

煤电气载污染物人体健康风险生命周期评价^{*}

林亲铁¹, 李适宇¹, 易春叶², 王志宏²

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275

2. 广东省工程技术研究所, 广东 广州 510400)

摘 要: 以国外的流行病学研究资料、健康统计资料和国内的有关统计资料为基础, 采用污染物生命周期分析的方法, 依据归宿分析—效应分析—危害分析这条途径, 研究了采煤—运输—发电过程产生的气载污染物通过空气、水和食品三种暴露途径对人体健康的危害, 将煤—电生产整个生命周期排放的气载污染物与人体健康危害之间的定量关系以单位质量污染物所引起的残疾调整生命年(D)表示, 提出了煤—电气载污染物对人体健康危害的定量评价方法。对广东茂名热电厂实例分析表明, 在煤—电生产的整个生命周期过程中, 由SO_x、NO_x、Cr⁶⁺三种污染物引起的健康危害为总健康危害的90.7%, 气载致癌物中Cr⁶⁺的健康危害最大, 三个不同生产阶段以燃煤发电阶段产生的人体健康风险最大。

关键词: 煤电; 气载污染物; 健康风险; 生命周期评价

中图分类号: X823 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2005)02-0116-05

电力工业是国民经济的基础产业, 也是我国煤炭消费的主渠道。目前我国电力生产以火电为主, 在全国发电量中火电占80%左右, 火电中90%为燃煤机组。这些燃煤电厂在生产运行中向大气排放出大量的气载污染物, 成为酸雨及大气污染的主要污染源。但是, 这些化学污染物对环境特别是人体健康的危害究竟有多大? 当前环境评价中普遍采用的“等标污染指数法”无法定量回答这一问题。本文在广泛调研国外流行病学研究资料、国内外燃煤电厂基本状况的基础上, 采用污染物生命周期(排放—迁移转化—人体吸收)的方法, 通过归宿分析——效应分析——危害分析这一途径, 研究了气载污染排放物通过不同介质和途径对人体健康的影响, 提出了气载污染物产生的人体健康风险的定量评价方法。在此基础上, 进一步采用生命周期评价方法, 从煤矿开采、煤炭运输、燃煤发电三个阶段对国内一个较典型燃煤电厂的气载污染排放物所产生的人体健康风险进行了实例分析。

1 评价模式

人体健康风险定量评价包含如下3个基本假设: ①污染排放物在整个影响范围内均匀分布, 在水、空气和土壤中形成均匀浓度, 不考虑污染源附

近高浓度污染物的局部急性效应; ②不考虑多种污染物之间可能存在的协同和拮抗作用, 即认为各种污染物共同作用于人体所产生的总健康风险是各种污染物单独作用所产生的健康风险之和; ③在本研究的污染物浓度范围内, 各种污染物的剂量响应关系是线性无阈的。

污染物进入到环境后, 主要通过空气、饮用水和食物三种途径对人体健康产生影响(NO_x等非致癌物只考虑通过空气途径对人体健康产生危害)。本文根据污染物对人体健康的影响路线, 建立污染物人体健康风险评价模型, 将排放到大气中的污染物与人体健康风险的因果关系以单位质量污染排放物所引起的残疾调整生存年D(disability adjusted life years)表示。

1.1 归宿分析(Fate analysis)

归宿分析主要研究各种污染物在环境中的迁移转化以及最终在各种介质中产生的浓度。归宿因子是污染物归宿分析中的一个重要参数, 它是指一定范围内的介质k中污染物浓度的增加量与该环境中污染物排放总量的比值^[1]。归宿因子 $F_{i,k}$ 为

$$F_{i,k} = \left(\frac{C_{i,k}}{M_i/A} \right) \quad (1)$$

式中: $F_{i,k}$ 为归宿因子, 其单位随介质k(空气、

* 收稿日期: 2004-03-04

基金项目: 广东省科技计划资助项目(2003C103040)

作者简介: 林亲铁(1972生), 男, 博士, 通讯联系人, 李适宇, E-mail: eesly@zsu.edu.cn

水和食品)的不同而不同; $C_{i,k}$ 为介质 k 中污染物 i 浓度的增量, 其单位随介质 k 的变化而变化; M'_i 为环境中污染物 i 的年平均排放量 (kg/a), A 为环境面积 (m^2)。

1.2 效应分析 (Effect analysis)

效应分析就是分析环境中的污染物浓度与人类发生疾病之间的关系, 它将作为终点的可观察健康效应与污染物 i 的归宿因子 $F_{i,k}$ 联系在一起。

污染物 i 通过暴露途径 k 产生的效应因子为

$$E_{i,k} = \frac{\rho_i}{T} \cdot R_{i,k} \tag{2}$$

式中: $E_{i,k}$ 为效应因子, 其单位随介质 k 的不同而不同, ρ_i 为人口密度, T 为平均寿命 (70a), $R_{i,k}$ 为污染物 i 通过暴露途径 k 产生的单位风险, 其单位随介质 k 的不同而不同。

这样, 根据式 (1) 和式 (2) 可以计算出排放到环境中的单位质量污染物 i 通过暴露途径 k 所产生的发病率 $T_{i,k}$

$$T_{i,k} = F_{i,k} E_{i,k} C = \frac{C_{i,k}}{(M'_i/A)} \cdot \frac{\rho_i}{T} \cdot R_{i,k} \cdot C \tag{3}$$

式中: $T_{i,k}$ 为排放到环境中的单位质量污染物 i 通过暴露途径 k 所产生的发病率 (kg^{-1}), C 为单位转换因子, 当 k 为饮用水和空气时, C 为 10^9 ; k 为食品时, C 为 10^6 。

1.3 危害分析 (Damage analysis)

衡量污染物对人体健康的一个重要指标是残疾调整生存年 D , 它是反映疾病所致的伤残和死亡带来的健康寿命损失年数的综合指标。它由残疾造成的损失——残疾生命年 Y_1 (Years Lived Disabled) 以及早死造成的损失——生命损失年 Y_2 (Years of Life Lost) 两部分组成。残疾调整生存年 D 为^[2]:

$$D = Y_1 + Y_2 \tag{4}$$

根据式 (3) 和式 (4), 可以计算出单位质量污染排放物 i 对人体的健康危害:

$$\frac{D_i}{M_i} = \sum_k \{ T_{i,k} (Y_{1k} + Y_{2k}) \} = T_{i,a} D_a + T_{i,w} D_w + T_{i,f} D_f \tag{5}$$

式中, $T_{i,a}$ 为单位污染物 i 通过空气吸入途径引发的发病率, $T_{i,w}$ 为单位物质 i 通过饮用水摄入途径引发的发病率, $T_{i,f}$ 为每千克物质 i 通过食品食入途径引发的发病率, D_a 为单位病例通过吸入途径引发的残疾调整生存年, D_w 为单位病例通过饮用水摄入途径引发的残疾调整生存年, D_f 为单位病例通过食品摄取途径引发的残疾调整生存年。

2 人体健康风险计算

2.1 电厂简介

茂名热电厂位于茂名市西部工业区, 2001 年对 200MW 机组进行了以煤代油热电联产技术改造, 由燃油改为燃煤, 年耗煤量为 44.5 万 t。电厂采用高效静电除尘器, 除尘效率为 99.6%, 烟囱高度为 150 m, 出口内径为 6 m, 总烟气量为 $278.42 \text{ Nm}^3/\text{s}$, 燃煤主要由贵州盘江煤电有限责任公司提供。根据茂名市气象站 1995—1999 年统计资料, 该区年平均主导风向为东风, 年平均风速为 2.5 m/s 。

2.2 源项

本文研究目标为茂名热电厂电能生产的不同生命周期阶段排放的对人体健康产生危害的气载污染物, 所确定的产品系统边界以工艺流程进行划分, 包括煤矿开采、煤炭运输、燃煤发电 3 个阶段, 因为煤燃烧产生的煤灰主要是作为另一公司的建筑材料, 因此不考虑最终处置阶段。不同生命周期阶段排放的气载污染物见表 1, 其中煤矿开采阶段产生的气载污染物主要参阅了文献 [3], 运输阶段产生的气载污染物主要参阅了文献 [4], 燃煤发电阶段产生的 SO_x 、 NO_x 、TSP、CO、 NH_3 (非致癌物) 主要参阅了电厂的环境影响评价报告书^①, BaP (致癌物) 和几种重金属 (致癌物) 主要按国内燃煤发电厂的统计值^[5] 计算得到。

2.3 健康风险计算

2.3.1 人口密度 煤矿开采阶段排放的气载污染物为地面排放, 受其影响的人口密度为盘江县的平均人口密度 ($2.74 \times 10^{-4} \text{ 人/m}^2$); 煤炭运输阶段产生的气载污染物排放高度为 4 m, 受其影响的人口密度为火车沿途的平均人口密度 ($3.71 \times 10^{-4} \text{ 人/m}^2$); 燃煤发电产生的气载污染物排放高度为 150 m, 受其影响的人口密度由污染物在大气中的残留时间、风速和影响范围内的实际人口确定, 其中受 SO_x 、 NO_x 、TSP、CO、 NH_3 以及 Cd 影响的人口密度为 $2.53 \times 10^{-4} \text{ 人/m}^2$, 受 BaP、 Cr^{6+} 影响的人口密度为 $4.13 \times 10^{-4} \text{ 人/m}^2$, 受 As 影响的人口密度为 $3.31 \times 10^{-4} \text{ 人/m}^2$, 受 Ni 影响的人口密度为 $3.99 \times 10^{-4} \text{ 人/m}^2$ 。

2.3.2 其它参数的选择 根据参考文献 [6] 和 [7] 可抽得污染物的归宿因子, 根据参考文献 [6、8—11] 可查得污染物的单位风险, 根据参考文献

① 国家环保总局华南环境科学研究所. 茂名热电厂 20 万千瓦机组以煤代油热电联产技术改造项目环境影响报告书 [M]. 2001

[6] 可计算各种污染物引起的单位病例引发的 D ，各种参数值见表 2、3。

表 1 茂名热电厂电能生产的不同生命周期阶段气载污染排放物

Tah 1 Airborne pollutants from Maoming coal-fired power plant

污染物	煤矿开采		煤炭运输		燃煤发电	
	年排放量 ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	归一化释放量 ($\text{kg} \cdot \text{GW}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	年排放量 ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	归一化释放量 ($\text{kg} \cdot \text{GW}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	年排放量 ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	归一化释放量 ($\text{kg} \cdot \text{GW}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)
SO_x	14.2	71	1.02×10^4	5.10×10^4	4.31×10^3	2.15×10^7
NO_x	9.51	47.6	5.66×10^4	2.83×10^5	2.28×10^3	1.14×10^7
TSP	2.58	12.9	2.42×10^4	1.21×10^5	3.83×10^2	1.92×10^6
CO	1.84	9.21	1.53×10^4	7.65×10^4	1.80×10^2	9.10×10^5
NH_3	19.7	98.6	—	—	2.18×10^{-5}	1.09×10^{-1}
BaP	—	—	—	—	6.50×10^{-3}	3.25×10^1
As	—	—	—	—	3.00×10^{-2}	1.50×10^2
Cd	—	—	—	—	1.46×10^{-2}	7.30×10^1
Cr^{6+}	—	—	—	—	8.60×10^{-2}	4.30×10^2
Ni	—	—	—	—	1.16×10^{-5}	5.79×10^{-2}

— 表示无数据或未检测到

表 2 气载污染物归宿因子

Tah 2 Fate factors for airborne pollutants

污染排放物	污染转化物	$F_{i,a} / (\text{m}^2 \cdot \text{a} \cdot \text{m}^{-3})$	$F_{i,w} / (\text{m}^2 \cdot \text{a} \cdot \text{L}^{-1})$	$F_{i,f} / (\text{m}^2 \cdot \text{a} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$
SO_x	SO_2	3.00×10^{-6}	—	—
	硫酸盐	1.30×10^{-6}	—	—
NH_3	硝酸盐	6.00×10^{-7}	—	—
	硫酸盐	1.70×10^{-6}	—	—
	硝酸盐	3.60×10^{-6}	—	—
NO_x	NO_2	2.50×10^{-6}	—	—
	O_3	1.50×10^{-6}	—	—
TSP	PM_{10}	4.40×10^{-6}	—	—
CO	CO	1.00×10^{-4}	—	—
BaP	BaP	5.40×10^{-6}	5.10×10^{-4}	1.60×10^{-3}
As	As	8.00×10^{-6}	1.90×10^{-4}	6.00×10^{-3}
Cd	Cd	1.60×10^{-5}	8.60×10^{-4}	1.60×10^{-3}
Cr^{6+}	Cr^{6+}	5.30×10^{-6}	1.40×10^{-3}	0.17
Ni	Ni	4.51×10^{-6}	3.33×10^{-4}	3.40×10^{-3}

— 表示无数据或未检测到

2.3.3 健康危害 根据式 (2)、式 (3)、式 (5) 和表 1—4 可以计算出各生命周期阶段气载污染物的人体健康风险。计算结果见表 4。

3 讨 论

由表 4 可看出，茂名热电厂电能生产的气载污染物人体健康归一化风险为 $8.97 \times 10^3 \text{ a/GW}$ ，其中燃煤发电阶段的人体健康归一化风险最大，为 $8.82 \times 10^3 \text{ a/GW}$ ，占整个电能生产过程气载污染物健康风险的 98.3%，煤炭开采阶段的人体健康风险最小，还不到整个电能生产过程气载污染物健康风险的 0.1%，这主要是因为煤炭开采阶段气载污

染物排放数据在我国极为缺乏，本文参考了美国同行业的数据，而美国煤炭开采业的技术水平明显高于我国。

由表 4 还可以看出，在电能生产的整个生命周期中， SO_x 等非致癌物产生的健康风险为总健康风险的 71.5%， Cr^{6+} 等致癌物产生的健康风险为总健康风险的 28.5%，煤电气载污染物的健康风险主要是由非致癌物引起的。由表 4 还可以看出，由 SO_2 、 NO_x 、 Cr^{6+} 3 种污染物引起的健康风险为总健康风险的 90.7%，因此在对燃煤电厂气载污染物进行治理时，从保护人体健康的角度出发，必须重点减少 SO_2 、 NO_x 、 Cr^{6+} 3 种污染物的排放。

表 3 气载污染物单位风险与单位病例引发的残疾调整生存年
Tab 3 Unit risk factors and *D* per incidence case caused by airborne pollutants

污染排放物	污染转化物	$\frac{R_{i,a}}{(\mu\text{g}^\circ\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{人}^{-1})}$	$\frac{R_{i,w}}{(\mu\text{g}^\circ\text{L}^\circ\text{a}^{-1}\cdot\text{人}^{-1})}$	$\frac{R_{i,f}}{(\text{mg}^\circ\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{人}^{-1})}$	$\frac{D_a}{a}$	$\frac{D_w}{a}$	$\frac{D_f}{a}$
SO _x	SO ₂	7.20×10 ⁻⁴	—	—	0.75	—	—
	硫酸盐	0.44	—	—	9.4	—	—
NH ₃	硝酸盐	0.26	—	—	9.4	—	—
	硫酸盐	0.44	—	—	9.4	—	—
	硝酸盐	0.26	—	—	9.4	—	—
NO _x	NO ₂	3.40×10 ⁻⁴	—	—	0.75	—	—
	O ₃	1.46×10 ⁻²	—	—	0.75	—	—
TSP	PM ₁₀	0.26	—	—	9.4	—	—
CO	CO	1.45×10 ⁻⁵	—	—	0.75	—	—
BaP	BaP	8.70×10 ⁻²	2.10×10 ⁻⁴	7.30	16.1	13.1	13.1
As	As	1.50×10 ⁻³	5.00×10 ⁻³	1.50	16.1	13.1	13.1
Cd	Cd	1.80×10 ⁻³	—	6.30	16.1	13.1	13.1
Cr ⁶⁺	Cr ⁶⁺	1.20×10 ⁻²	—	41.00	16.1	13.1	13.1
Ni	Ni	3.40×10 ⁻⁴	—	1.19	16.1	13.1	13.1

— 表示无数据或未检测到

表 4 茂名热电厂电能生产的气载污染物人体健康归一化风险
Tab 4 Human health risks of airborne pollutants from Maoming Coal-fired Power Plant

污染物	煤矿开采 <i>D_a</i>	煤炭运输 <i>D_a</i>	燃煤发电			<i>D/a</i>
	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>D_a/a</i>	<i>D_w + D_f/a</i>	<i>D/a</i>	
SO ₂	1.08×10 ⁻²	9.36	3.04×10 ³	—	3.04×10 ³	3.05×10 ³
NO _x	1.21×10 ⁻²	86.6	2.67×10 ³	—	2.67×10 ³	2.77×10 ³
TSP	3.96×10 ⁻³	44.9	5.44×10 ²	—	5.44×10 ²	5.93×10 ²
CO	1.77×10 ⁻⁵	0.18	1.59	—	1.59	1.79
NH ₃	3.94×10 ⁻²	5.91×10 ⁻⁵	4.03×10 ⁻⁵	—	4.03×10 ⁻⁵	3.95×10 ⁻²
BaP	—	—	1.45	1.11×10 ²	1.13×10 ²	1.13×10 ²
As	—	—	1.37×10 ⁻¹	8.37×10 ¹	8.39×10 ¹	8.39×10 ¹
Cd	—	—	1.22×10 ⁻¹	3.48×10 ¹	3.50×10 ¹	3.50×10 ¹
Cr ⁶⁺	—	—	2.60	2.32×10 ³	2.32×10 ³	2.32×10 ³
Ni	—	—	8.13×10 ⁻⁶	1.75×10 ⁻²	1.75×10 ⁻²	1.75×10 ⁻²
合计	6.63×10 ⁻²	145	6.26×10 ³	2.56×10 ³	8.82×10 ³	8.97×10 ³

— 表示无数据或未检测到

由表 4 还可以看出, 燃煤发电过程中, BaP、Cr⁶⁺ 等致癌物通过呼吸暴露途径产生的健康风险为 4.31 a/GW, 而通过饮水途径和食入途径产生的健康风险是 2.56×10³ a/GW, 远大于通过呼吸暴露途径产生的健康风险。这主要是因为排放到大气中的重金属, 一部分吸附在颗粒物上随风输送, 大部分则直接沉降到地面被植物吸收再通过食物链在人体内富集。在所有的致癌物中, 以 Cr⁶⁺ 通过食入途径产生的健康风险最大, 其原因主要有如下两点: ①Cr⁶⁺ 由大气到食品中的归宿因子显著高于其它致癌物; ②本研究在选择致癌物的单位风险时, 采用了 WHO 的数据。WHO 在建立该数据库时已经指出, 所有致癌物的吸入单位风险确定性较大, 而口

服单位风险带有较大的不确定性, 其中又以 Cr⁶⁺ 和 Ni 的口服单位风险不确定性最大, 正是由于这种原因, WHO 对致癌物的单位风险因子不断进行更新。

参考文献:

[1] JOLLIET O, CRETATZ P. Calculation of fate and exposure coefficients for the life cycle toxicity assessment of air emissions[J] . Int J of LCA, 1997, 2(2): 104- 110.
[2] MURRAY C J L, LOPEZ A D. The global burden of disease, I . Global burden of disease and injury series[M] . Boston: Harvard University Press, 1996: 10- 52.
[3] PAMELA L, MARGARET K, DAWN R. Life cycle assessment of coal fired power production[EB/OL] . available at <http://>

www. pre. nl June, 1999.

[4] 李桂中, 电力建设与环境保 护[M] . 天津: 天津大学出 版社, 2000. 75— 76.

[5] 潘自强. 燃煤排放物中有害物质的测定与分析[M] . 北 京: 原子能出版社, 1993. 57— 128.

[6] HOFSTETTER P. Perspectives in life cycle impact asses- sment; A structured approach to combine models of the technosphere, ecosphere and valuesphere [M] . Boston/ Dordrecht/London: Kluwers Academic Publishers, 1998. 362 — 365.

[7] JOLLIET O, CRETIAZ P. Fate coefficients for the toxicity assessment of air pollutants[J] . Int J LCA, 1997(b), 2(2): 104— 110.

[8] OSTRO B D. Air pollution and morbidity revisited: A specification test[J] . J Environ Econ Manage, 1987, 14: 87 — 98.

[9] SPIX C, WICHMANN H E. Daily mortality and air pollu- tants: Findings from Koln, Germany[J] . J Epidemiol Comm Health, 1996, 50(Suppl 1): 52— 58.

[10] OSTRO B D, ROTHSCCHILD S. Air pollution and acute respiratory morbidity: An observational study of multiple pollutants[J] . Environ Res, 1989, 50: 238— 247.

[11] WHO. Diesel Fuel and Exhaust Emission, Environmental Health Criteria 171 [M] . Geneva: WHO Regional Publications, 1996.

Human Health Risk Assessment of Airborne Pollutants from Coal fired Power Plants by Life Cycle Method

LIN Qin tie¹, LI Shi yu¹, YI Chun ye², WANG Zhi hong²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China;
(2. Guangdong Engineering and Technological Research Institute, Guangzhou 510400, China)

Abstract: The human health risk of airborne pollutants emitting from coal mining to coal fired power plants is investigated by analyzing their environmental behaviors during the life cycle based on epidemic statistic data. The risk assessment method consists of three steps. The first step is fate analysis, which models the fate factors to estimate the resulting contaminant level in the compartments of air, drinking water and food due to the coal life cycle emission into the air. The second step is effect analysis, which estimates stricken numbers according to the potential population exposed to the contaminated air, drinking water and food and their dose response relationships. The third step is damage analysis, which turns the resulting fate factors and the effect factors into the disease incidence factors expressed as disability adjusted life years (DALYs). The results of a case study for Guangdong Maoming Coal Fired Power Plant show that human health risk resulted from coal fired phase is much more severe than that from coal transport process and coal mining process, and the risks resulted from SO_x, NO_x, Cr⁶⁺ account for 90.7% of the total risks. It is also revealed that Cr⁶⁺ is the most harmful pollutant among airborne carcinogenic pollutants released in the life cycle.

Key words: coal mining transport coal fired power plant; airborne pollutant; health risk; life cycle assessment