

ICS 13.030.01

Z 27

HJ

中华人民共和国国家生态环境标准

HJ 1428—2025

固体废物 甲基汞和乙基汞的测定 液相色谱-原子荧光法

Solid waste—Determination of methyl mercury and ethyl mercury
—Liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometry

本电子版为正式标准文件，由生态环境部环境标准研究所审校排版。

2025-12-22发布

2026-07-01实施

生态环境部 发布

目 次

前言	II
1 适用范围	1
2 规范性引用文件.....	1
3 方法原理	1
4 试剂和材料	1
5 仪器和设备	3
6 样品	3
7 分析步骤	5
8 结果计算与表示.....	5
9 准确度	6
10 质量保证和质量控制.....	7
附录A（规范性附录） 方法检出限和测定下限	9



前 言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》，防治生态环境污染，改善生态环境质量，规范固体废物中甲基汞和乙基汞的测定方法，制定本标准。

本标准规定了测定固体废物中甲基汞及固体废物浸出液中甲基汞和乙基汞的液相色谱-原子荧光法。

本标准的附录 A 为规范性附录。

本标准首次发布。

本标准由生态环境部生态环境监测司、法规与标准司组织制订。

本标准主要起草单位：山东省青岛生态环境监测中心、青岛理工大学。

本标准验证单位：贵州省生态环境监测中心、青岛市城市排水监测站、青岛斯坦德衡立环境技术研究院有限公司、中国国检测试控股集团青岛京诚有限公司、青岛华测检测技术有限公司、析致通标技术检测（北京）有限公司和北京新奥环标技术服务有限公司。

本标准生态环境部 2025年12月22日批准。

本标准自 2026年7月1日起实施。

本标准由生态环境部解释。

固体废物 甲基汞和乙基汞的测定 液相色谱-原子荧光法

警告：实验中使用的硝酸具有强氧化性和腐蚀性，标准溶液和有机溶剂对人体健康有害，样品前处理过程应在通风橱内操作，按要求佩戴防护器具，避免吸入呼吸道或接触皮肤和衣物。

1 适用范围

本标准规定了测定固体废物中甲基汞及固体废物浸出液中甲基汞和乙基汞的液相色谱-原子荧光法。

本标准适用于固体废物中甲基汞及固体废物浸出液中甲基汞和乙基汞的测定。

固体废物取样量为 2.5 g，反萃取液体积为 3.0 mL 时，甲基汞的方法检出限为 0.07 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，测定下限为 0.28 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。固体废物浸出液取样量为 250 mL，反萃取液体积为 3.0 mL 时，甲基汞和乙基汞的方法检出限均为 0.8 ng/L，测定下限为 3.2 ng/L。

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。

HJ/T 20	工业固体废物采样制样技术规范
HJ 298	危险废物鉴别技术规范
HJ/T 299	固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法
HJ/T 300	固体废物 浸出毒性浸出方法 醋酸缓冲溶液法
HJ 557	固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法

3 方法原理

固体废物经硝酸-硫酸铜溶液超声波提取后，提取液中的甲基汞及固体废物浸出液中的甲基汞和乙基汞经二氯甲烷萃取，L-半胱氨酸-乙酸铵溶液反萃取，反萃取液中的甲基汞和乙基汞与 L-半胱氨酸的络合物通过液相色谱分离后，经紫外线照射和氧化剂氧化，有机态的汞转化为二价汞离子，二价汞离子被硼氢化钾还原为汞原子，用原子荧光法测定。根据保留时间定性，外标法定量。

4 试剂和材料

除非另有说明，分析时均使用符合国家标准和分析纯试剂，实验用水为不含目标化合物的纯水。

- 4.1 盐酸 (HCl): $\rho=1.18 \text{ g/mL}$, $w \in [36.0\%, 38.0\%]$, 优级纯。
- 4.2 硝酸 (HNO_3): $\rho=1.42 \text{ g/mL}$, $w \in [65.0\%, 68.0\%]$, 优级纯。
- 4.3 乙酸 (CH_3COOH): $\rho=1.05 \text{ g/mL}$, 优级纯。
- 4.4 氯化钠 (NaCl)。
- 4.5 氢氧化钾 (KOH): 优级纯。

4.6 L-半胱氨酸 ($C_3H_7NO_2S$): 纯度 $\geq 99\%$ 。

4.7 乙酸铵 (CH_3COONH_4): 优级纯。

4.8 硼氢化钾 (KBH_4): 优级纯。

4.9 过硫酸钾 ($K_2S_2O_8$): 优级纯。

4.10 五水合硫酸铜 ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$)。

4.11 无水硫酸钠 (Na_2SO_4)。

使用前在 $400^\circ C$ 下灼烧 4 h, 冷却后, 于磨口玻璃瓶中密封保存。

4.12 甲醇 (CH_3OH): 色谱纯。

4.13 二氯甲烷 (CH_2Cl_2): 色谱纯。

4.14 正己烷 (C_6H_{14}): 优级纯。

4.15 硝酸溶液: $c(HNO_3) \approx 4 \text{ mol/L}$ 。

量取 178 mL 硝酸 (4.2) 用水稀释至 1 L。

4.16 硝酸-硫酸铜提取液。

称取 65 g 五水合硫酸铜 (4.10) 用硝酸溶液 (4.15) 溶解并稀释至 1 L。

4.17 盐酸溶液。

盐酸 (4.1) 和纯水按 1: 19 体积比混合。

4.18 硼氢化钾溶液: $r(KBH_4) = 2 \text{ g/L}$ 。

称取 5.0 g 氢氧化钾 (4.5), 溶于少量水中, 加入 2.0 g 硼氢化钾 (4.8), 溶解并混匀, 用水稀释至 1 L。临用现配。

4.19 碱性过硫酸钾溶液: $r(K_2S_2O_8) = 2 \text{ g/L}$ 。

称取 5.0 g 氢氧化钾 (4.5), 溶于少量水中, 加入 2.0 g 过硫酸钾 (4.9), 溶解并混匀, 用水稀释至 1 L。临用现配。

4.20 L-半胱氨酸-乙酸铵溶液。

称取 1.0 g L-半胱氨酸 (4.6) 和 0.8 g 乙酸铵 (4.7), 用水溶解并定容至 100 mL。临用现配。

4.21 L-半胱氨酸-乙酸铵-甲醇混合溶液。

称取 1.2 g L-半胱氨酸 (4.6) 和 0.62 g 乙酸铵 (4.7) 溶于少量水中, 加入 80 mL 甲醇 (4.12) 混匀, 并用水定容至 1 L, 经滤膜 (4.28) 过滤后使用。临用现配。

4.22 饱和硫酸铜溶液。

称取 50 g 五水合硫酸铜 (4.10), 溶于 100 mL 水中, 于聚乙烯瓶中保存, 使用时取上清液。

4.23 甲基汞标准贮备液: $r(CH_3Hg^+) = 1.00 \text{ mg/L}$ 。

购买以甲醇为溶剂的市售甲基汞有证标准溶液, 贮备液参照标准溶液证书要求保存。标准溶液质量浓度以氯化甲基汞计时, 应换算为甲基汞的浓度。

4.24 乙基汞标准贮备液: $r(C_2H_5Hg^+) = 1.00 \text{ mg/L}$ 。

购买以甲醇为溶剂的市售乙基汞有证标准溶液, 贮备液参照标准溶液证书要求保存。标准溶液质量浓度以氯化乙基汞计时, 应换算为乙基汞的浓度。

4.25 混合标准中间液: $r = 100 \mu\text{g/L}$ 。

分别移取 5.00 mL 甲基汞标准贮备液 (4.23) 和 5.00 mL 乙基汞标准贮备液 (4.24) 于 50 mL 容量瓶中, 加入 100 μL 盐酸 (4.1) 和 250 μL 乙酸 (4.3), 用水定容至标线, 混匀。贮存于具聚四氟乙烯衬垫螺旋盖的棕色玻璃试剂瓶或含氟聚合物试剂瓶中, $4^\circ C$ 以下冷藏可保存 8 个月。

4.26 混合标准使用液: $r = 10.0 \mu\text{g/L}$ 。

移取 5.00 mL 混合标准中间液 (4.25) 于 50 mL 容量瓶中, 加入 100 μL 盐酸 (4.1) 和 250 μL 乙酸 (4.3), 用水定容至标线, 混匀, 贮存于具聚四氟乙烯衬垫螺旋盖的棕色玻璃试剂瓶或含氟聚合物试剂瓶中, $4^\circ C$ 以下冷藏可保存 8 个月。

4.27 石英砂：粒径 150 μm ~830 μm （100 目~20 目）。

4.28 滤膜：孔径 0.45 μm ，醋酸纤维滤膜。

4.29 氩气：纯度 \geq 99.999%。

5 仪器和设备

5.1 样品瓶：100 mL 和 500 mL 具螺口旋盖的棕色玻璃瓶、高密度聚乙烯或氟化聚乙烯塑料瓶。

5.2 液相色谱-原子荧光联用仪：由液相色谱仪、在线紫外消解装置及原子荧光光谱仪组成。

5.3 色谱柱：填料粒径为 5 μm ，柱长 15 cm，内径 4.6 mm 的 C18 反相色谱柱或其他等效色谱柱。

5.4 汞空心阴极灯。

5.5 超声波清洗仪：功率 \geq 216 W。

5.6 离心机：转速 \geq 3600 \times g。

5.7 分液漏斗：125 mL 和 500 mL，具聚四氟乙烯塞。

5.8 离心管：50 mL 具螺口旋盖的聚乙烯离心管。

5.9 进样瓶：2.0 mL 带聚四氟乙烯衬垫的螺旋盖玻璃瓶。

5.10 一般实验室常用仪器和设备。

6 样品

6.1 样品采集与保存

按照 HJ/T 20、HJ 298 的相关规定采集和保存固体废物样品。样品置于洁净的 100 mL 样品瓶（5.1）中冷藏保存及运输。

样品到达实验室后，应尽快分析。如不能及时分析，应于 4 $^{\circ}\text{C}$ 以下冷藏，14 d 内完成样品制备；或冷冻保存，30 d 内完成样品制备。

6.2 样品的制备

6.2.1 固体废物

固体废物样品的制备按照 HJ/T 20 的相关规定执行。样品制备完成后，需立即进行试样制备。

6.2.2 固体废物浸出液

按照 HJ/T 299、HJ/T 300 或 HJ 557 的相关规定制备固体废物浸出液样品。量取 500 mL 浸出液于样品瓶（5.1）中，加盐酸（4.1）酸化至 pH $<$ 2，再加入 1 mL 饱和硫酸铜溶液（4.22），于 4 $^{\circ}\text{C}$ 以下冷藏保存，2 d 内完成分析。若只测定甲基汞，可于 4 $^{\circ}\text{C}$ 以下冷藏保存，8 d 内完成分析。

6.3 试样的制备

6.3.1 固态和半固态废物

称取 2.5 g（精确到 0.01 g）样品（6.2.1）于 50 mL 离心管（5.8）中，加入 20.0 mL 硝酸-硫酸铜提取液（4.16）盖紧管盖并充分混匀，置于超声波清洗仪（5.5）中提取 10 min。提取后，将离心管放入离心机（5.6），以转速 \geq 3 600 \times g（5 000 r/min）离心 10 min。转移上清提取液至另一个离心管（5.8）中。再向含样品的离心管中加入 20.0 mL 硝酸-硫酸铜提取液（4.16）重复提取 1 次，合并 2 次提取液并

混匀。混匀后的提取液移至 500 mL 分液漏斗（5.7）中，加水 200 mL，待萃取。

6.3.2 水性液态固体废物

称取 2.5 g（精确到 0.01 g）样品（6.2.1）加入 20.0 mL 硝酸-硫酸铜提取液（4.16），混匀后移至 500 mL 分液漏斗（5.7）中，加水 200 mL，待萃取。

6.3.3 油性液态固体废物

称取 2.5 g（精确到 0.01 g）样品（6.2.1）于 50 mL 离心管中（5.8），加入 20.0 mL 硝酸-硫酸铜提取液（4.16）盖紧管盖并充分混匀，置于超声波清洗仪（5.5）中提取 10 min。提取后，将硝酸-硫酸铜提取液和油状固体废物一起倒入 500 mL 分液漏斗（5.7）中，加水 200 mL，再加入 20 mL 正己烷（4.14），振摇 10 min 以上，静置至两相分层，将下层水相转移至另一个 500 mL 分液漏斗（5.7）中，待萃取。

6.3.4 固体废物浸出液

量取 250 mL 浸出液样品（6.2.2）至 500 mL 分液漏斗（5.7）中，待萃取。

6.3.5 萃取

向 6.3.1、6.3.2、6.3.3 或 6.3.4 的试样中分别加入 10 g 氯化钠（4.4），溶解并摇匀，再加入 30 mL 二氯甲烷（4.13）萃取，振摇 10 min 以上，静置至两相分层，收集下层萃取液于锥形瓶中，再分别用 20 mL 二氯甲烷（4.13）重复萃取 2 次。合并 3 次萃取液于锥形瓶中，向锥形瓶中加入适量无水硫酸钠（4.11）至呈流沙状进行脱水。脱水后的萃取液转移至 125 mL 分液漏斗中，并用少量二氯甲烷（4.13）多次冲洗锥形瓶后一并转移至分液漏斗中，待反萃取。

注：如萃取过程中乳化现象严重，宜采用机械手段完成两相分离，包括搅动、离心、用玻璃棉过滤等方法破乳，也可采用冷冻的方法破乳。

6.3.6 反萃取

向 125 mL 分液漏斗（5.7）中加入 3 mL 反萃取液[L-半胱氨酸-乙酸铵溶液（4.20）]，振摇 5 min 以上，静置至两相分层，弃去下层有机相，水相经滤膜（4.28）过滤后，置于进样瓶（5.9）中，4℃以下冷藏保存，6 h 内完成分析。若只测定甲基汞，可于 4℃以下冷藏保存，5 d 内完成分析。

6.4 空白试样的制备

6.4.1 固体废物空白试样的制备

用石英砂（4.27）代替样品，按照与固体废物试样的制备（6.3）相同步骤制备固体废物实验室空白试样。

6.4.2 固体废物浸出液空白试样的制备

用石英砂（4.27）代替样品，按照与固体废物浸出液样品制备（6.2.2）、试样制备（6.3）相同步骤制备固体废物浸出液实验室空白试样。

7 分析步骤

7.1 仪器参考条件

7.1.1 液相色谱参考条件

液相色谱采用等度分离，以 L-半胱氨酸-乙酸铵-甲醇混合溶液（4.21）为流动相；流速：1.0 mL/min；柱温：30℃；进样体积：100 μL。

7.1.2 原子荧光参考条件

开启仪器，按仪器说明书设定仪器至最佳测量条件，开启紫外消解装置，将载流[盐酸溶液（4.17）]、还原剂[硼氢化钾溶液（4.18）]、氧化剂[碱性过硫酸钾溶液（4.19）]的泵管插入相应的试剂瓶中，预热稳定后，进样分析。参考测量条件见表 1。

表 1 原子荧光参考测量条件

负高压 (V)	灯电流 (mA)	原子化器温度 (°C)	载气流量 (mL/min)	屏蔽气流量 (mL/min)	积分方式
280~320	30~50	200	300~500	500~900	峰面积

7.2 标准曲线的建立

取适量的混合标准使用液（4.26），用反萃取液（4.20）稀释，配制不少于 5 个浓度点的标准系列，甲基汞和乙基汞的质量浓度为 0.500 μg/L、1.00 μg/L、2.00 μg/L、5.00 μg/L、10.0 μg/L（此为参考浓度）。按照仪器参考条件（7.1），由低浓度到高浓度依次进样分析，以目标化合物的质量浓度为横坐标，对应的色谱峰面积为纵坐标，建立标准曲线。

7.3 试样的测定

按照与标准曲线的建立（7.2）相同的条件测定试样（6.3.6）。若试样中甲基汞或乙基汞的浓度超出标准曲线最高点浓度时，可以通过增加反萃取时反萃取液（4.20）的体积或用反萃取液（4.20）稀释试样后重新测定。

7.4 空白试验

按照与试样的测定（7.3）相同的条件测定空白试样（6.4）。

8 结果计算与表示

8.1 定性分析

根据样品中目标化合物与标准系列中目标化合物的保留时间定性。必要时，可采用标准加入法辅助定性。在仪器参考条件（7.1）下，甲基汞和乙基汞的标准色谱图见图 1。

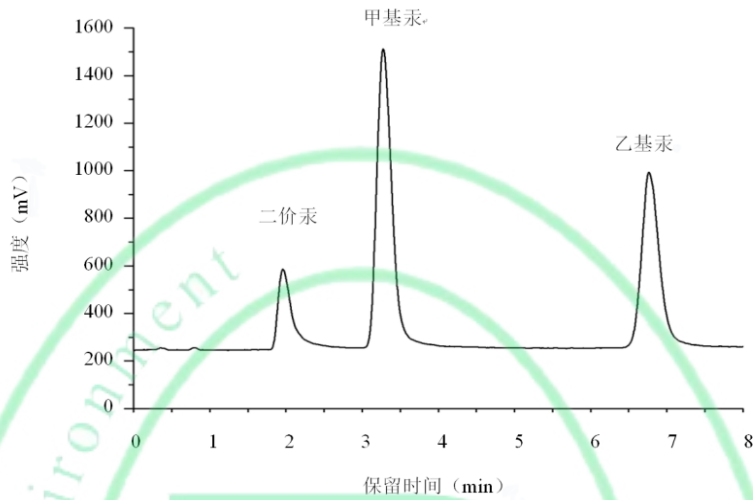


图1 甲基汞和乙基汞标准色谱图 ($\rho=5.00 \mu\text{g/L}$)

8.2 结果计算

固体废物样品中甲基汞的质量分数，按照公式（1）计算。

$$w = \frac{r_1 \times V_1 \times D}{m} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- w ——样品中甲基汞的质量分数， $\mu\text{g/kg}$ ；
- r_1 ——由标准曲线计算得到的试样中甲基汞的质量浓度， $\mu\text{g/L}$ ；
- V_1 ——反萃取液的体积， mL ；
- m ——样品的称样量（湿重）， g ；
- D ——稀释倍数。

固体废物浸出液样品中甲基汞或乙基汞的质量浓度，按照公式（2）计算。

$$r = \frac{r_2 \times V_2}{V_3} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- r ——样品中甲基汞或乙基汞的质量浓度， ng/L ；
- r_2 ——由标准曲线计算得到的试样中甲基汞或乙基汞的质量浓度， $\mu\text{g/L}$ ；
- V_2 ——反萃取液的体积， mL ；
- V_3 ——用于萃取的浸出液试样的体积， L 。

8.3 结果表示

测定结果最多保留3位有效数字，小数点后的位数与方法检出限一致。

9 准确度

9.1 精密度

7家实验室对甲基汞和乙基汞加标浓度为2.40 ng/L、12.0 ng/L和96.0 ng/L的统一浸出液空白加标样品重复测定6次：甲基汞的实验室室内相对标准偏差分别为2.7%~14%、1.2%~7.2%和1.6%~6.6%；

实验室间相对标准偏差分别为 12%、9.0%和 15%；重复性限分别为 0.5 ng/L、1.2 ng/L 和 12 ng/L；再现性限分别为 0.9 ng/L、2.7 ng/L 和 39 ng/L；乙基汞的实验室内相对标准偏差分别为 2.8%~17%、2.0%~10%和 1.9%~8.0%；实验室间相对标准偏差分别为 10%、6.4%和 12%；重复性限分别为 0.5 ng/L、1.7 ng/L和 11 ng/L；再现性限分别为 0.8 ng/L、2.3 ng/L 和 30 ng/L。

7 家实验室对甲基汞和乙基汞加标浓度为 15.0 ng/L、60.0 ng/L 和 180 ng/L 的统一污水处理厂生化污泥、物化污泥和含汞污泥浸出液样品重复测定 6 次：甲基汞的实验室内相对标准偏差分别为 2.8%~11%、0.57%~13%和 1.6%~10%；实验室间相对标准偏差分别为 9.4%、9.4%和 8.8%。乙基汞的实验室内相对标准偏差分别为 2.2%~16%、2.4%~7.8%和 1.2%~11%；实验室间相对标准偏差分别为 17%、7.8%和 13%。

7 家实验室对甲基汞加标浓度为 0.600 μg/kg、1.20 μg/kg 和 9.60 μg/kg 的统一空白样品重复测定 6 次：甲基汞的实验室内相对标准偏差分别为 2.3%~7.5%、2.0%~11%和 1.3%~15%；实验室间相对标准偏差分别为 14%、9.3%和 7.5%；重复性限分别为 0.07 μg/kg、0.19 μg/kg 和 1.5 μg/kg；再现性限分别为 0.16 μg/kg、0.34 μg/kg 和 2.3 μg/kg。

7 家实验室对甲基汞加标含量为 1.20 μg/kg、6.00 μg/kg 和 8.40 μg/kg 的统一污水处理厂生化污泥、物化污泥和含汞污泥样品重复测定 6 次：甲基汞的实验室内相对标准偏差分别为 1.4%~14%、1.3%~10%和 3.0%~7.0%；实验室间相对标准偏差分别为 11%、5.1%和 13%。

7 家实验室对河口沉积物标准样品重复测定 6 次：甲基汞的实验室内相对标准偏差为 1.1%~15%；实验室间相对标准偏差为 2.3%；重复性限为 13 μg/kg；再现性限为 13 μg/kg。

9.2 正确度

7 家实验室对甲基汞和乙基汞加标浓度为 2.40 ng/L、12.0 ng/L 和 96.0 ng/L 的统一浸出液空白样品重复测定 6 次：甲基汞加标回收率分别为 80.4%~122%、73.0%~91.7%和 77.8%~115%，乙基汞加标回收率分别为 75.7%~97.9%、74.2%~88.0%和 73.3%~105%。

7 家实验室对甲基汞和乙基汞加标浓度为 15.0 ng/L、60.0 ng/L 和 180 ng/L 的统一污水处理厂生化污泥、物化污泥和含汞污泥浸出液样品重复测定 6 次：甲基汞加标回收率分别为 76.0%~94.7%、83.2%~109%和 83.9%~107%，乙基汞加标回收率分别为 60.9%~92.0%、68.7%~83.3%和 65.0%~88.9%。

7 家实验室对甲基汞加标浓度为 0.600 μg/kg、1.20 μg/kg 和 9.60 μg/kg 的统一空白样品重复测定 6 次：甲基汞加标回收率分别为 73.3%~112%、75.0%~98.3%和 82.1%~98.2%，加标回收率最终值为 95.2%±26%、89.6%±17%和 91.4%±14%。

7 家实验室对甲基汞加标含量为 1.20 μg/kg、6.00 μg/kg 和 8.40 μg/kg 的统一污水处理厂生化污泥、物化污泥和含汞污泥样品重复测定 6 次：甲基汞加标回收率分别为 73.3%~100%、73.7%~95.7%和 72.1%~105%，加标回收率最终值分别为 83.1%±19%、81.3%±15%和 87.2%±22%。

7 家实验室对河口沉积物标准样品重复测定 6 次：甲基汞相对误差的范围为 0.40%~4.9%，相对误差最终值为 2.4%±3.4%。

10 质量保证和质量控制

10.1 空白试验

每 20 个样品或每批次（少于 20 个样品）至少做 1 个实验室空白，空白中甲基汞和乙基汞的浓度应低于方法检出限。

10.2 标准曲线

标准曲线相关系数应 ≥ 0.995 。每 20 个或每批次样品（少于 20 个）至少测定 1 个曲线中间浓度点，其测定结果与该点浓度的相对误差应在 $\pm 15\%$ 以内。否则，应重新建立标准曲线。

10.3 准确度

10.3.1 每 20 个或每批次样品（少于 20 个）至少测定 1 个平行样，平行样测定结果的相对偏差应在 $\pm 30\%$ 以内。

10.3.2 每 20 个或每批次样品（少于 20 个）至少测定 1 个基体加标样品或有证标准物质，固体废物的加标回收率应控制在 70%~120%之间，浸出液的加标回收率应控制在 65%~120%之间。有证标准物质测定值应在其给出的不确定度范围内。

附 录 A
(规范性附录)
方法检出限和测定下限

表 A.1 给出了甲基汞和乙基汞的方法检出限和测定下限。

表 A.1 方法检出限和测定下限

样品类型	化合物中文名称	化合物英文名称	CAS No.	方法检出限	测定下限
浸出液	甲基汞	Methyl mercury	22967-92-6	0.8 ng/L	3.2 ng/L
	乙基汞	Ethyl mercury	16056-37-4	0.8 ng/L	3.2 ng/L
固体废物	甲基汞	Methyl mercury	22967-92-6	0.07 µg/kg	0.28 µg/kg