

淄博城市污泥中多环芳烃分布特征及风险评价

宋艳艳, 崔静, 刁振凤, 梁景波, 边志明*

(山东省淄博生态环境监测中心, 山东 淄博 255040)

摘要:在淄博市6家代表性城市污水处理厂采集12个污泥样品,采用GC-MS法测定污泥中16种多环芳烃(PAHs)的含量,研究分析PAHs分布特征和来源,并作风险评价。结果表明,淄博城市污泥中共检出15种PAHs,总质量比(Σ_{16} PAHs)范围为0.23 mg/kg~3.76 mg/kg,平均值为1.20 mg/kg,各污泥间 Σ_{16} PAHs差异显著;7种致癌性PAHs的质量比为0.11 mg/kg~2.56 mg/kg;污泥以6环PAHs为主。来源分析显示,污泥中PAHs主要来源于生物质和煤的燃烧,兼有汽车尾气排放的特征。风险评价结果显示,6家污水处理厂污泥中PAHs毒性当量浓度(Σ_{16} TEQ)由高到低为Z2>Z5>Z6>Z4>Z1>Z3,7种致癌性PAHs是致癌风险的主要贡献者,其中二苯并[a,h]蒽贡献率最高。

关键词:多环芳烃;城市污泥;分布特征;源解析;风险评价;淄博

中图分类号:X703;X820.4 文献标志码:B 文章编号:1006-2009(2022)04-0043-06

Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sewage Sludge in Zibo

SONG Yan-yan, CUI Jing, DIAO Zhen-feng, LIANG Jing-bo, BIAN Zhi-ming*

(Zibo Eco-environmental Monitoring Centre of Shandong Province, Zibo, Shandong 255040, China)

Abstract: The content of 16 kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons in 12 sludge samples from 6 typical sewage treatment plants in Zibo were determined by GC-MS, the distribution and sources of PAHs were analyzed. The results showed that a total of 15 PAHs were detected in the sewage sludge in Zibo, and the total mass ratio (Σ_{16} PAHs) ranged from 0.23 mg/kg to 3.76 mg/kg, with an average of 1.20 mg/kg. Σ_{16} PAHs were significantly different among various sludge. The mass ratio of 7 carcinogenic PAHs ranged from 0.11 mg/kg to 2.56 mg/kg. Hexacyclic aromatic hydrocarbon were dominated. Source analysis showed that PAHs in sludge mainly came from the combustion of biomass and coal, and vehicle exhaust emission. The results of risk assessment showed that the toxic equivalent concentration of PAHs (Σ_{16} TEQ) in the sludge from 6 sewage treatment plants ranged from high to low as Z2>Z5>Z6>Z4>Z1>Z3, 7 carcinogenic PAHs were main contributors to cancer risk, among which dibenzo[a,h]anthracene had the highest contribution rate.

Key words: Polycyclic aromatic hydrocarbons; Sewage sludge; Distribution characteristic; Source apportionment; Risk assessment; Zibo

多环芳烃(PAHs)是一类广泛存在于环境中的持久性有机污染物,由于其在水中溶解度低,亲脂性较强,故易于从污水中分配到沉积物和有机质中,使水中的PAHs含量降低,随污泥沉降,在污泥中残留浓度较高^[1]。美国国家环境保护局(USEPA)将16种PAHs确定为优先控制污染物,我国也将其中7种PAHs列为环境优先污染物。国外早在20世纪80年代就对城市污泥中的PAHs进行

了研究,我国对于污泥中PAHs的研究起步较晚,相关的文献报道相对较少。2000年,莫测辉等^[2]

收稿日期:2021-06-30;修订日期:2022-03-18

基金项目:淄博市重点研发计划(公益类专项)基金资助项目(2019gy010142)

作者简介:宋艳艳(1986—),女,山东淄博人,工程师,硕士,主要从事环境监测工作。

*通信作者:边志明 E-mail: 694341554@qq.com

对11个城市污泥中的PAHs进行了研究,指出珠海和兰州污泥样品中PAHs质量比偏高,分别为78.41 mg/kg和143.80 mg/kg。随着污水处理技术的不断提高,污泥中的PAHs含量有所降低。在2010年以后的研究报道中,国内关于污泥中的PAHs质量比一般在1 mg/kg~10 mg/kg之间,如贵阳(1.90 mg/kg~4.26 mg/kg)^[3]、河南(5.06 mg/kg)^[4]、青岛(3.95 mg/kg)^[5]等。淄博是重工业城市,污水处理量大(100多万t/d),污泥产量高(30多万t/a)。然而,有关污泥中有机污染物方面的研究却未见报道。今以淄博市6家污水处理厂的污泥为研究对象,以USEPA确定的16种优先控制的PAHs作为目标化合物,分析研究城市污泥中PAHs的含量和分布特征,并作风险评价,以期为城市污泥的安全处理和资源化利用提供参考。

1 材料与方 法

1.1 样品采集

选取淄博市6家代表性污水处理厂(Z1—Z6),了解其污水来源、处理过程、污泥产量和污泥脱水方式等,基本情况见表1。按照《工业固体废物采样制样技术规范》(HJ/T 20—1998)^[6]进行污泥样品的采集、运输及保存。采集经过脱水处理后的污泥样品,每个污水处理厂均采集两个污泥样品(1#和2#),污水处理厂Z1、Z3、Z5在同一地点间隔8 h采样,Z2、Z4、Z6在不同地点同时采样。每个样品采集1 kg,装入具塞磨口棕色玻璃瓶中,运输过

程中应密封、避光、4℃以下冷藏。运至实验室后,若不能及时分析,则应于4℃以下密封冷藏保存,保存时间不超过10 d。

1.2 样品预处理与分析

污泥含水率测定采用重量法^[7]。样品制备、前处理及仪器分析参照《固体废物 多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法》(HJ 950—2018)^[8]。样品冷冻干燥后,采用快速溶剂萃取法萃取,氮吹方式浓缩,硅胶小柱法净化样品,GC-MS法分析,DB-5MS柱作为分析色谱柱,6点校正曲线,内标法定量。

1.3 试剂与标样

实验室所用有机试剂均为农残级。16种优控PAHs混标,包括萘(NaP)、蒽(Acy)、芘(Ace)、芴(Fl)、蒽(Ant)、菲(Phe)、芘(Pyr)、荧蒽(Flu)、苯并[a]蒽(BaA)、䓛(Chr)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[a,h]蒽(DBA)、茚并[1,2,3-cd]芘(InP)、苯并[g,h,i]芘(BghiP),替代物为2-氟联苯、4,4'-三联苯-d₁₄,内标为萘-d₈、芘-d₁₀、菲-d₁₀、䓛-d₁₀,标准样品均购自美国Accustandard公司。

1.4 质量保证与质量控制

用石英砂代替实际样品做实验室空白和空白加标,石英砂在用前应置于马弗炉中400℃烘烤4 h。实验过程做好基体加标、平行样的测定。实验室空白未检出目标化合物,空白加标、基体加标回收率分别为68.5%~91.6%、62.1%~86.4%,平行样相对偏差为0~27.5%,符合标准要求。

表1 污水处理厂的基本情况

Table 1 Basic information of sewage treatment plants

污水处理厂	脱水方式	污水处理量 /(万 t·d ⁻¹)	产泥量 /(t·d ⁻¹)	污水主要来源	工业废水 占比/%	含水率/%
Z1	带式浓缩压滤机	4.7	75	混排(石油化工、印染厂、生活污水)	60	75.1
Z2	离心脱水机	6.5	45	混排(石油化工、生活污水)	50	80.0
Z3	带式浓缩压滤机	5	60	生活污水为主	10	84.9
Z4	板框隔膜压滤机	12	70	混排(化工企业、电子企业、生活污水)	50	59.8
Z5	带式浓缩压滤机	12	80	工业废水为主(加工制造业)	70	82.8
Z6	离心脱水机	1	6.5	生活污水为主	0	86.9

2 结果与讨论

2.1 污泥中PAHs含量水平

6家污水处理厂12个污泥样品中共检出15种PAHs,Acy在所有样品中均未检出。表2为6家污水处理厂污泥中PAHs检出情况统计。由表2

可知,污泥中16种PAHs总质量比(\sum_{16} PAHs)范围在0.23 mg/kg~3.76 mg/kg之间,平均值为1.20 mg/kg,各污泥间 \sum_{16} PAHs差异显著。国内外城市污泥中 \sum_{16} PAHs一般在1 mg/kg~50 mg/kg之间,淄博城市污泥中 \sum_{16} PAHs相对较

低,与广州^[9](1.59 mg/kg)、西班牙^[10](1.06 mg/kg)接近,而远低于江苏^[11](39.62 mg/kg)、浙江^[11](34.12 mg/kg)。由表2中同一污水处理厂的两个污泥样品数据对比可见,检出的PAHs种类、含量都存在差异,这说明同一污水处理厂在不同时段或同一时段不同地点产生的污泥中PAHs的种类和含量都不尽相同,有的甚至相差很大。

PAHs是一种致癌性很强的环境污染物,一般来说,随着苯环数量增加,其水溶性越低,脂溶性越

强,环境滞留时间越长,毒性致癌性越强^[12],其中BaA、Chr、BbF、BkF、BaP、DBA、InP被认为是致癌性较强的化合物。淄博城市污泥中这7种致癌性PAHs的总质量比(\sum_7 PAHs)在0.11 mg/kg ~ 2.56 mg/kg之间,平均值为0.67 mg/kg,各污泥间 \sum_7 PAHs差异显著。进一步分析发现,淄博城市污泥中 \sum_7 PAHs占 \sum_{16} PAHs的比例在22.4% ~ 68.1%之间,平均为56.0%,表明致癌性PAHs在污泥中有较高比例。

表2 6家污水处理厂污泥中PAHs检出情况统计

Table 2 Statistics of detected PAHs in sludge from 6 sewage treatment plants

污水处理厂	\sum_{16} PAHs $w/(mg \cdot kg^{-1})$			相对偏差/%	PAHs 检出种类数 $n/种$		\sum_7 PAHs $w/(mg \cdot kg^{-1})$	
	1#	2#	平均值		1#	2#	1#	2#
Z1	0.24	0.23	0.24	5.9	2	2	0.12	0.12
Z2	1.86	3.76	2.81	33.8	3	13	1.20	2.56
Z3	0.30	0.32	0.31	3.2	3	3	0.11	0.11
Z4	1.52	0.46	0.99	53.5	5	3	0.34	0.14
Z5	1.45	2.92	2.18	33.6	3	3	0.91	1.78
Z6	0.78	0.55	0.66	17.3	4	3	0.33	0.34

2.2 污泥中PAHs组分分布特征

图1(a)~(f)分别为6家污水处理厂污泥中PAHs的组分分布。图1中1—16代表PAHs的16种单体,分别为NaP、Acy、Ace、Fl、Ant、Phe、Pyr、Flu、BaA、Chr、BbF、BkF、BaP、DBA、InP、BghiP。

由图1和表2可见,Z1、Z3各自的两个污泥样品中PAHs组成及含量相近;Z5检出的PAHs单体虽然含量相差较大,但各组分占比较接近。常被用作合成医药、染料等原料的Fl在Z3中有检出且所占比例较大,这可能与Z3污水来源中有医药化工企业有关。Z2、Z4、Z6同厂两个污泥样品中PAHs单体含量及所占比例相差较大,Z2最为明显,其污水以石油化工企业污水和生活污水为主要来源,两个污泥样品取自不同的离心脱水机,每台脱水机处理污泥的批次有所不同,故两个污泥中PAHs的差异较大。NaP是基础的化工原料,是合成染料、树脂、杀虫剂和油漆等的原料,最常见的NaP制品就是卫生球,其可通过多种途径进入城市污水中,进而富集到污泥中^[7],故在Z2、Z4、Z6污泥中均被检出。

污泥中6环的InP和BghiP检出率最高,达到100%,两者质量比之和在 \sum_{16} PAHs中所占比例达53.6%,其次是DBA(5环),检出率为41.7%,占

比为12.2%,其余PAHs单体检出率均<25.0%,占比<6.0%。由此可见,淄博城市污泥主要以6环PAHs为主,这可能与高环PAHs难降解且较易被吸附到污泥中,而低环类则较易挥发到大气中有关^[13]。张雪英^[1]指出,江苏城市污泥中的PAHs绝大多数以2环~4环为主;而莫测辉等^[2]发现,11个城市污泥中PAHs总体以3个和(或)4个苯环化合物为主,其余化合物百分含量较低。这些测定结果的不同可能是由污水的来源、污水处理工艺、污泥处理方式,以及样品的预处理方式等不同而导致的。

污泥中PAHs含量与其污水来源密切相关,按污水来源可分为工业废水和生活污水,一般以处理工业废水为主的污水处理厂产生的污泥中PAHs含量较高^[2]。由表2可知,各污水处理厂污泥中 \sum_{16} PAHs由高到低为Z2(混排)>Z5(工业废水为主)>Z4(混排)>Z6(生活污水为主)>Z3(生活污水为主)>Z1(混排)。就单个污水处理厂来看,并非工业废水占比越大, \sum_{16} PAHs就越高。这也印证了张雪英^[1]的研究结论,污泥中PAHs水平与工业废水种类有关而与工业废水总量关系不大。

2.3 污泥中PAHs来源解析

人类活动是PAHs的主要来源,主要包括燃烧

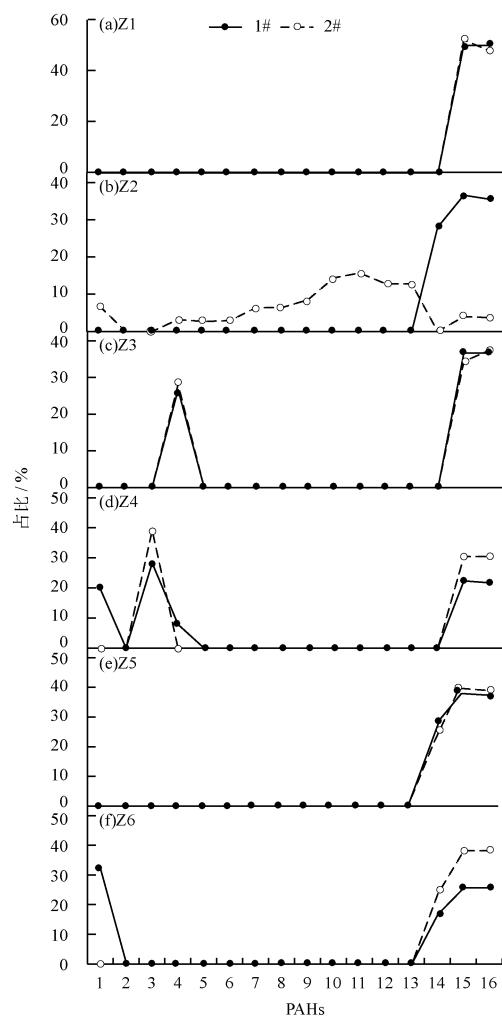


图1 6家污水处理厂污泥中PAHs的组分分布
Fig. 1 Component distribution of PAHs in sludge from 6 sewage treatment plants

源和石油源。燃烧源包含化石燃料、生物燃料等不完全燃烧及机动车尾气的排放等,而石油源主要包含石油及其精炼产品的泄漏与排放^[14]。燃料燃烧不完全产生的PAHs释放到大气中,然后通过干湿沉降和地表径流等进入城市污水管道,是城市污水中PAHs来源的主要途径^[15]。

有研究指出,PAHs环数相对丰度可以反映来自热解或石油类污染,通常4环及4环以上高环PAHs主要来源于化石燃料高温燃烧,而2环和3环低环PAHs则主要来源于石油类污染^[16]。淄博污泥中PAHs以高环为主,其中91.7%的样品高环PAHs占比>60.0%。这说明淄博污泥中PAHs来自相似的污染源(化石燃料高温燃烧),也反映淄博市能源、工业结构的整体水平

相当^[3]。

此外,还常用PAHs之间的比值来判定其来源^[17],见表3。由表3可知,淄博污泥中Ant/(Ant+Phe)为0.48,说明PAHs主要来自燃烧源,与环数相对丰度判断结果吻合;淄博污泥中Flu/(Flu+Pyr)、BaA/(BaA+Chr)、InP/(InP+BghiP)分别为0.63、0.37、0.50,说明PAHs主要来自生物质和煤燃烧源,同时石油燃烧也有部分贡献,这与淄博市产业及能源消费结构密切相关。该市石油化工企业居多,能源消费结构以燃煤为主,兼有生物质发电。除此之外,汽车尾气也产生一部分PAHs,主要源于汽油和柴油的不完全燃烧,这样的能源消费结构产生的PAHs吸附于大气颗粒,随着降水进入污水处理厂,沉降在污泥中。

表3 PAHs间的比值及来源判定

PAHs 来源判定	Ant/(Ant+Phe)	Flu/(Flu+Pyr)	BaA/(BaA+Chr)	InP/(InP+BghiP)
石油源	<0.1	<0.4	<0.2	<0.2
燃烧源	>0.1			
石油燃烧源		0.4~0.5	0.2~0.35	0.2~0.5
生物质和煤燃烧源		>0.5	>0.35	>0.5
本研究	0.48	0.63	0.37	0.50

2.4 污泥中PAHs的风险评价

PAHs因具有致癌、致畸、致突变的“三致”效应而受到广泛关注,其中BaP是最早被发现且致癌性最强的物质之一,人们通常用BaP来表征环境中PAHs的风险^[18]。国内外污泥中PAHs的生态风险尚未有统一评价标准^[19],而农业利用已逐渐成为污泥处置的主要方式。考虑到农业利用,今参考加拿大农业土壤质量标准^[20]中16种PAHs的标准值(见表4),采用BaP的毒性当量浓度(TEQ)进行PAHs的生态风险评价。

Nisbet等^[21]以BaP的毒性为标准,给出PAHs的毒性当量因子(TEF,见表4),TEF值越大,其毒性及致癌性越强。通过单体TEF计算TEQ的方法可以将不同毒性的环境污染物浓度转化为生物毒理学数据,以了解污染物的潜在生态风险^[22]。计算公式为:

$$TEQ_i = C_i \times TEF_i \quad (1)$$

式中:TEQ_i为PAHs单体*i*的毒性当量浓度,μg/kg;C_i为PAHs单体*i*的质量比,μg/kg;TEF_i为

PAHs 单体 i 的毒性当量因子。

淄博城市污泥中 PAHs 的 TEQ 计算结果见表 4。其中,在计算时取同厂两个污泥样品中 PAHs 的平均值作为该污水处理厂污泥中 PAHs 的质量比。由表 4 可知,16 种 PAHs 单体的毒性当量浓度之和 ($\sum_{16} \text{TEQ}$) 的范围为 $12.24 \mu\text{g}/\text{kg} \sim 618.69 \mu\text{g}/\text{kg}$,平均值为 $234.60 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。6 家污水处理厂污泥中的 $\sum_{16} \text{TEQ}$ 由高到低为 Z2 ($618.69 \mu\text{g}/\text{kg}$) > Z5 ($583.90 \mu\text{g}/\text{kg}$) > Z6 ($152.68 \mu\text{g}/\text{kg}$) > Z4 ($26.87 \mu\text{g}/\text{kg}$) > Z1 ($13.15 \mu\text{g}/\text{kg}$) > Z3 ($12.24 \mu\text{g}/\text{kg}$)。7 种致癌性 PAHs 单体的毒性当量浓度之和 ($\sum_7 \text{TEQ}$) 的范围

为 $11.00 \mu\text{g}/\text{kg} \sim 613.70 \mu\text{g}/\text{kg}$,平均值为 $231.13 \mu\text{g}/\text{kg}$,占 $\sum_{16} \text{TEQ}$ 的比例为 $89.9\% \sim 99.2\%$,平均占比 98.5% 。表明污泥中 7 种致癌性 PAHs 是污泥致癌风险的主要贡献者,其中 DBA 贡献率最高,达 62.5% ,应重点关注,其次是 BaP 和 InP,贡献率分别为 17.1% 和 13.8% 。对比由加拿大农业土壤质量标准计算得出的 $\sum_{16} \text{TEQ}$ ($274.35 \mu\text{g}/\text{kg}$), Z2 和 Z5 分别超标 126% 和 113% ,其余污泥未超标。风险评价结果表明, 33.3% 的淄博城市污泥农用存在较大的环境生态风险,在农业利用过程中的用量须加以控制。

表 4 TEF、加拿大 PAHs 土壤标准值及污泥 PAHs 毒性当量浓度

Table 4 TEF, Canada soil standard value of PAHs and toxic equivalent concentration of PAHs in sludge

PAHs	TEF	加拿大 PAHs		TEQ			PAHs	TEF	加拿大 PAHs		TEQ		
		土壤标准值 $w/$ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	范围/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	贡献率 /%	土壤标准值 $w/$ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)			范围/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	贡献率 /%		
NaP	0.001	50	0 ~ 0.15	0.07	0.03	Chr	0.01	100	0 ~ 2.70	0.45	0.19		
Acy	0.001	50	0	0	0	BbF	0.1	300	0 ~ 29.50	4.92	2.10		
Ace	0.001	80	0 ~ 0.31	0.05	0.02	BkF	0.1	50	0 ~ 24.0	4.00	1.70		
Fl	0.001	50	0 ~ 0.09	0.04	0.02	BaP	1	100	0 ~ 240	40.00	17.1		
Ant	0.01	50	0 ~ 0.50	0.08	0.03	DBA	1	110	0 ~ 490	146.67	62.5		
Phe	0.001	190	0 ~ 0.06	0.01	0	InP	0.1	150	11.00 ~ 85.50	32.42	13.8		
Pyr	0.001	240	0 ~ 0.12	0.02	0.01	BghiP	0.01	200	1.15 ~ 8.40	3.18	1.35		
Flu	0.001	190	0 ~ 0.12	0.02	0.01	$\sum_7 \text{TEQ}$			11.00 ~ 613.70	231.13	98.5		
BaA	0.1	100	0 ~ 16.00	2.67	1.14	$\sum_{16} \text{TEQ}$		274.35	12.24 ~ 618.69	234.60	100		

3 结论

(1) 淄博城市污泥共检出 15 种 PAHs, Acy 在所有样品中均未检出, InP 和 BghiP 检出率最高 (100%), 两者质量比之和在 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 中占比为 53.6% , DBA 检出率 41.7% , 占比 12.2% , 其余 PAHs 单体检出率均 $<25.0\%$, 占比 $<6.0\%$ 。污泥中 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 范围为 $0.23 \text{ mg}/\text{kg} \sim 3.76 \text{ mg}/\text{kg}$, 平均值为 $1.20 \text{ mg}/\text{kg}$, 各污泥间 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 差异显著。致癌性 PAHs 在 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 中占比 56.0% , 表明致癌性 PAHs 在污泥中有较高比例。

(2) 来源分析显示, 淄博市城市污泥中 PAHs 主要来源于生物质和煤的燃烧, 兼有汽车尾气排放的特征, 这与淄博市产业及能源消费结构密切相关。

(3) 风险评价结果显示, 6 家污水处理厂污泥中 $\sum_{16} \text{TEQ}$ 由高到低为 $Z2 > Z5 > Z6 > Z4 > Z1 > Z3$, 7 种致癌性 PAHs 是污泥致癌风险的主要贡献

者, 其中 DBA 贡献率最高, 为 62.5% , 应重点关注, 其次是 BaP 和 InP。对比由加拿大农业土壤质量标准计算得出的 $\sum_{16} \text{TEQ}$, Z2 和 Z5 分别超出 126% 和 113% 。

[参考文献]

[1] 张雪英. 江苏城市污泥中 PAHs 的分布特征及其堆肥对 PAHs(荧蒹)环境行为的影响研究[D]. 南京:南京农业大学, 2007.

[2] 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): 613-618.

[3] 杨少博, 李江, 张春辉, 等. 贵阳市城市污泥中多环芳烃的分布特征、来源解析及风险评价[J]. 生态学杂志, 2015, 34(6): 1675-1681.

[4] 高爱华, 黄林, 郭静, 等. 河南省城市污泥中多环芳烃的含量及其影响因素研究[J]. 广东化工, 2016, 43(15): 80-82.

[5] ZHAI J B, TIAN W J, LIU K K. Quantitative assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sewage sludge from wastewater treatment plants in Qingdao, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 180: 303-311.

- [6] 国家环境保护局. 工业固体废物采样制样技术规范: HJ/T 20—1998[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [7] 中华人民共和国建设部. 城市污水处理厂污泥检验方法: CJ/T 221—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [8] 生态环境部. 固体废物 多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法: HJ 950—2018[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [9] 余忆玄, 陈虹, 王晓萌, 等. 我国城市污泥中的有机污染物污染状况及其海洋倾倒入海研究[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(5): 652—656.
- [10] SÁNCHEZ-BRUNETE C, MIGUEL E, TADEO J L. Analysis of 27 polycyclic aromatic hydrocarbons by matrix solid-phase dispersion and isotope dilution gas chromatography-mass spectrometry in sewage sludge from the Spanish area of Madrid[J]. Journal of Chromatography A, 2007, 1148(2): 219—227.
- [11] 赵晓莉, 朱伟. 长三角部分城市污泥 PAHs 质量分数及特征分析[J]. 环境科学研究, 2010, 23(9): 1174—1179.
- [12] HAMDİ H, BENZARTI S, MANUSADŽIANAS L, et al. Solid-phase bioassays and soil microbial activities to evaluate PAH-spiked soil ecotoxicity after a long-term bioremediation process simulating landfarming [J]. Chemosphere, 2007, 70(1): 135—143.
- [13] 孙少静, 李博, 李洪伟, 等. 污水处理厂污水和污泥中 PAHs 的残留及风险研究进展[J]. 中国环境监测, 2017, 33(1): 106—114.
- [14] 张俊, 王海兵, 孟宪智, 等. 海河流域地表水源地多环芳烃污染特征及来源分析[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(6): 61—64.
- [15] SALIHOGLU N K, SALIHOGLU G, TASDEMİR Y, et al. Comparison of polycyclic aromatic hydrocarbons levels in sludges from municipal and industrial wastewater treatment plants [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, 58: 523—534.
- [16] FERNANDES M B, SICRE M A, BOIREAU A, et al. Polyaromatic hydrocarbon (PAH) distributions in the Seine River and its estuary [J]. Marine Pollution Bulletin, 1997, 34(11): 857—867.
- [17] 葛蔚, 程琪琪, 柴超, 等. 山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1587—1596.
- [18] 丁海霞, 陶雪梅, 吕康乐, 等. 兰州市土壤中 PAHs 和 PCBs 的分布特征及风险评价[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(2): 25—29.
- [19] 余杰, 鱼红霞, 苑文颖. 城市污泥土地利用多环芳烃 (PAHs) 生态风险评价研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(4): 173—176.
- [20] 张希. 上海交通沿线农田土壤中 PAHs 赋存、来源及风险评价[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [21] NISBET I C, LAGOY P K. Toxic equivalency factor (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 1992, 16(3): 290—300.
- [22] 蒋煜峰. 上海地区土壤中持久性有机污染物污染特征、分布及来源初步研究[D]. 上海: 上海大学, 2009.

本栏目编辑 谢咏梅

(上接第42页)

- [5] 何佳, 时迪, 王贝贝, 等. 10种典型重金属在八大流域的生态风险及水质标准评价[J]. 中国环境科学, 2019, 39(7): 2970—2982.
- [6] 吴岳玲, 郭琦, 邱小琮, 等. 星海湖水生生态系统健康评价[J]. 水力发电, 2020, 46(5): 1—4.
- [7] 李世龙, 雷兴碧, 邱小琮, 等. 银川阅海湖水生生态系统健康评价[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(3): 168—173.
- [8] 周孝德, 郭梦京, 陈勇民, 等. 博斯腾湖生态系统健康状态与水位关系研究[J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(4): 386—391.
- [9] 杨谦, 刑立文, 赵璐. 基于改进层次分析法的四川省生态承载力评价[J]. 资源开发与市场, 2019, 35(2): 190—196.
- [10] 程元庚, 李福林, 范明元, 等. 基于组合赋权和改进物元可拓模型的泗河生态系统健康评估[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2021, 35(3): 230—238.
- [11] 张乐, 徐慧. 宁夏人工河道典农河的健康状态评价[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(2): 16—22.
- [12] 王佳. 瀛湖水生生态系统健康评价及保护[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [13] 吴岳玲, 李世龙, 邱小琮, 等. 清水河流域水质综合评价与评价[J]. 环境监测管理与技术, 2021, 33(2): 40—45.
- [14] 王志强, 田娜, 缪建群, 等. 基于组合可拓综合分析法的鄱阳湖流域水质富营养化评价[J]. 生态学报, 2017, 37(12): 4227—4235.
- [15] 赵悦, 乌兰托亚, 王鹏, 等. 哈素海水生生物调查及水质评价[J]. 当代畜禽养殖业, 2020(6): 3—6.
- [16] 黄琪, 高俊峰, 张艳会, 等. 长江中下游四大淡水湖生态系统完整性评价[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 118—126.
- [17] 张柱. 河流健康综合评价指数法评价袁河水生态系统健康[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
- [18] 燕琳, 马岚, 潘成忠, 等. 基于模糊综合评价与灰色关联分析的河流自然性评价[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(3): 480—488.
- [19] 王楠琪, 姜卫兵, 甘可欣, 等. 基于灰色关联度分析和模糊综合评判法的李植株形态学评价[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(12): 172—177.
- [20] 秦聪, 郭华. 基于熵权-TOPSIS法的汾河水水质评价[J]. 水资源开发与管理, 2020(9): 34—39.
- [21] 吴易雯, 李莹杰, 张列宇, 等. 基于主客观赋权模糊综合评价法的湖泊水生态系统健康评价[J]. 湖泊科学, 2017, 29(5): 1091—1102.
- [22] 刘诚. 不同评价方法在阿克苏市地下水水质评价中的应用分析[J]. 节水灌溉, 2019(4): 66—71.