

免耕与秸秆还田对中国农田固碳和作物产量的影响

张雄智¹ 李帅帅¹ 刘冰洋¹ 张云² Ahmad Latif Virk¹ 王兴¹ 赵鑫¹ 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. 中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100193)

摘要 为明确免耕与秸秆还田对中国农田固碳和作物产量的影响,基于1995—2019年公开发表文献中的1162对研究数据,综合分析免耕和秸秆还田的农田生态及生产效应。结果表明,在全国(不包括香港和澳门特别行政区、台湾省)范围内,仅考虑耕作影响,以翻耕为对照,免耕试验中,占比75.00%的试验研究表现出固碳速率提高,占比42.70%的试验研究表现出增产;仅考虑秸秆影响,以秸秆不还田为对照,秸秆还田试验中占比88.23%的试验表现出固碳速率提高,占比79.80%的试验表现出增产。与传统方式相比,免耕与秸秆还田技术充分推广后,其固碳潜力可分别增至 2.22×10^{10} 和 7.00×10^{10} kg/年,增幅分别为63.90%和7.00%;全国主要粮食作物总产量分别增加-1.16%和3.72%。回归分析表明,免耕对作物产量和有机碳的影响分别与平均气温极显著相关,与土壤粘粒含量显著相关;秸秆还田对作物产量的影响与试验年限显著相关,与土壤pH极显著相关,而对有机碳的影响则与粘粒含量和土壤pH显著相关。总体上,免耕和秸秆还田可明显提高土壤的固碳能力,但存在地域上的差异,免耕和秸秆还田相对传统耕作在区域I、区域II和区域IV等区域表现为固碳速率提高。未来应进一步挖掘免耕与秸秆还田的互作效应,进一步增强农田生态效益,提高作物产量。

关键词 免耕; 秸秆还田; 农田; 固碳; 产量

中图分类号 S34

文章编号 1007-4333(2020)05-0001-12

文献标志码 A

Effects of no-till and residue retention on carbon sequestration and yield in China

ZHANG Xiongzhi¹, LI Shuaishuai¹, LIU Bingyang¹, ZHANG Yun², AHMAD LATIF Virk¹,
WANG Xing¹, ZHAO Xin¹, 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. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract The purpose of this study was to determine the effect of no-till and residue retention on carbon sequestration and yield in Chinese farmland. Based on 1162 pairs of data from published literatures from 1995 to 2019, this study comprehensively analyzed the farmland ecology and production effect of no-till and residue retention. The results showed that: At the national scale (excluding Hong Kong and Macao Special Administrative Regions and Taiwan Province), considering the effect of tillage, 75.00% of no-till experiments showed an increase in carbon sequestration rate, and 42.70% showed an increase in yield; Considering the influence of straw, 88.23% of residue retention experiments showed an increase in carbon sequestration rate and 79.80% showed an increase in yield. Under the situation that no-till and residue retention were fully promoted, the carbon sequestration potential of no-till and residue retention could be increased up to 2.22×10^{10} and 7.00×10^{10} kg/year and with increases of 63.90% and 7.00%. The

收稿日期: 2019-07-06

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503136)

第一作者: 张雄智, 硕士研究生, E-mail: zhangxiongzhi@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

no-till and residue retention would increase the national grain output to 6.09×10^8 and 6.39×10^8 t, with increases of -1.16% and 3.72% . Regression analysis showed that the effects of no-till on crop yield and organic carbon were significantly correlated with the average temperature and clay content. The effects of residue retention on crop yield were very significantly correlated with experimental years, correlated with pH, and significantly correlated with clay content and pH. In general, compared with conventional tillage, the no-till and residue retention could significantly improve the carbon sequestration capacity of soil, but there were regional differences. Compared with conventional tillage, the no-till and residue retention increases the carbon sequestration rate in Region I, Region II and Region IV. In the future, the interaction effects between no-tillage and residue retention should be further explored to improve farmland ecology and increase crop yield.

Keywords no-till; residue retention; farmland; carbon sequestration; yield

农田不仅仅是温室气体排放源,同时也是重要的碳汇^[1]。据估计,全球每年土壤呼吸释放的碳大约是化石燃料燃烧排放量的10倍以上^[2],农田土壤减排对缓解全球气候变化意义重大。免耕和秸秆还田因其具有改善土壤结构、提高土壤有机碳和增强地力等方面的优点,近年来得到大力推广^[3]。当前,免耕和秸秆还田的研究主要集中于应用技术、对作物产量的影响、农田固碳减排作用和对土壤肥力的影响等方面。IPCC估计,合理的农田管理措施可以使世界碳库增速在 $4 \times 10^{11} \sim 9 \times 10^{11}$ kg/年,或在50年内累积固碳 $2.4 \times 10^{13} \sim 4.3 \times 10^{13}$ kg^[4]。Manzoni等^[5]认为土壤碳库的微小变化也会对全球碳循环产生重大影响。薛建福等^[6]研究表明,采取合理的农田管理措施,进一步推广免耕和秸秆还田等保护性耕作措施,有助于增加土壤碳储量,提高土壤固碳能力,缓解气候变化,同时也可提高作物产量。谢瑞芝等^[7]研究表明,我国保护性耕作的产量研究结果多为增产,但也有10.92%的试验研究出现保护性耕作减产的情况。我国免耕和秸秆还田推广面积逐年递增,其对气候变化、农田生态和作物生产的影响日益深刻。

评估我国农田管理方式及其转变对土壤有机碳和作物产量的影响,明确全国范围的农田固碳潜力与产量潜力,对促进农业可持续发展有深远意义。目前,对全国(不包括香港和澳门特别行政区、台湾省)范围内传统耕作转换为免耕和秸秆还田的固碳潜力与产量潜力的综合分析鲜见报道。本研究通过收集1995—2019年全国各地田间试验的相关数据,并结合统计数据,系统探讨免耕和秸秆还田的固碳、增产情况,评估免耕和秸秆还田在当前与目标推广情况下的固碳潜力和产量潜力,以期客观评价免耕和秸秆还田技术的固碳和产量效应,为未来推广和应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究基于中国知网和 web of science 核心合集数据库于1995—2019年公开发表的关于免耕与秸秆还田的相关学术论文和国家数据中心、中国农业年鉴、全国农业机械化统计年报的相关统计数据,从中获取全国61个长期试验的研究数据,提取试验站点位置、耕作措施、有机碳含量、容重、碳储量、试验时间和产量等数据,建立免耕与秸秆还田数据库。为减小研究误差,研究数据必须符合以下条件:1)研究对象必须为中国(不包括香港和澳门特别行政区、台湾省)农田土壤;2)试验处理应至少包括耕作方式(免耕和翻耕)或秸秆还田方式(还田和不还田)2组处理中的一个;3)研究必须为大田位点试验,不包含盆栽试验、模型模拟、无重复和数据不全的研究。

1.2 试验位点

本研究试验数据均来源于全国各地试验站点或试验田,试验地点分布于中国主要粮食生产区,具有良好的代表性。根据全国粮食产区分布、气候、熟制和主要粮食作物种类将全国分为区域I、区域II、区域III、区域IV和区域V共5个区域(表1)^[7],并根据各省级行政区域将试验进行划分(香港和澳门特别行政区,台湾省,未纳入本研究范围)。

1.3 计算方法

固碳效应的主要评价指标包括有机碳含量、固碳速率和固碳潜力,其中,有机碳含量直接在文献中获取,对于缺乏有机碳含量的情况,通过以下公式将有机质含量转换为有机碳含量:

$$\text{SOC}_c = 0.58 \times \text{OM} \quad (1)$$

式中: SOC_c 是土壤有机碳含量,g/kg;OM为土壤有机质含量,%;0.58是有机质含量与有机碳含量转

表 1 中国农业区划
Table 1 China's agricultural regionalization

区域 Region	省(市、自治区) Province (City and Autonomous Region)	熟制 Cropping system	主要作物 Major crop
区域 I Region I	山东省、河南省、河北省、北京市、天津市	一年两熟	玉米、小麦
区域 II Region II	山西省、陕西省、宁夏回族自治区、甘肃省、青海省、新疆维吾尔自治区、西藏自治区	一年一熟	玉米、小麦
区域 III Region III	黑龙江省、吉林省、辽宁省、内蒙古自治区	一年一熟	玉米、大豆
区域 IV Region IV	江苏省、江西省、上海市、安徽省、浙江省、湖南省、湖北省、福建省、广东省、广西壮族自治区、上海市、海南省	一年两熟、一年多熟	水稻
区域 V Region V	四川省、重庆市、云南省、贵州省	一年多熟	玉米、小麦、水稻

注：香港和澳门特别行政区，台湾省，未纳入本研究范围。

Note: Hong Kong and Macao special administrative regions and Taiwan province are not included in this study.

换系数。

本研究通过对各省份位点试验的整理分析，得到各省份免耕措施的固碳速率，结合免耕措施当前和目标推广情况，依据推广面积的变化情况，对固碳潜力进行探讨。固碳速率和固碳潜力分别采用下列公式进行计算^[8-9]：

$$SOC_{SY} = \frac{SOC_{S2} - SOC_{S1}}{Y} \quad (2)$$

式中： SOC_{SY} 为固碳速率， $kg/(hm^2 \cdot 年)$ ； SOC_{S2} 为试验结束时土壤有机碳储量， kg/hm^2 ； SOC_{S1} 为试验开始时土壤有机碳储量， kg/hm^2 ； Y 为试验年限，年。

$$SOC_{SP} = \sum SOC_{SYi} \times \Sigma A_i \quad (3)$$

式中： SOC_{SP} 为农田土壤固碳潜力， $kg/年$ ； $\sum SOC_{SY}$ 为该地区年际固碳速率， $kg/(hm^2 \cdot 年)$ ； ΣA_i 为该省农田面积， hm^2 。

推广率是指免耕与秸秆还田的推广比率，

$$PI = \frac{SA}{SAT} \quad (4)$$

式中： PI 为某省份的推广率； SA 为该省采用免耕与秸秆还田的主要粮食作物播种面积， hm^2 ； SAT 为该省主要粮食作物总面积， hm^2 （本研究主要粮食作物有玉米、小麦和水稻）。

目标推广面积计算公式如下：

$$SA_P = SAT \times PI_P \quad (5)$$

式中： SA_P 为某省目标推广面积， hm^2 ； SAT 为该省主要粮食作物总播种面积， hm^2 ； PI_P 为该省目标推广率。根据刘恩科等^[10]和曾江海等^[11]研究，水稻、玉米和小麦秸秆 100% 还田，在技术上是可行的。本研究中，秸秆还田处理采用广泛应用的全量还田方式，将其与秸秆不还田进行对比进行探究。根据国家关于推广保护性耕作的计划来确定免耕措施的推广面积，再考虑经济因素，最终确定中国 13 个省、自治区和直辖市适宜推广免耕措施的面积为农田面积的 20%，包括北京市、天津市、河北省、山西省、内蒙古自治区、辽宁省、吉林省、黑龙江省、陕西省、甘肃省、宁夏回族自治区、青海省和新疆维吾尔自治区。对于其他地区，适宜推广免耕的面积为农田面积的 10%^[12]。

本研究采用相对产量来量化效应值，计算公式如下：

$$Y_R = \frac{X}{Y} \quad (6)$$

式中： Y_R 为相对产量； X 为某措施下的粮食实际产量， kg/hm^2 ； Y 为另一措施下的粮食实际产量， kg/hm^2 。

为明确环境因素对耕作和还田的产量和土壤有机碳效应的影响，本研究引入在生态学 Meta 分析中广泛使用的效应比自然对数 ($\ln R$) 为效应值

(Effect size)衡量环境因素对相应指标影响的大小,计算公式如下:

$$\ln R = \ln \frac{\chi_1}{\chi_2} \quad (7)$$

式中: χ_1 和 χ_2 分别为处理组和对照组的有机碳储量与作物产量, $\ln R$ 为效应值。本研究运用SPSS 17.0对环境变量和效应值进行回归分析,分别对平均气温、降水量、起始有机碳含量、当季施氮量、试验年限、年均蒸发量、土壤粘粒含量、土壤pH和起始容重等因素进行分析,通过回归分析的结果来探究环境因素对耕作方式的固碳和产量效应的影响。

2 结果与分析

2.1 免耕与秸秆还田措施对中国农田固碳效应的影响

本研究共收集95对免耕和秸秆还田对固碳速率影响研究的数据,其中免耕44对,秸秆还田51对。全国范围的试验研究中免耕相对翻耕固碳速率提高的试验研究占比为75.00%,表现为固碳速率降低的试验研究占比为25.00%;占比达88.23%的试验研究表现为秸秆还田相对秸秆不还田固碳速率提高,占比为11.77%的试验研究表现为固碳速率降低。

由图1可见,区域I、区域II和区域IV的耕作试验研究中,占比为77.80%~86.70%的试验研究表现为免耕相对翻耕农田固碳速率提高,其中区域II占比86.70%的试验研究表现出免耕相对翻耕固碳速率增加,但在区域III和区域V,有较多的试验研究表现为免耕相对翻耕固碳速率减少,其中区域III的试验全部表现为免耕相对翻耕固碳速率降低,区域V有50.00%的试验研究表现为免耕措施降低固碳

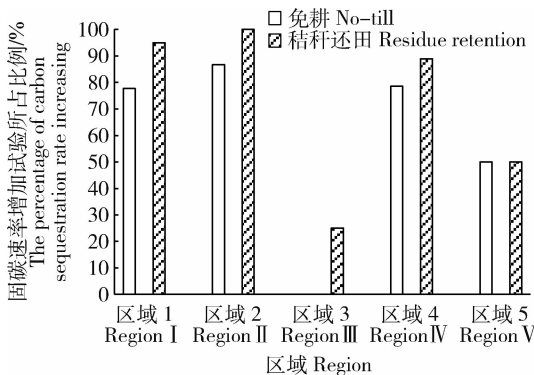


图1 免耕与秸秆还田措施提高固碳速率的试验所占比例
Fig. 1 Percentage of carbon sequestration rate increasing by no-till and residue retention

速率。在区域I、区域II与区域IV秸秆还田相对秸秆不还田均表现为固碳速率明显提高,占到各区域试验总数的88.90%~100.00%,其中在区域II的试验研究全部表现为秸秆还田相对秸秆不还田固碳速率增加,而在区域III和区域V秸秆还田提高固碳速率的试验研究较少。

2.2 免耕与秸秆还田措施对中国主要粮食作物产量效应的影响

整体来看,全国范围免耕相对翻耕增产的试验研究数量占总试验数的比例为42.70%,秸秆还田相对秸秆不还田增产的试验研究数量占总试验数的比例为79.80%。

由图2所示,免耕与秸秆还田对产量的影响在不同区域的差别较小,但这2种措施对产量的影响差异较大。免耕相对翻耕增产的试验研究数占各地区研究总数的比例为30.60%~47.60%,其中区域I免耕试验研究中增产的试验占比为30.60%,而秸秆还田相对秸秆不还田增产的田间试验数占各地区研究总数的比例为67.40%~94.40%,其中,区域III和区域IV秸秆还田试验研究中增产试验数占比分别高达94.40%和93.00%。

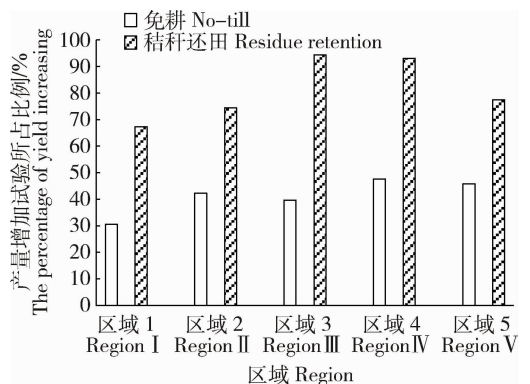


图2 免耕与秸秆还田措施产量增加的试验所占比例
Fig. 2 Percentage of yield increasing by no-till and residue retention

2.3 免耕与秸秆还田措施的固碳潜力

由表2可见,免耕在全国范围的推广率达12.57%,各地区差异明显,其中区域I推广率最高,北京市推广率高达84.79%,而区域IV和区域V推广率较低,多个省份推广率为0。免耕目前推广面积为 1.11×10^7 hm²,目标推广面积为 1.91×10^7 hm²,增长幅度达71.94%。大部分省份固碳速率为正值,这表明免耕对于农田土壤固碳具有正向

作用。当前情况下，免耕固碳潜力仅为 1.35×10^{10} kg/年，在考虑经济性的目标推广情况下，免耕措施的固碳潜力可增至 2.22×10^{10} kg/年，增幅达 63.90%。

表 2 中国免耕措施推广情况及其固碳速率与固碳潜力

Table 2 Popularization of no-till, carbon sequestration rate and carbon sequestration potential in China

区域 Region	省 (市、自治区) Province (City and Autonomous Region)	推广率/% Populari- zation rate	免耕措施推广面积/ (10^3 hm ²) No-till area		固碳速率/ (10^3 kg/ (hm ² · 年)) Soil carbon sequestration rate	固碳潜力/(10^9 kg/年) Soil carbon Sequestration potential	
			潜在 Potential	目前 Current		潜在 Potential	目前 Current
区域 I Region I	北京 Beijing	84.79	105.82	105.82	1.478	0.156	0.156
	河北 Hebei	35.11	1 661.64	1 661.64	1.460	2.426	2.426
	天津 Tianjin	22.85	74.44	74.44	1.808	0.135	0.135
	河南 Henan	29.60	1 706.11	1 706.11	2.888	4.927	4.927
	山东 Shandong	53.36	2 778.61	2 778.61	0.623	1.732	1.732
区域 II Region II	山西 Shanxi	7.14	706.82	252.45	0.667	0.472	0.168
	陕西 Shaanxi	15.40	572.50	440.84	0.191	0.110	0.084
	宁夏 Ningxia	5.04	157.32	39.64	0.693	0.109	0.027
	甘肃 Gansu	3.53	710.78	125.32	0.546	0.388	0.068
	青海 Qinghai	11.56	59.02	34.10	0.693	0.041	0.024
	新疆 Xinjiang	6.65	426.94	142.02	1.506	0.643	0.214
	西藏 Tibet	0.00	31.54	0.00	0.693	0.022	0.000
区域 III Region III	黑龙江 Heilongjiang	1.47	3 011.38	221.17	1.121	3.374	0.248
	吉林 Jilin	13.84	1 237.37	856.37	1.121	1.386	0.960
	辽宁 Liaoning	5.65	791.05	223.46	1.121	0.886	0.250
	内蒙古 Inner Mongolia	23.21	1 568.80	1 568.80	1.121	1.758	1.758
区域 IV Region IV	江苏 Jiangsu	1.59	323.48	51.42	0.638	0.206	0.033
	江西 Jiangxi	1.64	204.32	33.61	0.808	0.165	0.027
	上海 Shanghai	1.55	9.07	1.40	0.515	0.005	0.001
	安徽 Anhui	14.69	644.17	644.17	0.177	0.114	0.114
	浙江 Zhejiang	0.22	108.99	2.40	0.537	0.059	0.001
	湖南 Hunan	0.54	230.75	12.54	0.031	0.007	0.000
	湖北 Hubei	2.79	296.71	82.78	1.287	0.382	0.107
	福建 Fujian	0.00	67.57	0.00	0.537	0.036	0.000
	广东 Guangdong	0.00	135.45	0.02	0.537	0.073	0.000
	广西 Guangxi	1.54	216.25	33.29	0.537	0.116	0.018
	海南 Hainan	0.16	31.64	0.52	0.537	0.017	0.000
区域 V Region V	四川 Sichuan	0.30	446.66	13.39	3.078	1.375	0.041
	重庆 Chongqing	0.00	148.88	0.00	-0.717	-0.107	0.000
	云南 Yunnan	0.12	388.28	4.62	2.129	0.827	0.010
	贵州 Guizhou	0.00	252.00	0.11	1.340	0.338	0.000
合计 Total		12.57	19 104.35	1 111.07		22.178	13.531

由表3可见,秸秆还田措施全国范围推广率为42.47%,多个省份推广率超过80.00%,但也有部分地区推广率在5.00%以下。秸秆还田当前的推广面积为 3.95×10^7 hm²,目标推广面积为 9.46×10^7 hm²。

表3 中国秸秆还田措施推广情况及其固碳速率与固碳潜力

Table 3 Popularization of residue retention, carbon sequestration rate and carbon sequestration potential in China

区域 Region	省 (市、自治区) Province (City and Autonomous Region)	推广率/ % Populari- zation rate	秸秆还田措施 推广面积/ (10 ³ hm ²) Residue retention area		固碳速率/ (10 ³ kg/(hm ² ·年)) Soil carbon sequestration rate		固碳潜力/ (10 ⁹ kg/年) Soil carbon sequestration potential	
			潜在 Potential	目前 Current	秸秆不还田 Residue removed	秸秆还田 Residue retention	潜在 Potential	目前 Current
			区域 I Region I	北京 Beijing	65.27	124.80	81.46	-0.227
	河北 Hebei	61.04	4 733.23	2 889.31	0.074	0.674	3.189	2.084
	天津 Tianjin	89.19	325.74	290.53	0.708	1.284	0.418	0.398
	河南 Henan	62.70	5 764.86	3 614.65	1.516	2.148	12.383	11.023
	山东 Shandong	82.38	5 207.21	4 289.62	0.413	0.911	4.742	4.286
区域 II Region II	山西 Shanxi	47.84	3 534.12	1 690.78	0.810	1.294	4.574	3.681
	陕西 Shaanxi	33.29	2 862.48	952.95	0.014	0.137	0.391	0.157
	宁夏 Ningxia	19.34	786.60	152.16	0.323	0.766	0.602	0.321
	甘肃 Gansu	8.41	3 553.89	298.76	0.087	0.747	2.654	0.506
	青海 Qinghai	17.20	295.10	50.75	0.319	0.736	0.217	0.115
	新疆 Xinjiang	86.11	2 134.72	1 838.23	0.319	0.736	1.571	1.448
	西藏 Tibet	0.00	315.37	0.00	0.319	0.736	0.232	0.101
区域 III Region III	黑龙江 Heilongjiang	58.26	15 056.90	8 772.48	0.497	0.477	7.185	7.312
	吉林 Jilin	34.49	2 133.57	6 186.84	0.119	-0.057	-0.350	0.361
	辽宁 Liaoning	21.32	3 955.27	843.45	1.687	1.178	4.657	6.241
	内蒙古 Inner Mongolia	31.83	6 760.45	2 151.99	0.148	0.556	3.758	1.879
区域 IV Region IV	江苏 Jiangsu	69.60	3 234.81	2 251.27	0.120	0.299	0.968	0.792
	江西 Jiangxi	39.18	2 043.21	800.57	-0.291	0.345	0.705	-0.085
	上海 Shanghai	85.78	90.69	77.79	-0.170	0.253	0.023	0.018
	安徽 Anhui	69.83	4 383.66	3 060.90	-0.194	0.244	1.071	0.491
	浙江 Zhejiang	30.61	1 089.90	333.67	-0.194	0.244	0.266	-0.065
	湖南 Hunan	13.41	2 307.46	309.53	-0.471	0.107	0.248	-0.908
	湖北 Hubei	38.55	2 967.13	1 143.96	-0.194	0.244	0.725	-0.075
	福建 Fujian	14.54	675.66	98.26	-0.194	0.244	0.165	-0.088
	广东 Guangdong	20.71	1 354.49	280.58	-0.194	0.244	0.331	-0.140
	广西 Guangxi	24.24	2 162.47	524.16	-0.194	0.244	0.528	-0.190
	海南 Hainan	21.82	316.36	69.02	-0.194	0.244	0.077	-0.031
区域 V Region V	四川 Sichuan	6.13	4 466.63	273.91	3.078	3.144	14.044	13.765
	重庆 Chongqing	4.66	1 488.79	69.34	2.090	1.471	2.191	3.069
	云南 Yunnan	2.15	3 882.81	83.53	0.954	-0.453	-1.758	3.587
	贵州 Guizhou	2.39	2 519.95	60.29	2.207	1.670	4.208	5.530
合计 Total		42.47	94 581.60	3 987.46			70.030	65.578

10^7 hm², 增长幅度为 140.00%。秸秆还田措施对土壤固碳的影响表现为正效应, 除吉林省和云南省外, 其他省份固碳速率均 >0 , 而秸秆不还田条件下, 区域 I 中北京市和区域 IV 多数省、市及自治区的固碳速率 <0 , 表现出负效应。秸秆还田的固碳速率普遍高于秸秆不还田, 但区域 III 和区域 V 部分省份出现秸秆还田固碳速率低于秸秆不还田措施。在当前秸秆还田推广情况下, 全国农田固碳潜力为 6.56×10^{10} kg/年, 在秸秆还田技术充分使用的目标推广情况下时, 固碳潜力可增至 70.03 kg/年, 增幅为 7.00%。

2.4 免耕与秸秆还田措施的产量潜力

由表 4 可见, 各省份免耕的相对产量在 1 上下浮动, 免耕和翻耕的产量效应不是很明晰, 而对于秸秆还田, 其相对产量均 >1 。随着免耕技术的推广, 产量的增长出现倒退, 当前推广情况下全国主要粮食作物总产量为 6.16×10^8 t/年, 但免耕措施充分推广后, 产量降至 6.09×10^8 t/年, 呈现减产。秸秆还田技术充分推广后, 我国粮食总产将由 6.16×10^8 t/年增至 6.39×10^8 t/年, 增幅为 3.72%, 呈现出明显增长。

2.5 作物产量与固碳效应变化的影响因素分析

由表 5 和表 6 可见, 作物产量的耕作效应值与平均气温极显著相关, 在合理范围内, 平均气温为 12.43 °C 时, 耕作方式转变的产量效应最差, 高于或低于该值, 其发挥的效用增强。有机碳的耕作效应值与土壤粘粒含量显著相关, 土壤粘粒含量与效应值的抛物线拟合结果表明, 效应值随土壤粘粒含量增大而增强。作物产量的还田效应值与试验年限显著相关, 与土壤 pH 极显著相关, 试验年限为 9.12 时, 效应值最低, 土壤 pH 为 6.3 时, 效应值最高。有机碳的还田效应值与土壤粘粒含量和土壤 pH 相关, 土壤粘粒含量为 25.50%, 有机碳的效应值最低, 土壤 pH 为 7.03 时效应值最高。

3 讨论

3.1 免耕与秸秆还田措施对农田固碳效应的影响

从全国范围来看, 免耕与秸秆还田措施可明显增加土壤固碳, 其中占比为 75.00% 的免耕试验和占比为 88.23% 的秸秆还田试验表现为固碳速率提高。由于我国幅员辽阔, 气候、土壤环境多样, 免耕与秸秆还田措施对农田固碳和产量效应的影响并不完全一致。Lal 等^[13] 和 Ussiri 等^[14] 通过长期定位

试验发现, 免耕由于减少土壤扰动, 降低土壤有机碳的矿化速率, 从而增加土壤固碳。秸秆还田增加了土壤有机质投入从而使土壤有机碳含量增加^[15-16]。本研究 95 对试验数据表明, 区域 I、区域 II、区域 IV 免耕与秸秆还田措施比传统耕作方式能明显提高固碳速率, 而区域 III 明显表现出固碳速率降低, 这可能与地域气候差别较大有关。有研究表明, 区域 III 冬季寒冷, 夏季少雨, 微生物稀少, 秸秆不易腐化, 免耕与秸秆还田的固碳效果相对其他地区较差^[17]。因此, 要因地制宜实施免耕与秸秆还田技术, 充分发挥其固碳减排的优点。

3.2 免耕与秸秆还田措施对作物产量的影响

当仅考虑耕作或秸秆还田单项措施的影响时, 免耕表现为减产, 秸秆还田表现为增产。国内外大量研究表明, 与传统耕作方式相比, 免耕与秸秆还田可增加土壤有机质含量, 提高土壤湿度, 改善农田生态, 但对作物产量没有明显影响^[18-19]。也有研究表明, 免耕与秸秆还田相对传统耕作, 能够提高土壤质量, 提高根际土壤固碳, 提高土壤微生物的种类和数量, 增强水土保持能力而起到增产的效果^[20-24]。虽然多数研究从正面评价免耕与秸秆还田的生态效益, 但免耕与秸秆还田在部分区域存在减产现象是不争的事实。Lal 等^[25] 的研究表明, 以少免耕和秸秆还田为主要措施的保护性耕作技术会造成一定程度的土壤板结和排水不畅等不利影响, 从而出现减产的情况。本研究对 1 067 对研究数据进行分析, 免耕相较于传统耕作增产的比例明显低于 50.00%, 而秸秆还田相较于秸秆不还田增产比例高于 50.00%。谢瑞芝等^[7] 研究表明, 少免耕会造成 37.04% 的减产, 秸秆还田处理会造成 11.06% 的减产。由于免耕减少了土壤扰动, 土壤易板结, 水分流通不畅, 养分难以被作物所利用, 因此会造成一定程度的减产; 秸秆还田后, 在带来一系列有利作用的同时也会使病虫害增多, 影响作物产量。总之, 应用免耕与秸秆还田技术可能会使作物减产, 而不同区域间存在一定差异, 少免耕造成减产的比例较高, 秸秆还田引起减产比例较低。

3.3 固碳潜力与产量潜力

2016 年, 免耕的全国推广率为 12.57%, 但距离免耕措施理想的推广情况, 仍有一定差距^[26]。在最理想的免耕推广情况下, 推广面积可增加 71.94%, 固碳潜力增至 2.22×10^{10} kg/年。赵永存等^[27] 研究表明, 我国农田 20 cm 深度的土壤固碳量在 $9.6 \times$

表4 免耕与秸秆还田措施的产量及其潜力

Table 4 Yield and its potential of no-till and residue retention

区域 Region	省(市、自治区) Province (City and Autonomous region)	免耕 No-till			秸秆还田 Residue retention		
		相对产 量/% Relative yield	潜在产量/ (10 ⁴ t/年) Potential yield	当前产量/ (10 ⁴ t/年) Current yield	相对产 量/% Relative yield	潜在产量/ (10 ⁴ t/年) Potential yield	当前产量/ (10 ⁴ t/年) Current yield
区域 I Region I	北京 Beijing	96.42	53.69	53.69	102.29	54.11	53.69
	河北 Hebei	91.09	3 460.24	3 460.24	103.47	3 506.10	3 460.24
	天津 Tianjin	96.42	196.37	196.37	102.29	196.85	196.37
	河南 Henan	102.44	5 946.60	5 946.60	100.24	5 946.60	5 951.87
	山东 Shandong	92.65	4 700.71	4 700.71	104.10	4 733.58	4 700.71
区域 II Region II	山西 Shanxi	100.59	1 323.54	1 318.51	111.46	1 393.24	1 318.51
	陕西 Shaanxi	98.91	1 225.18	1 228.29	103.42	1 255.97	1 228.29
	宁夏 Ningxia	108.58	393.87	370.60	110.43	401.16	370.60
	甘肃 Gansu	98.48	1 126.23	1 140.59	116.89	1 314.59	1 140.59
	青海 Qinghai	100.78	103.79	103.45	110.43	112.23	103.45
	新疆 Xinjiang	103.61	1 548.26	1 512.28	110.43	1 532.38	1 512.28
	西藏 Tibet	100.78	102.71	101.91	110.43	112.54	101.91
区域 III Region III	黑龙江 Heilongjiang	87.68	5 360.38	6 058.50	104.58	6 171.33	6 058.50
	吉林 Jilin	102.28	3 742.91	3 717.21	107.49	3 895.11	3 717.21
	辽宁 Liaoning	101.97	2 130.18	2 100.63	106.53	2 207.12	2 100.63
	内蒙古 Inner Mongolia	93.72	2 780.25	2 780.25	113.97	3 033.82	2 780.25
区域 IV Region IV	江苏 Jiangsu	98.91	3 434.04	3 466.01	105.21	3 518.97	3 466.01
	江西 Jiangxi	98.28	2 107.27	2 138.11	119.80	2 377.04	2 138.11
	上海 Shanghai	97.00	96.63	99.16	107.90	100.20	99.16
	安徽 Anhui	94.14	3 417.40	3 417.40	107.90	3 494.60	3 417.40
	浙江 Zhejiang	107.61	808.09	752.20	108.12	793.56	752.20
	湖南 Hunan	100.07	2 955.03	2 953.20	103.66	3 046.45	2 953.20
	湖北 Hubei	97.14	2 501.06	2 554.12	110.88	2 717.94	2 554.12
	福建 Fujian	98.32	637.32	650.87	107.90	694.31	650.87
	广东 Guangdong	98.32	1 337.34	1 360.22	107.90	1 444.03	1 360.22
	广西 Guangxi	101.60	1 541.82	1 521.30	100.61	1 528.35	1 521.30
区域 V Region V	海南 Hainan	98.32	174.92	177.86	107.90	188.66	177.86
	四川 Sichuan	100.04	3 484.90	3 483.50	105.29	3 656.02	3 483.50
	重庆 Chongqing	99.37	1 158.64	1 166.00	105.34	1 225.23	1 166.00
	云南 Yunnan	99.37	1 891.03	1 902.89	105.41	2 003.51	1 902.89
	贵州 Guizhou	97.98	1 168.25	1 192.38	105.34	1 254.46	1 192.38
合计 Total			60 908.65	61 625.05		63 915.36	61 625.05

表 5 耕作对作物产量与固碳效应变化的影响因素分析

Table 5 Analysis of factors influencing the variation of crop yield and carbon sequestration by tillage

项目 Item	参数 Parameter	平均气温/°C Average temperature	试验年限/年 Experimental years	土壤粘粒 含量/% Clay content	土壤 pH Soil pH
产量 Yield	<i>n</i>	115.000	215.000 0	33.000 0	97.000
	<i>R</i> ²	0.104	0.000 1	0.024 0	0.006
	<i>P</i>	0.002	0.957 0	0.697 0	0.910
	<i>a</i>	0.007	-2.13E-05	0.000 1	-0.009
	<i>b</i>	-0.174	0.002 0	0.041 0	0.127
有机碳 Organic carbon	<i>c</i>	1.126	0.068 0	-0.590 0	-0.458
	<i>n</i>	115.000	129.000 0	19.000 0	71.000
	<i>R</i> ²	0.017	0.000 1	0.350 0	0.027
	<i>P</i>	0.525	0.985 0	0.032 0	0.398
	<i>a</i>	0.001	0.000 1	0.000 1	-0.018
	<i>b</i>	-0.025	0.000 6	0.062 0	0.282
	<i>c</i>	0.457	0.211 0	-0.690 0	-0.859

注：*n* 为数据对数；*a* 为抛物线拟合曲线 x^2 的系数，*b* 为抛物线拟合曲线 x 的系数，*c* 为抛物线拟合曲线常数。本研究将平均气温、降水量、起始有机碳、当季施氮量、试验年限、年均蒸发量、粘粒含量、土壤 pH、起始容重等因素纳入探究，上表仅将显著相关的因素进行展示。下同。

Note: *n* is the logarithm of data; *a*, the coefficient of the binomial fitting curve x^2 ; *b*, the coefficient of the binomial fitting curve x ; *c*, the binomial fitting curve constant. In this study, factors such as average temperature, precipitation, initial organic carbon, seasonal nitrogen application, experimental years, annual evaporation, clay content, soil pH and initial bulk density are included in the study. The above table only shows the significantly related factors. The same below.

表 6 还田对作物产量与固碳效应变化的影响因素分析

Table 6 Analysis of factors influencing the variation of crop yield and carbon sequestration by residue retention

项目 Item	参数 Parameter	平均气温/°C Average temperature	试验年限/年 Experimental years	土壤粘粒 含量/% Clay content	土壤 pH Soil pH
产量 Yield	<i>n</i>	115.000	94.000	35.000	57.000
	<i>R</i> ²	0.039	0.097	0.151	0.160
	<i>P</i>	0.216	0.011	0.072	0.009
	<i>a</i>	0.007	0.004	0.004	-0.068
	<i>b</i>	-0.150	-0.073	-0.248	0.857
有机碳 Organic carbon	<i>c</i>	1.007	0.430	3.517	-2.307
	<i>n</i>	115.000	85.000	28.000	47.000
	<i>R</i> ²	0.061	0.024	0.241	0.179
	<i>P</i>	0.116	0.377	0.032	0.013
	<i>a</i>	0.008	0.006	0.001	-0.119
	<i>b</i>	-0.189	-0.064	-0.051	1.674
	<i>c</i>	1.385	0.461	0.903	-5.367

$10^9 \sim 25.5 \times 10^9$ kg/年; Lu 等^[12]研究表明,我国农田固碳速率在 $157 \sim 390$ kg/($\text{hm}^2 \cdot \text{年}$),推广面积由 4.12×10^6 hm^2 增至 2.04×10^7 hm^2 ,面积增长近5倍,固碳潜力为 4.6×10^9 kg/年,增幅达 475%,免耕增加土壤固碳的趋势与本研究一致,但研究结果存在些许差异,主要由目标推广情况、基础数据来源不同所引起。

全球范围农田产生 4×10^{12} kg/年作物秸秆^[28],全部秸秆还田可提高约 3×10^{11} kg/年碳储量,固碳潜力巨大。秸秆还田措施在我国推广率达 42.47%,多个省份推广率超 80.00%,整体推广效果较好。目标推广情况下,秸秆完全进行还田处理,推广面积增幅为 140.00%,而伴随着秸秆不还田处理完全转换为秸秆还田处理,固碳潜力由 6.56×10^{10} kg/年增至 7.00×10^{10} kg/年,增幅为 7%。Lu 等^[12]研究表明,作物秸秆还田目前的固碳潜力为 9.76×10^9 kg/年,如果全面推广作物秸秆还田措施,其固碳潜力可增至 3.44×10^{10} kg/年, Lu 等^[12]研究是基于 2009 年的试验数据,当时秸秆还田措施推广较少,且其未将应用秸秆不还田处理土地的固碳潜力纳入研究,加之试验数据来源不同,最终估算固碳潜力出现差异。

基于省级维度分析免耕与秸秆还田对产量的影响,免耕较传统耕作在各省份中有增有减,19 个省份表现出增产,12 个省份表现减产,而秸秆还田在省级尺度则表现出完全增产。免耕充分推广后,总产量由 6.16×10^8 t/年降至 6.09×10^8 t/年,降低 1.16%,秸秆还田充分推广后,粮食总产将由 6.16×10^8 t/年增至 6.39×10^8 t/年,增幅为 3.72%。

本研究仅对耕作处理与秸秆还田处理分开进行探讨,并未对其互作效应进行分析。赵鑫等^[8]研究表明,与翻耕秸秆不还田相比,免耕秸秆不还田和免耕秸秆还田土壤有机碳含量分别显著提高 5.5% 和 8.2%,免耕会导致减产,但免耕秸秆还田能显著增产 4.6%。这表明免耕较翻耕可以增加土壤固碳,且免耕结合秸秆还田能增进固碳效果;免耕较翻耕会导致作物产量降低,但配以秸秆还田,则表现出增产效应。因此,在未来研究与应用中,应充分发掘免耕与秸秆还田的协同效应,同时达到增加土壤固碳和提高作物增产的目的。

3.4 环境因素的影响

赵鑫等^[8]研究表明,土壤有机碳储量的变化与年均气温、年均降雨量、土壤粘粒含量、土壤 pH、试

验年限存在显著线性相关关系,与本研究结果相似。本研究依据回归分析的方法,探讨了环境因素对免耕和秸秆还田条件下产量和有机碳储量效应值的影响。抛物线拟合结果表明,作物产量的耕作效应值与平均气温极显著相关。耕作方式主要通过改变土壤状态,进而影响作物生长及产量,平均温度会影响土壤温度,改变土壤蒸散,土壤微生物以及土壤含水量,进而影响耕作方式对作物产量的效果。作物产量的还田效应值与试验年限相关,与土壤 pH 显著相关,试验年限的增加深化了耕作对土壤的作用效果,土壤 pH 能改变土壤微生物种类及数量和秸秆腐解速率,从而影响土壤供给作物营养的速率。有机碳的耕作效应值与土壤粘粒含量显著相关,有机碳的还田效应值与土壤粘粒含量和土壤 pH 相关,这些因素主要是影响有机碳的分解及矿化,粘粒含量不同,其矿化速率也有差异,因此耕作方式与秸秆还田的有机碳效应值都与土壤粘粒含量有关。

4 结 论

本研究基于 1 162 对位点试验数据,针对免耕与秸秆还田分别进行探究,全国田间试验中占比为 75.00% 的试验研究表现为免耕相对翻耕固碳速率提高,占比为 88.23% 的试验研究表现为秸秆还田相对秸秆不还田固碳速率提高,免耕与秸秆还田可明显增加土壤固碳,但其效应在地域上有明显区别,免耕和秸秆还田在区域 I、区域 II 和区域 IV 提高固碳速率的试验研究较多,而在区域 III 和区域 V 降低固碳速率的情况较多。免耕与秸秆还田措施的固碳潜力可随技术推广有较大的提高,免耕措施的推广面积较当前可增加 71.94%,秸秆还田措施的推广幅度较当前可增加 140.00%。在当前推广情况下,免耕措施的固碳潜力为 1.35×10^{10} kg/年,秸秆还田措施的固碳潜力为 6.56×10^{10} kg/年,目标推广情况下,免耕的固碳潜力可增加 63.90%,达 2.22×10^{10} kg/年,秸秆还田的固碳潜力可增加 7.00%,增至 7.00×10^{10} kg/年。

全国田间试验中占比 42.70% 的试验研究表现为免耕增产,占比 79.80% 的试验研究表现为秸秆还田增产,其影响无明显地域差别。当免耕和秸秆还田措施充分推广后,主要粮食作物的产量略有浮动,免耕呈现出减产趋势,减产 1.16%,秸秆还田呈现出明显增产的趋势,增幅为 3.72%。回归分析表

明,作物产量的耕作效应值与平均气温极显著相关,有机碳的耕作效应值与粘粒含量显著相关,作物产量的还田效应值与试验年限显著相关,与土壤 pH 显著相关,有机碳的还田效应值与土壤粘粒含量和土壤 pH 相关。未来可考虑利用免耕与秸秆还田对农田生态和产量提升的协同效应来推广免耕与秸秆还田。

参考文献 References

- [1] Lal R. Agricultural activities and the global carbon cycle[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004a, 70(2): 103-116
- [2] 徐明岗, 张旭博, 孙楠, 张文菊. 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 M G, Zhang X B, Sun N, Zhang W J. Advance in research of synergistic effects of soil carbon sequestration on crop yields improvement in croplands[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1441-1449 (in Chinese)
- [3] 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
- [4] IPCC. *Climate Change 1995-Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996
- [5] Manzoni S, Jackson R B, Trofymow J A, Porporato A. The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization [J]. *Science*, 2008, 321: 684-686
- [6] 薛建福, 赵鑫, Shadrack Batsile Dikgwatlhe, 陈阜, 张海林. 保护性耕作对农田碳、氮效应的影响研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6006-6013
- Xue J F, Zhao X, Shadrack B D, Chen F, Zhang H L. Advances in effects of conservation tillage on soil organic carbon and nitrogen [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19): 6006-6013 (in Chinese)
- [7] 谢瑞芝, 李少昆, 金亚征, 李小君, 汤秋香, 王克如, 高世菊. 中国保护性耕作试验研究的产量效应分析[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 397-404
- Xie R Z, Li S K, Jin Y Z, Li X J, Tang Q X, Wang K R, Gao S J. The trends of crop yield responses to conservation tillage in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(2): 397-404 (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 张旭博. 中国农田土壤有机碳演变及其增产协同效应[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016
- Zhang X B. The synergistic effects of evolution of soil organic carbon on increment of crop yield in arable land in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016 (in Chinese)
- [10] 刘恩科, 赵秉强, 胡昌浩, 李秀英, 李燕婷. 长期施氮、磷、钾化肥对玉米产量及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 789-794
- Liu E K, Zhao B Q, Hu C H, Li X Y, Li Y T. Effects of long-term nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer applications on maize yield and soil fertility[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, 13(5): 789-794 (in Chinese)
- [11] 曾江海, 王智平, 胡春胜, 张玉铭. 东北半湿润区土壤有机质分解与积累特征[J]. 土壤肥料, 1996, 6(4): 1-4
- Zeng J H, Wang Z P, Hu C S, Zhang Y M. Characteristics of decomposition and accumulation of soil organic matter in north China semihumid region[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 1996, 6(4): 1-4 (in Chinese)
- [12] Fei L, Xiaoke W, Bing H. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-till in China's cropland[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(2): 281-305
- [13] Lal R. Soils and world food security [J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 102(1): 1-4
- [14] Ussiri D A N, Lal R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 104(1): 39-47
- [15] Lu F, Wang X K, Han B, Ouyang Z H, Duan X N, Zheng H, Miao H. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-till in China's cropland[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(2): 281-305
- [16] Li Z P, Liu M, Wu X C, Han F X, Zhang T L. Effects of long-term chemical fertilization and organic amendments on dynamics of soil organic C and total N in paddy soil derived from barren land in subtropical China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 106(2): 268-274

- [17] 王广栋. 秸秆还田方式对腐解特征及微生物群落功能多样性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018
- Wang G D. Study on characteristics of soil decomposition and functional diversity of microbial communities using straw returning method [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [18] 彭文英, 张雅彬. 免耕对粮食产量及经济效益的影响评述[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(4): 114-118
- Peng W Y, Zhang Y B. Review of impacts of no-till on crop yield and economic benefit [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(4): 114-118 (in Chinese)
- [19] Gupta R, Sethb A. A review of resource conserving technologies for sustainable management of the rice-wheat cropping systems of the Indo-Gangetic plains (IGP)[J]. *Crop Protection*, 2007, 26: 436-447
- [20] DeVita P, Di P E, Fecondo G, Di F N, Pisante M. No-till and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 92(1-2): 69-78
- [21] Mikha M M, Vigil M F, Benjamin J G. Long-term tillage impacts on soil aggregation and carbon dynamics under wheat-fallow in the central Great Plains[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(2): 594-605
- [22] Islam R, Glenney D C, Lazarovits G. No-till strip row farming using yearly maize-soybean rotation increases yield of maize by 75%[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(2): 837-846
- [23] Vanhie M, Deen W, Lauzon J D, Hooker D C. Effect of increasing levels of maize (*Zea mays* L) residue on no-till soybean (*Glycine max* Merr) in northern production regions: A review[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 150: 201-210
- [24] Zhao X, Liu S L, Pu C, Zhang X Q, Xue J F, Ren Y X, Zhao X L, Chen F, Lal Rattan, Zhang H L. Crop yields under no-till farming in China: A meta-analysis[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 84: 67-75
- [25] Lal R, Griffin M, Apt J, Lave L, Morgan M G. Managing soil carbon[J]. *Science*, 2004, 304(16): 393
- [26] 傅玉祥, 梁书升. 中国农业年鉴[M]. 四平: 吉林省农业科学院, 2005
- Fu Y X, Liang S S. *China Agriculture Yearbook*[M]. Siping: Jilin Academy of Agricultural Sciences, 2005 (in Chinese)
- [27] 赵永存, 徐胜祥, 王美艳, 史学正. 中国农田土壤固碳潜力与速率: 认识、挑战与研究建议[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 191-197
- Zhao Y C, Xu S X, Wang M Y, Shi X Z. Carbon sequestration potential in Chinese cropland soils: Review, challenge, and research suggestions[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 191-197 (in Chinese)
- [28] Lal R. World crop residues production and implications of its use as a biofuel[J]. *Environment International*, 2005, 31(4): 575-584

责任编辑: 吕晓梅