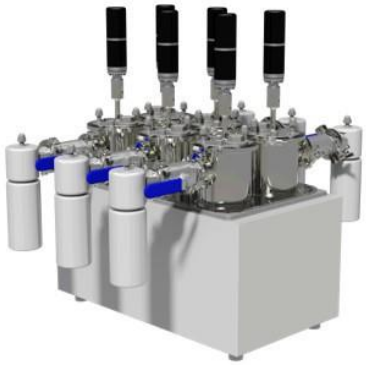
操作手册

for

批次/发酵罐

(Nautilus, Phoenix, Pegasus 模型)



上海芮塔生物科技有限公司

地址：上海市松江区沪松路999号

邮件: srb_rita@autofedreactors.com / edgar.blanco@anaero.co.uk

联系方式: +86 18019131501

目录

1. 介绍 3

2. 设备概述 4

2.1 反应器模块 4

2.2 搅拌器模块 5

2.3 气体流量计模块 5

2.4 Arduino数据记录器 6

3. 操作原理：建立BMP测试 7

3.1 气体流量计的准备 7

3.2 水浴锅的准备 9

4. 如何开始实验和准备底物 10

4.1 预分析 10

4.2 BMP分析和计算： 计算接种物和底物的用量 10

4.3 设置Arduino数据记录器 17

- 数据记录器的使用 17

- 沼气生产曲线 22

- 其它工具 25

5. 建议阅读：BMP实验的生产曲线和局限性（抑制/毒性） 26

6. 常见问题 28

7. 常规检查 30

8. 备件 30

9. 参考文献 30

缩略词列表

BMP	生物产甲烷潜力（Biomethane Potential）	**STP**	标准温度和压力（Standard conditions for Temperature and Pressure）
AD	厌氧消化（Anaerobic Digestion）	**VAC**	交流电压（Volts of Alternating Current）
CSTR	连续搅拌反应器（Continuous Stirred-Tank Reactor）	**VDC**	直流电压（Volts of Direct Current）
HDPE	高密度聚乙烯（High-Density Polyethylene）	**VFA**	挥发性脂肪酸（Volatile Fatty Acids）

1. 介绍

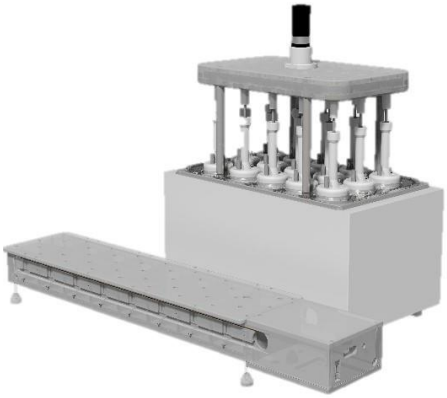


图 1. 标准BMP/RBP装置.

生物产甲烷潜力（Biomethane Potential, BMP[1]）实验是用于评估由底物（基质）产生的潜在甲烷/沼气量的生物学测试。该测试包括两个元素：a）接种物和b）底物。实验以两者的挥发性固体含量的比率（M / F）向接种物投加一定量的底物，然后实时连续测量产生的气体体积。测量得到的气体体积并转换成标准状态（Standard conditions for Temperature and Pressure, STP）下的形式，单位为ml / g VS。

我们从含有底物+接种物的反应器中减去接种物的沼气产量，为了提高了测试的一致性，我们用只装有接种物的反应器来确定接种物的产量基线标准，单位为ml / g $VS_{接种物}$。Anaero BMP设备使用一个单独的电机带动齿轮箱的转动，从而实现了15个1升的反应器同时被搅拌，确保了所有反应器的搅拌强度相同[2]。水浴锅的容量足够大，可完全浸泡15个反应器，因此所有反应器的温度都是保持恒定的。另外，水浴锅顶部还设有一个紧密的水盖，即使在高温模式下进行操作，也能保证浴水蒸发量最小化。搅拌和温度的控制使反应器之间的操作差异最小化，从而提高结果的一致性。此外，大多数连续搅拌反应器（CSTR）的顶端空气压力都比较低，为了反映实际情况，Anaero BMP设备也设置在一个较低顶端空气压力下运行。设备的气体流量计还装有备用的内置电池（最长15小时），以避免停电时数据丢失。

Anaero Technology BMP设备在以下方面优化技术性能：

- **更大的反应器体积：**1升反应器可以容纳更多的底物，使其在测试期间产生更多的气体，以减小产气量过少而带来的误差。
- **搅拌的一致性：**所有反应器以完全相同的速度通过由齿轮箱（15个反应器共用1个电机）驱动的不锈钢/硅树脂桨叶进行搅拌。即使对于高含量干固体（Dry Solids，DS）也能保持一致的搅拌
- **实时气体流量测量：**实时监测的气体流量会自动转换成标准状态下的体积，并且通过气体流量计的内置电池对数据进行保护
- **浴水蒸发损失低：**标准水浴锅带有紧密的顶盖，即使在高温模式下操作，也能最大限度地降低浴水蒸发的损失
- **取样灵活：**在不打开反应器的情况下，可以通过反应器顶部的取样端口进行取样，以测试pH、氧化还原、VFA或补充物质等，而不影响气体监测的结果
- **校准简易：**使用普通的注射器即可随时校准气体流量计，保证了气体测量的准确性
- **灵活的定制端口：**大直径盖帽可以根据需求安装额外的端口，如隔膜或更大的探针（*添加端口需要收取少量的成本费用）。

[1]在英国，残余沼气潜力(RBP)是一种类似的测试。在w004-005的WRAP报告中对其进行了描述，是一种认证了的方法。

[2]一组反应器之间搅拌速度的变化可影响沼气生产的动力学。

2. 设备概述

表 1.BMP设备特点.

反应器数量	15
反应器体积 (L)	1
材料	高密度聚乙烯[3] (High-density polyethylene, HDPE) (反应器)；316不锈钢[4] (搅拌器)；聚碳酸酯[5] (气体流量计) 和 硅树脂 (搅拌桨)，高温耐热性好
搅拌器电机数量	1
功率	水浴锅用110 或者 220V交流电压； 6V备用直流电池，用于气体流量计；搅拌器电机用24 V直流电压
测量精度 (ml)	7 – 10
测量方法	具有实时温度和压力传感器的体积位移法
软件	Arduino，具有自动转换和计算等功能，且开放源代码
尺寸	长570mm X 宽340mm x 高700mm (反应器装置)； 长1000mm X 宽200mm x 高200mm (气体流量计)
原产国	英国

2.1 反应器模块

1) 1升的高密度聚乙烯反应瓶
2) 反应器顶盖
3) 水浴锅
4) 水浴锅盖子
5) 取样口
6) 气体出口
7) 反应器搅拌桨

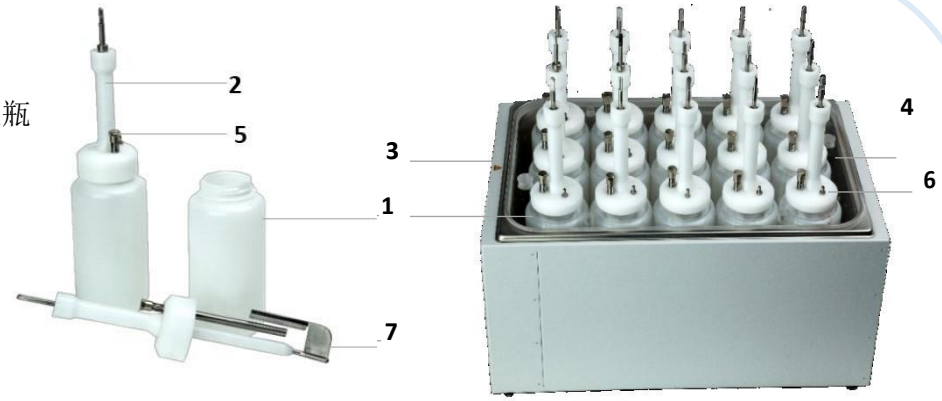


图2.反应器模块

描述：

- 生物反应器：1升宽口高密度聚乙烯瓶，易于操作，可处理更大剂量的底物和接种物，进一步减少潜在的误差。不锈钢/硅树脂桨为每个反应器提供一致和连续的搅拌，并以高固体含量的底物做实验时，能够承受更高的阻力。高密度聚乙烯具有生物学意义，在100℃时仍保持稳定。大多数市售的BMP设备不能保证均匀搅拌所有的反应器，一些学者通过每日手动摇动，摇动表面，磁力搅拌器等方式对反应器进行搅拌，这种做法对BMP的绝对值是可以的，但是限制了快速评估抑制或原料组成对沼气生产动态的影响；
- 水浴：通过将反应器浸入水浴中来控制反应器的操作温度。盖子的设计具有将反应器固定在适当位置和使浴水蒸发损失最小化的功能；

[3]参考： British plastic federation (2017). 'Polyethylene (High Density) HDPE' http://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/hdpe.aspx
[4]参考： British Stainless Steel Association (2001). 'Structural Design of Stainless Steel'. http://www.bssa.org.uk/cms/File/SCI%20291%20Structural%20Design%20of%20Stainless%20Steel.pdf
[5]参考： British plastic federation (2017). 'Polycarbonate PC' http://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/polycarbonate.aspx

2.2 搅拌器模块

8) 搅拌器驱动箱
9) 电机
10) 搅拌器模块支架

描述：所有反应器以完全相同的速度进行搅拌，并使用不锈钢/硅树脂材料，即使对于高固体混合物（例如12%DS），也能保证均匀搅拌。在较高的固体含量下，需要检查电机是否有过载情况，并安装杆以避免反应器旋转。

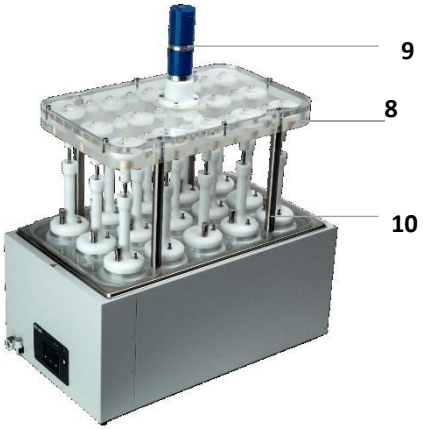


图3. 搅拌和反应器模块。

2.3 气体流量计模块

11) 气体流量计块
12) 滚筒
13) 温度传感器

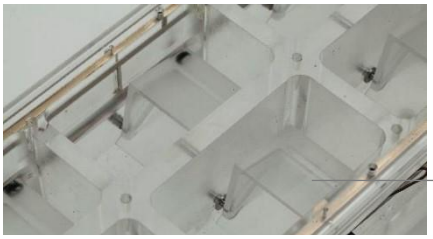


图4. 气流量计滚筒(顶部)和气流量计模块(底部)。

描述：气体流量计使用体积位移的方法测量产生的气体。气体流量计是一个单独的有机玻璃单元格，具有15±0.2升的单元格和气体体积约为7ml的有机玻璃滚筒，和一个备用单元格（16号）用于自动监测温度。 Arduino记录器中的气压计持续监测大气压力，将测得产气量实时转换成在标况下的数据。所有的单元格是相互连接的，使其中的液体保持在完全相同的水平，这样所有水箱中的顶端压力就能保持相等（液体规格：表2）。每个单元个内都有一个滚桶，有效容积约为7ml（用户可以轻松校准 - 见3.1节）。较小的测量体积可以更好地记录测试的动力学，尤其是在高产气的初始阶段之后。但是，测量体积越小，就可能有更多的气泡计算不到，而产生更大的误差。为了尽量减少气体测量过程中的潜在误差，我们将滚筒设计了最小5ml的计量体积。此外，设计过程中，还特别设置了进入单元格的气泡大小，气体进入单元格的进气口直径为1.5mm，从而减小了气泡的大小，并最大限度地减少了无数未计数的零散气泡绕过滚筒的潜在影响。

使用气体流量计的一些注意事项：

- 避免气管下垂，以免导致在反应器中积聚冷凝水和增加反应器顶端压力。
- 避免在个别气体流量计的单元格中连接气袋（收集气体样本）。如果条件允许，使用气袋时将所有单元格都连上，以避免单元格之间的压力差。
- 理想情况下，气体流量计应放置在低于反应器的位置。
- 避免气体管路扭结。
- 水浴的快速冷却会产生真空，从而将水从气体流量计吸入到反应器中，并导致实验产生误差。

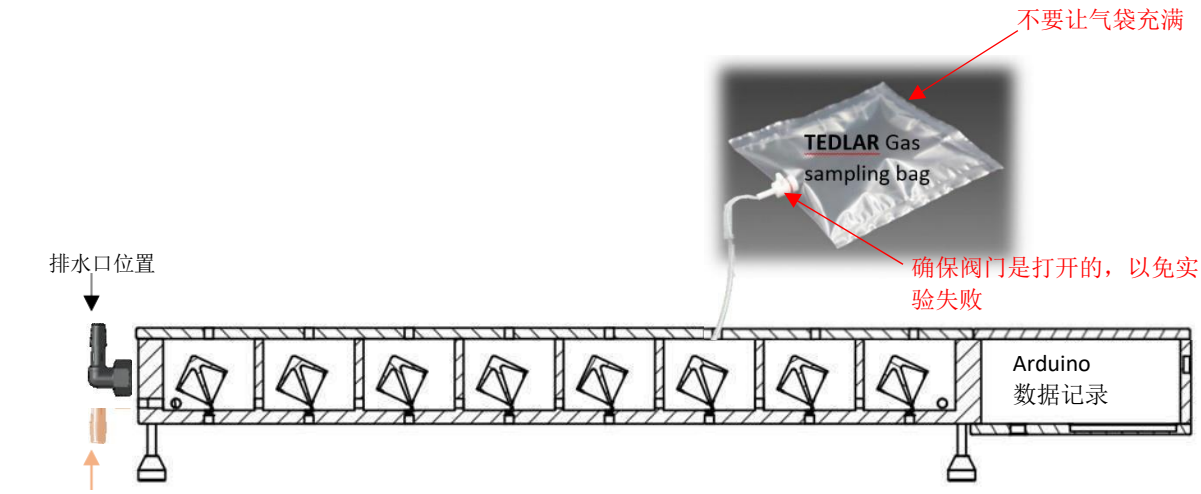


图5. 气体流量计模块示意图

气体流量计内的液体可以是酸性溶液或蒸馏水（用于总沼气测量）或苛性溶液（仅用于CH_4测量）。以下为详细说明。

表2. 气体流量计里的液体.

气体流量计里的液体	pH或摩尔浓度	参数测量
H_2O	-	CH_4, CO_2, H_2S, etc.
Na(OH) + H_2O	-	CH_4 only
HCl + H_2O	pH=2[6]	CH_4. CO_2, H_2S

2.4 ARDUINO数据记录器

IT系统由Arduino 2560 Mega微控制器组成，该微控制器充当数据记录器的主控制器。与此相连的是一个专门设计的“闩锁”，由15个独立的置位/复位锁存器组成。当气体流量计中的一个滚筒翻转时，连接到滚筒的磁铁使簧片开关闭合，与该通道相关联的锁存器存储事件，时间，温度和压力。每个翻转事件都由锁存器在硬件中捕获，保证所有翻滚事件都已记录。

[6] 参考文献：Walker, M. *et al.* (2010). ‘Residual biogas potential test’. Bioresource Technology. 100(24) 6339-6346. http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Residual%20Biogas%20Potential.pdf

3. 操作原则：设置BMP实验

3.1 气体流量计的准备

1. 将软管穿过气体流量计盖子上的孔，并牢固地连接到底部的进气口。

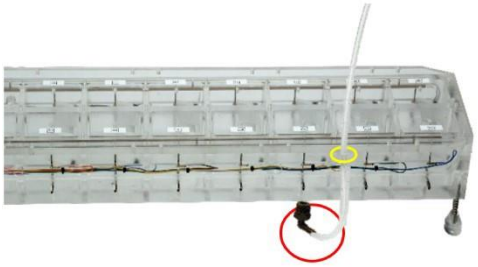


图6. 气体流量计，软管位置详图.

2. 填充气体流量计（见表2）直到液体从溢出点滴落。

图7. 如何填充气体流量计。

3. 校准气体流量计：为了获得准确的结果，首先需要对气体流量计进行调平（可以使用水平仪进行调平）。

3.1 调平气体流量计。

3.2 确保所有滚筒里没有气体。

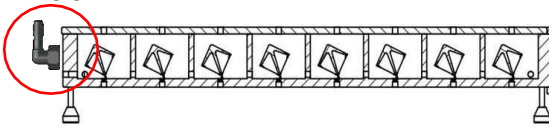
3.3 将排水口方向朝上。

3.4 将注射器接到输气管上，轻轻打入空气，使滚筒翻转一次（无效翻转），然后继续打入空气，使其间断翻转6次。每次校准重复以上步骤3次。

当滚筒翻转时，不要继续按压注射器，以免产生更多的气泡，增加误差。

3.1

3.3



3.4

您可以在开始时快速充满滚筒，然后在翻转之前开始减速。

图8. (3.1) 气体流量计的调平， (3.2) 排水管的操作位置， (3.4) 气体流量计校准。

气体流量计校准样板 Date: 07/12/17

反应器 №	起始体积 ml	结束体积 ml	№ 的翻转次数	mL/翻转
1	56	17.5	6	6.41
2	57	17.5	6	6.58
3	57	18	6	6.50
4	56	17	6	6.50
5	56	17.5	6	6.41
6	57	17.8	6	6.53
7	57.5	17	6	6.66
8	56	17	6	6.50
9	57	17.5	6	6.53
10	57	18	6	6.50
11	57	17.5	6	6.58
12	56	17	6	6.50
13	57.5	17	6	6.66
14	57	18	6	6.50
15	56	17	6	6.50

图9. 气体流量计校准样板。

3.5 记录反应器对应滚筒每次翻转的体积数。这个值为对应滚筒每次翻转测量的沼气量。为此，下面步骤讲解了其中一个可以参照的方法。

3.6 在白纸或计算机中制作包含图9中第一列和第一个行的表格。

3.7 用注射器将空气打入滚筒中，直到第一次翻转。第一次翻转是一个无效的翻滚，以排除水箱中的空气。一旦进行了无效翻转，将注射器上的读数作为起点，并继续打入空气以翻转6次，且6次翻转必须是连续的（每次校准进行3次以上步骤）。在翻转6次后，记下注射器的末端读数，并通过除以注射器位移的距离来计算每次翻转的体积，如下所示：

3.8 使用下面公式计算每次翻转的体积：

$$\frac{ml}{\text{翻转次数}} = \frac{(\text{始点} - \text{重点})}{№\ \text{的翻转次数}} \text{或} \frac{\text{注射器的移动距离}(ml)}{№\ \text{的翻转次数}}$$

$$\text{样品反应器 } №1 \quad \frac{ml}{\text{翻转}} = \frac{(56 - 17.5)}{6} = 6.41\ \frac{ml}{\text{翻转}}$$

3.9 完成后，表中的校准值（mL /翻转）可以输入到电脑上安装的Arduino软件的设置文件中（详细解释参见第3节，以了解BMP设备的操作原理和第4.3节，了解Arduino的详细设置）。

3.2 水浴锅的准备

在安装水浴之前，有必要先准备底物（参见第4节）。

a) 准备好底物后，将所有反应器瓶置于水浴中并将反应器顶盖安装好；

图10. 带有反应器的水浴锅.

b) 盖上水浴锅盖。根据需要，用选定的气体冲洗反应器和气体流量计，并确保气体流量计中的所有滚筒都处于向下位置；

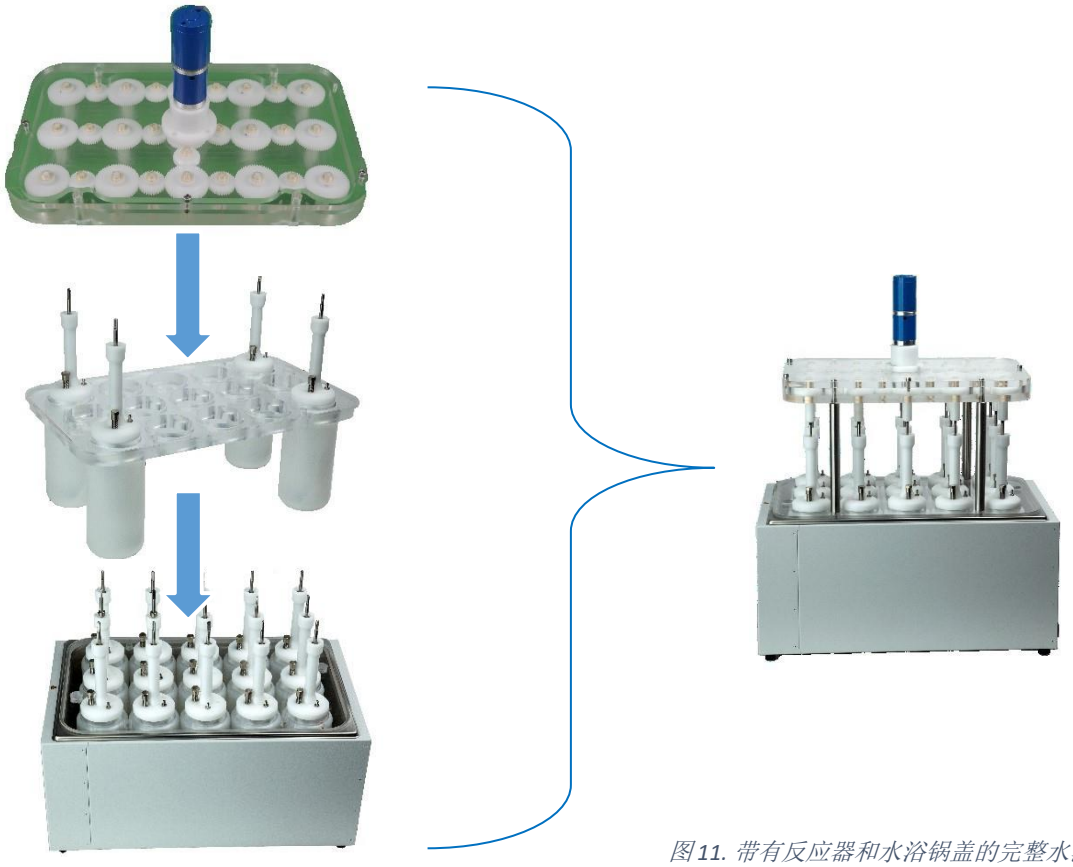


图11. 带有反应器和水浴锅盖的完整水浴锅。

c) 往水浴锅中注水并将其设置为所需温度（最高温度至95℃）；

d) 用软管将所有反应器与气体流量计连接起来；

e) 将反应器齿轮箱安装在反应器瓶盖顶部；

f) 将电机接上电源；

4. 如何开始实验和准备底物

4.1 预分析

图12. 在总固体和挥发性固体分析之前和之后的样品坩埚

➢ **总固体(Total Solids, TS):**

总固体是水分完全除去后底物的干物质。

为了测量TS，用坩埚来测试多个样品（见图3）。用天平称量空坩埚（C）的质量，在加入新鲜原料样品（C+S1）后称量坩埚。将样品在105℃的烘箱中干燥24小时。24小时后取出坩埚，冷却后再称重（C+S2）以测定干固体质量。称重干固体后，含有干固体的坩埚可以用来测定挥发性固体（volatile solids, VS）含量。

➢ **挥发性固体 (Volatile Solids, VS):**

挥发性固体是样品的有机干物质。为了进行VS分析，将含有干物质坩埚放在550摄氏度的马弗炉中4-5小时。之后，待含有灰分的坩埚冷却并再次称重（C+S3）。

4.2 BMP分析与计算：计算底物和接种物的用量

需要测量TS和VS，以了解在BMP实验中需要使用多少底物。我们将提供包含所有BMP实验中所有计算的电子表格。

1. 首先，完成电子表格（标签：TS VS），其中包含为TS和VS完成的测量数据[7].
   - **C**: 空坩埚的质量
   - **C+S1**: 含有底物的坩埚质量
   - **C+S2**: 烘干后含有干物质的坩埚质量
   - **C+S3:** 烧完后含有灰分的坩埚质量

2. 计算没有坩埚重量的底物重量：（这将由电子表格自动计算）

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2	**Sample**	**C**	**C+S1**	**C+S2**	**C+S3**	**S1(wet sample)**	**S2 (dried solids)**	**S3 (ash)**
3	Inoculum	17.7154	24.3332	18.3465	17.9434	6.6178	0.6311	0.2280
4		18.5738	22.9796	18.9884	18.7257	4.4058	0.4146	0.1519
5		19.3955	23.5458	19.7841	19.5376	4.1503	0.3886	0.1421
6	Parsnip	36.2630	53.9958	39.1105	36.5327	17.7328	2.8475	0.2697
7		19.1818	27.1855	20.4689	19.3091	8.0037	1.2871	0.1273
8		13.9632	20.1864	14.9826	14.0654	6.2232	1.0194	0.1022
9	Pulp	36.5546	55.0021	39.5673	36.9387	18.4475	3.0127	0.3841
10		17.9283	24.6893	19.0626	18.0661	6.7610	1.1343	0.1378
11		14.1980	18.8938	14.9868	14.2933	4.6958	0.7888	0.0953
12	S.Beet	35.0987	50.4728	37.3755	35.7591	15.3741	2.2768	0.6604
13		17.7178	25.6202	18.6662	17.9476	7.9024	0.9484	0.2298
14		14.1228	18.4807	14.6628	14.2547	4.3579	0.5400	0.1319
15	Paper	36.4252	46.4265	45.8590	43.0639	10.0013	9.4338	6.6387

TS VS | Set-up calcs

湿样品

S1=(C+S1)-C

烘干后固体

S2=(C+S2)-C

灰分

S3=(C+S3)-C

[7]需要将值写入红色列，黑色和白色值将由电子表格自动计算。

3. 计算：挥发性固体含量(干固体－灰分)，干固体（DS）在湿重中的占比，挥发性固体（VS）
4. 在湿重中的占比，挥发性固体在干固体中的占比。

	A	I	J	K	L
1					
2	**Sample**	**S2-S3 (volatile solids)**	**DS %wet weight**	**VS%wet weight**	**VS %DS wet weight**
3	Inoculum	0.4031	9.54	6.09	63.87
4		0.2627	9.41	5.96	63.36
5		0.2465	9.36	5.94	63.43
6	Parsnip	2.5778	16.06	14.54	90.53
7		1.1598	16.08	14.49	90.11
8		0.9172	16.38	14.74	89.97
9	Pulp	2.6286	16.33	14.25	87.25
10		0.9965	16.78	14.74	87.85
11		0.6935	16.80	14.77	87.92
12	S.Beet	1.6164	14.81	10.51	70.99
13		0.7186	12.00	9.09	75.77
14		0.4081	12.39	9.36	75.57
15	Paper	2.7951	94.33	27.95	29.63

TS VS | Set-up calcs

挥发性固体含量

VS=S2-S3

DS在湿重中的占比

$$DS\%\frac{w}{w}=\frac{S2}{S1}X100$$

VS在湿重中的占比

$$VS\%\frac{w}{w}=\frac{S2-S3}{S1}X100$$

VS在DS中的占比

$$VS\%DS\frac{w}{w}=\frac{S2-S3}{S2}X100$$

5. 计算：DS在湿重中占比的平均值，VS在湿重中占比平均值，VS在DS中占比的平均值。

	A	M	N	O
1		**Average**		
2	**Sample**	**DS % wet weight**	**VS % wet weight**	**VS% DS wet weight**
3	Inoculum			
4				
5		9.44	6.00	63.56
6	Parsnip			
7				
8		16.17	14.59	90.20
9	Pulp			
10				
11		16.64	14.59	87.67
12	S.Beet			
13				
14		13.07	9.66	74.11
15	Paper			
16				
17		94.64	27.97	29.55
18	Straw			
19				
20		91.45	86.90	95.02
21	Chicken Litter			
22				

TS VS | Set-up calcs

例子：

DS在湿重中占比的平均值

$$DS\%\frac{w}{w}=\frac{J3+J4+J5}{3}$$

VS在湿重中占比平均值

$$VS\%\frac{w}{w}=\frac{K3+K4+K5}{3}$$

VS在DS中占比的平均值

$$VS\%DS\frac{w}{w}=\frac{L3+L4+L5}{3}$$

6. 打开第二个选项卡（设置计算）。 接种物的VS值（%，w / w）将会显示在选项卡的顶部。
7. 为了更容易区分不同反应器中的底物，可以在电子表格中给每个反应器添加相应样品的描述。同理，必须给每个反应器设置编号（见图12），这样就可以在进行BMP分析时区分它们。

8. 使用电子天平称量空的HDPE瓶，并给每个反应器设置编号。

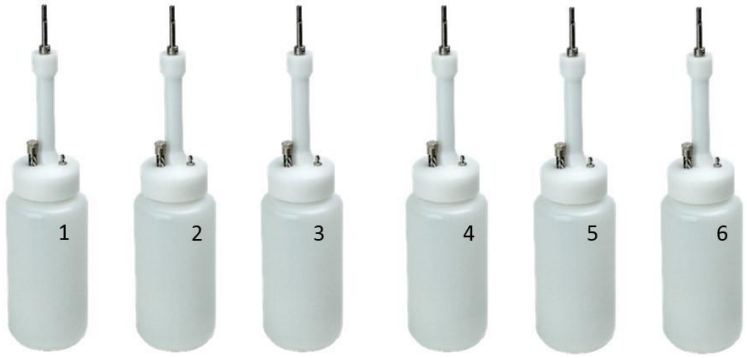


图13. 反应器编号的设置

9. 称取“X”克接种物（接种物的目标质量= 650g）装到反应器（15个1升瓶子）中并再次称重（实际重量）。将实际重量填在“Set-up calcs”选项卡中（例如650.3g）。电子表格将自动计算接种物用量的VS值。

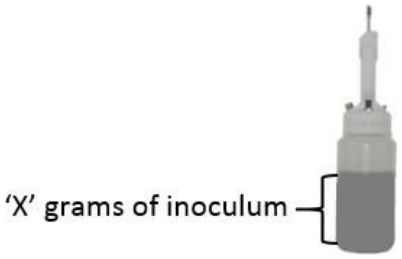


图14. 装有接种物HDPE瓶

10. **设置底物和接种物的比例**[8]（例如1:4）。 比例不要超过1：10（参考文献1可了解如何设置比列）。

	A	B	C	D	E	F
1	Inoculum VS (%w/w)	6.00				
2						
3						
4	Sample description	Reactor number	Target weight of inoculum (g)	Actual weight of inoculum (g) added to reactors	Inoculum mass VS (g)	Substrate:inoculum (1:x)
5	Inoc1	1	650	650.3	39.00	
6	Inoc2	2	650	650.4	39.01	
7	Inoc3	3	650	650.4	39.01	
8	Parsnip	4	650	650.7	39.03	4
9	Pulp	5	650	650	38.98	4
10	S.Beet	6	650	650.7	39.03	4
11	Paper	7	650	650.1	38.99	4

TS VS | Set-up calcs

例子：

接种物用量的VS

$$\text{接种物用量的VS} = \text{接种物 VS}\left(\%\frac{w}{w}\right) \times \frac{\text{接种物的实际重量 (g)}}{100} = 6.00 \times \frac{650.3}{100} = 39\ g$$

底物：接种物 → 1:4

[8]电子表格会自动计算黑白列的值；红色列必须手动填写

11. 基于接种物和所用底物的VS比，可以计算添加到15个1升反应器中的底物的量，假设接种物和所用底物的VS比为1：4，底物用量的VS则为接种物用量VS的四分之一。

	A	F	G	H	I	J
1	Inoculum VS (%w/w)					
2						
3						
4	Sample description	Substrate:inoculum (1:x)	Target sample VS (g) to achieve the ratio in Column F	Sample VS (%wet weight)	Target weight of sample (g) to achieve the ratio in column F	Actual sample weight (g) added to the reactors
5	Inoc1		-	-	-	-
6	Inoc2		-	-	-	-
7	Inoc3		-	-	-	-
8	Parsnip	4	9.76	14.59	66.87	66.89
9	Pulp	4	9.75	14.59	66.80	66.79
10	S.Beet	4	9.76	9.66	101.00	101.3
11	Paper	4	9.75	27.97	34.85	34.9

TS VS | Set-up calcs

例子：

底物用量的目标VS（g）：

$$\text{底物用量的目标 VS (g)} = \frac{\text{接种物用量VS (g)}}{\text{底物与接种物的VS比}} = \frac{39}{4} = 9.76$$

底物 VS (w/w %)：在前一个选项卡（TS VS）中计算底物的目标质量（g）以达到设定的比例：

$$\text{目标底物质量 (g)} \quad \frac{\text{目标底物 VS (g)x100}}{\text{底物的占比VS (\%}\frac{w}{w})} = \frac{9.76\times100}{14.59} = 66.87$$

12. 按照计算的样品量称取底物（底物的目标重量（g）以达到固定的比例），然后加入到各个反应器中，对它们进行称重并将值填入“加入反应器”列的“实际样品重量（g）”中。

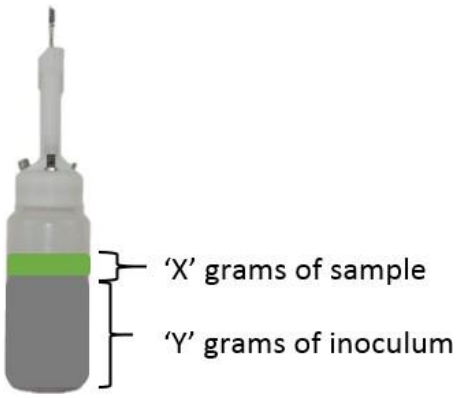


图 15. 装有接种物和底物的 HDPE

13. 电子表格将根据VS自动计算底物质量。

	A	F	G	H	I	J	K
1	Inoculum VS (%w/w)						
2							
3							
4	Sample description	Substrate:inoculum (1:x)	Target sample VS (g) to achieve the ratio in Column F	Sample VS (%wet weight)	Target weight of sample (g) to achieve the ratio in column F	Actual sample weight (g) added to the reactors	Sample mass VS (g)
5	Inoc1		-	-	-	-	-
6	Inoc2		-	-	-	-	-
7	Inoc3		-	-	-	-	-
8	Parsnip	4	9.76	14.59	66.87	66.89	9.759
9	Pulp	4	9.75	14.59	66.80	66.79	9.745
10	S.Beet	4	9.76	9.66	101.00	101.3	9.786
11	Paper	4	9.75	27.97	34.85	34.9	9.762

TS VS | Set-up calcs

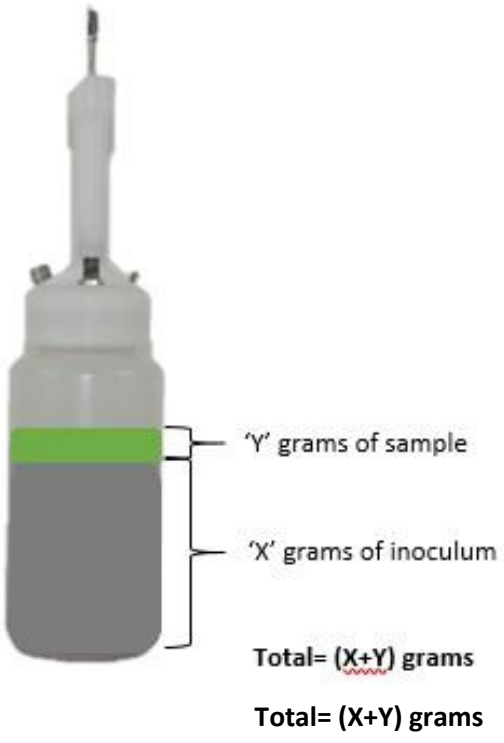
例子：

底物用量 VS:

$$\text{底物用量 VS (g)} = \frac{\text{底物用量 (g)}\times\text{底物VS在湿重中占比}}{100} = \frac{66.89 \text{ x } 14.59}{100} = 9.759$$

14. 最后安装反应器的顶盖并将所有反应器瓶放入水浴锅中（按照3.3节中的说明）。

气体流量计将计算由底物产生的沼气总量。由底物产生的气体可以根据下面公式计算。如果存在抑制/毒性问题，则有底物产生的沼气量可能是负值（参见第5节：建议阅读以了解更多关于抑制和毒性的信息）：



Total= (X+Y) grams

X+Y产生的总气体量 = a

X产生的总气体量 = b

Y (底物)产生的总气体量 = a-b

例子2：

X+Y产生的总气体量= 250 L Kg VS^{-1}

X产生的总气体量= 200 L Kg VS^{-1}

Y (底物)产生的总气体量= 250 – 200= 50 L Kg VS^{-1}

例子3：

X+Y产生的总气体量= 200 L Kg VS^{-1}

X产生的总气体量= 250 L Kg VS^{-1}

Y (底物)产生的总气体量= 200 – 250= - 50 L Kg V S^{-1}

→ **负值** (见第5节)

例子4:

底物：假设我们我们需要测量食物垃圾的生物产甲烷潜力，而我们的食物垃圾样本有20克，其VS含量为10%。那么，我们将有2g挥发性固体（VS）作为底物，并且这些底物都是可降解的。

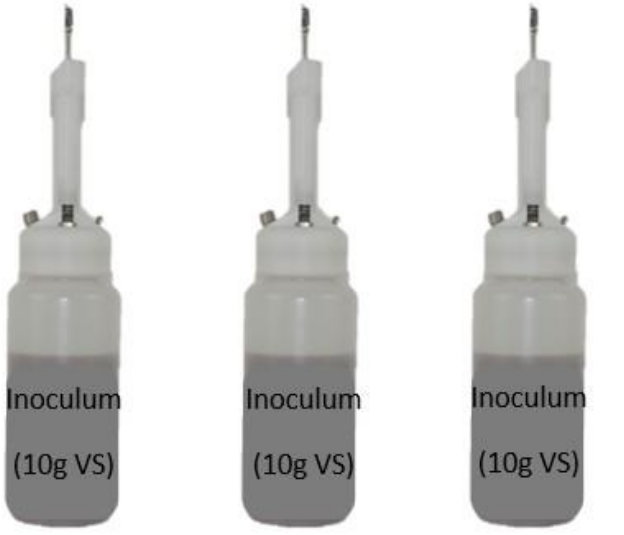
食物垃圾

底物 (2gVS)

由于我们想要评估反应器在投加这种底物时会产生多少沼气，因此需要另外设置只投加接种物的反应器作为对照组进行测试。

当使用过多的底物时，接种物会因底物浓度过高而受到冲击，并且导致沼气产生的动力学数据损失，所以我们建议接种物和底物的挥发性固体（VS）比控制在4：1和10：1之间，以尽量减少有机物对接种物的造成冲击的可能性。 在这个例子中，我们将使用5：1的比例。

接种物：接种物的VS含量为2.5%（每1千克液体接种物中就有25克挥发性固体，而我们假定这25克挥发性固体都是厌氧微生物），在下面例子中，我们有400g接种物，换算过来，我们就总共有10g VS的厌氧微生物作为接种物。



1001ml biogas **1020 ml biogas** **1005 ml biogas**

1001ml biogas **1020 ml biogas** **1005 ml biogas**

从上述结果可以得到以下接种量：

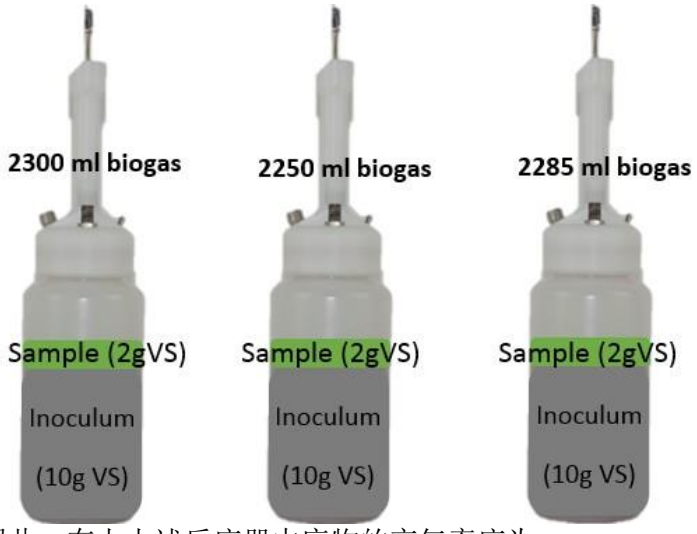
1001ml/10gVS
1020ml/gVS ➔ 100.1, 102, 100.5
1005ml/gVS

平均接种量=
(100.1 + 102 +100.5)/3 = **100.86 ml**
沼气/ g VS 接种物
(或 L biogas /kg VS)

测量底物的潜在沼气产量：为了进行实验，首先我们需要测量单独接种物产生的沼气量（L biogas /kg VS）。这些工作通过设置三个仅含有接种物的反应器完成，并在30天的时间内测量沼气产量，或者与正式实验时间相同。

我们从"接种物+底物的反应器"中减去实验中接种物产生的沼气量。 这样做我们就可以得到底物的沼气潜力，单位为L biogas /kg VS。

我们一式三份测量每个样品或接种物以获得一致的结果。 这是因为这是一种生物学测试，易受不可预测的变异性影响，并且样品可以是具有偏差可能性的不同化合物的混合物，例如，如果存在块状样品。 切勿仅使用一个控制反应器进行测试！



我们已知接种物平均沼气产量为100.86ml/g $VS_{接种物}$，并且我们在每个反应器中有10g VS接种物， **所以每个含有底物的反应器中有1008.6ml 沼气为对应接种物所产生，**如图为已经接种的反应器（灰色区域）。

因此，在上上述反应器中底物的产气率应为：

2300ml 总产气 - 1008.6ml 接种物产生的沼气 = 1291.4 ml 沼气/2 g 底物: 638.2ml/gVS

2250ml 总产气 - 1008.6 ml接种物产生的沼气= 1241.1 ml 沼气/2 g 底物: 620.5ml/gVS

2285ml 总产气 - 1008.6 ml 接种物产生的沼气 = 1276.4 ml沼气/2 g 底物: 638.2ml/gVS

因此，底物的平均产沼气潜力等于：(638.2+620.5+638.2)/3 = **632.3ml/g VS**

（底物的平均产沼气潜力是按日计算的，结果形成累积图，且通常实际值会更大）。

如果在正式实验时，底物产生的沼气量减去接种物产生的气体量为正值，则会显示一个向上趋势的累计图。

但是，当底物中存在抑制或毒性物质时，底物产生的沼气量减去接种物产生的气体量将会为负值，则累积图的趋势将会向下（见第5节）。

4.3 设置Arduino数据记录器

Arduino数据记录器里装有BMP280气压计，microSD读卡器和热电偶放大器。所有翻转事件都会写入microSD卡上的日志文件里，包括通道号，事件发生的时间，发生时的气压以及热电偶记录的温度。为了便于使用，其它的日志文件（例如，在过去24小时内发生的事件概括）也存储在microSD卡上。我们还开发了一套Python程序来简化数据记录器的设置和操作。

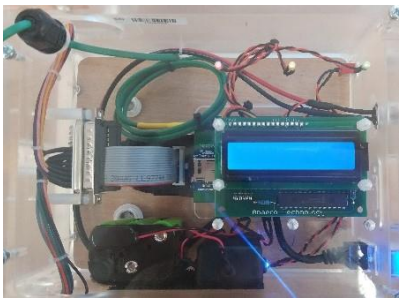


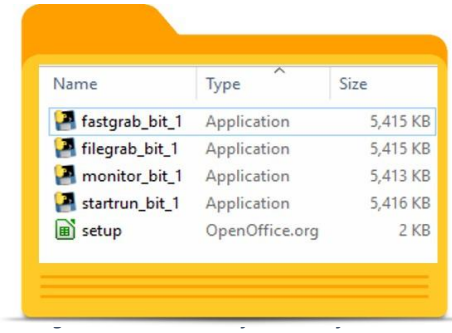
图16. Arduino数据记录器

数据记录器的使用

a) Anaero提供的Arduino软件含有两个版本，包括适用于32位操作系统的版本和适用于64位操作系统的版本。在安装软件之前，检查计算机处理器（也称为CPU）的属性，看它是32位还是64位[9].

b) 根据您的计算机属性，从我们提供的主软件文件夹中复制正确版本的Arduino软件（64位文件夹或32位文件夹）并将其粘贴到桌面上。 重命名复制的文件夹：右键单击文件夹，选择复制，右键单击桌面并选择粘贴，然后右键单击新文件夹，选择重命名并将文件夹重命名为相关名称（例如：Gas_Flow_1或Gas_Flow_2）。

c) **打开你刚刚创建的文件夹[10]** ，里面应该包含四个Python程序(分别是**filegrab，fastgrab, monitor 和 startrun**，文件格式为. exe)和setup.csv文件的模板。



d) 以Excel格式打开**setup文件**（通常计算机将默认通过Excel打开文件夹）。设置文件将以电子表格的形式显示。**setup文件**允许样品名称与15个通道中的每一个相关联，指定正在使用哪些通道并将它们命名，哪些通道是“仅含有接种物”的，每个通道的接种物的挥发性

[9]打开计算机的主菜单，按“您的计算机”，右键单击“C：”，转到属性并检查系统类型（32位或64位）。
[10]如果您运行的是多个系统，则每个系统都需要一个不同的文件夹，每个文件夹应包含相关的setup.csv和三个.exe文件。

固体质量和底物的挥发性固体质量（默认仅含有接种物通道的底物的挥发性固体质量为零）。最后一栏包含每个通道的滚筒校准容积。

	A	B	C	D	E	F
1	Sample description	In service	Inoculum only	Inoculum mass VS (g)	Sample mass VS (g)	Tumbler volume (ml)
2	Inoculum 1	1	1	15.46	0	6.41
3	Inoculum 2	1	1	15.48	0	6.58
4	Inoculum 3	1	1	15.5	0	6.5
5	Cellu 10	1	0	14.27	2.39	6.5
6	Cellu 11	1	0	14.28	2.42	6.41
7	Cellu 12	1	0	14.27	2.38	6.53
8	1623 Mar	1	0	15.31	3.92	6.66
9	1623 Mar	1	0	15.32	3.87	6.5
10	1623 Mar	1	0	15.3	3.83	6.53
11	1624 Agri	1	0	11.85	2.97	6.5
12	1624 Agri	1	0	11.8	2.98	6.58
13	1624 Agri	1	0	11.8	2.98	6.5
14	54 Bryn 1	1	0	11.92	3.1	6.66
15	54 Bryn 2	1	0	11.9	2.95	6.5
16	54 Bryn 3	1	0	11.88	2.96	6.5

图18. 数据CSV格式设置电子表格文件。

e) **校准气体流量计并将校准值输入到设置文件**（参见2.3节了解气体流量计的校准）。

f) 编辑电子表格的内容以匹配您的系统/实验：输入在气体流量计校准期间获得的mL/翻转值（第2.3节）（图18中的列）。输入已在计算表中得到的接种物质量VS（g）和底物质量VS（g）（第4.1和4.2节 – 即样品电子表格中以黄色突出显示的列 E和列 K）。

g) **保存Excel电子表格，**单击文件 – >保存。 软件会提示您检查是否要以.csv格式保存文件。 单击“使用TEXT CSV格式”。**关闭Excel电子表格。**

h) 通过编辑提供的模板生成setup.csv文件后，可将其传到Arduino[11]并使用“startrun”程序启动运行。**确保气流系统已经接上电源（图19→1至2）。使用USB数据线（3至4）将气体流量计与笔记本电脑相连，**然后在步骤1创建的文件夹中双击startrun图标。

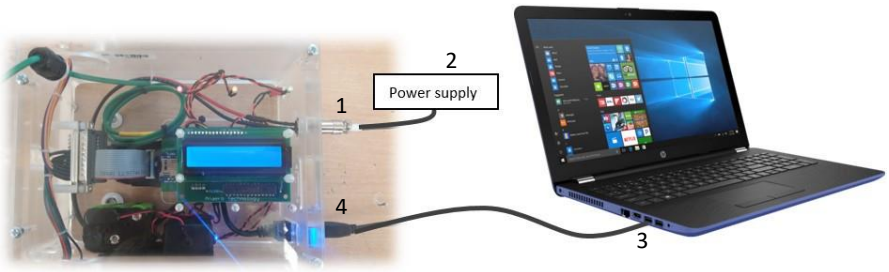
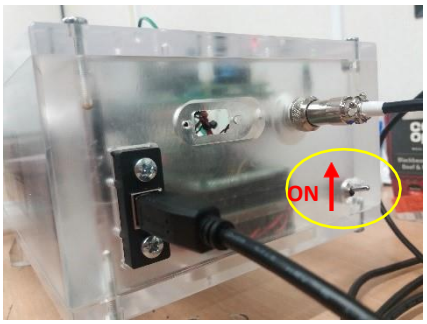


图19. Arduino连接。 数字为连接顺序。

[11]将计算机连接到Arduino数据记录器时，会出现连接不上的情况，请务必断开并重新连接Arduino端（即方形“type B”USB插头），请勿断开重连计算机段（即方形“type A”USB插头）。 如果您在计算机端拔下或重新连接，则有可能在连接USB时出现Arduino重置的情况 - 如果断开重连Arduino端，这种情况发生的概率就会大大减少。

i) 确保Arduino的ON / OFF按钮处于ON位置（参见图20）。



j) Startrun程序初始化日志记录系统并将setup.csv文件中的数据传输到系统。系统将询问您将使用的计算机的哪个端口（显示为COM +数字）。对于图21的示例，端口名称为COM10（系统将告诉您使用的是哪个端口），只需编写COM10并按Enter键即可[12].

```
>>> ********************************************************************************
>>> anaero technology - www.anaero.co.uk - gas flow monitor startup utility
>>>
>>> serial ports being used on this machine are:

    ('COM10', 'Arduino Mega 2560 (COM10)', 'USB VID:PID=2A03:0042 SNR=9533633363535130 41C2')

>>> enter the name of the COM port the Arduino Mega 2560 is connected to
>>> e.g. COM1 or COM2 or COM3 or COM4 or similar, and then press enter
```

图21. Arduino startrun.

k) ARDUIO将询问您是否要复制或删除旧数据。直接按“D”或“enter”键删除你的数据，或复制后删除（见图22）。

j) 一旦文件被复制或删除后，系统就会完成自检程序，并准备传输在setup.csv文件中的数据。

```
>>> ********************************************************************************
>>> anaero technology - www.anaero.co.uk - gas flow monitor startup utility
>>>
>>> serial ports being used on this machine are:

    ('COM10', 'Arduino Mega 2560 (COM10)', 'USB VID:PID=2A03:0042 SNR=9533633363535130 41C2')

>>> enter the name of the COM port the Arduino Mega 2560 is connected to
>>> e.g. COM1 or COM2 or COM3 or COM4 or similar, and then press enter

>>> COM10
>>> opening serial port connection to arduino

 2017-12-01 11:26:27

Arduino has been reset

Arduino running - starting self test

Running Bittern software build

Internal Temp = 24.06
Thermocouple reading is 23.25C
Barometer OK
Air pressure is: 1022.45 hPa

Checking SD card...SD card present

Card type: SDHC

Files found on the card (name and size in bytes):

Opening SD card for file read/write

SD card opened OK

*** This program loads a new setup file and starts a complete new run ***
*** if you continue, existing log files on the SD card will be deleted ***

*** Do you want to save existing log files to your computer before continuing? ***

To save the existing log files from SD card on your computer before new run starts press Enter now...

OR

To delete existing log files on SD card and start new run, press d followed by the Enter key...
```

图22. Arduino startrun 2.

[12]如果与笔记本电脑的Arduino COM连接有任何问题，请尝试连接计算机的其它端口。

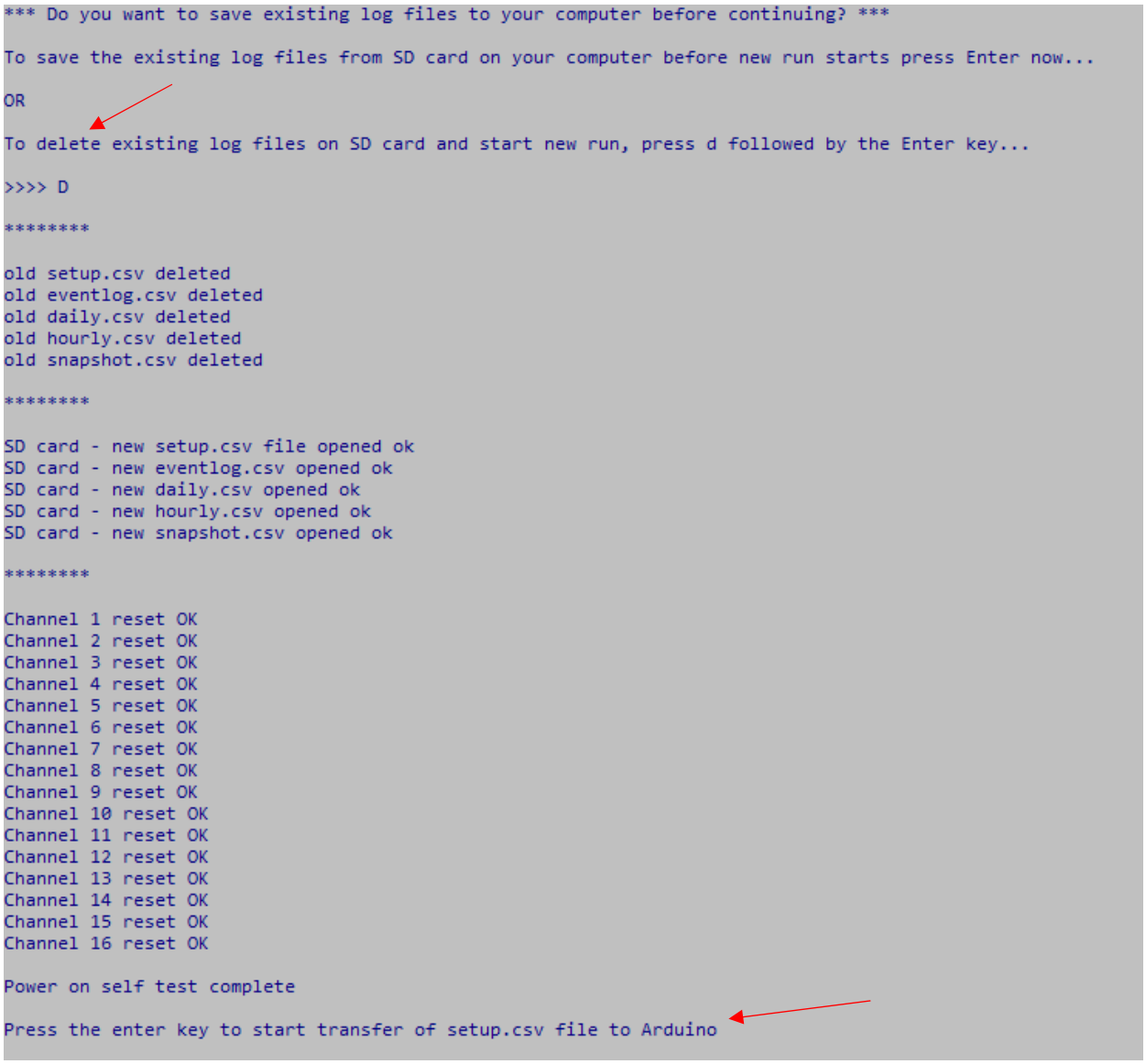


图23. Arduino startrun 3.

k) **再次按下“enter”以开始传输过程**（完成此操作后，日志记录系统存储的数据将写回控制台并返回到setup.csv文件）。数据记录器会对收到的数据执行范围检查，如果发现意外或超出范围的事项，将发出警告。检查写回的数据是否与发送的数据相匹配非常重要，可以通过检查控制台上显示的信息或打开Libre Office中的setup.csv文件来完成。从数据记录器写回的数据会被附加到文件中。

```
Press the enter key to start transfer of setup.csv file to Arduino

>>>>

Inoculum 1,1,1,15.46,0,5
Inoculum 2,1,1,15.48,0,5.2
Inoculum 3,1,1,15.5,0,5.17
Cellu 10,1,0,14.27,2.39,5.17
Cellu 11,1,0,14.28,2.42,5.2
Cellu 12,1,0,14.27,2.38,5.2
1623 Mar,1,0,15.31,3.92,5.17
1623 Mar,1,0,15.32,3.87,5
1623 Mar,1,0,15.3,3.83,5
1624 Agri,1,0,11.85,2.97,5
1624 Agri,1,0,11.8,2.98,5.17
1624 Agri,1,0,11.8,2.98,5.17
54 Bryn 1,1,0,11.92,3.1,5.17
54 Bryn 2,1,0,11.9,2.95,5.17
54 Bryn 3,1,0,11.88,2.96,5.17
End of data,,,,,

Data tables loaded

Setup file written to SD card

starting setup.csv writeback

Inoculum 1,1,1,15.46,0.00,5.00
Inoculum 2,1,1,15.48,0.00,5.20
Inoculum 3,1,1,15.50,0.00,5.17
Cellu 10,1,0,14.27,2.39,5.17
Cellu 11,1,0,14.28,2.42,5.20
Cellu 12,1,0,14.27,2.38,5.20
1623 Mar,1,0,15.31,3.92,5.17
1623 Mar,1,0,15.32,3.87,5.00
1623 Mar,1,0,15.30,3.83,5.00
1624 Agri,1,0,11.85,2.97,5.00
1624 Agri,1,0,11.80,2.98,5.17
1624 Agri,1,0,11.80,2.98,5.17
54 Bryn 1,1,0,11.92,3.10,5.17
54 Bryn 2,1,0,11.90,2.95,5.17
54 Bryn 3,1,0,11.88,2.96,5.17

writeback completed - setup.csv closed

Press the enter key to start data logging


Data tables loaded

Setup file written to SD card

starting setup.csv writeback

Inoculum 1,1,1,15.46,0.00,5.00
Inoculum 2,1,1,15.48,0.00,5.20
Inoculum 3,1,1,15.50,0.00,5.17
Cellu 10,1,0,14.27,2.39,5.17
Cellu 11,1,0,14.28,2.42,5.20
Cellu 12,1,0,14.27,2.38,5.20
1623 Mar,1,0,15.31,3.92,5.17
1623 Mar,1,0,15.32,3.87,5.00
1623 Mar,1,0,15.30,3.83,5.00
1624 Agri,1,0,11.85,2.97,5.00
1624 Agri,1,0,11.80,2.98,5.17
1624 Agri,1,0,11.80,2.98,5.17
54 Bryn 1,1,0,11.92,3.10,5.17
54 Bryn 2,1,0,11.90,2.95,5.17
54 Bryn 3,1,0,11.88,2.96,5.17

writeback completed - setup.csv closed

Press the enter key to start data logging

>>>>

--- data log started ---

-------------------------------------
```

图24. Arduino转移过程。

l) 确保Arduino数据记录器已经连上笔记本电脑且已经接上电源。需要注意，到现阶段，所有反应器都应在水浴锅中，并且用气管连接到气体流量计。若要开始记录气体流量，请按“enter”键 - 系统现在已经处于开启状态并开始记录所有翻转事件。 当检测到翻斗事件时，将向控制台发送更新信息。在翻转事件之间，控制台上的时间戳每10秒更新一次。要离开startrun程序，按键盘上的任意键即可（需要几秒钟来整理和关闭）。

m) Arduino收集沼气的产量数据可以在您的笔记本电脑中下载。

沼气生产曲线

n) **绘制数据透视图：**将文件daily.csv复制到桌面，使原始文件保留在测试目录中，然后双击打开桌面上的daily.csv文件。

o) 删除第一行（“file uploaded 2017-11-28...”）和最后一行（显示“writeback completed 2017-11-28 ...”）。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Channel nu	Name	Timestamp	Days	Hours	Mins	In service	Tips this da	Vol this day	Net vol this day (ml/g)	
2	1	inoculum	86400028	1	0	0	1	9	41.96	0	
3	2	inoculum	86400028	1	0	0	1	9	42.78	0	

图 25. 从Arduino 下载的Excel数据文件

p) 现突出显示您想要绘制的所有数据（整个表格）并选择数据透视表，然后单击确定。

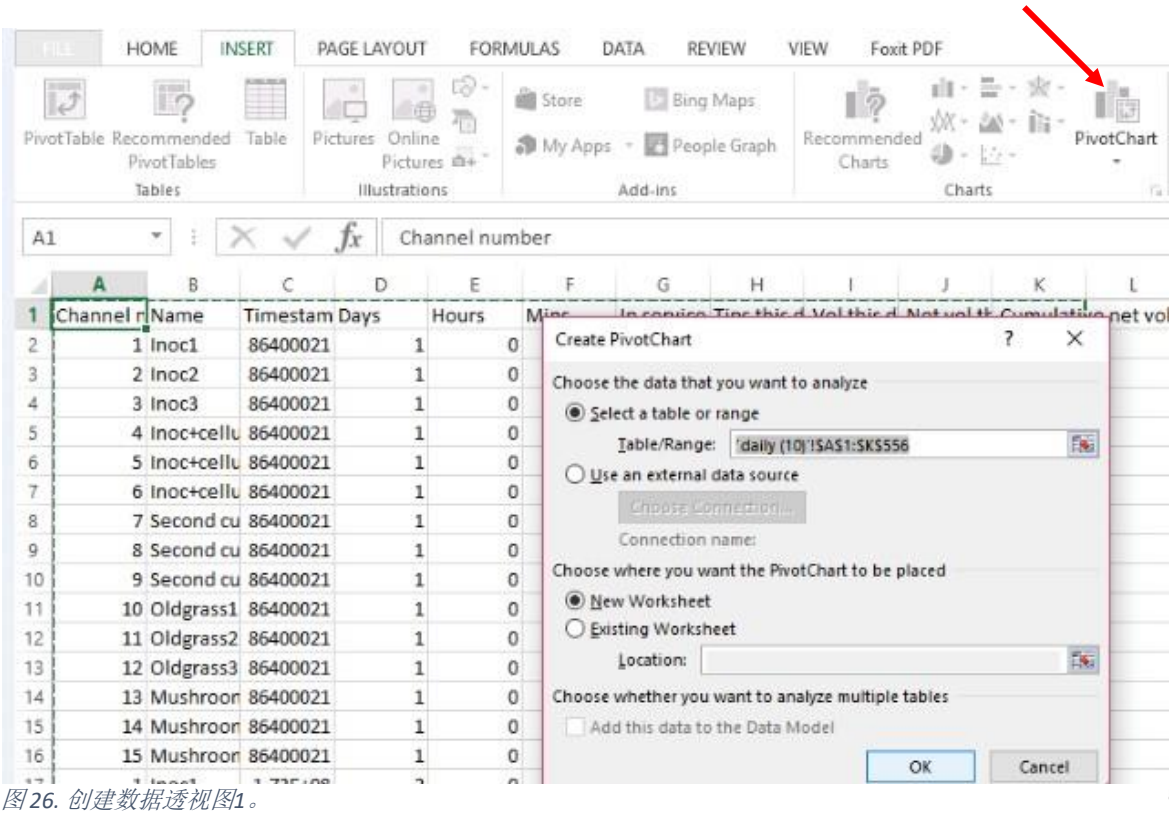


图 26. 创建数据透视图1。

q) 使用数据透视表创建一个新选项卡，如图27所示。

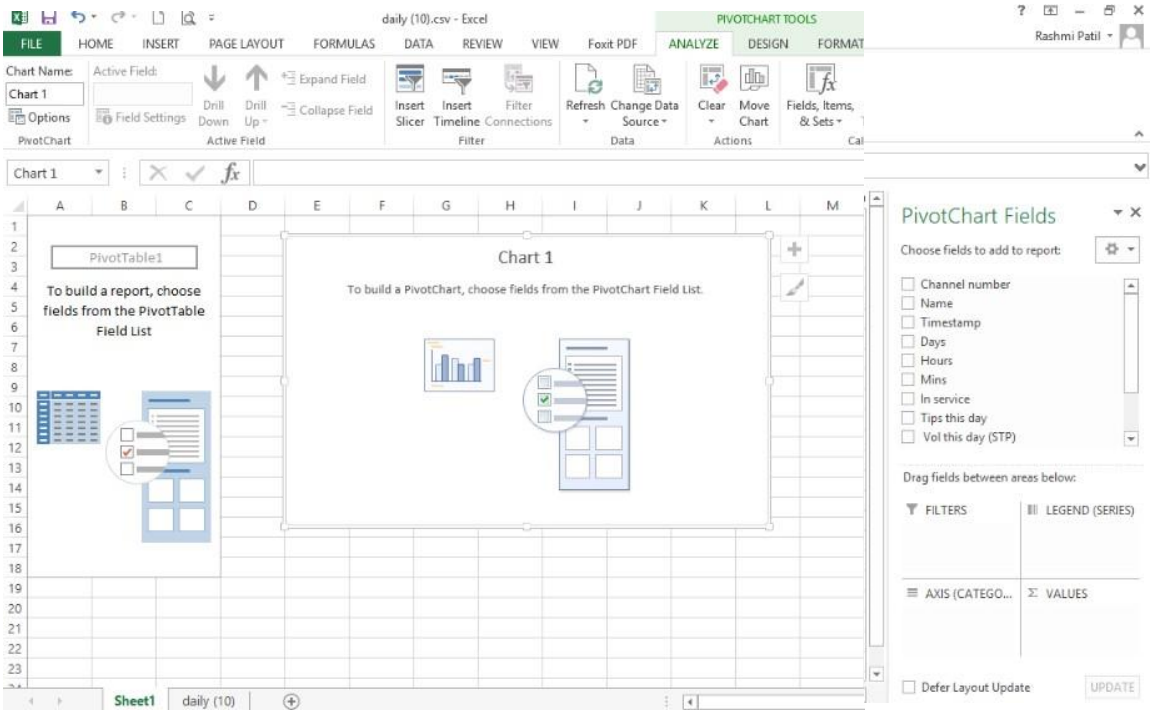


图27. 创建数据透视图 2。

r) 选择数据透视表字段并将这些字段拖到下面的区域（参见图28）。

区域	数据透视表字段
• 图例：	通道编号
• 轴：	天数
• 值：	累积净体积的总和

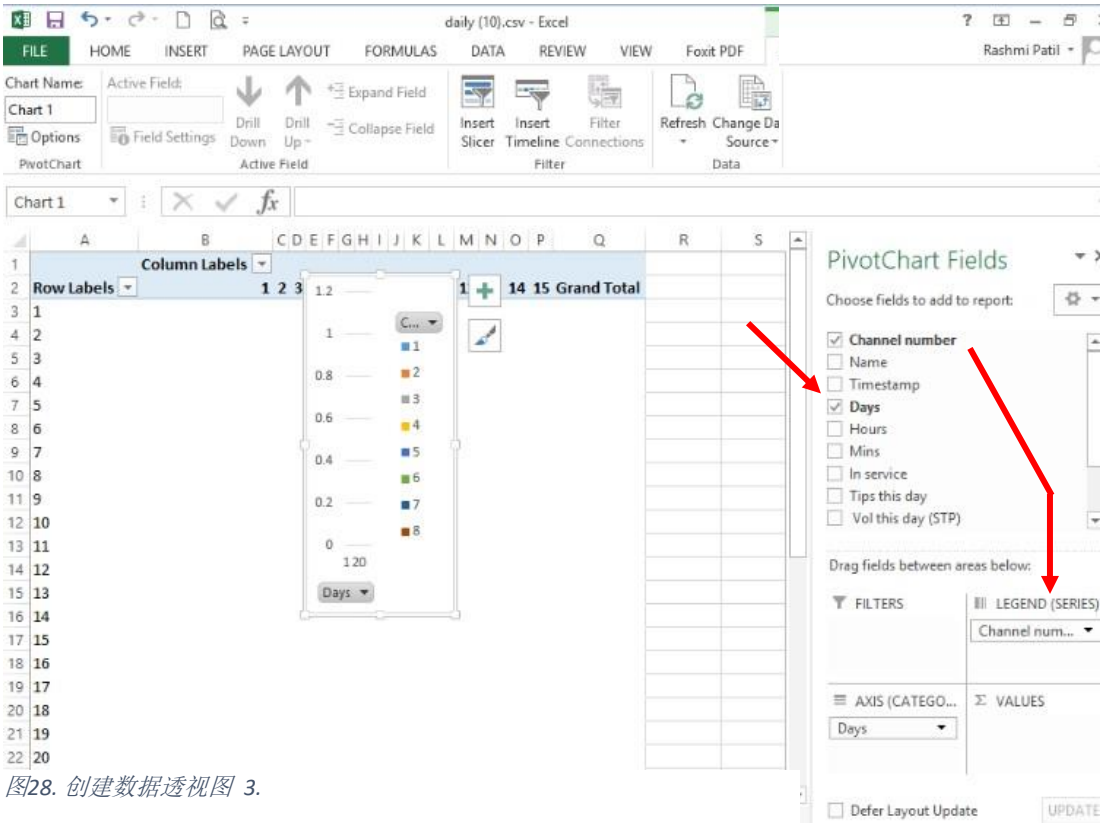


图28. 创建数据透视图 3.

s) 将图表移动到新选项卡（参见图29）并将图表类型更改为：折线图（参见图30）。

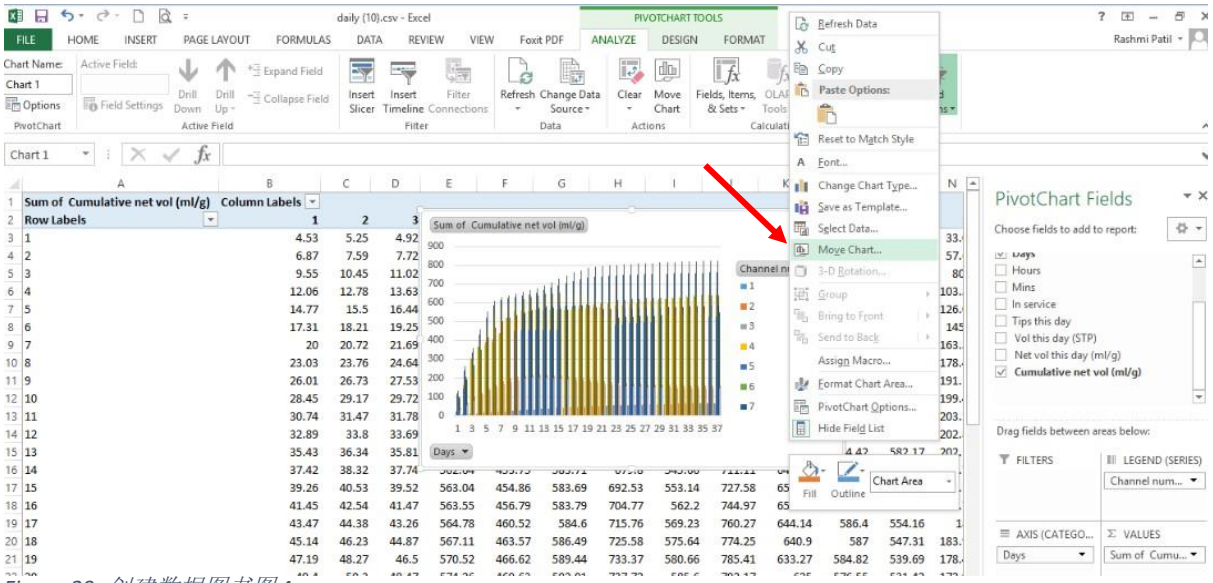


Figure 29. 创建数据图书图4

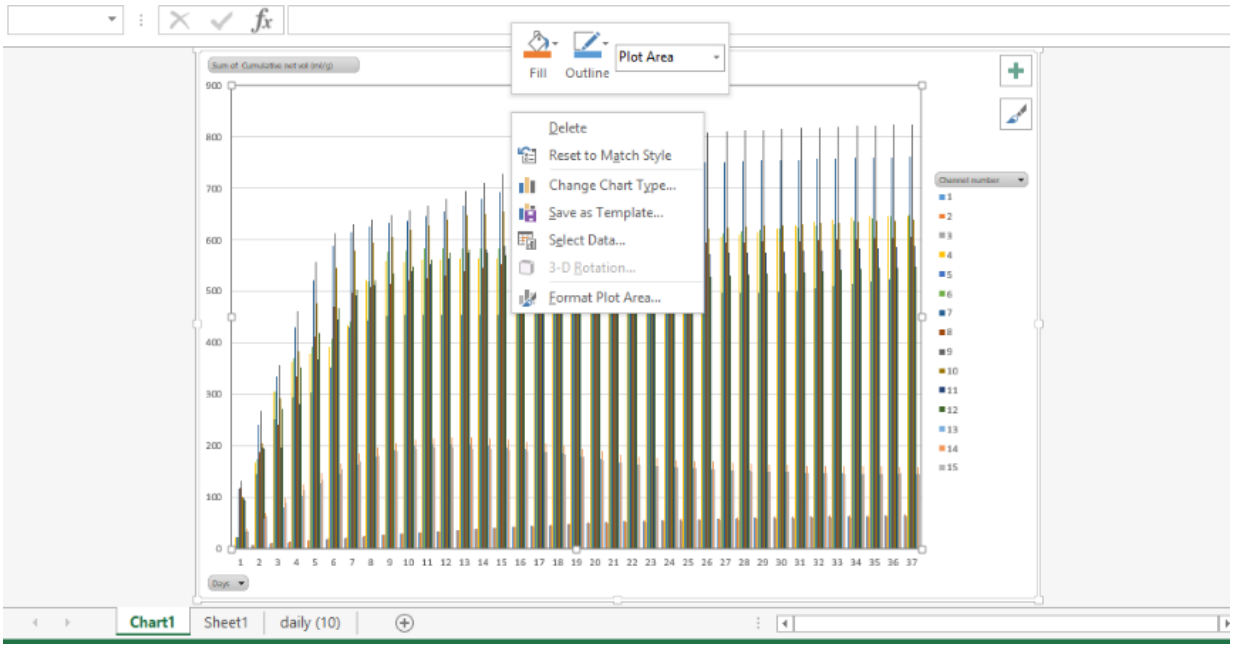


图30. 创建数据透视图 5.

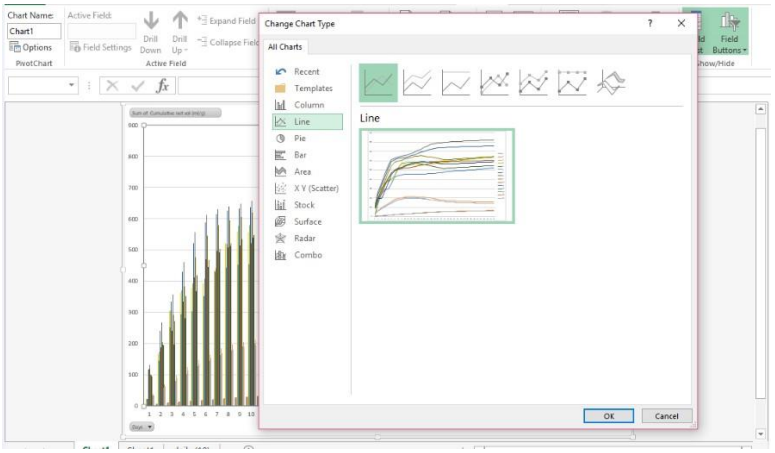


图31. 创建数据透视图 6

t) 最后，您将得到一张在BMP实验期间每个样品沼气生产的累积曲线图。

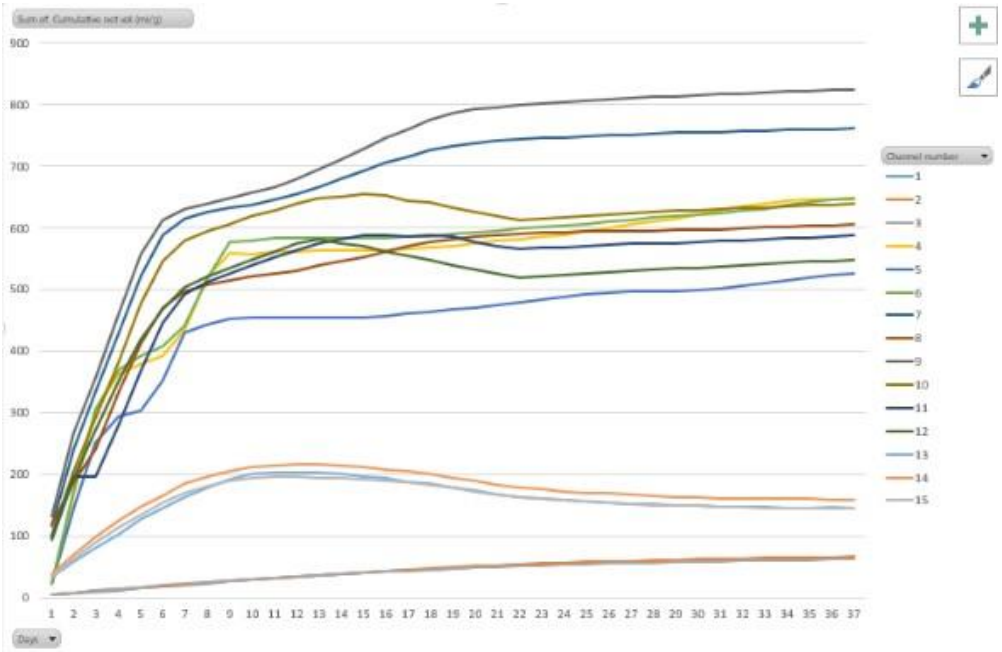


图33. 最终的沼气生产累积曲线图

其它工具

- **Filegrab**: 实现将系统记录的所有数据导出到笔记本电脑，包括事件日志，沼气每小时的累积量和增加量报告、沼气每天的累积量和增加量报告和四个每小时的沼气累积快照。实验运行几天后，将会产生了大量数据，因此若要传输所有数据的话可能需要一段时间才能完成。在传输完所有数据后，程序将在很短的时间内关闭。传输到笔记本电脑上每个文件的名称都含有时间和日期信息，所以文件是不会重复的；因此，数据可以根据需要传输多次，无需删除文件后再传输。
- **Fastgrab**：功能与程序Filegrab相同，但只能传输事件日志和产气的每日概况，因此传输需要的时间较短。在传输完所有数据后，程序会在较短时间内关闭。和Filegrab一样，输出的文件名包含时间和日期，因此已经导出的文件不会被覆盖。
- **Monitor**：实现实时观察系统，但不能输出任何数据。

注意：为了最大限度地减少短路或尖峰干扰的可能性，在实验中途连接气体流量计时，请**始终连接笔记本电脑的独立电源**，然后将USB线插入笔记本电脑，再将USB线另外一端接到气体流量计上的。如果USB线以相反的顺序连接，则可能会产生短路或尖峰干扰，还可能会影响到数据记录器。

5.建议阅读：BMP实验的生产曲线和局限性(抑制/毒性)

参考文献： Labatut, 2012. Anaerobic Biodegradability of complex substrates: Performance and Stability at Mesophilic and Thermophilic Conditions. *Cornell University*, 25- 28.

除了底物的产沼气潜力外，该实验还可提供有关潜在底物抑制或接种物强度的信息。通过BMP实验获得的沼气生产动力学数据，可得到底物是否存在抑制，毒性以及接种物强度等数据。底物的生物降解特性和中间产物的抑制性是厌氧消化不同阶段动力学的主要影响因素，而这些因素将最终影响沼气生产曲线的形状。

解释BMP实验的结果是非常重要的，因为我们可以利用BMP实验、实验室规模的实验和批次实验的结果来预测底物的半流动或连续流动式、商业规模的厌氧消化表现。除了由反应器的规模和几何形状引起的流体和热动力学特性等物理差异之外，间歇式反应器和半流动或连续流动式反应器的在操作方式上是根本不同的。反应器的进料方式对厌氧过程的热力学平衡有根本性的影响 – 因此也会影响食物网之间的相互作用。半流动和连续流动式反应器的特点是：由周期性的底物进料和产物去除而引起的动力学变化 – 因此，除非反应器受到负荷冲击或突然的环境变化，否则在稳态条件下很少会出现过程失稳（和产物积累）的情况。相反，在间歇式反应器中，如果不用生物介导过程将底物，微生物，酶，中间产物和（有时）最终产物等物质去除，它们将会在系统内积累。当中间产物（特别是挥发性脂肪酸和氢）的浓度达到某一微生物或某一微生物群落的稳态阈值时，热力学平衡被会被打破，并且其中的一种或几种代谢反应将可能被抑制，导致进一步的产物积累和基质降解延迟。在大多数情况下，产物抑制是可逆的，并且一旦热力学条件变得有利于消化进行，反应就会恢复平衡。

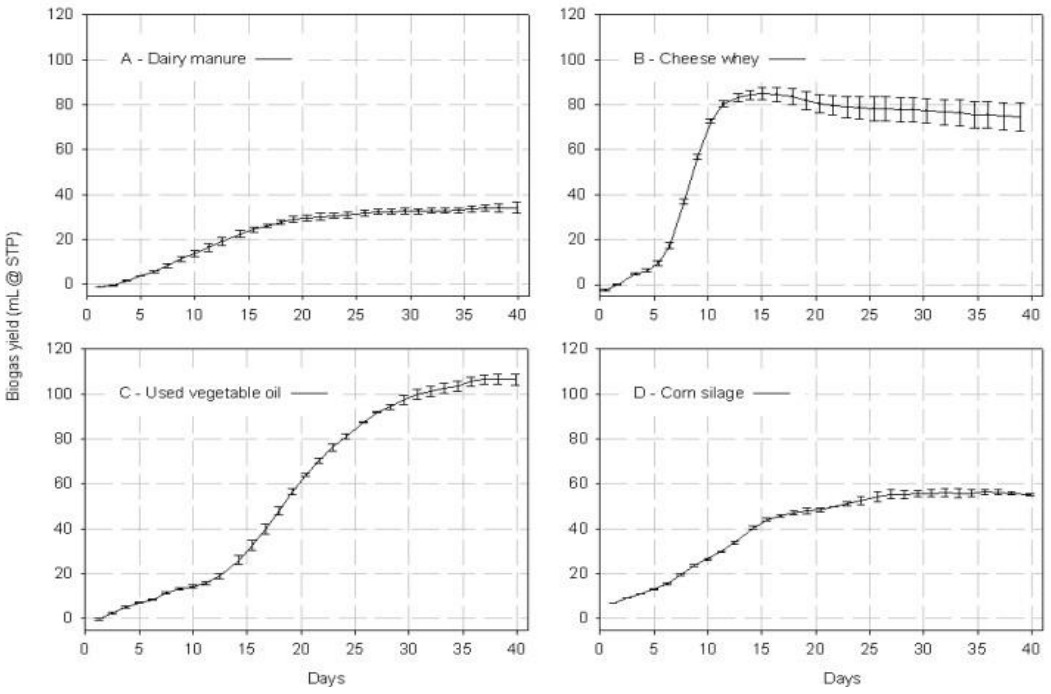


图34. 在40天的运行中，BMP实验的分析曲线显示了四种不同底物的沼气生产模式（标准状态下），它们分别是：A：奶牛粪便，B：奶酪乳清，C：用过的植物油，D：玉米青贮；误差棒表示标准偏差。

BMP实验应在严格的厌氧条件下进行，并防止任何形式的生化抑制。因此，在整个BMP实验中应满足三个重要条件：1）存在适当的微生物群落，酶和营养素；2）环境条件是最优的；3）底物和中间产物浓度远低于抑制/毒性水平。然而，产物抑制是很难预防的，并且实际上已经在一些BMP测定中发生。但是，产物抑制主要影响的是反应动力学，因此，只要有足够的消化时间，就应该可以实现底物可生物降解部分的稳定化和达到最大生物产甲烷产率。然而，一个更难以解决的问题是微量元素的缺乏，这直接影响了生物产甲烷潜力。这种可能发生在因长期厌氧消化而缺乏必需元素的某些底物中，例如在稀釜馏物中缺乏钴。因此，由长期半流动和连续流动厌氧消化操作导致的失稳或负荷冲击和产物抑制，从而导致过程失效的BMP实验，可能不适合用于预测生物甲烷产率。 BMP结果应限制于底物生物产甲烷潜力的相对解释，而不是绝对地评价每日生物甲烷产量或大规模反应器的整体性能和稳定性。BMP实验最适合于从一系列潜在底物中阐明哪种类型的底物具有最高的生物产甲烷潜力。此外，该实验可用于评估不同底物在共同消化时理想比例。最后，BMP实验结果可用于确定底物的生物降解程度，并确定完全消化所需的相对停留时间。

常见问题

1) 反应器的体积和材料是什么?

我们的反应器是经过标准化的1升的宽口HDPE瓶，可以处理更多的底物和接种物，这一改进减小了实验可能存在的误差。HPDE是生物惰性的，在100°C时仍能保持稳定。

2) 1升反应器中可容纳（或建议）的最小消化液量是多少？

在1升反应器瓶中，如果实验的工作体积为650-700毫升（接种物+底物），则取样管会低于液位，我们可以通过注射器来进行取样分析，从而避免沼气损失。但如果你的工作体积更小，使用同样的1升瓶子也是没有问题的。

3) 有多少个端口可用于采样?

我们在反应器顶盖上设有取样端口，该端口通道低于液面。您可以通过注射器取样并对样品进行分析，可以在不损失沼气的情况下测量pH值。我们的Arduino系统不具有持续监测pH和氧化还原电位的功能，您可以使用带有6 mm pH探头的手持式pH计来测量pH值。除了测试端口和沼气端口外，我们还有两个额外的气体端口可用于冲洗反应器顶部空间。此外，您还可以额外定制端口，不过这会产生一定的费用。

4) 如何采集气体样品进行后续GC分析?

您可以使用连接在出口处的Tedlar气袋分析沼气成分。

气体流量计的每个单元格都是独立的。来自反应器的气体从底部通过气体流量计并进入滚筒，当滚筒被气泡填满时，它就会漂起然后翻转，接着数据记录器将会记录此时的翻转事件，以及每次事件时的温度和压力。 在翻转之后，气体被排空到气体流量计的顶部空间。每个顶部空间都有一个软管接头，可以用来连接一个5升或10升的Tedlar气袋收集沼气。在气袋中收集的沼气成分可以用GC或便携式气体分析仪进行分析。

另一种方法是用苛性溶液代替水填充气体流量计。当气体从底部进入气体流量计时，苛性溶液会洗掉二氧化碳，此时气体流量计测得的将是甲烷流量而不是沼气流量。 我们建议使用第一种方法，因为它可以灵活地测量沼气甲烷，二氧化碳，硫化氢和氧气的含量。

5) 反应器是如何搅拌的?

我们的BMP装置由一台电机带动齿轮箱转动，使15个反应器同时被搅拌。大多数市售的BMP装置不能保证装置中所有反应器都均匀搅拌。一些学者通过每日手动摇动，摇动表面，磁力搅拌器等方式对反应器进行搅拌，这对于BMP的绝对值是可以的，但是限制了快速评估抑制或原料组成对沼气生产动态的影响。

当然，你还可以通过计时器来控制搅拌；根据需要，设定时间开启或关闭。

6) 温度如何控制?

通过将反应器浸入水浴锅中来控制反应器的操作温度，其控制温度高达95℃，误差范围为0.5℃左右。盖子的设计具有将反应器固定在适当位置和使浴水蒸发损失最小化的功能，便于在高温下进行测试，并且避免水汽蒸发大这个常见问题。

7) 数据是如何记录的?

主要数据记录软件安装在气体流量计的Arduino数据记录器上。笔记本电脑有三个程序可以通过USB线连接到Arduino。分别为“startrun”——用于在实验开始时向Arduino传输基本实验数据，“filegrab”——于将Arduino构建的日志文件传输回笔记本电脑，和“monitor” ——是一个简单的监控工具。结果被写入到多个.CSV日志文件中，可以用Excel或类似的方式打开。这些文件保存在microSD卡上，可以使用filegrab程序随时随地（如每天）上传到笔记本电脑上。其中microSD卡是Arduino系统的一部分。

气体流量计会自动记录最终气体产量的结果，单位为mL/天或mL/g VS，并实时自动转换标准状态（STP）下的形式。 可以使用笔记本电脑在“Filegrab”文件中获得结果。

8) 支持Arduino软件的最小计算机配置是什么？

带有备用USB端口的Windows 10的台式电脑或笔记本电脑 - 可以是32位或64位系统。

9) 如果其他组件不符合我们的需求，是否可以单独购买某些组装部件?

除了气体流量计，我们不单独出售任何设备。

10) 气体流量计如何清洗?

一些用户通过将除藻剂或漂白剂加到气体流量计中，然后用水将气体流量计填满，让它浸泡过夜。然后，轻轻摇动气体流量计，最后通过水管以温和的速度冲洗几分钟。这种方法不会将气体流量计洗得非常干净，但洗完后看起来更来清晰。如果还是洗不干净，那您可能需要取下顶盖并用漂白剂清洗单元格。 最后取下滚筒并清洗，并彻底清洗设备。

6. 常规检查

a. 检查水浴锅的水位。
b. 检查气体流量计的水位，如果水位低于溢出点，则要及时加满。
c. 检查翻斗是否处于垂直位置（如果气体流量超过翻斗容量，可能会发生这种情况）。

8. 备件

以下备件可从上海芮塔生物科技有限公司直接购买：反应器瓶、反应器顶盖、电机、水浴锅、软管、进出口盖和密封件等。

发送邮件到 srb_rita@autofedreactors.com / edgar.blanco@anaero.co.uk
获得以上提到的任何备件的报价

参考文献

1. Walker, M. *et al.* (2010). “Residual biogas potential test”. Bioresource Technology. 100(24) 6339-6346. Available at: http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Residual%20Biogas%20Potential.pdf

2. Walker, M. *et al.* (2009). “Potential errors in the quantitative evaluation of biogas production in anaerobic digestion processes”. Bioresource Technology. 100(24) 6339-6346. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409008876?via%3Dihub

3. Wrap (2013). “A review of the application of the Residual Biogas Potential (RBP) test for PAS110 as used across the UK's Anaerobic Digestion industry, and a consideration of potential alternatives”. Available at: http://www.biofertiliser.org.uk/images/upload/news_34_PAS110-digestate-stability-review.pdf

© Anaero Technology提供本手册旨在给客户在设备使用期间作为参考使用。 本设备的知识产权不会通过本手册的提供进行转让或许可，并且完全归Anaero Technology有限公司所有。未经授权的改编或复制设备将构成对知识产权的侵犯。