龚婷,刘胜,徐超,等.不同浓度沼液和沼渣/有机肥配施对土壤和大豆的作用效应[J].华中农业大学学报,2026,45(1):236-245.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.01.021

不同浓度沼液和沼渣/有机肥配施对土壤和大豆的作用效应

龚婷[1],刘胜[1],徐超[2],李骏[1],张鑫[1],牛文娟[1],袁巧霞[1]

1.华中农业大学工学院,武汉 430070; 2.武汉大学资源与环境科学学院,武汉 430079

摘要 为应对土壤结构破坏及养分流失对生态环境和食品安全带来的严峻挑战,同时实现沼液废物资源的高值化利用,以沼液作为液体肥料、沼渣和有机肥作为固体肥料,以大豆为供试作物,在大棚栽培条件下探究了沼肥施用浓度和配施方法对0～80 cm深度土壤理化性质和大豆产量的影响。沼肥配施方法和施用浓度组合包括单施有机肥(TK1)、干式发酵沼液作基肥结合有机肥追肥(TK2)、单施干式发酵沼液(TK3)、沼渣作基肥结合湿式发酵沼液追肥(TK4)、沼渣作基肥结合有机肥追肥(TK5)和沼渣/有机肥混作基肥结合湿式发酵沼液追肥(TK6),设置原土(校园绿化土)为空白对照组(CK)。结果显示,耕作层土壤碱解氮和速效磷含量提升最高的施肥处理为TK6组,分别增加3.56和2.44倍;土壤耕作层速效钾含量增幅最高的处理组为TK3组,增加9.37倍;在60～80 cm深层土壤,施用干式发酵沼液全氮和全钾易向下迁移,施用湿式发酵沼液全磷易向下迁移至80 cm土层。不同施肥处理组土壤团粒体结构存在显著差异;TK1处理显著增加了土壤小团粒体的数量,增幅为25.2%;TK3处理则增加了土壤大中团粒体的数量,增幅为1.68%;相较于其他处理,TK1处理组中土壤氮损失最大,大豆产量最低,而TK4处理组中大豆产量最高,约为4 350 kg/hm^2。综上,单施干式发酵沼液显著提升土壤耕作层养分含量、养分更易向下迁移,沼渣作基肥结合湿式发酵沼液追肥更有利于提升大豆产量。

关键词 沼液;沼渣;有机肥;配施;土壤理化特性;大豆

中图分类号 S216.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)01-0236-10

土壤问题是全球农业、生态和人类健康的重要关注点。由于不合理施用化肥,我国农业生产中长期存在土壤酸化[1-2]、土壤养分失衡、有机质含量减少、土壤结构破坏、土壤微生物活性降低和水体污染等问题,进而影响生态环境和农业经济的发展[3]。另一方面,随着我国沼气工程的大力推广,产生的大量沼液未能被有效利用,也已成为限制沼气工程进一步发展的关键因素[6]。

沼肥作为一种优质的有机肥,可以有效缓解化肥、农药过量施用造成的农业面源污染问题[4-5]。为了解决沼液产量大、运输成本高、附加值低等问题,不少学者将沼液浓缩后进行肥料化应用,这种方法对土壤肥力的改善效果显著,不仅能缓解土壤酸化[7],还能提高作物品质和产量[8-9]。有研究表明,沼液全量代替化肥可显著提高土壤pH、有机质、全氮、有效磷和速效钾含量[10],但相较于单施沼液,沼液与有机肥配施对土壤肥力改善效果更为显著,减少了养分流失[11]。也有研究表明,长期的不同施肥措施会引起土壤微生物活动和群落发生变化[12-13];如连续施用沼液可逐渐降低对pH和微生物群落多样性的影响,维持土壤微生态环境的稳定性[14];而长期施用沼渣[15]和有机肥则显著影响土壤细菌群落结构[16],提升土壤微生物活性,提高土壤供氮能力[17]。另一方面,不同沼渣沼液混施比例对水稳性团聚体粒径组成和结合有机碳含量产生显著影响,混施相较于单施,其大团聚体质量组成比例均有所提高[18]。可见,将沼肥应用于农田来改善土壤肥力同时提高作物生产力,对实现绿色生产具有重要意义。本研究以沼液作为液体肥料、沼渣和有机肥作为固体肥料,以大豆为供试作物,在大棚栽培条件下探究了沼

收稿日期:2025-02-25
基金项目:农业科技重大项目
龚婷,E-mail:2274651991@qq.com
通信作者:袁巧霞,E-mail:qxyuan@mail.hzau.edu.cn

肥施用浓度和配施方法对0～80 cm深度土壤理化性质和大豆产量的影响，旨在为土壤改良及沼液资源的高值化利用提供理论和研究基础。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验土壤为黄黏土，其土壤含有机质15.76 g/kg、全氮1.21 g/kg、全磷0.96 g/kg、全钾3.46 g/kg、碱解氮12.13 mg/kg、速效磷8.32 mg/kg、速效钾35.78 mg/kg，pH 7.44，EC 110.4 μS/cm，容重1.75 g/cm^3。试验作物为中黄57大豆，购自洛阳优质良种专行。湿式发酵沼液和沼渣取自湖北武汉中粮集团某养猪场沼气工程池（总固形物含量＜8%），发酵时间21 d；干式发酵沼液取自湖北省襄阳市宜城某高固厌氧发酵工程池（TS约为20%），发酵原料主要为猪粪和少量水稻秸秆，发酵时间40 d。有机肥由内蒙古青牧农业科技有限公司提供，为纯羊粪粉状肥料。各肥料的基本理化性质如表1所示。

表1　各种肥料的基本理化性质

Table 1　Basic physicochemical properties of various fertilizers

肥料 Fertilizer	全氮/(mg/L) Total nitrogen	全磷/(mg/L) Total phosphorus	全钾/(mg/L) Total potassium	pH	EC/(mS/cm)	COD/(mg/L)
湿式发酵沼液 Low-concentration biogas slurry	2 019.05	88.13	65.38	9.18	12.84	3 153.00
沼渣 Biogas residue	5 032.50	585.82	14.98	7.27	0.92	
干式发酵沼液 High-concentration biogas slurry	5 068.70	465.40	319.00	8.98	19.25	43 300.00
有机肥 Organic fertilizer	17 200.00	22 400.00	24 200.00	6.70	3.45	

1.2　试验方法与田间管理

本研究采用土柱进行栽培试验。试验于2023年6月至2023年10月在华中农业大学工科基地温室大棚（30°46′N，114°36′E）进行。试验所用土柱高约为1 m，直径约为30 cm，每个土柱种植3株大豆。试验设置6个处理，分别为：TK1，单施有机肥；TK2，干式发酵沼液作基肥结合有机肥追肥；TK3，单施干式发酵沼液；TK4，沼渣作基肥结合湿式发酵沼液追肥；TK5，沼渣作基肥结合有机肥追肥；TK6，沼渣/有机肥作基肥结合湿式发酵沼液追肥，设置原土（校园绿化土）为空白处理组（CK）。每个处理设置3个重复。各处理施肥按等氮量方案进行，总施氮量为500 kg/hm^2，其中基肥施300 kg/hm^2，开花期追肥200 kg/hm^2。基肥的灌溉参数分别为：湿式发酵沼液1.05 L，干式发酵沼液0.42 L，沼渣0.42 kg，有机肥0.12 kg为控制变量，试验期间采取的其他管理措施严格保持一致，包括防病、防虫、灌溉等处理。栽培试验结束后对土壤和植株进行取样分析，土壤采用土钻分层多点取样，取样深度分别为0、20、40、60、80 cm。各层土壤样品均匀混合，取部分鲜样进行微生物菌群分析，其余样品风干去杂，用于土壤理化性质分析。

1.3　土壤理化特性指标测试方法

使用pH计（FE28型pH计，瑞士梅特勒公司）和电导率计（DDSJ-308F型电导率仪，中国雷磁公司）测量土壤pH值（土壤∶水，1∶10，m/V）和电导率（EC）（土壤∶水，1∶10，m/V）。参照文献[19]进行土壤养分分析。土壤消解采用硫酸-双氧水法；全氮通过全自动化学分析仪（SmartChem200型全自动化学分析仪，意大利AMS公司）用比色法测定；土壤全磷用钼锑抗分光光度法测定；土壤全钾用火焰光度法测定；速效钾的含量由1.0 mol/L醋酸铵萃取然后用火焰分光光度法测定；碱解氮（速效氮）采用碱水解扩散法；采用重铬酸钾法测定有机质；土壤水稳性团聚体分离采用湿筛法，利用土壤团聚体分析仪（TF-100型，浙江舜龙）进行分析；土壤容重采用环刀法测定。

微生物菌群由武汉百易汇能生物有限公司测试分析，采用16S rRNA测定土壤细菌群落的丰度和微生物多样性指数。

1.4　大豆植株测定指标及方法

分别在大豆植株的分化期、开花期、结荚期、成熟期测量植株茎粗、株高，采用SPAD502叶绿素含量测定仪测定叶绿素含量，每组测定5棵 植株的3～5个叶片，每叶片取5个测量点，取其平均值。成熟期测量植株干物质含量及产量。

1.5　数据分析

使用Microsoft Excel 2021进行数据统计，用Origin 2018作图及相关性分析。运用IBM SPSS Statistics27进行方差分析，采用单因素方差分析和Duncan's多重比较检验各处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 沼肥配施对土壤团聚体和容重的影响

不同施肥处理下耕作层土壤容重如图1A所示，TK2处理土壤容重最大，为2.88 g/cm^3，TK4处理土壤容重最小，为2.68 g/cm^3。由于试验CK为校园绿化土，初始容重较小，试验中所有处理容重相较CK均有所提高，TK1～TK6比CK增加了52.49%～63.36%。其中有机肥追肥后的土壤容重值高于其他处理，可能是因为小团聚体的堆积增加土壤的密实度，导致容重增加。容重增加可能会使土壤保水性能提高，但土壤透水透气性差，也影响作物对水分和养分的吸收，进而影响作物的生长和产量。

不同施肥处理下耕作层土壤水稳性团聚体质量组成如图1B所示，除TK1团聚体质量百分比随着粒径减小而上升，其他处理团聚体质量百分比随着粒径减小，呈现先增加后减少的趋势。TK1小团聚体相比其他处理百分比最大，这可能是因为有机肥施入土壤后，通过作用于土壤颗粒之间的黏结作用形成了新的团聚体。

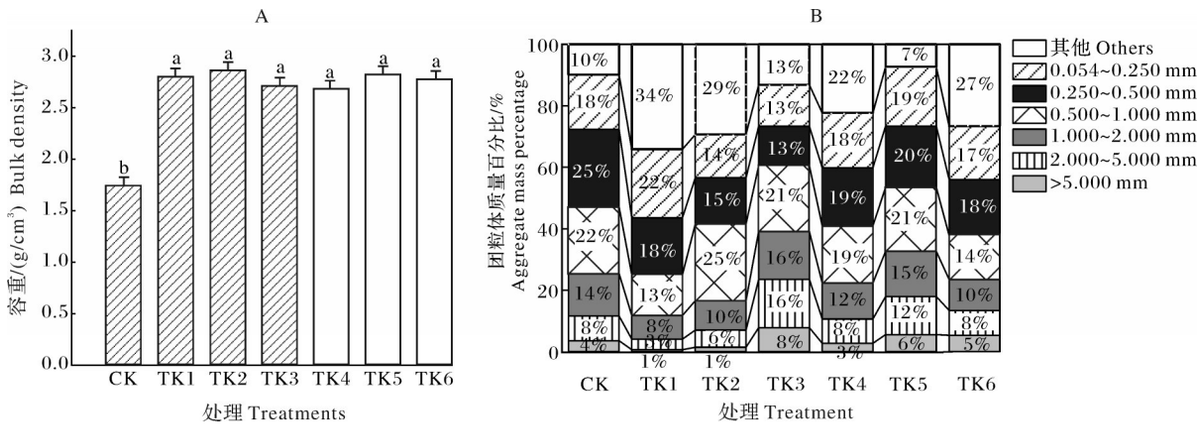


图1 不同处理土壤容重(A)和团聚体组分质量百分比(B)

Fig. 1 Different treatments for soil bulk density and aggregates mass percentage(B)

2.2 沼肥配施对土壤化学性质的影响

1)沼肥配施对土壤有机质、pH和EC值的影响。不同施肥处理下耕作层土壤有机质含量如图2A所示，相比CK，TK1、TK3和TK6有机质含量分别提升10.15%、156.03%和16.56%。可看出短期单施干式发酵沼液显著提升土壤有机质含量。

图2B为不同施肥处理下耕作层土壤pH值，相较于CK(pH7.44)，所有处理耕作层土壤pH均有所降低，且处理间差异显著($P<0.05$)，其中TK6处理pH比CK降低了15.66%，TK5处理pH仅降低了1.44%。可见，相比施用沼渣和有机肥，由于沼液本身含有一定的酸性物质，施用沼液更易使土壤酸化，目前仅1季施用，土壤酸碱度仍在中性范围内，长期施用则需要注意酸碱平衡。

土壤EC值可以直接反映土壤含盐量情况，一般来说，EC值0.5～2 dS/m是大多数农作物生长的最佳范围，过高的EC值可能会导致土壤盐化，影响作物生长。由图2C可看出，不同处理土壤耕作层EC值变化的趋势，TK6处理EC值较CK提升了114.65%。可见施用沼渣和有机肥作基肥，沼液作追肥更易增加土壤可溶性盐离子含量，这些离子不仅直接参与植物的营养吸收和生长，还会影响土壤微

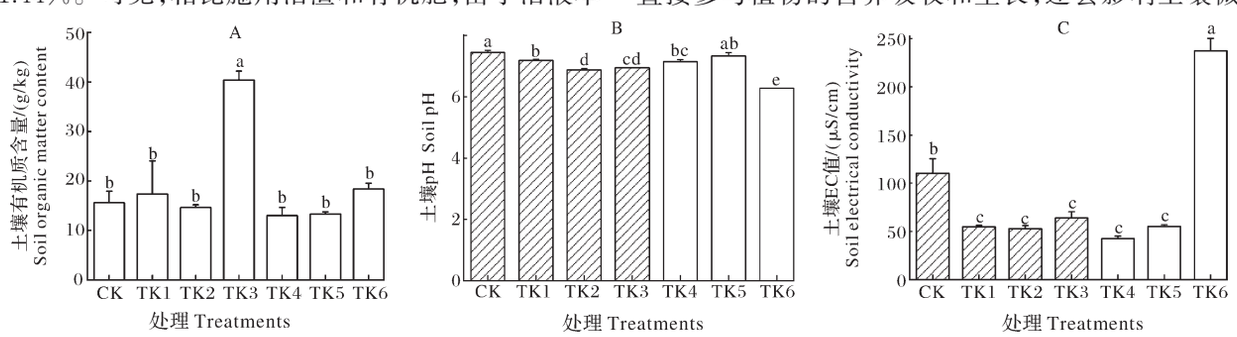


图2 不同处理土壤有机质含量、pH值和EC值

Fig. 2 Soil organic matter content，pH and EC values of different treatments

生物的活性。

2)沼肥配施对土壤耕作层氮、磷和钾含量的影响。由图3A可见，在0～20 cm耕作层土壤，不同施肥处理土壤全氮和碱解氮含量相比CK均得到显著提升，全氮含量最高处理为TK1，相对于CK提升了3.63倍；速效氮含量最高处理为TK6，相对于CK提升了3.56倍，说明有机肥配施沼液可提高氮的利用效率，促进作物对氮的吸收。

由图3B可知，在耕作层土壤0～20 cm，与CK相比，所有处理土壤全磷含量均有所降低，但土壤速效磷含量均有所提高。全磷和速效磷含量最高的处理均为TK6，相较于CK，TK6全磷含量减少了67.22%，速效磷提高了2.44倍。沼渣、有机肥及沼液的结合，发挥了基肥与追肥的互补作用，显著提高了土壤氮、磷的有效性，能促进作物对氮、磷的吸收效率。

由图3C可知，在耕作层土壤0～20 cm，不同施肥处理土壤全钾含量均显著增加，含量最高的为TK5处理组，相较于CK提升了1.11倍。除TK1和TK2，其他处理土壤速效钾含量均显著提升，尤其是TK3处理组，相较于CK，土壤速效钾含量提升了9.37倍，这主要是由于干式发酵沼液中全钾含量显著高于其他肥料，施用后能迅速提升土壤中的钾含量。

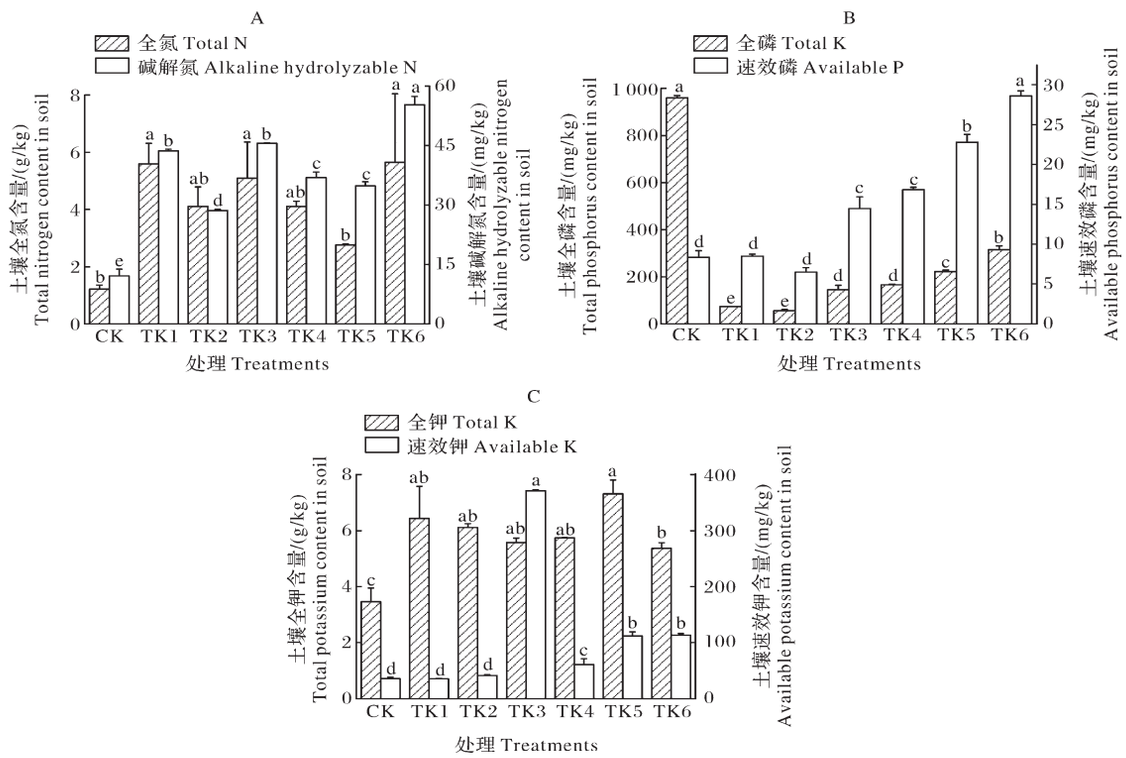


图3　不同处理耕作层土壤氮磷钾含量

Fig. 3　Soil nitrogen, phosphorus and potassium contents in different tillage layers

3)土壤全氮、全磷和全钾垂直迁移特征。土壤氮、磷、钾存在明显的垂直迁移趋势，由图4可知，在0～20 cm耕作层，TK1全氮含量显著高于其他处理，TK5全磷和全钾含量高于其他处理，这说明沼渣和有机肥中的养分因缓释性提高了耕作层土壤中养分的持久性，减少施肥后的养分流失。在20～80 cm土层，TK2随着土壤深度的增加，全氮含量也随之增加，其他处理呈现先减少后增加的趋势，TK5与之相反；TK6在40～80 cm土层全磷呈现迅速向下迁移的趋势；TK2在60～80 cm土层全钾呈现向下迁移的趋势。这说明施用干式发酵沼液促进了全氮和全钾在深层土壤中的迁移，由于全磷往往以无机磷的形态存在，无机磷在土壤中溶解性较低，湿式发酵沼液施用量加大，导致土壤中的磷更易向下迁移。

2.3　沼肥配施对植物生长的影响

SPAD值是评估植物生长状况和健康水平的指标。由图5A可见，随着大豆生育期的推进，各处理SPAD值的变化趋势为先上升后下降。从分枝期到开花期呈现上升趋势，开花期到成熟期呈现下降趋势，开花期时SPAD值最大。4个时期最大SPAD值各不相同，分枝期TK6处理显著高于其他组，开花期TK4处理显著高于其他组，结荚期TK3处理显著高

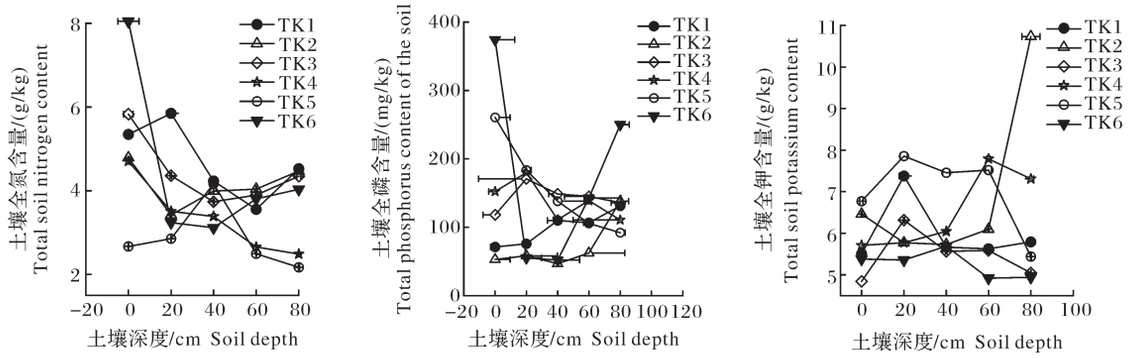


图4 不同处理土壤氮磷钾垂直迁移特征

Fig. 4 Vertical migration characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium in soils under different treatments

于其他组，成熟期TK4处理显著高于其他组，大豆4个时期SPAD值变化规律不一致，说明不同施肥处理影响了大豆叶片的生长。茎粗在大豆生长发育过程中处于持续增长状态，分化期差异不显著，其他3个时期TK3茎粗要高于其他处理（图5B）。说明施用高浓度沼液作基肥和追肥有助于大豆后期的生长。由图5C可见，TK4处理产量最高，达4 350 kg/hm^2，最低的为TK1处理，其产量为3 090 kg/hm^2。由图5D可见，各处理中籽粒的干物质量百分比要高于茎秆和叶片。

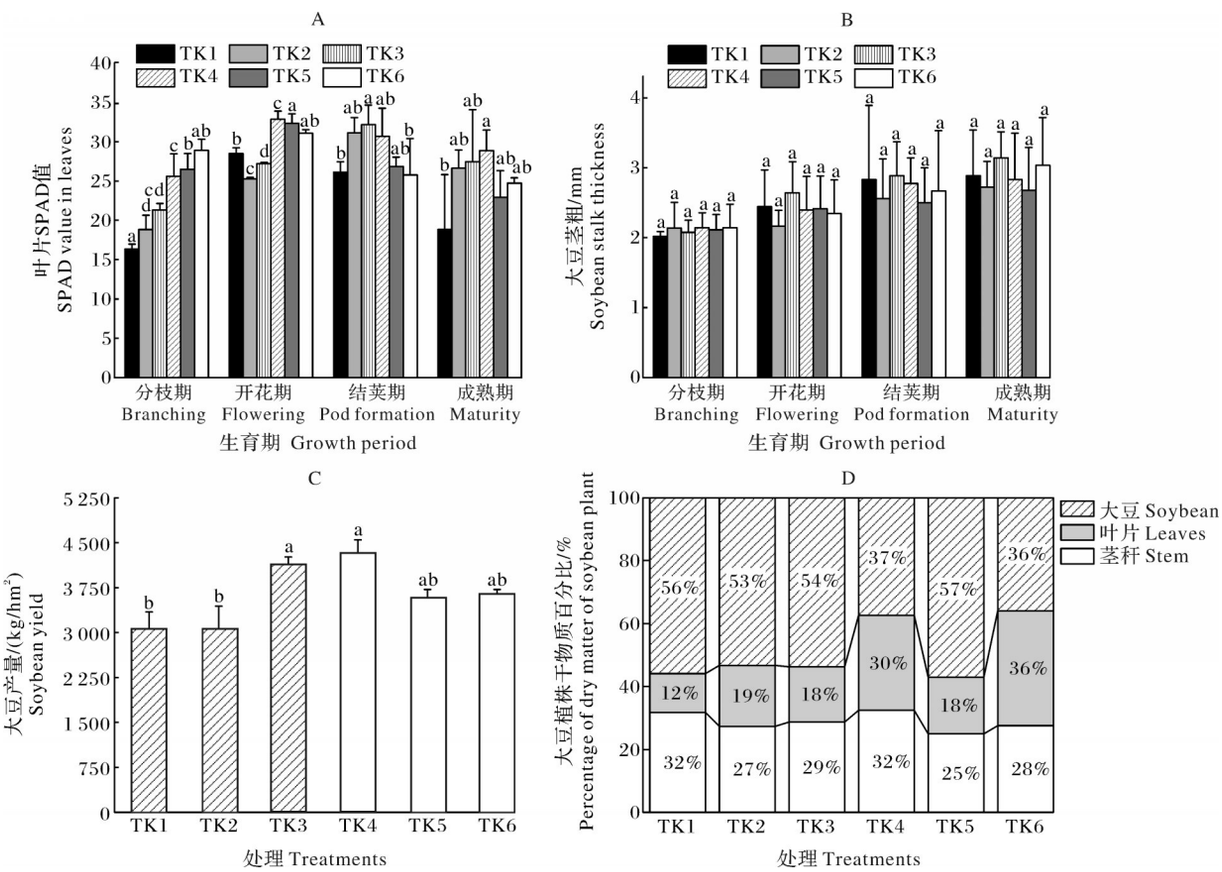


图5 不同处理下大豆叶片SPAD值（A）、茎粗（B）、产量（C）和植株干物质量百分比（D）

Fig. 5 Leaves SPAD value（A）, stem diameter（B）, yield（C）and percentage of dry matter of soybean（D）under different treatments

2.4 沼肥配施对土壤微生物的影响

1）土壤细菌群落组成。由图6可见，不同处理0～20 cm土层细菌群落主要由10个细菌门组成（相对丰度大于0.01），分别为放线菌门（Actinobacteriota）、变形菌门（Proteobacteria）、酸杆菌门（Acidobacteriota）、绿弯菌门（Chloroflexi）、厚壁菌门（Fir-

micutes）、拟杆菌门（Bacteroidota）、芽单胞菌门（Gemmatimonadota）、粘菌门（Myxococcota）、疣微菌门（Verrucomicrobiota）及髌骨菌门（Patescibacteria）。相比CK，除放线菌门丰度减少，其他细菌门丰度均得到提升。其中，放线菌门、变形菌门和绿弯菌门3个细菌门水平丰度之和在TK6时最高，达到了65%，是相对丰度最大的土壤优势细菌群落。放线菌在有机物分解和抗生物质产生方面具有积极作用；某些变形菌能进行氮的固定，提高土壤的氮素含量和可利用性；绿弯菌能够通过水、土壤和植物残体传播，分泌酶类物质改变土壤微生物群落结构。6个处理变形菌门相对丰度表现为TK5（33.95%）>TK1（32.95%）>TK4（29.82%）>TK6（29.04%）>TK3（25.91%）>TK2（24.85%）；放线菌门相对丰度表现为TK4（22.56%）>TK6（22.22%）>TK3（22.12%）TK2（21.76%）>TK5（17.98%）>TK1（15.29%）；绿弯菌门相对丰度表现为TK3（17.23%）>TK6（16.21%）>TK2（13.7%）TK5（12.44%）>TK4（11.7%）>TK1（10.53%）。

2）土壤细菌群落多样性。Chao1指数用于描述菌群丰富度，指数越大说明细菌群落丰度越高，香农指数反映细菌群落alpha多样性，数值越大说明细菌群落多样性越高；由表2可见，TK6的这2个指标均显著高于其他处理，说明沼渣、有机肥和沼液组合施肥促进了细菌的代谢活动，增加了细菌的数量和种类，从而提高了土壤中细菌的丰度和微生物多样性。样品覆盖率用于描述测序深度，数值越高表明未被检出的概率越低，辛普森指数反映物种多样性和均匀度，指数越高，代表生态系统的多样性较高；不同施肥处理土壤样品覆盖度和辛普森指数相比CK均降低，TK3显著低于其他处理（表2），说明未被检出的概率增加，微生物多样性增加且分布不均匀，可能是干式发酵沼液施肥养分过剩，对土壤微生物带来一定的环境压力。

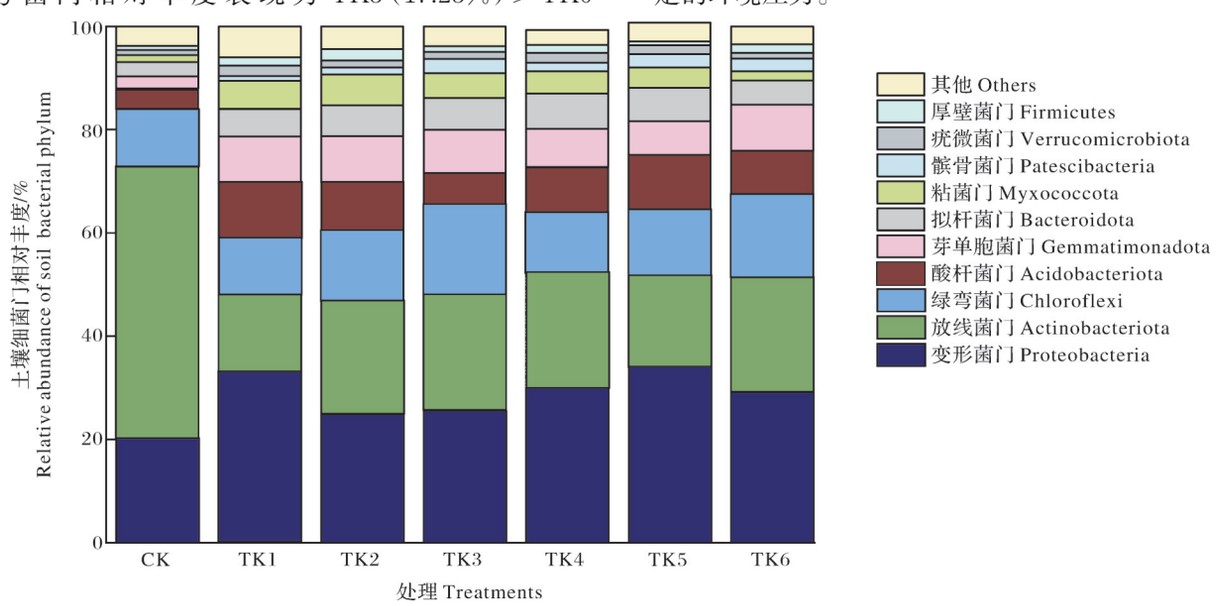


图6　不同处理土壤细菌门相对丰度

Fig. 6　Relative abundance of bacterial phylum in soils under different treatments

3　讨　论

3.1　沼液浓度对土壤理化性质的影响

有研究表明，沼液可以通过改变土壤微生物群落结构、缓解土壤酸化和提高有机质含量等，显著影响土壤理化性质[20-21]。本研究发现，不同浓度沼液显著影响土壤有机质含量，施用干式发酵沼液后0～80 cm土层有机质含量均显著高于湿式发酵处理。这与张云等[22]研究结果一致，沼液在土壤中的渗透效率随沼液浓度的增强而提升。这可能是因为沼液全量追肥时，干式发酵沼液处理下土壤中所带入的氮、磷、钾含量高，会提高土壤耕作层中速效养分（碱解氮、速效钾）含量，并且由于沼液浓度高，导致全氮和全钾易向下迁移，增加了深层土壤的养分。施用湿式发酵沼液时，由于试验中采用等氮量施用，而湿式发酵沼液含氮量低，需要加大施用量，康婉青等[10]在研究不同沼液施用量对土壤养分的影响时发现，沼液量过大会导致土壤pH下降、有机质含量相对其

表2 不同处理土壤细菌多样性指数

Table 2 Soil bacterial diversity index under different treatments

处理 Treatments	Chao1指数 Chao1 index	香农指数 Shannon index	样品覆盖率 Goods_coverage	物种数量 Observed species	辛普森指数 Simpson index
CK	1 188.216 3	9.281 8	0.999 7	1 181.500 0	0.996 0
TK1	2 619.480 2b	10.203 3c	0.997 2b	2 609.300 0b	0.998 2c
TK2	2 413.607 8b	10.127 4b	0.995 8ab	2 384.600 0b	0.998 1ab
TK3	2 565.226 0b	9.881 5bc	0.993 5ab	2 513.250 0b	0.997 1bc
TK4	2 540.432 8b	10.234 5b	0.997 0a	2 527.200 0b	0.998 2ab
TK5	2 493.390 2b	10.053 2b	0.994 9a	24 57.000 0b	0.997 7ab
TK6	3 186.564 1a	10.548 6a	0.994 1ab	3 151.600 0a	0.998 5a

他处理减少、沼液中的磷易受到水分的推动而向下迁移，本研究也提到类似结果，可能是由于大量的沼液施用破坏了土壤养分平衡。本研究中，沼液浓度对土壤团聚体结构产生显著影响，施用高浓度沼液土壤团聚体稳定性更强。这与阮仁杰等[23]的研究结果一致，土壤中有机物质的增加使土壤团聚体水稳定性增强，为微生物提供了一个适宜的栖息环境。然而施用干式发酵沼液的土壤细菌多样性指数和丰度显著下降，Wei等[24]研究表明，高氮含量沼液虽然提高土壤肥力，但垂直养分迁移也引起了底土酸化和降低酶活性，可能是因为湿式发酵沼液中氮含量低，对微生物的影响相对温和，有利于微生物的活动，微生物与土壤相互作用，提高作物氮素利用率和产量，这与Chen等[25]研究结果一致。综上，虽然干式发酵沼液可以显著增加土壤中的全氮等养分，但由于植物无法及时吸收过量的养分，造成养分的富营养化，导致养分向下淋溶，增加了污染地下水的风险[26]。

3.2 配施方法对土壤理化性质的影响

在农田生态系统中，不同施肥模式可以显著改变土壤结构和微生物环境，进而影响土壤理化性质[27]。王韵弘等[28]发现，施用有机肥可以增加微生物分泌物等促进土壤团聚体形成、增大团聚体粒径，本研究也得到类似的结果，施用有机肥相比CK增加了小粒径团聚体数量。这可能是由于有机肥的施用增强了碳转化微生物酶的活性，而较大团聚体中的有机碳易于被微生物分解转化，从而促进大团聚体向较小级别团聚体的迁移[29]。沼渣与沼液配施时，土壤大团聚体数目增加。

单施有机肥后，耕作层土壤有机质含量显著高于其他处理，有机质含量随着土层深度的增加而减少。单施沼液使深层土壤有机质含量增加，说明有机物料还田显著增加有机质含量，且在耕作层的提升幅度更明显[30]，这与Mi等[31]的研究结果一致。牛云梦等[32]研究证明，有机肥施用年限是影响土壤有机质含量变化的主要因素，长期施用有机肥对土壤有机质含量的提升效果最好。Mayer等[33]的研究也表明，只有长期连续施用纯有机肥料才能使土壤中的有机碳维持在较高的水平，从而确保土壤肥力。本研究涉及的试验时间为4个月，施用有机肥处理土壤中有机碳分解速率较小，沼液更易被土壤微生物吸收和利用，从而加速了土壤有机质的分解和再生，还能有效促进植物的生长，植物残渣进一步提升土壤有机质的含量[34]。Luo等[35]研究证实，沼渣和有机肥作基肥、沼液作追肥，通过改善土壤结构和微生物活动，将沼液中的营养物质固定在沼渣和有机肥上，减少了养分损失。Wang等[36]的研究表明，长期单施有机肥不仅提升土壤有机碳含量效果最显著且可以防止土壤酸化。本研究也证实，添加沼渣和沼液比单施有机肥更能提升土壤总养分含量，减少淋溶损失。

参考文献 References

[1] XIE J, WANG D, CHEN Y X, et al. Neutral purple soil acidification and mineralogical property changes due to long-term urea application in southwest China[J/OL]. Soil and tillage research, 2024, 244: 106227 [2025-02-25]. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106227.

[2] 肖倩，武升，刘莹，等. 不同有机养分替代化肥对小麦产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响[J]. 农业环境科学学报，2023，42(10)：2291-2300. XIAO Q, WU S, LIU Y, et al. Effects of different combinations of organic nutrients and chemical fertilizers on wheat yield, nitrogen use efficiency, and soil fertility [J]. Journal of agro-environment science, 2023, 42(10): 2291-2300 (in Chinese with English abstract).

[3] DE CORATO U, VIOLA E, KESWANI C, et al. Impact of

the sustainable agricultural practices for governing soil health from the perspective of a rising agri-based circular bioeconomy [J/OL]. Applied soil ecology, 2024, 194: 105199 [2025-02-25].https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105199.

[4] WANG H, WANG H T, LIANG X Y, et al.Replacing chemical fertilizers with biogas slurry is an environment friendly strategy to reduce the risk of soil nitrogen leaching: evidence from the HYDRUS model simulation [J/OL]. Agriculture, ecosystems & environment, 2024, 369: 109043[2025-02-25]. https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109043.

[5] VO N X Q, TRAN T P O, LAM P T H, et al.Reuse of biogas sludge for the slow-release fertilizer production to improve fertilizer use efficiency and soil fertility [J/OL]. Bioresource technology reports, 2024, 26: 101877 [2025-02-25]. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101877.

[6] 崔文静,李施雨,李国学,等.基于沼液浓缩的液态有机肥利用现状与展望[J].农业环境科学学报,2021,40(11):2482-2493.CUI W J, LI S Y, LI G X, et al.Current research status and perspectives on liquid organic fertilizer utilization based on concentrating biogas slurry [J]. Journal of agro-environment science, 2021, 40 (11) : 2482-2493 (in Chinese with English abstract).

[7] 刘致君.浓缩沼液配方肥配制及对小白菜生长的影响[D].泰安:山东农业大学,2023.LIU Z J.Preparation of concentrated biogas slurry formula fertilizer and its effect on the growth of Chinese cabbage [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023 (in Chinese with English abstract).

[8] 曲刚.浓缩沼液在大豆上的应用研究[J].农业科技与装备,2024(2):77-78.QU G.Study on application of concentrated biogas slurry on soybean[J].Agricultural science & technology and equipment, 2024(2):77-78 (in Chinese with English abstract).

[9] 娄雨,李艳,姜灵伟,等.不同浓度沼液及施用方式对小白菜生长效果的影响[J].中国农业大学学报,2024,29(8):86-94.LOU Y, LI Y, JIANG L W, et al.Effects of different concentrations and application methods of liquid digestate on the growth of Chinese cabbage [J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(8): 86-94 (in Chinese with English abstract).

[10] 康婉青,徐娅玲,徐晓玲,等.不同沼液施用量对土壤养分和土壤细菌群落结构的影响[J].中国草地学报,2022,44(10):75-83.KANG W Q, XU Y L, XU X L, et al.Effects of different biogas slurry application rates on soil nutrients and soil bacterial community structure [J]. Chinese journal of grassland, 2022, 44(10): 75-83 (in Chinese with English abstract).

[11] 周炜,王子臣,宗焦,等.沼液与有机肥配施对稻田磷、钾素径流损失的影响[J].中国土壤与肥料,2020(6):240-245.ZHOU W, WANG Z C, ZONG J, et al.Effects of biogas slurry combined with organic fertilizer on runoff loss of phosphorus and potassium in paddy field [J].Soil and fertilizer sciences in China, 2020 (6) : 240-245 (in Chinese with English abstract).

[12] JURGUTIS L, ŠLEPETIENĖ A, AMALEVIČIŪTĖ-VOLUNGĖ K, et al. The effect of digestate fertilisation on grass biogas yield and soil properties in field-biomass-biogas-field renewable energy production approach in Lithuania [J/OL]. Biomass and bioenergy, 2021, 153: 106211 [2025-02-25]. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106211.

[13] YU X Y, ZHU Y J, JIN L, et al.Contrasting responses of fungal and bacterial communities to biogas slurry addition in rhizospheric soil of poplar plantations[J/OL].Applied soil ecology, 2022, 175: 104427[2025-02-25]. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104427.

[14] 刘银秀,池永清,董越勇,等.不同沼液施用年限土壤养分含量和微生物群落结构差异[J].植物营养与肥料学报,2023,29(3):483-495.LIU Y X, CHI Y Q, DONG Y Y, et al.Variation of nutrient content and microbial community in soils under different application years of biogas slurry [J].Journal of plant nutrition and fertilizers, 2023, 29 (3) : 483-495 (in Chinese with English abstract).

[15] BARRA CARACCIOLO A, VISCA A, RAUSEO J, et al. Bioaccumulation of antibiotics and resistance genes in lettuce following cattle manure and digestate fertilization and their effects on soil and phyllosphere microbial communities [J/OL]. Environmental pollution, 2022, 315: 120413 [2025-02-25]. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120413.

[16] 熊涵,刘彦伶,李渝,等.长期不同施肥模式对黄壤旱地土壤细菌群落结构和土壤养分的影响[J].应用生态学报,2023,34(7):1949-1956.XIONG H, LIU Y L, LI Y, et al.Effects of long-term fertilization patterns on bacterial community structure and soil nutrients in dryland of yellow soil [J]. Chinese journal of applied ecology, 2023, 34(7): 1949-1956 (in Chinese with English abstract).

[17] 张亚飞,李秀芬,俞映倞,等.长、短期有机肥施用对菜地矿化氮流失的影响[J].农业环境科学学报,2025,44(4):1066-1077.ZHANG Y F, LI X F, YU Y J , et al.Effects of long-term and short-term organic fertilizer application on mineralized nitrogen loss in vegetable fields [J].Journal of agro-environment science, 2025, 24 (4) : 1066-1077 (in Chinese with English abstract).

[18] 王慧敏,唐蛟,吕利娟,等.沼渣沼液混施对潮土团聚体结合有机碳的影响[J].河南科技学院学报(自然科学版),2024,52(1):25-32.WANG H M, TANG J, LÜ L J, et al.Effect of biogas slurry and biogas residue combined application on aggregates associated organic carbon in fluvo-aquic soil[J].Journal of Henan Institute of Science and Technology (natural science edition), 2024, 52(1): 25-32 (in Chinese with English abstract).

[19] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,2000.LU R K.Methods of soil agrochemical analy-

sis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000(in Chinese).

[20] 赵培.浓缩沼液肥对作物产量品质及土壤质量的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.ZHAO P.Effect of concentrated biogas slurry fertilizer on crop yield and quality and soil quality [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019 (in Chinese with English abstract).

[21] CHEN Z M, MA J C, MA J W, et al.Long-term biogas slurry application increases microbial necromass but not plant lignin contribution to soil organic carbon in paddy soils as regulated by fungal community [J]. Waste management, 2024, 175: 254-264.

[22] 张云,周敬,金汉帅,等.不同浓度沼液处理对土壤及玉米苗期生长发育的影响[J].农业与技术,2023,43(10):24-27. ZHANG Y, ZHOU J, JIN H S, et al.Effects of different concentrations of biogas slurry treatment on the growth and development of soil and maize at seedling stage[J].Agriculture and technology, 2023, 43(10): 24-27 (in Chinese with English abstract).

[23] 阮仁杰,屠人凤,李阳,等.旱作红壤团聚体稳定性对沼液化肥混合溶液的响应研究[J].中国土壤与肥料,2021(4):26-32.RUAN R J, TU R F, LI Y, et al.Study on the response of the stability of red soil aggregates to chemical fertilizer mixture with biogas slurry in dryland farming[J].Soil and fertilizer sciences in China, 2021(4): 26-32 (in Chinese with English abstract).

[24] WEI X Y, ZHENG L, LI Y, et al.Enhancing soil fertility and organic carbon stability with high-nitrogen biogas slurry: Benefits and environmental risks[J/OL]. Journal of environmental management, 2025, 384: 125584 [2025-02-25]. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125584.

[25] CHEN S D, ZHAO C, YANG W Y, et al.Enhancing rice nitrogen use efficiency *via* plant-microbe-soil interactions: insights from ^{15}N tracing[J/OL]. Applied soil ecology, 2025, 207: 105931 [2025-02-25]. https://doi. org/10.1016/j. apsoil.2025.105931.

[26] 王忠江,张正,刘卓,等.生物炭配施沼液对淋溶状态下土壤养分的影响[J].农业机械学报,2018,49(11):260-267. WANG Z J, ZHANG Z, LIU Z, et al.Effects of biochar combined with biogas slurry on soil nutrients in leaching state[J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(11): 260-267 (in Chinese with English abstract).

[27] 白懿杭,侯赛赛,赵玉璞,等.农田土壤有机碳积累和团聚体稳定过程及其相互作用关系[J].中国土壤与肥料,2024(7):208-220.BAI Y H, HOU S S, ZHAO Y P, et al.Soil organic carbon accumulation and aggregate stabilization processes and their interactions[J].Soil and fertilizer sciences in China, 2024(7):208-220 (in Chinese with English abstract).

[28] 王韵弘,张济世,王红叶,等.提高滨海盐渍地区春玉米产量及改善土壤盐碱特性的综合管理措施[J].植物营养与肥料学报,2021,27(11):2045-2053.WANG Y H, ZHANG J S, WANG H Y, et al.Improving soil properties and maize yield by integrating soil and crop management measures in coastal saline area[J].Journal of plant nutrition and fertilizers, 2021, 27(11):2045-2053 (in Chinese with English abstract).

[29] 潘悦,孙宁,亢玉昆,等.有机肥对潮土团聚体微生物碳代谢功能的影响[J].北京农学院学报,2024,39(4):13-20.PAN Y, SUN N, KANG Y K, et al.Effect of organic fertilizer application on microbial carbon metabolism function in aggregates of fluvo-aquic soil[J].Journal of Beijing University of Agriculture, 2024, 39(4): 13-20 (in Chinese with English abstract).

[30] LIANG Y, AL-KAISI M, YUAN J C, et al.Effect of chemical fertilizer and straw-derived organic amendments on continuous maize yield, soil carbon sequestration and soil quality in a Chinese Mollisol[J/OL]. Agriculture, ecosystems & environment, 2021, 314: 107403 [2025-02-25]. https://doi. org/10.1016/j.agee.2021.107403.

[31] MI W H, GAO F, ZHU K Y, et al.Long-term organic-inorganic fertilization promoted the microbial necromass carbon accumulation in particulate and mineral-associated organic matter fractions in paddy soil[J/OL]. Soil and tillage research, 2025, 253: 106689[2025-02-25]. https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106689.

[32] 牛云梦,魏文良,王均艳,等.长期施用有机肥对土壤有机碳、全氮及腐殖质组分的影响[J].山东农业科学,2024,56(7):106-113.NIU Y M, WEI W L, WANG J Y, et al.Effects of long-term application of organic fertilizer on soil organic carbon, total nitrogen and humus components[J].Shandong agricultural sciences, 2024, 56(7): 106-113 (in Chinese with English abstract).

[33] MAYER M, KRAUSE H M, FLIESSBACH A, et al.Fertilizer quality and labile soil organic matter fractions are vital for organic carbon sequestration in temperate arable soils within a long-term trial in Switzerland[J/OL]. Geoderma, 2022, 426: 116080 [2025-02-25]. https://doi. org/10.1016/j. geoderma.2022.116080.

[34] BHATTACHARYA S S, KIM K H, DAS S, et al.A review on the role of organic inputs in maintaining the soil carbon pool of the terrestrial ecosystem[J]. Journal of environmental management, 2016, 167: 214-227.

[35] LUO Z F, LI Y L, PEI X, et al.A potential slow-release fertilizer based on biogas residue biochar: nutrient release patterns and synergistic mechanism for improving soil fertility[J/OL]. Environmental research, 2024, 252: 119076 [2025-02-25]. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119076.

[36] WANG H X, XU J L, LIU X J, et al.Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China[J/OL]. Soil and tillage research, 2019, 195: 104382[2025-02-25].https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104382.

Effects of combined application of biogas slurry with different concentrations and biogas residue/organic fertilizer on soil and soybeans

GONG Ting[1], LIU Sheng[1], XU Chao[2], LI Jun[1], ZHANG Xin[1], NIU Wenjuan[1], YUAN Qiaoxia[1]

1.*College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*;
2.*School of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China*

Abstract The effects of application concentration of biogas fertilizer and method of combined application on the physicochemical properties of soil and the soybean yield at a depth of 0-80 cm were studied under greenhouse cultivation with biogas slurry as liquid fertilizer, biogas residue and organic fertilizer as solid fertilizer, and soybean as tested crop to address the severe challenges posed by the damage of soil structure and nutrient loss to the ecological environment and food safety, while achieving the high-value utilization of waste resources from biogas slurry. The combined application methods and concentration combinations of biogas manure included organic fertilizer alone (TK1), dry fermentation biogas slurry as basal fertilizer combined with organic fertilizer as topdressing (TK2), dry fermentation biogas slurry alone (TK3), biogas residue as basal fertilizer combined with wet fermentation biogas slurry as topdressing (TK4), biogas residue as basal fertilizer combined with organic fertilizer as topdressing (TK5) and biodigne/organic fertilizer mixed base fertilizer combined with wet fermentation biogas slurry as topdressing (TK6). The original soil (campus green soil) was set as the blank control group (CK). The results showed that TK6 had the highest increase in the content of alkaline nitrogen and available phosphorus in the tillage layer of soil, which increased by 3.56 and 2.44 times, respectively. TK3 had the highest increase in the content of available potassium in the tillage layer of soil, with an increase of 9.37 times. The content of total nitrogen and total potassium in the dry fermentation biogas slurry were easy to migrate downward at a depth of 60-80 cm in soil, and the content of total phosphorus in the wet fermentation biogas slurry was easy to migrate downward at a depth of 80 cm in soil. The structure of soil aggregates was significantly affected by the treatment of fertilization. TK1 significantly increased the number of small soil aggregates by 25.2%. TK3 increased the number of large and medium aggregates in soil by 1.68%. Compared with other treatments, the TK1 had the highest loss of nitrogen in soil and the lowest yield of soybeans, while TK4 had the highest yield of soybeans about 4 350 kg/hm^2. It is indicated that the application of dry fermented biogas slurry alone significantly increases the content of nutrients in the tillage layer of soil and makes it easier for nutrients to migrate downwards. The combination of biogas residue as base fertilizer and wet fermented biogas slurry as topdressing is more conducive to improving the yield of soybeans.

Keywords biogas slurry; biogas residue; organic fertilizer; combined application; physicochemical properties of soil; soybean

（责任编辑：张志钰）