

黄土丘陵沟壑区治沟造地土壤快速培肥效应

付 威^{1,2}, 雍晨旭^{1,3}, 马东豪⁴, 樊 军^{1,2}, 张佳宝^{4*}, 魏宏安⁵,
冯小龙⁵, 魏润哲⁵, 刘霄飞⁶, 王光东⁶, 谭 钧⁷

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 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, 杨凌 712100; 3. 中共白水县委办公室, 渭南 715600; 4. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 5. 陕西省土地整治中心, 西安 710075; 6. 延安市治沟造地领导小组办公室, 延安 716000; 7. 北京中向利丰科技有限公司, 北京 100024)

摘 要: 为了在黄土区新垦土地上快速有效地构建优质耕作层, 缓解黄土高原耕地数量和质量退化问题。该研究以一次性工程化措施快速构建优质耕作层为目标, 选取黄土丘陵沟壑区治沟造地完成的沟道新构造土地为研究区域, 利用 3a 连续的田间定位试验, 探索以木本泥炭、生物炭等为主的外源有机物质, 配合腐熟秸秆和化肥等措施, 研究不同耕作层构建模式下对黄土区培肥土壤、改善土壤结构、提高土地生产力及作物产量的影响。结果表明: 添加木本泥炭, 配合腐熟秸秆, 辅以生物激发调节剂处理下可快速提高土壤有机质和易氧化碳等养分含量, 增加土壤团聚体数量及稳定性, 维持较高的土壤养分含量, 且不存在重金属超标的风险, 最终增加玉米籽粒产量, 2016—2018 年连续 3a 较对照分别增产 17.5%、28.6%、1.0%。耕层土壤物理、化学等性质得以显著改善, 土地生产力显著提升。因此, 木本泥炭+生物激发调节剂+腐熟秸秆+化肥是黄土区一次性工程化快速构建优质耕作层的最佳施用模式。

关键词: 土壤; 团聚体; 重金属; 黄土高原; 耕作层; 构建

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.21.031

中图分类号: S152

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-21-0252-10

付 威, 雍晨旭, 马东豪, 樊 军, 张佳宝, 魏宏安, 冯小龙, 魏润哲, 刘霄飞, 王光东, 谭 钧. 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 doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.21.031 http://www.tcsae.org

Fu Wei, Yong Chenxu, Ma Donghao, Fan Jun, Zhang Jiabao, Wei Hong'an, Feng Xiaolong, Wei Runzhe, Liu Xiaofei, Wang Guangdong, Tan Jun. 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 (Transactions of the CSAE), 2019, 35(21): 252-261. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.21.031 http://www.tcsae.org

0 引 言

土壤退化与城镇化建设对耕地的占用, 严重威胁了中国耕地质量与数量^[1]。其中, 在黄土高原出现大量耕地质量逐渐退化的趋势^[2]。为守住 18 亿亩耕地红线不动摇, 增加耕地面积与优质耕地数量迫在眉睫。新垦土地是快速增加耕地面积的最有效措施之一, 如“治沟造地”工程是针对黄土丘陵沟壑区特殊地貌, 集坝系建设、旧坝修复、盐碱地改造、荒沟闲置土地开发利用和生态建设为一体的沟道治理新模式, 通过闸沟造地、打坝修渠、垫沟覆土等措施, 实施沟、谷造地增良田, 梁、峁退耕还林保生态, 实现小流域坝系工程提前利用受益, 是一项惠民生的系统工程^[3]。截至目前, 该工程建设规模 $3.36 \times 10^4 \text{ hm}^2$,

新增耕地 $3.1 \times 10^3 \text{ hm}^2$, 耕地面积提升 9.2%, 耕地农业机械化可操作程度显著增加。但新构造的坝地和梯田剥离了以往农田熟化的耕层土壤, 而沟道填方土壤主要来源于梁、峁平整时的余土, 导致土壤贫瘠、养分不均问题突出; 同时, 在重机械的来回碾压过程中, 土壤紧实、结构性变差, 不利于作物的正常生长。因此, 提升该区域新垦耕地的土壤肥力与生产力, 可为该区域或类似区域培肥土壤, 快速构建优质耕作层提供技术支撑和理论依据。

国内外针对土壤培肥或构建优质耕作层技术进行过大量研究^[4-14]。构建优质耕作层, 提升新垦土地的土壤肥力, 实现贫瘠土壤沃土化, 是完成新垦土地或退化土地向优质耕地转化的核心。但传统的土壤培肥措施耗时、费力且效果不突出。因此, 本研究旨在利用新型外源碳等材料, 结合农业机械化, 通过一次标准的技术操作, 快速并有效的构建优质耕作层。在早期传统农耕文明中, 焚烧枯枝落叶是一种古老但有效的培肥技术。一方面, 焚烧产生的高温可杀死土壤中部分病虫害; 另一方面, 枯枝落叶焚烧后留下的灰分含有众多矿质营养元素, 尤其是钾元素, 提高土壤养分含量。但焚烧过程中会产生大量烟尘与 CO_2 , 破坏了土壤微生物群落结构、生物多样性和根区微环境等而被禁止应用。在化肥出现之前, 农民广泛施用动物粪肥或厩

收稿日期: 2019-04-02 修订日期: 2019-09-22

基金项目: 自然资源部土地整治中心外协项目资助

作者简介: 付 威, 博士生, 主要从事旱地水分养分循环方面研究。

Email: weifuu0518@163.com

*通信作者: 张佳宝, 研究员。主要从事土壤水动力学、污染物的迁移与地下水污染防治、平原与坡地水量平衡、农田生态系统物质循环与模拟、节水技术、水分和氮素管理区域模型以及精准种植技术、生态系统过程与模拟、水循环与污染物迁移、农田信息采集与水氮管理决策系统等方面的研究。Email: jbzhang@issas.ac.cn

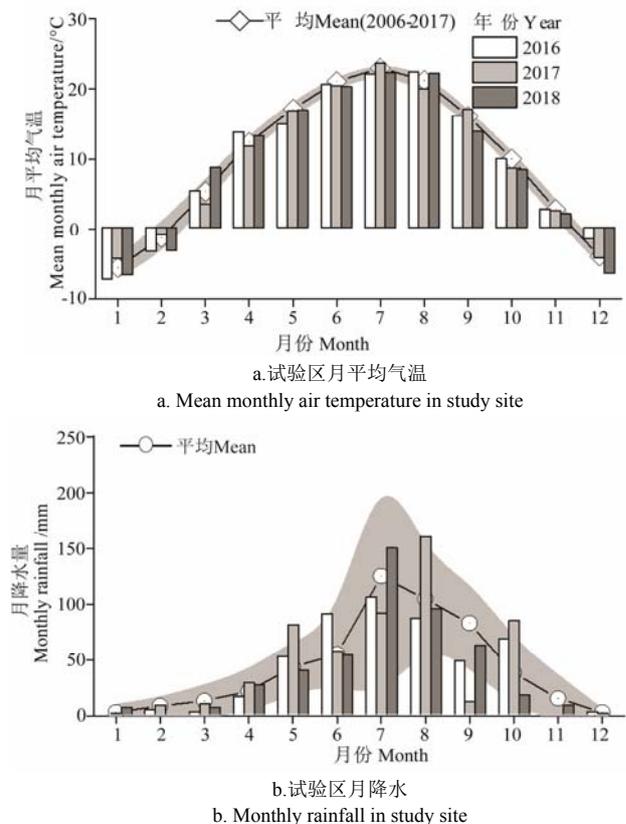
肥来提高土地生产力, 在短期内取得了显著的效果。然其易分解、肥效短, 难以维持长期高效土地生产力, 且大量牲畜粪肥不易批量获得^[9]。近些年来, 种植绿肥成为一种常见的土壤培肥方式^[8-11]。其中, 绿肥作物大都以豆科作物(怀豆、田菁、苜蓿等)为主, 其本身具有一定固氮能力^[12-13]。但这种固氮效果有限、培肥周期漫长, 提升土壤肥力并不显著。同时, 像苜蓿等绿肥作物属深根系高耗水作物, 可能会造成黄土区深层土壤水分过度消耗, 形成干层。在现代农业中, 国内外学者均认为秸秆还田是一种快速培肥土壤的技术^[4-5,7], 不仅可以减少农业废弃物数量, 变废为宝, 而且对提高土壤有机质的含量具有一定意义。但秸秆还田也存在一定的风险, 若秸秆不经过灭菌处理将携带各种病原菌, 对下一茬作物生长带来巨大影响。鉴于此, 传统土壤培肥措施已经无法满足现代农业快速发展之需要。因此, 亟待寻找一种快速、高效的土壤培肥措施或技术流程。利用一次标准的工程化技术流程来快速高效地改善黄土区土壤结构、提高土壤肥力与生产力, 增加作物产量, 保证区域粮食安全。添加新型外源有机物质被认为是改善土壤物理性质、迅速提高土壤肥力和生物化学性质的重要途径^[13-14]。土壤有机质作为土壤肥力最重要的指标之一, 其含量多少直接影响土壤肥力的高低^[15]。不同的土壤碳组分直接决定其在土壤中的周转速度及土壤肥力的水平和持久性^[14]。木本泥炭(woody peat)是经过漫长的地球生物化学循环过程形成的性质稳定的有机物质, 其比表面积大, 吸附整合能力强, 并且有较强的离子交换能力和盐分平衡能力, 在培肥土壤和改良土壤中有很好的积极作用^[16-18]。生物炭作为另外一种含碳量极高的人工合成外源有机物质, 近年也被广泛施用于农业生产实践^[19-20], 其作物秸秆或果木树枝经过高温裂解形成结构稳定、比表面积大的功能材料, 富含多种矿质元素, 具有容重小, 总孔隙度大等特点, 可以快速提升土壤养分含量, 改善土壤结构和孔隙分布特征, 提升土壤水力学参数, 从而促进作物生长^[16-22]。难氧化碳是保持持久土壤肥力的关键, 易氧化碳和溶解性有机碳是土壤中极易变化的部分, 是体现当季土壤肥力的重要指标^[14]。利用生物激发调节剂刺激土壤微生物和酶活性, 调节稳定外源有机物质的周转速率, 达到提升当季肥力与持久肥力的效果。结合腐熟秸秆提升土壤肥力, 增加土壤根区微环境生物活性, 改善根际环境^[4,23-24]。

因此, 本研究通过 3 a 田间定位试验。首先, 利用一次标准化的技术流程来改变治沟造地后新垦耕地, 以期快速并有效地构建能满足作物稳产高产的优质耕作层。其次, 添加外源有机物质, 结合化肥和腐熟秸秆有机肥, 快速提升土壤有机质、养分含量, 改善土壤水力学性质及物理性质。最后, 在生物激发调节剂的作用下, 刺激土壤酶活性, 增强土壤微生物活性, 调控土壤中的一系列生物化学过程。本文将从 3 种不同构建模式下 6 种处理, 研究其对土壤有机质及土壤碳组分差异、土壤物理性质中的团聚体分布及其稳定性的影响、土壤养分变化特征, 土壤重金属含量和作物产量及生物量等的影响, 对人工优质耕作层快速构建模式进行综合评估, 以期为黄土区土壤快速工程化构建优质耕作层提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2016 年 3 月—2018 年 10 月在陕西省延安市康坪村(36°44'N, 109°35'E)进行, 属典型黄土丘陵沟壑区。海拔 1 040~1 309 m, 年平均气温 8.8 °C, 年平均降雨量 500 mm (2006—2017 年), 冬春寒冷干燥, 夏秋炎热多雨(图 1)。典型土壤为黄绵土, 气候属于暖温带半湿润区向半干旱区过渡区。研究区域是典型的卯、梁地形, 于 2015—2016 年, 通过治沟造地项目工程措施, 完成土地平整, 建立排水沟, 在该区域新垦土地中具有典型代表性。试验开始前, 耕层(0~15 cm)土壤容重为 1.58 g/cm³, 有机质为 5.18 g/kg, 全氮、磷和钾含量为 0.23、0.59 和 19.1 g/kg, 碱解氮、速效磷、速效钾的质量分数分别为 16.38、2.27 和 59.13 mg/kg, pH 值为 8.16, 气象数据来源于距离 36 km 外的安塞水土保持综合试验站。本试验主要材料木本泥炭, 产自印度尼西亚露天木本泥炭矿^[18,25-26], 含水率为 25.0%, 有机质和灰分质量分数分别为 90.3%和 9.7%, 全氮、全磷和全钾质量分数分别为 6.6、0.025 和 0.43 g/kg, pH 值为 5.48。生物炭原材料为杂木(杨树、枣树、槐树等)黑炭, 购置于商业公司, 其基本理化性质如下: 容重为 0.58 g/cm³, 颗粒组成: <2~0.02 mm 占 86.29%、<0.02~0.002 mm 占 11.93%、<0.002 mm 占 1.78%, pH 值为 8.96, 阳离子交换量为 20.73 cmol/kg, 总含碳量 169.67 g/kg。



注: 灰色阴影部分为误差范围。

Note: Gray shaded part is the error range.

图 1 试验区气象条件

Fig.1 Meteorological environment in study area

1.2 试验设计

试验共设置3种模式,分别是推荐模式,对比模式和对照模式,共计6个处理(表1),不同处理采用完全随机区组设计,每个处理3次重复,每个小区面积为450 m² (50 m×9 m),各小区间用0.5 m隔离带隔开。2016—2018年玉米分别于4月28日、5月11日和5月7日播种,收

获时间分别在当年10月1日、10月2日和10月1日。3a种植密度分别为每公顷45 000、57 000和57 000株。其中2017年与2018年不同处理秸秆还田数量按前一年各处理收获后秸秆量确定,利用40%量的腐熟秸秆代替还田。施肥量分别是N: 225 kg/hm², P₂O₅: 225 kg/hm²; K₂O: 225 kg/hm²。其他事宜按照当地农事日程进行。

表1 优质耕作层构建模式详细流程

Table 1 Detailed construction mode of high-quality tillage layer of loess soil

步骤 Step	推荐模式 Recommended mode		对比模式 Comparison mode		对照模式 Control mode	
	A1	A2	B1	B2	C1	C2
第1步 Step 1	鉴于试验区域在治沟造地工程中由重型机械的碾压导致土壤压实、土壤水透性差与不同质地土壤空间上的不均匀分布等障碍因素。在玉米播种前(2016年4月初),采用深耕机对整个研究区域0~30 cm土层的土壤进行深翻作业,2次深翻从相互垂直方向进行,以消除优质耕作层构建过程中的上述障碍因子。					
第2步 Step 2	平整土地,试验设计总体规划,利用完全随机区组设计,每个处理3次重复,划定小区,为下一步撒施外源材料和肥料做准备。					
第3步 Step 3	首先,施加37.5 t/hm ² 的木本泥炭;其次,施加3.0 t/hm ² 的腐熟秸秆(利用40%有机肥替代),再施加1.5 t/hm ² 的生物激发剂。	首先,施加37.5 t/hm ² 的木本泥炭;其次,施加3.0 t/hm ² 的腐熟秸秆(利用40%有机肥替代),不施加生物激发调节剂。	首先,施加15 t/hm ² 的木本泥炭;其次,施加3.0 t/hm ² 的腐熟秸秆(利用40%有机肥替代),不施加生物激发调节剂。	首先,施加15 t/hm ² 的生物炭;其次,施加3.0 t/hm ² 的腐熟秸秆(利用40%有机肥替代),不施加生物激发调节剂。	施加3.0 t/hm ² 的腐熟秸秆(利用40%有机肥替代)。	不施加外源碳材料。
第4步 Step 4	按照上述施肥量,N: 225 kg/hm ² , P ₂ O ₅ : 225 kg/hm ² ; K ₂ O: 225 kg/hm ² ,均匀撒施化肥。					
第5步 Step 5	上述外源材料和肥料均采用人工撒施,尽量保证撒施均匀,待上述步骤完成后,利用旋耕机将各种材料旋耕混匀在0~15 cm土层。					
第6步 Step 6	田间种植按照当地农事日程进行,2017年和2018年不再施加木本泥炭、生物炭和生物激发调节剂,仅根据当季秸秆量,利用腐熟秸秆(秸秆量40%)进行还田,根据施肥量施加化肥。					

1.3 优质耕作层构建模式流程

3种优质耕作层构建模式下6个处理具体的工程化构建技术流程见表1。

1.4 土壤样品与植物样品采集

1.4.1 土壤样品

分别于2016年、2017年和2018年玉米收获期,采集土壤样品。每个小区按照“S”型随机选择5个土壤样点,土样采用直径40 mm的土钻采集0~15 cm深度土壤样品,混合后带回室内,风干研磨过筛,供土壤养分和土壤重金属指标检测。

土壤团聚体原状土土样于2018年玉米收获期采集,每个处理采集6次重复,利用不锈钢盒采集0~15 cm土层原状土样。实验室内将采集的原状土沿着自然结构掰成小于1 cm的团块,过8 mm筛,去除动植物残体和砾石,自然风干,备用。

1.4.2 植物样品

在玉米收获期,每个小区每间隔5株玉米挖取1株,共挖取30株玉米,将玉米脱粒,风干计产。测定玉米产量和生物量等相关指标,将籽粒和秸秆粉碎供养分测定。

1.5 测定指标与方法

称量过0.25 mm筛子1.000 g土壤样品,采用重铬酸钾外加热法测定其有机质含量。25℃下,称取过2 mm土壤筛的风干土(约含有机碳15~30 mg)(精确到0.1 mg),装入100 mL离心管中,加333 mmol/L KMnO₄溶液25 mL,密封瓶口,然后在振荡机上250 r/min振荡1 h,测定其易氧化碳的含量。土壤全氮、全磷、钾和速效磷、钾等及植物和籽粒养分等指标的测定参考鲍士旦《土壤农化分析》^[27]。

机械稳定性团聚体利用沙维诺夫干筛法^[28]测定。具体操作流程,将不同孔径分别为2、0.25和0.053 mm的筛子按孔径由大到小叠放成一组套筛,称取300 g风干土

样,干筛10 min,分离出2~8 mm(宏团聚体)、0.25~2 mm(大团聚体)、0.053~0.25 mm(微团聚体)和<0.053 mm(粉黏粒)的组分,分别进行称质量,备用。

水稳性团聚体采用Yoder提出的湿筛法^[29]测定:按照干筛法不同团聚体比例配100 g土样用于湿筛测定。将100 g土样置于团聚体分析仪(XY100型)套筛最上层(套筛孔径自上而下依次为2、0.25和0.053 mm),沿桶壁缓慢加入去离子水至水没过土样,浸泡10 min,竖直震荡30 min,30次/min,振幅为4 cm。依次收集各级筛子中土壤及不锈钢桶中土样于100 mL烧杯中,然后于60℃下烘干至恒质量,称量各粒径的质量,计算出各粒级团聚体的质量分数。

1.6 数据计算与处理

1.6.1 土壤团聚体相关指标计算

土壤团聚体破坏率(percentage of aggregate destruction, PAD)

$$PAD = \frac{A_{>0.25} - WSA_{>0.25}}{A_{>0.25}} \quad (1)$$

式中 $A_{>0.25}$ 为>0.25 mm机械稳定性团聚体的质量分数%, $WSA_{>0.25}$ 为>0.25 mm水稳性团聚体的质量分数(%)。

土壤团聚体稳定性指标利用平均重量直径(mean weight diameter, MWD)和几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)来描述,

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (2)$$

$$GMD = \exp\left[\sum_{i=1}^n (w_i \ln \bar{x}_i)\right] \quad (3)$$

式中 \bar{x}_i 为某一粒级下团聚体平均直径(mm), w_i 为该粒

级下团聚体的质量分数。

1.6.2 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 和 Origin 9.3 软件对数据、图表进行处理,采用 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析,并使用 Duncan 法进行多重比较,显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同模式处理下对土壤有机质和土壤碳组分的影响

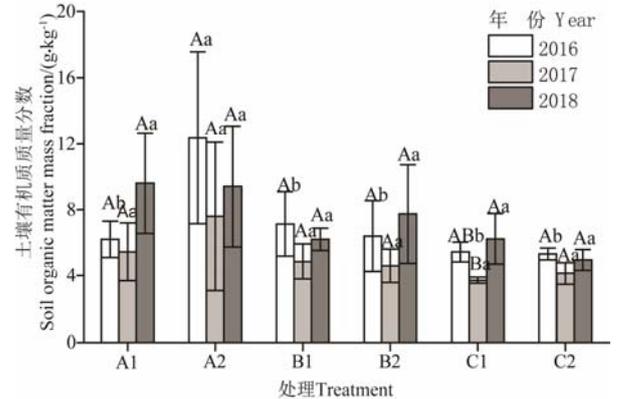
人工优质耕作层工程化快速构建过程中一次性施用木本泥炭和生物炭等外源有机材料,经过 1 个玉米生育期后(2016 年 10 月),耕层土壤(0~15 cm)有机质含量快速提升,经过 2 个玉米生育期后(2017 年 10 月),土壤有机质在第一个生育期的基础上有明显下降趋势,经过第 3 年种植玉米熟化后(2018 年 10 月),土壤有机质含量再次提升(图 2)。施加木本泥炭和生物炭处理有机质含量均高于对照模式,其中木本泥炭施加量越多,有机质提升越高。同时,在生物激发调节剂的作用下,第 1 年促进有机质的分解利用效果最好,有机质快速被分解消耗,达到显著水平($P<0.05$) (图 2)。各处理重复之间有机质和不同碳组分含量存在一定差异,其中以添加外源有机材料处理差异较大,对照处理差异最小。2016 年耕层土壤有机质存在显著差异($P<0.05$),其中推荐模式和对比模式下的 4 个处理 A1、A2、B1 和 B2 较对照模式不施加木本泥炭 C1 处理有机质含量分别提高了 14.2%、127.4%、31.3%和 10.7%;较 C2 处理分别提高了 16.7%、132.5%、34.2%和 13.2%。其中, A2 处理提升效果最显著, B1 处理次之。不同处理之间易氧化碳含量与有机质含量趋势基本保持一致,其中 A2 处理有机质与易氧化碳含量显著高于其他处理。2017 年土壤有机质含量较 2016 年普遍下降,有机质含量高低顺序为: A2>B2>A1>C1>B1>C2。其中推荐模式和对比模式下的 4 个处理 A1、A2、B1 和 B2 较对照模式下不施加木本泥炭 C1 处理有机质含量分别提高了 46.4%、104.6%、31.0%和 51.5%;分别较 C2 处理提高了 31.8%、84.2%、18.0%和 36.4%, A2 处理保持效果最显著, B2 处理次之。易氧化碳与有机质含量趋势一致,其中 B2 处理易氧化碳显著高于其他处理。2017 年有机质较 2016 年均下降比例分别是: 12.6%、38.6%、31.9%、6.6%、31.8%和 22.6%;有机质分解速率分别为: 0.78、4.78、2.28、0.40、1.73 和 1.20 g/(kg·a)。2018 年土壤有机质含量较 2017 年有增加趋势,不同处理较 2017 年平均增加了 47.4%,仅 C1 处理达到了显著水平($P<0.05$),其中 A1 处理增加量最大为 4.17 g/kg。A1、A2、B1、B2 和 C1 处理较 C2 处理分别增加了 93.9%、90.1%、25.2%、56.3%和 25.8%。

2.2 不同模式下土壤团聚体及稳定性差异

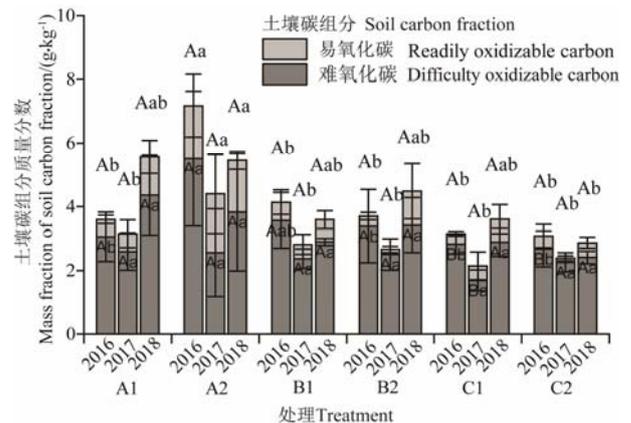
优质耕作层工程化快速构建 3 a 后,与对照处理相比机械稳定性团聚体含量增加,粉黏粒含量显著下降,水稳定团聚体含量增加,团聚体稳定性增强,破坏性率下降(图 3)。

对于机械稳定性团聚体, A1、A2、B1、B2 和 C1 处理的粉黏粒含量(<0.053 mm)显著低于对照 C2 处理($P<0.05$),且分别降低了 56.3%、56.0%、52.2%、68.6%和 48.1%。C1 处理宏团聚体(2~8 mm)含量增加,大团

团聚体(0.25~2 mm)含量显著降低; A1 与 B1 处理下微团聚体(0.053~0.25 mm)含量增加,但大团聚体含量有降低趋势。B2 处理宏团聚体含量显著增加($P<0.05$),而微团聚体含量减少。A1 与 B1 处理下的 MWD 和 GMD 基本与对照 C2 处理一致, A2、B2 和 C1 处理 MWD 和 GMD 的值高于 C2 处理。



a. 土壤有机质含量比较
a. Comparison of soil organic matter



b. 不同土壤碳组分含量比较
b. Comparison of different soil carbon fraction

注: 不同小写字母表示同年不同处理之间在 0.05 水平差异显著, 不同大写字母表示同一个处理 3 a 之间在 0.05 水平上差异显著, 下同。

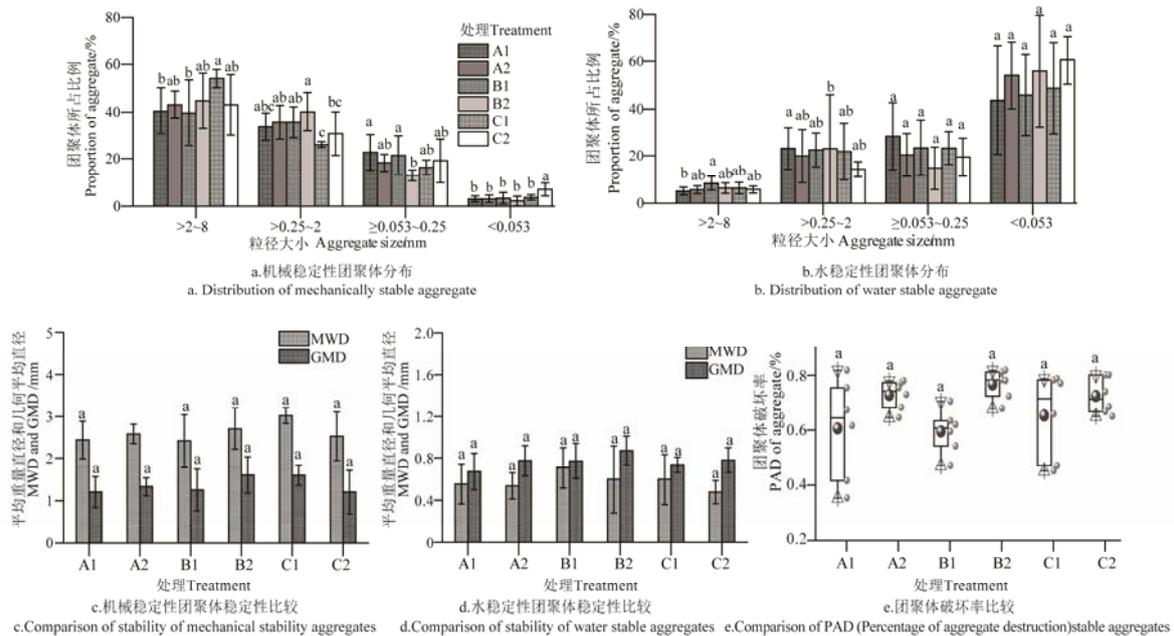
Note: Different lower case letters indicate significant differences between the different treatments at the 0.05 level in the same year, with different uppercase letters indicating a significant difference at the 0.05 level between the 3 years, the same below.

图 2 不同处理下土壤有机质和土壤碳组分含量比较

Fig. 2 Comparison of soil organic matter content and soil carbon fractions in cultivated layer

水稳定性团聚体含量显著差异主要出现在大团聚体和宏团聚体,其中 B2 处理大团聚体质量分数最高为 8.4%, A1 质量分数最低为 5.1%; A1 处理和 B1 处理宏团聚体质量分数最高为 23.0%, C2 宏团聚体质量分数最低为 14.3%。微团聚体质量分数以 A1、B1 和 C1 处理高于对照 C2 处理,分别提高了 91.7%、58.2%和 57.6%。不同处理的 MWD 的值均高于 C2 处理,但 GMD 值仅有 B2 处理。

不同处理 PAD 大小顺序为 C2>A2>B2>C1>A1>B1, 不同处理 PAD 值较 C2 处理依次降低了 6.6%、9.0%、9.8%、16.4%和 17.9%。



注：不同小写字母表示不同处理之间在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lower case letters indicate significant differences between the different treatments at 0.05 level.

图 3 2018 年收获期不同处理下土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体含量及稳定性比较

Fig. 3 Content and stability of soil mechanical stability aggregates and water stable aggregates under different treatments at harvest in 2018

2.3 不同模式处理下对土壤养分的影响

各处理耕层土壤氮、磷和钾等养分存在显著差异(表 2)。土壤全氮含量基本与土壤有机质含量变化趋势一致, 2017 年较 2016 年有略微降低, 但在 2018 年有了较大提升。对照 C2 处理 3 a 间变化较小, 2018 年 A1 和 B1 处理全氮含量较 2017 年有快速提升。土壤全磷含量不同处理基本呈现逐年增加的趋势, 但两个对照 C1 和 C2 处理在 2018 年却有降低趋

势。2016—2018 年不同处理速效磷含量逐年增加, 对照 C2 处理速效磷含量连续 3 a 均远低于其他处理。土壤全钾含量呈现连续 3 a 逐年下降的变化趋势, 除了对照 C2 处理外, 其他处理表现为全钾含量降低的趋势越来越快, 而 C2 处理则越来越慢。速效钾含量连续 3 a 逐年增加, 其中以 A2 和 B2 处理含量较高。土壤 pH 值连续 3 a 逐年降低, 不同处理 3 a 平均降低了 0.24、0.31、0.34、0.41、0.24 和 0.34 个单位。

表 2 2016—2018 年不同处理土壤养分含量变化情况
Table 2 Changes of soil nutrient content in different treatments during 2016-2018

年份 Year	处理 Treatment	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	速效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	全钾 Total K/(g·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)	pH 值 pH value
2016	A1	0.28±0.05Ba	0.66±0.08Ba	7.4±5.8Ba	18.8±0.1Aa	86.2±46.3Aa	8.75±0.21aAa
	A2	0.34±0.09Aa	0.62±0.03Aa	4.3±1.6Ca	18.9±0.3Aa	80.7±17.0Ba	8.79±0.06aAa
	B1	0.30±0.05Aa	0.61±0.01Aa	5.2±1.9Ba	18.7±0.3Aa	87.5±14.4Aa	8.86±0.21aAa
	B2	0.27±0.04Ba	0.66±0.12Aa	6.9±6.3Ba	18.9±0.7Aa	75.2±23.3Ba	8.89±0.25aAa
	C1	0.27±0.01Ba	0.63±0.02Aa	4.0±1.8Ba	18.5±0.6Aa	68.4±14.4Ba	8.72±0.07aAa
	C2	0.26±0.02Aa	0.62±0.03Aa	2.5±1.3Ba	19.2±0.3Aa	78.0±18.8Ba	8.88±0.10aAa
2017	A1	0.26±0.05Ba	0.68±0.06Ba	17.8±6.8Aa	18.6±0.3Aa	124.8±40.2Aa	8.67±0.11aAa
	A2	0.32±0.08Aa	0.70±0.14Aa	12.8±5.3Ba	19.0±0.5Aa	116.4±31.7ABa	8.58±0.16aBa
	B1	0.28±0.03Aa	0.64±0.03Aa	15.2±6.9ABa	18.4±0.1Aa	113.2±27.3Aa	8.65±0.20aAa
	B2	0.27±0.01Ba	0.66±0.08Aa	12.3±4.4Ba	18.8±0.2ABa	112.4±27.4Ba	8.69±0.06aABa
	C1	0.25±0.01Ba	0.66±0.02Aa	12.2±3.1ABa	18.6±0.9Aa	96.2±13.0Ba	8.59±0.14aABa
	C2	0.26±0.03Aa	0.64±0.02Aa	9.5±1.8Aa	18.5±0.3Ba	83.7±7.9ABa	8.71±0.13aABa
2018	A1	0.38±0.04Aab	0.68±0.03Ba	21.8±3.4Aa	17.8±0.5Ba	126.7±15.0Aab	8.51±0.08aAa
	A2	0.39±0.07Aa	0.65±0.05Aab	21.1±0.5Aa	18.1±0.3Ba	146.5±12.6Aa	8.48±0.04aCa
	B1	0.36±0.01Aab	0.66±0.03Aab	20.8±4.5Aa	17.8±0.6Ba	126.3±22.2Aab	8.52±0.07aAa
	B2	0.39±0.07Aa	0.69±0.03Aa	25.7±5.3Aa	17.8±0.5Ba	159.8±12.5Aa	8.48±0.12aBa
	C1	0.38±0.05Aab	0.66±0.02Aab	21.8±10.9Aa	17.9±0.4Aa	131.0±20.2Aab	8.48±0.07aBa
	C2	0.29±0.03Ab	0.62±0.06Ab	14.3±6.9Aa	18.4±0.6Ba	109.0±25.8Ab	8.54±0.04aBa

2.4 不同模式处理下土壤重金属含量比较

重金属在土壤耕作层没有显著差异, 但均远低于土壤环

境质量标准 GB-15618-1995 中重金属含量(表 3)。不同处理 0~15 cm 土壤重金属 Hg、As、Pb、Cd 和 Cr 的平均质量

分数分别为 0.039、10.28、26.63、0.21 和 60.45 mg/kg。

表 3 2016 年不同处理下土壤重金属质量分数

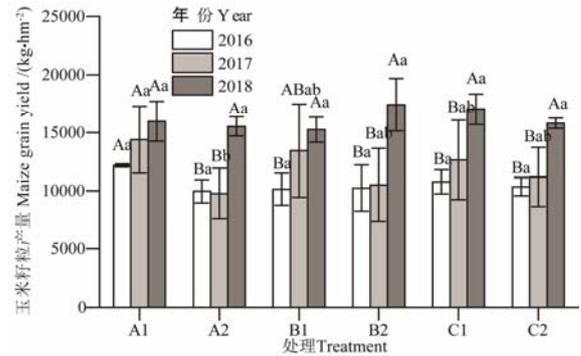
Table 3 Soil heavy metal content under different treatments in 2016

处理 Treatment	汞 Hg /(mg·kg ⁻¹)	砷 As /(mg·kg ⁻¹)	铅 Pb /(mg·kg ⁻¹)	镉 Cd /(mg·kg ⁻¹)	铬 Cr /(mg·kg ⁻¹)
耕层土壤 Cultivated land	≤1.5	≤40.0	≤500.0	≤1.0	≤300.0
A1	0.031±0.007a	10.2±0.1a	26.3±0.2a	0.20±0.08a	59.2±0.8a
A2	0.050±0.033a	10.2±0.7a	26.8±0.5a	0.22±0.04a	59.9±0.4a
B1	0.029±0.001a	10.2±0.6a	26.7±0.4a	0.18±0.06a	63.7±8.4a
B2	0.062±0.036a	10.2±0.4a	26.8±0.6a	0.23±0.03a	61.4±3.1a
C1	0.031±0.007a	10.6±0.3a	26.3±0.4a	0.18±0.03a	59.1±5.1a
C2	0.029±0.004a	10.3±0.2a	26.9±0.6a	0.23±0.02a	59.4±1.5a

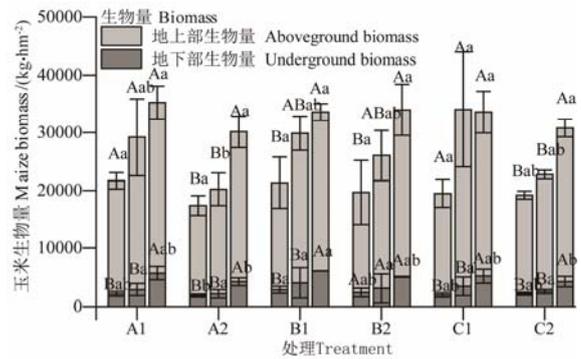
2.5 木本泥炭等处理对玉米产量、生物量及秸秆和籽粒养分的影响

2.5.1 不同处理下玉米籽粒产量与生物量差异

木本泥炭配合生物激发调节剂处理增加了玉米籽粒产量和生物量(图4)。2016与2017年,A1处理玉米籽粒产量最高,分别为12169和14396 kg/hm²,分别较C2处理增产17.5%和28.6%;2018年A1处理产量为15983 kg/hm²,较C2增产1.0%。A1处理玉米籽粒3a平均产量较对照C2处理提高了13.8%,较C1处理提高了8.2%,生物炭B2处理3a平均籽粒产量较C2仅提高了2.1%,但A2处理连续3a均较低,平均产量远远低于C2对照处理。不同处理连续3a玉米籽粒产量逐年增加,不同处理玉米地下部生物量和地上部生物量也逐年增加(图4)。2018年大部分处理玉米地下部生物量和地上部生物均显著高于2016年和2017年(P<0.05)。其中A1处理和C1处理地上部与地下部生物量较高,连续3a两个处理地上部生物量和地下部生物量平均分别为25143、3567和25499、3518 kg/hm²,较对照C2处理平均提高了18.2%、20.1%和19.8%、18.4%;B1和B2处理也可相应增加玉米生物量,但效果不及A1和处理;A2处理地上部生物量和地下部生物量均低于C2处理。同时,各处理3个重复之间差异较大,可能是不同小区的治沟造地过程导致整个地块土壤存在一定空间异质性,加之耕层构建过程施用添加物无法保证很高的均匀度导致。



a. 玉米籽粒产量差异
a. Difference in grain yield of maize



b. 玉米生物量差异
b. Difference in biomass of maize

图 4 不同处理下玉米籽粒产量和生物量对比

Fig.4 Comparison of maize grain yield and biomass under different treatments

2.5.2 不同处理下玉米秸秆与籽粒养分差异

2017—2018年不同处理籽粒氮、磷、钾养分和秸秆氮、磷养分差异未达到显著水平(P>0.05),但秸秆中全钾含量差异显著(P<0.05)(表4)。B2处理可显著增加秸秆中全钾含量,2017和2018年分别较对照C2处理提高了31.1%和53.1%。2017年籽粒中全氮、全磷和全钾含量分别为1.30%、0.34%和0.48%,秸秆中全氮全磷和全钾平均分别为1.07%、0.12%和1.36%。在平均值的基础上,A1处理可以增加籽粒全氮和全钾含量,降低秸秆中全氮和全钾含量。2018年施加木本泥炭的3个处理A1、A2和B1籽粒养分含量高于C2处理,但仅有A1处理增加了秸秆中的全氮和全磷含量。

表 4 不同处理对玉米秸秆及籽粒养分的影响

Table 4 Effect of different treatments on straw and grain yield nutrients

年份 Year	处理 Treatment	籽粒 Grain Yield			秸秆 Straw		
		全氮 Total nitrogen/%	全磷 Total P/%	全钾 Total potassium/%	全氮 Total nitrogen/%	全磷 Total P/%	全钾 Total potassium/%
2017	A1	1.31±0.14a	0.34±0.02a	0.50±0.03a	0.98±0.06a	0.12±0.02a	1.19±0.29b
	A2	1.21±0.10a	0.31±0.02a	0.46±0.06a	1.08±0.10a	0.12±0.01a	1.34±0.40ab
	B1	1.30±0.03a	0.34±0.05a	0.47±0.03a	1.12±0.13a	0.11±0.01a	1.34±0.19ab
	B2	1.36±0.08a	0.38±0.02a	0.51±0.03a	1.14±0.10a	0.14±0.01a	1.73±0.21a
	C1	1.35±0.06a	0.36±0.00a	0.49±0.04a	1.09±0.17a	0.13±0.02a	1.32±0.17b
	C2	1.34±0.04a	0.34±0.02a	0.47±0.03a	1.16±0.12a	0.12±0.01a	1.32±0.06b
2018	A1	1.29±0.07a	0.43±0.03a	0.52±0.01a	0.60±0.13a	0.11±0.03a	1.35±0.09b
	A2	1.29±0.08a	0.44±0.04a	0.53±0.04a	0.51±0.11a	0.09±0.04a	1.72±0.20ab
	B1	1.27±0.05a	0.44±0.03a	0.52±0.04a	0.63±0.06a	0.08±0.01a	1.54±0.21ab
	B2	1.25±0.07a	0.42±0.04a	0.52±0.03a	0.43±0.12a	0.06±0.04a	2.22±0.79a
	C1	1.20±0.09a	0.40±0.02a	0.49±0.02a	0.60±0.07a	0.12±0.03a	1.52±0.17ab
	C2	1.21±0.06a	0.40±0.01a	0.50±0.01a	0.50±0.15a	0.06±0.02a	1.45±0.37ab

3 讨论

重型机械碾压导致土壤紧实、导水透气性差等问题,通过两次不同方向上 30 cm 深翻解决。翻耕后土壤孔隙增加,容重降低。保证了耕层土壤均匀,确保降水可顺利入渗补给到土壤剖面,有利于根系下扎。添加不同的外源碳材料(木本泥炭^[16]、生物炭^[20]),可迅速提高土壤中的有机质含量和稳定土壤碳组分(难氧化碳)。木本泥炭作为一种自然的有机质含量极高的外源土壤培肥材料^[16],具有一定的生物活性,不仅可以增加土壤中易氧化碳组分,而且可增加土壤中难氧化碳组分,最终迅速增加土壤有机质与有机碳组分^[25]。本研究结果显示,当木本泥炭施用量 15 t/hm² 时,可提高有机质 34.2%;施用 37.5 t/hm² 时,土壤有机质提高 1.33 倍,有机质含量随木本泥炭用量提高而增加。类似研究表明^[25],于河北新垦弱碱性土壤中施用木本泥炭 37.5 t/hm² 时,一个生育期后,可以将土壤有机质含量从 5.8 g/kg,提高至 16.4 g/kg。在红壤新垦土地的研究^[26]表明,施加木本泥炭 15 t/hm² 和 30 t/hm² 时,土壤有机质由 4.94 g/kg 分别提升至 5.07 和 6.14 g/kg^[26]。这可能与土壤本身的性质(质地、酸碱性、碳酸盐含量、黏粒含量和有机质含量等)和外界环境有关。由于土壤激发效应,将促进有机质的分解消耗。此外,木本泥炭容重小、混入 0~15 cm 土层,会降低土壤容重,提高土壤总孔隙度,增加水分入渗能力,其也会在一定程度上增加有机质与空气、水分和根系的接触,促进其分解利用。但是,土壤中存在有机质在团聚体中的物理保护机制,有机质也可以充当土壤团聚体形成中的胶结物质,促进团聚体形成;而团聚体将有机质包裹在内部,减少了其与空气、水分和根系的直接接触,减缓了有机质的分解。且不同粒径下的团聚体对有机质保护机制和强度有差异,但团聚体粒径越小,其稳定性越高,内部的有机物质越稳定。相关研究表明^[30],颗粒化秸秆稳定性增强,可提高土壤有机质含量。但是,当土壤中有外源新鲜有机物质加入时,会促进土壤中原有的有机质分解^[31-32]。由于加入的量远高于分解的量,最终导致有外源有机物质添加到土壤后有机质较高。土壤激发效应与有机质团聚体物理保护机制同时存在^[33]。通过胶结物质将有机物质包裹在团聚体中,减少与空气接触而降低被土壤微生物或动物分解的速率^[34-36]。土壤中类似于有机质的胶结物质,如土壤黏粒含量和碳酸钙等粘土矿物均会对土壤团聚体的周转和破碎过程产生影响^[37-39]。本研究结果也表明,施加木本泥炭处理可以显著增加土壤中团聚体含量,降低粉黏粒含量。木本泥炭促进土壤粉黏粒在各种胶结剂的作用下相互胶结形成团聚体,其团聚体稳定性增加,破坏率降低,有利于土壤结构维持和有机质保持。在生物激发调节剂作用下,经过 1 a 的时间,土壤有机质分解加速,有机质含量显著降低,其中第一年分解速率远远大于不施加处理。第 2 年,土壤有机质分解速率为 0.78 g/(kg·a),而不施用激发剂处理为 4.78 g/(kg·a),这种生物激发调节剂效果仅在第一年最显著。此外,不同处理下 3 a 来土壤养分变化规律基本一致,土壤中大量元素氮、磷和钾含量基本不存在显著差异,

其主要原因是:所有处理下氮、磷和钾肥施用量均处于较高水平,致使其研究结果在氮、磷和钾养分含量结果差异上并没有达到显著水平。但施加木本泥炭养分含量略高于不施加处理,在施加木本泥炭处理下高产量和高生物量输出情况下,也会导致养分消耗。根据《土壤环境质量标准》GB 15618-1995,土壤重金属含量均在安全范围以内,不会引起重金属超标造成的污染。木本泥炭结合生物激发剂和腐熟秸秆施用增加玉米籽粒产量和生物量,耕层良好的导水透气性,增加降水入渗补给和氧气浓度,土壤有机质含量高促进根系生长。加之,稳定的土壤团聚体结构有利于土壤的保水保肥能力,增强植株的抗逆性,为后期玉米籽粒产量的形成提供了良好的土壤物理、化学等条件。2017 年玉米在生长期内遭遇一次虫害,尽管如此,施加木本泥炭处理的玉米植株抗虫害效果更强,其籽粒产量依然最高。

生物炭作为一种人工合成的重要外源有机物质,其具有有机质含量高、富含各种矿质元素、容重小和孔隙度大等诸多优点,近年被广泛用于土壤培肥与改良^[19-23]。但其在高温厌氧条件下裂解而成,生物活性丧失、结构更稳定,对土壤中难氧化碳组分影响大,但可以保持持久的土壤肥力。有研究指出,生物炭在土壤中的分解周转时间长达百年甚至上千年,足以说明了生物炭性质稳定^[19-20]。本研究表明,黄绵土中施用生物炭可以增加土壤中有机质含量,但易氧化碳含量会显著降低。可能是生物炭在厌氧高温条件下裂解制成,其中有机物质性质稳定,富含各种稳定的官能团,不易在土壤中分解消耗^[19],致使土壤原有的易氧化碳和生物炭中不稳定的结构材料加速分解利用。本研究中生物炭处理第 2 年土壤有机质分解速率最小,亦可说明其可以稳定存在于土壤之中。此外,相关研究表明,施用生物炭增加土壤养分含量和养分有效性,但不同类型的土壤其影响程度不同^[19-20]。生物炭在酸性土壤中对养分影响效果显著,是生物炭的碱性与酸性土壤中和,降低了土壤酸度,为微生物的生长提供了适宜的 pH 值范围,进一步增加了养分的有效性;而生物炭在碱性土壤中效果不显著。其中,黄绵土属弱碱性土壤,尽管其对土壤 pH 值影响不大,但由于生物炭本身富含各种矿质元素,在对土壤速效磷等养分具有显著提升作用。玉米在良好土壤养分条件下,会增加对氮、磷和钾元素的吸收利用,最后增加其籽粒和秸秆中的氮、磷和钾含量。再之,生物炭是果木等生物质制成,本身不存在重金属富集,亦不会造成土壤重金属污染。结果表明,施用生物炭改善了增加了有机质及各种养分含量和土壤结构特征,但玉米产量和生物量却没有显著增加。Jones 等通过 3 a 的田间试验也表明,施用生物炭没有促进玉米的生长,却促进了田间杂草的生长。这其中的原因可能是玉米和草的根系深度不同,尽管养分充足,但是作物无法完全吸收利用^[21]。另一方面生物炭的性质会随着其在土壤中的时间增加而衰退。众多试验均表明,生物炭应用在试验前几年效果突出,后期由于其结构性稳定,不易被微生物和根系分解利用^[20]。因此,在利用生物炭快速构建优质耕作层时,需要考虑生物炭在性质上的优点和缺点^[40]。

4 结 论

1) 在消除优质耕作层构建的障碍因子基础上, 通过一次性添加木本泥炭增加土壤惰性有机质含量, 辅以生物激发调节剂来丰富土壤微生物群落并调节木本泥炭的分解速率, 进行秸秆还田和化肥的施用增加易分解有机质和速效养分含量所构建的黄绵土优质耕作层。施用后 1 a、2 a 和 3 a 土壤有机质较对照分别可以增加 16.7%、31.8% 和 93.9%, 在生物激发调节剂的刺激作用下, 土壤易氧化碳含量也提升, 土壤团聚体破坏率降低 16.4%, 土壤团聚体含量及稳定性增加, 提高了土壤当季肥力, 促进作物生长发育, 连续 3a 分别提高产量 17.5%、28.6%、1.0%。同时, 不会导致土壤重金属超标。生物炭的添加也可以改善土壤养分状况, 但是会降低土壤中易氧化碳含量, 对产量和生物量的作用效果也不显著, 效果不如木本泥炭。

2) 木本泥炭在生物激发剂的作用下, 会快速分解而降低其含量, 施用后第 2 年有机质分解速率在 0.40~4.78 g/(kg·a), 可能带来后续效应。此外, 外源新鲜有机物质添加所带来的土壤激发效应, 也不利于土壤有机质保育。因此, 研究木本泥炭在黄绵土中的转化过程, 阐明其快速分解机制, 利用土壤团聚体对有机质的保护机理, 采取相应措施减缓其分解速率, 维持土地生产力, 对提升与保持土壤肥力持久性具有重要意义, 这一方面仍需进一步深入研究。

【参 考 文 献】

- [1] 陈杰, 檀满枝, 陈晶中, 等. 严重威胁可持续发展的土壤退化问题[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 720—728.
Chen Jie, Tan Manzhi, Chen Jingzhong, et al. Soil degradation: A global problem of endangering sustainable development[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(5): 720—728. (in Chinese with English abstract)
- [2] 卫新东, 王筛妮, 员学锋, 等. 陕西省耕地质量时空变化特征及其分异规律[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 240—248.
Wei Xindong, Wang Shaini, Yuan Xuefeng, et al. Spatial and temporal changes and its variation of cultivated land quality in Shaanxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CASE), 2018, 34(3): 240—248. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李裕瑞, 李怡, 范朋灿, 等. 黄土丘陵沟壑区沟道土地整治对乡村人地系统的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 241—250.
Li Yurui, Li Yi, Fan Pengcan, et al. Impacts of land consolidation on rural human-environment system in typical watershed of loess hilly and gully region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CASE), 2019, 35(5): 241—250. (in Chinese with English abstract)
- [4] Yin H, Zhao W, Li T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: Role of straw nutrient resources[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2695—2702.
- [5] Lu F, Wang X, Han B, et al. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland[J]. Global Change Biology, 2009, 15(2): 281—305.
- [6] 张娟, 徐宁彤, 孟庆峰, 等. 有机肥施用年限对土壤有机碳组分及其来源与玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 107—113.
Zhang Juan, Xu Ningtong, Meng Qingfeng, et al. Effect of years of manure fertilizer application on soil organic carbon component, its source and corn yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CASE), 2019, 35(2): 107—113. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王会, 何伟, 段福建, 等. 秸秆还田对盐渍土团聚体稳定性及碳氮含量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 124—131.
Wang Hui, He Wei, Duan Fujian, et al. Effects of straw returning on saline soil aggregate stability and its carbon, nitrogen contents[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CASE), 2019, 35(4): 124—131. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李红燕, 胡铁成, 曹群虎, 等. 旱地不同绿肥品种和种植方式提高土壤肥力的效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1310—1318.
Li Hongyan, Hu Tiecheng, Cao Qunhu, et al. Effect of improving soil fertility by planting different green manures in different patterns in dryland[J]. Journal of Plant Nutrition & Fertilizer, 2016, 22(5): 1310—1318. (in Chinese with English abstract)
- [9] Veloso M G, Cecagno D, Bayer C. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 190: 139—146.
- [10] Kumar N, Nath C P. Impact of zero-till residue management and crop diversification with legumes on soil aggregation and carbon sequestration[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 189: 158—167.
- [11] Yao Z, Zhang D, Liu N, et al. Dynamics and sequestration potential of soil organic carbon and total nitrogen stocks of leguminous green manure-based cropping systems[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191: 108—116.
- [12] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil[J]. Plant and Soil, 2007, 291(1-2): 275—290.
- [13] Li Z, Schneider R L, Morreale S. J, et al. Woody organic amendments for retaining soil water, improving soil properties and enhancing plant growth in desertified soils of Ningxia, China[J]. Geoderma, 2018, 310: 143—152.
- [14] 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): 387—398.
Zheng Yanyun, Zhang Jiabao, Tan Jun, et al. Chemical composition and structure of humus relative to sources[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(2): 387—398. (in Chinese with English abstract)
- [15] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. Soil & Tillage Research, 2004, 79: 7—31.

- [16] 彭格林, 张则有, 伍大茂. 泥炭与煤形成环境对比研究现状[J]. 地球科学进展, 1999, 14(3): 247—255.
Peng Gelin, Zhang Zeyou, Wu Damao. The study status of correlation of peat with coal-forming environment[J]. *Advance in Earth Science*, 1999, 14(3): 247—255. (in Chinese with English abstract)
- [17] 席改红, 石国荣, 李强, 等. 木本泥炭对 Cr(VI)的吸附性能[J]. 环境化学, 2019, 38(1): 202—208.
Xi Gaihong, Shi Guorong, Li Qiang, et al. Adsorption performance of woody peat for Cr(VI)[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(1): 202—208. (in Chinese with English abstract)
- [18] 潘慧, 傅欣, 赵世军, 等. 活化条件对木本泥炭中腐植酸提取效果的影响[J]. 腐植酸, 2016(1): 20—23.
Pan Hui, Fu Xin, Zhao Shijun, et al. Effects of activation conditions on the extraction of humic acid from woody peat[J]. *Humic Acid*, 2016 (1):20—23. (in Chinese with English abstract)
- [19] 付威, 樊军, 胡雨彤, 等. 施肥和地膜覆盖对黄土旱塬土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1158—1167.
Fu Wei, Fan Jun, Hu Yutong, et al. Effects of fertilization and film mulching on soil physical and chemical properties and winter wheat yield on the Loess[J] Plateau *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5): 1158—1167. (in Chinese with English abstract)
- [20] Ding Y, Liu Y, Liu S, et al. Biochar to improve soil fertility. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, 36(2): 1—36.
- [21] Jones D L, Rousk J, Edwards-Jones G, et al. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three-year field trial[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 45: 113—124.
- [22] Wu T, Schoenau J J, Li F, et al. Influence of cultivation and fertilization on total organic carbon and carbon fractions in soils from the Loess Plateau of China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 77:59—68.
- [23] Jeffery S, Meinders M B J, Stoof C R, et al. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil[J]. *Geoderma*, 2015, 251: 47—54.
- [24] Chen Y, Wang K, Lin Y, et al. Balancing green and grain trade[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8:739—741.
- [25] 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]. *China Soil and Fertilization*, 2018(5): 102—108. (in Chinese with English abstract)
- [26] 曲成闯, 陈效民, 张佳宝, 等. 基于木本泥炭快速构建红壤新垦耕地优质耕作层技术与效果[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 134—140.
Qu Chengchuang, Chen Xiaomin, Zhang Jiabao, et al. Techniques and effects of quickly constructing high-quality tillage layers for newly-cultivated arable in red soil and paddy field based on woody peat and organic materials[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6): 134—140. (in Chinese with English abstract)
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 7—100.
- [28] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [29] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses [J]. *Agronomy Journal*, 1936, 28(5): 337—351.
- [30] 丛萍, 李玉义, 高志娟, 等. 秸秆颗粒化高量还田快速提高土壤有机碳含量及小麦玉米产量[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 148—156.
Cong Ping, Li Yuyi, Gao Zhijuan, et al. High dosage of pelletized straw returning rapidly improving soil organic carbon content and wheat-maize yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CASE)*, 2019, 35(1): 148—156. (in Chinese with English abstract)
- [31] 常瑞雪, 甘晶晶, 陈清, 等. 碳源调理剂对黄瓜秧堆肥进程和碳氮养分损失的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 2): 254—259.
Chang Ruixue, Gan Jingjing, Chen Qing, et al. Effect of carbon resources conditioner on composting process and carbon and nitrogen loss during composting of cucumber stalk[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CASE)*, 2016, 32(supp2): 254—259. (in Chinese with English abstract)
- [32] Fontaine S, Barot S, Barré P, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. *Nature*, 2007, 450: 277—280
- [33] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 20—40.
- [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] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32:2099—2103.
- [36] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79:7—31.
- [37] FernándezUgalde O, Virto I, Barré P, et al. Mechanisms of macroaggregate stabilisation by carbonates: Implications for organic matter protection in semi-arid calcareous soils[J]. *Soil Research*, 2014, 52:180—192.
- [38] Wei H, Guenet B, Vicca S, et al. High clay content accelerates the decomposition of fresh organic matter in artificial soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 77:100—108.
- [39] Clough A, Skjemstad J O, Clough A, et al. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate[J]. *Soil Research*, 2000, 38:1005—1016.
- [40] Nelissen V, Ruysschaert G, Manka'Abusi D, et al. Impact of a woody biochar on properties of a sandy loam soil and spring barley during a two-year field experiment[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 62: 65—78.

Rapid fertilization effect in soils after gully control and land reclamation in loess hilly and gully region of China

Fu Wei^{1,2}, Yong Chenxu^{1,3}, Ma Donghao⁴, Fan Jun^{1,2}, Zhang Jiabao^{4*}, Wei Hong'an⁵,

Feng Xiaolong⁵, Wei Runzhe⁵, Liu Xiaofei⁶, Wang Guangdong⁶, Tan Jun⁷

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. CPC Baishui County Committee Office, Weinan 715600, China; 4. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 5. Land Remediation Center of Shaanxi Province, Xi'an 710075, China; 6. Ditch-making Land Leading Group Office, Yan'an 716000, China; 7. Beijing Zhong Xiang Li Feng Technology Co., Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: Land degradation is being widely recognized as a serious challenge in arid and semiarid environments worldwide and limited rapid development of agriculture. Although land reclamation and the newly-construction cultivated land have increased the area and agricultural mechanization of cultivated land, while its land fertility is low and poor physical structure and hydraulic conditions, which cannot meet the good quality and high yields of crops. Therefore, quickly and effectively fertilizing soil plays a vital role in the rapid development of agriculture in the region. However, the traditional soil fertilization systems and the technology of construction high-quality tillage layer are slow and the results are unremarkable. So, this study was conducted to investigate the potential for using additional organic amendments (woody peat, biochar, straw, etc.) to improve soil organic matter and nutrients, soil fertility, and plant growth in the newly-construction cultivated land on the loess plateau, China. The newly-construction cultivated lands are dammed land and terrace which from gully control and land reclamation project on the loess hilly and gully area, which is located in Kangping Village (36°44'N, 109°35' E), Yan'an City, Shaanxi Province, China. The dam land has been selected study site. Field located experiments and laboratory analyses were combined. Three modes have been set in the experiment from 2016 to 2018: i) Recommended mode, ii) New mode, iii) Control mode. And the experiment was consisted of six treatments: woody peat (37.5 t/hm²) + bio-activator+ decomposed straw (A1), woody peat (37.5 t/hm²) + decomposed straw (A2); woody peat (15 t/hm²) + decomposed straw (B1), biochar (15 t/hm²) + decomposed straw (B2); decomposed straw (C1), control (C2). The results showed that: 1) Applying additional organic amendments (especially the woody peat) had great rapid effect on soil organic matter and readily oxidized carbon. Among them, when the wood peat was applied at 37.5 t/hm², it undergoes a maize growth period. Compared with control (C2), the soil organic matter and readily oxidizable carbon of the tillage layer (0~15 cm) increased by 1.33 and 3.15 times, respectively. However, the organic matter could be quickly decomposed and consumption in the first year and second year during the maize growing period, especially adding the application of biological excitation regulators. In the third year, organic matter could be improved and protected. 2) For three consecutive years from 2016 to 2018, woody peat combined with bio-activator could increase corn grain yield, with the highest yield of maize grain yield in 2016 and 2017, 12 169 kg/hm² and 14 396 kg/hm², respectively. And the maize grain yield was 15 983 kg/hm² in third year. Compared with the control for three consecutive years, the maize grain yield increased by 17.5%, 28.6% and 1.0%, respectively. 3) Biochar application could also increase the nutrient content of organic matter, total nitrogen, total potassium, and available phosphorus, but the content of readily oxidized carbon was significantly reduced, and the impacts on increasing grain yield of maize were lower than woody peat. In conclusion, additional woody peat can serve as a valuable amendment for the newly-constructed cultivated land in the loess plateau and other places of Northwest China by increasing soil organic and readily oxidizable carbon, improving soil fertility and promoting higher crop yields. Therefore, wood peat + bio-activator + decomposed straw + fertilizer is the best model for rapid construction of high-quality tillage layer in loess area.

Keywords: soils; aggregate; heavy metals; Loess Plateau; tillage layer soil; construction