

# 生物炭施用对节水灌溉稻田土壤养分的影响

纪仁婧<sup>1</sup>, 胡梦阳<sup>2</sup>, 和玉璞<sup>1\*</sup>, 时元智<sup>1</sup>, 宋皓晨<sup>3</sup>, 冯政超<sup>3</sup>

(1.南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029;  
2.河海大学 农业科学与工程学院, 南京 211100; 3.南京市高淳区水务局, 南京 211300)

**摘要:**【目的】探究施用生物炭对节水灌溉条件下稻田土壤养分的影响, 为提升稻田土壤肥力、制定稻田水碳调控策略提供技术指导。【方法】在控制灌溉条件下, 设置0、10、20、40 t/hm<sup>2</sup>共4个生物炭施用水平, 分别记为CK、CL、CM、CH处理, 分析不同生物炭施用水平对节水灌溉条件下稻田土壤养分特征的影响。【结果】施用生物炭后, 各处理稻田土壤有机质、有机碳量由大到小依次为: CH处理>CM处理>CL处理>CK。2018年, CH、CM、CL处理下的水稻生育期土壤平均铵态氮量分别比CK增加1.52、0.61、0.39 g/kg, 2019年分别比CK处理减少2.01、1.71、0.99 g/kg; 施用分蘖肥后, CK条件下的稻田土壤铵态氮量上升速率最高, CH、CM、CL处理下的稻田土壤铵态氮量变化速率差异较小; 施用穗肥后, 2018年各处理土壤铵态氮量上升速率较为接近, 2019年上升速率为CK>CL处理>CM处理>CH处理。综合2a试验结果, CH、CM、CL处理下的稻田土壤硝态氮量的平均值比CK降低了32.34%、19.45%、9.21%。【结论】施用生物炭对节水灌溉条件下的稻田土壤有机质、有机碳量的提升效果与生物炭施用量呈正相关, 且随水稻生育进程的推进而逐渐下降; 新鲜生物炭可增加稻田土壤铵态氮量, 而老化生物炭的作用效果则相反; 施用生物炭可降低稻田土壤硝态氮量, 且硝态氮量与生物炭施用量呈负相关; 施用生物炭可在一定程度上减缓施肥后稻田土壤铵态氮量的上升速度, 对施肥后关键期内稻田氮素损失量的控制具有积极作用。

**关键词:** 节水灌溉; 生物炭; 稻田; 土壤养分

中图分类号: S278

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022376

OSID:



纪仁婧, 胡梦阳, 和玉璞, 等. 生物炭施用对节水灌溉稻田土壤养分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1): 47-53.

Ji Renjing, Hu Mengyang, He Yupu, et al. Effects of Biochar Amendment on Bioavailable Nutrients in Paddy Soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 47-53.

## 0 引言

【研究意义】中国作为水稻生产大国, 水稻种植面积约占全国粮食作物种植面积的26%, 产量占国内粮食总产量的32%<sup>[1]</sup>。水稻生产过程中耗水量较大, 其用水量约占农业用水总量的65%<sup>[2]</sup>。随着水稻节水灌溉的快速发展和大规模推广, 稻田灌溉用水量不断下降。在长期高强度耕作下, 稻田土壤肥力的保育与提升对保障水稻稳产、高产具有重要意义。如何在节水灌溉条件下进一步提升稻田土壤肥力, 从而提高水稻产量, 已成为研究的热点问题。【研究进展】施用生物炭是提升农田土壤肥力的有效方法<sup>[3-4]</sup>。生物炭施用可以改善土壤环境, 提高土壤持水、保肥能力, 减排温室气体排放<sup>[5-8]</sup>。添加生物炭可以提高土壤中有机质、有机碳量<sup>[9-11]</sup>, 但对土壤铵态氮、硝态氮量

的影响却存在争议。高德才等<sup>[12]</sup>、周志红等<sup>[13]</sup>研究结果表明, 添加少量生物炭对土壤氮素无明显影响。Sun等<sup>[14]</sup>、吴玉洁等<sup>[15]</sup>发现, 添加生物炭会降低土壤脲酶活性, 抑制尿素的硝化, 降低土壤铵态氮、硝态氮量。【切入点】以往围绕生物炭对节水灌溉条件下稻田土壤养分影响的研究中, 对于生物炭不同施用水平下的稻季土壤养分的变化过程和响应方面关注较少, 施肥后不同生物炭施用量对稻田土壤养分的影响效果尚不明确。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究基于田间原位观测试验, 研究不同生物炭施用水平对节水灌溉条件下稻田土壤养分动态变化过程的影响, 探讨施肥后关键期内生物炭施用对稻田土壤养分的影响效果及机制, 为科学制定稻田水碳调控策略提供技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于南京市高淳区桤溪镇尚义村(31°24'42"N, 119°9'40"E)。该区属于北亚热带和中亚热带过渡地区, 年平均气温16℃, 年平均降水量1190.8 mm。当地传统的农业生产模式为稻麦轮作,

收稿日期: 2015-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609141); 江苏省水利科技项目(2021052); 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y920009)

作者简介: 纪仁婧(1989-), 女, 工程师, 主要从事农田高效灌溉排水理论与环境效应研究。E-mail: jirenjing@126.com

通信作者: 和玉璞(1987-), 男, 高级工程师, 主要从事农田高效灌溉排水理论与环境效应研究。E-mail: heyupu28@163.com

耕层土壤为黏壤土，土壤有机质量 34.2 g/kg，全氮量 2.01 g/kg，全磷量 0.46 g/kg，全钾量 12.87 g/kg，pH 值 7.2。0~20、20~30、30~40 cm 土层的土壤饱和体积含水率分别为 52.0%、50.1%、47.9%。

### 1.2 试验设计

所有处理的灌溉模式均为控制灌溉，灌水下限控制在土壤饱和含水率的 60%~80%。生物炭施用量设置 4 个水平，分别为对照 0 (CK)、低生物炭施用量 10 t/hm<sup>2</sup> (L)、中等生物炭施用量 20 t/hm<sup>2</sup> (M) 和高生物炭施用量 40 t/hm<sup>2</sup> (H)，共计 4 个处理 (CK、CL、CM、CH)，每个处理重复 3 次。各小区的灌溉、施肥、植保等农艺管理措施一致。2018 年在稻田泡田前将生物炭按照设定的施用量均匀撒入各小区，并充分翻耕。施用的生物炭为南京勤丰秸秆科技有限公司生产的小麦秸秆生物炭，其理化性质如表 1 所示。

表 1 生物炭理化性质

Table 1 Physicochemical properties of biochar

碳/%	氢/%	氮/%	比表面积/ (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	孔容/ (cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> )	孔径/nm	灰分/%
38.523	2.375	1.325	40.483	0.049	15.745	39.305

### 1.3 试验布置

2018—2019 年，在配套有独立灌排系统和机械水表的田间小区内开展试验，各小区面积均为 60 m<sup>2</sup> (12 m×5 m)。小区之间使用砖砌混凝土埂进行分隔，砖砌混凝土埂埋设深度为田面以下 80 cm，沿砖砌混凝土埂两侧布设同样埋深的防水农膜，以减少小区之间的水分侧向交换，在砖砌混凝土埂的田面以上部分覆土夯实作为田埂。

2018 年，水稻于 6 月 16 日插秧，10 月 20 日收割；2019 年，水稻于 6 月 5 日插秧，10 月 12 日收割。水稻品种为南粳 5505，各处理稻田均沿用农民传统施肥方式，施肥过程如表 2 所示。

### 1.4 观测指标与方法

2018 年，在水稻返青期、分蘖中期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期采样，2019 年在 2018 年的基础上增加分蘖后期采样，采用五点取样法采集各小区 0~20 cm 土层土样，测定土壤有机质、有机碳、铵

态氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 量，测定方法详见《土壤农业化学分析方法》<sup>[16]</sup>，取部分鲜土样分别采用 KCL 浸提-靛酚蓝比色法、CaSO<sub>4</sub> 2H<sub>2</sub>O 浸提-酚二黄酸比色法测定土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 量和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 量，将剩余土样自然风干，研磨过筛后采用水合热重铬酸钾氧化-比色法测定土壤有机碳量，采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质量。

表 2 施肥过程

Table 2 Fertilization process

年份	施肥种类	化肥种类	施肥时间	施氮量/ (kg hm <sup>-2</sup> )
2018	基肥	碳酸氢铵，含氮量≥17.1%	20180613	85
	分蘖肥	尿素，含氮量≥46.2%； 复合肥，含氮量≥17%	20180704	52.2
		尿素，含氮量≥46.2%； 复合肥，含氮量≥17%	20180730	65.5
	合计			202.7
2019	基肥	碳酸氢铵，含氮量≥17.1%	20190601	93.5
	分蘖肥	尿素，含氮量≥46.2%； 复合肥，含氮量≥17%	20190625	40.2
		尿素，含氮量≥46.2%； 复合肥，含氮量≥17%	20190724	75.5
	合计			209.2

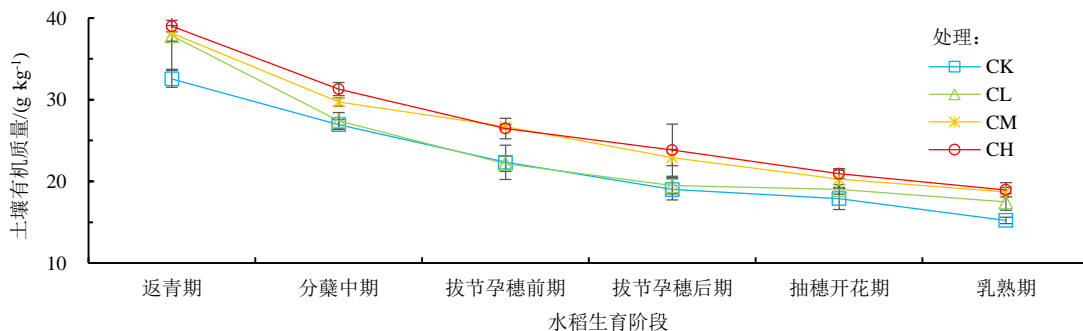
### 1.5 数据分析

用 Microsoft Excel 2016 分析数据并绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭施用对节水灌溉条件下稻田土壤有机质量的影响

不同生物炭施用量下的节水灌溉稻田土壤有机质量如图 1 所示。施用生物炭提高了节水灌溉条件下稻田土壤有机质量，且土壤有机质量与生物炭的施用量呈正相关。纵观整个水稻季，各处理稻田土壤有机质量总体呈先快后慢的下降趋势，不同生物炭施用量下的稻田土壤有机质量的差距随着水稻生育进程的推进逐渐缩小。2018—2019 年，与 CK 相比，CH、CM、CL 处理下的稻田土壤有机质量平均增幅分别为 26.33%、14.20%、6.81%。



(a) 2018 年

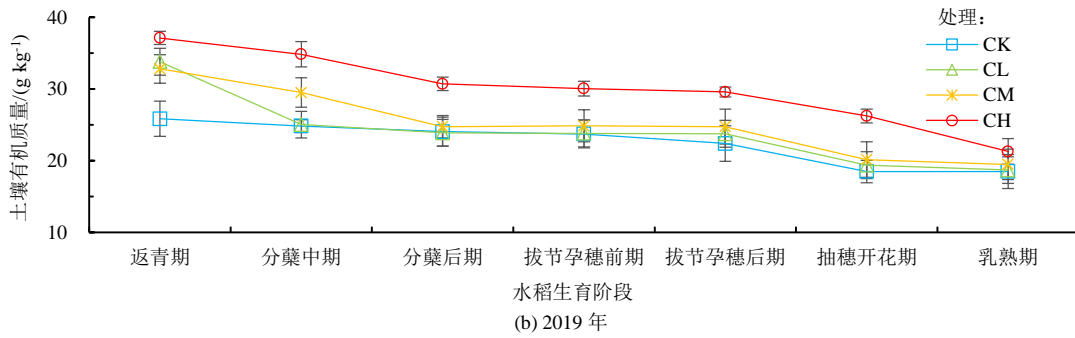


图 1 不同生物炭施用量下的稻田土壤有机质量

Fig.1 Soil organic matter content in water-saving irrigated paddy fields with different biochar application

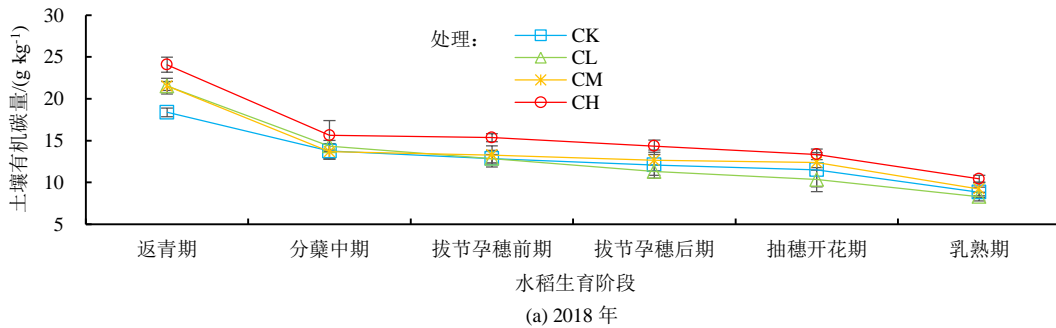
在水稻返青期，施用生物炭处理与 CK 之间的差异较大。与 CK 相比，CH、CM、CL 处理下的稻田土壤有机质量增加了 6.27~8.87 g/kg。各处理土壤有机质量下降，且呈先快后慢的趋势。在水稻分蘖中期，施用生物炭的稻田土壤有机质量相比 CK 增加了 0.38~7.22 g/kg，至水稻乳熟期，处理间的差异逐渐减小，CH、CM、CL 处理下的土壤有机质量相比 CK 增加了 1.25~3.28 g/kg。

### 2.2 生物炭施用对节水灌溉条件下稻田土壤有机碳量的影响

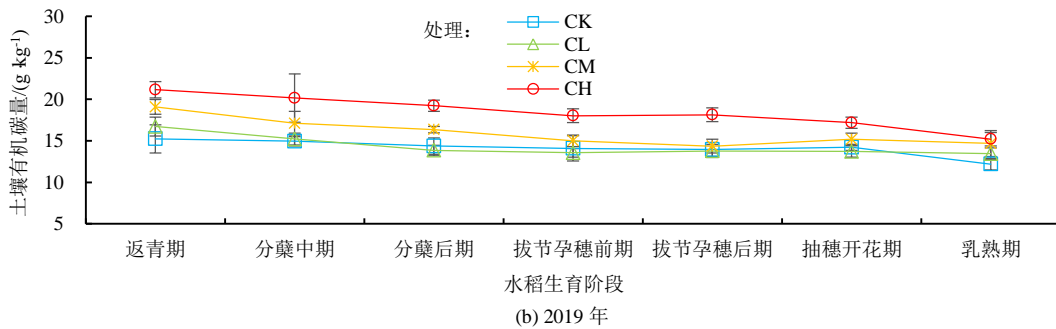
不同生物炭施用量下的稻田土壤有机碳量如图 2 所示。施用生物炭提高了稻田土壤有机碳量，且土壤有机碳量与生物炭的施用量呈正相关。纵观整个水稻

季，各处理稻田土壤有机碳量呈先快后慢的下降趋势，不同生物炭施用量下的稻田土壤有机碳量的差距随着水稻生育进程的推进而逐渐缩小。2018—2019 年，与 CK 相比，CH、CM、CL 处理下的稻田土壤有机碳量平均增幅分别为 25.57%、10.09%、1.65%。

在水稻返青期，施用生物炭处理与 CK 之间的差异较大。与 CK 相比，CH、CM、CL 处理下的稻田土壤有机碳量增加了 2.33~5.81 g/kg。随着水稻生育进程的推进，各处理土壤有机碳量逐渐下降。在水稻分蘖中期，CH、CM、CL 处理下的稻田土壤有机碳量相比 CK 增加了 0.43~3.54 g/kg，至水稻乳熟期，施用生物炭处理与 CK 的土壤有机碳量差距缩小至 0.38~2.31 g/kg。



(a) 2018 年



(b) 2019 年

图 2 不同生物炭施用量下的稻田土壤有机碳量

Fig.2 Soil organic carbon content in water-saving irrigated paddy fields with different biochar additions

### 2.3 生物炭施用对节水灌溉条件下的稻田土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 量的影响

不同生物炭施用量下的稻田土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 量如图 3 所示。施用生物炭对节水灌溉条件下的稻田土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 量的影响在年际间并不一致。2018 年的试验结果表明，施用生物炭能够提高土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 量，且

生物炭施用量与土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 量提高幅度呈正相关，而 2019 年的试验结果表明，稻田土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 量与生物炭施用量呈负相关。2018 年，CH、CM、CL 处理下的稻季土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 量的平均值分别相比 CK 增加了 1.52、0.61、0.39 mg/kg，增幅分别为 27.65%、11.15%、7.01%。2019 年，CH、CM、CL 处理下的稻季土壤

$\text{NH}_4^+\text{-N}$  量的平均值分别相比 CK 减少了 2.01、1.71、0.99  $\text{mg/kg}$ , 降幅分别为 44.22%、37.60%、21.93%。

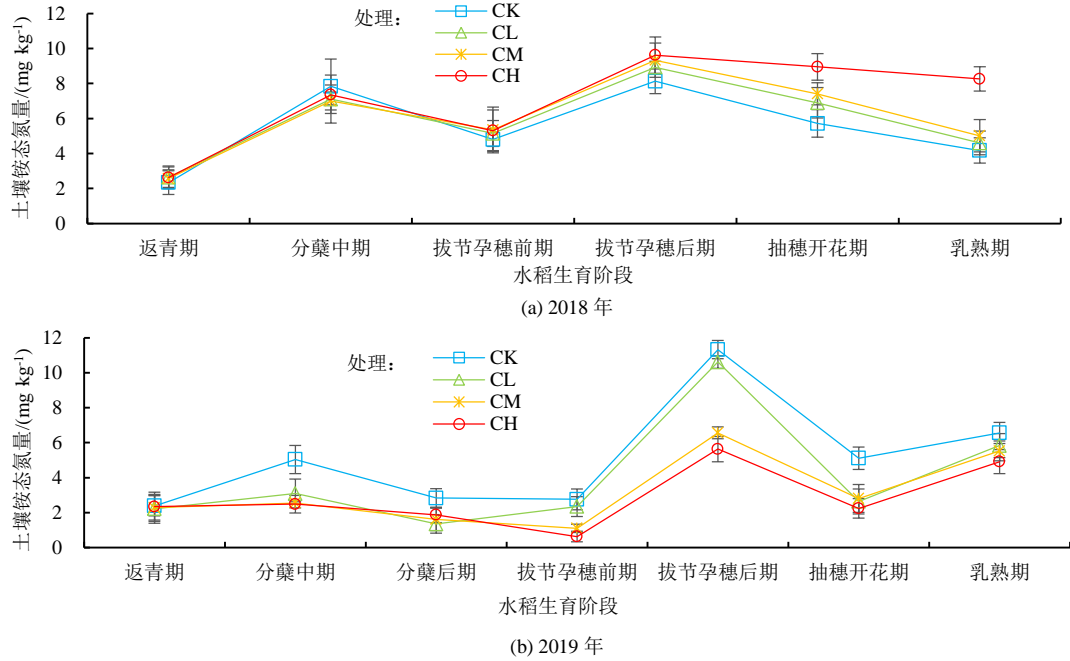


图 3 不同生物炭施用量下的稻田土壤铵态氮量

Fig.3 Soil ammonium nitrogen content in water-saving irrigated paddy fields with different biochar additions

施用生物炭一定程度上减缓了施肥后稻田土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量的上升速度。分蘖肥后, CK 条件下的稻田土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量上升速率最快, CH、CM、CL 处理下的稻田土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量变化速率较为接近。穗肥后, 稻田土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量开始上升, 至拔节孕穗后期达到整个生育期的峰值。2 a 内各处理的稻田土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量变化速率存在差异; 其中, 2018 年穗肥后各处理土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量上升速率较为接近, 而 2019 年穗肥后各处理稻田土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量的上升速率由大到小依次为: CK>CL 处理>CM 处理>CH 处理。

#### 2.4 生物炭施用对节水灌溉条件下稻田土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 量的影响

不同生物炭施用量下的稻田土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  量如图 4 所示。综合 2 a 的试验结果可知, 施用生物炭有效降低了节水灌溉条件下的稻田土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  量, 且土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  量与生物炭的施用量呈负相关。2018—2019 年, CH、CM、CL 处理下的水稻季土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  量的均值分别相比 CK 降低了 32.34%、19.45%、9.21%。施肥后各处理土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  量的变化特征没有明显规律。

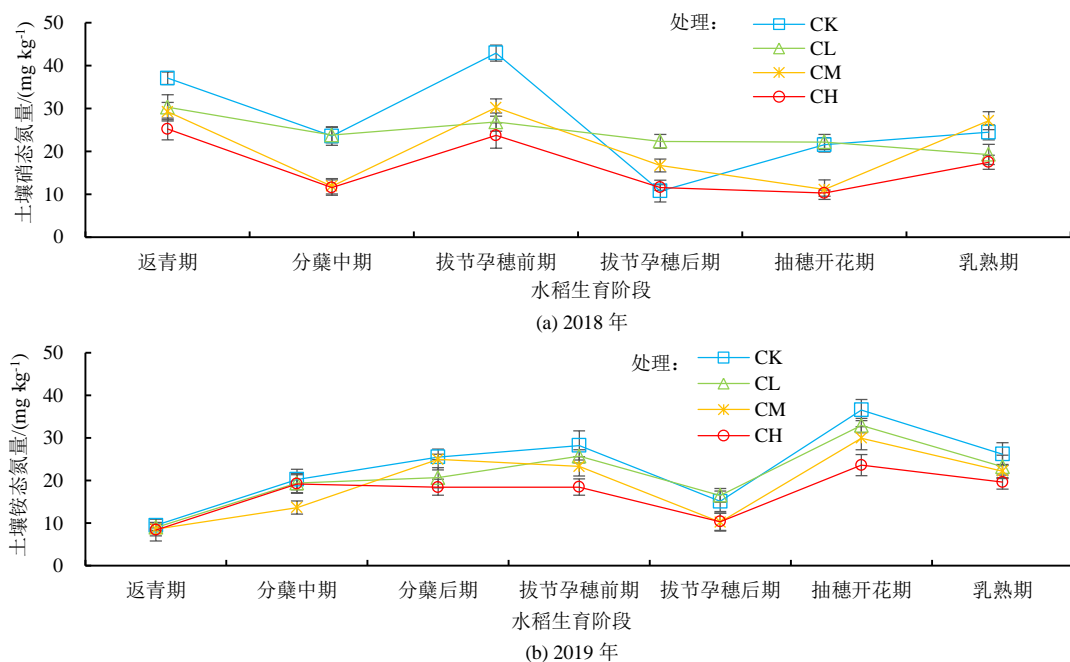


图 4 不同生物炭施用量下的稻田土壤硝态氮量

Fig.4 Soil nitrate nitrogen content in water-saving irrigation paddy fields with different biochar additions

### 3 讨论

本试验结果表明,施用生物炭可以提高节水灌溉条件下的稻田土壤有机质、有机碳量,且提升效果与生物炭施用量呈正相关,但作用效果随水稻生育进程的推进而逐渐下降。有机质是土壤的重要组成成分,施用生物炭相当于向土壤中添加外源有机质,因此可以增加土壤有机质量和有机碳量,且提高幅度取决于生物炭的施用量和稳定性<sup>[17-18]</sup>。随着水稻的发育,稻田土壤有机质量在矿化作用下不断下降,前期下降速率较快可能是由于添加的生物炭为土壤中微生物的繁殖提供了能源,增强了微生物的活性,进而促进了有机质矿化<sup>[19]</sup>。进入水稻生长中后期,由于土壤中有效养分的不断消耗,加之生物炭与土壤矿物质引起的老化作用,使得生物炭表面形成了新的官能团,促进了生物炭-矿物复合物的形成,增大了生物炭的表面积和孔径,降低了土壤有机质的矿化速率<sup>[20-22]</sup>,最终使得稻田有机质、有机碳量的下降速度减缓。因此,节水灌溉条件下的稻田施用生物炭后,稻田土壤有机质、有机碳量初始值较高,随后呈先快后慢的下降趋势,且与未施用生物炭处理的差距在不断缩小。

生物炭施用对节水灌溉条件下稻田土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量的影响随施用年限而变化。2018 年的试验结果表明,稻田土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量与生物炭的施用量成正相关关系。陈曦等<sup>[5]</sup>研究指出,节水灌溉稻田施加高量(40  $\text{t}/\text{hm}^2$ )生物炭下的土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量比不施生物炭处理提高了 26.47%。贾俊香等<sup>[23]</sup>在菜地的研究表明,施加生物炭处理后,菜地土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量提高了 34.9%。生物炭施入土壤后易形成较大的团聚体,对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  离子有较好的吸附及固持效果<sup>[24-25]</sup>。2019 年的试验结果表明,稻田土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量随生物炭施用量的增加呈下降趋势,这可能是由于生物炭老化减弱了其土壤氮素的固持作用<sup>[26-27]</sup>,此外,丛日环等<sup>[28]</sup>研究表明,土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量与有机碳量呈显著负相关。本研究表明,施用生物炭提高了节水灌溉条件下稻田土壤有机碳量,而有机碳又进一步抑制了土壤对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量的吸附能力,增加土壤的通透性,有利于硝态氮的转化。因此,在 2019 年呈现出生物炭施用降低了节水灌溉稻田土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量的现象。

由于本试验采用尿素施肥,尿素在脲酶的作用下发生水解生成  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,脲酶活性则反映了土壤对氮素的需求和利用<sup>[29]</sup>。已有研究指出,秸秆等常规生物炭会抑制脲酶活性,生物炭对脲酶活性的抑制可能是其表面自由基或自由基促使产生的活性氧簇与脲酶发生氧化反应的结果<sup>[14,30]</sup>。生物炭施用后,节水灌溉条件下的稻田土壤脲酶活性下降,使得稻田施肥后土壤

$\text{NH}_4^+\text{-N}$  量上升速率较对照出现了不同程度的降低。肥后 7 d 是稻田土壤氮素通过氨挥发、淋失的关键时期<sup>[31]</sup>,生物炭的施用减缓了脲酶的作用,对稻田氮素损失量的控制具有积极作用。本试验结果表明,稻田土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  量与生物炭施用量呈负相关,这与贾俊香等<sup>[23]</sup>研究结论一致。研究表明,添加麦秸和烟杆 2 种生物炭均可通过抑制硝化作用降低土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  量,并且影响效果与生物炭施加量呈正相关关系<sup>[15,32]</sup>。

### 4 结论

1) 施用生物炭提高了节水灌溉条件下稻田土壤有机质、有机碳量,且提升效果与生物炭施用量呈正相关,但其作用效果随水稻生育进程的推进而下降。

2) 施用生物炭对节水灌溉条件下稻田土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量的影响存在年际效应,新鲜生物炭可增加稻田土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量,而老化生物炭的作用效果则相反。施用生物炭会降低稻田土壤的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  量,且土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  量与生物炭的施用量呈负相关。

3) 施用生物炭会在一定程度上减缓施肥后稻田土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  量的上升速度,对施肥后关键期内稻田氮素损失量的控制具有积极作用。

### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [2] 姚林, 郑华斌, 刘建霞, 等. 中国水稻节水灌溉技术的现状及发展趋势[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1 381-1 387. YAO Lin, ZHENG Huabin, LIU Jianxia, et al. Current situation and prospect of rice water-saving irrigation technology in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(5): 1 381-1 387.
- [3] 刘安凯. 施用水稻秸秆生物炭对黄壤稻田土壤养分和水稻产质的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021. LIU Ankai. Effect of rice straw biochar application on soil nutrients and rice yield and quality in yellow soil paddy field[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [4] 斯林林. 生物炭配施化肥对稻田养分利用及流失的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. SI Linlin. Effects of biochar combined with fertilizer on nutrient use and loss in paddy fields[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [5] 陈曦, 江颀伟, 丁洁, 等. 生物炭施用对节水灌溉稻田土壤氮素量及脲酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(19): 268-274. CHEN Xi, JIANG Zewei, DING Jie, et al. Effects of biochar application on soil nitrogen content and urease activity in water-saving irrigated paddy fields[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(19): 268-274.
- [6] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 68-79. WU Yu, XU Gang, LYU Yingchun, et al. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: current status and knowledge gaps[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(1): 68-79.
- [7] 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭主要类型 理化性质及其研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1 402-1 417. YUAN Shuai, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. The main types of



- biochar and their properties and expectative researches[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(5): 1 402-1 417.
- [8] 张作合. 黑土稻田施加生物炭对水氮利用及温室气体排放的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- ZHANG Zuohe. Effects of biochar application on water and nitrogen utilization and greenhouse gas emissions in black soil paddy field[D]. Haerbin: Northeast Agricultural University, 2021.
- [9] 高海英, 何绪生, 陈心想, 等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(10): 1 948-1 955.
- GAO Haiying, HE Xusheng, CHEN Xinxiang, et al. Effect of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil chemical properties and crop yield[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(10): 1 948-1 955.
- [10] 顾美英, 刘洪亮, 李志强, 等. 新疆连作棉田施用生物炭对土壤养分及微生物群落多样性的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(20): 4 128-4 138.
- GU Meiyong, LIU Hongliang, LI Zhiqiang, et al. Impact of biochar application on soil nutrients and microbial diversities in continuous cultivated cotton fields in Xinjiang[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(20): 4 128-4 138.
- [11] 赵殿峰, 徐静, 罗璇, 等. 生物炭对土壤养分 烤烟生长以及烟叶化学成分的影响[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(3): 85-92.
- ZHAO Dianfeng, XU Jing, LUO Xuan, et al. Effect of biochar on soil nutrients, growth and chemical composition of tobacco[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2014, 23(3): 85-92.
- [12] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(6): 54-61.
- GAO Decai, ZHANG Lei, LIU Qiang, et al. Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(6): 54-61.
- [13] 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 Zhihong, LI Xinqing, XING Ying, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(2): 278-284.
- [14] SUN Haijun, ZHANG Huanchao, SHI Weiming, et al. Effect of biochar on nitrogen use efficiency, grain yield and amino acid content of wheat cultivated on saline soil [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2019, 65(2): 83-89.
- [15] 吴玉洁, 孙亚娇, 郭昕晔, 等. 麦秸和烟秆生物炭对氮肥硝化作用及  $N_2O$  和  $NH_3$  排放的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(11): 60-66, 76.
- WU Yujie, SUN Yajiao, GUO Xinye, et al. Impact of wheat straw and tobacco straw biochar on nitrification of nitrogenous fertilizer and emission of  $N_2O$  and  $NH_3$ [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(11): 60-66, 76.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Rukun. Methods for soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [17] BRUNO Glaser, LUDWIG Haumaier, GEORG Guggenberger, et al. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics[J]. *Naturwissenschaften*, 2001, 88(1): 37-41.
- [18] MICHAEL W.I.Schmidt, ANGELA G.Noack. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 777-794.
- [19] 李有兵, 把余玲, 李硕, 等. 作物残体与其生物炭配施对土壤有机碳及其自身矿化率的提升[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 943-950.
- LI Youbing, BA Yuling, LI Shuo, et al. Combined addition of crop residues and their biochar increase soil organic C content and mineralization rate[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4): 943-950.
- [20] LIN Yun, PAUL Munroe, STEPHEN Joseph, et al. Nanoscale organo-mineral reactions of biochars in ferrosol: an investigation using microscopy[J]. *Plant and Soil*, 2012, 357(1): 369-380.
- [21] REN Xinhao, WANG Fei, ZHANG Peng, et al. Aging effect of minerals on biochar properties and sorption capacities for atrazine and phenanthrene[J]. *Chemosphere*, 2018(206): 51-58.
- [22] 龙思帆. 生物炭对紫色土有机碳组分变化及其稳定性的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2019.
- LONG Sifan. Effect of biochar on fractions and stability of organic carbon in purple soil[D]. Chengdu: Sichuan agricultural university, 2019.
- [23] 贾俊香, 熊正琴. 秸秆生物炭对菜地  $N_2O$   $CO_2$  与  $CH_4$  排放及土壤化学性质的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(2): 283-288.
- JIA Junxiang, XIONG Zhengqin. Impact of application of maize stalk-derived biochar on soil properties of and  $N_2O$ ,  $CO_2$  and  $CH_4$  emissions from vegetable fields[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*; 2016, 32(2): 283-288.
- [24] KEI Mizuta, TOSHITATSU Matsumoto, YASUO Hatate, et al. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3): 255-257.
- [25] CHAN K Y L. VAN Zwieten, MESZAROS L, et al. Using poultry litter biochars as soil amendments[J]. *Soil Research*, 2008, 46(5): 437-444.
- [26] 王宣茗, 王丽学, 苏旭, 等. 生物炭陈化对玉米产量及土壤水肥的影响[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(8): 1 570-1 579.
- WANG Xuanming, WANG Lixue, SU Xu, et al. Effects of biochar aging on yield of maize and soil moisture and fertility[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(8): 1 570-1 579.
- [27] 李玉婷. 老化生物炭对土壤重金属生物有效性及氮素的影响[D]. 太原: 山西大学, 2020.
- LI Yuting. Effects of aged biochar on the bioavailability of heavy metals and nitrogen in soil[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020.
- [28] 丛日环, 张丽, 鲁艳红, 等. 长期秸秆还田下土壤铵态氮的吸附解吸特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 380-388.
- CONG Rihuan, ZHANG Li, LU Yanhong, et al. Adsorption-desorption characteristics of soil ammonium under long-term straw returning condition[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2): 380-388.
- [29] 许云翔, 何莉莉, 刘玉学, 等. 施用生物炭 6 年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1 110-1 118.
- XU Yunxiang, HE Lili, LIU Yuxue, et al. Effects of biochar addition on enzyme activity and fertility in paddy soil after six years[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1 110-1 118.
- [30] YANG Liu, DAI Qunying, JIN Xiuqi, et al. Negative impacts of biochars on urease activity: high pH, heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons, or free radicals?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(21): 12 740-12 747.
- [31] HE Yupu, ZHANG Jianyun, YANG Shihong, et al. Effect of controlled drainage on nitrogen losses from controlled irrigation paddy fields through subsurface drainage and ammonia volatilization after fertilization[J]. *Agricultural Water Management*, 2019(221): 231-237.
- [32] 朱继荣, 韦绪好, 祝鹏飞, 等. 施用生物炭抑制塌陷区复垦土壤硝化作用[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(7): 264-271.
- ZHU Jirong, WEI Xuhao, ZHU Pengfei, et al. Biochar addition inhibiting nitrification of reclaimed soils in coal-mining subsidence area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(7): 264-271.

## Effects of Biochar Amendment on Bioavailable Nutrients in Paddy Soil

JI Renjing<sup>1</sup>, HU Mengyang<sup>2</sup>, HE Yupu<sup>1\*</sup>, SHI Yuanzhi<sup>1</sup>, SONG Haochen<sup>3</sup>, FENG Zhengchao<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering,  
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

3. Gaochun Water Authority, Nanjing 211300, China)

**Abstract:** 【Objective】 Biochar is often used in soil amendment to improve soil quality and productivity. The objective of this paper is to investigate its efficacy in improving soil nutrients in a water-saving irrigated paddy soil.

【Method】 The experiment was conducted from 2018 to 2019 in a paddy field with controlled irrigation. It consisted of four biochar treatments: 0 (CK), 10 (CL), 20 (CM) and 40 t/hm<sup>2</sup> (CH). In each treatment, we measured soil organic matter and mineral nitrogen.

【Result】 Amending the soil with biochar increased soil organic carbon and the increase was in the order of CH>CM>CL>CK. The impact of biochar amendment on soil mineral nitrogen varied. Compared to CK, CH, CM and CL increased ammonium by 1.52, 0.61 and 0.39 g/kg, respectively, in 2018, while reduced them by 2.01, 1.71 and 0.99 g/kg, respectively, in 2019. After fertilizer application at the tillering stage, CK saw the fastest increase in ammonium, while the ammonium in other treatments was comparable. After fertilizer application at the spiking stage in 2019, ammonium content was comparable with that in 2018, and its content in other treatments in 2019 was ranked in the order of CK>CL>CM>CH. The two-year experiment showed that CH, CM and CL reduced nitrate content by 32.34%, 19.45% and 9.21%, respectively, compared to CK.

【Conclusion】 The effect of biochar amendment on soil organic carbon in the water-saving irrigated paddy field was positively correlated with the biochar amount, but decreased as time elapsed. The biochar increased ammonium content only at the early stage after the amendment, but it reduced nitrate nitrogen content. Nitrate content was negatively correlated with biochar amendment amount. The biochar slows down the increase of ammonium following fertilization, thereby reducing nitrogen loss.

**Key words:** water saving irrigation; biochar; paddy field; soil nutrients

责任编辑：韩 洋

(上接第 46 页)

## Effect of Irrigation and Planting Patterns on Yield, Quality and Economic Return of Winter Wheat-cotton Cropping System

GUO Xuan<sup>1</sup>, GUAN Xiaokang<sup>1</sup>, WEN Pengfei<sup>1</sup>, WANG Tongchao<sup>1\*</sup>,

ZHANG Hao<sup>2</sup>, WANG Shunsheng<sup>2</sup>, TONG Hao<sup>2</sup>

(1. Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China;

2. North China University of Water Resources and Hydropower, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** 【Objective】 Winter wheat-cotton rotation is a common cultivation in Yellow River Basin in China, but they have an overlapped growing period. How to plant the cotton to make most of above- and below-ground resources is an issue that is not well understood. This paper aims to investigate how planting and irrigation combine to modulate growth, yields, quality and economic return of the two crops. 【Method】 The experiment was conducted in a field, with the cotton either directly drilled before the wheat was harvested or transplanted from a seedling bed after wheat harvest. We compared three irrigations: border irrigation, micro-sprinkling hose irrigation and surface drip irrigation. 【Result】 Transplantation improved leaf area index (*LAI*) and yield of the winter wheat, as well as the net income of winter wheat compared with directly drilling, despite a 5.64% reduction in cotton yield; overall, its total net income was 8.64% higher than the directly drilling. Compared with border irrigation and micro-sprinkling hose irrigation, surface drip irrigation significantly improved the plant height, *LAI*, yield and economic return of the two crops. The total net income of surface drip irrigation was 36.01% and 10.10% higher than that of border irrigation and micro-sprinkling hose irrigation, respectively. Transplantation combined with surface drip irrigation gave the highest net income at 15 924.9 yuan/hm<sup>2</sup>. 【Conclusion】 Transplanting cotton seedling after harvesting the winter wheat combined with surface drip irrigation reduces their competition for resources and is therefore optimal for wheat-cotton rotation in the Yellow River Basin.

**Key words:** wheat cotton interplanting; transplanting cotton after wheat harvest; border irrigation; micro-sprinkling hose irrigation; surface drip irrigation; net profit

责任编辑：韩 洋