

Ecological and Health Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Taihu Lake Basin

Jieyu Zhu¹, Dong Wang^{1*}, Yuankun Wang¹, Lachun Wang², Wei Huang³,
Debiao Zeng^{1,4}, Lili Jiang¹, Dengfeng Liu¹

¹Department of Hydrosociences, School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China

²School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210046, China

³Environmental Protection Department of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China

4. Yellow River Bureau of Jinan, Jinan 250300, China

太湖流域多环芳烃生态与健康风险评价

朱洁羽¹, 王栋^{1*}, 王远坤¹, 王腊春², 黄卫³, 曾德彪^{1,4}, 姜丽丽¹, 刘登峰¹

¹南京大学地球科学与工程学院水科学系, 南京 210046, 中国

²南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210046, 中国

³江苏省环保厅, 南京 210036, 中国

⁴济南黄河河务局, 济南 250300, 中国

Abstract

With the rapid development of agriculture and industry in Taihu Lake Basin, Persistent Organic Pollutants (POPs) have become the focus of research. The paper performed ecological and health risk assessment for PAHs in Taihu Lake Basin. Based on the measured data from the centralized source of drinking water in Taihu Lake Basin and historical data from other regions, the paper analyzed the characteristics. The ecological risks of PAHs were assessed according to the environmental quality standards in sediment of USEPA, and the health risks were assessed with the exposure assessment method of USEPA. The results showed that PAHs in Taihu Lake Basin were in low ecological and health risk. The water quality from Taihu centralized drinking water source was good and in low ecological and health risk.

Keywords: Taihu Lake Basin; Polycyclic Aromatic Hydrocarbons; ecological risk assessment; health risk assessment

摘要

*通讯作者: rzhujiayu@163.com

太湖流域经济社会发展迅速, 近年持久性有机污染物逐渐成为研究热点。对太湖流域典型持久性有机污染物(多环芳烃 PAHs)进行特征分析、生态风险评价和健康风险评价。根据太湖流域集中式饮用水源地现场采样分析数据和其他地区历史数据, 对多环芳烃开展了特征分析: 依据 USEPA 沉积物环境质量标准进行了生态风险评价; 应用 USEPA 暴露计算方法加以健康风险评价。结果表明: 太湖流域沉积物中 PAHs 生态风险较低; 集中式饮用水源地水质较好, 生态风险和健康风险较低。

关键词: 太湖流域; 多环芳烃; 生态风险评价; 健康风险评价

1. 引言

持久性有机污染物 (Persistence Organic Pollutants, POPs) 中的典型污染物多环芳烃 (PAHs) 对环境 and 人体产生损害的有机化合物, 由于其毒性、持久性、易积聚性和不易降解性受到广泛关注[1]。

太湖作为我国第三大淡水湖, 是重要的饮

用水源地,工农业发展迅速,但水污染和水环境恶化问题不容小觑,研究太湖流域持久性有机污染物和饮用水风险[2]具有重要意义和实际应用价值。本研究结合实地采样和历史数据,对太湖流域 PAHs 这类典型持久性有机污染物采用 USEPA 沉积物环境质量标准以评价生态风险,应用 USEPA 暴露计算方法进行了健康风险评估。

2. 太湖流域多环芳烃特征分析

根据太湖流域 2005 年至 2012 年 PAHs 数据进行分析比较。

表 1 列出了太湖流域典型年份沉积物中优控 PAHs 的浓度值。

表 1 太湖流域典型年份沉积物中优控 PAHs 的浓度值 (ng·g⁻¹)

序号	地点	时间	种类	最小值	最大值	均值	数据来源
1	太湖(梅梁湾)	2005.11	16	1690	5033	3498	[3]
2	太湖	2009.09	16	436	1334	957	4]
3	太湖(梅梁湾)	2009.12	9	612	1703	1257	[5]
4	太湖	2009.12	9	265	1703	808	
5	太湖	2010.05	16	209	3843	584	[6]
6	太湖	2011.05	16	262	1087	491	[7]
7	太湖(梅梁湾)	2011.11	16	782	1105	943.5	[8]
8	太湖(竺山湾)	2012.11	16	61	2032	1132	[9]

分析表 1 可知:

(1)数据 3 和 4 均采自 2009 年 12 月,其最大值相近,但最小值相差较多(数据 3 为 612 ng·g⁻¹,数据 4 为 265 ng·g⁻¹),平均值也相差较多(数据 3 为 1257 ng·g⁻¹,数据 4 为 808 ng·g⁻¹);数据 6 和 7 均采自 2011 年,其最大值相近,但最小值相差较多(数据 6 为 262 ng·g⁻¹,数据 7 为 782 ng·g⁻¹),表明太湖流域梅梁湾沉积物中 PAHs 污染比太湖流域其他地区严重。

(2)根据数据 1、3 和 7,太湖流域梅梁湾地区沉积物中 PAHs 的平均浓度从 3498 ng·g⁻¹降至 1257 ng·g⁻¹再降至 943.5 ng·g⁻¹,可初步判断,自 2000 年至 2011 年,太湖流域梅梁湾地区沉积物中 PAHs 浓度呈先下降的变化态势;根据数据 2、4、5 和 6,太湖流域沉积物中 PAHs 的平均浓度从 957 ng·g⁻¹降至 491 ng·g⁻¹,可初步得出太湖流域沉积物中 PAHs 呈下降的变化态势。

综上所述,太湖流域沉积物中多环芳烃浓度总体呈下降态势。

3. 太湖流域多环芳烃(PAHs)生态风险评估

Long *et al*[10]提出的沉积物环境质量标准,现已被 USEPA (U.S. Environmental

Protection Agency 美国国家环境保护局)定为国家标准。该标准提出沉积物中有机物可分为两个界限,分别是毒性效应低值(Effects Range Low, ERL)和毒性效应中值(Effects Range Mediam, ERM)。当目标污染物浓度小于 ERL 时,生物效应几率小于 10%。当目标污染物浓度大于 ERM 时,生物效应几率大于 50%[11]。

根据太湖流域沉积物中 PAHs 浓度及该沉积物环境质量标准加以分析可得:

(1)太湖流域 PAHs 总量生态风险较低

由表 1 可得,美国 16 种 USEPA 优先控制污染物基本都有检出。根据 USEPA 沉积物环境质量标准,PAHs 的总量 ERL 为 4022 ng·g⁻¹,ERM 为 22792 ng·g⁻¹。根据表 1 数据 1-3,PAHs 总量分别为 5260 ng·g⁻¹、4754 ng·g⁻¹和 5033 ng·g⁻¹,均稍大于 ERL,远小于 ERM,数据 4-11 的 PAHs 总量均小于 ERL 值。这表明太湖流域 PAHs 总量生态风险较低。

本次太湖流域集中式饮用水源地实测数据得 PAHs 的总量最大值为 280 ng·g⁻¹,远低于 ERL,表明太湖流域集中式饮用水源地生态风险低。

(2)太湖流域 PAHs 单体生态风险也较低。

部分沉积物中的萘(NaP)、苊(Ace)、芴(Flu)

Risk Analysis and Crisis Response in Big Data Era (RAC-16)

和菲(Phe)的最大浓度超过 ERL, 如表 1 舒卫先和李世杰^[2]对太湖梅梁湾的研究中,

$$NaP = 174 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \text{ 大于 } ERL_{(NaP)} = 160 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1},$$

但远远小于 $ERM_{(NaP)} = 2100 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$;

$$Ace = 54 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \text{ 大于 } ERL_{(Ace)} = 16 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}, \text{ 但}$$

远远小于 $ERM_{(Ace)} = 500 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; $Phe = 587$

$\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 大于 $ERL_{(Phe)} = 240 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 但远远小于

$$ERM_{(Phe)} = 1500 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}. \text{ 虽然部分单体超过}$$

ERL, 但未达到ERM。其他单体都未达到ERL, 因此, 除部分单体的生态风险几率大于 10% 小于 50% 之外, 其他单体生态风险都较低。

本次汛期太湖流域集中式饮用水源地采样检测单体结果 $dBahA = 70 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 略大于

$$ERL_{(dBahA)} = 63 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}, \text{ 远小于}$$

$$ERM_{(dBahA)} = 260 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}, \text{ 其他如 } Fla = 40$$

$\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 低于 $ERL_{(Fla)} = 1600 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 的 3%, 均

远低于 ERL, 可见多环芳烃单体生态风险低。

综上所述, 太湖流域持久性有机污染物 PAHs 总量和单体生态风险均较低。

4.太湖流域多环芳烃健康风险评价

对水体中的 PAHs 采用 USEPA 暴露计算方法进行人体健康风险评价。

4.1 健康危害风险模型

健康危害风险模型包括致癌物所致健康危害风险计算和非致癌物所致健康危害风险计算[12]。

(1) 致癌物所致健康危害风险如下计算:

$$R_i^c = [1 - \exp(-D_i q_i)] / Y \quad (1)$$

式中: R_i^c 为致癌物 i 通过饮水途径产生的平

均个人致癌年风险, a^{-1} ; q_i 为致癌物 i 通过

饮水途径致癌强度系数, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$; Y 为

人平均寿命, a ; D_i 为化学致癌物 i 通过饮水途径的单位体重日均暴露剂量,

$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 计算公式:

$$D_i = Q \times C_i / W \quad (2)$$

式中: Q 为成人平均每日饮水量, L ; C_i

为致癌物质 i 的质量浓度, mg/L ; W 为成人

平均体重, kg 。

(2) 非致癌物所致健康危害风险如下计算:

$$R_j^n = (D_j / RfD_j) \times 10^{-6} / Y \quad (3)$$

式中: R_j^n 为非致癌物质 j 通过饮水途径

产生的平均个人健康危害年风险, a^{-1} ; RfD_j

为非化学致癌物质 j 通过饮水途径参考剂量,

$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$; D_j 为非致癌物质 j 通过饮水

途径的单位体重日均暴露剂量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$,

计算公式:

$$D_j = Q \times C_j / W \quad (4)$$

式中: Q 为成人平均每日饮水量, L ; C_j 为

非化学致癌物质的质量浓度, mg/L ; W 为

成人平均体重。

4.2 健康风险评价模型参数

根据 USEPA 健康风险评价指南[12]确定致癌类 PAHs 污染物致癌强度系数, 见表 2。

Risk Analysis and Crisis Response in Big Data Era (RAC-16)

根据 USEPA 研究结果确定非致癌类污染物饮水途径的参考剂量值, 见表 3。

表 2 健康风险评价模型参数 Q_i 值 (USEPA)

致癌类多环芳烃	BaA	Chr	BbF	BkF	BaP	DahA
致癌强度系数 [mg·(kg·d) ⁻¹]	7.30E-01	7.30E-03	7.30E-01	7.30E-02	7.30E00	7.30E00

表 3 健康风险评价模型参数 R^{RD}_j 值 (USEPA)

多环芳烃	Nap	Ace	Flu	Ant	Flua	Pyr
非致癌参考剂量 [mg·(kg·d) ⁻¹]	2E-02	4E-02	3E-02	3E-01	4E-02	3E-02

采用瑞典环保局、荷兰建设和环境部与英国皇家协会推荐的健康风险最大可接受水平为 $1.00E-06a^{-1}$, 可忽略水平为 $1.00E-08a^{-1} \sim 1.00E-07a^{-1}$ [13]。

4.3 太湖流域健康风险评价

根据 2015 年版《世界卫生统计》, 取 Y 为

中国人平均寿命 76, Q 取成人平均饮水量 2.2L, W 取成人平均体重 62 kg。

本次太湖流域集中式饮用水源地二次所采水样数据及其带入公式计算得到的个人健康危害年风险见表 4。实测数据显示仅 PAHs 高于检测限, 选取各污染物的平均值代入计算。

表 4 太湖流域集中式饮用水源地 PAHs 浓度及个人健康危害年风险

致癌类 PAHs	BaA	Chr	BbF	BkF	BaP	DahA
浓度 (ng/g)	4	10	12	6	12	14
R_i^c (a ⁻¹)	1.36E-09	3.41E-11	4.09E-09	2.04E-10	4.09E-08	4.77E-08
非致癌类 PAHs	Nap	Ace	Flu	Ant	Flua	Pyr
浓度 (ng/g)	-	-	26	-	-	10
R_j^n (a ⁻¹)	-	-	4.39E-13	-	-	1.69E-13

由表 4 可知, 计算所得太湖流域集中式饮用水源地最大污染物的个人健康危害年风险为 $4.77E-08a^{-1}$, 在可忽略风险范围内, 因此得出结论太湖流域集中式饮用水源地人体健康风险较低。

5. 结论

本文根据太湖流域表层沉积物中多环芳烃(PAHs)数据, 对其进行了特征分析, 依据 USEPA 沉积物环境质量标准开展生态风险评价, 应用 USEPA 暴露计算方法对太湖流域饮用水源地进行了健康风险评价。得到以下结论:

(1) 太湖流域沉积物中多环芳烃(PAHs)浓度总体呈下降态势。

(2) 太湖流域沉积物中多环芳烃(PAHs)的生态风险较低。

(3) 太湖流域集中式饮用水源地沉积物中多环芳烃(PAHs)的生态及健康风险均较低。

本文研究了太湖典型持久性有机污染物多环芳烃(PAHs)并开展了生态风险评价和健康风险评价, 其潜在风险不容忽视, 仍需加以深入研究, 如健康风险还应包括水生生物摄入的暴露途径等。同时, 国内持久性有机污染物研究多采用 USEPA 环境质量标准。由于国情不同, 美国标准运用于我国具有一定局限性, 迫切需要制订适用于我国国情的持久性有机污染物环境质量标准。

6. 参考文献

[1] Jones K C, De Voogt P. Persistent organic

Risk Analysis and Crisis Response in Big Data Era (RAC-16)

- pollutants (POPs): state of the science. *Environmental Pollution*, 1999, 100(1): 209-221.
- [2] Zhang R, Zou H W, Mei H, Zhou A X, Gang Z. Risk Analysis of Water Resources Crisis in the Lancang-Mekong River Drainage Basin under the Background of Climate Change. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 2012, 11(2): 209-213.
- [3] 舒卫先, 李世杰. 太湖流域典型湖泊表层沉积物中多环芳烃污染特征. *农业科学学报*, 2008, 27(4): 1409-1414.
- [4] Tao Y, Yao S, Xue B, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from drinking water sources of Taihu Lake, China: sources, partitioning and toxicological risk. *Journal of Environmental Monitoring*, 2010, 12(12): 2282-2289.
- [5] 李玉斌, 刘征涛, 冯流等. 太湖部分沉积物中多环芳烃生态风险评估. *环境化学*, 2011, 30(10): 1769-1774.
- [6] 鲁玥. 太湖水体中几种持久性有机污染物的时空分布研究. 硕士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2011.
- [7] 余云龙, 李圆圆, 林田等. 太湖表层沉积物中多环芳烃的污染现状及来源分析. *环境化学*, 2013, 32(12): 2336-2341.
- [8] 何隽杰, 陆光华, 丁剑楠等. 太湖北部表层沉积物中多环芳烃和多溴联苯醚及多氯联苯的分布和来源及生态风险评估. *环境与健康杂志*, 2013, 30(8): 699-702.
- [9] 陈明华, 李春华, 叶春等. 太湖竺山湾湖滨带沉积物中多环芳烃分布、来源及风险评估. *环境工程技术学报*, 2014, 4(3): 199-204.
- [10] Long E R, MacDonald D D, Smith S L, *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 1995, 19(1): 81-97.
- [11] Long E R, Field L J, MacDonald D D. Predicting toxicity marine sediments with numerical sediment quality guidelines. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1998, 17(4): 714-727.
- [12] EPA. Super fund public health evaluation manual. EPA/540 /1-86-060, 1986.
- [13] 李丽娜. 上海市多介质环境中持久性毒害污染物的健康风险评估. 上海: 华东师范大学, 2007: 129.