

# 基于毒性足迹的污染源头管控研究

靳强<sup>1,2</sup> 李琛<sup>4</sup> 刘莲<sup>3</sup> 苏凌寒<sup>3</sup> 申哲民<sup>1</sup> 单爱党<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240;

2. 上海交通大学中国城市治理研究院, 上海 200030;

3. 安徽省蚌埠市环境监测站, 蚌埠 233040;

4. 安徽省蚌埠市环境信息中心, 蚌埠 233040)

**【摘要】**论述了毒性足迹对于以人体健康为目标的污染源头管控的重要性; 基于生命周期数据库, 构建了一条适合中国国情的目标区域人体毒性计算的简便途径; 从方法论和数据库的角度, 分析了实际操作的可行性; 最后, 指出了基于毒性足迹的管理在确定区域和行业的毒性分布及构建人体健康的管理指标体系的重要意义。

**【关键词】**毒性足迹; 人体健康; 环境管理; 生命周期

中图分类号: X21 文献标识码: A 文章编号: 1673-288X(2017)04-0019-03

## 1 以人体健康为目标的管控指标

研究表明, 污染物末端治理的空间已十分有限, 源头控制仍为根本性的污染防治措施。当前针对行业排放的管控指标分为单一指标和综合指标, 这些指标在环境保护的过程中起到了非常重要的作用, 但同时也显示了严重的缺陷。

综合指标主要为 COD 和 BOD 等常规指标, 用来指示各类耗氧有机物总量大小, 在表征影响水体黑臭方面有重要作用, 但是与影响人体健康的毒性大小关联性较弱。而且, 不同行业的排水成分往往不同, 相同 COD 的废水在毒性方面差别巨大, 因此 COD 指标对于以人类健康为目的的管控并不科学<sup>[1]</sup>。

单一指标又分为常规指标和非常规指标。氮和磷等为常规性管控指标, 对于指示点源排水对水体富营养化的影响程度特别有效, 但与影响人体健康的毒性大小的关联性也较弱。非常规单一指标, 如砷、镉、铬、铅等, 是在考虑对人类健康的影响下制定的, 但是数量有限且仅适于单一污染物的管控。实际上, 排水中往往还含有大量的其它污染物甚至未知污染物, 而且多种污染物往往还产生协同和拮抗等复合毒性作用<sup>[2]</sup>, 因此, 单一指标不能反映多种污染物之间的联合作用, 难以作为简便有效的指标应用于源污染的管控策略。

毒性指标能够有效克服上述现行指标的不足, 适用于难以提出特定污染物排放控制的要求, 综合表征点源排放对环境生物的影响大小, 是一种专门以人体健康为

管控目标是科学方法。德国在排水性质比较复杂的有机化工、钢铁、印染等行业的排放标准中引入了综合毒性指标。目前, 我国污染物排放标准中对于综合毒性指标的应用还处于起步阶段, 仅在 2008 年制药行业系列排放标准(GB21903~GB21908)中首次以 HgCl<sub>2</sub> 急性毒性当量引入综合毒性指标<sup>[3]</sup>。以综合毒性为人体健康管控指标尚有诸多问题需要解决, 本文从方法论、可行性分析和应用方面进行初步探讨。

## 2 基于毒性足迹的方法论

为制定以人体健康目标的区域管控策略, 需要对众多点源进行准确的毒性排放核算, 以及大量的毒性测试。当前缺乏科学且简便的核算方法, 如果按照常规方法, 工作量相当巨大甚至难以实现。通过美国环保局和环境毒理与化学学会提供了 USEtox 模型<sup>[4]</sup>, 可以计算目标区域的人体健康和生态毒性, 但是需要详细的排放数据。一些发达国家具有完善的污染物排放申报制度, 相继建立了点源排放的国家级数据库, 如欧洲的 E-PRTR、美国的 TRI、加拿大的 NPRI、澳大利亚的 NPI 等。这些数据库免费在线, 有的甚至嵌入 Google Earth, 使用方便, 与 USEtox Model 结合可以计算目标区域的毒性足迹<sup>[5]</sup>。中国当前虽然有排污申报制度, 但是数据的可靠性及保密性导致 USEtox Model 无法应用, 不适用于中国国情。

基于前期的相关工作, 借鉴碳足迹的概念, 本文提出了毒性足迹(Toxicity Footprint)的概念, 并以此为核心

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07204-008)

作者简介: 靳强, 博士, 副教授, 研究方向为污染预防与资源化、生命周期评价(Life Cycle Assessment, 即 LCA)

引用文献格式: 靳强等. 基于毒性足迹的污染源头管控研究[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(4): 19-21.

尝试构建快速准确地核算点源毒性当量排放的技术框架。碳足迹方法从全生命周期的角度深度分析碳排放的整个过程，能够从源头上制定科学合理的碳减排计划<sup>[6]</sup>。随后又有人提出了水足迹、化学品足迹等概念<sup>[7,8]</sup>，应用于水的高效利用和目标污染物的控制等目的。类似地，以人类健康为管控目标，毒性足迹能够定量地描述毒性排放过程，有利于从源头消减综合毒性的策略制定。以1,4-二氯苯为基准物，采用毒性当量法表示毒性排放大小，计算公式：

$$TEQ = \sum (TP_i \times m_i) \quad (1)$$

其中，TEQ是指总毒性排放当量，TP<sub>i</sub>点源i的毒性当量因子，m<sub>i</sub>表示点源的活动强度。

生命周期评价是汇总和评估一个产品(或服务)体系在整个生命周期的所有投入及产出对环境造成的和潜在的影响的环境管理工具<sup>[9]</sup>，人体毒性是其对环境主要指标之一。技术框架如图1所示<sup>[10]</sup>。

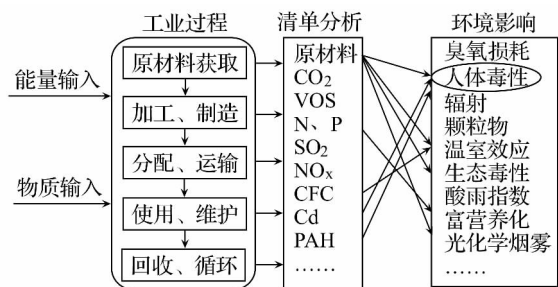


图1 点源的毒性当量计算方法

由图1可知，通过全生命周期分析可以得到单位产量的毒性排放当量，进而可以求出点源的总毒性当量；还可以建立毒性当量与单一排放物的定量关系，测定某一特定污染物来计算毒性排放当量，从而使人体毒性的计算变得容易，这是本方法的创新点之一。

对于目标区域，结合点源的地理信息(GIS)和区域物质流分析，扣除外输入和外输出后可得到该区域的毒性排放总量及其地理分布，如图2所示。

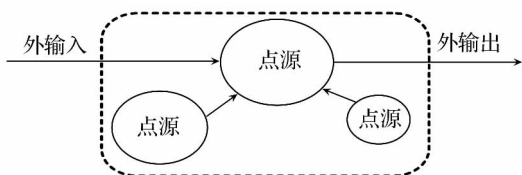


图2 区域毒性当量及分布的计算方法

本方法第二个创新点是，利用现有的大型数据库避免了海量的毒性测试，能够直接计算获得毒性排放当量。在数据库之外可以调研进行补充。

### 3 可行性分析

#### 3.1 毒性计算和测试简便可靠

任取某一化合物为基准物，按公式1进行计算可得到排放毒性当量。我国国家标准中采用HgCl<sub>2</sub>毒性当量，风险评价中ReCiPe方法采用1,4-二氯苯毒性当量<sup>[10]</sup>。由于排放毒性与排放污染物成正比，甚至指定任一污染物即可计算毒性排放当量。毒性测试方法也很成熟，从急、慢性毒性测试，到测试生物的代表性都进行了大量的研究和应用，甚至制定了相应的行业标准<sup>[11]</sup>。

#### 3.2 生命周期评价和区域物质流分析成熟可靠

生命周期评价方法已由国际化标准组织标准化(ISO140040)，并成功应用于产品环境性能的改进和公共政策的制定等诸多方面，如各类环境标志一般按照生命周期方法(ISO14020)设立的。物质流分析的理论基础是刚性的物料平衡，为系统中物质的流向和流量提供清楚的分析工具<sup>[12]</sup>，2001年欧盟统计局为物质流制定了一个方法指南。

#### 3.3 相关基础数据库丰富

美国国家环境保护局(EPA)提供了丰富的化合物毒性数据库(IRIS)<sup>[13]</sup>，免费向全球公开，毒性当量因子不需要测试也可以很容易计算出来。Ecoinvent是世界上最大最全的产品环境排放数据库<sup>[14]</sup>，非欧盟国家的教育机构可以免费使用，还有ELCD和USLCI等著名的数据库也可以免费使用。中国生命周期数据库(CLCD)中1/3是免费的且是基础性的<sup>[15]</sup>，中国第一次污染源普查和即将启动的第二次污染源普查报告中含各行各业的排放因子，全部是公开用免费的。此外，为了提高使用效率，不同机构还为上述数据库编写了应用软件，比较著名的有：Gabi, SimaPro, OpenLCA, Ebalance<sup>[16]</sup>。

### 4 管理应用

#### 4.1 确定行业和区域毒性排放分布

在带有地理信息的点源毒性排放基础上，定量计算毒性排放当量在行业分布，识别毒性贡献较大的行业，并确定这些行业的排放限值，为行业的毒性排放控制提供基础数据。也可以定量计算出毒性排放的区域分布，为功能区划和环境容量提供量化的科学依据。

#### 4.2 构建区域人体健康管理指标体系

在确定目标区域毒性排放较大的行业基础上，进一步识别起主要作用的排放因子及其贡献，构建以人体健康为目标的区域管理指标体系。

#### 4.3 制定区域人体健康的定量管控策略

基于区域人体健康管理指标体系，通过情景分析和

政策模拟,考察各种政策对区域毒性排放当量的影响,帮助管理层科学制定更有利于区域人体健康的管控政策。

## 5 研究小结

源头控制仍为根本性的污染防治措施。当前针对行业排放的管控指标分为单一指标和综合指标,这些指标在环境保护的过程中起到了非常重要的作用,但同时也显示了严重的缺陷。综合指标主要为 COD 和 BOD 等常规指标,用来指示各类耗氧有机物总量大小,在表征影响水体黑臭方面有重要作用,但是与影响人体健康的毒性大小关联性较弱。而且,不同行业的排水成分往往不同,相同 COD 的废水在毒性方面差别巨大,因此 COD 指标对于以人类健康为目的的管控并不科学。实际上,排水中往往还含有大量的其它污染物甚至未知污染物,而且多种污染物往往还产生协同和拮抗等复合毒性作用,因此,单一指标不能反映多种污染物之间的联合作用,难以作为简便有效的指标应用于源头污染的管控策略。毒性指标能够有效克服上述现行指标的不足,适用于难以提出特定污染物排放控制的要求,综合表征点源排放对环境生物的影响大小,是一种专门以人体健康为管控目标是科学方法。德国在排水水质比较复杂的有机化工、钢铁、印染等行业的排放标准中引入了综合毒性指标。目前我国污染物排放标准中对于综合毒性指标的应用还处于起步阶段。

以综合毒性为人体健康管控指标尚有诸多问题需要解决,本文从分析毒性足迹对于以人体健康为目标的污染源管控的重要性出发,基于生命周期数据库,构建了一条适合中国国情的目标区域人体毒性计算的简便途径,从方法论和数据库的角度,分析了实际操作的可行

性,最后进一步指出了基于毒性足迹的管理在确定区域和行业的毒性分布及构建人体健康的管理指标体系的重要意义。

## 参考文献:

- [1] 靳强,杨艳. 关于毒性排污权交易初探 [J]. 环境与可持续发展, 2016 (6): 7-8.
- [2] 任春,卢延娜,张虞等. 综合毒性指标在水污染物排放标准中的应用探讨 [J]. 工业水处理, 2014, 34(12): 4-7, 21.
- [3] GB 21903-2008, 发酵类制药工业水污染物排放标准 [S]. 北京: 国家质检总局, 2008.
- [4] UNEP/SETAC. USEtox 2. 0 Model (CP/DK). <http://www.usetox.org/>.
- [5] M. Nordborg, R. Arvidsson, G. Finnveden, et al. Updated indicators of Swedish national human toxicity and ecotoxicity footprints using USEtox 2. 01 [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2017 (62): 110-114.
- [6] T. Liu, Q. W. Wang, B. Su. A review of carbon labeling: Standards, implementation, and impact [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016 (53): 68-79.
- [7] L. Cucek, J. J. Klemes, P. S. Varbanov, et al. Significance of environmental footprints for evaluating sustainability and security of development [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2015, 17(8): 2125-2141.
- [8] 杜翠红,王中钰,陈景文等. 化学品足迹: 概念、研究进展及挑战. 生态毒理学学报, 2016, 11(2): 18-26.
- [9] ISO14040, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Brussels: European Committee for Standardisation, 2009.
- [10] M. Goedkoop, R. Heijungs, M. Huijbregts, et al. ReGiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level [R]. Netherlands: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, 2012.
- [11] 余若祯,穆玉峰,王海燕等. 排水综合评价中的生物毒性测试技术. 环境科学研究, 2014, 27(4): 390-397.
- [12] 张玲,袁增伟,毕军. 物质流分析方法及其研究进展. 生态学报, 2009 (11): 6189-6198.
- [13] United States Environmental Protection Agency (EPA). Integrated Risk Information System. <https://www.epa.gov/iris>.
- [14] The ecoinvent Association. Ecoinvent Database. <http://www.ecoinvent.org/home.html>.
- [15] 四川大学,亿科环境. 中国生命周期核心数据库 (CLCD). <http://www.ike-global.com/products-2/cled-intro>.
- [16] 郑秀君,胡彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展. 科技进步与对策, 2013 (6): 155-160.

## Environmental Management on Environmental Pollution Point Sources by Toxicity Footprint

JIN Qiang<sup>1,2</sup> LI Chen<sup>4</sup> LIU Lian<sup>3</sup> SU Ling-han<sup>3</sup> SHEN Zhemin<sup>1</sup> SHAN Aidang<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. China Institute of Urban Governance, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

3. Bengbu Environmental Monitoring Center, Bengbu 233040, Anhui China;

4. Bengbu's Bureau of Environmental Information, Bengbu 233040, Anhui China)

**Abstract:** Toxicity footprint is very suitable for indicating the regional environment of human health. Based on the basic databases of life cycle assessment, an easy-to-use framework was set up for calculating toxicity footprint of target region. The feasibility and importance of environmental management on toxicity footprint were also discussed.

**Keywords:** toxicity footprint; human health; environmental management; Life cycle thinking