

DOI: 10.11766/trxb201902190034

宋 鸽, 史东梅, 朱红业, 金慧芳, 张庆, 娄义宝. 不同耕作措施对红壤坡耕地耕层质量的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57 (3): 610–622.
SONG Ge, SHI Dongmei, ZHU Hongye, JIN Huifang, ZHANG Qing, LOU Yibao. Effects of Tillage Measures on Quality of Cultivated-layer
in Red Soil Slope Farmland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (3): 610–622.

不同耕作措施对红壤坡耕地耕层质量的影响*

宋 鸽¹, 史东梅^{1†}, 朱红业², 金慧芳¹, 张 庆², 娄义宝¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205)

摘 要: 为探明不同耕作措施对云南红壤坡耕地耕层土壤抗侵蚀性能和生产性能的影响, 以常规耕作为对照, 设置免耕、翻耕 20 cm、翻耕 20 cm+压实、翻耕 20 cm+深松 30 cm 四种耕作措施, 采用土壤质量指数法对不同耕作措施下耕层质量变化特征进行分析评价。结果表明: (1) 不同耕作措施对红壤坡耕地耕层土壤抗侵蚀性能影响显著。翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下土壤饱和导水率最大 ($1.19 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$); 与常规耕作相比, 翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下水稳性团聚体平均质量直径增加 28.13%; 免耕处理下土壤抗剪强度最高 ($12.12 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$), 耕层土壤饱和导水率最大 ($1.27 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$); 翻耕 20 cm 处理下大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量、水稳性团聚体平均质量直径、几何平均直径均显著高于其他措施, 分别为 $69.64 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、1.74 mm、0.77 mm。(2) 不同耕作措施对红壤坡耕地耕层生产性能影响具有差异性表现, 免耕处理下土壤容重显著增大, 土壤有机质、有效磷在表层富集; 翻耕 20 cm、翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下, 耕层增厚效果显著, 土壤有机质、有效磷含量显著增加。(3) 红壤坡耕地耕层土壤质量及诊断指标的适宜性对耕作措施响应有差异, 翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理耕层土壤质量指数最大 (0.58); 翻耕 20 cm、翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理的耕层厚度、容重及有效磷指标均在适宜性阈值范围。上述研究结论可为红壤坡耕地适宜耕作措施选择以及坡耕地合理耕层的构建与评价提供参考。

关键词: 坡耕地; 耕作措施; 免耕; 深松; 土壤质量指数

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Effects of Tillage Measures on Quality of Cultivated-layer in Red Soil Slope Farmland

SONG Ge¹, SHI Dongmei^{1†}, ZHU Hongye², JIN Huifang¹, ZHANG Qing², LOU Yibao¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Institute of Agricultural Environment and Resources, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China)

Abstract: [Objective] Red soil slope farmlands are an important cultivated land resource in South China. Because of long-term unreasonable tillage measures and uneven spatial and temporal distribution of precipitation, resultant serious soil erosion on slope farmlands in this area has led to a sharply declining productivity and low and unstable crop yields, thus seriously restricting

* 公益性行业 (农业) 科研专项 (201503119-01-01) 资助 Supported by the Special Fund for Agroscientific Research in the Public Interest of China (No. 201503119-01-01)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: shidm_1970@126.com

作者简介: 宋 鸽 (1995—), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与流域治理研究。E-mail: sg00000@126.com

收稿日期: 2019-02-19; 收到修改稿日期: 2019-06-19; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-07-18

development of the agriculture in South China. Reasonable tillage measures play an important role in improving soil structure, increasing water use efficiency, preventing soil erosion, improving ecological environment, building up land productivity and raising crop yields. In this paper, a tract of red soil slope farmland in Yunnan Province was taken as research object. Farmlands under different tillage measures were compared in soil quality. This study was conducted to explore mechanisms of tillage measures affecting erosion resistance and production performance of the cultivated-layers of the farmlands, in an attempt to provide certain scientific basis for quality evaluation of the cultivated-layers of red soil slope farmlands and improvement of conservative tillage technologies for red soil slope farmlands. 【 Method 】 In this study a total of 15 experimental plots were set up and cultivated for comparison between different tillage measures or treatments, i.e. CK (traditional tillage) , NT (no-tillage) , P20 (tillage 20 cm in depth) , P20C (tillage 20 cm in depth + compaction) , and P20S30 (tillage 20 cm + subsoiling 30 cm in depth) , in soil quality of the cultivated layer, and one-way ANOVA and soil quality index method were used to analyze the experimental data. 【 Result 】 Results show: (1) The impacts of tillages on erosion resistance of the cultivated-layers in red soil slope farmlands. Compared with Treatment CK, Treatment P20S30 increased by 28.13% in average mass diameter of water-stable aggregates. Treatment NT was the highest in shear strength ($12.12 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$), and in soil saturated hydraulic conductivity ($1.27 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) as well. Treatment P20 was the highest in content of $>0.25 \text{ mm}$ water-stable aggregates, in mean weight diameter of water-stable aggregates and in geometric mean diameter of the aggregates, reaching up to 69.64%, 1.74 mm and 0.77 mm, respectively; (2) The impact of tillage on productivity of the cultivated-layer in red soil sloping farmland varied with treatment. In Treatment NT, soil bulk density significantly increased, and soil organic matter and available phosphorus concentrated in the surface layer. In Treatment P20 and P20S30, the cultivated-layer was significantly thicker, and the soil organic matter and available phosphorus contents increased significantly; (3) And the effect of tillage on soil quality of the cultivated-layer and on the suitability of the diagnostic indices varied with treatment. Treatment P20S30 was the highest in soil quality index (0.58) ; and Treatments P20 and P20S30 varied within the range of suitability in thickness, bulk density and available phosphorus index of the cultivated-layer. Treatment P20 was the highest in organic matter content. 【 Conclusion 】 All the findings in this study may serve as reference for selection of suitable tillage measures, and evaluation and construction of a rational cultivated-layer in red soil slope farmlands.

Key words: Slope farmland; Tillage measures; No-tillage; Subsoiling; Soil quality index

红壤坡耕地是我国南方重要的耕地资源^[1]。长期以来由于耕作措施不合理,降水时空分布不均匀,该区坡耕地水土流失严重,导致生产力急剧下降,农作物产量低而不稳^[2-3],严重制约我国南方农业发展。采取合理的耕作措施对改善土壤结构、提高水分利用率、防治水土流失、改善生态环境、提高土地生产力、增加作物产出有重要作用^[4-5]。目前,国内外学者针对不同耕作措施对土壤理化性质、农业生产的影响开展了大量研究,由于研究区域、供试作物、耕作措施、观测时间长短等不同,研究结果存在显著差异,甚至相互矛盾^[4-9]。一些研究结果表明,以少耕、免耕为代表的耕作措施在增加土壤有机质、水稳性团聚体含量,提高土壤持水性能、通透性等方面效果显著^[7,10]。杨永辉等^[11]认为连续 2 年免耕可改善土壤结构,降低土壤容重,改良土壤孔隙状况,增加土壤肥力,促进作物生长。吴建富等^[12]研究认为免耕 1 年有利于改善土壤物理性状,

土壤养分在表土层富集。免耕、深松等耕作措施可改良土壤结构,减少地表径流,降低坡耕地水土流失^[8-9]。深松能够打破犁底层,提高土壤含水量,降低土壤容重,增大土壤孔隙度,提高土壤蓄水保墒能力^[13]。李荣和侯贤清^[3]研究指出,深松处理下大于 0.25 mm 机械稳定性团聚体数量较传统耕作显著增加。另一些研究表明,短时间免耕有利于改善土壤物理性状,随着免耕年限的延长土壤物理性质变差^[12];并且单一的免耕不会显著改善土壤养分状况^[14]。以往的研究多侧重于单一耕作措施或轮作对土壤理化性状及作物产量的影响,且研究深度多为犁底层以上的表层土壤,对于深层土壤的影响,以及不同耕作措施之间的差异性目前尚鲜见报道。为此,本文以云南红壤坡耕地为研究对象,采用野外调查及模型分析方法,以常规耕作为对照,比较免耕、翻耕 20 cm、翻耕 20 cm+压实、翻耕 20 cm+深松 30 cm 四种措施耕层土壤质量指标之间的差异性,以阐明不同耕作

措施对耕层土壤抗侵蚀性能和生产性能的作用机理, 研究结果可为红壤坡耕地耕层质量评价、完善保护性耕作技术提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验地位于云南省曲靖市马龙区旧县镇高堡村 (25°20'13.06"N, 103°22'32.10"E), 属于低纬高原季风型气候, 平均海拔 2 000 m, 坡度 6°~8°, 年平均气温 13.4 °C, 大于等于 10 °C 有效积温 2 500 °C 以上, 无霜期 241 d, 年均降水量 1 032 mm。试验地土壤为山原红壤。试验开始前 0~40 cm 土层基本理化性质如下: 土壤容重 1.12 g·cm⁻³, 贯入阻力 6.72 kg·cm⁻², 抗剪强度 4.1 kg·cm⁻², 饱和导水率 2.57 mm·min⁻¹, 大

于 0.25 mm 水稳性团聚体含量 63.33 g·kg⁻¹, 水稳性团聚体平均质量直径 1.36 mm, 水稳性团聚体几何平均直径 0.27 mm, 耕层厚度 20 cm, 有机质 13.19 g·kg⁻¹, 有效磷 21.83 mg·kg⁻¹, pH4.58。

试验始于 2015 年, 选择地形条件、基础肥力一致的红壤坡耕地作为试验地。以常规耕作 (CK) 为对照, 设置免耕 (NT)、翻耕 20 cm (P20)、翻耕 20 cm+压实 (P20C)、翻耕 20 cm+深松 30 cm (P20S30) 4 种耕作措施 (表 1)。各处理设 3 次重复, 共 15 个小区, 小区面积 60 m² (4 m×15 m)。为利用机械耕作, 采用裂区试验设计。云南省云田肥料有限公司玉米配方复合肥 (氮: 磷: 钾=13: 5: 7) 600 kg·hm⁻² 作为基肥施入, 玉米拔节期追肥, 施用尿素 255 kg·hm⁻²。供试玉米品种为云瑞 88, 其他田间管理措施与常规耕作一致。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatments	代码 Code	耕作措施 Tillage measures
常规耕作 Traditional tillage	CK	秋季收获后旋耕 15 cm Rotary tillage 15 cm after harvest in autumn
免耕 No-tillage	NT	全年不耕作, 播种时用免耕播种机一次性完成施肥和播种 No tillage throughout the year, no-tillage planter is used to complete fertilization and sowing at one time
翻耕 20 cm Tillage 20 cm	P20	秋季收获后翻耕至 20 cm Tillage to 20 cm after harvest in autumn
翻耕 20 cm+压实 Tillage 20 cm+ compaction	P20C	每年翻耕前压实 1 遍, 秋季收获后翻耕至 20 cm Compact once a year before tillage and till 20 cm after harvest in autumn
翻耕 20 cm+深松 30 cm Tillage 20 cm+subsoiling 30 cm	P20S30	每年翻耕前深松耕 30 cm, 秋季收获后翻耕至 20 cm Subsoiling 30 cm before tillage and tillage 20 cm after harvest in autumn

1.2 样品采集及测定

野外调查于 2018 年 1 月进行, 在小区上部、中部、下部按 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 分层采样, 于每层中部用环刀采集土样, 用于土壤饱和导水率和容重测定, 3 次重复, 采集原状土带回实验室自然风干, 用于土壤团聚体测定, 过筛后用于土壤理化性质测定。土壤团聚体组成测定采用干、湿筛法; pH 采用土水比 1: 1 电极法; 有效磷采用双酸浸提法测定; 有机质含量用重铬酸钾氧化-外加热法测定, 3 次重复^[15-16]。土壤抗剪强

度采用便携式三头抗剪仪 (14.10 Pocket Vane Tester 型, 荷兰) 测定; 土壤贯入阻力采用袖珍贯入仪 (PT 型, 江苏省溧阳市天目仪器厂) 测定, 6 次重复。

1.3 坡耕地耕层土壤质量指数构建

采用红壤坡耕地耕层土壤质量评价最小数据集 (Minimum data set, MDS)^[17] 中耕层厚度、土壤容重、土壤贯入阻力、土壤有机质、pH 和有效磷 6 个指标为坡耕地耕层土壤质量评价指标。根据评价指标与耕层土壤质量的相关情况, 耕层厚度、土壤有机质、有效磷与耕层质量呈正相关, 界定为 S 型函

数; 土壤贯入阻力与耕层质量表现为负相关, 界定为反 S 型函数; 土壤容重及 pH 与耕层质量存在适宜临界范围, 界定为抛物线型函数, 评价指标的最小值和最大值作为函数转折点, 抛物线型函数指标转折点参见相关文献^[18], 评价指标隶属函数、参数及评价指标权重见相关文献^[17]。

土壤质量指数 (Soil quality index, SQI) 是对土壤质量评价指标的集成, 土壤质量指数越大, 则土壤质量越高, 计算公式如下:

$$SQI = \sum_{i=1}^n w_i \times S_i \quad (1)$$

式中, w_i 为第 i 项评价指标的权重, S_i 为第 i 项评价指标隶属度, n 为评价指标个数。

根据坡耕地耕层土壤质量指数与作物产量的对应关系, 将坡耕地耕层土壤质量指数划分为 3 个等级, $0 < SQI \leq 0.33$ 属于低产耕层, $0.33 < SQI \leq 0.66$ 属于中产耕层, $0.66 < SQI \leq 1$ 属于高产耕层^[17]。

1.4 数据处理

数据经 Excel 2016 处理后, 采用 SPSS 22.0 统计软件进行统计分析, 采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 检验土壤各指标的差异显著性。

2 结 果

2.1 不同耕作措施下耕层土壤抗侵蚀性能变化特征

土壤抗剪强度与土壤侵蚀关系密切, 直接反映了土壤在外力作用下发生剪切变形的难易程度, 是表征土壤抗侵蚀性能^[19]的重要力学指标。由表 2 不同耕作措施土壤抗侵蚀性能特征可见, 不同耕作措施和不同垂直深度土壤抗剪强度存在显著差异。不同耕作措施下土壤抗剪强度由低到高依次为 P20 ($8.04 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)、P20S30 ($8.24 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)、P20C ($10.48 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)、CK ($11.11 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)、NT ($12.12 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$); 其中最大值 ($19.41 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$) 出现在免耕处理 30~40 cm 土层, 而最小值 ($4.51 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$) 出现在翻耕 20 cm 处理 0~10 cm 土层。这说明免耕处理下土体受到外力剪切破坏时, 能保持较高强度, 从而提高了坡耕地土体抗侵蚀性能^[20], 而翻耕 20 cm 处理下土体受到外力剪切破坏时容易发生侵蚀, 导致耕层土壤流失。不同耕作措施下随土层深度增加, 土壤抗剪

强度均呈增大趋势, 且常规耕作、免耕、翻耕 20 cm、翻耕 20 cm+压实处理下 0~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 土层之间差异显著 ($P < 0.05$), 0~10 cm、10~20 cm 土层之间未表现出显著差异, 而翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下, 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 土层之间差异均不显著, 其原因可能是深松处理加深了耕层。

不同耕作措施下红壤坡耕地土壤饱和导水率差异显著。由表 2 可知, 不同耕作措施下土壤饱和导水率由小到大依次为 P20C ($0.18 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$)、NT ($0.69 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$)、CK ($0.73 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$)、P20 ($1.06 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$)、P20S30 ($1.19 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$), 其中在 0~20 cm 耕层, 免耕处理饱和导水率最大 ($1.27 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$), 而在 20~40 cm 土层中翻耕 20 cm+深松 30 cm 最大 ($1.35 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$), 且与其他措施相比差异显著 ($P < 0.05$), 这表明翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下坡耕地土壤蓄水性能较其他措施更为适宜, 免耕处理有助于提高耕层 (0~20 cm) 土壤蓄水性能。常规耕作、翻耕 20 cm、翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下在 0~30 cm 土层中饱和导水率随土层深度增加呈增大趋势, 在 30~40 cm 土层显著降低, 免耕、翻耕 20 cm+压实处理下与 0~10 cm 土层相比, 10~20 cm 土层饱和导水率显著增大 ($P < 0.05$), 20~40 cm 土层显著降低。

土壤团聚体是土壤结构稳定性的重要指标之一, 对于提高作物产量, 防止土壤退化具有重要作用^[21]。由表 2 可知, 不同耕作措施下大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量由低到高依次为 P20S30 ($59.41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、CK ($65.32 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、P20C ($67.17 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、NT ($69.12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、P20 ($69.64 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 其中最小值 ($55.64 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 出现在翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理 10~20 cm 土层, 最大值 ($77.07 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 出现在翻耕 20 cm 处理 30~40 cm 土层, 这表明翻耕 20 cm 显著增加了土体大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量。随着土层深度增加, 不同耕作措施大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量整体呈逐渐增大趋势。

土壤团聚体平均质量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 是反映土壤团聚体大小分布状况和评价其稳定性的重要指标^[22], 由表 2 可知, 不同耕作措施下, 土壤水稳性团聚体 MWD 和 GMD 均表现为随土层深度增加呈不同程度上升趋势。在 0~40 cm 土层中, 免耕、翻耕 20 cm、翻耕 20 cm+压实、翻耕 20 cm+

表 2 不同耕作措施耕层土壤抗侵蚀性能特征

Table 2 Soil erosion resistance of the cultivated layer relative to treatment

耕作措施	土层深度	τ_f /	K/	R0.25/	MWD/	GMD/
Tillage measures	Soil depth/cm	($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	mm	mm
CK	0~10	6.84±0.71 $\alpha\beta\text{c}$	0.21±0.03 δd	62.64±1.27 $\beta\gamma\text{a}$	1.03±0.03 βa	0.47±0.01 βa
	10~20	8.48±2.23 ac	0.59±0.03 γc	63.79±2.93 $\alpha\beta\text{a}$	1.14±0.05 βa	0.49±0.04 βa
	20~30	11.44±3.14 ab	1.40±0.03 βa	72.81±8.05 aa	1.00±0.33 $\alpha\beta\text{a}$	0.57±0.19 αa
	30~40	17.68±1.92 $\alpha\beta\text{a}$	0.71±0.05 βb	69.42±5.52 $\alpha\beta\text{a}$	0.79±0.07 βa	0.46±0.05 αa
NT	0~10	7.32±0.58 ac	0.53±0.04 γb	62.99±1.34 βb	1.67±0.21 αa	0.64±0.06 αa
	10~20	8.98±1.44 ac	2.00±0.57 αa	69.29±2.64 aab	2.08±0.28 αa	0.88±0.16 αa
	20~30	12.76±2.82 ab	0.06±0.08 γb	69.20±1.36 aab	1.57±0.02 αa	0.67±0.05 αa
	30~40	19.41±5.21 αa	0.16±0.01 γb	77.07±8.64 aa	1.66±0.71 αa	0.89±0.41 αa
P20	0~10	4.51±1.59 γc	0.81±0.03 ab	61.22±3.28 $\beta\gamma\text{b}$	1.10±0.13 βa	0.47±0.04 βb
	10~20	5.79±0.82 βc	1.28±0.04 βa	69.34±0.03 aa	1.13±0 βa	0.56±0.01 βa
	20~30	7.75±2.12 βb	1.41±0.08 βa	72.97±3.21 aa	0.93±0.08 βab	0.55±0.02 αa
	30~40	14.13±1.66 $\beta\gamma\text{a}$	0.76±0.05 βb	72.95±0.72 $\alpha\beta\text{a}$	0.78±0.01 βb	0.49±0 aab
P20C	0~10	6.29±1.43 $\alpha\beta\text{c}$	0.13±0.03 eb	68.48±2.38 aa	1.06±0.11 βa	0.51±0.08 $\alpha\beta\text{a}$
	10~20	7.84±3.03 $\alpha\beta\text{c}$	0.48±0.04 γa	59.50±2.72 $\beta\gamma\text{b}$	0.84±0.11 βa	0.41±0.06 βa
	20~30	11.21±1.48 ab	0.06±0.08 γb	71.59±1.68 aa	1.16±0.25 $\alpha\beta\text{a}$	0.58±0.10 αa
	30~40	16.59±3.47 $\alpha\beta\gamma\text{a}$	0.05±0.07 γb	61.71±1.29 βb	0.81±0.08 $\alpha\beta\text{a}$	0.42±0.01 αa
P20S30	0~10	5.51±1.67 $\beta\gamma\text{b}$	0.71±0.02 βd	57.08±1.61 γa	1.18±0.08 βa	0.45±0.03 βa
	10~20	6.88±1.28 $\alpha\beta\text{b}$	1.34±0.01 βb	55.64±2.72 γa	1.15±0.18 βa	0.44±0.04 βa
	20~30	7.47±1.44 βb	1.81±0.06 αa	64.16±5.09 aa	1.29±0.25 $\alpha\beta\text{a}$	0.55±0.11 αa
	30~40	13.08±3.28 γa	0.89±0.03 ac	60.74±1.56 βa	1.31±0.10 $\alpha\beta\text{a}$	0.54±0.04 αa

注: τ_f 为抗剪强度; K 为饱和导水率; R0.25 为大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量; MWD 为水稳性团聚体平均质量直径; GMD 为水稳性团聚体几何平均直径。不同希腊字母表示同一垂直层次不同耕作措施差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同一耕作措施不同垂直层次差异显著 ($P<0.05$)。Note: τ_f stands for Shear strength; K for Saturated hydraulic conductivity; R0.25 for content of >0.25 mm water-stable aggregates; MWD for mean weight diameter of water-stable aggregates; and GMD for the geometric mean diameter of water-stable aggregates. Different Greek letters represent significant differences between treatment at the same vertical level ($P<0.05$), and different lowercase letters represent significant differences between different vertical levels under the same treatment ($P<0.05$).

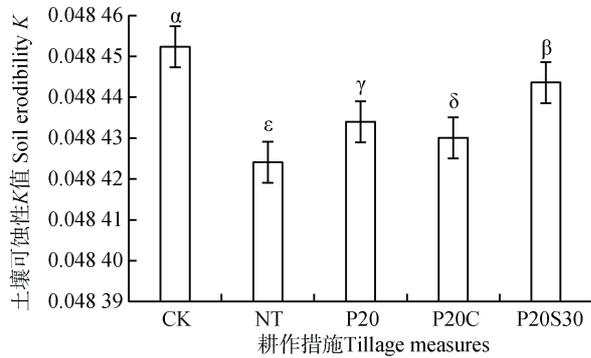
深松 30 cm 处理下 MWD 依次较常规耕作平均增加 2.40%、81.51%、2.99%和 28.13%, 其中翻耕 20 cm 差异显著 ($P<0.05$); 与常规耕作相比, 免耕、翻耕 20 cm、翻耕 20 cm+压实、翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下 GMD 随土层深度增加上升幅度依次为 18.07%~36.58%、14.66%~114.6%、9.64%~18.29%和 7.32%~28.92%, 在 0~40 cm 土层中不同耕作措施下 GMD 依次平均上升 7.55%、59.90%、2.86%和 2.60%, 翻耕 20 cm 差异显著 ($P<0.05$)。说明翻耕 20 cm 处理显著提高了 0~40 cm 土层土壤水稳性团聚体稳定性。

不同耕作措施下土壤可蚀性 K 值变化特征如图

1 所示, 与常规耕作相比, 免耕、翻耕 20 cm、翻耕 20 cm+压实、翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下土壤可蚀性 K 值分别降低 0.058%、0.038%、0.046%、0.018%。其中, 免耕处理下土壤可蚀性 K 值最小, 常规耕作下土壤可蚀性 K 值最大。

2.2 不同耕作措施下耕层土壤生产性能变化特征

耕层是指经耕种熟化的表土层, 易受生产活动及气候条件影响, 其厚度是决定水肥气热容量大小的关键因子。由图 2 可知, 不同耕作措施下耕层厚度由小到大依次为 NT (15 cm)、CK (19 cm)、P20C (20 cm)、P20 (21 cm)、P20S30 (30 cm), 与常规耕

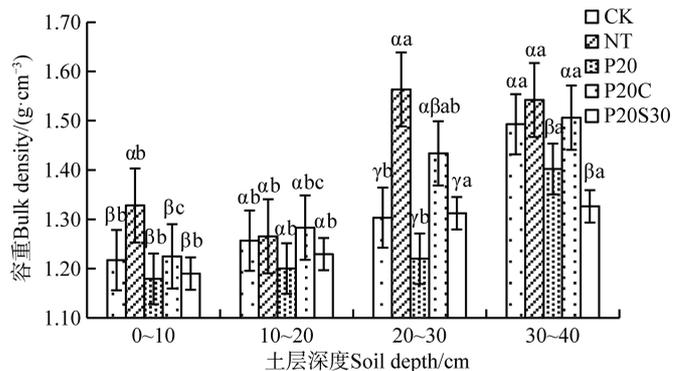
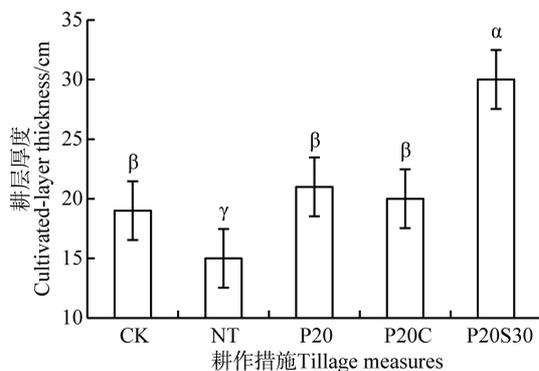


注：不同希腊字母表示同一垂直层次不同耕作措施差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different Greek letters represent significant differences between treatment at the same vertical level ($P < 0.05$). The same below.

图 1 不同耕作措施下土壤可蚀性 K 值变化特征

Fig. 1 Changes in soil erodibility K of the slope farmland relative to treatment

作相比, 翻耕 20 cm、翻耕 20 cm+压实、翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下的耕层厚度依次增加 21.05%、10.53%和 57.89%, 其中翻耕 20 cm+深松 30 cm 耕



注：不同小写字母表示同一耕作措施不同垂直层次差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different lowercase letters represent significant differences between different vertical levels under the same treatment ($P < 0.05$). The same below.

图 2 不同耕作措施下坡耕地耕层厚度和土壤容重变化特征

Fig. 2 Changes in cultivated-layer thickness and soil bulk density of the cultivated layer of the slope farmland relative to treatment

土壤贯入阻力是反映土壤耕性特征的重要物理参数之一, 能够反映土壤的松紧状况。由图 3 可知, 不同耕作措施下土壤贯入阻力由小到大依次为 P20S30 ($10.52 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)、P20 ($15.24 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)、NT ($15.55 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)、CK ($15.80 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)、P20C ($18.19 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)。与常规耕作相比, 免耕处理下 10~20 cm、20~30 cm 土层土壤贯入阻力分别降低 6.04%、17.14%, 而 0~10 cm 和 30~40 cm 土层分别增加 10.14%、12.05%; 翻耕 20 cm 和翻耕 20 cm+

层增厚效果显著。

土壤容重直接影响土壤通气性、透水性及作物根系生长, 土壤容重过小易跑风漏墒, 不利于作物生长, 反之, 通气透水性差, 容易产生地表径流^[23]。由图 2 可知, 不同耕作措施下耕层土壤容重由小到大依次为 P20 ($1.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、P20S30 ($1.26 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、CK ($1.32 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、P20C ($1.36 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、NT ($1.42 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。与常规耕作相比, 免耕、翻耕 20 cm+压实处理下 0~20 cm 耕层土壤容重分别增加 4.44%和 0.67%, 20~40 cm 心土层分别增加 10.83%和 5.00%; 翻耕 20 cm、翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下 0~20 cm 耕层土壤容重分别降低 3.76%和 2.55%, 20~40 cm 心土层分别降低 6.19%和 5.83%。这表明, 翻耕和深松处理有助于降低土壤容重, 土壤较疏松, 而免耕不进行耕作处理, 土壤容重偏大, 土壤较紧实, 易导致土壤板结。不同耕作措施下随着土层深度的增加土壤容重均呈逐渐增大趋势, 其中 0~20 cm 耕层与 20~40 cm 心土层之间差异显著 ($P < 0.05$)。

深松 30 cm 处理下 0~40 cm 土层土壤贯入阻力分别降低 3.52%和 33.40%, 其中, 翻耕 20 cm+深松 30 cm 下降趋势显著 ($P < 0.05$), 这表明翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理能够改良土壤耕性, 而翻耕 20 cm+压实处理下 0~40 cm 土层土壤贯入阻力显著高于其他措施, 不利于作物根系生长。不同耕作措施下随土层深度的增加, 土壤贯入阻力均呈增大趋势, 变化差异显著。

不同耕作措施对有机质在不同土层深度的分布

状况影响显著,随土层深度的增加,有机质呈不同幅度下降(图3)。翻耕20 cm+压实处理下,0~20 cm 耕层土壤有机质含量显著高于20~40 cm 心土层,其原因可能是耕层土壤经翻耕、压实处理后,面施肥料及植物残体进入心土层数量较少;翻耕20 cm+深松30 cm处理下,不同土层间有机质分布较均匀,

随土层深度的增加有机质含量降低幅度较小,20~40 cm 心土层有机质含量显著高于其他措施,其原因可能是深松后随耕作进入心土层的有机物含量增加。不同耕作措施下有机质由低到高总体表现为CK(8.22 g·kg⁻¹)、NT(9.14 g·kg⁻¹)、P20C(11.65 g·kg⁻¹)、P20S30(13.10 g·kg⁻¹)、P20(13.29 g·kg⁻¹)。

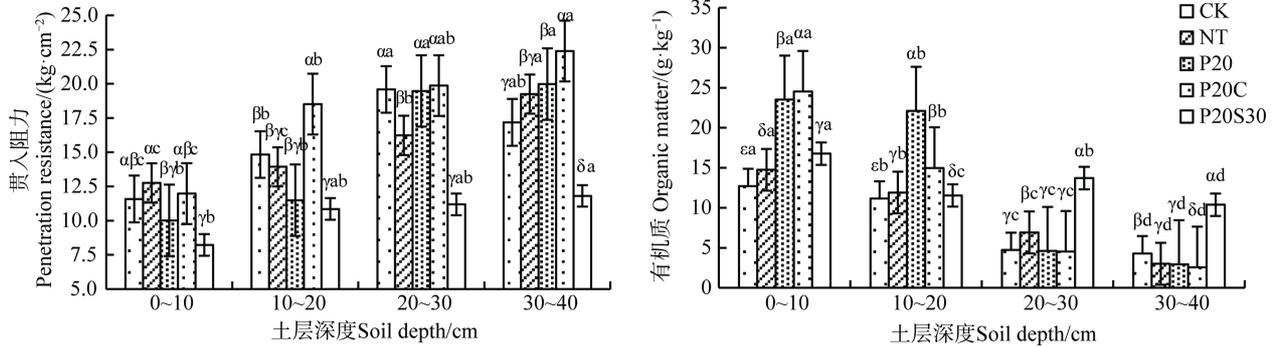


图3 不同耕作措施下坡耕地土壤贯入阻力和有机质变化特征

Fig. 3 Changes in soil penetration resistance and organic matter in the slope farmland relative to treatment

不同耕作措施下土壤有效磷含量存在显著差异(图4),由低到高总体表现为NT(14.25 mg·kg⁻¹)、CK(23.91 mg·kg⁻¹)、P20(42.13 mg·kg⁻¹)、P20C(43.18 mg·kg⁻¹)、P20S30(68.28 mg·kg⁻¹)。与常规耕作相比,免耕提高了0~10 cm 土层有效磷含量,10~40 cm 土层降幅为21.62%~84.96%,其原因可能是免耕促进了有效磷在土壤表层的聚集;翻耕20 cm 显著增加0~30 cm 土层有效磷含量,增幅为125.6%~175.7%;翻耕20 cm+压实处理下0~20 cm 耕层增加137.8%~169.3%;翻耕20 cm+深松30 cm 处理下0~40 cm 土层有效磷含量均显著增大,且分布较为均匀。可见,不同耕作措施提高土壤有效磷

含量的作用主要体现在耕层,其中翻耕20 cm 和翻耕20 cm+深松30 cm 明显优于免耕。

土壤pH是反映土壤理化性质的重要指标,对土壤供肥能力具有重要的调控作用。由图4可知,不同耕作措施下耕层土壤均呈酸性,其原因可能是由于施加氮肥、磷肥等肥料引起的土壤酸化。与常规耕作相比,免耕显著提高10~40 cm 土层pH,翻耕20 cm、翻耕20 cm+压实处理下0~10 cm 土层pH分别增加15.91%和6.82%。翻耕20 cm、翻耕20 cm+深松30 cm 处理下0~40 cm 土层pH分别增加12.78%、2.22%。不同耕作措施下土壤pH均随土层深度增加呈逐渐增大趋势。

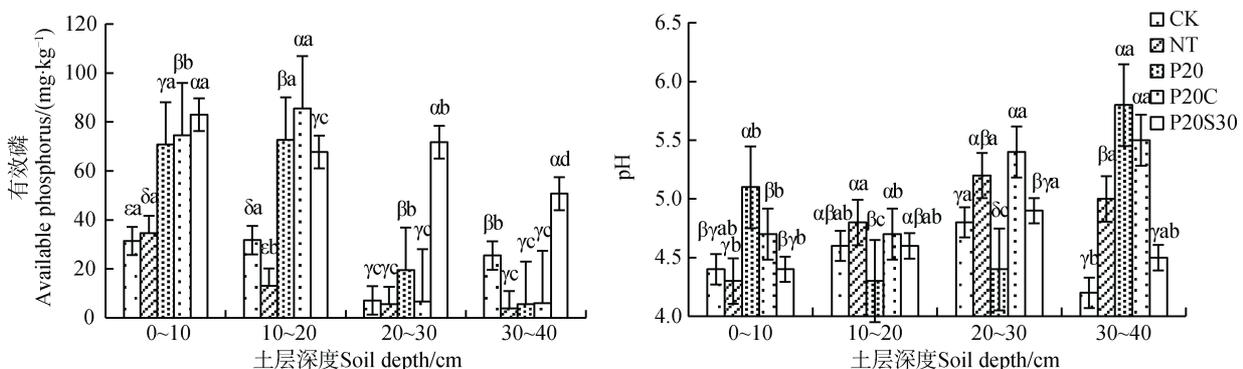


图4 不同耕作措施下坡耕地土壤有效磷和pH变化特征

Fig. 4 Changes in soil available phosphorus and pH in the slope farmland relative to treatment

不同耕作措施下玉米产量存在较大差异, 由图 5 可知, 翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下玉米产量 ($13.86 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 最高, 免耕处理下玉米产量 ($10.03 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 最低。与常规耕作相比, 翻耕 20 cm、翻耕 20 cm+压实、翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下玉米产量分别增加 19.19%、7.65%和 32.20%。

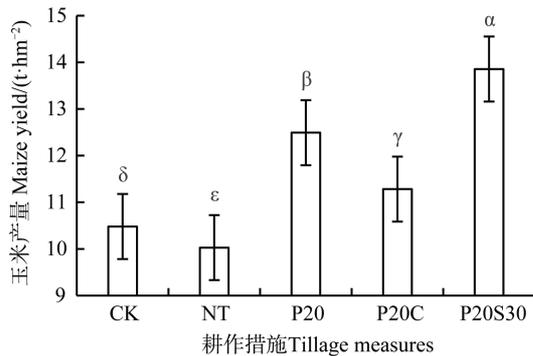


图 5 不同耕作措施下玉米产量变化特征

Fig. 5 Changes in maize yield in the slope farmland relative to treatment

2.3 不同耕作措施下耕层质量差异性特征

不同耕作措施下 0~20 cm 耕层土壤质量指数存在较大差异 (图 6)。不同耕作措施下耕层土壤质量指数在 0.35~0.58 之间, 变异系数为 21.33%。不同耕作措施耕层土壤质量指数由小到大依次为 NT (0.35)、CK (0.40)、P20C (0.51)、P20 (0.57)、P20S30 (0.58), 均属于中产耕层 ($0.33 \leq \text{SQI} \leq 0.66$)^[17]。翻耕 20 cm、翻耕 20 cm+压实、翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下耕层土壤质量指数分别较常规耕作增加 41.52%、27.82%和 45.55%。翻耕 20 cm、翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下耕层土壤质量指数均显著高于其他措施, 而免耕处理下耕层质量指数相对较低, 说明翻耕、深松处理有利于提升坡耕地耕层土壤质量水平。翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下, 耕层厚度、有机质、有效磷分别较常规耕作增加 57.89%、19.33%、138.6%, 土壤容重、贯入阻力分别较常规耕作降低 2.42%、27.92%。

基于红壤坡耕地耕层质量评价的最小数据集 (MDS) 及初步界定的红壤坡耕地合理耕层适宜性阈值^[17], 并根据实测数据分析不同耕作措施下耕层主要障碍因素。由表 3 可知, 免耕处理下各指标均不在适宜性阈值范围内, 其中耕层厚度、有机质、pH、有效磷分别较适宜性阈值低 26.43%、29.33%、8.73%和 17.45%, 容重、贯入阻力较适宜性阈值高 7.44%

和 64.21%, 说明免耕导致耕层土壤容重、贯入阻力变大, 耕层明显变浅, 其原因主要是由于免耕土壤缺乏扰动, 土壤颗粒之间排列更加紧密, 应适当进行翻耕。翻耕 20 cm、翻耕 20 cm+深松 30 cm 对各指标的调控效果较好, 耕层厚度、容重及有效磷均在适宜性阈值范围内, 有效磷分别较适宜性阈值高 149%和 162%, 其中, 翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理加深耕层效果显著, 较适宜性阈值高 47%, 翻耕 20 cm 处理下有机质含量最高, 较适宜性阈值高 24%。不同耕作措施下, 土壤贯入阻力均高于适宜性阈值, 但翻耕 20 cm 和翻耕 20 cm+深松 30 cm 较其他措施更接近适宜性阈值, 说明翻耕和深松有利于改良土壤耕性。不同耕作措施下耕层土壤 pH 均偏低, 可以合理施用生石灰等调控土壤 pH, 减少酸性肥料的施用, 避免过量施肥。

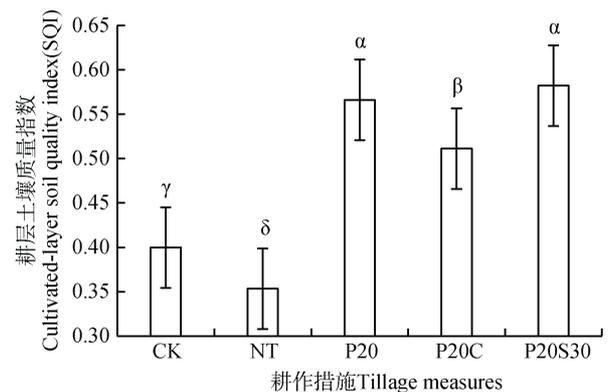


图 6 不同耕作措施下坡耕地耕层土壤质量指数变化

Fig. 6 Change in soil quality index of cultivated-layer of the slope farmland relative to treatment

3 讨论

3.1 红壤坡耕地耕层质量诊断标准

坡耕地土体可分为耕作层 (0~20 cm)、心土层 (20~40 cm)、底土层 (40~60 cm), 耕作层又可分为表土层 (0~15 cm) 和犁底层 (15~20 cm)。坡耕地合理耕层是指在一定耕作制度下, 可持续维持农作物正常生长且能实现侵蚀控制双重目标的坡耕地耕层土壤质量基准, 采用在地块尺度上可综合反映土壤生产力过程和土壤侵蚀控制的土壤属性 (或多) 指标表征, 对坡耕地合理耕层进行科学界定和客观评价是防治坡耕地耕层侵蚀退化、保证坡耕地土地生产力持续稳定的重要基础^[24]。研究表明,

表 3 不同耕作措施下坡耕地耕层适宜性特征
Table 3 Suitability characteristics of cultivated-layer of the slope farmland relative to treatment

土层深度 ^① /cm	最小数据集指标 ^①						
	耕层厚度 ^② /cm	容重 ^③ /(g·cm ⁻³)	贯入阻力 ^④ /(kg·cm ⁻²)	有机质 ^⑤ /(g·kg ⁻¹)	pH	有效磷 ^⑥ /(mg·kg ⁻¹)	
合理耕层适宜性阈值 ^②	≥20.39	0.92~1.21	≤8.13	≥18.82	5.04~5.38	≥28.83	
CK	17.00~21.00-19.00	1.20~1.30-1.22	6.04~16.46-11.59	12.00~13.40-12.70	4.30~4.50-4.40	29.03~33.71-31.37	
实测范围-平均值 ^⑧	10~20	1.21~1.31-1.26	11.75~18.47-14.83	10.80~11.50-11.15	4.50~4.70-4.60	30.08~33.42-31.75	
NT	15.00~16.00-15.00	1.26~1.44-1.33	10.75~14.78-12.76	14.2~15.3-14.7	4.20~4.40-4.30	33.48~35.75-34.62	
实测范围-平均值 ^⑧	10~20	1.17~1.40-1.27	11.42~15.45-13.94	11.0~12.8-11.9	5.70~5.90-5.80	12.79~13.22-13.01	
P20	19.00~23.00-21.00	1.10~1.25-1.19	8.40~11.75-10.02	22.80~24.30-23.51	5.00~5.20-5.10	70.58~70.96-70.77	
实测范围-平均值 ^⑧	10~20	1.16~1.27-1.20	8.06~17.80-11.50	21.60~22.60-22.10	4.20~4.40-4.30	72.38~72.99-72.68	
P20C	18.00~21.00-20.00	1.19~1.25-1.21	10.75~13.43-11.98	24.40~24.70-24.50	4.60~4.80-4.70	73.13~76.06-74.60	
实测范围-平均值 ^⑧	10~20	1.23~1.31-1.28	14.91~23.64-18.52	14.30~15.70-15.00	4.60~4.80-4.70	81.11~89.88-85.50	
P20S30	27.00~32.00-30.00	1.17~1.21-1.19	7.39~8.73-8.23	16.60~16.90-16.80	4.30~4.50-4.40	81.99~84.04-83.01	
实测范围-平均值 ^⑧	10~20	1.19~1.26-1.23	7.39~14.10-10.86	11.00~12.10-11.50	4.50~4.70-4.60	67.13~68.29-67.71	

① Minimum data set index; ② Reasonable threshold of cultivated layer; ③ Soil depth; ④ Measured range-Average value; ⑤ Cultivated-layer thickness; ⑥ Bulk density; ⑦ Penetration resistance; ⑧ Organic matter; ⑨ Available phosphorus.

土壤入渗速率和土壤抗剪强度可用来确定潜在水土流失等级，且二者与水土流失呈负相关关系，入渗速率和抗剪强度越小，水土流失越严重^[25]，说明土壤入渗速率和抗剪强度越大，耕层土壤质量越好。根据土壤侵蚀等级判定方法及红壤坡耕地耕层土壤调查相关研究成果^[17, 25]，对云南红壤坡耕地耕层厚度、土壤容重、土壤贯入阻力、饱和导水率、土壤抗剪强度、有机质等诊断指标进行等级划分(表4)。

坡耕地耕层质量诊断指标共分为5个等级，I级对应坡耕地耕层质量最高，V级对应坡耕地耕层质量

最低，I、II级耕层质量诊断指标所对应坡耕地耕层质量处于合理水平。由表5可知，不同耕作措施下翻耕20 cm、翻耕20 cm+深松30 cm处理下对耕层质量诊断指标调控效果较好，翻耕20 cm+压实处理次之，免耕处理下耕层土壤薄化、有机质缺乏现象严重，耕层抗侵蚀性能较差且养分含量偏低，以上分析与本文依据适宜性阈值分析所得结果具有较好的一致性。总体而言，适度翻耕土壤并进行深松处理有助于改良土壤理化性状，提高耕层土壤抗侵蚀性能和生产性能，有利于红壤坡耕地水土保持和土壤生产力的提高。

表4 红壤坡耕地耕层质量诊断标准等级划分

Table 4 Grading of the cultivated-layers in quality by diagnostic criteria of the red soil slope farmland

质量等级 ^①	诊断指标 Evaluation index							pH
	耕层厚度 ^② /cm	容重 ^③ / (g·cm ⁻³)	贯入阻力 ^④ / (kg·cm ⁻²)	饱和导水率 ^⑤ / (mm·min ⁻¹)	抗剪强度 ^⑥ / (kg·cm ⁻²)	有机质 ^⑦ / (g·kg ⁻¹)	有效磷 ^⑧ / (mg·kg ⁻¹)	
I	≥20	1.20~1.30	≤10	≥45	≥20	≥20	≥35	5.0~5.5
II	18~20	1.15~1.20; 1.30~1.35	10.0~13.0	35~45	15~20	16~20	20~35	4.5~5.0; 5.5~6.0
III	16~18	1.10~1.15; 1.35~1.40	13.0~16.0	25~35	10~15	12~16	10~20	4.0~4.5; 6.0~6.5
IV	14~16	1.05~1.10; 1.40~1.45	16.0~19.0	15~25	5~10	8~12	5~10	3.5~4.0; 6.5~7.0
V	<14	<1.05; >1.45	>19.0	<15	<5	<8	<5	<3.5; >7.0

①Quality grade; ②Cultivated-layer thickness; ③Bulk density; ④Penetration resistance; ⑤Saturated hydraulic conductivity; ⑥Shear strength; ⑦Organic matter; ⑧Available phosphorus

表5 不同耕作措施下耕层质量指标等级

Table 5 Grading of the cultivated-layers by quality index relative to treatment

耕作措施 Tillage measures	MDS 指标质量等级 Minimum data set index quality grade					
	耕层厚度 Cultivated-layer thickness	容重 Bulk density	贯入阻力 Penetration resistance	有机质 Organic matter	pH	有效磷 Available phosphorus
CK	II	I	III	IV	II	II
NT	IV	II	III	III	II	II
P20	I	II	II	I	II	I
P20C	II	I	III	II	II	I
P20S30	I	I	I	III	II	I

3.2 免耕和深松对红壤坡耕地耕层质量参数的调控

研究表明,免耕能够改良土壤结构和土壤通气、排水状况^[26]。随着免耕年限增加,土壤容重呈逐渐减小趋势,免耕处理 1~4 a,土壤容重呈大幅度下降趋势,降幅为 5.34%,土壤饱和导水率处于较高水平,4~8 a 土壤容重、饱和 p 导水率逐渐趋于稳定,且土壤容重较小,适宜作物生长;免耕处理第 4 年土壤饱和导水率最大(0.382 mm·h⁻¹),容重最低(1.24 g·cm⁻³)^[27]。而本试验结果表明,与常规耕作相比,免耕处理提高了土体抗剪强度、耕层(0~20 cm)饱和导水率(表 2)及土壤容重(图 2),其原因可能是,免耕处理下土体受扰动次数较少,在降雨等自然因素及机械碾压等外力作用下,耕层土壤逐渐趋于紧实、透气性降低,孔隙度减小,进而导致土壤容重变大^[28]。免耕处理下,土壤容重变化情况存在显著差异,这主要是由于土壤容重大小与成土母质、有机质含量、土壤管理措施等多种因素密切相关,可结合当地土壤质地、田间管理措施及种植作物类型等进行进一步研究。

深松是一种适于旱地作业的保护性耕作方法,深松深度通常为 30~40 cm,能够打破长期翻耕造成的犁底层而不扰乱土壤层次分布,达到调节土壤三相比、改善耕层土壤结构的目的^[29]。研究表明,深松降低了深层土壤容重,土壤疏松多孔,有利于蓄水保墒,为作物根系生长创造良好环境^[30]。随着深松年限的增加,0~20 cm 土层土壤容重整体呈下降趋势,深松 10 a 较深松 1 a 下降 6.34%,有机质含量随着深松年限的增加呈增大趋势,这主要是由于秸秆覆盖使得有机质集中于土壤表层^[31]。本实验结果表明,翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下 0~40 cm 土层有机质分布较为均匀,翻耕处理可将表层富含有机质的土壤和作物残茬翻至下层,深松可打破犁底层,增加下层土壤有机质含量,使得耕层(0~40 cm)有机质呈均匀分布的趋势(图 3)。这与谢迎新等^[32]的研究结果一致,深松处理有助于有机质向耕层土壤剖面下层分布,可明显增加下层土壤有机质含量,其原因可能是深松打破了犁底层,降低了土壤容重,同时也为耕层土壤微生物营造了良好的生长环境,从而促进了耕层(0~20 cm)有机质的积累。

4 结 论

不同耕作措施对云南红壤坡耕地耕层土壤抗侵蚀性能、生产性能影响显著。免耕处理下土壤容重显著增大,土壤养分在表层富集。翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下耕层增厚效果显著,土壤蓄水性能较其他耕作措施更为适宜,土壤可蚀性 K 值降低 0.018%;不同耕作措施下云南红壤坡耕地耕层土壤质量存在较大差异,翻耕 20 cm+深松 30 cm 处理下耕层土壤质量指数最大(0.58),与常规耕作相比,耕层厚度、有机质、有效磷分别增加 57.89%、19.33%、138.6%,土壤容重、土壤贯入阻力分别降低 2.42%、27.92%,玉米增产 32.20%。综上所述,翻耕 20 cm+深松 30 cm 对于提高坡耕地土壤抗侵蚀性能、生产性能具有重要作用,适合在红壤坡耕地推广。

参考文献 (References)

- [1] Huang S S, Zhong Y J, Ye C, et al. Effects of deep loosening and mechanical compaction on soil physical properties in red soil slope field[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48 (6): 1347—1353. [黄尚书, 钟义军, 叶川, 等. 深松与压实对红壤坡耕地土壤物理性质的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48 (6): 1347—1353.]
- [2] Holthusen D, Brandt A A, Reichert J M, et al. Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 177: 113—124.
- [3] Li R, Hou X Q. Effects of different ground surface mulch under subsoiling on potato yield and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (20): 115—123. [李荣, 侯贤清. 深松条件下不同地表覆盖对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (20): 115—123.]
- [4] Camara K M, Payne W A, Rasmussen P E. Long-term effects of tillage, nitrogen, and rainfall on winter wheat yields in the Pacific northwest[J]. Agronomy Journal, 2003, 95 (4): 828—835.
- [5] Blanco-Canqui H, Lal R. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 95 (1/2): 240—254.
- [6] Schneider F, Don A, Hennings I, et al. The effect of deep tillage on crop yield—What do we really know? [J] Soil & Tillage Research, 2017, 174: 193—204.

- [7] Mitchell J P, Shrestha A, Mathesius K, et al. Cover cropping and no-tillage improve soil health in an arid irrigated cropping system in California's San Joaquin Valley, USA[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 165: 325—335.
- [8] Martínez E, Fuentes J P, Silva P, et al. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile[J]. *Soil & Tillage Research*, 2008, 99 (2): 232—244.
- [9] Lei J Y, Wu F Q, Wang J, et al. Effects of conservation tillage on soil physical properties and corn yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24 (10): 40—45. [雷金银, 吴发启, 王健, 等. 保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24 (10): 40—45.]
- [10] Nouwakpo S K, Song J L, Gonzalez J M. Soil structural stability assessment with the fluidized bed, aggregate stability, and rainfall simulation on long-term tillage and crop rotation systems[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 178: 65—71.
- [11] Yang Y H, Wu J C, Mao Y P, et al. Using computed tomography scanning to study soil pores under different soil structure improvement measures[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (23): 99—108. [杨永辉, 武继承, 毛永萍, 等. 利用计算机断层扫描技术研究土壤改良措施下土壤孔隙[J]. *农业工程学报*, 2013, 29 (23): 99—108.]
- [12] Wu J F, Pan X H, Shi Q H, et al. Effects of continuous no-tillage and cast-transplanting on soil physical, chemical and biological properties[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (6): 1132-1139. [吴建富, 潘晓华, 石庆华, 等. 水稻连续免耕抛栽对土壤理化和生物学性状的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46 (6): 1132—1139.]
- [13] Gong L, An J W, Xing Y H, et al. Effects of continuous subsoiling and organic fertilization on corn yield and soil fertility[J]. *Soils*, 2016, 48 (6): 1092—1099. [官亮, 安景文, 邢月华, 等. 连年深松和施用有机肥对土壤肥力及玉米产量的影响[J]. *土壤*, 2016, 48 (6): 1092—1099.]
- [14] Zhang G S, Chan K Y, Li G D, et al. Effect of straw and plastic film management under contrasting tillage practices on the physical properties of an erodible loess soil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2008, 98(2): 113—119.
- [15] Soil Physics Laboratory, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. The assay method of soil physical properties[M]. Beijing: Science Press, 1978. [中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.]
- [16] Yang J H, Wang C L, Dai H L. The soil agro-chemistry analysis and environmental monitoring[J]. Beijing: China Land Press, 2008. [杨剑虹, 王成林, 代亭林. 土壤农化分析与环境监测[J]. 北京: 中国大地出版社, 2008.]
- [17] Jin H F, Shi D M, Chen Z F, et al. Evaluation indicators of cultivated layer soil quality for red soil slope farmland based on cluster and PCA analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34 (7): 155—164. [金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. *农业工程学报*, 2018, 34 (7): 155—164.]
- [18] Xu M X. Soil quality evolution mechanism in the process of ecosystem restoration and its management in the hilly Loess Plateau[J]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2003. [许明祥. 黄土丘陵区生态恢复过程中土壤质量演变及调控[J]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2003.]
- [19] Pu Y L, Xie D T, Ni J P, et al. Effects of hedgerow patterns on soil shear strength and anti-scourability on slope farmland in purple soil area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47 (5): 934—945. [蒲玉琳, 谢德体, 倪九派, 等. 紫色土区植物篱模式对坡耕地土壤抗剪强度与抗冲性的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47 (5): 934—945.]
- [20] Li J X, He B H, Chen Y, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (10): 144—152. [李建兴, 何丙辉, 湛芸, 等. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29 (10): 144—152.]
- [21] Mikha M M, Rice C W. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 (3): 809—816.
- [22] Yuan J J, Tong Y A, Lu S H, et al. Biochar and nitrogen amendments improving soil aggregate structure and jujube yields[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34 (3): 159—165. [袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量[J]. *农业工程学报*, 2018, 34 (3): 159—165.]
- [23] Fan W, Wu J G, Li J M, 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. [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.]
- [24] Shi D M, Jiang G Y, Jiang P, et al. Effects of soil erosion factors on cultivated-layer quality of slope farmland in purple hilly area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (13): 270—279. [史东梅, 蒋光毅, 蒋平, 等. 土壤侵蚀因素对紫色丘

- 陵区坡耕地耕层质量影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33 (13): 270—279.]
- [25] Pan J J. Determination of soil erosion class using soil infiltration rate and soil shear resistance[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9 (2): 93—96. [潘剑君. 利用土壤入渗速率和土壤抗剪力确定土壤侵蚀等级[J]. 水土保持学报, 1995, 9 (2): 93—96.]
- [26] Chen Q, Kravchenko Y S, Chen Y, et al. Seasonal variations of soil structures and hydraulic conductivities and their effects on soil and water conservation under no-tillage and reduced tillage[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (1): 11—21. [陈强, Yuriy S Kravchenko, 陈渊, 等. 少免耕土壤结构与导水能力的季节变化及其水保效果[J]. 土壤学报, 2014, 51 (1): 11—21.]
- [27] Yuan S. Effects of long-term conservation tillage on soil properties and crop yield in sloping fields[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016. [袁率. 长期保护性耕作对坡耕地土壤理化性质及作物产量影响的研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016.]
- [28] Chen X W, Zhang X P, Liang A Z, et al. Effects of tillage mode on black soil's penetration resistance and bulk density[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23 (2): 439—444. [陈学文, 张晓平, 梁爱珍, 等. 耕作方式对黑土硬度和容重的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23 (2): 439—444.]
- [29] Sun T. Tillage and fertilizer effects on soil physicochemical properties of black soil[D]. Haerbin: Northeast Agricultural University, 2008. [孙涛. 不同耕作方式及施肥对黑土理化性质的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008.]
- [30] Kong X M, Han C W, Zeng S M, et al. Effects of different tillage managements on soil physical properties and maize yield[J]. Journal of Maize Sciences, 2014, 22 (1): 108—113. [孔晓民, 韩成卫, 曾苏明, 等. 不同耕作方式对土壤物理性状及玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22 (1): 108—113.]
- [31] Zhang Y J. Observation and simulation for soil fertility and crop yield effects of long-term rotational conservation tillage and fertilization on winter wheat-spring maize rotation field of Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2018. [张玉娇. 黄土旱塬麦玉轮作田长期保护性轮耕与施肥的培肥增产效应试验与模拟[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2018.]
- [32] Xie Y X, Jin H Y, Meng Q Y, et al. Deep tillage improving physical and chemical properties of soil and increasing grain yield of winter wheat in lime concretion black soil farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (10): 167—173. [谢迎新, 靳海洋, 孟庆阳, 等. 深耕改善砂姜黑土理化性状提高小麦产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (10): 167—173.]

(责任编辑: 陈荣府)