

沼液滴灌抗堵塞研究进展

仇学峰¹, 王绍新², 王建东^{1*}, 王海涛^{1,3}, 孙越超⁴

(1. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 京蓝科技股份有限公司, 北京 100015; 3. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083; 4. 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056000)

摘要: 中国是养殖大国。沼液作为畜禽粪污资源化利用的重要途径, 如何作为有机液态肥实现资源化高效利用仍缺少有效的工程手段和技术载体。滴灌作为省工高效、精量可控的灌溉方式, 有望成为沼液实现资源化利用的核心技术与工程载体。对沼液滴灌的优势性进行了综述分析, 剖析了沼液滴灌系统在物理堵塞、化学堵塞以及生物堵塞控制方法研究与沼液滴灌专用产品研发等方面的研发现状和不足, 提出了沼液滴灌系统抗堵塞机理研究和专用产品研发亟需重点关注的方面, 可为沼液滴灌技术与产品研发提供参考和借鉴。

关键词: 滴灌; 沼液; 堵塞; 冲洗; 产品研发

中图分类号: S216.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2022)05-0018-06

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2022050018

Research Progress on Anti-clogging of Liquid Digestate Drip Irrigation / QIU Xuefeng¹, WANG Shaoxin², WANG Jiandong^{1*}, WANG Haitao^{1,3}, SUN Yuechao⁴ / (1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Kingland Technology Co Ltd, Beijing 100015, China; 3. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 4. College of Water Resources and Hydropower engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China)

Abstract: China is large livestock farming country. Liquid digestate is one of the main forms of livestock and poultry manure. As an organic liquid fertilizer, how to realize its proper use still lacks scientific engineering methods and technologies. As a labor-saving, highly efficient, precise and controllable irrigation method, drip irrigation is expected to become a core technology and carrier for the utilization of liquid digestate. First, the author explains the advantages of liquid digestate drip irrigation system, then analyzes its current status and deficiencies in physical, chemical and biological blockage control methods and special products research and development, and finally suggests key areas that need to focus on in the research of anti-clogging mechanism and special products research and development. The author's relevant conclusions can be used as reference for the research and development of liquid digestate drip irrigation technology and products.

Key words: drip irrigation; liquid digestate; clogging; rinse; products research and development

中国是养殖大国。2017年畜禽粪污排泄总量就达38亿t^[1], 一旦处理不当, 将会造成水体富营养化、氨挥发、病原体传播等二次污染^[2-3]。近年来, 习近平总书记提出的“两山理论”高度彰显了国家对生态环境发展的重视, 养殖业畜禽粪污的高效清洁处理关系到国家乡村振兴和美丽乡村建设的重要战略布局。我国农业的集约化程度尚处于起步阶段, 无法像欧洲等国将畜禽粪污集中还田处理^[4], 如何高效、清洁、经济地处理畜禽废弃物就成为限制

农业生态可持续发展和养殖业健康发展的关键瓶颈。

沼液作为畜禽粪污资源主要的体现形式之一, 被视为畜禽粪污处理的难点^[4]。目前沼液的处理方式主要包括工艺性达标处理、自然生态净化和资源化利用^[5]。近年来, 越来越多的学者指出, 沼液营养丰富, 处理得当可成为可再生能源生产的宝贵资源和农业养分来源^[6-7]。不仅可以提升作物品质和产量^[8], 还有助于改善土壤结构^[9], 增加生物活

收稿日期: 2022-02-24 修回日期: 2022-03-23

项目来源: 中国农业科学院科技创新工程项目(2021-2025)

作者简介: 仇学峰(1997-)男, 硕士, 主要从事节水灌溉装备研发等工作, E-mail: qiuxuefeng@caas.cn

通信作者: 王建东, E-mail: wangjiandong@caas.cn

性物质^[10]。因此,与达标处理和生态净化相比,沼液资源化利用不仅响应了我国化肥减量增效和有机肥替代化肥的号召,也为解决畜禽粪污的超负荷堆积问题提出了变废为宝的新思路。

现状下,国内沼液还田施用方式较为粗放^[11],沼液多伴随传统的漫灌方式进行还田利用,这种方式不仅会导致面源污染、养分淋失和土壤盐化板结等风险,而且需要花费大量运输成本。国外的有关经验表明,结合农田高效灌溉管网及其工程设施,实现沼液、清水和其他肥料混合下的水肥一体化技术运行,是实现沼液高效还田利用的重要途径。滴灌作为省工高效、精量可控的灌水方式,是沼液实现还田高效利用过程中最具潜力的技术和工程载体^[12]。然而由于沼液中复杂的成分组成,灌水器堵塞问题是制约沼液滴灌技术推广应用的瓶颈,及时分析沼液滴灌技术的优势性,并总结分析沼液滴灌系统抗堵塞研究亟需关注的方面,有助于进一步明晰沼液滴灌存在的技术难点,找准沼液滴灌技术研究的切入点,促进沼液滴灌技术科学高效的推广应用。

1 沼液滴灌技术优势性分析

1.1 沼液滴灌符合我国集约化、规模化现代化农业发展方向

我国的农田还处于由散户经营向合作社经营转变的阶段^[2],但欧洲国家,如丹麦、奥地利、德国等都已经完成了农业现代化的转型,在处理畜禽粪污的问题上,不需要过多的考虑沼液高成本的储存和运输等问题^[13]。滴灌是适应我国农业集约化、规模化发展的重要技术,单个滴灌系统可以控制 600 ~ 1500 亩农田,最大可达数万亩^[14]。多年的应用经验表明,滴灌技术具有明显的节水增产、省工高效和精量可控等优势,伴随着我国农业集约化和规模化经营管理的发展趋势,借助滴灌技术实施沼液还田将有广阔的推广与应用前景。

1.2 沼液滴灌是解决沼液大量过剩的重要技术和工程载体

目前,沼液还田施用方式主要是叶面喷施和根施,虽然很多学者通过叶面喷施的方式实现了作物高产稳产,甚至增加了经济收益,但考虑沼液中病原体的传播风险,认为喷施的施用方式存在一定风险;在根施方式中,包括沼液穴贮、与无机肥配施、与秸秆配施、作为无土栽培营养液等,作用方式多通过“水肥穴”或作为基肥施用^[15]。作为基肥根施虽能

消耗一部分沼液,但使用时间过于集中,很难解决养殖场沼液大量过剩的矛盾,滴灌可以实现水、沼液以及其它肥料的水肥一体化应用,通过合理的预处理、水肥匹配模式,结合安全的系统运行管护模式,可适时适量地将沼液肥高效施入田间。

1.3 沼液滴灌可减少沼液中病原体的传播

沼液中含有对人体和动物健康构成威胁的致病菌^[16],如沙门氏菌、李斯特菌、大肠杆菌、弯曲杆菌、梭状芽孢杆菌和耶尔森氏菌。这些细菌都是人畜共患病原体,且大多来自患病动物的粪便和尿液,其中,沙门氏菌是最有可能通过动物粪便和污水污泥在环境中传播的病原体之一^[17]。相比地面灌水方式,滴灌可以减少病原体在空中的传播,从而最大限度地减少病原体与人类和动物的直接接触^[18]。此外,沼液还可作为抑菌剂应用于农田病虫害防治,新鲜牛沼液对番茄灰霉病菌、番茄早疫病菌、辣椒疫病菌、辣椒绵腐病菌、黄瓜炭疽病菌以及茄子灰霉病菌均表现出较强的抑制作用^[19]。

1.4 沼液滴灌在实际应用中呈现良好效益

沼液营养成分丰富、可做速效养分供作物吸收利用^[20]。隋好林^[21]等研究了沼液滴灌对日光温室番茄和土壤理化性状的影响,12 ~ 14 t·0.0667 hm⁻²的沼液处理下番茄的产量和单果重分别提高了 20.7%、18.4%,番茄的部分品质也有所提升。且土壤中碱解氮含量提高了 25.4%,速效磷含量提高了 13.4%,速效钾、有机质的含量分别提高了 49.6% 和 30.7%;沼液滴灌还增加了土壤放线菌和真菌数量,降低了土壤中细菌的数量。刘鹏翔^[22]等研究发现在沙化土壤中应用沼液滴灌系统使猕猴桃水肥利用效率提高 63%,生产成本降低 42%,经济效益提高 45% 以上,降低了生产费用和劳动强度,具有较好的经济效益。

总体而言,从资源节约型社会、农业规模化和绿色循环发展等国家发展需求出发,沼液滴灌技术都将具有显著的优势和推广应用前景,也必将是养殖业粪污资源化高效利用的重要实现途径和技术载体。

2 沼液滴灌抗堵塞研究需重点关注的方面

2.1 沼液滴灌预处理与物理堵塞控制方法研究

滴灌系统能否持久运行与水源的水质状况密不可分,相比传统水肥一体化滴灌技术,沼液进入滴灌系统之前,需要进行严格的预处理和过滤措施。目前,围绕沼液滴灌物理堵塞控制方法的研究还未形

成系统的成果,学者大多通过深度预处理的方法来降低沼液进入滴灌系统后造成灌水器堵塞的概率,常见的沼液预处理方法用于沼液滴灌系统抗物理堵塞时的优点及局限性如表 1 所示。这些方法主要包括臭氧氧化、真空紫外线光降解处理^[23]、电场预处理^[24]、絮凝和曝气^[25]等,这些处理措施能够显著降低沼液化学需氧量和浊度,进而减少沼液有机物和悬浮物的含量。一些学者建立了沼液滴灌系统灌水器堵塞预测模型,并提出影响堵塞因素的主次顺序^[26]。有些学者通过电磁场^[3]、微纳米气泡^[27]控制沼液滴灌系统物理堵塞的发生,取得了较为显著

的效果。此外,一些研究发现,已堵塞的沼液滴灌系统经过长时间搁置,又出现水力性能恢复如初的现象^[28],但针对灌溉停歇周期对沼液滴灌系统水力性能恢复的影响依然鲜有定量报道。

针对沼液滴灌物理堵塞控制方法的研究方向,未来的研究亟需聚焦如下方面:物理堵塞类物质形成过程及随毛管冲洗迁移沉降机理;沼液预处理措施和过滤器组合模式下沼液滴灌系统抗堵塞性能提升机理与调控机制;不同停歇周期及毛管末端冲洗对滴灌系统抗物理堵塞性能恢复的影响等。

表 1 沼液预处理方法用于沼液滴灌系统抗物理堵塞的优点及局限性

控制方法	优点	局限性
臭氧氧化 ^[29]	有效减少沼液中难降解的大分子有机化合物	投入成本高,对化学沉淀和微生物降解效果不显著
真空紫外线光降解处理 ^[30]	光解部分有机物	沼液色度较大,紫外线透过率较低,需通过絮凝等方式进行预处理,且投入成本高
电场预处理 ^[24]	有效降低沼液浊度、色度及部分盐度物质含量	主要以沼液达标排放为目的,现多与微藻处理相结合
絮凝 ^[31]	有效降低沼液中悬浮物含量,促进沼液固液分离	容易导致沼液中氮、磷、钾等营养元素流失,且部分絮凝产品在沼液中可能产生有毒的中间产物
沉降与过滤 ^[32]	有效去除沼液部分悬浮物和胶体等杂质,成本极低	沉降处理周期长,需不定期清洗滤网
曝气 ^[32]	氧化部分大分子有机物,控制沼液氨氮浓度	曝气过度会导致氮素损失严重
电磁场 ^[3]	干扰微生物生长,降低物理颗粒与胞外聚合物的黏附作用	适用于沼液滴灌系统的技术参数有待明晰
微纳米气泡 ^[27]	有效降低灌水器堵塞物含量	适用于沼液滴灌系统的技术参数有待明晰
毛管冲洗 ^[33]	有效去除滴灌带内沉积的部分固体颗粒	需要定期进行,存在用工较多的可能

2.2 沼液滴灌化学堵塞控制方法研究

沼液的碱性环境为很多化学堵塞物的形成提供了有利条件,极易形成二氧化硅、硅酸盐、碳酸盐、磷酸盐等无机化合物^[34]。此外,沼液浓度较大时,滴灌系统更易发生堵塞,原因在于沼液中多数阳离子与带负电的悬浮物结合形成更大的絮状团聚体^[24]。目前主要通过 pH 值为 5.5 ~ 6.0 的酸液冲洗达到缓解化学堵塞物形成或加速其分解的作用,同时,絮状团聚体的含水率较高,加酸处理能够促进絮状团

聚体的脱水过程^[35],从而降低团聚体内部粘附性。但加酸处理对沼液絮状团聚体的脱水程度以及配合毛管冲洗的运行效果有待研究。有学者通过微纳米气泡^[27]控制的方式能够显著降低化学堵塞物质的含量,但作用机理尚不明晰。此外,沼液滴灌系统化学堵塞物的形成过程也尚不明确。化学堵塞控制方法用于沼液滴灌系统抗化学堵塞时的优点及局限性如表 2 所示,对于沼液滴灌系统而言,相关方法的实施技术参数需要进一步明晰。

表 2 化学堵塞控制方法用于沼液滴灌系统抗化学堵塞的优点及局限性

控制方法	优点	局限性
电磁场 ^[3]	有效减少灌水器生物膜中碳酸盐、硅酸盐等矿质元素含量	作用机理尚不明晰,沼液滴灌适用的技术参数有待确定
微纳米气泡 ^[27]	有效降低堵塞物中碳酸盐、硅酸盐等矿质元素含量	作用机理尚不明晰,沼液滴灌适用的技术参数有待确定
加酸处理 ^[32]	有效抑制灌水器中钙镁化合物的形成或加速其分解,同时促进团聚体脱水,多配合毛管冲洗措施	需要定期维护,目前缺少沼液滴灌适配的技术参数

针对沼液滴灌碱性条件容易生成化学堵塞物的特点,未来的研究亟需聚焦如下方面:化学堵塞物质在沼液滴灌系统中的形成过程;加酸处理对化学堵

塞物生成与降解变化过程的影响机理;加酸处理对沼液絮状团聚体脱水性能及其粘附性变化过程的影响;化学处理配合毛管末端冲洗对堵塞物质的运移

情况以及对滴灌系统水力性能维护的影响等。

2.3 沼液滴灌微生物菌群控制方法研究

沼液中微生物菌群极易黏附在滴灌系统中,并从沼液中不断吸收营养物质,同时会黏附沼液中其它物理、化学杂质,形成更加复杂的堵塞物质,此外,部分微生物会随滴灌系统水力作用向下游继续扩散^[36],造成滴灌系统更大范围堵塞。微生物菌群控制方法用于沼液滴灌系统抗生物堵塞时的优点及局限性如表3所示,一些学者的研究结果发现,通过在沼液滴灌系统中培养拮抗菌群可达到控制滴灌系统生物堵塞的效果^[37],也有些学者通过电磁场^[34]、微纳米气泡^[27]控制的措施干扰胞外聚合物的分泌,进而影响沼液微生物的黏附过程,较好的实现了对生物堵塞的控制。再生水滴灌系统采取加入酸液和氯

液的方式破坏胞外聚合物的生长实现对生物堵塞的控制^[38],但在沼液滴灌系统中,加酸加氯对微生物生长及对团聚体的作用机理尚未明晰,且关于加酸加氯处理对缓解沼液滴灌生物堵塞效果的研究还鲜有报道。此外,在材料改性方面,有学者提出引入超疏水涂层的方法减少微生物在滴灌系统中的附着^[33],但相关定型产品及其性能测试结果未见有报道。

围绕沼液滴灌系统缓解或控制生物堵塞的研究方向,未来的研究亟需聚焦如下方面:沼液滴灌系统优势菌群时空变化特征及不同菌群间粘附性特征差异;加酸加氯处理对沼液滴灌系统团聚类堵塞物质的破坏机理及对滴灌带管壁及流道内粘附性沼液脱落的作用机制;改性材料抑制微生物附着管壁的作用机理等。

表3 微生物菌群控制方法用于沼液滴灌系统抗生物堵塞的优点及局限性

控制方法	优点	局限性
电磁场 ^[3]	干扰沼液细菌物种间共生关系,抑制灌水器生物膜的形成	作用机理尚不明晰,未提出沼液滴灌适用的技术参数
微纳米气泡 ^[27]	有效降低灌水器堵塞物有机物和胞外聚合物含量	作用机理尚不明晰,未提出沼液滴灌适用的技术参数
培养拮抗菌 ^[39]	有助于缓解灌水器生物堵塞	沼液中寄主、病原菌和拮抗菌或其他寄生微生物之间作用机理还未明晰
加酸加氯 ^[39]	有效控制灌水器化学堵塞和生物堵塞,可与毛管冲洗协同进行	引起氯元素在土壤中富集,引发土壤和地下水污染,且未提出沼液滴灌适用的技术参数
改性材料 ^[33]	有效减少微生物及固体颗粒在灌水器流道中的附着	增加灌水器成本,且未提出适用于沼液的超疏水材料

2.4 沼液滴灌系统高效抗堵专用产品研发

相比传统灌溉水源,沼液和清水混配后的水质成分较为复杂,且沼液每次随水滴灌时吸入量较大,常规的滴灌设备在一定程度上很难满足沼液滴灌系统的正常运行。关乎沼液滴灌系统高效运行的关键设备包括施肥装置、过滤装置、灌水器 and 尾部冲洗装置等。有些学者针对沼液易引起堵塞的特点,提出了实现粘稠分离的自清洗智能过滤设备,能够满足滴灌的用水要求^[40],但仍需一定过滤周期,无法实现实时在线过滤。针对沼液滴灌系统每次灌水施肥过程中较大沼液吸入量的需求(沼液与清水的配比一般处于1:5~1:10),研发具有大吸肥量性能的施肥装置也极为迫切。此外,对于沼液滴灌系统而言,如何解决自动定期冲洗的问题也尤为重要,沼液滴灌系统中的堵塞物需要通过定期冲洗的方式排出^[41],现有尾部冲洗阀大多不能配合滴灌系统在任意时间实现毛管自动冲洗,且成本较高,多为国外产品。

针对沼液滴灌系统极为特殊的灌溉水质成分,亟需研发沼液滴灌系统高效抗堵专用产品,重点应

聚焦于高效自清洁功能的沼液滴灌专用过滤器、大吸肥量经济型文丘里施肥器及施肥机系统、大流量高抗堵滴灌灌水器、毛管末端自动冲洗阀等产品。

3 小结

从以上文献综述结果分析来看,沼液滴灌技术是养殖业粪污资源化高效利用的重要实现途径和技术载体,具有广阔的应用前景。能否有效解决沼液滴灌下灌水器的堵塞问题是沼液滴灌技术能否成功推广应用的关键,现有灌水器堵塞控制方法的研究成果主要针对高含沙水、再生水和其它常规水源,未见系统性关于沼液滴灌系统堵塞控制方法,尤其在生物堵塞方面,目前还未见较为系统和详实的堵塞机理方面的报道。沼液成分复杂,沼液中胞外聚合物与悬浮物之间的作用机理以及对滴灌系统堵塞的影响尚不清晰。此外,现有灌水器、过滤器等滴灌关键设备较难满足沼液滴灌系统的工作需求,研发沼液滴灌高抗堵专用系列产品极为迫切。通过相关文献的分析和总结,剖析了沼液滴灌系统在物理堵塞、化学堵塞以及生物堵塞控制方法研究与沼液滴灌专

用产品研发等方面的研发现状和不足,提出了沼液滴灌系统抗堵塞机理研究和专用产品研发亟需重点关注的方面,相关结论可为沼液滴灌技术与产品研发提供一定参考和借鉴。但总体而言,沼液滴灌技术在我国还处于探索和起步阶段,围绕沼液滴灌灌水器堵塞控制方法研究、专用设备研发、系统安全高效运行管护技术模式等还需要开展大量的科学研究,以最终支撑沼液作为有机液态肥实现资源化高效还田利用。

参考文献:

- [1] 邹梦圆,董红敏,朱志平,等. 畜禽场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(09): 103–109.
- [2] Wang H X, et al. Study on the pollution status and control measures for the livestock and poultry breeding industry in northeastern China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(5): 4435–4445.
- [3] Xiao Y, et al. Using electromagnetic fields to inhibit biofouling and scaling in biogas slurry drip irrigation emitters[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 401: 123365.
- [4] Gong H, et al. Concentrating process of liquid digestate by disk tube-reverse osmosis system[J]. Desalination, 2013, 326: 30–36.
- [5] 陈超,阮志勇,吴进,等. 规模化沼气工程沼液综合处理与利用的研究进展[J]. 中国沼气, 2013, 31(01): 25–28+43.
- [6] Ioannou Ttofa L, et al. Life cycle assessment of household biogas production in Egypt: Influence of digester volume, biogas leakages, and digestate valorization as biofertilizer[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 286: 125468.
- [7] Duran Ros M, et al. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(1): 67–79.
- [8] Garg R N, et al. Use of flyash and biogas slurry for improving wheat yield and physical properties of soil[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2005, 107(1–3): 1–9.
- [9] Wang X H, J F Li. Influence of using household biogas digesters on household energy consumption in rural areas—a case study in Lianshui County in China[J]. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2005, 9(2): 229–236.
- [10] Xu M, et al. Effect of biogas slurry addition on soil properties, yields, and bacterial composition in the rice-rape rotation ecosystem over 3 years[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(5): 2534–2542.
- [11] 董红敏,左玲玲,魏莎,等. 建立畜禽废弃物养分管理制度 促进种养结合绿色发展[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(02): 180–189.
- [12] Li J S, et al. Renewable resource for agricultural ecosystem in China: Ecological benefit for biogas by-product for planting[J]. Ecological Informatics, 2012, 12: 101–110.
- [13] Ai P, et al. Effect of application of different biogas fertilizer on eggplant production: Analysis of fertilizer value and risk assessment[J]. Environmental Technology Innovation, 2020, 19: 101019.
- [14] 张志昊. 规模化滴灌系统灌溉施肥性能评价及模拟[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2020.
- [15] 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(35): 109–117.
- [16] Jenssen P D, et al. Local recycling of wastewater and wet organic waste—A step towards the zero emission community[C]. Proceedings of the 8th International Conference on Environmental Science and Technology, 2003: 357–364.
- [17] Sahlström L. A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants[J]. Bioresource Technology, 2003, 87(2): 161–166.
- [18] Li J s, Y f Li, H Zhang. Tomato Yield and Quality and Emitter Clogging as Affected by Chlorination Schemes of Drip Irrigation Systems Applying Sewage Effluent[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(10): 1744–1754.
- [19] 尚斌,陶秀萍,陈永杏,等. 牛场沼液对几种蔬菜病原菌抑制作用的研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(04): 753–760.
- [20] Lv W L, et al. The Research of Biogas Slurry on Yield and Safety. Frontiers of Green Building[J]. Materials and Civil Engineering, 2011, 71–78: 3142–3146.
- [21] 隋好林,陈晓峰,秦娜,等. 沼液滴灌对番茄产量、品质和土壤理化性状的影响[J]. 山东农业科学, 2016, 48(02): 80–84.
- [22] 刘鹏翔. 沼液滴灌技术在沙化土壤猕猴桃树上的推广应用[J]. 现代农业, 2019(08): 48–49.
- [23] 夏彬芸. 沼液滴灌系统灌水器堵塞特性及控制方法研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [24] 孙盛进,徐慧,卓梦琼,等. 电场预处理强化微藻处理猪场废水的效果优化研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(08): 3166–3174.
- [25] 宋建超. 基于絮凝预处理的膜生物反应器处理奶牛场高浓度污水中试试验研究[D]. 北京: 中国农业科学

- 院 2021.
- [26] 陈红, 夏彬芸, 邵显, 等. 沼液滴灌系统灌水器堵塞模型构建及系统参数优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(03): 99–106.
- [27] 王逍遥. 沼液滴灌系统灌水器堵塞的微纳米气泡控制机理及应用研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2020.
- [28] Lamm F R, Trooien T P, Clack G A, et al. Using beef lagoon wastewater with SDI[C]//Proc Irrig Assoc Int’l Irrigation Technical Conf, October, 2002: 24–26.
- [29] 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(01): 37–44.
- [30] 李同, 董红敏, 陶秀萍. 猪场沼液絮凝上清液的紫外线杀菌效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(06): 165–171.
- [31] 范小芳, 康鹏洲, 王晓辉, 等. 沼液资源化利用混凝-絮凝处理技术研究进展[J]. 中国沼气, 2021, 39(06): 46–54.
- [32] 孙越超, 王书吉, 仇学峰, 等. 沼液滴灌技术研究进展[J]. 中国沼气, 2021, 39(06): 68–73.
- [33] 李云开, 周博, 杨培岭. 滴灌系统灌水器堵塞机理与控制方法研究进展[J]. 水利学报, 2018, 49(01): 103–114.
- [34] Xiao Y, et al. Electromagnetic fields for biofouling mitigation in reclaimed water distribution systems[J]. *Water Res*, 2020, 173: 115562.
- [35] 陈丹丹, 奚昱昊, 卢平, 等. 污泥深度脱水技术研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(10): 4722–4746.
- [36] Oliver M M H, G A Hewa, D Pezzaniti. Bio-fouling of subsurface type drip emitters applying reclaimed water under medium soil thermal variation[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 133: 12–23.
- [37] Zhou B, et al. Effects of microbial community variation on bio-clogging in drip irrigation emitters using reclaimed water[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 194: 139–149.
- [38] Song P, et al. Controlling mechanism of chlorination on emitter bio-clogging for drip irrigation using reclaimed water[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 184: 36–45.
- [39] 王天志. 滴灌系统毛管附生生物膜形成的控制机理及应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [40] 张青, 栗方亮, 孔庆波. 沼液滴灌过滤技术及设备集成研究[J]. 中国沼气, 2021, 39(01): 40–44.
- [41] 赵新凯, 莫彦, 夏辉, 等. 毛管末端自动冲洗阀水力性能试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(07): 105–112.