

· 专论与综述 ·

固相萃取剂在富集检测极性有机污染物领域的应用研究进展

钟声, 杨立成, 李爱民

(污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 江苏 南京 210093)

摘要:介绍了常用固相萃取剂的类型与适用范围, 综述了近年来在极性有机污染物富集检测中获得应用的新型固相萃取剂, 包括具有高比表面积和亲水表面的聚合物萃取剂, 以及利用分子印迹和免疫亲和技术制备的新型萃取剂。

关键词:固相萃取; 聚合物; 吸附剂; 有机污染物

中图分类号: O652.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-2009(2008)01-0007-05

The Research Development of Polar Organic Pollutants Extraction and Detection with Solid-phase Extraction Sorbents

ZHONG Sheng, YANG Li-cheng, LI Aimin

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Environmental Engineering Department of Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: The type and application of common solid-phase extraction (SPE) were described and the new types of SPE sorbents include polymeric sorbents with a large specific surface area and a hydrophilic character used for extraction of the polar organic pollutants in recent years were reviewed as well as other novel materials, such as molecularly imprinted polymers (MIPs) and immunosorbents (ISs).

Key words: Solid-phase extraction; Polymer; Sorbents; Organic pollutants

随着人们对环境的重视,传统的非极性有机污染物,如有机氯农药、PCB、PAH等^[1],已逐渐被禁止生产使用。近年来,一些极性有机污染物逐渐引起人们关注,主要包括一些新型除草剂和杀虫剂^[2],兽药^[3]和抗生素、激素类药物^[4],个人护理用品^[5],藻毒素^[6]和植物毒素^[7]等,具有一定的极性和水溶性,在环境中分布广泛,并可能存在如内分泌干扰、产生抗药菌、破坏自然生态系统等潜在危害。因此,有效地跟踪、分析这些新型污染物很有必要,而富集检测则成为关键。

为了检测环境和生物样品中的微量、痕量污染物,常采用一些富集分离预处理手段。固相萃取技术(SPE)因其简单、高效、易实现自动化和有机溶剂耗量低等优点,逐渐取代了传统的液-液萃取法(LLE),成为样品预处理的可靠方法。

应用于SPE的填料种类繁多,传统的固相萃取剂^[8]主要包括硅基材料、碳基材料和多孔聚合物等,其应用范围有如下局限^[9]:硅基材料对pH

值的耐受度较差,不能用于极端的酸碱条件,而且比表面积不高,使得负载量较低;碳基材料对一些化合物易产生不可逆吸附,导致回收率不高;传统的苯乙烯-二乙烯苯聚合物和硅基材料通常疏水性较强,对极性化合物的负载量和回收率不高;通常都需要预活化,导致检测时间较长;对特定化合物的选择性不佳,使得最终检测时杂质较多,对待测物造成干扰等。

萃取剂的性能与多种因素有关,一般来说,吸附剂的比表面积^[9]、孔分布^[8]、粒径大小及分布^[10]、表面极性^[8]等都会影响其性能。聚合物萃取剂可以方便地改变极性和提高比表面积,并且能

收稿日期: 2007-02-13; 修订日期: 2007-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578073); “八六三”资源与环境专题基金资助项目(2006AA06Z383); 2006年江苏省“六大高峰”及“333工程”人才基金资助项目

作者简介: 钟声(1984—),男,江西分宜人,硕士,主要从事聚合物材料的合成研究。

能够通过改变合成过程而赋予各种性能。近年来,人们合成了多种新型聚合物萃取剂,在极性有机污染物检测中得到了广泛的应用。

1 高比表面积聚合物萃取剂

通过增加交联剂的用量,可以增加聚合物的比表面积,提高其吸附性能,但交联度过高(如高于 50%),比表面积的增加将不明显。而通过傅式反应交联制得的超高交联树脂,比表面积能得到较大增加,可达到 $1\ 000\ \text{m}^2/\text{g} \sim 2\ 000\ \text{m}^2/\text{g}^{[11]}$ 。

超高交联树脂通常通过 π - π 相互作用和疏水作用吸附有机物^[12]。由于后交联反应的不完全,使得超高交联树脂通常具有较弱的极性,可用于部分极性有机物的富集。

Gimeno 等^[13]用超高交联的 LiChrolut EN 树脂作为固相萃取剂,检测海水中的敌草隆、灭菌丹等

极性农药,检出限可达 $5\ \text{ng/L}$,回收率 $> 85\%$ 。林黎明等^[14]使用同样的树脂,采用梯度洗脱,可在 15 min 内将水产品中的 4 种硝基喹啉代谢物完全分离,测定回收率为 $85\% \sim 90\%$,检出限可达 $0.5\ \mu\text{g/kg}$ 。Fontanals 等^[15]利用对氯苯乙烯和二乙烯苯共聚,在 FeCl_3 催化下后交联制得超高交联树脂,在同等用量下,对极性的草氨酰、灭多虫、苯酚等的萃取效果好于商品化的固相萃取剂 Oasis HLB。

由于超高交联树脂高比表面积的特点,其负载量较常规固相萃取剂大,较少的使用量就可达到良好的萃取效果。但超高交联树脂的极性主要来源于未交联的少量氯甲基和空气氧化形成的酚羟基、羧基等,极性较小且多为弱酸性,对较大极性或没有苯环的化合物的萃取效果不够理想。

常用的商业固相萃取剂^[8]见表 1。

表 1 常用的商业固相萃取剂

萃取剂种类	吸附剂	材料	供应商	比表面积 / ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
硅基	C_{18}		Supelco	500
	ENV I- C_{18}		Supelco	511
碳基	ENV I- Carb		Supelco	100
	Carbograph4		Alltech	210
	Hypersep PGC		ThermoQuest	1 200
大孔树脂	Amberlite XAD - 1	st - DVB	Rohm & Haas	100
	Amberlite XAD - 2	st - DVB	Rohm & Haas	300
	Amberlite XAD - 4	st - DVB	Rohm & Haas	> 750
	PLRP - S - 10	st - DVB	Polymer Laboratories	500
	PLRP - S - 30	st - DVB	Polymer Laboratories	375
超高交联	Envi - Chrom P	st - DVB	Supelco	800 ~ 950
	Bakerbond SDB - 1	st - DVB	J. T. Baker	1 060
	LiChrolut EN	st - DVB	Merck	1 200
	Styrosorb 2m	st - DVB	Purolite International	910
	Styrosorb MT - 43	st - DVB	Purolite International	1 050
	Styrosorb MN - 150	st - DVB	Purolite International	1 070
	Chromabond HR - P	st - DVB	Macherey - Nagel	1 200
	HySphere	st - DVB	Spark Holland	$> 1\ 000$
	Amberchrom GC - 161m	st - DVB	TosoHaas	900
	亲水单体	Amberlite XAD - 7	MA - DVB	Rohm & Haas
Amberlite XAD - 8		MA - DVB	Rohm & Haas	310
Oasis HLB		PVP - DVB	Waters	830
Porapak RDX		PVP - DVB	Waters	
Abse lut Nexus		MA - DVB	Varian	575
化学修饰	Discovery DPA - 6S	Polyamide	Supelco	
	Bond Elut PPL	St - DVB c m	Varian	700
	Isolute ENV +	St - DVB - OH	IST	1 000 ~ 1 100
	Strata X	St - DVB c m	Phenomenex	800

续表

萃取剂种类	吸附剂	材料	供应商	比表面积 / (m ² · g ⁻¹)
	Chromabond EASY	St - DVB c m	Macherey - Nagel	650 ~ 700
	Oasis MCX	PVP - DVB mc	Waters	
	Oasis WCX	PVP - DVB wc	Waters	
	Oasis MAX	PVP - DVB ma	Waters	
	Oasis WAX	PVP - DVB wa	Waters	
	Spe - ed Advanta	St - DVB c m	Applied Separations	

PVP指乙烯吡咯酮, MA指甲基丙烯酸甲酯, c m指化学修饰未知基团, mc指强酸, wc指弱酸, ma指强碱, wa指弱碱。

2 亲水型聚合物萃取剂

极性萃取剂使用时可以避免传统疏水型萃取剂的活化步骤, 且对特定极性化合物有较好的回收率。极性聚合物通常带有较强的氢键或偶极极化能力, 适用于在非极性有机溶剂中提取带有一定极性的有机物。利用聚合物的合成与改性是制备亲水型填料的重要手段。

2.1 引入亲水性单体

使用亲水性的单体, 通过直接聚合或与疏水交联剂共聚的方式可以制得亲水型树脂。

Oasis HLB是一种乙烯吡咯烷酮 - 二乙烯苯聚合物。由于吡咯烷酮具有一定的氢键受体和偶极极性, 联合二乙烯苯的交联作用, 使其适用于多种既有一定极性又有疏水性的芳香环有机物的富集, 是药品^[4]、杀虫剂^[16]、内分泌干扰物^[17]等环境中极性污染物检测时常用的一种固相萃取剂。Fontanals等^[15, 18]以 4 - 乙烯吡啶和 N - 乙烯咪唑为单体, 与二乙烯苯共聚, 引入的碱性基团使其对酸性化合物的吸附能力较苯乙烯树脂有大幅提高。Trochimczuk等^[19]使用丙烯腈、甲基丙烯腈与二乙烯苯共聚制得极性固相萃取剂, 提高了偶极极化度, 将其应用于杀虫剂和除草剂的吸附研究, 吸附量可达 30 mg/g ~ 66 mg/g。

由亲水单体直接聚合的固相萃取剂包括聚甲基丙烯酸甲酯的 XAD - 7 和 XAD - 8 (Rohm & Haas), 对酚类的吸附量比 XAD - 4 更高。由于孔径较大, XAD - 8 是分子量较大的弱极性有机物 (如腐殖酸) 富集分离的首选萃取剂。亲水性更强的聚酰胺聚合物也已商品化, 如 DPA - 6S (Supelco)。

亲水单体共聚固相萃取剂的优点是制备步骤简单, 但其极性受所用单体的限制, 对带有特殊基团化合物的选择性往往不够, 此时可通过修饰的方法提高聚合物材料的选择性。

2.2 在树脂表面修饰极性基团

通过傅式反应, 可以在含有苯环的树脂表面引入极性基团, 从而得到带有不同偶极强度、氢键结合能力及酸碱性的固相萃取剂。在 PS - DVB 上修饰基团是最常见的形式。Fritz等^[20]合成了修饰有乙酰基、羟甲基和磺酸基的固相萃取剂; Masque等^[21 - 22]在商业 XAD 系列树脂上修饰了苯甲酰基、邻苯二甲酰基、硝基邻苯二甲酰基等, 用于极性有机物的固相萃取, 效果大幅提升。

目前使用较为广泛的商品化修饰型固相萃取剂如 Strata X, 其表面基团疑为邻苯二甲酰基^[8], 极性与 Oasis HLB 类似, 适用于普通极性有机污染物的富集。Matamoros^[23]用其萃取富集水体中的水杨酸、异丁苯丙酸、加乐麝香等 PPCPs, 回收率达到 90%; Marazuela等^[24]用其萃取富集牛奶中的抗生素, 回收率达到 70%, 检出限达到 2.4 μg/L ~ 10 μg/L。

亲水单体共聚型聚合物材料上也可以修饰离子交换基团, 以进一步提升其对具有一定离子交换能力化合物的富集效果。Oasis MCX 是通过在 HLB 树脂上修饰磺酸基团得到的具有强酸离子交换和反相两重机理的固相萃取剂。Josefsson^[25]比较了 MCX 树脂和 HLB 树脂对药物 (Carvediol, Betaxolol, B isoprolo l, Propranolol 等) 的富集分离能力, 发现 MCX 的效果明显优于 HLB。Oasis WCX 通过修饰弱酸离子交换基团得到, 适用于强碱性化合物 (如磺胺类抗生素) 的富集^[26]。Oasis MAX 和 Oasis WAX 是通过修饰强碱和弱碱离子交换基团得到的新型固相萃取剂, 特别适用于带有酸性基团的 PPCPs 的富集检测^[25]。

一些研究组^[16, 27]在超高交联树脂上修饰了胺基、苯甲酰基等极性基团, 一方面保持了超高交联树脂的高比表面积, 另一方面改善了树脂的极性。商品化固相萃取剂 Iso lute ENV + 就是在超高交联

树脂 Lichrolut EN 上修饰了羟基。Fontanals 等^[28]合成了修饰有羟氧基的 HXL Gp 超高交联树脂, 用其富集检测环境中的草氨酰等极性污染物, 回收率达到 80%, 而且各项性能均优于商业树脂 Oasis HLB。该类树脂的应用目前还较少, 由于其同时具备了超高交联树脂和亲水型树脂的优点, 比表面积和选择性都有大幅提升, 是未来萃取剂合成的一个重要方向。

3 高选择性新型萃取剂

新型污染物往往结构复杂, 存在着多种异构体或同类新化合物, 传统萃取剂对其缺乏选择性。由于很难消除杂质的影响, 导致后续的色谱、质谱等检测工作受到严重干扰。一些新技术如分子印迹技术、免疫亲和技术的出现, 为新型污染物的特异性选择提供了支持。研究者们在这些技术的基础上开发了新型 SPE 填料, 并应用于新型污染物的富集检测。

3.1 印迹高分子吸附剂

分子印迹技术是以特定的分子为模板, 制备对该分子具有特殊识别功能和高选择性的材料。以目标分子作为模板 (又称印迹分子), 将具有互补结构的功能化聚合物单体分子通过共价键或非共价键的方式与模板分子结合, 加入交联剂发生聚合反应, 反应完成后将模板分子提取出来, 形成具有空穴的能识别模板分子的高分子。

分子印迹技术在新型污染物固相萃取富集中已得到应用。胡树国等^[29]利用分子印迹吸附剂萃取扑热息痛, 负载量得到了提升, 通过梯度洗脱, 可除去结构类似的干扰物, 回收率达到了 103%。Matsui^[30]利用二丁基三聚氰胺为模板分子, 合成了对阿特拉津具有特异性吸附能力的固相萃取剂, 回收率可达 97%, 富集因子达到 50 倍。陈小霞等^[31]利用分子印迹聚合物对生物样品中的氯霉素净化富集, 与 C₁₈ 柱相比, 柱容量更大, 净化效果更佳。

目前印迹高分子在色谱、SPE 等方面虽获得了广泛应用, 但主要还停留在实验室阶段。分子印迹技术因其独特的选择性, 在废水、生物等含有复杂组分的样品检测中, 可简化净化步骤, 提高检测效率, 具有重要的应用价值。

3.2 免疫亲和吸附剂

近年来, 一种利用抗原-抗体作用的吸附剂开始引起人们的关注。选用特定的吸附剂, 通过共价

键将抗体结合到表面, 使其具有与抗原结合的能力, 即可制得免疫亲和吸附剂^[9]。

免疫亲和吸附剂对特定化合物有极强的选择性, 往往不需要净化等步骤, 一步就可富集到位。Mhadhbi 等^[6]利用免疫亲和和色谱检测水体中的藻毒素, 与 C₁₈ 柱相比, 净化效果更好, 检出限可达 60 ng/L, 回收率为 83% ~ 119%。Degele 等^[32]利用免疫亲和 SPE 检测水体和食品中的磺脲类除草剂, 选择性很高, 检出限达到 20 ng/L ~ 100 ng/L, 回收率 > 75%。

目前抗体制备比较复杂, 获取困难, 造成免疫亲和吸附剂的价格较高。由于免疫亲和技术在色谱、生化制药、药品检测等方面都已广泛应用, 很有可能大规模生产, 从而大幅降低成本, 使其在 SPE 领域获得更多应用。

4 展望

近年来, 有关环境中抗生素、激素、生物毒素等新型极性有机污染物的检测、毒理报道呈上升趋势, 国家对水体中新型有机物的监测和控制也将加强。传统的 SPE 填料对极性有机物存在着回收率不高、选择性不强、使用前需要活化等缺点。研究者通过制备超高交联树脂, 提高了 SPE 填料的比表面积, 共聚或修饰极性基团, 改变了固相萃取剂的表面极性, 但将二者的结合研究还较少, 为开发新的 SPE 填料提供了思路。分子印迹技术和免疫亲和技术在国内外方兴未艾, 是提高 SPE 填料选择性的的重要手段。

随着社会的发展, 对城市应对环境突发事件特别是化工事故的能力提出了更高的要求^[33]。传统的监测方法灵敏度低、操作复杂, 难以为快速决策提供准确、有效的参考数据, 对于跟踪、分析污染事故的长期环境影响也缺乏有效手段。因此, 开发具有快速、高效富集能力的 SPE 自动化在线检测系统将具有广阔的应用前景。

[参考文献]

- [1] 周启星. 土壤环境污染化学与化学修复研究最新进展 [J]. 环境化学, 2006, 25(3): 257 - 265.
- [2] DIEZ C, BARRADO E, MAR NERO P, et al. Study of different parameters affecting the derivatization of acidic herbicides with trimethylsulfonium hydroxide to make them suitable for gas chromatography analysis [J]. Journal of Chromatography A, 2006, 1125(2): 244 - 253.

- [3] 庞国芳,张进杰,曹彦忠,等. 高效液相色谱 - 串联质谱法测定家禽组织中硝基喹啉类抗生素代谢残留的研究 [J]. 食品科学, 2005, 26 (10): 160 - 165.
- [4] BATA NEH M, NOLTE J, KUHLMANN B, et al Degradation behavior of selected pharmaceuticals and their main metabolites in model systems for slow sand filtration [J]. Current Pharmaceutical Analysis, 2006, 2 (3): 313 - 322.
- [5] LORANE G, APETTIGROVE M E. Seasonal variations in concentrations of pharmaceuticals and personal care products in drinking water and reclaimed wastewater in Southern California [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40 (3): 687 - 695.
- [6] MHADHB I H, BEN-REJEB S, CLEROUX C, et al Generation and characterization of polyclonal antibodies against microcystins—Application to immunoassays and immunoaffinity sample preparation prior to analysis by liquid chromatography and UV detection [J]. Talanta, 2006, 70 (2): 225 - 235.
- [7] ABRAHAM A, FLAKAS S M, WANG Z H, et al Characterization of polar brevetoxin derivatives isolated from *Karenia brevis* cultures and natural blooms [J]. Toxicon, 2006, 48 (1): 104 - 115.
- [8] FONTANALS N, MARCE R M, BORRULL F. New hydrophilic materials for solid-phase extraction [J]. Trac-Trends in Analytical Chemistry, 2005, 24 (5): 394 - 406.
- [9] MASQUE N, MARCE R M, BORRULL F. New polymeric and other types of sorbents for solid-phase extraction of polar organic micropollutants from environmental water [J]. Trac-Trends in Analytical Chemistry, 1998, 17 (6): 384 - 394.
- [10] WEIGEL S, KALLENBORN R, HUHNERFUSS H. Simultaneous solid-phase extraction of acidic, neutral and basic pharmaceuticals from aqueous samples at ambient (neutral) pH and their determination by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2004, 1023 (2): 183 - 195.
- [11] AHN J H, JANG J E, OH C G, et al Rapid generation and control of microporosity, bimodal pore size distribution, and surface area in Davankov-type hyper-cross-linked resins [J]. Macromolecules, 2006, 39 (2): 627 - 632.
- [12] SYCHOV C S, LYN M M, DAVANKOV V A, et al Elucidation of retention mechanisms on hypercrosslinked polystyrene used as column packing material for high-performance liquid chromatography [J]. Journal of Chromatography A, 2004, 1030 (1 - 2): 17 - 24.
- [13] GMENO R A, AGUILAR C, MARCE R M, et al Monitoring of antifouling agents in water samples by on-line solid-phase extraction-liquid chromatography-atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2001, 915 (1 - 2): 139 - 147.
- [14] 林黎明,林回春,刘心同,等. 固相萃取剂高效液相色谱 - 质谱法测定动物组织中硝基喹啉类代谢产物 [J]. 分析化学研究简报, 2005, 33 (5): 707 - 710.
- [15] FONTANALS N, MARCE R M, BORRULL F. Improved polymeric materials for more efficient extraction of polar compounds from aqueous samples [J]. Current Analytical Chemistry, 2006, 2 (2): 171 - 179.
- [16] LU J L Z, WLDNG A. Simultaneous determination of endocrine disrupting phenolic compounds and steroids in water by solid-phase extraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2004, 1022 (179 - 189): 179 - 189.
- [17] XUEN D, XU X B, JIN Z L. Screening 31 endocrine-disrupting pesticides in water and surface sediment samples from Beijing Guanting reservoir [J]. Chemosphere, 2005, 61 (11): 1594 - 1606.
- [18] FONTANALS N, MARCE R M, GALIA M, et al Preparation and characterization of highly polar polymeric sorbents from styrene-divinylbenzene and vinylpyridine-divinylbenzene for the solid-phase extraction of polar organic pollutants [J]. Journal of Polymer Science Part A - Polymer Chemistry, 2003, 41 (13): 1927 - 1933.
- [19] TROCHMCZUK A W, STREAT M, MALIK D J. Sorption of pesticides and herbicides on highly polar polymeric sorbents [J]. Separation Science and Technology, 2003, 38 (8): 1813 - 1827.
- [20] FRITZ J S D, PHILIP J S, LUTHER W. Methods and materials for solid-phase extraction [J]. Journal of Chromatography A, 1995, 691 (133): 133 - 140.
- [21] MASQUE N, GALIA M, MARCE R M, et al New chemically modified polymeric resin for solid-phase extraction of pesticides and phenolic compounds from water [J]. Journal of Chromatography A, 1998, 803 (1 - 2): 147 - 155.
- [22] LEON-GONZALEZ M, EPEREZ-ARRIBAS L V. Chemically modified polymeric sorbents for sample preconcentration [J]. Journal of Chromatography A, 2000, 902 (1): 3 - 16.
- [23] MATAMOROS V J M. Elimination of pharmaceuticals and personal care products in subsurface flow constructed wetlands [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40 (18): 5811 - 5816.
- [24] MARAZUELA M, DMORENO-BONDIM C. Multiresidue determination of fluoroquinolones in milk by column liquid chromatography with fluorescence and ultraviolet absorbance detection [J]. Journal of Chromatography A, 2004, 1034 (1 - 2): 25 - 32.
- [25] JOSEFSSON M A. Sample preparation on polymeric solid phase extraction sorbents for liquid chromatographic-tandem mass spectrometric analysis of human whole blood—A study on a number of beta-agonists and beta-antagonists [J]. Journal of Chromatography A, 2006, 1120 (1 - 2): 1 - 12.
- [26] BALAKRISHNAN V K, TERRY K A, TOPIO I. Determination of sulfonamide antibiotics in wastewater: A comparison of solid phase microextraction and solid phase extraction methods [J]. Journal of Chromatography A, 2006, 1131 (1 - 2): 1 - 10.

(下转第 32 页)

- 痕量镉 [J]. 中国环境监测, 1997, 13(2): 20 - 21.
- [5] 吴宪龙. 离子对高效液相色谱测定锡铅锌的 5 - 硝基 - 2 - [3 - (4 - 磺苯偶氮苯) - 1 - 三氮烯] 苯甲酸络合物 [J]. 理化检验 - 化学分册, 1998, 34(3): 104 - 106.
- [6] 潘丽梅, 王光建, 田永碧, 等. 反相 HPLC 法同时测定头发、尿和血中锌铜铅镉 [J]. 山西预防医学, 2000, 9(4): 315 - 317.
- [7] 吴彩威. 溶出伏安法测定水中铅镉 [J]. 广东卫生防疫, 2000, 26(2): 21 - 22.
- [8] 宋远志, 刘炳华, 陈美霞. 污水中铅镉的溶出伏安测定法 [J]. 环境与健康杂志, 2003, 20(4): 242 - 243.
- [9] 黎艳飞, 张正奇. 用色谱膜法富集阴极吸附溶出伏安法测定空气中的镍铜铅镉 [J]. 分析测试学报, 1999, 18(1): 72 - 74.
- [10] 丁建文, 吴裔, 李世荣, 等. 铅镉示波极谱法测定 [J]. 中国卫生防疫杂志, 2006, 16(6): 689 - 690.
- [11] 贾雨. 示波极谱法同时测定水中微量铅镉 [J]. 理化检验 - 化学分册, 1998, 34(2): 84 - 85.
- [12] 杨明华, 金传明, 郑云法, 等. 1 - (6 - 硝基 - 2 - 苯并噻唑) - 3 - (4 - 硝基苯) - 三氮烯与镉的显色反应研究 [J]. 冶金分析, 2001, 21(5): 47 - 49.
- [13] 汪朝存, 哈成勇. 2 - 吡啶重氮氨基偶氮苯与镉 () 的显色反应及其应用 [J]. 分析化学, 1998, 26(10): 1260 - 1263.
- [14] 王文革, 赵书林. 1 - 偶氮苯 - 3(6 - 甲氧基 - 2 - 苯并噻唑) - 三氮烯作为测定镉的光度试剂研究 [J]. 冶金分析, 2004, 24(2): 7 - 9.
- [15] 薛媛媛, 郭亚伟, 汪军涛, 等. 苯基荧光酮 - 溴代十六烷基三甲铵光度法测定微量镉的研究 [J]. 中国环境监测, 1999, 15(4): 34 - 35.

(上接第 11 页)

- [27] LIA M, ZHANG Q X, WU H S, et al A new amine-modified hypercrosslinked polymeric adsorbent for removing phenolic compounds from aqueous solutions [J]. Adsorption Science & Technology, 2004, 22(10): 807 - 819.
- [28] FONTANALS N, GALIÀ M, CORMACK P A G, et al Evaluation of a new hypercrosslinked polymer as a sorbent for solid-phase extraction of polar compounds [J]. Journal of Chromatography A, 2005, 1075(1 - 2): 51 - 56.
- [29] 胡树国, 王善韦, 何锡文. 扑热息痛分子印迹聚合物应用于固相萃取的研究 [J]. 化学学报, 2004, 62(9): 864 - 868.
- [30] MATSUI J F K Solid-phase extraction with a dibutylmelamine-imprinted polymer as triazine herbicide-selective sorbent [J]. Journal of Chromatography A, 2000, 889(1 - 2): 25 - 31.
- [31] 陈小霞, 岳振峰, 郑卫平, 等. 氯霉素分子烙印固相萃取柱的制备及萃取条件优化 [J]. 华南理工大学学报, 2004, 32(7): 51 - 55.
- [32] DEGELMANN P, EGGER S, JURLING H, et al Determination of sulfonylurea herbicides in water and food samples using sol-gel glass-based immunoaffinity extraction and liquid chromatography-ultraviolet/diode array detection or liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(6): 2003 - 2011.
- [33] 张丹宁, 许立峰. 浅谈环境预警应急指挥中心的构建与运作 [J]. 环境监测管理与技术, 2007, 19(2): 1 - 3.

本栏目责任编辑 姚朝英

(上接第 17 页)

定, 尤其适于复杂组分水样中痕量、超痕量 Hg^{2+} 的测定, 具有较好的应用前景。

[参考文献]

- [1] 刘永和. 电沉积 - 石墨炉原子吸收光谱法在痕量金属元素测定中的应用 [J]. 实用技术与管理, 1991, 8(1): 33 - 36.
- [2] 刘伟民, 陈晓青, 徐金华. 催化动力学 - 流动注射停留分光光度法测定微量汞的研究 [J]. 分析实验室, 2001, 20(3): 73 - 75.
- [3] 张爱梅. 动力学光度法测定污水中痕量汞 [J]. 分析化学, 1998, 26(10): 1222 - 1227.
- [4] 刘长增, 刘晓泓. 配体交换反应催化动力学光度法测定痕量汞 [J]. 分析化学, 2004, 32(9): 1272 - 1272.
- [5] 刘长增, 王淑仁. 污水中痕量汞的动力学分光光度法测定 [J]. 分析化学, 1990, 18(4): 348 - 351.
- [6] 王建华, 吕菊波. 测定痕量汞的新催化动力学分光光度法研究 [J]. 分析化学, 1996, 24: 717.
- [7] PHULL M. Trace element determination in environmental pollution: A kinetic method for mercury estimation [J]. Talanta, 1981, 28: 610 - 612.
- [8] TABATA M. A kinetic method for the determination of a nanogram amount of mercury (ii) by its catalytic effect on the complex formation reaction of manganese(II) with , , , - Tetraphenylphosphinesulfonate [J]. Analytical Letters, 1980, 13: 427 - 438.
- [9] 刘永和. 催化分光光度标准加入法测定水中痕量汞的研究 [J]. 理化检验 - 化学分册, 2007, 43(10): 830 - 832.
- [10] 林源红, 王鸿飞. 汞测定中应注意的几个问题 [J]. 环境监测管理与技术, 2002, 14(2), 30.
- [11] 刘永和. 仪器分析 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1992: 38.

本栏目责任编辑 李文峻 薛光璞