

## 分析测试

# 被动式采样器测定土壤中挥发性有机物的研究进展

李丹阳,任爱玲\*,宋 旸

(河北科技大学环境科学与工程学院,挥发性有机物与恶臭污染防治技术  
国家地方联合工程研究中心,河北 石家庄 050018)

**摘要:**被动采样器在许多工作场所中发挥着重要的作用,与主动采样器相比,具有易便携、质量轻、操作简便且不需要电力或采集动力等优势。被动采样器是采集一段时间内的气体污染物并进行浓度测定,即时间加权平均值(TWA)浓度。被动采样器主要用于监测大气中的污染物,但对土壤中挥发性有机物的监测比较少用。主要介绍了被动式采样器国内外的研究现状、类型原理及性能要求,综述了被动采样器中吸附剂种类及其效果,并介绍了被动采样器近些年在土壤中挥发有机物测定中的研究现状,最后对被动采样器的未来前景进行了展望。

**关键词:**挥发性有机物;被动采样器;吸附剂

中图分类号:X833

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)06-0227-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.06.053

## Research progress on using passive sampler to determine VOCs in soil

LI Dan-yang, REN Ai-ling\*, SONG Yang

(School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology,  
Shijiazhuang 050018, China)

**Abstract:** Passive samplers play an important role in many workplaces and have advantages of easy to carry, lightweight, easy to operate and no needing electricity or gathering power compared with active sampling. Passive samplers collect the concentration of gaseous pollutants over a period of time, known as the time-weighted average (TWA) concentration. Passive sampler is mainly used to monitor the pollutants in the atmosphere but has hardly been used in monitoring pollutants in the soil. This paper introduces mainly the research status, type principle and performance requirements of passive samplers at home and abroad, describes the types of adsorbents in passive samplers and their effect, and introduces the research situation using passive sampler to monitor VOCs in soil in recent years. Finally, the future prospects of passive samplers are prospected.

**Key words:** volatile organic compounds; passive sampler; adsorbent

PM<sub>2.5</sub>是指空气动力学直径小于2.5 μm的颗粒物,高浓度的PM<sub>2.5</sub>会导致大气的能见度下降,并对人类健康造成危害,这些影响逐渐引起了我国对大气污染的高度重视。挥发性有机物(Volatile Organic Compounds,简称VOCs)是对流层臭氧和二次有机气溶胶(Secondary Organic Aerosol, SOA)的重要前体物,控制其排放有助于降低臭氧和PM<sub>2.5</sub>的浓度,有助于防治城市区域大气臭氧的灰霾等复合型大气污染<sup>[1]</sup>。大气中有害物质的采集是对于

后期分析其性质的一个重要的程序,污染物样品的采集主要分主动采样和被动采样,被动采样技术是新型并具有广阔前景的一项监测技术。

自从被动式采样器被发明40多年以来,被动采样技术已被广泛应用于全球环境监测中。被动采样器最初设计用于空气中的气态污染物,然后应用于水性基质,直到最近应用在固体基质上,如土壤和沉积物。取样和样品制备通常占总分析时间的70%~90%<sup>[1]</sup>,大多数样品的前处理消耗很多资源,如高纯

收稿日期:2017-11-20;修回日期:2018-04-19

基金项目:河北省科技计划项目(国际合作:173976121D)

作者简介:李丹阳(1993-),女,硕士研究生,研究方向为挥发性有机物污染土壤的监测及修复,2201606004@stu.hebust.edu.cn;任爱玲(1963-),女,博士,教授,主要从事污染控制工程研究,通讯联系人,Ailingr@163.com。

度溶剂。因此,研究人员一直在努力开发可靠的取样和样品前处理制备程序,以简化工艺并减少资源的消耗。这一领域发展的一个例子就是开发了被动采样技术,笔者主要介绍了被动式采样器国内外的研究现状、类型原理及性能要求,阐述了被动采样器中吸附剂种类及其效果,并介绍了被动采样器近些年对土壤中挥发性有机物进行测定的研究及对被动采样器未来前景进行了展望。

## 1 被动采样器研究进展

### 1.1 国外被动采样器研究进展

自 1973 年 Palmes 和 Gunnison 首次成功研制出可定量分析  $\text{NO}_2$  的被动采样器后,许多学者出版了有关被动采样技术研究的文章,多集中在被动采样技术用于测量工作场所的暴露量方面的研究。

Saunders 于 1981 年出版的文章中表明,被动采样法已经应用到了室内环境空气的采样。1984 年,市场上已经出现多种被动采样器,如 PRO-TEK (DuPont)、Palmes 的 Palmes 采样管、VaporGard 的 MSA 采样器、国家矿山安全的 GASBADGE 采样器、对汞的采样器以及有机物和  $\text{CO}_2$  采样器。1986 年在卢森堡举行的有关扩散采样国际研讨会上,重点

介绍了工作场所中空气的监测。在这次会议之后,被动采样技术迅速发展,到 2002 年,被动采样器广泛应用于全世界<sup>[2]</sup>。

### 1.2 国内被动采样器研究进展

近年来,我国被动采样器逐渐兴起。20 世纪 90 年代崔久思等<sup>[3]</sup>研制了测定  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{HCHO}$  和  $\text{NH}_3$  等气体的徽章式被动采样器,为我国开辟了研究被动采样器的先河。1994 年陈乐恬等<sup>[4]</sup>利用被动采样的方法吸收空气中  $\text{NO}_2$ ;1996 年李晶等<sup>[5]</sup>利用被动采样器监测大气中的  $\text{SO}_2$ ,并对比分析了主动采样和被动采样 2 种方法的优劣;2002 年付斌<sup>[6]</sup>研究出了一种可以同时测定甲醛、二氧化氮和二氧化硫 3 种污染物的扩散被动监测方法。该方法用经过处理的活性炭纤维作为吸收材料,在采样后,经过洗脱、氧化等步骤转化成为  $\text{HCOO}^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ ,利用离子色谱法测定所吸附的甲醛、二氧化氮和二氧化硫的质量分数。该实验中利用多组分的被动采样器分析了温度、相对湿度和采样风速对采样速率的影响,结果表明,该采样器在一般的室内外环境温度即  $-10\sim 35^\circ\text{C}$  范围内都可以使用;该采样器可以在不同的湿度条件即 20%~90% 范围内进行正常采样,对 3 种污染物的采样速率不会产生影响;该采

(上接第 226 页)

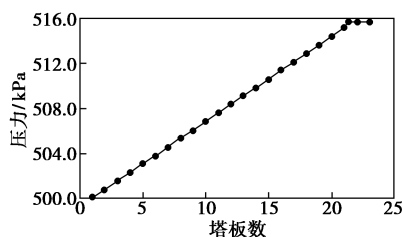


图 5 压力与理论板数的关系

### 2.3 压缩机

在本模拟中由二甲醚回收塔顶出来的二甲醚混合气体的循环利用至关重要,但是由于分离后的混合气体组成与反应进料的压力差别很大,并且由于采用一级压缩的出口气体温度过高难以继续压缩,为此采用二级压缩的方法使其压缩到 3 242 kPa,最终循环物流搭建起来,整个流程稳态收敛。

## 3 结论

(1)二甲醚回收塔在  $47^\circ\text{C}$ 、3 040 kPa 下进料分

离,塔顶冷凝器的压力为 500 kPa,塔釜再沸器的压力为 516 kPa,全塔温降为  $19.38^\circ\text{C}$ ,全塔压降为 16 kPa,满足稳态操作的要求。

(2)乙酸甲酯精馏塔在  $38.14^\circ\text{C}$ 、516 kPa 下进料分离,塔顶塔釜冷凝器再沸器的压力与二甲醚回收塔的一致,全塔压降为 16 kPa,温降为  $73.36^\circ\text{C}$ ,所以乙酸甲酯精馏塔稳态的可操作性强,分离稳定。

(3)为了满足压力要求采用 2 个压缩机,经 2 次压缩使压力达到 3 242 kPa。

## 参考文献

- [1] 徐克勋.精细有机化工原料及中间体手册[M].北京:化学工业出版社,1998.
- [2] Nagamalleswara K Rao, Koteswara G Reddy, Rajendra P Prasad, et al. Design and pinch analysis of methyl acetate production process using Aspen Plus and aspen energy analyzer[J]. International Journal of Chemical Engineering and Processing, 2015, 1: 31-40.
- [3] 孙兰义.过程模拟实训—Aspen HYSYS 教程[M].北京:中国石化出版社,2015. ■

采样器在风速增加的情况下,各污染物的采样速率也都相应的增加。而且根据付斌的研究结果:当风速小于0.2 m/s时,采样速率处于未能达到正常采样状态,当风速大于1.5 m/s以后采样速率上升较快。2013年杜正健等<sup>[7]</sup>为使被动采样器暴露量测试误差最小,利用一种反问题设计方法,结合被动采样器的传质模型,指导被动采样器设计,并依据此方法研发出新型被动采样器 THPDS,该采样器在被动采样中具有一定优势。有关被动采样器的研制越来越多,未来在土壤中的应用也会备受关注。

## 2 被动采样器类型、原理及影响参数

### 2.1 被动采样器的类型

被动采样器根据吸收原理、几何结构和分析物质不同分为3种:按照吸收原理的不同,可分为扩散型被动采样器(Diffusion passive sampler)和渗透型被动采样器(Permeation passive sampler);按照几何结构的不同分为管式被动采样器(Tube-type passive sampler)和徽章式被动采样器(Badge-type passive sampler)2种,管式采样器有一端或两端开口,呈管状,扩散的半径大,但扩散面积小,因此对气体的吸收速率较小。徽章式采样器形似纽扣状,具有阻挡层和吸附层以及其他部分,徽章式采样器的扩散面积大、扩散距离短,因此采样速率较快,但易受风速的影响。开口处设置的阻挡层一般用来减少风速的影响;按采集的分析物性质不同可分为液体采样器、气体采样器和固体采样器,分别适用于液体、气体和固体基质的采集。

### 2.2 被动采样器的原理

#### 2.2.1 扩散原理

被动采样器是根据费克分子扩散原理来富集空气中被测组分气体的一种采样方法。吸附外界污染物浓度( $C_1$ )和采样器的吸附介质中该物质浓度( $C_0$ )是有一定浓度差的,物质分子在一定介质中沿着浓度梯度高向浓度梯度低的方向移动,扩散到采样器中的吸附剂上被吸附剂吸收。其分析物的扩散质量传递速率与物质的浓度梯度、分子扩散系数和扩散区域的截面积成正比,与扩散区域的长度成反比,其计算式如下:

$$U = (DA/L_d)(C_1 - C_0) \quad (1)$$

式中: $U$ 为分析物的扩散质量传递速率,ng/s; $D$ 为分子扩散系数,cm<sup>2</sup>/s; $A$ 为扩散层的截面积,cm<sup>2</sup>; $L_d$

为扩散层的长度,cm; $C_1$ 为外界空气中被测物质的浓度,ng/cm<sup>3</sup>; $C_0$ 为吸附介质表面被测物质浓度,ng/cm<sup>3</sup>。

$C_1 - C_0$ 是整个吸附剂长度 $L_d$ 上的浓度变化,即浓度梯度。若给定一个吸附剂的暴露时间 $t$ ,则与式(1)相乘就可以得出被测污染物的质量:

$$M = (DA/L_d)(C_1 - C_0)t \quad (2)$$

式中: $M$ 为分析物的质量,ng; $t$ 为暴露时间,s。

渗透式采样器在吸收被测分析物时,与扩散式被动采样器不同的是分析物的渗透系数 $S$ 和膜厚 $L_m$ ,渗透系数 $S$ 和膜厚 $L_m$ 与所采用的渗透膜材料有关,其计算式如下:

$$M = (SA/L_m)(C_{ma} - C_{ms})t \quad (3)$$

式中: $S$ 为渗透系数,cm<sup>2</sup>/min; $L_m$ 为膜厚,cm; $C_{ma}$ 为暴露在空气中膜表面的分析物浓度,ng/cm<sup>3</sup>; $C_{ms}$ 为与吸附剂接触的膜表面上的分析物浓度,ng/cm<sup>3</sup>。

#### 2.2.2 吸附动力平衡区

被动采样器在扩散和渗透作用下,随着时间的推移,吸附剂对污染物有一定的吸附速率,经过动力学区的动态吸附后,达到一定的稳定即平衡区,如图1所示。

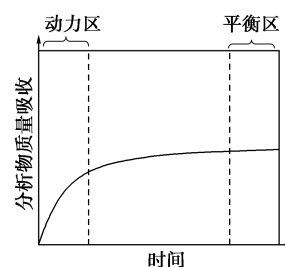


图1 被动式采样器吸收污染物的模型

### 2.3 被动采样器主要影响参数

虽然被动采样器被认为是很有价值的环境监测工具,但在不同环境条件下,这种技术的可靠性始终是一个有争议的话题。使用Fick扩散定律的理论处理是基于稳态条件下才适用于被动采样器的一个假设。而实际情况多处于非稳态条件,且分析物的实际吸收是随温度、湿度、风速、吸附剂种类、分析物浓度等环境因素而变化。温度会影响扩散采样器的扩散系数和渗透采样器的渗透率<sup>[2]</sup>,湿度会对亲水性吸附剂或渗透膜有影响,而浓度会影响渗透型采样器中分析物的溶解性和扩散程度<sup>[7]</sup>。按照吸收原理的分类即扩散型和渗透型被动采样器来分析不同参数对其影响,具体情况如表1所示。

表 1 气体采样器的环境影响参数

	扩散型	渗透型
温度对采样速率影响	扩散系数(基于气体分子运动论)是温度与压力的函数,所以温度对采样器有影响	温度影响渗透系数(基于阿伦尼乌斯方程关系)
湿度对采样器性能影响	对疏水性吸附剂影响较小;对亲水性吸附剂影响较大;湿度过大,采样器的采样速率会减小	对疏水性膜无影响;对亲水性膜影响较大 <sup>[8]</sup>
吸附剂对采样速率影响	强吸附剂通常用于动力吸收系统,较弱的吸附剂通常使用在动力学或平衡状态下的采样器	
分析物浓度对采样速率影响	无影响 <sup>[2]</sup>	聚合物中的吸附和扩散系数可能会在非常高的分析物浓度下发生变化,从而导致可变的吸收速率 <sup>[8]</sup>
风速对吸收速率影响	风速是一个变量,是否影响主要根据采样器的结构。对管式采样器影响很大,对具有孔阻挡层的采样器影响适中	在风速适中时影响大;在低速和膜的溶解性较高时有潜在的影响

根据被动采样器的原理及结构组成,对其设计和性能都有一定的标准要求。在设计上,如管式采样器中,采样管的长度决定了费克扩散定律的扩散层的长度  $L$ ; 采样管的半径决定了费克扩散定律的扩散层的截面积  $A$ ; 徽章式气体被动采样器透膜的厚度决定了费克扩散定律的扩散层的长度  $L$ ; 透膜的所有孔的总面积决定了费克扩散定律的扩散层的截面积  $A$ <sup>[7]</sup>。在性能上,包括响应时间、吸附容量、采样流量、解析效率等性能指标,常见的性能指标如表 2 所示。

表 2 被动采样器性能要求<sup>[9]</sup>

性能指标	性能要求	性能指标	性能要求
响应时间/s	≤30	样品稳定性/d	≥14
采样流量/ ( $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ )	≥25	采样范围	0.5-5.0×TWA
吸附容量	≥2×TWA×8 h	解析效率/%	≥75
		用前稳定性/d	≥10

### 3 被动采样器中吸附剂种类及效果

被动采样器吸附剂的选择原则是既要保证吸附剂对目标污染物有很好的保留作用,同时在分析时易于目标污染物的脱附<sup>[10]</sup>。环境空气领域吸附剂

的选择原则同样适用于土壤气领域,土壤气的湿度近似 100%,需要更加注重吸附剂的疏水性<sup>[11]</sup>。

#### 3.1 活性炭

活性炭是经过活化处理的黑色多孔固体物质,活性炭的原料非常丰富,一般的活性炭是以天然的植物材料(如椰壳活性炭、杏壳活性炭、木质粉炭等)<sup>[12]</sup>、矿物质原料活性炭(各种煤和石油及其加工产物为原料制成的活性炭)、其他原料制成的活性炭(如废橡胶、废塑料等制成的活性炭)<sup>[13]</sup>。

活性炭具有发达的孔结构,吸附性能好,拥有较大的比表面积。在李照海等<sup>[13]</sup>的研究中,对比了沸石分子筛与活性炭之间对处理一些不稳定的 VOCs 气体的性能,研究表明:虽然沸石分子筛与活性炭都具有均匀的孔径,但活性炭孔径分布较广且总体大于沸石分子筛。活性炭对气体和溶液中的有机或无机物以及胶体颗粒等有很强的吸附能力,具有足够的化学稳定性、机械强度及耐酸、耐碱、耐热、不溶于水和有机溶剂等优点,使其在各行各业有着广泛而重要的应用<sup>[14]</sup>。

活性炭虽然对于一些气体的吸附效果较好,但也不免会有一些因素影响着活性炭的吸附功能。周剑锋等<sup>[15]</sup>的研究表明:活性炭在处理非水溶性的 VOCs 时,气体中水蒸气的含量对吸附效果影响很大。改性后的活性炭具有很强的抗干扰能力,当改性条件确定到最佳时,可以达到技术合理、经济可行的最佳治废目的。

#### 3.2 沸石分子筛

沸石分子筛是一类无机多孔硅铝酸盐吸附剂,主要由硅、铝、氧及其他金属阳离子构成的微孔晶体。沸石分子筛对气体的吸附是一种物理过程,他可以吸附在其表面做不规则运动的流体中物质,可以达到流体中的分子吸附、分离、清除的目的。

沸石分子筛的微孔结构均匀,所以要根据分子大小来决定是否被吸附。沸石分子筛除了具有吸附的性能外,还具有离子交换性能和催化性能;同时还可以干燥空气、净化空气中的污染物;还可以吸附分离二甲苯、 $\text{N}_2/\text{O}_2$  的分离<sup>[16]</sup>。对于沸石分子筛分离二甲苯的研究中,李照海等<sup>[13]</sup>研究发现:沸石分子筛的平衡吸附量总体小于活性炭,分子筛的平衡吸附量随平衡浓度和吸附温度的变化要小于活性炭,二甲苯从沸石分子筛的表面脱附的难度大于活性炭。

### 3.3 活性炭纤维

活性炭纤维(activated carbon fiber, ACF)是一种新型的吸附材料,在处理有毒有害气体时能起到很好的作用。与活性炭相比,ACF具有巨大的比表面积,丰富的微孔,孔径小且分布均匀等特点<sup>[17]</sup>。ACF具有导电导热性好、耐高温等特点,因而既可以用于对电吸附,也可以制作电容器<sup>[18]</sup>。

2005年刘阳生等<sup>[19]</sup>将活性炭纤维上负载了纳米MnO<sub>2</sub>来氧化甲苯,在静态实验中,常温下的甲苯气体即可被负载了纳米MnO<sub>2</sub>的活性炭纤维氧化成CO<sub>2</sub>。在动态实验中,当反应时间在10h以内时,甲苯的净化性能是基本不变的,而超过10h后净化性能开始出现下降趋势。由此也可看出,负载了纳米MnO<sub>2</sub>的活性炭纤维材料对高浓度的甲苯气体具有较长的穿透时间。

## 4 被动采样器在土壤中的研究

与应用于空气和水性基质的被动采样技术相比,固体基质(如土壤、沉积物和堆肥)的应用历史相对较短。被动固体采样首先应用在20世纪90年代对土壤气中污染物的监测<sup>[20]</sup>。固体基质的被动采样实质上是土壤气体或土壤蒸汽的采样方法。根据所测定的土壤和沉积物不同元素和物质,几种采样器如表3所示。

表3 适用于土壤和沉积污染物的被动采样器

被动采样器	所分析土壤中元素	分析物类型
PETREX 采样管	沙质底沉积物 底沉积物	氯化烃和芳香烃蒸汽 挥发性氯化有机物(三氯乙烯、四氯乙烯、二氯乙烯)
GORE SORBER	土壤蒸气	苯系物, PAHs, 石油烃
DGT 设备(薄膜扩散梯度)	孔隙水、土壤	Cd、Zn、Ni、Fe、Sn、Pb、Al、Cr、Mn、Co、Cu、As
吸附剂管	土壤气	氯仿、四氯化碳、1,1,1-三氯乙烯
SPME	沉积物孔隙水	疏水性有机污染物
SPMD	沉积物	PAHs, PCB

德克萨斯理工大学于2006年利用被动采样器评估了2种爆炸性代谢物(MNX和TNX)在不同的土壤环境条件下的生物利用度。研究表明,该实验利用有良好吸收效果的十八烷基C18作为吸附剂,在德克萨斯州的沙壤土和内布拉斯加州的泥沙壤土这2种土中,被动采样器对MNX和TNX的吸收与

蚯蚓的摄入有良好的正线性关系<sup>[1]</sup>。这说明被动采样器是评估各种土壤类型中MNX和TNX或其他有机化合物的生物利用度的良好代用品。在2009年《环境污染》杂志中, Yuqiang Tao等<sup>[21]</sup>利用三油酸甘油酯的醋酸纤维素膜(TECAM)作为吸附剂对土壤中多环芳烃进行被动采样,测定结果显示:TECAM中多环芳烃的浓度与田间污染土壤中的浓度相关。在土壤溶液中测定的多环芳烃浓度接近于TECAM估计的相应值。此外,在TECAM和蚯蚓的PAH浓度之间观察到接近1:1的关系。上述结果表明,TECAM可以作为预测多环芳烃或其他疏水性有机污染物(Hydrophobic Organic Contaminants, HOCs)在野外污染土壤中的生物利用度的有用工具。在2009年Mark H. Garnett等<sup>[22]</sup>开发了一种在分子筛上被动捕获二氧化碳的新方法,使其可以回到实验室进行C同位素分析。他们在草地土壤进行了测试,并使用了一个合成的土壤来提供对比同位素特征。结果表明,分子筛可用于大范围的条件;使用分子筛收集二氧化碳的被动采样方法简单又便宜,且利用率比较高。2017年Carey E. Donald等<sup>[23]</sup>用新型无源被动采样器评估多环芳烃和多氯联苯在土壤空气中空气和土壤-空气的通量分配情况,空气和土壤空气是接近土壤,且与土壤平衡。将一个盒子放在土壤表层1cm处的低密度聚乙烯被动采样器上,将空气的被动采样器放置在距离土壤1.5m处的位置,分析土壤-空气和空气。研究结果表明,土壤-空气采样器的可变性大于空气采样器,且灵敏度可以随着被动采样材料的部署时间和质量而调整。新型土壤空气箱下的环境条件不会显著改变土壤-空气分配行为,应在将来的使用中加以监测。被动的土壤-空气采样器可以成为应用在许多新的或具有历史污染地方的候选者。Chuanfei Wang等<sup>[24]</sup>利用改进的被动空气采样器对西藏高原中部牧区中的有机氯农药进行监测。分析测定了近地面2~200cm内的空气中有机氯农药的含量情况:夏季的有机氯浓度要高于冬季的有机氯浓度;无论夏季还是冬季,有机氯的浓度是随着高度逐渐减小的,这表明有机氯农药是从空气逐渐沉积到土壤表面的,青藏高原中部地区的牧场土壤中有机氯农药将会以很小的沉积浓度缓慢增长。

## 5 展望

被动采样器对监测环境中的有害物质和痕量物

质具有重要意义,国外的被动采样器已广泛地应用到室内场所采样、家居检测、个人暴露量采样、大气采样以及相关政府调研和科学研究,并建立了一系列全方位评价被动式气体采样器性能的评价标准<sup>[25]</sup>。目前,我国的被动采样技术还处于起步阶段,在一些实际的环境监测中的应用还不够广泛。但被动采样器与主动采样相比,具有易便携、质量轻、操作简便且不需要电力或采集动力等的优势,在未来的环境监测中必能得到大力的发展和推广。

在今后的相关研究中,可以向着以下几个方面来发展:(1)设计建立一种针对不同地域需求的被动采样器,优化其性能,对污染物质的采集更有影响力。(2)被动采样器最主要的是其吸附材料,只有选择对了吸附材料,才能更有效地监测污染物质,同时对吸附剂进行改性会达到更好的效果。(3)吸附剂结构可以适当的改良,利用同种吸附剂或改良的吸附剂吸附多组分污染物,可以达到快速且准确的分析。(4)建立健全被动采样器在使用过程中的相关规范和标准,这样对于监测的数据更有规范性。(5)被动采样器广泛应用在各个领域,将其廉价化可以更好地推广。

### 参考文献

- [1] Zhang B H, Philip N S, Todd A Anderson. Evaluating the bioavailability of explosive metabolites, hexahydro-1-nitroso-3,5-dinitro-1,3,5-triazine (MNX) and hexahydro-1,3,5-trinitroso-1,3,5-triazine (TNX), in soils using passive sampling devices[J]. *Journal of Chromatography A*, 2006, 1101:38-45.
- [2] Seethapathy S, Gorecki T, Li X J. Passive sampling in environmental analysis[J]. *Journal of Chromatography A*, 2008, 1184:234-253.
- [3] 崔久思. 扩散法被动式个体采样器的设计原理试验装置和性能评价方法[J]. *卫生研究*, 1994, 23(1):1-1220.
- [4] 陈乐恬, 佟玉芹. 被动采样法测定环境空气中的二氧化氮[J]. *环境化学*, 1994, 13(5):460-465.
- [5] 李晶, 宁玉英, 刘玉艳. 被动采样器监测大气中二氧化硫[J]. *中国医科大学学报*, 1996, 25(4):439.
- [6] 付斌. 多组分气体污染物被动式监测方法的研究. *卫生研究*, 2002, 31(5):390-393.
- [7] 杜正健, 莫金汉, 李欣笑, 等. 被动采样器设计方法及应用效果研究[J]. *暖通空调*, 2013, 43(12):51-58.
- [8] Strandberg B, Sunesson A L, Olsson K, et al. Evaluation of two types of diffusive samplers and adsorbents for measuring 1,3-butadiene and benzene in air[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(22):4101-4110.
- [9] 张小阳, 邵华. 气体被动式采样器的应用与研究进展[J]. *职业与健康*, 2011, 27(8):921-922.
- [10] Elizabeth Woolfenden. Sorbent-based sampling methods for volatile and semi-volatile organic compounds in air. Part 2. Sorbent selection and other aspects of optimizing air monitoring methods[J]. *Journal of Chromatography A*, 2010, 1217:2685-2694.
- [11] Seethapathy S, Gorecki T. Polydimethylsiloxane-based permeation passive air sampler. Part I: Calibration constants and their relation to retention indices of the analytes[J]. *Journal of Chromatography A*, 2011, 1218:143-155.
- [12] 孙健, 戴维杰, 肖伟豪, 等. 挥发性有机物吸附材料研究进展[J]. *现代化工*, 2017, 37(7):58-62.
- [13] 周烈兴. 活性炭吸附处理苯和甲苯气体的性能及机理研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2010.
- [14] 李照海, 羌宁, 刘涛, 等. 活性炭和沸石分子筛处理非稳定排放 VOCs 气体的性能比较. *环境工程学报*, 2017, 11(5):2933-2939.
- [15] 周剑锋, 吴祖成. 不同条件对活性炭吸附挥发性有机物的影响[J]. *浙江大学学报*, 2013, 40(2):201-206.
- [16] 王春蓉. 沸石分子筛的性能与应用研究[J]. *化学与黏合*, 2010, 32(4):76-78.
- [17] 白洪亮. 活性炭吸附法脱除低浓度苯系物的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006.
- [18] 李新艳, 秦志宏. 活性炭纤维的研究进展[J]. *化工生产与技术*, 2011, 18(4):43-46.
- [19] 刘阳生, 易莎. 活性炭纤维负载纳米 MnO<sub>2</sub> 氧化甲苯的实验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2005, 13(3):276-283.
- [20] Kot-Wasik A, Zabiegala B, Urbanowicz M, et al. Advances in passive sampling in environmental studies[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2007, 602(2):141-163.
- [21] Tao Yuqiang, Zhang Shuzhen, Wang Zijian, et al. Predicting bioavailability of PAHs in field-contaminated soils by passive sampling with triolein embedded cellulose acetate membranes[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157:545-551.
- [22] Mark H Garnett, Iain P Hartley, David W Hopkins, et al. A passive sampling method for radiocarbon analysis of soil respiration using molecular sieve[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41:1450-1456.
- [23] Carey E Donald, Kim A Anderson. Assessing soil-air partitioning of PAHs and PCBs with a new fugacity passive sampler[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 596-597:293-302.
- [24] Wang Chuanfei, Wang Xiaoping, Ren Jiao, et al. Using a passive air sampler to monitor air-soil exchange of organochlorine pesticides in the pasture of the central Tibetan Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 580:958-965.
- [25] 朱珍, 高峤, 曹罡, 等. 被动式气体个体采样器的研究[J]. *环境卫生学杂志*, 2015, 5(4):389-396. ■