

耕作方式和生物炭用量对冬小麦产量、土壤氮碳的影响

陈海情^{1,2}, 张凯³, 黄超², 王鹏飞⁴, 孟晔², 安佳慧⁴,
刘栩辰², 马守田², 王兴鹏¹, 刘战东²

(1. 塔里木大学水利与建筑工程学院, 新疆阿拉尔 843300; 2. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南新乡 453002;
3. 河南农业大学烟草学院, 河南郑州 450002; 4. 河南师范大学生命科学学院, 河南新乡 453000)

摘要: 为探讨旋耕和深松条件下生物炭施用量对冬小麦产量和土壤碳氮的影响, 探寻冬小麦最佳耕作方式和生物炭施用量组合, 2021—2023 年通过二因素随机区组试验, 设置旋耕和深松两种耕作方式, 以及 0、4.5 和 9 t·hm⁻² 三个生物炭施用水平, 比较分析了不同处理间冬小麦产量和土壤碳氮的差异。结果表明, 耕作方式和生物炭施用量对麦田土壤硝态氮残留量、总碳含量、全氮含量和微生物量碳、氮含量均有显著影响, 两者的交互作用对土壤全氮含量和微生物量碳含量的影响分别在 2022 和 2023 年均达到显著水平。在 0~20 cm 土层, 与旋耕相比, 深松下土壤总碳含量和全氮含量分别提高 13.9% 和 29.5%, 同时深松对 20~30 cm 土层土壤微生物量碳、氮含量均有促进作用, 使土壤硝态氮残留量显著降低 8.5%。与不施生物炭相比, 施用生物炭对 0~30 cm 土层土壤微生物量碳、氮含量均有促进作用, 并减少 0~50 cm 土层土壤硝态氮残留量, 使总碳和全氮含量增加 22.4% 和 6.7%。在 2022 和 2023 年, 深松下冬小麦产量较旋耕均显著增加, 增幅分别为 15.8% 和 12.0%, 其中 SSB2 处理产量均最高。综合分析表明, 深松+9 t·hm⁻² 生物炭效果最好, 是高产和提高土壤肥力的耕作与生物炭施用组合, 可以应用推广。

关键词: 施用生物炭; 耕作方式; 冬小麦; 产量; 土壤碳; 土壤氮

中图分类号: S278

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)02-0224-10

Effects of Tillage Methods and Biochar Application Rates on Yield of Winter Wheat and Nitrogen and Carbon Status in Soil

CHEN Haiqing^{1,2}, ZHANG Kai³, HUANG Chao², WANG Pengfei⁴, MENG Ye²,
AN Jiahui⁴, LIU Xuchen², MA Shoutian², WANG Xingpeng¹, LIU Zhandong²

(1. College of Water Resource and Architecture Engineering, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China; 2. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002, China; 3. College of Tobacco, Henan Agricultural, Zhengzhou, Henan 450002, China; 4. College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453000, China)

Abstract: To explore the effects of biochar application rates under rotary tillage and deep loosening conditions on winter wheat yield and carbon and nitrogen status in soil, a two-factor randomized block experiment was set up by establishing two tillage methods (rotary tillage and deep loosening) and three biochar application rates of 0, 4.5, and 9 t·hm⁻². The differences in winter wheat yield and soil carbon and nitrogen were comparatively analyzed among different treatments. The results indicated that both tillage method and biochar application rate had significant impact on soil nitrate nitrogen residue, total carbon, total nitrogen, and microbial biomass carbon and nitrogen content in wheat field. The interaction between the two factors reached significant levels for soil total nitrogen and mi-

收稿日期: 2024-01-27

修回日期: 2024-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(32101851); 国家科技基础资源调查专项(2022FY101600); 中国农业科学院科技创新工程项目(ASTIP); 河南省重点研发与推广专项(222102110163)

第一作者 E-mail: chqboss@163.com(陈海情)

通讯作者 E-mail: liuzhandong@caas.cn(刘战东); 13999068354@163.com(王兴鹏)

crobial carbon in both 2022 and 2023. In the 0–20 cm soil layer, compared to rotary tillage, deep loosening increased soil total carbon content and total nitrogen content by 13.9% and 29.5%, respectively. Additionally, deep loosening promoted the microbial carbon and nitrogen content in the 20–30 cm soil layer, leading to a significant decrease in soil nitrate nitrogen residue by 8.5%. Compared to no biochar application, the application of biochar had a promoting effect on the microbial carbon and nitrogen content in the 0–30 cm soil layer. It also reduced soil nitrate nitrogen residue in the 0–50 cm soil layer, with total carbon and total nitrogen content increased by 22.4% and 6.7%, respectively. In 2022 and 2023, winter wheat yield significantly increased under deep loosening compared to that under rotary tillage, with increase rate of 15.8% and 12.0%, respectively. Among them, the deep loosening with 9 t hm⁻² biochar application had the highest yield. Comprehensive analysis indicated that deep loosening combined with 9 t · hm⁻² biochar had the best effect, serving as a cultivation and biochar application combination for high yield and improved soil fertility, which is suitable for application and promotion.

Keywords: Biochar application; Tillage Methods; Winter wheat; Yield; Soil carbon; Soil nitrogen

土壤是农业生产的重要物质条件,具有调控作物所需养分、水分、空气和热量的作用^[1]。华北平原为中国小麦的主产区,其小麦产量占中国总产量的 50%^[2]。但随着粮食的高强度产出,农田土壤质量也在持续变化,由此引发了一系列土壤环境问题^[3-4]。如果农田土壤状况得不到有效改善,土壤退化将会影响作物生产,进而不利于中国现有的粮食安全。深松是改善农田土壤质量和提高土壤生产力的一种土壤改良措施,被大力推广应用^[5]。华北平原近些年一直采用冬小麦旋耕和夏玉米免耕的单一耕作方式,导致耕层逐步变浅、上层土壤肥力减弱,同时使秸秆还田的作用大大降低^[6],而小型农机具的反复碾压致使农田犁底层不断加厚变硬,引起耕层结构变差,也加剧了下层土壤的沉积^[7-8]。深松可打破犁底层,疏松耕层,为作物根系生长创造良好环境,有利于作物产量形成,而且深松会使 0~45 cm 土层土壤容重降低,且对 0~25 cm 土层的效果最优^[9]。深松还能够改变土壤微生物群落的空间分布^[10],进而直接影响作物的生长发育和产量。

生物炭因具有吸附力强、含碳量丰富以及固碳减排的作用,得到国内外学者的广泛关注^[11-12]。生物炭施入土壤后,不仅可以改变土壤理化性质,还可以改善土壤微环境、固定养分和降低淋溶。一些研究表明,施用生物炭显著影响土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的含量^[13-14],改善土壤微生物群落结构^[15],直接或间接地影响土壤微生态环境,进而对作物生长产生影响。因此,可通过施用生物炭与深松结合,发挥其各自土壤改良的优势,

缓解农田土壤退化带来的粮食生产压力,促进土地资源利用和可持续发展。目前不少学者围绕长期、短期深松在农田土壤蓄水保墒、增产增收方面或者施用生物炭在培肥地力、改善土壤结构等方面开展了大量研究,而针对深松条件下施用生物炭对土壤养分特征及产量等方面影响的探讨尚不多见,二者结合的实际效果尚无定论。本试验结合华北平原生产实际,通过大田试验,明确耕作方式和生物炭施用量对冬小麦产量和土壤碳氮的影响,以期为该地区选择适宜的耕作培肥方式提供科学依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2021–2023 年在中国农业科学院新乡综合试验基地(35°19'N、113°53'E,海拔 81 m)进行。试验区地处华北平原,属暖温带半湿润半干旱气候区,年均降水量 582 mm。试验区土壤类型为潮土,质地为轻砂壤土(黏粒 4.52%,粉粒 40.27%,砂粒 55.21%),地下水埋深大于 5 m。试验开始前耕层土壤 pH 值、容重、田间持水率、速效含量、速效钾含量、有机质含量和全氮含量分别为 8.8、1.51 g · cm⁻³、0.31 cm³ · cm⁻³、16.0 mg · kg⁻¹、135.7 mg · kg⁻¹、1.92 g · kg⁻¹ 和 1.51 g · kg⁻¹。图 1 为 2021–2023 年冬小麦全生育期温度及降水状况。

1.2 试验设计

供试冬小麦材料为当地主栽品种周麦 22。试验采用随机区组设计,设置旋耕(XG)和深松(SS)

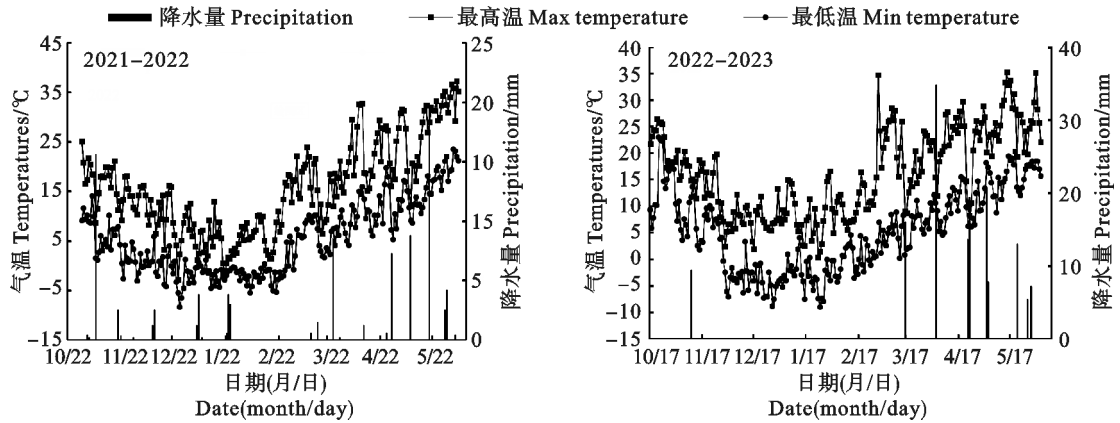


图 1 冬小麦全生育期温度及降水状况

Fig. 1 Temperature and precipitation conditions of winter wheat during the whole growth period

两个耕作方式,以及 0、4.5 和 $9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 三个生物炭施用水平(分别用 B0~B2 表示),小区面积为 120 m^2 ($20 \text{ m} \times 6 \text{ m}$),重复 3 次。小区间设置 1 m 宽隔离带,防止互相影响。试验地采用冬小麦—夏玉米轮作种植模式,每年玉米收获后秸秆全部粉碎还田。深松处理在冬小麦播种前采用深松机深松土壤,耕作深度 35 cm;旋耕处理在冬小麦播种前采用旋耕机耕作,耕作深度 10~15 cm。旋耕为一年一耕,深松两年一耕,2021 年和 2023 年深松,2022 年旋耕,生物炭一年一施,在冬小麦耕作前将生物炭和基施化肥撒施均匀,随耕作翻入土中,当土壤含水量降至田间持水量的 70% 时进行灌溉,灌水定额为 $750 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。供试生物炭(河南惠农土质保育研发有限公司)由花生壳制成,其有机质含量 $611.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,总氮含量 $12.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,总磷含量 $3.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,总钾含量 $7.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。冬小麦播种量为 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,播种深度为 5~8 cm。各小区化肥基施量为纯氮 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 K_2O $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,拔节期追施纯氮 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其他田间管理措施与当地农户保持一致。

1.3 测量项目与方法

1.3.1 土壤硝态氮残留量测定

在小麦收获期,各小区在中间区域用土钻采集 0~10、10~20、20~30 和 30~50 cm 土层土样,去杂质,过 2 mm 筛后取 10 g 土样,加 50 mL 的 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提液,振荡 30 min 后过滤,用 AA3 流动分析仪(Seal Analytical Inc. AA3-HR USA)测定土壤含量^[16]。采用环刀法测定 0~50 cm 土壤容重。并计算土壤硝态氮残留量。硝态氮残留量=土层厚度×土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量×土壤容重。

1.3.2 土壤总碳及全氮含量测定

将土壤样品挑出杂质,自然风干后粉碎,并过 0.15 mm 筛,采用重铬酸钾法^[17]测定土壤总碳含量,利用凯氏定氮法^[18]测定土壤全氮含量。

1.3.3 土壤微生物生物量碳、氮含量测定

将鲜土土样挑出杂质后采用氯仿熏蒸法^[19]测定,用凯氏定氮仪测其微生物量氮含量,用 TOC 仪测微生物量碳含量。

1.3.4 产量测定

冬小麦收获期,各小区随机收取 1 m^2 ($1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$) 植株,进行脱粒、晾晒,等籽粒自然风干后测定籽粒产量^[20]。

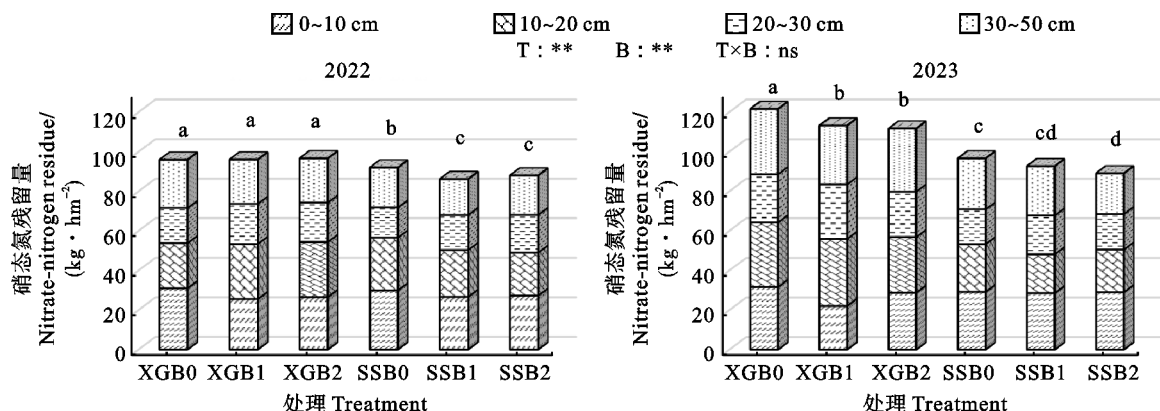
1.4 数据分析

采用 Excel 2010(Microsoft, USA)、SPSS 19.0 (IBM, 2010) 进行数据处理、方差分析和作图。

2 结果与分析

2.1 耕作方式和施炭量对麦田土壤硝态氮残留量的影响

2022 年冬小麦季为生物炭施用第一年,旋耕处理(XGB0~XGB2)间硝态氮残留量差异不显著,深松条件下生物炭施用处理的土壤硝态氮残留量较不施处理显著降低,但两个生物炭施用处理(SSB1 和 SSB2)间差异不显著;深松处理的土壤硝态氮残留量较旋耕处理平均降低 8.5%;旋耕条件下 XGB1 和 XGB2 处理的土壤硝态氮残留量在 10~20 cm 土层增加,分别达 27.8 和 $27.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2023 年 SSB2 处理的 0~50 cm 土层土壤硝态氮残留量显著低于其他处理,较 XGB0 处理降低 26.8%;与 2022 年冬小麦相比,2023 年冬小麦各处理土壤硝态氮残留量均有增加, XGB0 处理增幅最高,为 26.7%(图 2)。



图柱上不同字母表示 0~50 cm 土层土壤硝态氮总残留量在 0.05 水平下差异显著。T:耕作方式;B:生物炭施用量;T×B:耕作方式与生物炭施用量的交互; ** : $P < 0.01$; ns: $P > 0.05$ 。下图同。

Different letters above the columns indicate that the total nitrate-nitrogen residues in the 0–50 cm soil layer are significantly different at 0.05 level. T: Tillage method; B: Biochar application rate; T×B: Interaction of tillage method and biochar application rate; ** : $P < 0.01$; ns: $P > 0.05$. The same in the following figures.

图 2 耕作方式和生物炭施用量对冬小麦土壤硝态氮残留量的影响

Fig. 2 Effect of tillage method and biochar application rate on soil nitrate-nitrogen residue of winter wheat

2.2 耕作方式和施炭量对麦田土壤总碳含量的影响

2022 年,在 0~20 cm 土层,与 XGB0 处理相比,其他处理的土壤总碳含量均显著提高 ($P < 0.05$),其中深松处理平均提高 13.9%;两种耕作方式下生物炭施用处理的土壤总碳含量平均值较不施用处理分别增加 15.8%和 28.9%,相同耕作方式下不同生物炭施用水平间差异不显著;在 20~30 cm 土层,生物炭施用的影响也显著,其中 XGB2 和 SSB2 处理显著高于其余处理。2023 年,在 0~20 cm 土层,SSB2 处理的土壤总碳含量

最高,XGB2 处理次之(图 3)。从不同年份看,2023 年不同处理的土壤总碳含量较 2022 年均有所提高,在 0~20 和 20~50 cm 土层,分别以 XGB2 和 SSB2 处理的增幅较高,分别为 16.4%和 11.6%。

2.3 耕作方式和施炭量对冬小麦土壤全氮含量的影响

由图 4 可知,随着土层深度的增加,土壤全氮含量逐渐降低。与 XGB0 处理相比,其余处理的土壤全氮含量均显著提高。2022 年,相同耕作方式下,0~20 cm 土层内,土壤全氮含量随着生物炭

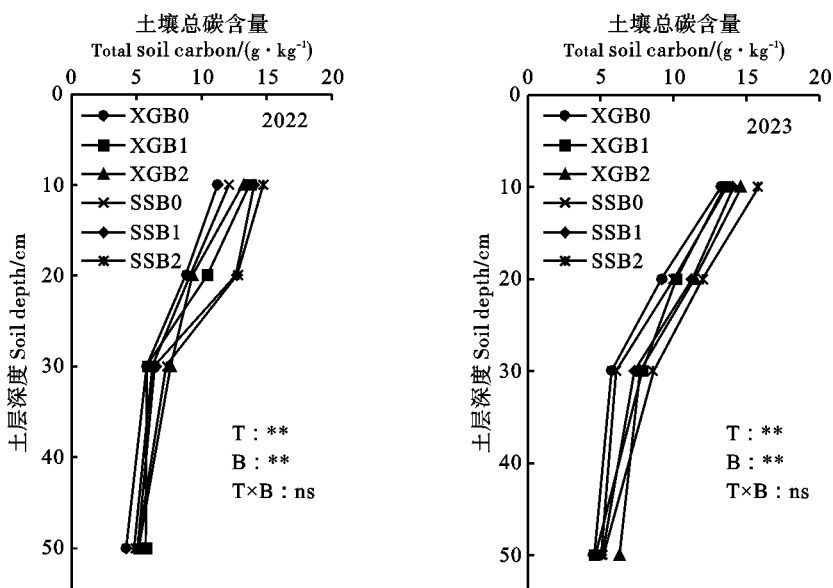


图 3 耕作方式和生物炭施用量对冬小麦土壤总碳含量的影响

Fig. 3 Effect of tillage method and biochar application rate on total soil carbon content of winter wheat

施用增加而提高,SSB2 处理的土壤全氮平均含量最高,较 XGB0 和 SSB0 处理分别高 29.7%和 7.1%。2023 年,随着生物炭施用量的增加,成熟期 0~50 cm 土层土壤全氮含量在旋耕和深松条件下分别呈增加的趋势和先增后趋于平稳的趋势。各处理 0~20 cm 土层的全氮含量均显著高于其他土层,处理间土壤全氮含量的差异主要表

现在 0~20 cm 土层,20 cm 以下土层差异逐渐减小。在 0~20 cm 土层,SSB1 处理土壤全氮含量最高,较 XGB0 和 SSB0 处理分别增加 29.2%和 6.3%。在相同生物炭施用量下,0~20 cm 土层深松处理的全氮含量高于旋耕处理,且表现为表现为 SSB1 > SSB2 > SSB0 > XGB2 > XGB1 > XGB0。

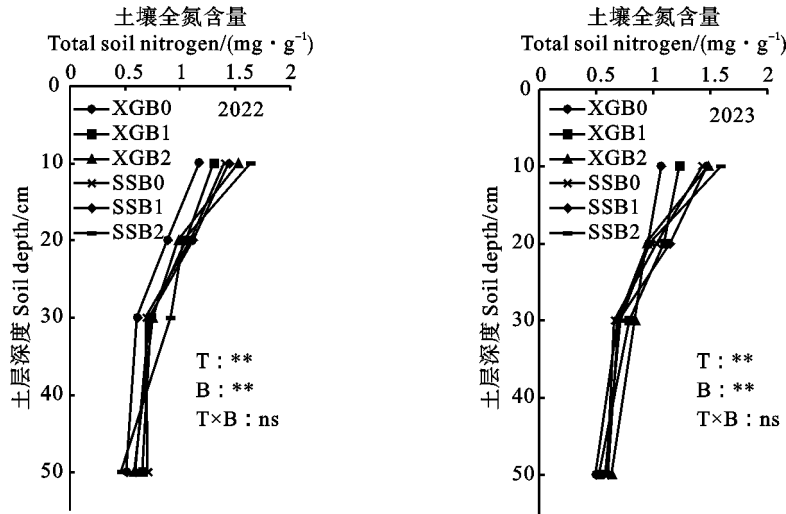


图 4 耕作方式和生物炭施用量对冬小麦土壤全氮含量的影响

Fig. 4 Effect of tillage method and biochar application rate on total soil nitrogen content of winter wheat

2.4 耕作方式和施炭量对冬小麦微生物量碳、氮的影响

不同处理土壤微生物量碳、氮含量在 2022 和 2023 年均随土层深度的增加而下降,在 30~50 cm 土层不同处理间差异不显著(图 5 和图 6)。在 0~10 cm 土层,同一耕作方式下生物炭施用处理的土壤微生物量碳、氮含量均显著高于不施处理;相同生物炭施用量下耕作方式间土壤微生物量碳、氮含量差异均不显著;在 10~20 cm 土层,两年的土壤微生物量氮含量和 2023 年土壤微生

物量碳含量均表现为旋耕施炭处理显著高于深松施炭处理,2022 年和 2023 年均以 XGB2 处理最高,其中土壤微生物量氮含量分别较 XGB0 处理增加 19.0%和 28.6%,土壤微生物量碳含量分别较 XGB0 处理增加 49.4%和 51.2%;在 20~30 cm 土层,2023 年相同生物炭施用量下,深松处理的土壤微生物量碳、氮含量较旋耕处理显著提高。从不同年份看,2023 年各处理 0~50 cm 土层土壤微生物量碳、氮含量高于 2022 年均,以 XGB2 处理增幅最大,分别达 5.7%和 18.4%。

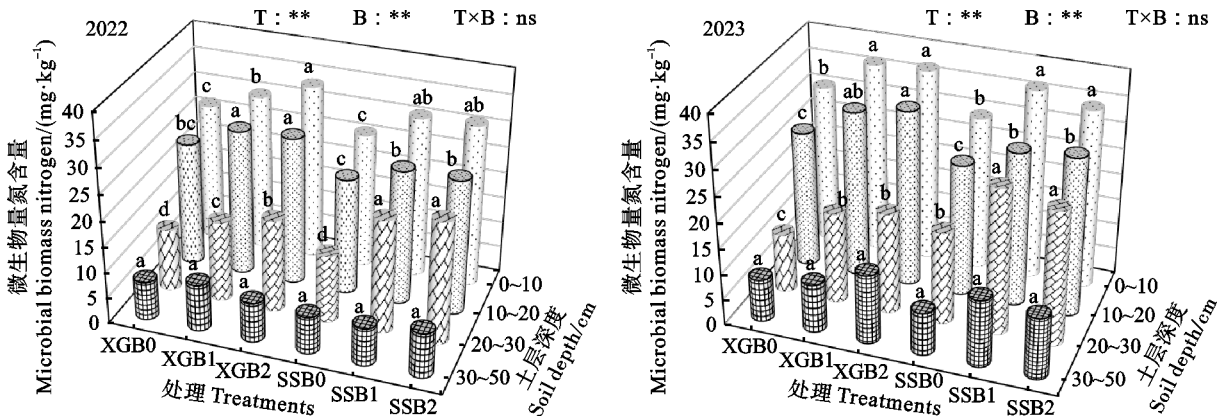


图 5 耕作方式和生物炭施用量对冬小麦土壤微生物量氮含量的影响

Fig. 5 Effect of tillage method and biochar application rate on soil microbial biomass nitrogen content of winter wheat

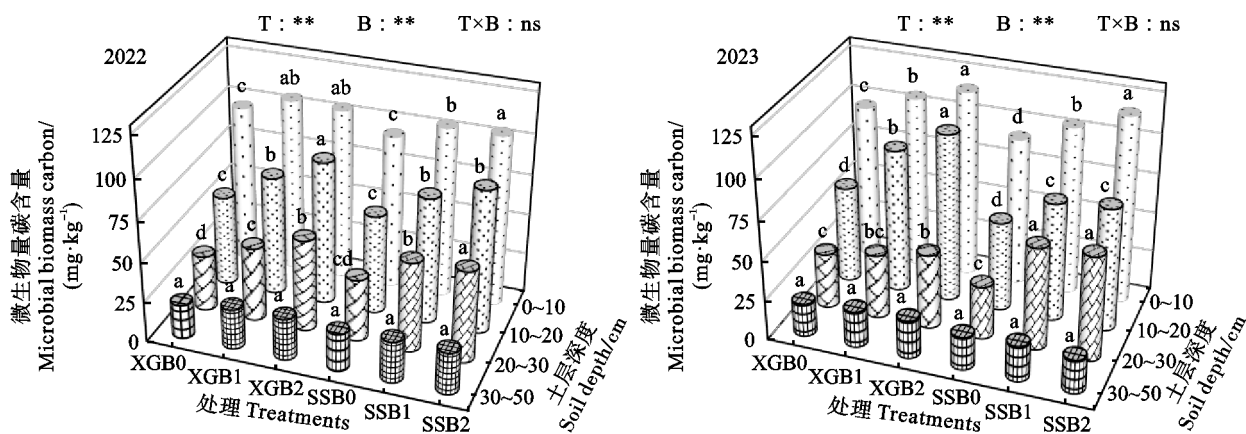


图 6 耕作方式和生物炭施用量对冬小麦土壤微生物量碳含量的影响

Fig. 6 Effect of tillage method and biochar application rate on soil microbial biomass carbon content of winter wheat

2.5 耕作方式和施炭量对冬小麦植株不同器官含氮量的影响

生物炭施用对冬小麦穗含氮量两年均有极显著影响,2022 年对茎含氮量和 2023 年对叶含氮量有显著影响;耕作方式仅在 2023 年对茎含氮量有显著影响;施炭量和耕作方式的交互作用对茎和穗含氮量两年均有显著影响(表 1)。2022 和 2023 年不同器官含氮量均表现为穗>叶>茎。2022 年,旋耕条件下茎秆含氮量随生物炭施用量的增加呈先增后降趋势,深松下生物炭施用处理的茎含氮量显著高于不施处理。2023 年,随着生物炭施用量的增加,旋耕下茎含氮量呈增加趋势,叶片含氮量变化不显著,穗含氮量先增加后平稳,而深松下茎和叶含氮量均呈先平稳后下降趋势,穗含氮量呈先增加后平稳趋势;相同生物炭施用量下,旋耕处理茎含氮量高于深松处理,叶片含氮

量在不同耕作方式间差异不显著,穗以 SSB1 和 SSB2 处理含氮量最高,较 XGB0 处理分别提高 3.5%和 3.4%。

2.6 耕作方式和施炭量对冬小麦产量及产量构成的影响

方差分析表明,耕作方式、生物炭施用量对冬小麦产量均有极显著影响,而两者的交互作用不显著(表 2)。与不施生物炭相比,施用生物炭显著提高冬小麦产量,平均增产幅度在 2022 年和 2023 年分别为 18.1%和 13.7%。与旋耕相比,深松也具有增产作用,平均增产幅度两年分别为 15.8%和 12.0%,其中 SSB2 处理的产量显著高于其他处理,两年分别较 XGB0 处理增产 28.9%和 20.0%。2023 年冬小麦收获期雨水较多,导致部分小麦发芽发霉,所以冬小麦产量较 2022 年略有降低。

表 1 耕作方式和生物炭施用量对冬小麦不同器官含氮量的影响

Table 1 Effect of tillage method and biochar application rate on nitrogen content in different organs of winter wheat $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$

处理 Treatment	2022			2023		
	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Spike	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Spike
XGB0	4.2c	7.0a	18.5b	5.2c	13.1ab	17.9c
XGB1	5.9a	8.0a	18.8b	5.7b	13.1ab	23.1b
XGB2	4.4bc	6.7a	17.9c	6.5a	11.7b	23.4b
SSB0	2.9d	5.1a	17.3d	5.6bc	13.0ab	17.9c
SSB1	4.9abc	7.5a	19.3a	5.3c	13.8a	24.1a
SSB2	5.5ab	8.0a	18.7b	4.3d	11.4b	23.9a
B	**	ns	**	ns	*	**
T	ns	ns	ns	**	ns	ns
T×B	*	ns	**	**	ns	**

同列数值后不同字母表示处理间在 0.05 水平下差异显著。T:耕作方式;B:生物炭施用量;T×B:耕作方式与生物炭施用量的交互;*: $P<0.05$; **: $P<0.01$;ns: $P>0.05$ 。下表同。

Different letters after the values in the same columns indicate that significant differences among different treatments at 0.05 level. T: Tillage method; B: Biochar application rate; T×B: Interaction of tillage method and biochar application rate; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ns: $P>0.05$. The same in table 2.

从产量构成看,施用生物炭和耕作方式对穗数影响不显著。在同一耕作方式下,与不施生物炭相比,施用生物炭后小麦穗粒数和千粒重均不同程度增加;在相同生物炭施用量下,深松的穗粒数和千粒重总体上高于旋耕。在旋耕条件下,XGB2 处理的穗粒数较 XGB0 处理显著增加,2022 年和 2023 年分别增加 14.9% 和 9.6%;深松条件下,施用生物炭处理的穗粒数均显著增加,

SSB1 处理和 SSB2 处理的两年平均穗粒数较 SSB0 处理分别提高 14.7% 和 13.8%。在旋耕和深松条件下施用生物炭处理两年平均千粒重与不施生物炭处理相比分别增加 6.6% 和 6.5%;深松的千粒重与旋耕在 2023 年差异较大,两年均以 SSB2 处理最高,较 XGB0 处理分别增加 10.0% 和 11.4%。由此可见,施用生物炭和深松的增产作用主要是因为增加了穗粒数和千粒重。

表 2 耕作方式和施炭量对冬小麦产量构成要素的影响

Table 2 Effect of tillage method and biochar application rate on yield components of winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	穗数 Spike number/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
2022	XGB0	528.0a	31.0c	46.9c	7.6c
	XGB1	506.7a	34.3abc	49.6ab	8.6b
	XGB2	505.0a	35.6ab	49.4ab	8.8b
	SSB0	514.2a	32.3bc	47.6bc	7.9c
	SSB1	469.4a	37.1a	50.4a	8.7b
	SSB2	515.3a	36.8a	51.6a	9.8a
2023	XGB0	480.2a	41.1b	37.1d	7.5c
	XGB1	495.3a	40.9b	39.9b	8.2b
	XGB2	452.0a	45.0a	40.0b	8.3b
	SSB0	496.5a	40.4b	38.6c	7.6c
	SSB1	462.0a	46.2a	40.4ab	8.6ab
	SSB2	485.7a	45.8a	41.4a	9.0a
2022	T	ns	ns	*	**
	B	ns	*	**	**
	T×B	ns	ns	ns	ns
2023	T	ns	*	**	**
	B	ns	**	**	**
	T×B	ns	ns	ns	ns

3 讨论

土壤总碳是表征固碳能力的重要指标,氮素是植株生长发育最重要的元素,其丰缺程度直接影响作物生长和产量^[21]。研究表明,随着土层深度的增加,土壤总碳、全氮含量均呈降低的趋势^[22-23],与本研究结果相似。从耕作方式来看,在 0~20 cm 土层,深松处理的总碳和全氮含量显著高于旋耕处理,可能是因为深松不翻动土壤,没有土壤通气过度,而旋耕处理打碎了团聚体,增加与空气接触面积,所以与旋耕相比,深松减缓了土壤碳的矿化,再加上秸秆的覆盖分解,降低了土壤养分流失的风险。本研究还发现,随着生物炭施用量的增加,土壤总碳含量也相应增加。其可能原

因:一是生物炭本身含有大量的碳,施入土壤中自然能够提高土壤总碳的含量;二是深松后施加生物炭的土壤具有稳定的土壤团粒结构以及良好的水分、通气条件,更有利于微生物的分解;三是生物炭能够促进土壤腐殖质和有机大分子的形成,促进土壤微生物的繁殖,进而分泌大量有机质,提高土壤总碳的含量^[24]。

本研究中,施用生物炭可以降低土壤硝态氮残留量,可能是因为生物炭促进硝态氮转化为其他形式的氮,防止其他形式的氮转化为硝态氮,从而使土壤中的硝态氮含量降低^[25]。深松降低了硝态氮残留量的主要原因可能是促进了氮素吸收^[26]。郑成岩等^[27]认为,深松增加了土壤比表面积,缩短了挥发路径,同时也会影响土壤水分和

氮素的运动和转化,以及植株对氮的吸收,进而对硝态氮的累积和分布产生影响。

土壤微生物量碳、氮是土壤微生物所固定的氮与碳,参与土壤养分循环和转化,能够灵敏地反映土壤质量变化及土壤微生物数量和活性。本研究表明,施用生物炭处理均提高了土壤微生物量碳、氮含量,说明施用生物炭能够促进微生物繁殖。Chen 等^[28]通过大田试验也得出相同结果,这可能是由于添加生物炭为微生物提供了足够的碳源和氮源,加速了有机质的转化,同时生物炭多孔的结构为微生物的繁殖提供了有利条件,进而提高了土壤微生物量碳、氮含量。然而,生物炭施用量对土壤微生物量碳、氮的影响规律各异。如,宋大利等^[29]在石灰性潮土上的试验结果显示,随着生物炭施用量的增加,土壤微生物量碳、氮含量呈先增后减的趋势;Dempster 等^[30]用树枝生物炭在沙土上进行试验,土壤微生物量碳氮含量随着生物炭施用量的增加呈下降趋势;而本研究结果表明,随着生物炭施用量的增加,土壤微生物量碳、氮含量呈先增加后平稳的趋势。导致试验结果不同的原因可能是土壤类型、生物炭施用量和生物炭底物的不同。耕作方式也是影响微生物量碳、氮含量的重要因素。之前有学者研究发现,随着土层深度的增加,土壤孔隙度减小,含氧量降低,微生物量逐渐减少^[31],本研究结果与此一致。从不同土层来看,深松能够显著提高 20~30 cm 土层微生物量碳、氮含量,可能原因有深松增加了土壤通气性,促进好氧微生物活化和生长,从而增加了下层土壤微生物量碳、氮含量,同时深松可以降低土壤容重和紧实度,促进植株根系下扎,为微生物提供了良好的环境,进而增加了土壤微生物量碳、氮含量,多名学者也得出相同结论^[32-34]。

本研究表明,与 XGB0 处理相比,深松+生物炭处理均能显著提高冬小麦产量,2022 年增产 13.2%~28.9%,2023 年增产 9.3%~20.0%,SSB2 处理产量最高,显著高于其他大部分处理,主要原因可能是深松+生物炭处理有良好的土壤环境,促进了小麦植株对养分的吸收,提高了籽粒氮素含量,使穗粒数和千粒重增加。许多研究发现,与旋耕相比,深松具有可以降低土壤密度,提高土壤养分和微生物量的特性,同时能够改善小麦根系特征,调节干物质积累转运^[35-37]等生理代谢,最终使产量提升。此外,该试验为两年深松一次,使深松耕作和秸秆覆盖技术各自的优势充分

发挥,也是造成增产的原因之一。He 等^[38]试验研究也表明,农田隔 2 年深松较每年翻耕增产 11.9%。与此同时,深松是在长期旋耕耕作的农田上进行的,能够打破犁地层,在增加耕层厚度和土壤透气性的同时,不会过度增加土壤水分和氮素的渗漏和淋溶损失^[39],对小麦根系的生长和养分的吸收具有促进作用,从而使冬小麦产量提升。

4 结论

深松和施用生物炭均能显著提高 0~20 cm 土壤总碳和全氮含量,增加 20~30 cm 土层土壤微生物量碳、氮含量,同时能够降低土壤硝态氮残留量,减少土壤环境污染。本试验条件下,深松+9 t·hm⁻² 生物炭效果最好,是既高产又环境友好的组合,可以应用推广。

参考文献:

- [1] WEI Z, GU Y, FRIMAN V P, *et al.* Initial soil microbiome composition and functioning predetermine future plant health [J]. *Science Advances*, 2019, 5(9): eaaw0759.
- [2] 刘俊明, 司转运, 武利峰, 等. 高低畦种植模式下水氮耦合对冬小麦产量和水氮利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(8): 144.
LIU J M, SI Z Y, WU L F, *et al.* Effects of water and nitrogen coupling on winter wheat yield and water or nitrogen use efficiency under high-low seedbed cultivation pattern [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(8): 144.
- [3] 沈仁芳, 王超, 孙波. “藏粮于地、藏粮于技” 战略实施中的土壤科学与技术问题[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 135.
SHEN R F, WANG C, SUN B. Soil related scientific and technological problems in implementing strategy of “storing grain in land and technology” [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 135.
- [4] 张亦涛, 刘宏斌, 王洪媛, 等. 农田施氮对水质和氮素流失的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(20): 6664.
ZHANG Y T, LIU H B, WANG H Y, *et al.* A bibliometric analysis of status and trend of international research on field nitrogen application effects on nitrogen losses and water quality [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(20): 6664.
- [5] 杨建宇, 杜贞容, 杜振博, 等. 基于耕地质量评价和局部空间自相关的高标准农田划定[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 109.
YANG J Y, DU Z R, DU Z B, *et al.* Well-facilitated capital farmland assignment based on land quality evaluation and LISA [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(6): 109.
- [6] 刘战东, 张凯, 米兆荣, 等. 豫北潮土灌区土壤肥力特征与作物产量的关系研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(8): 31.
LIU Z D, ZHANG K, MI Z R, *et al.* Characteristics of soil fer-

- tility and its relation with crop yield in fluvo-aquic soil irrigation area of North Henan [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(8): 31.
- [7] 张凯, 刘战东, 强小媛, 等. 深松处理对豫北农田土壤水分与作物耗水的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(10): 251.
ZHANG K, LIU Z D, QIANG X M, *et al.* Effects of subsoiling on soil moisture and crop water consumption in farmland of northern Henan Province [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(10): 251.
- [8] LIU Z, QIN A, ZHAO B, *et al.* Yield response of spring maize to inter-row subsoiling and soil water deficit in northern China [J]. *PLoS One*, 2016, 11(4): e0153809.
- [9] 梁金凤, 齐庆振, 贾小红, 等. 不同耕作方式对土壤性质与玉米生长的影响研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 945.
LIANG J F, QI Q Z, JIA X H, *et al.* Effects of different tillage managements on soil properties and corn growth [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 945.
- [10] 李彤, 王梓廷, 刘露, 等. 保护性耕作对西北旱区土壤微生物空间分布及土壤理化性质的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(5): 859.
LI T, WANG Z T, LIU L, *et al.* Effect of conservation tillage practices on soil microbial spatial distribution and soil physico-chemical properties of the northwest dryland [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(5): 859.
- [11] SOHI S P, KRULL E, LOPEZ-CAPEL E, *et al.* A review of biochar and its use and function in soil [J]. *Advances in Agronomy*, 2010, 105: 47.
- [12] ZAMA E F, REID B J, ARP H P H, *et al.* Advances in research on the use of biochar in soil for remediation: A review [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(7): 2433.
- [13] 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.
- [14] 罗煜, 赵小蓉, 李贵桐, 等. 生物质炭对不同 pH 值土壤矿质氮含量的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 166.
LUO Y, ZHAO X R, LI G T, *et al.* Effect of biochar on mineral nitrogen content in soils with different pH values [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(19): 166.
- [15] YU J, DEEM L M, CROW S E, *et al.* Biochar application influences microbial assemblage complexity and composition due to soil and bioenergy crop type interactions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 117: 97.
- [16] LU J, HU T, ZHANG B, *et al.* Nitrogen fertilizer management effects on soil nitrate leaching, grain yield and economic benefit of summer maize in Northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 247: 106739.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] LI H, HAO W, LIU Q, *et al.* Developing nitrogen management strategies under drip irrigation for wheat and maize production in the North China Plain based on a 3-year field experiment [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2019, 182(3): 335.
- [19] 吴金水, 林启美. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
WU J S, LIN Q M. Determination method of soil microbial biomass and its application [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [20] 陈海清, 黄超, 刘棚辰, 等. 灌水方式和施肥组合对冬小麦生长及肥料利用影响[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(1): 31.
CHEN H Q, HUANG C, LIU X C, *et al.* Combined effects of irrigation and fertilization on growth and fertilizer utilization of winter wheat [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(1): 31.
- [21] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(1): 355.
XU G X, WANG Z F, GAO M, *et al.* Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(1): 355.
- [22] 宋丽萍, 罗珠珠, 李玲玲, 等. 苜蓿-作物轮作模式对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(1): 27.
SONG L P, LUO Z Z, LI L L, *et al.* Effects of lucerne-crop rotation patterns on soil aggregate stability and soil organic carbon [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(1): 27.
- [23] 张健利, 王振华, 陈睿, 等. 灌水量和生物有机肥对滴灌枣田水盐动态及土壤养分属性的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 323.
ZHANG J L, WANG Z H, CHEN R, *et al.* Effects of irrigation amount and bio-organic fertilizer on water and salt dynamics and soil nutrient properties of jujube field under drip irrigation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1): 323.
- [24] 勾芒芒, 屈忠义. 生物炭对改善土壤理化性质及作物产量影响的研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(5): 1.
GOU M M, QU Z Y. Research on using biochar to agricultural soil amendment and crop yield [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(5): 1.
- [25] 姜志翔, 崔爽, 张鑫, 等. 基于 Meta-analysis 的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(10): 4658.
JIANG Z X, CUI S, ZHANG X, *et al.* Influence of biochar application on soil nitrate leaching and phosphate retention: A synthetic meta-analysis [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(10): 4658.
- [26] 黄明, 吴金芝, 李友军, 等. 耕作方式和秸秆覆盖对旱地麦豆轮作下小麦籽粒产量、蛋白质含量和土壤硝态氮残留的影响[J]. *草业学报*, 2018, 27(9): 34.
HUANG M, WU J Z, LI Y J, *et al.* Effects of tillage method and straw mulching on grain yield and protein content in

- wheat and soil nitrate residue under a winter wheat and summer soybean crop rotation in drylands [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(9): 34.
- [27] 郑成岩, 于振文, 王东, 等. 耕作方式对冬小麦氮素积累与转运及土壤硝态氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1303.
- ZHENG C Y, YU Z W, WANG D, *et al.* Effects of tillage practices on nitrogen accumulation and translocation in winter wheat and NO_3^- -N content in soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(6): 1303.
- [28] CHEN J, LIU X, ZHENG J, *et al.* Biochar soil amendment increased bacterial but decreased fungal gene abundance with shifts in community structure in a slightly acid rice paddy from Southwest China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 71: 33.
- [29] 宋大利, 习向银, 黄绍敏, 等. 秸秆生物炭配施氮肥对潮土土壤碳氮含量及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 369.
- SONG D L, XI X Y, HUANG S M, *et al.* Effects of combined application of straw biochar and nitrogen on soil carbon and nitrogen contents and crop yields in a fluvo-aquic soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2): 369.
- [30] DEMPSTER D N, GLEESON D B, SOLAIMAN Z M, *et al.* Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralization with *Eucalyptus* biochar addition to a coarse textured soil [J]. *Plant and Soil*, 2012, 354(1): 311.
- [31] 朱长伟, 龙潜, 董士刚, 等. 小麦-玉米轮作体系不同旋耕和深耕管理对潮土微生物量碳氮与酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(1): 51.
- ZHU C W, LONG Q, DONG S G, *et al.* Effects of rotary and deep tillage modes on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities in fluvo-aquic soil under wheat-maize rotation system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(1): 51.
- [32] 王玉凤, 陈天宇, 付健, 等. 不同耕作方式对松嫩平原半干旱区玉米土壤生物特性影响[J]. 玉米科学, 2023, 31(3): 95.
- WANG Y F, CHEN T Y, FU J, *et al.* Effects of different tillage methods on maize soil biological characteristics in semi-arid area of Songnen Plain [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(3): 95.
- [33] 周吉红, 王俊英, 孟范玉, 等. 耕作方式对小麦播种质量、产量和效益的影响[J]. 作物杂志, 2022(4): 199.
- ZHOU J H, WANG J Y, MEN F Y, *et al.* Effects of tillage methods on sowing quality, yield and benefit of wheat [J]. *Crops*, 2022(4): 199.
- [34] 郭仁松, 王亮, 崔建平, 等. 深松耕作对新疆绿洲棉田土壤特性及产量形成的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(12): 1804.
- GUO R S, WANG L, CUI J P, *et al.* Effects of subsoiling on soil characteristics and yield formation of cotton field in oasis area of Xinjiang [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(12): 1804.
- [35] YU Q, WANG H, WEN P, *et al.* A suitable rotational conservation tillage system ameliorates soil physical properties and wheat yield: An 11-year *in situ* study in a semi-arid agroecosystem [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 199: 104600.
- [36] HE J, SHI Y, YU Z. Subsoiling improves soil physical and microbial properties, and increases yield of winter wheat in the Huang-Huai-Hai Plain of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 182.
- [37] 刘明琪, 刘春媚, 曹洪宇, 等. 不同生物炭对风沙土土壤养分及氮素利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(5): 20.
- LIU M Q, LIU C M, CAO H Y, *et al.* Effects of different biochar on soil nutrients and nitrogen use efficiency in sandy soil [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(5): 20.
- [38] HE J, SHI Y, ZHAO J, *et al.* Strip rotary tillage with a two-year subsoiling interval enhances root growth and yield in wheat [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 11678.
- [39] 王瑾瑜, 程文龙, 槐圣昌, 等. 深翻、有机无机肥配施对稻田水分渗漏和氮素淋溶的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(20): 4385.
- WANG J Y, CHENG W L, HUAI S C, *et al.* Effects of deep plowing and organic-inorganic fertilization on soil water and nitrogen leaching in rice field [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(20): 4385.