doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.030

猪粪厌氧消化液两阶段闭式循环氨脱除工艺优化*

刘　良[1,2]　訾　海[3]　陈新颖[2]　庞昌乐[2]　董仁杰[2]

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;
3. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对氨吹脱工艺碱消耗量大、填料塔填料易结垢造成压降、塔板塔易夹带雾沫、漏液的技术缺陷和尾气氨吸收不完全的问题,设计了两阶段闭式循环氨脱除工艺,并利用研发的鼓泡反应器进行了猪粪厌氧消化液 NH_4^+-N 脱除的研究。利用响应面法优化气流量、投碱量、气液比与 NH_4^+-N 去除率的控制模型。研究表明:第 1 阶段吹脱厌氧消化液 CO_2,消化液 pH 值 1 h 可从 8.03 升高到 8.86;第 2 阶段在气流量、投碱量和气液比分别为 6 L/min、22.13 g 和 3 000 时,NH_4^+-N 去除率可达 96.78%;两阶段闭式循环氨脱除工艺可用于未固液分离的猪粪厌氧消化液 NH_4^+-N 的脱除,鼓泡反应器可作为该工艺条件下的 NH_4^+-N 脱除装置。

关键词: 猪粪　厌氧消化液　氨脱除工艺　响应面法　两阶段　闭式循环

中图分类号: S24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2015)09-0211-06

Optimization of Ammonia Stripping Process in Two-stage Air-recirculation for Anaerobic Digestion of Pig Manure

Liu Liang[1,2]　Zi Hai[3]　Chen Xinying[2]　Pang Changle[2]　Dong Renjie[2]

(1. *College of Agriculture and Biotechnology*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100193, *China*
2. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
3. *College of Water Resources and Civil Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Ammonia stripping process consumes large amounts of alkali. The packed column is easy to scale and cause pressure drop. The tray tower has the disadvantages of discharge and the large fine droplets loss by entrainment. Besides, the absorption of ammonia nitrogen in the exhaust gas is incomplete. In order to solve the above problems, a two-stage air-recirculated stripping process was developed and used in the gas-liquid reactor to remove the ammonia nitrogen during anaerobic digestion of pig manure. A mathematical model focusing on the effects of controlling factors (gas flow rate, dose of alkali and gas-to-liquid ratio) on one response (ammonium nitrogen removal efficiency) was developed and fitted by response surface methodology (RSM). The results showed that the pH value could rise from 8.03 to 8.86 in 1 h by stripping CO_2. The alkalinity of anaerobic digestion was decreased from (8 953 ± 297) mg/L to (8 283 ± 21) mg/L. Stripping carbon dioxide was conducive to reduce the buffer capacity of anaerobic. The ammonium nitrogen removal efficiency could reach 96.78% (dose of lime 22.13 g, gas flow rate 6 L/min, gas-to-liquid ratio 3 000). The two-stage air-recirculation process could be used to remove and recover ammonium nitrogen in anaerobic digestion of pig manure without pretreatment in this system. The RSM further optimized the two-stage air-recirculation ammonia removal process. The developed gas-liquid reactor could be used to remove ammonium nitrogen with air-recirculated stripping process.

Key words: Pig manure　Anaerobic digestion　Ammonia stripping process　Response surface methodology　Two-stage　Air-recirculated stripping

收稿日期: 2015-01-29　修回日期: 2015-04-07

*国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA101803)、北京市科技计划资助项目(D141100001214001、D141100001214002)和"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAD47B02)

作者简介: 刘良,助理研究员,博士生,主要从事生物质能源和环保工程、设施农业设计研究,E-mail: liuliang198104@163.com

通讯作者: 庞昌乐,教授,博士生导师,主要从事生物质转化和农业工程装备研究,E-mail: pangcl@cau.edu.cn

引言

猪粪厌氧消化液含有大量氮等营养元素,可作为农肥施用,但是我国大部分猪场没有足够的土地来消纳这些连续产生的、过量的厌氧消化液。如果厌氧消化液未经深度处理而直接排放到水体,当水体含氮量大于 0.2 mg/L,含磷量大于 0.01 mg/L,易富营养化[1],造成地表水污染[2-3],严重的则产生水华和赤潮[4],且废水中的氮素还能够通过渗透作用污染地下水[5]。厌氧消化液在储存和施用过程中会产生氨挥发,NH_3-N 在大气中比较活跃,能够中和酸物质,产生有助于形成 PM2.5 的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N。张攀等[6]、邓利群等[7]、寿幼平等[8]分别对上海、北京、济南进行了大气 PM2.5 的研究,发现 NH_4^+-N、NO_3^--N 是其主要水溶性离子。

厌氧发酵虽然能够生成可再生能源,减少温室气体排放[9],高效地去除 COD[10],但不能降低 NH_4^+-N 的浓度[11]。NH_4^+-N 是氮在厌氧消化液中的主要存在形态[12],虽然厌氧发酵工艺繁多,但出水 NH_4^+-N 浓度远超过 GB 18596—2001《畜禽养殖业污染物排放标准》的规定[13-16]。为了降低废水的污染力,一些方法被应用于猪粪厌氧消化液 NH_4^+-N 的脱除研究,如化学沉淀法[17]、吹脱法[18-21]等。吹脱法是一种有效的物化脱氮工艺,已经被成功用于各类含氮废水的脱氮处理[22-26]。

虽然吹脱法能够有效地将溶解在废水中的 NH_3-N 脱除,但耗能高、碱消耗量大等限制了其经济适用性。常用吹脱塔存在一定的技术难题,如填料塔易结垢产生较大压降[27],塔板塔会产生雾沫夹带、漏液等问题[28],吹脱尾气含氨且净化不完全,易造成二次污染。针对上述问题,本文提出两阶段闭式循环氨脱除工艺,利用响应面法优化其操作参数,为该工艺的应用及厌氧消化液的深度处理提供技术参考。

1 材料和方法

1.1 试验装置及试验条件

试验在内径 0.15 m、高 0.40 m 的有机玻璃鼓泡反应器中进行。系统所需动力由气泵提供;气泵进气前端设置有气流缓冲装置、脱除 CO_2 的碱吸收装置和回收氨气的酸吸收装置(0.5 mol/L H_2SO_4);气泵出气端与 LZB-6 型玻璃转子气体流量计连接;气体经布气装置进入反应器,系统与外界无气体交换作用。各部件按图示顺序连接,如图 1 所示。

考虑到中温发酵厌氧出水的温度和吹脱过程控温的必要性,试验在(36 ± 1)℃ 的温室进行。试验过程分为 2 个阶段:第 1 阶段,用气液比 180 来完成脱除厌氧消化液中 CO_2 的工作,提高厌氧消化液的 pH 值降低其缓冲能力;第 2 阶段,投加 CaO 大幅提升厌氧消化液 pH 值,完成 NH_3-N 脱除,气液比设定为 1 500、2 250 和 3 000。未经固液分离处理的厌氧消化液被充分搅拌并提取 3 L,在试验前一天置入温室,试验时充分混合并量取 2 L 注入鼓泡反应器。

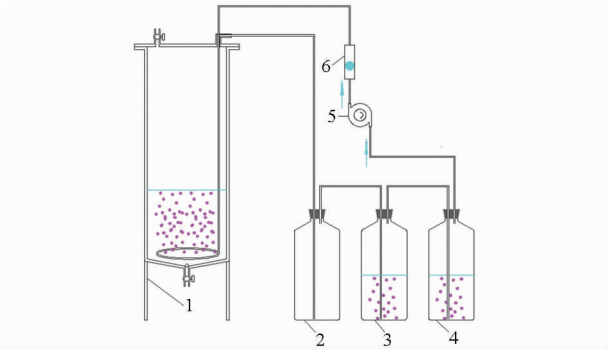

图 1 闭式循环系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of air-recirculated stripping system

1. 鼓泡反应器 2. 气流缓冲装置 3. 碱吸收装置 4. 酸吸收装置 5. 气泵 6. 玻璃转子流量计

1.2 试验材料及分析方法

试验用猪粪厌氧消化液取自北京市顺义区某沼气工程(其发酵工艺为 USR),各项指标如表 1 所示。TS、pH 值、NH_4^+-N 质量浓度等指标的检测均依据《水和废水监测分析方法(第 4 版)》。COD 利用 COD 消解仪(Model DR200, HACH Company, USA)测定,BOD_5 利用 BOD 测定仪(Model 205-2, HACH Company, USA)测定。

表 1 厌氧消化液特性

Tab. 1 Characteristics of anaerobic digestion

参数	数值
pH 值	8.03 ± 0.05
TS/%	1.93 ± 0.02
COD/(mg·L^{-1})	5 585 ± 120
BOD_5/(mg·L^{-1})	895 ± 176
NH_4^+-N 质量浓度/(mg·L^{-1})	1 449 ± 62

1.3 试验设计

利用响应面法(RSM)进行参数优化,利用二阶多项式近似拟合数学模型。RSM 是一种有效的工艺优化工具[29],能够很好地评估参数的交互作用。试验选取气流量、投碱量和气液比作为控制参数,分别记为变量 x_1、x_2 和 x_3,按照 Box-Behnken Design (BBD)方法设计了三因素三水平共计 15 个试验点的试验方案,因素水平和编码详见表 2。

表 2　BBD 试验变量和编码

Tab. 2　Variables and coding standards of Box－Behnken design

因子	水平		
	－1	0	1
气流量/(L·min^{-1})	6	8	10
投碱量/g	16	20	24
气液比	1 500	2 250	3 000

利用 RSM 进行多项式拟合，将得到一个二次多项式模型

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (1)$$

式中　Y——响应值，NH_4^+-N 去除率，%

b_0——截距

b_1、b_2、b_3——线性系数

b_{12}、b_{13}、b_{23}——交互项系数

b_{11}、b_{22}、b_{33}——二次项系数

2　试验结果

2.1　NH_4^+-N 去除率及预测模型的建立

试验按照编码顺序进行，15 个试验点的结果见表 3。

表 3　试验设计与结果

Tab. 3　Experimental design matrix and results

序号	x_1/(L·min^{-1})	x_2/g	x_3	Y/%
1	10	16	2 250	75. 59
2	8	16	3 000	83. 82
3	6	16	2 250	77. 28
4	8	24	1 500	81. 45
5	10	20	3 000	94. 47
6	6	20	1 500	79. 55
7	6	20	3 000	96. 44
8	8	16	1 500	60. 07
9	8	20	2 250	89. 58
10	10	20	1 500	74. 80
11	10	24	2 250	88. 35
12	8	24	3 000	95. 48
13	8	20	2 250	88. 47
14	6	24	2 250	93. 87
15	8	20	2 250	90. 49

利用 Design－Expert 的方差分析判断模型各项的显著和不显著作用。x_1^2的 p 值远大于 0. 1，表明其对 NH_4^+-N 去除率影响不显著，所以将系数 b_{11} 调为 0。但是如果其他对 NH_4^+-N 去除率影响不显著的交互项 x_1x_2、x_1x_3、x_2x_3（$p > 0.05$）的系数也调整为 0，将增加方程的失拟度，方程拟合效果变差，所以予以保留。调优后，模型的信噪比为 55. 97 > 4，比调优前增加了 6. 5。

模型的 $F = 255.74$，且 $p < 0.000\ 1$，表明适应性显著，3 个自变量对响应值 Y 影响显著。模型失拟项（$F = 0.50 > 0.05$）对于纯误差不显著，说明残差由随机误差引起，各因素与响应值之间非线性方程关系显著。复相关系数为 0. 997 1，表明实测值和预测值高度相关；多元决定系数 $R^2 = 0.993\ 2$，拟合度大于 90%，试验误差较小，99. 32% 的试验数据变异性可用此回归模型来解释；$R^2_{Adj} - R^2_{Pred} = 0.010\ 9$，变异系数为 0. 98%，表明模型可信度和精确度高。上述回归方差分析结果说明模型能够很好地反映响应值变化情况，可分析和预测该工艺条件下 NH_4^+-N 的去除率。

根据优化结果，各个系数值被确定，得到一个优化后的预测 NH_4^+-N 去除率的二次多项式，公式为

$$Y = -89.63 - 1.74x_1 + 7.80x_2 + 9.29x_3 - 0.96x_1x_2 + 0.70x_1x_3 - 2.43x_2x_3 - 5.94x_2^2 - 3.40x_3^2 \quad (2)$$

2.2　模型的验证

在 Criteria 中，将 NH_4^+-N 去除率目标设置为 100%，在参数取值范围内 Design－Expert 给出 17 组优化组合，选取第 1 组（x_1 = 6 L/min、x_2 = 22. 13 g、x_3 = 3 000）用于验证模型可靠性。验证试验结果为（96. 55 ± 0. 21）%，相比于式（2）计算得到的最优预测值 98. 25%，预测精度分别达到 98. 11%、98. 50% 和 98. 19%。验证结果进一步表明：该模型能较好地预测两阶段闭式循环氨脱除工艺下厌氧消化液 NH_4^+-N 去除情况。

3　讨论

3.1　残差与因子交互效应

残差是指观测值与预测值之间的差，即实际值与回归估计值的差。模型外学生化残差的每个数据点均落在（－2，2）区间内，无离群值，即在 95% 的置信区间内无异常试验点；图 2 显示了 NH_4^+-N 去除率的预测值与实际值之间的关系，这些点聚集在对角线的两侧，表明试验值与预测值关系令人满意，模型鲁棒性较好。

图 3 是气流量 6 L/min、投碱量 22. 13 g、气液比 3 000 条件下，所得交互项的响应面图。随着投碱量的增加，NH_4^+-N 去除率并不是持续增加，原因是随着投碱量的增加，厌氧消化液的表面张力降低，气泡变小，液体黏度变大，气泡到达液面时不能及时破裂，导致氨的传质过程受到一定的抑制。

图 3a 表明随着气液比的增加，NH_4^+-N 去除率逐渐增高。在投碱量不低于 20 g 的条件下，气液比

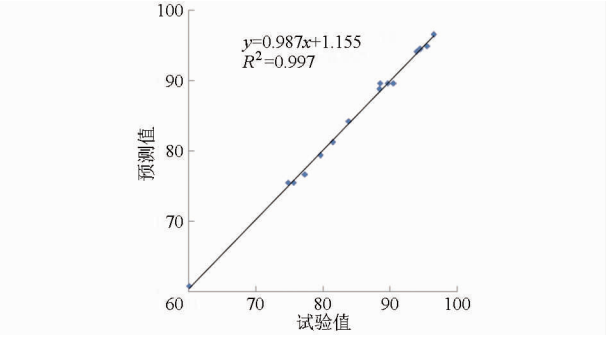

图 2 预测值与试验值关系图

Fig. 2 Predicted value *vs* real value

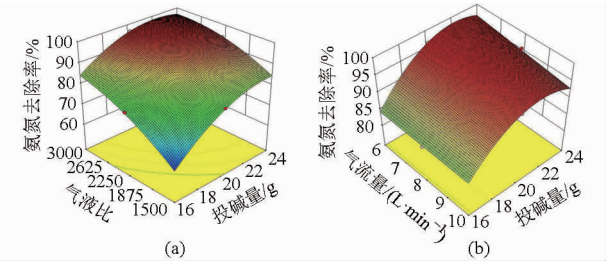

图 3 因素交互作用响应曲面图

Fig. 3 Response of factor interactions

(a) $Y=f(6, x_2, x_3)$响应曲面图

(b) $Y=f(x_1, x_2, 3\,000)$响应曲面图

大于 2 000 后,NH_4^+-N 去除率无明显优势,这与 Guštin 等的研究结果相同[19],他们的研究结果也表明氨氮吹脱工艺的气液比适宜控制在 1 500 ~ 2 000。

图 3b 说明随着气流量的增加,在相同气液比条件下,NH_4^+-N 去除率呈下降趋势。试验中,气体的表观流速在形成湍流的范围内。随着气流量的增加,达到相同气液比的时间越来越短,但湍流作用越来越显著,可以明显地观察到即将到达液面的一部分气泡被湍流重新拉入液体中,这部分气泡不能及时逸出破裂,导致气泡中的 NH_3-N 可能返溶到液体中,影响传质过程。

3.2 厌氧消化液理化性质的变化

生物降解能力通常被用于描述废水的降解性能,其中 COD 与 NH_4^+-N 含量之比和 BOD_5 与 COD 之比是 2 个重要指标,传统生物处理需要较高的 BOD_5 与 COD 之比[30],而试验用厌氧消化液 COD 与 NH_4^+-N 含量之比和 BOD_5 与 COD 之比均不在传统生物处理的适宜范围内。

试验用厌氧消化液初始 COD 与 NH_4^+-N 含量之比为 3.85,小于 5,表明其生化性较差。在吹脱气液比为3 000 时,处理液 COD 与 NH_4^+-N 含量之比在不同投碱量条件下(16 g、20 g、22.13 g、24 g),其变化范围为13 ~ 65,表明该工艺能够有效地去除能够产生毒害作用的 NH_4^+-N,有利于提高处理液的生物降解性。

BOD_5 与 COD 之比小于 0.1,表明厌氧消化液中有难降解的有机分子[31],BOD_5 与 COD 之比为 0.3 被视为废水可生化降解的下限,厌氧消化液初始 BOD_5 与 COD 之比为 0.16,而验证试验结束时 BOD_5 与 COD 之比仅为 0.08,处理液的生物降解性变差。这主要是因为投加的 Ca^{2+} 会产生与铁盐和铝盐相似的絮凝作用,厌氧消化液中的胶体和有机物等被沉淀移除[32]。经该系统及工艺处理后,厌氧消化液 COD 质量浓度基本维持在 3 000 mg/L 的水平上,达不到排放标准。

虽然 BOD_5 与 COD 之比的变化致使处理液生物降解能力下降,而 COD 与 NH_4^+-N 含量之比的变化结果则表明 NH_4^+-N 质量浓度降低则能降低其对生物处理过程的微生物的毒害作用。处理液 NH_4^+-N 质量浓度为(50 ± 5) mg/L,低于 80 mg/L 的排放标准,对于厌氧消化液下一步深度处理起到重要作用。

3.3 两阶段闭式循环工艺特点

脱除厌氧消化液中的 CO_2 能够升高其 pH 值[33-34]。试验第 1 阶段所需气液比设定为 180,厌氧消化液 pH 值从 8.03 升高到 8.86。如果想要进一步提升 pH 值,则需要更多气流量,这一结果与 Cohen 等[33]的研究相同。当 pH 值升高到 8.60 时,厌氧消化液中 35% ~40%(体积比)的 CO_2 将被吹脱下降至 0.035%[1]。系统内 CO_2 将被 $Ca(OH)_2$ 溶液吸收,CO_2 分压的降低有利于其快速地被移除。相比之下,用未脱除 CO_2 的空气吹脱厌氧消化液,需要 2 h 才能将 pH 值提升到 8.81,而在此系统的闭式循环工艺下仅需 1 h,不难得出,该工艺能够更快地提升厌氧消化液的 pH 值。李小平等[34]在进气端采用 $Ca(OH)_2$ 溶液吸收空气中的 CO_2 的方法处理 1 L 厌氧消化液,在气流量为 3 L/min 的条件下,2 h 可以将厌氧消化液 pH 值提升到 9.00。本研究利用 6 L/min 的气流量处理 2 L 厌氧消化液,1 h 时 pH 值可以上升到 8.86。这一结果与李小平的研究有一定区别:①由于厌氧消化液取自 2 个不同发酵工艺的沼气工程,消化液性质有差异。②李小平的研究吹脱时间比本研究多 1 h。2 个研究结果都表明,脱除 CO_2 可用于提升厌氧消化液的 pH 值,能够减少后续提升厌氧发酵液 pH 值所需 CaO 投加量。

第 1 阶段能够降低厌氧消化液的缓冲能力。厌氧消化液起始碱度为(8 953 ± 297) mg/L(以 $CaCO_3$ 计),在气液比 180 时,气流量为 6、8、10 L/min 时处理液碱度分别达到(8 283 ± 21) mg/L、(8 426 ± 131) mg/L、(8 481 ± 96) mg/L。脱除 CO_2 有利于降

低厌氧消化液的缓冲能力。

第 2 阶段，CaO 被投到厌氧消化液后，其 pH 值在气液比 300 时能够达到 12.33。在气液比 500 时基本达到稳定，500 到 3 000 的过程中，pH 值波动范围小于 0.2。隋倩雯等[20]的研究表明投加氧化钙搅拌处理猪粪厌氧消化液，6% ~10% 氮会通过挥发而损失。本研究厌氧消化液 pH 值的上升是依靠气流产生的水力作用促使 CaO 溶解完成的，气流造成的紊流保证 CaO 不能沉降。但这一过程相对于采用 NaOH 提升 pH 值需要更多的时间来完成，一方面 CaO 与水反应生成的 $Ca(OH)_2$ 微溶于水，而 NaOH 极易溶于水；另一方面 CaO 粉末投到厌氧消化液后，与水反应释放大量热能，在热量、悬浮物和外层 $Ca(OH)_2$ 等共同作用下，形成比较致密的阻隔层，致使内部反应受阻。在闭式循环系统中，厌氧消化液中的 OH^- 不会与大气中的 CO_2 反应，因此无需投加多余的 CaO 来维持较高的 pH 值，且能够保持较高的离解率，换言之系统能够节省大量碱。

4　结论

（1）两阶段闭式循环氨脱除工艺在第 1 阶段起到脱除 CO_2 的重要作用，能够提高厌氧消化液 pH 值；第 2 阶段，在气流量 6 L/min、投加 CaO 22.13 g、气液比 3 000 条件下，NH_4^+-N 去除率最高可达 96.78%，该工艺可用于猪粪厌氧消化液的 NH_4^+-N 脱除。

（2）两阶段闭式循环氨脱除工艺能够减少向厌氧消化液投加 CaO 的质量。第 1 阶段脱除消化液中的 CO_2 可以减少提升消化液 pH 值所需 CaO 的量为 36.4 mg/L，第 2 阶段封闭系统在单位气液比条件下相比开放式空气吹脱法可以减少 CaO 的投加量为 0.75 mg。

参　考　文　献

1　孙锦宜. 含氮废水处理技术及应用［M］. 北京：化学工业出版社，2003：33，94.

2　Zeng R J，Lemaire R，Yuan Z G，et al. Simultaneous nitrification，denitrification，and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor［J］. Biotechnology Bioengineering，2003，84(2)：170 - 178.

3　Buosi P R B，Pauletto G M，Lansac-Tôha L A，et al. Ciliate community associated with aquatic macrophyte roots：efforts of nutrient enrichment on the community composition and species richness［J］. European Journal of Protistology，2011，47(2)：86 - 102.

4　国家海洋局. 2013 年中国海洋环境状况公报［R］. 国家海洋局，2014.

5　Hao X Y，Chang C. Effect of 25 annual cattle manure applications on soluble and exchangeable cations in soil［J］. Soil Science，2002，167(2)：126 - 134.

6　张攀，仲勉，管晶晶，等. 应用溶浊器/后置膜系统分析上海大气 PM2.5 中水溶性离子的组成及采样误差［J］. 地球化学，2013，42(3)：197 - 204.
Zhang Pan，Zhong Mian，Guan Jingjing，et al. Concentration and sampling artifacts of water-soluble ions in PM2.5 in Shanghai sampled using denuder/backup-filter system［J］. Geochimica，2013，42(3)：197 - 204.（in Chinese）

7　邓利群，李红，柴发合，等. 北京市东北城区冬季大气细粒子与相关气体污染特征［J］. 中国环境科学，2010，30(7)：954 - 961.
Deng Liqun，Li Hong，Chai Fahe，et al. Pollution characteristics of the atmospheric fine particles and related gaseous pollutants in the northeastern urban area of Beijing in winter season［J］. China Environmental Science，2010，30(7)：954 - 961.（in Chinese）

8　寿幼平，高晓梅，王静，等. 济南秋季大气 PM2.5 中水溶性离子的在线观测［J］. 环境科学研究，2010，23(1)：41 - 47.
Shou Youping，Gao Xiaomei，Wang Jing，et al. Online measurement of water-soluble ions in fine particles from the atmosphere in autumn in Jinan［J］. Research of Environmental Science，2010，23(1)：41 - 47.（in Chinese）

9　Clemens J，Trimborn M，Weiland P，et al. Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry［J］. Agriculture，Ecosystems & Environment，2006，112(2 - 3)：171 - 177.

10　任南琪，王爱杰. 厌氧生物技术原理与应用［M］. 北京：化学工业出版社，2004：9 - 12.

11　Rousseau P，Stryer J P，Volcke E I P，et al. Combined anaerobic digestion and biological nitrogen removal for piggery wastewater treatment：a modeling approach［J］. Water Science & Technology-WST，2008，58(1)：133 - 141.

12　Deublein D，Steinhauser A. Biogas from waste and renevable resources［M］. Weinheim：Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA，2008：57 - 78.

13　Deng L W，Zheng P，Chen Z A. Anaerobic digestion and post-treatment of swine wastewater using IC-SBR process with bypass of raw wastewater［J］. Process Biochemistry，2006，41(4)：965 - 969.

14　许振成，谌建宇，曾雁湘，等. 集约化猪场废水强化生化处理工艺试验研究［J］. 农业工程学报，2007，23(10)：204 - 209.
Xu Zhencheng，Chen Jianyu，Zeng Yanxiang，et al. Experimental research on piggery farm wastewater treatment by enhanced biological process［J］. Transactions of the CSAE，2007，23(10)：204 - 209.（in Chinese）

15 孟海玲, 陶秀萍, 董红敏, 等. 猪场厌氧出水后续处理效果的测定[J]. 农业工程学报, 2006, 22(增刊2): 231-234.
Meng Hailing, Tao Xiuping, Dong Hongmin, et al. Measurement of post-treatment efficiency for anaerobic digestion effluent from swine wastewater treatment [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(Supp.2): 231-234. (in Chinese)
16 林伟华, 蔡昌达. CSTR-SBR 工艺在畜禽废水处理中的应用[J]. 环境工程, 2003, 21(3): 13-15.
17 鲍小丹, 叶志隆, 马建华, 等. 鸟粪石回收养猪废水中磷时 pH 对沉淀物组分的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(9): 2598-2603.
Bao Xiaodan, Ye Zhilong, Ma Jianhua, et al. Effect of pH on precipitate composition during phosphorous recovery as struvite from swine wastewater [J]. Environmental Science, 2011, 32(9): 2598-2603. (in Chinese)
18 Bonmati A, Flotats X. Air stripping of ammonia from pig slurry: characterization and feasibility as a pre- or post-treatment to mesophilic anaerobic digestion [J]. Waste Management, 2003, 23(3): 261-272.
19 Guštin S, Marinŝek-Logar R. Effect of pH, temperature and air flow rate on the continuous ammonia stripping of the anaerobic digestion effluent [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2011, 89 (1): 61-66.
20 隋倩雯, 董红敏, 朱志平, 等. 提高猪场厌氧消化液净化处理效果的氨吹脱控制参数[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 205-211.
Sui Qianwen, Dong Hongmin, Zhu Zhiping, et al. Ammonia stripping control parameters for improving effluent treatment effect in anaerobic digesters of piggery wastewater [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11): 205-211. (in Chinese)
21 Laureni M, Palatsi J, Llovera M, et al. Influence of pig slurry characteristics on ammonia stripping efficiencies and quality of the recovered ammonium-sulfate solution [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2013, 88(9): 1654-1662.
22 Cheung K C, Chu L M, Wong M H. Ammonia stripping as a pretreatment for landfill leachate [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1997, 94(1-2): 209-221.
23 Pi K W, Li Z, Wan D J, et al. Pretreatment of municipal landfill leachate by a combined process [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2009, 87(3): 191-196.
24 Ozyonar F, Karagozoglu B, Kobya M. Air stripping of ammonia from coke wastewater [J]. Jestech, 2012, 15(2): 85-91.
25 Minocha V K, Rao A V S P. Ammonia removal and recovery from urea fertilizer plant waste [J]. Environmental Technology Letters, 1988, 9(7): 655-664.
26 Başakçilardan S, İpekoğlu A N, Talinli İ. Recovery of ammonia from human urine by stripping and absorption [J]. Environmental Engineering Science, 2007, 24(5): 615-624.
27 孙友, 张超, 李本高. 物化法处理垃圾渗滤液的研究进展[J]. 工业水处理, 2013, 33(1): 1-5.
Sun You, Zhang Chao, Li Ben'gao. Research progress in the treatment of landfill leachate by physic-chemical methods [J]. Industrial Water Treatment, 2013, 33(1): 1-5. (in Chinese)
28 董军, 李建波. 塔板技术的发展现状与研究展望[J]. 石油炼制与化工, 2007, 38(11): 46-51.
Dong Jun, Li Jianbo. Present status and research prospect of tray technology [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2007, 38(11): 46-51. (in Chinese)
29 Gholami R M, Mousavi S M, Borghei S M. Process optimization and modeling of heavy metals extraction from a molybdenum rich spent catalyst by aspergillus niger using respose surface methodology [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2012, 18(1): 218-224.
30 Lema J M, Mendez R, Blazquez R, et al. Characteristics of landfill leachates and alternatives for their treatment: a reviews [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1988, 40(3-4): 223-250.
31 Kim S, Hong S, Kim G, et al. Source identification and characterization of the accumulating non-biodegradable organics in Korean reservoirs [J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(4): 1056-1065.
32 Quan Xuejun, Ye Changying, Xiong Yanqi, et al. Simultaneous removal of ammonia, P and COD from anaerobically digested piggery wastewater using an integrated process of chemical precipitation and air stripping [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178(1-3): 326-332.
33 Cohen Y, Kirchmann H. Increasing the pH of wastewater to high levels with different gases-CO_2 stripping [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2004, 159(1): 265-275.
34 李小平, 魏泉源, 金明军, 等. CO_2 吹脱提升厌氧消化液 pH 值研究[J]. 中国沼气, 2010, 28(3): 3-7, 27.
Li Xiaoping, Wei Quanyuan, Jin Mingjun, et al. Increasing the fementation slurry pH inside digester by carbon dioxide stripping [J]. China Biogas, 2010, 28(3): 3-7, 27. (in Chinese)