

文献著录格式：李华，罗娜，马洁，等. 沼液灌溉对农田土壤及产地环境影响研究进展 [J]. 浙江农业科学，2019，60（8）：1317-1321.

DOI: 10.16178/j.issn.0528-9017.20190814

沼液灌溉对农田土壤及产地环境影响研究进展

李华¹，罗娜^{1,2}，马洁¹，李凝玉¹，陈喜靖¹，沈阿林¹，郭彬¹，傅庆林^{1*}

（1. 浙江省农业科学院 环境资源与土壤肥料研究所，浙江 杭州 310021；2. 安徽农业大学 资源与环境学院，安徽 合肥 230036）

摘 要：沼液富含营养，可作为优质有机肥料灌溉农田，替代部分化肥。作为资源进行再利用，还可降低其本身处理成本。大量研究表明，沼液农田灌溉可通过增加土壤氮磷钾与有机质养分含量、疏松土壤等途径改良土壤，提升土壤肥力，提高农产品的产量与品质。但大量施用沼液对周边土壤与水体环境也存在着一定的污染风险。综述沼液农田灌溉对土壤、地表水和地下水环境影响的研究现状，并展望今后的研究方向，建议开展沼液农田灌溉对区域土壤与水环境污染风险的长期定位监测，构建沼液农田回用风险评估体系，以期对沼液长期可持续性农田回用提供理论参考。

关键词：沼液；农田灌溉；重金属；抗生素；地表水；地下水

中图分类号：S141.8

文献标志码：A

文章编号：0528-9017(2019)08-1317-05

随着我国养殖业的稳步发展和沼气工程的快速推进，大量的沼液如何处置已成为备受关注的环境问题。沼液中含有大量的氮、磷、钾等营养元素，以及丰富的铁、锌、锰等微量元素和氨基酸等营养物质^[1]。目前，农田灌溉已成为其资源化利用的一个重要方式：一来可替代部分化肥，二来也可降低沼液的处理成本。诸多研究表明，沼液在提升土壤肥力、提高农作物（水稻、蔬菜、水果、茶等）产量方面具有积极作用^[2-5]。但长期大量施用沼液也存在着诱发土壤与农作物重金属、抗生素污染的风险，同时，沼液长期施用是否会对地表水及地下水产生污染也逐渐引起了学者们的重视。本文拟从沼液长期施用对土壤、水环境的影响着手，综述沼液农田灌溉的环境污染风险，提出今后沼液长期合理施用研究应聚焦的热点，以期为实现沼液的资源化利用与可持续发展提供参考。

1 沼液农田灌溉对土壤肥力及作物生长的影响

沼液中总氮与铵态氮浓度可分别达到 1 000 ~ 1 800 mg · L⁻¹ 和 600 ~ 1 200 mg · L⁻¹^[6]，总磷浓度也可达 30 ~ 60 mg · L⁻¹^[7]，具有非常高的资源化利用价值。现有研究一致认为，沼液农田灌溉可通过

提高土壤氮磷钾含量、有机质含量、微生物总量等提升土壤肥力。沼液农田灌溉后可使土壤全氮、全磷与全钾含量分别提高 6.80%、13.16% 与 25.04%^[3]，铵态氮、速效磷与速效钾含量分别提高 19.9%、21.1% 与 35.8%，同时使有机质含量提高 31.6%^[2]。Xu 等^[8]连续 3 a 施加沼液处理，发现沼液能够改良土壤肥力。国外学者在德国巴登-符腾堡州东北部的 5 个沼液灌溉田取样，分析显示，土壤有机质含量均有所增加^[9]。沼液施加在提升土壤有机质含量的同时，也提升了土壤中微生物的活跃度。张红等^[10]在菜地土壤上研究发现，沼液可以改善土壤中的碳、氮含量，从而促进土壤微生物数量增加；左狄等^[11]进行了 2 a 的大田小区试验，结果表明，沼液还田显著提高了土壤微生物总量，促进了稻田的养分循环；徐莉等^[12]在对杨树林地的研究中发现，施加沼液能够增加土壤中微生物的多样性，增强土壤微生物活性。Wentzel 等^[9]研究结果也表明，沼液投入量的增加可提升土壤微生物生物量的有效性，进而提升土壤肥力。

沼液中的氮素以铵态氮为主，约占总氮的 62.5% ~ 99.0%^[13]，更利于作物的吸收利用。沼液与化肥配合使用，除可提高土壤肥力外，还可以提

收稿日期：2019-06-10

基金项目：浙江省重点研发计划（2015C03013）；国家重点研发计划（2016YFD0200804）；农业部行业专项（201503106）

作者简介：李华（1977—），女，河北石家庄人，副研究员，博士，主要从事农业面源污染控制方面的研究工作，E-mail: lisar-123@163.com。

通信作者：傅庆林（1963—），男，浙江东阳人，研究员，博士，主要从事农业生态方面的研究工作，E-mail: fuqll61@aliyun.com。

高土壤透气性,疏松土壤^[14],减少板结,在丰富土壤有机质含量及活跃微生物群落的同时,长期施用还能改善作物生长环境,进而促进作物生长;因此,沼液灌溉通常可提高作物产量,这一结论已在水稻^[4]、小麦^[15]、茶树^[16]、葡萄^[17]、紫甘蓝^[18]等农作物上得到了验证。另外,随着沼液施用量的增加,作物与蔬菜(小白菜)等的产量也有增加的趋势^[4,19],但超过一定用量,增产效果会减弱。为确定沼液灌溉对小麦增产效果的最佳方案,邵文奇等^[15]研究并最终确定了“前重后轻法”,即重施基肥、适量追肥,二者比例以2:1为最佳。Jothi等^[20]按一定比例配备沼液,并用其替代肥料施加于西红柿田地中,结果表明,沼液可增加西红柿产量,并使得西红柿果实结果期提前。这也说明沼液中丰富的微量元素对于改善作物品质具有积极作用^[21-22]。

2 沼液农田灌溉对土壤环境的影响

养殖饲料中含有重金属和抗生素成分。养殖废水经过厌氧发酵后,其中的重金属和抗生素成分仍会残留在沼液中;因此,沼液长期施用有增加土壤重金属和抗生素含量的风险^[23-24]。

2.1 土壤重金属污染风险

猪场沼液是目前农田中常见的灌溉用沼液,学者围绕猪场沼液的土壤重金属污染风险开展了一系列研究。赖星等^[25]明确了连续多年施用猪场沼液会增加土壤中重金属Pb、Cd、Cr、As、Hg的累积量,这与高杰云等^[26]和陈瑶等^[27]的研究结果一致。董志新等^[28]研究了不同沼肥的重金属含量,结果表明,供试的3种沼液中重金属含量均未超出国家标准GB 5084—2005中的农田灌溉水质要求。黄继川等^[29]在稻田生态系统中进行试验,证明在连续施用2茬沼液的条件下,稻田土壤中Cd、Cr、As、Pb和Hg含量都符合国家标准GB 15618—1995中规定的土壤质量二级标准,无重金属污染风险,但As和Cr含量与沼液用量呈现明显正相关性,长期施用沼液可能会致使土壤中As、Cr含量超标。王桂良等^[30]在沼液替代化肥氮的试验研究中发现,稻米Cu、Zn、Pb、As含量稍有增加,Cd、Cr含量有所降低,认为对于稻田长期施用沼液的重金属含量应进行长期监测,以科学制订农田沼液的适宜用量。

土壤中重金属的积累可能引发农产品安全问题。有研究对太湖地区施用沼肥后的农产品进行了

风险评估,结果表明,谷物和蔬菜中的Pb、As、Cd含量均超出联合国粮食及农业组织(FAO)/世界卫生组织(WHO)的限制^[31]。沼液施用量与土壤中砷含量具有明显正相关性,但各处理下作物重金属含量均未超过国家蔬菜食用标准^[32]。沼液作为作物和蔬菜种植的肥料,通过植物根系进入植物内部,并通过食物链危害人类健康。Guo等^[33]在稻-麦轮作模式下发现,沼液施加处理下,土壤中的Pb、Cr、Cu、Zn含量均在允许范围内。Duan等^[1]鉴定出一些低积累重金属的水稻基因型。这些研究为降低沼液灌溉条件下的农产品安全风险进行了有益尝试。

2.2 土壤抗生素污染风险

随着集约化畜禽养殖发展,在畜禽饲料中添加抗生素的现象并不少见,其中相当部分的抗生素残留在猪场粪污水中。目前,有关畜禽粪便中抗生素的研究较多,但关于沼液中抗生素的关注较少^[34-36]。沼液中常见的抗生素以四环素类、磺胺类为主^[37]。为探索沼液在防治植物病害上的机理,聂莹等^[38]利用高效液相色谱检测了猪粪沼液中3种常见抗生素(土霉素、四环素、金霉素)的含量,结果表明,沼液中抗生素含量偏高。卫丹等^[39]对嘉兴市10家大型养猪场沼液水质调查发现,四环素类抗生素含量最高,最高值可达 $1\ 090\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,远超欧盟水环境抗生素限制值($10\ \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)。贺南南等^[40]研究发现,沼液所含抗生素中,含量较高的为四环素类和磺胺类抗生素,其中磺胺嘧啶和磺胺甲恶唑的检出浓度最高。

目前,对沼液中抗生素的处理方法主要有污水处理、微波强化氧化处理、微生物法、液相色谱法、酶联免疫吸附法等。王霜等^[37]利用现有技术对减控猪场粪污中的重金属和抗生素提出如下建议:加大饲料生产的监管力度;跟进重金属、抗生素去除试验结果,开展重金属、抗生素的去除创新技术研究。迟翔等^[41]利用超声-Fenton法对沼液中4种四环素类和4种磺胺类抗生素进行氧化去除,去除率达88%~91%,为沼液农中抗生素的处理提供了一条可能的途径。

3 沼液农田灌溉对水环境的影响

3.1 对地表水环境的影响

国内外研究已明确,施用沼液对田面水、地表水中的氮、磷浓度有一定影响。姜丽娜等^[42]发现,沼液灌溉后稻田田面水中铵态氮的浓度达

120 mg · L⁻¹以上,且随沼液用量增加,田面水铵态氮浓度明显升高,随径流流失的风险增大,但沼液对田面水中硝态氮浓度无显著影响。另有研究表明,沼液灌溉明显增加了水稻穗肥期田面水总氮与铵态氮浓度,且前述指标均随沼液施灌量的增加而增大^[43]。一些模拟试验与田间试验也证实,沼液灌溉可能污染水环境^[33, 44],但沼液灌溉后12 d,稻田田面水氮、磷浓度与化肥对照处理无显著差异;因此,需重点防范灌溉后2周之内径流的发生^[45-46]。同时,也有研究发现,与施用化肥的对照农田相比,农田采用沼液灌溉可有效减少地表径流中总氮、铵态氮和总磷的浓度^[47],这可能与气候、土壤类型、种植模式、沼液用量和施用方式等多种因素相关。沼液灌溉后田面水中较高的氮素,特别是铵态氮浓度,已成为沼液处理中氨挥发损失较高的一个重要原因^[43]。适量施用沼液代替复合肥后,氨挥发速率增加,增大沼液用量增加了稻田氨挥发损失总量^[47]。姜丽娜等^[42]通过3 a的定位田间小区试验发现,沼液灌溉与化肥相比,氨挥发量增加10倍以上。

为确定沼液灌溉的最佳施用量,研究人员也进行了许多尝试。乔小珊等^[48]采用水稻盆栽试验发现,在单季灌溉量为2 250 mL · kg⁻¹的条件下,沼液对稻田水环境的污染潜力较低。大田试验研究表明,基肥期稻田每次沼液消解量应控制在211.76 t · hm⁻²以内;穗肥期稻田消解沼液能力较强,单次消解量控制在423.53 t · hm⁻²以内较为安全^[43]。综上,采用沼液进行农田灌溉时,需根据作物、生育期及土壤类型等因素,综合确定适宜用量。

3.2 对地下水环境的影响

磷素向下移动性较差,沼液灌溉条件下的磷几乎全部被吸附在0~35 cm土壤中^[49];因此,沼液农田灌溉对地下水环境的影响研究主要侧重于氮素。盆栽试验发现,随着沼液灌溉强度的提高,草地淋溶液中总氮、铵态氮与硝态氮含量升高^[50]。淹水稻田土壤溶液中铵态氮向下运移的幅度不大,主要分布在表层(0~30 cm),且上层明显高于下层,这主要是由于表层土壤对沼液中铵态氮的吸附作用更强,降低了其深层淋失风险^[45]。与施用化肥相比,沼液不会增加地下水铵态氮的污染风险,这与姜丽娜等^[42]的研究结果大致相同。小型片区沼气工程试验还发现,沼液还田后地下径流(即淋溶)的铵态氮浓度有一定程度的降低^[46]。

沼液可增强土壤硝化作用^[51],用量过高会导

致大量硝态氮产生;因此,在沼液农田灌溉相关研究中,氮素往往以硝态氮的形式淋失^[52-53]。Matsunaka等^[54]进行了3 a多的牛场沼液试验,发现硝态氮流失占了沼液总氮损失的6%~12%。Park等^[55]研究发现,土壤30 cm处淋溶液中硝酸盐浓度为6~20 mg · L⁻¹。盆栽试验中,高用量沼液处理中硝态氮浓度显著增加,同时,沼液灌溉显著增加了冬小麦硝酸盐淋失浓度^[52]。但也有研究表明,不同用量沼液灌溉对稻田60 cm淋溶液中硝态氮的影响不显著^[42],不会导致当季地下水硝态氮浓度超标^[56],这与王子臣等^[57]的发现一致,即等氮量沼液灌溉与常规施肥相比,前者的地下水硝态氮污染风险较小。朱志玲等^[46]也发现,沼液还田与施用化肥相比,未对地下径流硝态氮造成显著影响。

为避免沼液长期灌溉对水环境带来的潜在风险,乔小珊等^[48]量化了沼液灌溉量,发现总氮投入量应控制在1 198.95 kg · hm⁻²之内,总磷应控制在62.5 kg · hm⁻²之内,这样不致影响地下水环境。按其所用沼液中的氮、磷含量折算,沼液灌溉的安全施用量为单季大田3 960 m³ · hm⁻²。王子臣等^[43]通过小区试验发现,从地下水水质安全角度考虑,水稻穗肥期沼液一次消解安全量应控制在100%沼液替代化肥处理的范围内。

4 沼液农田灌溉研究前景

沼液在增强土壤肥力、提升作物品质、提高作物产量的同时,因缺乏长期的环境污染监测与施用标准规范,盲目施用也可能会直接危害农田用地和作物生长,甚至伴生食品安全问题。为更好地指导沼液用于农业生产,获得沼液资源化利用的最大经济效益及环境效益,以下问题仍有待深入研究。

4.1 沼液长期农田灌溉对区域土壤与水环境污染风险的长期定位监测

目前,关于沼液导致的环境问题研究多集中于模拟试验,即便是大田小区试验,也多集中在当季作物或3 a以内的结果,5 a以上沼液灌溉的研究非常缺少。评估沼液长期农田灌溉对环境的影响,需要建立大田长期定位试验,10 a以上的数据最佳。除关注研究时间外,研究区域也应从试验田块向周边土壤及水体扩展,因为氮磷养分及其他元素具有一定的横向迁移性,可能会对灌溉田块外的区域环境产生一定的影响。除了对氮、磷的研究之外,还应关注水体化学需氧量等的变化,以全面评

价沼液的污染风险。

4.2 沼液农田回用风险评估

综合调研或实地监测沼液养分含量、农田灌溉用量、氮磷水相与气相损失特征与通量、污染物横向与纵向迁移分布特征、水体化学需氧量、环境重金属与抗生素污染程度等因素,结合土壤类型、种植模式、农作物产量与品质,从沼液灌溉对大气、水、土壤3方面的污染贡献入手,确定沼液灌溉风险评价的主要指标,明确核算方法与评价等级,构建沼液长期农田回用的环境风险评估体系,为沼液资源化利用、有机物料替代化肥等提供坚实的理论基础。

参考文献:

- [1] DUAN G L, ZHANG H M, LIU Y X, et al. Long-term fertilization with pig-biogas residues results in heavy metal accumulation in paddy field and rice grains in Jiaying of China [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 58 (5): 637-646.
- [2] 李文涛, 冯康, 吕洋. 沼液施肥对土壤肥力特性的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2018, 46 (20): 108-109.
- [3] 李金怀, 李林维, 魏世清, 等. 沼液对果树种植土壤肥力的影响 [J]. *宁夏农林科技*, 2018, 59 (7): 51-52.
- [4] 何旭华, 徐君, 邵赛男, 等. 沼液在水稻上氮肥替代试验探索 [J]. *浙江农业科学*, 2018, 59 (12): 2262-2264.
- [5] 王玮, 孙岩斌, 周祺, 等. 国内畜禽厌氧消化沼液还田研究进展 [J]. *中国沼气*, 2015, 33 (2): 51-57.
- [6] 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.
- [7] 靳红梅, 常志州, 叶小梅, 等. 江苏省大型沼气工程沼液理化特性分析 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27 (1): 291-296.
- [8] XU M, XIAN Y, WU J, et al. Effect of biogas slurry addition on soil properties, yields, and bacterial composition in the rice-rapeseed rotation ecosystem over 3 years [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19 (5): 2534-2542.
- [9] WENTZEL S, SCHMIDT R, PIEPHO H P, et al. Response of soil fertility indices to long-term application of biogas and raw slurry under organic farming [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 96: 99-107.
- [10] 张红, 王桂良. 沼液和氮肥配施对菜田土壤微生物生物量和活性的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2011, 39 (27): 16601-16603.
- [11] 左狄, 吕卫光, 李双喜, 等. 沼液还田对稻田土壤养分与氮循环微生物的影响 [J]. *上海农业学报*, 2018, 34 (2): 55-59.
- [12] 徐莉, 周伟, 俞元春, 等. 沼液施用对杨树林地土壤性质及林分生长的影响 [J]. *浙江农林大学学报*, 2015, 32 (2): 204-207.
- [13] 董越勇, 聂新军, 王强, 等. 不同养殖规模猪场沼气工程沼液养分差异性分析 [J]. *浙江农业科学*, 2017, 58 (12): 2089-2092.
- [14] 李萍, 蒋滔, 陈云跃, 等. 沼液灌溉对作物生长·土壤质量的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2013, 41 (4): 1501-1503.
- [15] 邵文奇, 纪力, 孙春梅, 等. 不同沼液施用量对水稻生长、产量及重金属含量的影响 [J]. *浙江农业学报*, 2017, 29 (12): 1963-1969.
- [16] 胡康赢, 郑浩, 孔德浩, 等. 沼液与常规化肥对茶树产量与品质的影响 [J]. *浙江农业科学*, 2017, 58 (12): 2121-2122.
- [17] 尤滨乾, 杨丽. 沼液喷滴技术在葡萄栽培上的应用效果 [J]. *浙江农业科学*, 2017, 58 (12): 2123-2125.
- [18] 覃舟. 施用沼液对紫甘蓝产量、营养品质及土壤质量的影响 [J]. *江西农业学报*, 2009, 21 (7): 83-86.
- [19] 钱宏兵, 于倩倩. 施用沼液对小白菜产量及土壤质量的影响 [J]. *现代农业科技*, 2015 (24): 209-210.
- [20] JOTHI G, PUGALENDHI S, POORNIMA K, et al. Management of root-knot nematode in tomato *Lycopersicon esculentum* Mill. with biogas slurry [J]. *Bioresource Technology*, 2003, 89 (2): 169-170.
- [21] 吴树彪, 崔梅, 张笑千, 等. 农田施用沼液增产提质效应及水土环境影响 [J]. *农业机械学报*, 2013, 44 (8): 118-125.
- [22] 曲明山, 郭宁, 陈保华, 等. 沼液与化肥长期配施对蔬菜生产和土壤肥力的影响 [J]. *中国沼气*, 2013, 31 (1): 44-47.
- [23] 刘向林, 王丽霞, 吴冬悦, 等. 长期施用沼液对土壤及产品的影响 [J]. *中国沼气*, 2018, 36 (2): 87-91.
- [24] PU C J, LIU H, DING G C, et al. Impact of direct application of biogas slurry and residue in fields: *in situ* analysis of antibiotic resistance genes from pig manure to fields [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 344: 441-449.
- [25] 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.
- [26] 高杰云, 康凌云, 严正娟, 等. 沼液替代化肥对设施蔬菜产量和土壤养分及重金属累积的影响 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33 (17): 200-207.
- [27] 陈瑶, 史秋萍, 陈玉成. 沼液连续浇灌对旱作和水田土壤养分及重金属含量的影响 [J]. *水土保持学报*, 2015, 29 (2): 76-80.
- [28] 董志新, 卜玉山, 续珍, 等. 沼液肥养分物质和重金属含量差异及安全农用分析 [J]. *中国土壤与肥料*, 2015 (3): 105-110.
- [29] 黄继川, 彭智平, 徐培智, 等. 沼液稻田消解对水稻生产、土壤肥力及环境安全的影响 [J]. *广东农业科学*, 2016, 43 (10): 69-76.
- [30] 王桂良, 寇祥明, 张家宏, 等. 沼液替代化肥氮对水稻生长发育及稻米品质的影响 [J]. *生态学杂志*, 2018, 37 (9): 2672-2679.
- [31] BIAN B, HAI S W, LV L, et al. Health risk assessment of metals in food crops and related soils amended with biogas slurry in Taihu Basin: perspective from field experiment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22 (18): 14358-14366.

- [32] 欧杨虹,孙正国,陈学祥.不同沼液施用量对生菜产量及砷累积量的影响[J].江苏农业科学,2014,42(2):110-112.
- [33] GUO Y J, TANG H, LI G D, et al. Effects of cow dung biochar amendment on adsorption and leaching of nutrient from an acid yellow soil irrigated with biogas slurry [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2013, 225 (1): 1-13.
- [34] 王瑞,魏源送.畜禽粪便中残留四环素类抗生素和重金属的污染特征及其控制[J].农业环境科学学报,2013,32(9):1705-1719.
- [35] 王丽.畜禽粪便中抗生素的检测、释放及削减研究[D].赣州:江西理工大学,2013.
- [36] 张树清,张夫道,刘秀梅,等.规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究[J].植物营养与肥料学报,2005,11(6):822-829.
- [37] 王霜,邓良伟,王兰,等.猪场粪污中重金属和抗生素的研究现状[J].中国沼气,2016,34(4):25-33.
- [38] 聂莹,曾晓楠.沼液中几种抗生素的检测与樱花细菌性穿孔病防效研究[J].中国园艺文摘,2014,30(1):76-77.
- [39] 卫丹,万梅,刘锐,等.嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究[J].环境科学,2014,35(7):2650-2657.
- [40] 贺南南,管永祥,梁永红,等.固相萃取-高效液相色谱同时测定沼液中3种四环素类和6种磺胺类抗生素[J].分析科学学报,2017,33(3):373-377.
- [41] 迟翔,周文兵,武林,等.Fenton法对沼液中三种四环素类和三种磺胺类抗生素氧化去除的研究[J].农业环境科学学报,2018,37(11):2451-2455.
- [42] 姜丽娜,王强,陈丁江,等.沼液稻田消解对水稻生产、土壤与环境安全影响研究[J].农业环境科学学报,2011,30(7):1328-1336.
- [43] 王子臣,梁永红,盛婧,等.穗肥期沼液消解对稻田水体氮素的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):246-251.
- [44] YANG H S, YU D G, ZHOU J J, et al. Rice-duck co-culture for reducing negative impacts of biogas slurry application in rice production systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 213: 142-150.
- [45] 史一鸣.稻田生态系统消解沼液的潜力及风险评估[D].杭州:浙江大学,2010.
- [46] 朱志玲,许英杰.片区沼气工程沼液沼渣还田对水环境的影响[J].上海农业科技,2017(6):23-26.
- [47] 李松林.大量施沼液稻田氮素动态特征及其对环境的影响[D].杭州:浙江大学,2011.
- [48] 乔小珊,张馨蔚,陈玉成,等.沼液灌溉对稻田水环境影响分析[J].中国沼气,2013,31(4):21-26.
- [49] 朱家悦.沼灌后氮磷元素在土壤中迁移吸附环境行为[D].重庆:重庆交通大学,2017.
- [50] 李彦超,廖新伟,吴银宝.施用沼液对杂交狼尾草产量和土壤养分含量的影响[J].农业环境科学学报,2007,26(4):1527-1531.
- [51] CHENG J B, CHEN Y C, HE T B, et al. Nitrogen leaching losses following biogas slurry irrigation to purple soil of the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25 (29): 29096-29103.
- [52] SÄNGER A, GEISSELER D, LUDWIG B. Effects of moisture and temperature on greenhouse gas emissions and C and N leaching losses in soil treated with biogas slurry [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47 (3): 249-259.
- [53] SVOBODA N, TAUBE F, WIENFORTH B, et al. Nitrogen leaching losses after biogas residue application to maize [J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130: 69-80.
- [54] MATSUNAKA T, SAWAMOTO T, ISHIMURA H, et al. Efficient use of digested cattle slurry from biogas plant with respect to nitrogen recycling in grassland [J]. *International Congress Series*, 2006, 1293: 242-252.
- [55] PARK S H, LEE B R, JUNG K H, et al. Acidification of pig slurry effects on ammonia and nitrous oxide emissions, nitrate leaching, and perennial ryegrass regrowth as estimated by ^{15}N -urea flux [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2018, 31 (3): 457-466.
- [56] 李松林,吕军,张峰,等.高浓度沼液淹灌土水系统中氮、磷和有机物的动态变化[J].水土保持学报,2011,25(2):125-129.
- [57] 王子臣,梁永红,盛婧,等.稻田消解沼液工程措施的水环境风险分析[J].农业工程学报,2016,32(5):213-220.

(责任编辑:高峻)