

我国环境介质中多环芳烃的分布及其生态风险

程家丽^{1,2} 黄启飞^{2*} 魏世强¹ 王琪² 唐阵武³

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716;

2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要 持久性有机污染物多环芳烃 (PAHs) 在我国环境介质中广泛分布, 美国 EPA 规定的 16 种优先控制多环芳烃大多在我国大气、水体、沉积物、土壤和生物体内检出。总结了我国环境介质中 PAHs 污染水平及特点, 分析了其存在的环境风险。我国大气中 PAHs 污染较重, 尤其是北方。水体已普遍受 PAHs 污染, 其中部分水体污染严重; 沉积物多环芳烃污染大多处于低生态风险水平, 但沉积记录研究表明有越来越严重的趋势。我国土壤和生物体 PAHs 含量较低, 污染生态风险较小。部分区域蔬菜中 PAHs 含量较高, 存在不可忽视的生态风险。

关键词 多环芳烃 环境介质 分布 生态风险

中图分类号 X5 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2007)04-0138-07

A review on distribution and risks of pollution from polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in China

Cheng Jiali^{1,2} Huang Qifei² Wei Shiqiang¹ Wang Qi² Tang Zhenwu³

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment of Chongqing, Chongqing 400716; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012;

3. State Key Laboratory of Water Environmental Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract Being a representative persistent organic pollutant (POP), PAHs was widespread in China and 16 PAHs as priority pollutants promulgated by US Environmental Protection Agency (EPA) had nearly been determined in various environmental media including atmosphere, water, sediment, soil and organism. This research represents an assessment of the current state of pollution and risk from polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in China. On a national basis, PAHs levels in atmosphere were relatively high and a high biological impairment were most likely to be posed in China, especially in north. Furthermore, surface water was universally polluted by PAHs and heavily in some areas. The concentration of PAHs in sediments tended to be a range-low risk in most areas, while distribution profile in sediment cores showed a tendency of rapidly increase with economic development. With the small amount of investigation in China, PAHs pollution associated with low adverse biological effects in soils and organism, but high risk in vegetables in limited areas.

Key words polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); environmental media; distribution; ecological risks

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是指 2 个或 2 个以上苯环以稠环的形式连接形成的一类典型持久性有机污染物 (POPs), 在环境中广泛存在。多环芳烃大部分都有较强的毒性 (致癌性、致畸性和致突变性), 人类及动物癌症病变有 70% ~ 90% 是环境中化学物质引起的, 而 PAHs 则是环境中致癌化学物质中最大的一类^[1]。自从 1979 年美国 EPA 将其中 16 种 PAHs 规定为优先监测污染物, 目前 PAHs 已被世界各国列为优先

控制污染物。环境中的多环芳烃来源广泛, 主要来源于人类活动, 如化石燃料的不完全燃烧、生物质燃烧和石油的渗漏等; 此外, 森林火灾、火山活动、植物和生物的内源性合成等也是环境中 PAHs 的来源之

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50508042)

收稿日期: 2006-02-18; 修订日期: 2006-06-09

作者简介: 程家丽 (1977~), 女, 硕士研究生, 主要从事环境污染控制方面的研究。

*通讯联系人, E-mail: huangqf@caes.org.cn

一。目前,国内外环境介质中普遍受到了 PAHs 的污染。开展环境介质中 PAHs 污染调查,对保护人类和生态系统健康具有重要意义。我国对环境介质中 PAHs 的研究开展较晚,调查很不充分。本文以已有的研究为依据,总结我国大气、水、沉积物、土壤以及生物体内 PAHs 的污染水平,分析我国环境介质中 PAHs 污染特点及其趋势、潜在的生态风险,为控制我国环境中多环芳烃污染提供科学依据。

1 大气环境

大气中多环芳烃主要来源于化石燃料、生物质及塑料等有机物的不完全燃烧。PAHs在大气中主要以颗粒态和气态 2 种形式存在,气相中主要以芴、菲等低环数为主,而高于四环的主要分布在颗粒相中^[2]。研究发现,我国大气颗粒物中不同粒径对 PAHs 的富集程度不同,大部分 PAHs 主要富集在细小颗粒上(粒径 $<2.0\text{ }\mu\text{m}$)^[3]。调查表明,我国大气已受到 PAHs 不同程度的污染,其含量一般为 $19.6\sim 1970.40\text{ ng/m}^3$ ^[4~9] 之间,多集中在几十到几百 ng/m^3 水平。其中北方大气中 PAHs 浓度多集中在 $74.86\sim 1970.40\text{ ng/m}^3$ ^[4~6],南方大气中 PAHs 多集中在 $19.73\sim 497.40\text{ ng/m}^3$ ^[7~9]。由此可见,我国北

方大气中 PAHs 的污染比南方严重得多。而且,我国大气中 PAHs 的含量还与季节变化有很大的关系,冬季一般高于夏季,北方这种差异尤为明显,而南方大气中 PAHs 季节性差异较小。我国城市大气中 PAHs 污染南北差异以及北方的季节性差异的原因可能和我国燃煤用量以及燃煤方式有关^[10]。我国大气中 PAHs 的含量普遍高于国外,如希腊在 2000 年检测出大气中 PAHs 总浓度为 $44.3 \sim 129.2 \text{ ng/m}^3$, 平均为 79.3 ng/m^3 ^[11];芝加哥 1995 年大气中 PAHs 平均浓度为 $428 \pm 240 \text{ ng/m}^3$ ^[12]。此外, Li 等^[13]还在室内空气中也检测到了 PAHs, 其含量与户外 PAHs 的含量差别很小, 并且楼低层 PAHs 的含量较高。

美国 EPA 规定的 16 种优先控制 PAHs 在我国大气中都有不同程度的检出^[6~8,14~19] (图 1), 其中苯并 (a) 芘在大气中检出率最高。研究发现, 我国大气中苯并 (a) 芘 (B (a) P) 含量与多环芳烃总量具有较好相关性 ($p < 0.001$)^[4], 因此可以通过 B (a) P 检测来反映大气中 PAHs 污染状况。目前, 我国部分城市大气中 B (a) P 含量已经超出国家规定标准 (10 ng/m^3), 存在着较大的环境风险。如太原大气中 B (a) P 年均浓度为 74.7 ng/m^3 ^[6], 兰州大气 B (a) P 含量冬季达到了 59.9 ng/m^3 ^[5]。

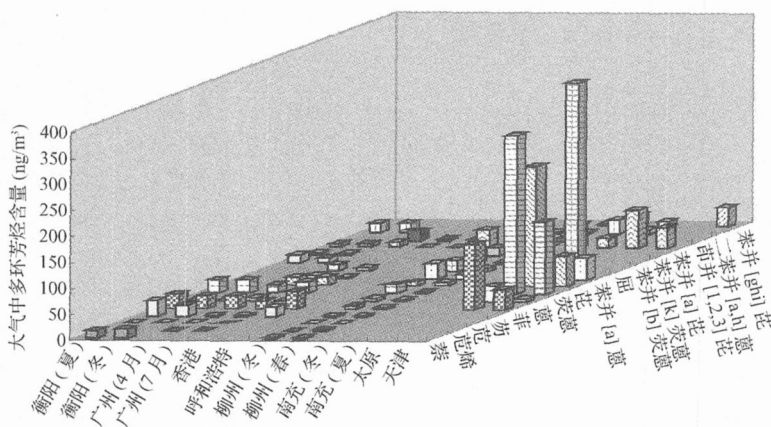


图 1 我国部分地区大气 PAHs组成

Fig. 1 Profiles of 16 PAHs in atmosphere of some areas in China

2 水体

水中 PAHs 主要来源于大气沉降、工业污水及农业污水排放等。PAHs 水溶性较差,水中溶解度很低。研究发现,通常低环化合物的检出率大于高环化合物检出率,尤其萘的检出率最高,菲、芘、荧蒹、芴及其他化合物较低,高环化合物检出率最

低^[19]。目前我国水中 PAHs 的研究报道不多。已有的研究表明,我国水体已普遍受到 PAHs 的污染,水中 PAHs 的含量大部分高于国外(表 1)^[20~31]。河口、海湾和港口污染较严重,而河流与湖泊污染相对较轻。造成不同水体 PAHs 污染差异的原因可能是河口、海湾和港口等地经济发达、污水直接排入。Maskaoui 等^[27]研究九龙河口中 PAHs 的污染时

发现,间隙水的 PAHs 浓度远大于上覆水 (分别为 158~949 μg/L 和 6.96~26.9 μg/L)。Zhang 等^[21]的研究也表明,间隙水中 PAHs 含量高于表层水。而且,水中 PAHs 含量通常也随季节发生变化,一般来说,枯水期水中 PAHs 含量明显高于丰水期^[25]。

表 1 国内外部分水体中 PAHs 污染水平
Table 1 Levels of PAHs in surface waters
at home and abroad

水 域	浓度 (ng/L)	参考文献
国内		
厦门港	106~945	[20]
闽江口	9900~474 000	[21]
钱塘江	2436~9663	[22]
西湖	989~4869	[22]
海河	115	[23]
永定新河	117	[23]
澳门港	944.0~6654.6	[24]
珠江(广州段)	987.1~2878.5	[24]
珠江虎门	11 360~34 338	[25]
北京通惠河	192.9~2651	[26]
九龙河口	6960~26 900	[27]
大亚湾	4228~29 325	[28]
国外		
北切萨皮克湾	8710~14 050	[29]
北希腊	184~856	[30]
哥伦比亚	5590	[31]

3 沉积物

沉积物在 PAHs 的迁移转化中起着重要作用。由于 PAHs 水溶性较差,大部分 PAHs 最终都被沉积物吸附;但当上覆水中 PAHs 浓度降低时,沉积物中 PAHs 又重新释放到水中,成为新的污染源,因此研究沉积物中多环芳烃污染状况对于评价水体环境风

险具有重要意义。我国对许多河流、河口、湖泊、海岸带、海湾和港口等沉积物中 PAHs 污染水平进行了调查^[22, 23, 26, 32~43]。不同类型水体中,一般以港口、海湾、河口地区沉积物中 PAHs 含量较高,而河流、湖泊、海洋沉积物中相对较低,支流污染一般比干流严重。我国部分河流沉积物中 PAHs 含量相当高(如海河平均为 64 000 ng/g),其主要原因可能是大量的工业废水排放、石油泄漏等^[23]。

美国 EPA 规定的 16 种优先控制 PAHs 在我国沉积物中也检出。研究发现,沉积物中 PAHs 通常以 4 环以上为主,2~3 环含量较少^[34]。目前我国还没有制定沉积物中 PAHs 环境标准,本文使用 Long 等^[44]报道的海洋和河口湾沉积物中污染物的风险评价值来分析我国沉积物中 PAHs 的污染状况。Long 等^[44]确定的 PAHs 风险标准分生物影响低值(ERL)和生物影响高值(ERM),分别为 4022 ng/g 和 44 792 ng/g。图 2 中,PAHs 污染最严重的是海河(平均为 64 000 ng/g),超出了 ERM 水平,对生物产生负效应,属于高生态风险区。其次为珠江广州段、澳门内港、长江口潮滩和胶州湾(PAHs 最高浓度分别为 21 329 ng/g, 14 812 ng/g, 6372 ng/g 和 4567 ng/g),最高浓度超出了 ERL 水平,可能对生物产生负效应,属于低生态风险区。香港红树林、大连湾、狮子洋水道、西江、伶仃洋、黄河干流等区域最高浓度(3000 ng/g 左右)接近 ERL 水平,因此这些地区存在着潜在的生物负效应。而北京通惠河、黄海、辽河、南海、长江南京段和太湖等地区沉积物中 PAHs 浓度较低(<1000 ng/g),一般不会对生物产生负效应。

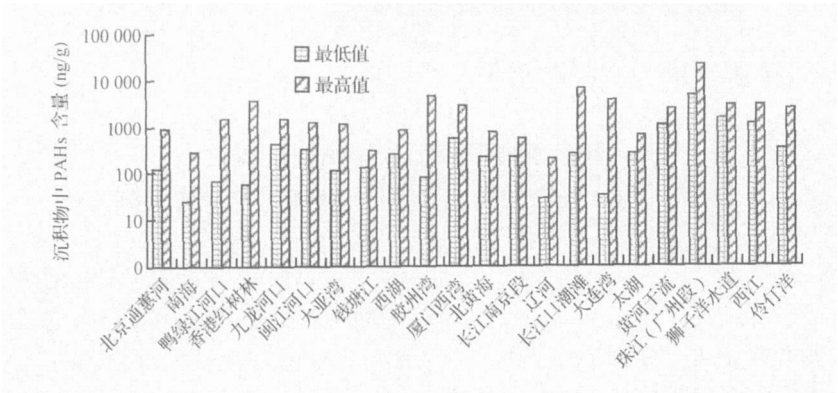


图 2 我国沉积物中多环芳烃含量

Fig. 2 Contents of PAHs in sediments in China

柱芯沉积物由于具有良好的记录作用,在研究中通常被用来反映环境污染的变化趋势及其来源。刘国卿等^[45]研究了珠江口沉积物中多环芳烃的百年变化,结果表明,该区域从 20 世纪 80 年代起,PAHs 含量急剧上升,并在 90 年代达到最高值;机动车尾气排放和燃煤是其主要来源。康跃惠等^[46]的研究也表明该区域沉积物毒性当量浓度从 90 年代初期至 1996 年呈线性趋势增加。吴莹等^[47]研究渤海沉积物中多环芳烃时也发现了呈递增的规律。Liu 等^[48]在研究长江口沉积物中多环芳烃时不仅发现单个 PAHs 和 PAHs 总量随深度发生明显变化,而且还发现热解成因是该区域沉积物中 PAHs 的主要来源。可见,人类活动的加剧是沉积物中多环芳烃增加的直接原因。Liu 等^[49]研究珠江三角洲地区沉积物多环芳烃污染进一步证实了这点,该区域沉积物中 PAHs 沉积通量与珠江三角洲 GDP 具有极好的相关性。

4 土 壤

土壤中 PAHs 主要来源于大气干湿沉降、化学品施用、农用污水污泥以及意外渗漏等。PAHs 一旦进入土壤,即被土壤中有机质吸附,很难消失,从而造成土壤的污染,对人类健康构成威胁。因此,土壤 PAHs 污染的研究已引起人们的高度重视。我国不同利用类型土壤中的 PAHs 含量存在明显差异(表 2),其中油田区土壤最高,城市土壤远高于乡村。陈静等^[50]研究发现,PAHs 含量峰值一般位于土壤表层或次表层,并随着土壤剖面的加深而减少。此外,土壤中 4~6 环 PAH 通常占总 PAHs 的 66% 左右,且高环 PAHs 与总 PAHs 有较大相关性^[51]。我国土壤中 PAH 大部分远低于国外,如英国城市和乡村土壤中 PAH 含量分别为 4 239 000 ng/g 和

187 000 ng/g^[54],希腊农业土壤中 PAHs 平均为 707 000 ng/g^[55]。可见,我国土壤中 PAHs 属于轻度污染状态,生态风险较小。

5 生物体

生物体内多环芳烃是环境中多环芳烃污染的直接证据,也是生态风险的直接表征。我国对生物体内多环芳烃的研究较少。潘勇军等^[57]对株洲樟树测定结果表明,树皮中 PAHs 含量最高,为 8641 ng/g;树干最低,为 2843 ng/g。植物体内多环芳烃往往成为大气多环芳烃污染的直接证据。刘向等^[58]对苔藓的研究就证明了这点。其对南岭北坡两个垂直剖面上大灰藓中多环芳烃进行了定量分析,PAHs 范围为 309.2~1342.4 ng/g (干重),大灰藓中 PAHs 浓度与大气 PAHs 有很好的相关性;而且还发现苔藓更倾向于累积高环数 PAHs,大灰藓中 PAHs 组成与大气 PAHs 组成相关性显著。

蔬菜中多环芳烃的高低直接关系到人类的健康,但我国蔬菜中 PAHs 的研究还鲜见报道。Tao 等^[56]对天津两地蔬菜中多环芳烃进行了研究,平均为 280 ng/g 和 690 ng/g (干重)。而 Voutsas 等^[59]测定希腊甘蓝、胡萝卜、韭菜、莴苣和苦苣中多环芳烃为 25~290 mg/g (干重),芬兰公路旁莴苣内也仅为 4.8~94 ng/g (湿重)^[60],显然天津蔬菜高于国外的研究。Zhong 等^[61]对中国北部菜市场 9 种常用蔬菜中多环芳烃进行了调查,结果表明其葱、黄葱、苯并(a)葱和苯并(a)芘含量分别为 6.46、4.05、3.33 和 4.51 ng/g (湿重);而 Kipoubou 等^[62]对希腊北部工业区甘蓝、胡萝卜、韭菜、莴苣和苦苣中的调查表明,葱、黄葱、苯并(a)葱和苯并(a)芘分别为 0.47~1.4、3~44、0~2.9、0.1~0.28 ng/g (干重);巴西乡村甘蓝中黄葱、苯并(a)葱和苯并(a)芘分别为 1.75、0.38、0.07 ng/g (湿重),公路旁也仅为 5.53、0.36、0.12 ng/g (湿重)^[63]。可见,我国蔬菜中 PAHs 含量较高,这对人体健康构成较大风险。

水生生物体内 PAHs 的研究已经成为国际热点,但我国对生物体的研究开展较晚,报道不多。贝类通常作为水体特别是海洋环境 POPs 污染的指示生物。大连、青岛、上海、宁波、九龙江口、闽江口沿海双壳类调查表明^[64],上海沿海水体贝类多环芳烃含量为 3495 ng/g,青岛、宁波和九龙江相似(<1600 ng/g),大连为 456 ng/g,闽江口低于 550 ng/g。1~3 环多环芳烃在大连、上海和宁波贝类占优势,而其

表 2 我国部分土壤中 PAHs 含量

Table 2 The levels of PAHs in some soils in China

地 区	含量 (ng/g, 干重)	参考文献
天津农用地	49 000	[50]
天津油田	10 974 000	[50]
天津山地	961 000	[50]
北京郊区	3884	[51]
北京乡村	16	[51]
北京市区	366~27 825	[52]
广州农用地	42~3077	[52]
杭州	59.71~615.8	[22]
鸭绿江河口	370~840	[33]
天津菜地	1008~7082	[56]

他区域高低环相似,石油污染是其主要来源。与埃及红海海岸带(5452 ng/g湿重)以及其他报道相比^[65],我国沿海贝类多环芳烃含量明显较低。Kong等^[66]对珠江三角洲鱼塘中胖头鱼、草鱼、鲫鱼、罗非鱼和桂鱼体内 PAHs进行了研究,结果表明鱼体肌肉中 PAHs为 0~0.16 ng/g(湿重),低于美国 EPA规定的标准值(0.67 ng/g湿重)^[67]。但美国 EPA是按 142.4 g/d(每周 4~5餐)计算的,对于中国和日本等喜食鱼类的国家,仍然存在较大的风险。

6 结论与展望

我国不同环境介质中都检测到了多环芳烃,而且美国 EPA规定的 16种优先控制多环芳烃也大多在环境介质中检出。我国大气中 PAHs污染较重,特别是北方,而且部分城市大气中苯并(a)芘已超标,因此存在相当大的生态风险。我国是发展中国家,生物质和煤炭等化石燃料是我国的主要能源,而生物质和煤炭燃烧释放又分别占我国多环芳烃释放总量的 60%和 20%^[68]。在今后相当长一段时间内,煤炭仍然是我国主要能源,在广大农村生物质仍然是主要能源之一,因此仍然存在较大的生态风险。

我国水体已普遍受到 PAHs污染,其中部分水体污染严重。我国沉积物中多环芳烃污染大多处于低生态风险水平,但研究表明有越来越严重的严峻趋势。

与国外相比,目前我国土壤中 PAHs属于轻度污染状态,生态风险较小。

我国生物体内 PAHs污染开展较少,生态风险评估困难。少量的研究虽表明我国水生生物 PAHs污染较小,但这是局部调查的结论,很难全面的评价其生态风险。蔬菜等食品类多环芳烃含量直接关系到人类健康,但我国报道不多,有调查表明我国部分地区蔬菜中 PAHs含量较高,存在着不可忽视的生态风险。因此,我国应重视环境介质特别是生物体内 PAHs的调查,以便充分评价我国所面临的 PAHs污染风险;而且还必须加大环境介质中 PAHs存在形态、环境行为和归趋研究,以便从源头上控制多环芳烃污染。

参考文献

[1] Menzie C. A., Potocki B. B., Santodonato J. Ambient concentrations and exposure to carcinogenic PAHs in the environment *Environmental Science and Technology*, 1992, 26

(7): 1278~1284

- [2] 毕新慧,盛国英,谭吉华,等.多环芳烃(PAHs)在大气中的相分布. *环境科学学报*, 2004, 24(1): 101~106
- [3] 李立波,谢华林,蒋宏伟.多环芳烃在不同粒径大气颗粒物上的分布. *环境与健康*, 2004, 21(3): 153~154
- [4] 张逸,陈永桥,张晓山,等.北京市不同区域采暖期大气颗粒物中多环芳烃的分布特征. *环境化学*, 2004, 23(6): 681~684
- [5] 彭林,陈名燧,张春梅.兰州市大气飘尘中多环芳烃分布及来源判识. *太原理工大学学报*, 2000, 31(2): 126~128
- [6] 彭林,曾凡刚,陈名,等.太原市大气总悬浮颗粒物中正构烷烃和多环芳烃空间分布及来源分析. *岩矿测试*, 2003, 22(3): 206~209
- [7] Bi X., Sheng G., Chen Y., et al Distribution of particulate and vapor-phase n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban atmosphere of Guangzhou, China *Atmospheric Environment*, 2003, 37: 289~298
- [8] Ho K. F., Lee S. C., Chiu G. M. Y. Characterization of selected volatile organic compounds polycyclic aromatic hydrocarbons and carbonyl compounds at a roadside monitoring station *Atmospheric Environment*, 2002, 36(1): 57~65
- [9] 牛红云,王荟,王格慧,等.南京大气气溶胶中多环芳烃源识别及污染评价. *中国环境科学*, 2005, 25(5): 544~548
- [10] Chen Y., Sheng G., Bi X., et al Emission factors for carbonaceous particles and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion in China *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(6): 1861~1867
- [11] Tzapakis M., Stephanou E. G Occurrence of gaseous and particulate polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: Study of sources and ambient temperature effect on the gas/particle concentration and distribution *Environmental Pollution*, 2005, 133(1): 147~156
- [12] Odabasias M., Vardarb N., Sofuoglu A., et al Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Chicago air *The Science of the Total Environment*, 1999, 227(1): 57~67
- [13] Li C., Fu J., Sheng G., et al Vertical distribution of PAHs in the indoor and outdoor PM_{2.5} in Guangzhou, China *Building and Environment*, 2005, 40(3): 329~341
- [14] 李立波,谢华林,蒋宏伟.多环芳烃在不同粒径大气颗粒物上的分布. *环境与健康杂志*, 2004, 21(3): 153~154
- [15] 冯沈迎,阮玉英,全青,等.呼和浩特市大气颗粒物中几种多环芳烃的粒度分布. *内蒙古大学学报*, 1999, 30(4): 518~522
- [16] 何星存,陈孟林,杨崇毅,等.柳州市大气颗粒物中多环

- 芳烃的分布特征及来源. 城市环境与城市生态, 2005, 18(1): 7~9
- [17] 赵立志, 戴加林. 四川省南充市大气中多环芳烃的分布. 四川环境, 1995, 14(1): 48~51
- [18] 朱坦, 孙韧, 张林的, 等. 大港地区大气颗粒物中多环芳烃分布及污染源识别的研究. 中国环境科学, 1998, 18(4): 289~292
- [19] 杨清书, 麦碧娴, 罗孝俊, 等. 珠江澳门水域水柱多环芳烃初步研究. 环境科学研究, 2004, 17(3): 28~33
- [20] Zhou J. L., Hong H., Zhang Z., et al Multi-phase distribution of organic micropollutants in Xiamen harbour, China Water Research, 2000, 34(7): 2132~2150
- [21] Zhang Z. L., Hong H. S., Zhou J. L., et al Phase association of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Min jiang River Estuary, China The Science of the Total Environment, 2004, 323(1~3): 71~86
- [22] Chen B. L., Xuan X. D., Zhu L. Z., et al Distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface waters, sediments and soils of Hangzhou City, China Water Research, 2004, 38(16): 3558~3568
- [23] Shi Z., Tao S., Pan B., et al Contamination of rivers in Tianjin, China by polycyclic aromatic hydrocarbons Environmental Pollution, 2005, 134(1): 97~111
- [24] Mai B. X., Luo X. J., Yang Q. S., et al Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorine pesticides in water columns from the Pearl River and the Macao harbor in the Pearl River Delta in South China Marine Pollution Bulletin, 2004, 48(11~12): 1102~1115
- [25] 杨清书, 欧素英, 谢萍, 等. 珠江虎门潮汐水道水体中多环芳烃的分布及季节变化. 海洋学报, 2004, 26(6): 37~46
- [26] Zhang Z. L., Huang J., Yu G., et al Occurrence of PAHs, PCBs and organochlorine pesticides in the Tonghui River of Beijing, China Environmental Pollution, 2004, 130(2): 249~261
- [27] Maskaouia K., Zhou J. L., Hong H. S., et al Contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Jiulong River Estuary and Western Xiamen Sea, China Environmental Pollution, 2002, 118(1): 109~122
- [28] Zhou J. L., Maskaoui K. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and surface sediments from Daya Bay, China Environmental Pollution, 2003, 121(2): 269~281
- [29] Ko F. C., Baker J. E. Partitioning of hydrophobic organic contaminants to resuspended sediments and plankton in the mesohaline Chesapeake Bay. Environmental Science and Technol, 1995, 49(2~3): 171~188
- [30] Manoli E., Samara C., Konstantinou A. T. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the bulk precipitation and surface waters of Northern Greece Chemosphere, 2000, 41(12): 1845~1855
- [31] Ngabe B., Terry F. B., Geoffrey I. S. Polycyclic aromatic hydrocarbons in storm runoff from urban and coastal South Carolina The Science of the Total Environment, 2000, 255(1~3): 1~9
- [32] Yang G. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the South China Sea Environmental Pollution, 2000, 108(2): 163~171
- [33] Wu Y., Zhang J., Zhu Z. J. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the Yalujiang Estuary, North China Marine Pollution Bulletin, 2003, 46(5): 619~625
- [34] Ke L., Wong Y. S., Tam N. F. Y., et al Spatial and vertical distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in mangrove sediments Science of the Total Environment, 2005, 340(1~3): 177~187
- [35] Yuan D. X., Yang D. N., Wade T. L., et al Status of persistent organic pollutants in the sediment from several estuaries in China Environmental Pollution, 2001, 114(1): 101~111
- [36] 杨永亮, 麦碧娴, 潘静, 等. 胶州湾表层沉积物中多环芳烃的分布及来源. 海洋环境科学, 2003, 22(4): 38~42
- [37] 田蕴, 郑天凌, 王新红, 等. 厦门西港表层沉积物中多环芳烃 (PAHs) 的含量、分布及来源. 海洋与湖沼, 2004, 35(1): 16~19
- [38] 李斌, 吴莹, 张经, 等. 北黄海表层沉积物中多环芳烃的分布及其来源. 中国环境科学, 2002, 22(5): 429~432
- [39] 许士奋, 蒋新, 王连生, 等. 长江和辽河沉积物中的多环芳烃类污染物. 中国环境科学, 2000, 20(2): 128~131
- [40] 刘敏, 侯立军, 邹惠仙, 等. 长江口潮流表层沉积物中多环芳烃分布特征. 中国环境科学, 2001, 21(4): 343~346
- [41] 刘现明, 徐学仁, 张笑天, 等. 大连湾沉积物中 PAHs 的初步研究. 环境科学学报, 2001, 21(4): 508~510
- [42] 袁旭音, 李阿梅, 王禹, 等. 太湖表层沉积物中的多环芳烃及其毒性评估. 河海大学学报, 2004, 32(6): 607~609
- [43] Mai B. X., Fu J. M., Sheng G. Y., et al Chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta, China. Environmental Pollution, 2002, 117(3): 457~474
- [44] Long E. R., MacDonald D. D., Smith S. L., et al Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuary sediments Environment Management, 1995, 19(1): 81~97

- [45] 刘国卿,张干,李军,等.多环芳烃在珠江口的百年沉积记录. *环境科学*, 2005, 26(3): 141~145
- [46] 康跃惠,盛国英,李芳柏,等.珠江口现代沉积物柱芯样多环芳烃高分辨沉积记录研究. *环境科学学报*, 2005, 25(1): 45~51
- [47] 吴莹,张经.多环芳烃在渤海海峡柱状沉积物中的分布. *环境科学*, 2001, 22(3): 74~77
- [48] Liu M., Baugh P. J., Hutchinson S. M., et al. Historical record and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in core sediments from the Yangtze Estuary, China. *Environmental Pollution*, 2000, 110(2): 357~365
- [49] Liu G. Q., Zhang G., Li X. D., et al. Sedimentary record of polycyclic aromatic hydrocarbons in a sediment core from the Pearl River Estuary, South China. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 51(8~12): 912~921
- [50] 陈静,王学军,刘瑞民,等.天津地区土壤多环芳烃在剖面中的纵向分布特征. *环境科学学报*, 2004, 24(2): 286~290
- [51] Ma L. L., Chu S. G., Wang X. T., et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soils from outskirts of Beijing, China. *Chemosphere*, 2005, 58(10): 1355~1363
- [52] Tang X. Y., Zhu Y. G., Zheng M. H., et al. Contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils in Beijing, China. *Environment International*, 2005, 31(6): 822~828
- [53] Chen L. G., Ran Y., Xing B. S., et al. Contents and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in vegetable soils of Guangzhou, China. *Chemosphere*, 2005, 60(7): 879~890
- [54] Kipopoulou A. M., Manoli E., Samara C. Bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables grown in an industrial area. *Environmental Pollution*, 1999, 106(3): 369~380
- [55] Wild S. R., Jones K. C. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the united kingdom environment: A preliminary source inventory and budget. *Environmental Pollution*, 1995, 88(1): 91~108
- [56] Tao S., Cui Y. H., Xu F. L., et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in agricultural soil and vegetables from Tianjin. *The Science of the Total Environment*, 2004, 320(1): 11~24
- [57] 潘勇军,田大伦,唐大武,等.樟树林生态系统中多环芳烃含量和分布特征. *林业科学*, 2004, 40(6): 2~7
- [58] 刘向,张干件,刘国卿,等.南岭北坡苔藓中多环芳烃的研究. *中国环境科学*, 2005, 25(1): 101~105
- [59] Voutsas D., Samara C. Dietary intake of trace elements and polycyclic aromatic hydrocarbons via vegetables grown in an industrial Greek area. *The Science of the Total Environment*, 1998, 218(2~3): 203~216
- [60] Wickström K., Pyysalo H., Plaami-Heikkilä S., et al. Polycyclic aromatic compounds (PAC) in leaf lettuce. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und-Forschung*, 1986, 183(3): 182~185
- [61] Zhong W., Wang M. Some polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables from Northern China. *Journal of Environmental Science and Health-Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2002, 37(2): 287~296
- [62] Kipopoulou A. M., Manoli E., Samara C. Bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables grown in an industrial area. *Environmental Pollution*, 1999, 106(3): 369~380
- [63] Camargo M. C. R., Toledo M. C. F. Polycyclic aromatic hydrocarbons in Brazilian vegetables and fruits. *Food Control*, 2003, 14(1): 49~53
- [64] Funga C. N., Lama J. C. W., Zheng G. J., et al. Mussel-based monitoring of trace metal and organic contaminants along the east coast of China using *Perna viridis* and *Mytilus edulis*. *Environmental Pollution*, 2004, 127(2): 203~216
- [65] Nemr A. E., El-sikaily A., Khaled A., et al. Determination of hydrocarbons in mussels from the Egyptian Red Sea Coast. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2004, 96(1~3): 251~261
- [66] Kong K. Y., Cheung K. C., Wong C. K. C., et al. The residual dynamic of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in fishponds of the Pearl River delta, South China. *Water Research*, 2005, 39(3): 1831~1843
- [67] US Environmental Protection Agency. Guidance for assessing chemical contaminant data for use in fish advisories. Volume 1. Fish Sampling and Analysis 2000, Third Edition. EPA 823-R-95-007. Office of Water, Washington, DC, 2000
- [68] Xu S., Liu W., Tao S. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons in China. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(3): 702~708