

# 生物炭对旱地冬小麦产量、水氮利用及土壤养分的影响

桑丽智<sup>1,2,3</sup>, 周捷<sup>1,2,3</sup>, 吴锁智<sup>4</sup>, 王绪峰<sup>4</sup>, 沈玉芳<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 中国科学院水土保持与生态环境研究中心, 陕西杨凌 712100; 2. 中科院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;

3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为了解生物炭在旱地小麦栽培上的应用效果, 基于2012年开始的田间定位试验, 比较了0、10、30和50 t·hm<sup>-2</sup>四个生物炭施用水平(分别用B0、B1、B2和B3表示, 生物炭于2012年施入土壤, 此后不再施用)下旱地冬小麦产量、水氮吸收利用及土壤养分的差异。结果表明, 与不施用生物炭(B0)处理相比, B2和B3处理的冬小麦产量和成熟期干物质积累均显著增加, 其中产量增幅分别为8.1%和14.6%, 干物质增幅分别为16.3%和20.0%。高量施用生物炭(B2、B3)促进了冬小麦地上部及各器官的花后氮素积累, 其中茎、叶、籽粒的氮素积累量分别增加了11.3%~18.2%、4.9%~16.5%和4.2%~10.9%。施用生物炭显著降低了表观氮损失(降幅34.5%~38.5%), 提高了氮肥以及水分利用效率, 其中B3处理的氮肥利用效率和水分利用效率均最高, 分别为12.3 kg·kg<sup>-1</sup>和9.1 kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>。同时, 施用生物炭显著提高了土壤有机质、铵态氮、全氮、速效磷等土壤养分含量。本试验条件下, 30和50 t·hm<sup>-2</sup>施用生物炭能够有效促进旱地冬小麦干物质积累, 氮素吸收利用, 提高产量及氮肥和水分利用效率, 增加土壤养分含量, 有利于旱地小麦高产高效。

**关键词:** 生物炭; 冬小麦; 产量; 氮肥利用效率; 水分利用效率; 土壤养分

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)05-0679-09

## Effect of Biochar on Yield, Water and Nitrogen Utilization, and Soil Nutrients of Winter Wheat in Dryland

SANG Lizhi<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Jie<sup>1,2,3</sup>, WU Suozhi<sup>4</sup>, WANG Xufeng<sup>4</sup>, SHEN Yufang<sup>1,2,3,4</sup>

(1. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To elucidate the application effects of biochar in the cultivation of dryland wheat, a field experiment initiated in 2012 was conducted to compare the yield, water and nitrogen utilization, and soil nutrient differences of dryland winter wheat under the four biochar application levels of 0, 10, 30, and 50 t·hm<sup>-2</sup> (designated as B0, B1, B2, and B3, respectively, with biochar applied in 2012 and no further application thereafter). The results indicated that, compared to the control without biochar application (B0), B2 and B3 treatments showed a significant increase in the yield and dry matter accumulation at maturity of winter wheat, with yield increase rate of 4.9% and 11.3%, and dry matter increase rate of 16.3% and 20.0%, respectively. The application of high amounts of biochar (B2 and B3) promoted the accumulation of nitrogen after flowering in winter wheat, by significantly enhancing the accumulation of nitrogen in the aerial parts and various organs, with increase rates in nitrogen ac-

收稿日期: 2024-04-23 修回日期: 2024-05-08

基金项目: 国家重点研发计划专项(2021YFD1900700); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JM-103); 国家自然科学基金项目(41671307, 51279197)

第一作者 E-mail: 1574721076@qq.com(桑丽智)

通讯作者 E-mail: shenyufang11@163.com(沈玉芳)

cumulation in the stem, leaf, and grain by 11.3% to 18.2%, 4.9% to 16.5%, and 4.2% to 10.9%, respectively. The addition of biochar significantly reduced the apparent nitrogen loss (by 34.5% to 38.5%) and improved the nitrogen and water use efficiency, with the highest nitrogen use efficiency and water use efficiency observed in the B3 treatment, at 12.3 kg · kg<sup>-1</sup> and 9.1 t · hm<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>, respectively. Additionally, the application of biochar significantly increased the content of soil organic matter, ammonium nitrogen, total nitrogen, and available phosphorus. Under the conditions of this experiment, the application of biochar at 30 and 50 t · hm<sup>-2</sup> effectively promoted the dry matter accumulation, nitrogen absorption and utilization, increased yield and nitrogen and water use efficiency, as well as increased in soil nutrient content, which is beneficial for high yield and efficiency in dryland wheat cultivation.

**Keywords:** Biochar; Winter wheat; Yield; Nitrogen fertilizer use efficiency; Water use efficiency; Soil nutrients

农作物秸秆是农业生产中的重要生物质资源<sup>[1]</sup>,将其通过高温裂解制成生物炭还田,相较于秸秆直接还田,在作物增产、土壤性状改善等方面能起到更高效的作用,并且可以有效避免秸秆直接还田带来的负面影响,如病虫害加重<sup>[2]</sup>、后茬作物出苗率低<sup>[3]</sup>等问题。研究表明,生物炭施用能够提高土壤碳、氮含量<sup>[4]</sup>。生物炭具有较高的碳含量和较大的比表面积,其施用能够改善土壤总有机碳含量,稳定土壤碳库,促进良好土壤结构的形成,使土壤吸附更多有机分子和营养物质,增加化肥存留的可能,提高土壤对氮素及其他养分的吸附能力,进而培肥土壤地力<sup>[5-10]</sup>。因此,施用生物炭在作物增产、土壤培肥等方面的高效作用被广泛认可。研究发现,施用生物炭能够提高玉米吐丝前后和灌浆期的生长速率,促进干物质及氮、磷、钾等养分积累,增加产量<sup>[11-12]</sup>。然而,生物炭的增产培肥效应在不同种类土壤、作物以及不同生物炭种类间差异很大<sup>[13]</sup>,生物炭的施用量过高或过低也可能导致作物减产<sup>[14]</sup>。如,在不同施氮水平下生物炭施用对早稻产量均有影响<sup>[15]</sup>;而 Tammeorg 等<sup>[16]</sup>认为施用生物炭对作物产量没有影响。因此,生物炭在不同生态条件下的应用效果有待更进一步解析。

黄土高原是中国重要的旱作农业区,光照条件良好,土地广袤,有着很大的农业发展潜力。但该区域多年平均降水量不足 400 mm,整个冬、春、夏季干旱少雨,水分蒸发强烈,导致 80% 以上的耕层土壤水分损失,水分利用效率低下<sup>[17-19]</sup>。此外,该区土壤结构稳定性差,土壤有机质含量偏低。这些因素制约着黄土高原农业可持续发展。因此,黄土高原旱作农田区如何科学合理地改善

土壤结构、增加作物生产力、提高水分利用和化肥利用效率,减少农业面源污染是生态系统管理及农业经济可持续发展中迫切需要解决的重大问题。施用生物炭对该区域农田土壤的改良效应、旱作小麦生长和养分利用的影响机制目前尚不明确。本研究基于黄土高原典型旱作区的不同生物炭施用量长期田间定位试验,测定分析施用生物炭对旱地冬小麦生长、产量、水分和养分利用以及土壤质量的调控作用,以期为该区科学施用生物炭、促进作物生产和绿色农业可持续提供一定的理论依据和实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2020—2021 年冬小麦生长季,在中国科学院长武黄土高原农业生态试验站进行。该试验站位于陕西省咸阳市长武县洪家镇王东村(35°12'N,107°40'E),海拔 1 200 m,地处陕甘交界处、黄土高原中南部。该区域属于典型的暖温带半湿润大陆性季风气候区,年平均降水量 555 mm,其中 31% 的降水分布在冬小麦生长季(10 月至次年 6 月),年平均气温 9.1 °C,无霜期 171 d,地下水埋深 50~80 m,属于典型的旱作农业区。试验地土壤为黑垆土,0~20 cm 土壤中 pH 值 7.89,容重为 1.36 g · cm<sup>-3</sup>,有机质、全氮、有效磷、速效钾、硝态氮和铵态氮含量分别为 15.91 g · kg<sup>-1</sup>、0.99 g · kg<sup>-1</sup>、6.56 mg · kg<sup>-1</sup>、127.12 mg · kg<sup>-1</sup>、8.79 mg · kg<sup>-1</sup> 和 1.17 mg · kg<sup>-1</sup>,阳离子交换量(CEC)为 15.64 cmol · kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,设置 0、10、

30 和 50 t · hm<sup>-2</sup> 四个生物炭施用水平(分别用 B0、B1、B2 和 B3 表示),每个处理 3 次重复,小区面积 56 m<sup>2</sup>。生物炭于 2012 年 9 月一次性播撒于土壤表面,并通过翻耕与表层土混合均匀,此后不再施用生物炭。各处理均施用纯氮 120 kg · hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 60 kg · hm<sup>-2</sup> 和 K<sub>2</sub>O 54 kg · hm<sup>-2</sup>,氮磷钾肥分别采用尿素(含氮 46.4%)、过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)和硫酸钾(含 K<sub>2</sub>O 51%)均在 2020 年冬小麦播种前作为底肥全部施入。另外设置 3 个不施生物炭和氮肥小区,用于氮肥利用效率计算。供试冬小麦品种为长旱 58,于 9 月下旬播种,播种量 150 kg · hm<sup>-2</sup>,行距 20 cm。供试生物炭来自河南商丘三利新能源有限公司,采用连续竖式生物炭化炉生产,其原料是玉米秸秆,炭化温度 400 °C(pH 值 9.8,容重 0.4 g · cm<sup>3</sup>,比表面积 53.03 m<sup>2</sup> · g<sup>-1</sup>,全氮含量 9.77 g · kg<sup>-1</sup>,硝态氮含量 1.6 mg · kg<sup>-1</sup>,铵态氮含量 1.11 mg · kg<sup>-1</sup>)。冬小麦整个生育期内不灌水,按当地常规管理及时防治病虫害、除草等。所有处理田间管理措施一致。

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 土壤样品采集与土壤理化指标测定

分别于冬小麦播前、拔节期、扬花期和成熟期采集 0~200 cm 土层的土壤样品,每 20 cm 一层,采用烘干法测定土壤含水量。

于冬小麦成熟期,采用五点取样法采集每个小区 0~20 cm 土层土壤样品,过 2 mm 筛去除杂质后充分混匀,将样品分成两份,一部分保存到 4 °C 冰箱中用于测定土壤矿质氮和微生物量碳氮,另外一部分风干过筛后用于测定其他土壤理化指标。

土壤硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)含量采用 1 mol · L<sup>-1</sup> KCl 浸提,用流动分析仪测定;土壤微生物量碳(MBC)和土壤微生物量氮(MBN)含量用氯仿熏蒸直接浸提法测定;取新鲜土壤,按水土比 5:1 混匀,震荡抽滤后滤液用 TOC 仪测定土壤水溶性有机碳(DOC);土壤 pH 值用 pH 测定仪测定;土壤有机质(SOM)含量用重铬酸钾外加热法测定;土壤有效磷(AP)含量用 0.5 mol · L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 浸提,紫外分光光度计测定;土壤全磷(TP)含量用 HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消解-钼锑抗显色后分光光度计测定;土壤溶解性总氮(DTN)含量用凯氏定氮法测定<sup>[20-22]</sup>。

#### 1.3.2 干物质积累量测定

分别于冬小麦扬花期、灌浆期和成熟期,在每个小区随机选取 1 行(避开边际 5 行)40 cm 长样段,采集植株地上部,并按营养器官分开,于 105 °C 杀青 30 min,75 °C 烘干至恒重,称重。

#### 1.3.3 植株氮含量测定

将烘干植株样品粉碎后,用浓硫酸-过氧化氢(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)消煮,半微量凯氏定氮法测定全氮含量,根据不同部位生物量和氮含量计算各部位氮吸收及转运量。

#### 1.3.4 产量测定

于冬小麦成熟期,避开边际 5 行,采集各小区中间 1 m<sup>2</sup> 区域植株,调查穗数和穗粒数,然后脱粒风干后称重,并测定千粒重。

### 1.4 其他指标计算

#### 1.4.1 土壤贮水量及水分利用效率计算

$$SWS = WC \times BD \times D \quad (1)$$

$$ET = Pr + \Delta SWS \quad (2)$$

$$WUE = Y / ET \quad (3)$$

式中,SWS 为 0~200 cm 土壤贮水量(mm);WC 为土壤含水量(%);BD 为土层容重;D 为土层深度(mm);ET 为作物耗水量(mm);Pr 为冬小麦生育期降水量(mm);ΔSWS 为 0~200 cm 土层在生育期内土壤贮水量变化;WUE 为水分利用效率(kg · hm<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>);Y 为冬小麦籽粒产量(kg · hm<sup>-2</sup>)。

#### 1.4.2 植株氮素积累与转运参数计算

$$\text{氮素积累量} = \text{地上部干重} \times \text{各器官氮含量} \quad (4)$$

$$\text{氮素转运量} = \text{扬花期营养器官氮素积累量} - \text{成熟期营养器官氮素积累量} \quad (5)$$

$$\text{氮素转运效率} = \text{营养器官氮素转运量} / \text{扬花期营养器官氮素积累量} \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{氮素转运对籽粒氮素的贡献率} = \text{营养器官氮素转运量} / \text{成熟期氮素积累量} \times 100\% \quad (7)$$

$$\text{氮收获指数} = \text{成熟期籽粒氮素积累量} / \text{成熟期地上部氮素积累量} \times 100\% \quad (8)$$

#### 1.4.3 氮肥利用效率计算

$$\text{氮肥农学效率} = (\text{施氮处理籽粒产量} - \text{不施氮处理籽粒产量}) / \text{施氮量} \quad (9)$$

$$\text{氮肥偏生产力} = \text{籽粒产量} / \text{施氮量} \quad (10)$$

#### 1.4.4 土壤氮素平衡计算

$$\text{剖面硝态氮残留量} = \text{土层深度} \times \text{土壤容重} \times \text{硝态氮含量} \times 10 / 100 \quad (11)$$

表观氮损失 = 播前 0~100 cm 土层初始硝态氮总量 + 氮肥投入量 + 表观氮素矿化量 - 施氮处理植株地上部氮素累积量 - 收获期 0~100 cm 土层硝态氮残留量 (12)

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 19.0 软件进行试验数据整理和统计分析,在 0.05 水平下采用最小显著差数法(LSD)对各指标的处理间差异进行显著性比较;使用 Excel 和 Origin 2021 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 生物炭对旱地冬小麦产量和干物质积累的影响

2.1.1 生物炭对旱地冬小麦产量及其构成的影响

施用生物炭可提高旱地冬小麦产量(表 1)。与不施用生物炭(B0)处理相比, B2 和 B3 处理的小麦产量显著增加,增幅分别为 8.1%和 14.6%,

且 B2 与 B3 处理间差异也显著。从产量构成因素来看,增产的主要原因是穗数和千粒重的增加, B2 和 B3 处理的穗数和千粒重均显著高于 B0 处理。不同处理间穗粒数无显著差异。与 B0 处理相比, B1、B2、B3 处理的收获指数均显著降低,而 B1、B2、B3 处理间无显著差异。

2.1.2 生物炭对冬小麦不同器官干物质积累量的影响

整体来看,施用生物炭提高了冬小麦不同时期干物质积累量,但提升效果受生物炭施用量以及冬小麦生育期的影响(表 2)。灌浆期,施用生物炭后,冬小麦茎秆、叶片、颖壳和籽粒干物质积累量分别较 B0 处理提高了 9.1%~28.8%、8.3%~33.3%、6.3%~18.8%和 7.1%~14.3%,其中 B3 处理提升效果最显著。成熟期, B1、B2、B3 处理下冬小麦总干物质积累量分别较 B0 处理分别提高了 8.5%、16.3%和 20.0%,且各器官干物质积累量均显著高于 B0 处理。

表 1 生物炭对冬小麦籽粒产量和产量构成的影响

Table 1 Influence of biochar on grain yield and yield components of winter wheat

处理 Treatment	产量 Yield/(kg · hm <sup>-2</sup> )	穗数 Ear number/ (×10 <sup>4</sup> · hm <sup>-2</sup> )	穗粒数 Kernel number per ear	千粒重 1 000-kernel weight/g	收获指数 Harvest index/%
B0	3 398.2c	471.5d	29.5a	31.1b	24.1a
B1	3 493.3c	467.0c	29.3a	34.2a	22.8b
B2	3 669.0b	491.2b	29.6a	33.2a	22.6b
B3	3 894.4a	496.7b	30.2a	34.2a	23.1b

同列数值后不同小写字母代表处理间差异显著(P<0.05)。表 2~表 4 同。

Different lowercase letters after the values within the same columns indicate significant differences among the treatments(P<0.05). The same in tables 2-4.

表 2 生物炭对冬小麦干物质积累量的影响

Table 2 Influence of biochar on the dry matter accumulation of winter wheat

生育期 Growth stage	处理 Treatment	茎秆 Stem	叶片 Leaf	颖壳 Glume	籽粒 Grain	总和 Total
开花期 Flowering	B0	6.3a	3.4a	1.0a		10.7b
	B1	6.3a	3.5a	1.0a		10.8b
	B2	6.5a	3.6a	1.1a		11.2a
	B3	6.6a	3.4a	1.1a		11.1a
灌浆期 Filling	B0	6.6c	2.4c	1.6b	1.4a	12.0d
	B1	7.2b	2.6b	1.7b	1.5a	13.0c
	B2	7.5b	2.9b	1.9a	1.6a	13.9b
	B3	8.5a	3.2a	1.9a	1.6a	15.1a
成熟期 Maturity	B0	5.5b	2.6b	1.9b	4.0b	14.1c
	B1	5.9b	2.9a	2.2a	4.3a	15.3b
	B2	6.7a	3.1a	2.3a	4.4a	16.4a
	B3	6.8a	3.4a	2.2a	4.6a	16.9a

## 2.2 生物炭对冬小麦氮素吸收和分配的影响

### 2.2.1 生物炭对冬小麦地上部氮素积累的影响

与 B0 处理相比, 高量施用生物炭(B2、B3)显著提高了冬小麦地上部的氮素积累, 增幅分别为 8.0%和 7.8%, 而 B1 处理减少了 3.1%(表 3)。这主要归因于 B2 和 B3 处理下冬小麦茎秆、叶片和籽粒的氮素积累量均较 B0 处理显著增加, 其中茎的积累量分别增加了 11.3%和 18.2%, 叶片的积累量分别增加了 4.9%和 16.5%, 籽粒的积累量分别增加了 4.2%和 10.9%。颖壳氮素积累量在不同处理间差异不显著。总体而言适量施用生物炭能有效促进冬小麦对氮素的吸收和利用。

### 2.2.2 生物炭对冬小麦氮素转运特征的影响

冬小麦花前的氮素积累与转运及花后氮素积累均明显受到生物炭的影响(表 4)。与 B0 处理相比, B1 处理显著增加了花前氮素积累量(增幅 8.6%), 显著降低了花后氮素积累量(降幅 49.7%); 而 B3 和 B2 处理的花前氮素积累量与 B0 处理差异均不显著, 但均显著增加了花后氮素积累量, 增幅分别为 29.1%和 48.0%。与 B0 处理相比, B1 处理促进了花前营养器官贮存氮素在花后向籽粒的转运, 提高了氮素转运量和转运效率, 而 B2 和 B3 处理的氮素转运量和转运效率不同程度下降, 其中 B3 处理变化显著; 但 B2 和 B3 处理显著促进了花后氮素的吸收和积累, 提高了植株花后吸

收的氮素对籽粒氮素的贡献率。不同处理间氮收获指数无显著差异。

### 2.2.3 生物炭对冬小麦水氮利用效率的影响

施用生物炭可减少麦田表观氮损失量, 提高氮肥和水分利用效率(图 1)。相较于 B0 处理, B1、B2、B3 处理的表观氮损失均显著下降, 降幅分别为 36.3%、38.5%和 34.5%, 但 B1~B3 处理间差异不显著。施用生物炭后, 冬小麦氮肥偏生产力较 B0 处理增加 4.8%~11.3%, 其中 B2 和 B3 处理变化显著。B2 和 B3 处理均显著提高了氮肥农学效率, 增幅分别为 15.6%和 36.8%。B3 处理的水分利用效率较 B0 处理显著增加, 而 B1 和 B2 处理影响不明显。

## 2.3 不同量生物炭添加对土壤养分的影响

生物炭显著影响旱作麦田土壤容重(BD)土壤有机质(SOM)、土壤全氮(TN)、可溶性有机碳(DOC)、土壤铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、土壤速效磷(AP)、土壤速效钾(AK)含量(表 5)。与 B0 处理相比, B2 和 B3 处理的土壤容重均显著降低, 而 B1、B0 处理间差异不显著; SOM 含量随着生物炭施用量的增加而增加, B1、B2 和 B3 处理较 B0 处理的增幅分别为 10.2%、27.6%和 34.7%; B2 和 B3 处理的土壤 TN 含量均增加了 12.7%, 变化均显著; B2 和 B3 处理的土壤 DOC 含量均显著增加, 增幅分别为 14.6%和 9.0%; B1 和 B2 处理土壤

表 3 生物炭对冬小麦地上部各器官氮素积累量的影响

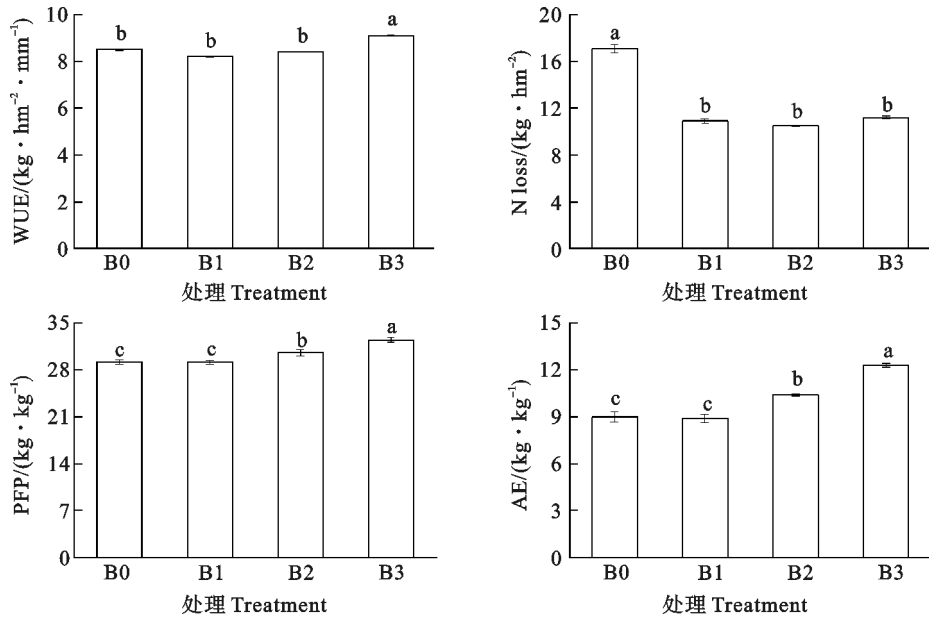
Table 3 Influence of biochar on nitrogen accumulation in different organs of winter wheat shoot kg · hm<sup>-2</sup>

处理 Treatment	茎秆 Stem	叶片 Leaf	颖壳 Glume	籽粒 Seed	地上部 Shoot
B0	34.5b	24.9b	20.9a	97.7bc	178.0b
B1	34.0b	24.2b	20.3a	93.9c	172.4b
B2	38.4a	26.0b	20.3a	108.3a	193.0a
B3	40.8a	29.0a	20.4a	101.8b	192.0a

表 4 生物炭对小麦氮素积累和转运的影响

Table 4 Influence of biochar on nitrogen accumulation and transportation of wheat

处理 Treatment	氮素积累量 N accumulation/(kg · hm <sup>-2</sup> )		花前氮素 Pre-anthesis N			氮收获指数 Nitrogen harvest index/%
	花前 Pre-anthesis	花后 Post-anthesis	转运量 Transfer amount/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	转运效率 Transfer efficiency/%	贡献率 Contribution rate/%	
B0	137.0bc	41.0c	56.7b	41.4b	58.0b	54.9a
B1	148.7a	20.6d	73.2a	49.2a	61.3a	55.4a
B2	139.2b	53.0b	55.4b	39.8b	56.2b	56.4a
B3	131.2c	60.7a	41.0c	31.3c	56.3b	53.0a



WUE:水分利用效率; N loss:表观氮损失量; PFP:氮肥偏生产力; AE:氮肥农学效率。图柱上不同小写字母代表处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

WUE: Water use efficiency; N loss: Apparent nitrogen loss; PFP: Nitrogen fertilizer partial factor productivity; AE: Nitrogen fertilizer agronomic efficiency. Different lowercase letters above the columns indicate significant differences among the treatments ( $P < 0.05$ ).

图 1 生物炭对冬小麦水分和氮肥利用的影响

Fig. 1 Influence of biochar on water and nitrogen fertilizer utilization in winter wheat

表 5 生物炭对土壤养分的影响

Table 5 Influence of biochar on soil nutrients

指标 Index	B0	B1	B2	B3
BD/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.29a	1.28a	1.22b	1.22b
pH	8.25a	8.22a	8.19b	8.25a
SOM/(g·kg <sup>-1</sup> )	9.8d	10.8c	12.5b	13.2a
TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.02b	1.04b	1.15a	1.15a
TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.85b	0.87ab	0.87ab	0.89a
DOC/(mg·kg <sup>-1</sup> )	32.3c	33.1bc	37.0a	35.2ab
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/(mg·kg <sup>-1</sup> )	3.2a	3.0a	3.2a	2.9a
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/(mg·kg <sup>-1</sup> )	3.2c	3.7ab	4.1a	3.4bc
AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	8.5b	10.8a	12.2a	10.6a
AK/(mg·kg <sup>-1</sup> )	446.0b	456.0b	480.7b	527.3a
MBC/(mg·kg <sup>-1</sup> )	218.8a	195.1a	202.5a	190.3a
MBN/(mg·kg <sup>-1</sup> )	29.4ab	25.8b	31.0a	30.8a

BD:容重;SOM:有机质;TN:全氮;TP:全磷;DOC:可溶性有机碳;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:铵态氮;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N:硝态氮;AP:土壤速效磷;AK:土壤速效钾;MBC:微生物量碳;MBN:土壤微生物量氮。同行数据后不同字母表示处理间差异在 0.05 水平上显著。

BD: Bulk density; SOM: Organic matter; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; DOC: Soluble organic carbon; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: Ammonium nitrogen; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N: Nitrate nitrogen; AP: Soil available phosphorus; AK: Soil available potassium; MBC: Microbial biomass carbon; MBN: Soil microbial biomass nitrogen. Different letters after the values in the same rows indicate significant difference among the treatments at 0.05 level.

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量分别增加 15.6%和 28.1%;B1、B2 和 B3 处理土壤 AP 含量分别增加了 27.1%、43.5%和 24.7%;B2 和 B3 处理的土壤 AK 含量分别增加了 7.8%和 18.2%。不同生物炭处理间土壤 pH

值、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量和 MBC 含量差异均不显著;B1 和 B3 处理的 MBC 含量均显著降低,降幅分别为 10.8%和 13%;B1 处理的 MBN 含量显著降低,降幅 12.2%。

### 3 讨论

#### 3.1 生物炭对小麦产量和干物质累积的影响

作物秸秆通过高温裂解,将会聚集大量的碳,从而形成一种密度低、具有较大比表面积以及高孔隙度的固体有机材料即生物炭<sup>[23]</sup>。由于这些特性,生物炭可用于土壤理化性质的改善,提高土壤养分和水分的利用效率,进而为作物生长提供更适宜的生长环境。Jeffer等<sup>[24]</sup>通过Meta分析方法得出,生物炭对土壤改良作用与增加作物产量之间具有良好的相关性,可使作物平均增产10%。但有研究发现,施用生物炭对作物产量和生物量没有显著的影响<sup>[25-26]</sup>。本研究结果表明,施用生物炭增加了旱地小麦产量,且产量随着生物炭施用量的提高呈增加趋势,当施用 $50\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭时产量和收获指数均达到最高,但由于本试验当年3-4月份降雨匮乏以及越冬期和拔节期冻害的影响,小麦产量整体低于往年。这也说明生物炭在降水较少、土壤水分供应不足的情况下对旱地冬小麦可以起到显著的增产作用。在水稻上的研究结果也显示,在水分亏缺的情况下,产量随着生物炭施用量的加大呈现出增加趋势<sup>[27]</sup>。这主要因为生物炭有着良好的保水能力,在降雨匮乏的情况下,施用生物炭能够在小麦关键生育时期固持更多土壤水分,保障植株生长发育,促进干物质积累,从而提高最终的籽粒产量。从前人的研究结果来看,生物炭的增产作用与土地条件、作物种类以及施用量和年限有关。例如,在盆栽试验中, $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭处理的水稻籽粒产量比对照高 $7.2\%\sim 8.1\%$ ,而 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭处理产量比对照低 $9.3\%\sim 10.4\%$ <sup>[28]</sup>;4年研究发现,生物炭施用在第一年对玉米产量没有影响,而后显著增产<sup>[29]</sup>;室内试验表明,施用生物炭可以提高大豆产量,但降低了小麦和萝卜产量<sup>[30]</sup>。

#### 3.2 生物炭对小麦氮素吸收和分配的影响

本研究结果表明,生物炭施用可促进冬小麦吸收氮素,但也有研究提出施用生物炭对作物养分吸收的影响不显著<sup>[25,31]</sup>。本研究中, $30$ 和 $50\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物炭施用量增加了小麦地上部氮素总累积量和花后氮素累积量,减少了花前氮素累积量、氮素转运量及其对籽粒氮素的贡献率。施用生物炭促进小麦养分吸收的原因可能是生物炭较大的比表面积能够有效吸附速效养分,为微生物群落生存提供了良好的环境,进而促进了冬小麦

的生长和养分的吸收<sup>[32]</sup>。另外,生物炭处理显著减少了土壤表观氮损失,提高了氮肥偏生产力。这与姜佰文等<sup>[33]</sup>在黑土中施入 $2.5$ 和 $5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭后玉米氮肥偏生产力分别提高了 $5.1\%$ 和 $9.6\%$ 的研究结果一致;解文孝等<sup>[34]</sup>的研究也表明,在棕壤土中施入 $6.3\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭后水稻氮肥偏生产力显著提高。生物炭具有丰富的孔隙结构和巨大的比表面积,其施用可减少表层土壤氮素流失,增强氮固存,并且能够有效吸附活性氮,使土壤养分缓慢的释放,有利于作物对氮素的吸收,从而提高了氮肥利用效率<sup>[35]</sup>。

#### 3.3 生物炭对土壤养分的影响

作物养分吸收利用、产量形成等与土壤养分相互转换有着密切联系。研究表明,施用生物炭可以提高土壤养分含量<sup>[36-37]</sup>。本研究结果也显示,施用生物炭提高了土壤有机质、全磷、水溶性有机氮和铵态氮含量,其中施用 $50\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭提高了土壤全氮和微生物量氮含量。本研究采用的生物炭是由玉米秸秆炭化而来,施入土壤中可以补充作物生长发育所需的土壤养分,同时还补充了一部分矿质元素,促进有机质含量的增加。其次,由于生物炭结构稳定,生物炭中所含有的有机质施入土壤后相对稳定,不易被吸收利用。通常,土壤全氮含量与土壤有机质含量呈正比,有机质的积累与分解速率影响土壤氮含量。土壤中一系列的生化过程均以碳、氮循环为主,而碳氮循环主要推动力又来源于土壤微生物<sup>[38]</sup>。本研究发现,施用生物炭降低了土壤容重,提高了土壤水分含量,良好的水分条件、土壤通透性以及生物炭本身具有的多孔结构为土壤微生物生存和繁衍提供了良好的生态环境,有利于土壤中养分的分解转换过程,从而提高土壤中的养分含量<sup>[39]</sup>。

### 4 结论

施用生物炭提高了旱地冬小麦产量和氮吸收利用率,但提升效果受到施用量的影响。与不施用生物炭相比,施用高量生物炭( $30$ 和 $50\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )显著增加冬小麦干物质积累以及产量,提高了地上部氮素积累以及花后氮素累积量,减少了表观氮损失量,提高了氮肥偏生产力和农学效率。施用 $50\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭时,冬小麦氮肥利用效率和水分利用效率最高。

施用高量生物炭显著增加了土壤有机质、全氮、全磷、水溶性有机碳、铵态氮、有效磷和微生物

量氮含量,提高了土壤肥力,可保障旱作区冬小麦增产稳产。

#### 参考文献:

- [1] 宋大利,侯胜鹏,王秀斌,等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(1):1.  
SONG D L, HOU S P, WANG X B, *et al.* Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1):1.
- [2] 章力干,石心怡,王玉宝,等. 秸秆还田对中国主要粮食作物病害影响的Meta分析[J]. 农业工程学报,2022,38(21):93.  
ZHANG L G, SHI X Y, WANG Y B, *et al.* Meta-analysis for the impacts of straw return on the diseases of major grain crops in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(21):93.
- [3] 靳海洋,蒋向,杨习文,等. 作物秸秆直接还田思考与秸秆多途径利用商榷[J]. 中国农学通报,2016,32(9):142.  
JIN H Y, JIANG X, YANG X W, *et al.* Exploration of returning crop straw to the field directly and discussion on multi-way utilization of straws [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(9):142.
- [4] 曾爱,廖允成,张俊丽,等. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2013,32(5):1009.  
ZENG A, LIAO Y C, ZHANG J L, *et al.* Effects of biochar on soil moisture, organic carbon and available nutrient contents in manural loessial soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5):1009.
- [5] ZHAO W, WU K, WU Y, *et al.* Effects of biochar amendment on greenhouse tomato quality, nutrient uptake and use efficiency under various irrigation and fertilization regimes [J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 337:113441.
- [6] CUI T, LI Z, WANG S. Effects of *in situ* straw decomposition on composition of humus and structure of humic acid at different soil depths [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(10):2391.
- [7] ZHANG J, WEI Y, LIU J, *et al.* Effects of maize straw and its biochar application on organic and humic carbon in water-stable aggregates of a Mollisol in Northeast China: A five-year field experiment [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 190:1.
- [8] ZHANG J J, CAI H, ZHANG C, *et al.* First characterization of humic-like substances isolated from maize straw biochar [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2015, 24(5A):1815.
- [9] AHMAD M, LEE S S, LIM J E, *et al.* Speciation and phytoavailability of lead and antimony in a small arms range soil amended with mussel shell, cow bone and biochar; EXAFS spectroscopy and chemical extractions [J]. *Chemosphere*, 2014, 95:433.
- [10] DING Y, LIU Y X, WU W X, *et al.* Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns [J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2010, 213(1):47.
- [11] 肖茜. 生物炭对旱作春玉米农田水氮运移、利用及产量形成的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.  
XIAO (Q/X). Effects of biochar on water and nitrogen transport, utilization and yield formation of spring maize farmland in dry farming [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [12] 刘美玲,刘悦,陈婷婷,等. 水稻秸秆生物炭对江汉平原麦区小麦养分吸收和产量的影响[J]. 中国农学通报,2021,37(15):7.  
LIU M L, LIU Y, CHEN T T, *et al.* Rice straw biochar: Effects on nutrient absorption and yield of wheat in Jianghan Plain [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(15):7.
- [13] 刘卉,周清明,黎娟,等. 生物炭施用量对土壤改良及烤烟生长的影响[J]. 核农学报,2016,30(7):1411.  
LIU H, ZHOU Q M, LI J, *et al.* Effect of biochar application amount on the soil improvement and the growth of flue-cured tobacco [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(7):1411.
- [14] 王月玲,耿增超,尚杰,等. 施用生物炭后壤土土壤有机碳、氮及碳库管理指数的变化[J]. 农业环境科学学报,2016,35(3):532.  
WANG Y L, GENG Z C, SHANG J, *et al.* Soil organic carbon and nitrogen and carbon pool management index in Loess soil as influenced by biochar [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3):532.
- [15] 范龙,单双吕,张恒栋,等. 生物炭施用对早稻产量形成的影响[J]. 中国稻米,2017,23(4):107.  
FAN L, SHAN S L, ZHANG H D, *et al.* Effects of biochar addition on yield formation in early rice [J]. *China Rice*, 2017, 23(4):107.
- [16] TAMMEORG P, SIMOJOKI A, MÄKELÄ P, *et al.* Erratum to: Biochar application to a fertile sandy clay loam in boreal conditions: Effects on soil properties and yield formation of wheat, turnip rape and faba bean [J]. *Plant and Soil*, 2014, 379(1):389.
- [17] 唐靓. 覆盖和施氮对旱作春玉米农田水氮迁移利用和生产力的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.  
TANG L. Effects of mulching and nitrogen application on water and nitrogen migration and utilization and productivity of dry spring maize farmland [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [18] QU T, XIA C, HUANG L. Analysis of precipitation time characteristics in key water demand period of main crops in Western Guanzhong [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 780(6):062034.
- [19] 林文. 地膜和秸秆覆盖对黄土高原旱作农田土壤水库与作物产量的影响[D]. 北京:中国科学院大学,2017.  
LIN W. Effects of plastic film and straw mulching on soil reservoir and crop yield of dry farmland in Loess Plateau [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [20] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil*

- Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703.
- [21] WU J, JOERGENSEN R G, POMMERENING B, *et al.* Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction—An automated procedure [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(8): 1167.
- [22] 朱利霞. 不同调控措施对旱作农田土壤碳氮及微生物学特性的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
- ZHU L X. Effects of different control measures on soil carbon and nitrogen and microbial characteristics in dry farmland [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [23] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 509.
- SHANG J, GENG Z C, CHEN X X, *et al.* Effects of biochar on soil organic carbon and nitrogen and their fractions in a rainfed farmland [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3): 509.
- [24] 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.
- [25] 陈心想. 生物炭对土壤性质、作物产量及养分吸收的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- CHEN X X. Effects of biochar on soil properties, crop yield and nutrient absorption [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014.
- [26] 钟雪梅, 朱义年, 刘杰, 等. 竹炭包膜对肥料氮淋溶和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(S1): 154.
- ZHONG X M, ZHU Y N, LIU J, *et al.* Influence of bamboo-charcoal coating on N leaching and effectiveness of fertilizers [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(S1): 154.
- [27] 朱士江, 叶晓思, 王斌, 等. 不同水分调控、生物炭配比对水稻产量与水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2018(1): 1.
- ZHU S J, YE X S, WANG B, *et al.* Effects of water-biochar coupling on rice yield and water use efficiency [J]. *Water Saving Irrigation*, 2018(1): 1.
- [28] 张学艳, 曹莹, 孟军, 等. 生物炭对镉胁迫下水稻生长及光合产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(5): 97.
- ZHANG X Y, CAO Y, MENG J, *et al.* Effects of biochar on rice growth and photosynthetic yield under cadmium stress [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(5): 97.
- [29] 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): 117.
- [30] VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, *et al.* Influence of biochars on flux of N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> from ferrosol [J]. *Soil Research*, 2010, 48(7): 555.
- [31] 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.
- 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.
- [32] 康日峰, 张乃明, 史静, 等. 生物炭基肥料对小麦生长、养分吸收及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(6): 33.
- KANG R F, ZHANG N M, SHI J, *et al.* Effects of biochar-based fertilizer on soil fertility, wheat growth and nutrient absorption [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(6): 33.
- [33] 姜佰文, 许欣桐, 张迪, 等. 减量施肥条件下生物炭与耕作方式对玉米氮吸收及产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(10): 23.
- JIANG B W, XU X T, ZHANG D, *et al.* Effect of biochar and tillage on nitrogen absorption and yield of maize under reduced fertilizer [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2019, 50(10): 23.
- [34] 解文孝, 李建国, 刘军, 等. 不同土壤背景下秸秆还田量对水稻产量构成及氮吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 248.
- XIE W X, LI J G, LIU J, *et al.* Effects of straw returning amounts on rice yield components and N uptake of different soil background [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(2): 248.
- [35] LEHMANN J. Bio-energy in the black [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5: 381.
- [36] LUO S, WANG S, YAO P, *et al.* Soil microbial communities under film mulching and N fertilization in semiarid farmland [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2019, 114(2): 157.
- [37] WANG D, LAN Y, CHEN W, *et al.* The six-year biochar retention interacted with fertilizer addition alters the soil organic nitrogen supply capacity in bulk and rhizosphere soil [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 338: 117757.
- [38] 孙海妮, 王仕稳, 李雨霖, 等. 生物炭施用量对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 159.
- SUN H N, WANG S W, LI Y L, *et al.* Effects of biochar levels on winter wheat yield and water-use efficiency in Loess Plateau [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(6): 159.
- [39] MANDAL S, PU S, ADHIKARI S, *et al.* Progress and future prospects in biochar composites: Application and reflection in the soil environment [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2021, 51(3): 219.