

《东北黑土区土壤除草剂生态安全阈值 氟磺胺草醚》

编制说明

一、工作简况

1.1 任务来源

东北黑土区作为我国重要的商品粮生产基地和生态功能区，总面积达 109 万平方公里，耕地面积约 5.62 亿亩，其粮食产量和调出量分别占全国总量的四分之一和三分之一，是保障国家粮食安全的“压舱石”。同时，该区域作为东北亚生态屏障，承载着防风固沙、水源涵养、生物多样性维护等核心生态功能，森林、草地、湿地面积分别占全国的 27%、8% 和 26%，9 个国家级生态功能区覆盖全国 14.3% 的区划面积。习近平总书记强调需通过科学举措强化黑土资源保护，农业农村部先后编制《东北黑土地保护规划纲要（2017-2030 年）》及《东北黑土地保护性耕作行动计划（2020-2025 年）》，标志着黑土保护从传统耕地数量管理转向以“农田生态质量”为核心的综合管控。

随着现代农业集约化进程推进，除草剂已成为东北黑土区农业生产体系的重要组成部分。2021-2023 年东北四省区农药年均施用量达 16.7 万吨（占全国总量 14%），其中除草剂占比达 80%，而氟磺胺草醚作为二苯醚类除草剂的典型代表，因其高效除草活性、良好选择性及较低应用成本，已成为大豆种植区广泛使用的除草剂。然而，氟磺胺草醚具有高持久性、强吸附性及隐蔽迁移特征，实际利用率仅为 20%~30%，未被吸收的部分通过土壤淋溶、迁移进入水体和沉积物系统，导致土壤残留积累，引发后茬作物药害，降低农田生态系统稳定性与生物多样性，并通过食物链传递对人体健康构成潜在风险。

当前，我国现行的《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》（GB 15618-2018）和《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》（GB 36600-2018）尚未纳入氟磺胺草醚等常用除草剂，除草剂的生态毒理基准体系不健全，缺乏针对东北黑土区土壤特性的差异化生态安全阈值。由于黑土区土壤类型多样、理化性质差异显著，不同土壤中污染物的迁移转化规律和生态毒性效应存在较大差异，现有通用标准难以满足区域精准管控需求。因此，开展东北黑土区土壤氟磺胺草醚生态安全阈值研究，编制针对性的阈值标准，对于完善土壤环境质量标准体系、保障黑土资源可持续利用、防控农业面源污染等具有重要的现实意义和科学价值。

1.2 协作单位及起草组成员分工

本文件起草单位：中国科学院南京土壤研究所、兴安盟农牧科学院、生态环境部南京环境科学研究所、中国科学院沈阳应用生态研究所、江苏省农业科学院。

本文件主要起草人：宋洋、滕应、李逸、谢炎杰、宋丽莹、倪妮、任文杰、丁昌峰、徐明恺、生弘杰、杨兴伦、蒋新。

中国科学院南京土壤研究所宋洋、滕应、李逸、谢炎杰、任文杰、丁昌峰、杨兴伦、蒋新负责实验方案制订、样品采集、实验开展、数据处理、文档整理、监督指导、标准起草与修改等工作。

兴安盟农牧科学院宋丽莹负责供试土壤样品采集、标准修改等工作。

生态环境部南京环境科学研究所倪妮负责供试样品分析、标准起草与修改等工作。

中国科学院沈阳应用生态研究所徐明恺负责供试土壤样品采集、标准修改等工作。

江苏省农业科学院生弘杰负责供试土壤样品采集、标准修改等工作。

1.3 主要工作过程

前期调研阶段（2022 年 11 月 – 2023 年 6 月）：开展东北黑土区氟磺胺草醚使用现状与污染特征调研，收集区域农药施用数据、土壤污染监测数据及相关研究文献；梳理国内外土壤除草剂生态安全阈值研究进展、相关标准与技术方法，分析现有研究存在的不足；确定标准编制的技术路线、研究内容及关键技术难点，形成编制工作方案。

实验研究阶段（2023 年 6 月-2025 年 2 月）：采集黑龙江海伦、佳木斯、辽宁阜新、吉林公主岭、内蒙古兴安盟 5 个地区的旱地表层土壤（0-20 cm），测定土壤基础理化参数；开展氟磺胺草醚对典型植物（玉米、大麦、大豆）的生长抑制试验，对赤子爱胜蚓的回避行为试验，对土壤微生物呼吸、群落结构及功能基因的影响试验，获取不同生物终点的剂量-效应关系数据；基于 Log-logistic 模型拟合剂量-效应关系曲线，计算 EC_{10} 、 EC_{50} 等毒性阈值；采用物种敏感性分布法（SSD），结合土壤性质归一化处理，推导不同土壤类型中氟磺胺草醚的 5% 危害浓度（ HC_5 ）值及土壤预测无效应浓度（ $PNEC_{soil}$ ）。

标准草案编制阶段（2025 年 3 月-12 月）：整合实验数据与研究结果，明确标准的适用范围、术语定义、技术要求、监测方法及实施与监督等内容；起草标准文本及编制说明，形成标准草案初稿；组织内部专家评审，对草案的科学性、合理性、可操作性进行论证，修改完善后形成标准草案征求意见稿。

二、标准编制原则和主要内容

2.1 标准编制原则

本标准的制定遵循规范性、科学性、实用性和区域性原则：严格按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则》的规则起草；以国家环境保护法律法规及《土壤污染防治行动计划》为依据，立足我国东北黑土区实际；充分考虑氟磺胺草醚的环境行为特征及黑土区土壤理化性质差异，借鉴国际先进基准制定方法；确保阈值推导过程科学、透明，结果可操作、可验证，服务于土壤环境管理决策。

2.2 标准主要内容

2.2.1 适用范围

本标准规定了保护生态安全的农用地土壤氟磺胺草醚安全阈值及其监测要求，适用于东北黑土区及类似土壤类型区农用地土壤氟磺胺草醚生态风险评价。

2.2.2 标准制定思路

基于保护土壤生态系统完整性的目标，选取陆生植物（玉米、大麦、大豆）、土壤动物（蚯蚓）及土壤微生物（群落结构、功能基因、呼吸作用）为代表性生态受体。通过室内标准化毒性测试，获取氟磺胺草醚的毒性效应数据，利用 SSD 法推导保护特定比例物种的危害浓度（ HC_x ），并结合安全系数确定生态安全阈值。

2.2.3 制定程序

土壤生态安全阈值的制定整体上遵循国家风险管控标准制定的技术方法和《生态安全土壤环境基准制定技术指南（征求意见稿）》。主要包括以下步骤：

- （1）确定需要保护的生态受体和生态过程；
- （2）有效毒性数据的获取及筛选；

- (3) SSD 法外推;
- (4) 生态安全阈值的确定;
- (5) 生态安全阈值的审核。

2.2.3.1 毒性终点的选择

制定土壤污染物的生态安全阈值时, 优先选择可能影响关注生态受体个体或种群特性的慢性毒性指标或亚致死毒性指标。

- (1) 对于陆生植物, 选择株高、生物量、根伸长等;
- (2) 对于土壤无脊椎动物, 选择回避率、繁殖率、种群数量和生长率等;
- (3) 对于土壤微生物和微生物主导的土壤生态过程, 选择土壤硝化作用、微生物酶活、土壤呼吸作用等。

2.2.3.2 毒性数据获取

毒性数据主要通过实验室土壤生态毒性实验获取。在开展土壤生态毒性实验时, 优先参照我国现行国家标准测试规范执行; 若实验条件受限, 则依据经济合作与发展组织 (OECD) 或国际标准化组织 (ISO) 发布的等效标准化测试程序作为补充性实验方案。毒性实验数据使用 Logistic 方程拟合污染物与毒性终点的剂量-效应关系曲线, 并计算毒性阈值 EC_{10} 和 EC_{50} 。

2.2.3.3 物种敏感性分步法外推

在采用 SSD 法拟合不同生态受体或生态过程的毒性阈值 (优先选用 EC_{10}) 分布曲线前, 需将同一物种或同一品种在不同土壤条件下的生态毒性效应参数归一化到相同土壤性质 ($pH=6.5$ 、有机质 (SOM) $=20 \text{ g kg}^{-1}$ 或阳离子交换量 (CEC) $=20 \text{ cmol kg}^{-1}$ 等) 条件下。数据按照下列公式进行归一化:

$$EC_{10}^{std} = EC_{10}^1 \times 10^{a(pH^{std} - pH^1) + blg(\frac{SOM^{std}}{SOM^1})}$$

其中, EC_{10}^{std} 为标准土壤条件下的 $x\%$ 效应浓度; EC_{10}^1 为实验土壤条件下的 $x\%$ 效应浓度; SOM^{std} 为标准土壤条件下的有机质含量; SOM^1 为实验土壤条件下的有机质含量; pH^{std} 为标准土壤条件下的土壤 pH; pH^1 为实验土壤条件下的土壤 pH。

利用 EEC-SSD 软件对数据用函数拟合后得到均方根 (Room mean square errors, RMSE), 函数采用软件推荐的 Normal、Log-normal 和 Log-logistic 三种函数。RMSE 该统计参数可用作拟合优度评价, 能够反映出模型的精确度。RMSE 越接近于零, 说明模型拟合的精确度越高。然后利用 EEC-SSD 软件拟合物种敏感性分布曲线, 可得到危害浓度 HC_x 。制定不同用地分类下土壤环境生态安全阈值时, 若需要将短期效应毒性数据外推到慢性毒性数据、将实验室数据外推到野外并考虑测试生物种内和种间的差异, 可根据实际情况将危害浓度除以 1-5 的安全系数得到预测无效应浓度值。安全系数与曲线拟合时采用的毒性效应水平、污染物的活性以及用地分类有关。

以物种敏感性分布法外推法获得的预测无效应浓度值作为土壤环境生态安全阈值。阈值取值一般保留 2 位有效数字, 单位用 mg/kg 表示。

生态安全阈值的最终确定需要仔细审核标准推导所用数据以及推导步骤, 以确保标准合理可靠。自审包括自审核和专家审核。

三、 实验室标准毒性数据实验报告

3.1 供试土壤采集及相关性质测定

为获得可靠的氟磺胺草醚生态毒性数据, 本研究选取东北黑土区五个地区典型土壤 (类型涉及黑土、黑钙土、暗棕壤等), 开展了系统的室内毒理实验。

供试土壤采自东北黑土区五个地区的表层土壤（0-20 cm），分别采自黑龙江省海伦市（47°28'N，126°58'E）、黑龙江省佳木斯市（46°48'N，130°19'E）、辽宁省阜新市（42°01'N，121°40'E）、吉林省公主岭市（43°30'N，124°49'E）、内蒙古自治区兴安盟（46°04'N，122°05'E）。

将所采集的土壤去除植物、苔藓、凋落物以及可见的土壤动物等上覆物后风干、混匀、研磨后分别通过 0.15 和 2 mm 尼龙筛。一部分用于土壤理化性质的测定。土壤 pH 值测定采用梅特勒 FE20 型 pH 计（土水比 1:5，m/v）；总有机碳（TOC）采用重铬酸钾氧化-容量法测定（GB 9834-88）；CEC 采用 pH=7.0 的醋酸铵交换法测定；全氮采用凯氏蒸馏定氮法分析；全磷通过钼锑抗比色法检测；全钾使用火焰光度法测定；土壤机械组成采用激光衍射粒度仪测定，并按国际制分类标准划分砂粒（2-0.02 mm）、粉粒（0.02-0.002 mm）和黏粒（<0.002 mm）组分含量。供试土壤基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤的理化性质

	黑土 (佳木斯)	黑土 (海伦)	暗棕壤 (兴安盟)	棕壤 (阜新)	黑钙土 (公主岭)
pH	5.41	6.27	6.49	6.28	5.79
有机质 (g/kg)	150.01	72.29	46.83	14.31	27.9
阳离子交换量 (cmol/kg)	42.33	29.64	24.36	12.99	22.13
可溶性有机碳 (mg/kg)	399.04	161.54	82.69	59.62	73.08
全氮 (g/kg)	8.12	3.37	2.47	0.81	1.56
全磷 (g/kg)	2.60	1.13	0.48	0.55	0.39
全钾 (g/kg)	11.02	18.71	18.89	21.07	20.80
硝态氮 (mg/kg)	16.43	7.02	1.09	5.52	21.79
铵态氮 (mg/kg)	15.81	13.92	30.51	157.73	14.88
速效磷 (mg/kg)	12.48	6.16	49.05	72.73	8.07
速效钾 (mg/kg)	265.00	135.00	255.00	225.00	315.00
粒径 2-0.05mm (%)	23.72	10.2	53.92	53.88	19.41
粒径 0.05-0.002mm (%)	58.48	59.40	24.16	30.96	45.13
粒径<0.002mm (%)	17.80	30.40	21.92	15.16	35.46

3.2 土壤中氟磺胺草醚的植物毒性阈值

植物毒性实验：选取大小一致且饱满的种子（玉米、大豆、大麦），将种子用 3% H_2O_2 浸泡 30 min，用去离子水洗净，放置于带有纱布的培养盆中，在 25℃、无光照条件下放置 36~48 h，选用根长度不超过 2 mm 的种子进行植物毒性试验。参照 ISO 11269-1 与 ISO 11269-2 标准进行实验处理。取适量纯度 $\geq 97\%$ 的氟磺胺草醚标准品，溶于丙酮中制成溶液待其充分溶解后，对 5 种土壤进行人工外源添加制备污染土。对照组只加入丙酮。根据预试验结果，污染土浓度设置在 0、0.1、0.5、1、5、10、20 mg/kg（玉米和大麦），种植大豆污染土浓度设置为 0、50、100、200、500、1000、2000 mg/kg。首先取 5 g 土壤溶解至 10 ml 丙酮中，配制成相应浓度梯度的溶液，置于通风橱使丙酮挥发至干，然后加入 95 g 土壤混合均匀，得到空白和氟磺胺草醚各个浓度的染毒土壤各 100 g，丙酮挥发后加入适量蒸馏水，将土壤湿度调整到 55%-60%，放置于通风处平衡 1 d 后备用。后将不同种植物种植在氟磺胺草醚污染土中，每盆种植三株，每个处理组设置三个平行。放置在白天 14 h（22℃），夜间 10 h（18℃），光照强度 24000 lx，湿度 65~70% 的人工气候培养箱中培养，培养期间土壤含水量维持在最大田间持水量的 60% 左右，并在 7 d 后收获。收获后用去离子水冲洗干净植株根部，用标尺测量每个处理每株作物的株高、根伸长。

根据 Log-logistic 函数模型对土壤中氟磺胺草醚的毒性数据拟合得到不同测试物种的毒性阈值（ EC_x ， $x=10, 50$ ）。不同类型土壤中氟磺胺草醚对植物株高的毒性阈值具有显著差异。青贮玉米株高在五种土壤中的 EC_{10} 和 EC_{50} 分别为 0.07~0.42 和 0.66~3.82 mg/kg。籽粒玉米株高在五种土壤中的 EC_{10} 和 EC_{50} 分别为 0.03~0.32 和 0.25~37.27 mg/kg。糯玉米株高在五种土壤中的 EC_{10} 和 EC_{50} 分别

为 0.06~1.47 和 0.58~13.24 mg/kg。大麦株高在五种土壤中的 EC₁₀ 和 EC₅₀ 分别为 0.07~0.63 和 0.59~9.36 mg/kg。大豆株高在五种土壤中的 EC₁₀ 和 EC₅₀ 分别为 44.92~92.97 和 404.30~836.70 mg/kg。在公主岭黑钙土中，3 个品种玉米（青贮玉米、籽粒玉米和糯玉米）以及大麦均对氟磺胺草醚毒害更为敏感，而大豆在阜新棕壤中最为敏感。此外，籽粒玉米对氟磺胺草醚生物毒性的响应比其它植物更为敏感，糯玉米在五种土壤中的毒性响应差异最大。总体而言，土壤中氟磺胺草醚毒性阈值在不同植物物种株高中差异很大，不同植物株高对氟磺胺草醚毒性的敏感程度不同。

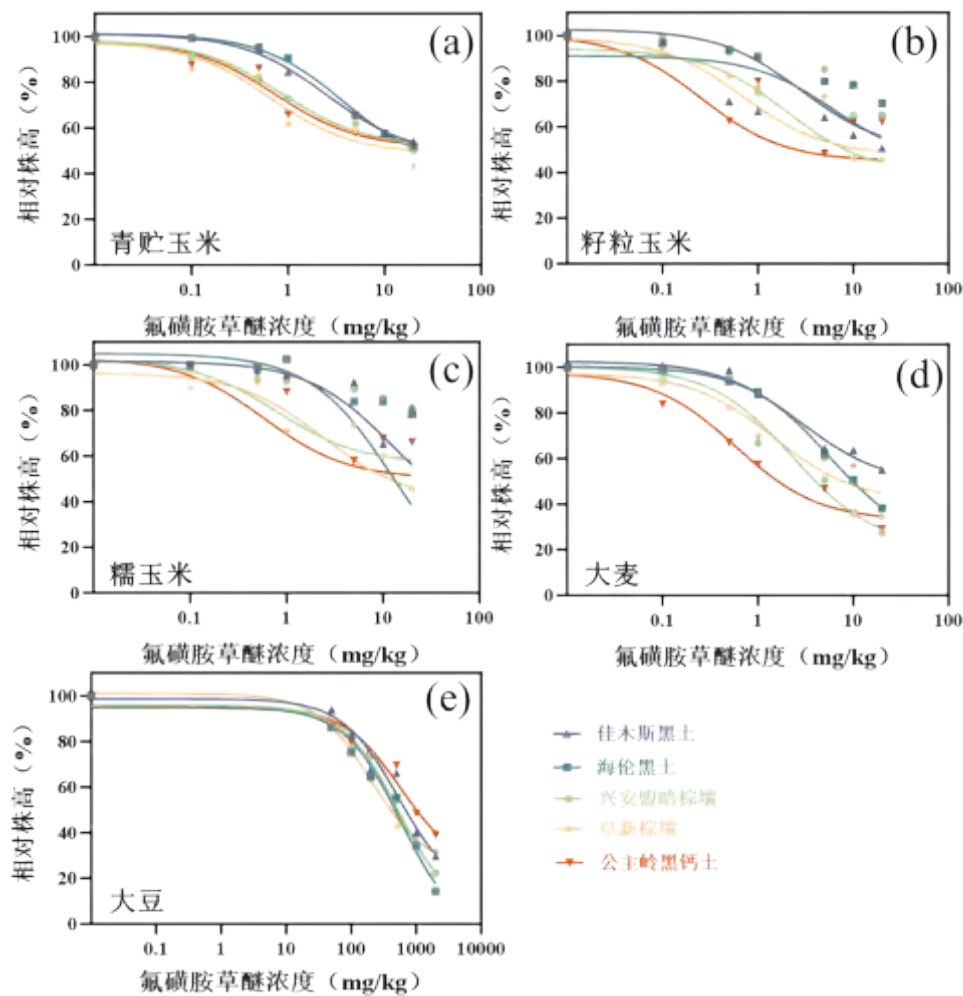


图 1 土壤中氟磺胺草醚对不同植物株高的剂量-效应拟合曲线

青贮玉米根伸长在五种土壤中的 EC_{10} 和 EC_{50} 分别为 0.07~3.29 和 0.63~29.59 mg/kg。 EC_{10} 和 EC_{50} 的最大值分别是最小值的 47 倍和 46.9 倍。籽粒玉米根伸长在五种土壤中的 EC_{10} 和 EC_{50} 分别为 0.04~2.26 和 0.36~20.37 mg/kg。糯玉米根伸长在五种土壤中的 EC_{10} 和 EC_{50} 分别为 0.31~8.57 和 2.76~77.10 mg/kg。大麦根伸长在五种土壤中的 EC_{10} 和 EC_{50} 分别为 0.04~1.35 和 0.40~12.17 mg/kg。大豆根伸长在五种土壤中的 EC_{10} 和 EC_{50} 分别为 6.84~18.97 和 61.53~170.70 mg/kg。总体来说，五种植物在不同类型土壤中对氟磺胺草醚的毒害响应差异较大，其中，青贮玉米、糯玉米及大麦根伸长在公主岭黑钙土中最为敏感，籽粒玉米根伸长在佳木斯黑土中最为敏感，而大豆根伸长在海伦黑土中较为敏感。

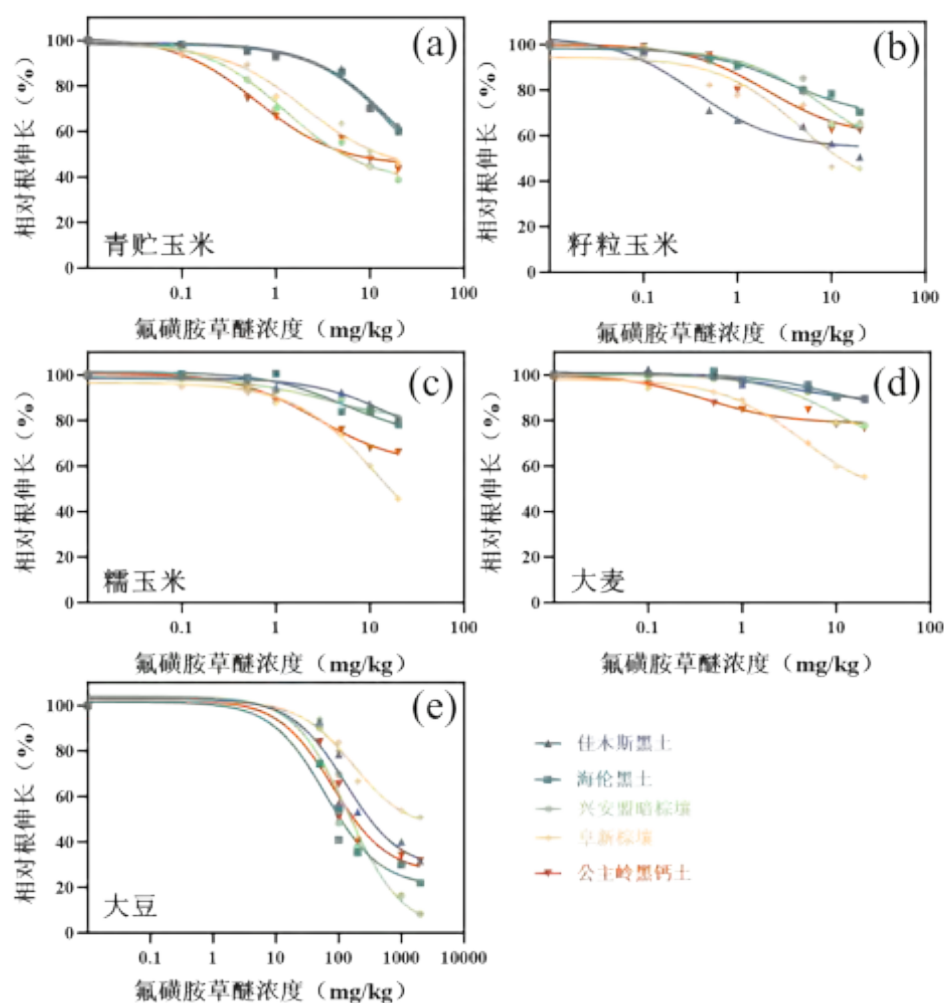


图 2 土壤中氟磺胺草醚对不同植物根伸长的剂量-效应拟合曲线

3.3 土壤中氟磺胺草醚的动物毒性阈值

蚯蚓回避率测定：采用二室法研究蚯蚓的回避行为，试验浓度设置为 0、1、5、10、50、100、500、800、1000 mg/kg，污染土制备方法同植物毒性实验。在长 21.5 cm、宽 16 cm 和高 7 cm 的塑料盒中插入一个 6 mm 厚的无孔塑料板，在塑料盒的一侧加入 200 g 的染毒土壤，另一侧加入 200 g 没有染毒的土壤后移除塑料板。将经过 24 h 清肠处理的 15 条蚯蚓均匀放置于土壤表面先前隔板所处的位置，10 min 后，待蚯蚓完全进入土壤，用塑料盖将塑料盒盖住，避免蚯蚓逃跑，用针在塑料盖上扎孔以保持空气流通，置于 $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ，保持 24 h 黑暗的培养箱中。48 h 后，将无孔塑料板插到原来的位置，防止蚯蚓移动，记录塑料板两侧蚯蚓的数量，若蚯蚓被插入的塑料挡板切为两半，则不管该蚯蚓残体的长度如何，均被分别记为 0.5 条。每个处理组设置三个平行，回避率计算公式如下：

$$NR = \frac{(c - t)}{N} \times 100$$

其中：NR 为回避率（%）；C 为未污染土壤中的蚯蚓数量（条）；T 为污染土壤中的蚯蚓数量（条）；N 为试验开始时蚯蚓的总数量（条）。

根据 ISO 17512-1（2008）标准，如果平均 80% 的蚯蚓存在于对照土壤中，则土壤的栖息地功能被认为是有限的，这表明对这些生物的行为有直接影响。基于五种不同土壤中氟磺胺草醚对蚯蚓回避率的剂量-效应曲线如图 3 所示，在接触到不同浓度氟磺胺草醚时，可以看出高浓度氟磺胺草醚处理下，五种土壤中蚯蚓回避率均达到 80% 以上，表明氟磺胺草醚会严重抑制蚯蚓行为。通过对氟磺胺草醚对蚯蚓回避率的毒性阈值进行拟合，五种土壤中氟磺胺草醚对蚯蚓的毒性阈值 EC_{10} 和 EC_{50} 分别为 1.16~35.91 mg/kg 和 22.69~217.50 mg/kg。其中，五种土壤

中氟磺胺草醚对蚯蚓回避率的敏感程度为海伦黑土>佳木斯黑土>阜新棕壤>兴安盟暗棕壤>公主岭黑钙土。

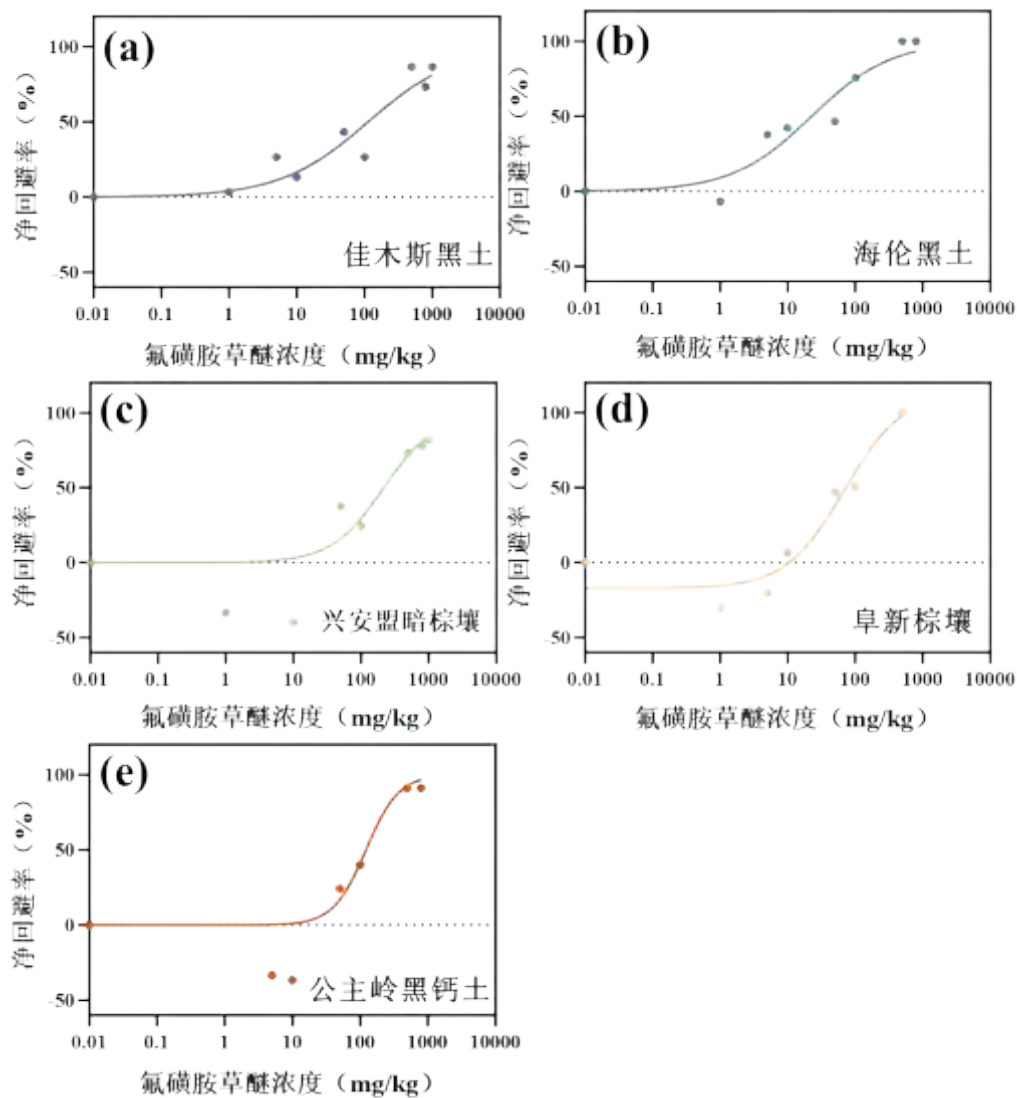


图 3 不同土壤中氟磺胺草醚对蚯蚓回避率的剂量-效应曲线

3.4 土壤中氟磺胺草醚的微生物毒性阈值

土壤微生物毒性实验: 称取风干后土壤样品测定土壤田间持水量和土壤含水率, 将土壤含水率调节为田间持水量的 60%。将土壤置于 25℃的恒温培养箱中预培养一周, 培养期间每两天按照差量法向土壤中补加纯水, 预培养结束后进行土壤染毒。土壤染毒时, 以丙酮为溶剂, 配制浓度为 0、0.1、1、5、10、50、

100、500、1000 mg/kg 的氟磺胺草醚-丙酮溶液。首先取 5 g 土壤加入 10 ml 丙酮或氟磺胺草醚-丙酮溶液，置于通风橱使丙酮挥发至干，然后加入 95 g 土壤混合均匀，得到空白和氟磺胺草醚各个浓度的染毒土壤各 100 g，每个处理组设置三个平行。染毒完成后，将所有含有土壤样品的棕色瓶称重记录并置于 25℃ 的恒温培养箱中避光培养。培养期间每两天按照差量法向土壤中补加纯水，使土壤含水率保持为田间持水量的 60%，总培养时间为 14 d。培养结束后采集新鲜土壤样品保存在 -80 °C 冰箱中，用于后续进行高通量测序分析。

微生物呼吸测定采用 GB/T 32720-2016 土壤微生物呼吸的实验室测定方法，在培养的第 14 d 采集气体。采样前打开瓶盖敞口 30 min，使得培养中气体与周围空气充分交换，用带有三通阀的注射器采集培养瓶上部空间气体（30 mL），作为初始气体浓度，记录采样时间，密闭静置培养 1.5 h 后，反复推拉注射器以混匀瓶中气体，然后立即抽气（30 mL）并移至预真空的集气瓶中，再次记录采样时间。采集后的 CO₂ 气体样品用气相色谱仪分析并计算 CO₂ 通量。CO₂ 排放通量的计算公式如下：

$$F = \frac{273}{273 + T} \times \frac{(C_1 - C_0) \times V \times M \times 10^{-3}}{24.4 \times m \times h}$$

式中：F 为 CO₂ 排放通量（mg/（kg·h））；T 为采样时的稳定温度（℃）；C₁ 为采样时的 CO₂ 浓度（μmol/mol）；C₀ 为初始时的 CO₂ 浓度（μmol/mol）；V 为采样时的气体体积（L）；M 为 CO₂ 的摩尔质量（44 g/mol）；24.4 为培养温度下 CO₂ 气体的摩尔体积（L/mol）；m 为实验所用的干土质量（kg）；h 为两次采气间隔的时间（h）。

土壤微生物呼吸强度作为表征土壤微生物代谢活性的关键指标，其变化规律如图 4 所示。在 14 天培养实验中，五种不同类型土壤经不同浓度氟磺胺草醚处

理后，微生物呼吸强度呈现显著剂量效应关系。与空白对照组相比，随着氟磺胺草醚处理浓度的梯度增加，各类型土壤微生物呼吸速率均呈现浓度依赖性递增趋势。具体表现为：佳木斯黑土呼吸速率由 0.21 mg/（kg·h）提升至 0.29 mg/（kg·h）；海伦黑土从 0.25 mg/（kg·h）增至 0.40 mg/（kg·h）；兴安盟暗棕壤由 0.15 mg/（kg·h）显著升高至 0.41 mg/（kg·h）；阜新棕壤从 0.12 mg/（kg·h）上升至 0.23 mg/（kg·h）；公主岭黑钙土则由 0.13 mg/（kg·h）增至 0.33 mg/（kg·h）。值得注意的是，高浓度氟磺胺草醚处理（1000 mg/kg）对兴安盟暗棕壤和公主岭黑钙土的微生物呼吸促进作用更为显著。微生物在降解有机质过程中通过呼吸作用释放 CO₂，短期内显著提升土壤呼吸速率。对氟磺胺草醚的毒性阈值进行拟合，其中海伦黑土中土壤呼吸对氟磺胺草醚胁迫最为敏感，EC₁₀ 为 0.38 mg/kg，阜新棕壤最不敏感，EC₁₀ 为 25.74 mg/kg。可以看出不同土壤类型中的毒性阈值具有显著差异。

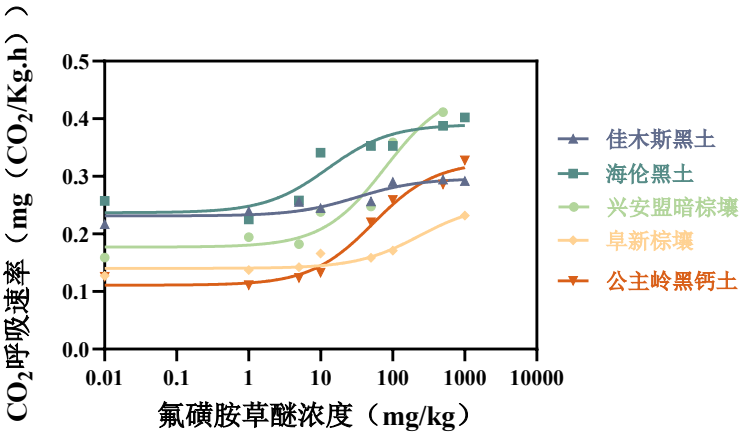


图 4 不同土壤中氟磺胺草醚对微生物呼吸的剂量-效应拟合曲线

为判断各处理中细菌群落多样性，进行细菌群落 α 多样性分析。利用 Chao1 指数和 Shannon 指数对细菌群落的丰富度和多样性进行剂量-效应关系曲线拟合和毒性阈值 EC₁₀ 和 EC₅₀ 的计算，结果如图 5 所示。可以看出，五种土壤中不同

浓度处理下氟磺胺草醚对细菌的丰富度有一定的抑制作用，尤其是在高浓度氟磺胺草醚（1000 mg/kg）处理中，内蒙和阜新棕壤中微生物丰富度显著下降。氟磺胺草醚对五种土壤微生物丰富度的毒性阈值 EC_{10} 和 EC_{50} 分别为 0.12~63.59 mg/kg 和 1.11~572.3 mg/kg。五种土壤中氟磺胺草醚对细菌多样性也呈现一定的抑制作用，尤其是 1000 mg/kg 的氟磺胺草醚处理会极大抑制阜新棕壤中细菌多样性。五种土壤中细菌相对多样性的毒性阈值 EC_{10} 和 EC_{50} 分别为 8.55~383.91 mg/kg 和 76.97~717.4 mg/kg。总体来说，土壤中细菌群落结构丰富度指标对氟磺胺草醚的敏感程度要高于多样性指标。

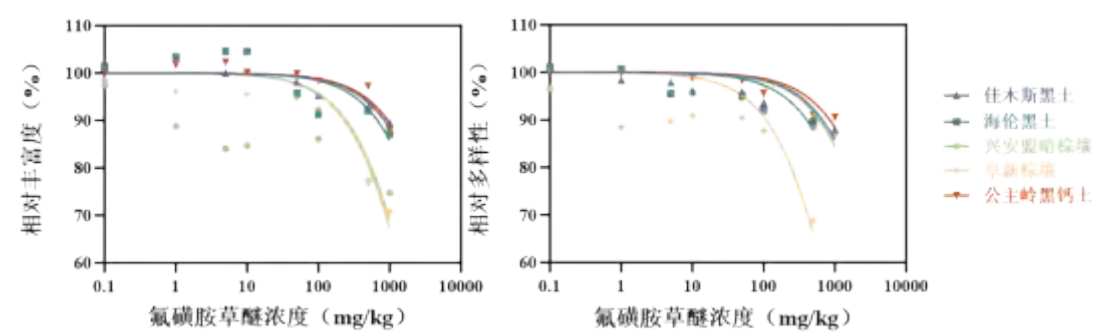


图 5 不同土壤中氟磺胺草醚对土壤细菌丰富度和多样性的剂量-效应关系曲线

进一步基于污染物浓度与微生物多层级分类单元（门、纲、目、科、属）丰度的相关性分析（ $R^2 > 0.7$ ），筛选了与氟磺胺草醚呈现剂量效应关系的微生物类群，门水平分类级别结果如图 6 所示。在不同土壤中，不同浓度的氟磺胺草醚处理显著抑制了黏菌门（*Myxococcota*）和装甲菌门（*Armatimonadota*）相对丰度，并存在一定程度的剂量-效应关系。相对于黏菌门来说，氟磺胺草醚对装甲菌门的刺激效应更明显。在五种土壤的高浓度氟磺胺草醚处理下，氟磺胺草醚对装甲菌门相对丰度的抑制率均超 80%以上。在不同土壤中氟磺胺草醚对黏菌门和装甲菌门的毒性阈值具有显著差异，其毒性阈值 EC_{10} 和 EC_{50} 分别为 3.57~31.86 mg/kg

和 32.1~286.7 mg/kg、2.39~24.13 mg/kg 和 21.52~217.20mg/kg。

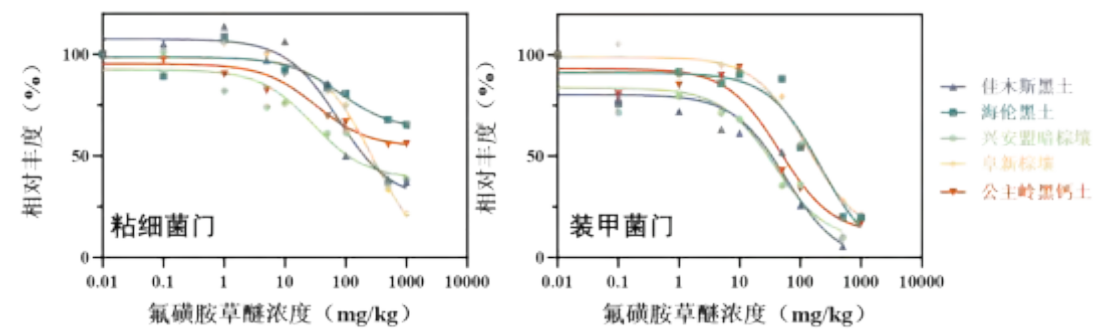


图 6 不同土壤中氟磺胺草醚对菌门水平细菌相对丰度的剂量-效应关系曲线

氟磺胺草醚对菌纲水平土壤微生物相对丰度的剂量-效应关系曲线如图 7 所示，氟磺胺草醚对多囊菌纲（*Polyangia*）和 *Chthonomonadetes* 纲表现出显著抑制作用，其中对 *Chthonomonadetes* 纲的群落丰度最高抑制率达 80%以上，其中氟磺胺草醚对多囊菌纲和 *Chthonomonadetes* 纲的 EC₁₀ 分别是 5.53~88.58 mg/kg 和 0.03~23.51 mg/kg，海伦黑土中氟磺胺草醚对两种微生物菌纲均呈现严重的抑制效应。

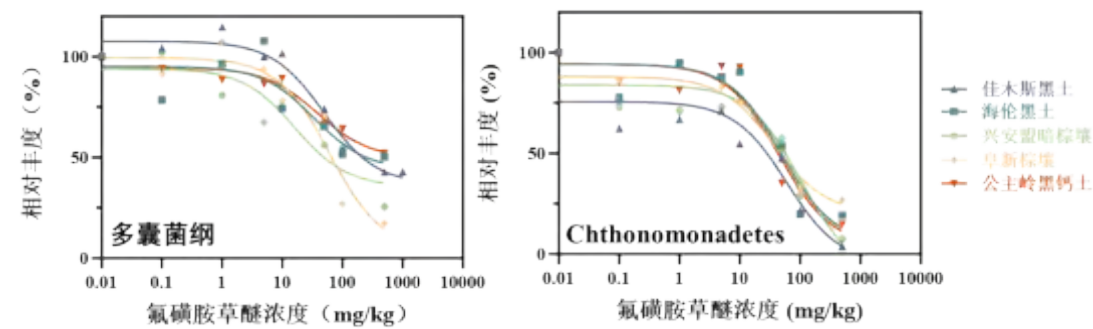


图 7 不同土壤中氟磺胺草醚对菌纲水平细菌相对丰度的剂量-效应关系曲线

通过对目水平和科水平土壤微生物的分析发现，不同浓度的氟磺胺草醚处理对 *Abditibacteriales* 目、*Chthonomonadales* 目及多囊菌目（*Polyangiales*），以及其对应的科水平微生物 *Abditibacteriaceae* 科、*Chthonomonadaceae* 科和多囊菌科表现出显著的抑制效应和剂量-效应关系。不同土壤类型中，氟磺胺草醚对

Abditibacteriales 目及其对应的 *Abditibacteriaceae* 科的 EC_{10} 毒性阈值分别为 0.01~17.26 mg/kg 和 0.04~17.54 mg/kg；对 *Chthonomonadales* 目及 *Chthonomonadaceae* 科的 EC_{10} 值分别为 0.03~11.27 mg/kg 和 0.03~12.81 mg/kg；对多囊菌目及其多囊菌科的 EC_{10} 范围则显著增加，分别达到 0.99~157.22 mg/kg 和 0.58~153.78 mg/kg。

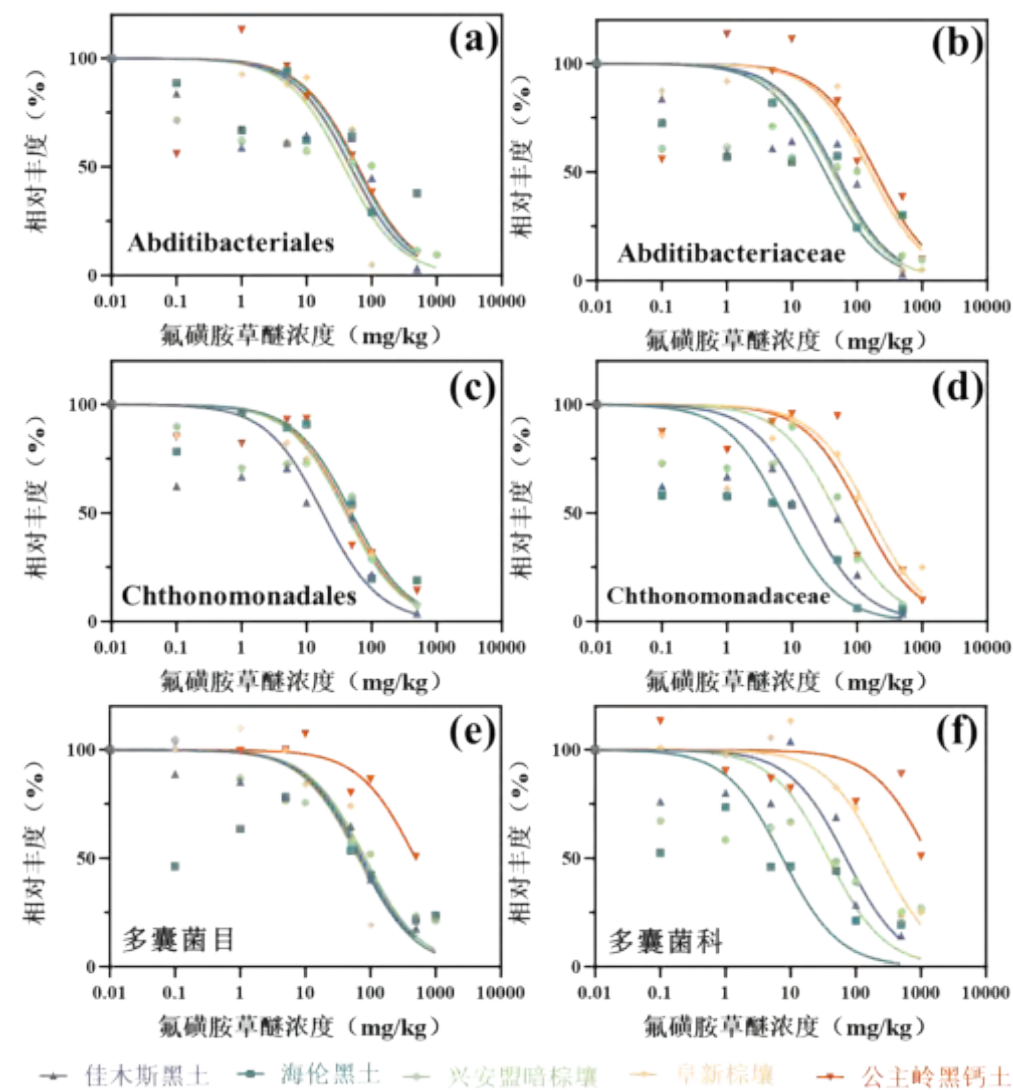


图 8 不同土壤中氟磺胺草醚对菌目和菌纲水平细菌相对丰度的剂量-效应关系曲线

在不同土壤中，在属水平仅发现氟磺胺草醚对海生囊菌属（*Haliangium*）存在显著的剂量-效应关系。实验数据显示，随着氟磺胺草醚暴露浓度的升高，该菌属的相对丰度显著降低（图 9），基于剂量-效应关系计算得出其毒性阈值 EC_{10}

为 0.01~138.22 mg/kg,可以看出在氟磺胺草醚对海生囊菌属的毒性在不同土壤中呈现显著差异。

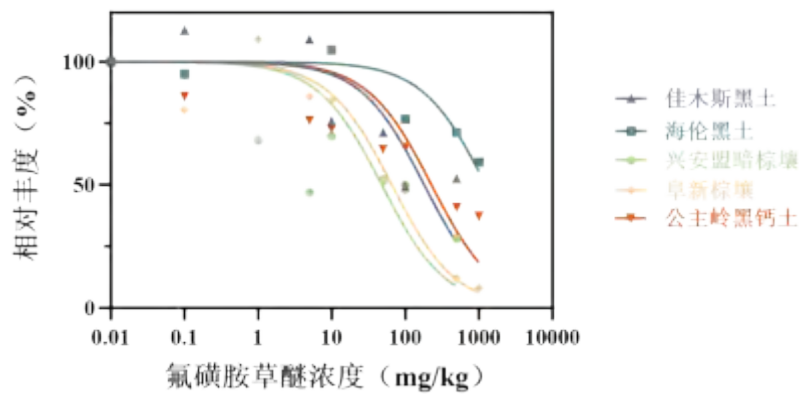


图 9 不同土壤中氟磺胺草醚对海生囊菌属相对丰度的剂量-效应关系曲线

基于 PICRUST 功能预测工具,探究了氟磺胺草醚在不同土壤细菌群落的功能响应特征。通过 KEGG 数据库对土壤细菌群落特征进行功能注释,筛选出基因丰度与氟磺胺草醚剂量呈现显著剂量-效应关系的三条代谢通路。结果如图 10 所示,土壤中氟磺胺草醚显著抑制了二级注释中四种功能基因的相对丰度,五种土壤中氟磺胺草醚对能量代谢基因丰度的毒性阈值 EC_{10} 和 EC_{50} 分别是 0.24~2.41 和 5.80~21.65 mg/kg,表明氟磺胺草醚通过抑制微生物的 ATP 合成、碳氮循环等基础能量转化过程,可能削弱土壤系统的物质分解与养分供给能力。氟磺胺草醚对次生代谢物生物合成基因丰度的毒性阈值 EC_{10} 和 EC_{50} 分别是为 0.83~2.67 和 7.50~23.99 mg/kg,除草剂可能干扰微生物合成抗生素等次生代谢产物,破坏微生物种间拮抗或共生关系,最终导致群落结构失衡与生态系统稳定性下降。氟磺胺草醚对转录基因丰度的毒性阈值 EC_{10} 和 EC_{50} 分别是为 0.47~1.28 和 4.19~11.54 mg/kg。作为四个通路中响应最敏感的靶点,氟磺胺草醚对转录相关基因丰度的抑制直接反映氟磺胺草醚对微生物遗传信息传递过程的干扰,可能通过阻碍

RNA 聚合酶活性或 DNA 识别，影响功能基因的表达。氟磺胺草醚对调控土壤细菌生长和死亡基因丰度的毒性阈值 EC_{10} 和 EC_{50} 分别是为 0.65~2.86 和 5.89~25.43 mg/kg。除草剂对微生物增殖周期与程序性死亡的调控异常，可能导致土壤微生物生物量锐减或特定菌群过度增殖，改变群落组成与功能冗余度。

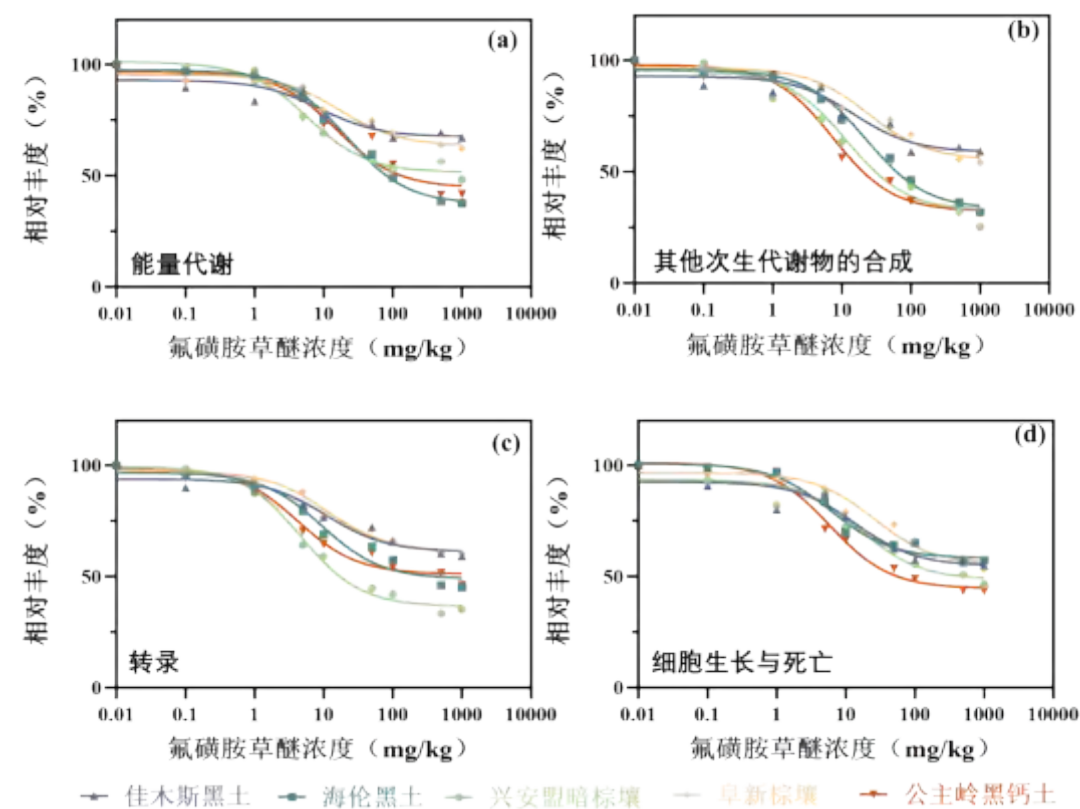


图 10 不同土壤中氟磺胺草醚对土壤细菌功能基因丰度相对丰度的剂量-效应关系曲线

3.5 黑土中氟磺胺草醚的生态安全阈值

中国科学院发布的《东北黑土白皮书 2020》指出，东北黑土地以暗棕壤分布最广，其次为草甸土、黑钙土和黑土等，其中棕壤的分布面积最小。因此，本研究选择黑土、暗棕壤和黑钙土的理化性质作为标准，并通过文献和数据库整理得到东北黑土区三种典型土壤的理化性质，结果如表 2 所示。

表 2 三种典型黑土区土壤的理化性质

	黑土	暗棕壤	黑钙土
pH	6.36	5.94	7.67
有机质 (g/kg)	55.08	36.70	14.32
阳离子交换量 (cmol/kg)	32.17	24.99	20.39
可溶性有机碳 (mg/kg)	280.29	82.69	45.79
全磷 (g/kg)	0.68	0.80	0.51
全氮 (g/kg)	2.03	1.90	0.93
全钾 (g/kg)	20.40	21.45	22.41
粘粒 (%)	25.26	18.60	25.92

基于 log-logistic 概率分布模型，本研究对氟磺胺草醚在东北黑土区三种典型土壤（黑土、暗棕壤、黑钙土）中的物种敏感度分布进行拟合，构建的 SSD 曲线如图 11 所示。模型拟合过程通过最大似然估计法优化参数，黑土、暗棕壤和黑钙土的模型均方根误差分别为 0.06、0.05 和 0.03，表明 Log-logistic 分布能有效描述污染物毒性响应的累积概率特征。

为构建生态保护的环境风险管控体系，本研究基于物种敏感度分布模型，整合多物种毒性数据，系统建立了除草剂氟磺胺草醚的生态安全土壤基准值计算框架。SSD 曲线采用均方根误差最小的 Log-logistic 模型拟合，获得东北黑土区三类典型土壤的 HC₅值（黑土 0.16 mg/kg、暗棕壤 0.11 mg/kg、黑钙土 0.02 mg/kg）。HC₅作为保护 95%物种的统计阈值，仍存在实验室向田间外推、物种敏感度变异等不确定性。为此，本研究引入安全系数 2，取 $PNEC_{soil} = HC_5/2$ 。该系数可使保守水平达到传统评估因子法的同等程度；同时，它既能覆盖最敏感的 5%物种及复杂生态相互作用，又避免了系数 5 过度严苛导致风险指标失效。据此，黑土、暗棕壤、黑钙土中氟磺胺草醚的预测无效应浓度分别为 0.08、0.06 和 0.01 mg/kg。该标准体系为区域除草剂风险评估提供了科学依据，有效平衡了农作物安全与土壤生态保护。

表 3 氟磺胺草醚在不同土壤条件下的生态安全阈值

	样本数	HC ₅	PNEC _{soil}	RMSE	P 值
黑土	24	0.16	0.080	0.06	< 0.05
暗棕壤	24	0.11	0.055	0.05	< 0.05
黑钙土	24	0.02	0.010	0.03	< 0.05

黑土、暗棕壤和黑钙土三种土壤中氟磺胺草醚生态安全阈值存在显著差异（黑土 > 暗棕壤 > 黑钙土），其主要调控机制如下：

a) 土壤有机质（SOM）：有机质是影响氟磺胺草醚毒性阈值的关键因子。有机质通过腐殖酸的孔隙结构与极性官能团增强对氟磺胺草醚的吸附容量，降低其生物有效态浓度。黑土有机质含量最高，对氟磺胺草醚的吸附固定能力最强。

b) 土壤 pH：氟磺胺草醚为弱酸性化合物，在低 pH 条件下以分子态存在，水溶性降低，通过疏水作用增强与有机质亲脂位点的结合，吸附亲和力显著提升。黑土和暗棕壤呈酸性至

微酸性，有利于氟磺胺草醚的吸附固定。

c) 阳离子交换量（CEC）：高 CEC 土壤富含蒙脱石、有机质等组分，可通过吸附作用降低土壤中游离态氟磺胺草醚的含量，减少生物细胞膜接触的毒性剂量。

综上，黑土因高有机质、低 pH 和高 CEC 的综合效应，对氟磺胺草醚的吸附固定能力最强，生态安全阈值最。

四、标准涉及的相关知识产权说明

本标准版权归土壤学会所有，由土壤学会统一负责团体标准的出版和发行事宜。标准中涉及专利的问题按照国家相关规定处理。

五、有机污染物的环境质量标准国内外发展现状

5.1 国内外相关研究进展和标准制定情况

我国现行土壤环境质量标准中，《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》（GB 15618-2018）仅针对重金属、六六六、滴滴涕、苯并[a]芘等污染物设定风险筛选值，《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》（GB 36600-2018）虽包含部分有机农药，但未纳入氟磺胺草醚等二苯醚类除草剂，缺乏针对性的生态安全阈值。

与现有农业行业标准相比，《农药合理使用准则》（GB/T 8321）规定了氟磺胺草醚的施用剂量和安全间隔期，但未涉及土壤残留的生态安全阈值；《农田土壤环境质量监测技术规范》（NY/T 395）仅规定了土壤样品采集与监测方法，未明确污染物的安全阈值。

本标准填补了国内东北黑土区氟磺胺草醚生态安全阈值标准的空白，针对区域土壤特性制定差异化阈值，相比通用标准更具针对性和适用性，为黑土区农田

土壤除草剂污染精准管控提供了科学依据。

5.2 与现行标准、法规的关系

本标准与相关标准及法律法规协调一致，没有冲突。国内现有相关标准及法律法规如下：

- （1）《中华人民共和国土壤污染防治法》（2019 年 1 月 1 日起实施）
- （2）《中华人民共和国环境保护法》（2014 年修订，2015 年 1 月 1 日起施行）
- （3）《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618-2018）
- （4）《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）

六、 重大意见分歧的处理经过和依据

本指南无重大意见分歧。

七、 其他应予以说明的事项

无。

附录 A 氟磺胺草醚的生物毒性数据

受试终点	黑土归一化值 (mg/kg)	暗棕壤归一化值 (mg/kg)	黑钙土归一化值 (mg/kg)
青贮玉米株高	0.15	0.11	0.06
籽粒玉米株高	0.19	0.12	0.07
糯玉米株高	1.13	0.63	0.13
大豆株高	63.20	55.97	42.77
大麦株高	0.54	0.30	0.36
青贮玉米根长	0.60	1.47	0.33
籽粒玉米根长	0.51	0.32	0.06
糯玉米根长	0.57	2.65	0.004
大豆根长	23.94	9.93	0.69
大麦根长	0.87	0.42	0.06
回避率	13.05	6.85	8.46
多样性	18.62	66.70	89.15
丰富度	5.93	8.68	3.10
土壤呼吸	3.23	9.34	13.49
黏菌门	13.81	14.63	65.30
装甲菌门	10.08	7.26	4.56
多囊菌属	7.07	56.00	78.74
Chthonomonadetes	15.14	22.10	24.27
Abditibacteriaceae	4.54	9.40	1.42
海生囊菌属	9.56	1.03	17.94
能量代谢	1.55	1.61	1.68
转录	0.95	0.90	0.60
其他次生代谢物的生物合成	1.69	1.83	2.63
细胞生长和死亡	1.01	1.80	1.11