

王红越,宋玉凤,肖辉,等.生物炭配合深翻对稻田土壤性质及水稻产量的影响[J].华中农业大学学报,2025,44(1):120-127.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.01.013

## 生物炭配合深翻对稻田土壤性质及水稻产量的影响

王红越<sup>1</sup>,宋玉凤<sup>1</sup>,肖辉<sup>1,2</sup>,张慧<sup>2</sup>,陈坤<sup>2</sup>,董昱辰<sup>3</sup>,陈冠益<sup>1</sup>,钟磊<sup>1</sup>

1. 天津大学环境科学与工程学院,天津 300350; 2. 天津市农业科学院,天津 300384;  
3. 天津亚派绿肥生物科技发展有限公司,天津 301600

**摘要** 为探索改善土壤质量和提升水稻产量的农艺措施,通过田间小区试验,设置对照(CK)、深翻30 cm(T1)、生物炭15 t/hm<sup>2</sup>(T2)、生物炭15 t/hm<sup>2</sup>+深翻30 cm(T3)处理,探究土壤性质和水稻产量对不同农艺措施的影响。结果显示,与对照相比,施用生物炭使土壤渗透系数、有机质、水稻产量、穗粒数和生物量分别提升224.66%、22.42%、9.46%、23.90%和6.51%;深翻对土壤性质及水稻产量无显著影响;生物炭配合深翻使土壤渗透系数和水稻产量分别增加184.25%和9.93%;生物炭和深翻仅对穗粒数有显著交互效应;水稻产量和生物量均与土壤渗透系数和有机质呈现显著正相关;穗粒数与土壤渗透系数呈极显著正相关。结果表明,施用生物炭是改善土壤质量并提高水稻产量的有效措施,可以通过改善土壤通透性、提高有机质含量,增加水稻穗粒数最终提高产量。

**关键词** 生物炭;深翻;土壤性质;土壤通透性;土壤有机质;水稻;产量

**中图分类号** S3-33 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)01-0120-08

近年来,由于世界人口持续增长,粮食供应需求不断增加,尤其是以稻米为主食的亚洲地区<sup>[1]</sup>。我国是第一人口大国,超过65%的人口以稻米为主食,目前水稻主要产区由于过量施肥面临着土壤持续退化、有机质损失和根系生长受限等问题,导致水稻产量下降<sup>[2-3]</sup>。水稻产量的可持续增长对中国乃至世界粮食安全有重要意义,因此,目前迫切需要提升稻田土壤质量以增加水稻产量。

生物炭是在氧气限制和不同温度条件下对原料进行热解而产生的富含碳(C)的材料<sup>[4]</sup>。比表面积大、孔隙率高和负表面电荷等特性使生物炭能够在改善农业土壤质量和提高作物生产力方面发挥重要作用<sup>[5-6]</sup>。已有研究报道了生物炭对稻田土壤性质和水稻产量的影响,如Sriphrom等<sup>[6]</sup>在研究泰国水稻种植时发现土壤有机碳储量、pH值和速效养分与施加生物炭含量呈正相关。Wu等<sup>[7]</sup>在黄河三角洲盐渍土的田间试验中发现,MgO改性生物炭通过提高土壤速效磷含量从而增加水稻产量。Ali等<sup>[8]</sup>研究表明使用生物炭可显著优化水稻根系特性,同时提

升生物量与籽粒产量。Lu等<sup>[9]</sup>试验表明稻田施用生物炭能有效改善水稻农艺性状,如株高、穗粒数、有效穗数和千粒重,进而提高水稻产量。此外,稻田土壤需要大量施加生物炭才能显著提质增效<sup>[10]</sup>。施用生物炭不仅能促进废弃物资源的综合利用,还可使作物增产,对农业的可持续协调发展具有重要意义。

植物根际一般处于缺氧状态,造成有毒物质(如Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>和有机酸)大量积累,影响水稻根系生长并抑制养分吸收,从而导致水稻产量低下<sup>[11]</sup>。深翻可以有效疏松土壤,减轻深层土壤压实程度从而解决根部缺氧问题,被认为是提高养分可用性和作物产量的有效途径<sup>[12-13]</sup>。深翻配合秸秆还田可通过重塑土壤结构来影响微生物群落结构和功能,最终影响作物产量<sup>[13]</sup>。Meta分析表明深翻能够增加作物对底土养分的可用性,并使作物产量提高6%<sup>[14]</sup>。研究表明深翻可使印度西北部种植小麦和玉米的土壤渗透率提高31%<sup>[15]</sup>。深翻30 cm已被证明是干旱农田缓解土壤压实的最佳深度<sup>[16]</sup>。但深翻后原犁底层土壤未形成团聚结构,不利于作物生长,而配施生物

收稿日期:2024-01-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD190090505);天津市农业科学院青年科技创新项目(2022007)

王红越,E-mail:why010120@163.com

通信作者:肖辉,E-mail:xiaohui-81@163.com

炭可以有效提高大团聚体的含量和稳定性,改善土壤结构并提高有机碳含量<sup>[17]</sup>。目前深翻已是应用相当广泛的农艺措施,但生物炭配合深翻对作物产量影响的研究非常缺乏,而探究生物炭配合深翻对作物产量的影响对制定农业管理措施具有重要指导意义。

基于此,本研究在天津市宁河区实验林场开展田间试验,探究生物炭配合深翻对稻田土壤性质和水稻产量及其构成因素的影响,旨在为提升稻田土壤质量及作物产量提供科学依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验点位于天津市宁河区实验林场(117°42'59.5"E,39°28'34.5"N),属暖温带大陆性季风气候,年平均气温11.1℃,平均地面温度2.7~4.9℃,平均日照时数2801.7h,平均降水量在360~970mm。供试土壤为粘壤土,碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为69.85、40.93、290.50mg/kg,有机质和全盐含量分别为20.90和2.12g/kg,pH为8.08。

### 1.2 试验设计

采用田间小区试验,共设4个处理,分别为:对照(常规,浅翻15~20cm,CK)、深翻30cm(T1)、表施15t/hm<sup>2</sup>生物炭(T2)、生物炭15t/hm<sup>2</sup>+深翻30cm(T3),各处理重复3次。小区面积为2.1m×4.5m,共12个小区,各小区独立排灌水。N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O施肥量为330-75-52.5kg/hm<sup>2</sup>。肥料品种为尿素(46%)、过磷酸钙(12%)、硫酸钾(50%)。氮肥基施50%,追肥50%(提苗肥12.5%、分蘖25%、孕穗12.5%),磷钾肥全部基施,生物炭全部基施。

供试水稻品种为津原U99。供试水稻生物炭由南京勤丰秸秆科技有限公司提供,为生物炭与硅钙粉按95:5的质量比复配形成。生物炭中碳、氮、磷、钾含量分别为25.45%、0.70%、0.36%和1.95%,pH10.87。

试验小区于2021年4月16日建成,4月26日施生物炭和底肥,5月12日插秧,11月5日收获。其他日常管理措施与当地农户相同。

### 1.3 样品采集与分析

水稻收获期每个小区挑选5穴水稻植株,测定水稻株高、有效穗数、穗粒数、产量、千粒重、生物量;根系样品利用根钻(直径10cm)选择相同株数(11株)种植穴,采集剖面根系,洗净、烘干称质量得到水稻

剖面根质量。

水稻收获期用五点取样法在每个小区采集表层(0~20cm)土壤样品,混合均匀后送往实验室分析土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、水溶性盐总量和pH值;采集环刀样品,测定土壤容重、渗透系数。土壤有机质采用重铬酸钾外加加热法测定;土壤全氮采用半微量凯氏定氮法测定;土壤碱解氮采用碱解扩散法测定;速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定;水溶性盐总量采用烘干质量法测定;全盐量采用烘干质量法测定;pH值采用电极电位法测定;容重采用环刀法测定;渗透系数采用环刀法测定。

### 1.4 统计分析

使用Microsoft Excel 2019汇总试验数据及绘制图表。采用SPSS 26.0进行方差分析(ANOVA),利用Duncan's法进行显著性检验,同时进行皮尔逊相关性分析检验土壤性质和水稻指标的相关性。运用R4.1.3中的“ggplot2”包绘制柱状图,“lavaan”包绘制结构方程模型(structural equation modeling, SEM)。

## 2 结果与分析

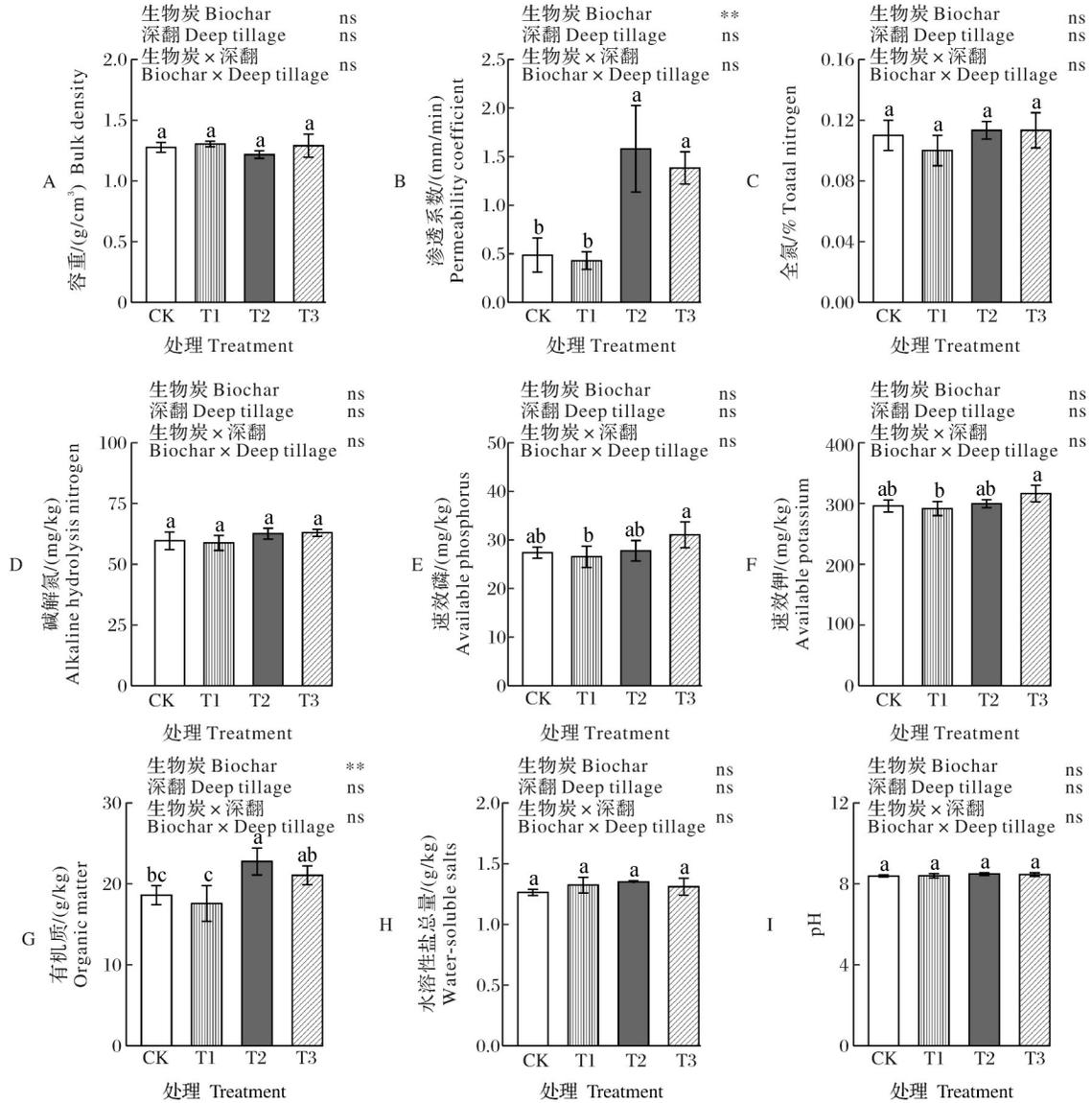
### 2.1 生物炭配合深翻对土壤性质的影响

由图1可见,不同处理间土壤容重无显著差异。各处理土壤容重大小排序为T1[(1.30±0.02)g/cm<sup>3</sup>]>T3[(1.29±0.10)g/cm<sup>3</sup>]>CK[(1.28±0.04)g/cm<sup>3</sup>]>T2[(1.22±0.03)g/cm<sup>3</sup>]。由图1可见,各处理土壤渗透系数T2[(1.58±0.45)mm/min]>T3[(1.38±0.17)mm/min]>[CK(0.49±0.18)mm/min]>T1[(0.43±0.09)mm/min],T2和T3较CK处理使土壤渗透系数分别显著增加224.66%和184.25%(*P*<0.05)。土壤化学性质在不同处理间存在显著差异(图1)。各处理土壤有机质含量大小排序为T2[(22.77±1.67)g/kg]>T3[(21.06±1.17)g/kg]>CK[(18.60±1.18)g/kg]>T1[(17.58±2.22)g/kg]。T2与CK相比土壤有机质含量显著增加22.42%(*P*<0.05)。速效磷和速效钾最高值均为T3处理,分别为(31.06±2.65)和(316.33±13.58)mg/kg,T1处理均最小,分别为(26.54±2.18)和(291.67±11.55)mg/kg。各处理间全氮和碱解氮含量均无显著差异,各处理间大小排序均呈现为T2>T3>CK>T1。各处理间水溶性盐总量和pH值无显著差异,T2处理最高,分别为(1.35±0.01)和

( $8.49 \pm 0.07$ ) g/kg, CK处理最小, 分别为( $1.26 \pm 0.03$ )和( $8.39 \pm 0.05$ ) g/kg。

由双因素方差分析结果可知, 生物炭对土壤理

化性质影响显著或极显著(图1)。其中, 生物炭对土壤渗透系数和有机质均影响极显著( $P < 0.01$ ); 深翻的主效应及生物炭与深翻的交互效应不显著。



柱上不同小写字母表示不同处理间稻田土壤性质差异显著( $P < 0.05$ )。上方为双因素方差分析结果, “\*”和“\*\*”分别表示在0.05和0.01水平差异显著和极显著, ns表示不显著。下同。 Different lowercase letters above the bars represent significant differences among paddy soils with different treatments ( $P < 0.05$ ). The top is the result of two-factor analysis of variance, where “\*” and “\*\*” are associated with differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively, while ns is not significant. The same as below.

图1 不同处理下稻田土壤容重(A)、渗透系数(B)、全氮(C)、碱解氮(D)、速效磷(E)、速效钾(F)、有机质(G)、水溶性盐总量(H)和pH值(I)

Fig.1 Paddy soil bulk density (A), permeability coefficient (B), total nitrogen (C), alkaline hydrolysis nitrogen (D), available phosphorus (E), available potassium (F), organic matter (G), water-soluble salts (H) and pH (I) under different treatments

### 2.2 生物炭配合深翻对水稻产量及其构成因素的影响

由图2可见, 施用生物炭和生物炭配合深翻均能显著提升水稻产量, 分别达9.46%和9.93% ( $P <$

0.05), 而单独深翻会使水稻产量略微减少(0.63%)。分析水稻产量构成因素可知, 与CK相比, T2处理下穗粒数和生物量分别增加23.90%和6.51% ( $P <$

0.05)。有效穗数和千粒重在不同处理间无显著差

异,最高值均出现在 T3 处理[(12.93±1.51) 株/穴和 (29.33±0.67) g]。水稻株高和根质量在不同处理间无显著差异,各处理间株高排序为:T2[(98.21±5.17) cm]>T3[(95.10±3.98) cm]>CK[(95.09±1.77) cm]>T1[(93.07±0.1)9 cm],各处理间根质量排序为:T3[(9.17±0.75) g]>T2[(8.72±1.98) g]>T1[(8.54±1.79) g]>CK[(7.42±2.07) g]。

由双因素方差分析结果可知,生物炭对水稻产量及其构成因素影响显著或极显著(图 2)。其中,生物炭对水稻穗粒数、生物量和产量影响极显著( $P<0.01$ );生物炭和深翻的交互效应对穗粒数影响显著( $P<0.05$ );深翻对水稻产量及其构成因素无显著影响。

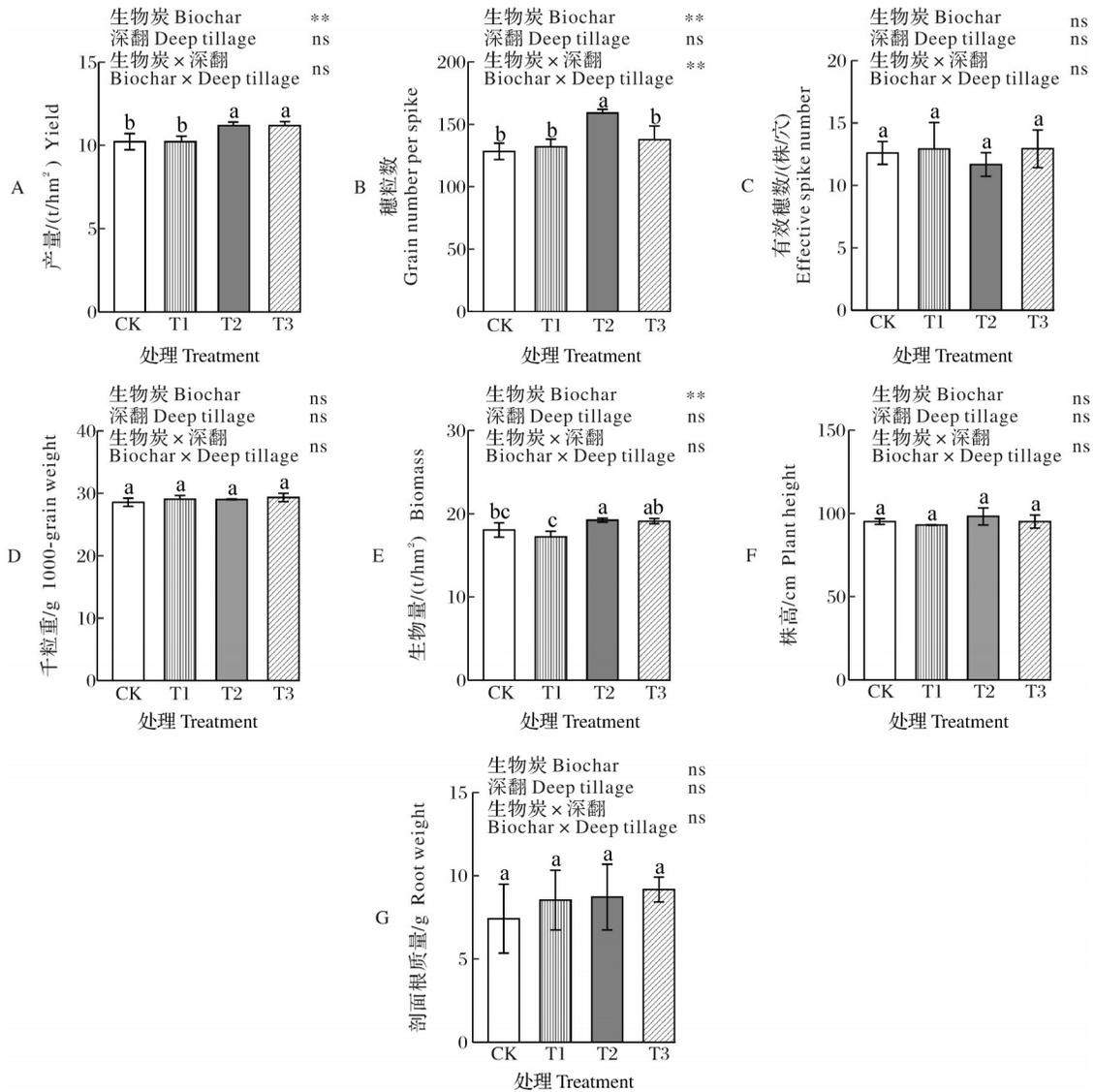


图 2 不同处理下稻田土壤水稻产量(A)、穗粒数(B)、有效穗数(C)、千粒重(D)、生物量(E)、株高(F)、剖面根质量(G)  
Fig.2 Rice yield (A), grain number per spikelet (B), spikelet number (C), 1 000-grain weight (D), biomass (E), plant height (F) and root weight (G) under different treatments

### 2.3 土壤性质与水稻产量的相关性分析

筛选重要的土壤性质指标和水稻产量因素进行皮尔逊相关性分析,由表 1 可见,水稻产量与土壤性质直接相关。水稻产量与生物量呈现极显著正相关( $P<0.01$ ),水稻产量和生物量均与土壤渗透系数和有机质呈现显著正相关( $P<0.05$ )。在产量的构成

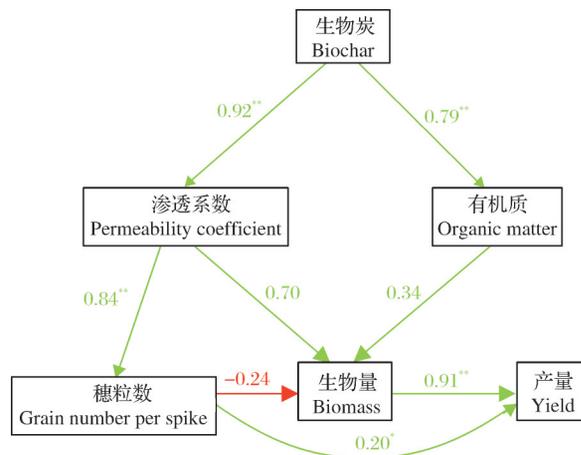
因素中,穗粒数与土壤渗透系数呈现极显著正相关( $P<0.01$ )。

进一步用结构方程模型(图 3)分析生物炭与土壤性质、水稻产量的相关性,结果表明,生物炭对土壤渗透系数和有机碳具有正向驱动作用,施用生物炭能够增加水稻穗粒数从而提高产量( $P<0.05$ )。

表1 土壤性质与水稻产量及其构成因素的  
皮尔逊相关性分析

Table 1 Pearson correlation analysis between  
soil properties and rice index

项目 Item	渗透系数 Permeability coefficient	有机质 Organic matter	穗粒数 Grain num- ber per spike	生物量 Biomass	产量 Yield
渗透系数 Permeability coefficient	1				
有机质 Organic matter	0.74**	1			
穗粒数 Grain num- ber per spike	0.73**	0.57	1		
生物量 Biomass	0.75**	0.69*	0.47	1	
产量 Yield	0.79**	0.66*	0.51	0.96**	1



红色和绿色箭头分别代表正、负关系;将路径系数的大小定义为重要值。Red and green arrows represent positive and negative relationships, respectively. The size of the path coefficient is defined as an important value.

图3 生物炭、土壤性质与水稻产量及其构成因素  
的结构方程模型

Fig.3 Structural equation modeling (SEM)  
between the soil properties and rice index

### 3 讨论

#### 3.1 生物炭配合深翻对土壤性质的影响

本研究结果显示,深翻对土壤性质均无显著影响(图1)。Arora等<sup>[18]</sup>研究表明深翻可促进南亚热带地区土壤大团聚体形成以降低土壤渗透阻力,Hu等<sup>[13]</sup>研究显示深翻能显著提高南方地区土壤10~30 cm土层稳定性有机碳含量,有助于增加碳固存。本

研究与他们的研究结果不一致,可能是由于所研究土壤所处气候条件不同、土壤基本性质如土壤质地、pH值和有效养分不一样。但也有研究表明,免耕或浅翻(深度为15~20 cm)可低限度扰动土壤,避免破坏土壤结构,导致表层土中有机碳含量高于深翻(深度为25~30 cm)<sup>[19]</sup>。张雨萌等<sup>[20]</sup>研究显示,深翻会使底土腐殖质翻到上层从而增加表层土有机质含量。本研究中深翻对土壤性质无影响,推测原因可能是稻田土属于淹水环境,深翻的影响远小于环境的影响,深翻更适用于玉米或高粱等旱地作物土壤,可以松动表层土、破坏犁底层以减少植物根系生长阻力<sup>[14]</sup>;前人研究普遍采用深翻加施肥处理,如Wu等<sup>[21]</sup>的研究是将肥料深施后翻动肥料土层,而本研究是翻动土层后表施生物炭,因此在水稻田进行深翻处理对土壤理化性质没有显著调节作用。

生物炭高孔隙率等特性可以改善土壤理化性质,为作物生长和根系养分吸收创造更好的环境。本研究中施用生物炭能显著提升土壤渗透系数并显著增加土壤有机质含量(图1)。这与之前的研究结果一致。一方面生物炭因其多孔、高比表面积的特点,施用后土壤孔隙体积增加。另一方面,生物炭密度低使其具有稀释效应,导致土壤容重降低<sup>[22]</sup>,本研究中土壤容重虽然在各处理间无显著差异,但生物炭添加下容重确实存在降低的趋势(图1)。土壤容重下降会改善土壤通透性,最终增加土壤渗透系数<sup>[23]</sup>。而有机质增加主要因为生物炭本身具有高芳香族碳含量,施用后可增加有机质储量<sup>[24]</sup>;此外它能够促进土壤碳固存,推测机制之一可能是生物炭通过有机-矿物相互作用增强颗粒间的内聚力,促进微团聚体稳定性并进一步提高土壤有机碳积累速率<sup>[25]</sup>。因此,施用生物炭是增加土壤养分含量、提升土壤质量和碳固存的有效途径。

生物炭配合深翻处理与对照相比仅土壤渗透系数显著增加184.25% ( $P < 0.05$ ),且无交互效应(图1)。这与张雨萌等<sup>[20]</sup>的研究结果类似,生物炭配合深翻较传统耕作有利于提高土壤团聚体的稳定性和改善土壤通气性。Xiao等<sup>[17]</sup>的研究结果显示,深翻配施生物炭和化肥处理较深翻配施化肥处理显著提高甘蔗种植土壤速效氮、磷、钾、全氮和有机质含量。原因可能是本研究中仅仅深翻土壤,并没有将生物炭深翻,且研究作物是水稻而非旱地作物,导致其对土壤理化性质影响不大;同时也表明本研究中土壤渗透系数显著增加主要是由于添加生物炭造成的。

### 3.2 生物炭配合深翻对水稻产量的影响

在以往研究中深翻被证明是作物增产的重要措施,而在本试验中,深翻对水稻产量及其构成因素无显著影响(图2)。这与之前的研究<sup>[14]</sup>不一致。一方面可能是本研究只是深翻,对于土壤理化性质无显著影响,从而导致产量无显著变化(图1),另一方面可能是频繁深翻会破坏土壤结构,从而对作物产量有负向作用<sup>[13]</sup>。

农田应用生物炭的目的在于改善土壤特性与提高作物产量。本研究中施用生物炭使水稻产量、穗粒数和生物量分别提升9.46%、23.90%和6.51% ( $P < 0.05$ , 图2),这与前人研究结果不一致。有研究表明,增加生物炭施用量通过提高水稻穗粒数使水稻增产<sup>[26-27]</sup>;连续施用生物炭提高水稻每粒穗数和总生物量从而使水稻产量增加4%~10%<sup>[28]</sup>。生物炭对作物增产的潜在机制在于其具有多孔结构和高碳含量,施用后能优化土壤结构、增强水分及养分保持能力。另一方面,添加生物炭可直接刺激维持土壤健康的功能微生物的活性、群落结构和功能多样性,也可为微生物间接提供充足养分和更为广阔的栖息环境,微生物参与并调控土壤养分循环过程进而反哺作物使之产量提高<sup>[10,24]</sup>。这与本研究结果相似,生物炭使土壤渗透系数、有机质含量、穗粒数和水稻产量显著增加,且水稻产量与土壤渗透系数和有机质含量呈现显著正相关( $P < 0.05$ , 图1、图2和表1)。结构方程模型(图3)也显示生物炭对土壤渗透系数和有机碳的正向驱动作用,施用生物炭能够提高水稻穗粒数从而提高其产量( $P < 0.05$ ),这与Arunrat等<sup>[29]</sup>和Liu等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。因此,本研究中施用生物炭使水稻产量增加的机制为生物炭通过改善土壤通透性、提升有机质含量、提高水稻植株利用土壤养分的能力,进而增加水稻穗粒数,最终提高产量。

本研究中生物炭配合深翻与对照相比,水稻产量显著增加9.93% ( $P < 0.05$ , 图2)。Xiao等<sup>[17]</sup>的研究显示,生物炭配合深翻具有协同效应,可显著提升甘蔗产量( $P < 0.05$ );Chen等<sup>[31]</sup>研究显示,深翻配施化肥和生物炭处理比轮作配施化肥处理可分别提高冬小麦和夏玉米产量14.4%和3.8%;Zhang等<sup>[32]</sup>研究表明,施肥配合深翻是提高土壤有机碳固存、土壤质量和小麦产量的有效方法。由此推测,深翻可能营造出适合作物根系生长的土壤环境;施用生物炭使作物根系生物量增加。鉴于作物地上与地下部分

存在紧密关联,良好的根系结构有助于植株糖分积累和作物产量提升<sup>[17]</sup>;但本研究中生物炭和深翻对产量无交互效应(图2),因此,本研究中生物炭配合深翻使水稻增产主要原因是添加生物炭,而非深翻。

综上,本研究结果表明,深翻对稻田土壤质量及水稻产量无显著影响;生物炭配合深翻使水稻增产的主要原因是添加生物炭;生物炭对土壤质量及作物产量有正向影响,主要是由于生物炭通过改善土壤通透性和提升有机质含量,进而增加水稻产量构成因素中的穗粒数,最终增加产量。因此,施用生物炭是改善土壤质量和提高水稻产量的有效途径。

### 参考文献 References

- [1] YAKUBU A, DANSO E O, ARTHUR E, et al. Rice straw biochar and irrigation effect on yield and water productivity of okra[J]. *Agronomy journal*, 2020, 112(4): 3012-3023.
- [2] MUHAMMAD N, AZIZ R, BROOKES P C, et al. Impact of wheat straw biochar on yield of rice and some properties of Psammaquent and Plinthudult[J]. *Journal of soil science and plant nutrition*, 2017, 17(3): 808-823.
- [3] YANG X, LIU H B, MAO X T, et al. Non-flooding rice yield response to straw biochar and controlled-release fertilizer[J]. *Agronomy journal*, 2020, 112(6): 4799-4809.
- [4] ZHANG A F, CUI L Q, PAN G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake Plain, China[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2010, 139(4): 469-475.
- [5] OLADELE S O, ADEYEMO A J, AWODUN M A. Influence of rice husk biochar and inorganic fertilizer on soil nutrients availability and rain-fed rice yield in two contrasting soils[J]. *Geoderma*, 2019, 336: 1-11.
- [6] SRIPHIROM P, CHIDTHAISONG A, YAGI K, et al. Effects of biochar on methane emission, grain yield, and soil in rice cultivation in Thailand[J]. *Carbon management*, 2021, 12(2): 109-121.
- [7] WU L P, WEI C B, ZHANG S R, et al. MgO-modified biochar increases phosphate retention and rice yields in saline-alkaline soil[J]. *Journal of cleaner production*, 2019, 235: 901-909.
- [8] ALI I, ZHAO Q, WU K, et al. Biochar in combination with nitrogen fertilizer is a technique: to enhance physiological and morphological traits of rice (*Oryza sativa* L.) by improving soil physio-biochemical properties[J]. *Journal of plant growth regulation*, 2022, 41(6): 2406-2420.
- [9] LU H H, WANG Y F, LIU Y X, et al. Effects of water-washed

- biochar on soil properties, greenhouse gas emissions, and rice yield[J/OL]. CLEAN - soil, air, water, 2018, 46(4):1700143 [2024-01-23]. <https://doi.org/10.1002/clen.201700143>.
- [10] 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.
- [11] XIE K Z, XU P Z, YANG S H, et al. Effects of supplementary composts on microbial communities and rice productivity in cold water paddy fields[J]. Journal of microbiology and biotechnology, 2015, 25(5):569-578.
- [12] DHALIWAL J, KAHLON M S, KUKAL S S. Deep tillage and irrigation impacts on crop performance of direct seeded rice-wheat cropping system in north-west India[J]. Paddy and water environment, 2021, 19(1):113-126.
- [13] HU R W, LIU Y J, CHEN T, et al. Responses of soil aggregates, organic carbon, and crop yield to short-term intermittent deep tillage in Southern China[J/OL]. Journal of cleaner production, 2021, 298:126767. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126767>.
- [14] WU P P, LI L J, WANG X. Shallow plough tillage with straw return increases rice yield by improving nutrient availability and physical properties of compacted subsurface soils[J]. Nutrient cycling in agroecosystems, 2023, 127(1):69-83.
- [15] KAHLON M S. Effect of land management practices on physical properties of soil and water productivity in wheat - maize system of north west India[J]. Applied ecology and environmental research, 2017, 15(4):1-13.
- [16] SUN M, REN A X, GAO Z Q, et al. Long-term evaluation of tillage methods in fallow season for soil water storage, wheat yield and water use efficiency in semiarid southeast of the Loess Plateau[J]. Field crops research, 2018, 218:24-32.
- [17] XIAO J M, ZHU S F, HAN S J, et al. Fenlong-ridging deep tillage integrated with biochar and fertilization to improve sugarcane growth and yield[J/OL]. Agronomy, 2023, 13(9):2395 [2024-01-23]. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092395>.
- [18] ARORA V K, JOSHI R, SINGH C B. Irrigation and deep tillage effects on productivity of dry-seeded rice in a subtropical environment[J]. Agricultural research, 2018, 7(4):416-423.
- [19] YAO S H, TENG X L, ZHANG B. Effects of rice straw incorporation and tillage depth on soil puddlability and mechanical properties during rice growth period[J]. Soil and tillage research, 2015, 146:125-132.
- [20] 张雨萌, 郭艳杰, 张丽娟, 等. 生物炭配合深松对土壤团聚体及有机碳的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5):368-375. ZHANG Y M, GUO Y J, ZHANG L J, et al. Effects of biochar combined with subsoiling on soil aggregates and organic carbon[J]. Bulletin of soil and water conservation, 2022, 42(5):368-375.
- [21] WU Q X, DU B, JIANG S C, et al. Side deep fertilizing of machine-transplanted rice to guarantee rice yield in conservation tillage[J/OL]. Agriculture, 2022, 12(4):528 [2024-01-23]. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040528>.
- [22] KANG S W, KIM S H, PARK J H, et al. Effect of biochar derived from barley straw on soil physicochemical properties, crop growth, and nitrous oxide emission in an upland field in South Korea[J]. Environmental science and pollution research international, 2018, 25(26):25813-25821.
- [23] BURRELL L D, ZEHETNER F, RAMPAZZO N, et al. Long-term effects of biochar on soil physical properties[J]. Geoderma, 2016, 282:96-102.
- [24] SUN J, LI H, WANG Y, et al. Biochar and nitrogen fertilizer promote rice yield by altering soil enzyme activity and microbial community structure[J]. Global change biology bioenergy, 2022, 14(12):1266-1280.
- [25] KALU S, SIMOJOKI A, KARHU K, et al. Long-term effects of softwood biochar on soil physical properties, greenhouse gas emissions and crop nutrient uptake in two contrasting boreal soils[J/OL]. Agriculture, ecosystems & environment, 2021, 316:107454 [2024-01-23]. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107454>.
- [26] CHEN L, GUO L, DENG X, et al. Effects of biochar on rice yield, grain quality and starch viscosity attributes[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2023, 103(12):5747-5753.
- [27] CHEN X, YANG S, DING J, et al. Effects of biochar addition on rice growth and yield under water-saving irrigation[J/OL]. Water, 2021, 13(2):209 [2024-01-23]. <https://doi.org/10.3390/w13020209>.
- [28] HUANG M, FAN L, JIANG L G, et al. Continuous applications of biochar to rice: effects on grain yield and yield attributes[J]. Journal of integrative agriculture, 2019, 18(3):563-570.
- [29] ARUNRAT N, KONGSURAKAN P, SEREENONCHAI S, et al. Soil organic carbon in sandy paddy fields of northeast Thailand: a review[J/OL]. Agronomy, 2020, 10(8):1061 [2024-01-23]. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081061>.
- [30] LIU Y, LI H, HU T, et al. A quantitative review of the effects of biochar application on rice yield and nitrogen use efficiency in paddy fields: a Meta-analysis[J/OL]. Science of the total environment, 2022, 830:154792 [2024-01-23]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154792>.
- [31] CHEN W, LI P, LI F, et al. Effects of tillage and biochar on soil physiochemical and microbial properties and its linkage with crop yield[J/OL]. Frontiers in microbiology, 2022, 13:929725 [2024-01-23]. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.929725>.
- [32] ZHANG X, WANG M, ZHANG D, et al. Increasing soil organic carbon pools and wheat yields by optimising tillage and fertilisation on the Loess Plateau in China[J/OL]. European journal of soil science, 2022, 73(1):e13197 [2024-01-23]. <https://doi.org/10.1111/ejss.13197>.

## Effects of rice husk biochar combined with deep tillage on properties of soil in paddy fields and yield of rice

WANG Hongyue<sup>1</sup>, SONG Yufeng<sup>1</sup>, XIAO Hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, CHEN Kun<sup>2</sup>,  
DONG Yuchen<sup>3</sup>, CHEN Guanyi<sup>1</sup>, ZHONG Lei<sup>1</sup>

1. College of Environmental Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300384, China;

3. Tianjin Yapai Green Fertilizer Biological Science and Technology Development Co.,  
Ltd., Tianjin 301600, China

**Abstract** Treatments including the control (CK), deep tillage of 30 cm (T1), biochar 15 t/hm<sup>2</sup> (T2), and biochar 15 t/hm<sup>2</sup> + deep tillage of 30 cm (T3) were set up to conduct a field experiment to study the response of the properties of soil in paddy fields and the yield of rice to different agronomic measures in order to investigate agronomic measures for improving the quality of soil and increasing the yield of rice. The results showed that the application of biochar significantly increased the permeability coefficient in soil, organic matter, the yield of rice, the number of grains per panicle, and the biomass by 224.66%, 22.42%, 9.46%, 23.90%, and 6.51%, compared with that of the control. Deep tillage had no significant effect on the physicochemical properties of soil in paddy fields and the yield of rice. Biochar combined with deep tillage significantly increased the permeability coefficient in soil and the yield of rice by 184.25% and 9.93%, respectively. Biochar and deep tillage plowing had a significant interactive effect on the number of grains per panicle. The yield of rice and the biomass were significantly positively correlated with the permeability coefficient in soil and organic matter. There was a significant positive correlation between the number of grains per panicle and the permeability coefficient in soil. It is indicated that the application of biochar is an effective measure to improve the quality of soil and increase the yield of rice. It can improve the permeability in soil, increase the content of organic matter and the number of rice grains per panicle, and ultimately increase the yield of rice.

**Keywords** rice husk biochar; deep tillage; properties of soil; soil permeability; soil organic matter; yield; rice

(责任编辑:张志钰)