

保护性措施对中低肥力黑土区有机质变化的影响

李贝, 丁广歌, 赵鹏飞, 周丹, 赵闯, 米国华, 张卫峰

引用本文:

李贝, 丁广歌, 赵鹏飞, 等. 保护性措施对中低肥力黑土区有机质变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 891-900.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0106>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小麦-水稻秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响

张雅洁, 陈晨, 陈曦, 常江, 章力干, 郜红建

农业环境科学学报. 2015, 34(11): 2155-2161 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.11.017>

我国保护性耕作对农田温室气体排放影响研究进展

张国, 王效科

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 872-881 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0102>

中国茶园N₂O排放及其影响因素

姚志生, 王燕, 王睿, 刘春岩, 郑循华

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 715-725 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0137>

无害化污泥与钼尾矿配施对沙化潮土土壤质量的影响

刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰

农业环境科学学报. 2016, 35(12): 2385-2396 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0711>

土壤-水稻籽粒系统镉富集主要影响因素统计分析

郑宏艳, 刘书田, 米长虹, 黄治平, 侯彦林, 王农, 蔡彦明

农业环境科学学报. 2015(10): 1880-1888 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.10.007>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李 贝, 丁广歌, 赵鹏飞, 等. 保护性措施对中低肥力黑土区有机质变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 891-900.
LI Bei, DING Guang-ge, ZHAO Peng-fei, et al. Effect of conservation practices on soil organic matter in medium or low fertility black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 891-900.



开放科学 OSID

保护性措施对中低肥力黑土区有机质变化的影响

李 贝¹, 丁广歌², 赵鹏飞³, 周 丹³, 赵 闯³, 米国华¹, 张卫峰^{1*}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 四平市发展和改革委员会, 吉林 四平 136000; 3. 梨树县农业技术推广总站, 吉林 梨树 136500)

摘 要:为探索农户采用保护性措施对东北黑土区土壤有机质(SOM)变化的影响,通过跟踪2008年至2015年间梨树县19个乡镇341块农田SOM的变化,分析了免耕、秸秆还田和有机肥施用三项保护性措施采用情况对SOM变化的影响。2015年梨树县SOM平均为 $18.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,较8年前下降了10.5% ($P < 0.05$)。土壤初始SOM含量越高,其SOM下降越明显。在初始SOM $> 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的区域,SOM显著降低,但在初始SOM $\leq 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的区域,SOM含量较2008年提升了4.5% ($15.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。主要是因为SOM $\leq 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 区域采用过保护性措施的农户比例高达63.2%,而SOM $> 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 区域农户采用比例为49.3%。同时发现在初始SOM较低的土壤,采用单项保护性措施可以维持甚至提高SOM,同时采用三项措施显著提升了SOM。但在初始SOM较高的土壤,两项措施结合才可维持SOM不下降。目前梨树黑土区保护性措施的采用可以维持甚至提高SOM,但在应用时需要加强应用时间的连续和技术间的集成。

关键词:免耕; 秸秆还田; 有机肥; meta-analysis

中图分类号: S153.621 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)04-0891-10 doi:10.11654/jaes.2020-0106

Effect of conservation practices on soil organic matter in medium or low fertility black soil

LI Bei¹, DING Guang-ge², ZHAO Peng-fei³, ZHOU Dan³, ZHAO Chuang³, MI Guo-hua¹, ZHANG Wei-feng^{1*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Siping Municipal Commission of Development and Reform, Siping 136000, China; 3. Lishu County Agricultural Technology Extension Station, Lishu 136500, China)

Abstract: In order to explore the effect of conservation practices on soil organic matter in the black soil area of northeast China, the soil organic matter (SOM) from 341 sites across 19 townships of Lishu County were tracked in 2008 and 2015, and the SOM change was analyzed which was affected by three conservation practices, including no-tillage, straw return and manure application. Compared to the initial in 2008, the average SOM content decreased by 10.5% with an average of $18.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in 2015. The higher the initial organic matter content was, the more obvious the decrease was. Significant decrease were found in the groups of initial SOM $> 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. However, in groups of initial SOM $\leq 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, the SOM increased by 4.5% compared with that in 2008 ($15.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). The main reason is that the proportion of conservation practices adopted by farmers in the groups of SOM $\leq 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ was as high as 63.2%, which was much higher than that in the groups of SOM $> 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (49.3%). Furthermore, the soil fertility could be improved by the combination of two practices in areas with low initial SOM, and SOM was significantly enhanced by three measures using together. But in areas with high initial SOM, these two practices contributed only to maintaining soil fertility. Now, SOM of black soil area of Lishu could keep up and even increase by using conservation practices, but we need to strengthen technological integration and continuous adoption.

Keywords: no-tillage; straw return; manure; meta-analysis

收稿日期: 2020-01-30 录用日期: 2020-03-20

作者简介: 李 贝(1990—),女,河南新乡人,博士研究生,从事农业绿色技术应用研究。E-mail: libei90@126.com

*通信作者: 张卫峰 E-mail: wfzhang@cau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201303); 农业农村部“农业法制建设与政策调研项目”(101821301122441002); 主要粮食作物化肥减量增效技术模式汇总(201801910310761)

Project supported: The National Key R&D Program of China (2016YFD0201303); The Ministry of Agriculture and Rural Affairs “Agricultural Legal System Construction and Policy Research Project” (101821301122441002); Summary of Technical Models of Fertilizer Reduction Efficiency Improvement for Major Grain Crops (201801910310761)

土壤有机质(SOM)是土壤质量最重要的指标^[1],是生产力提高、资源高效、生态环境保护的基础^[2-3]。土壤SOM下降是黑土区从自然生态系统转变为农田生态系统的伴生现象^[4-5]。东北黑土区在开垦后的一百年中,SOM迅速从原来的 $151\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到 $50.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[6],而近些年仍在缓慢下降。2005—2014年测土配方施肥项目评估发现,东北黑土区260个县区中,55.0%的县区SOM含量高于 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,25.4%的县区SOM含量位于 $20\sim 30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,19.6%的县区SOM含量低于 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[7]。黑土区南部吉林省的SOM平均水平已下降到 $26.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[8]。吉林南部SOM较低的黑土区未来SOM是否会进一步下降,哪些措施会影响其变化趋势是目前普遍关注的问题。

引起土壤SOM变化的原因非常广泛:侵蚀(包括风蚀和水蚀)造成表土中最为丰富的SOM大量损失^[9];长期采用翻耕、旋耕等传统耕作方式,土壤矿化作用使SOM分解加快^[10];仅施化肥不施有机肥造成土壤碳源减少,SOM含量下降等^[11-12]。除不易改变的自然环境对SOM变化的影响,人为干扰成了影响土壤矿化速率的主要因素,如土壤扰动(耕作)和物质输入(化肥施用、秸秆还田、有机肥利用)等^[2,10,11-13],其实土壤侵蚀量也与人为因素存在很大关系,例如作物种类、种植坡向、地表覆盖等^[6,14]。近些年关于黑土区SOM下降的研究主要围绕环境影响^[15]和水土流失^[16-17],而且主要研究试验条件下某些因素的影响。鲜有研究系统剖析农户生产措施对东北黑土区SOM变化的影响,尤其是中低肥力水平的区域已经开展了多年技术推广,却对其效果未有明确的认识。在实际生产中,引起SOM下降的因素是多样的,因素之间也会相互影响,难以用试验条件下单一因素的作用机理去解释,需要引入多因素交互的统计方法来认识多因子的影响。

如现有实验研究已涉及到耕作、秸秆还田和肥料施用对黑土区SOM的影响,但单项措施的效果存在不确定性。如Ding等^[18]2011年在吉林黑土区的定位实验研究证明,免耕是改善SOM的良好措施,但2017年Du等^[19]的Meta分析结果显示,与传统耕作相比,采用免耕并没有显著增加东北黑土区表层土SOM的含量;范围和董智(2007—2012年)等^[20-21]对吉林黑土区的长期定位研究也发现,仅耕作方式的改变对SOM的提升很有限,SOM增加主要依靠秸秆还田。Lu^[22]2015年利用Meta分析发现,秸秆还田可以显著增加东北黑土区SOM含量,且随着时间的增长而增长;但

Liu等^[23]在2014年的Meta分析表示,秸秆还田促进了土壤有机碳的积累,但短期内秸秆还田对土壤作用效果不明显,秸秆还田连续12a后土壤有机碳达到饱和和平衡状态。徐宁等^[12]对黑龙江省28a长期定位试验田的研究发现,长期施用有机肥可以显著增加黑土SOM;然而Domingo-Olivé等^[24]的长期定位研究却发现,长期施用猪粪,SOM含量并未显著增长,说明有机肥种类和施用方法会对其改良SOM的效果产生不同影响。近些年黑土区已经通过政策、技术推广宣传等方式推动了一些保护性措施的应用,包括秸秆还田、有机肥施用和免耕等,但实际上这些措施的采用情况以及其对SOM的影响却没有实证性的研究。

为了分析保护性措施对于SOM的影响,尤其是实际生产中多项技术集成对SOM的影响,本文以梨树县2008年和2015年大样本的土壤定位测试数据和农户调研数据为基础,通过Meta分析方法定量了少免耕、秸秆还田和有机肥施用三项保护性措施对SOM变化的影响,通过识别技术效果,期望提出维持或提高SOM的针对性措施,为实现东北黑土区的保护和利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及土壤SOM分析

梨树县地处吉林省西南部半湿润平原区($123^{\circ}45'\sim 120^{\circ}53'\text{E}$ 、 $42^{\circ}49'\sim 43^{\circ}46'\text{N}$),松辽平原腹地,地势平坦,属于世界著名的“黄金玉米带”,素有“松辽明珠”和“东北粮仓”之美称。耕作历史悠久,主要农作物有玉米、水稻和大豆,其中玉米播种面积占86.9%,近20年种植结构变化不大。该区海拔为160m,属北温带半湿润季风性大陆气候,年平均气温 6.5°C ,年日照时数2541h,无霜期155d,年平均降水量553mm。全县农业人口58.0万人,耕地面积25.2万 hm^2 。土壤种类较多,按照土类分类方法,以黑土、黑钙土、淡黑钙土、草甸土、冲积土、风砂土和棕壤为主,属于吉林薄层黑土区,土壤SOM在黑土区中处于中下等水平^[25]。

2008年梨树县耕地地力评价中,根据随机分层抽样原则,测试了431块农田的SOM,涵盖了全县主要土壤类型,如黑土、黑钙土、草甸土、风砂土等。土壤样品采用五点“S”取样,取样深度为0~20cm。2015年10月,根据2008年每个取样点的GPS定位再次取样,跟踪评价了SOM变化。由于有些地块农转非、有些地块未找到所有者,最终获得有效样本341个,样本跟踪率79.1%。样本在各个乡镇及土壤类型

上的分布情况见表1。两个年度均采用重铬酸钾-硫酸溶液-油浴法测定SOM。

第二次全国土壤普查耕层SOM含量是按照 >40 、 $30\sim 40$ 、 $20\sim 30$ 、 $10\sim 20$ 、 $6\sim 10$ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 ≤ 6 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 分为6个等级^[26]。因本研究中 ≤ 6 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 >40 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样本数量较少(3~4个),因此以2008年土壤SOM含量为本底值,将所有样本按照 >30 、 $20\sim 30$ 、 $10\sim 20$ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 ≤ 10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 分为4个等级。梨树县2008年341个采样点SOM整体呈正态分布,平均值为21.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,为了便于统计,进一步将20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 作为土壤肥力区域的分界点,土壤SOM ≤ 20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域定义为低肥力土壤区域,SOM >20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域定义为中肥力土壤区域。

1.2 影响SOM的因素及数据来源

影响SOM变化的因素有土壤本底条件(如土壤质地、土类、成土母质、砂粒及黏粒含量等)、气候因素(如降雨、温度、气候类型等)和管理因素。在本研究中选择梨树县域341个地块作为研究对象,虽然这些地块分布在全县不同地区,但梨树县全县都是缓坡丘陵区,没有山川等影响小气候变化的因素,即使降雨在县域内略有差异,但无法获得每个农户地

块的气象数据,因此我们认为所有研究地块气象条件相同,不纳入分析范畴。土壤因素中我们重点考虑了土类和土壤质地,其他因素如成土母质和砂粒及黏粒含量不考虑,原因是同土类具有相同的成土条件和土壤属性,土壤质地是不同比例的粗细土粒组成,反映了土壤的机械组成。本文主要分析管理因素对SOM的影响。

已有研究中明确对SOM有影响的生产管理因素包括轮作模式、耕作方式、有机肥还田量、化肥施用量、秸秆还田和灌溉^[20,27-29]。为了反映梨树当地各项管理措施的具体方式及与SOM的关联性,我们对2008—2015年间341个地块所属的农户田间生产管理行为进行了问卷调查,调研与土壤取样同时开展。调研由驻扎梨树的科技小院研究生完成,这些学生长期驻扎农村,对农户生产方式充分了解。调研对象是每个抽样地块的户主,调研指标包括2008—2015年间每一年的种植结构、粮食产量、耕作方式(免耕、旋耕/翻耕)、秸秆还田(年限、还田量和还田方式)和有机肥施用(年限、种类、方式和用量)、化肥施用、灌溉等全生育期管理行为。

表1 2015年跟踪地块样本分布表

Table 1 Distribution of tracking plot samples in 2015

乡镇 Township	土壤类型 Soil type							小计 Subtotal
	黑钙土 Chernozem	黑土 Black soil	草甸土 Meadow soil	棕壤土 Brunisolic soil	淡黑钙土 Light chernozem	风砂土 Aeolian sandy soil	冲击土 Alluvium	
白山乡 Baishan		12	3				1	16
蔡家镇 Caijia		10	2	1				13
东河镇 Donghe	3	7	4			1	1	16
郭家店镇 Guojiadian		8	6	4				18
金山乡 Jinshan	9		1		4			14
喇嘛甸镇 Lamadian	6	6	4				1	17
梨树镇 Lishu		11	9	1			1	22
林海镇 Linhai	1		1		23	6		31
刘家馆子镇 Liujiaguanzi	1		1		15	6		23
孟家岭镇 Mengjialing		1	1	8			1	11
泉眼岭乡 Quanyanling	8	2	6		1			17
沈洋乡 Shenyang			8		3	2	1	14
胜利乡 Shengli	7	3	2			2	1	15
十家堡镇 Shijiabao		11	3				1	15
双河乡 Shuanghe	5	2	3				2	12
四棵树乡 Sikeshu	2		8		3	4	3	20
万发镇 Wanfa	14	10	3					27
小城子镇 Xiaochengzi	4	2	4		2	4		16
榆树台镇 Yushutai	11	8	2			2	1	24
总计 Total	71	93	71	14	51	27	14	341

调研分析结果表明,98.5%的农户在2008—2015年间种植模式没有发生变化,均为玉米连作,因此轮作方式不纳入分析框架。调研发现耕作方式发生了较大变化,主要存在免耕、旋耕和深耕几种方式,而当地自2011年开始推广免耕技术,因此本研究将免耕作为影响SOM的重要指标。本研究中免耕指既不旋耕也不翻耕,当年无整地过程。

当地自2011年开始限制秸秆焚烧,推广秸秆还田,2015年开展秸秆打捆补贴,农户秸秆处理方式从过去的焚烧、喂牛向秸秆还田和打捆出售多种方式转变。秸秆还田又分为秸秆粉碎覆盖还田和秸秆粉碎翻压还田两种,由于粉碎翻压还田秸秆腐解缓慢影响出苗,通过调研发现到2015年还田农户中有75.8%选择覆盖还田,还田方式变化不大。而秸秆还田影响SOM主要体现在还田量和还田时间长短,本文中秸秆还田量根据作物产量计算^[30]:

秸秆还田量=0.850 9×产量+3 974.1 ($R^2=0.582$)
分析发现(表2和表3),每年秸秆还田量与SOM变化

量无显著相关性,而还田年限显著影响秸秆累积还田量进而影响土壤SOM,因此我们以秸秆还田年限界定农户秸秆还田技术采用情况。

有机肥投入方式包括机械撒施和机械深施两种,但不同投入方式在不同肥力等级中的分布比例相似;在有机肥种类方面,57.0%的有机肥为猪粪,其次为牛粪(25.9%)和鸡粪(11.4%),根据不同种类有机肥的碳、氮含量,计算出其投入有机碳和有机氮的量^[31],比较有机肥投入量的差异,但平均每年不同SOM等级之间有机肥投入量没有差异,而有机肥施用年限影响有机碳氮累积量,因此我们用有机肥施用年限来反映农户之间的差异。

梨树农户氮肥用量整体较高,群组间没有差异。在氮肥施用方式方面,全县差异不大,底肥以机械施用为主,追肥时才会选择人工施肥,但人工施肥并不是广泛采用的保护性措施。另外,在肥料种类方面,梨树县肥料类型由单质肥、15-15-15复合肥转变为多种比例的复合肥,缓控释肥、包膜肥、抑制剂肥等新型肥料在

表2 管理因素与SOM变化量的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of management factors and SOM variation

管理因素 Management factors	免耕年数 Years of no-tillage	秸秆还田年数 Years of straw return	每年秸秆还田量 Annual straw mulching quantity	还田方式 Return way	有机肥年限 Years of manure	有机肥施用方式 Manure application method	每年有机碳施用量 Annual application rate of organic carbon	每年有机氮施用量 Annual application rate of organic nitrogen	每年氮肥施用量 Annual N-fertilizer application rate
皮尔森相关 Pearson	0.191**	0.160**	0.135	0.099	0.185**	0.064	0.035	0.017	-0.085
显著性(双尾) Significance (double tail)	<0.001	0.003	0.462	0.589	0.001	0.441	0.675	0.836	0.118
样本量n	341	341	32	32	341	149	149	149	341

注:**表示该变量与SOM变化值相关性显著。

Notes:** Indicates that the variable is significantly correlated with the change value of SOM.

表3 管理因素在不同SOM等级上的差异

Table 3 Difference among management practices in different SOM levels

土壤SOM等级 SOM levels/g·kg ⁻¹		SOM≤10	10<SOM≤20	20<SOM≤30	SOM>30
产量Yield	/kg·hm ⁻² ·a ⁻¹	19 316±1974a(n=17)	20 352±1807ab(n=119)	21 224±2317bc(n=182)	21 217±1580c(n=23)
免耕No-tillage	免耕年数/a	2.50±1.00a(n=4)	2.00±1.16a(n=29)	2.00±0.94a(n=19)	2(n=1)
秸秆还田 Straw return	秸秆还田年数/a	4.20±3.49a(n=5)	2.35±1.80a(n=17)	2.11±2.26a(n=9)	1(n=1)
	秸秆还田量/kg·hm ⁻² ·a ⁻¹	20 588±1875a(n=5)	20 198±1500a(n=17)	17 505±6820a(n=9)	21 311(n=1)
有机肥投入 Manure application	有机肥年数/a	3.55±1.92a(n=11)	3.75±2.32a(n=53)	3.59±2.19a(n=75)	4.20±2.90a(n=10)
	有机碳施用量/kg·hm ⁻² ·a ⁻¹	974±372a(n=11)	1091±550a(n=53)	1451±936a(n=75)	925±326a(n=10)
	有机氮施用量/kg·hm ⁻² ·a ⁻¹	39.9±18.6a(n=11)	49±36.4a(n=53)	65.9±52.0a(n=75)	38.7±17.9a(n=10)
氮肥Nitrogen fertilizer	氮肥施用量/kg·hm ⁻²	230±43.4a(n=17)	236±34.1a(n=119)	235±33.6a(n=182)	231±31.2a(n=23)

注:同行不同小写字母表示不同土壤SOM等级间差异显著($P<0.05$)。

Note: The different lowercase letters in row indicate significant differences among soil SOM grades ($P<0.05$).

当地农资市场较为混乱,农户不能甄别出其具体的肥料类型,因此本文未将肥料类型考虑在内。

梨树属于北温带半湿润季风性大陆气候,年降水量充足,农户灌溉情况很少,341户中每年仅1~2人会灌溉。因此灌溉也不作统计分析。

综上所述,最终我们将8年间是否采用过免耕、有机肥施用和秸秆还田的农户及采用年限进行分类,选择免耕年限、秸秆还田年限和有机肥施用年限3个指标来表征农户保护性措施的采用情况。

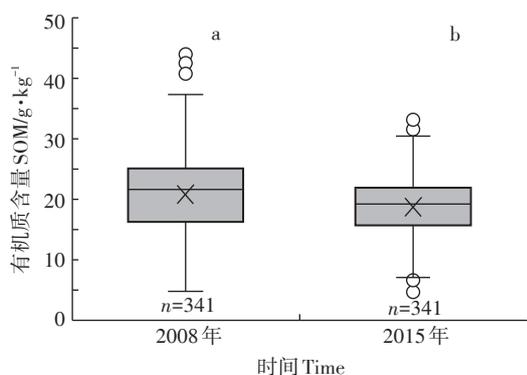
1.3 数据处理

本文数据均采用Excel 2016软件进行录入和整理,相关性和显著性测验均采用SPSS 21进行,年际间的显著性检验用配对样本 T 检验,不同SOM等级间的显著性检验使用单因素方差分析。Meta-analysis方法是运用定量方法去概括和总结多个研究结果的系统评价方法,用于区分多变量的影响。使用Meta-analysis方法对大样本实验数据进行分析,可以得到更加接近真实情况的统计分析结果^[32],由于农户生产中多因素交互较多,为了便于统计,本文采用Meta-analysis方法分析农户田间管理措施对SOM含量的影响,为了确保统计检验的有效性,样本量少于3个的技术不纳入统计。结果采用Sigma Plot 12.0进行作图。

2 结果与分析

2.1 梨树县土壤有机质含量变化趋势

对所有样本汇总分析发现,2015年梨树县SOM平均含量为 $18.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较2008年的 $21.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 显著



图中不同小写字母表示年际间SOM含量差异显著($P < 0.05$)。
 n 表示样本量。下同

The different lowercase letters in picture indicate significant differences among SOM grades between 2008 and 2015 ($P < 0.05$).

The letter n is the sample size. The same below

图1 2008—2015年梨树县土壤SOM含量变化

Figure 1 Average change of SOM in Lishu County between 2008 and 2015

下降了 10.5% ($P < 0.05$) (图1),已经低于吉林省近年来的平均水平 $26.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[8]。梨树县土壤种类较多,以黑土、黑钙土、淡黑钙土、草甸土、冲积土、风砂土和棕壤为主。统计发现(图2),2015年风砂土、淡黑钙土和冲积土的土壤SOM含量较2008年无显著变化,而草甸土、黑钙土、黑土和棕壤的SOM含量在8年间发生了显著变化,分别下降了 10.1% 、 9.0% 、 14.6% 和 17.7% ($P < 0.05$)。在土壤质地方面(图3),2015年黏壤土和黏土SOM含量较2008年显著下降了 9.0% 和 11.7% ($P < 0.05$),壤土和砂土SOM含量变化不显著。

根据梨树县土壤背景SOM(2008年的测试值)分级发现(图4):SOM $\leq 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 区域土壤SOM含量提高 4.5% 。其中SOM $\leq 10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域其SOM含量显著增加 33.1% ($P < 0.05$),2015年平均含量已达到 $10.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。而 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1} < \text{SOM} \leq 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 区域,土壤SOM含量基本持平,增加 2.5% ,经统计检验未达到显著性差异。在背景SOM $> 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域,SOM含量呈显著下降趋势(16.0% , $P < 0.05$),且2008年背景SOM含量越高,下降趋势越明显。如SOM $> 30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 区域SOM含量从2008年的 $34.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,下降到了2015年的 $23.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,下降比例高达 33.1% ($P < 0.05$)。

2.2 梨树县保护性措施采用情况

对梨树县341位农户采用保护性生产措施的比例分析发现,8年间采用过保护性措施的农户比例为 54.8% ,但2008—2015年间农户的田间管理技术应用发生了很大变化(图5)。在2008年,无人采用免耕技术,仅3人采用秸秆还田技术,但自2011年梨树县开始推广免耕和秸秆还田技术后,到2015年采用免耕技术和秸秆还田技术的农户比例分别上升到了

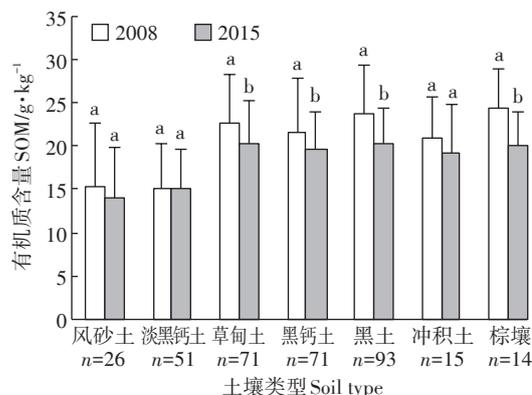


图2 2008—2015年间不同土壤类型SOM含量变化

Figure 2 Average change of SOM among soil types between 2008 and 2015

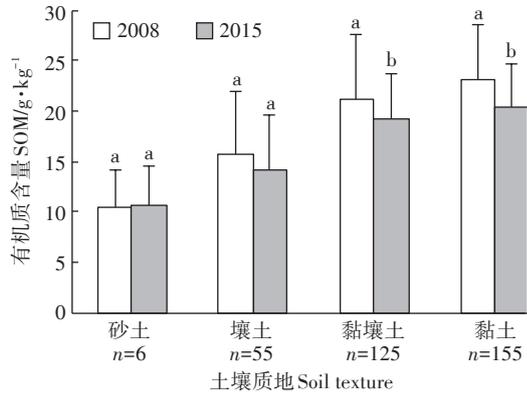


图3 2008—2015年间不同土壤质地SOM含量变化

Figure 3 Average change of SOM among soil texture between 2008 and 2015

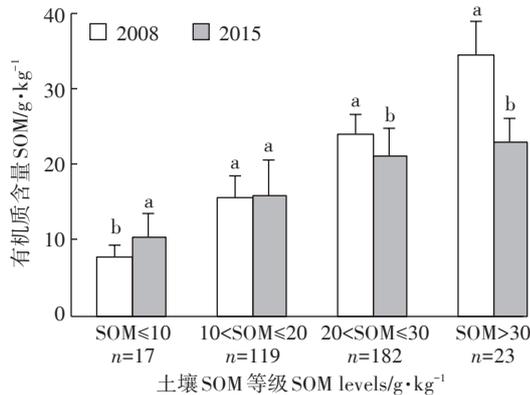


图4 2008—2015年不同土壤SOM等级样本群组的SOM含量变化

Figure 4 Average change of SOM among different SOM levels between 2008 and 2015

12.9%和9.7%。但施用有机肥的农户比例从2008年的27.3%下降到2015年的13.5%。

技术采用率与土壤背景SOM呈现负相关关系(图6)。土壤SOM背景值越高,技术采用率反而越低。如所有采用过保护性措施的农户比例从63.2%($SOM \leq 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 区域)下降到了49.3%($SOM > 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 区域),免耕、秸秆还田、有机肥施用三项措施的表现结果与整体一致。比如,免耕技术采用率(定义见方法部分)随背景SOM升高从23.5%下降到4.3%。秸秆还田从29.4%下降到4.3%,有机肥从64.7%下降到41.2%。而且随着背景SOM升高,技术的集成采用率(同时采用2项或3项技术的农户)也呈下降趋势(图7),同时采用2项技术的农户从10.1%降低到4.3%,同时采用3项技术的农户从17.6%降低到0。

2.3 保护性措施采用对土壤有机质变化的影响

通过 Meta-analysis 方法分析发现,在所有样本

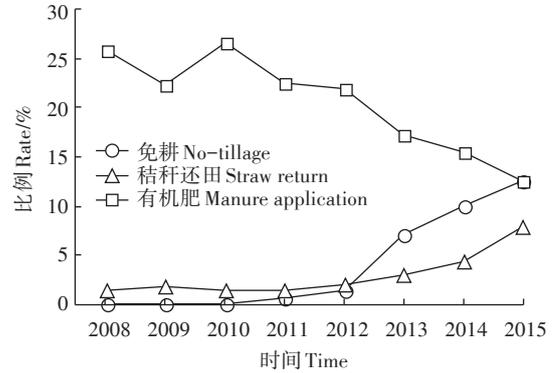


图5 2008—2015年梨树县保护性措施采用情况

Figure 5 Adoption rate of various conservation practices in Lishu from 2008 to 2015

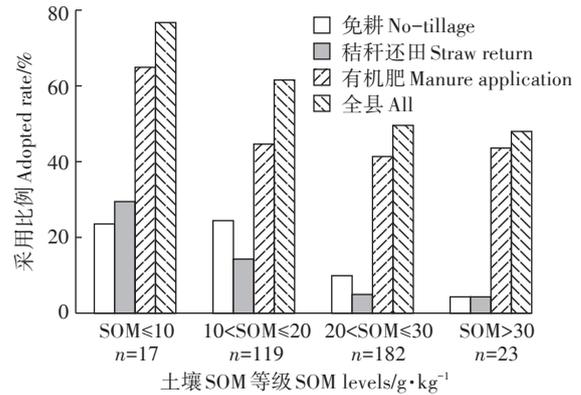


图6 2008—2015年间不同土壤SOM等级下保护性措施采用比例

Figure 6 Adoption proportion of various conservation practices in different SOM levels among 2008 and 2015

中,不采用任何技术($n=154$,占样本总量的45.2%)的农田SOM显著下降。仅采用单项技术($n=152$,占样本总量的44.6%)的农田SOM保持不变,但是存在较大的变异(图8a)。技术效果与土壤背景SOM之间存在一定的交互作用,不论土壤背景SOM是高还是低,仅采用免耕技术或秸秆还田技术都能维持土壤SOM含量。但单独采用有机肥技术时,在背景SOM较高的区域($SOM > 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $n=73$)土壤SOM含量仍然降低,而在背景SOM低的区域($SOM \leq 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $n=43$)可以提高土壤SOM。进一步分析发现,SOM变化也与技术采用的持续性相关,其中有机肥施用技术在低肥力区域($SOM \leq 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)表现出明显的累积效应,如采用1~2 a时不能提升SOM($n=16$),但采用3 a以上时,SOM可以显著提高,6~8 a时SOM可提高 $5.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($n=8$, $P < 0.05$)。但免耕单项技术的累积效应并不明显,如免耕1~2 a与3~5 a之间没有区别。秸秆还田

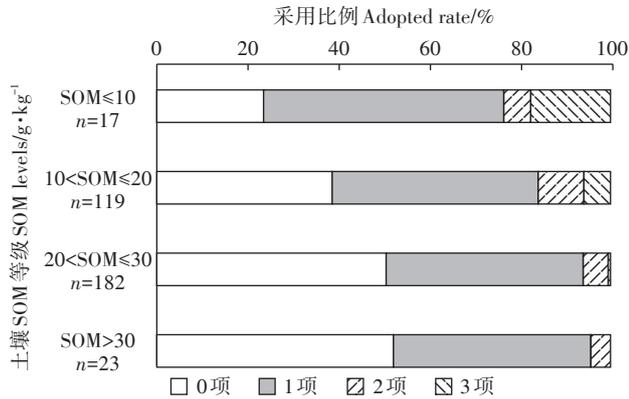
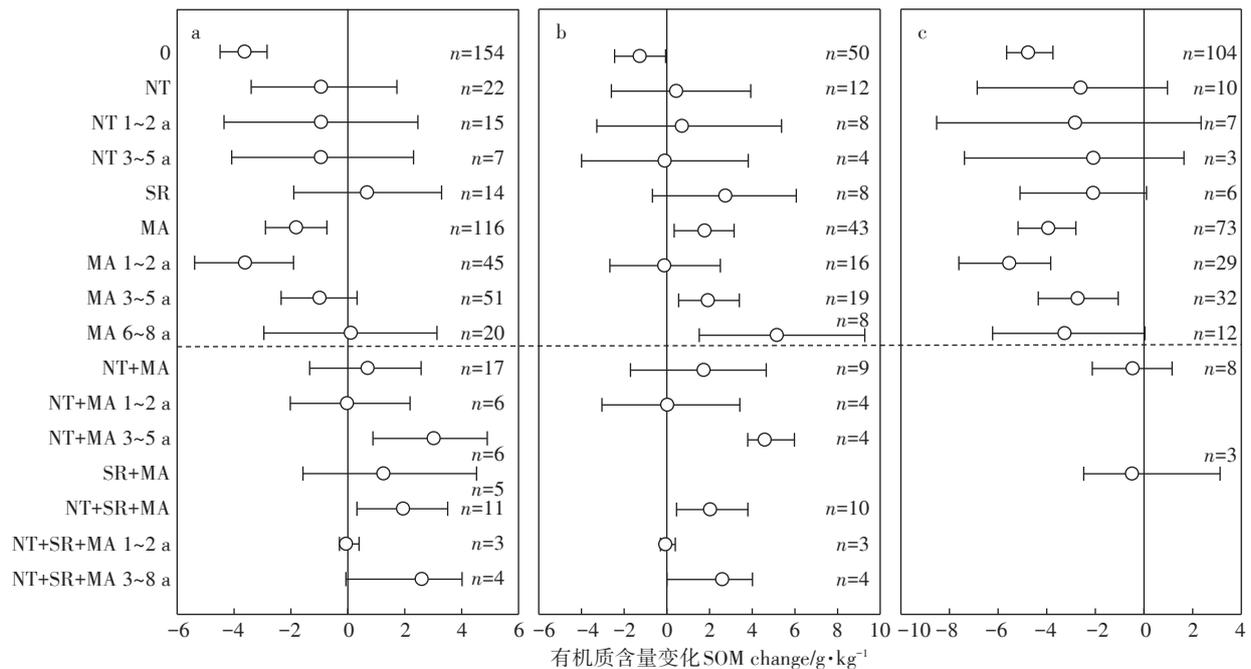


图7 2008—2015年间不同土壤SOM等级下采用不同数量保护性措施的比例

Figure 7 Ratio of quantities of adopted conservation practices in different SOM levels among 2008 and 2015

因采用不同年限的样本量较少,而没有进一步分析其累积效应。

无论是土壤SOM较高或较低的区域,当两项技术结合采用时,都能够维持甚至显著提高SOM含量。整体而言,免耕或秸秆还田技术与有机肥配合可以维持SOM含量,效果明显优于仅采用有机肥施用技术,而且随着采用时间的延长,可以提升SOM含量达1.25%($n=5$)。由于样本量限制,并没有发现免耕与秸秆还田配合的效果(原因见讨论部分)。三项技术协同采用的效果进一步提升,如有机肥、免耕和秸秆还田同时采用,可以显著增加SOM含量达1.94%($n=11$)。多项技术结合的效果也随着土壤肥力升高发生了衰减,如有机肥与免耕技术结合采用时间超过3 a(样本量 $n=4$)时,可以显著增加低肥力区土壤SOM含量(图8b)。但在SOM > 20 $g \cdot kg^{-1}$ 区域(图8c)有机肥与免耕技术结合采用($n=8$)并没有提高SOM含量。因此,在农业生产时要注意技术的配合使用、技术应用区域的土壤肥力状况和技术的应用时间。



(1)a为所有样本,b为SOM $\leq 20 g \cdot kg^{-1}$ 土壤区域,c为SOM > 20 $g \cdot kg^{-1}$ 土壤区域;(2)MA代表有机肥,SR代表秸秆还田,NT代表免耕,若出现一项技术代码表示仅采用一项技术,若出现两项技术代码则代表采用两项技术,依此类推;(3)“1~2 a”指技术采用的年限为1~2 a,多项技术以采用年限最低为准,若技术采用某年限的样本量少于3,则不进行统计分析;(4)圆点代表效应值(SOM含量变化平均值),误差线代表95%置信区间,置信区间与零坐标系重合代表无显著差异,处理间误差线无交叉表示处理间差异显著($P < 0.05$)

(1)“a” represents Lishu County, “b” represents the soil of SOM $\leq 20 g \cdot kg^{-1}$, “c” represents the soil of SOM > 20 $g \cdot kg^{-1}$; (2) MA stands for manure application, SR stands for straw return, NT stands for no-tillage. If there is only one code, it means only using this one practice. If there are two codes, it means using these two practices. And so on. (3) “1~2 a” represents years of practice adoption is 1~2 a. Many practices are subject to the minimum years. If the sample size of a certain year is less than 3, statistical analysis is not conducted. (4) The dot represents the effect value (average change), the error line represents the 95% confidence interval, the coincidence between the confidence interval and the zero coordinate system means no significant difference, and the non-crossing of the error line means the difference between treatments is significant ($P < 0.05$)

图8 不同保护性措施对土壤SOM含量变化的影响

Figure 8 Effects of different conservation practices on soil organic matter change

3 讨论

本研究发现梨树县土壤SOM整体仍呈现下降趋势,与焉莉、Zhao、黄耀等的研究结果类似^[8,10,17]。梨树虽然整体处于黑土区,但位于黑土区最南端,以黏壤土和黏土为主(占全部样本的82.1%)。黏壤土和黏土质地黏重、透气性差、SOM不易分解,砂土漏水漏肥、SOM不易形成,但本研究却发现砂土SOM增加,可见在本文中质地并不是SOM变化的决定因素。主要原因在于土地利用方式上,梨树县仍以玉米连作为主(玉米种植面积占耕地面积的80%以上),连续单一的种植结构加快了土壤SOM矿化速率^[33]。同时梨树县典型的缓坡丘陵地形地貌上土壤侵蚀(包括风蚀和水蚀)严重,近些年并没有采取有效的措施,其仍是造成SOM含量降低的关键因素^[5]。此外,翻耕占主导的耕作方式,秸秆不还田、有机肥投入少导致外源碳投入少都是土壤SOM持续下降的关键原因^[10]。因此,逆转土壤SOM下降趋势需要多项措施结合,但理解措施在生产中的作用、采用制约因素及集成原理是前提条件。

本研究发现农民采用的几项耕作措施在部分田块已经开始显效,从大的趋势上,这几项措施能够减缓下降、维持甚至提高土壤SOM,但效果受到技术本身及采用的持续性影响,也与土壤背景条件相关。如本研究发现秸秆还田技术在SOM>20 g·kg⁻¹中肥力区域有降低SOM的趋势,这是因为研究样本中,农户采用秸秆还田的平均年限为2.1 a,而秸秆还田前期对土壤的固碳作用变异比较大^[23];秸秆还田后,在适宜温度和湿度条件下才会被土壤微生物分解转化,而梨树县位于吉林省中南部,年平均气温为6.5℃,冬季长时覆雪,不利于秸秆有机碳的转化和固定,因此当地秸秆还田方式多为覆盖还田;而该地区春季干旱多风,土壤风蚀严重,造成秸秆还田效果较差。此外本研究中,中肥力土壤碳氮比较高,秸秆中碳氮比更高,秸秆还田后带入的氮难以为继,影响微生物的活动,不利于SOM的形成。因此,从提升土壤SOM出发,这一区域秸秆还田应该发展翻压还田方式,提高秸秆还田持续性,同时优化氮素施用与秸秆还田的配合。

本研究还发现在SOM≤20 g·kg⁻¹低肥力土壤区域连续施用有机肥可以提高SOM含量,而在SOM>20 g·kg⁻¹区域连续施用有机肥却使SOM含量下降,这与前人的研究结果相反。这是因为一方面本研究中土壤有机碳的投入量平均为1241 kg·hm⁻²,远低于前人在定位实验中的投入量,这是目前小农户种养分离,有

机肥缺乏的现实情况。另一方面有机肥种类也很重要,梨树有机肥种类中58.4%是猪粪,且大多是自然堆沤,猪粪碳氮比较低,不利于固碳。一些定位实验也表明长期施用猪粪并不会提高土壤SOM含量^[24]。另外在有机肥施用方式方面,梨树县农户习惯在每年秋天或初春时将有机肥撒施在地表,在播种时将其旋耕翻压到地下,腐熟程度不够,且在地头长期堆放导致养分损失,降低了有机肥的作用。在初始有机碳含量比较高的地方(SOM>20 g·kg⁻¹),微生物种群比较丰富,需要消耗更多的有机碳,也是有机肥效果不好的原因。因此从提升SOM的角度,应考虑从提升有机肥碳氮比、提高施用效率入手,发挥有机肥施用提升SOM的作用。

本研究也发现,免耕维持土壤SOM含量的变异比较大,即使其与有机肥技术结合后,仍然存在很大变异,只有当免耕与有机肥技术结合连续使用3 a以上,在低肥力土壤区域才表现出增加SOM效应。这是因为在本研究中,低肥力土壤的主要类型是保水保肥能力较差的风沙土和淡黑钙土,采用免耕技术虽然减少了播期土壤水分和养分损失,但有机碳积累不足,只有长期采用才能增加SOM。其他研究表明,在SOM>20 g·kg⁻¹区域,免耕和秸秆还田配合的效果比单独采用的效果好^[21,34]。但本研究发现这一生产技术的应用存在困难,因此实际采用的农户极少。一方面秸秆还田影响免耕的播种质量,本研究开展时尚未找到解决途径,2017年才开始推广条耕技术。另一方面是秸秆还田后带来的病虫害加重,连续免耕后土壤紧实度加重等原因使得农户仍不愿冒险使用这两项技术,近两年才刚刚推广免耕2~3 a后深松的技术。

可见在实际生产中技术的应用效果受到多方面因素的影响,梨树县仍需要加强技术的集成创新来实现SOM的提升,如通过堆肥技术提升有机肥碳氮比,提升机械化水平以提升有机肥施用效率;通过机械和技术创新,加强秸秆还田与免耕技术的协同应用。另一方面,也应该加强农户认知的转变,提高技术综合效应的培训。本研究发现在SOM≤20 g·kg⁻¹区域中采用过保护性措施的农户比例高达63.2%,高于SOM>20 g·kg⁻¹区域中的农户比例(49.3%)。原因是低SOM区域的农户已经认识到过低的SOM对玉米生产的影响,尤其是SOM过低加重了春季干旱的影响,灌溉保障度不高的情况下减产风险极大。农业技术推广部门在推广过程中也向低肥力区倾斜,改变了农户认知,提高了保护性措施的采用率。而中肥力区域的农

户还没有认识到SOM下降的潜在影响,技术采用动力不足。

4 结论

目前,梨树县SOM平均水平为 $18.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,与8年前(2008年)相比下降了10.5% ($P < 0.05$),在初始SOM $> 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的区域,SOM含量降低显著,但在背景SOM $\leq 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的区域SOM却提升4.5%。在玉米连作、侵蚀等降低SOM的大因素之下,农户采用免耕、秸秆还田和有机肥几项保护性措施取得了一定效果。但在田间生产中这些保护性措施的应用效果不仅与技术本身和采用时间有关,也与技术集成及与土壤条件配合有关。不采用保护性措施SOM会进一步下降,仅采用单项技术措施并不一定能够维持SOM含量不变,只有当多项技术配合采用并连续采用时才能够维持甚至显著提高SOM含量。可见,中低肥力黑土区通过采用保护性措施能够逆转土壤SOM含量下降的趋势,但需要加强技术之间配合集成。

参考文献:

- [1] Reeves D W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems[J]. *Soil & Tillage Research*, 1997, 43(1/2):131-167.
- [2] Johnston A E, Poulton P E, Coleman A. Soil organic matter: Its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes[J]. *Advances in Agronomy*, 2009, 101:1-57.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677):1623-1627.
- [4] Lal R. Anthropogenic influences on world soils and implications to global food security[J]. *Advances in Agronomy*, 2007, 93:69-93.
- [5] Lal R. Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security[J]. *Bioscience Journal*, 2010, 60L:708-721.
- [6] 张孝存, 郑粉莉, 安 娟, 等. 典型黑土区坡耕地土壤侵蚀对土壤有机质和氮的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4):182-186.
ZHANG Xiao-cun, ZHENG Fen-li, AN Juan, et al. Effects of soil erosion on soil organic matter and nitrogen in sloping farmland in typical black soil region[J]. *Agricultural Research in the Arid Area*, 2013, 31(4):182-186.
- [7] 全国农业技术推广服务中心. 测土配方施肥土壤基础养分数据集[M]. 北京:中国农业出版社, 2015.
National Agricultural Technology Extension Service Center. Soil nutrient data set of soil testing and formulated fertilization[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015.
- [8] 焉 莉, 王 寅, 冯国忠, 等. 吉林省农田土壤肥力现状及变化特征[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23):4800-4810.
YAN Li, WANG Yin, FENG Guo-zhong, et al. Status and change characteristics of farmland soil fertility in Jilin Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23):4800-4810.
- [9] Wallace A. Soil organic matter is essential to solving soil and environmental problems[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1994:25(1/2):15-28.
- [10] Zhao Y, Wang M, Hu S, et al. Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16):4045-4050.
- [11] Li Z P, Liu M, Wu X C, et al. 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.
- [12] 徐 宁, 周连仁, 苗淑杰. 长期施肥对黑土有机质及其组成的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(6):14-16.
XU Ning, ZHOU Lian-ren, MIAO Shu-jie. Effect of fertilization on organic matter and its composition in mollisols[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2012(6):14-16.
- [13] Ladha J K, Reddy C K, Padre A T, et al. Role of nitrogen fertilization in sustaining organic matter in cultivated soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(6):1756-1766.
- [14] 张雪花, 侯文志, 王 宁. 东北黑土区土壤侵蚀模型中植被因子C值的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3):797-801.
ZHANG Xue-hua, HOU Wen-zhi, WANG Ning. C-value in the model of soil erosion in black earth area in the northeastern China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(3):797-801.
- [15] 郭乃嘉, 史学正, 赵永存, 等. 人为与环境因子对农田土壤有机质影响的比较研究:以典型黑土区和水稻土区为例[J]. 土壤学报, 2016, 53(5):1097-1106.
GUO Nai-jia, SHI Xue-zheng, ZHAO Yong-cun, et al. Comparative study on impacts of anthropogenic and environment factors on soil organic matter: A case study of typical black soil region and paddy soil region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5):1097-1106.
- [16] 杨学明, 张晓平, 方华军, 等. 20年来部分黑土耕层有机质和全氮含量的变化[J]. 地理科学, 2004, 24(6):710-714.
YANG Xue-ming, ZHANG Xiao-ping, FANG Hua-jun, et al. Changes in organic matter and total nitrogen of black soils in Jilin Province over the past two decades[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(6):710-714.
- [17] 黄 耀, 孙文娟. 近20年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势[J]. 科学通报, 2006, 51(7):750-763.
HUANG Yao, SUN Wen-juan. The variation trend of organic carbon content in farmland surface soil in mainland China in recent 20 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7):750-763.
- [18] Ding X, Zhang B, Zhang X, et al. Effects of tillage and crop rotation on soil microbial residues in a rainfed agroecosystem of northeast China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 114(1):43-49.
- [19] Du Z, Angers D A, Ren T, et al. The effect of no-till on organic C storage in Chinese soils should not be overemphasized: A meta-analysis [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2017, 236:1-11.
- [20] 范 围, 吴景贵, 李建明, 等. 秸秆均匀还田对东北地区黑钙土土

- 壤理化性质及玉米产量的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 835-846.
- FAN Wei, WU Jing-gui, LI Jian-ming, et al. Effects of straw return on soil physico-chemical properties of chernozem in northeast China and maize yield therein[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(4): 835-846.
- [21] 董智, 解宏图, 张立军, 等. 东北玉米带秸秆覆盖免耕对土壤性状的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(5): 100-103.
- DONG Zhi, XIE Hong-tu, ZHANG Li-jun, et al. Effects of no-tillage practice with corn stalk mulching on soil properties in the northeast of China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(5): 100-103.
- [22] Lu F. How can straw incorporation management impact on soil carbon storage? A meta-analysis[J]. *Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change*, 2015, 20(8): 1545-1568.
- [23] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [24] Domingo-Olivé F, Bosch-Serra AD, Yagüe M R, et al. Long term application of dairy cattle manure and pig slurry to winter cereals improves soil quality[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 104(1): 39-51.
- [25] 马强, 宇万太, 赵少华, 等. 黑土农田土壤肥力质量综合评价[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1916-1920.
- MA Qiang, YU Wan-tai, ZHAO Shao-hua, et al. Comprehensive evaluation of cultivated black soil fertility[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1916-1920.
- [26] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查数据[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- National Soil Survey Office. China soil survey data[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997.
- [27] 马俊永, 曹彩云, 郑春莲, 等. 长期施用化肥和有机肥对土壤有机碳和容重的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6): 38-42.
- MA Jun-yong, CAO Cai-yun, ZHENG Chun-lian, et al. Effect of long-term application of chemical fertilizers and organic manure on soil organic carbon and bulk density[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(6): 38-42.
- [28] 韩晓增, 王凤仙, 王凤菊, 等. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 66-71.
- HAN Xiao-zeng, WANG Feng-xian, WANG Feng-ju, et al. Effects of long-term organic manure application on crop yield and fertility of black soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Area*, 2010, 28(1): 66-71.
- [29] Zhao X, Zhang R, Xue J F, et al. Management-induced changes to soil organic carbon in China: A meta-analysis[J]. *Advances in Agronomy*, 2015, 134: 1-50.
- [30] 佟玉欣. 松嫩平原黑土区种植结构调整对SOC、土壤pH和侵蚀的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- TONG Yu-xin. Effect of crop conversion on SOC, soil pH and soil erosion in mollisols region of songnen plain[D]. Beijing: China agricultural university, 2018.
- [31] 张福锁, 陈新平, 陈清, 等. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
- ZHANG Fu-suo, CHEN Xin-ping, CHEN Qing, et al. Guidelines for fertilization of major crops in China[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009.
- [32] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80: 1150-1156.
- [33] 邢会琴, 肖占文, 闫吉智, 等. 玉米连作对土壤微生物和土壤主要养分的影响[J]. 草业科学, 2011, 28(10): 1777-1780.
- XING Hui-qin, XIAO Zhan-wen, YAN Ji-zhi, et al. Effects of continuous cropping of maize on soil microbes and main soil nutrients[J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(10): 1777-1780.
- [34] 许仁良, 王建峰, 张国良, 等. 秸秆、有机肥及氮肥配合使用对水稻土微生物和有机质含量的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(13): 3584-3590.
- XU Ren-liang, WANG Jian-feng, ZHANG Guo-liang, et al. Changes of microbe and organic matter content in paddy soil applied with straw, manure and nitrogen fertilizer[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(13): 3584-3590.