

Typical Environment Ecological Risk Assessment Approach
of New POPs Chemicals

典型环境新POPs物质 生态风险评估方法与应用

刘征涛 祝凌燕 陈来国 等编著



化学工业出版社

Typical Environment Ecological Risk Assessment Approach
of New POPs Chemicals

典型环境新POPs物质 生态风险评估方法与应用

刘征涛 祝凌燕 陈来国 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

典型环境新 POPs 物质生态风险评估方法与应用/刘征涛等编著. —北京: 化学工业出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-122-28100-5

I. ①典… II. ①刘… III. ①持久性-有机污染物-评估方法-中国 IV. ①X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 222099 号

责任编辑: 刘兴春 刘 婧

装帧设计: 王晓宇

责任校对: 宋 夏

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 10 $\frac{3}{4}$ 字数 172 千字 2017 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

《典型环境新 POPs 物质生态 风险评估方法与应用》

编著人员名单

编著者：刘征涛 祝凌燕 陈来国 张亚辉
曹莹 杨丽萍 胡国成

持久性有机污染物 (POPs), 通常是指具有生物脂溶性的蓄积特征、在自然环境中难以降解、对生物体有毒害作用, 可通过大气、水、土壤及生物等介质长距离迁移并可较长期累积于环境介质中的一类有机化学物质。由于许多 POPs 还可能具有对人体健康危害的致畸、致癌、致突变等遗传毒性的“三致”效应, 以及对环境中生物体的生殖、发育或内分泌激素系统的干扰毒性作用, 其对生态系统及人体健康产生的危害影响可能会较长期持续存在, 从而可能对人体健康和自然生态系统产生较严重的环境风险。

随着有关 POPs 控制的斯德哥尔摩国际公约正式生效, 我国面临履约及削减 POPs 的巨大挑战。公约规定的 12 种 POPs 包括艾氏剂、氯丹、滴滴涕、狄氏剂、异狄氏剂和七氯、六氯苯、多氯联苯、灭蚁灵、毒杀芬、多氯代二苯并对二噁英、多氯代二苯并呋喃受到了各缔约国的严格管控。2009 年在瑞士日内瓦举行的缔约方大会第四届会议决定, 将全氟辛酸 (PFOA)、全氟辛烷磺酸及其盐类 (PFOS)、商用五溴联苯醚、八溴联苯醚等 9 种新增 POPs 列入公约附件 A、B 或 C 的受控范围。至此, 已有包括多溴联苯醚、全氟化合物 (PFCs) 等新 POPs 物质在内的 27 种 POPs 被国际公约禁限用。新增 POPs 物质中如多溴联苯醚 (PBDEs) 和全氟辛烷类 (PFOS/PFOA) 在我国均有大量生产和使用, 可能广泛存在于我国多种环境生态介质及人体中。

随着人们对 POPs 的环境问题越来越关注及我国履约进程的加快, 迫切需要针对我国典型环境中新 POPs 物质进行生态风险评估, 提出环境生态风险控制对策, 为我国新 POPs 物质的环境风险管理提供技术支持。

本书主要阐述了新 POPs 物质的环境风险评估技术方法, 并以相关环保公益课题“新增 POPs 典型环境暴露风险评估技术研究”的成果为主, 重点介绍我国典型水环境如江苏太湖流域与广东东江流域中 PBDEs、PFOS、PFOA 等新增 POPs 环境风险评估的应用案例。全书共分 6 章, 第 1 章概述了新 POPs 物质的环境风险评估技术的发展概况, 并简要描述我国典型流域新 POPs 物质环境风险评估的技术方法; 第 2 章主要阐述我国典型流域太湖水环境介质中全氟化合物 (PFCs) 的环境暴露含量特征; 第 3 章着重介绍我国典型流域东江水环境及典型电子垃圾拆解场地区域广东清远地区环境介质中多溴联苯醚 (PBDEs) 的暴露水平特征; 第 4 章主要论述我国典型流域环境介质中 PFOS、PFOA 和 PBDEs 等主要新 POPs 物质的环境安全阈值的推导方法技术; 第 5 章针对我国典型区域环境介质中 PFOS、PFOA 和 PBDEs 的环境风险评估需求, 阐述了我国新 POPs 物质环境风险评估表征的实例应用; 第 6 章综合论述适用我国新 POPs 物质的环境风

险评估及风险管理措施，主要阐述典型区域新 POPs 的环境风险管理对策建议，为我国新增 POPs 物质的国际履约及有效的环境监管提供技术支持。

感谢环境保护行业公益专项科研课题对本研究工作的资助，也感谢对本书相关内容的完成提供帮助的各位朋友。

限于编著者编著时间和水平，书中难免存在不妥和疏漏之处，敬请读者批评指正。

编著者
2016 年 9 月

第 1 章 新 POPs 环境风险评估概况	001
1.1 化学物质环境风险评估发展过程	002
1.2 国外生态风险评估	004
1.2.1 美国生态风险评估	005
1.2.2 欧盟生态风险评估	005
1.3 我国生态风险评估	007
1.4 国内外环境生态风险评估比较	009
1.5 新 POPs 生态风险评估指标筛选	013
1.6 新 POPs 物质生态风险评估	018
1.6.1 环境暴露评估	018
1.6.2 环境风险表征	020
第 2 章 典型环境介质中全氟化合物暴露特征	038
2.1 太湖流域水环境中全氟化合物暴露特征	038
2.1.1 太湖流域水环境概况	038
2.1.2 太湖水样中 PFCs 含量与分布特征	039
2.1.3 太湖沉积物中 PFCs 含量与分布特征	041
2.1.4 PFCs 在沉积物和水中的分配	042
2.2 氟工业园区环境中全氟化合物暴露调查	044
第 3 章 典型环境介质中多溴联苯醚 (PBDEs) 暴露特征	052
3.1 东江流域环境中多溴联苯醚暴露特征	052
3.1.1 东江流域水环境概况	052
3.1.2 水样中 PBDEs 含量与分布特征	054
3.1.3 沉积物中 PBDEs 含量与分布特征	059
3.1.4 生物样品中 PBDEs 含量与分布特征	063
3.2 电子垃圾拆解场区域多溴联苯醚暴露特征	067
3.2.1 场区域空气中 PBDEs 含量与分布	067
3.2.2 水体中 PBDEs 含量与分布特征	068
3.2.3 沉积物中 PBDEs 含量与分布特征	071
3.2.4 土壤中 PBDEs 含量与分布特征	073

3.2.5	环境尘土中 PBDEs 含量与分布特征	076
3.2.6	场地生物样品中 PBDEs 含量与分布特征	077
第 4 章 主要新 POPs 环境安全阈值		089
4.1	典型 PFCs 预测无效应浓度	089
4.1.1	全氟辛烷磺酸 (PFOS) 安全阈值	089
4.1.2	全氟辛酸 (PFOA) 安全阈值	097
4.2	PBDEs 的预测无效应浓度	100
4.2.1	四溴联苯醚安全阈值	100
4.2.2	五溴联苯醚安全阈值	102
4.2.3	八溴联苯醚安全阈值	105
4.2.4	十溴联苯醚安全阈值	106
第 5 章 典型环境多溴联苯醚和全氟化合物的风险表征		108
5.1	太湖流域全氟化合物环境风险	109
5.1.1	流域水环境典型 PFCs 风险表征	109
5.1.2	氟工业园区 PFCs 生态及人体健康风险表征	114
5.2	东江流域多溴联苯醚环境风险	118
5.2.1	水环境中 PBDEs 生态及健康风险表征	118
5.2.2	电子垃圾拆解场地 PBDEs 生态及健康风险表征	121
第 6 章 典型区域环境新 POPs 风险管理对策		124
6.1	新 POPs 环境风险管理措施	124
6.1.1	全氟类化合物风险管理	124
6.1.2	多溴联苯醚类物质风险管理	133
6.2	新 POPs 环境风险评估	139
6.2.1	全氟类化合物评估	139
6.2.2	多溴联苯醚类物质评估	141
6.3	新 POPs 环境生态风险控制对策讨论	144
6.3.1	我国新 POPs 环境风险管理状况	144
6.3.2	我国新 POPs 生态风险控制对策建议	146
参考文献		150

第 1 章

新 POPs 环境风险评估概况

持久性有机污染物 (POPs) 是一大类具有生物毒性、生态累积性且难以自然降解的有机化学物质, 其可长期存在于环境中, 通过生态系统中空气、水、土壤及生物等介质的迁移或积累传输, 可能对人体健康和生态系统造成危害性风险。一般生态风险是指生态系统的正常功能受外界因素胁迫, 对其本身生产力、遗传结构、稳定性、经济价值和美学价值造成危害的可能性。2004 年我国开始履行在斯德哥尔摩签约的有关控制 POPs 国际公约的义务, 至 2009 年, 全氟辛烷磺酸及其盐类 (PFOS)、全氟辛酸及其含铵盐 (PFOA)、商用五溴联苯醚、商用八溴联苯醚等 9 种新 POPs 化学物质被在瑞士日内瓦召开的联合国控制 POPs 缔约方大会第四届会议列入公约附件 A、B 或 C 的受控范围。在该公约禁用的包括多溴联苯醚 (PBDEs)、全氟化合物 (PFCs) 等新 POPs 物质在内的 21 种 POPs 目录中, 新增的多溴联苯醚、全氟辛烷类化合物 (PFOS/PFOAs) 在现阶段我国有较多生产和使用, 这些新 POPs 物质存在于我国多种环境介质及人体中, 可能对暴露于这些环境污染物的生态系统造成潜在的安全风险。由于我国 POPs 生态风险评估处于刚起步阶段, 对于新 POPs 在化学品管理、环境行为、生态毒性识别、环境中生态与人体健康风险控制等方面还没有形成有效的技术管理体系, 但可通过设立相关的科研项目, 建立相应的科研实验平台, 提高对新 POPs 的环境技术监控水平。随着 POPs 的环境问题越来越突出, 迫切需要研发适用于新增

POPs 生态风险评估的方法技术,如加强对我国典型流域、区域中新 POPs 的环境生态风险评估技术研究,以便为相关 POPs 类物质的环境监控管理提供科学依据。

环境风险评估(ERA)通常指自然生态系统受一个或多个胁迫因素影响后,主要对生态系统可能产生的有害影响进行识别、分析评估及表征的过程。在生态风险评估中,各种可能引发不利生态效应的因素如物理、化学、生物等因素都可以作为胁迫因子,而风险受体可以是生态系统的各类组成成分、要素或介质,也可以是整个生态系统,这要根据环境风险管理的目标来决定。环境风险评估是在环境风险管理的框架下发展起来的生态风险评估和健康风险评估的综合体,主要评估人类活动在环境中引入的化学品或污染物质引起的对自然生态系统及人体健康的不利效应的风险程度,最终为环境管理提供决策支持。

1.1 化学物质环境风险评估发展过程

20 世纪 60~70 年代美国开始较系统地评估化学物质的环境风险,起初的环境风险评估主要为人体健康风险评估,研究评估人体暴露于环境中化学污染物质时可能产生的健康不利影响的风险。人体健康风险评估主要关注污染物对目标人体健康的危害,其评估生物对象常为单一人种;生态风险评估通常需要综合理解污染物质或胁迫因子对目标生态系统的生物、化学、物理等相互作用关系及毒理学、生态学等原理过程,主要关注污染物质对目标物种、种群及生态系统的结构与功能的不利影响风险,其评估生物对象可能涉及生态系统的多个物种。

20 世纪 70~80 年代,美国环保局(USEPA)的实验室开展了面向种群、生态系统层面的生态风险评估研究,此后风险评估的尺度逐渐开始从种群、群落向生态系统水平扩展,研究内容除了生态毒理学风险、人体健康风险外也更加关注食物链生态系统风险。1986 年美国环保局出台了化学复合物的健康风险评估导则,多种化学物质暴露所导致的健康风险受到了重视;1990 年颁布的技术支持性文件给出了化学复合物毒性作用的详细信息,1992 年美国环保局发布了世界上第一个由国家政府机构发布的生态风险评估框架技术文件,阐述了环境生态风险评估的技术准则。1998 年美国环保局颁布了《生态风险评估指南》,对以前

的评估准则进行了改进。《生态风险评估指南》提出了生态风险评估的步骤：即提出风险问题、分析风险（暴露和效应）和表征风险。提出风险问题就是在评估前需要对评估内容、范围、目标等问题进行清楚的表述；分析风险包括实际暴露分析和效应分析，主要是分析受体的暴露途径、强度以及胁迫因子可能导致的生态危害作用效应；表征风险是将分析结果进行整合并得出危害风险发生的概率。风险评估指南与风险评估框架相比，其更加强调风险评估者和管理者之间在协商的基础上建立的风险评估计划的合理性。

由于空间分析、不确定性分析和统计理论方法的不断发展，以及地理信息系统、蒙特卡罗模拟技术、贝叶斯不确定性分析及统计方法等的大量使用，很多学者逐渐把研究尺度扩展到了区域、景观及流域等尺度。尤其是近 20 多年的发展，生态风险评估的内容、范围及研究尺度等都有了长足的发展。风险胁迫因子由单一的风险因子发展到多种化学因子及可能造成生态风险的生态事件，风险受体也从单物种向多物种、种群、生态系统、流域景观等方向发展，并且开始全面考虑人类活动如城市化、渔业、气候变化、土地利用等的影响。

我国政府层面的环境生态风险评估管理工作基本始于 20 世纪 90 年代，1993 年国家环保局发布了《环境影响评估技术导则（总则）》（HJ/T 2.1—93），指出针对风险事故，在有必要和有条件时应进行相应的环境风险评估。二十多年来我国的环境生态风险评估工作主要开展了水环境中污染化学物质的生态风险评估、区域和景观生态风险评估及近年来的功能区土壤生态风险评估等领域的研究，国内对化学污染物质的生态风险评估主要关注有毒有机化合物、农药、重金属以及营养盐富集等的生态风险效应。其中区域或景观生态风险评估一般通过运用景观生态学方法来获得景观损失指数和综合风险指数，进而对实际环境暴露指数的采样检测结果进行数理统计分析得出相关生态风险结果。目前区域和景观生态风险评估的研究主要集中在景观结构和生态空间范围风险评估等方面。

环境风险评估是用来预测污染物对生态系统及人体健康可能产生的危害的程度和范围，以保证生态系统及人类生活的正常运行，它用到了如生态学、化学、生物学、地理学、毒理学及数理统计学等多学科交叉的知识。污染生态效应是由胁迫因子引起的包括生物个体、种群、群落以及生态系统水平上的危害作用或变化过程及结果，一般在

生态风险评估中重点关注的是引起不利的生态效应。

环境生态风险评估的重点是环境风险源识别，定量或定性预测风险出现的概率或风险控制限度，进而提出可行的风险解决方案。当前环境风险评估的不确定性识别仍然是值得研究的重要问题，应清楚地认识到风险评估过程中如风险源的确定、风险受体的选择、评估终点的界定、评估参数的选择、评估模型或推导方法的选择、风险表征的表述方式及其解释应用等都存在着科学研究的不确定性。要考虑充分结合室内实验和野外实际监测的结果来校正、检验风险评估模型方法给出的推测性风险结果，依据实际情况，选择或调整合适的风险评估方法，尽可能减少环境风险评估的不确定性，获得正确的风险评估结果，为环境管理决策实践服务。

1.2 国外生态风险评估

为了使环境生态风险评估的过程科学化和规范化，相关国际组织如国际经济与合作组织（OECD）及美、欧等发达国家和地区大多发布了适合地区或国情的环境风险评估指南文件，这其中也包括了有关环境生态风险评估框架类的指导性技术文件。生态风险评估的基本过程为风险问题描述与问题识别或提出、风险问题分析（效应评估与暴露评估）、风险表征等。在问题描述阶段可通过对风险的初步危害识别，提出风险评估的目标及评估范围，说明可能存在的风险问题并制定工作方案。问题分析分为暴露分析和效应分析两部分，暴露分析主要关注人为胁迫因子（如污染物）的实际场景暴露途径、方式、强度等的有害作用影响，效应分析主要针对污染物的毒理学剂量/浓度-效应分析的结果，预测可能产生的危害效应。风险表征是对风险分析结果的综合表达，一般可有风险估计、风险描述和风险报告等形式。其中，风险估计是对暴露和效应分析的数据进行总结后做出的估计，风险描述主要表征风险估计结果及其影响，风险报告通常是将风险分析阶段的工作总结以报告的形式提交管理者；不确定性分析在生态风险评估中有重要作用，如区域的划分、风险源的确定、风险受体和毒理学评估终点的选择、评估方法以及参数的选取等都不存在不确定性，关键是怎样降低不确定性。当前不确定性的定量分析是困扰许多学者的一个难点，而只有对不确定性进行定量表征才能为风险管理提供更为有效的决策。

需要建立科学的风险评估方法，分析目前复杂的环境胁迫因素对生态系统及人体健康产生的多种风险，以便提出有效的环境管理方法，加强环境管理的科学性。

1.2.1 美国生态风险评估

1998 年美国环保局发布了包括环境风险评估（生态风险问题的提出、风险分析、风险表征）和风险管理等内容的环境生态风险评估框架（USEPA, 1998）。其中风险评估主要涉及：生态风险评估工作开始前阶段，风险管理者、风险评估人员以及其他相关人员要共同协商讨论，提出风险管理的目标，风险评估的范围，以及风险管理者希望达到的风险评估过程的完整性、准确度和详细程度的要求；问题提出阶段，主要任务是收集数据并进行风险识别和初步危害性分析，提出风险评估终点，确定风险分析模型方法；风险分析阶段，包括进行各胁迫因子的实际场景暴露分析、评估终点反应的测量值，以及污染物的暴露量级、持续时间及与终点危害效应相关的生态效应暴露分析。其中为使暴露分析结果可靠，并为数据收集及方法的适用性提供正确的参考，该风险分析阶段要进行不确定性分析，以说明采用的风险评估方法中已知与未知因素对评估结果的影响。风险表征阶段，主要是对风险分析阶段结果的总结表述或描述风险大小的阶段，可包括风险推算结果、风险描述和风险报告结论等部分。美国环保局发布的生态风险评估框架如图 1-1 所示（USEPA, 1998）。

1.2.2 欧盟生态风险评估

按照欧盟的定义，风险指有害效应在一定环境和人群中发生的潜在可能性，而环境污染物质的风险评估指权衡环境中污染物对生态系统及人体所造成危害可能性的认定、定性或定量表征的过程。

欧盟及参加 OECD 国家早期的生态风险评估程序由危害识别、剂量-效应（危害）评估、暴露评估、风险表征四部分组成。风险管理用来衡量风险级别与规避风险之间的关系，重点关注风险级别与社会所能接受的舒缓风险成本之间的联系。

2003 年欧盟及 OECD 国家颁布了现有和新化学物质评估指南文

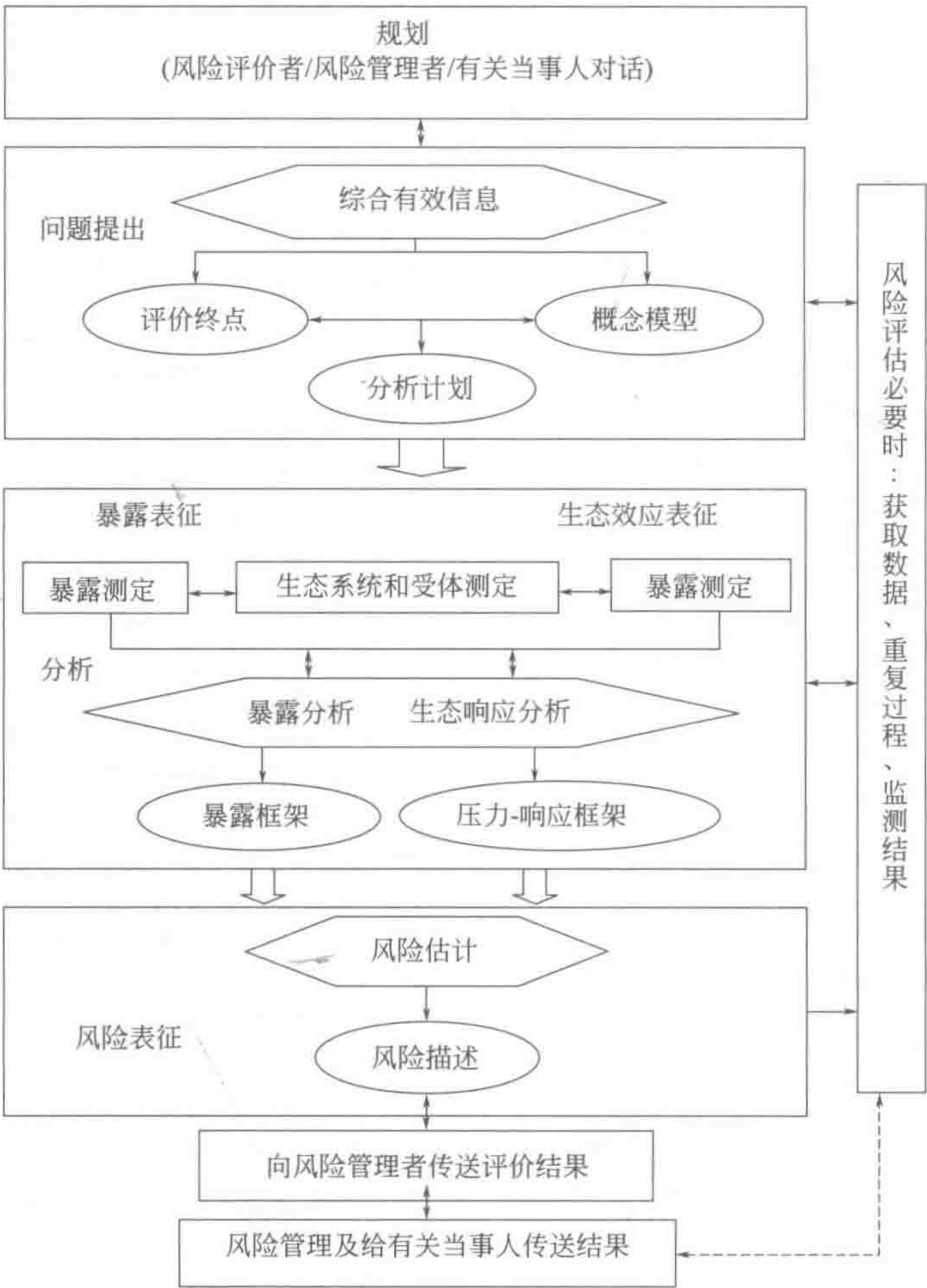


图 1-1 美国环境生态风险评估技术框架

件，该指南主要针对化学物质在水生态系统效应、陆生生态系统效应、污水处理厂微生物作用效应、沉积物效应等暴露风险进行了分析。同年，欧盟及国际经济与合作组织（OECD）出台了有关化学物质注册、评估、许可和限制（REACH）的有关化学品管理政策的执行法规性文件。该文件指出化学物质在环境中的安全暴露量应低于预测安全浓度（*PNEC*），并且化学物质还应该进行管理分类和标记。欧盟要求生产和使用的化学物质需进行化学品信息登记和对登记信息进行评估，加强化学品的管理。

英、德、荷、法等国建立有成熟的化学品生态风险评估管理文件，是欧盟国家开展化学物质生态风险评估工作较先进的国家，欧盟国家的环境生态风险评估以社会需求和预防为主，较多考虑社会公众意见。欧盟相关的化学品风险技术指导文件（technical guidance document, TGD）给出了化学品环境风险评估的概况过程，其中环境风险评估程序（EC，2003）如图 1-2 所示，主要评估参数有预测环境（暴露）浓度（*PEC*）与预测（暴露）无效应浓度（*PNEC*）。

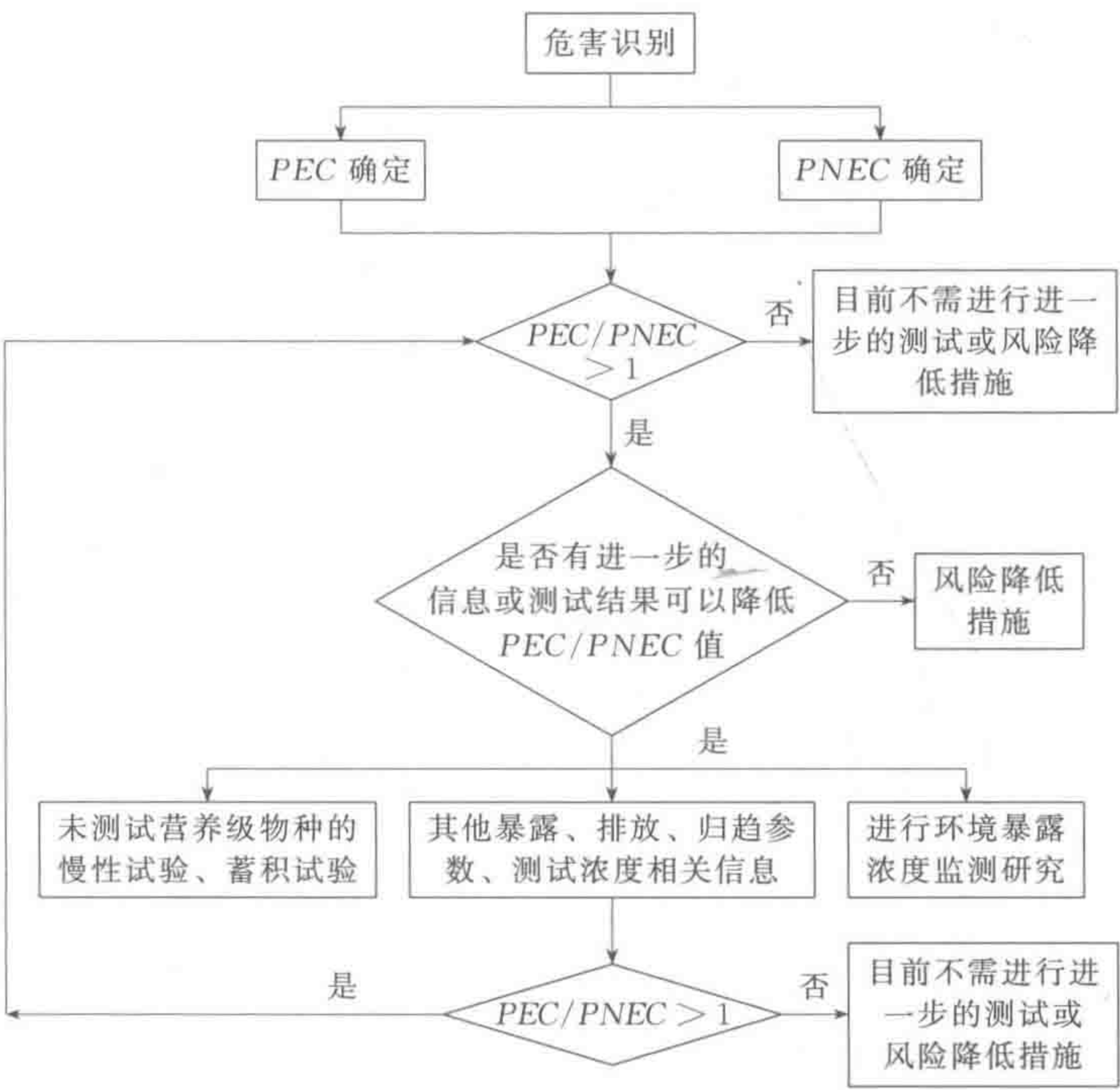


图 1-2 欧盟化学物质环境风险评估技术框架

1.3 我国生态风险评估

自 20 世纪 90 年代起，在引进国外发达国家或组织如 OECD 的化学物质生态风险评估技术的同时，我国学者也对本土化学物质的环境生态风险评估的理论和技術展开了研究。有毒有害污染物不断被排放到水体环境中，可能导致生态系统和人体健康受到危害；而水环境中

的污染物大多以混合物的形式存在，其实际环境中的暴露作用机制通常要比单一污染物复杂，如有时低浓度的单一污染物在一定时段内可能对目标生物没有表现明显的危害效应，但当目标生物暴露于多种低浓度单一污染物组成的混合物状态时，就可能表现出明显的生态危害作用风险。在水环境质量监管中，依据实际环境与污染物特征，综合考虑监测对象的物理、化学、生物等指标参数的应用科学性，正确开展环境生态系统的风险评估，对于生态系统安全的监管有着重要意义。

我国《生态风险评估导则》于 2010 年由水利部发布，评估程序参考了美国 EPA 的《生态风险评估指南》(USEPA, 1998)，我国的生态风险评估框图见图 1-3。

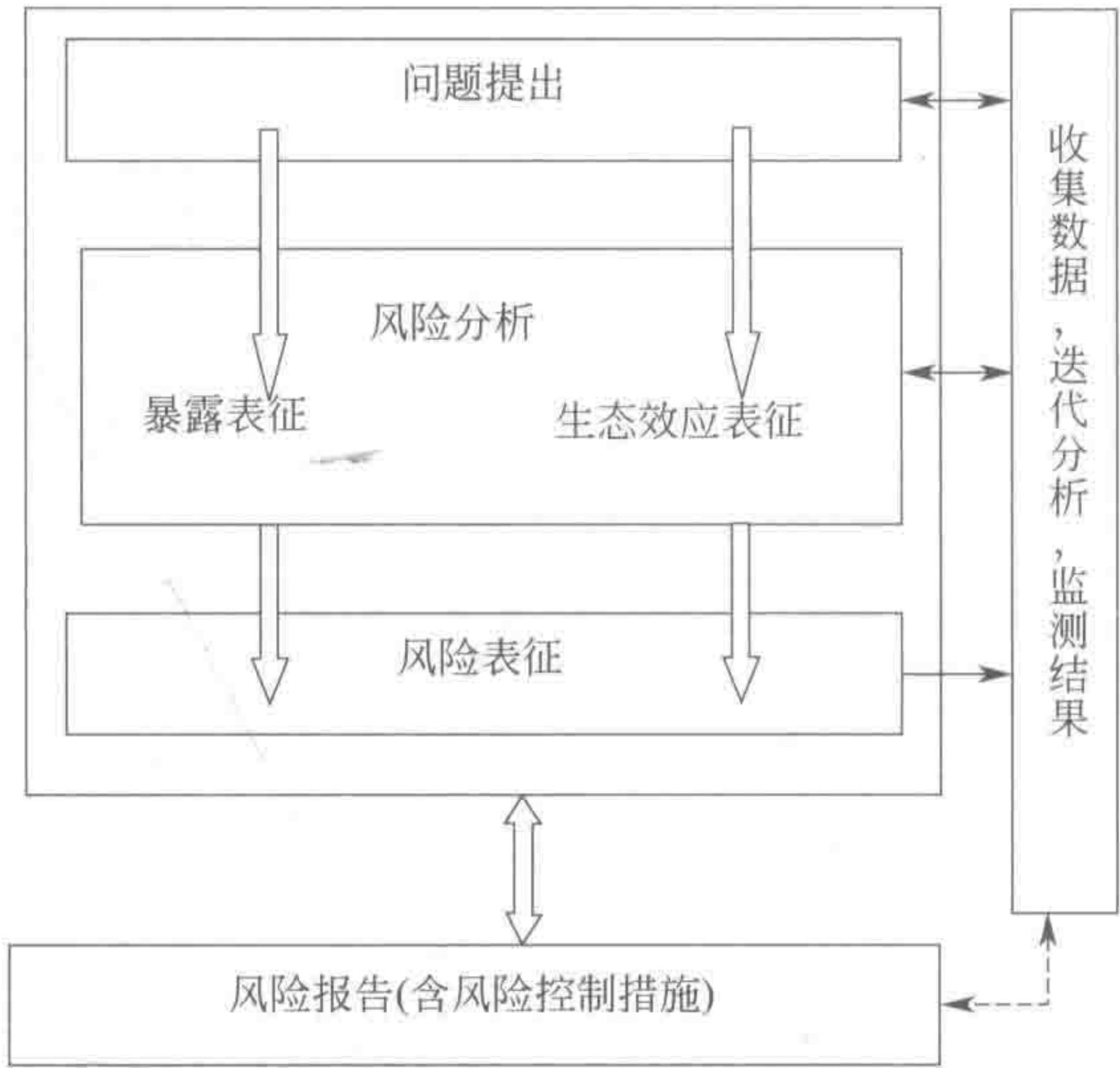


图 1-3 我国生态风险评估技术框架

我国环保部有关研究单位主要参考欧盟或 OECD 国家及美国 EPA 的相关化学物质环境风险评估技术管理文件，于 2011 年提出了《化学物质风险评估导则》(征求意见稿)，其中化学物质的环境风险评估由评估准备、危害评估、暴露评估和风险表征四部分组成，其中环境风险主要分环境生态风险与环境人体健康风险两大类，危害评估包括化学物质的危害识别与定性或定量危害性(毒性)的剂量-效应关系表征分析等，当前我国化学物质环境风险评估程序框架见图 1-4。

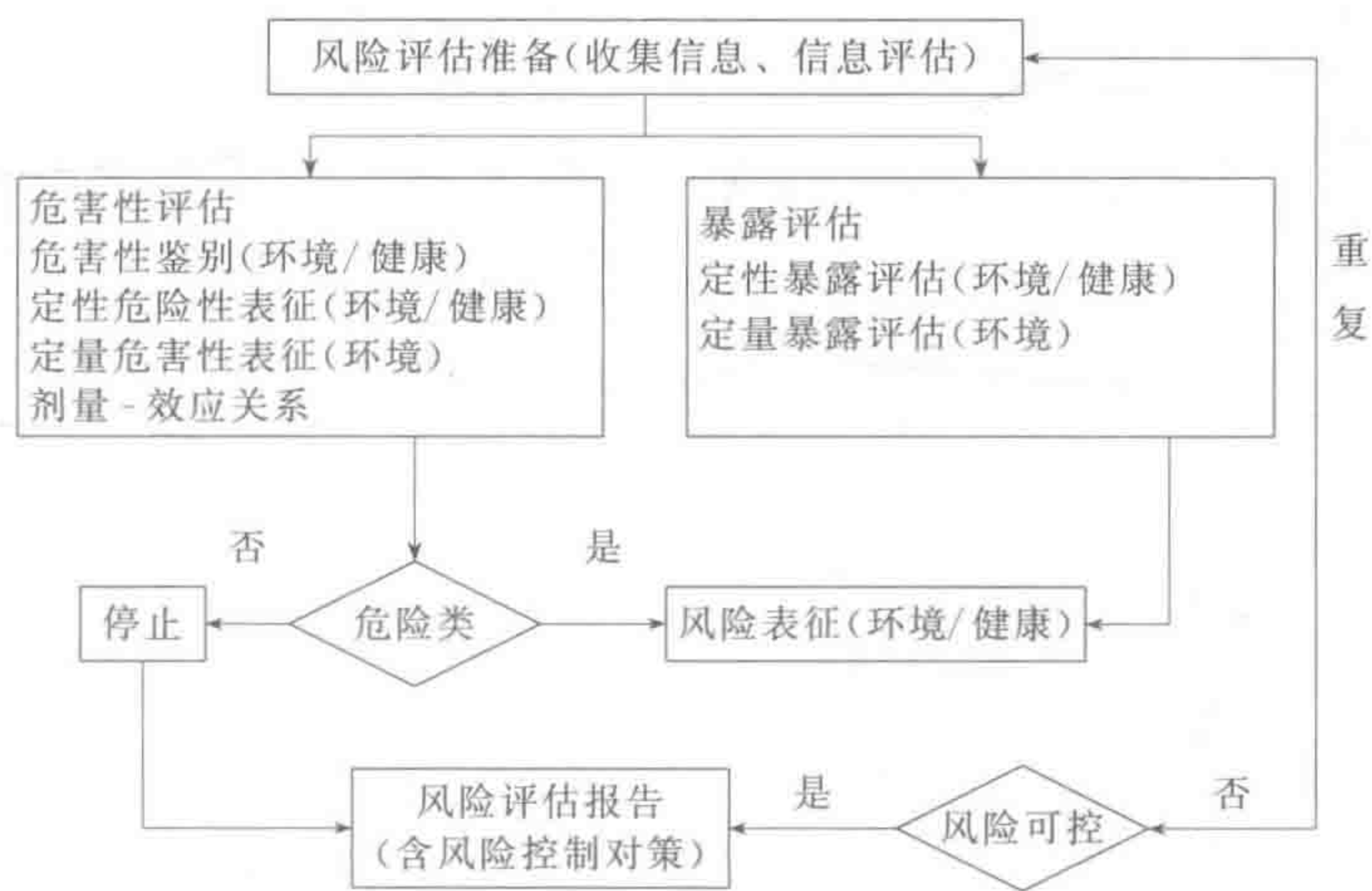


图 1-4 我国化学物质环境风险评估技术框架

1.4 国内外环境生态风险评估比较

目前国内外的化学物质的环境生态风险评估技术框架大多都源自美国环保局发布的《生态风险评估指南》文件，不同国家的相关技术文件虽有一些不同特色，但基本上都包含了危害识别、效应分析、暴露分析和风险表征等过程。

环境生态风险评估是科学管理环境污染物生态危害性的重要手段之一，通过获得污染物的环境安全阈值或风险控制限度，为相关环境决策、环境标准或基准的制定提供支持依据。国家或国际组织发布的环境风险评估技术文件中，环境浓度/剂量-效应评估是风险评估过程中目标化学物质危害性评估的主要内容，目前推荐的技术方法主要有两类：一类是基于仅有少量物种毒性数据的专家经验性评估系数外推方法；另一类是基于有较多生态物种毒性数据的统计外推方法来确定毒性无效应浓度/剂量（NOEC/NOED），进而确定化学物质的预测无效应浓度（PNEC）。目前主要国家或组织的环境风险评估数据外推方法概况见表 1-1，其中环境生态风险评估中的暴露评估，经济合作与发展组织（OECD）成员国通常考虑涉及水生生物生态系统、污水处理厂微生物系统、水体沉积物系统、陆生生物生态系统、大气环境系统以及由于生态食物链蓄积机制导致的次生毒性效应等主要暴露场景类型。