

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21099

沼液配施化肥对土壤质量及作物生长的影响

刘 敏¹, 纪立东^{2*}, 王 锐¹, 司海丽²

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021;

2. 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 宁夏 银川 750002)

摘 要: 研究沼液配施化肥对土壤微生物特性、土壤养分及玉米生长的影响。结果表明: 沼液配施化肥及单施沼液均能降低土壤真菌数量和增加细菌、放线菌数量, 其中 45% 沼液配施 55% 化肥处理真菌数量较常规施肥显著降低 66%, 细菌、放线菌数量分别显著增加 160.3%、312.5%。沼液配施化肥可显著增加土壤脲酶、磷酸酶及蔗糖酶活性, 但过氧化氢酶含量变化不明显。施用沼液可有效促进土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷和速效钾含量的增加, 且差异显著。沼液配施化肥有效提高土壤微生物生物量 (SMB) 和有机碳 (SOC) 含量, 其中 45% 沼液配施 55% 化肥处理土壤微生物生物量碳 (SMBC), 微生物生物量氮 (SMBN)、微生物生物量磷 (SMBP) 和有机碳 (SOC) 含量较常规施肥分别显著增加 70.0%、195.6%、91.6% 和 71.6%。施用沼液降低了 SMBC/SMBN 值, 而土壤微生物熵 (qMB) 和土壤 SMBN/TN 值均增加, 且随着沼液用量的增加先增加后降低。相关性分析表明, 土壤 SMB 与土壤有机质、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾间均呈显著或极显著正相关关系, 脲酶、磷酸酶、蔗糖酶均与土壤养分呈显著或极显著正相关关系, 过氧化氢酶与土壤养分的相关性不显著。沼液配施化肥对玉米生长及光合作用有显著促进作用, 以 45% 沼液配施 55% 化肥处理最佳, 随着沼液配施比例的增加, 玉米产量先增加后降低, 45% 沼液配施 55% 化肥处理最高, 较常规施肥显著增加 40.9%。综合分析, 45% 沼液配施 55% 化肥可有效改善土壤结构, 显著提高土壤肥力, 从而促进作物生长, 增加产量, 可作为沼液配施化肥的最佳比例。

关键词: 沼液; 青贮玉米; 微生物生物量; 微生物熵; 相关性

沼液是畜禽粪便和农作物秸秆等经沼气工程发酵形成的, 沼液的消纳是当前生产亟须解决的问题^[1], 有研究指出, 沼液含氮、磷、钾、锌、铁等多种元素及有机质, 速效性强、养分可利用率高, 能有效改善土壤结构, 提高作物产量和品质^[2-3]。沼液中的细菌可有效调节作物的代谢, 促进植物生长, 抑制病虫害^[4]。李友强等^[5]研究表明沼液施用量在 45 t/hm² 以上能显著提高土壤氮、磷、钾含量, 分别比对照高 15.3% (全氮)、8.4% (有效磷)、44.4% (速效钾)、16.2% (缓效钾)。然而, 沼液过量施用会引起氮、磷流失等问题, 对环境造成二次污染以及抑制作物生长, 降低作物产量和品

质^[6]。吴树彪等^[7]认为, 沼液能提高作物产量及品质, 但并不是沼液用量越多越好。因此, 沼液的适宜用量以及与化肥配施的最佳比例是目前的研究热点之一。

土壤中微生物分布广, 数量大, 种类丰富, 参与土壤养分循环释放、动植物残体降解转化, 是衡量土壤肥力的重要指标^[8]。土壤酶能反映土壤生物活性和土壤生化反应强度^[9]。土壤微生物生物量 (SMB) 是土壤有机库的活性组分, 反映了土壤同化和矿化能力的大小, 参与土壤动植物残体的分解和矿化^[10]。杨子峰等^[11]研究发现, 施用沼液可增加西兰花种植前土壤细菌和放线菌数量, 促进西兰花收获后土壤脲酶和蔗糖酶活性的提高, 同时提高土壤有机质含量。周伟等^[12]研究发现, 施用沼液可以提高土壤微生物生物量碳 (SMBC)、氮 (SMBN) 的含量, 分别为 4.29% ~ 61.62%、6.08% ~ 76.10%。耿晨光等^[13]研究表明沼液灌溉能明显提高蔗糖酶和脲酶活性。目前, 对沼液施用的研究多见于林地, 少数为盆栽或者短期的田间观

收稿日期: 2021-02-20; 录用日期: 2021-05-07

基金项目: 宁夏农林科学院一二三产业融合发展科技创新示范项目 (YES16-0908); 宁夏回族自治区重点研发计划项目 (2019BCF01001); 宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目 (NGSB-2021-11-07)。

作者简介: 刘敏 (1998-), 硕士研究生, 研究方向为植物营养与农业资源利用。E-mail: 1152038835@qq.com。

通讯作者: 纪立东, E-mail: 940307275@qq.com。

测试验, 缺乏沼液施用后农田土壤性质的研究, 本试验以青贮玉米“东润 58”为材料, 研究沼液与化肥不同配施比例对土壤化学性状及土壤微生物、酶活等的影响, 从而为沼液还田应用和农牧结合的生态循环农业提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2020 年 4 月至 10 月在宁夏回族自治区吴忠市利通区孙家滩农业科技园区试验地进行。该区域海拔为 1125 m, 常年干旱少雨, 蒸发强烈, 年均降水量 260 mm 左右, 年均蒸发量 2000 mm, 昼夜温差大, 年均气温 11.2℃, 四季分明, 日照充足, 全年日照时数 3000 h, 无霜期 171 d, 是全国太阳辐射最充足的地区之一, 适宜农作物及瓜果生长。该地土壤为灰钙土, 土壤基础化学性质: 有机质 9.12 g/kg, 全氮 0.41 g/kg, 全磷 0.42 g/kg; 碱解氮 38.47 mg/kg, 有效磷 (P_2O_5) 24.1 mg/kg, 速效钾 (K_2O) 162 mg/kg。

1.2 试验材料

供试肥料: 沼液 ($N:P_2O_5:K_2O=0.16\%:0.24\%:0.04\%$, 宁夏金宇浩兴农牧业股份有限公司奶牛粪厌氧发酵 40 d 产物), 氮肥为颗粒尿素 ($N 46\%$, 中国石化化工集团有限公司生产), 磷肥为重过磷酸钙 ($P_2O_5 46\%$, 云南云天化股份有限公司生产), 钾肥为硫酸钾 ($K_2O 50\%$, 吴忠金牛化工集团生产)。

供试玉米品种为“东润 58”, 作物为一年一熟 (4 月中旬 ~ 9 月中旬)。

1.3 试验设计

试验以常规施肥 ($N:P_2O_5:K_2O=32:12:8$) 为施肥标准, 按照沼液中的总氮含量折算形成沼液灌溉量, 采用单因素多水平试验设计, 共设 7 个处理。CK: 不施肥 ($N:P_2O_5:K_2O=0:0:0$)。CF: 常规施肥 ($N:P_2O_5:K_2O=32:12:8$), 其中尿素 1043.4 t/hm², 基施 743.4 t/hm², 拔节期和孕穗期各追施 150 t/hm²。磷钾肥一次性基施, 其中重过磷酸钙 409.05 t/hm²、硫酸钾 240 t/hm²。T1: 15% 沼液 + 85% 化肥 ($N:P_2O_5:K_2O=32:17.4:8$)。T2: 30% 沼液 + 70% 化肥 ($N:P_2O_5:K_2O=32:22.8:8$)。T3: 45% 沼液 + 55% 化肥 ($N:P_2O_5:K_2O=32:28.2:8$)。T4: 60% 沼液 + 40% 化肥 ($N:P_2O_5:K_2O=32:33.6:8$)。T5: 100% 沼液 ($N:P_2O_5:K_2O=32:48:8$)。各处

理沼液全部追肥, 统一灌水量, 沼液灌溉处理不足供水量用黄河水补足; 氮肥部分基施, 其余部分在拔节期和大喇叭口期追施; 磷钾肥一次性基施。每个处理重复 3 次, 共计 21 个小区, 小区面积 $8 m \times 10 m=80 m^2$, 共计 1680 m²。每个小区安装水表计量水量, 田间其他统一管理操作。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤化学性质测定

玉米收获后, 多点混合法采集土壤 0 ~ 20 cm 土层土样, 新鲜土壤样品立即置于便携式冷藏箱带回实验室。土壤样品过 2 mm 筛后分成 2 份, 1 份土样在 4℃ 下保存, 用于测定土壤微生物生物量碳、氮、磷; 另 1 份土壤样品风干研磨后, 用于测定土壤基础化学性质。有机质采用重铬酸钾-硫酸亚铁滴定法测定; 全氮、全磷和全钾含量测定分别采用凯氏定氮法、钼锑抗比色法和火焰光度法; 碱解氮用碱解扩散法测定; 有效磷用钼锑抗比色法测定; 速效钾用火焰光度法测定^[14]。

1.4.2 土壤微生物区系特征及土壤酶活性测定

土壤 3 大类群微生物数量: 细菌、放线菌、真菌 3 大类群, 均采用稀释平板法分离计数, 结果以每克干土所含菌落数 (CFU) 表示, 细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基; 放线菌采用高氏 1 号培养基, 临用前每 300 mL 培养基加入灭菌的 3% 重铬酸钾溶液 1 mL, 真菌采用马丁氏孟加拉红培养基, 接种后, 细菌于 37℃ 培养 3 ~ 5 d, 放线菌于 28℃ 培养 5 ~ 7 d, 真菌于 28℃ 培养 3 ~ 5 d, 计数后计算每克干土中的微生物数量。

土壤酶活性: 土壤酶活性的测定根据关松荫^[15]的方法, 土壤蔗糖酶活性、脲酶活性、磷酸酶活性、过氧化氢酶活性分别采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法、靛酚蓝比色法、磷酸苯二钠比色法、高锰酸钾滴定法测定。

1.4.3 土壤微生物生物量碳、氮、磷的测定

土壤微生物生物量碳 (SMBC) 和土壤微生物生物量氮 (SMBN) 采用氯仿熏蒸-0.5 mol/L K_2SO_4 浸提法测定, 换算系数分别为 0.45 和 0.54; 土壤微生物生物量磷 (SMBP) 采用氯仿熏蒸-NaHCO₃ 提取-Pi 测定-外加 Pi 校正法测定^[16]。

1.4.4 作物相关指标测定

生长指标: 每个处理选 3 株用标签标记, 关键生育期测定植株株高及茎粗。

生理指标: 在作物关键生育期, 对不同处理作

物叶片, 采用叶绿素 SPAD-502 测定叶片叶绿素; 采用便携式光合作用测量系统 CI-340 测定净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率、胞间 CO_2 浓度、气孔导度等指标。

根系特性: 于作物收获期, 各处理选取长势一致、有代表性的 3 株植株, 采用完全采样法采集完整根系, 根系样本冲洗干净后, 用 WinRHIZO 根系图像分析系统分析计算根系长度、直径、面积、体积、根尖记数等指标。

产量: 于蜡熟期在每小区随机选取 $1.1 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ 的样方, 在距离地面 10 cm 处统一收割, 测量整株鲜重。

1.5 数据处理

试验数据以 Excel 2010 和 Origin 2018 整理和制图; SPSS 21.0 进行统计分析, 用 LSD 法进行显著性检验, 显著性水平 $P < 0.05$ ($n=5$); 采用 Pearson 法进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 沼液配施化肥对土壤质量的影响

2.1.1 沼液配施化肥对土壤微生物区系的影响

如表 1 所示, 与 CK 处理相比, 其他处理均显著降低了土壤真菌数量, 有效增加了土壤细菌和放线菌数量。施用沼液 T2、T3、T4、T5 处理较 CF 处理土壤真菌数量分别显著降低 73.4%、77.7%、66.0%、61.2%, T1 处理降低效果不显著。与 CF 处理相比, 各沼液处理土壤细菌数量有效增加, 其中 T2、T3、T4、T5 处理分别显著增加 124.7%、160.3%、131.5%、109.6%。T3、T4 较 CF 处理土壤放线菌数量分别显著增加 312.5%、182.5%, 而 T1、T2、T5 处理增加效果无显著差异。随着沼液施用量的增加, 土壤总菌数呈先增加后降低的变化趋势, T2、T3、T4、T5 较 CF 处理分别显著增加 121.4%、173.4%、134.1%、102.5%。

表 1 沼液配施化肥对土壤微生物区系的影响

处理	真菌 (10^4 cfu/g)	细菌 (10^7 cfu/g)	放线菌 (10^6 cfu/g)	总菌数 (10^6 cfu/g)
CK	$2.60 \pm 0.11\text{a}$	$0.69 \pm 0.10\text{b}$	$0.36 \pm 0.14\text{c}$	$7.25 \pm 0.93\text{c}$
CF	$1.88 \pm 0.26\text{b}$	$0.73 \pm 0.11\text{b}$	$0.40 \pm 0.02\text{c}$	$7.72 \pm 1.05\text{c}$
T1	$1.74 \pm 0.05\text{b}$	$1.12 \pm 0.04\text{ab}$	$0.54 \pm 0.10\text{c}$	$11.79 \pm 0.52\text{bc}$
T2	$0.50 \pm 0.06\text{c}$	$1.64 \pm 0.44\text{a}$	$1.13 \pm 0.13\text{b}$	$17.09 \pm 4.42\text{ab}$
T3	$0.42 \pm 0.03\text{c}$	$1.90 \pm 0.48\text{a}$	$1.65 \pm 0.21\text{a}$	$21.11 \pm 4.99\text{a}$
T4	$0.64 \pm 0.04\text{c}$	$1.69 \pm 0.14\text{a}$	$0.65 \pm 0.03\text{bc}$	$18.07 \pm 1.34\text{ab}$
T5	$0.73 \pm 0.05\text{c}$	$1.53 \pm 0.14\text{a}$	$0.63 \pm 0.13\text{bc}$	$15.63 \pm 1.52\text{ab}$

注: 数据后的小写字母不同分别表示 0.05 水平上差异显著。下同。

2.1.2 沼液配施化肥对土壤酶活性的影响

土壤酶是土壤新陈代谢的重要因素, 主要来自土壤生物代谢过程及动植物残体分解。如表 2 所示, T3 处理脲酶活性最高, 其次是 T2、T4 处理,

T2、T3、T4 较 CF 处理分别增加 38.0%、41.3%、35.9%, T1 较 CF 处理脲酶活性略有降低, 且无显著差异。各处理间过氧化氢酶含量无显著差异。与 CF 处理相比, T2、T3、T4、T5 处理土壤

表 2 沼液配施化肥对土壤酶活性的影响

处理	脲酶	过氧化氢酶	磷酸酶	蔗糖酶
CK	$0.88 \pm 0.07\text{b}$	$0.90 \pm 0.04\text{a}$	$0.93 \pm 0.01\text{b}$	$4.35 \pm 0.46\text{e}$
CF	$0.99 \pm 0.16\text{ab}$	$1.00 \pm 0.02\text{a}$	$1.00 \pm 0.12\text{b}$	$5.62 \pm 0.19\text{d}$
T1	$0.92 \pm 0.06\text{b}$	$0.95 \pm 0.03\text{a}$	$0.98 \pm 0.01\text{b}$	$5.72 \pm 0.51\text{d}$
T2	$1.27 \pm 0.07\text{a}$	$0.94 \pm 0.05\text{a}$	$1.27 \pm 0.11\text{a}$	$10.83 \pm 0.13\text{b}$
T3	$1.30 \pm 0.03\text{a}$	$0.91 \pm 0.03\text{a}$	$1.29 \pm 0.02\text{a}$	$13.91 \pm 0.12\text{a}$
T4	$1.25 \pm 0.14\text{a}$	$1.09 \pm 0.06\text{a}$	$1.17 \pm 0.04\text{ab}$	$9.32 \pm 0.17\text{c}$
T5	$1.02 \pm 0.08\text{ab}$	$0.90 \pm 0.01\text{a}$	$1.00 \pm 0.11\text{b}$	$6.13 \pm 0.47\text{d}$

磷酸酶活性均增加, 其中 T2、T3 处理达到显著差异, 分别较 CF 处理显著增加 27.0%、29.0%。与 CK 处理相比, CF 与沼液配施化肥处理蔗糖酶活性均显著增加, 且沼液配施化肥处理土壤蔗糖酶活性高于 CF 处理, 且除 T1、T5 处理外均达到显著差异, T2、T3、T4 处理较常规施肥处理土壤蔗糖酶活性分别显著增加 92.7%、147.5%、65.8%。

2.1.3 沼液配施化肥对土壤化学性质的影响

土壤养分含量随着沼液用量增加呈先增加后降低的变化趋势 (表 3)。与 CK 处理相比, 其他处理土壤养分均增加, CF 处理各养分除速效钾含量外, 均与 CK 处理间无显著差异。与 CF 处理相比,

施用沼液增加了土壤有机质含量, T2、T3、T4 处理间差异显著, 其中 T3 处理效果最佳, 较 CF 处理显著增加 71.5%。T1、T2、T3 较 CF 处理土壤全氮含量分别显著增加 38.1%、50%、40.5%。与 CF 处理相比, 沼液配施化肥处理土壤全磷含量均有增加, 其中 T3 较 CF 处理显著增加 24.2%。T2、T3、T4 处理土壤碱解氮含量均显著增加, 较 CF 处理分别显著增加 43.8%、65.6%、50.5%。沼液配施化肥处理土壤有效磷含量均得到增加, 其中 T3 较 CF 处理显著增加 96.9%。与 CF 处理相比, T2、T3、T4、T5 处理土壤速效钾含量分别显著增加 139%、162.6%、123.9%、118.7%, T1 处理增加效果不明显。

表 3 沼液配施化肥对土壤化学性质的影响

处理	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
CK	5.29 ± 0.15d	0.37 ± 0.02b	0.28 ± 0.02c	11.79 ± 1.11c	10.27 ± 1.27d	57.00 ± 11.36d
CF	5.76 ± 0.59d	0.42 ± 0.02b	0.33 ± 0.02bc	14.66 ± 1.76c	19.25 ± 6.04bcd	82.00 ± 5.51c
T1	6.16 ± 0.14d	0.58 ± 0.06a	0.34 ± 0.03bc	14.65 ± 3.34c	20.80 ± 5.51bcd	102.00 ± 3.06c
T2	7.80 ± 0.56b	0.63 ± 0.07a	0.37 ± 0.02ab	21.08 ± 1.74ab	23.83 ± 4.69bc	196.00 ± 4.16ab
T3	9.88 ± 0.49a	0.59 ± 0.06a	0.41 ± 0.03a	24.28 ± 1.59a	37.90 ± 5.14a	215.33 ± 6.89a
T4	7.51 ± 0.41bc	0.45 ± 0.01b	0.39 ± 0.01ab	22.07 ± 1.93ab	29.69 ± 1.90ab	183.67 ± 2.60b
T5	6.53 ± 0.18cd	0.41 ± 0.01b	0.37 ± 0.01ab	17.43 ± 0.45bc	16.06 ± 1.05cd	179.33 ± 9.21b

2.1.4 沼液配施化肥对土壤微生物生物量 (SMB)、有机碳 (SOC) 及其比值的影响

如表 4 所示, 与 CK 处理相比, 其他处理土壤 SMB 和 SOC 含量均显著增加。与 CF 处理相比, 沼液配施化肥土壤 SMB 和 SOC 含量均得到增加, 且 T2、T3、T4 处理具有显著差异。与 CF 处理相比, T2、T3、T4 处理土壤微生物生物量碳 (SMBC) 含量分别显著增加 53.3%、70.0%、26.2%; 土

壤微生物生物量氮 (SMBN) 含量分别显著增加 161.7%、195.6%、85.1%; 土壤微生物生物量磷 (SMBP) 含量分别显著增加 74.3%、91.6%、42.6%; SOC 含量分别显著增加 35.3%、71.6%、30.5%。

土壤微生物熵 (qMB)、SMBN/TN 和 SMBC/SMBN 可表征土壤 SOC 和氮素营养含量的变化规律和作物所需养分供应情况。qMB 是土壤中 SMBC 所占 SOC 的百分比, SMBN/TN 是土壤微生物生物

表 4 沼液配施化肥对 SMB、SOC 及其比值的影响

处理	SMBC (mg/kg)	SMBN (mg/kg)	SMBP (mg/kg)	SOC (g/kg)	SMBC/SMBN	qMB	SMBN/TN
CK	58.42 ± 1.31e	5.82 ± 0.48d	5.63 ± 0.24d	3.07 ± 0.09d	10.17 ± 0.80a	1.88 ± 0.03c	1.55 ± 0.12c
CF	79.96 ± 5.38d	8.43 ± 1.08cd	5.84 ± 0.59d	3.34 ± 0.34d	9.64 ± 0.64ab	1.88 ± 0.08c	1.95 ± 0.33bc
T1	85.07 ± 4.00d	10.01 ± 1.12c	7.09 ± 0.49cd	3.57 ± 0.08d	8.63 ± 0.60abc	2.34 ± 0.02bc	1.91 ± 0.48bc
T2	122.56 ± 1.64b	22.06 ± 1.79a	10.18 ± 0.99ab	4.52 ± 0.32b	5.64 ± 0.53d	2.87 ± 0.22ab	3.81 ± 0.96a
T3	135.64 ± 0.33a	24.92 ± 0.89a	11.19 ± 0.01a	5.73 ± 0.29a	5.46 ± 0.20d	3.04 ± 0.28a	4.71 ± 0.56a
T4	100.88 ± 3.27c	15.60 ± 1.43b	8.33 ± 1.14bc	4.36 ± 0.24bc	6.61 ± 0.81cd	2.27 ± 0.25c	3.52 ± 0.43ab
T5	85.54 ± 2.70d	11.67 ± 1.46c	6.68 ± 0.61cd	3.79 ± 0.11cd	7.62 ± 1.18bcd	2.24 ± 0.18c	2.98 ± 0.46abc

量氮和土壤全氮的比值, SMBC/SMBN 即土壤微生物生物量碳氮比, 由表 4 可知, 与 CK 处理相比, 其他处理 SMBC/SMBN 均降低, 其中 CF、T1 与 CK 处理间无显著差异, T2、T3、T4 较 CF 处理的 SMBC/SMBN 分别显著降低。qMB 随沼液用量的增加呈先增加后降低的变化趋势, CF 与 CK 处理间无显著差异, T2、T3 较 CF 处理分别显著增加 52.7%、61.7%。T1、T4、T5 处理的 qMB 高于 CF, 但差异不显著。SMBN/TN 的变化与 qMB 基本一致, T2、T3 较 CF 处理分别显著增加 95.4%、141.5%, T1 与 CF 处理相比略有降低, 但无显著差异。

2.1.5 土壤养分与微生物生物量及酶活性的相关性分析。

如表 5 所示, 土壤 SMBC、SMBN 和 SMBP 与土壤有机质、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾间均呈显著或极显著的正相关关系, 而全氮与土壤 SMBC 及 SMBP 有显著的相关关系; 脲酶与土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾间呈极显著的正相关关系, 过氧化氢酶与有机质、碱解氮呈负相关, 与全氮、全磷、有效磷、速效钾间呈正相关, 但相关性均不显著。磷酸酶、蔗糖酶均与土壤养分呈显著或极显著的正相关关系。

表 5 土壤养分与微生物生物量及酶活性的相关关系

指标	有机质	全氮	全磷	碱解氮	有效磷	速效钾
SMBC	0.95**	0.78*	0.87*	0.93**	0.88**	0.87**
SMBN	0.95**	0.75	0.84*	0.93**	0.84*	0.89**
SMBP	0.95**	0.80*	0.80*	0.90**	0.85*	0.84*
指标	有机质	全氮	全磷	碱解氮	有效磷	速效钾
脲酶	0.77**	0.54**	0.78**	0.92**	0.75**	0.62**
过氧化氢酶	-0.09	0.18	0.02	-0.07	0.06	0.10
磷酸酶	0.76**	0.35*	0.67**	0.77**	0.69**	0.48*
蔗糖酶	0.56**	0.54**	0.72**	0.73**	0.77**	0.47*

注: *, ** 分别表示在 0.05、0.01 水平上差异显著。

2.2 沼液配施化肥对玉米生长发育及产量的影响

2.2.1 沼液配施化肥对玉米生长的影响

如表 6 所示, 沼液配施化肥处理玉米株高较 CF 均增加, 且 T1、T2、T3 处理差异显著, 分别显著增加 5.9%、15.5%、23.8%, T4、T5 处理与 CF 处理无显著差异; 与 CF 处理相比, T2、T3 处理茎粗分别显著增加 11.8%、22.8%, T1、T4、T5 处理

无显著差异。与 CK 处理相比, 施肥处理玉米总根长、总根表面积、总根体积及根系平均直径均显著增加。与 CF 处理相比, 配施沼液处理均增加了玉米总根长、总根表面积、总根体积, 但无显著差异 (除 T3 处理); 常规施肥与沼液配施化肥处理玉米根系平均直径无显著差异。

表 6 沼液配施化肥对玉米生长的影响

处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	总根长 (mm)	总根表面积 (cm ²)	总根体积 (cm ³)	根系平均直径 (mm)
CK	207.23 ± 1.67e	23.97 ± 0.96d	698 ± 58c	234 ± 245b	7.85 ± 0.70b	0.91 ± 0.05b
CF	280.22 ± 3.58d	30.45 ± 1.30c	1079 ± 188b	337 ± 10b	8.48 ± 0.48b	1.01 ± 0.07ab
T1	296.79 ± 6.72c	30.60 ± 1.24c	1188 ± 94ab	340 ± 17b	9.11 ± 1.95b	0.99 ± 0.08ab
T2	323.58 ± 3.55b	34.04 ± 0.51b	1252 ± 34ab	379 ± 10b	9.17 ± 0.47b	1.09 ± 0.08ab
T3	346.89 ± 2.10a	37.40 ± 0.37a	1447 ± 124a	447 ± 66a	14.09 ± 2.88a	1.21 ± 0.06a
T4	289.68 ± 3.39cd	32.14 ± 0.52bc	1248 ± 163ab	375 ± 62b	10.71 ± 0.97b	1.14 ± 0.08ab
T5	286.78 ± 3.79cd	31.87 ± 0.89bc	1102 ± 89ab	382 ± 25b	9.35 ± 2.44b	1.09 ± 0.09ab

2.2.2 沼液配施化肥对玉米叶片光合特性的影响

如表 7 所示, 与 CF 处理相比, 除 T5 处理之外, T1、T2、T3、T4 处理均显著降低了玉米胞

间 CO₂ 浓度, 分别降低了 18.7%、19.5%、28.5%、13.7%; 沼液配施化肥处理 (除 T2 处理) 气孔导度均高于常规施肥, 且 T3 处理差异显著, 较 CF 显

著增加 28.6%；净光合速率各处理间无显著差异。与 CF 处理相比，T1、T5 处理蒸腾速率显著增加 15.9%、18.6%，其他处理无显著差异。各处理水分利用效率无明显规律，T3 处理最高，但与常规

施肥无显著差异。沼液与化肥配施增加了玉米叶片的叶绿素含量，其中 T2、T3、T4、T5 处理具有显著差异，分别较常规施肥显著增加 10.8%、16.3%、13.3%、10.7%。

表 7 沼液配施化肥对玉米光合作用的影响

处理	胞间 CO ₂ 浓度 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	气孔导度 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	蒸腾速率 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	水分利用效率 (%)	叶绿素含量
CK	182.20 $\pm$ 7.34a	0.38 $\pm$ 0.01d	35.61 $\pm$ 1.97a	7.58 $\pm$ 0.31ab	4.69 $\pm$ 0.12ab	38.70 $\pm$ 1.78c
CF	186.86 $\pm$ 7.32a	0.42 $\pm$ 0.02bcd	35.02 $\pm$ 1.24a	6.92 $\pm$ 0.21b	5.06 $\pm$ 0.13a	39.20 $\pm$ 1.22c
T1	152.00 $\pm$ 4.87c	0.51 $\pm$ 0.06ab	38.45 $\pm$ 0.94a	8.02 $\pm$ 0.35a	4.81 $\pm$ 0.19ab	40.66 $\pm$ 0.55bc
T2	150.43 $\pm$ 4.33c	0.41 $\pm$ 0.01cd	34.37 $\pm$ 1.09a	7.47 $\pm$ 0.23ab	4.60 $\pm$ 0.04b	43.44 $\pm$ 0.70ab
T3	133.56 $\pm$ 2.85d	0.54 $\pm$ 0.03a	38.79 $\pm$ 1.61a	7.57 $\pm$ 0.17ab	5.12 $\pm$ 0.16a	45.58 $\pm$ 0.73a
T4	161.29 $\pm$ 4.05bc	0.48 $\pm$ 0.03abc	36.36 $\pm$ 0.62a	7.55 $\pm$ 0.18ab	4.83 $\pm$ 0.14ab	44.43 $\pm$ 1.02a
T5	173.33 $\pm$ 2.19ab	0.45 $\pm$ 0.01bcd	37.93 $\pm$ 1.49a	8.21 $\pm$ 0.10a	4.62 $\pm$ 0.15b	43.38 $\pm$ 0.70ab

2.2.3 沼液配施化肥对玉米产量的影响

如图 1 所示，与 CK 处理相比，常规施肥与沼液配施化肥处理均增加了玉米产量，且除 T5 处理外，均达显著差异。随着沼液配施比例的增加，玉米产量呈先升高后降低的趋势，T3 处理产量最高，为 66.93 t/hm²，其次是 T2 处理，与 CF 相比，T2、T3 处理产量显著增加，分别增加 28.2%、40.9%，T1、T4、T5 处理与常规施肥无显著差异。

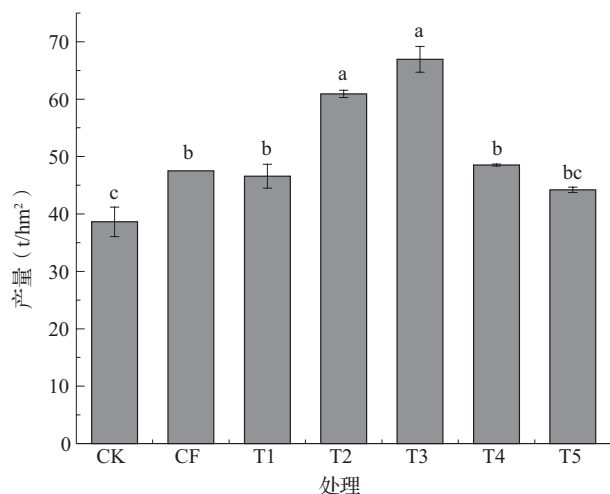


图 1 沼液配施化肥对玉米产量的影响

注：图中不同小写字母表示 0.05 水平上差异显著。

3 讨论

3.1 沼液配施化肥对土壤质量的影响

土壤微生物参与土壤中的多种生化反应，在土壤生态系统中发挥着重要作用^[17]。杨子峰等^[11]研

究表明，西兰花种植前施用沼液可使土壤细菌和放线菌数量分别显著增加 91.16% 和 79.09%，真菌数量显著减少 55.03%。土壤真菌数量增加，会导致细菌/真菌比值的降低，从而使植物发生多种病害，使土壤土传病害增加^[18-19]，本研究结果表明，沼液配施化肥可增加土壤微生物数量，提高土壤肥力，这是因为沼液中含有氮、磷、钾和多种微量元素以及大量葡萄糖、氨基酸、纤维素等营养物质，为土壤微生物生存提供了能量和养料^[11]，也促进了微生物的生长发育，促使土壤微生物数量增加。且沼液本身含有大量微生物，直接增加土壤微生物数量。

土壤酶参与分解作物和微生物残体并转化成可供作物吸收利用的养分。万海文等^[20]研究表明，追施沼液可有效提高小麦耕层土壤蔗糖酶活性，土壤碱性磷酸酶、脲酶活性随沼液总施用量的增加而增大。本试验研究结果显示，施肥处理均增加了土壤酶活性，且沼液配施化肥效果更好，T3 处理最佳，其脲酶、磷酸酶、蔗糖酶活性较常规施肥分别显著增加 41.3%、29.0%、147.5%，说明增施沼液比单施化肥更有利于土壤酶活性的增加，同时达到减施化肥的效果。耿晨光等^[13]研究发现，沼液在园林地的消解利用中增加了土壤脲酶和蔗糖酶含量，但过氧化氢酶含量未出现较大变化，本研究结果也显示，施用沼液对过氧化氢酶的含量影响不大，过氧化氢酶活性可能受土壤质地、施肥方式和施肥用量等多方面因素的影响。

唐华等^[21]研究表明土壤全氮、全磷、有机

质含量随沼液灌溉量的增加呈增加趋势。崔宇星等^[22]研究结果显示,施用沼液能提高土壤有机质含量,且提高幅度与沼液用量呈正相关关系。本研究施用沼液后土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷和速效钾含量均显著增加,这是因为增施沼液为微生物的生长创造了良好的生长环境,而土壤微生物活动可有效改善土壤结构,进而增加土壤养分,且沼液中含有的腐植酸和纤维素等物质,对增加有机质、维护土壤结构有直接的促进作用^[23]。

本研究中,沼液配施化肥处理的 SMB 和 SOC 含量均增加,其中 T2、T3、T4 处理差异显著,这是因为沼液的施入为土壤微生物的活动提供充足的碳源和氮源,增加了微生物数量,从而有效提高土壤微生物生物量碳、氮的含量。土壤 SMBC/SMBN 可以反映土壤微生物的区系构成,一般情况下,真菌的 SMBC/SMBN 为 10,细菌为 5,放线菌为 6^[24]。本研究中,施用沼液均显著降低 SMBC/SMBN,这与周伟等^[12]的研究结果“沼液的施入明显降低了土壤微生物量碳氮比”一致。T3、T4 处理的 SMBC/SMBN 在 5 ~ 6 之间,可见,施入适量沼液能使土壤由高害的真菌型向低害的细菌型转化,从而改变土壤微生物群落结构。土壤微生物熵(qMB)值越大,土壤有机碳周转越快,其范围为 1% ~ 4%^[25]。本研究中 qMB 范围介于 1.88% ~ 3.04% 之间,且 qMB 随着沼液用量的增加呈先增加后减少的趋势,其中 T2、T3 处理较常规施肥分别显著增加 52.7%、61.7%,这可能是适量施用沼液有效增加了生物产量,改善了土壤环境,有利于土壤碳的“源”与“汇”,进而促使土壤有机碳周转速率增加。SMBN/TN 可作为土壤氮素有效性和土壤氮素供应能力的重要评价指标,范围在 2% ~ 6% 之间^[26]。本研究中, SMBN/TN 值随着沼液配施比例的增加先增加后减少,说明配施沼液可以增加土壤氮素的有效性和氮素供应能力。

土壤养分与土壤微生物特性之间有显著的相关关系^[27]。李娟等^[28]研究表明,脲酶与土壤养分之间呈极显著正相关,而过氧化氢酶与土壤各养分因子之间却无明显的相关性。本研究结果显示,土壤 SMBC、SMBP 及脲酶、磷酸酶、蔗糖酶活性与土壤养分之间均呈现显著或极显著的正相关关系。过氧化氢酶与有机质、碱解氮呈负相关,与全氮、全磷、有效磷、速效钾之间相关性均不显著,这可能与沼液的性质和土壤质地有关,也可能是过氧化氢

酶的辅基遭到了肥料中阴离子的封阻^[29]。

3.2 沼液配施化肥对玉米生长及产量的影响

沼液中含有丰富的氨基酸、维生素以及各种生长素等,能提供植物生长发育所需的营养,赵金华等^[30]研究显示,70% 沼液配施 30% 化肥,西瓜植株的株高、茎粗、叶片数显著高于其他处理。本研究中,T2、T3 处理玉米株高、茎粗较常规施肥显著增加。T3 处理玉米总根长、总根表面积、总根体积较常规施肥显著增加,这是因为沼液配施化肥改善了玉米根部生长环境,促使根部生长点快速发育,增强根的活力。

本研究表明,与常规施肥相比,T1、T2、T3、T4 处理玉米胞间 CO₂ 浓度显著降低,T3 处理气孔导度显著增加 28.6%,T1、T5 处理蒸腾速率分别显著增加 15.9%、18.6%,由此可见,沼液与化肥配施能显著促进玉米叶片光合作用。叶绿素在植物光合作用中吸收光能并参与原初反应,其含量决定了光合作用的效率^[31-32]。沼液配施化肥增加了玉米叶片的叶绿素含量,其中 T2、T3、T4、T5 处理分别较常规施肥显著增加 10.8%、16.3%、13.3%、10.7%。这是因为沼液与化肥配施,降低了养分对叶绿素合成的胁迫作用,同时沼液中含有与叶绿素合成有关的钙、镁、铜、铁、锌等矿质元素,可显著降低植物光合午休现象,降低叶绿素的降解速度,为株高的增加提供了充足的光合产物^[33-34]。

沼液与化肥配施能提高作物产量,具有常规施肥和单施沼液无法比拟的优势。本试验结果表明,T2、T3 处理产量较常规施肥分别显著增加 28.2%、40.9%,这是因为沼液中含有多种作物所需的水溶性营养成分,养分可利用率高,另一方面沼液与化肥配施可以改善土壤结构,提高土壤肥力,改善叶片光合性能,从而协调营养生长和生殖生长,有效地提高玉米产量。

李金澄等^[35]研究表明沼液过量施用土壤存在铜、锌污染以及大肠杆菌污染的风险。这与本研究结果“随着沼液用量增加,土壤微生物区系、酶活性、微生物生物量及作物产量等均呈先升高后降低的变化趋势”相似,说明适量沼液配施可提高土壤肥力,改善土壤微生物特性,从而促进作物生长,产量增加,但沼液过量施用则会产生抑制或毒害作用。

4 结论

(1) 施用沼液能显著增加土壤有机质、全

氮、全磷、碱解氮、有效磷和速效钾含量,与常规施肥相比,T3处理提高土壤养分含量效果最佳,分别增加71.5%、40.5%、24.2%、65.6%、96.9%和162.6%。

(2) 沼液配施化肥可增加土壤微生物数量,与CK处理相比,各处理均能有效降低土壤真菌数量,增加土壤细菌和放线菌数量及土壤酶活性,T3处理效果最好。沼液配施化肥可有效增加土壤SMB和SOC含量,与常规施肥相比,T3处理土壤SMBC、SMBN、SMBP和SOC含量分别显著增加70.0%、195.6%、91.6%和71.6%。同时,沼液能有效降低土壤SMBC/SMBN,增加土壤qMB和SMBN/TN,以T3处理效果最佳。

(3) 相关性分析表明,土壤SMBC、SMBN和SMBP与土壤有机质、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾之间均呈显著或极显著的正相关关系,脲酶、磷酸酶、蔗糖酶均与土壤养分呈显著或极显著的正相关关系。过氧化氢酶与有机质、碱解氮呈负相关,与全氮、全磷、有效磷、速效钾之间呈正相关,但相关性均不显著。

(4) 沼液配施化肥显著促进了玉米的生长发育,与常规施肥相比,T3处理株高、茎粗分别显著增加23.8%、22.8%,总根长、总根表面积、总根体积分别显著增加34.1%、32.6%、66.2%,胞间CO₂浓度显著降低28.5%,气孔导度、叶绿素含量分别显著增加28.6%、16.3%;玉米产量随着沼液配施比例的增加先升高后降低,T3处理最高,较常规施肥显著增加40.9%。

以45%沼液配施55%化肥处理效果最佳,可有效改善土壤结构,提高土壤肥力,进而促进作物生长,产量增加。

参考文献:

- [1] 宋朝霞,孙普,徐荣敏.沼渣沼液的性质及应用[J].农技服务,2016,33(2):5-7.
- [2] 孙启玉,江霞.沼渣沼液在大棚黄瓜上的应用[J].农业知识(瓜果菜),2014(5):38-39.
- [3] 艾俊国.沼肥与化肥不同配比对春玉米生长发育、产量及品质的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2014.
- [4] Manyi-Loh C, Mamphweli S, Meyer E, et al. An overview of the control of bacterial pathogens in cattle manure[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, 13(9): 843.
- [5] 李友强,盛康,彭思姣,等.沼液施用量对小麦产量及土壤理化性质的影响[J].中国农学通报,2014,30(12):181-186.
- [6] Möller K. Effects of anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions, and soil biological activity[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(3): 1021-1041.
- [7] 吴树彪,崔畅,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):118-125,179.
- [8] 单文俊,王庆贵,闫国永,等.基于土壤微生物的碳氮互作效应综述[J].中国农学通报,2016,32(23):65-71.
- [9] Finkenbein P, Kretschmer K, Kuka K, et al. Soil enzyme activities as bioindicators for substrate quality in revegetation of a subtropical coal mining dump[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 56: 87-89.
- [10] Niemeyer J C, Lolata G B, de Carvalho G M, et al. Microbial indicators of soil health as tools for ecological risk assessment of a metal contaminated site in Brazil[J]. Applied Soil Ecology, 2012, 59: 96-105.
- [11] 杨子峰,陈伟强,王伟,等.沼液施用对西兰花耕作土壤微生物特性的影响[J].中国农学通报,2017,33(29):112-115.
- [12] 周伟,徐莉,俞元春,等.沼液施肥对杨树林地土壤微生物量碳氮的影响[J].林业科技开发,2015,29(1):49-51.
- [13] 耿晨光,段婧婧,李汛,等.沼液的园林地消解处理利用及其对土壤微生物碳、氮与酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(10):1965-1971.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析(第三版)[M].北京:中国农业出版社,2007.
- [15] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [16] 张利青,彭晚霞,宋同清,等.云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量C、N、P空间分布[J].生态学报,2012,32(7):2056-2065.
- [17] Pascual J A, Garcia C, Hernandez T. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 1877-1883.
- [18] 邹莉,袁晓颖,李玲,等.连作对大豆根部土壤微生物的影响研究[J].微生物学杂志,2005(2):27-30.
- [19] 张全国,杨群发,李随亮,等.猪粪沼液中铵态氮含量的影响因素实验研究[J].农业工程学报,2005,21(6):114-117.
- [20] 万海文,贾亮亮,赵京奇,等.追施沼液对小麦光合特性及土壤酶活性和养分含量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(1):35-44.
- [21] 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].草业学报,2011,19(6):939-942.
- [22] 崔宇星, Muhammad A, 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.
- [23] 周阳,黄旭,赵海燕,等.麦秸秆和沼液配施对水稻苗期

- 生长和土壤微生物的调控 [J]. 土壤学报, 2020, 57 (2): 479-489.
- [24] Lovell R D, Jarvis S C, Bardgett R D. Soil microbial biomass and activity in long-term grassland: Effects of management changes [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, 27: 969-975.
- [25] Anderson T H, Domsch K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1989, 21: 471-479.
- [26] 赵睿宇, 李正才, 王斌, 等. 毛竹林地覆盖和翻耕对土壤酶活性及土壤养分含量的影响 [J]. 林业科学研究, 2019, 32 (5): 67-73.
- [27] 闫丽娟, 王海燕, 李广, 等. 黄土丘陵区 4 种典型植被对土壤养分及酶活性的影响 [J]. 水土保持学报, 2019, 33 (5): 190-196, 204.
- [28] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响 [J]. 中国农业科学, 2008, 41 (1): 144-152.
- [29] 周礼恺. 土壤酶学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [30] 赵金华, 蒋卫杰, 余宏军. 沼液、化肥配施对西瓜产量和品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2010 (4): 53-56.
- [31] 王忠. 植物生理学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [32] 赵曙光. 沼肥在蔬菜上应用效果及施用技术规程研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [33] 李合生. 现代植物生理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [34] 李清莹, 文珊娜, 姜清彬, 等. 不同营养元素缺乏对火力楠幼苗生长的影响 [J]. 生态学杂志, 2017, 36 (3): 664-669.
- [35] 李金澄, 孙吉翠, 杨丽, 等. 沼液过量还田对土壤环境容量及玉米生长的影响 [J]. 河南农业科学, 2021, 50 (5): 49-56.

Effects of biogas slurry combined with chemical fertilizer on soil quality and crop growth

LIU Min¹, JI Li-dong^{2*}, WANG Rui¹, SI Hai-li² (1. Agricultural College of Ningxia University, Yinchuan Ningxia 750021; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan Ningxia 750002)

Abstract: The effects of biogas slurry combined with chemical fertilizer on soil microbial characteristics, soil nutrients and maize growth were studied. The results showed that biogas slurry combined with chemical fertilizer and biogas slurry alone reduced the number of soil fungi and increase the number of bacteria and actinomycetes. The number of fungi in 45% biogas slurry combined with 55% chemical fertilizer treatment was significantly lower than that in conventional fertilization by 66%, and the number of bacteria and actinomycetes was significantly increased by 160.3% and 312.5%, respectively. Biogas slurry combined with chemical fertilizer significantly increased soil urease, phosphatase and invertase activities, but the change of catalase content was not obvious. The application of biogas slurry effectively promoted the increase of soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus and available potassium, and the differences were significant. Soil microbial biomass (SMB) and organic carbon (SOC) were effectively increased by biogas slurry combined with chemical fertilizer. Compared with conventional fertilization, 45% biogas slurry combined with 55% chemical fertilizer significantly increased soil microbial biomass carbon (SMBC), microbial biomass nitrogen (SMBN), microbial biomass phosphorus (SMBP) and organic carbon (SOC) by 70.0%, 195.6%, 91.6% and 71.6%, respectively. The application of biogas slurry decreased the MBC/MBN ratio, while soil microbial entropy (qMB) and soil MBN/TN value increased, and increased first and then decreased with the increase of biogas slurry dosage. Correlation analysis showed that soil SMB was significantly or extremely significantly positively correlated with soil organic matter, total phosphorus, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus and available potassium. Urease, phosphatase and sucrase were significantly or extremely significantly positively correlated with soil nutrients, and catalase was not significantly correlated with soil nutrients. The application of biogas slurry combined with chemical fertilizer significantly promoted the growth and photosynthesis of maize, and the treatment of 45% biogas slurry combined with 55% chemical fertilizer was the best. With the increase of biogas slurry proportion, the yield of maize increased first and then decreased. The treatment of 45% biogas slurry combined with 55% chemical fertilizer was the highest, which was significantly increased by 40.9%, compared with conventional fertilization. Comprehensive analysis showed that 45% biogas slurry combined with 55% chemical fertilizer could effectively improve soil structure, significantly improve soil fertility, thereby promoting crop growth and increasing yield, which could be used as the optimal proportion of biogas slurry combined with chemical fertilizer.

Key words: biogas slurry; silage maize; microbial biomass; microbial entropy; relevance