

# 残留于中药材中拟除虫菊酯类农药的风险评估

闫研<sup>1</sup>, 秦斌<sup>1</sup>, 梁雪<sup>1</sup>, 王炳志<sup>2</sup>, 连少敏<sup>1</sup>, 殷果<sup>1</sup>

(1. 深圳市药品检验研究院 国家药品监督管理局中药质量研究与评价重点实验室, 广东 深圳 518057;

2. 深圳市易瑞生物技术股份有限公司, 广东 深圳 518101)

**[摘要]** 对6种中药材中残留的拟除虫菊酯类农药进行污染分析和风险评估。农残污染程度分析以检出率、超标率为指标; 农残风险评估采用慢性和急性膳食风险暴露评估。以拟除虫菊酯类农药合计, 农药残留检出涉及6种中药材共计115批次, 占比43.73%, 其中金银花的农残总检出率高达88.89%; 农药残留超标涉及3种中药材共计14批次, 占比5.32%, 其中金银花的总超标率高达55.00%。各拟除虫菊酯类农药在6种中药材中的暴露评估在可接受范围内。农残超标率较高的中药材应列为重点监管对象, 以防其他种类农药残留的累积风险加重影响中药材质量, 亟待开发农残检测有效技术手段, 以不断提升监管力度。

**[关键词]** 中药材; 拟除虫菊酯类农药; 农残分析; 风险评估

**[中图分类号]** S48

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 2097-4566 (2025) 08-0113-05

## Risk assessment of pyrethroid pesticides in Chinese medicinal materials

YAN Yan<sup>1</sup>, QIN Bin<sup>1</sup>, LIANG Xue<sup>1</sup>, WANG Bingzhi<sup>2</sup>, LIAN Shaomin<sup>1</sup>, YIN Guo<sup>1</sup>

(1. NMPA key laboratory for Quality Research and Evaluation of Traditional Chinese medicine, Shenzhen Institute for Drug Control, Shenzhen 518057, China; 2. Shenzhen Bioeasy Biotechnology Co., Ltd., Shenzhen 518101, China)

**Abstract:** Pollution analysis and risk assessment are conducted on the residual pyrethroid pesticides in six kinds of Chinese medicines. The analysis of the degree of pesticide residue pollution adopts the detection rate and the over-standard rate as the indicators. Pesticide residue risk assessment adopts chronic and acute dietary risk exposure assessment. Based on the total of pyrethroid pesticides, a total of 115 batches of 6 kinds of Chinese medicines are detected for pesticide residues, accounting for 43.73%. Among them, the total detection rate of pesticide residues in honeysuckle is as high as 88.89%. A total of 14 batches of three types of medicinal materials are involved in excessive pesticide residues, accounting for 5.32%. Among them, the total over-standard rate of honeysuckle is as high as 55.00%. The exposure assessment of each pyrethroid pesticide in six kinds of Chinese medicines is within an acceptable range. Chinese medicines with a relatively high rate of excessive pesticide residues shall be listed as key regulatory targets to prevent the cumulative risk of other types of pesticide residues from increasing and affecting the quality of Chinese medicines. It is urgent to develop effective technical means for pesticide residue detection to continuously enhance regulatory efforts.

**Key words:** traditional Chinese medicines; pyrethroid pesticide; residue analysis; risk assessment

作为我国传统文化瑰宝的中药, 距今已有5 000多年的历史, 在预防治疗疾病和保健养生等方面具有重要意义。由于中药材病虫害种类繁多, 在种植过程中农药使用的频率越来越高, 农药长期大量不规范使用, 对中药材安全和生态环境安全造成了严重威胁<sup>[1-4]</sup>。拟除虫菊酯类农药(pyrethroid pesticides, PYRs)是从植物除虫菊中提取的天然除虫菊素为先导物合成的一类农药, 因其具有高效、低毒、低残留、易降解等特点, 被广泛应用于农业生产应用领域中, 是使用量全球排名第二的杀

虫剂, 其使用量约占全球农药市场的30%。常见的PYRs包括氯菊酯、氰菊酯、氟氯菊酯、溴氰菊酯、氰戊菊酯、联苯菊酯等。长期、大量、频繁等不规范使用这类农药会导致其在环境中残留与积

**[收稿日期]** 2023-05-22; **[修回日期]** 2025-05-20

**[作者简介]** 闫研(1983-), 女, 吉林吉林人, 主任药师, 研究方向: 药品质量控制与快检方法研究。

**[通信作者]** 殷果, 女, 主任药师, 研究方向: 药品质量控制与监管。

**[基金项目]** 广东省科技计划项目(2021A0505080003)

累, 渗透进入土壤、水环境等, 通过饮食摄入、皮肤接触、呼吸吸入等多种途径进入人体, 并在人体蓄积。PYRs 可导致机体免疫系统氧化损伤和凋亡增加, 从而导致免疫毒性, 同时长时间低剂量暴露或短时间高剂量暴露会对机体产生神经毒性、生殖毒性、致癌等伤害<sup>[5-9]</sup>。

近年来, 国家已推出系列举措积极推进农药使用量零增长、负增长和农药使用安全性评价<sup>[10]</sup>, 因此亦有必要明确中药材中拟除虫菊酯类农药的残留状况, 并进行科学有效的风险评估, 以提高中药材质量, 提升监管力度。目前, 农药残留的污染分析主要以检出率和超标率为指标展开; 暴露风险评估主要从慢性膳食暴露评估和急性膳食暴露评估两方面进行。

本研究以金银花、山药、陈皮等6种市售常见、药食常用中药材为对象, 以高效氯氟氰菊酯、甲氰菊酯、氯氰菊酯等8种拟除虫菊酯类农药为检测指标, 根据《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》中“蔬菜”品种项下的最大残留限量要求判断是否超限。同时采用上述评价方法对中药材中农药残留进行全面、系统的分析和评价, 以科学、准确地掌握中药材中农残的摄入风险, 为中药材的农药日常使用和监督管理等提供基础数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究以2018—2022年国家评价抽验、日常监督抽验等项目检验为基础, 针对金银花、山药、陈皮、绞股蓝、栀子、北五味子6种中药材, 获取农药检测相关数据; 在中国知网、万方、维普三大数据库进行文献检索, 获取2018—2022年来6种中药材的农药检测相关数据, 最终数据涉及中药材共263批次, 生产企业或供应商9家, 产地涵盖全国20个省(自治区、直辖市), 以确保分析评价的系统全面和科学有效。

### 1.2 污染现状分析方法

计算检出率、超标率, 从而客观地分析样本中的农药污染状况, 公式见式(1)(2):

$$\text{检出率} = \frac{N}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $N$  为检出样品个数,  $M$  为单类中药材的样品总数。

$$\text{超标率} = \frac{S}{A} \times 100\% \quad (2)$$

### 1.3 风险评估方法

#### 1.3.1 慢性膳食暴露评估

估算每日摄入量 (Estimated daily intake, EDI), 与评估推荐的每日允许摄入量 (Acceptable daily intake, ADI) 进行比较, 计算慢性危害商数 (Hazard quotient,  $HQ_c$ ) 和%ADI, 进行慢性膳食暴露评估。计算公式分别见式(3)(4)(5):

$$EDI = \frac{\sum PL_i \times F_i}{m} \quad (3)$$

$$HQ_c = \frac{EDI}{ADI} \quad (4)$$

$$\%ADI = \frac{C_i \times F_i}{m \times ADI} \times 100\% \quad (5)$$

式(3)中,  $PL_i$  为药材中农药残留量中位值, 取残留量平均值, mg/kg;  $F_i$  为平均每日摄入量, 根据《中国药典》2020年版一部规定药材每日用量范围, 取其平均值, kg/d;  $m$  为我国居民人均体质量, 按63 kg计算。

式(4)中, ADI为每日允许摄入量, 取值参考GB 2763—2021, mg/kg。当 $HQ_c > 1$ 时, 表明该药材的慢性摄入风险较高; 当 $HQ_c < 1$ 时, 表明其慢性风险较低, 在可接受范围之内。

式(5)中,  $C_i$  为药材中农药残留平均值, mg/kg;  $F_i$ 、 $m$  和 ADI 同上。当 $\%ADI \leq 100\%$ , 表明风险尚可接受, 当 $\%ADI \geq 100\%$ , 表明风险不可接受。

#### 1.3.2 急性膳食暴露评估

估算短期摄入量 (National estimated short-term intake, NESTI), 并与不同急性参考剂量 (Acute reference dose, ARfD) 进行比较; 计算急性危险商数 ( $HQ_a$ ), 进行急性摄入风险评估; 计算%ARfD, 进行急性膳食摄入风险评估。计算公式分别见式(6)(7)(8):

$$NESTI = \frac{HR \times LP}{m} \quad (6)$$

$$HQ_a = \frac{NESTI}{ARfD} \quad (7)$$

$$\%ARfD = \frac{HR \times LP}{m \times ARfD} \times 100\% \quad (8)$$

式(6)中, HR (High residue) 为中药材中农药残留最大值; LP (Largest portion) 为每日用量最大值, 根据《中国药典》2020年版一部规定的药材每日用量最大值;  $m$  同上。

式(7)中, ARfD是急性参考剂量, 其取值参考农药残留专家联席会议 (Joint FAO/WHO Meeting on Pesticide Residues, JMPR), mg/kg。当 $HQ_a > 1$ 时, 表明该药材的急性摄入风险较高, 其数值越大说明风险越高; 当 $HQ_a < 1$ 时, 表明其急性风险较低, 在可接受范围之内。

当%ARfD ≤ 100%，说明风险尚可接受，当%ARfD ≥ 100%，说明风险不可接受。

## 2 结果

### 2.1 农药残留污染分析

6种中药材中拟除虫菊酯类农药残留检出率及超标情况见表1。由表1可知，6种中药材中拟除虫菊酯类农药均有检出。检出农药数量最多的中药材是金银花、栀子、陈皮，均检出4种农药；绞股蓝检出3种农药；山药和北五味子检出1种农药。

检出最多的农药：高效氯氟氰菊酯、甲氰菊酯、氯氟菊酯，均涉及3种药材。农药检出率前3

位是金银花中的联苯菊酯、氯氟氰菊酯、苯醚菊酯，检出率分别为72.22%、72.22%和66.67%。农药残留超标率前3位是金银花中的联苯菊酯、氯氟氰菊酯，陈皮中的高效氯氟氰菊酯，超标率分别为50.00%、25.00%和3.64%。

综上，6种中药材共263批次，按拟除虫菊酯类农药合计，农药残留检出涉及6种中药材共计115批次，占比43.73%，其中金银花总检出率高达88.89%；农药残留超标涉及3种药材共计14批次，占比5.32%，其中金银花的总超标率高达55.00%，详情见表2。

表1 6种中药材中拟除虫菊酯类农药检出率及超标率

Table 1 Detection rate and over-standard rate of PYRs in 6 traditional Chinese medicines

品种	检出农药	农药残留量/(mg·kg <sup>-1</sup> )			检出率/%	超标率/%
		限值	平均值	最大值		
金银花	甲氰菊酯	1.00	0.039 4	0.46	16.67	0
	联苯菊酯	0.05	0.285 0	2.94	72.22	50.00
	氯氟氰菊酯	0.20	0.254 4	1.48	72.22	25.00
	苯醚菊酯	20.00	0.373 3	4.21	66.67	0
陈皮	氰戊菊酯	0.02	0.022 7	1.25	1.82	1.82
	甲氰菊酯	1.00	0.032 4	0.78	12.73	0
	高效氯氟氰菊酯	0.20	0.044 0	0.81	16.36	3.64
	氯氟菊酯	2.00	0.145 6	1.71	27.27	0
栀子	氯氟菊酯	2.00	0.018 0	0.30	56.19	0
	氯氟氰菊酯	0.02	0.026 0	0.13	21.90	0
	联苯菊酯	0.05	0.007 0	0.034	12.38	0
	氰戊菊酯	0.02	0.000 3	0.015	1.90	0
绞股蓝	高效氯氟氰菊酯	0.20	0.000 3	0.005	8.33	0
	甲氰菊酯	1.00	0.000 8	0.01	8.33	0
	氯氟菊酯	2.00	0.002 3	0.53	8.33	0
山药	高效氯氟氰菊酯	0.20	0.020 2	0.12	46.67	0
北五味子	联苯菊酯	0.05	0.002 3	0.07	6.45	3.23

表2 6种中药材中拟除虫菊酯类农药残留总检出率及总超标率

Table 2 Total detection rate and total over-standard rate of PYRs in 6 traditional Chinese medicines

品种	样品数量/批	农药残留量/(mg·kg <sup>-1</sup> )		总检出数量/批	检出率/%	总超标数量/批	超标率/%
		平均值	最大值				
金银花	18	0.238 1	4.210	16	88.89	11	55.00
陈皮	55	0.061 2	1.710	17	30.91	2	3.64
栀子	105	0.004 3	0.300	63	60.00	0	0.00
绞股蓝	24	0.001 2	0.530	3	12.50	0	0.00
山药	30	0.020 3	0.121	14	46.67	0	0.00
北五味子	31	0.002 3	0.070	2	6.45	1	3.23

### 2.2 暴露风险评估

各品种中药材中拟除虫菊酯类农药残留慢性及急性膳食风险评估情况见表3。由表3可知，除部分农药缺乏相关数据未做评估外，各拟除虫菊酯类农药在6种中药材中的慢性及急性膳食风险评估结果

均在可接受范围内，且慢性及急性膳食风险评估结果基本一致。其中金银花中联苯菊酯和氯氟氰菊酯的%ADI和%ARfD均较高，分别为0.48%和7.00%、0.21%和1.76%，与农药残留超标结果基本对应。综上，农药残留暴露风险评估与污染评估结果一致。

表3 各6种中药材中拟除虫菊酯类农药残留慢性及急性膳食风险评估情况

Table 3 Chronic and acute dietary risk exposure assessment of PYRs in 6 traditional Chinese medicines

品种	检出农药	ADI/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	ARfD/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	慢性膳食风险评估			急性膳食风险评估		
				EDI/ (mg·d <sup>-1</sup> )	HQ <sub>c</sub>	%ADI/ %	NESTI/ (mg·d <sup>-1</sup> )	HQ <sub>a</sub>	%ARfD/ %
金银花	甲氰菊酯	0.03	-	0.000 006 6	0.000 219 1	0.02	0.000 109 5	/	/
	联苯菊酯	0.01	0.01	0.000 047 5	0.004 750 0	0.48	0.000 700 0	0.070 000 0	7.00
	氯氟氰菊酯	0.20	0.02	0.000 042 4	0.002 120 4	0.21	0.000 352 4	0.017 619 0	1.76
	苯醚菊酯	0.07	-	0.000 062 2	0.000 888 9	0.09	0.001 002 4	/	/
陈皮	氰戊菊酯	0.02	0.20	0.000 002 3	0.000 117 2	0.01	0.000 198 4	0.000 992 1	0.10
	甲氰菊酯	0.30	-	0.000 003 3	0.000 111 5	0.01	0.000 123 8	/	/
	高效氯氟氰菊酯	0.02	0.02	0.000 004 5	0.000 227 0	0.02	0.000 128 6	0.006 428 6	0.64
	氯氰菊酯	0.02	0.04	0.000 015 0	0.000 751 3	0.08	0.000 271 4	0.006 785 7	0.68
栀子	氯氰菊酯	0.02	0.04	0.000 002 3	0.000 114 3	0.01	0.000 047 6	0.001 190 5	0.12
	氯氟氰菊酯	0.02	0.02	0.000 003 3	0.000 165 1	0.02	0.000 020 6	0.001 031 7	0.10
	联苯菊酯	0.01	0.01	0.000 000 9	0.000 090 2	0	0.000 005 4	0.000 539 7	0.05
	氰戊菊酯	0.02	0.20	0.000 000 0	0.000 001 7	0	0.000 002 4	0.000 011 9	0.00
绞股蓝	高效氯氟氰菊酯	0.02	0.02	0.000 000 1	0.000 004 0	0	0.000 001 6	0.000 079 4	0.01
	甲氰菊酯	0.03	-	0.000 000 2	0.000 006 6	0	0.000 003 5	/	/
	氯氰菊酯	0.02	0.04	0.000 000 6	0.000 027 7	0	0.000 168 3	0.004 206 3	0.42
山药	高效氯氟氰菊酯	0.02	0.02	0.000 007 2	0.000 361 3	0.04	0.000 057 6	0.002 881 0	0.29
北五味子	联苯菊酯	0.01	0.01	0.000 000 1	0.000 014 4	0	0.000 006 7	0.000 666 7	0.07

注：“-”表示未查询到相关数据；“/”表示无计算结果。

### 3 结论

研究表明，目前我国中药材中拟除虫菊酯类农药仍存在不同程度的残留超标现象，问题主要集中在以下两点：单一药材中存在多种农药同时检出现象，如金银花、陈皮、栀子同时检出4种农药；农药残留超标严重，如金银花和陈皮同时存在2种农药超标现象，金银花总超标率高达55.00%，金银花中联苯菊酯超标率高达50.00%。

尽管上述6种中药材的拟除虫菊酯类农药残留的暴露风险评估在可接受的范围，但农药残留超标率较高的中药材应列为重点监管对象。中药材种植过程中可能接触多种农药（如有机磷、氨基甲酸酯、三嗪类等），不同农药的毒性机制不同，可能通过协同作用加剧健康风险。例如，有机磷类农药抑制胆碱酯酶活性，拟除虫菊酯类影响神经递质传导，二者残留叠加可能对神经系统产生更复杂的毒性效应。同时，长期低剂量暴露于多种农药残留，可能引发慢性毒性（如内分泌干扰、免疫功能异常），尤其对婴幼儿、孕妇等敏感人群威胁更大。

中药作为中华民族之国粹，农药残留甚至超标现象必须加以重视和控制，除了在种植源头上规范农药的使用外，更亟待开发农残检测有效技术手

段，以不断提升监管力度。

#### [参考文献]

- [1] 谢璇,刘莞汐,周婷婷,等.中药材中农药残留风险评估方法及研究进展[J].农药学报,2025,27(2):196-206.  
XIE X, LIU Y X, ZHOU T T, et al. Research progress on risk assessment methods of pesticide residues in Chinese medicinal materials[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2025, 27(2): 196-206.
- [2] 刘佳悦,徐军,董丰收,等.中草药中禁用农药残留限量标准及分析方法研究进展[J].现代农药,2020,19(5):1-8,35.  
LIU J Y, XU J, DONG F S, et al. Research Progress on Residues Limits Standards and Analysis Methods of Banned and Restricted Pesticides in Herbal Medicines[J]. Modern Agrochemicals, 2020, 19(5):1-8,35.
- [3] 张淑娟,王临艳,张育贵,等.中药饮片行业的现状分析及对策探讨[J].药学研究,2020,39(6):341-343.  
ZHANG S J, WANG L Y, ZHANG Y G, et al. Analysis of the current situation of traditional Chinese medicine decoction industry and countermeasure[J]. Journal of Pharmaceutical Research, 2020, 39(6):341-343.
- [4] 陈禹欣.环境农药残留的人体毒效应和修复技术综述[J].环境科学与技术,2020,43(11):180-187.  
CHEN Y X. Review of Human Toxic Effects and Remediation Techniques for Environmental Pesticide Residues[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(11):180-187.
- [5] 齐志业,陈颖,李燕.拟除虫菊酯类农药暴露的免疫毒理学研究

进展[J].昆明医科大学学报,2024,45(8):154-160.

QI Z Y, CHEN Y, LI Y. Research Progress on Immunotoxicology of Pyrethroid Pesticides Exposures [J]. Journal of Kunming Medical University, 2024, 45(8): 154-160.

- [6] 来宏伟,冉新炎,樊梅娜,等.微生物降解土壤中拟除虫菊酯类农药残留研究进展[J].内蒙古林业科技,2024,50(3):59-64.

LAI H W, RAN X Y, FAN M N, et al. Research Progress on Microbial Degradation of Pyrethroids Pesticide Residues in Soil [J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 2024, 50(3): 59-64.

- [7] 钱丽花,户宜,胡培培,等.拟除虫菊酯类农药暴露与学龄期儿童肺功能的相关性[J].环境与职业医学,2025,42(3):342-348.

QIAN L H, HU Y, HU P P, et al. Association between pyrethroid insecticide exposure and pulmonary function among schooled children [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2025, 42(3): 342-348.

- [8] 孙维敏,季琳琳,陈素传,等.安徽省薄壳山核桃产地有机磷和拟除虫菊酯农药残留及风险评估[J].经济林研究,2024,42

(3):69-76.

SUN W M, JI L L, CHEN S C, et al. Residue level and risk assessment of organophosphate pesticides and pyrethroids in *Carya illinoensis* and soil from Anhui province [J]. Non-wood Forest Research, 2024, 42(3): 69-76.

- [9] 左琪琦,张瑞雨,李文廷,等. GC-MS/MS检测野生食用菌中8种拟除虫菊酯类农药残留[J/OL].安徽农业科学. <https://link.cnki.net/urlid/34.1076.S.20250319.1821.006>.

ZUO Q Q, ZHANG R Y, LI W T, et al. Determination of 8 Pyrethroid Pesticide Residues in Wild Edible Fungi Using Gas Chromatography-Tandem Mass Spectrometry [J/OL]. Journal of Anhui Agricultural Sciences. <https://link.cnki.net/urlid/34.1076.S.20250319.1821.006>.

- [10] 高璐阳,张强,陈宏坤,等.我国农业面源污染现状与防控措施[J].磷肥与复肥,2018,33(8):37-38,45.

GAO L Y, ZHANG Q, CHEN H K, et al. Pollution status and control measures of agricultural non-point source pollution in China [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2018, 33(8): 37-38, 45.

(上接第49页)

在布袋除尘器检修前后,均通过荧光粉实验检测漏袋情况,确保布袋除尘器出口烟尘浓度达标,从而有效减少烟尘进入脱硫系统的量。

## 5 结论

从锅炉燃料、系统补水水质、烟尘富集、硫酸铵溶液pH、烟气温度方面全面分析了影响硫酸铵溶液结晶因素。最终确定了影响硫酸铵溶液结晶的因素为烟尘富集导致溶液中 $Fe^{3+}$ 升高和溶液黏度增大;补水F偏高并与 $Fe^{3+}$ 发生络合反应,络合物附着于晶体表面阻碍了晶体生长;硫酸铵溶液pH控制偏高,导致结晶形状改变和破坏了结晶的正常生长条件<sup>[10]</sup>。通过降低浓缩结晶段溶液pH、更换系统补水水源、优化运行周期、定期过滤废液、烟尘控制等措施,消除了影响硫酸铵溶液结晶的因素。

在实际生产过程中,影响硫酸铵结晶的因素不是单一的,可能是一种或几种因素共同作用,应根据生产实际和工况做出相应调整,认真控制工艺指标,及时进行总结和原因分析。当硫酸铵溶液出现结晶不良现象时,须细致分析各项参数,准确识别影响结晶的关键因素,并针对性地采取措施予以消除,以期提升硫酸铵溶液的结晶质量。

### [参考文献]

- [1] 许士强.氨法脱硫的硫酸铵结晶影响因素及解决措施[J].云南化工,2018,45(5):87-88

- [2] 肖海建.稀土分离过程氮氨内循环工艺研究[D].赣州:江西理工大学,2015.

XIAO H J. Research on Ammonia Nitrogen Internal Circulation

Process in Rare Earth Separation [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2015.

- [3] 李作伟,赖晶,向伟,等.高镍 $LiNi_{0.9}Co_{0.05}Mn_{0.05}O_2$ 正极材料的形貌调控及电化学性能研究[J].广州化工,2020,48(22):46-50,119.

LI Z W, LAI J, XIANG W, et al. Study on Morphology Regulation and Electrochemical Performance of High-nickel  $LiNi_{0.9}Co_{0.05}Mn_{0.05}O_2$ , Cathode Material [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 48(22): 46-50, 119.

- [4] 王耀袁,袁爱群,周泽广,等.球霏石型纳米碳酸钙椭圆形颗粒的合成[J].无机盐工业,2020,52(1):54-58.

WANG Y X, YUAN A Q, ZHOU Z G, et al. Preparation of vaterite nano-sized  $CaCO_3$  with ellipse ball-like [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2020, 52(1): 54-58.

- [5] 袁贵成.石油焦燃烧特性及其循环流化床燃烧技术的应用研究[D].武汉:华中科技大学,2003.

YUAN G C. Study on the Combustion Characteristics of Petroleum Coke and Its Application in Circulating Fluidized Bed Combustion Technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003.

- [6] 徐宁.冰晶石-氧化铝熔液中胶体行为以及阴极电渗现象[D].沈阳:东北大学,2000.

XU N. Colloidal Behavior and Cathodic Electroosmosis Phenomenon in Cryolite-Alumina Melts [D]. Shenyang: Northeastern University, 2000.

- [7] 王小凤.氨法脱硫结晶的影响因素与对策[J].化工管理,2018(29):68-69.

WANG X F. Ammonia Desulfurization Crystallization Influence Factors and Countermeasures [J]. Chemical Management, 2018(29): 68-69.

- [8] 张圆圆,王文振,许小静,等.基于典型行业的氨法烟气脱硫中硫酸铵结晶研究进展[J].煤炭转化,2022,45(4):92-105.

ZHANG Y Y, WANG W Z, XU X J, et al. Research Progress of Ammonium Sulfate Crystallization in Ammonia Gas Desulfurization Based on Typical Industry characteristics [J]. Coal Conversion, 2022, 45(4): 92-105.

- [9] 何国健,杨根山.燃煤锅炉氨法脱硫后处理系统的优化实践[C]//中建设计杯2014年全国烟气脱硫脱硝及除尘技术交流年会论文集.郑州:[出版者不详],2014:62-65.