



## 免耕对农田土壤持水特性和有机碳储量影响的区域差异

李婧妤<sup>1,2</sup>, 李倩<sup>2,3</sup>, 武雪萍<sup>2</sup>, 吴会军<sup>2</sup>, 宋霄君<sup>2</sup>, 张永清<sup>1</sup>, 刘晓彤<sup>2</sup>, 丁维婷<sup>2</sup>, 张孟妮<sup>2</sup>, 郑凤君<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 山西师范大学地理科学学院, 山西临汾 041000; <sup>2</sup> 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; <sup>3</sup> 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

**摘要:** 【目的】分析耕作对土壤碳储量的影响, 明确我国东北、华北地区的科学耕作方式, 为区域优化耕作模式、改善土壤提供依据。【方法】基于吉林公主岭(GZL)、山西寿阳(SSY)、河北廊坊(HLF)、山西临汾(SLF) 4个长期定位试验, 选择传统耕作(CT)、免耕(NT)两个耕作处理, 分析耕作对有机碳影响的区域差异。【结果】(1) 免耕对土壤容重和紧实度影响存在区域性差异, 显著提高了东北冷凉区黏质黑土(公主岭)和华北砂质潮土(廊坊)的土壤容重和紧实度, 土壤容重分别增加了12.1%、0.7%, 但降低了黄土高原东部粉砂壤质黄土(临汾)和砂壤质褐土(寿阳)的土壤容重和紧实度, 土壤容重分别降低了1.5%、8.2%。(2) 公主岭试验点0、10 kPa土壤体积含水量处理间差异显著, 免耕较传统耕作分别提高了40.4%、30.1%; 寿阳试验点0、10、500 kPa下免耕较传统耕作土壤体积含水量分别降低了6.4%、4.3%、5.9%, 350 kPa下提高了2.1%; 廊坊试验点10、350、500 kPa免耕下土壤体积含水量分别提高了0.6%、5.6%、2.6%; 临汾试验点0和10 kPa免耕下土壤体积含水量分别降低了7.1%、5.5%, 350和500 kPa土壤体积含水量分别提高了2.9%、8.9%。(3) 在4个区域, 免耕显著提高了0—10 cm表层土壤有机碳储量, 其中公主岭增加最显著, 提高了45.4%; 但免耕对0—80 cm土层总有机碳储量影响存在区域性差异, 公主岭提高了7.2%, 寿阳、廊坊、临汾分别降低了26.8%、31.3%、23.5%。(4) 土壤有机碳与饱和含水量呈极显著正相关关系, 而与年均温、年降水、紧实度具有显著负相关关系, 有机碳储量受气候因子、持水能力、紧实度的影响显著。【结论】由于我国东北和华北地区气候、作物类型、土壤性质等不同, 免耕对土壤有机碳储量影响存在区域性差异, 可以显著提高各区域表层土壤有机碳储量, 但仅提高了东北冷凉区黏质黑土(公主岭)土壤总有机碳储量。总体来说, 免耕保护性耕作技术是提高表层有机碳储量的有效途径。

**关键词:** 免耕; 土壤有机碳; 土壤物理性质; 水分特征曲线; 区域

## Regional Variation in the Effects of No-Till on Soil Water Retention and Organic Carbon Pool

LI JingYu<sup>1,2</sup>, LI Qian<sup>2,3</sup>, WU XuePing<sup>2</sup>, WU HuiJun<sup>2</sup>, SONG XiaoJun<sup>2</sup>, ZHANG YongQing<sup>1</sup>, LIU XiaoTong<sup>2</sup>, DING WeiTing<sup>2</sup>, ZHANG MengNi<sup>2</sup>, ZHENG FengJun<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041000, Shanxi; <sup>2</sup> Institute of Agricultural Resource and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; <sup>3</sup> College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048)

**Abstract:** 【Objective】 Soil tillage is an important factor which affecting soil organic carbon, but the impact of tillage on soil organic carbon and the driving factors in different regions are still unknown. In this study, the regional variation in the effects of no-till on soil water retention and organic carbon pool were studied to improve regional soil tillage in the north of China. 【Method】

收稿日期: 2020-04-29; 接受日期: 2020-07-09

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0300804、2018YFD0200408)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610132019034、1610132019033)

联系方式: 李婧妤, E-mail: lijingyu0809@126.com. 通信作者吴会军, E-mail: wuhuijun@caas.cn. 通信作者张永清, E-mail: yqzhang208@126.com

The four typical long-term tillage experiments were selected, which was located in Shouyang (SSY) and Linfen (SLF) of Shanxi Province, Gongzhuling (GZL) of Jilin Province and Langfang (HLF) of Hebei Province. Two tillage treatments, including conventional tillage (CT) and no-till (NT), were selected to study the effects of tillage on organic carbon. 【Result】 (1) Soil bulk density and penetrometer resistance were significantly affected by no-tillage in different regions. Compared with CT, NT significantly increased the bulk density in black soil (GZL) and sandy soil (HLF), which was increased by 12.1% and 0.7%, respectively. But CT reduced the bulk density in fluvo-aquic soil (SLF) and cinnamon soil (SSY), which was decreased by 1.5% and 8.2%, respectively. (2) The soil water content of 0 and 10 kPa under NT in black soil (GZL) was significantly different, which were increased by 40.4% and 30.1%, respectively; the soil water content of 0, 10 and 500 kPa under NT in cinnamon soil (SSY) was reduced by 6.4%, 4.3%, and 5.9%, respectively, and which was increased by 2.1% at 350 kPa. The soil water content of 10 kPa, 350 kPa, and 500 kPa under NT in sandy soil (HLF) were increased by 0.6%, 5.6%, and 2.6%, respectively. The soil water content of 0 and 10 kPa under NT in fluvo-aquic soil (SLF) decreased by 7.1% and 5.5%, respectively, and the soil water content of 350kPa and 500kPa was increased by 2.9% and 8.9%, respectively. (3) Soil organic carbon was affected by no-tillage in different regions. Compared with CT, NT significantly increased the organic carbon storage in 0-80 cm layer in black soil (GZL); in cinnamon soil (SSY), fluvo-aquic soil (SLF) and sandy soil (HLF), NT decreased soil organic carbon storage by 26.8%, 31.3%, and 23.5%, respectively. (4) Soil organic carbon stocks were positive correlated with altitude and saturated moisture, which was negatively correlated with annual average temperature, annual precipitation, and penetrometer resistance. This showed that organic carbon storage was significantly affected by climatic factors, soil water retention and penetrometer resistance. 【Conclusion】 No-tillage changed soil organic carbon stocks by affecting penetrometer resistance and soil water retention. However, due to differences in climate, crop and soil factors in northeast and north of China, the increase in soil organic carbon stocks was different. In general, conservation tillage was an effective way to increase the surface soil organic carbon storage.

**Key words:** no-tillage; soil organic carbon; soil physical properties; soil water characteristic curve; region

## 0 引言

【研究意义】土壤是陆地生态系统最大的碳库<sup>[1]</sup>, 土壤碳库对全球陆地碳循环产生巨大影响<sup>[2]</sup>。耕作措施会改变土壤物理性质, 影响有机碳分解和转化, 进而影响有机碳储量。许多研究表明, 保护性耕作技术能够增加有机碳含量, 增强土壤固碳效应<sup>[3]</sup>。但是土壤固碳潜力受到土壤质地、耕作方式、种植制度等多种因素影响<sup>[4]</sup>, 开展耕作方式对不同区域土壤物理性质的对比联网研究, 有助于理解不同耕作对土壤有机碳储量影响的差异, 为今后保护性耕作技术的推广提供依据。【前人研究进展】秸秆输入和有机碳矿化分解是影响土壤有机碳储量的两个因素。与传统耕作相比, 免耕秸秆覆盖可以提高表层土壤有机碳含量<sup>[5-6]</sup>, 但秸秆输入不能完全解释不同区域、不同耕作方式下土壤有机碳储量差异。土壤容重、紧实度、孔隙度、持水能力等物理指标也是影响有机碳储量的重要因素<sup>[7-8]</sup>。目前关于保护性耕作下土壤容重、孔隙度、持水能力等物理性质的变化, 其试验结果并不一致。孙国峰等<sup>[9]</sup>发现, 免耕处理下 0—10 cm 土层土壤容重显著降低, 土壤孔隙度提高, 持水能力提高。罗珠珠等<sup>[10]</sup>研究发现免耕处理下土壤容重和紧实度增加, 而孔隙度和持水能力减小。刘孝义等<sup>[11]</sup>发现保护性耕作

能够提高土壤总孔隙度, 提高土壤持水能力。大量研究结果认为有机碳含量与容重及紧实度呈正相关, 与孔隙度呈负相关; 传统耕作降低了土壤容重, 增加了孔隙度, 通气性增加, 微生物活性提高, 加快了土壤有机碳分解, 降低有机碳储量<sup>[12-15]</sup>; GAO 等<sup>[16]</sup>认为土壤有机碳含量与孔隙度呈正相关, 保护性耕作通过降低土壤容重、提高孔隙度数量和团聚体稳定性增加有机碳储量。由此可见, 不同区域农田生态系统中, 耕作对有机碳的影响及其驱动因素还不明晰。【本研究切入点】现有的研究多集中于单一试验点, 不同区域、不同耕作方式下土壤物理性质及其与有机碳之间的关系尚不清楚。本研究借助 4 个长期定位试验点开展联网研究, 试验结果结论具有普适意义。【拟解决的关键问题】本试验借助吉林公主岭 (GZL)、山西寿阳 (SSY)、河北廊坊 (HLF) 和山西临汾 (SLF) 4 个长期定位试验点的农田土壤为研究对象, 探讨不同区域耕作对有机碳储量的影响及其驱动因素, 为评价保护性耕作对不同区域农田土壤的固碳效应提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验选取吉林公主岭、山西寿阳、河北廊坊、山

西临汾 4 个试验点，地处我国东北与华北地区，是我国保护性耕作推广应用的重要区域，各试验点基本信息如表 1 所示。

1.2 试验设计

每个试验点田间管理按照当地习惯进行，但秸秆还田量和施肥量不同。试验采用随机区组设计，选取传统耕作（CT）、免耕（NT）作为供试处理，每个处理设 3 次重复。传统耕作（CT），收获后，将作物秸秆（吉林公主岭和山西寿阳的玉米秸秆、河北廊坊

的小麦和玉米秸秆、山西临汾的小麦秸秆）从田间移除，利用旋耕机、播种机等农用机械进行耕地和播种，播种前撒施化肥；免耕（NT），将收获后的作物秸秆还田，利用免耕播种机播种，同时在播种行侧，深施化肥。土壤采样，2017 年，作物收获后，利用多点混合取样法，在 4 个试验点小区用土钻取 0—10、10—20、20—40、40—60 和 60—80 cm 土壤样品，选用挖剖面法采集环刀样，所有土样装入聚乙烯样袋中，带回室内分析测定。

表 1 4 个试验地点基本信息

Table 1 Basic of the four experimental site

地点 Site	试验起始年 Experiment starting year	年均气温 Annual average temperature (°C)	年均降水 Annual precipitation (mm)	作物 Crop	土壤类型 Soil type	土壤颗粒组成 Soil particle composition (%)		
						黏粒 (0-0.002 mm) Clay	粉粒 (0.002-0.05 mm) Silt	砂粒 (0.05-2 mm) Sand
吉林公主 (GZL) Gongzhuling, Jilin	1990	5.6	594.8	春玉米 Spring corn	黑土 Black soil	31.1	29.9	39.1
山西寿阳 (SSY) Shouyang, Shanxi	2003	7.4	461.8	春玉米 Spring corn	褐土 Cinnamon soil	5.6	63.9	30.5
河北廊坊 (HLF) Langfang, Hebei	2009	11.9	550.0	冬小麦-夏玉米 Winter wheat- summer corn	潮土 Fluvo-aquic soil	4.1	51.4	44.5
山西临汾 (SLF) Linfen, Shanxi	1992	10.7	555.0	冬小麦 Winter wheat	黄绵土 Loessal soil	5.2	73.9	20.9

1.3 指标测定及数据处理

土壤紧实度：利用紧实度仪（SC900 型）于 2017 年 8—9 月在田间小区测定 0—45 cm 土层紧实度，土壤紧实度仪随土壤深度的变化自动计数，每隔 2.5 cm 读取一个数值，水平间距 10 cm，9 次重复。

土壤容重：环刀法。将环刀样品置于烘箱，105 °C 下烘 8 h，拿出后置于干燥器，冷却称重。

土壤机械组成：采用吸管法进行测定，土壤粒径分级采用《美国制土壤颗粒分级标准》。

土壤总孔隙度 (%) = (1 - 土壤容重 / 土壤密度) × 100；土壤密度为 2.65 g·cm<sup>-3</sup>。

土壤有机碳：vario MACRO cube CHN 元素分析仪。将风干后的土壤样品过 0.15 mm 筛，用 1 mol·L<sup>-1</sup> 的盐酸去除碳酸盐后烘干，上机测定。

土壤有机碳储量采用等质量土壤有机碳储量法计算：

$$M_{SOC} = Bd \times S \times (H + H_{add}) \times SOC \times 10 \quad (1)$$

$$M_{soil} = S \times h \times Bd \times 1000 \quad (2)$$

式中，M<sub>SOC</sub> 为土壤机碳储量 (t·hm<sup>-2</sup>)，M<sub>soil</sub> 为单位面积土壤质量 (t·hm<sup>-2</sup>)；SOC 为土壤有机碳含量 (g·kg<sup>-1</sup>)；S 为土壤面积 (m<sup>2</sup>)；Bd 为土壤容重 (g·cm<sup>-3</sup>)；H

为土层厚度 (m)；H<sub>add</sub> 为要达到等质量土壤需要另加的亚表层土壤深度 (m)。

根据公式可以得到不同耕作处理下土壤质量。以不同处理下土壤质量最大值作为统一的土壤质量。然后采用式 (3) 计算其他耕作处理方式下达到同质量的土壤需要另加的土壤深度。

$$H_{add} = (M_{soil, equiv} - M_{soil, surface}) / S / Bd_{surface} \quad (3)$$

式中，M<sub>soil, equiv</sub> 为较大的单位面积土壤质量 (t·hm<sup>-2</sup>)；M<sub>soil, surface</sub> 为较小的单位面积土壤质量 (t·hm<sup>-2</sup>)；Bd<sub>surface</sub> 为较小土壤容重 (g·cm<sup>-3</sup>)。

土壤水分特征曲线测定方法：采用环刀法在每个采样点分层取 4 个重复样，带回实验室，将其中一个环刀土样烘干 (105 °C) 称重测定土壤含水量，并计算土壤容重，其余环刀土样沙箱法和压力膜法测定土壤水分特征曲线。

利用 Van-Genuchten 模型（简称 VG 模型）对数据进行拟合，获得土壤水分特征曲线。

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m$$

式中， $\theta$  为体积含水量 ( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ )； $h$  为土壤水吸力 (Pa)； $\theta_r$  为残留含水量 ( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ )； $\theta_s$  为饱和含水量 ( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ )； $\alpha$ 、 $n$  和  $m$  是方程参数。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 进行数据处理，Sigmaplot14.0 制作图表，数据测定结果均以平均值±标准差表示。利用 SAS 9.1 软件进行单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和双因素方差分析 (two-way ANOVA)，用 LSD 方法对不同处理之间进行多重比较，单个试验点两个处理间进行 t 检验 ( $P<0.05$ )。

2 结果

2.1 不同耕作方式对土壤物理性质的影响

2.1.1 土壤容重与孔隙度 不同耕作处理影响土壤容重，但影响程度在 4 个试验点存在差异 (表 2)。公主岭 NT 处理的土壤容重值较 CT 处理增加了 12.1% 左右，差异显著 ( $P<0.05$ )；寿阳 NT 处理的土壤容

重显著低于 CT 处理 ( $P<0.05$ )，降低了 8.2%；廊坊和临汾 CT 与 NT 处理土壤容重差异不显著 ( $P>0.05$ )。相比于土壤容重，土壤总孔隙度变化趋势相反。公主岭 CT 处理土壤孔隙度大于 NT 处理，差异显著 ( $P<0.05$ )；寿阳 NT 处理土壤孔隙度为 49.4%，与 CT 处理间差异显著 ( $P<0.05$ )；廊坊和临汾 CT 和 NT 处理间差异不显著 ( $P>0.05$ )。

2.1.2 土壤紧实度 4 个试验点不同耕作处理对土壤紧实度的影响存在差异 (图 1)。公主岭整个土壤剖面 NT 处理土壤紧实度均不同程度地高于 CT 处理；0—5 cm 表土层，寿阳、廊坊、临汾试验点不同耕作处理土壤紧实度差异不显著 ( $P>0.05$ )；5—25 cm，寿阳和临汾试验点 NT 处理土壤紧实度显著高于 CT 处理 ( $P<0.05$ )，廊坊 NT 处理土壤紧实度高于 CT 处理，差异不显著 ( $P>0.05$ )；25—45 cm，寿阳土壤紧实度 CT>NT ( $P<0.05$ )，廊坊与临汾试验点土壤紧实度处理间差异不显著 ( $P>0.05$ )。

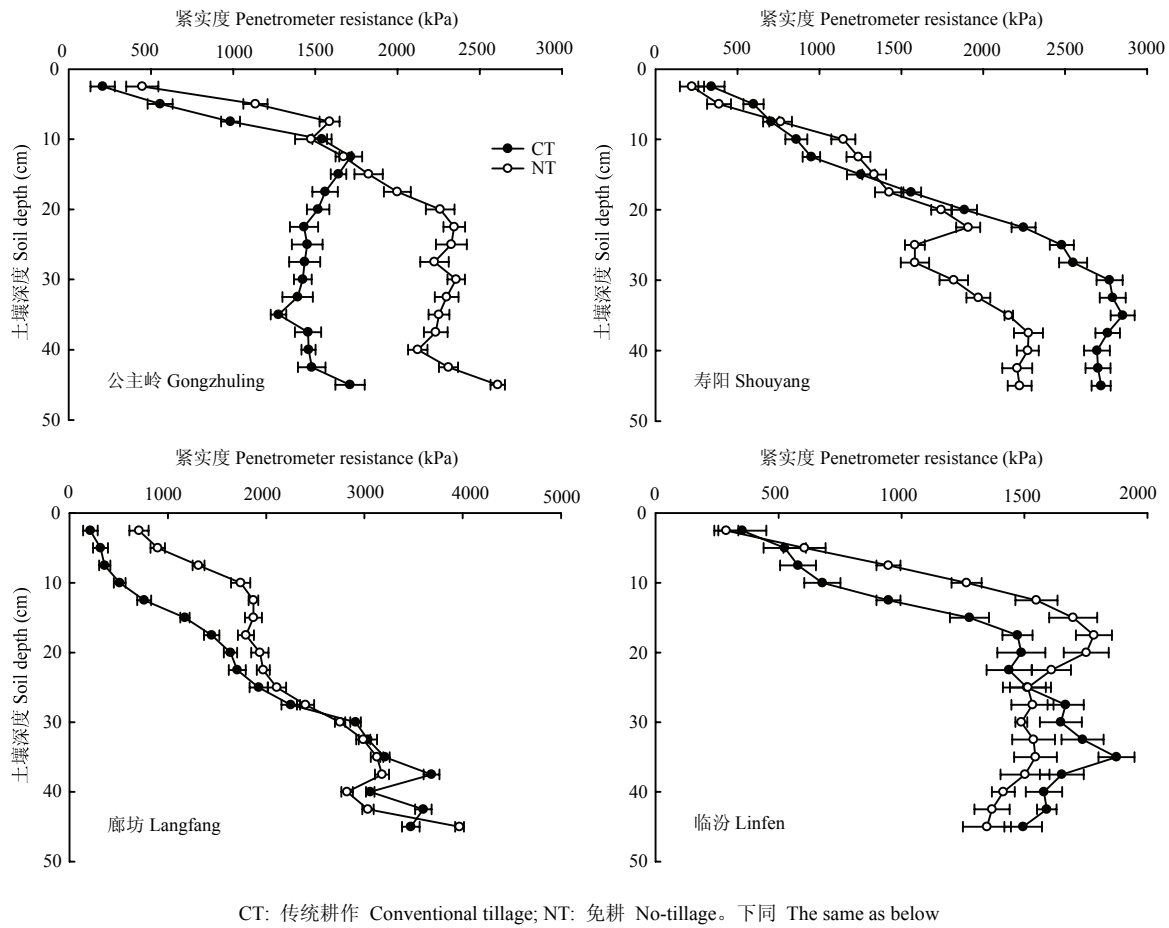


图 1 不同耕作处理下土壤紧实度  
Fig. 1 Penetrometer resistance under different tillage

表 2 不同耕作处理下 0—10 cm 土层容重和孔隙度  
Table 2 Soil bulk density and total porosity in 0-10 cm depth under different tillage

试验点 Site	处理 Treatment	容重 Bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度 Total porosity (%)
吉林公主岭 (GZL) Gongzhuling, Jilin	CT	1.33 ± 0.03b	0.49 ± 0.01a
	NT	1.49 ± 0.13a	0.44 ± 0.05b
山西寿阳 (SSY) Shouyang, Shanxi	CT	1.46 ± 0.02a	0.45 ± 0.01b
	NT	1.34 ± 0.07b	0.49 ± 0.03a
河北廊坊 (HLF) Langfang, Hebei	CT	1.46 ± 0.06a	0.45 ± 0.02a
	NT	1.47 ± 0.01a	0.44 ± 0.01a
山西临汾 (SLF) Linfen, Shanxi	CT	1.38 ± 0.10a	0.47 ± 0.04a
	NT	1.36 ± 0.06a	0.49 ± 0.02a

表中字母 a, b 表示同一试验点不同处理间存在显著差异。下同  
a and b indicate significant differences in the same site between different treatments. The same as below

2.1.3 土壤水分特征曲线 Van-Genuchten 模型  
对各试验点不同耕作处理曲线拟合的参数结果如

表 3 所示, 各试验点的拟合参数  $\theta_s$ 、 $\theta_r$ 、 $\alpha$ 、 $n$  差异很大, 相同试验点的土壤变化不显著, 饱和含水量  $\theta_s$  在 27.2—39.1 之间,  $n$  值在 1.2—1.5 之间,  $\alpha$  值在 0.01—0.06 之间, 残余含水量  $\theta_r$  随试验点的变化显著。通过 4 个试验点两种耕作处理下土壤水分特征曲线发现 (图 2): 与 CT 相比, 公主岭试验点 0 和 10 kPa NT 下土壤体积含水量分别显著提高了 40.4%、30.1% ( $P<0.05$ ), 350 和 500 kPa 处理间差异不显著, 分别提高了 3.8%、4.7%; 临汾试验点 0 和 10 kPa NT 下土壤体积含水量较 CT 分别降低了 7.1%、5.5%, 差异不显著 ( $P>0.05$ ), 350 和 500 kPa 土壤体积含水量分别提高了 2.9%、8.9%; 廊坊试验点 10、350、500 kPa 下 NT 较 CT 相比, 土壤体积含水量分别提高了 0.6%、5.6%、2.6%, 但处理间差异不显著 ( $P>0.05$ ); 与 CT 相比, 寿阳试验点 0、10、500 kPa 下 NT 处理的土壤体积含水量分别降低了 6.4%、4.3%、5.9%, 350 kPa 下提高了 2.1%。

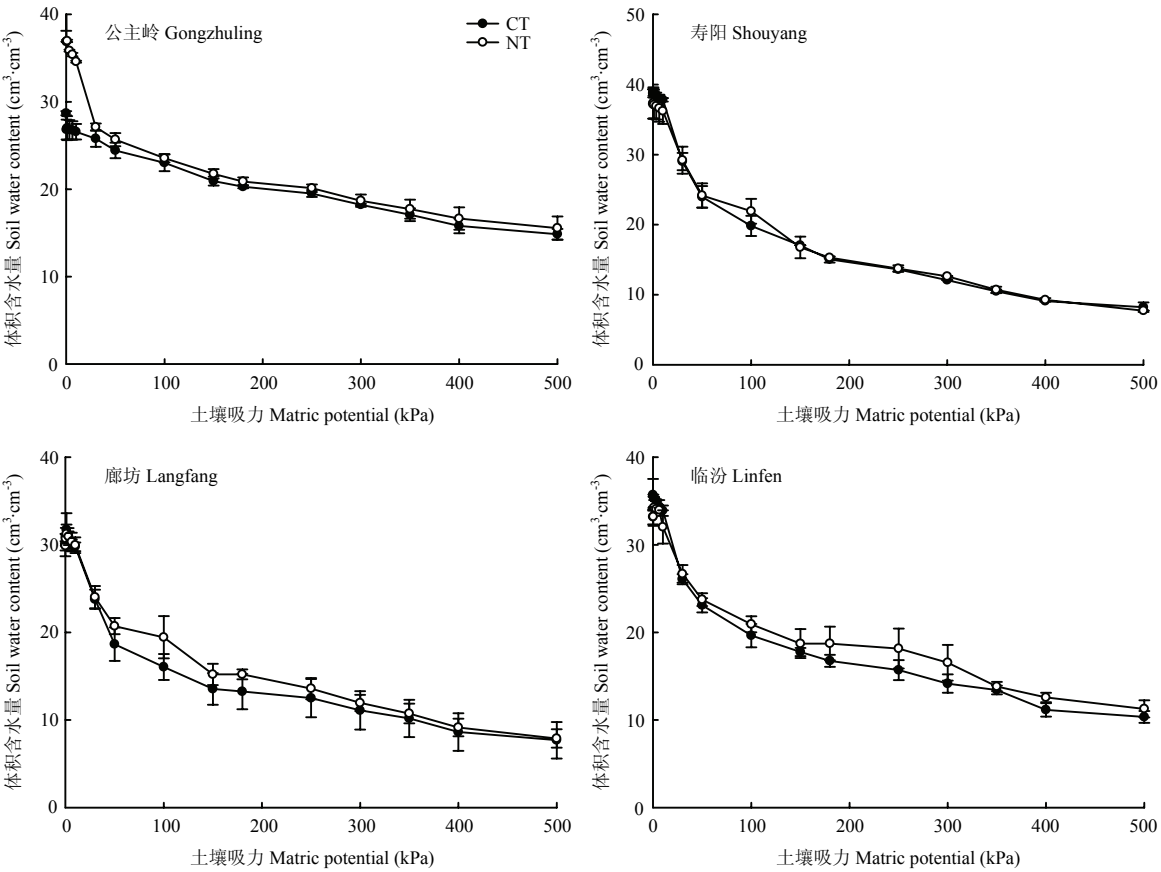


图 2 不同耕作处理下土壤持水曲线  
Fig. 2 Soil water retention curve under different tillage methods

表 3 不同耕作下土壤水分特征曲线 Van-Genuchten 模型参数拟合值

Table 3 Fitting value of water characteristic curve parameters of Van-Genuchten

试验点 Site	处理 Treatment	拟合参数值 Fitting parameter value				相关系数 Correlation coefficient, $R^2$
		$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	n	
吉林公主岭 (GZL) Gongzhuling, Jilin	CT	27.25	0.000048	0.01240	1.2942	0.9835
	NT	38.21	0.000090	0.11683	1.2028	0.9864
山西寿阳 (SSY) Shouyang, Shanxi	CT	39.08	0.000853	0.03930	1.4887	0.9958
	NT	37.14	0.000130	0.03026	1.4947	0.9923
河北廊坊 (HLF) Langfang, Hebei	CT	31.14	0.000002	0.04490	1.4784	0.9924
	NT	30.96	0.000005	0.04155	1.3655	0.9848
山西临汾 (SLF) Linfen, Shanxi	CT	35.88	0.000457	0.05522	1.3415	0.9936
	NT	34.06	0.000713	0.04422	1.3097	0.9832

2.2 不同耕作方式对土壤有机碳的影响

2.2.1 土壤有机碳含量 两种耕作处理下土壤有机

碳含量随土层加深而下降，下降趋势渐缓。4 个试验点不同耕作处理下土壤有机碳含量存在差异（图 3）：

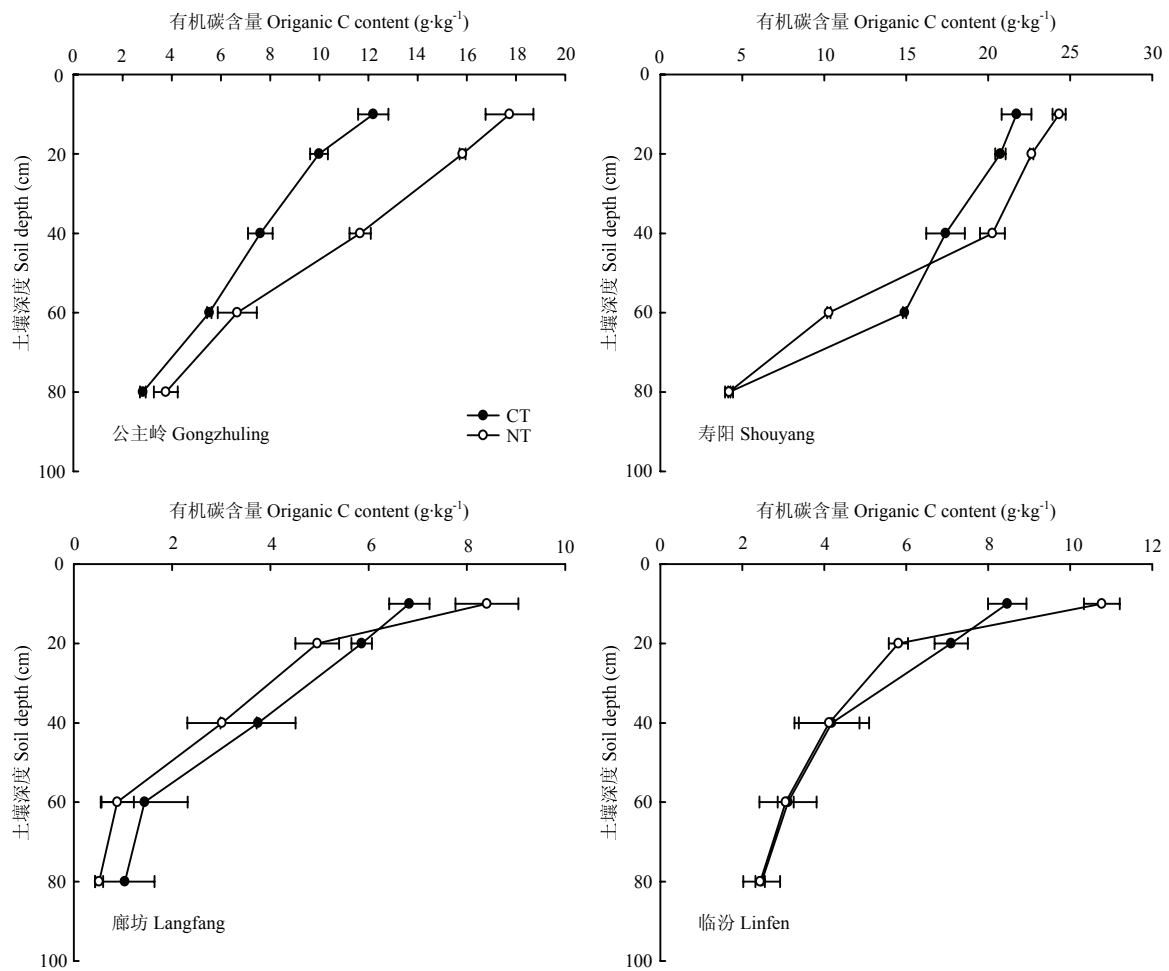


图 3 不同耕作处理下土壤有机碳含量

Fig. 3 Soil organic carbon contents under different tillage

公主岭试验点不同土层 NT 处理土壤有机碳含量均显著高于 CT 处理 ( $P<0.05$ )；寿阳试验点免耕显著提高了 0—40 cm 土层土壤有机碳含量 ( $P>0.05$ )，40 cm 以下土层有机碳含量 CT 处理>NT 处理；临汾 NT 处理提高土壤 0—10 cm 耕作层的碳含量，10—20 cm 有机碳含量 CT>NT，40 cm 以下土层有机碳含量的处理间差异不显著 ( $P>0.05$ )；与其他试验点相比，廊坊不同处理下土壤有机碳含量差异显著 ( $P<0.05$ )，NT 处理的土壤有机碳含量仅仅在 0—10 cm 土壤表层高于 CT 处理。

**2.2.2 土壤有机碳储量** 根据双因素方差分析发现，耕作方式对土壤有机碳储量具有极显著影响 ( $P<0.01$ )，试验点对土壤有机碳储量具有显著影响 ( $P<0.05$ )，土壤有机碳储量受地点和耕作方式交互作用影响较小 ( $P>0.05$ )。表 4 表明，耕作方式对不同试验点 0—80 cm 土层有机碳储量影响不同，与 CT 相比，NT 增加了 4 个试验点表层农田土

壤的有机碳储量。其中，公主岭试验点 0—10、10—20 cm 土层有机碳储量和 0—80 cm 土层有机碳总储量 NT 显著高于 CT 处理 ( $P<0.05$ )，分别提高了 45.4%、58.5%、7.2%；寿阳试验点 0—10、10—20 cm 土层有机碳储量 NT 较 CT 分别提高了 11.9%、9.2%，但 0—80 cm 土层总有机碳储量下降了 26.8%；廊坊试验点 0—10 cm 土层 NT 处理有机碳储量比 CT 处理提高了 23.1%，0—80 cm 土层 NT 处理有机碳储量显著小于 CT 处理，降低了 31.3%；临汾试验点 0—10 cm 土层有机碳储量 NT 较 CT 增加了 27.2%，其他各土层和 0—80 cm 土层有机碳总储量均下降，其中总储量降低了 23.5%，差异显著 ( $P<0.05$ )。

**2.3 气候因子、土壤因子与有机碳的相关性**

4 个试验点长期不同耕作措施下，气候因子、土壤因子与有机碳储量之间存在相关关系（表 5）。土壤有机碳储量与饱和含水量呈极显著正相关关系 ( $P<$

表 4 不同耕作处理下土壤有机碳储量  
Table 4 Soil organic carbon storage under different tillage

试验点 Site	处理 Treatment	有机碳储量 Organic carbon storage (t·hm <sup>-2</sup> )					
		0-10 cm	比 CT 提高 Increased than CT (%)	10-20 cm	比 CT 提高 Increased than CT (%)	20-40 cm	比 CT 提高 Increased than CT (%)
吉林公主 (GZL)	CT	19.04 ± 0.96b		15.59 ± 0.56b		23.21 ± 0.02a	
Gongzhuling, Jilin	NT	27.69 ± 1.52a	45.4	24.71 ± 0.19a	58.5	19.37 ± 0.72b	-16.5
山西寿阳 (SSY)	CT	28.41 ± 1.19b		27.12 ± 0.42b		56.55 ± 4.89a	
Shouyang, Shanxi	NT	31.81 ± 0.52a	11.9	29.62 ± 0.14a	9.2	24.49 ± 1.66b	-56.7
河北廊坊 (HLF)	CT	10.56 ± 0.63b		9.06 ± 0.32a		12.14 ± 2.48a	
Langfang, Hebei	NT	12.99 ± 0.99a	23.1	7.66 ± 0.69b	-15.5	4.96 ± 1.16b	-59.1
山西临汾 (SLF)	CT	12.02 ± 0.67b		10.07 ± 0.58a		12.32 ± 2.67a	
Linfen, Shanxi	NT	15.29 ± 0.62a	27.2	8.25 ± 0.33b	-18.1	6.26 ± 1.12b	-49.2

试验点 Site	处理 Treatment	有机碳储量 Organic carbon storage(t·hm <sup>-2</sup> )					
		40-60 cm	比 CT 提高 Increased than CT (%)	60-80 cm	比 CT 提高 Increased than CT (%)	0-80 cm	比 CT 提高 Increased than CT (%)
吉林公主 (GZL)	CT	16.87 ± 0.28a		8.61 ± 0.36a		83.33 ± 0.89b	
Gongzhuling, Jilin	NT	11.07 ± 1.79b	-34.4	6.24 ± 0.81b	-27.5	89.32 ± 0.21a	7.2
山西寿阳 (SSY)	CT	28.68 ± 0.28a		11.69 ± 0.69a		154.09 ± 3.57a	
Shouyang, Shanxi	NT	20.97 ± 0.14b	-26.9	5.92 ± 0.09b	-49.4	112.84 ± 1.81b	-26.8
河北廊坊 (HLF)	CT	3.04 ± 0.31a		3.36 ± 1.96a		39.85 ± 1.75a	
Langfang, Hebei	NT	1.45 ± 0.55b	-52.3	0.85 ± 0.14b	-74.7	27.37 ± 2.81b	-31.3
山西临汾 (SLF)	CT	9.18 ± 2.06a		7.28 ± 1.32a		50.22 ± 4.06a	
Linfen, Shanxi	NT	4.65 ± 0.29b	-49.3	3.71 ± 0.17b	-49.1	38.42 ± 0.45b	-23.5

表 5 气候因子、土壤因子与土壤有机碳储量的 Pearson 相关系数

Table 5 Correlation coefficients between climate factors、soil factors and soil organic carbon

	年均温 Annual average temperature	年降水 Annual precipitation	容重 Bulk density	黏粒含量 Clay	粉粒含量 Silt	砂粒含量 Sand	饱和含水量 Saturated moisture	紧实度 Penetrometer resistance	有机碳储量 Organic C storage
年均温 Annual average temperature	1								
年降水 Annual precipitation	0.126	1							
容重 Bulk density	0.149	0.106	1						
黏粒含量 Clay	-0.132	0.101	-0.389	1					
粉粒含量 Silt	-0.368	0.023	-0.321	0.902**	1				
砂粒含量 Sand	0.337	-0.035	0.335	-0.928**	-0.998**	1			
饱和含水量 Saturated moisture	-0.381	-0.589**	-0.524**	0.381	0.317	-0.315	1		
紧实度 Penetrometer resistance	-0.337	0.298	0.084	-0.308	-0.544**	0.538**	-0.154	1	
有机碳储量 Organic C storage	-0.731**	-0.708**	-0.88	0.46	0.218	-0.194	0.627**	-0.538*	1

\*表示在 0.05 水平上显著; \*\*表示在 0.01 水平上极显著  
\*Indicate significant different at  $\alpha=0.05$ ; \*\*Indicate significant different at  $\alpha=0.01$

0.01), 与年均温、年降水量呈极显著负相关关系 ( $P<0.01$ ), 与紧实度呈显著负相关关系 ( $P<0.05$ ), 但与容重、黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量无显著相关性。同时, 饱和含水量与年降水、容重具有极显著相关性 ( $P<0.01$ ), 紧实度与粉粒含量、砂粒含量具有极显著相关性 ( $P<0.01$ )。

3 讨论

3.1 保护性耕作下土壤物理性质的变化

土壤容重、紧实度、持水性能是土壤物理性质的重要指标, 各区域土壤类型、耕作年限、耕作机械不同, 导致不同耕作下土壤物理性质具有区域性差异。众多研究者对不同区域保护性耕作下土壤物理性质的研究结果存在分歧, 许多研究者发现免耕处理下土壤容重和紧实度增大、孔隙度减少, 土壤含水量低<sup>[17-19]</sup>; 也有研究发现免耕处理下 0—10 cm 土层土壤容重显著降低, 土壤孔隙度提高, 土壤含水量提高<sup>[9]</sup>; 而侯雪坤<sup>[20]</sup>认为免耕与传统耕作下土壤容重、孔隙度无显著差异, 而与土壤质地、种植制度等有关。本研究中免耕处理下, 廊坊试验点土壤容重与紧实度高于传统耕作, 这可能是由于该试验点为一年两熟的种植制度, 传统耕作下频繁的机械扰动降低了土壤容重, 而免耕对土壤扰动比较小, 同时播种机械对土壤具有压实作用, 造成表层容重值的提高和紧实度的增加, 但对深层土壤影响较小。公主岭试验点 0—80 cm 土壤剖面容

重和紧实度免耕显著大于传统耕作, 分析其原因可能是黑土黏粒含量较高, 受耕作播种机械影响大, 免耕处理下播种机机械的压实作业导致土壤紧实度进一步增加、孔隙度减少, 土壤容重显著增大, 而传统耕作以大机械翻耕作业为主, 土壤疏松多孔, 进而降低了土壤容重和紧实度, 这与王恩姮等<sup>[21]</sup>的结果一致; 临汾和寿阳试验点主要是人工操作, 试验小区机械压实作用小, 同时免耕增加秸秆还田, 增加土壤有机碳, 土壤动物、微生物增多, 对土壤具有疏松作用, 再加上冬季土壤冻融疏松作用, 因此免耕下表层土壤容重低于传统耕作。

土壤颗粒组成决定土壤孔隙结构, 而孔隙结构影响土壤水分运动<sup>[22]</sup>。公主岭试验点 0—500 kPa 吸力下土壤体积含水量都较大, 这可能是由于黏质黑土保水性能比较好<sup>[23]</sup>; 而廊坊试验点 0—50 kPa 吸力下孔隙释水性较强, 一定吸力以后平缓, 这有可能是由于砂质潮土含沙量多, 保水性能差造成的。本试验中, 不同试验点各处理下土壤含水量在低吸力阶段没有显著差异, 10—350 kPa 中高吸力段, 免耕处理下土壤持水能力高于传统耕作, 这是由于保护性耕作土壤的持水性能较传统耕作土壤显著提高, 一是秸秆还田带来有机质的增加, 改善土壤内部的水热条件; 二是耕作活动影响土壤的孔隙分布和团聚体结构; 三是免耕秸秆还田覆盖减少了土壤水分的无效蒸发, 增加土壤有效持水量, 因此, 免耕土壤持水能



力高于传统耕作<sup>[24-25]</sup>。

### 3.2 保护性耕作下土壤有机碳储量的变化

保护性耕作能促进土壤有机碳积累。BAKER 等<sup>[26]</sup>发现耕作方式对土壤有机碳的影响主要集中在 0—30 cm 土层; 而胡宁等<sup>[27]</sup>发现免耕提高 5—15 cm 土层有机碳储量, 这主要是由于不同区域翻耕深度、土壤类型、地理条件等造成的, 说明保护性耕作对土壤有机碳储量的影响因区域不同而差异显著。土壤有机碳含量由秸秆还田量、有机碳分解速率等因素决定, 不同区域耕作下土壤物理性质的变化是影响有机碳分解转化的重要因素<sup>[28-29]</sup>。公主岭试验点 0—80 cm 土层土壤总有机碳储量免耕高于传统耕作, 可能是由于表层积累的碳的淋溶和搬运, 导致亚表层碳的输入性增加, 而免耕秸秆覆盖提高了土壤的导水性能和生物活性, 因此有利于土壤有机质向亚表层淋溶和迁移<sup>[30-33]</sup>。廊坊和临汾试验点 0—10 cm 表层免耕处理土壤有机碳储量高于传统耕作, 一是由于秸秆还田增加碳输入量, 土壤表层碳含量增加; 二是由于秸秆覆盖降低了土壤水分蒸发, 土壤持水能力提高, 减少了因风蚀和水蚀造成的碳损失<sup>[34]</sup>; 三是由于免耕改变了土壤的物理性状, 土壤容重增加, 孔隙度较小, 不利于微生物活动, 降低了有机碳的分解速率<sup>[35-37]</sup>。而传统耕作对土壤扰动较大, 土壤通气性增强, 土壤有机碳分解比较快<sup>[12]</sup>。免耕对土壤扰动比较小, 秸秆仅覆盖在地表, 深层土壤基本无秸秆输入, 因此免耕显著降低了 10 cm 以下土层有机碳储量; 寿阳试验点免耕处理提高了 0—40 cm 土层有机碳储量, 这主要是由于该区域土壤质地为砂壤土, 土壤颗粒间孔隙度比较大, 造成有机质向下层迁移和淋溶, 因此免耕在增加寿阳试验点表层碳储量的同时增加了 20—40 cm 土层有机碳储量。

### 3.3 区域气候因素及土壤物理性质对有机碳储量的影响

土壤有机碳储量受气候因子和土壤性质等因子影响显著。STRONG 等<sup>[38]</sup>认为土壤总孔隙度与土壤有机碳具有正相关性; 而祖元刚等<sup>[39]</sup>研究了东北黑土发现, 土壤容重与有机碳呈正相关关系, 总孔隙度与土壤有机碳含量呈显著负相关。王玉珏等<sup>[40]</sup>研究发现土壤有机碳、总氮含量与年均温、年降水有显著正相关关系, 与砂土含量、土壤容重有显著正相关关系。本研究表明, 土壤有机碳与饱和含水量呈极显著正相关关系, 而与年均温、年降水、紧实度具有显著负相关关系, 有机碳储量受气候因子、持水能力、紧实度的影响显著。保护性耕作提高土壤持水能力、

增加有机碳储量主要原因: 一是保护性耕作增加了土壤覆盖, 裸露面积减少, 土壤有机碳矿化少; 另一方面, 保护性耕作通过减少对土壤的扰动, 降低了土壤水分蒸发, 减少了因风蚀和水蚀造成的有机碳损失。因此, 保护性耕作可以不同程度地增加有机碳储量。

## 4 结论

4.1 免耕对土壤容重和紧实度影响存在区域性差异。免耕提高了黏质黑土(公主岭)和砂质潮土(廊坊)土壤容重和紧实度, 降低了粉砂壤质黄土(临汾)和砂壤质褐土(寿阳)土壤容重。

4.2 与传统耕作相比, 免耕显著提高 4 个试验点 0—10 cm 表层有机碳储量。其中黏质黑土(公主岭)有机碳储量提高了 45.4%, 砂壤质褐土(寿阳)有机碳储量提高了 11.9%, 砂质潮土(廊坊)有机碳储量提高了 23.1%, 粉砂壤质黄土(临汾)有机碳储量提高了 27.2%。

4.3 耕作对 0—80 cm 土层不同区域的有机碳总储量影响存在显著性差异。其中免耕下黏质黑土(公主岭)有机碳储量显著提高了 7.2%, 砂壤质褐土(寿阳)、砂质潮土(廊坊)、粉砂壤质黄土(临汾)有机碳储量分别降低了 26.8%、31.3%、23.5%。

4.4 4 个试验点不同耕作处理下土壤体积含水量在低吸力阶段没有显著差异, 10—350 kPa 中高吸力段, 免耕处理下土壤持水能力高于传统耕作。

4.5 长期耕作可以通过调节土壤持水能力和紧实度影响土壤有机碳储量, 但影响程度存在区域性差异。总体来说, 免耕是提高表层土壤有机碳储量的重要措施。

致谢: 感谢刘恩科研究员, 卢昌艾研究员在土壤样品采集中的支持帮助!

## References

- [1] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. 地理学报, 2000, 55(50): 533-544.  
WANG S Q, ZHOU C H, LI K R, ZHU S L, HUANG F H. Analysis of soil organic carbon pool and spatial distribution in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(50): 533-544. (in Chinese)
- [2] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [3] LIU E, CHEN B, YAN C, ZHANG Y, MEI X, WANG J. Seasonal changes and vertical distributions of soil organic carbon pools under

- conventional and No-till practices on Loess Plateau in China. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79: 517-526.
- [4] WANG H, WANG S, ZHANG Y, WANG X, WANG R, LI J. Tillage system change affects soil organic carbon storage and benefits land restoration on loess soil in North China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29: 2880-2887.
- [5] PUGET P, LAL R. Soil organic carbon and nitrogen in a Mollisol in central Ohio as affected by tillage and land use. *Soil and Tillage Research*, 2004, 80(1): 201-213.
- [6] DOLAN M S, CLAPP C E, ALLMARAS R R. Soil organic carbon and nitrogen in a Minnesota soil a related to tillage, residue and nitrogen management. *Soil & Tillage Research*, 2006, 89: 221-231.
- [7] 田效琴, 田佳乔, 李卓, 刘永红. 保护性耕作下西南黄壤坡地的土壤结构效应. *中国农学通报*, 2017, 33(14): 62-68.
- TIAN X Q, TIAN J Q, LI Z, LIU Y H. Soil structure effects of sloping land in the yellow soil of Southwest China under Conservation tillage. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33 (14): 62-68. (in Chinese)
- [8] MARQUEZ C O, GARCIA V J, CAMBARDELA C A. Aggregate-size stability distribution and soil stability. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 725-735.
- [9] 孙国峰, 张海林, 徐尚起, 崔思远, 汤文光, 陈阜. 轮耕对双季稻田土壤结构及水贮量的影响. *农业工程学报*, 2010(9): 66-71.
- SUN G F, ZHANG H L, XU S Q, CUI S Y, TANG W G, CHEN F. Effects of rotary cultivation on soil structure and water storage in double cropping paddy fields. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010(9): 66-71. (in Chinese)
- [10] 罗珠珠, 黄高宝, 张国盛. 保护性耕作对黄土高原旱地表土容重和水分入渗的影响. *干旱地区农业研究*, 2005(4): 7-11.
- LUO Z Z, HUANG G B, ZHANG G S. Effects of conservation tillage on bulk density and water infiltration of dry surface soils in the Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005(4): 7-11. (in Chinese)
- [11] 刘孝义, 周桂琴, 依艳丽, 刘春梅. 东北地区几种主要土壤持水特性研究. *沈阳农学院学报*, 1985, 16(2): 31-37.
- LIU X Y, ZHOU G Q, YI Y L, LIU C M. Study on water holding characteristics of several major soils in Northeast China. *Journal of Shenyang Agricultural College*, 1985, 16(2): 31-37. (in Chinese)
- [12] 魏燕华, 赵鑫, 翟云龙, 张二鹏, 陈阜, 张海林. 耕作方式对华北农田土壤固碳效应的影响. *农业工程学报*, 2013, 29(17): 87-95.
- WEI Y H, ZHAO X, ZHAI Y L, ZHANG E P, CHEN F, ZHANG H L. Effects of tillage methods on soil carbon sequestration in North China farmland. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(17): 87-95. (in Chinese)
- [13] 田慎重, 王瑜, 宁堂原, 董晓霞, 董亮, 郑东峰, 郭洪海. 转变耕作方式对长期旋免耕农田土壤有机碳库的影响. *农业工程学报*, 2016, 32(17): 98-105.
- TIAN S Z, WANG Y, NING T Y, DONG X X, DONG L, ZHENG D F, GUO H H. Effects of shifting tillage methods on soil organic carbon pool in long-term spin-no-till farmland. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (17): 98-105. (in Chinese)
- [14] 王旭东, 张霞, 王彦丽, 李军. 不同耕作方式对黄土高原黑垆土有机碳库组成的影响. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 29-23.
- WANG X D, ZHANG X, WANG Y L, LI J. Effects of different tillage methods on the composition of organic carbon pools in black loess soil on the Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 29-23. (in Chinese)
- [15] 张国盛, Chan K Y, Li G D, Heenan D P. 长期保护性耕作方式对农田表层土壤性质的影响. *生态学报*, 2008, 28(6): 2722-2728.
- ZHANG G S, CHAN K Y, LI G D, HEENAN D P. Effects of long-term protective tillage methods on soil properties of topsoil. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (6): 2722-2728. (in Chinese)
- [16] GAO L L, WANG B S, LI S P, WU H J, WU X P, LIANG G P, GONG D Z, ZHANG X M, CAI D X, AURORE D. Soil wet aggregate distribution and pore size distribution under different tillage systems after 16 years in the Loess Plateau of China. *Catena*, 2019, 173: 38-47.
- [17] LOGSDON S D, KARLEN D L. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 2004, 78: 143-149.
- [18] 李亚杰, 唐江华, 苏丽丽, 张永强, 彭姜龙, 徐文修. 耕作方式对土壤含水量及夏大豆生长的影响. *新疆农业科学*, 2015, 52(4) : 621-627.
- LI Y J, TANG J H, SU L L, ZHANG Y Q, PENG J L, XU W X. Effects of tillage methods on soil moisture and content and summer soybean growth. *Xinjiang Agricultural Science*, 2015, 52(4): 621-627. (in Chinese)
- [19] 苏丽丽, 徐文修, 李亚杰, 唐江华, 王娜, 罗家祥. 耕作方式对干旱绿洲滴灌复播大豆农田土壤有机碳的影响. *农业工程学报*, 2016, 32(4): 150-156.

- SU L L, XU W X, LI Y J, TANG J H, WANG N, LUO J X. Effects of tillage methods on soil organic carbon in soybean farmland with Drip Irrigation in Arid Oasis. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (4): 150-156. (in Chinese)
- [20] 侯雪坤. 不同耕作方式下土壤耕层理化性状和生物学特性时空分布研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江八一农垦大学, 2010.
- HOU X K. Temporal and spatial distribution of physical and chemical properties and biological characteristics of soil plow layer under different tillage methods[D]. Harbin: Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2010. (in Chinese)
- [21] 王恩姮, 柴亚凡, 陈祥伟. 大机械作业对黑土区耕地土壤结构性特征的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 351-356.
- WANG E X, CHAI Y F, CHEN X W. Effects of large mechanical operations on soil structural characteristics of cultivated land in black soil areas. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 351-356. (in Chinese)
- [22] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森伟. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988: 18-24.
- LEI Z D, YANG S X, XIE S C. *Soil Hydrodynamics*. Beijing: Tsinghua University Press, 1988: 18-24. (in Chinese)
- [23] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学. 北京: 高等教育出版社, 2006: 67-74.
- SHAO M A, WANG Q J, HUANG M B. *Soil Physics*. Beijing: Higher Education Press, 2006: 67-74. (in Chinese)
- [24] 王小华, 贾克力, 刘景辉, 李立军. Van Genuchten 模型在土壤水分特征曲线拟合分析中的应用. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(2): 179-183.
- WANG X H, JIA K L, LIU J H, LI L J. Application of Van Genuchten model to soil moisture characteristic curve fitting analysis. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(2): 179-183. (in Chinese)
- [25] MRABET R, SABER N, EI-BRAHLI A, LAHLOU S, BESSAM F. Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco. *Soil and Tillage Research*, 2001, 57: 225-235.
- [26] BAKER J M, OCHSNER T E, VENTEREA R T, GRIFFIS T J. Tillage and soil carbon sequestration: what do we really know? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 118: 1-5.
- [27] 胡宁, 姜翼来, 梁雷. 保护性耕作对土壤有机碳、氮储量的影响. *生态环境学报*, 2010, 19(1): 223-226.
- HU N, LOU Y L, LIANG L. The effect of conservation tillage on soil organic carbon and nitrogen storage. *Journal of Eco-Environment*, 2010, 19(1): 223-226. (in Chinese)
- [28] WEST T O, POST W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 1930-1946.
- [29] 李倩, 李晓秀, 吴会军, 宋霄君, 王碧胜, 武雪萍. 不同气候和施肥条件下保护性耕作对农田土壤碳氮储量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1539-1549.
- LI Q, LI X X, WU H J, SONG X J, WANG B S, WU X P. Effects of conservation tillage on soil carbon and nitrogen storage in farmland under different climate and fertilization conditions. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24(6): 1539-1549. (in Chinese)
- [30] 李新举, 张志国, 邓基先, 刘辉友. 免耕对土壤生态环境的影响. *山东农业大学学报*, 1998, 29(4): 520-526.
- LI X J, ZHANG Z G, DENG J X, LIU H Y. Effects of no-tillage on soil ecological environment. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1998, 29(4): 520-526. (in Chinese)
- [31] MELERO S, LÓPEZ-GARRIDO R, MURILLO J M, et al. Conservation tillage: Short- and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions. *Soil & Tillage Research*, 2009, 104: 292-298.
- [32] 李景, 吴会军, 武雪萍, 蔡典雄, 姚宇卿, 吕军杰, 田云龙. 长期不同耕作措施对土壤团聚体特征及微生物多样性的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2341-2348.
- LI J, WU H J, WU X P, CAI D X, YAO Y Q, LY J J, TIAN Y L. Effects of long-term different tillage measures on soil aggregates and microbial diversity. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8): 2341-2348. (in Chinese)
- [33] 严昌荣, 刘恩科, 何文清, 刘爽, 刘勤. 耕作措施对土壤有机碳和活性有机碳的影响. *中国土壤与肥料*, 2010(6): 58-63.
- YAN C R, LIU E K, HE W Q, LIU S, LIU Q. Effects of farming measures on soil organic carbon and active organic carbon. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(6): 58-63. (in Chinese)
- [34] MUNKHOLML J, HECK R J, DEEN B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil and Tillage Research*, 2013, 127: 85-91.
- [35] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, C. F. Drury. 耕作方式对耕层黑土有机碳库储量的短期影响. *中国农业科学*, 2006, 39(6): 1287-1293.
- LIANG A Z, ZHANG X P, YANG X M, DRURY C F. Short-term effects of tillage methods on soil organic carbon storage in plow layer

- of black soil in Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(6): 1287-1293. (in Chinese)
- [36] 王碧胜, 蔡典雄, 武雪萍, 李景, 梁国鹏, 于维水, 王相玲, 杨毅宇, 王小彬. 长期保护性耕作对土壤有机碳和玉米产量及水分利用的影响. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1455-1464.
- WANG B S, CAI D X, WU X P, LI J, LIANG G P, YU W S, WANG X L, YANG Y Y, WANG X B. Effects of long-term conservation tillage on soil organic carbon and maize yield and water use. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1455-1464. (in Chinese)
- [37] 宋霄君, 吴会军, 武雪萍, 李倩, 王碧胜, 李生平, 梁国鹏, 李景, 刘彩彩, 张孟妮. 长期保护性耕作可提高表层土壤碳氮含量和根际土壤酶活性. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1588-1597.
- SONG X J, WU H J, WU X P, LI Q, WANG B S, LI S P, LIANG G P, LI J, LIU C C, ZHANG M N. Long-term conservation tillage can increase carbon and nitrogen content in surface soil and soil enzyme activities in rhizosphere. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24 (6): 1588-1597. (in Chinese)
- [38] STRONG D T, DE WEVER H, MERCKX R, RECOUS S. Spatial location of carbon decomposition in the soil pore system. *European Journal of Soil Science*, 2004, 55(4): 739-750.
- [39] 祖元刚, 李冉, 王文杰, 苏冬雪, 王莹, 邱岭. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性. *生态学报*, 2011, 31(18): 5207-5216.
- ZU Y G, LI R, WANG W J, SU D X, WANG Y, QIU L. Correlation between soil organic carbon and inorganic carbon contents and soil physical and chemical properties in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5207-5216. (in Chinese)
- [40] 王玉珏, 赵佳宁, 于洋, 张敬莉, 张钰舒, 冯金朝, 肖春旺. 不同纬度兴安落叶松林土壤碳氮含量特征及影响机制. *中央民族大学学报(自然科学版)*, 2020, 29(2): 13-20.
- WANG Y J, ZHAO J N, YU Y, ZHANG J L, ZHANG Y S, FENG J C, XIAO C W. Characteristics and influence mechanisms of soil carbon and nitrogen in larch forests of different latitudes. *Journal of Central University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2020, 29(2): 13-20. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)