

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

引用本文:

刘聪, 郑瑶琪, 刘爽, 等. 秋闲期沼液施用对黑土区土壤氮素损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2528–2536.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1022>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

沼液在稻田的精确施用及其环境效应研究

杨润, 孙钦平, 赵海燕, 邹国元, 刘本生, 李恋卿

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1566–1572 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1617>

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>

化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响

秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 翟丽梅, 王洪媛, 武淑霞, 刘宏斌

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1558–1567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1364>

温度对农田黑土氮初级转化速率的影响

郎漫, 李平, 魏玮

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 815–822 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1133>

施用粪肥和沼液对设施菜田土壤磷素累积与迁移的影响

王敏锋, 严正娟, 陈硕, 高杰云, 李吉进, 许俊香, 陈清

农业环境科学学报. 2016, 35(7): 1351–1359 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.07.018>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘聪, 郑瑶琪, 刘爽, 等. 秋闲期沼液施用对黑土区土壤氮素损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2528–2536.

LIU C, ZHENG Y Q, LIU S, et al. Effects of biogas slurry application on nitrogen loss soil in black soil area during the autumn fallow period[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2528–2536.



开放科学 OSID

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*

(东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要:为探讨非种植期施用沼液的可行性,采用喷施加深翻及注施方式于2018年10月和2019年10月将不同氮素替代量的沼液施于东北黑土中,研究了黑土区作物收割后(秋闲期)沼液施用对玉米土壤有机质含量的影响,考察了黑土区玉米土壤铵态氮挥发和铵态氮及硝态氮淋溶特性。结果表明:沼液施用能够增加土壤有机质含量,注施沼液对土壤有机质的升高幅度要高于喷施处理。秋闲期在低温条件下以喷施加深翻的方式施用沼液能够减少土壤氮挥发量。秋闲期当喷施氮素替代量在 $135\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 以下时可以施用沼液,此时未发生铵态氮和硝态氮淋溶风险,而采用注施方式时,即使沼液氮素替代量为 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 时仍有潜在发生铵态氮淋溶的风险。两年试验结果初步表明,黑土区秋闲期采用合理的氮素替代量及施用方式施用沼液是可行的。

关键词:沼液;秋闲期;氮挥发;氮淋溶;黑土

中图分类号:S153 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)11-2528-09 doi:10.11654/jaes.2021-1022

Effects of biogas slurry application on nitrogen loss soil in black soil area during the autumn fallow period

LIU Cong, ZHENG Yaoqi, LIU Shuang, LIU Qingping, YAN Lilong*

(School of Resource and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: To explore the feasibility of applying biogas slurry during the non-planting period, different amounts of biogas slurry with different amount of nitrogen replacement were applied via spraying with deep turning and injection to the black soil of northeast China in October 2018 and October 2019. In addition, the effect of applying biogas slurry on the organic matter content of maize soil in the black soil area was investigated after crop harvesting (the autumn fallow period). The characteristics of ammonium nitrogen volatilization, ammonium nitrogen leaching, and nitrate nitrogen leaching in maize soil in black soil area were also determined. The results showed that the application of biogas slurry could increase the organic matter content of soil, and the improvement of soil organic matter by biogas slurry injection was higher than that by spraying. Applying biogas slurry by spraying with the deep turning method under low temperatures during the autumn fallow period could reduce ammonia volatilization from soil. Biogas slurry could be applied by spraying when the amount of nitrogen replacement was $<135\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ in the autumn fallow period, and there was no leaching risk of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen. However, a potential leaching risk of ammonium nitrogen existed even when the amount of nitrogen replacement was $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ using the injection method. The experimental results of both years indicate the feasibility of applying biogas slurry with a reasonable amount of nitrogen replacement and a suitable application mode during the autumn fallow period.

Keywords: biogas slurry; autumn fallow period; ammonia volatilization; nitrogen leaching; black soil

收稿日期:2021-09-06 录用日期:2021-09-23

作者简介:刘聪(1995—),男,山东潍坊人,硕士研究生,从事畜禽粪污处理与资源化研究。E-mail:1224313802@qq.com

*通信作者:闫立龙 E-mail:yanll98@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0800105);黑龙江省级领军人才梯队后备带头人项目

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2018YFD0800105); Leading Talent Echelon Reserve Leader Funding Project of Heilongjiang Province of China

近年来我国畜牧业的飞速发展,在满足了人们食用需求及创造了巨大经济效益的同时,也产生了大量废水,如果不能对这些养殖废水进行有效处理,将对周围环境产生非常严重的危害。生猪养殖业在我国畜禽养殖业中占据主导地位,且生猪养殖污染已经成为农业面源污染的主要来源之一^[1]。生猪养殖废水属于“三高”废水,其具有处理难度大、处理成本高等特点^[2]。大量未经处理的畜禽养殖废水直接排放到环境中,将会对周边生态环境造成严重危害^[3-4]。如何经济高效地处理该类废水,已经成为制约畜禽养殖业绿色生态发展的瓶颈。国内外对畜禽养殖废水的处理开展了大量研究,尝试采用了多种技术和手段对其进行处理^[5]。常用的以达标排放为目的的生物技术,如好氧生物处理、厌氧生物处理、厌氧-好氧组合工艺等在处理畜禽废水时存在处理成本高、构筑物占地面积大等问题。从资源化利用和循环经济的角度考虑,畜禽养殖废水处理最直接、最有效的方式就是将畜禽养殖废水经过厌氧发酵后产生的沼气用作能源、产生的沼液用作肥料进行农田回用,从而达到零排放的目标^[6-7]。

沼液常被用于生产液肥,其含有多种氨基酸,如亮氨酸、谷氨酸、赖氨酸等^[8-9]。沼液农田回用在提高土壤氮和磷的含量、酶的活性以及土壤所富含的各种营养物质的同时,还可以使其得到有效处理以保护环境^[10],从而达到减少化肥施用对生态环境造成的污染以及降低农业生产成本的目的^[11]。土壤有机质含量下降导致土壤结构恶化,土壤生产力降低^[12]。富含大量有机物的沼液施用于农田能够增加土壤中有机质尤其是溶解性有机质的含量,从而有助于改善土壤结构^[9]。

施加沼液在使土壤中氮以及磷等营养物质增加的同时^[13],这些营养元素还可能随沼液以及雨水向下发生淋溶,从而对底层土壤以及地下水等造成危害。土壤氮挥发在降低肥料氮素利用、增加生产成本的同时还会引起环境问题^[14]。如果长期盲目地施用沼液,则会使农田存在重金属超标的风险,进而破坏农田生态系统,引起粮食安全问题^[15]。为了提高作物在发芽以及生长期对沼液的利用效率以及降低沼液的淋溶风险和生态风险,许多国家规定沼液必须经过6个月的储存之后才能够用于农田,且在秋季之后不能够将沼液施于农田中,其余时间沼液必须储存在专门设计的储存罐内,且对施用方式也提出了相关要求^[16-17]。沼液施用受季节性影响较大,目前基本是在农闲季节施用,其他时间产生的沼液只能存储在容器或专有构

筑物中,由此产生了存储构筑物占地面积大、基建费用高等问题^[18-19],且该问题在我国北方寒冷地区尤为突出。在秋闲期施用沼液能够增加沼液的消纳量,提高沼液的资源化利用率,有效缓解我国北方寒冷地区畜禽养殖过程中排放大量养殖废水的处理压力、沼液存储压力,且可降低农业成本。然而在秋闲期施用沼液是否存在氮素淋溶风险尚未可知。

鉴于此,本文通过大田试验,采用注施以及喷施加深翻的施用方式,在秋季玉米收割之后(秋闲期)将不同氮素替代量的沼液施用于农田,分析秋闲期沼液施用后田间土壤有机质、氨挥发以及氮素淋溶量的动态变化,并分析此过程产生的氮素损失及潜在的淋溶风险,以期为沼液的合理化施用提供参考,及解决北方畜禽养殖业所面临的沼液施用难题。

1 材料与方法

1.1 试验土壤和沼液的基本理化性质

试验在东北农业大学向阳农场进行。土壤类型为黑土,土壤指标:全磷含量(0.43 ± 0.02) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;有机质含量(19.06 ± 2.22) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,铵态氮含量(27.88 ± 4.98) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,硝态氮含量(13.29 ± 1.94) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 5.38 $\pm$ 0.12, Cu 含量(30.67 ± 0.20) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn 含量(55.54 ± 1.03) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, As 含量(11.89 ± 0.25) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。所用沼液取自黑龙江省巴彦县某养猪场。由于在厌氧发酵过程中,季节气候以及每次进料的差异,使得所产生的沼液性质有所不同。2018年秋闲期施加沼液理化性质:全氮含量($1\,324.60 \pm 8.45$) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,全磷含量(137.36 ± 3.72) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,化学需氧量($9\,897.96 \pm 12.16$) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,砷含量(0.21 ± 0.02) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,铜含量(42.7 ± 2.4) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,锌含量(62.50 ± 2.21) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。2019年秋闲期施加沼液理化性质:全氮含量($1\,920.80 \pm 22.41$) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,全磷含量(51.04 ± 1.03) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,铜含量(50.41 ± 1.60) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,锌含量(66.41 ± 0.31) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验作物为玉米,采用人工点种方式种植。大田试验持续两年,沼液分别于2018年秋季闲置期(秋闲期,玉米收获后,约10月份)以及2019年秋闲期施加,于2019年和2020年春季种植玉米。施用方式为喷施+深翻和注施两种,喷施处理为将沼液喷洒在土壤表面后对农田进行深翻,翻耕深度为30 cm,注施处理为在农田深翻及起垄之后,破垄开沟后将沼液注入到10 cm左右土层。2018年秋闲期设置 ACK、A0%、A25%、A50%、A75%、A100%、A125%、AZ50%、

AZ75% 和 AZ100% 10 组处理, 2019 年秋闲期设置 BCK、B0%、B25%、B50%、B75%、B100%、B125%、BZ50%、BZ75% 和 BZ100% 10 组处理, 分别代表 2018 年及 2019 年秋闲期不施肥、喷施沼液氮素替代量分别为 0%、25%、50%、75%、100%、125% 以及注施沼液氮素替代量分别为 50%、75% 和 100% 的处理(表 1), 小区面积为 22.75 m² (5 m×4.55 m), 每个处理 3 个重复。缺失的氮、磷及钾于 2019 年以及 2020 年春播期使用化肥予以补充。

1.3 样品采集及测定方法

1.3.1 样品采集

在大田试验过程中, 因喷施处理需经过沼液喷施、深翻及起垄等操作, 故于喷施处理后第 4 d 开始测定氨挥发量, 注施处理则于沼液施用第 2 d 开始测定氨挥发量。用取样钻于 2019 年不同玉米生育期(播种期、拔节期、抽穗期和成熟期)采集各处理土壤样品, 测定土壤有机质含量、铵态氮淋溶量以及硝态氮淋溶量。在此基础上, 于 2020 年玉米播种期和成熟期采集各处理土壤样品, 进一步测定铵态氮淋溶量以及硝态氮淋溶量。采样深度分别为 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 以及 80~100 cm。土样置于阴凉处风干后, 仔细将碎石以及植物残体等杂质去除, 处理后的土壤按照不同指标的测定方法要求进一步研磨、过筛, 备用。

1.3.2 常规指标测定方法

试验采用重铬酸钾法、碱性过硫酸钾紫外分光光度法以及钼酸铵分光光度法分别对沼液中有有机物、全氮、全磷进行测定^[20]。采用水合热重铬酸钾氧化-比色法、靛酚蓝比色法、高氯酸-硫酸-钼锑抗比色法、

电位法以及酚二磺酸比色法分别对土壤有机质、铵态氮、硝态氮、全磷以及 pH 进行测定^[21]。氨挥发量按文献所述方法采用通气法进行收集并用靛酚蓝比色法进行测定^[22]。

1.3.3 相关性分析与显著性差异分析

采用 SPSS 统计软件中的多重比较 (Duncan、LSD) 对各种处理的测定数据进行显著性差异分析 ($\alpha=0.05$), 同时采用该统计软件对各种数据的相关性进行分析。使用 Origin 2018 做图。

2 结果与讨论

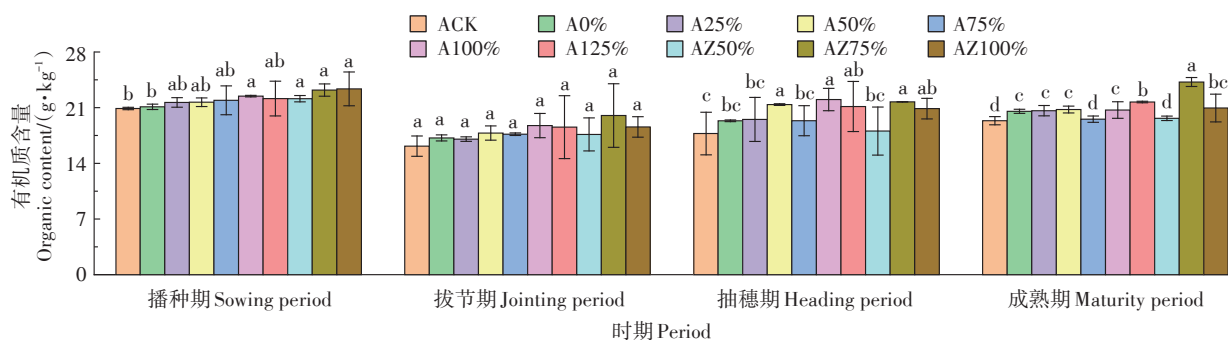
2.1 秋闲期沼液与化肥配施对田间表层土壤有机质含量的影响

土壤有机质不仅能改善土壤理化性状, 也是作物生长所需营养的重要来源, 本试验对沼液与化肥配施后田间表层土壤有机质含量进行了测定, 结果如图 1 所示。

由图 1 可以看出, 2019 年播种期各处理土壤有机质含量随沼液施加量增多而增大, 其中 AZ100% 处理的有机质含量最高, 较 ACK 处理升高了 11.83%。拔节期各处理的土壤有机质含量相较于播种期明显降低, 此时施加沼液的处理有机质含量仍高于 ACK。土壤有机质在被分解利用时能够释放维生素以及氨基酸等促进植物生长的物质, 其对作物的生长有着重要作用^[23]。对于抽穗期和成熟期, 喷施各处理的土壤有机质含量随施加沼液量增多整体呈现上升趋势, 且均高于 ACK。在成熟期各喷施处理中, A125% 处理的有机质含量最高, 为 21.71 g·kg⁻¹; 而在注施处理中, 随着沼液施加比例的增加, 土壤有机质呈先上升

表 1 田间试验设计 (kg·hm⁻²·d⁻¹)
Table 1 Field test design (kg·hm⁻²·d⁻¹)

处理 Treatment	2018 年		处理 Treatment	2019 年	
	沼液提供氮素量 Nitrogen provided from biogas slurry	化肥提供氮素量 Nitrogen provided by chemical fertilizer		沼液提供氮素量 Nitrogen provided from biogas slurry	化肥提供氮素量 Nitrogen provided by chemical fertilizer
ACK	0	0	BCK	0	0
A0%	0	140	B0%	0	180
A25%	35	105	B25%	45	135
A50%	70	70	B50%	90	90
A75%	105	35	B75%	135	45
A100%	140	0	B100%	180	0
A125%	175	0	B125%	225	0
AZ50%	75	75	BZ50%	90	90
AZ75%	105	35	BZ75%	135	45
AZ100%	140	0	BZ100%	180	0



不同小写字母表示处理之间差异显著($P<0.05$)。下同

Bars not sharing the same lowercase letter are significantly different from each other ($P<0.05$). The same below

图1 2018年秋闲期不同处理在各时期有机质含量变化

Figure 1 Changes of organic matter content of different treatments in different periods in the autumn slack period of 2018

后下降的趋势,其中AZ75%处理的有机质含量最高,为 $24.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;当沼液氮素替代量为75%及100%时,注施处理的土壤有机质含量高于喷施处理。土壤有机质含量随时间延长呈现动态变化,其中土壤有机质含量下降主要是由于土壤中的微生物对土壤有机质的分解,而土壤中有机质含量上升是由于玉米根系在生长过程中能够分泌多种有机质^[23]。在玉米生长的各个时期,各施加沼液处理的土壤有机质含量均高于ACK处理。沼液施用对土壤有机物质含量的影响与沼液施用方式和施用量有关。在相同沼液氮素替代条件下,注施处理的有机质含量升高幅度高于喷施处理。黄界颖等^[24]的研究结果显示土壤有机质含量的提高程度与沼液施用量呈正比,这与本研究结果相一致。同时也有研究表明,全部施加化肥的土壤有机质含量随玉米的生长而逐渐降低,而沼液处理与之相反,在成熟期时,各处理中全部施加沼液的处理有机质含量提升最大^[25]。这与本试验结果有所不同,原因可能是与本试验所用基肥、沼液施加时间以及沼液施加方式不同所致。

2.2 秋闲期沼液与化肥配施对土壤氮挥发量的影响

沼液中的氮素主要以铵态氮的形式存在,因此沼液的施加会增大土壤氮挥发量^[26]。不同处理土壤氮挥发结果如图2所示。

沼液施用量、施用时间、气温以及施用方式都会对氮挥发量产生影响。由图2可以看出,秋闲期施用沼液氮挥发量(以N计)较小,且受施用温度时和沼液施用量影响较大。在2018年秋闲期低温时施用沼液,氮挥发量处于较低水平,喷施和注施处理峰值分别为 $0.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (图2a和图2b)。而在2019年,无论是在喷施处理还是注施处理中,氮挥发量均随温度的降低而减小(图2c和图2d),

当温度低于 0°C 时,各处理氮挥发量维持在 $0.01\sim 0.03 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。由于喷施处理在沼液喷灌后又对田地进行了深翻处理,之前 $0\sim 20 \text{ cm}$ 土层的土壤被较深土层的土壤覆盖,而注施处理沼液被注入 10 cm 左右土层,因此相同沼液灌溉量下注施处理氮挥发量大于喷施处理。类似文献已有报道,氮肥施加后通过再覆土以及增加施肥深度能够显著降低氮挥发累积量^[27-28]。各处理氮挥发量随温度的升高有升高的趋势,但低于吴华山等^[28]的研究结果,其结果表明春季施加猪粪沼液后土壤的氮挥发量(以N计)的峰值为 $3.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。而当沼液施用温度较高时,氮挥发量明显升高(图2c和图2d),且随施加沼液量的增多而增大。同时可以看出,氮挥发主要集中在施肥后的前一周。与此类似,杨润等^[14]的研究结果也表明氮挥发主要发生在施用沼液后的一周内。在此之后各处理氮挥发量逐渐降低,并趋于稳定,且氮挥发量稳定值低于吴华山等^[28]春季施用沼液时的研究结果。除沼液施用量外,本试验施用沼液时气温较低是氮挥发量较小的原因,2019年各处理的氮挥发量以及氮素损失率均高于2018的试验结果也验证了这一点。尽管秋收工作完成后,我国北方进入低温期,此时施用沼液土壤仍存在一定量的氮挥发,但氮挥发氮素损失率最大为 0.52% ,远低于文献所述数值^[29]。秋闲期施用沼液以低温期施用为宜,以减少土壤氮挥发量^[30]。

2.3 秋闲期沼液与化肥配施对土壤铵态氮淋溶量的影响

土壤中的铵态氮能够被土壤吸附、解吸以及直接被植物吸收利用,因此土壤中的铵态氮能直接反映土壤供氮强度和供氮水平,其对植物生长起着极其重要的作用^[13]。秋闲期施用沼液后各处理玉米不同生育期土壤铵态氮随土层变化如图3所示。

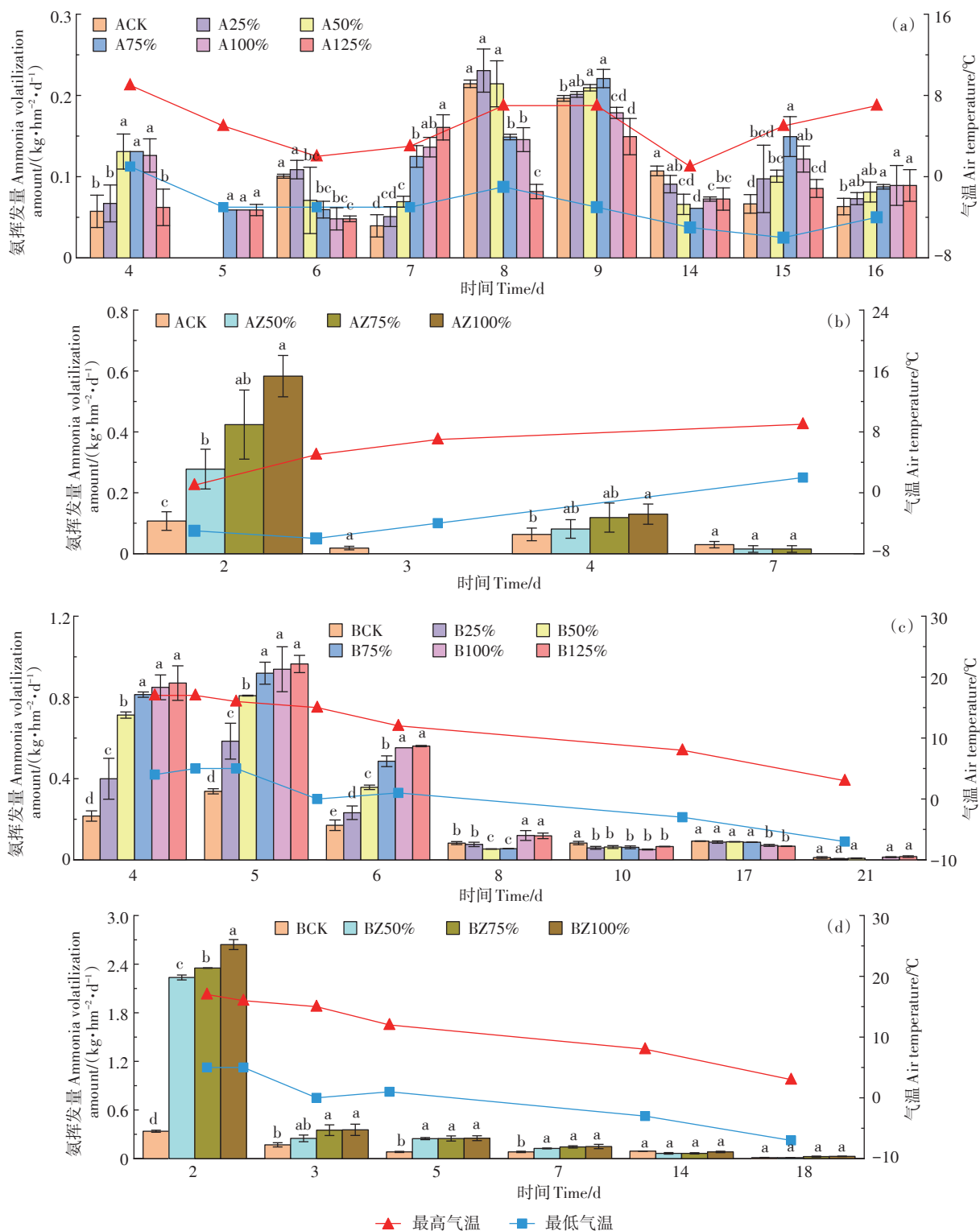


图2 2018年和2019年秋闲期喷施和注施两种处理的氨挥发量变化(以N计)

Figure 2 Variation of ammonia volatilization(calculated by N) of spraying treatments and injection treatments in autumn fallow period of 2018 and 2019

由图3可以看出,秋闲期施用沼液产生的铵态氮淋溶量与作物生长季、沼液施用量及沼液施用方式有关。沼液施用量增大,发生铵态氮淋溶风险升高;同时注施处理较喷施处理易于铵态氮淋溶的发生,采取

喷施处理沼液氮素替代量应控制在75%以下。2018年秋闲期施用沼液后,在2019年播种期0~40 cm土层随沼液氮素替代量增多,土壤中铵态氮含量降低。这可能是各处理土壤铵态氮含量不均匀或沼液施用

间为2018年10月,经过较长时间的氮素损失(如氨挥发)所致。同时可以看出,喷施处理中A100%和A125%处理,在80~100 cm土层中的铵态氮分别比ACK增加了 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而2018年注施各处理在2019年播种期的80~100 cm土层检测到的铵态氮含量与ACK处于相同水平(图3a)。随着种植时间的延长,土壤表层铵态氮含量有所降低(图3b和图3c),分析是因为表层土壤的铵态氮被硝化细菌转化为硝态氮、被植物吸收利用以及氮固持、氨挥发和向下淋溶所致^[23]。在抽穗期,A75%的处理0~40 cm土层中铵态氮含量最高,与ACK相比升高了128.47%,而在60~80 cm以及80~100 cm土层中,

A100%以及A125%两个喷施处理的土壤铵态氮含量高于ACK以及A0%处理,说明此时存在潜在铵态氮淋溶风险。比较而言,在相同氮素替代量条件下注施处理土壤铵态氮含量低于喷施处理,且在80~100 cm土层土壤铵态氮含量均低于A0%和ACK处理,无铵态氮淋溶风险。在成熟期(图3d),0~40 cm土壤铵态氮含量随着喷施氮素替代量的增加,整体呈降低趋势,其中A25%处理铵态氮含量比ACK提高了5.69%;而注施处理中,0~40 cm土壤铵态氮含量随注施氮素替代量的增加整体呈上升趋势。在60~80 cm和80~100 cm土层中,各处理土壤铵态氮含量均低于ACK,表明未发生铵态氮淋溶。

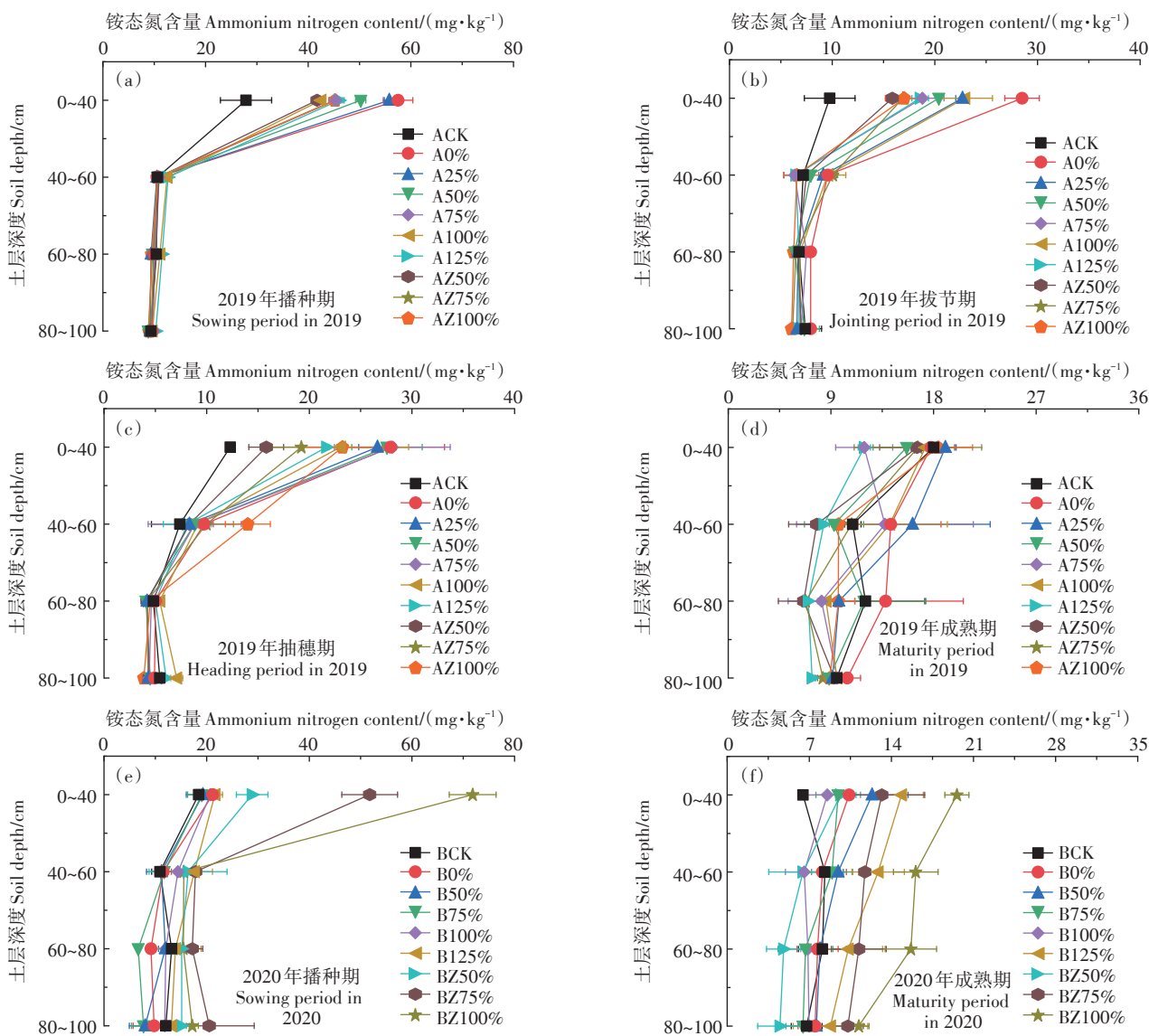


图3 2018年和2019年秋闲期施用沼液后玉米不同生育期各处理铵态氮含量变化

Figure 3 The variation of ammonium nitrogen content after biogas slurry application in autumn fallow period under different treatments during different period in 2018 and 2019

2019年秋闲期施用沼液其喷施和注施处理结果存在差异(图3e和图3f)。在2019年秋闲期喷施处理中氮素替代量在100%以下时,未发生铵态氮淋溶风险。在注施处理下氮素替代量为50%以上时,有铵态氮淋溶的风险。在2020年播种期的0~40 cm土层中随氮素替代量增多,土壤铵态氮含量逐渐升高。杜妍宁^[31]的试验结果表明,随沼液施用量的增加,土壤铵态氮含量整体呈上升趋势,且施用沼液能够对土壤铵态氮的季节动态变化产生显著影响,这与文献研究结果相一致。而这一结果与2018年秋闲期处理结果相反。这可能是2018年不同地块的铵态氮含量存在差异,经过一年的试验后这一差异被削弱且沼液中氮素主要以铵态氮为主,而尿素中的氮为酰胺态氮,酰胺态氮需要经过一定时间才能转化为铵态氮所致。在80~100 cm土层,喷施处理的B125%处理土壤铵态氮含量高于BCK,但差异不显著($P>0.05$),其他喷施处理土壤铵态氮含量均低于BCK。注施处理的土壤铵态氮含量均高于BCK,且均与BCK无显著差异($P>0.05$)。注施处理过程中沼液施加较为集中,铵态氮更容易积累,且2020年雨水较大使得更多的铵态氮向下淋溶,在相同氮素施用条件下,成熟期注施处理比喷施处理土壤中铵态氮含量更高(图3f)。0~40 cm土层土壤中铵态氮含量随氮素替代量的增加呈整体增加的趋势,其中B125%和BZ100%处理分别比BCK高出129.95%和202.88%。B125%、BZ75%以及BZ100%处理与BCK差异显著($P<0.05$)。在40~60、60~80 cm以及80~100 cm土层中,随氮素替代量的增加,各处理铵态氮含量变化趋势与0~40 cm土层相似。在80~100 cm土层中,B125%、BZ75%以及BZ100%处理土壤铵态氮含量分别比BCK高出29.99%、51.84%以及65.58%,且高于施加化肥的B0%处理,但差异均不显著($P>0.05$),其他处理铵态氮含量与BCK无显著差异,甚至低于BCK。

2.4 秋闲期沼液与化肥配施对土壤硝态氮淋溶的影响

与全部施化肥处理相比,秋闲期施加沼液并未发生明显的硝态氮淋溶现象。2018年秋闲期沼液处理后,在2019年播种期时土壤中硝态氮含量随沼液施加量的增大而增多(图4a)。A100%和A125%两个喷施处理在40~60 cm土层中检测到少量硝态氮,而其他处理在该土层以下均未检出硝态氮。在拔节期,随着沼液施加量的增加各处理硝态氮含量有降低趋势(图4b),分析是因为在高沼液施用量条件下闲置期氮素损失较大,表层土壤中剩余氮素含量降低所致。

与播种期相比,拔节期各处理40~60 cm土层硝态氮含量均有所增加,表层硝态氮有因雨水淋溶而向土壤下层迁移的趋势,但80~100 cm土层硝态氮仍处于未检出状态,这种状态一直持续到抽穗期和成熟期(图4c和图4d)。在整个试验周期内,随玉米的生长,土壤硝态氮含量的变化趋势较大。这是因为植物的生长状况、土壤氮素水平以及硝化-反硝化作用均会对土壤硝态氮产生影响,而硝化-反硝化作用又受土壤各种理化性质的影响。

类似结果在2020年结果中得到验证。2019年秋闲期沼液喷施处理对土壤硝态氮含量影响较小(图4e和图4f),仅在成熟期B125%的0~80 cm土层中检测到硝态氮。对于注施处理,在BZ50%以及AZ75%处理的60 cm土层以下未检测到硝态氮,尽管BZ100%处理在60~80 cm以及80~100 cm的土层中均检测到硝态氮,但在80~100 cm土层中硝态氮含量很低,仅有 $0.022 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由此推断,秋闲期施加沼液未发生硝态氮淋溶。土壤氮素淋失量与天气条件、作物种类、土壤性质、沼肥性质和施氮强度等因素有关^[32]。本试验中,两年秋闲期沼液与化肥配施对田间土壤铵态氮、硝态氮的影响有所不同,可能是不同年份所施用的沼液量以及年降雨量存在差异所致;同时2019年试验过程中铵态氮和硝态氮产生累积也会导致试验结果存在差异。同时也可以看出,沼液施用方式对表层土壤硝态氮含量的影响存在差异,秋闲期采用喷施的方式施用沼液对成熟期表层土壤硝态氮含量影响较小。但是采用注施的方式施用沼液时,表层土壤硝态氮含量会随沼液氮素替代量的增加而增加,其中氮素替代量为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时对成熟期表层土壤硝态氮含量提升最大。这一结果与袁雨婷等^[29]的研究结果相似,当施加沼液量相同时,采用沟施方式(沼液施加较为集中)处理的土壤铵态氮以及硝态氮含量高于表施及深翻处理。

3 结论

(1)沼液施用对土壤有机质含量的影响与沼液施用方式和施用量有关。在相同沼液氮素替代条件下,注施氮素替代化肥处理的有机质含量升高幅度高于喷施处理。

(2)秋闲期低温施用沼液时氨挥发损失氮素量较小,喷施和注施处理下氨挥发量(以N计)最高为 $0.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(3)秋闲期施用沼液是可行的,当喷施氮素替代

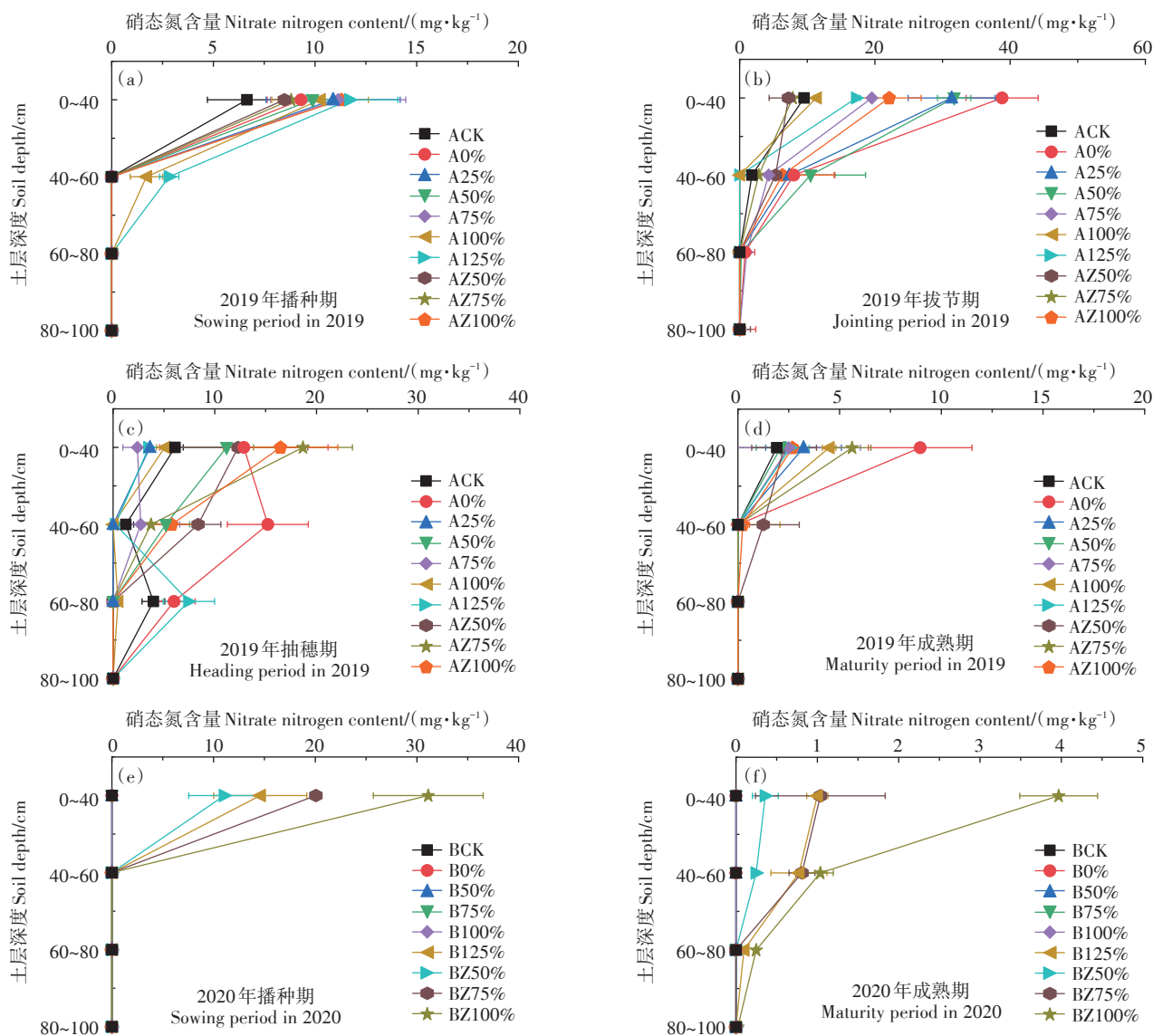


图4 2018年和2019年秋闲期施用沼液后玉米不同生育期各处理硝态氮含量变化

Figure 4 The variation of nitrate nitrogen content after biogas slurry application in autumn fallow period under different treatments during different period in 2018 and 2019

量在 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 以下时未发生铵态氮和硝态氮淋溶。

参考文献:

- [1] HU Y N, CHENG H F, TAO S. Environmental and human health challenges of industrial livestock and poultry farming in China and their mitigation[J]. *Environment International*, 2017, 107(11): 111–130.
- [2] YAN Z Y, WANG C, XU J P, et al. Examining the effect of absorptive capacity on waste processing method adoption: A case study on Chinese pig farms[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 978–984.
- [3] MENG J, LI J L, LI J Z, et al. Enhanced nitrogen removal from piggery wastewater with high NH_4^+ and low COD/TN ratio in a novel upflow microaerobic biofilm reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 249: 935–942.
- [4] ZHAO B W, LI J Z, LEU S Y. An innovative wood-chip-framework soil infiltrator for treating anaerobic digested swine wastewater and analysis of the microbial community[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 173: 384–391.
- [5] 龙木措. 浅谈畜禽养殖废水处理技术[J]. *今日畜牧兽医*, 2019, 35(7): 77. LONG M C. Discussion on wastewater treatment technology of livestock and poultry breeding[J]. *Today Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2019, 35(7): 77.
- [6] CHEN Q, LIU T B. Biogas system in rural China: Upgrading from decentralized to centralized[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 78: 933–944.
- [7] HERRMANN A, KAGE H, AUBE F, et al. Effect of biogas digestate, animal manure and mineral fertilizer application on nitrogen flows in biogas feedstock production[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 91: 63–73.

- [8] YANG W J, SHAO D D, ZHOU Z Z, et al. Carbon quantum dots (CQDs) nanofiltration membranes towards efficient biogas slurry valorization[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 385: 123993.
- [9] YAN L L, LIU Q P, LIU C, et al. Effect of swine biogas slurry application on soil dissolved organic matter (DOM) content and fluorescence characteristics[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 184: 109616.
- [10] CHEN S L, YU W W, ZHANG Z, et al. Soil properties and enzyme activities as affected by biogas slurry irrigation in the three gorges reservoir areas of China[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2015, 36(2): 513–520.
- [11] CHAOU I H, IBILSK L M, HNO T. Effects of earthworm casts and compost on soil microbial activity and plant nutrient availability[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(2): 295–302.
- [12] YILMAZ E, ÇANAKCI M, TOPAKCI M, et al. Effect of vineyard pruning residue application on soil aggregate formation, aggregate stability and carbon content in different aggregate sizes[J]. *Catena*, 2019, 183: 104219.
- [13] 王静童, 王勇, 殷金忠, 等. 短期沼液还田对小麦产量和土壤理化性质的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2019, 47(4): 5–9. WANG J T, WANG Y, YIN J Z, et al. Effects of short-term biogas slurry returning on wheat yield and soil physiochemical properties[J]. *Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(4): 5–9.
- [14] 杨润, 孙钦平, 赵海燕, 等. 沼液在稻田的精确施用及其环境效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1566–1572. YANG R, SUN Q P, ZHAO H Y, et al. Precision application of biogas slurry and its environmental effects in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8): 1566–1572.
- [15] 赖星, 伍钧, 王静雯, 等. 连续施用沼液对土壤性质的影响及重金属污染风险评价[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 359–364. LAI X, WU J, WANG J W, et al. The long-term effects of biogas slurry on soil properties and potential risks of heavy metals in soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6): 359–364.
- [16] HOLM-NIELSEN J B, SEADI T A, OLESKOWICA-POPIEL P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization[J]. *Bioresour Technology*, 2008, 100(22): 5478–5484.
- [17] PETERSEN S O, SOMMER S G, BERNAL M P, et al. Recycling of manure and organic wastes—a whole-farm perspective[J]. *Danish Institute of Agricultural Sciences*, 2006, 122: 9–15.
- [18] 王德刚, 齐文, 王伟, 等. 沼液还田的作用、问题及对策[J]. 农村经济与科技, 2019, 30(19): 3–4. WANG D G, QI W, WANG W, et al. Effects, problems and countermeasures of returning biogas slurry to field[J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2019, 30(19): 3–4.
- [19] 李国亮, 王维生. 沼液还田措施的利用及示范推广的分析[J]. 农业开发与装备, 2020, 12: 93–94. LI G L, WANG W S. Analysis on the utilization and demonstration of biogas slurry returning measures[J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2020, 12: 93–94.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 701–731. State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 701–731.
- [21] 李肖开. 土壤农化常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 67–116. LI Q K. Soil agro-chemistry conventional analysis methods[M]. Beijing: Science Press, 1989: 67–116.
- [22] 王峰, 陈玉真, 吴志丹, 等. 酸性茶园土壤氨挥发及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 808–816. WANG F, CHEN Y Z, WU Z D, et al. Ammonia volatilization and its influencing factors in tea gardens soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 808–816.
- [23] 刘庆平. 沼液农用对黑土土壤肥力、重金属含量和玉米产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020. LIU Q P. Effect of biogas slurry on soil fertility, heavy metal content and corn yields in black soil[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.
- [24] 黄界颖, 伍震威, 高连芬, 等. 沼液对土壤质量及小白菜产量品质的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40(5): 849–854. HUANG J Y, WU Z W, GAO L F, et al. Effects of biogas slurry on soil quality and yield quality of Chinese cabbage[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2013, 40(5): 849–854.
- [25] 崔宇星, AZEEM M, 孙吉翠, 等. 沼液与化肥配施对耕层土壤化学性状及玉米产量品质的影响[J]. 山东农业科学, 2020, 52(5): 77–81. CUI Y X, AZEEM M, SUN J C, et al. Effects of biogas slurry combined with chemical fertilizer on soil chemical properties and corn yield and quality[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020, 52(5): 77–81.
- [26] 靳红梅, 常志州, 郭德杰, 等. 追施猪粪沼液对菜地氨挥发的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 86–95. JIN H M, CHANG Z Z, GUO D J, et al. Effects of topdressing with digested pig slurry on ammonia volatilization in vegetable fields[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1): 86–95.
- [27] 孟祥海, 魏丹, 王玉峰, 等. 氮素水平与施氮方式对稻田氨挥发影响[J]. 黑龙江农业科学, 2011, 12: 38–42. MENG X H, WEI D, WANG Y F, et al. Nitrogen levels and nitrogen application modes on ammonia volatilization effect[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2011, 12: 38–42.
- [28] 吴华山, 郭德杰, 马艳, 等. 猪粪沼液施用对土壤氨挥发及玉米产量和品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(2): 163–168. WU H S, GUO D J, MA Y, et al. Effects of pig manure-biogas slurry application on soil ammonia volatilization and maize output and quality[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(2): 163–168.
- [29] 袁雨婷, 高志岭, 贾树云, 等. 施用沼液对苹果园土壤 N_2O 和 NH_3 排放的影响[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(5): 57–64. YUAN Y T, GAO Z L, JIA S Y, et al. Effects of digestate application on N_2O and NH_3 emissions of apple orchard soil[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2019, 42(5): 57–64.
- [30] SVOBODA N, TAUBE F, KLU C, et al. Crop production for biogas and water protection: A trade-off? [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, 177(4): 36–47.
- [31] 杜妍宁. 施用沼液和生物炭对杨树人工林土壤氮、磷的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2018: 14–15. DU Y N. Effects of biogas slurry and biochar applications on soil nitrogen and phosphorus in the poplar plantation in a costal area, China[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018: 14–15.
- [32] 王洪媛, 李俊改, 樊秉乾, 等. 中国北方主要农区农田氮磷淋溶特征与时空规律[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(1): 11–18. WANG H Y, LI J G, FAN B Q, et al. Nitrogen and phosphorus leaching characteristics and temporal and spatial distribution patterns in northern China farmlands[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(1): 11–18.