



云南省液体粪污处理与农田消纳综合分析

郭怡欣 王艺璇 王宇蕴 朱琼蓉 彭一龙 徐智

Comprehensive analysis of liquid manure treatment and farmland absorption in Yunnan Province

GUO Yixin, WANG Yixuan, WANG Yuyun, ZHU Qiongrong, PENG Yilong, XU Zhi

在线阅读 View online: <https://www.hjgcjsxb.org.cn/article/doi/10.12153/j.issn.1674-991X.20240230>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

整县推进畜禽粪污资源化利用项目温室气体减排量评估方法

Evaluation on greenhouse gas emission reduction of the whole county's promotion project of livestock and poultry manure resource utilization
环境工程技术学报. 2024, 14(1): 25-32. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20230486>

云南省九湖流域低污染水总量、类型及利用现状分析

Analysis of total amount, types and utilization status of low-polluted water in the Nine Plateau Lake Basins of Yunnan Province
环境工程技术学报. 2024, 14(3): 889-896. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20230739>

西北生态脆弱区畜禽粪污处理技术综合评价

Comprehensive evaluation research of livestock and poultry waste treatment technologies in the ecological fragile areas of Northwest China
环境工程技术学报. 2023, 13(2): 654-662. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20220080>

天然气开采钻井固体废物处理处置及资源化技术的应用现状与展望

Application status and prospects of solid waste disposal and resource utilization technology in natural gas extraction drilling
环境工程技术学报. 2021, 11(3): 582-590. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20200161>

我国农村生活污水资源化利用现状及模式分析

Analysis on current situation and model of resource utilization of rural sewage in China
环境工程技术学报. 2022, 12(6): 2089-2094. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20210829>

城市生活垃圾焚烧飞灰利用处置现状及环境管理

Current situation for utilization and disposal and environmental management of fly ash from municipal solid waste incineration
环境工程技术学报. 2021, 11(5): 1034-1040. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20210083>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

郭怡欣,王艺璇,王宇蕴,等.云南省液体粪污处理与农田消纳综合分析[J].环境工程技术学报,2025,15(2):702-708.

GUO Y X,WANG Y X,WANG Y Y,et al.Comprehensive analysis of liquid manure treatment and farmland absorption in Yunnan Province[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2025, 15(2): 702-708.

云南省液体粪污处理与农田消纳综合分析

郭怡欣¹,王艺璇²,王宇蕴¹,朱琼蓉¹,彭一龙³,徐智^{1*}

1.云南农业大学资源与环境学院

2.南京农业大学资源与环境科学学院

3.泰国国立清迈大学科学院

摘要 以2023年云南省畜禽养殖数据为基础,估算了云南省畜禽液体粪污产生量,结合液体粪污厌氧发酵模式,以灌溉量为基础,对云南省畜禽液体粪污土地的消纳能力进行了估算。结果表明:云南省畜禽液体粪污的产生量为20584.50万t/a,经过存储发酵后可替代754.68万t/a的尿素和20.09万t/a的普钙。以灌溉量计算农田配套面积,云南省将有90%以上市(州)不能消纳当地所产生的粪污,有16%~74%的粪污需要进行达标排放处理。云南省液体粪污减少达标排放实现全量还田需增加无害化程度、减少液体粪污还田稀释倍数,基于云南省现状提出了微生物协同液体粪污酸化存储发酵增加液体粪污无害化程度和养分保存能力的技术模式,为云南省液体粪污处理的资源化利用提供新的技术途径。

关键词 液体粪污;土地消纳能力;厌氧发酵;资源化利用;无害化;灌溉量

中图分类号:X713 文章编号:1674-991X(2025)02-0702-07 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20240230

Comprehensive analysis of liquid manure treatment and farmland absorption in Yunnan Province

GUO Yixin¹, WANG Yixuan², WANG Yuyun¹, ZHU Qiongrong¹, PENG Yilong³, XU Zhi^{1*}

1.College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University

2.School of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University

3.Academy of Sciences, Chiang Mai University, Thailand

Abstract Based on the livestock and poultry breeding data of Yunnan Province in 2023, we estimated the livestock and poultry liquid manure production in Yunnan Province. Combined with the anaerobic fermentation mode of liquid manure and based on irrigation volume, we estimated the absorption capacity of the land polluted by livestock and poultry liquid manure in Yunnan Province. The results showed that livestock and poultry liquid manure production in Yunnan Province was 20584.50 t/a, which could substitute 754.68 t/a of urea and 20.09 t/a of calcium superphosphate after proper storage and fermentation. When calculating the supporting area of farmland based on irrigation volume, more than 90% of cities (prefectures) in Yunnan Province would not be able to dispose of the manure generated locally, and 16%-74% of the manure discharged needed to be processed to meet the discharge standard. It was necessary to increase the degree of harmless treatment and reduce the dilution factor of liquid manure for returning to the field, in order to achieve a full return and reduce the up-to-standard discharge of liquid manure in Yunnan Province. Based on the current situation of Yunnan Province, we proposed a technical model of microbial synergistic liquid manure acidification, storage and fermentation to increase the harmless degree and nutrient preservation capacity of liquid manure, which could provide a new technical approach for the resource utilization of liquid manure treatment in Yunnan Province.

Key words liquid manure; land absorption capacity; anaerobic fermentation; resource utilization; harmless; irrigation volume

收稿日期:2024-04-11

基金项目:云南省重大科研专项(202202AE090027);国家自然科学基金项目(32160744);云南省“兴滇英才支持计划”青年人才项目

作者简介:郭怡欣(1999—),女,硕士,主要从事固体废物资源化利用相关研究,1059457746@qq.com

*通信作者:徐智(1980—),男,教授,博士,主要从事有机固体废物处理处置与肥料化利用,有机肥、生物肥、有机无机等肥料开发与应用,土壤改良、种养循环和有机农业方面的研究,xuzhi9910@126.com

截至 2020 年,我国畜禽粪污年排放量达 30.5 亿 t/a,养殖业废水排放中总氮量达 37.00 t/a,总磷量达 8.04 t/a^[1],畜禽粪污污染稳居农业源污染之首。根据农业农村部统计,畜禽粪污综合利用率不到 60%^[2],大量的畜禽粪尿废物排放使得规模养殖场周边污染有不断加剧的趋势。根据《第二次全国污染源普查公报》,畜禽养殖业化学需氧量(COD)、氨氮排放分别占农业源水污染物排放总量的 93.76% 和 51.29%^[3]。全国畜牧总站提出了种养结合、粪水肥料化利用、粪污资源化利用、清洁回用、达标排放等 9 种畜禽粪污资源化利用主推技术模式^[4]。大多数畜禽固体粪污通常采用堆肥发酵后还田利用或加工成有机肥利用,而液体粪污(尿液和污水)处理难度大、处理成本高^[5]。

根据农业农村部教育司在云南省设立的农业面源污染(生猪)国控监测点连续 3 年监测的结果估算,2019 年我国的畜禽粪污产量为 38 亿 t(干基),其中畜禽直接排放粪便约 18 亿 t(干基),养殖过程产生的污水量为 20 亿 t^[6]。虽然云南省近几年一直在不断探索畜禽粪污处理方式且对于畜禽粪污的处理投入显著提高,但其种养规划不合理,加之种养结合匹配度不高;对清洁生产不够重视,致水体污染愈发严重;有关部门对畜禽养殖污染防治引导不够,设施缺乏长期维护监督,不能结合当地特色,加之固体粪污处理技术^[7-9]不适用于液体粪污的处理^[10],而云南省大部分的养殖场对液体粪污仍然采用自然发酵的方式,这种方式不仅会产生大量恶臭气味,也不能很好地清除病原菌、虫卵等有害物质,且处理时间长、养殖规模与处理量不成正比^[11]。现如今液体粪污的有效治理已经成为云南省养殖产业健康发展的主要瓶颈。

液体粪污指畜禽养殖过程中产生的粪、尿、外漏饮水和冲洗水及粪污固液分离粪水等液态混合物(含粪浆)^[12]。畜禽粪污的处理技术在不同地区适应性有着较大差异^[13],周海宾等^[11]对中国畜禽资源化利用技术进行调查,指出中国规模养殖场畜禽粪污处理方式主要有贮存厌氧发酵、沼气发酵、沼气工程+污水深度处理、异位发酵床等方式,而针对液体粪污处理,我国主要采用厌氧发酵沼液还田、贮存发酵这 2 种方式,占比分别为 41.59%和 39.09%,这是因为这 2 种方式粪污收集、处理、贮存设施建设成本低,相较于其他的处理方式费用较低,但液体粪污贮存存在无害化周期比较长,需要有足够的配套土地来消纳液体粪污,否则就需要长距离运输,存在运输费用高等问题。周海宾等^[11]研究表明,液体粪肥

主要施用于追肥和基肥,平均施肥量为 130.5 t/ha,同时《果菜茶有机肥替代化肥技术指导意见》中对于沼液作为果树和蔬菜追肥的推荐施用量分别为果树每次 300~450 t/ha、蔬菜每次 45~60 t/ha,但是对于粪水储存后的液体粪肥还田没有做出相关推荐。程红胜等^[14]在调查长江流域平原地区畜禽粪污现状中指出,液体粪肥还田方式主要有漫灌、喷灌、注入式施肥、滴灌等,其中漫灌是主要施用方式,占比为 95.1%,喷灌和滴灌仅分别占 1.6%和 3.3%。

液体粪污不论是经过沼气发酵还是通过贮存发酵,首先都要实现无害化,在无害化的基础上,将液体粪污转变成液体粪肥,再实现资源化利用的目的。液体粪污转变成液体粪肥,其关键是“肥”,粪水酸化保肥技术在国内得到了广泛应用,有研究表明添加酸化剂可降低 6.3%~11.1%的总氮损失,能够降低粪水贮存初期中氨气的排放,同时也可以有效抑制奶牛粪水中粪大肠菌群的活性,使其更易达到无害化处理^[15]。

近年来我国畜禽养殖业规模化发展迅速,资源化利用效果显著,但仍然有 40%的粪污不能实现合理资源化^[16]。云南省的畜禽养殖规模也已从散养户、少量专业户为主向现代化规模化养殖场、养殖专业户和散养户并存转变。截至 2020 年,云南省已经有 22 个畜禽养殖大县开启了畜禽粪污资源化利用全县推进工作,大力推进畜禽粪污资源化利用进程^[17]。云南省大部分地区针对液体粪污的处理方式大多为储存发酵肥水还田^[18],也有一些粪污净化达标排放的具体案例,如云南省红河州泸西县天禾绿色实业有限公司针对液体粪污采用“沼气+曝气池+MBR 生化处理”的粪污处理工艺,完成日处理液体粪污 200 m³的污水净化工程;狐尾藻生态湿地污水处理模式采用“生物基质池+生态氧化塘+湿地”工艺,对养殖废水进行处理,达标后排放^[19]。云南省作为我国西部的畜禽养殖大省,在全国占有十分重要的地位,畜禽养殖业的快速发展对促进云南省农村经济发展和农民持续增收具有重要作用。云南省深入实施“湖泊革命”攻坚战,截至 2022 年底,各类巡河(湖)、督察发现畜禽粪污治理问题 60 项,督促整改 55 项。督促九湖流域 630 家规模养殖场建设粪污处理设施,有序规范畜禽养殖 9.7 万户,流域内畜禽粪污综合利用率比全省平均水平高出 10 个百分点^[20]。液体粪污的高效处理是“推进畜禽粪污综合利用”攻坚战的一项重要举措。

本文根据《云南统计年鉴 2023》,估算了云南省畜禽液体粪污产生量,基于灌溉量针对不同作物系

统对液体粪污消纳能力的差异进行了评估;基于最大农田消纳情景,提出了微生物协同液体粪污酸化存储发酵技术,增加液体粪污无害化程度和养分保存能力。旨在加强液体粪污的肥料化利用,为云南省液体粪污资源化利用提供新思路和方法。

1 数据来源与主要方法

以《云南统计年鉴 2023》为基础,对云南省各市(州)畜禽粪污产生量作粗略计算,在计算粪污产生量时,只考虑猪、牛、羊和家禽这 4 类畜禽。由于畜禽种类不同,饲养周期也不同。根据相关文献^[21]及生态环境部公布的数据,确定各类畜禽饲养周期及饲养量。根据《第一次全国污染源普查畜禽养殖业产污系数与排污手册》及相关文献^[22-24],对畜禽液体粪污的排污系数进行确定。根据《畜禽规模养殖场粪污资源化利用设施建设规范(试行)》,生猪液体粪污日排泄系数取值为 4.7 L/(头·d),牛液体粪污日排泄系数取值为 15 L/(头·d),羊液体粪污日排泄系数取值为 0.58 L/(头·d),家禽液体粪污日排泄系数取值为 0.08 L/(头·d)。基于此,采用下式对液体粪污产生量进行估算:

$$Q = N \times T \times M + K \quad (1)$$

式中: Q 为各类液体粪污产生量, t/a; N 为畜禽饲养量, 万头; T 为饲养周期, d; M 为各类畜禽液体粪污日排泄系数, kg/(头·a); K 为畜禽饲养周期污水产生量, kg/(头·a)。

云南省液体粪污配套农田消纳量分析中各市(州)年降水量以及相关计算数据来源于文献 [25-30], 根据 GB 5084—2021《农田灌溉水质标准》, 云南省大部分作物是旱作, 液体粪污排放浓度数据来源于文献 [6]。由沼液排放的污染浓度可知, COD、BOD₅ 及 SS 的排放浓度分别约是农田灌溉水质标准值的 11、14、20 倍, 因此, 需要对沼液稀释 20 倍, 沼液中的污染物才能满足农田灌溉水质标准。利用灌溉配套面积估算农田配套面积, 公式如下:

$$S = cV/[c_0(U + E + W + Z + r + D + Ic - P - G)] \quad (2)$$

式中: S 为配套农田面积, hm²; c 为沼液污染物浓度, mg/L; V 为产生的沼液量, m³; c_0 为农田灌溉水质标准, mg/L; U 为作物需水量, m³/ha; E 为作物蒸散量, m³/ha; W 为土壤有效水量, m³/ha; Z 为农田排水量, m³/ha; r 为地表径流量, m³/ha; D 为深层渗漏量, m³/ha; Ic 为作物截留量, m³/ha; P 为降水量, m³/ha; G 为地下水补给量, m³/ha。具体数据见表 1。

表 1 以灌溉量计算消纳沼液配套面积的参数

Table 1 Parameters for calculating the supporting area of biogas slurry absorbed by irrigation volume

参数	小麦-玉米	蔬菜-黄瓜	果树-葡萄
产生的沼液量(V)/(m ³ /a)	各市(州)实际	各市(州)实际	各市(州)实际
降水量(P)/(m ³ /ha)	各市(州)实际	各市(州)实际	各市(州)实际
作物需水量(U)/(m ³ /ha)	7 653.8	2 401.8	6 967.2
作物截留量(Ic)/(m ³ /ha)	各市(州)实际	各市(州)实际	各市(州)实际
作物蒸散量(E)/(m ³ /ha)	8 550	8 550	8 550
地表径流量(r)/(m ³ /ha)	421	421	421
深层渗漏量(D)/(m ³ /ha)	0	0	0
地下水补给量(G)/(m ³ /ha)	0	0	0
土壤有效水量(W)/(m ³ /ha)	0	0	0
农田排水量(Z)/(m ³ /ha)	0	0	0
沼液稀释倍数(c/c_0)	20	20	20

注: 作物蒸散量和地表径流量均为云南省平均值, 地下水对土壤水分状况的影响比较小, 故地下水补给量为 0, 该地区冬小麦、夏玉米均为旱田农作物, 因此农田排水量为 0, 本研究是在底墒条件良好的条件下进行的估算, 即土壤有效含水量不变, 因此计算时, 不再考虑土壤有效含水量, 即 $W=0$ 。

2 结果与分析

2.1 云南省畜禽液体粪污产生量

云南省各市(州)主要畜禽养殖状况及液体粪污产生量估算如表 2 所示。从表 2 可以看出, 将云南省各市(州)畜禽养殖量换算成猪当量, 其总量为 7 622.29 万头, 养殖主要集中在曲靖市、红河州、保山市、大理州, 占比为 9.25%~12.34%; 各畜禽养殖比例, 猪为 44.32%, 牛为 38.40%, 羊为 7.23%, 家禽为 10.03%。其中猪和牛是全省最主要的养殖畜种。云南省液体粪污总量为 20 584.50 万 t/a(尿液和污水量), 主要集中在曲靖市、红河州、文山州、大理州, 占比为 10.00%~13.20%。云南省沼液中氮养分存储量为 347.78 万 t/a, 若能全部利用则可替代 754.68 万 t/a 的尿素; 磷养分存储量为 3.2 万 t/a, 若能全部利用则可替代 20.09 万 t/a 的普钙。云南省液体粪污肥料化潜力较大, 提高液体粪污养分储存能力是实现液体粪污高值化利用的重要方向, 也是实现云南省液体粪污资源化利用、增加产品附加值的重要研究方向。

2.2 云南省液体粪污农田消纳配套分析

云南省液体粪污还田土地面积估算情况如表 3 所示, 以灌溉量计算的农田配套面积, 结合各地降水量、作物蒸散量等情况, 调整作物系统可以增加农田液体粪污消纳量。如果按照现行的厌氧发酵模式, 粪污还田的稀释倍数应按照 20 倍计算, 云南省仅有

表 2 云南省各市(州)畜禽粪污产生量及化肥替代量估算

Table 2 Estimation of livestock and poultry manure production and chemical fertilizer substitution in each city (prefecture) of Yunnan Province

市(州)	畜禽饲养量(折算成猪当量)/万头				合计/万头	污水产生量/(t/a)	液体粪污总产生量/(万t/a)	沼液氮养分存储量/(万t/a)	沼液磷养分存储量/(万t/a)
	猪	牛	羊	家禽					
昆明市	104.60	149.89	47.65	104.95	407.10	930.34	991.85	17.67	0.16
曲靖市	294.35	410.88	114.65	65.29	885.16	2 550.24	2 718.94	48.45	0.43
玉溪市	31.11	61.50	14.57	64.20	171.37	369.95	394.38	7.22	0.06
保山市	421.32	226.57	25.79	31.69	705.36	1 640.53	1 747.98	27.27	0.28
昭通市	401.85	165.24	28.11	32.73	627.93	1 287.04	1 371.22	20.10	0.23
丽江市	116.62	123.43	32.76	13.76	286.57	792.04	844.35	14.62	0.13
普洱市	248.04	186.85	35.09	60.98	530.95	1 263.45	1 346.51	22.28	0.21
临沧市	308.49	187.37	39.35	51.62	586.84	1 323.61	1 410.53	22.47	0.23
楚雄彝族自治州(楚雄州)	273.48	234.22	68.63	50.31	626.65	1 553.54	1 656.03	27.85	0.27
红河哈尼族彝族自治州(红河州)	433.60	346.20	42.12	118.73	940.64	2 311.88	2 463.71	41.20	0.37
文山壮族苗族自治州(文山州)	232.74	376.55	15.12	47.47	671.88	2 283.27	2 433.58	44.27	0.33
西双版纳傣族自治州(西双版纳州)	33.64	15.70	0.84	19.45	69.63	117.92	125.61	1.90	0.02
大理白族自治州(大理州)	335.12	293.16	60.90	75.41	764.59	1 932.64	2 059.90	34.83	0.32
德宏傣族景颇族自治州(德宏州)	51.55	50.61	3.82	15.12	121.11	326.39	347.83	6.00	0.05
怒江傈僳族自治州(怒江州)	53.78	35.18	15.31	8.68	112.95	246.31	262.57	4.21	0.05
迪庆藏族自治州(迪庆州)	38.66	63.28	7.00	4.62	113.55	384.16	409.50	7.44	0.06
合计	3 378.94	2 926.63	551.72	765.00	7 622.29	19 313.30	20 584.50	347.78	3.21

表 3 云南省各市(州)液体粪污还田面积估算

Table 3 Estimation of the area of liquid manure returned to the field in each city (prefecture) of Yunnan Province

市(州)	总播种面积/ (10 ⁴ m ²)	降水量/ (m ³ /a)	液体粪污 产生量/(m ³ /a)	大田作物		蔬菜		果树	
				配套面积 (以小麦-玉米为例)	消纳比例	配套面积 (以黄瓜为例)	消纳比例	配套面积 (以葡萄为例)	消纳比例
昆明市	38.31	8 391	931 359.63	91.96	1:2.40	60.56	1:1.58	86.12	1:2.25
曲靖市	80.07	9 491	2 553 118.88	226.29	1:2.83	154.41	1:1.93	213.30	1:2.66
玉溪市	19.76	7 384	370 327.78	40.83	1:2.07	25.86	1:1.31	37.96	1:1.92
保山市	25.09	12 245	1 641 375.22	115.80	1:4.62	84.49	1:3.37	110.45	1:4.40
昭通市	43.87	7 543	1 287 592.84	139.39	1:3.18	88.86	1:2.03	129.75	1:2.96
丽江市	18.16	9 610	792 855.28	69.50	1:3.83	47.59	1:2.62	65.56	1:3.61
普洱市	41.56	13 113	1 264 389.84	83.81	1:2.02	62.17	1:1.50	80.16	1:1.93
临沧市	37.06	10 168	1 324 505.42	110.43	1:2.98	76.80	1:2.07	104.45	1:2.82
楚雄州	32.91	8 066	1 555 033.01	158.90	1:4.83	103.40	1:3.14	148.48	1:4.51
红河州	59.89	11 780	2 313 454.70	169.04	1:2.82	122.16	1:2.04	160.96	1:2.69
文山州	61.02	11 092	2 285 162.25	176.27	1:2.89	125.45	1:2.06	167.41	1:2.74
西双版纳州	11.44	13 720	117 949.37	7.50	1:0.66	5.62	1:0.49	7.19	1:0.63
大理州	34.56	7 180	1 934 272.02	218.41	1:6.32	137.10	1:3.97	202.69	1:5.86
德宏州	14.51	14 323	326 616.75	19.97	1:1.38	15.12	1:1.04	19.16	1:1.32
怒江州	5.44	12 245	246 556.53	17.39	1:3.20	12.69	1:2.33	16.59	1:3.05
迪庆州	5.01	7 526	384 525.65	41.71	1:8.32	26.57	1:5.30	38.82	1:7.75

西双版纳州畜禽养殖产生的液体粪污能通过稀释灌溉的方式完全消纳,其余 90% 以上的市(州)所产生的液体粪污都不能够被其所消纳。就算针对性地调整种植结构,也只能增加 24%~35% 的还田量。但从现有无害化程度来看,即使调整了种植结构,也不能完全实现液体粪污灌溉还田。因此,基于目前的状况,要实现区域内粪污的完全处理处置,除西双版纳州以外,其余市(州)可能还有 16%~74% 的液体粪污要进行达标排放处理。

如果能够进一步提高液体粪污的无害化程度,减少稀释倍数,可能会大大减少各市(州)粪污达标排放的比例和数量。若有相应的技术配套,能够提高粪污的无害化程度,减少稀释倍数 2~4 倍,则云南省大多数市(州)的粪污基本可以实现灌溉还田处理。

2.3 云南省液体粪污资源化利用模式

基于上述分析,通过调整区域内种植结构,可以部分增加原生液体粪污以灌溉的方式还田,相对减少液体粪污污染的问题,若能够进一步增加液体粪污发酵后的无害化(腐熟程度),减少原生粪污灌溉还田的稀释倍数,这是增加原生粪污还田量、减少达标排放的重要突破口。在还田过程中,更希望液体粪污具有“肥”的特性,因此在粪污处理过程中协同

提高无害化程度(腐熟程度)和养分保存的处理模式,是粪污全量还田希望建立的技术模式。

我国液体粪污的处理均需要经过暂存处理^[31],以达到稳定化和基本无害化的目的,这个过程基本是一个厌氧过程。在这个过程中,不仅需要长时间厌氧存储,增加养殖场的处理成本,还会造成大量的氮损失。丁京涛等^[32]发现,粪水经自然贮存 6 个月,氨氮损失率达 68%; Dexter 等^[33]发现,将粪水贮存 81 天后氮素损失率达 62%。大量研究表明,酸化暂存发酵处理,通常可以降低 50% 以上^[34-35]的氮损失。此外,微生物在强化粪污无害化过程和增加氮留存也有积极的作用,通过微生物的活化作用使液体粪污中的有机质、有机酸等活化物质含量增加,能成为较好的液体有机肥^[36]。

因此,在云南省粪污暂存阶段,可以联合酸化和微生物发酵强化无害化过程的同时实现氮的保存,再结合作物系统和水肥一体化系统,构建微生物协同的提高无害化程度(腐熟程度)和养分保存的处理模式(图 1),实现粪污深度无害化,减少灌溉还田稀释量,保证最大量的原生粪污的还田量,同时最大限度保留无害化原生粪污的养分,提高资源化利用的价值。

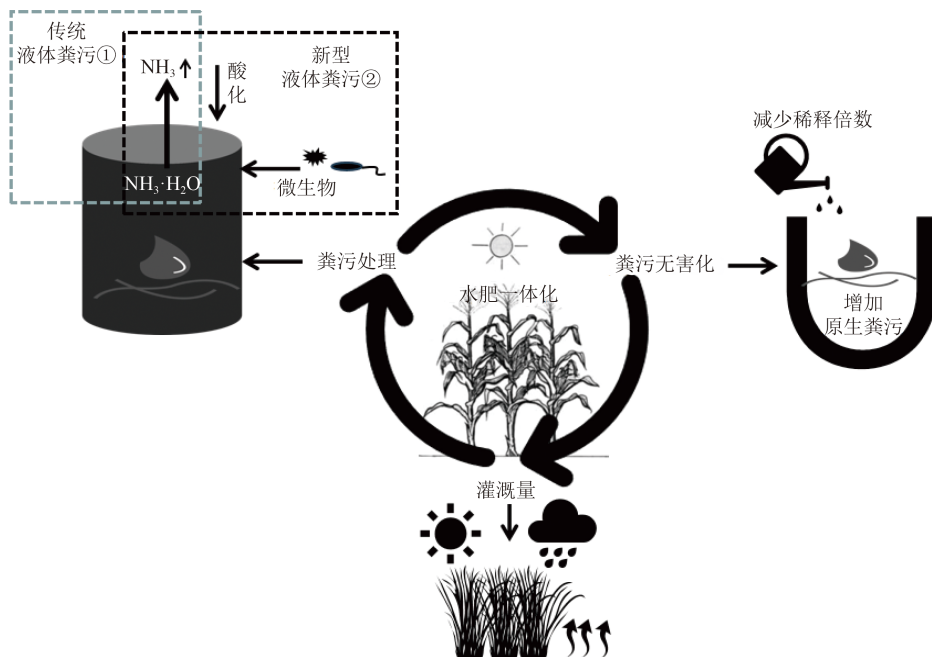


图 1 微生物协同的提高无害化程度(腐熟程度)和养分保存的处理模式

Fig.1 Microbial synergistic treatment mode to improve the degree of harmlessness (decomposition degree) and nutrient preservation

3 结论

(1)云南省畜禽养殖总量为 7 622.29 万头(以猪当量计算),其产生液体粪污总计为 20 584.50 万 t/a。厌氧消化后产生的沼液有 19 329.09 万 t/a,沼液

中氮养分存储量为 347.78 万 t/a,磷养分存储量为 3.21 万 t/a,可替代 754.68 万 t/a 的尿素和 20.09 万 t/a 的普钙。

(2)以灌溉还田的方式云南省液体粪污将有超

过 90% 以上市(州)不能消纳,若调整种植结构也只能增加 24%~35% 的消纳量,将有 16%~74% 的液体粪污不能被消纳。提高无害化程度、减少原生粪污稀释倍数,是减少各市(州)粪污达标排放的比例和数量的重要突破口。提出酸化和微生物协调发酵是提高液体粪污无害化程度和养分保存能力的技术模式。

参考文献

- [1] 陈铭哲, 印遇龙, 何流琴. 畜禽粪污资源化处理与种养循环一体化研究与思考[J]. 中国科学: 生命科学, 2024, 54(7): 1211-1225.
CHEN M Z, YIN Y L, HE L Q. Research and reflection on the integration of manure resource treatment and integrated farming system in animal husbandry[J]. Science China: Life Sciences, 2024, 54(7): 1211-1225.
- [2] 吴浩玮, 孙小淇, 梁博文, 等. 我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1168-1176.
WU H W, SUN X Q, LIANG B W, et al. Analysis of livestock and poultry manure pollution in China and its treatment and resource utilization[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(6): 1168-1176.
- [3] 生态环境部, 国家统计局, 农业农村部. 关于发布《第二次全国污染源普查公报》的公告(公告 2020 年第 33 号)[A]. 北京: 生态环境部, 国家统计局, 农业农村部, 2020.
- [4] 蒋晓峰. 畜禽粪污处理模式、成本与设备的选择[J]. 中国禽业导刊, 2023, 40(3): 47-48.
JIANG X F. The treatment mode, treatment cost of animal manure, and the selection of treatment equipment[J]. Guide to Chinese Poultry, 2023, 40(3): 47-48.
- [5] 袁雪波, 王祥, 李家华, 等. 两个生猪养殖场液体粪污资源化利用典型案例分析[J]. 养猪, 2022(4): 78-82.
YUAN X B, WANG X, LI J H, et al. Typical case analysis of resource utilization of liquid fecal sewage in two pig farms[J]. Swine Production, 2022(4): 78-82.
- [6] 冯秋莲. 畜禽粪便资源化利用方式、存在问题和解决方法[J]. 今日畜牧兽医, 2023, 39(3): 68-69.
- [7] 李瑞婷, 宋国华, 李静, 等. 畜禽粪污资源化利用的现状与问题探讨[J]. 家畜生态学报, 2022, 43(7): 83-87.
LI R T, SONG G H, LI J, et al. The status quo and problems of resource utilization of livestock manure[J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2022, 43(7): 83-87.
- [8] 赵玥, 李翠霞. 畜禽粪污治理政策演化研究[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(2): 232-241.
ZHAO Y, LI C X. The policy evolution of livestock and poultry manure governance[J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(2): 232-241.
- [9] 刘志林. 畜禽粪污处理利用现状及对策[J]. 山东畜牧兽医, 2022, 43(7): 47-49.
- [10] 盛婧, 孙国峰, 郑建初. 典型粪污处理模式下规模养猪场农牧结合规模配置研究: I. 固液分离-液体厌氧发酵模式[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(2): 199-206.
SHENG J, SUN G F, ZHENG J C. Pig farm-cropland configuration under typical waste treatment modes: a case study of anaerobic liquid fermentation following solid-liquid separation of waste[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(2): 199-206.
- [11] 周海宾, 丁京涛, 孟海波, 等. 中国畜禽粪污资源化利用技术应用调研与发展分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 237-246.
ZHOU H B, DING J T, MENG H B, et al. Survey and development analysis of resource utilization technology of livestock and poultry wastes in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(9): 237-246.
- [12] 杨浩君, 江沛聪, 熊传教, 等. 2021 年度广东省畜禽粪污资源化利用评估报告[J]. 现代农业装备, 2022, 43(6): 82-88.
YANG H J, JIANG P C, XIONG C J, et al. Assessment report on utilization of livestock manure resources in Guangdong Province in 2021[J]. Modern Agricultural Equipment, 2022, 43(6): 82-88.
- [13] 王颖, 王月, 吴昌永, 等. 西北生态脆弱区畜禽粪污处理技术综合评价[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(2): 654-662.
WANG Y, WANG Y, WU C Y, et al. Comprehensive evaluation research of livestock and poultry waste treatment technologies in the ecological fragile areas of Northwest China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 654-662.
- [14] 程红胜, 丁京涛, 孟海波, 等. 长江流域平原地区畜禽粪污资源化利用全链条技术应用现状[J]. 环境工程, 2022, 40(7): 240-247.
CHENG H S, DING J T, MENG H B, et al. Analysis on whole chain technology of livestock manure resource utilization in the Yangtze River basin plain[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(7): 240-247.
- [15] 张朋月, 丁京涛, 孟海波, 等. 牛粪水酸化贮存过程中氮形态转化的特性研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 212-218.
ZHANG P Y, DING J T, MENG H B, et al. Characteristics of nitrogen transformation in the process of acidification and storage of cow slurry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 212-218.
- [16] 李红娜, 吴华山, 耿兵, 等. 我国畜禽养殖污染防治瓶颈问题及对策建议[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(2): 167-172.
LI H N, WU H S, GENG B, et al. The bottleneck and countermeasures in the pollution control of livestock and poultry breeding in China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(2): 167-172.
- [17] 胡清泉, 刘秉岗, 刘健梅, 等. 云南省畜禽养殖粪污处理与资源化利用情况调研[J]. 养猪, 2021(6): 69-73.
HU Q Q, LIU B G, LIU J M, et al. Investigation report on poultry manure treatment and resource utilization in Yunnan Province[J]. Swine Production, 2021(6): 69-73.
- [18] 鲍晓伟, 沙茜, 杨仁灿, 等. 云南省养殖业粪污处理利用情况调查[J]. 贵州畜牧兽医, 2021, 45(1): 66-68.
BAO X W, SHA Q, YANG R C, et al. Investigation on the

- treatment and utilization of manure in aquaculture industry in Yunnan Province[J]. *Guizhou Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2021, 45(1): 66-68.
- [19] 李志雄. 红河州畜禽粪污资源化利用整县推进优秀案例分析[J]. *中国畜禽种业*, 2022, 18(1): 14-16.
- [20] 杨惠. 云南:种养业循环发展格局初步形成 [N]. *农民日报*, 2022-12-12(6).
- [21] 邓亚琴, 王宇蕴, 李兰, 等. 云南省畜禽粪污土地消纳能力的评估及其肥料化发展前景 [J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(11): 2419-2427.
- DENG Y Q, WANG Y Y, LI L, et al. Evaluation of land absorption capacity for livestock and poultry waste in Yunnan Province and development prospect for fertilizer utilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2419-2427.
- [22] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应 [J]. *中国环境科学*, 2006, 26(5): 614-617.
- WANG F H, MA W Q, DOU Z X, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5): 614-617.
- [23] 耿维, 胡林, 崔建宇, 等. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 171-179.
- GENG W, HU L, CUI J Y, et al. Biogas energy potential for livestock manure and gross control of animal feeding in region level of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1): 171-179.
- [24] 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.
- [25] 李雪雪. 农田消纳规模化养殖场沼液的配套面积估算模式研究 [D]. 开封: 河南大学, 2019.
- [26] 马波, 耿晓晨, 马璠, 等. 模拟降雨条件下谷子和冬小麦植株对降雨再分配过程的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(6): 207-214.
- MA B, GENG X C, MA F, et al. Effect of millet and winter wheat planting on the redistribution of rainfall under simulated rainfall conditions[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(6): 207-214.
- [27] 张青雯, 崔宁博, 冯禹, 等. 中国西南五省参考作物蒸散量时空变化分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(11): 80-87.
- ZHANG Q W, CUI N B, FENG Y, et al. Temporal-spatial changing characteristics of reference crop evapotranspiration in the five provinces of Southwest China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(11): 80-87.
- [28] 彭记永, 陈巧. 农田土壤水分渗透深度模型 [J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(7): 419-422.
- [29] 杜秋月. 设施栽培黄瓜全生育期需水规律研究 [D]. 天津: 天津农学院, 2019.
- [30] 李雅善, 王波, 杨云源, 等. 基于作物水分亏缺指数的云南葡萄干旱状况时空差异分析 [J]. *北方园艺*, 2016(12): 11-15.
- LI Y S, WANG B, YANG Y Y, et al. Analysis of temporal-spatial variation characteristic on drought of grape based on crop water deficit index in Yunnan Province[J]. *Northern Horticulture*, 2016(12): 11-15.
- [31] 夏立勇. 畜禽粪污资源化利用技术 [J]. *现代农业研究*, 2022, 28(11): 134-137.
- XIA L Y. Resource utilization technology of livestock manure[J]. *Modern Agriculture Research*, 2022, 28(11): 134-137.
- [32] 丁京涛, 张朋月, 赵立欣, 等. 养殖粪水长期贮存过程理化特性变化规律 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(14): 220-225.
- DING J T, ZHANG P Y, ZHAO L X, et al. Change rule of physical and chemical properties of slurry in the process of long-term storage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(14): 220-225.
- [33] DEXTER M, LUO J F, HOULBROOKE D, et al. Effects of acidification on nitrogen transformations in stored dairy effluent[C]//Nutrient management for the farm, catchment and community, 2009.
- [34] RODRIGUES J, ALVARENGA P, SILVA A C, et al. Animal slurry sanitization through pH adjustment: process optimization and impact on slurry characteristics[J]. *Agronomy*, 2021, 11(3): 517.
- [35] DAI X R, BLANES-VIDAL V. Emissions of ammonia, carbon dioxide, and hydrogen sulfide from swine wastewater during and after acidification treatment: effect of pH, mixing and aeration[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 115: 147-154.
- [36] 王连林, 宋学秀, 朱雪冬, 等. “厕所革命”中资源无害化处理与全利用模式创新 [J]. *肥料与健康*, 2021, 48(6): 19-23.
- WANG L L, SONG X X, ZHU X D, et al. Innovation of harmless treatment and full utilization mode of resources in "toilet revolution"[J]. *Fertilizer & Health*, 2021, 48(6): 19-23. □