

DOI: 10.11766/trxb202112170583

王根林, 段衍, 刘峥宇, 王楠楠, 高阳, 李玉梅, 王伟, 蔡姗姗, 孙磊. 低山丘陵坡耕地秸秆覆盖轮耕对土壤水热及碳氮库的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 1058–1066.

WANG Genlin, DUAN Yan, LIU Zhengyu, WANG Nannan, GAO Yang, LI Yumei, WANG Wei, CAI Shanshan, SUN Lei. Effects of Soil Hydrothermal Response and Pools of Carbon and Nitrogen Under Straw Cover Rotation on Slope Farmland of Low Mountains and Hills [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(4): 1058–1066.

低山丘陵坡耕地秸秆覆盖轮耕对土壤水热及碳氮库的影响*

王根林¹, 段 衍², 刘峥宇³, 王楠楠^{1, 4}, 高 阳⁵, 李玉梅^{1†}, 王 伟¹,
蔡姗姗¹, 孙 磊¹

(1. 黑龙江省黑土保护利用研究院, 哈尔滨 150086; 2. 中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230031; 3. 黑龙江省绥滨农场, 黑龙江绥滨 154213; 4. 黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江大庆 163000; 5. 农业农村部耕地质量监测保护中心, 北京 100015)

摘 要: 为了提高坡耕地的秸秆还田效率, 探索一种适于坡耕地的基于种植和养地基础上的耕作方式。利用田间小区试验, 研究了秸秆覆盖轮耕技术(包括当季秸秆覆盖+休闲、上季秸秆覆盖+旋耕)与常规耕作(秸秆移除后旋耕)对土壤水热变化及碳、氮积累的影响。结果表明: 秸秆覆盖可显著提高播种前期 20~40 cm 土壤含水量, 覆盖休闲与覆盖旋耕处理较常规耕作分别提高 26.02%和 37.49%, 同时覆盖旋耕处理降低了 20~40 cm 土壤容重, 较常规耕作和覆盖休闲分别降低 6.52%和 13.04%; 与覆盖旋耕相比, 覆盖休闲可降低作物生育前期 0~20 cm 和 20~40 cm 土层温度 1.57~1.63 °C, 而土壤含水量提高 15.25%~24.41%, 为覆盖旋耕区作物出苗和前期生长提供了水分条件; 通过秸秆覆盖休闲与覆盖旋耕组合的轮耕技术可提高 0~20 cm 土层碳氮含量, 有机碳和全氮储量较常规耕作平均提高 11.36%和 20.51%, 为今后低山丘陵区坡耕地实施保护性耕作提供了科学依据。

关键词: 坡耕地; 秸秆覆盖; 轮耕; 土壤水热; 碳氮库容

中图分类号: S157.4 **文献标志码:** A

Effects of Soil Hydrothermal Response and Pools of Carbon and Nitrogen Under Straw Cover Rotation on Slope Farmland of Low Mountains and Hills

WANG Genlin¹, DUAN Yan², LIU Zhengyu³, WANG Nannan^{1, 4}, GAO Yang⁵, LI Yumei^{1†}, WANG Wei¹, CAI Shanshan¹, SUN Lei¹

* 国家重点研发计划项目(2022YFD1500704)、国家大豆产业技术体系(CARS-04-01A)和黑龙江省产业协同技术体系课题(20190506)共同资助 Supported by the National Key R&D Program of China(No. 2022YFD1500704), the National Soybean Industry Technology System of China(No. CARS-04-01A) and the Industrial Cooperative Technology System Project of Heilongjiang Province, China(No. 20190506)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: Liyumeiwxy1@126.com

作者简介: 王根林(1971—), 男, 河北迁安人, 研究员, 主要从事土壤研究。E-mail: wanggenlin2005@163.com

收稿日期: 2021-12-17; 收到修改稿日期: 2022-03-14; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-05-27

(1. Heilongjiang Black Soil Conservation and Utilization Research Institute, Harbin 150086, China; 2. Hefei Institute of Material Science of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 3. Heilongjiang Suibin Farm, Suibin, Heilongjiang 154213, China; 4. College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163000, China; 5. Farmland Quality Monitoring and Protection Center of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100015, China)

Abstract: 【Objective】The main forms of soil erosion are water, wind and freeze-thaw erosion in the black soil area of Northeast China, and slope farmland is the main source of soil erosion. Human factors such as long-term plowing and straw burning or leaving the field untended and heavy use of light farming or other factors have led to the loss of surface soil, shallow cultivated layer, soil infiltration and erosion resistance of sloping farmland. This would aggravate surface runoff and soil water erosion in summer during severe rainfall. To improve the straw return rate in sloping farmland, a suitable farming method based on planting and cultivating land was proposed. 【Method】Field experiments were used to study the effects of straw mulching and rotation tillage technology (including this season straw mulching and fallow, last season straw mulching and rotary tillage) and conventional farming (straw removal and rotary tillage) on soil water and heat changes and carbon and nitrogen accumulation. 【Result】The results showed that: water content in the 20–40 cm soil layer in the early stage of planting could significantly be increased with straw mulching, and the mulching fallow and mulching rotary tillage treatments increased by 26.02% and 37.49%, respectively, compared with conventional tillage. At the same time, the 20–40 cm soil bulk density in mulching rotary tillage treatment was higher than that of conventional tillage and mulching fallow, which were reduced by 6.52% and 13.04%, respectively. Compared with mulching and rotary tillage, mulching and fallow could reduce the soil temperature of 0–20 cm and 20–40 cm in the early stage of crop growth by 1.57–1.63 °C, while the soil moisture content increased by 15.25%–24.41%, which provided conditions for crop emergence and early growth. Combining straw mulching fallow tillage and mulching rotary tillage technologies increased the carbon and nitrogen content of 0–20 cm soil layer, and the organic carbon and total nitrogen reserves were increased by 11.36% and 20.51% compared with conventional tillage. 【Conclusion】All of this provide a scientific basis for the implementation of protective farming techniques on slope farmland in the low mountain and hilly areas. In the future, the optimized combination of crop varieties and dwarfing and maturity promotion would promote the increase of productivity in slope farmland when implementing conservation tillage technology.

Key words: Sloping farmland; Straw mulch; Rotatin tillage; Soil water and heat; Carbon and nitrogen storage

水蚀、风蚀和冻融侵蚀是东北黑土区水土流失的主要形式，其中水蚀面积最大为 18 万 km²，占总侵蚀面积的 65.2%^[1]。坡耕地是产生水土流失的主要策源地，东北黑土区坡耕地面积 1 280 万 hm²，占耕地总面积的 60%，且多分布在 3°~15°坡面上^[2]。坡耕地水土流失发生的自然因素包括漫川漫岗波状起伏地形、坡缓、坡长（500~2 000 m），导致坡耕地集雨面积大、径流集中、冲刷力增强^[3]。而长期翻耕、秸秆焚烧或离田、重用轻养等人为因素导致表土流失、耕层浅薄、土壤渗透和抗蚀能力削弱，在降雨集中的夏季，加剧了地表径流和土壤水蚀现象的发生^[4]。因此，针对坡耕地的水土流失问题，因地制宜开展地力提升与水土流失阻控与防控技术，对于推动坡耕地的持续利用具有重要意义。

保护性耕作是将最小的土壤扰动（免耕、少耕）、土壤覆盖与轮耕相结合的耕作系统。通过轮耕能改善土壤结构，丰富土壤毛管体系，提高土壤蓄水量^[5-6]，促进作物的出苗与生长。在作物生长旺盛时期，地下水通过毛管上升水的输送，满足作物产量需求^[7]。秸秆覆盖还田是秸秆有效利用的重要途径之一。秸秆覆盖可减少地表蒸发，减缓地表结皮，增加土壤孔隙度和入渗能力^[8]。通过秸秆覆盖还可避免雨滴直接击打地面，延长产流时间，对雨水具有拦截和蓄存作用^[3]。本文通过在低山丘陵坡耕地上开展秸秆覆盖轮耕技术研究，分析秸秆覆盖还田休闲与耕作对土壤结构、水热变化及养分的影响，探索坡耕地适宜的耕作技术，为今后黑土区坡耕地因地制宜开展恢复和提升耕地质量的保护性耕作技术提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验区位于黑龙江省牡丹江市海林镇卜家村(44°60'N, 129°58'E), 半湿润中温带大陆性季风气候, 年平均气温 5.7 °C, 年平均降水量 550 mm, 平均活动积温 2 400~2 600 °C。土壤类型为砂土质暗棕壤, 地形坡度 5°~15°, 试验地坡度为 8°。

试验区 1981—2010 年 30 年间平均降水量为 530.5 mm, 降雨集中分布在 7—8 月, 占全年降水量的 46.2%, 冬季和春季平均降水量和总降水量均较低。2020 年全年降水量为 650.4 mm, 高于历年平均水平, 但降雨分配不均现象明显。最高降雨时段出现在 8 月和 9 月, 降水量分别达到 180 mm 和 142.3 mm, 占全年降水量的 49.6 %。1—4 月和 11—12 月降水量仅为 42.5 mm、30.5 mm, 冬季少雪、春季干旱是当地显著的气候特征。

1.2 试验设计

田间试验以 6 行为 1 个试验小区, 小区面积 6 行 × 0.60 m × 200 m, 设 5 次重复。试验小区内分为

玉米种植区(4 行, 当季移除秸秆并旋耕)和秸秆覆盖区(2 行, 覆盖且当季休闲)。其中, 秸秆覆盖还田于每年春季进行, 将秸秆用集行机(9GHJ-H(4), 长春)归行后直接覆盖地表; 玉米种植区采用常规的根茬耙茬旋耕方式。

试验于 2019 年 3 月—2021 年 3 月进行。2019 年将 4 行种植区秸秆全部集行至 2 行秸秆覆盖区, 该覆盖区当季为休耕模式, 下一年度种植玉米。4 行种植区 2019 年种植玉米, 2020 年将 4 行区中的 2 行与上一年度的 2 行秸秆覆盖区组合成新的种植区, 而另外 2 行作为新的秸秆覆盖休闲区。至 2021 年 4 月取样期, 试验小区由 3 个部分组成(每部分 2 行): (1) 覆盖休闲处理(SFT): 上年种植玉米、本年秸秆覆盖; (2) 覆盖旋耕处理(SRT): 上年秸秆覆盖、本年种植玉米; (3) 常规旋耕处理(CRT): 连续 2 年种植玉米、且无秸秆覆盖(表 1)。选择早熟、较耐密植的玉米品种, 生育期 120~130 d, 种植密度为每公顷 5 000 株。施肥总量 N-P₂O₅-K₂O 为 150-100-50 kg·hm⁻², 其中追施氮肥量为纯 N 100 kg·hm⁻², 田间管理措施保持一致。

表 1 试验处理

Table 1 Treatments in the experiment

处理 Treatment	秸秆还田方式 Straw returning method	秸秆还田时间 Straw return time	耕作方式 Tillage method
SRT	覆盖 Cover	上季还田 Return last season	旋耕 Rotary tillage
SFT	覆盖 Cover	本季还田 Return this season	休耕 Fallow
CRT	无覆盖 No cover	无 No	旋耕 Rotary tillage

注: SRT, 覆盖旋耕; SFT, 覆盖休闲; CRT, 常规旋耕。下同。Note: SRT, Straw covered and rotary tillage; SFT, Straw covered and fallow; CRT, Conventional rotary tillage. The same below.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 调查方法 2020 年在玉米播种后第 15、30、35、45、60、70、75 天用手持式土壤水分、温度测定仪(LTS, 杭州绿博仪器有限公司), 测定 0~20 cm、20~40 cm 土壤温度和含水量(%), 并记录当日大气最高、最低温度及降雨量(mm), 降雨量采用气象站(TRM-ZS2 型, 辽宁锦州)现场自动记录。

1.3.2 样品采集与测定 2020 年秋季玉米成熟期每小区选取代表性 3 点, 每点 5 m² 取样测产。采用高效玉米测产机(DSTDB, 铁岭旭日农业技术开

发有限公司)和金农星谷物小区测产系统(DSCA-1, 铁岭东升京研高科)测产。按照(收获籽粒重÷收获样点实际面积)×[1-籽粒含水率(%)]÷(1-14%)×10 000 (kg·hm⁻²) 计算产量。

2021 年春季用环刀、土钻采集 0~10 cm、10~20 cm 和 20~40 cm 土样, 每小区采集 5 点均匀混合为 1 个样品, 3 次重复。土壤含水量、土壤容重采用环刀法测定; 采集 0~20 cm 土层土壤样品, 自然风干后, 测定土壤全量氮、磷、钾、有机碳等指标, 参照常规方法^[9]。

1.4 数据处理

$$\text{有机碳储量 (SOCs)} = C \times P \times T \times 0.1 \quad (1)$$

$$\text{全氮储量 (TNs)} = TN \times P \times T \quad (2)$$

式中, SOC_s 为某深度的土壤有机碳储量, t·hm⁻²; TN_s 为某深度的土壤全氮储量, t·hm⁻²; C 为土壤有机碳含量, g·kg⁻¹; TN 为土壤全氮含量, g·kg⁻¹; P 为土壤容重, g·cm⁻³; T 为土壤厚度, cm。

试验数据用 Excel 2013 处理, SPSS 19.0 软件邓肯 (Duncan) 法进行显著性检验。

2 结果

2.1 秸秆覆盖轮耕对土壤容重和含水量的影响

秸秆不还田条件下, 长期翻耕作业通过机械的夯实作用易形成紧实的犁底层, 耕层变浅, 土体紧实、持水能力下降^[10]。由图 1a 可见, 常规旋耕和覆

盖休闲处理土壤容重随土层深度呈增加趋势, 0~10 cm 土层容重分别为 1.07 g·cm⁻¹ 和 1.15 g·cm⁻¹, 至 20~40 cm 土层分别达到 1.56 g·cm⁻¹ 和 1.41 g·cm⁻¹。覆盖旋耕处理显著降低了 20~40 cm 土层容重, 较常规旋耕和覆盖休闲处理分别降低 6.52% 和 13.04%。与容重变化趋势相反, 常规旋耕处理土壤含水量随土层深度增加呈降低趋势 (图 1 b), 20~40 cm 土层含水量较 0~10 cm 表土层降低了 31.39%, 较覆盖休闲与覆盖旋耕处理分别降低 26.02% 和 37.49%, 差异显著 ($P < 0.05$)。无论是上季秸秆覆盖还是本季秸秆覆盖, 对 0~20 cm 土层平均含水量影响差异均不显著, 但覆盖旋耕后明显增加了 20~40 cm 土层含水量, 较覆盖休闲与常规旋耕分别增加了 8.35% 和 27.27%。

2.2 秸秆覆盖轮耕下玉米生育期内土壤温度的动态变化

秸秆覆盖对玉米生育期土壤温度变化有一定的影响。由图 2 可见, 0~40 cm 土层以覆盖休闲处理

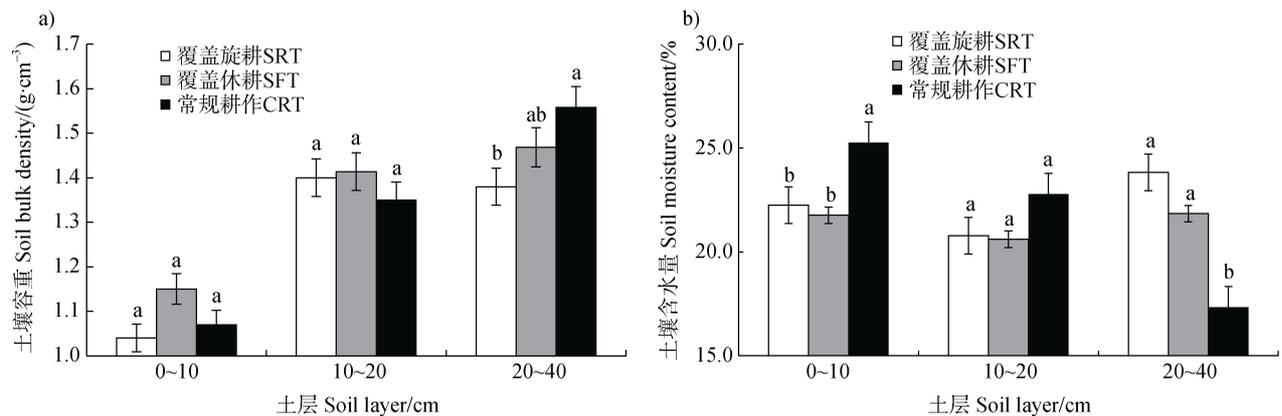


图 1 不同处理土壤容重 (a) 和土壤含水量 (b) 变化

Fig. 1 Changes in soil bulk density (a) and soil moisture (b) with different treatments

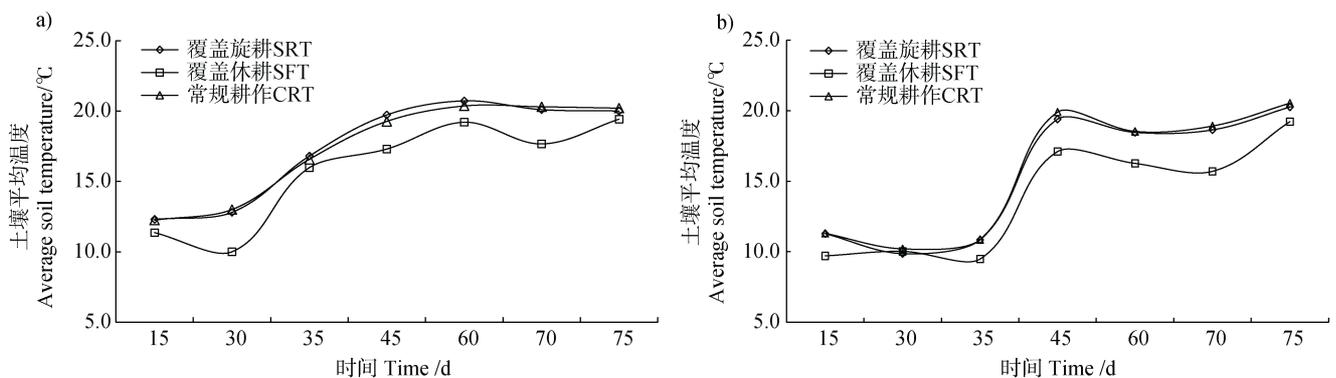


图 2 0~20 cm (a) 和 20~40 cm (b) 土层平均温度变化

Fig. 2 Changes of average temperature in 0-20 cm (a) and 20-40 cm (b)

土壤平均温度最低, 0~20 cm 和 20~40 cm 土层平均温度为 15.85 °C 和 13.93 °C, 较覆盖旋耕处理降低 1.63 °C 和 1.57 °C, 较常规旋耕处理降低 1.6 °C 和 1.82 °C。随深度增加土壤温度降低, 0~20 cm 与 20~40 cm 土层温差覆盖休闲处理为 1.92 °C, 覆盖旋耕与常规旋耕处理分别为 1.96 °C 和 1.67 °C, 差异不显著。随玉米生育期延长, 覆盖休闲处理土温逐渐升高, 秸秆覆盖的“降温”效应小于外界的“升温”变化^[11]。总体而言, 随气温升高土壤温度升高, 覆盖旋耕与常规旋耕处理间土壤温差变化趋势基本一致, 高于覆盖休闲处理。

2.3 秸秆覆盖轮耕下玉米生育期内土壤含水量的动态变化

秸秆覆盖可减少地表蒸发、增加降雨入渗、增强土壤抗旱保墒能力。由图 3 可见, 0~40 cm 土层以覆盖休闲处理土壤含水量最高, 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤平均含水量为 25.23%、28.73%, 较覆盖旋耕处理分别增加 24.41%、15.25%, 较常规旋耕处

理分别增加 31.92% 和 22.92%。随玉米生育进程至第 75 天, 在降雨量仅有 9.6 mm 而最高温度达到 31.4 °C 条件下, 覆盖休闲处理由于未种植作物耗水量减少, 0~20 cm 土壤蓄水量增加至 34.72%, 较覆盖旋耕和常规旋耕处理分别增加 49.42% 和 56.5%, 差异显著 ($P < 0.05$)。干旱少雨条件下坡耕地地表蒸发量增大, 而地表无覆盖蒸发量明显高于覆盖处理^[7-8]。与常规旋耕比较, 覆盖旋耕处理 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤含水量分别提高 11.35% 和 9.95%, 一定程度缓解了前期干旱对幼苗生长带来的不利影响。

2.4 秸秆覆盖轮耕对土壤碳氮养分的影响

秸秆不还田土壤有机碳库下降^[12]。通过秸秆覆盖还田能够促进土壤有机质在表层积累, 使养分分布状况出现成层现象^[13]。由表 2 可见, 无论是当季秸秆覆盖的休耕处理, 还是上季秸秆覆盖的旋耕处理, 0~20 cm 土层全氮、有机碳、水溶性碳及其储量均表现为增加趋势。与常规旋耕处理比较, 秸秆

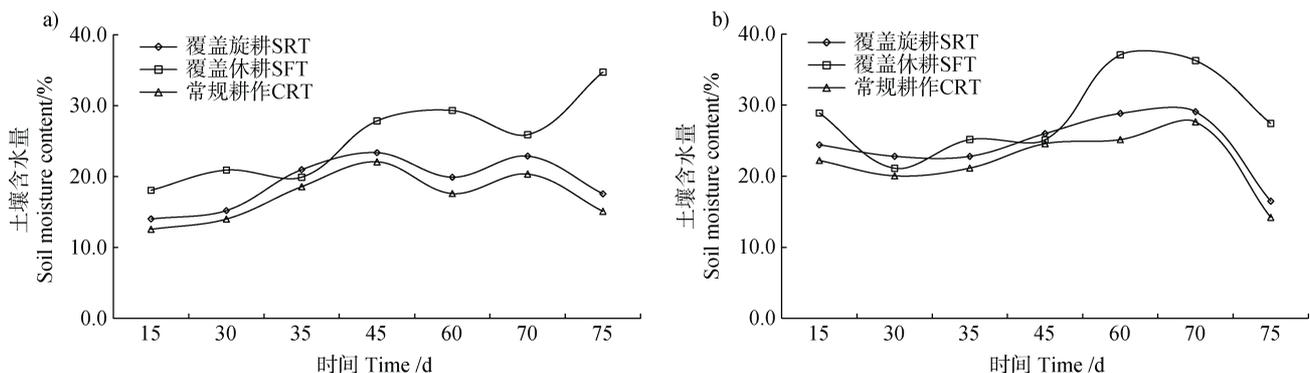


图 3 0~20 cm (a) 和 20~40 cm (b) 土层含水量变化

Fig. 3 Changes of moisture content in 0~20 cm (a) and 20~40 cm (b)

表 2 不同处理 0~20 cm 土层碳氮含量变化

Table 2 Changes of soil carbon and nitrogen content in 0~20 cm with different treatments

处理 Treatment	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	有机碳 Organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	水溶性碳 Water-soluble carbon/ (mg·kg ⁻¹)	总氮储量 Total N storage/ (t·hm ⁻²)	有机碳储量 Organic carbon storage/ (t·hm ⁻²)	水溶性碳储量 Water-soluble carbon storage/ (kg·hm ⁻²)
SFT	1.63a	14.15b	18.63b	41.73b	36.39b	0.478ab
SRT	1.77a	16.95a	21.54a	44.13a	42.34a	0.538a
CRT	1.64a	13.47b	17.46b	39.16b	32.07c	0.416b

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

覆盖处理土壤全氮平均提高 9.63%，秸秆有机碳库储量平均增加 25.74%。覆盖旋耕处理由于上季秸秆的腐解促进了土壤外源腐殖质的转化和积累，土壤水溶性碳较当季秸秆覆盖休闲处理增加 15.61%。

2.5 秸秆覆盖轮耕对玉米产量的影响

由表 3 可见，试验区玉米平均产量为 10 788 kg·hm⁻²，

覆盖旋耕与常规旋耕处理玉米产量分别为 10 542 kg·hm⁻² 和 11 033 kg·hm⁻²。覆盖旋耕处理虽增加了单位面积玉米株数，弥补了覆盖休闲区对产量带来的影响，但植株密度的增加可能通过影响单株结实而影响产量。短期内秸秆覆盖旋耕较无秸秆还田的常规旋耕处理玉米产量略有降低。

表 3 不同处理玉米产量变化

Table 3 Changes of corn yield with different treatments

处理 Treatment	小区穗数 Number of spikes	小区鲜物质量 Fresh biomass/kg	小区产量 Plot yield/kg	折合 14%水的产量 Yield of 14% water/ (kg·m ⁻²)	折合公顷产量 Equivalent to hectare yield/ (kg·hm ⁻²)
常规旋耕 CRT	36	9.29	6.79	1.19	11 876
	30	8.24	5.44	1.09	10 874
平均 Average	30	8.78	5.08	1.04	10 351
	32	8.77	5.77	1.10	11 033
覆盖旋耕 SRT	48	14.32	7.71	1.54	10 285
	51	12.53	9.15	1.63	10 866
平均 Average	45	12.44	6.86	1.57	10 477
	48	13.10	7.90	1.58	10 542

3 讨 论

黑龙江省东南部低山丘陵区坡耕地面积占总耕地面积的 50.35%，占中低产田面积的 69.55%。由于表土层薄、砂石层浅、不宜翻耕，导致该地区长期以来以秸秆焚烧、离田、耙茬旋耕为主，造成土壤“跑水、跑肥、跑土”现象严重^[14]。因此，本研究以秸秆全量还田为前提，探索适于坡耕地的保护性耕作技术，研究秸秆覆盖还田耕作技术对土壤结构、水热变化及养分的影响。

3.1 秸秆覆盖轮耕对土壤物理性状的影响

土壤水的含量、运动变化对土壤气、热状况产生直接影响，同时还影响土壤中的生物过程及理化性质，从而影响土壤结构，进而调控退化土壤的恢复^[13, 15]。已有研究表明，覆盖、免耕、留茬等保护性耕作技术可以降低蒸发、增加土壤入渗、减少水土流失^[6, 8, 16-18]。秸秆覆盖具有调节农田小气候的特点，在夏季气温较低的上午提高土壤表层温度，在气温较高的下午减缓土壤温度的升高。夏季休闲期免耕覆盖处理可提高播种前期土壤贮水量 30.62 mm^[19]。

本研究表明，在作物生长前期，秸秆覆盖休闲处理 0~20 cm 表层土壤温度较常规旋耕降低 1.6℃，而土壤含水量提高 24.41%（图 2a、3a、1b）。由于覆盖休闲处理未种植作物，所以前期温度虽有降低，但对玉米出苗及前期生长无影响。相反，由于试验区冬季少雪、春季少雨，前期 1 月—4 月降水量仅为 42.5 mm 的干旱条件下，秸秆覆盖休闲处理土壤水分含量的增加对于缓解前期干旱、促进覆盖旋耕种植区出苗及前期生长创造了有利条件，这一点与李友军等^[20]研究一致。

长期频繁翻耕、旋耕和秸秆焚烧、离田是造成坡耕地表土流失、耕地质量下降的主要原因^[21]。与传统耕作处理相比，黑土区免耕加上秸秆覆盖处理可阻止坡耕地的表土流失，减少坡面径流量 97.7%，减少侵蚀量 98.9%^[22]。本研究表明，与秸秆不还田的常规旋耕比较，无论当季秸秆覆盖还是上季秸秆覆盖处理均增加了 0~20 cm 表土层的容重，降低了 20~40 cm 亚耕层的土壤容重（图 1a）。同时，秸秆覆盖后土壤持水能力增强，播种前期 20~40 cm 土壤含水量覆盖休闲和覆盖旋耕较常规旋耕分别提高 26.02%和 37.49%（图 3b），与吴发启等^[13]研究一致。

坡耕地秸秆覆盖轮耕后更易形成“上实下虚”的土体结构,为根系生长提供充足有效的空间,同时促进土壤团聚结构的形成,利于退化土壤的修复。

3.2 秸秆覆盖轮耕对土壤碳氮储量的影响

坡耕地由于水土流失导致黑土层变薄,土壤有机质下降^[23]。有研究认为,实施秸秆覆盖虽然对黑土区土壤流失阻控率超过 90%^[24],但覆盖免耕恢复土壤质量可能所需时间更长^[24]。本研究表明,与秸秆不还田的常规旋耕方式比较,秸秆覆盖旋耕后 0~20 cm 土壤全氮和有机碳库储量平均提高 9.63%和 25.74%^[25]。土壤有机碳增加幅度较大,与单位面积秸秆还田量有关^[26],秸秆覆盖处理的秸秆还田量为不还田常规旋耕处理的 2 倍。覆盖旋耕处理对土壤养分库容的增加幅度高于覆盖休闲处理,这与上季腐解的秸秆在增进表层土壤生物多样性、刺激作物根系生长进而增强土壤碳库的积累和转化方面强于当季秸秆腐解的作用效果有关。

3.3 秸秆覆盖轮耕对作物产量的影响

关于保护性耕作对作物产量的影响已有诸多报道。旱区坡耕地实施深松覆盖和免耕覆盖后,小麦的水肥利用效率提高,较常规耕作产量增加 23.22%和 15.38%^[17]。机械灭茬免耕播种玉米产量也较常规耕作提高 9.01%^[8]。也有研究认为,短期保护性耕作可能对产量并未有一定提升,但长期增产效果显著^[27],其中,“低温效应”是导致保护性耕作对作物增产效果不显著的原因^[28]。保护性耕作带来的前期低温可影响冬小麦苗期生长发育,造成植株偏小,干物质积累迟缓。后期低温虽延长了小麦灌浆时间,但同时因减少蒸发而提供了相对较多的土壤水分,为提高小麦穗粒数和千粒重创造了前提条件^[29]。在东北冷凉地区研究表明,秸秆覆盖处理表现为玉米拔节前“降温”拔节后“增温”,其“降温”影响大于“增温”,导致玉米出苗晚,早期生长缓慢,整体表现为弱苗,拔节后秸秆覆盖处理的玉米虽长势强劲,但仍低于对照^[19]。本研究中,秸秆覆盖轮耕技术由两部分组成,其中覆盖休闲为当季秸秆覆盖且不种植作物,覆盖旋耕为上季秸秆覆盖本季种植作物,所以玉米出苗及前期生长受温度影响不明显;而秸秆覆盖后土壤含水量的增加,可有效缓解试验区春季干旱对出苗及前期生长的不利影响。栽培措施相同条件下,植株密度是决定玉米产量的主要因素之一。秸秆覆盖轮耕区单位面积玉米种植密度相对增加,

随着秸秆还田、休闲与耕作的间歇式交替进行,坡耕地地力得以恢复和提升,产量差异会逐渐减小。

4 结 论

本研究在坡耕地秸秆全量还田条件下,开展了秸秆覆盖休闲与旋耕相结合的轮耕技术研究。通过秸秆覆盖轮耕降低了 20~40 cm 土壤容重,播种前期土壤含水量提高 26.02%,缓解了春季干旱的不利影响。秸秆覆盖轮耕后 0~20 cm 土层有机碳和全氮储量较常规耕作有不同程度提高。今后在坡耕地上实施保护性耕作技术时,将作物品种与矮化、促熟等栽培技术优化组合,对于坡耕地产能提升将具有促进作用。

参考文献 (References)

- [1] Yang W W, Zhang X P, Wang H Y. Study on soil and water loss and prevention technology of sloping land in blackland in the northeast [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12 (5): 232—236. [杨文文, 张学培, 王洪英. 东北黑土区坡耕地水土流失及防治技术研究进展[J]. 水土保持研究, 2005, 12 (5): 232—236.]
- [2] Lyu G, Ban X F, Lei Z Y, et al. Benefit of soil and water conservation in the process of harnessing a sloping farmland in the black soil region, Northeast China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16 (6): 51—55. [吕刚, 班小峰, 雷泽勇, 等. 东北黑土区坡耕地治理过程中的水土保持效应[J]. 水土保持研究, 2009, 16 (6): 51—55.]
- [3] Zhang Y, Xu X H, Sui Y Y, et al. The research of the influence of conservation tillage on the soil conservation in sloping black soil zone [J]. Jilin Water Resources, 2012 (11): 1—5. [张瑜, 许晓鸿, 隋媛媛, 等. 保护性耕作对黑土区坡耕地水土流失防治效应影响研究[J]. 吉林水利, 2012 (11): 1—5.]
- [4] Xu X H, Sui Y Y, Zhang Y, et al. Anti-erodibility of sloping land soil in upland region of northeast China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32 (4): 32—35, 47. [许晓鸿, 隋媛媛, 张瑜, 等. 东北丘陵漫岗区坡耕地土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32 (4): 32—35, 47.]
- [5] Gao H W, Li W Y, Li H W. Conservation tillage technology with Chinese characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19 (3): 1—4. [高焕文, 李同盈, 李洪文. 中国特色保护性耕作技术[J]. 农业工程学报, 2003, 19 (3): 1—4.]
- [6] Kong F L, Chen F, Zhang H L, et al. Effects of rotational

- tillage on soil physical properties and winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26 (8): 150—155. [孔凡磊, 陈阜, 张海林, 等. 轮耕对土壤物理性状和冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26 (8): 150—155.]
- [7] He J H, Wang P, Chen J, et al. Effects of different rotational tillage patterns on bulk density and moisture of soil and yield of spring maize (*Zea mays* L) in arid areas[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(2): 415—422. [贺建华, 王平, 陈娟, 等. 不同轮耕方式对旱作区土壤容重、水分及春玉米产量的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49 (2): 415—422.]
- [8] Lü J J, Yao Y Q, Wang Y H, et al. Effects of soil tillages on soil moisture in slop land [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34 (1): 74—76. [吕军杰, 姚宇卿, 王育红, 等. 不同耕作方式对坡耕地土壤水分及水分生产效率的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34 (1): 74—76.]
- [9] Bao S D. Analytical methods for soil and agrochemistry [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [10] Liu S, He W Q, Yan C R, et al. Effects of different tillage managements on soil physical properties in dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28 (2): 65—70. [刘爽, 何文清, 严昌荣, 等. 不同耕作措施对旱地农田土壤物理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28 (2): 65—70.]
- [11] Chang C L, Liu L P, Zhang L F, et al. Development situations and comments on conservation tillage[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24 (2): 167—172. [常春丽, 刘丽平, 张立峰, 等. 保护性耕作的发展研究现状及评述[J]. 中国农学通报, 2008, 24 (2): 167—172.]
- [12] Li X H, Guo H H, Zhu Z L, et al. Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (9): 130—135. [李新华, 郭洪海, 朱振林, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32 (9): 130—135.]
- [13] Wu F Q, Zhao X N, Cui W F. Effect of tillage management measure on rainfall infiltration[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 115—117. [吴发启, 赵西宁, 崔卫芳. 坡耕地耕作管理措施对降雨入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2003, 17 (3): 115—117.]
- [14] Li L X, Chen Y Z, Dong J H. Construction and benefit evaluation of soil erosion control in small watershed in low mountain and hill region of Northeast China—A case study in Hesheng small watershed of Ning'an City in Heilongjiang Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36 (1): 253—258. [李立新, 陈英智, 董景海. 东北低山丘陵区小流域水土流失防治措施的布设及效益评估——以黑龙江省宁安市和盛小流域为例[J]. 水土保持通报, 2016, 36 (1): 253—258.]
- [15] Qian C, Cai X B. Effect of straw returning on soil moisture of degenerated farmland in central Tibet[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34(6): 586—588. [钱成, 蔡晓布. 秸秆还田对西藏中部退化农田土壤水分的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34 (6): 586—588.]
- [16] Bu Y S, Miao G Y, Zhou N J, et al. Temporal and spatial variation of soil moisture in corn field mulched with straw and plastic film—Simultaneous evaluation of the application of regression isogram[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41 (5): 795—802. [卜玉山, 苗果园, 周乃健, 等. 秸秆与地膜覆盖玉米农田土壤水分时空动态变化——兼评回归等值线法的应用[J]. 土壤学报, 2004, 41 (5): 795—802.]
- [17] Wang M H, Chen W F, Song X L, et al. Preliminary study on effect of straw mulching and incorporation on water and salt movement in salinized soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 (6): 1395—1403. [王曼华, 陈为峰, 宋希亮, 等. 秸秆双层覆盖对盐碱地水盐运动影响初步研究[J]. 土壤学报, 2017, 54 (6): 1395—1403.]
- [18] Yuan Z J, Ma D F, Nie X D, et al. Progress in research on prevention and control of soil erosion under forest in red soil hilly region of South China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (1): 12—21. [袁再健, 马东方, 聂小东, 等. 南方红壤丘陵区林下水土流失防治研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 57 (1): 12—21.]
- [19] Yao B L, Jing M, Shi J L. Effects of no-tillage with straw mulch on water saving during fallow and soil temperature regulation in growing season[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2005, 40 (2): 208—211. [姚宝林, 景明, 施炯林. 覆盖免耕在休闲期的节水和生育期的调温效应[J]. 甘肃农业大学学报, 2005, 40 (2): 208—211.]
- [20] Li Y J, Huang M, Wu J Z, et al. Effects of different tillage on utilization and run-off of water and nutrient in sloping farmland of Yuxi dryland area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20 (2): 42—45, 101. [李友军, 黄明, 吴金芝, 等. 不同耕作方式对豫西旱区坡耕地水肥利用与流失的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20 (2): 42—45, 101.]
- [21] Zhao Y S, Wei Y X. Soil and water conservation effects of protective tillage measures on sloping farmland[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(3): 86—90. [赵雨森, 魏永霞. 坡耕地保护性耕作措施的水土保持效应[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7 (3): 86—90.]
- [22] He Y F, Shen H O, Zhang Y, et al. Analysis of soil and water conservation effects of different straw returning patterns in sloping farmland in the Chinese black soil region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,

- 34 (6): 89—94. [贺云锋, 沈海鸥, 张月, 等. 黑土区坡耕地不同秸秆还田方式的水土保持效果分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34 (6): 89—94.]
- [23] Li F, Han X, Ma X L, et al. Straw mulch controls runoff and nitrogen and phosphorus loss from slope farmland in black soil region of northeast China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34 (4): 37—42. [李飞, 韩兴, 马秀兰, 等. 秸秆覆盖对东北黑土区坡耕地产流产沙及氮磷流失的阻控[J]. 水土保持学报, 2020, 34 (4): 37—42.]
- [24] Chen S, Chen Q, Sun T, et al. Effects of straw mulching on topsoil structure and air permeability in black soil sloping farmland[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36 (1): 17—21. [陈帅, 陈强, 孙涛, 等. 黑土坡耕地秸秆覆盖对表层土壤结构和导气性的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36 (1): 17—21.]
- [25] Tan C J. Effects of conservation tillage on the soil nutrient maintenance and control of water erosion of sloping farmland[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2015. [谭春荐. 保护性耕作对坡耕地土壤养分维持及水蚀防控效应研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015.]
- [26] Cong P. Fertilization effect and mechanism of subsoil under high dosage straw returning in black soil of Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019. [丛萍. 秸秆高量还田下东北黑土亚耕层的培肥效应与机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.]
- [27] Gao Y J, Li S X. Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dryland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21 (7): 15—19. [高亚军, 李生秀. 旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21 (7): 15—19.]
- [28] Chang X H, Zhao G C, Meng X Y, et al. Effect of conservation tillage on soil moisture and temperature in the farming-pasture zone[J]. *Soils*, 2006, 38 (3): 328—332. [常旭虹, 赵广才, 孟祥云, 等. 农牧交错区保护性耕作对土壤含水量和温度的影响[J]. 土壤, 2006, 38 (3): 328—332.]
- [29] Li Y X, Zhang B L, Wei Y X. Effects of straw mulching on ground temperature and growth relationship of maize[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30 (2): 82—85. [李月兴, 张宝丽, 魏永霞. 秸秆覆盖的土壤温度效应及其对玉米生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30 (2): 82—85.]

(责任编辑: 陈荣府)