

冯精兰 王丽霞 翟梦晓 等. 2011. 长江水系武汉段沉积物再悬浮过程中 PAHs 的释放动力学[J]. 环境科学学报 31(10):2240-2245
Feng J L , Wang L X , Zhai M X , et al. 2011. Release kinetics of PAHs during resuspension of sediments at Wuhan section of Yangtze River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae 31(10):2240-2245

长江水系武汉段沉积物再悬浮过程中 PAHs 的释放动力学

冯精兰^{1,2}, 王丽霞³, 翟梦晓¹, 孙剑辉^{1,*}

1. 河南师范大学化学与环境科学学院, 黄淮水环境与污染防治教育部重点实验室, 河南省环境污染控制重点实验室, 新乡 453007

2. 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

3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012

收稿日期:2010-12-23 修回日期:2011-03-01 录用日期:2011-03-02

摘要:采用沉积物再悬浮模拟装置进行了再悬浮过程中多环芳烃(PAHs)的释放动力学实验,研究了长江水系武汉段7种沉积物中PAHs的释放动力学特征,并考察了沉积物组成对PAHs释放动力学的影响.结果表明,不同剪应力作用下的沉积物再悬浮过程中,不同性质沉积物中PAHs向上覆水体的释放均符合一级动力学方程,且释放过程分为两个阶段,第1阶段的释放速率大于第2阶段的释放速率,2~3环PAHs的释放速率大于4环PAHs;0.5 N·m⁻²剪应力作用下PAHs的释放速率大于0.2 N·m⁻²下的释放速率,且对于2~3环PAHs的影响更明显;不同性质沉积物再悬浮过程中,PAHs的释放速率与沉积物的组成特征无显著的相关性.

关键词:多环芳烃;长江;沉积物再悬浮;释放动力学;再悬浮模拟装置

文章编号:0253-2468(2011)10-2240-06 中图分类号:X171 文献标识码:A

Release kinetics of PAHs during resuspension of sediments at Wuhan section of Yangtze River

FENG Jinglan^{1,2}, WANG Lixia³, ZHAI Mengxiao¹, SUN Jianhui^{1,*}

1. College of Chemistry and Environmental Sciences, Key Laboratory of Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control of Ministry of Education, Henan Normal University, Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, Xinxiang 453007

2. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875

3. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012

Received 23 December 2010; received in revised form 1 March 2011; accepted 2 March 2011

Abstract: Release kinetics of PAHs during the resuspension of sediment samples at Wuhan section of Yangtze River were determined using a particle entrainment simulator (PES). The relationship between the sediment composition and release characteristics of PAHs was also investigated. The results showed that release of PAHs into overlying water during sediment resuspension followed first-order reaction kinetics. The release rate constants for the initial phase (0~1 h) were greater than those for the second phase (1~12 h) and the release rate constants of 2~3-ring PAHs were greater than those of 4-ring PAHs. The release rates of PAHs increased with the increasing shear stress. The release rate constants of PAHs under 0.5 N·m⁻² were greater than those under 0.2 N·m⁻². Resuspension energy had larger effect on the release of 2~3-ring PAHs. There was no significant correlation between release rate constants and sediment compositional characteristics.

Keywords: Polycyclic aromatic hydrocarbons; Yangtze River; Sediment resuspension; Release kinetics; Particle entrainment simulator

1 引言(Introduction)

多环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是环境中广泛存在的一类有机污染物,具有致癌、致畸、生殖毒性和免疫毒性. PAHs溶解度低、

疏水性强,容易被颗粒物吸附,并在沉积物中积累(Chiou *et al.*, 1998). 蓄积在沉积物中的污染物在沉积物再悬浮过程中会重新释放进入水体,造成二次污染(Schoellhamer *et al.*, 2007; Feng *et al.*, 2007; Birch *et al.*, 2007). 沉积物再悬浮可由水流、

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2003CB415204); 国家自然科学基金(No. 40701166)

Supported by the National Basic Research Program of China (No. 2003CB415204) and the National Natural Science Foundation of China (No. 40701166)

作者简介: 冯精兰(1979—)女,副教授(博士),E-mail: fengjl1123@yahoo.com.cn; * 通讯作者(责任作者),E-mail: sunjh_hj@yahoo.com.cn

Biography: FENG Jinglan (1979—), female, associate professor (Ph. D.), E-mail: fengjl1123@yahoo.com.cn; * **Corresponding author**, E-mail: sunjh_hj@yahoo.com.cn

波浪等自然因素,以及拖网、疏浚等人为因素和生物扰动等引起,广泛发生于河流环境系统中 (Sanford *et al.*, 1994; Schoellhamer *et al.*, 1996; Lewis *et al.*, 2001; Tengberg *et al.*, 2003). 研究表明,沉积物再悬浮过程中,会导致上覆水体污染物浓度急剧增加,且污染物浓度与剪应力大小及沉积物性质存在相关性 (Alkhatib *et al.*, 2000; Cantwell *et al.*, 2002; Schneider *et al.*, 2002). 长江水系武汉段位于长江中游,贯穿整个武汉市,是该地区工农业生产和人民生活用水的主要来源. 该江段水流速快、波浪大,沉积物易于发生再悬浮,且 PAHs 是沉积物中典型的有机污染物 (Wang *et al.*, 2001). 因此,开展长江水系武汉段沉积物再悬浮过程中 PAHs 释放行为研究,考察剪应力及再悬浮持续时间对再悬浮过程中 PAHs 释放的影响对于了解该区域水污染变化规律具有重要意义 (Feng *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2008; Feng *et al.*, 2008). 基于此,本研究进一步考察长江水系武汉段沉积物再悬浮过程中 PAHs 释放的动力学特征,并分析其与沉积物组成性质之间的关系,以期为系统评价长江水系武汉段沉积物中 PAHs 的生态风险提供基础数据和理论依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 仪器和试剂

仪器: Waters1525 双泵高效液相色谱仪,配有 Waters474 扫描荧光检测器和 Waters2487 双波长紫外检测器,Varian PAHs 专用色谱柱 (250 mm × 4.6 mm, 5 μm); KQ502B 数控超声波清洗器; RV 05 basic 旋转浓缩蒸发仪; TDL-5 台式离心机; Liqui TOC 分析测定仪; SALD-3001 激光粒度分析仪; Simplicity 185 超纯水系统.

试剂: 16 种 PAHs 混合标样 (PAH-Mix 9) 购自 Dr. Ehrenstorfer 公司; 甲醇、正己烷、二氯甲烷、丙酮 (Tedia, 美国) 均为色谱纯; 无水硫酸钠、层析硅胶 (200 ~ 300 目) 为分析纯 (使用前在马弗炉中 550 °C 烘焙 4 h, 放在干燥器中备用); 实验用水采用 Simplicity 185 超纯水系统处理.

2.2 样品采集

实验用沉积物样品采自长江水系武汉段干流,使用 Van veen 抓斗式采样器 (Eijkelpkamp, Netherlands) 分别在 2005 年 7 月和 11 月采集 7 个沉积物样品,采样点位置如图 1 所示. 采集后的沉积物样品放置于洁净的不锈钢小桶中,4 °C 下遮光保存.

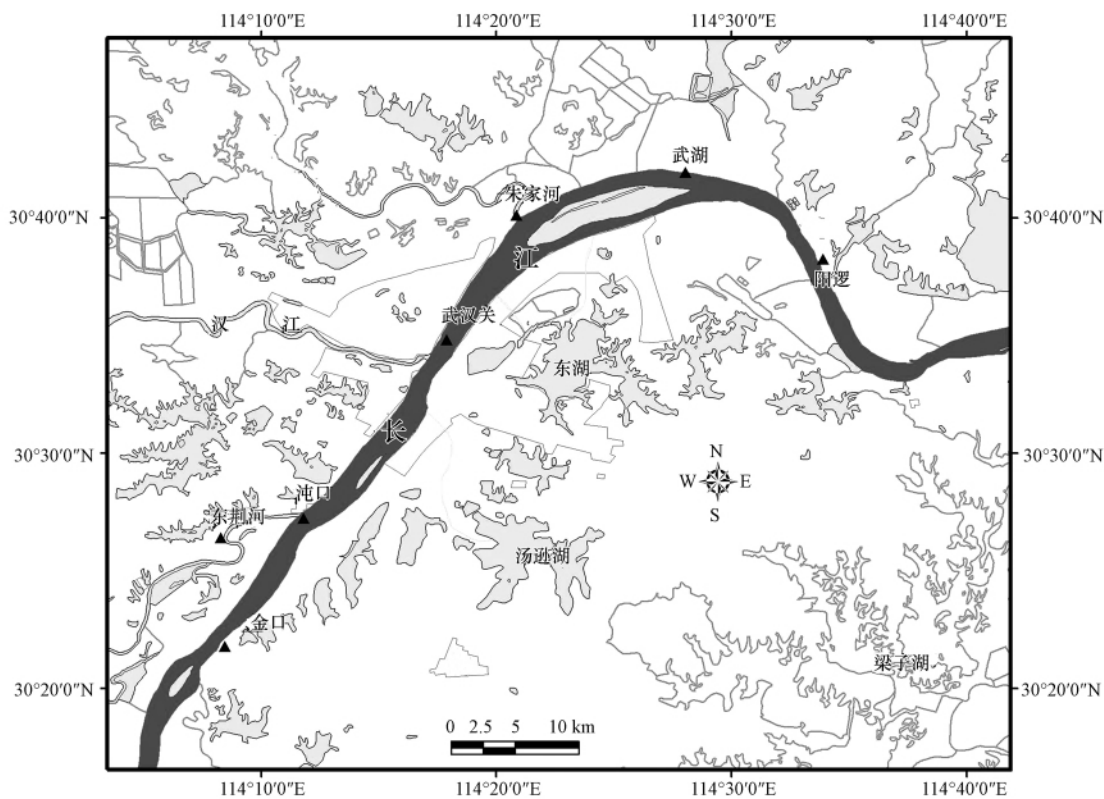


图 1 采样点位置示意图

Fig. 1 Map of sediment sampling sites in the mainstream of the Yangtze River

到进行再悬浮模拟实验. 模拟实验用水采自沌口, 经 $0.45 \mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜过滤, $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 下遮光保存.

2.3 再悬浮模拟装置

沉积物再悬浮模拟装置参见文献(Feng *et al.*, 2007), 其工作原理为: 穿孔板通过连接杆与变速电机相连, 并在电机的带动下在水体中上下摆动, 在沉积物-上覆水界面产生剪应力, 夹带沉积物进入水体, 产生再悬浮. 产生的剪应力大小与穿孔板的摆幅、频率及穿孔板距沉积物的高度有关. Tsai 和 Lick (1986) 对该模拟装置进行了校正, 当穿孔板在距沉积物界面 $5.0 \sim 7.5 \text{ cm}$ 之间摆动, 产生 0.2 和 $0.5 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 剪应力所需的电机转速分别为 375 和 $750 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$. 该装置已被证实模拟过程重现性较好, 可比较不同强度再悬浮模拟及不同性质沉积物再悬浮过程(Latimer *et al.*, 1999; Alkhatib *et al.*, 2002; Cantwell *et al.*, 2004).

2.4 释放动力学实验

将 7 个不同理化性质的沉积物样品分别放置于再悬浮模拟装置中进行沉积物再悬浮过程的实验模拟, 整个再悬浮过程持续时间选定为 12 h , 定时取样, 取样量为 100 mL , 之后重新注入 100 mL 水样以维持水样体积保持恒定. 水样取出后, 立即用孔径为 $1.2 \mu\text{m}$ 的微孔玻璃纤维滤膜(GF/C, Whatman, England) 过滤, 测定其中 PAHs 含量, 计算 PAHs 释放量. 同时测定沉积物及再悬浮颗粒物中 PAHs 含量、有机碳含量、炭黑含量、孔径、比表面积及粒径分布.

2.5 PAHs 分析

取 70 mL 水样置于 250 mL 磨口锥形瓶中, 加入等体积二氯甲烷超声萃取 30 min , 静置 20 min , 使用分液漏斗取出有机相, 旋转蒸发至约 0.5 mL , 加入 10 mL 甲醇溶剂置换, 旋转蒸发, 定容至 1.0 mL , 采用 HPLC 分析.

将沉积物或滤膜置于 50 mL 聚四氟乙烯离心管中, 加入 30 mL 正己烷/丙酮混合溶液(1:1, 体积比) 放置过夜. 超声($30 \text{ }^\circ\text{C}$) 萃取 1 h , $4000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 20 min , 萃取液旋蒸至约 1 mL , 过装有 1 g 无水硫酸钠 + 2 g 硅胶的层析柱净化, 以 8 mL 正己烷预洗, 10 mL 正己烷/二氯甲烷混合溶液(1:1, 体积比) 洗脱, 收集洗脱液旋蒸($30 \text{ }^\circ\text{C}$) 至干, 用甲醇精确定容到 1.0 mL , 进 HPLC 分析(Niu *et al.*, 2003).

色谱条件: 柱温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$; 流动相为甲醇-水二元梯度; 流速 $1.0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$; 进样量 $20 \mu\text{L}$; 检测器: 程序

可变波长荧光检测器, 双波长紫外检测器.

水相及沉积物中 PAHs 分析的质量控制包括方法空白、基质空白和基质加标回收率. 方法空白均无检出目标化合物. 通过加标回收实验, 得出水相中 16 种 PAHs 的回收率和检测限分别为 $60\% \sim 100\%$ 和 $0.098 \sim 0.191 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 沉积物中 16 种 PAHs 的回收率和检测限分别为 $60\% \sim 110\%$ (萘除外, $30\% \pm 5\%$) 和 $0.34 \sim 4.05 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.6 沉积物理化性质的测定

称取 $50 \sim 200 \text{ mg}$ 待测的沉积物或再悬浮颗粒物, 加入约 600 mL 蒸馏水, 以 20% 的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 溶液作为分散剂, 在超声波的作用下充分分散, 以激光粒度分析仪(测量范围 $0.269 \sim 2000 \mu\text{m}$, 相对误差小于 3%) 进行粒径分析(Ding *et al.*, 1998).

沉积物或再悬浮颗粒物研磨匀质后, 以过量的 1.6% 盐酸酸化预处理除去总无机碳(TIC), $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 干燥后用 TOC 仪进行总有机碳的测定.

沉积物样品及再悬浮颗粒物样品在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥 24 h 后, 用 ASAP2010 比表面及孔径测定仪进行测定.

炭黑的测定采用 Gustafsson 等(1997) 建立的 CTO-375 方法进行, 具体步骤如下: 准确称取适量待测沉积物或再悬浮颗粒物(经研磨匀质), 以过量的 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 进行酸化预处理, 除去 TIC, 酸化反应时间为 0.5 h , $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 干燥. 干燥后的样品在鼓风马弗炉中(流量 $200 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$) 于 $375 \text{ }^\circ\text{C}$ 下焙烧 18 h , 然后以元素分析仪进行炭黑的测定.

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 沉积物再悬浮过程中 PAHs 的释放动力学

再悬浮过程中, 由于周围条件的改变, 吸附在沉积物上的 PAHs 解吸释放进入水体. 图 2 显示了再悬浮过程中上覆水体 PAHs 浓度随时间的变化. 从图 2 可知, 再悬浮过程的初期($0 \sim 1 \text{ h}$), 上覆水体 PAHs 浓度增加较快, 随着再悬浮过程的持续, PAHs 释放速率变小. 对上覆水体在 $0 \sim 1 \text{ h}$ 及 $1 \sim 12 \text{ h}$ 内的 PAHs 浓度变化分别进行考察, 发现 PAHs 浓度的自然对数($\ln C_t$) 与时间 t 之间的关系均近似为直线, 符合一级动力学, 即:

$$\ln C_t = k \times t + a \quad (1)$$

式中 k 为上覆水体 PAHs 的释放速率常数(h^{-1}), C_t 为 t 时刻上覆水体中 PAHs 的浓度($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), a 为常数.

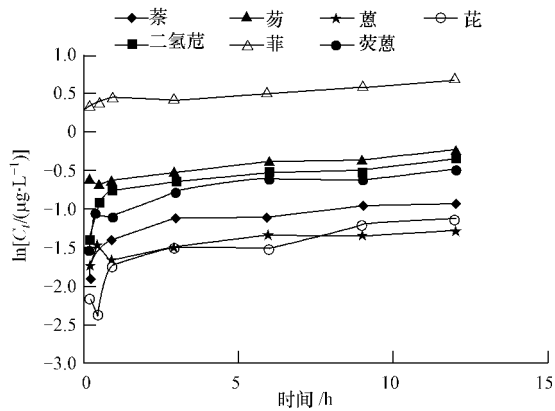


图2 上覆水体 PAHs 浓度随时间的变化

Fig. 2 The variation of PAHs concentration in overlying water versus time

采用简单的回归分析,依据动力学方程(1)对实验数据进行拟合,计算得到 k 和 R^2 , PAHs 的释放结果如表 1 所示(由于实验的复杂性,使得部分数据在拟合过程中缺乏相关性,故而大量 0~1 h 动力学数据未在文章中列出)。

由表 1 可知,随着再悬浮过程的持续,释放速率明显减慢,实验初期(0~1 h)再悬浮颗粒物向上覆水体释放 PAHs 的速率快于第 2 阶段(1~12 h)。这可能是由于再悬浮过程中,吸附在颗粒物外表面的 PAHs 先发生解吸,当解吸一段时间后,颗粒物外表面上大部分的 PAHs 发生了解吸,而颗粒物内部的 PAHs 较难发生解吸所致。对不同 PAHs 在第 2 阶段的速率常数进行比较,发现低分子量 PAHs(萘、二氢萘、芴)的释放速率常数大于中等分子量 PAHs(菲、荧蒽、芘、蒽)的释放速率常数,这与 PAHs 的性质有关,中等分子量 PAHs 的 K_{ow} 大于低分子量 PAHs,制约了其向水体的释放。

表 1 上覆水体 PAHs 的释放动力学

PAHs	k_1/h^{-1}	R^2	k_2/h^{-1}	R^2
萘	0.61	0.851	0.038	0.928
二氢萘	0.76	0.897	0.035	0.978
芴			0.035	0.986
菲			0.023	0.994
蒽			0.032	0.911
荧蒽			0.029	0.887
芘			0.030	0.965

注: k_1 为第 1 阶段(0~1 h)的释放速率常数, k_2 为第 2 阶段(1~12 h)的释放速率常数。

3.2 剪应力对再悬浮过程中 PAHs 释放的影响

剪应力对再悬浮过程中 PAHs 的释放有较重要影响(Latimer *et al.*, 1999; Alkhatib *et al.*, 2002; Feng *et al.*, 2007)。本研究中,分别考察了 0.2 $N \cdot m^{-2}$ 、0.5 $N \cdot m^{-2}$ 剪应力作用下再悬浮过程中 PAHs 的释放速率,结果见表 2。由表 2 可知,0.2 $N \cdot m^{-2}$ 、0.5 $N \cdot m^{-2}$ 下再悬浮过程中 PAHs 释放的一级动力学回归曲线拟合结果较好,表明 0.2 $N \cdot m^{-2}$ 、0.5 $N \cdot m^{-2}$ 条件下再悬浮过程中 PAHs 的释放均符合一级动力学过程。且由表 2 可知,0.2 $N \cdot m^{-2}$ 、0.5 $N \cdot m^{-2}$ 下再悬浮过程中 PAHs 的释放均分 2 个阶段,第 1 阶段(0~1 h)再悬浮颗粒物向上覆水体释放 PAHs 的速率均快于第 2 阶段(1~12 h)。比较 0.2 $N \cdot m^{-2}$ 、0.5 $N \cdot m^{-2}$ 下 PAHs 的释放速率常数,结果表明,PAHs 在较高的剪应力条件下能达到较快的释放。当剪应力从 0.2 $N \cdot m^{-2}$ 增加到 0.5 $N \cdot m^{-2}$,萘在第 1 阶段的释放速率常数由 0.61 h^{-1} 增加到 0.95 h^{-1} ,第 2 阶段的释放速率常数由 0.038 h^{-1} 增加到 0.070 h^{-1} ,其它 PAHs 也表现为明显的增加趋势(表 2)。由实验结果可知,再悬浮过程中 PAHs 的

表 2 不同剪应力条件下上覆水体 PAHs 的释放动力学

Table 2 Kinetics for the release of PAHs into overlying water under different shear stress

PAHs	0.2 $N \cdot m^{-2}$ 下的参数值				0.5 $N \cdot m^{-2}$ 下的参数值			
	k_1/h^{-1}	R^2	k_2/h^{-1}	R^2	k_1/h^{-1}	R^2	k_2/h^{-1}	R^2
萘	0.61	0.851	0.038	0.928	0.95	0.995	0.070	0.860
二氢萘	0.76	0.897	0.035	0.978	0.73	0.982	0.050	0.990
芴			0.035	0.986	0.15	0.970	0.064	0.985
菲			0.023	0.994			0.036	0.948
蒽			0.032	0.911			0.044	0.960
荧蒽			0.029	0.887			0.033	0.952
芘			0.030	0.965				

注: k_1 为第 1 阶段(0~1 h)的释放速率常数, k_2 为第 2 阶段(1~12 h)的释放速率常数。

释放速率常数随剪应力的增大而增大,表明自然环境中水动力条件对 PAHs 释放起着不容忽视的作用,对于 PAHs 的释放有加速作用.这与 Latimer 等 (1999) 研究再悬浮过程中 PCBs 的释放,认为再悬浮加速了 PCBs 的释放,且释放速率与剪应力成正比的结论相一致.比较不同 PAHs 释放速率常数增加的幅度,发现剪应力对低分子量 PAHs (2~3 环) 释放速率的影响明显高于中等分子量的 PAHs (4 环).

3.3 沉积物性质对 PAHs 释放的影响

沉积物有机碳含量、比表面积等理化性质会影响沉积物中 PAHs 的解吸动力学 (Rockne *et al.*, 2002; Shor *et al.*, 2003) 这些理化性质是否对于再悬浮过程中 PAHs 的释放动力学有影响? 根据以上

问题,本研究比较了 7 种不同理化性质 (表 3) 沉积物再悬浮过程中 PAHs 的释放行为,以观察沉积物理化性质对 PAHs 释放动力学的影响.通过对实验结果分析可知,不同性质沉积物再悬浮过程上覆水体 PAHs 浓度的自然对数 ($\ln C_t$) 与时间 t 之间的关系近似为直线.采用简单回归分析对实验数据进行拟合,计算得到释放速率常数 k 和 R^2 ,结果列于表 4.由表 4 可知,不同理化性质沉积物再悬浮过程中 PAHs 释放的一级动力学回归曲线均有较高的 R^2 ,表明不同性质沉积物再悬浮过程中 PAHs 向上覆水体释放符合一级动力学.由表 4 可知,不同理化性质沉积物再悬浮过程中不同 PAHs 具有不同的释放速率常数,第 1 阶段的释放速率大于第 2 阶段,低环 (2~3 环) PAHs 的释放速率大于 4 环 PAHs.对

表 3 沉积物理化性质

Table 3 Physiochemical characteristics of the sediments

采样点	组成(砂质/粉砂/粘土)	TOC	TN	C/N	炭黑	比表面积 ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔径 /nm
武汉关	26.01% /61.02% /13.97%	1.09%	0.24%	4.54	0.18%	12.02	9.91
东荆河	5.50% /42.01% /52.49%	1.84%	0.34%	5.38	0.40%	24.90	11.50
朱家河	5.91% /60.75% /33.34%	1.49%	0.15%	10.08	0.32%	14.85	11.24
沌口	28.00% /51.88% /21.12%	1.90%	0.22%	8.79	0.18%	8.56	11.70
金口	12.18% /55.74% /32.08%	1.06%	0.15%	6.86	0.20%	12.22	11.33
阳逻	42.57% /39.34% /18.09%	0.49%	0.21%	2.33	0.16%	6.14	10.29
武湖	63.44% /29.90% /6.66%	0.48%	0.17%	2.84	0.18%	6.61	9.35

表 4 不同理化性质沉积物再悬浮过程中 PAHs 的释放动力学

Table 4 The kinetics for the release of PAHs from sediments with different physiochemical characteristics

采样点	萘		二氢萘				芴				菲					
	k_1/h^{-1}	R^2	k_2/h^{-1}	R^2	k_1/h^{-1}	R^2	k_2/h^{-1}	R^2	k_1/h^{-1}	R^2	k_2/h^{-1}	R^2	k_1/h^{-1}	R^2	k_2/h^{-1}	R^2
武汉关	0.95	0.995	0.07	0.86	0.73	0.982	0.05	0.99	0.15	0.97	0.064	0.985			0.036	0.948
东荆河	0.28	0.999			0.13	0.999	0.039	0.865	0.14	0.886	0.036	0.811			0.047	0.981
朱家河			0.05	0.932	0.083	0.99					0.043	0.944	0.26	0.832	0.04	0.984
沌口			0.028	0.748												
金口			0.047	0.725			0.065	0.97	0.22	0.844	0.058	0.821	0.23	0.93	0.041	0.995
阳逻			0.041	0.865			0.058	0.959			0.061960				0.064	0.974
武湖			0.06	0.916			0.069	0.974			0.04	0.939	0.38	0.997		

采样点	蒽				荧蒽				芘			
	k_1/h^{-1}	R^2	k_2/h^{-1}	R^2	k_1/h^{-1}	R^2	k_2/h^{-1}	R^2	k_1/h^{-1}	R^2	k_2/h^{-1}	R^2
武汉关			0.044	0.96			0.033	0.952				
东荆河					0.27	0.976	0.039	0.982	0.15	0.944	0.036	0.963
朱家河	0.24	0.972					0.048	0.944	0.43	0.993	0.045	0.985
沌口											0.033	0.974
金口			0.033	0.881	0.48	0.984	0.032	0.976	0.37	0.945	0.029	0.925
阳逻			0.06	0.946			0.028	0.904			0.035	0.994
武湖			0.03	0.833			0.031	0.916			0.035	0.927

注: k_1 为第 1 阶段 (0~1 h) 的释放速率常数, k_2 为第 2 阶段 (1~12 h) 的释放速率常数.

沉积物各种性质与释放速率常数(k)进行回归分析. 结果表明: 沉积物的各种理化性质均与再悬浮过程中 PAHs 释放的动力学速率常数没有显著的相关性. 这主要是因为沉积物再悬浮过程中上覆水体 PAHs 主要来自表层沉积物及再悬浮颗粒物的解吸, 而再悬浮颗粒物的理化性质与沉积物的理化性质存在较大差异(Feng *et al.*, 2007). 因此, 沉积物的各理化性质对再悬浮过程中 PAHs 释放的影响不显著.

4 结论 (Conclusions)

本文研究了长江水系武汉段 7 种沉积物的 PAHs 释放动力学特征, 并考察了沉积物组成对 PAHs 释放动力学的影响. 结果表明: 不同水动力条件作用下的再悬浮过程中, 不同理化性质沉积物中 PAHs 向上覆水体的释放符合一级动力学方程, 释放过程分为 2 个阶段, 第 1 阶段的释放速率大于第 2 阶段的释放速率, 低环(2~3) PAHs 的释放速率大于 4 环 PAHs; $0.5 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 条件下, 沉积物中 PAHs 的释放速率大于 $0.2 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 条件下 PAHs 的释放速率, 且对于低环(2~3) PAHs 的影响更明显; 不同性质沉积物再悬浮过程中 PAHs 释放速率的差异与沉积物的理化性质无显著相关性.

责任作者简介: 孙剑辉(1957—), 男, 教授(博士), 主要研究领域为持久性有机污染物的环境行为. E-mail: sunjh_hj@yahoo.com.cn.

参考文献 (References):

- Alkhatib E, Castor K. 2000. Parameters influencing sediment resuspension and link to sorption of inorganic compounds [J]. *Environ Monit Assess*, 65: 531-546
- Alkhatib E, Weigand K. 2002. Parameters affecting partitioning of 6 PCB congeners in natural sediment [J]. *Environ Monit Assess*, 78: 1-17
- Birch G, O'Hea L. 2007. The chemistry of suspended particulate material in a highly contaminated embayment of Port Jackson (Australia) under quiescent, high-wind and heavy-rainfall conditions [J]. *Environ Geol*, 53(3): 501-516
- Cantwell M G, Burgess R M, Kester D R. 2002. Release and phase partitioning of metals from anoxic estuarine sediments during periods of simulated resuspension [J]. *Environ Sci Technol*, 36: 5328-5334
- Cantwell M G, Burgess R M. 2004. Variability of parameters measured during the resuspension of sediments with a particle entrainment simulator [J]. *Chemosphere*, 56: 51-58
- Chiou C T, McGroddy S E, Kile D E. 1998. Partition characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons on soils and sediments [J]. *Environ Sci Technol*, 32(2): 264-269
- Ding Z L, Sun J M, Liu T S, *et al.* 1998. Wind-blown origin of the Pliocene red clay formation in the central Loess Plateau, China [J]. *Ear Plane Sci Lett*, 161: 135-143
- Feng J L, Yang Z F, Niu J F, *et al.* 2007. Remobilization of polycyclic aromatic hydrocarbons during the resuspension of Yangtze River sediments using a particle entrainment simulator [J]. *Environ Pollut*, 149(2): 193-200
- Feng J L, Shen Z Y, Niu J F, *et al.* 2008. The role of sediment resuspension duration on release of PAHs [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(18): 2777-2782
- Gustafsson O, Haghseta F, Chan C, *et al.* 1997. Quantification of the dilute sedimentary soot phase: implications for speciation and bioavailability [J]. *Environ Sci Technol*, 31: 203-209
- Latimer J S, Davis W R, Keith D J. 1999. Mobilization of PAHs and PCBs from in-place contaminated marine sediments during simulated resuspension events [J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, 49: 577-595
- Lewis M A, Weber D E, Stanley R S, *et al.* 2001. Dredging impact on an urbanized Florida bayou: effects on benthos and algal-periphyton [J]. *Environ Pollut*, 115: 161-171
- Niu J F, Chen J W, Martens D, *et al.* 2003. Photolysis of polycyclic aromatic hydrocarbons adsorbed on spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) needles under sunlight irradiation [J]. *Environ Pollut*, 123(1): 39-45
- Rockne K J, Shor L M, Young L Y, *et al.* 2002. Distributed sequestration and release of PAHs in weathered sediment: The role of sediment structure and organic carbon properties [J]. *Environ Sci Technol*, 36: 2636-2644
- Sanford L P. 1994. Wind-forced resuspension of upper Chesapeake Bay muds [J]. *Estuaries*, 17: 149-165
- Schneider A, Porter E, Baker A. 2007. Polychlorinated biphenyl release from resuspended Hudson River sediment [J]. *Environ Sci Technol*, 41(4): 1097-1103
- Schoellhamer D H, Mumley T E, Leatherbarrow J E. 2007. Suspended sediment and sediment-associated contaminants in San Francisco Bay [J]. *Environ Res*, 105(1): 119-131
- Schoellhamer D H. 1996. Anthropogenic sediment resuspension mechanisms in a shallow microtidal [J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, 43: 533-548
- Shor L M, Rockne K J, Taghon G L, *et al.* 2003. Desorption kinetics for field-aged polycyclic aromatic hydrocarbons from sediments [J]. *Environ Sci Technol*, 37: 1535-1544
- Tengberg A, Almroth E, Hall P. 2003. Resuspension and its effects on organic carbon recycling and nutrient exchange in coastal sediments: in situ measurements using new experimental technology [J]. *J Exp Mar Biol Ecol*, 285-286: 119-142
- Tsai C H, Lick W. 1986. A portable device for measuring sediment resuspension [J]. *J Gt Lakes Res*, 12: 314-321
- 王彻华, 彭彪. 2001. 长江干流主要城市江段微量有机物污染分析 [J]. *人民长江*, 32(7): 20-36
- Wang C H, Peng B. 2001. Analysis on micro organic pollution along Yangtze river stretches of urban areas in major cities [J]. *Yangtze River*, 32(7): 20-36 (in Chinese)
- Yang Z F, Feng J L, Niu J F, *et al.* 2008. Release of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from Yangtze River sediment cores during periods simulated resuspension [J]. *Environ Pollut*, 155: 366-374