



李果,王熙颖,魏露露,张帅,崔建宇.施用猪粪水热炭对玉米幼苗生长和土壤养分的影响[J].中国农业大学学报,2026,31(02):1-12.

LI Guo, WANG Xiyong, WEI Lulu, ZHANG Shuai, CUI Jianyu. Effect of application of pig manure hydrochar on maize seedlings growth and soil nutrients[J].

Journal of China Agricultural University, 2026, 31(02): 1-12.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.02.01

## 施用猪粪水热炭对玉米幼苗生长和土壤养分的影响

李果<sup>1</sup> 王熙颖<sup>2</sup> 魏露露<sup>1</sup> 张帅<sup>3</sup> 崔建宇<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业大学 资源与环境学院/农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室, 北京 100193;

2. 华南理工大学 环境与能源学院, 广州 510006;

3. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所/北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室, 北京 100081)

**摘要** 为探究猪粪水热炭对土壤养分含量和玉米幼苗生长的影响。通过玉米盆栽试验,设置对照处理(CK)、施用猪粪处理(PM)、施用220℃生产的猪粪水热炭处理(HC220)和施用260℃生产的猪粪水热炭处理(HC260)共4个处理,采用重铬酸钾氧化、凯氏定氮、NaCl/KCl浸提、钼蓝法对比不同处理对玉米株高和干重、土壤有机碳、氮磷养分含量及组分变化。结果表明:与CK处理相比,HC220和HC260处理未对幼苗株高和干重产生显著影响,但土壤有机碳含量显著提高了74.7%和94.4%,全氮含量均显著提高了55.1%,全磷含量显著提高了65.0%和80.0% ( $P<0.05$ ),HC220处理土壤有效磷含量还显著增加了11.5% ( $P<0.05$ );与PM处理相比,HC220和HC260处理显著提高了幼苗株高39.2%和32.8%,幼苗干重提高了77.5%、56.3%,土壤有机碳含量显著提高了32.4%和47.4%,全氮含量均增加了15.2%,硝态氮和铵态氮含量均显著降低7.89%~8.35%和78.7%~78.8%,全磷含量显著增加了26.9%和38.5%,有效磷含量显著降低了42.7%和50.6% ( $P<0.05$ )。采用高锰酸钾氧化法、Hedley磷素分组进一步对土壤有机碳库和磷库进行化学分组发现,施用猪粪水热炭显著增加了土壤有机碳库中稳定性有机碳的含量和占比,显著增加了土壤磷库中钙结合磷(由HCl-P<sub>i</sub>组分表示)的含量,且随着水热炭生产温度增加效果进一步增强。因此,猪粪水热炭可以作为有机肥提升土壤肥力,与传统猪粪有机肥相比,猪粪水热炭能增加有机碳稳定性、调节磷素释放速率和促进玉米幼苗生长。

**关键词** 猪粪; 水热炭; 玉米生长; 土壤养分

中图分类号 S153

文章编号 1007-4333(2026)02-0001-12

文献标志码 A

## Effect of application of pig manure hydrochar on maize seedlings growth and soil nutrients

LI Guo<sup>1</sup>, WANG Xiyong<sup>2</sup>, WEI Lulu<sup>1</sup>, ZHANG Shuai<sup>3</sup>, CUI Jianyu<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environmental, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China;

3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning/State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arable Land in China, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract** To investigate the effects of pig manure-derived hydrochar on soil nutrients and corn seedling growth, a maize pot experiment was conducted under four treatments: a control (CK), raw pig manure (PM), pig manure-derived hydrochar produced at 220℃ (HC220) and 260℃ (HC260), respectively. The seedling height and dry weight of maize, along with soil organic carbon, nitrogen and phosphorus content/fractions, were determined

收稿日期: 2025-05-10; 接受日期: 2025-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(42307434); 国家重点研发计划(2023YFE0104700)

第一作者: 李果(ORCID: 0009-0008-5540-9088), 硕士研究生, E-mail: liguo@zgnydx@163.com

通讯作者: 崔建宇(ORCID: 0009-0008-7727-5885), 副教授, 主要从事作物养分管理及土壤质量研究, E-mail: cuijy@cau.edu.cn

by potassium-dichromate oxidation, Kjeldahl digestion, NaCl/KCl extraction and the molybdenum-blue methods, respectively. The results indicated that: Compared to the CK treatment, neither HC220 nor HC260 treatments significantly affected the seedling height and dry weight, yet both significantly increased soil organic carbon content by 74.7% and 94.4%, total nitrogen by 55.1% and 55.1%, and total phosphorus by 65.0% and 80.0% ( $P<0.05$ ). The HC220 treatment also significantly increased soil available phosphorus content by 11.5% relative to CK ( $P<0.05$ ). Compared to the PM treatment, the HC220 and HC260 treatments significantly increased seedling height by 39.2% and 32.8%, seedling dry weight by 77.5% and 56.3%, soil organic carbon content by 32.4% and 47.4%, total nitrogen content by 15.2% and 15.2%, and total phosphorus content by 26.9% and 38.5%, respectively. Meanwhile, the HC220 and HC260 treatments significantly reduced nitrate content by 7.89% and 8.35%, ammonium content by 78.8% and 78.7%, available phosphorus content by 42.7% and 50.6% ( $P<0.05$ ), compared with the PM treatment. Using the potassium permanganate oxidation method and the Hedley phosphorus fractionation method for further chemical fractionation of the soil organic carbon and phosphorus pools, it was found that the pig manure-derived hydrochar application significantly increased the content and proportion of stable organic carbon fraction and the content of Ca-bound phosphorus (indicated by HCl-P<sub>i</sub> fraction) in the soil. The above positive effects were amplified with the increase in hydrochar production temperature. In conclusion, pig manure-derived hydrochar improves soil fertility, enhances organic carbon stability, regulates phosphorus release, and promotes maize seedling growth compared with traditional pig manure fertilizer.

**Keywords** pig manure; hydrochar; maize growth; soil nutrients

我国畜禽养殖业的快速发展在确保肉类产品供给的同时,也产生了每年约40亿t的畜禽粪污,经过恰当处理后作为有机肥料施用,可以促进其中的氮、磷等养分的资源化利用,并避免养分流失到附近水体引发的富营养化等环境问题<sup>[1-3]</sup>。目前,一方面,我国畜禽粪污综合利用率已达到79%,但仍有超过9亿t未能得到很好的资源化利用;另一方面,畜禽粪污资源化利用的先进工艺、技术和装备的研发取得了重要成果。如何充分结合当下畜禽粪污处理处置技术发展,进一步推动高效资源化利用畜禽粪污是当下研究和生产实践共同关注的热点。其中我国生猪粪污年产生量约18亿t,约占总量的47%。因此,猪粪急需得到有效处理和利用。

水热炭化是以生物质为原料,在130~260℃自生压力下以水为介质,通过热化学反应得到的生物质炭<sup>[4-5]</sup>。所得的水热炭具有高产率以及孔隙结构和含氧官能团丰富等优点<sup>[6-7]</sup>。与传统处理方法(如堆肥、厌氧发酵、直接还田等)相比,水热炭化技术可快速转化有机物,显著减少固体废弃物体积,降低恶臭气体和温室气体排放;与热解技术相比,水热炭化处理畜禽粪污具有显著优势,即不需要对高含水率的原料进行脱水,可直接处理畜禽粪污等湿生物质<sup>[8]</sup>,且反应时间短、温度低,具有低耗能、方便快捷的特点。此外,大量研究指出对畜禽粪污进行

水热炭化处理降低了盐分和重金属元素的含量,并且保存了粪污中大部分的有机质和养分,因此水热炭有很好的提升土壤肥力和碳封存的潜力<sup>[9]</sup>。

水热炭本身含有丰富的营养元素,具有作为肥料为作物生长直接提供营养的潜力<sup>[10]</sup>;其表面结构疏松可以改良土壤结构,影响土壤理化性质和养分有效性,促进作物生长<sup>[11]</sup>。用水热炭进行土壤改良可以提高生菜<sup>[12]</sup>、多年生黑麦草<sup>[13]</sup>和水稻<sup>[14-15]</sup>的生长<sup>[16]</sup>;在大豆生长时期,添加水热炭可以提高大豆幼苗的株高、根长以及地上、地下部的鲜重、干重<sup>[17]</sup>;适量施用水热炭源改良剂提高了土壤矿质元素含量,对牧草的生长具有促进作用<sup>[18-19]</sup>。综上,向土壤中添加适宜的水热炭对促进植物生长有积极作用。Deenik等<sup>[20]</sup>研究发现水热炭可以为土壤提供有机碳,且随着水热炭添加比例的增加,土壤中碳的可利用性也随之提高,可以为微生物提供能量并促进其生长;向土壤中施用玉米水热炭增加土壤有机碳含量,水热炭中的碳能够与更稳定的土壤有机质发生相互作用并结合<sup>[21]</sup>,这有助于稳定土壤中的碳,增强土壤的碳储存能力。此外,研究发现水热炭对土壤有机碳含量和作物生长的影响受到水热炭施用量的显著影响,如Feng等<sup>[22]</sup>报道了施用3%的小麦秸秆水热炭使得水稻产量大幅度降低60.4%,而施用0.5%的小麦秸秆水热炭时则不影

响作物生长。

此外,添加水热炭后对土壤释放温室气体和氮磷元素具有显著减排作用。Adjuk等<sup>[23]</sup>基于水热炭的大田试验结果显示,施用水热炭可以显著降低土壤CO<sub>2</sub>的排放<sup>[24]</sup>;Zhou等<sup>[25]</sup>发现施用少量的水热炭可降低稻田土壤CH<sub>4</sub>的排放<sup>[24]</sup>;Hou等<sup>[26]</sup>试验发现水热炭也可用于抑制土壤N<sub>2</sub>O的排放。水热炭中的挥发性有机物可能会抑制硝化与反硝化过程微生物的活性,降低N<sub>2</sub>O的排放量<sup>[27]</sup>。水热炭对养分(例如NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)的吸附增强增加了NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N等养分的植物可用性,并降低了其产生的环境影响,如降低温室气体排放和氮淋溶<sup>[16]</sup>。Bargmann等<sup>[27]</sup>研究表明施用水热炭后土壤中的矿物氮特别是硝态氮的含量降低。刘梅<sup>[28]</sup>研究发现,与直接施用粪便污泥相比,添加水热炭使土壤淋出总磷浓度增加的幅度更小。

水热炭还田的效果还取决于其理化性质,而其理化性质受到生产条件(如反应温度、停留时间、原料类型、固液比例和pH等)的显著影响。已有研究发现猪粪在160~240℃的反应温度下水热炭化,水热炭中磷质量分数为21.5~30.6 g/kg,磷含量高于原料,且随炭化温度升高逐渐增大<sup>[29]</sup>。随着炭化温度从140℃增加到220℃,猪粪水热炭中有机碳含量增加了8.94%,全氮含量变化较4.46%~4.69%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>的含量在3.71%~6.04%<sup>[30]</sup>。

基于水热炭富含氮磷养分,对刺激部分作物生长和培肥土壤有积极作用,其性质也受到生产温度

显著影响的特点。四川、湖南作为我国的养猪大省,近年来为促进经济发展,加大了对玉米等经济作物的种植力度,尽管已有研究涉及水热炭对小麦、大豆等作物生长的影响,但针对玉米的相关研究相对较少。因此,为探究不同温度下制备的猪粪水热炭对玉米幼苗生长及其土壤养分变化的影响,拟选择玉米作为试验作物,通过盆栽试验,测定施用不同温度制备的猪粪水热炭对玉米幼苗株高、干重和土壤有机碳、氮磷养分含量及组分的变化,以期土壤碳氮磷调控和猪粪水热炭作为有机肥的潜在利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及制备

#### 1.1.1 猪粪水热炭的制备

考虑到实际生产中,养殖废水的含固率高度不稳定,而水热炭的性质又受到了包括固液比等生产条件因素的显著影响。本研究猪粪水热炭的制备程序参考Xie等<sup>[31]</sup>研究。风干猪粪磨成粉末后过0.5 mm筛,以 $m(\text{猪粪粉末}):V(\text{去离子水})=1:10$ 的比例在反应釜中混合,以3℃/min的升温速率升至预设温度(220℃和260℃),保温2 h后自然降至室温,得到220℃、260℃固液混合相。降至室温后,进行固液分离,所得固体经105℃烘干24 h得到220℃水热炭(HC220)、260℃水热炭(HC260)。猪粪(PM)和猪粪水热炭的理化性质和元素含量见表1。

表1 猪粪和猪粪水热炭的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of pig manure and pig manure-derived hydrochar

| 处理<br>Treatment   | pH   | EC/<br>(μS/cm) | 有效磷/<br>(mg/kg)<br>Olsen-P | 有机质/%<br>Organic<br>matter | 元素质量浓度/%<br>Element content |      |      |      |      |      |
|-------------------|------|----------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|
|                   |      |                |                            |                            | C                           | N    | H    | S    | O    | P    |
| 施用猪粪 PM           | 7.80 | 2 450          | 11.4                       | 39.4                       | 32.9                        | 2.26 | 5.70 | 0.38 | 40.0 | 2.16 |
| 施用220℃猪粪水热炭 HC220 | 6.04 | 92.9           | 71.2                       | 46.9                       | 43.0                        | 2.31 | 5.13 | 0.25 | 22.8 | 3.71 |
| 施用260℃猪粪水热炭 HC260 | 6.40 | 29.4           | 62.6                       | 42.5                       | 46.2                        | 2.58 | 4.92 | 0.34 | 10.1 | 4.59 |

#### 1.1.2 供试土壤

本试验的供试土壤为潮土,取自山东省寿光市。土壤自然风干之后过2 mm筛,待用。供试土壤基本理化性质:pH为7.90,EC为

1 719 μS/cm,全氮含量1.08 g/kg,硝态氮和铵态氮含量分别为629和1.98 mg/kg,全磷、有效磷和速效钾含量为826、77和252 mg/kg,有机质含量为11.3 g/kg。

### 1.1.3 供试作物种子

供试作物为玉米,品种为“郑单958”,将玉米种子用10%  $H_2O_2$ 消毒15 min,去离子水浮选种子以去掉瘪粒,洗净后浸泡在饱和 $CaSO_4$ 溶液中过夜。用去离子水反复冲洗,挑选籽粒饱满的种子,室温25℃避光培养催芽一天,挑选长势一致的种子用于盆栽试验。

### 1.2 试验设计

盆栽试验设置4个处理,分别为不施用猪粪和猪粪水热炭的对照处理(CK)、施用猪粪原料处理(PM)、施用220℃生产的猪粪水热炭处理(HC220)以及施用260℃生产的猪粪水热炭处理(HC260)。每个处理设置4个重复。以往研究发现,水热炭在较低的投加质量比(0.1%~1.0%)有利于种子的萌发,在较高投加比(1.5%~2.0%)有明显的抑制作用<sup>[32]</sup>,因此,选定后续盆栽试验以1%的投加比进行试验。在土壤中添加猪粪或猪粪水热炭,添加量为土壤质量的1%。

试验所用花盆开口直径为13.5 cm,高为10.5 cm,容积约为1.2 L,每盆装入1 kg土壤(先将水热炭混拌均匀,再进行装盆)。将玉米种子埋入约0.5 cm深度的土壤,轻微压实。1盆埋入5粒,10 d后间苗,每盆留3株。播种后加50 mL水,待吸收后再补充30 mL,以本次补充后盆栽重量为基线,播种后的第2~6天根据称重法一天补充2次水分,第7天后开始每天补充一次水分,每次补充前后称重记录。玉米种子定植后,期间土壤水分状况保持在田间持水量的60%~70%,田间持水量的保持采用称重法,考虑到相较于花盆和土壤的总重量,幼苗时期玉米的植株重量变化有限,尽管植株重量增加一定程度上导致水分补充量减少,但仍可以使土壤水分状况保持在田间持水量的60%~70%。考虑到幼苗的生长对玉米的全生育期至关重要,玉米生长状况观察主要集中在幼苗发育时期,进行定植40 d。盆栽试验培养结束后,取200 g鲜样对植株株长进行测定,再在105℃烘箱中烘干至恒重,测定玉米植株干重。剩余土壤样品自然风干、粉碎,过2 mm筛后置于干燥阴凉处保存,测定土壤基本理化性质。

### 1.3 土壤理化性质测定及方法

土壤pH采用电位法测定;全氮采用凯氏定氮法;硝态氮采用1 mol/L NaCl浸提-紫外分光光度

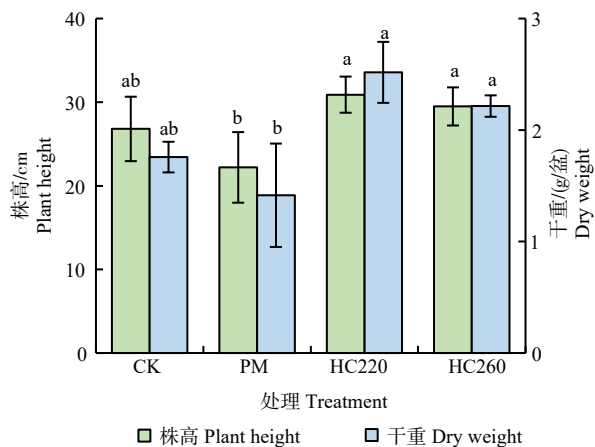
法;铵态氮采用2 mol/L KCl浸提-紫外分光光度法;全磷采用消解-钼锑抗分光光度法;有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法;磷素分组采用Hedley磷素分组;土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-分光光度法;土壤碳组分采用高锰酸钾氧化法对活性、中活性和高活性有机碳进行测定。

猪粪及猪粪水热炭样品pH和EC采用pH电位法及电导率仪测定,有机质采用重铬酸钾水浴法;浸提后过0.45 μm滤膜,采用钼锑抗显色紫外分光光度法测定有效磷含量;采用元素分析仪分析C、H、O、N、P、S元素组成。

## 2 结果与分析

### 2.1 施用水热炭对玉米幼苗生长的影响

施用水热炭对玉米株高及干重的影响见图1。可见:HC220和HC260处理的株高与CK处理相比,呈现出一定的上升趋势,但没有统计学显著性差异( $P>0.05$ );与PM处理相比,HC220处理和HC260处理显著提高了玉米植株株高( $P<0.05$ ),种植40 d后HC220、HC260处理其株高分别提高39.2%、32.8%。其中:施用猪粪水热炭的处理(HC220和HC260)相比于CK处理,干重没有显著性差异;而相比于PM处理,HC220处理和HC260处理分别显著提高了玉米植株干重77.5%、56.3%



CK, 对照。柱子不同字母表示差异显著( $P<0.05$ ),相同字母表示差异不显著( $P>0.05$ )。下同。

CK, control group. Different letters above columns represent significant differences ( $P<0.05$ ), while same letters represent no significant differences ( $P>0.05$ ). The same below.

图1 施用水热炭对玉米幼苗生长株高及干重的影响

Fig. 1 Effects of application of hydrochar on seedling growth of maize plant height and dry weight

( $P<0.05$ )；尽管 HC220 处理效果优于 HC260 处理,但没有展现出统计学差异( $P>0.05$ )。因此,施用猪粪水热炭对玉米幼苗生长没有负面影响,与传统猪粪有机肥相比,可以促进玉米幼苗的株高和干重。

## 2.2 施用猪粪水热炭对土壤有机碳及碳组分的影响

土壤有机碳是土壤肥力的核心要素之一,其含量和动态在土壤质量演变和土壤碳循环中起着重要的作用。施用猪粪水热炭对土壤有机碳影响见图 2。可见:与 CK 处理相比,HC220 和 HC260 处理的有机碳含量分别显著提高了 74.7%、94.4%；与 PM 处理相比,HC220 和 HC260 处理分别显著提高了 32.4% 和 47.4%( $P<0.05$ )；HC260 处理对土壤有机碳含量的增加效果显著高于 HC220 处理。

施用猪粪水热炭对土壤有机碳组分含量影响见表 2。可见:与 CK 处理相比,HC220 和 HC260 处理显著提高活性有机碳、中活性有机碳、活性有机碳以及稳定性有机碳,HC220、HC260 处理将土壤中不稳定碳组分比例从 55.7% 降低至 49.2%、35.7%,同时将稳定性碳组分比例从 44.3% 上升至 50.8%、64.3%；与 PM 处理相比,HC220 处理对增

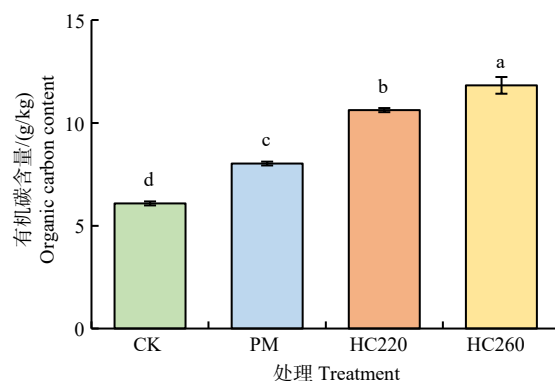


图 2 不同处理对土壤有机碳含量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on soil organic carbon content

加高活性有机碳显著高于 PM 处理 21.7% ( $P<0.05$ ),中活性有机碳的含量,HC220 和 HC260 处理与 PM 处理之间差异不显著( $P>0.05$ ),活性有机碳含量方面,HC220 处理显著高于 PM 处理 11.8% ( $P<0.05$ ),HC260 处理和 PM 处理之间差异不显著( $P>0.05$ ),对于稳定性有机碳而言,HC220 处理和 HC260 处理含量分别显著增加 39.5% 和 96.6% ( $P<0.05$ )。

表 2 不同处理对土壤有机碳组分含量的影响

Table 2 Effects of different treatments on soil organic carbon grouping

g/kg

| 处理<br>Treatment | 高活性有机碳<br>High activity organic carbon | 中活性有机碳<br>Medium activity organic carbon | 活性有机碳<br>Activity organic carbon | 稳定性有机碳<br>Stable organic carbon |
|-----------------|----------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| CK              | 0.664±0.028 d                          | 1.18±0.090 d                             | 1.54±0.300 c                     | 2.70±0.276 d                    |
| PM              | 0.825±0.030 b                          | 1.47±0.154 ab                            | 1.86±0.169 bc                    | 3.87±0.249 c                    |
| HC220           | 1.01±0.028 a                           | 1.65±0.106 a                             | 2.56±0.232 a                     | 5.40±0.302 b                    |
| HC260           | 0.763±0.034 c                          | 1.38±0.231 bc                            | 2.08±0.371 b                     | 7.61±0.603 a                    |

注:同列数据不同字母表示差异显著( $P<0.05$ ),相同字母表示差异不显著( $P>0.05$ )。下同。

Note: Within the same column, different letters represent significant differences ( $P<0.05$ ), while the same letters represent no significant differences ( $P>0.05$ ). The same below.

施用猪粪水热炭对土壤有机碳分组比例的影响见图 3。可见:不同温度制备的水热炭处理下,高活性有机碳、中活性有机碳、活性有机碳含量 HC220 处理均显著高于 HC260 处理,稳定性有机碳含量 HC260 处理显著高于 HC220 处理 40.9% ( $P<$

0.05)。因此,施用猪粪水热炭能够显著提高土壤有机碳含量,增加稳定性有机碳的含量,从而增强土壤的肥力和碳储存能力。其中,HC260 在增加土壤有机碳含量和稳定性有机碳比例方面表现出更优的效果。

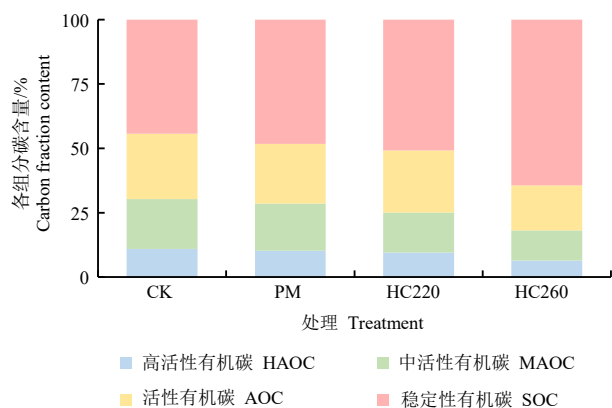


图3 不同处理对土壤有机碳组分占比的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on the proportion of soil organic carbon grouping

### 2.3 施用猪粪水热炭对土壤氮组分的影响

施用水热炭对土壤全氮、矿物氮的影响见表3。可见:与CK处理相比,HC220和HC260处理土壤全氮含量显著增加了55.1% ( $P<0.05$ );土壤硝态氮、铵态氮、矿物氮含量与CK处理相比未显示出显著差异 ( $P>0.05$ )。而与PM处理相比,施用水热炭后土壤全氮含量显著高于PM处理15.2%,HC220和HC260处理土壤硝态氮分别显著下降7.9%、8.3%,铵态氮含量分别降低了78.8%、78.7%,HC220和HC260处理矿物氮含量显著降低 ( $P<0.05$ );HC220和HC260处理土壤全氮含量提高量相同,HC220处理和HC260处理硝态氮、铵态氮和矿物氮含量差异不大。因此,水热炭的施用在增加土壤全氮含量方面效果显著,但在矿物氮形态的调控上,尤其是铵态氮的降低上,可能对土壤氮素循环产生重要影响。

### 2.4 施用猪粪水热炭对土壤磷素有效性的影响

不同处理对土壤全磷、有效磷和磷组分含量的

影响如图4所示。由图4(a)可见:相比于CK处理,施用猪粪水热炭处理土壤全磷含量显著提高了65%、80%;而相比于PM处理,施用水热炭后全磷含量提高了26.9%和38.5%,HC260处理相比于HC220处理土壤全磷含量又显著提高了0.12 g/kg ( $P<0.05$ )。

由图4(b)可见:HC220处理与CK处理相比显著提高了11.5% ( $P<0.05$ ),HC260处理与CK处理差异不显著 ( $P>0.05$ );与PM处理相比,2个水热炭处理有效磷含量均显著降低,其中HC260处理显著降低50.6%;HC220处理有效磷含量显著高于HC260处理 ( $P<0.05$ )。

由图4(c)可见:与CK处理相比,施用水热炭处理后,HC220和HC260处理  $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$  含量显著增加了64.1%和25.1%,  $\text{HCl-P}_i$  含量显著增加了45.5%和75.6%;HC220处理  $\text{NaOH-P}_i$  含量还显著增加了49.7%。与PM处理相比,HC220和HC260处理的  $\text{H}_2\text{O-P}_i$  含量显著降低58.5%和63.7%;  $\text{HCl-P}_i$  含量显著增加40.0%和68.8%。HC220处理  $\text{NaOH-P}_i$  含量显著提高了16.2%,HC260处理的  $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$  含量和  $\text{NaOH-P}_i$  含量显著降低了25.1%和12.7% ( $P<0.05$ )。随着水热炭化温度的增加,相比于HC220处理,HC260处理的  $\text{H}_2\text{O-P}_i$  含量,  $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$  含量和  $\text{NaOH-P}_i$  含量均进一步显著下降,而  $\text{HCl-P}_i$  含量则进一步显著增加。因此,施用猪粪水热炭显著提高了土壤全磷含量,但对有效磷含量的影响因处理不同而异,同时改变了不同形态磷组分的含量,表明水热炭化温度对磷组分的影响显著,且HC260处理在提高全磷和  $\text{HCl-P}_i$  含量方面更为有效,但在降低有效磷和其他形态磷含量方面效果更为显著。

表3 施用水热炭对土壤全氮、矿物氮含量的影响

Table 3 Effects of application of hydrochar on soil total nitrogen and mineral nitrogen

| 处理<br>Treatment | 全氮/(g/kg)<br>Total nitrogen | 硝态氮/(mg/kg)<br>Nitrate nitrogen | 铵态氮/(mg/kg)<br>Ammonium nitrogen | 矿物氮/(mg/kg)<br>Mineral nitrogen |
|-----------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| CK              | 0.98±0.03 c                 | 635±23 ab                       | 0.885±0.378 b                    | 636±23 ab                       |
| PM              | 1.32±0.03 b                 | 659±30 a                        | 7.65±1.48 a                      | 667±31 a                        |
| HC220           | 1.52±0.02 a                 | 607±15 b                        | 1.62±0.89 b                      | 609±15 b                        |
| HC260           | 1.52±0.03 a                 | 604±17 b                        | 1.63±0.27 b                      | 606±17 b                        |

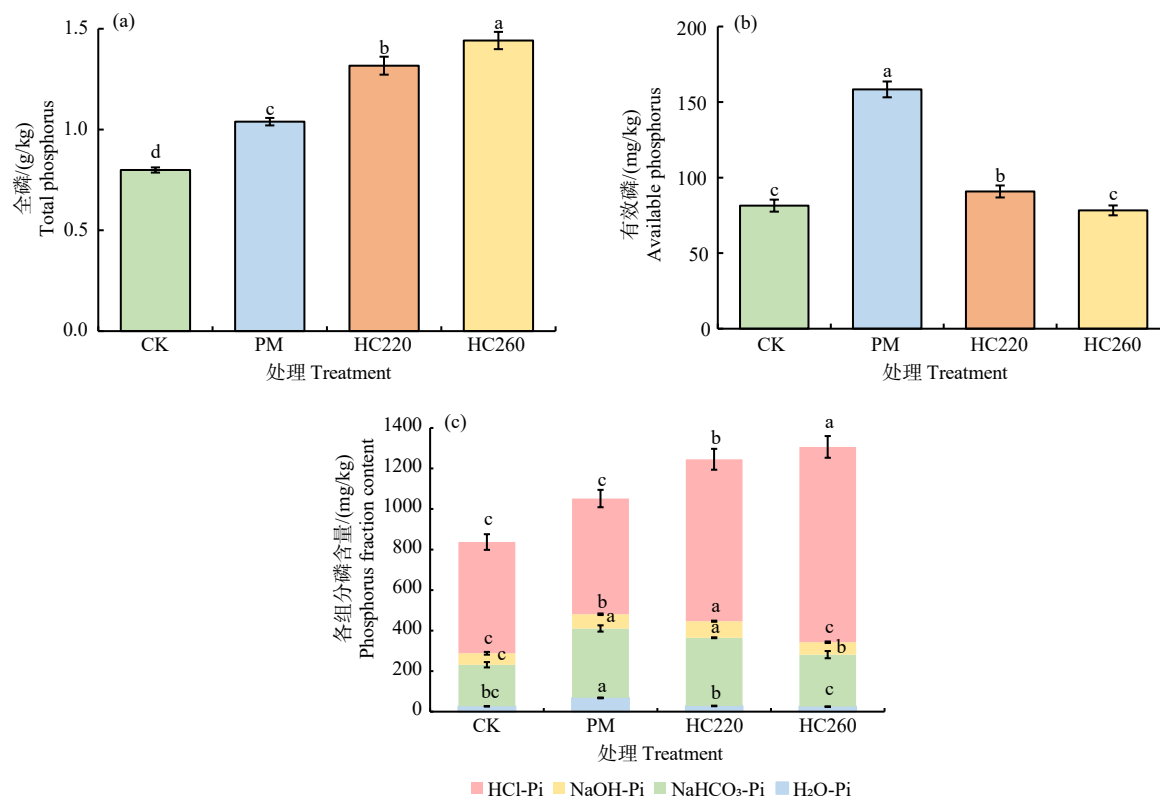


图4 不同处理对土壤全磷(a)、有效磷(b)及磷组分(c)含量的影响

Fig. 4 Effect of different treatments on soil total phosphorus (a) available phosphorus (b) and phosphorus fractionation (c)

### 3 讨论

#### 3.1 猪粪水热炭对玉米幼苗生长的影响

越来越多的研究支持,水热炭作为有机肥还田可以影响植物生长、培肥土壤和改善土壤养分含量<sup>[33]</sup>。其中,水热炭还田影响植物生长一方面可能与其提供了丰富的有效养分有关,另一方面可能归因于水热炭表面携带的可溶性有机物对作物幼苗生长产生刺激作用<sup>[34]</sup>。在本研究中,我们发现添加猪粪水热炭的玉米幼苗的株高和干重尽管高于CK处理,但处理间未达到统计学显著差异。该结果与杨晋霞等<sup>[17]</sup>发现施用水热炭可以促进大豆作物生长、Feng等<sup>[22]</sup>工作发现3%的施用量水热炭降低水稻产量结果不同。这可能归因于玉米生育期养分需求特征与大豆、小麦等作物不同,伯维提<sup>[35]</sup>总结玉米生育期养分特征发现玉米苗期植株小,生长缓慢,对养分吸收的数量少且速度慢,相应的,其对土壤养分含量的变化可能不敏感。尽管在本研究中,猪粪水热炭可以提供大量养分,但玉米幼苗养分需求和吸收能力有限;其次,本试验选取的土壤本身

肥力较高,也进一步弱化了施用猪粪水热炭后,土壤有效养分含量增加带来的可能对植株生长产生的影响;本试验设计玉米幼苗生长周期为40 d,相比于大豆、小麦等到收获季的全周期试验而言观察时间较短,因此可能水热炭对于玉米幼苗的影响尚未完全展现。这些因素可能部分地解释了施用水热炭处理未影响玉米幼苗株高和干重的原因。

与施用猪粪处理相比,施用水热炭显著促进玉米株高和干重,HC220处理其株高、干重分别提高39.2%、77.5%,类似的结果也出现在先前的关于水稻的研究报道中,与施用有机肥相比水热炭及其改良产物在适宜用量下能够增加水稻产量<sup>[34]</sup>,Busch等<sup>[36]</sup>在盆栽试验中观察到通过微生物老化水热炭的处理组较施肥组植物茎干质量相比有高达261%的增加<sup>[37]</sup>,均与本研究结果一致。本研究中还发现,施用猪粪的处理相比于CK处理,对玉米幼苗株高和干重产生了一定的负面影响,尽管统计学差异不显著,这可能归因于1%的有机肥施用,向土壤中补充了大量活性有机碳,激发微生物繁殖和呼吸,释放了大量热量对玉米幼苗发育产生了一定负

面影响。而水热炭相比于原料猪粪,研究通过测定发现猪粪水热炭的碳、氮、磷含量均高于原料,有机碳稳定性也显著提高<sup>[31]</sup>,说明水热炭化过程促进了原料中的不稳定有机碳向稳定有机碳转化,这也使得施用水热炭后,可以相比于原料猪粪,显著降低了向土壤输入的不稳定碳,在本研究土壤有机碳组分中,高活性有机碳含量和占比显著下降,也侧面支持了这一推理,说明猪粪水热炭化后还田,避免了猪粪原料可能产生的对玉米幼苗生长的负面影响。此外,HC220和HC260处理在株高和干重上显示出的效果相似,表明不同温度制备的猪粪水热炭在1%施加量下对玉米幼苗生长影响不大。因此,盆栽试验中,相比于传统的有机肥,猪粪水热炭在促进玉米幼苗生长上展现了一定的优势。

### 3.2 施用猪粪水热炭对土壤肥力的影响

土壤有机质是土壤养分的核心组成部分,本研究试验发现,施用水热炭后土壤有机碳含量显著高于CK处理,土壤有机碳的各个组分含量也均显著增加;而在土壤有机碳的各个组分占比方面,施用水热炭处理显著降低了高活性和中活性有机碳组分,显著增加了稳定性有机碳组分。Sun等<sup>[33]</sup>研究发现水热炭施用有利于增加土壤稳定性有机质的含量,降低土壤中不稳定的有机碳比例与本研究结果一致。与常见的有机物料,如粪肥或者秸秆增加土壤有机碳类似<sup>[38-39]</sup>,水热炭材料本身是高碳含量的材料,还田后向土壤中输入了大量外源有机碳,对提高土壤的总有机碳含量有直接贡献。另一方面,因为水热炭中的碳结构多是由高度缩合的芳香环结构组成,含有较高的芳构化结构<sup>[40]</sup>,具有较强的生物稳定性,不利于在相对较短的时间内作为碳源被微生物分解,这也直接导致了施用水热炭后土壤中稳定性碳组分含量显著增加,高活性和中活性有机碳组分下降。施用水热炭后土壤中不稳定碳组分占比下降,稳定性碳组分占比增加。

在本研究中,相比于PM处理,施用猪粪水热炭处理进一步显著提高了土壤总有机碳含量,显著提高了土壤总有机碳中稳定性有机碳组分的含量和占比。这可能归因于猪粪水热炭相比于猪粪,本身就具有更高的有机碳含量,等施用量前提下的猪粪和猪粪水热炭施用,水热炭处理投入了更多的有机碳。如前面论述的,水热炭化后有机碳的稳定性显著增加,也使得水热炭处理后土壤总有机碳中稳定

性有机碳组分的含量和占比显著增加。施用猪粪水热炭处理对高活性有机碳组分含量的影响在两个水热炭处理之间表现不一致,HC220处理显著增加土壤高活性有机碳组分的含量,而HC260处理显著降低了土壤高活性有机碳组分的含量。先前研究报道了随着制备温度的升高,水热炭中碳的稳定性呈现出升高趋势<sup>[41]</sup>,意味着更多的不稳定碳转化为更加稳定的形式存在,这解释了HC260处理后的稳定性有机碳含量更高、活性有机碳含量低的原因。综上所述,水热炭的施用可以增加土壤有机碳含量,对提高稳定性有机碳含量,作为改良剂增加土壤固碳,提升土壤肥力具有相应潜力。

在本研究中,与CK处理相比,土壤全氮含量显著增加,硝态氮、铵态氮和矿物氮含量无显著性差异。该结果与Feng等<sup>[42]</sup>研究发现通过添加粪肥水热炭,土壤中的氮和磷含量显著增加不一致。土壤矿质氮含量变化不显著可能是因为施入的水热炭,在土壤中的氮素释放速率相对平缓,而玉米幼苗生长期间,铵态氮也逐渐在通过硝化作用转化为了硝态氮;同时,水热炭也可能改善了铵态氮和硝态氮在土壤中通过静电吸附和孔隙填充,从而降低土壤中可测的矿质氮<sup>[43]</sup>;其次猪粪水热炭含有高碳氮比和丰富的可溶性有机质,初期会刺激微生物活性,导致微生物固定氮素,降低矿质氮含量<sup>[44]</sup>。施用猪粪水热炭后土壤全氮含量显著增加,这与Malghani等<sup>[45]</sup>和Melo等<sup>[46]</sup>试验结果一致。部分研究结果表明水热炭施入后土壤中硝态氮和铵态氮的含量均增加,水热炭可以显著减少硝酸盐浸出<sup>[47]</sup>,这与本试验结果不同,可能是因为水热炭对土壤氮素的影响可能随时间变化,短期内可能观察到硝态氮和铵态氮的减少,但长期效果可能不同<sup>[48-49]</sup>。

与PM处理相比,施用水热炭处理的全氮含量显著增加,硝态氮、铵态氮、矿物氮含量显著降低,与Li等<sup>[50]</sup>研究结果部分相同。但相比于猪粪,施用水热炭化后的猪粪水热炭可能本身可提供的矿物氮含量较少,同时特定的水热炭表面官能团特征和有机质含量,促进了微生物对氮素的生物固定,这二者共同作用下,可能导致短期内硝态氮和铵态氮的减少。此外,也有研究<sup>[51]</sup>指出,水热炭表面富含羧基、羟基等含氧官能团,这些官能团通过静电作用或氢键吸附矿物氮,水热炭具有较高的比表面积

和孔隙度,这使得它能够有效地吸附土壤中的矿物氮<sup>[52]</sup>,包括硝态氮( $\text{NO}_3^-$ )和铵态氮( $\text{NH}_4^+$ ),这种吸附作用可以减少土壤中硝态氮和铵态氮的含量,这样的矿物氮吸附和促进生物固定的特征,有助于土壤氮素的固持,从而降低土壤的氮素淋失和挥发损失。本试验还发现HC220处理和HC260处理对土壤全氮、矿物氮含量影响差异不显著,说明不同温度的制备条件,对猪粪水热炭提升土壤氮素的性能没有影响。综上所述,水热炭的施用在增加土壤全氮含量方面效果显著。

与CK处理相比,施用水热炭后显著增加了土壤全磷,但对土壤有效磷含量的影响因水热炭的生产温度而异。HC220处理有效磷含量仍然显著提升,但HC260处理对土壤有效磷含量无显著影响。而相较于PM处理而言,施用水热炭之后土壤全磷含量显著提高,有效磷含量降低。HC220处理和HC260处理有效磷含量与PM处理相比显著降低了42.7%和50.6%。这些结果表明猪粪水热炭的施入可以补充土壤中磷的含量,先前的研究已经指出,水热炭化过程后,生产的固相产物回收了原料中绝大部分的磷,仅有极少数的磷遗留在水热炭化液中<sup>[53]</sup>;并且归因于水热炭化过程导致的固体浓缩作用,水热炭的磷含量也显著高于原料。这意味着猪粪水热炭本身是高磷有机物料,猪粪水热炭还田也将直接增加土壤总磷含量。这解释了施用水热炭处理总磷含量高于CK和PM处理。

进一步对土壤磷库进行化学分级发现,施用水热炭处理相比于对照处理,显著增加了土壤 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 $\text{HCl-P}_i$ 组分的含量,相比于PM处理,显著降低了 $\text{H}_2\text{O-P}_i$ 组分的含量,显著增加了 $\text{HCl-P}_i$ 组分的含量。 $\text{HCl-P}_i$ 组分含量的显著增加可能更多归因于水热炭材料本身的磷素组分特征,与先前的Meta分析指出了水热炭化过程促进了 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 向 $\text{HCl-P}_i$ 组分转化<sup>[53]</sup>结果相符,炭化产物的磷素主要是以 $\text{HCl-P}_i$ 组分为主,这也导致了施用水热炭后土壤中 $\text{HCl-P}_i$ 组分含量的相应增加。相比于对照处理,土壤 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 组分含量的增加相比于 $\text{HCl-P}_i$ 组分含量的增加,增幅较小,可能仍是因为水热炭材料提供了一定的 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 组分,或施用水热炭后一定程度上增强了磷素的活化过程,例如通过有机质的作用增强土壤有机磷矿化,或通过有机质的竞争吸附作用抑制了活性磷被土壤吸附等

机制<sup>[54]</sup>。而相比于PM处理显著降低的 $\text{H}_2\text{O-P}_i$ 组分含量,站在磷素流失的环境视角观察,意味着施用水热炭后对活性磷的增加作用相对“温和”,并不会短期显著大量增加土壤活性磷,这种变化可能有助于减少磷的流失,而其在更长的时间跨度内对土壤有效磷的影响,未来还需要进一步开展研究。此外,本研究还发现,水热炭对土壤总磷和有效磷的影响受到水热炭的生产温度的明显影响,HC260处理全磷含量显著高于HC220处理38.5%,HC220处理有效磷含量显著高于HC260处理,这可能是由于提高水热炭化温度可加强水热炭中磷的转化,研究表明,较高的制备温度更好地促进了水热炭中稳定性高的钙结合态磷的积累<sup>[55]</sup>。这也为未来基于调节土壤磷素含量和有效性提供了切入点,可以通过调节水热炭的生产温度,改变水热炭对土壤全磷含量和磷素有效性,为不同情况的土壤提供合适的水热炭产品。综上,施用猪粪水热炭显著提高了土壤全磷含量,对有效磷含量的影响因处理不同而异,同时改变了不同形态磷组分的含量。

## 4 结 论

为探究猪粪水热炭的施用对植物生长和土壤养分的影响,本研究以玉米幼苗为研究对象,设置4个对比处理,探究不同温度下制备的猪粪水热炭对玉米幼苗生长和土壤养分的影响。主要结论如下:

1)施用猪粪水热炭对玉米幼苗生长并未产生负面影响,且与常见的猪粪原料相比,猪粪水热炭显著促进玉米幼苗生长水平( $P<0.05$ );

2)施用猪粪水热炭显著提高土壤有机碳、全氮、全磷含量,显著降低矿物氮、有效磷含量。施用猪粪水热炭可以提高土壤有机碳32.4%~94.4%,全氮15.2%~55.1%,全磷26.9%~80%( $P<0.05$ ),在培肥土壤,提升土壤养分库容方面有一定的优势,有潜力在满足作物养分需求的前提下,减少氮磷损失,一定程度避免了直接施用猪粪的负面效应;

3)不同温度下生产的水热炭对玉米幼苗生长、土壤全氮、矿物氮含量差异并不显著( $P>0.05$ ),而对土壤磷素有效性影响明显,可以通过调节生产温度影响水热炭本身性质,适用于不同养分含量或类型的土壤,以实现养分利用效率提升和养分流失风险的下降。

综上,施用猪粪水热炭可以增加土壤固碳,扩大养分库容,调节养分有效性,可作为有价值的有机肥料使用,未来研究可进一步分析施用猪粪水热炭对作物生长和土壤养分含量的长期效应。

## 参考文献 References

- [1] 杨东海, 华煜, 武博然, 戴晓虎. 双碳背景下有机固废资源化处置技术发展思考[J]. 环境工程, 2022, 40(12): 1-8, 36  
Yang D H, Hua Y, Wu B R, Dai X H. Consideration on development of organic solid waste resource treatment and disposal technology under the background of double carbon[J]. *Environment Engineering*, 2022, 40(12): 1-8, 36 (in Chinese)
- [2] 谢光辉, 包维卿, 刘继军, 安捷. 中国畜禽粪便资源研究现状述评[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(4): 75-87  
Xie G H, Bao W Q, Liu J J, An J. An overview of research on livestock and poultry excreta resource in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(4): 75-87 (in Chinese)
- [3] 陈玲玲, 连小云, 张红美, 许伟国, 赵目喜. 生物炭对畜禽粪污堆肥中养分演化影响研究现状[J]. 农业与技术, 2024, 44(21): 86-89  
Chen L L, Lian X Y, Zhang H M, Xu W G, Zhao M X. Research status of the influence of biochar on nutrient evolution in livestock manure compost[J]. *Agriculture and Technology*, 2024, 44(21): 86-89 (in Chinese)
- [4] 俞盈, 韩兰芳, 姜晓满. 水热炭的制备、结构特征和应用[J]. 环境化学, 2018, 37(6): 1232-1244  
Yu Y, Han L F, Jiang X M. Production, properties and environmental application of hydrochar[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(6): 1232-1244 (in Chinese)
- [5] Fakkaew K, Koottatep T, Pussayanavin T, Polprasert C. Hydrochar production by hydrothermal carbonization of faecal sludge[J]. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 2015, 5(3): 439-447
- [6] 王悦满, 冯彦房, 杨林章, 刘杨, 侯朋福, 李辉信, 薛利红. 水热及裂解生物炭对水稻产量及氮素利用率的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(8): 755-761  
Wang Y M, Feng Y F, Yang L Z, Liu Y, Hou P F, Li H X, Xue L H. Effects of hydrochar and pyrochar on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(8): 755-761 (in Chinese)
- [7] 刘冬冬, 李金铭, 赵博骏, 朱俊昊, 陈光, 董良杰. 秸秆水热炭与热裂解炭结构表征及铅吸附机制研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 304-314  
Liu D D, Li J M, Zhao B J, Zhu J H, Chen G, Dong L J. Pb<sup>2+</sup> absorption mechanism and structure characterization of hydrochar and pyrochar from straw[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(12): 304-314 (in Chinese)
- [8] Picone A, Volpe M, Codignole Lüz F, Malik W, Volpe R, Messineo A. Co-hydrothermal carbonization with process water recirculation as a valuable strategy to enhance hydrochar recovery with high energy efficiency[J]. *Waste Management*, 2024, 175: 101-109
- [9] Song C F, Zheng H B, Shan S D, Wu S C, Wang H L, Christie P. Low-temperature hydrothermal carbonization of fresh pig manure: Effects of temperature on characteristics of hydrochars[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2019, 145(6): 04019029
- [10] Wang D, Jiang P K, Zhang H B, Yuan W Q. Biochar production and applications in agro and forestry systems: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 723: 137775
- [11] Zhang Z K, Zhu Z Y, Shen B X, Liu L N. Insights into biochar and hydrochar production and applications: A review[J]. *Energy*, 2019, 171: 581-598
- [12] Mau V, Arye G, Gross A. Poultry litter hydrochar as an amendment for sandy soils[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 271: 110959
- [13] Paneque M, Knicker H, Kern J, De la Rosa J M. Hydrothermal carbonization and pyrolysis of sewage sludge: Effects on *Lolium perenne* germination and growth[J]. *Agronomy*, 2019, 9(7): 363
- [14] Chu Q N, Xue L H, Cheng Y Q, Liu Y, Feng Y F, Yu S, Meng L, Pan G, Hou P F, Duan J J, Yang L Z. Microalgae-derived hydrochar application on rice paddy soil: Higher rice yield but increased gaseous nitrogen loss[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 717: 137127
- [15] Xu Y J, Wang B Y, Ding S D, Zhao M Y, Ji Y, Xie W P, Feng Z Z, Feng Y F. Hydrothermal carbonization of kitchen waste: An analysis of solid and aqueous products and the application of hydrochar to paddy soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 850: 157953
- [16] Gebretsadkan A A, Belete Y Z, Krounbi L, Gelfand I, Bernstein R, Gross A. Soil application of activated hydrochar derived from sewage sludge enhances plant growth and reduces nitrogen loss[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 949: 174965
- [17] 杨晋霞, 陈元晖, 任杰, 张博涵, 范旭红, 李明堂. 富磷水热炭对碱化土壤的改良作用及对大豆幼苗生长的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报, 2024: 1-9 (2024-05-11). <https://link.cnki.net/doi/10.13327/j.jjlau.2024.20488>  
Yang J X, Chen Y H, Ren J, Zhang B H, Fan X H, Li M T. Improvement effect of phosphorus rich hydrothermal charcoal on alkaline soil and its impact on the growth of soybean seedlings[J/OL]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2024: 1-9 (2024-05-11). <https://link.cnki.net/doi/10.13327/j.jjlau.2024.20488> (in Chinese)
- [18] 杨刚, 周威宇. 生物炭对盐碱土壤理化性质、生物量及玉米苗期生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(16): 68-72  
Yang G, Zhou W Y. Effects of biochar on the physical and chemical properties, biomass and maize seedling growth of saline-alkaline soil[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(16): 68-72 (in Chinese)
- [19] 赵晨晨, 杨靖民, 周清华, 张义, 刘悦, 杨玉玲, 刘金华, 常海波. 水热炭源改良剂对盐碱地牧草生长及根际土壤酶活性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2024, 46(5): 860-868  
Zhao S C, Yang J M, Zhou Q H, Zhang Y, Liu Y, Yang Y L, Liu J H, Chang H B. Effects of hydrothermal carbon amendment on forage growth and rhizosphere soil enzyme activities in saline-alkali soil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2024, 46(05): 860-868. 2024, 46(5): 860-868 (in Chinese)
- [20] Deenik J L, McClellan T, Uehara G, Antal M J, Campbell S. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(4): 1259-1270
- [21] de Jager M, Schröter F, Wark M, Giani L. The stability of carbon from a maize-derived hydrochar as a function of fractionation and hydrothermal carbonization temperature in a Podzol[J]. *Biochar*, 2022, 4(1): 52
- [22] Feng Y F, He H Y, Xue L H, Liu Y, Sun H J, Guo Z, Wang Y M, Zheng X B. The inhibiting effects of biochar-derived organic materials on rice production[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 293: 112909
- [23] Adjuik T, Rodjom A M, Miller K E, Reza M T M, Davis S C. Application of hydrochar, digestate, and synthetic fertilizer to a *Miscanthus x giganteus* crop: Implications for biomass and greenhouse gas emissions[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(24): 8953

- [24] 程虎, 张佳鹏, 宋洋, 卞永荣, 李威, 李胎花, 张萌, 蒋新, 韩建刚. 水热炭在土壤环境中的应用研究进展和展望[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(6): 1202-1209
- Cheng H, Zhang J P, Song Y, Bian Y R, Li W, Li T H, Zhang M, Jiang X, Han J G. The application of hydrochar in soil environment: Study progress and prospects[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(6): 1202-1209 (in Chinese)
- [25] Zhou B B, Feng Y F, Wang Y M, Yang L Z, Xue L H, Xing B S. Impact of hydrochar on rice paddy CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions: A comparative study with pyrochar[J]. *Chemosphere*, 2018, 204: 474-482
- [26] Hou P F, Feng Y F, Wang N, Petropoulos E, Li D T, Yu S, Xue L H, Yang L Z. Win-win: Application of sawdust-derived hydrochar in low fertility soil improves rice yield and reduces greenhouse gas emissions from agricultural ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 748: 142457
- [27] Bargmann I, Rillig M C, Kruse A, Greef J M, Kücke M. Effects of hydrochar application on the dynamics of soluble nitrogen in soils and on plant availability [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, 177(1): 48-58
- [28] 刘梅. 粪便污泥水热炭磷素形态与其在土柱中淋失规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017
- Liu M. Study on phosphorus speciation of fecal sludge hydrochar and loss of phosphorus in simulated soil column[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017 (in Chinese)
- [29] 张曾, 单胜道, 吴胜春, 宋成芳. 炭化条件对猪粪水热炭主要营养成分的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(3): 398-404
- Zhang Z, Shan S D, Wu S C, Song C F. Carbonization with main nutrients in pig manure hydrochar[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2018, 35(3): 398-404 (in Chinese)
- [30] 盛聪, 宋成芳, 单胜道, 吴胜春. 炭化温度和时间对猪粪水热炭性质的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(2): 302-305
- Sheng C, Song C F, Shan S D, Wu S C. Effects of carbonization temperature and time on the characteristics of hydrothermal carbon from pig manure[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(2): 302-305 (in Chinese)
- [31] Xie S Y, Zhang T, You S M, Mukherjee S, Pu M J, Chen Q, Wang Y S, Ali E F, Abdelrahman H, Rinklebe J, Lee S S, Shaheen S M. Applied machine learning for predicting the properties and carbon and phosphorus fate of pristine and engineered hydrochar[J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 19
- [32] 李勇丽. 猪粪水热炭改良红壤机理研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023
- Li Y L. Mechanism study on improvement of red soil by hydrothermal carbonization of pig manure[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023 (in Chinese)
- [33] Sun R X, Zheng H, Yin S J, Zhang X, You X W, Wu H Y, Suo F Y, Han K X, Cheng Y D, Zhang C S, Li Y Q. Comparative study of pyrochar and hydrochar on peanut seedling growth in a coastal salt-affected soil of Yellow River Delta, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 833: 155183
- [34] 韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章. 麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3451-3457
- Han C, Hou P F, Xue L H, Feng Y F, Yu S, Yang L Z. Effects of wheat straw hydrochar and its modified product on rice yield and ammonia volatilization from paddy fields[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(7): 3451-3457 (in Chinese)
- [35] 伯维提·伊力旦. 玉米苗期需肥特点及管理技术要点[J]. 农业工程技术, 2020, 40(23): 31, 36
- YiLiDan B. Characteristics and management techniques of fertilizer demand in maize seedling stage [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2020, 40(23): 31, 36 (in Chinese)
- [36] Busch D, Stark A, Kammann C I, Glaser B. Genotoxic and phytotoxic risk assessment of fresh and treated hydrochar from hydrothermal carbonization compared to biochar from pyrolysis[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 97: 59-66
- [37] 张曾. 养猪废弃物水热炭的土壤改良特性研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021
- Zhang Z. Study on soil improvement characteristics of pig waste hydrochar [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2021 (in Chinese)
- [38] Li B Z, Song H, Cao W C, Wang Y J, Chen J S, Guo J H. Responses of soil organic carbon stock to animal manure application: A new global synthesis integrating the impacts of agricultural managements and environmental conditions[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(20): 5356-5367
- [39] Wang Q J, Liu X, Li J Y, Yang X Y, Guo Z H. Straw application and soil organic carbon change: A meta-analysis[J]. *Soil and Water Research*, 2021, 16(2): 112-120
- [40] Zhang S C, Zhu X D, Zhou S J, Shang H, Luo J W, Tsang D C. W. Hydrothermal carbonization for hydrochar production and its application[J]. *Biochar from Biomass and Waste*, 2019: 275-294
- [41] Li F Y, Jiang Z L, Ji W C, Chen Y H, Ma J R, Gui X Y, Zhao J R, Zhou C H. Effects of hydrothermal carbonization temperature on carbon retention, stability, and properties of animal manure-derived hydrochar [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2022, 15(1): 124-131.
- [42] Feng Y Y, Wang N, Xie H F, Li J, Li G L, Xue L H, Fu H B, Feng Y F, Poinern G E J, Chen D L. Livestock manure-derived hydrochar is more inclined to mitigate soil Global Warming Potential than raw materials based on soil stoichiometry analysis[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2023, 59(4): 459-472
- [43] Wang X Y, Duo J, Jin Z Z, Yang F, Lai T Y, Collins E. Effects of hydrothermal carbonization conditions on the characteristics of hydrochar and its application as a soil amendment: A review[J]. *Agronomy*, 2025, 15(2): 327
- [44] 周悦, 褚克坚, 苏良湖, 王赛尔, 张龙江, 蔡金傍, 程虎, 纪荣婷. 农艺措施对土壤可溶性有机质的影响研究进展[J]. 土壤, 2022, 54(3): 437-445
- Zhou Y, Chu K J, Su L H, Wang S E, Zhang L J, Cai J B, Cheng H, Ji R T. Effects of agronomic measures on soil dissolved organic matter: A review [J]. *Soils*, 2022, 54(3): 437-445 (in Chinese)
- [45] Malghani S, Jüschke E, Baumert J, Thuille A, Antonietti M, Trumbore S, Gleixner G. Carbon sequestration potential of hydrothermal carbonization char (hydrochar) in two contrasting soils; Results of a 1-year field study[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 5(1): 123-134
- [46] Melo T M, Bottlinger M, Schulz E, Leandro W M, Menezes de Aguiar Filho A, Wang H L, Ok Y S, Rinklebe J. Plant and soil responses to hydrothermally converted sewage sludge (sewchar)[J]. *Chemosphere*, 2018, 206: 338-348
- [47] 陈曦, 江斌伟, 丁洁, 蔡敏, 杨士红. 生物炭施用对节水灌溉稻田土壤氮素含量及脲酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(19): 268
- Chen X, Jiang Z W, Ding J, Cai M, Yang S H. Impacts of biochar application on soil nitrogen content and urease activity in water-saving irrigated paddy fields[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(19): 268 (in Chinese)
- [48] Xiong J B, Chen S W, Wang J X, Wang Y J, Fang X L, Huang H J. Speciation of main nutrients (N/P/K) in hydrochars produced from the hydrothermal carbonization of swine manure under different reaction temperatures[J]. *Materials*, 2021, 14(15): 4114
- [49] McIntosh S, Padilla R V, Rose T, Rose A L, Boukaka E, Erler D. Crop fertilisation potential of phosphorus in hydrochars produced from sewage

- sludge[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 817: 153023
- [50] Li H T, Li D T, Xu S H, Wang Z Q, Chen X, Ding Y L, Chu Q N, Sha Z M. Hydrothermal carbonization of biogas slurry and cattle manure into soil conditioner mitigates ammonia volatilization from paddy soil [J]. *Chemosphere*, 2023, 344: 140378
- [51] 张曾, 宋成芳, 单胜道, 郑华宝, 张成. 猪粪水热炭对土壤有机碳矿化及土壤性质的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(4): 765-773  
Zhang Z, Song C F, Shan S D, Zheng H B, Zhang C. Effects of swine manure hydrochar on soil organic carbon mineralization and soil properties [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, 38(4): 765-773 (in Chinese)
- [52] 张英锋, 赵琳, 赵婷婷, 马子川. 水热炭的制备及其吸附应用的研究进展[J]. 化学教育, 2019, 40(15): 11-15  
Zhang Y F, Zhao L, Zhao T T, Ma Z C. Progress in preparation and adsorption of hydrothermal carbon [J]. *Chinese Journal of Chemical Education*, 2019, 40(15): 11-15 (in Chinese)
- [53] Zhang S, Wei L L, Trakal L, Wang S S, Shaheen S M, Rinklebe J, Chen Q. Pyrolytic and hydrothermal carbonization affect the transformation of phosphorus fractions in the biochar and hydrochar derived from organic materials: A meta-analysis study[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 906: 167418
- [54] Zhang S, Wang L Y, Chen S, Fan B Q, Huang S W, Chen Q. Enhanced phosphorus mobility in a calcareous soil with organic amendments additions: Insights from a long term study with equal phosphorus input[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 306: 114451
- [55] Fu H B, Wang B Y, Wang H H, Liu H, Xie H F, Han L F, Wang N, Sun X L, Feng Y F, Xue L H. Assessment of livestock manure-derived hydrochar as cleaner products: Insights into basic properties, nutrient composition, and heavy metal content[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 330: 129820

责任编辑: 杨爱东



**第一作者简介:** 李果, 硕士研究生, 现就读于中国农业大学资源与环境学院环境科学与工程专业。硕士研究生期间, 获得二等奖学金, 目前参与青年科学基金项目1项。



**通讯作者简介:** 崔建宇, 博士, 副教授, 硕士生导师。主要从事农业废弃物资源化利用、作物营养与施肥、土壤测试、草坪与环境管理等方面的研究与推广。现任中国植物营养与肥料学会农化测试技术委员会副主任、中国自然资源学会农业资源利用专业委员会秘书长。参加国家重点研发项目、国家自然科学基金项目、横向课题等研究20余项; 发表SCI/EI论文、核心期刊论文等50余篇; 出版学术专著5部; 制定国家标准、地方标准2项。