

· 创新与探索 ·

四川省水泥工业大气污染物排放水平分析

梅林德^{1,2}, 熊文朋^{1,2}, 冯小琼^{1,2}, 陈军辉^{1*}, 钱骏¹, 刘政¹

(1. 四川省生态环境科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 四川省环保科技工程有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要:通过调研2018年四川省37条水泥生产线活动水平数据,结合企业污染治理技术,分析该省水泥工业的主要大气污染物排放水平。结果表明:2018年四川省水泥行业SO₂、NO_x、PM_{2.5}和PM₁₀的排放量分别为1.2万t、5.5万t、3.9万t和6.5万t,其不确定性主要来自污染物的产生系数和去除效率。四川省水泥生产企业各工序排放的颗粒物、SO₂和NO_x浓度总体上均低于现行标准,部分工序颗粒物超标主要受布袋的去除效率影响。

关键词:大气污染物;排放水平;水泥工业;四川省

中图分类号:X51

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2021)02-0060-04

Analysis on Air Pollutant Emission Levels of the Cement Industry in Sichuan

MEI Lin-de^{1,2}, XIONG Wen-peng^{1,2}, FENG Xiao-qiong^{1,2}, CHEN Jun-hui^{1*}, QIAN Jun¹, LIU Zheng¹

(1. Sichuan Academy of Environmental Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China;

2. Sichuan Province Environmental Protection Technology Engineering, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: By investigating the activity level of 37 cement production lines in Sichuan province in 2018, and the pollution control technologies, the emission level of the major atmospheric pollutants in the cement industry was analyzed. The results showed that the emissions of SO₂, NO_x, PM_{2.5} and PM₁₀ were 12 000 t, 55 000 t, 39 000 t and 65 000 t in 2018 in Sichuan cement industry, respectively, the uncertainty were mainly from the production coefficient and the removal efficiency of the pollutants. The emission concentration of particulate matter, SO₂ and NO_x were below the current standards in each process of cement production. Particulate matter which exceeded the standard in some processes was mainly affected by the removal efficiency of bag filter.

Key words: Air pollutants; Emission level; Cement industry; Sichuan province

水泥行业主要污染物有粉尘、二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)等^[1-2],其与雾霾、光化学烟雾、酸雨等现象密切相关,同时SO₂和NO_x还可与空气中的阳离子反应生成二次颗粒物,增加大气中细颗粒物的浓度,降低大气能见度,危及人体健康^[3-4]。

四川作为水泥大省,大气污染物排放执行《水泥工业大气污染物排放标准》(GB 4915—2013)。四川省先后发布《四川省蓝天保卫行动方案(2017—2020年)》《关于做好2019—2020年水泥行业错峰生产工作的通知》等文件,严控水泥污染物排放^[5-6]。

目前,国内对水泥工业污染物排放相关研究较多,如刘鹏等^[7]通过BAT调查得出水泥行业NO_x和粉尘排放浓度需要对生产线升级改造后才能满足相关标准;江梅等^[8]的研究结果说明,要提高水泥工业污染物排放要求,才能有效提升环境管理和污染控制水平;徐志荣等^[9]的研究结果表明,只有提高水泥行业SO₂、NO_x、颗粒物排放限值,才能有

收稿日期:2020-03-31;修订日期:2021-01-05

基金项目:四川省重大科技专项基金资助项目(2019YFS0495)

作者简介:梅林德(1986—),男,四川广安人,工程师,硕士研究生,从事大气污染防治方面的工作。

*通信作者:陈军辉 E-mail: 9503062@qq.com

效减少大气污染物排放量;程钟等^[10]的研究表明,常州市工业源是大气颗粒物的重要污染源,而水泥的排在工业源的占比较大。今通过现场调研搜集数据,并结合水泥生产企业各工序的污染物控制技术,分析行业污染物的排放情况,以期为水泥超低排放提供参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区域及对象

研究区域为成都平原(成都、德阳、绵阳、乐山、雅安、眉山、遂宁、资阳),川东北地区(广安、广元、达州、南充),川南片区(宜宾、泸州、内江、自贡),川西及攀西地区(甘孜、阿坝、凉山、攀枝花)等4个区域。研究对象为区域内的水泥熟料生产企业。

1.2 数据来源

排放量计算基数来源于四川省大气污染物排放清单数字化平台2018年企业填报数据。污染物排放浓度来源于企业2018年在线监测数据年均值(水泥窑)和2018年4个季度监测报告的平均值(其他工序)。污染治理技术来源于现场调查。

1.3 排放量估算方法

水泥生产主要为熟料烧制和熟料加工两个阶段。在污染物估算中,基于水泥产量进行估算,计算公式见式(1):

$$E_{i,j} = \left(\sum_k AK_{i,k} \times EF_{j,k} + AC_i \times EF_j \right) \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: i 为企业编号; j 为污染物种类; k 为熟料烧制工艺; $E_{i,j}$ 为企业 i 的污染物 j 排放量,t; $AK_{i,k}$ 为企业 i 的熟料烧制工艺 k 所产生的熟料量,t; $EF_{j,k}$ 为 k 工艺在熟料烧制阶段的污染物 j 排放因子,g/kg; AC_i 为企业 i 的水泥产量,t; EF_j 为熟料加工阶段污染物 j 的排放因子,g/kg。

研究参考文献[11]中水泥行业气态污染物产生系数,四川省现有水泥熟料生产企业均采用新型干法水泥窑, SO_2 、 NO_x 产生系数分别取值0.119 g/kg和1.746 g/kg。颗粒物粒径分布主要参考文献[12]中的相关系数,见表1。

四川省水泥企业普遍采用选择性非催化还原技术(SNCR)脱硝,基本无脱硫,相应去除效率根据企业填报获取。静电除尘技术对 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{2.5-10}$

和 $PM_{\geq 10}$ 的去除率分别为96.0%、98.0%和99.5%,布袋(电袋)除尘技术对三者的去除率分别为99.0%、99.5%和99.9%^[13]。

表1 水泥工业颗粒物分粒径产生系数EF g/kg
Table 1 Emission factor of particulate matter of different size from the cement industry g/kg

生产工段	工艺	EF _{2.5}	EF _{2.5-10}	EF _{≥10}	EF _{TSP}
熟料烧制	新型干法窑	32.9	43.8	106	182.7
熟料加工	水泥磨(≥60万t)	0.7	2.1	14.9	17.7
	水泥磨(<60万t)	0.9	3.6	18.3	22.8

2 结果与讨论

2.1 污染物排放总量

2018年四川省水泥熟料生产线共63条,熟料总产能约8840万t,水泥产量约1.4亿t。调研的37条生产线分布基本覆盖四川省所有区域,调研生产线占全省水泥生产线的59%,生产线熟料产能约占全省的44%,基本信息见表2。水泥窑尾主要污染物有颗粒物、 SO_2 和 NO_x 3种,窑头及其他工序是颗粒物。调研的37条生产线窑尾颗粒物去除方式以袋式除尘和静电除尘为主,分别占89%和11%, NO_x 均采用SNCR脱硝,仅2条生产线脱硫分别采用干法脱硫和湿法脱硫;窑头颗粒物去除方式有袋式除尘、静电除尘和电袋复合式除尘,分别占76%、19%和5%;其余工序均为袋式除尘。

表2 生产线基本信息

城市	生产线数量n/条	熟料产能m/万t
成都	4	523
达州	4	564
德阳	3	160
广元	5	600
广安	4	533
乐山	4	443
泸州	4	217
眉山	1	60
绵阳	6	597
攀枝花	2	152
合计	37	3849

2018年四川省水泥行业 SO_2 、 NO_x 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的排放量分别为1.2万t、5.5万t、3.9万t和6.5万t,各城市污染物排放情况见图1。由图1可见,乐山市水泥产量位居全省首位,其 SO_2 和 NO_x

排放量全省最高,而达州、广安和广元的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 均高于乐山市,说明三市颗粒物治理水平相对较低;成都市水泥产量全省第二,各项污染物排放量均不高,表明其污染物治理技术和管理水平等均较高;阿坝、甘孜、眉山等城市水泥产量较低,其污染物排放也低。

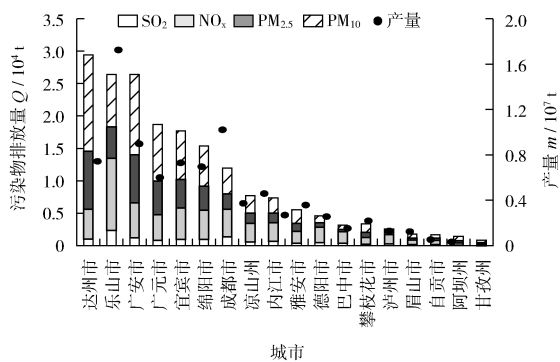


图1 各城市污染物排放情况

Fig. 1 Pollutant emission in various cities

2018年四川省各区域水泥行业污染物排放分布见图2。

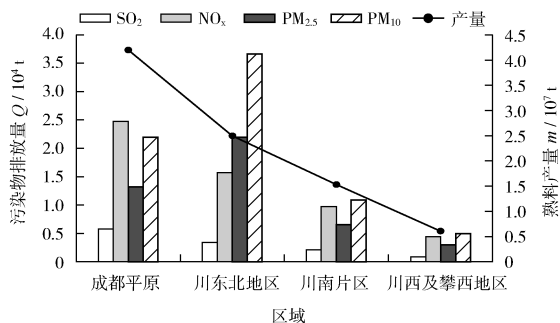


图2 四川省分区域各污染物排放量

Fig. 2 Emissions in different region of Sichuan province

由图2可见, NO_x 和 SO_2 排放量最高的是成都平原,最低为川西及攀西地区,排放量与熟料产量变化趋势基本相同;川东北地区在熟料产量低于成都平原的情况下,其 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 明显高于成都平原,说明受污染物控制技术影响较大。

2.2 结果比对与不确定性分析

将上述研究的排放结果与其他结果进行比较,结果表明,上述研究 SO_2 和 NO_x 的排放量低于文献[14] (SO_2 3.91 万 t, NO_x 9.79 万 t) 的研究结果,高于文献[11] (SO_2 0.6 万 t, NO_x 2.7 万 t) 研究结

果,而 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 均低于文献结果(13.99 万 t 和 20.20 万 t^[14], 19.5 万 t 和 35.5 万 t^[11])。一方面是新型干法窑的不断建设,生产工艺不断优化,相应污染物产生有一定变化;另一方面是近年来水泥产量大幅度上升,同时污染治理设施不断成熟与完善,污染物去除能力得到提升,最终污染物排放发生了变化。

上述研究建立的排放量,活动水平中的产品产量来源于企业填报,数据相对较为可靠。污染物去除效率来源于企业填报,而分粒径颗粒物的去除效率则根据企业采取的除尘设施结合相应的文献数据确定,与实际情况必然存在差异。在生产系数方面,因各企业生产工况、管理水平、原辅材料及清洁生产水平等均不同,故因子与实际存在差异,存在一定的不确定性。

2.3 污染物排放控制水平分析

水泥窑是水泥熟料生产的核心设备,主要用于水泥煅烧工序,是水泥工业大气污染物排放的主要环节。此外,原辅料破碎、水泥磨、煤磨、包装等工序也会产生一定的颗粒物。

调研的 37 条生产线 SO_2 平均排放量为 18 mg/m^3 ,远低于现行 200 mg/m^3 的标准限值。排放量在 50 mg/m^3 以内的生产线占 86%,仅 3% 的生产线的排放量为 $100 \text{ mg/m}^3 \sim 200 \text{ mg/m}^3$,这主要与水泥生产工艺有关。熟料煅烧过程具有很强的吸硫率,大部分 SO_2 能与水泥原料分解的 CaO (MgO) 反应生成石膏。

NO_x 平均排放量为 162 mg/m^3 ,最高不超过四川省的现行标准(400 mg/m^3)。排放量在 200 mg/m^3 以内的生产线有 62%,享受到环保税减半政策。有 3% 的生产线能够稳定于 50 mg/m^3 以下,达到超低排放限值要求,成为四川省水泥工业超低排放的先例。

企业采取的超低措施有:一是在窑内最适合温度点建立还原区;二是增加低氮、分级燃烧技术;三是优化喷氨系统;四是加强企业管理,为四川省水泥工业的超低排放改造起到了推动作用。

颗粒物方面,四川省水泥窑尾、窑头和煤磨执行 30 mg/m^3 ,其余工序执行 20 mg/m^3 的排放标准,颗粒物排放占比分布见表 3。

由表 3 可知,除水泥磨有 6% 的生产线排放浓度超标外,其余工序均达标,超标是由企业采用普通滤袋、滤袋长时间未更换导致除尘效率下降

引起。

表 3 各工序颗粒物排放占比分布 %

Table 3 Distribution of emission proportion of particulate matter in each process %

工序	排放量 $\rho / (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$			
	0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 以上
窑尾	68	27	5	0
窑头	57	30	13	0
煤磨	46	43	11	0
矿石破碎	47	53	0	0
页岩破碎	60	40	0	0
熟料库底	83	17	0	0
水泥磨	43	51	3	3
包装机	64	36	0	0
装车	100	0	0	0

3 结语

2018 年四川省水泥行业 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的排放量分别为 1.2 万 t、5.5 万 t、3.9 万 t 和 6.5 万 t。熟料产量和污染物控制技术是影响各污染物排放量的主要因素。水泥生产企业排放的 SO_2 、 NO_x 和颗粒物浓度总体上均低于现行标准,存在部分工序颗粒物少量超标现象,主要受颗粒物去除效率影响较大。该省已实现超低排放水泥企业的部分技术可为省内其他水泥企业推进超低排放改造提供参考。

[参考文献]

[1] 马静玉. 水泥行业大气污染物排放特征研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2010.

[2] 林亲铁,肖艳云,徐文彬. 水泥厂大气污染物健康风险评价初探[J]. 环境监测管理与技术,2007,19(2):47-49.

[3] BATTYE W, ANEJA V P, ROELLE P A. Evaluation and improvement of ammonia emissions inventories [J]. Atmospheric Environment,2003,37(27):3873-3883.

[4] HE K B, YANG F M, MA Y L, et al. The characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing China [J]. Atmospheric Environment,2001,35:4959-4970.

[5] 魏晋瑜. 不忘初心推进四川水泥行业健康发展——四川省水泥协会 2018 年工作会议侧记 [J]. 中国水泥,2018,189(2):44-47.

[6] 唐敏,胡志锋,邓劲蕾. 水泥工业项目竣工环保验收监测中应关注的问题 [J]. 环境监测管理与技术,2011,23(2):64-67.

[7] 刘鹏,郑志侠,张红,等. 水泥行业大气污染物排放现状分析 [C]//上海市环境科学学会,江苏省环境科学学会,浙江省环境科学学会. 第 11 届长三角科技论坛环境保护分论坛暨上海市环境科学学会第 18 届学术年会论文集. 上海:同济大学音像出版社有限公司,2014:183-189.

[8] 江梅,李晓倩,纪亮,等. 我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考 [J]. 环境科学,2014,35(12):4759-4766.

[9] 徐志荣,陈凤兰,钱莲英. 水泥工业大气污染物排放地方标准制定研究——以浙江省为例 [J]. 水泥,2019,505(5):59-62.

[10] 程钟,章建宁,周俊,等. 常州市大气污染物排放清单及分布特征 [J]. 环境监测管理与技术,2016,28(3):24-28.

[11] 何敏,陈军辉,韩丽,等. 四川省 2008—2014 年水泥行业大气污染物排放清单及时空分布特征 [J]. 环境科学学报,2017,37(1):34-43.

[12] LEI Y, ZHANG Q, NIELSEN C, et al. An inventory of primary air pollutants and CO_2 emissions from cement production in China, 1990—2020 [J]. Atmospheric Environment,2011,45(1):147-154.

[13] 王彦超,蒋春来,贺晋瑜,等. 京津冀及周边地区水泥工业大气污染控制分析 [J]. 中国环境科学,2018,38(10):3683-3688.

[14] 王永红,薛志钢,柴发合,等. 我国水泥工业大气污染物排放量估算 [J]. 环境科学研究,2008,127(2):207-212.

启 事

本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、万方数据-数字化期刊群、重庆维普中文科技期刊数据库,凡被录用的稿件将同时在相关数据库产品中进行网络出版或提供信息服务,其作者著作权使用费与本稿酬一并支付。如作者不同意将文章编入数据库,请在来稿中注明,本刊将做适当处理。