

长期秸秆深翻还田及养分管理对潮土有机碳矿化影响

聂浩亮，杨军芳，杨云马，黄少辉，张 静，王敬霞，杨慧敏，
杨文方，邢素丽，贾良良*

(河北省农林科学院农业资源环境研究所，石家庄 050051)

摘 要：为了明确耕作方式与养分管理对华北潮土土壤有机碳矿化的影响。基于连续 15 a (2007—2022 年) 耕作与养分管理模式长期定位试验开展研究，长期定位试验分为农民习惯耕作管理模式 (秸秆不还田+浅旋耕 RP-S, rotate plow without straw return) 和高产耕作管理模式 (秸秆还田+深翻耕 DP+S, deep plow with straw return) 2 个主处理，以及对对照施肥 (CK)、农民习惯施肥 (CON) 和优化施肥 (OPT) 3 个副处理，共计 6 个处理。于 2022 年 10 月，采集表层 (0~20 cm) 土壤样品，分析土壤有机碳及活性碳组分含量与土壤碳库管理指数，并采用室内培养法，测定土壤有机碳矿化速率，利用一级动力学方程拟合土壤有机碳潜在可矿化量和碳半周期，应用结构方程模型揭示长期不同耕作模式与养分管理措施下，土壤有机碳的周转规律。多年试验数据得出，在 RP-S 条件下，C/N(SOC and TN ratio) 总体呈逐渐下降趋势，在 DP+S 条件下，C/N 总体呈先降后增趋势。秸秆还田+深翻耕处理显著提高了土壤活性有机碳组分含量 ($P<0.05$)，且碳库管理指数 (CPMI, carbon pool management index) 提升显著 ($P<0.05$)。与农民习惯施肥相比，优化施肥可以显著提高土壤有机碳含量 12.35%。在 DP+S 条件下，优化施肥显著提高了土壤易氧化有机碳 (ROC, readily oxiedozable carbon) 与 CPMI。各处理土壤有机碳矿化速率均在 1 d 达到最大，而后 1~10 d 迅速下降，10 d 后缓慢下降直至稳定，有机碳矿化速率随时间呈对数函数型变化，不同处理土壤有机碳矿化速率均符合一级动力学模型。秸秆还田+深翻耕显著提高了累积矿化率 (潜在可矿化量与土壤有机碳的比值) 23.59%，而优化施肥可以显著降低累积矿化率 22.12%。土壤有机碳矿化累积量 (C_t) 与土壤有机碳 (SOC, soil organic carbon)、土壤活性碳组分和土壤碳库管理指数均呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)，与土壤潜在可矿化有机碳量 (C_0) 呈显著正相关关系 ($P<0.05$)，结构方程模型表明，耕作管理、微生物碳 (MBC, microbial biomass carbon) 和 ROC 是影响土壤有机碳周转能力和固碳能力的直接因素，耕作与施肥管理可通过对土壤有机碳及活性碳组分的影响，间接影响土壤有机碳周转能力，进而影响土壤固碳能力。长期秸秆深翻耕还田结合优化施肥有利于提高土壤固碳能力，促进农田资源的增碳及可持续利用。

关键词：秸秆；还田；潮土；长期施肥；耕作方式；土壤有机碳矿化

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406027

中图分类号: S155.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-18-0070-11

聂浩亮，杨军芳，杨云马，等. 长期秸秆深翻还田及养分管理对潮土有机碳矿化影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 70-80. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406027 <http://www.tcsae.org>

NIE Haoliang, YANG Junfang, YANG Yunma, et al. Effects of long-term deep tillage, straw returning and nutrient management on organic carbon mineralization of fluvo-aquic soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(18): 70-80. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406027 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

耕地土壤有机碳 (SOC, soil organic carbon) 是表征耕地土壤肥力的重要指标^[1-2]，对减缓全球气候变化有重要作用^[3]。耕地土壤碳库的输出主要通过土壤有机碳矿化过程，由微生物驱动的土壤有机碳矿化过程是土壤碳循环的重要一环^[4]。土壤活性有机碳在土壤碳库中占比较少，但却最易被微生物分解利用，能显著影响土壤有

机碳矿化过程^[5]，与土壤有机碳的迁移、固持和 CO₂ 的释放有密切联系^[6]，因此从土壤活性有机碳角度系统研究耕地土壤有机碳库的周转与固存规律对合理利用土壤资源、提高土壤肥力及农田生态环境的健康发展具有重要意义。

近年来，耕地土壤有机碳矿化作为国内外研究热点，相关报道已经较多，主要涉及土壤类型、施肥、秸秆还田以及耕作方式等方面^[7]。秸秆还田能够增加土壤有机碳含量方面已得到广泛认可，但秸秆还田在不同耕作和施肥管理措施下对土壤 CO₂ 释放方面的影响仍存在分歧。有研究表明^[8]，与秸秆不还田相比，秸秆覆盖还田促进了土壤有机碳的矿化过程，而秸秆深翻还田则可以有效抑制 CO₂ 的排放。王旭东等^[9]通过 meta 分析对中国秸秆还田条件下农田土壤有机碳含量变化进行解析，得出较长的还田年限、适当的耕作措施和适当的氮肥施用量

收稿日期: 2024-06-04 修订日期: 2024-08-18

基金项目: 国家十四五重点研发计划项目 (2021YFD19010005); 河北省农林科学院科技创新专项 (2022KJCXZX-ZHS-4)

作者简介: 聂浩亮，研究实习生，研究方向为土壤改良与地力提升。

Email: nie301064002@163.com

※通信作者: 贾良良，博士，研究员，研究方向为农田养分管理。

Email: jiall990@126.com

能够提升秸秆还田的固碳潜力。LIU 等^[10]通过对秸秆还田的固碳效果进行聚类分析认为，秸秆还田可以显著提高土壤有机碳及活性有机碳含量，但受耕作及还田方式的影响，对土壤碳库周转过程的结果不尽相同。耕作方式是影响土壤有机碳周转的重要人为因素之一，不同耕作深度及扰动强度对土壤碳库矿化速率的影响程度不同^[11]。已有研究表明^[12]，深翻耕能促进耕地土壤碳库的周转，也有研究认为，秸秆深翻还田为深层土壤提供碳源，提高了土壤碳的固持^[13]，PAUSTIAN 等^[14]研究表明，在 0~30 cm 耕层土壤每年土壤有机碳储量增加 0.4%，可抵消当年土壤有机碳的矿化量。施肥也是影响土壤有机碳矿化的重要因子之一，施肥会改变土壤养分状况尤其是土壤活性有机碳含量，进而影响土壤有机碳矿化过程，王朔林等^[15]基于 25 a 长期定位施肥试验数据，得出施肥可促进土壤有机碳积累，降低累积矿化率、提高固碳能力。也有研究表明^[16]，施氮能改善土壤有机碳官能团和化合物结构，提高其在土壤中的稳定性、增强固碳能力进而影响到土壤有机碳的矿化过程，而戴相林等^[17]的研究则认为，施氮量过高会降低土壤的固碳能力。此外，施肥对秸秆还田的固碳效果也有显著影响，秸秆还田会造成 C/N 升高，进而引起土壤微生物与作物的争氮效应^[18]，梁尧等^[13]的研究表明，秸秆还田配施氮肥能提高土壤团聚体对土壤有机碳的保护进而提高土壤碳储量，而薛旭杰等^[19]在有机质较高的设施菜地长期定位试验表明，秸秆还田与施肥对土壤有机碳无正向交互作用。

华北平原是中国小麦和玉米的重要主产区之一，潮土是黄淮海区域的代表性土壤类型之一，其分布广泛、增产潜力大且秸秆资源十分丰富^[20]，浅旋耕为该区域的主要耕作方式，长期浅旋耕会导致耕层浅薄、土壤肥力下降等问题，制约了该区域的土壤培肥改良与持续高产^[21]，秸秆深翻还田因其具有提高耕层厚度、改善土壤结构、促进土壤养分供应等优势，在此区域得到了越来越多的应用，秸秆还田为深层土壤提供了碳源，促进了土壤有机碳的固定，而深翻耕结合施肥又显著增强了土壤有机碳的矿化能力^[13]，在同时强化碳输入与输出的双重影响下，对耕地土壤有机碳的周转与固存的交互影响缺乏深入研究。为此，本研究以华北平原典型潮土（冬小麦-夏玉米轮作）为研究对象，依托“耕作与养分管理模式长

期定位试验”（2007—2022 年），采用室内恒温培养方法，明确秸秆还田和长期不同耕作与养分管理模式下土壤有机碳的矿化特征及主要影响因素，以期深入理解土壤有机碳转化与稳定机制，为潮土土壤培肥和固碳增产提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

耕作与养分管理模式长期定位试验位于河北省曲周县，太行山东麓海河平原的黑龙港流域。属暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候区，雨热同期，年均降水量 556.2 mm，年平均气温 13.1℃，种植体系为冬小麦-夏玉米轮作。供试土壤类型为壤质潮土，取自中国农业大学曲周实验站（36°51'N，115°01'E）。

1.2 试验设计

供试土壤取自耕作与养分管理模式长期定位试验，该试验设置于 2007 年，截止 2022 年已历时 15 a。试验供试作物为冬小麦/夏玉米轮作，采用裂区设计：主处理为：农民习惯耕作管理模式（秸秆不还田+浅旋耕 RP-S，rotate plow without straw return）和高产耕作管理模式（秸秆还田+深翻耕 DP+S，deep plow with straw return）。副处理为：3 种养分管理模式，分别是不施氮肥对照（CK）、农民习惯施肥（CON）和优化施肥（OPT），2007 年至 2010 年，农民习惯施肥根据当地农户调查获取的农户施肥量和农户施肥习惯来确定，包括肥料分配比例以及施肥方法等；优化施肥处理是根据作物目标产量确定氮肥总量，公式为

施氮量(kg/hm²) = (作物单位产量养分吸收量×
目标产量 - 土壤供肥量)/(肥料养分含量×肥料利用率)

(1)

采用“恒量监控法”来确定磷钾肥施用量，通过每年土壤养分测定对养分平衡进行监控，使土壤速效磷钾的保持在一定范围内。

供试肥料为尿素（N 46%）、过磷酸钙（含 P₂O₅ 16%）和硫酸钾（含 K₂O 50%），磷钾肥全部一次性基施，氮肥除基施外，还分别于玉米大喇叭期和小麦拔节期追施。每个处理 4 次重复，共 24 个小区，小区面积 10 m×5 m=50 m²。具体耕作管理与养分管理如表 1、表 2 所示。

表 1 不同主处理的耕作管理模式
Table 1 Tillage management in different main treatments

管理模式 Management	小麦品种 Wheat variety	玉米品种 Maize variety	玉米定植密度 Maize plantation density/(1 000 株·hm ⁻²)	耕作模式 Tillage method	耕作深度 Tillage depth/cm	秸秆处理 Straw treatment
秸秆不还田+浅旋耕（DP+S）	石麦 15	先玉 335	75	深翻耕	30	秸秆还田
秸秆还田+深翻耕（RP-S）	邯 6 172	郑单 958	60	浅旋耕	15	秸秆不还田

1.3 土壤样品采集

土壤样品于 2008、2015、2022 年 10 月玉米季收获后进行采集。每小区采用五点取样法，采集 0~20 cm 土壤，去除动植物残体和砂石等可见物，置于阴凉处，待其自然风干后，过 2 mm 筛保存，用于土壤有机质、全氮等理化性状的测定，2022 年采集土壤时，使用四分法充分混匀后分为两份，一份用于土壤有机碳、易氧化有

机碳等土壤基本理化性状的测定及室内恒温培养；另一份装入具有冰袋的保温箱内带回实验室，冷藏于 4℃ 冰箱中，并尽快用于土壤微生物量碳、可溶性有机碳的测定。

1.4 土壤样品测定

总土壤有机碳（TOC，total organic carbon）采用重铬酸钾氧化外加加热法测定、土壤全氮（TN，total nitrogen）采用半微量凯氏定氮法测定^[22]；土壤微生物量

碳 (MBC, microbial biomass carbon) 采用氯仿熏蒸浸提法测定^[11]、土壤可溶性有机碳 (DOC, dissolved organic carbon) 采用去离子水浸提—碳氮分析仪测定^[5]；土壤易氧化有机碳 (ROC, readily oxidizable carbon) 采用高锰酸钾氧化—紫外分光光度法^[18]；每测定 10 个样品，制备 1 个平行样，平行测定值不符合规定值范围的，将该批次重新测定，确保样品测定的准确性。

土壤有机碳矿化室内恒温培养^[5]：准确称取 40 g 平铺于 250 mL 的玻璃培养瓶底部，在恒温培养箱 (25 ℃) 中预培养 7 d，恢复微生物活性，沿瓶壁四周均匀加入土

壤最大持水量的 60% 的去离子水，称取培养瓶重量 (日后补水至该质量)，每个处理重复 4 次，在培养后的第 1、3、5、7、11、18、25、32、39、46 天采集气体，采样时间为上午 9:00—12:00，取样前将培养瓶通风，调节瓶内气体初始值一致，后用与培养瓶配套的带有三通阀的丁基胶塞密封，每个处理均于 0、2 h 分别采集气体 2 次，打入 10 mL 真空采气管内，使用配备 FID 检测器的气相色谱仪 (安捷伦 7890B, Agilent, Palo Alto, USA) 测定样品 CO₂ 浓度，并根据两次测定差值计算，土壤有机碳矿化速率。

表 2 不同副处理的养分管理模式

Table 2 The nutrient management in different secondary treatments

管理模式 Management	处理 Treatment	夏玉米 Summer maize				冬小麦 Winter wheat			
		N/(kg·hm ⁻²)	氮肥基追比 BTRN	P (P ₂ O ₅) / (kg·hm ⁻²)	K (K ₂ O) / (kg·hm ⁻²)	N/(kg·hm ⁻²)	氮肥基追比 BTRN	P (P ₂ O ₅) / (kg·hm ⁻²)	K (K ₂ O) / (kg·hm ⁻²)
DP+S	DCK	0	—	75	90	0	—	90	90
	DCON	250	9: 16	60	90	300	1:1	75	90
	DOPT	300	1: 2	75	90	225	1:2	90	90
RP-S	RCK	0	—	0	0	0	—	90	90
	RCON	250	9:16	0	0	300	1:1	120	90
	ROPT	180	1:2	0	0	180	1:2	90	90

注：DCK 为秸秆还田+深翻耕条件下不施肥；DCON 为秸秆还田+深翻耕条件下农民习惯施肥；DOPT 为秸秆还田+深翻耕条件下优化施肥；RCK 为秸秆不还田+浅旋耕条件下不施肥；RCON 为秸秆不还田+浅旋耕条件下农民习惯施肥；ROPT 为秸秆不还田+浅旋耕条件下优化施肥；下同。

Note: DCK, deep plow with straw return; DCON, deep plow with straw return; DOPT, deep plow with straw return; RCK, rotate plow without straw return; RCON, rotate plow without straw return; ROPT, rotate plow without straw return, BTRN, basal to topdressing ratio of Nitrogen fertilizer, the same below.

1.5 数据计算

碳库管理指数能够量化反映土壤有机碳库的质量和数量，包括碳库指数 (CPI, carbon pool index) 为土壤总有机碳含量与对照处理 (CK) 土壤有机碳含量的比值；稳态碳 (NAOC, no activity organic carbon) 为土壤总有机碳含量与土壤易氧化有机碳含量的差值；碳库活度 (CPA, carbon pool activity) 为土壤易氧化有机碳含量与稳态碳的比值；碳库活度指数 (CPAI, carbon pool activity index) 为碳库活度与对照处理 (CK) 的碳库活度的比值；碳库管理指数 (CPMI, carbon pool management index) 为碳库指数与碳库活度指数的乘积 (%)。

土壤有机碳矿化速率为培养时间内有机碳累积矿化量与培养时间的比值，计算式为

$$F = V \times dc/dt \times \rho \times 273 / (273 + T) / W \quad (2)$$

式中 F 为土壤有机碳矿化速率，mg/(kg·d)； V 为培养瓶上部空间体积，L； dc/dt 为单位时间内培养瓶中的气体浓度变化率，mg/(kg·d)； ρ 为标准大气压下的气体密度，g/L； T 为抽气过程中的瓶内温度，℃； W 为培养瓶内土样质量，g。

土壤有机碳矿化累积量是从培养开始至某一时间点土壤 CO₂ 总释放量，通过线性内插法估算，计算式为

$$C_t = \sum (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (T_{i+1} - T_i) \quad (3)$$

式中 C_t 为培养时间 t 内的土壤有机碳矿化累积量，mg/kg； F_{i+1} 为第 $i+1$ 次试验采集气体的土壤有机碳矿化速率，mg/(kg·d)； F_i 为第 i 次采集气体的土壤有机碳矿化速率，mg/(kg·d)； $T_{i+1}-T_i$ 为第 $i+1$ 次采集气体与第 i 次采集气体的间隔时间，d。

土壤有机碳的矿化采用一级动力学方程模拟^[11]：

$$C_t = C_0(1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

式中 C_0 为土壤潜在可矿化有机碳量，mg/kg； t 为培养时间，d； k 为生物活性有机碳库的周转速率常数，d⁻¹；半周转期 $T_{1/2} = \ln 2 / k$ 。

1.6 数据处理

本研究使用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理；采用 SPSS Statistics 27.0 进行方差分析及相关性分析，Duncan 进行多重比较；Origin Pro 2022 进行图表制作；SPSS Amos 24.0 构建结构方程模型 (SEM) 用以分析耕作方式、施肥管理与土壤有机碳活性组分对土壤有机碳周转与固碳能力的综合影响。

2 结果与分析

2.1 长期不同耕作及施肥管理条件下对土壤有机碳含量的影响

如表 3 所示，经过 15 a 的长期定位试验，与 2008 年相比，除不施肥处理外，各处理土壤都有不同程度增碳效果，土壤 SOC 含量总体呈前慢后快的上升趋势，在 RP-S 与 DP+S 条件下，前期 (2008—2015 年) 土壤 SOC 含量分别增长 1.24%、4.16%，后期 (2015—2022 年) 分别增长 6.57%、21.04%；与 2008 年相比，除不施肥处理外，不同处理土壤全氮含量均有所增加，除 ROPT 处理外，土壤全氮含量总体呈前快后慢的上升趋势，前期土壤全氮含量增长 22.00%，后期增长 6.93%，ROPT 处理趋势表现相反，具体为前期增加 2.89%、后期增加 15.37%。优化施肥与农民习惯施肥相比，土壤全氮含量增长表现为前期 CON 较 OPT 多增长 9.85%，后期 OPT 较 CON 多增长 8.06%；在土壤碳氮比方面，RP-S 条件下，C/N 总体呈逐渐下降趋势，前期 CON 较 OPT 下降

幅度高 8.34%，后期 OPT 较 CON 下降幅度高 9.39%。
DP+S 条件下，C/N 总体呈先降后增趋势，前期 CON 较

OPT 下降幅度高 3.93%，后期 OPT 较 CON 增长幅度高 9.90%。

表 3 不同耕作及养分管理对土壤有机碳、全氮含量的多年变化
Table 3 Multi-year changes of SOC and TN under tillage and nutrient management

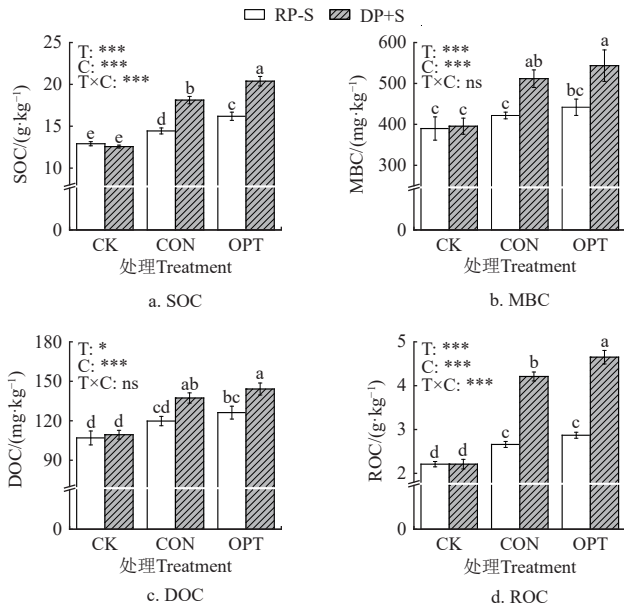
管理模式 Management	处理 Treatment	2008			2015			2022		
		SOC/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	C/N	SOC/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	C/N	SOC/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	C/N
RP-S	RCK	14.22bc	0.82c	17.35a	13.52c	0.88c	15.35a	12.91c	0.89c	14.51b
	RCON	13.50c	0.89bc	15.14c	13.85c	1.03b	13.44c	14.44 d	1.08b	13.38c
	ROPT	15.57a	1.03a	15.19c	15.56ab	1.05b	14.75b	16.19c	1.22a	13.31c
DP+S	DCK	12.54 d	0.77 d	16.18b	12.53 d	0.86c	14.62b	12.57e	0.85c	14.87b
	DCON	15.02ab	0.93b	16.08b	16.08a	1.20a	13.38c	18.11b	1.27a	14.31b
	DOPT	14.85ab	0.97ab	15.28c	15.74 ab	1.18a	13.31c	20.38a	1.31a	15.55a

注：SOC 为土壤有机碳含量；TN 为土壤全氮含量；不同小写字母表示不同处理差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Note: SOC, soil organic carbon; TN, total nitrogen; Different lowercase letters indicate significant differences in different treatments ($P<0.05$). The same as below.

2.2 土壤有机碳库及碳库管理指数差异

长期秸秆还田+深翻耕和优化施肥管理均有利于土壤有机碳 (SOC) 含量的提高。所有处理中，土壤有机碳含量以秸秆还田+深翻耕 (DP+S) 下优化施肥 (DOPT) 处理最高，为 20.38 g/kg。与不施肥 (CK) 相比，秸秆不还田+浅旋耕 (RP-S) 处理中，农民习惯施肥 (RCON) 的土壤有机碳含量显著提高 11.83%，优化施肥 (ROPT) 处理提高 25.39%；秸秆还田+深翻耕 (DP+S) 处理中，农民习惯施肥 (DCON) 土壤有机碳含量显著提高 44.13%、优化施肥 (DOPT) 提高 62.13%，与农民习惯施肥相比，优化施肥可以显著提高土壤有机碳含量 12.35%。 ($P<0.05$ ，图 1a)；



注：方差分析中，T 表示耕作管理，C 表示养分管理，T×C 表示耕作管理与养分管理的交互作用；***、* 和 ns 分别表示变量效应达到 0.001、0.05 显著水平和不显著。

Note: In the ANOVA, T: tillage management, C: nutrient management, T×C: The interaction between tillage and nutrient management; ***, * and ns indicate the significant effect of variable at 0.001 level, 0.05 level, and no significant effect, respectively.

图 1 不同耕作及养分管理对土壤有机碳含量及活性碳组分的影响

Fig.1 Effects of tillage and nutrient management on organic carbon content and activated carbon components

如 (图 1b) 所示，在 RP-S 条件下，不同施肥条件

下土壤微生物量碳 (MBC) 差异均不显著；而 DP+S 条件下，DOPT 与 DCON 施肥处理的土壤微生物量碳均显著高于不施肥 DCK 处理，但其两者间差异不显著，优化施肥略高于农民习惯施肥。DP+S 条件与 RP-S 条件相比，土壤微生物量碳显著提高 22.21%；在土壤可溶性有机碳 (DOC) 方面，不同养分管理条件下，优化施肥处理的土壤可溶性有机碳较农民习惯施肥处理提升 5.16%，但无显著性差异。DP+S 条件与 RP-S 条件相比，土壤可溶性有机碳显著提高 14.43%，差异显著 ($P<0.05$ ，图 1c)；

如 (图 1d) 所示，与不施肥相比，各处理土壤易氧化有机碳 (ROC) 含量均显著提升 ($P<0.05$)，在 RP-S 条件下提高约 20%~30%，优化施肥略高于农民习惯施肥，但差异不显著，在 DP+S 条件下提高约 90%~110%，DCON 与 DOPT 处理间差异显著，ROC 含量提高 10.45%。双因素方差分析表明，耕作管理和施肥管理均对 SOC、MBC、DOC、ROC 有显著影响 ($P<0.05$)，两者交互作用仅对 SOC、ROC 有显著影响 ($P<0.001$)。

方差分析表明 (表 4)，在 RP-S 条件下，与不施肥处理相比，RCON 处理仅有碳库管理指数 (CPMI) 显著增加了 23.00%，其他指标均无显著性差异，ROPT 处理对碳库指数 (CPI)、稳定态碳 (NROC)、CPMI 均有显著增加 ($P<0.05$)，增幅为 26.00%、24.46% 及 31.00%，而 ROPT 与 RCON 相比，仅在 CPI 与 NROC 上有显著影响 ($P<0.05$)，增幅为 12.50% 和 13.16%。在 DP+S 条件下，各处理土壤碳库管理指数均与不施肥处理有显著性差异 ($P<0.05$)，DOPT 较 DCON 相比，在 CPI、NROC、CPMI 指标上存在显著性差异 ($P<0.05$)，增幅分别为 12.06%、13.08% 和 10.19%；2 种不同耕作管理模式，除 CK 差异不显著外，长期秸秆还田+深翻耕模式可显著提高 CPI、NROC、CPA、CPAI、CPMI 指标 ($P<0.05$)，其增幅分别可达 25.40%、18.04%、35.57%、35.37%、70.38%。

2.3 土壤有机碳矿化特征及拟合参数

如图 2 所示，长期不同耕作方式及施肥管理下土壤有机碳矿化速率总体均随培养天数的增加而逐渐降低，且不施肥处理在整个培养期间均低于其他处理，具体表现为土壤有机碳矿化速率均在 1 d 达到最大，而后 1~10 d 迅速下降，10 d 后缓慢下降直至稳定，有机碳矿

化速率整体上随时间呈对数函数型变化，秸秆不还田+浅旋耕（RP-S）处理的条件下土壤有机碳矿化速率在 4.35~19.64 mg/(kg·d)，而秸秆还田+深翻耕（DP+S）条件下土壤有机碳矿化速率在 6.55~40.64 mg/(kg·d)，较 RP-S 模式约提升 60.97%。综合来看，优化施肥与传统施肥相比，可提高土壤有机碳矿化速率 28.55%。

表 4 不同耕作及养分管理对土壤碳库管理指数的影响

Table 4 Effects of cropping system of tillage and nutrient management on soil carbon pool management index						
管理模式 Management	处理 Treatment	碳库指数 Carbon pool index (CPI)	稳定态碳 No activity organic carbon (NROC)	碳库活性 Carbon pool activity (CPA)	碳库活性指数 Carbon pool activity index (CPAI)	碳库管理指数 Carbon pool management index (CPMI)
RP-S	RCK	1.00±0.00 de	10.71±0.23 cd	0.21±0.01 b	1.00±0.00 b	1.00±0.00 d
	RCON	1.12±0.02 d	11.78±0.39 c	0.23±0.01 b	1.10±0.04 b	1.23±0.06 c
	ROPT	1.26±0.02 c	13.33±0.42 b	0.22±0.00 b	1.05±0.04 b	1.31±0.03 c
DP+S	DCK	0.97±0.01 e	10.36±0.21 d	0.22±0.01 b	1.05±0.09 b	1.02±0.08 d
	DCON	1.41±0.06 b	13.91±0.52 b	0.31±0.02 a	1.48±0.09 a	2.06±0.05 b
	DOPT	1.58±0.07 a	15.73±0.42 a	0.30±0.00 a	1.43±0.05 a	2.27±0.11 a

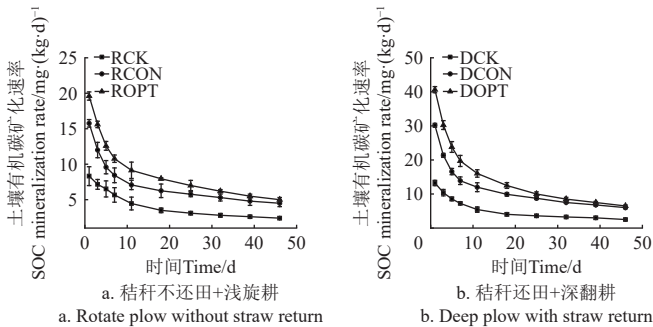


图 2 不同耕作及养分管理对土壤有机碳矿化速率的动态变化
Fig.2 Dynamic changes of soil organic carbon(SOC) mineralization rate under tillage and nutrient management

长期不同耕作及施肥管理下土壤有机碳累积矿化量总体均随培养天数的延长呈逐渐上升趋势（图 3），但土壤有机碳累积矿化强度逐渐放缓。培养 46 d 结束时，秸秆不还田+浅旋耕（RP-S）条件下累积矿化量达到 261.02~456.59 mg/kg，秸秆还田+深翻耕（DP+S）条件下累积矿化量达到 354.58~793.08 mg/kg，累积矿化量较 RP-S 模式提高约 36%~74%。从不同施肥处理来看，累积矿化量差异表现为：优化施肥>传统施肥>不施肥。优化施肥较传统施肥土壤有机碳累积矿化量约能提高 25%。

利用一级动力学参数方程，对土壤有机碳累积矿化量随培养时间的变化关系进行模拟： $C_t=C_0(1-e^{-kt})$ ，其决定系数 R^2 均在 0.99 以上，说明拟合效果较好（表 5）。根据拟合结果，秸秆不还田+浅旋耕（RP-S）

条件下土壤潜在可矿化量达 380.14~852.43 mg/kg，而秸秆还田+深翻耕（DP+S）条件下土壤的潜在可矿化量达 795.47~1 306.40 mg/kg，较 RP-S 模式土壤潜在可矿化量提高 70.53%。不同施肥管理条件下，优化施肥较传统施肥可以显著降低土壤潜在可矿化量 12.75%；在不同耕作模式下，DCON 与 RCON 相比，碳半周期有所下降，但不显著，而 DOPT 较 ROPT 显著缩短碳半周期 15.11%。与 RCK 相比，RCON 与 ROPT 均能提高碳半周期，表现为：RCON>ROPT>RCK，相反，与 DCK 相比，DCON 与 DOPT 均表现为缩短碳半周期，表现为：DCK>DCON>DOPT。

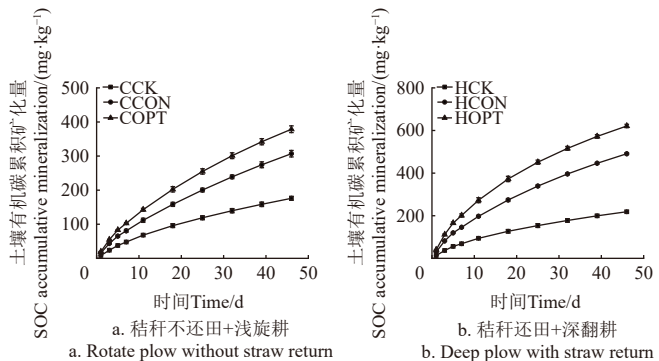


图 3 不同耕作及养分管理对土壤有机碳累积矿化量的动态变化
Fig.3 Dynamic changes of soil organic carbon(SOC) accumulative mineralization under tillage and nutrient management

表 5 长期不同耕作方式及养分管理下土壤有机碳矿化的动力学参数

Table 5 Dynamic parameters of soil organic carbon mineralization under long-term tillage method and fertilizer management				
处理 Treatment	潜在可矿化量 Potential mineralizable C_0 /(mg·kg ⁻¹)	周转常数 Constant of turnover rate k /d ⁻¹	决定系数 Determination coefficient R^2	碳半周期 Half turnover period of SOC pool $T_{1/2}$ /d
RCK	380.14±14.72 e	0.020±0.000 b	0.996 7**	29.48±0.81 d
RCON	852.43±53.54 c	0.014±0.003 cd	0.998 4**	47.97±2.60 b
ROPT	732.69±14.32 d	0.020±0.003 b	0.995 7**	35.01±0.28 c
DCK	795.47±11.29 cd	0.013±0.001 d	0.995 7**	55.53±1.71 a
DCON	1 306.40±32.59 a	0.016±0.000 c	0.994 8**	44.24±0.81 b
DOPT	1 156.89±85.47 b	0.023±0.001 a	0.990 9**	29.72±0.60 d

注：C₀ 为土壤潜在可矿化量；k 为土壤周转常数；T_{1/2} 为土壤碳半周期；下同。
Note: C₀, Potential mineralizable SOC content; k, Constant of turnover rate; T_{1/2}, Half turnover period of SOC pool; The same as below.

土壤有机碳累积矿化率是指培养时间内土壤有机碳潜在可矿化量占总有机碳比例，能够反映土壤固碳能力的强弱。土壤有机碳累积矿化率越高，其固碳能力越弱。如表 6 所示，本研究中，与不施肥处理相比，各处理土

壤有机碳累积矿化率有明显差异，在秸秆不还田+浅旋耕（RP-S）条件下，农民习惯施肥（RCON）的土壤有机碳累积矿化率显著提高 100.68%，优化施肥（ROPT）处理提高 54.08%；在秸秆还田+深翻耕（DP+S）条件下，

农民习惯施肥（DCON）土壤有机碳累积矿化率显著提高 13.90%，而优化施肥（DOPT）降低了 10.27%。DP+S 条件与 RP-S 条件相比，土壤有机碳累积矿化率显著提高约 23.59%。结果表明，与农民习惯施肥相比，优化施肥可以显著降低土壤有机碳累积矿化率 22.12%，可以提高土壤固碳能力，而秸秆还田+深翻耕与秸秆不还田+浅旋耕模式相比，提高了土壤有机碳累积矿化率，对土壤固碳能力有一定减弱效果。

表 6 培养 46 d 土壤有机碳累积矿化率
Table 6 Cumulative mineralization rate of SOC during 46 days' incubation

处理	秸秆不还田+浅旋耕	秸秆还田+深翻耕
Treatment	Rotate plow without straw return/ %	Deep plow with straw return/ %
CK	2.94±0.001 c	6.33±0.000 b
CON	5.90±0.002 a	7.21±0.001 a
OPT	4.53±0.001 b	5.68±0.002 c

2.4 土壤有机碳矿化与土壤活性碳组分间相关性及其结构方程模型拟合

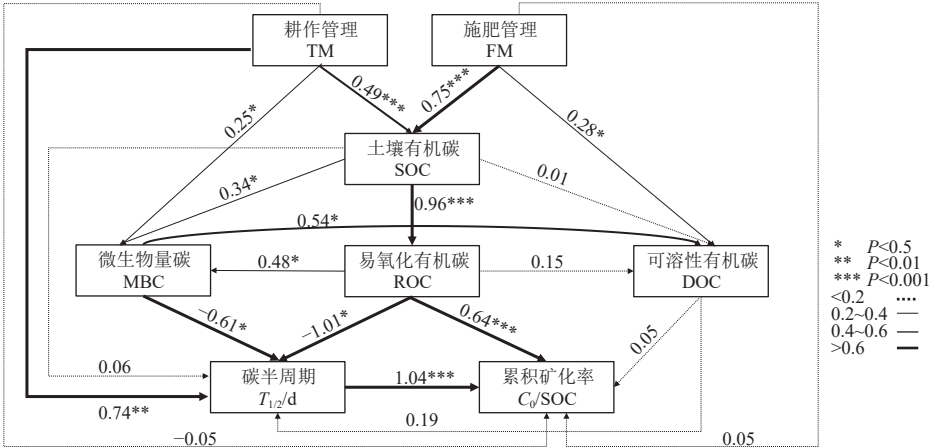
对土壤活性碳组分、土壤碳库管理指数与土壤有机碳矿化的动力学参数、有机碳累积矿化量进行相关分析，结果表明 (表 7)：土壤 C_0 与土壤活性碳组分、CPMI 和 C_0/SOC 均呈显著正相关关系 ($P<0.05$)、与 CPAI 呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)， C_1 与 SOC、土壤活性碳组分和土壤碳库管理指数均呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)，与 C_0 呈显著正相关关系 ($P<0.05$)， k 值与 $T_{1/2}$ 间呈及显著负相关关系 ($P<0.01$)，与 C_0/SOC 值呈显著负相关关系 ($P<0.05$)，土壤 C_0/SOC 与 $T_{1/2}$ 间呈显著正相关关系 ($P<0.05$)。基于结构方程模型将相关指标间关系进行拟合，拟合结果：卡方值 (χ^2) =8.56，自由度 (Df) =8， χ^2 自由

度比值 (χ^2/Df) =1.07，拟合优度指数 (GFI) =0.90，比较拟合指数 (CFI) =0.997，增量拟合指数 (IFI) =0.997，近似误差均方根 (RMSEA) =0.064，适配合理 (图 4)。模型拟合结果显示：耕作管理、SOC 与土壤活性碳组分对土壤碳半周期有直接作用，其中耕作管理起显著正效应 ($P<0.01$)，SOC 与 DOC 起正向作用但不显著，而 MBC 与 ROC 起显著负向作用 ($P<0.5$)；土壤易氧化碳和土壤碳半周期是显著影响土壤累积矿化率的主要因素 ($P<0.001$)。耕作管理对土壤累积矿化率的直接负向影响较小，但显著增加了 SOC ($P<0.001$)、MBC ($P<0.5$)。施肥管理对土壤累积矿化率有较小的正向效应但不显著，对 SOC ($P<0.001$)、DOC ($P<0.5$) 有显著的正向效应。此外，施肥管理与 DOC 对土壤累积矿化率有正向效应，耕作管理对土壤累积矿化率有负向效应但均不显著。施肥管理及耕作管理也可通过 SOC 及土壤活性碳组分间接影响土壤碳半周期和累积矿化率。

表 7 土壤有机碳矿化参数与土壤活性碳含量间相关性分析
Table 7 Correlation analysis of soil organic carbon mineralization parameters and labile carbon contents

指标 Index	C_0	k	$T_{1/2}$	C_1	C_0/SOC
SOC	0.785	0.580	-0.428	0.967**	0.370
MBC	0.857*	0.485	-0.328	0.993**	0.479
DOC	0.852*	0.461	-0.307	0.977**	0.482
ROC	0.859*	0.472	-0.326	0.989**	0.482
CPI	0.785	0.579	-0.429	0.966**	0.370
CPAI	0.920**	0.252	-0.126	0.948**	0.632
CPMI	0.867*	0.454	-0.307	0.988**	0.498
C_0	1	-0.032	0.198	0.905*	0.860*
k	-0.032	1	-0.956**	0.394	-0.718*
$T_{1/2}$	0.198	-0.956**	1	-0.218	0.870*

注：*和**分别代表 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著。
Note: * and ** represent significances at the $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.



注：TM 为耕作管理；FM 为施肥管理；图中箭头上的数字为标准化路径系数。
Note: TM, tillage management; FM, fertilizer management; The numbers on the arrows are significant standardized path coefficients.

图 4 土壤有机碳周转与固碳能力结构方程模型

Fig.4 Structural equation model of soil organic carbon decomposition and sequestration potential

3 讨论

3.1 不同耕作方式及施肥管理对土壤活性碳组分及碳库指数的影响

土壤活性有机碳组分包括 MBC、ROC、DOC，是土壤碳库中最活跃的部分，也是土壤微生物可以直接利用的重要碳源之一，受外界环境条件的影响其数值变化

明显，在土壤碳循环及养分循环中起着至关重要的作用 [23]。研究发现，除不施肥处理外，长期秸秆还田+深翻耕的耕作方式显著提高了土壤有机碳及活性碳组分含量，这与何家帅等在同区域进行的研究结果一致 [24]。方差分析也表明土壤有机碳库及活性碳组分受到耕作与秸秆还田的强烈影响。秸秆还田可以为土壤微生物提供碳

源, 促进土壤微生物量碳的提高^[23], 而耕作也会改变土壤孔隙度、土壤湿度等土壤环境条件, 对微生物数量及群落结构有显著影响^[25], 同时, 耕作也降低了土壤紧实度, 并增加了土壤的通透性, 能使土壤可溶性有机碳含量明显提高^[11]。本研究发现, 与不施肥相比, 施肥可以提高土壤有机碳及其活性组分含量, 根据作物目标产量优化施肥效果更加明显, 这是由于施肥为作物提供充足养分, 促进植物地上部生物量的增加和根系生长, 植物残体的增加为土壤提供碳源而根系分泌物可以与土壤矿物颗粒形成有机胶体, 进而提高土壤有机碳与活性碳含量^[26]。此外, 有研究表明, 优化施肥可以减弱肥料对土壤的负面效应, 有利于土壤酸碱度的平衡, 提高了土壤活性碳含量^[27]。与农民习惯施肥相比, 本研究中优化施肥对 MBC、DOC 的影响均未达到显著水平, 这可能与其在土壤碳库中占比较小, 且活性和移动性较强有关。

碳库管理指数 (CPMI) 与土壤碳库指数 (CPI) 和碳库活度指数 (CPAI) 相互关联, 能灵敏反映土壤有机碳库的质量和数量, 为农田土壤增碳固碳提供量化依据^[28], 研究发现, 秸秆还田+深翻耕条件下的 CPMI 显著高于秸秆不还田+浅旋耕, 这是由于长期秸秆还田+深翻耕有效提高了 0~30 cm 土层土壤碳库含量, 促进团聚体的形成使土壤结构更加稳定, 进而提高 CPMI 指数。与不施肥相比, 优化施肥处理和农民习惯施肥处理均显著增加了土壤 CPMI 指数, 表明施肥可以改善土壤质量, 且在秸秆还田+深翻耕条件下, 优化施肥显著高于农民习惯施肥, 表明优化施肥管理可以进一步增加土壤碳库稳定性, 提高固碳能力, 这与刘强等的^[29] 研究结果一致。

3.2 不同耕作方式及施肥管理对土壤有机碳矿化的影响

土壤有机碳矿化指土壤微生物活动释放 CO_2 的过程, 是土壤生物学活性的总体体现。本研究不同处理矿化速率均在培养开始阶段达到峰值, 而后迅速下降, 10 d 后矿化速率下降幅度减缓并直至稳定, 其有机碳矿化速率呈对数函数变化, 这与很多相关研究结果类似^[14]。这是因为培养前期, 微生物优先分解土壤中易分解的活性有机碳, 养分充足且易于利用, 微生物数量与群落迅速增加, 但随培养进行, 土壤活性碳含量下降, 土壤微生物开始分解土壤中难分解的纤维素等复杂的大分子有机结合体, 土壤微生物代谢缓慢, 土壤矿化速率随之下降^[30]。本研究优化耕作管理涉及耕作方式、秸秆还田、作物品种及种植密度方面, 已有相关研究表明^[31], 新品种作物在产量更高的同时也在一定程度上降低了温室气体的排放, 虽然品种、密度等的差异一定程度上会影响试验的精度, 但综合优化管理措施反映的结果更切合实际。秸秆还田与耕作方式是耕作管理综合模式对土壤有机碳周转与固持的决定性因素, 是本文的讨论重点。

本研究以碳半周期 ($T_{1/2}/\text{d}$) 表征土壤周转能力, 碳半周期越低则土壤周转能力越强, 以累积矿化率 (C_0/SOC) 表征土壤固碳能力, 累积矿化率越低则土壤固碳能力越强^[32]。通过结构方程模型拟合发现, 土壤有机碳含量与土壤活性有机碳各组分关系紧密, 对 ROC 与

MBC 的影响最为显著^[33]。同时, ROC 与 MBC 对土壤周转能力也有显著的正向作用, 这是主要因为, ROC 与 MBC 在土壤活性有机碳组分中占比较高, 在矿化试验中, 其初始含量对土壤有机碳前期矿化速率有重要影响。基于路径分析得出秸秆还田+深翻耕的耕作措施对土壤有机碳周转的存在两方面影响: 一方面通过提高土壤有机碳及活性碳组分, 间接的促进土壤有机碳周转能力提升, 这主要是因为添加秸秆为土壤提供了碳源, 尤其是易分解的活性碳组分会快速被微生物分解转化^[34], 并引起正激发效应, 提高土壤有机碳矿化速率^[35]。深翻耕能改善土壤结构, 使土壤与外界接触更密切, 促进了土壤有机碳氧化降解, 提高了土壤活性碳在土壤碳库中的占比, 加速了土壤的矿化进程^[36]; 另一方面, 秸秆还田+深翻耕又对土壤有机碳周转能力有直接抑制作用, 有利于土壤固碳能力的提升, 深翻耕后秸秆会与土壤充分接触, 能加快秸秆能腐解过程, 促进土壤有机碳的累积并增强土壤固碳能力^[13, 37], 此外添加秸秆对土壤团聚体构成也有明显的改善作用^[38], 而土壤团聚体的占比提高能有效促进土壤结构的稳定, 进而降低土壤矿化度^[39]。也有研究认为, 长期深翻耕也会打破犁底层, 有利于作物根系向深处延伸, 深层根茬量的提高有利于土壤有机碳的固持^[40]。本研究中, 从土壤 SOC 含量变化结果来看, 长期秸秆还田+深翻耕处理对土壤碳周转能力的直接抑制作用, 已完全抵消其因活性碳库增加对土壤周转能力的间接促进作用, 有利于土壤有机碳的累积。本研究选用 0~20 cm 土壤厚度, 可能存在对深翻耕处理固碳能力的低估, 今后应加强对深层土壤固碳能力的研究。

施肥对土壤有机碳与活性碳各组分含量有明显正效应, 能够间接促进土壤周转能力, 其原因可能是一方面施肥提高了作物的生物量, 植物残体的增加不仅为微生物活动提供必要底物, 且会提高微生物群落丰度并产生激发效应, 加速新鲜有机质分解, 对土壤碳库中的惰性有机碳的分解也有一定的促进^[41]。也有研究表明, 施肥在提供养分及对木质素等难分解物质的腐解方面有积极的促进作用^[42], 且在低肥力土壤上更加显著。本研究发现, 优化施肥相比于农民习惯施肥, 降低了累积矿化率, 这是由于长期优化施肥处理减少了因过量施肥导致的土壤酸化, 建立了更合理的 C/N 值, 可以满足土壤微生物对氮源的需求, 使其群落数量维持在合理的范围^[18], 同时提高了秸秆腐解过程中的活性碳等组分, 降低了对原有土壤有机碳的分解, 提高土壤固碳能力^[43]。王光翔等^[44] 的研究结果也表明, 合理施氮量有利于土壤有机碳的累积, 施氮量过高会导致土壤固碳效率的减弱。

4 结 论

为明确长期秸秆深翻还田与优化施肥结合条件在华北平原潮土区土壤有机碳的转化与稳定机制, 促进该区域土壤培肥和固碳增产, 开展上述试验研究, 结论如下:

1) 与秸秆不还田+浅旋耕相比, 秸秆还田+深翻耕

显著提高了耕层(0~20 cm)土壤有机碳及活性碳含量及土壤碳库管理指数(CPMI),增加了土壤碳库的积累及稳定性,在优化施肥条件下效果更为明显,土壤活性碳组分中的MBC与ROC对土壤周转与固碳能力影响最为显著。

2) 长期秸秆还田+深翻耕处理对土壤周转能力的直接抑制作用,已完全抵消其因活性碳库增加对土壤周转能力的间接促进作用,对土壤固碳能力有显著的提升。施肥对土壤有机碳与活性碳各组分含量有明显正效应,能够间接促进土壤周转能力,而优化施肥与农民习惯施肥相比,可以显著降低土壤有机碳累积矿化率,有效提高土壤的固碳能力。

因此,秸秆深翻耕还田结合优化施肥有利于提高土壤固碳能力,促进土壤资源的增碳及可持续利用。

[参 考 文 献]

- [1] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] 袁红朝, 秦红灵, 刘守龙, 等. 固碳微生物分子生态学研究[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(14): 2951-2958.
YUAN Hongchao, QIN Hongling, LIU Shoulong, et al. Advances in research of molecular ecology of carbon fixation microorganism[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(14): 2951-2958. (in Chinese with English abstract)
- [3] 徐明岗, 张旭博, 孙楠, 等. 农田土壤固碳与增产协同效应研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1441-1449.
XU Minggang, ZHANG Xubo, SUN Nan, et al. Advance in research of synergistic effects of soil carbon sequestration on crop yields improvement in croplands[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1441-1449. (in Chinese with English abstract)
- [4] 吕真真, 刘秀梅, 仲金凤, 等. 长期施肥对红壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(15): 2636-2645.
LV Zhenzhen, LIU Xiumei, ZHONG Jinfeng, et al. Effects of long-term fertilization on mineralization of soil organic carbon in red paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(15): 2636-2645. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王永慧, 杨殿林, 红雨, 等. 不同地力玉米田土壤有机碳矿化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(3): 590-599.
WANG Yonghui, YANG Dianlin, HONG Yu, et al. Characteristics of soil organic carbon mineralization in the soil of maize fields with different soil fertility[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3): 590-599. (in Chinese with English abstract)
- [6] ZHAO S, LI K, ZHAO W, et al. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 216: 82-88.
- [7] 张雅蓉, 刘彦伶, 黄兴成, 等. 不同有机肥施用模式下黄壤稻田根际和非根际土壤有机碳的矿化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(3): 449-458.
ZHANG Yarong, LIU Yanling, HUANG Xingcheng, et al. Organic carbon mineralization characteristics in rhizosphere and bulk soil of rice under organic fertilization modes in yellow paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(3): 449-458. (in Chinese with English abstract)
- [8] 白银萍, 海江波, 杨刚, 等. 稻田土壤呼吸及酶活性对不同秸秆还田方式的响应[J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(1): 28-32.
BAI Yinping, HAI Jiangbo, YANG Gang, et al. Effect of the straw returning pattern on soil respiration and enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, 23(1): 28-32. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王旭东, 庄俊杰, 刘冰洋, 等. 秸秆还田条件下中国农田土壤有机碳含量变化及其影响因素的 Meta 分析[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(8): 12-24.
WANG Xudong, ZHUANG Junjie, LIU Bingyang, et al. Residue returning induced changes in soil organic carbon and the influential factors in China's croplands: a meta-analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(8): 12-24. (in Chinese with English abstract)
- [10] LIU C, LU M, CUI J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [11] 王永慧, 轩清霞, 王丽丽, 等. 不同耕作方式对土壤有机碳矿化及酶活性影响研究[J]. *土壤通报*, 2020, 51(4): 876-884.
WANG Yonghui, XUAN Qingxia, Wang Lili, et al. Soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities under different tillage methods[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(4): 876-884. (in Chinese with English abstract)
- [12] CUZMAN J, AL-KAISI M, PARKIN T. Greenhouse gas emissions dynamics as influenced by corn residue removal in continuous corn system[J]. *Soil Science Society of American*, 2015, 79(2): 612-625.
- [13] 梁尧, 蔡红光, 杨丽, 等. 玉米秸秆覆盖与深翻两种还田方式对黑土有机碳固持的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(1): 133-140.
LIANG Yao, CAI Hongguang, YANG Li, et al. Effects of maize stovers returning by mulching or deep tillage on soil organic carbon sequestration in Mollisol[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(1): 133-140. (in Chinese with English abstract)
- [14] PAUSTIAN K, LEHMANN J, OGLE S, et al. Climate-smart soils[J]. *Nature*, 2016, 532(7597): 49.
- [15] 王朔林, 杨艳菊, 王改兰, 等. 长期施肥对栗褐土有机碳矿化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1278-1285.
WANG Shuolin, YANG Yanju, WANG Gailan, et al. Effect of long-term fertilization on organic carbon mineralization of

- cinnamon soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(5): 1278-1285. (in Chinese with English abstract)
- [16] HU Q, LIU T, DING H. Application rates of nitrogen fertilizers change the pattern of soil organic carbon fractions in a rice-wheat rotation system in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022(338): 108081.
- [17] 戴相林, 刘雅辉, 孙建平, 等. 秸秆还田和氮肥减施对滨海盐渍土稻田温室气体排放及氮肥利用率的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2023, 29(4): 994-1005.
- DAI Xianglin, LIU Yahui, SUN Jianping, et al. Combined effects of straw return and reduced nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions and nitrogen use efficiency in a coastal saline paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2023, 29(4): 994-1005. (in Chinese with English abstract)
- [18] 郭戎博, 李国栋, 潘梦雨, 等. 秸秆还田与施氮对耕层土壤有机碳储量、组分和团聚体的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(20): 4035-4048.
- GUO Rongbo, LI Guodong, PAN Mengyu, et al. Effects of long-term straw return and nitrogen application rate on organic carbon storage, components and aggregates in cultivated layers[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(20): 4035-4048. (in Chinese with English abstract)
- [19] 薛旭杰, 康晓晗, 石小霞, 等. 长期施肥和秸秆还田对设施蔬菜土壤有机碳的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(增刊): 98-105.
- XUE Xujie, KANG Xiaohan, SHI Xiaoxia, et al. Effects of long-term fertilization and straw returning on soil organic carbon in plastic-shed vegetable production[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(增刊): 98-105. (in Chinese with English abstract)
- [20] 黄少辉, 杨军芳, 杨云马, 等. 长期不同施肥措施下华北潮土土壤有机碳的固存变化[J]. *华北农学报*, 2019, 34(S1): 168-175.
- HUANG Shaohui, YANG Junfang, YANG Yunma, et al. Soil organic carbon sequestration under long term fertilization practices in fluvo-aquic soil of north china plain[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(S1): 168-175. (in Chinese with English abstract)
- [21] 聂良鹏, 郭利伟, 牛海燕, 等. 轮耕对小麦-玉米两熟农田耕层构造及作物产量与品质的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(3): 468-478.
- NIE Leipeng, GUO Liwei, NIU Haiyan, et al. Effects of rotational tillage on tilth soil structure and crop yield and quality in maize-wheat cropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(3): 468-478. (in Chinese with English abstract)
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 25-28.
- [23] 包建平, 袁根生, 董方圆, 等. 生物质炭与秸秆施用对红壤有机碳组分和微生物活性的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(3): 721-729.
- BAO Jianping, YUAN Gensheng, DONG Fangyuan, et al. Effects of biochar application and straw returning on organic carbon fractionations and microbial activities in a red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(3): 721-729. (in Chinese with English abstract)
- [24] 何家帅, 李新美, 魏跃鹏, 等. 长期深耕秸秆还田配施生物炭对砂姜黑土团聚体及小麦-玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(7): 161-171.
- HE Jiashuai, LI Xinmei, WEI Yuepeng, et al. Effects of long-term deep tillage and straw return with biochar addition to lime concretion black soil on the aggregates and wheat-maize yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(7): 161-171. (in Chinese with English abstract)
- [25] KUNTZ M, BERNER A, GATTINGER A, et al. Influence of reduced tillage on earthworm and microbial communities under organic arable farming[J]. *Pedobiologia*, 2013, 56(4/6): 251-260.
- [26] ALI KUBAR K, HUANG L, W L J, et al. Long-term tillage and straw returning effects on organic C fractions and chemical composition of SOC in rice-rape cropping system[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2019, 65(1): 125-137.
- [27] LU X F, HOU E Q, GUO J Y, et al. Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(12): 2780-2792.
- [28] TROYER I D, AMERY F, MOORLEGHEM C V, et al. Tracing the source and fate of dissolved organic matter in soil after incorporation of a ^{13}C labelled residue: A batch incubation study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(3): 513-519.
- [29] 刘强, 梁鑫, 董佩丽, 等. 不同施肥措施对黄土丘陵区农田土壤有机碳组分和碳库管理指数的影响[J]. *土壤*, 2023, 55(2): 446-452.
- LIU Qiang, LIANG Xin, DONG Peili, et al. Effects of different fertilization methods on farmland soil active organic carbon and carbon pool management indicators in loess hilly area[J]. *Soils*, 2023, 55(2): 446-452. (in Chinese with English abstract)
- [30] 陈甜, 元方慧, 张琳梅, 等. 不同化学性质叶凋落物添加对土壤有机碳矿化及激发效应的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(10): 2602-2610.
- CHEN Tian, YUAN Fanghui, ZHANG Linmei, et al. Effects of addition of leaf litter with different chemical properties on soil organic carbon mineralization and priming effect[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(10): 2602-2610. (in Chinese with English abstract)
- [31] YING H, YIN Y L, ZHENG H F, et al. Newer and select maize, wheat, and rice varieties can help mitigate N footprint while producing more grain[J]. *Global Change Biology*, 2019,

- 25(12): 4273-4281.
- [32] 郭振, 王小利, 段建军, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 225-235.
- GUO Zhen, WANG Xiaoli, DUAN Jianjun, et al. Long-term fertilization and mineralization of soil organic carbon in paddy soil from yellow earth[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(1): 225-235. (in Chinese with English abstract)
- [33] 张媛, 郑朝霞, 赵志远, 等. 有机无机肥长期配施对果园土壤碳库及温室气体排放的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(10): 5823-5831.
- ZHANG Ai, ZHENG Zhaoxia, ZHAO Zhiyuan, et al. Effects of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on soil carbon pool and greenhouse gas emissions in orchards[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(10): 5823-5831. (in Chinese with English abstract)
- [34] LEMKE R L, VANDENBYGAART A J, CAMPBELL C A. Crop residue removal and fertilizer N: Effects on soil organic carbon in a long-term crop rotation experiment on a udic boroll[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(1/2): 42-51.
- [35] BLAGODATSKAYA E, KUZYAKOV Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 45(2): 115-131.
- [36] 田平, 姜英, 孙悦, 等. 不同还田方式对玉米秸秆腐解及土壤养分含量的影响[J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2019, 27(1): 100-108.
- TIAN Ping, JIANG Ying, SUN Yue, et al. Effect of straw return methods on maize straw decomposition and soil nutrients contents[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(1): 100-108. (in Chinese with English abstract)
- [37] 黄璐, 赵国慧, 李廷亮, 等. 秸秆还田对黄土旱塬麦田土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(13): 123-132.
- HUANG Lu, ZHAO Guohui, LI Tingliang, et al. Effects of straw returning on the organic carbon components of soil aggregates in wheat fields on the loess plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(13): 123-132. (in Chinese with English abstract)
- [38] 王碧胜, 于维水, 武雪萍, 等. 不同耕作措施下添加秸秆对土壤有机碳及其相关因素的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(6): 1176-1187.
- WANG Bisheng, YU Weishui, WU Xueping, et al. Effects of straw addition on soil organic carbon and related factors under different tillage practices[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(6): 1176-1187. (in Chinese with English abstract)
- [39] 王碧胜, 于维水, 武雪萍, 等. 添加玉米秸秆对旱作土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(9): 1553-1563.
- WANG Bisheng, YU Weishui, WU Xueping, et al. Effect of straw addition on the formation of aggregates and accumulation of organic carbon in dryland soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(9): 1553-1563. (in Chinese with English abstract)
- [40] 吴玉红, 郝兴顺, 田霄鸿, 等. 秸秆还田与化肥配施对汉中盆地稻麦轮作农田土壤固碳及经济效益的影响[J]. *作物学报*, 2020, 46(2): 259-268.
- WU Yuhong, HAO Xingshun, TIAN Xiaohong, et al. Effect of straw returning combined with NPK fertilization on soil carbon sequestration and economic benefits under rice-wheat rotation in Hanzhong basin[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(2): 259-268. (in Chinese with English abstract)
- [41] ZHOU S, LIN J J, WANG P, et al. Resistant soil organic carbon is more vulnerable to priming by root exudate fractions than relatively active soil organic carbon[J]. *Plant and Soil*, 2022, 488(29): 71-82.
- [42] 曾莉, 张鑫, 张水清, 等. 不同施氮量下潮土中小麦秸秆腐解特性及其养分释放和结构变化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(9): 1565-1577.
- ZENG Li, ZHANG Xin, ZHANG Shuiqing, et al. Characteristics of decomposition, nutrient release and structure change of wheat straw in a fluvo-aquic soil under different nitrogen application rates[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1565-1577. (in Chinese with English abstract)
- [43] 戚瑞敏, 赵秉强, 李娟, 等. 添加牛粪对长期不同施肥潮土有机碳矿化的影响及激发效应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(增刊 2): 118-127.
- QI Ruimin, ZHAO Bingqiang, LI Juan, et al. Effects of cattle manure addition on soil organic carbon mineralization and priming effects under long-term fertilization regimes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(Supp.2): 118-127. (in Chinese with English abstract)
- [44] 王光翔, 张黎明, 李晓迪, 等. 基于高精度土壤数据库的苏北旱地固碳速率和潜力研究[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(3): 422-431.
- WANG Guangxiang, ZHANG Liming, LI Xiaodi, et al. Study of soil organic carbon sequestration rate and potential of upland in northern jiangsu province based on high-resolution soil database[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(3): 422-431. (in Chinese with English abstract)

Effects of long-term deep tillage, straw returning and nutrient management on organic carbon mineralization of fluvo-aquic soil

NIE Haoliang, YANG Junfang, YANG Yunma, HUANG Shaohui, ZHANG Jing, WANG Jingxia, YANG Huimin, YANG Wenfang, XING Suli, JIA Liangliang^{*}

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Soil organic carbon (SOC) mineralization is closely related to the terrestrial ecosystem carbon cycle and global climate change. Reasonable tillage and nutrient management can be adopted to improve the carbon accumulation and sequestration potential in soil. It is urgent to explore the relationship between tillage-nutrient management and SOC stability in the process of soil biochemistry, within the context of carbon sequestration and emission reduction. Therefore, this study aims to clarify the effects of tillage and nutrient management on SOC mineralization in fluvo-aquic soil of North China. A 15-year long-term positioning experiment was carried out on the tillage and nutrient management (2007-2022). Two main treatments were set: rotate plow without straw return (RP-S), and deep plow with straw return (DP+S). Three secondary treatments were set: controlled fertilization (CK), Conventional fertilization (CON), and Optimized fertilization (OPT), with a total of six treatments. Soil samples were collected at 0-20 cm depth in October 2022. Some parameters were measured, including the contents of SOC and activated carbon components, as well as the carbon pool management index. SOC mineralization rate was determined by the incubation method. A first-order kinetic model was used to calculate the potential mineralization and turnover rates. The structural equation model was fitted to reveal the turnover and sequestration of SOC under different tillage and nutrient management. The experimental results show that the C/N (SOC and TN ratio) generally shared a decreasing trend under the condition of RP-S, while the C/N generally shared an increasing first and then decreased trend under the condition of DP+S. Compared with the RP-S, DP+S treatments increased the contents of activated carbon components in soil, and the carbon pool management index (CPMI) increased significantly. Compared with CON, OPT significantly increased the content of SOC, with incremental rates of 12.35%. OPT significantly increased the readily oxidizable carbon (ROC) and CPMI with the condition of DP+S. SOC mineralization rates were the highest in the 1 d and then decreased rapidly. After 10 d incubation, SOC mineralization rates decreased slowdown until it stabilized. The SOC mineralization rate was in agreement with the logarithmic function. Nutrient management enhanced the mineralization rates of SOC in the fluvo-aquic soils in the following order: OPT, CON, CK. SOC mineralization rates in all treatments were consistent with the first-order kinetic model. DP+S significantly increased the cumulative mineralization rate (value of C_0 /SOC) by 23.59% (C_0 is potential mineralizable organic carbon content in soil), while the OPT significantly reduced the value of C_0 /SOC by 22.12%. The accumulative mineralization of SOC (C_t is accumulation of soil organic carbon mineralization during cultivation time t) was significantly and positively correlated with the SOC, activated carbon components, and soil carbon pool management index ($P<0.01$), both of which were significantly and positively correlated with Potential mineralizable of SOC (C_0) in the fluvo-aquic soils ($P<0.05$). Tillage management, microbial biomass carbon (MBC), and ROC were the direct factors of SOC mineralization and sequestration potential in soil. Tillage and fertilization management dominated the SOC mineralization by the contents of SOC and activated carbon components, then impacting soil carbon sequestration potential. According to the SOC accumulation content, the direct positive impact of long-term deep plow with straw return treatment on soil carbon sequestration potential can be fully counteracted by the indirect negative effect of the increase in SOC and activated carbon components on soil carbon sequestration potential. In conclusion, Long-term DP+S with OPT significantly improved the stability of soil structure and the SOC sequestration potential. Optimal fertilization reduced the cumulative SOC mineralization rate of soil and then enhanced the SOC accumulation and sustainable utilization of farmland resources. The finding can also provide ideal farmland management to optimize the combination of tillage and fertilization in fluvo-aquic soil of North China.

Keywords: straw; returning to field; fluvo-aquic soil; long-term fertilization; tillage methods; SOC mineralization.