

DOI: 10.11766/trxb202101150028

赵旭, 樊军, 王茜, 付威. 添加木本泥炭和膨润土对侵蚀退化黑土理化性质的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 953–963.

ZHAO Xu, FAN Jun, WANG Xi, FU Wei. Effects of Adding Woody Peat and Bentonite on Physical and Chemical Properties of Eroded and Degraded Black Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(4): 953–963.

## 添加木本泥炭和膨润土对侵蚀退化黑土理化性质的影响\*

赵旭<sup>1</sup>, 樊军<sup>1, 2†</sup>, 王茜<sup>3</sup>, 付威<sup>1</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. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127)

**摘要:** 为减缓黑土农田侵蚀退化, 提高农田地力。本研究选取典型侵蚀退化黑土地, 向土壤中添加木本泥炭和膨润土, 利用室内模拟和田间原位观测相结合, 进行土壤饱和导水率、导气率和相对气体扩散率以及持水性、有机碳含量和作物产量研究。结果显示: 室内条件下添加 2%或 4%木本泥炭会使饱和导水率分别降低 14.3%和增加 9.9%、导气率分别增加 18.9%和 4.1%、相对气体扩散率分别增加 15.5%和 6.6%、有机碳含量分别增加 39.4%和 71.5%、盆栽玉米产量分别增加 2.0 倍和 1.9 倍; 添加 1%膨润土会使饱和导水率、导气率和相对气体扩散率分别降低 63.2%、55.3%和 7.6%, 有机碳含量和盆栽玉米产量分别增加 1.0%和 1.1 倍; 添加 2%或 4%木本泥炭和 1%膨润土会使饱和导水率分别降低 65.8%和 73.1%、导气率分别降低 33.2%和 32.8%、相对气体扩散率分别增加 0.2%和降低 4.7%、有机碳含量分别增加 37.8%和 70.6%、盆栽玉米产量分别增加 1.9 倍和 1.5 倍。大田中添加木本泥炭会使土壤饱和导水率、相对气体扩散率、有机碳含量和大豆产量分别增加 75.0%、32.0%、36.1%和 43.2%, 土壤导气率降低 45.2%; 添加膨润土会使土壤饱和导水率、导气率和相对气体扩散率分别降低 39.1%、44.4%和 44.0%, 有机碳含量和大豆产量分别提高 3.6%和 4.2%, 但有机碳含量和大豆产量差异不显著。混合添加木本泥炭和膨润土会使土壤饱和导水率、相对气体扩散率、有机碳含量和大豆产量分别增加 134.4%、28.0%、36.0%和 26.3%, 土壤导气率降低 38.2%。添加木本泥炭和膨润土均可提高土壤持水能力, 添加膨润土的处理有机碳分解减慢。总之, 混合添加效果最好, 可提高土壤通气透水性、持水能力、有机碳含量和作物产量, 并有助于有机碳累积。

**关键词:** 饱和导水率; 导气率; 相对气体扩散率; 持水性; 有机质保蓄

**中图分类号:** S156.99      **文献标志码:** A

## Effects of Adding Woody Peat and Bentonite on Physical and Chemical Properties of Eroded and Degraded Black Soil

ZHAO Xu<sup>1</sup>, FAN Jun<sup>1, 2†</sup>, WANG Xi<sup>3</sup>, FU Wei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of City and Environment, Northwestern University, Xi'an, 710127, China)

**Abstract:** 【Objective】 Black land is a valuable land resource, which plays an important role in ensuring food security in the

\* 国家重点研发计划项目 (2018YFC0507005) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2018YFC0507005)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: fanjun@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 赵旭 (1996—), 男, 山西晋中人, 硕士研究生, 主要从事土壤水分和养分高效利用研究。E-mail: xuzhao1129@foxmail.com

收稿日期: 2021-01-15; 收到修改稿日期: 2021-07-12; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-09-10

northeast region of China. In order to slow down the erosion and degradation of black soil farmland and improve farmland fertility, new soil management practices need to be developed. 【Method】In this study, woody peat and bentonite were added to a typical eroded and degraded black land. The saturated hydraulic conductivity, air permeability and relative gas diffusion, water holding capacity, organic carbon content and crop yield were evaluated by the combination of indoor simulation and field in-situ observation. 【Result】The results showed that: under indoor conditions, (1) adding 2% or 4% woody peat decreased the saturated hydraulic conductivity by 14.3% or increased it by 9.9%, increased the air permeability by 18.9% or 4.1%, increased the relative gas diffusion by 15.5% or 6.6%, increased the organic carbon content by 39.4% or 71.5%, and increased the yield of potted maize by 2.0 times or 1.9 times respectively; (2) adding 1% bentonite decreased the saturated hydraulic conductivity, air permeability and relative gas diffusion by 63.2%, 55.3% and 7.6%, and increased the organic carbon content and yield of potted maize by 1.0% and 1.1 times, respectively; (3) adding 2% or 4% woody peat and 1% bentonite decreased the saturated hydraulic conductivity by 65.8% or 73.1%, decreased the air permeability by 33.2% or 32.8%, increased the relative gas diffusion by 0.2% or 4.7%, increased the organic carbon content by 37.8% or 70.6%, and increased the yield of potted maize by 1.9 times or 1.5 times. The saturated hydraulic conductivity, relative gas diffusion, organic carbon content and soybean yield increased by 75.0%, 32.0%, 36.1% and 43.2% respectively, and the air permeability decreased by 45.2% when woody peat was added to the eroded farmland. Also, the saturated hydraulic conductivity, air permeability and relative gas diffusion decreased by 39.1%, 44.4% and 44.0% respectively, while the organic carbon content and soybean yield increased by 3.6% and 4.2%, respectively, when bentonite was added to the eroded farmland. Even though there was no significant difference in organic carbon content and soybean yield; the soil saturated hydraulic conductivity, relative gas diffusion, organic carbon content and soybean yield increased by 134.4%, 28.0%, 36.0% and 26.3% respectively, and the air permeability decreased by 38.2% when woody peat and bentonite was added to the eroded farmland. The addition of woody peat and bentonite could improve the water holding capacity of black land soils, and bentonite can retard the decomposition of organic carbon. 【Conclusion】In general, the mixed addition of woody peat and bentonite has the best effect, which can effectively improve the soil aeration permeability, water holding capacity, organic carbon content and crop yield, and also help to accumulate organic carbon in the soil. It is an effective measure to rapidly improve the degraded black soil.

**Key words:** Saturated hydraulic conductivity; Air permeability; Relative gas diffusion; Water holding capacity; Organic matter retention

我国东北黑土区是重要的商品粮生产基地，但由于特殊的自然条件和人为因素的共同作用，使土壤侵蚀退化日趋严重。土壤侵蚀导致容易吸附养分的细颗粒流失，不易吸附养分的粗颗粒沉积<sup>[1]</sup>，土壤通气透水性和持水性变差，有机质含量下降，造成严重的土地退化，成为东北黑土区亟待解决的问题。因此，研究改善土壤通气透水性，提高土壤持水能力和有机质固持能力的措施对减缓东北黑土区土壤侵蚀退化具有重要意义。大量研究表明，有机质和黏粒含量会影响土壤结构和持水性能。土壤有机质和黏粒之间的相互作用使土壤团聚体趋于稳定，同时有助于有机质在土壤中固定<sup>[2]</sup>。Abdollahi 等<sup>[3]</sup>研究显示，土壤有机质可以缓解机械耕作引起的土壤压实作用的不利影响。Ankenbauer 和 Loheide<sup>[4]</sup>通过测定草甸土壤在不同有机质含量下

的土壤含水量和水分特征曲线，发现 van Genuchten 模型参数  $\theta_s$ （饱和体积含水量）和  $\alpha$ （进气吸力参数）随着有机质含量的变化而变化。有机质含量低的土壤饱和时水分较少，且随吸力的增大，水分释放更充分，有机质较多的土壤在饱和时具有更多的水分，并且在增加吸力的情况下会保持更多的水分。Olness 和 Archer<sup>[5]</sup>利用美国土壤调查数据库数据运用 GEMLS 模型对土壤有机碳含量和黏粒含量与土壤有效水含量的关系进行了拟合，结果显示：添加有机碳对土壤有效水含量的影响取决于土壤质地和初始有机碳含量，在有机碳含量低于  $25 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，黏粒含量低于 40% 的土壤中，有机碳含量每增加  $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，土壤有效水的增加幅度约为 2.5% 至 5%。向土壤中添加改良剂可以改善土壤理化性质，激发土壤微生物活性，从而提高土地的生产力<sup>[6]</sup>。木本泥

炭是在湿地条件下, 死亡植物残体不完全碳化形成的产物, 具有通气性好、容重小、有机质和腐殖酸含量高、疏松多孔、比表面积大、吸附能力强等特点。研究表明, 农田土壤中添加木本泥炭可以改善土壤性质和作物产量及品质<sup>[7-8]</sup>。木本泥炭用于提高土壤有机碳含量, 相比于秸秆和有机肥, 其不易造成农田土壤病虫害等负面影响, 具有更好的适用性。膨润土是以蒙脱石为主要成分的黏土矿物, 其黏粒含量较高, 具有很强的吸湿性和膨胀性, 可吸附 8~15 倍于自身体积的水量, 体积膨胀可达数倍。添加膨润土可以增加土壤黏粒含量, 改善土壤结构<sup>[9]</sup>。前人有关改良土壤的研究, 其措施大多集中在增施有机肥、合理使用化肥、种植绿肥作物等, 有关添加木本泥炭和膨润土对土壤理化性质影响的研究较少。本研究选取东北黑土区典型的侵蚀退化农地为试验地, 向土壤中添加木本泥炭和膨润土, 通过分析土壤的物理性质如水气传输特性和持水性, 以及化学性质如有机碳含量的改变, 探究木本泥炭和膨润土对土壤性质的影响, 并最终影响作物产量, 旨在为东北黑土区农田土壤肥力快速提升提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验样地位于黑龙江省农垦总局九三管理局鹤山农场鹤北小流域 (48°59'—49°03'N, 125°16'—125°21'E), 该流域在黑土区具有典型代表性。流域面积约为 28 km<sup>2</sup>, 海拔 310~390 m, 地处小兴安岭向嫩江谷地的过渡区, 地形属丘陵漫岗地带, 坡度大多在 1°~3°, 坡长一般为 800~1500 m, 土样采集工作也在该流域完成。所选试验区属寒温带大陆性季风气候, 年降水量 534 mm, 6—8 月降水占年降水量的 66.8%。土壤以黑土为主, 自然植被属于温带半湿润草甸草原, 主要种植作物为玉米 (*Zea mays* L.) 和大豆 (*Glycine max*), 种植模式为起垄耕作, 其作物种类和种植模式在该区域具有典型代表性。由于地形为漫川漫岗, 坡缓坡长, 夏季降雨集中, 黑土地质黏重, 水分来不及下渗, 加之未采取有效的水土保持措施, 极易形成地表径流, 导致该区土壤水力侵蚀日趋严重, 侵蚀形态以面蚀和沟蚀为主。

### 1.2 试验设计

本试验分为室内模拟和田间原位观测两部分, 共 3 个试验。

室内模拟试验: 为探究添加木本泥炭和膨润土, 不经过作物生育期对退化黑土土壤通气透水性的影响, 于 2020 年 6 月利用 2018 年在鹤北小流域内多点采集的侵蚀退化黑土进行室内一维条件下土壤饱和和导水率 ( $K_s$ )、导气率 ( $K_a$ ) 和相对气体扩散率 ( $D_p/D_0$ ) 的测定, 各项指标均进行 5 次重复测定, 设置六个处理, 分别为空白对照 (CK)、添加 2% 木本泥炭 (WP1)、添加 4% 木本泥炭 (WP2)、添加 1% 膨润土 (B)、添加 2% 木本泥炭和 1% 膨润土 (WP1B)、添加 4% 木本泥炭和 1% 膨润土 (WP2B)。将土样与添加物混合好后按照容重 ( $1.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) 装入环刀, 放入水中浸泡 24 h 达到饱和, 一部分用于测定土壤  $K_s$ 。将其余水分饱和的环刀放在装有相同土样未浸泡的环刀上, 经过水分再分布过程后, 上部环刀水分达到田间持水量, 用于测定土壤  $K_a$  和  $D_p/D_0$ 。从该环刀中取一定土样用烘干法测得土样含水量即为各处理田间持水量。

盆栽玉米试验: 利用室内模拟试验混合好的六个处理土样进行盆栽玉米实验, 玉米品种为“正大 12 号”。于 2020 年 6 月 9 日将混合好的土样加入底肥 (尿素  $0.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、过磷酸钙  $1.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、氧化钾  $0.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。按照容重 ( $1.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) 装入直径 16 cm, 高 15 cm 的 PVC 土柱, 每个处理设置 4 个重复, 加入水分使土柱含水量达到田间持水量的 80%, 傍晚时进行播种, 每个土柱播种 5 株。出苗后进行定苗, 每个土柱只留一株。玉米生长期间通过盆栽称重计算灌水量来控制每个处理含水量保持在田间持水量的 80% 左右, 于 6 月每日傍晚浇水, 7—9 月每日早晚浇水, 并进行两次追肥 (尿素  $0.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。在播种时和 6—9 月月底用土钻在土柱内取样用于测定有机碳含量, 玉米收获时测定玉米株高, 地上部生物量和产量。

田间原位观测试验: 选取典型侵蚀退化坡耕地作为试验样地 (表 1), 样地面积约为 26.7 hm<sup>2</sup>, 在坡耕地中下部选择土壤侵蚀严重且土质相对均匀的区域作为研究区。设置四个样地, 分别为空白对照 (CK)、添加木本泥炭 (WP)、添加膨润土 (BE)、添加木本泥炭和膨润土 (WPB), 每个样地大小为

0.3 hm<sup>2</sup> (161 m×21 m)。2020 年春季播种时将木本泥炭 (1.5 t·a<sup>-1</sup>) 和膨润土 (0.3 t·a<sup>-1</sup>) 均匀撒在土地表面, 并免耕播种大豆 (*Glycine max*)。试验相关指标于 2020 年 9 月在 4 块样地进行采集测定, 在样地内采用梅花形布点法选择 5 个测点即为 5 次重复。在每个测点进行表层土壤 (0~5 cm)  $K_s$ 、 $K_a$  和  $D_p/D_0$  的原位测定, 其中土壤  $K_a$  和  $D_p/D_0$  的测定在土壤含水量为田间持水量时进行。为使土壤含水量达到田

间持水量, 于傍晚对测点进行充分灌水, 当水分下渗很慢几乎停止时用地膜将地表覆盖, 第二天上午进行测定。用环刀取样测定样地容重 ( $\rho_b$ ), 并采用蛇形布点采集 0~5 cm 土层土样进行土壤有机碳含量、机械组成和水分特征曲线的测定, 原位测定和土样采集均在垄台上完成。大豆成熟后采用收获一定面积 (1 m×1 m), 重复 7 次的方式<sup>[10-11]</sup>, 进行作物地上部生物量和产量的测定。

表 1 不同添加模式下侵蚀退化农地土壤容重、有机碳含量和机械组成

Table 1 Soil bulk density, organic carbon content and particle size distribution of eroded and degraded farmland under different addition patterns

添加模式 Addition patterns	容重 Bulk density /(g·cm <sup>-3</sup> )	有机碳 Organic carbon /(g·kg <sup>-1</sup> )	黏粒	粉粒	砂粒
			Clay (<0.002 mm)	Silt (0.002~0.05 mm)	Sand (0.05~2 mm)
			-----/%-----		
CK	1.62±0.05a	12.10±0.26b	38.7±8.7a	46.4±4.4a	14.9±4.5a
WP	1.28±0.06c	16.47±0.12a	46.5±3.2a	50.4±2.3a	3.2±2.4c
BE	1.45±0.07b	12.54±0.46b	43.9±1.2a	47.3±0.9a	8.8±1.7b
WPB	1.38±0.01bc	16.46±0.37a	42.4±0.2a	48.1±1.1a	9.5±0.9b

注: 同列不同字母表示差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。CK: 空白对照; WP: 添加木本泥炭; BE: 添加膨润土; WPB: 添加木本泥炭和膨润土, 下同。Note: Different letters in the same column indicated a significant difference at 0.05 level. CK: blank control; WP: adding woody peat; BE: adding bentonite; WPB: adding woody peat and bentonite. The same below.

### 1.3 相关指标的测定方法和计算

土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量法测定。室内土壤饱和导水率采用定水头法测定, 利用 Modified Philip-Dunne (MPD) 入渗仪进行原位土壤饱和导水率测量<sup>[12]</sup>。

土壤导气率的测定: 将装有土样的环刀放入一维气室, 原位测量时将三维气室插入土壤, 并连接马氏瓶和压力计, 用排出马氏瓶的水流量代替通过土样气体流量 ( $q$ ), 利用 U 型压力计读取土样上表面与大气压差值 ( $\Delta p$ ), 导气率计算公式为<sup>[13]</sup>:

$$K_a = \frac{1}{A} \frac{\eta q}{\Delta p} \quad (1)$$

$$A = D \left[ \left( \frac{\pi}{4} + \frac{D}{H} \right) \left( 1 + \frac{D}{H} \right)^{-1} \ln \left( 1 + \frac{D}{H} \right) \right] \quad (2)$$

$$\eta = (1717 + 4.8T) \times 10^{-8} \quad (3)$$

式中,  $A$  为经验形状因子;  $\eta$  为空气黏滞系数

(Pa·s);  $q$  为单位时间通过土样的气体流量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\Delta p$  表示土样上表面与大气压的差 (Pa);  $D$  为土样直径 (m);  $H$  为土样高度 (m);  $T$  为气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )<sup>[13]</sup>。

土壤相对气体扩散率的测定: 当导气率测定完成后在气室顶部装入  $\text{O}_2$  探头, 往气室通入  $\text{N}_2$  直至数据采集器上记录的  $\text{O}_2$  浓度降低至 0 时, 停止通入  $\text{N}_2$ , 并迅速将气室两端通气口关闭, 使空气经土样向上扩散, 测定相对气体扩散率。定义  $D_p/D_0$  为土壤相对气体扩散率, 其中,  $D_p$  代表土壤中气体扩散系数,  $D_0$  为大气中的气体扩散系数。  $D_p$  为气体相对浓度  $C_t$  关于时间  $t$  的线性函数的斜率。  $C_t$  计算公式如下<sup>[14]</sup>:

$$C_t = \frac{C_t - C_a}{C_0 - C_a} \quad (4)$$

式中,  $C_t$  为气室内  $t$  时刻  $\text{O}_2$  浓度 (%);  $C_0$  为气室  $\text{O}_2$  初始浓度 (%);  $C_a$  为大气  $\text{O}_2$  浓度 (%).  $D_0$  为关于气压 ( $P$ ) 与温度 ( $T$ ) 的函数<sup>[14]</sup>:

$$D_0 = D_s \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1.75} \left( \frac{P_0}{P} \right) \quad (5)$$

式中,  $D_s$  为  $D_0$  在  $T_0=293.15$  K、 $P_0=1.013 \times 10^5$  Pa 时的参考值, 其值为  $1.47 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  [15]。一般在  $20^\circ\text{C}$ ,  $D_0$  取值为  $2 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  [15]。

水分特征曲线的拟合: 利用压力膜仪与 WP4 露点水势仪结合测定 10 组土壤含水量与土壤水吸力对应值, 采用 Gardner 模型对土壤水分特征曲线实测资料进行拟合。Gardner 模型如下:

$$\theta = A \cdot h^{-B} \quad (6)$$

式中,  $\theta$  为土壤体积含水量 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $h$  为土壤水吸力 (MPa); 参数  $A$  决定土壤持水能力的大小,  $A$  值越大, 持水能力越强; 参数  $B$  决定土壤含水量随土壤水吸力变化的快慢程度,  $B$  值越大, 变化越快 [16]。

#### 1.4 数据处理

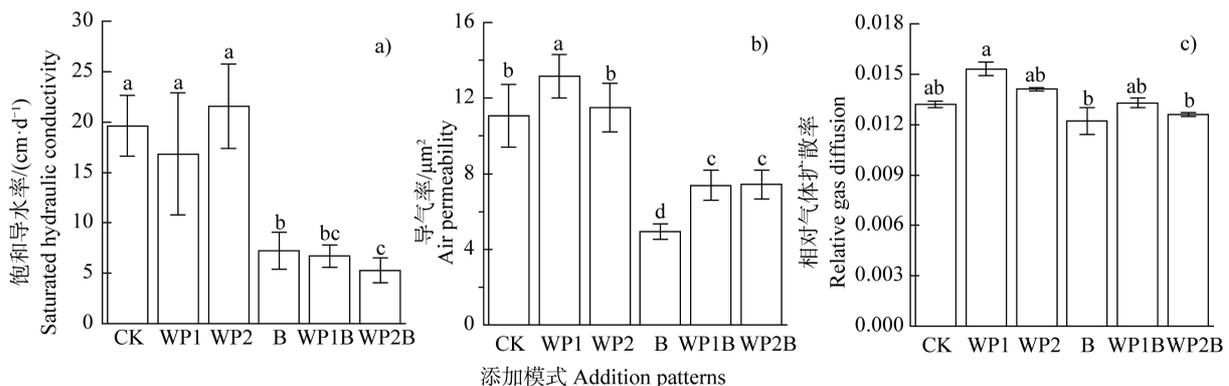
采用 SPSS 20.0 统计分析软件进行单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和 Duncan 法多重比较

( $\alpha=0.05$ ), 利用 Origin (2017) 软件制图, 图表中数据为平均值  $\pm$  标准差。

## 2 结果

### 2.1 添加模式对土壤 $K_s$ 、 $K_a$ 和 $D_p/D_0$ 的影响

添加木本泥炭和膨润土在室内条件下土壤  $K_s$  (图 1 a) 和  $K_a$  (图 1 b) 差异显著, 土壤  $D_p/D_0$  (图 1 c) 差异不显著。与空白对照相比, 添加 2% 木本泥炭处理  $K_s$  降低 14.3%、 $K_a$  增加 18.9%、 $D_p/D_0$  增加 15.5%; 添加 4% 木本泥炭处理  $K_s$  增加 9.9%、 $K_a$  增加 4.1%、 $D_p/D_0$  增加 6.6%; 添加 1% 膨润土处理  $K_s$  降低 63.2%、 $K_a$  降低 55.3%、 $D_p/D_0$  降低 7.6%; 添加 2% 木本泥炭和 1% 膨润土处理  $K_s$  降低 65.8%、 $K_a$  降低 33.2%、 $D_p/D_0$  增加 0.2%; 添加 4% 木本泥炭和 1% 膨润土处理  $K_s$  降低 73.1%、 $K_a$  降低 32.8%、 $D_p/D_0$  降低 4.7%。除添加 2% 木本泥炭处理  $K_s$  低于空白对照外, 其余只添加木本泥炭处理  $K_s$ 、 $K_a$  和  $D_p/D_0$  均有所提高; 除添加 2% 木本泥炭和 1% 膨润土处理  $D_p/D_0$  高于空白对照外, 其余添加膨润土处理  $K_s$ 、 $K_a$  和  $D_p/D_0$  均有所降低。



注: 不同字母表示差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。CK: 空白对照; WP1: 添加 2% 木本泥炭; WP2: 添加 4% 木本泥炭; B: 添加 1% 膨润土; WP1B: 添加 2% 木本泥炭和 1% 膨润土; WP2B: 添加 4% 木本泥炭和 1% 膨润土, 下同。Note: Different letters indicated a significant difference at 0.05 level. CK: blank control; WP1: adding 2% woody peat; WP2: adding 4% woody peat; B: adding 1% bentonite; WP1B: adding 2% woody peat and 1% bentonite; WP2B: adding 4% woody peat and 1% bentonite. The same below.

图 1 添加模式对一维条件下土壤饱和导水率 ( $K_s$ )、土壤导气率 ( $K_a$ ) 和土壤相对气体扩散率 ( $D_p/D_0$ ) 的影响  
Fig. 1 Effects of addition patterns on saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ), air permeability ( $K_a$ ) and relative gas diffusion ( $D_p/D_0$ ) under the one-dimensional condition

添加木本泥炭和膨润土在原位条件下土壤  $K_s$  (图 2 a)、 $K_a$  (图 2 b) 和  $D_p/D_0$  (图 2 c) 差异显著。与空白对照相比, 添加木本泥炭处理  $K_s$  增加 75.0%、 $K_a$  降低 45.2%、 $D_p/D_0$  增加 32.0%; 添加膨润土处理

$K_s$  降低 39.1%、 $K_a$  降低 44.4%、 $D_p/D_0$  降低 44.0%; 添加木本泥炭和膨润土处理  $K_s$  增加 134.4%、 $K_a$  降低 38.2%、 $D_p/D_0$  增加 28.0%。添加木本泥炭处理  $K_s$  和  $D_p/D_0$  均高于空白对照, 只添加膨润土处理  $K_s$ 、

$K_a$  和  $D_p/D_0$  均低于空白对照。

## 2.2 添加模式对土壤水分特征曲线的影响

利用 Gardner 模型对不同添加模式下侵蚀退化黑土和农地土壤水分特征曲线拟合效果较好(表 2、表 3)。不同添加模式下侵蚀退化黑土持水能力大小依次为添加 4%木本泥炭和 1%膨润土>添加 2%木本泥炭和 1%膨润土>添加 1%膨润土>添加 4%木本泥炭>添加 2%木本泥炭>空白对照。土壤体积含水量随土壤水吸力变化的快慢程度依次为空白对照>添加 1%膨润土>添加 4%木本泥炭和 1%膨润土>添加 2%木本泥炭和 1%膨润土>添加 2%木本泥炭>添加 4%木本泥炭。不同添加模式下侵蚀退化农地土壤持水能力大小依次为添加膨润土>添加木本泥炭和膨润土=添加木本泥炭>空白对照。土壤体积含水量随土壤水吸力变化的快慢程度依次为添加木本泥炭=添加膨润土>添加木本泥炭和膨润土>空白对照。

## 2.3 添加模式对土壤有机碳含量和作物产量的影响

不同添加模式下侵蚀退化土壤有机碳含量差异显著,添加膨润土处理有机碳含量下降较慢(图 3)。相比于空白对照,添加 2%木本泥炭、添加 4%木本泥炭、添加 1%膨润土、添加 2%木本泥炭和 1%膨润土、添加 4%木本泥炭和 1%膨润土处理有机碳含量分别提高了 39.4%、71.5%、1.0%、37.8%和 70.6%。玉米从播种到收获,空白对照、添加 2%木本泥炭、添加 4%木本泥炭、添加 1%膨润土、添加 2%木本泥炭和 1%膨润土、添加 4%木本泥炭和 1%膨润土处理有机碳减少量依次为 2.31  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、2.21  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、1.89  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、1.27  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、1.13  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、1.02  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。对于农地而言,添加木本泥炭、膨润土以及混合添加使土壤有机碳分别提高了 36.1%、3.6%和 36.0%。

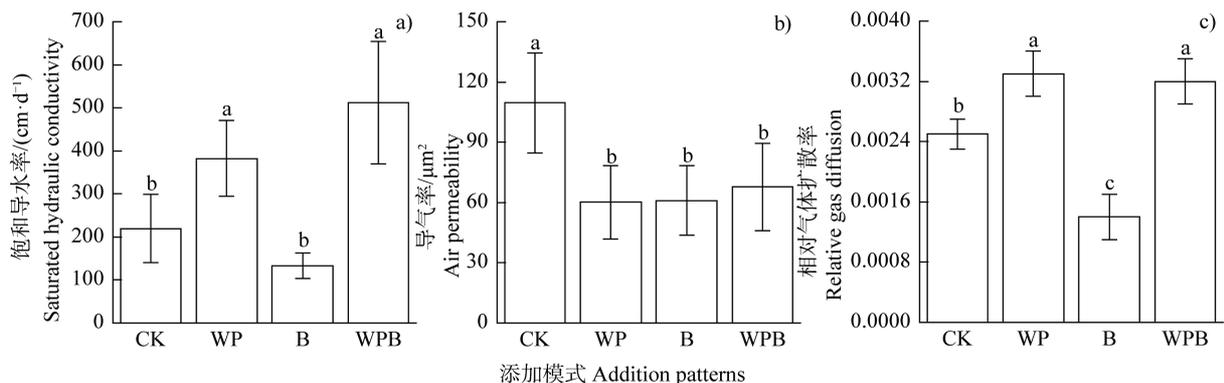


图 2 添加模式对原位条件下土壤饱和导水率 ( $K_s$ )、土壤导气率 ( $K_a$ ) 和土壤相对气体扩散率 ( $D_p/D_0$ ) 的影响

Fig. 2 Effects of addition patterns on saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ), air permeability ( $K_a$ ) and relative gas diffusion ( $D_p/D_0$ ) in situ

表 2 添加模式对侵蚀退化黑土水分特征曲线拟合参数的影响

Table 2 Effects of addition patterns on fitting parameters of the soil-water characteristic curve of eroded degraded black soil

添加模式 Addition patterns	Gardner 模型 Gardner model		$R^2$
	参数 A Parameter A	参数 B Parameter B	
CK	0.160	0.355	0.98**
WP1	0.164	0.321	0.99**
WP2	0.169	0.307	0.97**
B	0.175	0.336	0.99**
WP1B	0.195	0.327	0.99**
WP2B	0.200	0.328	0.99**

\*\*  $P < 0.01$ .

表 3 添加模式对侵蚀退化农地水分特征曲线拟合参数的影响

Table 3 Effects of addition patterns on fitting parameters of the soil-water characteristic curve of eroded degraded farmland

添加模式 Addition patterns	Gardner 模型 Gardner model		$R^2$
	参数 A	参数 B	
	Parameter A	Parameter B	
CK	0.102	0.223	0.96**
WP	0.107	0.230	0.96**
BE	0.108	0.230	0.93**
WPB	0.107	0.224	0.96**

\*\*  $P < 0.01$ .

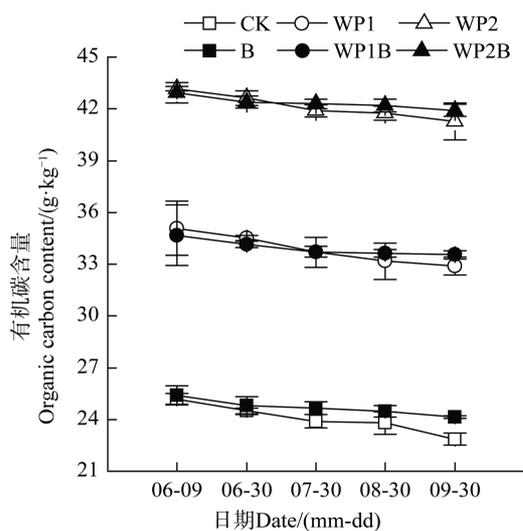


图 3 不同添加模式下侵蚀退化黑土有机碳含量变化  
Fig. 3 Changes of organic carbon in eroded degraded black soil under different addition patterns

不同添加模式下盆栽玉米和农地大豆产量差异显著 (表 4、表 5)。与空白对照相比, 添加 2% 木本泥炭、添加 4% 木本泥炭、添加 1% 膨润土、添加 2% 木本泥炭和 1% 膨润土、添加 4% 木本泥炭和 1% 膨润土处理盆栽玉米地上部生物量分别提高了 47.4%、25.3%、3.5%、37.8%、40.4%, 产量分别提高了 2.0 倍、1.9 倍、1.1 倍、1.9 倍、1.5 倍。对于农地大豆而言, 相比于空白对照, 添加木本泥炭、添加膨润土、添加木本泥炭和膨润土处理产量分别提高了 43.2%、4.2%、26.3%。除添加木本泥炭和膨润土农地大豆籽粒数与空白对照差异不显著外, 其余添加木本泥炭的处理盆栽玉米和农地大豆的测定指标均高于空白对照, 且差异显著。盆栽玉米只添加膨润土处理籽粒重和籽粒数与空白对照差异显著, 株高和地上部生物量差异不显著, 木本泥炭两个添加梯度之间产量差异不显著。农地大豆只添加膨润土处理地上部生物量和产量与空白对照差异不显著。

### 3 讨论

#### 3.1 添加模式对土壤水气传输性质的影响

添加木本泥炭和膨润土显著影响了土壤  $K_s$ 、 $K_a$  和  $D_p/D_0$ 。添加木本泥炭通过降低土壤容重和增大孔隙度来提高土壤  $K_s$ 、 $K_a$  和  $D_p/D_0$ ; 添加膨润土会降低土壤有效孔隙率, 使得土壤  $K_s$ 、 $K_a$  和  $D_p/D_0$  降低; 混合添加木本泥炭和膨润土可以改善土壤结构, 增强土壤的通气透水性能。木本泥炭的添加使土壤容

表 4 添加模式对室内盆栽玉米产量的影响

Table 4 Effect of addition patterns on corn yield of potted

添加模式 Addition patterns	株高 Plant height /cm	地上部鲜重 Aboveground fresh weight / (g·plant <sup>-1</sup> )	地上部干重 Aboveground dry weight / (g·plant <sup>-1</sup> )	籽粒重 Grain weight / (g·plant <sup>-1</sup> )	籽粒数 Grain number / (plant <sup>-1</sup> )
CK	139.25 ± 0.88b	204.29 ± 14.48b	63.27 ± 2.07c	15.53 ± 8.69c	50 ± 21c
WP1	149.75 ± 3.01a	269.54 ± 26.75a	93.29 ± 4.35a	47.35 ± 3.73a	196 ± 13a
WP2	147.00 ± 0.71a	255.64 ± 16.09a	79.28 ± 4.61b	44.53 ± 9.06a	188 ± 58a
B	144.00 ± 1.41ab	211.12 ± 9.12b	65.51 ± 2.19c	32.23 ± 6.19b	106 ± 8b
WP1B	147.75 ± 3.01a	276.04 ± 30.18a	87.18 ± 0.78ab	44.67 ± 5.15a	207 ± 31a
WP2B	148.50 ± 5.30a	260.03 ± 11.41a	88.82 ± 4.29a	39.05 ± 6.54ab	158 ± 39a

表 5 添加模式对田间农田大豆产量的影响

Table 5 Effect of addition patterns on soybean yield of field farmland

添加模式 Addition patterns	地上部鲜重 Aboveground fresh weight / (g·m <sup>-2</sup> )	地上部干重 Aboveground dry weight / (g·m <sup>-2</sup> )	籽粒重 Grain weight / (g·m <sup>-2</sup> )	籽粒数 Grain number / (m <sup>-2</sup> )
CK	1514.04±130.23b	456.56±26.71b	181.02±12.31c	1070±93b
WP	2182.46±96.65a	645.93±28.12a	259.19±21.88a	1420±204a
BE	1680.08±227.29b	488.27±25.79b	188.65±26.21c	1157±156b
WPB	2095.36±92.85a	614.34±73.26a	228.56±36.76b	1317±202ab

重大降低<sup>[17]</sup>，本研究中侵蚀退化农地结果也是如此，但空白对照处理容重较上一年在此区域的测定值 1.4~1.5 g·cm<sup>-3</sup><sup>[18]</sup>偏高，可能是木本泥炭和膨润土撒施时机械压实所造成的。容重的下降是因为有机物质稀释了土壤基质，更重要的是改善了土壤团聚性，增加了土壤孔隙度<sup>[19]</sup>，木本泥炭添加为土壤通气透水创造了良好的条件。膨润土吸湿膨胀会造成土壤孔隙堵塞，导致有效孔隙率降低，是土壤  $K_s$ 、 $K_a$  和  $D_p/D_0$  下降的主要原因。本研究田间试验结果显示，添加木本泥炭或混合添加使土壤  $K_s$  和  $D_p/D_0$  增加，土壤  $K_a$  降低。这是由于农地中添加木本泥炭和膨润土改变了土壤孔隙分布，虽然总孔隙度增大，但大孔隙被填充，小孔隙增加。而土壤  $K_a$  主要受到土壤大孔隙的影响，因此有所降低。室内条件下混合添加木本泥炭和膨润土的处理，其土壤  $K_s$ 、 $K_a$  和  $D_p/D_0$  相比空白对照有所降低，而田间原位条件下混合添加木本泥炭和膨润土的处理，其土壤  $K_s$  和  $D_p/D_0$  高于空白对照。这是由于室内试验是将混合好的各处理土样按照等容重装入环刀，环刀内土壤孔隙条件大致相同，当水分达到田间持水量时，膨润土膨胀堵塞孔隙，导致土壤  $K_s$ 、 $K_a$  和  $D_p/D_0$  有所降低。而田间试验时，向土壤中添加木本泥炭和膨润土后经过了 3 个月的时间才进行原位测量，有机碳促进了微生物的活动<sup>[20]</sup>，同时有机碳和黏粒在微生物的作用下形成了稳定的团粒结构，使土壤容重大大降低，土壤孔隙增多，结构得到改善，因此田间试验中混合添加木本泥炭和膨润土的处理其土壤  $K_s$  和  $D_p/D_0$  有所提高。Li 等<sup>[21]</sup>的研究也证实了这一点，将园林废弃物堆肥与膨润土混合施用到盐渍土能够提高土壤总孔隙度、饱和导水率和养分水平。土壤侵蚀导致东北黑土区农地土壤结构变差，向土壤中

添加木本泥炭或者混合添加木本泥炭和膨润土可以改善土壤结构，增强土壤水气传输性能，对于减缓土壤侵蚀具有重要作用。

### 3.2 添加模式对土壤持水能力的影响

添加模式对土壤持水能力的影响在室内和田间试验结果中呈现一致的规律，单独添加木本泥炭或膨润土以及混合添加均可以提高土壤的持水能力，土壤持水能力随着木本泥炭添加量的增加而增加。土壤水分特征曲线是土壤水的能量与数量对应关系，土壤水的能量状态即水势的大小与孔隙尺寸特征密切相关，因而一切影响土壤孔隙状况和水分特性的因素均会对土壤水分特征曲线产生影响。木本泥炭含有大量有机碳，一方面可以与黏土矿物相互作用，形成有机-矿物复合体，从而改变土壤颗粒的表面特性<sup>[22]</sup>；另一方面，有机碳又是形成稳定团聚体重要的胶结剂，有助于形成良好的团聚体内和团聚体间孔隙结构<sup>[23]</sup>，因此有机碳的改变会影响土壤持水特性<sup>[24]</sup>。本研究结果显示，增加土壤中的有机碳含量可以增强土壤的持水性，这与许多学者的研究结果一致。Arthur 等<sup>[25]</sup>研究发现，生物炭和有机肥的使用扩大了砂壤土的持水范围；Ekwue 等<sup>[26]</sup>模拟了三种质地土壤（砂壤土、黏壤土、黏土）在不同泥炭和农家肥添加量下的坡面径流冲刷侵蚀实验，结果表明，在坡耕地上加入有机物料可以有效地改善水土保持，大大减少水对土壤的侵蚀；土壤水分保持的湿润范围由不同大小的土壤孔隙的毛细管力所控制<sup>[27]</sup>。Zhou 等<sup>[28]</sup>认为土壤颗粒组成是决定土壤孔隙特性的主要因素，进而会影响土壤水分保持。由于膨润土黏粒含量高，吸湿性强，添加后使得土壤的黏粒含量变大，土壤中细孔隙增多，表面能增大，故能吸持更多的水分。一般而言，土壤质

地被认为是土壤持水特性的主要驱动因素<sup>[29]</sup>。因此, 添加膨润土较添加木本泥炭对土壤持水能力的影响更大。本研究中室内试验提高土壤持水性的效果好于田间试验。这是由于室内试验对于土壤持水性的提高主要来自于木本泥炭和膨润土对水分的吸附, 而田间试验经过大豆整个生育期后, 木本泥炭和膨润土在微生物分解和水力侵蚀的作用下有所损失, 且各处理之间黏粒含量没有显著性差异, 其土壤持水性的提高主要来自于容重的降低与孔隙度的提高。向侵蚀退化土壤中添加木本泥炭和膨润土可以增强土壤持水能力, 有利于东北黑土区水土资源的保护。

### 3.3 添加模式对土壤有机质固持和作物产量的影响

添加木本泥炭向土壤中输入了大量有机物质, 促进了植物生长, 增强了植物代谢活动, 从而提高了产量, 而添加膨润土增加了土壤黏粒含量, 其与有机碳的相互作用可有效减少有机碳的分解。土壤有机质是土地生产力的重要指标之一<sup>[30]</sup>, 可以使化肥增效, 从而刺激作物生长, 增强作物抗逆性能, 提高作物产量。Li 等<sup>[7]</sup>研究了泥炭对于砂质土壤性质和马铃薯产量的影响, 结果显示, 泥炭的应用显著提高了马铃薯块茎产量、干重和块茎氮含量。Vestberg 等<sup>[8]</sup>对粉砂土进行了泥炭改良, 草莓试验的结果显示, 泥炭改良对产量没有影响, 但可以降低受冬季低温伤害或死亡的草莓植株的比例。本研究盆栽玉米试验中两个木本泥炭添加梯度之间产量没有显著性差异, 且高量添加会导致产量有所降低, 需要针对不同的土壤设置更多梯度来确定最佳添加量。土壤中的有机质大部分是以有机无机复合的形态存在, 这一形态可以通过有机质和黏土矿物的吸附作用形成<sup>[31]</sup>。盆栽玉米经过整个生育期后, 相同木本泥炭添加量下添加了膨润土的处理有机碳减少量要小于未添加膨润土的处理, 且产量的差异不显著, 这表明添加膨润土可以减少有机碳的分解和矿化。土壤中的黏粒与有机物质形成了团聚体, 这种对有机质的物理保护可以抵抗微生物对其的降解<sup>[32]</sup>。Rakhsh 等<sup>[33]</sup>通过研究紫花苜蓿残渣在石英砂和高岭石组成的人工土壤中的分解情况, 进而探讨黏粒含量和组成对土壤有机碳稳定性的影响及其机制, 结果显示, 随着黏粒含量的增加, 有机碳的矿化程

度降低。本研究大田每公顷施用木本泥炭的成本为 6.75 万元, 但木本泥炭对土壤的改良作用可以持续多年, 一次投入, 多年受益。Calver 等<sup>[34]</sup>的研究证实, 将泥炭土作为矿区复垦覆盖土后, 泥炭的改良作用在土壤中可以保持至少 5 年。木本泥炭和膨润土在提高作物产量的同时, 也减缓了土壤侵蚀, 在退化黑土地力提升和水土资源的保护方面发挥了重要作用。

## 4 结 论

在东北黑土区, 向侵蚀退化土壤中添加木本泥炭和膨润土可以缓解土壤侵蚀带来的不利影响。室内模拟试验添加木本泥炭可以使饱和导水率增加 9.9%、导气率增加 18.9%、相对气体扩散率增加 15.5%、有机碳含量增加 71.5%、盆栽玉米产量增加 2.0 倍。大田大豆地添加木本泥炭或混合添加可以使原位土壤饱和导水率分别提高 75.0%和 134.4%、导气率分别降低 45.2%和 38.2%、相对气体扩散率分别提高 32.0%和 28.0%、有机碳含量分别提高 36.1%和 36.0%、大豆产量分别提高 43.2%和 26.3%。添加木本泥炭和膨润土均可以提高土壤持水能力, 膨润土可以使有机碳在土壤中矿化减慢。总体而言, 混合添加木本泥炭和膨润土的效果最好, 可以快速改良退化农田土壤, 提高地力, 未来的研究可以根据不同土壤退化程度优化木本泥炭和膨润土的添加量。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Sun J M, Huang C H, Han G N, et al. Effects of cover on soil particle and associated soil nutrient redistribution on slopes under rainfall simulation[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19 ( 2 ): 729—740.
- [ 2 ] Saidu A R, Smernik R J, Baldock J A, et al. Microbial degradation of organic carbon sorbed to phyllosilicate clays with and without *Hydrous* iron oxide coating[J]. *European Journal of Soil Science*, 2015, 66( 1 ): 83—94.
- [ 3 ] Abdollahi L, Schjønning P, Elmholt S, et al. The effects of organic matter application and intensive tillage and traffic on soil structure formation and stability[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 136: 28—37.
- [ 4 ] Ankenbauer K J, Loheide II S P. The effects of soil organic matter on soil water retention and plant water use in a meadow of the Sierra Nevada, CA[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31 ( 4 ): 891—901.

- [ 5 ] Olness A, Archer D. Effect of organic carbon on available water in soil[J]. *Soil science*, 2005, 170 ( 2 ): 90—101.
- [ 6 ] Huang R, Gao M, Lü S, et al. Effect of saw dust ash ameliorating degraded vegetable garden purple soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 ( 3 ): 695—706. [黄容, 高明, 吕盛, 等. 锯木灰渣改良退化菜园紫色土壤的效果研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55 ( 3 ): 695—706.]
- [ 7 ] Li H, Parent L E, Karam A, et al. Potential of *Sphagnum* peat for improving soil organic matter, water holding capacity, bulk density and potato yield in a sandy soil[J]. *Plant and Soil*, 2004, 265 ( 1/2 ): 355—365.
- [ 8 ] Vestberg M, Kukkonen S, Kuru H N, et al. Effect of cropping system and peat amendment on strawberry growth and yield[J]. *Agricultural and Food Science*, 2008, 17 ( 1 ): 88—101.
- [ 9 ] Gan F Q, Hang X S, Liu Y, et al. Physicochemical and mineralogical properties of bentonites in south Jiangsu, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 ( 4 ): 945—954. [干方群, 杭小帅, 刘云, 等. 苏南地区膨润土物理化学和矿物学特性研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55 ( 4 ): 945—954.]
- [ 10 ] Fu X W, Zhang Y J, Du X J, et al. Effect of annual nitrogen application rate on nitrogen use efficiency and yield of summer soybean in winter wheat-summer soybean rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26 ( 3 ): 453—460. [符小文, 张永杰, 杜孝敬, 等. 麦-豆轮作体系周年施氮量对夏大豆氮素利用效率和产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 ( 3 ): 453—460.]
- [ 11 ] Zou W X, Han X Z, Jiang H, et al. The effect of water levels on yield and water use efficiency of soybean in northeast black soil region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30 ( 6 ): 68—73. [邹文秀, 韩晓增, 江恒, 等. 黑土区不同水分处理对大豆产量和水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30 ( 6 ): 68—73.]
- [ 12 ] Ahmed F, Nestingen R, Nieber J L, et al. A modified Philip-Dunne infiltrometer for measuring the field-saturated hydraulic conductivity of surface soil[J]. *Vadose Zone Journal*, 2014, 13 ( 10 ): 1—14.
- [ 13 ] Mohammadi M H, Vanclouster M. A simple device for field and laboratory measurements of soil air permeability[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2019, 83 ( 1 ): 58—63.
- [ 14 ] Kuncoro P H, Koga K. A simple and low cost method for measuring gas diffusivity and air permeability over a single soil cylinder[J]. *Journal of the Japanese Society of Soil Physics*, 2012, 120: 55—60.
- [ 15 ] Jones H G. *Plant and Microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge : Cambridge University Press, 1992, 66 ( 3/4 ): 267—268.
- [ 16 ] Currie J A. *Gaseous diffusion in porous Media*. 1. A non-steady state method[J]. *British Journal of Applied Physics*, 2002, 11 ( 8 ): 314—317.
- [ 17 ] Barzegar A R, Yousefi A, Daryashenas A. The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physical properties and yield of wheat[J]. *Plant and Soil*, 2002, 247 ( 2 ): 295—301.
- [ 18 ] Zhao X, Fan J, Fu W. Effects of soil erosion and land use patterns on the characteristics of soil water and gas transport in the black soil region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31 ( 5 ): 1599—1606. [赵旭, 樊军, 付威. 土壤侵蚀与土地利用方式对黑土地土壤水气传输特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31 ( 5 ): 1599—1606.]
- [ 19 ] Blanco-Canqui H, Hergert G W, Nielsen R A. Cattle manure application reduces soil compactibility and increases water retention after 71 years[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79 ( 1 ): 212—223.
- [ 20 ] Zhao W H, Ma L, Xu J S, 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. [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.]
- [ 21 ] Li J N, Sun X Y, Li S Y. Effects of garden waste compost and bentonite on muddy coastal saline soil[J]. *Sustainability*, 2020, 12 ( 9 ): 3602.
- [ 22 ] Wissing L, Kölbl A, Schad P, et al. Organic carbon accumulation on soil mineral surfaces in paddy soils derived from tidal wetlands[J]. *Geoderma*, 2014, 228/229: 90—103.
- [ 23 ] Wang D C, Wu J G. Effects of organic manure on soil nutrients and aggregate composition in soil under mono-cropping of soybean[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 ( 4 ): 825—834. [王笃超, 吴景贵. 不同有机物料对连作大豆土壤养分及团聚体组成的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55 ( 4 ): 825—834.]
- [ 24 ] Zhou H, Chen C, Wang D Z, et al. Effect of long-term organic amendments on the full-range soil water retention characteristics of a Vertisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 202: 104663.
- [ 25 ] Arthur E, Tuller M, Moldrup P, et al. Effects of biochar and manure amendments on water vapor sorption in a sandy loam soil[J]. *Geoderma*, 2015, 243/244: 175—182.
- [ 26 ] Ekwue E I, Bharat C, Samaroo K. Effect of soil type, peat and farmyard manure addition, slope and their interactions on wash erosion by overland flow of some Trinidadian soils[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 102 ( 2 ): 236—243.
- [ 27 ] Jensen D K, Tuller M, de Jonge L W, et al. A New Two-Stage Approach to predicting the soil water

- characteristic from saturation to oven-dryness[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 521: 498—507.
- [ 28 ] Zhou H, Fang H, Zhang Q, et al. Biochar enhances soil hydraulic function but not soil aggregation in a sandy loam[J]. *European Journal of Soil Science*, 2019, 70( 2 ): 291—300.
- [ 29 ] Zhuang J, Jin Y, Miyazaki T. Estimating water retention characteristic from soil particle-size distribution using a non-similar media concept[J]. *Soil Science*, 2001, 166 ( 5 ): 308—321.
- [ 30 ] Liu D P, Yu H B, Yang F, et al. Characterizing humic substances from native halophyte soils by fluorescence spectroscopy combined with parallel factor analysis and canonical correlation analysis[J]. *Sustainability*, 2020, 12 ( 23 ): 9787.
- [ 31 ] Schapel A, Marschner P, Churchman J. Clay amount and distribution influence organic carbon content in sand with subsoil clay addition[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 184: 253—260.
- [ 32 ] Schapel A, Marschner P, Churchman J. Influence of clay clod size and number for organic carbon distribution in sandy soil with clay addition[J]. *Geoderma*, 2019, 335: 123—132.
- [ 33 ] Rakhsh F, Golchin A, Beheshti Al Agha A, et al. Mineralization of organic carbon and formation of microbial biomass in soil: Effects of clay content and composition and the mechanisms involved[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 151: 108036.
- [ 34 ] Calver T, Yarmuch M, Conway A J, et al. Strong legacy effect of peat composition on physicochemical properties of reclamation coversoil[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2019, 99: 244—253.

( 责任编辑: 檀满枝 )