

生猪粪水液态肥高量还田对黑土和风沙土养分含量的影响

欧阳¹, 孙琳¹, 梁雷¹, 张玉兰^{2,3,4,5*}

¹辽宁大学环境学院, 辽宁 沈阳

²中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳

³辽宁省现代保护性耕作与生态农业重点实验室, 辽宁 沈阳

⁴辽宁沈阳农田生态系统国家野外科学观测研究站, 辽宁 沈阳

⁵临沂大学环境学院, 山东 临沂

收稿日期: 2023年3月12日; 录用日期: 2023年4月13日; 发布日期: 2023年4月21日

摘要

随着“南养北上”新布局, 东北生猪养殖量迅速增加, 产生了大量液体粪污。生猪液体粪污处理方向由“治理”转“利用”。为探究生猪粪水液态粪肥还田利用后对土壤肥力的影响, 在辽宁省康平县玉米地开展试验, 以常耕施肥为对照(黑土区BCK、沙土区SCK), 将生猪粪水厌氧发酵生成的液态肥以每亩20立方高量还田, 研究猪粪水液态粪肥施用(黑土区BMS和沙土区SMS)对土壤养分含量的影响。结果表明: 黑土区两次施用猪粪水后, 有机碳、总碳、硝态氮、速效氮、总氮、有效磷、总磷含量均显著高于常规施肥处理显著, 分别提高了60.89%、83.24%、120.53%、358.17%、58.83%、56.27%、95.82%, 但土壤速效钾含量显著降低了49.34%。风沙土上施用猪粪水液态肥后, 土壤硝态氮和有效磷含量均显著提高, 分别提高了247.37%、105.34%。施用猪粪水液态肥后, 黑土大部分养分含量提升幅度较大, 增肥效果较好; 风沙土与常规施肥处理土壤肥力差异不大。综上所述, 在辽河流域黑土区施用猪粪水可显著提高土壤肥力, 进而科学合理消纳猪粪水、促进东北地区黑土保墒培肥, 并减少农业面源性污染, 有利于推进东北地区种养结合循环利用模式。

关键词

液态粪污, 生猪粪水, 黑土, 风沙土, 养分含量

Effects of Pig Manure Liquid Fertilizer Returning to Field in High Amount on Nutrient Content of Black Soil and Aeolian Sandy Soil

*通讯作者。

Yang Ou¹, Lin Sun¹, Lei Liang¹, Yulan Zhang^{2,3,4,5*}

¹School of Environment, Liaoning University, Shenyang Liaoning

²Shenyang Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning

³Liaoning Key Laboratory of Modern Conservation Tillage and Ecological Agriculture, Shenyang Liaoning

⁴Shenyang National Field Scientific Observation and Research Station of Farmland Ecosystem, Liaoning Province, Shenyang Liaoning

⁵School of Environment, Linyi University, Linyi Shandong

Received: Mar. 12th, 2023; accepted: Apr. 13th, 2023; published: Apr. 21st, 2023

Abstract

With the new layout of “raising pigs from the south to the north”, the number of pigs raised in northeast China has increased rapidly, resulting in a large amount of liquid manure pollution. The treatment direction of pig liquid manure is changed from “treatment” to “utilization”. In order to explore the effects of returning liquid manure from pig manure to field on soil fertility, an experiment was carried out in Kangping County, Liaoning Province. Taking regular tillage and fertilization as the control (BCK in black soil area and SCK in sandy soil area), the liquid fertilizer generated by anaerobic fermentation from pig manure was returned to field at a high rate of 20 cubic meters per mu. The effects of liquid manure application (BMS in black soil area and SMS in sandy soil area) on soil nutrient content were studied. The results showed that: In the black soil area, the contents of organic carbon, total carbon, nitrate nitrogen, available nitrogen, total nitrogen, Available phosphorus and total phosphorus were significantly increased by 60.89%, 83.24%, 120.53%, 358.17%, 58.83%, 56.27% and 95.82%, respectively, after two application of pig manure water, but the soil available potassium content was significantly reduced by 49.34%. After the application of pig manure liquid fertilizer on the wind-blown sandy soil, the contents of nitrate nitrogen and available phosphorus in the soil were significantly increased by 247.37% and 105.34%, respectively. After the application of liquid fertilizer with pig manure water, the content of most nutrients in black soil increased greatly, and the fertilizer effect was good. There was little difference in soil fertility between aeolian sand and conventional fertilization. In conclusion, the application of pig manure water in the black soil area of Liaohe River Basin can significantly improve soil fertility, so as to scientifically and rationally absorb pig manure water, promote soil moisture conservation and fertilizer cultivation in northeast China, and reduce agricultural non-point source pollution, which is conducive to promoting the combined planting and breeding recycling mode in Northeast China.

Keywords

Liquid Feces, Pig Slurry, Black Soil, Aeolian Sand Soil, Nutrient Content

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着畜禽养殖的快速发展，规模化养殖产生液体粪污(又称粪水)数量是固体粪污的 5~10 倍，中国每年畜禽养殖产生的粪水(液体粪污)量高达 20 亿 T [1] [2]。液体粪污处理难度较大，处理不当成为农业的

污染源,成为养殖业和种植业健康发展的难点和热点。近10年来,中国规模养殖场液体粪污处理主要采用厌氧发酵沼液还田、贮存发酵、异位发酵床和达标排放等[3]。早期较多采用“达标排放”和“异位发酵床”模式。但“达标排放”投入高、处理成本高、难以达到排放标准,且难有许可排放场所,当前已被摒弃[4]。“异位发酵床”虽能解决临时问题,但垫料难找、成本高,但易发生死床状况,难以长期解决液体粪污处理和资源化问题,且运行几个月后垫料重金属严重超标,越来越多有机肥厂和种植基地拒收垫料,浪费了垫料资源[5]。国家明确已获得环评批复的规模养殖场可由达标排放(含按农田灌溉水标准排放)变更为资源化利用(不含商业化沼气工程和商品有机肥生产)。当前应用较广的液体粪污资源化利用技术包括“厌氧发酵沼气工程资源化利用后贮存还田”和“贮存发酵后还田利用”。养殖液体粪污资源循环对农田土壤地力的提升作用和有机肥替代化肥潜力巨大,但是粪污农田施用是“双刃剑”,既是养分“源”也是污染“源”,不合理利用或过量施用都会导致严重的环境问题和健康问题[6]。

“厌氧发酵沼气工程资源化利用结合贮存还田”模式在中国南方应用较早,但在中国北方较少应用,归因于北方高温期较短造成沼气质量不佳和运行工艺要求较高以及初期投入高等方面[3][7]。北方养殖粪污资源化利用适合采用“贮存发酵后还田利用”模式。早期多采用敞开式好氧发酵,模式的空气污染指数过高,增加了碳排放,在丹麦等国家发展了表层覆盖和酸化剂(硫酸铝、浓硫酸、明矾等)添加等技术以减少污染和提高肥效[8]-[16],增加了处理成本和环节;另外,在遭遇大雨的时候,敞开式贮存池会有洪水漫灌和粪污泄漏的风险,该模式已不推广使用。当前越来越多地采用封闭式粪污处理系统,如膜覆盖厌氧发酵技术,实行贮存发酵后还田利用[17]。

粪水肥料化产物中营养元素丰富,且容易被作物吸收[18][19]。液态粪污资源化最有效的方式就是农田回用[20]。液体粪肥显著提高小麦、玉米、蔬菜等作物产量,且随着粪水带氮量增加而增加[21]-[26];增加株高、叶面积指数、叶绿素含量[27]、植株对氮素吸收量[23]和氮素表观利用率[28],增强作物光合作用能力[29]、增加植株不同生长阶段的磷吸收量和总量[30],有研究表明,粪水施用降低土壤硝态氮含量,降低氮素淋溶,减少氮素损失[22][31][32],有效改善土壤肥力质量[33][34],但也会增加土壤氨挥发[13],可能与土壤偏碱性促进氨挥发有关[35],土壤氨挥发累积量与施氮量、温度、pH和含水量均呈显著正相关关系[36]。畜禽液态粪污中的活性炭能够激发土壤微生物活性,促进土壤有机氮素转化增加氨气释放[37]。适量施用猪粪水不会造成氮、磷素向下淋溶污染地下水和重金属超标[38],能减少氨挥发[19],降低温室气体的产生[18]。社会英等[39]研究发现,华北地区粪水施用量 $600\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}\sim 900\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,增加灌溉量和灌溉次数均能促进产量提高,但过量施用粪水造成减产,可能与氮带入量超过阈值有关。因此,液体粪污肥料化后用于农田应设置合理的施用量,避免减产,同时避免对农田污染。

随着我国养殖业“南养北上”新布局,辽宁省养殖业发展非常迅速,2017年被农业农村部评定为全国生猪潜力增长区。根据“辽宁省畜禽养殖场信息直联直报平台”的数据统计,2020年单位面积耕地承载畜禽固体粪污数量接近《畜禽粪污土地承载力测算技术指南(2018)》中玉米种植土地的承载力极限,环境风险急剧增加,液体粪污处理更成为制约北方现代养殖业发展的难题。养殖粪污通过农田土壤消纳的需求十分迫切。当前种植端重用轻养的高强度利用经营模式造成的土壤生产保障功能衰退,为达成改土培肥、粮食产量持续提升和缓解增加化肥投入保障作物产量导致的购买性投入成本增加窘况的三个目标,种植端对于畜禽粪污富含的大量有机质和氮磷等元素作为种植业的有机肥来源具有极大的需求。但北方液态粪污肥料化应用尚不成熟,多采用简单短期处理甚至不处理即向邻近耕地集中连续漫灌排放方法[40]。因东北气候因素影响,只能在秋季或早春施肥,过量排放必然造成液体粪污或粪肥的集中度过高,局部地块中氮磷营养过量,导致养分资源的浪费,面临耕地重金属积累超标而成为污染土地的隐患[41]。粪污集中过量输入会对局部农田土壤生产功能造成极大破坏,导致土地和环境承载力越来越接近极限,其环境风险呈指数增加,且污染日积月累直到超限,治理难度不断加大[42]。有效利用生猪和肉/奶牛养

殖产生的液体粪污, 变废为宝, 促进养殖业与环境协调发展, 是当前面临的亟需解决的重要问题。

综上可知, 国外、中国南部和中部对液体粪肥利用的研究较多, 研究内容包括作物产量、土壤氮磷元素迁移、转化等, 但中国北部对粪水液态粪肥利用和研究尚少。因此, 本项目将黑膜厌氧发酵无害化技术处理的生猪液体粪污作为液体肥料还田, 高量施用在两种不同类型土壤(黑土和风沙土)玉米地, 对土壤全量养分和速效养分含量的响应展开研究, 以期科学合理消纳液态粪污以及液态粪污还田对土壤肥力的影响提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 试验地概况

实验样地位于辽宁省康平县(42°83'N, 123°5'E), 地处辽河流域, 行政区划隶属于辽宁省沈阳市, 研究区属于北温带大陆气候, 夏秋季降水较多, 春冬季降水较少, 一年中集中降水在夏季的 7~8 月, 年降水量约 540 mm。康平县年平均气温 6.9℃, 年平均日照时数 2867.8 小时, 无霜期平均约 150 天。实验样地土壤为风沙土和黑壤土, 种植作物为玉米。

2.2. 样品采集

于辽宁省沈阳市康平县(42°83'N, 123°5'E), 选择黑土和风沙土类型区域布设试验。每个处理区域面积为 3000 m², 每个实验区设置 2 个处理, 3 次重复。每个试验区内均以常耕施肥处理作为对照, 即黑土区对照处理(BCK)和风沙土区对照处理(SCK); 在每个试验区内设置猪粪水液态粪肥施用处理, 即黑土液态粪肥施用处理 BMS 和风沙土液态粪肥免耕种植处理 SMS)。于 2021 年 9 月秋收前采集土壤样品, 分别在上述这两个样地内, 随机选取 10 个取样点, 在每个取样点以五点法采集 0 cm~20 cm 土层的土壤样品, 每个样地重复 3 次, 将土壤样品剔除石子根茎等杂质并过筛(2 mm), 四分法将新鲜土壤样品缩分, 装进塑料自封袋。将其中一部分土壤放冰箱(4℃)保存, 另一部分土壤采用球磨机研磨待测。

液态粪肥来源于康平县域内新望农牧有限公司生猪粪水黑密闭塘厌氧发酵肥料化产物。采用地头罐车结合管带铺设地面喷洒粪肥, 2020 年秋季和 2021 年春季在黑土实验区施用 20 m³/亩。2021 年春季在沙土区施用粪肥 1 次。每次液体粪肥施用量为 20 m³/亩。春季播种时采用当地农户常用化肥施用量。

2.3. 测定指标与方法

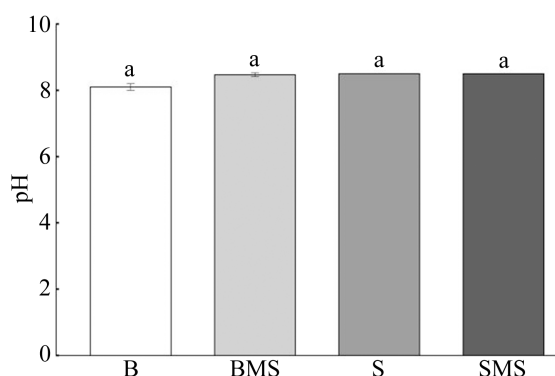
土壤含水率采用称重法测定; 采用 pH 计(pHS-25, 上海霄盛仪器制造有限公司)测定 pH 值, 将电极玻璃球泡插入制备好的待测液中, 轻摇, 稳后, 读数记录。蒸馏水清洗电极, 滤纸吸干, 测下一样品; 采用氯化钾浸提, 连续流动分析仪(AutoAnalyzer3, SEAL, Germany)测定土壤铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)含量; 采用碳酸氢钠浸提, 火焰光度计法测定土壤速效钾含量; 采用高温外热重铬酸钾氧化, 容量法测定土壤有机碳(SOC)含量; 采用元素分析仪(Perkin-Elmer 2400 CHNS/O, Norwalk, CT, USA)测定全碳(TC)和土壤全氮(TN)含量; 采用酸液消煮法提取土壤全磷(TP)和全钾(TK)含量, 流动注射分析仪(QC8500, Lachat Instruments, USA)测定含量; 采用碳酸氢钠浸提土壤有效磷, 移液枪取浸提液, 10 mL。放入 50 mL 三角瓶, 移液枪加 5 mL 钼锑抗试剂, 摇匀, 比色法测定含量。

2.4. 数据处理

采用 Excel 2010 软件处理数据; 采用 SPSS24 进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Pearson 相关系数分析; 采用 Origin 2018 绘制图表。

3. 结果与分析

3.1. 生猪粪水还田对土壤 pH 的影响



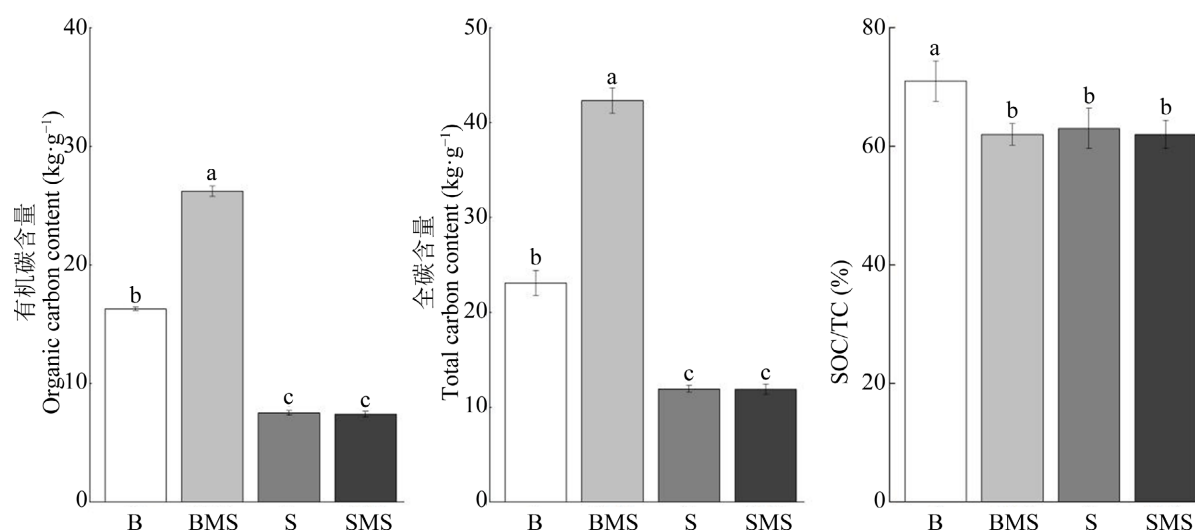
注：常规施肥：黑土常规施肥处理；常规施肥 MS：黑土施用生猪粪水处理；S：沙土常规施肥处理；SMS：沙土施用生猪粪水处理；不同的小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)，下同。

Figure 1. Effect of pig-slurry on soil pH

图 1. 生猪粪水对土壤 pH 的影响

黑土区常规施肥处理土壤 pH 8.47，施用猪粪水处理土壤 pH 值为 8.1，小于常规施肥土壤，但二者之间无显著性差异(图 1)。风沙土上施用生猪粪水处理较常规施肥处理沙土 pH 基本没有发生变化，二处理间差异不显著。

3.2. 生猪粪水还田对土壤碳素含量的影响



注：B：黑土常规施肥处理；BMS：黑土施用生猪粪水处理；S：沙土常规施肥处理；SMS：沙土施用生猪粪水处理。

Figure 2. Effects of pig-slurry on soil carbon content

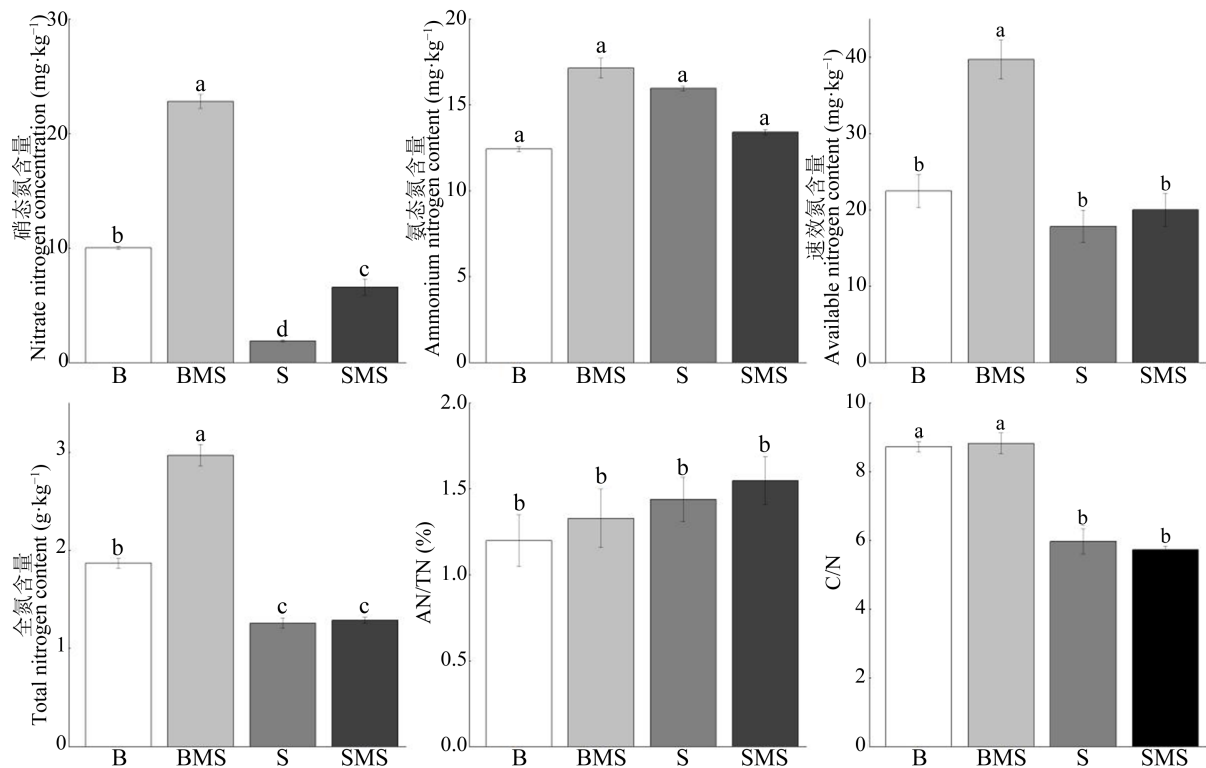
图 2. 生猪粪水对土壤碳素含量的影响

黑土区和沙土区粪水液态肥施用处理与常规施肥处理土壤总碳(TC)含量介于 $11.88 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ~ $42.31 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，有机碳(SOC)含量介于 $7.41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ~ $26.21 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，SOC/TC 比值介于 62%~71% 之间(图 2)。黑土区常规施肥土壤有机碳、总碳、SOC/TC 含量均高于沙土常规施肥土壤，施用生猪粪水液态肥后仍

高于沙土区。生猪粪水液态肥还田对黑土区土壤总碳、有机碳、SOC/TC 影响大于风沙土区，总碳和有机碳含量变幅较大，SOC/TC 比值变化较平缓。与常规施肥处理相比，黑土区施用猪粪水液态肥处理显著增加了有机碳含量，增幅为 60.89%；施用生猪粪水液态肥处理的土壤总碳含量显著高于常规施肥处理，增幅为 83.24%；施用猪粪水液态肥处理的 SOC/TC 比值显著低于常规施肥处理，降幅为 12.68%，随着生猪粪水施用量的增加，土壤总碳含量增速大于土壤有机碳含量。沙土区施用生猪粪水处理土壤总碳、有机碳、SOC/TC 比值较常规施肥处理无显著差异。

3.3. 生猪粪水施用对土壤氮素含量的影响

各处理土壤硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)、铵态氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、速效氮(AN)、总氮(TN)含量以及 AN/TN 比值和碳氮比(C/N)分别介于 $1.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\sim 85.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $12.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\sim 17.14 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\sim 2.97 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $17.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\sim 102.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.2\sim 3.47\%$ 、 $5.74\sim 8.83$ (图 3)。黑土硝态氮、速效氮、总氮含量和 AN/TN 比值均高于沙土。黑土区施用猪粪水液态肥处理较常规施肥处理黑土硝态氮、速效氮、全氮含量和 AN/TN 比值均显著增加，增幅分别 124.83%、358.17%、58.82%、189.17%，铵态氮和 C/N 无显著差异。沙土区施用猪粪水液态肥处理较常规施肥处理土壤硝态氮含量显著增加，增幅为 247.37%，其他指标均无显著差异。



注: B: 黑土常规施肥处理; BMS: 黑土施用生猪粪水处理; S: 沙土常规施肥处理; SMS: 沙土施用生猪粪水处理。

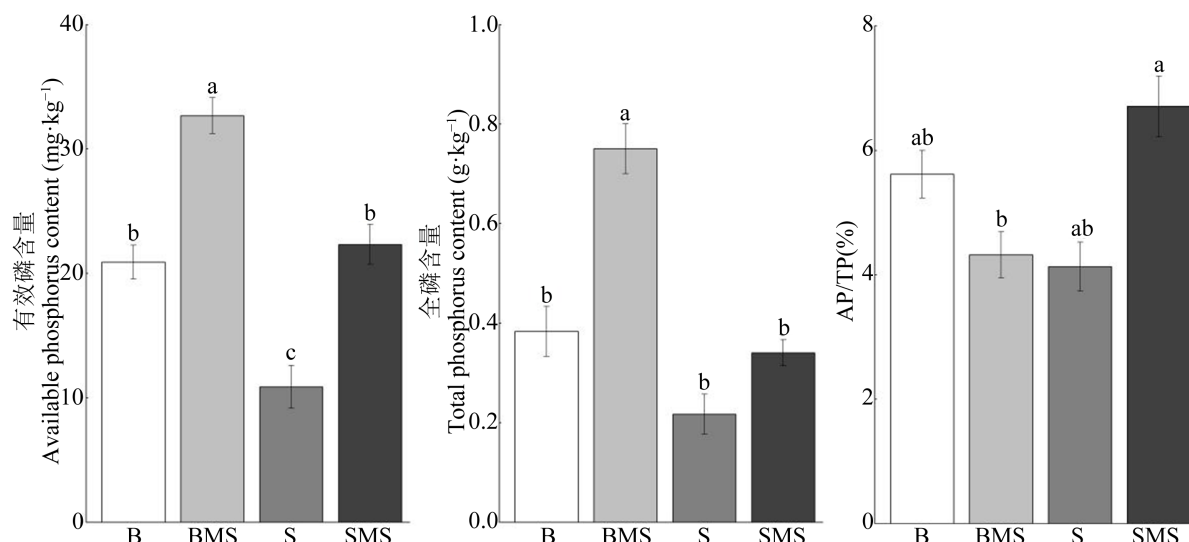
Figure 3. Effects of pig-slurry on soil nitrogen content

图 3. 生猪粪水对土壤氮素含量的影响

3.4. 生猪粪水施用对土壤磷素含量的影响

各处理土壤有效磷(AP)含量介于 $10.87\sim 22.31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，全磷(TP)含量介于 $0.31\sim 0.75 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，AP/TP 比值介于 $2.83\sim 6.7\%$ 之间(图 4)。常规施肥条件下，黑土有效磷和总量含量均高于施用猪粪水后的沙土有效磷含量，黑土全磷含量高于沙土。

黑土区常规施肥处理与施用猪粪水液态肥处理间有效磷含量显著增加了 56.27%；黑土区施用猪粪水处理土壤总磷含量显著高于常规施肥处理，增幅为 95.82%。沙土区施用猪粪水液态肥较常规施肥处理显著增加了土壤有效磷含量，增幅为 105.34%，增幅较大，施用猪粪水后的土壤总磷含量较常规施肥处理没有显著差异。施用猪粪水较常规施肥处理 AP/TP 比值显著下降，降幅为 49.66%，沙土 AP/TP 比值无显著差异。

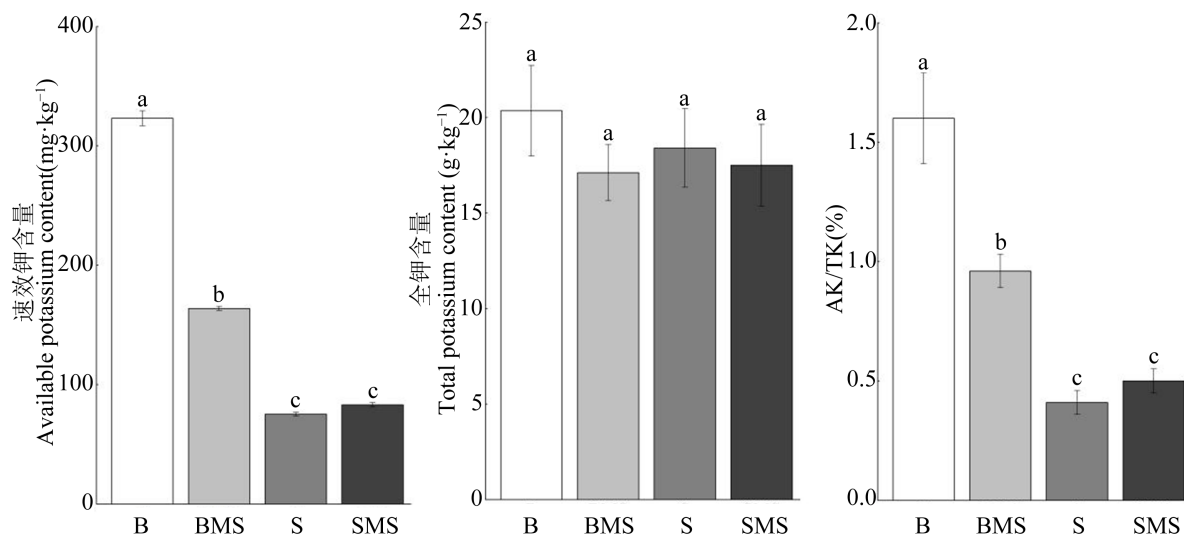


注: B: 黑土常规施肥处理; BMS: 黑土施用生猪粪水处理; S: 沙土常规施肥处理; SMS: 沙土施用生猪粪水处理。

Figure 4. Effects of pig-slurry on soil phosphorus content

图 4. 生猪粪水对土壤磷素含量的影响

3.5. 生猪粪水施用对土壤钾元素含量的影响



注: B: 黑土常规施肥处理; BMS: 黑土施用生猪粪水处理; S: 沙土常规施肥处理; SMS: 沙土施用生猪粪水处理。

Figure 5. Effects of pig-slurry on soil potassium content

图 5. 生猪粪水施用对土壤钾元素含量的影响

黑土区和风沙土区常规施肥处理和生猪粪水液态肥处理土壤的速效钾(TK)含量介于 75.09

mg·kg⁻¹~323.02 mg·kg⁻¹ 之间, 全钾(AK)含量介于 17.11~20.35 g·kg⁻¹ 之间, AK/TK 比值介于 0.41~1.6% 之间(图 5)。黑土区土壤总钾含量间无显著性差异, 黑土速效钾含量和 AK/TK 比值均大于沙土。与常规施肥处理相比, 黑土区施用猪粪水液态肥处理显著降低了土壤速效钾含量, 降幅为 49.34%, 变化幅度较大, 沙土区施用猪粪水液态肥处理与常规施用化肥处理间的土壤速效钾含量间无显著性差异。黑土区施用猪粪水液态肥处理土壤总钾含量下降了 15.92%, 沙土区施用猪粪水液态肥处理总钾含量下降了 4.89%, 但均与对照常规施用化处间无显著差异。黑土区施用猪粪水液态肥处理土壤 AK/TK 比值较常规施用化肥处理显著下降, 降幅为 40%。沙土区施用猪粪水液态肥处理土壤 AK/TK 比值较常规施用化肥处理间无显著差异。

Table 1. Correlation between soil C, N, P, K content

表 1. 土壤碳、氮、磷、钾元素含量的相关性

指标 Index	土壤碳素 Soil carbon content		土壤氮素 Soil nitrogen content				土壤磷素 Soil phosphorus content			土壤钾素 Soil potassium content	
	SOC	TC	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	AN	TN	C/N	AP	TP	AK	TK
SOC	1										
TC	0.992**	1									
NO ₃ ⁻ -N	0.913**	0.949**	1								
NH ₄ ⁺ -N	0.148	0.185	0.254	1							
AN	0.893**	0.933**	0.991**	0.382	1						
TN	0.989**	0.999**	0.955**	0.174	0.937**	1					
C/N	0.894**	0.834**	0.642*	0.052	0.621*	0.820**	1				
AP	0.238	0.211	0.171	-0.14	0.144	0.215	0.27	1			
TP	0.780**	0.788**	0.844**	0.406	0.863**	0.782**	0.622*	0.206	1		
AK	0.473	0.376	0.079	-0.184	0.05	0.358	0.792**	0.336	0.114	1	
TK	-0.09	-0.14	-0.319	0.21	-0.275	-0.158	0.163	0.258	-0.166	0.467	1

注: *为 0.05% 显著水平差异; **为 0.01% 极显著水平差异。

土壤碳、氮、磷、钾素的相关性分析显示(表 1), 除铵态氮、有效磷、速效钾、总钾外, 有机碳与全碳、硝态氮、速效氮、全氮、全磷、C/N 都达到了 0.780** 以上极显著相关。

4. 讨论

本研究中施用猪粪水后黑土 pH 由 8.47 逐渐降至 8.1, 可能与猪粪水液态肥含有较高有机酸有关, 导致 pH 值降低[43], 这与杨继昌等[44]在黄土高原苹果园上的研究结果一致。施用猪粪水液态肥可使土壤 pH 趋于中性, 有利于黑土地作物的生长。风沙土 pH 变化不明显, 可能仅一次施用尚未导致 pH 值产生显著变化。

猪粪水液态肥水溶性养分较多, 含有丰富的可溶性氮磷钾等营养元素和有机质, 施用到土壤后, 养分速效性强, 可利用率高[45] [46]。本研究发现施用猪粪水处理较常规施肥处理黑土有机碳含量显著增加了 51.31%, 这与李娇等[47]在棕壤地和刘敏等[48]在玉米地上研究一致。可能是由于猪粪水本身含有大量可溶性有机质, 被黑土中丰富的微生物吸附, 持续高效的满足土壤的碳素供给, 高量施用后在土壤中蓄积[46]。土壤有机质能给作物提供丰富的有机、矿质营养, 同时能影响土壤结构的形成和土壤的保肥、

缓冲作用,是衡量土壤肥力的重要指标[49]。

本研究施用猪粪水显著增加了黑土硝态氮含量,在速效氮中占比远高于铵态氮,硝态氮含量是铵态氮的5倍,可能会增加土壤硝态氮向下淋溶污染地下水的风险[49],与社会英等[39]的研究结果一致。社会英等[39]研究证实,养殖肥水施用能增加土壤无机氮含量,硝态氮的含量远高于铵态氮,占速效氮的含量的90%。肥水中的大量有机氮和无机氮相互协调提供氮素,降低了氮肥施用向下淋溶污染水体的风险[40]。王贵云等[50]发现随着年份的增加,施氮量增加后深层土壤中根区硝态氮也会随之增加。施用猪粪水显著增加了黑土总氮含量,可能是由于猪粪水有机氮比化肥氮氮素分解转化速率要慢,有利于土壤积累氮素,增加土壤总氮含量;孙铭鸿等[51]在稻田地和唐华等在黑麦草上的研究也得到类似结果。

本研究中猪粪水液态肥施用降低了黑土速效钾含量,一方面缘于猪粪水液态肥中的速效养分更容易被作物吸收[52];另一方面缘于作物产量增加(数据未列出),黑土地作物对钾吸收量增大。黑土中的速效钾更容易被作物吸收带走而钾素补充不足,加上玉米前期降水集中易造成养分流失,速效钾含量显著降低,这与齐文等[52]在青菜上施用不同量的沼液灌溉的研究一致。风沙土速效钾、全钾含量均无明显变化,而风沙土有效磷含量显著增加,是作物吸收、磷素活化、磷素固定以及液态粪肥供应平衡的结果[47][53]。土壤碳、氮、磷、钾素的相关性分析说明有机碳含量能不同程度影响土壤其他养分含量,有机碳是土壤肥力的主要影响因素。

综上可知,施用猪粪水对黑土肥力的影响较为明显,可显著提高其土壤肥力,可能是因为除了猪粪水补充外,黑土中氮、磷、钾等养分向有效形态转化。黑土中氮、磷、钾原本以难溶性化合物的形态存在,作物不能直接吸收利用,而黑土自身养分含量较高,施用猪粪水后,其所含有的微生物、各种水解酶、腐植酸等物质促进了其向可溶性养分转化,提高了黑土中可溶性的营养元素和有机质,导致残留在土壤中的营养元素显著增加,持续高效的为作物提供养分[54]。随着施用猪粪水灌溉量的增多,土壤全氮和有机碳都会随之增加,且C、N相互耦合,C/N值趋于稳定,有利于改善土壤质地和促进作物生长[55]。施用猪粪水液态肥对风沙土肥力的影响较小,可能与施用粪肥数量少、风沙土养分元素较少且易淋溶损失[56],对液态肥养分固持比例低,对低产田作物和土壤生物活性提升幅度低等综合因素有关,导致其肥力提升效果不显著。

5. 结论

本研究施用猪粪水显著提高黑土有机碳和氮磷钾等养分含量,使C/N值趋于稳定,并利于黑土酸碱度趋向中性,一定程度上改善土壤理化性质,提高了土壤肥力。施用猪粪水液态肥既可为作物提供其生长必需的养分及活性物质,又可为作物生产补充大量的灌溉水而缓解干旱胁迫,能够提高作物产量。在东北特殊气候下采用黑膜厌氧发酵生猪粪水,将其肥料化利用于农田,一方面减少了环境污染,另一方面充分利用其中有机碳和氮磷钾养分资源,较好的做到了粪污资源化利用,有利于科学合理消纳猪粪水,实现液态粪污资源化。但要同期研究土壤中重金属和抗生素含量对猪粪水液态肥施用的响应,兼顾保障土壤肥力提升和肥力健康改善。预期逐年多次一定程度上替代化肥,从而减少化肥施用量,提高种养结合模式下的经济效益,适宜在辽河流域黑土地推广。本研究聚焦科学合理消纳生猪液态粪污,为提高东北地区黑土肥力、实现黑土地保护利用和“藏粮于地”目标提供了科学依据。

基金项目

中国科学院战略性先导科技专项《黑土地保护与利用科技创新工程》(XDA28090100)中国科学院研究所重大项目(IAEMP202201)和辽宁省现代保护性耕作研发与应用高水平创新创业团队(XLYC2008015)资助。

参考文献

- [1] 牛新胜, 巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1462-1479.
- [2] 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.
- [3] 周海滨, 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.
- [4] 张翎, 乔娟. 基于种养结合的种植户粪肥支付意愿研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(8): 177-186.
- [5] 李艳苓, 耿兵, 朱昌雄. 畜禽养殖业面源污染微生物发酵床控制技术应用与防治建议[J]. 中国猪业, 2017, 12(7): 25-29.
- [6] 程娟, 付莉, 翟中葳, 等. 化肥减施下粪水替代对设施白菜氮利用与土壤氮盈余的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2551-2558.
- [7] 陈贺亮. 辽宁省大型生猪规模养殖场污水治理模式调研和处理效果对比[J]. 新农业, 2015(17): 34-36.
- [8] Hornig, G., Turk, M. and Wanka, U. (1999) Slurry Covers to Reduce Ammonia Emission and Odour Nuisance. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **73**, 151-157. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0402>
- [9] Kai, P., Pedersen, P., Jensen, J.E., et al. (2008) A Whole-Farm Assessment of the Efficacy of Slurry Acidification in Reducing Ammonia Emissions. *European Journal of Agronomy*, **28**, 148-154. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.06.004>
- [10] Fanguero, D., Hjorth, M. and Gioelli, F. (2015) Acidification of Animal Slurry: A Review. *Journal of Environmental Management*, **149**, 46-56. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.001>
- [11] Ten Hoeve, M., Nyord, T., Perers, G.M., et al. (2016) A Life Cycle Perspective of Slurry Acidification Strategies under Different Nitrogen Regulations. *Journal of Cleaner Production*, **127**, 591-599. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.014>
- [12] 李晨艳, 乔玮, 董仁杰. 养殖场粪污氨排放控制的管理对策分析[J]. 四川环境, 2017, 36(3): 147-153.
- [13] Dai, X.R. and Blanes-vidal, V. (2013) Emissions of Ammonia, Carbon Dioxide, and Hydrogen Sulfide from Swine Wastewater during and after Acidification Treatment: Effect of pH, Mixing and Aeration. *Journal of Environmental Management*, **115**, 147-154. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.019>
- [14] Sørensen, P. and Eriksen, J. (2009) Effects of Slurry Acidification with Sulphuric Acid Combined with Aeration on the Turnover and Plant Availability of Nitrogen. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **131**, 240-246. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.01.024>
- [15] Regueiro, I., Coutinho, J. and Fanguero, D. (2016) Alternatives to Sulfuric Acid for Slurry Acidification: Impact on Slurry Composition and Ammonia Emissions during Storage. *Journal of Cleaner Production*, **131**, 296-307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.032>
- [16] 邢向欣, 赵国明, 裴海林. 东北地区沼气发酵技术现状研究[J]. 农业与技术, 2017, 37(19): 87-89+100.
- [17] Srensen, P. and Amato, M. (2002) Remineralisation and Residual Effects of N after Application of Pig Slurry to Soil. *European Journal of Agronomy*, **16**, 81-95. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(01\)00119-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(01)00119-8)
- [18] 孙国峰, 郑建初, 陈留根, 等. 沼液替代化肥对麦季 CH₄, N₂O 排放及温室效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1654-1661.
- [19] 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.
- [20] 杜臻杰, 樊向阳, 李中阳, 等. 猪场沼液灌溉对冬小麦生长和品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 547-554.
- [21] 赵莉, 于建光, 常志州, 等. 施用沼液对水芹产量及品质的影响[J]. 土壤, 2014, 46(1): 94-99.
- [22] Silvia, B., Markus, G. and Bettina, E. (2014) Phosphorus Availability and Soil Microbial Activity in a 3 Year Field Experiment Amended with Digested Dairy Slurry. *Biomass and Bioenergy*, **70**, 429-439. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.08.004>
- [23] 徐海东, 董合林, 苏丽丽, 等. 液态有机肥对滴灌棉花光合特性及产量形成规律的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(20): 71-77.
- [24] 徐瑞强, 董合林, 徐文修, 等. 喷施浓缩沼液对棉花幼苗生长发育和生理特性的影响[J]. 棉花学报, 2018, 30(3): 261-271.
- [25] 付莉, 王贵云, 杜连柱, 等. 猪场废水施用对设施白菜地土壤氮盈余的影响[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(2): 215-222.

- [26] 李然, 余雪标, 高刘, 等. 畜禽粪便沼液肥对苦瓜光合作用、产量的影响[J]. 中国沼气, 2017, 35(2): 110-114.
- [27] Ai, P., Jin, K., Alengebawy, A., *et al.* (2020) Effect of Application of Different Biogas Fertilizer on Eggplant Production: Analysis of Fertilizer Value and Risk Assessment. *Environmental Technology & Innovation*, **19**, Article ID: 101019. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101019>
- [28] 陈年来, 毛昊昊, 陈思瑾, 等. 叶面喷施沼液肥对温室香瓜茄叶片光合特性、果实产量和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(4): 88-93.
- [29] 裴雪霞, 党建友, 张定一, 等. 化肥减施下有机替代对小麦产量和养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10): 1768-1781.
- [30] 宁建凤, 徐培智, 杨少海, 等. 有机无机肥配施对菜地土壤氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 17-21.
- [31] 马臣, 刘艳妮, 梁路, 等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量和硝态氮残留淋失的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1240-1248.
- [32] Du, H., Gao, W., Li, J., *et al.* (2019) Effects of Digested Biogas Slurry Application Mixed with Irrigation Water on Nitrate Leaching during Wheat-Maize Rotation in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, **213**, 882-893. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.012>
- [33] Omar Alaa El-din, K., Belal Elsayed, B. and El-Abd Abd El-Naiem, A. (2012) Effects of Foliar Application with Compost Tea and Filtrate Biogas Slurry Liquid on Yield and Fruit Quality of Washington Navel Orange (*Citrus sinensis* Osbeck) Trees. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), **62**, 767-772. <https://doi.org/10.1080/10962247.2012.676381>
- [34] 郭治国, 李梓丹, 刘华, 等. 不同比例沼液施用量对苜蓿生长发育、品质及土壤肥力的影响[J]. 草地学报, 2019, 27(4): 1006-1012.
- [35] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 40-44+62.
- [36] 付莉, 王贵云, 社会英, 等. 养殖肥水施用对土壤氮挥发的影响及响应因素[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 931-938.
- [37] Hernández, D., Polo, A. and Plaza, C. (2013) Long-Term Effects of Pig Slurry on Barley Yield and N Use Efficiency under Semiarid Mediterranean Conditions. *European Journal of Agronomy*, **44**, 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.09.001>
- [38] 陈广银, 曹海南, 吴佩, 等. 稻麦轮作下施用猪粪水对作物生长及农田土壤质量的影响[J/OL]. 土壤学报: 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20220526.0839.004.html>, 2023-01-20.
- [39] 社会英, 冯洁, 郭海刚, 等. 麦季牛场肥水灌溉对冬小麦-夏玉米轮作土壤氮素平衡的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 159-165.
- [40] 齐星宇. 辽河上游面源污染负荷估算及评价[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 辽宁大学, 2019.
- [41] 师晓春. 辽宁省生猪养殖业污染防治对策研究[J]. 绿色科技, 2020(10): 15-16+19.
- [42] 侯福银, 杨智青, 金崇富, 等. 猪粪沼液施用量对水稻农艺性状和青贮品质的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(20): 124-131.
- [43] 唐华, 郭彦军, 李智燕. 沼液灌溉对黑麦草生长及土壤性质的影响[J]. 草地学报, 2011, 19(6): 939-942.
- [44] 杨继昌, 张德, 王双成, 等. 施用沼液对黄土高原雨养农业区苹果园土壤生态及果实品质的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(6): 105-113, 121.
- [45] 朱娟玉, 李正山, 邓良伟. 猪粪水特性的研究[J]. 安徽农业科学, 2008(4): 1578-1579+1588.
- [46] 李硕, 王选, 张西群, 等. 猪场肥水施用对玉米-小麦农田氨排放、氮素利用与表观平衡的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(10): 1502-1514.
- [47] 李娇, 张学英, 时连辉, 等. 鸭粪沼液施用浓度对土壤肥力及芹菜生长的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(12): 130-136.
- [48] 刘敏, 纪立东, 王锐, 等. 沼液配施化肥对土壤质量及作物生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(5): 68-76.
- [49] 郑学博, 樊剑波, 崔键, 等. 沼液化肥配施对旱地红壤花生养分吸收分配和产量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(2): 332-337.
- [50] 王贵云, 张克强, 付莉, 等. RZWQM2 模型模拟牛场肥水施用夏玉米土壤硝态氮迁移特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 47-54.

- [51] 孙铭鸿, 蒋炳伸, 沈健林, 等. 猪粪化肥配施对稻田土壤氮素含量及氮肥利用率的影响[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(1): 175-183.
- [52] 齐文, 王德刚, 何贤彪, 等. 沼液替代化肥对青菜产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(5): 988-990+995.
- [53] 于海霞, 陈荣荣, 李泽青, 等. 畜禽养殖场肥水还田存在问题及对策[J]. 天津农业科学, 2022, 28(2): 83-86.
- [54] 秦乃群, 陈现朝, 高敬伟, 等. 沼液施用对花生小麦轮作土壤养分和重金属含量的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(10): 1422-1428.
- [55] 张秀芝, 高洪军, 彭畅, 等. 长期有机培肥黑土有机碳、全氮及玉米产量稳定性的变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(9): 1473-1481.
- [56] 乔云发, 苗淑杰, 陆欣春, 等. 东北风沙土区玉米田剖面土壤障碍因子分析[J]. 玉米科学, 2020, 28(3): 148-154+162.