

• 专论与综述 •

大气颗粒物中多环芳烃的源解析方法

杨旭曙, 王正萍, 宋艳涛

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 综述了用于大气颗粒物中多环芳烃(PAHs)源解析的主要定性、定量方法, 并对其优缺点作了总结。比值法多用于定性解析, 化学质量平衡法(CMB)要求源的成分谱较全面, 而多元统计法则要求输入的数据较多。由于缺乏各污染源较完整的PAHs成分谱, 且PAHs易发生化学反应, 所以CMB法难以广泛推广, 而多元统计法对源成分谱要求低, 且不需要考虑PAHs的降解, 因而具有推广价值。

关键词: 多环芳烃; 大气颗粒物; 源解析; 受体模型

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1006-2009(2002)04-0010-05

Discussion on Methods of Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on Airborne Particulate

YANG Xu-shu, WANG Zheng-ping, SONG Yan-tao

(School of Chemical Engineering, NUST, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The main qualitative and quantitative methods for source apportionment of PAHs on airborne particulate are reviewed and evaluated in this article. Ratio method is mainly applied in qualitative apportionment. Comprehensive source fingerprints are required for chemical mass balance method, while more data are required for multivariate statistical analysis method. Broad application of chemical mass balance method is hindered by the absence of a reliable combustion source fingerprints and the reactivity and instability of PAHs, while comprehensive source fingerprints aren't required and decay of PAHs can not be considered for multivariate statistical analysis method. Therefore multivariate statistical analysis method is of high value of application.

Key words: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); Airborne particulate; Source apportionment; Receptor model

大气中可吸入悬浮颗粒物是我国各主要工业城市的大气主要污染物之一, 而其中所含的多环芳烃(PAHs)对人体的伤害极大, 多种PAHs已被鉴定出具有致癌性^[1]。欧美各国已将苯并(a)芘(BaP)等一些有致癌活性的PAHs列入大气优先控制污染物之中。我国大气环境标准GB 3095-1996规定BaP质量浓度 $< 0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 而欧美等国的大气环境标准规定的更严($< 0.25 \text{ng}/\text{m}^3$)。研究还表明大气颗粒物和机动车排放颗粒物的有机溶剂提取物的致癌活性实际超过按其已知PAHs含量推算的结果, 上述颗粒物具有所谓的“直接致癌活性”。

因此通过对大气颗粒物中PAHs的源解析, 识别主要污染源, 计算出各污染源对颗粒物中PAHs的贡献率, 可以为控制我国大气颗粒物中的PAHs污染物提供必要的决策依据。

1.1 PAHs的来源

大气环境中的PAHs来源于化石能源及其他有机物不完全燃烧或热降解产物, 它主要以气、固两种形态存在^[2]。刘维立、孙韧等^[2, 3]已对PAHs的来源作了总结, 在美国等发达国家, 家庭燃煤是一项贡献率很大的污染源, 我国则有许多差异, 由于饮食习惯不同, 烹饪污染源成为我国特色的污染源。

1.2 PAHs在不同颗粒物中的分布和气、固平衡

大气颗粒物中, 低元环、易挥发性PAHs的含量相对较低, 而多元环、难挥发性PAHs含量相对较高。Yamasaki已证实在气温条件下, 大量三环至四环PAHs成气态, 六元环PAHs则吸附在颗粒物上, 并给出了气态PAHs和颗粒态PAHs之间的

收稿日期: 2002-01-02; 修订日期: 2002-07-09

作者简介: 杨旭曙(1972-), 男, 江苏泰州人, 研究生, 硕士, 主要从事大气颗粒物中多环芳烃的分析及源解析研究。

1 PAHs的来源及其在大气环境中的行为

平衡关系式。小颗粒物中 PAHs 含量高,大颗粒物中 PAHs 含量低。粒径 $< 7 \mu\text{m}$ 的可吸入颗粒物能通过上呼吸道进入人体, $< 3.3 \mu\text{m}$ 的颗粒物可沉积在支气管或肺泡内。研究表明可吸入颗粒物所含的 PAHs 约占总量的 95%, 粒径 $< 1.1 \mu\text{m}$ 的微小颗粒物所含的 PAHs 占总量的 60% ~ 70%, 可见 PAHs 几乎全部吸附在可吸入颗粒物上, 而且大部分包含在能沉积在肺泡内的微小颗粒物上^[4]。Baek^[5] 认为颗粒态 PAHs 浓度在不同粒径颗粒物上呈单峰分布, 峰顶为 $0.4 \mu\text{m} \sim 1.1 \mu\text{m}$ 。有报道认为存在两种不同的粒径分布范围, 一种是粒径 $< 1 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 其所含 PAHs 为相对不挥发的、由吸附形成的 PAHs; 另一种是粒径 $> 1 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 其所含 PAHs 是相对挥发性的, 其所吸附的颗粒物由冷凝产生, 大多颗粒态 PAHs 吸附在以积聚的方式形成的颗粒物上(其粒径为 $0.2 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$)。Antonio 等研究还表明柴油车是低环 PAHs 的主要来源, 而轻型汽油车则是多元环 PAHs(如 BaP)的主要来源。由柴油车产生的 PAHs 既存在于 $\text{PM} < 0.12 \mu\text{m}$ 的颗粒物上, 又存在于 PM 为 $0.12 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$ 的颗粒物上; 而由汽油车产生的 PAHs 几乎只存在于 $\text{PM} < 0.12 \mu\text{m}$ 的颗粒物上。

1.3 PAHs 的季节性变化规律

国内外学者对大气颗粒物中 PAHs 的研究分析表明, 颗粒物中 PAHs 的质量浓度有明显的季节性特征, 一般采暖期的 PAHs 质量浓度明显高于非采暖期。这种差别的主要原因是: ①燃料结构不同^[6]; ②气象因素的变化(包括光强, 温度和湿度); ③化合物自身的物理化学性质; ④被吸附的颗

粒物的特性。

2 PAHs 的源解析

2.1 PAHs 源解析的发展概况

国外对 PAHs 的源解析较早。20 世纪 60 年代早期, Sawicki 首先提出使用 PAHs 化合物成分谱分析不同源对其所排放化合物浓度的影响。Blifford 和 Meeker 在进行污染源解析时, 首先把着眼点从排放源转移到受体(即受污染源影响的某一部局大气环境), 通过分析采集的颗粒物样品推断污染物的来源。因为受体模型不要求对污染物排放源进行详细调查, 不依赖于气象资料和气溶胶在大气中的许多特征参数, 而且能解决扩散模型难以处理的一些问题, 因而自 20 世纪 70 年代受体模型问世以后, 发展迅速。就 PAHs 的源解析的受体模型, 孙韧等^[3]已作了总结。

早期人们多用比值法、轮廓图法和特征化合物法等定性半定量方法对污染源进行识别和解析。孙韧和汤国才等^[3, 7]将这几种方法的主要技术内容和方法优缺点作了比较。后来人们开始用定量方法从事大气颗粒物中 PAHs 源解析的研究, 并取得了重大成果^[8, 9]。

2.2 PAHs 的定量解析方法

2.2.1 比值法

不同源其特征 PAHs 比值有不同的特点, 由此可识别 PAHs 的来源。其中比较有价值的是 BaP、晕苯(Cor)和苯并(g, h, i)芘(BghiP)的比值。一般认为 $\text{BaP}/\text{Cor} > 1$ 为燃煤源, $\text{BaP}/\text{Cor} < 1$ 为燃油源^[7, 9]。后有学者对此作了总结^[8], 见表 1。

表 1 各类源典型颗粒物中 PAHs 的特征比值

污染源	苯并(a)芘 芘	菲 萘	4,5-亚甲基菲 甲基菲	苯并(a)蒽 蒽	苯并(e)芘 苯并(a)芘
燃煤	0.9~6.6 ^[10]	3 ^[11]	0.3 ^[11]	1.0~1.2 ^[11, 12]	0.84~1.6 ^[11, 12]
车辆	0.3~0.78 ^[10, 13]	2.7 ^[13]		0.63 ^[13]	
汽油燃烧排放物	0.3~0.4 ^[14]	3.4~8 ^[14]		0.28~1.2 ^[11, 14]	1.1~13 ^[11, 14]
柴油源 ^[14]	0.46~0.81	7.6~8.8		0.17~0.36	2.0~2.5
森林燃烧 ^[11]		3	1	0.93	0.44
道路扬尘 ^[11]		8	0.3		1.4
焦炉 ^[15]	5.1	0.79		0.70	2.6
焚烧 ^[10]	0.14~0.6				
炼油厂 ^[10]	0.65~1.7				

Lee 等^[16]用比值法对英国伯明翰市中心交通稠

密处和校区两点处的 PAHs 作了研究, 并分别用苯

并(e)芘(BeP)和 Cor/BeP 作交通源的指示剂,解析出两点处交通废气源对 4-7 环 PAHs 的贡献率分别是 80%~82% 和 61%~67%。用 $\Sigma\text{MePhen}/\text{Phen}$ (甲基菲/菲)的比值,估计出市中心柴油车辆废气对 PAHs 的贡献率占总交通源贡献率的 60%~84%。

Nielsen^[17]以 BeP 作 PAHs 源解析的指示剂,由工作日闹市区 BghiP/BeP 和 Cor/BeP 的比值(其中交通源 BghiP/BeP 为 2.02, Cor/BeP 为 1.54;非交通源 BghiP/BeP 为 0.8, Cor/BeP 为 0.3),解析出工作日闹市区交通源废气对 BeP 的贡献率为 90%。这与用两点处(街区与公园)的 PAHs 浓度的比值所解析出的贡献率 86% 相吻合。

2.2.2 化学质量平衡法

化学质量平衡法(CMB)假设在受体所测得污染物的量是各类污染源对其贡献量的线性相加,可表示成:

$$C_i = \Sigma(S_j F_{ij}) + E_i \quad (1)$$

式中:

- C_i ——受体上第 i 种污染物的浓度;
- S_j ——污染源 j 对污染物的贡献率;
- F_{ij} ——污染源 j 中污染物 i 的浓度;
- E_i ——相似不确定性误差。

因此对模型输入的数据包括:各类污染源的成分谱(F_{ij});受体颗粒物上 PAHs 的浓度(C_i);相似不确定性的估计(E_i)。另外要对源的线性关系予以检验。

许多 PAHs 易降解且易与大气中的 NO_x 、 O_3 、 HNO_3 、OH 根等发生化学反应^[18]。为了使具有反应活性的 PAHs 适用于 CMB 模型,先后有人提出不同的模型。1973 年 Friedlander 提出了城市大气环境连续搅动箱式反应模型(CSTR),并假设有机物如 PAHs 均以同一速率降解,降解因子 α 定义为受体浓度与经颗粒物质量标准化后的源浓度的比值,表示为:

$$\alpha = 1/(1 + k_{ij}\tau_j) \quad (2)$$

式中:

- α ——PAHs i 的降解因子;
- k_{ij} ——污染源 j 中 PAHs i 的降解常数;
- τ_j ——源 j 在反应器中的平均停留时间。

Pistikopoulos 等^[19]提出用校正因子定量计算出 PAHs 在迁移过程中的化学变化,以此对 CMB 模型作了修改。此校正因子考虑到 PAHs 所有可

能的变化,其中包括了迁移时间的测定,所以它具有扩散模型参数的特征。受体处测得的 PAHs 浓度经过定量校正以弥补 PAHs 在污染源到受体过程中的损失,其中校正因子由 Masclet^[18] 计算所得的衰减因子(RDI)而求得。

1993 年 Cheng & Richard^[20]认为每种 PAHs 示踪物有其不同的反应常数,因此就有不同的反应时间,并提出一个模型,认为每种源 j 以不同的边界和体积排放于不同的反应器中,这就允许在各自的反应器中有不同的停留时间(τ)和老化时间,进而提出用降解反应因子 α 来校正 CMB 模型,并认为 α 与一级反应速率常数 k 有关,所以原表达式应包括降解反应因子 α 。改进后的表达式为:

$$C_i = \Sigma(S_j F_{ij}\alpha_j) + E_i \quad (3)$$

式中:

- C_i 、 S_j 、 F_{ij} 、 E_i ——含义与表达式(1)相同
- α_j ——污染源 j 中 PAHs i 的降解因子。

CMB 方法有一定的局限性:①缺乏各污染源较完整可靠的成分谱;②同一类型污染源排放的 PAHs 成分谱变化较大(如燃煤锅炉源的成分谱与锅炉的型号、煤的类型、燃烧温度、氧气供给相关)^[21];③PAHs 被排入大气后,易发生化学反应,生成其他污染物,对源排放组分的受体浓度会产生较大的误差。

2.2.3 多元统计法

多元统计法包括主成分回归法(PCR)、一般因子分析法/多元回归法(FA/MR)和目标因子转换分析法(TTFA)。Kleinman^[22,23]发展了 FA/MR 模型以解析纽约市的总悬浮颗粒物(TSP)。此方法首先用 FA 识别污染源的种类以及各污染源的惟一示踪物(unique tracer),然后解析在逐步多元回归中作为独立变量的污染源标识示踪物,所得系数作为污染源对污染物的贡献率。Daisey, Kneip, Hopke and Shah 都曾应用此模型解析大气气溶胶中的各类污染物^[24-26]。

FA/MR 与其他模型比较,优点是:①使用简单;②不需要研究地区优先源的检测数据;③对 PAHs 成分谱缺乏的污染源仍可以解析;④不必了解降解因子或假设为 1;⑤可广泛使用统计软件对数据进行处理^[3,27]。其不足是:①当一个或多个源示踪物不是来自于同种类型的污染源时,它的应用就受到限制;②需要受体样品数较多,一般超过 50 个。③实际使用中,多元分析技术只能识别 5 个~8 个

污染源^[3,13,27]。1987 年, Morandi^[27] 对 FA/MR 模型进行了改进, 使得 FA/MR 模型能应用于解决示踪物来自于多种类型污染源的解析问题。

FA/MR 模型表达式如下:

$$y = \sum_{i=1}^p k_i x_i + R \quad (4)$$

式中:

y —— 相关变量的浓度;

x_i —— 污染源示踪物的浓度;

k_i —— 示踪物的回归系数;

p —— 不同类污染源的数量;

R —— 常数。

p 值可通过对数据的因子分析获得, 而 x_i 值可由逐步多元回归得到。上述公式只适用于污染源示踪物仅来自于同类污染源的情况。如果要适用于除了一种污染源示踪物外, 其他示踪物全都来自于惟一污染源类型, 则公式改为:

$$x_i = \sum_{i=1}^{p-1} k_i' m_i + R' \quad (5)$$

式中:

x_i —— 污染源示踪物的浓度;

p —— 示踪物所来自的污染源类型的个数;

m_i —— 示踪物的浓度;

k_i' —— 示踪物的回归系数;

R' —— 与余下的污染源相关的示踪物浓度的余数。

示踪物来自于多种类型源的某类污染源示踪物浓度的余数估计如下:

$$R' = x_i - \sum_{i=1}^{p-1} k_i' m_i \quad (6)$$

用多元统计法对大气颗粒物上 PAHs 进行源解析, 国外研究的比较多。

Harrison 等^[13] 用多元统计技术(主成分分析法/多元线性回归法(PCA/MLRA))对大气中 PAHs 进行源解析, 通过 PCA 对 35 个变量进行解析, 最后得到 6 类污染源: 有车辆通过的道路灰尘、石油燃烧、二次气溶胶、焚烧、机动车排放物和海盐。其中对粗大颗粒物贡献率最大的是灰尘, 对细颗粒物贡献率最大的是机动车排放物, 约占 50%。交通对 BaP 的贡献率约占 88%。

1994 年—1995 年, Matt 等^[28] 用 FA/MR 法对芝加哥沿海地区空气中 PAHs 源/沉降关系及其源解析进行了研究, 成功地解析出 4 类污染源, 其中

煤燃烧贡献率为 48% ± 5%, 天然气燃烧贡献率为 26% ± 2%, 机动车贡献率为 9% ± 4%, 焦炉的贡献率为 14% ± 3%。所得结果与所在地区能源消耗结构相吻合, 并与用 PAHs 比值法所得结果相一致。

2.3 国内对 PAHs 源解析的研究进展

我国学者在 PAHs 源解析研究上作了许多工作, 并使源解析研究取得了一定进展。20 世纪 80 年代, 戴树桂等^[29] 提出了目标识别因子分析(TR-FA), 并首次在我国运用混合模型(FA/CMB)进行污染源解析研究, 这些研究促进了受体模型在我国的应用和发展。成玉、朱坦等^[30] 运用比值法, 通过 Flu/Byr(荧蒹/芘)、间四联苯/荧蒹、BaP/Cor 和 BaP/BghiP 的比值识别煤炭类、油类、垃圾焚烧等高温燃烧源。为了利用 CMB 法受体模型解析各污染源对环境空气 PAHs 的贡献率, 朱磊等^[31] 对燃烧煤烟尘和焦化厂的 PAHs 成分谱作了研究。刘建勇^[32] 等采用 FA/MR 法对杭州市室内外空气中 PAHs 来源及贡献率进行了研究, 求得 PAHs 总量与公共因子间的特征方程, 结果表明影响室内外空气中 PAHs 浓度的主要因子依次为烹饪、卫生球的挥发、吸烟及加热、汽车尾气, 并计算出这 4 种污染源对 4 种代表化合物在室内外空气中的贡献率。

3 结语

受体模型为 PAHs 的源解析提供了便利。定性解析方法主要用于识别污染源的类型。化学质量平衡法(CMB)和多元统计法(FA/MLR)各有其优缺点。化学质量平衡法要求源的成分谱全面, 且降解因子要求准确, 对于解析污染源数目多的体系更显优越; 而多元统计法分析源数目少的体系很成功, 它要求数据量大, 而对各种污染源的成分谱以及 PAHs 的降解情况要求较低。由于各污染源的 PAHs 成分谱缺乏, 且各地区差异较大, 而且要知道各 PAHs 的停留时间和降解率, 因而化学质量平衡法在其应用上受到限制, 而多元统计法不受这些因素限制, 简便易行, 是进行源解析的首选方法。无论何种方法, 对 PAHs 源的成功解析都要求测得的数据准确可靠。

[参考文献]

- [1] DIANA J Freeman, FRANK C R Cattell. Wood burning as a source of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons [J] .

- Environ Sci & Technol, 1990, 24: 1581– 1585.
- [2] 刘维立. 大气中多环芳烃的来源及采样方式的研究[J]. 城市环境与城市生态, 1999, 12(5): 58– 60.
- [3] 孙 韧. 大气颗粒物上多环芳烃的识别和源解析的进展[J]. 城市环境与城市生态, 1997, 10(3): 27– 31.
- [4] 蒋亨光. 多环芳烃在不同粒径颗粒物中的分布[J]. 环境科学, 1985, 6(2): 18– 23.
- [5] BAEK S O. Significance and behavior of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban ambient air[D]. Ph D Thesis, Imperial College of Science and Technology, University of London, 1988.
- [6] 洪伟雄. 北京市地区大气可吸入颗粒物中多环芳烃的分布规律[J]. 环境科学, 7(1): 51– 58.
- [7] 汤国才. 气溶胶中多环芳烃的源识别方法[J]. 环境科学研究, 1993, 6(3): 37– 41.
- [8] SIMICIK M F, EISENREICH S J, LIOY P J. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and lake Michigan[J]. Atmos Environ, 1999, 33: 5071– 5079.
- [9] DUVAL M M, FRIEDLANDER S K. Source resolution of PAH in Los Angeles atmosphere— Application of CMB with first order decay[R]. U S EPA, Report No. EPA – 600/2– 81– 161, 1981.
- [10] DAISEY J M, KEYKO M H, KNEIP T J. Source identification and allocation of polynuclear aromatic hydrocarbon compounds in the New York city aerosol: methods and applications[A]. in: Jones P W, Leber P. (Eds) Polynuclear Aromatic Hydrocarbons[C]. Ann Arbor Science: Ann Arbor, 1979. 201– 215.
- [11] GSCHWEND P M, HITES R A. Fluxes of polycyclic aromatic hydrocarbons to marine and lacustrine sediments in the northeastern United States[J]. Geochimica et cosmochimica Acta, 1981, 45: 2359– 2367.
- [12] MASCLET P, BRESSON M A, MOUVIER G. Polycyclic aromatic hydrocarbons emitted by power stations and influence of combustion conditions[J]. Fuel, 1987, 66: 556– 562.
- [13] HARRISON R M, SMITH D J T, LUHANA L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham U K[J]. Environ Sci & Technol, 1996, 30: 825– 832.
- [14] ROGGE W F, HILDEMAN L, MAZUREK M A, *et al.* Source of fine organic aerosol 2– noncatalyst and catalyst– equipped automobiles and heavyduty diesel trucks[J]. Environ Sci & Technol, 1993, 27: 636– 651.
- [15] KHALILI N R, SCHEFF P A, HOLSEN T M. PAHs source fingerprints for coke ovens, diesel and gasoline engines, highway tunnels and wood combustion emissions[J]. Atmos Environ, 1995, 29: 533– 542.
- [16] LIM L H, HARRISON R M, HARRAD S. The contribution of traffic to atmospheric concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Environ Sci & Technol, 1999, 33: 3542– 3548.
- [17] TORBEN NIELSEN. Traffic contribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the center of a large city[J]. Atmos Environ, 1996, 30: 3481– 3490.
- [18] MASCLET P, MOUVIER G, NIKOLAOU S K. Relative decay index and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Atmos Environ, 1986, 20(3): 439– 446.
- [19] PISTIKOPOULOS P, MASCLET P, MIONVIER G. A receptor model adapted to reactive species: polycyclic aromatic hydrocarbons; Evaluation of source contributions in an open urban site– I, particle compounds[J]. Atmos Environ, 1990, 24(A): 1189– 1197.
- [20] LI C K, KAMENS R M. The use of polycyclic aromatic hydrocarbons as source signatures in receptor modeling[J]. Atmos Environ, 1993, 27(A): 523– 532.
- [21] GLEN E G. Receptor Models[J]. Environ Sci & Technol, 1988, 22(10): 1132– 1142.
- [22] KLEINMAN M T. The apportionment of source of airborne particulate matter [M]. Ph D, dissertation, New York: University Medical Center, New York, 1977.
- [23] KLEIMAN M T, PASTERNAK B S, EISEN M, *et al.* Identifying and estimating the relative importance of the sources of airborne particulate[J]. Environ Sci & Technol, 1980, 14: 62– 66.
- [24] DAISEY J M, KNEIP T J. Atmospheric particulate organic matter. Multivariate methods for identifying sources and estimating their contributions to the ambient aerosol in atmospheric aerosol source/air quality relationships[J]. ACS symposium series, 1981, 167: 197– 221.
- [25] DAISEY J M, HOPKE P J. Receptor source apportionment modern for three fractions of respirable particulate organic matter[R]. Proceedings of the 77th annual meeting of the Air Pollut Control Assoc, San Francisco CA, 1984, 4: 84– 16.
- [26] SHAH J T, HUNTZICKER J J, KNEIP T J, *et al.* Source apportionment of carbonaceous aerosol in New York city by multiple linear regression[J]. J air pollut control Assoc, 1985, 35: 541– 544.
- [27] MORANDI M T, DAISEY J M, LIOY P J. Development of a modified factor analysis/ multiple regression model to apportion suspended particulate matter in a complex urban airshed[J]. Atmos Environ, 1987, 21: 1821– 1831.
- [28] SIMICIK M F, EISENREICH S J, LIOY P J. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and lake Michigan[J]. Atmos Environ, 1999, 33: 5071– 5079.
- [29] 戴树桂. 受体模型在大气颗粒物源解析中的应用和进展[J]. 中国环境科学, 1995, 15(4): 252– 257.
- [30] 成 玉. 广州市气溶胶中多环芳烃分布 \ 季节性变化及来源判别指标[J]. 中国环境科学, 1998, 18(2): 136– 139.
- [31] 朱先磊. 燃煤烟尘多环芳烃成分谱特征的研究[J]. 环境科学研究, 2001, 14(5): 4– 8.
- [32] 刘勇建. 室内空气多环芳烃(PAHs)的源及贡献率[J]. 环境科学, 2001, 22(6): 39– 43.