

《填埋场土壤-地下水中微塑料生态环境健康风险评估技术指南》

编制说明

一、工作简况

1. 任务来源

据《中国土壤学会团体标准管理办法（试行）》规定，经自愿申请、专家评审论证，评定《填埋场土壤-地下水中微塑料生态环境健康风险评估技术指南》团体标准符合立项要求，中国土壤学会于2026年3月13日准予立项并下达制定工作任务，牵头单位为华东理工大学。

随着微塑料污染问题的快速发展，填埋场作为重要污染源，其对土壤与地下水系统的长期影响逐渐受到关注。然而，目前国内外尚缺乏针对填埋场情景下微塑料环境、生态与健康风险评估的系统性技术规范。在此背景下，本标准立项开展，旨在填补该领域技术空白。

2. 协作单位

上海环境卫生工程设计院有限公司、中国科学院南京土壤研究所、生态环境部南京环境科学研究所、中国地质大学（武汉）。

3. 主要工作过程

（1）成立标准起草小组

华东理工大学牵头申报《填埋场土壤-地下水中微塑料生态环境健康风险评估技术指南》团体标准时，立即由主要起草人牵头组织成立起草小组，研讨标准编制前期调研、数据采集、资料收集与补充、标准相关要求与进度以及人员分工等，确保标准编制过程中各个环节顺利实施。

（2）预研与立项阶段

项目组在前期研究中发现，我国存在大量历史不规范填埋场，其缺少规范的防渗和污染阻隔措施，同时微塑料作为新污染物其环境风险日益受到关注。基于上述背景，项目组选取浙江省嘉善县某历史不规范填埋场及周边农田作为典型研究区，依托先期研究积累的试验数据，系统开展了填埋场及周边农田土壤微塑料污染特征识别、土壤-地下水中微塑料三维特征量化、多模型生态风险评价、扬尘叶面暴露途径验证、食物链传递规律研究等工作，明确了历史不规范填埋场是周边农田土壤微塑料的重要释放源，具备建立填埋场土壤-地下水微塑料生态环境健康风险评估技术指南的现实基础和数据支撑，为标准立项奠定了科学依据。

（3）数据采集和材料收集

依据浙江省嘉善县某历史不规范填埋场及周边农田的实地调查采样，开展了密度浮选结合显微傅里叶变换红外光谱定性定量分析。从Web of Science数据库中搜索土壤和地下水中MPs相关文献，初筛获得754篇，经过数据清洗后获得符合研究要求的土壤和地下水MPs文献14篇，对文献中图像数据数字化提取明确的

采样地点信息以及MPs尺寸、形状和类型的占比数据。从Web of Science数据库中搜索土壤和地下水中MPs毒性效应的研究论文，初筛获得1896篇，经初筛与全文复核后，最终保留29篇符合标准的实验研究，共提取48个有效毒性终点数据。在生态风险评价方面，采用污染负荷指数法、改进风险商法和多特征潜在风险指数法进行了多模型对比验证，并通过蒙特卡罗模拟开展不确定性分析。同时，通过植物叶面降尘暴露实验验证了土壤中小粒径微塑料可能通过土尘形式被叶片吸收，从而对生态和健康产生潜在风险。构建了“生菜-蜗牛-鸡”陆生食物链，利用稀土元素钕螯合物标记示踪技术揭示了微纳塑料食物链传递规律与放大风险。在上述试验研究基础上，标准起草组广泛查阅了我国现有可供参考的多项国家或行业技术法规和标准（见表1），对研究成果进行总结和归纳，形成了填埋场土壤-地下水中微塑料生态环境健康风险评估技术方法体系。在广泛征求相关领域专家的意见建议后，进一步修改完善，使得标准草案更具科学性、规范性、实用性和可操作性。

表1 参考相关标准目录

序号	标准名称
1	HJ 2016-2012环境工程 名词术语
2	HJ 1111-2020 生态环境健康风险评估技术指南 总纲
3	HJ 25.1-2019 建设用地土壤污染状况调查技术导则
4	HJ 25.3-2019 建设用地土壤污染风险评估技术导则
5	DB51/T 2988-2022 四川省固体废物堆存场所土壤风险评估技术规范
6	T/CAEPI 109—2025 水质 微塑料丰度光谱检测技术规范
7	T/CSTM 00886-2024地下水中微塑料的测试 傅里叶变换显微红外光谱法
8	T/EERT 001-2019 农用地土壤污染风险评估技术指南
9	T/SSSC 016-2025 土壤环境微塑料监测技术规范
10	WS/T 777-2021 化学物质生态环境健康风险评估技术指南
11	环办便函〔2022〕382号 危险废物处置场和垃圾填埋场地下水环境状况调查评估技术指南

（4）起草标准草案

根据整理的相关试验及研究成果数据，结合国内外相关标准文献资料，起草编写了《填埋场土壤-地下水中微塑料生态环境健康风险评估技术指南》标准的初稿。初稿完成后，起草小组成员针对各条款进行了认真研究和讨论，修改形成递交初稿。初稿报中国土壤学会申请立项，经专家评审论证，确定符合立项要求，获得立项。

(5) 起草标准征求意见稿

本标准征求意见稿共发送至13家单位征求意见,回函单位13家,回函率100%,其中有建议或意见的单位13家,无意见单位0家,共收集反馈意见94项。编制组逐条梳理并认真研讨了所有反馈意见,最终处理结果为:采纳90项,部分采纳3项,未采纳1项。总体来看,征求意见范围覆盖了填埋场管理、土壤与地下水污染防治、微塑料环境风险评估等相关领域的代表性单位,反馈意见全面且具有针对性,为本标准的修改完善提供了重要依据。

4. 起草组成员及其所做的主要工作

起草组成员及其任务分工具体如下表所示:

表2 起草组成员及其任务分工

姓名	性别	职务/职称	工作单位	任务分工
彭程	女	教授	华东理工大学	组织编写
隋倩	女	院长/教授	华东理工大学	技术指导
宋立杰	女	总工程师/正高级工程师	上海环境卫生工程设计院有限公司	技术指导
张卫	男	教授	华东理工大学	技术指导
涂晨	男	副研究员	中国科学院南京土壤研究所	技术指导
韦婧	女	研究员	生态环境部南京环境科学研究所	技术指导
邱清文	男	总工程师/正高级工程师	上海环境卫生工程设计院有限公司	技术指导
周磊	男	副教授	华东理工大学	技术研究
刘惠	女	高级工程师	上海环境卫生工程设计院有限公司	技术研究
王宇航	男	教授	中国地质大学(武汉)	技术研究
顾雍	男	高级工程师	上海环境卫生工程设计院有限公司	技术研究
陈文岭	男	副教授	中国地质大学(武汉)	技术研究
杨杰	男	助理研究员	中国科学院南京土壤研究所	技术研究
龚凯林	男	博士后	华东理工大学	技术验证
谢雯雯	女	博士	华东理工大学	技术验证
张鹏	男	研究助理	华东理工大学	技术验证
陈小艺	男	研究助理	华东理工大学	技术验证

乔治华	男	副研究员	华东理工大学	技术验证
杨悦心	女	研究助理	华东理工大学	技术验证
茜静然	女	研究助理	华东理工大学	技术验证
李敏萱	女	研究助理	华东理工大学	技术验证

二、标准编制原则和确定标准主要内容

1. 标准编制原则

本标准依据GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的要求和规定起草。本标准的制订遵循“科学性、规范性、适用性、先进性”的原则，依据国家相关法律法规和相关强制性标准的规定和要求，同时针对我国历史不规范填埋场土壤-地下水中微塑料污染来源复杂、生态环境健康风险不明、评估方法不统一等问题，以“污染识别-危害判断-暴露表征-风险评价”为主线，将填埋场源微塑料的环境行为、生态毒性效应及多途径暴露评估纳入同一技术体系，强调“源识别-暴露评估-效应评估-风险表征”全过程管理。

本标准起草组通过历史不规范填埋场及周边农田的实地调查采样、微塑料定性定量分析、土壤-地下水中微塑料三维特征量化、多模型生态风险评估验证、蒙特卡罗模拟不确定性分析、扬尘叶面暴露途径验证、食物链传递规律研究等系统研究，经过科学的总结、梳理和提炼，提出《填埋场土壤-地下水中微塑料生态环境健康风险评估技术指南》。本标准结合微塑料污染的环境行为和毒性效应，对填埋场场景下的风险评估程序、参数体系和技术要求进行了系统整合与补充，属于对现有标准体系的延伸和完善。

2. 确定标准主要内容的论据

本标准的主要内容涵盖填埋场土壤-地下水系统微塑料污染源调查与识别、危害识别、暴露评估、效应评估及风险表征五个方面，这些内容的确定均基于系统的试验验证和国内外风险评估方法研究成果，科学合理地规范填埋场土壤-地下水中微塑料生态环境健康风险评估的技术程序，具体如下：

本标准首先明确了填埋场微塑料污染源调查与识别的技术要求。污染源调查是风险评估的起点，微塑料的丰度、聚合物类型、粒径分布、形状分布及空间分布特征，直接决定了后续风险判断的准确性和评估结果的可信度。历史不规范填埋场缺少规范的防渗和污染阻隔措施，其释放的微塑料具有粒径小、迁移能力强、易扩散的特征，对周边土壤和地下水环境构成长期威胁。因此，标准将微塑料丰度、聚合物类型、粒径分布、形状分布及空间异质性作为污染源调查的核心参数，并规定了相应的采样布点密度和分析方法要求，以确保污染源特征识别的系统性和代表性。

其次，本标准构建了危害识别与效应评估的技术方法。危害识别是连接污染调查与风险评估的关键环节。微塑料作为颗粒污染物，其危害效应与传统化学污

染物存在显著差异，不仅取决于丰度，还与粒径、聚合物类型、表面理化性质等因素密切相关。研究表明，小粒径微塑料具有更高的环境反应活性和组织穿透能力，高危害聚合物类型（如聚丙烯腈等）在低丰度条件下仍可能导致显著风险，单纯基于丰度的评价方法难以充分反映上述风险差异。因此，标准在危害识别中引入证据综合与证据集成方法，要求将微塑料的粒径、浓度、形状、聚合物类型及表面老化程度纳入危害判断的关键参数。在效应评估方面，标准引入物种敏感度分布（SSD）方法推导预测无效应浓度（PNEC），并推荐采用蒙特卡罗模拟等概率化方法开展不确定性分析，以弥补传统静态评价方法对尾部风险和关键控制因子表征不足的问题。

最后，本标准规定了暴露评估与风险表征的技术要求。填埋场源微塑料存在经土壤摄入、地下水饮用、皮肤接触、扬尘吸入及食物链传递等多途径暴露的可能性，小粒径微塑料因其高迁移性和组织穿透能力，具有更高的多途径暴露潜力。因此，标准在暴露评估中兼顾多种暴露途径，将小粒径微塑料作为暴露评估的重点关注对象。在风险表征方面，标准综合采用危害商（HQ）、致癌风险（CR）、危害指数（HI）及累积致癌风险（CCR）等指标，从生态环境风险和健康风险两个维度进行综合判断，并规定在不确定性较高时应采用概率化方法进行补充评估，以确保风险判断的科学性和可信度。

三、主要试验的分析报告，技术经济论证，预期的经济效果

1. 主要试验与验证基础

本标准编制过程中，依托国家重点研发计划“历史不规范填埋场土壤-地下水中微塑料形成机制与污染风险”（2023YFC3711600）项目研究成果，以历史不规范填埋场及周边农田土壤微塑料污染特征识别、土壤-地下水中微塑料三维特征量化、多模型生态风险评价、扬尘叶面暴露途径验证、食物链传递规律等研究内容为基础，对本标准涉及的微塑料风险识别、危害判断、暴露表征及风险评价技术路径进行了系统验证。研究结果表明，历史不规范填埋场是周边农田土壤微塑料污染的重要释放源，填埋场与周边农田之间存在较明确的污染扩散与传递关系，具备建立填埋场土壤-地下水微塑料生态环境健康风险评估技术指南的现实基础和数据支撑。

（1）土壤微塑料污染特征识别

选取浙江省嘉善县某历史不规范填埋场及周边农田作为典型研究区，该填埋场于2000年启用，2005年关闭，占地面积约4800 m²（长80 m，宽60 m），累计填埋废物总量约为2万m³，主要成分包括塑料、橡胶及纺织品等。因填埋场建设初期缺乏渗滤液收集与处理系统，渗滤液长期渗漏，对周围环境造成了严重污染。在填埋场本体布设9个采样点，在周边农田布设15个采样点，采用密度浮选结合显微傅里叶变换红外光谱技术对表层土壤中微塑料进行定性定量分析。验证结果

表明，填埋场表层土壤微塑料丰度为7425.5~21306.5 个/kg，平均丰度为13066.7±3813.9 个/kg（图1）；周边农田土壤微塑料丰度为199.5~2868.5 个/kg，平均丰度为1092.6±831.3 个/kg¹（图2），填埋场表层土壤微塑料丰度显著高于周边农田，且空间分布存在明显异质性。填埋场与农田土壤中检出的微塑料类型均以PET和PE为主，两者合计占比超过70%（图3），小尺寸微塑料（50~1000 μm）在填埋场和农田中的占比分别为70.9%和66.3%（图4），颜色均以透明色为主，占比分别为71.8%和53.1%，形状以纤维和碎片为主（图5）。上述结果表明，历史不规范填埋场是周边农田土壤微塑料的重要来源之一，且其释放的微塑料具有粒径小、迁移能力强、易扩散的特征。

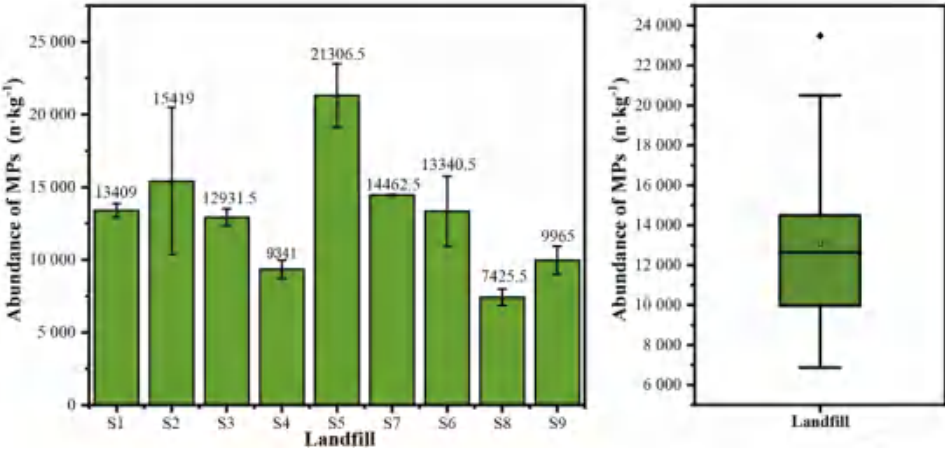


图1 历史不规范填埋场表层土壤微塑料丰度分布

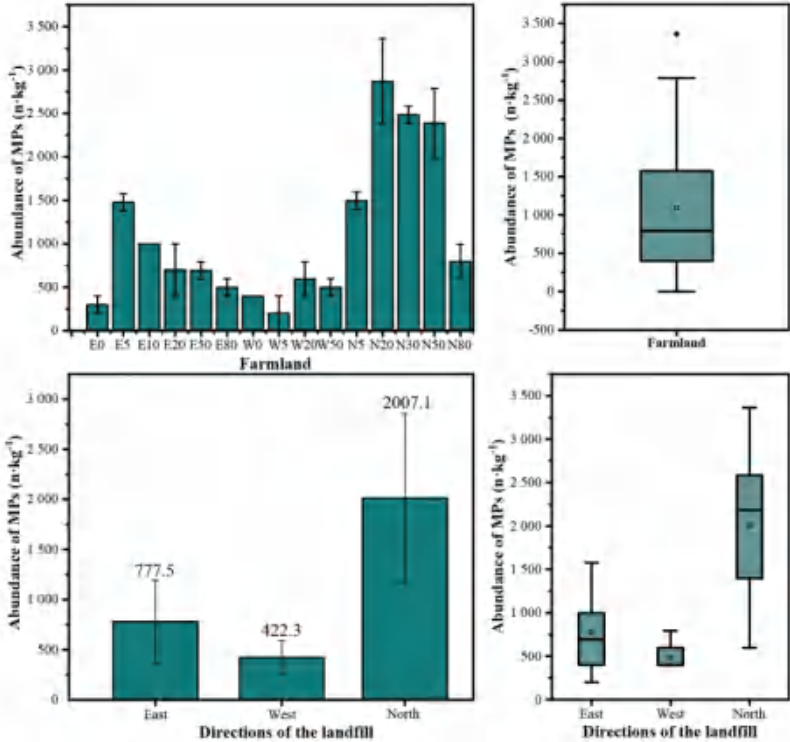


图2 历史不规范填埋场周边农田表层土壤微塑料丰度分布（a）各个点位微塑料丰度分布；（b）北、东、西三个方向微塑料丰度分布

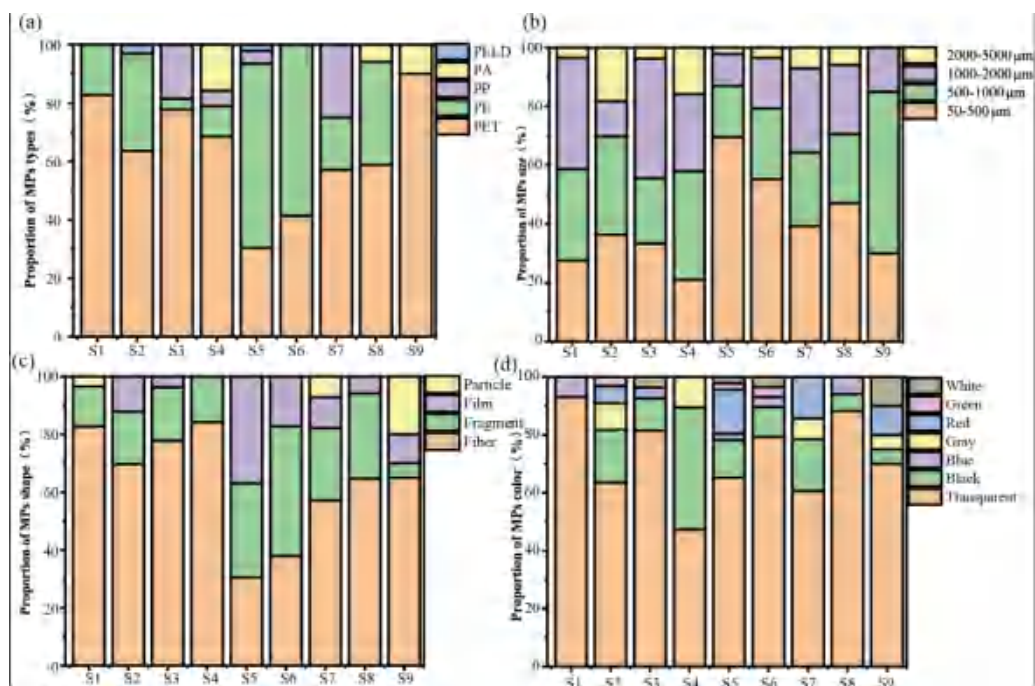


图3 历史不规范填埋场表层土壤中微塑料污染特征 (a) 类型、 (b) 尺寸、 (c) 形状、 (d) 颜色

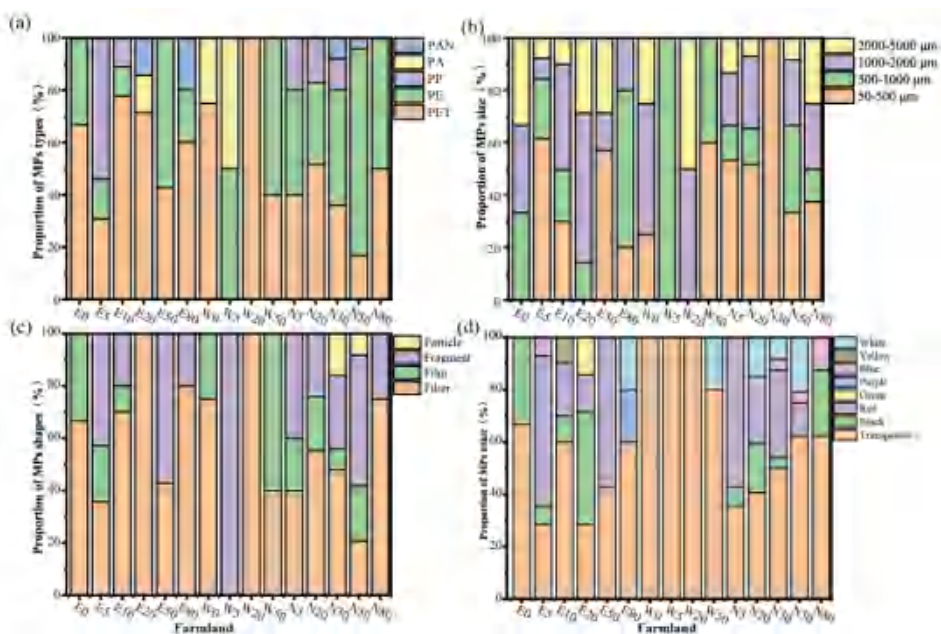


图4 历史不规范填埋场周边农田表层土壤中微塑料的污染特征 (a) 类型、 (b) 尺寸、 (c) 形状、 (d) 颜色

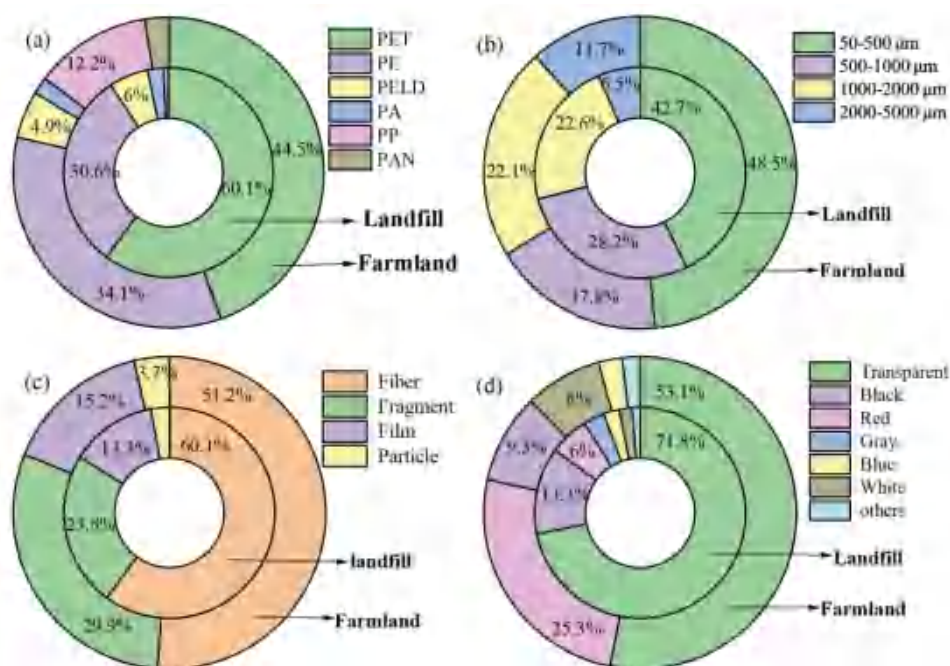


图5 历史不规范填埋场和周边农田表层土壤中微塑料不同污染特征占比

(a) 类型、(b) 尺寸、(c) 形状、(d) 颜色

(2) 土壤-地下水中微塑料三维特征量化

运用以下模型对填埋场土壤和地下水中微塑料的尺寸、形状、密度三维特性进行量化。

a) 尺寸：指数分布模型

$$y = bx^{-\alpha}$$

其中 x 是其最长维度的粒径（微米）， y 是丰度（百分比）。

$b = (\alpha - 1) x_{\min}^{\alpha - 1}$ ；其中 $x_{\min}$ 是方程有效的最小粒径。

b) 形状：双峰分布模型

$$y = f_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} e^{-(x-\mu_1)^2/2\sigma_1^2} + f_2 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2^2}} e^{-(x-\mu_2)^2/2\sigma_2^2}$$

其中 f 、 μ 和 σ 分别是两个正态分布的相对贡献、平均值和标准差。

c) 密度：正态-逆高斯分布（NIG）分布模型

$$y = \frac{\alpha \delta K_1 [\alpha \sqrt{\delta^2 + (x - \mu)^2}]}{\pi \sqrt{\delta^2 + (x - \mu)^2}} e^{\delta \sqrt{\alpha^2 - \beta^2} + \beta(x - \mu)}$$

其中 μ 、 δ 、 α 和 β 分别表示分布的位置、尺度、尾部重量和不对称性。 K_1 是第三类改进的贝塞尔函数，阶数为1。

量化结果如表3所示：

表3 填埋场土壤和地下水中微塑料的尺寸、形状、密度三维特性量化

性质	参数	土壤	地下水
尺寸	α	1.1	1.5
形状	$f_1, f_2, \sigma_1, \sigma_2, \mu_1, \mu_2$	0.37, 0.63, 0.03, 0.18, 0.07, 0.43	0.35, 0.65, 0.03, 0.18, 0.07, 0.43
密度	$\mu, \delta, \alpha, \beta$	0.93, 0.05, 2.09, 2.00	0.94, 0.05, 0.53, 0.49

(3) 土壤和地下水中MPs的预测无效应浓度确定

MPs的尺寸、形状和密度对其毒性具有显著影响。已有研究表明，不同尺寸的MPs由于迁移能力的差异，可能导致不同的生物效应；而MPs的形状（如碎片、薄膜、纤维）不仅影响其在生物体内的迁移和累积，也会影响其与生物体表面或环境中其他污染因子的相互作用，其中薄膜类和纤维类MPs对生物组织造成的机械损伤和物理干扰更为显著。此外，MPs的密度决定了其在环境介质（如水体或土壤）中的分布特征，从而影响其被生物摄取的可能性以及与环境污染物的结合行为。因此，将MPs的多维特性纳入SSD曲线分析，不仅能够使得曲线更符合实际场地的MPs特性，也能够更加精准地反映MPs对生态系统的潜在危害，是进一步提升SSD模型实用性和适用性的重要方向。

为进一步优化SSD曲线，系统性地收集了2017年至2024年期间发表的关于土壤中MPs尺寸、形状、类型对其生物毒性影响的相关文献。在Web of Science中使用关键词（"microplastic*" OR "plastic particle*" ; "size" OR "shape" OR "type" ; "toxicity" OR "toxic effects"）组合进行文献检索。筛选标准要求研究必须报告实验中所使用的MPs的尺寸、形状、类型情况，并报告毒性值。共检索出相关文献1896篇，初筛后剩余土壤MPs毒性文献108篇。

对于每项符合标准的研究，记录以下信息：（1）研究物种和分类群；（2）MPs特征（尺寸、形状、类型）；（3）实验设计（暴露持续时间、实验终点、毒性值）。在同一类研究中，若同一物种存在多个实验终点，优先选用慢性毒性值；若存在多个毒性值，则选取丰度最低的值（即对应MPs毒性最高的值）纳入数据库。经过进一步详细阅读文献筛选，最终剩余有效数据文献17篇，共收集到有效MPs毒性数据33条。

根据Koelmans等人提出的方法，现有的SSD曲线绘制方法需要进行两项关键修正，以使其与环境中MPs的实际情况（特别是多分散性）保持一致：使其与环境中MPs浓度保持一致：一是不同实验所得到的MPs毒性数据需要进行换算，将实验所用的单一粒径MPs毒性值换算为符合环境中MPs粒径尺寸分布规律的毒性值；二是将实验室测试所得到的MPs毒性数据修正为实际环境浓度对应毒性数

据。在实验中，由于使用的某一固定区间尺寸范围的MPs进行毒性实验，因此在实验中所添加特定尺寸范围的MPs能够被生物100%利用。但在自然环境中，MPs的尺寸成连续分布，其中存在对于某一物种是无法摄入的尺寸范围。另一方面，由于在不同实验中所使用的MPs尺寸、形状、密度各不相同，即使两个相同的阈值效应浓度其反应的实际情况也可能有很大的区别，所以这些不同实验中所得到的阈值效应浓度无法直接进行比较。

单分散MPs的效应测试中报告的阈值效应（数量）浓度可以转换为环境现实多分散MPs可摄入颗粒尺寸范围的阈值效应浓度，只要摄入的总体积保持不变。

$$EC_{X,mono} \times V_{mono} = EC_{X,poly} \times V_{poly}$$

$$V_{poly} = \frac{\sum_{i=1}^{i=k} V_{poly,i}}{k_{ingestible}}$$

$$EC_{X,poly} = EC_{X,mono} \frac{k \times V_{mono}}{\sum_{i=1}^{i=k} V_{poly,i}}$$

$EC_{X,poly}$ 与可摄入颗粒有关，仍然只是物种所接触的环境MPs总浓度的一部分；量化这个物种特定分数可以将所有 $EC_{X,poly}$ 阈值效应浓度转换为“总”环境MPs ($EC_{X,env}$) 的阈值浓度。

$$EC_{X,env} = \frac{EC_{X,poly}}{f_{available}}$$

通过以上修正，不同实验中所得出的MPs毒性值便可以进行比较，得出更加合理的MPs SSD曲线。

在此基础上，提出一种特定场地对周边环境的生态风险评估方法。该方法对经过上述Koelmans方法优化后的通用SSD曲线进行进一步的场地特异性优化。具体而言，基于特定场地（如本研究中的垃圾填埋场）实测得到的MPs尺寸、形状、密度分布特征，对通用SSD曲线所依据的毒性值进行针对性校正。即，在实施过程中，将20-5000 μm 定为默认的MPs尺寸范围（选用20 μm 作为下限主要受当前显微傅立叶红外检测手段的限制，可视具体情况调整）。为了统一比较，将不同实验中使用的MPs尺寸范围进行换算对齐，以获得覆盖整个20-5000 μm 尺寸范围的MPs数量浓度估计值。需要注意，选择不同的MPs尺寸下限会对换算后的数量浓度产生显著影响，因为尺寸越小的MPs数量占比越高，对总数量浓度的贡献极大。利用校正后得到的环境MPs阈值浓度 ($EC_{X,env}$) 绘制更加符合该特定场地MPs污染特征的SSD曲线（图6），并据此评估目标场地中MPs对周边环境的生态风险。基于此曲线计算得到土壤和地下水中MPs的HC₅为999.56个/kg和11.77个/L，该值具有环境参考意义。

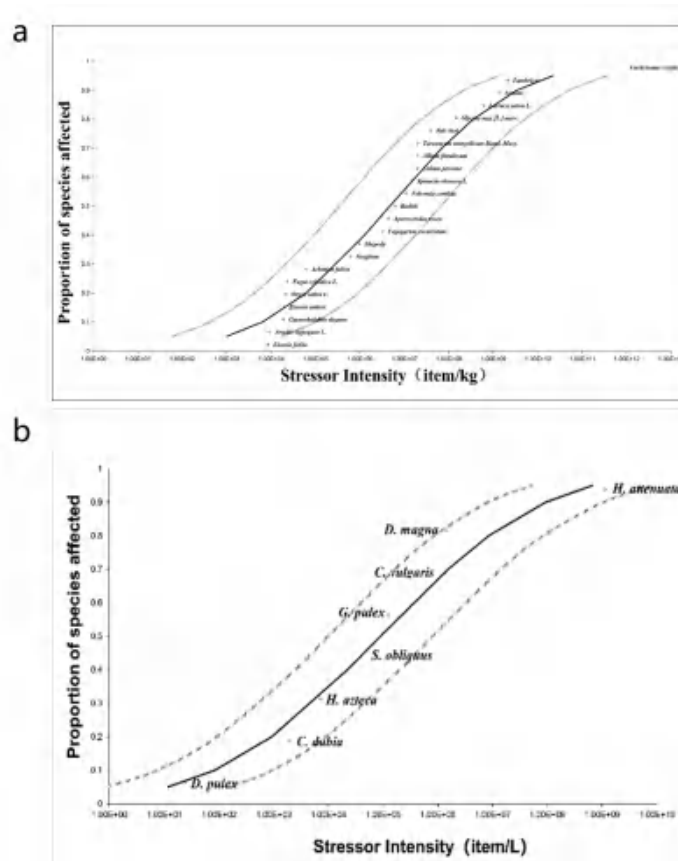


图6 校正后的填埋场土壤（a）和地下水（b）中MPs的物种敏感性分布曲线

（4）多模型生态风险评价

采用污染负荷指数法（PLI）、改进风险商法（RCR）和多特征潜在风险指数法（MPERI）对填埋场表层土壤、周边土壤以及地下水的MPs进行生态风险评估。

a) 污染负荷指数法（PLI）

具体计算公式如下：

$$CF_i = \frac{C_i}{C_{oi}}$$

$$PLI = \sqrt{CF_i}$$

$$PLI_{ZONE} = \sqrt[n]{PLI_1 \times PLI_2 \times PLI_3 \cdots PLI_n}$$

CF_i ----MPs的污染系数；

C_i -----在特定采样点处MPs的实际含量，单位为 个/kg；

C_{oi} ----参考值，选择类似方法所获得的MPs丰度数据，本研究中土壤参考值取2462 个/kg，地下水参考值取38 个/L。

PLI法中将污染风险分为三个等级，如表4 PLI风险等级所示：

表4 PLI风险等级

PLI值	<1	1-2	>2
污染程度	轻度污染	中等污染	重度污染

b) 改进风险商法（RCR）

PLI值与采样点MPs丰度呈正相关，选择不同的MPs参考值（C₀）也会影响到PLI的最终计算结果，而对于MPs参考值来说，至今没有一个统一的标准。环境中MPs污染较为复杂，MPs丰度只是分析途径之一，较为片面。因此，研究环境中MPs生态风险还需要与其他方法组合，对环境MPs污染风险进行更加

改进风险商法结合MPs的丰度与聚合物类型，能够更加全面的评估MPs的环境生态风险。计算公式如下：

$$\begin{aligned} Z &= K \times S \\ H &= \sum P_i \times Z_i \\ MEC_z &= MEC \times H \\ RCR &= MEC_z / PNEC \end{aligned}$$

S----MPs 危害系数；

H ----由MPs引起的聚合物风险指数；

K ----取值 3/16，调整系数；

Z----调整后的聚合物危害系数；

P ----该MPs在环境中的占比；

MEC_z----调整后MPs占比；

RCR ----风险表征比率；

PNEC----无效应浓度，根据组内SSD曲线拟合计算，取999.56个/kg，该值由上述SSD曲线拟合得到；地下水中微塑料的PNEC值取 11.77个/L。

风险概率表征（RCR）将污染程度分为四个等级，如表5 改进风险商法污染等级所示：

表5 改进风险商法污染等级

风险概率表征（RCR）	风险等级
0 < RCR < 1	无显著风险
1 < RCR < 10	低风险
10 < RCR < 100	中风险
RCR > 100	高风险

c) 多特征潜在风险指数法（MPERI）

上述改进后的RQ法考虑到了MPs的类型与毒性效应，但未考虑MPs的颜色、粒径、形状等多维特征，故引入多特征潜在风险指数法（MPERI）以全面评估MPs生态风险，该方法具有较强综合性，适合复杂污染系统，但参数选取依赖于专家权重打分，计算公式如下：

$$PLI = \sqrt{\frac{C_i}{C_0}}$$

$$T_{polymer_i, shape_i, color_i} = \sum_{n=1}^n P_{polymer_n, shape_n, color_n} \times S_{polymer_n, shape_n, color_n}$$

$$Ti_m = \sum T_{polymer} \times (0.2T_{color} + 0.8T_{shape}) \times P_{size}$$

$$MPERI = PLI \times Ti_m$$

其中， Ti_m 作为新的毒性指数是基于微塑料污染负荷指数（PLI）、聚合物危害指数（ $T_{polymer}$ ）、颜色危害指数（ T_{color} ）、形状危害指数（ T_{shape} ）和小尺寸微塑料百分比（ P_{size} ）计算的。不同多维特征的危险参数参考Chang等的研究，使用公式确定聚合物、颜色和形状的危险指数。MPERI根据其得分分为五个等级，如表所示：

表6 MPERI评估标准

风险类别	I（轻微风险）	II（中等风险）	III（高风险）	IV（严重风险）	V（极度风险）
MPERI	<10	10-100	100-500	500-1000	>1000

研究采用污染负荷指数法（PLI）、改进风险商法（RCR）和多特征潜在风险指数法（MPERI）对研究区域进行了多模型对比分析（图7），分别侧重丰度、毒性与多维特征的综合考量。对不同生态风险指数的累积进行概率模拟迭代100000次后量化（图8），并通过敏感度分析量化不同参数对生态风险评价结果的贡献程度（图9）。PLI方法评价填埋场整体处于中高风险水平，周边农田整体处于中低风险水平；周边农田土壤PLI均值为0.64，处于低风险水平，而填埋场表层土壤PLI均值为2.27，处于高风险水平；同时，周边农田仍有8.15%的累积概率处于中高风险，表明局部高风险情形不容忽视。RCR和MPERI方法同样表明填埋场的中高风险累积概率显著高于周边农田，并且微塑料类型是影响风险结果的核心参数，其中部分含聚丙烯腈（PAN）类微塑料的点位风险显著升高。上述研究结果为本标准中将微塑料类型、丰度及多维特征共同纳入风险评估提供了直接依据。进一步分析发现，在RCR>10的条件下，填埋场表层土壤进入中高风险的累积概率显著高于周边农田，提示确定性RCR评价对填埋场风险存在低估可能。敏感性分析结果表明，填埋场RCR指数贡献最大的参数为微塑料实测丰度（MEC），而周边农田的主要敏感参数为PAN聚合物类型；MPERI模型则显示，填埋场和周边农田中影响风险结果贡献率最高的参数均为微塑料类型。

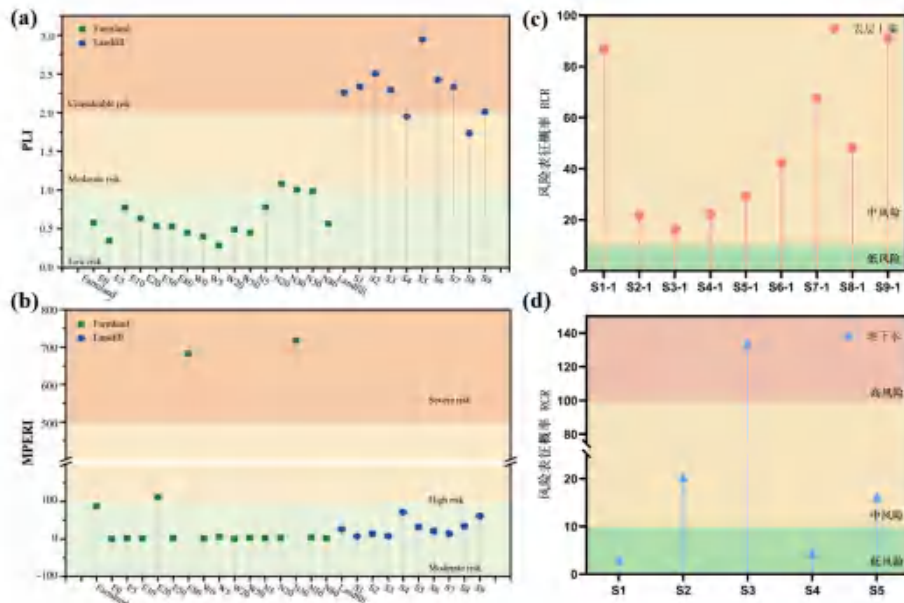


图7 历史不规范垃圾填埋场及周边农田表层土壤和地下水中微塑料的生态风险评价结果（a）污染负荷指数法、（b）多特征潜在风险指数法、（c和d）改进风险商法

PLI操作简便，适用于大范围丰度筛查，但未考虑聚合物毒性差异。RCR和MPERI均将聚合物毒性系数作为核心权重因子，PAN作为含氰基的高分子材料，其单体具有显著生物毒性，且在环境降解过程中可能释放氰化物等有毒副产物，因此，低丰度下出现中高风险评级。MPERI综合了丰度、毒性和粒径等多维特征，信息更全面，但计算过程相对复杂。通过系统对比三类方法的评价结果，可明确其在填埋场场景下的适用边界，为本标准中采用“丰度+聚合物类型+其他特征”的多指标联合评估框架提供依据。

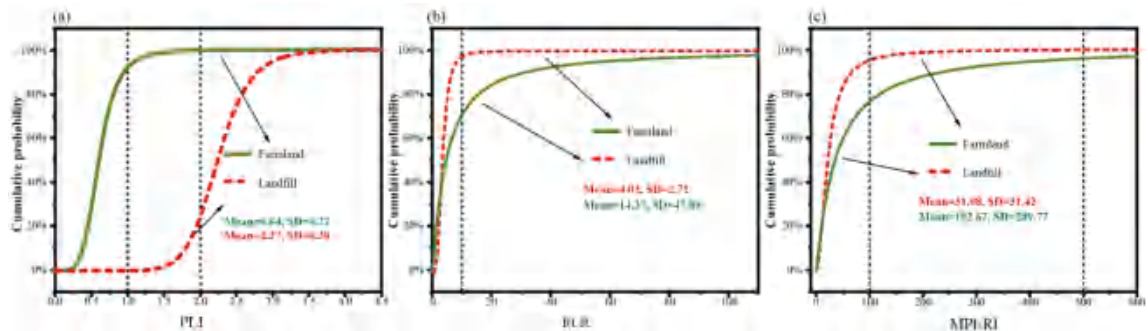


图8 蒙特卡罗模拟累积概率图（a）污染负荷指数法、（b）改进风险商法、（c）多特征潜在风险指数法

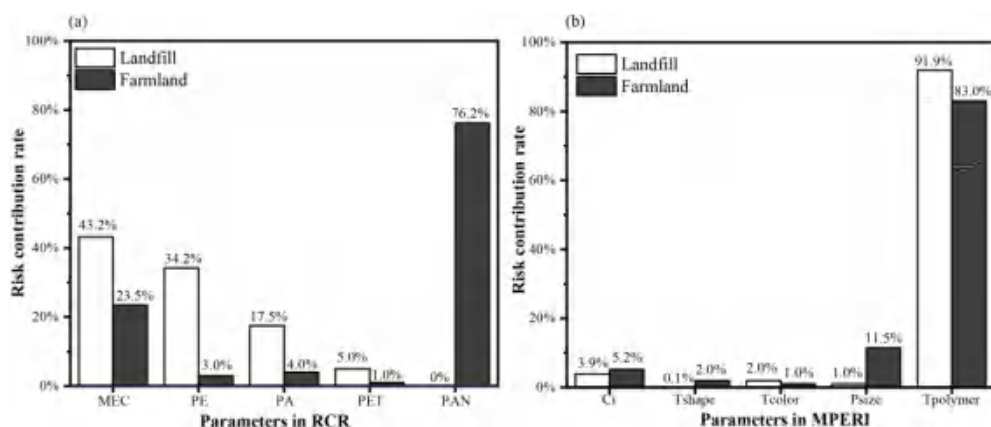


图9 蒙特卡罗模拟风险敏感度图 (a) 改进风险商法、(b) 多特征潜在风险指数法

(5) 土尘叶面暴露吸收途径验证

在暴露效应与健康风险相关验证方面，围绕场地主导微塑料类型PET，进一步开展了模拟自然光老化和叶面降尘暴露实验。实验设置空白对照组、单一降尘暴露组及4个PET微塑料处理组。单一降尘暴露组（P0）仅添加降尘，不添加微塑料，用于排除降尘基质本身的影响。4个处理组按粒径（小粒径1-5 μm 、大粒径约10 μm ）和投加量（低浓度0.5%、高浓度2%，均以w/w计，即微塑料质量/土壤干重）进行两两组合，分别为：小粒径低浓度组（SP0.5）、小粒径高浓度组（SP2）、大粒径低浓度组（LP0.5）和大粒径高浓度组（LP2）。空白对照组（CK）不添加任何降尘或微塑料。结果表明，自然光照老化可显著改变PET微塑料表面性质，使其表面粗糙度增加并生成含氧官能团，从而增强其在环境中的反应活性和复合暴露潜力。以生菜为模式植物开展降尘叶面暴露实验后发现，PET微塑料显著抑制生菜生长，高浓度小粒径处理下叶面积和根重分别降低22.6%和31.6%（图10），叶片光合色素明显降解，Rubisco活性下降至对照组的10.2%（图11）；抗氧化-解毒系统则表现出明显应激响应，低浓度处理可诱导SOD活性升高，而高浓度处理则导致SOD活性明显下降，GST活性最高可达对照组的5.7倍。纳米高光谱显微成像与扫描电镜结果进一步证实，小粒径PET微塑料可经叶面降尘途径穿透叶片表皮并在组织内累积，表明填埋场源微塑料不仅可在土壤环境中累积并造成生态风险，还可能通过扬尘-沉降-叶面暴露途径对农作物产生潜在危害。该研究结果为本标准在暴露评估中考虑吸入、食物链摄入及植物暴露等多途径情景提供了实证基础。

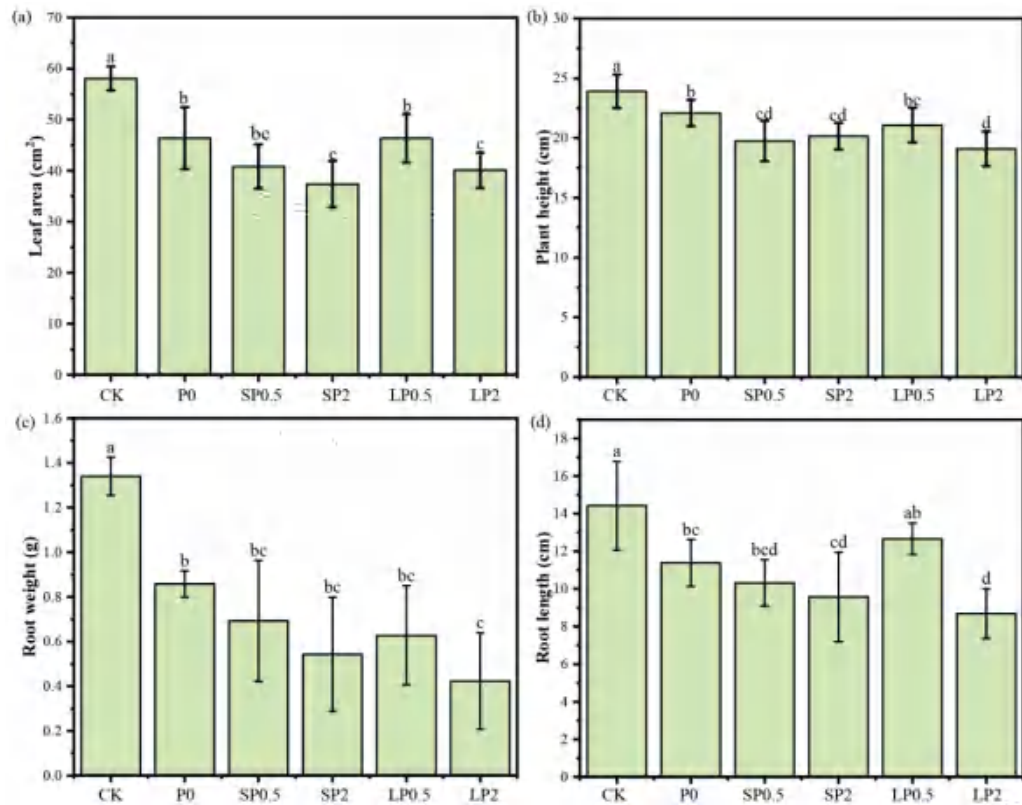


图10 生菜PET-MPs降尘叶面暴露第21天生长指标 (a) 叶面积、(b) 株高、(c) 根重、(d) 根长 (不同字母表示差异显著 $p < 0.05$)

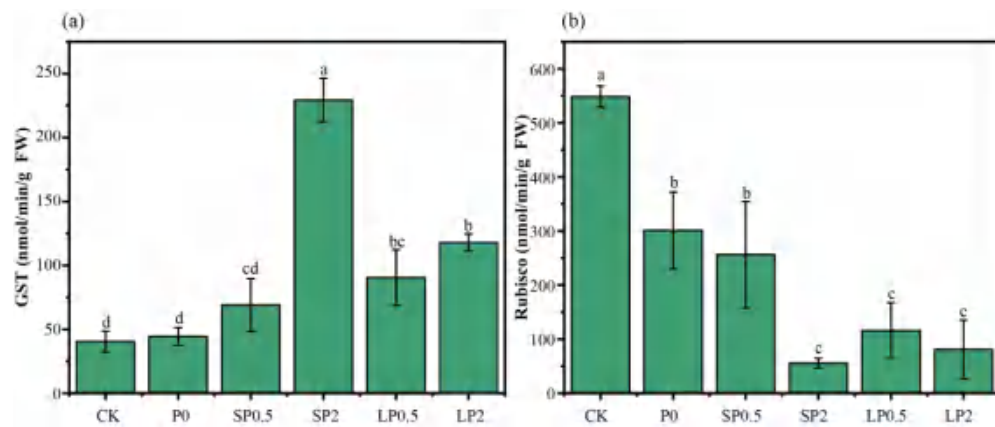


图11 生菜PET-MPs降尘叶面暴露解毒机制和光合作用酶活性 (a) GST、(b) Rubisco (不同字母表示差异显著 $p < 0.05$)

纳米高光谱显微成像 (HSM) 与扫描电镜 (SEM) 结果共同证实, 高浓度小粒径PET微塑料 (PET-MPs) 可在降尘介导下经大气沉降途径进入生菜叶片组织。CK组仅呈现微弱背景信号 (图12a), 映射后对照组无PET-MPs特征信号 (图12b), 表明自然状态下生菜叶片无PET-MPs富集; 而暴露组映射中可清晰观察到大量红色PET-MPs特征信号 (图12d), 且信号呈弥散状分布于叶片组织内部, 结合PET标准光谱的匹配验证, 直接证明高浓度小粒径PET-MPs可穿透生菜叶片表皮并进入内部组织 (图12c)。这一结果直观体现了降尘作为载体, 在大气沉降过程中

携带PET-MPs完成叶面附着与渗透的过程。

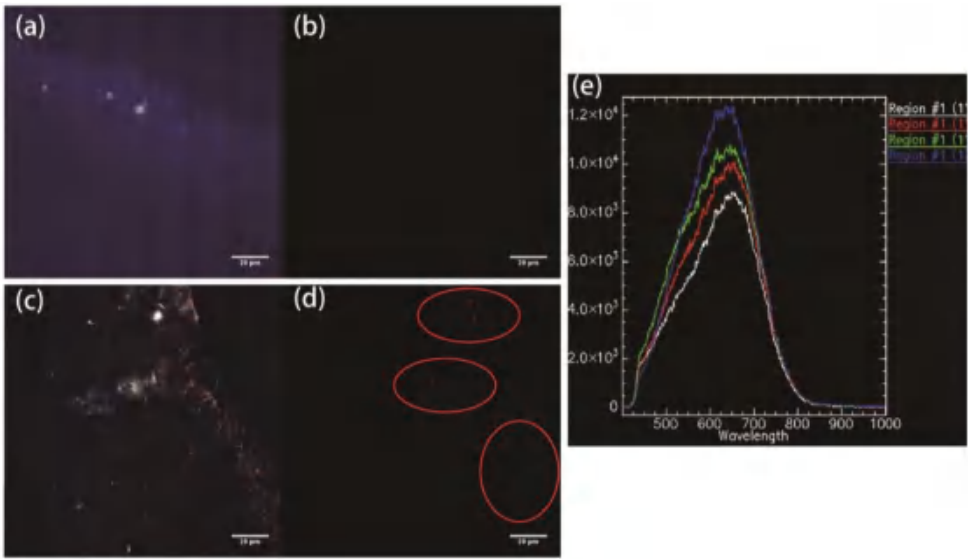


图12 高浓度小粒径PET-MPs降尘叶面暴露后生菜叶片HSM图 (a) 对照组、(b) 映射后对照组、(c) 映射后的暴露组、(d) 去除组织的映射后暴露组、(e) PET材料光谱信息

SEM图像进一步提供了PET-MPs侵入叶片的直接物理证据：对照组叶片表面结构完整、褶皱平缓，而高浓度小粒径暴露组叶片表面可观察到大量粒径约1 - 2 μm 的不规则颗粒附着，部分颗粒嵌入叶片褶皱与细胞间隙，甚至穿透表皮层进入组织内部（图13）。这些颗粒与PET-MPs颗粒形态高度吻合，且在高倍镜下可观察到颗粒与叶片细胞壁的紧密结合，表明PET-MPs除了在叶面富集，可能还通过物理磨损与机械挤压穿透叶片角质层与表皮屏障，最终实现向叶片内部的迁移。

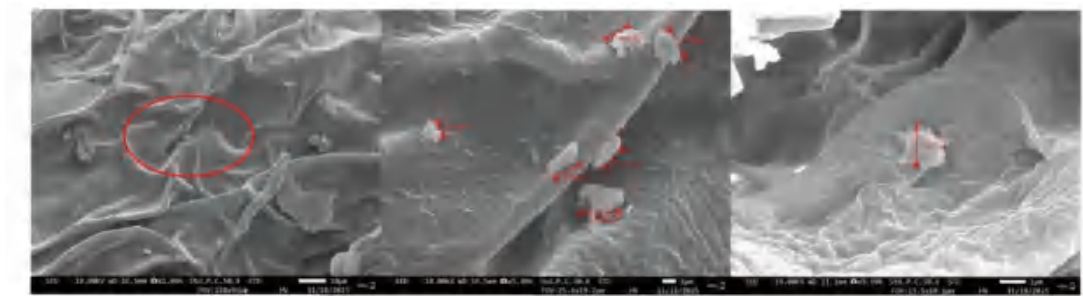


图13 高浓度小粒径PET-MPs降尘叶面暴露后生菜叶片组织SEM图
(5) 微纳塑料的陆生食物链传递规律研究

将生菜根部暴露在含有160 nm和2 μm PS MPs的砂培体系中28天，收集地上部分冷干后饲喂蜗牛（直接暴露，D）；同时测定生菜中积累量，设置等量浓度的MPs以饮食直接暴露形式与生菜混合后饲喂蜗牛，作为对照（间接暴露，ID）。结果表明，蜗牛消化组织中MNP_s的含量均在暴露阶段（E2-E14）增加，并在清

除阶段（C4-C28）减少（图14）。相较于E2，E14时蜗牛消化组织内MNPs含量分别增加了4.37（0.16D）、2.11（0.16ID）、2.53（2D）和2.37（2ID）。0.16ID组较0.16D组高出62.23%，2ID组较2D组高出212.40%。表明间接暴露会导致更高的累积水平，可能是由于MNPs在生菜体内形成蛋白质冠层从而提升其在蜗牛体内的吸收效率。在28天清除阶段，四个处理组的MNPs含量分别降低了89.6%（0.16D）、87.6%（0.16ID）、81.1%（2D）和71.3%（2ID）。直接暴露组的排泄效率高于间接暴露组，2D的清除率比2ID高出13.74%。因此，间接暴露在促进MNPs积累的同时，还会导致其在消化系统中更难以排出。

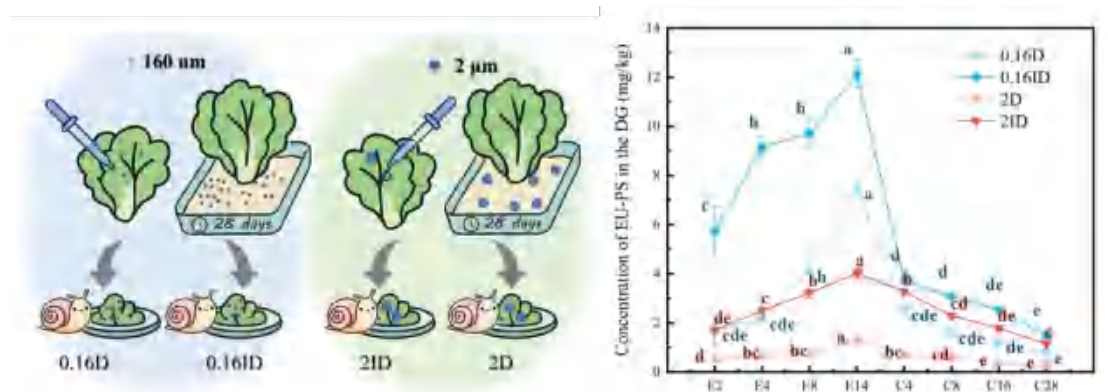


图14 饮食直接暴露和食物链间接暴露PS MPs 28天内蜗牛体内MPs动态积累和清除特征

通过对蜗牛在暴露期和恢复期内粪便中微纳塑料浓度的监测发现，不同粒径及暴露途径对颗粒在肠道内的转运模式产生了显著影响（图）。在为期14天的暴露期内，小粒径组（0.16 µm）粪便中的 MNPs 浓度远高于大粒径组（2 µm），且直接暴露组的粪便排放浓度均高于等粒径间接暴露组，0.16D组粪便中NMPs含量在E10时达到90.39 mg/kg的峰值。这表明直接暴露组摄入的微塑料大部分仅是穿肠而过，随后被快速排出。相比之下，0.16ID组在暴露期的粪便排放量较低，暗示其摄入的颗粒更多地滞留在体内或穿透肠道屏障进入了组织深处，而非随粪便立即排出。进入28天的恢复期后，粪便中的MNPs浓度呈现出关键的反转现象。虽然所有组别的排放量均显著下降，但0.16ID组在恢复期初期的粪便排放浓度显著高。0.16D组及其他处理组，并随着恢复时间的延长逐渐降至基线水平。暴露期排放少、恢复期排放多的现象有力地证明了间接暴露途径具有更强的生物蓄积性。小粒径颗粒经植物组织摄入后，更易在蜗牛体内深层组织中发生累积，并在停止暴露后通过机体的自我清理机制缓慢向肠道转移并排出。

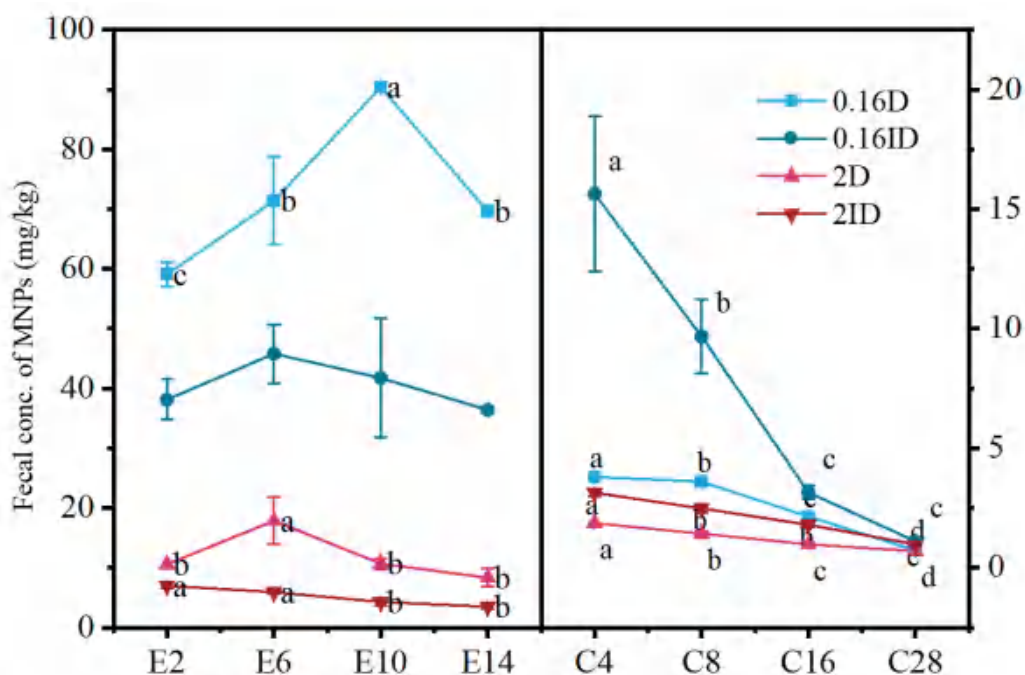


图15 饮食直接暴露和食物链间接暴露微纳塑料在蜗牛体内的排泄动力学

2. 技术经济论证

(1) 技术可行性

指南的技术基础已经具备。在风险评估方法方面，污染负荷指数法（PLI）、聚合物风险指数法（H）和潜在生态危害指数法（PERI）已在填埋场微塑料生态风险评估中得到实证应用，蒙特卡罗模拟等概率风险评估方法也在该领域得到推广。在检测技术方面，傅里叶变换显微红外光谱技术（ μ -FTIR）等标准化检测手段日趋成熟，为指南的落地实施提供了可操作的技术工具。

(2) 成本分析

指南实施的成本主要涉及检测设备与耗材成本、人员培训与能力建设、合规性监测的常态化支出等环节。微塑料分析通常需要显微红外光谱仪等设备，初始资本投入和持续耗材费用较高。填埋场管理单位和监测机构需要投入培训资源，掌握标准化的采样、前处理和风险评价方法。这部分成本属于一次性投入，可在后续常态化监测中摊销。指南实施后，相关填埋场需定期开展土壤-地下水微塑料风险评估监测，产生持续性运营成本。但标准化流程本身即可通过减少重复实验和无效采样来压缩总支出。

3. 预期经济效果

(1) 检测成本的显著节约。标准化指南的统一采样和分析流程，可减少因方法不一致导致的重复检测和数据无效问题。对于需要开展常态化监测的填埋场群体而言，这一成本节约具有显著的规模效应。

(2) 环境风险管控的早期效益。微塑料污染的经济评估研究显示，每吨微塑料废物的排放对应的经济价值约为16500美元。填埋场作为微塑料的重要来源，

其渗滤液和地下水中微塑料的持续泄漏将造成显著的环境经济损失。指南的实施使风险评估从定性判断走向定量标准化,有助于在污染扩散前识别高风险场地并采取针对性管控措施,避免污染范围扩大后所需的高昂修复成本。早期风险评估的成本远低于事后修复的经济代价。

(3) 管理决策效率的提升。指南提供的标准化风险评估框架,使环境管理部门能够基于统一的数据口径进行填埋场风险分级和优先管控排序。当前PLI、RCR、MPERI等多种方法在填埋场和农田中可能给出不一致的风险判定结论,统一的方法学规范可以减少决策过程中的信息不确定性,提高监管资源配置效率。

(4) 产业带动效应。指南的实施将催生对标准化微塑料检测设备、采样耗材和数据分析服务的市场需求,推动环境监测产业向微塑料这一新兴领域延伸。同时,指南可作为后续污染场地修复技术规范制定的前置标准,形成“评估—管控—修复”的完整标准链条。

四、标准涉及的相关知识产权说明

本标准不涉及相关专利及其他知识产权问题。所有引用的标准和文献均已注明出处,并尊重原作者的知识产权。

五、采用国际标准的程度与水平的简要说明,与现行有关法律法规和强制性标准的关系

本标准未等同采用或修改采用国际标准。目前国际上尚未形成专门针对填埋场土壤-地下水中微塑料生态环境健康风险评估的系统性标准,尤其缺乏同时覆盖危害识别、危害表征、暴露评估、风险表征及评估报告编制全过程的技术指南。现有国际研究和技术文件主要集中于微塑料的环境监测、样品前处理、光谱检测、生态毒理效应研究以及风险评估方法探索等方面,尚未建立适用于填埋场这一特定污染场景的完整标准体系。因此,本标准是在充分参考国际上环境健康风险评估、生态毒性评价、微塑料检测分析和概率风险分析等通行方法基础上,结合我国填埋场及其他潜在微塑料污染场地的实际环境特征、管理需求和研究基础,自主研究形成的团体标准。

本标准总体上借鉴了国际通行的风险评估基本框架,即按照“危害识别-危害表征-暴露评估-风险表征”的逻辑开展评价,并针对微塑料作为污染物在粒径、形状、密度、聚合物类型及多途径暴露方面的特殊性,对传统化学污染物风险评估方法进行了扩展和修正。例如,在危害识别部分引入了证据综合、证据集成和生态环境风险初筛的技术思路,在生态风险评估中引入物种敏感度分布(SSD)、预测无效应浓度(PNEC)推导及蒙特卡洛模拟等方法,在暴露评估中兼顾土壤摄入、地下水饮用、皮肤接触、扬尘吸入及食物链传递等多种暴露途径,在风险

表征中采用危害商（HQ）、致癌风险（CR）、危害指数（HI）和累积致癌风险（CCR）等指标进行综合判断。总体而言，本标准技术框架完整，方法体系与国际相关研究进展基本一致，能够反映当前微塑料风险评估领域的发展方向和技术水平，同时具有较强的本土适用性。

国内目前与本标准直接相关的标准和技术文件主要包括《生态环境健康风险评估技术指南 总纲》（HJ 1111-2020）、《建设用地土壤污染状况调查 技术导则》（HJ 25.1-2019）、《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3-2019）、《四川省固体废物堆存场所土壤风险评估技术规范》（DB51/T 2988-2022）、《地下水中微塑料的测试 傅里叶变换显微红外光谱法》（T/CSTM 00886-2024）、《农用地土壤污染风险评估技术指南》（T/EERT 001-2019）、《土壤环境微塑料监测技术规范标准 激光显微拉曼光谱/傅里叶变换红外光谱-光学显微镜法》（T/SSSC016-2025）、《化学物质环境健康风险评估技术指南》（WS/T 777-2021）以及《危险废物处置场和垃圾填埋场地下水环境状况调查评估技术指南》（环办便函〔2022〕382号）等。上述标准或文件分别从风险评估总体框架、土壤和地下水调查、微塑料检测分析、健康风险评价等方面提供了依据，但尚未形成面向填埋场土壤-地下水系统中微塑料生态环境健康风险评估的专门标准。本标准在充分衔接上述标准和技术文件的基础上，结合微塑料污染的环境行为和毒性特征，对填埋场场景下的风险评估程序、参数体系和技术要求进行了系统整合与补充，属于对现有标准体系的延伸和完善。

六、重大意见分歧的处理经过和依据

本标准起草过程中无重大分歧意见。所有起草组成员均对标准内容表示认同和支持，并积极参与标准的制订和完善工作。

七、其他应予说明的事项

在起草标准征求意见稿阶段，顾雍、陈文岭、乔治华、李敏萱四人实质性参与了本标准中第7.4.1、7.4.2、7.4.3和8.2.1条款的修改与完善工作，对微塑料风险评估方法等关键技术内容的确定做出了重要贡献。根据标准编制工作的实际需要，经编制组研究决定，增补顾雍、陈文岭、乔治华、李敏萱为本标准起草人。