

我国 VOC 类有毒空气污染物优先控制对策探讨

陈颖¹ 李丽娜¹ 杨常青¹ 郝郑平² 孙汉坤¹ 李瑶¹

(1. 环境保护部环境发展中心,北京 100029; 2. 中国科学院生态环境研究中心,北京 100085)

摘要: VOC 污染日趋严重,不仅影响环境空气质量,也能直接损害人体健康,我国亟待完善控制对策。研究了美国有毒空气污染物(HAPs)控制体系,针对我国环境管理的特点,提出 VOC 类有毒空气污染物优先控制对策,供有关部门参考。美国通过清洁空气法案确定有毒空气污染物重点控制名单,采取区域管理和行业重点源控制促其削减,VOC 类化合物是城市地区重点控制对象。我国 VOC 管理和技术基础相对薄弱,应筛选部分污染物进行优先控制,针对这类污染物组分复杂、行业分布广、区域性和过程性强等特点,逐步开展区域污染调查评估,加强累积性风险评估和环境影响后评价管理,抓好突发事件风险防范。

关键词: VOC; 有毒; 污染; 控制; 对策

中图分类号: X32; X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)12-3469-07

Countermeasures for Priority Control of Toxic VOC Pollution

CHEN Ying¹, LI Li-na¹, YANG Chang-qing¹, HAO Zheng-ping², SUN Han-kun¹, LI Yao¹

(1. Environmental Development Centre, Ministry of Environment Protection, Beijing 100029, China; 2. Research Center of Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: VOC pollution is worsening, not only affects the environment, air quality, but also directly harm human health, and Chinese relevant departments need to improve control measures. U. S. toxic air pollutants (HAPs) control system was studied, and Chinese environment countermeasures were proposed based on pollution features. U. S. recognized sources of hazardous air pollutants in the Clean Air Act (CAA), and reduced their emissions by industrial regulations and regional policies. In urban areas, VOC occupied a great part of toxic air and were controlled as a major project in U. S. Due to relatively weak management and technical base, China should screen some VOC components for priority pollutant control. The feature of Chinese VOC pollution was described as complex components, industry sources widely distributed, strong regional characteristics and processes, and gradual development of regional pollution. It was suggested to carry out investigation assessment activities, enhance cumulative risk assessment and environmental impact assessment management, and strengthen emergency risk prevention.

Key words: volatile organic compound(VOC); toxic; pollution; control; countermeasures

有毒空气污染物(hazardous air pollutants, HAPs)是我国工业高速发展的副产物,组成范围不断扩大,危害日益严重,已成为我国新时期关系民生的环境问题。我国对此类污染物尚未建立健全的法律法规,亟待研究制定有针对性的控制对策。人为源排放的 VOC 已经成为城市以及重点工业区域环境空气污染的重要组成^[1-8],不仅会增加环境大气氧化性,还可能引发环境大气的毒性,直接威胁人体健康安全。VOC 物种成分较为复杂,涉及烷烃、不饱和烃、苯系物、醇类、醛酮类、酯类、卤代烃等物种。在美国 EPA 优先控制的 187 种污染物中有 33 种属于挥发性有机物,其中苯、三氯甲烷、四氯乙烯等已被 WHO 确定为对动物具有致癌和致畸性。2005 年我国 VOC 排放量为 19 406 kt,主要由烷烃(20%)、不饱和烃(21%)、苯系物(30%)构成,表现出了较高的大气氧化活性和毒性,其平均光化学臭氧生成潜势(POCP)为 53.7,毒性 VOC 的排放比重约占 30%^[1]。我国对于 VOC 污染控

制,应在加强总量控制的同时,优先控制有毒组分,促进环境质量改善与人体健康保护的协调统一。本文以 VOC 类有毒空气污染物为主要对象,通过研究美国法律法规和政策,针对我国相关环境管理的缺陷和不足,提出优先控制对策,供有关部门参考。

1 有毒空气污染物的定义和 VOC 毒性特征

我国《大气污染防治法》(2000-09-01 实施)中曾提到对“有毒有害气体”、“有毒有害烟尘”等开展污染防治管理,但未对“有毒有害废气”明确定义。《清洁生产审核暂行办法》仅给出了有毒有害物质的定义。美国环境保护署(EPA)的相关定义^[9]是:有毒空气污染物,也被称为空气有毒物质,是指那些已知的或者可能引起癌症或其他严重的健康影响,

收稿日期:2010-06-27; 修订日期:2011-08-20

基金项目:国家软科学计划项目(2010GXSSB148)

作者简介:陈颖(1976~),女,博士,高级工程师,主要研究方向为污染防治政策, E-mail: cyisea@163.com

如生殖系统的影响或出生缺陷,或不利环境和生态效应的空气污染物.综合国外相关法规和研究报道,可以认为,有毒空气污染物一般是指人类生产和生

活活动中产生的,以气态或气溶胶形式存在的,对人群健康和生态环境有严重危害的化学性污染物质.典型 VOC 的毒性特征见表 1^[10].

表 1 典型 VOC 对人体的危害¹⁾
Table 1 Harmful effects of the representative VOC to human body

VOC	刺激性、腐蚀性			器官毒性				致癌性
	皮肤	眼睛	呼吸道	神经系统	肝脏	肾脏	胃	
苯	△	△	△	△				★
甲苯	△	△	△	▲	▲			
间二甲苯	△	△	△		▲	▲	△	
氯苯	△	▲	△	▲	△	△		
丙酮	▲	△	▲	▲				
乙酸乙酯	▲			▲				
二氯甲烷	▲	▲	▲	▲	▲	▲		☆
三氯甲烷	▲	▲		▲	△	△	▲	☆
四氯乙烯	▲	▲	▲	▲	△	△		☆
四氯化碳		▲	▲	△	△	△		☆
1,2-二氯乙烯	△	△	△	△				
偏二氯乙烯	△	▲	▲					
1,3-丁二烯	△	△	△	△		△		
乙醛	△	△	△	▲	△	△	△	
乙醚				▲	▲	▲		
乙腈	▲		△	△	▲	▲	▲	
丙烯腈	△	△	△	△	△	△	△	☆

1) △表示低浓度健康损害; ▲表示高浓度健康损害; ★表示 IARC 确认的人类致癌物; ☆表示 IARC 认为可能是人类致癌物

2 美国有毒空气污染物控制发展历程及主要措施

美国有毒空气污染物控制早在 20 世纪 70 年代初开始,经过 20 a 的摸索,于 20 世纪 90 年代通过清洁空气法案确定了控制管理体系框架^[9],实施了清洁空气法案(CAA)、清洁空气州际法规(CAIR)等法律文件,提出了 187 种重点控制的污染物,明确了有毒空气污染物的控制范围、目标和主要污染源类别.

2.1 美国有毒空气污染物控制管理体系

美国控制有毒空气污染物的管理体系主要构成见图 1,主要措施包括:①发布清洁空气法案,列出有毒空气污染物重点控制名录和主要污染源名单,对点源和面源分别实施最大可行控制技术(MACT)和一般可行控制技术(GACT);②按行业分批制定各类污染源排放和控制标准,实行重点行业控制,并及时开展残余风险评估,对污染源的控制效果进行评估,以补充和完善相关标准;③通过模型估算和现场实测,开展区域调查评估,提出城市污染较重的污染物名单,实施地区削减策略;④定期开展有毒空气污染物全国评估确认健康风险最大的有毒空气污染物,制定阶段控制目标并实施.

2.2 重点源分类监管模式

美国 EPA 对各种排放源实行分类控制和削减策略,分为固定源、移动源和室内源三类进行控制.已发布的一系列有毒空气污染物行业控制标准,涵盖 96 种工业源.移动源的控制对象主要为苯等挥发性有机物.主要源是指年排放或者可能排放 10 t 以上的一种污染物或 25 t 以上的多种污染物固定排放源,包括点源和面源. EPA 对主要源进行调查并建立重点源名单,通过排污许可制度进行管理.面源主要来自小型工业和商业单位(包括农业和小型印刷厂等),或者消费品应用行业(例如建筑涂料).移动源的控制对象为苯等挥发性有机物.根据美国 EPA 的估算结果,通过采取这些措施,1999~2030 年期间美国将减少 33 万 t 有毒空气污染物排放,其中包括 6.1 万 t 苯.

2.3 城市有毒空气污染物削减策略

城市空气有毒物质来自多种排放源(移动源、工业、商业和室内),苯并芘、苯、二氯甲烷、汞、铅等污染物能够污染城市地区一定范围内的环境空气,形成区域性污染.由于城市地区污染较为严重,美国 EPA 实施了城市有毒空气污染物削减策略^[12],筛选出 33 种对城市地区公众健康具有较高风险的污染

物,要求 90% 以上的排放源(主要是面源)达到标准要求.这份 33 种污染物名单中有 19 种属于 VOC,

主要来自涂料生产、有机化工、石油和天然气生产,见表 2^[13-15].

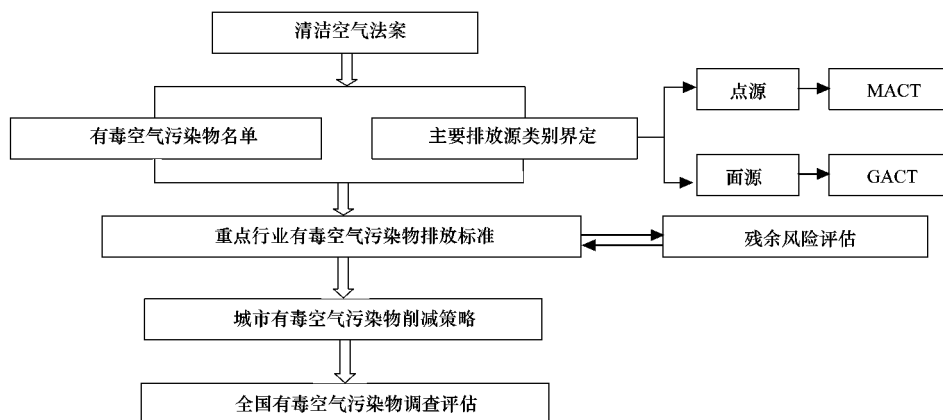


图 1 美国有毒空气污染物控制管理体系构架

Fig. 1 U. S. toxic air pollutant control management system framework

表 2 美国城市重点控制的 VOC 类有毒空气污染物及其来源

Table 2 VOC toxic air pollutants and its source mainly controlled in U. S. cities

序号	VOC	主要来源
1	乙醛	工业有机化工制造、石油和天然气生产、涂料、有机化工制造业
2	丙烯醛	涂料、有机化工制造业
3	丙烯腈	丙烯酸和腈氯纶纤维生产、涂料、有机化工制造业
4	苯	石油分销阶段、石油和天然气生产、涂料、有机化工制造业
5	1,3-丁二烯	涂料、有机化工制造业
6	四氯化碳	涂料、有机化工制造业
7	氯仿	工业有机化工制造、涂料、有机化工制造业
8	1,2-溴甲烷	涂料、有机化工制造业
9	1,2-二氯丙烷(丙烯酰氯)	涂料、有机化工制造业
10	1,3-氯丙烯	涂料、有机化工制造业
11	二氯乙烷(1,2-二氯乙烷)	涂料、有机化工制造业
12	环氧乙烷	医院消毒器、涂料、有机化工制造业
13	甲醛	石油、天然气生产、固氮内燃机
14	肼	涂料、有机化工制造业
15	二氯甲烷(二氯甲烷)	工业有机化工制造、脱漆、木材存储、
16	1,1,2,2-四氯乙烷	涂料、有机化工制造业
17	四氯乙烯	涂料、有机化工制造业
18	三氯乙烯	涂料、有机化工制造业
19	氯乙烯	工业有机化工生产、聚氯乙烯共聚物生产、涂料、有机化工制造业

2.4 有毒空气污染物环境风险评估

为识别有毒空气污染物的区域污染情况、存在的健康风险、跟踪控制目标和计划的完成情况,美国在 1996~2005 年连续开展了 4 次全国范围的有毒空气污染物风险评估(NATA)^[16],建立了有毒空气污染物减排的基准. NATA 是基于风险评估模型和污染物普查结果,评估国家和区域水平上的健康风险. 根据 NATA 评估结果,美国 EPA 分别在 2004 年、2006 年和 2008 年出版行业绩效报告(sector performance report),包括 12 类对美国环境和经济均

具有重要影响意义的行业,分别是水泥制造业、化工、高等院校、建筑业、食品饮料制造业、木材加工、钢铁、金属制造、石油天然气、油漆涂料、港口、船舶制造及维修. 已经发布的 2002 年 NATA 评估结果^[17],将有空气污染物分为致癌风险驱动物、致癌风险贡献物、非致癌危险驱动物、非致癌危险贡献物四类,从国家和区域 2 个水平上进行评价; 12 种 VOC,包括苯、1,3-丁二烯、四氯乙烯、1,4-二氯苯、乙醛、丙烯腈、四氯化碳、甲苯、1,3-二氯丙烯、二氯甲烷、1,1,2,2-四氯乙烷、甲基叔丁基醚、甲

醛,被列为国家或区域水平上具有较高健康风险的有毒空气污染物。

3 我国 VOC 有毒空气污染现状与主要问题

我国经济发达地区已经受到 VOC 污染,呈现组分复杂、行业分布广、区域性和过程性强等特征。京津、珠三角地区等地普遍检出有毒组分^[2-4]。京津地区大气颗粒物的主要成分为烃类和含氧有机化合物,其中北京、天津苯系有机物分别占颗粒物总量的 $9.3\% \pm 3.0\%$ 和 $7.5\% \pm 3.7\%$,高于其他国家污染区的一般水平。北京大气中苯的平均质量浓度为 $7.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,甲苯为 $12.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在检出物中有 54 种是有毒有害的物质,主要成分是苯系物和卤代烃,其中苯,甲苯,丙烯,1,3-丁二烯,氯乙烯和 1,2-二氯乙烷是含量最高的组分^[2]。珠三角地区 VOC 中苯系物是主要组成部分,苯背景浓度平均是海南省的 5 倍以上,其中广州市苯平均水平普遍超过美国 EPA 推荐的限值 $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。香港地区大气中存在 60 多种 VOC,在检出的 VOC 中有 17 种是有毒挥发性有机物,其主要成分是苯系物和氯代烃^[19]。根据北京市环境保护科学研究院对 VOC 污染源调查的不完全统计结果,典型 VOC 类有毒有害物质可来自于炼油和石化、油品的储运销、涂料生产与使用、印刷及油墨制造、合成橡胶、合成纤维等多个行业,见表 3。

表 3 国内部分行业典型 VOC 有毒有害物质¹⁾
Table 3 Major industries VOC hazardous substances

序号	污染源名称	典型 VOC 有毒有害物质列举
1	炼油和石化	苯系物,1,3-丁二烯,己烷
2	油品的储运销	己烷,苯,甲苯,二甲苯
3	涂料生产与使用(汽车,家具,其它涂装企业生产)	二甲苯,甲苯,苯系物,二氯(氯)甲烷,甲基异丁基酮,乙二醇
4	印刷行业及油墨制造企业	甲苯,二甲苯,乙二醇
5	合成橡胶	甲苯,二甲苯,苯并芘
6	合成纤维	甲醛,苯
7	胶黏剂生产	甲醛,甲苯,二甲苯,四氯化碳
8	炼焦,钢铁	苯,甲苯,乙苯
9	纺织	甲醛
10	人造板制造	甲醛
11	半导体及电子	苯,甲苯,二甲苯,甲醛,三氯乙烯,二氯甲烷
12	建筑涂装	乙醛,甲苯,甲醛
13	玻璃钢制造	苯乙烯
14	防水卷材生产	苯系物,苯并芘

1) 资料由北京市环境保护科学研究院大气污染防治研究所提供

(1) 环境质量监测以及污染源调查数据资料稀缺

过去,由于有毒有害废气管理与监控条件所限,我国环境监管部门对于工业企业有毒有害废气的排放源分布、排放强度和治理情况等基础信息掌握较少。我国在有毒有害废气的污染防治现状情况重视不够、了解不全,有必要开展系统、全面的污染源与污染防治现状情况的系统调查。

(2) 污染防治与监管体系不健全

目前,国家和地方大气污染防治相关的法律、法规中对于有毒有害废气的污染防治管理虽然设有相应的条文,但比较局限于突发性事故条件,缺少对有毒有害废气污染源环保准入、日常监管和风险防范方面的专项具体要求,系统、有效的有毒有害废气污染监管体系有待建立。

(3) 控制标准和监测规范不完善

从现有颁布实施的环境空气质量和 15 项主要废气排放标准来看,我国有毒有害废气的控制标准还不够完善,典型有毒空气污染物的质量标准和排放标准存在空白,有毒空气污染因子的环境监测分析方法缺少技术规范,给污染防治工作带来实际困难。我国尚未制定制药、农药等精细化工类,以及有色冶炼行业的有毒废气排放标准;尚未颁布 VOC 的环境质量标准和污染排放标准,对于石油、石油化工类和电子行业等建设项目,环评预测和环保验收监测结果往往相互矛盾^[18]。

(4) 环境监测能力薄弱

我国目前地方环境监测机构的能力建设有待加强,现有的监测设备和力量无法对 VOC 等类型的大气污染物开展行之有效的采样与实验室分析,从而导致地方环境监督执法也缺乏相应的技术依据,有关部门开展专项的环境监察受到制约。

(5) 对累积性风险跟踪管理和突发性风险防范重视不够

对于突发的各类有毒有害废气污染环境事件,缺乏专项应急预案,事故现场快速检测的能力不强,应急队伍能力有待加强。如前所述,累积性环境风险评估和环境影响后评价几乎没有开展,潜在性环境污染没有得到跟踪监控导致环境中毒事件爆发后造成难以挽回的社会影响和经济损失。

4 借鉴美国经验研究我国有毒空气污染物控制管理对策

我国工业门类复杂,产业规模庞大,目前环境污

染控制着重于常规污染物。VOC 类污染物种类复杂、来源广泛,美国近 30 年的有毒空气污染控制实践虽然带来很多启示,但是应针对我国国情有针对性的吸收借鉴。

4.1 美国经验带来的启示

(1) 加强有毒空气污染物的控制管理首先要加强法制建设

美国的清洁空气法案中就有毒空气污染物的含义、管理目标、对象和主要政策和措施手段进行了明确规定,为规划实施和地方落实提供了明确的法律依据。而我国尚未建立有毒空气污染物名录,在现行的大气污染防治法中没有就有毒空气污染物或有毒有害废气进行明确界定,相关标准体系的制定缺乏系统性,很多行业对有毒空气污染物缺乏相应的控制标准,无法对其进行有效控制。

我国要加强有毒空气污染物的控制,首先要完善法律,制定优先控制名录,对有毒空气污染物的范围、管理对象、控制原则和主要策略进行明确要求,才能指导落实具体工作,使地方配套完善相关管理体系。其次,由于环境管理工作是随着科学认知水平的发展而不断完善,不能过分强调法律的完善,还应在法律规定基本完备的前提下,通过我国不同时期的环境规划,审时度势,制定与我国社会关注焦点相一致、经济发展相协调、环境管理能力相匹配的有毒空气污染物管理策略。

(2) 按行业协同控制较污染物逐个控制更为可行

美国针对重点排放源所属行业,出台了国家有毒空气污染物排放标准体系,基于 MACT 和 GACT 对主要点源和面源控制多种污染物,不仅限定污染物排放限值,还对污染防治设备、操作方法和措施提出明确和详细的要求。我国 VOC 类污染物来源和种类十分广泛,对污染物逐个进行控制从时间和经济上都缺乏效率;相反,如果针对相似污染物按行业协同控制,则相对容易。

我国目前的污染物控制实行的是总量控制和浓度控制相结合,对于主要污染物全面实行总量控制,对于非常规污染物则实行浓度控制。但是很多有毒空气污染物具有生物富集作用,具有环境累积性,用浓度控制不能达到完全预防的有毒空气污染物的目的,而是要从削减其排放量入手尽量减少其进入环境的可能性。由于不同行业对不同种类的污染物的排放贡献不同,即某些行业排放特征污染物,要对排放贡献高的重点行业按类别控制其特征有毒空气污

染物。

(3) 明确区域综合治理对象可重点保护敏感人群的环境健康

由于城市或工业区周边有毒空气污染的危害更为突出,美国通过区域环境风险从 187 种污染物中进一步筛选出城市重点控制的有毒空气污染物。这些污染物的排放源在分布较为集中、排放量大、多为面源,可造成一定范围内的空气污染和环境健康损害。加强城市有毒空气污染物的综合整治和总量削减,可突出重点,使管理对象和环境保护目标更为明确。

我国近年来的环境事件发生的情况表明,污染物可通过在环境介质中的迁移-扩散过程和生物富集作用,可造成相当范围内区域内的人群健康造成严重或不可逆的损害。因此,我国在全面加强有毒空气污染物达标排放的同时,应结合大气污染联防联控工作,实行更为严格的重点区域优先因子总量控制措施:对容易造成区域性大气污染的挥发性有机物、重金属污染物等,选取优先控制的有毒污染因子;根据行业发展趋势和污染源分布特征筛选出高风险区域,如石油化工、有色金属冶炼企业分布较为的工业区和城市,对重点区域、重点排放源的有毒空气污染物排放量进行优先控制。

(4) 针对慢性累积健康风险制定预防对策

除突发事件应急管理以外,美国 EPA 还加强了累计健康风险的管理。同急性毒作用相比,由于潜在性、累积性环境健康风险更加隐蔽,危害范围更大,后果更为严重,是大多数有毒空气污染物的重要特征,如何对其有效预防,美国采取了残余评估的方式,即行业排放标准执行后在一定的时段内(8 a)评估其健康风险的削减程度,以验证标准制定的科学性和有效性。

近年来,我国已经开始关注环境有毒物质的健康风险,但是由于技术和经济上的种种原因尚未付诸实施。基于有毒空气污染物的累积性和潜在性特点,在短时间内无法得出明确结论,应充分利用国内较为成熟的环境影响评价工作基础加强后评估体系建设,通过跟踪管理,定期监控重点排放源附近有毒空气污染物环境暴露水平变化情况、周边人群的健康状况,才能将“难以确定”、变为“可控可防”。

4.2 基于我国国情的有毒空气污染控制对策建议

(1) 制定优先控制名录,开展有毒空气污染物污染防治数据调查

为了便于有毒空气污染物的排放监管,首先根

据已掌握情况,初步制定首批优先控制名录,指导环境管理部门开展污染物排放现状与环境质量调查,组织企业申报,调查收集相关的污染源强、环境质量等统计数据.由企业上报所属行业、所在地域、单位污染物排放量等数据,地方环保部门对部分重点源进行核准,为进一步出台具有针对性的污染防治政策提供决策支持.

(2) 逐步实施名录中有毒空气污染物申报登记制度

以现有的排污申报系统为基础,出台对有毒空气污染物的申报登记办法.办法应给予结合项目环境影响评价文件、工艺条件、污染防治措施等,确定各地区、各行业的污染物种类和排放系数.工业企业在环保部门和相关技术部门的指导下,科学、准确、有序的分步实施名录所列有毒空气污染物排污申报工作.

(3) 将 VOC 类有毒有害物质控制纳入环境准入与后评价管理

充分发挥环境影响评价制度在控制有毒空气污染源准入的作用.以环境影响评价为主,结合“三同时”验收、后评价、上市核查等手段,严格对名录中有毒空气污染物进行准入端控制.通过制定发布相关行政规章、政策文件,要求环境影响评价等工作中,增加或加强名录中有毒物质的分析、预测与评价,完善有毒空气污染物的技术评估和审查,使企业加强相关污染防治措施.

(4) 补充完善环境控制标准

基于控制技术和环境健康,逐步完善有毒空气污染物控制标准体系.结合有毒空气污染特点,质量标准应注重污染源周边区域的控制,排放标准应关注污染源的排放方式、排放强度以及排放时段.在现行质量标准和污染物排放标准中未加以控制的,地方环保部门可根据项目技术引进地的相应控制标准合理选择使用,对于技术引进地也无标准的,可参考国外或自身制定相应的控制标准,使用这些标准时应报上级环保部门审批确认.

(5) 建立完善的环境监测与污染防治技术规范

结合全国工业企业有毒空气污染防治现状调查以及环境控制标准的补充完善,及时总结适合不同行业和地区的污染防治技术,由国家环保部门发布重点控制因子的污染防治技术政策.各地方环保部门应从污染源监测、环境质量监测抓起,有计划的分区域、分层次配套相应的监测技术和设备,逐步形成完备的技术方法并逐步推广.

(6) 结合清洁生产审核工作推动有毒空气污染物全过程监管

根据《清洁生产审核暂行办法》的要求,进一步推动工业企业在生产、运输、储存、产品等全过程的有毒空气污染物监管.从原材料、生产工艺和产品环节,推荐和鼓励采用无毒低毒的替代性原材料,推行得率高、可循环回收的生产工艺,改进结构和成分设计减轻产品使用中的排放,逐步完善有毒空气污染物控制方面的清洁生产指标体系.国内目前没有相应清洁生产指标体系的行业或技术,可根据实际情况采取专家研讨的方式制定建议执行的改进方案.

(7) 建立健全区域环境健康监测与风险评估制度

地方环保部门应定期联合医疗卫生、科研机构,对辖区内重点城市、重点工业区等周边环境区域可能造成或曾经引发慢性环境安全事故的因子,开展环境健康风险调查、编制详细的人群健康监测调查与风险评估报告,制定相应的控制管理与修复方案.对于国家认定的应重点控制的有毒空气污染物排放源,由国家环境保护部门负责组织周边环境和居民健康状况监视性监测、居民健康检查与风险评估以及后续控制管理与修复工作.国家和地方环保部门同时应建立健全相关环境风险事故责任制,提出具有操作性的生态补偿和健康赔偿机制.

致谢:本研究在资料收集和分析过程中得到了美国 EPA 钱启祥先生和北京市环境保护科学研究所聂磊研究员的帮助,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 魏巍. 中国人为源挥发性有机化合物的排放现状及未来趋势[D]. 北京:清华大学, 2009.
- [2] 张靖, 邵敏, 苏芳. 北京市大气中挥发性有机物的组成特征[J]. 环境科学研究, 2004, 17(5): 1-5.
- [3] 魏恩祺, 时庭锐, 李利荣, 等. 天津市大气中挥发性有机物的组成及分布特点[J]. 中国环境监测, 2010, 4: 7-11.
- [4] 王伯光, 张远航, 邵敏, 等. 广州地区大气中 C2~C9 非甲烷碳氢化合物的人为来源[J]. 环境科学学报, 2008, 28(7): 1430-1440.
- [5] 郭观林, 王世杰, 施烈焰, 等. 某废弃工场地 VOC /SVOC 污染土壤健康风险分析[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 397-402.
- [6] 解鑫, 邵敏, 刘莹, 等. 大气挥发性有机物的日变化特征及在臭氧生成中的作用——以广州夏季为例[J]. 环境科学学报, 2009, 29(1): 54-62.
- [7] 王玲玲, 王潇磊, 南淑清, 等. 郑州市环境空气中挥发性有机物的组成及分布特点[J]. 中国环境监测, 2008, 24(4): 66-69.
- [8] 陆思华, 白郁华, 张广山, 等. 大气中挥发性有机化合物(VOCs)的人为来源研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(5): 757-763.
- [9] U. S. EPA (U. S. Environmental Protection Agency). Rules and

- Implementation [EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/atw/eparules.html>.
- [10] 环境保护部. 国家污染物环境健康风险名录——化学第一分册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [11] Axelrada D A, Morello-Frosch R A, Woodruff T J, *et al.* Assessment of estimated 1990 air toxics concentrations in urban areas in the United States[J]. *Environmental Science & Policy*, 1999, 2(4-5): 397-411.
- [12] U. S. EPA (U. S. Environmental Protection Agency). National Air Toxics Program: the integrated urban strategy; notice [EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/atw/area/fr19jy99.pdf>.
- [13] U. S. EPA. List of urban HAPs for the integrated urban air toxics strategy [EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/atw/area/list33.html>.
- [14] U. S. EPA. List of 70 Area Source Categories [EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/atw/area/70list.pdf>.
- [15] U. S. EPA. Compilation of Area Source Rules [EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/atw/area/compilation.html>.
- [16] U. S. EPA. National Air Toxics Assessments [EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/atw/natamain/>.
- [17] U. S. EPA. 2002 National-Scale Air Toxics Assessment [EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/atw/nata2002/risksum.html>.
- [18] 齐文启, 孙宗光, 连军, 等. 建设项目环保验收监测中的 VOC 问题分析[J]. *中国环境监测* 2007, 23(3): 28-32.
- [19] 刘刚, 盛国英, 傅家谟, 等. 香港大气中有毒挥发性有机物研究[J]. *环境化学* 2000, 19(1): 61-66.