

DOI: 10.11766/trxb202307140272

郝点, 周润惠, 高闻哲, 罗继鹏, 王远帆, 李廷强. “非粮化”土壤优质耕层快速重构材料的创制及其评价方法[J]. 土壤学报, 2024, 61(6): 1524–1536.

Hao Dian, Zhou Runhui, Gao Wenzhe, Luo Jipeng, Wang Yuanfan, Li Tingqiang. Creation and Evaluation Method of Plough Layer Reconstruction Materials for “Non-grain Production of Cultivated Land” [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(6): 1524–1536.

“非粮化”土壤优质耕层快速重构材料的创制及其评价方法*

郝 点, 周润惠, 高闻哲, 罗继鹏, 王远帆, 李廷强[†]

(浙江大学环境与资源学院, 污染环境修复与生态健康教育部重点实验室, 杭州 310058)

摘 要: 优质耕层快速构建是耕层剥离型“非粮化”土壤复耕前提, 但目前缺乏相应的重构材料。应用草本泥炭、苔藓泥炭、稻壳生物炭、木屑生物炭, 蔬菜玉米壳及微生物菌剂, 按不同配方创制耕层重构材料, 并构建相应的评价方法体系。研究表明, 苔藓泥炭与稻壳生物炭配置形成的耕层重构材料质地疏松, 蓄水保墒能力强; 有机质含量高, 范围介于 658.85~704.92 g·kg⁻¹ 之间, 同时有机碳难降解指数范围为 75.27%~84.71%, 具备较高的固碳增汇潜力; 有机碳、活性碳组分 I、总腐殖酸、全氮、全钾、毛管孔隙度、pH 可作为耕层重构材料的评价指标体系, 结合质量指数模型可以评价耕层重构材料综合质量, 依托该体系筛选出了最佳耕层重构材料配方, 即当苔藓泥炭 (M) 与稻壳生物炭 (R) 按质量比 1:1、2:1、3:1, 再按质量比 10:1 与蔬菜玉米壳 (C) ((M+R)₁₀C₁、(2M+R)₁₀C₁、(3M+R)₁₀C₁) 混合配置时可以形成优质耕层重构材料; 将优质耕层重构材料施入“非粮化”土壤可以显著降低土壤容重、增加土壤有机质及活性养分含量, 增强土壤固碳潜力, 提高小麦产量。本研究所建立的指标评价体系可以全面客观评价耕层重构材料的综合质量, 以苔藓泥炭、稻壳生物炭为原料创制的耕层重构材料在改善土壤质量、提高土壤固碳能力以及恢复作物生产方面均表现出较高的应用价值。

关键词: “非粮化”土壤; 耕层构建技术; 耕层重构材料; 材料质量指数; 综合评价体系

中图分类号: S156; S158 文献标志码: A

Creation and Evaluation Method of Plough Layer Reconstruction Materials for “Non-grain Production of Cultivated Land”

HAO Dian, ZHOU Runhui, GAO Wenzhe, LUO Jipeng, WANG Yuanfan, LI Tingqiang[†]

(Ministry of Education Key Laboratory of Environmental Remediation and Ecological Health, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: 【Objective】Economical crops like seedlings and flowers are frequently sold with soil transplantation practices, which directly leads to the soil plough layer becoming shallow or even stripped and eventually disappearing. This type of “non-grain production of cultivated land” with stripped plough layer can cause soil structure damage, nutrient imbalance, and fertility degradation, thus, it is a serious threat to the foundation of national food security and the healthy development of agriculture. The

* 浙江省重点研发计划项目 (2022C02022, 2022C02018) 和国家自然科学基金项目 (42177008) 资助。Supported by the Key Research and Development Program of Zhejiang Province (Nos. 2022C02022, 2022C02018); National Natural Science Foundation of China (No. 42177008).

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: litq@zju.edu.cn

作者简介: 郝 点 (1999—), 女, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤质量提升。E-mail: 2872620263@qq.com

收稿日期: 2023-07-14; 收到修改稿日期: 2023-09-06; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-10-09

main problem with the stripped “non-grain production of cultivated land” is the lack of a high-quality plough layer. Therefore, a solution promoting the reconstruction of the high-quality plough layer to meet the fundamental needs of crops is key to replanting these soils. However, there is currently no systematic research aimed at solving this problem. 【Method】A novel plough layer reconstruction material was developed using long-lasting organic materials such as herbal peat, moss peat, rice husk biochar, sawdust biochar, active organic material vegetable corn husk, and microbial inoculants. We employed cluster and principal component analyses to identify the minimum data set of quality evaluation indicators for plough layer reconstruction materials, which was then combined with the quality index model to create a comprehensive quality evaluation system. 【Result】The result showed that the plough layer reconstruction materials with moss peat and rice husk biochar as main raw materials had higher quality and could effectively improve the fertility and compact structure of plough layer damaged soils. This material was characterized by a loose texture, bulk density of $0.1347\text{--}0.1466\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, high capillary porosity (64.83%–67.82%), strong water-holding capacity, high organic matter content ($658.85\text{--}704.92\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), and high SOC recalcitrance index of 75.27%–84.71%, with a high potential for sequestration and sink enhancement. The minimum data set constructed with SOC, Labile C, HS, TN, TK, capillary porosity, and pH can be used as a quality evaluation system for plough layer reconstruction materials. Based on the above system, the optimal formulation of the plough layer reconstruction material was screened as follows: when moss peat (M) is mixed and configured with rice husk biochar (R) at mass ratios of 1 : 1, 2 : 1, 3 : 1, and then 10 : 1 with vegetable corn husk (C); $(\text{M}+\text{R})_{10}\text{C}_1$, $(2\text{M}+\text{R})_{10}\text{C}_1$, and $(3\text{M}+\text{R})_{10}\text{C}_1$, a high-quality ploughing layer reconstruction material can be formed. On “non-grain production of cultivated land,” the application of selected plough layer reconstruction materials can dramatically lower soil bulk density and raise soil organic matter content by 177.35% to 204.31% compared to the control. Additionally, the treatment also increased the soil's effective nutrient content and soil carbon sequestration potential. The plant height, weight, and number of spikes of wheat were higher than those in the control after the application of the plough layer reconstruction material. This resulted in the yield of wheat being 5.6 times higher than that of the control, which demonstrates the benefit of this type of material for crop growth. 【Conclusion】The indicator evaluation system established by this research can comprehensively and objectively evaluate the overall quality of plough layer reconstruction materials, and the materials created with moss peat and rice husk biochar as raw materials showed high application value in improving soil quality, increasing soil carbon sequestration capacity, and restoring crop production.

Key words: Non-grain production of cultivated land; Plough layer reconstruction technology; Plough layer reconstruction materials; Material quality index; Comprehensive evaluation system

近年来,随着土地流转、农业种植结构调整,我国耕地“非粮化”现象突出^[1]。据统计 2021 年我国耕地“非粮化”率约为 33.2%,其中,大量经济作物如苗木、花卉在售卖时常采用带土移苗的措施,直接造成土壤耕层变浅、甚至剥离消失^[2],这类耕层剥离型“非粮化”土壤会造成土壤结构破坏、养分失衡、肥力衰退^[3],严重威胁国家粮食安全根基和农业健康发展。优质耕层缺失是耕层剥离型“非粮化”土壤存在的主要问题,如何重构优质耕层以满足作物基础需要是此类土壤复耕的关键,但是,目前缺乏相关研究。因此“非粮化”土壤优质耕层的快速构建技术亟待研发,也是实现“藏粮于地、藏粮于技”的迫切需要。

传统的耕层构建技术主要包括表土剥离和定向培肥^[4]。前者指剥离适宜耕种的表层土壤覆盖于贫瘠土层以实现耕层重构,但价格昂贵,工程量大,不利于推广应用。后者指人工对贫瘠土壤进行培育

改造^[5],如增施有机肥、种植绿肥、秸秆还田、增施微生物肥、深耕改土等,但耗时长、见效慢^[6]。近年来应用耕层重构材料因其可以实现原位改良耕层,同时促进土壤快速熟化以缩短优质耕层重新构建时间而受到广泛关注。以往的耕层重建材料主要针对矿区、丘陵等立地条件差、基础养分贫瘠的新垦土壤^[3],常用的材料主要是天然有机物料及矿物材料,这些材料有利于提高土壤有机质含量,但是对土壤结构及微生态环境改善效果不明显,并不适用于耕层扰动或缺失的土壤。因此,亟须寻找能协同改善土壤物理、化学、生物学性质的新型耕层重建材料。

泥炭由于质地疏松、有机碳含量丰富在土壤培肥领域受到广泛关注,如以木本泥炭、腐熟秸秆复配的耕层重构材料,对土壤肥力提升、结构改善成效显著^[7],但木本泥炭资源紧缺,同时泥炭添加至土壤中容易引发激发效应,加剧 CO_2 排放。也有研究

表明泥炭腐殖质组分胡敏素远低于水稻土和黑土,这种差异势必阻碍耕层的培肥效果^[8],亟须寻找合适的替代原料。生物炭作为另一种富碳材料,有利于改善土壤质量,在实现农业废弃物资源化利用的同时还能增强土壤负激发效应,被视为增强固碳封存的重要环境策略^[9]。因此本研究应用生物炭部分替代泥炭创制一种新型复合耕层重建材料,旨在短期内耦合两类材料优点,协同实现优质耕层构建、农业废弃物资源化利用以及固碳减排效益提升的目标。

综上,本研究选取资源分布相对广泛兼具高有机碳含量的草本泥炭、苔藓泥炭,搭配生物炭材料,创制一种兼具固碳增汇功能的新型耕层重构材料,探究将优质耕层形成的冗长培育过程简化为一次性工程作业的实际可行性。同时,选取传统土壤质量评价指标体系中常见理化指标,建立针对耕层重构材料的综合质量评价体系,进一步完成优质材料的筛选工作,为

“非粮化”土壤耕层快速构建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与土壤

长效有机类材料:草本泥炭(Herbal peat, H),购自敦化吉祥泥炭开发有限公司;苔藓泥炭(Moss peat, M),购自俄罗斯远东泥炭有限公司;稻壳生物炭(Rice husk biochar, R)和木屑生物炭(Sawdust biochar, S),购自浙江长三角聚农业科技开发有限公司。活性有机类材料:蔬菜玉米壳(Vegetable corn husk, C),购自杭州市三墩街道农贸市场。微生物菌剂:枯草芽孢杆菌,有效活菌数含量 $\geq 1\,000$ 亿·g⁻¹(Bacillus, B),购自强兴生物科技工厂。供试材料基本理化性质见表1,结构见图1。

表 1 供试材料的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the raw materials

原料类型 Material type	全氮 TN/ (g·kg ⁻¹)	全磷 TP/ (g·kg ⁻¹)	全钾 TK/ (g·kg ⁻¹)	总腐殖酸 HS/ %	pH	电导率 EC/ (mS·cm ⁻¹)	灰分 Ash/ %	C/ %	H/ %	N/ %
草本泥炭 Herbal peat	13.03	0.99	4.98	38.34	5.26	17.66	20.63	36.92	4.95	2.13
苔藓泥炭 Moss peat	7.62	0.20	3.00	44.80	6.35	11.98	4.19	41.64	5.91	1.15
稻壳生物炭 Rice husk biochar	3.10	1.37	12.99	—	9.29	94.30	19.42	52.71	2.43	0.82
木屑生物炭 Sawdust biochar	1.76	0.35	4.25	—	7.50	10.22	2.54	74.16	4.17	0.47

原料类型 Material type	水溶性碳			酸溶性碳				
	有机碳	Water-soluble carbon		Acid-soluble carbon				
	SOC/ (g·kg ⁻¹)	可溶性有机碳	DOC/SOC/ %	活性碳组分 I	活性碳组分 II	有机碳活	顽固性碳组分	有机碳难降解
		DOC/ (g·kg ⁻¹)		Labile I C/ (g·kg ⁻¹)	Labile II C/ (g·kg ⁻¹)	性指数	Recalcitrant C/ (g·kg ⁻¹)	指数 RI/%
草本泥炭 Herbal peat	325.29	0.80	0.25	49.36	21.10	21.66	254.83	78.34
苔藓泥炭 Moss peat	375.04	0.64	0.17	53.23	19.93	19.51	301.87	80.49
稻壳生物炭 Rice husk biochar	450.11	1.01	0.22	3.95	3.47	1.65	442.69	98.35
木屑生物炭 Sawdust biochar	515.77	0.70	0.14	5.51	4.36	1.91	505.90	98.09

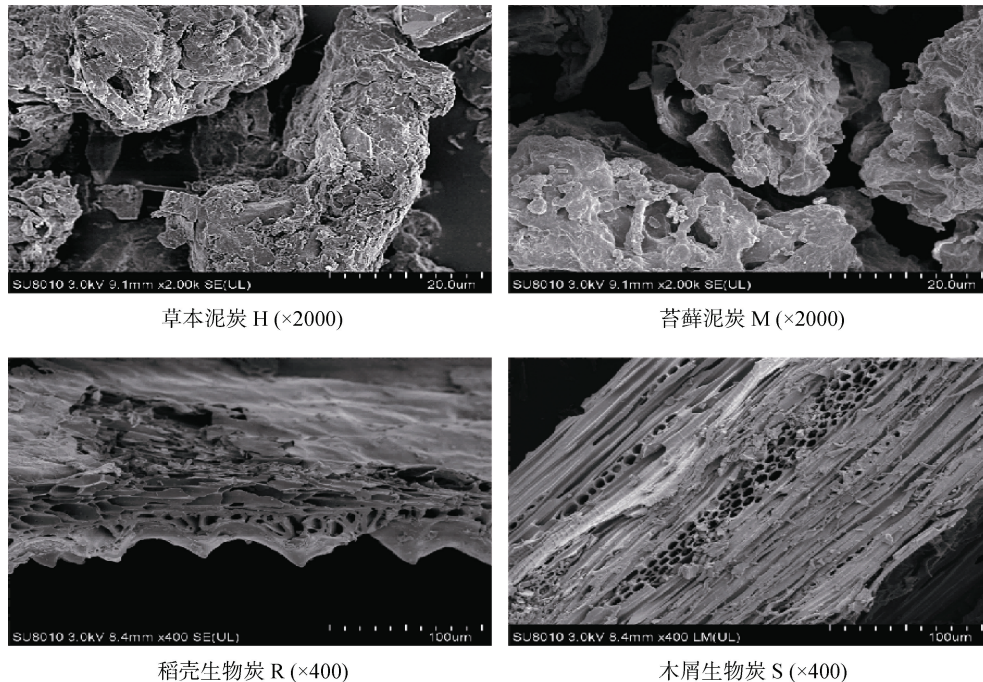


图 1 供试材料的扫描电镜图

Fig. 1 Scanning electron microscope image of the test material

试验所需土壤采自浙江省杭州市萧山良江苗木基地,供试土壤为苗木移除后的残余土壤(耕作层被破坏、剥离的土壤),土壤质地为壤质黏土($<0.002\text{ mm}$ 黏粒占 28.23%, $0.02\sim0.002\text{ mm}$ 粉粒占 33.27%, $>0.02\text{ mm}$ 砂粒占 38.51%)。化学性质: pH 为 4.57, 电导率 EC 为 $1.06\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 土壤有机碳 SOC 为 $6.75\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 TN 为 $0.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全磷 TP 为 $0.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮 AN 为 $17.49\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷 AP 为 $9.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 AK 为 $87.71\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 新型耕层重构材料的创制

为探究耕层重构材料中生物炭对泥炭的替代效应,将 2 种泥炭与 2 种生物炭按质量比 1:1、2:1、3:1 进行混合,再按质量比 10:1 比例与蔬菜玉米壳(C)混合。在此基础上将所选枯草芽孢杆菌菌剂溶于 1 000 倍水中,喷施到上述有机类材料中,同时控制水分保持在 60%左右,搅拌均匀,配置形成 12 种以天然有机材料为核心的新型耕层重构材料。具体:(1)草本泥炭(H)-稻壳生物炭(R)型: $(\text{H}+\text{R})_{10}\text{C}_1$ 、 $(2\text{H}+\text{R})_{10}\text{C}_1$ 、 $(3\text{H}+\text{R})_{10}\text{C}_1$, (2)草本泥炭(H)-木屑生物炭(S)型: $(\text{H}+\text{S})_{10}\text{C}_1$ 、 $(2\text{H}+\text{S})_{10}\text{C}_1$ 、 $(3\text{H}+\text{S})_{10}\text{C}_1$, (3)苔藓泥炭(M)-稻壳生物炭(R)型: $(\text{M}+\text{R})_{10}\text{C}_1$ 、 $(2\text{M}+\text{R})_{10}\text{C}_1$ 、

$(3\text{M}+\text{R})_{10}\text{C}_1$, (4)苔藓泥炭(M)-木屑生物炭(S)型: $(\text{M}+\text{S})_{10}\text{C}_1$ 、 $(2\text{M}+\text{S})_{10}\text{C}_1$ 、 $(3\text{M}+\text{S})_{10}\text{C}_1$ 。

1.3 新型耕层重构材料的筛选

1.3.1 建立评价指标体系 评价材料质量的理化指标众多,应用全部指标进行质量评价将增加工作难度。因此,有必要构建一个最小数据集(Minimum Data Set, MDS),用有限的指标快速准确地评价材料质量。聚类分析和主成分分析法是建立 MDS 过程中应用最广泛的数理统计方法,前者在无先验知识的前提下按数据亲疏程度自动分类,后者在数据信息损失较小的前提下进行降维划分,两种方法均能够克服传统指标筛选的主观性,客观准确地筛选土壤属性的变异性^[10]。

具体方法如下:基于 R 型欧氏距离的聚类分析(Cluster Analysis, CA)对全部质量评价指标进行分类。若同组内指标之间存在显著相关性,则根据土壤质量评估经验,选择更具代表性的指标进入 MDS;若相关性低且冗余时,使用主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)对指标进行重新分类,选择特征值 ≥ 1 的主成分,将每个主成分中旋转因子载荷绝对值 ≥ 0.5 的指标划分为同组,若某指标同时在多个主成分上载荷绝对值 ≥ 0.5 ,则将该指标划分至与其他指标相关性较低的那一组。选择每组中

Norm 值最高的指标直接进入 MDS, 再保留与最高 Norm 值相差 10%范围内的指标进行相关性分析, 若相关性较高则舍弃, 若相关性较低则选入 MDS。Norm 值作为某指标在主成分组成的多维空间的矢量常模长度, 值越大则表明该信息对主成分的综合荷载越高, 解释综合信息能力越强。Norm 值计算公式如下^[11]:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^k U_{ik} \lambda_k}$$

式中, N_{ik} 为第 i 个变量在特征值 ≥ 1 的前 k 个主成分上的综合荷载; U_{ik} 为第 i 个变量在第 k 个主成分上的荷载; λ_k 为第 k 个主成分的特征值。

1.3.2 建立材料质量评价体系 材料质量指数 (Material Quality Index, MQI) 能够通过指标定量的方法对耕层材料进行综合评价。MQI 的范围为 0~1, 值越大则表明质量越好。计算公式如下^[12]:

$$MQI = \sum_{i=1}^n F_i W_i$$

式中, n 为参评指标的数量; F_i 为第 i 个指标的隶属度; W_i 为第 i 个因子的权重。

其中, F_i 隶属度由指标所属的隶属度函数确定^[13], 划分为两种函数: (1) 递增型函数, 对土壤质量起到促进作用的指标。(2) 递减型函数, 对土壤有限制作用的指标, 在本研究中选择容重和灰分, 其余指标均为递增型函数。隶属度计算: 递增型: $F(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$; 递减型: $F(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。式中, X_i 为指标实测值, X_{\min} 为指标测定最小值, X_{\max} 为指标测定最大值; W_i 因子权重为各指标公因子方差与总公因子方差之比。

1.3.3 最小数据集的可靠性验证 本研究通过计算全体数据集 (Total Data Set, TDS) 指标和最小数据集两种指标体系下不同配方耕层重构材料的质量指数, 再通过 MQI-TDS 与 MQI-MDS 两者相关分析, 以及样品间聚类分析验证最小数据集指标体系对材料综合质量评价的可靠性, 从而建立耕层重构材料的质量评价体系。

1.4 耕层土壤重构的有效性验证

经筛选, 选择 MQI 较高的 3 种优质耕层重构材料 (M+R)₁₀C₁、(2M+R)₁₀C₁、(3M+R)₁₀C₁, 以

4% (w/w) 添加量混入耕层剥离型“非粮化”土壤, 同时以未添加材料的土壤作为 CK 开展盆栽验证试验 (2.5 kg·盆⁻¹), 各处理重复三次, 共计培养 56 d, 培养期间水份控制在 60%。培养结束后通过测定土壤物理结构、有机质及活性养分含量及固碳指标来验证耕层重构材料及其评价体系的有效性。

在此基础上, 本研究以 (3M+R)₁₀C₁ 材料为例, 探究此类材料对耕层剥离型“非粮化”土壤复耕的现实可行性。为了在构建优质耕层的同时最大程度提高经济效益, 对作物种植体系下对材料添加量进行调整, 以提高 1.5% 土壤有机质为目标, 设置 2% 添加量进行复耕试验。具体如下: 以 2% (w/w) 添加量混入耕层剥离型“非粮化”土壤, 同时以未添加材料的土壤作为 CK 开展粮食作物小麦盆栽种植试验 (3 kg·盆⁻¹), 各处理重复三次, 每盆 6 株小麦, 常规水管理。培养结束后测定土壤养分、固碳指标及小麦生长指标。

1.5 指标测定

基础理化指标具体操作参考《土壤农化分析》^[14]。供试原料 C、H、N 含量采用元素分析仪测定, 采用 SU8010 冷场发射扫描电子显微镜进行微观结构观察。pH 采用浸提电位法 (材料: 水=1:15) 测定, 电导率 (EC) 采用浸提电导法 (材料: 水=1:15) 测定。可溶性有机碳 (DOC) 采用水浸提-TOC 分析法测定。活性碳组分 (LabileI C/LabileII C) 和难降解碳组分 (Recalcitrant C) 采用 2.5 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 和 13 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 两步酸水解法^[15] 测定。微生物生物量碳 (MBC) 采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定; 微生物呼吸速率 (MR) 采用室内培养-气相色谱法测定; 微生物代谢熵计算方法: $qCO_2 (h^{-1}) = MR/MBC$ 。

1.6 数据处理

试验数据在 Microsoft Excel2010 中计算处理后通过 SPSS 23.0 进行指标标准化、聚类分析、主成分分析、相关分析, 数据差异均采用单因素方差分析, 并进行 LSD 多重比较, 不同字母代表不同处理间性质具有显著性差异 ($P < 0.05$)。图表在 Origin18.0 进行制作。

2 结 果

2.1 耕层重构材料物理指标统计

不同类型的耕层重构材料均具备容重低、孔隙

丰富的特点(表2)。本试验所创制的材料容重(Bulk density, BD)介于0.129 8~0.148 8 g·cm⁻³之间,毛管孔隙度(Capillary porosity, CP)介于47.02%~67.82%之间,以苔藓泥炭配置的(M+S)₁₀C₁容重显著低于其他材料,为0.129 8 g·cm⁻³,M+R类及M+S类材料的毛

管孔隙度均显著高于草本泥炭构成的H+R类、H+S类,即苔藓泥炭类材料在结构上具有更优质的通气透水性,有利于土壤耕层结构的塑造。此外,不同材料的pH为5.26~6.54、电导率为2.51~3.99 mS·cm⁻¹,均处于适宜范围,符合耕层重构材料基本要求。

表2 不同耕层重构材料的物理性质

Table 2 Physical properties of different plough layer reconstruction materials

处理 Treatment	容重 BD/ (g·cm ⁻³)	pH	电导率 EC/ (mS·cm ⁻¹)	灰分 Ash/ %	毛管孔隙度 CP/%
(H+R) ₁₀ C ₁	0.1488a	6.41b	3.99a	17.87bc	62.58d
(2H+R) ₁₀ C ₁	0.1426b	5.89e	3.03b	17.10cd	54.25f
(3H+R) ₁₀ C ₁	0.1334cd	5.72f	2.93b	16.38d	54.83f
(H+S) ₁₀ C ₁	0.1327cd	5.66f	3.10ab	13.56e	47.02h
(2H+S) ₁₀ C ₁	0.1344cd	5.39g	3.00b	17.75bc	50.51g
(3H+S) ₁₀ C ₁	0.1333cd	5.26h	3.22ab	18.96ab	48.42h
(M+R) ₁₀ C ₁	0.1466a	6.54a	2.78b	19.97a	67.82a
(2M+R) ₁₀ C ₁	0.1420b	6.39bc	2.72b	16.84cd	65.65b
(3M+R) ₁₀ C ₁	0.1347c	6.28cd	2.64b	14.76e	64.83bc
(M+S) ₁₀ C ₁	0.1298f	6.30bc	3.06b	8.21h	59.55e
(2M+S) ₁₀ C ₁	0.1309e	6.26d	2.62b	10.41g	60.45e
(3M+S) ₁₀ C ₁	0.1323de	6.20d	2.51b	11.70f	63.54cd

注: 同列不同字母表示不同处理间差异显著。下同。Note: Different letters in the same column indicate significant differences between different treatments. The same as below.

2.2 耕层重构材料化学指标统计

2.2.1 碳组分含量 耕层重构材料有机碳含量均处于较高水平,(M+S)₁₀C₁最高为408.9 g·kg⁻¹,(2H+R)₁₀C₁最低为319.3 g·kg⁻¹。以苔藓泥炭配置的材料有机碳平均含量高于草本泥炭类。以稻壳生物炭配置材料有机碳难降解指数为80.12%~88.78%,高于木屑生物炭类,稳定性更高,输入土壤时有利于提高SOC固存^[16]。不同材料均表现出LabileIC含量高于LabileIIC含量(图2)。

2.2.2 养分含量 耕层重构材料有机质含量为550.46~704.93 g·kg⁻¹,DOC含量为1.25~4.49 g·kg⁻¹,总腐殖酸含量为22.17%~45.2%,全氮含量为5.05~12.64 g·kg⁻¹,全磷含量为0.23~1.42 g·kg⁻¹,全钾含量为3.48~8.99 g·kg⁻¹(图3)。草本泥炭类有机质、DOC含量显著低于苔藓泥炭类,但全氮、全磷含量相对较高,其中(3H+R)₁₀C₁和(3H+S)₁₀C₁的全氮含量分别为12.64、

12.38 g·kg⁻¹, (H+R)₁₀C₁全磷含量为1.42 g·kg⁻¹。在苔藓泥炭配置的两类材料中,M+R类全量养分含

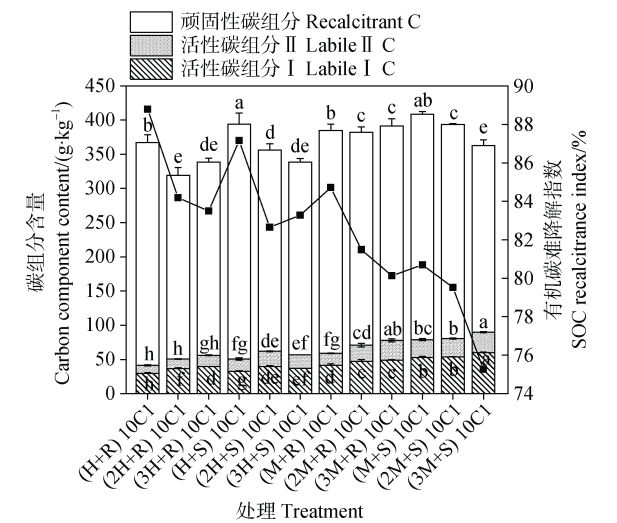


图2 不同耕层重构材料碳组分含量和有机碳难降解指数
Fig. 2 Carbon component content and recalcitrance index of different plough layer reconstruction materials

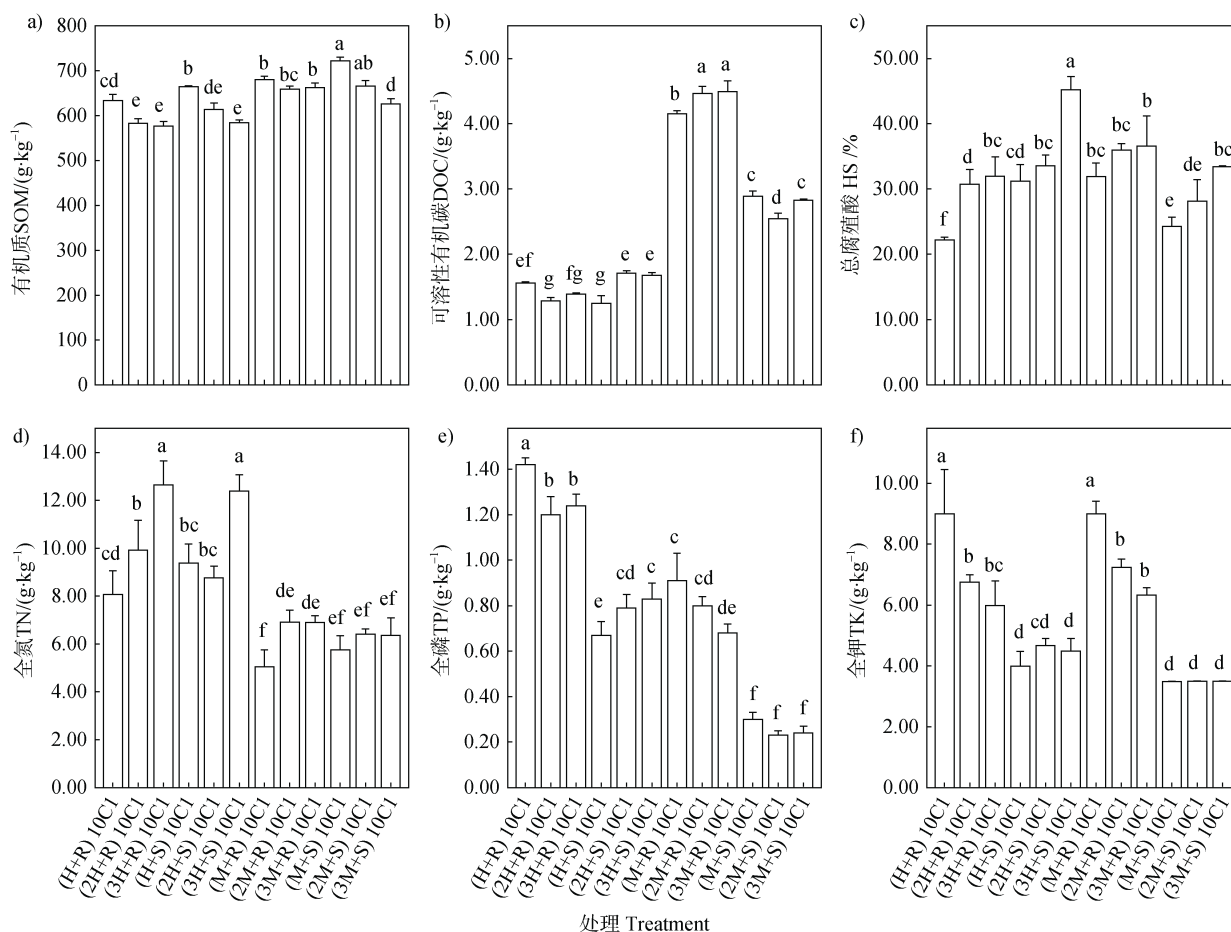


图3 不同耕层重构材料养分含量

Fig. 3 Nutrient content of different plough layer reconstruction materials

量总体高于 M+S 类材料, 有利于养分储存, 同时其 DOC 含量介于 4.15~4.49 g·kg⁻¹ 之间, 有利于活性养分的释放。

2.3 最小数据集的构建

2.3.1 聚类分析构建指标分类体系 基于 R 型聚类将 14 项理化指标划分为 4 类: (1) TK、容重、TP、灰分、EC, 代表养分及物理性质; (2) TN、HS, 代表养分; (3) Labile I C、Labile II C、DOC、pH、毛细孔隙度, 代表碳组分及物理性质; (4) SOC、Recalcitrant C, 代表有机碳组分。

通过对同组内相关性分析初步筛选进入 MDS 的指标。首先对 14 项指标进行正态分布检验, DOC、容重、EC 不符合正态分布, 选择 Spearman 系数进行相关分析。第一类中 EC 与其余指标均无显著相关性, 直接选入 MDS; TK 与容重高度相关 ($r=0.982$), 容重衡量结构特性, TK 主要受矿物种类影响, 二者无明显实际关联, 为避免造成误差同时选入 MDS; TK 与 TP、灰分均高度相关 ($r=0.800$ 、

$r=0.761$), 灰分可表征材料中矿质养分, 可用全量养分进行衡量, 此时选择相关性之和更高的 TK 作为养分含量代表; 第二类 TN、HS 无显著相关性, 同时选入 MDS; 第三类 SOC 与 Recalcitrant C 显著相关 ($r=0.853$), SOC 更能衡量土壤肥力特性, 将 SOC 选入 MDS; 第四类中 Labile I C、Labile II C 显著相关 ($r=0.853$), 考虑到 Labile I C 组分更能体现活性碳组分, 选择 Labile I C 进入 MDS; 毛细孔隙度分别与 DOC、pH 显著相关 ($r=0.790$ 、 $r=0.860$), 通气透水情况能直接影响水溶态养分, 但无法直观反映酸碱度, 故选择毛细孔隙度、pH 进入 MDS。

2.3.2 主成分分析筛选冗余指标 由于聚类结果的第一类和第三类备选指标中存在数据冗余, 故采用主成分分析进一步筛选代表性指标最终进入 MDS。分别对第一类、第三类指标进行 KMO 与 Bartlett's 检验, 结果表明 KMO 值分别为 0.624>0.5 (Sig=0.000)、KMO=0.559>0.5 (Sig=0.001), 均可以进行主成分分析 (表 3)。

表 3 指标载荷矩阵和 Norm 值

Table 3 Indicator loading matrix and Norm values

主成分			主成分			
第一组评价指标 Group 1 evaluation indicators	Principal components	Norm 值	第三组评价指标 Group 3 evaluation indicators	Principal components		Norm 值
	第一因子			第一因子	第二因子	
	PC1			PC1	PC2	
TK	0.919	1.743	毛管孔隙度 CP	0.882	-0.438	1.689
TP	0.917	1.741	DOC	0.891	-0.109	1.639
容重 BD	0.908	1.723	LabileI C	0.811	0.520	1.597
灰分 Ash	0.843	1.600	PH	0.800	-0.535	1.584
EC	0.615	1.167	LabileII C	0.704	0.696	1.506
主成分特征值 ^①	3.6		主成分特征值 ^①	3.364	1.246	
贡献率 ^②	71.99%		贡献率 ^②	67.273/%	24.914/%	
累计贡献率 ^③	71.99%		累计贡献率 ^③	67.273/%	92.190/%	

①Eigenvalue, ②Contribution rate, ③Cumulative contribution

第一类指标划分 1 个主成分，累计贡献率为 71.993%，选择 Norm 值最高指标 TK（1.743）90% 范围以内指标进一步筛选，容重、TP、灰分符合条件，再次进行相关分析表明 TK 与容重（ $r=0.941$ ）、TP（ $r=0.764$ ）、灰分（ $r=0.783$ ）高度相关，故仅选择 Norm 值最高的 TK 进入 MDS。第三类指标提取到 2 个主成分，累积贡献率为 92.19%，DOC、毛管孔隙度在主成分 1 载荷值较高，pH、LabileI C、LabileII C 在两个主成分上载荷值均 ≥ 0.5 ，将三指标纳入相关系数和较小的主成分 2 中。主成分 1 中最高载荷毛管孔隙度 Norm 值为 1.689，DOC Norm 值符合其 90%内，相关性分析表明毛管孔隙度与 DOC（ $r=0.790$ ）高度相关，故仅选择毛管孔隙度进入 MDS。在主成分 2 中最高载荷指标 LabileI C，Norm 值为 1.597，剩余指标 pH、LabileII C 的 Norm 均值符合 90%范围，相关分析表明 LabileI C 与 pH 无相关关系（ $r=0.266$ ）、与 LabileII C 高度相关（ $r=0.853$ ），故选择 LabileI C、pH 进入 MDS。

综合以上聚类分析、主成分分析结果，最终从 14 个质量评价指标中选出 SOC、LabileIC、HS、TN、TK、毛管孔隙度、pH 共 7 个指标，作为评价耕层重构材料质量的 MDS。

2.4 材料质量综合评价

2.4.1 材料质量指数计算 提取全体数据集和最

小数据集的指标公因子方差，各指标公因子方差占公因子方差和的比例视为权重值（图 4），利用隶属函数计算各指标隶属度，根据各指标隶属度及权重值计算材料质量指数（表 4）。

2.4.2 最小数据集的适用性验证 以 MQI-TDS 为基准进行 MQI-MDS 精度检验。MQI-TDS 范围为 0.322~0.628，MQI-MDS 范围为 0.288~0.678，差距较小。相关分析呈显著正相关 1， R^2 为 0.6611，说明建立的 MDS 能够较全面地反映 TDS 对耕层重构材料质量评价的信息。主成分分析及聚类分析结果表明（图 5）：耕层重构材料质量与原料种类密切相关，同时 12 种材料划分为三组，第一组（7、8、9、10、11、12 号处理）质量较高、第二组（2、3、4、5、6 处理）质量相对较低、第三组（1 号处理）质量中等。综合分析以苔藓泥炭、稻壳生物炭为原料配置的（M+R）₁₀C₁、（2M+R）₁₀C₁、（3M+R）₁₀C₁ 型耕层重构材料效益更好。

2.5 耕层土壤培育及复耕

优选的耕层重构材料均可以显著降低土壤容重（表 5），改善耕层剥离型“非粮化”土壤质地紧实的问题，有利于塑造疏松、多孔物理结构。耕层重构后土壤有机质含量与 CK 相比提高了 177.35%~204.31%，土壤活性养分含量均显著提升，即经过短期耕层重构“非粮化”土壤肥力得到显著改善。耕

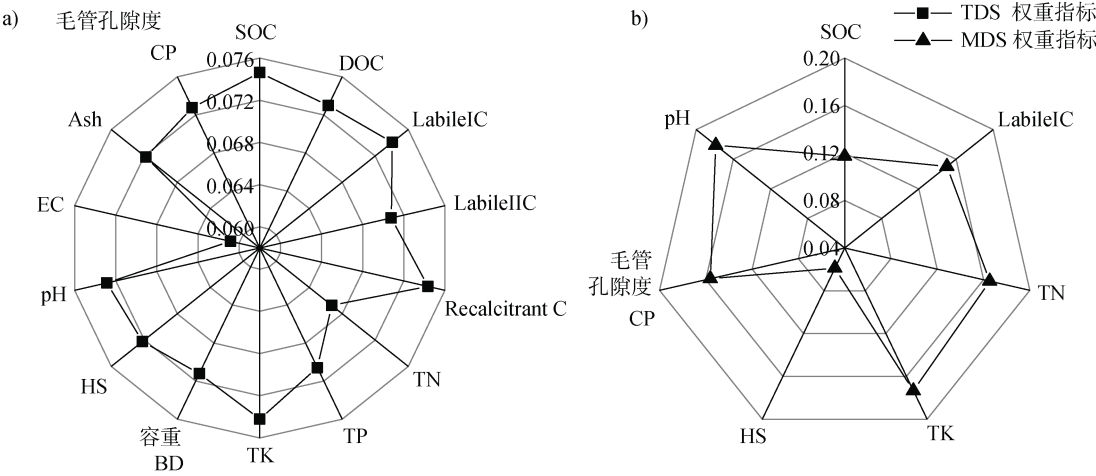


图 4 全体数据集、最小数据集体系下评价指标权重
Fig. 4 TDS and MDS evaluation indicator weights

表 4 全体数据集、最小数据集的材料质量指数 (MQI) 及综合排名

Table 4 MQI and overall ranking for TDS and MDS

排名 Rank	全体数据集 TDS			最小数据集 MDS		
	序号 No.	处理 Treatment	MQI	序号 No.	处理 Treatment	MQI
1	9	(3M+R) ₁₀ C ₁	0.628	7	(M+R) ₁₀ C ₁	0.678
2	8	(2M+R) ₁₀ C ₁	0.583	8	(2M+R) ₁₀ C ₁	0.660
3	10	(M+S) ₁₀ C ₁	0.571	9	(3M+R) ₁₀ C ₁	0.633
4	7	(M+R) ₁₀ C ₁	0.539	1	(H+R) ₁₀ C ₁	0.580
5	11	(2M+S) ₁₀ C ₁	0.518	12	(3M+S) ₁₀ C ₁	0.520
6	12	(3M+S) ₁₀ C ₁	0.492	11	(2M+S) ₁₀ C ₁	0.503
7	1	(H+R) ₁₀ C ₁	0.469	10	(M+S) ₁₀ C ₁	0.491
8	3	(3H+R) ₁₀ C ₁	0.418	3	(3H+R) ₁₀ C ₁	0.467
9	4	(H+S) ₁₀ C ₁	0.414	2	(2H+R) ₁₀ C ₁	0.405
10	6	(3H+S) ₁₀ C ₁	0.372	6	(3H+S) ₁₀ C ₁	0.322
11	5	(2H+S) ₁₀ C ₁	0.357	4	(H+S) ₁₀ C ₁	0.302
12	2	(2H+R) ₁₀ C ₁	0.322	5	(2H+S) ₁₀ C ₁	0.288

层重构材料明显促进了微生物生长繁殖，与 CK 相比各处理 MBC 含量均显著提高。此外，此类材料的固碳功能也在土壤耕层重构过程中加以证实，结果表明经耕层重构后土壤微生物呼吸和代谢熵均显著降低，这说明此类材料可以提高土壤碳利用率，增强土壤的固碳潜力^[17]。

应用耕层重构的“非粮化”土壤进行粮食作物种植后发现土壤有机质及养分含量与 CK 相比明显提升（表 6），同时土壤 MBC 含量增加，呼吸速率及 qCO₂ 下降，即在种植作物后，此类材料在改善土壤质量以及增强土壤固碳能力方面仍具有巨大优

势，与前期土壤培育结果相一致。此外，成熟期作物生长情况与 CK 相比表现出明显优势，小麦株高、重量、有效穗数、穗长等均高于 CK，小麦产量约为 CK 处理小麦产量的 5.6 倍。

3 讨 论

3.1 “非粮化”土壤优质耕层重构材料评价体系的建立

以往耕层重构材料质量评价方法主要分为两类：一类是单因子指标直接筛选，即对材料某项特

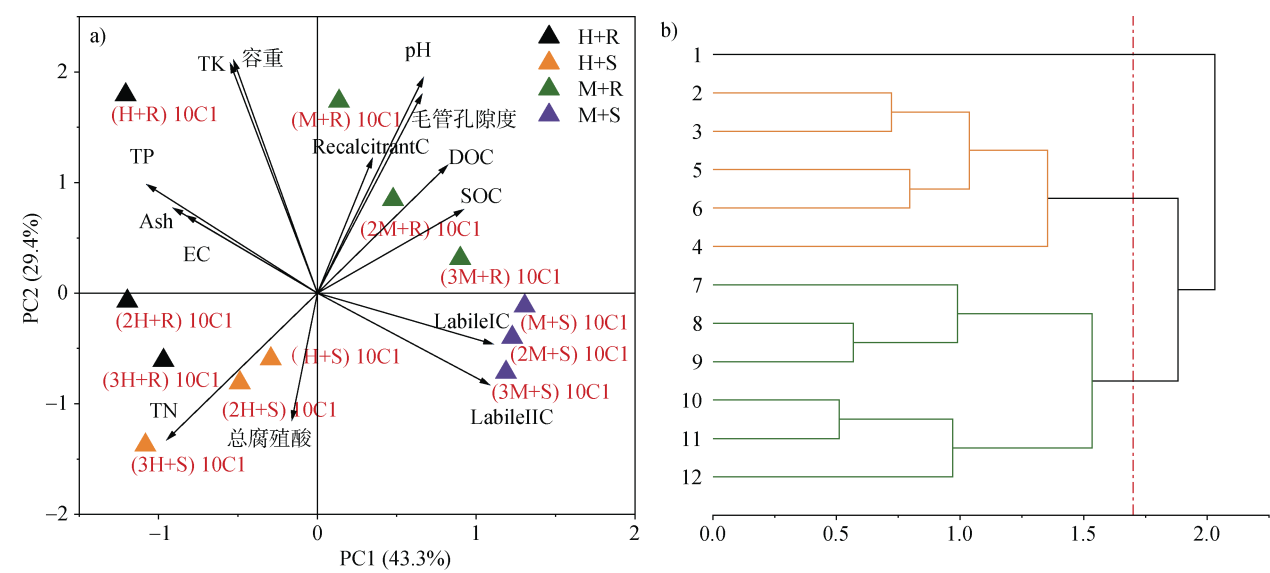


图 5 不同处理主成分分析及聚类分析结果示意图

Fig. 5 The results of principal component analysis and cluster analysis for different treatments

表 5 应用优选的耕层重构材料后土壤物理、化学、生物学指标

Table 5 Soil physical, chemical, and biological indicators after application of selected plough layer reconstruction materials								
处理 Treatment	容重 BD/ (g·cm ⁻³)	有机质 SOM/ (g·kg ⁻¹)	可溶性有机碳 DOC/ (mg·kg ⁻¹)	碱解氮 AN/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/ (mg·kg ⁻¹)	微生物生物量碳 MBC/ (mg·kg ⁻¹)	微生物呼吸速率 MR/ (mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)	代谢熵 qCO ₂ / (h ⁻¹)
(M+R) _{10C1}	1.237 6ab	32.81b	12.25b	24.57b	41.15a	142.311a	0.186ab	0.001 3ab
(2M+R) _{10C1}	1.187 9bc	34.30ab	10.51c	29.17a	29.94b	163.275a	0.194ab	0.001 2bc
(3M+R) _{10C1}	1.149 5c	36.00a	21.72a	28.63a	41.77a	170.376a	0.165b	0.001 0c
CK	1.288 4a	11.83c	6.01d	20.98c	21.47c	86.741b	0.219a	0.002 5a

表 6 土壤化学、生物学指标及小麦生长情况

Table 6 Soil chemical, biological indicators and crop growth								
处理 Treatment	有机质 SOM/ (g·kg ⁻¹)	全氮 TN/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 AN/ (mg·kg ⁻¹)	全磷 TP/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 AP/ (mg·kg ⁻¹)	微生物生物量碳 MBC/ (mg·kg ⁻¹)	微生物呼吸速率 MR/ (mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)	代谢熵 qCO ₂ / (h ⁻¹)
CK	10.57	0.71	62.99	0.34	11.32	81.378	0.347	0.004 3
(3M+R) _{10C1}	26.17	0.84	69.99	0.41	15.03	145.327	0.225	0.001 6

处理 Treatment	茎重 Stem weight/ (g·盆 ⁻¹)	穗重 Spike weight / (g·盆 ⁻¹)	根重 Root weight/ (g·盆 ⁻¹)	株高 Height/ cm	穗数 Tillers/ (个·株 ⁻¹)	穗长 Length/ cm	穗粒数 Grains per panicle/ (粒·穗 ⁻¹)	千粒重 1 000 Grains weigh/ (g ⁻¹)	产量 Yield/ (g·盆 ⁻¹)
CK	3.08	6.03	0.13	63.33	1	4.97	16.67	27.50	2.73
(3M+R) _{10C1}	10.11	29.93	0.36	73.50	2	7.83	37.00	34.27	15.23

征指标高低或经验判断直接进行选择,但此类方法只适用于具有典型障碍问题土壤,如有学者比较石灰与生物炭对酸性土壤整治效果时,由于石灰 pH 更高对土壤酸化改善效果更显著^[18],但未考虑两类材料对土壤养分含量的影响,这种单一评价方法无法全面衡量耕层重构材料质量。另一类是将材料施用土壤后,经过盆栽或田间土壤培育过程,通过对土壤质量进行综合比较,间接评价耕层重构材料优劣,是目前普遍应用的评价方法。例如,有研究通过聚类分析对 5 种有机物料重构新垦红壤耕层进行效果评价,结果表明经木本泥炭+腐熟秸秆+石灰石粉型材料处理后土壤质量水平等级最高,该材料效益最高^[7],但此类方法一般评价周期长、过程相对复杂。本研究将土壤综合质量评价法在耕层重构材料质量评价中加以运用,通过对有利于构建优质耕层的理化指标进行综合分析,略过土壤培育过程,直接比较不同种类材料优劣,极大提高筛选效率。质量指数法是近年来用于土壤综合质量评价的重要方法之一,其最大优势是能够充分考虑评价指标实测值、权重及指标间相互作用对评价结果的共同影响,并通过数值量化方式直接比较不同种类耕层重构材料优劣^[19],该方法已在多种生态系统中加以运用,例如,有学者应用该方法对丘陵区坡耕地耕层土壤^[11]和对矿区复垦土壤^[10]的质量评价结果均表现较高的准确性。

评价耕层重构材料质量的指标繁多,考虑到耕层剥离型“非粮化”土壤耕层重构材料的应用目的是提高土壤肥力、改善土壤结构。本研究选择了能快速、精准反应养分含量、蓄水保墒能力的 14 项物理、化学指标,但若采用全部指标进行评价会增加评价难度和工作量,且不一定准确,因此建立一套简单的指标评价体系尤为关键。本研究通过建立评价指标的 MDS 极大程度减少数据冗余,简化分析过程。经筛选,所构建的 MDS 中 SOC、pH、TN、AK、毛管孔隙度均是以往土壤质量评价 MDS 中应用频次较高的指标^[20],除此之外,HS、Labile I C 也纳入本研究 MDS,说明创制耕层重构材料时还要考虑材料的耐降解性及活性养分的供给问题。拟合验证结果表明 TDS 与 MDS 两类数据集材料质量指数呈显著正相关,与以往研究中采用最小数据集评价南方冷浸田^[21]及人工林地的土壤质量^[22]的研究结果中 MDS 与 TDS 评价结果呈正相关相一致。进一步说明本构建的评价体系可以较为全面、客观反映耕层

重构材料质量水平,为耕层重构材料快速遴选评价以及后续改良提供借鉴意义。

3.2 “非粮化”土壤优质耕层重构材料的创制与效果验证

优质耕层重构材料的创制是实现“非粮化”土壤复耕的前提。传统的耕层重构材料重点关注于如何提高耕层有机质含量,但对土壤结构、养分含量等改善效果一般。例如,腐殖酸复配脱硫石膏可以有效改善滨海土壤耕层盐碱问题,但对养分含量提升有限^[23];应用黏土矿物-腐殖酸复合材料能有效促进矿区复垦土壤耕层有机质积累,但对土壤结构优化不明显^[24]。而“非粮化”土壤因耕层缺失,普遍存在有机质及养分含量低,土壤结构紧实、微生物缺乏等问题^[25],这对耕层重构材料的创制提出了新要求,既要补充缺乏的养分及微生物,又要增强通气透水性、改善土壤结构。近年来为实现土壤养分与土体结构的协同改善,木本泥炭得到广泛应用^[7],但木本泥炭资源有限且活性养分丰富容易被微生物降解,难以长期稳定提高土壤质量。生物炭作为另一种富碳材料,在提高土壤有机碳及固碳能力上发挥重大作用^[9],然而生物炭制造成本较高会提高土壤改良的成本,因此本研究假设用泥炭和生物炭进行合理搭配可以同时利用两种材料的优势,在降低成本的同时增加土壤固碳增汇效果,本研究结果进一步证实了上述假设的可行性。同时,本研究遵循“相似增效”原则,按土壤有机质组成对耕层重构材料的创制比例进行优化。土壤有机质包括 80%~95%难分解腐殖质成分和 5%~20%易分解多糖成分^[26],本研究以难、易降解组分 10:1 比例进行创制。考虑到土壤微生物在健康耕层的形成过程中尤为关键,本研究辅以微生物菌剂补填耕层剥离型“非粮化”土壤初始土壤微生物缺乏状态。但微生物活性的提高会消耗大量土壤有机碳,需要提供活性碳组分来供给微生物利用^[27],从而避免所添加的难降解碳组分被消耗掉。因此,选择降解速率较快的蔬菜玉米壳来补充土壤活性碳组分,既有利于土壤微生物活性的提升又可以减少微生物对难降解碳组分的矿化,从而提升土壤固碳效果。此外,所选原料天然绿色,容易获取,也有利于保障耕层环境生态安全,在应用时直接机械施入土壤,操作简单,利于推广。

主成分分析结果表明耕层重构材料的综合质量

与原料种类密切相关。本研究所建立的材料评价体系表明以苔藓泥炭和稻壳生物炭为原料所创制的耕层重构材料综合质量更好,通过分析原料特性也可以证实上述观点。苔藓泥炭微观孔隙较草本泥炭丰富(图1),具有更优越的吸水保肥能力,同时苔藓泥炭长期生长于湿冷气候区,植物残体分解度低,稳定性更高^[15]。稻壳生物炭 H/C 为 0.046 低于木屑生物炭 0.056,芳香程度更高,固碳增汇潜力更大,与以往研究从木质素含量较高的原料提取的生物炭在输入土壤时总矿化度最低相一致^[16]。因此,本研究认为原料质地疏松、SOC 含量高且稳定性高时有利于创制优质耕层重构材料。同时将 MQI 高的材料施入土壤可以显著降低土壤容重,提高土壤有机质及养分含量,促进微生物活性,降低土壤呼吸速率及代谢熵,本研究所创制的新型耕层重构材料在改善土壤质量及提高土壤固碳能力等方面均具有较好的应用前景,其材料质量评价体系有效性也进一步得到证实。小麦产量在耕层重构后得到显著提升,表明此类耕层重构材料可以有效恢复土壤复耕生产,对于我国“非粮化”耕地快速复耕培肥的理论和实践具有参考意义。

4 结 论

以有机碳、活性碳组分 I、总腐殖酸、全氮、全钾、毛管孔隙度、pH 构建的最小数据集可以作为耕层重构材料的指标评价体系,依托该指标体系再结合质量指数模型可以建立耕层重构材料的综合质量评价方法。应用本研究的质量评价方法筛选出的最佳耕层重构材料配方为苔藓泥炭、稻壳生物炭按质量比 1:1、2:1、3:1,再按质量比 10:1 与蔬菜玉米壳混合的 $(M+R)_{10}C_1$ 、 $(2M+R)_{10}C_1$ 、 $(3M+R)_{10}C_1$ 。优质耕层重构材料具备质地疏松、蓄水保墒能力强、有机质含量高且兼具固碳功能的特点,可以显著提高耕层剥离型“非粮化”土壤肥力,促进作物生长。

参考文献 (References)

- [1] Chen F, Liu J N, Chang Y Y, et al. Spatial pattern differentiation of non-grain cultivated land and its driving factors in China[J]. China Land Science, 2021, 35 (9): 33—43. [陈浮, 刘俊娜, 常媛媛, 等. 中国耕地非粮化空间格局分异及驱动机制[J]. 中国土地科学, 2021, 35 (9): 33—43.]
- [2] Li T Q, Hao D. Current situation of cultivated land “non-grain” in China and research progress of its re-cultivation and fertilization technology[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34 (6): 1703—1712. [李廷强, 郝点. 我国耕地“非粮化”现状及其复耕培肥技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2023, 34 (6): 1703—1712.]
- [3] Ye L M, van Ranst E. Production scenarios and the effect of soil degradation on long-term food security in China[J]. Global Environmental Change, 2009, 19 (4): 464—481.
- [4] Hu Z Q. Principle and method of soil profile reconstruction for coal mine land reclamation[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22 (6): 617—622. [胡振琪. 煤矿山复垦土壤剖面重构的基本原理与方法[J]. 煤炭学报, 1997, 22 (6): 617—622.]
- [5] Mustafa A, Xu M G, Ali Shah S A, et al. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of Southern China[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 270: 110894.
- [6] Xin X L, Zhang J B, Zhu A N, et al. Effects of long-term (23 years) mineral fertilizer and compost application on physical properties of fluvo-aquic soil in the North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 156: 166—172.
- [7] Qu C C, Chen X M, Zhang J B, et al. Techniques and effects of quickly constructing high-quality tillage layers for newly-cultivated arable land 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. [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.]
- [8] Zheng Y Y, Zhang J B, Tan J, et al. Chemical composition and structure of humus relative to sources[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56 (2): 386—397. [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.]
- [9] Tan X F, Liu S B, Liu Y G, et al. Biochar as potential sustainable precursors for activated carbon production: Multiple applications in environmental protection and energy storage[J]. Bioresource Technology, 2017, 227: 359—372.
- [10] Li P F, Zhang X C, Hao M D, et al. Soil quality evaluation for reclamation of mining area on Loess Plateau based on minimum data set[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2019, 35 (16): 265—273.
- [11] Lou Y B, Shi D M, Jiang G Y, et al. Evaluation of soil quality in the cultivated-layer of sloping farmland in purple hilly area based on minimum data set[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17 (5): 75—85.

- [12] Sheidai Karkaj E, Sepehry A, Barani H, et al. Establishing a suitable soil quality index for semi-arid rangeland ecosystems in northwest of Iran[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2019, 19(3): 648—658.
- [13] Zhou M, Xiao Y, Li Y S, et al. Soil quality index evaluation model in responses to six-year fertilization practices in Mollisols[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2022, 68 (2): 180—194.
- [14] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [15] Chen J H, Chen D, Xu Q F, et al. Organic carbon quality, composition of main microbial groups, enzyme activities, and temperature sensitivity of soil respiration of an acid paddy soil treated with biochar[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55 (2): 185—197.
- [16] Kan Z R, Liu W X, Liu W S, et al. Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: A global synthesis and perspective[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28 (3): 693—710.
- [17] Clayton J, Lemanski K, Bonkowski M. Shifts in soil microbial stoichiometry and metabolic quotient provide evidence for a critical tipping point at 1% soil organic carbon in an agricultural post-mining chronosequence[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57 (3): 435—446.
- [18] Liao H H, Chen M Z, Zhu Y L, et al. Amendment effect of biochar and lime on acidic latosol[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2022, 42 (2): 31—37. [廖辉煌, 陈敏忠, 朱银玲, 等. 石灰及生物炭对酸性砖红壤的改良效果比较[J]. *热带农业科学*, 2022, 42 (2): 31—37.]
- [19] Zeraatpisheh M, Bakhshandeh E, Hosseini M, et al. Assessing the effects of deforestation and intensive agriculture on the soil quality through digital soil mapping[J]. *Geoderma*, 2020, 363: 114139.
- [20] Qiao Y F, Zhong X, Miao S J, et al. Evaluation indicators of soil quality in plough layer of Aeolian Sandy Land in Northeast China based on Minimum Data Set[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26 (4): 132—138.
- [21] Deng S H, Zeng L T, Guan Q, et al. Minimum dataset-based soil quality assessment of waterlogged paddy field in South China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (5): 1326—1333 [邓绍欢, 曾令涛, 关强, 等. 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价[J]. *土壤学报*, 2016, 53 (5): 1326—1333]
- [22] Yang Z Q, Qin F C, Yu X J, et al. Construction of artificial forest soil quality evaluation indices in the feldspathic sandstone region based on minimum data set[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50 (5): 1072—1078. [杨振奇, 秦富仓, 于晓杰, 等. 基于最小数据集的砷砂岩区人工林地土壤质量评价指标体系构建[J]. *土壤通报*, 2019, 50 (5): 1072—1078.]
- [23] Sun Z J. Study on the effect and mechanism of desulfurization gypsum and humic acid improving coastal saline-alkali soil[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013. [孙在金. 脱硫石膏与腐植酸改良滨海盐碱土的效应及机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.]
- [24] Lü X H, Zhang M K, Yan J L. Effects of clay mineral amendments on soil organic carbon accumulation in newly reclaimed sandy loam farmland[J]. *Journal of Agriculture*, 2021, 11 (12): 48—52. [吕晓茜, 章明奎, 严建立. 黏土矿物改良剂对新垦砂壤质耕地土壤有机碳积累的影响[J]. *农学学报*, 2021, 11(12): 48—52.]
- [25] Zhou C Y, Zheng M J, Zhang M K, et al. Study on the change of soil properties after long-term reconstruction of nursery in paddy field[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62 (6): 1071—1075. [周成云, 郑铭洁, 章明奎, 等. 水田长期改建苗圃后土壤性状的变化研究[J]. *浙江农业科学*, 2021, 62 (6): 1071—1075.]
- [26] Dou S. Soil organic matter[M]. Beijing: Science Press, 2010. [窦森. 土壤有机质[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [27] Ansari M A, Choudhury B U, Layek J, et al. Green manuring and crop residue management: Effect on soil organic carbon stock, aggregation, and system productivity in the foothills of Eastern Himalaya (India) [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 218: 105318.

(责任编辑: 檀满枝)