

有机物料输入对关中塬土碳氮影响的后效作用

柳媛媛¹, 孙本华^{1,3}, 皮小敏¹, 张彤勋¹, 刘平静¹, 高明霞², 冯浩^{2,3,4}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学

中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 4. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:土壤有机碳氮是土壤肥力的关键因素,有机物料施用是提高土壤有机碳氮的有效措施。研究和比较了不同有机物料输入对塬土耕层(0—20 cm)土壤有机碳、全氮、可溶性有机碳及0—200 cm剖面土壤硝态氮和含水量分布变化的后效作用。结果表明,停止施入有机物料两年后,与对照(CK)相比,秸秆与氮磷肥配施(SNP)和生物炭与氮磷肥配施(BNP)的表层(0—20 cm)土壤有机碳(SOC)分别提高了29.5%和29.8% ($p < 0.05$);氮磷肥(NP)、有机肥与氮磷肥配施(MNP)、秸秆与氮磷肥配施(SNP)和生物炭与氮磷肥配施(BNP)的表层土壤全氮含量较CK分别提高了22.0%, 14.3%, 24.2%和26.4% ($p < 0.05$)。BNP处理的土壤可溶性有机碳(DOC)显著高于其他处理 ($p < 0.05$),分别比CK, NP, MNP和SNP提高了23.4%, 10.9%, 21.3%, 20.5%;所有施肥处理的土壤可溶性有机氮(DON)均显著高于CK ($p < 0.05$),分别提高了39.3%, 29.3%, 34.5%和52.3%。与CK相比,各施肥处理显著提高了表层土壤硝态氮含量 ($p < 0.05$),增加了0—100 cm土层的硝态氮累积量。与NP处理相比,MNP和SNP显著提高了0—200 cm土层的硝态氮累积量 ($p < 0.05$),而BNP则差异不显著。相比CK,施肥处理(NP, MNP, SNP, BNP)可显著提高0—20 cm土层的含水量,增加0—40 cm土层的储水量,且BNP处理显著高于SNP和MNP。总体而言,生物炭在提高和维持表层土壤肥力以及降低剖面硝态氮淋溶风险等方面的后效作用显著优于秸秆和有机肥,是陕西关中地区旱地塬土上一种较好的有机物料施用方式。

关键词:有机物料; 土壤有机碳; 可溶性有机碳氮; 硝态氮; 塬土

中图分类号:S153.6; S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)04-0071-06

Post-Effects of Organic Material Input on Soil Carbon and Nitrogen on Anthropogenic Loess Soil in Guanzhong Area

LIU Yuanyuan¹, SUN Benhua^{1,3}, PI Xiaomin¹, ZHANG Tongxun¹,

LIU Pingjing¹, GAO Mingxia², FENG Hao^{2,3,4}

(1. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil organic carbon and nitrogen are the key factors of soil fertility, and organic material application is an effective measure to improve soil organic carbon and nitrogen. We studied and compared the post-effects of inputs of different organic materials on soil organic carbon, total nitrogen, dissolved organic carbon and nitrogen in the top layer (0—20 cm) and the distribution of soil nitrate and water in 0—200 cm depth. The results showed that compared with CK ($p < 0.05$), the soil organic carbon (SOC) under the treatments of straw together with nitrogen and phosphorus fertilizers (SNP), and biochar together with nitrogen and phosphorus fertilizers (BNP) increased by 29.5% and 29.8%, respectively after 2 years of the application of organic materials. The soil total nitrogen contents under the treatments of nitrogen and phosphorus fertilizer

收稿日期:2017-08-15

修回日期:2017-09-14

资助项目:国家高技术研究发展计划(2013AA102904);陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016KTZDNY03-06);高等学校学科创新引智计划(B12007)

第一作者:柳媛媛(1990—),女,甘肃庆阳人,硕士研究生,研究方向为农田生态系统土壤碳氮循环。E-mail:891639355@qq.com

通信作者:孙本华(1972—),男,江苏淮安人,副教授,博士生导师,主要从事土壤化学和土壤生态研究。E-mail:sunbenhua@126.com

(NP), Organic fertilizer together with nitrogen and phosphorus fertilizer (MNP), straw together with nitrogen and phosphorus fertilizers(SNP) and biochar together with nitrogen and phosphorus fertilizers(BNP) increased by 22.0%, 14.3%, 24.2% and 26.4%, respectively ($p < 0.05$). The soil dissolved organic carbon (DOC) of BNP was 23.4%, 10.9%, 21.3% and 20.5% higher than that of other treatments (CK, NP, MNP and SNP), respectively ($p < 0.05$). The soil dissolved organic nitrogen (DON) of all fertilization treatments were 39.3%, 29.3%, 34.5% and 52.3% higher than that of CK, respectively ($p < 0.05$). Compared with CK, the fertilization treatment significantly improved the nitrate content in the surface soil and increased the nitrate accumulation in the 0—100 cm soil layer ($p < 0.05$). Compared with NP treatment, MNP and SNP significantly increased nitrate accumulation in 0—200 cm soil layer ($p < 0.05$), while it was not significantly different from BNP. Compared with CK, NP, MNP, SNP and BNP could significantly increase the soil water content in 0—20 cm soil layer and the water storage in 0—40 cm soil layer and BNP treatment was Significantly higher than treatments of SNP and MNP ($p < 0.05$). In general, the post-effects of biochar on the improvement and maintenance of the soil fertility and the reduction of the risk of nitrate leaching in the profile were more significant than that of straw and organic fertilizer. Therefore, application biochar was a much better way to apply organic material to the anthropogenic soil of dry land area in Guanzhong Area of Shaanxi.

Keywords: organic materials; soil organic carbon; dissolved organic carbon and nitrogen; nitrate nitrogen; anthropogenic loess soil

土壤碳、氮是农业生态系统中最重要的一大因素,其变化是生物地球化学循环最基本的过程之一^[1]。农田系统中土壤有机碳和氮是土壤肥力的关键因素,是土壤肥力不可或缺的两项指标^[2]。有机质对土壤质量有重要的作用,它能通过改善土壤团聚体,来提升土壤的储水量,增加养分供给及土壤有机物的活性,与此同时它还可以提高肥料利用率和产品的性能^[3]。可溶性有机碳(DOC)和可溶性有机氮(DON)是土壤碳、氮循环中关键的组成成分^[4], DOC, DON 含量受多种因素影响,如施肥、耕作、水分、气候等^[5-6],长期施肥能显著提高 DOC 和 DON 含量,尤其是有机物料与化肥配施作用效果更显著^[1,7]。有研究表明,与无机肥料相比,有机化合物的投入能使土壤微生物活性提高 16%~20%^[8]。秸秆还田不仅可以增加土壤有机碳含量,还可以减少氮素淋洗损失,促进作物对氮素的吸收,提高氮素利用率和有效性^[9]。国内近几年,有关利用生物炭提高作物产量和生产力的报道越来越多^[10]。生物炭的施入可提高土壤有机质含量,增加土壤养分有效性,降低土壤酸度^[11]。魏孝荣^[12]、王志勇^[13]等研究表明有机物料与化肥配施可以增加土壤储水量,降低硝态氮向土壤下层淋溶。目前优质有机肥源越来越多地施用在经济作物如大棚蔬菜、果园等的情况下,大田作物的有机肥源越来越紧缺^[14]。如何能在尽量减少有机肥投入的情况下,还能较好维持或提高土壤肥力是值得研究的问题之一。有关不同有机物料持续投入对

土壤碳氮的综合影响研究较多^[15],而在有机物料输入对土壤碳氮的后效作用还未见报道。本文利用大田试验,在仅施入有机物料 2 次(分别在小麦和玉米播种时)情况下,比较不同有机物料输入对土壤碳氮的后效作用,为旱地培土有机肥种类的选择和合理施用以及旱地土壤肥力维持和提高等提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究地区概况

试验地点位于陕西省杨凌区西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站(108°24'E, 34°20'N),海拔 521 m,属暖温带季风半湿润气候区,全年无霜期 221 d,降水多集中在 7—10 月,年降雨量 600~680 mm。供试土壤为土垫旱耕人为土,中壤质。耕层土壤基础养分含量:有机碳(8.99±0.57) g/kg,全氮(0.95±0.03) g/kg,全磷(0.82±0.03) g/kg,全钾(20.42±0.12) g/kg,速效磷(20.91±1.56) mg/kg,速效钾(132.75±2.50) mg/kg,土壤 pH 值 8.32±0.05,土壤容重为 1.37 g/cm³。2015 年 11 月—2016 年 6 月小麦作物生育期的温度和降雨量见图 1。

1.2 试验设计

试验于 2013 年 10 月,采用的是小麦玉米轮作,供试小麦品种为小偃 22,玉米品种为秦龙 14。试验设 5 个处理:不施肥(CK)、单施氮磷肥(NP)、氮磷肥+有机肥(MNP)、氮磷肥+小麦秸秆还田(SNP)、氮

磷肥+生物炭(BNP)。其中氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙。冬小麦施肥量:基肥为 N 120 kg/hm² 和 P₂O₅ 100 kg/hm²,返青前追肥为 N 30 kg/hm²;夏玉米施肥量:基肥为 N 225 kg/hm² 和 P₂O₅ 90 kg/hm²。所施用有机肥为西安紫瑞生物科技有限公司佳禾家旺生物有机肥,主要技术指标:有效活菌数(CFU)≥0.2亿个/g,有机质(以干基计)≥40%,水分≤30%。秸秆为粉碎小麦秸秆(5 mm)。生物炭由河南三利新能源有限公司提供,由小麦秸秆在 550℃下无氧热解产生,其灰分 46.7%,pH 值 10.25,过 5 mm 筛施用。除 CK 外,其他处理的氮磷肥用量一致。有机物料均是在 2013—2014 年度冬小麦和夏玉米播前施入,之后停止有机物料的输入,以观后效。3 种有机物料(有机肥、秸秆、生物炭)的有机碳含量分别为 18.8%,37.8%和 49.0%;全氮含量分别是 1.60%,0.76%和 1.07%;C/N 比分别是 11.7,50.0,46.0。每个处理为 3 个重复,共 15 个小区,随机区组排列,小区面积为 10 m²。

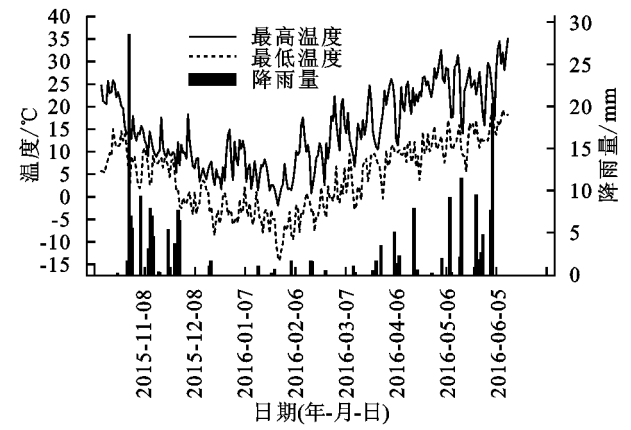


图 1 2015 年 11 月—2016 年 6 月日最高、最低温度和日降雨量

1.3 样品采集及测定

耕层(0—20 cm)土壤样品于 2016 年 6 月收获时采集。在试验小区内沿 S 形路线采集土壤样品,去掉作物残茬和其他杂物,将土样分为两部分。一部分风干用于测定土壤有机质和全氮;另一部分装入塑封袋,保存在 4℃冰箱中,用于土壤可溶性有机碳氮和矿质态氮(NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N)的测定。剖面(0—200 cm)土壤样品于 2016 年 6 月小麦收获时采集,每 20 cm 为 1 个样,采集的样品用于土壤水分和矿质氮的分析。

可溶性有机碳、氮用 K₂SO₄ 溶液浸提测定^[16];有机碳用重铬酸钾容量法—外加热法测定^[17];全氮用凯式定氮法测定^[17];矿质氮测定:用 1 mol/L 的 KCL 浸提土样,浸提液经过滤后,滤液中的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 用流动分析仪测定;土壤含水量用烘干法测定。

$$\text{土壤硝态氮累积量(kg/hm}^2\text{)} = \text{土层厚度(cm)} \times \text{硝态氮含量(mg/kg)} \times \text{土壤容重(g/cm}^3\text{)} / 10$$
$$\text{土壤储水量(mm)} = \text{土层深度(cm)} \times \text{土壤质量含水量(\%)} \times \text{土壤容重(g/cm}^3\text{)} / 10$$

1.4 数据处理

数据经 Excel 2003 整理后,用 SPSS 23 进行统计分析,绘图由 OriginPro 8.0 和 Excel 2003 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同有机物料对表层土壤碳氮含量的影响

由表 1 可知,冬小麦收获后,不同施肥处理对土壤有机碳含量影响不同。NP 和 MNP 与 CK 没有显著差异。SNP 和 BNP 较 CK 分别提高了 29.5%和 29.8%($p<0.05$),但二者之间差异不显著。与基础土壤有机碳相比,BNP 与 SNP 显著提高了 29.5%和 29.3%($p<0.05$),CK,NP 和 MNP 没有显著变化。冬小麦收获后,NP,MNP,SNP 和 BNP 的土壤全氮含量较 CK 分别提高了 22.0%,14.3%,24.2%和 26.4%($p<0.05$)。与基础土壤全氮相比,NP,MNP,SNP 和 BNP 分别显著提高了 16.8%,9.5%,18.9%和 21.1%($p<0.05$)。BNP 处理的土壤可溶性有机碳显著高于其他处理($p<0.05$),分别比 CK,NP,MNP 和 SNP 提高了 23.4%,10.9%,21.3%,20.5%(表 1)。所有施肥处理的土壤可溶性有机氮均显著高于 CK($p<0.05$),分别提高了 39.3%,29.3%,34.5%和 52.3%(表 1)。

表 1 不同处理土壤碳氮含量

| 处理 | SOC/ (g·kg ⁻¹) | TN/ (g·kg ⁻¹) | DOC/ (mg·kg ⁻¹) | DON/ (mg·kg ⁻¹) |
|-----|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| CK | 8.97±0.10b | 0.91±0.02d | 134.5±3.0b | 28.7±2.2c |
| NP | 8.87±0.33b | 1.11±0.01b | 149.7±3.2b | 40.0±1.8ab |
| MNP | 8.71±0.20b | 1.04±0.01c | 136.9±7.2b | 37.1±4.2b |
| SNP | 11.62±0.04a | 1.13±0.02ab | 137.8±0.1b | 38.6±5.2ab |
| BNP | 11.64±1.11a | 1.15±0.03a | 166.0±15.5a | 43.7±1.3a |

注:小写字母表示同一列数据后不同字母表示差异显著($p<0.05$),下同。

2.2 不同有机物料对剖面土壤硝态氮的影响

不同处理 0—200 cm 剖面土壤硝态氮分布随土层深度的增加而不同(图 2)。除 CK 和 BNP 处理外,其余施肥处理均出现了硝态氮累积峰,其中 MNP 出现在 60—80 cm,SNP 出现在 80—100 cm,而 NP 出现在 100—120 cm。BNP 处理的土壤硝态氮含量表层(0—20 cm)最高,并随土层深度的增加而波动下降。与 CK 相比,各施肥处理显著提高了表层(0—20 cm)土壤硝态氮含量($p<0.05$)。与 NP 相比,各有机物料处理的土壤剖面硝态氮累积峰不同程度上移。

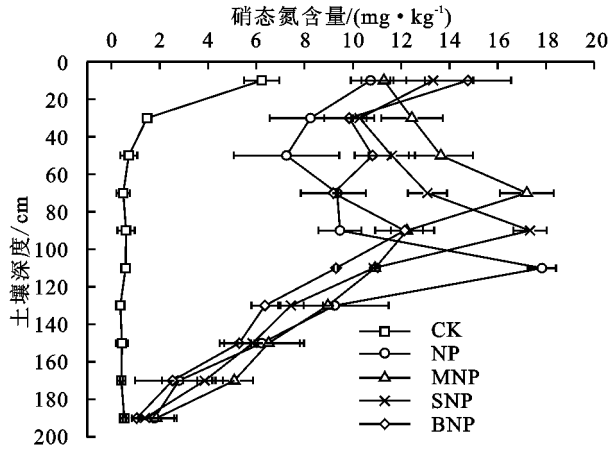


图 2 不同处理土壤剖面硝态氮分布

表 2 不同处理土壤 NO_3^- -N 累积量kg/hm²

| 土层/cm | CK | NP | MNP | SNP | BNP |
|---------|------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| 0—100 | 27.4±3.01d | 126.7±13.79c | 187.6±14.20a | 183.5±10.19a | 159.8±0.50b |
| 100—200 | 6.1±1.32e | 98.5±3.56a | 86.7±4.20b | 76.4±3.56c | 63.8±1.69d |
| 0—200 | 33.5±3.89c | 225.2±13.23b | 274.3±18.36a | 259.9±6.72a | 223.6±1.76b |

2.3 不同施肥处理对剖面土壤水分分布的影响

冬小麦收获后在 0—200 cm 土层中,不同处理对剖面土壤水分分布影响较大(图 3)。0—20 cm 耕层土壤,相比 CK,NP,MNP,SNP 和 BNP 土壤含水量分别显著提高了 12.7%,12.9%,10.7%和 22.4%,且 BNP 处理显著高于 SNP 和 MNP ($p<0.05$)。NP,MNP,SNP 和 BNP 均在 60—100 cm 土层形成了水分低谷。

不同施肥处理下 0—200 cm 土壤储水量变化见表 3。冬小麦收获后,0—40 cm 和 40—200 cm 土层土壤储水量分别在 91.0~108.9 mm 和 310.1~353.0 mm 变化。0—40 cm 土层,施肥处理(NP,MNP,SNP 和 BNP)的土壤储水量分别比 CK 高 4.1%,11.5%,9.0%和 19.7% ($p<0.05$);所有有机物料处理(MNP,SNP 和 BNP)的土壤储水量均显著高于 NP,且 BNP 显著高于 MNP 和 SNP ($p<0.05$)。40—200 cm 土层,不施肥 CK

的土壤储水量显著高于施肥处理 ($p<0.05$)。0—200 cm 土层储水量,不施肥 CK 显著高于施肥处理,且有机物料处理(MNP,SNP 和 BNP)显著高于 NP,而各有机物料处理间差异不显著。

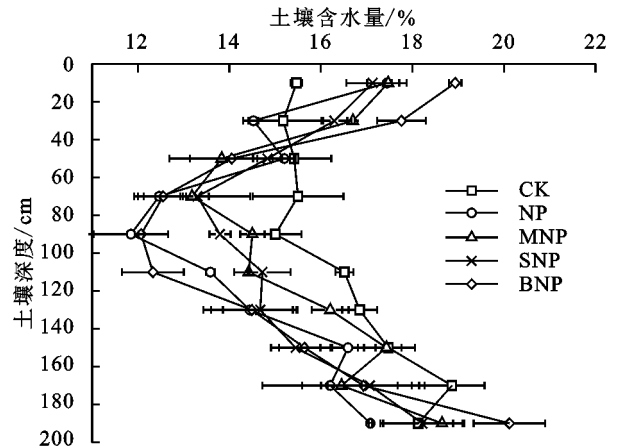


图 3 不同处理土壤水分分布

表 3 不同处理土壤剖面储水量

mm

| 土层/cm | CK | NP | MNP | SNP | BNP |
|--------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 0—40 | 91.0±3.02d | 94.7±1.17c | 101.4±0.30b | 99.2±1.48b | 108.9±1.86a |
| 40—200 | 353.0±8.21a | 310.1±5.54d | 328.8±5.12b | 322.2±5.76bc | 311.9±6.55cd |
| 0—200 | 444.0±11.06a | 404.7±4.97c | 430.3±5.01b | 421.4±5.40b | 420.7±6.28b |

3 讨论

3.1 对表层土壤碳氮的后效作用

大量研究表明,与单施无机化肥相比,有机与无机肥配施更有利于土壤有机质含量的提高^[18]。本研究结果表明,有机物料停施两年后,SNP 和 BNP 的土壤有机碳与 NP 处理仍然差异显著,说明秸秆和生

物炭的后效作用比较强,对土壤有机碳有显著的持续提升作用。MNP 与 NP 的差异不显著,这与 Gao 等^[19]的研究结果,施用有机肥可以增加土壤有机碳含量不一致,主要可能是因为他们长达 33 a 长期定位试验,在后几十年施用的有机肥是鸡粪,其 C/N 是 12.9,而本试验施用的商品有机肥碳氮比低,有利于有机碳矿化,而不利于有机碳积累。有机物料的投

人会直接增加土壤有机质输入从而可提高土壤有机碳的含量^[15],本研究中,有机物料只在小麦和玉米播种时各施1次,之后停止施入,且所施用的有机肥为商品有机肥,其C/N小,相比秸秆和生物炭而言,易被土壤微生物分解利用,故后效弱。本研究中,小麦收获后土壤全氮与有机碳的变化趋势基本一致。生物炭具有提高和维持表层土壤肥力的显著后效作用,但这种后效作用能够持续的时间值得进一步研究。此外,相对于秸秆和商品有机肥而言,生物炭需要通过高温分解来获得,在生产过程中需要消耗能源,施用成本相对较高,其与其他有机物料如秸秆和商品有机肥的经济效益比较有待进一步研究。

可溶性有机碳、氮是土壤有机碳和氮库中易损失的组成成分之一,其受有机物料输入、微生物活性及数量等多种因素的影响^[1]。本试验中BNP处理的可溶性有机碳与其他各处理差异显著,可能因为生物炭比较稳定,可以存留的时间较长,而有机肥和秸秆分解快,说明生物炭提升土壤肥力的后效比较强。本研究结果表明,与CK相比,施肥均能显著提高可溶性有机氮含量。梁斌等^[20]的研究也表明,与不施肥相比,长期施用化肥能显著提高可溶性有机氮。施入的有机肥自身本就含有一定数量的可溶性有机氮^[21],同时施用有机肥能改善土壤养分状况,促进作物根系分泌物增加,从而增加了可溶性有机氮含量^[22]。丁婷婷等^[23]研究表明秸秆还田是土壤可溶性有机氮重要的来源之一,因此秸秆还田可以增加土壤可溶性有机氮含量。有研究表明^[24]生物炭对从沙土淋溶出的DON没有显著影响,而本试验生物炭对土壤可溶性有机氮含量的提升效果最好,可能与生物炭来源、试验时间及土壤类型等因素有关,其内在机制还需进一步探讨^[10]。

3.2 对剖面土壤硝态氮和水分分布的后效作用

本研究结果表明,0—200 cm剖面中,土壤硝态氮分布和累积量随施肥措施的不同而有所不同。NP的硝态氮累积峰出现在100—120 cm,MNP和SNP的硝态氮累积峰出现在60—100 cm,而BNP表层硝态氮最大且仅在80—100 cm处出现一个小累积峰。相比NP,有机物料(MNP,SNP和BNP)剖面硝态氮累积峰均不同程度上移。0—100 cm土层,MNP,SNP和BNP的硝态氮累积量显著高于NP,其中BNP处理最低;而100—200 cm土层,各有机物料处理硝态氮累积量均显著低于NP。这些表明有机物料投入抑制了硝态氮向土壤深层淋溶^[25],在降低硝态氮淋溶方面均有一定的后效作用。有研究表明^[26],与化肥相比较,有机肥的投入

可以降低土壤剖面硝态氮含量,阻止其累积峰向下移动。南镇武等^[26]的研究结果也表明有机肥的输入可减少硝态氮向土壤深层淋溶,而化肥氮易向下淋失。0—20 cm BNP硝态氮含量最大,但0—100 cm硝态氮累积量显著低于SNP和MNP处理,说明生物炭可以增加耕层(0—20 cm)硝态氮含量,显著降低硝态氮的淋溶^[27]。

本研究结果表明,CK耕层(0—20 cm)土壤含水量低于其他各施肥处理(图3),说明施肥有利于表层土壤水分的提高,尤其是配施生物炭。CK处理0—40 cm土壤储水量显著低于各施肥处理,有机物料有利于提高上层土壤的储水量,特别是生物炭;40—180 cm土层,各施肥处理土壤含水量低于CK;40—200 cm和0—200 cm土壤储水量,施肥处理低于不施肥处理。这说明有机无机配施有利于提高表层土壤水分含量和储水量^[28],主要是因为不施肥CK处理的作物比较弱小,导致土壤耕层(0—20 cm)水分的蒸发较强,同时由于作物生长弱小从而对深层土壤水分的吸收利用减少^[28],施肥可促使小麦根系生长,使得其吸水空间增大,可提高对土壤深层水分的吸收利用^[29],NP,MNP,SNP和BNP处理均在60—100 cm土层形成了水分低谷(图3)也表明了这一点。

4 结论

有机物料停施两年后,秸秆和生物炭处理的表层土壤有机碳和全氮显著高于NP处理,而有机肥处理土壤有机碳含量有下降趋势。相对于不施肥CK处理,生物炭可显著提高表层土壤可溶性有机碳氮含量。相比NP肥,各有机物料(MNP,SNP,BNP)显著降低100—200 cm硝态氮累积量,有降低剖面硝态氮淋溶风险的作用。NP,MNP,SNP和BNP均可显著提高耕层(0—20 cm)土壤含水量和0—40 cm储水量;有机物料处理0—200 cm剖面土壤储水量均显著低于CK,但均显著高于NP。生物炭在提高和维持表层土壤肥力以及降低剖面硝态氮淋溶风险等方面的后效作用显著优于秸秆和有机肥,是旱地塿土上一种较好的有机物料施用方式,但生物炭的这种后效作用所能持续的时间及其与其他有机物料的效益比较有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈安强,付斌,鲁耀,等. 有机物料输入稻田提高土壤微生物炭氮及可溶性有机碳氮[J]. 农业工程学报,2015,

- 31(21):160-167.
- [2] 张刚,王德建,王灿.不同农田施肥方式下土壤碳氮变化特征及其环境意义[J].中国农学通报,2013,29(32):303-308.
- [3] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, et al. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial) [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1): 4-10.
- [4] 陈裴裴,吴家森,郑小龙,等.不同施肥对雷竹林渗漏水中可溶性有机碳、氮流失的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(5):1303-1310.
- [5] 汤宏,沈健林,张杨珠,等.秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J].水土保持学报,2013,27(1):240-246.
- [6] 张宏威,康凌云,梁斌,等.长期大量施肥增加设施菜田土壤可溶性有机氮淋溶风险[J].农业工程学报,2013,29(21):99-107.
- [7] 宋震震,李絮花,李娟,等.有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(3):525-533.
- [8] Lazcano C, Gómez-Brandón M, Revilla P, et al. Short-term effects of organic and inorganic fertilizers on soil microbial community structure and function[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(6): 723-733.
- [9] 潘剑玲,代万安,尚占环,等.秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J].中国生态农业学报,2013,21(5):526-535.
- [10] 黄剑.生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究[D].北京:中国农业科学院,2012.
- [11] 崔全红,孙本华,吴得峰,等.有机无机肥配施对旱地土壤碳氮的影响[J].生态与农村环境学报,2016,32(2):289-294.
- [12] 魏孝荣,郝明德,张春霞.旱地长期施肥对土壤水分的影响[J].水土保持研究,2003,10(1):95-97.
- [13] 王志勇,红梅,杨殿林,等.供氮水平和有机无机配施对夏玉米产量及土壤硝态氮的影响[J].中国土壤与肥料,2008,26(6):11-14.
- [14] 樊羿.有机肥资源利用现状调查与施用有机肥对土壤环境的影响[D].郑州:河南农业大学,2006.
- [15] 徐虎,张敬业,蔡岸冬,等.外源有机物料碳氮在红壤团聚体中的残留特征[J].中国农业科学,2015,48(23):4660-4668.
- [16] 李文军,彭保发,杨奇勇.长期施肥对洞庭湖双季稻区水稻土有机碳、氮积累及其活性的影响[J].中国农业科学,2015,48(3):488-500.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [18] Ge S, Xu H, Ji M, et al. Characteristics of soil organic carbon, total nitrogen, and C/N ratio in Chinese apple orchards [J]. Open Journal of Soil Science, 2013, 3(5): 213-217.
- [19] Gao W, Yang J, Ren S R, et al. The trend of soil organic carbon, total nitrogen, and wheat and maize productivity under different long-term fertilizations in the upland fluvo-aquic soil of North China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 103(1): 61-73.
- [20] 梁斌,李俊良,杨学云,等.施肥对麦田土壤可溶性有机氮的影响[J].生态学报,2016,6(14):4430-4437.
- [21] Khalili B, Nourbakhsh F. Vertical distribution of soluble organic nitrogen, nitrogen mineralization, nitrification, and amidohydrolase activities in a manure-treated soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2012, 175(2): 265-272.
- [22] 段鹏鹏,丛耀辉,徐文静,等.氮肥与有机肥配施对设施土壤可溶性氮动态变化的影响[J].中国农业科学,2015,48(23):4717-4727.
- [23] 丁婷婷,王百群,何瑞清,等.施用秸秆对土壤可溶性有机碳氮及矿质氮的影响[J].水土保持研究,2014,21(6):72-77.
- [24] Clough T, Condron L, Kammann C, et al. A review of biochar and soil nitrogen dynamics[J]. Agronomy, 2013, 3(2): 275-293.
- [25] 刘方春,聂俊华,刘春生,等.不同施肥措施对土壤硝态氮垂直分布的特征影响[J].土壤通报,2005,36(1):50-53.
- [26] 南镇武,刘树堂,袁铭章,等.长期定位施肥土壤硝态氮和铵态氮积累特征及其与玉米产量的关系[J].华北农学报,2016,31(2):176-181.
- [27] Jin Z, Chen X, Chen C, et al. Biochar impact on nitrate leaching in upland red soil, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(14): 1109.
- [28] 高洪军,朱平,彭畅,等.不同施肥方式对东北春玉米农田土壤水热特征的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):195-200.
- [29] 于昕阳,翟丙年,金忠宇,等.有机无机肥配施对旱地冬小麦产量、水肥利用效率及土壤肥力的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):320-324.