

南方丘陵地区生物黑炭和有机肥配施化肥的应用研究

谢勇, 赵易艺, 张玉平, 唐丽, 何石福, 石敦杰, 刘强, 荣湘民

(湖南农业大学资源环境学院, 农田污染控制与农业资源利用湖南省重点实验室,

植物营养湖南省普通高等学校重点实验室, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 长沙 410128)

摘要: 研究生物黑炭和有机肥配施化肥对旱地作物种植和养分损失的影响, 旨在进一步探索高温多雨的南方丘陵地区旱地作物合理施肥和高产高效种植以及资源优化利用的有效途径。采用田间小区试验, 设置了5个处理: 不施肥(CK)、单施化肥(CF)、化肥+生物黑炭(CF+B)、有机无机肥配施(OF+CF)和有机无机肥配施且添加生物黑炭(OF+CF+B), 探讨了生物黑炭和有机肥施用对春玉米产量、地表氮磷径流损失、作物氮磷肥料利用率的影响。结果表明: 生物黑炭或有机肥的施用可显著增产8.2%~11.1%, 但有机肥和生物黑炭结合施用增产效果最佳, 增产率可高达13.7%。相比CF处理, CF+B处理可显著降低15.9%的氮素径流损失和24.2%磷素径流损失, 显著提高26.3%和11.8%的地上部氮磷累积量; OF+CF处理可显著降低17.5%的氮素径流损失和25.0%磷素径流损失, 提高36.5% ($P < 0.05$) 和8.2% ($P > 0.05$) 地上部氮磷累积量; OF+CF+B处理可显著降低33.3%的氮素径流损失和35.2%磷素径流损失, 显著提高52.1%和29.0%地上部氮磷累积量, 且氮磷肥料利用率最高, 分别达49.1%和26.4%。OF+CF+B处理施肥方式一方面可促进春玉米旺盛生长, 增加地表植被覆盖度和增强土壤的抗蚀性, 显著降低了地表的径流体积; 另一方面可以全面降低土壤氮磷养分溶解态和颗粒态的径流损失, 培肥了地力。因此, 从产量经济效益和环境效益方面综合来看, 认为添加生物黑炭和有机肥部分替代化肥结合化肥施入土壤是最合理的施肥方式, 值得在该区域进行推广和应用。

关键词: 生物黑炭; 有机肥; 产量; 氮磷径流损失; 肥料利用率; 春玉米

中图分类号: S143.1⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0197-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.04.031

Research on Application of Biochar and Organic Manure Combined with Chemical Fertilizers in Hilly Area of Southern China

XIE Yong, ZHAO Yiyi, ZHANG Yuping, TANG Li,

HE Shifu, SHI Dunjie, LIU Qiang, RONG Xiangmin

(Hunan Key Laboratory of Farmland Pollution Control and Agricultural Resources Use, Hunan Key

Laboratory of Plant Nutrition in Common University, National Engineering Laboratory on Soil and Fertilizer

Resources Efficient Utilization, College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128)

Abstract: Based on chemical fertilizer application, we studied effects of combining application biochar and organic fertilizer on crops planting and nutrients loss in dryland, which aimed to further explore the effective ways of rational fertilization, high yield and high efficiency planting and the optimal utilization of resources in dry land crops under the conditions of high temperature and precipitation in the hilly region of southern China. Field plot experiments were conducted to investigate the effects of biochar and organic fertilizer on maize yield, nitrogen-phosphorus loss derived by surface runoff and fertilizer utilization efficiency, and five fertilization treatments were set up, which were non fertilization (CK), only chemical fertilizer application (CF), chemical fertilizer combined with biochar (CF+B), chemical fertilizer combined with organic fertilizer (OF+CF) and chemical fertilizer combined with biochar and organic fertilizer (OF+CF+B). The results showed that compared with CF, the application of biochar or organic fertilizer could significantly increase the yield of 8.2%~11.1%, but the combination of organic fertilizer and biochar was the best, and the yield increased by up to 13.7%. Compared with the CF treatment, the treatment of CF+B could significantly reduce the runoff losses of nitrogen and phosphors by 15.9% and 24.2%, respectively, and significantly

收稿日期: 2018-03-10

资助项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC09B01); 湖南省教育厅平台项目(15K056); 湖南省科技计划项目(2016JC2030)

第一作者: 谢勇(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事农业面源污染研究。E-mail: 2497000692@qq.com

通信作者: 荣湘民(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事养分资源高效安全利用研究。E-mail: rongxm2005@126.com

increase the aboveground accumulation of nitrogen and phosphorus by 26.3% and 11.8%, respectively. The OF+CF treatment could significantly reduce the runoff losses of nitrogen and phosphorus by 17.5% and 25.0%, respectively, increase the nitrogen and phosphorus accumulations by 36.5% ($P<0.05$) and 8.2% ($P>0.05$), respectively. The runoff losses of nitrogen and phosphorus were significantly reduced by 33.3% and 35.2% in the treatment of OF+CF+B, respectively, and aboveground accumulations of these two nutrients were increased by 52.1% ($P<0.05$) and 29.0% ($P>0.05$), respectively, and this treatment presented the highest fertilizer utilization efficiencies of nitrogen and phosphorus, up to 49.1% and 26.4%, respectively. On the one hand, OF+CF+B could promote the growth of spring maize, increase vegetation coverage and enhance erosion resistance of the soil, significantly reduce the volume of surface runoff; on the other hand, this treatment could reduce runoff loss of soil nitrogen and phosphorus including the dissolved and particulate, increase soil fertility. Therefore, comprehensive considering the economic and environmental benefits, applying biochar and organic fertilizer combined with partial chemical fertilizer is the most reasonable way of fertilization, and it is worth promoting and applying in the region.

Keywords: biochar; organic fertilizer; yield; runoff loss of nitrogen and phosphorus; fertilizer use efficiency; spring maize

玉米作为我国主要粮食作物和饲料作物,在农业生产领域占有重要地位,在工业生产过程中也是不可或缺或工业原料^[1-2]。因此,当前和今后的玉米需求量不断增加,玉米种植力度不断加强。可是我国玉米种植模式是以肥料资源高投入追求玉米高产出,肥料养分损失严重,增产效果不明显,是世界上单位化肥投入粮食产出最低的国家之一^[3]。其中,肥料资源投入以氮肥和磷肥最多,如何合理施用氮磷肥,减少氮磷损失,提高玉米产量,增加玉米种植收益,建立高产优质、低耗无污染的氮肥管理技术,成为当前亟待解决的重点问题。

改革开放以来,随着社会的迅速发展,人们对农产品的高质量和高需求越来越多,农业生产结构不断发生变化,其中化肥的投入从 1980 年至 21 世纪初几乎直线增加^[4]。在化肥高投入的生产背景下,不可避免地出现大量的氮磷养分得不到充分利用而迁出土壤环境,进而引发环境污染问题^[5]。进入 21 世纪以来,随着农业生产的发展,人们逐渐意识到环境污染,化肥的施用受到一定的控制,也展开了一系列合理施肥的科学研究与推广,但总体上化肥的产量和施用量仍然缓慢增长,且在世界上也是化肥产量和消耗量最多的国家^[6]。发达国家的氮肥利用率为 60%~70%^[7],我国氮肥利用率为 25%~35%^[8],磷肥利用率为 10%~20%^[7],氮磷肥料的有效利用率较低。因此,我国农业生产过程中的关键是提高肥料利用率,这也是我国农业专家和学者一直以来所关注的问题。尤其是在农业氮磷流失造成江河、湖泊等水体富营养化之后,农业生产关注的重心逐渐转移到了以环境友好为背景的粮食生产。

我国农业种植如何实现环保增产增效,需要从施肥管理的源头进行控制。目前大部分的研究集中在

施肥量的合理控制和肥料品种的筛选,并且主要研究氮素损失方面^[9]。农业面源污染造成水体富营养化的一个不可或缺的限制因素是磷。研究^[10]表明,如果磷素含量未达到一定水平,仅有氮、碳等元素的富集是不会引起水体富营养化的。本试验设置了 5 个施肥处理,在高温多雨易造成径流损失的南方丘陵地区以春玉米为研究对象,综合研究了产量效应和施肥土壤氮磷流失的潜在风险,旨在为该地区科学施肥和防控农业氮磷面源污染提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

2016 年选用的供试玉米品种为登海 605,由山东登海种业股份有限公司提供。氮肥为尿素(含 N 46.0%),磷肥为钙镁磷肥(含 P_2O_5 12.0%),钾肥为氯化钾(含 K_2O 60.0%),有机肥为猪粪堆肥(含 N 1.30%, P_2O_5 1.54%, K_2O 0.91%),生物黑炭采用市场购买的稻壳型生物质炭,其基本性质为:C 含量 51.8%,N 含量 1.1%,P 含量 0.2%,K 含量 0.5%,灰分含量 33.6%。

1.2 试验地概况

试验于 2016 年在湖南省浏阳市湖南农业大学试验基地(28°19'N,113°49'E)进行。该地区属亚热带季风性湿润气候,雨季 6—9 月,年平均气温 17℃,年均降水量为 1 552 mm。供试土壤为河潮土,基本理化性质为:pH 5.8,有机质含量 14.6 g/kg,全氮含量 1.2 g/kg,碱解氮含量 49.3 mg/kg,全磷含量 0.5 g/kg,速效磷含量 11.8 mg/kg,全钾含量 14.5 g/kg,速效钾含量 157.1 mg/kg。

试验观察期间(2016 年 3 月 27 日至 7 月 10 日)降雨总量 1 029 mm,最大单次降雨量 129 mm(7 月 4 日),发生径流事件 5 次。

1.3 试验设计

试验采用田间小区试验,小区面积 20 m² (5 m×4 m)。各处理小区以水泥砂浆筑埂分隔,水泥埂高 110 cm,筑埂后填土 80 cm,使田埂上表面距土面高 30 cm。在小区一侧修筑径流收集池,收集池内壁长 2 m,宽 0.5 m,高 1 m,池壁厚为 0.3 m,池底部设置一个控制阀出水口,径流收集池加石棉瓦盖。收集池旁修筑深度为 110 cm 的排水沟,通到本试验区的总排水口,略向总排水口倾斜。小区另一侧的水泥田埂边铺设了相联的灌水管,并通向总进水口。

本试验共设 5 个处理:处理 1,不施肥(CK);处理 2,单施化肥(CF);处理 3,化肥+生物黑炭(CF+B);处理 4,有机无机肥配施(猪粪堆肥氮代替 20% 的化肥氮)(OF+CF);处理 5,有机无机肥配施(猪粪堆肥氮代替 20% 的化肥氮)+生物黑炭(OF+CF+B)。各施肥处理的施氮量、施磷量和施钾量分别控制为 240,150,150 kg/hm²。生物黑炭的添加量为 13 500 kg/hm²。各施肥处理中,氮肥按总 N 量的 40% 作基肥,30% 作苗肥,30% 作穗肥(大喇叭口期);钾肥按总 K₂O 量的 50% 作基肥,50% 作穗肥(大喇叭口期)。有机肥和生物黑炭、磷肥全作基肥一次性施用。每个处理设 3 次重复,共 15 个小区,随机区组排列,每区种植 112 株玉米,种植密度为 56 000 株/hm²。基肥施用方式是撒施后覆土混匀,苗肥和穗肥施肥方式是株旁条施覆土起垄,其他栽培管理都按照当地常规方法进行。

玉米于 2016 年 3 月 27 日施基肥、播种(播种后的第 1~28 天记为基肥期),4 月 25 日施苗肥(播种后的第 29~57 天记为苗肥期),5 月 24 日施穗肥(播种后的第 58~104 天记为穗肥期),7 月 10 日收获,全生育期为 104 天。

1.4 采样与测定

1.4.1 降水 玉米种植期间的降水情况由试验地安置的小型气象站(Oneset HOBO, USA)进行监测和收集数据。

1.4.2 水样 每次降雨产流后,通过径流收集池内水文尺刻度的变化,用体积法求得降雨产生的径流,用专用工具将收集池内水分搅拌均匀,取部分水样于 500 mL 塑料瓶内,加酸加氯仿且低温保存,带回实验室于 24 h 内进行水样指标分析。

分析方法以《水和废水监测分析方法》为准^[11],分析指标包括总氮磷(TN/TP)、溶解态氮(DN/DP)、颗粒态氮(PN/DP)、硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)。部分径流水样直接采用碱性过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定 TN 含量,采用过硫酸钾氧化—钼锑抗比色法测定 TP 含量;部分径流水样经 0.45

μm 微孔滤膜抽滤后的滤液用于测定 DN/DP、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量。其中,DN/DP 的测定方法同 TN/DP、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量采用连续流动分析仪 AA3 测定。PN/PP 可通过差减法计算出来:

$$c(\text{PN}) = c(\text{TN}) - c(\text{DN}) \quad (1)$$

$$c(\text{PP}) = c(\text{TP}) - c(\text{DP}) \quad (2)$$

各时段径流氮磷损失量为各时段径流体积乘以各时段相应氮磷的浓度,总氮磷负荷量为各时段各形态氮流失量之和。

1.4.3 植株样 玉米籽粒和秸秆产量按小区收获分别计产。玉米取样每小区按照五点法取 5 株风干,再分为茎、叶、籽粒、玉米穗轴 4 个部分取样烘干,用于测定玉米地上部的全氮磷含量分析。植株干样采用浓硫酸—双氧水消煮,再分别采用凯氏定氮法和钒钼黄比色法测定作物的 TN 和 TP。

地上部春玉米的肥料利用计算公式为:

$$\text{氮肥利用率}(\text{NUE}, \%) = \frac{(\text{施肥区地上部 N 累积量} - \text{不施肥区地上部 N 累积量})}{\text{施 N 量}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{氮肥偏生产力}(\text{PFPN}, \text{kg/kg}) = \frac{\text{籽粒产量}}{\text{施 N 量}} \quad (4)$$

$$\text{磷肥利用率}(\text{PUE}, \%) = \frac{(\text{施肥区地上部 P 累积量} - \text{不施肥区地上部 P 累积量})}{\text{施 P 量}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{磷肥偏生产力}(\text{PFPN}, \text{kg/kg}) = \frac{\text{籽粒产量}}{\text{施 P 量}} \quad (6)$$

1.4.4 数据处理与分析 采用 SPSS 18.0 和 Excel 2016 软件对数据进行处理,方差分析采用 SSR 法。

2 结果与分析

2.1 生物黑炭和有机肥施用对南方丘陵地区春玉米产量及其产量构成的影响

从图 1 可以看出,5 种处理的玉米产量表现为 OF+B (6 626 kg/hm²) > OF+CF (6 476 kg/hm²) > CF+B (6 307 kg/hm²) > CF (5 830 kg/hm²) > CK (2 816 kg/hm²)。相比 CK 处理,施肥处理的玉米籽粒产量显著增加 107%~135% ($P < 0.05$)。与单施化肥处理 CF 相比,CF+B、OF+CF 和 OF+CF+B 处理春玉米产量分别提高了 8.2%,11.1% 和 13.7%,均达到显著性差异水平 ($P < 0.05$)。说明添加生物黑炭或有机肥替代在春玉米生产过程中相比化肥单一施用具有明显的增产优势。在施用化肥的基础上,添加生物黑炭或者有机肥替代氮对春玉米产量的影响表现为 OF+CF 处理的籽粒产量比 CF+B 处理的高出 2.7%,但差异不显著。说明生物黑炭和有机肥施用对于春玉米籽粒增产效应差异不明显。相比单一生物黑炭添加或部分有机肥替代情况,生物黑炭和有机肥都添加的产量增加 2.3%~4.8%,但差异均不显

著。表明生物黑炭和有机肥替代部分氮的结合施用在本试验施肥方式下没有发挥最佳增产效应,最优生物黑炭添加量和有机肥替代部分氮比例的研究有待进一步探索。

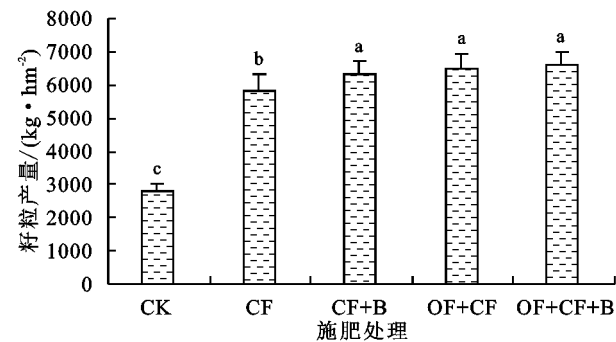


图1 不同施肥处理的春玉米籽粒产量差异

从表1可以看出,与不施肥处理CK相比,各施肥处理春玉米的穗长、穗粗、(鲜)穗重、百粒重均显著提高。与单施化肥处理CF相比,OF+CF和OF+CF+B处理的春玉米穗长分别增加了4.0%和3.4%,差异达显著水平($P<0.05$),而CF+B降低了0.3%($P>0.05$)。OF+CF和OF+CF+B处理比CF+B处理的穗长分别增加4.6%和4.0%,且差异达到显著水平($P<0.05$)。OF+CF和OF+CF+B处理间穗长差异不显著($P>0.05$)。在穗粗方面,所有施肥处理间无显著差异,仅均与CK处理有差异且达到显著水平。在春玉米鲜穗重方面,与不施肥CK处理相比,CF、CF+B、OF+CF、OF+CF+B处理分别增加了86.7%,86.7%,113.3%,106.7%,差异均达到了显著水平($P<0.05$)。其中OF+CF处理的鲜穗重表现最好,分别比CF、CF+B、OF+CF+B处理的增加14.3%,14.3%,3.2%。在百粒重方面,CF、CF+B、OF+CF、OF+CF+B处理比CK处理分别增加59.5%,53.8%,65.8%,65.2%,且差异均达显著水平($P<0.05$)。OF+CF处理百粒重最大,较CF、CF+B、OF+CF+B处理分别提高了4.0%,7.8%,0.4%。综上可知,OF+CF和OF+CF+B处理的施肥方式对春玉米产量构成的影响较好,对作物增产有一定的促进作用。

表1 生物黑炭和有机肥施用对春玉米产量构成的影响

处理	穗长/cm	穗粗/cm	穗重(鲜)/kg	百粒重/g
CK	10.5c	11.9b	0.15c	15.7d
CF	15.2b	14.8a	0.28b	25.1bc
CF+B	15.1b	14.5a	0.28b	24.2c
OF+CF	15.8a	14.8a	0.32a	26.1a
OF+CF+B	15.7a	14.7a	0.31a	26.0ab

注:数据后不同字母表示处理间差异达显著水平($P<0.05$)。下同。

2.2 春玉米种植期间不同处理地表径流量差异

我国南方丘陵地区自然降水随季节的推移逐渐增加(图2)。2016年春玉米种植期间日降水量0~128.7 mm,总降水量达1 032.9 mm。不同施肥期的

降水对氮磷养分的分解和流失有一定的影响。2016年春玉米种植期间基肥期、苗肥期和穗肥期的降水量分别为207.6,258.2,567.1 mm。可知降水趋势为基肥期<苗肥期<穗肥期。

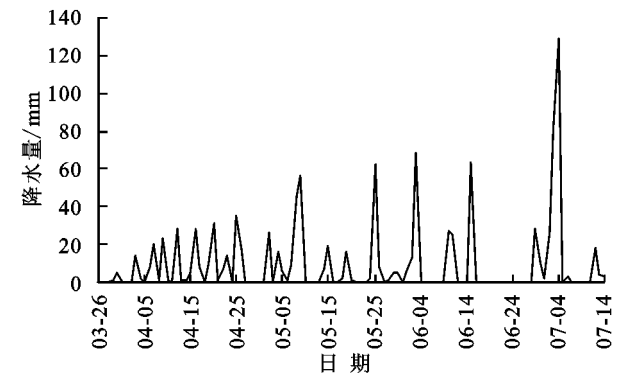


图2 春玉米生长期降水变化

我国中南丘陵地区属于亚热带季风湿润气候区,春夏多雨,年降水量为1 200~1 700 mm。当地的农业种植受益于充沛的雨量时,也发生了比较严重的土壤养分径流或渗漏损失。本试验整个玉米生育期共发生产流事件5次(图3)。5个处理径流总量分别为2 050,1 840,1 680,1 615,1 365 L/hm²。径流体积变化存在一定的季节性,春末夏初雨水逐渐增多的情况下(图2),地表径流量也不断增加(图3)。从4月12日和4月30日的径流体积来看,各处理径流量为110~250 L/hm²,明显低于后期3次的径流体积。这是因为苗期的降水量较少,且日降水强度低(图2)。CK、CF、CF+B和OF+CF的4个处理之间前两次径流体积差异不显著,这是因为土壤表面的裸露程度和地表植被覆盖度有关,即苗肥期地表裸露程度均相似,作物覆盖度均较低,穿透雨冠下空间分布均匀。5月20日、6月9日和7月2日CF、CF+B和OF+CF处理的3次径流体积明显低于CK处理,这是因为随着作物生长,施肥差异导致地上部生物量和植被郁闭度不同,使穿透雨冠下空间分布由均匀逐渐趋向于不均匀^[12]。施肥处理表现为CF+B、OF+CF处理的径流量少于CF处理,差异的显著性是受制于降雨强度、生物黑炭或者有机肥改良土壤作用、地表覆盖度等的协同效应。OF+CF+B处理在每次径流事件中径流量最少,一方面源于生物黑炭和有机肥提高了土壤养分的含量及其有效性,增加了地上部的生物量,有利于截雨保水;另一方源于生物黑炭和有机肥的施入改变了土壤物理性状(如增加了土壤孔隙度,降低了土壤容重),增强了土壤的水土保持功能^[13]。

2.3 不同施肥处理春玉米土壤氮素径流损失差异

由表2可知,各处理的TN径流损失总量表现为:CF(6.3 kg/hm²)>CF+B(5.3 kg/hm²)>OF+CF(5.2 kg/hm²)>OF+CF+B(4.2 kg/hm²)>CK

(1.2 kg/hm²)。与 CF 处理相比,CF+B、OF+CF 和 OF+CF+B 处理的径流总氮流失量显著降低了 15.9%,17.5%和 33.3%。CF+B 与 OF+CF 处理之间差异不显著($P>0.05$),而 OF+CF+B 处理的径流总氮损失量较 CF+B 与 OF+CF 处理有较大幅度的降低,分别达 20.8%和 19.2%,差异均达显著水平($P<0.05$)。可知添加生物黑炭或者有机肥替代部分氮均能控制土壤氮素的径流损失,而且二者结合施用阻控氮素流失效果最好。

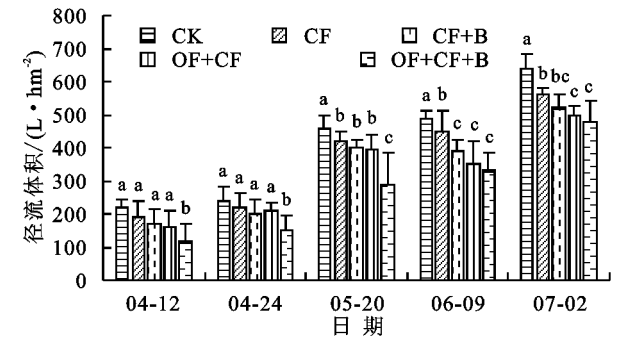


图 3 不同施肥处理的径流体积变化

各处理 DN 径流损失总量表现为:CF(4.5 kg/hm²)>CF+B(3.9 kg/hm²)>OF+CF(3.5 kg/hm²)>OF+CF+B(2.7 kg/hm²)>CK(0.7 kg/hm²)。各处理 PN 径流损失总量表现为:CF(1.8 kg/hm²)>OF+CF(1.7 kg/hm²)>OF+CF+B(1.5 kg/hm²)>CF+B(1.4 kg/hm²)>CK(0.4 kg/hm²)。表明各处理氮素径流损失以 DN 形式为主,CK、CF、CF+B、OF+CF、OF+CF+B 处理中 DN 占 TN 的比例分别为 58.3%,71.4%,73.6%,67.3%,64.3%。与单施化肥处理 CF 相比,CF+B、OF+CF 和 OF+CF+B 处理的 DN 径流损失分别降低了 13.3%,22.2%和 40.0%,差异均达显著水平($P<0.05$),PN 分别减少了 22.2%($P<0.05$),5.6%($P>0.05$)和 16.7%($P<0.05$)。可知添加生物黑炭可以显著降低 DN 和 PN 的损失,而有机肥替代主要是通过显著降低 DN 损失而减少 TN 的径流损失。这种差异源于两种物料本身的结构和改善土壤环境的不同。由 OF+CF+B 的结果可知,有机无机肥配施和添加生物黑炭有利于减少旱地 TN、DN 和 PN 的径流损失,这可能是发挥了两种物料的氮素止损叠加效应,也是本试验从控制氮素养分损失方面找到一种较好的施肥方案。

表 2 生物黑炭与有机肥替代化肥对旱地

氮素径流损失的影响 单位:kg/hm²

处理	DN	PN	TN
CK	0.7d	0.4d	1.2d
CF	4.5a	1.8a	6.3a
CF+B	3.9b	1.4bc	5.3b
OF+CF	3.5b	1.7ab	5.2b
OF+CF+B	2.7c	1.5c	4.2c

2.4 不同施肥处理春玉米土壤磷径流损失的差异

从表 3 可以看出,各处理 TP 径流损失总量表现为:CF(0.492 kg/hm²)>CF+B(0.373 kg/hm²)>OF+CF(0.369 kg/hm²)>OF+CF+B(0.319 kg/hm²)>CK(0.143 kg/hm²)。相比 CF 处理,CF+B、OF+CF 和 OF+CF+B 处理的 TP 径流损失量分别显著降低了 24.2%,25.0%和 35.2%;并且 OF+CF+B 处理的径流 TP 流失量较 CF+B 和 OF+CF 均显著降低,分别达 14.5%和 13.4%。说明生物黑炭和有机肥施用均能显著降低土壤春玉米 TP 损失风险,二者混合化肥施用,效果最佳。

各处理 DP 径流损失总量表现为:CF(0.066 kg/hm²)>CF+B(0.060 kg/hm²)>OF+CF(0.037 kg/hm²)>OF+CF+B(0.026 kg/hm²)>CK(0.015 kg/hm²)。各处理 PP 径流损失总量表现为:CF(0.426 kg/hm²)>OF+CF(0.332 kg/hm²)>CF+B(0.313 kg/hm²)>OF+CF+B(0.293 kg/hm²)>CK(0.128 kg/hm²)。土壤磷素径流损失主要是以 PP 形式为主,占 TP 损失的 83%~92%。与 CF 处理的 DP 流失相比,CF+B、OF+CF 和 OF+CF+B 处理分别降低了 9.1%,43.9%和 60.6%。表明生物黑炭的添加对降低 DP 径流损失的作用不大,这是因为生物黑炭的多孔隙结构一方面吸附了磷,而另一方面又改善了土壤的还原条件,从而提高了 Fe—P 的溶解性^[14],最终致使 CF 与 CF+B 处理的 DP 差异不显著。生物黑炭的多孔吸附特性,显著降低了 PP 的径流损失风险。OF+CF 处理相比 CF 而言,既能显著降低 DP 的径流损失,又能显著减少 PP 的损失。这与有机肥改良土壤结构、增强微生物活性、调节 pH 和增加土壤抗蚀性有关^[13]。OF+CF+B 处理很好的结合了生物黑炭和有机肥的优势,比 CF、CF+B、OF+CF 处理显著降低 29.7%~60.1%的 DP 径流损失和 6.4%~31.2%的 PP 径流损失,最终显著降低 13.6%~35.2%的 TP 损失风险。因此,在旱地土壤上添加生物黑炭和采用有机肥替代化肥均有利于降低地表总磷的流失风险,尤其是两种措施结合运用的条件下,效果更好。

表 3 生物黑炭与有机肥替代化肥对旱地

磷素径流损失的影响 单位:kg/hm²

处理	DP	PP	TP
CK	0.015e	0.128d	0.143d
CF	0.066a	0.426a	0.492a
CF+B	0.060a	0.313b	0.373b
OF+CF	0.037c	0.332b	0.369b
OF+CF+B	0.026d	0.293c	0.319c

2.5 不同施肥处理的氮磷利用效率差异

从表 4 可以看出,施肥处理的地上部氮素累积量显著高于 CK。单施化肥的 CF 处理地上部氮素累积

量为 101.9 kg/hm², 添加生物黑炭或者有机肥替代部分氮的处理均显著促进了春玉米地上部氮素的吸收, CF+B 和 OF+CF 分别较 CF 显著提高了 26.3% 和 36.5%。CF+B 和 OF+CF 处理的地上部氮素累积量差异不显著 ($P>0.05$), 说明生物黑炭和有机肥施用都有增加作物地上部转运氮素营养的作用。添加生物黑炭和 OF+CF+B 处理地上部累积氮最多, 达 155.0 kg/hm², 比 CF 提高了 52.1% ($P<0.05$), 比 CF+B 提高了 20.4% ($P<0.05$), 比 OF+CF 提高了 11.4% ($P<0.05$)。

表 4 生物黑炭与有机肥替代化肥对旱地春玉米
氮肥利用率和氮肥偏生产力的影响

处理	地上部 N 累积量/ (kg · hm ⁻²)	NUE/%	PFPN/ (kg · kg ⁻¹)
CK	37.1d	—	—
CF	101.9c	27.0c	24.3b
CF+B	128.7b	38.1b	26.3a
OF+CF	139.1b	42.5b	27.0a
OF+CF+B	155.0a	49.1a	27.6a

单施化肥 CF 处理的氮肥利用率 (NUE) 比较低 (27.0%), CF+B 和 OF+CF 处理的 NUE 显著提高了 11.1、15.5 个百分点。OF+CF+B 处理的 NUE 更高, 达 49.1%, 差异较其他处理达显著水平 ($P<0.05$)。从氮肥偏生产力 (PFPN) 来看, CF 处理最低 (24.3 kg/kg), CF+B、OF+CF 和 OF+CF+B 分别显著提高了 8.2%、11.1% 和 13.6%。CF+B、OF+CF 和 OF+CF+B 处理的 PFPN 逐渐提高, 差异不显著 ($P>0.05$)。

从表 5 可以看出, 施肥处理的地上部磷素累积量显著高于 CK 处理。单施化肥的 CF 处理地上部磷素累积量为 34.0 kg/hm², 添加生物黑炭均显著促进了春玉米地上部磷素吸收, CF+B 较 CF 显著提高了 11.8%。OF+CF 处理的地上部磷素累积量比 CF 处理提高了 8.2%, 差异不显著 ($P>0.05$), 这可能是与有机肥施用量和有机肥解磷菌等微生物含量及活性特征有关。CF+B 和 OF+CF 处理的地上部磷素累积差异不显著 ($P>0.05$)。但化肥施用结合生物黑炭添加和有机肥替代部分氮可显著增加春玉米地上部的磷养分累积, 即 OF+CF+B 处理地上部累积磷最多, 达 47.9 kg/hm², 比 CF 提高了 29.0% ($P<0.05$), 比 CF+B 提高了 26.1% ($P<0.05$), 比 OF+CF 提高了 30.2% ($P<0.05$)。

单施化肥 CF 处理的磷肥利用率 (PUE) 较低 (16.5%), CF+B 和 OF+CF 处理的 PUE 提高了 2.7、1.9 个百分点, 差异不显著 ($P>0.05$)。OF+CF+B 处理的 PUE 较高, 达 25.8%, 差异较其他处理均达显著水平 ($P<0.05$)。从磷肥偏生产力 (PFPP) 来看, CF 处理最低 (38.9 kg/kg), CF+B、OF+CF 和 OF+CF+B

分别显著提高了 8.2%、11.1% 和 13.6%。CF+B、OF+CF 和 OF+CF+B 处理间的 PFPP 逐渐提高, 但差异不显著 ($P>0.05$)。

表 5 生物黑炭与有机肥替代化肥对旱地春玉米
磷肥利用率和磷肥偏生产力的影响

处理	地上部 P 累积量/ (kg · hm ⁻²)	PUE/%	PFPP/ (kg · kg ⁻¹)
CK	8.4d	—	—
CF	34.0c	17.1b	38.9b
CF+B	38.0b	19.8b	42.1a
OF+CF	36.8bc	18.9b	43.2a
OF+CF+B	47.9a	26.4a	44.2a

3 讨论

生物黑炭是生物有机体转化的稳定性碳物质, 可作为土壤添加剂来改良土壤、减少温室气体排放和修复污染等。近年来生物黑炭在农业中的应用研究进展很快, 其在固碳减排、治理重金属污染、提高土壤肥力、解决全球粮食生产问题方面较当前秸秆还田存在的一系列负面效应^[15]具有优势。

本试验中添加生物黑炭处理的玉米籽粒产量显著增加 8.1%, 但已有大量研究^[16-18]表明, 生物黑炭的添加可增加作物产量的 20%~200%。本试验增产率较前人的研究偏低, 这与生物黑炭的添加量有关, 本试验添加量为 13.5 t/hm², 而前人的添加量均在 20 t/hm² 以上。生物黑炭的施入, 改善了土壤理化环境, 其较大的比表面积有利于吸附养分和为微生物群落的生存提供较大的空间^[19]。这不仅有利于增加作物产量, 还能减少养分损失和提高肥料利用率。本试验结果表明, 添加生物黑炭显著降低 15.9% 的氮素径流损失、24.2% 的磷素径流损失; 显著提高了 26.3% 的地上部氮素累积、11.8% 的地上部磷素累积量; 显著提高了肥料利用率。这是因为生物黑炭中丰富的有机大分子和孔隙结构在土壤中容易形成大团聚体, 增强土壤养分离子的吸持力^[20], 可吸附铵、硝酸盐、磷和其他水溶性盐离子^[15], 特别是对 NH₄⁺ 有很强的吸附作用^[21-22]。

大量化肥的投入缓解了粮食安全的压力, 同时也造成资源和环境矛盾, 农业可持续发展面临严峻的挑战。研究^[23]发现, 有机肥替代部分化肥可缓解农业生产依赖化肥资源和环境污染的矛盾。有机肥含有较多有机质, 养分元素全面而含量低, 肥效缓慢利于培肥地力, 环境污染少。但化肥养分含量高, 肥效快, 环境污染负荷大。二者的结合, 可以取长补短, 既有利于农作物生产, 又能减轻环境污染危害。本试验结果表明, 有机肥替代部分化肥可显著增产 11.1%, 这与张国荣等^[24]、Yadav 等^[25] 和李春明等^[26] 在水田或

者旱地作物种植过程中有机无机肥配施增产效果显著的结论相一致。主要由于有机肥在土壤中良好的理化性质和带入了额外的中微量元素,即有机无机配施通过改善产量构成因素而达到增产效果^[27-28]。有机肥配施化肥还可以提高作物磷的吸收和减少土壤磷元素的迁移损失。本试验中有机肥替代部分化肥处理的总磷损失显著减少 25.0%,作物吸收磷的累积量提高了 8.2%。这是因为有机肥持续提高土壤速效磷含量^[29],且以增加有机磷为主^[23]。

单一添加生物黑炭或有机肥对春玉米生长、产量和氮磷的止损效应较差于二者同时添加。本试验表明,生物黑炭和有机肥部分替代化肥结合化肥施用能显著增产 13.7%,显著提高氮、磷吸收分别达 52.1%和 29.0%,显著减少氮、磷径流损失分别达 33.3%和 35.2%,显著提高春玉米种植的肥料利用率(NUE, PUE)。这是充分结合了生物黑炭和有机肥的保肥促生长优势的叠加效应,使得作物生长旺盛,地表覆盖度高,导致该处理径流体积始终最低(图3),从而减低了氮磷的水溶性迁移概率和环境污染风险。

4 结论

(1)添加生物黑炭(CF+B)或者有机肥替代化肥氮(OF+CF)施用对春玉米种植的产量效应比单一化肥处理 CF 显著高出 8.2%~11.1%,改善了玉米产量结构。OF+CF+B 处理增产效果最佳,提高了 13.7%($P<0.05$)。

(2)本试验中 OF+CF+B 处理的径流体积显著低于其他处理,表明生物黑炭和有机肥的结合添加增强了旱地土壤的水土保持功能。

(3)与 CF 处理相比,CF+B、OF+CF、OF+CF+B 处理的氮素径流损失显著降低了 15.9%,17.5%,33.3%,磷素径流损失显著降低了 24.2%,25.0%,35.2%。OF+CF+B 处理可最大效应降低氮磷养分的水溶态和颗粒态径流损失。

(4)与 CF 处理相比,CF+B、OF+CF、OF+CF+B 处理的地上部氮素累积量显著增加了 26.3%,36.5%,52.1%,地上部磷素累积量显著增加了 11.8%,8.2%,29.0%,显著提高了氮磷养分的肥料利用率。

(5)综合不同施肥处理的春玉米产量、氮磷径流损失和肥料利用率的状况发现,OF+CF+B 处理是该地区旱地作物种植的最佳施肥模式,既能增加产量,又能显著降低肥料养分的径流损失,从而大幅度提高肥料利用效益,节约资源,保护环境。

参考文献:

[1] 杨国庆,刘天军.入 WTO 以来中国玉米生产效率评价:来自全国 15 个省的面板数据分析[J].广东农业科学,2013,40(3):217-221.

[2] 王璞,王启现,鲁来清,等.开展规范种植,提高玉米商品竞争力[J].玉米科学,2004,12(增刊2):45-49.

[3] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.

[4] 杨旺鑫.我国农田氮磷损失影响因素及损失量初步估算[D].南京:南京农业大学,2015.

[5] 邱君.农业污染治理政策分析[M].北京:中国农业科学技术出版社,2008.

[6] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[R].北京:中国统计出版社,2006.

[7] 王金楠.中国环境政策[M].1卷.北京:中国环境科学出版社,2004:4-105.

[8] 巨晓棠,刘学军,邹国元,等.冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J].中国农业科学,2002,35(12):1493-1499.

[9] 谢勇,荣湘民,刘强,等.控释氮肥减量施用对春玉米土壤地表径流氮素动态及其损失的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):14-19,25.

[10] 鲁如坤.植物营养与施肥原理[M].北京:农业出版社,2000:201-202.

[11] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2002:243-250.

[12] 马波,李占斌,马璠,等.模拟降雨条件下玉米植株对降雨再分配过程的影响[J].生态学报,2015,35(2):497-507.

[13] 韩召强,陈效民,曲成闯,等.生物质炭施用对潮土理化性状、酶活性及黄瓜产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):272-278.

[14] 靖彦,陈效民,刘祖香,等.生物黑炭与无机肥料配施对旱作红壤有效磷含量的影响[J].应用生态学报,2013,24(4):989-994.

[15] 刘祖香.生物黑炭与氮肥配施对典型旱地红壤地力提升效果的初步研究[D].南京:南京农业大学,2013.

[16] Katyal S, Thambimuthu K, Valix M. Carbonisation of bagasse in a fixed bed reactor: Influence of process variables on char yield and characteristics[J]. Renewable Energy,2003,28(5):713-725.

[17] 我国作物秸秆燃烧甲烷、氧化亚氮排放量变化趋势预测(1990—2020)[J].农业环境保护,1995(3):111-116.

[18] 王秋华.我国农村作物秸秆资源化调查研究[J].生态与农村环境学报,1994(4):67-71.

[19] Iswaran V, Jauhri K S, Sen A. Effect of charcoal, coal and peat on the yield of moong, soybean and pea[J]. Soil Biology and Biochemistry,1980,12(2):191-192.

[20] 张阿凤,潘根兴,李恋卿.生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2459-2463.

[21] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,2006,11(2):395-419.

- [18] Cambouris A N, Ziadi N, Perron I, et al. Corn yield components response to nitrogen fertilizer as a function of soil texture[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2016, 96(4): 386-399.
- [19] 范霞, 张吉旺, 任伯朝, 等. 不同株高夏玉米品种的氮素吸收与利用特性[J]. 作物学报, 2014, 40(10): 1830-1838.
- [20] 杜红霞, 吴普特, 冯浩, 等. 氮施用量对夏玉米土壤水氮动态及水肥利用效率的影响[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(4): 82-87.
- [21] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 281-296.
- [22] 张婧, 李虎, 朱国梁, 等. 控释肥施用对土壤 N_2O 排放的影响: 以华北平原冬小麦/夏玉米轮作系统为例[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7624-7635.
- [23] 张宏. 半旱地不同栽培模式下小麦—玉米轮作体系作物水肥利用特性研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [24] 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉米—大豆套作体系中作物产量及养分吸收利用的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 474-482.
- [25] 潘家荣, 巨晓棠, 刘学军, 等. 水氮优化条件下在华北平原冬小麦/夏玉米轮作中化肥氮的去向[J]. 核农学报, 2009, 23(2): 334-340, 307.
- [26] 侯云鹏, 孔丽丽, 秦裕波, 等. 吉林省中部黑土区玉米氮肥效应研究[J]. 玉米科学, 2012(3): 130-133, 138.
- [27] Zhang X, Bol R, Rahn C, et al. Agricultural sustainable intensification improved nitrogen use efficiency and maintained high crop yield during 1980—2014 in Northern China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 596: 61-68.
- [28] 吴永成, 王志敏, 周顺利. ^{15}N 标记和土柱模拟的夏玉米氮肥利用特性研究[J]. 中国农业科学, 2011, 44(12): 2446-2453.
- [29] Huang P, Zhang J B, Zhu A N, et al. Nitrate accumulation and leaching potential reduced by coupled water and nitrogen management in the Huang-Huai-Hai Plain [J]. Science of the Total Environment, 2018, 610/611: 1020-1028.
- [30] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.

(上接第 203 页)

- [22] Yazawa Y, Asakawa D, Matsueda D, et al. Effective carbon and nitrogen sequestrations by soil amendments of charcoal[J]. Journal of Arid Land Studies, 2006, 15(4): 463-467.
- [23] 李燕青. 不同类型有机肥与化肥配施的农学和环境效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [24] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 543-551.
- [25] Yadav R L, Dwivedi B S, Prasad K, et al. Yield trends, and changes in soil organic-C and available NPK in a long-term rice-wheat system under integrated use of manures and fertilisers[J]. Field Crops Research, 2000, 68(3): 219-246.
- [26] 李春明, 熊淑萍, 赵巧梅, 等. 有机无机肥配施对小麦冠层结构、产量和蛋白质含量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4287-4293.
- [27] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008(10): 3133-3139.
- [28] 周江明. 有机—无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 234-240.
- [29] 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[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2809-2819.

(上接第 209 页)

- [16] Sharma V, Hussain S, Sharma K R, et al. Labile carbon pools and soil organic carbon stocks in the foothill Himalayas under different land use systems[J]. Geoderma, 2014, S232/234(12): 81-87.
- [17] 胡振宏, 何宗明, 范少辉, 等. 采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4205-4213.
- [18] 王芳丽, 高明, 代文才, 等. 不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 227-232.
- [19] 盛卫星, 吴家森, 徐建春, 等. 不同经营年限对山核桃林地土壤轻重组有机碳的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(5): 803-808.
- [20] 曲晓晶, 吴景贵, 李建明, 等. 外源有机碳对黑土有机碳及颗粒有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 278-286.
- [21] 郑永红, 胡友彪, 张治国, 等. 煤矿复垦区重构土壤溶解性有机碳空间分布特征[J]. 土壤, 2017, 49(5): 977-981.
- [22] 吴玉红, 郝兴顺, 田霄鸿, 等. 秸秆还田对汉中盆地稻田土壤有机碳组分、碳储量及水稻产量的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 325-331.
- [23] 梁利宝, 冯鹏艳. 生物炭与有机肥、无机肥配施对采煤塌陷区复垦土壤理化性状的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 305-308.
- [24] 梁利宝, 闫峰, 许剑敏. 不同培肥处理对采煤塌陷区复垦土壤氮素形态的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 262-266.