

有机成分比例对餐厨废弃物厌氧发酵特性的影响*

刘丹 李文哲 刘爽 王明 曹澜 常素青

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为确定餐厨废弃物厌氧发酵过程中脂肪、淀粉和蛋白质的交互作用规律,采用混料设计研究了3种有机成分不同混合比例对中温厌氧发酵产甲烷特性和降解特性的影响。结果表明:脂肪、淀粉和蛋白质分别单独作为原料时,其产甲烷性能都受到了不同程度的抑制,平均生化产甲烷势分别为345.36、59.80、135.87 mL/g,相应地占理论产甲烷量的34%、14%和26%;其降解性能也受到了明显的影响。当三者进行混合发酵时,表现出了明显的协同作用。建立各有机成分在混合发酵中配比与发酵的生化产甲烷势和挥发性固体降解率之间的回归模型并进行参数优化,优化结果为脂肪、淀粉、蛋白质质量比为36:30:33时,可获得最高的生化产甲烷势和挥发性固体降解率。经验证最优配比时生化产甲烷势、挥发性固体降解率分别为451.36 mL/g、79.62%。

关键词: 餐厨废弃物 厌氧发酵 有机成分 混合比例 混料设计

中图分类号: S216.4; X712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)05-0166-07

引言

餐厨废弃物的处理问题在我国经济社会发展过程中日益凸显^[1]。厌氧发酵技术可以实现餐厨废弃物的能源化、资源化和减量化,已受到了广泛的关注。目前众多研究者已对餐厨废弃物厌氧发酵原料预处理、反应器类型选择、运行条件控制等方面开展了大量研究^[2-5]。

典型的餐厨废弃物的主要成分是脂肪、淀粉和蛋白质^[6]。三者具有不同的元素组成、分子构造,在化学性质上具有较大的差异。餐厨废弃物的厌氧发酵过程实际上是3种成分的厌氧代谢途径相互交叉、反馈、协调的综合结果。目前虽然已经有研究者分别对3种成分的厌氧发酵特性进行了探讨^[7-9],也有研究者对含有3种成分量不同的物质如餐厨废弃物和剩余污泥进行了混合厌氧发酵特性分析^[10-11],但以阐明3种成分在厌氧发酵过程中相互作用机理为目的研究还鲜有报道,所以有必要对三者以不同比例混合时的发酵特性进行系统研究。

混料试验设计是研究某个特性指标与原料各种成分所占比例关系的一种响应曲面试验方法。采用混料试验设计能够分析原料中各组分间的交互影响,并获得最优的成分配比。目前混料试验设计已经被广泛应用于培养基成分优化、菌剂复配、肥料配

方设计等领域中^[12-14],并取得良好效果。本文采用混料试验设计系统分析脂肪、淀粉和蛋白质混合比例对厌氧发酵过程的影响,明确不同成分之间的协同或拮抗关系,并通过软件分析确定其最佳混合比例,为餐厨废弃物的厌氧发酵过程的调控提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 接种物和原料

接种物取自长期稳定运行的中温厌氧发酵产甲烷反应器。该反应器以餐厨废弃物和牛粪挥发性固体(VS)比例为1:1的混合物为原料,在35℃条件下连续运行30 d,最终平均容积产甲烷率稳定在1.5 L/(L·d)。在本试验使用前3~4 d,反应器停止进料,待完全停止产气后,取出发酵液作为接种物。接种物的总固体质量分数、挥发性固体质量分数、pH值分别为3.58%、2.81%、7.36。

发酵原料用豆油、可溶性淀粉和蛋白胨作为脂肪、淀粉和蛋白质的代表,干燥恒质量备用,原料的主要性质如表1所示。

1.2 试验设计

设 x_1 、 x_2 和 x_3 分别表示脂肪、淀粉和蛋白质在原料中的质量分数,限制条件为: $x_1 + x_2 + x_3 = 1$, $0 \leq (x_1, x_2, x_3) \leq 1$ 。采用混料试验设计中的Simplex

收稿日期:2013-12-18 修回日期:2014-01-31

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD15B04)

作者简介:刘丹,博士生,主要从事生物质转化与利用研究,E-mail:LD_wangqi@163.com

通讯作者:李文哲,教授,博士生导师,主要从事生物质转化与利用研究,E-mail:liwenzhe9@163.com

表 1 发酵原料的主要性质

Tab. 1 Main properties of fermentation materials

原料	元素质量分数/%				理论产甲烷量/(mL·g ⁻¹)
	C	H	O	N	
豆油	75.0	12.5	12.5	0	1 006.3
可溶性淀粉	44.4	6.17	49.4	0	414.8
蛋白胨	54.5	6.82	22.7	15.9	525.0

Centroid 法,设计不同处理有机成分的混合比例见表 2,每个水平重复 3 次,以其均值作为试验结果。采用 1 L 锥形瓶作为厌氧发酵反应器进行批式试验,控制底物的总固体质量分数为 8%,接种物和底物的质量比为 1:1。锥形瓶经纯氮气吹脱驱除氧气后用橡胶塞密封,在 35℃ 恒温培养箱中静置培养,每天手动搅拌 2 次,试验持续直至所有混合水平都进入停止产气的平台期,结束后测定发酵液相代谢产物成分。

表 2 试验设计及响应指标

Tab. 2 Experimental design and indexes

处理	因素			响应指标	
	x_1	x_2	x_3	P_m /(mL·g ⁻¹)	η /%
1	1	0	0	312.39	50.02
2	0	1	0	59.35	35.44
3	0	0	1	138.11	77.95
4	0.50	0.50	0	218.00	62.35
5	0.50	0	0.50	203.05	67.57
6	0	0.50	0.50	198.18	64.63
7	0.33	0.33	0.33	415.13	83.84
8	0.67	0.17	0.17	451.23	67.06
9	0.17	0.67	0.17	209.50	69.20
10	0.17	0.17	0.67	252.69	73.90
11	1	0	0	378.32	64.80
12	0	0	1	133.62	75.50
13	0	1	0	60.25	37.92
14	0	0.50	0.50	198.54	62.71

通过测定批式厌氧发酵试验累积甲烷产量、挥发性固体降解率,考察有机成分的混合比例对厌氧发酵产甲烷特性的影响。

采用 Modified Gompertz 方程拟合厌氧发酵累积甲烷产量曲线

$$M(t) = P_m \exp \left(- \exp \left(\frac{R_m}{P_m} (\lambda - t) + 1 \right) \right) \quad (1)$$

式中 $M(t)$ —— t 时刻的累积甲烷产量, mL/g

P_m ——生化产甲烷势, mL/g

R_m ——最大产甲烷速率, mL/(d·g)

λ ——延滞期, d

原料的挥发性固体降解率计算式为

$$\eta = \frac{f_{vsi} - f_{vse}}{f_{vsi}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 f_{vsi} ——发酵开始时的挥发性固体质量分数, %

f_{vse} ——发酵结束时的挥发性固体质量分数, %

由于混料试验的响应指标只和原料组分的比例有关,其回归模型采用 Scheffé 多项式,具体形式如下:

$$\text{线性模型} \quad Y = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i \quad (3)$$

$$\text{二次模型} \quad Y = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i < j}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

特殊三次模型

$$Y = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i < j}^n \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j < k}^n \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (5)$$

式中 Y 代表响应指标;线性项 $\beta_i x_i$ 代表单一组分的效应;二次项 $\beta_{ij} x_i x_j$ 代表两组分混合的协同或者拮抗效应;特殊三次项 $\beta_{ijk} x_i x_j x_k$ 代表三组分的交互作用。

本研究以生化产甲烷势 P_m 和挥发性固体降解率 η 作为响应指标,采用 Design Expert 软件对试验数据进行统计分析,建立回归方程,优化原料中有机成分的组成,并对优化结果进行试验验证。

1.3 分析方法

采用气体采样袋收集所产生的气体,每 12 h 采用排水法测量一次产气体积,并折算为标准状态下体积。气体成分和发酵结束后发酵液中的总有机酸(乙酸、丙酸、正丁酸、正戊酸、乳酸)和乙醇均采用安捷伦 GC-6890N 型气相色谱仪测定,气体成分采用 TDX-01 型填充柱和 TCD 热导检测器,总有机酸和乙醇采用毛细管柱和 FID 氢火焰离子化检测器^[15]。总糖和还原糖的测定:菲林试剂比色法^[16];脂肪含量采用索氏提取法测定;总固体测定:采用 105℃ 干燥法;挥发性固体测定:采用 550~600℃ 灼烧法^[17];氨态氮根据仪器标准分析方法,采用 Foss Kjeltac 2300 型全自动凯式定氮仪测定。

2 结果与讨论

2.1 回归模型建立

全部 14 组处理的累积甲烷产量随时间的变化情况如图 1 所示。脂肪、淀粉和蛋白质以不同比例混合时,累积甲烷产量曲线的走势差异明显,不仅最大累积甲烷产量差异明显,最短的在发酵 2 d 后即停止产气,最长的发酵时间近 60 d,各组的陡缓程度也大不相同。采用 Modified Gompertz 方程分别对各个处理的累积产甲烷量进行拟合,所获得的拟合参

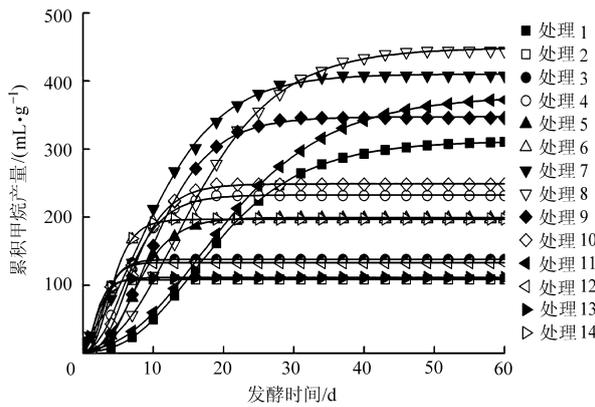


图1 不同处理累积甲烷产量随时间的变化曲线

Fig. 1 Cumulative methane production of different treatments

数见表2。通过 Gomperts 方程拟合所得各组的相关系数 R^2 值皆大于 0.99, 表明 Modified Gomperts 模型可以较好地反映有机成分厌氧发酵产甲烷过程。

采用式(2)计算不同混合比例时的挥发性固体降解率, 结果见表2。

利用统计软件 Design Expert 对表2中试验数据进行回归分析, 所得方程的方差分析结果见表3。

表3 方差分析结果

Tab. 3 ANOVA of the experiment results

指标	模型	模型 P 值	失拟 P 值	决定系数 R^2
P_m	线性	0.013 2	0.004 7	0.54
	二次	0.015 7	0.007 8	0.78
	特殊三次	0.000 9	0.050 2	0.93
η	线性	0.001 9	0.088 0	0.68
	二次	0.006 3	0.121 6	0.83
	特殊三次	0.000 9	0.446 3	0.93

由表3可见, P_m 和 η 的特殊三次模型的 P 值均小于 0.01, 失拟 P 值均大于 0.05, 能同时满足模型显著和失拟不显著的条件, 可以用来对试验结果进行预测, 二者的回归方程分别为

$$Y_{P_m} = 358.35 X_1 + 51.44 X_2 + 130.77 X_3 + 89.51 X_1 X_2 - 102.86 X_1 X_3 + 375.20 X_2 X_3 + 5183.09 X_1 X_2 X_3 \quad (6)$$

$$Y_{\eta} = 78.32 X_1 + 37.14 X_2 + 75.70 X_3 + 29.46 X_1 X_2 - 38.66 X_1 X_3 + 26.74 X_2 X_3 + 547.28 X_1 X_2 X_3 \quad (7)$$

由式(6)、(7)可见二者都是特殊三次项系数最大, 表明三组分的交互作用最强, 对响应指标的贡献最大。

2.2 不同有机成分混合比例对厌氧发酵产甲烷特性的影响

混料设计可以根据各组分的3元等值线图直观地观察各组分间的变化对指标的影响。不同混合比例时生化产甲烷势(P_m)变化情况如图2所示。

当3种原料单独发酵时, 平均 P_m 由大到小的顺

序是脂肪、蛋白质、淀粉, 脂肪、淀粉和蛋白质的平均 P_m 为 345.36、59.80 和 135.87 mL/g, 均远小于理论产甲烷量, 分别为理论值的 34%、14% 和 26%。这说明3种有机成分在单独发酵时, 都受到了不同程度的抑制。当三者分别进行二组分和三组分混合发酵时, 其 P_m 均较单独发酵有大幅度提高, 表现出较强的协同作用。当脂肪、淀粉、蛋白质质量比为 67:17:17 时, P_m 达到最大值 451 mL/g; 当脂肪、淀粉、蛋白质质量比为 1:1:1 时, P_m 为 415 mL/g, 此时原料的甲烷转化率最高, P_m 达到了理论值的 64%。

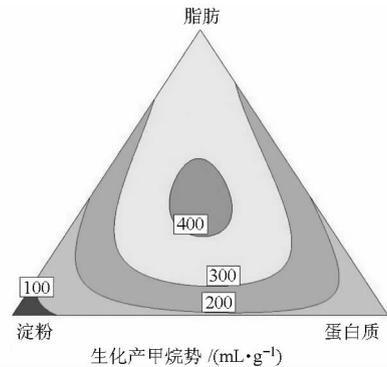


图2 混合比例对生化产甲烷势的影响

Fig. 2 Effect of mixing ratio on BMP

2.3 不同有机成分混合比例对厌氧发酵原料降解特性的影响

图3为不同混合比例下的挥发性固体降解率 η 的变化情况。

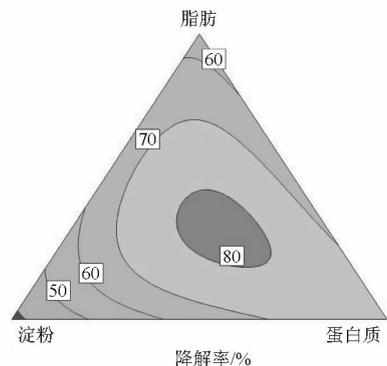


图3 混合比例对挥发性固体降解率的影响

Fig. 3 Effect of mixing ratio on VS degradation rate

当3种原料单独发酵时, 脂肪、淀粉和蛋白质的 η 平均值分别为 57.41%、36.68% 和 76.73%。以往的研究表明3种有机物质的降解速率常数顺序为淀粉、蛋白质、脂肪^[18], 而本研究中挥发性固体降解率由大到小的顺序是蛋白质、脂肪、淀粉, 可见降解速度快并不一定意味着降解率高。快速水解酸化的产物如果不能及时转化, 往往会因为过度积累而产生负反馈抑制, 进而降低原料的降解率。当三者进行二组分和三组分混合发酵时, 挥发性固体降解率均有明显提高, 当脂肪、淀粉、蛋白质质量比为 1:1:1

时, η 达到最大值 83.84%。

2.4 不同有机成分混合比例对厌氧发酵液相代谢产物的影响

为了探讨有机成分混合比例影响厌氧发酵的机

理,本研究对不同混合比例下发酵的 pH 值和液相代谢产物分布情况进行了分析,结果如表 4 所示。

当单独以脂肪为原料时(1 号和 11 号),发酵液 pH 值略高于产甲烷菌的适宜 pH 值下限 6.5,平均

表 4 不同混合比例的 pH 值及液相产物分布

Tab. 4 pH value and liquid metabolites distribution at different mixing ratios

处理	pH 值	氨氮质量浓度		有机酸和乙醇浓度/(mmol·L ⁻¹)						
		/(mg·L ⁻¹)	/(mg·L ⁻¹)	乙醇	乙酸	丙酸	正丁酸	正戊酸	乳酸	总和
1	6.58	206.54	0.89	6.50	6.59	19.06	7.74	0	11.11	51.00
2	4.20	147.62	0.01	90.29	85.53	17.62	42.54	0	49.02	285.00
3	7.37	7484.00	198.25	4.12	223.43	25.58	43.81	0	306.06	603.00
4	5.32	147.60	0.04	5.6	49.10	22.26	25.04	0	10	112.00
5	6.82	4302.00	32.12	4.23	132.95	25.54	25.22	16.61	62.45	267.00
6	4.88	2416.00	0.21	11.15	127.88	15.2	52.4	0	80.37	287.00
7	7.29	1915.00	42.20	6.80	5.18	7.21	13.86	3.65	12.3	49.00
8	7.54	1856.00	75.05	2.07	5.30	20.51	14.8	0	15.32	58.00
9	4.53	854.70	0.03	18.53	103.27	25.37	51.23	0	77.6	276.00
10	6.82	5009.00	37.40	0	167.41	35.35	68.14	0	147.1	418.00
11	6.64	265.50	1.31	3.71	2.54	19.75	7.56	0	15.44	49.00
12	7.30	7248.00	163.42	4.45	221.35	23.38	43.11	0	346.62	638.91
13	4.24	236.00	0.01	78.49	65.53	8.21	12.3	0	35.47	200.00
14	4.35	2298.15	0.21	11.15	147.88	25.2	72.42	0	125.06	381.71

总有机酸和乙醇浓度为 50 mmol/L,无明显积累。由于脂肪中不含氮元素,发酵液中氨氮完全来自接种物,质量浓度最高仅为 236.02 mg/L,游离氨质量浓度仅为 1.1 mg/L。虽然此时无明显的有机酸和氨积累,但是脂肪的甲烷产量和挥发性固体降解率都很低。这可能是因为脂肪的主要成分是三酰甘油酯,降解过程要先经过水解生成甘油和长链脂肪酸(LCFA,本研究中未进行测定),LCFA 再通过 β 氧化降解成乙酸,进而转变为甲烷。在此过程中,LCFA 会吸附在甲烷菌的细胞膜上而产生抑制作用,且脂肪浓度越高其抑制效果越显著。李东的研究结果也支持这种推测^[19]。

当单独以淀粉为原料时(2 号和 13 号),发酵后 pH 值降到 4.2 左右。总有机酸和乙醇有明显的积累,平均浓度为 192 mmol/L,成分以乙醇和乙酸为主。发酵液中氨氮质量浓度最高仅为 191.8 mg/L,游离氨质量浓度低于 1 mg/L。结合图 2、3 的分析,可以发现,当单独以淀粉为原料时,由于其水解酸化速度较快,所产生的有机酸不能及时被甲烷菌利用,造成有机酸累积。同时体系中没有足够的氨氮来维持酸碱度平衡,导致 pH 值快速下降,pH 值降到一定水平后会抑制产酸菌和产甲烷菌的活性,进而造成生化产甲烷势和挥发性固体降解率双低的结果^[20]。

当单独以蛋白质为原料时(3 号和 12 号),发酵

液 pH 值约为 7.3,处于厌氧发酵最适宜 pH 值范围内。总有机酸和乙醇有明显的积累,平均浓度为 620.95 mmol/L,主要成分为乳酸和乙酸。蛋白质的碳氮比较低,仅为 3.43,在厌氧发酵过程中发生了较强烈的氨化反应,发酵结束时氨氮质量浓度高达 7366 mg/L,游离氨质量浓度达 180.84 mg/L。氨氮的产生增加了厌氧体系的碱度,使体系的 pH 值能稳定在 7.0 以上中性偏碱的环境,更有利于蛋白质的溶解,形成蛋白质降解的良性循环;同时中性偏碱的环境中产酸微生物的活性好,有机酸能持续产生^[21-22]。但文献[23]的研究表明,在 pH 值为 6.5~8.5 时,当氨氮质量浓度为 1670~3717 mg/L 时,产甲烷活性下降 10%;4086~5550 mg/L 时,下降 50%;5870~6600 mg/L 时,产甲烷活性将完全丧失。虽然本研究中以蛋白质为单一原料时,挥发性固体降解率能达到 70% 以上,但由于过高的氨氮浓度强烈抑制了甲烷菌的活性,致使发酵过程处于水解酸化率高但甲烷产率低的“抑制型稳态”。

从单一有机成分发酵的结果可以看出,厌氧发酵是由多个微生物代谢过程和不同原料相互联系相互制约所形成的整体过程,不仅要满足发酵体系的酸碱平衡条件,还要保证水解酸化和产甲烷等代谢过程的动力学平衡。单一原料由于往往无法同时满足适宜的碳氮比和原料降解速率的条件,难以获得较高产甲烷率和原料利用率。

当进行二组分和三组分混合发酵时,不仅产甲烷性能和底物利用率较单组分有大幅提高,液相代谢产物也有较大变化,其中以7号最为明显。7号的脂肪、淀粉、蛋白质质量比为1:1:1, P_m 为415 mL/g, η 为83.84%,此时pH值为7.29,总有机酸和乙醇浓度仅为49 mmol/L,且分布比较均匀,说明没有发生酸的累积。氨氮质量浓度为1 915.00 mg/L,略高于文献[23]所报道的甲烷活性抑制下限。但此时游离氨质量浓度仅为42.2 mg/L, Wang等的研究结果显示,当pH值为7.5,游离氨在80~100 mg/L时才会对微生物有明显的抑制作用^[24],可见经适当比例混合,可以有效避免中间代谢产物的抑制。

此时脂肪、淀粉和蛋白质主要通过以下3种方式实现了对产甲烷过程的协同促进作用。首先,三者分别起到了彼此稀释剂的作用,减轻了各自代谢产物的浓度,降低了长链脂肪酸、挥发性脂肪酸和氨氮的潜在抑制风险;其次,氨氮可以提供碱度,中和了挥发性脂肪酸的酸度,保证了发酵液pH值稳定在中性范围;再次,脂肪降解速率相对比较缓慢,避免了短时间内有机酸的大量产生,保证了甲烷菌有足够的时间消耗有机酸。上述3种方式充分利用了不同原料在碳氮比、降解速率常数上的互补性,实现了有机酸产生速度、碱度产生速度和甲烷菌利用有机酸的速度相互匹配,保证了稳定高效产甲烷过程的进行。

2.5 参数优化与验证

在建立的回归模型的基础上,以生化产甲烷势、VS降解率为响应指标进行多目标优化,优化的原则是生化产甲烷势和VS降解率越大越好,得到脂肪、淀粉、蛋白质优化数值比为36:30:33,此时预测的生化产甲烷势为415.13 mL/g,挥发性固体降解率为81.63%。为了检验混料设计所得结果的可靠

性,采用上述优化参数条件进行厌氧发酵产甲烷试验。生化产甲烷势、VS降解率分别为451.36 mL/g、79.62%,验证结果与优化结果基本吻合。

在国内,实际的餐厨废弃物的主要营养成分平均比例为淀粉(40%~60%)、蛋白质(15%~17%)和脂肪(6%~24%)^[6]。与优化值相比较,实际的餐厨废弃物蛋白质所占比例偏低、淀粉的比例偏高。过多的淀粉导致餐厨废弃物极易酸化,其厌氧发酵只能承受较低的有机负荷率。根据本研究的结果,为了实现餐厨废弃物高负荷厌氧发酵,需要提高蛋白质的比例或降低淀粉的比例以保证发酵原料的营养成分均衡。在实际工程应用中,可考虑将餐厨废弃物与含氮量较高的原料(如畜禽粪便、剩余污泥等)混合发酵或将发酵完全的沼液部分回流等工艺。

3 结论

(1) 采用脂肪、淀粉和蛋白质单独作为原料时,其厌氧发酵过程分别受到了长链脂肪酸、挥发性脂肪酸和氨氮的不同程度抑制,平均生化产甲烷势分别为345.36、59.80、135.87 mL/g,各占理论产甲烷量的34%、14%、26%。

(2) 3种有机成分经适当比例混合,可以发生协同促进作用,有效避免中间代谢产物的抑制。经优化得脂肪、淀粉、蛋白质最优混合配比为36:30:33,此时最大生化产甲烷势、VS降解率分别为451.36 mL/g、79.62%。

(3) 与最优混合比例相比,实际的餐厨废弃物蛋白质含量偏低、淀粉的含量偏高,为了实现餐厨废弃物高负荷厌氧发酵,应采取与含氮量较高的原料(如畜禽粪便、剩余污泥等)混合发酵或将发酵完全的沼液部分回流等工艺。

参 考 文 献

- 余真,罗文邃.餐厨废弃物资源化概述[C].中国环境科学学会学术年会论文集:第5卷,2013.
- 姜虎,李文哲,刘建禹,等.城市餐厨垃圾资源化利用的问题和对策[J].环境科学与管理,2010,35(6):27-31.
Jiang Hu, Li Wenzhe, Liu Jianyu, et al. Urban problems and countermeasures of kitchen waste utilization[J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(6): 27-31. (in Chinese)
- 刘国治,尤宇嘉.中国餐厨垃圾厌氧处理工艺难点[J].中国沼气,2011,29(6):33-34,50.
Liu Guozhi, You Yujia. The technical difficulties on food waste treating process in China[J]. China Biogas, 2011, 29(6): 33-34, 50. (in Chinese)
- 林云琴,武书彬,梁嘉晋.预处理对造纸污泥和餐厨垃圾混合发酵的影响[J].华南理工大学学报:自然科学版,2012,40(5):71-75,83.
Lin Yunqin, Wu Shubin, Liang Jiabin. Effect of pretreatment on mixed fermentation of paper mill sludge and food waste[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(5): 71-75, 83. (in Chinese)
- 马磊,王德汉,王梦男,等.矿物材料预处理对餐厨垃圾高温厌氧消化过程的影响[J].环境科学学报,2008,28(11):2277-2283.
Ma Lei, Wang Dehan, Wang Mengnan, et al. Effect of mineral pretreatment on thermophilic anaerobic digestion of food waste[J].

- Acta Scientiae Circumstantiae,2008,28(11):2277-2283. (in Chinese)
- 6 李荣平,葛亚军,王奎升,等.餐厨垃圾特性及其厌氧消化性能研究[J].可再生能源,2010,28(1):76-80.
Li Rongping, Ge Yajun, Wang Kuisheng, et al. Characteristics and anaerobic digestion performances of kitchen wastes [J]. Renewable Energy Resources,2010,28(1):76-80. (in Chinese)
- 7 杨渤京,王洪涛,陆文静,等.填埋条件下单组分垃圾厌氧降解特性研究[J].清华大学学报:自然科学版,2008,48(9):65-68.
Yang Bojing, Wang Hongtao, Lu Wenjing, et al. Anaerobic digestion of single material waste for land fill conditions [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology,2008,48(9):65-68. (in Chinese)
- 8 Qunbiao He, Bin Dong, Jianghua Li, et al. Research advances in the inhibition of long chain fatty acid to methanogenic activity in anaerobic digestion system [J]. Resources and Environment,2012,13(11):2389-2393.
- 9 焦秀梅,刘月敏,马华继.温度对蔬菜废弃物厌氧发酵的影响[J].农业环境与发展,2013(3):82-85.
Jiao Xiumei, Liu Yumin, Ma Huaji. Influence of temperature on anaerobic fermentation of vegetable wastes [J]. Agricultural Environment and Development,2013(3):82-85. (in Chinese)
- 10 赵云飞,刘晓玲,李十中,等.餐厨垃圾与污泥高固体联合厌氧产沼气的特性[J].农业工程学报,2011,27(10):255-260.
Zhao Yunfei, Liu Xiaoling, Li Shizhong, et al. Characteristics of high-solids anaerobic co-fermentation for converting food waste and excess sludge to biogas [J]. Transactions of the CSAE,2011,27(10):255-260. (in Chinese)
- 11 葛芳州,董滨,段妮娜,等.污泥与餐厨垃圾的可酸化性能评价指标[J].安徽农业科学,2013,41(1):254-255,265.
Ge Fangzhou, Dong Bin, Duan Nina, et al. Evaluation indicator of the acidified performance for sludge and food waste [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2013,41(1):254-255,265. (in Chinese)
- 12 林增祥,张红漫,严立石,等.混料试验设计在纤维素酶复配中的应用研究[J].生物工程,2009,30(15):169-171.
Lin Zengxiang, Zhang Hongman, Yan Lishi, et al. Mixture design optimization of cellulase complex formulation [J]. Biotechnology, 2009,30(15):169-171. (in Chinese)
- 13 芦鑫,孙强,艾志录,等.混料实验和模糊评价结合优化芝麻花生油茶配方[J].食品工业科技,2012,33(6):258-262.
Lu Xin, Sun Qiang, Ai Zhilu, et al. Optimization of fuzzy evaluation and mixture design in the formula of You Cha made of sesame and peanut [J]. Food Industry and Technology,2012,33(6):258-262. (in Chinese)
- 14 骆海平,吴胜旭,徐勇,等.采用混料设计优化保健型餐桌代糖的配方研究[J].现代食品科技,2012,28(3):316-318.
Luo Haiping, Wu Shengxu, Xu Yong, et al. Optimization of the formula of healthy sugar substitute using mixture design [J]. Modern Food Science and Technology,2012,28(3):316-318. (in Chinese)
- 15 贺延龄.废水的厌氧生物处理[M].北京:中国轻工业出版社,1998.
- 16 国家环境保护总局,水和废水监测分析方法编委会.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2002.
- 17 刘爽,李文哲.猪粪与马铃薯皮渣混合厌氧发酵产氢特性[J].农业工程学报,2012,28(16):197-202.
Liu Shuang, Li Wenzhe. Characteristics of hydrogen production from anaerobic co-fermentation of pig manure and potato pulp [J]. Transactions of the CSAE,2012,28(16):197-202. (in Chinese)
- 18 李东,孙永明,袁振宏,等.有机垃圾组分中温厌氧消化产甲烷动力学研究[J].太阳能学报,2010,31(3):387-390.
Li Dong, Sun Yongming, Yuan Zhenhong, et al. Kinetic study of the mesophilic anaerobic digestion of organic waste components [J]. Acta Energetica Sinica,2010,31(3):387-390. (in Chinese)
- 19 李东,袁振宏,张宇,等.城市生活有机垃圾各组分的厌氧消化产甲烷能力[J].环境科学学报,2008,28(11):2284-2290.
Li Dong, Yuan Zhenhong, Zhang Yu, et al. Anaerobic biochemical methane potential of organic fraction of municipal solid waste [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2008,28(11):2284-2290. (in Chinese)
- 20 任南琪,王爱杰,马放.产酸发酵微生物生理生态学[M].北京:科学出版社,2005.
- 21 吴云.餐厨垃圾厌氧消化影响因素及动力学研究[D].重庆:重庆大学,2009.
- 22 刘晓玲.城市污泥厌氧发酵产酸条件优化及其机理[D].无锡:江南大学,2008.
- 23 Lay J J, Li Y Y, Noike T, et al. Analysis of environmental factors affecting methane production from high-solids organic waste [J]. Water Science and Technology, 1997,36(6-7):493-500.
- 24 Wang Yuanyuan, Zhang Yanlin, Wang Jianbo, et al. Effects of volatile fatty acid concentrations on methane yield and methanogenic bacteria [J]. Biomass and Bioenergy, 2009,33(5):848-853.
- 25 李轶,李磊,张大雷,等.餐厨垃圾和牛粪混合厌氧发酵工艺优化[J].农业机械学报,2012,43(增刊):180-185.
Li Yi, Li Lei, Zhang Dalei, et al. Process optimization of anaerobic fermentation with mixed material of food garbage and cow dung [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(Supp.):180-185. (in Chinese)
- 26 刘爽,李文哲.牛粪与餐厨废弃物混合比例对厌氧发酵产氢的影响[J].农业机械学报,2013,44(3):114-118.
Liu Shuang, Li Wenzhe. Effects of mixing ratio on hydrogen production from anaerobic co-fermentation of cattle manure and food waste [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(3):114-118. (in Chinese)
- 27 吴树彪,郎乾乾,张万钦,等.微量元素对餐厨垃圾厌氧发酵的影响实验[J].农业机械学报,2013,44(11):128-132.
Wu Shubiao, Lang Qianqian, Zhang Wanqin, et al. Effect of trace elements on anaerobic digestion of food waste [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(11):128-132. (in Chinese)

Influence of Organic Ingredients Mixing Ratio on Anaerobic Fermentation

Liu Dan Li Wenzhe Liu Shuang Wang Ming Cao Lan Chang Suqing

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to determine the interaction rule of fat, starch and protein in the process of anaerobic fermentation, the influence of different mixing ratios on the characteristics of methanogenesis and degradation was investigated using mixture design under mesophilic condition. The results revealed that when fat, starch, and protein was used as substrate separately, the methanogenesis performances were inhibited in different degrees, and the mean biochemical methane potentials (BMP) were 345.36, 59.80 and 135.87 mL/g, respectively, which accordingly accounted for 34%, 14% and 26% of theoretical methane production. At the same time, the degradation property was affected apparently. However, the synergistic effects on methanogenesis and degradation were obvious while the three components were mixed as substrates. The regression models between the organic ingredients mixing ratios and BMP and volatile solid (VS) degradation rate were established, furthermore, the parameter optimization was carried out. The optimization result was that as the ratio of fat, starch and protein was 36:30:33, BMP and VS degradation rate were maximum. Experimental verification showed that BMP and VS degradation rate were 451.36 mL/g and 79.62% respectively at optimal ratio.

Key words: Anaerobic fermentation Organic ingredients Mixture design Dynamics

(上接第 130 页)

Change Characteristics and Influencing Factors of Soil Shear Strength during Maize Growing Period

Zheng Zicheng¹ Zhang Xizhou¹ Li Tingxuan¹ Jin Wei¹ Lin Chaowen²

(1. College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

2. Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Science, Chengdu 610006, China)

Abstract: In order to explore the change characteristics of soil shear strength, change characteristics and influence factors of soil shear strength were studied during maize growing period based on the method of field investigation and laboratory. The result showed that in the 0 ~ 5 cm soil layer, soil shear strength increased gradually with the maize growth period and reached the maximum in mature period. However, soil shear strength increased first and then decreased with the maize growth period in the 5 ~ 10 cm and 10 ~ 15 cm soil layers, and soil shear strength reached the maximum in tasseling period. Soil shear strength showed the higher values in the different maize growing periods. The reinforcing effects of the shear strength in the first three soil layers were the better, and the reinforcing rates were the highest in tasseling period of maize. There existed linear function between soil shear strength and the soil moisture, and there were significant positive linear correlations between soil shear strength and soil bulk density, root amount, root length, root volume. At the same time, there were significant positive correlations between the reinforcing values of the shear strength and increasing value of 0 ~ 1 mm root length. Soil shear strength enhanced gradually with the maize growth period, and soil water content, bulk density and maize root had a great influence on soil shear strength. So, it had significant importance for soil erosion control to select the maize variety with 0 ~ 1 mm root, and applied soil and water conservation measures to increase soil water content and bulk density.

Key words: Purple soil Maize Soil shear strength Influence factors