



中华人民共和国国家标准

GB/T □□□□□—202□

生态环境损害鉴定评估技术指南 基础方法 第 3 部分：金属同位素技术

Technical guidelines for identification and assessment of environmental
damage—Principal methods—Part 3: Metal isotope technology

（征求意见稿）

202□-□□-□□发布

202□-□□-□□实施

生态环境部
国家市场监督管理总局 发布

目 次

前 言	ii
1 适用范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 工作程序	2
5 前期准备	4
6 同位素样品采集与分析测试	5
7 结果表征	6
8 因果关系判定	7
9 贡献度分析	10
10 不确定性分析	11
11 报告编制	11
附 录 A（资料性附录）应用金属同位素技术进行因果关系判定污染溯源报告模板及编制要求	12

前 言

为贯彻《中华人民共和国民法典》《中华人民共和国环境保护法》等法律法规和《生态环境损害赔偿制度改革方案》《生态环境损害赔偿管理规定》等文件，保护生态环境，保障公众健康，规范生态环境损害鉴定评估工作，完善生态环境损害鉴定评估技术体系，制定本标准。

本标准规定了采用金属同位素进行生态环境损害因果关系判定污染溯源的工作程序、方法和技术要求。

本标准附录A为资料性附录。

本标准为首次发布。

本标准由生态环境部组织制定。

本标准起草单位：生态环境部环境规划院、天津大学、广东省生态环境监测中心、中国环境科学研究院。

本标准自20□□年□□月□□日起实施。

本标准由生态环境部解释。

生态环境损害鉴定评估技术指南 基础方法 第3部分：金属同位素技术

1 适用范围

本标准规定了采用金属同位素进行生态环境损害因果关系判定污染溯源的工作程序、方法和技术要求。

本标准适用于地表水、沉积物、土壤、地下水等环境介质中汞、镉、铬、铜、锌、铅等重金属损害案件因果关系判定污染溯源的情形，环境管理工作中涉及同位素污染溯源的可参考本标准执行。

本标准不适用于核与辐射所致生态环境损害因果关系判定污染溯源。

2 规范性引用文件

本标准引用了下列文件或其中的条款。凡是注明日期的引用标准，仅注日期的版本适用于本标准。凡是未注日期的引用标准，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。其他文件被新文件废止、修改、修订的，新文件适用于本标准。

GB 17378.5	海洋监测规范 第5部分：沉积物分析
GB/T 32722	土壤质量 土壤样品长期和短期保存指南
GB/T 37847	同位素组成质谱分析方法通则
GB/T 39791.2	生态环境损害鉴定评估技术指南 总纲和关键环节 第2部分：损害调查
GB/T 39792.1	生态环境损害鉴定评估技术指南 环境要素 第1部分：土壤和地下水
GB/T 39792.2	生态环境损害鉴定评估技术指南 环境要素 第2部分：地表水和沉积物
HJ/T 20	工业固体废物采样制样技术规范
HJ 91.1	污水监测技术规范
HJ 91.2	地表水环境监测技术规范
HJ 164	地下水环境监测技术规范
HJ/T 166	土壤环境监测技术规范
HJ 493	水质样品的保存和管理技术规定
HJ 494	水质采样技术指导
HJ 597	水质 总汞的测定 冷原子吸收分光光度法
HJ 680	土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法
HJ 700	水质 65种元素的测定 电感耦合等离子体质谱法
HJ 702	固体废物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法
HJ 766	固体废物 金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法
HJ 1315	土壤和沉积物 19种金属元素总量的测定 电感耦合等离子体质谱法
《地下水环境背景值统计表征技术指南（试行）》	

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

同位素 isotope

指质子数相同而中子数不同的同一元素的不同核素。

3.2

稳定同位素 stable isotope

指某元素中不发生或极不易发生放射性衰变的同位素，即半衰期大于 10^{15} 年的元素的同位素，迄今尚未发现有自发衰变现象的同位素，或无可测放射性的同位素。

3.3

同位素丰度 isotopic abundance

指一种元素的所有同位素中，某特定同位素的原子数占该元素的总原子数百分比。

3.4

同位素丰度比值 isotope ratio

指某种元素的重同位素丰度与轻同位素丰度之比，包括 $^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}$ 、 $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ 、 $^{114}\text{Cd}/^{110}\text{Cd}$ 、 $^{202}\text{Hg}/^{198}\text{Hg}$ 、 $^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 等。

3.5

δ 值 δ value

指用于描述同位素丰度微小变化的量，通常以某样品同位素丰度比值与某标准物质同位素丰度比值的千分差（ δ ‰）来表示，包括 $\delta^{65}\text{Cu}$ 、 $\delta^{66}\text{Zn}$ 、 $\delta^{114}\text{Cd}$ 、 $\delta^{202}\text{Hg}$ 、 $\delta^{53}\text{Cr}$ 等。

3.6

同位素分馏 isotope fractionation

指在物理、化学、生物等因素影响下，某元素的同位素丰度在不同物质或同一物质的不同相态中发生变化的过程。

3.7

质量分馏 mass dependent fractionation

指服从质量分馏定律的同位素分馏。

3.8

非质量分馏 mass independent fractionation

指不服从质量分馏定律的同位素分馏，具有非质量分馏的同位素包括氧、硫、汞、锡等同位素。

3.9

Δ 值 Δ value

指 δ 实测值与基于质量分馏定律计算得到的 δ 理论值的偏差，包括 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 、 $\Delta^{200}\text{Hg}$ 等。

3.10

背景区 background zone

指一定时间条件下，仅受地球化学生物过程和非点源输入影响，能代表自然源和交通等人为面源影响的区域。

3.11

端元 end-member

指同位素关联污染物的自然源、人为点源或人为面源中的某一种。

4 工作程序

应用金属同位素技术进行因果关系判定的工作程序包括前期准备、同位素样品采集与分析测试、结果表征、因果关系判定、贡献度分析。工作程序如图 1 所示。

a) 前期准备

收集自然环境特征、污染物类型、潜在污染源分布、污染时间等资料，提出潜在污染源清单，分析是否适用金属同位素技术开展污染溯源，制定调查方案。

b) 同位素样品采集与分析测试

开展样品采集、保存、运输、分析测试工作，实施相应的质量保证与质量控制措施。

c) 结果表征

以图、表等方式对同位素样品分析测试数据进行展示。

d) 因果关系判定

开展受污染环境介质与不同端元同位素特征比对，分析环境介质与潜在污染源的污染物源性，结合其他方法溯源分析结论、时间先后顺序分析、迁移路径分析等，判定因果关系。

e) 贡献度分析

当存在多个确定的污染源时，根据环境介质与识别出的污染源中污染物浓度、同位素组成，计算各污染源的贡献度。

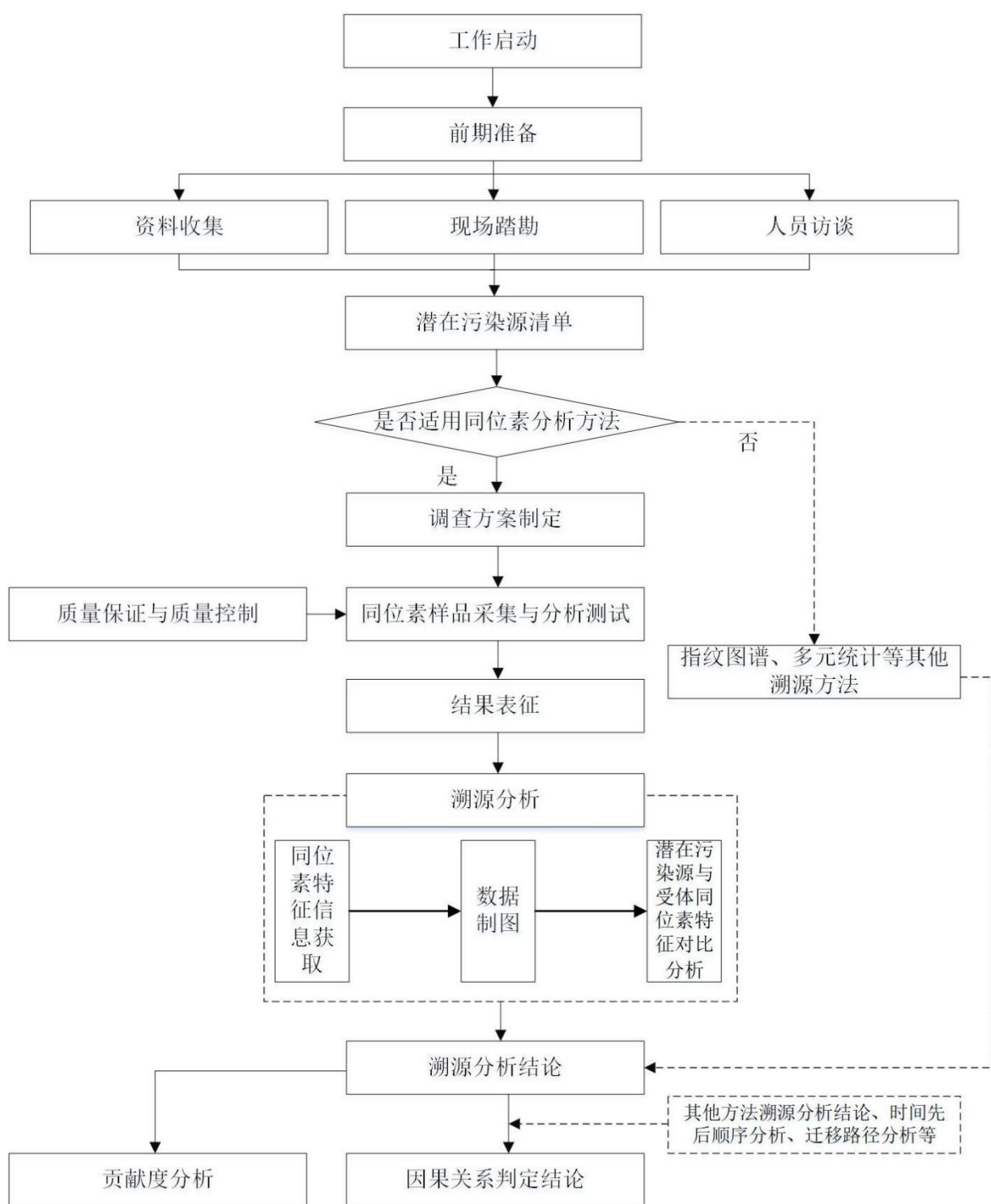


图1 工作程序

5 前期准备

5.1 资料收集和现场踏勘

参照 GB/T 39791.2 开展资料收集、现场踏勘和人员访谈，获取污染溯源需要的信息。

5.2 潜在污染源清单

识别特征污染物，分析可能的污染来源和污染过程，提出固体废弃物、废水等潜在污染源清单。

5.3 方法适用性分析

分析特征污染物和潜在污染源，对于存在多个潜在污染源、特征污染物涉及金属同位素、可以获得潜在污染源同位素丰度比值相关信息的情形，适用金属同位素技术开展溯源分析。

5.4 调查方案制定

制定同位素溯源分析调查方案，包括调查范围、样品类型和数量、样品采集位置、采集深度、采集方法、保存方法、运输方法、分析检测方法、质量保证与质量控制方法等内容：

- a) 调查范围包括受损区、背景区以及潜在污染源所在区域。受损区和潜在污染源所在区域参照 GB/T 39791.2 确定；当存在自然源时，调查范围还应包括背景区，土壤背景区参照 HJ/T 166 确定，地下水背景区参照《地下水环境背景值统计表征技术指南（试行）》确定，地表水和沉积物背景区参照 HJ 91.2 确定；
- b) 按照潜在污染源和受损区的分布，结合污染物迁移途径，布设采样点。样品类型包括受损区环境介质样品、背景区环境介质样品、潜在污染源样品，样品数量应根据调查区域面积确定，受损环境介质样品至少采集 10 个，背景区环境介质样品和潜在污染源样品至少采集 3 个；
- c) 样品采集位置和深度能够代表受损区和背景区环境介质特点和潜在污染源性质，原则上按照系统随机方式布设；
- d) 样品采集、保存、运输、分析测试、质量保证与质量控制方法参照第 6 章确定。

6 同位素样品采集与分析测试

6.1 同位素样品采集和保存

铅、镉、铬、铜、锌和汞等同位素土壤样品执行 HJ/T 166 和 GB/T 32722；沉积物样品执行 HJ 494；固体废物样品执行 HJ/T 20，地表水样品执行 HJ 91.2 和 HJ 493；地下水样品执行 HJ 164；废水和污水样品执行 HJ 91.1 和 HJ 493。

6.2 同位素样品前处理

6.2.1 样品制备

铅、镉、铬、铜和锌等同位素土壤样品执行 HJ/T 166；沉积物样品执行 GB 17378.5；固体废物样品执行 HJ/T 20；地表水、地下水、废水和污水等样品使用孔径小于 $0.45\ \mu\text{m}$ 的滤膜过滤，过滤后的样品于 $0\sim 4\ ^\circ\text{C}$ 冷藏避光保存。

汞同位素土壤和沉积物样品经自然风干后研磨至至少 100 目后，在室温下避光保存；固体废物样品执行 HJ/T 20；地表水、地下水、废水和污水等样品使用孔径小于 $0.45\ \mu\text{m}$ 的滤膜过滤，过滤后的样品于 $0\sim 4\ ^\circ\text{C}$ 冷藏避光保存。

6.2.2 试样制备

铅、镉、铬、铜和锌等同位素土壤和沉积物样品执行 HJ 1315；固体废物样品执行 HJ 766；地表水、地下水、废水和污水样品执行 HJ 700。

汞同位素土壤和沉积物样品执行 HJ 680，也可采用热解法制备试样，即加热样品，利用氮气或氧气将释放出的 Hg^0 吹扫至酸性高锰酸钾溶液等捕集液，使其转化为 Hg^{2+} ，将 Hg 从固体样品中分离富集；固体废物样品执行 HJ 702，也可采用上述热解法制备试样；地表水、地下水、废水和污水样品执行 HJ 597。

6.2.3 试样纯化

铅、镉、铬、铜、锌等同位素试样通过离子交换色谱法进行分离纯化。铜、锌、镉同位素均使用强

碱性阴离子交换树脂，并分别采用盐酸和过氧化氢、硝酸、盐酸作为洗脱液进行分离纯化。铅同位素使用强碱性阴离子交换树脂，并采用盐酸作为洗脱液进行洗脱，纯化后的溶液再采用强碱性阴离子交换树脂，并采用盐酸、氢氟酸和硝酸作为洗脱液进行分离纯化。

汞同位素试样通过离子交换色谱法/吹扫捕集法进行分离纯化。离子交换色谱法使用强碱性阴离子交换树脂，采用半胱氨酸和硝酸作为洗脱液进行分离纯化；吹扫捕集法通过向水体中加入氯化亚锡等还原剂将 Hg^{2+} 还原为 Hg^0 ，利用氮气或氩气将释放出的 Hg^0 吹扫至酸性高锰酸钾溶液等捕集液，使其转化为 Hg^{2+} ，实现分离纯化。

6.3 同位素组成测定

6.3.1 目标同位素组成

从 ^{204}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{208}Pb ， ^{108}Cd 、 ^{110}Cd 、 ^{111}Cd 、 ^{112}Cd 、 ^{113}Cd 、 ^{114}Cd ， ^{50}Cr 、 ^{52}Cr 、 ^{53}Cr 、 ^{54}Cr ， ^{63}Cu 、 ^{65}Cu ， ^{64}Zn 、 ^{66}Zn 、 ^{67}Zn 、 ^{68}Zn ， ^{198}Hg 、 ^{199}Hg 、 ^{200}Hg 、 ^{201}Hg 、 ^{202}Hg 、 ^{204}Hg 等同位素组成中选择目标同位素组成进行测定。

6.3.2 分析仪器

同位素组成测定的分析仪器应满足 GB37847 要求。测定铜、锌、汞、铬和镉等同位素使用多接收电感耦合等离子体质谱仪（MC-ICP-MS），测定铅同位素使用 MC-ICP-MS 和热电离子质谱仪（TIMS）。

6.3.3 标准物质

采用权威机构认证的有证标准物质进行正确度控制，有证标准物质应具有元素浓度、基质成分及同位素组成的标准值及不确定度等信息。

6.3.4 校准

铜、锌、汞和铅等同位素采用内标法和标准一样品一标准间插法；铬和镉等同位素采用双稀释剂法和标准一样品一标准间插法。

6.3.5 干扰和消除

采用对样品进行化学分离纯化、仪器参数调节等方法降低或消除同量异位素、双电荷干扰、多原子干扰等质谱干扰。采用基体匹配、内标法和优化仪器条件等措施降低或消除基体效应、质量歧视效应等非质谱干扰。

6.4 质量保证和质量控制

6.4.1 样品采集、保存和运输

土壤样品参照 HJ 166、GB/T 32722；沉积物样品参照 HJ 494；固体废物样品参照 HJ/T 20；地表水样品参照 HJ 91.2 和 HJ 493；地下水样品参照 HJ 164；废水、污水等样品参照 HJ 91.1 和 HJ 493。

6.4.2 样品前处理

分离纯化阶段 Pb 同位素无回收率要求，Cr 同位素回收率应 $\geq 80\%$ ；其他同位素回收率应 $\geq 90\%$ 。

6.4.3 同位素组成测定

同位素组成测量结果的不确定度评定和质量保证/质量控制应满足 GB/T 37847 要求。

7 结果表征

采用以下三种方式进行结果表征：

- 对于铅同位素，直接采用同位素丰度比值表示。
- 对于铜、锌、铬、镉、汞等同位素，采用 δ 表示，计算方法见公式（1）：

$$\delta = \left(\frac{R_Y}{R_S} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

式中： R_Y ——代表样品的同位素丰度比值，‰；

R_S ——代表标准物质的同位素丰度比值，‰。

c) 对于汞同位素，还可以采用 Δ 表示，包括 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 、 $\Delta^{200}\text{Hg}$ 、 $\Delta^{201}\text{Hg}$ 、 $\Delta^{204}\text{Hg}$ ，计算方法见公式(2)、(3)、(4)、(5)：

$$\Delta^{199}\text{Hg} = \delta^{199}\text{Hg} - \delta^{202}\text{Hg} \times 0.252 \quad (2)$$

$$\Delta^{200}\text{Hg} = \delta^{200}\text{Hg} - \delta^{202}\text{Hg} \times 0.502 \quad (3)$$

$$\Delta^{201}\text{Hg} = \delta^{201}\text{Hg} - \delta^{202}\text{Hg} \times 0.752 \quad (4)$$

$$\Delta^{204}\text{Hg} = \delta^{204}\text{Hg} - \delta^{202}\text{Hg} \times 1.493 \quad (5)$$

式中： $\delta^{199}\text{Hg}$ ——样品中 $^{199}\text{Hg}/^{198}\text{Hg}$ 相对于标准样品的 $^{199}\text{Hg}/^{198}\text{Hg}$ 的千分偏差，‰；

$\delta^{200}\text{Hg}$ ——样品中 $^{200}\text{Hg}/^{198}\text{Hg}$ 相对于标准样品的 $^{200}\text{Hg}/^{198}\text{Hg}$ 的千分偏差，‰；

$\delta^{201}\text{Hg}$ ——样品中 $^{201}\text{Hg}/^{198}\text{Hg}$ 相对于标准样品的 $^{201}\text{Hg}/^{198}\text{Hg}$ 的千分偏差，‰；

$\delta^{204}\text{Hg}$ ——样品中 $^{204}\text{Hg}/^{198}\text{Hg}$ 相对于标准样品的 $^{204}\text{Hg}/^{198}\text{Hg}$ 的千分偏差，‰；

$\delta^{202}\text{Hg} \times 0.252$ ——基于质量分馏定律计算得到的 $\delta^{199}\text{Hg}$ 理论值，‰；

$\delta^{202}\text{Hg} \times 0.502$ ——基于质量分馏定律计算得到的 $\delta^{200}\text{Hg}$ 理论值，‰；

$\delta^{202}\text{Hg} \times 0.752$ ——基于质量分馏定律计算得到的 $\delta^{201}\text{Hg}$ 理论值，‰；

$\delta^{202}\text{Hg} \times 1.493$ ——基于质量分馏定律计算得到的 $\delta^{204}\text{Hg}$ 理论值，‰。

8 因果关系判定

8.1 同位素特征信息获取

根据同位素分析检测结果获取受损区环境介质样品、背景区环境介质样品、潜在污染源样品同位素特征信息，即第7章计算得到的同位素丰度比值、 δ 值或 Δ 值。对于无法采集到潜在污染源样品的情况，可以通过文献资料查询等方式获取与潜在污染源类型相同的物质的同位素丰度比值、 δ 值或 Δ 值。

8.2 数据制图

汇总污染物浓度值、受损环境介质样品同位素特征信息、潜在污染源和自然源等不同端元样品同位素特征信息等数据，绘制二维散点图。

a) 仅存在两个端元（包含潜在污染源和自然源）且两者具有明显不同的同位素 δ 值时，选取环境介质样品和不同端元样品同位素 δ 值和元素浓度数据作图，元素浓度或浓度倒数为横坐标，同位素 δ 值为纵坐标，见示意图2；

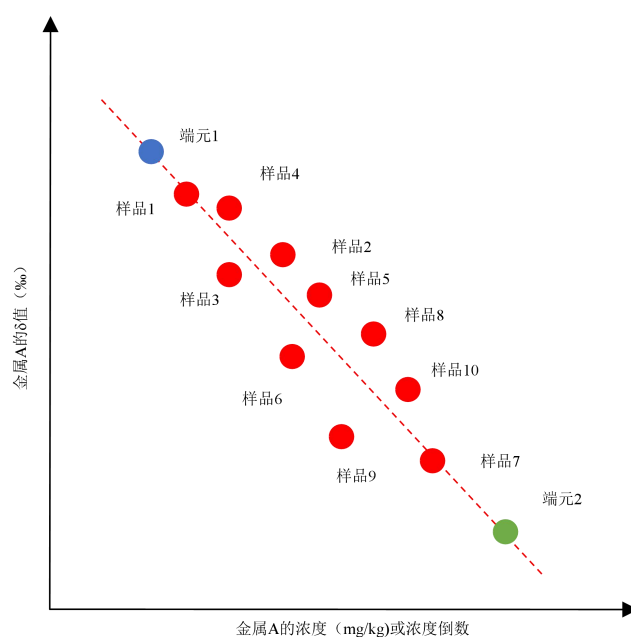


图2 同位素 δ 值和元素浓度数据二维散点图

- b) 当存在三个及以上端元（包含潜在污染源和自然源）时，对于用 Cr、Cd、Pb、Zn、Cu 等同位素进行溯源的，可先选取环境介质样品和不同端元样品同位素 δ 值和元素浓度数据作图，当无法识别污染源时，还可选取环境介质样品和不同端元样品同位素 δ 值和两种元素浓度比值作图，两种元素浓度比值为横坐标，同位素 δ 值为纵坐标，见示意图 3；

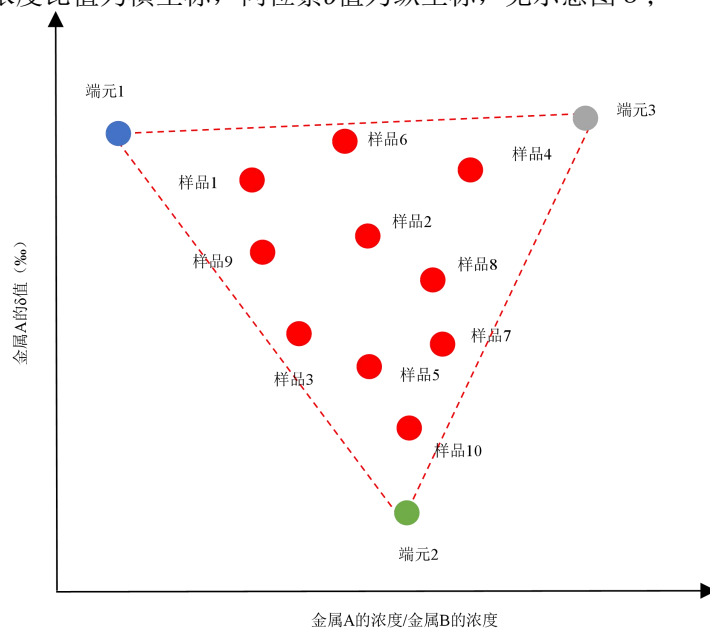


图3 同位素 δ 值和两种元素浓度比值二维散点图

- c) 当存在三个及以上端元（包含潜在污染源和自然源）时，对于用 Hg 同位素进行溯源的，可先选取环境介质样品和不同端元样品同位素 δ 值和 Hg 浓度数据作图，当无法识别污染源时，还可选取环境介质样品和不同端元样品同位素 δ 值和非质量分馏 Δ 值作图，同位素 δ 值为横坐标，非质量分馏 Δ 值为纵坐标，如 $\delta^{202}\text{Hg}-\Delta^{199}\text{Hg}$ 等，见示意图 4；

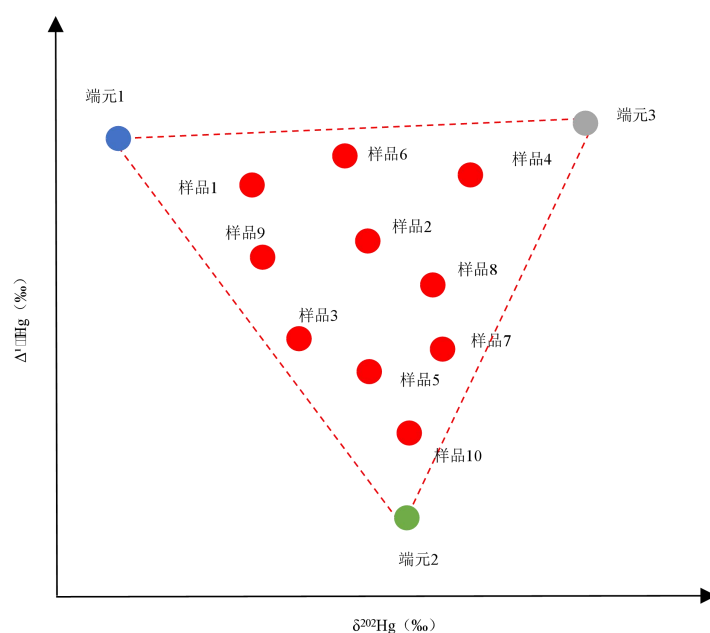


图4 同位素 δ 值和非质量分馏 Δ 值二维散点图

- d) 当上述方法无法识别污染来源, 还可使用多元同位素体系解析污染物来源, 选取环境介质样品和不同端元样品不同元素的同位素 δ 值作图, 见示意图 5;

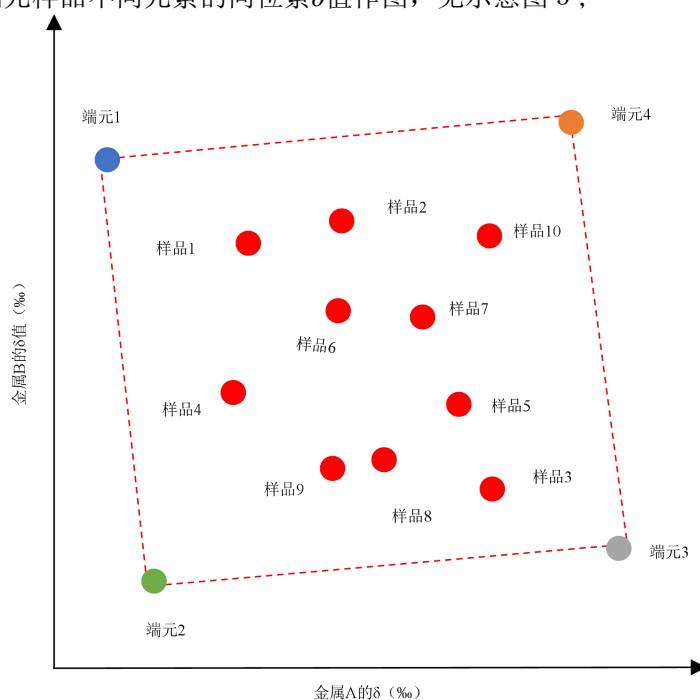


图5 不同元素的同位素 δ 值二维散点图

- e) 对于铅, 上述 δ 值用同位素丰度比值 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 替代。

8.3 潜在污染源与受体同位素特征对比分析

在二维散点图上标出不同端元数据点的分布范围, 根据二维散点图中受污染环境介质样品同位素样品与不同端元样品在图中的分布情况和接近程度, 判定受污染环境介质中污染物与潜在污染源排放的污染物是否具有同源性:

- a) 当受体样品数据点在两端元间呈线性趋势时, 表明受体样品污染物主要来源于这两个端元, 见示意图 2;

- b) 当受体样品的数据点呈离散分布,且分布在以三个端元分布范围作为顶点的三角形区域时,表明受体样品污染物主要来源于这三个端元,见示意图 3 和 4;
- c) 当受体样品的数据点呈离散分布,且分布在以多个端元作为顶点的多边形区域时,表明这几个端元对受体样品污染物均有贡献,见示意图 5;
- d) 当不存在上述规律时,表明污染不是主要来源于这些端元。

8.4 同位素关联污染物与其他污染物来源佐证分析

采用相关分析、聚类分析、因子分析等统计学方法,分析受体中各项关注污染物之间的相关关系,如某同位素关联污染物 A 与其他污染物 B 之间存在强相关关系(相关系数>0.8),可以根据下列结果进行进一步推断或佐证:

- a) 当同位素溯源结果表明 A 来源于某污染源,则 B 也来源于该污染源;
- b) 当其他溯源分析结果表明 B 也来源于某污染源,则证明污染物 A 的同位素溯源分析结果可信。

8.5 因果关系综合判定

根据同位素溯源分析结果或综合采用特征比值法、指纹图谱法、多元统计分析法、化学质量平衡法等其他方法进行溯源分析的结论,结合参照 GB/T 39792.1、GB/T 39792.2 进行时间先后顺序分析、迁移路径分析等的结论,对照 GB/T 39792.1、GB/T 39792.2 中的因果关系判定原则,综合判定因果关系。

9 贡献度分析

根据环境介质和不同端元同位素组成,计算各端元对环境介质中相关污染物的贡献度,包括污染源端元的贡献度。贡献度计算方法如下:

- a) 两个端元

当存在两个端元时, f_1 计算方法见公式(6):

$$f_1 = \frac{\delta_2 - \delta_s}{\delta_2 - \delta_1} \quad (6)$$

然后利用公式(7)计算 f_2 :

$$f_2 = 1 - f_1 \quad (7)$$

式中: f_1 ——端元 1 的贡献度;

f_2 ——端元 2 的贡献度;

δ_s ——环境介质中特征污染物的金属同位素丰度比值,‰;

δ_1 ——端元 1 的该种同位素丰度比值,‰;

δ_2 ——端元 2 的该种同位素丰度比值,‰。

- b) 三个端元

当存在三个端元时, f_1 、 f_2 计算方法见公式(8)、(9):

$$f_1 = \frac{\delta_s(C_2 - C_3) - \delta_2(C_3 - C_1) + \delta_3(C_1 - C_2)}{\delta_1(C_2 - C_3) - \delta_2(C_1 - C_3) + \delta_3(C_1 - C_2)} \quad (8)$$

$$f_2 = \frac{\delta_1(C_3 - C_2) - \delta_s(C_1 - C_3) + \delta_3(C_1 - C_2)}{\delta_1(C_2 - C_3) - \delta_2(C_1 - C_3) + \delta_3(C_1 - C_2)} \quad (9)$$

利用公式(10)计算 f_3 :

$$f_3 = 1 - f_1 - f_2 \quad (10)$$

式中: f_1 ——端元 1 的贡献度;

f_2 ——端元 2 的贡献度;

f_3 ——端元 3 的贡献度;

δ_s ——环境介质中特征污染物的金属同位素丰度比值,‰;

δ_1 ——端元 1 的该种同位素丰度比值,‰;

δ_2 ——端元 2 的该种同位素丰度比值,‰;

δ_3 ——端元 3 的该种同位素丰度比值,‰;

C_s ——环境介质中特征污染物的浓度，mg/kg 或 mg/L；

C_1 ——端元 1 的该种污染物浓度，mg/kg 或 mg/L；

C_2 ——端元 2 的该种污染物浓度，mg/kg 或 mg/L；

C_3 ——端元 3 的该种污染物浓度，mg/kg 或 mg/L。

对于铅，式中的 δ 用 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 替代。

对于具有非质量分馏的元素， δ 采用 Δ 替代。

c) 三个以上端元

当存在三个以上端元时，基于贝叶斯算法，通过常用的稳定同位素溯源混合模型计算不同端元贡献度。

10 不确定性分析

采用定性的方法对基于同位素开展因果关系判定污染溯源过程中的不确定性进行分析，包括：

- a) 采样点位布设过程的不确定性，主要为污染源样品异质性、环境样品采样点位置和深度代表性不足及其空间异质性等引起的不确定性等；
- b) 样品分析测试过程的不确定性，主要为干扰消除不充分导致的不确定性、分离纯化过程样品损失导致的不确定性等；
- c) 溯源分析过程的不确定性，主要为潜在污染源与受体同位素特征比对过程中的不确定性等。

11 报告编制

编制因果关系判定溯源分析报告，报告模板和内容要求见附录 A。

附录 A (资料性附录)

应用金属同位素技术进行因果关系判定污染溯源报告模板及编制要求

A.1 工作背景

阐述生态环境损害事件的基本信息，包括发生时间、地点、起因、经过和主要损害指标等；描述事件发生地周围的自然环境信息、环境质量状况、潜在污染源基本情况等。

A.2 金属同位素技术适用性分析

基于污染物种类、是否具有同位素、潜在污染源数量、已开展的其他因果关系判定方法应用效果、是否能获取潜在污染源同位素丰度比值等方面信息，分析判断用金属同位素技术开展溯源分析的适用性。

A.3 工作概况

A.3.1 工作目标

明确应用金属同位素技术进行因果关系判定污染溯源的主要目标。

A.3.2 工作依据

写明应用金属同位素技术进行因果关系判定污染溯源过程中所依据的法律法规和标准规范等。

A.3.3 工作程序

给出应用金属同位素技术进行污染溯源调查分析的技术路线，明确每一步的工作流程。

A.4 调查过程及结果

详细介绍污染溯源调查范围和数量确定的依据，以及样品采集、保存、运输、实验室分析检测过程，并阐述全流程质量保证和质量控制措施和结果；给出同位素分析测试结果。

A.5 结果表征

阐述基于仪器给出的同位素丰度比值进行结果表征的过程，给出同位素丰度比值、 δ 、 Δ 等表征结果。

A.6 因果关系判定过程及结论

阐述基于污染物浓度值、受污染环境介质样品同位素特征信息、不同端元样品同位素特征信息等数据绘制二维散点图的过程，给出二维散点图。描述潜在污染源与受体同位素特征进行对比分析、同位素关联污染物与其他污染物来源佐证分析和因果关系综合判定过程及结果。

A.7 贡献度分析过程及结论

给出根据环境介质和不同端元同位素组成计算各端元对环境介质中相关污染物的贡献度的过程和计算结果，开展分析结果的不确定性分析。

A.8 附件

在附件中给出利用同位素进行因果关系判定污染溯源的相关图表、数据、记录等，包括地形图、遥感影像图、水文地质图、采样点位布置图、调查记录表、样品检测报告、调查问卷、调查过程中产生的照片、参考文献资料等。