

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

T/ESC

中国生态学会团体标准

T/ESC XXXX—XXXX

工矿污染场地土壤生态风险基准制定 技术指南

Technical guideline for deriving soil ecological risk criteria for contaminated
industrial and mining sites

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国生态学会 发布

前言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》，防止工矿场地土壤污染，保护生态安全，科学、规范地制定土壤生态风险基准，制定本标准。

本指南参照 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》的规定起草。

本标准规定了工矿污染场地土壤生态风险制定的程序、方法和技术要求。

本标准的附录 A~附录 C 为资料性附录。

本标准为首次发布。

本标准由□□□□□□□□组织制定。

本标准起草单位：中国科学院生态环境研究中心、生态环境部南京环境科学研究所、中山大学、厦门大学。

本标准自发布之日起实施。

本标准由□□□□□解释。

工矿污染场地土壤生态风险基准制定技术指南

1 范围

本标准规定了工矿污染场地土壤生态风险基准制定的内容、程序、方法和技术要求。
本标准适用于工矿污染场地土壤生态风险基准值的制定。
本标准不适用于放射性物质。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

本标准引用了下列标准、技术规范等规范性文件，包括土壤生态毒理学和生物测试标准化方法，未涉及的方法可参考附录A。

GB/T 21809 化学品 蚯蚓急性毒性实验

GB/T 27855 化学品 土壤微生物 碳转化试验

3 术语和定义

请选择适当的引导语

3.1 工矿场地 industrial and mining site

用于从事工业生产和矿山开采活动的地块，包括地块范围内的土壤、地表水、地下水以及地块内所有构筑物、设施和生物之和。

3.2 土壤生态风险基准 criteria for soil ecological risk

污染物对土壤生态系统不产生特定不利影响（或有害效应）的临界含量，包含了土壤污染物含量和其所产生的不利影响（或有害效应）之间的完整关系。

3.3 生态情景 ecological scenario

污染物暴露于受体时，造成差异化生态效应的环境参数的集合。

3.4 x%危害浓度 hazardous concentration (HCX)

受影响物种的累积概率达到 x%时的污染物浓度，或（100-x）%的物种能够得到有效保护的污染物浓度。

3.5 x%效应浓度 effective concentration (ECX)

与对照组相比，污染物对受试生物产生 x%生态效应（如死亡率、生长抑制率、生殖等）时的浓度。

3.6 无观察效应浓度 no observed effect concentration, NOEC

在规定的暴露条件下，通过实验和观察，与适当的对照机体比较，一种外源污染物质不引起生物任何有害作用的最高浓度。

3.7 最低可观察效应浓度 lowest observed effect concentration, LOEC

指在规定的暴露条件下，通过实验和观察，与适当的对照机体比较，一种化合物引起机体出现某种

作用（非有害作用）的最低剂量或浓度。

3.8 预测无效应浓度 predicted no effect concentration, PNEC

化学物质不会对土壤生物产生特定不利效应的最大暴露剂量或浓度，或称保护土壤生态安全的土壤污染物最大允许含量。

3.9 生态保护水平 ecological protection level

根据工矿场地未来土地开发利用方式下土壤所提供的生态服务功能的重要性所确定的生态物种或生态过程保护的等级。

3.10 物种敏感度分布 species sensitivity distribution (SSD)

在生态系统中，不同物种对某一胁迫因子的敏感程度服从一定的累积概率分布，可通过概率或经验分布函数来描述不同物种样本对胁迫因素的敏感度差异。

3.11 评估因子 assessment factor

从实验测定的剂量效应关系外推估计不会发生不利效应的污染物浓度的校正系数。

3.12 污染土壤生态风险评估 ecological risk assessment of contaminated soil

评估污染物进入土壤后对关注的生态受体（陆生植物、土壤微生物和土壤动物等）及其生态过程（如硝化作用、有机质矿化、磷酸酶活性等）产生显著危害的可能性。

3.13 土壤环境背景值 soil environmental background value

指基于目标土壤污染物环境背景含量的统计值。通常以土壤环境背景含量的某一分位值表示。

4 工矿污染场地土壤生态风险基准制定流程

工矿污染场地土壤生态风险基准的制定主要包括 6 个步骤（图 1），具体如下：

- （1）确定需要保护的生态受体和生态过程；
- （2）生态毒性数据的收集与筛选；
- （3）基准外推方法选择；
- （4）PNEC 的外推；
- （5）基准值的确定；
- （6）基准值的审核。

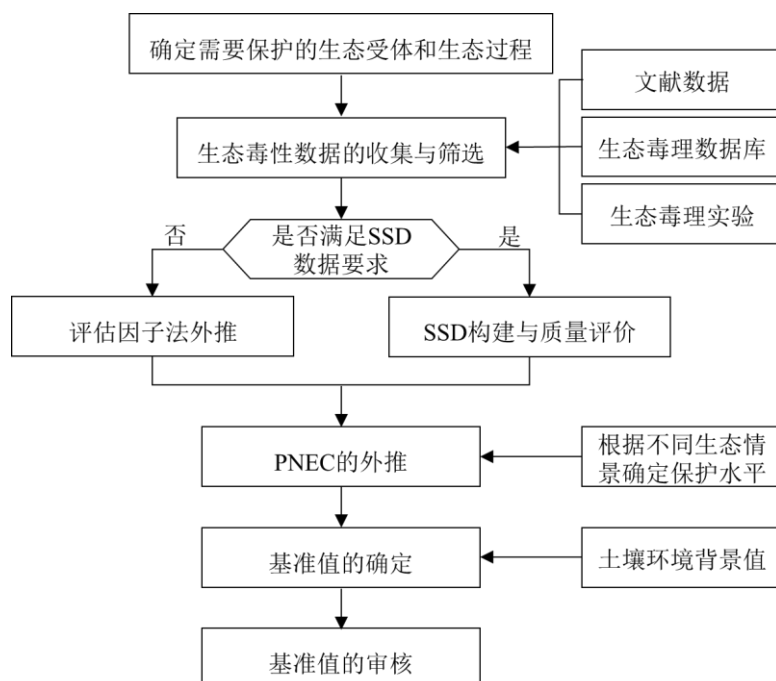


图 1 工矿污染场地土壤生态风险基准制定流程

5 确定需要保护的生态受体和生态过程

在制定工矿污染场地土壤生态风险基准时，需要先确定需要保护的土壤生态受体和生态过程，这些生态受体和生态过程应为土壤生态系统中有代表性的生产者、消费者和分解者，具体可包括以下 3 类：

- (1) 生产者为陆生植物，如农作物、需要保护的野生植物等；
- (2) 消费者为整个生命周期主要生活在土壤中的无脊椎动物，如蚯蚓、线虫、跳虫等；
- (3) 分解者为土壤微生物和微生物主导的土壤生态过程，如真菌、细菌、土壤呼吸作用、土壤消化作用等。

6 生态毒性数据的收集及筛选

6.1 数据来源

单一物种的生态毒性数据主要通过以下 3 种途径获得：

- (1) 开展土壤生态毒理实验：按照附录 A 中的土壤生态毒理学和生物测试标准化方法，开展相应物种的生态毒理实验，优先考虑我国的本土模式生物和实验方法，获取生态毒性数据；
- (2) 检索已有的生态毒数据库：主要从美国环保署的“ECOTOX”生态毒理数据库 (<https://cfpub.epa.gov/ecotox>) 获取目标毒性数据；
- (3) 收集公开发表文献里的毒性数据：主要从国内外常用的文献数据获取数据，包括 Web of Science (<http://www.isiknowledge.com>)、中国知网 (<http://www.cnki.net>)、万方数据库 (<http://www.wanfangdata.com.cn>) 等。

6.2 数据筛选原则

从数据库或文献中获取毒性数据需对收集的毒性数据进行筛选和处理，有效毒性数据的筛选遵循以下原则：

- (1) 生态毒性数据应遵循 GB/T、OECD 或 ISO 规定的标准化实验方法获得；
- (2) 应能根据文献资料确定测试生物暴露于土壤污染物的时间和毒性终点，并可根据剂量-效应关系估算毒性效应数据 ECX，如 EC10、EC50 等；
- (3) 文献应记录开展毒性实验的条件，如土壤 pH、有机质、阳离子交换量、粘粒含量、温度等；

(4) 毒理实验开展的环境暴露介质选择人工或者自然土壤，排除水培、滤纸培养、体腔注射等暴露方式下获得的毒性数据；

(5) 文献资料获得的生态毒性数据应排除复合污染实验结果，选择单一关注污染物暴露获得的毒性数据，避免存在非关注污染物的显著干扰；

(6) 田间实验数据用于基准的制定时，除满足以上条件外，还应当同时满足如下条件：①效应数据必须来自同一地区同一研究实验周期，并有供试土壤理化性质数据；②样品采集、处理和存储应遵照标准方法或可接受的操作程序；③其他田间实验相关条件如采样设计的科学性等需要根据具体实验进行评估；

6.3 毒性效应指标的选择

制定工矿污染场地土壤生态风险基准时，优先选择可能影响生态受体个体生长、发育或种群繁衍相关特性的毒性效应指标。

(1) 对于陆生植物，选择生物量、产量、根伸长等；

(2) 对于土壤无脊椎动物，选择繁殖率、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，选择土壤微生物量、土壤硝化作用、土壤呼吸作用等。

6.4 毒性效应终点的选择

制定工矿污染场地土壤生态风险基准时，根据不同的毒性效应终点，确定不同的毒性效应水平。具体可分为以 NOEC、LOEC、EC10 等为效应终点的无效应水平 (Level 1) 和以 EC50、LC50、LD50 等为效应终点的半数效应水平 (Level 2)

(1) 无效应水平毒性数据推导的生态风险基准相对严格，当环境浓度超过相应基准浓度时表明生态风险开始发生，可作为生态风险筛选值；

(2) 半数效应水平毒性数据推导的生态风险基准相对宽松，当环境浓度超过相应基准浓度时表明可能对土壤生态物种或生态过程产生 50% 的生态危害效应，生态风险相对较高，需要采取措施以降低生态风险，可作为生态风险管制值；

(3) 低效应水平和高效应水平的生态毒性数据分别处理；

(4) 同一物种有多个毒性效应指标的，取最敏感的毒性效应指标；

(5) 同一物种的相同毒性效应指标，取这些毒性效应浓度的几何平均值，不同土壤的相同微生物或生态过程指标分别处理。

(6) 所有毒性效应终点的单位保持一致，均换算为 mg/kg；

7 基准外推方法选择

根据收集与筛选后的生态毒性数据量多少，选择工矿污染场地土壤生态风险基准外推的方法，当筛选后的毒性数据满足不低于 2 类 6 种不同的生态受体或生态过程时，优先选择 SSD 模型进行毒性数据外推，并根据获取的毒性数据情况，结合评估因子估算 PNEC。当数据类型和质量不满足 SSD 构建要求时，可选择评估因子法进行毒性数据外推，评估因子法外推获得的 PNEC 可作为工矿污染场地土壤生态风险基准确定的临时依据，待毒性数据量满足 SSD 要求时，仍需对基准值进行修订。

7.1 SSD 构建与质量评价

利用收集筛选后的生态毒性数据建立污染物效应浓度和物种累积分布之间的 SSD 模型，常用的分布函数包括 Burr III、Log-normal、Log-logistic、Weibull、Gumbel 及 Gamma。分别利用上述 6 种分布函数对毒性数据进行拟合，推荐根据赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC)，选择拟合度较好的一个或多个分布函数，确定各个优选分布函数的权重，最终建立基于优选分布函数加权平均后的 SSD 模型。6 种分布函数、拟合优度评价方法及优选函数的权重确定方法见附录 B。

7.2 评估因子法

当生态毒性数据量不满足 SSD 构建要求时，可按照表 1 所列情况选择最敏感毒性效应浓度和相应的评估因子进行外推。

表 1 评估因子 AF 取值推荐表

有效数据限定条件	评估因子取值
至少有一个营养级生物（如植物、蚯蚓或微生物）的 $L(E)C_{50}$ 值	1000
至少有一种生物（如植物）的 NOEC 值	100
至少在两个营养级上有两种生物的 NOEC 值	50
至少在三个营养级上有三种生物的 NOEC 值	10
已知物种敏感性分布曲线（SSD 方法）	5-1（根据情况确定）
现场数据或模拟生态系统下得到的数据	（根据现场情况确定）

8 土壤预测无效应浓度 PNEC 的外推

8.1 物种敏感度分布法外推

分别依据优选的分布函数，按照权重平均获得不同生态保护水平下的危害浓度 \overline{HC}_X ，结合考虑获取毒理数据的质量，除以评估因子（1~5）（表 1）作为土壤 PNEC 值。其中危害浓度 \overline{HC}_X 中 X 值的确定可根据不同的生态情景确定，如场地未来不同用地开发类型，不同土壤性质等，具体由当地环境管理要求而定。无效应 Level 1 水平外推的数据作为生态筛选值，半数效应 Level 2 水平外推的数据作为生态管制值。

8.2 评估因子法外推

当获取的毒理数据不满足 SSD 要求时，选择毒性数据的最敏感值，根据表 1 所列情况选择相应的评估因子（AF），用毒性数据最敏感值除以评估因子估算 PNEC 值。由于数据量的限制，该方法可只用于生态筛选值推导。

9 工矿污染场地土壤生态风险基准值的确定

获取 PNEC 值后，根据污染物类型，考虑土壤环境背景值的影响，最终确定工矿污染场地土壤生态风险基准值。主要分以下两类情况：

（1）制定重金属元素类污染物的基准，考虑土壤环境背景浓度，可选取全国土壤环境背景数据的 50% 顺序统计值作为背景值缺省值（见附录 C），也可根据具体评价项目所在地区的背景值，利用外推获得的 PNEC 叠加当地土壤环境背景值作为工矿污染场地土壤生态风险基准值；

（2）制定无背景浓度污染物的基准，直接以外推获得的 PNEC 作为工矿污染场地土壤生态风险基准值。

基准值的取值一般保留两位有效数字，单位以 mg/kg 表示。

10 工矿污染场地土壤生态风险基准值的审核

10.1 基准的自审核项目

工矿污染场地土壤生态风险基准的最终确定需要仔细审核基准推导所用数据以及推导步骤，以确保基准合理可靠。自审项目如下：

- （1）使用的毒性数据是否可被充分证明有效。
- （2）所使用的数据是否符合数据质量要求。
- （3）急性毒性数据中是否存在可疑数值。
- （4）慢性毒性数据中是否存在可疑数值。
- （5）是否存在明显异常数据。
- （6）是否遗漏其它重要数据。

10.2 基准的专家审核项目

- （1）基准推导所用数据是否可靠。

- (2) 物种要求和数据量是否符合基准推导要求。
- (3) 基准推导过程是否符合技术标准。
- (4) 基准值的得出是否合理。
- (5) 是否有任何背离技术标准的内容并评估是否可接受。

附 录 A
(资料性附录)

国内国际土壤生态毒理学和生物测试标准化方法

附表 A.1 国内土壤生态毒理学和生物测试标准化方法

方法编号	供试生物	方法名称
GB/T 21809	蚯蚓 (<i>Eisenia fetida</i>)	化学品 蚯蚓急性毒性试验
GB/T 27855	土壤微生物	化学品 土壤微生物 碳转化试验
GB/T 31270.15	蚯蚓 (<i>Eisenia fetida</i>)	化学农药环境安全评价实验准则 第 15 部分: 蚯蚓急性毒性试验
GB/T 31270.16	土壤微生物	化学农药环境安全评价实验准则 第 16 部分: 土壤微生物毒性试验
GB/T 31270.19	植物	化学农药环境安全评价实验准则 第 19 部分: 非靶标植物影响试验

附表 A.2 国际土壤生态毒理学和生物测试标准化方法

方法编号	供试生物	方法名称
ISO 10872	线虫 (<i>Caenorhabditis elegans</i>)	沉积物和土壤样品对秀丽隐杆线虫(<i>Caenorhabditis elegans</i>)生长、肥力和繁殖毒性影响的测定
ISO 11267	跳虫 (<i>Folsomia candida</i>)	土壤污染物对弹尾虫(<i>Folsomia candida</i>)繁殖的抑制作用
ISO 11268-1	蚯蚓 (<i>Eisenia fetida</i>)	污染物对蚯蚓(<i>E.fetida</i>)的急性致毒效应测试
ISO 11268-2	蚯蚓 (<i>Eisenia fetida</i>)	污染物对蚯蚓(<i>E.fetida</i>)生殖影响的测定
ISO 11269-1	植物	除挥发性物质以外的所有可能进入到土壤中的物质对植物根系生长情况的影响
ISO 11269-2	植物	土壤中化学物质对多种高等植物的出苗率和早期生长的潜在毒性效应
ISO 14238	土壤微生物	污染物对土壤氮矿化和硝化作用的潜在影响
ISO 14240	土壤微生物	土壤污染对微生物生物量的影响
ISO 15685	土壤微生物	土壤污染对硝化微生物的抑制效应
ISO 15952	幼螺 (<i>Helicidae</i>)	污染物对陆地幼螺 (<i>Helicidae</i>)生长的影响
ISO 16072	土壤微生物	土壤污染对微生物土壤呼吸的影响
ISO 16387	线蚓 (<i>Enchytraeus albidus</i>)	污染物对线蚓(<i>Enchytraeus sp.</i>)的繁殖和存活影响
ISO 17126	莴苣 (<i>Lactuca sativa L.</i>)	污染土壤对莴苣 (<i>Lactuca sativa L.</i>) 出苗率的影响
ISO 17155	土壤微生物	运用土壤呼吸曲线法确定微生物群落的丰度和活性, 适用于确定土壤污染物的潜在生态毒性
ISO 17512-1	蚯蚓 (<i>Eisenia fetida</i> and <i>Eisenia andrei</i>)	测定土壤质量和化学品对蚯蚓 (<i>Eisenia fetida</i> and <i>Eisenia andrei</i>)的回避试验.
ISO 17512-2	弹尾虫 (<i>Folsomia candida</i>)	测定土壤质量和化学品对弹尾虫 (<i>Folsomia candida</i>)的回避试验.
ISO 18187	土壤微生物 (<i>Arthrobacter globiformis</i>)	利用球形节杆菌 (<i>Arthrobacter globiformis</i>) 脱氢酶活性进行固体样品接触试验
ISO 20963	昆虫类 (<i>Oxythyrea funesta</i>)	污染物对昆虫幼虫(<i>Oxythyrea funesta</i>)的急性致毒效应
ISO 22030	油菜 (<i>Brassica rapa</i>) 燕麦 (<i>Avena sativa</i>)	化学物质对陆地植物油菜和燕麦的繁殖力的影响
ISO 23753	土壤微生物	污染物对非淹水土壤中脱氢酶活性的影响
ISO 29200	蚕豆 (<i>Vicia faba</i>)	高等植物遗传毒性效应评价—蚕豆微核试验
OECD 207	蚯蚓(<i>E.fetida</i> 和 <i>E.andrei</i>)	污染物对蚯蚓(<i>E.fetida</i> 和 <i>E.andrei</i>)的急性致毒效应
OECD 208	植物	化学物质对土壤中高等植物出苗率和苗生长情况的影响
OECD 216	土壤微生物	污染物对土壤微生物氮转化能力的影响
OECD 217	土壤微生物	污染物对土壤微生物碳转化能力的影响
OECD 220	线蚓 (<i>Enchytraeus albidus</i>)	化学物质对线蚓(<i>Enchytraeus albidus</i>)的繁殖力影响
OECD 222	蚯蚓 (<i>E.fetida</i> 和 <i>E.andrei</i>)	化学物质对蚯蚓(<i>E.fetida</i> 和 <i>E.andrei</i>)的繁殖力影响
OECD 226	螨虫 (<i>Hypoaspis aculeifer</i>)	化学物质对螨虫 (<i>Hypoaspis aculeifer</i>) 的繁殖力影响
OECD 227	植物	化学物质的沉降过程对土壤植物叶片和地上部分生长状况的影响
OECD 232	跳虫 (<i>Folsomia candida</i> 和 <i>Folsomia fimetaria</i>)	化学物质对跳虫 (<i>Folsomia candida</i> 和 <i>Folsomia fimetaria</i>)的繁殖力影响

附录 B
(资料性附录)

物种敏感性分布曲线拟合函数、拟合优度评价及优选函数权重确定方法

附表 B.1 物种敏感性分布曲线拟合函数

拟合函数名称	函数公式	变量及参数含义
Burr III 型函数	$F = \frac{1}{1 + (\frac{x}{\beta})^\gamma}$	F — 拟合函数的累积分布函数, % x — 污染物毒性浓度, mg/kg $\alpha, \beta, \gamma, \mu, \sigma$ — 拟合函数参数
Gamma 型函数	$F = \frac{\beta^\gamma}{\Gamma(\gamma)} (\frac{x}{\beta})^{\gamma-1} e^{-x/\beta}$	
Gumbel 型函数	$F = e^{-e^{-(x-\alpha)/\beta}}$	
Log-logistic 型函数	$F = \frac{1}{1 + (\frac{x}{\beta})^\alpha}$	
Log-normal 型函数	$F = \Phi\left(\frac{\log x - \mu}{\sigma}\right)$	
Weibull 型函数	$F = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}$	

B.1 拟合函数拟合优度评价

模型拟合优度评价是用于检验总体中的一类数据其分布是否与某种理论分布相一致的统计方法。对于参数模型来说, 检验模型拟合优度的方法推荐使用赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC), 使用最大似然估计法进行模型拟合, 并计算每个模型的 AIC 值:

$$AIC = -2L + 2K \quad (\text{Eq.1})$$

式中 L 表示最大对数似然函数, K 为拟合模型的参数数量, 计算得到的 AIC 值越小, 说明模型拟合优度越好。当样本量较少时, 可使用小样本版 AIC (AIC_C) 进行模型评价。

$$AIC_C = -2L + 2K \left(\frac{n}{n-K-1} \right) \quad (\text{Eq.2})$$

式中 L 和 K 的含义同上, n 代表样本数量, 当 $n \leq K + 1$ 时, 本参数不适用。

贝叶斯信息准则 (Bayesian information criterion, BIC) 可作为另一种替代来评价模型拟合优度, 它在形式和设计上与 AIC 相似, 但模型估算的方法为 Metropolis-Hastings, 下式中的参数含义同上。

$$BIC = -2L + 2K \ln(n) \quad (\text{Eq.3})$$

B.2 优选函数权重确定

根据各个拟合函数的 AIC 值, 建立不同分布函数与最优分布函数 (最低 AIC 值) 之间的信息差值:

$$\Delta_i = AIC_i - \min(AIC) \quad (\text{Eq.4})$$

AIC_i 为第 i 个分布的 AIC 值, $\min(AIC)$ 为所有拟合函数中 AIC 的最低值, $\Delta_{AIC} = 0$ 的分布函数为最优拟合分布函数, 一般认为 $\Delta_{AIC} \leq 2$ 的函数拟合度均较好, 建议保留并赋予函数权重 W_i :

$$W_i = \frac{e^{-\frac{1}{2}\Delta_i}}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{\Delta_j}} \quad (\text{Eq.5})$$

上式中 m 为保留的函数个数, Δ_i 含义同上, 最终 SSD 模型为多个模型的加权平均模型, 推导特定 HC_x 为各优选模型的加权均值:

$$\overline{HC_x} = \sum_{j=1}^m W_j HC_{xj} \quad (\text{Eq.6})$$

$$PNEC = \frac{\overline{HC_x}}{AF} \quad (\text{Eq.7})$$

附 录 c
(资料性附录)
全国表层土壤重金属背景含量统计表 (mg/kg)

附表 C.1 全国表层土壤重金属背景含量统计表 (mg/kg)

元素	样点数	顺序统计量								
		最小值	5%值	10%值	25%值	中位数	75%值	90%值	95%值	最大值
镉	4095	0.001	0.016	0.024	0.046	0.079	0.121	0.187	0.264	13.4
汞	4092	0.001	0.009	0.012	0.02	0.038	0.079	0.148	0.221	45.9
砷	4093	0.01	2.4	3.5	6.2	9.6	13.7	20.2	27	626
铅	4095	0.68	10.9	13.6	18	23.5	30.5	43	55.6	1143
铬	4094	2.2	17.4	23.7	40.2	57.3	73.9	94.7	118.8	1209
铜	4095	0.33	6	8.8	14.9	20.7	27.3	36.6	44.8	272
镍	4095	0.06	5.7	9	17	24.9	33	42.4	51.2	627
锌	4095	2.6	25.1	35	51	68	89.2	116	140	593

数据来源：《中国土壤元素背景值》中国环境科学出版社，1991。