

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

王旭东¹ 庄俊杰¹ 刘冰洋¹ 李帅帅¹ 赵鑫¹ 刘洋² 张海林^{1*}

(1. 中国农业大学 农学院/农业农村部农作制度重点实验室,北京 100193;

2. 辽宁省农业科学院 耕作栽培研究所,沈阳 110161)

摘要 为明确秸秆还田对土壤有机碳的影响,构建合理的碳库管理策略,收集整理 1992—2018 年已发表的文献数据,以 Meta-analysis 方法定量分析秸秆还田对中国农田土壤有机碳含量的影响,并系统解析其影响因素。结果表明:整体上,与秸秆不还田相比,秸秆还田可显著增加土壤有机碳的含量,但不同区域土壤有机碳增加幅度有一定的差异。华东地区土壤有机碳增幅最高,显著增加 14.6%,华中地区增幅最低,为 7.7% ($P < 0.05$);华东、西北和西南地区高于全国 12.1% 的平均水平(未包括港澳台地区,下同),而东北、华北和华中地区低于全国平均水平。不同土层有机碳含量对秸秆还田的响应也表现出一定的差异,秸秆还田对 0~10 cm 土层土壤有机碳含量的增加效应达 11.2%,而对 >40 cm 土层(最深达 100 cm)的增加效应仅为 3.9% ($P < 0.05$)。此外,试验区域的年均气温、施氮量、土地利用类型以及还田年限等均对秸秆还田下有机碳含量有不同程度的影响。本研究表明,较长的还田年限(6~10 年)、适当的耕作措施(免耕结合旋耕翻耕等)和适当的氮肥施用量(120~240 kg/hm²)等条件均能有效提升秸秆还田的固碳潜力。

关键词 气候变化; 秸秆还田; 土壤有机碳; Meta 分析; 碳库管理

中图分类号 Q178.51+6;S964.2

文章编号 1007-4333(2020)08-0012-13

文献标志码 A

Residue returning induced changes in soil organic carbon and the influential factors in China's croplands: A meta-analysis

WANG Xudong¹, ZHUANG Junjie¹, LIU Bingyang¹, LI Shuaishuai¹, ZHAO Xin¹, LIU Yang², ZHANG Hailin^{1*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology/Key Laboratory of Farming System of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Tillage and Cultivation Research Institute, Liaoning Academy of Agriculture Sciences, Shenyang 110161, China)

Abstract Soil organic carbon (SOC) pool is important for improving soil quality and crop productivity as well as for climate change mitigation. Crop residue returning (RR) is considered as sustainable agriculture technology with high efficiency and environmental protection. Therefore, understanding the effect of RR on SOC is of great significance to establish a suitable carbon pool management strategy and to realize the SOC sequestration potential. This study aimed to reveal the effects of RR on SOC and to determine the SOC sequestration influencing factors in China's croplands. Based on peer-reviewed papers from 1992 - 2018, a meta-analysis was conducted to assess the effects of RR on SOC. The results showed certain differences in SOC contents under RR. Specifically, RR significantly increased SOC contents by 14.6% in the Eastern China, which was the highest value in all regions ($P < 0.05$). And 7.7% increment of SOC was observed in the Central China, which was the lowest value in all regions ($P < 0.05$). In addition, the significant effects of RR on SOC were noted in Northwest and Southwest China, which were more than the national average

收稿日期: 2019-10-28

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201503136);国家级大学生创新训练项目(201910019003)

第一作者: 王旭东,本科生,E-mail:w-xd@cau.edu.cn

通讯作者: 张海林,教授,主要从事保护性农业与农田生态研究,E-mail:hailin@cau.edu.cn

(12.1%, $P < 0.05$). Less effects were observed in Northeast and North China than the national average. The responses of SOC contents to RR in different soil depths were highly variable. RR significantly enhanced SOC by 11.2% in 0–10 cm soil depths, but only increased by 3.9% in 40 cm soil depth and below (>40 cm, as deep as 100 cm) ($P < 0.05$). Besides, the mean annual temperature, nitrogen fertilization, land-use type and consecutive years of RR were observed to change the responses of SOC contents to RR. Notably, RR can significantly increase SOC content, optimized RR based field management practices with suitable tillage practices (no-till, plow tillage and rotary tillage), suitable experimental duration (6–10 a) and low nitrogen fertilizer input (120–240 kg/hm²) can enhance the SOC sequestration potential.

Keywords climate change; residue returning; soil organic carbon; meta-analysis; carbon pool management

农田土壤的固碳能力对全球碳循环的意义重大^[1]。土壤有机碳库是影响大气 CO₂ 含量变化的重要因素^[2],对全球气候变化具有重要的影响。通过适当的农田管理措施,可以显著提高农田土壤有机碳含量^[3-4]及其活性组分^[5],改善土壤结构^[6-8],从而提高土壤肥力^[9],最终促进作物增产增收。此外,土壤有机碳是评价土壤质量的重要指标,其状态变化对土壤的物理、化学和生物学过程有着显著的影响^[10]。提高土壤有机碳含量可降低土壤退化和被侵蚀的风险,为土壤微生物提供足够能量,促进土壤污染物的降解^[11]。因此,提高土壤固碳能力,不仅可以缓解气候变化,同时也可以维持土壤健康,提高生产能力。

中国是秸秆资源非常丰富的国家,据估算我国 2015 年农作物秸秆总产量约为 9.31 亿 t,是一笔宝贵而丰富的资源^[12]。对于作物秸秆的处理方式有很多,如直接还田、制备生物炭、作为燃料、动物饲料和田间焚烧等^[13-14]。不合理的利用方式(如田间直接焚烧)不仅浪费了宝贵的农业资源,还会造成环境污染、加剧温室效应^[15-16]。秸秆直接还田被认为是一项经济、高效、环保的秸秆处理方式^[17-18]。但秸秆还田对土壤有机碳的作用受诸多因素影响,如还田方式^[19-20]、还田年限^[21]、耕作方式^[22-24]、作物种类^[25]、施氮量^[26]和气候条件^[27-28]等。Fan 等^[19]对中国东北地区单季玉米种植的研究表明,比起覆盖还田,将秸秆粉碎后均匀还田能显著增加土壤有机碳含量。Liu 等^[21]通过 Meta 分析研究 176 篇同行评议的论文,指出秸秆还田 12 年之后,土壤碳库将达到饱和。Zhang 等^[24]在山西省的长期定位试验结果表明,秸秆还田配合免耕相比常规耕作,能增加 0~5 cm 土壤氮储量达 48%。Dong 等^[25]通过陕西省杨凌市 3 年的田间试验得出,秸秆还田条件下种植小麦相比种植玉米,土壤微生物量碳能增加 18.2%,可溶解有机碳增加 2.8 倍。Dalal 等^[26]在澳大利亚昆士兰州持续 40 年的田间试验结果显示,

秸秆还田配施氮肥能够显著增加土壤有机碳含量和提高小麦产量。Wilhelm 等^[27]总结了多篇文献后指出,气候条件影响农作物秸秆变成有机碳的方式和速度。此外,秸秆还田促进土壤固碳这一作用效果在不同区域间变化明显,这可能和我国不同区域种植模式、气候、土壤条件差异有关^[13]。因此,从全国范围了解评价秸秆还田对土壤有机碳的影响,明确造成不同区域间差异的主要原因,有助于科学高效利用秸秆,提高农田土壤碳库的固碳能力,揭示秸秆还田对土壤有机碳的影响机制^[29],同时,对进一步挖掘秸秆还田固碳潜力和正确认识其对缓解气候变化的真实效果有着重要意义。

Meta 分析是一种对同类研究的多个研究结果进行整合分析,并获取一致性结论的统计方法^[30-31]。近年来,Meta 分析在我国农学领域的应用不断延伸,作为适合更大时间和空间范围的统计工具,正不断地发挥着独特而重要的作用,已经成为分析关键因素的潜在影响和评价因素变化有效的方法^[32]。目前关于土壤有机碳含量影响因素的研究多基于特定试验地的若干年份试验,对于更多因素对秸秆还田后土壤有机碳含量的变化研究鲜有报道。本研究基于 Meta 方法分析 1992—2018 年已发表的相关文献数据,在此基础上讨论还田年限、施氮量和熟制等不同影响因素对土壤有机碳的作用效果,同时对重要影响因素在不同土层、不同还田年限的变化情况进行分析,旨在探究秸秆还田对中国农田土壤有机碳含量的影响,构建合理的秸秆还田及碳库管理策略,以为农田土壤固碳减排和应对缓解气候变化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究收集了 1992—2018 年已发表的文献,其中中文文献来自中国知网(<http://www.cnki.net>),

net/),英文文献来自 Web of Science 核心合集数据库(<http://apps.webofknowledge.com/>)。本研究所用中文检索词包括秸秆还田、有机碳等,所用英文检索词包括 straw or residue, and return or retention or incorporation or retain or mulch, and soil organic carbon。为确保研究的准确性,本研究所用文献均满足以下标准:1) 试验区域为中国农田土壤,试验起止年份、地点等基本信息明确;2) 试验设计包括至少 1 对除秸秆还田与秸秆不还田外其他条件完全相同的处理;3) 文献给出试验期间土壤有机碳含量,或根据文献数据可以计算得出;4) 试验具有明确的重复数;5) 试验为田间定位试验。基于以上标准严格筛选,共获得 159 篇符合要求的文献,其中英文文献 43 篇,中文文献 116 篇,可进行分析的试验数据 1 063 对。

1.2 数据分析

本研究使用 MetaWin 2.1 进行 Meta 分析^[33],以响应比(R)的自然对数为效应值($\ln R$),通过式(1)计算每一对数据的效应值^[34]:

$$\ln R = \ln\left(\frac{X_t}{X_c}\right) = \ln X_t - \ln X_c \quad (1)$$

式中: X_t , 秸秆还田处理下土壤有机碳含量,以 C 计, g/kg; X_c , 秸秆不还田处理下土壤有机碳含量。通过式(2)得到各效应值对应权重:

$$w = (n_t \times n_c) / (n_t + n_c) \quad (2)$$

式中: w , 权重; n_t , 有秸秆还田处理的试验重复次数; n_c , 没有秸秆还田处理的试验重复次数。利用重抽样法计算效应值得 95% 置信区间,如果效应值的 95% 置信区间不与 0 重合,那么则认为效应值显著^[35],即若置信区间全部 >0 ,则说明秸秆还田显著增加农田土壤有机碳含量 ($P < 0.05$);若置信区间全部 <0 ,则说明秸秆还田能够显著降低农田土壤有机碳含量 ($P < 0.05$)^[36]。若置信区间包含 0,则说明秸秆还田对农田土壤有机碳含量无显著影响。为了便于描述,通过式(3)计算得到土壤有机碳含量的变化百分数。

$$E = (\exp(\ln R) - 1) \times 100\% \quad (3)$$

式中: E , 秸秆还田条件相对于秸秆不还田条件土壤有机碳的变化, %。

本研究采用 SigmaPlot 12.5 软件进行相关作图。

1.3 分亚组 Meta 分析

由于中国不同农业生产区的气候条件、耕作措施、种植制度以及作物种类差异较大,且秸秆还田方

式、秸秆还田年限、氮肥施用情况等诸多因素均对农田土壤有机碳含量有一定影响。因此,在本研究对已有的数据以多种方式进行分组,利用分亚组 Meta 分析方法检验某一特定因素对农田土壤有机碳含量的影响,如还田年限、耕作措施、作物种类、土地利用类型等(表 1)。此外,为更加精确地探究不同土层有机碳含量的影响因素,本研究将各土层数据分为: $0 \sim 10$ 、 $>10 \sim 20$ 、 $>20 \sim 40$ 、 >40 cm (最深达 100 cm)。对每一土层有机碳含量的影响因素分别加以分析。为明确各类因素对有机碳含量影响随还田年限变化所表现出的规律,本研究将还田年限分为 $1 \sim 5$ 、 $6 \sim 10$ 和 >10 年。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田对中国不同区域农田土壤有机碳含量的影响

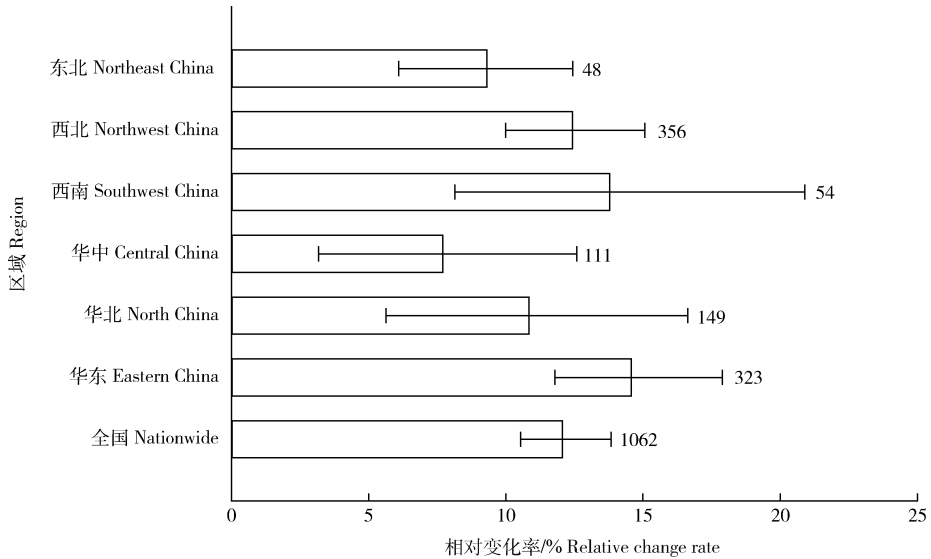
图 1 可知,从全国范围,秸秆还田能显著增加农田土壤全土层(在本研究中,全土层最深达 100 cm) 12.1% 的有机碳含量 ($P < 0.05$, 下文如未说明均指全土层),不同地区秸秆还田都促进土壤有机碳含量的增加,但影响程度各不相同。在华东地区,秸秆还田对农田土壤有机碳含量的增加效应最为显著 ($P < 0.05$),能够显著增加 14.6% 的土壤有机碳含量。西北和西南地区分别显著增加 12.4% 和 13.8%,均高于全国平均水平 ($P < 0.05$)。华中、东北和华北 3 个地区秸秆还田对农田土壤有机碳含量的影响效应均低于全国平均水平,其中东北和华北地区分别显著增加 9.3% 和 10.8% ($P < 0.05$)。在华中地区,秸秆还田显著增加 7.7% 的土壤有机碳含量 ($P < 0.05$),在所有地区中增加效应最小。

2.2 秸秆还田试验地自然条件对土壤有机碳含量的影响

与秸秆不还田相比,随着年均降水量的增加,秸秆还田对全土层土壤有机碳的增加效应总体上呈波动变化的趋势(图 2)。当年均降水量为 $0 \sim 400$ 、 $>400 \sim 600$ 、 $>600 \sim 800$ 、 >800 mm 时,相对秸秆不还田,秸秆还田条件下土壤有机碳含量分别显著增加 11.4%、12.1%、9.0%、14.3% ($P < 0.05$)。随着年均温度的增加,秸秆还田对全土层土壤有机碳的增加效应先减小后增大。年均温度在 $0 \sim 10$ °C、 $>10 \sim 15$ °C 和 >15 °C 的区域,秸秆还田增加有机碳含量的幅度分别为 13.3%、10.5% 和 13.6% ($P < 0.05$)。

表 1 数据分组情况
Table 1 Data grouping

影响因素 Influential factor	亚组 Sub-group			
	1	2	3	4
种植模式 Cropping pattern	轮作 Crop rotation	不轮作 Without crop rotation		
施氮量/(kg/hm ²) N input	0~120	>120~240	>240	
年均温度/°C Mean annual temperature	0~10	>10~15	>15	
耕作措施 Tillage practices	旋耕 Rotary tillage	免耕 No-till	翻耕 Plow tillage	
种植制度 Cropping system	一年一熟 Single cropping	一年两熟 Double cropping	两年三熟 Triple cropping in two years	
土地利用 Land-use type	旱地 Dry land	水田 Paddy field	水旱轮作 Paddy-upland rotation	
作物种类 Crop types	水稻 Rice	玉米 Maize	小麦 Wheat	
还田年限/年 Experimental duration	1~5	6~10	>10	
年均降水量/mm Mean annual precipitation	0~400	>400~600	>600~800	>800
土层深度/cm Soil depth	0~10	>10~20	>20~40	>40



0 线表示无效线, 误差线表示 95% 置信区间, 误差线附近的数字表示相应分组的数据对数量。误差线与无效线没有交点时差异显著, $P < 0.05$ 。下同。华东地区包括安徽省、江苏省、浙江省、福建省、江西省、山东省和上海市; 华北地区包括山西省、河北省、北京市和天津市; 华中地区包括河南省、湖北省、湖南省; 西南地区包括四川省、贵州省、云南省、西藏自治区和重庆市; 西北地区包括陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区; 东北地区包括黑龙江省、吉林省和辽宁省。未列出的省份表示根据本研究文献筛选标准, 没有获得相关地区的研究数据。

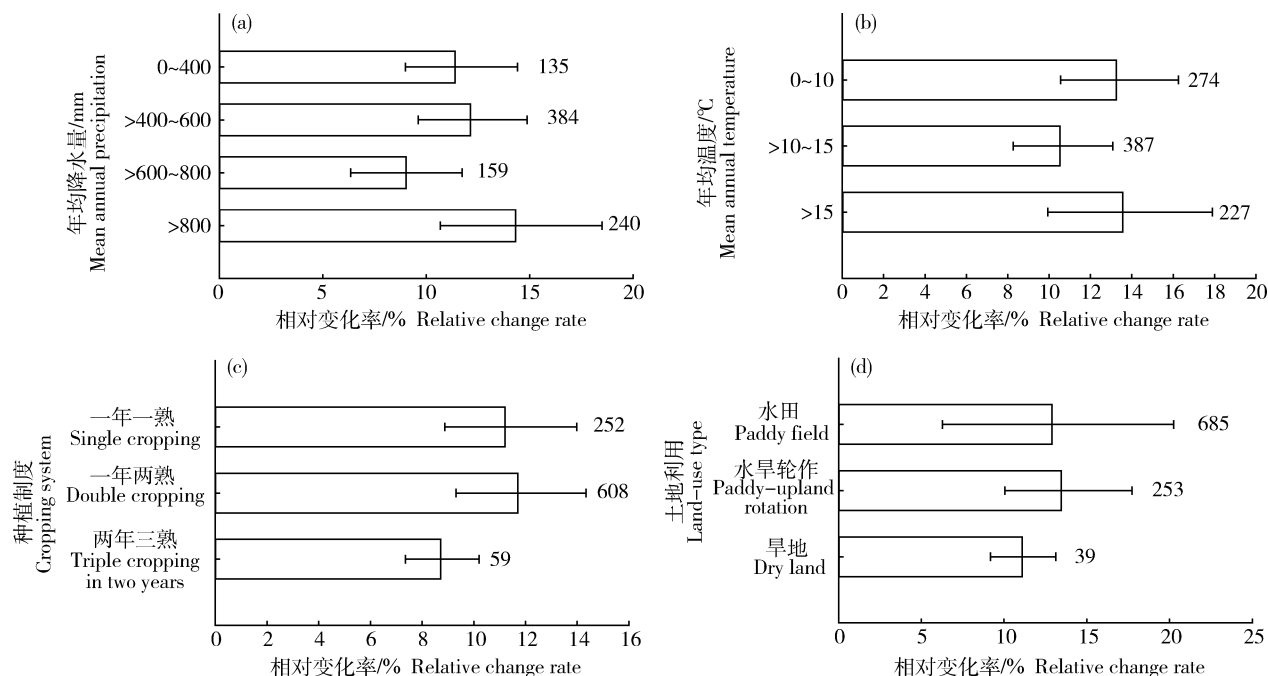
Vertical axis represents invalid line. Error bars represent 95% confidence intervals. Numbers near each bars are numbers of comparisons; If confidence intervals do not overlap with zero, it indicates significant increase (>0) or decrease (<0) ($P < 0.05$). The same below. Eastern China includes Anhui Province, Jiangsu Province, Zhejiang Province, Fujian Province, Jiangxi Province, Shandong Province, Shanghai Municipality; North China includes Shanxi Province, Hebei Province, Beijing Municipality, Tianjin Municipality; Central China includes Henan Province, Hubei Province and Hunan Province; Southwest China includes Sichuan Province, Guizhou Province, Yunnan Province, Tibet Autonomous Region, Chongqing Municipality; Northwest China includes Shaanxi Province, Gansu Province, Qinghai Province, Ningxia Hui Autonomous Region, Xinjiang Uygur Autonomous Region; Northeast China includes Heilongjiang Province, Jilin Province, Liaoning Province. The unlisted provinces indicated that no data are obtained according to the screening criteria of this study.

图 1 秸秆还田下中国不同区域土壤有机碳含量的变化率

Fig. 1 Relative change rate of residue retention on SOC content in different regions of China

不同种植制度和土地利用类型对秸秆还田下全土层土壤有机碳含量也有不同的影响,一年两熟制有机碳增量最高,达11.7%;一年一熟制有机碳增量居中,为11.2%;两年三熟制度下有机碳增

量最低,为8.7%。水旱轮作下有机碳增量最高,达13.5%;其次为水田,为12.9%;旱地有机碳增量最低,为11.1%,总体上三者差异不大($P > 0.05$)。



(a)、(b)、(c)和(d)分别为年均降水量、年均温度、种植制度和土地利用类型

(a) Mean annual precipitation; (b) Mean annual temperature; (c) Cropping system; (d) Land-use type

图2 秸秆还田不同气候状况及管理措施下土壤有机碳含量的变化率

Fig. 2 Relative change rate of SOC content responding to residue retention under different conditions

2.3 秸秆还田农田管理措施对土壤有机碳含量的影响

秸秆还田下不同耕作措施对全土层有机碳均呈现显著的增加效应($P < 0.05$),秸秆还田下免耕、翻耕和旋耕3种措施对土壤有机碳的增加效应呈递增趋势,分别为8.3%、9.2%和10.5%,不同措施的影响之间差异不大(图3)。

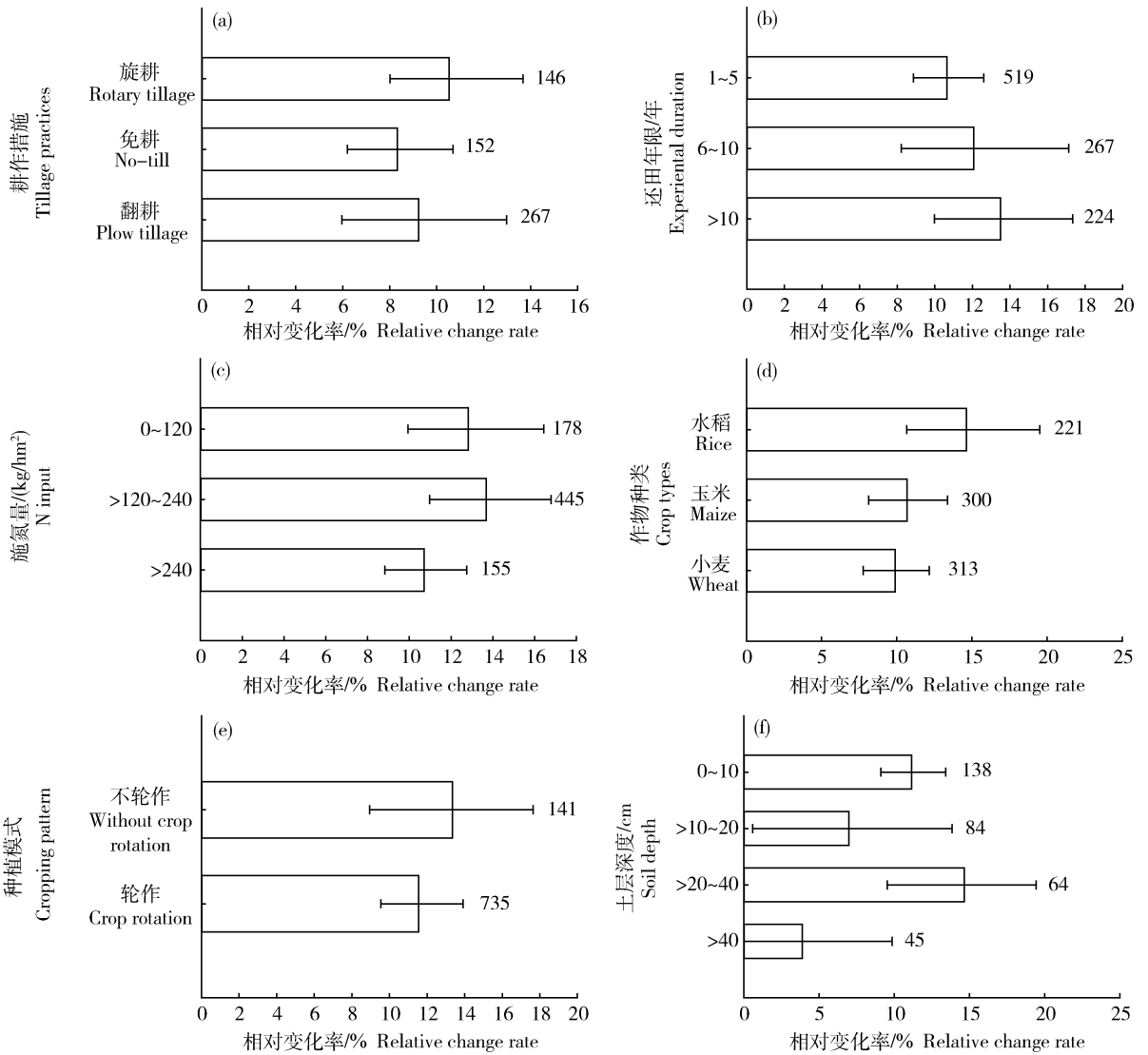
随着还田年份的增加,秸秆还田对全土层土壤有机碳的增加效应呈增加的趋势,还田年限在1~5、6~10和>10年时,分别显著增加10.6%、12.1%和13.5%的有机碳含量($P < 0.05$)。

秸秆还田对全土层土壤有机碳含量的增加效应总体上随施氮量的增加呈先增加后减小的趋势。当施氮量为0~120 kg/hm²,秸秆还田增加12.8%的有机碳含量;施氮量为>120~240 kg/hm²,秸秆还田增加13.7%的有机碳含量;施氮量>240 kg/hm²时,秸秆还田增加10.7%的有机碳含量($P < 0.05$)。

作物种类以及是否轮作对全土层土壤有机碳含量也有影响。秸秆还田条件下,种植水稻能增加14.6%的有机碳含量,种植小麦增加9.9%,种植玉米增加10.7%。当在作物轮作模式中使用秸秆还田时,土壤有机碳含量显著增加11.6%;而在不存在作物轮作的模式中,秸秆还田显著提高13.4%的土壤有机碳含量($P < 0.05$)。

2.4 秸秆还田条件下不同土层土壤有机碳含量的影响因素分析

由图4可知,试验区域年均降水量在>400~600和>600~800 mm时,秸秆还田对土壤有机碳含量的增加效应总体上随土层加深而减小,在0~10 cm相对变化率最大,分别为11.4%和14.6% ($P < 0.05$),降水量为>400~600 mm时,秸秆还田对>10~20和>40 cm土层没有显著影响。然而当年均降水量>800 mm时,秸秆还田显著增加>20~40和40 cm以下土层有机碳含量分别达35.7%和37.5% ($P < 0.05$),远高于其他土层。



(a)、(b)、(c)、(d)、(e)和(f)分别为耕作措施、还田年限、施氮量、作物种类、种植模式和土层深度。

(a) Tillage practices; (b) Experimental duration; (c) N input; (d) Crop types; (e) Cropping pattern; (f) Soil depth

图 3 秸秆还田不同农田管理措施下土壤有机碳含量的变化率

Fig. 3 Relative change rate of SOC responding to residue retention under different field management practices

试验区域年均温度为 0~10 °C 时, 秸秆还田分别显著增加 0~10 和 >20~40 cm 土壤有机碳含量 10.7% 和 13.4%, 由于缺少 >10~20 cm 土层的研究数据, 总体趋势不明晰。年均温度为 10~15 °C 时, 秸秆还田对 10 cm 以下土层的有机碳增加效应不显著, 在 0~10 cm 为 12.9% ($P < 0.05$); 年均温度 >15 °C 时, 随土层加深, 秸秆还田对土壤有机碳的增加效应总体上呈现增大的趋势, 在 >10~20 cm 土层最小, 为 4.7%, 在 >20~40 cm 土层最大, 为 22.8% ($P < 0.05$)。

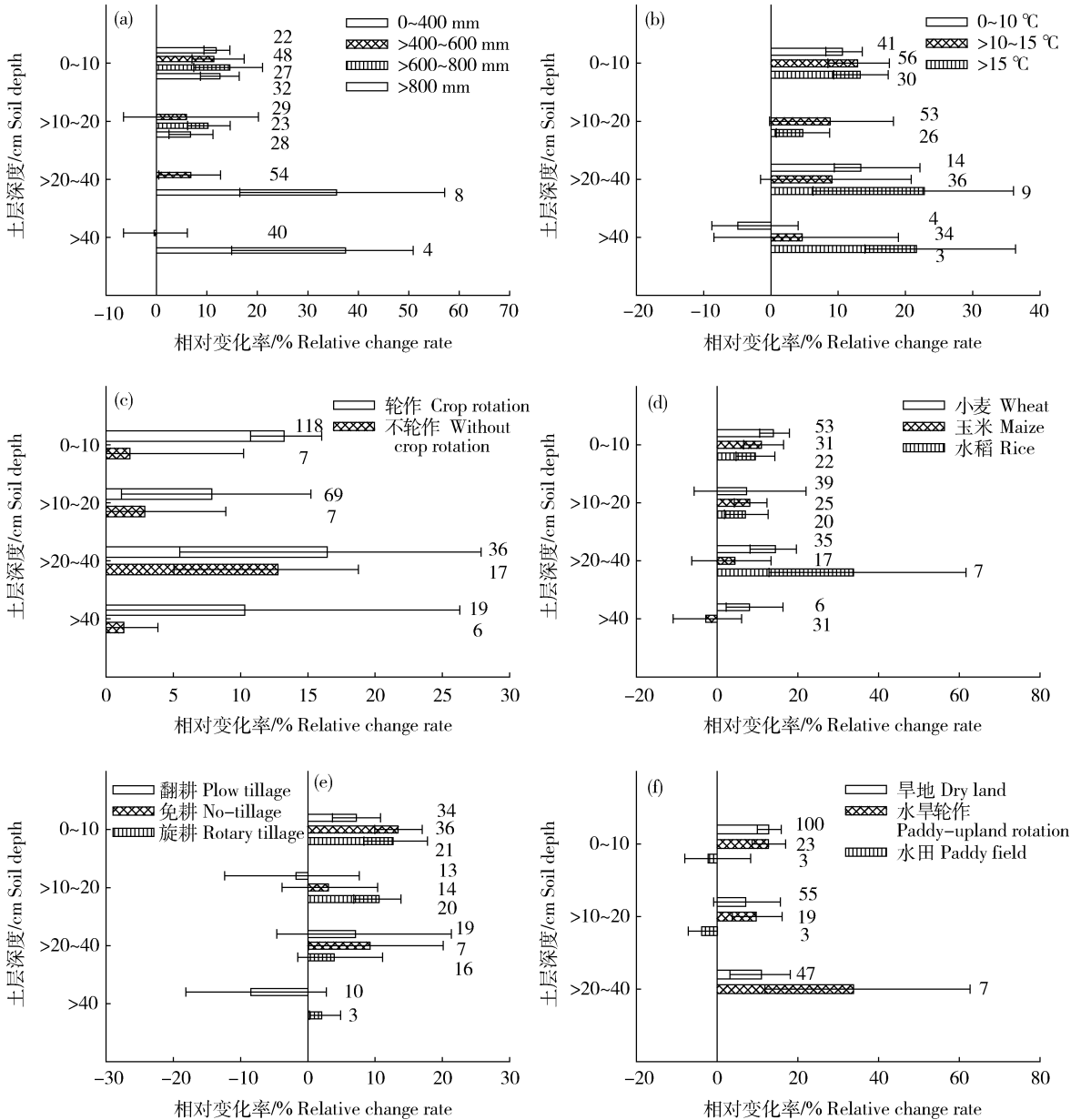
研究表明, 无论试验区域是否轮作, 秸秆还田均能增加土壤有机碳的含量, 增加效应均在 >20~

40 cm 土层最大, 轮作为 16.4%, 不轮作为 12.8% ($P < 0.05$)。随土层加深, 轮作下秸秆还田的增加效应在 7.9%~16.4%, 无论试验区域是否轮作, 秸秆还田对 40 cm 以下土层有机碳含量的影响不显著。

种植不同的作物, 秸秆还田对土壤有机碳含量的影响有所差异。试验区域种植小麦、玉米均增加有机碳含量, 最高分别增加 14.5% 和 11.0% ($P < 0.05$), 见图 3。种植玉米对 40 cm 以下土层的有机碳含量影响不显著。种植水稻对较深层土壤有机碳含量的增加效应高于浅层土壤, 在 >20~40 cm 土层增加 33.8% ($P < 0.05$), 而 0~10 和 >10~20 cm 分别仅增加 9.4% 和 7.0% ($P < 0.05$)。

比较秸秆还田下不同耕作方式对土壤有机碳的影响,0~10 cm 土层中,旋耕、免耕和翻耕分别增加了12.7%、13.4%和7.2%的有机碳含量($P < 0.05$);然而在10 cm 以下的土层中,翻耕对土壤有机碳的影响不显著。旋耕和免耕对土壤有机碳总体上均呈现增加效应,免耕在>10~20 cm 土层的增加效应不显著,旋耕在>20~40 cm 土层的增加效应不显著(图4)。

不同土地利用类型中,水旱轮作下秸秆还田对全土层土壤有机碳均呈现显著的增加效应,加权平均效应值总体上随土层加深而增大,>20~40 cm 最大为33.8%($P < 0.05$)。旱地在>10~20 cm 土层的影响不显著,在0~10和>20~40 cm 分别增加12.8%和11.0%($P < 0.05$)。水田的研究数据较少,有限的数据中,秸秆还田对水田0~10和>10~20 cm 土层均无显著影响。



(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)分别为年均降水量、年均温度、种植模式、作物种类、耕作措施、土地利用类型。下同。

(a) Mean annual precipitation; (b) Mean annual temperature; (c) Cropping pattern; (d) Crop types; (e) Tillage practices; (f) Land-use type. The same in Fig. 5.

图4 秸秆还田条件下不同土层土壤有机碳含量的变化率

Fig. 4 Relative change rate of SOC content in different soil depth under residue return

2.5 秸秆还田条件下不同还田年限土壤有机碳含量的影响因素分析

由图 5 可知，试验区域年均降水量在 0~400 mm 时，秸秆还田对全土层土壤有机碳含量的增加效应随还田年限的增加变化不大。年均降水量为 >400~600 mm 时，还田 6~10 年秸秆还田对全土层土壤有机碳含量的增加最显著，达 17.6% ($P < 0.05$)。年均降水量在 >600~800 mm 时，随还田年限增加，土壤有机碳含量的增加效应越大，还田 10 年以上时，增加 18.8% ($P < 0.05$)。当年均降水量 >800 mm 时，随还田年限增加，秸秆还田下土壤

有机碳含量呈稳定的小幅增长趋势，还田 1~5、6~10 和 10 年以上分别显著增加全土层土壤有机碳 12.7%、14.3% 和 15.1% ($P < 0.05$)。

试验区域年均温度为 0~10 °C 时，秸秆还田 6~10 年全土层土壤有机碳的增加效应最显著，达 21.1% ($P < 0.05$)，年均温度为 >10~15 °C 时，随还田年限增加，全土层土壤有机碳的增加效应递增，还田 1~5、6~10 和 10 年以上分别显著增加全土层土壤有机碳 6.2%、8.8% 和 16.6% ($P < 0.05$)。年均温度 >15 °C 时，秸秆还田对全土层土壤有机碳含量的增加效应随还田年限的增加变化不大。

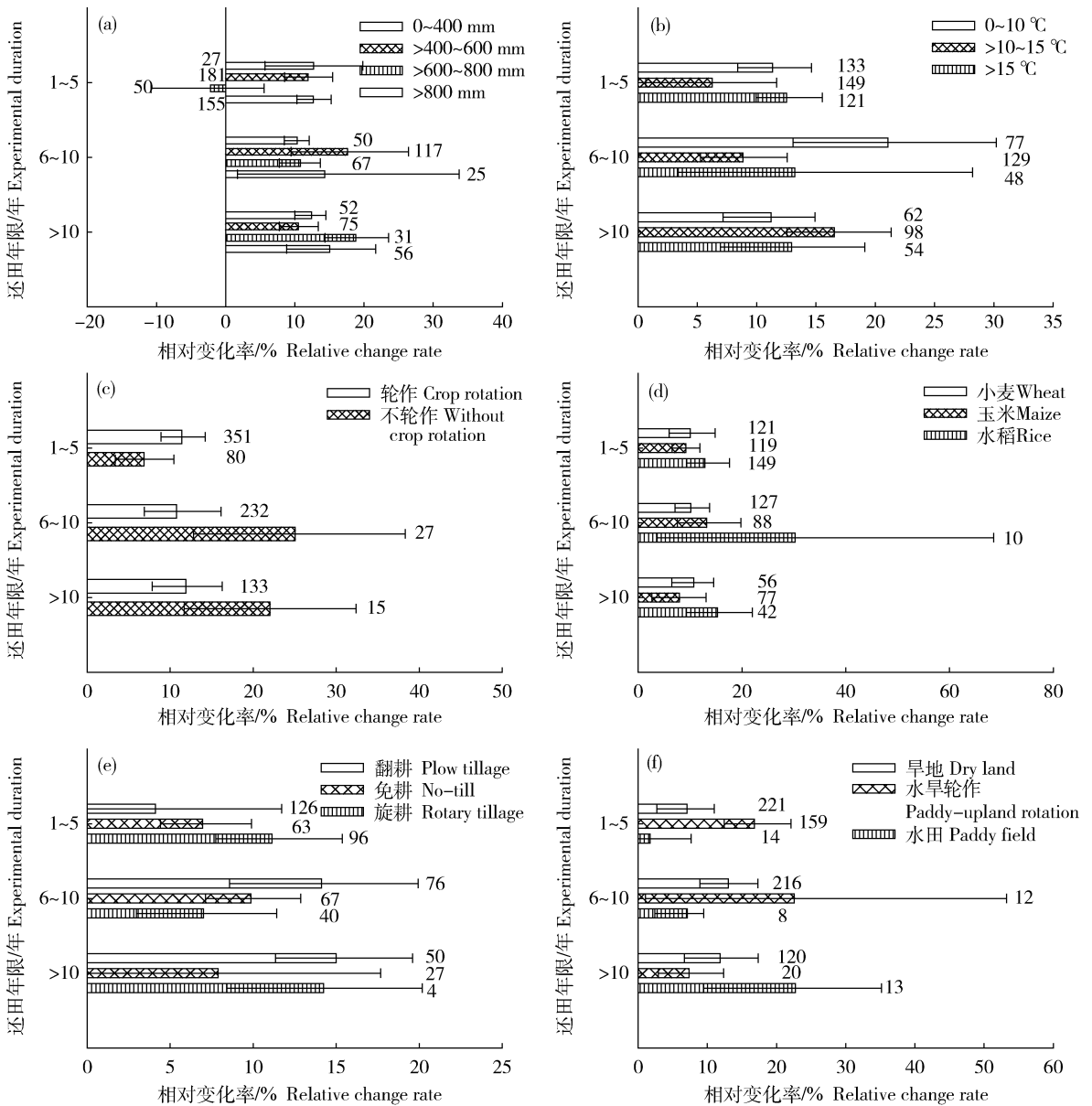


图 5 秸秆还田条件下不同还田年限土壤有机碳含量的变化率

Fig. 5 Relative change rate of SOC content in different experimental duration under residue returning

研究表明,对于轮作的试验区域,还田不同年限对全土层土壤有机碳含量的增加效应变化不大,还田1~5、6~10和10年以上分别显著增加全土层土壤有机碳11.4%、10.7%和11.9% ($P < 0.05$)。对于不轮作的试验区域,还田6~10和10年以上分别增加全土层有机碳含量25.1%和22.0% ($P < 0.05$),增加效应明显高于还田1~5年的6.8% ($P < 0.05$)。

种植不同的作物,秸秆还田年限对土壤有机碳含量的影响有所差异。不同还田年限下,种植小麦、玉米、水稻均显著增加全土层土壤有机碳含量,不同还田年限对小麦田土壤有机碳含量的影响在10.1%~10.7% ($P < 0.05$),随试验年限增加变化不大。玉米田和稻田均在还田6~10年时全土层土壤有机碳含量增加效应最显著,分别达13.2%和30.2% ($P < 0.05$)。

不同还田年限下,各耕作方式均显著增加土壤有机碳含量。翻耕的试验地随还田年限增加,全土层土壤有机碳含量的增加效应递增,还田1~5、6~10和10年以上分别显著增加全土层土壤有机碳4.1%、14.1%和15.0% ($P < 0.05$)。免耕的试验地在还田6~10年全土层土壤有机碳含量的增加效应最大,达9.9% ($P < 0.05$)。旋耕的试验地在还田10年以上时全土层土壤有机碳含量的增加效应最大,达14.2% ($P < 0.05$),在还田6~10年增加效应最小,为7.0% ($P < 0.05$)。

不同土地利用类型中,旱地和水旱轮作下还田年限对全土层土壤有机碳均呈现显著的增加效应,增加效应均在还田6~10年最显著,分别为13.0%和22.6% ($P < 0.05$)。在水田秸秆还田10年以上时,全土层土壤有机碳显著增加22.7% ($P < 0.05$),在不同还田年限各土地利用类型中增加得最多。然而秸秆还田1~5年时,水田土壤有机碳含量表现出增加的趋势,但增加效应不显著。

3 讨论

本研究应用 Meta-analysis 对秸秆还田条件下农田土壤有机碳含量及其影响因素进行了定量分析,有助于揭示秸秆还田对农田土壤有机碳含量的影响机制。土壤碳库由许多不同稳定性的组分组成,其动态平衡对土壤肥力的保持和提高、作物产量的提升有重要影响^[37]。秸秆还田能否增加土壤有机碳的含量,与土壤有机质的输入和土壤有机碳的

矿化分解有关^[38]。本研究表明,秸秆还田能够显著增加土壤有机碳的含量,这与赵鑫^[39]、蔡太义等^[40]研究结论一致,这主要是因为土壤碳库的损失在秸秆还田下得以直接补充^[41]。

3.1 秸秆还田下不同农田管理措施对有机碳含量的影响

研究表明,在秸秆还田的基础上,免耕能显著提高0~10 cm有机碳含量达13.4% ($P < 0.05$),免耕、翻耕等耕作方式能增加有机碳的含量,这与叶新新^[42]等在沿淮区域的研究结果一致,因此,适当的耕作方式结合秸秆还田是提升农田土壤生产力的重要措施。

一直以来,免耕因被认为是改善土壤质量、保持水土资源的有效做法^[1,22,43],然而从本研究结果来看,免耕对>10~20 cm土层有机碳含量的增加效应略强于翻耕,但不如旋耕。这可能是由于研究数据取自不同深度土层而产生的差异,在本研究使用的数据中,土层最深达到100 cm,远远深于常规研究大多关注的0~20 cm土层。Du等^[44]通过 Meta-analysis 提出,免耕的影响在不同区域以及不同土层的差异很大,不应过于高估免耕的作用。再考虑到实际应用中,农户生产条件及意愿也各有差异,因此,耕作方式的选择应该因地制宜,一地一法,不能一概而论。

秸秆还田与化肥配施能有效改土培肥,效果好于单施肥料或单施秸秆^[45-46]。前人研究表明,以往的氮肥施用量(300 kg/hm²)往往是过量的,适当减少氮肥施用能降低N₂O排放量^[47-48],从本研究数据得出,土壤的固碳效应也呈现类似的结果,即低氮肥施用量有利于土壤有机碳的固定(图3),因此,建议生产中适当降低氮肥施用量,既能降低生产成本,增加作物产量,也有利于土地的持续利用。

3.2 秸秆还田下不同作物类型和熟制对有机碳含量的影响

相对小麦和玉米,稻田秸秆还田的有机碳增量更大,平均增加14.6%的有机碳,这可能与稻田水分充足,土壤微生物活动更频繁,促进了还田秸秆的分解有关^[49]。稻田对>20~40 cm较深层土壤有机碳的增加效应比表层更大,可能是由于充足的水分提供了介质,使更多有机碳随重力作用向深层渗透沉淀。本研究中年均降水量的分析结果初步印证了这一推测:当年均降水量>800 mm时,秸秆还田对>20~40和40 cm以下土层有机碳的增加效应

明显大于 0~20 cm 土层,而较少的降水量对 40 cm 以下土层有机碳没有显著影响,且影响的加权平均效应值为负。因此,更高的土壤含水量可能更有利于有机碳的积累,但实际情况如何,有待对更多数据的进一步研究。

一年一熟和一年两熟的种植制度下,全土层土壤有机碳的增加效应相似,分别为 11.2% 和 11.7%,两年三熟下农田土壤有机碳增加效应最小,只增加 8.7%。作物生长消耗土壤有机碳,种植频率高的土地,有机碳消耗量更大。从全土层来看,有轮作的土地有机碳增量(11.6%)小于不轮作的土地(13.4%),可能同样与轮作土地的使用频率更高有关^[50]。在实际生产中,通过合理种植作物,采取适当管理措施,可以较长时间保持土壤肥力,弥补种植频率过高对土壤有机碳的消耗。然而本研究也有数据表明相比不轮作,轮作对有机碳的增加效应更明显,这可能与试验地的自然情况有关,作物种植还能起到防风固土的作用,在容易发生水土流失的地区,更高频率的种植保留了更多的有机碳。因此,应当重视土壤有机碳的固定,选用合适的耕作措施,适时施肥,保持土壤肥力。

有研究表明^[51],一年两熟的稻麦种植系统中仅秸秆还田对土壤有机碳的影响与稻麦双还的结果没有显著差异,这对于缓解我国秸秆的阶段性和地区性短缺,提供了新的思路。对于秸秆资源过剩的地区,除了传统的秸秆利用方式,如焚烧、还田、作为饲料外,应当着力推动秸秆资源的综合利用,例如,秸秆还可以代替木材造纸、生产建材和包装材料、发电等。这些利用方式既能减少污染,增加农民收入,更有利于农业的健康可持续发展,响应了建设“资源节约型,环境友好型”社会的要求^[52]。

3.3 还田年限对有机碳含量影响因素的影响

多项研究表明,土壤有机碳含量随着秸秆还田年限的增加而增加^[53-54]。也有研究指出,秸秆还田较长时间后,土壤有机碳会达到饱和^[21]。图 5 可知,在年均降水量、年均温度、种植模式、作物种类、耕作方式、土地利用类型等因素影响下还田 6~10 年对土壤有机碳含量的相对变化率相较于还田 1~5 年,基本都表现增加的趋势。而还田 10 年以上相较于还田 6~10 年,仅部分因素影响下的土壤有机碳含量呈增加趋势,多数情况下有机碳含量并无明显提高,反而有下降的趋势。这与 Yemadje 等^[55]和 Yang 等^[56]的研究结果一致。因此,秸秆还

田持续年限并非越长越好,从本研究的结果来看,试验地经过 10 年左右的秸秆还田之后,可以暂停一段时间,配合轮耕措施、适当的施肥和灌溉,可以改善土壤结构,保持土地肥力^[57-58]。

为保证数据结果准确可靠,本研究在筛选数据时,严格要求所用数据除秸秆还田与否的因素外,其他条件完全相同,且必须给出有机碳数据和明确的实验重复数,基于现有的已发表文献,有些影响因素的数据量较小,有些文献由于数据提供不详实等原因,不能用于 Meta 的分析,由此可能会使结果的可靠性降低。此外,农田土壤有机碳含量受多种因素的影响,这些因素之间可能存在一定的交互作用,因此还需要更进一步的研究进行检验。因此,在 Meta 分析时,应尽可能增大样本数据量,以便更客观全面地揭示研究对象内在的影响机制。在实际生产实践中,应综合考虑当地气候特征、土壤状况等条件,针对不同情形选择适宜的种植方法,以期更好地达到农田土壤固碳减排的效果。

4 结 论

本研究基于 1992—2018 年公开发表的秸秆还田对有机碳影响的文章数据,应用 Meta-analysis 方法,定量分析了秸秆还田对农田土壤有机碳含量的影响因素,结果表明,秸秆还田显著增加了农田土壤有机碳含量,但是增幅受多种因素的影响。

1) 相对于秸秆不还田,秸秆还田条件下,华东、西北和西南地区农田土壤有机碳含量的增量高于全国平均水平,华中、东北和华北地区则低于全国平均水平($P < 0.05$)。秸秆还田配合翻耕、免耕、旋耕均有利于农田土壤有机碳的积累,但积累效应在不同地区不同土层的差异可能较大,一般随土层加深,效应减小。

2) 稻田秸秆还田有机碳增量比小麦田、玉米田更高。一年一熟与一年两熟种植制度下农田土壤有机碳增加效应相近,分别为 11.2% 和 11.7%,都高于两年三熟制度(8.7%),试验地不轮作可能导致深层(>40 cm)土壤有机碳含量减少。

3) 试验地不同年均降水量对秸秆还田土壤有机碳含量的影响总体上差异不大,平均增加 11.7%,但 >800 mm 的降水对 20 cm 以下土层有机碳含量的增加效应有显著提高。年均温度的效应与年均降水量相似,平均增加 12.4%。高施氮量(>240 kg/hm²)不利于有机碳的固定,而 >120 ~

240 kg/hm² 的氮肥施用量更有利于农作物生长和土壤可持续利用。

综上所述,秸秆还田对农田土壤有机碳含量的影响因素很多,总体来说,较长的还田年限(6~10年)、适当的耕作措施(免耕结合旋耕翻耕等)、适度的氮肥施用量(>120~240 kg/hm²)等条件更有助于土壤有机碳含量的增加,从而实现农田土壤的固碳减排以及农业的可持续发展。

参考文献 References

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627
- [2] Smith P. Soil as carbon sinks: The global context[J]. *Soil Use and Management*, 2004, 20: 212-218
- [3] Huang Y, Sun W J, Zhang W, Yu Y Q. Changes in soil organic carbon of terrestrial ecosystems in China: A mini-review[J]. *Science China: Life Science*, 2010, 53 (7): 766-775
- [4] Zhao X, Zhang R, Xue J F, Pu C, Zhang X Q, Liu S L, Chen F, Lal R, Zhang H L. Management-induced changes to soil organic carbon in China: A meta-analysis[J]. *Advances in Agronomy*, 2015, 134: 1-50
- [5] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover [J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52: 345-353
- [6] Eagle A J, Bird J A, Horwath W R, Linquist B A, Brouder S M, Hill J E, Kessel C V. Rice yield and nitrogen efficiency under alternative straw management practices[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92: 1096-1103
- [7] Mosaddeghi M R, Mahboubi A A, Safadoust A. Short-term effects of tillage and manure on some soil physical properties and maize root growth in a sandy loam soil in western Iran[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(1): 173-179
- [8] Lampurlanés J, Cantero-Martínez C. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(3): 526-536
- [9] Lazarev A P, Abrashin Y I. The influence of wheat straw on the properties, biological activity and fertility of chernozems [J]. *Eurasian Soil Science*, 2000, 33(10): 1112-1117
- [10] 陆欣. 土壤肥料学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002
Lu X. *Soil Fertilizer Science*[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2002 (in Chinese)
- [11] Borenstein M, Hedges L V, Higgins J P, Rothstein H R. Effect sizes based on means[M]. In: *Introduction to Meta-Analysis*. Cornwall: John Wiley and Sons Ltd. Publication, 2009
- [12] Ji L. An assessment of agricultural residue resources for liquid biofuel production in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 44: 561-575
- [13] 赵秀玲, 任永祥, 赵鑫, 濮超, 张向前, 张海林. 华北平原秸秆还田生态效应研究进展[J]. 作物杂志, 2017(1): 1-7
Zhao X L, Ren Y X, Zhao X, Pu C, Zhang X Q, Zhang H L. Advances in ecological effects of residue retained in North China plain[J]. *Crops*, 2017(1): 1-7 (in Chinese)
- [14] 解文艳, 樊贵盛, 周怀平, 关春林, 杨振兴. 秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 60-67
Xie W Y, Fan G S, Zhou H P, Guan C L, Yang Z X. Effect of straw-incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(11): 60-67 (in Chinese)
- [15] Jacinthe P A, Lal R, Kimble J M. Carbon budget and seasonal carbon dioxide emission from a central Ohio Luvisol as influenced by wheat residue amendment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 67: 147-157
- [16] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 曹凑贵, 吴海亚, 梅金安, 翟中兵, 张丛德, 魏坦雄, 刘诗晴, 夏起昕. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2362-2367
Li C F, Kou Z K, Zhang Z S, Cao C G, Wu H Y, Mei J A, Zhai Z B, Zhang C D, Wei T X, Liu S Q, Xia Q X. Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2362-2367 (in Chinese)
- [17] 李新华, 朱振林, 董红云, 杨丽萍, 郭洪海. 秸秆不同还田模式对玉米田温室气体排放和碳固定的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2228-2235
Li X H, Zhu Z L, Dong H Y, Yang L P, Guo H H. Effects of different return modes of wheat straws on greenhouse gas emissions and carbon sequestration of maize fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11): 2228-2235 (in Chinese)
- [18] 李继福, 任涛, 鲁剑巍, 丛日环, 李小坤, 马晓晓. 水稻秸秆钾与化肥钾释放与分布特征模拟研究[J]. 土壤, 2013, 45(6): 1017-1022
Li J F, Ren T, Lu J W, Cong R H, Li X K, Ma X X. Study on characteristics of release and distribution of rice straw potassium and chemical potassium by lab simulation[J]. *Soils*, 2013, 45(6): 1017-1022 (in Chinese)
- [19] Fan W, Wu J G, Li J M, Hu J. Comparative effects of different maize straw returning modes on soil humus composition and humic acid structural characteristics in Northeast China[J]. *Chemistry and Ecology*, 2018, 34(4): 355-370
- [20] Zhang A, Cheng G, Hussain Qaiser, Zhang M, Feng H, Dyck Miles, Sun B H, Zhao Y, Chen H X, Chen J, Wang X D. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar

- application on net global warming potential in the Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2017, 205: 45-54
- [21] Liu C, Lu M, Cui J, Li B, Fang C M. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366-1381
- [22] Zhang H L, Lal R, Zhao X, Xue J F, Chen F. Opportunities and challenges of soil carbon sequestration by conservation agriculture in China[J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 124: 1-36
- [23] Zhao X, Liu S L, Pu C, Zhang X Q, Xue J F, Ren Y X, Zhao X L, Chen F, Lal R, Zhang H L. Crop yields under no-till farming in China: A meta-analysis[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 84: 67-75
- [24] Zhang H H, Zhang Y Q, Yan C R, Liu E K, Chen B Q. Soil nitrogen and its fractions between long-term conventional and no-tillage systems with straw retention in dryland farming in northern China[J]. *Geoderma*, 2016, 269: 13-144
- [25] Dong Q G, Yang Y C, Yu K, Feng H. Effects of straw mulching and plastic film mulching on improving soil organic carbon and nitrogen fractions, crop yield and water use efficiency in the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 201: 133-143
- [26] Dalal R C, Allen D E, Wang W J, Reeves S, Gibson I. Organic carbon and total nitrogen stocks in a Vertisol following 40 years of no-tillage, crop residue retention and nitrogen fertilisation[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 112(2): 133-139
- [27] Wilhelm W W, Johnson J M F, Hatfield J L, Voorhees W B, Linden D R. Crop and soil productivity response to corn residue removal: A literature review[J]. *Agronomy Journal*, 2004 96(1): 1-17
- [28] Humberto Blanco-Canqui, Lal R. Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2009, 28(3): 139-163
- [29] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52: 345-353
- [30] Van Kessel C, Venterea R, Six J, Adviento-Borbe M A, Linquist B, Groenigen K J. Climate, duration, and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(1): 33-44
- [31] Gurevitch J, Hedges L V. Statistical issues in ecological meta-analyses[J]. *Ecology*, 1999, 80(4): 1142-1149
- [32] Philibert A, Loyce C, Makowski D. Assessment of the quality of meta-analysis in agronomy[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 148: 72-82
- [33] Rosenberg M S, Adams D C, Gurevitch J. *MetaWin: Statistical Software for Meta-Analysis* [M]. Sunderland: Sinauer Associates Inc, 2000
- [34] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150-1156
- [35] Curtis P S, Wang X. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form, and physiology[J]. *Oecologia*, 1998, 113(3): 299-313
- [36] Morgan P B, Ainsworth E A, Long S P. How does elevated ozone impact soybean? A meta-analysis of photosynthesis, growth and yield[J]. *Plant Cell and Environment*, 2003, 26(8): 1317-1328
- [37] 徐蒋来, 胡乃娟, 张政文, 朱利群. 连续秸秆还田对稻麦轮作农田土壤养分及碳库的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(1): 71-75
- Xu J L, Hu N J, Zhang Z W, Zhu L Q. Effects of continuous straw returning on soil nutrients and carbon pool in rice-wheat rotation system[J]. *Soils*, 2016, 48(1): 71-75 (in Chinese)
- [38] 沈宏, 曹志洪, 王志明. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究[J]. *自然资源学报*, 1999, 14(3): 206-211
- Shen H, Cao Z, Wang Z M. Study of carbon pool management index in soils under different agroecosystems[J]. *Journal of National Resources*, 1999, 14(3): 206-211 (in Chinese)
- [39] 赵鑫. 基于 Meta-analysis 对我国保护性耕作农田土壤固碳减排效应及其潜力的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017
- Zhao X. Effects and potential of conservation tillage on soil carbon sequestration and greenhouse gases emission reduction in China based on meta-analysis[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [40] 蔡太义, 黄会娟, 黄耀威, 路文涛, 贾志宽, 杨宝平. 不同量秸秆覆盖还田对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(6): 964-973
- Cai T Y, Huang H J, Huang Y W, Lu W T, Jia Z K, Yang B P. Effects of different rates of straw mounding and returning to field on soil labile carbon and carbon pool management index[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6): 964-973 (in Chinese)
- [41] 陈鲜妮, 岳西杰, 葛玺祖, 王旭东. 长期秸秆还田对壤土耕层土壤有机碳库的影响[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(1): 25-32
- Chen X N, Yue X J, Ge X Z, Wang X D. Effect of long-term residue return on soil organic carbon storage[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(1): 25-32 (in Chinese)
- [42] 叶新新, 王冰清, 刘少君, 马超, 李军利, 柴如山, 熊启中, 李虹颖, 郜红建. 耕作方式和秸秆还田对砂姜黑土碳库及玉米小麦产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(14): 112-118
- Ye X X, Wang B Q, Liu S J, Ma C, Li J L, Chai R S, Xiong Q Z, Li H Y, Gao H J. Influence of tillage and straw retention on soil carbon pool and maize-wheat yield in Shajiang black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(14): 112-118 (in Chinese)
- [43] Zhao X, Liu S, Pu C, Zhang X Q, Xue J F, Zhang R, Wang Y Q, Lal R, Zhang H L, Chen F. Methane and nitrous oxide emissions under no-till farming in China: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22: 1372-1384

- [44] Du Z L, Denis A A, Ren T S, Zhang Q Z, Li G C. The effect of no-till on organic C storage in Chinese soils should not be overemphasized: A meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 236 (2017): 1-11
- [45] 劳秀荣, 吴子一, 高燕春. 长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 49-52
Lao X, Wu Z Y, Gao Y C. Effect of long-term returning straw to soil on soil fertility[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18 (2): 49-52 (in Chinese)
- [46] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 陈占全. 施钾和秸秆还田对栗钙土区土壤养分及小麦产量的长期效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 194-198
Tan D S, Jin J Y, Huang S W, Chen Z Q. Study on effect of long-term application of K fertilizer and returning straw to soil on soil nutrient and wheat yield in the region of castanozem [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(2): 194-198 (in Chinese)
- [47] Ju X T, Lu X, Gao Z L, Chen X P, Su F, Kogge M, Römheld V, Christie P, Zhang F S. Processes and factors controlling N₂O production in an intensively managed low carbon calcareous soil under sub-humid monsoon conditions [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(4): 1007-1016
- [48] Huang T, Gao B, Christie P, Ju X. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in a double-cropping cereal rotation as affected by nitrogen and straw management [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(12): 7897-7911
- [49] 王志明, 朱培立, 黄东迈, 刘海琴. 秸秆碳的田间原位分解和微生物量碳的周转特征[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 446-452
Wang Z M, Zhu P L, Huang D M, Liu H Q. Straw carbon decomposition in situ in field and characteristics of soil biomass carbon turnover[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3): 446-452 (in Chinese)
- [50] 臧逸飞. 长期不同轮作施肥土壤微生物学特性研究及生物肥力评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016
Zang Y F. Effect of long-term rotation and fertilization on soil microbial characters and biological fertility evaluation [D]. Yangli: Northwest A & F University, 2016 (in Chinese)
- [51] 王海候, 金梅娟, 陆长婴, 施林林, 周新伟, 沈明星, 季国军, 张永春. 秸秆还田模式对农田土壤碳库特性及产量的影响[J]. 自然资源学报, 2017, 32(5): 755-764
Wang H H, Jin M J, Lu C Y, Shi L L, Zhou X W, Shen M X, Ji G J, Zhang Y C. Effects of patterns of returning straw to field on soil carbon pool and yield in rice-wheat double cropping systems[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32 (5): 755-764 (in Chinese)
- [52] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010
Bi Y Y. Study on straw resources evaluation and utilization [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010 (in Chinese)
- [53] 张翰林, 郑宪清, 何七勇, 李双喜, 张娟琴, 吕卫光. 不同秸秆还田年限对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 216-220
Zhang H L, Zheng X Q, He Q Y, Li S X, Zhang J Q, Lv W G. Effect of years of straw returning on soil aggregates and organic carbon in rice-wheat rotation systems[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (4): 216-220 (in Chinese)
- [54] Li Y E, Shi S W, Waqas M A, Zhou X X, Li J L, Wan Y F, Qin X B, Gao Q Z, Liu S, Wilkes A. Long-term (≥ 20 years) application of fertilizers and straw return enhances soil carbon storage: a meta-analysis [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2018, 23: 603
- [55] Yemadje P L, Chevallier T, Guibert H, Bertrand I, Bernoux M. Wetting-drying cycles do not increase organic carbon and nitrogen mineralization in soils with straw amendment [J]. *Geoderma*, 2017, 304: 68-75
- [56] Yang J, Gao W, Ren S R. Long-term effects of combined application of chemical nitrogen with organic materials on crop yields, soil organic carbon and total nitrogen in fluvo-aquic soil [J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 151: 67-74
- [57] Chen H Q, Marhan S, Billen N, Stahr K. Soil organic-carbon and total nitrogen stocks as affected by different land uses in Baden-Württemberg (southwest Germany) [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2009, 172(1): 32-42
- [58] Staley T E, Edwards W M, Owens L B, Scott C. L. Soil microbial biomass and organic component alterations in a no-tillage chronosequence [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(4): 998-1005

责任编辑: 吕晓梅