

藻类生物絮凝剂对沼液的絮凝效果研究

关正军 王新志 杨一盈
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 选择4种代表性藻种(小球藻、莱茵衣藻、紫球藻、斜生栅藻)在培养基中培养15 d,每天提取其培养液作为絮凝剂絮凝沼液,研究了不同藻种产出的絮凝活性物质对沼液的絮凝效果,选出能够高效絮凝沼液的藻种。经筛选试验,发现紫球藻所产出的絮凝活性物质能够最高效地絮凝沼液,沼液絮凝率可达到39.01%;利用最适培养条件下提取的紫球藻培养液,以絮凝率为评价指标,采用中心组合试验设计,探究了pH值、絮凝温度、絮凝剂投放量、絮凝时间4个条件及其交互作用对沼液絮凝效果的影响,建立了响应面模型,获得了最佳工艺参数。试验结果表明:pH值、絮凝温度、絮凝剂投放量、絮凝时间都会对技术指标产生较大影响,而助凝剂添加量所产生的影响较小;最优工艺参数为:pH值7.69、絮凝温度26.78℃、絮凝剂投放量47.70 mL、絮凝时间20.39 min,验证后测得絮凝率为76.09%;总氮去除率达51.30%、总磷去除率达57.00%、氨氮去除率达54.67%、化学需氧量去除率达43.16%、总固体去除率达54.11%、挥发性固体去除率达57.80%、固体悬浮物去除率达53.71%。

关键词: 藻类生物; 沼液; 絮凝剂; 絮凝效果

中图分类号: S216.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)05-0290-06

Effect of Algae Flocculant Applied in Biogas Slurry

GUAN Zhengjun WANG Xinzhi YANG Yiyang
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Algae flocculating agent is nontoxic and easy to be degraded, which can be used to pre-treat biogas slurry. Based on the existing literature and research, four kinds of algae (*Porphyridium cruentum*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella* sp.) were cultured under the same conditions for 15 d and the growth period were determined every day. Meanwhile, culture medium was collected to flocculate the biogas slurry every day. Flocculating rate was measured by optical density value. The highest flocculating rate of those four species algae in 15 d is as following: the flocculation rate of *Porphyridium cruentum* reached 39.01% on the 7th day, *Chlorella* sp. reached 26.99% on the 11th day, *Chlamydomonas reinhardtii* reached 25.93% on the 8th day and *Scenedesmus obliquus* reached 25.39% on the 6th day. Considering the flocculation effect, *Porphyridium cruentum* was better than the other algae in several continuous days. Then *Porphyridium cruentum* was cultured under its best optimal culture conditions: the light intensity of 3 000 lx, the temperature of 30℃, light ratio of 12 h: 12 h, inoculation amount of 30%, pH value of 7 and salinity of 3%. The culture medium was collected after 7 d. Based on center composite test, four factors were chosen, including flocculation concentration, flocculation reaction time, temperature of flocculation and initial pH value. The flocculation rate reached the highest of 76.25%, and the corresponding optimum conditions were as following: pH value of 7.69, temperature of 26.78℃, flocculation concentration of 47.70 mL and flocculation reaction time of 20.39 min. The parameters of the corresponding flocculated biogas slurry were measured, including the corresponding removal rate of TN, ammonia nitrogen, TP, TS, VS, SS and COD were 51.30%, 54.67%, 57.00%, 54.11%, 57.80%, 53.71% and 43.16%, respectively. Under the condition of optimizing flocculation parameters, the flocculating substances produced by *Porphyridium cruentum* had better removal effect on various kinds of nutrient in biogas slurry.

Key words: algae creatures; biogas slurry; flocculant; flocculation effect

引言

沼液是高浓度有机废水,其中氮、磷等污染物含量很高,直接排放会对土壤、地表水和地下水带来不同程度的污染^[1-2]。沼液中悬浮物浓度大,颗粒小,直接过滤或沉淀效率低,效果不明显,采用絮凝的工艺加速悬浮物的聚集,是沼液处理中的关键步骤。目前使用的无机絮凝剂和人工合成的有机高分子絮凝剂都存在二次污染环境和危害人体健康缺陷,随着沼气工程的建设和发展,亟待寻找一种易制取、无危害、能降解的沼液絮凝剂。

20 世纪 80 年代,研究者在培养微生物时,发现其代谢过程中产生的多糖、蛋白质等有机高分子物质具有絮凝活性,培养液可以直接作为生物絮凝剂使用^[3-6]。藻类培养成本更低、培养条件和方法简单,且蛋白质、油脂等成分含量丰富,大规模培养提取其产生的生物絮凝剂后还可以用作饲料,比细菌和真菌更具优势^[7]。对微生物絮凝剂的研究和应用大多集中在细菌和真菌领域,对于藻类絮凝剂仅有部分研究试验性的文章报道,国内外仅限于对颤藻、鱼腥藻、衣藻、栅藻、念球藻等少数藻类的单一或对照研究^[8],且多集中于直接在高浓度有机废水中培养微藻,这些方法只能利用有一定耐受能力的特定藻种,虽然能够高效去除水中污染物成分,但无法直接观察和研究藻类产生的絮凝物质对污染物的絮凝效果。

本文选择 4 种分布广泛、具有经济价值和研究价值的微藻在稳定可控环境中培养,然后提取其培养液作为絮凝剂对沼液进行絮凝,对比不同藻种的絮凝活性物质对沼液的絮凝效果,从中筛选出能够高效产出沼液絮凝活性物质的藻种,再运用响应面法,探究 pH 值、温度、絮凝剂投放量、絮凝时间、助凝阳离子投放量等絮凝条件对絮凝效果的影响,以确定最佳絮凝条件。

1 材料与方法

1.1 试验材料

筛选试验用的微藻均为自然界广泛分布、实验室常用的藻种,能产出较多的生物活性物质且具有一定的经济效益和研究价值。参照文献^[9-13],除波长和盐度,在适宜 4 类藻种生长繁殖的条件内设定了同一培养条件。试验用藻种均由上海光语生物科技有限公司提供,除菌后用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基和马铃薯培养基检测无菌。各藻种特性如表 1 所示。

试验用沼液为牛粪与秸秆混合厌氧发酵产沼气

表 1 4 种试验用藻种		
Tab.1 Four kinds of experiment algae		
名称	初始培养条件	特点
紫球藻 <i>Porphyridium cruentum</i>	25℃, 光照强度	圆形单细胞藻类,生长于阴湿地面,抗盐性强,驯化后可在海水中大量培养,不饱和脂肪酸含量高
	3 000 lx, pH 值 7, 光/暗时间 12 h/12 h, f/2 培养基 + 3% 海盐, 恒温摇床, 波长 500 nm, 30% 接种量	
莱茵衣藻 <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	25℃, 光照强度 3 000 lx, pH 值 7, 光/暗时间 12 h/12 h, f/2 培养基, 恒温摇床, 波长 680 nm, 30% 接种量	单细胞球型或卵型水藻,有鞭毛,能游动,大规模培养可作饲料或食品
斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i>		细胞呈纺锤形,可净化水体,蛋白质、维生素含量丰富,可作饲料
小球藻 <i>Chlorella sp.</i>		球形单细胞水藻,分布极广,油脂、蛋白含量高,可作食用或饲料

后的液体,取自黑龙江省哈尔滨市双城区良大集团沼气示范工程项目现场。为了便于观察絮凝情况,先对原始沼液进行过滤预处理,分别用 50 目和 100 目筛网过滤,去除大颗粒不溶固体,然后将筛分后的沼液放入干净的空桶中置于阴凉处备用。筛分后沼液的污染物成分为:总固体质量分数 2.31%、挥发性固体质量分数 1.09%、化学需氧量 17 607.37 mg/L、固体悬浮物质量浓度 9 460.12 mg/L、总氮质量浓度 1 310.69 mg/L、总磷质量浓度 25.20 mg/L、氨氮质量浓度 1 169.36 mg/L。

1.2 试验方法

1.2.1 高效絮凝藻种的筛选

按照表 1 的培养条件,在 ZGX-150 型震荡光照培养箱(上海欧盟实业有限公司)中用培养皿分别对 4 种藻种进行培养,接种量 30%,连续培养 15 d,每个藻种做 3 组平行样。每天 08:00—10:00 使用 WFJ722 型可见分光光度计(上海光谱仪器有限公司)测定培养皿中藻种的光密度值(Optical density, OD 值),衡量藻种的生长情况^[14],OD 值越高,说明藻的生长状态越好,数量越多;同时提取培养液后对沼液进行絮凝,观察絮凝效果,絮凝率越高表示絮凝效果越好。最后根据测定结果,综合分析培养液对沼液絮凝率最高的藻种。絮凝沼液的具体操作方法为:提取培养后的藻种培养液,在 TGL-16G 型高速离心机(上海安亭科学仪器厂)中以 1 000 r/min 离心 25 min,取 50 mL 上清液加至 100 mL 筛分后的沼液中,用 MY3000-6M 型混凝试验搅拌机(武汉梅宇仪器厂)在 100 r/min 转速下快速搅拌 5 min,50 r/min 转速下慢速搅拌 5 min,静置 5 min,取上清液,用可见光分光光度计在 550 nm 可

见光下测上清液的 OD 值,每次做 3 组重复求平均值,将蒸馏水处理的样品作为对照组,以 OD 值计算絮凝率 Q 的公式^[15]为

$$Q = \frac{X - Y}{X} \times 100\%$$

(1)

式中 Q ——絮凝率, %
 X ——对照组上清液的 OD 值
 Y ——待测样品中上清液的 OD 值

1.2.2 基于响应面法进行絮凝条件优化

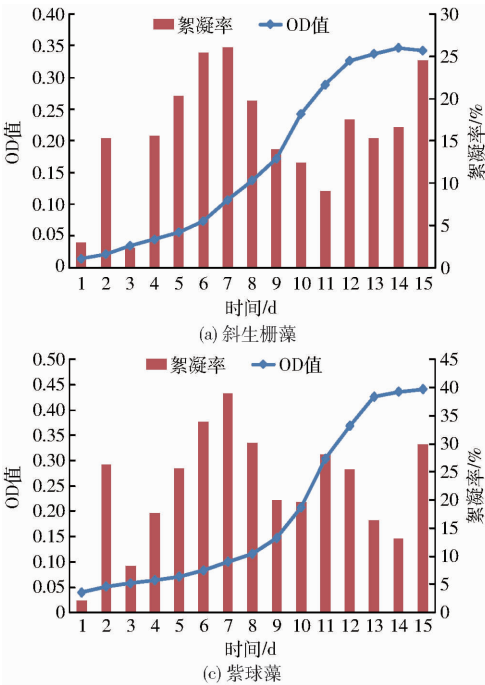
筛选出高效产出絮凝活性物质的藻种后,通过预试验确定藻种高效产出絮凝物质的最佳培养条件,并提取该条件下藻种的培养液作为絮凝剂,研究絮凝反应体系不同条件对沼液絮凝效果的影响。影响生物絮凝剂絮凝效果的主要因素为:pH 值、温度、助凝剂浓度、絮凝剂投放量、絮凝时间^[16-19],设定这 5 项因素的水平,助凝阳离子选择 Ca^{2+} ,添加对反应体系影响较小的 CaCl_2 作为助凝剂。因素水平取值见表 2。

运用响应面法中的中心组合试验分析模型显著

表 2 试验因素的参数范围

Tab.2 Range of experiment variables

因素	水平	
	低	高
pH 值 A	6	10
温度 B/℃	20	40
助凝剂浓度 C/(mol·L ⁻¹)	1	10
絮凝剂投放量 D/mL	30	60
絮凝时间 E/min	6	30



性,选出最优絮凝条件,在此之前,应在不考虑因素间交互作用的前提下,设计五因素二水平正交试验,以絮凝率为指标,通过方差分析剔除不显著因素,再进行中心组合试验。

2 试验结果与分析

2.1 藻种生长情况与絮凝率分析

在筛选藻种时,同时测定了藻种的生长情况和絮凝活性物质对沼液的絮凝情况。图 1 反映了 4 种微藻在 15 d 培养周期内的生长繁殖情况和絮凝活性物质对沼液的絮凝效果。从图 1a 中可以看出,斜生栅藻产出的活性物质对沼液的最高絮凝率出现在第 7 天,而生长期从第 1 天开始持续持续到第 13 天,之后趋于稳定,第 14 天达到峰值;从图 1b 中可以看出,小球藻产出活性物质对沼液的最高絮凝率出现在第 11 天,在生长期基本上都维持在相对较高的状态,其生长情况在第 13 天达到峰值,后趋于稳定;从图 1c 中可以看出,紫球藻产出活性物质对沼液的最高絮凝率出现在第 7 天,生长期持续到第 13 天,之后达到稳定期,并在第 15 天达到峰值;从图 1d 中可以看出,莱茵衣藻产出的活性物质对沼液的最高絮凝率出现在第 8 天,培养到第 13 天时到达生长稳定期。

综上所述,藻类絮凝活性物质絮凝效果与其生长繁殖情况并没有直接的相关性,并不是在藻种生长稳定期数量最多时,产出的絮凝活性物质就最多、对沼液的絮凝效果就最好。这是由于一部分具有絮凝活性的物质是在藻类开始培养时期就开始产生,

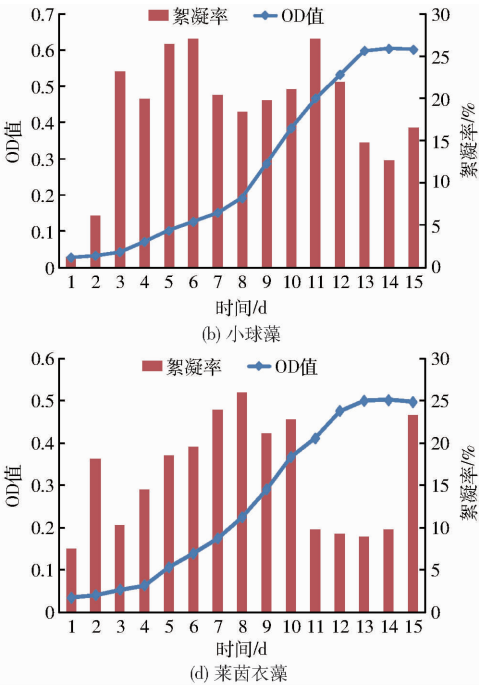


图 1 生长曲线和絮凝活性物质变化情况

Fig.1 Growth curves and variation of flocculation rate

另一部分是在藻类生长饱和、停止代谢后才开始产生,同时,藻类在不同生长期会释放降低絮凝活性的酶,也对絮凝活性物质的产生和效果造成影响,因此,藻种的生长繁殖情况与其絮凝活性物质的产出量及效果并不等同,这是接下来筛选高效絮凝藻种的重要依据。

2.2 高效絮凝藻种的确定

图2是4种藻种的絮凝活性比较,从图中可以看出,紫球藻培养到第7天时,其产出的絮凝活性物质絮凝效果最好,沼液的絮凝率达到了39.01%;其它3种藻中,小球藻培养到第11天时,其产出的絮凝活性物质絮凝效果最好,沼液的絮凝率达到了26.99%;斜生栅藻在培养到第7天时其产出的絮凝活性物质絮凝效果最好,沼液絮凝率达到26.01%;莱茵衣藻在培养至第8天时其产出的絮凝活性物质絮凝效果最好,沼液的絮凝率达到25.93%。

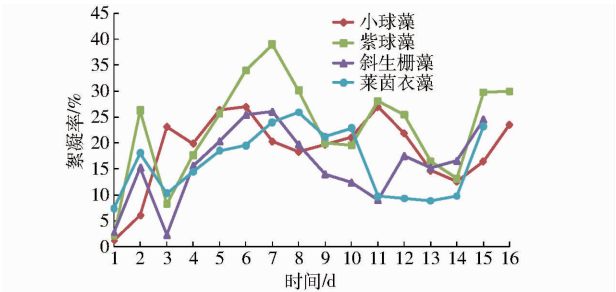


图2 4种藻种的絮凝活性对比

Fig.2 Comparison of flocculation activity of four kinds of algae

由于藻种生长情况繁殖情况与絮凝活性物质产出和絮凝效果并无线性相关性,综合4种藻种在培养期内产出的絮凝活性物质对沼液的絮凝能力,同时考虑培养时间越短成本就越低,确定紫球藻作为高效产出絮凝活性物质的藻种。通过查阅资料和单因素预试验,得到第7天时紫球藻适合絮凝物质产出的最佳培养条件为:温度30℃、光照强度3 000 lx、pH值7、光/暗时间12 h/12 h、接种量30%、盐度3%。

2.3 响应面试验结果与分析

2.3.1 因素显著性分析

不考虑交互作用,进行五因素二水平试验,考察各个因素的显著性,试验结果见表3,应用 Design-Expert 8.0 软件进行方差分析,剔除不显著因素,保留显著因素进行接下来的中心组合试验。因素C助凝剂CaCl₂的添加量P值大于0.05,为不显著因素,其它4个因素P值均小于0.05,为显著因素,回归模型显著,证明结果可靠,方差分析结果见表4。

2.3.2 中心组合试验回归分析

设计四因素五水平中心组合试验,将因素A、B、

表3 五因素二水平正交试验结果

Tab.3 Results of five factors and two levels orthogonal test

试验序号	A	B/℃	C/(mol·L ⁻¹)	D/mL	E/min	絮凝率/%
1	6	20	10	30	6	23.560
2	6	20	1	30	30	24.813
3	6	20	10	60	30	45.426
4	6	20	1	60	6	21.355
5	6	40	10	30	30	61.407
6	6	40	1	30	6	31.078
7	6	40	10	60	6	56.768
8	6	40	1	60	30	66.508
9	10	20	10	60	6	52.128
10	10	20	1	60	30	60.851
11	10	20	10	30	30	59.274
12	10	20	1	30	6	30.957
13	10	40	10	60	30	69.447
14	10	40	1	60	6	71.382
15	10	40	10	30	6	65.957
16	10	40	1	30	30	66.936

表4 方差分析

Tab.4 Variance analysis

来源	自由度	平方和	均方和	F	P	显著性
A	1	1 332.56	1 332.56	26.95	0.000 4	极显著
B	1	1 830.11	1 830.11	37.01	0.000 1	极显著
C	1	225.65	225.65	4.56	0.058 4	不显著
D	1	398.83	398.83	8.06	0.017 6	显著
E	1	643.60	643.60	13.01	0.004 8	极显著
模型	5	4 430.75	886.15	17.92	0.000 1	极显著

D、E作为考察因素,絮凝率作为响应值进行试验,除中心点处试验结果,每组试验均做3组平行样取平均值作为结果。试验结果见表5。

通过 Design-Expert 8.0 软件对模型进行方差分析, $R^2 = 0.908\ 3$,调整 R^2 为 $0.822\ 3$,二者差值在0.2以内,模型拟合度较好。表6是逐步回归后的方差分析。回归模型 $P < 0.000\ 1$,说明回归是极显著的,失拟平方和检验 $P > 0.05$,表明该回归模型适合分析和预测各因素对絮凝率的影响情况,模型能够充分地描述响应值的变化情况,响应面模型的预测和优化是合理的^[20]。

通过F检验可以看出,因素A是显著的;B、D、E、AB、B²、D²和E²是极显著的;而交互因素AD、AE、BD、BE、DE和A²不显著。这说明因素A、B、D、E、AB、B²、D²和E²对响应值絮凝率具有显著的影响,而AD、AE、BD、BE、DE和A²对其影响并不显著。因此,剔除不显著因素得到优化后的回归方程为

$$Q = -778.314 + 34.394A + 21.298B + 15.102D + 7.189E - 1.284AB - 0.219B^2 - 0.155D^2 - 0.176E^2$$

(2)

表 5 中心组合试验结果
Tab.5 Result of center composite test

试验序号	A	B/℃	D/mL	E/min	絮凝率/%	试验序号	A	B/℃	D/mL	E/min	絮凝率/%
1	9	35	52.5	24	36.918	16	7	25	37.5	24	58.303
2	9	35	37.5	12	7.363	17	10	30	45	18	68.472
3	9	35	52.5	12	28.596	18	6	30	45	18	63.835
4	9	35	37.5	24	13.740	19	8	40	45	18	39.748
5	9	25	52.5	12	63.288	20	8	20	45	18	60.748
6	9	25	37.5	24	61.918	21	8	30	60	18	53.040
7	9	25	52.5	24	68.082	22	8	30	30	18	21.625
8	9	25	37.5	12	49.315	23	8	30	45	30	63.698
9	7	35	52.5	12	61.042	24	8	30	45	6	29.742
10	7	35	37.5	24	34.458	28	8	30	45	18	74.435
11	7	35	52.5	24	67.206	26	8	30	45	18	72.615
12	7	35	37.5	12	29.488	27	8	30	45	18	75.947
13	7	25	52.5	24	69.413	28	8	30	45	18	67.722
14	7	25	37.5	12	53.088	29	8	30	45	18	63.548
15	7	25	52.5	12	64.642	30	8	30	45	18	75.618

表 6 中心组合试验方差分析

Tab.6 Variance analysis of center composite test					
来源	自由度	平方和	均方和	F	P
A	1	409.58	409.58	6.13	0.025 7
B	1	2 630.02	2 630.02	39.34	<0.000 1
D	1	1 914.31	1 914.31	28.63	<0.000 1
E	1	611.33	611.33	9.14	0.008 5
AB	1	659.64	659.64	9.87	0.006 7
AD	1	31.41	31.41	0.47	0.503 5
AE	1	7.53	7.53	0.11	0.741 8
BD	1	271.52	271.52	4.06	0.062 2
BE	1	0.15	0.15	0.002 2	0.962 8
DE	1	1.63	1.63	0.024	0.877 8
A ²	1	82.82	82.82	1.24	0.283 2
B ²	1	895.54	895.54	13.39	0.002 3
D ²	1	2 193.60	2 193.60	32.81	<0.000 1
E ²	1	1 193.34	1 193.34	17.85	0.000 7
失拟检验	10	878.89	87.89	3.54	0.087 5

2.3.3 响应面分析及絮凝条件优化

通过回归方程做出响应面图和等高线图可以直观地反映不同因素对评价指标的影响情况,交互作

用可以通过等高线图来判断:等高线越接近圆形,表示交互作用越不显著,反之则交互作用越显著。图 3 体现了絮凝过程中 pH 值和絮凝温度之间的交互作用对紫球藻絮凝活性物质絮凝沼液的影响效果。从等高线图可以看出,线形呈纺锤状椭圆形,可以证明 pH 值 A 与絮凝温度 B 间的交互作用对絮凝效果的影响是显著的;从响应面图中可以看出,絮凝率随着 pH 值降低而升高,随温度升高呈先升后降的趋势,可见温度过高或过低都会使紫球藻产出物质的絮凝效果降低。

为了寻找使沼液絮凝率达到最佳效果的最佳絮凝条件,对回归方程进行偏微分计算,得到理论上最佳絮凝条件为:pH 值 7.69、温度 26.78℃、絮凝剂投放量 47.70 mL、絮凝时间 20.39 min,在此条件下,最高絮凝率理论值为 76.25%。为了检验预测模型的准确性,按照上述条件进行验证试验。经过验证,紫球藻出产的絮凝活性物质对沼液的絮凝率达到了 76.09%,误差小于 5%,证明预测模型是真实可靠的。

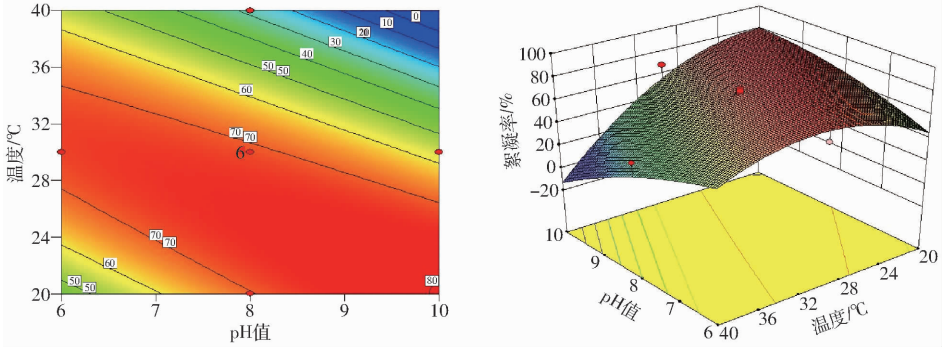


图 3 pH 值和絮凝温度对絮凝效果的影响
Fig.3 Influence of pH value and temperature on flocculating efficiency

测定絮凝率的同时对絮凝后沼液的总氮含量、总磷含量、化学需氧量、氨氮含量以及总固体质量分数、挥发性固体质量分数、固体悬浮物质量浓度进行测定,进一步验证藻类絮凝活性物质处理沼液的优势。絮凝后,沼液中总氮质量浓度为 757.64 mg/L,去除率达 51.30%;总磷质量浓度为 13.49 mg/L,去除率达 57.00%;氨氮质量浓度为 559.89 mg/L,去除率达 54.67%;化学需氧量为 11 107.58 mg/L,去除率达 43.16%,总固体质量分数为 1.06%,去除率达 54.11%,挥发性固体质量分数为 0.46%,去除率达 57.80%,固体悬浮物质量浓度为 4 473.21 mg/L,去除率达 53.71%。

3 结论

(1)通过分析 4 个藻种在同一培养条件下 15 d 内的生长情况和所出产絮凝活性物质对沼液的絮凝效果,发现絮凝活性物质对沼液的絮凝效果与藻种本身的生长繁殖情况并无线性相关性;为了达到最好的絮凝效果同时控制较低的培养成本,选择紫球藻为高效絮凝沼液的藻种,在培养至第 7 天时,提取

其产出的絮凝活性物质对沼液的絮凝效果达到峰值,沼液的絮凝率为 39.01%。

(2)在所选参数范围内,pH 值、絮凝温度、絮凝剂投放量、絮凝时间均会对絮凝率产生显著影响,而助凝剂投放量对絮凝率的影响并不显著,因素间的交互作用中,pH 值和絮凝温度的交互作用显著。

(3)能够使紫球藻产出的絮凝活性物质达到对沼液的最大絮凝率的絮凝条件为:pH 值 7.69、絮凝温度 26.78℃、絮凝剂投放量 47.70 mL、絮凝时间 20.39 min。在此条件下;理论上的最大絮凝率为 76.25%,经试验验证,实测的絮凝率为 76.09%。

(4)对最佳絮凝条件下絮凝后的沼液进行成分测定:总氮去除率达 51.30%;总磷去除率达 57.00%;氨氮去除率达 54.67%;化学需氧量去除率达 43.16%,总固体去除率达 54.11%,挥发性固体去除率达 57.80%,固体悬浮物去除率达 53.71%。经絮凝后,沼液的主要污染物含量虽有大幅下降,但还没有达到排放标准,只能作为沼液处理的一个有效环节,还需进行进一步处理。

参 考 文 献

- 隋倩雯,董红敏,朱志平,等. 沼液深度处理技术与现状应用[J]. 中国农业科学导报,2011,13(1):83-87.
SUI Qianwen, DONG Hongmin, ZHU Zhiping, et al. Present status of biogas effluent treatment technology research and application [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(1): 83-87. (in Chinese)
- 贺清尧,冉毅,刘璐,等. 生物质灰致沼气氮磷脱除研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(1):237-244. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170131&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.031.
HE Qingyao, RAN Yi, LIU Lu, et al. Ammonia nitrogen and phosphorous removal from biogas slurry induced ash addition [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1):237-244. (in Chinese)
- AN J Y, SIN S J, LEE J S, et al. Hydncarbon production from secondary treated piggery wastewater by the green alga *Botryococcus braunii*[J]. Journal of Applied Phycology, 2003,15(2-3):185-191.
- PARK J M, JIN H F, LIM B R, et al. Ammonia removal from anaerobic digestion effluent of livestock waste using green alga *Scenedesmus* sp. [J]. Bioresource Technology,2010,101(22):8649-8657.
- 程海翔. 一株栅藻的分离培养及其应用于养猪废水处理的潜力研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
CHENG Haixiang. Research on isolation and cultivation of a new microalgae and the potential of its application for treating piggery wastewater [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- 陈晓畅,王洪媛,杨翔华. 微生物絮凝剂的研究与应用进展[J]. 抚顺石油学院学报,2002,22(4):27-30.
CHEN Xiaochang, WANG Hongyuan, YANG Xianghua. Study of microbial flocculant and application progress[J]. Journal of Fushun Petroleum Institute, 2002,22(4): 27-30. (in Chinese)
- RAWAT I, KUMAR R R, MUTANDA T, et al. Dual role of microalgae: phytoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable bio-fuels production[J]. Applied Energy, 2011,88(10):3411-3424.
- ZHU Chi, CHEN Chuanhong,ZHAO Liangyuan, et al. Bio-flocculant produced by *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. Journal of Applied Phycology,2012,24(5):1245-1251.
- 王长海,李叙凤,鞠宝,等. 紫球藻及其应用研究[J]. 海洋通报,1998,17(3):79-85.
WANG Changhai, LI Xufeng, JU Bao, et al. Studies on *Porohyridium cruentum* and its applications[J]. Marine Science Bulletin, 1998, 17(3): 79-85. (in Chinese)
- LEE R E. 藻类学[M]. 段德麟,胡自民,胡征宇,等,译. 北京:科学出版社,2012.
- 殷燕,张运林,王明珠,等. 光照强度对铜绿微囊藻和斜生栅藻生长及吸收特性的影响[J]. 湖泊科学,2012,24(5):755-764.
YIN Yan, ZHANG Yunlin, WANG Mingzhu, et al. Effect of different irradiation intensity on the growth and absorption properties of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus*[J]. Journal of Lake Science, 2012, 24(5): 755-764. (in Chinese)
- 晁建颖,颜润润,张毅敏. 不同温度下铜绿微囊藻和斜生栅藻的最佳生长率及竞争作用[J]. 生态与农村环境学报,2011, 27(2):53-57.
CHAO Jianying, YAN Runrun, ZHANG Yimin. Optimal growth of and competition between *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* related to temperature[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, 27(2): 53-57. (in Chinese)

8 ZARKADAS I, DONTIS G, PILIDIS G, et al. Exploring the potential of fur farming wastes and byproducts as substrates to anaerobic digestion process[J]. Renewable Energy, 2016, 96(B):1063 – 1070.

9 NIMAS M S, SUNYOTO, ZHU Mingming, et al. Effect of biochar addition on hydrogen and methane production in two-phase anaerobic digestion of aqueous carbohydrates food waste[J]. Bioresource Technology, 2016,219:29 – 36.

10 寇巍, 郑磊, 曲静霞, 等. 太阳能与发电余热复合沼气增温系统设计[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24):211 – 217. KOU Wei, ZHENG Lei, QU Jingxia, et al. Engineering design of solar and power waste energy heating system for biogas project [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24):211 – 217. (in Chinese)

11 燕纪伦. 基于热管理器的太阳能加热高效制取沼气系统的设计与分析[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.

12 赵亚杰, 王黎明, 郭志江, 等. 基于寒区沼气池增温技术的研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2010, 22(6):23 – 26. ZHAO Yajie, WANG Liming, GUO Zhijiang, et al. Research on heating technology based on biogas digester in north high cold region pools[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2010, 22(6):23 – 26. (in Chinese)

13 HASSANEIN A A M, ZHANG Duo, QIU Ling. Solar water heating model with sun tracking system for increasing biogas production[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6):256 – 261.

14 HASSANEIN A A M, QIU L, JUNTING P, et al. Simulation and validation of a model for heating underground biogas digesters by solar energy[J]. Ecological Engineering, 2015, 82:336 – 344.

15 CHAE K J, JANG A M, YIM S K, et al. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(1):1 – 6.

16 杨萌. 严寒地区太阳能—土壤源热泵联合加热沼气池的模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

17 BHARGAVI S, KRISHNA R. Anaerobic digester foaming in full-scale cylindrical digesters—effects of organic loading rate, feed characteristics, and mixing[J]. Bioresource Technology, 2014, 159:182 – 192. (in Chinese)

18 GUTIERREZ-CASTRO L M, QUINTO-DIEZ P, BARBOSA-SALDANA J G, et al. Comparison between a fixed and a tracking solar heating system for a thermophilic anaerobic digester [J]. Energy Procedia, 2014, 57:2937 – 2945.

19 中国气象局气象信息中心气象资料室. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

20 刘猛, 龙惟定. 夏季工况双层皮玻璃幕墙综合传热系数计算模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1):1403 – 1408. LIU Meng, LONG Weiding. Calculation model of comprehensive heat transfer coefficient of glazing double-skin facade in summer working condition[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(1):1403 – 1408. (in Chinese)

(上接第 295 页)

13 张桂艳, 温小斌, 梁芳, 等. 重要理化因子对小球藻生长和油脂产量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(8):2076 – 2085. ZHANG Guiyan, WEN Xiaobin, LIANG Fang, et al. The effect of physical and chemical factors on the growth and lipid production of *Chlorella* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8):2076 – 2085. (in Chinese)

14 霍书豪, 陈玉碧, 刘宇鹏, 等. 添加沼液的 BG11 营养液微藻培养试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4):241 – 246. HUO Shuhao, CHEN Biyu, LIU Yupeng, et al. Experiment on microalgae cultivation in BG11 nutrient solution adding biogas slurry[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4):241 – 246. (in Chinese)

15 颜东方, 负建民. 马铃薯淀粉废水生产微生物絮凝剂菌株筛选及其营养条件优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3):198 – 206. YAN Dongfang, YUAN Jianmin. Screening of bioflocculant-producing strains and optimization of its nutritional conditions by using potato starch wastewater[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3):198 – 206. (in Chinese)

16 郑怀礼, 张海彦, 钱力. 微生物絮凝剂的研究进展[J]. 现代化工, 2003, 23(10):22 – 25. ZHENG Huaili, ZHANG Haiyan, QIAN Li. Research progress of microbial flocculants[J]. Modern Chemical Industry, 2003, 23(10):22 – 25. (in Chinese)

17 陈宗琪. 胶体化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984:298 – 308.

18 陶涛, 卢秀清, 冷静. 微生物絮凝剂研究与应用进展[J]. 环境科学进展, 1999, 7(6):21 – 25. TAO Tao, LU Xiuqing, LENG Jing. Advances in research and application of bio-flocculants[J]. Advance in Environmental Science, 1999, 7(6):21 – 25. (in Chinese)

19 JUNGI Nakamura. Model of flocculation of yeast cells with flocculant produced by *Aspergillus sojae* AJ7002[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1976, 40(8):1565 – 1571.

20 张志平, 周雪花, 冯宜鹏, 等. 基于响应面法的秸秆与粪便联合制氢预混工艺优化[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(9):97 – 101. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130918&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.018. ZHANG Zhiping, ZHOU Xuehua, FENG Yipeng, et al. Optimization of premixing process of joint hydrogen production by straw and manure based on response surface method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9):97 – 101. (in Chinese)