



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

富碳沼液施用对水稻分蘖期生长的影响

冉毅, 吴延萍, 徐朗, 梁飞虹, 晏水平

引用本文:

冉毅, 吴延萍, 徐朗, 等. 富碳沼液施用对水稻分蘖期生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 202–208.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0089>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基施富硒有机肥料对玉米和土壤硒含量的影响

李圣男, 岳士忠, 李花粉, 乔玉辉

农业资源与环境学报. 2015(6): 571–576 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0140>

沼液替代化肥氮对冬小麦产量、品质及生长发育的影响

王桂良, 张家宏, 王守红, 寇祥明, 徐荣, 韩光明, 唐鹤军, 朱凌宇, 毕建花, 吴雷明

农业资源与环境学报. 2018, 35(5): 467–475 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0001>

稳定氮肥用量和施用方式对水稻产量和氮肥效率的影响

李敏, 叶舒娅, 刘枫, 郭熙盛, 武际, 黄义德, 郭肖颖

农业资源与环境学报. 2015(6): 559–564 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0157>

两种钢渣源调理剂对水稻生长及氮磷钾吸收量的影响

张璐, 蔡泽江, 文石林, 上官方钦, 秦松, 张会民

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 439–448 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0118>

不同种类有机物对污染农田土壤重金属活性的影响

倪中应, 邱志腾, 石一珺, 章明奎

农业资源与环境学报. 2017, 34(6): 517–524 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0146>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

冉 毅, 吴延萍, 徐 朗, 等. 富碳沼液施用对水稻分蘖期生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 202–208.

RAN Yi, WU Yan-ping, XU Lang, et al. Growth performance of rice at the tillering stage after applying CO₂-rich biogas slurry[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(2): 202–208.

富碳沼液施用对水稻分蘖期生长的影响

冉 毅^{1,2}, 吴延萍³, 徐 朗^{4,5}, 梁飞虹^{4,5}, 晏水平^{4,5*}

(1. 农业农村部沼气科学研究所, 成都 610041; 2. 农业农村部生物质发酵产品质量安全风险实验室(成都), 成都 610041; 3. 湖北省农村能源办公室, 武汉 430070; 4. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 5. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘 要:为探究施用富碳沼液对水稻生长的影响,以氮素含量为施肥指标,分别以原沼液(BS)、富碳原沼液(CO₂-BS)、5倍浓缩沼液(5CBS)和富碳5倍浓缩沼液(CO₂-5CBS)为肥料施用于水稻,对水稻的矿质元素吸收利用情况及生长状况进行研究,并与复合肥施用进行对比。结果表明,从生理学指标来看,与复合肥处理的水稻相比,施用BS、CO₂-BS、5CBS和CO₂-5CBS后的水稻根系活力提升了93%~437%,对P元素的吸收分别降低了22.42%、20.25%、42.75%和41.06%,但CO₂-BS组和CO₂-5CBS组对K元素的吸收量分别提高了9.95%和2.58%,而CO₂-5CBS组则对Ca元素吸收量提升了45.23%。从农艺性状角度来看,施用了BS和CO₂-BS后水稻的生长量比复合肥组分别提高了9.67%和25.25%,且施用CO₂-BS的水稻外观长势最好。从营养性状指标来看,施用沼液后水稻的可溶性糖含量比复合肥施用组提升14.45%~23.07%。研究表明,施用富碳沼液可促进水稻对矿质元素的吸收,提高水稻的物质同化能力,建议沼液施用前先进行富碳处理,并配合化学磷肥共同施用。

关键词:水稻;沼液;CO₂;营养吸收;生长品质

中图分类号:S216.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)02-0202-07

doi: 10.13254/j.jare.2019.0089

Growth performance of rice at the tillering stage after applying CO₂-rich biogas slurry

RAN Yi^{1,2}, WU Yan-ping³, XU Lang^{4,5}, LIANG Fei-hong^{4,5}, YAN Shui-ping^{4,5*}

(1. Biogas Institute of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610041, China; 2. Risk Assessment Lab of the Quality Safety of Biomass Fermentation Products (Chengdu), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610041, China; 3. Rural Energy Office of Hubei Province, Wuhan 430070, China; 4. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 5. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to explore the growth performance of rice after applying CO₂-rich biogas slurry, the nitrogen content was selected as the index to determine the fertilizer amount for rice. Biogas slurry (BS), CO₂-rich BS (CO₂-BS), 5-times concentrated BS (5CBS), and CO₂-rich 5CBS (CO₂-5CBS) were the different fertilizer treatments applied. After their application during rice growth, the absorption and utilization of mineral elements by rice plants and growth rate were analyzed and compared with those of plants after applying the compound fertilizer (CK). The results showed that the root activities of rice treated with biogas slurry were 0.93~4.37 times higher than those under the compound fertilizer treatment. The uptake of P by rice plants treated with BS, CO₂-BS, 5CBS, and CO₂-5CBS decreased by about 22.42%, 20.25%, 42.75%, and 41.06%, respectively, when compared to the compound fertilizer treatments. However, the K absorption capacities of rice plants subjected to CO₂-BS and CO₂-5CBS treatments increased by 9.95% and 2.58%, respectively. Additionally, the Ca absorption

收稿日期:2019-02-25 录用日期:2019-05-08

作者简介:冉 毅(1983—),男,重庆武隆人,主要从事生物质发酵产品质量安全风险实验室研究。E-mail: ranyi@caas.cn

*通信作者:晏水平 E-mail: yanshp@mail.hzau.edu.cn

基金项目:中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-2019-BIOMA);中央高校基本科研业务费专项基金(2662018PY046);农业农村部农村能源综合建设项目(2130126-19-016)

Project supported: Agricultural Science and Technology Innovation Project of Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-ASTIP-2019-BIOMA); Special Funds for Fundamental Scientific Research Business Expenses of Central Universities (2662018PY046); Rural Energy Comprehensive Construction Project of Ministry of Agriculture and Rural Affairs (2130126-19-016)

capacity increased by 45.23% in the CO₂-5CBS treatment. Furthermore, the biomass of rice plants in BS and CO₂-BS treatments were 9.67% and 25.25% higher than that in the compound fertilizer treatments, respectively, and the phenotype of the rice plants in the CO₂-BS treatment was the best. The soluble sugar content of rice plants subjected to biogas slurry application increased by about 14.45%~23.07%. In conclusion, the application of CO₂-rich biogas slurry could promote the absorption of mineral elements and improve the assimilation ability of rice. It is suggested that CO₂ saturation should be treated before biogas slurry application, and the chemical phosphate fertilizer should be applied together.

Keywords: rice; biogas slurry; CO₂; nutrition absorption; growth quality

随着我国沼气工程数量的增长,尤其是大中型沼气工程数量的剧增,沼液的产量大幅提升,年排放量已超过2亿t,其低成本无害化处理已成为沼气工程良性发展的关键环节之一^[1-2]。沼液中除了富含植物生长和发育所必需的大量元素、微量元素和植物生长激素外,还含有较丰富的可溶性有机碳等营养物质及对病虫害有抑制作用的抗生素,是一种可循环再生的优质有机肥原料^[3-5]。目前,沼液的主要处理方式为农田直接消纳,但沼液的利用率及附加值都较低^[6],且难以形成商业化产品,既造成沼液的浪费,又对农田健康构成潜在威胁,甚至还会造成环境的二次污染^[7-8]。

已有研究表明,沼液对改良土壤、提升肥力和提高农产品产量、品质及优化土壤微生物群落结构等均有重要作用^[9-10]。因此,将沼液肥料化、资源化利用是一种可行的途径。水稻作为全球种植分布最广的粮食作物,需水多,施用沼肥为处理储量巨大的沼液提供了一种可能的途径。但由于沼液中的氮、磷、钾含量相差较大,在实际生产中单施沼液对提高作物生长的效果并不明显^[11],同时沼液呈弱碱性,氨氮含量高,施用不当极易造成烧苗现象^[12-13]。如果在沼液利用前,降低其氨氮含量,并将pH值调节至近中性,同时与化肥配合施用,可能有益于提高作物产量和改善营养品质^[14]。

基于此,本研究首先对沼液进行浓缩与富碳处理,通过沼液浓缩来降低氨氮含量,并提升相关营养元素的含量,通过富碳处理来稳定沼液pH值,使pH降至近中性。研究中,采用原沼液及浓缩与富碳后的沼液对水稻进行施肥,从水稻对沼液中矿质元素的吸收利用与水稻生长状况等角度探究了沼液施用对水稻分蘖期生长的影响,并与传统复合肥施肥效果进行对比,从而提出沼液的前处理方法与施用建议。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻品种选取广泛种植于成都平原的泸优

9803(四川川种有限责任公司,纯度≥96.0%,发芽率≥80.0%,水分≤13.0%),水稻种子用清水催芽后,在穴盘中育苗,培养至三叶期进行移栽^[15]。

供试沼液来源于华中农业大学沼气发酵中试装置,发酵以猪粪为主要原料,配合添加少量的鸡粪及生活污水,在35℃下中温发酵20d。沼液取回后在常温(25±5)℃下密封保存至不再产气后,将沼液在4000 r·min⁻¹下离心分离20 min(TSZ5-WS型低速多管架自动平衡离心机,湖南湘仪离心机仪器有限公司),然后取上清液通过旋蒸仪(RE-5298旋转蒸发器,上海恒勤仪器设备有限公司)进行浓缩。浓缩系统及工艺流程参照文献[16]。浓缩过程中,沼液温度设置为45℃,系统压力为2 kPa,循环冷却水温度为2.5℃。根据前期研究结果,当沼液浓缩后体积为原体积的1/5(即5倍浓缩沼液)时,沼液具有更低的植物生理毒性,且浓缩经济成本适中。当浓缩倍数不足5倍时,沼液中氨氮含量仍偏高;超过5倍后,沼液中N元素含量无法满足水稻生长所需,且浓缩成本过高^[17-18]。

对离心后的原沼液(BS)和5倍浓缩后沼液(5CBS)进行富碳操作来降低pH值至近中性,具体方法为向BS和5CBS中通入纯CO₂,使pH降至6.5~7.0,制备出富碳原沼液(CO₂-BS)和富碳5倍浓缩沼液(CO₂-5CBS)备用。各沼液的主要养分含量如表1所示。

由表1可知,5倍浓缩后,沼液氨氮含量降低,这主要是因为沼液体系中存在NH₄⁺与NH₃之间的动态平衡,而在减压浓缩条件下,沼液中的自由氨(NH₃)会被抽离系统,促进了NH₄⁺向NH₃的转变,进而源源不断地从沼液体系中脱离,导致氨氮含量下降^[19]。

1.2 试验设计

育苗完成后的水稻移栽至培养钵中进行土培,每钵装15 kg过筛后的风干混合栽培土壤。为避免稻田土壤肥力对试验效果产生影响,栽培土壤由稻田土

表1 处理前后沼液上清液的主要养分含量

Table 1 Main nutrient content of the supernatant of biogas slurry

处理 Treatments	氨氮 Ammonia nitrogen/mg·L ⁻¹	P/mg·L ⁻¹	K/mg·L ⁻¹	Ca/mg·L ⁻¹	总无机碳 TIC/mol·L ⁻¹	pH	EC/mS·cm ⁻¹
BS	1 255.05±4.32	60.67±1.11	2 035.99±10.13	123.52±4.76	0.103±0.003	7.6±0.07	5.67±0.10
CO ₂ -BS	—	—	—	—	0.120±0.001	6.5±0.04	8.45±0.21
5CBS	998.10±1.79	81.24±1.84	9 950.65±15.67	273.15±7.22	0.112±0.003	8.1±0.10	10.87±0.12
CO ₂ -5CBS	—	—	—	—	0.145±0.009	6.9±0.02	12.94±0.10

和黄沙按 1:1 (V/V) 混合而成,其具体成分如表 2 所示。试验过程中,培养钵土壤表面全程保持 2~5 cm 深的水层。

研究设置 BS、CO₂-BS、5CBS 和 CO₂-5CBS 4 种沼液浇灌处理进行试验。沼液施用量根据每千克土 0.1 g 氨氮的标准来确定,其中 50% 用作基肥,其余用于水稻分蘖期追肥。同时,以复合肥(N:P₂O₅:K₂O=16:16:16)施用作为对照(CK),按每千克土 0.1 g 纯氮的标准(通过每公顷施肥量换算)施用复合肥。同样,基肥占 50%,其余作为追肥在分蘖期施用。

研究从水稻三叶期开始,到水稻全部分蘖完成结束,整个试验历时 40 d。水稻种植在栽培温室中,气候条件模拟适宜水稻生长的最佳条件。首先在 25 ℃、湿度 60% 条件下黑暗处理 12 h,再在光照 20 000 lx、温度 28 ℃和湿度 60% 条件下处理 9 h,接着在光照 12 000 lx、温度 32 ℃及湿度 65% 条件下处理 3 h,循环此设定^[20]。

以水稻干物质中主要元素(P、K、Ca)含量、水稻的农艺学性状^[21-22](生长量、根长、株高、叶片数)和生理学性状^[23](叶绿素含量、可溶性糖含量、根系活力)为主要指标,并与复合肥组水稻对比,探究沼液对水稻生长的施肥效果。

1.3 测试方法

1.3.1 沼液及土壤养分含量测定

在土壤养分测量前,先取试验土壤 5 g,加入 100 mL 蒸馏水,振荡 15 min 后,取过滤液进行测定。土壤滤液及经过 1.1 节方法初步处理后沼液的电导率(EC)采用 DDS-307A 型电导率仪(上海仪电科学仪器

股份有限公司)进行测定,总无机碳(TIC)浓度由 T860 型全自动滴定仪(济南海能仪器)测定,铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、总磷(TP)及速效磷含量等则采用 SmartChem 200 全自动化学分析仪(意大利 AMS-Westco 公司)测定。测量时随机取样分析。

K、Ca 含量测试前,先取沼液 1 mL 或试验土壤 0.1 g,采用 MARS6 型全自动微波消解仪(美国 CEM 公司)经 H₂SO₄-H₂O₂ 在 220 ℃下消解 1 h,再用电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7700X ICP-MS)进行 K、Ca 含量测试。

1.3.2 水稻干物质中 P、K、Ca 含量测定

将清理干净的水稻植株置于烘箱中进行烘干脱水,先在 105 ℃烘箱中杀青 15~20 min,随后立即降低烘箱温度至 80 ℃,继续烘干 12 h。用粉碎机粉碎后过 60 目筛,取 0.1 g 样品采用 MARS6 型全自动微波消解仪(美国 CEM 公司)经 H₂SO₄-H₂O₂ 在 220 ℃下消解 1 h,用电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7700X ICP-MS)测定 P、K、Ca 含量。

1.3.3 水稻农艺学性状测定

生长量采用精度为 0.01 g 的电子天平测量,称量前先用自来水冲洗根系上的杂物,吸干水分后进行称量。水稻处于自然伸展状态时,采用毫米刻度尺测量其根长和株高。

1.3.4 水稻生理学性状测定

水稻的可溶性糖含量采用 3,5-二硝基水杨酸法测定,根系活力采用标准 TTC 法测定,光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素)采用 95% 乙醇法进行测定。

表2 试验土壤中主要养分含量

Table 2 Main nutrient content in the test soil

土壤样本 Soil sample	NH ₄ ⁺ -N/ mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/ mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/ mg·kg ⁻¹	有机质 Organic matter/ g·kg ⁻¹	总氮 Total N/ g·kg ⁻¹	总磷 Total P/ g·kg ⁻¹	pH	EC/ μS·cm ⁻¹
稻田土	7.10±0.02	4.39±0.07	23.63±0.16	111.92±1.20	14.93±0.10	0.43±0.00	0.48±0.01	6.15±0.10	102.30±0.12
混合土	1.31±0.01	5.91±0.21	16.45±0.10	96.70±0.98	5.17±0.11	—	—	6.85±0.08	98.70±0.29

2 结果与讨论

2.1 沼液施用对水稻生长状况的影响

一般而言,作物的生长状况可由农艺学性状与生理学性状进行评价,农艺学性状包括生长量、根长、株高与叶片数,生理学性状可用根系活力、可溶性糖含量、叶绿素含量等来反映。

2.1.1 沼液施用对水稻农艺学性状的影响

施用BS、CO₂-BS、5CBS和CO₂-5CBS后,水稻的农艺性状如图1所示。由图1a可知,施用BS和CO₂-BS后的水稻生长量均高于CK,分别提高了9.67%和25.25%,但施用5CBS和CO₂-5CBS后的水稻生长量均低于CK。由图1还可看出,对于施用相同浓度沼液的水稻,施用富碳沼液组水稻的生长量均高于非富碳处理组:施用CO₂-BS的水稻生长量比施用BS的水稻增加14.21%,而施用CO₂-5CBS的水稻生长量则比施用5CBS的水稻增加了29.13%。

水稻的生长分为地上部和地下部,当营养物质一定时,根长与株高发育越好,水稻长势就越好^[24]。由图1a可知,施用CO₂-BS和CO₂-5CBS后水稻的根长和株高与CK基本相当,但施用BS和5CBS时的水稻长势则不如CK。总体而言,CO₂-BS的农艺性状最好。

在实际生长过程中,水稻绿叶数越多、死叶数越少,其植株越健康。除施用BS外,施用其他沼液时的水稻绿叶数均与CK相当(图1b)。同时,如果沼液未经富碳处理,会导致生长过程中死叶数增加,如图1b所示。施用BS和5CBS时,死叶数比CK分别增加

66.67%和83.33%。可能是由未富碳处理的沼液pH较高所引起的,沼液体系pH越高,其中自有氨含量越高,更容易在环境中逸散,从而造成水稻叶片氨中毒^[18]。

不同施肥方案种植的水稻生长40 d后,水稻的根系生长表现型如图2所示。根系是植物吸收水分、矿质元素的主要器官,根的生长情况和活力水平直接影响地上部的营养^[25]。由图2可知,除施用5CBS处理组外,施用其他沼液后水稻的根系生长状况均与CK相当。这是由于沼液中富含的粗纤维、N、P、K、微量元素等营养物质浓度可充分满足水稻的营养需求^[26]。因此,水稻根系发育良好。

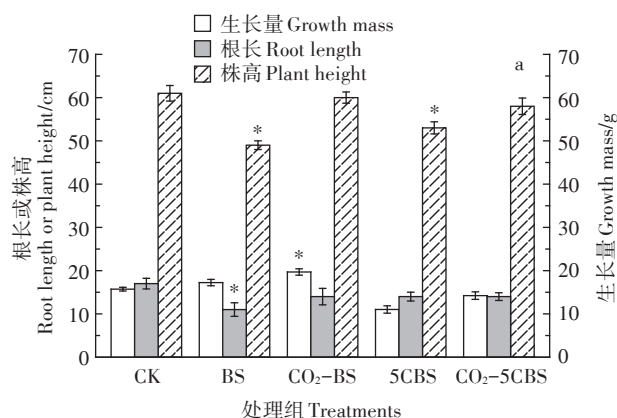
2.1.2 沼液施用对水稻生理学性状的影响

根系活力以脱氢酶活性为指标,而酶活的高低则与底物浓度相关^[27]。与CK相比,施用BS、CO₂-BS、5CBS和CO₂-5CBS的水稻根系活力分别提高了121%、437%、93%和353%,如图3所示。值得注意的



图2 水稻根系生长表现型

Figure 2 Phenotype of rich root growth

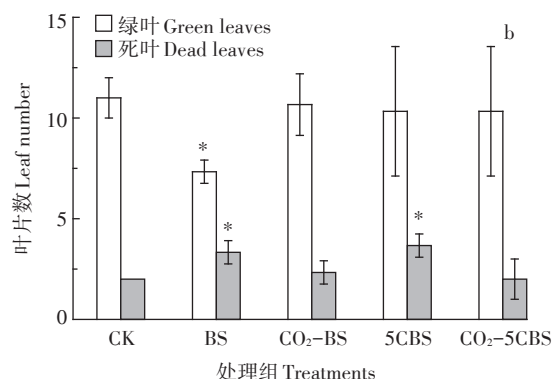


*表示与复合肥处理(CK)差异显著($P<0.1$)。下同

* indicate significant differences compared with the compound fertilizer treatment(CK)($P<0.1$). The same below

图1 不同施肥方案下水稻的主要农艺性状

Figure 1 Main agronomic traits of rice by applying different fertilizers



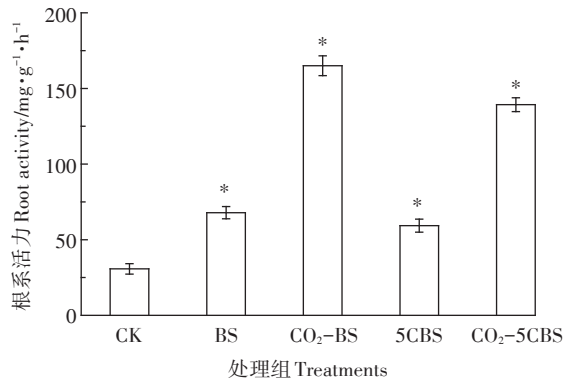


图3 不同施肥方案下的水稻根系活力

Figure 3 Root activity of rice by applying different fertilizers

是,施用富碳处理的沼液后,水稻根系活力大幅提升,这说明此时沼液中的营养物质与矿物元素浓度较高,能满足水稻根系吸收及自身需求,因而脱氢酶的酶促反应可达到一级反应阶段,酶活性最高,故根系活力较高^[28]。而复合肥施用时效能提供N、P、K三种元素,虽然能够满足水稻生长需求,但根系无法充分吸收微量元素及可溶性有机碳等其他营养,脱氢酶没有足够的反应底物,酶促反应较弱^[29],因而根系活力较低。

另外,从物质同化能力来考虑,水稻合成的光合色素含量越高,光合效率和物质同化能力越强,水稻合成和储存的可溶性糖则越多。由于沼液中含有多种植物激素和氨基酸,水稻有充分的营养物质积累去合成叶绿素a,维持自身光合作用,如图4所示。从图中可知,除施用BS处理组外,施用CO₂-BS、5CBS和CO₂-5CBS处理组的水稻叶绿素a含量均略高于CK,但差异不显著。在施用沼液时,作为辅助色素的叶绿素b(合成时以叶绿素a为前体物质)和类胡萝卜素的含量低于CK。值得注意的是,施用沼液后,水稻的叶绿素a与叶绿素b的含量比有所增加,这意味着水稻对光的利用效率提升,因此合成的可溶性糖也就越多。与CK相比,施用BS、CO₂-BS、5CBS和CO₂-5CBS后水稻的可溶性糖含量分别显著提升了18.76%、23.07%、14.45%和20.79%(图4b)。

2.2 沼液施用对水稻主要营养元素吸收的影响

不同施肥方案下种植的水稻生长40 d后,水稻干物质中P、K、Ca元素含量如图5所示。由于试验设计中以N素含量为基准进行施肥,因此本研究未考虑水稻对N元素的吸收情况。

对K元素的吸收而言,施用富碳沼液后的水稻中含量更高,且施用CO₂-BS与CO₂-5CBS后的水稻中的K含量比CK分别提高了9.95%和2.58%。这说明富

碳沼液可以作为优质的钾肥,而K在碳水化合物代谢、呼吸作用及蛋白质代谢中起重要作用^[20,30]。对于Ca元素的吸收,施用BS、CO₂-BS和5CBS后的水稻中Ca含量与CK相当,但施用CO₂-5CBS时Ca含量比CK增加了约45.23%。由表1可知,沼液浓缩后,Ca元素含量更高,而经富碳处理后,沼液中引入的碳酸氢根离子会使沼液中的Ca元素处于游离状态,更适宜水

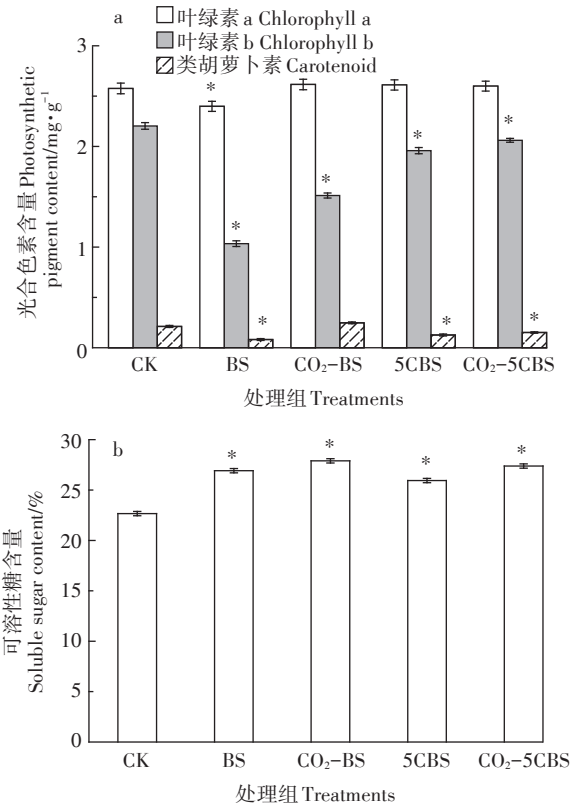


图4 不同施肥方案下水稻的同化能力

Figure 4 Photosynthetic assimilation of rice by applying different fertilizers

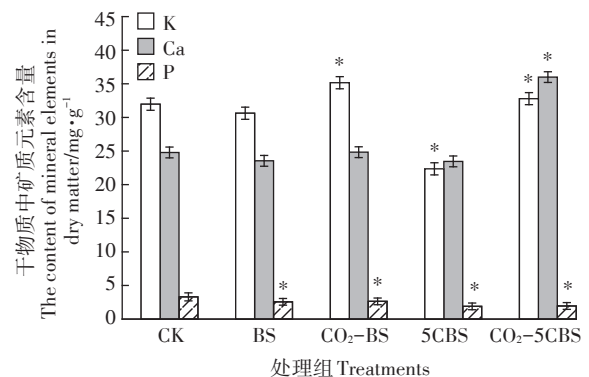


图5 不同施肥方案下水稻对主要营养元素的吸收

Figure 5 Absorption of major nutrients in rice by applying different fertilizers

稻的吸收^[31]。

由图5可知,与CK相比,施用沼液后水稻对P的吸收量相对较低,施用BS、CO₂-BS、5CBS和CO₂-5CBS后水稻中P含量分别降低了22.42%、20.25%、42.75%和41.06%。这主要是因为沼液中的P元素含量较低,而P元素又是水稻生长所需的大量元素^[32],因而导致沼液中P元素无法满足水稻的正常生长需求。值得注意的是,施用富碳沼液后的水稻对P的吸收效果略好于未富碳处理沼液,但两者差异不明显。

2.3 沼液施肥建议

与普通复合肥相比,沼液营养更丰富,能够提升水稻的根系活力,促进光合色素的合成,进而有利于可溶性糖的合成,且综合效果与复合肥相当。因此,沼液可用于水稻栽培。另外,对沼液进行富碳处理后,沼液的功效得到进一步增强,体现为水稻的同化能力更强。

从水稻对主要营养元素的吸收利用情况可知,沼液中P含量偏低,因此,在实际施用沼肥时,应配合磷肥共同施用。其次,由于沼液本身偏碱性,进行富碳处理的沼液,其主要养分处于最佳状态,可促进水稻对矿质元素的吸收。因此,在沼液施肥时,建议先对沼液进行富碳处理。

3 结论

(1)与施用复合肥相比,施用原沼液、富碳原沼液、5倍浓缩沼液和富碳5倍浓缩沼液后的水稻根系活力可以提升93%~437%,且对K和Ca元素的吸收普遍增强,同时水稻可溶性糖含量上升了14.45%~23.07%,但对P元素的吸收下降了20.25%~42.75%。另外,施用富碳原沼液后的水稻生长量比施用复合肥提高约1/4。

(2)对沼液进行富碳处理有助于促进水稻对矿质元素的吸收,且能提高水稻的物质同化能力。因而,在沼液施用前,建议先进行富碳处理,且配合化学磷肥共同施用。

参考文献:

- [1] 梁康强, 阎中, 魏泉源, 等. 基于反渗透技术的沼液浓缩研究[J]. 中国沼气, 2012, 30(2): 12-14.
LIANG Kang-qiang, YAN Zhong, WEI Quan-yuan, et al. Research on concentration of biogas slurry based on reverse osmosis[J]. *China Biogas*, 2012, 30(2): 12-14.
- [2] 黄继川, 徐培智, 彭智平, 等. 基于稻田土壤肥力及生物学活性的沼液适宜用量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 362-371.

- HUANG Ji-chuan, XU Pei-zhi, PENG Zhi-ping, et al. Biogas slurry use amount for suitable soil nutrition and biodiversity in paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(2): 362-371.
- [3] Gericke D, Bornemann L, Kage H, et al. Modelling ammonia losses after field application of biogas slurry in energy crop rotations[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, 223(1): 29-47.
- [4] 陈超, 徐凤花, 高立洪, 等. 规模化沼气工程沼液中微生物的细菌种群分析与功能初探[J]. 中国沼气, 2012, 30(6): 7-11.
CHEN Chao, XU Feng-hua, GAO Li-hong, et al. Population structure analysis and function exploration of the bacteria in biogas slurry from large-scale anaerobic digestion projects[J]. *China Biogas*, 2012, 30(6): 7-11.
- [5] Walsh J J, Rousk J, Edwards J G, et al. Fungal and bacterial growth following the application of slurry and anaerobic digestate of livestock manure to temperate pasture soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(8): 889-897.
- [6] Bian B, Lv L, Yang D, et al. Migration of heavy metals in vegetable farmlands amended with biogas slurry in the Taihu basin, China[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 71: 380-383.
- [7] Tan F, Wang Z, Zhouyang S Y, et al. Nitrogen and phosphorus removal coupled with carbohydrate production by five microalgae cultures cultivated in biogas slurry[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 221: 385-393.
- [8] 梁飞虹, 崔秋芳, 涂特, 等. 基于水培技术的沼液净化及生菜品质提升[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 788-795.
LIANG Fei-hong, CUI Qiu-fang, TU Te, et al. Benign treatment of biogas slurry and improvement in lettuce quality using hydroponics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4): 788-795.
- [9] 石治华, 杨晓天, 庄海燕, 等. 沼液施用量对新植甘蔗产量、品质及土壤理化性状的影响[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(2): 29-31.
SHI Zhi-hua, YANG Xiao-tian, ZHUANG Hai-yan, et al. Effects of biogas slurry doses on the yield, quality and soil physicochemical properties of new-planting sugarcane[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(2): 29-31.
- [10] Fang B Y, Xi P L, Cheng F S, et al. Concentrated biogas slurry enhanced soil fertility and tomato quality[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 2010, 60(3): 262-268.
- [11] 王文超, 贺清尧, 余歌, 等. 外源吸收剂对沼液CO₂吸收及农业应用的影响[J]. 化工进展, 2017, 36(4): 1512-1520.
WANG Wen-chao, HE Qing-yao, YU Ge, et al. Effect of exogenous absorbents addition on CO₂ absorption performance of biogas slurry and its agricultural application[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(4): 1512-1520.
- [12] 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.
JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, et al. Physical and chemical characteristics of anaerobically digested slurry from large-scale biogas project in Jiangsu Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 291-296.
- [13] 李轶, 刘荣厚, 张振, 等. 沼液对番茄产量及其植株生理活性指标的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(2): 103-106.
LI Yi, LIU Rong-hou, ZHANG Zhen, et al. Effect of biogas slurry on

- production of tomato and physiological activity index of tomato plant [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2002, 33(2): 103-106.
- [14] Lu J, Jiang L, Chen D, et al. Decontamination of anaerobically digested slurry in a paddy field ecosystem in Jiaying region of China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 146(1): 13-22.
- [15] 涂军明, 曹志刚, 陈杰, 等. 16个水稻品种作再生稻栽培的比较试验结果及评价[J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(23): 4475-4478.
- TU Jun-ming, CAO Zhi-gang, CHEN Jie, et al. Comparative experiment results and evaluation of 16 varieties as ratooning rice[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(23): 4475-4478.
- [16] 贺清尧, 王文超, 刘璐, 等. 沼液氨氮减压蒸馏分离性能与反应动力学[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(17): 191-197.
- HE Qing-yao, WANG Wen-Chao, LIU Lu, et al. Ammonia nitrogen separation performance and kinetics from biogas slurry using vacuum distillation method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(17): 191-197.
- [17] Jurado E, Antonopoulou G, Lyberatos G, et al. Continuous anaerobic digestion of swine manure: ADM1-based modelling and effect of addition of swine manure fibers pretreated with aqueous ammonia soaking [J]. *Applied Energy*, 2016, 172: 190-198.
- [18] 贺清尧, 王文超, 蔡凯, 等. 减压浓缩对沼液CO₂吸收性能和植物生理毒性的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 200-207.
- HE Qing-yao, WANG Wen-chao, CAI Kai, et al. Effect of vacuum concentration on CO₂ absorption performance and phytotoxicity of biogas slurry[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 200-207.
- [19] 焦有宙, 关山月, 李鹏飞, 等. 沼液负压蒸发浓缩装置的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(24): 72-76.
- JIAO You-zhou, GUAN Shan-yue, LI Peng-fei, et al. Design and experiment on system for concentrating biogas slurry with vacuum evaporation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(24): 72-76.
- [20] 孙永健, 孙园园, 李旭毅, 等. 水氮互作对水稻氮磷钾吸收、转运及分配的影响[J]. *作物学报*, 2010, 36(4): 655-664.
- SUN Yong-jian, SUN Yuan-yuan, LI Xu-yi, et al. Effects of water-nitrogen interaction on absorption, translocation and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(4): 655-664.
- [21] 李小坤. 水稻营养特性及科学施肥[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
- LI Xiao-kun. Rice nutritional characteristics and scientific fertilization[J]. Beijing: China Agricultural Press, 2016.
- [22] Valarmathi P, Kumar G, Robin S, et al. Evaluation of virus resistance and agronomic performance of rice cultivar ASD 16 after transfer of transgene against *Rice tungro bacilliform virus* by backcross breeding [J]. *Virus Genes*, 2016, 52(4): 521.
- [23] 孙园园, 孙永健, 王明田, 等. 种子引发对水分胁迫下水稻发芽及幼苗生理性状的影响[J]. *作物学报*, 2010, 36(11): 1931-1940.
- SUN Yuan-yuan, SUN Yong-jian, WANG Ming-tian, et al. Effects of seed priming on germination and seedling growth of rice under water stress[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(11): 1931-1940.
- [24] 敖和军, 王淑红, 邹应斌, 等. 不同施肥水平下超级杂交稻对氮、磷、钾的吸收累积[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(10): 3123-3132.
- AO He-jun, WANG Shu-hong, ZOU Ying-bin, et al. Characteristics of nutrient uptake and utilization of super hybrid rice under different fertilizer application rates[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10): 3123-3132.
- [25] Wang L, Chu H, Li Z, et al. Origin and development of the root cap in rice[J]. *Plant Physiology*, 2014, 166(2): 603-613.
- [26] Hafeez-ur R, Tariq A, Muhammad F, et al. Zinc nutrition in rice production systems: A review[J]. *Plant and Soil*, 2012, 361(1/2): 203-226.
- [27] 郭士伟, 夏士健, 朱虹霞, 等. 水稻根系活力测定方法及超级稻两优培九生育后期根系活力研究[J]. *土壤*, 2012, 44(2): 308-311.
- GUO Shi-wei, XIA Shi-jian, ZHU Hong-xia, et al. Factors influencing collecting amount of rice roots bleeding and investigation on roots vigor after heading[J]. *Soils*, 2012, 44(2): 308-311.
- [28] 唐珺瑶, 贾蓉, 曲东, 等. 生物质炭对水稻土中脱氢酶活性和铁还原过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 262-267.
- TANG Jun-yao, JIA Rong, QU Dong, et al. Effects of biochar on dehydrogenase activity and iron reduction in paddy soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(3): 262-267.
- [29] Ameloot N, Graber E R, Verheijen F G A, et al. Interactions between biochar stability and soil organisms: Review and research needs[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(4): 379-390.
- [30] Dhadi S R, Deshpande A, Driscoll K, et al. Major cis-regulatory elements for rice bidirectional promoter activity reside in the 5'-untranslated regions[J]. *Gene*, 2013, 526(2): 400-410.
- [31] 吴沿友, 邢德科, 刘莹. 植物利用碳酸氢根离子的特征分析[J]. *地球与环境*, 2011, 39(2): 273-277.
- WU Yan-you, XING De-ke, LIU Ying. The characteristics of bicarbonate used by plants[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(2): 273-277.
- [32] Gamuyao R, Chin J H, Pariascatanaka J, et al. The protein kinase Pstol1 from traditional rice confers tolerance of phosphorus deficiency [J]. *Nature*, 2012, 488(7412): 535-539.