

网络出版时间:2020-09-25 13:44 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2021.03.009  
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20200924.1246.009.html

# 水肥管理与生物炭对作物产量和氮效率及氮淋失的影响

卢慧宇,杜文婷,张弘弢,Ayaz Muhanmond,徐佳星,王仁杰,  
李若楠,杨学云,张树兰

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

**[摘要]** 【目的】探讨关中平原冬小麦/夏玉米轮作模式下,水分优化、养分优化以及生物炭对作物产量、氮效率和氮素淋失的影响。【方法】2016—2018年,利用田间渗漏池试验,设计习惯水肥1(CP1)、习惯水肥2(CP2)、灌水优化(CP1-W)、养分优化(CP1-F)、水分养分优化(OPT)、习惯水肥2+生物炭(CP2+B)以及水分养分优化+生物炭(OPT+B)7个处理,测定2016—2017、2017—2018年不同处理的作物产量、氮肥偏生产力、氮素淋失的变化。【结果】与CP1处理相比,CP1-W、CP1-F和OPT处理未显著影响作物总产量,但是CP1-F和OPT处理显著降低了第二个轮作年(2017—2018年)小麦产量。就2个轮作年而言,CP1-F和OPT较CP1处理总体上显著增加了氮肥偏生产力,平均增幅分别为33.6%和21.7%。在2016—2017和2017—2018两个轮作年,CP1-W、CP1-F和OPT处理的TN淋失量均降低,其中OPT处理显著降低2个轮作年硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)和总氮(TN)淋失量。在2个轮作年,与CP2处理相比,CP2+B处理显著提高了作物总产量和氮肥偏生产力,显著降低TN淋失量。与OPT处理相比,OPT+B处理未能显著影响作物总产量和氮肥偏生产力,但显著降低了TN淋失量。【结论】陕西关中平原农户水肥施用过量,在习惯水肥的基础上合理调控水肥,可以保证作物产量,提高氮肥利用率,降低氮素淋失量,而施用生物炭的效应不明显。

**[关键词]** 水肥调控;生物炭;作物产量;氮肥偏生产力;氮素淋失

**[中图分类号]** S151<sup>+</sup>.22

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2021)03-0075-11

## Responses of crop yield, nitrogen use efficiency and nitrogen leaching to water nutrient management and biochar application

LU Huiyu, DU Wenting, ZHANG Hongtao, Ayaz Muhanmond, XU Jiaying,  
WANG Renjie, LI Ruonan, YANG Xueyun, ZHANG Shulan

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University/Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** 【Objective】 This study aimed to understand the effects of water and nutrient optimization and biochar application on crop yield, nitrogen (N) use efficiency and nitrogen leaching losses under winter wheat-summer maize cropping system in the Guanzhong Plain. 【Method】 A field lysimeter experiment was carried out in 2016—2018 with seven treatments of conventional practice 1 (CP1), conventional practice 2 (CP2), CP1 combined with reduced water supply (CP1-W), CP1 combined with reduced nutrient supply (CP1-F), CP1 combined with reduced both water and nutrient supplies (OPT), CP2 plus biochar applica-

**[收稿日期]** 2020-02-26

**[基金项目]** 国家重点研发计划项目“汾渭平原小麦化肥农药减施技术集成研究与示范”(2018YFD0200404),“褐土区氮磷淋溶阻控机制与措施研究”(2016YFD0800105)

**[作者简介]** 卢慧宇(1994—),女,辽宁朝阳人,硕士,主要从事土壤养分管理研究。E-mail:1223650765@qq.com

**[通信作者]** 张树兰(1966—),女,内蒙古商都人,教授,博士生导师,主要从事农田水肥管理研究。

E-mail:zhangshulan@nwafu.edu.cn

tion (CP2+B), and OPT plus biochar application (OPT+B). Crop yield, nitrogen partial productivity and nitrogen leaching loss during 2016–2017 and 2017–2018 were measured and analyzed. 【Result】 The CP1-W, CP1-F and OPT treatments had no significant effect on crop total yield, but CP1-F and OPT treatments significantly reduced wheat yield in the second year (2017–2018) compared with CP1 treatment. For both years, CP1-F and OPT treatments significantly increased partial factor productivity of nitrogen ( $PF\text{P}_N$ ) compared with CP1 treatment by 33.6% and 21.7%, respectively. The CP1-W, CP1-F and OPT treatments reduced TN leaching losses, and OPT treatment significantly reduced nitrate-N ( $\text{NO}_3^-$ -N) and TN leaching losses in 2016–2017 and 2017–2018. CP2+B treatment significantly increased total crop yield and  $PF\text{P}_N$ , while significantly reduced total N leaching loss compared with CP2 treatment. The OPT+B treatment had no significant effect on total crop yield and  $PF\text{P}_N$ , but significantly reduced total N leaching losses compared with the OPT treatment. 【Conclusion】 Excessive application of water and fertilizers in Guanzhong Plain should be optimized with water and fertilizer management to ensure crop yield, improve nitrogen use efficiency and reduce nitrogen leaching losses. The effect of biochar application was insignificant.

**Key words:** water and fertilizer optimization; biochar; crop yield; nitrogen use efficiency; N leaching loss

冬小麦/夏玉米一年两熟制是我国北方地区主要的作物种植模式,其种植面积约为 16 Mhm<sup>2</sup>,作物产量约占全国粮食总产量的 1/4<sup>[1]</sup>,对保证国家粮食安全起着重要的作用,但该体系过量施肥现象非常普遍。Vitousek 等<sup>[2]</sup>研究表明,中国北方平原氮的盈余量为 227 kg/(hm<sup>2</sup>·年),约是美国中西部的 22.7 倍。常艳丽等<sup>[1]</sup>报道,陕西关中平原冬小麦、夏玉米施氮量过高的农户分别占 55.3% 和 78.2%。过量施用氮肥不仅会导致肥料利用率下降,而且大量养分残留在土壤中,易通过地表径流、侵蚀和淋失等途径损失,引发地下水硝酸盐污染、水体富营养化和温室效应等一系列环境问题<sup>[3-4]</sup>。因此,优化该体系氮肥管理,提高氮效率,减少氮素损失十分重要。研究表明,我国氮肥淋失和径流损失的量约占其施用总量的 7%<sup>[5]</sup>,北方旱地土壤氮素的年淋失量为 4%~19%<sup>[3]</sup>,而南方稻田氮素的年淋失量为 6.8~27.0 kg/hm<sup>2</sup><sup>[6]</sup>。淋失是北方地区氮素损失的重要途径之一,尤其是硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)易随土壤空隙水下渗到植物根系活动层以下或者进入环境水体中,从而不能被作物吸收利用<sup>[7]</sup>。因此,合理的水氮管理非常重要。近年来,生物炭作为一种新兴的功能材料,因比表面积大、吸附性能好、稳定性强等特点在农业上广泛应用<sup>[8]</sup>。有研究报道,生物炭不仅可以提高土壤有机碳含量,改良土壤的保水、保肥性能,而且还可以有效抑制土壤中氮的淋失<sup>[9-10]</sup>,如紫色土、赤红壤和黄棕壤中添加生物炭后,硝态氮淋洗总量分别减少 16%,14% 和 22%<sup>[10]</sup>。可见生物炭对不同类型土壤氮素淋失的抑制效果有一定差异。另外,生物炭对氮素淋失的控制作用还受其施用量

的影响。例如,在黑钙土中分别添加 50 和 100 t/hm<sup>2</sup> 玉米秸秆生物炭后,土壤氮素淋失量分别减少 29% 和 74%,但添加 10 t/hm<sup>2</sup> 玉米秸秆生物炭后,土壤氮素淋失量却增加了 22%<sup>[11]</sup>。因此,在特定的土壤上生物炭对氮素淋失的影响还需要进一步研究。关中平原是陕西省重要的粮食生产基地,主要土壤类型是塿土,冬小麦/夏玉米轮作是该区主要的作物种植模式,其小麦、玉米产量约占陕西省小麦和玉米总产量 50% 以上<sup>[12]</sup>。该种植模式普遍存在过量施肥及由此导致的潜在的氮素淋溶损失,使得改善区域水肥管理变得非常迫切。而生物炭在提高氮效率方面的潜力为该区域氮损失的控制提供了可能,但目前有关施用生物炭对塿土小麦/玉米轮作模式中作物产量、氮利用率以及氮淋失损失的研究鲜有报道。因此,本试验利用田间渗漏池设施,研究控水控肥以及施用生物炭对小麦和玉米产量、氮利用率及氮淋失的影响,以期为塿土小麦/玉米轮作模式可持续生产及环境友好提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点及供试材料

本试验于 2016–2018 年在“国家黄土肥力和肥料效益监测基地”进行,该基地位于陕西省杨凌农业高新技术产业示范区头道塬(34°17'N,108°00'E),海拔 534 m,年平均气温 13 °C,年平均降水量 550~600 mm,主要集中在 6–9 月。供试土壤为塿土(土垫旱耕人为土),黄土母质。试验开始时 0~20 cm 土层土壤的理化性质为:全氮 0.612 g/kg,全磷 0.446 g/kg,速效磷 0.22 mg/kg, pH 8.44。

2016—2017年小麦季降雨量 288.1 mm,玉米季降雨量 366.6 mm;2017—2018年小麦季降雨量174.8 mm,玉米季降雨量 421.0 mm。

氮肥用尿素(含 N 46%)、磷肥用过磷酸钙(含  $P_2O_5$  12%)。试验期间小麦品种为小偃 22,玉米品种为郑单 958。试验所用生物炭为小麦秸秆生物炭,制备温度为 550 °C,有机质和全氮含量分别为 249.0 和 8.46 g/kg,pH 9.8。

### 1.2 试验设计

冬小麦/夏玉米轮作试验在渗漏池进行,试验共设 7 个处理,分别为:(1)习惯水肥 1 处理(CP1):施肥量和灌水量均为传统农户用量;(2)灌水优化处理(CP1-W):灌溉量视当年的降雨情况而定。2016—2017年小麦季和玉米季,灌溉量在 CP1 处理的基础上分别减少 23.5%和 21.7%;2017—2018年小麦季和玉米季,灌溉量在 CP1 处理的基础上分别减少 20%和 25%;(3)养分优化处理(CP1-F):在 CP1 处理的基础上施氮量减少 28.6%,施磷量减少

33.3%;(4)水分养分优化处理(OPT):灌溉量同 CP1-W 处理,施肥量同 CP1-F 处理;(5)水分养分优化+小麦秸秆生物炭处理(OPT+B):在 OPT 处理的基础上增施 15 t/hm<sup>2</sup> 的小麦秸秆生物炭;(6)习惯水肥 2 处理(CP2):施肥量和灌水量均与 CP1 处理相同,但渗漏池深度不同;(7)习惯水肥 2+小麦秸秆生物炭处理(CP2+B):在 CP2 处理的基础上增施 15 t/hm<sup>2</sup> 的小麦秸秆生物炭。习惯水肥处理中的施肥量参考该研究地区冬小麦/夏玉米模式农户施肥水平<sup>[1]</sup>。每个处理重复 4 次。表 1 为各处理施肥量、生物炭用量、灌水量以及渗漏池深度。2016—2017 年,小麦播种时间为 2016-10-03,收获时间为 2017-06-02;玉米播种时间为 2017-06-11,收获时间为 2017-10-04 收获。2017—2018 年,小麦播种时间为 2017-10-06,收获时间为 2018-06-05;玉米播种时间为 2018-06-08,收获时间为 2018-10-05。生物炭于小麦播前施用,氮磷肥于小麦播前或玉米六叶期施用。

表 1 2016—2018 年不同处理灌水及氮磷肥和生物炭施用量

Table 1 Application rates of water and fertilizer and biochar in different treatments during 2016—2018

处理 Treatment	年份 Year	渗漏池深/cm Depth of seepage pool	小麦 Wheat				玉米 Maize			
			N/(kg· hm <sup>-2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / (kg·hm <sup>-2</sup> )	灌溉量/ mm Irrigation	生物炭/ (t·hm <sup>-2</sup> ) Biochar	N/(kg· hm <sup>-2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / (kg·hm <sup>-2</sup> )	灌溉量/ mm Irrigation	生物炭/ (t·hm <sup>-2</sup> ) Biochar
CP1	2016—2017	120/150	210	180	170	0	280	45	230	0
	2017—2018	120/150	210	180	150	0	280	45	120	0
CP1-W	2016—2017	120/150	210	180	130	0	280	45	180	0
	2017—2018	120/150	210	180	120	0	280	45	90	0
CP1-F	2016—2017	120/150	150	120	170	0	180	0	230	0
	2017—2018	120/150	150	120	150	0	180	0	120	0
OPT	2016—2017	120/150	150	120	130	0	180	0	180	0
	2017—2018	120/150	150	120	120	0	180	0	90	0
OPT+B	2016—2017	200	150	120	130	15	180	0	180	0
	2017—2018	200	150	120	120	15	180	0	90	0
CP2	2016—2017	100	210	180	170	0	280	45	230	0
	2017—2018	100	210	180	150	0	280	45	120	0
CP2+B	2016—2017	100	210	180	170	15	280	45	230	0
	2017—2018	100	210	180	150	15	280	45	120	0

注:“120/150”表示该处理 4 个重复中深度分别为 120 和 150 cm 渗漏池各 2 个重复。

Note:“120—150” indicates that each of the four treatments contains two lysimeters with depths of 120 and 150 cm.

### 1.3 样品采集与测定

在作物生长期采集渗滤液,测量体积,并取一定体积的样品于 4 °C 贮存,用于分析不同氮组分。2016—2017 年共采集 17 次样品,2017—2018 年共采集 11 次样品。渗滤液总氮(TN)质量浓度采用碱性过硫酸钾消解,紫外分光光度法<sup>[13]</sup>测定;硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)质量浓度采用 AA3 连续型注射流动分析仪测定;有机氮(ON)质量浓度由总氮(TN)与无机氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)质量浓

度的差值求得。作物成熟后,调查穗数和穗粒数,然后每个渗漏池全部收割,风干后称质量,脱粒计算籽粒产量,并测定千粒质量。

$$\text{氮肥偏生产力(PFP}_N\text{)} = Y/N;$$

$$\text{累积渗滤液量}(L) = \sum(L_1 + L_2 + \dots + L_n);$$

$$\text{氮素累积淋失量(NL)} = \sum(L_1 \times C_1 + L_2 \times C_2 + \dots + L_n \times C_n)。$$

式中:Y 为施氮处理作物籽粒产量;N 为氮肥用量;L<sub>n</sub> 为第 n 次采集渗滤液量(mm);C<sub>n</sub> 为第 n 次淋失

水样中的氮素质量浓度(mg/L)。

#### 1.4 数据处理与统计分析

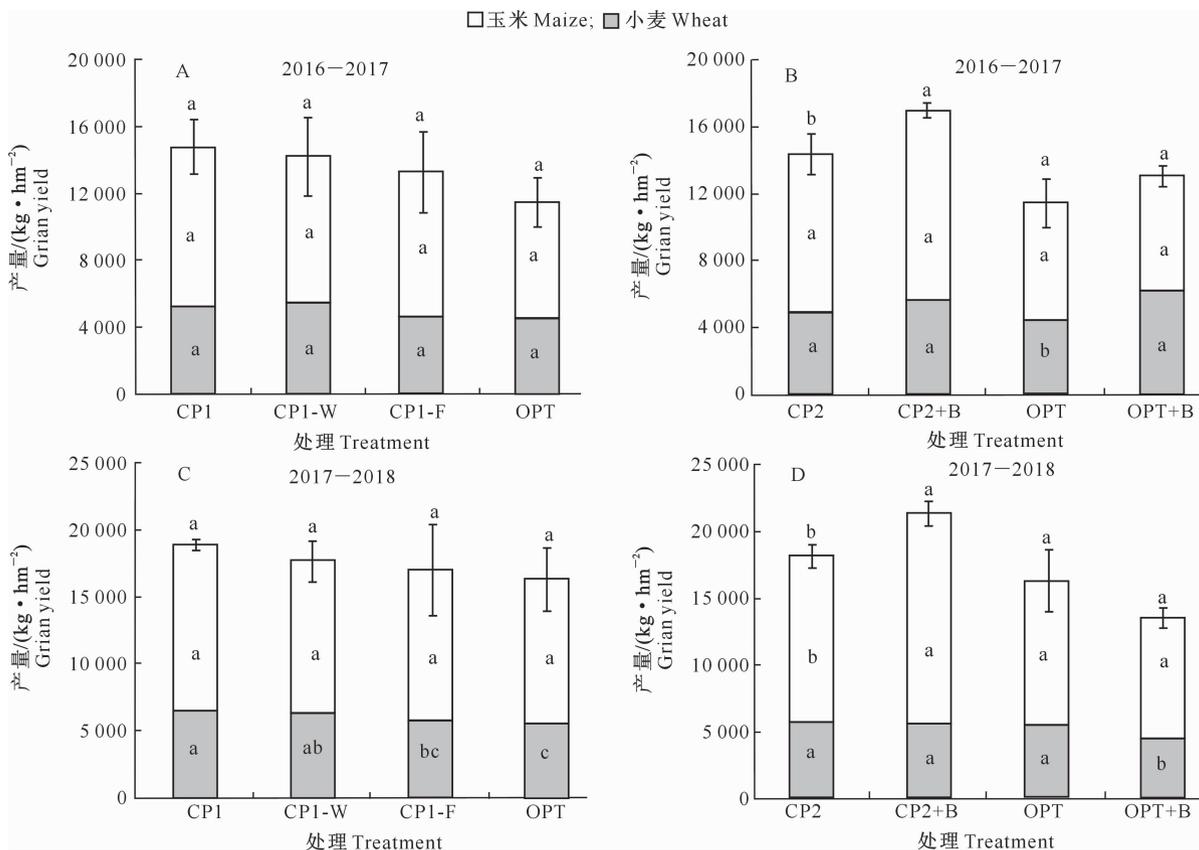
所有数据均为 4 个重复的均值,CP1、CP1-W、CP1-F 和 OPT 处理采用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析,差异达到显著水平( $P < 0.05$ )则进一步进行多重比较。CP2 与 CP2+B 处理、OPT 与 OPT+B 处理采用 SPSS 18.0 软件独立样本 *T* 检验进行显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理作物产量与产量三要素的比较

从 2 个轮作年作物产量的结果(图 1)可知,2017—2018 年各处理玉米产量及总产量均高于 2016—2017 年。2016—2017 年,CP1-W、CP1-F 和 OPT 处理的小麦、玉米产量以及总产量均与 CP1 处

理无显著差异。与 CP2 处理相比,CP2+B 处理的小麦和玉米产量无显著变化,但显著提高了总产量,增幅达 17.9%。与 OPT 处理相比,OPT+B 处理显著增加小麦产量(39.1%),但对玉米产量和总产量无显著影响。2017—2018 年,CP1-F 和 OPT 处理小麦产量较 CP1 显著降低,但是 CP1-W、CP1-F 和 OPT 处理的玉米产量以及总产量均与 CP1 处理之间无显著差异。与 CP2 处理相比,CP2+B 处理显著提高了玉米产量以及总产量,增幅分别为 26.1%和 10.0%。OPT+B 处理较 OPT 处理显著降低小麦产量,降幅达 19%,但玉米产量及总产量与 OPT 处理之间无显著差异。由图 1 还可知,2016—2018 年,养分优化及水分养分优化对小麦产量的影响不同,施用生物炭对小麦、玉米产量影响也不一致,不过所有处理对作物总产量的影响相同。



图柱中标的不同小写字母表示不同处理小麦或玉米产量差异达显著水平( $P < 0.05$ ),

图柱上标不同小写字母表示总产量差异显著( $P < 0.05$ )

Different lowercase letters inside bars indicate significant differences in yields of wheat and maize among treatments ( $P < 0.05$ ), and different lowercase letters above bars represent significant differences between treatments for total crop yield ( $P < 0.05$ )

图 1 2016—2018 年水肥管理(A,C)和施用生物炭(B,D)对小麦和玉米产量以及总产量的影响

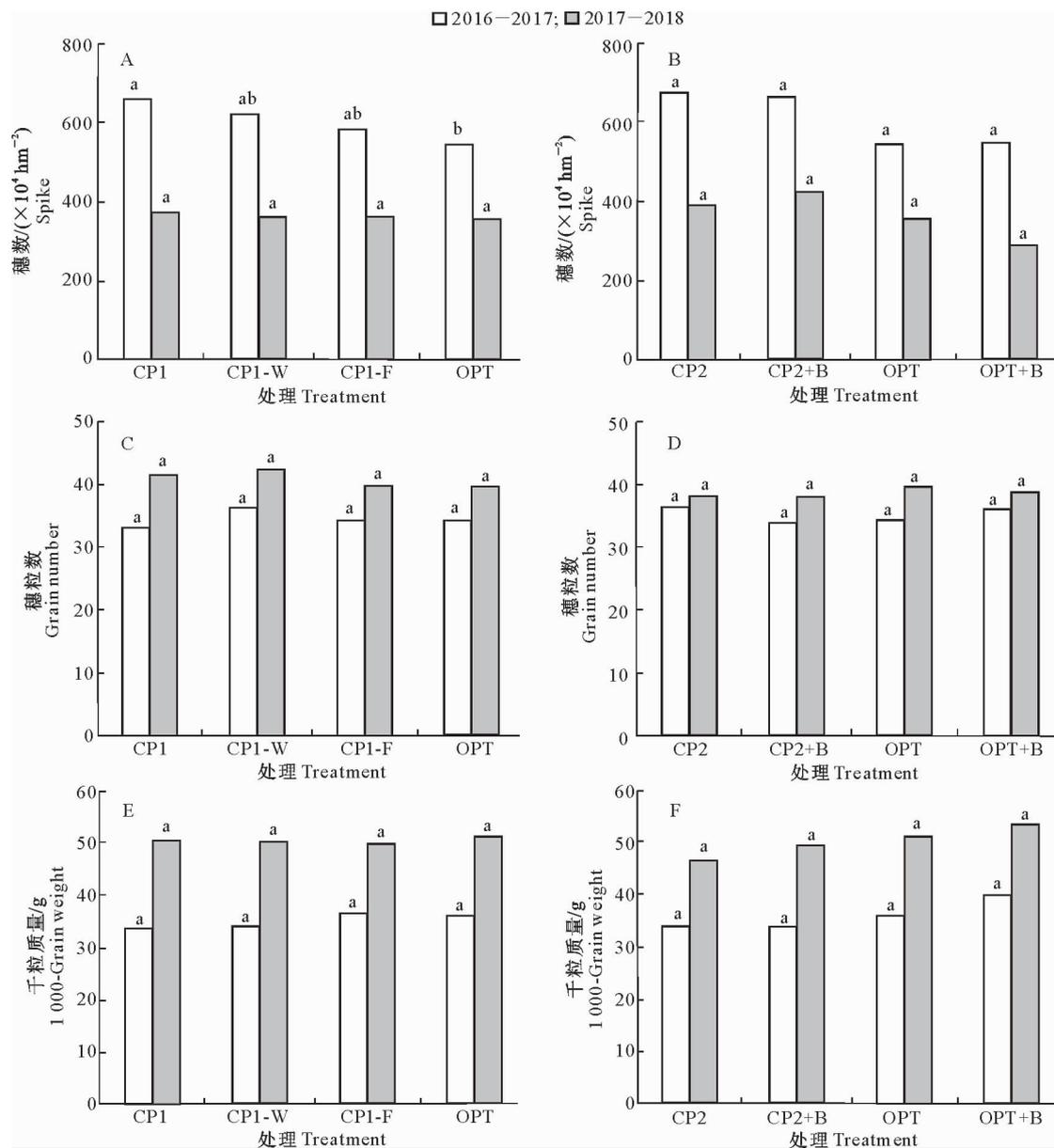
Fig. 1 Effects of water and nutrient management (A,C) and biochar application (B,D) on wheat, maize and total yield in 2016—2018

由图 2 和图 3 可知,与 CP1 处理相比,除了 OPT 处理显著降低了 2016—2017 年小麦的穗数

外,灌水优化处理(CP1-W)、养分优化处理(CP1-F)以及水分养分优化处理(OPT)对 2 个轮作年小麦、

玉米产量三要素均无显著影响。与 CP2 处理相比,除 CP2+B 处理显著增加了 2017—2018 年玉米的

千粒质量外,施用生物炭对小麦、玉米产量三要素也基本无显著影响。



图柱上不同小写字母表示不同处理间差异达显著水平( $P < 0.05$ )。图 3—5 同

Different lowercase letters above bars represent significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ). The same for Fig. 3—5

图 2 2016—2018 年水肥管理(A,C,E)和生物炭(B,D,F)对小麦产量三要素的影响

Fig. 2 Effects of water and nutrient management (A,C,E) and biochar application (B,D,F) on wheat yield components in 2016—2018

## 2.2 不同处理作物氮偏生产力的比较

由图 4 可知,2016—2018 年氮肥偏生产力为 29~51.9 kg/kg,其中 CP1-F 处理最大,CP1-W 处理最小。在 2016—2017 年,CP1-F 处理氮肥偏生产力显著高于 CP1 处理,增幅为 37%;而 CP1-W 和 OPT 处理的氮肥偏生产力均与 CP1 处理无显著差异。与 CP2 处理相比,CP2+B 处理显著提高了氮

肥偏生产力,增幅达 17.9%;与 OPT 处理相比,OPT+B 处理氮肥偏生产力无显著变化,说明在水分养分优化的基础上施用生物炭对氮肥偏生产力无显著影响。在 2017—2018 年,CP1-F 与 OPT 处理氮肥偏生力之间无显著差异,但均显著高于 CP1 处理,增幅分别达 33.6%和 27.9%;CP1-W 处理氮肥偏生产力与 CP1 处理之间无显著差异。

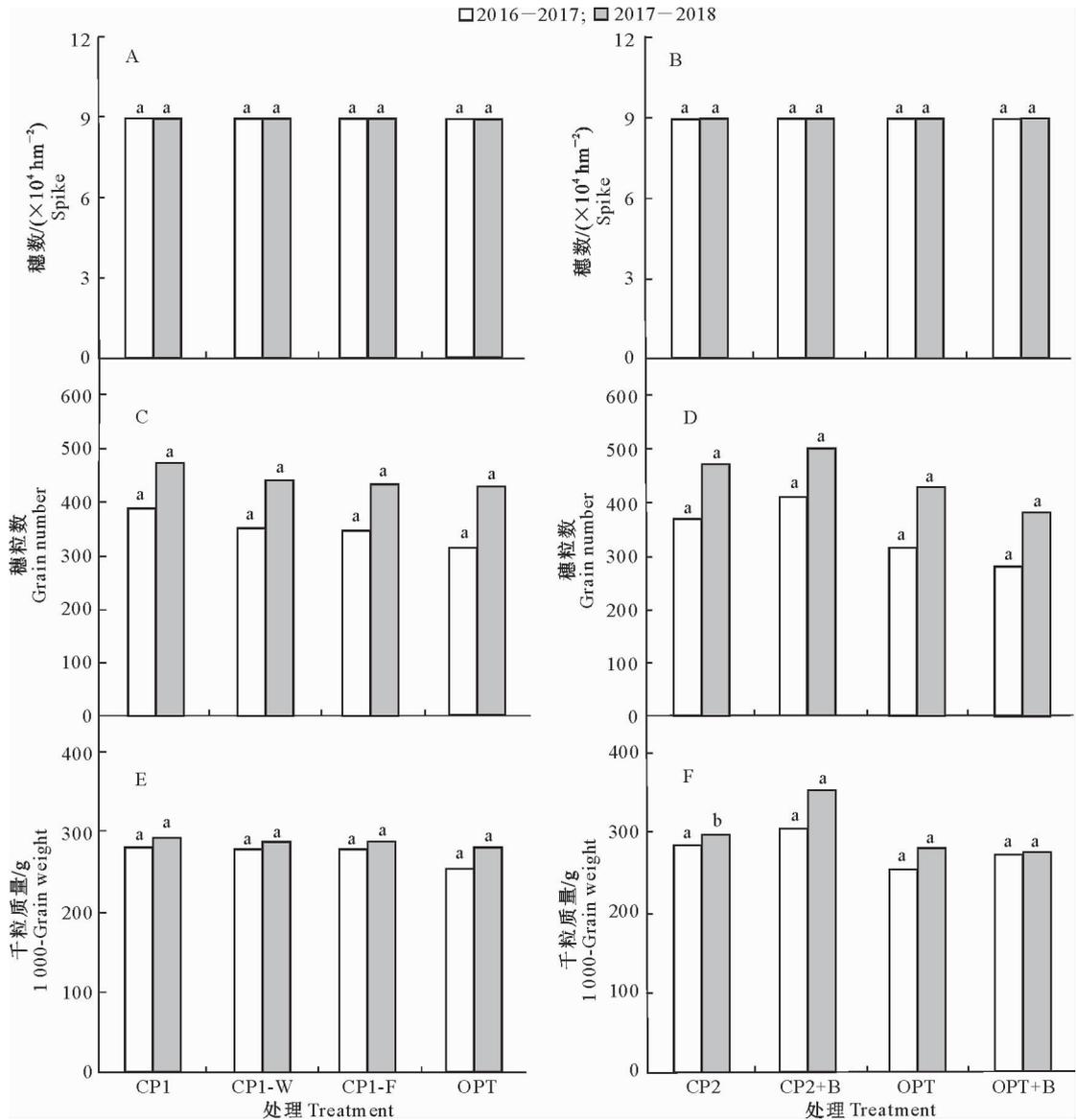


图 3 2016—2018 年水肥管理(A,C,E)和生物炭(B,D,F)对玉米产量三要素的影响

Fig. 3 Effects of water and nutrient management (A,C,E) and biochar application (B,D,F) on maize yield components in 2016–2018

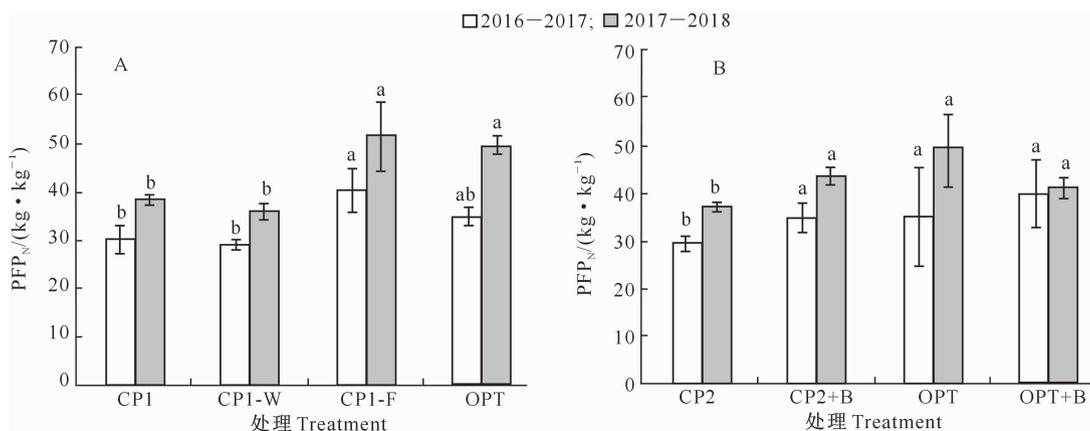


图 4 2016—2018 年水肥管理(A)以及生物炭(B)对小麦/玉米轮作模式中氮肥偏生产力的影响

Fig. 4 Effects of water and nutrient management (A) and biochar application (B) on partial factor productivity of nitrogen ( $PFP_N$ ) under wheat and maize rotation in 2016–2018

### 2.3 不同处理氮素淋失的比较

轮作模式中累积渗漏液量和氮素淋失量的影响如图

2016—2018 年水肥管理和生物炭对小麦/玉米

5 和图 6 所示。

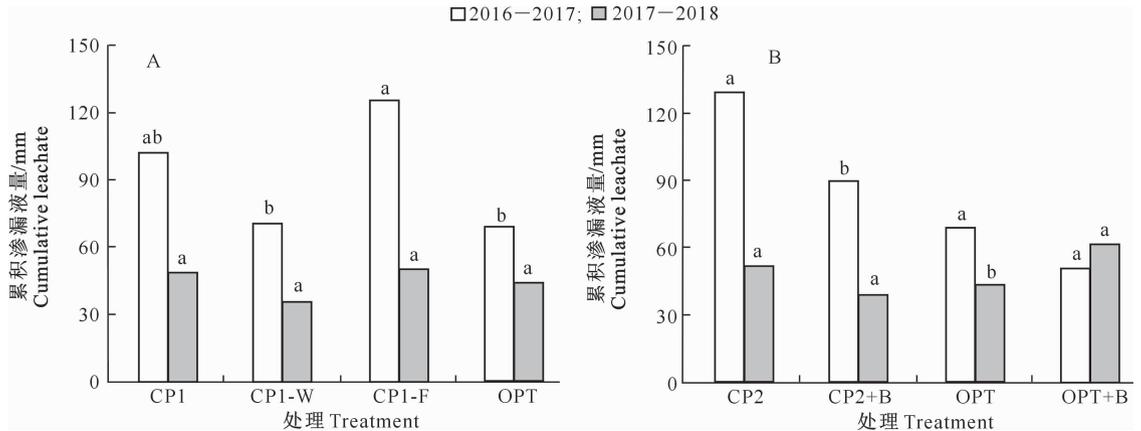
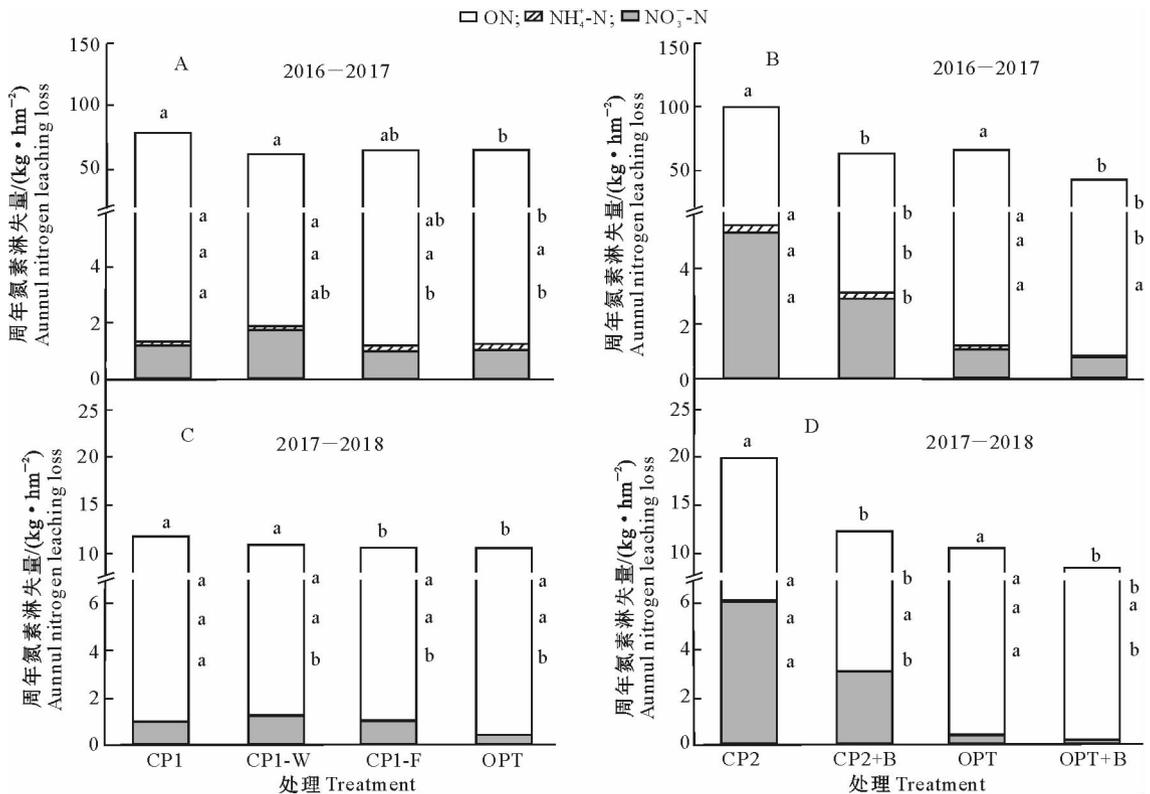


图 5 2016—2018 年水肥管理(A)以及生物炭(B)对小麦/玉米轮作模式中累积渗漏液量的影响

Fig. 5 Effects of water and nutrient management (A) and biochar application (B) on cumulative leachate under wheat and maize rotation in 2016—2018



图柱右侧从上到下的不同小写字母表示不同处理 ON、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量差异显著 ( $P < 0.05$ ),

图柱上方不同小写字母表示不同处理 TN 淋失量差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different lowercase letters on right side of bars represent significant differences for ON, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N leaching losses among treatments ( $P < 0.05$ ), and different lowercase letters above bars represent significant differences for N leaching loss among treatments ( $P < 0.05$ )

图 6 2016—2018 年水肥管理(A,C)以及生物炭(B,D)对小麦/玉米轮作年氮素淋失量的影响

Fig. 6 Effects of water and nutrient management (A,C) and biochar application (B,D) on nitrogen leaching loss under winter wheat and summer maize rotation in 2016—2018

从图 5 可以看出,2016—2017 年各处理的累积渗漏量总体高于 2017—2018 年(OPT+B 处理除

外)。减少灌溉量处理(CP1-W、OPT)的累积渗漏液量均低于习惯水肥 1 处理(CP1),而减少施肥量

处理(CP1-F)的累积渗漏量高于 CP1 处理,但与 CP1 之间无显著差异。2016—2018 年,与 CP2 处理相比,CP2+B 处理的累积渗漏量均减少。2016—2018 年,在水分养分优化的基础上施用生物炭对累积渗漏量影响不一致,其中在 2016—2017 年,与 OPT 处理相比,OPT+B 处理的渗漏量无显著差异;在 2017—2018 年,与 OPT 处理相比,OPT+B 处理的渗漏量却显著增加。

由图 6 可知,2017—2018 年各处理氮素淋失量均低于 2016—2017 年,氮素淋失以 ON 最大,其次为  $\text{NO}_3^-$ -N,而  $\text{NH}_4^+$ -N 淋溶量很低。2016—2017 年,CP1-W 处理各个形态氮素的淋失量均与 CP1 处理差异不显著。CP1-F 处理  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量较 CP1 处理显著降低,降幅为 39.6%,其他形态氮素的淋失量均与 CP1 处理差异不显著。OPT 处理较 CP1 处理显著降低了  $\text{NO}_3^-$ -N、ON 和 TN 淋失量,其中  $\text{NO}_3^-$ -N 的降幅最高(73.2%)。与 CP2、OPT 处理相比,CP2+B、OPT+B 处理均显著降低了  $\text{NO}_3^-$ -N、ON 和 TN 的淋失量,其中 OPT+B 处理的降幅明显高于 CP2+B 处理。

由图 6 还可知,2017—2018 年,与 CP1 处理相比,CP1-F 与 OPT 处理均显著降低了 TN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 的淋失量。与第一个轮作年相似,第二个轮作年施用生物炭也显著降低了  $\text{NO}_3^-$ -N、ON 和 TN 的淋失量。

## 3 讨论

### 3.1 水肥管理和生物炭对作物产量的影响

本研究结果表明,在 2 个小麦/玉米轮作年中,与习惯水肥处理相比,在其基础上减水、减肥或水分养分同时优化均对作物总产量无显著影响,说明研究区农户水肥过量施用现象严重,这与以往的报道<sup>[1,14]</sup>一致。刘小利等<sup>[15]</sup>在关中西部灌区进行的限量节水灌溉试验结果也证明,减少一定灌溉量,小麦产量未明显降低。本试验中,与习惯水肥处理相比,养分优化及水分养分优化处理小麦产量均减少,今后应根据作物产量水平考虑氮平衡进一步调整施肥量。本试验还发现,在习惯水肥基础上施用生物炭显著提高了作物总产量,而在水分养分优化的基础上施用生物炭对作物总产量影响不显著。前人关于施用生物炭对作物产量影响的研究结果并不一致。程效义等<sup>[16]</sup>报道,生物炭与氮肥配施提高了玉米产量。而韩瑛祚等<sup>[17]</sup>研究表明,基于生物炭还田条件下磷肥减施并没有影响作物籽粒产量。Jeffery

等<sup>[18]</sup>报道,在粘粒含量较高的土壤中施用生物炭对作物无增产作用。而 Uzoma 等<sup>[19]</sup>报道,在沙质土壤中分别施用 15 和 20 t/hm<sup>2</sup> 生物炭,玉米产量分别提高了 150%和 98%。李帅霖等<sup>[20]</sup>研究表明,在不同氮水平下,施用 1%和 2%苹果枝生物炭对小麦产量无显著影响,而施用 4%和 6%生物炭小麦显著减产。施用生物炭增产主要与其改善了土壤结构、增加土壤保持水分和养分的能力、促进作物对养分的吸收有关<sup>[21]</sup>。本试验中,与水分养分优化处理(OPT)相比,在其基础上施用生物炭无显著增产作用,这可能是施用生物炭后增加了土壤中有机碳含量,提高了微生物活性,造成微生物与植物之间出现了养分竞争,影响了作物对养分的吸收,从而导致施用生物炭不仅没有增产,反而减产<sup>[22-23]</sup>。

### 3.2 水肥管理和生物炭对氮肥偏生产力及氮素淋失的影响

本研究结果表明,养分优化处理(CP1-F)以及水分养分优化处理(OPT)显著提高了氮肥偏生产力,且氮肥偏生产力处于最佳范围(40~70 kg/kg)<sup>[24]</sup>。施用生物炭对氮肥偏生产力的影响与其对产量的影响一致,即在习惯水肥基础上施用生物炭显著提高了氮肥偏生产力,而在水分养分优化的基础上施用生物炭对氮肥偏生产力无显著影响。韩晓日等<sup>[21]</sup>连续 3 年施用生物炭后发现,前两年(2013—2014 年)氮肥偏生产力显著提高,而第 3 年(2015 年)变化不明显。本研究在水分养分优化的基础上施用生物炭后对作物产量无显著影响,所以在施氮量相同的条件下氮肥偏生产力也无显著变化。

从本研究中 2 个轮作年的结果可知,与习惯水肥处理(CP1)相比,灌水优化(CP1-W)、养分优化(CP1-F)以及水分养分优化(OPT)处理 TN 淋失量均降低,其中水分养分优化处理(OPT)显著降低了 TN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 的淋失量。这可能是养分淋失总量由淋失液总体积和淋失液中养分浓度决定,施肥量和灌溉量减少后,累积渗漏液量随之减少,氮淋失的运输载体数量和浓度均减少,导致氮素淋失量减少。这与王欢元等<sup>[25]</sup>的研究报道一致。张玉铭等<sup>[26]</sup>通过水肥试验也证明了适当灌溉量和施肥量是减少  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失的关键。本试验还发现,无论渗漏水深度相同与否,施用生物炭均显著降低了 TN 淋失量,但 2016—2017 年与 2017—2018 年  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量有一定的差异。以往有关生物炭对氮素淋失的报道不一,如张千丰等<sup>[27]</sup>报道,在白浆土和黑土中添加

2%玉米棒芯生物炭,氮素淋失量分别显著减少12.0%和15.0%。Bruun等<sup>[28]</sup>研究报道,施用生物炭对氮素淋失量无显著影响,Beusch等<sup>[29]</sup>研究报道,施用生物炭提高了57%氮素淋失量。添加生物炭对土壤 $\text{NO}_3^-$ -N淋失影响的机制可能有两方面:一方面,生物炭具有高比表面积、孔隙度、极性和非极性表面吸附位点,可以吸收土壤中的 $\text{NO}_3^-$ -N,大幅度降低土壤氮素的淋失作用<sup>[30]</sup>;此外施用生物炭可以降低土壤体积质量,增加土壤孔隙度,提高土壤的持水能力,减少水分渗漏。另一方面,生物炭施入土壤后,增加了土壤中氧气的有效性,促进了土壤氮的矿化作用,从而增加了 $\text{NO}_3^-$ -N的淋失<sup>[31]</sup>。此外,有研究发现,不同土壤类型会影响生物炭对氮素淋失的效果<sup>[11]</sup>,例如有研究报道施用稻壳生物炭后,淋溶土中 $\text{NO}_3^-$ -N的淋失量显著大于变性土<sup>[30]</sup>,其原因可能是土壤本身的颗粒组成以及粘土矿物不同,进而影响生物炭的作用<sup>[32]</sup>。本试验发现,ON的淋失量不可忽视,这与其他研究者报道的结果相似。例如周志红等<sup>[11]</sup>在黑钙土和紫色土的模拟研究中发现,ON与 $\text{NO}_3^-$ -N淋失量占淋失TN量的比例相同,均接近50%;Jiao等<sup>[33]</sup>在作物收获后模拟年降雨量条件发现,耕层可溶性ON淋失量可达20~33 kg/hm<sup>2</sup>,与硝态氮淋失量相当。本试验中,ON淋失量高于 $\text{NO}_3^-$ -N,可能与估算方法有关,ON是基于TN与无机氮的差值计算所得,其间可能有很大的误差,造成ON结果偏高,今后还需要进一步调查分析。ON淋失量大可能与短时间内降雨量大或灌溉量多有关,导致可溶性ON大量损失<sup>[34]</sup>。而一些研究<sup>[35-36]</sup>只监测了 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NH}_4^+$ -N淋失量,没有考虑ON的淋失,这可能没有真正反映氮素的淋失量。

## 4 结 论

关中平原小麦/玉米轮作模式,灌水优化、养分优化以及水分养分优化对2016—2018年作物总产量均无显著影响,但是减少施肥量处理(CP1-F、OPT)在第二个轮作年(2017—2018年)显著降低了小麦产量,今后应根据作物产量水平进一步调整施肥量。减少施肥量处理(CP1-F、OPT)显著提高了氮肥偏生产力,明显降低了TN淋失量。在不同水肥条件下施用生物炭显著降低了TN淋失量,但施用生物炭对作物产量和氮肥偏生产力的影响不一致,具体机制还有待今后进一步研究。

## [参考文献]

- [1] 常艳丽,刘俊梅,李玉会,等. 陕西关中平原小麦/玉米轮作体系施肥现状调查与评价 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(8):51-61.  
Chang Y L, Liu J M, Li Y H, et al. Investigation and evaluation of fertilization under winter wheat and summer maize rotation system in Guanzhong Plain [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2014, 42(8): 51-61.
- [2] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development [J]. Science, 2009, 324(5934): 1519-1520.
- [3] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China-contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2/3): 117-127.
- [4] Tiessen H. Phosphorus loss from soil to water [J]. Soil Science, 1999, 164(4): 288-290.
- [5] 朱兆良. 中国土壤氮素研究 [J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.  
Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 778-783.
- [6] Xing G X, Zhu Z L. An assessment of N loss from agricultural fields to the environment in China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 57(1): 67-73.
- [7] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究 [J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 405-413.  
Liu H B, Li Z H, Zhang Y G, et al. Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rural areas of Beijing plain [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(3): 405-413.
- [8] 李卓瑞,韦高玲. 不同生物炭添加量对土壤中氮磷淋溶损失的影响 [J]. 生态环境学报, 2016, 25(2): 333-338.  
Li Z R, Wei G L. Effects of biochar with different additive amounts on the leaching loss of nitrogen and phosphorus in soils [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(2): 333-338.
- [9] 何绪生,张树清,余 雕,等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 16-25.  
He X S, Zhang S Q, She D, et al. Effects of biochar on soil and fertilizer and future research [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(15): 16-25.
- [10] 李江舟,张庆忠,娄翼来,等. 施用生物炭对云南烟区典型土壤养分淋失的影响 [J]. 农业资源与环境学报, 2014, 32(1): 48-53.  
Li J Z, Zhang Q Z, Lou Y L, et al. Effects of biochar addition on nutrient leaching loss of typical tobacco-planting soils in Yunnan province [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 32(1): 48-53.
- [11] 周志红,李心清,邢 英,等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用 [J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 278-284.  
Zhou Z H, Li X Q, Xing Y, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil [J]. Earth and Environment, 2011, 39(2): 278-284.

- [12] 胥志文,张林约,郭德龙,等.影响关中西部灌区夏玉米增产的主要因素及持续增产措施[J].农业科技通讯,2009(3):118-120.  
Xu Z W, Zhang L Y, Guo D L, et al. The main factors affecting summer maize yield increase in the west irrigated area of Guanzhong and the measures of continuous yield increase [J]. Agricultura Technology Newsletter, 2009(3):118-120.
- [13] 周建斌,李生秀.碱性过硫酸钾氧化法测定溶液中全氮含量氧化剂的选择[J].植物营养与肥科学报,1998,4(3):299-304.  
Zhou J B, Li S X. Choosing of a proper oxidizer for alkaline persulfate oxidation to determining total nitrogen in solution [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(3):299-304.
- [14] 赵护兵,王朝辉,高亚军.关中平原农户冬小麦养分资源投入的调查与分析[J].麦类作物学报,2010,30(6):1135-1139.  
Zhao H B, Wang Z H, Gao Y J. Investigation and analysis of winter wheat nutrients resource inputting in Guanzhong area [J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(6):1135-1139.
- [15] 刘小利,蔡铁,徐悦,等.关中西部灌区限量节水灌溉对冬小麦水分利用效率和产量的影响[J].节水灌溉,2018(1):24-29.  
Liu X L, Cai T, Xu Y, et al. Effect of limited water-saving irrigation on winter wheat water use efficiency and yield in Guanzhong irrigation district [J]. Water Saving Irrigation, 2018(1):24-29.
- [16] 程效义,孟军,黄玉威,等.生物炭对玉米根系生长和氮素吸收及产量的影响[J].沈阳农业大学学报,2016,47(2):218-223.  
Cheng X Y, Meng J, Huang Y W, et al. Effect of biochar on root growth, absorption of nitrogen and maize yield [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016, 47(2):218-223.
- [17] 韩瑛祚,娄春荣,王秀娟,等.生物炭还田条件下磷肥减施对玉米产量及养分利用的影响[J].玉米科学,2018,26(2):125-130.  
Han Y Z, Lou C R, Wang X J, et al. Effects of phosphorus fertilizer reduction on maize yield and nutrient utilization under biochar returning [J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(2):125-130.
- [18] Jeffery S, Verheijen F G A, van der Velde M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 144(1):175-187.
- [19] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition [J]. Soil Use and Management, 2011, 27(2):205-212.
- [20] 李帅霖,上官周平.生物炭对不同水氮条件下小麦产量的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(2):8-15.  
Li S L, Shanguan Z P. Effects of biochar on wheat yield under different water and nitrogen conditions [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(2):8-15.
- [21] 韩晓日,葛银凤,李娜,等.连续施用生物炭对土壤理化性质及氮肥利用率的影响[J].沈阳农业大学学报,2017,48(4):392-398.  
Han X R, Ge Y F, Li N, et al. Effects of continuous application of biochar on soil physico-chemical properties and nitrogen use efficiency [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(4):392-398.
- [22] 张军,周丹丹,吴敏,等.生物炭对土壤硝化反硝化微生物群落的影响研究进展[J].应用与环境生物学报,2018,24(5):993-999.  
Zhang J, Zhou D D, Wu M, et al. Advances in the study of the effects of biochar on soil nitrifying and denitrifying microbial communities [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2018, 24(5):993-999.
- [23] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol [J]. Plant and Soil, 2010, 333(1/2):117-128.
- [24] Dobermann A R. Nitrogen use efficiency-state of the art [M]. Frankfurt, Germany: IFA International Workshop on Enhanced Efficiency Fertilizers, 2005.
- [25] 王欢元,胡克林,李保国,等.不同管理模式下农田水氮利用效率及其环境效应[J].中国农业科学,2011,44(13):2701-2710.  
Wang H Y, Hu K L, Li B G, et al. Analysis of water and nitrogen use efficiencies and their environmental impact under different water and nitrogen management practices [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(13):2701-2710.
- [26] 张玉铭,张佳宝,胡春胜,等.水肥耦合对华北高产农区小麦-玉米产量和土壤硝态氮淋失风险的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(3):532-539.  
Zhang Y M, Zhang J B, Hu C S, et al. Effect of fertilization and irrigation on wheat-maize yield and soil nitrate nitrogen leaching in high agricultural yield region in North China Plain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3):532-539.
- [27] 张千丰,元野,刘居东,等.室内模拟:生物炭对白浆土和黑土中氮素淋溶的影响[J].土壤与作物,2013,2(2):88-96.  
Zhang Q F, Yuan Y, Liu J D, et al. Effects of a biochar on nitrogen leaching in an albic soil and black soil - A simulating lab experiment [J]. Soil of Crop, 2013, 2(2):88-96.
- [28] Bruun E W, Petersen C, Strobel B W, et al. Nitrogen and carbon leaching in repacked sandy soil with added fine particulate biochar [J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(4):1142.
- [29] Beusch C, Cierjacks A, Böhm J, et al. Biochar vs clay: comparison of their effects on nutrient retention of a tropical Arenosol [J]. Geoderma, 2019, 337:524-535.
- [30] Singh P B, Hatton J B, Sing B, et al. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils [J]. Journal of Environment Quality, 2010, 39(4):1224-1235.
- [31] Eykelbosh A J, Johnson M S, Couto E G, et al. Biochar decreases dissolved organic carbon but not nitrate leaching in re-

- lation to vinasse application in a Brazilian sugarcane soil [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 149: 9-16.
- [32] 张爱平,刘汝亮,高 霁,等. 生物炭对灌溉土氮素流失及水稻产量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(12): 2395-2403.  
Zhang A P, Liu R L, Gao Q, et al. Effects of biochar on nitrogen losses and rice yield in anthropogenic-alluvial soil irrigated with yellow river water [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12): 2395-2403.
- [33] Jiao Y, Hendershot W H, Whalen J K. Agricultural practices influence dissolved nutrients leaching through intact soil cores [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6): 2058-2068.
- [34] Kessel C V, Clough T, Groenigen J W V, et al. Dissolved organic nitrogen: an overlooked pathway of nitrogen loss from agricultural systems? [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(2): 393-401.
- [35] 张亦涛,王洪媛,刘宏斌,等. 基于大型渗漏池监测的褐潮土农田水、氮淋失特征 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49(1): 110-119.  
Zhang Y T, Wang H Y, Liu H B, et al. Characteristics of field water and nitrogen leaching in a haplic luvisol soil based on large lysimeter [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(1): 110-119.
- [36] 陈心想,何绪生,张 雯,等. 生物炭用量对模拟土柱氮素淋失和田间土壤水分参数的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(1): 110-114.  
Chen X X, He S X, Zhang W, et al. Effects of quantity of biochar on nitrogen leaching in simulated soil columns and soil moisture parameters in field [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(1): 110-114.

(上接第 74 页)

- [34] 周 全,王 宏,张迎信,等. 不同镉浓度处理下水稻植株镉含量变化及其镉调控相关基因表达分析 [J]. *中国水稻科学*, 2016, 30(4): 380-388.  
Zhou Q, Wang H, Zhang Y X, et al. The cadmium content in rice plants under different concentration of cadmium treatment changes and cadmium regulation of related gene expression analysis [J]. *Chinese Rice Science*, 2016, 30(4): 380-388.
- [35] 杨红霞,陈俊良,刘 崑. 镉对植物的毒害及植物解毒机制研究进展 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(2): 1-8.  
Yang H X, Chen J L, Liu W. Research progress of cadmium on plant toxicity and mechanism of plant detoxification [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(2): 1-8.
- [36] Dahmani-Muller H, van Oort F, Gelie B, et al. Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter [J]. *Environmental Pollution*, 2000, 109(2): 231-238.
- [37] Babula P, Klejdus B, Kovacic J, et al. Lanthanum rather than cadmium induces oxidative stress and metabolite changes in *Hypericum perforatum* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 286: 334-342.
- [38] Brooks R R, Lee J, Reeves R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1977, 7: 49-57.