



Toxics-Free
China

无毒先锋

第04期

DETOXIFICATION FILE

解毒档案

—— 解开垃圾焚烧
与二噁英的迷思

为什么要关注二噁英

二噁英是世界卫生组织列出的应引起重大公共卫生关注的10种化学品之一。作为一种典型的持久性有机污染物，它具有高毒、难降解、可生物累积、可远距离传输等特性。早在1997年，世界卫生组织下属的国际癌症研究所就将它列为一种已知的人类致癌物。近年来，二噁英的内分泌干扰毒性及低剂量暴露下的长期健康影响也得到更清楚的认识。

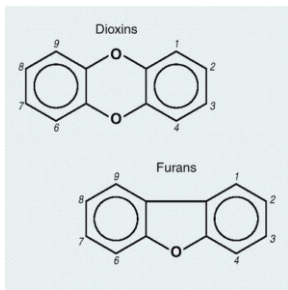


图 1：二噁英化学结构式

2004年生效的联合国《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》（以下简称《斯德哥尔摩公约》）要求包括中国在内的缔约方采取行动，减少二噁英人为来源的排放总量，其目的是持续减少并在可行的情况下最终消除此类化学物质的污染。

垃圾焚烧与二噁英

1977年，科学家第一次报道荷兰阿姆斯特丹某生活垃圾焚烧厂飞灰检出二噁英的问题，由此开启了全世界范围内对垃圾焚烧二噁英污染的关注和研究。^[1]



图 2：广州某垃圾焚烧厂外观

1985年，德国科研机构在一次实验中观察到实验焚烧炉飞灰温度变化与二噁英水平存在某种规律性关系，即在200摄氏度以下，二噁英的量保持在非常低的水平不变，此后随温度上升开始迅速增加，至300摄氏度达到最高值，为初始水平的10倍。再往后，随温度继续升高，二噁英产生量开始下降，至600摄氏度几乎完全消失。

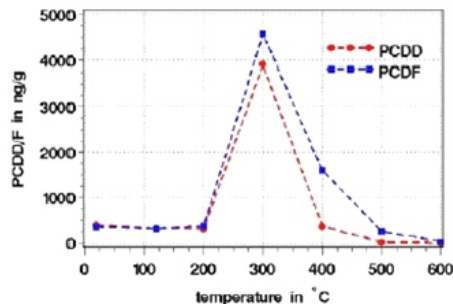


Fig. 1 Formation of PCDD and PCDF in fly ashes from waste incineration during annealing in air atmosphere

图 3：降温过程中垃圾焚烧飞灰二噁英的生成规律

接下来，学界逐步弄清了垃圾焚烧产生二噁英的化学反应机理，可概括为一种复杂的异构化/氧氯化过程（Heterogeneous oxy-chlorination process），包含如下要素和条件：

- (1) 未完全燃烧产物，如碳黑；
- (2) 卤素，主要是氯，也可以是溴；
- (3) 氧化气氛；
- (4) 催化剂，最佳者是铜盐。此外，学者还确认，在垃圾焚烧过程中，除了二噁英的生成外，其他氯化化合物，如氯苯、氯酚、多氯联苯及氯代芳香烃也会一并产生，而且相关反应开始变得明显的温度也是200摄氏度。^[2]

基于以上认识，科学家认为，垃圾焚烧厂二噁英减排工作的重点首先在于源头生成减量技术的应用，包括：

- (1) 努力做到完全燃烧，以减少初始烟气、飞灰和锅炉沉积物中未完全燃烧产物的量；
- (2) 降低燃料床上方的烟气流动速度，阻止飞灰从床上溢出；
- (3) 锅炉应保持充分清洁，以防止飞灰在炉中沉积；
- (4) 除尘作业在低温下进行。

我国垃圾焚烧行业与二噁英有关的标准及要求

烟气二噁英

《生活垃圾焚烧污染控制标准》（GB18485-2014）^[3]规定烟气中二噁英类物质的排放限值为 0.1ng-TEQ/m³，并要求企业一年至少对烟气二噁英监测一次，环保部门一年至少开展一次监督性监测。

飞灰二噁英

《生活垃圾填埋场污染控制标准》（GB 16889-2008）^[4]规定生活垃圾焚烧飞灰和医疗废物焚烧残渣（包括飞灰、底渣）经固化和稳定化处理，二噁英含量（或等效毒性量）需低于 3ug/kg（3ppb），才可以进入生活垃圾填埋场填埋处置。

环境二噁英

2008年，三部委（环境保护部、发展改革委、能源局）联合发布了《关于进一步加强生物质发电项目环境影响评价管理工作的通知》（环发[2008]82号文）^[5]，对垃圾焚烧厂周边环境二噁英监测做了如下要求：



图4：环发[2008]82号文的要求

- 1、在垃圾焚烧电厂试运行前，需在厂址全年主导风向下风向最近敏感点及污染物最大落地浓度点附近各设1个监测点进行大气中二噁英监测；在厂址区域主导风向上、下风向各设1个土壤中二噁英监测点，下风向推荐选择在污染物浓度最大落地带附近的种植土壤。
- 2、在国家尚未制定二噁英环境质量标准前，对二噁英环境质量影响的评价参照日本年均浓度标准（ 0.6 pg TEQ/m^3 ）评价。
- 3、在垃圾焚烧电厂投运后，每年至少要对烟气排放及上述现状监测布点处进行一次大气及土壤中二噁英监测，以便及时了解掌握垃圾焚烧发电项目及其周围环境二噁英的情况。

标准解读

监测要求有缺陷

烟气二噁英一年测 2 次，缺乏代表性

1

按国家标准的要求，烟气二噁英一年只用测 2 次，采样时间加起来约为 12 小时。通常，垃圾焚烧炉的年度运行时间约为 8000 小时，算下来采样监测的时间占总运行时间比例约为 0.15/100，显然不能代表全年的二噁英排放情况。

此外，烟气二噁英的采样检测大多是在“最佳工况”下实施的^[6]，所以更无代表性。而全年启停炉阶段的二噁英排放可达全年正常工况排放的70%以上，但是这部分排放并没有被统计在内^[7]。

飞灰处置相关条例有空白

2

虽然我国对于飞灰进入垃圾填埋场填埋有准入要求，包括含水率、二噁英和12项重金属三个方面，但对检测次数和监督方式没有明确要求，实际造成每座焚烧厂对于飞灰的检测次数都不同。

芜湖生态中心^[8]通过信息公开申请发现一些负有监督职责的环保部门并不完全掌握垃圾焚烧厂的飞灰监测数据，而接受飞灰的填埋场同样不关心入场飞灰的检测数据，对于入场飞灰未起到有效监督职责。

此外，《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB18485-2014)对环保部门针对垃圾焚烧厂烟气开展监督性监测提出了相关要求，却没有对飞灰监督性监测进行规定，也没有对垃圾焚烧厂开展飞灰自行监测提出要求。

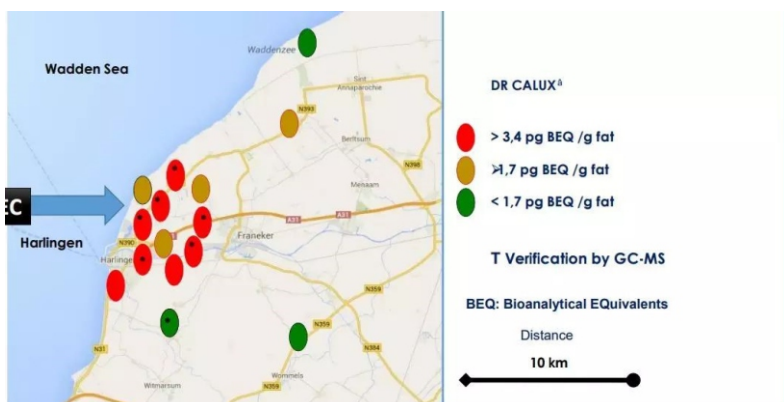
标准无法保障安全

烟气二噁英排放限值

1

欧盟除自2000年起就要求焚烧行业执行 0.1 ng TEQ/m³ 的排放限值。一些成员国为进一步减排二噁英，还会参照最佳可行技术的排放水平，即 0.01 ng TEQ/m³，来审批和监督新设施的运行。^[9]然而，即使是 0.01 ng TEQ/m³，也无法保障环境健康安全。

2012-2015年，荷兰一家名为 ToxicoWatch Foundation的公益组织^[10]，对荷兰哈灵根 (Harlingen) 的 REC 焚烧厂周边环境中的散养鸡蛋、草以及焚烧厂烟气中的二噁英 (PCDD/Fs) 和类二噁英多氯联苯 (dl-PCBs) 进行了采样和分析，发现：



- 焚烧厂半径 2 公里内所有11组散养鸡蛋样品二噁英含量均高于基于生物检测方法 (DR CALUX®) 的行动限值 1.7 pg BEQ/g 脂质，其中 8 组超过基于化学分析方法的法定限值。并且，离焚烧厂越近，二噁英和类二噁英多氯联苯的含量越高。

图5：散养鸡蛋二噁英生物分析当量结果 (有 1 个黑点的是用化学分析法验证了的)

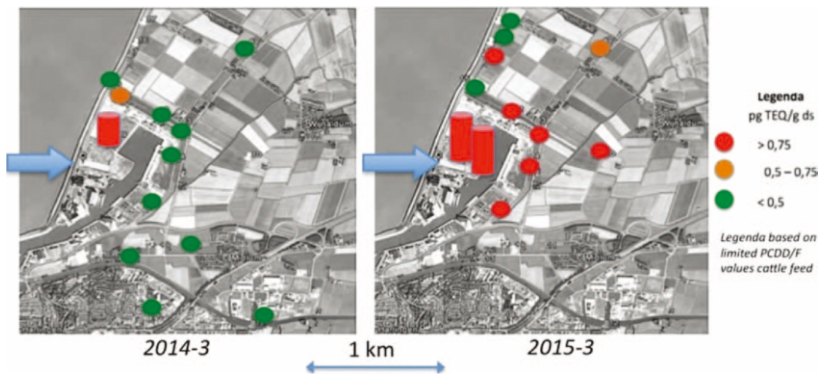


图6: 2014年和2015年, 哈灵根焚烧厂附近的草样二噁英累积浓度

- 2014年在焚烧厂附近的草样中测得二噁英沉积量较高, 达到了1.2 pg TEQ/g。2015年, 67%的草样二噁英含量超过了欧盟规定的牛饲料二噁英的最高限值 (0.75 pg TEQ/g)。焚烧厂附近的草样二噁英浓度是参照点 (距离焚烧厂1.5-11km) 的2-4倍, 参照点没有一个超过 0.75 pg TEQ/g。

- 2015年10月, 28天 (672小时) 的连续采样发现, 哈灵根焚烧厂一系列事故导致了二噁英排放浓度达到了0.17 ng TEQ/Nm³, 超过了欧盟标准 0.1 ng TEQ/Nm³, 是地方许可标准 (0.01 ng TEQ/Nm³) 的17倍。

飞灰处置标准

2

目前我国关于飞灰二噁英污染控制的要求, 是包含在生活垃圾填埋场污染控制标准中的, 这也反映出: “整合固化+卫生填埋” 是最主流的飞灰处理技术。

2005年, 台湾正修科技大学化学与材料工程系的学者研究了台湾一座处置生活垃圾焚烧飞灰和炉渣固化体的填埋场中二噁英类物质分布情况^[11], 结果发现:

- 即使送往填埋场的飞灰固化体符合污染控制标准要求, 填埋场土壤也会被二噁英污染, 且浓度比固化体还高 (表层土和深层土二噁英含量分别达到了飞灰固化体的 3.4 和 1.2 倍)。
- 填埋场表层土的二噁英最高值 (2810 ng I-TEQ/kg) 达到了台湾土壤管理标准 (1000 ng I-TEQ/kg) 的 2.8 倍, 意味着产生二次污染的风险较高。
- 填埋场监测井中地下水的平均浓度达到了背景浓度的 16 倍, 经处理的填埋场渗滤液二噁英的平均浓度是河水背景浓度的5倍, 表明填埋场对于附近的水环境是一个潜在的二噁英排放源。

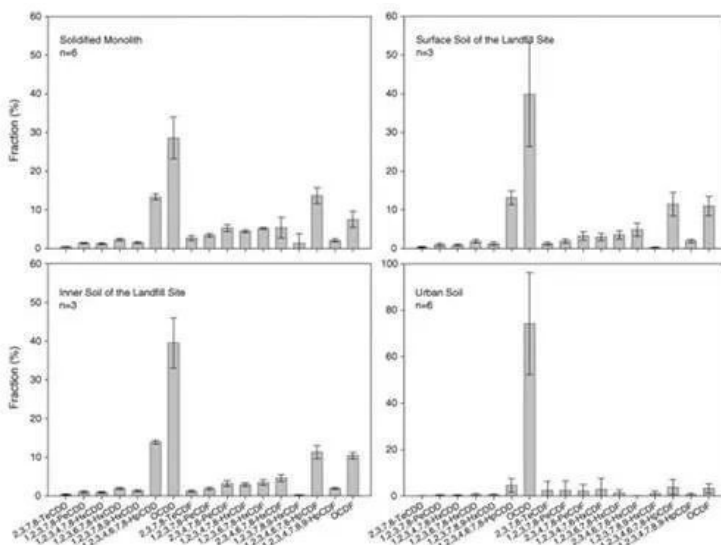


图7: 土壤样品和固化体样品中 PCDD/Fs 异构体指纹特征图

(横坐标为不同种类的异构体, 纵坐标为各异构体占 PCDD/Fs 总量的百分比, 四幅图从左到右、从上到下依次是固化体 (solidified monolith)、填埋场表层土 (surface soil of the landfill site)、填埋场深层土 (inner soil of the landfill site) 和城市土壤 (urban soil) 的指纹特征图。)

研究个案虽然不能代表行业全貌, 却提示了一种严重问题存在的可能性: 目前行业流行、政策认可的“飞灰安全处理”, 也许只是设置了另一种显著的二噁英环境排放源而已。

标准执行情况堪忧

烟气二噁英

根据芜湖生态中心的调查^[8]，2017年全国在运行的359座垃圾焚烧厂中，仅可获取112座的烟气二噁英自行监测数据，以及50座的烟气二噁英监督性监测数据。

二噁英监测信息不公开，公众就可能会怀疑企业和环保部门没有对烟气二噁英进行监测，或者监测结果不达标。而部分公开的信息则表明烟气二噁英超标事件时有发生。例如：湖州南太湖环保能源有限公司2017年8月国控污染源监督性监测二噁英超标三次；诸暨八方热电有限责任公司2017年第四季度第六次监督性监测数据二噁英超标一次；2018年7月，泰州绿色动力再生能源有限公司因为原环保部二噁英监督性监测超标被罚款100万。

飞灰

2017年11月，芜湖生态中心^[8]针对104座非在线垃圾焚烧厂，向环保部门申请从2016年第三季度至2017年第一季度的飞灰监督性监测报告，仅获得4座垃圾焚烧厂的数据信息。

2018年5月，芜湖生态中心^[8]通过观察各省市企业自行监测信息公开平台、环保局官网、企业官网发现，全国仅22座垃圾焚烧厂主动公开了飞灰监测报告和去处信息。

环境二噁英

2017年11月至2018年5月，深圳零废弃^[12]依据《关于进一步加强生物质发电项目环境影响评价管理工作的通知》（环发[2008]82号文），先后向135座生活垃圾焚烧厂的属地环保部门，提交了焚烧厂试运行前和运行后每年周围大气与土壤环境二噁英监测信息公开申请书。在得到属地环保部门有效信息公开申请答复的121座在运行垃圾焚烧厂中：

- 全部或部分公开环境二噁英监测信息的只有33座，比例仅为27.3%。
- 被公开的环境二噁英信息完整度不足四成。
- 综合信息公开的完整度和有信息公开的焚烧厂数量比例两因素，121座焚烧厂环境二噁英监测信息的总体公开程度仅有10%。

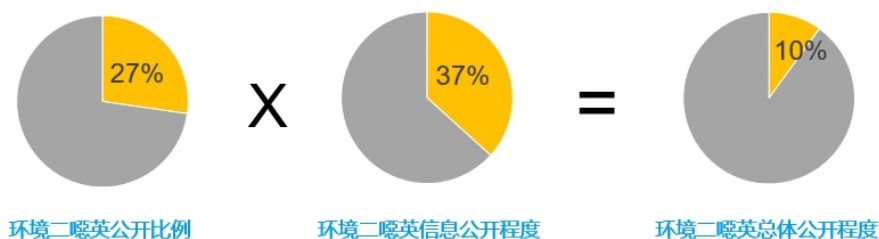


图8：环境二噁英信息公开情况

- 33 座有环境二噁英监测信息公开的焚烧厂中，仅有 1 座能按要求每年在同一监测点进行监测。
- 有 6 座在运行期间出现过环境空气二噁英监测浓度超过法规目前参考的日本年均浓度标准 (0.6pg TEQ/m³) 的情况。

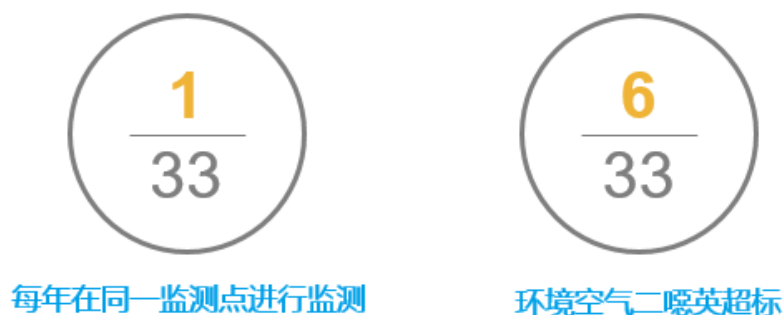


图9：按要求监测的比例，超标情况

垃圾焚烧二噁英谣言

焚烧1000吨垃圾排放的二噁英比3辆车的尾气/一堆树叶排放还少？
焚烧1吨垃圾还不如抽1根烟？

?

首先，假设所有垃圾焚烧厂的二噁英排放都能达到国标要求，也就是0.1 ng TEQ/m³。然后，根据联合国环境规划署《二噁英和呋喃排放识别和量化标准工具包》(2012年)^[13]给出的垃圾焚烧（最佳情况）、林木燃烧、四冲程发动机（最差情况）的排放因子，以及科学文献给出的香烟二噁英排放因子^[14]，计算可得：

- 1000吨垃圾焚烧产生的二噁英跟500吨树叶差不多；
- 1000吨垃圾焚烧产生的二噁英是3辆轿车连续跑一整天尾气排放的631倍；
- 焚烧1吨垃圾产生的二噁英相当于135135 根香烟的排放。

垃圾焚烧是二噁英“削减器”？



有些文献提到“垃圾焚烧实际上会减少二噁英的量”。事实上，已有研究表明，不同焚烧厂，甚至同一焚烧厂不同运行时段二噁英输入、输出水平会很不一样，净输出量可能为“正”，可能为“负”。

法国研究

法国环境部^[15]对 8 座生活垃圾焚烧厂和 2 座危险废物焚烧厂所做的调查结果：不同焚烧厂二噁英排放强度可相差 10-1000 倍。

Other data from a 1997 study (French Ministry of Environment/TIRU) of 8 MSWI and 2 HWI showed significant variation in residue PCDD/F content:

• bottom ash:	0.3 - 300 ng I-TEQ/kg	炉渣
• boiler ash:	40 - 700 ng I-TEQ/kg	炉灰
• fly ash:	60 - 5000 ng I-TEQ/kg	飞灰
• filter cake (wet FGT):	600 - 30000 ng I-TEQ/kg	滤饼 (湿法脱硫)
• semi-wet FGT residues:	800 ng I-TEQ/kg (approx.).	半湿法烟气脱硫残渣

Where data shows variation to the extent indicated in the bullets above, it is more difficult to draw conclusions regarding the overall mass balance of PCDD/F.
[64, TWGComments, 2003]

The following data is an example of an MSWI (in France) operating with a release to water:

Output stream	Specific Load
Flue-gas	0.1 ng I-TEQ/Nm ³
Bottom ash	7 ng I-TEQ/kg
FGT residues	5200 ng I-TEQ/kg
Waste water	<0.3 ng I-TEQ/l

Note: Example given is for a MSWI with FGT of ESP + wet scrubber (2 stage) + SCR

Table 3.5: Example PCDD/F load data for an MSWI in France
[64, TWGComments, 2003]

图10：法国 8 座生活焚烧厂和 2 座危废焚烧厂二噁英输出值

西班牙研究：10次采样仅2次“削减”

西班牙学者E.阿巴德 (E.Abad) ^[16]等曾在1998至1999年间对西班牙一座经现代化改造的大型生活垃圾焚烧厂（名为“SIRUSA”）进行过 8 次采样研究，发现仅有一次二噁英净输出量为负，说明在多数情况下，该垃圾焚烧厂可能是二噁英的净产生源。

若进一步考察唯一一次二噁英净输出量为负的具体数据，可以发现当时焚烧厂处理的生活垃圾平均二噁英含量高达 64.15 ng TEQ/kg，比其他时段采样结果高出近 10 倍以上（最高平均含量水平不超过 7.09 ng TEQ/kg），说明可能存在于一些受到二噁英明显污染的特殊垃圾，与平常状态有所不同。

Table 3
Levels of PCDD/PCDF in RDF, USW and compost samples

	Range (pg I-TEQ/g)	Mean (pg I-TEQ/g)
RDF	3.81-4.76	4.34
USW		
1st sample collection	4.40-13.27	8.84
2nd sample collection	45.73-87.48	64.15
Compost	5.00-57.23	31.20

垃圾二噁英平均含量

Table 4
Dioxin mass balance

	Input (g I-TEQ/yr)	Output (g I-TEQ/yr)	Balance (g I-TEQ/yr)
1st sample collection	1.33	4.64	3.31
2nd sample collection	9.62	1.92	-7.70

年净输出量

图11：西班牙 SIRUSA 焚烧厂 8 次采样研究（2002年）



华南理工大学和环保部华南环境科学研究所三位学者^[17]通过对我国南方某“现代化”大型垃圾焚烧厂的二噁英物质平衡问题研究之后，发现该焚烧厂输出的二噁英总量（7.62 g I-TEQ/yr）要大于输入总量（5.38 g I-TEQ/yr），即净输出量为“正”，增幅为 41.6%。

TABLE 4. Dioxin Mass Balance: Overall Results of PCDDs/PCDFs in MSW, Stack Gas Emissions, Fly Ashes, and Slags over the Eight Campaigns (1998-1999)

campaign (data)	02/09/98	10/03/99	15/04/99	20/05/99	17/06/99	01/07/99	22/07/99	16/09/99
Output (Emissions, Fly Ashes, and Slags)								
combustion unit emissions	1	1	2	2	1	1	2	2
no. of samples	1	1	1	1	1	1	1	1
ng I-TEQ/Nm ³	0.004	0.020	0.003	0.010	0.006	0.006	0.009	0.008
g I-TEQ/yr	0.002	0.012	0.002	0.006	0.004	0.004	0.006	0.005
contribution to output (%)	0.154	0.631	0.095	0.258	0.220	0.315	0.274	0.191
fly ashes								
no. of samples	1	1	1	1	1	1	1	1
ng I-TEQ/g	0.37	0.51	0.55	0.67	0.50	0.27	0.51	0.72
g I-TEQ/yr	1.15	1.58	1.72	2.09	1.56	0.83	1.58	2.26
contribution to output (%)	71.40	79.69	87.30	86.56	91.47	69.89	77.30	86.29
slags								
no. of samples	1	1	1	1	1	1	1	1
ng I-TEQ/g	0.013	0.011	0.007	0.009	0.004	0.010	0.013	0.010
g I-TEQ/yr	0.46	0.39	0.25	0.32	0.14	0.35	0.46	0.35
contribution to output (%)	28.45	19.68	12.60	13.18	8.31	29.79	22.43	13.52
total emitted (g I-TEQ/yr)	1.62	1.98	1.97	2.42	1.70	1.19	2.05	2.62
concn in RSU required for dioxin destruction (ng I-TEQ/kg)	11.15	13.64	13.56	16.66	11.74	8.19	14.14	18.05
Input (MSW)								
no. of samples	9	2	2	2	1	2	2	2
max (ng I-TEQ/kg)	87.48	3.67	3.98	4.33	2.29	7.58	2.26	2.41
min (ng I-TEQ/kg)	45.73	2.81	1.47	3.80	2.29	6.60	2.19	2.31
av. (ng I-TEQ/Kg) 垃圾二噁英含量均值	64.15	3.24	2.73	4.07	2.29	7.09	2.23	2.36
input (g I-TEQ/yr) 年二噁英输入值	9.30	0.47	0.40	0.59	0.33	1.03	0.32	0.34
Dioxin Mass Balance								
annual (g I-TEQ/yr) 年二噁英净输出值	-7.68	1.51	1.57	1.83	1.37	0.16	1.73	2.28

图12：华南理工大学和环保部华南环境科学研究所的研究结果

综合以上信息，“垃圾焚烧是二噁英‘削减器’”的论断，显然是以偏概全。

自然界也会产生二噁英，垃圾焚烧排放的无需担心？

1990年代，美国联邦环保署就指出，二噁英确实可以经由自然燃烧而形成，但自然燃烧对环境中的二噁英浓度的贡献“或许并不重要”，因为多种证据，如湖底沉积物、木乃伊、古代冻尸的采样检测都表明，20世纪40年代以前二噁英的存在微乎其微，而在40年代左右才开始持续增加，出现很高的浓度，这一变化正好与石油化工业的产生并迅猛发展在时间段上是吻合的。另外，一些森林大火测得较高浓度的二噁英排放其实很可能是因为原本就受到了严重的二噁英污染，如氯代苯氧基农药的喷洒和二噁英空气沉降。^[18]

表 2-16 2004年二噁英排放量估算清单

编号	排放源及类别	排放因子的确定方法	2004年总量	规模及计算依据	排放量 (克 TEQ/年)				
					空气	水	产品	残余物	总量
1	废弃物焚烧类				610.47			1147.1	1757.57
11	生活垃圾焚烧*	I	660万吨	我国有54座生活垃圾焚烧厂，日焚烧能力为16907吨。按照实际检测和调研，共分成四类并分别确定了排放因子	125.8			212.2	338

图13：2004年二噁英排放量估算清单-废弃物焚烧类

参考我国政府2007年公布的《〈关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约〉国家实施计划》（以下简称《国家实施计划》）中的二噁英排放清单（2004年数据），纳入统计的二噁英排放源共有9大类、94种，2004年排放总量为10236.8 g TEQ。森林火灾和草原火灾是其中可视为“自然源”的两种排放源（尽管失火很可能有人为的原因），排放总量分别为29.5 g TEQ和0.56 g TEQ，合计30.06 g TEQ，占有源排放总量仅0.29%。同年，生活垃圾焚烧行业二噁英排放总量为338 g TEQ，是自然源排放总量的11.24倍。^[19]

在2007年《国家实施计划》中，中央政府还明确了一批“优先控制的二噁英重点排放源”（简称“重点行业”），生活垃圾焚烧位列其中，因为它完全符合三项选定标准，即“有增长趋势”、“有BAT/BEP（最佳可行技术/最佳环境实践）导则”、以及“风险相对高”。

2009年，中国城市建设研究院和中国市政工程中南设计研究院的三位专家根据最新研究出来的二噁英排放因子和政府统计数据，估算出2007年全国生活垃圾焚烧厂的二噁英总排放量为608.36克TEQ。^[20]

近期一项研究显示，2013年全国生活垃圾焚烧二噁英排放量为555 g TEQ，虽然较2009年城建院专家的估算低一些，但仍然比2004年的数据高出64.2%，说明“具有增长趋势”这一重点行业选定标准对生活垃圾焚烧仍然适用。

二噁英呼吸途径摄入不足1%，可考虑建在城市区域？

2013年4月至2014年1月，和2014年4月至2015年1月，国家环境分析测试中心和国家环境保护二噁英污染控制重点实验室的几位研究人员两度对北京市某生活垃圾焚烧厂周边环境空气中二噁英污染状况监测分析。^{[21][22]}

表1 各采样点大气中PCDD/Fs总质量浓度(pg/m^3)及毒性当量浓度($\text{pg I-TEQ}/\text{m}^3$)

Table 1 Mass and TEQ concentrations of PCDD/Fs in the samples at each sampling site

采样点位	春季	夏季	秋季	冬季	季节平均值
S1	13.9 ^a /0.18 ^b	10.1/0.11	29.9/0.35	115/1.9	42.2/0.64
S2	20.3/0.25	22.6/0.24	63.0/0.80	105/1.8	52.7/0.77
S3	10.0/0.13	32.6/0.36	34.4/0.39	73/1.2	37.5/0.52
S4	10.6/0.13	14.3/0.15	19.5/0.25	71/1.2	28.8/0.43
S5	8.3/0.11	13.3/0.14	15.3/0.25	62/1.1	24.7/0.40
点位平均值	12.6/0.16	18.6/0.20	32.4/0.41	85.2/1.4	/

注: a. 4-8氯代PCDD/Fs同族体总质量浓度; b. 17种2,3,7,8位取代的异构体毒性当量浓度.

图14: 2013-2014的监测中, 秋季1个采样点和冬季全部采样点二噁英毒性当量超出日本环境空气质量标准限值。

表1 各采样点大气中PCDD/Fs总质量浓度及毒性当量浓度
Table 1 Mass and TEQ concentrations of PCDD/Fs in the samples at each sampling site

采样点位	春季 $/\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$	夏季 $/\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$	秋季(雾-霾) $/\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$	秋季(良好) $/\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$	冬季 $/\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$	季节平均值 ³⁾ $/\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$
S1	21.1 ¹⁾ /0.27 ²⁾	16.0/0.18	95.5/1.0	44.1/0.54	106/1.1	46.8/0.52
S2	33.7/0.36	13.3/0.17	91.1/0.98	39.7/0.46	80.6/0.78	41.8/0.44
S3	11.9/0.16	13.7/0.14	65.6/0.84	30.1/0.32	56.7/0.64	28.1/0.32
S4	25.0/0.27	13.9/0.16	112/1.3	18.8/0.19	79.6/0.80	34.3/0.36
S5	14.8/0.20	11.7/0.15	50.0/0.60	11.3/0.15	95.1/1.1	33.2/0.40
S6	22.7/0.33	13.1/0.15	35.9/0.49	16.0/0.21	82.9/0.91	33.7/0.40
S7	25.0/0.38	12.7/0.15	39.6/0.53	8.9/0.11	140/1.8	46.6/0.61
点位平均值/ $\text{pg}\cdot\text{m}^{-3}$	22.0/0.28	13.5/0.16	70.0/0.82	24.1/0.28	91.6/1.0	/

1) 4-8氯代PCDD/Fs同族体总质量浓度; 2) 17种2,3,7,8位取代的异构体毒性当量浓度; 3) 秋季选取良好天气数值

图15: 2014-2015的监测中, 秋季霾天4个采样点和冬季全部采样点超出日本环境空气质量标准限值

对照环发[2008]82号文^[5]的要求, 两次监测都发现雾霾天和冬季大气二噁英浓度超出环评参考的环境空气浓度限值 $0.6 \text{ pg TEQ}/\text{m}^3$, 且冬季儿童的二噁英呼吸暴露贡献率超过了“每日可耐受摄入量 10%”的负荷分摊比例, 具体暴露水平如下表所示:

	2013-2014 监测		2014-2015 监测	
	潜在呼吸暴露量 ($\text{pg I-TEQ}/(\text{kg}\cdot\text{d})$)	呼吸暴露贡献率	潜在呼吸暴露量 ($\text{pg I-TEQ}/(\text{kg}\cdot\text{d})$)	呼吸暴露贡献率
成人	0.034~0.066	0.85%~1.65%	0.060~0.115	1.50%~2.88%
儿童	0.094~0.181	2.35%~4.52%	0.117~0.224	2.92%~5.60%
冬季成人	0.094~0.163	2.35%~4.08%	0.123~0.345	3.08%~8.63%
冬季儿童	0.257~0.445	6.43%~11.13%	0.238~0.671	5.95%~16.78%

图16: 呼吸暴露风险评估结果

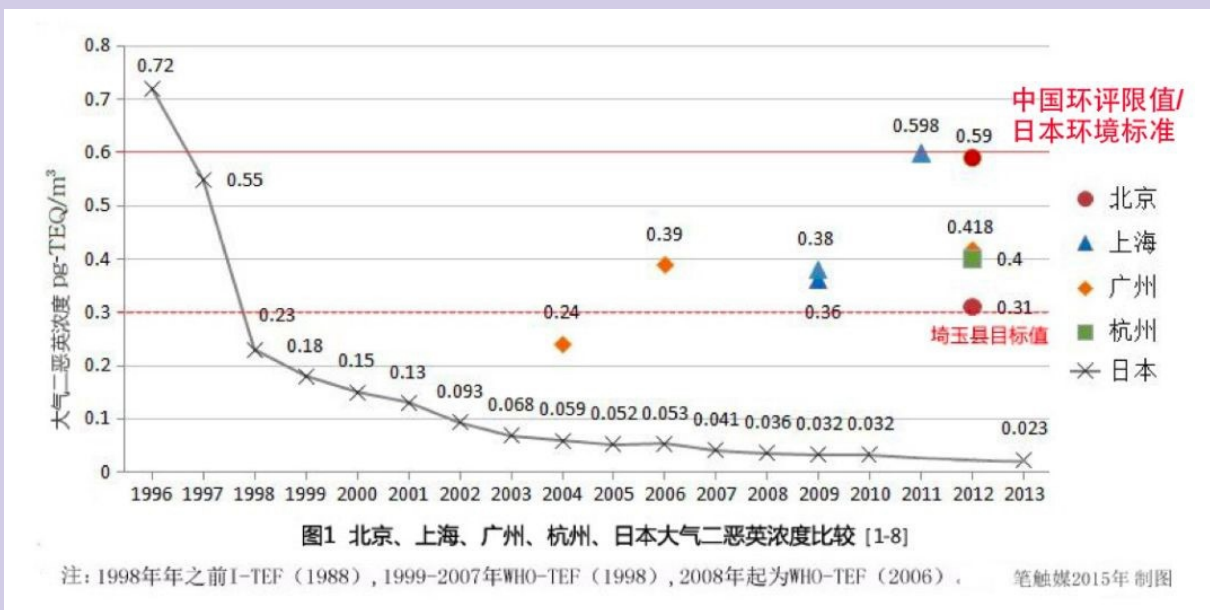
而近期，欧洲食品安全局^[23]的二噁英风险评估报告建议：青少年和成人的二噁英每日暴露量应低于 0.25 pg TEQ/kg 体重/天，远远低于当前世卫组织建议的1-4 pg TEQ/kg 体重/天的标准。

如果参考欧洲食品安全局建议的安全限值，上文中北京某焚烧厂周边所有人群的环境呼吸暴露风险全年都超过了10% (0.025 pg TEQ/kg 体重/天) 的负荷分摊，甚至在冬季，儿童仅呼吸摄入的二噁英就已经超过了这一限值。

因此，从二噁英风险控制角度出发，呼吸摄入虽然相比膳食占比较低，但如果摄入总量较高的话，同样是不安全的。所以，若以呼吸摄入占比低为由，主张二噁英排放源可建在人口密集的区域并不合适。

多个大城市环境二噁英浓度持续偏高，新建焚烧厂需三思

我国大城市环境空气二噁英偏高的情况并非个案。如下图所示，科研论文中北京、上海、广州、杭州四城市所监测到的环境空气二噁英浓度平均值，已与我国环评参考标准限值处在同一数量级，部分数据已经逼近限值。与日本同期相比，这些城市环境二噁英浓度普遍高出一个数量级，并大多超过了日本埼玉县设置的目标控制限值，即 0.3 pg TEQ/m³。这一情况显示，不论具体来源如何，偏高的环境空气二噁英浓度一定会显著增加城市居民经呼吸摄入的风险。



图片来源：笔触媒环境科学工作室

垃圾分类与垃圾焚烧二噁英排放无直接关系？

有文献指出，日本垃圾分类效果优于德国，远优于美国，但垃圾焚烧二噁英因子却远高于德国和美国，说明垃圾焚烧二噁英排放与分类效果好坏并无直接关系。

浙江大学对杭州一座焚烧厂的研究 (2008年) ^[24]

- 经分类垃圾焚烧烟气在进入净化设施前测得的二噁英总量约为 73.80 ng/Nm³，明显低于混合垃圾焚烧的水平 (132.99 ng/Nm³)。
- 在排放浓度相近的情况下，由于经分类垃圾焚烧烟气在净化前的二噁英浓度显著低于混合垃圾焚烧烟气，所以净化过程所需的活性炭的量减少了 20%。
- 同等运行水平和烟气净化条件下，经分类垃圾焚烧产生的飞灰二噁英毒性当量浓度为 0.27 ng I-TEQ/g，显著低于混合垃圾焚烧的水平 0.36 ng I-TEQ/g。

虽然上述研究并不能得出行业整体性结论，但仍弥足珍贵。它至少清楚地提示：即便在垃圾分类、分流不充分，厨余垃圾仅仅得到脱水处理的情况下，入炉燃料因一定的热值提高及含氯成分减少，就足以显著降低焚烧二噁英排放风险。

表 2：两类实验垃圾焚烧二恶英控制效果对比

	经分类垃圾		混合垃圾	
	烟气净化前	烟气净化后	烟气净化前	烟气净化后
采样时间	11:30-13:20	14:45-17:00	11:50-13:40	15:00-17:00
烟气流量 (Nm ³ /h)	49,600	28,300	28,900	59,500
氧气量 (体积%)	6.70	8.60	10.30	9.30
一氧化碳 (mg/Nm ³)	7.90	8.90	12.30	10.50
国际毒性当量 I-TEQ (ng/Nm ³)	9.28	0.12	13.38	0.10
PCDD/Fs (ng/Nm ³)	73.80	1.18	132.99	1.27
活性炭消耗 (kg/h)	4.0	—	5.0	—
活性炭吸附率 (ng PCDD/Fs/g 活性炭)	906.78	—	753.55	—

图17：经分类垃圾和混合垃圾焚烧二噁英控制效果对比

国际公约：垃圾分类是焚烧二噁英减排的最佳技术和实践

《斯德哥尔摩公约》的《BAT/BEP导则》^[25]建议采取如下“替代措施”以有效减少生活垃圾处理过程二噁英等持久性有机污染物的排放：

1. 零废物管理策略，通过立法和经济手段来消除废物产生；
2. 废物减量化，源头分离和回收来减少需进行最终处理的废物体积；
3. 堆肥，通过生物分解来减少废物体积；
4. 机械生物处理，通过机械和生物处理方法来减少废物体积，产生残留物需要进行进一步的处理；
5. 高温熔化，使用热处理方法来减少废物体积，产生残留物需要进行进一步的处理。
6. 特殊建造的填埋场，容纳并隔离废物（有效收集和燃烧产生的甲烷可以回收能量，若不能实现能量回收时要将甲烷气燃烧掉）

以上六条“替代措施”，前四条显然都和垃圾分类有关。

日本垃圾焚烧二噁英排放高可能就是因为分类不够好

日本的垃圾分类整体而言是“抓小放大”，因为全国只有 18.7% 的生活垃圾得到循环利用，精细分类的效果实际只局限在不足两成的范围内，剩余部分则是以混合垃圾的形式被焚烧或填埋掉了，前者占比 80.2%，后者占比 1.1%。^[26]造成这种局面的重要原因之一是，日本各地的垃圾分类方案基本将占垃圾总量 3 成以上的厨余垃圾视作可燃物进行焚烧，循环利用率不足 7%。^[27]

Nonindustrial waste¹⁾

Total volume of waste generation	50,257	54,834	52,720	45,359	43,981
Municipally scheduled and collected	42,495	46,695	44,633	38,827	37,867
Directly brought to					
waste treatment facilities	6,776	5,373	5,090	3,803	3,720
Recyclable waste					
collected by community	986	2,765	2,996	2,729	2,394
Waste generated					
daily per person (in grams)	1,115	1,185	1,131	976	939
Total volume of processed waste	49,282	52,090	49,754	42,791	41,699
Direct incineration	36,192	40,304	38,486	33,799	33,423
Intermediate treatment for recycling, etc. ...	3,300	6,479	7,283	6,161	5,777
Direct recycling		2,224	2,541	2,170	2,031
Direct final disposal	9,790	3,084	1,444	662	468

图18：日本垃圾处理比例

反观德国，近年来生活垃圾的循环利用率一直保持在 65% 左右（堆肥部分达到 15% 以上），混合垃圾的焚烧仅为 35%，填埋为 1%。^[28]也就是说，德国的垃圾分类虽然看上去没有日本做得那么精细，但由于抓住了“干湿分开”这个主要矛盾，减少了混合垃圾中的厨余部分，实际效果更好。

日本垃圾焚烧的二噁英排放因子高于德国或许还有监管运营方面的问题。但从前文探讨过的垃圾分类与焚烧二噁英排放的紧密关系，我们应考虑“垃圾分类做得不够好”这个因素的影响。

结语

40多年以来，垃圾焚烧一直摆脱不了二噁英的纠缠。虽然焚烧行业的二噁英污染防治水平一直在进步，但人们对排放水平、控制技术以及环境健康风险之间关系的认识也在不断更新中。如此背景下，垃圾焚烧的二噁英污染风险迟迟无法到达可以高枕无忧的境地。相比欧洲、日本等发达国家，我国垃圾焚烧的运行水平还有较大差距，这更让我们不能对其二噁英污染问题掉以轻心。

参考文献

- [1] Olie K, Vermeulen R, Hutzinger O. Chlorobenzo-p-dioxins and chlorobenzo-furans are trace components of fly ash and flue gas of some municipal incinerators in the Netherlands [J]. Chemosphere, 1977,6:455-459.
- [2] Jürgen Vehlow, "Dioxin in Waste Combustion-Conclusion from 20 Years of Research," paper prepared for "Bioenergy Australia 2005," Melbourne, Dec. 12-13, 2005, p. 1.
- [3] 环境保护部、国家质量监督检验检疫总局：《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485-2014)，2014年5月16日。
- [4] 环境保护部、国家质量监督检验检疫总局：《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB16889-2008) ，2008年4月2日。
- [5] 环境保护部、国家发展和改革委员会、国家能源局：《关于进一步加强生物质发电项目环境影响评价管理工作的通知》(环发[2008]82号) ，2008年9月4日。
- [6] 赵树青、宋薇、刘晶昊、蒲志红：《我国生活垃圾焚烧二噁英污染现状及减排建议》，《环境工程》，2011年2月第29卷第1期，第86-88页。
- [7] Hung P C, Chang S H, Buekens A, et al. Continuous sampling of MSWI dioxins[J]. Chemosphere, 2016, 145:119-124.
- [8] 芜湖生态中心：359座生活垃圾焚烧厂信息公开与污染物排放报告，2018年7月18日。
- [9] European Commission, Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, August 2006.
- [10] A Arkenbout, K H Esbensen. Sampling, monitoring and source tracking of dioxins in the environment of an incinerator in the Netherlands. Eighth World Conference on Sampling and Blending/ Perth, WA, 9-11 MAY 2017.
- [11] Wang M S, Wang L C, Chang-Chien G P. Distribution of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in the landfill site for solidified monoliths of fly ash [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 133(1-3):177-182.

- [12] 深圳零废弃等：被遗忘的“82号文”-生活垃圾焚烧厂周边环境二噁英监测信息公开状况研究，2018年7月18日。
- [13] UNEP and Stockholm Convention, Toolkit for Identification and Quantification of Releases of Dioxins, Furans and Other Unintentional POPs, 2013.
Wilson CL
- [14] 1, Bodnar JA, Brown BG, Morgan WT, Potts RJ, Borgerding MF. Assessment of dioxin and dioxin-like compounds in mainstream smoke from selected US cigarette brands and reference cigarettes [J]. Food Chem Toxicol. 2008 May; 46(5):1721-33.
- [15] European Commission, Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, August 2006.
- [16] E. Abad, M.A. Adrados, J. Caixach, B. Fabrellas, and J. Rivera, “Dioxin mass balance in a municipal waste incinerator” , Chemosphere, 40 (2000), pp. 1143-1147.
- [17] Gang Zhang, Jing Hai, Jiang Cheng, “Characterization and mass balance of dioxin from a large-scale municipal solid waste incinerator in China” , Waste Management, 32 (2012), pp. 1156-1162.
- [18] [1] Lois Marie Gibbs, DYING FROM DIOXIN: A CITIZEN'S GUIDE TO RECLAIMING OUR HEALTH AND REBUILDING DEMOCRACY AND THE CITIZENS CLEARINGHOUSE FOR HAZARDOUS WASTE, pp. 10, 11.
- [19] 中华人民共和国：《〈关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约〉国家实施计划》，2007年。
- [20] 赵树青、黄文雄、谢力：《我国生活垃圾焚烧行业二噁英排放现状及趋势》，《城市管理技术》，2009年第2期，第58、59页。
- [21] 齐丽，任玥，李楠，等. 垃圾焚烧厂周边大气二噁英含量及变化特征—以北京某城市生活垃圾焚烧发电厂为例[J]. 中国环境科学，2016,36(4)：1000~1008.
- [22] 齐丽，任玥，刘爱民，等. 北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险[J]. 中国环境科学，2017,38(4)：1317~1326.
- [23] <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2903/j.efsa.2018.5333>
- [24] De-Zhi Shi, Wei-Xiang Wu, Sheng-Yong Lu, Tong Chen, Hui-Liang Huang, Ying-Xu Chen, Jian-Hua Yan, “Effect of MSW source-classified collection on the emission of PCDDs/Fs and heavy metals from incineration in China” , Journal of Hazardous Materials, 153 (2008), pp. 685–694.
- [25] 《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》：《针对斯德哥尔摩公约第五条和附件C的最佳可行技术》，2006年。
- [26] Statistics Bureau, Ministry of Internal Affairs and Communications (Japan), Statistical Handbook of Japan, 2018, 2018.
- [27] Akikun Ushikubo, “Recycling of Food Waste in Japan” (presentation), 2013.
- [28] Eurostat, “Environment in the EU Each person in the EU generated 475 kg of municipal waste in 2014: 44% was recycled or composted” (press release), 2016.



无毒先锋

- 本刊是“深圳市零废弃环保公益事业发展中心”实施的“化学品管理民间网络与能力建设”项目的一部分，该项目是由联合国开发计划署负责管理的全球环境基金小额赠款计划支持的。
- 同时感谢北京市企业家环保基金会（阿拉善SEE）提供部分资金支持。本文内容及意见仅代表主办单位的观点，与阿拉善SEE的立场或政策无关。



SGP The GEF Small Grants Programme



文字/校对：何玲辉，毛达

版式设计：莫存柱 图片拍摄：部分专业图片来源于网络

版权所有：©深圳市零废弃环保公益事业发展中心，2019，保留所有权利

解毒档案

档案时间:2019.3

无毒先锋

第04期