

Anthropogenic Mercury Emission Sources and Inventory of Chongqing, China

Dingyong Wang, Cheng Zhang

Southwest University

2015-12-08



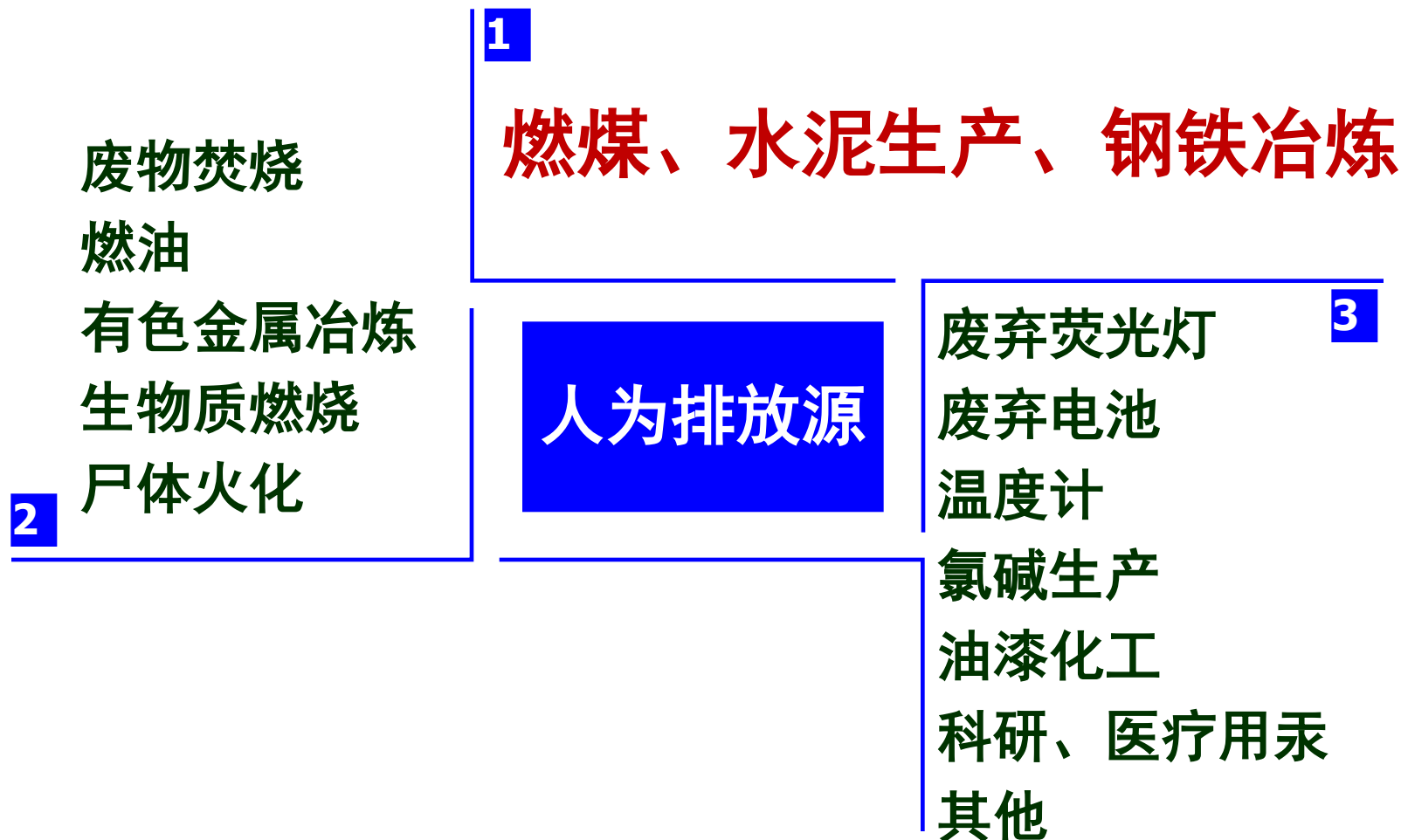
Outline

- **Hg anthropogenic emission sources of Chongqing**
- **Hg emission factors in key industries of Chongqing**
- **Establishment of Hg anthropogenic emission inventory of Chongqing**

1 Part

- **Hg anthropogenic emission sources of Chongqing**
- **Hg emission factors in key industries of Chongqing**
- **Establishment of Hg anthropogenic emission inventory of Chongqing**

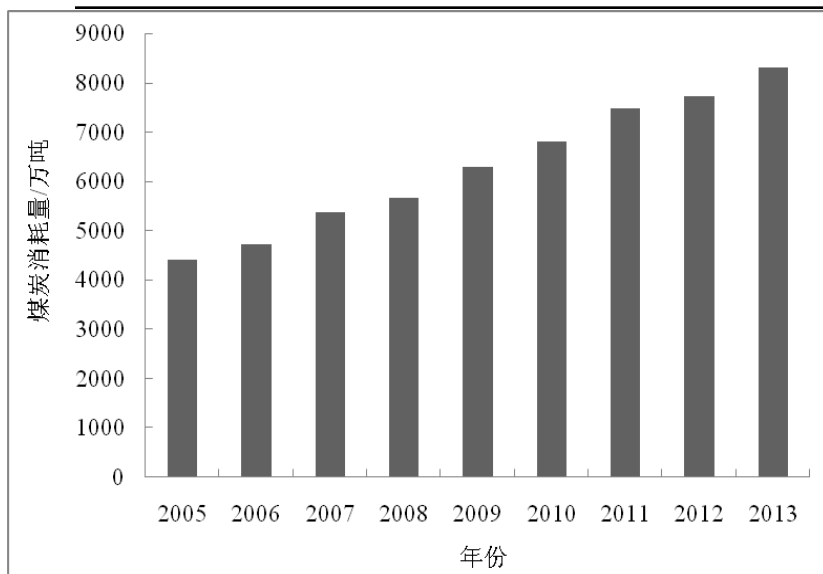
Hg anthropogenic emission sources of Chongqing



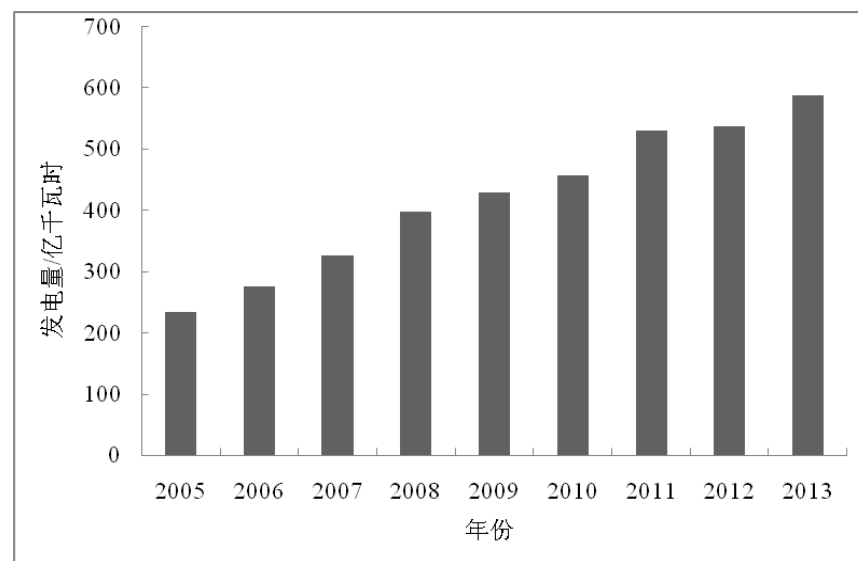
Hg anthropogenic emission sources of Chongqing

Coal combustion power plant

装机容量 (MW)	燃煤电厂合计 (MW)	占统计范围内火电容量比例
1500MW以上	4560	46.33%
500~1500MW	2560	26.01%
300~500MW(不含500)	1040	10.57%
100~300MW (不含300)	1924	19.55%
100MW以下	721	7.33%



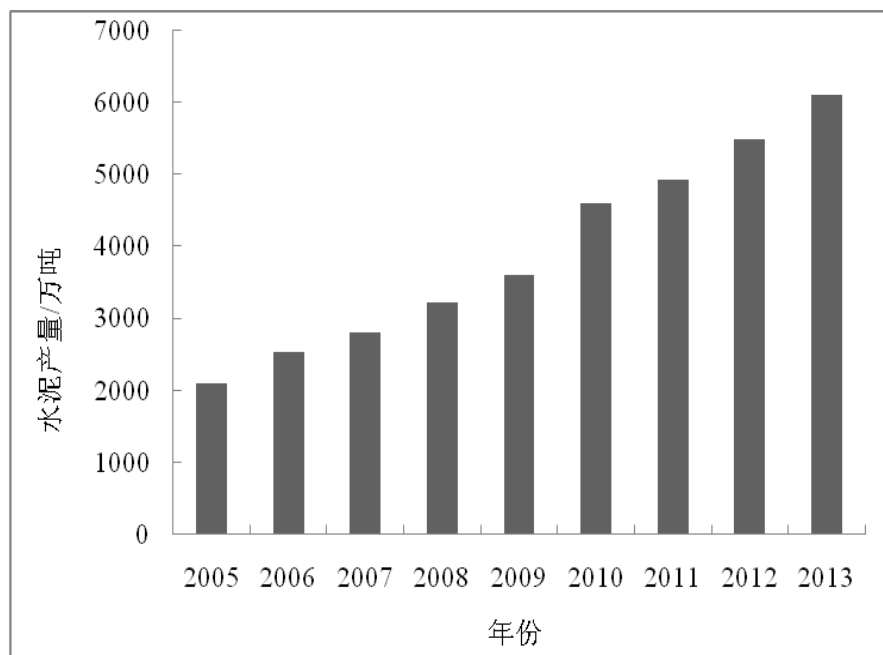
重庆燃煤消耗量



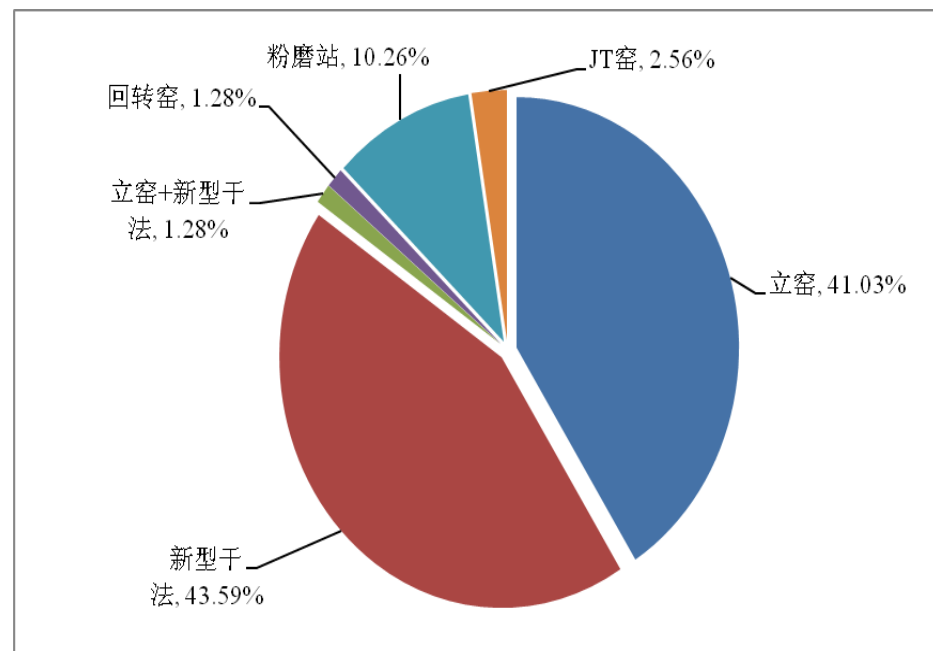
重庆市近年发电量

Hg anthropogenic emission sources of Chongqing

Cement Production



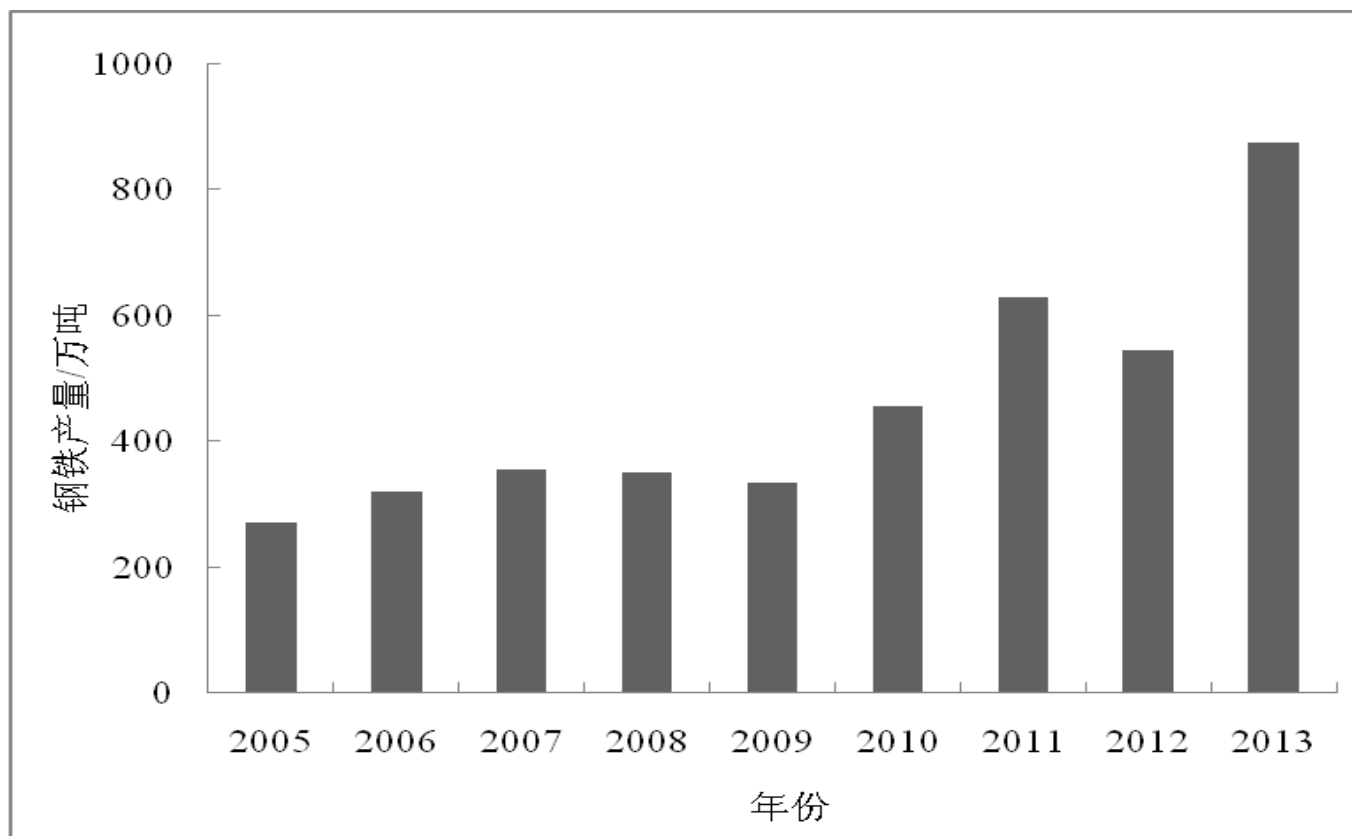
重庆市水泥产量



重庆市水泥厂类型及比例

Hg anthropogenic emission sources of Chongqing

Steel Production



重庆市钢铁产量

Hg anthropogenic emission sources of Chongqing

Others

其他工业及民用燃煤(other industries and civil coal combustion): 2013年约为 4520 万t。

有色金属冶炼(Nonferrous metal smelt): 重庆市的有色金属主要是铝，2013铝锭产量为55.86万t。

燃油(Fuel petroleum): 2013年达到34.87万 t。

生物质燃烧(Biomass burning): 薪柴约500万t，秸秆约350万t

废物焚烧(Waste burning): 垃圾焚烧约164.25万t，医疗废物焚烧6.13万t。

尸体火化(Cremation): 重庆市有37家殡仪馆，111台火化炉，台车式火化机共火化1.37万具，平板式火化机共火化5.47万具。

其他(others): 汞还被广泛应用于工业、科研、医疗、日用品中，工业上用来制造各种仪器仪表、温度计、血压计、开关、传感器、荧光灯、油漆、电池、杀虫剂、杀菌剂等。

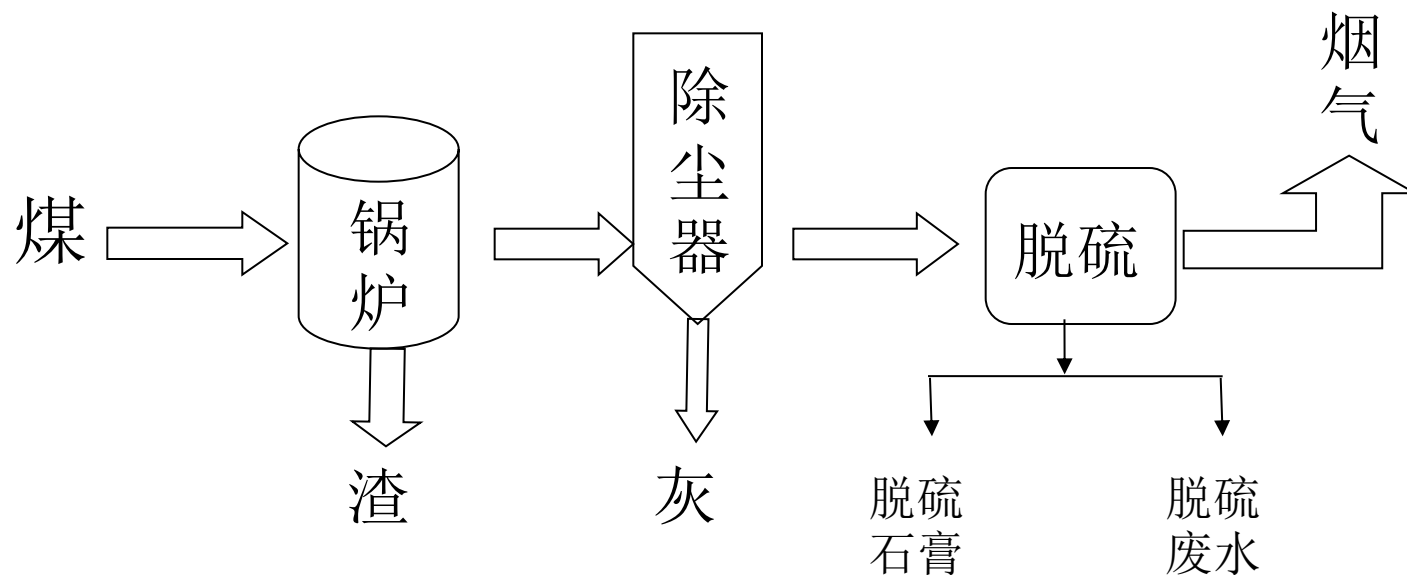
2 Part

- **Hg anthropogenic emission sources of Chongqing**
- **Hg emission factors in key industries of Chongqing**
- **Establishment of Hg anthropogenic emission inventory of Chongqing**

Coal combustion power plant

据统计，重庆市2013年发电生产的火电厂共有31所。其中，采用循环流化床锅炉的21所，采用粉煤炉的10所，总装机容量达9842 MW，火电燃煤消耗量共 2.24×10^7 t。

Coal combustion power plant



输入物料(Input): 煤、石灰石
输出物料(Output): 灰、脱硫石膏、炉渣

$$EF_{Hg} = \frac{M^g_{Hg}}{EG \times 10000} \times 100\%$$

Coal combustion power plant

选取4个燃煤电厂，分析燃煤电厂大气汞排放特征及排放因子。

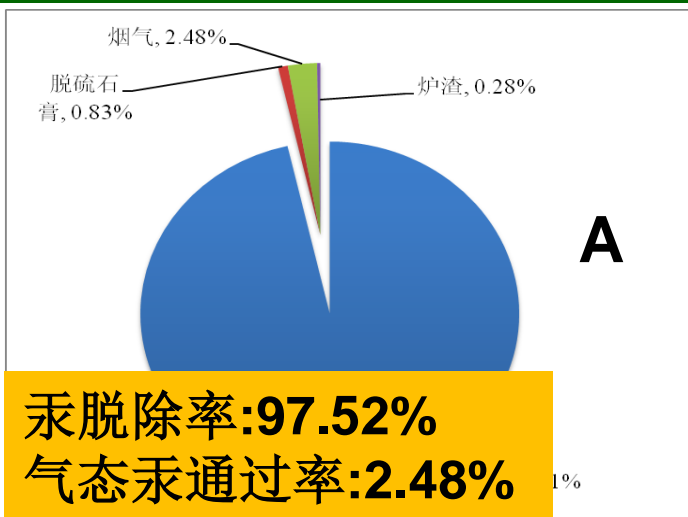
电厂编号	A	B	C	D
装机容量 (MW)	2×135	24	2×300	4×3602×600
发电量 (万kw·h/ 年)	177395	13000	242319	1086193
锅炉类型	循环流化床	循环流化床	煤粉炉	煤粉炉
脱硫装置	炉内固硫+石灰石-石膏湿法脱硫	炉内固硫	石灰石-石膏湿法脱硫	石灰石-石膏湿法脱硫
除尘装置	静电除尘	静电除尘+布袋除尘	/	静电除尘
脱硝装置	/	/	低氮燃烧+SCR	SCR
燃煤消耗量 (万吨/年)	134.73	14.28	108.77	248.60

Coal combustion power plant

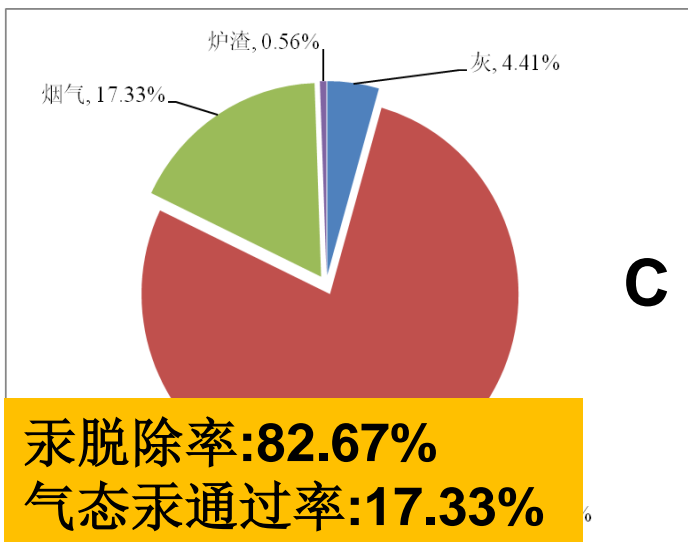
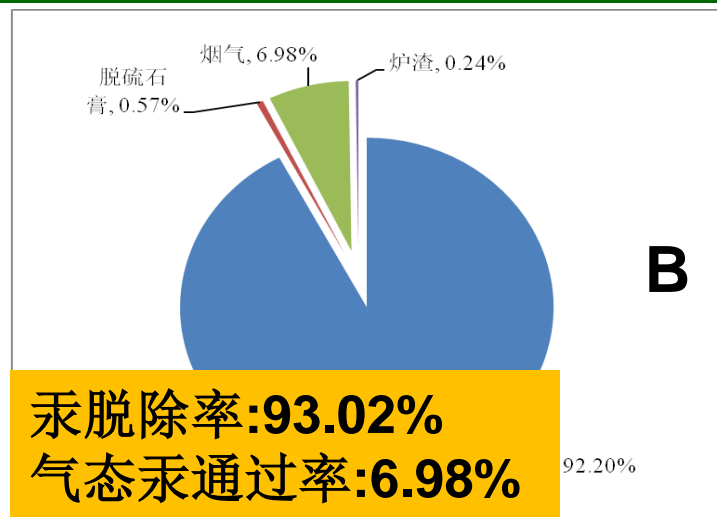
四个燃煤电厂汞排放因子比较

电厂编号	A	B	C	D
发电量 (万kw·h/年)	177395	13000	242319	1086193
锅炉类型	循环流化床	循环流化床	煤粉炉	煤粉炉
脱硫装置	炉内固硫+石灰石-石膏湿法脱硫	炉内固硫	石灰石-石膏湿法脱硫	石灰石-石膏湿法脱硫
除尘装置	静电除尘	静电除尘+布袋除尘	/	静电除尘
脱硝装置	/	/	低氮燃烧+SCR	SCR
排放量 (g·d ⁻¹)	19.01	6.85	40.63	981.55
汞脱除率 (%)	97.52	93.02	82.67	54.97
汞排放因子 ($\mu\text{g}\cdot(\text{kw}\cdot\text{h})^{-1}$)	3.91	19.23	6.12	32.98

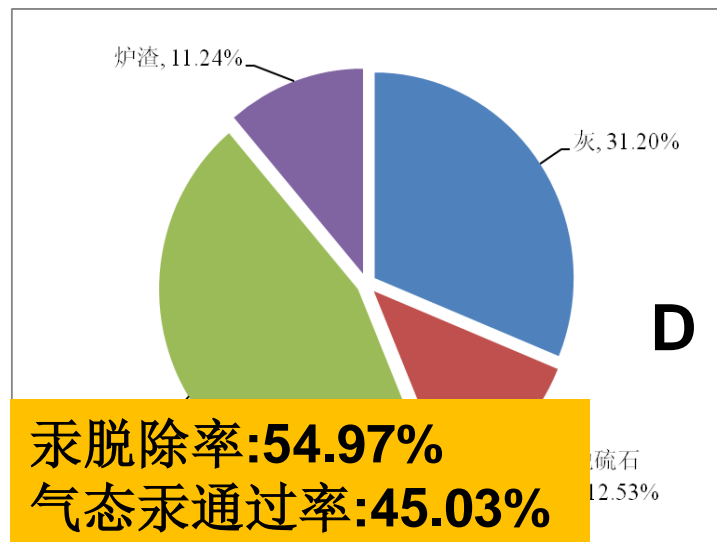
Coal combustion power plant



循环流化床



煤粉炉



4个电厂汞输出比例

Summary of coal combustion power plant

(1) 四个燃煤电厂的汞排放量分别为19.01、6.85、40.63、981.55 g/d，燃煤电厂的汞排放量与燃煤消耗量、锅炉类型、烟气净化装置等密切相关。

(2) 燃煤电厂中的汞主要来源于煤的燃烧，固体废物中灰与脱硫石膏的汞含量较高，说明除尘装置与脱硫装置对汞的去除有很大作用。

(3) 燃煤电厂汞排放因子为3.91~32.98 $\mu\text{g}/(\text{kw h})$ ，与国内部分学者的研究结果相近。循环流化床锅炉电厂的汞排放因子明显小于煤粉炉电厂，分别为11.52和19.55 $\mu\text{g}/(\text{kw h})$ 。

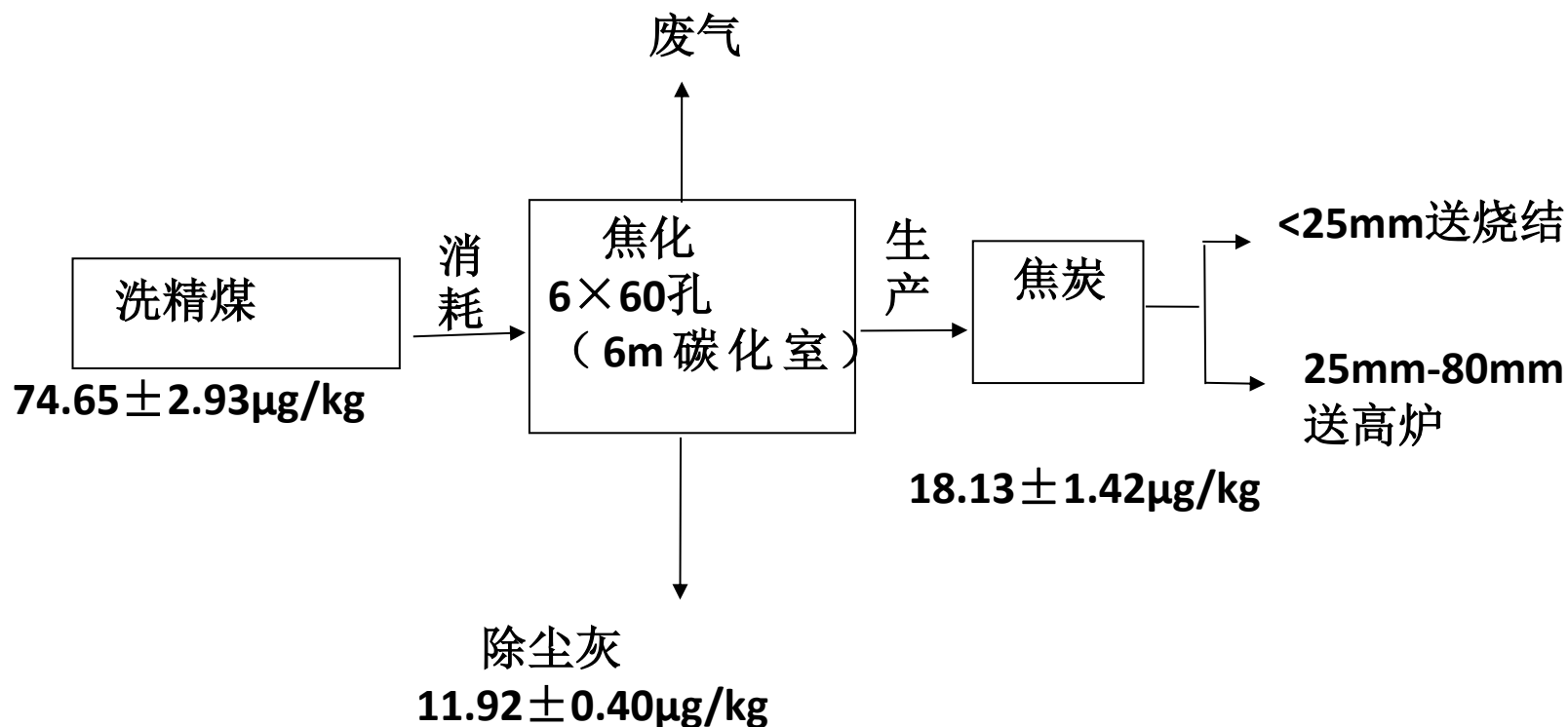
Steel smelting

监测对象生产概况

生产环节	工艺设施	原料	产物	副产物
焦化	6×60孔（6m碳化室） 焦炭：351×10 ⁴ t a ⁻¹	焦煤（主焦煤、1/3焦煤、瘦煤）	焦炭	除尘灰
烧结	3×360m ² 烧结机 烧结矿：950×10 ⁴ t a ⁻¹	铁矿粉、白云石、生石灰、球团矿、烧结返矿、焦粉	烧结矿	烧结钢渣、除尘灰
球团	1条链篦机-回转窑 球团矿：200×10 ⁴ t a ⁻¹	铁矿粉、膨润土	球团矿	除尘灰
高炉	3×2500m ³ 铁水： 580×10 ⁴ t a ⁻¹	焦炭、喷吹煤、球团矿、烧结矿、块矿	铁水	高炉渣、除尘灰
转炉	3×210t 钢水： 615.4×10 ⁴ t a ⁻¹	活性石灰、轻烧白云石、萤石	钢坯	转炉渣、除尘灰

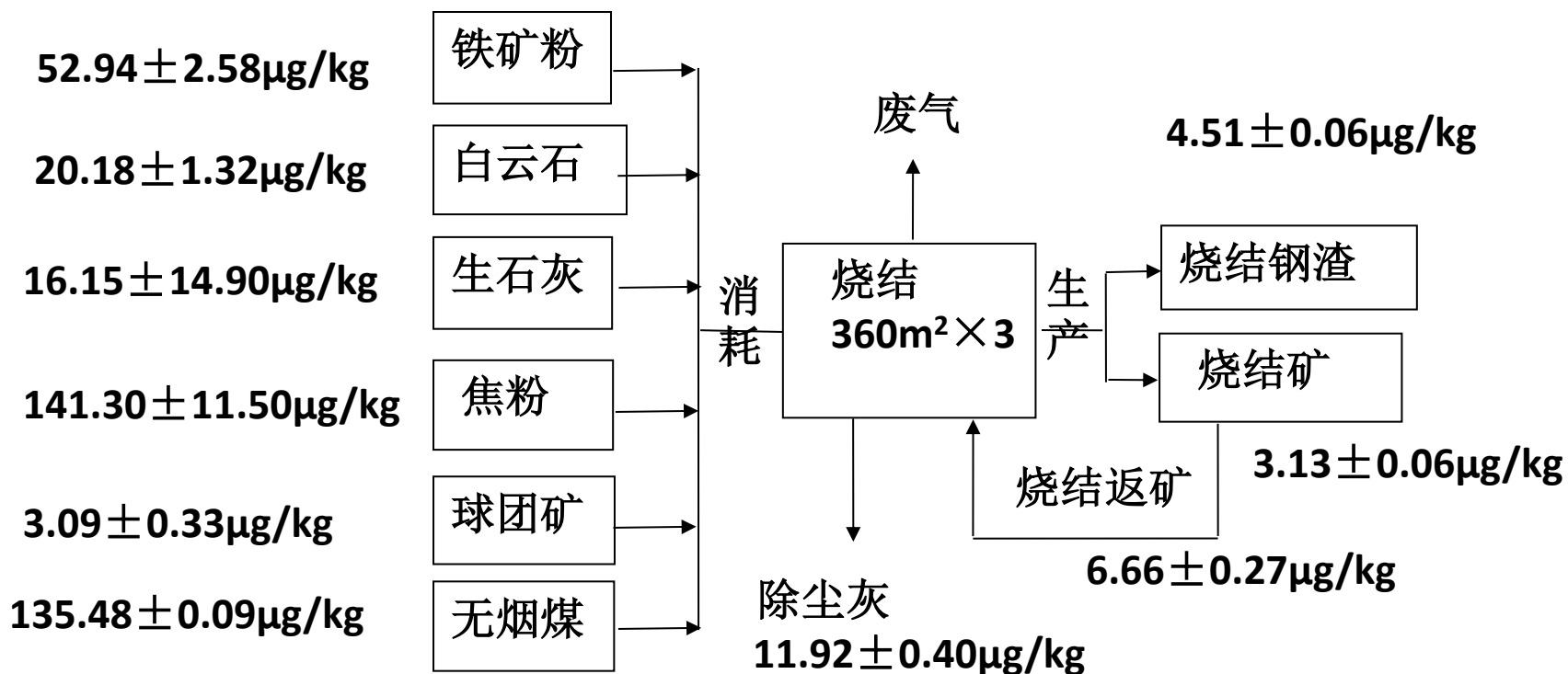
Hg emission from steel smelting

➤ 焦化工序输入、输出物料汞含量分析



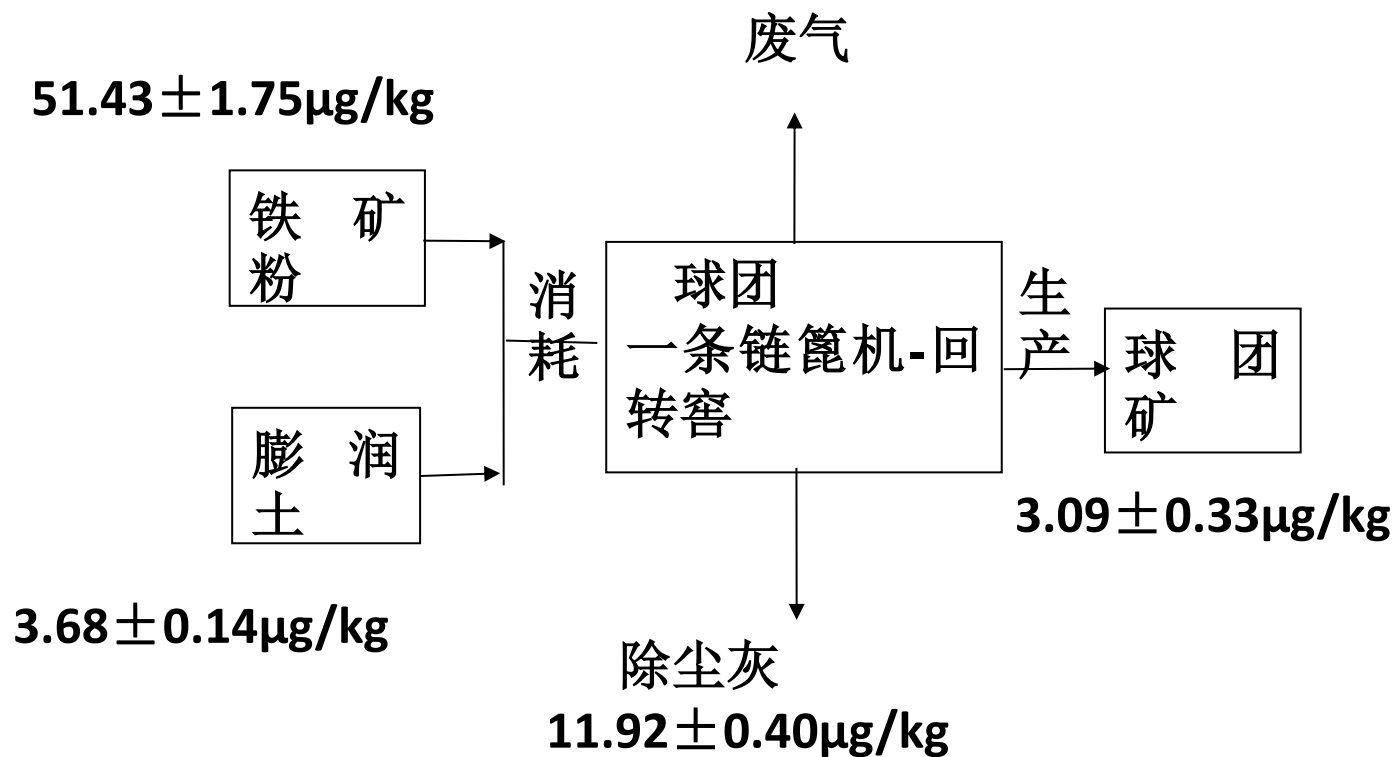
Hg emission from steel smelting

➤ 烧结工序输入、输出物料汞含量分析



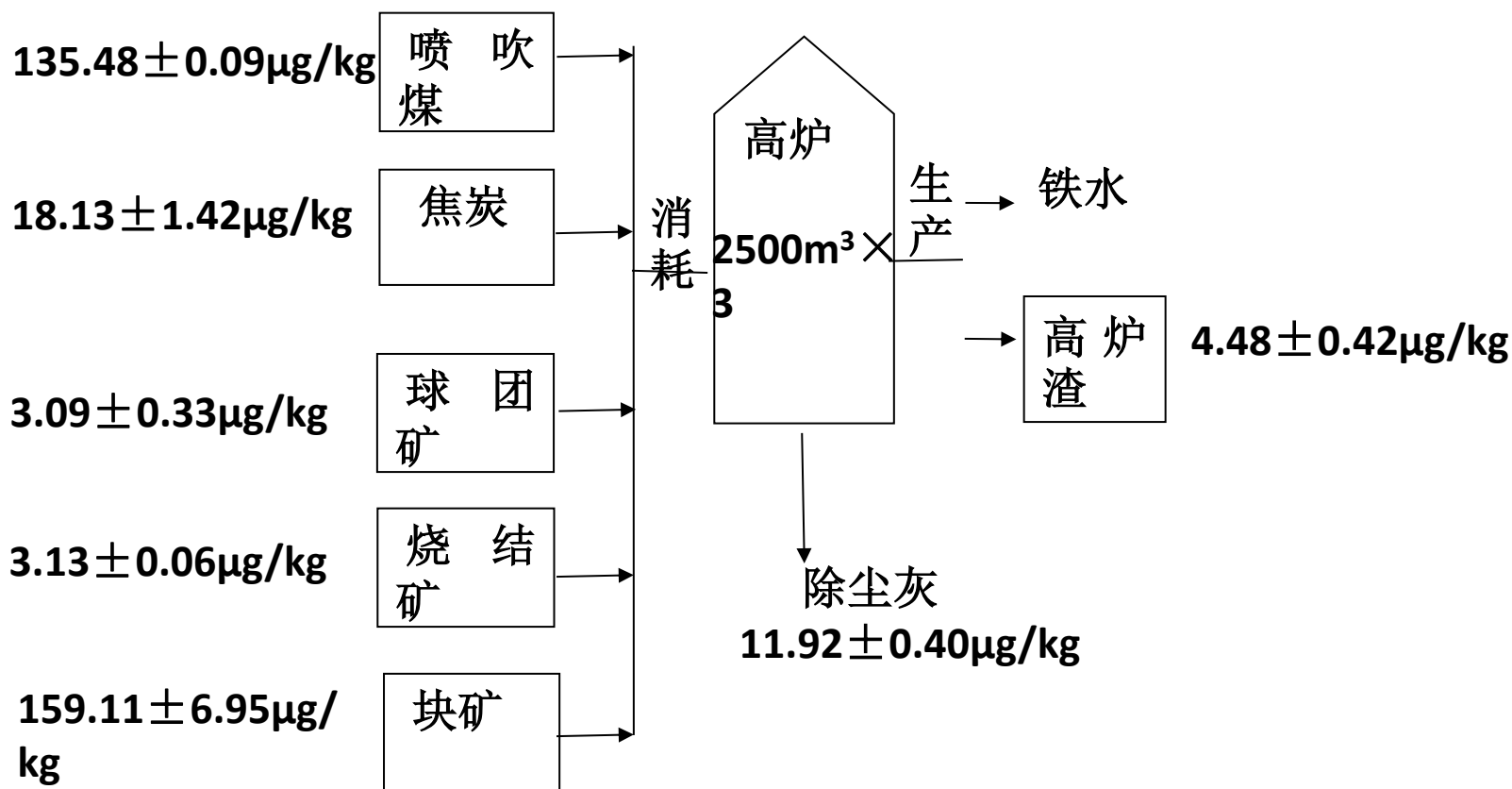
Hg emission from steel smelting

球团工艺输入、输出物料汞含量分析



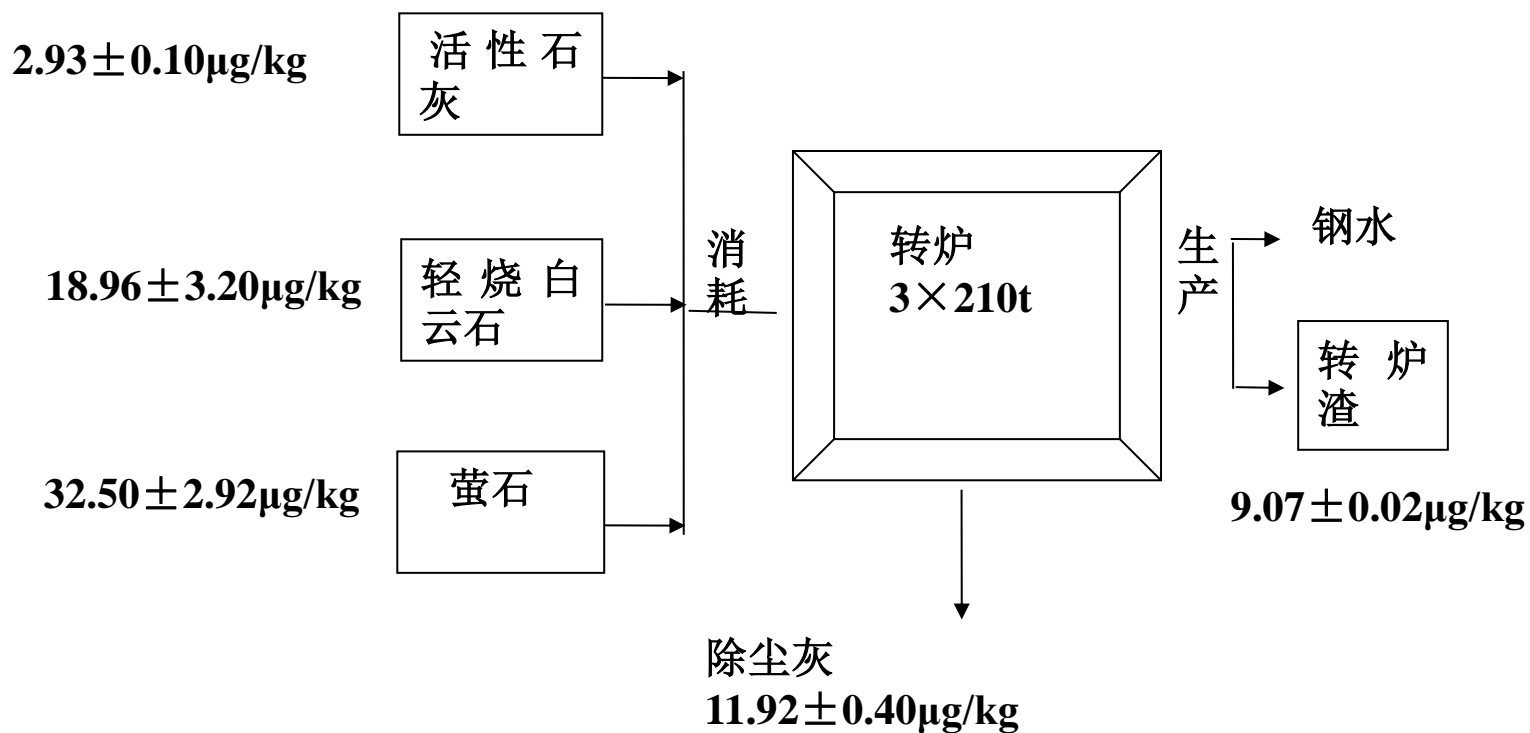
Hg emission from steel smelting

➤ 高炉炼铁工艺输入、输出物料汞含量分析



Hg emission from steel smelting

转炉炼钢工艺输入、输出物料汞含量分析



Hg mass balance in steel smelting

不同工艺汞输入量

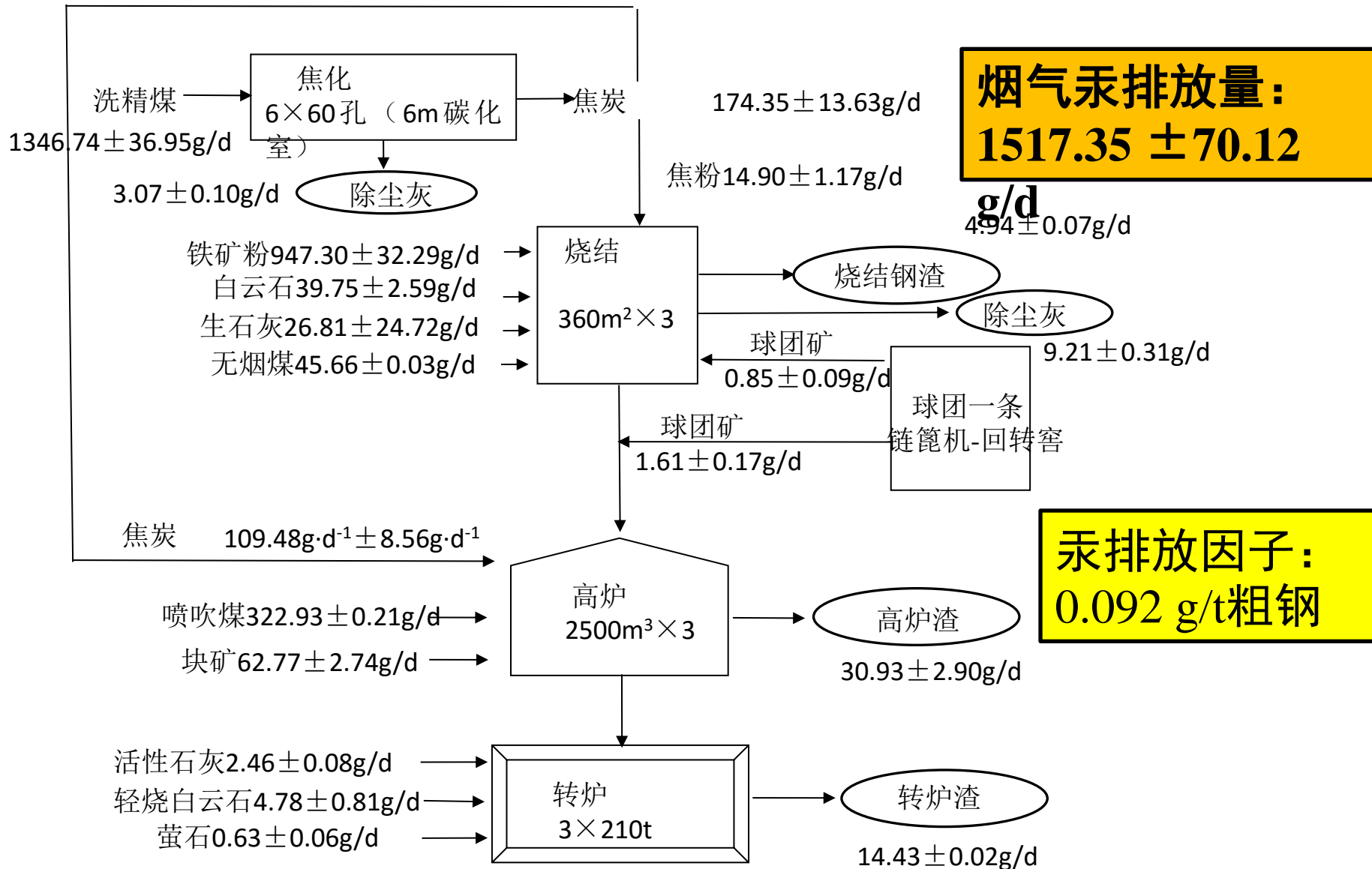
工序	输入物料	V/ t·d ⁻¹	W/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	汞输入量/g·d ⁻¹	合计/g·d ⁻¹
焦化	焦煤	12628.8	106.64±2.93	1346.74±36.95	1346.74±36.95
烧结	铁矿粉（烧结）	18419.2	51.43±1.75	947.30±32.29	1075.27±60.89 (m ₁)
	白云石	1969.9	20.18±1.32	39.75±2.59	
	生石灰	1660.3	16.15±14.90	26.81±24.72	
	焦粉	821.9	18.13±1.42	14.90±1.17	
	无烟煤	337.0	135.48±0.09	45.66±0.03	
	球团矿	274.0	3.09±0.33	0.85±0.09	
高炉	焦炭	6038.4	18.13±1.42	109.48±8.56	496.79±11.68 (m ₂)
	喷吹煤	2383.6	135.48±0.09	322.93±0.21	
	球团矿	520.5	3.09±0.33	1.61±0.17	
	块矿	394.5	159.11±6.95	62.77±2.74	
转炉	活性石灰	843.0	2.93±0.10	2.46±0.08	7.87±0.95 (m ₃)
	轻烧白云石	252.1	18.96±3.20	4.78±0.81	
	萤石	19.5	32.50±2.92	0.63±0.06	

Hg mass balance in steel smelting

不同工艺汞输出量

工序	输出物料	V/t·d ⁻¹	W/μg·kg ⁻¹	汞输出量/g·d ⁻¹	合计/g·d ⁻¹
焦化	焦炭	9616.4	18.13±1.417	174.35±13.63	177.42±13.73
	除尘灰(焦化)	257.64	11.92±0.40	3.07±0.10	
烧结	烧结矿	26027.4	3.13±0.06	81.47±1.43	14.15±0.38 (m ₄)
	烧结钢渣	1095.9	4.51±0.06	4.94±0.07	
	除尘灰(烧结)	772.92	11.92±0.40	9.21±0.31	
高炉	高炉渣	6904.1	4.48±0.42	30.93±2.90 (m ₅)	48.43±3.02
转炉	转炉渣	1591.0	9.07±0.02	14.43±0.02 (m ₆)	
除尘灰(球团、高炉、转炉)		257.64	11.92±0.40	3.07±0.10 (m ₇)	

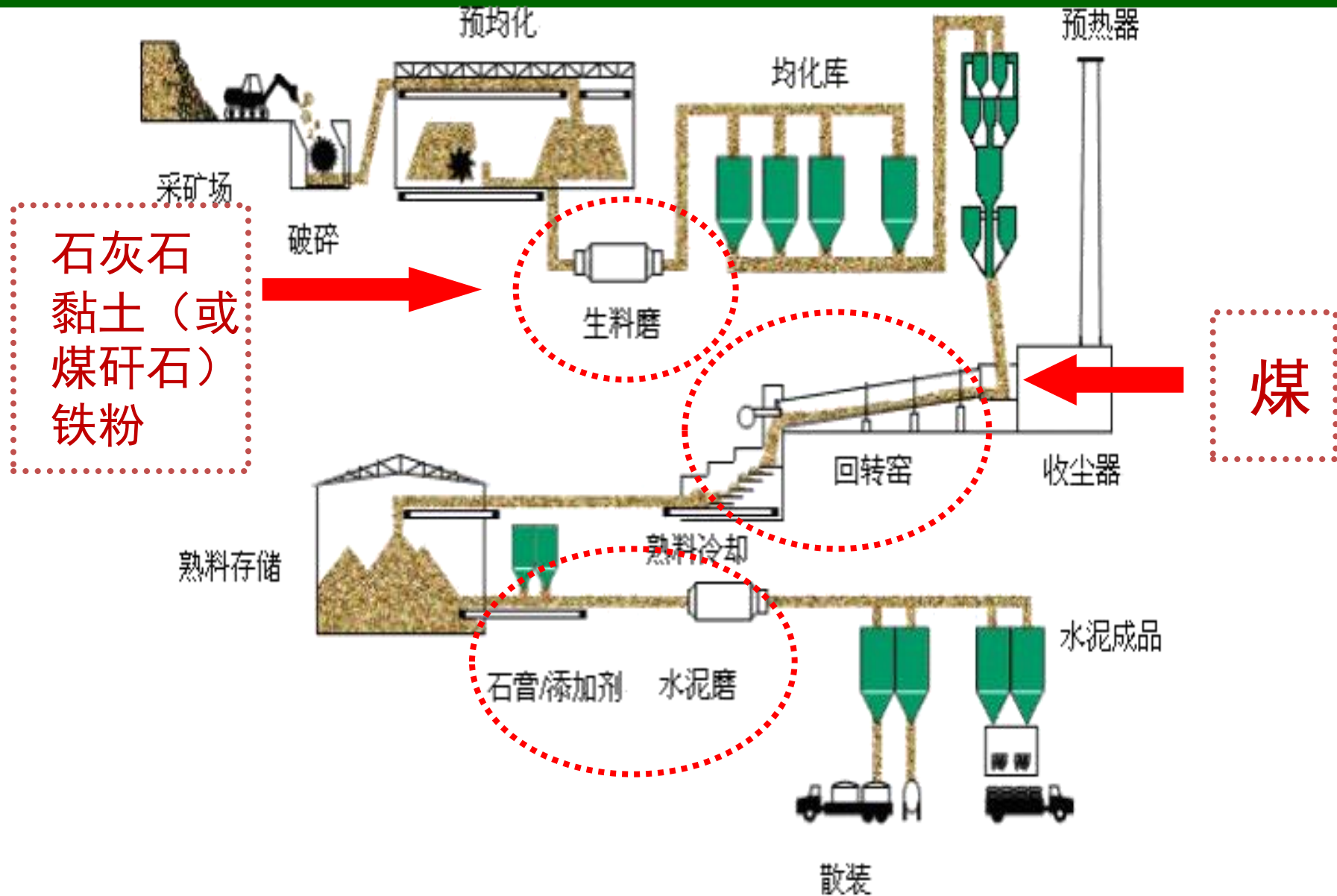
Hg mass balance in steel smelting



Cement production

据统计，2013年重庆市有大小水泥厂78家，水泥产量约为6360.72万吨。其中：新型干法水泥厂年生产水泥占水泥总量的86.47%。立窑及其他水泥厂年生产水泥占水泥总量的13.53%。。

Cement production



Cement production

选取4个水泥厂，分析水泥厂大气汞排放特征及排放因子。

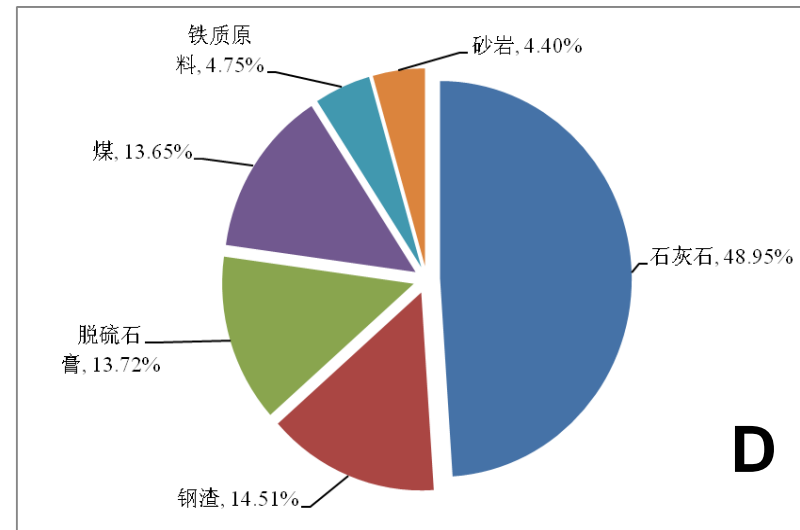
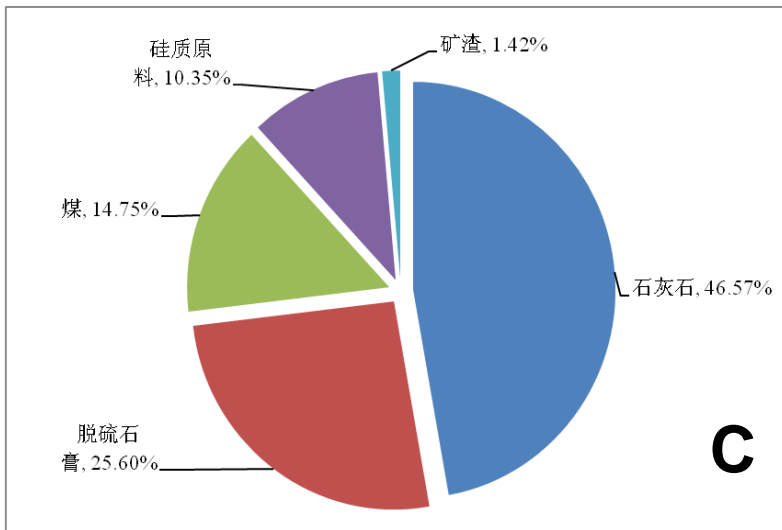
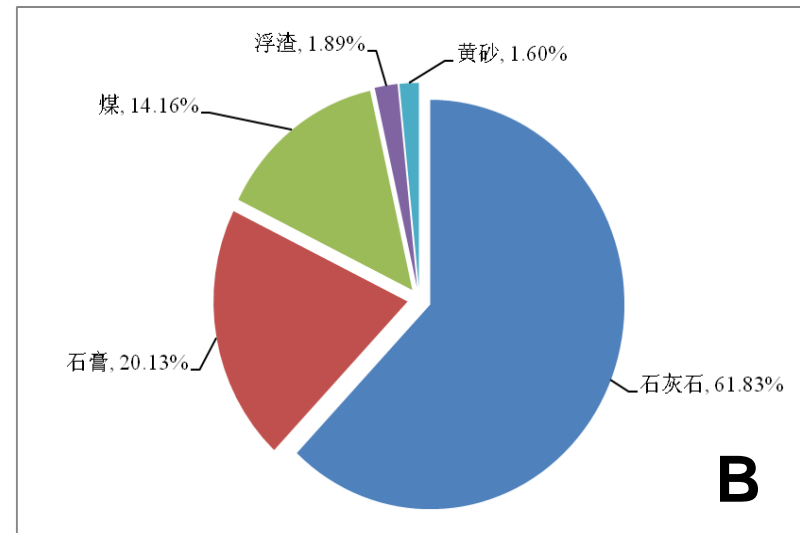
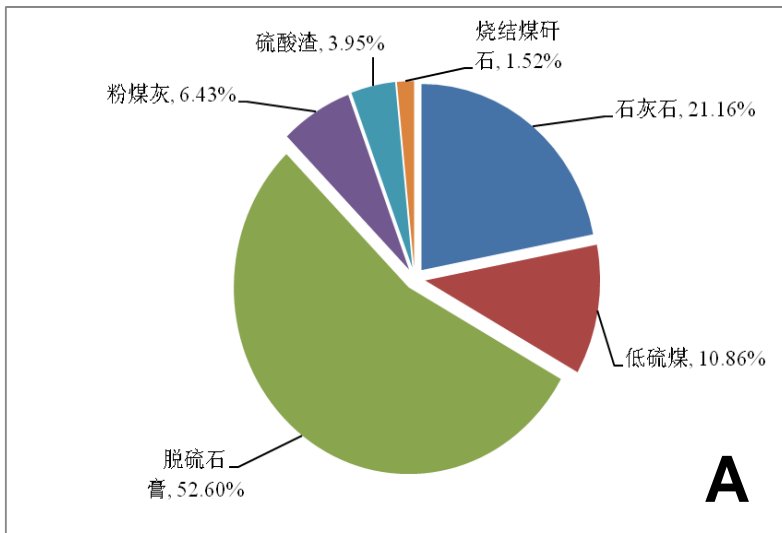
水泥厂编号	A	B	C	D
生产规模 (万吨)	220.80	233.85	189.32	357.59
生产类型	新型干法	新型干法	新型干法	新型干法
除尘类型	布袋除尘器	布袋除尘器	布袋除尘器	布袋除尘器

Cement production

A水泥厂固体样品中的汞含量

	物料	汞含量 ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准偏差
输入	石灰石	30.7	0.01
	硫酸渣	299.08	1.95
	砂岩	25.77	0.39
	石英尾矿	13.42	1.33
	中硫煤	194.94	8.91
	低硫煤	199.86	4.32
	酒糟	21.93	3.13
	煤矸石	182.52	1.08
	矿渣	11.77	1.63
	烧结煤矸石	93.29	0.45
	脱硫石膏	1770.7	38.59
	粉煤灰	109.09	0.32
	输出	熟料	3.16
窑尾灰		852.40	0.15
水泥		49.31	0.64

Cement production



水泥厂输入汞分配比例

Cement production

水泥厂大气汞排放因子比较

水泥厂编号	A	B	C	D
生产规模（万吨）	220.80	233.85	189.32	357.59
生产类型	新型干法	新型干法	新型干法	新型干法
除尘类型	布袋除尘器	布袋除尘器	布袋除尘器	布袋除尘器
石灰石汞量（g/d）	183.36±0.06	165.52±6.0	177.56±0.06	483.12±1.85
脱硫石膏汞量（g/d）	455.72±9.93	54.79±0.83	97.6±1.71	135.43±1.45
石灰石+脱硫石膏汞量（g/d）	639.08±9.99	220.31±6.83	275.16±1.77	618.55±3.30
燃煤汞量（g/d）	103.64±2.47	38.5±6.04	103.64±2.47	134.7±6.99
排放因子（mg/t）	8.22	6.27	9.64	11.61

平均排放因子
8.94 mg/t

Summary of cement production

- 四个水泥厂的汞排放量分别为**49.70、40.15、50.10、113.73 g/d**。
- 水泥生产中的汞主要来源于石灰石和脱硫石膏，其次为燃煤。其中，石灰石及燃煤中的汞带入量对水泥成品以及烟气汞排放量有一定影响。
- 新型干法水泥生产过程大气汞排放因子为6.27-11.61 mg/t水泥，**平均汞排放因子为8.94 mg/t水泥**。

3 Part

- **Hg anthropogenic emission sources of Chongqing**
- **Hg emission factors in key industries of Chongqing**
- **Establishment of Hg anthropogenic emission inventory of Chongqing**

Hg emission amount of coal combustion power plant

重庆市燃煤电厂大气汞排放量（712.44 kg）

电厂序号	锅炉类型	发电量 (万KWh)	排汞量 (kg)
1	煤粉炉	1086193	212.35
2	煤粉炉	613592	119.96
3	煤粉炉	509339	99.58
4	煤粉炉	242319	47.37
5	煤粉炉	238750	46.80
6	煤粉炉	187524	36.48
7	煤粉炉	145630	28.73
8	循环流化床锅炉	177395	20.44
9	煤粉炉	85600	16.73
10	循环流化床锅炉	131611	15.16

前3家电厂汞
排放占总量的
60.6%

32家电厂采用循环流化床锅炉，汞排放量为90.71kg，占12.7%；10家电厂采用煤粉炉，汞排放621.73 kg，占87.3%。
11家循环流化床锅炉电厂未生产。排放量最大的均为煤粉炉电厂。

Hg emission amount of cement production

重庆市水泥厂大气汞排放量 (551.1kg)

水泥厂序号	锅炉类型	发电量 (万KWh)	排汞量 (kg)
1	新型干法	444.38	39.73
2	新型干法	397.48	35.53
3	新型干法		31.97
4	1-3#新型干法; 4#立窑	28	25.15
5	新型干法	233.85	20.91
6	新型干法	220.8	19.74
7	新型干法	219.9	19.66
8	新型干法	195	17.43
9	新型干法	193.86	17.33
10	新型干法	191.3	17.1

前10家水泥厂汞
排放占总量的
44.4%

36家新型干法及回转窑水泥厂，汞排放491.72 kg，占89.2%；立窑及其他水泥厂42家，汞排放59.36 kg，占10.8%。11家水泥厂未生产。

Hg emission amount in other industries

- **钢铁工业**：汞排放因子 0.092 g/t，排放量 **806.32** kg。
- **其他工业与民用燃煤**：汞排放因子 0.0656 g/t，排放量 **2965.12** kg。
- **燃油行业**：汞排放因子 0.065 g/t，排放量 **22.67** kg，
- **有色金属冶炼（铝）**：汞排放因子 0.71 mg/t，排放量 **39.66** kg。
- **废物焚烧**：垃圾焚烧汞排放因子 22.5 mg/t，排放量 36.95 kg。医用废物焚烧排汞因子 10 g/t，排放量 613 kg。总排放量 **649.95** kg。
- **尸体火化**：台车式火化机汞排放因子 0.017 g/具，排放量 0.23kg；平板式火化机汞排放因子 0.374 g/具，排放量 20.46kg。总排放量 **20.69** kg。
- **生物质燃烧**：薪柴燃烧汞排放因子 9.27 ng/g，排放量 46.35kg；秸秆燃烧汞排放因子 6.54 ng/g，排放量 21.58 kg。总排放量 **67.93** kg。
- **其他有意用汞**：大气汞排放量 **100**kg。

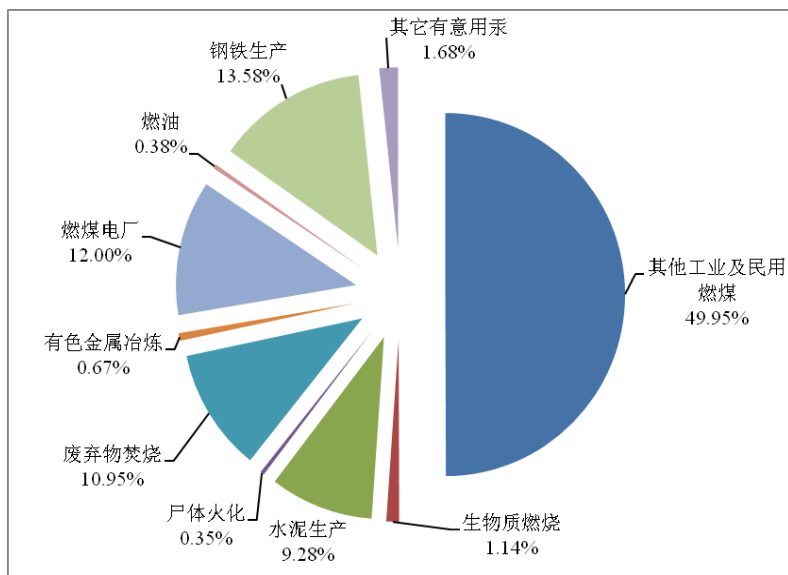
Hg anthropogenic emission inventory of Chongqing

重庆市2013年主要人为源大气汞排放清单

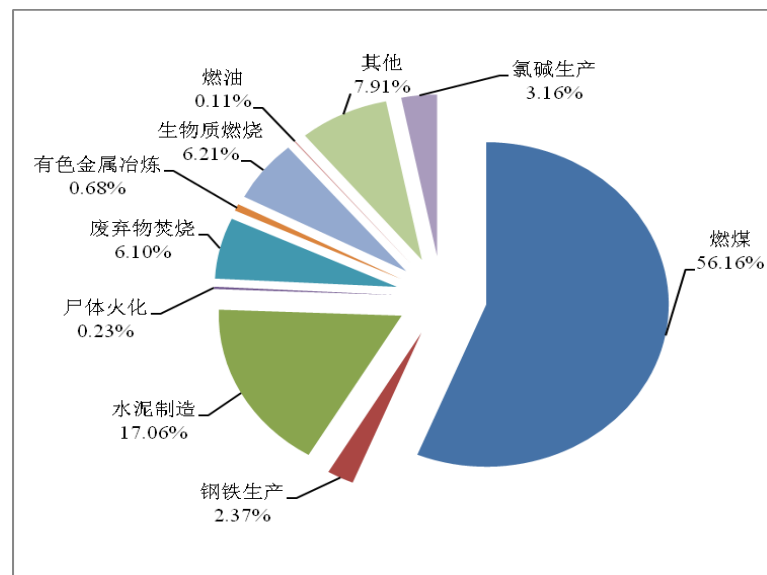
排放源	排放因子 单位	生产或消耗量(亿KWh/万t/亿 m ³ /万具)	排放因子		汞排放量(kg)		
			2013	2001*	2013	2001*	
燃煤电厂	循环流化床	μg/(kw·h)	78.74	11.52	-	90.71	-
	煤粉炉	μg/(kw·h)	318.02	19.55	-	621.73	-
水泥生产	新型干法	mg/t	5500.32	8.94	100	491.72	1510
	立窑及其他	mg/t	860.4	6.9		59.36	
钢铁生产		g/t	876.43	0.092	0.04	806.32	210
其他工业及民用燃煤		g/t	4520	0.0656	0.238	2965.12	4970
废弃物焚烧	垃圾焚烧	mg/t	164.25	22.5	-	36.95	-
	医疗及有害废物焚烧	g/t	6.13	10.0	10.0	613	540
有色金属冶炼(铝)		mg/t	55.86	0.71	15000	39.66	60
生物质燃烧	燃油	g/t	34.87	0.065	0.065	22.67	10
	薪柴	mg/t	500	9.27	65	46.35	550
	秸秆	mg/t	330	6.54		21.58	
尸体火化	台车式火化机	g/具	1.37	0.017	0.7	0.23	20
	平板式火化机	g/具	5.47	0.374		20.46	
氯碱生产					3.5	-	280
其它有意用汞						100	700
总计						5936	8850

Hg emission amount in Chongqing

- 2013年重庆市人为源大气汞排放总量约为**5936kg**。
- 人为源大气汞排放主要来自于**原煤焚烧、钢铁冶炼、燃煤电厂、水泥生产和废物焚烧**，大气汞排放量占总排放量的**95.76%**。



2013年



2001年

Acknowledgement

- **National Science Foundation of China**
- **National Key Basic Research Program of China**
- **EPA of Chongqing, China**



谢谢关注！
Thank You!

