

沼液对成都平原地区土壤氮、磷、钾含量及其平衡的影响

罗伟¹, 张智慧¹, 伍钧¹, 赖星¹, 孟晓霞², 黄柏豪¹

(1. 四川农业大学环境学院, 成都 611130; 2. 四川省环境保护科学研究院, 成都 610041)

摘要: 为探讨在成都平原地区冲积性水稻土上施用沼液后土壤氮磷钾元素含量的变化及养分平衡的状况, 实现沼液资源化利用的绿色发展。采用田间试验, 设置 10 个沼液施用量梯度, 并以清水与常规化肥为对照。研究施用不同量沼液对土壤氮、磷、钾等养分含量的影响, 并对田间各养分平衡状况进行综合分析。结果表明: 当沼液施用量在 108.0~126.0 t/hm² 时土壤全氮、碱解氮、全钾及速效钾含量较高, 为 1.35~1.42 g/kg, 63.31~65.34 mg/kg, 12.90~13.26 g/kg, 45.45~59.25 mg/kg。随着沼液施用量的增加, 土壤全磷含量(0.92~1.10 g/kg)变化不明显, 而速效磷含量(8.49~18.85 mg/kg)较清水对照相比降低 11.0%~59.9%。沼液处理组土壤氮、磷、钾元素的平衡范围为 -25.61~66.68, -7.99~-15.34, -81.33~-145.82 kg/hm²。当沼液施用量大于 108.0 t/hm² 时, 氮素能基本维持平衡。随沼液施用量增加, 磷素亏损得到缓解, 而钾素亏损加剧。施用适量沼液能提高土壤氮钾元素含量, 但单施沼液难以满足土壤磷钾元素的平衡。因此, 在实际生产过程中沼液施用量应控制在 108.0~144.0 t/hm², 并与 10~15 kg/hm² 磷肥、115~120 kg/hm² 钾肥配合施用才能达到理想的效果。

关键词: 沼液; 土壤; 氮磷钾含量; 养分平衡; 成都平原

中图分类号: S141; S158.2; X712

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0185-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.028

Effects of Biogas Slurry on Soil Nitrogen, Phosphorus and Potassium Contents and Balance in Chengdu Plain

LUO Wei¹, ZHANG Zhihui¹, WU Jun¹, LAI Xing¹, MENG Xiaoxia², HUANG Bohao¹

(1. College of Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130;

2. Sichuan Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610041)

Abstract: In order to explore the changes of soil nitrogen, phosphorus and potassium contents and nutrient balance after applying biogas slurry in alluvial paddy soil in Chengdu Plain, and realize the green development of biogas slurry resource utilization. Field experiments were conducted. Ten gradients of biogas slurry application rate were set up, and clear water and conventional fertilizers were taken as control. The effects of different amounts of biogas slurry on soil nitrogen, phosphorus, potassium and other nutrients contents were studied, and the balance of nutrients in the field was comprehensively analyzed. The results showed that the contents of total nitrogen, alkali-hydrolyzed nitrogen, total potassium and available potassium were higher when the biogas slurry application rate was 108.0~126.0 t/hm², which were 1.35~1.42 g/kg, 63.31~65.34 mg/kg, 12.90~13.26 g/kg and 45.45~59.25 mg/kg. With the increasing of biogas slurry application, the total phosphorus content of soil (0.92~1.10 g/kg) did not change significantly, while the available phosphorus content (8.49~18.85 mg/kg) decreased by 11.0%~59.9% compared with the clear water control. The balance of nitrogen, phosphorus and potassium in the biogas slurry treatment groups were -25.61~66.68, -7.99~-15.34 and -81.33~-145.82 kg/hm². When the amount of biogas slurry was more than 108.0 t/hm², the nitrogen balance was basically maintained. With increasing of biogas slurry application, phosphorus deficit was alleviated, while the potassium deficit was aggravated. Applying appropriate amount of biogas slurry could increase the contents of nitrogen and potassium in soil, but it was difficult to meet the balance of phosphorus and potassium in soil by applying biogas slurry alone. Therefore, the application rate of biogas slurry should be controlled in the range of 108.0~144.0 t/hm² in the actual production, and combined with 10~15 kg/hm² phosphate fertilizer and 115~120 kg/hm² potassium fertilizer to achieve the desired effect.

收稿日期: 2018-12-10

资助项目: 四川省科技支撑计划项目(2014NZ0045)

第一作者: 罗伟(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事废弃物资源化利用研究。E-mail: 1139880834@qq.com

通信作者: 伍钧(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事环境污染生态修复研究。E-mail: wuj1962@163.com

Keywords: biogas slurry; soil; content of nitrogen, phosphorus and potassium ; nutrient balance; Chengdu Plain

沼气工程是一种高效利用农业资源的方式,既实现了能源的清洁生产,又促进环境污染的防治^[1-2]。新世纪以来,沼气工程逐渐普及应用,在处理大量农业废物及养殖粪污的同时,产生大量副产物沼液。沼液中含有氮、磷、钾等多种营养元素,具有较高的还田利用价值^[3]。大量研究^[4-5]表明,施用沼液不仅可以给植物生长提供必需养分,促进作物增产提质,还能增加土壤有机质、氮、磷、钾等含量,提高土壤肥力和生产力水平,兼具环境与经济效益。在当今的农业生产中,施用化肥是保证土壤肥力和农作物高产的关键措施,但盲目施肥追求产量的现象日益严重^[6-7],随之而来的环境问题也日渐突出。因此,控制化肥的输入量,用沼液等效代替化肥具有重要现实意义。

农田养分平衡是影响土地质量的一项重要指标,是指农田养分退化与施肥后养分的重建过程之间的平衡。常规的养分平衡是基于统计资料中提供的施肥和产量数据来计算,普遍使用的计算方法有 2 种:一种是农场总体平衡(Farm gate balance),另一种是土壤表面平衡(Soil surface balance)可被用来计算不同尺度和不同类型的农业系统养分平衡状况^[8-9]。因为土壤、气候条件、农艺技术及作物品种等的不同,各地区养分平衡情况差异较大,但普遍出现氮磷钾元素失衡的情况^[10-11]。徐维明等^[12]探讨不同施肥处理下的土壤养分平衡,发现常规施肥模式下土壤磷、钾素亏损十分严重。因此,因地制宜与合理投入非常重要,农田养分平衡的研究为土壤养分的变化情况提供依据,同时也为治理施肥所带来的环境污染提供新的思路。

目前,沼液农用的研究报道多集中在沼液对作物产量、品质、防病虫害及土壤理化性质的影响等方面^[13-14]。而探讨在成都平原冲积性水稻土上施用沼液对土壤氮磷钾含量及其平衡影响的研究较少。基于此,本文在成都平原腹地双流区,通过田间试验,研究施用不同量沼液对土壤氮、磷、钾等养分含量的影响,并对田间各养分表面平衡状况进行综合分析,以期在成都平原冲积性土壤上的沼液农用提供科学参考和理论依据。

1 材料与方 法

1.1 区域概况

试验区位于四川省成都市双流区金桥镇新安村六组科道农业公司现代农业产业试验区内。试验田的土壤类型为成都平原冲积性水稻土。试验区地势平坦开阔,土层较厚,耕层土壤为粒状结构,松散易耕。试验于 2015 年 10 月至 2016 年 2 月进行,上季

试验作物为油麦菜。试验前土壤基本理化性质:pH 6.51,全氮 1.17 g/kg,全磷 1.01 g/kg,全钾 10.94 g/kg,碱解氮 45.83 mg/kg,速效磷 24.76 mg/kg,速效钾 36.27 mg/kg,有机质 1.88 g/kg。

1.2 试验材料

供试沼液采自科道农业公司大型养殖场,主要发酵原料为养殖废弃物(畜禽粪便)、种植废弃物(蔬菜、秸秆等)、餐厨垃圾等多种混合材料。pH 和主要成分含量见表 1。

表 1 沼液 pH 和主要成分的含量

处理	pH	全氮/ (mg·kg ⁻¹)	全磷/ (mg·kg ⁻¹)	全钾/ (mg·kg ⁻¹)	总残渣/ (g·L ⁻¹)
沼液底肥	7.75	862.49	94.27	127.72	9.86
沼液追肥	7.68	968.53	88.53	154.26	9.45

供试作物为“韩国雪美”白萝卜。供试化肥为四川美丰复合肥料(总养分≥40%,N:P:K 为 20:5:15)。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计 试验共设置 12 个处理,包括 1 个清水对照(CK1)、1 个常规化肥处理(CF1)和 10 个纯沼液处理(BS1~BS10)。处理小区面积为 3 m×4 m (12 m²),12 个处理小区随机区组排列,每个处理小区 3 次重复,小区之间设立保护行间隔 50 cm,再用土夯实并用薄膜包裹防止水肥互串。

萝卜种子做畦穴播 2~3 粒,株距 35 cm,行距 25 cm,沟宽 40 cm。每个小区播 168 粒种子,按东西走势布局种植。种植时 CK1 只施清水,CF1 施 0.75 t/hm² 复合肥料作基肥,BS1~BS10 均施沼液设计总量的 50%作为基肥,剩余 50%分 4 次作追肥施用,分别在 2~3 真叶期、莲坐期、肉质根生长前期及肉质根生长中期按照比例 2:1:1:2 追肥。萝卜种植至小区后,除施肥种类和施用量不同外,其他农事管理按田间常规方法进行,并要求在同一天完成。具体施肥方案见表 2。

1.3.2 样品采集及测定方法 干湿沉降收集方法:在试验田中均匀放置 4 个干湿沉降收集桶,收集桶为外径 20 cm、内径 18 cm、高 75 cm 的聚乙烯塑料桶,受尘面积 254.34 cm²。追施沼液时注意避免带入养分导致结果偏高。收集时间为萝卜整个生长周期。萝卜成熟收获后,将收集桶带回实验室测定干湿沉降带入的氮磷钾含量。

萝卜收获后按照多点分布的原则,以“S”形分别采集各试验小区耕层(0—20 cm)土壤并制成混合土样。土壤样品测定全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾含量,测定方法参照鲁如坤^[15]的方法。

表2 不同施肥量试验设计

单位:t/hm²

施肥时期	CK1	CF1	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	BS6	BS7	BS8	BS9	BS10
播种期(底肥)	0	0.75	36.00	40.50	45.00	49.50	54.00	58.50	63.00	72.00	81.00	90.00
2~3真叶期	0	0	12.00	13.50	15.00	16.50	18.00	19.50	21.00	24.00	27.00	30.00
莲坐期	0	0	6.00	6.75	7.50	8.25	9.00	9.75	10.50	12.00	13.50	15.00
肉质根生长前期	0	0	6.00	6.75	7.50	8.25	9.00	9.75	10.50	12.00	13.50	15.00
肉质根生长中期	0	0	12.00	13.50	15.00	16.50	18.00	19.50	21.00	24.00	27.00	30.00
沼液总用量	0	0	72.00	81.00	90.00	99.00	108.00	117.00	126.00	144.00	162.00	180.00

注 CF1 为复合施用量;BS1~BS10 均匀沼液施用量。

1.3.3 表层土壤养分平衡的计算方法 本研究采用 Soil surface balance 方法计算建立养分平衡模式图,即分别估算养分收入与支出,再进行加和计算土壤氮、磷、钾的平衡状况^[16]。土壤养分输入包括:化肥和沼液的养分投入量、干湿沉降带入养分量(当季通过干湿沉降收集桶共收集到氮素 3.03 kg/hm²,磷素 0.030 kg/hm²,钾素 0.645 kg/hm²)。作物种子带入的养分占养分总投入量的比例极小,故忽略不计。土壤养分输出以农田收获萝卜时带出养分量计,不考虑因淋洗、挥发和反硝化造成的养分损失。计算公式为:

$$\text{养分平衡值}(\text{kg}/\text{hm}^2) = \text{养分输入量} - \text{养分输出量}$$

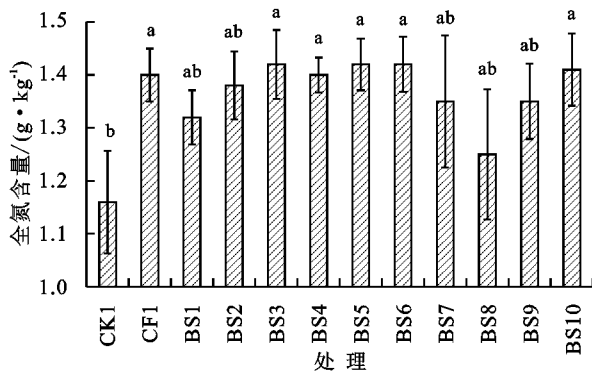
1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件进行处理统计,结合单因素方差分析法和 LSD 法进行多重分析比较,显著水平为 0.05,并用 Origin 8.0 软件完成制图。

2 结果与分析

2.1 沼液对土壤氮、磷、钾元素含量的影响

2.1.1 不同施用量沼液对土壤氮含量的影响 由图 1 可知,沼液处理 BS1~BS10 的土壤全氮含量为

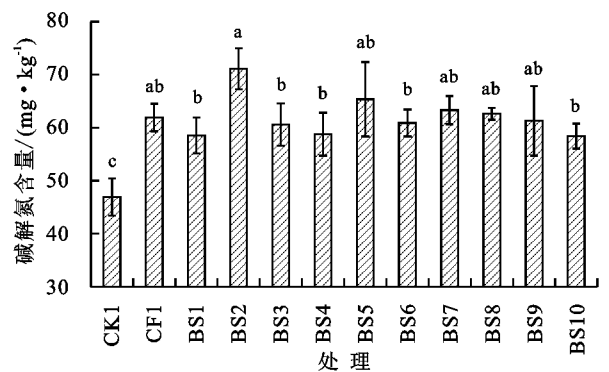


注:同一指标不同字母表示处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图1 不同施用量沼液对土壤全氮和碱解氮含量的影响

2.1.2 不同施用量沼液对土壤磷含量的影响 由图 2 可知,沼液处理 BS1~BS10 的土壤全磷含量为 0.92~1.10 g/kg,CF1 的含量为 1.02 g/kg。随着沼液施用量的增加,土壤全磷含量变化不明显,在沼液处理 BS3 达到最大值 1.10 g/kg,分别较 CK1 及 CF1 高 4.8%,7.8%;在沼液处理 BS8 达到最低值 0.92

1.25~1.42 g/kg,CF1 的含量为 1.40 g/kg,均高于 CK1 组(1.16 g/kg)。随着沼液施用量的增加,土壤全氮含量总体呈先上升后下降的趋势。沼液处理 BS3~BS6 的土壤全氮含量较高为 1.40~1.42 g/kg,较 CK1 差异显著($p < 0.05$),与 CF1 差异不显著,且在 BS5 达到最高水平 1.42 g/kg,分别较 CK1 及 CF1 高 22.4%,1.4%。沼液处理 BS8 达到最低水平 1.25 g/kg,也明显较 CK1 高 7.8%。可见,沼液的施用可显著增加土壤全氮的含量,施用量在 90.0~117.0 t/hm² 时,增加效果明显。沼液处理 BS1~BS10 的土壤碱解氮含量为 58.41~71.09 mg/kg,CF1 的含量为 61.91 mg/kg,均显著高于 CK1 组(46.90 mg/kg) ($p < 0.05$)。沼液处理 BS2 含量最高为 71.09 mg/kg,分别较 CK1 及 CF1 高 51.6%,14.6%;沼液处理 BS5 含量次之为 65.34 mg/kg,分别较 CK1 及 CF1 高 39.3%,5.54%。沼液处理 BS10 的碱解氮含量最低为 58.41 mg/kg,略低于 CF1,但仍较 CK1 高 24.8%。可见,沼液的施用可显著增加土壤碱解氮的含量,施用量在 108.0~162.0 t/hm² 时,土壤碱解氮可以达到较高水平。



g/kg,分别较 CK1 及 CF1 低 12.4%,9.8%,且 CF1 的全磷含量也略低于 CK1。可见,化肥及沼液的施用对当季土壤全磷含量具有一定的负效应,当施用量在 81.0~99.0 t/hm² 时,土壤全磷含量可以达到较高水平,且与其他沼液处理组结果差异显著($p < 0.05$)。土壤速效磷是指能为当季农作物吸收利用的磷。沼液处

理 BS1~BS10 的土壤速效磷含量为 8.49~18.85 mg/kg, CF1 的含量为 30.20 mg/kg。随着沼液施用量的增加,土壤速效磷呈逐渐降低的趋势。CF1 的速效磷含量较 CK1 显著 ($p<0.05$) 提升 42.5%, 而沼液处理 BS1~BS10 的土壤速效磷含量较 CK1 显著

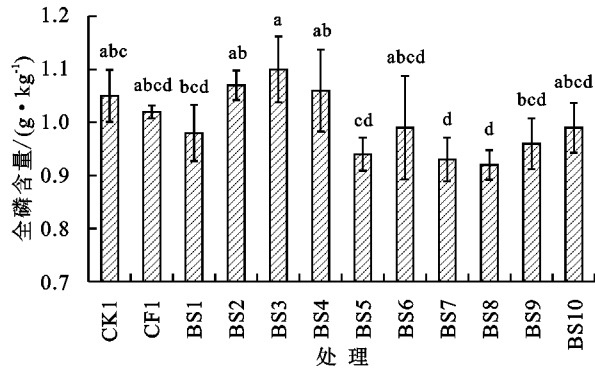


图 2 不同施用量沼液对土壤全磷和速效磷含量的影响

2.1.3 不同施用量沼液对土壤钾含量的影响 由图 3 可知,沼液处理 BS1~BS10 的土壤全钾含量为 10.42~13.26 g/kg, CF1 的含量为 8.82 g/kg。在本试验沼液浓度范围内,除 BS1 外,其余沼液处理组较 CK1 及 CF1 均有显著 ($p<0.05$) 增加,且随着沼液施用量的增加,土壤全钾含量总体呈先增加后减少的趋势。沼液处理 BS3~BS6 的全钾含量达到较高水平 13.21~13.26 g/kg, 分别较 CK1 及 CF1 高 16.9%~17.3%, 49.8%~50.3%。CF1 的土壤全钾含量较 CK1 显著 ($p<0.05$) 下降 21.9%。可见,施用化肥不利于土壤钾素含量的累积,而施用沼液则相反,且当施用量在 90.0~117.0 t/hm² 时,土壤钾素增加效果

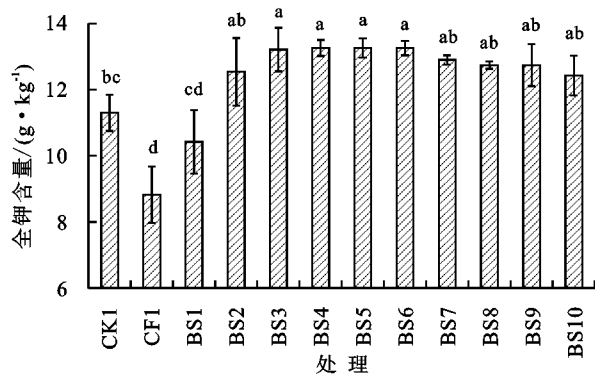


图 3 不同施用量沼液对土壤全钾和速效钾含量的影响

2.2 沼液对土壤养分平衡的影响

由表 3 可知,不施肥种植萝卜时,理论土壤氮素当季亏损量高达 66.08 kg/hm²。沼液处理 BS1~BS10 的氮素平衡范围为 -25.61~66.68 kg/hm², 随着沼液施用量的增加,土壤氮素平衡由亏损向盈余转变。沼液处理 BS1~BS4 为土壤氮素处于亏损状态,在 BS2 达到最大亏损量 25.61 kg/hm², 约为 CK1 亏损量的 38.8%;沼液处理 BS5~BS10 的土壤氮素

($p<0.05$) 下降 11.0%~59.9%, 较 CF1 显著 ($p<0.05$) 下降 37.6%~71.9%。可见,施用沼液对当季土壤速效磷含量具有明显的负效应,当施用量在 72.0~90.0 t/hm² 时,土壤速效磷含量相对较高,且与沼液其他处理组结果差异显著 ($p<0.05$)。

明显。沼液处理 BS1~BS10 的土壤速效钾含量为 29.81~60.17 mg/kg, CF1 的含量为 45.45 mg/kg。除 BS2 外,沼液处理组土壤速效钾总体呈先增加后减少的趋势。沼液处理 BS8 的土壤速效钾含量达到最高值 60.17 mg/kg, 分别较 CK1 及 CF1 增加 55.8%, 32.4%;沼液处理 BS1 含量最低为 29.81 mg/kg, 分别较 CK1 及 CF1 降低 21.7%, 34.4%。沼液处理 BS5~BS10 与 CK1 结果差异显著 ($p<0.05$), BS7~BS8 与 CF1 结果差异显著 ($p<0.05$)。可见,一定量的沼液施用能增加土壤速效钾含量,且当沼液施用量在 126.0~144.0 t/hm² 范围内时,土壤速效钾含量较 CF1 有显著提高 ($p<0.05$)。

处于盈余状态,且在 BS10 达到最大盈余量 66.68 kg/hm², 较 CF1 低 3.5%。总体上土壤氮素的平衡,主要依靠氮肥的投入,氮肥投入越多,土壤氮素盈余量越大,且仅将作物带出的氮素养分作为土壤氮素唯一支出的情况下,沼液施用量高于 108.0 t/hm² 时,才能保证土壤氮素的盈余,当沼液施用量达到 180.0 t/hm² 时,土壤氮素盈余量可接近化肥施用效果。

由表 3 可知,当季各处理中只有 CF1 的磷素平衡

达到盈余。CK1的土壤磷素平衡为 -16.57 kg/hm^2 。沼液处理BS1~BS10的土壤磷素平衡范围 $-7.99\sim-15.34\text{ kg/hm}^2$,由于试验沼液中磷素含量较低,磷素输入量较低,各沼液处理组均处于亏损状态,因而单施沼液不能满足萝卜对磷素的需求。在沼液处理BS2达到最大亏损量 15.34 kg/hm^2 ,但略小于CK1的亏损。沼液处理BS8的土壤磷素亏损达到最小值 7.99 kg/hm^2 ,约为CK1的48.22%。可见,沼液的施用在一定程度上缓解了土壤磷素的亏损,且在一定范围内,随着沼液施用量的增加,沼液处理组磷素亏损量逐渐减少,当沼液施用量为 $108.0\sim 144.0\text{ t/hm}^2$ 时,应当配施 $10\sim 15\text{ kg/hm}^2$ 的磷肥才能维持土壤磷素平衡。

由表3可知,当季各处理的土壤钾素平衡均呈赤字,沼液处理BS1~BS10的土壤钾素平衡范围 $-81.33\sim$

-145.82 kg/hm^2 。随沼液施用量的增加,钾素亏损量逐渐增加,除BS1及BS2外,其余沼液处理组钾素的亏损量均高于CK1(-87.69 kg/hm^2),且在沼液处理BS9达到最大亏损量 145.82 kg/hm^2 ,分别较CK1及CF1增加66.3%,823.5%。施用沼液大幅度加剧了土壤钾素的当季亏损,虽然化肥处理组同样处于亏损状态,但亏损量明显远低于沼液处理。由此说明,沼液中的钾素含量较低,相较于复合化肥,沼液的供钾能力相对较差。进一步分析可知,沼液处理BS5~BS8的亏损量之间差异不明显($111.02\sim 115.72\text{ kg/hm}^2$),钾素输出量同样差异不明显,这种差异不明显主要是由于钾素投入远小于钾素输出导致的。因此,在本试验条件下,单施沼液不利于土壤钾素平衡,当施用沼液种植作物时,应当配施一定量的钾肥。

表3 当季土壤养分平衡

单位: kg/hm^2

处理	氮素平衡			磷素平衡			钾素平衡		
	输入量	输出量	平衡	输入量	输出量	平衡	输入量	输出量	平衡
CK1	3.03	69.11±9.78f	-66.08	0.03	16.60±0.80h	-16.57	0.65	88.33±4.95h	-87.69
CF1	179.96	111.46±7.75a	68.50	50.47	26.90±0.12b	23.57	113.15	128.93±6.60cde	-15.79
BS1	68.95	74.40±4.04ef	-5.45	6.61	20.40±0.75g	-13.79	10.80	92.13±5.81gh	-81.33
BS2	77.19	102.80±8.29ab	-25.61	7.43	22.77±0.48d	-15.34	12.07	98.00±5.61g	-85.94
BS3	85.43	99.37±4.18ab	-13.94	8.26	20.88±0.45efg	-12.62	13.33	106.03±2.85f	-92.70
BS4	93.67	94.41±3.35bc	-0.74	9.08	21.30±0.34e	-12.22	14.60	123.17±6.89e	-108.57
BS5	101.91	85.50±4.79cde	16.41	9.90	21.73±0.72de	-11.83	15.87	128.30±3.74de	-112.43
BS6	110.14	81.61±1.50cdef	28.53	10.72	20.18±0.37fg	-9.46	17.14	132.33±1.04cd	-115.19
BS7	118.38	80.10±8.91def	38.28	11.55	20.90±0.38efg	-9.35	18.41	129.43±5.81cde	-111.02
BS8	134.86	84.26±4.61cde	50.60	13.19	21.18±0.19ef	-7.99	20.95	136.67±5.59c	-115.72
BS9	151.34	91.32±3.16bcd	60.02	14.84	29.19±0.71a	-14.35	23.49	169.30±11.78a	-145.82
BS10	167.82	101.14±13.76ab	66.68	16.48	24.51±0.61c	-8.03	26.02	150.43±7.46b	-124.41

注:输出量数据为平均值±标准差;不同字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。

3 讨论

3.1 不同施用量沼液对土壤氮、磷、钾元素含量的影响

氮、磷、钾素是植物吸收量较高的营养元素。氮素是植物体内蛋白质、核酸和叶绿素的组成成分,对植物的生长发育至关重要;磷素能促进植物营养,有助于增产提质;钾素也与植物的新陈代谢密切相关。土壤中氮、磷、钾含量的多少,对农作物的养分吸收影响极大。大量研究^[4-5]表明,在农业生产中施用沼液可明显提高土壤氮磷钾元素的含量,进而满足作物对养分的吸收。本试验中控制不同量沼液在大田中的施用,表明当沼液施用量在 $108.0\sim 126.0\text{ t/hm}^2$ 范围内时,土壤全氮、全钾、碱解氮及速效钾含量水平较清水对照有明显地提升,较常规化肥处理也略有提升。但随着沼液施用量进一步增加,土壤全氮与碱解氮含量有所下降,说明沼液中的氮素除大部分进入土

壤和被萝卜吸收以外,有相当一部分可能因挥发或反硝化作用而损失。而全钾与速效钾含量随沼液施用量的增加也有降低趋势,这可能是由于沼液呈溶液状态,表层土壤所能保持的沼液量有限,当施用量过大时,会造成部分径流损失^[17]。在本研究中也发现,施用沼液对土壤磷素含量有一定的负效应,这与王卫平等^[18]研究结果类似。其原因一方面可能与磷素的投入量低以及当季利用率低有关,Rehm等^[19]研究重复施用磷对玉米产量及土壤磷素含量的影响,结果表明每年磷素投入量越少土壤磷素含量越低,磷素投入量过高则会明显降低磷素利用率;另一方面也与土壤质地等因素有关,陈康等^[20]研究不同水分调控措施对土壤养分转移的影响,发现砂壤土表层土壤有效磷往深层土壤的运移量要多于重壤土。

3.2 不同施用量沼液对土壤养分平衡的影响

刘瑞等^[21]认为,农田养分平衡状况从根本上决

定土壤养分发展的演变方向,且与生态环境安全具有紧密的联系。黄莹等^[22]也认为,研究农田养分平衡为平衡施肥提供依据,对改善高投入低产出的农业生产现状具有重要意义。本研究设计 10 个沼液施用量梯度,当沼液施用量大于 108.0 t/hm² 时,可基本满足土壤氮素的平衡,但氮素盈余量偏低,这与张晓光等^[23]研究结论一致。可能是因为随施氮量的增加,氮素损失量也会增加,同时也相应提高了作物对氮元素的吸收量。随着沼液施用量的增加,在一定程度上缓解了土壤磷素的亏损,但却大幅度加剧土壤钾素的收支赤字。马强等^[24]从施肥模式的角度探讨了作物—土壤系统的养分收支,发现仅施用有机肥有利于缓解土壤养分收支赤字,但无法实现土壤养分平衡,且不平衡的养分投入会加剧土壤中钾元素收支赤字。Palm 等^[25]的研究也得出类似结果。可能是因为试验中所使用沼液的氮元素含量较高,磷、钾元素含量相对较低,而农作物萝卜对钾元素吸收量较高,沼液的施用促进了萝卜的生长发育,同时也加剧了萝卜钾素的带出。因此,单施沼液无法满足农田磷钾的收支平衡,在实际应用中应配合无机磷肥、钾肥的施用来维持土壤养分平衡。

4 结论

(1)施用适量沼液能提高土壤部分养分含量,当沼液施用量在 108.0~126.0 t/hm² 范围内时,土壤全氮、碱解氮、全钾及速效钾含量较高,为 1.35~1.42 g/kg、63.31~65.34 mg/kg、12.90~13.26 g/kg、45.45~59.25 mg/kg。随着沼液施用量的增加,土壤全磷含量变化不明显,而速效磷含量与清水对照相比显著降低 11.0%~59.9%。

(2)沼液处理组土壤氮素平衡范围为 -25.61~66.68 kg/hm²,随着沼液施用量的增加,氮素平衡由亏损转向盈余,当施用量大于 108.0 t/hm² 时,可基本满足氮素的平衡;磷素平衡范围为 -7.99~-15.34 kg/hm²,沼液的施用在一定程度上缓解了磷素的亏损;钾素平衡范围为 -81.33~-145.82 kg/hm²,且随沼液施用量的增加,钾素亏损量逐渐增加。

(3)施用沼液对土壤氮、钾元素含量的提高有促进作用,但单施沼液无法满足农田磷、钾元素的收支平衡。因此,根据土壤肥力及养分平衡情况,在实际生产过程中沼液的施用量应控制在 108.0~144.0 t/hm²,并与 10~15 kg/hm² 磷肥、115~120 kg/hm² 钾肥配合施用才能达到理想的效果。

参考文献:

[1] 王飞,蔡亚庆,仇焕广. 中国沼气发展的现状、驱动及制

约因素分析[J]. 农业工程学报,2012,28(1):184-189.

- [2] 陈超,阮志勇,吴进,等. 规模化沼气工程沼液综合处理与利用的研究进展[J]. 中国沼气,2013,31(1): 25-28,43.
- [3] 沈其林,单胜道,周健驹,等. 猪粪发酵沼液成分测定与分析[J]. 中国沼气,2014,32(3):83-86.
- [4] 杨静,徐秀银. 施用沼液对生菜产量及土壤质量的影响[J]. 中国沼气,2013,31(6):51-54.
- [5] Mohammad R, Munir J, Hinnawi S, et al. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters [J]. Desalination, 2007, 215(1): 143-152.
- [6] Zotarelli L, Dukes M D, Scholberg J M S, et al. Tomato nitrogen accumulation and fertilizer use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(8): 1247-1258.
- [7] 侯萌瑶,张丽,王知文,等. 中国主要农作物化肥用量估算[J]. 农业资源与环境学报,2017,34(4):360-367.
- [8] 王士超,白新禄,陈竹君,等. 日光温室土壤养分平衡及其累积特性[J]. 环境科学研究,2015,28(7):1091-1098.
- [9] 余海英,李廷轩,张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征[J]. 中国农业科学,2010,43(3):514-522.
- [10] 张磊,王立春,孔丽丽,等. 不同施肥模式下春玉米养分吸收利用和土壤养分平衡研究[J]. 土壤通报,2017, 48(5):1169-1176.
- [11] 丁晓东. 农田养分流失风险评价及养分平衡管理研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.
- [12] 徐维明,高雅琴,李小坤,等. 沼肥替代部分化肥对杂交水稻产量、土壤肥力及养分表观平衡的影响[J]. 杂交水稻,2016,31(4):39-40.
- [13] 毛晓月,伍钧,孟晓霞,等. 连续 3 年定位施用沼液对水稻产量和品质的影响[J]. 华北农学报,2016, 31(3): 218-224.
- [14] 赖星,伍钧,王静雯,等. 连续施用沼液对土壤性质的影响及重金属污染风险评价[J]. 水土保持学报,2018,32(6):359-364,370.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000:146-197.
- [16] 赵亚南,宿敏敏,吕阳,等. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2017,23(4):864-873.
- [17] 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.
- [18] 王卫平,陆新苗,魏章焕,等. 施用沼液对柑桔产量和品质以及土壤环境的影响[J]. 农业环境科学学报,2011, 30(11):2300-2305.
- [19] Rehm G W, Sorensen R C, Wiese R A. Soil test values for phosphorus, potassium, and zinc as affected by rate applied to corn [J]. Soil Science Society of Ameri-

- ca Journal, 1984, 48(4): 814-818.
- [20] 陈康, 邓兰生, 涂攀峰, 等. 不同水肥调控措施对马铃薯种植土壤养分运移的影响[J]. 广东农业科学, 2011, 38(20): 51-54.
- [21] 刘瑞, 戴相林, 郑险峰, 等. 半旱地不同栽培模式及施氮下农田土壤养分表观平衡状况研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 934-941.
- [22] 黄莹, 赵牧秋, 王永壮, 等. 长期不同施磷条件下玉米产量、养分吸收及土壤养分平衡状况[J]. 生态学杂志, 2014, 33(3): 694-701.
- [23] 张晓光, 田迎宇, 兰富军, 等. 氮肥用量对白萝卜产量与水分利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(1): 33-36.
- [24] 马强, 刘中良, 周桦, 等. 不同施肥模式对作物-土壤系统养分收支的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 520-524.
- [25] Palm C A, Myers R J K, Nandwa S M. Combined use of organic and inorganic nutrient sources for soil fertility maintenance and replenishment[C]//Buresh R J, Sanchez P A, Calhoun F. Replenishing Soil Fertility in Africa. Soil Science Society of America. Special Publication No. 51. Madison, 1997: 193-217.
- (上接第184页)
- [7] Chen Y, Chen G, David R. Large amounts of easily decomposable carbon stored in subtropical forest subsoil are associated with r-strategy-dominated soil microbes [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 95: 233-242.
- [8] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 土壤颗粒有机质研究进展[J]. 亚热带资源与环境学报, 2009, 4(4): 43-52.
- [9] Vasilevich R S, Beznosikov V A. Effect of climate changes in the holocene on the distribution of humic substances in the profile of forest-tundra peat mounds [J]. Soil Chemistry, 2017, 11: 1312-1324.
- [10] 薛龙飞, 罗小锋, 吴贤荣. 中国四大林区固碳效率: 测算、驱动因素及收敛性[J]. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1351-1363.
- [11] 赵山山. 温带森林土壤有机碳特征初步研究[D]. 长春: 东北林业大学, 2013.
- [12] Wang D, He N, Wang Q, et al. Effects of temperature and moisture on soil organic matter decomposition along elevation gradients on the Changbai Mountain, northeast China [J]. Pedosphere, 2016, 26: 399-407.
- [13] 张雪, 韩士杰, 王树起, 等. 长白山白桦林不同演替阶段土壤有机碳组分的变化[J]. 生态学杂志, 2016, 35(2): 282-289.
- [14] Zhang M, Zhang X K, Liang W J, et al. Distribution of soil organic carbon fractions along the altitudinal gradient in Changbai Mountain, China [J]. Pedosphere, 2011, 21(5): 615-620.
- [15] 鲁如坤. 土壤农化分析手册[M]. 3版. 北京: 农业科技出版社, 2000.
- [16] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. Australian Journal of Agriculture Research, 1995, 46: 1459-1466.
- [17] Zhang J, Hu F, Li H, et al. Effects of earthworm activity on humus composition and humic acid characteristics of soil in a maize residue amended rice-wheat rotation agroecosystem [J]. Applied Soil Ecology, 2011, 51: 1-8.
- [18] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distributions in aggregates from cultivated and grassland soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57: 1071-1076.
- [19] Elliott E, Palm C, Reuss D E, et al. Organic matter contained in soil aggregates from a tropical chronosequence: Correction for sand and light fraction [J]. Agriculture Ecosystems Environment 1991, 34: 443-451.
- [20] 郭聃. 长白山植被垂直带地形控制机制研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2014.
- [21] 李步杭, 王绪高, 张健, 等. 长白山温带森林阔叶红松林及其次生杨桦林的物种组成及其分布格局[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [22] 于海艳, 宫汝宁, 周娅, 等. 北京八达岭地区4种人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 162-166.
- [23] 白秀梅, 韩有志, 郭汉清. 庞泉沟自然保护区典型森林土壤大团聚体特征[J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1654-1662.
- [24] Wilson C A, Cloy J M, Graham M C, et al. A micro-analytical study of iron, aluminium and organic matter relationships in soils with contrasting hydrological regimes [J]. Geoderma, 2013, 202/203: 71-81.
- [25] 衡利沙, 王代长, 蒋新, 等. 黄棕壤铁铝氧化物与土壤稳定性有机碳和氮的关系[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2748-2755.