



联合国
环境规划署

Distr.: General
11 November 2010

Chinese
Original: English

**拟定一项具有法律约束力的全球性汞问题文书
政府间谈判委员会
第二届会议**

2011年1月24-28日，千叶，日本
临时议程*项目3

拟定一项具有法律约束力的全球性汞问题文书

有关汞源头和排放的研究，以及控制措施的成本和效益分析

秘书处的说明

1. 联合国环境规划署（环境署）理事会在第 25/5 号决定第 29 段中，请环境署执行主任为通报政府间谈判委员会的工作情况，与相关国家协商，就各种类型的汞排放源以及目前和将来的汞排放趋势实施一项研究，分析并评估替代控制技术和措施的成本和效益。
2. 该研究见本说明的附件。它在印发之前未经正式编辑。在编制该项研究时，秘书处从各国政府和其它来源收集了资料，以便委员会能够对广泛的有关数据加以审议。该研究包括以下资料：
 - (a) 基于环境署和北极监测评价方案 2005 年清单的全球大气汞排放的概述，包括对历史性全球排放量的新估算；
 - (b) 国家排放清单报告以及自上述清单于 2008 年出版以来编制的、基于研究的清单的概述；
 - (c) 旨在控制下列选定部门的排放的技术描述和备选方案：燃煤发电厂和工业锅炉、水泥生产、有色金属生产和废物焚化；
 - (d) 关于各种排放控制技术的成本和效益的可得资料的概述；
 - (e) 对选定部门的成本——效益计算实例。
3. 委员会不妨在讨论排放时，对本研究中的资料进行审议。

* UNEP(DTIE)/Hg/INC.2/1。

附件

有关汞源头和排放的研究，以及控制措施的成本和效益分析

有关汞源头和排放的研究，以及控制措施的成本和效益分析
“环境署第 29 段研究”



技术、工业和经济司

化学品处

瑞士日内瓦

2010年11月

免责声明

本报告所用名称及其材料的编制方式并不意味着联合国或环境署对于任何国家、领土、城市或地区、或其当局，或对于其边界的划分，表示任何意见。文档中的任何观点不一定反映环境署的观点。

提及具体公司或特定制造商的产品并不意味着环境署对它们的认同或推荐，也不意味着与其它具有相似性质但未提及的产品相比更倾向于它们。本报告中有关专利产品的信息不得用于宣传或广告之目的。

本报告中的材料可以自由引用或复制，但是要求予以声明并在参考文献中列出文件编号。

应该将一份含有引用或复制内容的出版物递送到环境署化学品处。

本文件的电子版本可从以下网址获得：

<http://www.unep.org/hazardoussubstances/Mercury/tabid/434/Default.aspx>，也可以通过以下途径获得：

UNEP Chemicals

11-13, chemin des Anémones

CH-1219 Châtelaine, Geneva

Switzerland

电话：+41 22 917 1234

电子邮件：mercury@unep.org

环境署化学品处隶属于环境署技术、工业和经济司

作者

环境署对那些为本项研究做出贡献的人表示感谢，特别对以下主要作者的奉献和承诺表示感谢。

John Munthe, Karin Kindbom, IVL 瑞典环境研究所，

Jozef Pacyna, Kyrre Sundseth, Elisabeth Pacyna, 挪威大气研究所

Simon Wilson, 北极监测评价方案

Damian Panasiuk, 挪威大气研究所（波兰），

1. 执行摘要

1.1. 导言

1. 本报告的目的是提供关于大气汞排放、选定部门的控制备选方案、及其效益和成本的概况。编写本报告旨在为编写一份具有法律约束力的全球性汞文书而正在进行的谈判过程提供支持。

1.2. 排放

2. 关于排放的这份报告是基于为 2005 年编写的关于大气汞排放的综合性全球清单（环境署/北极监测评价方案，2008 年）。目前的研究包括对这个清单的更新，分析了自 2008 年以来出现在各国的呈文和出版的报告中的汞排放资料。除此之外，对 1990 年到 2005 年这段时期的全球排放趋势进行了评估，包括数据统一和对先前出版的清单的进一步充实。

3. 2005 年，全球人为大气汞排放估计为 1921 公吨。主要来源于发电厂和工业锅炉中的化石燃料燃烧，大约为了 500 吨（占全球大气排放量的 26%）。还有 380 吨汞（20%）与家庭取暖用的化石燃料燃烧相关。个体小型采金业排放约为 323 吨（17%）。其它重要的部门有水泥生产（190 吨，10%）、有色金属工业（不包括黄金）（130 吨，7%）和大型黄金生产（110 吨，6%）。剩下的 15%来自于钢铁生产、废物管理、火化、氯碱工业和制汞业。

4. 上述的全球排放量数据，也可以按照地理分布的（网格的）排放清单提供，该清单用于大气建模的输入。关于汞在汞/汞化合物的三种主要形式间的分类形成：气态元素汞、二价汞化合物以及与颗粒相关的汞，也可以提供相关资料。

5. 对 1990 年、1995 年、2000 年和 2005 年以来的全球汞清单进行了重新分析，以编制一系列更有可比性的历史全球排放清单，并得以分析大气汞排放全球趋势。这一重新分析也包括重新估算 1990 年、1995 年和 2000 年由于“有意使用”汞而造成的排放。这一重新分析表明，全球排放量在 1990 年为 1967 吨，到 1995 年和 2000 年分别略微下降到 1814 和 1819 吨，到 2005 年又增加到 1921 吨。在这个重新分析中，未发现全球汞排放量有重大变化。原因是各地区之间的排放量有了显著的转移。在 1990 年到 2005 年间，亚洲的排放量增加了，而同一时期北美和欧洲的排放量则下降了。

6. 审查了最近的国家排放清单报告和关于汞排放的研究论文，可得出结论，在大多数情况下新的排放估计值在环境署/北极监测评价方案（2008 年）研究所报告的排放值范围内。

7. 为了在本研究中对排放控制备选方案进行调查，根据排放规模以及所排放的汞主要源自高温下处理或燃烧的燃料、原料或废物，选定了四个部门。这些特性在一定程度上使得控制备选方案是相似的，因此这些部门适合于联合研究。所选定的部门是发电厂和工业锅炉的煤炭燃烧、水泥生产、有色金属生产（包括黄金）以及废物焚化，2005 年它们的总额约为总的全球大气汞排放的 51%。

1.3. 排放控制备选方案

1.3.1. 对所有四个选定部门的排放控制的一般考虑

8. 四个选定部门的汞排放量，取决于若干因素，包括燃料和原材料的汞含量和其它组成特性、排放源设施的技术配置以及是否有专门用于控制大气污染物的排放控制设备和针对汞的控制。这些因素在世界各地的不同地区，以及地区内部，差异都很大，这对确定可普遍适用的控制备选方案提出了挑战。为了对具体的工厂/设施确定合适的控制备选方案，就需要详细了解该工厂/设施当前的技术状况。要制定地区或国家的减少汞排放策略，还需要考虑地区的经济状况。

9. 一个重要的因素是，用于减少其它大气污染物（如颗粒、二氧化硫、氮氧化物或其它有毒污染物）排放的现有设备，也可减少汞的排放。所实现的共同控制汞减排量水平，可以有很大的差异，取决于输入材料的特性和控制的细节。在评估当前的汞排放时，在考虑是否需要增加措施、制定汞排放控制的未来设想方案和策略时，都需要考虑这方面的需求。

10. 另一个适用于这四个部门的普遍方面是，旨在改进性能和增加能源效率的措施将减少燃料和原材料的消耗量，因而间接地减少汞排放量。

11. 要估算控制汞排放的成本，需要了解排放源的当前状况，包括对当前和计划的大气污染控制的技术描述。为了满足有关的大气污染标准而实施一些针对非汞污染物的控制措施时，常常会实现一定程度的对汞排放的控制。在这种情况下，不需要额外的成本，就能够在一定程度上降低汞排放。

1.3.2. 燃煤发电厂和工业锅炉

12. 常常在燃烧前采取措施，如洗煤，来减少煤的硫含量和灰份。在这一过程中，煤炭中的汞也会被不同程度地除去。燃烧前的措施已表明平均可减少汞排放量的 30%。用低汞煤对煤进行混合，也能相应地减少排放量。

13. 在燃烧之前加入卤素（特别是溴）能加强烟气中汞的氧化，增加在下游颗粒物控制和烟气脱硫设备中的去除效率，从而改善汞去除的潜力。

14. 活性炭喷入，在与颗粒控制装置，如静电除尘器或袋式除尘器结合，进行商业规模的应用时，可明显减少汞排放。已经发现减少的幅度达 90% 以上。经过化学处理的碳（如溴化碳），在处理含有更多元素汞蒸气的烟气时，要比常规的、未经处理的活性炭效率更高。

15. 要对控制汞排放的成本和效益进行详细评估，需要有关源头的技术特性以及有关用于混合的煤以及潜在添加剂的可得性的详细资料。在美国，可从现场应用中获得相当多的数据。

16. 大气污染控制装置可能将汞从烟气中转移到残留物中，如飞灰或烟气脱硫洗涤器的污泥中去。所以要评估总的控制成本，应该包括由于废料成分的变化，包括汞含量的增加所带来的潜在影响而造成的对这些残留物的管理成本的潜在增加。

1.3.3. 水泥生产

17. 水泥生产所排放的汞，来自煤炭和所用的其它燃料以及原材料，如石灰石和其它添加剂。在燃料和原材料中，汞的浓度差异很大，如改用含汞量较低的燃料和原材料，就可以大大减少排放量。

18. 在水泥生产中水泥窑尘对汞的吸收，在很大程度上取决于水泥厂的运行条件，温度较低时，会促进这种吸收。如果排出气体的温度较低，可通过从颗粒控制装置除去粉尘，从工艺过程中除去汞。由于从水泥生产的烟囱排气中除去的水泥窑尘在很大程度上是在工艺中循环的，如采用活性碳喷入的方法，可能要求增加去除颗粒的工序，在这个工序中收集的颗粒不再加入循环。

19. 水泥生产中对大气污染物的其它终点控制，可用与燃煤发电厂相似的控制技术来实现，如果采用烟气脱硫以主要减少酸性气体，预期也可以去除相当数量的汞。

1.3.4. 有色金属生产

20. 有色金属生产是一个高度复杂的工业过程，具有各种不同的配置，取决于所提炼的是什么金属、矿石的特性和采用什么基本工艺。矿石的汞含量会有很大的差别。在对矿石进行高温冶炼时，第一步是焙烧，此时矿石中的硫被转变为二氧化硫气体。矿石中的汞会与气体一起被释放出来。大型有色金属冶炼炉通常都配备有高效率的大气污染控制装置，以控制来自焙烧炉、冶炼炉和转炉的颗粒和二氧化硫排放。通过在硫酸厂（这通常是冶炼厂的一部分）吸收二氧化硫实现对烟气的排放控制。

21. 可采用诸如博利登（Boliden Norzink）等工艺技术来专门去除汞（约为 90-95%），采用这种技术时，汞被吸收到一种甘汞溶液（氯化亚汞）中，再进入硫酸厂。

22. 对于黄金生产工业中的其它热装置，如窑、罐和炉，最好的专门用于控制汞的手段是采用浸硫的碳过滤器，它可有效地减少汞排放，减量可达 93% 到 99% 以上。

1.3.5. 废物焚化

23. 由于因废物焚化而排放到大气中的汞都来自于废物中的汞，因此最重要的主要措施是减少焚化炉的汞输入量。在焚化之前从废物流中分选出含汞的物品，就可以做到这一点。

24. 现代城市废物焚化炉大部分都配备了针对不同污染物的先进的排放控制。这些装置中，有一些可针对汞加以优化，如通过控制温度。

25. 通过喷注碳或采用洗涤器，或同时采用这两种手段，可实现针对汞的控制。有关活性碳喷入的成本实例，美国环保局有来自几个废物焚化处理厂的报告。

1.3.6. 结论

26. 对于所研究的各个工业部门，各国已经有、且已经采用了各种不同的技术，来减少汞排放。这其中有许多用来减少其它的大气污染物（如颗粒、二氧化硫、氮氧化物或其它有毒污染物）。

27. 用于减少此类排放的现有设备，也可减少汞排放。然而，减少汞排放的水平会有相当大的差异，这取决于输入材料的特性以及控制的具体细节。在评估当前的汞排放以及

考虑是否需要增加措施、制定未来用于汞排放控制的设想方案和策略时，都需要考虑这方面需求。

28. 旨在改进性能和增加能源效率的一般措施，将减少燃料和原材料的消耗量，因而间接地减少汞排放量。

29. 要估算控制汞排放的成本，需要了解排放源的当前状况，包括对当前和计划的大气污染控制的技术描述。

目录

1.	执行摘要	5
1.1.	导言	5
1.2.	排放	5
1.3.	排放控制备选方案	6
1.3.1.	对所有四个选定部门的排放控制的一般考虑	6
1.3.2.	燃煤发电厂和工业锅炉	6
1.3.3.	水泥生产	7
1.3.4.	有色金属生产	7
1.3.5.	废物焚化	7
1.3.6.	结论	7
2.	导言	13
2.1.	背景、范围和任务	13
2.2.	资料来源	13
3.	全球汞排放	15
3.1.	全球人为大气汞排放	15
3.2.	全球大气汞排放趋势	18
3.2.1.	各地理区域的排放情况	19
3.3.	排放资料的比较	21
3.3.1.	可得到的全球排放研究的比较	21
3.3.2.	各个国家清单的比较	23
4.	排放控制、效益和成本	27
4.1.	主要排放控制措施	27
4.2.	共同控制汞和大气污染物	27
4.3.	结合不同的控制技术以优化汞控制	29
4.4.	汞控制的成本和效益	30
5.	选定部门的特点	34
5.1.	发电厂和工业锅炉中的煤炭燃烧	34
5.1.1.	燃煤过程中的汞来源和排放	34
5.1.2.	燃煤技术	34
5.1.3.	燃煤过程中的控制措施	35
5.1.4.	燃煤发电厂所涉控制技术的成本和效率	38
5.2.	有色金属生产	41
5.2.1.	有色金属生产过程中的汞来源和排放	41
5.2.2.	有色金属生产技术	42
5.2.3.	有色金属生产过程中的控制措施	42
5.2.4.	有色金属生产所涉控制技术的成本和效率	43
5.3.	水泥生产	44
5.3.1.	水泥生产过程中的汞来源和排放	44
5.3.2.	水泥生产过程中的控制措施	45
5.3.3.	水泥生产所涉控制技术的成本和效率	47
5.4.	废物焚化	48
5.4.1.	来自废物焚化的汞来源和排放	48
5.4.2.	废物焚化技术	48
5.4.3.	废物焚化过程中的控制措施	49
5.4.4.	废物焚化所涉控制技术的成本和效率	50
6.	结论	52

6.1.	排放.....	52
6.2.	排放控制备选方案.....	52
6.2.1.	关于所有四个选定部门中的排放控制的基本结论.....	52
6.2.2.	燃煤发电厂和工业锅炉.....	53
6.2.3.	水泥生产.....	53
6.2.4.	有色金属生产.....	53
6.2.5.	废物焚化.....	54
7.	参考文献.....	55
	附件一：问卷答复的概述.....	60
	附件二：关于减少大气汞排放战略的国家评估的指导.....	63
	制定基准.....	63
	更多排放控制的设想方案.....	64
	其他信息.....	64

缩略语表

AMAP	北极监测评价方案
ASGM	个体小型采金业
BAT	最佳可得技术
BREF	最佳可得技术参考文件
副产品排放	来自源点的排放，在该源点汞是工艺过程所用燃料或原材料的一个成分。
CCC	国际能源署的清洁煤中心
CO	一氧化碳
ESP	静电除尘器
ESPREME	欧洲重金属排放综合评估。欧洲联盟资助的研究项目，参见参考清单
EU	欧洲联盟
EU-27	欧洲联盟的 27 个成员国
FBC	流化床燃烧
FF	袋式除尘器
FGD	烟气脱硫
HEIMTSA	欧盟资助的研究项目，参见参考清单。
Hg ⁰	元素汞
HgCl ₂	汞氯化物
IEA	国际能源署
INC	政府间谈判委员会
有意使用的排放	因在产品中或作为工业过程的一部分而有意使用汞的源头产生的排放。
IPPC	综合污染防治，一项欧盟的导则
LHV	低位发热值（也称为净热值）
LRTAP 公约，CLRTAP	远距离越境空气污染公约。联合国欧洲经济委员会下面的一项关于大气污染的公约
NH ₃	氨
NO _x	氮氧化物
PCC	煤粉燃烧
PM	颗粒物
SCR	选择性催化还原
SNCR	选择性非催化还原

SO ₂	二氧化硫
VOC	挥发性有机化合物
NETL	国家能源技术实验室
EPRI	电力研究所
POG	工艺优化导则，参见参考清单。
O&M	运行和维护
GAO	（美国）政府问责局
PAC	粉末活性炭
MWh	兆瓦（发电）
MWhe	兆瓦电能

2. 导言

2.1. 背景、范围和任务

1. 根据联合国环境规划署（环境署）理事会/全球部长级环境论坛第 25/5 III 号决定第 29 段的要求，已针对各种类型的汞排放源以及目前和将来的汞排放趋势开展本研究，包括分析并评估替代控制技术和措施的成本和成效。
2. 本研究的目的是，通报政府间谈判委员会的工作，为此，要给出有关制定汞排放控制措施的背景资料，这些资料可用于正在制订中的具有法律约束力的文书。
3. 该研究的主要目标是：
 - (a) 提供关于选定国家和地区汞排放以及目前汞排放趋势的最新资料；
 - (b) 提供一份针对选定的国家中重要部门的主要汞排放源的技术特点概述；
 - (c) 提供关于不同排放控制技术的成本和效益的、可获得的资料汇总。
4. 本项研究的重点是最大的几类排放源。它们是根据先前的环境署排放报告以及可以从出版文献中得到的资料加以确定的。还考虑了是否能得到关于替代控制技术和措施的成本和效益资料，以及这些资料可能为政府间谈判委员会提供信息的程度。确定了汞排放源的优先次序：燃煤发电厂和工业锅炉；有色金属生产（特别是铅、锌、铜和金）；废物焚化；以及水泥生产。
5. 本报告提供了有关大气汞排放的可获得知识的汇总；对于为本研究而选定部门的简短描述；有关汞在何处进入工艺以及在何处/如何排放进入大气的资料；以及控制备选方案和相关成本。
6. 因此，本报告旨在向关于选定部门汞减排的全球协议的持续谈判通报情况。各国如果希望在本国对控制备选方案进行更为详细的评估，本报告的附件可用作指南。

2.2. 资料来源

7. 本报告依据的是：2008 年为环境署编写的有关全球汞排放的报告和控制备选方案的成本和效益定性评估、各个国家和组织提交的资料、以及从有关排放、控制备选方案和本成本的出版文献中获得的最新资料。
8. 用于本项研究的 2008 年为环境署编写的报告有：2005 年全球汞排放清单¹（环境署/北极监测评价方案，2008 年）（环境署和北极监测评价方案合作编写），以及“对与不限成员名额工作组第一次会议报告之附件 1 中规定的各个战略目标相关的潜在成本和效益的总体定性评估”²。有关控制技术的更多的资料，来自于出版的文献和欧盟资助的研究项目，如欧洲重金属排放综合评估和 HEIMTSA 的研究结果。

¹ http://www.chem.unep.ch/mercury/Atmospheric_Emissions/Technical_background_report.pdf

² [http://www.chem.unep.ch/mercury/OEWG2/documents/e52\)/English/OEWG_2_5_add_1.pdf](http://www.chem.unep.ch/mercury/OEWG2/documents/e52)/English/OEWG_2_5_add_1.pdf)

9. 请各国提供有关排放、控制备选方案和成本的资料。为了便于收集资料，分发了调查问卷和 excel 模板。本研究选定的国家有巴西、中国、印度、俄罗斯联邦、南非、美利坚合众国（美国）以及欧洲联盟的 27 个成员国。还与一些政府召开了后续会议，以协助它们收集资料。
10. 在本报告的编写过程中，进行了两次审查。2010 年 3 月 4 日的零草案报告曾直接发送给上述各国，并在环境署的网站上公布供审查。2010 年 9 月 29 日的最终草案发送给了曾提交过资料的所有利益攸关方进行审查。
11. 附件 1 中给出了所提交资料的汇总。各国提交的资料也可以在环境署的网站上查到。

3. 全球汞排放

12. 本章的目的，是提供一份全球人为大气汞排放的概况，包括全球的总排放量和选定部门和地区的排放量。

3.1. 全球人为大气汞排放

13. 2008 年，在环境署/北极监测评价方案的联合项目中，编制了一份 2005 年全球人为汞排放清单。这份清单基于各国报告的排放量、以及根据活动数据和有关排放因素对其它国家估算的排放量。由于普遍缺乏对汞排放量的直接测量，“估算”全球排放量采用的方法基本上与用于得到大多数国家报告数据的方法相同。有关这些方法的细节、数据来源和其它资料，可在环境署/北极监测评价方案（2008 年）中找到。

14. 2005 年清单针对的是“无意的”和“有意使用”排放部门。大气中“无意的”汞排放主要来自能源生产和工业部门，它们的汞排放是与诸如煤炭等化石燃料和原材料中存在的汞相关的“无意的副产品”。“无意”排放的部门包括：发电厂中和用于家居取暖³时的静止化石燃料燃烧；生铁和钢的生产；有色金属生产；水泥生产；汞生产；大型黄金生产；以及某些“其它的”活动。来自氯碱工业的汞排放，也算在“无意的”部门清单中，因为它通常作为国家排放清单的一部分来报告，另外还有历史上的原因（如为了与先前公布的清单保持一致）。对某些国家来说，国家排放报告还包括了废物的焚化和其它一些可被定义为有意使用的部门。然而，在世界的大多数地区，对于来自有意使用的源头的排放，估算的方法主要涉及物质流分析或质量平衡估算（环境署/北极监测评价方案，2008 年）。

15. “有意使用”的部门包括个体和小型采金业；对曾用汞化合物做过牙科修补的人进行火化时的排放；再生钢的生产；使用产品（如医疗器械、电池、灯泡等）以及废物处置（包括对含汞废物的焚化）时的扩散释放。

16. 如图 1 所示，在发电厂、家居取暖中以及其它燃烧源的静止燃煤，是大气中人为汞排放的最大单一来源。汞在煤炭中是一个微小的成分，它在燃烧时被释放到大气中去。为了能源或供热而燃烧其它的化石燃料，也会导致汞排放，但与煤炭相比程度要轻得多。

17. 矿石的开采和工业加工，特别是钢铁的初始生产和有色金属生产（尤其是铜、铅和锌的冶炼），会由于燃料燃烧以及矿石中作为杂质存在的汞而释放出汞。金属生产中汞的来源，还包括汞本身的开采和生产（是相对较小的来源）以及黄金的生产，汞既存在于矿石中，也在某些工业过程中用于从矿脉堆积物中萃取黄金。在个体和小型采金业的运作中，用汞来萃取黄金被认为是有意使用。

18. 汞的“无意”排放的第三个主要来源，与水泥的生产相关。在水泥生产中，排放的汞来自用于加热水泥窑的燃料（主要是煤炭）、以及同时燃烧的任何燃料或废料、石灰

³ 在许多国家，大量的（常常是低质的）煤炭被用于家庭取暖和烹饪。在其它一些国家，则用锅炉来为大量的居住单元供暖。

石和其它次要原材料和添加剂中存在的汞。因此，在水泥生产中汞排放的来源和量级会有相当大的差异。

19. 在环境署/北极监测评价方案（2008年）清单中，有意使用的部门包括个体和小型采金业，它同时产生对大气和水体的大量排放。与其它大多数部门不同，与个体和小型采金业活动相关的向水体的排放规模与向大气的排放一样，甚至还超过后者，可以对当地环境造成相当大的影响。在环境署/北极监测评价方案（2008年）清单中估计的其它有意使用的排放包括来自废物焚化和其它废物处置的排放、对人体火化后牙用汞的排放（但目前还不包括在制备牙用汞合金时的释放）、以及在诸如电池、灯泡和测量仪器等产品中使用汞造成的扩散释放。

20. 2005年各部门的全球人为大气汞排放估算见表1和图1所示。

21. 表1的前五行是在当前这个研究中审议的选定部门在2005年的排放量以及对于全球大气汞排放的相对贡献率。总的来说，这五个部门约占估计的全球排放量的50%，其中发电厂中的煤炭燃烧贡献了26%；有色金属生产（不包括黄金生产）贡献了7%；大型黄金生产贡献了6%；水泥生产贡献了10%；大型废物焚化贡献了2%。这些部门在当前的研究中被列为优先部门，一方面由于它们对全球大气汞排放的相对贡献率，同时也因为它们大体上由高温燃烧或工艺的污染源组成，安装和使用相似的排放控制技术是可行的。

22. 无论是国家报告的，还是“估算的”排放量，都有着很大的不确定性。在“无意使用”的部门中，全球估计值中的不确定性对于煤炭燃烧为±25%，对于黑色/有色金属和水泥生产为±30%，虽然这些数据也许不反映各个国家的估计不确定性。这些不确定性在各国和各大洲之间是不同的，取决于是否能够得到有关活动和汞消费的统计数据、以及让人们能够应用合适的排放因素（如燃料中的汞含量、控制技术）的资料，还取决于这些数据和资料的可靠性。对于像黄金生产这样的部门以及来自废物焚化和废物处置的排放，不确定性明显要大一些，在环境署/北极监测评价方案（2008年）中的高端估计值被视为可能的最大排放量。“保守的”估计值则代表了来自环境署/北极监测评价方案（2008年）中“有意使用”部门的最合理的估计值。

表 1. 2005年各部门的全球人为大气汞排放估算（根据环境署/北极监测评价方案，2008年版修改）。本项研究中选定的部门在前五行，下面是其它各个部门。

部门	2005年的排放量* (吨=1000千克)	对总的大气汞排放的 贡献率%
发电厂和工业锅炉中煤炭燃烧	498 (339-657)	26
有色金属（铜，锌，铅）	132 (80-185)	7
大型黄金生产	111 (66-156)	6
水泥生产	189 (114-263)	10
废物焚化	42	2
家居取暖/其它燃烧	382 (257-506)	20
个体和小型黄金生产	323	17
其它废物	74	4
生铁和钢，再生钢	61 (35-74)	3
氯碱工业	47 (29-64)	2

部门	2005 年的排放量* (吨=1000 千克)	对总的大气汞排放的 贡献率%
牙用汞合金 (火化) **	27	1
其它	26	1
汞生产	9 (5-12)	0.5
合计	1921	

*代表最佳估计值：估计值（不确定性区间），或保守的估计值（没有相应的范围）。关于不确定性的讨论，参见环境署/北极监测评价方案（2008 年）。

** 不包括来自牙用汞合金的生产、处理、使用和处置的其它释放。

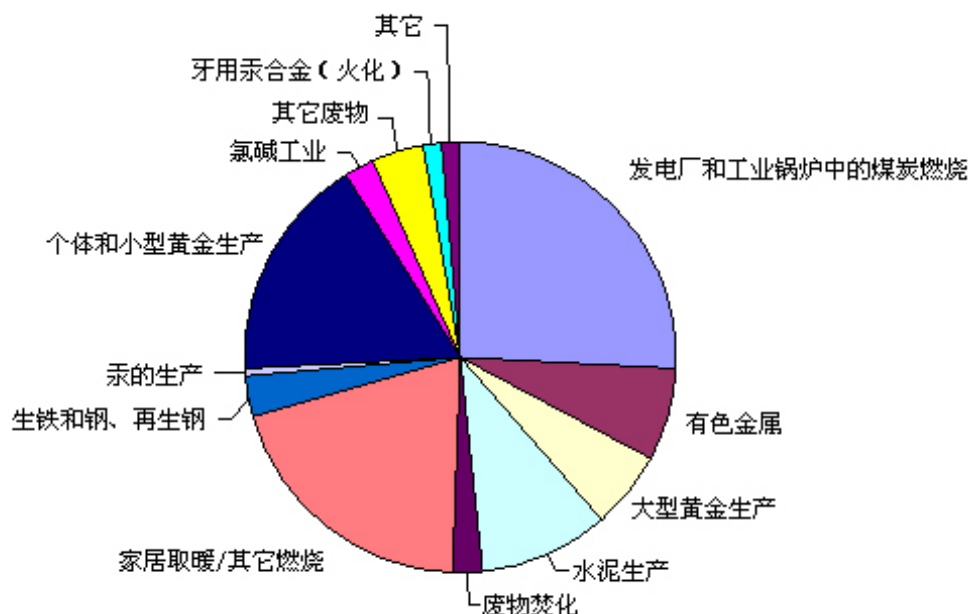


图 1. 2005 年各部门的全球人为大气汞排放比例（根据环境署/北极监测评价方案，2008 年版修改）。

23. 在环境署/北极监测评价方案（2008 年）中描述并在环境署（2008 年）中汇总的 2005 年全球大气人为汞排放清单是迄今为止编制的这类（全球）清单中最具综合性的。在 2010 年进行的修订中，对这个清单连同先前出版的 1990、1995 和 2000 名义年度清单进行了重新审查；对于 2005 年，这次修订对总的全球大气汞排放有一些小修改，特别是有关有意使用的部门的，这是由于有关部门的汞消耗量资料有一些改进。这在下面的第 3.2 节中还要进一步加以说明。

24. 在 2005 年 1921 吨的总的大气汞排放估计值中，发电厂和工业锅炉燃烧化石燃料贡献了约 500 吨（26%）。还有 380 吨汞（占全球排放量的 20%）与家居取暖时燃烧化石燃料有关（环境署/北极监测评价方案，2008 年，北极监测评价方案，2010 年）。在许多国家，大量的（常常是低质的）煤炭被用于家庭的取暖和烹饪。在其它一些国家，则用锅炉来为大量的居住单元供暖。虽然家居取暖是一个重要的汞排放源，但没有被进一步列在当前的研究中，因为合适的排放控制备选方案与发电厂和工业锅炉的备选方案非常不同。应考虑其它的替代控制手段，如改用其它燃料或转向其它能源用于烹饪和取暖，这要取决于当地的条件和资源的可得性。

25. 在有色工业的汞排放总量中，几乎有 70% 源自亚洲（关于按地理区域划分的更多排放详情，参见第 2.2 节）。据估计，有色金属工业（来自大规模生产的）为 2005 年总的全球大气汞排放贡献了大约 130 吨，其中来自该部门的估计排放量中，有大约 50% 来自中国，接下来是韩国（约 5%）、智利和澳大利亚，后两个国家也各排放了约 5%。大型黄金生产占了全球排放量的 6%（约 110 吨）。2005 年，据估计，中国是该部门最大的排放国，占到了该部门排放量的 40%，接下来是澳大利亚、美利坚合众国和印度尼西亚，总共为该部门的排放量贡献了 5% 到 7%。最近，环境署收到的相关资料表明中国在大型黄金生产中已经停止了使用汞。

26. 在 2005 年，从人为的排放源向大气排放的全球总汞排放量中，约有 190 吨（10%）源自于水泥生产。水泥行业排放的总汞量大约有 74% 来自亚洲，其中中国是主要的贡献者，大概占到水泥生产向大气排放的总排放量的 45%，其次是印度（6%）和日本（5%）。接下来最大的贡献者是美国（3%）（环境署/北极监测评价方案，2008 年）。

27. 来自家庭和其它废物的汞排放，是高度不确定的。大多数国家在填埋场或通过露天焚化处置大量的废物。许多国家没有对固体废物进行大规模高温焚化的设施。因此，来自这个部门的排放量常常要么没有报告，要么包括在“其它”排放的一般类别项下。而对来自城市废物、医疗废物和危险废物的大规模焚化设施的排放量确实进行了报告的国家有美国、日本和欧洲国家——由于这些原因，它们可能在废物部门清单的这一部分，在某些程度上“超出比例”了。在其它国家中，废物焚化可能被列在全球清单中的“废物和其它”类项下。根据物质流分析或质量平衡方法计算出的废物部门排放量，与这些国家中的废物处理资料一起，可以与报告的废物焚化估计值相比较，只要能够得到这些资料。根据对有意使用部门 2005 年排放量的最新修改的估计值（北极监测评价方案，2010 年）（见第 30 段），大型设施中城市固体废物的焚化估计对全球大气汞排放贡献了大约 2%（还有 4% 被算在“其它废物”一类中）。注意到将排放量分配到废物部门的不同部分时的不确定性，北美和欧洲各贡献了全世界与大规模废物焚化直接相关的汞排放的大约 20%，而亚洲则贡献了大约 45%。

28. 为了进行大气建模，采用了按地理空间分布的（网格化的）排放清单作为输入。除此之外，模型还要求对这些排放量进行“物种分类”，将初始排放量分为汞/汞化合物的三种主要形式：气态元素汞（也缩写为 Hg^0 或 Hg^0 ）、二价汞化合物（ Hg^2 ）以及与颗粒相关的汞（ Hg-P ）；它们共同组成汞的总排放量（ HgT ）。不同种类的汞具有明显的不同的迁移行为，因此有关物种形成的资料就是确定汞的排放去向所要求的。在北极监测评价方案/环境署（2008 年）的报告中可查到关于物种形成和烟囱高度的资料。

3.2. 全球大气汞排放趋势

29. 作为其 2010 年对北极的汞进行评估的一部分，北极监测评价方案对 1990 年、1995 年、2000 年和 2005 年的全球汞清单进行了重新分析（Pacyna 和 Pacyna，2002 年；Pacyna 和 Pacyna，2005 年；Pacyna 等人，2006 年），以便编制一系列更具可比性的全球历史排放清单，并对全球大气汞排放的趋势进行分析（北极监测评价方案，2010 年）。这项重新分析采用了一种常用的方法、为估算特定排放的更为一致的资料基础、以及对不同国家和部门的以前清单的更新，以纳入在过去 15 年间编制清单的过程中所了解的更多情况。它用新得到的区域汞消费数据对 2005 年清单做进一步的修订，这些区域汞消费构成了与“有意使用”的部门相关的排放量估算依据。修订的详细情况可在 2010 年北极监测评价方案报告中查到。

30. 对于 2005 年，修订的结果是估计值大约减少了 5 吨，即是 1921 吨，与之相较，环境署/北极监测评价方案（2008 年）报告中估算的全球大气汞排放为 1926 吨。与环境署/北极监测评价方案（2008 年）报告相比，“无意的”排放量基本上没有变化；然而，对一些国家来自“有意使用”部门的估算排放量作了某些修订。除了修订各个年份（1990 年、1995 年、2000 年和 2005 年）“无意”排放部门的排放量以外，重新分析还引入了 1990 年、1995 年和 2000 年各年份的源自“有意使用”汞的排放量估算数，这（除了氯碱工业的排放量以外）对于这些“历史的”清单，以前是无法得到的。

31. 经过修订的“无意排放”和“有意使用”部门在 1990 年、1995 年、2000 年和 2005 年大气汞排放的估计值见图 2。重要的是须注意，对“有意使用”部门的排放量数据代表的是低的“保守估计值”。

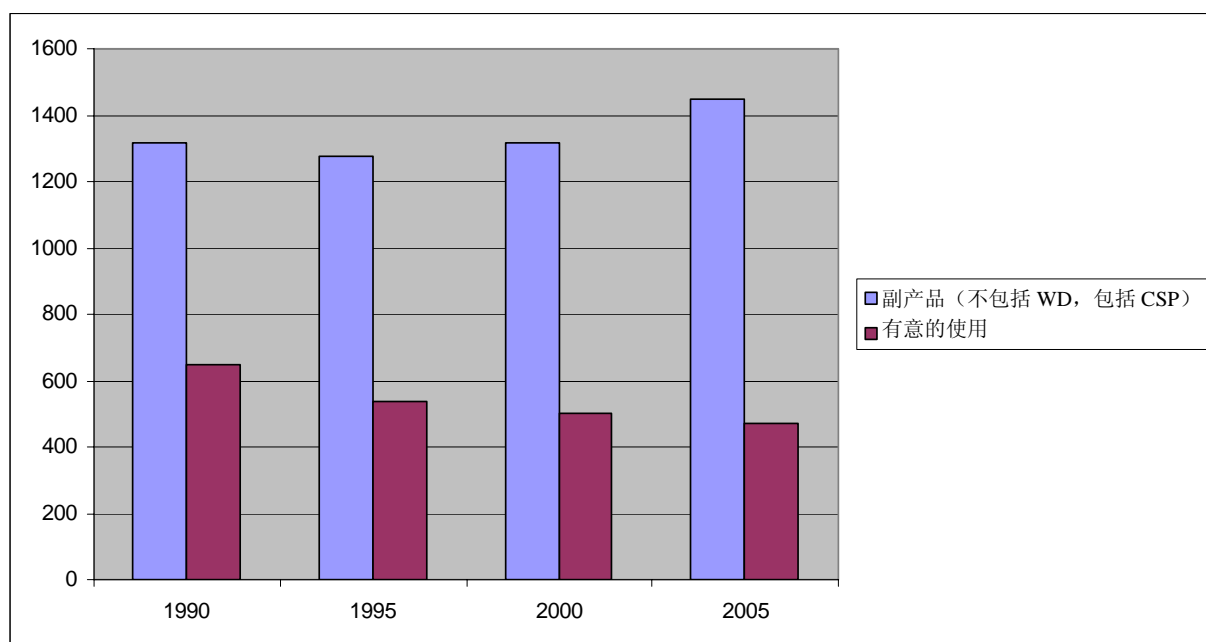


图 2. 经修订的 1990 年、1995 年、2000 年和 2005 年源自“副产品”和“有意使用”排放部门的全球人为大气汞排放估计值（吨）。（WD = 废物处置，CSP = 氢氧化钠生产）（数据来源：北极监测评价方案，2010 年）

32. 在图 2 中，每一年左边的柱子表示相应年份经修订的“副产品”的估算排放量。右边的柱子表示“有意使用”的部门向大气排放的汞排放估计值。根据经修订的估计值，从 1990 年到 2005 年，“副产品”的排放有所增加，而同期“有意使用”部门的排放有所减少。总体来看，将“无意”和“有意使用”的部门排放源加起来，全球大气汞排放的总水平从 1990 年到 2005 年保持了相对稳定。

3.2.1. 各地理区域的排放情况

33. 虽然自 1990 年以来全球大气汞排放的总水平保持了相对稳定，但排放源却发生了相当大的区域转移。1990 年、1995 年、2000 年和 2005 年“无意”和“有意使用”部门的（联合）排放区域趋势概况见图 3。该图显示，人为大气汞排在亚洲明显增加，非洲和南美的增加幅度要小得多，而欧洲、欧亚地区（俄罗斯）和北美的排放量从 1990 年到 2005 年下降了。

34. 根据环境署/北极监测评价方案（2008 年）的报告，2005 年，亚洲国家贡献了约 67% 的来自人为排放源的全球大气汞排放，其次是北美和欧洲（环境署/北极监测评价方

案，2008年）。俄罗斯因为地跨欧亚两个大洲而另外考虑，其对全球排放量的贡献约为4%。

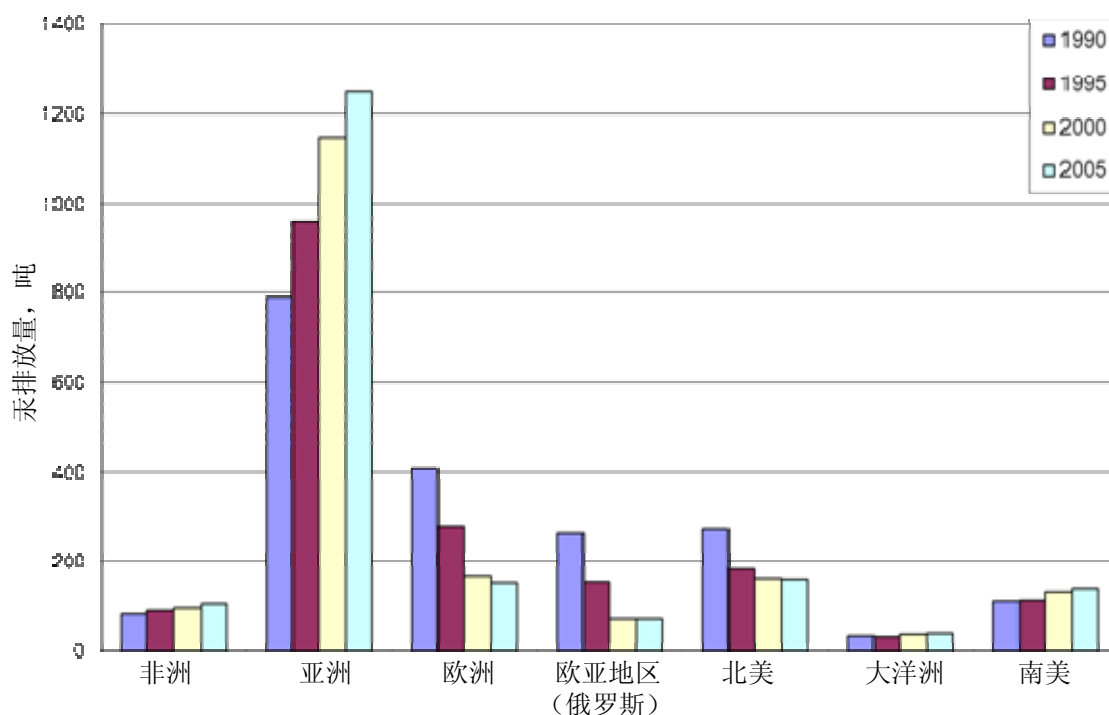


图 3. 1990 年、1995 年、2000 年和 2005 年经修订的不同大洲/区域的人为大气汞排放估计值 (吨)。(数据来源: 北极监测评价方案, 2010 年)

35. 中国是燃煤发电厂数量最多的国家, 据估计是 2005 年世界上最大的大气汞排放国家。发电厂的排放只是中国总的燃烧汞排放的一部分。同样值得注意的是, 在小型居住单元中为了取暖和农村地区为了烹饪食物而燃烧混有各种废物的劣质煤炭时的排放。中国电力部门的排放量自 2005 年以来很可能会有所下降 (见第 3.3.2 节)。

36. 中国、印度和美国这三个国家加起来, 占 2005 年全球大气汞排放估计总量的 57% (1921 吨中的 1097 吨)。

37. 图 4 显示了根据 2008 年环境署/北极监测评价方案报告中描述的方法、按地理分布的 2005 年人为汞排放的全球分布情况。

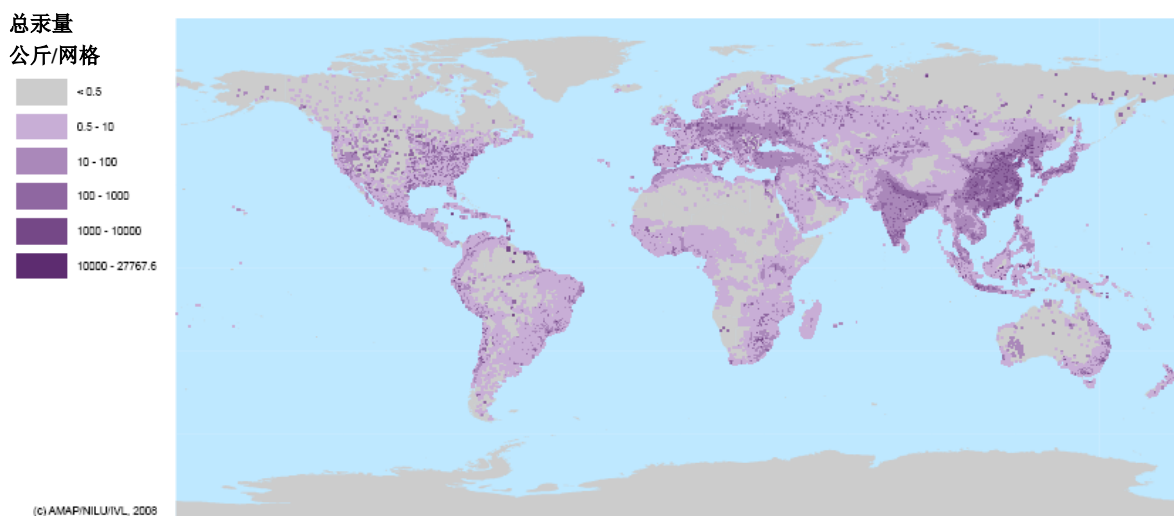


图 4. 汞排放的空间分布（摘自环境署/北极监测评价方案，2008 年）。

3.3. 排放资料的比较

3.3.1. 可得到的全球排放研究的比较

38. 环境署/北极监测评价方案（2008 年）2005 年全球人为排放清单，可以与其它同类评估中给出的清单进行比较，如 Pirrone 等人的人为和自然来源的全球汞排放量（2010 年）。那个清单估计全球人为向大气中的排放量为 2320 吨，所依据的是来自不同国家的 2003-2006 年的数据，包括一些在编制 2005 年的环境署/北极监测评价方案清单时用过的相同来源的数据，以及环境署/北极监测评价方案对于欧洲、俄罗斯和南美的估计值。清单的总量（2320 吨）完全在环境署/北极监测评价方案（2008 年）的报告所估计的全球清单范围内，即 1221-2950 吨（最佳估计值为 1921 吨），对于一些部门所做的估算排放量也是如此（参见表 2）。例如，对于静止煤炭燃烧（发电厂和家居取暖合在一起）和水泥生产，Pirrone 等人（2010 年）的估计值分别为 810 和 236 吨，而环境署/北极监测评价方案估计的是 878（597-1163）和 189（114-263）吨。然而对于有色金属生产，其吻合程度就不那么好了（310 吨，而环境署/北极监测评价方案估计的为 132（80-185）吨）。同样，对于氯碱工业，Pirrone 等人（2010 年）给出的估计值为 163 吨，大大高于环境署/北极监测评价方案所给出的 47（29-64）吨。对各个国家给出的排放量估计值也是有差异的。在某些情况下，这些差异可部分地被解释为采用了不同的排放因子。例如，煤炭中的汞含量差异很大，在没有实测浓度的情况下，在不同的清单中对煤炭中的汞含量作了不同的假设。

表 2. 2005 年选定部门全球人为大气汞排放的估计值——比较全球清单汇编 (吨)

选定的部门	环境署/北极监测评价方案 2008 年 (经修订) *	Pirrone 等人 (2010 年)	Hylander 和 Herbert (2008 年)
	吨	吨	吨
静止燃烧			
发电厂和工业锅炉中燃煤	498 (339-657)	810 (其中 747 来自发电厂燃煤)	
家居取暖/其它燃烧	382 (257-506)		
有色金属生产			
有色金属 (铜, 锌, 铅)	132 (80-185)	310	275
大型黄金生产	111 (66-156)	-	
水泥生产			
水泥生产	189 (114-263)	236	
废物焚化			
废物焚化	42	187 (废物处置)	
其它废物	74		
其它主要部门			
生铁和钢、再生钢	61 (35-74)	43	
个体和小型黄金生产	323	400	
氯碱工业	47 (29-64)	163	
清单合计**	1921 (1221-2950)	2320	

* 代表最佳估计值: 估计值 (不确定性区间), 或保守的估计值 (没有相应的范围)。关于不确定性的讨论, 参见环境署/北极监测评价方案 (2008 年)。

** 包括未列在上面各行中的其它部门。

39. Hylander 和 Herbert (2008 年) 估计, 2005 年全球在铜 (Cu)、铅 (Pb) 和锌 (Zn) 硫化物矿石的有色金属高温处理过程中排放的汞约为 275 吨, 其中有几乎一半是从锌冶炼炉中排放的, 其余部分为铜和铅冶炼炉各占一半。这个数字也高于环境署/北极监测评价方案 (2008 年) 清单中报告的估计排放量, 可归因于采用了比环境署/北极监测评价方案更高的排放因子 (但低于 Pirrone 等人 (2010 年) 的清单中在一些工作中所用的排放因子)。Pirrone 等人 (2010 年) 和 Hylander 和 Herbert (2008 年) 所进行的评估表明, 特别是有色金属部门, 对全球大气中的排放量的贡献, 甚至要高于在 2008 年环境署/北极监测评价方案评估中估算的数字, 而这可能部分地与中国等国家的小型冶金生产的相关排放有关。

40. 由于所包含的部门不同, 也使得清单的比较相当复杂, 例如, 在 Pirrone 等人 (2010 年) 的清单中, 大规模采金业在排放部门中没有单独列为一个类别, 但它们确实包括了来自煤床火 (32 吨) 和氯乙烯单体生产 (24 吨) 的排放, 这两者未列在环境署/北极监测评价方案的清单中 (前者被认为是非人为的, 后者则因缺少有关该来源的足够资料而未包括进去)。

41. 环境署/北极监测评价方案 (2008 年) 的报告较为详细地描述了上面给出的一些比较; 但所有这些比较都指出了对关键参数要有更好的资料这一基本需求, 这些关键参数包括煤炭的汞含量、合适的排放因子 (对于采用的不同技术等)、关于汞消耗量和用途的统计数据、不同国家中的活动以及采取的控制措施。对于全球清单显示汞排放量较大

的国家，因为缺少有保证的国家研究或统计数据来支持对排放量估计值的验证，要减少与这些排放量估计值有关的不确定性仍然存在障碍，虽然向环境署报告的有关燃煤发电厂部门的最新研究已经显示了可观的进步（海洋环境保护委员会，2010年）。

42. 为了取得这类的改进资料而在当前研究下开展的许多工作以及从一些国家得到的其它有关资料，将在下面一节中进行讨论。

3.3.2. 各个国家清单的比较

43. 近年来，一些国家编写了本国的大气汞排放清单，并提供给环境署，以用于当前的研究。下面要对其中一些进行讨论，包括与在环境署/北极监测评价方案（2008年）的报告中给出的排放估计值进行比较。

澳大利亚

44. 对于澳大利亚，Nelson 等人（2009年）估计 2006年的人为大气汞排放约为 15 吨，这还不到环境署/北极监测评价方案清单中对 2005 年估算排放量的一半。在国家清单中，贡献了大约 7.6 吨的黄金生产都被列为澳大利亚人为排放的一个主要贡献部门。发电厂的煤炭燃烧在国家清单中列为第二大排放源，其贡献量约为 2.3 吨，而环境署/北极监测评价方案清单所列的排放量接近 8.8 吨，这是因为采用的煤炭汞含量不同所致；用于家居取暖的燃煤在 Nelson 等人（2009年）的清单中没有专门列出。澳大利亚的其它主要排放源为用铝土矿生产铝（1.9 吨）和有色金属生产中的开采和冶炼（除黄金冶炼之外；0.89 吨），这也低于环境署/北极监测评价方案对这些部门大约每年 6 吨的估计数。对诸如焦炭生产（0.5 吨）、氯碱工业（0.34 吨）以及水泥和石灰生产（0.31 吨）等活动的排放估计值，与环境署/北极监测评价方案清单中的相当。

加拿大

45. 加拿大的国家报告称，在 2007 大约 7.1 吨的总排放量中，燃煤发电厂、有色金属生产和水泥生产的排放量分别是 2.0、1.4 和 0.3 吨。这些数据基于 2007 年（加拿大）全国污染物排放清单，与环境署/北极监测评价方案 2005 年清单中报告的数值相似，后者主要基于全国污染排放清单 2005 年的数据和估计的 8.0（4.0-12.0）吨的 2005 年加拿大总排放量。在环境署/北极监测评价方案的报告中，2005 年源于废物焚化的排放量估计为 0.8 吨，采用的是质量流方法，而 2007 年所报告的数值为 1.1 吨。全国污染排放清单的数据表明，从 2005 年到 2007 年，燃煤发电厂和有色金属生产的排放量略有下降，而水泥生产的排放量略有上升。

中国

46. 虽然缺乏关于中国的详细的国家排放量估算值，但最近已出版了各种有关的研究结果。Wu 等人于 2006 年估计，中国在 2003 年的人为汞排放为 696 吨，其不确定性区间为 ±307 吨。这与环境署/北极监测评价方案的报告中估计的 794 吨（范围为 477-1113 吨）相当。Li 等人（2010 年）估计，中国每年来自原生锌生产的汞排放量为 80.7-104.2 吨（2002-2006 年期间）。在 Streets 等人（2009 年）的数据中，燃煤的数据已按 2005 年的情况进行了更新和外推，得出的结果是，2005 年发电厂和工业燃煤的汞排放估计接近 295 吨。在北京清华大学为中国环境保护部编制的一项环境署研究中（海洋环境保护委员会编制中，2010 年），2005 年燃煤发电厂中来自烧煤的汞排放初步估计为 108.6 吨（置信区间为 65.2-195.4）；环境署/北极监测评价方案（2008 年）对该部门 2005 年的估计值也是 195 吨（146-243 吨）。Wu 等人（2006 年）对发电厂和工业（组合）燃煤

排放的估计值为 225 吨（与环境署/北极监测评价方案对该组合的估计值相似）。他们还估算了大规模有色金属冶炼的排放量为 290 吨（比环境署/北极监测评价方案估计的包括大型黄金生产在内的有色金属冶炼的 77-143 吨要高得多），水泥生产为 35 吨（低于环境署/北极监测评价方案的估计值，其范围为 59-110 吨），城市废物焚化所产生的排放量大约为 10 吨。

印度

47. 在与汞的大气传输和归宿研究合作组织联系的地区活动中，Mukherjee 等人（2009 年）估算了 2000 年和 2004 年印度工业源的大气汞排放。由于缺乏针对本国的资料，估算所依据的，是从文献、从印度收到的有限资料中得到的欧洲联盟（欧盟）的排放因子和美国的排放因子。根据这些估算，由于氯碱厂排放量的显著下降，排放量从 2000 年的 321 吨下降到了 2004 年的 253 吨；这与环境署/北极监测评价方案估算的 2005 年的 180（108-252）吨相当。印度是一个煤炭生产大国，Mukherjee 等人（2009 年）估计 2004 年印度最大的大气汞排放源是燃煤发电厂，大约为 121 吨。这个估计数字与环境署/北极监测评价方案（2008 年）对 2005 年的估计数字（52-87 吨）有差异，主要是由于 Mukherjee 等人采用的煤炭中的汞含量（0.376 毫克/千克）要高于环境署/北极监测评价方案的研究中所采用的值。Kumari（2010 年）估计，从 2006 年到 2008 年，印度热电厂的汞排放量从 95 吨增加到了 112 吨，其中 2008 年的不确定性区间为 59-200 吨。根据 Mukherjee 等人（2009 年）的估算，印度的有色金属生产（在铜、铅和锌的生产中采用了若干不同的技术），在 2004 年的大气汞排放量中贡献了 15.5 吨，比 2000 年大约 8 吨的量有所升高。Kumari（2010 年）估计有色金属冶炼炉的排放量在 2007 年的范围是 7.6-21.7 吨；环境署/北极监测评价方案对 2005 年的估计数是 3-5.6 吨。印度的水泥工业，根据 Mukherjee 等人（2009 年）的资料，在世界上规模列第二位，其 2004 年的汞排放量估计为大约 4.7 吨，这要低于环境署/北极监测评价方案报告中估计的 8-14.8 吨。在印度，有些硅酸盐水泥厂是相当现代化和先进的。Mukherjee 等人（2009 年）指出，水泥生产中的能源消耗量相当高，但不知道是否有水泥厂采用废物作为替代燃料。在印度，城市废物主要是通过填埋、露天倾倒和露天焚化的方法进行处置的。医疗废物在有些医院是焚化的，但资料并不完整。

大韩民国

48. 在大韩民国 2007 年的排放清单（Kim 等人，2010 年）中，总的大气汞排放量估计为 12.8 吨（范围为 6.5-20.2 吨），其中有 54.8% 源于工业源，45.0% 源于固定的燃烧源点，0.02% 来自活动源点。主要的排放源有：热电厂（26%）、炼油厂（25%）、水泥窑（20%）和废物焚化（城市废物、工业废料、医疗废物和污水污泥）（20%）。有色金属生产的排放量极少，比环境署/北极监测评价方案的估算要少得多。

49. 虽然这比环境署/北极监测评价方案报告中对大韩民国估算的 32.3（19.4-45.2）吨要低，Kim 等人（2010 年）注意到，伴随着控制技术的引入，排放量从 2000 年到 2007 年急剧下降；同时，没有对家居燃煤的排放量进行定量统计。Kim 等人（2010 年）估计的发电厂排放量为 1.1-4.5 吨，比环境署/北极监测评价方案报告中估算的 6.7-11.3 吨要低三倍，然而，对废物焚化的估计值（1.8 吨）要高于环境署/北极监测评价方案的估计值（0.3 吨）。

50. Kim 等人（2010 年）所报告的研究中，包括了一个对大韩民国各种排放源的排放量进行广泛测量的计划。有了它，便可以制订出针对该国的具体排放因子，这大大提高了 Kim 等人（2010 年）所报告的清单的准确性。所得到的排放因子一般都低于文献中公布

的值。韩国采用高效的大气污染控制装置和良好的环境管理实践。当前在韩国采用的实践做法包括：对产品的汞管制、汞废物和源点排放控制、以及在现有的大气污染控制装置中不断提高共同受益的汞控制、更清洁的燃料、关闭高污染和低效率的工厂、严格的大气污染管制、提高设施业主和公众的意识以限制在产品中使用汞（Kim 等人，2010年）。

南非

51. Masekoameng 等人（2010年）对2000-2006年这段时期南非排放源的大气汞排放进行了估算。运用关于活动的年度资料组合，结合针对南非的排放因子和基于排放因子的环境署工具包，估算了每项活动的大气汞排放。总的情况是，估算的总的大气汞排放有所上升，从2000年的34吨上升到2006年的50吨。2006年，燃煤发电厂是最大的汞排放源，为38.9吨，其次是水泥生产，为3.9吨。南非的这个排放清单，无论是总排放量还是几乎所有被审议的各部门，都与环境署/北极监测评价方案给出的结果非常吻合。

52. 对于燃煤发电厂，是根据针对发电厂的具体煤炭消耗量和煤的汞含量、以及排放控制装置及其假设的去除效率进行计算的。

基于环境署工具包的国家清单

53. 有一些国家利用环境署工具包（环境署，2005年和环境署，2010年）已经制订了或正在制订国家汞排放清单。下面所提及的清单都已经正式提交给环境署，并可在环境署的网站上找到。

54. 在南美和中美，智利、厄瓜多尔、多米尼加共和国、墨西哥和巴拿马已报告了估算数量。智利在大气中的人为汞排放量估计在每年1.7-9吨的范围内（智利政府，2008年）；这比环境署/北极监测评价方案（2008年）报告中估计的12.6吨要低。巴拿马的排放清单也是根据环境署工具包制订的，其估算的大气汞排放量为每年0.24-4.8吨（巴拿马国家环境局，2009年），而环境署/北极监测评价方案的估计值为0.8吨。厄瓜多尔估算的2005年人为汞排放量在0.9-16吨之间（厄瓜多尔环境部，2008年），而环境署/北极监测评价方案的估计值为6.5吨。墨西哥报告2004年的排放量为50吨；环境署/北极监测评价方案（2008年）估计墨西哥来自所有审议源头的数值为14.7吨。多米尼加共和国报告的大气汞排放量为1.1吨（自然资源和生态环境部，2010年），而环境署/北极监测评价方案的工作所估算的为0.654吨。

55. 一些亚洲国家已经运用环境署工具包制订了大气汞排放量的国家估计值，具体如下：

- 柬埔寨：0.8-14.8吨（尽管不清楚大气中的排放量和水中排放量的明细），而环境署/北极监测评价方案（2008年）的估计数字为2.3（1.4-3.3吨）；
- 巴基斯坦：2.1-5.7吨，而环境署/北极监测评价方案（2008年）的估计数字为5.9（3.5-8.3吨）；
- 菲律宾：80.7吨（其中32吨来自热电联供生产，39.5吨来自黄金生产），而环境署/北极监测评价方案（2008年）的估计数字为14.4（8.6-20.1吨）；
- 阿拉伯叙利亚共和国：1.3-7.1吨，而环境署/北极监测评价方案（2008年）的估计数字为0.7（0.4-1.0吨）；
- 也门：0.2-1.8吨，而环境署/北极监测评价方案（2008年）的估计数字为0.4（0.2-0.5吨）。

56. 在非洲，以下几个国家编制了基于环境署工具包的清单：

- 布基纳法索：0.5 吨，而环境署/北极监测评价方案（2008 年）的估计数字为 2.4（1.2-3.6 吨）；和
- 马达加斯加：15 吨（主要与废物处置相关），而环境署/北极监测评价方案（2008 年）的估计数字为 0.9（0.4-1.3 吨）。

57. 应当注意，在这些国家清单中，有一些还是初步的，由于所包括的源头不同（如菲律宾的热电联供生产，这在环境署/北极监测评价方案的工作中并未涉及），将总排放估计值与环境署/北极监测评价方案（2008 年）报告中的数字进行直接比较也许并不总是合适的。同样，来自除发电厂以外的煤炭燃烧源的排放量（如用煤进行家庭取暖和烹饪），在许多国家清单中并没有加以定量，且在所有包括这一项的清单中具有很大的不确定性。

58. 现在还缺乏大多数国家的国家清单，包括主要排放国的，或者清单不完整。如果没有这些清单，要得出定量的全球排放估算，唯一的办法就是根据现有的（全球汇编的）统计数据、排放因子和有关技术和实践的假设来计算。这些计算具有某种不确定性，根据北极监测评价方案/环境署（2008 年）的估计，对于静止化石燃料燃烧为 25%，有色金属、钢铁和水泥生产部门为 30%。对于废物处置，其不确定性要高得多，最高可达 5 倍。对于汞和黄金生产，主要是由于估算个体黄金生产的排放量有很高的不确定性，所以没有对不确定性进行估算。对不同的地区，也给出了总排放量估算的不确定性，在北美、欧洲和澳大利亚为 27-30%，世界其它地区为 40-50%。在当前的研究中，没有对这些不确定性进行审核，但随着可以得到越来越多的国家排放清单（如本节所述），将会提供有价值的资料，将使未来编制的排放清单更为准确。除了采用全球统计数据和排放因子时的相关不确定性之外，还应注意，自北极监测评价方案/环境署（2008 年）的报告所采用的基准年 2005 年以来，排放量可能已经发生变化。能源使用量和工业生产的增加，可能使一些地区的汞排放量上升，而为减少大气污染物排放而采取的措施，或专门针对减少汞排放的措施，也许已经导致其它部门和地区的汞排放量下降。在这方面，有一个例子是中国，根据中国为本项研究提交的资料，燃煤发电排放的汞从 2005 年到 2008 年已经减少了 35 吨，这主要是因为在该部门提高了能源效率，采取措施减少了二氧化硫的排放。

4. 排放控制、效益和成本

59. 本节的目的，是介绍选定部门现有的汞减排技术及其相关效益和成本、对汞和大气污染物的共同控制、简短的一般性讨论以及关于成本计算要求的例子。

4.1. 主要排放控制措施

60. 汞是作为工艺中使用的燃料和原材料、或废物（在焚化时）中的微量成分，进入燃烧或本项研究中涉及的高温工业工艺过程的，在燃烧之后，这些汞将有不等的部分会被排入大气。虽然最实用的汞减排方法，是对排气进行控制，在许多场合，其它步骤也发挥着重要的作用。其中一种主要的控制措施，就是在进行燃烧之前降低燃料、原材料或废物中的汞含量。另一种常用的减排方法，是提高运行的效率，由此减少所用的燃料或原材料数量，从而减少汞和其它污染物的排放量。

61. 还有一些更常规性的措施，可看作是一般的最佳实践，它们能有效地减少各种形式的汞排放，通常成本较低，尤其是与建立或运行一座工厂的总成本相比较时（环境署2006年，环境署在编写中的，2010年）：

- *培训、教育和激励员工和运行人员。*工业过程是由人来监控的。因此，对员工进行合适的、有针对性的培训，是减少有害物质排放的一条成本效益非常高的途径。
- *过程控制优化。*为了能同时减少不同的污染物，并维持低排放量，就需要严格注意对过程的控制。
- *定期维护。*为了保持工业过程中技术单元的效率，并使相关的减排系统保持高水平运行，就必须确保充分的定期维护。
- *运行层面对环境管理重要性的意识。*明确规定了与环境相关的运行责任的环境管理系统是负责任的管理的一种必要工具。它可提高意识，并根据需要，将目标和措施、过程和作业指导、检查单和其它有关文件涵盖在内。

62. 为了控制燃烧过程之后烟气中的汞排放，可采用不同的技术方法。在许多情况下，采用大气排放控制技术可同时控制汞和其它大气污染物的排放。为了进一步控制大气汞排放，已开发了专门的控制技术，它们常常采用添加吸附剂的方法，如用活性炭（经过化学处理和未经化学处理的）来捕获汞。

63. 对于在本项研究中选定的部门，许多潜在可应用的控制和专门用于控制汞的技术是相似的，因此在此不针对每个部门分别叙述。然而，由于部门之间和部门内部的差异，在第5.1到5.4节中也进一步审议了针对具体部门的资料。

4.2. 共同控制汞和大气污染物

64. 现代化的燃烧和工业过程装置，以及许多已被更新过的老式装置，都具有各种不同的减排设备（表3）。对一些减排技术而言，其主要目标是某一类大气污染物，但是这项技术也许还可以从烟气中去除其它污染物，比如，袋式除尘器就具有控制酸性气体的第二功能，同样的，湿法洗涤器还可以用于颗粒控制。不同的控制系统常常需要组合起来，以实现若干污染物的理想控制。通常，安装的减排设备都是用来减少诸如颗粒（颗粒物）、二氧化硫（SO₂）和氮氧化物（NO_x）等的污染物的排放的，它们对汞排

放也许也有不同程度的影响。为了在通用大气污染物减排技术共同受益已达到的水平上再进一步降低汞的排放，需要另外的措施，来专门减少汞的排放。

表 3. 一些通用的大气污染物控制技术（主要摘自欧洲监察和评价方案/欧洲环境署的大气污染物排放清单指南，2007 年）。

大气污染物控制技术	描述
袋式除尘器	用做成袋子或套子形式的半透气性材料制成，这些袋子或套子捕获颗粒，安装在一个气密的壳体中（袋室），壳体又分为若干部分。袋式除尘器还在酸性气体控制系统（如二氧化硫控制）中作为第二级使用。
静电除尘器	采用静电吸引的原理来除去烟气中携带的颗粒。除尘器中有数排放电电极（金属丝或细的金属棒），通过它们施加高电压，并让它们在收集带电颗粒的平行成排金属板之间移动。
湿法洗涤器	通过在一个设计成使气体和液体高度接触的反应塔中洗涤烟气，来除去酸性气体（如氯化氢、氟化氢和二氧化硫）。在第一级，通过喷水对气体进行冷却，以除去氯化氢、氟化氢、某些颗粒和一些重金属。在第二级，采用氢氧化钙或另一种合适的碱性物质来除去二氧化硫和残留的氯化氢。在用石灰/石灰石进行湿法洗涤时，二氧化硫的减量大于 90%。湿法洗涤器有时还用作清除颗粒的首选。世界各地使用的大多数烟气脱硫系统都采用湿石灰洗涤器。
半干法除尘器/喷雾吸收器系统（喷雾干燥）	它利用一种碱性的反应浆液（通常是氢氧化钙），以小液滴的形式喷入。酸性气体（如二氧化硫）在这些小液滴的表面被液相吸收，并被中和；浆液在烟气热量的作用下干燥，变为干的产物，用静电除尘器或袋式除尘器收集。二氧化硫削减效率可 > 90%。
干法喷入系统	它是将碱性制剂（如氢氧化钙或碳酸氢钠）以干的细粉喷入，以除去和中和酸性气体。中和的产物一般收集在袋式除尘器中。
选择性非催化还原和选择性催化还原	它用于减少烟气中的氮氧化物（NO _x ）。选择性非催化还原工艺是将氨或尿素在靠近炉子的地点喷入。选择性催化还原系统则基于在催化剂存在的条件下与注入的添加剂进行选择反应。所用的添加剂大多为氨（气态的和溶液的），也可以是尿素。用选择性非催化还原实现的氮氧化物减排是有限的（最高为 50%），但用选择性催化还原则可达 70% 到 95%。
用活性炭/活性褐煤焦炭吸收	为控制汞、挥发性有机化合物和二噁英，已开发了若干不同的技术。这些系统用于去除氯化氢和二氧化硫也是比较有效的。

65. 袋式除尘器和静电除尘器主要用于减少烟气中的颗粒物，但它们也可通过除去吸收了汞的颗粒，在一定程度上减少大气汞排放。除尘器的汞去除效率取决于除尘器除去可能吸收了汞的小尺寸颗粒的能力、以及可能被除尘器捕获并用作汞吸收场所的烟气流中存在的成分。

66. 用于从烟气中去除二氧化硫（以及其它酸性气体）的系统，也称为烟气脱硫系统，有湿法洗涤器、半干法除尘器/喷雾吸收器系统和干法喷入。它们的基础都是二氧化硫与碱性制剂进行反应，生成相应的盐，这些碱性制剂以固体或悬浮物或制剂的水溶液形式加入。使用烟气脱硫工艺也可以减少颗粒物、汞和其它金属排放的排放。其它湿法系统主要用于去除颗粒，但也能够减少水溶性气体如二氧化硫的排放。

67. 选择性非催化还原和选择性催化还原旨在减少氮氧化物（NO_x）的排放，也可通过增强对元素汞的氧化，使之形成二价形式，对汞的去除产生积极的影响。

68. 共同控制来自燃烧源的汞排放，主要取决于所安装的大气污染控制系统（除尘器或洗涤器）将汞从气相吸收到固相或液相的能力，此后固相或液相就可与随后的气流分离开来。煤炭燃烧时释放的汞，有氧化的（Hg²⁺）、元素态的（Hg⁰）或与颗粒结合的

(Hg^p)形式。汞在煤炭中以痕量存在，在燃烧过程中，它作为元素汞被释放到排气中。在烟气的冷却过程中，它可被氧化。氧化的汞能容易地被液态和固态吸收剂吸收，从而可从烟气中更高效地去除。被吸收到固体表面上的汞称为与颗粒结合的汞。是否形成氧化的汞，既取决于烟气的温度，还取决于烟气的成分，而这又取决于燃烧的条件、燃料的成分和是否有添加剂等等。例如，煤炭中是否含氯就是一个重要的参数。煤炭中的氯含量较高时，通常会在烟气中形成较高浓度的氯原子团，并能更有效地将元素汞氧化成二价形式。在任何实际情形中，汞的物种形成都取决于多项参数，并且也是变化很大的。生煤燃烧产生的烟气中，氧化的汞更为普遍，并能相对容易地用诸如湿石灰洗涤器等二氧化硫控制手段加以捕获。与颗粒结合的汞也可以在现有颗粒物控制装置中比较容易地捕获。元素汞在褐煤和亚生煤燃烧产生的烟气中更为常见，用现有的污染控制手段捕获要更困难些。

69. 关于选定部门可以获得的相关技术，更多资料可在以下资源中找到：例如，欧洲综合污染预防与控治局的工作的最佳可得技术参考文件，网址为 <http://eippcb.jrc.es/reference/>，或在美国环境保护局的排放因子手册（美国环保局，AP-42）中，网址为 <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>、以及美国环境保护局的清洁空气技术中心，网址为 <http://www.epa.gov/ttn/catc/>。

4.3. 结合不同的控制技术以优化汞控制

70. 控制燃烧源的汞排放，可用若干种不同的措施或组合的控制措施来实现。大气污染控制技术（主要针对其它污染物，但也能在一定程度上减少汞的排放）在 4.2 节中作了描述。可用的专门针对汞的控制措施实例，在第 5 章中各个部门的有关分部门项下描述。为了制订有关的汞控制策略，应考虑将大气污染控制技术与专门的汞控制技术结合起来。安装哪种大气污染控制装置，当然还取决于其它要优先考虑的因素，如减少颗粒物或二氧化硫的排放。因此，如果不了解更广范围的大气污染控制现状，就难以提出可普遍适用于优化汞排放控制的不同控制技术组合。影响潜在控制备选方案的其他参数包括排放源的技术细节和烟气的特性（如其它成分和汞的物种形成）。

71. 在本项研究的四个选定部门中，现有信息最多的是燃煤发电厂的汞控制，这主要基于在美国开展的研究（见 5.1 节）。对于这个部门，在美国所研究的发电厂相关条件下，通过采用活性碳喷入，也许辅以诸如袋式除尘器等颗粒物清除装置，能够显著地减少汞的排放。例如，活性碳喷入已经在美国的大约 30 台锅炉中减少了 90% 的汞排放⁴（政府问责局，2009 年；东北州际协调空气使用管理机构，2010 年）。活性碳可以是未经处理的，而近来则更多的是经过化学处理的，特别是用溴或氯等卤素进行处理。化学处理增加了烟气中被氧化的汞（Hg²⁺）的比例，从而改进了用于脱除汞的烟气脱硫和静电除尘器的性能（Weem，2010 年）。这对于低等级的褐煤和亚生煤尤其管用。经过化学处理的活性碳喷入还在继续开发和试验中，但在美国也已能够投入商用。

72. 活性碳喷入已主要应用于发电厂现有的大气污染控制设备（如静电除尘器、脱硫、氮氧化物控制）。对仅装备了比如静电除尘器的燃煤发电厂，可能还需要进一步试验和研究活性碳喷入的效率。虽然活性碳喷入和其它的直接汞控制手段能与其它大气污染控

⁴ 清洁空气公司研究所列出了 155 项活性碳喷入的汞控制技术，这些技术到 2010 年 6 月已在美国和加拿大的发电厂中采用；其中许多已达到运行水平。

http://www.icac.com/files/members/Commercial_Hg_Bookings_060410.pdf

制手段很好地结合使用，这并不一定表示要很好地对汞进行控制，就需要先进的排放控制手段。然而，由于专门针对汞的控制手段的目标是增加颗粒物对汞的吸收量，颗粒物的排放控制设备（如袋式除尘器中的静电除尘器）就是一项基本要求。因此，为了制订国家的汞排放规划和减排战略，作为第一步，就需要评估当前和规划的大气污染物排放控制的技术状况。在只有颗粒物排放控制手段而没有规划附加的大气污染物控制措施的地区，可以考虑直接采用吸收剂或氧化剂。燃烧前的措施，如洗煤或燃料混合（与汞含量较低的燃料），也可以加以考虑。

4.4. 汞控制的成本和效益

73. 要估算控制汞排放的成本，就需要了解排放源的现状，包括当前和规划的大气污染控制措施的技术描述。因此，如果已经或正准备应用控制措施来控制非汞污染物（如颗粒物、硫氧化物和氮氧化物），来达到有关的大气污染标准，那么实现汞减排的成本可以认为是零。对汞进行控制的真正成本，应被认为是专门为减少汞的排放而采取的措施的成本。本报告中提供的所有成本方面的资料，应在这个背景下进行评估。最后，控制汞的成本当然也取决于所实现的汞控制水平。

74. 在下面针对具体部门的各节中，有关汞控制成本的一般资料，主要是基于在欧洲和北美的研究给出的。

75. 对现有工厂中加装污染物控制技术的成本，一般要高于在设计新工厂时就把类似控制措施涵盖进去的成本。这是由于下面的因素：老厂的效率较低、控制措施在空间和设计上的特殊要求、与安装有关的收入损失以及停产时间。由于现有工厂的运行时间可能短于新厂，使得投资成本分摊的年数较少，年度投资开支也许也会较高。对于较为昂贵的技术，如烟气脱硫和选择性催化还原，加装的成本通常假定为要在年度资本成本的基础上增加 30%，而颗粒物控制技术的加装成本要明显低一些。

76. 控制装置的不同组合带来的汞减排效果见表 4、表 5 以及下面各章中对本项研究所包括的四个部门中的各部门说明。在一些表中，对每种控制技术的组合都单独给出一个去除效率的数字，作为最好的、对减排效率的一般估计。在现实中，去除效率更应该看作是一个范围，因为在任何一个具体的工厂，除汞都要取决于许多因素，如煤的质量、燃烧条件等等。

77. 重要的是还需要注意，在本报告中，对汞控制的有效性是用汞减排的百分数来表示的。一个工厂的总排放量还取决于另外一些因素，如在输入或供入的材料（如煤炭、矿石和废物）中汞的总活性和水平。

78. 投资（资本）成本一般反映了购买设备及其必要的基础设施、仪表和控制件的成本。此外，它们还包括运费和安装费、税以及工程设计费用。

79. 运行和维护成本反映了劳动力成本、动力成本、维护成本、部件定期更换的费用、控制成本、以及输入的吸收材料的可变成本。通过出售控制污染得到的特定副产品，如通过湿石灰烟气脱硫得到的石膏，可以部分地抵消这种成本。部分运行和维护成本，如劳动力和动力成本，要基于各国的具体情况，因此在一定程度上在国与国之间会有差异。在本报告中，成本主要依据来自美国或欧洲的成本报告，但通过对具体国家的国内生产总值/人均平价购买力进行调节，也许能计算出具体国家的更为准确的成本。然而，对于专用于去除汞的技术，这些成本只是总运行维护成本中的一小部分，因此可能

没有必要进行这样的调整。在某些情况下，对排放进行强制性监控的成本，也包括在运行维护成本中。

80. 美国环保局（2005 年）报告成本数据的不确定性范围幅度在-30 到+80%之间。在一般情况下，处于实施早期阶段的技术的成本，将随着时间的推移而下降。成本也是高度因地点而异的，因此一般都是用根据不同规模和不同地点的工厂报告文献整理对照的参考成本来表示的，这使得对其它工厂采用外推法不那么确定。

81. 基于在欧洲研究计划欧洲重金属排放的综合评估下进行的控制成本评估，开发了一个针对某些不同的控制备选方案的成本⁵和效益数据库。如 Pacyna 等人 2010 年所公布的，在煤炭燃烧、有色金属、水泥和废物焚化部门，每项活动的污染物减排技术选定组合的年化成本及其汞减排效率见表 4、表 5 和表 6。请注意，有关更多的控制备选方案的讨论见本报告第 5 章。

表 4. 煤炭燃烧的排放控制成本和去除效率实例，Pacyna 等人，2010 年。

排放控制技术	估计的汞减排 (%)	年度成本 ^b (2008 年美元/兆瓦电能)		
		投资成本	运行维护成本	总成本 ^a
干法静电除尘器	> 63	0.5	0.9	1.4
袋式除尘器	> 93	0.5	1.5	1.9
袋式除尘器+湿法或干法除尘器+吸附剂喷入法	> 98	2.7	3.0	5.7
干法静电除尘器+湿法或干法除尘器+吸附剂喷入法	> 98	2.7	2.4	5.1

a. 诸如静电催化氧化或综合气化联合循环等新兴技术的年运行成本预计在 20 美元/兆瓦左右。

^b 本表中成本估算的精确度在±50%内。

⁵ 投资/资本成本假定的技术寿期为 15 年，包括 4%的折现率。

表 5. 有色金属和水泥生产的排放控制成本和去除效率实例, Pacyna 等人, 2010 年。

部门	具体活动的指标 (SAI)	排放控制技术	汞减排 (%)	年度成本 ^a (2008 年美元/SAI)		
				投资成本	运行维护成本	总成本
原生铅	公吨 原生铅	干法静电除尘器	5	0.1	0.04	0.1
	公吨 原生铅	袋式除尘器	10	0.1	1.1	1.2
	公吨 原生铅	活性炭喷入+袋式除尘器+烟气脱硫	90	2.5	1.3	3.8
原生锌	公吨 原生锌	干法静电除尘器	5	0.1	0.06	0.2
	公吨 原生锌	袋式除尘器	10	4.5	1.1	5.6
原生铜	公吨 原生铜	袋式除尘器	5	1.8	13.8	15.6
	公吨 原生铜	袋式除尘器-最新技术	10	3.9	25.7	29.5
再生铅	公吨 再生铅	干法静电除尘器	5	0.1	0.06	0.2
	公吨 再生铅	袋式除尘器	10	6.8	1.1	7.9
再生锌	公吨 再生锌	干法静电除尘器	5	0.1	0.06	0.2
	公吨 再生锌	袋式除尘器	10	0.1	1.4	1.5
再生铜	公吨 再生铜	干法静电除尘器	5	10.9	15.9	26.8
	公吨 再生铜	袋式除尘器	10	6.6	44.0	50.6
水泥生产	公吨 水泥	袋式除尘器	5	0.2	0.2	0.4
	公吨 水泥	袋式除尘器-经优化	98	0.4	0.4	0.8
	公吨 水泥	湿法烟气脱硫	90	1.4	0.5	1.8

^a 本表中成本估算的精确度在±50%以内。

表 6. 废物焚化的排放控制成本和去除效率实例, Pacyna 等人, 2010 年。

排放控制技术	汞减排 (%)	年度成本 ^a (2008 年美元/公吨废物)		
		投资成本	运行成本	总成本
加入碱的湿法洗涤器-排放控制效益“中等”	20	0.1	0.1	0.2
废物分离-中等	60	0.6	0.6	1.2
干法静电除尘器	70	1.8	7.0	8.8
静电除尘器+湿法洗涤器+加入石灰的活性炭+袋式除尘器	99	2.3	2.5	4.8

排放控制技术	汞减排 (%)	年度成本 ^a (2008年美元/公吨废物)		
		投资成本	运行成本	总成本
二级洗涤器+湿法静电除尘器-	90	2.3	1.8	4.1
活性炭喷入+袋式除尘器	80	2.2	4.0	6.2
活性炭喷入+文丘里除尘器+静电除尘器-	95	5.3	6.2	11.4
活性炭喷入+加石灰水的文丘里除尘器 +烧碱+袋式除尘器	99	5.8	7.1	12.7

^a 本表中成本估算的精确度在±50%以内。

5. 选定部门的特点

82. 本章旨在提供简要技术说明以及汞向大气排放的信息，重点是在选定部门中控制汞排放的可用备选方案以及相关成本。同时也介绍了单个设施的成本估算示例。

关于燃煤发电厂的更多详细信息可参见《环境署过程优化指南文件草案》（环境署 2010 年，制订中）。

5.1. 发电厂和工业锅炉中的煤炭燃烧

83. 煤炭燃烧的目的一般是为工业和社会供热和供电。煤炭燃烧可采用几种不同的技术实现。

5.1.1. 燃煤过程中的汞来源和排放

84. 汞作为一种痕量成分天然存在于煤炭中，在燃烧过程中释放，通过烟气进入大气。汞在煤炭中的浓度随地理区域的不同而有所不同，通常为 0.1 至 0.3 ppm，但也发现了该范围以外的值。经认可的实验室测得褐煤中的浓度高达 1 ppm。美国地质调查局最近公布了全球 1500 多个煤炭样本的世界煤炭质量清单，其中一个分析参数是汞含量（参见 <http://pubs.usgs.gov/of/2010/1196>）。

5.1.2. 燃煤技术

85. 煤粉燃烧是全世界最主要的燃煤技术，通常用在较大机组中。它可能是按低发热值计算效率最高为 40% 的第一代传统蒸汽技术，或是效率最高为 47%（低发热值）的第二代超临界技术。类似效率也可通过整体煤气化联合循环技术获得，虽然它现在才因其碳捕获和存储的特殊优点而开始应用到燃煤中。流化床燃烧用得较少，虽然现在用在较大的机组中，最大效率约为 44%（低发热值）。煤粉燃烧和流化床燃烧均需要通过研磨等手段对煤炭进行预处理，以获得合适尺寸的煤炭碎块。排放控制系统在这些通常较大的机组中，是常见的、具有商业可行性的。自动加煤机系统在规模较小的锅炉中已经用了一个多世纪了，采用一次性给煤和燃烧。由于氧气到达可燃物质的途径有限，这些系统相对低效和不稳定。整体煤气化联合循环技术在燃烧前将煤转化成气态，从而无需使用昂贵的二次减排控制就实现了低排放。

86. 煤粉燃烧技术较为发达，全世界有成千上万个机组（国际能源机构洁净煤中心）。煤粉燃烧可用于燃烧多种煤，尽管并不总是适合某些灰分高的煤。

87. 流化床燃烧有一床惰性材料，通过一个孔板或炉排从下面喷射的预热空气使惰性材料搅动或“流化”。其结果是气体和固体的猛烈混合。这个很像发泡液体的翻滚动作提供了有效的化学反应和热传递。通过空气分段供给、添加石灰石以及约 750-950°C 的低燃烧温度，流化床燃烧向大气排放的污染物一般相对较低。流化床燃烧尤其适用于高灰分煤和质量各异的燃料（欧洲监测与评价计划/欧洲环境署，2009 年；欧洲委员会，2006 年）。但是，它有废物流较大的缺点，因为不能像使用煤粉燃烧的烟气脱硫石膏一样，使用脱硫过程的产物。

88. 电厂中的燃烧将存储在燃料中的化学能量转换成电或热，或同时转换成电和热。在利用释放的能量方面，热电联产发电厂的效率更高，而在老式的自动加煤机发电厂中，

根据燃料和具体技术的不同，损失到环境中的总能量可能高达燃料中化学能量的 70%。在一个现代的高效发电厂中，损失降至燃料中所含化学能量的大约一半。在一个热电联产发电厂中，在燃料中的更多能量以电或热的形式传递给了最终用户（用于工业过程、住宅采暖或类似用途）。欧盟大型火力发电厂最佳可行技术的参考文件设定的热电联产燃煤效率的标准为 70%-90%（低发热值）。

5.1.3. 燃煤过程中的控制措施

89. 一个最主要的措施是减少燃料中的汞含量，例如通过选用天然汞含量较低的煤炭、对煤炭进行预处理、或采用燃料替代方案（例如用天然气或可再生能源替代煤炭）。另一个减少排放的常用方法是提高工作效率，减少所需煤量，从而减少汞和其他污染物的最终排放。要控制燃烧阶段后的汞排放，可采用多种大气污染控制措施和针对汞的控制措施。这些备选方案简要概述如下：

煤炭的预处理

90. 除了煤的质量和汞含量以外，煤内汞的化学组成和性质也会影响燃煤时的汞排放。来自不同地理区域的煤可能会有非常不同的特性。煤的主要分类为无烟煤、生煤、亚生煤和褐煤，其中无烟煤的碳含量和能量值最高，褐煤最低。在另一个可供选择的命名系统中，含碳量最高的煤有时被称之为“硬煤”；含碳量最低的煤被称之为“褐煤”⁶。

91. 要减少发电厂的汞排放，可以在燃烧前利用煤炭处理技术来实现。考虑到发电厂的效率和除汞，煤炭处理技术包括常规洗煤、针对汞含量选煤、配煤和煤添加剂。

92. 虽然洗煤/煤处理可显著降低某些煤炭的汞排放，但它们不足以用作降低所有煤种的汞排放的可靠方法。主要为了降低生煤含硫量的洗煤，也能减小汞浓度，这是相对于地下浓度而言的。根据煤炭中硫化物的汞含量及脱硫效率不同，去除效率也各不相同（Kolker 等人，2006 年，在 Sloss 中，2008 年）。其他的选煤过程，例如泡沫浮选法、选择性聚团法、旋流法以及化学方法，也都是以脱硫为目的的，因此汞的降低是一个附带好处。在这些过程中，汞的减少从 10% 到最高 70% 不等，平均 30%，基于能量当量计（Sloss，2008 年）。

改进操作程序

93. 工厂效率的提高（例如：以降低生产成本为目的）可涉及一些节约燃料（煤炭）的措施，结果也减少了汞的排放量。在燃煤发电厂中最常用的一些措施包括：采用新式燃烧器、改进空气预热器、改进省煤器、改进燃烧措施、短循环最小化、气侧导热表面沉积最小化、空气渗透最小化以及升级涡轮机。另外，运行与维护方法对工厂绩效有重大影响，包括效率、可靠性和运行成本。在运行与维护良好的发电厂，其热耗率的恶化较

⁶ 国际上采用不同的系统对煤进行分类和命名，主要是依据煤在从泥煤成熟到无烟煤（即煤化）时所经历的变化程度。低煤阶煤，例如褐煤和亚生煤，一般较软，是无光泽、泥土样易碎物质。它们的特点是含水量高、含碳量低，因此能量含量较低。高煤阶煤一般较硬，强度更大，通常具有黑色玻璃光泽。它们含有更多的碳，含水量较低，能产生更多能量。无烟煤是煤阶最高的煤，具有相应的更高碳含量和能量含量，更低的含水量。另一个命名系统把低煤阶的煤叫做“褐煤”；把最高煤阶的煤叫做“硬煤”或“黑煤”。

慢；因此。运行与维护方法本身会影响煤炭的使用和汞的排放。良好的运行与维护实践应该在电厂的日常运行中给予持续关注。然而，现有煤粉燃烧发电厂的最大效率只能在40%左右，只有升级到新的超临界锅炉，才能获得进一步改进。

在燃煤设施中共同控制汞

94. 第三章中描述的多污染物控制技术广泛应用于燃煤设施中。对于燃煤设施中现有控制技术的效果以及关于汞捕集的附带效果，对已经报告的情况，Sloss（2008年）进行了汇编，其概况见表7。这个表显示，特定控制组合的汞捕集范围可能相当大，捕集的程度还取决于煤的质量（生煤、亚生煤或褐煤）。因此，要对大气污染控制设备附带的汞捕集效果进行评估，必须针对具体的工厂，要包括关于燃料质量、烟气组分以及安装的空气控制设备的具体详情等信息。

表7. 燃煤发电厂大气污染控制及其汞捕集效率（百分比）示例，改编自Sloss（2008年）。PM=颗粒物；SO₂=二氧化硫；NO_x=氮氧化物。

颗粒物控制	生煤*	亚生煤*	褐煤*
CS——静电除尘器	0-63	0-18	0-2
HS——静电除尘器	0-48	0-27	- ^a
袋式除尘器	84-93	53-67	-
颗粒物与二氧化硫控制			
CS——静电除尘器+湿式烟气脱硫	64-74	0-58	21-56
HS——静电除尘器+湿式烟气脱硫	6-54	0-42	-
袋式除尘器+干式洗涤器	很高		较低
袋式除尘器+湿式烟气脱硫	62-89		
氮氧化物、颗粒物与二氧化硫控制			
选择性催化还原+喷雾干燥器+袋式除尘器	94-99	0-47	0-96

CS——冷侧；HS——热侧；ESP——静电除尘器；FF——袋式除尘器；FGD——烟气脱硫；SCR——选择性催化还原。

*范围基于在美国设施中开展的一组数量有限的测试。

^a - 无数据。

95. 为了开发燃煤汞排放的控制技术，美国做了大量的工作，包括根据煤的类型、吸附剂和其他添加剂的类型、温度和运行条件，针对汞控制装置的控制效率，开展了广泛而全面的试验。这些试验的结果在环境署2010年（制订中）和Sloss（2008年）中进行了总结。请注意，在第4.3节中提到的几十个设施中已经采用了汞控制。

96. 最近对大气污染控制装置的除汞情况进行的一些调查表明，效率在68%至91%，以韩国火力发电厂的汞去除效率最高，伴随高效的大气污染控制（主要是选择性催化还原、冷侧——静电除尘器与湿式烟气脱硫）（Kim等人，2010年；Pudasainee，2009年）。

燃煤设施中专门针对汞的控制

97. 除了因其他的大气污染控制技术而附带的除汞效益外，专门针对汞的控制能够并正在美国广泛应用，已实现商业规模上的应用。

98. 在设计针对汞的控制技术时，通常是基于添加一个吸附剂（例如活性炭）来吸附汞，以此提高吸收能力。最初未处理的吸附剂对于劣质煤不是很成功，因为在烟气中元素汞的含量更高，更难捕集。但是，现在有了经过化学处理的吸附剂，例如用溴和氯等卤素来处理。这些吸附剂将较难捕集的元素汞转变成了较易捕集的二价（氧化）形式，从而在所有类型的煤中获得较高的除汞率。

99. 为了控制汞而向燃煤锅炉的烟气中喷入吸附剂的方法从二十世纪九十年代起就在德国被应用于锅炉（Wirling, 2000 年），在美国也在几个全尺寸商业系统上进行了示范（政府问责局, 2009 年；东北州际协调空气使用管理机构, 2010 年）。可以把吸附剂添加在现有的颗粒物控制装置的上游，然后在飞灰部分收集汞。还有一个替代技术是在现有的颗粒物控制装置后喷入吸附剂，在这种情况下，需要一个额外的颗粒物控制装置，用来捕集含汞的吸附剂（例如：有毒排放控制过程[TOXECON™]配置）。吸附剂喷入的第三个示范配置是 TOXECON II™，它是把吸附剂喷入现有静电除尘器中段。电力研究所开发并获得专利的 TOXECON™ 法包括一个次级颗粒控制装置（袋式除尘器），经证实能将汞的排放减少 90% 以上。大部分飞灰因此能在汞控制步骤前收集，有更广泛的用途和可销售性。含有活性炭和汞的少得多的飞灰将在第二步中收集。

100. 影响具体吸附剂汞捕集性能的一些因素有：（Pavlish 等人, 2003 年与 Srivastava 等人, 2006 年；NESCAUM, 2010 年）：

- 吸附剂的物理和化学特性
- 吸附剂的喷入率与分布
- 烟气参数，如温度、卤化物（例如：氯化氢和溴化氢）浓度以及三氧化硫（SO₃）浓度
- 现有大气污染控制配置

101. 在《环境署过程优化指导文件》（制订中）和 Sloss（2008 年）中总结的大部分试验中，吸附剂是在现有颗粒物控制的上游注入的。一些主要的结论是：

- 汞的捕集量随着加入的吸附剂的增多而增多，但在有些情形中发现有最佳数量，进一步增加吸附剂只会产生很小的效果。
- 较低的静电除尘器入口温度（<150°C），有利于较高的汞捕集量。
- 采用未处理的活性炭，控制效率取决于氧化汞在烟气中的形成，一般来说煤中氯浓度高时更有利于氧化汞的形成。采用卤素处理过的碳，可获得更高的效率，尤其是当电厂使用的是低氯含量的低阶煤。

102. 对于利用活性炭喷入进行汞控制，一个已经确定的不利方面是汞（以及添加的活性炭）最终会含在飞灰中，从而可能降低灰的安全处置与使用潜力，例如建筑施工以及水泥制造。为了避免这一点，可以安装第二个颗粒去除装置，在常规颗粒控制装置之后再添加活性炭，就像上述 TOXECON™ 法一样。

103. 为了加强烟气中汞的氧化，把溴作为一种燃烧前添加剂、以相当于 25 ppm 的浓度添加，已经对此进行了测试。在一个燃烧亚生煤、采用选择性催化还原与湿法烟气脱硫

的 600 兆瓦发电厂中，持续地观察到汞的排放量减少了 92-97 %（Rini 与 Vosteen，2009 年）。在 14 个使用低氯含量燃煤的发电厂中进行了类似试验，结果显示在煤中添加相当于 25 至 300 ppm 的溴时，烟气中 90% 以上的汞发生了氧化。（Chang 等人，2008 年）。在某些情况下，用卤素，尤其是溴，作为燃烧前添加剂，汞排放有可能会减少 80% 以上（环境署，制订中，2010 年）。

5.1.4. 燃煤发电厂所涉控制技术的成本和效率

煤炭的预处理

104. 煤炭的预处理包括以提高燃烧过程中的性能和能量输出为目的或以降低有害物质排放为目的的程序（例如：压碎、干燥和洗煤）。有时候也会添加化学试剂或进行配煤，以获得更好的性能。洗煤主要是一个降低煤中灰分和硫含量的措施，但也可以降低汞含量。煤炭预处理的直接成本因而难以确切地分配给汞控制措施。配煤（即与汞含量较低的其他煤炭或燃料混合）的成本取决于混合燃料的可得性以及市场需求（环保署，2005 年）。

改进的操作程序

105. 工厂设计和运营变化对于工厂的性能和可靠性均是有益的，因此可减少运营与维护成本。关于这些成本和减少的成本，还没有发现足够合格的数据可用。

在燃煤设施中共同控制汞

106. 国际能源机构洁净煤中心可提供关于控制技术和相关成本的大量评审（Sloss，2008 年）。

107. 在估计汞排放控制的成本时，一个重要方面是具体发电厂的现有条件。现有条件是包括配备有现代大气污染控制装置的发电设备还是十分简单的排放控制装置，除汞的成本将有很大不同。对现有排放控制装置进行优化可减低汞排放，但没有通用成本估算值。

108. 美国环保局制订了一个手册（煤公用事业环境成本手册），用于评估在发电厂内控制大气污染（包括汞）的成本。该方法可用来评估十二种去除二氧化硫、氮氧化物、二氧化碳和汞的不同技术的安装成本，或者作为单独的部分，或者作为一个综合的大气污染控制系统 <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r09131/600r09131.html>。

109. 根据在欧洲研究项目欧洲重金属排放的综合评估中执行的控制成本评估，开发了一个不同控制备选方案的成本和效率数据库。针对选定的多污染物减排技术每个活动的年化成本及其在燃煤领域降低汞排放的效率也发表在 Pacyna 等人 2010 年中。年度总成本⁷（即年度投资成本加上运行与维护成本）的范围为：从估计汞去除效率大于 63%、安装了静电除尘器的 1.3 2008 年美元 /兆瓦电能，至估计汞去除效率大于 93%、安装有更先进的空气污染控制（在洗涤器中去除颗粒与硫）的 2-5-5 2008 年美元/兆瓦电能。这些结果代表了欧洲的情况，也许不能移植到其他区域。

⁷ 资本成本是假定技术寿命为 20 年得出的，包括了 4% 的折现率。

110. 在最佳可行技术层面（颗粒控制+烟气脱硫），减污设备的资本成本占燃煤发电厂总成本（不含燃料成本）不足 5%。如果电厂成本还包括煤的成本，则在 3-3.5%的水平。估算的依据来自于（Rokke, 2006 年），新的燃煤发电厂的生产成本为 60 美元/兆瓦，包括 14.10 美元/兆瓦的燃料成本、以及 2.28 美元/兆瓦的最佳可行技术总成本。

燃煤设施中针对汞的控制措施

111. 煤炭燃烧中汞排放的减少是实施常规大气污染物（颗粒物、二氧化硫和氮氧化物）控制技术以及去除重金属的专门技术的影响。美国政府问责局-10-47（2009 年）报告的美国发电厂的例子以及（美国）东北州际协调空气使用管理机构（2010 年）的报告表明，许多发电厂采用碳注入，以相对较低的成本实现了商业规模的汞控制，但是在有些情况下可能需要替代控制措施。也有一些例子显示，常规的大气污染控制装置足以达到 90% 以上的汞控制。有些锅炉类型不用其他控制措施，也能达到这种除汞水平。购买和安装碳（以及吸附剂）喷入系统和监测设备的成本从每个电厂 120 万至 620 万美元（2008 年美元），显著低于用于控制颗粒物、二氧化硫和氮氧化物的其他类型的大气污染控制费用。相比之下，用于二氧化硫控制的湿式洗涤器的平均投资（购买与安装）成本每台锅炉超过 8600 万美元（2008 年美元）。除了吸附剂喷入系统之外，还投资了袋式除尘器的发电厂，其投资费用从 1270 万美元至 2450 万美元（2008 年美元）。实际的除汞量在这个研究中没有报告（政府问责局，2009 年）。但是，在东北州际协调空气使用管理机构（2010 年）的报告中，有关于美国一些燃煤发电厂汞控制效率的数据。

112. 由美国能源部资助的国家能源技术实验室的研究活动发现，用于除汞的吸附剂喷入成本有了显著进步，可降低整体安装与运营成本。能源部于 2007 年公布的一份经济分析表明，当使用更有效的处理过的吸附剂时，由于吸附剂的喷入率降低，汞控制成本可以大幅低于最初的估计值，甚至抵消了处理过的吸附剂的较高成本。分析表明，在能源部的实地试验场，采用活性碳喷入、除汞率为 90% 的汞排放控制成本为每去除一磅汞从不足 10,000 美元至 30,000 美元（相当于 22,000 美元至 66,000 美元/千克）（Feeley, 2008 年）。这些能源部试验场采用的是经化学处理的（溴化）活性碳。虽然汞控制系统的投资成本较低，但主要费用来自于吸附剂自身的成本。一般而言，要实现相同的除汞水平，溴化碳的注入率（吸附剂质量/烟气流速）要比未处理的碳低很多。因此，尽管经化学处理的碳要比未处理的碳更贵，但使用经化学处理的碳可以大幅降低除汞成本。

113. 从大气污染控制装置中捕集的飞灰可重新用于工程用途，具有经济价值。添加活性碳等吸附剂可影响飞灰（以及石膏）的质量，有可能妨碍销售。对于销售飞灰用于有利可图的再利用的发电厂而言，汞控制成本也会因此受到潜在收入损失的影响。东北州际协调空气使用管理机构的一份报告最近总结了能源部的试验，这个报告显示，如果将飞灰收入损失考虑在内，可观察到除汞成本增加了 170-300%（美国能源部，2006 年；与东北州协调空气使用管理机构，2010 年）。但是，这个经济影响导致了以开发混凝土友好型吸附剂为形式的技术进步，应当能最终抵消该成本。

114. 美国能源部对一个使用低硫、低氯、高碱煤炭、装有喷雾干燥器吸收器和袋式除尘器的、360 兆瓦机组燃煤发电厂，估算了活性碳喷入的投资成本（美国能源部，2006 年）。对于这个机组，投资成本（定义为总资本要求[TCR]）被确定为 3.6 美元/千瓦（0.03 美元（2010 年）/兆瓦电能）。在这个例子中，如果除汞率为 90%，估计总运行与维护成本为 600,000 美元/年（0.21 美元（2010 年）/兆瓦电能）。运行一个活性碳喷入系统的额外成本属于副产品影响，或处置成本加上未实现的飞灰销售收入（由于飞灰的活性炭污染）。这个 360 兆瓦发电机组的副产品影响估计为 1,430,000 美元/年。

115. 关于不同大气污染控制技术配置的投资与运行成本，更多例子见表 4。

116. 假设一个配置了选定的现有设备的发电厂，要增加针对汞的排放控制装置，其成本见表 8。成本估计值按照 Sloss (2008 年) (80%除汞率) 的方式列出，并基于国家能源技术实验室报告的、东北州际协调空气管理机构的报告所总结的活性碳喷入成本。这些国家能源技术实验室的成本是基于其第二阶段实地试验计划，提出了针对不同煤炭、配置以及汞控制水平的几个成本情景。对于吸附剂技术 (活性碳喷入) 而言，分析包括了生煤、亚生煤和褐煤在 50%、70%和 90%控制时的情景；对于氧化技术 (催化剂与添加剂，例如溴化钙) 而言，分析包括了亚生煤和褐煤减少 73%汞排放的情景 (东北州际协调空气使用管理机构，2010 年)。一般情况下，添加溴 (溴化钙) 的成本取决于化学成本，例如吸附剂技术；而催化剂一般取决于投资/资本与再生成本 (东北州际协调空气使用管理机构，2010 年)。

117. 根据表 8 中的数据，可进行假设计算。对于一个仅配置了静电除尘器的 220 兆瓦发电厂而言，引入活性碳喷入技术，将会以 0.13-1.20 美元/兆瓦电能的成本，每燃烧一吨含有 0.2 ppm 汞的褐煤，去除 180 克 (90%) 汞。通过添加溴，一个配置了静电除尘器+烟气脱硫配置的 500 兆瓦发电厂，将以 0.08 美元/兆瓦电能的成本，每燃烧一吨含有 0.1 ppm 汞的亚生煤去除 73 克 (73%) 的汞，或每燃烧一吨含有 0.2 ppm 汞的褐煤去除 146 克汞。

表 8. 对于针对汞的排放控制的不同配置，投资与运行维护成本以及汞去除效率示例。基于 Sloss (2008 年) / Curs (2007 年) 与东北州际协调空气使用管理机构 (2010 年) 的数据

现有设备配置 1=褐煤 2=亚生煤	新设备配置	资本成本 (2010 年美元/ 兆瓦电能)	运营维护成本 (2010 年美元/兆 瓦电能)	汞去除效率 (百分比) / 发电厂容量 (兆瓦)	文献
旋风静电除尘器	+活性碳喷入	0.15	4.06	80 /	Sloss, 2008 年
旋风静电除尘器+ 烟气脱硫	+活性碳喷入	0.15	4.06	80 /	Sloss, 2008 年
干法洗涤器+袋式 除尘器	+活性碳喷入	0.02	0.32	80 /	Sloss, 2008 年
静电除尘器 ¹	+活性碳喷入	0.04	0.09-1.16	90 / 220	东北州际协调空 气使用管理机 构, 2010 年
静电除尘器 ²	+活性碳喷入	0.06-0.07	0.14-1.06	90 / 240 与 140	东北州际协调空 气使用管理机 构, 2010 年
静电除尘器+湿法 烟气脱硫 ¹	+溴化钙	0.01	0.07 ⁸	73 / 500	东北州际协调空 气使用管理机 构, 2010 年
静电除尘器+湿法 烟气脱硫 ²	+溴化钙	0.01	0.07	73 / 500	东北州际协调空 气使用管理机 构, 2010 年
静电除尘器+湿法 烟气脱硫 ¹	+铅催化剂	0.02	不详	73 / 500	东北州际协调空 气使用管理机

⁸ 运行与维护费用是根据对第 29 段研究 (KNX 技术) 每年 160 万美元的专业报告。

现有设备配置 1=褐煤 2=亚生煤	新设备配置	资本成本 (2010年美元/ 兆瓦电能)	运营维护成 本(2010 年美元/兆 瓦电能)	汞去除效率 (百分比)/ 发电厂容量 (兆瓦)	文献
					构, 2010年
静电除尘器+湿法 烟气脱硫 ²	+金催化剂	0.03	不详	73 / 500	东北州际协调空 气使用管理机 构, 2010年

5.2. 有色金属生产

118. 有色金属生产包括锌、铜、铅和金等的生产。有色金属是从开采的矿石中生产出来的，要经过几个加工过程的处理以提取最终产物。

5.2.1. 有色金属生产过程中的汞来源和排放

119. 有色金属生产过程中的汞排放主要取决于所用有色金属矿石中的汞含量、工业技术类型以及有色金属生产中采用的控制技术。汞作为一种杂质出现在许多硫化物矿石中。在这些矿石中，汞可能取代元素锌、铜、镉、铋、铅和砷。在一些金属矿石中，汞也作为元素汞或与其他金属的合金（汞合金）出现。在有些这样的矿床中，汞含量高到足以将汞作为一种副产品进行有目的的汞生产。据估计，全球平均 123 毫克汞 / 千克锌矿石的含量使得锌的生产过程可以产生出 600 吨的汞（Hageman 等人，2010 年，及其中的参考资料）。大多数与铜相关的汞是在大型硫化物矿床中发现的。汞是在矿床形成过程中锌浓度和环境条件的共同作用产物。汞常被发现与金矿有关，虽然汞在金矿中的含量差别很大，从小于 0.1 毫克/千克到大于 100 毫克/千克不等（Hagemann 等人，2010 年及其中的参考资料）。

120. 采用的工业技术将在很大程度上决定矿石中所含汞的命运。如果在矿石的初步处理中采用高温过程（例如焙烧与烧结），则汞将被释放到气相；而如果采用电解过程，则汞将会保留在液相中（图 5）。

121. 在高温过程中，精矿中的大部分汞将从氧化中蒸发。蒸发的汞随着气流流动，通过颗粒过滤器、干式和湿式静电除尘器、或洗涤器净化，最后得到含汞的干燥固体废物或泥状物质（环境署工具包）。由于大部分矿石都富含硫，因此有色金属厂通常也一起生产硫酸。硫和汞一样，在焙烧/烧结步骤的最初氧化过程中从精矿中释放出来，含有汞的含硫气流被传输到硫酸装置。可以安装针对汞的去除技术，确保生成的硫酸中汞的含量足够低。焙烧或烧结剩下的汞将随残留物一起再循环利用或沉积。

122. 作为电解过程的一部分，浸出过程可得到浸出的含汞液体和固体残留物。部分剩余的汞可随沉淀物由净化过程进一步处理。电解步骤的汞排放没有明确的数据（环境署工具包）。

123. 熔炼过程可包括原则上可代表汞来源的再生物质。熔炼炉给料中的汞将被挥发，进入气流。

124. 人们认为，在加热过程中所用燃料的汞排放不重要。

125. 有色金属初级生产的主要步骤以及汞在这些步骤间的流动，可在图 5 中观察到。

5.2.2. 有色金属生产技术

126. 有许多技术用于有色金属的初级生产。主要分为使用比较广泛的湿法冶金（电解）工艺和火法冶金（热）工艺。

127. 火法冶金工艺用热的方式来处理矿物、冶金矿石和精矿，以提取金属，因此大部分的火法冶金工艺都需要能量输入，以维持工艺发生时的温度。能量通常是以化石燃料燃烧的形式提供的。

128. 在湿法冶金工艺中，采用化学来从矿石、精矿、循环使用的物质或残留物质中回收金属。

129. 图 5 显示的步骤中采用了不同的技术和技术组合。关于有色金属生产的各种技术，详细描述请参见网址 <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/> 上的欧盟委员会有色金属行业参考文件草案。

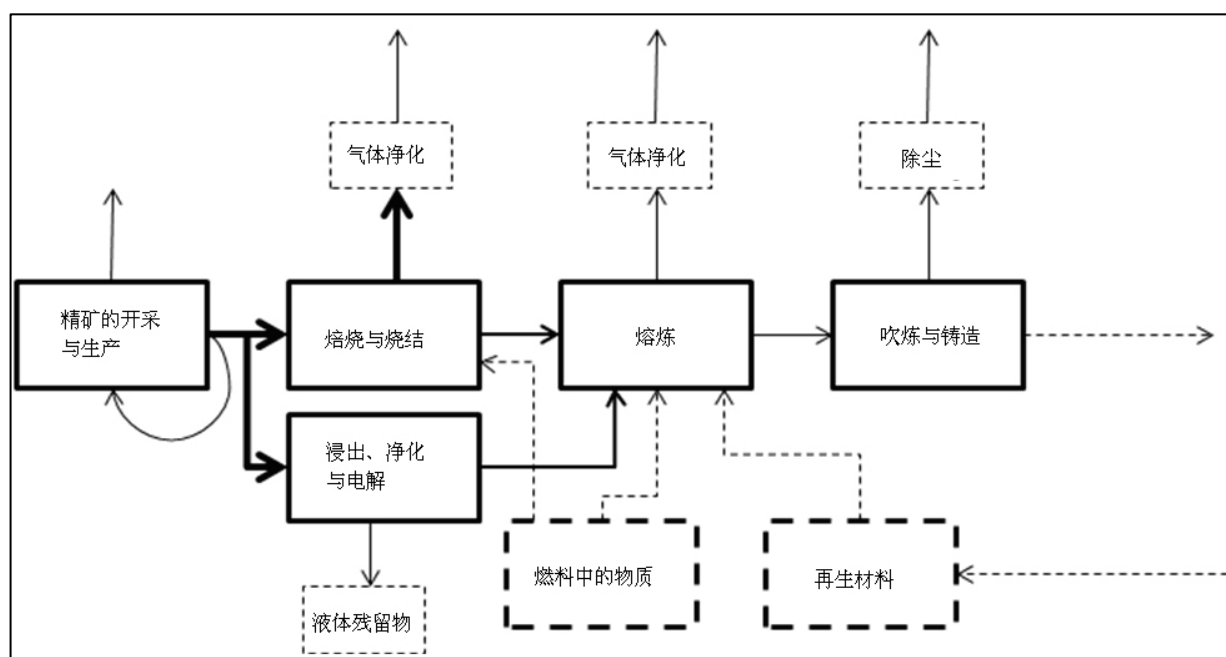


图 5. 有色金属生产的主要步骤以及这些步骤内的汞流动。焙烧/烧结与熔炼为高温过程，在这些过程中，汞可能会首先排放到大气中。

5.2.3. 有色金属生产过程中的控制措施

130. 有色金属矿石（例如铜、锌、黄铁矿、铅和金）通常含有作为痕量成分的汞。有色金属生产设施中采用的是第 4 章中所述的通用大气污染物控制技术。大气污染控制也可在不同程度上捕集烟气中的汞。除了常用大气污染控制技术的附带除汞外，人们也开发了专门的汞去除技术，用于有色金属的生产。为有色金属的生产设施开发汞控制技术有两大驱动因素：降低大气污染物排放的目标以及防止汞污染硫酸，因为可以在含硫矿物焙烧后生产硫酸。有些汞将通过与矿石中已经存在的硒或硫酸盐沉淀析出（例如在用于大气污染控制的洗涤器或过滤装置中）从烟气中被去除。

131. 在中国一个湿法锌冶炼厂的测量值（Wang 等人，2010 年）显示了处理来自焙烧炉的废气的大气污染控制装置的汞去除效率。各个步骤测得的汞去除效率用一个平均百

分比减小值 \pm 一个标准差来表示。在废热锅炉、旋风分离器和静电除尘器之后，气体进入烟气净化步骤，这个步骤包含一个湿法洗涤器，使用循环利用的稀释硫酸。这个烟气净化设备的汞去除效率约为 $17.4\pm 0.5\%$ 。下一个步骤是电除雾器，目的是为了去除水蒸汽，可去除 $30.3\pm 10.9\%$ 的汞。汞回收塔的汞去除效率为 $87.9\pm 3.5\%$ 。该回收塔采用的是博利登（Boliden Norzink）工艺，在进入硫酸装置前从气体中去除汞。硫酸装置自身也从进入硫酸装置的气体中去除了 $97.4\pm 0.6\%$ 的汞。

132. Hylander 和 Herbert（2008 年）在有色金属生产的汞排放清单中假定，如果一个铜、铅或锌的火法冶炼厂中有硫酸装置，假定要防止汞污染硫酸产品，则汞去除效率应在 95-99%之间。如果只安装了静电除尘器和/或洗涤器，如果静电除尘器和洗涤器的效率高，则假定值为 80%的汞去除效率；如果不是那么高，则为 40%。如果安装了有限的或没有安装脱硫装置，也没有针对汞的控制，则假定汞去除效率为 10%。

133. 有几种不同的方法可用来专门去除有色金属行业烟气中的汞。将汞转化为固体化合物、以便通过沉淀、洗涤或过滤去除汞的工艺包括 Outokumpu 与 Bolkem 工艺（其中汞以固体硫化物形式沉淀）和博利登工艺（其中汞以氯化亚汞的形式沉淀）。可供选择的方法包括碳或硒过滤器（用于低浓度处理）或硒洗涤器（环境署工具包，2010 年）。其他信息见 http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/GasCleaning/gcl_hg.htm。

134. 提交的问卷回复信息显示，在美国工业黄金的生产中采用了一系列针对汞的去除技术。大部分工厂用袋式过滤器或静电除尘器来控制颗粒物，有些工厂采用湿法洗涤器等控制二氧化硫，而这些方法是上述两类方法之外的选项。专门针对汞的控制包括：与各种类型的碳吸附床或过滤器配合使用的汞冷凝器，汞去除效率为 93-99.6%。一些工厂也安装了洗涤器，例如获得较高汞去除效率的氯化亚汞或次氯酸盐注入洗涤器。

135. 关于工业黄金的生产，内华达州环境保护局在 2006 年实施了内华达州汞控制计划，以降低贵金属操作（即黄金和白银的生产设施）中向大气排放的污染物。虽然，美国一些工业黄金的生产设施已经有了有效的针对汞的控制，但内华达州汞控制计划将要求内华达州内所有使用热过程（例如：熔炉、焙烧炉、高压釜、窑炉、电积金属法、蒸馏罐等）的金矿和银矿生产设施都采用最佳可得的汞大气排放控制技术。

136. 另外，美国正在制定关于工业黄金生产中汞排放的国家法规。如果计划于 2010 年 4 月 28 日征求公众意见的这个法规获得全面实施，加上内华达州汞计划，美国估计来自该行业的全国汞排放将会比 1999 年的排放水平降低约 94%，比潜在的、未加控制的排放水平低 96%以上。矿石预处理过程（例如焙烧）中的汞排放与未加控制的情形相比，将减少 94%，与 2007 年的情形相比将减少 64%。在随后的黄金生产步骤中，例如：窑炉、蒸馏罐和熔炼，估计与未加控制的情形相比要减少 98%-99%；与 2007 年的情形相比减少约达 90%。

137. 可得出以下结论：有色金属行业中有许多不同的除汞方法。但是，由于有色金属矿石多种多样，每种矿都可能有很不相同的特征，因此几乎不可能概括其可行性、成本等（环境署，2006 年）。

5.2.4. 有色金属生产所涉控制技术的成本和效率

138. 大型有色金属冶炼厂采用高效空气污染控制装置来控制焙烧炉、熔炼炉和转炉的颗粒和二氧化硫排放。汞大多以气态的形式排放，因此，袋式除尘器或静电除尘器在元素去除方面作用甚微。通过在硫酸厂（通常是冶炼厂的一部分）吸收二氧化硫实现了对

烟气排放的控制。干式静电除尘器、湿法洗涤器、汞去除与湿法静电除尘器的组合在欧盟被认为是最佳可行技术（欧盟委员会，2001年a）。剩余的排放量取决于矿石中的汞含量。

139. 据报道，在针对有色金属生产的汞去除技术中，博利登（Boliden-Norzink）工艺的投资和运营成本最低，尽管运行洗涤器有一些能源成本。（环境署，2006年，第5.3章，再循环（有色）金属的生产）。没有发现有关博利登（Boliden-Norzink）工艺的成本数据。正如在第5.2.3节中提到的一样，硫酸工厂本身也有从气体中去除汞的无意效果。

140. 选定的多污染物减排技术每生产一吨金属的年化成本（表示为特定活动指标）及汞减排效率在欧洲重金属排放的综合评估项目（<http://espreme.ier.uni-stuttgart.de>）内进行了分析。汞去除效率潜力较低（5-10%）的排放控制装置（例如：静电除尘器）也比较便宜，每年的总成本为每生产一吨金属在0.1和0.2 2008年美元之间。对于原生铅和原生锌的生产，具有类似汞减排潜力的袋式除尘器比静电除尘器几乎要贵一个数量级。在原生铜生产部门，这一差距甚至更大，达到每生产一吨铜的年总成本为15.0至30.0美元。

141. 针对汞的措施，例如在原生铅和原生锌生产过程中与静电除尘器、袋式除尘器和烟气脱硫配合使用的活性炭喷入，与仅用静电除尘器/烟气脱硫或袋式除尘器/烟气脱硫相比，年度总成本增加两倍（Pacyna等人，2010年）。

142. 得益于美国环保局制定汞管理法规的提案过程，有关黄金生产的汞减排成本与效率的详细信息可从美国获得。内华达州工业黄金生产的成本和效率评估得出了采用气体冷却、颗粒物控制和博利登（Boliden Norzinc）氯化亚汞洗涤器能减排99.7%的估计值。对于已经使用10年左右的控制装置，安装成本约为350万美元，运营成本估算为660,000美元/年。对于其他热装置，在黄金生产行业中诸如窑炉、蒸馏罐和熔炉，最佳控制是注入硫的碳过滤器，能获得大约93%至99%的减少量。在一个设施（体积流速为2500立方英尺/分钟）中安装一个碳吸附系统的成本估算约为184,000美元。这个碳吸附器每年的人工成本估计约为10,000美元，估计换碳成本为每年54,000美元。更多详情参见内华达州环保处局网站<http://ndep.nv.gov/baqp/hg/clearinghouse.html>。

5.3. 水泥生产

5.3.1. 水泥生产过程中的汞来源和排放

143. 汞天然存在于用于水泥生产的原材料中（例如石灰岩），同时也存在于过程中用到的燃料中，从而导致汞进入水泥窑系统。

144. 水泥生产的天然原材料，例如石灰岩、白垩泥灰岩、页岩或黏土是从采石或采矿作业（凿岩、爆破、挖掘、搬运、压碎）中提取的，然后在碾磨机或压床上压碎，并通过接受控比例混合的原材料获得化学上的均质。

145. 提取和制备过程中得到的生料（干粉或泥浆）送到窑炉内，经过热处理生成熟料。热处理涉及：1）干燥与预热、2）煅烧以及3）烧结。冷却后，熟料与石膏（CaSO₄）一起研磨以制得水泥。

146. 由于其特性，发电厂的灰料（飞灰与底灰）、高炉渣或其他工艺残留物（铁渣、造纸泥浆、硅粉、黄铁矿灰以及磷石膏）可以混合在水泥中。使用的飞灰可能含有汞（ $<0.002-0.8$ 毫克/千克，根据 Renzoni 等人，2010 年），但难以评估有多少汞通过这一途径进入到环境中。

147. 不管工艺类型和窑炉类型（例如：湿法窑和干法窑）如何，汞都会和汞含量随地区不同而不同的原材料以及汞含量各异的燃料进入窑炉内。汞在熟料制造过程中的主要输出预计发生在窑炉内，它会随着粉尘和废气一起离开窑炉。

148. 极少量未排放到大气中或未被排放控制设备捕获的汞会留在水泥窑粉尘或最终的水泥产品中。根据环境署工具包，汞在每吨水泥中的含量预计在 0.02-0.1 克之间，Renzoni 等人（2010 年）表示，从对于美国和加拿大的研究来看，平均值为每吨 0.014 克汞，而每吨德国水泥为 0.06 克汞，单个值的范围从低于检测限到远高于环境署工具包的范围不等。

149. 由于水泥生产包括能源密集型工艺，燃料使用构成了生产成本的很大一部分。各种各样的燃料被用来生成熟料制造过程中所需的热量，主要是粉煤（黑煤与褐煤）和石油焦、重燃油和天然气，但也有其他较为便宜的废燃料，例如切碎的市政垃圾、碎橡胶和废溶液等被广泛使用，可能会造成水泥生产中的汞排放（Pacyna 等人，2010 年）。根据有关水泥制造行业中的最佳可行技术的综合污染防治文件（欧盟委员会，2010 年），欧洲水泥行业 2006 年的燃料消耗主要是石油焦（39%）、煤炭（19%）或石油焦和煤炭的混合物（16%），但它们也使用燃油（3%）、褐煤和其他固体燃料（5%）、天然气（1%）以及不同种类的废燃料（18%）。根据美国对问卷的答复，煤炭（63%）和石油焦（21%）是用量最大的燃料，其次是各种类型的替代燃料（12%）、天然气（3%）以及少量其他化石燃料。根据对问卷的答复，石油焦在巴西是用得最多的燃料，但木炭与替代燃料也在使用。

150. 水泥生产中汞排放的来源可能是原材料中的杂质和采用的燃料。相对贡献在工厂与工厂之间以及国与国之间均不相同，是燃料还是原材料对窑炉中汞输入的贡献度最大，尚无定论。美国环保局一项针对波特兰水泥制造行业有害大气污染物国家排放标准的研究（环保局，2009 年）显示，在美国大约 55% 的窑炉中，非石灰岩的汞占了窑炉汞排放（即来自其他原材料或来自燃料）的 50% 以上。但应注意的是：在被调查的窑炉中，汞的来源高度易变。列日大学所作的一项研究得出了这样一个结论：在大多数情况下，在欧洲输入到窑炉系统中总汞的主要贡献因素是天然原材料，而不是燃料（Renzoni 等人，2010 年）。

5.3.2. 水泥生产过程中的控制措施

151. 降低水泥生产中汞排放的主要措施是谨慎选择和控制在进入窑炉的物质（欧盟委员会，2010 年），因此选择汞含量低的原材料和燃料是很重要的。另一个主要措施是确保工厂的高效运行，例如减少燃料或控制不同工艺阶段的温度和气流，从而利用控制穿过系统的汞流的可能性。在水泥生产中，通过与工艺过程整合的机制和运行条件，使水泥窑提高汞捕获能力，减少大气汞排放（Senior，2010 年；Renzoni 等人，2010 年）。

152. 例如：在干法窑系统内，通过让废气从预热器经过生料磨机中的原料干燥/研磨，加强颗粒对汞的吸附。生料磨机可以在线（运行中），也可以离线（关闭）。当生料磨机在线时，来自预热器的废气先穿过磨机，然后进入颗粒控制装置（图 6）。当磨机离线时，废气绕开生料磨机，冷却后直接进入颗粒控制装置。

153. 当生料磨机在线时，高含尘量以及更多的固体和气体间的接触时间可以在颗粒控制装置前让更多的汞吸附在固体上（Renzoni 等人，2010 年）。波特兰水泥协会开展了一个项目，包括烟囱排放数据的收集和评审（Schreiber 等人，2009 年），该项目得出结论：当生料磨机关闭时，预热器/预分解窑向大气排放的汞排放量明显更高，这是因为失去了生料磨机中新鲜研磨的颗粒的吸附能力。在水泥厂的操作中会定期关闭生料磨机。

154. 在窑炉系统中，挥发的汞在相对较低温度下（120-150°C）会凝结在原材料颗粒上（环境署工具包，2010 年）。当烟气温度足够低时，吸附在颗粒上的汞将会与颗粒一起收集在颗粒收集装置中。通常会在生产过程中循环利用颗粒控制装置中收集的灰尘（通常称之为水泥窑粉尘）（Senior，2010 年）。

155. 减少大气汞排放的方法之一是定期吹扫水泥窑粉尘，以便从系统中去除吸附在颗粒上的汞。这个措施的效率部分取决于从系统中去除的粉尘量以及在大气污染控制装置中的通常温度（Renzoni 等人，2010 年）。

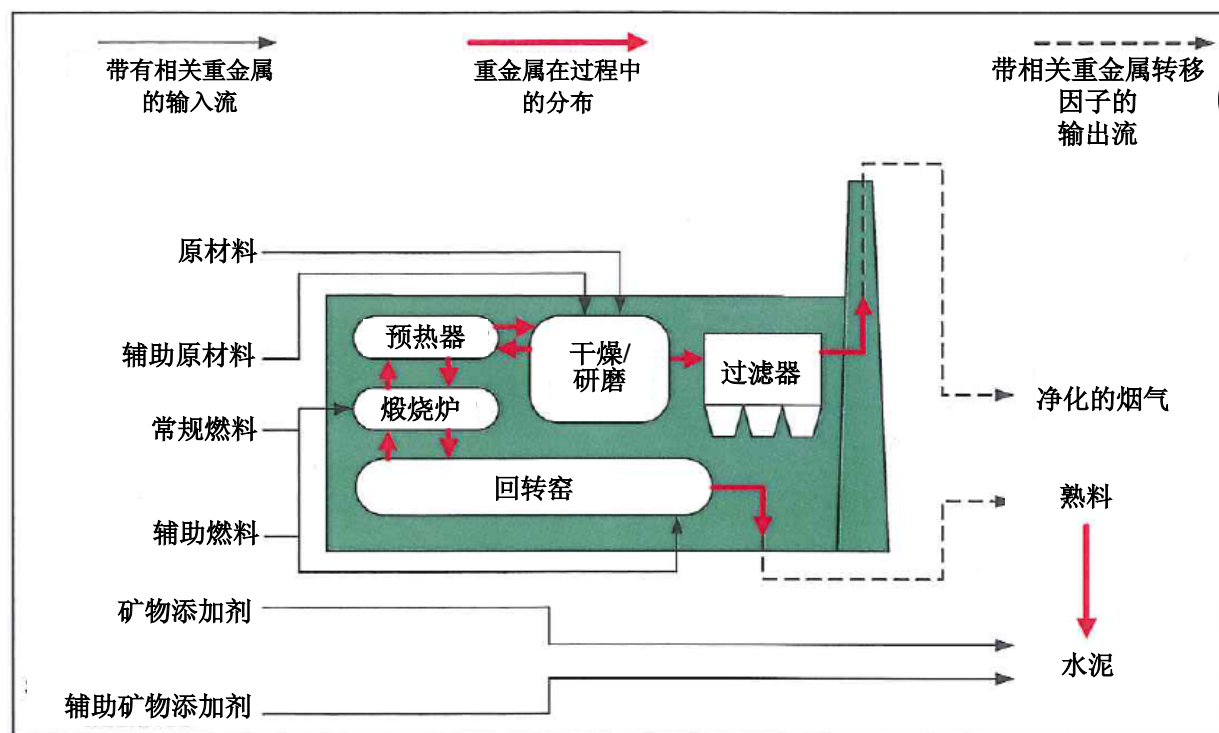


图 6. 干法中金属在带有预热器的水泥窑中的路径（欧盟委员会，2010 年及其中的参考资料）。

156. 从各国（关于各国提供资料的信息，参见附录 I）提交的资料来看，显然这些国家的水泥厂最常用的大气污染控制设备是各类颗粒控制装置。根据提交的资料，水泥厂中常用的是静电除尘器或袋式过滤器/袋式除尘器等颗粒控制（巴西、塞浦路斯、冰岛、英国和美国）。英国的一些工厂和美国的一些工厂也报告说使用了选择性非催化还原。在美国，一些工厂还安装了湿法或干法洗涤器，以去除二氧化硫。从提交的资料看，除了一个厂例外，没有发现任何其他水泥厂安装了针对汞的控制。美国通报有一个水泥窑目前正在运行针对汞控制的活性炭喷入系统。

157. 袋式除尘器或静电除尘器等减排技术在水泥厂很常用，但缺乏针对水泥窑的汞去除效率的资料。一般来说，可以预料的是，只要积极吹扫和处置水泥窑粉尘，窑炉内的汞去除效率可能会高于或比得上采用类似装置的发电厂等的汞去除效率。

158. 根据 Renzoni 等人，（2010 年），在水泥行业中测试过的排放去除技术包括活性焦（Polvitec）吸附和活性炭喷入。活性炭喷入比在燃煤发电厂中的更为复杂。因为水泥厂的常用做法是从袋式除尘器中循环利用收集的灰尘，将袋式除尘器用作原材料处理系统的一个不可分割的组成部分，所以最终会包含在所收集的水泥窑粉尘中的活性炭喷入是不可取的。必须小心地将该系统的温度控制在 200°C 以下，以确保适当的汞吸附，降低活性炭在袋式除尘器或固体处理系统中起火的风险。如果其他措施失效，则有一个备选方案是在主窑过滤器下游安装一个活性炭喷入系统并增加一个除尘装置（Renzoni 等人，2010 年）。

5.3.3. 水泥生产所涉控制技术的成本和效率

159. 在估计汞排放的控制成本时，一个重要方面是基准条件的假设。基准条件是安装有现代大气污染控制的水泥厂与基准条件是安装有十分简单的排放控制的水泥厂的汞去除成本，将有很大的不同。有些控制，例如静电过滤器，可被预计具有较低的汞去除效率，因为气体中元素汞（Hg⁰）的含量较大。

160. 选定的多污染物减排技术每生产 1 吨水泥的年化成本及其汞减排效率如下所述。

161. 根据从关于水泥、石灰和氧化镁生产的最佳可得技术参考文件中获得的资料（欧盟委员会，2010 年），选定的多污染物减排技术的平均年化成本⁹（资本成本在括号内）在使用静电除尘器和袋式除尘器时每生产 1 吨水泥¹⁰分别为 0.56（0.34）2010 年美元和 0.69（0.32）2010 年美元。只引入干式或湿法洗涤器将会导致平均成本为 1.94（1.12）和 2.63（0.81）2010 年美元。如果组合使用袋式除尘器和洗涤器，则可获得较高的去除效率（最高达 90%），平均成本为 2.63（1.13）2010 年美元。

162. 美国环保局关于在水泥窑安装控制汞的活性炭喷入的成本分析包括一个抛光囊式集尘室。大部分水泥窑粉尘会回到窑炉中循环利用。在主囊式集尘室上游喷入活性炭会导致水泥窑粉尘中的含碳量增加，如果不小心控制该过程的话，会使得水泥窑粉尘不适合在窑炉中循环利用。在水泥生产单元中采用针对汞的控制，其成本估算采用的是最初为电力设施的锅炉制定的成本。资本成本系数为每吨熟料 1.81 美元至 3.00 美元，平均值为每吨熟料 2.41 美元。总年化成本为每吨熟料 0.96 美元至 1.13 美元，平均值为每吨熟料 1.41 美元。一个新的年产 120 万吨的预热器/预分解窑将会产生 290 万美元的资本成本和 125 万美元的年化成本（2005 年美元）。由于与活性炭喷入相比洗涤器的成本较高，美国环保局预计只有当其他污染物的控制也需要洗涤器时，才会安装洗涤器进行汞控制。美国环保局还估计在水泥厂中活性炭喷入可获得 90% 的汞减排（环保局，2010 年）。

⁹ 假定 20 年的技术寿命，4% 的折现率。

¹⁰ 水泥厂产能为 3.000 吨熟料/天。

5.4. 废物焚化

5.4.1. 来自废物焚化的汞来源和排放

163. 对于来自废物焚化的大气汞排放总量，造成主要影响的是：废物中的汞含量、焚化炉废物燃烧能力、焚化炉类型（混烧过量空气或缺氧模块式）、运行方式（例如：是否包括热回收）以及适合于工厂的减排程度。避免汞进入废物流或对废物进行预处理，例如在废物进入焚化炉前分离和去除含汞物质，是降低大气汞排放的最重要的措施。汞可存在于家庭废物中，不同国家浓度截然不同，主要取决于家用产品中是否存在汞以及是否有收集汞的系统，或产品是否在常规废物流中处置。可能含汞的常见产品类别为电池、温度计和荧光灯来源。废物焚化中的汞控制因此与家用产品和医疗设备等的汞释放密切相关，一部分汞可能最终会进入废物流。因此，替代含汞产品或引入有效的汞收集和安全处置系统是避免废物焚化过程中汞排放的可选措施。

5.4.2. 废物焚化技术

164. 应该注意的是，大规模废物焚烧——本节的重点——在许多国家不是一个常用程序。其他形式的废物管理或缺乏受控的废物处理系统也会导致汞排放升高，例如，通过垃圾填埋场沉积物放出的气体或非受控废物燃烧等。因此，此处介绍的信息只关乎那些大规模废物焚烧是其废物管理系统的一个组成部分的国家。

165. 在城市固体废物焚化中，使用了许多不同的焚化炉设计和燃烧技术。在一个典型的焚化炉中，废物被送进燃烧室，放置在一个炉排上，炉排将废物送过燃烧器，让废物与热空气充分混合，以确保有效燃烧。许多焚化炉设计有两个燃烧室。空气通过废物提供到主燃烧室内（一次空气）。不完全燃烧产物（一氧化碳和有机化合物）进入到辅助燃烧室中，在那里会添加更多的空气（二次空气），完成燃烧。

166. 根据被燃烧的废物的数量和形式，有三类主要的城市固体废物焚化技术，分别是混烧型焚化炉、模块式焚化炉和流化床焚化炉（欧洲监测与评价计划/欧洲环境署，2009年）。在混烧型焚化炉中，除了要去除因为太大而不能通过给料系统的物体以及有害物体（例如压缩气瓶）外，城市固体废物的焚化没有任何其他的预处理。在焚烧没有经过预处理的废物方面，模块式焚化炉与混烧型焚化炉类似，但它们通常规模更小，每天燃烧4至130吨废物。在流化床焚化炉中，废物在一床惰性物质（例如沙或灰）中焚化，在炉排或分配板上，用空气进行流化。如果城市固体废物在流化床燃烧中燃烧，废物必须经过处理（例如切碎）以获得合适的尺寸（欧盟委员会，2006年a）。

167. 可能具有高含汞量的危险废物通常是在特殊技术焚烧炉或在回转窑式焚烧炉中焚烧。特殊技术焚烧炉包括技术水平极低的鼓形炉、炉排炉或马弗炉。同样，其它用于处理危险废物的技术（例如超临界水氧化、电弧玻璃化）可归于这一范畴（尽管它们不一定属于“焚烧技术”）。在有些国家，危险废物在水泥厂或轻集料窑中焚烧。在某些国家，医疗废物在危险废物焚烧炉或适宜此目的的生活垃圾焚烧炉中焚烧（环境署，2005年）。

5.4.3. 废物焚化过程中的控制措施

168. 由于废物焚化中排放到大气中的所有汞都来源于废物中的汞，最重要的主要措施就是减少对焚化炉的汞输入。通过在焚化前将含汞产品从废物流中分拣出来就能够实现这一点。

169. 在废物焚化时，采用以下方法可能提高控制措施的去除效率：将燃烧室中的汞蒸气吸附到酸性气体吸附物质或其他吸附剂上，然后再去除颗粒相中的汞。将控制设备进口处的烟气温度降低到 175°C（或更低），将有利于实现高效汞控制。典型的新式城市废物焚烧炉系统在颗粒物去除装置的上游同时安装气体冷却和管道吸附剂喷入或喷雾干燥器系统，以便降低气体温度，提供酸性气体控制的机制（环境署，2006 年）。

170. 焚烧条件控制在温度高于 850°C，氧气含量为 8-10 个体积百分数，则汞主要以汞氯化物（I 和 II）和元素汞的形式存在（Velzen 等人，2002 年）。使用热力学计算含有氯化氢和二氧化硫的典型烟气中汞的化学平衡，结果表明当温度在 300-700°C 时主要产物为汞氯化物，当温度高于 700°C 时主要产物为元素汞。对于焚烧炉中的不同烟气净化设备，汞去除效率概况见表 9 所示（Velzen 等人，2002 年）。这些控制措施不是针对汞的，应被视为一般排放控制技术示例。为了估算，假定汞氯化物/汞（0）的比率在 70/30 和 80/20 之间。添加的“特殊吸附剂”（吸附剂）可能是注入了硫或硫化化合物的吸附剂，或活性炭吸附剂，它们提高了颗粒对汞的吸附性。

表 9. 废物焚烧炉烟气净化系统的汞去除效率（环境署工具包）

设备	温度	汞氯化物	汞 (0)	整体**	参考文件
	(°C)	百分比	百分比	百分比	
静电除尘器	180	0-10	0-4	0-8	Velzen 等人，2002 年
湿式洗涤器	65-70	70-80	0-10	55-65	Velzen 等人，2002 年
带调节剂的湿式洗涤器		90-95	20-30	76-82	Velzen 等人，2002 年
喷淋吸收塔+袋式除尘器（石灰岩）	130	50-60	30-35	44-52	Velzen 等人，2002 年
喷淋吸收塔+袋式除尘器（添加了特殊吸附剂）*		90-95	80-90	87-94	Velzen 等人，2002 年
气流床吸收塔+袋式除尘器（添加了特殊吸附剂）*	130	90-95	80-90	87-94	Velzen 等人，2002 年
循环流化床+袋式除尘器（添加了特殊吸附剂）*	130	90-99	80-95	87-98	Velzen 等人，2002 年
静电除尘器或袋式除尘器+碳喷入				50->90	Pirrone 等人，2001 年
静电除尘器或袋式除尘器+抛光湿式洗涤器				85	Pirrone 等人，2001 年

* 特殊吸附剂可能是注入了硫或硫化化合物的吸附剂或活性炭吸附剂，它们提高了颗粒对汞的的吸附性。

171. 如上表所示，简单的静电除尘器有时候只有极低的汞去除效率。用于酸性气体去除的湿式洗涤器或使用石灰的喷淋吸收塔对汞的去除效率分别为 55-65% 和 44-52%。要达到 90% 以上的高去除效率，必须添加特殊吸附剂/吸附剂，最常用的是活性炭。

172. Takaoka 等人（2002 年）报告了在一个配备有袋式除尘器（BF）试产规模的城市固体废物焚烧炉中引入活性炭喷入时，汞的减排可提高 20%-30%。降低的烟气温度可提高汞的减排率。

173. 大韩民国已经对二噁英和酸性气体有了严格的监管要求，城市废物焚烧炉中已经安装了许多大气污染物控制设备，其配置多种多样。平均汞去除效率约为 85%（Kim 等人，2010 年）。有些设施还喷入了活性炭，汞去除效率更高。在工业废物焚化中，测得的汞去除效率为 50%-92%（干式大气污染控制装置的除汞率较低；湿式较高）。对于有害的医疗传染性废物焚化，汞去除效率约为 89%，但汞去除效率取决于输入废物中的汞含量。

174. 从问卷答复中可得出以下结论：在废物焚化工厂，除了常见的大气污染控制设备外，针对汞的控制也相当常见。提到的针对汞的技术有活性炭喷入或各种类型的洗涤器等。

5.4.4. 废物焚化所涉控制技术的成本和效率

175. 对于除汞而言，通常要求采用碳基试剂的吸附，以达到排放的最佳可行技术水平（非连续采样时 < 0.05 毫克/立方纳米）（欧盟委员会，2006 年 a）。精确的减排性能视废物中的汞含量和分布而定。一些废物流的汞含量变动很大，因此需要其他的废物预处理。

176. 在估算汞排放控制的成本时，一个重要方面是基准条件的假设。基准条件是安装有现代大气污染控制的工厂与基准条件是安装有十分简单的排放控制的工厂的除汞成本将有很大的不同。

177. 根据欧盟资助的欧洲重金属排放的综合评估项目开展的工作，得出了选定的多污染物减排技术每吨城市废物的年化成本及其附带的对汞排放的共同控制效率。这些资料是针对欧洲条件得出的，因此可能与别的地方不相关。对于基本的颗粒排放控制（静电除尘器或袋式除尘器）而言，估计每吨废物的总年度成本为 0.18 美元。对于带洗涤器的颗粒控制、优化的静电除尘器和活性炭喷入的组合，估计每吨废物的年度成本为 4 到 12 美元。在这些例子中对于汞的共同控制，第一种情况下为 5%-10%；在第二种情况下为 80%-99%。

178. Visschedijk 等人（2006 年）估计医疗废物焚化的排放控制技术（采用静电除尘器预先除尘，随后是石灰与活性炭喷入，最后是袋式除尘器）年平均成本约为每焚化一吨废物 25 美元。

179. 在发达国家，合适的焚烧和填埋成本分别为高和中，因此，对于最不发达国家从经济上看，难以实现。基于这些高成本，采用无汞替代品可能会是更受青睐的备选方案。（环境署，2008 年）。

180. 在问卷回复中，美国报告了一个日处理量为 730 吨废物的典型大型城市废物焚烧单位的活性炭喷入成本：投资成本 150,000 美元；年运行成本 91,000 美元（以 1987 年美元计），这是在二十世纪九十年代早期法规制定过程中获得的。这些数据大致相当于 0.7 美元/年（20 年的年化成本和 4% 的折现率，以 2010 年美元计）。这些成本没有包括喷雾干燥器/袋式除尘器系统的成本，如果还没有用它们来控制汞以外的污染物的话，上述成本还将再增加 12×10^6 美元的资本成本和 3.6×10^6 的年度成本。

181. 对于医院、医疗与传染性废物焚化炉，美国环保局报告的活性炭喷入系统的投资成本从大约 3,800 美元至 12,000 美元。活性炭喷入系统的年度成本从大约 5,400 美元/年到 56,300 美元/年。资本和年度成本均按 2007 年美元计。如果在一个商业或工业固体废物焚化（工业废物焚化）单位中应用活性炭喷入系统，估计的投资成本从大约 5,600 美元到 156,000 美元。活性炭喷入系统的年度成本从大约 2,900 美元/年到 320 万美元/年。这些应用于工业废物焚化中的活性炭喷入成本包括了在水泥窑中焚化工业固体废物。资本和年度成本均按 2008 年美元计。

182. 在以上例子中关于成本来源的更多资料，可参见作为美国废物焚化部门规则制定的一部分的各种文件（参见美国向环境署提交的资料）。

6. 结论

183. 本报告旨在概要说明大气中的汞排放、选定部门的控制备选方案及其效率和成本。它是为了支持正在进行中的、为制定一项具有法律约束力的全球性汞问题文书的谈判过程。

184. 本研究包括问卷的制定与分发，以收集关于不同国家选定部门的技术特点的资料、关于排放和排放控制的现有资料以及各部门的未来发展计划。本研究的重点是介绍潜在的排放控制方法并更新排放清单。

6.1. 排放

185. 在发电厂和工业锅炉的煤炭燃烧、水泥生产、有色金属生产以及废物焚化这几个选定部门的汞排放占 2005 年全球大气汞排放总量的 51%。

186. 对最近国家排放清单报告以及汞排放研究论文的审查得出结论：在大多数情况下，新的排放估算在环境署/北极监测评价方案（2008 年）研究中报告的排放值范围内。

187. 包括数据协调和提高清单完整性的全球排放趋势评估显示：全球排放量有些变化，从 1990 年的 1967 吨略微下降至 1995 年的 1814 吨和 2000 年的 1819 吨，直到 2005 年的 1921 吨。

188. 此次评估没有发现全球汞排放总量有重大变化。但是，值得注意的是观察到了区域之间排放量的重大改变。当亚洲的排放量在 1990 年至 2005 年期间增长时，北美和欧洲的排放量同期在下降。

189. 缺乏详细的针对设施的资料，而且许多国家缺乏足够的代表性监测数据，限制了当前的所有全球排放估计值的准确性。

6.2. 排放控制备选方案

190. 四个选定部门的汞排放取决于一些因素，包括燃料和原材料的含汞量和其他成分特点、源设施和现有大气污染物排放控制设备的技术配置（例如采用静电除尘器或袋式除尘器去除颗粒或在洗涤器内脱硫）以及针对汞的控制。这些因素在全世界不同区域以及同一区域内都有很大的不同，使得确定普遍适用的控制备选方案很具挑战性。要确定适合于一个特定工厂/设施的控制备选方案，就需要详细了解该工厂/设施当前的技术状况。要制定区域或国家的汞减排战略，也需要考虑该区域的经济状况。

6.2.1. 关于所有四个选定部门中的排放控制的基本结论

191. 对于研究的每一个部门，许多国家都已经有了、并使用了一系列的汞减排技术。在这些技术中，有许多是为了减少其他的大气污染物（例如：颗粒、二氧化硫、氮氧化物或其他有毒污染物）。

192. 减少这些排放的现有设备也可以减少汞排放。然而，根据输入材料的特点以及控制的具体情况，汞减排的程度可有很大差别。在评估当前的汞排放、考虑是否需要其他措施以及制定汞排放控制的未来办法与策略时，均需将这一方面考虑在内。

193. 以提高性能和能源效率为目标的一般措施将减少燃料和原材料的消耗，从而间接地减少汞排放。

194. 要估算汞排放控制的成本，就需要了解排放源的现状，包括当前和计划的大气污染控制的技术描述。

6.2.2. 燃煤发电厂和工业锅炉

195. 燃烧前的措施（例如洗煤、配煤）可将汞排放减少最多约 70%，平均减少 30%。

196. 燃烧前添加卤素（特别是溴）有可能通过增强烟气中汞的氧化（特别是存在选择性催化还原时）来改进除汞，从而提高下游颗粒物控制和烟气脱硫设备中的去除效率。

197. 当在商业规模下，与颗粒控制装置（例如静电除尘器或袋式除尘器）配合使用活性碳喷入时，可大幅降低汞的排放。已发现减少 90% 以上。在处理含有较多元素汞蒸气的烟气时，经化学处理的碳（例如溴化碳）已被证实比常规的、未经处理的活性碳更有效。

198. 要详细评估汞排放控制的成本与效率，就需要有关源头的技术特点以及配煤和潜在添加剂的可得性的详细资料。大量数据可从美国的现场应用中获得。

199. 大气污染控制装置可将汞从烟气中转移到残余物中，例如飞灰或烟气脱硫洗涤器的淤渣。总控制成本的评估应包含由于废物组成的变化（包括汞含量增加）的潜在影响而导致这些残余物的管理成本有任何潜在增加。

6.2.3. 水泥生产

200. 水泥生产中的汞排放来源于使用的煤和其他燃料、以及原材料（例如石灰岩）和其他添加剂。汞在燃料和原材料中的浓度大不相同，转而使用含汞量较低的燃料和原材料可显著降低汞排放。

201. 由于在水泥生产中从烟囱气去除的水泥窑粉尘在很大程度上会在工艺中再循环，如果不小心控制温度的话，添加活性碳不能直接与现有的颗粒控制装置组合使用。

202. 水泥生产中将汞吸附到水泥窑粉尘中高度依赖于工厂中的运行条件，较低的温度会促进吸附。如果废气温度低，可通过去除颗粒控制装置中的粉尘将汞从过程中去除。

203. 可以用燃煤发电厂的类似控制技术实现水泥生产中对汞排放的终端控制，如果引入以减少酸性气体为主要目的的烟气脱硫，预计可以显著除汞。如果采用活性碳喷入来除汞，则需要小心地控制温度，并增加一个颗粒去除步骤，从而让所收集的颗粒不再循环。

6.2.4. 有色金属生产

204. 有色金属生产是一个高度复杂的工业过程，根据提取的金属、矿石的特点以及采用的基本过程而采用不同的配置。矿石中的汞含量可有范围广泛的差别。

205. 在矿石的火法冶炼过程中，第一步是焙烧，在这一步中矿石中的硫会转换成二氧化硫气体。矿石中的所有汞将会与该气体一起释放。

206. 大型有色金属冶炼厂通常都配备有高效的大气污染控制装置，以控制来自焙烧炉、熔炼炉和转炉的颗粒和二氧化硫排放。汞大多以气态形式排放，因此，静电除尘器在汞去除方面作用甚微。通过在硫酸工厂（这通常是冶炼厂的一部分）吸收二氧化硫实现了对烟气的排放控制。

207. 采用例如博利登技术（其中汞在硫酸工厂前被吸收在甘汞（氯化亚汞）溶液中）可实现针对汞的进一步去除（约 90-95%）。

208. 对于黄金生产行业的其他热装置，例如窑炉、甑炉和焚烧炉等，针对汞的最佳控制是注入硫的碳过滤器，可获得 93% 至 99% 的高汞减排效率。

6.2.5. 废物焚化

209. 由于废物焚化中排放到大气中的所有汞都来源于废物中的汞，因此最重要的主要措施就是减少焚化炉中的汞输入。通过在焚化前将含汞产品从废物流中分拣出来，可以实现这一点。

210. 大多数现代城市废物焚化炉都配备有针对不同污染物的先进排放控制装置。在这些装置中，有些可以针对汞进行优化，例如通过控制温度。

211. 通过碳注入、或洗涤器、或碳注入和洗涤器的组合，能够实现针对汞的控制。美国环保局根据几个废物燃烧的常规过程，报告了活性炭喷入成本的示例。

7. 参考文献

- AMAP, 2010. Updating Historical Global Inventories of Anthropogenic Mercury Emissions to Air. AMAP Technical report No 3 (2010), Arctic Monitoring and Assessment programme (AMAP), Oslo, Norway.
- Chang, R., Dombrowski, K., Senior, C. (2008). Near and Long Term Options for Controlling Mercury Emissions from Power Plants, The MEGA Symposium, Baltimore, MD, 2008.
- CURS (2007) *Coal utility environmental cost (CUECost) workbook user's manual. Version 4.0.* Chapel Hill, NC, USA, CURS- Center for Urban and Regional Studies, University of North Carolina at Chapel Hill, 28 pp (Feb 2007) BETA VERSION
- MEPC in prep., 2010. Reducing mercury emissions from coal combustion in the energy sector. Prepared by: Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China, for the Ministry of Environment Protection of China, and for UNEP Chemicals. September 17, 2010
- EC 2001a. IPPC Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries, European Commission, December 2001.
- EC 2006a. IPPC Reference Document on Best Available Techniques for Waste Incineration, European Commission, August 2006. ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/wi_bref_0806.pdf
- EC, 2006b. IPPC Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants. July 2006. ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/lcp_bref_0706.pdf
- EC 2010. IPPC Reference Document on best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. May 2010. ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/clm_bref_0510.pdf
- EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook — 2009. EEA Technical report No 6/2009. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>
- EPA 2005. United States Environmental Protection Agency. Multipollutant Emission Control Technology Options for Coal- fired Power Plants. EPA-600/R-05/034. March 2005.
- EPA 2009. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants From the Portland Cement Manufacturing Industry Federal Register / Vol. 74, No. 86 / Wednesday, May 6, 2009.
- EPA. 2010. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants from the Portland Cement Manufacturing Industry and Standards of Performance for Portland Cement Plants; Final Rule.
- ESPREME- INTEGRATED ASSESSMENT OF HEAVY METAL RELEASES IN EUROPE. European research program aimed at developing methods and to identify strategies to support EU environmental policy-making for reducing the emissions and thus the harmful impacts of heavy metals (HMs). More information available at: <http://espreme.ier.uni-stuttgart.de/>
- Feeley T.J. III, Brickett L.A., O'Palko A., Jones A.P. 2008, DOE/NETL's Mercury Control Technology R&D Program Taking Technology from Concept to Commercial Reality, Presented at the MEGA Symposium, Baltimore, August 2008.

- GAO 2009. Mercury control technologies at coal-fired powerplants have achieved substantial emissions reductions. Report to the Chairman, subcommittee on Clean Air and Nuclear safety, Committee on Environment and Public Works, US Senate. GAO -10-47
- Government of Chile, 2008. "Pilot Project on Strengthening Inventory Development and Risk Management-Decision Making for Mercury: A Contribution to the Global mercury Partnership. December 2008.
- Hageman, S. et al 2010. Technical and economic criteria for processing mercury-containing tailings. Report to UNEP February, 2010.
- HEIMTSA - **H**ealth and **E**nvironment **I**ntegrated **M**ethodology and **T**oolbox for **S**enario **A**ssessment. European research project in support of the Environment and Health Action Plan (EHAP) by extending health impact assessment (HIA) and cost benefit analysis (CBA) methods and tools so that environment and health impacts of policy scenarios in key sectors can be evaluated reliably at the European level. More information at: <http://www.heimtsa.eu/>
- Hylander, L.D., Herbert, R.B. 2008. Global Emissions and Production of Mercury during the Pyrometallurgical Extraction of Nonferrous Sulfide Ores. *Env.Sci Technol.* 2008, 42, 5971-5977.
- IEA Clean Coal Centre, Coal online, <http://www.coalonline.org/site/coalonline/content/home>
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- Kim, J.-H., Park, J.-M., Lee, S.-B., Pudasainee, D., Seo, T.-C. 2010. Anthropogenic mercury emission inventory with emission factors and total emissions in Korea. *Atmospheric Environment* 44 (2010) 2714-2721.
- Kumari, R. 2010. Emission Estimate of Passport-Free Heavy Metal Mercury from Indian Thermal Power Plants and Non-Ferrous Smelters. By Toxic Link, supported by the European Environmental Bureau - Zero Mercury Campaign.
- Li, G., Feng, X., Li, Z., Qiu, G., Shang, L., Liang, P., Wang, D., Yang, Y. Mercury emission to the atmosphere from primary Zn production in China. *Science of the Total Environment* 408 (2010) 4607–4612.
- Masekoameng, K. M., Leaner, J., Dabrowski, J. 2010. Trends in anthropogenic mercury emissions estimated for South Africa during 2000-2006. *Atmospheric Environment* (2010), doi:10.1016/j.atmosenv.2010.05.006
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, the Dominican Republic, 2010. “ANÁLISIS SITUACIONAL SOBRE LA GESTIÓN DEL MERCURIO EN LA REPÚBLICA DOMINICANA E INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES DE MERCURIO. INFORME PRELIMINAR
- Ministerio del Ambiente, Ecuador, 2008. Pilot Project on Strengthening Inventory Development and Risk Management-Decision Making for Mercury: A Contribution to the Global Alliance on Mercury. Final report.
- Mukherjee, A.B., Bhattacharya, P., Sarkar, A., Zevenhoven, R. 2009. Mercury Emissions from Industrial Sources in India and its Effects in the Environment. Chapter 4 in N. Pirrone and R. Mason (eds.), *Mercury Fate and Transport in the Global Atmosphere*, DOI:10.1007/978-0-387-93958-2_4. Springer Science + Business Media, LLC 2009.
- National Environmental Authority, Department of Environmental Quality Protection, Panama, 2009. Pilot Project on Strengthening the Development of an Inventory and Risk

- Management in Making Decisions on Mercury. “National Emissions Inventory of Mercury in Panama”, Summary of the Final Report. January 2009.
- Nelson, P. F., Nguyen, H., Morrison, A. L., Malfoy, H. Cope, M. E., Hibberd, M. F., Lee, S., McGregor, J. L., Meyer, M. 2009. Mercury Sources, Transportation and Fate in Australia. Final Report to the Department of Environment, Water, Heritage & the Arts, RFT 100/0607. December 2009.
- NESCAUM (2010). Technologies for Control and Measurement of Mercury Emissions from Coal-Fired Power Plants in the United States: A 2010 Status Report. Northeast States for Coordinated Air Use Management (NESCAUM).
- Pacyna, E.G. and J.M. Pacyna, 2002. Global emission of mercury from anthropogenic sources in 1995. *Water, Air and Soil Pollution*, 137: 149-165.
- Pacyna, J.M. and E.G. Pacyna, 2005. Anthropogenic sources and global inventory of mercury emissions. In: Parsons, M.B. and J.B. Percival (eds.), *Mercury: Sources, Measurements, Cycles, and Effects*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series Volume No. 32.
- Pacyna, J. M., Sundseth, K., Pacyna, E. G., and Jozewich, W., 2009. An Assessment of costs and Benefits Associated with Mercury Emission Reductions from Major Anthropogenic Sources. *Journal of Air and Waste Management Association* (Accepted).
- Pacyna, J. M., Sundseth, K., Pacyna, E. G., and Jozewich, W., 2010. An Assessment of costs and Benefits Associated with Mercury Emission Reductions from Major Anthropogenic Sources. *Journal of Air and Waste Management Association* 60:302-315
- Pavlish J H, Sondreal E A, Mann M D, Olson E S, Galbreath K C, Laudal D, Benson S A (2003) Status review of mercury control options at coal-fired power plants. *Fuel Processing Technology*; 82 (2-3); 89-165 (Aug 2003)
- Pirrone, N., Cinnirella, S., feng, X., Finkelman, R. B., Friedli, H. R., leaner, J., Mason, R., Mukherjee, A. B., Stracher, G. B., Streets, D. G., Telmer, K. (2010). Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 5951-5964, 2010.
- Pudasainee, D., Kim, J.-H., Seo, Y.-C. 2009. Mercury emission trend influenced by stringent air pollutants regulation for coal fired power plants in Korea. *Atmospheric Environment* 43 (2009) 6254-6259.
- Renzoni, R., Ullrich, C., Belboom, S., German, A. (2010) Mercury in the Cement Industry. Université de Liège. Independently commissioned by CEMBUREAU - CSI.
- Rini, M.J., Vosteen, B.W. (2009). Full-Scale Test Results from a 600 MW PRB-fired Unit Using Alstom’s KNX Technology for Mercury Control, MEC-6 Conference, Ljubljana, Slovenia, April 2009.
- Rokke, N., 2006. The Energy Outlook of Norway. Plenary session presentation of the Polish-Norwegian Energy Supply and Environmental Impact Thematic Seminar 18 October 2006. PowerPoint presentation.
- Schreiber, R. J., Kellett, P. E., Kellett, C. D. 2009. Compilation of mercury emissions data. Portland Cement Association. PCA R&D Serial No. SN3091.
- Senior, C. (2010) Mercury Emissions Reduction from Portland Cement Kilns using Wet Scrubbers. Paper-2010-A-1419. Presented at the Air & Waste Management Association Annual Meeting and Exhibition, Calgary, Alberta, Canada, June 22-25, 2010.

- Sloss, L. (2008). Economics of mercury control. Clean Coal Center, CCC/134
- Srivastava R K, Hutson N, Martin B, Princiotta F, Staudt J (2006) Control of mercury emissions from coal- fired utility boilers. *Environmental Science and Technology*; 40 (5); 1385-1393 (Mar 2006)
- Streets, D. G., Hao, J., Wang, S., Wu, Y. 2009. Mercury emissions from coal combustion in China. Chapter 2 in N. Pirrone and R. Mason (eds.), *Mercury Fate and Transport in the Global Atmosphere*, DOI:10.1007/978-0-387-93958-2_2. Springer Science + Business Media, LLC 2009.
- Takaoka M, Takeda N, Fujiwara T, Kurata M, Kimura T. 2002. Control of mercury emissions from a municipal solid waste incinerator in Japan. *J Air Waste Manag Assoc.* 2002 Aug;52(8):931-40.
- UNEP, 2006. Guide for Reducing Major Uses and Releases of Mercury. June 2006. <http://www.unep.org/hazardoussubstances/Mercury/MercuryPublications/GuidanceTrainingMaterialToolkits/tabid/3609/language/en-US/Default.aspx>
- 环境署，2005年。《汞排放识别与定量工具包》，环境署化学品处，汞方案 <http://www.chem.unep.ch/mercury/Toolkit/default.htm>
- 环境署，2010年。《汞排放识别与定量工具包》 <http://www.unep.org/hazardoussubstances/Mercury/MercuryPublications/GuidanceTrainingMaterialToolkits/MercuryToolkit/tabid/4566/language/en-US/Default.aspx>
- UNEP/AMAP, 2008. Technical Background Report to the Global Atmospheric Mercury Assessment. Arctic Monitoring and Assessment Programme / UNEP Chemicals Branch. 159 pp. (http://www.chem.unep.ch/mercury/Atmospheric_Emissions/Technical_background_report.pdf)
- 环境署，2008年。联合国环境规划署报告：关于不限成员名额工作组第一次会议报告附件一列各项战略目标的相关潜在成本和惠益的总体定性评估，环境署化学品处，环境署-成本效益分析报告 [http://www.chem.unep.ch/mercury/OEWG2/documents/e52\)/English/OEWG_2_5_add_1.pdf](http://www.chem.unep.ch/mercury/OEWG2/documents/e52)/English/OEWG_2_5_add_1.pdf)
- 环境署，2008年。全球大气汞评估：源头、排放和运输。环境署化学品处，日内瓦。42 pp. (http://www.chem.unep.ch/mercury/Atmospheric_Emissions/UNEP%20SUMMARY%20REPORT%20-%20final%20for%20WEB%20Dec%202008.pdf)
- 环境署，编制中(2010年)。《对来自电厂燃煤的汞减排的过程优化指南文件》，给环境署的报告，2010年1月起可从 <http://hqweb.unep.org/hazardoussubstances/Mercury/PrioritiesforAction/Coalcombustion/ProcessOptimizationGuidanceDocument/tabid/4873/language/en-US/Default.aspx> 获得
- US DOE, 2006年。DOE/NETL's Phase II Mercury Control Technology Field Testing Program. Preliminary Economic Analysis of Activated Carbon Injection. Prepared by Jones, A.P., Hoffman, J.W., Smith, D.N., Felley, T.J., Murphy, J.T. 2006.
- Wang, S. X., Song, J. X., Li, G. H., Wu, Y., Zhang, L., Wan, Q., Streets, D. G., Chin, C. K., Hao, J. M., 2010. Estimating mercury emissions from a zinc smelter in relation to China's mercury control policies. *Environmental Pollution* 158 (2010) 3347-3353.

- Wang, S. X., Zhang, L., Li, G. H., Wu, Y., Hao, J. M., Pirrone, N., Sprovieri, F., Ancora, M. P. (2010). Mercury emission and speciation of coal-fired power plants in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 1183-1192, 2010.
- Weem, A.P., 2010. Reduction of mercury emissions from coal fired power plants. Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Working Group on Strategies and Review, 47th session, Informal document No 6, August 3,2010.
- Wirling, J., Schiffer, H.-P., Merzbach, F. (2000). Adsorptive Waste Gas Cleaning During the Co-Combustion of Sewage Sludge in a Lignite-Fired Industrial Power Plant; VGB-Power Tech., December 2000.
- Visschedijk A.J.H., Denier van der Gon H.A.C., van het Bolscher M. and P.Y.J. Zandveld, 2006. Study to the effectiveness of the UN ECE Heavy Metals (HM) Protocol and cost of additional measures. TNO report No. 2006-A-R0087/B, Apeldorn, the Netherlands.
- Wu, Y., Wang, S., Streets, D. G., Hao, J., Chan, M., Jiang, J. 2006. Trends in anthropogenic mercury emissions in China from 1995 to 2003. *Environ. Sci. technol.* 2006, 40, 5312-5318.

附件 I：问卷答复的概述

以下国家或组织正式提交了答复：奥地利、澳大利亚、巴巴多斯、巴西、加拿大、中国、塞浦路斯、欧洲共同体、冰岛、印度、立陶宛、波兰、俄罗斯、塞舌尔、南非、土耳其、联合王国（英格兰和威尔士）和美国。

这些答复的详细程度和涉及范围各不相同。以下汇总了答复中所提交的数据和其他一些资料。一些国家还提交了显示各个部门在能力和/或技术开发方面的未来发展、以及在空气污染物和汞控制状态方面的未来发展的相关资料。

煤炭燃烧

A=汇总信息，I=各个工厂的信息

源头定性：燃煤发电厂和工业锅炉								
所提交答复的概述								
	工厂或单位的信息 (数量)	能力	锅炉类型	煤炭消耗	煤炭中的汞含量	已安装的控制技术	去除效率	汞排放
巴西	>7	A	A	A		A		
加拿大	51							A
中国	6242	A		A	A	A	A	
印度	396	A	A	A		A	A (PM)	
立陶宛	58	A		A		A		
波兰	296							
俄罗斯	120	I	I	I	I	I	I	I
英国	16							I
美国（电气事业）	1282 家单位，522 家工厂	I	I	I		I	I	I
美国（锅炉/工艺加热炉）	596 家单位，294 家工厂	I	I	I	I	I	I (PM)	I

PM=指颗粒物

有色金属生产

源头定性：有色金属生产								
所提交答复的概述								
	工厂信息 (数量)	工艺流程信息	燃料/还原剂的消耗	燃料中的汞含量	金属生产	已安装的控制技术	去除效率	汞排放
巴西	>10 家公司	A	A		A			
加拿大	12							A
中国	8200	A	A		A			
冰岛	1	I	I	I	I	I	I (PM)	I
波兰	17+54							
俄罗斯								A
英国	12							I
美国	28	I			I	I	I	I

PM=指颗粒物

水泥生产

源头定性：水泥生产								
所提交答复的概述								
	工厂信息 (数量)	水泥生产	燃料/消耗	燃料/原材料中的汞含量	原材料的消耗	已安装的控制技术	去除效率	汞排放
巴巴多斯	1	I	I		I			
巴西	70	A	A		A	A		
加拿大	17							A
中国		A	A					
塞浦路斯	2	I	I		I	I		I
冰岛	1	I	I	I	I	I	I (PM)	I
波兰	53							
俄罗斯								A
南非	11	I			I	I	I (PM)	
英国	12	I	I			I		I
美国	184	I	A	A	A	I		I

PM=指颗粒物

废物焚烧

源头定性：废物焚烧厂 所提交答复的概述							
	工厂信息 (数量+废物类型)	焚烧的废物量	废物类型	废物中的汞含量	已安装的控制技术	去除效率	汞排放
奥地利	2	I	I		I		I
巴西	22 (IW, HZ)	A	A		A		
加拿大							A
中国		A					
冰岛	1	I	I		I		I
立陶宛	1 (ME)	I	I	I	I	I	I
波兰	1						
土耳其	1	I	I		I	I (PM)	I
英国	33		I				I
美国	96 (HZ)		I		I		I
美国	167 家单位 /66 家工厂 (HO)	A	I	A	A		I
美国	57 (ME)	I	I		I		I

PM=指颗粒物

IW=工业废物, ME=医疗废物, HZ=危险废物, HO=生活废物

附件 II： 关于减少大气汞排放战略的国家评估的指导

本附件提供了制定国家战略的一般性指导。对于减少汞排放的替代控制技术的详细评估，必需了解当地的工业部门、经济和国家立法的未来计划。图 7 中，以流程图的形式概述了建议的国家评估程序。

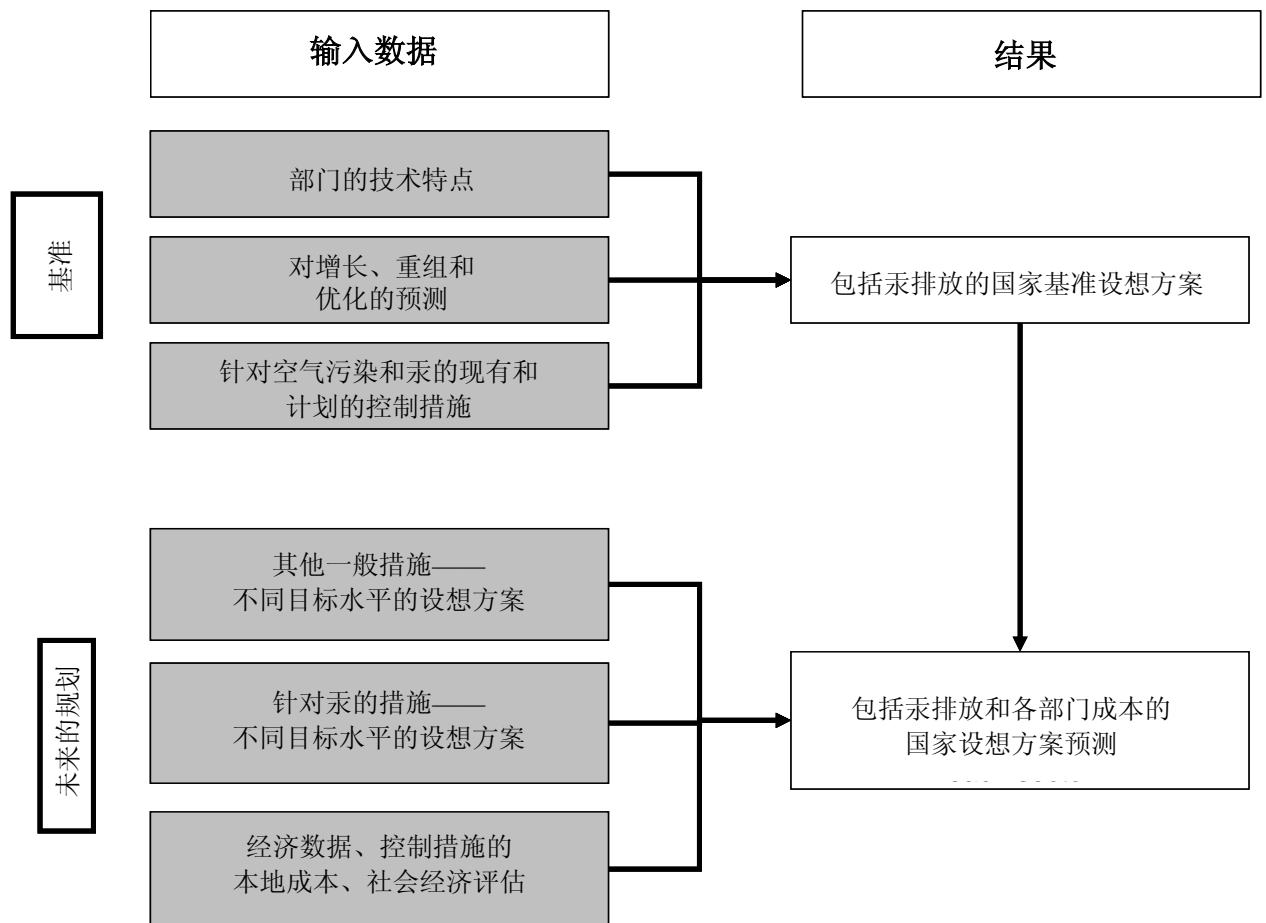


图 7. 制定关于大气汞排放控制的国家战略的程序示意图

制定设想方案的这个分步骤的程序所需的输入信息，详细地列在为本研究（可在环境署网站上找到）而准备的问卷中，并且能够以下列方式进行汇总。

制定基准

本步骤的目的是评估目前的汞排放以及对于工业和能源的社会驱动因素变化（例如经济增长、立法等）。评估的基础是对技术现状的确定以及选定部门的汞排放清单的制定。汞排放清单可以是基于对活动数据（能源、工业生产和原材料消耗）和排放因子的测量或估算、或两者之组合。了解了燃料和原材料中的汞含量，就可以对工业或能源过

程中的总的汞输入进行评估，而总的汞输入，结合关于技术状况和排放控制现状的知识，能够用来估算排放量。

这个步骤还包括评估社会驱动因素中可预见的变化以及目前和将来的国家或国际法规的实施将如何改变工业活动和汞排放。这个步骤的结果既包括目前的汞排放清单，也包括一项评估：如果不采取减少汞排放的具体措施，汞排放情况将如何变化。

更多排放控制的设想方案

这个第二步主要包括制定可能适用的控制战略，以减少汞排放。这些控制战略的选择应基于从基准评估中得到的关于技术特点的资料，即能够选择与现状相关的、在技术上和经济上可行的措施。针对不同的控制措施实施程度或不同的现代化程度，能够制定代表不同目标水平的设想方案。最后，应当对实施成本进行评估。根据经济状况、服务和消耗品的可得性、以及其他当地因素，运营成本和（在某种程度上）投资成本将存在重大差异。因此要求进行基于国家的评估。

其他信息

正如本报告先前所述，从本研究发放的问卷中收集到的信息尚不足以制定全球的设想方案。一些国家已经进行了它们自己的研究，所使用的程序类似于上述程序，其研究能够为其他国家提供实际的指导。综合信息可以从美国为了控制不同部门汞排放的立法程序之一部分的相关文件中找到。其中一个例子来自大型采金业，已经制定了针对减排潜力及相关费用的评估。该立法程序的信息在本报告第 5 章中进行了概述。更多信息可以在美国向环境署提交的有色金属生产资料及其参考资料中找到。美国提交的报告中还包括与其他选定部门相关的详细信息。

提交给环境署化学品处的另一个例子是由中国北京的清华大学向中国环境保护部、环境署化学品处海洋环境保护委员会（筹）（2010 年）提交的报告“减少能源部门煤炭燃烧中的汞排放”（该报告也可在环境署的网站上找到）。这个报告阐述和讨论了关于煤炭部门、汞排放、在空气污染控制设备中对汞的共同控制以及排放设想方案的基本资料。
