

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20211109005

张璐莹, 于洋, 黄怡, 等. 典型高危害日化品的筛选及其水生生物预测无效浓度推导[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(3): 143-156

Zhang L Y, Yu Y, Huang Y, et al. Screening of typical high-hazard daily chemical products and derivation of their predicted no-effect concentration for aquatic organisms [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, 17(3): 143-156 (in Chinese)

## 典型高危害日化品的筛选及其水生生物预测无效浓度推导

张璐莹<sup>1,2</sup>, 于洋<sup>2,\*</sup>, 黄怡<sup>3</sup>, 王力明<sup>3</sup>, 郑玉婷<sup>2</sup>, 张丽丽<sup>2</sup>, 李晨男<sup>1</sup>, 高子竣<sup>1</sup>, 林军<sup>2</sup>, 于彩虹<sup>1,#</sup>

1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083

2. 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心, 北京 100029

3. 北京市污染源管理事务中心, 北京 100089

收稿日期: 2021-11-09 录用日期: 2021-12-27

**摘要:** 随着人们生活水平的提高, 众多日用化学品(以下简称日化品)走进家庭, 部分日化品中可能含有潜在致癌性、致突变性和生殖毒性的物质(CMR), 在方便生活的同时带来了污染, 也危害了人体健康。本文通过文献调研法与数据库检索法收集了包括国际香料组织香水成分清单、国际化妆品原料标准中文名称目录 2018(草)清单和食品用洗涤剂原料(成分)名单(第一批)(草)在内的 8 类日化品成分清单, 通过与高关注物清单、致癌物清单和内分泌干扰物(EDCs)清单等进行名录比对筛选, 识别出典型高危害污染物邻苯二甲酸二丁酯(DBP)。DBP 作为广泛使用的增塑剂、软化剂等, 多应用于化妆品、洗涤用品中, 对环境和生物体具有潜在危害。本研究通过收集整理 DBP 对我国水生生物的急、慢性毒性数据, 开展了危害数据质量评估。评估结果表明, 在调研的 23 篇文献以及数据库数据中, 共计 41 条有效数据满足评估要求。采用物种敏感度分布法(SSD)获得通过质量评估的全部物种、鱼类和藻类的 5% 物种危害浓度(HC<sub>5</sub>)值, 其中正态分布模型得到的 HC<sub>5</sub> 值分别为 0.59、1.97 和 0.42 mg·L<sup>-1</sup>; 逻辑斯蒂分布模型得到的 HC<sub>5</sub> 值分别为 0.63、2.08 和 0.23 mg·L<sup>-1</sup>。应用评估系数法估算出全部物种、鱼类和藻类的预测无效浓度(PNEC)值分别为 0.118、0.394 和 0.046 mg·L<sup>-1</sup>。研究表明, DBP 对不同种类水生生物 PNEC 值存在差异, 其中藻类相对敏感。本研究基于现有数据完成, 以期对 DBP 的环境风险评估及水质基准建立提供科学依据。

**关键词:** 日用化学品; 邻苯二甲酸二丁酯(DBP); 数据质量评估; 物种敏感度分布(SSD); 预测无效浓度(PNEC)

文章编号: 1673-5897(2022)3-143-14 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

## Screening of Typical High-hazard Daily Chemical Products and Derivation of Their Predicted No-effect Concentration for Aquatic Organisms

Zhang Luying<sup>1,2</sup>, Yu Yang<sup>2,\*</sup>, Huang Yi<sup>3</sup>, Wang Liming<sup>3</sup>, Zheng Yuting<sup>2</sup>, Zhang Lili<sup>2</sup>, Li Chennan<sup>1</sup>, Gao Zijun<sup>1</sup>, Lin Jun<sup>2</sup>, Yu Caihong<sup>1,#</sup>

1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China

2. Solid Waste and Chemicals Management Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China

3. Beijing Municipal Pollution Source Management Center, Beijing 100089, China

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31471803); 国家重点研发计划(2016YFD0200208, 2017YFD0800701)

第一作者: 张璐莹(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为化学品环境风险评估, E-mail: 578232419@qq.com

\* 通讯作者( Corresponding author), E-mail: yuyang@meescc.cn

# 共同通讯作者( Co-corresponding author), E-mail: caihongyu@cumb.edu.cn

Received 9 November 2021      accepted 27 December 2021

**Abstract:** With the improvement of people's living standard, many daily-use chemicals (hereinafter referred to as daily chemicals) have entered households, and some of them may contain potentially carcinogenic, mutagenic and reproductive toxic substances (CMR), which bring pollution and endanger human health while facilitating life. In this paper, the composition lists of 8 types of daily chemical products, including the International Fragrance Organization perfume composition list, the International Standard for Cosmetic Ingredients 2018 (d.) Chinese name list, and the detergent raw materials (ingredients) list for food (first batch) (d.), were collected by literature research method and database search, and compared with the list of substances of high concern, the list of carcinogens, and the list of endocrine disruptors (EDCs), etc. DBP is widely used as plasticizers and softeners in cosmetics and detergents, and is potentially harmful to the environment and living organisms. In this study, a hazard data quality assessment was conducted by collecting and collating data on the acute and chronic toxicity of DBP to aquatic organisms in China. The assessment results showed that a total of 41 valid data met the assessment requirements in the 23 literatures studied as well as in the database. The  $HC_5$  values for all species, fish and algae derived by the data that passed the quality assessment were obtained using the species sensitivity distribution (SSD) method, where the  $HC_5$  values obtained from the normal distribution model were 0.59, 1.97 and 0.42  $mg \cdot L^{-1}$ , respectively; the  $HC_5$  values obtained from the logistic distribution model were 0.63, 2.08 and 0.23  $mg \cdot L^{-1}$ , respectively. The PNECs were estimated by applying the evaluation factor method to be 0.118, 0.394 and 0.046  $mg \cdot L^{-1}$  for all species, fish and algae, respectively. The study showed that there were differences in the PNEC values of DBP for different species of aquatic organisms, among which algae were relatively more sensitive to DBP. This study was done on the basis of available data to provide a scientific basis for environmental risk assessment of DBP and establishment of water quality benchmarks.

**Keywords:** daily-use chemicals; dibutyl phthalate (DBP); data quality assessment; species sensitivity distribution (SSD); predicted no-effect concentration (PNEC)

日化品给人们生活带来极大便利的同时,也对生态环境与人体健康造成了潜在的危害。例如,洗涤剂中含有表面活性剂和助剂,其中三聚磷酸盐(STPP)是最理想的助剂,其在水体富营养化进程中,起到了一定的促进作用。1970年日本琵琶湖等封闭水域由于水中磷酸盐含量超过正常值,水体富营养化,出现了水藻疯长、鱼类死亡的现象。20世纪80年代以后我国湖泊、水库等水域也普遍受到磷、氮等物质的污染,水域生态系统遭到破坏,鱼类和贝类大量死亡,从而影响了人类生活<sup>[1]</sup>。目前世界上约有7000多种化学物质作为化妆品的原料,其中最常见的化学毒物为汞、铅、砷、甲醇及雌激素等,能引起皮肤功能障碍的原料中最危险的是香料,其次为色素和防腐杀菌剂<sup>[2]</sup>。这些以原料和添加剂作为化妆品组分的化学物质,大多为人工合成,可能对人体产生一定的急、慢性危害,如可使人体过敏、刺激皮肤黏膜等,甚至不乏诱发人体疾病的物质,以至潜在的致癌性、致突变性和生殖毒性的物质(carcino-

genic, mutagenic or substances toxic to reproduction, CMR)类物质。据调查显示,染发剂中均含有20余种化学成分,其中有10种会引起人体细胞突变而致癌,这也是导致近年来国内中老年急性白血病患者显著增多的原因之一。

欧盟化学品管理法规(Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals, REACH),将CMR类物质划分为有毒有害物质<sup>[3]</sup>。部分日化品,例如洗涤剂、清洁用产品、油漆去除剂、香皂和沐浴露等制剂产品中均可能存在含有CMR类物质的风险,这类物质的长期大量使用会对环境和健康带来直接或间接的危害。因此,如何对CMR类日化品进行筛选评估并加以管控十分重要。

本研究基于文献调研法及数据库检索法,收集了8类日化品成分清单,包括国际香料组织香水成分清单、国际化妆品原料标准中文名称目录清单和食品用洗涤剂原料(成分)清单等。通过与欧洲化学品管理局(ECHA)最新发布的高关注物质清单、国际

癌症研究机构(IARC)的致癌物清单、法国国家科学研究中心(CNRS)的CMR类物质清单和内分泌干扰物清单进行比对筛选,识别出一种典型高危害CMR类物质。通过数据质量评估开展高质量数据筛选,采用物种敏感度分布法(SSD)构建该物质对各物种的敏感度曲线,计算出5%物种危害浓度(HC<sub>5</sub>)值,进而应用评估系数法推导出各物种的预测无效应浓度(PNEC)值,评估该污染物对水生生物的危害,以期为我国典型高危害日化品的环境风险评估和水质基准的建立提供参考。

## 1 研究方法(Research methodology)

### 1.1 高危害日化品清单的建立及筛选

#### 1.1.1 高危害日化品清单的建立

本研究采用文献调研法以及数据库检索法,收集各类日化品成分清单为后续筛选工作提供数据支撑。

#### 1.1.2 高危害日化品清单的筛选

本研究筛选的是同时具有CMR和内分泌干扰物(EDC)特性的,可能会对人体健康带来潜在危害的高危害日化品。我国任幸等<sup>[4]</sup>利用基于风险的Football组合法对15种农用地酞酸酯类内源污染物进行筛选,发现邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、邻苯二甲酸二(2-乙己基)酯(DEHP)等5种酞酸酯类污染物可能会对生态环境和人体健康造成风险。朱晓晶等<sup>[5]</sup>等运用Copeland计分排序法和证据权重法对50种有毒有害大气污染物开展危害特性优先性排序。张丽丽等<sup>[6]</sup>采用两步筛选法,筛选出高分值的污染物名单,进而形成包括苯、环氧乙烷等在内的12种污染物优控名录。以上学者在筛选高危害污染物时的方法虽然不完全相同,但关注的筛选指标均为致癌性、致突变、生殖毒性和内分泌干扰性等,且都是通过名录对比法得到筛选结果。

本研究利用EXCEL筛选重复值工具进行名录对比,首先将8类日化品成分清单中带有CAS号的有效物质信息与ECHA最新发布的高关注物质(SVHC)清单和IARC的1类致癌物清单中的有效物质信息进行比对筛选,得到一个CMR类物质的初筛清单。为保证筛选结果更为准确,将上述初筛清单与法国国家科学研究中心化学研究院的化学品防范(PRC)管理部门发布的CMR类物质清单对照,重复以上筛选操作,得到进一步明确的物质清单。最后,再与内分泌干扰物物质清单进行筛选,识别出一个典型高危害CMR类物质。

### 1.2 水生生物毒性数据的获取和筛选

#### 1.2.1 水生生物毒性数据的获取

本研究从国内外公开发表的文献和报告中收集典型高危害日化品对水生生物的急、慢性毒性数据。当同一物种存在多组数据时,选择最敏感试验终点的的数据。

毒性数据指标包括物种种类、拉丁文名称、测试标准、介质、测试时间、毒性终点、毒性值、数据来源和数据年份等内容。其中,水生生物种类优先采用藻类、溞类和鱼类3个营养级的毒性数据。急性毒性数据选择暴露时间96 h以内的LC<sub>50</sub>或EC<sub>50</sub>数据,其中鱼类选择96 h的数据,溞类选择48 h的数据,藻类选择72 h或96 h的数据;慢性毒性数据选择暴露时间最长的无可见效应浓度(NOEC)以及最低有影响浓度(LOEC)。

#### 1.2.2 水生生物毒性数据的筛选

本研究应用Klimisch等<sup>[7]</sup>于1997年提出的生态毒理试验可靠性评估一级及二级数据信息表,对所收集到的毒性数据进行数据质量评估。根据表中21个评估因素对文献进行打分,通过总分将文献划分为非常可靠、可靠和不可靠3个等级,总分在18~21分为非常可靠;13~17分为可靠;<13分为不可靠,进而筛选出可供后续使用的高质量数据,具体评估信息如表1所示。

对于收集到的所有生态毒理学终点数据,首先剔除存在支撑信息不充分、测试明显不规范等情形的无效数据。对于有效数据中的所有生态毒理学数据进行质量评估,筛选满足质量要求的数据。选用最敏感物种数据作为关键效应数据,明确评估高危害典型日化品对水环境生物的危害性。

### 1.3 HC<sub>5</sub>值的计算

本研究通过数据库检索法和文献调研法收集了典型高危害日化品的毒性数据,利用数据质量评估开展高质量数据筛选,采用SSD法构建该物质对全部物种、鱼类、藻类和浮游动物的敏感度曲线,计算出3个类别水生生物的HC<sub>5</sub>值。

SSD曲线的拟合采用国家生态环境基准委员会于2021年研制开发的“国家生态环境基准计算软件物种敏感度分布法”(EEC-SSD)来完成,以此计算出HC<sub>5</sub>。EEC-SSD主要用于毒性数据的物种敏感度分布拟合,软件涵盖的拟合模型包括正态分布、对数正态分布、逻辑斯蒂分布和对数逻辑斯蒂分布4个模型。由于HC<sub>5</sub>更具有统计学意义,故一般

表1 生态毒理试验可靠性评估表

Table 1 Factors for reliability assessment of ecotoxicological tests

数据质量评估因素	
Data quality assessment factors	
试验 Test	
作者 Author	
题目 Title	
测试机构、年份、委托方或参考文献 Testing institution, year, client, or references	
GLP 遵从情况 GLP compliance	
遵从(类似)测试标准 Comply with (similar) test standards	
测试终点 Test endpoint	
文献类型(测试报告、发表文章、风险评估、详细试验总结及其他) Type of literature (test reports, published articles, risk assessments, detailed test summaries, and others)	
标准 Standard	
	* 测试物质是否为评价物质本身(化学名称、分子式、CAS 号等)? * Whether the test substance is the evaluation substance itself (chemical name, molecular formula, CAS number, etc.)?
组 I : 测试物质鉴别 Group I : Test substance identification	是否给出测试物质的纯度? Is the purity of the tested substance given? 是否给出测试物质的出处/来源信息? Is the source/source information of the tested substance given? 是否给出测试物质不可或缺的自然特性和/或物化性质? Are the essential natural and/or physical properties of the substance under test given?
	* 是否列出测试的物种? * Are species tested listed?
组 II : 试验物种表征 Group II : Experimental species characterization	是否列出测试物种的性别?(若不适用直接给分) Is the sex of the tested species listed? (score directly if not applicable) 是否列出测试物种的详细信息和/或为何选用此品种? Are details of the species tested and/or why this species was selected listed? 测试物种的年龄和/或体质量是否列出? Are age and/or weight of test species listed? 是否列出试验动物驯养和/或喂食情况? Is the domestication and/or feeding of laboratory animals listed?
	* 是否列出暴露方式(静态、半静态、流水式)? * Is the exposure mode listed (static, semi-static, flow)?
	* 是否列出测试体系中的暴露浓度(或说明未测定的原因)? * Is the exposure concentration in the test system listed (or why it is not measured)?
组 III : 试验设计表述 Group III : Trial design presentation	* 是否列出暴露时间和观察时间点? * Are exposure and observation time points listed? * 是否包括阴性对照和/或阳性对照(如需要)? * Are negative and/or positive controls included (if required)? * 是否列出每组试验的动物数或接种数量? * Is the number of animals or inoculations in each group listed? 是否列出必要的测试条件信息? Is the necessary test condition information listed? 浓度是否通过分析验证或稳定性是否合理保持? Is the concentration analytically validated or is stability reasonably maintained?

续表1

数据质量评估因素	
Data quality assessment factors	
组IV: 试验结果 Group IV: Test results	测试终点和其分析方法是否阐述清晰? Are the end points and analysis methods clearly stated? 所有测试终点相关的试验结果描述是否透明和完整? Are the descriptions of test results related to all test endpoints transparent and complete? 是否给出数据分析的统计方法(如不必要或不适用请直接给分)? Are statistical methods for data analysis provided (please give marks directly if unnecessary or not applicable)?
组V:试验设计和 结果的合理性 Group V: Experimental design and rationality of results	* 实验设计对于旨在获得的数据是否合适? * Is the experimental design appropriate for the data to be obtained? 定量测试方法是否可靠 Whether the quantitative test method is reliable
备注 Remarks	1. 每条标准赋分分值均为1分 Each criterion is assigned a score of 1 point 2. *代表达到1或2级评分的最大分数来源 * Represents the maximum source of points to achieve a score of 1 or 2 3. 18~21分为非常可靠;13~17分为可靠;<13分或若不满足所有的*标准为不可靠 18~21 score is very reliable; 13~17 is reliable; <13 points or unreliable if all * criteria are not met

选用 $HC_5$ 作为最大有害环境浓度<sup>[8]</sup>。在数据量上的选择,一般认为控制数据量在10~15个随机选择量就能符合统计分析的要求,此时数据变异性较小。这些数据常要求覆盖3个营养级8个分类群,并选用标准毒性测试物种,数据过少(少于5个)或是数据质量差(多个物种的毒性数据相同),都可能导致拟合度的降低。另外,数据并非越多越好,数据越多 $HC_5$ 就会越小,这是不合理的<sup>[9]</sup>。

#### 1.4 预测无效应浓度的推导

水环境危害表征通常采用统计外推法或评估系数法,推导水环境中生物的PNEC。对于不同方法获得的不同PNEC值,应予以比较分析,确定用于适合水环境危害表征的PNEC值。

本研究获得的水生生物毒性数据充分且满足评估系数法对数据的基本要求,故采用评估系数法推导PNEC值。该方法由危害识别确定的水环境生物的生态毒理学关键效应数据( $HC_5$ )除以评估系数( $AF_{water}$ )推算得出PNEC值,由于数据来自实验室,实验物种单一,具有较好的保守性。具体见公式(1)。

$$PNEC_{water} = HC_5 / AF_{water} \quad (1)$$

式中: $PNEC_{water}$ 为水环境生物的预测无效应浓度( $mg \cdot L^{-1}$ ); $HC_5$ 为水环境生物的生态毒理学关键效应值,通常采用最敏感物种的半数致死浓度( $LC_{50}$ )、效应浓度( $EC_{50}$ 或 $EC_{10}$ )或无观察效应浓度(NOEC)及最低有影响浓度(LOEC)等( $mg \cdot L^{-1}$ ); $AF_{water}$ 为评

估系数,取值范围为1~5。 $AF_{water}$ 的取值根据可获得毒性数据的质量、涉及生物物种的代表性和多样性等情况选择确定,无量纲。根据生态风险评价中“最坏情况”(The Worstcase)原则,该研究中 $AF_{water}$ 值取5。

## 2 结果与分析 (Results and analysis)

### 2.1 初筛清单的建立及筛选

通过数据库检索法收集了8类日化品成分清单,共28 515条物质信息,仅选用具有CAS号的15 201条有效物质信息(以下简称有效信息)供后续名录对比使用,如表2所示。其中包括国际香料组织(IFRA)香水成分清单共3 963条物质信息;国际化妆品原料标准中文名称目录2018(草)清单共24 039条物质信息,其中10 741条有效信息;食品用洗涤剂原料(成分)名单(第一批)(草)共122条信息,其中120条有效信息;抗(抑)菌剂有效成分清单2019(草)96条物质信息,其中95条有效信息;消毒剂原料清单及禁限用物质名单共203条物质信息,其中190条有效信息;通过查询口腔卫生用品成分表、洗发用品成分表、洗衣用品成分表,形成了3类日化品的成分清单,共92条物质信息,均为有效信息,如表2所示。

ECHA最新的高关注物质(SVHC)清单共440条物质信息,其中390条有效信息;IARC致癌物清单共1 112条物质信息,其中包括1类、2A类、2B

类以及3类致癌物有效信息共1 029条,仅选取1类致癌物的121条物质信息,其中60条有效信息;法国国家科学研究中心化学研究院的化学品防范

(PRC)管理部门CMR类物质清单共1 238条物质信息;内分泌干扰物物质清单共688条物质信息,其中620条有效信息,如表3所示。

表2 日化品清单初筛表

Table 2 Preliminary screening list of daily chemical products

清单名称 List name	物质信息总数 Total amount of material information	有效物质信息总数(有CAS号) Total number of active substance information (with CAS number)
国际香料组织(IFRA)香水成分清单 International Fragrance Association (IFRA) perfume ingredients list	3 963	3 963
国际化妆品原料标准中文名称目录2018(草)清单 International cosmetic raw materials standard Chinese name directory 2018 (draft) list	24 039	10 741
食品用洗涤剂原料(成分)名单(第一批)(草) Detergents for food raw materials (ingredients) list (the first batch) (draft)	122	120
抗(抑)菌剂有效成分清单2019(草) List of active ingredients of anti bacterial agents 2019 (draft)	96	95
消毒剂原料清单及禁限用物质名单 Disinfectant raw material list and the list of prohibited and restricted substances	203	190
口腔卫生用品成分表 Oral hygiene products composition table	37	37
洗发用品成分表 Shampoo products ingredients list	26	26
洗衣用品成分表 Laundry products ingredients list	29	29
总计 Total	28 515	15 201

表3 4类筛选条件物质信息表

Table 3 Material information sheet of 4 categories of screening conditions

清单名称 List name	物质信息总数 Total amount of material information	有效物质信息总数(有CAS号) Total number of active substance information (with CAS number)
欧洲化学品管理局(ECHA)高关注物质(SVHC)清单 European Chemicals Agency (ECHA) list of substances of very high concern (SVHC)	440	390
国际癌症研究机构(IARC)1类致癌物清单 International Agency for Research on Cancer (IARC) list of group 1 carcinogens	121	60
法国国家科学研究中心(CNRS)CMR类物质清单 List of substances in the CMR category of the French National Center for Scientific Research (CNRS)	1 238	1 238
内分泌干扰物清单(EDCs) List of endocrine disruptors (EDCs)	688	620
总计 Total	2 487	2 308

将8类日化品成分清单与SVHC清单和IARC的1类致癌物清单中的有效物质信息进行比对筛选,得到一个CMR类物质的初筛清单。为保证筛选结果更为准确,将上述初筛清单与法国CNRS的CMR类物质清单对照重复以上筛选操作,得到进一

步明确的物质清单。最后,再与内分泌干扰物物质清单进行筛选,最终得到邻苯二甲酸丁苄酯(BBP)、1,2-二氯乙烷、N-甲基吡咯烷酮、邻苯二甲酸二(2-乙基己)酯(DEHP)、乙二醇甲醚、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)和酚酞7种1类CMR类物质,如图1所示。

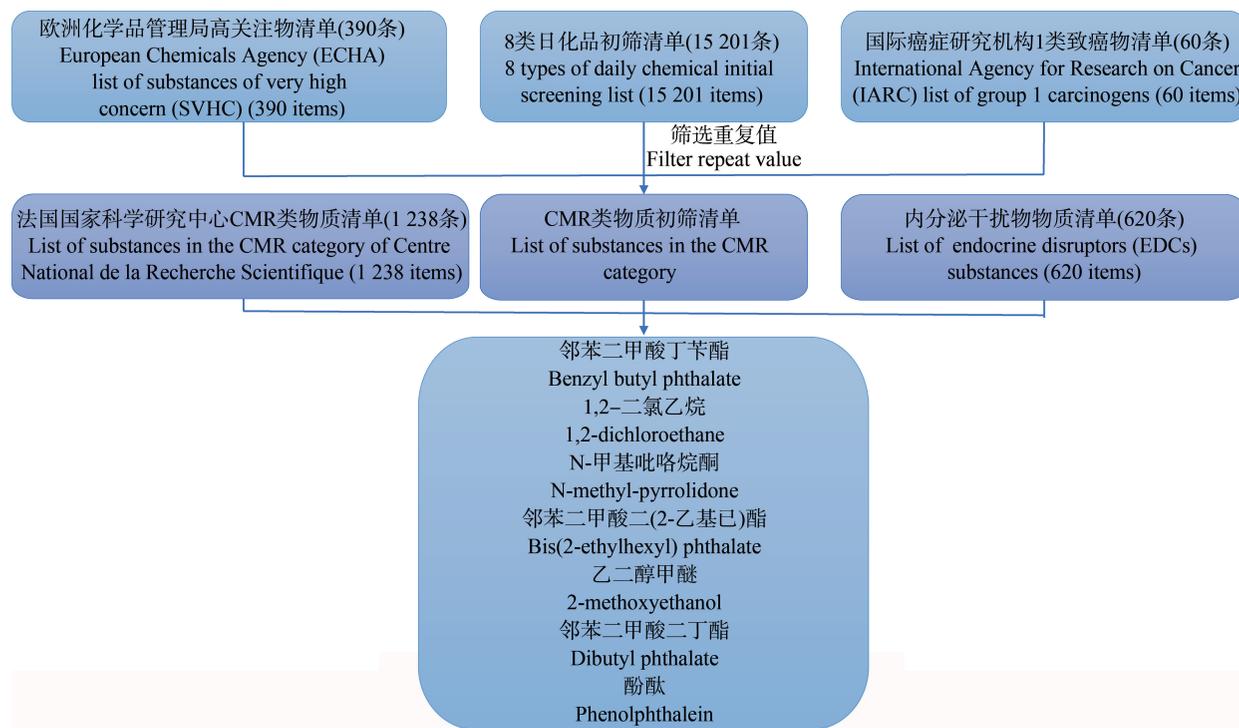


图1 典型高危害日化品筛选流程图

Fig. 1 Screening flow chart of typical high-hazard daily chemical products

对以上7种CMR类物质近10年的文献发表数量进行统计,结果表明有关酚酞的文献发表量最高,但其环境风险评估方面的文献量几乎为零,或因为其环境浓度较低或不造成生态危害。其次是邻苯二甲酸酯类(PAEs),包括BBP、DEHP和DBP这3种物质,相对于BBP和DEHP,DBP在总文献发表量与环境风险评估方面的文献发表量都较高,如图2所示。又因其是一种新污染物,将是今后的研究热点及重点治理管控对象之一,故本文选择DBP作为研究对象。

## 2.2 数据质量评估

通过文献调研法收集到23篇相关文献,其中,中文文献10篇,英文文献13篇,共计151条数据,根据所需毒性数据信息进一步在文献中提取有效信息。通过数据库检索法分别从ECHA数据库<sup>[10]</sup>、EPA-ECOTOX数据库<sup>[11]</sup>中收集到共计24条数据,均视为有效数据。通过对比表1中21项评估因素,

对该23篇文献进行数据质量评估,得到非常可靠文献10篇(18~21分),可靠文献5篇(13~17分),不可靠文献8篇(<13分)。上述文献共得到52条相关数据,通过数据质量评估最终得到17条有效数据,而满足数据质量要求的数据库数据24条,合计41条有效数据。

根据PNEC值对数据的要求,对41条评估数据进一步筛选,最终筛选出满足生物毒性数据要求的17个物种的急性数据,如表4所示。17个物种分为三大类,即鱼类、藻类和浮游动物。其中鱼类包含4种即三角鲂(*Megalobrama terminalis*)、斑马鱼(*Danio rerio*)、红鳍笛鲷(*Lutjanus erythropterus*)和大黄鱼(*Larimichthys crocea*);藻类包含9种即斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)、埃氏小球藻(*C. emersonii*)、蛋白核小球藻(*C. pyrenoidosa*)、近具刺栅藻(*S. subspicatus*)、羊角月牙藻(*Selenastrum capricornutum*)、短裸甲藻(*Gymnodinium breve*)、巴夫杜氏藻(*D. parva*)、

蒙古裸腹藻(*Moina mongolica* Daday)和三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum* Bohlin);浮游动物包含 2 种即多刺裸腹溞(*Moina macrocopa*)、大型溞(*Daphnia magna*)。全部物种 LC<sub>50</sub>/EC<sub>50</sub> 的范围为 0.28 ~ 13 mg · L<sup>-1</sup>, 鱼类 LC<sub>50</sub>/EC<sub>50</sub> 的范围为 2.08 ~ 8.51 mg · L<sup>-1</sup>, 藻类 LC<sub>50</sub>/EC<sub>50</sub> 的范围为 0.28 ~ 13 mg · L<sup>-1</sup>, 浮游动物 LC<sub>50</sub>/EC<sub>50</sub> 的范围为 9.68 ~ 10.35 mg · L<sup>-1</sup>。

### 2.3 HC<sub>5</sub> 值的计算

本研究分别通过正态分布模型和逻辑斯蒂分布模型,对 17 个水生生物物种的毒性数据进行拟合及分析,得到基于急性毒性的物种敏感度分析曲线,如图 3 所示。由于 SSD 模型要求每组样本数据量在 5 ~ 500 个范围内,而浮游动物的数据量仅有 2 个,不满足 SSD 曲线的要求,因此未对浮游动物拟合 SSD 曲线。

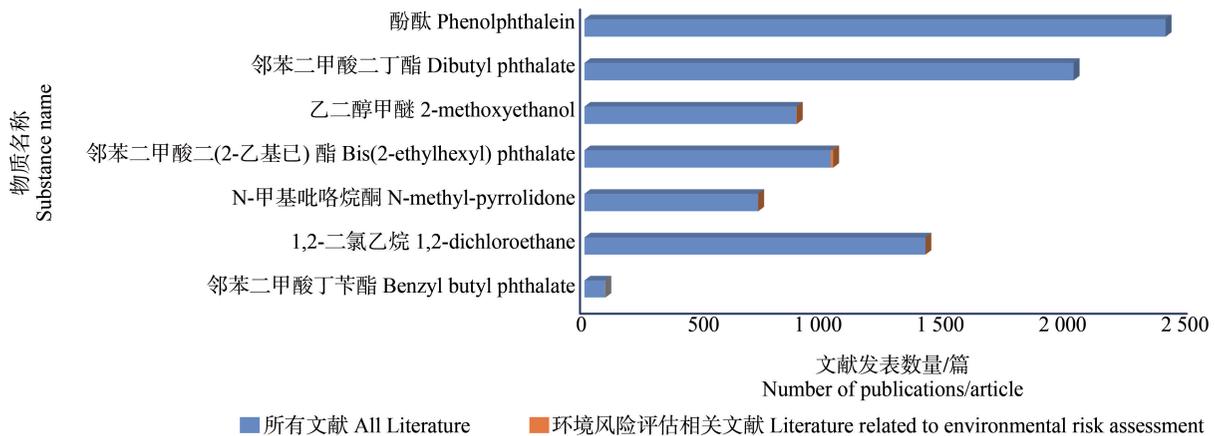


图 2 7 种致癌、致突变和致生殖毒性 (CMR) 类物质近 10 年的文献发表数量  
Fig. 2 Number of literature publications for seven carcinogenic, mutagenic or toxic to reproduction (CMR)-like substances in the last decade

表 4 邻苯二甲酸二丁酯 (DBP) 对水生生物的毒性数据

Table 4 Toxicity data of dibutyl phthalate (DBP) to aquatic organisms

生物分类 Biological classification	物种中文名/物种拉丁名 Chinese name of the species/ Latin name of the species	毒性值 Toxicity value LC <sub>50</sub> /EC <sub>50</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	试验时间/h Time duration/h	数据来源 Data sources
鱼类 Fish	三角鲂 <i>Megalobrama terminalis</i>	2.08	96	[12]
	红鳍笛鲷 <i>Lutjanus erythropterus</i>	6.66	96	[13]
	虹鳟 <i>Salmo gairdneri</i>	6.47	96	[14]
	斑点叉尾 <i>Ictalurus punctatus</i>	2.91	96	[15]
	斑马鱼 <i>Brachydanio rerio</i>	8.51	96	[15]
	大黄鱼 <i>Larimichthys crocea</i>	5.23	96	[16]
藻类 Alga	斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i>	2.21	96	[17]
	埃氏小球藻 <i>C. emersonii</i>	2.78	96	[18]
	蛋白核小球藻 <i>C. pyrenoidosa</i>	13	96	[19]
	近具刺栅藻 <i>S. subspicatus</i>	3.5	72	[20]
	羊角月牙藻 <i>Selenastrum capricornutum</i>	0.4	72	[18]
	短裸甲藻 <i>Gymnodinium breve</i>	0.6	96	[21]
	巴夫杜氏藻 <i>D. parva</i>	0.28	72	[22]
	蒙古裸腹藻 <i>Moina mongolica</i> Daday	6.34	72	[23]
浮游动物 Zooplankton	三角褐指藻 <i>Phaeodactylum tricornutum</i> Bohlin	7.5	96	[24]
	多刺裸腹溞 <i>Moina macrocopa</i>	9.68	48	[25]
	大型溞 <i>Daphnia magna</i>	10.35	48	[26]

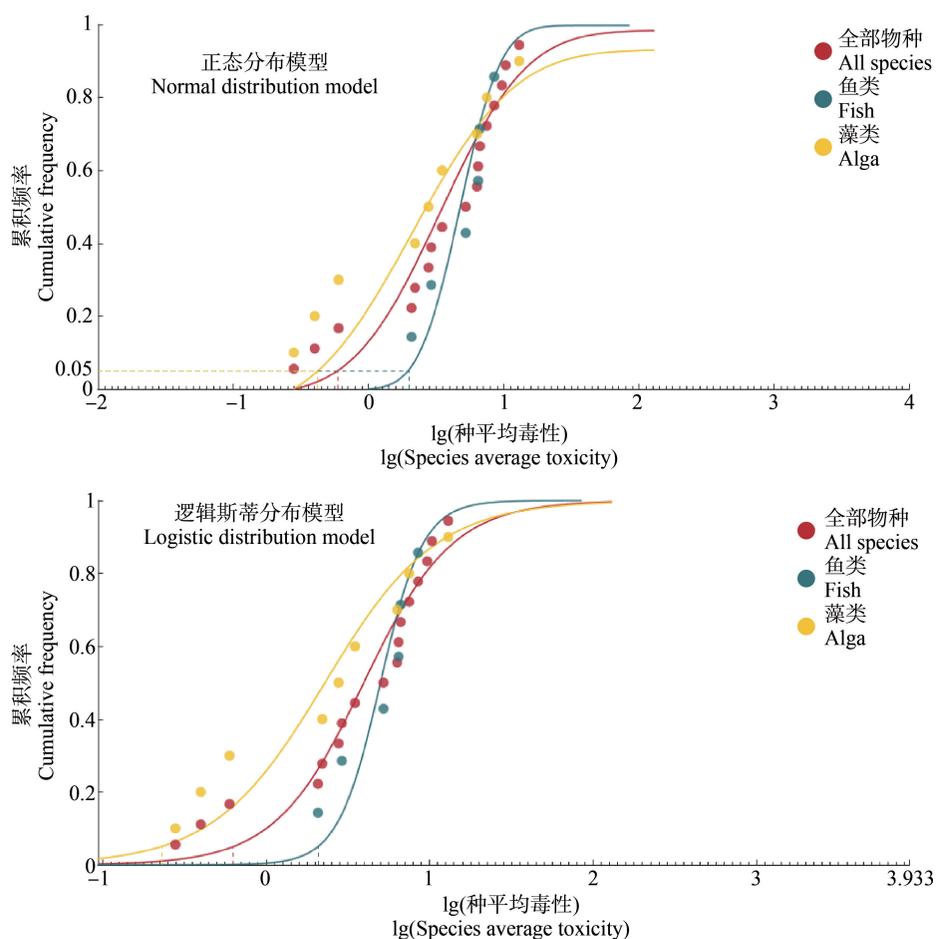


图3 邻苯二甲酸二丁酯(DBP)对不同物种的物种敏感度分布(SSD)曲线

Fig. 3 Species sensitivity distribution (SSD) curves of dibutyl phthalate (DBP) for different species

毒性值的高低对DBP在不同物种体内的累积频率具有一定影响。如图3所示,当毒性值较低时( $<0.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),不同物种对DBP的累积频率由高到低的顺序依次为:藻类>全部物种>鱼类,表明藻类对DBP的敏感度高于其他物种;当毒性值在 $0.79 \sim 0.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间时,不同物种对DBP的累积概率由高到低的顺序依次为:藻类>鱼类>全部物种,藻类的敏感度仍处于最高,但鱼类的敏感度有所变化,高于了全部物种;当毒性值 $>0.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,不同物种对DBP的累积频率由高到低的顺序依次为:鱼类>全部物种>藻类,表明鱼类对DBP的敏感度高于藻类,全部物种则上升到第二位。可见当DBP的毒性值浓度较低时,在藻类体内的累积频率较高,但当其毒性值逐渐升高时,其在鱼类体内的累积频率逐渐升高。综上结果表明,当毒性值较高时,相对藻类来说,DBP在鱼类体内更容易累积。

采用正态分布模型和逻辑斯蒂分布模型拟合出SSD曲线,可见以上2种方法获得了较为一致的结

果。其中,正态分布模型中全部物种的 $\text{HC}_5$ 值为 $0.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,逻辑斯蒂模型中的 $\text{HC}_5$ 值为 $0.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;正态分布模型中鱼类的 $\text{HC}_5$ 值为 $1.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,逻辑斯蒂模型中的 $\text{HC}_5$ 值为 $2.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;正态分布模型中藻类的 $\text{HC}_5$ 值为 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,逻辑斯蒂模型中的 $\text{HC}_5$ 值 $0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。SSD曲线拟合参数如表5和表6所示。全部物种的拟合度( $R^2$ )始终保持在0.9以上;鱼类的 $R^2$ 均在0.8以上,但未超过0.9;藻类 $R^2$ 处于0.85~0.92之间。

#### 2.4 预测无效应浓度

根据公式(1)通过 $\text{HC}_5$ 及 $\text{AF}_{\text{water}}$ 推导PNEC。由于正态分布模型和逻辑斯蒂分布模型拟合SSD曲线,可得出2组包含全部物种、鱼类和藻类的 $\text{HC}_5$ 值,基于保守原则,本研究 $\text{HC}_5$ 选择2组数据中较低的值。PNEC结果如表7所示。

如表6所示,不同物种的PNEC由低到高顺序依次为:藻类<全部物种<鱼类。在2类不同物种之

表 5 正态分布模型模拟 SSD 曲线关键拟合参数

Table 5 Key fitting parameters of SSD curve simulated by normal distribution model

样本 Sample	样本数 Sample size	HC <sub>5</sub> / (mg·L <sup>-1</sup> )	拟合度(R <sup>2</sup> ) R-squared (R <sup>2</sup> )	均方根误差(RMSE) Root mean square error (RMSE)	P (K-S)
全部物种 All species	17	0.59	0.914705	0.079487	>0.05
鱼类 Fish	6	1.97	0.841428	0.097153	>0.05
藻类 Alga	9	0.42	0.865597	0.094658	>0.05

表 6 逻辑斯蒂分布模型模拟 SSD 曲线关键拟合参数

Table 6 Key fitting parameters of SSD curve simulated by Logistic distribution model

样本 Sample	样本数 Sample size	HC <sub>5</sub> / (mg·L <sup>-1</sup> )	拟合度(R <sup>2</sup> ) R-squared (R <sup>2</sup> )	均方根误差(RMSE) Root mean square error (RMSE)	P (K-S)
全部物种 All species	15	0.63	0.943675	0.064592	>0.05
鱼类 Fish	6	2.08	0.836611	0.098618	>0.05
藻类 Alga	9	0.23	0.910280	0.077339	>0.05

表 7 不同种类水生生物体的预测无效应浓度(PNEC)推算结果

Table 7 Predicted no effect concentration (PNEC) results of different aquatic organisms

种类 Species	HC <sub>5</sub> (mg·L <sup>-1</sup> )	PNEC (mg·L <sup>-1</sup> )
全部物种 All species	0.59	0.118
鱼类 Fish	1.97	0.394
藻类 Alga	0.23	0.046

间,藻类的 PNEC 最小,数值为 0.046 mg·L<sup>-1</sup>,鱼类的 PNEC 最大,数值为 0.394 mg·L<sup>-1</sup>。PNEC 结果表明,DBP 对不同物种的 PNEC 存在差异,鱼类与全部物种的 PNEC 较接近,与藻类的 PNEC 相差较大。

### 3 结论与讨论(Conclusion and discussion)

#### 3.1 结论

本研究通过收集国际香料组织(IFRA)香水成分清单在内的 8 类日化成分清单,共得到 15 201 条有效物质信息。将以上物质信息与高关注物清单、致癌物清单以及内分泌干扰物清单等进行比对筛选,得到邻苯二甲酸丁苄酯(BBP)、1,2-二氯乙烷、N-甲基吡咯烷酮和邻苯二甲酸二丁酯(DBP)在内的 7 种 1 类 CMR 类物质。通过文献检索,统计结果表明 DBP 在总发文量与环境风险评估方面的发文量都相对较高,又因其是一种新污染物,故选择 DBP 作为本文研究对象。

通过数据质量评估,筛除了不可靠文献,得到 15 篇高质量文献,最终获得包括数据库有效数据在内的 17 个物种的急性毒性数据,共计 41 条物质信息。可见数据质量评估对于推导典型有毒有害化学物质的 PNEC 具有十分重要的意义。

正态分布模型和逻辑斯蒂分布模型拟合结果表明,2 种模型拟合出的 SSD 曲线变化趋势相似,即 DBP 对水生生物的 HC<sub>5</sub> 值较为接近。全部物种的 PNEC 值为 0.118 mg·L<sup>-1</sup>、鱼类的 PNEC 值为 0.394 mg·L<sup>-1</sup>、藻类的 PNEC 值为 0.046 mg·L<sup>-1</sup>。全部物种与鱼类的 PNEC 值相近,与藻类存在较大差异,得出 DBP 对藻类的敏感度最高,对鱼类的敏感度相对较低。

#### 3.2 讨论

本研究使用物种敏感度分布法基于 EEC-SSD 模型推导出 DBP 的 PNEC 值,所用数据涉及了鱼类、藻类和浮游动物 3 个营养层级生物在内的 17 个物种,减少了单独使用某一类生物数据推导的不确定性。且相比于没有开展数据质量评估所获得毒性数据的研究,本文筛除了不可靠数据,避免了可能出现的偏差。

不同的 SSD 分析软件对典型有毒有害化学物质的 PNEC 拟合结果可能存在差异。我国有学者利用荷兰公共健康与环境研究所(RIVM)开发的 ETX 2.1 风险评估软件进行 SSD 分析,进而推导出代森锰锌、百菌清和敌敌畏 3 种农药水生态系统的 PNEC<sup>[27]</sup>。该模型主要为对数正态分布,具有 A-D 初级检验、K-S 中级检验和 C-M 高级检验 3 种阶梯

式检验方法。而本研究采用的 EEC-SSD 模型,检验方法较为单一,仅有 K-S 检验。因此,ETX2.1 软件可能具有更高的拟合度,结果可能更为精确,但其拟合曲线表现形式较为单一,无法更直观形象地体现出不同物种之间的种平均毒性与累积频率的关系。

建立水质基准的目的在于保护水生生态系统中的生物免受污染。通过对比本研究不同水生生物物种的 PNEC 值: $PNEC_{藻类} < PNEC_{全部物种} < PNEC_{鱼类}$ ,得出 DBP 对不同种类水生生物的 PNEC 值存在差异,不同地区的水生生物物种及水质也有所不同,这些都会影响水质基准的建立。因此,建议我国根据不同地区水生生物及水质的情况,提出相应的 DBP 限值,注意区别治理与管控。

本研究通过文献检索发现,近 10 年国内外对于 DBP 的毒性研究实验相对较少,研究主要集中在 20 世纪 80 年代,且试验物种类型有限,尚未有如林氏细鲫等我国特有物种的毒性数据。另外,本研究获得的数据仅基于文献调研与数据库检索,后续随着更多毒性效应研究的开展,能够获得更多的水生生物毒性数据或中国特有物种试验数据时,本研究推算的 PNEC 值应进一步更新与完善。

#### 4 展望 (Prospect)

当前,我国新污染物治理任务艰巨。国家发布了《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》等一系列文件,其中反复强调重视新污染物治理,并对此提出明确要求,可见新污染物治理将是未来“十四五”期间的热点话题。

新污染物是指由人类活动造成的、目前已明确存在、但尚无法律法规和标准予以规定或规定不完善、危害生活和生态环境的所有在生产建设或者其他活动中产生的污染物<sup>[28]</sup>。本研究中的邻苯二甲酸二丁酯(DBP)作为一种典型新污染物,在环境中广泛存在。最主要的危害在于环境激素作用,在极低的浓度下就可干扰人和动物的内分泌系统<sup>[29]</sup>。美国环境保护局(United States Environmental Protection Agency, US EPA)于 1977 年将 DBP 类列为优先控制的有毒污染物,同年世界野生动物基金会(World Wide Fund for Nature, WWF)列出的 68 种环境激素类物质中也包括 DBP<sup>[30]</sup>。目前,中国已将 DBP 列入优先控制污染物名单<sup>[31]</sup>,《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)也将 DBP 作为邻苯二甲酸酯类污染物的检测指标,并规定其含量不得超过  $3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

在环境危害方面,近年来我国农膜的使用量不断增加,由于塑料农膜的稳定性差,极易导致 DBP 从塑料薄膜中释放。因此,越来越多的 DBP 进入到周边土壤中,导致农业用地污染。另外,由于化肥、污灌等的不当使用,也使土壤中 DBP 的含量有所增加。受 DBP 污染土壤的影响,导致种植的作物对 DBP 的积累,进而通过食物链进入到人体中,对人体内分泌、神经系统等产生危害<sup>[32]</sup>。不仅如此,DBP 还会以吸附或者气溶胶的形式存在于气体环境中,借助灰尘等进入大气<sup>[33]</sup>。由于其化学性质稳定,不易光解,因此会造成污染的积累<sup>[34]</sup>,并且距离地面越高的空气中,含量越高<sup>[35]</sup>。

在环境暴露方面,我国水环境中 DBP 含量严重超标,污染严重。随着塑料的生产、应用与处理,DBP 不断地向周围环境释放,水环境中残余量持续增长,已经在长江、黄河等重要水域及多种水生生物(海洋哺乳动物、鱼类和水生无脊椎动物)中普遍检出,且对水生生物产生影响<sup>[36]</sup>,还可通过食物链的富集和传递,潜在威胁人体健康<sup>[37-39]</sup>。孔昊玥和刘红玲<sup>[40]</sup>在华东地区检出 DBP 平均浓度为  $54.389 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;卓丽等<sup>[41]</sup>在黄河中下游检出 DBP 浓度为  $\text{ND} \sim 26.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,胡卫星等<sup>[42]</sup>在渭河流域西安段检出 DBP 平均浓度为  $13.73 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;朱鹏利等<sup>[43]</sup>在曹娥江绍兴段检出 DBP 浓度为  $1974.4 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ;吴自清等<sup>[44]</sup>在长江南京段检出 DBP 浓度为  $10 \sim 500 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;韩文辉等<sup>[45]</sup>在汾河流域检出 DBP 浓度为  $1.01 \sim 16.53 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

本文推导了新污染物 DBP 的 PNEC 值,接下来还需进一步开展其暴露评估,识别其潜在环境风险,从而为我国新污染物治理提供参考。同时,现阶段我国应加强对 CMR 类日化品风险评估及管控等领域的研究。由于日化品种类多样,在日常生活中暴露水平也相对较高,若其中含有 CMR 类物质,其毒性更应引起重视,需要尽量降低其最大的暴露源,尤其是化妆品、洗涤剂以及增塑剂中 CMR 类物质的含量。因此,建议各生产企业和监管部门针对日化品的生产线、包装材料等产业链各环节进行分级排查,有效管控日化品中 CMR 物质的污染风险。

通讯作者简介:于洋(1982—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为化学物质环境风险评估技术方法。

共同通讯作者简介:于彩虹(1973—),女,博士,教授,主要研究方向为环境微生物菌种研发与应用。

## 参考文献(References):

- [1] 宋福, 沈英娃, 卢玲. 洗涤剂、化妆品与人体健康和环境保护[J]. 日用化学品科学, 2001, 24(2): 21-25  
Song F, Shen Y W, Lu L. Detergents, cosmetics and environmental protection [J]. Detergent & Cosmetics, 2001, 24(2): 21-25 (in Chinese)
- [2] 孙绍丽. 化妆品的危害及预防[J]. 健康向导, 2012, 18(3): 40-41
- [3] European Union. Regulation (EC) No.1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006, concerning the registration, evaluation, authorization, and restriction of chemicals (REACH) [R]. Brussels: EU, 2006
- [4] 任幸, 于洋, 郑玉婷, 等. 基于风险的Football组合法在筛选农用地优先控制酞酸酯类污染物的应用[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(2): 195-205  
Ren X, Yu Y, Zheng Y T, et al. Risk-based football combination method for screening priority control phthalates in agricultural land [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(2): 195-205 (in Chinese)
- [5] 朱晓晶, 于洋, 竹涛, 等. Copeland法与证据权重法在污染物危害性排序上的对比研究[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(3): 214-225  
Zhu X J, Yu Y, Zhu T, et al. A comparative study of Copeland method and weight-of-evidence method application on hazard ranking of pollutants [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(3): 214-225 (in Chinese)
- [6] 张丽丽, 朱晓晶, 于洋, 等. 京津冀及周边地区优先控制有毒有害大气污染物名录研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(1): 194-201  
Zhang L L, Zhu X J, Yu Y, et al. Priority control of hazardous air pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(1): 194-201 (in Chinese)
- [7] Klimisch H J, Andreae M, Tillmann U. A systematic approach for evaluating the quality of experimental toxicological and ecotoxicological data [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 1997, 25(1): 1-5
- [8] Maltby L, Blake N, Brock T C, et al. Insecticide species sensitivity distributions: Importance of test species selection and relevance to aquatic ecosystems [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2005, 24(2): 379-388
- [9] 林荣华, 姜辉, 王猛, 等. 物种敏感度分布(SSD)方法在农药环境风险评估中的应用[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(4): 110-118  
Lin R H, Jiang H, Wang M, et al. Application of species sensitivity distribution (SSD) to the environmental risk assessment of pesticides [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, 12(4): 110-118 (in Chinese)
- [10] European Chemical Agency (ECHA). ECHA [DB/OL]. [2021-11-09]. <https://echa.europa.eu/registration-dossier/-/registered-dossier/15543/6/2/6>
- [11] United States Environmental Protection Agency (US EPA). ECOTOX database [DB/OL]. (2013-07-29) [2021-11-09]. <http://cfpub.Epa.gov/ecotox>
- [12] 张威振, 赖子尼, 赵李娜, 等. 邻苯二甲酸酯类(PAEs)对三角鲂的急性毒性研究[J]. 生物学杂志, 2015, 32(1): 26-29, 33  
Zhang W Z, Lai Z N, Zhao L N, et al. Acute toxicity study of phthalate esters (PAEs) on the *Magalobrama terminalis* [J]. Journal of Biology, 2015, 32(1): 26-29, 33 (in Chinese)
- [13] 秦洁芳, 陈海刚, 蔡文贵, 等. 邻苯二甲酸二丁酯对红鳍笛鲷幼鱼的胁迫效应[J]. 中国水产科学, 2011, 18(5): 1125-1131  
Qin J F, Chen H G, Cai W G, et al. Effects of di-*n*-butyl phthalate (DBP) on activity of enzymes in different tissues of crimson snapper (*Lutjanus erythropterus*) [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(5): 1125-1131 (in Chinese)
- [14] Mayer F L Jr, Sanders H O. Toxicology of phthalic acid esters in aquatic organisms [J]. Environmental Health Perspectives, 1973, 3: 153-157
- [15] 李文英, 熊丽, 刘荣, 等. 邻苯二甲酸二丁酯(DBP)对斑马鱼(*Brachydanio rerio*)生理生化特性的影响[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(1): 117-122  
Li W Y, Xiong L, Liu R, et al. Effects of DBP on physiological and biochemical characteristics of *Brachydanio rerio* [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2007, 2(1): 117-122 (in Chinese)
- [16] 李磊, 蒋玫, 王云龙. 邻苯二甲酸二丁酯和邻苯二甲酸二辛酯对大黄鱼受精卵及仔鱼的急性毒性效应[J]. 海洋渔业, 2019, 41(3): 346-353  
Li L, Jiang M, Wang Y L. Toxic effects of DBP and DOP on early life stage of *Pseudosciaena crocea* [J]. Marine Fisheries, 2019, 41(3): 346-353 (in Chinese)
- [17] 胡芹芹, 熊丽, 田裴秀子, 等. 邻苯二甲酸二丁酯(DBP)对斜生栅藻的致毒效应研究[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(1): 87-92  
Hu Q Q, Xiong L, Tian P, et al. Toxic effects of dibutyl phthalate (DBP) on *Scenedesmus obliquus* [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2008, 3(1): 87-92 (in Chinese)
- [18] Melin C, Egnéus H. Effects of di-*n*-butyl phthalate on growth and photosynthesis in algae and on isolated organelles from higher plants [J]. Physiologia Plantarum, 1983,

- 59(3): 461-466
- [19] Yan H, Ye C M, Yin C Q, et al. Kinetics of phthalate ester biodegradation by *Chlorella pyrenoidosa* [J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 1995, 14(6): 931-938
- [20] Scholz N. Determination of the effect of vestinol C(DBP) on the growth of *Scenedesmus subspicatus* 86.81.SAG. complies with Directive 92/69/EEC. Final report AW-392 [R]. Marl, Germany: Hüls AG, 1995
- [21] Wilson W B, Giam C S, Goodwin T E, et al. The toxicity of phthalates to the marine dinoflagellate *Gymnodinium breve* [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1978, 20(2): 149-154
- [22] Acey R, Healy P, Unger T F, et al. Growth and aggregation behavior of representative phytoplankton as affected by the environmental contaminant di-*n*-butyl phthalate [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1987, 39: 1-6
- [23] 崔竞丹, 魏杰, 赵文. 邻苯二甲酸二丁酯(DBP)对蒙古裸腹蚤的毒性及其跨代影响[J]. 环境科学学报, 2020, 40(9): 3473-3480
- Cui J D, Wei J, Zhao W. Study on toxicity effect and transgenerational impact of dibutyl phthalate (DBP) to *Moina mongolica* Daday, 1901 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(9): 3473-3480 (in Chinese)
- [24] 杨慧丽, 段舜山. 邻苯二甲酸二丁酯对三角褐指藻的生态毒性效应[J]. 生态环境学报, 2010, 19(9): 2155-2159
- Yang H L, Duan S S. The ecological toxic effects of dibutyl phthalate on *Phaeodactylum tricoratum* [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(9): 2155-2159 (in Chinese)
- [25] 王金霞, 席貽龙, 刘晓波, 等. 邻苯二甲酸二丁酯对多刺裸腹蚤的毒性[J]. 生态学杂志, 2009, 28(7): 1335-1339
- Wang J X, Xi Y L, Liu X B, et al. Toxicity of dibutyl phthalate to cladoceran *Moina macrocopa* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(7): 1335-1339 (in Chinese)
- [26] 黄国兰, 孙红文, 高娟, 等. 邻苯二甲酸二丁酯对大型蚤(*Daphnia magna*)的毒性作用研究[J]. 环境化学, 1998, 17(5): 428-433
- Huang G L, Sun H W, Gao J, et al. Study on toxic effects of dibutyl phthalate on *Daphnia magna* [J]. Environmental Chemistry, 1998, 17(5): 428-433 (in Chinese)
- [27] 于洋, 郑玉婷, 赵静, 等. 3种农药水生态系统预测无效应浓度(PNEC)估算[J]. 农药科学与管理, 2018, 39(11): 24-32
- Yu Y, Zheng Y T, Zhao J, et al. Research on the predicted no effect concentration of 3 pesticides for aquatic ecosystem [J]. Pesticide Science and Administration, 2018, 39(11): 24-32 (in Chinese)
- [28] Field J A, Johnson C A, Rose J B. What is "emerging"? [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(23): 7105
- [29] Gu J D, Li J, Wang Y. Biochemical pathway and degradation of phthalate ester isomers by bacteria [J]. Water Science and Technology, 2005, 52(8): 241-248
- [30] Dauwe T, van de Vijver K I, de Coen W D, et al. PFOS levels in the blood and liver of a small insectivorous songbird near a fluorochemical plant [J]. Environment International, 2007, 33(3):357-361
- [31] 张付海, 张敏, 朱余, 等. 合肥市饮用水和水源水中邻苯二甲酸酯的污染现状调查[J]. 环境监测管理与技术, 2008, 20(2): 22-24
- [32] 董俊伟. 功能菌剂复配对邻苯二甲酸二丁酯污染土壤的修复研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017: 1-2
- Dong J W. Study on the multifunctional compound microbial preparation remediation of dibutyl phthalate contaminated soil [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017: 1-2 (in Chinese)
- [33] Howard P H, Banerjee S, Robillard K H. Measurement of water solubilities, octanol/water partition coefficients and vapor pressures of commercial phthalate esters [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1985, 4(5): 653-661
- [34] 胡培磊. *Sphingomonas* sp. XJ1 降解 DBP 的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008: 3-4
- Hu P L. Studies on degradation of DBP by *Sphingomonas* sp. XJ1 [D]. Changsha: Central South University, 2008: 3-4 (in Chinese)
- [35] 全青, 冯沈迎, 阮玉英, 等. 呼和浩特市不同粒径空气颗粒物上酞酸酯的污染[J]. 环境科学学报, 1999, 19(2): 159-163
- Tong Q, Feng S Y, Ruan Y Y, et al. Phthalic esters in atmospheric particulate of different diameter in Huhehaote urban area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1999, 19(2): 159-163 (in Chinese)
- [36] 张蕴晖. 邻苯二甲酸二乙基己酯对环境和生物体的危害[J]. 国外医学(卫生学分册), 2002(2): 73-77
- [37] 董继元, 王式功, 尚可政. 黄河兰州段邻苯二甲酸酯类有机污染物健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 963-968
- Dong J Y, Wang S G, Shang K Z. Water environmental health risk assessment of phthalic acid esters in Lanzhou reach of Yellow River [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(5): 963-968 (in Chinese)
- [38] Adams W J, Biddinger G R, Robillard K A, et al. A summary of the acute toxicity of 14 phthalate esters to repre-

- sentative aquatic organisms [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1995, 14(9): 1569-1574
- [39] Benli A Ç, K, Erkmén B, Erkoç F. Genotoxicity of sub-lethal di-*n*-butyl phthalate (DBP) in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Arhiv Za Higijenu Rada i Toksikologiju*, 2016, 67(1): 25-30
- [40] 孔昊玥, 刘红玲. 最大累积率识别中国地表水中邻苯二甲酸酯类关键污染物和复合污染生态风险[J]. *环境化学*, 2021, 40(3): 706-716
- Kong H Y, Liu H L. Identification the key pollutants of phthalic acid esters in surface water of China and ecological risk of mixture based on maximum cumulative ratio [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(3): 706-716 (in Chinese)
- [41] 卓丽, 石运刚, 蔡凤珊, 等. 长江干流、嘉陵江和乌江重庆段邻苯二甲酸酯污染特征及生态风险评估[J]. *生态毒理学报*, 2020, 15(3): 158-170
- Zhuo L, Shi Y G, Cai F S, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of phthalate esters in the Yangtze River, Jialing River and Wujiang River in Chongqing, China [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, 15(3): 158-170 (in Chinese)
- [42] 胡卫星, 刘晓宇, 陈贝, 等. 渭河流域西安段水体中DBP污染特征及生态风险评估[J]. *环境保护科学*, 2020, 46(1): 84-90
- Hu W X, Liu X Y, Chen B, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of dibutyl phthalate in Xi'an section of the Wei River Basin [J]. *Environmental Protection Science*, 2020, 46(1): 84-90 (in Chinese)
- [43] 朱鹏利, 蔡海江, 何晓芳, 等. 曹娥江绍兴段环境内分泌干扰物残留及风险[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(1): 192-198
- Zhu P L, Cai H J, He X F, et al. Residual characteristics and health risk of typical environmental endocrine disruptors in the basin of Cao'e River in Shaoxing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(1): 192-198 (in Chinese)
- [44] 吴自清, 傅翊, 王莹, 等. GC/MS法测定地表水中邻苯二甲酸二丁酯[C]/探索“智慧水利”推动科技创新——2017(第五届)中国水利信息化技术论坛论文集. 南京: 江苏省水文水资源勘探局南京分局, 2017: 10-13
- [45] 韩文辉, 赵颖, 党晋华, 等. 汾河流域邻苯二甲酸酯的分布特征及生态风险评估[J]. *环境化学*, 2017, 36(6): 1377-1387
- Han W H, Zhao Y, Dang J H, et al. Distribution and ecological risk evaluation of phthalate esters in Fenhe River Basin [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(6): 1377-1387 (in Chinese) ◆