

沼液不同施用年限土壤性质差异分析

陈凌霄^{1,2}, 张燕燕³, 赵红², 张昌爱^{1*}

(1. 浙江科技学院, 浙江 杭州 310023; 2. 泰安市城市管理综合服务中心, 山东 泰安 271000; 3. 泰安市园林管理处, 山东 泰安 271000)

摘要: 为分析沼液连续多年还田施用后对土壤生态系统造成的影响, 选择示范园区内沼液连续还田利用年限不同的地块作为研究对象, 研究沼液不同施用年限间土壤性质的差异, 以期对沼液的科学施用提供依据。研究结果表明: 在酸性土壤中沼液还田利用能够提高土壤 pH 值, 并致使土壤交换性氢离子和交换性铝离子含量下降, 且随着沼液施用年限的增加土壤酸碱平衡体系更加稳定; 沼液施入土壤后会增加土壤还原性物质总量及土壤活性还原性物质总量, 且活性还原物质占还原性物质总量的比例也有所提高, 沼液长期还田利用对土壤的氧化-还原平衡有明显的扰动作用; 随着沼液施用年限的增加, 土壤水溶液中 HCO_3^- 含量呈现下降趋势, Cl^- 含量和 SO_4^{2-} 含量呈现增加趋势, 而土壤水溶性 K^+ 、 Na^+ 含量出现累积, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量却呈现下降趋势。与 CK 处理相比, Y1、Y2、Y3 和 Y4 处理包菜的鲜重分别增加了 9.08%、16.32%、35.57% 和 49.41%, 而包心重分别增加了 6.48%、10.79%、20.15% 和 23.46%。试验期内包菜种植中沼液施用表现出稳定持续的增产效果。

关键词: 沼液; 酸碱平衡; 交换性酸; 还原性物质; 可溶性盐含量

中图分类号: S15; S216.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2023)04-0040-06

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023040040

Effects of Applied Biogas Slurry Continuously for Different Application Years on Soil Chemical Characteristics and Cabbage Growth / CHEN Lingxia^{1,2}, ZHANG Yanyan³, ZHAO Hong², ZHANG Changai^{1*} / (1. Zhejiang university of science and technology, Hangzhou 310023, China; 2. Taian city management comprehensive service, Taian 271000, China; 3. Tai'an garden management office, Taian 271000, China)

Abstract: The objective of this study was to predict the potential influence applied biogas slurry continuously for many years on soil chemical characteristics and cabbage growth. Farmlands have been irrigated using biogas slurry for different years were chose as the research object, and soil characteristics and cabbage growth in the different farmland were conducted, so can to provide practical basis for scientific application of biogas slurry. The results of the experiment indicated that soil pH value enhanced, soil exchangeable H^+ and exchangeable Al^{3+} descend by applied BS, the acid-alkali balance of soil could been easier keep stable if BS been used for more years. The contents of reductive material, activity reductive material, and ratio of active reducing substances are all increased with the age applied BS added. The redox balance of soil have been broken because of applied BS; Soil water-soluble K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- were been affected obviously by applied BS, and the contents of water-soluble K^+ , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} are all increased. And the contents of soil water-soluble Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- are all decreased with the age applied BS added. Cabbage output and potassium content are all elevated, nitrogen content of cabbage was reduced, and phosphorus content of cabbage was not influenced with the age applied BS added.

Key words: biogas slurry (BS); cabbage; acid-alkali balance; exchangeable acidity; reductive materials; soluble salt ions content

沼液作为养殖粪污厌氧消化处理后的重要产物, 是具有显著增产效果的有机肥资源^[1-2], 因此以沼液为纽带的种养循环生产体系中, 沼液还田利用

是重要的生产环节^[3-4]。有关沼液还田利用方面的研究较多, 沼液施用在蔬菜、粮食、水果等多种作物种植中都表现出显著的增产效果^[5-7], 同时, 沼液还

收稿日期: 2022-09-16 修回日期: 2022-11-28

项目来源: 浙江省重点研发计划项目(2019C02053); 浙江省废弃生物质循环利用与生态处理技术重点实验室开放基金(HZ-2020-011)。

作者简介: 陈凌霄(1971-), 女, 高级工程师, 主要从事污水处理方面的科研及技术等工作, E-mail: 287203640@qq.com

通信作者: 张昌爱, E-mail: zca2006@sina.com

田利用也有利于土壤肥力及土壤质量的提升^[7-9], 并且利用沼液作为有机肥资源开展替代化肥技术研究^[10-11]也逐步受到重视, 因此, 随着沼气在我国的发展, 沼液还田利用方面的研究已逐步成为研究热点之一^[12-13]。

但由于沼液在具备一定营养成分的同时, 也存在盐分含量较高、成分较为复杂、还原电位值较低, 粘性较高的特点^[14-15], 因此在沼液还田利用中也需要兴利除弊、科学施用, 尤其开展长期施用后对土壤性质的影响分析很有必要。要研究沼液长期还田利用的效果, 不仅需要长期的定位试验, 也要考虑诸如沼液性质变迁、施肥因素、土地种植作物的相对稳定等因素, 目前由于缺乏较好的试验条件, 沼液长期还田利用, 尤其同一地块不同沼液施用年限方面的研究报道较少。

浙江某生态牧业有限公司是一家奶牛养殖企业, 自2011年就完善了园区内以沼气为纽带的种养循环生产体系, 随着沼气工程运行的稳定, 园区逐年扩大沼液还田利用土地面积, 因此在园区内可找到沼液施用年限不同的地块作为研究对象。文章在调查分析的基础上, 试验选择1~6年沼液不同还田利用年限的地块, 并且这些地块具有一致的土壤基底, 且均采用“春玉米+夏玉米+包菜”的种植模式, 每处理种植面积均不低于30亩, 依次为基础研究了不

同沼液施用年限间土壤性质的差异, 从而为沼液的科学施用提供参考和依据。

1 材料与方法

浙江某生态牧业有限公司建有4000 m³的大型沼气工程, 以奶牛场牛粪为原料经厌氧发酵生产的沼液为试材, 其具体性状见表2; 以本公司的种植区作为研究对象, 在调查中勘定的基础上确定了沼液不同利用年限的5种地块作为研究分析标本, 从而分析沼液还田利用不同年限土壤性质的差异。这5种地块分别为: 1) CK处理: 未施用沼液地块; 2) Y1处理, 沼液还田利用1年地块; 3) Y2处理, 沼液还田利用2年地块; 4) Y3处理, 沼液还田利用4年地块; 5) Y4处理, 沼液还田利用6年地块。

试验区采用“玉米-玉米-甘蓝”的轮作方式, 沼液采用管道和泵体输送至田间沟灌施用。在每年四月中旬按照每亩20 kg复合肥(15-15-15)用量施用基肥, 然后对土壤采用机械深耕, 耙平后机械播种。第一茬玉米于7月中下旬全株机械打碎作青贮饲料, 而后直接播种第二茬玉米, 于10月上旬收获作青贮饲料; 此后每亩施入30 kg复合肥(15-15-15)种植甘蓝至12月下旬收获。土壤类型为壤质潮土, 试验前未施用沼液处理土壤基本理化性状如表1所示。

表1 供试土壤基本理化性质

有机质 (g·kg ⁻¹)	有效氮 (mg·kg ⁻¹)	速效磷 (mg·kg ⁻¹)	速效钾 (mg·kg ⁻¹)	pH值	电导率 (uS·cm ⁻¹)	砂粒 (g·kg ⁻¹)	粉粒 (g·kg ⁻¹)	粘粒 (g·kg ⁻¹)
17.64	106.72	46.45	186.32	5.53	72.1	244	253	503

注: pH值和EC测定的土水比为1:5。

沼液采用浇灌沟兑水沟灌, 兑水比为1:1, 分别在春玉米苗期、春玉米大喇叭口期、夏玉米苗期、夏玉米收获后4个时期各浇灌1次, 每亩土地沼液周年总用量约合50~60 t。由于奶牛养殖中各季节冲洗水用量不同, 故夏秋季与冬春季节沼液的营养成分含量有一定差异, 其基本理化性状如表2所示。

土壤pH值采用1:5土水比, pHSJ-3F型酸度计电位法测定, 植株全氮、磷、钾采用H₂SO₄-H₂O₂消化法处理样品, 凯式定氮法测定氮, 比色法测定磷, 火焰光度法测定钾; 土壤可溶性盐采用1:5土水比浸提, 水浴蒸干称重法测定, 钾、钠用火焰光度法测定, 钙、镁离子用原子吸收分光光度法测定, 硫酸根用铬酸钡比色法测定^[16], 沼液的氧化还原电位和pH值采用FIA-4型ORP测定仪原位测定; 铵态氮

表2 沼液理化性质

指标	冬春季沼液	夏秋季沼液
氧化还原电位/mv	-45.32	-25.37
pH值	7.85	7.62
可溶性盐含量/%	0.546	0.423
铵态氮/(mg·L ⁻¹)	296.3	205.9
有机质/%	1.776	1.433
全氮/%	0.122	0.089
全磷/%	0.18	0.145
全钾/%	0.172	0.133
氯离子Cl ⁻ /(mg·L ⁻¹)	351.36	337.83
钠离子Na ⁺ /(mg·L ⁻¹)	421.35	403.74
钙离子Ca ²⁺ /(mg·L ⁻¹)	65.43	60.12
镁离子Mg ²⁺ /(mg·L ⁻¹)	20.11	18.27

含量采用稀释后溶液流动注射仪测定;其他项目均采用常规分析测定^[17]。数据采用 SAS 软件进行处理和分析。

2 结果与讨论

2.1 沼液还田利用对土壤酸碱平衡体系的影响

2.1.1 沼液还田利用对土壤 pH 值的影响

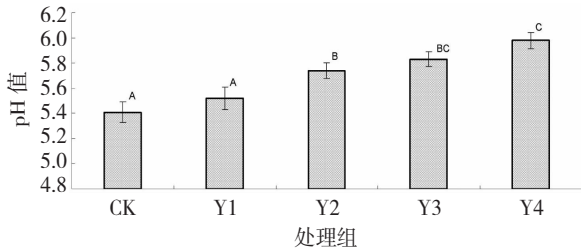


图1 各处理土壤的 pH 值

试验前未施用沼液处理土壤的 pH 值为 5.53 (见表 1), 而甘蓝种植后变成了 5.41 (见图 1), 因而正常种植状态下土壤出现逐步酸化的趋势, 而沼液还田利用后对土壤的 pH 值有极显著的影响, 未使用沼液地块的土壤 pH 值最低, 而随着沼液还田利用年限的增加, 土壤 pH 值持续升高。与 CK 处理相比, 除了沼液施用 1 年地块外, 其他处理地块的土壤 pH 值提升幅度较大, 与对照相比差异均达到显著水平; 沼液连续还田利用 2 年后土壤 pH 值有了显著提高, 但还田 4 年与还田 2 年的土壤 pH 值差异未达到显著水平, 同时还田 4 年与还田 6 年地块相比, 土壤 pH 值差异也未达到显著水平, 这表明随着沼液还田利用年限的增加, 沼液对土壤 pH 值的扰动作用在下降, 因此沼液对土壤 pH 值的影响具有明显的缓冲性。已有研究证实沼液还田利用会显著增加酸性土壤的 pH 值^[18], 虽然沼液中的有机物也会在矿化的过程中产生一定的有机酸, 但沼液本身具有较高 pH 值, 且含有较高含量的阳离子, 因此盐基离子的增加会减缓土壤的酸化。沼液还田利用后对土壤 pH 值的影响作用不能简单以升高或下降作为评判, 实际上沼液对土壤酸碱平衡的扰动较为复杂, 需要做进一步或更深入的研究。

2.1.2 沼液还田利用对土壤交换性酸的影响

交换性酸度说明土壤中交换性盐基不能饱和, 而代替其位置的是交换性氢离子和铝离子。研究结果表明 (见图 2), 土壤添加沼液后, 土壤的交换性铝含量显著降低, 交换性铝含量在各处理间的大小顺序为: CK > Y1 > Y2 > Y3 > Y4。从土壤酸化的角度

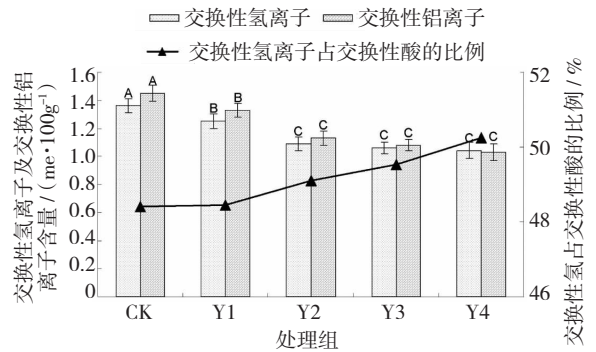


图2 各处理间土壤交换性氢离子(Ex-H)和交换性铝离子(Ex-Al)的变化

分析, 交换性铝离子的存在, 是土壤潜性酸的主要来源, 因而交换性 Al^{3+} 的存在和增加不是土壤酸化的原因, 而是土壤酸化的结果^[19]。因此可以看出, 沼液加入土壤后, 影响了土壤的酸碱平衡, 造成了土壤酸化恢复。但值得注意的是, 沼液还田 2~6 年间处理土壤的交换性铝含量没有显著性差异, 可见土壤的酸度的降低不会无限制延续, 一方面土壤酸化难以及时恢复, 另一方面可能在于沼液中的有机物增加了土壤的酸碱缓冲性能, 有利于土壤酸碱缓冲体系的稳定。

土壤交换性氢离子含量在不同处理间的大小顺序为: CK > Y1 > Y2 > Y3 > Y4, 表明随着沼液施用年限的增加, 土壤交换性氢离子含量呈现降低的趋势, 但 Y3、Y4 和 Y2 这 3 个处理之间的差异不显著。交换性氢离子和交换性铝离子构成了土壤的潜在酸度, 反映了土壤进一步酸化的趋势。

土壤交换性氢离子所占交换性酸的比例反映了土壤交换性酸的组成, 其值越小表明土壤中铝的活化越明显, 土壤酸碱平衡的影响可能越剧烈。各处理间交换性氢离子所占交换性酸的比例大小顺序为: Y4 > Y2 > Y3 > Y1 > CK。因此可以看出沼液的施用不仅提高了土壤 pH 值, 且随着沼液施用年限的增加土壤酸碱平衡体系越稳定。因此沼液还田利用有利于土壤酸碱平衡体系的稳定。

2.2 沼液还田利用对土壤中还原性物质的影响

土壤的还原性物质含量既反映了土壤的氧化还原状态, 也反映各处理对土壤氧化还原体系的影响^[20]。如图 3 所示, 沼液施用土壤的还原性物质总量及活性还原物含量都有所增加, 表明沼液施入土壤后会使土壤更容易处于嫌气状态, 土壤的氧化反应会受到一定抑制, 从而增加了土壤中的还原性物质存在的可能。

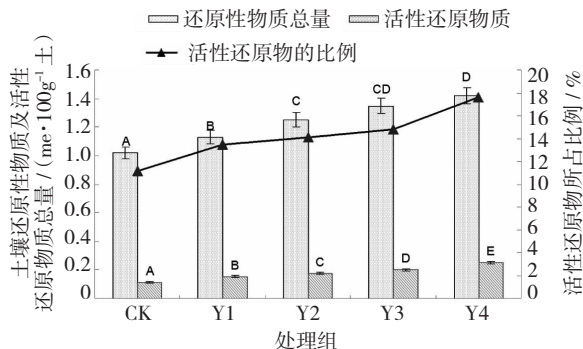


图3 各处理间土壤中还原性物质(RM)和活性还原物质(ARM)含量

各处理间还原性物质总量的大小顺序为:Y4 > Y3 > Y2 > Y1 > CK。与CK处理相比,Y4、Y3、Y2和Y1处理还原性物质总量分别增加了39.22%、32.35%、22.55%和10.78%,差异均达到显著水平。Y2与Y3、Y3与Y4处理相比,土壤还原性物质总量差异未达到显著水平,这表明沼液施用的影响主要是改变了土壤的氧化还原环境,而不是还原性物质的带入,尽管 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是重要的还原性物质,但在收获期,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 已转化或溢失。

活性还原物质在各处理间的大小顺序与还原性物质总量一致,活性还原物所占的比例表现出的趋势也几乎与之相近。活性还原物所占比例较低,一般在11.17%~17.61%。

2.3 沼液还田利用对土壤可溶性盐含量的影响

2.3.1 沼液还田利用对土壤水溶液中阴离子的影响

试验各处理间土壤 HCO_3^- 含量的高低顺序为:CK > Y1 > Y2 > Y3 > Y4,施用沼液后,土壤的 HCO_3^- 含量有下降的趋势:与CK处理相比,沼液施用1年后土壤 HCO_3^- 含量下降了3.21%,但未达到差异显著水平;沼液施用超过2年,则其差异达到了显著水平,但Y2、Y3、Y4处理间无显著差异(见图4)。土壤中 HCO_3^- 的含量受两个主要因素影响:一是产生

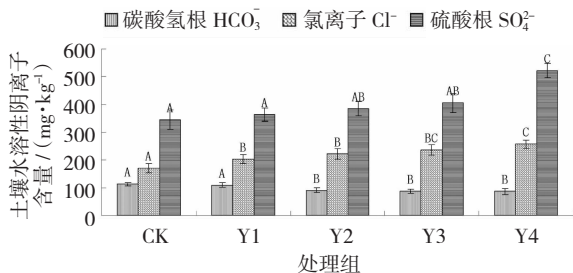


图4 各处理土壤的阴离子含量(5:1水溶液)

量,二是 HCO_3^- 本身的转化快慢。沼液本身pH值较高,不利于 HCO_3^- 的存在,这应该是主要的原因。

土壤中 Cl^- 含量随着沼液施用年限的增加而呈现增加的趋势,与CK处理相比,其他处理的土壤 Cl^- 含量都有显著增加,其中Y4处理的土壤 Cl^- 含量增加最大,达到了50.61%(见图4)。沼液本身含有较高的盐分,其中 Cl^- 含量较高,沼液的施用给土壤带来了大量 Cl^- ,同时由于沼液含有较高成分的可溶性有机物^[21],因而土壤粘滞性、吸附性均有所提高,所以会致使大量 Cl^- 在表层土中滞留。尽管我们还不清楚土壤 Cl^- 含量的提高会带来哪些影响,但这种现象应该引起重视。

试验各处理间土壤 SO_4^{2-} 含量的高低顺序为:Y4 > Y3 > Y2 > Y1 > CK,土壤 SO_4^{2-} 含量随着沼液利用年限的延长而增加,与CK处理相比,Y1、Y2、Y3及Y4处理土壤 SO_4^{2-} 含量分别增加了5.50%、11.64%、17.36%及51.33%。除Y1处理外,其他处理土壤 SO_4^{2-} 含量与CK处理均达到显著性差异水平,整体而言沼液还田利用造成的土壤 SO_4^{2-} 含量变化与土壤 Cl^- 含量的变化极为相似,其原因也基本一致。因此沼液长期还田利用造成土壤中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 在耕层土中累积现象值得重视和进一步研究。

2.3.2 沼液还田利用对土壤水溶液中阳离子含量的影响

甘蓝收获后,在未施用沼液处理中土壤水溶性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量情况如图5所示,其中钙离子含量较高,约占四种阳离子总量的36.78%。

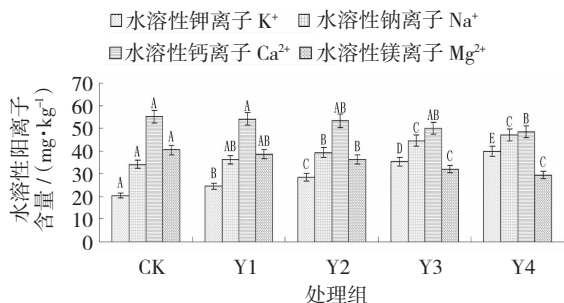


图5 各处理土壤中水溶性阳离子含量(5:1水溶液)

施用沼液处理中,土壤的水溶性 K^+ 含量呈现随沼液施用年限延长而增加的趋势(见图5):与CK相比,Y1、Y2、Y3和Y4处理土壤的水溶性 K^+ 含量分别增加了20.22%、39.11%、73.08%和95.64%,差异均达到显著水平;与Y1处理相比,Y2处理土壤的水溶性 K^+ 含量增加了15.72%,差异也达到了

显著水平;同时不同沼液施用年限处理之间相比,差异均达到显著水平。由此可见,在现有管理模式下,耕层土壤的水溶性 K^+ 含量出现了累积现象,这是否表征土壤钾素的过量呢?实际上,由于 NH_4^+-N 的存在,会出现土壤浸提液中 K^+ 含量升高的现象^[22],但是否是重要原因尚有待进一步研究和分析。从生产角度而言,尽管沼液促进了甘蓝生物量的增加(见图6),但土壤的水溶性 K^+ 含量仍出现累年升高的趋势,这表明植物钾素的吸收已处于奢侈吸收的状态,因此生产中应在此基础上减少钾肥的用量。

各处理间土壤水溶性 Na^+ 含量变化情况与 K^+ 含量变化情况类似,亦呈现随沼液施用年限延长而升高的现象,且差异除了 Y1 和 Y2 间之外均达到了显著水平,甚至 Y4 处理土壤水溶性 Na^+ 含量比 CK 处理提高了 38.09%。沼液本身含有价高含量的 Na^+ ,且由于沼液的施用,土壤耕层的蓄水保肥能力得到显著加强^[23],因此 K^+ 和 Na^+ 在土壤耕层的增加可以理解。

各处理间土壤 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量高低顺序基本一致,均为:CK > Y1 > Y2 > Y3 > Y4。可见随沼液施用年限的延长土壤 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量呈现逐步下降的趋势。其原因在于沼液还田利用不仅没有带入较高量的离子,也可以通过增加土壤酸度而促进这两种离子的活化,且沼液施用促进了植物生长和生物量的增加,必然会促进植物对 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的吸收,从而出现累年下降的趋势。

2.4 沼液还田利用对包菜鲜重及包心重的影响

包菜鲜重和包心重是反映包菜生长的重要指标。各处理间包菜鲜重和包心重的大小顺序是一致的,均为:Y4 > Y3 > Y2 > Y1 > CK(见图6)。包菜是喜肥作物,大肥大水有利于包菜产量的提高,因此在一致的管理水平下,沼液还田利用能带来显著的增产效果。与 CK 处理相比,Y1、Y2、Y3 和 Y4 处理

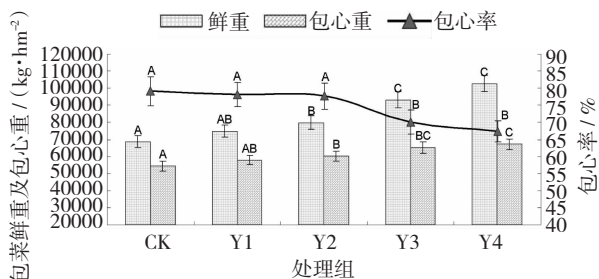


图6 沼液施用对包菜产量及包心率的影响

的鲜重分别增加了 9.08%、16.32%、35.57% 和 49.41%,而包心重分别增加了 6.48%、10.79%、20.15% 和 23.46%。因此在沼液连续还田利用 6 年内,随沼液还田利用年限的增加,包菜种植中沼液施用表现出稳定持续的增产效果。

包心率反映了包菜生产中成品菜的生产效率,也反映出植株的生长状况和营养供应状况。试验中发现,随着沼液施用年限的增加,包心率呈现下降趋势,尤其在沼液连续施用 4 年之后,包心率下降更为明显。沼液长期施用造成包菜包心率下降的现象,表明沼液的施用在营养元素协调、供肥需肥拟合等方面仍存在不合理的可能。因此沼液还田利用虽然有很好的前景,但也包涵科学施用的具体内容,尤其其他元素配施、施用间歇期、施用后土壤水肥气热调节等,都必须经过系统研究。

3 结论

(1)在酸性土壤中沼液还田利用能够提高了土壤 pH 值,减缓土壤的酸化,且随着沼液施用年限的增加土壤酸碱平衡体系更加稳定。具体表现为随沼液还田利用年限的增加,土壤 pH 值显著提高,交换性氢离子和交换性氯离子含量都有所下降,且交换性氢离子占交换性酸的比例有所提高。

(2)沼液施入土壤后会增加土壤还原性物质总量及土壤活性还原性物质总量,活性还原物质占还原性物质总量的比例也有所提高,因此沼液长期还田利用对土壤的氧化还原平衡有明显的扰动作用。

(3)随着沼液施用年限的增加,土壤水溶液中 HCO_3^- 含量呈现下降趋势,而 Cl^- 含量和 SO_4^{2-} 含量呈现增加趋势;随着沼液施用年限的增加土壤水溶性 K^+ 、 Na^+ 含量出现累积,而土壤水溶性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量却呈现下降趋势。

(4)与 CK 处理相比,Y1、Y2、Y3 和 Y4 处理的鲜重分别增加了 9.08%、16.32%、35.57% 和 49.41%,而包心重分别增加了 6.48%、10.79%、20.15% 和 23.46%。但包菜的包心率随沼液施用年限的增加而降低。在沼液连续还田利用 6 年内,随沼液还田利用年限的增加,包菜种植中沼液施用表现出稳定持续的增产效果。

参考文献:

- [1] Yu W, Zhang Z, Luo S, et al. Study on the characteristics of soil irrigated by biogas slurry in the southwest of

- China [J]. *Asian Journal of Chemistry*, 2013, 25 (5) : 2861 – 2865.
- [2] Garg R N, Pathak H, Das D K, Tomar R K. Use of flyash and biogas slurry for improving wheat yield and physical properties of soil [J]. *Environ Monit Assess*, 2005, 107 (1 /3) : 1 – 9.
- [3] 钟珍梅, 黄勤楼, 翁伯琦, 等. 以沼气为纽带的种养结合循环农业系统能值分析 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28 (14) : 196 – 200.
- [4] 陈彪, 陈敏, 钱午巧, 等. 规模化养猪场粪污处理工程设计 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21 (2) : 126 – 130.
- [5] 张昌爱, 刘英, 曹曼, 等. 沼液的定价方法及其应用效果研究 [J]. *生态学报* 2011, 31 (6) : 1735 – 1741.
- [6] Wen Ke Liu, Qi Chang Yang, Lian Feng Du, et al. Nutrient supplementation increased growth and nitrate concentration of lettuce cultivated hydroponically with biogas slurry [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil Plant Science*, 2011, 61 : 5, 391 – 394.
- [7] Fang Bo Yu, Xi Ping Luo, Cheng Fang Song, et al. Concentrated biogas slurry enhanced soil fertility and tomato quality [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil Plant Science*, 2010, 60 : 3, 262 – 268
- [8] Dauden A, Quilez D. Pig slurry versus mineral fertilization on corn yield and nitrate leaching in a Mediterranean irrigated environment [J]. *European Journal of Agronomy*, 2004, 21 (1) : 7 – 19.
- [9] Forge T A, Bitiman S, Kowlenko C G. Responses of Grass land Soil Nematodes and Protozoa to Multi-Year and Single-Year Applications of Dairy Manure Slurry and Fertilizer [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37 (9) : 1751 – 1762.
- [10] 王靖荃, 谷端银, 于晓东, 等. 沼液部分替代化肥在日光温室秋番茄上的应用效果 [J/OL]. *应用生态学报*. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201901.035>.
- [11] 王桂良, 张家宏, 王守红, 等. 沼液替代化肥氮对冬小麦产量、品质及生长发育的影响 [J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35 (5) : 467 – 475.
- [12] T K Enock, C K King' ondu, A Pogrebnoi. Effect of biogas-slurry pyrolysis temperature on specific capacitance [J]. *Mater Today Proc*, 2018, 5 : 10611 – 10620.
- [13] T E Kibona, Godlisten N Shao, Hee Taik Kim, et al. Specific capacitance-pore texture relationship of biogas slurry mesoporous carbon/MnO₂ composite electrodes for supercapacitors [J]. *Nano Structures Nano Objects*, 2019, 17 : 21 – 33.
- [14] 韩敏, 刘克锋, 王顺利, 等. 沼液的概念、成分和再利用途径及风险 [J]. *农学学报*, 2014, 4 (10) : 54 – 57.
- [15] Willers Hans C, Derikx, et al. Storage, handling and disposal of animal slurries [J]. *Agricultural mechanization and automation*, 2012, 18 (1) : 5 – 10.
- [16] 国家环境保护局. 空气和废气检测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 298 – 300.
- [17] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [18] Rodhe L, Pell M, Yamulki S. Nitrous oxide, methane and ammonia emissions following slurry spreading on grassland [J]. *Soil Use and Management*, 2006, 22 (3) : 229 – 237.
- [19] 戎秋涛, 杨春茂, 徐文彬. 土壤酸化研究进展 [J]. *地球科学进展*, 1996, 11 (4) : 378 – 401.
- [20] 黄红英, 曹金留, 常志州, 等. 猪粪沼液施用对稻麦轮作系统土壤氧化亚氮排放的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30 (11) : 2353 – 2361.
- [21] 靳红梅, 常志州, 叶小梅, 等. 江苏省大型沼气工程沼液理化特性分析 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27 (1) : 291 – 296.
- [22] 张福所. 植物营养: 生态生理学和遗传学 [M]. 北京: 中国农业技术出版社, 1993.
- [23] 余薇薇, 张智, 罗苏蓉, 等. 沼液灌溉对紫色土菜地土壤特性的影响 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28 (16) : 178 – 184.