

“硫酰氟熏蒸风险评估与应用（上）—硫酰氟熏蒸应用技术” 特约专栏文章之五

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.04.010

崔森, 刘尚峰, 甘双庆, 等. 硫酰氟气体在不同品种粮堆扩散规律比较研究[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(4): 73-78.

CUI M, LIU S F, GAN S Q, et al. Research on the diffusion law pattern of sulfuryl fluoride gas in different grain varieties grain piles[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(4): 73-78.

# 硫酰氟气体在不同品种粮堆 扩散规律比较研究

崔森<sup>1</sup>, 刘尚峰<sup>2</sup>, 甘双庆<sup>3</sup>, 季振江<sup>4</sup>, 杨旭<sup>4</sup>, 洪文奎<sup>3</sup>, 吕明<sup>2</sup>, 汪中明<sup>1</sup>✉

- (1. 国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037;
2. 安徽现代粮食物流中心库, 安徽 六安 231323;
3. 中储粮铜陵直属库, 安徽 铜陵 245000;
4. 清苑国家粮食储备库, 河北 保定 071100)

**摘要:** 为了解硫酰氟在小麦、稻谷和大豆 3 种粮堆中的扩散和分布规律, 通过 6 个实仓熏蒸的数据采集, 对熏蒸气体在不同粮堆内的扩散速度、均匀性、以及衰减速度等参数进行比较分析。试验结果表明, 硫酰氟气体在不同粮种中的扩散速度是大豆>稻谷>小麦; 大豆粮堆最快在熏蒸后 8 h 后, 可实现整仓气体均匀; 平均气体浓度半衰期分别是大豆>小麦>稻谷; 在 5.0~12.7 g/m<sup>3</sup> 的熏蒸药剂浓度下实现 6 个月无虫期的防护效果。

**关键词:** 硫酰氟; 稻谷; 小麦; 大豆; 粮堆; 扩散

中图分类号: TS205.3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)04-0073-06

网络首发时间: 2021-07-02 13:42:15

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20210702.1054.017.html>

## Research on the Diffusion Pattern of Sulfuryl Fluoride Gas in Different Grain Piles

CUI Miao<sup>1</sup>, LIU Shang-feng<sup>2</sup>, GAN Shuang-qing<sup>3</sup>, JI Zhen-jiang<sup>4</sup>, YANG Xu<sup>4</sup>,  
HONG Wen-kui<sup>3</sup>, LV Ming<sup>2</sup>, WANG Zhong-ming<sup>1</sup>✉

- (1. Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 2. The Modern Center Grain Warehouse of Anhui, Liu'an, Anhui 231323, China; 3. Sinograin Tongling Grain Depot, Tongling, Anhui 245000, China; 4. Qingyuan State Grain Reserve Depot, Baoding, Hebei 071100, China)

**Abstract:** To understand the diffusion and distribution of sulfuryl fluoride in wheat, rice and soybean piles, experiments were carried out in 6 warehouses to compare and analyze the diffusion speed, uniformity, and attenuation speed of fumigant gas in different grain piles. Data were collected in the process of fumigation. Experiment results show that the diffusion rate of sulfuryl fluoride gas in different grains is quickest in the soybean pile, followed by the rice pile and wheat pile: the soybean pile can achieve uniform gas in its

收稿日期: 2021-04-02

基金项目: 中央级公益性基本科研业务费专项 (ZX1923)

Supported by: Fundamental Research Funds of non-profit Central Institutes (No. ZX1923)

作者简介: 崔森, 女, 1990 年出生, 硕士, 助理研究员, 研究方向为储粮害虫综合防治。E-mail: cm@ags.ac.cn.

通讯作者: 汪中明, 男, 1971 年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为储粮害虫综合防治。E-mail: wzm@ags.ac.cn.

warehouse as soon as 8 hours after fumigation. The average gas concentration half-life is longest in the soybean pile, shortest in the rice pile with the wheat pile stands in the middle: the fumigation concentration of 5.0~12.7 g/m<sup>3</sup> can safeguard an insect-free environment for 6 months.

**Key words:** sulfuranyl fluoride; rice; wheat; soybean; grain pile; diffusion

储粮粮堆呈现多孔介质特征，粮堆的宏观特性参数如有效孔隙率在不同方向上差异较大，称为各向异性。由于粮堆各向异性的影响，单位粮层阻力存在一定的差异。不同粮种的粮堆单位粮层阻力不同，会导致气流在粮堆内部流动和分布上的差异<sup>[1-3]</sup>。江利国<sup>[4]</sup>等发现磷化氢熏蒸效果因粮种不同而异，而导致效果差异的主要因素就是气体在粮堆内的扩散和分布状态。小麦和稻谷是我国两大主要口粮，大豆是我国主要油料作物。大部分地区均需粮入仓后进行首次熏蒸杀虫，之后每年基本进行一次熏蒸杀虫。这三大粮

种的安全储备直接关系到我国粮油战略安全，而硫酰氟是我国仓储行业具有潜在推广应用价值的熏蒸剂，因此，本文通过比较分析硫酰氟在小麦、稻谷和大豆粮堆中的扩散和分布规律，为指导仓储企业使用硫酰氟熏蒸制订出合理方案提供支撑，也是为保障国家粮食安全提供技术储备。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验选择小麦、稻谷和大豆 3 个粮种作为研究对象，每个粮种选择 2 个试验仓房，详见表 1。

表 1 试验仓房情况  
Table 1 Experimental warehouse

仓号	单位	品种	粮食水分/%	粮温/°C	仓温/°C	数量/t	入仓时间/年	仓房气密性/s
20	安徽粮食批发交易市场有限公司现代粮物流中心库	小麦	12.8	18.6	28.0	4 150	2019	40
29	安徽粮食批发交易市场有限公司现代粮物流中心库	小麦	11.6	18.9	28.0	4 150	2019	38
10	安徽粮食批发交易市场有限公司现代粮物流中心库	稻谷	13.4	15.6	25.0	3 771	2018	48
17	中储粮安徽铜陵库	稻谷	14.1	16.5	32.8	3 430	2018	—*
1	清苑国家粮食储备库	大豆	11.7	18.7	20.0	7 560	2019	—*
16	清苑国家粮食储备库	大豆	11.7	18.6	20.0	6 300	2019	—*

注：气密性检测过程中压力上升不到 300 Pa。

Note: \*The pressure rises less than 300 Pa during the air tightness test.

### 1.2 仪器及设备

SP Tr-GAS@200 硫酰氟浓度检测仪：江苏舒茨仪器股份有限公司；SF-ExplorIR 硫酰氟报警仪：美国 SPECTROS 仪器有限公司。环流风机（功率 7.5 kW），仓内环流管（直径 1.1 m）：安徽省华粮粮油储运有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 气密性检测

全仓密闭（窗户，轴流风机口，检查口，通风口）只留一个通风口连接小功率（3 kW）风机，对面检测管连接压力计，开始压入或吸出。负压

吸出至压力计-350 Pa 时，关停风机，快速关闭风机阀门，压力计-300 Pa 时，开始计时至-150 Pa（半衰期）所用时间<sup>[5]</sup>。

#### 1.3.2 熏蒸方式及用药量

采取仓内粮面施药和仓外称重施药的方式。根据预设浓度计算好用药量，将需要用量的钢瓶气均匀垂直放置于粮面，避免钢瓶与粮食直接接触，以防汽化过程产生的低温导致粮食结露。施药人员佩戴好自给式呼吸器，同时依次由内向外打开钢瓶气气阀，让气体缓慢排出，确保气体释放彻底。

表 2 试验仓房熏蒸方式及用药量  
 Table 2 Fumigation method and dosage of experimental warehouse

仓号	施药浓度/(g/m <sup>3</sup> )	投药量/kg
20	8.0	59.4
29	10.0	74.3
10	5.0	38.3
17	12.7	140.0
1	6.0	62.0
16	6.0	58.0

### 1.3.3 熏蒸散气

当仓内气体检测浓度降至 4 mg/m<sup>3</sup> 以下, 开始散气。散气采用自然通风散气, 散气 20 h 以上, 记录仓内空气中硫酰氟最高容许浓度降低到 20 mg/m<sup>3</sup> 所用时间, 并监测记录仓外上风向、下风向空气中硫酰氟浓度变化情况。

### 1.3.4 气体采样点布置及浓度检测

整仓熏蒸布置点: 仓内对角线三点, 每个点上、中、下布置三根取样管(上层粮堆深度 1.5 m, 中层深度 3 m, 下层深度 4.5 m)。空间中间 1 个(粮面与天花板之间的中心位置)。

投药结束每 6 h 检测一次硫酰氟浓度。48 h 后每天定时检测两次。

### 1.3.5 熏蒸后害虫长期监测

熏蒸结束后, 在粮堆上层 0.2 m、中层 3 m、下层 5 m, 分别进行扦样检查, 进行长期害虫检测。熏蒸后 1 个月内 2 周检查一次上层害虫, 5~6 个月每月检测一次。中层和下层第 1 个月检测一次, 第 2 个月检测一次, 其余时间随机抽查。并进行结果记录。

## 1.4 数据处理

用 WPS Office Excel 2020 处理数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 硫酰氟在 3 个粮种粮堆的扩散速度

从硫酰氟气体在小麦粮堆浓度检测结果来看(表 3 和表 4), 在第一次检测的时间 5~6 h 左右, 气体均已到达小麦粮堆底层。并且分别在 30 h 和 45 h 的时候实现整仓气体均匀。

稻谷 10 号仓在 5.5 h 粮堆中下层和底层尚检测不到气体浓度, 但在熏蒸后 30 h 第二次检测时, 整仓气体浓度已经实现了均匀(见表 5)。稻谷 17

号仓在 5.5 h 粮堆底层能够检测到气体浓度, 但浓度还较低, 直至 16 h 整仓气体基本均匀(见表 6)。

表 3 20 号小麦仓硫酰氟气体浓度变化表  
 Table 3 The change of sulfuryl fluoride concentration in No.20 wheat warehouse

熏蒸时间/h	气体浓度/(g/m <sup>3</sup> )					气体均匀性
	空间	粮堆 0.5 m	粮堆 3 m	粮堆 5 m	粮堆平均	
6.0	11.8	23.0	9.6	10.3	14.3	0.42
29.5	5.6	18.9	11.5	11.6	14.0	0.61
44.5	4.9	9.0	7.5	9.4	8.6	0.80
55.5	5.0	7.6	7.6	8.6	7.9	0.88
68.0	4.9	6.5	6.6	6.4	6.5	0.97
80.0	4.2	5.4	5.5	5.6	5.5	0.97
92.0	3.6	4.5	4.9	5.2	4.9	0.87
103.5	4.0	4.8	4.6	4.4	4.6	0.92
116.5	4.1	4.0	4.2	4.0	4.1	0.96
127.5	3.5	3.7	3.8	3.9	3.8	0.96
139.5	3.6	3.5	3.9	4.0	3.8	0.87
150.5	2.9	3.5	3.4	2.8	3.2	0.78
163.0	2.7	3.0	3.0	3.0	3.0	1.00
174.5	1.4	2.5	2.6	2.6	2.6	0.95
189.0	2.1	2.5	2.0	2.3	2.2	0.81
212.0	2.0	2.1	2.0	2.1	2.1	0.95
223.0	1.6	1.8	1.8	1.8	1.8	0.98

表 4 29 号小麦仓硫酰氟气体浓度变化表  
 Table 4 The change of sulfuryl fluoride concentration in No.29 wheat warehouse

熏蒸时间/h	气体浓度/(g/m <sup>3</sup> )					气体均匀性
	空间	粮堆 0.5 m	粮堆 3 m	粮堆 5 m	粮堆平均	
5.5	19.9	29.9	0.0	15.1	15.0	0.00
29.0	7.0	10.2	17.8	12.1	13.4	0.57
45.5	6.5	8.7	15.4	9.6	11.2	0.56
58.0	6.4	6.5	10.7	9.0	8.7	0.60
68.0	6.1	6.0	9.2	8.3	7.8	0.65
80.3	5.6	5.4	7.4	6.4	6.4	0.73
92.5	4.7	5.1	5.9	5.2	5.4	0.86
104.5	4.7	4.7	5.7	4.6	5.0	0.81
116.5	5.0	4.8	5.4	4.8	5.0	0.90
128.0	4.1	4.0	4.7	4.1	4.3	0.85
140.5	2.7	2.9	3.4	3.4	3.2	0.85
152.5	3.4	3.1	3.1	3.1	3.1	0.97
164.5	3.0	2.8	3.1	2.9	2.9	0.88
175.5	2.5	2.4	2.7	2.6	2.6	0.89
190.5	2.0	2.0	2.5	2.1	2.2	0.80
213.0	1.7	1.7	2.1	1.8	1.9	0.84
224.0	1.7	1.6	1.8	1.5	1.6	0.79

表 5 10 号稻谷仓硫酰氟气体浓度变化表

Table 5 The change of sulfuryl fluoride concentration in No.10 paddy warehouse

熏蒸 时间/h	气体浓度/(g/m <sup>3</sup> )					气体 均匀性
	空间	粮堆 0.5 m	粮堆 3 m	粮堆 5 m	粮堆 平均	
5.5	11.1	9.5	0.0	0.0	3.2	0.00
29.5	4.8	7.1	7.2	8.8	7.7	0.80
43.0	4.6	4.8	6.0	6.1	5.6	0.78
54.5	4.3	4.4	4.5	5.7	4.9	0.77
67.5	4.0	4.0	3.7	4.3	4.0	0.85
78.5	2.9	3.3	2.9	3.1	3.1	0.89
90.2	2.6	2.6	2.7	3.0	2.8	0.86
103.0	2.3	2.2	2.5	2.6	2.4	0.84
116.0	1.6	1.9	2.2	2.1	2.1	0.84
127.0	1.7	1.8	1.9	1.8	1.8	0.95
139.5	1.7	2.0	1.9	1.9	1.9	0.97
151.0	1.2	0.6	1.5	1.4	1.2	0.93
177.0	0.0	0.0	0.8	0.7	0.5	0.00
200.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00

表 6 17 号稻谷仓硫酰氟气体浓度变化表

Table 6 The change of sulfuryl fluoride concentration in No.17 paddy warehouse

熏蒸 时间/h	气体浓度/(g/m <sup>3</sup> )					气体 均匀性
	空间	粮堆 0.5 m	粮堆 3 m	粮堆 5 m	粮堆 平均	
5.5	29.5	33.9	29.6	6.3	23.3	0.19
8.5	32.9	25.7	26.2	6.1	19.3	0.23
16.5	24.5	20.6	20.4	12.4	17.8	0.60
24.0	22.6	17.8	21.8	12.7	17.4	0.58
29.5	21.9	17.6	23.1	11.0	17.2	0.48
32.5	21.9	18.1	21.8	11.1	17.0	0.51
40.5	21.2	18.1	19.9	11.6	16.5	0.58
46.5	19.9	17.4	17.8	13.1	16.1	0.74
66.5	14.8	14.9	15.7	10.6	13.7	0.71
89.5	9.4	12.2	12.9	8.4	11.2	0.65
111.5	7.6	9.7	10.5	6.2	8.8	0.59
119.5	8.7	8.1	8.3	6.2	7.5	0.75
137.5	7.1	6.6	7.6	5.0	6.4	0.66
161.5	5.7	5.2	6.1	3.8	5.0	0.62
192.0	5.6	3.4	4.4	2.5	3.4	0.57
216.0	3.1	2.8	3.3	2.0	2.7	0.61
281.5	1.4	1.3	1.2	0.0	0.8	0.00
312.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00

两个大豆仓在熏蒸后 8 h 第一次检测时, 粮堆底层的气体浓度与粮堆上层的浓度基本一致 (见表 7 和 8)。1 号仓在熏蒸 8 h 后, 整仓气体浓度均匀性即达到 0.9 以上。

表 7 1 号大豆仓硫酰氟气体浓度变化表

Table 7 The change of sulfuryl fluoride concentration in No.1 soybean warehouse

熏蒸 时间/h	气体浓度/(g/m <sup>3</sup> )					气体 均匀性
	空间	粮堆 0.5 m	粮堆 3 m	粮堆 5 m	粮堆 平均	
8.0	7.7	7.5	7.6	7.0	7.4	0.93
16.0	6.5	6.8	6.5	6.6	6.6	0.95
24.0	6.3	5.5	6.1	6.0	5.9	0.90
32.0	5.7	5.3	5.8	5.8	5.6	0.92
40.0	5.4	4.9	5.4	5.4	5.2	0.92
48.0	4.4	3.5	4.5	4.9	4.3	0.72
60.0	3.9	3.1	4.2	4.5	3.9	0.69
72.0	3.8	3.4	3.7	3.9	3.6	0.88
84.0	3.7	3.4	3.6	3.7	3.6	0.92
96.0	3.6	3.4	3.6	3.6	3.5	0.94
108.0	3.0	2.9	2.8	3.0	2.9	0.95
120.0	2.6	2.2	2.5	2.6	2.4	0.86
132.0	2.1	2.1	1.5	1.6	1.7	0.71
144.0	1.6	1.8	1.5	1.6	1.6	0.81

表 8 16 号大豆仓硫酰氟气体浓度变化表

Table 8 The change of sulfuryl fluoride concentration in No.16 soybean warehouse

熏蒸 时间/h	气体浓度/(g/m <sup>3</sup> )					气体 均匀性
	空间	粮堆 0.5 m	粮堆 3 m	粮堆 5 m	粮堆 平均	
8.0	10.0	4.4	1.4	10.8	5.5	0.12
16.0	8.7	3.8	4.8	8.7	5.8	0.44
24.0	7.9	3.9	4.8	8.0	5.6	0.48
32.0	6.5	3.6	4.7	6.6	5.0	0.54
40.0	5.9	3.4	4.7	5.4	4.5	0.62
48.0	6.3	3.7	4.4	5.1	4.4	0.73
60.0	5.2	3.1	3.9	4.6	3.9	0.67
72.0	4.8	3.1	3.8	4.3	3.7	0.71
84.0	4.4	2.8	3.5	3.8	3.4	0.74
96.0	4.0	2.6	3.3	3.6	3.2	0.72
108.0	3.5	2.2	2.6	2.8	2.5	0.79
120.0	3.0	1.8	2.2	2.3	2.1	0.80
132.0	2.2	1.5	1.5	1.8	1.6	0.80
144.0	1.5	1.1	1.2	1.2	1.2	0.89

根据以上结果, 硫酰氟气体在不同粮种中的扩散速度是大豆>稻谷>小麦。而从气体在粮堆内部分布均匀性分析来看 (表 9), 两个大豆粮堆内气体浓度比均可达到 0.9, 两个小麦仓粮堆气体浓度比均能达到 0.8, 而稻谷仓的均匀性都不超过 0.7。总体上来说, 粮堆气体均匀性与气体在粮堆的扩散速度呈正相关。

表 9 硫酰氟气体在粮堆内部分布均匀性

Table 9 Uniformity of sulfuryl fluoride gas distribution inside grain pile

仓号	粮食品种	浓度比 $\geq 0.6$			浓度比 $\geq 0.7$		浓度比 $\geq 0.8$	
		达到时间/h	保持时间/h	所占时间/%	保持时间/h	所占时间/%	保持时间/h	所占时间/%
20	小麦	29.5	193.5	86.8	178.5	80.0	155.0	69.5
29	小麦	58.0	166.0	74.1	143.7	64.2	120.5	53.8
10	稻谷	29.5	121.5	60.8	121.5	60.8	121.5	60.8
17	稻谷	16.5	183.0	58.7	91.0	29.1	-	-
1	大豆	8.0	136.0	94.4	136.0	94.4	136.0	94.4
16	大豆	40.0	104.0	72.2	48.0	33.3	24.0	16.7

## 2.2 气体浓度在 3 个粮种粮堆中衰减速度比较

气体浓度整仓均匀后,分析其在 3 个粮种粮堆中的浓度衰减半衰期。选取起始  $4.5 \text{ g/m}^3$  左右的浓度作为起始浓度。各仓的半衰期分别为:20 号小麦仓 C4.6 为 86 h, 29 号仓 C4.3 为 62 h; 10 号稻谷仓 C4.0 为 49 h, 17 号仓 C5.0 为 45 h; 1 号大豆仓 C4.3 为 77 h, 16 号 C4.5 约等于 88 h。小麦粮堆平均气体浓度半衰期为 54 h, 稻谷平均半衰期为 47 h, 大豆平均半衰期为 82.5 h。平均气体浓度半衰期分别是大豆>小麦>稻谷。

气体在粮堆中的衰减速度与仓房气密性相关

性最大,而本试验中,大豆仓房的气密性较差,而半衰期最长。表明气体衰减速度除与不同粮种对于硫酰氟气体的吸附具有一定的相关性。3 个粮种相比,可能稻谷对于硫酰氟的吸附量最大,小麦次之。有报道称硫酰氟吸附率与初始浓度无关,会随着温度和水分含量的增加而增加<sup>[6]</sup>,此次试验中稻谷含水量最高,因此对硫酰氟的吸附量要高于其他两种粮食。

## 2.3 杀虫(防护效果)分析

表 10 结果显示,熏蒸各仓 6 个月内均未发现活虫(含粘虫板)。

表 10 熏蒸后仓内害虫长期监测情况

Table 10 Long-term monitoring of pests in the warehouse after fumigation

仓号	20			29			10			17			1			16		
	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

备注: 1. 上: 代表粮堆上层 0.2 m; 中: 代表中层 3 m; 下: 代表底层 5 m。2. 检测时间 1 表示熏蒸结束后第 1 个月, 2 代表第 2 个月, 以此类推。

Note: 1. Upper: represents 0.2 m of the upper layer of the grain pile; middle: represents 3 m of the middle layer; lower: represents 5 m of the bottom layer. 2. Detection time 1 means the first month after the end of fumigation, 2 means the second month, and so on.

## 3 讨论

气体扩散过程受药剂浓度、气密性和粮粒吸附等因素导致的药剂衰减、以及粮层间的阻力等因素密切相关。而其中粮粒对药剂的吸附作用,以及粮层阻力均取决于粮种。本研究结果表明硫酰氟气体在不同粮种中的扩散速度是大豆>稻谷>小麦,很大程度上是由于不同粮种的粮层阻力的

差异所致。大豆颗粒较大,粮堆孔隙率最大,有利于气体扩散。有研究表明,气流在稻谷粮堆横向扩散的单位粮层阻力小于小麦<sup>[7]</sup>。

熏蒸药剂浓度越大,其穿透单位面积的气体流量越大,而相应的阻力会增加。有相关研究证实稻谷和小麦的单位通风量越大,粮层阻力越大的现象<sup>[8-9]</sup>。本研究中,对于小麦,熏蒸浓度为  $10 \text{ g/m}^3$  的仓房扩散效果要稍差于  $8 \text{ g/m}^3$  的仓房。

对稻谷同样呈现了这样的现象。

对于熏蒸过程中粮粒对熏蒸药剂的吸附作用，江利国等认为磷化氢在粮堆内的渗透与粮种和药剂剂量的影响，而稻谷对磷化氢的吸附较其它粮种强<sup>[4]</sup>。本研究结果表明，在三个粮种中，稻谷对于硫酰氟的吸附作用可能最强，而根据 Hwaidi 报道，硫酰氟吸附率与初始浓度无关，与温度和水分含量相关<sup>[6]</sup>。由于本研究中稻谷水分最高，因此，对于不同粮种对于硫酰氟的吸附率有待进一步检测和研究。

#### 4 结论

硫酰氟气体在不同粮种中的扩散速度是大豆>稻谷>小麦；大豆粮堆最快在熏蒸后 8 h 后，可实现整仓气体均匀；平均气体浓度半衰期分别是大豆>小麦>稻谷；5.0~12.7 g/m<sup>3</sup> 的熏蒸药剂浓度可实现 6 个月无虫期的防护效果。

#### 参考文献：

- [1] 王远成, 魏雷, 刘伟, 等. 储粮保水降温通风关键技术研究[J]. 中国粮油学报, 2008(5): 141-145.  
WANG Y C, WEI L, LIU W, et al. Key techniques of ventilation for cooling stored cereal grains[J]. Journal of The Chinese Cereals and Oils Association, 2008(5): 141-145.
- [2] GRIFFITH F. Numerical investigation into the aeration of grain silos[D]. Toowoomba: University of Southern Queensland, 2004.
- [3] LUKASZUK J, MOLEND A M, HORABIK J, et al. Variability of pressure drops in grain generated by kernel shape and bedding method[J]. Journal of Stored Products Research, 2009, 45: 112-118.
- [4] 江利国, 李平忠, 薛家智, 等. 不同粮种磷化氢薄膜密闭熏蒸施药剂量的选择[J]. 粮油仓储科技通讯, 1988(2): 30-37.  
JIANG L G, LI P Z, XUE J Z, et al. Selection of the dosage of different grain types of phosphine film for sealed fumigation[J]. Liang You Cang Chu Ke Ji Tong Xun, 1988(2): 30-37.
- [5] 磷化氢膜下环流熏蒸技术规程: Q/ZCL T1—2007[S]. 北京: 中国储备粮管理总公司, 2007.  
Regulation of phosphine recirculation fumigation under plastic sheeting: Q/ZCL T1—2007[S]. Beijing: China Grain Reserve Management Corporation, 2007.
- [6] HWAIDI M, COLLINS P J, SISSONS M, et al. Sorption and desorption of sulfur dioxide by wheat, flour and semolina[J]. Journal of Stored Products Research, 2015, 62: 65-73.
- [7] 潘钰, 孙源, 王远成, 等. 不同粮种横向通风和地上笼上行通风粮层阻力模拟研究[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(1): 102-105.  
PAN Y, SUN Y, WANG Y C, et al. The numerical and experimental study on the ventilation resistance of three stored grains during horizontal aeration and vertical aeration using half-round perforated duct on the floor[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2016, 24(1): 102-105.
- [8] 祝祥坤, 石天玉, 沈波, 等. 稻谷平房仓储藏的横向通风技术工艺研究[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(S1): 33-37.  
ZHU X K, SHI T Y, SHEN B, et al. Application of transverse ventilation in paddy warehouse[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2015, 23(S1): 33-37.
- [9] 尹君, 石天玉, 魏雷, 等. 小麦竖向通风阻力研究[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(S1): 38-42.  
YIN J, SHI T Y, WEI L, et al. Vertical ventilation resistance in wheat bulk[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2015, 23(S1): 38-42. ☞