

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20180926.002

覃东棉, 韦吉福, 雷勋杰, 等. 电解铝企业周边土壤氟化物累积影响的研究[J]. 广西科学院学报, 2018, 34(4): 324-330.

QIN D M, WEI J F, LEI X J, et al. The research on fluoride accumulation in soil surrounding the electrolytic aluminum factory [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2018, 34(4): 324-330.

## 电解铝企业周边土壤氟化物累积影响的研究 The Research on Fluoride Accumulation in Soil Surrounding the Electrolytic Aluminum Factory

覃东棉<sup>1</sup>, 韦吉福<sup>2</sup>, 雷勋杰<sup>1</sup>, 伍绍政<sup>1</sup>

QIN Dongmian<sup>1</sup>, WEI Jifu<sup>2</sup>, LEI Xunjie<sup>1</sup>, WU Shaozheng<sup>1</sup>

(1. 广西博环环境咨询服务有限公司, 广西南宁 530000; 2. 广西朴诚信息咨询有限公司, 广西南宁 530000)

(1. Guangxi Bohuan Environmental Consulting Services Co., Ltd, Nanning, Guangxi, 530000, China; 2. Guangxi Pucheng Information Consulting Co., Ltd, Nanning, Guangxi, 530000, China)

**摘要:**【目的】系统研究电解铝企业氟化物排放对企业周边土壤的累积影响。【方法】基于电解铝企业电解烟气的监测结果, 采用 ADMS 模式预测企业周围大气中固态氟和气态氟的年平均落地浓度, 通过土壤累积预测模式预测出不同年份氟化物在土壤氟污染关心点和区域土壤中的累积影响。【结果】固态氟、气态氟的年平均落地浓度与气象、地形和距离等因素有密切的关系。土壤中氟化物的累积与企业投产运行时间密切相关, 随着企业运营时间的持续, 土壤中氟化物含量的不断递增, 电解铝企业运行 30 年后, 厂区四周土壤中氟化物的累积量均出现了超出  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的区域, 该区域最远距离可达 1 640 m, 总区域面积高达 4 487 411  $\text{m}^2$ 。【结论】电解铝企业生产对周围土壤的影响不容忽视, 电解铝企业应提高污染防治措施, 减少氟化物的排放。

**关键词:** 固态氟 气态氟 ADMS 模式 氟化物累积影响

中图分类号: X511 文献标识码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1002-7378(2018)04-0324-07 微信扫一扫, 与作者在线交流



**Abstract:**【Objective】To systematically study the cumulative impact of fluoride emissions from electrolytic aluminum enterprises on the surrounding soil of enterprises. 【Methods】Based on the monitoring results of electrolytic flue gas in electrolytic aluminum factory, the annual average concentration of solid fluoride and gaseous fluorine in the atmosphere around the factory was predicted by ADMS model. Through the soil accumulation prediction model, the cumulative effects of fluoride on the soils of pollution concerns and regions in different years were predicted. 【Results】The results showed that the annual average concentration of solid fluoride and gaseous fluorine were related to the weather, topography and distance. The accumulation of fluoride in the soil was closely related to the operation time of the enterprise. As the operation time of the enterprise continued, the fluoride content in the soil increased continuously. The cumulative amount of fluoride in the soil around the plant area had exceeded  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , which had a maximum distance of 1 640 m and a total area of 4 487 411  $\text{m}^2$ . 【Conclusion】The influence of the electrolytic

收稿日期: 2018-01-10

作者简介: 覃东棉(1985—), 女, 硕士, 环评工程师, 主要从事环境影响评价、环境污染治理研究, E-mail: qindongmian@163.com。

aluminum factory on the surrounding soil cannot be ignored, and the electrolytic aluminum factory should improve pollution prevention measures and reduce the emission of fluoride.

**Key words:** solid fluoride, gaseous fluorine, ADMS model, cumulative effect of fluoride

## 0 引言

**【研究意义】**铝在经济建设和国防工业中都具有举足轻重的地位和作用<sup>[1-2]</sup>。在电解铝生产过程中会伴随着氟化物、二氧化硫、烟尘等污染物的产生及排放,其中氟化物是电解铝生产过程中的特征污染物(主要以氟化氢、尘氟等形式存在),随烟气排入大气经干湿沉降作用一定程度地污染周围土壤环境<sup>[3]</sup>,因此,研究土壤中氟化物的累积影响具有相当重要的意义。**【前人研究进展】**大气中的氟化氢易于与植被和土壤成份反应并为地表吸附,沉降速度较快<sup>[4]</sup>。Jha等<sup>[5]</sup>在统计印度勒克瑙市郊砖厂附近土壤中的氟化物浓度时发现,土壤中总氟含量与土壤水溶性氟含量无显著相关,说明氟化物易转化成其他形态积累于土壤中。Tripathy等<sup>[6]</sup>在对印度奥里萨邦的土壤氟污染区进行了结合地球化学过程的因子分析评价,对各因子进行多元回归分析得到的土壤氟污染指数,并定性了该地区氟污染级别。杨成等<sup>[7]</sup>分析了云贵高原某城市不同排氟污染企业的植被和土壤含氟特征,发现电解铝厂和玻璃厂附近土壤氟污染最为严重,土壤均氟含量40倍于普通土壤背景值。郑喻<sup>[8]</sup>对铝厂周围的氟污染进行了监测和评估,其中以含氟烟气的无组织排放污染最为严重。张西林等<sup>[9-10]</sup>发现铝厂附近土壤的氟污染与方位、地貌类型、土壤类型有关。**【本研究切入点】**目前国内外的研究主要集中于单一的大气氟监测评价和土壤氟化物监测评价,但缺少一定的时间尺度和氟污染浓度范围,因此在反映和预测铝厂周边土壤氟污染的动态积累情况上有局限性。**【拟解决的关键问**

表1 有组织排放的电解烟气

Table 1 Electrolyzed flue gas by organised emission

名称 Name	高度 Height (m)	内径 Inner diameter(m)	烟气流速 Gas velocity ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	固态氟排放速率 Emission rate of solid fluoride( $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ )	气态氟排放速率 Emission rate of gaseous fluoride ( $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1# 烟囱 1# Chimney	70	5	7.717 3	0.078 4	0.115 8
2# 烟囱 2# Chimney	70	5	7.304 8	0.068 8	0.073 5
3# 烟囱 3# Chimney	70	5	7.364 7	0.039 7	0.065 3
4# 烟囱 4# Chimney	70	5	7.113 2	0.030 6	0.111 9

**题】**本研究采用ADMS空气扩散预测模型、土壤累积影响评价定量预测的模式预测电解铝企业周围土壤氟化物的累积影响,不仅考虑了企业运行时间对土壤氟化物累积的影响,也考虑了风向、地形、距离等对土壤累积的影响,给出了土壤氟化物影响的等值线图,为科学评价电解铝氟化物在土壤中的累积影响提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 空气扩散预测模型

#### 1.1.1 电解铝企业污染源清单调查

本研究以广西某电解铝企业为研究对象,该企业生产规模为年产铝水25万t,由2个长1027m、宽27m的电解车间平行布局。两个车间之间布局4套氧化铝干法吸附净化系统和4根高70m、内径5m的烟囱。

企业采用的生产工艺是冰晶石-氧化铝熔融电解法,电解质均属于熔融状态,电解质在电解槽内经过复杂的电化学反应,氧化铝被分解,在槽底析出液态金属铝,阳极释放阳极气体,即电解烟气<sup>[11]</sup>。电解烟气主要通过电解车间的天窗和烟气净化系统的烟囱两种途径排放<sup>[12]</sup>。一定比例(捕集效率或集气效率)的电解槽烟气经过烟气经捕集后进入氧化铝干法吸附净化处理系统进行处理,处理后烟气经烟囱外排,为有组织排放。未经捕集的烟气经电解车间天窗排放,为无组织排放。电解烟气的集气效率一般为98.5%<sup>[13]</sup>。

企业电解烟气的排放情况见表1、表2。

表2 无组织排放的电解烟气

Table 2 Electrolyzed flue gas by unorganised emission

名称 Name	长度 Length(m)	宽度 Width(m)	高度 Height (m)	固态氟排放速率 Emission rate of solid fluoride( $g \cdot s^{-1}$ )	气态氟排放速率 Emission rate of gaseous fluoride( $g \cdot s^{-1}$ )
1# 车间 1# shop	1 027	27	18	2.889 8	0.105 5
2# 车间 2# shop	1 027	27	18	5.932 7	0.149 1

### 1.1.2 空气扩散模型的选择

空气扩散预测模型主要有 AERMOD 模式、ADMS 模式、CALPUFF 模式<sup>[14]</sup>。本研究选用 ADMS 模式进行模拟,ADMS 是由剑桥环境研究咨询有限公司研制,可模拟点源、面源、线源和体源等排放出的污染物在短期(小时平均、日平均)、长期(年平均)的浓度分布的模型。ADMS 的一个重要特点是能够计算地面反射影响,化学反应影响和地形的影响。在边界层之内的浓度分布遵循高斯烟羽浓度分布规律,且在地表和逆温层之间反射。

### 1.2 土壤污染预测方法

进行土壤累积影响评价定量预测的模式主要有两种<sup>[15-18]</sup>,分别为考虑土壤残留系数的模式和不考虑土壤残留系数的模式。本报告采用考虑土壤残留系数的模式进行计算,土壤中污染物的累积量计算公式见式(1)。在气源性污染物在土壤中的累积影响中,考虑到成土过程与气源性重金属的输入时间

表3 土壤背景值调查

Table 3 Survey of soil background value

名称 Name	与企业的相对位置关系 Relative position with enterprises	背景值 Background value ( $mg \cdot kg^{-1}$ )
1# 土壤观测点 1# Observation point	北面,年主导风向上风向 North, upwind of dominant wind direction	570
2# 土壤观测点 2# Observation point	南面,年主导风向下风向 South, downwind of dominant wind direction	308
3# 土壤观测点 3# Observation point	南面,年主导风向下风向 South, downwind of dominant wind direction	378
4# 土壤观测点 4# Observation point	南面,年主导风向下风向 South, downwind of dominant wind direction	272

### 1.2.2 污染物在土壤中的残留率

广西全区土壤类型主要为红壤,红壤面积达 1 074.3 万公顷,占全区土壤总面积的 66.55%<sup>[19-20]</sup>。土壤氟在土壤中的存在形态主要有无机形态氟( $F^-$ 、 $[SiF_6]^{2-}$ 、 $[AlF_6]^{3-}$ 、 $[FeF_6]^{2-}$ 等)、有机态氟(如氟乙酸和氟柠檬酸等)、水溶性氟(用蒸馏水提取)、酸溶性氟(用草酸、醋酸或者  $HNO_3$  及柠檬酸提取)、碱溶性氟(用 NaOH 或者

的差异较大,可以不考虑土壤背景值中污染物的衰减影响,即土壤背景值  $Q_0$  不变<sup>[17]</sup>,公式(1)可变为公示(2)。

$$Q_t = Q_0 K^t + PK \frac{1 - K^t}{1 - K}, \quad (1)$$

$$Q_t = Q_0 + P_1 K \frac{1 - K^t}{1 - K}, \quad (2)$$

式中,  $Q_t$  为污染物在土壤中的年累积量,  $mg \cdot kg^{-1}$ ;  $Q_0$  为区域土壤背景值,  $mg \cdot kg^{-1}$ ;  $P$  为污染物的年输入量,  $mg \cdot kg^{-1}$ ;  $K$  为污染物在土壤中的残留率, %;  $t$  为累积年限, 年;  $P_1$  为企业排放污染物的年输入量,  $mg \cdot kg^{-1}$ 。

#### 1.2.1 区域土壤背景值 $Q_0$ 的确定

在该企业年主导风向上风向设置一个土壤背景值调查点,在主导风向下风向设置 3 个土壤背景值调查点,背景值调查结果见表 3。

$Na_2CO_3$  等碱性溶液提取)、盐溶性氟(用  $KCl$ 、 $MaCl_2$ 、 $CaCl_2$  等提取)<sup>[21]</sup>。

一般水溶性氟会受自然淋溶进行迁移,其他形态的氟大都保留在土壤中,不易受自然淋溶迁移。区域水溶性氟占总氟含量的比例为 0.10% ~ 12.72%,均值约 2.5%,故本研究预测氟的残留率  $K$  值取 97.5%。

### 1.2.3 氟的年输入量 $P_1$ 的确定

$P_1$  包括干沉降量和使沉降量两部分,大气中污染物的沉降量湿沉降约为 80%~90%,干沉降只占 10%~20%<sup>[22]</sup>。本研究预测以干沉降占 15%,湿沉降占 85%计,则氟的年输入量  $P_1$  的计算公示见式(3)和式(4)。

$$P_1 = R + \frac{0.85}{0.15}R, \quad (3)$$

$$R = \frac{3\,600 \times 8\,760 \times C \times v \times 10^{-2}}{\text{单位面积土壤量}}, \quad (4)$$

式中,  $R$  为干沉降累积量,  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}$ ;  $C$  为大气污染物地面年平均质量浓度,  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 通过 ADMS 预测结果获得;  $v$  为沉降速率,  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 1.2.4 沉降速率的确定

大气中氟主要以气态氟和固态氟的形态存在,根据研究,气态氟的沉降速率约为  $0.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[4]</sup>。固态氟的干沉降速率采用斯托克斯定律进行计算见式(5)。

$$v = \frac{gd^2(\rho_1 - \rho_2)}{18\mu}, \quad (5)$$

式中,  $g$  为重力加速度,  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $d$  为粒子的直径,以  $10 \mu\text{m}$  计;  $\rho_1$  为颗粒真密度,以氟化铝计,为  $1.91 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $\rho_2$  为空气密度,为  $1.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $\mu$

表 4 各土壤观测点氟化物的累积量预测结果

Table 4 Prediction results of fluoride accumulation at each soil observation point

土壤观测点 Observation point	$Q_0$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$P_1$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$Q_5$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$Q_{10}$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$Q_{20}$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$Q_{30}$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	增加量 Increase( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
1#	570	1.970 6	579.138 1	587.189 6	600.534 4	610.894 4	40.894 4
2#	308	1.706 3	315.912 6	322.884 4	334.439 6	343.410 3	35.410 3
3#	378	1.370 9	384.357 4	389.958 8	399.242 8	406.450 3	28.450 3
4#	272	0.691 1	275.204 7	278.028 3	282.708 3	286.341 4	14.341 4

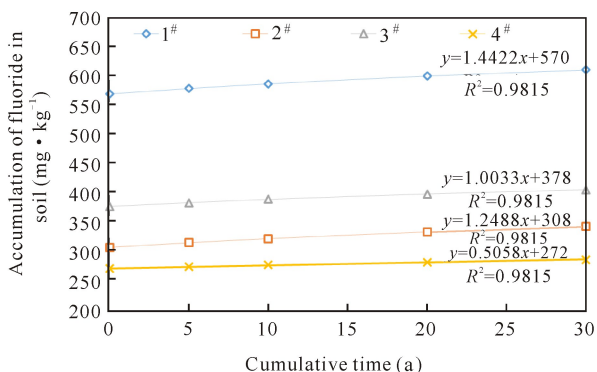


图 1 各土壤观测点氟化物的累积预测结果

Fig. 1 Prediction results of fluoride accumulation at each soil observation point

为空气的粘度,为  $1.81 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤关心点氟化物累积影响预测结果

根据各个土壤观测点固态氟、气态氟的年平均预测结果以及土壤污染预测方法,计算出电解铝企业投产 5 年、10 年、20 年和 30 年后 4 个土壤观测点中土壤中氟化物的累积量(表 4 和图 1)。从表 4 和图 1 中可以看出,随着投产运行时间的延长,土壤中氟化物的含量不断递增,增加速度与氟化物的年输入量(即氟化物的年平均落地浓度)成正比的关系。根据每个土壤监测点的对比分析,运行 30 年后,1# 土壤监测点土壤中氟化物的含量相比于为投产时的背景值增加  $40.894 4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,增加 7.17%;2# 土壤监测点土壤中氟化物的含量相比于为投产时的背景值增加  $35.410 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,增加 11.50%;3# 土壤监测点土壤中氟化物的含量相比于为投产时的背景值增加  $28.450 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,增加 7.53%;4# 土壤监测点土壤中氟化物的含量相比于为投产时的背景值增加  $14.341 4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,增加 5.27%。

### 2.2 区域土壤氟化物累积影响预测结果

#### 2.2.1 区域土壤氟化物累积的影响因素

根据区域固态氟、气态氟的年平均预测结果以及土壤污染预测方法,计算出电解铝企业投产 5 年、10 年、20 年和 30 年后区域土壤中氟化物的累积量(图 2)。从图 2 中可以看出,土壤中氟化物的累积量与风向、地形、相对距离等有关。

##### 2.2.1.1 与风向的关系

从图 2 中可知,土壤中氟化物的累积量自污染源向外,位于主导风向、次风向的氟化物的扩散范围明显大于其他方位的扩散范围。气象条件对烟羽扩散的影响极为显著。由于土壤中氟化物的累积量预测基于 ADMS 大气预测结果,ADMS 是基于区域大气扩散条件进行模拟,风向作为气象条件的重要

组成部分,对氟化物的扩散影响相当显著。

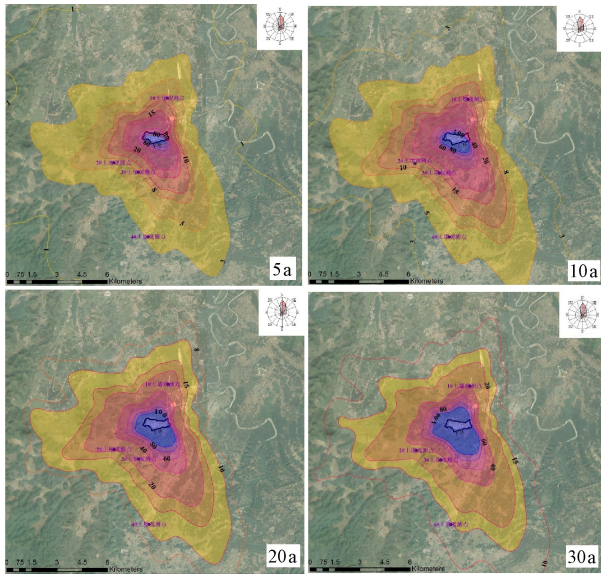


图2 区域土壤中氟化物的累积预测结果( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )

Fig. 2 Prediction results of fluorine accumulation in soil around the factory( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )

### 2.2.1.2 与地形的关系

从图2可知,受地形影响<sup>[23]</sup>,土壤中氟化物的累积量不呈连续均匀分布,而是形成花型扩散。原因是土壤中氟化物的累积量预测基于ADMS大气预测结果,ADMS是一个高斯烟羽扩散预测模型,模型中考虑了复杂地形对烟羽的扩散的影响,预测结果说明复杂地形地区地形高度、起伏对烟羽扩散流场的影响较大,颗粒类污染物扩散烟羽在传输过程受山体的阻隔,水平方向烟羽将直接撞击到山体地形并被迫分流绕过山体,垂直方向烟羽沿山体地形表面向上抬升并向前传输扩散,进而导致污染物

表5 区域土壤中氟化物的累积量超过 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的范围

Table 5 The accumulation of fluoride in soil beyond  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

名称 Name	距离 Distance (m)				面积 Area( $\text{m}^2$ )			
	$Q_5$	$Q_{10}$	$Q_{20}$	$Q_{30}$	$Q_5$	$Q_{10}$	$Q_{20}$	$Q_{30}$
厂区东面 East	0	0	0	40	0	0	0	757
厂区南面 South	290	740	1 190	1 640	169 571	754 663	1 770 947	2 689 094
厂区西面 West	0	150	500	650	0	44 216	459 849	919 850
厂区北面 North	0	120	590	890	0	69 119	506 274	877 710

## 3 结论

电解铝企业排放氟化物对土壤中氟化物的累积影响与氟化物的大气环境影响区域分布规律类似,氟化物的累积影响与风向、地形、距离有密切关系。其中距离的影响最大,越远离电解铝企业区的土壤,

落地浓度的变化,从而也导致土壤中氟化物的累积量与风向不形成完全的正相关。

### 2.2.1.3 与相对距离的关系

从图2中可知,随着相对距离的不断增加,土壤中氟化物的累积量呈下降的趋势,这与大气模拟的结论基本一致<sup>[24]</sup>。

### 2.2.2 区域土壤氟化物累积结果

电解铝企业投产5年、10年、20年和30年后厂址外围土壤中氟化物的累积量超过 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的区域面积及区域最远距离(表5)。从单个区域方位而言,厂区南面的土壤氟化物的含量最先超过 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,超出 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的最远距离从铝厂投产5年的290 m增加至投产30年的1 640 m,超出 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的面积从169 571  $\text{m}^2$ 增加到2 689 094  $\text{m}^2$ 。从总体区域而言,投产5年后,仅厂区南面部分区域土壤中氟化物的累积量超出 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最远距离为290 m,区域面积为169 571  $\text{m}^2$ (图2a);投产10年后,厂区南面、西面、北面部分区域土壤中氟化物的累积量超出 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最远距离为740 m,总的区域面积为867 998  $\text{m}^2$ (图2b);投产20年后,厂区南面、西面、北面部分区域土壤中氟化物的累积量超出 $100 \text{ mg}/\text{kg}$ ,最远距离为1 190 m,总的区域面积为2 737 070  $\text{m}^2$ (图2c);投产30年后,厂区东面、南面、西面、北面部分区域土壤中氟化物的累积量均超出 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最远距离为1 640 m,总的区域面积为4 487 411  $\text{m}^2$ (图2d)。

其氟化物的累积量越小,氟化物累积量变化高达 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上;其次是风向的影响,位于主风向、次风向的下风向的影响范围和影响区域明显高于主导风向上风向;再次是地形的影响,由于电解铝排放的氟化物大部分为无组织排放的固态氟排放,固态氟传输受地形阻隔影响较大,因而土壤环境的

影响也与土壤区位与电解铝企业之间的地形所影响。电解铝企业运行 30 年后,厂区四周土壤中氟化物的累积量均出现了超出  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的区域,该区域最远距离可达 1 640 m,总的区域面积高达  $4\,487\,411 \text{ m}^2$ 。可见电解铝企业生产对周围土壤的影响不容忽视。因此,电解铝企业应提高污染防治措施,减少氟化物的排放,尤其需要减少通过天窗无组织排放的氟化物。

#### 参考文献:

- [1] 朱政江,徐金荣,董建忠. 山西省有色金属产业发展的现状及问题解析[J]. 中国有色冶金, 2016, 45(4): 71-74.  
ZHU Z J, XU J R, DONG J Z. Analysis on the current situation and issues of nonferrous metals industry development in Shanxi Province [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2016, 45(4): 71-74.
- [2] 王祝堂. 中国原铝深加工现状与发展趋势[J]. 轻金属, 2012, 3: 3-6.  
WANG Z T. Present situation and development trend of primary aluminium deep processing in China [J]. Light Metals, 2012, 3: 3-6.
- [3] 龙智翔,谢涛,周琳,等. 离子色谱法测定环境空气中可溶性氟化物含量[J]. 广西科学院学报, 2010, 26(3): 273-276, 279.  
LONG Z X, XIE T, ZHOU L, et al. Determination of the soluble fluoride content in air by ion chromatography [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2010, 26(3): 273-276, 279.
- [4] 忻贤华. 气体污染物的干沉降[J]. 气象科学, 1981(5): 13-15.  
XIN X H. Dry deposition of gas pollutants [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 1981(5): 13-15.
- [5] JHA S K, NAYAK A K. Fluoride accumulation in soil and vegetation in the vicinity of brick fields [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, 80(4): 369-73.
- [6] TRIPATHY S, PANIGRAHI M K. Geochemistry of soil around a fluoride contaminated area in Nayagarh District, Orissa, India: Factor analytical appraisal [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2005, 27(3): 205-216.
- [7] 杨成,罗绪强,王娅,等. 大气污染影响下凯里植物、土壤氟含量特征[J]. 中国农学通报, 2012, 28(19): 76-79.  
YANG C, LUO X Q, WANG Y, et al. Characteristics of fluorine contents in plants and soils from Kaili under air pollution [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(19): 76-79.
- [8] 郑瑜. 电解铝厂周边氟化物污染特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2010.  
ZHENG Y. Study on pollution characteristics of the fluoride around the electrolysis aluminum factory [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2010.
- [9] 张西林,曾光明,蒋益民,等. 电解铝厂周边土壤和农作物氟污染评价[J]. 环境科学与管理, 2006, 1: 157-160.  
ZHANG X L, ZENG G M, JIANG Y M, et al. Assessment on fluoride pollution in soil and crop around electrolytic aluminum factory [J]. Environmental Science and Management, 2006, 1: 157-160.
- [10] 张西林,马超,熊如意,等. 对电解铝厂周边氟污染的环境影响评价[J]. 中国环保产业, 2012, 10: 41-46.  
ZHANG X L, MA C, XIONG R Y, et al. Environmental impact assessment on fluoride pollution around electrolysis aluminum plant [J]. China Environmental Protection Industry, 2012, 10: 41-46.
- [11] 李振宇. 电解铝生产中含氟烟气的治理技术[J]. 云南冶金, 2010, 39(5): 73-77.  
LI Z Y. Treatment technology of fluorine-containing fume in the electrolytic aluminium production [J]. Yunnan Metallurgy, 2010, 39(5): 73-77.
- [12] 刘志玲. 关于电解铝厂烟气净化系统集气效率的探讨[J]. 有色金属设计, 2006, 33(2): 69-74.  
LIU Z L. Study on hooding efficiency of the pot fume treatment plant [J]. Nonferrous Metals Design, 2006, 33(2): 69-74.
- [13] 环境保护部. 铝电解废气氟化物和粉尘治理工程技术规范: HJ 2033—2013 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.  
Environmental Protection Department. Technical specification for the treatment of fluoride and dust in the waste gas of aluminum electrolysis: HJ 2033—2013 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013.
- [14] 环境保护部. 环境影响评价技术导则 大气环境: HJ 2.2—2008 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.  
Environmental Protection Department. Technical guidelines for environmental impact assessment—Atmospheric environmental: HJ 2.2—2008 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008.
- [15] 王红旗,刘新会,李国学,等. 土壤环境学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.  
WANG H Q, LIU X H, LI G X, et al. Soil environment science [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.

- [16] 赵珂. 大气降尘对土壤重金属累积量估算方法探讨——以重庆市綦江县永新冶炼厂为例[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(11): 55-58.  
ZHAO K. Discussions on the method of estimating accumulated quantity of heavy metal in soil caused by dustfall—As Yongxin smelt factory an example in Qijiang county of Chongqing[J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(11): 55-58.
- [17] 朱铁才, 葛仙梅. 废气重金属排放对土壤累积影响评价方法探讨[J]. 环境与发展, 2017, 29(3): 44-45.  
ZHU T C, GE X M. Effects of heavy metal emissions from exhaust on soil accumulation evaluation method [J]. Environment and Development, 2017, 29(3): 44-45.
- [18] 郭志明, 韩震, 王浩宇, 等. 气源性重金属污染物在土壤中的累积效果以及影响预测分析[J]. 环境与可持续发展, 2015, 40(5): 64-66.  
GUO Z M, HAN Z, WANG H Y, et al. On cumulative effect and the impact predictive analysis of airborne heavy metal pollutants in the soil[J]. Environment and Sustainable Development, 2015, 40(5): 64-66.
- [19] 刘康怀, 李纯, 蓝俊康, 等. 广西红壤类土的地球化学演化和退化[J]. 广西科学, 2001, 8(3): 215-217, 222.  
LIU K H, LI C, LAN J K, et al. Geochemical evolution and degeneration of red soils in Guangxi [J]. Guangxi Sciences, 2001, 8(3): 215-217, 222.
- [20] 李纯, 刘康怀, 蓝俊康, 等. 腐植酸及其土壤环境保护意义[J]. 广西科学院学报, 2001, 17(3): 129-132.  
LI C, LIU K H, LAN J K, et al. Humic acid and its significant in protection of soil environment [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2001, 17(3): 129-132.
- [21] 桂建业, 韩占涛, 张向阳, 等. 土壤中氟的形态分析[J]. 岩矿测试, 2008, 27(4): 284-286.  
GUI J Y, HAN Z T, ZHANG X Y, et al. Speciation analysis of fluorine in soil samples [J]. Rock and Mineral Analysis, 2008, 27(4): 284-286.
- [22] 王晓蓉. 环境化学[M]. 南京: 南京大学出版社, 1993.  
WANG X R. Environmental chemistry [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1993.
- [23] 傅中平, 陈永红, 刘干荣, 等. 广西石林地貌的分布及其特征[J]. 广西科学院学报, 2006, 22(1): 44-46, 54.  
FU Z P, CHEN Y H, LIU G R, et al. Characteristics and distribution of stone forest in Guangxi [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2006, 22(1): 44-46, 54.
- [24] 李庭, 舒型武, 肖怀德. 应用 ADMS 确定大气环境保护距离方法探讨[J]. 环境工程, 2011, 29(3): 120-123.  
LI T, SHU X W, XIAO H D. Discussion on calculating environment protection zone by ADMS [J]. Environmental Engineering, 2011, 29(3): 120-123.

(责任编辑: 符支宏)

(上接第 323 页 Continue from page 323)

- [7] 王云变, 刘洋, 王成虎. 干旱对山西林业的影响及应对措施[J]. 中国农业资源与区划, 2012, 33(1): 93-96.  
WANG Y B, LIU Y, WANG C H. Influence of drought on forestry and countermeasures in Shanxi [J]. Chinese Agricultural Resources & Regional Planning, 2012, 33(1): 93-96.
- [8] 王燕, 刘青院. 江西省林业气象灾害特点、分布及防灾减灾对策[J]. 江西林业科技, 2006(2): 25-27.  
WANG Y, LIU Q Y. Characteristics and distribution of forestry meteorological disasters in Jiangxi and countermeasures for disaster prevention and reduction [J]. Jiangxi Forestry Science and Technology, 2006(2): 25-27.
- [9] 杨尚英, 张梅梅, 杨玉玲. 近 10 年来我国农业气象灾害分析[J]. 江西林业科技, 2011, 19(7): 106-108.  
YANG S Y, ZHANG M M, YANG Y L. Analysis of agrometeorological disasters in China in recent 10 years [J]. Jiangxi Forestry Science and Technology, 2011, 19(7): 106-108.
- [10] 王春乙, 张继权, 霍治国, 等. 农业气象灾害风险评估研究进展与展望[J]. 气象学报, 2015(1): 1-19.  
WANG C Y, ZHANG J Q, HUO Z G, et al. Research progress and prospect of agrometeorological disaster risk assessment [J]. Journal of Meteorology, 2015(1): 1-19.

(责任编辑: 陆雁)