

DOI: 10.11766/trxb201509210375

# 沼液化肥配施对红壤旱地土壤养分和花生产量的影响\*

郑学博<sup>1, 2</sup> 樊剑波<sup>1</sup> 周 静<sup>1, 2, 3, 4†</sup> 何园球<sup>1, 2</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 国家红壤改良工程技术研究中心, 中国科学院红壤生态实验站, 江西鹰潭 335211)

(4 江西省科学院生物资源研究所, 南昌 330029)

**摘 要** 通过沼液化肥配施定位实验, 研究等氮量条件下沼液替代化肥的不同比例 (沼液全氮分别占总 N 0%、15%、30%、45%、100%) 对红壤旱地土壤养分库和花生产量的影响。结果表明, 沼液施用 2 年后, 花生平均产量显著增加, 较无肥和单施化肥处理分别增产 33.15%~48.29% 和 10.24%~22.77%, 其中 30% 处理达到最高 (3 332 kg hm<sup>-2</sup>), 较其他处理显著增产 4.0%~48.3%。同时土壤有机质 (OM)、活性有机质 (LOM) 及碳库管理指数 (CMI) 也发生了显著变化, 30% 处理较其他处理表现为显著增加。可见沼液化肥均衡配施在提高土壤有机质含量的同时显著改善了有机质质量。同时较不施肥和单施化肥处理, 30% 处理显著提高了土壤全氮、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、有效磷和速效钾含量。对花生产量与土壤各养分指标进行 Pearson 相关分析, 发现相关系数最高的是有效磷 (0.956\*\*), 表明有效磷是当前红壤旱地花生持续高产的首要限制因子。作物产量与 LOM 显著正相关 (0.826\*), 而与 OM 无显著相关性。同时, LOM 与 OM (0.920\*\*)、全氮 (0.894\*)、全磷 (0.867\*)、有效磷 (0.872\*) 和速效钾 (0.821\*) 均呈极显著或显著正相关, 而 OM 除与 LOM 达到显著相关外, 仅与全氮 (0.922\*\*) 和有效磷 (0.862\*) 呈极显著或显著正相关。这表明 LOM 较 OM 更能客观反映土壤质量的变化, 应成为土壤施肥的良好评价指标。本实验条件下, 红壤旱地花生产区沼液化肥均衡配施 (30%) 既显著提高花生产量、减少化肥使用量, 又可以提高土壤养分库, 增加土壤有机质和活性有机质含量, 应成为红壤旱地地区花生增产和地力培肥的有效途径。

**关键词** 红壤旱地; 沼液; 土壤养分; 花生产量; 活性有机质

中图分类号 S158.3 文献标识码 A

近年来我国畜禽养殖业规模化、集约化快速发展, 特别是生猪饲养量的急速增多<sup>[1]</sup>, 引起畜禽粪便量大幅增加<sup>[2-3]</sup>, 导致部分地区已无法承载, 由此造成的环境污染问题严重影响人们的健康和周围环境。作为畜禽粪便无害化的重要途径, 沼气工程消除了其对环境的污染和生态的破坏, 利于促进农村生产、生活和生态协调发展<sup>[4]</sup>。另一方面,

沼气工程产生的沼液被认为是良好的有机肥源, 其农田施用可形成物质循环利用的生态种养结合模式<sup>[5]</sup>。沼液是一种养分全面兼具速效特点的液体有机肥, 有机质、大量元素 (N、P、K 等)、微量元素 (B、Mn 等) 等含量丰富, 氮素养分特别是速效氮 (以 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 为主) 含量较高<sup>[6]</sup>, 对提高作物产量<sup>[7]</sup> 和氮素利用效率<sup>[8]</sup>、促进土壤 C/N

\* 国家自然科学基金项目 (31201690)、公益性行业 (农业) 科研专项 (201203050) 和赣鄱英才 555 工程项目资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31201690), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (No. 201203050) and the GanPo "555" Talent Program

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhoujing@issas.ac.cn

作者简介: 郑学博 (1985—), 男, 山东寿光人, 博士研究生, 主要从事土壤肥力和农业废弃物资源化利用研究。E-mail: sss1061@126.com

收稿日期: 2015-09-21; 收到修改稿日期: 2015-10-11

矿化和减少温室气体排放<sup>[9]</sup>等均具有显著影响。Abubaker等<sup>[7]</sup>发现沼液施用可以提高小麦产量、土壤有机碳矿化和氨氧化潜力；Galvez等<sup>[2]</sup>发现沼液施用可以平衡土壤中各营养元素；冯丹妮等<sup>[10]</sup>则发现长期施用沼液有利于土壤微生物生长和酶活性提高，却对土壤质量存在潜在危险。但前人关于沼液施用的研究主要以单施沼液为主，缺乏沼液化肥配施的相关研究。

红壤作为我国热带、亚热带地区主要土壤类型，总面积达到 $2.18 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。其中耕地面积占全国耕地总面积的28%，养活了全国43%的人口<sup>[11]</sup>。一方面红壤地区水热资源丰富，生物循环较快，利于土壤肥力提高<sup>[12]</sup>；另一方面该地区强烈的淋溶、风化作用加上长期不合理的开发利用，导致土壤退化严重，特别是农业生态系统中养分循环和平衡的失调，进一步加剧了肥力衰减过程<sup>[13]</sup>。孙波等<sup>[14]</sup>研究发现营养元素的缺乏和土壤肥力的衰退已严重阻碍本地区农业生产的持续发展，特别是红壤旱地养分更为缺乏，尤其是土壤有效磷。因此，采取有效的土壤培肥措施，防止土壤养分持续流失意义重大。前人研究结果表明有机无机肥配施效果优于单施化肥，可以大幅度提高作物产量和土壤肥力。刘国顺等<sup>[15]</sup>研究表明施用绿肥可显著提高土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾和作物产量；李继明等<sup>[16]</sup>则发现紫云英、猪粪与化肥长期配合施用可使土壤有机质、全氮、全磷含量显著积累；林治安等<sup>[17]</sup>在潮土上研究发现牛粪与化肥配施可持续提高土壤有机碳和全氮含量；王伯仁等<sup>[18]</sup>则发现在红壤旱地长期坚持猪粪与化肥配施，土壤有机质从 $11.5 \text{ g kg}^{-1}$ 上升至13年后的 $24.3 \text{ g kg}^{-1}$ ，而且增加的有机质以易氧化的有机质为主。

然而前人针对沼液与化肥配施在红壤旱地上的增产效应及其对土壤养分库影响的研究却鲜见报道。基于此，本试验在花生全生育期等氮量控制条件下，研究了沼液化肥不同全氮比对土壤养分指标和花生产量的影响，以期建立红壤旱地花生产区科学合理的施肥模式提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于江西省余江县刘家站鲁王村（ $116^{\circ}5'E$ ， $28^{\circ}12'N$ ）。该地区年降水量 $1750 \text{ mm}$ ，

80%的降水集中在每年的3—6月，年蒸发量 $1350 \text{ mm}$ ，年平均气温 $18^{\circ}\text{C}$ ，无霜期267 d左右，属亚热带湿润季风气候。试验田为旱平地，试验时间2013年4月—2014年8月，前茬作物为花生。共设置6个处理，单因素随机区组设计，每个处理3次重复，各小区面积 $12.4 \text{ m} \times 4.8 \text{ m} = 60 \text{ m}^2$ ，小区间田埂宽 $50 \text{ cm}$ ，高 $25 \text{ cm}$ ，保护行 $20 \text{ cm}$ 。供试土壤为第四纪红黏土发育的典型红壤。试验开始时 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤pH（土：水=1：2.5）4.94，有机质 $12.15 \text{ g kg}^{-1}$ ，全氮 $0.83 \text{ g kg}^{-1}$ ，碱解氮 $35.54 \text{ mg kg}^{-1}$ ，有效磷 $15.41 \text{ mg kg}^{-1}$ ，速效钾 $169.21 \text{ mg kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

花生生育期折合总施N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O为 $120-90-135 \text{ kg hm}^{-2}$ （不施肥除外），沼液施用处理中不足的P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O用化肥补足。各试验处理具体为：I 不施肥（CK）；II 单施化肥氮（NPK）；III 化肥氮+沼液氮（沼液全氮分别占总N 15%、30%、45%，BS15、BS30、BS45）；IV 单施沼液氮（BS100）。不同处理具体肥料施用量及外源有机碳带入量见表1。

供试沼液取自当地正常发酵的沼气池，原料主要是猪粪尿等，发酵时间3个月以上。2013年其养分含量分别为有机碳 $162 \text{ mg L}^{-1}$ 、全氮 $281 \text{ mg L}^{-1}$ 、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N $269 \text{ mg L}^{-1}$ 、全磷 $54 \text{ mg L}^{-1}$ 、全钾 $188 \text{ mg L}^{-1}$ 、pH 7.67。2014年其养分含量分别为有机碳 $121 \text{ mg L}^{-1}$ 、全氮 $203 \text{ mg L}^{-1}$ 、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N $133 \text{ mg L}^{-1}$ 、全磷 $46 \text{ mg L}^{-1}$ 、全钾 $169 \text{ mg L}^{-1}$ 、pH 8.01。供试氮肥为尿素（N 46%），磷肥为钙镁磷肥（P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%），钾肥为氯化钾（K<sub>2</sub>O 60%）。所有肥料全部基施。

2013年播种前整地规划小区、翻耕，播种前2天采用人工泼灌方式施用沼液，尿素、钙镁磷肥、氯化钾于播种前1天先混合，然后随二次翻耕翻入。种植制度为单季花生/年。供试品种赣花1号，基本苗为每公顷14万株。分别于2013年4月10日、2014年4月15日播种和2013年8月5日、2014年8月10日收获。按当地习惯进行病虫害及水分管理。

### 1.3 样品采集与分析

花生收获期：分小区单打、单收，籽粒产量按烘干法折算。同时按“S”形用土钻（直径 $5.0 \text{ cm}$ ）采集5个 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤样品，混匀、剔除砂砾及作物细根等，风干后过 $1 \text{ mm}$ 、 $0.25 \text{ mm}$ 和 $0.149 \text{ mm}$ 筛。

活性有机质的测定采用徐明岗等<sup>[19]</sup>的方法，试验中选择的KMnO<sub>4</sub>浓度为 $333 \text{ mmol L}^{-1}$ ；有机质

表1 2013—2014年各处理施肥量

**Table 1** Designing of the field experiment (2013—2014年)

处理 Treat ment	沼液		带入有机碳量		尿素		钙镁磷肥		氯化钾	
	Biogas slurry (BS)		Organic carbon		Urea		Calcium magnesium		Potassium chloride	
	( $\times 10^5$ L $\text{hm}^{-2}$ )		input with BS		( $\times 10^2$ kg $\text{hm}^{-2}$ )		( $\times 10^2$ kg $\text{hm}^{-2}$ )		( $\times 10^2$ kg $\text{hm}^{-2}$ )	
	2013	2014	2013	2014	2013	2014	2013	2014	2013	2014年
CK	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NPK	—	—	—	—	2.61	2.61	7.50	7.50	2.25	2.25
BS15	0.64	0.89	10.38	10.73	2.22	2.22	6.84	6.72	2.00	1.95
BS30	1.28	1.77	20.75	21.46	1.83	1.83	6.18	5.94	1.77	1.65
BS45	1.92	2.66	31.13	32.19	1.43	1.43	5.52	5.16	1.52	1.35
BS100	4.20	5.91	69.18	71.53	—	—	3.17	2.31	0.66	0.24

注：CK：不施肥；NPK：单施化肥氮；BS15：化肥氮+沼液氮（沼液全氮占总N 15%）；BS30：化肥氮+沼液氮（沼液全氮占总N 30%）；BS45：化肥氮+沼液氮（沼液全氮占总N 45%）；BS100：单施沼液氮。下同 Note：CK：No fertilizer；NPK：Chemical fertilizer (CF) total nitrogen (TN) only；BS15：15% biogas slurry (BS) TN plus 85% CF - TN；BS30：30% BS - TN plus 70% CF - TN；BS45：45% BS - TN plus 55% CF - TN；BS100：BS TN only. The same below

的测定采用重铬酸钾-硫酸外加热法<sup>[20]</sup>。所有土壤样品均以2013年试验开始前的土壤样品为参照。根据活性有机质及非活性有机质含量计算土壤碳库管理指数(CMI)，具体计算步骤见徐明岗等<sup>[19]</sup>。

土壤养分采用常规方法分析测定<sup>[20]</sup>：全氮采用半微量凯氏定氮法；全磷采用钼锑抗比色法；全钾采用氢氟酸-高氯酸消煮、火焰光度计法测定；土壤无机氮先用1 mol L<sup>-1</sup> KCl溶液浸提鲜土样，然后过滤，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N浓度采用连续流动分析仪法测定；有效磷采用Olsen法；速效钾采用1 mol L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>OAc浸提-焰光度计法测定；土壤pH采用去离子水提取（土：水=1：2.5）、电位法测定。

肥料对作物产量的贡献率采用董鲁浩等<sup>[21]</sup>的计算方法：

肥料对作物产量的贡献率(%) = (施肥处理产量 - 不施肥处理产量) / 施肥处理产量 × 100。

#### 1.4 数据分析

所得数据采用Excel 2007进行处理、绘制图表。SPSS 13.0 统计分析软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)、相关性分析(大小采用pearson指数)。差异显著性分析采用Duncan新复极差方法，显著性水平 $p < 0.05$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沼液化肥配施对土壤有机质和碳库管理系数的影响

土壤有机质可提供作物生长所需的养分，影响土壤团聚体结构的形成及稳定，增加土壤的保水保肥及缓冲性能<sup>[22-23]</sup>。沼液施用量显著影响土壤有机质含量(表2)。施肥处理有机质含量高于CK 7.9%~21.3%。BS30处理较CK、NPK、BS100处理分别增加21.3%、7.5%、12.5%。上述差异均达到显著水平。BS15、BS30、BS45处理活性有机质含量较CK、NPK、BS100处理分别提高20.9%~28.9%、-0.7%~5.8%、1.2%~7.9%。BS30处理CMI显著高于CK、NPK、BS15处理，较其他处理提高了4.3%~18.9%。

活性有机质是土壤中有效性较高、易被土壤微生物分解矿化、对作物养分供应有最直接作用的那部分有机质<sup>[24]</sup>。相对于有机质，活性有机质对施肥措施的反应更敏感。由活性有机质得到的碳库管理指数(CMI)能够反映土壤质量变化或更新的程度<sup>[25]</sup>。本文中，BS30处理显著提高了土壤活性有机质含量和CMI。可见沼液化肥均衡配施显著改善了土壤有机质质量，进而提高了土壤的综合生

表2 沼液施用下土壤有机质和碳库管理指数的变化

Table 2 Changes of soil organic matter and carbon pool management index of the red soil after application of biogas slurry

处理 Treatments	有机质 Organic matter (g kg <sup>-1</sup> )	活性有机质 Labile organic matter (mg kg <sup>-1</sup> )	碳库管理指数 Carbon management index (CMI)
CK	12.65 ± 0.05d	12.44 ± 0.12c	104.11 ± 0.08bc
NPK	14.28 ± 0.16bc	15.15 ± 0.61b	99.84 ± 0.06c
BS15	14.99 ± 0.50ab	15.28 ± 0.18ab	101.49 ± 4.64c
BS30	15.35 ± 0.13a	16.03 ± 0.58a	118.72 ± 8.63a
BS45	14.70 ± 1.07ab	15.04 ± 0.20b	114.41 ± 11.14ab
BS100	13.65 ± 0.90c	14.86 ± 0.82b	108.83 ± 6.83abc

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $p < 0.05$ )，下同 Note: Different small letters in the same column mean significant difference between treatments at 0.05 levels, respectively. The same below

产力。王伯仁等<sup>[26]</sup>发现有机肥化肥配施可显著改善土壤质量，进而提高土壤生产力；徐明岗等<sup>[19]</sup>发现有机（猪粪、秸秆）无机肥配施可显著增加红壤活性有机质含量和CMI；张继光等<sup>[24]</sup>研究发现较单施化肥和单施有机肥处理，有机肥化肥配施显著增加了土壤有机质的数量和质量。而本研究结果并不完全与之相同，本文发现沼液必须以一定比例（30%）与化肥配施才能显著提高土壤有机质的数量及质量，从而使土壤肥力向良性方向发展，可能原因是较猪粪、秸秆等有机肥，沼液中速效养分含量更丰富，与适宜化肥配施后改善了土壤微生物的营养供应，使微生物C/N适宜，进而提高了微生物碳源代谢强度（未发表数据），驱动了土壤有机碳库的转化。

## 2.2 沼液化肥配施对土壤养分库的影响

氮素：氮是土壤中最为活跃的大量营养元素之一。施肥处理全氮含量较试前土壤和CK分别增加24.1%~37.4%和8.4%~20.0%。BS30处理分别高于CK、NPK、BS15、BS45、BS100处理20.0%、10.7%、2.7%、9.6%、9.6%（表3）。速效氮含量在一定程度上反映土壤氮素的供应强度。BS30、BS45、BS100处理NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量较CK、NPK和BS15处理分别增加27.5%~80.9%、40.2%~72.6%、40.2%~72.6%；BS30、BS45处理NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量较CK、NPK、BS15、BS100处理分别增加13.3%~21.8%、9.6%~17.8%、10.6%~18.9%、13.7%~22.2%；BS15、BS30、BS45、BS100处理NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N含量高于CK和NPK处理120.0%~220.0%和83.3%~166.7%。同时土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N含量峰值均出现在BS30处理，较CK、

NPK、BS15、BS45、BS100处理，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量分别提高1.86、1.75、1.75、0.78、0.51 mg kg<sup>-1</sup>；NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量分别提高5.36、4.52、4.75、2.09、5.34 mg kg<sup>-1</sup>；NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N含量分别提高0.55、0.50、0.25、0.10、0.15 mg kg<sup>-1</sup>。上述差异均达到显著水平。表3还显示土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量是NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量的10倍左右，表明该地区具有较高的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N淋溶风险。沼液化肥配施对土壤全氮和速效氮含量均表现为不同程度积累，因沼液化肥配施显著提高了花生生物量（未发表数据），大量根茬和植株体遗留在土壤中经微生物分解后返回氮素<sup>[22]</sup>，进而提高了土壤氮素水平。

磷素：土壤中磷素不易迁移<sup>[27]</sup>，同时红壤中存在大量活性铁铝<sup>[28]</sup>，具有较强的固磷能力，每年磷固定量达到43.5 kg hm<sup>-2</sup><sup>[12]</sup>，磷肥进入土壤后易被土壤矿物固定或微生物固持<sup>[29]</sup>，从而造成红壤中有效磷的缺乏。与CK相比，施肥处理土壤全磷和有效磷含量分别提高16.3%~24.5%和7.9%~23.4%（表3）。BS15、BS30、BS45、BS100处理有效磷含量较NPK处理分别提高4.9%~14.3%，但无显著差异。CK土壤中的有效磷被作物吸收带走而无磷素补充，导致有效磷含量显著降低。与NPK处理相比，沼液施用明显提高了土壤有效磷含量。可能原因是沼液本身含有的有机酸离子参与竞争土壤固相表面的专性吸附点，从而降低了土壤矿物的固定<sup>[30]</sup>，提高了土壤磷素的有效性，增强了土壤的供磷能力。

钾素：土壤钾素主要来源于土壤矿物钾、作物残体分解和钾素肥料。施肥对土壤全钾含量无显著影响，但土壤速效钾含量较CK提高37.5%~68.5%

表3 沼液施用下土壤养分的变化

处理 Treatments	全氮 Total nitrogen (g kg <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N Ammonium nitrogen (mg kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N Nitrate nitrogen (mg kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N Nitrite nitrogen (× 10 <sup>-2</sup> mg kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorus (g kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available phosphorus (mg kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total potassium (g kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available potassium (mg kg <sup>-1</sup> )	pH
CK	0.95d	2.30c	24.57c	0.25d	0.49b	54.99b	7.91ab	102.36c	4.90ab
NPK	1.03c	2.41c	25.41bc	0.30d	0.57ab	59.36ab	8.05a	140.71b	4.79ab
BS15	1.11b	2.41c	25.18bc	0.55c	0.58ab	66.23a	7.91ab	143.57b	4.76b
BS30	1.14a	4.16a	29.93a	0.80a	0.58ab	67.88a	8.10a	167.97a	4.95ab
BS45	1.04c	3.38b	27.84ab	0.70ab	0.61a	62.26ab	7.68b	170.47a	5.22a
BS100	1.04c	3.65ab	24.49c	0.65bc	0.58ab	63.42ab	8.11a	170.82a	4.96ab

(表3)。BS30、BS45、BS100处理速效钾含量较CK、NPK、BS15处理分别增加64.1%~66.9%、19.4%~21.4%、17.0%~19.0%。上述差异均达到显著水平。CK、NPK、BS15处理较试前土壤显著下降，而BS30、BS45、BS100处理则基本持平。表明沼液化肥均衡配施具有相互促进作用，显著提高了土壤钾素有效性，从而提高了土壤的供钾潜力，应成为提高红壤旱地供钾潜力的一条重要途径。

**pH:** pH作为重要的土壤化学性质直接影响土壤中各养分元素的存在形态和其对植物的有效性。本研究中土壤pH随沼液施用量的增加呈倒“U”形变化(表3)。BS45处理较CK、NPK、BS15、BS30、BS100分别增加了0.32、0.43、0.46、0.27、0.26个pH单位。NPK和BS15处理较CK分别下降了0.11和0.14个pH单位，而BS30、BS45、BS100处理较CK则分别增加了0.05、0.32、0.06个pH单位。可见单施化肥和沼液(15%)处理增强了红壤的酸化趋势，而沼液(30%~100%)处理则抑制了红壤酸化。可归因于供试沼液偏碱性(7.67和8.01)，其中的OH<sup>-</sup>中和了部分土壤H<sup>+</sup>。

### 2.3 沼液化肥配施对花生产量和肥料贡献率的影响

沼液施用导致花生产量显著高于CK和NPK处理(表4)。2013、2014年BS15、BS30、BS45、BS100处理较CK分别增加55.0%、64.5%、44.6%、55.5%和27.0%、31.3%、21.2%、29.3%；较NPK处理则分别增加18.7%、26.1%、10.8%、19.2%和14.8%、18.7%、9.6%、14.8%。上述差异均达到显著水平。其中BS30处理(3 789和2 875 kg hm<sup>-2</sup>)2013、2014年较其他处理分别增加5.8%~64.5%

和3.4%~31.3%。可见沼液化肥均衡配施能显著提高红壤旱地生产力。这是因为单施化肥导致土壤pH降低(表3)，土壤交换性H<sup>+</sup>和Al<sup>3+</sup>大幅增加<sup>[18]</sup>，而Al<sup>3+</sup>是酸性红壤的主要障碍因子，抑制花生根系生长。沼液的强碱性则抑制土壤酸化作用，维持或提高土壤原pH，减轻了Al<sup>3+</sup>对花生根系的毒害作用。变异系数显示，各施肥处理产量年际间变幅(15.18%~19.40%)达到中等变异<sup>[31]</sup>，其中施用沼液处理(15.99%~19.40%)高于NPK处理(15.18%)。这一方面与年际间气候变化有关，花生生育期为每年4—8月，正好为该地区的雨季，降水量年际变化较大；另一方面沼液仅仅施用了两年，土壤环境远未达到稳定。然而沼液施用处理在年际气候变化和土壤环境的双重影响下依然能得到最大产量，进一步说明了红壤旱地上施用沼液的增产潜力。

肥料贡献率反映了当季花生投入肥料的生产能力<sup>[32]</sup>。不同肥料及沼液化肥不同配施比例对肥料贡献率的影响存在明显差异(表4)。BS30处理在2013年、2014年均最高，分别达到39.2%和31.3%。NPK处理则为最低，分别为23.4%和9.6%。总体而言，施用沼液提高了肥料对产量的贡献率，特别是沼液化肥均衡配施，这是花生产量提高的一个重要原因。

### 2.4 各土壤养分与作物产量的关系

相关性分析表明(表5)，除全钾外，有机质与其他各养分指标相关性较高，相关系数在0.400以上且均为正相关，其中与活性有机质、全氮达到极显著水平( $r > 0.900$ )；与有效磷达到显著水平(0.862\*)；与硝态氮、亚硝态氮、全磷、速效钾

表4 沼液施用下花生产量和肥料贡献率的变化

Table 4 Changes of peanut yield and fertilizer contribution after application of biogas slurry

处理 Treatments	2013年			2014年			2013—2014年		
	产量 Yield (kg hm <sup>-2</sup> )	增产 Increasing rate (%)	肥料对产量 贡献率 Fertilizer contribution to peanut yield (%)	产量 Yield (kg hm <sup>-2</sup> )	增产 Increasing rate (%)	肥料对产量 贡献率 Fertilizer contribution to peanut yield (%)	平均产量 Average yield (kg hm <sup>-2</sup> )	平均年增 产 Average increasing rate (%)	变异系数 Variation coefficient (%)
CK	2 303d	—	—	2 190d	—	—	2 247c	—	3.56
NPK	3 005c	30.49	23.36	2 422c	10.62	9.60	2 714bc	20.78	15.18
BS15	3 568ab	54.96	35.47	2 780ab	26.95	21.23	3 174ab	41.28	17.57
BS30	3 789a	64.54	39.22	2 875a	31.28	23.82	3 332a	48.29	19.40
BS45	3 330bc	44.60	30.84	2 654b	21.18	17.48	2 992ab	33.15	15.99
BS100	3 582ab	55.54	35.71	2 78 a	29.23	22.62	3 206 ab	42.68	16.58

表5 土壤肥力指标及产量之间的相关性 (Pearson双侧显著检验)

Table 5 Correlation between the soil fertility index and peanut yield (Pearson 2-tailed test of significance)

因子 Factor	有机质 <sup>①</sup>	活性有机质 <sup>②</sup>	碳库管理 指数 <sup>③</sup>	全氮 <sup>④</sup>	铵态氮 <sup>⑤</sup>	硝态氮 <sup>⑥</sup>	亚硝态 氮 <sup>⑦</sup>	全磷 <sup>⑧</sup>	有效磷 <sup>⑨</sup>	全钾 <sup>⑩</sup>	速效钾 <sup>⑪</sup>	pH
有机质 <sup>①</sup>												
活性有机质 <sup>②</sup>	0.920**											
碳库管理指数 <sup>③</sup>	0.415	0.392										
全氮 <sup>④</sup>	0.922**	0.894*	0.422									
铵态氮 <sup>⑤</sup>	0.443	0.566	0.912*	0.534								
硝态氮 <sup>⑥</sup>	0.713	0.595	0.838*	0.622	0.704							
亚硝态氮 <sup>⑦</sup>	0.689	0.713	0.832*	0.742	0.885*	0.699						
全磷 <sup>⑧</sup>	0.789	0.867*	0.405	0.664	0.525	0.464	0.739					
有效磷 <sup>⑨</sup>	0.862*	0.872*	0.497	0.969**	0.636	0.568	0.850*	0.723				
全钾 <sup>⑩</sup>	0.071	0.256	-0.087	0.310	0.170	0.037	-0.069	-0.201	0.214			
速效钾 <sup>⑪</sup>	0.665	0.821*	0.643	0.648	0.810	0.537	0.883*	0.910*	0.756	-0.030		
pH	0.065	0.036	0.726	-0.106	0.553	0.464	0.523	0.383	0.025	-0.653	0.490	
产量 <sup>⑫</sup>	0.732	0.826*	0.534	0.860*	0.728	0.457	0.901*	0.770	0.956**	0.155	0.864*	0.157

注: \*\* 在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关, \* 在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关 Note: \*\*Correlation is significant at the 0.01 level, \* Correlation is significant at the 0.05 level; ① Organic matter, ② Labile organic matter, ③ Carbon management index, ④ Total nitrogen, ⑤ Ammonium nitrogen, ⑥ Nitrate nitrogen, ⑦ Nitrite nitrogen, ⑧ Total phosphorus, ⑨ Available phosphorus, ⑩ Total potassium, ⑪ Available potassium, ⑫ Grain yields

相关系数在0.650以上。说明有机质直接或间接影响其他矿质元素的含量, 因此提高有机质含量是土壤培肥的核心。然而活性有机质除与有机质极显著相关外, 还与全氮、全磷、有效磷、速效钾显著相关 ( $r > 0.800$ )。活性有机质显著影响土壤中植

物所需大量元素的供应, 是土壤养分的主要供给库<sup>[19]</sup>。可见有机质虽然是土壤肥力的重要指标, 但与活性有机质相比, 后者更能准确反映土壤肥力的变化。因此土壤培肥时在提高有机质数量的同时更应注重提高有机质的质量。同时土壤全氮与有效

磷、铵态氮与亚硝态氮、有效磷与亚硝态氮、速效钾与亚硝态氮、速效钾与全磷之间均显著正相关。表明各养分指标在土壤中并非单独存在, 而是相互促进共同发挥作用的。

土壤有效磷与花生产量极显著正相关(0.956)(表5), 表明有效磷的缺乏是限制当前红壤旱地花生持续高产的主要肥力因子。这与孔宏敏等<sup>[12]</sup>、张桃林等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。土壤活性有机质、全氮、亚硝态氮、速效钾与花生产量均存在显著正相关关系, 相关系数分别为0.826\*、0.860\*、0.901\*、0.864\*。有机质、铵态氮、全磷虽然与花生产量不存在显著相关关系, 但相关系数仍高达0.700以上。

### 3 结 论

沼液全氮(30%)处理显著提高了土壤活性有机质、铵态氮、硝态氮、亚硝态氮、有效磷、速效钾含量及碳库管理指数。单施化肥和沼液全氮(15%)处理促进了土壤酸化, 而沼液全氮(30%~100%)处理则对土壤酸化起抑制作用。沼液施用显著提高了花生产量, 其中沼液全氮(30%)处理年平均产量较其他处理显著增产4.0%~48.3%。同时为了达到花生高产, 红壤旱地应注重提高土壤有机质质量和全氮、亚硝态氮、有效磷和速效钾含量, 特别是有效磷。相比土壤有机质, 土壤活性有机质能更为客观地反映土壤质量的变化, 应成为土壤施肥的良好评价指标。本试验条件下, 沼液化肥均衡配施(30%)一方面可显著提高花生产量, 减少化肥使用量; 另一方面则显著提高土壤活性有机质含量、速效养分库和碳库管理指数, 应成为红壤旱地花生增产和地力培肥的有效途径。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 陈永杏. 猪场沼液农用生态环境效应研究——以北京地区冬小麦/夏玉米轮作农田为例. 北京: 中国农业科学院, 2012  
Chen Y X. Study on the ecological and environmental impacts of liquid digestate from swine farm applied on cropland—A case study on a wheat/maize rotation cropland in Beijing ( In Chinese ). Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. 2012
- [ 2 ] Galvez A, Sinicco T, Cayuela M, et al. Short term effects of bioenergy by-products on soil C and N dynamics, nutrient availability and biochemical properties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 160: 3—14
- [ 3 ] 李远, 单正军, 徐德徽. 我国畜禽养殖业的环境影响与管理政策初探. *中国生态农业学报*, 2002, 10(2): 136—138  
Li Y, Shan Z J, Xu D H. Preliminary studies of management of livestock pollution in China ( In Chinese ). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(2): 136—138
- [ 4 ] 史一鸣. 稻田生态系统消解沼液的潜力及风险评估. 杭州: 浙江大学, 2010  
Shi Y M. The potential capacity for paddy field ecosystem to decontaminate biogas slurry and its risks assessment ( In Chinese ). Hangzhou: Zhejiang University, 2010
- [ 5 ] 张昌爱, 刘英, 曹曼, 等. 沼液的定价方法及其应用效果. *生态学报*, 2011, 31(6): 1735—1741  
Zhang C A, Liu Y, Cao M, et al. Pricing method and application effects of biogas slurry ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 1735—1741
- [ 6 ] Zirkler D, Peters A, Kaupenjohann M. Elemental composition of biogas residues: Variability and alteration during anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*, 2014, 67: 89—98
- [ 7 ] Abubaker J, Risberg K, Pell M. Biogas residues as fertilisers—Effects on wheat growth and soil microbial activities. *Applied Energy*, 2012, 99: 126—134
- [ 8 ] Sieling K, Herrmann A, Wienforth B, et al. Biogas cropping systems: Short term response of yield performance and N use efficiency to biogas residue application. *European Journal of Agronomy*, 2013, 47: 44—54
- [ 9 ] Terhoeven-Urselmans T, Scheller E, Raubuch M, et al. CO<sub>2</sub> evolution and N mineralization after biogas slurry application in the field and its yield effects on spring barley. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42: 297—302
- [ 10 ] 冯丹妮, 伍钧, 杨刚, 等. 连续定位施用沼液对水旱轮作耕层土壤微生物区系及酶活性的影响. *农业环境科学学报*, 2014, 33(8): 1644—1651  
Feng D N, Wu J, Yang G, et al. Influence of long-term application of biogas slurry on microbial community composition and enzymatic activities in surface soil under rice-rape rotation ( In Chinese ). *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8): 1644—1651
- [ 11 ] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策. *生态学报*, 2013, 33(24): 7615—7622

- Zhao Q G, Huang G Q, Ma Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (24): 7615—7622
- [12] 孔宏敏, 何圆球, 吴大付, 等. 长期施肥对红壤旱地作物产量和土壤肥力的影响. *应用生态学报*, 2004, 15 (5): 782—786
- Kong H M, He Y Q, Wu D F, et al. Effect of long-term fertilization on crop yield and soil fertility of upland red soil (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (5): 782—786
- [13] 赵其国. 我国红壤的退化问题. *土壤*, 1995, 27 (6): 281—285
- Zhao Q G. The problems about the red soil degradation in China (In Chinese). *Soils*, 1995, 27 (6): 281—285
- [14] 孙波, 张桃林, 赵其国. 南方红壤丘陵区土壤养分贫瘠化的综合评价. *土壤*, 1995, 27 (3): 119—128
- Sun B, Zhang T L, Zhao Q G. The comprehensive evaluation of soil nutrient barren about red soil in hilly region in South China (In Chinese). *Soils*, 1995, 27 (3): 119—128
- [15] 刘国顺, 罗贞宝, 王岩, 等. 绿肥翻压对烟田土壤理化性状及土壤微生物量的影响. *水土保持学报*, 2006, 20 (1): 95—98
- Liu G S, Luo Z B, Wang Y, et al. Effect of green manure application on soil properties and soil microbial biomass in tobacco field (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 (1): 95—98
- [16] 李继明, 黄庆海, 袁天佑, 等. 长期施用绿肥对红壤稻田水稻产量和土壤养分的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17 (3): 563—570
- Li J M, Huang Q H, Yuan T Y, et al. Effects of long-term green manure application on rice yield and soil nutrients in paddy soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17 (3): 563—570
- [17] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响. *中国农业科学*, 2009, 42 (8): 2809—2819
- Lin Z A, Zhao B Q, Yuan L, et al. Effects of organic manure and fertilizers long-term located application on soil fertility and crop yield (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42 (8): 2809—2819
- [18] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期不同施肥对旱地红壤性质和作物生长的影响. *水土保持学报*, 2005, 19 (1): 97—100
- Wang B R, Xu M G, Wen S L. Effect of long time fertilizers application on soil characteristics and crop growth in red soil upland (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19 (1): 97—100
- [19] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化. *土壤学报*, 2006, 43 (5): 723—729
- Xu M G, Yu R, Wang B R. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 (5): 723—729
- [20] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [21] 董鲁浩, 李玉义, 逢焕成, 等. 不同土壤类型下长期施肥对土壤养分与小麦产量影响的比较研究. *中国农业大学学报*, 2010, 15 (3): 22—28
- Dong L H, Li Y Y, Pang H C, et al. Comparison of the effect of long-term fertilizer application on soil nutrients and wheat yield under different soil types (In Chinese). *Journal of China Agricultural University*, 2010, 15 (3): 22—28
- [22] 姜灿烂, 何园球, 李辉信, 等. 长期施用无机肥对红壤旱地养分和结构及花生产量的影响. *土壤学报*, 2009, 46 (6): 1102—1109
- Jiang C L, He Y Q, Li H X, et al. Effect of long-term inorganic fertilization on soil nutrient and structure and peanut yield in upland red soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (6): 1102—1109
- [23] 徐玲, 张杨珠, 周卫军, 等. 不同施肥结构下稻田产量及土壤有机质和氮素营养的变化. *农业现代化研究*, 2006, 27 (2): 153—156
- Xu L, Zhang Y Z, Zhou W J, et al. Effects of different fertilizer application systems on soil fertilizer quality and rice yield (In Chinese). *Research of Agriculture Modernization*, 2006, 27 (2): 153—156
- [24] 张继光, 秦江涛, 要文倩, 等. 长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响. *土壤*, 2010, 42 (3): 364—371
- Zhang J G, Qin J T, Yao W Q, et al. Effects of long-term fertilization on soil active organic carbon and soil enzyme activities in upland red soils (In Chinese). *Soils*, 2010, 42 (3): 364—371
- [25] Whitbread A, Lefroy R, Blair G. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36: 669—682
- [26] 王伯仁, 蔡泽江, 李东初. 长期不同施肥对红壤旱地肥力的影响. *水土保持学报*, 2010, 24 (3): 85—88
- Wang B R, Cai Z J, Li D C. Effect of different long-term

- fertilization on the fertilizy of red upland soil ( In Chinese ) . Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24 ( 3 ) : 85—88
- [ 27 ] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征. 生态学报, 2007, 27 ( 2 ) : 603—612
- Wei X R, Shao M A. The distribution of soil nutrients on sloping land in the gully region watershed of the Loess Plateau ( In Chinese ) . Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 ( 2 ) : 603—612
- [ 28 ] 张桃林, 鲁如坤, 李忠佩. 红壤丘陵区土壤养分退化与养分库重建. 长江流域资源与环境, 1998, 7 ( 1 ) : 18—24
- Zhang T L, Lu R K, Li Z P. Nutrient degradation and restoration of red soil in hilly region of China ( In Chinese ) . Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1998, 7 ( 1 ) : 18—24
- [ 29 ] 张宝贵, 李贵桐. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用. 土壤学报, 1998, 35 ( 1 ) : 104—111
- Zhang B G, Li G T. Roles of soil organisms on the enhancement of plant availability of soil phosphorus ( In Chinese ) . Acta Pedologica Sinica, 1998, 35 ( 1 ) : 104—111
- Yu W T, Zhao X, Zhang L, et al. Contribution of long-term fertilization to crop yield ( In Chinese ) . Chinese Journal of Ecology, 2008, 26 ( 12 ) : 2040—2044
- [ 30 ] 章永松, 林咸永, 罗安程, 等. 有机肥 ( 物 ) 对土壤中磷的活化作用及机理研究I: 有机肥 ( 物 ) 对土壤不同形态无机磷的活化作用. 植物营养与肥料学报, 1998, 4 ( 2 ) : 145—150
- Zhang Y S, Lin X Y, Luo A C, et al. Studies on activation of phosphorus by organic manure in soils and its mechanisms I: Effect of organic manure ( matter ) on activation to different phosphate in soils ( In Chinese ) . Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4 ( 2 ) : 145—150
- [ 31 ] Wilding L. Spatial variability: Its documentation, accommodation and implication to soil surveys // Nielsen D, Bouma J. Soil Spatial Variability. Proceedings of a Workshop of ISSS and the SSSA, Las Vegas USA. 1985
- [ 32 ] 宇万太, 赵鑫, 张璐, 等. 长期施肥对作物产量的贡献. 生态学杂志, 2008, 26 ( 12 ) : 2040—2044

## Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Chemical Fertilizer on Soil Nutrients and Peanut Yield in Upland Red Soil

ZHENG Xuebo<sup>1, 2</sup> FAN Jianbo<sup>1</sup> ZHOU Jing<sup>1, 2, 3, 4\*</sup> HE Yuanqiu<sup>1, 2</sup>

( 1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China )

( 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China )

( 3 National Engineering Research and Technology Center for Red Soil Improvement, Red Soil Ecological Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, Yingtan, Jiangxi 335211, China )

( 4 Institute of Biology Resource, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330029, China )

**Abstract** Biogas slurry was known to affect the soil-plant ecosystem when applied as manure, especially in combination with chemical fertilizer. However, little knowledge was available regarding how this combination affects peanut yield and soil fertility in peanut fields of red soil, South China. Therefore, a two-year field experiment, designed to have 6 treatments, except for CK ( No fertilizer applied ), different in proportion of biogas slurry N to total N input [ 0% ( NPK ), 15% ( BS15 ), 30% ( BS30 ), 45% ( BS45 ) and 100% ( BS100 ) ] and the same in NPK rate ( N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O, 120-90-135 kg hm<sup>-2</sup> ), was carried out to evaluated synthetically the effects of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on peanut yield, soil organic matter, labile organic matter, carbon management index and soil nutrients ( N, P, K et al ) in the Red Soil Ecological Experiment Station, Chinese Academy of Sciences. Results show that combined application increased peanut yield by 33.2% ~ 48.3% and 10.2% ~ 22.8% as compared to that in CK and Treatment NPK, respectively, with Treatment BS30 in particular, reaching 3 332 kg hm<sup>-2</sup> in peanut yield or being 4.0% ~ 48.3% higher than the other treatments, separately. Meanwhile it also significantly increased soil organic matter, labile organic

matter and carbon management index (CMI), and the effect was especially obvious in Treatment BS30. The findings suggest that combined application may increase the content of soil organic matter and improve its quality as well. Treatment BS30 markedly increased soil total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, available phosphorus and potassium in the soil, as compared with CK and Treatment NPK, respectively. Correlation analysis of peanut yield with soil nutrients (N, P, K, etc.) reveals that its correlation coefficient was the highest with available phosphorus, being 0.956\*\*, which indicates that soil available phosphorus is presently the main factor affecting peanut yield in peanut fields of red soil. In addition, peanut yield was also found positively related to labile organic matter with correlation coefficient being 0.826\*, but did not have much to do with organic matter. At the same time, labile organic matter was in extremely significant or significant positive relationship with organic matter (0.920\*\*), total nitrogen (0.894\*), total phosphorus (0.867\*), available phosphorus (0.872\*) and available potassium (0.821\*), while organic matter was significantly related only to labile organic matter (0.920\*\*), total nitrogen (0.922\*\*) and available phosphorus (0.862\*), which suggests that labile organic matter could be better used as indicator of soil quality than organic matter, and, hence, may well be used as a good index for evaluation of soil fertilization efficiency. All the findings in this experiment indicate that the combined application of biogas slurry and chemical fertilizer, 3:7 in ratio can not only significantly increase peanut yield and reduce the use of chemical fertilizer, but also build up the soil nutrient pool with higher labile organic matter and organic matter contents. It is, therefore considered to be an effective way to increase peanut yield, while building up soil fertility in the upland red soil areas of South China.

**Key words** Upland red soil; Biogas slurry; Soil fertilizer; Peanut yield; Labile organic matter

(责任编辑: 陈荣府)