sepa2 ration of Co Ni and Cd via capillary microextraction on ordered mesoporous alumina coating and determination by inductively plasma mass spectrometry (ICP- MS) [J]. Analytica Chimica Acta, 2006 572(1): 55- 62.

[24] 熊文明, 周方钦, 江放明. 纳米氧化铝对贵金属 Pd(Ⅱ) 的吸 附性能研究 [J]. 分析试验室, 2005 24(12): 41- 43.

[25] 熊文明, 周方钦, 江放明. 纳米氧化铝微柱在线预富集火焰 原子吸收光谱法测定痕量银 [J]. 分析化学, 2006 34 (5): 742

[26] FU X L, JIANG Z C, HU B et al CMPIMS modified nanome2 ter2sized alumina microcolumn separation and preconcentration of trace amounts of Hg Cu Au and Pd in biological environ2 mental and geological samples and their determination by induc2 tively coupled plasma mass spectrometry[J]. Journal of Analyti2 cal Atomic Spectrometry, 2004 19(8): 984- 989

[27] RAMESH A, DEVI B A, HASEGAWA H, et al Nanomete2 sized alumina coated with chromotropic acid as solid phase me2 al extractant from environmental samples and determination by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry [J]. Microchemical Journal 2007, 86(1): 124- 130

[28] SULEMAN J S, HU B, FU X L, et al Nanomete2 sized zircon2 um dioxide microcolumn separation/preconcentration of trace metals and their determination by ICP2OES in environmental and biological samples[J]. Microchim Acta, 2007, 159(3- 4): 379- 385.

[29] 喻德忠, 蔡汝秀, 潘祖亭. 纳米级氧化铁的合成及其对六价 铬的吸附性能研究 [J]. 武汉大学学报 (理学版), 2002, 48 (2): 136- 138

[30] LONG R Q, YANG R T. Carbon nanotubes as superior sorbent for dioxin removal[J]. Journal of the American Chemical Socie2 ty 2001, 123(9): 2058- 2059

[31] STAF E J A, PYRZYNSKA K. Solid phase extraction of metal 2 ons using carbon nanotubes[J]. Microchemical Journal 2008, 89(1): 29- 33

[32] TUZEN M, SAYGI K Ö, SOLYAK M. Solid phase extraction of heavy metal ions in environmental samples on multivalled ca2 bon nanotubes[J]. Journal of Hazardous Materials 2008 152 (2): 632- 639

[33] LIANG P, LIU Y, GUO L. Determination of trace rare earth ele2 ments by inductively coupled plasma atomic emission spectrom2 etry after preconcentration with multivalled carbon nanotubes [J]. Spectrochimica Acta Part B, 2005 60(1): 125- 129.

[34] GIL R A, GOYANES S N, POLLA G et al Application of mult2 walled carbon nanotubes as substrate for the on2line preconcen2 tration, speciation and determination of vanadium by ETAAS [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry 2007, 22(10): 1290- 1295.

[35] 张东, 苏会东, 高虹. 钛酸锶钡纳米粉体的制备及其对 铬 (Ⅵ) 和铬 (Ⅲ) 吸附性能 [J]. 冶金分析, 2007, 27(4): 7 - 10.

本栏目责任编辑 姚朝英