

沼渣好氧发酵原料配比优化研究

郑圣尉^{1,2,3}, 张 曦^{2,3}, 孟海波^{2,3}, 沈玉君^{2,3}, 董姗姗^{2,3}, 蔡 璐^{1*}

(1. 宁波大学 土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211; 2. 农业农村部规划设计研究院 农村能源与环保研究所, 北京 100125; 3. 农业农村部 资源循环利用技术与模式重点实验室, 北京 100125)

摘要: 为研究以沼渣为主要原料的好氧发酵物料配比, 用响应曲面法(RSM)中 Box-Behnken 设计和主成分分析法对发酵产品的含水率、有机质含量、种子发芽指数(GI)、pH 值、 $E4/E6$ 、C/N 进行分析, 建立响应值模型并拟合。结果表明, 9 组堆体的 50 °C 以上持续时间达到相关无害化标准; 发酵产品的含水率在 20%~58%; 13 组发酵产品的 C/N 为 11.58~16.52, 有机质含量为 46.34%~59.94%, 总养分含量为 7.03%~9.26%, $E4/E6$ 为 1.65~2.83, 且 11 组的 GI 均大于 85%, 说明 11 组处理发酵产品腐熟程度较高, 无植物毒性。以沼渣为主要原料的好氧发酵最佳物料质量配比为沼渣:猪粪:秸秆=8:4.5:5。验证试验结果表明, 试验结果与预测值的误差为 4.77%, 说明 RSM 预测的沼渣好氧发酵原料配比能进行应用。

关键词: 沼渣; 好氧发酵; 原料配比; 响应曲面法

中图分类号: X712

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 05-0115-06

据农业部统计, 截至 2015 年底, 全国以畜禽粪污为主要原料的沼气工程有 11.05 万处, 每年沼渣排放量 7 100 万 t^[1], 若不进行无害化处理, 会有二次污染的风险^[2]。沼渣由于高含水率和纤维素类物质含量^[3], 需要添加辅料进行联合好氧发酵。目前, 如翟红等^[4]研究不同初始含水率下对沼渣好氧发酵的影响, 发现当初始含水率为 60%时, 最终物料纤维素降解率最高, 腐熟最好。赵龙彬^[5]发现, C/N 为 26 是最适合牛粪沼渣好氧发酵的初始 C/N 值; 邱珊等^[6]研究认为, 0.5 L·(min·kg)⁻¹ OM 是好氧发酵过程中的最佳通风速率。添加玉米秸秆能提高发酵产品的富里酸含量^[7], 其侧重研究混合物料的初始理化性质对好氧发酵过程以及产物的影响, 和沼渣主要作为辅料与猪粪、鸡粪进行联合好氧发酵^[8]。但以沼渣为主要发酵原料的好氧发酵和物料定量配比的研究鲜有报道。

响应曲面法(RSM)将统计方法和数学方法相结合, 准确度高, 预测性好, 是优化工艺参数、评价影响因素水平及交互作用的有效方法之一^[8-13]。

本研究以沼渣、猪粪、秸秆作为原料, 采用 Box-Behnken 设计, 以 3 种原料添加量为自变量, 以发酵产品有机质含量、pH 值、含水率、C/N、种子发芽指数(GI)、水溶性有机物在 465 nm 和 665 nm 处消光系数比($E4/E6$)等 6 个指标进行综合评价, 并建立产品质量评价函数 F , 以 F 作为响应值进行二次回归拟合, 优化得到以沼渣为主要原料的好氧发酵最佳混料配比, 并进行相应验证, 以期对中小型沼气站的沼渣好氧发酵处理提供配比参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试沼渣和猪粪均取自北京市顺义区东华山村沼气站, 秸秆采购自山东潍坊某农场(粉碎至 1 cm 左右)。好氧发酵原料的基本理化性质见表 1。

1.2 试验设备

好氧发酵所用试验装置为农业农村部规划设计研究院自主研发的好氧发酵罐(图 1), 发酵罐高 65 cm, 直径 60 cm, 有效容积 60 L。

收稿日期: 2019-03-14。

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFD0800800)。

第一作者: 郑圣尉(1994—), 男, 浙江台州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 固体废弃物处理。E-mail: nbuzhengshengwei@126.com

*通信作者: 蔡璐(1986—), 女, 浙江绍兴人, 副教授, 主要研究方向: 固体废弃物处理。E-mail: cailu@nbu.edu.cn

表1 好氧发酵原料主要理化性质

原料	C/N	有机质/%	pH 值	含水率/%	TN/%	TP/%	TK/%
沼渣	13.92±0.47	66.33±0.27	8.32±0.02	77.81±0.02	2.76±0.10	5.20±0.26	0.72±0.06
猪粪	7.03±0.15	47.18±1.10	6.64±0.01	74.26±0.01	3.89±0.02	3.33±0.18	1.77±0.03
秸秆	27.88±0.31	67.01±0.36	-	9.53±0.01	1.39±0.01	0.44±0.18	2.83±0.07



图1 好氧发酵装置

1.3 响应曲面法试验设计

以沼渣、猪粪、秸秆为自变量(表2和表3), 分别用字母 X_1 、 X_2 、 X_3 表示, 每个自变量分别用-1、0、1 进行编码, 在前期及相关预实验基础上确定每个自变量的范围, 用 Design-Expert 8.0 软件中 Box-Behnken 设计 13 组配比试验(标记为 T1~T13), 调节混合物料含水率在 63%左右, 好氧发酵期间通风量控制在 $0.1\sim 0.2\text{ m}^3\cdot(\text{min}\cdot\text{m}^3)^{-1}$, 好氧发酵周期为 30 d. 优化分析得最佳原料配比后, 进行验证试验, 试验材料和试验设备与模型建立试验一致.

1.4 指标分析方法

本试验中温度由好氧发酵罐的温度传感器测得; 含水率采用烘干法测定; 新鲜样品和去离子水以 1:10(m/V)混合, $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 30 min, $4000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 6 min, 过滤得浸提液^[14], 用 pH 计测定 pH 值; 用分光光度计分别在 465 nm 和 665 nm 波长下测定浸提液的吸光值, 计算其比值($E4/E6$)^[15]; 样品的 C/N 由元素分析仪(PerkinElmer-2400)分析测量; 有机质含量、总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)含量分别按照《有机肥料》(NY525-2012)中 5.2~5.5 节进行测试; GI 采用油菜种子发芽试验^[16], 并根据下式计算:

$$\text{GI} = \frac{\text{试验样种子发芽率} \times \text{种子平均根长}}{(\text{对照样种子发芽率} \times \text{对照样种子平均根长})} \times 100\% \quad (1)$$

表2 Box-Behnken 试验设计及编码设置 kg

因素	水平		
	-1	0	1
沼渣(X_1)	7.5	8.75	10
猪粪(X_2)	4.5	6.25	8
秸秆(X_3)	3	4	5

表3 Box-Behnken 实验设计变量编码值及响应值

处理	X_1	X_2	X_3	响应值 F
T1	-1	-1	0	0.72
T2	-1	0	-1	-83.63
T3	0	-1	-1	-21.40
T4	0	0	0	41.59
T5	0	1	1	41.70
T6	1	-1	0	-25.46
T7	1	0	-1	-140.04
T8	-1	1	0	-16.52
T9	-1	0	1	112.12
T10	0	-1	1	140.33
T11	0	1	-1	-28.40
T12	1	0	1	-76.52
T13	1	1	0	45.40

1.5 数据处理

试验数据采用 Excel 进行处理, 用 SPSS 22.0 进行相关性分析和主成分分析, 用 Design Expert 8.0 软件进行响应曲面优化, 并拟合出预测模型, 最终优化得出最佳配比.

2 结果与分析

2.1 温度变化

我国《畜禽粪便无害化处理规范》(GB/T36195-2018)规定, 采用反应器好氧堆肥技术进行无害化处理, 其堆体温度维持 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的时间不少于 7 d, 或 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上不少于 14 d. 美国环保局(USEPA)规定, 堆体在 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上持续 3~5 d, 即达到无害化要求^[17]. 由图 2 可知, T1、T4、T5、T10 堆体 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的维持时间达到 7 d, 比现有研究结果的 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及

以上的时间延长 1~3 d^[6], T8 堆体 50℃以上持续 5 d, 45℃以上的维持时间为 14 d, 达到规范中的无害化标准. T4、T5、T7、T9、T10、T12 堆体 55℃以上的维持时间为 3~4 d, 达到 USEPA 规定的无害化要求. 好氧发酵初期, 物料中易被微生物分解利用的有机质含量相对充足, 有利于微生物繁殖, 释放热量使堆体温度升高^[8]. T2、T3、T11、T13 堆体在 30 d 的好氧发酵周期内未达到 50℃以上. 因此, 沼渣好氧发酵不同的物料配比下, 堆体维持 50℃及以上的时间长短不同, 合适的配比能够提高沼渣好氧发酵的无害化效果.

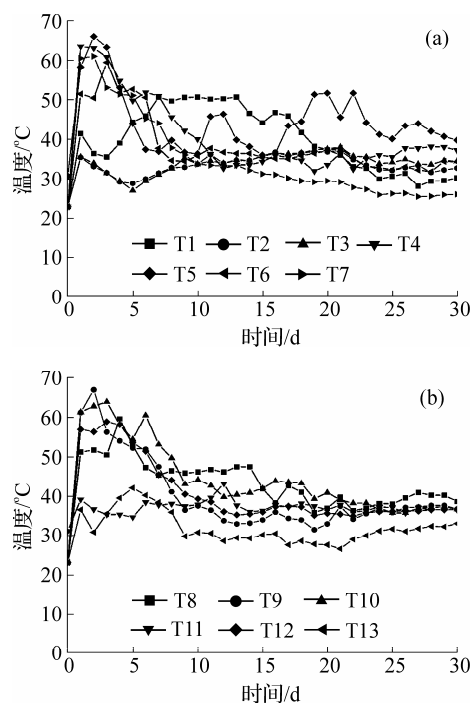


图 2 好氧发酵过程温度变化

2.2 发酵产品腐熟度分析

杨玖等^[15]和 Bernal 等^[18]研究认为, 堆体 pH 值在 8.5~8.9 之间是最适宜微生物生长及物料的酶促降解作用的范围. 李艳霞等^[19]分析认为, 堆肥结束后, 物料 pH 值在 8~9 左右可认为已经腐熟. 表 4 中 13 组试验发酵产品的 pH 值在 7.65~8.93 之间, 产品腐熟. $E4/E6$ 用来表征好氧发酵产品的腐殖化程度, 表 4 中 13 组发酵产品的 $E4/E6$ 范围在 1.65~2.83 之间. Zorpas 等^[20]发现, 当 $E4/E6$ 低于 5 时, 样品被表征为腐殖酸. $E4/E6$ 也与腐殖酸分子的大小有关, 一般随着腐殖酸分子量的增大而减小^[21]. 除 T7、T11 外, 其余各组发酵产品的 $E4/E6$ 均在 2.0

以上, 说明发酵产品中形成了大分子的腐殖酸, 产品基本腐熟. Zucconi 等^[22]研究认为, 当 GI 小于 50%, 可认为好氧发酵产品对植物基本没有毒性, 当 GI 大于 80%, 可认为其对植物完全没有毒性. 表 4 中的 12 组发酵产品的 GI 均大于 50%, T13 的 GI 为 56%, 说明产品基本没有植物毒性; 其余 11 组产品 GI 均大于 85%, 说明产品完全没有植物毒性, 腐熟程度高. 当好氧发酵产品 C/N 低于 20 是产品达到腐熟的必要条件^[23]. 如表 4 所示, 13 组发酵产品的 C/N 在 11.58~16.52, 基本达到腐熟要求. 13 组产品的有机质含量都大于 45%, 相比沼渣作为辅料得到的好氧发酵产品, 有机质含量增加^[24],

表 4 好氧发酵产品各项理化指标

处理	pH 值	$E4/E6$	GI/%
T1	8.61±0.01 ^a	2.19±0.19 ^{ac}	176 ^a
T2	8.39±0.01 ^b	2.33±0.23 ^{abg}	232 ^b
T3	8.42±0.07 ^c	2.02±0.07 ^{ce}	262 ^{bc}
T4	8.15±0.00 ^d	2.83±0.42 ^d	192 ^{ad}
T5	8.52±0.07 ^{ce}	2.69±0.06 ^{ace}	107 ^{ade}
T6	8.64±0.00 ^{df}	2.13±0.09 ^f	250 ^{aef}
T7	7.65±0.00 ^{bdg}	1.65±0.10 ^{ag}	228 ^{aefg}
T8	8.67±0.02 ^f	2.38±0.05 ^{bdgh}	349 ^{acd}
T9	8.77±0.04 ^{bceh}	2.51±0.05 ^{aghi}	112 ^{afgi}
T10	8.77±0.11 ^{bcghi}	2.57±0.15 ^{dghi}	40 ^{aefgi}
T11	8.93±0.04 ^{bghij}	1.69±0.33 ^f	163 ^{bchj}
T12	8.78±0.04 ^{bdgj}	2.03±0.01 ^{acej}	113 ^{bchjk}
T13	8.82±0.08 ^{cehik}	2.15±0.15 ^{abcegi}	56 ^{bchjkl}

处理	C/N	有机质/%	总养分/%
T1	12.34±0.16 ^a	53.82±0.34 ^a	9.26 ^a
T2	12.99±1.32 ^{ab}	46.34±4.27 ^b	7.90 ^b
T3	16.52±1.56 ^c	50.93±1.22 ^c	7.03 ^c
T4	12.15±0.25 ^{abd}	52.16±0.61 ^{ad}	8.67 ^d
T5	13.11±0.51 ^{abde}	53.71±0.74 ^{ade}	7.43 ^{ae}
T6	12.31±0.07 ^{abdef}	53.51±0.31 ^{cf}	9.08 ^{ef}
T7	11.98±0.51 ^{abdefg}	50.53±0.98 ^{acdefg}	8.87 ^{efg}
T8	11.72±0.08 ^h	52.89±0.45 ^h	8.81 ^{cdh}
T9	14.83±0.24 ^{abdefgi}	57.94±0.96 ^{hi}	7.37 ^{fgi}
T10	15.69±0.21 ^{ch}	59.94±0.83 ^{hj}	7.21 ^{cdhj}
T11	12.95±2.28 ^{abdefgij}	54.44±0.92 ^{adegik}	8.99 ^{aefgik}
T12	11.58±0.17 ^{abefgij}	49.48±1.13 ^{cf}	8.54 ^{fgi}
T13	13.29±0.35 ^{abdefijk}	53.95±0.35 ^{adegkl}	8.16 ^{blm}

注: 上标处不同字母表示具有显著差异性($P<0.05$).

总养分含量都大于 5%, 符合《有机肥料》(NY525-2012)中有机肥中有机质的质量分数 $\geq 45\%$, 总养分的质量分数 $\geq 5\%$ 的要求。

2.3 响应曲面法优化沼渣好氧发酵混料配比分析

2.3.1 主成分分析及响应值确定

将各组发酵产品的含水率、有机质含量、GI、pH 值、E4/E6、C/N 数据导入 SPSS 软件, 对数据进行描述、降维及主成分分析, 得到 6 个指标的主成分系数及 2 个主成分的贡献率(表 5 和表 6)。

表 5 主成分分析结果

指标	主成分因子系数	
	1	2
有机质(Z_1)	-0.570 1	0.182 0
pH(Z_2)	0.504 5	0.258 4
含水率(Z_3)	0.372 9	-0.075 9
E4/E6(Z_4)	0.346 9	0.149 1
C/N(Z_5)	0.196 6	0.747 0
GI(Z_6)	-0.351 3	0.560 4

表 6 2 个主成分特征值和贡献率

项目	特征值	贡献率%	累计贡献率%
1	2.598 0	43.299 0	43.299 0
2	1.158 0	19.296 0	62.595 0

由表 5 和表 6 可得 2 个主成分的线性组合记为 y_1 、 y_2 如下:

$$y_1 = 0.5701Z_1 + 0.5045Z_2 - 0.3729Z_3 + 0.3469Z_4 + 0.1966Z_5 - 0.3513Z_6, \quad (2)$$

$$y_2 = 0.1820Z_1 + 0.2584Z_2 - 0.0759Z_3 + 0.1491Z_4 + 0.7470Z_5 + 0.5604Z_6. \quad (3)$$

以 2 个主成分的贡献率 α_1 、 α_2 为权数构造综合评价函数 $F = \alpha_1 y_1 + \alpha_2 y_2$, F 值用来评价好氧发酵产品的质量, 计算得各组产品的得分见表 3, 并在模型拟合试验中将其作为响应值进行模型拟合。

2.3.2 发酵原料配比优化

利用 Design-Expert 8.0, 对表 3 中的数据进行多元回归拟合, 可得响应值 F 对自变量(沼渣(X_1)、猪粪(X_2)、秸秆(X_3))的二次多项回归方程如下:

$$F = -3454.30221 + 628.07311X_1 - 103.27529X_2 + 514.25609X_3 + 10.06778X_1X_2 - 19.84208X_1X_3 - 13.08950X_2X_3 - 35.95749X_1^2 + 5.105967X_2^2 - 24.16463X_3^2. \quad (4)$$

该方程的决定系数 $R^2=0.8458$, 表明响应值的变化有 84.58%来自所选变量^[8]; 该模型信噪比为 7.627, 在大于 4 的可接受范围内^[13]。由表 7 可知, 模型显著($P<0.05$), 表明该模型对试验结果拟合较好, 可以对不同物料配比下的响应值进行预测。

表 7 多元二次方程方差分析表

项目	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	6 1981.57	9	6 886.84	4.27	0.034 4 ¹⁾
X_1	3 884.16	1	3 884.16	2.41	0.164 8
X_2	338.26	1	338.26	0.21	0.6610
X_3	34 334.07	1	34 334.07	21.27	0.002 4 ²⁾
X_1X_2	1 940.10	1	1 940.10	1.20	0.309 2
X_1X_3	2 460.68	1	2 460.68	1.52	0.256 8
X_2X_3	2 098.85	1	2 098.85	1.30	0.291 7
X_1^2	13 290.92	1	13 290.92	8.23	0.024 0 ¹⁾
X_2^2	1 029.54	1	1 029.54	0.64	0.450 8
X_3^2	2 458.65	1	2 458.65	1.52	0.257 0
残差	11 300.49	7	1 614.36		
失拟项	11 300.49	3	3 766.83		
误差项	0	4	0		
总和	73 282.06	16			

注: 1)显著性水平($P<0.05$); 2)极显著水平($P<0.01$)。

由表 7 还可知, 秸秆量一次项达极显著水平($P<0.01$), 沼渣量的二次项显著水平($P<0.05$), 沼渣量、猪粪量、秸秆量对响应值 F 影响的显著性顺序为秸秆量>沼渣量>猪粪量, 说明秸秆的添加量直接影响产品的质量。图 3 和图 4 分别为当猪粪量取 0 水平时, 沼渣量、秸秆量对于响应值的影响, 以及沼渣量取 0 水平时, 猪粪量和秸秆量对于响应值的影响曲面图。由图可知, 秸秆量对发酵产品质量的影响趋势与沼渣量一致, 但是产品质量得分对秸秆量的变化更敏感。这可能与秸秆量直接影响物料的 C/N 有关, 邱珊等^[7]研究了不同秸秆添加量对沼渣好氧发酵的影响, 发现产品无害化程度和腐熟度并不随着秸秆的增加而持续上升。

2.4 最佳配比的确定及模型验证

通过模型优化, 得到以沼渣为主要原料的好氧发酵最佳物料配比中沼渣量为 8.0 kg, 猪粪量为 4.5 kg, 秸秆量为 5.0 kg。为验证模型的可靠性和准确性, 按照上述比例混料进行验证试验, 好氧发酵 30 d 得到最优混料配比下沼渣好氧发酵产品。在最优配比下, 物料好氧发酵第 1 天进入高温期, 50℃

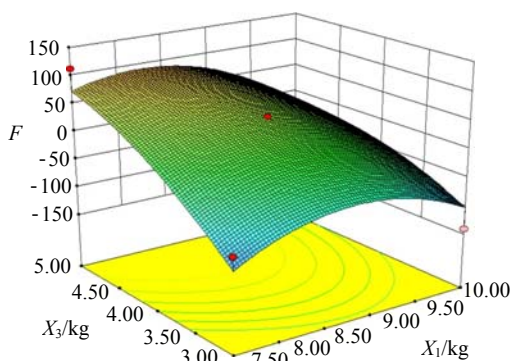


图3 沼渣量、秸秆量及其交互作用对产品质量得分的影响

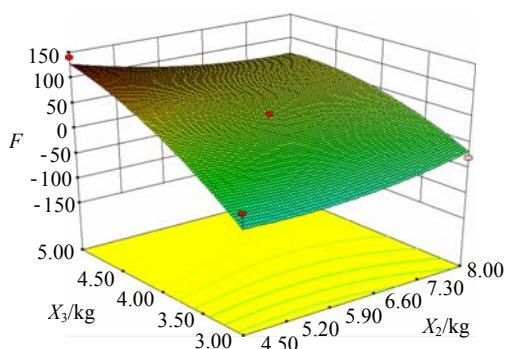


图4 猪粪量、秸秆量及其交互作用对产品质量得分的影响

以上的维持时间达到 7 d, 达到相关无害化要求; 发酵产品有机质含量为 59.98%, 含水率为 24.30%, pH 值为 8.77, $E4/E6$ 为 2.57, C/N 为 15.34, GI 为 130%, 说明产品内部形成了较大的腐殖酸分子, 腐熟程度高, 对植物完全没有生物毒性。验证试验结果表明, 在最优混料配比下, 试验结果与预测值的相对误差为 4.77%, 误差在合理范围内, 说明该模型有效, 预测的最佳配比能进行应用。

3 结论

(1)不同质量的原料配比下各组堆体 50℃以上的持续时间不同, T1、T4、T5、T10 堆体 50℃以上的维持时间达到 7 d; T8 处理的堆体 50℃以上持续 5 d, 45℃以上的维持时间为 14 d, 达到《畜禽粪便无害化处理规范》(GB/T36195-2018)中的无害化标准。T4、T5、T7、T9、T10、T12 处理的堆体 55℃以上的维持时间为 3~4 d, 达到 USEPA 规定的无害化要求; T4、T5、T9、T10 处理的发酵产品含水率均低于 30%。

(2)13 组处理的发酵产品 C/N 为 11.58~16.52, 有机质含量为 46.34%~59.94%, pH 值为 7.65~8.93, $E4/E6$ 为 1.65~2.83, 11 组发酵产品的 GI 均大于 85%,

说明大部分发酵产品腐熟程度较高, 无植物毒性。

(3)响应曲面分析表明, 二次模型显著; 沼渣量、猪粪量、秸秆量对产品质量影响的显著性顺序为秸秆量>沼渣量>猪粪量; 根据模型优化得出以沼渣为主要原料的好氧发酵最佳物料配比中沼渣量为 8.0 kg, 猪粪量为 4.5 kg, 秸秆量为 5 kg; 验证实验结果表明, 实际结果与预测值的误差为 4.77%, 小于 5%, 在可接受范围内, 说明 RSM 优化得到的以沼渣为主要原料的好氧发酵物料配比可应用。

参考文献:

- [1] 农业部, 国家发展和改革委员会. 全国农村沼气发展“十三五”规划[R]. 2017.
- [2] Meng X, Liu B, Zhang H, et al. Co-composting of the biogas residues and spent mushroom substrate: Physico-chemical properties and maturity assessment[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 276(276):329-336.
- [3] 黄光群, 黄晶, 张阳, 等. 鸡粪沼渣联合好氧堆肥基质降解与气体排放研究[J]. *农业机械学报*, 2016(9):220-226.
- [4] 翟红, 张衍林, 艾平, 等. 不同初始含水率对沼渣和秸秆混合堆肥过程的影响[J]. *湖北农业科学*, 2011, 50(21):4357-4360.
- [5] 赵龙彬. 沼渣堆肥参数优化及堆肥利用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [6] 邱珊, 赵龙彬, 马放, 等. 不同通风速率对厌氧残余物沼渣堆肥的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(8):2402-2408.
- [7] 邱珊, 赵龙彬, 马放, 等. 添加秸秆对厌氧残余物沼渣堆肥影响的研究[J]. *中国沼气*, 2017, 35(1):35-39.
- [8] 宋彩红, 夏训峰, 席北斗, 等. 响应曲面法优化沼渣混合物料堆肥配比研究[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(8):1474-1479.
- [9] 侯韦竹, 丁晶, 赵庆良, 等. 响应面法优化电氧化-絮凝耦合工艺深度处理垃圾渗滤液[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(3):948-955.
- [10] Hasan H A, Abdullah S R S, Kamarudin S K, et al. Response surface methodology for optimization of simultaneous COD, NH_4^+ -N and Mn^{2+} removal from drinking water by biological aerated filter[J]. *Desalination*, 2011, 275(1/3):50-61.
- [11] Iqbal M K, Nadeem A, Sherazi F, et al. Optimization of process parameters for kitchen waste composting by response surface methodology[J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2015, 12(5):1759-1768.

- [12] 颜瑾, 李燕, 熊仁, 等. 农村不同类型有机固体废弃物混合堆肥配比优化[J]. 环境工程学报, 2018, 12(7): 2106-2113.
- [13] 马帅, 吴丁山, 吴滔, 等. 椰子壳生物炭促进餐厨垃圾厌氧消化的响应面优化实验[J]. 环境工程, 2019, 37(1): 142-146.
- [14] Meng X Y, Dai J, Zhang Y, et al. Composted biogas residue and spent mushroom substrate as a growth medium for tomato and pepper seedlings[EB/OL]. [2018-12-23]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479717309258>.
- [15] 杨玖, 谷洁, 张友旺, 等. 磺胺甲唑对猪粪堆肥过程中堆料性质与酶活性的影响[J]. 环境科学学报, 2013, 33(12):3267-3274.
- [16] Zhou H B, Ma C, Gao D, et al. Application of a recyclable plastic bulking agent for sewage sludge composting[J]. Bioresource Technology, 2014, 152:329-336.
- [17] USEPA. A plain English guide to the EPA part 503 biosolids rule[S]. EPA/8322/R-93/003, 1994.
- [18] Bernal M P, Alburquerque J A, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(22):5444-5453.
- [19] 李艳霞, 王敏健, 王菊思. 有机固体废弃物堆肥的腐熟度参数及指标[J]. 环境科学, 1999, 20(2):99-104.
- [20] Zorpas A A, Loizidou M. Sawdust and natural zeolite as a bulking agent for improving quality of a composting product from anaerobically stabilized sewage sludge[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(16):7545-7552.
- [21] 李春萍, 李国学, 李玉春, 等. 北京南宫静态堆肥隧道仓不同区间的垃圾堆肥腐熟度模糊评价[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2):201-206.
- [22] Zucconi F, Pera A, Forte M, et al. Evaluating toxicity of immature compost[J]. Biocycle, 1981, 22(2):54-57.
- [23] 秦莉, 李玉春, 李国学, 等. 城市生活垃圾堆肥过程中腐熟度指标及控制参数[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12):189-194.
- [24] 宋彩红, 贾璇, 李鸣晓, 等. 沼渣与畜禽粪便混合堆肥发酵效果的综合评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 227-234.

Optimization of raw material ratio for aerobic fermentation of biogas residue

ZHENG Shengwei^{1,2,3}, ZHANG Xi^{2,3}, MENG Haibo^{2,3}, SHEN Yujun^{2,3}, DONG Shanshan^{2,3}, CAI Lu^{1*}

(1.School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Institute of Energy and Environmental Protection, Chinese Academy of Agricultural Engineering Planning & Design, Beijing 100125, China; 3.Key Laboratory of Technology and Model for Cyclic Utilization from Agricultural Resources,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

Abstract: To optimize the ratio of raw materials for aerobic fermentation, in which the biogas residue is the main ingredient, the Box-Behnken design of Response and PCA are used to analyze the organic matter content, C/N, pH value, moisture content, $E4/E6$ and seed germination index (GI) of the aerobic fermentation products. The optimal mixture ratio of aerobic fermentation raw materials with biogas residue, pig manure and straw is obtained by RSM. The results show that 9 products last in thermophilic phase for 5~7 days. The moisture content of products range from 20% to 58%, C/N from 11.85 to 16.52, the organic matter contents from 46.34% to 59.94%, the $E4/E6$ from 1.65 to 2.83, the GI of 11 products are all greater than 85%, suggesting that these products have reached the high maturity level and no phytotoxicity is found in them. Response surface analysis indicates that, with biogas residue as the main raw material, the optimum ratio for aerobic fermentation is identified to be: biogas residue: pig manure: straw = 8:4.5:5. The error between the measured results and the predicted values is 4.77%. As such it may come to the conclusion that RSM can be used to optimize the raw material ratio and the optimum ratio is applicable.

Key words: biogas residue; aerobic fermentation; raw material ratio; response surface methodology

(责任编辑 章践立)