

沼液处理方式及资源化研究进展

宋英今¹, 王冠超¹, 李 然², 陈冠益^{1*}

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要: 该文综述了国内外厌氧发酵概况, 以及沼液性质和国内外处理工艺的发展情况, 并针对沼液成分的分析, 从资源化利用的角度, 对沼液回用的现实意义和限制条件进行讨论, 综合分析沼液在微藻养殖应用的优势和前景, 论述了沼液作为肥料的农业应用价值和可行性。沼液的处理处置和资源化利用不仅仅是对水资源的保护, 也可推进资源型和节约型社会建设, 实现变废为宝, 化害为利, 缓解工业发展对生态环境带来的负面影响。结合沼液处理处置和资源化利用方式的特点, 形成最合理、也最符合可持续发展的处理利用模式至关重要。

关键词: 沼液; 肥; 处理; 沼液回用; 微藻养殖; 农用价值

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.028

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-12-0237-14

宋英今, 王冠超, 李然, 等. 沼液处理方式及资源化研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 237-250. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.028 <http://www.tcsae.org>

Song Yingjin, Wang Guanchao, Li Ran, et al. Research progress of biogas slurry treatment and resource utilization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 237-250. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.028 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

近年来, 中国大中型沼气工程发展迅猛, 据统计, 从 2005 年到 2009 年底, 中国大型工程从 860 处增长到 3 717 处, 中型工程从 2 677 处增长到 18 853 处, 增长迅速, 截至 2010 年, 沼气工程已接近 50 000 处, 沼气年产量为 155 亿 m^3 ^[1], 2013 年中国已建成大中小型沼气工程 99 625 处, 其中, 处理农业废弃物的大型沼气工程 5 246 处、中型沼气工程 9 767 处^[2], 2018 年初, 中国已建成大中小型沼气工程 113 440 处^[3]。2020 年中国规划实现建成超 130 000 处大中小型沼气工程, 农村沼气池 4 300 余万户, 沼气利用达 440 亿 m^3 ^[4-5]。分析数据可知, 2010—2013 年中国沼气工程增长率约为 99.25%, 2013—2018 年增长率约为 13.88%。随着沼气工程扩大化和规模化, 产生的大量沼液也逐渐成为中国污水来源的重要组成部分。发达国家对于沼液的处理方式, 更多倾向于贮存后作为肥料实现田间消纳利用^[6], 但由于中国当前集约化养殖业规模大, 沼液产量巨大, 长期贮存势必需要占用大量土地, 且多数养殖场周边的农田消纳能力有限, 未经处置的沼液直接排放也不能符合畜禽养殖业排放标准要求, 易造成农田污染^[7-9]。当前, 针对沼液的处理, 传统污水处理工艺可实现其净化,

如活性污泥法、膜浓缩法、化学絮凝法等, 但提高处置效率有待进一步研究和细化, 同时也面临资源的浪费和高成本投入。沼液循环回用从根本上减少了沼液外排, 节省了稀释用水, 提高了系统的缓冲能力和产气量^[10], 然而, 在实际运行过程中, 沼液循环回用也存在着氨氮抑制、挥发性有机酸累积和纤维素类等难降解物质积累等一系列问题^[11-12]。从营养成分方面看, 沼液中含有大量的氮、磷、钾元素, 除此之外, 还包含许多有机酸、氨基酸等有机物^[13-15], 更重要的是这些物质大部分可溶, 能促进植物生长, 对比传统氮磷钾肥, 猪粪沼液作为肥料施用可提高作物总体最高收益率和氮矿化能力, 增加种植季节土壤氮供给能力, 因此沼液可作为植物的速效肥^[16-17]。微藻养殖净化是具有潜力且运行稳定的新型污水处理工艺, 对比传统生化法, 可提高大约 20%对氮的去除效率^[18]。利用沼液进行微藻养殖, 沼液净化的过程也是为微藻生长代谢提供营养的过程, 可收获并创造附加值, 具有当前工业污水处理模式无可比拟的优势。同时, 微藻系统在吸收二氧化碳解决温室效应方面具有巨大优势, 其作用超过森林系统的 10 倍^[19]。针对沼液直接处理而言, 沼液资源化利用更符合可持续发展的要求^[20]。本文综述国内外关于沼液处理及资源化研究进展并加以展望。

1 沼液性质

农村沼气工程发展迅猛, 沼液作为厌氧发酵残留物, 有机物浓度和营养成分较高, 没有达到国家养殖废弃物排放标准, 如果不能被有效地处置或利用, 不仅会对周围环境造成污染, 还是一种农业资源的浪费^[21]。沼液富含农作物生长所必需的氮、磷、钾和多种微量元素以及

收稿日期: 2021-01-11 修订日期: 2021-04-19

基金项目: 国家重点研发计划: 华北东北村镇资源清洁利用技术综合示范 (2020YFD1100300); 天津市科技项目 (18YFJLCG00090)

作者简介: 宋英今, 博士, 副教授, 研究方向为有机固废厌氧消化与耗氧发酵、固体废物能源与资源化、环境生物修复等研究。Email: yingjin@tju.edu.cn

*通信作者: 陈冠益, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为生物质能源与环境、固体废物转化与利用、西藏高原环境技术与管理、环境交叉与前沿技术等研究。Email: chen@tju.edu.cn

氨基酸、腐殖酸、吡啶乙酸、维生素 B 和某些生长素等生物活性物质^[22]，具有促进作物生长、防治作物病害和改良土壤性状等多重功效^[23]，是生产无公害农产品最好的有机肥；沼液中还含有动物生长所需要的维生素和激素，因此，可作为饲料的添加剂^[24]；但沼液中也含有许多污染和有害物质，COD（Chemical Oxygen Demand，化学需氧量，下同）、BOD（Biochemical Oxygen Demand，生化需氧量，下同）、NH₄⁺-N（Ammonia Nitrogen，氨氮，下同）含量高，重金属（如汞、铬、镉、砷、铅）易沉降，同时可能含有抗生素和病原微生物等^[23-26]。表 1

列举了不同底物厌氧消化液的化学组成成分^[27-32]，禽畜粪便和其他有机物浓度高的废物或废水参与厌氧发酵的反应系统，与以秸秆类为底物时相比，产物的 pH 值降低，营养物质含量提高，C/N 比增大，但重金属种类和浓度均有所增加。同时，不同底物参与发酵过程、发酵反应的控制条件、沼液贮存条件等，均会造成沼液的性质产生较大的差异^[33-35]。

因此，沼液的合理处置与利用是对水资源的保护，实现沼液资源化利用的途径和方法对于进一步实现沼液处理利用具有现实意义。

表 1 不同类型废弃物厌氧消化液的化学成分表^[27-32]
Table 1 Chemical compositions of slurry from the anaerobic digestion of different types of wastes^[27-32]

原料类型 Type of raw material	pH 值 pH value	TOC/ (g·L ⁻¹)	化学成分												
			N	P	K	S	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Hg	Pb	
鲜猪粪+稻草（2：1） ^[27] Fresh pig manure +straw(2：1) ^[27]	7.67	ND	0.552	0.076	0.814	ND	0.167	0.028	0.010	0.001	0	0.000 3	0.001 7	0.000 05	0.020
鲜猪粪+稻草（2.5：1） ^[27] Fresh pig manure + straw(2.5：1) ^[27]	8.03	ND	0.143	0.114	0.362	ND	0.128	0.029	0.013	0.000	4	0.002 5	0.002 5	0.000 08	0.060
鲜猪粪+稻草（3：1） ^[27] Fresh pig manure + straw(3：1) ^[27]	8.60	ND	0.161	0.072	0.362	ND	0.140	0.030	0.042	0.000	7	0.000 6	0.001 1	0.001 3	0.055
鲜猪粪+玉米秸秆（2：1） ^[27] Fresh pig manure + maize straw（2：1） ^[27]	8.14	ND	0.362	0.120	0.874	ND	0.091	0.029	0.004	0.000	45	0.000 8	0.001 5	0.000 3	0.015
鲜猪粪+玉米秸秆（2.5：1） ^[27] Fresh pig manure +maize straw (2.5：1) ^[27]	7.62	ND	0.380	0.032	1.115	ND	0.064	0.026	0.011	0.000	3	0.000 9	0.000 8	0.000 3	0.005
鲜猪粪+玉米秸秆（3：1） ^[27] Fresh pig manure +maize straw（3：1） ^[27]	7.45	ND	0.705	0.146	0.780	ND	0.204	0.116	0.001	0.002	5	0.000 7	0.000 6	0.000 4	0.017
鲜猪粪+青草（2：1） ^[27] Fresh pig manure +grass(2：1) ^[27]	7.14	ND	0.286	0.140	0.263	ND	0.072	0.033	0.003	0.001	3	0.002 0	0.002 3	0.000 4	0.003
鲜猪粪+青草（2.5：1） ^[27] Fresh pig manure +grass(2.5：1) ^[27]	7.20	ND	0.543	0.164	0.506	ND	0.117	0.033	0.002	0.000	6	0.000 4	0.000 5	0.001 6	0.013
鲜猪粪+青草（3：1） ^[27] Fresh pig manure +grass(3：1) ^[27]	7.58	ND	0.616	0.107	0.486	ND	0.087	0.037	0.003	0.000	24	0.000 3	0.000 3	0.000 4	0.002
70%牛粪+30%番茄淀粉 ^[28] 70%cattle manure+30%tomato starch ^[28]	7.6	ND	2.17	0.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
猪粪 ^[29] Pig manure ^[29]	6.8	40	5.3	1.4	2.5	0.47	1.7	0.6	ND	0.426	0.218	0.801	0.001	0.001	
屠宰场废物+生活垃圾 ^[30] Slaughterhouse waste + domestic waste ^[30]	7.9	19	7.9	0.9	1.6	0.6	0.6	0.2	ND	0.201	0.070	0.474	0.001	0.001	
谷类发酵酒糟 ^[30] Fermented distiller's grains ^[30]	7.9	7	5.9	0.22	1.1	1.2	0.3	0.1	ND	0.266	0.070	0.465	0.001	0.007	
青贮+生活垃圾 ^[30] Silage + domestic waste ^[30]	8.7	24	5.3	0.4	3.7	2.6	1.3	0.3	ND	0.287	0.097	0.396	0.001	0.003	
牛粪 ^[31] Cattle manure ^[31]	7.61	ND	1.250	0.324	0.585	ND	ND	ND	1.418	0.025	0.007 6	0.011 1	ND	ND	
羊粪 ^[31] Sheep dung ^[31]	7.32	ND	1.480	0.490	0.490	ND	ND	ND	1.659	0.0112	0.003 3	0.010 8	ND	ND	
牛粪+羊粪+猪粪(1：1：1) ^[31] Cattle manure+ sheep dung+ pig manure ^[31]	7.84	ND	1.730	0.365	0.599	ND	ND	ND	1.413	0.0412	0.001 1	0.006 7	ND	ND	
鸡粪 ^[32] Chicken manure ^[32]	8.38	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.0034	ND	0.000 2	0.001 5	ND	0.000 02	

注：ND 表示未检出，TOC 指总有机碳。
Note: ND indicates not detected, TOC is Total Organic Carbon.

2 沼液工业化处理方式

沼液性质在很大程度上取决于发酵底物，针对不同来源的沼液，采用相同净化工艺达到的效果也会存在差异，不同处理工艺下沼液净化程度差别明显。

2.1 沼液膜浓缩

白晓凤等^[36]采用蒸发法进行沼液浓缩，研究了低温

蒸发、常压蒸发和减压蒸发过程对沼液浓缩的影响，不同温度下（常温、25、35、45、55、65、75、85℃）低温蒸发对浓缩沼液的氨氮质量浓度影响较大，氨氮在蒸发过程中损失近 98%，几乎全部损失，不利于对浓缩液的营养物质回收；在不同 pH 值（2、3、4、5、6、7）下进行沼液常压蒸发研究表明，当初始 pH 值≤4 时，冷凝水的氨氮质量浓度低于 41 mg/L，水质可以满足《畜禽养

殖业污染物排放标准》（GB18596—2001）要求；不同 pH 值（2、3、4、5、6、7）下的减压蒸发试验中，相对真空度在-0.03~-0.08 MPa 时对蒸发过程影响不大，与常压蒸发相比，减压蒸发可以降低冷凝水中的氨氮质量浓度和化学需氧量，提高冷凝水水质，可见真空蒸发对整个系统的运行最为有利。魏欢欢^[37]利用 Box-Behnken 响应面法优化最优削减沼液氨氮的研究中，在运行压力为 5.50 MPa、二次利用百分比为 76.00%、pH 值为 7.70 的条件下，小试试验氨氮的实际去除率可达 96.13%；在中试试验中，氨氮削减率均值达 94.27%，中试试验与小试试验氨氮削减率误差仅为 1.93%，证明了 Box-Behnken 响应面法优化的反渗透技术去除沼液中氨氮工艺可行有效，透过液中 COD 浓度为 50.99 mg/L，NH₄⁺-N 浓度为 29.22 mg/L，达到国家畜禽养殖业相关污染物排放标准和国家农田灌溉回用标准。隋倩文等^[38]利用荷兰规模性养殖场的畜禽养殖粪便连同污染源、稻杆类等农业废弃物作为原料产生的沼液，经过超滤膜技术与反渗透膜技术，浓缩液中氮、磷、钾的含量分别为 6.80、0.60、11.58 kg/t，出水水质较好。武林等^[39]采用正交实验法对猪粪沼液反渗透浓缩工艺参数进行优化，表明在 pH 值为 5、温度为 35 ℃、操作压力为 3.50 MPa 的条件下，可实现 NH₄⁺-N、TP（Total Phosphorus，总磷，下同）、TN（Total Nitrogen，总氮，下同）的平均截留率分别为 90.70%、86.30%、93.30%。张明慧等^[7]采用抽样组合絮凝工艺对牛粪沼液的研究中，臭氧氧化阶段最佳 COD 降解率可达 47%，絮凝阶段在 pH 值为 8.3、搅拌时间为 2 min、搅拌速率为 300 r/min、静置时间为 15 min、投药量/总固体为 1.50 的条件下，实现沉降比为 14%，极大提升了沉降性能，COD 去除效率达 72%，工艺总 COD 去除率实现 82%。沼液的膜浓缩法可截留大部分污染物，达到污染物在一定程度上的净化效果，但是，膜浓缩法面临材料的侵蚀、污染和使用寿命有限等自身限制条件，同时，沼液膜浓缩成本高，无论是采用单级处理或是多级联合处理，均难以完全实现沼液中污染物质出水浓度达到较低水平，无疑是沼液膜浓缩法处理的一大弊端^[4,40-42]。

2.2 沼液贮存

沼液贮存过程也是部分污染物的降解过程，刘庆玉等^[33]发现在所有贮存条件下均会降低沼液中总氮、速效氮含量，当沼液在 30 ℃、遮光、厌氧条件下贮存 20 d 时，

可实现总氮、速效氮最大去除率分别为 79.70%和 77.60%，但此条件下氨氮含量增加 10%；沼液在 30 ℃、光照、自然条件下贮存 20 d 时，氨氮含量最低，降解率为 31.60%；所有贮存条件下沼液中 TP 浓度均随时间呈现降低趋势，当在 30 ℃、遮光、厌氧条件下贮存 20 d 时，达到最低出水浓度为 301 mg/L；沼液在 15 ℃、遮光、自然条件下贮存 20 d 时，速效磷含量增加，其他贮存条件下速效磷含量均呈现降低趋势，在 30 ℃、遮光、好氧条件下贮存 20 d 时，达到最大降解率为 97.10%。杜静等^[43]采用沼液自然沉降的方式，在沉降时间为 1 d 时，SS（Suspended Solid，悬浮固体，下同）变化趋于平稳，继续沉降效果不再明显，表明沼液中大颗粒物在 24 h 内已经基本沉淀完全，去除率可达 38.30%，与梁康强等^[44]在沼液浓缩预处理实验中认为自然沉降时间为 1 d 时沼液中 SS 去除效果最佳的结论一致；同时，沼液自然沉降 1 d，COD 可实现由 8 195 降低至 4 917 mg/L，去除率为 40.00%，TP 可实现由 52 降低至 33 mg/L，去除率为 36.50%，但是对于 TN 和 NH₄⁺-N 去除效果不明显，分别为 20.00%和 8.70%，主要由于总氮存在于固态有机物，氨氮以可溶态形式存在于溶液中，随着 SS 的沉降影响很小。可见对于应用自然沉降法去除沼液中的污染物时，可有效去除 COD 和 SS，同时降解一定浓度的 TN，但是对于溶解态和游离态物质去除能力有限，沼液自然沉降法可作为其他处理工艺的预处理，在一定程度上减少絮凝剂的应用。在沼液贮存时，温室气体产生量也不可忽视，Joachim 等^[28]在研究存储条件对牛粪浆产生温室气体的影响时，通过对比无遮盖、草皮盖、木盖三种实验条件，表 2 列举了不同遮盖条件下温室气体排放情况。夏季 140 d 的无遮盖贮存期间，温室气体排放量为 40.5~90.5 kg/m³，冬季 100d 的无遮盖贮存期间，温室气体排放量为 14.3~17.1 kg/m³；而有遮盖存储时，甲烷产生量明显减少。同时，未经处置的牛粪浆氨气排放量在夏季可高达冬季的两倍，氧化亚氮的排放量夏季时也明显增加，验证了牛粪浆存储过程中因季节、存储系统和遮盖物不同，温室气体排放量会产生明显差异。因而，沼液贮存过程应考虑加强控制温室气体排放量以减少对于大气环境的影响。沼液贮存的影响程度较高，表明通过一定条件下的沼液贮存和自然沉降可促进部分污染物一定程度上的降解。

表 2 牛粪浆在冬季和夏季存储过程中 CH₄、NH₃、N₂O 和温室气体累计排放量数据表^[28]
Table 2 Cumulated CH₄, NH₃, N₂O, and greenhouse gas emissions during a winter and summer storage experiment^[28]

处理方式 Treatment method	夏季（140 d） Summer (140 days)				冬季（100 d） Winter (100 days)			
	CH ₄ / (kg·m ⁻³)	NH ₃ / (kg·m ⁻³)	N ₂ O/ (kg·m ⁻³)	温室气体 Greenhouse gases/(kg·m ⁻³)	CH ₄ / (kg·m ⁻³)	NH ₃ / (kg·m ⁻³)	N ₂ O/ (kg·m ⁻³)	温室气体 Greenhouse gases/(kg·m ⁻³)
消化后牛粪浆+无遮盖 Treated cow dung +uncover	1 154.2	222.5	72.4	46.7	111.3	62.0	40.1	14.8
消化后牛粪浆+切碎的稻草 Treated cow dung + chopped straw	1 191.9	125.7	75.7	48.5	114.5	49.6	39.9	14.8
消化后牛粪浆+切碎的稻草+木盖 Treated cow dung slurry + chopped straw + wooden cover	1 021.4	78.1	61.4	40.5	81.1	48.7	40.7	14.3
未经消化牛粪浆+切碎的稻草 Untreated cow dung slurry + chopped straw	3 591.2	110.5	48.7	90.5	164.3	72.5	44.0	17.1
未经消化牛粪浆+切碎的稻草+木盖 Untreated cow dung slurry + chopped straw + wooden cover	2 999.0	60.0	58.6	81.1	142.0	52.2	38.2	14.8

2.3 沼液生化处理

由表 3 所示王峰等^[45]研究了鸟粪石-SBR(Sequencing Batch Reactor Activated Sludge Process, 序批式活性污泥法, 下同)-混凝工艺对禽畜粪便发酵后沼液的处理效果, 出水达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)要求, 实现进水 COD、NH₄⁺-N、TP 质量浓度由 9 200.00、3 200.00、270.00 mg/L, 降解至出水 COD、NH₄⁺-N、TP 质量浓度分别达到 280.00、36.00、3.30 mg/L, 去除率分别为 96.96%、98.88%和 98.78%。Yetilmeszsoy 等^[46]采用 UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanketreactor, 上流式厌氧污泥床, 下同)工艺处理猪粪厌氧发酵后的沼液, 并添加了适量的镁离子和磷酸根离子, 通过鸟粪石方式回收沼液中的氨氮, 在 pH 值为 9 的条件下, 加入 MgCl₂·H₂O 和 KH₂PO₄, 实现了 NH₄⁺-N、COD 的去除率分别为 85.40%和 53.50%。郭会真等^[47]采用 MAP (Magnesium Ammonium Phosphate, 磷酸铵镁, 下同)-化学絮凝-MBR (Membrane Bio-Reactor, 膜生物反应器, 下同)工艺处理猪粪沼液, 最终出水 COD、NH₄⁺-N 和 TN 的浓度分别为 138.00、3.60 和 97.20 mg/L, 去除率分别实现 78.40%、99.60%和 36.80%, 相较于 A/O(Anoxic Oxidation, 厌氧好氧工艺法, 下同)-MBR 工艺、化学絮凝-A/O-

MBR 工艺, 此法水力停留时间短, 可减少至 32 h, 去除大部分的氨氮, 减少生化处理脱氮压力。刘小雨等^[48]对生活垃圾厌氧发酵后的沼液投加 MgCl₂·6H₂O 和 NaHSO₄·12H₂O, 氮磷物质的量比从 0.80 提高至 1.30 时, NH₄⁺-N 的回收率从 64.73%提高至 91.05%, 同时验证了 pH 值对于氨氮回收率无明显影响的结论。杨朝晖等^[49]对猪粪厌氧发酵产生的沼液经过乙酸钠-SBR 工艺处理后, 实现了硝化反应的完全反应进程, 出水硝态氮浓度低于 15 mg/L。徐耀鹏^[50]对畜禽粪便发酵产生的沼液经过 UASB-SBR 工艺处理后, COD、NH₄⁺-N 和 SS 去除率分别实现 98.90%、95.10%和 93.70%, 出水浓度分别为 240.80、46.50 和 80.70 mg/L, 可符合排放标准。刘建国等^[51]对猪粪厌氧发酵产生的沼液采用 A/O 工艺, 设置缺氧和好氧运行时间比为 0.40, 实现了 COD 和 NH₄⁺-N 的去除率分别为 97.00%和 78.60%。高峰^[52]对猪粪厌氧发酵产生的沼液通过组合 ASBR (Anaerobic Sequencing Batch Reactor, 厌氧序批式反应器)-SBR-混凝沉淀技术处理后, 出水可实现达标排放。段鲁娟^[53]采用鸟粪石-厌氧-MBR-Fenton 组合工艺对养鸡场废水发酵沼液进行处置, 实现 COD、NH₄⁺-N 的平均去除率分别为 86.40%和 99.80%, 基本完全降解。

表 3 各生化处理工艺污染物去除率情况汇总表

Table 3 Summary of pollutant removal rate of each biochemical treatment process.

生化工艺 Biochemical process	沼液类型 Types of biogas slurry	COD Chemical Oxygen Demand /%	NH ₄ ⁺ -N/%	TN Total Nitrogen /%	TP Total Phosphorus/ %	SS Suspended solid/%
鸟粪石-SBR-混凝 ^[45] Struvite-SBR-coagulation ^[45]	禽畜粪便沼液	96.96	98.88	-	98.78	-
UASB ^[46]	猪粪沼液	53.50	85.40	-	-	-
MAP-化学絮凝-MBR ^[47] MAP-chemical flocculation-MBR ^[47]	猪粪沼液	78.40	99.60	36.80	-	-
UASB-SBR ^[50]	禽畜粪便沼液	98.90	95.10	-	-	93.70
A/O ^[51]	猪粪沼液	97.00	78.60			
鸟粪石-厌氧-MBR-Fenton ^[53] Struvite- Anoxic-MBR- Fenton ^[53]	鸡粪沼液	86.40	99.80	-	-	-

与膜浓缩法和贮存处置相比, 生化工艺对于沼液中各类污染物去除均具有明显效果, 去除率较高, 处理禽畜类粪便厌氧发酵产生的污染物浓度较高的沼液, 基本可实现出水达标外排, 应用 SBR 工艺、MBR 工艺可推动完全硝化反应进程, 对比 UASB 工艺、A/O 工艺, 可明显降低出水 NH₄⁺-N 浓度, 处理以秸秆类为底物厌氧

发酵产生的含氮量较高的沼液效果更具有优势。对于厌氧处理工艺, 水力停留时间基本在 20 d 以上, 此时沼液中的 BOD 基本被转化完全, 不利于后续好氧处理工艺, 因此采用化学结晶和化学絮凝作为生物法预处理, 系统对 SS 和 COD 的去除效果明显提高, 同时降低后续处理压力, 有效减少厌氧阶段水力停留时间。

3 沼液应用及资源化

3.1 沼液回流回用

倪萍等^[54]认为大中型沼气工程采用沼液循环回用工

艺可实现沼液减排, 同时节省大量稀释用水, 外排沼液中的碱度物质回到发酵系统, 提高了系统的缓冲能力, 进而提高了反应的稳定性; 未完全降解的有机物回到发酵系统进行二次降解, 提高了系统的产气量; 部分微生物回到发酵系统, 增加了系统的微生物总量。吴树彪等^[55]在中温条件(37±1)℃下采用 CSTR (连续搅拌反应器, 下同)研究了沼液长期回流对牛粪厌氧发酵过程中产气特性及其微生物动力学的影响, 在水力停留时间为 40 d、有机负荷为 3.00 g/(L·d)的条件下, 将 50%的沼液进行回流时, 能够提高基质产甲烷率, 促进厌氧发酵系统中微生物的合成代谢, 但由于难降解物质累积, 传质效果降低, 使得回流组日产气量及甲烷产量呈下降趋势, 处理组的沼气容积日产气量从 1.07 逐渐降至 0.83 L/L, 降低了 22.40%, 引起了 pH 值、NH₄⁺-N、SCOD (Solluted Chemical Oxygen Demand, 溶解性 COD, 下同)等指标的升高, 但未达到抑制水平。王欣等^[56]采用沼液回流工

艺, 通过设置不同的沼液回流比, 综合考量沼液回流对于玉米秸秆厌氧发酵的日产气量、 CH_4 (甲烷, 下同) 及 TOC (Total Organic Carbon, 总有机碳, 下同) 含量变化, 当沼液回流比为 75% 时, 日产气量最大, 其最大值可达 1 275 mL, 产气中甲烷含量高, 最高值可达 68.40%, TOC 去除效率显著。李慧莉等^[57]以秸秆与市政污水厂污泥混合物作为底物, 考察不同沼液回流对中温混合厌氧消化过程的影响, 试验设置 0、20、30、40、50 和 60% 等 6 种不同的沼液回流比, 综合考察沼液回流量下发酵系统产气量、甲烷含量、发酵过程氨氮含量、SCOD、VFAs (Volatile Fatty Acids, 挥发性脂肪酸, 下同) 的变化情况, 回流比为 50% 时, 实现最大产气量和最大甲烷产量, 分别是 1 645 和 797.50 mL, TS (Total Solid, 总固体, 下同) 和 VS (Volatile Solid, 挥发性固体, 下同) 去除率分别为 17.5% 和 47.8%, 单位 VS 的甲烷产量为 613.45 mL/g, 较未添加沼液对照组发酵瓶提高了 37.7%, 未出现 VFAs 积累; 当沼液回流比高于 50% 时, 便会导致厌氧反应的氨氮浓度升高, 厌氧产气出现抑制。张晗等^[58]在中温条件下采用 CSTR 研究了沼液长期回流对棉花秸秆厌氧发酵的影响, 在水力停留时间为 15 d、进水有机负荷为 4 g/(L·d) 的条件下, 通过与未回流组对比, 回流组的产气在第 153 天时受到抑制, 产气量下降了 23.10%; 试验组 pH 值在 7.10 上下波动, 对照组 pH 值为 6.80 左右; 试验组和对照组氨氮浓度分别为 108、71 mg/L 左右; 试验组粘度增至 139 mPa·s, VFAs 含量明显提高 (乙酸和乳酸积累较为明显), 沼液回流对于棉花秸秆发酵过程中, 提高了反应器有机负荷率及缓冲能力, 大大节约淡水资源, 但同时由于回流组沼液粘度的增加, 其产甲烷率降低较为明显。Niu 等^[59]对鸡粪厌氧发酵后的沼液进行回流, 研究发现在鸡粪厌氧发酵过程中, 随着 VFAs 浓度增加到 20 000 mg/L 时, 会导致沼液中甲烷含量从 60% 降低至 40%~50%。Sponza^[60]对城市生活垃圾批式厌氧发酵沼液进行回流, 研究发现当沼液回流量为 21 L/d 时, 比回流量为 9 L/d 时的 VFAs 浓度提高了 61.50%, 产气量下降 7.69%, 证实了较高沼液回流比例更易引起 VFAs 的积累, 降低产气量, 主要由于外排沼液中未完全降解的有机物及本身含有的 VFAs 随回流沼液重新进入发酵系统后, 容易导致发酵系统的 VFAs 累积, 从而影响产气特性。陈玉成等^[61]在利用鸡粪沼液回流作为发酵系统补充用水的研究中, 发现氨氮的动态变化会制约甲烷产量, 当 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度从 2 500 mg/L 升高至两倍时, 发酵系统的甲烷日产量会从 (1.30 ± 0.10) 降低至 (0.80 ± 0.10) L/(L·d), 平均甲烷日产量减少 42%, 验证了沼液回流过程中的氨氮积累会降低甲烷产气量, 甚至影响整个发酵系统的运行。范仁英^[62]在研究沼液循环回用的研究中, 认为沼液回流比应控制在 50% 以下, 并且在回用前对沼液中氨氮进行吹脱处理, 保证氨氮浓度始终在 2 500 mg/L 以下, 高浓度的 VFAs 会抑制产甲烷菌的生长代谢, 降低部分有机物的分解作用, 当鸡粪发酵沼液的 VFAs 的浓度为 2 000 mg/L 时, 甲烷产率会降低 10%~20%; 生活污水发酵沼液回流量为 21 L/d 较回流量为

11 L/d 时, 发酵系统 VFAs 浓度增加 53.30%, 产气量减少 5.63%, 主要由于纤维素等物质难以被降解而存在沼液中, 沼液回流量过高时会导致发酵系统酸化; 在禽畜粪便发酵沼液回流研究中, 发现回流后发酵黏度明显升高, 从未回流状态的 56 增加至 116 mPa·s, 黏度超出正常运行时一倍, 平均甲烷日产量随之由 1.08 降低至 0.82 L/(L·d), 减少了 22.30%, 主要由于难降解物质的积累会影响发酵系统的产气能力; 因而在含有难降解类物质原料的发酵系统要慎重选择回流量, 如沼液回流时要确保低负荷和低回流比, 以防止高黏度抑制正常发酵过程。

沼液在不同光照、温度、贮存条件等条件下, 沼液性质会发生很大变化, 尤其是对于氨氮和速效磷的影响最大^[33], 不同时间和条件下的沼液性质突变后回流比保持原有回流比时, 对于系统的平衡会有不同的影响, 这也间接对沼液回用产生一定的挑战。沼液回流在一定程度上可减少生产用水量, 增加发酵系统的微生物总量, 在回流比选择合适的前提下可推动厌氧发酵进程, 提高产气量和甲烷产率, 但是由于不同底物参与发酵过程、发酵反应的控制条件、沼液贮存条件等均会导致沼液性质和成分差异较大, 回流比较难确定, 同时存在着氨氮抑制、挥发性有机酸累积和纤维素类等难降解物质的积累等一系列问题, 降低产气量和甲烷含量, 严重时甚至导致系统停止产气。因此, 在实际应用时, 要严格根据发酵底物和沼液性质等严格设置回流比, 避免发生抑制产气情况。

3.2 微藻养殖利用

目前关于沼液的物理法及传统生化法的应用广泛, 沼液净化效果明显, 如物理/化学吸收法、膜分离法、传统生化法、变压吸附和低温分离等^[63-65], 但上述方法仅将沼液视为污水进行处理, 没有考虑资源性, 成本高且不利于再利用。沼液微藻养殖利用, 与传统生化法相比, 资源性优势更为显著。

藻类是一种良好的可再生生物能源, 具有光合效率高、生物量和含油量高的优势, 具有除污固碳的优良效果^[66-69]。一些微藻培养方法具有去除废水中营养物质、重金属和有机化学毒素的潜力^[70-72], 微藻净化可作为更清洁、有前景的沼液处理方式, 生产的微藻可用作燃料或发酵系统原料^[73]。张国治等^[74]对猪粪发酵产生的沼液培养微藻, 固定藻法可实现沼液中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 的去除率分别为 41.9%、68.5% 和 85.4%; 悬浮藻法对于 COD 去除率较低, 但实现了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 的去除率分别为 93.9 和 78.4%, 从污染物去除能力分析, 固定藻法优于悬浮藻法。Yan 等^[75]通过建立光合反应器培养微藻, 通过改变光照的波长, 当蓝光波长: 红光波长=5:5 时, 可实现沼液最大净化率的同时, 也可去除二氧化碳, COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 的去除率分别为 85.23%±8.32%, 87.10%±7.55% 和 92.40%±3.05%。Tan 等^[76]利用猪粪发酵液对 5 种微藻进行培养, 考察对氮的去除能力和糖分积累程度, *Chlorella vulgaris* ESP-6 表现出最佳的产糖能力, 最大糖分含量和日均产糖能力分别为 61.50% 和

395.73 g/L, 具有最佳氨氮去除效率, 氨氮去除率和日均去除浓度分别为 96.30%和 91.7mg/L, 验证了微藻对沼液良好的净化能力, 同时, 微藻细胞中积累更多的碳水化合物, 可视为产糖的新策略, 充分证明了沼液微藻养殖利用的价值和资源的再生价值。Maria 等^[77]利用城市生活污水培养微藻, 发现微藻对于新兴污染物去除效率可达 90%, 弥补现有污水处理工艺对新兴污染物无降解能力的短板, 微藻养殖利用对于实现沼液净化表现出明显优势。除此之外, Magdalena 等^[78]提出收获的微藻作为混合发酵的原料之一, 可提高厌氧发酵能力, 且由于其细胞内高蛋白质含量可明显提高 C/N 比, 大大减少胺中毒的风险。任丽滨等^[79]采用光合细菌处理沼液产氢试验中, 在 35℃、光照度 1 000、pH 值为 9、接种量为 50%、反应预处理时间 24 h 的条件下, 200 mL 沼液的最大产氢量达到 500 mL, 对进一步研究开发光合细菌处理沼液废水和产氢有重要的参考价值, 微藻等光合生物养殖是沼液资源化的新方向和产氢新途径。

微藻光合效率高, 以微藻为原料生产生物柴油, 对比其他原料, 微藻的生物量、油脂和生物柴油产率更具有优势^[80], 2013 年美国 Sapphire 公司与 Phillips66 石油有限公司合作, 通过对比藻油和原油数据, 决定开展藻油的研究, 开辟新的市场, 符合 EPA (Environmental Protection Agency, 环境保护署) 清洁空气法案的要求^[81]。微藻油脂产率是由微藻的油脂含量和生物量产率综合影响的结果, 最理想的过程是微藻以最高的油脂含量和最高的生物量产率实现最高的油脂产率, 然而现实中常常在氮饥饿、高光照强度、高盐度等条件下产生高油脂含量, 此时却伴随着相对较低的生物量产率, 二者同时处于较高水平下的影响因素属胁迫条件^[82], 尚未有公司在生产藻类原油方面取得盈利, 因此也应注重对于微藻高附加值副产物的研究, 如 EPA、DHA、能源作物和糖类^[83-84], 既可创造经济价值, 又合理地利用了资源, 避免浪费。目前在各国政府的支持下, 许多试点项目已经启动, 个人投资也逐步增加。但是如何实现微藻转化为生物燃料, 降低成本投入和突破技术水平限制^[85], 从而实现规模化生产, 仍需要政府、科研单位、政策、企业 and 个人的共同努力。

3.3 沼液农业应用

沼液中含有生物活性物质, 如氨基酸、腐殖酸、植物生长素等, 对于植物生长和土壤性质改善具有明显的积极效应, 对整个植物生长周期有着重要的调控作用^[86]。沈其林等^[87]通过对猪粪沼液的成分测定和分析, 发现沼液中除含有大量元素与微量元素外, 还含有 17 种生物活性物质, 符合农田灌溉标准, 具有作为有机速效肥的潜力。沼液在提升农作物品质和产量、提高种子发芽率、抗虫抑菌、改善土壤肥力、禽畜增产增重等方面均表现出积极作用, 可成为当今农业发展化学肥料的高效替代品^[88-91]。虽然沼液中还存在种类繁多的挥发性有机成分以及砷、镉、铅、铬、汞等有毒重金属, 但是含量非常低, 在农田中积累引起浓度超标的风险较小, 基本不会对土壤和水体造成污染^[92-94]。

3.3.1 提升作物品质和产量

李金澄等^[95]在采用不同沼液还田量对于玉米生产的研究中, 发现在 1 倍氮当量沼液还田量下, 土壤安全容量环境最佳, 3 倍氮当量沼液还田量时, 玉米产量和品质最佳, 4 倍氮当量还田量时会降低玉米籽粒中可溶性糖分的含量, 同时增加铜和锌元素的过度富集, 产生负效应, 降低玉米产量和品质。李泽碧等^[96]在沼液、沼渣与化肥配施对莴笋产量和品质的影响试验中, 发现沼液和沼渣配施一定比例的化肥能促进莴笋的生长, 提高莴笋的产量, 改善其营养品质。沼液、沼渣配施化学肥料能提高莴笋叶中的维生素 C 含量; 施用沼渣的各处理组能明显提高莴笋中氨基酸的含量; 施用沼液的各处理组都能提高莴笋叶和茎中的还原糖的含量, 而施用沼渣仅提高莴笋叶中的还原糖含量。马虎等^[31]对油菜施用牛粪、猪粪、羊粪和混合沼液肥等 4 种不同来源的沼液肥, 施加沼液肥后油菜生物学特性 (株高、根茎粗、分枝数、冠幅、SPAD 值) 和养分吸收方面均表现出积极作用, 提高果实品质, 降低硝酸盐含量的同时, 促进土壤养分含量的积累, 尤其以混合沼液效果最为明显, 其次是羊粪沼液、牛粪沼液、猪粪沼液。张有富等^[97]在沼肥施用对红地球葡萄品质和光合作用强度影响的研究中, 发现沼肥中存在的大量及微量元素、微生物等不仅可提高葡萄树的光合作用效率, 改善葡萄品质, 更在一定程度上提高了土壤中速效氮、磷和钾的含量, 改善了土壤质量。范成五等^[98]对辣椒幼苗施加沼液后, 较清水处理组可增产 5.17%~9.09%, 公顷增产鲜辣椒质量为 2 429.79 t, 增产效果显著。

3.3.2 浸种育苗优势

李小娥^[99]考察沼液对玉米生产影响的应用试验中, 当利用沼液浸种及制钵育苗时, 沼液可充分为幼苗提供生长所需养分, 且更易于吸收, 促进玉米苗齐、苗壮, 长势增强, 抗逆性提高。张艺菲等^[100]参照国际上确定植物毒性因子的手段, 讨论猪粪沼液还田的环境安全性和对于秋田 MD311 玉米种子的安全阈值, 研究表明, 沼液中铵态氮和乳酸浓度为 186 和 35.80 g/L 时该玉米种子出现最大萌发指数, 当沼液中铵态氮和乳酸的浓度高于 336 和 61 mg/L 时, 会产生植物毒性, 不可还田。可见在沼液还田应用于秋田 MD311 玉米种植中, 要严格控制铵态氮和乳酸浓度在安全阈值内, 方能促进作物生长, 保障环境安全性。石吕等^[101]利用腐熟较好且发酵时间较长的沼液原液进行小麦种子浸种处理, 较清水处理可提高约 13%的发芽率, 种子可提前 3 d 出苗, 叶长增加 1.70 cm, 叶宽增加 0.10 cm, 幼苗干质量增加 0.70 g, 成熟期缩短 2 d, 每公顷产量增加 379.50 kg。

3.3.3 抗虫抑菌

毕婷婷等^[102]考察了施用沼液对于核桃高效生产的影响, 发现沼液肥对于核桃品质和质量提高、病虫害防治等方面均有较好的促进作用, 作叶面肥和防治病虫害实际施用时, 要注意稀释, 并叶背面进行喷施。陶世洪^[103]对蜜柑树新梢抽发前、中期的叶片喷洒沼液, 可明显提升对于红蜘蛛及其虫卵的消除率, 保护 85%以上的叶片免受其侵害。陈艳^[104]利用沼液沼渣作为肥料施用于番茄

的研究中，对降低番茄裂果病发病率和提高番茄产量两方面进行考察，发现番茄植株在施加沼液沼渣后生长健壮，平均单个番茄增重 52.7 g，口感明显提升，当施加量增加至 30 000 kg/hm²时，番茄裂果病的发病率降至 1%，明显提升番茄质量，经济效益大为增加。

3.3.4 改良土壤性状

土壤酸化成为制约我国农业生产和影响生态环境的主要因素之一，会降低土壤微生物的生物活性、毒害农作物、破坏生物细胞膜结构等^[105]。高刘等^[106]在利用沼液配方肥料对香蕉园的土质影响的研究中，发现在果园中施加沼液配方肥料后，对比施用常规化学肥料，各土层土壤有机质含量增加 2.98%~3.93%，有效磷增加 5.59%~18.64%，速效钾增加 25.20%~39.20%，可明显改善土壤质量，提高土壤肥力。孙天资等^[107]采用餐厨垃圾厌氧消化制备的沼液液态菌肥对单季水稻和冬小麦进行施用，考察沼液液态菌肥对于土壤理化性质的影响，发现冬小麦土样中有效磷最大增长率达 81.12%，总磷的最大增长率为 12.66%，速效氮最大增长率为 84.88%，总氮最大增长率达 127.70%；水稻土样中有效磷最大增长率达 137.22%，总磷的最大增长率为 5.26%，速效氮和总氮均随着液态菌肥的施加呈现先增加后降低的趋势，但对比未施加前均明显增加，两种土样中速效磷增长明显证明了沼液液态菌肥对于土壤的解磷作用有明显提升，速效氮和总氮增长明显证明了沼液液态菌肥可有效提高土壤固氮能力，同时沼液本身的氮素可直接被吸收利用，但是冬小麦和水稻土壤中水溶性全盐和氯离子均表现出微弱积累，虽未出现盐胁迫现象，若常年施用仍需要进一步分析试验。祁步凡等^[108]采用沼液源鸟粪石对四川地区酸性黄壤土进行改良，以小白菜为试验材料，发现沼液源鸟粪石作为肥料施用于酸性土壤后，可明改良土壤性状，增加小白菜的鲜重，促进叶绿素和可溶性糖的积累，不影响硝酸盐含量，确保了小白菜的安全品质，当沼液源鸟粪石施加量为 0.30%时，小白菜株高为 14.20 cm，对

比对照组增加 54.15%，土壤 pH 值较初始时平均增加 1.02，并指出若作为追肥连续性施用，土壤酸性改良效果可能更佳。沈月等^[109]对不同地区沼液沼渣进行取样检测，通过对钠离子的含量进行客观分析，结果表明沼渣和沼液中钠离子平均含量分别为 0.113%和 0.016%，资源化利用沼液沼渣时存在促进土壤次生盐渍化的潜在风险。郭全忠等^[110]对设施菜田土壤长期施用猪粪沼肥，对施用 0、1、3、5 和 7 a 土壤的养分和盐分累积量进行考察，结果表明，土壤中碱解氮、有效氮、速效氮、有机质、全铜、全锌和电导率均表现出逐年增加趋势，7a 后各项指标分别为未施用土壤的 3.4、1.5、3.3、1.3、3.9、1.88 和 4.74 倍，在增加土壤养分的同时也导致盐分快速积累，存在土壤污染风险。因此在农业施用沼肥时应从源头控制土壤中盐分累积量，降低土壤盐渍化风险程度。禽畜粪便发酵沼液以管道喷灌方式用作茶园春季追肥、秋季基肥时，可提升春茶产量和品质，并且对于土壤和茶叶中重金属含量在安全范围内提供保障，但是在单独施用沼液时会出现钾亏损现象，因此实际应用时要注意对钾元素的补充^[111]。沼液还田可改善土壤理化性质，增强土壤通透性、保水、保肥能力，避免因使用肥料和农药对于土壤环境和功能的破坏，增强持续提供肥效的能力^[99]，同时表现出改善土壤环境质量这一化学肥料不具备的优势^[95]。沼液中含有一定量的重金属成分，当沼液低用量时可利于降低土壤中铅、铜、锌等 3 种重金属的有效性，高用量时则会提高有效性，增加土壤环境污染^[112]，因此合理控制沼液施用量对于土壤中重金属污染具有明显影响，分析结果见表 4。

3.3.5 禽畜增产增质量

沼液用作有机饲料喂鱼时，可明显提升鱼的产量^[113]。沼液拌料喂猪，可以实现促进生长、缩短育肥期、提高肉料比的效果。据推算，用沼液作为生猪饲料添加剂，每头猪可以节约饲料 50 kg 左右，育肥期也可缩短 20~40 d。且生猪饲喂沼液屠宰后经解剖分析和肉质分析，主要脏器和肉质无异常，未检出任何传染病和寄生虫病^[92]。

表 4 沼液处理及利用方式优缺点分析表
Table 4 Advantages and disadvantages of biogas slurry treatment and utilization.

沼液处理及利用方式 Biogas slurry treatment and utilization	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
膜浓缩 Membrane concentration	沼液的膜浓缩法可截留大部分污染物，达到污染物在一定程度上的净化效果，在一定程度上实现营养物质的再利用。	面临材料的侵蚀、污染和使用寿命有限等自身限制条件，沼液膜浓缩成本高，无论是采用单级处理或是多级联合处理，均难以完全实现沼液中污染物质出水浓度达到较低水平。
贮存处置 Storage and disposal	贮存的温度、条件、时间和光照等因素对于沼液中污染物的影响程度较高，表明通过一定条件下的沼液贮存和自然沉降可促进部分污染物一定程度上的降解。	贮存对于沼液中溶解态和游离态物质去除能力有限，贮存过程中温室气体排放会对大气环境造成不良影响，应通过控制遮盖条件、温度、光照等因素减少对于大气环境污染。
生化处理 Biochemical treatment	生化处理可根据不同沼液的性质选择高效的处理工艺，可实现对于各种污染物质的高效净化作用，出水水质较好，基本实现排放要求。	沼液生化处理仅从沼液作为污水的角度出发，难以实现资源的循环利用，工艺复杂，一般需要多种工艺组合实现较高的处理效率，成本较高。
回流回用 Reflux and reuse	可节省大量稀释用水，沼液中的碱度物质回到发酵系统，提高了系统的缓冲能力，进而提高反应的稳定性。	发酵底物性质、沼液成分及含量、回流比等对整个系统的影响差异显著，控制不当时会导致产气量降低、甲烷产率下降，严重时破坏发酵系统稳定而终止产气。
微藻养殖 Microalgae culture	实现沼液净化目标的同时，微藻利用沼液积累糖分满足自身生长代谢，微藻本身也是产品，具有附加价值，有望通过生物精炼等技术实现生物燃料的开发，弥补化石燃料不可再生性的制约。	商业化进程前景明确，但经济性差，微藻开发利用技术限制较多，如何实现生物燃料开发需要进一步发展。
农业应用 Agricultural application	可提供种子、农作物、禽畜等生长所需养分，具有经济性好，防治病虫害效果好，改良土壤性状，提高农作物、禽畜的品质和产量，提高种子萌发率等明显优势，是当前沼液资源化最经济、最有效的利用方式。	沼液肥料化效果虽好，沼液利用模式需要突破，解决运输和使用的限制，进而沼液肥料实现商业化。

4 结论与展望

很多研究已经证明将工业化物理及生化工艺应用于沼液处理处置时, 可实现出水达标排放, 将沼液进行回流减少发酵系统用水, 可在一定程度上节约水资源。但沼液工业化处理与处置时, 仅从其作为污水的角度出发, 难以实现资源的循环利用, 成本较高; 回流发酵时, 发酵底物性质、沼液成分及含量、回流比等对整个系统的影响差异显著, 控制不当时会导致产气量降低、甲烷产率下降, 严重时会导致发酵系统稳定而终止产气。因此, 沼液进行回流作为发酵系统的补充用水时, 必须根据发酵底物组成和沼液成分, 综合沼液的 pH 值、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD 和难降解物质等因素, 慎重选择回流比。

应用沼液进行微藻养殖, 实现沼液净化目标的同时, 微藻利用沼液积累糖分满足自身生长代谢, 微藻本身也是产品, 具有附加价值, 有望通过生物精炼等技术实现生物燃料的开发, 弥补化石燃料不可再生性的制约。同时, 微藻可解决当前物理及生化技术对于新兴污染物无处处置能力的短板, 还可利用二氧化碳进行光合作用, 成为当前 CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage, 碳捕获、利用与封存) 技术二氧化碳利用的一环, 对碳中和、乃至二氧化碳净零排放目标的实现具有良好的推动作用。微藻养殖过程对沼液净化效果明显, 可持续性优势较强, 无产污环节, 商业化进程前景明确, 但经济性差, 微藻开发利用技术限制较多。沼液农业应用具有较高的实用价值, 可提供种子、农作物、禽畜等生长所需养分, 具有经济性好, 防治病虫害效果好, 改良土壤性状, 提高农作物、禽畜的品质和产量, 提高种子萌发率等明显优势, 是当前沼液资源化最经济、最有效的利用方式。因此, 针对我国沼液产生量巨大、消纳土地有限、资源化程度不高等实际, 应制定合理、高效的沼液处置和资源化利用相结合的组合方式, 发展最健康、也最符合可持续发展的沼液处理模式。

参考文献

- [1] 田宜水. 2013 年中国农村能源发展现状与趋势[J]. 中国能源, 2014, 36(8): 10-14.
Tian Yishui. China rural energy development status and trends in 2013[J]. Energy of China, 2014, 36(8):10-14. (in Chinese with English abstract)
- [2] 农业部科技教育司. 中国农村能源年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [3] 农业部科技教育司. 中国农村能源年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [4] 邹梦圆, 董红敏, 朱志平, 等. 禽畜沼液处理及资源化利用的研究进展与展望[J]. 中国家禽, 2020, 42(9): 103-109.
Zou Mengyuan, Dong Hongmin, Zhu Zhiping, et al. Progress and prospect of treatment and resource utilization of biogas slurry on livestock and poultry farms[J]. China Poultry, 2020, 42(9):103-109. (in Chinese with English abstract)
- [5] 陆国弟, 杨扶德, 陈红刚, 等. 沼液应用的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2021(1): 339-345.
- [6] Lu Guodi, Yang Fude, Chen Honggang, et al. Research progress on application of biogas slurry[J]. Solid and Fertilizer Sciences in China, 2021(1):339-345. (in Chinese with English abstract)
- [7] Walsh J J, Jones D L, Chadwich D R, et al. Repeated application of anaerobic digestate, undigested cattle slurry and inorganic fertilizer N:Impacts on pasture yield and quality[J]. Grass and Forage Science, 2018, 73(3):758-763.
- [8] 张明慧, 高大文. 臭氧组合絮凝工艺处理牛粪沼液的研究[J]. 中国沼气, 2020, 38(1): 37-44.
Zhang Minghui, Gao Dawen. Ozonation and flocculation combination treatment biogas slurry of cow dung[J]. China Biogas, 2020, 38(1):37-44. (in Chinese with English abstract)
- [9] Cheng J, Chen Y, He T, et al. Nitrogen leaching losses following biogas slurry irrigation to purple oil of the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25:29096-29103.
- [10] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 畜禽养殖业污染物排放标准: GB 18596—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [11] 曹汝坤, 陈灏, 赵玉柱. 沼液资源化利用现状与新技术展望[J]. 中国沼气, 2018, 33(2): 42-45.
Cao Rukun, Chen Hao, Zhao Yuzhu. Resource utilization of biogas slurry:Current status and future prospects[J]. China Biogas, 2018, 33(2):42-45. (in Chinese with English abstract)
- [12] 邓玉营, 黄振兴, 阮文权, 等. 沼液回流比与有机负荷对秸秆厌氧发酵特性的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 198-206.
Deng Yuying, Huang Zhenxing, Ruan Wenquan, et al. Effect of digestate recirculation ratio and organic loading rate on fermentation characteristics for anaerobic digestion of straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 198-206. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王月霞. 沼液农田消解利用技术及其土壤环境效应研究[D]. 杭州: 浙江师范大学, 2010.
Wang Yuexia. Research on the Use of Farmland Disposal Technology by Biogas Slurry and Soil Environmental Effects[D]. Zhejiang: Zhejiang Normal University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [14] Kirchmann H, Witter E. Composition of fresh, aerobic and anaerobic farm animal dungs[J]. Bioresour. Technol, 1992, 40:137-142.
- [15] Walsh J, Jones D, L, Edwards-Jones G, et al. Replacing inorganic fertilizer with anaerobic digestate may maintain agricultural productivity at less environmental cost[J]. J. Plant Nutr. Soil Sci, 2012, 175: 840-845.
- [16] Abubaker J, Risberg K, Pell M. Biogas residues as

- fertilisers: Effects on wheat growth and soil microbial activities[J]. *Applied Energy*, 2012, 99:132-133.
- [16] Qin W, Egolfopoulos F N, Tsotsis T T. Fundamental and environmental aspects of land fill gas utilization for power generation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2001, 82: 157-172.
- [17] 李尧琴, 杨丽军, 张乃华. 养猪场沼液重金属含量及安全性分析[J]. *农业环境与发展*, 2012(3): 106-108.
- [18] Odlare M, Nehrenheim E, Ribé V, et al. Cultivation of algae with indigenous species-potentials for regional biofuel production[J]. *Appl Energy* 2011, 88:3280-3285.
- [19] Brune D, E, Lundquist T, J, Benemann J, R. Microalgal biomass for greenhouse gas reductions: Potential for replacement of fossil fuels and animal feeds[J]. *J Environ Eng*, 2009, 135:1136-55.
- [20] 张昌爱, 徐振, 李彦, 等. 禽畜养殖污染防治典型工程的综合效益评价[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(10): 4555-4560. Zhang Chang'ai, Xu Zhen, Li Yan, et al. Comprehensive evaluation of several typical pollution control engineering of livestock and poultry breeding[J]. *Chinese Journal Environmental Engineering*, 2014, 8(10):4555-4560. (in Chinese with English abstract)
- [21] 葛昕, 李布青, 丁叶强, 等. 沼液利用现状和潜在风险分析[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(30): 14897-14898, 15058. Ge Xin, Li Buqing, Ding Yeqiang, et al. Analysis on utilization status and potential risk of biogas slurry[J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.*, 2012, 40(30):14897-14898, 15058. (in Chinese with English abstract)
- [22] 郭益鸿, 杨洁. 发展生态循环农业利用沼肥生产鸡腿菇[J]. *农业工程技术 (新能源产业)*, 2018(8): 37-38.
- [23] 王远远, 刘荣厚. 沼液综合利用研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(4): 1089-1091. Wang Yuanyuan, Liu Ronghou. Progress on comprehensive utilization of biogas slurry[J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.*, 2007, 35(4):1089-1091. (in Chinese with English abstract)
- [24] 吴祥集. 沼液、沼液在养殖业中的应用[J]. *贵州农业科学*, 2006, 34(4): 116-118. Wu Xiangji. Application of marsh gas and marsh liquid in poultry enterprise[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2006, 34(4):116-118. (in Chinese with English abstract)
- [25] Pokój T, Bułkowska K, Gusiatiń Z, M, et al. Semicontinuous anaerobic digestion of different silage crops: VFAs formation, methane yield from fiber and non-fiber components and digestate composition[J]. *Bioresour. Technol*, 2015, 190:201-210.
- [26] 王康, 许玉超, 戴辉, 等. 沼液在土壤改良上的应用研究[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(24): 299-303.
- [27] 谢涛. 农村沼气发酵及其残余物的主要化学成分评价[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- Xie Tao. Biogas Fermentation in Rural and Primary Chemical Component Evaluate of the Residual Products[D]. Chongqing: Southwest University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [28] Joachim C, Manfred T, Peter W, et al. Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 112:171-177.
- [29] Albuquerque J, A, de la Fuente C, Ferrer-Costa A, et al. Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues[J]. *Biomass Bioenergy*, 2012, 40:181-189.
- [30] Albuquerque J, de la Fuente C, Campoy M, et al. Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties[J]. *Eur. J. Agronm*, 2012b, 43:119-128.
- [31] 马虎, 司海丽, 王明. 不同来源的沼液肥对油菜产量及土壤肥力的影响[J]. *陕西农业科学*, 2016, 62(10): 74-77, 103.
- [32] 辛格, 高亚茹, 陈国松, 等. 沼液成分与重金属含量分析[J]. *化工时代*, 2019, 32(1): 9-16. Xin Ge, Gao Yaru, Chen Guosong, et al. Analysis of biogas slurry composition and heavy metal content[J]. *Chemical Industry Times*, 2019, 32(1):9-16. (in Chinese with English abstract)
- [33] 刘庆玉, 李晓娟, 翟建宇, 等. 不同贮存条件对沼液成分的影响[J]. *中国沼气*, 2017, 35(1): 63-64. Liu Qingyu, Li Xiaojuan, Zhai Jianyu, et al. Influence of different storage conditions on biogas slurry composition[J]. *China Biogas*, 2017, 35(1):63-64. (in Chinese with English abstract)
- [34] 陈小华, 朱洪光. 农作物秸秆产沼气研究进展与展望[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(3): 279-283. Chen Xiaoguang, Zhu Hongguang. Research progress and Prospect on producing biogas from crop straws[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(3):279-283. (in Chinese with English abstract)
- [35] 靳红梅, 付广青, 常志州, 等. 猪、奶牛粪厌氧发酵中 Pb 的形态转化及其分布特征[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(22): 218-225. Jin Hongmei, Fu Guangqing, Chang Zhihou, et al. Distribution of Pb and its chemical fractions in liquid and solid phases of digested pig and cow manure slurry[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(22):218-225. (in Chinese with English abstract)
- [36] 白晓凤, 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): 165-169.

- Bai Xiaofeng, Li Zifu, Yin Fubin, et al. Evaporation treatment on biogas slurry from anaerobic fermentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):165-169. (in Chinese with English abstract)
- [37] 魏欢欢. 基于反渗透法浓缩分离沼液试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- Wei Huanhuan. Research for Reverse Osmosis Membrane Concentration Separation of Biogas Slurry[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [38] 隋倩雯, 董红敏, 朱志平, 等. 沼液深度处理技术研究与应用现状[J]. 中国农业科技导报, 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 with English abstract)
- [39] 武林, 迟翔, 周文兵, 等. 猪场沼液的卷式反渗透膜浓缩实验研究[J]. 环境工程, 2019, 37(3): 87-90.
- Wu Lin, Chi Xiang, Zhou Wenbing, et al. Experimental study on piggery biogas slurry concentration process by reverse osmosis membrane[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(3):87-90. (in Chinese with English abstract)
- [40] 岳彩德. 不同膜技术组合处理猪场沼液效果的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- Yue Caide. Studies on Treatment Performance of Different Membrane Combinations for Pig Manure Digested Slurry[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [41] 王欣, 苏小红, 范超, 等. 用于沼液浓缩的正渗透技术工艺参数研究[J]. 黑龙江科学, 2019, 10(8): 14-17.
- Wang Xin, Su Xiaohong, Fan Chao, et al. Study on process parameters of forward osmosis technology for biogas slurry concentration[J]. Heilongjiang Science, 2019, 10(8):14-17. (in Chinese with English abstract)
- [42] Zhan Y H, Dong H M, Yin F B, et al. The combined processes of paper filtration and ultrafiltration for the pretreatment of the biogas slurry from swine manure[J]. International Journal of Environment Research and Public Health, 2018, 15(9):1894-1906.
- [43] 杜静, 张聪, 奚永兰, 等. 自然沉降作为沼液浓缩膜前预处理的效果初探[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(4): 749-751.
- [44] 梁康强, 朱民, 林秀军, 等. 反渗透浓缩沼液预处理试验研究[J]. 中国沼气, 2013, 31(2): 8-10.
- Liang Kangqiang, Zhu Min, Lin Xiujun, et al. Pretreatment of biogas slurry for its concentrating by reverse osmosis[J]. China Biogas, 2013, 31(2):8-10. (in Chinese with English abstract)
- [45] 王峰, 严潇南, 杨海真. 鸡粪厌氧发酵沼液达标处理工艺研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 84-90.
- Wang Feng, Yan Xiaonan, Yang Haizhen. Treatment process of anaerobically digested effluent of chicken for meeting the discharging standard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5):84-90. (in Chinese with English abstract)
- [46] Yetilmezsoy K, Sertyesilisik B, Kocak E, et al. Ameliorative effect of different doses of $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ precipitate recovered from the effluent of UASB treating poultry manure wastewater: Growth of *Lolium perenne*[J]. International Journal of Food Agriculture & Environment, 2009, 7(3):823-831.
- [47] 郭会真, 陶智伟, 冯亮, 等. 化学絮凝-磷酸铵镁结晶-MBR 组合工艺处理养猪沼液研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(1): 86-90.
- Guo Huizhen, Tao Zhiwei, Feng Liang, et al. Study on chemical flocculation MAP/ MBR combined processes for treatment of piggery biogas slurry[J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(1):86-90. (in Chinese with English abstract)
- [48] 刘小雨, 蔡超, 祝平凡, 等. 鸟粪石结晶法回收沼液中氨氮[J]. 山东化工, 2018, 47(14): 199-202.
- Liu Xiaoyu, Cai Chao, Zhu Pingfan, et al. Recovery of ammonia nitrogen from biogas slurry by crystallization of struvite[J]. Shandong Chemical Industry, 2018, 47(14):199-202. (in Chinese with English abstract)
- [49] 杨朝晖, 曾光明, 陈军. 固液分离-UASB-SBR 工艺处理养猪场废水的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2002, 29(6): 95-99.
- Yang Zhaohui, Zeng Guangming, Chen Jun. Study on piggery wastewater by Screening-UASB-SBR processes[J]. Journal of Hunan University(Social Sciences), 2002, 29(6):95-99. (in Chinese with English abstract)
- [50] 徐耀鹏. UASB、SBR、稳定塘组合工艺处理高浓度养殖废水研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- Xu Yaopeng. UASB, SBR, Stabilization Pond Combined Process Used in Aquaculture Wastewater with High Concentration[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [51] 刘建国, 汪永辉. 三沟式氧化沟处理规模化猪场粪水的厌氧出水[J]. 污染防治技术, 2003, 16(z1): 41-44.
- Liu Jianguo, Wang Yonghui. Treatment of anaerobically digested effluent of piggery wastewater with triple oxidation ditch[J]. Pollution Control Technology, 2003, 16(z1):41-44. (in Chinese with English abstract)
- [52] 高峰. 厌氧消化-SBR 工艺处理养猪场废水及工艺最优化的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.

- Gao Feng. Treatment of Piggery Wastewater by Anaerobic Digestion-SBR Process and Its Optimization[D]. Changsha: Hunan University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [53] 段鲁娟. 鸟粪石沉淀法与 MBR 结合工艺去除发酵沼液的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.
- Duan Lujuan. Study on Treatment of Fermentation Liquid by Combination of Struvite and MBR[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [54] 倪萍, 孙昊, 吴树彪, 等. 大中型农业沼气工程沼液循环回用影响分析[J]. 可再生能源, 2017, 35(4): 482-488.
- Ni Ping, Sun Hao, Wu Shubiao, et al. Influence analysis of biogas slurry recirculation in large and medium-scale biogas plants treating agricultural wastes[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(4): 482-488. (in Chinese with English abstract)
- [55] 吴树彪, 黎佳茜, 李伟, 等. 沼液回流对牛粪厌氧发酵产气特性及其动力学的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 241-245.
- Wu Shubiao, Li Jiaqian, Li Wei, et al. Effect of liquid digestate recirculation on biogas production and fermentation kinetics for anaerobic digestion of cattle manure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 241-245. (in Chinese with English abstract)
- [56] 王欣, 周闯, 秦国辉, 等. 不同沼液回流比对玉米秸秆厌氧发酵产气效果的影响探究[J]. 黑龙江科学, 2019, 10(16): 22-25.
- Wang Xin, Zhou Chuang, Qin Guohui, et al. Effects of different biogas slurry reflux ratio on gas production of corn straw on anaerobic fermentation[J]. Heilongjiang Science, 2019, 10(16): 22-25. (in Chinese with English abstract)
- [57] 李慧莉, 刘鹏程, 陈志强, 等. 沼液回流对秸秆与污泥混合中温厌氧消化的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(10): 249-255.
- Li Huili, Liu Pengcheng, Chen Zhiqiang, et al. Effect of slurry recirculation on mesophilic anaerobic digestion of straw and sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(10): 249-255. (in Chinese with English abstract)
- [58] 张晗, 王文政, 袁旭峰, 等. 沼液回流对棉花秸秆产甲烷效率及微生物群的影响[J]. 中国沼气, 2018, 36(1): 19-25.
- Zhang Han, Wang Wenzheng, Yuan Xufeng, et al. Effect of slurry recirculation on methane production of cotton stalk and its microflora[J]. China Biogas, 2018, 36(1): 19-25. (in Chinese with English abstract)
- [59] Niu Qigui, Qiao Wei, Qiang Hong, et al. Microbial community shifts and biogas conversion computation during steady, inhibited and recovered stages of thermophilic methane fermentation on chicken manure with a wide variation of ammonia[J]. Bioresource Technology, 2013, 146(10): 223-233.
- [60] Sponza D T. Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors[J]. Process Biochemistry, 2004, 39(12): 2157-2165.
- [61] 陈玉成, 杨志敏, 陈庆华. 大中型沼气工程厌氧发酵液的后处置技术[J]. 中国沼气, 2010, 28(1): 14-20.
- Chen Yucheng, Yang Zhimin, Chen Qinghua. An overview on disposal of anaerobic digestate for large scale biogas engineering[J]. China Biogas, 2010, 28(1): 14-20. (in Chinese with English abstract)
- [62] 范仁英. 大中型沼气工程沼液循环回用研究[J]. 农业开发与装备, 2020, 4: 36, 39.
- [63] 宫亚斌. 沼液利用及处理方法[J]. 陕西农业科学, 2014, 60(6): 40-42.
- [64] 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): 234-244.
- Xiao Hua, Xu Xing, Zhou Xin, et al. Application of membrane technology for volume reduction of biogas slurry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 234-244. (in Chinese with English abstract)
- [65] Bacsik Z, Cheung O, Vasiliev P, et al. Selective separation of CO₂ and CH₄ for biogas upgrading on zeolite NaKA and SAPO-56[J]. Appl Energy 2016, 162: 613-621.
- [66] Luo G, Wang W, Angelidak I. A new degassing membrane coupled upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor to achieve in-situ biogas upgrading and recovery of dissolved CH₄ from the anaerobic effluent[J]. Appl Energy, 2014, 132: 536-542.
- [67] Guo Y, Yeh T, Song W H, et al. A review of bio-oil production from hydrothermal liquefaction of algae[J]. Renew Sust Energ, 2015, 48: 776-790.
- [68] Sharifzadeh M, Wang L, Shah N. Integrated biorefineries: CO₂ utilization for maximum biomass conversion[J]. Renew Sust Energ, 2015, 47: 151-161.
- [69] Simionato D, Basso S, Giacometti GM, et al. Optimization of light use efficiency for biofuel production in algae[J]. Biophys Chem, 2013, 182: 71-78.
- [70] Salafudin, Setyobudi R H, Wahono S K, et al. Biological purification system: integrated biogas from small anaerobic digestion and natural microalgae[J]. Proc Chem, 2015, 14: 387-393.
- [71] McKennedy J, Sherlock O. Anaerobic digestion of marine macroalgae: a review. Renew[J]. Sustain. Energy, 2015, 52: 1781-1790.
- [72] Chen Guanyi, Zhao Liu, Qi Yun. Enhancing the productivity of microalgae cultivated in wastewater toward biofuel production: A critical review[J]. Applied Energy 2015, 137: 282-91.

- [73] Zhu Liandong, Yan Cheng, Li Zhaohua. Microalgal cultivation with biogas slurry for biofuel production[J]. Bioresource Technology, 2016, Res xxx:4-5.
- [74] 张国治, 兰利琼. 藻类对沼液中氮, 磷去除作用的初步研究[J]. 中国沼气, 1997, 15(4): 11-15.
Zhang Guozhi, Lan Liqiong. A Preliminary study on using algae to eliminate nitrogen and phosphorus from anaerobically digested slurry[J]. China Biogas, 1997, 15(4):11-15. (in Chinese with English abstract)
- [75] Yan Cheng, Zhu Liandong, Wang Yanxin. Photosynthetic CO₂ uptake by microalgae for biogas upgrading and simultaneously biogas slurry decontamination by using of microalgae photobioreactor under various light wavelengths, light intensities, and photoperiods[J]. Applied Energy, 2016, 178:9-18.
- [76] Tan Fen, Wang Zhi, Zhouyang Siyu, et al. Nitrogen and phosphorus removal coupled with carbohydrate production by five microalgae cultures cultivated in biogas slurry[J]. Bioresource Technology, 2016, 221:385-393.
- [77] Maria S, Marianna G, Víctor M, et al. Co-digestion of microalgae and primary sludge: Effect on biogas production and microcontaminants removal[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660:974-981.
- [78] Magdalena J, Ballesteros M, González-Fernandez C. Efficient anaerobic digestion of microalgae biomass: Proteins as a key macromolecule[J]. Molecules, 2018, 23: 1098.
- [79] 任丽滨, 杨晓瑞, 陈晓晔, 等. 光合细菌利用沼液废水制氢的影响因素[J]. 环境工程学报, 2013, 7(3): 869-872.
Ren Libin, Yang Xiaorui, Chen Xiaoye, et al. Influencing factors of hydrogen producing by photosynthetic bacteria using biogas slurry[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(3):869-872. (in Chinese with English abstract)
- [80] Abas, N, Kalair A, Khan N. Review of fossil fuels and future energy technologies[J]. Future, 2015, 69:31-49.
- [81] Su Yujie, Song Kaihui, Zhang Peidong, et al. Progress of microalgae biofuel's commercialization[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017(74):402-411.
- [82] 罗淋. 基于沼液和市政污水培养的栅藻两步法生长和油脂合成研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
Luo Lin. Study on Two-Step Process Consisting Growth with Lipid Production of Scenedesmus SP. Based on Anaerobic Digested Effluent Combing Municipal Wastewater[J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [83] Ziolkowska J, R, Simon L. Recent developments and prospects for algae-based fuels in the US[J]. Renew Sust Energ, 2014, 29:847-853.
- [84] Holm-Nielsen J, B, Seadi T, A, Oleskowicz-Popiel P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization[J]. Bioresource Technology, 2009, 100:5478-5484.
- [85] Singh V, Chaudhary D, K, Mani I, et al. Recent advances and challenges of the use of cyanobacteria towards the of biofuels[J]. Renewable & Sustainable Energy Review, 2016, 10:1-10.
- [86] Haraldsen T, Andersen U, Krogstad T, et al. Liquid digestate from anaerobic treatment of source-separated household waste as fertilizer to barley[J]. Waste Manage, 2011, 29:1271-1276.
- [87] 沈其林, 单胜道, 周健驹, 等. 猪粪发酵沼液成分测定与分析[J]. 中国沼气, 2014, 32(3): 83-86.
Shen Qilin, Shan Shengdao, Zhou Jianju, et al. Determination and analysis of compositions in biogas slurry produced by swine manure digestion[J]. China Biogas, 2014, 32(3):83-86. (in Chinese with English abstract)
- [88] Wang Lei, Guo Shirong, Wang Ying, et al. Poultry biogas slurry can partially substitute for mineral fertilizers in hydroponic lettuce production[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(1):659-671.
- [89] 曲威, 孙丽英, 江晨洁, 等. 鸡场沼液对农作物病原真菌的抑制作用[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(16): 83-86.
- [90] Tambone F, Scaglia B, D'Imporzano G, et al. Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost[J]. Chemosphere, 2010, 81:577-583.
- [91] Abubaker J, Risberg K, Pell M. Biogas residues as fertilisers: Effects on wheat growth and soil microbial activities[J]. Applied Energy, 2012, 99:126-134.
- [92] 王惠霞, 张坐省. 沼液中的化学物质及在农业生产上的应用[J]. 陕西农业科学, 2006(3): 89-91.
Wang Huixia, Zhang Zuoxing. Application of liquid biogas residue in agricultural production[J]. Shanxi Journal of Agricultural Sciences, 2006(3):89-91. (in Chinese with English abstract)
- [93] 刘德源. 沼肥特性及其在农业生产中的应用[J]. 现代化农业, 2013(9): 17-18.
- [94] 闫文娟. 沼气综合利用技术研究[J]. 山西农业科学, 2007, 35(9): 56-58.
Yan Wenjuan. Research on the multipurpose use of marsh gas[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2007, 35(9):56-58. (in Chinese with English abstract)
- [95] 李金澄, 孙吉翠, 杨丽, 等. 沼液过量还田对土壤环境容量及玉米生长的影响. 河南农业科学[J], 2021, 50(5): 49-56.
- [96] Li Jincheng, Sun Jicui, Yang Li, et al. Effects of excess biogas slurry returning on soil environmental capacity and maize growth[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2021, 50(5):49-56. (in Chinese with English abstract)
- [96] 李泽碧, 王正银, 李清荣, 等. 沼液、沼渣与化肥配施对莴笋产量和品质的影响[J]. 中国沼气, 2006, 24(1): 27-30.

- Li Zebi, Wang Zhengyin, Li Qingrong, et al. Effects of combined application of biogas digestate and chemical fertilizer on yield and quality of lettuce[J]. *China Biogas*, 2006, 24(1):27-30. (in Chinese with English abstract)
- [97] 张有富, 张爱萍, 马正龙, 等. 沼肥对设施红地球葡萄光合特性及品质的影响[J]. *经济林研究*, 2017, 35(3): 140-146.
- Zhang Youfu, Zhang Aiping, Ma Zhenglong, et al. Influences of biogas fertilizer on photosynthetic characteristics and quality of Red Globe grape in greenhouse[J]. *Non-wood Forest Research*, 2017, 35(3):140-146. (in Chinese with English abstract)
- [98] 范成五, 刘德军, 陈量, 等. 辣椒沼液浸种育苗效果研究[J]. *江西农业学报*, 2011, 23(1): 77-78.
- [99] 李小娥. 沼液在玉米生产上的应用试验[J]. *现代农村科技*, 2020, 2: 83.
- [100] 张艺菲, 李哲灿, 张力川, 等. 猪粪沼液理化性质对玉米种子萌发的影响[J]. *中国沼气*, 2021, 39(1): 13-21.
- Zhang Yifei, Li Zhecan, Zhang Lichuan, et al. Effect of physicochemical properties of liquid digestate of pig manure on seed germination of maize[J]. *China Biogas*, 2021, 39(1):13-21. (in Chinese with English abstract)
- [101] 石吕, 刘建, 魏亚凤, 等. 沼液在农业领域的资源化利用现状[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(19): 109-117.
- Shi Lyu, Liu Jian, Wei Yafeng, et al. Current status of resource utilization of biogas slurry in agriculture[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(19):109-117. (in Chinese with English abstract)
- [102] 毕婷婷, 胡涵, 刘春丽, 等. 沼液施用对核桃高效生产的影响研究[J]. *东北农业科学*, 2020, 45(6): 119-121, 128.
- Bi Tingting, Hu Han, Liu Chunli, et al. Effect of biogas slurry application on high efficient production of walnut[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2020, 45(6):119-121, 128. (in Chinese with English abstract)
- [103] 陶世洪. 沼肥对早熟蜜柑土壤肥力及产量品质的影响[J]. *广西农业科学*, 2005, 36(4): 344-346.
- Tao Shihong. Effect of marsh manure on soil fertility, yield and quality of fruit in early mature orange[J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2005, 36(4):344-346. (in Chinese with English abstract)
- [104] 陈艳. 沼液沼渣在番茄生产中的应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- Chen Yan. Application Research of Biogas Slurry and Biogas Residue in Tomato Production[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [105] 王爱英, 赵啸林, 孙玲丽, 等. 沼渣土壤调理剂对胶东地区酸性土壤改良效果研究[J]. *中国沼气*, 2019, 37(4): 98-102.
- Wang Aiyang, Zhao Xiaolin, Sun Lingli, et al. Effect of soil conditioner of biogas slurry on acid soil improvement in Jiaodong area[J]. *China Biogas*, 2019, 37(4):98-102. (in Chinese with English abstract)
- [106] 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 Liu, Yu Xuebiao, Li Ran, 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. (in Chinese with English abstract)
- [107] 孙天资, 王攀, 陈锡腾, 等. 沼液制备的液态菌肥对农田土壤理化性质的影响[J]. *环境工程*, 2020.
- Sun Tianzi, Wang Pan, Chen Xiteng, et al. Effects of liquid bacterial fertilizer from biogas slurry on physical and chemical properties of farmland Soil[J]. *Environmental Engineering*, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [108] 祁步凡, 李俊, 王虹, 等. 沼液源鸟粪石对酸性土壤的改良研究[J]. *中国沼气*, 2019, 37(6): 55-59.
- Qi Bufan, Li Jun, Wang Hong, et al. Improvement of acidic soil with struvite from liquid digestate[J]. *China Biogas*, 2019, 37(6):55-59. (in Chinese with English abstract)
- [109] 沈月, 叶波, 陆若辉. 沼液沼渣资源化利用对土壤次生盐渍化的潜在影响[J]. *土壤科学*, 2018, 6(1): 22-26.
- Shen Yue, Ye Bo, Lu Ruohui. Potential effects of biogas slurry and biogas residues resource utilization on the secondary salinization of soil[J]. *Hans Journal of Soil Science*, 2018, 6(1):22-26. (in Chinese with English abstract)
- [110] 郭全忠, 龚晓松、刘化隆. 长期施用沼肥对设施菜田土壤养分和盐分积累量的影响[J]. *西北农业学报*, 2020, 29(1): 127-134.
- Guo Quanzhong, Gong Xiaosong, Liu Hualong. Study on effect of long-term of biogas manure on soil nutrients and salt in protected-land vegetable field[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(1):127-134. (in Chinese with English abstract)
- [111] 胡振民, 万青, 李欢, 等. 喷灌沼液对茶园土壤性质及茶叶产量和品质的影响[J]. *南京农业学报*, 2020, 51(11): 2757-2763.
- Hu Zhenmin, Wan Qing, Li Huan, et al. Effects of sprinkler irrigation with biogas slurry on tea garden soil and tea yield[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51(11):2757-2763. (in Chinese with English abstract)
- [112] 韩金, 范弟武, 郭俨辉, 等. 猪粪沼液对不同 pH 土壤中重金属有效性的影响[J]. *农业现代化研究*, 2021, 42(2): 2-9.
- Han Jin, Fan Diwu, Guo Yanhui, et al. Effect of pig slurry on availability of heavy metals in soils with different pH[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2021, 42(2):2-9. (in Chinese with English abstract)
- [113] 张志平. 沼液的新用途[J]. *现代农业*, 2018(6): 38-39.

Research progress of biogas slurry treatment and resource utilization

Song Yingjin¹, Wang Guanchao¹, Li Ran², Chen Guanyi^{1*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology -Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: A large amount of biogas slurry has gradually become an important part of sewage sources with the rapid development of large and medium-sized biogas projects in China in recent years. Biogas slurry, as a residue of anaerobic fermentation, generally cannot meet the national discharge standard of aquaculture wastes, due to the high concentration of organic matter and nutrients. Effective disposal of biogas slurry can greatly contribute to the surrounding environment, while saving agricultural resources. There are most useful matters in the biogas slurry for plants, including nitrogen, phosphorus, potassium, microelement, amino acids, humic acid, indoleacetic acid, vitamin B, and some auxin. Correspondingly, biogas slurry can widely be expected to serve as the best organic fertilizer in pollution-free agricultural products for better crop growth and soil properties without diseases. Additionally, it can also be used as feed additive for animal growth, where there are essential vitamins and hormones. However, biogas slurry also has many pollutants, such as high concentration of chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), and ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$). In addition, it even has harmful substances, such as heavy metals (for instance, mercury, chromium, cadmium, arsenic, and lead), which are easy to settle, antibiotics, and pathogenic microorganisms. Therefore, the disposal and resource utilization of biogas slurry are highly demanding to alleviate the impact of current industrial development on the environment. Traditional wastewater treatment can achieve the purification of biogas slurries, such as activated sludge process, membrane concentration, and chemical flocculation. But how to improve the efficiency of treatment needs to clarify in further researches, particularly for the waste of resources and high-cost investment in current direct processing. Among them, the membrane concentration of biogas slurry can intercept most pollutants, while considering high-value utilization of nutrients recovery. However, it is difficult to achieve a lower effluent concentration of pollutants using whether single-stage or multistage combined treatment, where there are material erosion, pollution, limited service, and the high cost of membrane concentration. Biochemical methods have an obvious removal effect for pollutants in biogas slurry, with the high removal rate, and the effluent over the discharge standard. MBR and SBR processes can achieve a higher removal rate of ammonia nitrogen, compared with the UASB and A/O processes. The removal efficiencies of suspended solid (SS) and COD are significantly improved using chemical crystallization and flocculation as biological pretreatment, while the subsequent treatment pressure and the hydraulic retention time (HRT) are effectively reduced. Biogas slurry reflux can increase the total amount of microorganisms in the fermentation system, the gas production, and methane yield for better performance of anaerobic fermentation with water-saving consumption under the premise of appropriate reflux ratio. However, it is difficult to determine the reflux of biogas slurry, due to the participation of different substrates in the fermentation, the control conditions of fermentation reaction, and the storage conditions of biogas slurry. At the same time, there are also a series of problems, such as ammonia nitrogen inhibition, volatile organic acids, and cellulose accumulation, leading to the reduction of gas production and methane content, even the termination. Therefore, the reflux ratio should be set strictly in practical application, according to the properties of fermentation substrate and biogas slurry to prevent the occurrence of inhibition of gas production. Microalgae culture using biogas slurry is more significant to realize resource reuse, compared with the traditional physical and biochemical way. However, it still remains unsolved to achieve the conversion of microalgae into biofuels, the cost-saving, and high technical level. Biogas slurry has the potential as an organic quick-acting fertilizer for the high standard of farmland irrigation, due to the 17 kinds of bioactive substances in addition to macroelements and microelements. An active role of biogas slurry can be found to improve the crop yield, soaking seeds, insect resistance and bacteriostasis, soil fertility, and livestock breeding. It can thus become an efficient substitute for chemical fertilizers in agricultural development, particularly for the most economical and effective way to the resource utilization of biogas slurry. In view of the considerable amount of biogas slurry production, limited land consumption and low degree of resource utilization in China, it is very urgent to formulate a reasonable and efficient combination of biogas slurry disposal and resource utilization for the most healthy and sustainable agriculture.

Keywords: biogas slurry; fertilizer; treatment; biogas slurry reuse; microalgae culture; agricultural value