

## 专栏:农业固碳减排

【特约主持人】张志勇:中原科技创新领军人才,河南省特聘教授

【主持人按语】习近平总书记指出:“推进碳达峰碳中和是党中央经过深思熟虑作出的重大战略决策,是我们对国际社会的庄严承诺,也是推动经济结构转型升级、形成绿色低碳产业竞争优势,实现高质量发展的内在要求。”农业兼具碳源和碳汇双重属性,是实现碳达峰、碳中和的重要领域。土壤有机质是陆地生态系统最大的活性碳库,每年全球土壤呼吸所释放的二氧化碳相当于化石燃料燃烧排放量的10倍以上。我国目前农业耕地面积达1.28亿 $\text{hm}^2$ ,大多农田有机质含量不高,碳汇能力弱。而农艺措施的优化对提升土壤有机质含量、改善土壤碳库容具有显著效果,尤其在目前“双碳”背景下,农田碳库的改良尤为重要。期待本专栏能够从土壤碳库提升的农业措施优化、方法与技术等方面为从事农业生态改良领域的学者提供参考。

# 不同秸秆还田模式对冬小麦土壤活性有机碳库的影响

张黛静,刘毅昕,陈慧平,方凌,李春喜,王岚

(河南师范大学 生命科学学院,河南 新乡 453007)

**摘要:**为探寻最适宜小麦种植的秸秆还田模式,优化土壤结构、提升土壤质量,采用根箱培养,以不施肥(CK)为对照,设置不同秸秆还田方式配施化肥共6个处理,即秸秆还田(SF)、秸秆生物炭还田(BF)、秸秆配施腐熟剂还田(SDF)、秸秆配施纳米载体腐熟剂还田(SNDF)以及单施化肥(F)。结果表明:所有处理在不同时期的土壤活性有机碳库组分质量分数基本表现为随土层的加深而降低,SNDF处理在小麦成熟期的表层土壤总有机碳(SOC)、土壤可溶性有机碳(DOC)、土壤微生物量碳(MBC)质量分数分别为36.40 g/kg、491.56 mg/kg、273.10 mg/kg,土壤碳库管理指数为225.7%;SDF在小麦成熟期的土壤活性有机碳(LOC)质量分数为7.79 g/kg;SOC、土壤DOC、土壤MBC、土壤LOC和碳库管理指数之间均存在极显著的正相关性( $P < 0.01$ )。研究发现SNDF处理对冬小麦土壤有机碳组分及土壤碳库管理指数的改善效果最好,该结果为秸秆还田与化肥配施在农业生产上的应用提供了理论依据和研究基础。

**关键词:**秸秆还田;土壤活性有机碳库;碳库管理指数

**中图分类号:**S153.6

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-2367(2024)06-0001-09

土壤有机碳库在全球生态系统碳循环中的作用至关重要,其质量分数与土层深度、地理位置等有关<sup>[1-2]</sup>。土壤活性有机碳在总量上占比不大,但由于其快速周转、易于响应环境变化的特性,被视为土壤有机碳库健康状况和稳定性的重要指标<sup>[3-5]</sup>。土壤碳库管理指数(carbon management index,CMI)作为一种实用

**收稿日期:**2024-03-07;**修回日期:**2024-04-19.

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2023YFD2301500).

**作者简介:**张黛静(1974—),女,河南新乡人,河南师范大学教授,博士,研究方向为小麦栽培生理,E-mail:zdjdai@163.com.

**通信作者:**李春喜,河南师范大学教授,博士,研究方向为小麦栽培生理,E-mail:wheat\_lab@163.com.

**引用本文:**张黛静,刘毅昕,陈慧平,等.不同秸秆还田模式对冬小麦土壤活性有机碳库的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(6):1-9.(Zhang Daijing,Liu Yixin,Chen Huiping,et al.Effects of different straw-returning modes on active organic carbon pools in wheat soils[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2024,52(6):1-9.DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.03.07.0004.)

工具,能够量化评估特定土地管理措施对土壤有机碳动态变化的影响程度。

冬小麦为华北平原主要种植作物之一,合理的秸秆还田模式在麦田土壤管理中扮演着关键角色,可对土壤碳固存、土壤质量提升以及作物增产产生积极的影响<sup>[6-8]</sup>。秸秆还田后,土壤微生物通过一系列分解和矿化过程将秸秆中的有机物质转化为可供作物吸收利用的无机营养物质。这一过程有利于提升土壤质量,且得到了广泛的研究证实<sup>[9-12]</sup>。同时,研究显示,秸秆还田除了能显著提高土壤有机碳质量分数和土壤肥力之外,还对改善土壤理化性质、提高水氮利用效率以及促进冬小麦干物质积累和最终作物产量有积极作用<sup>[13]</sup>。多年来,科研人员不断探索更高效、更环保的秸秆还田技术,如秸秆生物炭还田、秸秆配施腐熟剂还田以及秸秆配施纳米腐熟剂还田等,将秸秆转化为易于土壤吸收的养分,从而改善土壤结构、增强土壤保水保肥能力<sup>[14]</sup>。

目前,已有较多关于不同秸秆还田模式下土壤养分、土壤氮素循环及作物产量的相关研究<sup>[15-16]</sup>,但针对不同秸秆还田模式对土壤活性有机碳库及碳库管理指数的影响研究仍较少。因此,本研究通过设置不同秸秆还田处理的小麦根箱试验,总结并分析出不同秸秆还田模式下土壤总有机碳、活性有机碳库组分及碳库管理指数的变化规律,为筛选出最适宜小麦种植的秸秆还田模式提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点与材料

试验于 2022 年 9 月在河南师范大学生命科学学院网室进行。试验采用根箱(长 100 cm×宽 50 cm×高 100 cm)培养种植小麦,箱内土壤采自河南师范大学试验田(深 0~100 cm),按原土层分层(0~20 cm、>20~40 cm、>40~60 cm、>60~100 cm)移入。

试验冬小麦品种为新麦 26。不同秸秆还田模式材料来源:(1)冬小麦秸秆(河南师范大学试验田冬小麦秸秆);(2)秸秆生物炭(河南誉中奥农业科技有限公司);(3)微生物腐熟剂(鹤壁市人元生物科技发展有限公司);(4)纳米材料凹凸棒土(南京远大粘土有限公司)。

### 1.2 试验设计

试验采用随机试验设计,以不施入任何化肥为对照(CK),设置不同秸秆还田方式配施化肥处理,即:秸秆还田(straw, SF)、秸秆生物炭还田(biochar, BF)、秸秆配施腐熟剂还田(straw decomposing inoculant, SDF)、秸秆配施纳米载体菌剂还田(straw nanocarrier decomposing inoculant, SNDF),以及单施化肥(fertilizer, F),共 6 个处理。各处理下的肥料按等碳量施入,具体施肥方式见表 1。

按照当地田间正常施肥量折算,除 CK 处理不施化肥外,其他处理冬小麦播前均底施化肥 74.96 g/m<sup>2</sup> (N、P、K 质量比为 24:6:10)于 0~30 cm 土壤中,各还田物料均匀覆盖表面。供试土壤为壤质潮土,其基本性质如下:有机质 26.11 g/kg,全氮 1.72 g/kg,速效氮 39.20 mg/kg,速效磷 18.65 mg/kg,速效钾 127.88 mg/kg。每组处理设置 3 个重复,每个根箱播种面积为 0.5 m<sup>2</sup>,2022-10-27 播种冬小麦,2023-05-30 收获。冬小麦生长期,定期进行浇水、除草、除虫等管理措施,维持作物的正常生长。

表 1 不同处理的施肥方式

Tab. 1 Fertilization methods for different treatments

处理	具体措施	施肥量
CK	不施肥	不施肥
F	单施化肥	化肥 74.96 g/m <sup>2</sup> (N、P、K 质量比为 24:6:10)
SF	秸秆还田+化肥	秸秆还田 450 g/m <sup>2</sup> +底施化肥 74.96 g/m <sup>2</sup> (N、P、K 质量比为 24:6:10)(下同)
BF	秸秆生物炭+化肥	秸秆生物炭 225 g/m <sup>2</sup> +底施化肥
SDF	秸秆还田+腐熟剂+化肥	秸秆还田 450 g/m <sup>2</sup> +腐熟剂 2.66 g/m <sup>2</sup> +底施化肥
SNDF	秸秆还田+纳米载体腐熟剂+化肥	秸秆还田 450 g/m <sup>2</sup> +凹凸棒土 2.66 g/m <sup>2</sup> +腐熟剂 2.66 g/hm <sup>2</sup> +底施化肥

### 1.3 测定指标及方法

于冬小麦拔节期、开花期和成熟期分 3 层(0~20 cm、>20~40 cm、>40~60 cm)采集土壤样品,去除

肉眼可见的动植物残体、砂砾后自然风干,粉碎后过 0.15 mm 筛,重复 3 次,进行土壤有机碳指标测定:土壤总有机碳(SOC)采用重铬酸钾-外加热法<sup>[17]</sup>;土壤可溶性碳(DOC)采用去离子水浸提法测定<sup>[18]</sup>;土壤活性有机碳(LOC)用高锰酸钾氧化法测定<sup>[18]</sup>;土壤 MBC 采用氯仿熏蒸浸提法测定<sup>[19]</sup>。

碳库管理指数计算方法参照 BLAIR 等<sup>[20]</sup>:

$$CMI = CPI \times LI \times 100; CPI = C_{T \text{ sample}} / C_{T \text{ reference}};$$

$$LI = L_{\text{sample}} / L_{\text{reference}}; L = C_L / C_{NL}.$$

式中, $CMI$  为碳库管理指数; $CPI$  为碳库指数; $LI$  为碳库活性指数; $C_{T \text{ sample}}$  为样品 SOC(g/kg); $C_{T \text{ reference}}$  为参考 SOC(g/kg); $L_{\text{sample}}$  为样品土壤碳库活性; $L_{\text{reference}}$  为参考土壤碳库活性; $L$  为活性碳库; $C_L$  为活性碳质量分数(g/kg), $C_{NL}$  为非活性碳质量分数(g/kg)。

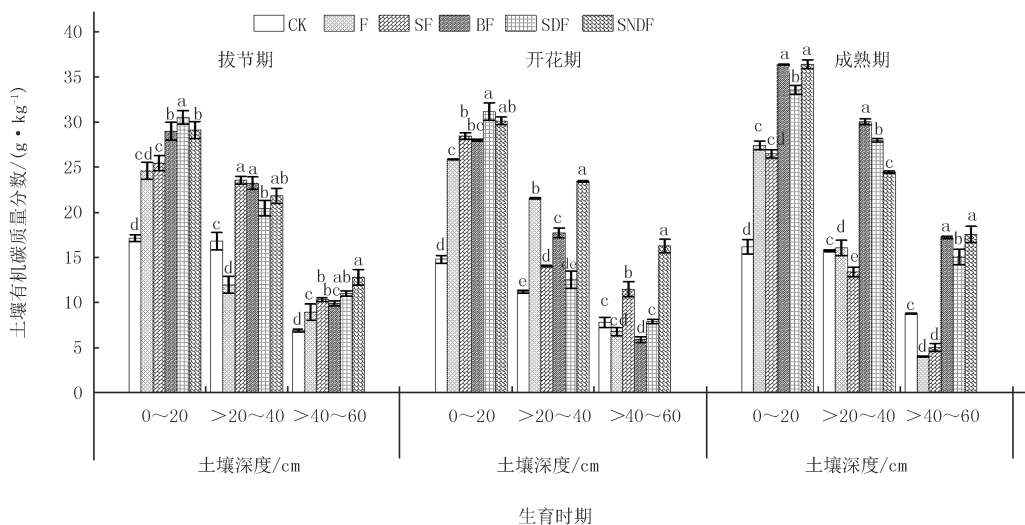
## 1.4 数据统计

用 Excel 和 SPSS 软件对数据基础处理,进行 Duncan 检验处理间的显著性( $P < 0.05$ ).Origin 软件进行数据处理与图表绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同秸秆还田模式对土壤总有机碳(SOC)质量分数的影响

由图 1 可知,SOC 质量分数随生育期的推进呈逐渐升高的趋势,随土层的加深呈逐渐降低的趋势。拔节期,0~20 cm 土层,各处理 SOC 质量分数均显著高于 CK 处理( $P < 0.05$ ),SDF(秸秆+腐熟剂+化肥)处理下的 SOC 质量分数在小麦拔节期与开花期显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),分别为 30.52 g/kg、30.15 g/kg,而在成熟期,相较于其他处理,BF(生物炭+化肥)和 SNDF(秸秆+纳米载体+化肥)处理土壤有机碳质量分数最高,分别为 36.34 g/kg、36.40 g/kg;>20~40 cm 土层,SF 和 BF 处理在拔节期均显著高于 CK 与其他处理( $P < 0.05$ ),在开花期,SNDF 处理下 SOC 质量分数相较于 BF 处理提高了 32.12%,为 23.41g/kg,SF 处理显著低于 CK 处理( $P < 0.05$ );>40~60 cm 土层,SNDF 处理下 SOC 质量分数在拔节期、开花期与成熟期均显著高于 CK 与其他处理( $P < 0.05$ )。



图中不同小写字母表示同一时期不同处理间是否差异显著( $P < 0.05$ ),全文同。

图1 不同秸秆还田模式对SOC质量分数的影响

Fig.1 Effects of different straw returning patterns on SOC content

### 2.2 不同秸秆还田模式对土壤活性有机碳库组分质量分数的影响

由图 2 可知,随生育期的推进,土壤 DOC 质量分数呈逐渐升高的趋势;随土层的加深,土壤 DOC 质量分数呈“增-减”的趋势。0~20 cm 土层,SNDF 处理下小麦拔节期、开花期与成熟期的土壤 DOC 质量分数均

显著高于 CK 与其他处理 ( $P < 0.05$ ), 分别为 359.39 mg/kg、394.11 mg/kg 和 491.56 mg/kg;  $>20 \sim 40$  cm 土层, SNDF 处理在拔节期显著高于 CK 与 SDF 处理 ( $P < 0.05$ ), 在开花期, 除 SNDF 处理外, 所有秸秆还田处理土壤 DOC 质量分数均低于 CK 处理, 所有秸秆还田处理 DOC 质量分数在成熟期均低于 F 处理, SNDF 土壤 DOC 质量分数相较于  $0 \sim 20$  cm 土层显著降低了 28.57% ( $P < 0.05$ );  $>40 \sim 60$  cm 土层中, SNDF 土壤 DOC 质量分数为 286.54 mg/kg, 高于 CK 与其他处理, 开花期 SF 处理土壤 DOC 质量分数为 265.92 mg/kg, 高于 CK 处理, 且相较于 F 处理降低了 12.18%, 而在成熟期, SDF 与 SNDF 处理土壤 DOC 质量分数高于其他处理, 分别为 313.59 mg/kg 和 350.30 mg/kg, 且二者差异性显著 ( $P < 0.05$ ).

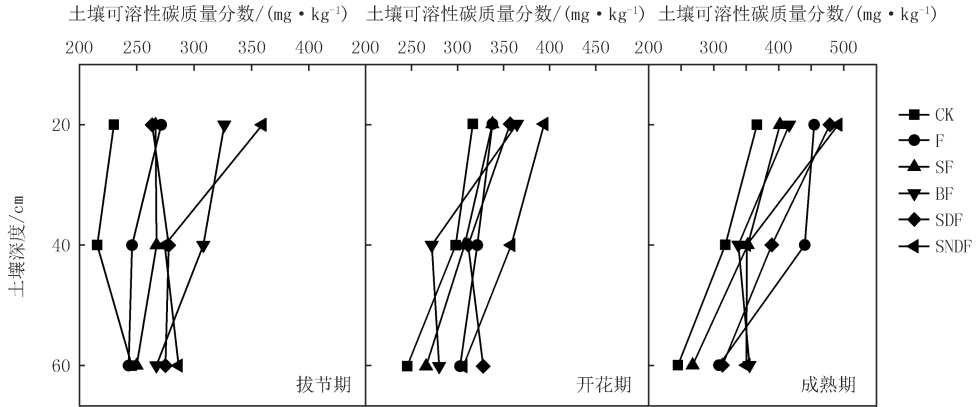


图2 不同秸秆还田模式对小麦土壤DOC质量分数的影响

Fig.2 Effects of different straw returning patterns on DOC content in soil of wheat

由图 3 可知, 土壤 MBC 质量分数随着生育期的推进呈先减小后增大的趋势, 随土层的加深呈逐渐降低的趋势. 小麦拔节期,  $0 \sim 20$  cm 土层, SNDF 处理下土壤 MBC 质量分数在拔节期、开花期与成熟期均显著高于 CK 与其他处理 ( $P < 0.05$ ), 分别为 225.73 mg/kg、229.43 mg/kg 和 273.10 mg/kg;  $>20 \sim 40$  cm 土层, 与 CK 与其他处理相比, BF 处理下土壤 MBC 质量分数最高, 为 208.02 mg/kg, 在成熟期, SF 与 BF 处理相较于 CK 处理分别降低了 28.46%、45.89%;  $>40 \sim 60$  cm 土层, 所有秸秆还田处理中, SNDF 处理在拔节期、开花期与成熟期均显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ), 其土壤 MBC 质量分数在拔节期相比 SDF、BF 处理分别增加了 22.34%、13.29%, 在开花期相较于 SDF 处理大幅提高了 44.95%.

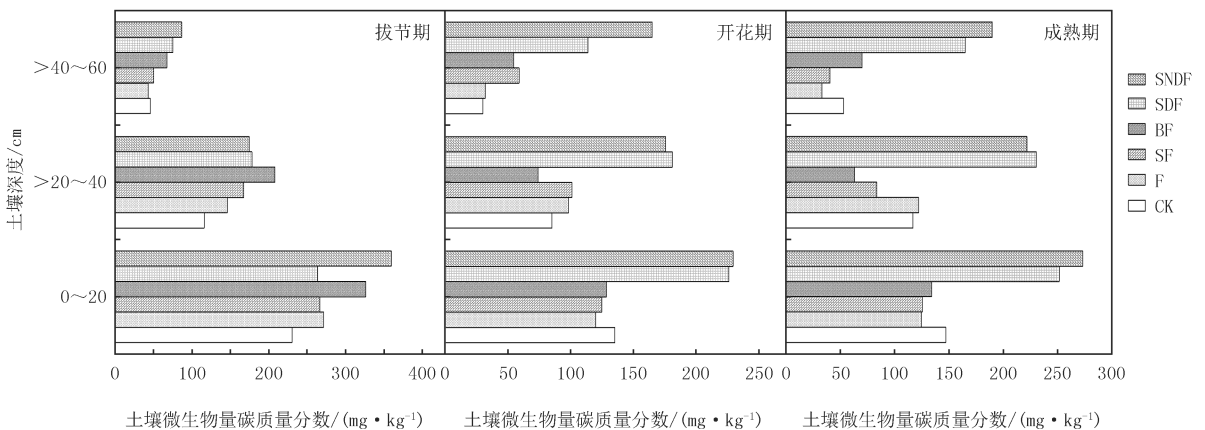


图3 不同秸秆还田模式对小麦土壤MBC质量分数的影响

Fig.3 Effects of different straw returning patterns on MBC content in soil of wheat

由图 4 可知, 土壤 LOC 质量分数随生育时期推进呈逐渐增高的趋势, 随土层的加深呈逐渐减少的趋势. 小麦拔节期,  $0 \sim 20$  cm 土层, SF 处理下土壤 LOC 质量分数高于 CK 处理, 且分别比 SDF、BF 处理增加了 16.09%、10.66%, SDF 处理下土壤 LOC 质量分数在开花期与成熟期显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ), 分别为

7.75 g/kg、7.79 g/kg; >20~40 cm 土层, BF 处理下 LOC 质量分数最高, 为 2.84 g/kg, 且显著高于 CK 与其他处理 ( $P < 0.05$ ), 开花期所有处理下土壤 LOC 质量分数均无显著差异, SF 处理下 LOC 质量分数在成熟期最高, 为 2.59 g/kg, 相较于 SDF、SNDF 处理分别提高了 1.93%、14.70%; >40~60 cm 土层, SF、BF 处理下土壤 LOC 质量分数显著低于 CK 处理 ( $P < 0.05$ ), 而在开花期, SF 处理具有最高的 LOC 质量分数, 且相较于 SDF 处理提高了 10.51%, SDF 处理下土壤 LOC 质量分数在成熟期显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ), 为 2.89 g/kg.

### 2.3 不同秸秆还田模式对土壤碳库管理指数的影响

土壤碳库管理指数是反应土壤利用和管理方式对土壤有机碳库质量动态变化影响的重要指标, 其值越大, 土壤碳库质量越高<sup>[5]</sup>. 由表 2 可以看出, 各时期不同秸秆还田模式对土壤碳库管理指数的影响显著, 随生育时期的推进, 碳库管理指数呈现为先增大后减小的变化规律, 且随土层加深大体呈现出“高-低-高”的变化规律.

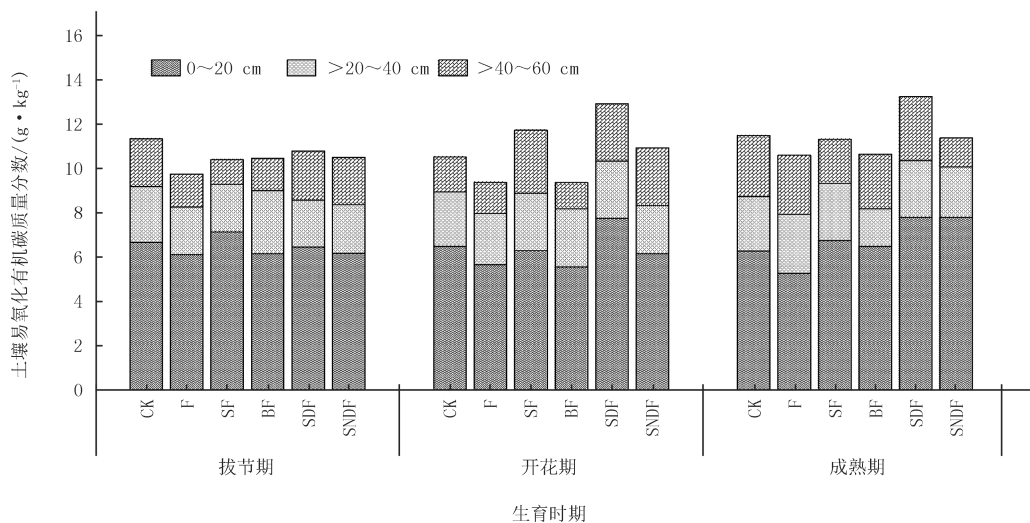


图4 不同秸秆还田模式对小麦土壤易氧化碳质量分数的影响

Fig.4 Effects of different straw returning patterns on LOC content in soil of wheat

表 2 不同秸秆还田模式对冬小麦土壤碳库管理指数的影响

Tab. 2 Effects of different straw returning patterns on CMI in soil of wheat

生育时期	土层/cm	碳库管理指数/%					
		CK	F	SF	BF	SDF	SNDF
拔节期	0~20	211.74cd	385.44b	268.42bc	239.89c	424.34a	201.42d
	>20~40	156.14a	90.07b	72.25bc	140.00ab	78.05bc	59.94c
	>40~60	241.24bc	179.75c	264.51b	137.52d	160.99cd	427.40a
开花期	0~20	331.97c	469.77b	285.76d	152.53e	776.33a	273.52d
	>20~40	154.92b	74.48d	77.10d	194.04a	108.54c	34.68e
	>40~60	149.00d	249.41b	500.26a	207.40c	108.45e	209.68bc
成熟期	0~20	101.04c	211.28ab	92.28c	147.84b	205.07ab	225.7a
	>20~40	86.65a	26.99b	72.65ab	29.67b	54.65b	32.22b
	>40~60	82.73de	382.25a	110.97d	179.89c	107.88d	302.67b

小麦拔节期, 0~20 cm 土层, SDF 处理下的碳库管理指数在拔节期与开花期显著高于 CK 与其他处理

( $P < 0.05$ ),而在成熟期,SNDF 处理下的碳库管理指数显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),相较于 SDF 处理提高了 9.14%; $>20 \sim 40$  cm 土层,CK 处理具有最高的碳库管理指数,SNDF 处理与  $0 \sim 20$  cm 土层中一致,碳库管理指数相较于其他处理为最低,开花期 BF 处理下的碳库管理指数相较于 CK 处理大幅提高了 25.25%,且显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),成熟期所有处理下的碳库管理指数均显著低于 CK 处理( $P < 0.05$ ),但均高于 F 处理; $>40 \sim 60$ cm 土层,与前 2 个土层截然不同,SNDF 处理在这一土层具有最高的碳库管理指数,且相较于 SDF 处理大幅提高了 165.48%,在开花期,SF 处理具有最高的碳库管理指数,且显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),F 处理在成熟期具有最高的碳库管理指数,且显著高于其他处理( $P < 0.05$ ).

## 2.4 土壤有机碳库组分、土壤碳库管理指数之间的相关性

土壤有机碳库组分、土壤碳库管理指数之间密切相关,由表 3 可知,SOC、土壤 DOC、土壤 MBC、土壤 LOC 和碳库管理指数之间均存在极显著的正相关性( $P < 0.01$ ).这表明了不同秸秆还田模式配施化肥对土壤有机碳库组分、碳库管理指数以及对冬小麦土壤质量有明显改善作用.

表 3 土壤有机碳库组分、土壤碳库管理指数之间的相关性

Tab. 3 Correlation between soil organic carbon pool components and soil carbon pool management index

	土壤有机碳	微生物量碳	可溶性有机碳	易氧化有机碳	碳库管理指数
土壤有机碳	1.000				
微生物量碳	0.879 **	1.000			
可溶性有机碳	0.905 **	0.881 **	1.000		
易氧化有机碳	0.760 **	0.910 **	0.966 **	1.000	
碳库管理指数	0.833 **	0.974 **	0.913 **	0.777 **	1.000

注: \*\* 表示相关系数达极显著( $P < 0.01$ )水平.

## 3 讨论

### 3.1 不同秸秆还田模式对 SOC 及活性有机碳库组分的影响

土壤有机碳库作为农田生态系统的核心组成部分,其动态平衡与外源物质的输入密切相关.当不同质量的外源物质(如作物残茬、有机肥料、生物质废弃物等)通过人工翻埋等方式被引入土壤时,会被土壤中的微生物转化、分解,进而对土壤活性有机碳库组分质量分数产生显著影响<sup>[21]</sup>.本研究表明,SDF(秸秆配施腐熟剂还田)处理能显著提高  $0 \sim 20$  cm 土层 SOC 及 MBC、LOC 的质量分数( $P < 0.05$ ),原因可能是外源有机物料的施入能够提供微生物生长代谢所需要的营养物质,从而对土壤有机碳质量分数和活性碳库组分质量分数产生积极影响<sup>[22]</sup>,但是与 SDF 处理表现相反的是 SF(秸秆还田)处理抑制了 MBC 质量分数的积累,这种抑制在  $>20 \sim 40$  cm 土层表现更为明显,但 BF 处理在  $>20 \sim 40$  cm 土层具有最高的 SOC 质量分数,可能是由于生物炭相较于秸秆直接还田具有较高的碳浓度,故其能够明显提高土壤有机碳质量分数<sup>[23]</sup>.在  $>40 \sim 60$  cm 土层,SNDF(秸秆配施纳米载体腐熟剂还田)处理显著提高了 SOC 及 DOC 的质量分数,SDF 处理显著提高了土壤 MBC 及 LOC 的质量分数( $P < 0.05$ ).SF 的施入相较于 SDF 和 SNDF 处理没有更好地改善土壤活性有机碳库,很有可能是因为秸秆配施腐熟剂后得到了充分腐解,进而提高土壤活性碳的质量分数<sup>[24]</sup>.而 SDF 处理的有机碳质量分数、DOC 质量分数低于 SNDF 处理,原因可能是后者施用了纳米载体腐熟剂,秸秆腐熟效果相较于前者有了较大提升<sup>[25]</sup>.

本试验显示,所有模式的秸秆还田处理下土壤有机碳质量分数和土壤活性有机碳质量分数均高于 CK 处理.各模式下土壤活性有机碳的增加确实与不同还田模式下的碳投入量密切相关,且这一投入主要集中在土壤表层,因而导致土壤有机碳质量分数及活性有机碳库组分的质量分数随土层的加深越来越少,且微生物分解有机物料的过程中,会产生多种营养物质和秸秆腐解物质,这些产物不仅是土壤中活性碳库组分的主要来源,也是土壤肥力的重要组成部分<sup>[26-27]</sup>.DOC 和 LOC 是土壤活性有机碳库的重要组成部分,它们分别反映了土壤有机质在水溶态和易于微生物利用两方面的活性特征<sup>[28]</sup>.因此,在农业管理实践中,合理利用秸秆

还田等措施,适当增加外源有机碳输入,有助于构建健康的土壤生态系统,实现土壤碳库的可持续管理与利用.

### 3.2 不同秸秆还田模式对土壤碳库管理指数及其与土壤有机碳库组分相关性的影响

碳库管理指数作为一种量化工具,确实被广泛应用于衡量土壤养分状况和土壤碳素动态变化,其优势在于比单纯测量 SOC 质量分数更能灵敏地反映出土壤碳库的综合状况及其对管理措施响应<sup>[28-29]</sup>.本研究发现,麦-玉周年各时期不同秸秆还田模式对土壤碳库管理指数的影响显著,随生育时期的推进,碳库管理指数呈现为“增大-减小-增大”的变化规律,且随土层加深大体呈现出“高-低-高”的变化规律.SDF 处理下的碳库管理指数在小麦拔节期和开花期相较于其他处理均有显著提高( $P < 0.05$ ),这可能是由于 SDF 处理添加了微生物腐熟剂,提高了秸秆利用效率的同时提高了微生物对其周转利用的效率,从而提高了土壤碳库活度指数,进而提高了 CMI.SNDF 处理在小麦成熟期具有最高的碳库管理指数,这种现象可能是由于 SNDF 处理下的 SOC 质量分数在短期内增加,所以此时 CPI 较高,导致 CMI 值较大<sup>[30]</sup>.

土壤有机碳库组分、土壤碳库管理指数之间密切相关,SOC、土壤 DOC、土壤 MBC、土壤 LOC 和碳库管理指数之间均存在极显著的正相关性( $P < 0.01$ ).这表明了连续不同秸秆还田模式配施化肥对土壤有机碳库组分、碳库管理指数以及对冬小麦土壤质量有明显改善作用.

## 4 结 论

本研究采用根箱培养试验的方法,旨在系统地分析不同秸秆还田模式对土壤活性有机碳库及碳库管理指数的影响.结论如下:

1)不同秸秆还田模式对土壤活性有机碳库组分有显著影响.0~20 cm 土层,与其他处理相比,SDF 处理能较好地提高土壤活性有机碳的质量分数;>20~40 cm 土层,BF 处理下土壤活性有机碳的质量分数在所有处理中最高;>40~60 cm 土层,SNDF 处理下土壤活性有机碳质量分数显著高于 SDF 与 SF 处理( $P < 0.05$ ).

2)不同秸秆还田模式对土壤碳库管理指数有显著影响.0~20 cm 土层,SDF 处理下的碳库管理指数显著高于其他处理( $P < 0.05$ );>20~40 cm 土层,SF 处理具有最高的碳库管理指数,且显著高于其他处理( $P < 0.05$ );>40~60 cm 土层,与前两个土层截然不同的是,SDF 处理下的碳库管理指数在这一土层具有最高的碳库管理指数.

3)SOC、土壤 DOC、土壤 MBC、土壤 LOC 和碳库管理指数之间均存在极显著的正相关性( $P < 0.01$ ).

## 参 考 文 献

- [1] SPRUNGER C D,ROBERTSON G P.Early accumulation of active fraction soil carbon in newly established cellulosic biofuel systems[J]. Geoderma,2018,318(6):42-51.
- [2] BRAHMA B,PATHAK K,LAL R,et al.Ecosystem carbon sequestration through restoration of degraded lands in Northeast India[J]. Land Degradation & Development,2018,29(1):15-25.
- [3] BOSATTA E,GREN G I.Theoretical analysis of microbial biomass dynamics in soils[J].Soil Biology and Biochemistry,1994,26(1): 143-148.
- [4] 王楚涵,刘菲,高健永,等.减氮覆膜下土壤有机碳组分含量的变化特征[J].中国农业科学,2022,55(19):3779-3790.  
WANG C H,LIU F,GAO J Y,et al.The variation characteristics of soil organic carbon component content under nitrogen reduction and film mulching[J].Scientia Agricultura Sinica,2022,55(19):3779-3790.
- [5] 徐明岗,于荣,孙小凤,等.长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(4):459-465.  
XU M G,YU R,SUN X F,et al.Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index(CMI)of the typical soils of China[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2006,12(4):459-465.
- [6] ZHANG D J,CHEN H P,GUO Y X,et al.Effects of different tillage and fertilizer on soil quality under wheat-maize rotation in the North China Plain[J]. Land Degradation & Development,2024,35(6):2122-2136.
- [7] 张黛静,王艳杰,陈倩青,等.不同耕作与培肥对小麦氮吸收效率、根效率及产量的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2018, 46(5):85-91.  
ZHANG D J,WANG Y J,CHEN Q Q,et al.Effects of different tillage and fertilization on wheat nitrogen absorption efficiency,root effi-

- ciency and yield[J].*Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition)*,2018,46(5):85-91.
- [8] 纪仁婧,胡梦阳,和玉璞,等.生物炭施用对节水灌溉稻田土壤养分的影响[J].*灌溉排水学报*,2023,42(1):47-53.  
JI R J,HU M Y,HE Y P,et al.Effects of biochar amendment on bioavailable nutrients in paddy soil[J].*Journal of Irrigation and Drainage*,2023,42(1):47-53.
- [9] TTURMEL M S,SPERATTI A,BAUDRON F,et al.Crop residue management and soil health:A systems analysis[J].*Agricultural Systems*,2015,134:6-16.
- [10] 黄运湘,王改兰,冯跃华,等.长期定位试验条件下红壤性水稻土有机质的变化[J].*土壤通报*,2005,36(2):181-184.  
HUANG Y X,WANG G L,FENG Y H,et al.Changes of organic matter in paddy soil derived from red soil in a long-term located experiment[J].*Chinese Journal of Soil Science*,2005,36(2):181-184.
- [11] 张夫道,FOKIN A D.作物秸秆碳在土壤中分解和转化规律的研究[J].*植物营养与肥料学报*,1994(1):27-28.
- [12] 胡宏祥,程燕,马友华,等.油菜秸秆还田腐解变化特征及其培肥土壤的作用[J].*中国生态农业学报*,2012,20(3):297-302.  
HU H X,CHENG Y,MA Y H,et al.Decomposition characteristics of returned rapeseed straw in soil and effects on soil fertility[J].*Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2012,20(3):297-302.
- [13] 董林林,王海侯,陆长婴,等.秸秆还田量和类型对土壤氮及氮组分构成的影响[J].*应用生态学报*,2019,30(4):1143-1150.  
DONG L L,WANG H H,LU C Y,et al.Effects of straw returning amount and type on soil nitrogen and its composition[J].*Chinese Journal of Applied Ecology*,2019,30(4):1143-1150.
- [14] 战厚强.水稻秸秆还田对土壤酶活性及土壤养分的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2015.  
ZHAN H Q.Effects of rice straw returning on soil enzyme activity and soil nutrients[D].Harbin:Northeast Agricultural University,2015.
- [15] 关小康,王静丽,刘影,等.轮耕秸秆还田促进冬小麦干物质积累提高水氮利用效率[J].*水土保持学报*,2018,32(3):280-288.  
GUAN X K,WANG J L,LIU Y,et al.Rotational tillage with straw returning increased dry matter accumulation and utilization efficiency of water and nitrogen in winter wheat[J].*Journal of Soil and Water Conservation*,2018,32(3):280-288.
- [16] 张鑫.不同秸秆还田模式对盐碱地土壤理化性质及碳库的影响[D].哈尔滨:哈尔滨师范大学,2022.  
ZHANG X.Effects of different straw return modes on soil physicochemical properties and carbon pools in saline soils[D].Harbin:Harbin Normal University,2022.
- [17] ZHANG Y Q,WANG J D,GONG S H,et al.Straw mulching enhanced the photosynthetic capacity of field maize by increasing the leaf N use efficiency[J].*Agricultural Water Management*,2019,218(2):60-67.
- [18] JONES D L,WLLEYBYB.Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen and dissolved organic carbon in soil[J].*Soil Biology and Biochemistry*,2006,38(5):991-999.
- [19] 张万儒,杨光澄,屠星南.中华人民共和国林业行业标准:森林土壤分析方法[M].北京:中国标准出版社,1999.
- [20] BLAIR G J,LEFROY R D B,Lisle L.Soil carbon fractions based on their degree of oxidation,and the development of carbon management index for agricultural systems[J].*Australian Journal of Agricultural Research*,1995,46:1459-1466.
- [21] 程淑兰,方华军,徐梦,等.氮沉降增加情景下植物-土壤-微生物交互对自然生态系统土壤有机碳的调控研究进展[J].*生态学报*,2018,38(23):8285-8295.  
CHENG S L,FANG H J,XU M,et al.Regulation of plant-soil-microbe interactions to soil organic carbon in natural ecosystems under elevated nitrogen deposition;a review[J].*Acta Ecologica Sinica*,2018,38(23):8285-8295.
- [22] 李明浩.纳米载体菌剂对小麦秸秆的降解作用研究[D].合肥:中国科学技术大学,2019.  
LI M H.Research on the degradation of wheat straw by nanocarrier bacterial agents[D].Hefei:University of Science and Technology of China,2019.
- [23] 刘欣萌,姜涵,魏文良,等.秸秆与秸秆生物炭还田对石灰性潮土有机碳固定的影响[J].*土壤通报*,2023,54(6):1316-1325.  
LIU X M,JIANG H,WEI W L,et al.Effects of straw and straw biochar returning on soil organic carbon sequestration in calcareous fluvo-aquic soil[J].*Chinese Journal of Soil Science*,2023,54(6):1316-1325.
- [24] 朱容辰,王文升,王玲,等.秸秆腐熟剂在冬小麦上的应用试验[J].*现代农村科技*,2023(6):77-78.
- [25] 贾匡迪,王勇强,高雨,等.山西太岳山不同针叶纯林及混交林土壤有机碳库的变异性[J].*东北林业大学学报*,2024,52(3):112-118.  
JIA K D,WANG Y Q,GAO Y,et al.Variability of soil organic carbon pool in different coniferous pure forests and mixed forests in Taiyue Mountain,Shanxi Province[J].*Journal of Northeast Forestry University*,2024,52(3):112-118.
- [26] 王维.有机物料对不同作物根际土壤活性有机碳组分及腐殖质特征的影响[D].长春:吉林农业大学,2017.  
WANG W.Effects of organic materials on active organic carbon fractions and humus characteristics of inter-root soils of different crops [D].Changchun:Jilin Agricultural University,2017.
- [27] 侯赛赛,白懿抗,王灿,等.土壤有机碳及其活性组分研究进展[J].*江苏农业科学*,2023,51(13):24-33.  
HOU S S,BAI Y H,WANG C,et al.Research progress of soil organic carbon and its active components[J].*Jiangsu Agricultural Sciences*,2023,51(13):24-33.
- [28] LEFROY R D B,BLAIR G J,STRONG W M.Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and



- <sup>13</sup>C natural isotope abundance[J].Plant and Soil,1993,155(1):399-402.
- [29] 连玉珍,庄朝飞,仇晓玉,等.土地利用方式对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J].高原农业,2020,4(1):26-33.  
LIAN Y Z,ZHUANG C F,QIU X Y,et al.Effects of different land use types on soil labile organic carbon and carbon management index [J].Journal of Plateau Agriculture,2020,4(1):26-33.
- [30] 付钊珊,黎建强,陈奇伯,等.计划烧除对云南松林土壤碳组分及碳库管理指数的影响[J].西北林学院学报,2023,38(4):197-206.  
FU Y S,LI J Q,CHEN Q B,et al.Effects of prescribed burning on soil carbon fractions and carbon pool management index in Pinus yunnanensis forests[J].Journal of Northwest Forestry University,2023,38(4):197-206.

## Effects of different straw-returning modes on active organic carbon pools in wheat soils

Zhang Daijing, Liu Yixin, Chen Huiping, Fang Ling, Li Chunxi, Wang Lan

(College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

**Abstract:** This experiment was conducted to find out the most suitable straw return mode for wheat cultivation, to optimize soil structure and to improve soil quality. In this study, we used root box culture, no fertilizer(CK) as the control, and set up six treatments, namely:straw-farming(SF), straw-biochar-farming(BF), straw-decomposing(SDF), straw-nanocarrier-decomposing(SNDF), and fertilizer-application alone(F), for the different methods of straw-farming and fertilizer application. The results showed that the contents of soil active organic carbon pool components in all treatments at different times generally decreased with the deepening of the soil layer, and the contents of total soil organic carbon(SOC), soil soluble organic carbon(DOC), and soil microbial biomass carbon(MBC)in the surface soil of SNDF treatment at the maturity stage of wheat were 36.40 g/kg, 491.56 mg/kg, 273.10 mg/kg. And the soil carbon pool management index was 225.7%; the soil LOC content of SDF was 7.79 g/kg at the maturity stage of wheat; and there was a significant positive correlation between SOC, soil DOC, soil MBC, soil LOC, and the carbon pool management index( $P < 0.01$ ). In conclusion, the SNDF treatment had the best effect on the improvement of soil organic carbon fractions and soil carbon pool management index in winter wheat, and the results provide a theoretical basis and research foundation for the application of straw return and fertilizer blending in agricultural production.

**Keywords:** straw return; soil active organic carbon pools; carbon pool management indexes

[责任编辑 刘洋 杨浦]