

## 响应面法优化干清猪粪半干法连续厌氧发酵试验参数

陈文成, 袁存亮, 张重, 李靖, 裴海林, 邢向欣, 孙京, 赵国明\* (吉林省农业机械研究院, 吉林长春 130022)

**摘要** 为实现干清猪粪连续高效厌氧发酵, 以干清猪粪为原料进行连续厌氧发酵试验, 利用实验室自制连续厌氧发酵反应器探究水力滞留时间(HRT)、搅拌间隔与搅拌转速对干清猪粪连续厌氧发酵的影响, 采用响应面分析法进行参数优化, 得到最优参数组合: HRT 19 d、搅拌间隔 2 h、搅拌转速 30 r/min。经过干清猪粪连续厌氧发酵试验验证, 其平均日产气量达 23.48 L, VS 降解率 56.47%, 平均容积产气率 2.35 L/(L·d), 能够实现干清猪粪连续厌氧发酵的高效稳定运行。因此, 干清猪粪的无害化处理可采用半干法连续厌氧发酵运行, 从而实现干清猪粪的资源化利用。

**关键词** 干清猪粪; 半干法; 连续厌氧发酵; 参数优化

**中图分类号** X 713 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2023)24-0196-06

**doi:** 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.24.044



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Optimization of the Continuous Anaerobic Fermentation Experiment Parameters of Semi-dried Pig Manure by Using Response Surface Method

CHEN Wen-cheng, YUAN Cun-liang, ZHANG Zhong et al (Jilin Academy of Agricultural Machinery, Changchun, Jilin 130022)

**Abstract** In order to realize the continuous and efficient anaerobic fermentation of dry pig manure, the continuous anaerobic fermentation test was carried out with dry pig manure as raw materials. The effects of hydraulic retention time (HRT), stirring interval and stirring speed on the continuous anaerobic fermentation of dry pig manure were studied by using the self-made continuous anaerobic fermentation reactor in the laboratory. The response surface analysis method was used to optimize the experiment parameters, and the optimal parameter combination was obtained as follows: HRT 19 d, stirring interval 2 h, and stirring speed 30 r/min. The average daily gas yield was up to 23.48 L after the continuous anaerobic fermentation test of dry pig manure. VS degradation rate was 56.47%, and the average volumetric gas production rate was 2.35 L/(L·d), which could achieve efficient and stable operation of dry pig manure continuous anaerobic fermentation. Therefore, the harmless treatment of dry pig manure could be operated by semi-dry continuous anaerobic fermentation, so as to realize the resource utilization of dry pig manure.

**Key words** Dry pig manure; Semi-dried method; Continuous anaerobic fermentation; Parameter optimization

随着我国人民生活水平的不断提高, 对肉蛋奶的需求量也逐年递增, 从而导致我国畜牧业的飞速发展<sup>[1-3]</sup>, 但目前生猪仍是畜牧业养殖的重要饲养品种之一<sup>[4]</sup>。截至 2019 年我国生猪出栏量为 54 419.3 万头, 而每头生猪每日排放废水约 13.5 kg、粪便 1.5 kg<sup>[5-6]</sup>, 养殖场排除的粪污及废水若不经处理将直接影响生态环境, 污染水土资源, 因此猪粪的无害化处理至关重要<sup>[7-9]</sup>。郑盼<sup>[2]</sup>在猪粪干式厌氧消化试验中发现, 猪粪干发酵产气率较湿发酵产气率增加 22.1%, 猪粪干式厌氧发酵工艺最佳参数为发酵温度 34 ℃, 接种量 40%; 朱圣权<sup>[10]</sup>通过对猪粪厌氧干发酵工艺研究及其效益分析, 优化出适宜的厌氧发酵工艺参数, 经过 20~22 d 厌氧发酵, 其原料日产甲烷量可达 1 600 mL/(kg·d)。目前我国大规模生猪养殖企业及畜禽养殖舍大多采用干清粪方式进行粪污收集, 其优点是节水、污染小, 但会导致粪便干物质质量浓度高<sup>[11-13]</sup>。采取半干法连续厌氧发酵技术来处理干清猪粪是一种很好的技术模式, 可以使产生的粪污得到及时有效地处理, 并且产生清洁能源。为达到良好的处理效果和较高的生产效率, 需要考虑各参数的综合控制, 以使微生物生长繁殖达到最佳平衡状态, 因此, 为实现厌氧发酵的高产气率及合格的降解率, 对连续厌氧发酵的水力滞留时间、搅拌参数进行研究与优化, 从而实现猪粪的无害化处理。

**基金项目** 吉林省科技发展计划项目(20210202009NC)。

**作者简介** 陈文成(1995—), 男, 河南周口人, 研究实习员, 硕士, 从事农业废弃物资源化利用研究。\* 通信作者, 研究员, 硕士, 从事农业废弃物无害化处理及资源化利用、生物质能技术研究。

**收稿日期** 2022-12-07; **修回日期** 2023-07-03

## 1 材料与方法

**1.1 试验材料** 试验所用干清猪粪取自吉林省长春市九台区小袁家窝堡养殖户的干清猪粪; 接种物取自吉林省农业机械研究院废弃物利用实验室, 是牛粪经过充分厌氧反应后直至不再产气的活性污泥。干清猪粪及接种物的理化性质如表 1 所示。

表 1 干清猪粪及接种物的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of dry pig manure and inoculum

原料 Materials	TS 含量 TS content//%	VS 含量 VS content//%	pH	C/N
干清猪粪 Dry pig manure	26.2	78.6	7.1	14.7
接种物 Inoculum	10.2	38.7	8.2	8.1

**1.2 试验仪器** 试验所用仪器具体见表 2。

表 2 试验仪器与设备

Table 2 The test instruments and equipment

序号 No.	产品名称 Product name	生产企业 Manufacturing enterprise	用途 Usage
1	电热鼓风干燥箱	上海实验仪器厂有限公司	测定 TS 含量
2	电子天平	慈溪市天东衡器厂	称取质量
3	S-X-4-10 型箱式电阻炉	天津泰斯特仪器有限公司	测定 VS 含量
4	量筒	河北鼎盛隆华试验仪器公司	量取水的体积
5	pH 计 PHS-3CW	上海般特仪器制造有限公司	测定 pH

**1.3 试验装置** 试验装置为实验室自主研制的卧式三轴搅拌厌氧发酵反应器(图 1),反应器容积约 10 L。整个厌氧发酵系统(图 2)包括电控系统、水箱循环系统、反应器、脱硫脱水装置、湿式气体流量计、集气装置等。通过电控系统,控制电机带动反应器内部的搅拌叶翅来实现对发酵物料的搅拌。



图 1 厌氧发酵反应器

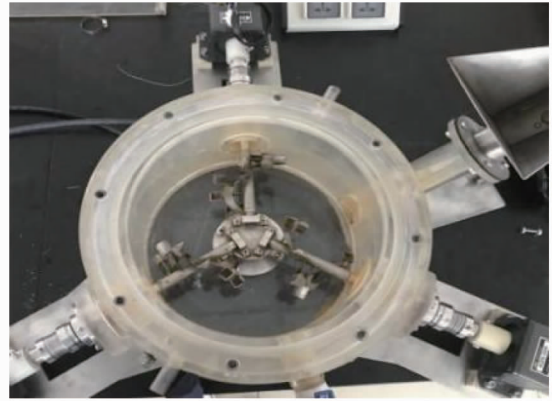


Fig.1 The anaerobic fermentation reactor



图 2 厌氧发酵系统

Fig.2 Anaerobic fermentation system

## 1.4 试验设计

**1.4.1 水力滞留时间(HRT)对干清猪粪半干法连续厌氧发酵的影响试验。**以干清猪粪为发酵原料,有效反应容积为反应器容积的 60%,HRT 逐渐降低(有机负荷逐渐升高),通过 HRT 换算出进料量,再通过进料量的改变来研究 HRT 对干清猪粪半干法连续厌氧发酵日产气量和 VS 降解率的影响。HRT 设定 25、20、15、10 d 4 个水平,每天固定时间进物料各 1 次,先出料,后进料。进料体积的计算如公式(1)所示,出料体积的计算如公式(2)所示。该试验采取中温发酵(35℃),料液浓度为半干法厌氧发酵浓度(干清猪粪+接种物混合浓度),搅拌参数为上述试验筛选出适宜的搅拌参数,反应初始以 50%接种率启动,产气平稳后开始连续进物料,每天同一时间记录每日产气量并测定出料时的 VS 含量,换算出其 VS 降解率。

$$V_{\text{进}} = \frac{V_{\text{有效容积}}}{\text{HRT}} \quad (1)$$

$$V_{\text{出}} = V_{\text{进}} - V_{\text{下}} \quad (2)$$

通过调速器调节电机转速,通过时控开关来控制搅拌电机的开启与关闭,从而满足不同的搅拌间隔与搅拌时长;通过水箱循环系统以及测温传感器和控制系统,可实现对发酵物料的温度控制。此外,反应器还设有进料口和出料口,可实现连续运行中进出料的要求。

式中: $V_{\text{进}}$ 为反应器连续运行过程中的每日进料体积,单位 mL; $V_{\text{出}}$ 为反应器连续运行过程中的每日出料体积,单位 mL; $V_{\text{下}}$ 为出料前反应器内的发酵料液下降的体积,单位 mL; $V_{\text{有效容积}}$ 为反应器内的发酵料液体积,单位 mL;HRT 为反应器运行过程中的水力滞留时间,单位 d。

**1.4.2 干清猪粪半干法连续厌氧发酵参数优化试验。**采用 Design Expert 8.0.6 的 Box-Behnken 中心组合设计原理,在中温(35℃)、发酵料液浓度为半干法厌氧发酵浓度的条件下,设计水力滞留时间(HRT)、搅拌间隔和搅拌转速 3 个因素 3 个水平,以每组试验在产气稳定后的平均日产气量和 VS 降解率作为试验结果评价指标,进行响应面分析试验,确定干清猪粪半干法连续厌氧发酵最佳工艺条件。正交试验因素与水平设计如表 3 所示,对优化后的参数进行试验验证。

表 3 正交试验因素与水平设计

Table 3 Level and factor design of the orthogonal test

水平 Level	(A)水力滞留时间 HRT//d	(B)搅拌间隔 Stirring interval//h	(C)搅拌转速 Stirring speed//r/min
1	12	1.5	20
2	16	2.0	30
3	20	2.5	40

**1.5 测定项目与方法** 每天 09:00 使用湿式气体流量计进行读数,记录每日产气情况;TS、VS 含量采用灼烧法进行测定。

**1.6 数据处理与分析** 试验数据通过 Excel 2019 软件进行统计,并利用 Design Expert 12 软件对试验数据进行进一步分析处理。

## 2 结果与分析

**2.1 HRT 对干清猪粪半干法连续厌氧发酵的影响** 图 3、图 4 为 HRT 对干清猪粪半干法连续厌氧发酵日产气量及 VS

降解率的影响。整个发酵时间为 25 d,其中 0~7 d 为启动阶段。从图 3 可以看出,所有试验组均能正常启动,HRT=15 d 时的日产气量明显高于 HRT=25、20、10 d 时,在连续运行稳定后的 15 d 内,HRT=25、20、15、10 d 时平均日产气量分别为 19.16、22.73、25.47 和 2.05 L,说明当 HRT=25、20、15 d 时随着 HRT 的缩短,平均日产气量升高。当 HRT=10 d 时,厌氧发酵系统内部有机负荷过高,营养物质不能及时消耗,酸积累过多,厌氧发酵系统遭到破坏,不再是一个正常的发酵系统。从图 4 可以看出,在连续运行稳定后的 15 d 内,HRT=25、20、15、10 d 时的平均 VS 降解率为 62.42%、58.04%、51.51%和 9.18%,说明随着 HRT 的缩短,VS 降解率逐渐降低。这是因为当 HRT=25、20 d 时,发酵物滞留期相对较长,日进料量相对较少,反应充分,VS 降解率也较高;当 HRT=15 d 时,日进料量增多,营养物质充足,水解酸化产物更多,此时日产气量高于 HRT=25、20 d 时,但是此时 VS 降解率有所降低,说明此时已不能完全消化营养物质;当 HRT=10 d 时,日产气量与 VS 降解率急剧下降,这可能是随着进料量的增多,有机负荷过高,引起整个发酵系统酸化,形成病态池。综上所述,干清猪粪在半干法连续厌氧发酵试验中,在一定范围内 HRT 越长,降解效果越好。若缩短 HRT,日产气量会有所提高,但降解效果有所下降,若 HRT 过短则会引起发酵系统酸化,形成病态池,因此在干清猪粪半干法连续厌氧发酵中 HRT 选取 20 d 较为合适。

**2.2 干清猪粪半干法连续厌氧发酵参数的优化** 干清猪粪半干法连续厌氧发酵在中温 35℃ 条件下进行,按表 3 进行参

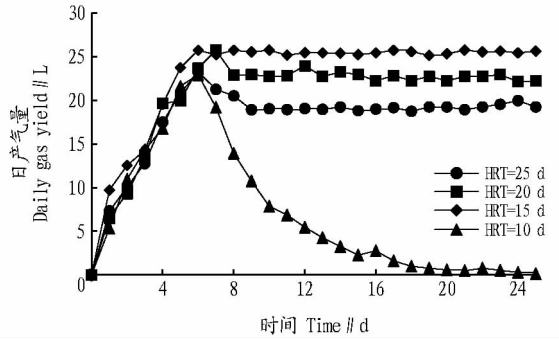


图 3 日产气量的变化

Fig.3 The changes of daily gas yield

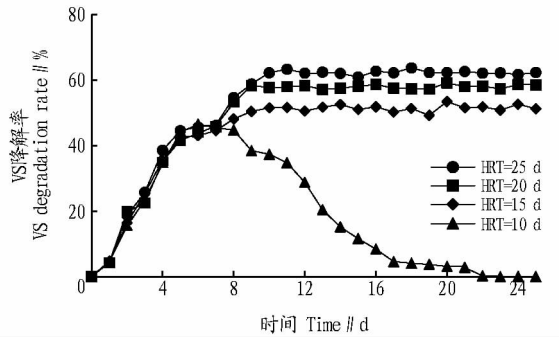


图 4 VS 降解率的变化

Fig.4 Changes of VS degradation rate

数的响应面优化试验,并以平均日产气量与 VS 降解率为试验结果评价指标,结果见表 4。

表 4 正交试验结果

Table 4 The results of the orthogonal test

试验序号 Test No.	HRT d	搅拌间隔 Stirring interval h	搅拌转速 Stirring speed r/min	平均日产气量 Average daily gas yield//L	VS 降解率 VS degradation rate//%
1	12	2.0	20	22.66	46.27
2	16	2.0	30	24.07	53.46
3	16	2.0	30	24.19	52.64
4	16	1.5	20	23.37	47.18
5	16	2.0	30	24.07	53.29
6	20	1.5	30	23.21	53.78
7	20	2.5	30	23.05	57.24
8	12	1.5	30	22.35	49.36
9	12	2.0	40	22.92	46.84
10	12	2.5	30	23.07	48.26
11	20	2.0	20	23.55	53.73
12	16	2.0	30	24.04	52.42
13	16	1.5	40	23.03	47.16
14	16	2.5	20	23.91	48.12
15	16	2.0	30	23.94	53.34
16	16	2.5	40	23.62	49.49
17	20	2.0	40	23.03	56.58

利用 Design Expert 8.0.6 软件对试验数据进行分析拟合,并进行差异显著性分析。平均日产气量与 VS 降解率的回归方程见公式(3)和(4)。

$$Y = 24.06 + 0.23A + 0.21B - 0.11C - 0.22AB - 0.20AC + 0.01BC - 0.79A^2 - 0.35B^2 - 0.23C^2 \quad (3)$$

$$Z = 53.03 + 3.82A + 0.70B + 0.60C + 0.14AB + 0.57AC +$$

$$0.35BC + 1.00A^2 - 1.87B^2 - 3.17C^2 \quad (4)$$

响应面方差分析结果见表 5~6。

由表 5~6 可知,该模型 P 值 < 0.000 1,说明回归模型极显著。失拟项 P 值大于 0.05,影响不显著,说明该方程拟合度良好。通过分析各因素的一次项、二次项和交互项的 P 值可知,一次项因素 A、B、C 的 P 值均小于 0.05,影响显著;二

次项因素  $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$  的  $P$  值均小于 0.05, 影响显著; 交互项 AB 的  $P$  值小于 0.05, 影响显著; 交互项 BC 的  $P$  值大于 0.05, 说明影响不显著。通过对  $F$  值的分析发现, 各影响因素的主次顺序为  $A > B > C$ , 即  $HRT > \text{搅拌间隔} > \text{搅拌转速}$ 。

(1) 对平均日产气量的影响分析。基于回归模型对平均日产气量的方差分析, 为了进一步研究相关因素及其交互作用并且确定最优值, 利用 Design Expert 8.0.6 软件对回归模型进行响应面分析。当搅拌转速一定时 (搅拌转速 = 30 r/min), 平均日产气量随着 HRT 和搅拌间隔变化的三维曲面和等高线图如图 5(a)、(b) 所示。从图 5(a)、(b) 可以看出, 随着 HRT 和搅拌间隔的增加, 平均日产气量先增加后

减小, 而且 HRT 对日产气量的变化比搅拌间隔更为敏感, 因此等高线图呈现 HRT 为短轴、搅拌间隔为长轴的椭圆, 所以 HRT 比搅拌间隔对平均日产气量的影响要更为显著, 此结论与表 5 中 HRT 的  $F$  值大于搅拌间隔  $F$  值的结论相一致, 证实了 HRT 的重要程度大于搅拌间隔。

图 6(a)、(b) 为当搅拌间隔一定时 (搅拌间隔 = 2 h), 平均日产气量随着 HRT 和搅拌转速变化的三维曲面和等高线图。从图 6(a) 可以看出, 随着 HRT 和搅拌转速的增加, 平均日产气量先增加后减小。由图 6(b) 可知, HRT 比搅拌转速对平均日产气量的影响更为显著。此结论与表 5 中 HRT 的  $F$  值大于搅拌转速  $F$  值的结果相一致。

表 5 平均日产气量回归方程方差分析

Table 5 Variance analysis of the average daily gas yield's regression equation

差异来源 Source of difference	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方差 Mean square error	$F$ 值 $F$ value	$P$ 值 $P$ value	显著性 Significance
Model	4.88	9	0.54	40.89	< 0.000 1	显著
A	0.42	1	0.42	31.92	0.000 8	
B	0.36	1	0.36	8.93	0.011 3	
C	0.099	1	0.099	7.47	0.029 2	
AB	0.19	1	0.19	14.60	0.006 5	
AC	0.15	1	0.15	11.47	0.011 6	
BC	6.25E-04	1	6.25E-04	0.05	0.834 3	
$A^2$	2.64	1	2.64	199.34	< 0.000 1	
$B^2$	0.52	1	0.52	38.85	0.000 4	
$C^2$	0.22	1	0.22	16.76	0.004 6	
残差 Residual error	0.093	7	0.01			
失拟项 Misfitting item	0.061	3	0.02	2.55	0.194 0	不显著
纯误差 Pure error	0.032	4	7.97E-03			
总和 Sum	4.97	16				

表 6 VS 降解率回归方程方差分析

Table 6 Variance analysis of the regression equations for VS degradation rate

差异来源 Source of difference	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方差 Mean square error	$F$ 值 $F$ value	$P$ 值 $P$ value	显著性 Significance
Model	192.93	9	21.44	45.24	< 0.000 1	显著
A	117.05	1	117.05	247.01	< 0.000 1	
B	3.96	1	3.96	8.36	0.023 3	
C	2.84	1	2.84	6.00	0.044 1	
AB	5.20	1	5.20	10.97	0.012 9	
AC	1.30	1	1.30	2.74	0.141 7	
BC	0.48	1	0.48	1.02	0.346 3	
$A^2$	4.20	1	4.20	8.86	0.020 6	
$B^2$	14.70	1	14.70	31.03	0.000 8	
$C^2$	42.41	1	42.41	89.50	< 0.000 1	
残差 Residual error	3.32	7	0.47			
失拟项 Misfitting item	2.44	3	0.81	3.73	0.117 8	不显著
纯误差 Pure error	0.87	4	0.22			
总和 Sum	196.25	16				

图 7(a)、(b) 为  $HRT = 16$  d 时平均日产气量随搅拌间隔和搅拌转速变化的三维曲面和等高线图。从图 7(a) 可以看出, 随着搅拌间隔和搅拌转速的增大, 平均日产气量变化不

明显。由图 7(b) 可知, 等高线图大致呈圆形, 说明搅拌转速与搅拌间隔对平均日产气量的影响基本相当, 与表 5 中搅拌转速  $F$  值与搅拌间隔  $F$  值大致相同的结果一致。

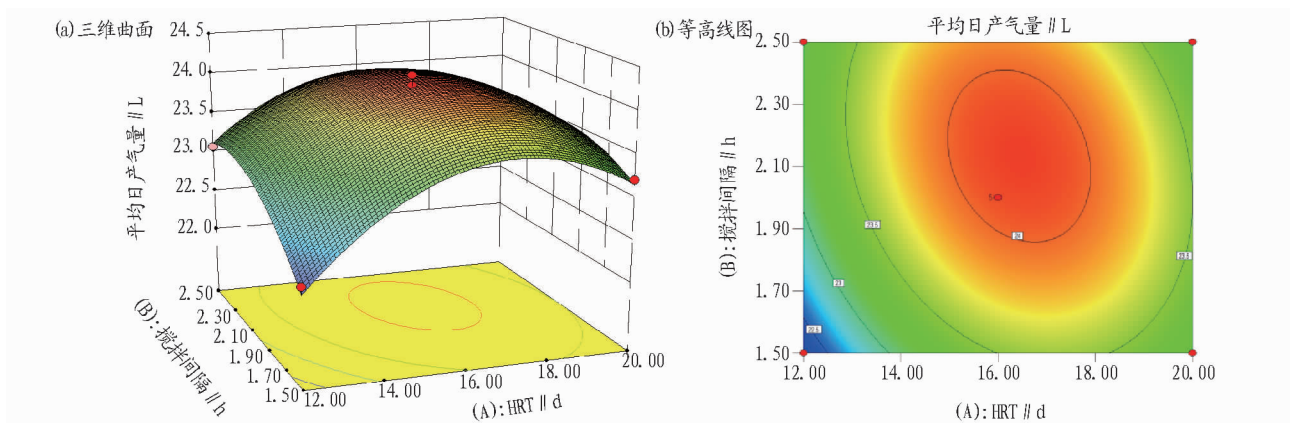


图5 HRT 与搅拌间隔对平均日产气量的交互影响

Fig.5 Interaction effects of HRT and stirring interval on the average daily gas yield

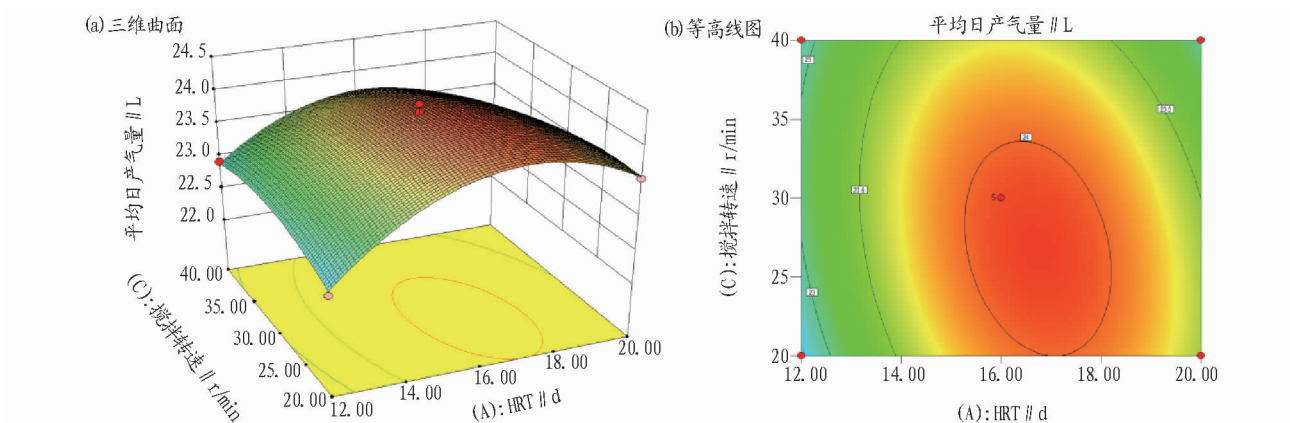


图6 HRT 与搅拌转速对平均日产气量的交互影响

Fig.6 Interaction effects of HRT and stirring speed on the average daily gas yield

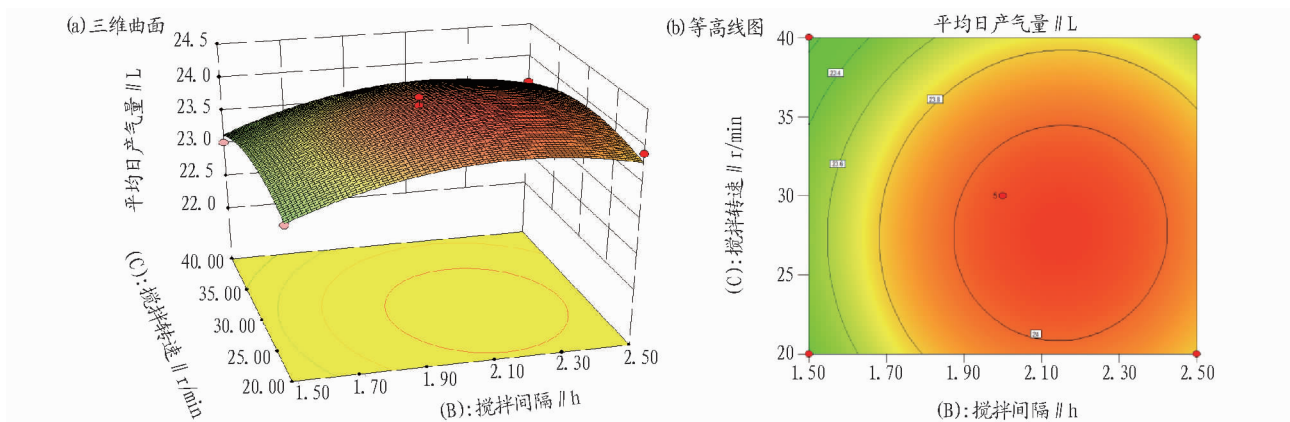


图7 搅拌间隔与搅拌转速对平均日产气量的交互影响

Fig.7 Interaction effects of mixing interval and stirring speed on the average daily gas yield

(2)对 VS 降解率的影响分析。基于回归模型对 VS 降解率的方差分析,利用 Design Expert 8.0.6 软件对回归模型进行响应面分析。图 8(a)、(b)为搅拌转速一定时(搅拌转速 = 30 r/min),VS 降解率随着 HRT 和搅拌间隔变化的三维曲面和等高线图。由图 8(a)可知,VS 降解率随着 HRT 的增大而增大。从 8(b)可以看出,当 HRT 处于合适范围内,搅拌间隔的大幅变化对 VS 降解率的影响不大,反之当搅拌间隔处于合适范围时,HRT 小幅变化会对 VS 降解率产生较大影响,所以 HRT 比搅拌间隔对 VS 降解率的影响要更为显著,

此结论与表 6 中 HRT 的  $F$  值大于搅拌间隔  $F$  值的结果相一致。

图 9(a)、(b)为搅拌间隔一定时(搅拌间隔 = 2 h),VS 降解率随着 HRT 和搅拌转速变化的三维曲面和等高线图。由图 9(a)可知,VS 降解率随着 HRT 的增大而增大。从图 9(b)可以看出,HRT 对 VS 降解率的影响要比搅拌转速对 VS 降解率的影响更显著,此结论可从表 6 中 HRT 的  $F$  值大于搅拌转速  $F$  值得到验证。

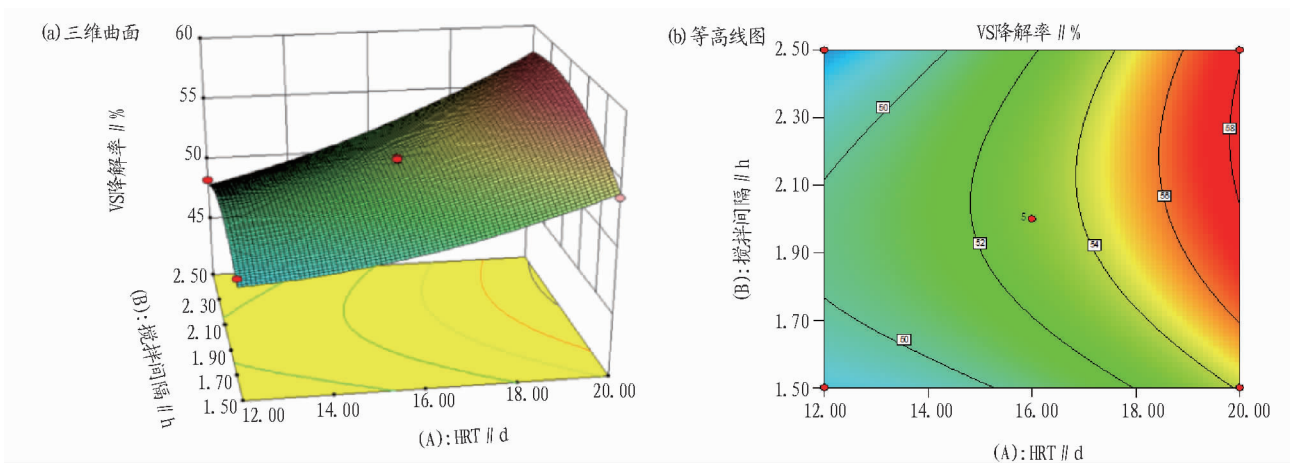


图 8 HRT 与搅拌间隔对 VS 降解率的交互影响

Fig.8 Interaction effects of HRT and stirring interval on VS degradation rate

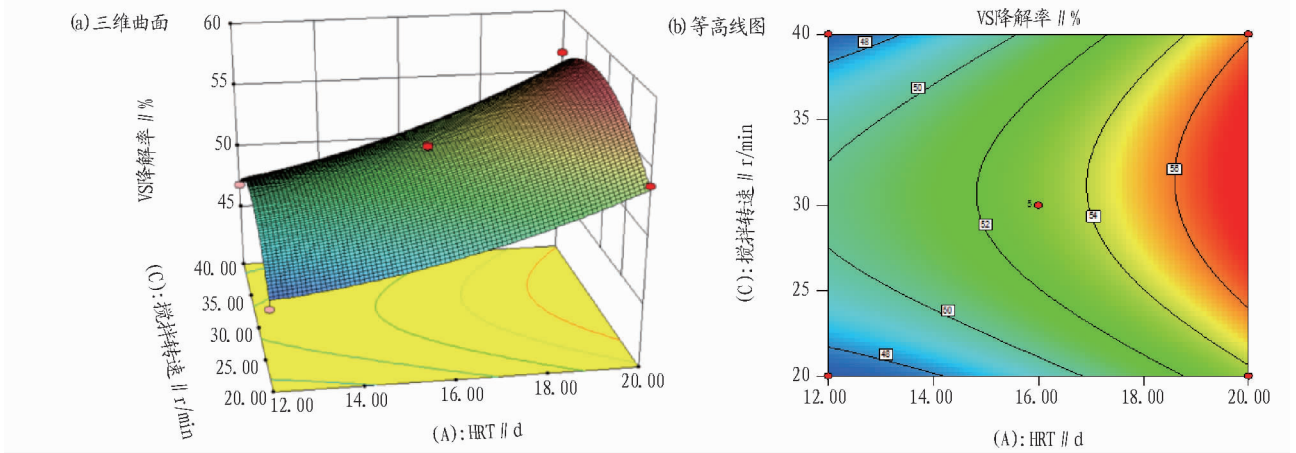


图 9 HRT 与搅拌转速对 VS 降解率的交互影响

Fig.9 Interaction effects of HRT and stirring speed on VS degradation rate

图 10(a)、(b)为 HRT 一定时(HRT=16 d),VS 降解率随着搅拌间隔和搅拌转速变化的三维曲面图和等高线图。由图 10(b)可知,等高线图大致呈圆形,说明搅拌转速与搅

拌间隔对 VS 降解率的影响基本相当,从表 6 中搅拌转速  $F$  值与搅拌间隔  $F$  值大致相同,可以得到验证。

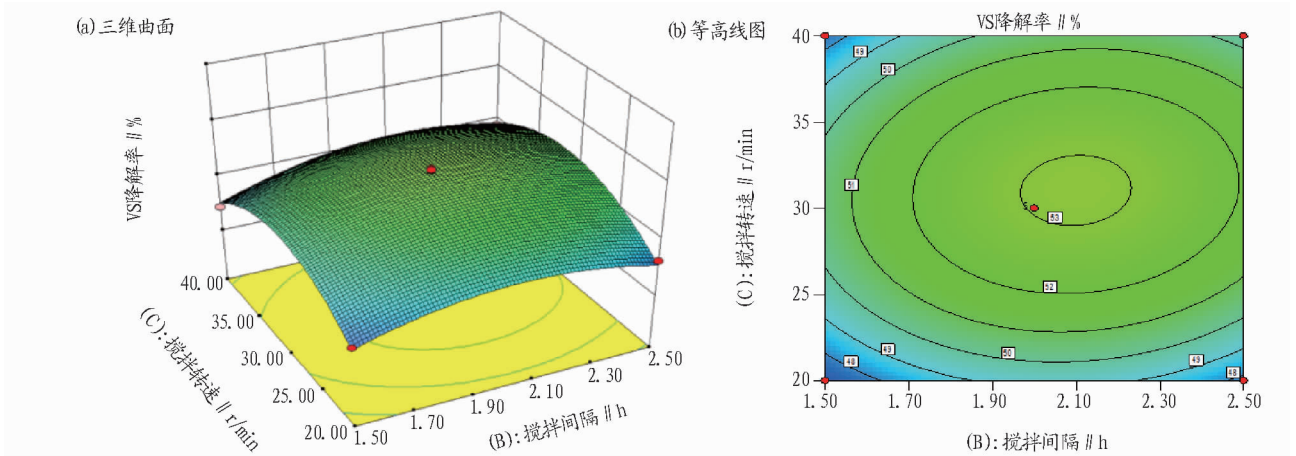


图 10 搅拌间隔与搅拌转速对 VS 降解率的交互影响

Fig.10 Interaction effects of stirring interval and stirring speed on VS degradation rate

2.3 最佳条件的确定及试验验证 在干清猪粪半干法连续厌氧发酵试验中,平均日产气量和 VS 降解率越高越好,因此利用 Design Expert 8.0.6 软件的优化模块将试验指标都调至

最大值,根据相关回归模型分析得到以下参数:HRT 为 18.59 d、搅拌间隔为 2.11 h、搅拌转速为 29.51 r/min。预测 (下转第 208 页)

模拟方程的模拟精度较好,液流速率系列综合误差为3.57%,日液流量系列综合误差为4.24%。

茎干液流是植物体内由于蒸腾作用引起木质部内向上的液流,其测定已经成为研究不同环境条件下植物水分关系的一种有效手段,其变化特征很大程度决定了植株的蒸腾特征。叶片蒸腾也是水分在SPAC系统中不断循环迁移的动力。冠层蒸腾耗水是作物实际耗水的主要组成,约占蒸散耗水总量的66.4%<sup>[21]</sup>~85.8%<sup>[23]</sup>,直接影响植物的生理生化过程和形态结构,从而影响植物的生长、产量和品质<sup>[4]</sup>。摸清各类作物在不同条件下的茎干液流变化特征及其与环境因子的响应关系,并将其应用于大尺度下作物冠层蒸腾耗水量计算和实际耗水量的模拟都十分有意义。因此,探明茎干液流与土壤水分、土壤温度、气象要素和作物生理生态参量之间的关系,构建多参数系统模拟模型,推求近似区域或缺资料情况下同类作物蒸腾耗水,明确蒸腾耗水与蒸散发量的比值,并反向推求相关作物各生育阶段的作物参数,同时为开展作物的缺水诊断、优化灌溉制度并进行精确灌溉提供基础依据,这些或将成为国内外学者的研究热点。

### 参考文献

- [1] 张继澍.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,1999.
- [2] BAKER J M, VAN, BAVEL C H M. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants[J]. Plant, cell & environment, 1987, 10(9): 777-782.
- [3] 黄雅茹, 马迎宾, 辛智鸣, 等. 柽柳不同季节树干液流特征及其与土壤含水量及土壤温度的关系[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(5): 1-10.
- [4] 徐利岗, 苗正伟, 杜历, 等. 干旱区枸杞树干液流变化特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5519-5527.

(上接第201页)

最佳平均日产气量为23.89 L, VS降解率为56.09%。

在进行最佳试验条件的验证时,考虑到实际应用的简便性,将干清猪粪半干法连续厌氧消化条件调整为HRT 19 d、搅拌间隔2 h、搅拌转速30 r/min,结果表明干清猪粪连续厌氧发酵的平均日产气量实际值为23.48 L, VS降解率56.47%,实测值与理论值基本一致。

### 3 结论

通过研究干清猪粪半干法连续厌氧发酵中HRT对平均日产气量和VS降解率的影响,并利用响应面分析法优化干清猪粪半干法连续厌氧发酵中的最优工艺条件,得到以下结论:

固定发酵温度、搅拌参数、发酵料液浓度等条件不变,研究当HRT为25、20、15、10 d时对干清猪粪半干法连续厌氧发酵的影响,发现在一定范围内HRT越长,降解效果越好;缩短HRT,日产气量会有所提高,但降解效果有所下降;若HRT过短时则会引起发酵系统酸化,形成病态池,因此在干清猪粪半干法连续厌氧发酵中HRT宜控制在20 d。

通过采用Design Expert 8.0.6的Box-Behnken中心组合设计原理,在发酵温度、料液浓度等其他因素一致条件下,研究HRT、搅拌间隔和搅拌转速3个因素对干清猪粪半干法连续厌氧发酵平均日产气量和VS降解率的影响,发现各因素对日产

- [5] 王睿照.树干液流的研究进展[J].辽宁林业科技, 2019(6): 44-46.
- [6] 赵春彦, 司建华, 冯起, 等. 树干液流研究进展与展望[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 98-105.
- [7] 刘毅, 金谦, 桂东伟, 等. 新疆南部矮化红枣树干液流特征及其对环境因子的响应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1146-1152.
- [8] 麦合木提·图如普, 周伟权, 丁想, 等. 吐鲁番盆地杏树树干液流变化特征及其对环境因子的响应[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2378-2387.
- [9] 吴佳伟, 李苇洁, 杨瑞, 等. 红阳猕猴桃生长发育期树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 果树学报, 2022, 39(3): 388-405.
- [10] 孙旭, 杨文慧, 焦磊, 等. 不同时间尺度北京蟒山油松树干液流对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 4113-4123.
- [11] 武鹏飞, 刘云强, 李冬梅, 等. 环境因子对沙地人工杨树林树干液流的驱动影响[J]. 中国农业气象, 2021, 42(5): 402-411.
- [12] 任冉冉, 夏江宝, 张淑勇, 等. 黄河三角洲柽柳光合作用及树干液流对潜埋深的响应[J]. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2615-2628.
- [13] 姚增旺, 褚建民, 吴利禄, 等. 民勤绿洲荒漠过渡带梭梭树干液流的时滞特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2339-2346.
- [14] 孙鹏飞, 周宏飞, 李彦, 等. 古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6901-6909.
- [15] 王海波, 刘凤之, 韩晓, 等. 葡萄需冷量和需热量估算模型及设施促早栽培品种筛选[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 187-193.
- [16] 杨洋, 张晓煜, 张磊, 等. 宁夏酿酒葡萄越冬期冻害时空分布特征[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(6): 214-222.
- [17] JIN W M, DONG J, HU Y L, et al. Improved cold-resistant performance in transgenic grape (*Vitis vinifera* L.) overexpressing cold-inducible transcription factors AtDREB1b[J]. HortScience, 2009, 44(1): 35-39.
- [18] 付诗宁, 魏新光, 郑思宇, 等. 滴灌水肥一体化对温室葡萄生理特性及水肥利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 61-72.
- [19] 曹毅, 钟永红, 张赓, 等. 水肥耦合对设施葡萄产量、品质和水肥利用的影响[J]. 农机化研究, 2021, 43(9): 186-193.
- [20] 牛最荣, 赵霞, 张芮, 等. 水分胁迫对日光温室葡萄叶片生理变化及果实发育的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(2): 265-271.
- [21] 王尚涛, 赵楠, 张扬, 等. 干旱绿洲农田无核白葡萄树蒸散发的分割研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 1-6.
- [22] 白岩, 朱高峰, 张琨, 等. 基于树干液流及涡动相关技术的葡萄冠层蒸腾及蒸散发特征研究[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7821-7831.
- [23] 白岩, 朱高峰, 张琨, 等. 敦煌葡萄液流特征及耗水分析[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 175-181.

气量和VS降解率的影响重要性排序均为HRT>搅拌间隔>搅拌转速,并通过模型寻优与验证,得到最优参数组合为HRT 19 d、搅拌间隔2 h、搅拌转速30 r/min,实际平均日产气量23.48 L, VS降解率56.47%,平均容积产气率2.35 L/(L·d)。

### 参考文献

- [1] 李丹妮.猪场粪污厌氧干发酵酸氨抑制规律研究[D].北京:中国农业科学院, 2021.
- [2] 郑盼.猪粪干式厌氧消化实验研究[D].昆明:云南师范大学, 2019.
- [3] 孔德望, 张克强, 房芳, 等. 猪粪厌氧发酵消化液回流体系微生物群落结构特征与产气关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(3): 559-566.
- [4] 许彩云, 靳红梅, 杜静, 等. 水力停留时间对猪粪厌氧发酵残留物中磺胺类抗生素分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11): 2187-2194.
- [5] 蔡连.以猪粪为原料的高温厌氧发酵产沼气的工艺研究[D].南昌:南昌大学, 2014.
- [6] 王悦超, 雷中方.驯化接种对高固体浓度猪粪厌氧发酵的影响[J]. 复旦学报(自然科学版), 2012, 51(1): 118-124.
- [7] 庞小平, 牛明芬, 王赛月, 等. 北方玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵条件[J]. 生态学杂志, 2011, 30(1): 126-130.
- [8] 刘荣厚, 郝元元, 武丽娟. 温度条件对猪粪厌氧发酵沼气产气特性的影响[J]. 可再生能源, 2006, 24(5): 32-35.
- [9] 张靖雨, 汪邦稳, 夏小林, 等. 农村规模化畜禽养殖污染生态综合治理技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(19): 9-14, 29.
- [10] 朱圣权.猪粪厌氧干发酵工艺研究及其效益分析[D].武汉:华中农业大学, 2009.
- [11] 沈其林, 单胜道, 周健勇, 等. 猪粪发酵沼液成分测定与分析[J]. 中国沼气, 2014, 32(3): 83-86.
- [12] 马媛, 邓功成, 赵洪, 等. 温度对猪粪发酵产沼气的产气特性的影响[J]. 广东农业科学, 2012, 39(18): 190-192.
- [13] 谭新, 方热军. 猪粪对环境的污染及其处理与利用技术[J]. 饲料工业, 2006, 27(21): 58-60.