

## 基于沼液浓缩的液态有机肥利用现状与展望

崔文静, 李施雨, 李国学, 陈清, 李赟, 张邦喜, 罗文海

### 引用本文:

崔文静, 李施雨, 李国学, 等. 基于沼液浓缩的液态有机肥利用现状与展望[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(11): 2482-2493.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0996>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 沼液与有机肥配施条件下氮损失风险的研究

周炜, 孙国峰, 王鑫, 童红玉, 盛婧

*农业环境科学学报*. 2019, 38(8): 1743-1750 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1614>

### 沼液板式超滤膜预处理试验研究

杨顾坤, 朱洪光, 沈根祥, 张中华, 石惠娴, 王旦一, 钱晓雍, 史建国

*农业环境科学学报*. 2020, 39(7): 1643-1648 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0546>

### 秋闲期沼液施用对黑土区土壤氮素损失的影响

刘聪, 郑瑶琪, 刘爽, 刘庆平, 闫立龙

*农业环境科学学报*. 2021, 40(11): 2528-2536 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1022>

### 长期粪肥还田条件下稻米品质及氮肥利用率

孙国峰, 王鑫, 盛婧, 张丽萍, 王子臣, 周炜

*农业环境科学学报*. 2021, 40(11): 2521-2527 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1023>

### 高效液相色谱-荧光检测法同时分析沼液中4种喹诺酮类抗生素

贺南南, 管永祥, 梁永红, 吴昊, 罗朝晖, 赵海燕, 顾祖丽

*农业环境科学学报*. 2016, 35(10): 2034-2040 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0442>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

崔文静, 李施雨, 李国学, 等. 基于沼液浓缩的液态有机肥利用现状与展望[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2482–2493.  
CUI W J, LI S Y, LI G X, et al. Current research status and perspectives on liquid organic fertilizer utilization based on concentrating biogas slurry[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2482–2493.



开放科学 OSID

# 基于沼液浓缩的液态有机肥利用现状与展望

崔文静<sup>1</sup>, 李施雨<sup>1</sup>, 李国学<sup>1</sup>, 陈清<sup>1</sup>, 李贇<sup>2</sup>, 张邦喜<sup>3</sup>, 罗文海<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109; 3. 贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵阳 550006)

**摘要:** 厌氧发酵是解决有机废弃物处理与资源化利用的有效手段, 然而发酵残余物——沼液的处理利用成为限制厌氧发酵技术发展的关键因素。沼液中富含养分及活性物质, 可作为有机肥还田, 在农田承载力和运输成本的双重约束下, 沼液浓缩制肥技术迅速发展。沼液浓缩不仅可以减少储存和运输成本, 还可以大幅度提高单位体积沼液中的养分含量, 复配成高品质有机肥, 分离后的水还可回用或达标排放。本文通过查阅文献, 根据现阶段的沼液浓缩技术及浓缩液利用现状, 分析了不同浓缩技术的优缺点及浓缩液制肥潜力, 并对沼液的应用潜力提出了展望及建议。

**关键词:** 沼液; 膜浓缩; 肥料化

中图分类号: S141 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)11-2482-12 doi:10.11654/jaes.2021-0996

## Current research status and perspectives on liquid organic fertilizer utilization based on concentrating biogas slurry

CUI Wenjing<sup>1</sup>, LI Shiyu<sup>1</sup>, LI Guoxue<sup>1</sup>, CHEN Qing<sup>1</sup>, LI Yun<sup>2</sup>, ZHANG Bangxi<sup>3</sup>, LUO Wenhai<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 3. Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China)

**Abstract:** Anaerobic digestion is an effective technique for treatment and resourceful utilization of organic wastes. However, treatment and utilization of biogas slurry is a substantial hurdle to further development of anaerobic digestion. Biogas slurry is rich in nutrients and active substances and can thereby be used as liquid organic fertilizer in agricultural production. Within the constraints of farmland carrying capacity and transportation costs, techniques for concentrating biogas slurry have been developed. Concentrating biogas slurry can reduce storage and transportation costs, and considerably increase unit nutrient content in high-quality organic fertilizer, and the separated water can be reused or discharged to suit local standards. This article discussed the advantages and disadvantages of different technologies for biogas slurry concentration and the potential for subsequent liquid fertilizer production. Perspectives regarding future advances in concentrating biogas slurry were also provided.

**Keywords:** biogas slurry; membrane concentration; fertilization

收稿日期: 2021-08-31 录用日期: 2021-09-29

作者简介: 崔文静(1991—), 女, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事废弃物处理与资源化研究。E-mail: cuiwenjing910311@163.com

\*通信作者: 罗文海 E-mail: luowenhai@cau.edu.cn

基金项目: 中国科学技术协会青年人才托举工程项目

Project supported: Youth Talent Promotion Project of China Association for Science and Technology

我国作为农业生产大国,畜禽粪污、农作物秸秆、厨余垃圾、尾菜等有机废弃物产量巨大。据报道,2017年,全国秸秆产生量为8.05亿t<sup>[1]</sup>,畜禽粪便产量达到23.8亿t<sup>[2]</sup>,厨余垃圾产生量约在1.58亿t<sup>[3]</sup>。若这些农业废弃物处置不当,将会产生一系列的环境问题。第二次环境污染普查公告显示,农业源氮、磷排放量分别占氮、磷总排放量的46.7%和65.6%,其中畜禽养殖业的全氮、全磷排放量,占全国农业源排放总量的比例分别为49.3%和66.7%。

厌氧发酵技术可以有效转化有机废弃物,并产生清洁能源沼气,沼液沼渣也可以还田利用,实现有机废弃物的无害化、资源化与肥料化利用<sup>[4]</sup>。农业农村部数据表明,用于处理农业废弃物的沼气厂数量一直在增长,截至2017年底,已达10.97万座,产气量占总沼气产量的19%。沼气工程在利用废弃物产沼气的同时,还会产生大量的副产物——沼液和沼渣。其中,沼渣可堆肥后作为有机肥使用,也可直接作为育苗和食用菌基质,或作为饲料、饵料及垫料,具有丰富的利用途径<sup>[5]</sup>。

相比于沼渣,沼液的产量巨大,含水率高,处理利用的难度也相应增大。据报道,原料经厌氧发酵形成的沼液可保留原料中90%以上的养分<sup>[6]</sup>。因此,将沼液用作有机肥,有助于改善土壤和作物品质<sup>[7]</sup>。陈永杏等<sup>[8]</sup>的研究表明,猪粪沼液可将表层土壤有机质含量增加至3.0 kg·hm<sup>-2</sup>,同时总氮含量增加65%。杨合法等<sup>[9]</sup>的研究也证明,施用沼液可以全面提高耕层土壤的养分含量,使其有机质含量提高12.7%。舒秀丽等<sup>[10]</sup>的研究表明,随施用沼液量的增加,土壤中有效微生物菌群显著增加,土壤有机质养分含量也显著增加,且提高了土壤脲酶和多酚氧化酶活性。此外,沼液施用可以提高作物品质,如降低蔬菜的硝酸盐含量<sup>[11]</sup>,增加水果和蔬菜的维生素C含量<sup>[12]</sup>,增加作物中蛋白质和矿物质含量<sup>[13-14]</sup>等。除氮磷钾养分外,沼液中还富含其他有效成分。霍翠英等<sup>[15]</sup>验证了沼液中含有吲哚乙酸、赤霉素和细胞分裂素3种植物激素,对解释沼液可以促进作物生长、改良土壤具有一定的参考价值。另外,沼液中还检测出8-羟基-3,4-二氢喹啉-2-酮和3,4-二氢喹啉-2-酮喹啉酮等具有广谱抗菌活性的抗生素成分,这些成分对细菌、真菌性病毒具有良好的防治效果,进而验证沼液对小麦、甜菜、亚麻等常见病有较好的控制效果。孟庆国等<sup>[16]</sup>检测了7种不同沼液中的游离氨基酸,其中鸡粪沼液和猪皮汤沼液中氨基酸的种类和含量均高于其他沼液。

我国的厌氧发酵工艺主要为湿法发酵,沼液占发酵副产物总质量的80%以上。但是,目前大型沼气工程周围通常缺乏足够的土地消纳沼液<sup>[17]</sup>。伍福琳<sup>[18]</sup>的研究表明,不同作物-土壤系统对沼液具有不同的消纳和承载能力,其中承载量在0.039~1 584 t·hm<sup>-2</sup>不等。超负荷施用沼液可能会引起烧苗、土壤溶液浓度高和土壤氮磷积累等现象,从而导致在实际中广泛应用难度较大。因此,沼液能否安全、高效地处理与资源化利用,成为制约沼气工程发展的重要因素。

近年来,沼液浓缩技术逐渐被关注,沼液经浓缩后可将体积减少一半以上,这不仅减少了储存与运输空间和成本,还能大幅提高单位体积沼液的养分含量,从而增强了沼液制肥的潜力<sup>[19]</sup>,并可进一步复配成高品质有机肥。另外,经沼液浓缩分离后的水,可直接进行场区回用或者达标排放,从而实现沼液的水肥分质利用,有利于扩展沼液肥料化利用的广度和维度。

本文基于当前的研究进展,系统地梳理了沼液浓缩技术及浓缩液的应用现状,分析了沼液浓缩技术的优缺点及浓缩液制肥方案,并进一步阐明了沼液浓缩制肥的可行性与发展前景。

## 1 沼液浓缩技术

沼液中含有较丰富的养分及生物活性物质,相比较成本的市政污水处理技术,如果能对其中的主要营养元素进行合理的高附加值开发,则可有效弥补沼液处理中的成本投入<sup>[20]</sup>。现有的沼液资源化技术主要有气体吹脱法、化学沉淀法、生物电化学法、吸附法、微藻养殖、膜分离技术等<sup>[21]</sup>。其中,针对沼液体量大、运输成本高的问题,沼液浓缩技术可以大幅降低沼液的体积,从而在一定程度上降低沼液运输成本。目前针对沼液浓缩技术的研究主要为膜过滤、蒸发、冷冻和萃取浓缩技术等,见表1。

### 1.1 沼液膜浓缩技术

膜技术浓缩沼液是通过水分子等穿过膜进入另一侧,而营养物质被截留,从而使浓度提高。膜技术作为一种物理分离技术,分离过程中不发生化学变化,还具有分离效率高、不产生二次污染、操作简便安全等优点<sup>[25]</sup>,不仅能产生可回用的清水,还能大幅减少浓缩液体积,便于储运<sup>[26]</sup>。膜技术主要包括微滤、超滤、纳滤、反渗透等及其组合技术(图1),该技术在沼液的浓缩处理中得到了一定的应用,不同膜技术的养分回收及其出水品质有所不同。

表1 不同沼液浓缩技术对比

Table 1 Comparison of different biogas slurry concentration technologies

浓缩技术 Concentration technology	原料 Raw material	处理效果 Treat effect	优缺点 Advantagy and disadvantagy	参考文献 Reference
膜浓缩技术	超滤	牛粪沼液 体积浓缩为原来的4%~20%;COD截留率约70%,NH <sub>4</sub> -N、K <sup>+</sup> 等小分子物质截留率为22%~40%	优点:可截留大分子有机物; 缺点:浓缩液中易产生浓差极化,造成膜污染,对小分子物质截留效果差	[22-24]
	纳滤	猪粪沼液 体积浓缩为原来的4.2%~50%;磷截留率约96.4%~97.2%,常规营养元素、微量元素和活性物质浓度提高10~20倍	优点:可截流分子量低的无机盐; 缺点:运行所需压力较高、膜污染严重	[25-27]
	反渗透	猪粪沼液 体积浓缩为原来的10%~50%,无机盐离子可提高3~6倍	优点:出水水质较高,可回用或直接还田; 缺点:运行压力大、能耗高、膜污染严重	[28]
	膜蒸馏	猪粪沼液 体积浓缩为原来的30%,水溶态的NH <sub>4</sub> 可回收99%以上,COD、TOC和蛋白质的截留率超过95%	优点:可实现近100%的氨氮截留; 缺点:热能耗高,化学品消耗量大	[17]
	正渗透	猪粪沼液 体积浓缩为原来的20%~30%,浓缩液中K、TP、TN的回收率超过80%,COD、腐植酸和氨基酸的回收率高于99.5%	优点:操作简单、能耗小、溶质截留率高; 缺点:透过液无法直接利用,需要进一步脱盐处理	[29]
	超滤+纳滤	猪粪沼液 体积浓缩为原来的4%~25%,氨基酸和蛋白质含量提高了约10倍,盐分、悬浮物、TN、NH <sub>4</sub> 截留率超过90%	优点:养分回收率高,出水水质稳定; 缺点:成本较高	[27]
	超滤+反渗透	猪粪沼液 体积浓缩为原来的25%,TN浓度提高97.95%,COD、TP截留率分别为99.43%、99.73%	优点:养分回收率高、脱盐率高; 缺点:膜污染严重、成本较高	[30]
蒸发浓缩技术	负压蒸发技术	人粪沼液 体积浓缩为原来的10%,浓缩液中TP和K的质量浓度是原液的10倍	优点:能耗较低,避免沼液受到高温发生质变; 缺点:占地面积大、氨氮损失量较大	[31]
	多效蒸发技术	— 体积缩小70.9%,有效物质浓度由10%提高到34.3%	优点:降低蒸汽用量,节省能耗,投资较低,操作简便; 缺点:占地面积较大,初次投入成本较高	[32]
冷冻浓缩技术	— 酒糟沼液	可去除97%以上的氨氮和有机物,91%以上的盐	优点:保存热敏、易挥发物质,设备不易结垢; 缺点:结晶物质易被损失,设备投资较大	[33]
萃取浓缩技术	— 猪粪沼液	萃取浓缩沼液中的活性物质,可有效抑制病原菌的生长	优点:萃取物纯度较高,针对性较强; 缺点:萃取方法复杂,难以大规模开发利用	[34]

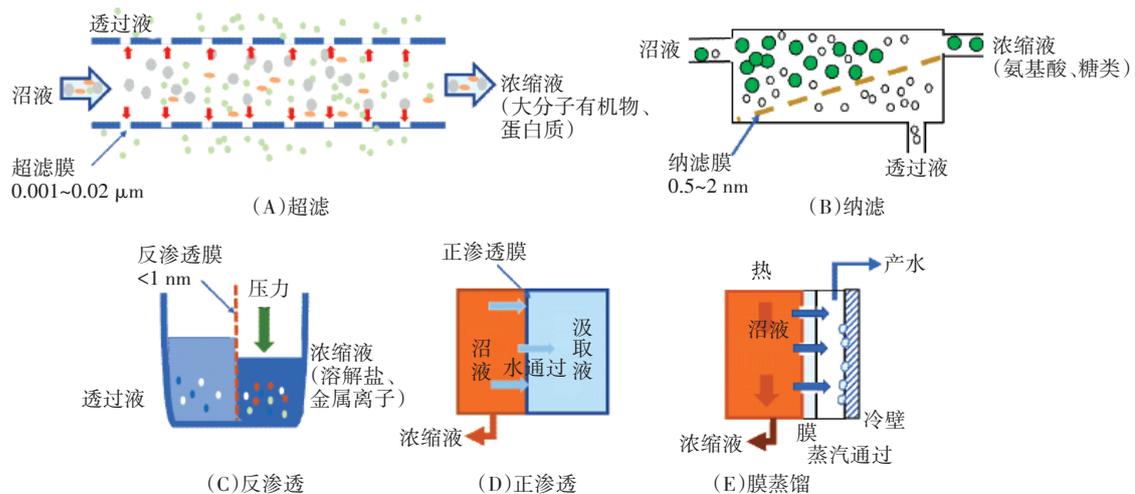


图1 不同膜浓缩技术示意图

Figure 1 Schematic diagram of different membrane concentration technologies

1.1.1 沼液超滤浓缩技术

超滤(Ultrafiltration, UF)是利用多孔膜材料的拦截能力,以物理截留的方式筛分水质的杂质颗粒(图1A)。国内外的研究表明,UF膜可以将沼液浓缩为原

体积的4%~25%,且对大分子物质如蛋白质、腐植酸,以及全氮(TN)、全磷(TP)等截留率较高<sup>[22-24]</sup>。陆佳等<sup>[22]</sup>采用UF膜处理牛粪沼液时发现,当体积浓缩至原来的20%~25%时,沼液浓缩液中化学需氧量

(COD)为原液的4倍,TN为原液的2.5倍,透过液中的COD和悬浮物(SS)能够达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)的要求( $COD \leq 400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $SS \leq 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。杨顾坤等<sup>[23]</sup>发现UF膜对生活污泥沼液中COD的截留率较高,可达70%。魏玉珍等<sup>[24]</sup>的研究表明,采用UF膜可将牛粪沼液体积浓缩至原来的4%,蛋白质等大分子量物质被完全截留。任秋慧<sup>[37]</sup>的研究表明,超滤系统可以将进料液体积浓缩为原来的20%,并且具有较高的SS、TP截留率,分别达到99.20%和80.21%。但是,KONIECZNY等<sup>[38]</sup>的研究发现,UF膜对于小分子物质的分离效果不佳,截留率仅为17%。因此,需要对UF透过液进一步处理,以满足严格的污水排放或回用标准。

#### 1.1.2 沼液纳滤浓缩技术

纳滤(Nanofiltration, NF)又称为低压反渗透,孔径通常为几纳米,对二价和多价离子及分子量在200~2 000 Da之间的大分子有机物有较高的截留能力,而对单价离子和小分子有机物的阻截效率较低<sup>[25]</sup>(图1B)。徐国锐<sup>[25]</sup>在对经砂芯过滤器预处理过的牛粪沼液进行NF膜浓缩试验中发现,在体积浓缩至原来的25%时,沼液浓缩液中COD、TN、TP、 $K^+$ 含量为原液的3倍, $Cu^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 等多价微量金属离子浓度都随浓缩倍数的增加而提高,说明NF膜对沼液中二价离子有较好的截留效果。张聪<sup>[39]</sup>通过小试试验表明,采用NF技术浓缩猪粪沼液为原体积的1/6时,N、P、K浓度分别提高了2.06、3.10倍和3.70倍。曾令泽<sup>[40]</sup>采用中心设计响应曲面法(CCD)优化沼液NF膜浓缩的工艺条件,研究表明,体积浓缩为原来的1/8时,TN、 $NH_4^+$ 、 $K^+$ 、TP、腐植酸的浓缩倍数分别达到5.51、4.33、4.86、5.73、6.12倍。另外,CHEN等<sup>[41]</sup>的研究发现,利用NF膜处理废水,当废水中大分子物质较多时,随着试验的进行,膜通量会出现大幅度下降,从而严重影响污水处理效率。

#### 1.1.3 沼液反渗透浓缩技术

反渗透(Reverse osmosis, RO)膜理论上可以截留所有分子量大于100 Da的有机物(图1C),并且可以截留90%的可溶性盐<sup>[42]</sup>。据报道,使用RO膜在将沼液体积浓缩至原来的10%~50%的同时,对COD、TN、TP、 $NH_4^+$ 、 $K^+$ 的截留率也能达到80%<sup>[30,43]</sup>。祁步凡<sup>[44]</sup>利用RO膜对猪粪沼液进行10%~100%的体积浓缩试验,结果表明,当体积浓缩至原来的10%时,浓缩液中腐植酸含量上升到0.47%,为原液的5.25倍,TN、TP浓度也分别提升到原液的4.94倍和5.64倍。刘伟

丽等<sup>[45]</sup>将污泥沼液体积浓缩至原来的5%时发现,COD和 $NH_4^+$ 分别浓缩了14.97倍和17.10倍。此外,还有研究表明,采用RO膜浓缩猪粪沼液,浓缩体积至原来的50%时,TN截留率在94%~99%<sup>[46]</sup>。除此之外,张鑫<sup>[47]</sup>的研究表明,沼液中的细菌能堵塞复合膜,也可以醋酸纤维为食,进而使膜受损出现孔堵现象。另外,当浓度积超过溶度积时,也会出现RO膜的表面结垢现象,从而降低脱盐率和产水量。刘向东等<sup>[48]</sup>的研究表明,浓缩液中的组分被滞留在RO膜表面,从而使膜分离性能下降。武林等<sup>[49]</sup>的研究表明,随着体积由100%浓缩至10%,浓缩速率下降60%。

#### 1.1.4 沼液正渗透浓缩技术

正渗透(Forward osmosis, FO)是将渗透压作为驱动力,利用膜两侧渗透压差,将水自动由低渗透压侧送至高渗透压侧,达到原液浓缩或水回收效果(图1D)。李红娜等<sup>[29]</sup>发现以海水作为汲取液的正渗透方式对沼液浓缩效果较好,体积浓缩为原液的1/4,物质回收率可达96.7%,稀释后的海水可直接排放。许美兰等<sup>[50]</sup>的研究发现,FO能够将猪场沼液体积浓缩至原来的20%,对溶解性有机物、养分的截留率均在80%以上。鹿晓菲等<sup>[51]</sup>的研究表明,汲取液为 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 时,沼液体积浓缩至原来的20%时是较为理想的浓缩条件,此时,营养成分可浓缩4.74倍以上,回收率高达94.8%,特别是COD、腐植酸和氨基酸,回收率高达99.5%。然而,FO对沼液中氨氮截留能力较差,通常不足40%,且汲取液难以直接利用或者排放,需要进一步进行脱盐处理。

#### 1.1.5 沼液膜蒸馏浓缩技术

膜蒸馏(Membrane distillation, MD)是一种以蒸汽压差为驱动力的膜分离技术。在沼液浓缩过程中,沼液经加热后,其中的挥发性组分通过膜孔自由扩散,透过疏水膜至冷凝液侧收集,实现沼液的资源回收与减量化处理<sup>[52]</sup>。因此,MD技术能充分利用厌氧发酵过程中的中、高温条件,降低沼液加热的能耗。沼液中的挥发性组分主要包括水分、氨氮以及挥发酸等低含量有机物等<sup>[53-54]</sup>。SHI等<sup>[55]</sup>和ZAREBSKA等<sup>[56]</sup>的研究表明,利用MD技术可从猪场沼液中实现超过99%的水溶态 $NH_4^+$ 回收。YAN等<sup>[57]</sup>的研究发现,将沼液的pH值由8.5酸化至5.0,同时将体积浓缩至原来的20%时,能使 $NH_4^+-N$ 截留率从66%增加至99%。WU等<sup>[58]</sup>采用直接接触膜蒸馏(DCMD)技术处理沼液,可使发酵液体积降低为原来的27%,其中的有机类物质如COD、TOC和蛋白质的截留率超过95%。

但是,目前用于沼液的膜蒸馏处理技术缺少工程实践,其中可循环使用的氨氮接受液也需进一步开发。

### 1.1.6 沼液膜组合浓缩技术

沼液的成分复杂,单一膜技术很难达到理想的浓缩效果。因此,国内外的研究者采用组合膜工艺进行沼液浓缩。研究表明,利用UF+NF技术将猪粪沼液体积浓缩至原来的5%~10%时,浓缩液中的大分子有机物,如腐植酸、蛋白质、氨基酸等的浓度提高了约10倍<sup>[59-60]</sup>。GEBREZGABHER等<sup>[61]</sup>通过UF+RO组合工艺处理猪粪沼液,浓缩液中N、P、K浓度分别达到6.8、0.5、11.6 g·L<sup>-1</sup>。李汪晟<sup>[30]</sup>利用UF+RO组合工艺将沼液体积浓缩至原来的1/4时,TN、NH<sub>3</sub>截留率均超过90%。霍丹阳<sup>[62]</sup>的研究表明,通过微滤(MF)+NF将沼液体积浓缩至原来的2/3时,浓缩液中除有机质外,其他成分均满足《沼肥》(NY/T 2596—2014)的要求。任秋慧<sup>[37]</sup>设计了UF+RO的技术路线对奶牛厂废水进行处理,结果表明,TN、COD和TP的截留率分别能达到98.88%、98.90%和99.96%。近年来,MF+RO组合工艺在和沼液性质类似的垃圾渗滤液处理中的研究逐渐广泛。郭健等<sup>[63]</sup>的研究表明,该工艺对COD、NH<sub>3</sub>的去除率均在90%以上。双膜或者多级膜组合工艺能够利用前端低压多孔膜的截留作用,有效去除沼液中的SS和大分子有机物,降低后端高压膜的污染风险,提高整个系统的稳定性。此外,还可以根据不同级的浓缩液性质,进行定向复配,实现沼液浓缩肥料的产品多元化。

## 1.2 沼液蒸发浓缩技术

蒸发浓缩技术根据操作压力可以分为常压蒸发和负压蒸发,该技术在制糖、制药、食品、石化、废水处理等领域具有稳定的工程应用。近年来,在沼液浓缩处理领域的研究主要围绕负压蒸发技术。另外,多效

蒸发技术因其节省蒸汽、可操作性强的特点也逐渐被关注。

### 1.2.1 沼液负压蒸发技术

负压蒸发是指在低压情况下,料液沸点降低,溶剂分子获得动能克服分子间的吸引力而逸出液面,蒸汽不断排出,从而达到料液浓缩的目的(图2A)。运用负压蒸发浓缩装置处理沼液,既能避免沼液受到高温发生的质变,还能有效浓缩养分。据报道,当污泥沼液采用负压蒸发技术浓缩,浓缩得到的体积低于原来的33%时,TN、TP、TK的浓缩倍数最高可达1.6倍<sup>[64-65]</sup>;白晓凤等<sup>[31]</sup>的研究表明,采用负压蒸发技术,在沼液体积浓缩至原来的10%时,浓缩液中TP和K的质量浓度是原液的10倍;娄佑武等<sup>[66]</sup>采用两级减压浓缩,可将牛粪沼液体积浓缩至原液的4%。郑戈<sup>[67]</sup>的研究表明,在真空度为0.065 MPa时,沼液的浓缩率可达到26.5%。然而,负压蒸发浓缩所需设备占地面积较大,保证真空度需投入的成本较高,难以进行实际工程应用。

### 1.2.2 沼液多效蒸发技术

沼液的蒸发过程是沼液不断地从热源吸热,并持续沸腾让水分汽化的过程。通常第一效的蒸汽来自外源加热,产生的蒸汽经过压缩机增压用于第二效蒸发罐的加热,同理,也用于第三效蒸发,从而形成多效蒸发工艺,以达到节省蒸汽的目的(图2B)。唐弓斌等<sup>[32]</sup>采用三效蒸发后,使沼液体积缩小了70.9%,养分浓度提高了3倍。然而,效数过多不仅会提高成本,同时会增加有效温差的损失,进而降低蒸发强度。

## 1.3 沼液冷冻浓缩技术

冷冻浓缩是指利用冷冻分离的固液相平衡原理,在一定的冷冻条件下,形成上层冰晶、下层浓缩液的两相溶液(图3)。浓缩过程通常在一个很低的温度

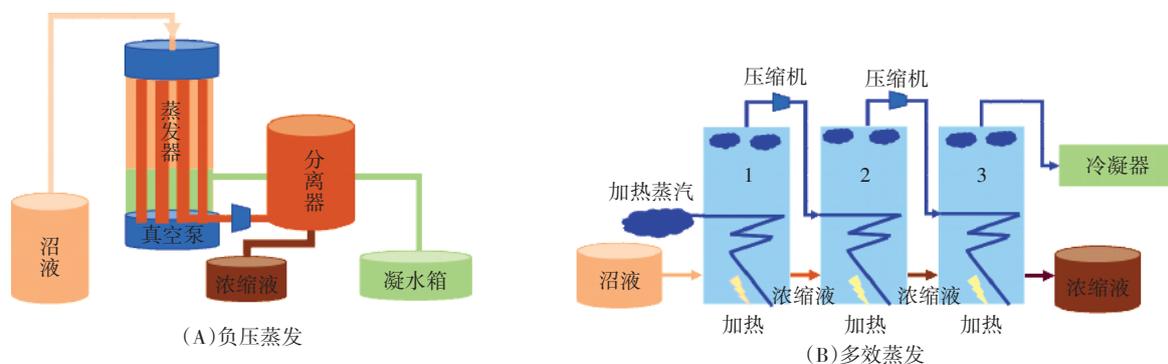


图2 不同蒸发浓缩技术示意图

Figure 2 Schematic diagram of different evaporation and concentration technologies

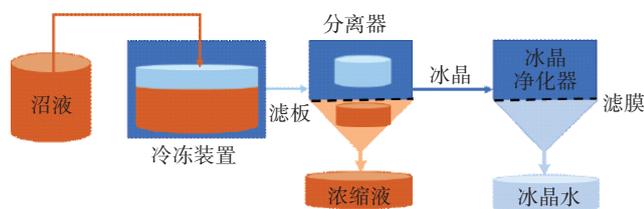


图3 沼液冷冻浓缩技术示意图

Figure 3 Schematic diagram of biogas slurry freezing and concentration technology

下进行,以保证溶液中热敏性物质能够很好地保存。文玲等<sup>[68]</sup>利用冷冻浓缩技术对COD和总有机碳(TOC)的截留率在70%以上。BO-BERTIL等<sup>[69]</sup>应用冷冻技术处理黄水,结果表明,在-14℃时能够回收80%的营养物质。RODRÍGUEZ等<sup>[33]</sup>采用冷冻浓缩技术,有效截留了酒糟沼液中97%以上的氨氮和有机物,以及91%以上的盐。但是,由于沼液成分较复杂,冷冻浓缩受浓度的限制较大,冰晶与浓缩液的可能分离程度也会影响浓缩的效果,且存在不可避免的溶质损失,因此,大规模的工程化应用受限。

#### 1.4 沼液萃取浓缩技术

萃取技术是利用物质在两种互不相溶(或微溶)的溶剂中溶解度或分配系数的不同,使物质从一种溶剂内转移到另外一种溶剂中。刘继红等<sup>[34]</sup>采用萃取浓缩液进行抑菌试验,研究表明,6种有机溶剂萃取得到的萃取浓缩物都对尖孢镰刀菌和腐皮镰孢菌有较好的抑菌效果。张加稳<sup>[70]</sup>利用不同有机溶剂对沼液进行萃取,结果显示,使用乙酸乙酯作为萃取剂对猪粪、玉米秸秆和青蒿3种原料的沼液进行萃取的效果最好。

## 2 沼液浓缩液应用现状

限制沼液浓缩应用的关键因素是设施投资和运行成本高。因此,为抵消运行成本,实现沼液浓缩液的高值化利用尤为重要。沼液浓缩液高值化处理主要是指充分利用浓缩液中保留的营养物质、活性物质和功能成分。主要利用方式有直接利用、混合施用,以及复配制肥高值化利用等。

### 2.1 直接利用

沼液浓缩技术,通常能使其中的养分含量被充分截留,可再供给作物生长利用。付艳艳<sup>[71]</sup>的研究表明,追施沼液浓缩液可增加辣椒产量,并提高辣椒中维生素C、可溶性糖、蛋白质的含量,其中维生素含量比市面叶面肥增幅了18.32%。薛淑华等<sup>[72]</sup>的研究表明,叶面追施沼液浓缩液,可使黄瓜增产率达6%,番

茄增产率达8%。张凤梅等<sup>[73]</sup>的研究表明,根灌沼液浓缩液显著提高了番茄产量,增产率达10%,维生素C含量提高了1.54倍。另有研究表明,浓缩沼液可以显著抑制棉花黄萎病菌菌丝生长、产孢量、分生孢子萌发和微菌核萌发,两次喷施0.50%(体积分数,下同)的浓缩液对棉花黄萎病防治效果为64.89%,而采用根灌的方式施用1.25%的浓缩液的防治效果达到了78.01%<sup>[74]</sup>。另外,黄利民等<sup>[75]</sup>的研究表明,沼液浓缩液施用,还对水稻褐稻虱长翅成虫起到有效的驱避效果,实现害虫的生态治理。

### 2.2 混合施用

沼液浓缩液的养分含量并非能完全满足植物生长所需的所有功能,因此,通常要与化肥、农药联用。刘金<sup>[76]</sup>的研究表明,沼液浓缩液与化肥和鸡粪配施能够显著提高番茄的品质,其中维生素C含量和糖度分别提高了9.36%和49.52%,亚硝酸盐含量降低了27.05%。据报道,种植油菜时,配施沼液浓缩液和化肥可增产9.7%,同时还能提高油菜籽的品质<sup>[77]</sup>。有研究表明,沼液浓缩液与粗木醋液配施,可以缓释沼液浓缩液养分,还可以有效降低农田土壤的温室气体排放<sup>[78-79]</sup>。刘民晓等<sup>[80]</sup>采用沼液浓缩液与吡蚜灵减量混用叶面喷施,用于防治苹果红蜘蛛,结果表明,鸡粪沼液浓缩液稀释300~500倍与吡蚜灵减量10%混用,可使药剂施用量减少10%~20%,既达到防控害虫的目的,又延缓害虫抗药性的增强,还降低了用药成本。王洪涛等<sup>[81]</sup>采用浓缩鸡粪沼液与氟啶虫酰胺减量混用防控苹果黄蚜,在药剂减少10%~20%的情况下,防效优于或与氟啶虫酰胺常规剂量持平。

### 2.3 基质化利用

沼液浓缩液作为生长载体,在微藻种植方面也被广泛关注。微藻生长代谢能够吸收污水水体中的C、N、P等营养元素,既可实现污水处理与资源回用,所收获的微藻又可用于能源生产<sup>[82]</sup>。WANG等<sup>[83]</sup>利用沼液浓缩液培养微藻的研究表明,小球藻(BWY-1)可在沼液中正常生长,并且絮凝效果较好,绿藻(*C. vulgaris* JSC-6)处理猪场沼液,可有效利用水中的氨氮,去除率达91.3%。高志刚等<sup>[84]</sup>的一项发明专利,即利用UF技术浓缩沼液,制备出的适合微藻养殖的有机沼液,适合大规模高效的养殖。这项技术不仅可以降低沼液中的污染物,还可以收获高密度的微藻,生产生物质能源原料。

### 2.4 复配与高值化利用

沼液经过浓缩后再利用可以增加其中各组分的

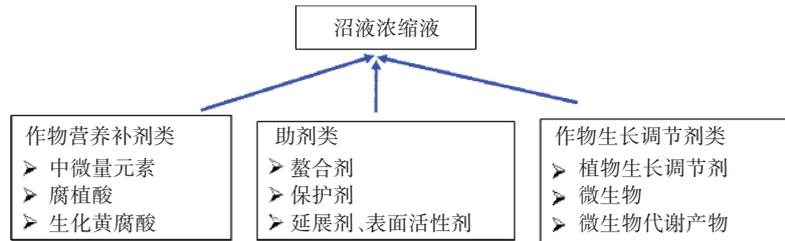


图4 沼液浓缩液主要复配物质

Figure 4 Functional substances used to regulate concentrated biogas slurry

含量(图4),达到肥料施用的基本标准,而以浓缩液作为基础进行进一步配比,以替代市场上的相关肥料,在实现资源再利用的同时,还能实现利用最大化。近年来,针对沼液浓缩液的高值化、肥料化应用主要集中在制备高品质水溶肥上,其中相关发明专利68项,实用新型专利13项。从功能上主要集中在微生物有机肥和氨基酸有机水溶肥等。

#### 2.4.1 微生物有机肥

沼液浓缩液中的C、N含量较适宜,能在保证微生物活性的前提下补充养分。束剑锋等<sup>[85]</sup>通过管式UF膜过滤技术将沼液浓缩至原体积的5%~10%时,浓缩液中营养成分均衡且丰富,添加微生物功能菌后,既可以促进植株叶绿素的合成,增强光合作用,利于碳水化合物化合物的形成,从而提高产量,又能减少病虫害。李凤兰等<sup>[86]</sup>利用浓缩沼液制备微生物除草剂,在成本降低10%~20%的同时,除草的效果良好,85%的杂草萌发得到了抑制。

#### 2.4.2 氨基酸有机水溶肥

沼液pH值较高,通常大于8,如需进行肥料复配,通常需要加入一定量的螯合剂,配位体与选择的植物所需金属元素通过配位键结合,形成具有钳形环状结构的螯合物。螯合剂通常包括氨基酸、糖类、EDTA、腐植酸、柠檬酸等。范蓓蓓等<sup>[87]</sup>在体积浓缩至原来10%的沼液中添加腐植酸及其他养分,复配成腐植酸大量、中量、微量元素有机肥,作为叶面肥施用,显著提高了小白菜的产量和品质,使小白菜增产23.3%,维生素C和可溶性糖含量分别提高了68.5%和43.1%,同时提高了土壤肥力及酶活,土壤养分含量增加明显。程红胜等<sup>[88]</sup>探索了沼液浓缩液制备高腐植酸含量、低水不溶物腐植酸液体肥的适宜工艺,所获得的液体总养分质量分数为 $220.47 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,腐植酸含量为 $33.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,制备成黄瓜专用型沼液基含腐植酸水溶性肥料。张妙仙等<sup>[89]</sup>以沼液浓缩液为载体,复配大量元素、黄腐酸等,可以促进水稻生长与增产。

郁雷<sup>[90]</sup>向反渗透浓缩液中添加大量元素和氨基酸,制备得到符合含氨基酸水溶肥(NY 1106—2010)的液体肥。陈年来等<sup>[91]</sup>以香瓜茄为材料,叶面喷施氨基酸沼液肥,使香瓜果肉硬度和可溶性固形物含量分别提高了13.9%和7.7%。高刘等<sup>[92]</sup>的研究表明,施用沼液氨基酸配方肥可以使香蕉产量提高4.09%,香蕉果实蛋白质增加10.67%、维生素C增加3.32%;还能提高酸性土壤pH值,使土壤有机质含量增加2.98%~3.93%。祁步凡等<sup>[28]</sup>的研究表明,施用沼液膜浓缩液复配成的腐植酸肥能显著提高小白菜的产量和品质。张凤梅等<sup>[73]</sup>自主研发了沼液腐植酸大量元素高效肥,试验结果表明稀释300倍根灌和稀释800倍叶面喷施配合施用可显著增产23.9%。

#### 2.4.3 其他功能型肥料

沼液浓缩液通常呈碱性,冉毅等<sup>[93]</sup>通过向沼液浓缩液中通二氧化碳,制备了富碳沼液肥,使pH降至6.5~7.0。刘金蓉等<sup>[94]</sup>除向沼液浓缩液中添加养分外,还将之与小蘗碱配合,制备的沼液药肥对番茄的灰霉病有较强的抑制作用。胡登吉等<sup>[95]</sup>利用多级膜浓缩技术,向NF、RO膜分离得到的浓缩液中添加功能性成分,调配成功能型液态有机肥,并通过田间试验,在葡萄、西瓜、蔬菜种植中均取得了明显的效果。

### 3 结论

本文综述了沼液浓缩技术及浓缩液在制备液体有机肥中的应用。常见的沼液浓缩技术主要包括膜浓缩、蒸发浓缩、冷冻和萃取浓缩等,适用于工程应用的主要有膜浓缩和蒸发技术。浓缩后的沼液可以直接与其他产品配合应用于农业生产中,提升作物产量和品质。更重要的是,浓缩沼液可以通过添加养分、微生物菌剂、生长调节剂等复配成专用液态有机肥料,提升沼液的产品价值,并扩大利用半径。然而,目前仍需进一步开发、优化沼液浓缩技术,研发浓缩液高值化、功能化产品,实现沼液浓缩液利用的多元

化,提高产品市场价值,从而有效抵消沼液处理运行的高投入。

#### 4 展望

针对沼液直接还田利用存在的问题,通过浓缩沼液及复配功能性物质,实现沼液增值化,具有较高的发展潜力,将成为有机废弃物资源化循环利用的重要研究方向之一。为适应新型农业、节水农业发展趋势,开展沼液有效活性成分与作用机理研究,制备新型肥料将是沼液资源化利用的关键环节。采用向沼液浓缩液添加具有一种或兼具促生、抗病、土壤修复等多种功能的物质或微生物菌剂,复配成功能性肥料,并通过其施用对植物生理、土壤物理、化学性状及微生物群落变化等产生影响,从而揭示其作用机理。此外,一般厌氧发酵过程在产酸阶段可使碳水化合物等有机物降解为有机酸,主要是乙酸、丁酸和丙酸等,如以肥料化利用有机废弃物为目的,缩短厌氧发酵进程,将会从另外一个角度提高物质的利用效率,值得做进一步的探究。

#### 参考文献:

- [1] 霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 等. 中国农作物秸秆综合利用潜力研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 218-224. HUO L L, ZHAO L X, MENG H B, et al. Study on straw multi-use potential in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(13): 218-224.
- [2] 石晓晓, 郑国砥, 高定, 等. 中国畜禽粪便养分资源总量及替代化肥潜力[J]. 资源科学, 2021, 43(2): 403-411. SHI X X, ZHENG G D, GAO D, et al. Quantity of available nutrient in livestock manure and its potential of replacing chemical fertilizers in China[J]. *Resources Science*, 2021, 43(2): 403-411.
- [3] 王凯军, 王婧瑶, 左剑恶, 等. 我国餐厨垃圾厌氧处理技术现状分析及建议[J]. 环境工程学报, 2020, 14(7): 1735-1742. WANG K J, WANG J Y, ZUO J E, et al. Analysis and suggestion of current food waste anaerobic digestion technology in China[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(7): 1735-1742.
- [4] DENG L, LIU Y, ZHENG D, et al. Application and development of biogas technology for the treatment of waste in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 70: 845-851.
- [5] 屈安安, 郑鑫, 王阳, 等. 基于文献计量的沼渣沼液处理利用技术研究态势分析[J]. 中国沼气, 2020, 38(6): 86-94. QU A A, ZHENG X, WANG Y, et al. Research status and trends of biogas slurry treatment and utilization based on bibliometrics[J]. *China Biogas*, 2020, 38(6): 86-94.
- [6] 甘福丁, 魏世清, 覃文能, 等. 施用沼液对土豆品质及土壤肥效的影响[J]. 中国沼气, 2011, 29(1): 59-60. GAN F D, WEI S Q, TAN W N, et al. Effect of biogas slurry on tabe bean quality and soil fertility[J]. *China Biogas*, 2011, 29(1): 59-60.
- [7] WALSH J J, JONES D L, EDWARDS-JONES G, et al. Replacing inorganic fertilizer with anaerobic digestate may maintain agricultural productivity at less environmental cost[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175(6): 840-845.
- [8] 陈永杏, 董红敏, 陶秀萍, 等. 猪场沼液灌溉冬小麦对土壤质量的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3): 154-158. CHEN Y X, DONG H M, TAO X P, et al. Effects of biogas slurry irrigation on soil quality of winter wheat in pig farm[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(3): 154-158.
- [9] 杨合法, 范聚芳, 郝晋珉, 等. 沼肥对保护地番茄产量、品质和土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(7): 369-372. YANG H F, FAN J F, HAO J M, et al. The research marsh fertilizer impact on tomatoes' output, quality and soil fertility in protected field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(7): 369-372.
- [10] 舒秀丽, 赵柳, 孙学振, 等. 不同土壤改良剂处理对连作西洋参根际微生物数量、土壤酶活性及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1289-1294. SHU X L, ZHAO L, SUN X Z, et al. Effect of soil amendments on rhizosphere microbial number, soil enzyme activity and yield of continuous cropped American ginseng[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(6): 1289-1294.
- [11] 王远远, 沈飞, 刘荣厚, 等. 沼肥对小白菜产量及品质的影响[J]. 可再生能源, 2007, 25(5): 40-43. WANG Y Y, SHEN F, LIU R H, et al. Effects of anaerobic fermentation residue on the yield and quality of Chinese cabbage[J]. *Renewable Energy Resources*, 2007, 25(5): 40-43.
- [12] 刘芳, 李泽碧, 苏胜齐, 等. 沼液与化肥配施对葡萄产量和品质的影响[J]. 中国沼气, 2009, 27(2): 21-23. LIU F, LI Z B, SU S Q, et al. Effect of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on yield and quality of grape[J]. *China Biogas*, 2009, 27(2): 21-23.
- [13] 唐微, 伍钧, 孙百晔, 等. 沼液不同施用量对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2268-2273. TANG W, WU J, SUN B Y, et al. Effects of application amounts of biogas slurry on yield and quality of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12): 2268-2273.
- [14] 伍钧, 王静雯, 张璘玮, 等. 沼液对玉米产量及品质的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(5): 905-911. WU J, WANG J W, ZHANG L W, et al. Effects of biogas slurry on yield and quality of maize[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(5): 905-911.
- [15] 霍翠英, 吴树彪, 郭建斌, 等. 猪粪发酵沼液中植物激素及喹啉酮类成份分析[J]. 中国沼气, 2011, 29(5): 7-10. HUO C Y, WU S B, GUO J B, et al. Analysis of phytohormone and quinolin-ketone components in anaerobic digestion effluent[J]. *China Biogas*, 2011, 29(5): 7-10.
- [16] 孟庆国, 赵凤兰, 张聿高, 等. 气相色谱法测定沼液中的游离蛋白氨基酸[J]. 农业环境保护, 2000, 19(2): 104-105. MENG Q G, ZHAO F L, ZHANG Y G, et al. The determination of seven free amino acids in liquid from a methane generator by gas-liquid chromatography using pre-column derivation[J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(2): 104-105.

- [17] 贺清尧, 石明菲, 冯棕, 等. 基于膜蒸馏的沼液资源化处理研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 259-268. HE Q R, SHI M F, FENG L, et al. Research progress of biogas slurry resourceful treatment by membrane distillation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(8): 259-268.
- [18] 伍福琳. 农田紫色土对猪场沼液高负荷还田利用的响应[D]. 重庆: 西南大学, 2020: 65-66. WU F L. Response of farmland purple soil to high load utilization of biogas slurry in pig farm[D]. Chongqing: Southwest University, 2020: 65-66.
- [19] KONIECZNY K, KWIECIŃSKA A, GWOREK B. The recovery of water from slurry produced in high density livestock farming with the use of membrane processes[J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, 80(3): 490-498.
- [20] 马艳茹, 丁京涛, 赵立欣, 等. 沼液中氮的回收利用技术研究进展[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(3): 339-344. MA Y R, DING J T, ZHAO L X, et al. Advances in recycling and reuse of nitrogen from biogas slurry[J]. *Environmental Pollution and Prevention*, 2018, 40(3): 339-344.
- [21] ROBLES Á, AGUADO D, BARAT R, et al. New frontiers from removal to recycling of nitrogen and phosphorus from wastewater in the circular economy[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 300: 122673.
- [22] 陆佳, 刘伟, 王欣, 等. 超滤膜浓缩处理沼液实验研究[J]. 应用能源技术, 2016(8): 49-53. LU J, LIU W, WANG X, et al. Research on biogas slurry concentration by ultrafiltration membrane[J]. *Applied Energy Technology*, 2016(8): 49-53.
- [23] 杨顾坤, 朱洪光, 沈根祥, 等. 沼液板式超滤膜预处理试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1643-1648. YANG G K, ZHU H G, SHEN G X, et al. Experimental study on pretreatment of plate ultrafiltration membrane for biogas slurry[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7): 1643-1648.
- [24] 魏玉珍, 孙小妹, 褚润, 等. 沼液膜浓缩处理工艺工作参数研究[J]. 中国沼气, 2020, 38(2): 60-65. WEI Y Z, SUN X M, CHU R, et al. Process parameters of biogas slurry concentrating by membrane method[J]. *China Biogas*, 2020, 38(2): 60-65.
- [25] 徐国锐. 沼液纳滤膜浓缩技术及其液体有机肥开发研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 52-53. XU G R. The research on concentration technology for biogas slurry using nanofiltration membrane and subsequent development of concentrated biogas slurry as liquid organic fertilizer[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 52-53.
- [26] 韩瑾. 沼液膜浓缩分离及其液肥混配技术研究[D]. 杭州: 浙江林学院, 2009: 49-50. HAN J. Study on biogas slurry concentration and separation by membrane and liquid fertilizer preparation technology[D]. Hangzhou: Zhejiang Forestry University, 2009: 49-50.
- [27] 宋成芳, 单胜道, 张妙仙, 等. 畜禽养殖废弃物沼液的膜过滤浓缩试验研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(3): 84-86. SONG C F, SHAN S D, ZHANG M X, et al. Study on concentration of biogas slurry from livestock and poultry waste using membrane technology[J]. *China Water and Wastewater*, 2011, 27(3): 84-86.
- [28] 祁步凡, 王虹, 李俊, 等. 沼液膜浓缩液复配肥对小白菜的肥效及安全性研究[J]. 西南农业学报, 2021, 34(1): 89-93. QI B F, WANG H, LI J, et al. Fertilizer efficiency and safety of liquid diges-
- tate membrane concentrate based fertilizer on pakchoi (*Brassica chinensis* L.)[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34(1): 89-93.
- [29] 李红娜, 史志伟, 朱昌雄. 利用海水汲取液的沼液正渗透浓缩技术[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 240-245. LI H N, SHI Z W, ZHU C X. Concentration of biogas slurry with forward osmosis technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(24): 240-245.
- [30] 李汪晟. 畜禽养殖沼液浓缩液液肥化技术研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017: 53-54. LI W S. Study on liquid fertilization technology of biogas concentrate concentrated in livestock and poultry[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017: 53-54.
- [31] 白晓风, 李子富, 尹福斌, 等. 蒸发法处理厌氧发酵沼液试验研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 164-170. BAI X F, LI Z F, YIN F B, et al. Evaporation treatment on biogas slurry from anaerobic fermentation[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2015, 46(5): 164-170.
- [32] 唐弓斌, 陈一帆, 卢誉远, 等. 浓缩沼液的三效节能蒸发工艺研究[J]. 中国沼气, 2017, 35(4): 61-66. TANG G B, CHEN Y F, LU Y Y, et al. Concentration of biogas slurry by three-effect evaporation[J]. *China Biogas*, 2017, 35(4): 61-66.
- [33] RODRÍGUEZ M, LUQUE S, ALVAREZ J, et al. A comparative study of reverse osmosis and freeze concentration for the removal of valeric acid from wastewaters[J]. *Desalination*, 2000, 127(1): 1-11.
- [34] 刘继红, 尹芳, 王昌梅, 等. 萃取浓缩沼液对尖孢镰刀菌和腐皮镰孢菌抑制效果的影响研究[J]. 中国沼气, 2019, 37(1): 88-93. LIU J H, YIN F, WANG C M, et al. Effects of extracting and concentrating biogas slurry on the inhibition of *Fusariumoxysporum* and *Fusariumsolani*[J]. *China Biogas*, 2019, 37(1): 88-93.
- [35] 谢辉玲, 叶红齐, 曾坚贤. 膜分离技术在重金属废水处理中的应用[J]. 化学与生物工程, 2005(5): 41-44. XIE H L, YE H Q, ZENG J X. Application of membrane separation technology in heavy metal wastewater treatment[J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2005(5): 41-44.
- [36] 肖华, 徐杏, 周昕, 等. 膜技术在沼气工程沼液减量化处理中的应用[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 226-236. XIAO H, XU X, ZHOU X, et al. Application of membrane technology for volume reduction of biogas slurry[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(14): 226-236.
- [37] 任秋慧. 高浓度养牛废水膜法处理技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2019: 65-66. REN Q H. Study on treatment of the high concentrated cattle wastewater by membrane technologies[D]. Shanghai: Shanghai University, 2019: 65-66.
- [38] KONIECZNY K, KWIECIŃSKA A, GWOREK B. The recovery of water from slurry produced in high density livestock farming with the use of membrane processes[J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, 80(30): 490-498.
- [39] 张聪. 猪场沼液纳滤膜浓缩与氨氮回收[D]. 南京: 南京农业大学, 2019: 39-40. ZHANG C. Concentration and ammonia nitrogen recovery based on nanofiltration membrane of piggery biogas slurry[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019: 39-40.

- [40] 曾令泽. 絮凝-超滤-纳滤浓缩沼液养分研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018: 60-61. ZENG L Z. Study on nutrient concentration of biogas slurry by flocculation-ultrafiltration-nanofiltration[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018: 60-61.
- [41] CHEN Q, YANG Y, ZHOU M S, et al. Comparative study on the treatment of raw and biologically treated textile effluents through submerged nanofiltration[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 284: 121-129.
- [42] 杨镜石. 高分子反渗透膜在海水淡化中的应用分析[J]. 云南化工, 2018, 45(10): 138-139. YANG J S. Application analysis of polymer reverse osmosis membrane in seawater desalination[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2018, 45(10): 138-139.
- [43] 梁康强, 阎中, 魏泉源, 等. 基于反渗透技术的沼液浓缩研究[J]. 中国沼气, 2012, 30(2): 12-14. LIANG K Q, YAN Z, WEI Q Y, et al. Research on concentration of biogas slurry based on reverse osmosis[J]. *China Biogas*, 2012, 30(2): 12-14.
- [44] 祁步凡. 猪场沼液膜浓缩制肥及其对小白菜的肥效与安全性评价[D]. 成都: 成都大学, 2020: 61-62. QI B F. Study on fertilizer efficiency and safety of pig farm liquid digestate membrane concentrate based fertilizer on pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [D]. Chengdu: Chengdu University, 2020: 61-62.
- [45] 刘伟丽, 高仁爽, 李宏艳. 污泥厌氧消化液的DTRO浓缩试验研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(9): 63-66. LIU W L, GAO R S, LI H Y. Concentration treatment of digestive liquid from municipal sludge using DTRO membrane technology[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(9): 63-66.
- [46] MASSE L, MASSÉ D I, PELLERIN Y. The effect of pH on the separation of manure nutrients with reverse osmosis membranes[J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 325(1): 914-919.
- [47] 张鑫. 反渗透系统膜污堵原因分析及清洗方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014: 42-43. ZHANG X. Research on membrane fouling and cleaning method in reverse osmosis system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014: 42-43.
- [48] 刘向东, 楼伟. 卷式反渗透膜的损害及预防[J]. 膜科学与技术, 2002(6): 69-72. LIU X D, LOU W. Prevention and infringement of spiral reverse osmosis membrane[J]. *Membrane Science and Technology*, 2002(6): 69-72.
- [49] 武林, 迟翔, 周文兵, 等. 猪场沼液的卷式反渗透膜浓缩试验研究[J]. 环境工程, 2019, 37(3): 87-91. WU L, CHI X, ZHOU W B, et al. Experimental study on piggery biogas slurry concentration process by reverse osmosis membrane[J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(3): 87-91.
- [50] 许美兰, 叶茜, 李元高, 等. 基于正渗透技术的沼液浓缩工艺优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 193-198. XU M L, YE Q, LI Y G, et al. Optimization of forward osmosis process for concentration of biogas slurry[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(2): 193-198.
- [51] 鹿晓菲, 马放, 王海东, 等. 正渗透技术浓缩沼液特性及效果研究[J]. 中国沼气, 2016, 34(1): 62-67. LU X F, MA F, WANG H D, et al. Characteristics of forward osmosis technology for biogas slurry concentrating and its efficiency[J]. *China Biogas*, 2016, 34(1): 62-67.
- [52] NAIDU G, TIJING L, JOHIR M A H, et al. Hybrid membrane distillation: Resource, nutrient and energy recovery[J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 599: 117832.
- [53] HE Q, JI L, YU B, et al. Renewable aqueous ammonia from biogas slurry for carbon capture: Chemical composition and CO<sub>2</sub> absorption rate[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, 77: 46-54.
- [54] WANG Y J, FENG L S, ZHAO X S, et al. Characteristics of volatile compounds removal in biogas slurry of pig manure by ozone oxidation and organic solvents extraction[J]. *Journal of Environmental Science*, 2013, 25(9): 1-8.
- [55] SHI M, HE Q, FENG L, et al. Techno-economic evaluation of ammonia recovery from biogas slurry by vacuum membrane distillation without pH adjustment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 265: 121806.
- [56] ZAREBSKA A, NIETO D R, CHRISTENSEN K V, et al. Ammonia recovery from agricultural wastes by membrane distillation: Fouling characterization and mechanism[J]. *Water Research*, 2014, 56: 1-10.
- [57] YAN Z, LIU K, YU H, et al. Treatment of anaerobic digestion effluent using membrane distillation: Effects of feed acidification on pollutant removal, nutrient concentration and membrane fouling[J]. *Desalination*, 2019, 449: 6-15.
- [58] WU Y, KANG Y, ZHANG L, et al. Performance and fouling mechanism of direct contact membrane distillation (DCMD) treating fermentation wastewater with high organic concentrations[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 65: 253-261.
- [59] 毛金剛. 超滤-纳滤膜耦合处理养猪废水技术研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014: 40-41. MAO J G. Treatment of anaerobically digested pig slurry with the use of UF-NF membrane processes[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University 2014: 40-41.
- [60] 杜龙龙, 张智焯, 王蒙, 等. 沼液一体化综合处理与循环利用工艺[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 207-212. DU L L, ZHANG Z Y, WANG M, et al. Research on comprehensive integration process and recycling technologies of biogas slurry[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(10): 207-212.
- [61] GEBREZGABHER S A, MEUWISSEN M P M, PRINS B A M, et al. Economic analysis of anaerobic digestion: A case of green power biogas plant in the Netherlands[J]. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 2010, 57(2): 109-115.
- [62] 霍丹阳. 某集中式养殖粪污厌氧发酵设施沼液处理工艺优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 59-60. HUO D Y. Study on optimization of biogas slurry treatment process in a centralized aquaculture manure sewage anaerobic fermentation facility[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 59-60.
- [63] 郭健, 邓超冰, 洗萍, 等. “微滤+反渗透”工艺在处理垃圾渗滤液中的应用研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(5): 170-182. GUO J, DENG C B, XIAN P, et al. Research and application of landfill leachate treatment based on technology of microfiltration and reverse osmosis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(5): 170-182.
- [64] 邓蓉. 畜禽养殖场沼液的负压浓缩与纳滤膜浓缩研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014: 41-42. DENG R. Vacuum concentration and

- nanofiltration concentration of livestock biogas slurry[D]. Chongqing: Southwest University, 2014:41-42.
- [65] 焦有宙, 关山月, 李鹏飞, 等. 沼液负压蒸发浓缩装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24):72-76. JIAO Y Z, GUAN S Y, LI P F, et al. Design and experiment on system for concentrating biogas slurry with vacuum evaporation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(24):72-76.
- [66] 娄佑武, 邱俊, 王荣民, 等. 基于减压浓缩和微生物培养的牛沼液制取农用微生物菌剂的关键技术研究[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2016(2):1-3. LOU Y W, QIU J, WANG R M, et al. Study on the key technology of preparing agricultural microbial agent from bovine biogas slurry based on decompression concentration and microbial culture[J]. *Jiangxi Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2016(2):1-3.
- [67] 郑戈. 生态型气肥耦联发酵工艺模式与技术研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2015:65-66. ZHENG G. Key technology and application mode for the co-production of biogas and organic fertilizer by ecological fermentation[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2015:65-66.
- [68] 文玲, 张旭. 冷冻浓缩处理废水 COD、TOC 及能耗分析[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(1):129-134. WEN L, ZHANG X. Energy consumption and COD, TOC removal rate analysis of freezing condensation on wastewater treatment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(1):129-134.
- [69] BO-BERTIL L, ZSO FIA B, STEFAN B. Volume reduction and concentration of nutrients in human urine[J]. *Ecological Engineering*, 2001(16):561-566.
- [70] 张加稳. 沼液抑制云南红豆杉叶斑病原菌的实验研究[D]. 昆明:云南师范大学, 2016:66-67. ZHANG J W. Experimental study on inhibition of leaf spot pathogen of *Taxus yunnanensis* by biogas slurry [D]. Kunming: Yunnan Normal University 2016:66-67.
- [71] 付艳艳. 沼液浓缩分离工艺的选择及沼液效果研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学, 2018:47-48. FU Y Y. Study on the selection of biogas slurry concentration-separation process and effect of biogas slurry[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2018:47-48.
- [72] 薛淑华, 张春焱, 刘晓莉, 等. 黄瓜、番茄喷施纯沼液效果试验报告[J]. 吉林农业, 2013(2):72. XUE S H, ZHANG C Y, LIU X L, et al. Experimental report on the effect of spraying pure biogas concentrate on cucumber and tomato[J]. *Jilin Agriculture*, 2013(2):72.
- [73] 张凤梅, 呼世斌, 康康, 等. 沼液高效肥在大棚番茄上的应用效果研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(6):75-78. ZHANG F M, HU S B, KANG K, et al. Effect of highly efficient biogas slurry fertilizer on greenhouse tomatoes[J]. *Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed)*, 2013, 41(6):75-78.
- [74] 冯自力, 董泰丽, 赵丽红, 等. 浓缩沼液对棉花黄萎病的防治作用及机理[J]. 棉花学报, 2018, 30(5):375-385. FENG Z L, DONG T L, ZHAO L H, et al. The control effect and mechanism of concentrated biogas slurry on *Verticillium Wilt* of upland cotton[J]. *Cotton Science*, 2018, 30(5):375-385.
- [75] 黄利民, 楼润忠, 徐有祥, 等. 沼肥在水稻上驱虫防病效果初探[J]. 中国沼气, 2014, 32(6):79-82. HUANG L M, LOU R Z, XU Y X, et al. Preliminary study on insect repellent and disease control effect of biogas fertilizer on rice[J]. *China Biogas*, 2014, 32(6):79-82.
- [76] 刘金. 沼液与其它肥源耦合在番茄有机基质培中的应用研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2013:34-35. LIU J. Biogas slurry coupled with other source of manure application reseach in cultture of organic ground substance[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013:34-35.
- [77] 骆林平. 沼液浓缩液与化肥配施对水稻和油菜产量及品质的影响 [D]. 杭州:浙江农林大学, 2010:36-37. LUO L P. Effect of concentrated biogas slurry application combined with chemical fertilizers on rice and rape yield and quality[D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2010:36-37.
- [78] 童文彬, 周旭健, 刘银秀, 等. 沼液浓缩液与粗木醋液农田混合施用的应用前景及潜在环境效应探讨[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(11):2127-2131. TONG W B, ZHOU X J, LIU Y X, et al. Application prospect and potential environmental effects of mixed application of biogas slurry concentrate and crude wood vinegar in farmland[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2019, 60(11):2127-2131.
- [79] CHEN D, JIANG L, HUANG H, et al. Nitrogen dynamics of anaerobically digested slurry used to fertilize paddy fields[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(6):647-659.
- [80] 刘民晓, 王洪涛, 王英姿, 等. 药肥混用对苹果红蜘蛛的田间防治效果[J]. 农药, 2019, 58(12):929-931. LIU M X, WANG H T, WANG Y Z, et al. Field control effects of mixed application of pesticides fertilizer[J]. *Agrochemicals*, 2019, 58(12):929-931.
- [81] 王洪涛, 王恩慧, 王英姿, 等. 鸡粪沼液与氟啶虫酰胺减量混用对苹果黄蚜的田间防治效果[J]. 中国果树, 2019(6):83-86. WANG H T, WANG E H, WANG Y Z, et al. Field control effect of chicken manure biogas slurry and fluridamide on apple yellow aphid [J]. *China Fruits*, 2019(6):83-86.
- [82] 王新锋. 基于能源转化的沼液浓缩稀水微藻养分循环利用研究 [D]. 北京:中国农业大学, 2018:81. WANG X F. Utilization and nutrients recovery of anaerobic digestion effluent after membrane treatment based on microalgae for energy production[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018:81.
- [83] WANG H, QI B, JIANG X, et al. Microalgal interstrains differences in algal-bacterial biofloc formation during liquid digestate treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 289:121741.
- [84] 高志刚, 程军, 李元广, 等. 一种用于微藻养殖的有机沼液的制备方法:202011207947[P]. 2020-11-03. GAO Z G, CHENG J, LI Y G, et al. A preparation method of organic biogas slurry for microalgae culture:202011207947[P]. 2020-11-03.
- [85] 束剑峰, 戴辉, 疏再发, 等. 一种用于浓缩沼液制成的高效微生物液体菌肥及应用:201710605498[P]. 2017-07-21. SHU J F, DAI H, SHU Z F, et al. A high efficiency microbial liquid bacterial fertilizer for concentrating biogas slurry and its application:201710605498 [P]. 2017-07-21.
- [86] 李凤兰, 何流琴, 田立余, 等. 一种用于水稻田的液态微生物除草剂、制备方法及其应用:201910670066[P]. 2019-07-24. LI F L, HE L Q, TIAN L Y, et al. Liquid microbial herbicide for paddy field,

- preparation method and application thereof:201910670066[P]. 2019-07-24.
- [87] 范蓓蓓,倪亮,石伟勇. 浓缩沼液配方肥对小白菜生长及土壤特性的影响[J]. 土壤, 2015, 47(5):868-873. FAN B B, NI L, SHI W Y. Effects of concentrated slurry fertilizers on pakchoi growth and soil quality[J]. *Soil*, 2015, 47(5):868-873.
- [88] 程红胜,张玉华,孟海波,等. 沼液基含腐植酸水溶性液体肥制取工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14):227-233. CHENG H S, ZHANG Y H, MENG H B, et al. Parameter optimization of preparation for biogas slurry based water-soluble liquid fertilizer containing humic acid[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(14):227-233.
- [89] 张妙仙,骆林平,单胜道. 以沼液浓缩液为基液的水稻黄腐酸多元复合液体基肥:200910100820[P]. 2009-07-13. ZHANG M X, LUO L P, SHAN S D. Rice fulvic acid multicomponent compound liquid base fertilizer with biogas slurry concentrate as base liquid:200910100820[P]. 2009-07-13.
- [90] 郁雷. 一种畜禽养殖场粪尿沼液综合处理回收制备液体肥的方法:201710675373[P]. 2017-08-09. YU L. A method for preparing liquid fertilizer by comprehensive treatment and recovery of manure: Urine and biogas liquid in livestock and poultry farms:201710675373 [P]. 2017-08-09.
- [91] 陈年来,毛昊昊,陈思瑾,等. 叶面喷施沼液肥对温室香瓜茄叶片光合特性、果实产量和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(4):88-93. CHEN N L, MAO H H, CHEN S J, et al. Effect of biogas slurry foliar spraying on leaf photosynthesis characteristics, fruit yield and quality of pepino in greenhouse[J]. *Chinese Melons and Vegetables*, 2021, 34(4):88-93.
- [92] 高刘,余雪标,李然,等. 沼液配方肥对香蕉产量、品质及香蕉园土壤质量的影响[J]. 热带生物学报, 2017, 8(2):209-215. GAO L, YU X B, LI R, et al. Effects of biogas formulated manure on yield and quality of banana and soil quality[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2017, 8(2):209-215.
- [93] 冉毅,吴延萍,徐朗,等. 富碳沼液施用对水稻分蘖期生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2):202-208. RAN Y, WU Y P, XU L, et al. Growth performance of rice at the tillering stage after applying CO<sub>2</sub>-rich biogas slurry[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(2):202-208.
- [94] 刘金蓉,李映,田平芳,等. 基于小檗碱和沼液的药肥一体化水剂制备及其功能研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(19):309-313. LIU J R, LI Y, TIAN P F, et al. Preparation and function of medicine and fertilizer integrated aqua based on berberine and biogas slurry[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(19):309-313.
- [95] 胡登吉,李强,王怡博,等. 利用多级膜分离技术浓缩沼液制造有机肥料的生产工艺:201610671854[P]. 2016-08-16. HU D J, LI Q, WANG Y B, et al. Production process of concentrating biogas slurry to produce organic fertilizer by multistage membrane separation technology:201610671854[P]. 2016-08-16.