

# 添加外源有机物料和黏土矿物对菠菜生长及土壤理化性质的影响

刘萌<sup>1,2</sup>, 樊军<sup>1,3\*</sup>, 付威<sup>1,2</sup>, 罗瑞华<sup>1,2</sup>, 苟国花<sup>1,2</sup>, 牛育华<sup>4</sup>

(1.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;  
2.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院 水利部水土保持研究所,  
陕西 杨凌 712100; 4.陕西科技大学 化学与化工学院, 西安 710021)

**摘要:**【目的】快速提高粗质地贫瘠土壤的有机质量, 增强其在土壤中的稳定性, 提升与维持土壤肥力。【方法】选择菠菜作为供试作物, 试验设 8 个处理, 包括对照 (H0)、木本泥炭 (HW)、生物炭 (HB)、褐煤 (HC)、腐殖酸 (HH)、木本泥炭+膨润土 (HWb)、木本泥炭+伊利石 (HWa) 和木本泥炭+高岭石 (HWg)。探究在粗质地黄绵土中添加不同外源有机物料和黏土矿物对植物生长和土壤理化性质的影响。【结果】与 H0 处理相比, 单施外源有机物料的 HW、HB、HC 处理和 HH 处理对菠菜生长、产量和土壤理化性质有改善作用, HB 处理收获期菠菜净光合速率、株高、叶面积和产量分别显著提高了 21.5%、23.5%、69.5% 和 70.9%, 收获期土壤有机质量和全氮量分别显著增加了 236.2% 和 20.7%; HH 处理收获期土壤 pH 值显著降低了 16.8%, 菠菜产量仅提高 4.7%。与 HW 处理相比, 添加黏土矿物的 HWb、HWa、HWg 处理菠菜产量分别提高了 22.7%、9.0%、9.0%, 土壤有机质量分别增加了 33.5%、2.4% 和 27.0%。【结论】在单施有机物料的处理中, 添加生物炭对粗质地土壤培肥效果最好; 在添加黏土矿物的处理中, 木本泥炭添施 2:1 型胀缩性黏土矿物膨润土对菠菜的生长具有良好促进作用, 并且可显著提高粗质地土壤肥力水平, 稳定土壤碳库, 具有一定的应用推广价值。

**关键词:** 生物炭; 木本泥炭; 膨润土; 粗质地; 菠菜

中图分类号: S156

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021567

OSID:



刘萌, 樊军, 付威, 等. 添加外源有机物料和黏土矿物对菠菜生长及土壤理化性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 21-30.

LIU Meng, FAN Jun, FU Wei, et al. Amending Soil with Organic Materials and Clay Minerals to Improve Its Physicochemical Properties and Spinach Growth[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 21-30.

## 0 引言

【研究意义】黄土高原地区是世界上最大的黄土沉积区, 农业生产和生态环境建设面临着土壤肥力有限、水分短缺等诸多限制, 引入适合当地气候、土壤特征的培肥技术是改良土壤结构、维持土壤肥力水平, 实现农业可持续发展的重要措施<sup>[1]</sup>。土壤有机质量是评价土壤肥力水平最重要的指标之一。近年来, 大量研究表明, 通过添加外源有机物料等方法可使粗质地土壤肥力得到提高, 进而促进农业生产的发展和生态环境的改善<sup>[2-3]</sup>。

【研究进展】木本泥炭、生物炭、褐煤和腐殖酸都是富含有机碳的有机物料, 具有快速培肥粗质地土

壤, 提高作物产量的效果。赵文慧等<sup>[4]</sup>研究表明, 单施木本泥炭能够迅速提高土壤有机质量。此外, 添加木本泥炭可以减缓设施菜田土壤养分淋失, 改良土壤, 提高养分利用效率<sup>[5]</sup>。生物炭是高温厌氧热裂解得到的富碳物质, 可有效降低土壤体积质量<sup>[6-7]</sup>, 改善土壤孔性, pH 值等<sup>[8]</sup>, 促进植物生长。Baiamonte 等<sup>[9]</sup>指出生物炭与土壤的结合可以改善土壤结构, 增加孔隙度, 并增强保水性。褐煤是碳化程度最低的煤种, 是由泥炭在成煤过程第二阶段形成的产物, 其施入土壤能够增加有机碳量, 增强有机质的稳定性<sup>[10]</sup>。腐殖酸是天然有机高分子化合物, 当其进入土壤后会通过离子交换、吸附等反应影响土壤中微量元素的有效性, 促进作物养分吸收, 提高产量<sup>[11-12]</sup>。

前人研究发现, 有机质在粗质地土壤中不稳定, 容易快速降解, 当输入相同的有机物料时, 细质地土壤有机碳、含氮量高于粗质地土壤<sup>[13]</sup>, 细质地土壤中的黏粒和腐殖物质相互作用可以减缓土壤有机碳的

收稿日期: 2021-11-18

基金项目: 国家重点研发专项项目 (2021YFC1808902); 陕西省重点研发计划项目 (2020NY-158)

作者简介: 刘萌 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤水分养分高效利用研究。E-mail: meng12019@163.com

通信作者: 樊军 (1974-), 男, 研究员, 主要从事生态系统物质循环研究。

E-mail: fanjun@ms.iswc.ac.cn

分解<sup>[14]</sup>。Paul 等<sup>[15]</sup>报道,在温带土壤中存在黏粒对有机碳的保护作用,土壤有机碳的平均驻留时间与黏粒量成正比,而与砂粒量成反比。因此,黏粒量对粗质地土壤有机质的保护具有重要作用。膨润土、伊利石、高岭石是富含黏粒的黏土矿物,其具有优异的晶体结构和物理化学性能,对于协调土壤水肥气热,提升粗质地土壤肥力水平效果显著。郑毅等<sup>[16]</sup>研究发现,膨润土和腐殖酸配合可以减少土壤氮素气态损失,提高玉米氮肥利用率、籽粒产量和品质。高岭石等黏土矿物可加速土壤中有机物质的分解,提高土壤有机碳量<sup>[17]</sup>。因此,黏土矿物对粗质地土壤有机碳的固存有积极作用。

【切入点】但是,以往的研究只关注了单一外源有机物料和黏土矿物,对于不同黏土矿物固存有有机碳的效果差异关注较少。【拟解决的关键问题】因此本试验对黄绵土中添加木本泥炭,生物炭,褐煤和腐殖酸 4 种有机物料,以及单施木本泥炭基础上添加膨润土,伊利石和高岭石 3 种黏土矿物的培肥效果差异及其对粗质地土壤有机质的影响进行研究。力求找出最佳的土壤改良模式,为粗质地土壤的培肥提供理论依据。

表 1 土壤、外源有机物质和黏土矿物的部分理化性状

Table 1 Basic soil physicochemical properties, exogenous organic materials and clay minerals used in the pot experiment

项目	pH 值	电导率 EC/ ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	有机质量/%	全磷量/%	全氮量/%	含水率/%	砂粒量/%	粉粒量/%	黏粒量/%
黄绵土	8.20	79.1	0.52	0.06	0.02	2.2	25.64	58.14	16.22
木本泥炭	4.09	353.7	84.2	0.01	0.57	72.2	-	-	-
生物炭	9.24	129.9	79.4	0.12	0.64	9.8	-	-	-
褐煤	4.63	1 779.6	45.8	0.06	0.51	22.1	-	-	-
腐殖酸	2.70	1 2278.4	57.7	0.02	0.86	19.8	-	-	-
膨润土	9.32	815.8	-	-	-	15.2	19.99	53.78	26.23
伊利石	7.89	35.2	-	-	-	0.2	6.72	70.42	22.86
高岭石	7.44	27.6	-	-	-	0.6	11.65	64.71	23.64

## 1.2 试验设计

试验设置 8 个处理:黄绵土对照处理(H0),黄绵土+木本泥炭处理(HW),黄绵土+生物炭处理(HB),黄绵土+褐煤处理(HC),黄绵土+腐殖酸处理(HH),黄绵土+木本泥炭+膨润土处理(HWb),黄绵土+木本泥炭+伊利石处理(HWa),黄绵土+木本泥炭+高岭石处理(HWg)。每个处理 5 次重复。

所有处理在播种前均施用基肥(氮(N)0.1 g/kg,磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )0.2 g/kg),木本泥炭、生物炭、褐煤、腐殖酸施用量根据自身有机质量计算,保证全部有机物料施入有机质的量均为 13.37 g/kg,膨润土、伊利石、高岭石施入量为土壤质量的 1%,各物料与土壤混匀后装入盆中,每盆播种 10 粒,浇水量是保持盆中土

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

本试验于 2019 年 12 月 12 日—2020 年 1 月 15 日在西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟干旱大厅常态人工气候室中进行,温度控制为 25  $^{\circ}\text{C}$ ,湿度 70%, $\text{CO}_2$  物质的量浓度为 400  $\mu\text{mol/mol}$ ,控制光照强度为 400  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ,光周期为 12 h/d。供试菠菜品种为陕西省秦兴种苗有限公司的金菠,供试盆(高 15 cm,内径 15 cm,装土 3.4 kg)由聚氯乙烯(PVC)材料制成。所用木本泥炭来源于印度尼西亚露天煤矿,生物炭来源于陕西省杨陵区五泉镇亿鑫生物公司,褐煤来源于陕西省榆林市煤矿,腐殖酸来源于陕西科技大学腐殖酸生态工程中心,为低阶煤活化产物。膨润土是以 2:1 型蒙脱石为主的胀缩性黏土矿物,伊利石是 2:1 型非胀缩性黏土矿物,高岭石是 1:1 型非胀缩性黏土矿物。盆栽所用土壤取自延安市宝塔区冯庄乡康坪村,为粗质地黄绵土,风干后过 2 mm 筛,去掉土壤中可见的作物残留物。土壤和添加的外源有机物质、黏土矿物的部分理化性状见表 1。

壤质量含水率为 25%,每次均称质量浇水,待菠菜长出 2 片真叶后间苗,每盆留 5 株。在 2019 年 12 月 24 日菠菜间苗期,12 月 30 日菠菜苗期,2020 年 1 月 6 日菠菜生长期,1 月 14 日菠菜收获期拍摄生长照片如图 1。在 2019 年 12 月 24、31 日、2020 年 1 月 5、10、15 日采样测定鲜质量,在 2019 年 12 月 30 日、2020 年 1 月 5、10、15 日测定株高、叶绿素、叶面积,在 2020 年 1 月 11—13 日测定净光合速率、气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度、蒸腾速率,从 2019 年 12 月 27 日—2020 年 1 月 14 日连续监测各处理的水分变化情况。在收获后采集土样测定土壤 pH 值、电导率、全氮和有机质量。

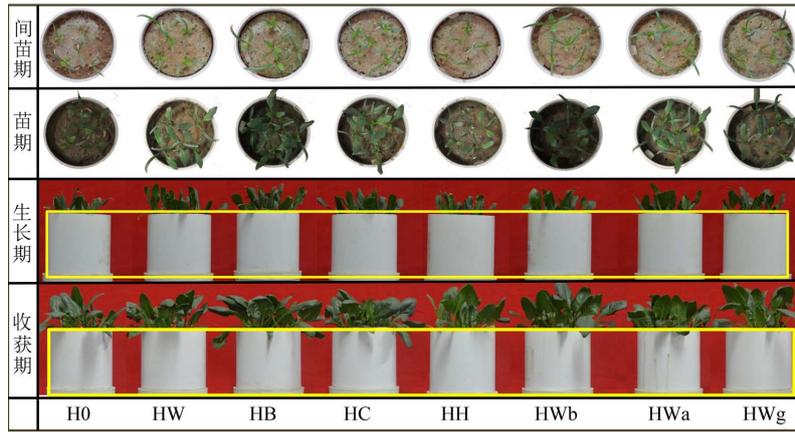


图 1 各处理菠菜不同生育期对比

Fig.1 Comparison of different growth periods of spinach in different treatments

### 1.3 分析方法

菠菜生物量的测定：将菠菜紧贴土壤表层剪下，然后用蒸馏水洗净，用干净纱布吸干水分后用精度为 0.001 g 的电子分析天平称量得到植株鲜质量。

菠菜生理指标的测定：用直尺测量植株自然状态下土壤表层到叶片最高点的高度，每盆测 3 株；用 SPAD-502Plus 手持式叶绿素仪测量基部向上的第 1、第 2 片叶子，每盆测 3 株；将采集的植株样品称取鲜质量后，用 LI-3000A 便携式激光叶面积仪测定菠菜的叶面积；用 LI-6400XT 便携式光合测定仪 (Li-Cor, Inc., USA)，在 CO<sub>2</sub> 物质的量浓度为 500 μmol/mol，温度 25 °C，光量子强度 1 000 μmol/(m<sup>2</sup> s) 条件下，测定净光合速率 (*Pn*)、气孔导度 (*Gs*)、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度 (*Ci*)、蒸腾速率 (*Tr*)，每个处理 10 次重复。

土壤理化指标的测定：土壤养分采用常规测定方法，土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定；土壤全氮采用凯氏定氮法测定；土壤 pH 值测定采用电极法，利用雷磁 PHSJ-4F 数显 pH 计测定；土壤电导率采用雷磁 DDS-303A 电导率仪测定；土壤颗粒组成采用 MS2000 型马尔文激光粒度仪测定；土壤含水率采用称质量法每天测定。土壤质量含水率计算式为：

$$\theta_m = \frac{m_2 - m_1}{m_1 - m}, \quad (1)$$

式中： $\theta_m$  为土壤质量含水率 (%)； $m$  为供试盆质量 (g)； $m_1$  为试验前风干土与供试盆质量 (g)； $m_2$  为每日称质量 (g)。

$$DWC = M_1 - M_2, \quad (2)$$

式中： $DWC$  为日水分消耗量 (g/d)； $M_1$  为当日盆栽质量 (g)； $M_2$  为昨日盆栽质量 (g)。

### 1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2010 进行整理和计算，采用 SPSS 22 对数据进行单因素方差 (one-way ANOVA) 分析，如果差异显著 ( $P < 0.05$ )，使用 Duncan 法进行多重比较，采用 Origin 2016 进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对菠菜光合作用的影响

随着菠菜的生长发育，不同处理的菠菜叶绿素相对量呈现先增高后平稳的趋势 (图 2)，在播种后第 18 天 (2019 年 12 月 30 日)，各处理的叶绿素相对量均显著高于对照 H0 处理。在收获期，各处理的叶绿素相对量表现为 HWg 处理 > HW 处理 > HWb 处理 > HWa 处理 > HB 处理 > HC 处理 > H0 处理 > HH 处理，HW、HB、HWb、HWa、HWg 处理显著高于 H0 处理，HC 处理与 H0 处理之间差异不显著，H0 处理显著高于 HH 处理，而添加黏土矿物的 HWb、HWa、HWg 处理与 HW 处理之间差异不显著。

由表 2 可知，除 HH 处理菠菜叶片净光合速率 (*Pn*) 显著低于对照 H0 处理外，其余各处理均显著高于 H0 处理，在单独添加外源有机物料的处理中，HB 处理的 *Pn* 达到 32.1 μmol/(m<sup>2</sup> s)，与其他处理相比差异达到显著水平，加入黏土矿物的 HWb、HWa、HWg 处理显著高于 HW 处理。HWb 处理的气孔导度 (*Gs*)、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度 (*Ci*) 与蒸腾速率 (*Tr*) 均显著高于 H0 处理，其中 HW 处理下 *Gs* 最高，除 HH 处理外其余处理 *Gs* 显著高于 H0 处理，HC 处理下 *Ci* 最高，HB 处理下 *Tr* 最高，而且添加黏土矿物的处理 HWb、HWa、HWg 处理的 *Tr* 显著高于 HW 处理。

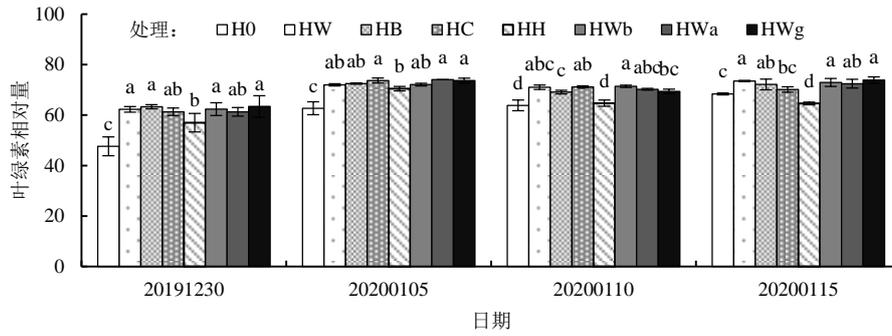


图2 各处理菠菜叶绿素相对量的比较

Fig.2 Comparison of spinach chlorophyll content for each treatment

表2 各处理菠菜净光合速率及气体交换参数的比较

Table 2 Comparison of spinach net photosynthetic rate and gas exchange parameters for each treatment

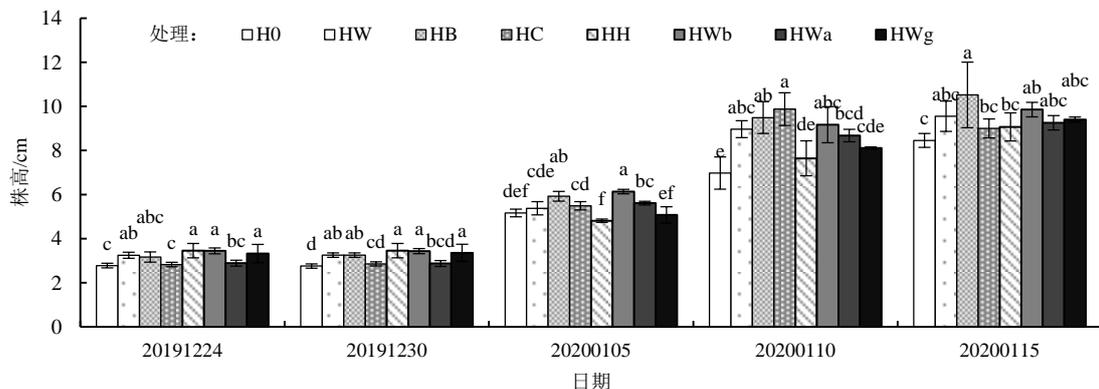
处理	净光合速率( $P_n$ )/( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	气孔导度( $G_s$ )/( $\text{mol}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度( $C_i$ )/( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )	蒸腾速率( $T_r$ )/( $\text{mmol}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
H0	26.43±1.26c	0.58±0.06c	369.33±53.58b	9.45±1.20bcd
HW	29.07±1.44b	1.08±0.05a	406.67±9.61ab	8.76±0.43d
HB	32.10±0.36a	1.07±0.18a	366.67±6.51b	10.83±0.68a
HC	29.10±1.01b	1.03±0.07a	426.67±10.69a	10.33±0.15ab
HH	23.83±1.19d	0.66±0.09bc	389.33±9.87ab	8.93±0.61cd
HWb	31.27±0.71a	0.96±0.11a	413.33±1.55a	10.77±0.49a
HWa	31.10±1.05a	0.88±0.25ab	402.00±18.03ab	10.02±0.31abc
HWg	31.97±0.70a	0.98±0.08a	320.67±20.31c	10.47±0.72ab

## 2.2 不同处理对菠菜形态生长指标的影响

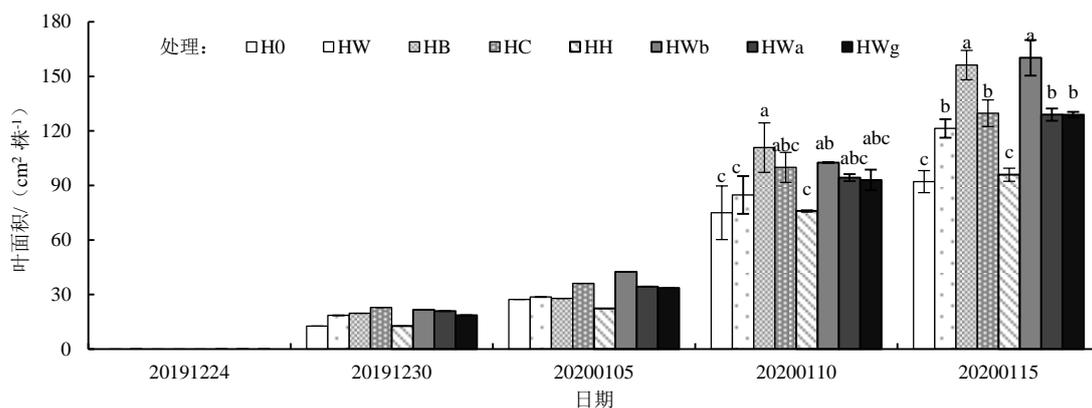
添加不同外源有机物料和黏土矿物处理的菠菜株高始终优于对照。由图3(a)可知,随着时间的推移至收获期(2020年1月15日)各处理菠菜的株高都逐渐增大,不同处理间的株高差异显著,尤其是旺盛生长期(2020年1月5日),单独添加外源有机物料的处理中,HB处理显著高于其他处理,HW、HC处理高于H0处理,但差异不显著,HW、HB、HC处理显著高于HH处理,加入黏土矿物的处理中,HWb处理显著高于HW处理,HWa处理高于HW处理,但没有达到显著水平。随着菠菜的生长发育,不同处理间株高的差异逐渐减小,在收获期时,HW、

HB、HC、HH、HWb、HWa、HWg处理分别比H0处理高12.9%、23.5%、5.9%、7.1%、16.5%、9.4%、10.6%,HWb处理比HW处理提高了3.1%。

随着菠菜的生长发育,所有处理的叶面积迅速增大。由图3(b)可知,不同处理栽培条件下菠菜的单株叶面积有显著性差异,在收获期HWb和HB处理显著优于其他处理,H0处理和HH处理显著低于其它处理,而HW、HB、HC、HH、HWb、HWa、HWg处理分别比H0处理增加了31.7%、69.5%、40.8%、4.0%、73.9%、40.0%、39.9%,HWb、HWa、HWg处理分别比HW处理增加了32.1%、6.3%、6.2%。



(a) 各处理菠菜株高的比较



(b) 各处理叶面积的比较

图3 各处理菠菜株高和叶面积的比较

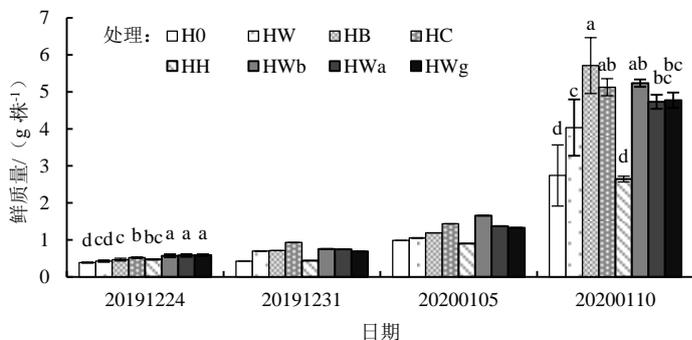
Fig.3 Comparison of spinach height and leaf area per plant for each treatment

### 2.3 不同处理对菠菜生物量的影响

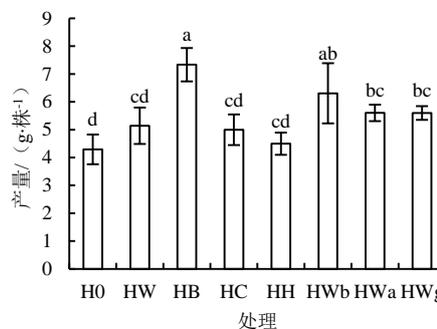
随着菠菜生育期的发展,各处理菠菜生物量均迅速增长。如图4(a)所示,在间苗期(2019年12月24日)各处理的鲜质量均高于H0处理,其中添加黏土矿物的HWb、HWa、HWg处理分别比HW处理高32.7%、34.9%、37.2%,差异达到显著水平。在收获前期(2020年1月10日),HH处理的鲜质量与对照H0处理差异不显著,其余处理均显著高于H0处理,其中HB处理地上部鲜质量最高,达到5.7 g/株,HWb处理次之,添加黏土矿物的处理HWb、HWa、HWg

处理鲜质量均大于HW处理。

不同处理的菠菜产量有显著差异,如图4(b)所示,各处理的鲜质量产量表现为HB处理>HWb处理>HWa处理>HWg处理>HW处理>HC处理>HH处理>H0处理,其中在单独添加外源有机物料的处理中,HB处理菠菜鲜质量产量与其他处理差异显著,且比H0处理显著提高了70.9%,在添加黏土矿物的处理中,HWb、HWa、HWg处理鲜质量产量均高于HW处理,且HWb处理比HW处理高22.7%,差异达到显著水平。



(a) 各处理菠菜生物量随时间的变化



(b) 各处理菠菜最终产量的比较

图4 各处理菠菜生物量随时间的变化和最终产量的比较

Fig.4 Comparison of changes in spinach biomass with time and final yield for each treatment

### 2.4 不同处理对土壤理化性质的影响

菠菜生育期内日水分消耗量和对应的土壤质量含水率随时间变化(图5),整体来看,菠菜生育期(2019年2月27日—2020年1月14日)内日水分消耗量呈逐渐升高的趋势。在所有处理中,HB处理日均消耗土壤水分最高,达到40.1 g/d,HH处理最低,仅为26.5 g/d,这与HB处理较其他处理生长旺盛,水分利用效率高有很大关系,而添加黏土矿物的HWb处理和HWg处理日水分消耗量平均比HW处理高5.5%和2.3%,HWa处理比HW处理低2.9%。图5(b)还表明,灌水后土壤质量含水率呈逐渐下

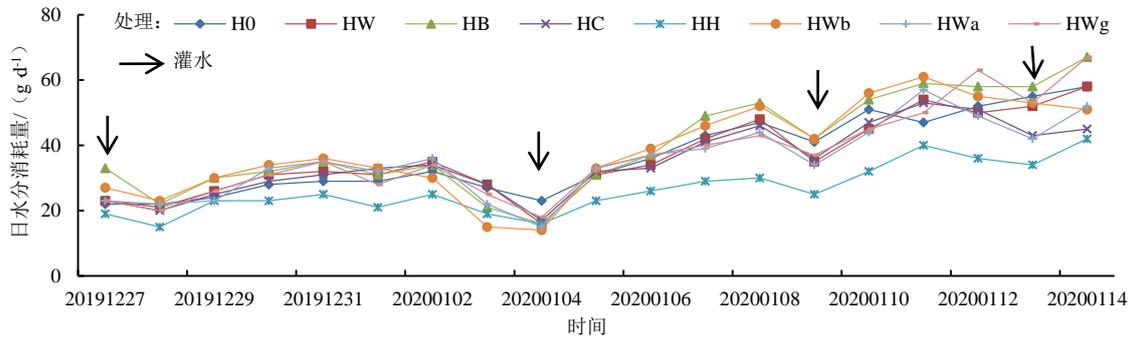
降的趋势,各处理质量含水率保持在9%~25%之间,2020年1月3日各处理的质量含水率最低,其中HW处理达到9.8%,添加黏土矿物的HWb、HWa、HWg处理的质量含水率分别比HW处理高1.0%、2.4%、5.1%。

添加不同外源有机物料和黏土矿物对菠菜收获期的土壤pH值和电导率值有一定影响(图6)。由图6(a)可知,在单独添加外源有机物料的处理中,HW、HB、HC、HH处理土壤pH值比H0处理分别降低了2.0%、0.9%、2.7%、16.8%,其中HH处理pH值仅为6.8,显著低于其他处理,添加黏土矿物的处理中,

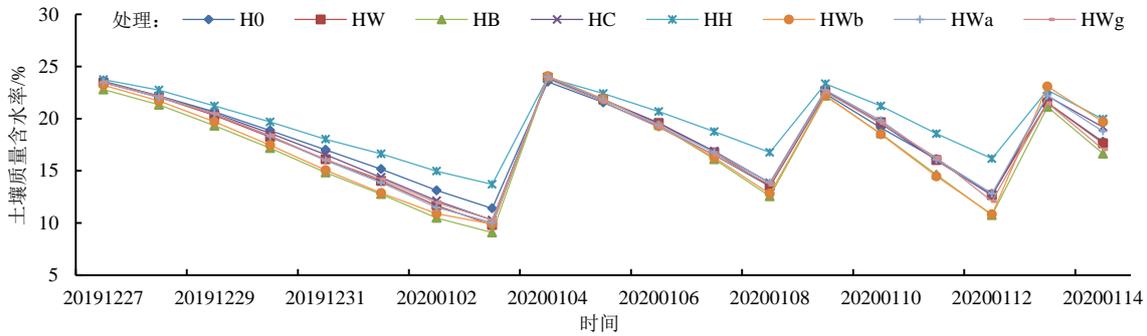
HWb 处理和 HWa 处理土壤 pH 值比 HW 处理分别降低了 1.6% 和 1.3%，但差异不显著。由图 6 (b) 可知，在单独添加外源有机物料的处理中，HW、HB、HC、HH 处理土壤电导率比 H0 处理分别提高了 3.9%、2.0%、54.0%、179.7%，其中 HH 处理土壤电导率值达到 511.18  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，显著高于其他处理，HC 处理显著高于除 HH 处理外的其余处理，而 H0、HW、HB 处理间未达到显著水平，此外，添加黏土矿物的处理之间差异不显著。

添加不同外源有机物料和黏土矿物对菠菜收获期的土壤有机质量和全氮量影响显著 (图 7)。由图 7 (a) 可知，HW、HB、HC、HH、HWb、HWa、HWg

处理有机质量分别比 H0 处理显著提高了 187.2%、236.2%、141.1%、201.4%、283.4%、193.8%、264.4%，在添加黏土矿物的处理中，HWb、HWa、HWg 处理收获期土壤有机质量分别比 HW 处理提高了 33.5%、2.4% 和 27.0%，且 HWa 处理和 HWg 处理与 HW 处理之间差异显著。由图 7 (b) 可以看出，各处理收获期土壤全氮量均显著高于 H0 处理，其中单独添加外源有机物料的处理中，HH 处理显著高于其他处理，在添加黏土矿物的处理中，HWb、HWa、HWg 处理收获期土壤全氮量分别比 HW 处理高 9.7%、6.47% 和 9.7%，但差异未达到显著水平。



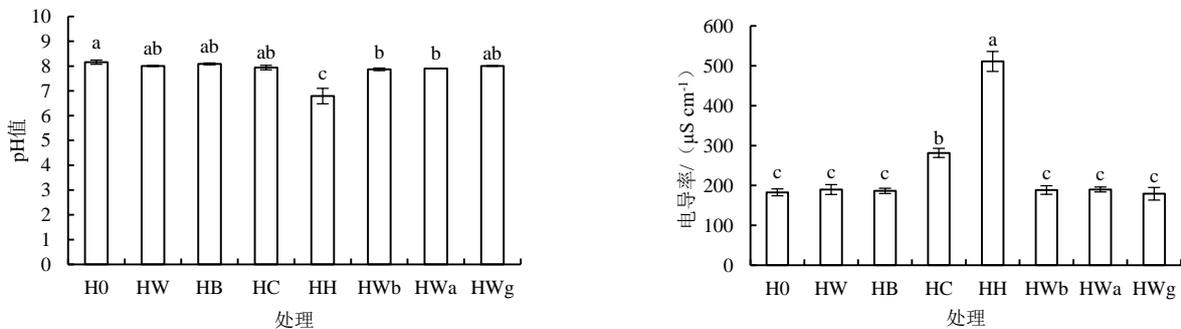
(a) 各处理菠菜日水分消耗量随时间的变化



(b) 各处理菠菜土壤质量含水率随时间的变化

图 5 各处理日水分消耗量和土壤质量含水率随时间的变化

Fig.5 Change of daily water consumption and soil mass water content with time



(a) 不同处理对收获期土壤 pH 值的影响

(b) 不同处理对收获期土壤电导率的影响

图 6 不同处理对收获期土壤 pH 值和电导率的影响

Fig.6 Effects of different treatments on soil pH and electrical conductivity during harvest

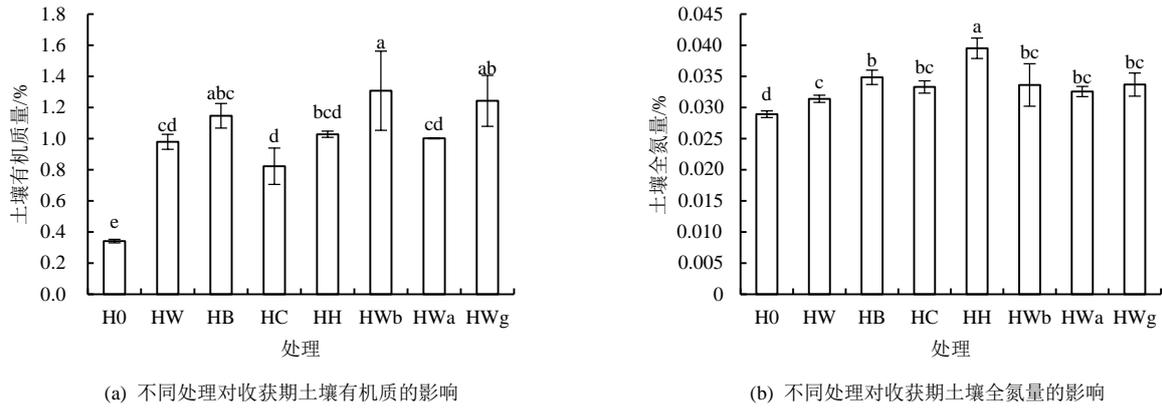


图 7 不同处理对收获期土壤有机质和全氮量的影响

Fig.7 Effects of different treatments on soil organic matter and total nitrogen during harvest

### 3 讨论

#### 3.1 不同外源有机物料对菠菜生长和土壤理化性质的影响

大量研究表明,外源有机物料可以通过改变土壤物理、化学特性进而影响农作物生长和产量<sup>[18-21]</sup>。试验结果显示,添加木本泥炭、生物炭和褐煤均能显著提高菠菜叶绿素相对量和净光合速率,而添加腐殖酸导致收获期菠菜叶绿素相对量和净光合速率分别降低了5.5%和9.8%,且差异达到显著水平(图2,表2),主要是因为土培中添加木本泥炭、生物炭和褐煤在一定程度上会降低土壤体积质量,提高土壤孔隙度<sup>[9,22]</sup>,增加土壤有机质与空气、水分和根系的接触<sup>[23]</sup>,为微生物生长提供充足的碳源和适宜的栖息微环境<sup>[24]</sup>,对菠菜根系养分吸收和叶绿素的合成有一定的促进作用。土壤pH值对植物生长和养分利用具有重要影响<sup>[25]</sup>,腐殖酸降低了菠菜收获期土壤pH值,提高了土壤电导率(图6),施入后改变了土壤本身的酸碱性,从而使其对菠菜生长的提升效果局限于一定范围之内,而适宜的土壤环境是保证菠菜健壮生长的必要条件<sup>[16]</sup>,因此菠菜光合作用不佳。进一步的研究发现四种外源有机物料均能提高菠菜的株高、叶面积和产量(图3,图4)。这可能是因为木本泥炭富含腐殖酸和其他矿物质养分,可增加土壤保水保肥性能,促进菠菜生长<sup>[4,26]</sup>;褐煤物质施入后提高了土壤的生物活性以及离子交换能力<sup>[10]</sup>,为菠菜生长提供了更多的有效养分含量;腐殖酸可以影响土壤中微量元素的有效性,促进菠菜养分吸收<sup>[11-12]</sup>。而对比发现添加生物炭的处理菠菜叶面积和产量均显著高于添加木本泥炭、腐殖酸和褐煤的处理,其中与对照相比菠菜鲜质量提高了70.9%(图3(b),图4(b)),表明生物炭对菠菜生长的提升效果最佳,这可能是由于木本泥炭含有羧基、酚羟基、甲氧基等多种官能团,导致其分子结构复杂,施入土壤难以被微生物分解<sup>[27]</sup>;褐煤物质是泥炭经过

成岩作用形成的低级煤炭,相比生物炭较难被植物吸收<sup>[10]</sup>;而生物炭自身含有一定有益元素并且能够改善土壤理化性状<sup>[28]</sup>,陈温福等<sup>[29]</sup>研究发现,随着作物生长时间的延长,生物炭对作物产量的促进作用表现出一定的累加效应,而本研究中菠菜生长时间仅一个多月,未进行连续栽培,因此,在粗质地黄绵土上,生物炭对菠菜的增产是否存在时间的累加效应还待进一步研究。此外,4种外源有机物料均能显著提高菠菜收获期土壤有机质量和全氮量,特别是添加生物炭的处理土壤有机质量和全氮量比对照分别显著提高了236.2%和20.7%(图7),这与前人研究结果相一致<sup>[2,5,10,19,28-30]</sup>。但是也有大量研究表明,生物炭对土壤团聚体形成<sup>[18]</sup>、作物生长<sup>[31]</sup>和土壤微生物与动物区系多样性<sup>[32]</sup>产生不利影响,并且后期由于其结构性稳定,富含各种稳定性官能团<sup>[23]</sup>,不易被微生物和根系分解利用<sup>[31]</sup>,因此粗质地土壤中添加生物炭需要考虑其性质上的优缺点,在未来找寻更加经济有效的添加物料。

#### 3.2 不同黏土矿物对菠菜生长和土壤理化性质的影响

试验研究表明,在粗质地黄绵土添加木本泥炭并增施黏土矿物后,菠菜的净光合速率、叶面积和产量相比单独添加木本泥炭均有明显增长(表2,图3(b),图4),一方面是因为木本泥炭可以促进添加的黏粒相互胶结而形成团聚体,对粗质地土壤结构稳定性和土壤有机质的保持起到一定的促进作用<sup>[23,33-34]</sup>;另一方面黏土矿物对粗质地土壤养分起整合作用,提高土壤水分有效性和养分利用率<sup>[16,35]</sup>,从而有利于植物根系对养分的吸收利用,促进菠菜地上部生长。另外,本研究还发现,木本泥炭中添加2:1型胀缩性黏土矿物膨润土对菠菜株高、叶面积和产量的提升效果优于木本泥炭中添加2:1型非胀缩性黏土矿物伊利石和1:1型非胀缩性黏土矿物高岭石,可能是由于膨润土具有吸水膨胀特性,保水持水性能优异,可以有效提高粗质地土壤含水率<sup>[16,36]</sup>,从而有利于菠菜地上

部的生长发育,提高产量。本研究同时也发现,黏土矿物施入土壤具有保肥供肥的作用,木本泥炭中添加的3种黏土矿物均能提高土壤有机质量和全氮量(图7),主要是因为黏土矿物可与有机物料形成的腐殖物质结合为有机无机复合体或团聚体,土壤黏粒等胶结物质将有机质包裹在团聚体中,具有隔离微生物的作用,减少了与空气接触,降低了分解者的分解速率,同时增加了团聚体的稳定性,从而有利于土壤结构的维持和有机质的保持<sup>[17,37]</sup>,所以黏土矿物的存在能增加粗质地土壤有机质的稳定性,提高土壤有机质累积量<sup>[38-39]</sup>。当土壤中有新鲜外源有机物料加入时,会促进土壤原有有机质的分解<sup>[13]</sup>,而添加黏土矿物会激发土壤团聚体的物理保护机制<sup>[13,15,37]</sup>,减缓粗质地土壤肥力流失。不同种类的黏土矿物,其比表面积和阳离子交换量不同,故而对有机物料的胶结与稳定能力也不同<sup>[36]</sup>,膨润土由于独特的2:1型网架状晶体结构,因而具有吸附性、黏着性和阳离子交换性等优良理化性质<sup>[16,36]</sup>,能对结构较差的粗质地土壤养分起到截留和束缚作用<sup>[16,38]</sup>,并且膨润土具有较大的比表面积、负电荷和阳离子交换量<sup>[37,40]</sup>,有利于土壤团粒结构的形成<sup>[38]</sup>,所以维持粗质地土壤有机质量的作用优于伊利石和高岭石。本研究结果也表明添加膨润土比单施木本泥炭土壤有机质量显著提高了33.5%,说明膨润土可有效减少粗质地土壤外源有机物料的损失,降低分解速率,增加有机物料对土壤有机质量的贡献率,对粗质地土壤肥力提升效果最显著。综上所述,粗质地土壤中补充黏粒能够对土壤有机质起到物理保护作用,是黄绵土土壤快速培肥的有效途径,因此,在未来开展粗质地土壤添加有机物料改良时,应该配合使用黏土矿物,以期达到减少土壤有机质流失,促进作物生长的最佳效果。

本研究虽然通过盆栽试验对比了不同外源有机物料和黏土矿物对菠菜生长、产量和土壤理化性质的影响,并发现添加生物炭、木本泥炭中添加2:1型胀缩性黏土矿物膨润土对粗质地土壤肥力提升效果最好,但是机理尚未十分明确,特别是本试验盆栽体积较小以及栽培时间较短,而土壤改良是一个漫长的过程。因此,应在日后进行大田试验的验证,为进一步明确不同外源有机物料和黏土矿物对植物生长、土壤肥力的影响提供试验依据,也为在利用外源有机物料和黏土矿物改良粗质地土壤时提供科学依据,减少肥料使用量,提高作物产量,改善土壤肥力水平。

## 4 结论

添加外源有机物料提升了粗质地土壤的肥力并促进了菠菜的生长发育,其中添加生物炭是单施有机

物料组中的最佳处理。在添加外源有机物料的情况下补充黏粒是粗质地土壤地力提升的有效措施之一,其中添加木本泥炭后补充2:1型胀缩性黏土矿物(膨润土)效果最佳。

## 参考文献:

- [1] 范亚琳,刘贤赵,高磊,等.不同培肥措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失的影响[J].土壤学报,2019,56(3):638-649.  
FAN Yalin, LIU Xianzhao, GAO Lei, et al. Effects of fertility-building practices on soil organic carbon loss with sediment in sloping cropland of red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(3): 638-649.
- [2] 魏永霞,石国新,冯超,等.黑土区施加生物炭对土壤综合肥力与大豆生长的影响[J].农业机械学报,2020,51(5):285-294.  
WEI Yongxia, SHI Guoxin, FENG Chao, et al. Effects of applying biochar on soil comprehensive fertility and soybean growth in black soil area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 285-294.
- [3] SARKAR B, SINGH M, MANDAL S, et al. Clay minerals—Organic matter interactions in relation to carbon stabilization in soils[M]. The Future of Soil Carbon. Academic Press, 2018: 71-86.
- [4] 赵文慧,马垒,徐基胜,等.秸秆与木本泥炭短期施用对潮土有机质及微生物群落组成和功能的影响[J].土壤学报,2020,57(1):153-164.  
ZHAO Wenhui, MA Lei, XU Jisheng, et al. Effect of application of straw and wood peat for a short period on soil organic matter and microbial community in composition and function in fluvo-aquic soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(1): 153-164.
- [5] 陈硕,聂海斌,谭钧,等.木本泥炭促进设施番茄生长和改良土壤的效果[J].中国蔬菜,2015,(10):42-46.  
CHEN Shuo, NIE Haibin, TAN Jun, et al. Effect of wood peat on greenhouse tomato growth and soil improvement[J]. China vegetables, 2015(10): 42-46.
- [6] 尚杰,耿增超,赵军,等.生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J].应用生态学报,2015,26(7):1969-1976.  
SHANG Jie, GENG Zengchao, ZHAO Jun, et al. Effects of biochar on water thermal properties and aggregate stability of Lou soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(7): 1969-1976.
- [7] 袁晶晶,齐学斌,赵京,等.生物炭施沼液对土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].灌溉排水学报,2022,41(1):80-86.  
YUAN Jingjing, QI Xuebin, ZHAO Jing, et al. The effect of biochar amendment and slurry application on soil aggregation and organic carbon distribution[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(1): 80-86.
- [8] ZWIETEN L V, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327(1/2): 235-246.
- [9] BAIAMONTE G, DE PASQUALE C, MARSALA V, et al. Structure alteration of a sandy-clay soil by biochar amendments[J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(4): 816-824.
- [10] 方丽婷,张一扬,黄崇俊,等.泥炭和褐煤对土壤有机碳和腐殖物质组成的影响[J].土壤通报,2017,48(05):1149-1153.  
FANG Liting, ZHANG Yiyang, HUANG Chongjun, et al. Effects of peat and brown coal on soil organic carbon and humic substances[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(5): 1149-1153.
- [11] 孙静悦,袁亮,林治安,等.氧化/磺化腐殖酸对潮土中Cu、Zn、Fe、Mn有效性的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(9):1495-1503.  
SUN Jingyue, YUAN Liang, LIN Zhian, et al. Effects of oxidized/sulphonated humic acid on the availability of Cu, Zn, Fe and Mn in fluvo-aquic soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2019, 25(9): 1495-1503.

- [12] 陈亮, 常丽, 桂秀平, 等. 腐殖酸增值混肥料及其减量在花椰菜上的应用效果[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(Supp.2): 107-110.  
CHEN Liang, CHANG Li, GUI Xiuping, et al. Effects of humic acid added compound fertilizer and its reduction on cauliflower[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(Supp.2): 107-110.
- [13] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 412-418.  
DOU Sen, LI Kai, GUAN Song. A review on organic matter in soil aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(2): 412-418.
- [14] LUTZOW M V, KOGEL-KNABNER I, EKSCHEMITT K, et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review[J]. European journal of soil science, 2006, 57(4): 426-445.
- [15] PAUL E A, COLLINS H P, LEAVITT S W. Dynamics of resistant soil carbon of Midwestern agricultural soils measured by naturally occurring  $^{14}\text{C}$  abundance[J]. Geoderma, 2001, 104: 239-256.
- [16] 郑毅, 周磊, 刘景辉. 膨润土-腐殖酸型改良剂对沙质土壤氮素气态损失、氮肥利用率和玉米产量的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(12): 3 887-3 894.  
ZHENG Yi, ZHOU Lei, LIU Jinghui. Effects of bentonite-humic acid on gaseous nitrogen loss, nitrogen use efficiency and maize yield on sandy soil[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(12): 3 887-3 894.
- [17] SINGH M, SARKAR B, BOLAN N S, et al. Decomposition of soil organic matter as affected by clay types, pedogenic oxides and plant residue addition rates[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 374: 11-19.
- [18] 王欣, 尹带霞, 张凤, 等. 生物炭对土壤肥力与环境质量的影响机制与风险解析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 248-257.  
WANG Xin, YIN Daixia, ZHANG Feng, et al. Analysis of effect mechanism and risk of biochar on soil fertility and environmental quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(4): 248-257.
- [19] AGEGNEHU G, SRIVASTAVA A K, BIRD M I. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review[J]. Applied Soil Ecology, 2017, 119: 156-170.
- [20] 王世斌, 高佩玲, 相龙康, 等. 生物炭、河沙对盐碱土水盐、氮素及玉米产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(9): 17-23.  
WANG Shibin, GAO Peiling, XIANG Longkang, et al. Amending saline-alkali soils with biochar or fluvial sand to improve bioavailable nitrogen and yield of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage 2021, 40(9): 17-23.
- [21] 赵红玉, 朱成立, 黄明逸, 等. 生物炭添加量对冬小麦花后干物质积累及转运的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 16-23.  
ZHAO Hongyu, ZHU Chengli, HUANG Mingyi, et al. Amending soil with biochar to improve accumulation and translocation of dry matter after anthesis in winter wheat [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 16-23.
- [22] OGUNTUNDE P G, ABIODUN B J, AJAYI A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(4): 591-596.
- [23] 付威, 雍晨旭, 马东豪, 等. 黄土丘陵沟壑区治沟造地土壤快速培肥效应[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 252-261.  
FU Wei, YONG Chenxu, MA Donghao, et al. Rapid fertilization effect in soils after gully control and land reclamation in loess hilly and gully region of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(21): 252-261.
- [24] 李冬, 陈蕾, 夏阳, 等. 生物炭改良剂对小白菜生长及低质土壤氮磷利用的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(9): 2 384-2 391.  
LI Dong, CHEN Lei, XIA Yang, et al. The effects of biochar on growth and uptake of nitrogen and phosphorus for Chinese cabbage in poor quality soil in Ningxia[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(9): 2 384-2 391.
- [25] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 等. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性和肥力状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 906-918.  
HUANG Shaowen, WANG Yujun, JIN Jiyun, et al. Status of salinity, pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2011, 17(4): 906-918.
- [26] 于兵, 吴克宁, 黄勤. 木本泥炭对谷子物质生产及产量构成的影响研究[J]. 中国土壤与肥料, 2018, (5): 102-108.  
YU Bing, WU Kening, HUANG Qin. Study on the effect of woody peat on the dry matter accumulation and yield of millet[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018, (5): 102-108.
- [27] 郑延云, 张佳宝, 谭钧, 等. 不同来源腐殖质的化学组成与结构特征研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(2): 386-397.  
ZHENG Yanyun, ZHANG Jiabao, TAN Jun, et al. Chemical composition and structure of humus relative to sources[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(2): 386-397.
- [28] 吕波, 王宇函, 夏浩, 等. 不同改良剂对黄棕壤和红壤上白菜生长及土壤肥力影响的差异[J]. 中国农业科学, 2018, 51(22): 4 306-4 315.  
LYU Bo, WANG Yuhan, XIA Hao, et al. Effects of biochar and other amendments on the cabbage growth and soil fertility in yellow-brown soil and red soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(22): 4 306-4 315.
- [29] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3 324-3 333.  
CHEN Wenfu, ZHANG Weiming, MENG Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(16): 3 324-3 333.
- [30] SPOKAS K A, CANTRELL K B, NOVAK J M, et al. Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration[J]. Journal of Environmental Quality, 2011, 41(4): 973-989.
- [31] RONDON M, LEHMANN J, RAMIREZ J, et al. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions[J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 43(6): 699-708.
- [32] LIESCH A M, WEYERS S L, GASKIN J W, et al. Impact of two different biochars on earthworm growth and survival[J]. Annals of Environmental Science, 2010, 4: 1-9.
- [33] DING Y, LIU Y, LIU S, et al. Biochar to improve soil fertility. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2016, 36(2): 36.
- [34] WEI H, GUENET B, VICCA S, et al. High clay content accelerates the decomposition of fresh organic matter in artificial soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 77: 100-108.
- [35] KOME G K, ENANG R K, TABI F O, et al. Influence of clay minerals on some soil fertility attributes: A Review[J]. Open Journal of Soil Science, 2019, 9(9): 155-188.
- [36] 周春生, 龚萍, 刘伟, 等. 改性膨润土对沙地土壤改良及紫花苜蓿生物效应的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(7): 16-22.  
ZHOU Chunsheng, GONG Ping, LIU Wei, et al. Amending sandy soils with modified bentonite to improve its physical properties and crop growth[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(7): 16-22.
- [37] HASSINK J. Effects of soil texture and grassland management on soil organic C and N and rates of C and N mineralization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(9): 1 221-1 231.
- [38] ZHOU L, MONREAL C M, XU S, et al. Effect of bentonite-humic acid application on the improvement of soil structure and maize yield in a sandy soil of a semi-arid region[J]. Geoderma, 2019, 338: 269-280.
- [39] SINGH M, SARKAR B, SARKAR S, et al. Stabilization of soil organic carbon as influenced by clay mineralogy[J]. Advances in Agronomy. Academic Press, 2018, 148: 33-84.
- [40] GERARD F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils—A myth revisited[J]. Geoderma, 2016, 262: 213-226.

## Amending Soil with Organic Materials and Clay Minerals to Improve Its Physicochemical Properties and Spinach Growth

LIU Meng<sup>1,2</sup>, FAN Jun<sup>1,3\*</sup>, FU Wei<sup>1,2</sup>, LUO Ruihua<sup>1,2</sup>, GOU Guohua<sup>1,2</sup>, NIU Yuhua<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 4. College of Chemistry and Chemical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** 【Objective】 Increasing and stabilizing carbon in coarse-textured soils is important to improve their stability and fertility. The purpose of this paper is to investigate how soil amendment with organic materials and clay minerals can achieve these goals. 【Method】 We took spinach as a model crop, and compared eight treatments by amending the soil with woody peat (HW), biochar (HB), lignite (HC), humic acid (HH), woody peat + bentonite (HWb), woody peat + illite (HWa) and woody peat + kaolinite (HWg), respectively. Not amending the soil was taken as the control (H0). In each treatment, we measured crop growth as well as the changes in soil physical and chemical properties. 【Result】 Compared with H0, HW, HB, HC and HH improved the growth and yield of the spinach, as well as physical and chemical properties of the soil. In particular, HB increased the net photosynthetic rate, plant height and leaf of the spinach during the harvest period by 21.5%, 23.5%, 69.5% and 70.9%, respectively, and soil organic matter and total nitrogen content by 236.2% and 20.7%, respectively, compared to H0. In comparison, HH reduced soil pH by 16.8% and increased crop yield by 4.7% during the harvest period, compared to H0. Combined with clay mineral amendment, HWb, HWa and HWg increased crop yield by 22.7%, 9.0%, and 9.0%, respectively, and soil organic matter by 33.5%, 2.4%, and 27.0%, respectively, compared with HW without clay mineral amendment. 【Conclusion】 Amending the soil with organic materials alone, biochar was most effective in improving soil fertility and crop yield. For combined amendment with organic materials and clay minerals, amending the soil with woody peat and swelling and shrinking clay mineral bentonite at 2:1 ratio worked best for boosting crop growth while in the meantime improving soil fertility.

**Key words:** soil amendment; biochar, woody peat; bentonite; coarse-textured soil; spinach

责任编辑: 赵宇龙

---

### 关于评选优秀论文的公告

本刊已开启优秀论文评选活动, 每年评选优秀论文 10 篇, 每篇奖励 800 元, 并颁发获奖证书, 届时将在期刊网站首页展示, 同时微信公众号推送。欢迎广大读者、作者积极向我刊投稿。

《灌溉排水学报》编辑部