

沼液与化肥配施对水稻生长及土壤质量的影响

魏飞¹, 李永杰², 孙琪玮², 徐晓燕¹, 王小波^{1*}

(1.天津农学院 农学与资源环境学院, 天津 300392;

2.天津农垦渤海农业集团有限公司, 天津 301800)

摘要:【目的】探究水稻种植中沼液和化肥配合高效施肥模式。【方法】通过连续2 a 大田试验, 以传统纯化肥施肥处理为对照(CK), 设置了2种沼液用量(150、300 m³/hm²)、3种化肥用量(传统化肥用量的25%、50%、75%)、2种追肥次数(2次、3次), 共计13个处理, 研究不同沼液与化肥配施对水稻生长和土壤理化性质的影响。

【结果】①2021年T7(300 m³/hm²沼液+25%化肥+3次追肥)处理的产量最高, 达到了9.88 t/hm², 2022年T3(150 m³/hm²沼液+50%化肥+3次追肥)处理产量最高, 达到了10.4 t/hm², 2 a中都是T2(150 m³/hm²沼液+25%化肥+2次追肥)处理产量最低, 300 m³/hm²沼液配合50%、75%化肥(T9、T10、T11、T12)施肥量都降低了稻米的产量和食味值。②相同施肥处理中, 3次追肥处理对水稻的增产效果好于2次追肥处理。③施用沼液处理土壤有机质量提高了7.1%~52.4%, 随着沼液和化肥用量的增加土壤碱解氮量、有效磷量、速效钾量、磷酸酶活性、EC值提高, 而对土壤pH值没有显著影响。各沼液处理中, 150 m³/hm²+25%化肥(T1、T2)处理土壤的碱解氮量、有效磷量、速效钾量、EC值都低于CK, 而300 m³/hm²沼液+50%化肥(T9、T10)和300 m³/hm²沼液+75%化肥(T11、T12)处理土壤EC值、碱解氮量、有效磷量、速效钾量都显著高于CK。④2021—2022年, 150 m³/hm²沼液+75%化肥处理(T5、T6)、300 m³/hm²沼液用量(T7、T8、T9、T10、T11、T12)处理土壤磷酸酶活性都显著的高于CK, 提高了10.6%~42.4%。

【结论】适量沼液和化肥配施可提高水稻产量, 提高土壤养分和酶活性, 而少量或过量施用沼液和化肥则降低了水稻产量, 综合2 a的试验结果推荐150 m³/hm²沼液+50%~75%化肥+3次追肥为最佳沼液化肥配合施用模式。

关键词: 水稻; 沼液; 化肥; 产量; 土壤养分

中图分类号: S5

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023042

OSID:



魏飞, 李永杰, 孙琪玮, 等. 沼液与化肥配施对水稻生长及土壤质量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 48-54.

WEI Fei, LI Yongjie, SUN Qiwei, et al. Combined Effects of Biogas Slurry Application and Chemical Fertilization on Rice Growth and Soil Quality[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 48-54.

0 引言

【研究意义】随着规模化畜禽养殖场、沼气工程的发展, 沼液产量日益递增, 目前年产量已超过16亿t。大量沼液如不能合理应用, 一方面会造成环境污染, 另一方面则引起资源浪费, 同时也制约禽畜养殖业和沼气工程的发展^[1]。沼液富含氮磷钾等植物生长需要的营养元素, 其中氮素以氨态氮为主, 还含有有机质、氨基酸、维生素等多种活性物质和锌、铁、铜、锰、钙等中微量元素, 是一种良好的土壤改良剂和有机肥料^[2]。因此研究沼液合理还田利用, 可使养殖业粪污处理更加效率化和低廉化^[3], 同时减少农业生产中化肥施用, 促进我国农业种养结合循环发展。

【研究进展】欧盟多国采取沼液贮存后作为肥料利用, 实现沼液的田间消纳利用^[4], 澳大利亚不但将沼液用于农田施肥, 而且还施用于草地^[5]。我国也有将沼液还田用于种植大麦、水稻、油菜等作物, 侯福银等^[6]研究发现, 沼液施用量为612 t/hm²时, 水稻的产量和品质最好, 沼液施用量超过816 t/hm²时, 水稻产量下降。黄翔等^[7]研究发现, 沼液施用可提高水稻产量, 施用量300 m³/hm²时水稻产量最高。李金澄等^[8]研究表明, 沼液用量为450 t/hm²时玉米产量最高, 过量施用产量降低。不同作物-土壤系统对沼液的消纳、承载能力不同^[9], 即使同一种作物因地域气候不同对沼液的最佳用量也不同, 不合理施用会降低土壤质量, 影响作物生长^[10]。水稻作为我国最主要的粮食作物之一, 2022年全国早稻种植面积为475.51万hm²^[11], 将沼液安全合理还田用于水稻种植可消纳大量的沼液^[12], 促进沼液资源化利用。【切入点】沼液还田种植水稻在南方研究较多, 在北方结合当地的传统施肥模式明确最佳的沼液与化肥配施模式的研究还鲜有报道。【拟解决的关键问题】为此, 2021—2022

收稿日期: 2023-02-10 修回日期: 2023-04-07 网络出版日期: 2023-05-15

基金项目: 天津市科技计划项目(21ZYCGSN00090, 22ZYCGSN00690);

天津现代农业技术体系创新项目(ITPRS2021010)

作者简介: 魏飞(1995-), 男。硕士研究生, 主要从事农业废弃物资源化利用与土壤生态环境的研究。E-mail: 1441156121@qq.com

通信作者: 王小波(1981-), 男。高级实验师, 硕士, 主要从事农业废弃物资源化利用与土壤环境研究。E-mail: wangxiaobo1111@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

年进行大田试验,研究不同沼液配合化肥施用对当地水稻生长及土壤质量的影响,以期沼液在本地区水稻种植上的合理应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在天津市宝坻区天津农垦小站稻产业发展有限公司的水稻田(117.55 E, 39.69 N)进行。试验稻田在 2010—2020 年每年种植 1 茬水稻,但并未施用沼液。每个试验区均有单独进水口以及排水口,为防止串肥各区用聚苯乙烯塑料薄膜包裹田埂隔离。试验田土壤为潮土,土质为轻质黏土。试验田土壤有机质量为 24.1 g/kg,碱解氮量、有效磷量、速效钾量分别为 97.08、18.03、231.78 mg/kg, pH 值为 7.91, EC 值为 465.2 μ S/cm。

试验品种为津原 89,常规粳稻品种,由天津市原种场选育,该品种产量高、抗病性强,为天津主栽品种。试验沼液采集自天津市宝坻区某奶牛场。2021 年试验沼液理化性质:总氮量、总磷量、总钾量分别为 1 445.05、244.17、939.26 mg/L, pH 值为 7.20、EC 值为 11.89 mS/cm,总固体悬浮物(TS)为 15.95 g/L, COD 为 12 780.60 mg/L。2022 年试验沼液理化性质:总氮量、总磷量、总钾量分别为 1 547.58、295.73、1 028.63 mg/L, pH 值为 7.21, EC 值为 11.32 mS/cm,总固体悬浮物(TS)为 15.90 g/L, COD 为 14 593.4 mg/L。

1.2 试验设计

试验于 2021 年 5 月—2022 年 10 月进行,小区面积为 33 m $\times$ 40 m,以当地传统全化肥处理为对照(CK),设置了 2 种沼液用量(150、300 m³/hm²)、3 种化肥用量(全化肥处理用量的 25%、50%、75%)、2 种追肥次数(2 次、3 次),具体为:T1(150 m³/hm²+25%化肥+3 次追肥)、T2(150 m³/hm²+25%化肥+2 次追肥)、T3(150 m³/hm²+50%化肥+3 次追肥)、T4(150 m³/hm²+50%化肥+2 次追肥)、T5(150 m³/hm²+75%化肥+3 次追肥)、T6(150 m³/hm²+75%化肥+2 次追肥)、T7(300 m³/hm²+25%化肥+3 次追肥)、T8(300 m³/hm²+25%化肥+2 次追肥)、T9(300 m³/hm²+50%化肥+3 次追肥)、T10(300 m³/hm²+50%化肥+2 次追肥)、T11(300 m³/hm²+75%化肥+3 次追肥)、T12(300 m³/hm²+75%化肥+2 次追肥),共计 13 个处理。具体施肥方案见表 1。试验沼液做基肥,在水稻幼苗移栽之前 30 d 采用运输车 and 喷头均匀喷洒施入,施入沼液后翻耕,翻耕深度为 20 cm,基肥复合肥 26-10-12(复合肥含 N 量 26%,含 P₂O₅ 量 10%,含

K₂O 量 12%)在水稻植株移栽之前 5 d 施加。试验 2 次追肥分别作为分蘖肥、穗肥施用,试验 3 次追肥分别作为分蘖肥、穗肥、粒肥施用。3 次追肥处理中第 1 次、第 2 次追施尿素,第 3 次追施复合肥 18-18-18(复合肥含 N 量 18%,含 P₂O₅ 量 18%,含 K₂O 量 18%),2 次追肥处理每次都追施尿素+复合肥 18-18-18。根据水稻植株的生长发育时期以及植株生长状况施肥。2021 年机器插秧种植时间为 5 月 17 日,收获时间为 10 月 27 日;2022 年机器插秧种植时间为 5 月 15 日,收获时间为 10 月 28 日。

表 1 沼液还田试验各处理施肥方案

Table 1 Fertilization scheme for experimental treatment of biogas slurry returning to field

处理	基肥		追肥		
	沼液/ (m ³ hm ⁻²)	复合肥/ (kg hm ⁻²)	第 1 次 追肥/ (kg hm ⁻²)	第 2 次 追肥/ (kg hm ⁻²)	第 3 次 追肥/ (kg hm ⁻²)
CK	0	600	120	180	150
T1	150	150	30	45	37.5
T2	150	150	30+18.8	45+18.7	0
T3	150	300	60	90	75
T4	150	300	60+37.5	90+37.5	0
T5	150	450	90	135	112.5
T6	150	450	90+56.3	135+56.2	0
T7	300	150	30	45	37.5
T8	300	150	30+18.8	45+18.7	0
T9	300	300	60	90	75
T10	300	300	60+37.5	90+37.5	0
T11	300	450	90	135	112.5
T12	300	450	90+56.3	135+56.2	0

1.3 测定项目与方法

水稻收获当天,采取网格取样法在试验小区内取 0~20 cm 耕层内土壤样本 9 个点,取样混合均匀,土壤风干后研磨过筛。水稻全部收获后,测产,每个处理随机取样 5 kg,用于稻米品质分析。

土壤 pH 值使用水土比 2.5:1 浸提, pH 计(赛多利斯 PB-30)测定;电导率使用 5:1 水土比浸提,电导率仪(雷磁 DDSJ-308A)测定;使用重铬酸钾容量法测定土壤有机质量;使用碱解扩散滴定法测定土壤碱解氮量;使用碳酸氢钠提取钼蓝比色法测定土壤有效磷量;使用乙酸铵提取火焰光度计法测定土壤速效钾量;使用苯酚钠比色法测定脲酶活性;使用磷酸苯二钠比色法测定磷酸酶活性^[13]。使用食味分析仪(型号:RL TA10B2-K,厂家:SATAKE)进行食味值测定。

1.4 数据处理

使用 Excel 2016 处理试验数据并绘制相关图表。使用 SPSS Statistics 23 进行方差分析及多重比较分析。方差分析显著性水平均为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 沼液配合化肥施用对稻米产量的影响

不同沼液配合化肥施用对水稻产量的影响如图 1 所示, 2021 年 T7 处理产量最高, 为 9.88 t/hm^2 , T2 处理产量最低, 为 8.0 t/hm^2 , 各处理中 T5、T6、T7、T8 处理产量较 CK 分别提高了 3.0%、4.3%、4.4%、1.7%; 与 CK 相比, T1、T2、T3、T4、T9、T10、T11、T12 处理产量降低了 1.5%~15.8%。在 $150 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液处理中, 随着化肥用量增加, 水稻产量增加; 而在 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液处理中, 随着化肥用量增加, 水稻产量降低。3 次追肥处理产量都高于 2 次追肥处理, 增幅为 0.2%~7.5%。

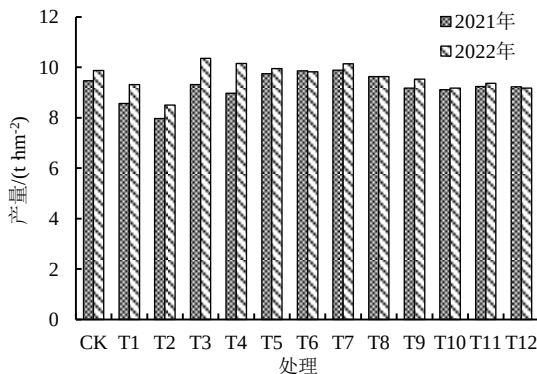


图 1 2021—2022 年不同处理水稻产量

Fig.1 Rice yield under different treatments from 2021 to 2022

2022 年 T3 处理产量最高, 为 10.4 t/hm^2 , T2 处理产量最低, 为 8.5 t/hm^2 。与 CK 相比, T3、T4、T5、T7 处理产量提高了 4.9%、2.8%、0.8%、2.8%, 而 T1、T2、T6、T8、T9、T10、T11、T12 处理产量降低了 0.4%~13.8%。3 次追肥处理产量都高于 2 次追肥处理, 增幅为 1.3%~9.5%。

2.2 沼液配合化肥施用对稻米食味值的影响

不同沼液配合化肥施用对稻米食味值的影响如图 2 所示, 图中不同小写字母表示同年份各处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。2 a 中都是 T2 处理的食味值最高, 显著高于 T9、T10、T11、T12 处理, 但 T2 处理与 CK 无显著差异。2021 年各沼液施肥处理稻米食味值与 CK 均无显著差异, 2022 年各沼液施肥处理中 T6、T9、T10、T11、T12 处理都显著低于 CK, 较 CK 降低了 3.0%~4.8%, 其余处理与 CK 无显著差异。整体 2 a 试验中随着沼液和化肥用量增加稻米食味值有降低趋势。

2.3 沼液配合化肥施用对土壤理化性质的影响

由表 2 可知, 2021 年各处理间土壤 pH 值无显著差异, 2022 年仅 T11 处理土壤 pH 值显著低于 CK, 其余处理间无显著差异。施用沼液提高了土壤有机质量, $150 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液处理土壤的有机质量较 CK 提高

了 7.1%~23.8%, $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液处理土壤有机质量较 CK 提高了 21.2%~52.4%, 化肥用量和追肥次数对土壤有机质量无显著影响。施用沼液和化肥提高了土壤 EC 值和碱解氮量、有效磷量、速效钾量, 相同沼液用量下随着化肥用量的增加, 土壤 EC 值和碱解氮量、有效磷量、速效钾量提高; 相同化肥用量下随着沼液用量增加, 土壤 EC 值和碱解氮量、有效磷量、速效钾量提高。各沼液施肥处理中 T9、T10、T11、T12 处理土壤 EC 值、碱解氮量、有效磷量、速效钾量都显著高于 CK; T1、T2、T3、T4 处理土壤 EC 值显著低于 CK; T1、T2 处理的碱解氮量、有效磷量、速效钾量都显著低于 CK; T3、T4 处理的碱解氮量与 CK 无显著差异, 而 2021 年 T3、T4 处理的有效磷量、速效钾量与 CK 相比无显著差异, 但在 2022 年均显著高于 CK。

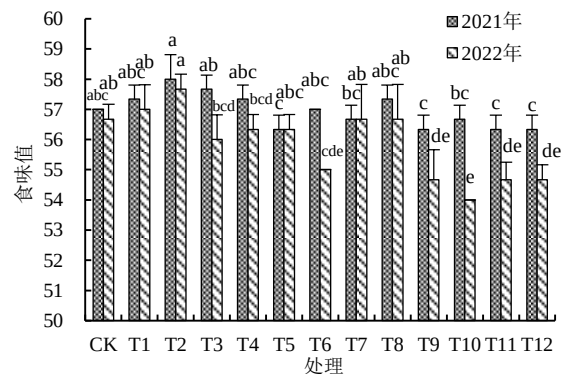


图 2 2021—2022 年不同处理稻米食味值

Fig.2 Taste value of rice under different treatments from 2021 to 2022

2.4 沼液配合化肥施用对土壤酶活性的影响

由图 3 可知, 2021 年在 $150 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液处理中土壤脲酶活性随化肥用量的增加而提高, 其中 T5、T6 处理显著高于 T3、T4 处理, T4 处理显著高于 T2 处理, 而在 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液处理中, T7、T8、T9、T10、T11、T12 处理间无显著差异。 $150 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液处理中土壤脲酶活性除 T2 处理外都显著高于 CK, 而 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液各处理与 CK 无显著差异。相同化肥用量处理中, $150 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液施用量中 T4、T5、T6 处理土壤脲酶活性均显著高于 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液施用量中相同化肥用量的 T10、T11、T12 处理。2022 年 T9、T10、T11、T12 处理的脲酶活性都显著高于其他处理, T1、T2 处理的脲酶活性显著低于 CK, 其他处理间无显著差异。相同沼液用量下, 随着化肥用量增加土壤磷酸酶活性提高; 相同化肥用量下, 随着沼液用量的增加土壤磷酸酶活性也提高。2 a 试验中 T5、T6、T7、T8、T9、T10、T11、T12 处理土壤磷酸酶活性较 CK 显著提高了 10.6%~42.4%。

表 2 不同处理对土壤理化性质的影响

Table 2 Soil physical and chemical properties under different treatments

处理	pH 值		有机质量/(g kg ⁻¹)		EC 值/(μS·cm ⁻¹)	
	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年
CK	7.82±0.05a	7.83±0.02a	24.17±0.11 c	24.26±0.86c	599.2±21.2de	592.3±6.9e
T1	7.85±0.05a	7.84±0.05a	26.17±0.46b	27.26±0.57b	538.0±17.3h	544.0±4.5g
T2	7.80±0.10a	7.82±0.08a	27.02±0.22b	28.41±0.65b	553.5±25.3h	532.3±3.6h
T3	7.85±0.04a	7.80±0.10ab	26.17±0.53b	28.88±1.13b	557.8±19.8gh	544.0±2.9g
T4	7.83±0.10a	7.82±0.08a	26.47±0.16b	29.80±0.86b	566.0±16.0fgh	527.3±2.2h
T5	7.84±0.03a	7.82±0.08a	25.89±0.80b	29.80±1.96b	596.3±13.3def	553.7±1.3f
T6	7.82±0.11a	7.77±0.12ab	26.17±0.40b	30.03±1.50b	587.5±9.0efg	556.7±4.5f
T7	7.77±0.09a	7.74±0.12ab	29.29±0.52a	35.81±1.73a	622.0±9.0d	635.7±1.3e
T8	7.78±0.02a	7.77±0.05ab	29.30±0.22a	36.96±1.42a	619.7±25.7d	596.3±1.3e
T9	7.79±0.10a	7.73±0.08ab	29.71±0.68a	35.57±1.42a	671.0±18.0bc	671.7±1.7c
T10	7.76±0.05a	7.74±0.09ab	29.86±0.41a	35.34±0.86a	663.5±2.5 c	631.7±12.3d
T11	7.73±0.05a	7.66±0.03b	29.58±0.39a	35.11±1.13a	701.8±18.5a	745.0±1.5a
T12	7.72±0.09a	7.69±0.02ab	29.59±0.22a	35.57±1.63a	698.7±14.6ab	693.7±3.7b

处理	碱解氮量/(mg kg ⁻¹)		有效磷量/(mg kg ⁻¹)		速效钾量/(mg kg ⁻¹)	
	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年
CK	124.5±5.7ef	126.00±5.72d	26.56±2.09d	28.73±1.44d	242.5±5.4e	260.31±2.79h
T1	119.7±6.3ef	112.00±5.72e	18.80±0.91e	22.44±1.12e	223.0±7.0gh	239.83±4.83i
T2	114.1±2.1f	110.60±7.50e	19.35±0.91e	22.84±1.14e	218.1±3.7h	238.69±1.61i
T3	126.8±2.3de	130.67±6.60cd	24.90±1.20d	35.42±1.77c	240.2±7.5ef	303.55±1.61g
T4	116.3±7.7f	126.93±1.32d	24.71±1.20d	34.24±1.71c	230.6±9.3fg	293.31±3.22f
T5	136.3±6.1cd	144.20±8.63c	28.96±0.52c	38.36±1.92b	258.8±1.2cd	316.06±1.61e
T6	128.6±3.5de	137.67±3.30cd	28.96±1.05c	37.19±1.86b	255.9±4.8cd	324.03±1.61de
T7	142.3±6.0c	142.33±8.73c	25.08±0.94d	30.90±1.54c	260.4±4.4c	326.30±4.26d
T8	139.1±4.4c	139.53±8.11cd	25.64±1.14d	32.47±1.62 c	248.3±4.9de	318.34±7.37de
T9	156.8±7.4b	168.00±5.72ab	32.10±1.14b	41.71±2.09a	266.4±5.9c	351.33±1.61c
T10	144.0±5.7c	157.73±2.38c	31.92±0.91b	39.54±1.98a	265.0±7.1c	349.06±4.83c
T11	174.1±5.1a	174.53±5.87a	35.43±0.26a	42.10±2.10a	303.9±7.7b	377.50±4.26a
T12	158.7±8.1b	161.93±6.60ab	35.99±0.91a	43.87±2.19a	323.5±7.3a	367.26±8.96b

注 同列数据后不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P<0.05$)。

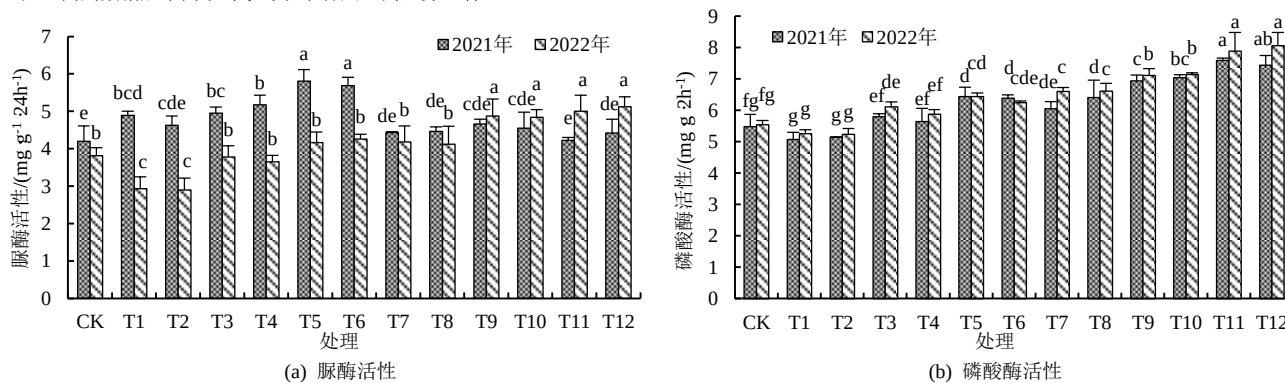


图 3 2021—2022 年不同处理对土壤酶活性的影响

Fig.3 Effect of different treatments on soil enzyme activity from 2021 to 2022

3 讨论

沼液为养殖业粪污厌氧发酵而得，其中有机物、氮、磷、钾、锌、铁、铜、钙等植物生长所需的营养元素含量丰富^[14]，可作为肥料还田利用。黄旭^[15]研究表明，沼液灌溉可以提高稻麦轮作生产中土壤肥力，丰富土壤微生物多样性，有利于提高作物产量。杨继昌等^[16]研究表明，施用沼液提高了作物对土壤养分的利用效率，增强了作物抗逆性，改善了作物品质。但沼液本身所含养分有限，尤其是氮磷钾大量元素不能完全满足作物生长需求，需要与化肥配合施用^[17]。本研究中沼液与化肥配合施用，随着沼液用量的增加，土壤有机质量提升，随着沼液和化肥用量比例的增加，

土壤碱解氮量、有效磷量、速效钾量上升，这与杨诗贵等^[18]研究结论一致。且沼液用量为 300 m³/hm² 时，化肥用量达到传统施肥量的 50% 时，2 a 中土壤碱解氮量、有效磷量、速效钾量都超过了 CK。

施用沼液可改变土壤微生物群落结构，为微生物的繁殖营造良好的生存条件，从而提高土壤酶活性^[19]。万海文等^[20]研究发现，沼液做追肥施用使土壤的过氧化氢酶活性、碱性磷酸酶活性和脲酶活性提高。黄继川等^[21]研究发现，在稻田连续施用 2 次沼液后土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸酶活性比 CK 提高了 13.0%~31.35%，比常规施肥处理提高了 28.74%~42.11%。本研究中随着沼液用量和化肥用量增加土壤磷酸酶活性提高，而

且当沼液用量为 $150 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 配合 75%化肥和 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 的沼液用量处理土壤磷酸酶活性都显著高于 CK。2022 年沼液用量的增加提高了土壤脲酶活性, 而 2021 年随沼液用量的增加, 土壤脲酶活性降低, 可能是因为 2021 年过量沼液施用影响了部分土壤微生物的性能, 而 2021—2022 年连续施用沼液改善了土壤环境, 故 2022 年没有对脲酶产生负面影响。

沼液养分丰富, 可增强植物光合速率, 促进植物器官发育^[22]。适当施用沼液对水稻的生长具有明显的促进作用, 提高水稻的产品和品质, 但过量施用沼液会导致作物出现徒长的现象, 而且在使用不当的情况下还会影响根系的发育, 从而使作物的叶片出现发黄和凋萎等情况, 造成作物减产^[23]。王康等^[24]研究表明, 水稻施用沼液总量为 $210 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时, 水稻产量提高 22.2%。侯福银等^[6]研究表明, 沼液施用量为 $612 \text{ t}/\text{hm}^2$ 时, 对籼稻产量和品质有较大的提升作用, 但沼液施用量超过 $816 \text{ t}/\text{hm}^2$ 时, 籼稻的产量下降。不同研究沼液最大用量不同, 这可能与沼液的理化性质不一样有关, 还可能与水稻品种、田间气候差异等有关。沼液还田种植水稻时, 必须减少化肥的施用量, 防止养分过量供给^[25]。本研究发现, 沼液和化肥施用不足 ($150 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液+25%的化肥) 降低了水稻产量, 而过量施用 ($300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液+50%化肥、 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液+75%化肥) 同样降低了水稻的产量和食味值, 适量的沼液和化肥配合施用: 2021 年 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液+25%化肥+3 次追肥、 $150 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液+75%化肥+2 次追肥, 2022 年 $150 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液+50%化肥+3 次追肥与纯化肥处理相比都提高了水稻的产量, 而食味值没有显著差异。同时 3 次追肥处理对水稻增产的效果总体好于 2 次追肥处理, 说明在水稻籽粒成熟期施肥对于提高水稻的产量具有重要作用。但沼液与化肥配施的最佳用量, 与当地的自然条件如降水、气温等密切相关, 所以在沼液还田利用过程中应根据种植作物、当地气候、沼液特性等条件而确定最佳用量。

在现代的畜牧业发展中大量饲料添加剂使用于畜禽养殖业中, 使得畜禽粪污中残留有大量的盐基离子, 过量的沼肥施用会导致土壤盐分的累积^[26], 对农田土壤造成潜在的污染。本研究中沼液的施用并未产生明显的盐分累积效应, 可能与试验沼液中盐基离子量较低有关, 需要进行进一步、更长时间的施用验证。

4 结 论

1) 水稻栽培中沼液施用提高了土壤有机质量, 沼液用量越多土壤有机质量越高。随着沼液用量和化肥用量增加, 土壤碱解氮量、有效磷量、速效钾量、磷酸酶活性、EC 值提高, 而对土壤 pH 值没有显著影响。

2) 适量的沼液和化肥配施可提高水稻产量, 而少量或过量施用沼液和化肥则降低了水稻产量, 本试验中 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液配合传统化肥用量 50%、75%施用降低了水稻的产量和食味值, $150 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液配合 25%化肥用量也降低了水稻的产量。相同沼液化肥用量中 3 次追肥处理的增产效果好于 2 次追肥处理。

3) 推荐 $150 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 沼液+50%~75%化肥+3 次追肥为最佳沼液化肥配合施用模式。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 魏佳欣, 元传仁, 刘婉岑, 等. 生物质覆盖对沼液污染气体排放的影响及机制[J]. 中国环境科学, 2023, 43(4): 1 744-1 756.
WEI Jiaxin, QI Chuanren, LIU Wancen, et al. Effects of biomass-covering materials on gaseous emissions and mechanism during biogas slurry storage[J]. China Environmental Science, 2023, 43(4): 1 744-1 756.
- [2] 胡建林, 郭英, 董华林, 等. 沼液在水稻生产上的应用现状与展望[J]. 农业科技通讯, 2022(12): 197-199.
HU Jianlin, GUO Ying, DONG Hualin, et al. Application status and prospect of biogas slurry in rice production[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2022(12): 197-199.
- [3] 孙芹菊, 凌峰, 韩建刚, 等. 沼液施肥对滨海盐碱地土壤性状的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(5): 91-98.
SUN Qinju, LING Wei, HAN Jiangang, et al. Effects of biogas slurry application on the coastal saline-alkali soil properties[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(5): 91-98.
- [4] 朱颖, 胡启春, 汤晓玉, 等. 丹麦集中式沼气工程发展模式分析与启示[J]. 世界农业, 2016(11): 149-155.
ZHU Hao, HU Qichun, TANG Xiaoyu, et al. Analysis and enlightenment of development mode of centralized biogas project in Denmark[J]. World Agriculture, 2016(11): 149-155.
- [5] 刘银秀, 聂新军, 叶波, 等. 基于知识图谱分析的沼液还田利用研究现状与发展趋势[J]. 土壤通报, 2023, 54(1): 192-201.
LIU Yinxu, NIE Xinjun, YE Bo, et al. Research status and development trend of biogas slurry returning to field based on knowledge map analysis[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(1): 192-201.
- [6] 侯福银, 杨智青, 陈应江, 等. 猪粪沼液替代尿素对籼稻生长性状、产量和饲用品质的影响[J]. 南方农业学报, 2019, 50(6): 1 197-1 203.
HOU Fuyin, YANG Zhiqing, CHEN Yingjiang, et al. Effects of biogas slurry produced from swine manure substituting for urea applied on growth traits, yield and forage quality of indica rice[J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(6): 1 197-1 203.
- [7] 黄翔, 洪娟, 陈钢, 等. 不同沼肥施用量对水稻生长和产量及其重金属含量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2019(4): 25-29.
HUANG Xiang, HONG Juan, CHEN Gang, et al. Effects of different biogas fertilizer application amount on growth, yield and heavy metals content of rice[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019(4): 25-29.
- [8] 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.
LI Jincheng, SUN Jicui, YANG Li, et al. Effects of excessive biogas slurry returning on soil environmental capacity and maize growth[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2021, 50(5): 49-56.
- [9] GAO Lihong, LI Ping, WEI Xiuli, et al. Effects of crops, soil types and irrigation methods on digestion capacity of biogas slurry[J]. Agricultural Science & Technology, 2015, 16(8): 1 712-1 715.
- [10] 王康婷, 伍福琳, 周忠波, 等. 高氮负荷沼液灌溉对紫色土氮素积累、淋溶和微生物多样性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(11): 1 487-1 496.

- WANG Kangting, WU Fulin, ZHOU Zhongbo, et al. Effects of high nitrogen load liquid digestate irrigation on nitrogen accumulation, leaching and microbial diversity in purple soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(11): 1 487-1 496.
- [11] 王贵荣. 2022 年我国早稻产量 2812 万吨——国家统计局农村司司长王贵荣解读早稻生产情况[N]. *中国信息报*, 2022-08-29(1).
- [12] 齐琳, 王飞, 张晓雷, 等. 空闲水稻田消纳沼液对土壤及水稻种植的影响[J]. *中国沼气*, 2015, 33(3): 87-89.
- QI Lin, WANG Fei, ZHANG Xiaolei, et al. Absorption of biogas slurry by paddy field during the idle time and its effects on soil and rice planting[J]. *China Biogas*, 2015, 33(3): 87-89.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [14] 曹汝坤, 陈灏, 赵玉柱. 沼液资源化利用现状与新技术展望[J]. *中国沼气*, 2015, 33(2): 42-50.
- CAO Rukun, CHEN Hao, ZHAO Yuzhu. Resource utilization of biogas slurry: Current status and future prospects[J]. *China Biogas*, 2015, 33(2): 42-50.
- [15] 黄旭. 沼液灌溉和秸秆还田对稻麦轮作生产的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- HUANG Xu. Effects of biogas slurry irrigation and straw returning on rice-wheat rotation production[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
- [16] 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.
- YANG Jichang, ZHANG De, WANG Shuangcheng, et al. Effects of biogas slurry application on soil ecology and fruit quality of apple orchards in rain-fed agricultural region on Loess Plateau[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2022, 57(6): 105-113, 121.
- [17] 胡润, 王允青, 唐杉, 等. 有机肥与无机肥配合施用及氮肥运筹对晚稻产量 农艺性状的影响[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(36): 22 397-22 398.
- HU Run, WANG Yunqing, TANG Shan, et al. Effects of combining application of different organic fertilizer and inorganic fertilizer and N-fertilizer operation method on late rice yield and agronomic traits[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(36): 22 397-22 398.
- [18] 杨诗贵, 洪宁, 李铸, 等. 沼液施用背景下稻田土壤养分的含量特征[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(2): 239-244.
- YANG Shigui, HONG Ning, LI Zhu, et al. Characteristics of nutrient content in paddy soil under the background of biogas slurry application[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(2): 239-244.
- [19] 李瑞, 张巡, 杨阳, 等. 沼液替代化学氮肥对滨海稻田土壤有机氮和细菌群落的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(8): 1 364-1 375.
- LI Rui, ZHANG Xun, YANG Yang, et al. Effects of substituting biogas slurry for chemical nitrogen fertilizer on soil organic nitrogen and bacterial communities in coastal paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(8): 1 364-1 375.
- [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.
- WAN Haiwen, JIA Liangliang, ZHAO Jingqi, et al. Effects of topdressing biogas slurry on photosynthesis characteristics of wheat and soil enzyme activities and nutrients[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(1): 35-44.
- [21] 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.
- HUANG Jichuan, PENG Zhiping, XU Peizhi, et al. Effects of paddy field disposal of biogas slurry on rice production, soil fertility and environmental safety[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2016, 43(10): 69-76.
- [22] XU C M, TIAN Y, SUN Y X, et al. Effects of biogas slurry irrigation on growth, photosynthesis, and nutrient status of perilla frutescens seedlings[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(22): 3 381-3 390.
- [23] 陆国弟, 杨扶德, 陈红刚, 等. 沼液应用的研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(1): 339-345.
- LU Guodi, YANG Fude, CHEN Honggang, et al. Research progress on application of biogas slurry[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(1): 339-345.
- [24] 王康, 吴家旺, 戴辉, 等. 沼液叶面肥对水稻生长的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(15): 126-129.
- WANG Kang, WU Jiawang, DAI Hui, et al. Effect of biogas slurry foliar fertilizer on rice growth[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(15): 126-129.
- [25] 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.
- LIU Min, JI Lidong, WANG Rui, et al. Effects of biogas slurry combined with chemical fertilizer on soil quality and crop growth[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(5): 68-76.
- [26] 郭全忠, 葛一洪, 龚晓松, 等. 沼液用量对设施土壤养分和盐分累积与迁移的影响[J]. *陕西农业科学*, 2022, 68(3): 56-61.
- GUO Quanzhong, GE Yihong, GONG Xiaosong, et al. Effect of amount of biogas slurry on nutrients, salt accumulation and migration in greenhouse soil[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 68(3): 56-61.

Combined Effects of Biogas Slurry Application and Chemical Fertilization on Rice Growth and Soil Quality

WEI Fei¹, LI Yongjie², SUN Qiwei², XU Xiaoyan¹, WANG Xiaobo^{1*}

(1. College of Agronomy and Resource and Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China;

2. Tianjin Nongken Bohai Agricultural Group Company Limited, Tianjin 301800, China)

Abstract: 【Objective】 Amending soil with biogas slurry is a way to treat livestock wastes. This paper is to elucidate the combined effect of biogas slurry application and chemical fertilization on improving rice yield and soil quality. 【Method】 A two-year field experiment was conducted from 2021—2022, with the traditional chemical fertilization served as the control (CK). There were two biogas slurry treatments: 150 m³/hm² and 300 m³/hm², each associated with three chemical fertilizations by applying 25%, 50% and 75% of the chemical fertilizer traditionally used by local farmers. The fertilizers were applied in two or three top-addressings. In each treatment, we measured rice growth and changes in soil properties. 【Result】 ① In 2021, applying 300 m³/hm² of biogas slurry combined with 25% of traditionally used fertilizer (topdressing 3 times) gave the highest yield at 9.88 t/hm². In 2022, the

highest yield was 10.4 t/hm², achieved by applying 150 m³/hm² of biogas slurry combined with 50% of traditionally used fertilizer (topdressing 3 times). In both years, applying 150 m³/hm² of biogas slurry combined with 25% of traditionally used fertilizer but by topdressing twice only gave the lowest yield. Applying 300 m³/hm² of biogas combined with 50% and 75% of traditionally used reduced the rice yield and taste of the grains. ② Increasing topdressing from 2 to 3 times increased rice yield when the fertilization was the same. ③ Applying biogas slurry increased soil organic matter by 7.1% to 52.4%. Increasing biogas slurry and chemical fertilization also increased alkali hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, available potassium, phosphatase activity, and electrical conductivity (EC) of the soil, but had little effect on soil pH. Applying 150 m³/hm² of biogas slurry combined with 25% of traditionally used fertilizer reduced alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium contents, compared to CK. Applying 300 m³/hm² of biogas slurry combined with 50% of traditionally used fertilizer increased EC, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium contents in the soil, compared to CK. ④ Applying 75% of traditionally used fertilizer increased soil phosphatase activities by 10.6% and 42.4%, depending on biogas slurry application, compared to CK. **【Conclusion】** Combing biogas slurry application and chemical fertilization can improve rice yield, soil nutrient contents, and enzyme activity only when applied at right rates. From our two-year experiment, applying 150 m³/hm² of biogas slurry combined with 50%~75% of traditionally used fertilizers by topdressings the fertilizers 3 times is optimal for improving crop yield and soil quality.

Key words: rice; biogas slurry; chemical fertilizer; yield; soil nutrient

责任编辑: 白芳芳

(上接第 40 页)

Sensitivity and Uncertainty Analysis of the APEX Model to Water Status

HOU Jinjin, SUN Xiaolu*, WANG Bisheng, YANG Xiaohui, XU Mengjie, FANG Quanxiao*

(Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: **【Background and Objective】** The APEX model is a comprehensive watershed-scale model for simulating the effects of management practices on agricultural systems and their impacts on water quality, soil erosion, and nutrient cycling. This paper analyzes the sensitivity of its parameters to water status in soil. **【Method】** The analysis is based on data measured from 2016 to 2019 from an irrigation experiment conducted in Jiaodong in Shandong province. Winter wheat was used as the model plant; the Sobol, Morris, and FAST methods were used to analyze the sensitivities of the APEX model parameters associated with crop growth and water stress. We considered the influences of groundwater depth, rainfall and irrigation. **【Result】** When groundwater depth was 1.25 m, the maximum root depth (RDMX) was the most sensitive parameter affecting evapotranspiration, biomass, and yield, while the maximum potential leaf area index (DMLA) was the most sensitive parameter impacting leaf area index (LAI). When the groundwater depth was increased to 5 m, the sensitive parameters influencing crop evapotranspiration and yield differed, with PARM38 (weight coefficient of water stress calculation) and RWPC1 (proportion of root biomass during germination) becoming the most sensitive parameters. Results calculated from all three methods indicated that as irrigation water increased, the sensitivity of RDMX decreased, while the sensitivities of DMLA, DLAI (peak point in growth season), and WA (potential light energy utilization) increased. The sensitivity of RDMX was significantly higher in dry years than in humid years, as opposed to the sensitivity of DMLA. Uncertainty analysis demonstrated that wheat biomass, yield, and evapotranspiration fell within the 5% to 95% confidence interval of the simulated data. **【Conclusion】** The most sensitive parameters identified by the Sobol, Morris, and FAST methods were consistent, although their sensitivity indexes varied with irrigation treatments, rainfall patterns, and groundwater depth. Considering computational efficiency and accuracy, the Morris method is more suitable for parameter sensitivity analysis of the APEX model. These findings provide valuable insights into the application of the APEX to analyze the impact of environmental conditions on crops.

Key words: APEX model; sensitivity analysis; water stress; Sobol; Morris; FAST; uncertainty analysis

责任编辑: 韩 洋