

# 污水处理厂污水和污泥中 PAHs 的残留及风险研究进展

孙少静<sup>1</sup> 李博<sup>1</sup> 李洪伟<sup>2</sup> 齐虹<sup>1</sup> 彭永臻<sup>1</sup>

1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院 城市水资源与环境国家重点实验室 黑龙江 哈尔滨 150090

2. 黑龙江省环境保护科学研究院 黑龙江 哈尔滨 150056

**摘要:** 多环芳烃(PAHs)是一类极其复杂的有机污染物,衍生物种类较多,1976年美国环保局因其致癌、致畸、致突变将其中的16种列为优先控制污染物。城市污水处理厂作为一个地区污染物迁移和转化的重要媒介,在控制和截断PAHs进入天然水体的过程中扮演着重要的角色。因此,研究污水处理厂中PAHs的浓度水平对于了解和控制PAHs进入天然水体和通过污泥进入到土壤中进而通过食物链危害人类健康具有重要的意义。文章综述了污水处理厂污水和污泥中PAHs的前处理技术、分析方法、浓度水平、生态风险以及国内外污水处理厂污泥土地利用现状。

**关键词:** 污水处理厂;多环芳烃;分析检测;土地利用;生态风险

中图分类号: X820.1 文献标志码: A 文章编号: 1002-6002(2017)01-0106-09

DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2017.01.16

## Study on the Residue and Risk of PAHs in Sewage and Sludge of Wastewater Treatment Plant

SUN Shaojing<sup>1</sup>, LI Bo<sup>1</sup>, LI Hongwei<sup>2</sup>, QI Hong<sup>1</sup>, PENG Yongzhen<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

2. Environmental Protection Science Research Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150056, China

**Abstract:** Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are a well-known group of toxic compounds. Because of their toxic, mutagenic and carcinogenic properties, 16 PAHs have been identified as prior controlled pollutants by the United States Environmental Protection Agency (US EPA). As the media for movement and transformation of regional pollutants, wastewater treatment plant (WWTP) plays an important role in preventing PAHs from entering natural water-body. Thus it has important significance to study PAHs in WWTP. This paper reviews the pretreatment technology, analysis methods, concentration and ecological risk of PAHs in wastewater and sludge. The land application status of sludge from WWTP is also summarized.

**Keywords:** wastewater treatment plant; PAHs; analysis and detection; land application; ecological risk

多环芳烃(PAHs)是指2个或2个以上稠环或非稠环的形式连接在一起所形成的有机化合物,属于半挥发性物质,多为无色或淡黄色的结晶,具有较高的熔点和沸点,蒸气压很低,难溶于水,易于在环境中远距离传输,是一种普遍存在的污染物,并且极其复杂,衍生种类众多<sup>[1]</sup>。目前已经发现40多种PAHs及其衍生物具有致癌作用,是一类具有典型三致(致癌、致畸、致突变)作用的有机污染物,1979年美国环保局(USEPA)将16种PAHs列入优先控制污染物,分别是萘、苊烯、苊、芴、菲、蒽、荧、芘、苯并[a]蒽、屈、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、苯并[a]芘、茚并[1,2,3-cd]芘、二苯并[a,h]蒽、苯并[ghi]花。截至目前为止,PAHs的来源、在环境中的迁移转化及其生物

毒性仍为世界各国研究污水处理厂PAHs的重点。

PAHs来源广泛,主要分为天然源和人为源<sup>[2-3]</sup>。天然源主要包括燃烧和生物的合成作用,如火灾、火山爆发等都会产生PAHs。另外未开采的石油中也有大量的PAHs。而PAHs的人为源包括人类排泄物、日用化学品、汽车燃料、润滑油、清洁剂、雨水径流等,许多不同行业和燃料燃烧产物沉积在城市土壤上,通过污水处理系统进入污水处理厂。随着经济的不断发展和人们生活水平的不断提高,PAHs在污水处理厂中呈现逐渐增加的趋势,因此对污水处理厂中PAHs的研究具有重要的意义。

污水处理厂主要用于城市污水和工业废水的

收稿日期: 2016-04-26; 修订日期: 2016-07-25

作者简介: 孙少静(1991-),女,河北邢台人,在读硕士研究生。

通讯作者: 齐虹

处理以使其达标排放,也是水环境中 PAHs 的重要来源<sup>[4]</sup>。PAHs 具有难以生物降解、生物毒性及较高的辛醇水分配系数,因此转移到污泥中是污水处理厂 PAHs 去除的一个重要途径。研究污水处理厂中 PAHs 的迁移转化规律,对于控制 PAHs 引起二次污染起到了非常重要的作用。国内外已有许多专家学者对于城市污水处理厂的 PAHs 开展了研究,为人们了解 PAHs 在污水处理厂的迁移转化规律以及为政府制定相应的法律法规提供了依据。文章总结了哈尔滨某污水处理厂中 2011—2014 年 PAHs 的检测结果,同时综述了污水处理厂污水和污泥中 PAHs 的前处理技术、分析方法、浓度水平、生态风险以及国内外污水处理厂 PAHs 的土地利用现状,希望能为污水处理厂 PAHs 的研究提供参考。

## 1 污水处理厂 PAHs 的检测方法

### 1.1 样品预处理

#### 1.1.1 污水样品预处理

水体中 PAHs 呈 3 种状态: 吸附在悬浮性固体上、溶解于水中、呈乳化状态。水体中 PAHs 的样品前处理方法最常用的是液液萃取、固相萃取和固相微萃取<sup>[5]</sup>。液液萃取是指用溶剂提取液体混合物中目标物的过程,WANG 等<sup>[6]</sup>用液液萃取和 GC-MS 相结合的方法分析了合肥某污水处理厂 PAHs 的特点、分布和降解率等问题。固相萃取技术就是利用固体吸附剂将液体样品中的目标化合物吸附,与样品的基体和干扰化合物分离,然后再用洗脱液洗脱或加热解吸,达到分离和富集目标化合物的目的<sup>[7]</sup>。QI 等<sup>[8]</sup>用固相萃取技术分别分析了北京某水厂出水和天津某水厂出水及受纳水体中的 PAHs,结果表明,固相萃取较液液萃取能够大大增强对分析物特别是痕量分析物的检出能力,提高被测样品的回收率。固相微萃取是一种集采集、浓缩、净化和进样于一体的无溶剂样品萃取技术,现已有纤维素固相萃取、管内固相萃取和搅拌棒吸附萃取等不同形式。

#### 1.1.2 污泥样品预处理

PAHs 具有较高的辛醇水分配系数( $K_{ow}$ ),易于从水中分配到生物体内或沉积物中。目前用于土壤和底泥中 PAHs 的前处理方法有索氏提取、超声波提取、微波辅助萃取、加速溶剂萃取、超临界萃取、压力流萃取、超零界流体萃取等<sup>[9]</sup>。索

氏提取被认为是经典的提取方法,被许多国家作为法定的标准方法。QI 等<sup>[8]</sup>用丙酮和正己烷以体积比 1:1 来提取污泥样品中的 PAHs,得到了较高的回收率。用索氏提取法提取污泥中的 PAHs 时,提取剂的用量和对比对样品回收率有很大的影响。超声提取是 USEPA 推荐的 PAHs 提取方法之一,超声提取固体中 PAHs 时间短,操作简单,同时具有较高的回收率。微波辅助萃取是指利用微波加热来加速溶剂对固体样品中目标萃取物的萃取过程,因其具有加热均匀、选择性和萃取效率高、不破坏被测物质、消耗容积少及无污染等特点,在固体样品的预处理中得到广泛的应用。加速溶剂萃取是最新的全自动萃取方法,利用提高温度和增加压力来提高萃取效率,其结果大大加快了萃取的时间并明显降低萃取溶剂的用量,避免了使用超声波萃取所带来的多次清洗的问题。除此之外,超临界萃取、压力流萃取、超临界流体萃取也常被用于 PAHs 的样品前处理,超临界流体萃取无毒性溶剂残留,是一种理想清洁的样品前处理技术。随着检测技术的进步,样品前处理技术有了很大的发展,并且将趋于简便、快捷、小型化、自动化、微量化、无毒化<sup>[10]</sup>。

### 1.2 仪器分析

随着人们对 PAHs 及其衍生物研究的日益深入,PAHs 的检测方法也在不断发展变化,常用的分析方法有色谱法和质谱法。气相色谱是一种高效、灵敏、快速、操作简单、应用广泛的分析方法,分析环境样品中的 PAHs 一般用氢火焰离子化检测器。气相色谱-质谱法适用于混合物中未知组分的定性鉴定及定量分析,可以判断化合物的分子结构,鉴定出部分分离甚至未分离的色谱峰,还可以测定未知组分的相对分子质量等。在定量分析方面,抗干扰力强,灵敏度高,适用于基质复杂环境样品分析,被很多专家学者用来分析环境样品中的 PAHs<sup>[6,8,11-18]</sup>。高效液相色谱法是以液体为流动相,采用高压输液系统携带柱内被分离组分进入检测器进行样品检测的方法,高效液相色谱配合荧光检测常用于分析环境样品中的 PAHs<sup>[7,19-23]</sup>。USEPA 标准方法 610 针对废水中 PAHs,通过高效液相色谱-紫外法和荧光检测器以及气相色谱-火焰离子检测器测定其含量,此外,方法 525、626 和 8270 通过气象色谱和质谱法分析废水和固体废弃物中的一些 PAHs。方法 8275 是一种用热法提取毛细管气相色谱-质谱

技术分析存在于土壤、污泥和固体废弃物中的 16 种 PAHs。(GB/T 13198—1991) 针对 6 种 PAHs 采用高效液相色谱法测定。HJ 478—2009 采用液液萃取、固相萃取高效液相色谱法测定水中的 16 种 PAHs。

## 2 PAHs 在污水处理厂的残留现状

### 2.1 污水处理厂进水中 PAHs 的浓度水平

近年来国内外学者对污水处理厂中的 PAHs 污染进行了大量的监测(见表 1) 结果表明,在各国污水处理厂进水中 16 种优先控制 PAHs 都有不同程度的检出。世界各地污水处理厂进水中的 PAHs 为 220 ~ 14 000 ng/L, 浓度跨度较大。中国哈尔滨、合肥以及波兰进水中 PAHs 浓度处于较高的水平,其质量浓度约 5 000 ng/L 以上<sup>[6, 24]</sup>。约旦和中国泰安的 PAHs 质量浓度处于中等水平(约 500 ~ 1 300 ng/L)<sup>[19, 25]</sup>。日本的 PAHs 质量浓度最低(219 ng/L)<sup>[26]</sup>。污水处理厂进水分为生活污水和工业废水,但是其占比会有不同,例如日本污水厂进水中生活污水和工业废水各占 50%, 合肥生活污水占 60%、工业废水占 40%, 波兰生活污水占 70%、工业废水占 30%。进水来源的不同对污水厂 PAHs 的浓度及其低高环占比等都有影响,进水中工业废水占比高可能是导致污泥中 PAHs 较高的一个原因,但还有待进一步研究。

表 1 不同地区污水处理厂进水中 PAHs 的浓度水平  
Table 1 PAHs concentration in influent of wastewater treatment plant in different regions

国家或城市	地区	采样年份	PAH 种类	∑PAHs/(ng/L)	参考文献
波兰	欧洲	2003	16	5 163 ~ 6 985	[24]
挪威	欧洲	2002—2004	16	220 ~ 1 340	[27]
希腊	欧洲	1995	16	11 514	[28]
意大利	欧洲	2005—2008	16	140 ~ 1 540	[29]
加拿大	美洲	1989	16	787 ~ 1 586	[30]
南非	非洲	2007	16	14 300	[31]
日本	亚洲	2005		219	[26]
约旦	亚洲	1997	16	496 ~ 1 241	[19]
中国浙江	亚洲	2010	16	1 004	[32]
中国泰安	亚洲	2008	16	1 148 ~ 1 157	[25]
中国合肥	亚洲	2011	16	5 759	[6]
中国哈尔滨	亚洲	2011—2014	16	4 781 ~ 8 451	本研究

### 2.2 污水处理厂出水中 PAHs 的浓度水平

污水处理厂的出水一般直接排入附近水体,因此研究污水厂中 PAHs 对减少接纳水体污染具

有重要的意义。在中国天津某水厂出水 PAHs 质量浓度高达 12 000 ng/L,其次为中国合肥<sup>[6]</sup>、哈尔滨以及波兰<sup>[24]</sup>(约为 760 ~ 2 300 ng/L),中国泰安和日本的出水中总 PAHs 的质量浓度较低(约为 40 ~ 300 ng/L)<sup>[25-26]</sup>。考虑到苯并[a]芘(BaP)的强致癌性,中国《城镇污水处理厂污染物排放标准》对城镇污水处理厂出水中苯并[a]芘(BaP)的排放要求是 30 ng/L<sup>[33]</sup>,合肥污水厂出水苯并[a]芘超过标准约 12 倍,波兰(64 ng/L)、哈尔滨(42 ng/L)出水中苯并[a]芘的质量浓度略超过标准中规定的 30 ng/L 浓度水平。对于难降解有机污染物,污水厂进水和经过处理后出水往往具有很好的相关性,即进水浓度高往往导致出水浓度高。有研究表明,从进水到出水总 PAHs 的去除率约 60%,去除途径包括生物降解、挥发到大气和吸附到污泥中,其中约有 20% 的 PAHs 转移到污泥中。高环与低环 PAHs 在污水处理过程中的去除途径有差异,其中高环 PAHs 较易吸附到污泥中,而低环类较易挥发到大气中。可见,一些难降解并且具有累积性的有机污染物很难被污水处理厂的生化作用降解,反而是以一定的比例转移到其他介质(如污泥)中,根据不同的处理设施和进水水质的不同,这种转化率可能会有差异,但是总体呈现出相似的转化规律。

表 2 不同地区污水处理厂出水中 PAHs 浓度水平  
Table 2 PAHs concentration in effluent of wastewater treatment plant in different regions

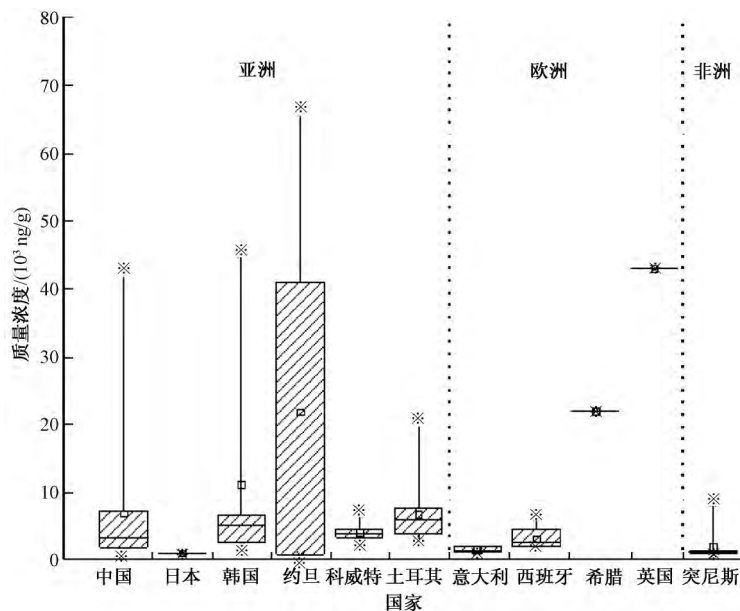
国家或城市	地区	采样年份	PAH 种类	∑PAHs/(ng/L)	参考文献
波兰	欧洲	2003	16	767 ~ 1 172	[24]
希腊	欧洲	1999	16	5685	[28]
加拿大	美洲	1989	16	324	[30]
南非	非洲	2007	16	3 910	[31]
日本	亚洲	2005	未知	44	[26]
约旦	亚洲	1997	16	288 ~ 496	[19]
中国浙江	亚洲	2010	16	147	[32]
中国泰安	亚洲	2008	16	129 ~ 261	[25]
中国天津	亚洲	2008	未知	960 ~ 11 610	[8]
中国合肥	亚洲	2011	16	2 240	[6]
中国哈尔滨	亚洲	2011	16	270 ~ 1 688	本研究

### 2.3 污水处理厂污泥中 PAHs 的浓度水平

不同国家污泥中检测到的 PAHs 化合物种类及其含量相差较大,从图 1 可以看出,中国、韩国、约旦、科威特、希腊、西班牙、意大利和英国 16 种 PAHs 总质量浓度为 1 264 ~ 65 940 ng/g,其中英国平均质量浓度较高(约 45 000 ng/g)<sup>[11]</sup>,韩国<sup>[13]</sup>和中国<sup>[8, 12, 14, 16, 35-42]</sup>平均质量浓度约 10 000 ng/g,西

班牙<sup>[43]</sup>和意大利<sup>[44]</sup>等国家平均质量浓度较低(约为2 000 ng/g)。尽管各个国家检出的 PAHs 的同系物的种类和数量不同,但是从各国家总 PAHs 的浓度仍然可以看出各个地区的差异。总的来说,亚洲地区较欧洲和非洲污水处理厂污泥中 PAHs 浓度高,其中中国、约旦、韩国最高水平高出西班牙和突尼斯约 15~20 倍。日本浓度较低,可能是因为雨水分流制导致因雨水冲刷作用进入污水厂的 PAHs 减少,使得污水厂 PAHs 浓度较低<sup>[26]</sup>。约旦卡拉克某污水厂进水大部分是生活

污水,工业废水占比很小,可能是该地区污泥中 PAHs 含量较低的原因,此外,其进水和出水 PAHs 也均处于较低的水平。英国进水中工业废水占比超过 50%,高环 PAHs 占比较大,可能是该污水厂污泥中 PAHs 浓度较高的原因<sup>[25]</sup>,可见污水厂进水来源是影响该厂污泥中 PAHs 浓度水平的一个重要因素,此外有机污染物的理化性质、污泥类型以及污水处理工艺等也可能是影响污水处理厂 PAHs 浓度水平的因素,对此还需要进一步研究。



注:上、下箱两端数据分别是第 55 个百分点、第 75 个百分点,箱形的中间横线和方框分别代表中位数和算术平均值,箱外的上下 2 个※号分别代表最大值和最小值。下同。

图 1 不同地区污水处理厂污泥中总 PAHs 的残留水平

Fig. 1 residual levels of total PAHs in sewage sludge from different regions

### 3 污水处理厂 PAHs 的源解析

PAHs 的主要来源有自然源和人为源。自然源主要包括火山和森林火灾,人为源主要包括化石燃料的不完全燃烧以及石油相关产品在家庭和工厂使用过程中的排放<sup>[45]</sup>。分析污水处理厂进水中 PAHs 的来源可以很好反映当地的能源结构和生活生产方式。PAHs 的源解析方法主要包括定性和定量 2 类。定性方法直接利用 PAHs 的化学性质或某些化学参数来辨析污染源,如比值法等。常用的定量方法则利用数学方法分析手段解析,如化学质量平衡法(CMB)、因子分析法(FA)以及与因子分析结合使用的多元统计法、稳定同位素法等,其中 CMB、FA、多元统计法的研究历史

较长,方法相对成熟,稳定同位素法则是近几年提出的一种较有效的解析方法。

对于不同的污染源,其特征 PAHs 的比值不同,根据该特点可以采用比值法识别其来源。目前,尚未形成一套固定的指标参数体系,主要根据 PAHs 的轻重组分比例、特定组成之间的比例等判别来源。如利用菲/蒽、荧蒽/芘、芘/苯并[a]芘、苯并[a]蒽/屈等异构体比例指数作为分子标志物来判别 PAHs 的来源。SICRE 等<sup>[46]</sup>提出,当荧蒽与芘的质量比大于 1 时,PAHs 主要来自化石燃料燃烧;而比值小于 1 则表示来自石油类产品的输入。YUNKERA 等<sup>[47]</sup>认为,当蒽/178 小于 0.1 时,PAHs 主要来自石油;而比值大于 0.1 指示来自化石燃料的燃烧。当茚并[1,2,3-cd]芘/(茚并[1,2,3-cd]芘+苯并[ghi]花)小于 0.20

时, PAHs 主要来自石油; 处于 0.2 ~ 0.5 之间时, 主要来自液化的化石燃料; 当比值大于 0.5 时, 主要来自草、木材和煤的燃烧。BUDZINSKI 等<sup>[48]</sup>认为: 当荧/(荧 + 芘) 小于 0.5 时, PAHs 主要来自石油燃烧(汽油、柴油、燃料油、原油燃烧以及汽车和柴油车燃油排放); 当比值大于 0.5 时, 认为可能来自煤、草和木材的燃烧。MANSUY-HUAULT 等<sup>[49]</sup>检测到某污水厂进水中荧/(荧 + 芘) 的比值小于 0.4, 认为 PAHs 主要来自于石油燃烧。KATSOYIANNIS 等<sup>[50]</sup>认为, 由于污水在迁移过程中的混合和均一化过程以及污泥是污水经过生物化学处理之后的产物, 使得比值法并不适用于探究污泥中 PAHs 的来源。

#### 4 污水处理厂中 PAHs 的生态风险研究

PAHs 是一种致癌性很强的环境污染物, 具有多种同系物, 并且其毒性往往是多个同系物协同作用表现的结果。被 USEPA 列为优先控制污染物的 16 种 PAHs 中有 7 种是公认的致癌性较强, 包括苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、屈、二苯并[a,h]蒽、茚并[1,2,3-cd]芘。因此, 选用毒性当量因子(TEF)作为 PAHs

致癌性的一种评价标准, 相应的国际毒性当量(TEQ)的计算公式<sup>[14]</sup>:

$$TEQ = C_i \times TEF_i$$

式中:  $C_i$  代表同系物的浓度;  $TEF_i$  代表该物质的毒性当量因子。

分别从进水、出水和污泥 3 个角度出发研究 TEQ 水平, 结果表明, 进水中 TEQ 较高的中国合肥、哈尔滨以及波兰比约旦高约 16 倍, 但是不同地区对 TEQ 起主要贡献作用的单体不同, 中国合肥进水苯并[a]芘和茚并[1,2,3-cd]芘为高 TEQ 的主要贡献者, 哈尔滨进水茚并[1,2,3-cd]芘对 TEQ 贡献最大, 波兰进水则以蒽和苯并[a]蒽对 TEQ 贡献最高。除此之外, 各个地区 PAHs 的进出水 TEQ 相关性较强, 即进水 TEQ 高相应的出水 TEQ 也较高。污泥土地利用存在的生态风险使得探究污泥中 PAHs 的 TEQ 水平具有重要意义。从图 2 可以看出, 中国、韩国、突尼斯等国家污泥中 TEQ 最高值是西班牙和意大利等国家 TEQ 最高值的 5 ~ 10 倍, 表明具有更大的生态风险, 但大部分地区的 TEQ 处于一个相对较低的水平。但是, 由于 PAHs 的难降解和生物富集等性质, 应对污泥土地利用的生态风险重点关注。

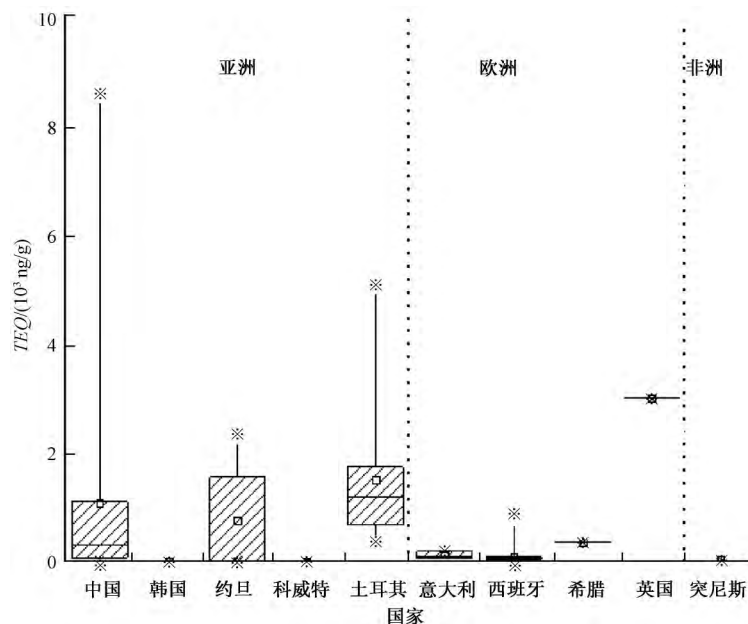


图2 不同国家污泥中 PAHs 的 TEQ 水平

Fig. 2 TEQ levels of PAHs in sludge from different countries and regions

对于污泥土地利用, 尤其是污泥农业利用, 在国内外一直存在争议。一方面, 污泥中含有丰富的营养物质(如有机质、氮、磷等)可以为植物的

生长所利用, 这些污泥在土地利用的过程中有助于改良土壤的结构<sup>[51-53]</sup>; 另一方面, 由于污泥中同时含有一些重金属、PAHs、PBDEs 等物质, 这些

物质很有可能通过污染土壤进入食物链,所以污泥的土地利用又有一定的风险,研究污泥中的 PAHs 对于污泥的土地利用以及政府部门制定污泥土地利用的法规具有重要的意义。

评价污泥土地利用的标准现在主要有 2 类: 总 PAHs 浓度和单个 PAHs 浓度。欧盟对污泥土地利用过程中的 9 种 PAHs 进行了限制,9 种 PAHs 的同系物包括芘、菲、芴、荧蒹、芘、苯并[a]芘、苯并[b+k]荧蒹、茚并[1,2,3-cd]芘、苯并[ghi]芘,其总质量浓度不超过 6 000 ng/g。上述研究报道过的欧盟 9 种 PAHs 质量浓度为 23.7 ~ 57 480 ng/g,中国哈尔滨(6 257、14 991 ng/g)、韩国(34 751 ng/g)和约旦(32 460、57 480 ng/g)的部分检测结果超过了欧盟的标准,具有较高的生态风险。考虑 PAHs 单体浓度,法国污泥土地利用标准中,芘(Flt)、苯并[a]芘和苯并[b]荧蒹的质量浓度分别低于 5 000、2 000、2 500 ng/g 时,可以被用于土地修复。美国要求污泥中苯并[a]芘、芘、苯并[b]荧蒹、苯并[k]荧蒹、苯并[a]芘、茚并[1,2,3-cd]芘、二苯并[a,h]芘总质量浓度不超过 4 600 ng/g,同时苯并[a]芘的质量浓度不超过 1 000 ng/g,低于标准时生态风险较低。

## 5 结论

随着检测技术的不断进步,样品前处理技术有了很大发展,并且将趋于简便、快捷、小型化、自动化、微量化、无毒化,同时配合先进的仪器分析手段,共同实现了对复杂环境基质中有机污染物的检测。世界各国的研究学者针对污水处理厂中的 PAHs 已经做了大量的研究工作,为我们深入了解 PAHs 的迁移转化提供了良好的依据。从污水与污泥的生态风险 TEQ 来看,只有少部分地区的 TEQ 明显较高,存在一定的风险,大部分地区的 TEQ 处于一个相对较低的水平。但是,由于 PAHs 的难降解和生物富集作用等性质,应对污泥土地利用的生态风险重点关注。

1) 培养高效的 PAHs 降解菌。污泥农用资源化是城市污泥最有前景的处置方式,但是,污泥中的 PAHs 成为污泥农用的一个限制因素。现有污水厂 PAHs 的去除率约为 60%,并且只有少部分被微生物降解掉。其他大部分都进入到污泥中或者随出水排出。如何有效提高微生物对 PAHs 的降解率、降低污泥中 PAHs 的含量,使之安全有效

地用于农业生产是今后值得研究的方向。

2) 目前关于污水处理过程中 PAHs 去除机理的研究不多,在污水处理厂的水力停留时间里 PAHs 降解率、降解途径以及对周围大气和土壤的影响机制尚不清晰,加强这方面的研究具有重要的意义。

3) 需要建立模型模拟 PAHs 在污水处理过程中的环境归趋。评价有机污染物在污水处理系统中的化学行为时,应该采取合适的计算方法还原或预测有机污染物的迁移转化过程,即建立数学模型描述迁移分配过程,对了解 PAHs 在污水厂的环境归趋及其风险评估具有重要意义。

4) 污泥土地利用标准的建立和健全。现有各个国家和地区针对污泥农用中 PAHs 的标准不够完善,由于每个地区经济等发展的不平衡,所以欧盟标准不一定适用于中国或别的国家/地区。因此,建立完善的适合本国国情的污泥土地利用标准对有效防止 PAHs 对土壤的二次污染具有重要意义。

## 参考文献(References):

- [1] 包贞,潘志彦,杨晔,等. 环境中多环芳烃的分布及降解[J]. 浙江工业大学学报,2003,31(5): 529-533,544.
- BAO Zhen, PAN Zhiyan, YANG Ye, et al. The distribution and decomposition of PAHs in the environment[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2003, 31(5): 529-533, 544.
- [2] 赵文昌,程金平,谢海贻,等. 环境中多环芳烃(PAHs)的来源与监测分析方法[J]. 环境科学与技术,2006,29(3): 105-107.
- ZHAO Wengchang, CHENG Jinping, XIE Haizhui, et al. Sources and monitoring analysis method of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the environment[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(3): 105-107.
- [3] 张卫东, ZOU Linday, LI Yugcan, et al. 不同木柴在两种条件下燃烧生成的颗粒物中多环芳烃的排放特性研究[J]. 中国环境监测,2003,19(5): 24-27.
- ZHANG Weidong, ZOU Linday, LI Yugcan, et al. The characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in particle emitted from different firewood burning in two condition [J]. Environmental Monitoring in China, 2003, 19(5): 24-27.
- [4] 周文敏,符德黔,孙宗光. 水中优先控制污染物黑名单[J]. 中国环境监测,1990,6(4): 1-3.

- ZHOU Wenmin ,FU Deqian ,SUN Zongguang. Black list of pollution substance for preferential control in water [J]. *Environmental Monitoring in China* ,1990 ,6(4) : 1-3.
- [5] 宋冠群,林金明. 环境样品中多环芳烃的前处理技术 [J]. *环境科学学报* ,2005 ,25(10) : 1 288-1 296.
- SONG Guanqun , LIN Jinming. Sample pretreatment techniques for polycyclic aromatic hydrocarbons in environmental matrix [J]. *Acta Scientiae Circumsantiae* , 2005 25(10) : 1 88-1 296.
- [6] WANG Xiaowei , XI Beidou , HUO Shouliang , et al. Characterization , treatment and releases of PBDEs and PAHs in a typical municipal sewage treatment plant situated beside an urban river , East China [J]. *Journal of Environmental Sciences* , 2013 , 25 ( 7 ) : 1 281-1 290.
- [7] 彭华,多克辛,南淑清,等. 膜、柱串联固相萃取-高效液相色谱法测定水中多环芳烃(PAHs)的研究 [J]. *中国环境监测* ,2003 ,19(4) : 30-31.
- PENG Hua , DUO Kexin , NAN Shuqing , et al. Study on detection of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in water samples by filme-columniation in series solid Phase extraction-High Performance Liquid Chromatography [J]. *Environmental Monitoring in China* , 2003 , 19 (4) : 30-31.
- [8] QI Weixiao , LIU Huijuan , QU Jiuhui , et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in effluents from wastewater treatment plants and receiving streams in Tianjin , China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment* ,2011 ,177(1/4) : 467-480.
- [9] 陈晓秋,苏鹏起,林淡清. 废水及土壤中多环芳烃监测时样品的预处理 [J]. *中国环境监测* ,1994 ,10(6) : 27-28.
- CHEN Xiaoqiu , SU Pengqi , LIN Danqing. Pretreatment of samples in the monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons in waste water and soil [J]. *Environmental Monitoring in China* ,1994 ,10(6) : 27-28.
- [10] HELALEH I. H M , Al-OMAIR A , NISAR A , et al. Validation of various extraction techniques for the quantitative analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in sewage sludges using gas chromatography-ion trap mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A* ,2005 , 1083: 153-160.
- [11] STEVENS J L , NORTHCOTT G L , STERN G A , et al. PAHs , PCBs , PCNs , Organochlorine Pesticides , Synthetic Musks , and Polychlorinated n-Alkanes in U. K. Sewage Sludge: Survey Results and Implications [J]. *Environ Sci Technol* ,2003 ,37(3) : 462-467.
- [12] DAI Jianyin , XU Muqi , CHEN Jiping , et al. PCDD/F , PAH and heavy metals in the sewage sludge from six wastewater treatment plants in Beijing , China [J]. *Chemosphere* ,2007 ,66(2) : 353-361.
- [13] JU J H , LEE I S , SIM W J , et al. Analysis and evaluation of chlorinated persistent organic compounds and PAHs in sludge in Korea [J]. *Chemosphere* , 2009 ,74(3) : 441-447.
- [14] MOREDA J M , ARRANZ A , BETONO S F D , et al. Chromatographic determination of aliphatic hydrocarbons and polyaromatic hydrocarbons PAHs in a sewage sludge [J]. *The Science of the Total Environment* , 1998 ,220: 33-43.
- [15] MARIA W M. The loads of PAHs in wastewater and sewage sludge of municipal treatment plant [J]. *Polycyclic Aromatic Compounds* ,2005 ,25(2) : 183-194.
- [16] SHEN Rongyan , LUO Yongming , ZHANG Gangya , et al. Contamination of PAHs in sludge samples from the Yangtze River Delta Area [J]. *Pedosphere* ,2007 ,17(3) : 373-382.
- [17] TORRETTA V , KATSOYIANNIS A. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in sludges from different stages of a wastewater treatment plant in Italy [J]. *Environmental Technology* , 2013 , 34 ( 5/8 ) : 937-943.
- [18] BATARSEH M I. Polynuclear aromatic hydrocarbons ( PAH ) and heavy metals in dry and wet sludge from As-Samra wastewater treatment plant , Jordan [J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* , 2011 ,20(5) : 535-549.
- [19] JIRIES A , HUSSAIN H , LINTELMANN J. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in wastewater , sediments , sludge and plants in Karak province , Jordan [J]. *Water , Air , and Soil Pollution* 1999 , 121: 217-228.
- [20] VILLAR P , CALLEJO M , ALONSO E , et al. Temporal evolution of polycyclic aromatic hydrocarbons ( PAHs ) in sludge from wastewater treatment plants: comparison between PAHs and heavy metals [J]. *Chemosphere* ,2006 ,64(4) : 535-541.
- [21] BLANCHARD M , TEIL M J , OLLIVON D , et al. Origin and distribution of polyaromatic hydrocarbons and polychlorobiphenyls in urban effluents to wastewater treatment plants of the Paris area( France) [J]. *Water Research* 2001 ,35(15) : 3 679-3 687.

- [22] BARAN S , OLESACAUK P. The concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in sewage sludge in relation to the amount and origin of purified sewage [J]. Polish Journal of Environmental Studies , 2003 , 12( 5) : 523-529.
- [23] 孟明宝 舒小平. 高压液相色谱法测定工业废水中的多环芳烃 [J]. 中国环境监测 , 1987 , 3( 1) : 158-163.  
MENG Mingbao , SHU Xiaoping. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in industrial wastewater by high pressure liquid chromatography [J]. Environmental Monitoring in China , 1987 , 3( 1) : 158-163.
- [24] WLODARCZYK-MAKULA M. The loads of PAHs in wastewater and sewage sludge of municipal treatment plant [J]. Polycyclic Aromatic Compounds , 2005 , 25 ( 2) : 183-194.
- [25] TIAN Weijun , BAI Jie , LIU Kunkun , et al. Occurrence and removal of polycyclic aromatic hydrocarbons in the wastewater treatment process [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety , 2012 82: 1-7.
- [26] OZAKI N , TAKAMURA Y , KOJIMA K , et al. Loading and removal of PAHs in a wastewater treatment plant in a separated sewer system [J]. Water Research , 2015 , 80: 337-345.
- [27] VOGELSANG C , GRUNG M , JANTSCH T G , et al. Occurrence and removal of selected organic micropollutants at mechanical , chemical and advanced wastewater treatment plants in Norway [J]. Water Research , 2006 , 40( 19) : 3 559-3 570.
- [28] MANOLI E , SAMARA C. Occurrence and mass balance of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Thessaloniki sewage treatment plant [J]. Journal of Environmental Quality , 1999 28: 176-187.
- [29] FATONE F , FABIO S D , BOLAONELLA D , et al. Fate of aromatic hydrocarbons in Italian municipal wastewater systems: an overview of wastewater treatment using conventional activated-sludge processes ( CASP) and membrane bioreactors ( MBRs) [J]. Water Research , 2011 , 45( 1) : 93-104.
- [30] PHAM T T , PROULX S. PCBs and PAHs in the Montreal Urban Community ( Quebec , Canada ) wastewater treatment plant and in the effluent plume in the St Lawrence River [J]. Water Research , 1997 , 31 ( 8) : 1 887-1 896.
- [31] SANCHEZ-AVILA J , BONET J , VELASCO G , et al. Determination and occurrence of phthalates , alkylphenols , bisphenol A , PBDEs , PCBs and PAHs in an industrial sewage grid discharging to a Municipal Wastewater Treatment Plant [J]. Science of the Total Environment , 2009 , 407( 13) : 4 157-4 167.
- [32] YAO Min , ZHANG Xingwang , LEI Lecheng. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the centralized wastewater treatment plant of a chemical industry zone: Removal , mass balance and source analysis [J]. Science China Chemistry , 2011 , 55( 3) : 416-425.
- [33] 国家环境保护总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准: GB 18918—2002 [S]. 北京: 中国环境科学出版社 2002.
- [34] ZENG Xiangying , CAO Shuxia , ZHANG Delin , et al. Levels and distribution of synthetic musks and polycyclic aromatic hydrocarbons in sludge collected from Guangdong Province [J]. Journal of Environmental Science and Health: Part A , 2012 , 47( 3) : 389-397.
- [35] ZHAI Jinbo , TIAN Weijun , LIU Kunkun. Quantitative assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sewage sludge from wastewater treatment plants in Qingdao , China [J]. Environmental Monitoring and Assessment , 2011 , 180( 1/4) : 303-311.
- [36] ZENG Xiangying , LIN Zheng , GUI Hongyan , et al. Occurrence and distribution of polycyclic aromatic carbons in sludges from wastewater treatment plants in Guangdong , China [J]. Environmental Monitoring and Assessment , 2010 , 169( 1/4) : 89-100.
- [37] CAI Quanying , MO Cehui , WU Qitang , et al. Occurrence of organic contaminants in sewage sludges from eleven wastewater treatment plants , China [J]. Chemosphere , 2007 , 68( 9) : 1 751-1 762.
- [38] LIU Cao , LI Kun , YU Liqin , et al. POPs and their ecological risk in sewage sludge of waste water treatment plants in Beijing , China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment , 2013 , 27( 7) : 1 575-1 584.
- [39] 莫测辉 蔡全英 吴启堂,等. 我国一些城市污泥中多环芳烃\_PAHs\_的研究 [J]. 环境科学学报 , 2001 , 21( 5) : 614-618.  
MO Cehui , CAI Quanying , WU Qitang , et al. A study of polycyclic aromatic hydrocarbons ( PAHs) in municipal sludge of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae , 2001 , 21( 5) : 614-618.
- [40] 朴哲华 金莲顺 赵坤. 污水处理厂“四泥”中几种多环芳烃污染物的分析 [J]. 分析测试 , 2005 , 14 ( 5) : 20-21.  
PIAO Zhehua , JIN Lianshun , ZHAO Kun. The manufacturing domestically of extruder screw rod part [J]. Science & Technology in Chemical Industry , 2005 , 14( 5) : 20-21.



- [41] 马璐,刘俊建,王晓昌,等. 污水处理厂各工艺阶段多环芳烃变化规律研究 [J]. 环境工程学报, 2010, 4(9): 2 038-2 041.  
MA Luo, LIU Junjian, WANG Xiaochan, et al. A research of PAHs in water at different stages of a wastewater treatment plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(9): 2 038-2 041.
- [42] 杜兵,张彭义,张祖麟,等. 北京市某典型污水处理厂中内分泌干扰物的初步调查 [J]. 环境科学, 2004, 25(1): 115-116.  
DU Bing, ZHANG Pengyi, ZHANG Zulin, et al. Preliminary Investigation on Endocrine Disrupting Chemicals in a Sewage Treatment Plant of Beijing [J]. Environmental Science, 2004, 25(1): 115-116.
- [43] PEREZ S, GUILLAMON M, BARCELO D. Quantitative analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in sewage sludge from wastewater treatment plants [J]. Journal of Chromatography A, 2001, 938: 57-65.
- [44] BUSETTI F, HEITZ A, CUOMO M, et al. Determination of sixteen polycyclic aromatic hydrocarbons in aqueous and solid samples from an Italian wastewater treatment plant [J]. Journal of Chromatography A, 2006, 1 102(1/2): 104-115.
- [45] ZHANG Lifei, DONG Liang, REN Lijun, et al. Concentration and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters in the surface water of the Yangtze River Delta, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(2): 335-342.
- [46] SCHAUER J J, KLEEMAN M J, CASS G R, et al. Measurement of Emissions from Air Pollution Sources. 2. C1 through C30 Organic Compounds from Medium Duty Diesel Trucks [J]. Environ Sci Technol, 1999, 33: 1 566-1 577.
- [47] YUNKERA M B, MACDONALD R W, VINGARZANC R, et al. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. Organic Geochemistry, 2002, 33: 489-515.
- [48] BUDZINSKI H, JONES I, BELLOCQ J, et al. Evaluation of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Gironde estuary [J]. Marine Chemistry, 1997, 58: 85-97.
- [49] MANSUY-HUAULT L, REGIER A, FAURE P. Analyzing hydrocarbons in sewer to help in PAH source apportionment in sewage sludges [J]. Chemosphere, 2009, 75(8): 995-1 002.
- [50] KATSOYIANNIS A, TERZI E, CAI Quanying, et al. On the use of PAH molecular diagnostic ratios in sewage sludge for the understanding of the PAH sources. Is this use appropriate? [J]. Chemosphere, 2007, 69(8): 1 337-1 339.
- [51] GONZALEZ-UBIENA S, JORGE-MARDOMINGO I, CARRERO-GONZ B, et al. Soil organic matter evolution after the application of high doses of organic amendments in a Mediterranean calcareous soil [J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12(8): 1 257-1 268.
- [52] 蔡全英,莫测辉,王伯光,等. 城市污泥和化肥对水稻土种植的通菜中多环芳烃(PAHs)的影响 [J]. 生态学报, 2002, 22(7): 7 881-7 885.  
CAI Quanying, MO Cehui, WANG Boguang, et al. Effect of municipal sludges and chemical fertilizer on the occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in ipomoea aquatic grown in paddy soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(7): 7 881-7 885.
- [53] 赵晓莉,徐德福,方华,等. 污泥中有机污染物对农田植物影响研究综述 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(18): 7 880-7 882, 7 885.  
ZHAO Xiaoli, XU Defu, FANG Hua, et al. Summary of research on the influences of organic pollutants in sludge on farmland plants [J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2008, 36(18): 7 880-7 882, 7 885.