

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.013; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.013.

颜科宇, 李靖, 陈正发, 等. 耕作措施对红壤坡耕地土壤 CO₂ 排放的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 140-149, 157.

Yan Keyu, Li Jing, Chen Zhengfa, et al. Effects of tillage practices on soil CO₂ emissions in red soil sloping farmland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 140-149, 157.

耕作措施对红壤坡耕地土壤 CO₂ 排放的影响

颜科宇^{1,2}, 李靖^{1,2}, 陈正发^{1,2}, 段青松^{1,2}, 王道祥^{1,2}, 胡燕梅^{1,2}

(1. 云南农业大学 水利学院, 昆明 650201;

2. 云南省高校绿色智慧农田与碳减排工程研究中心, 昆明 650201)

摘要: [目的] 探析红壤坡耕地不同耕作措施对土壤二氧化碳(CO₂)排放的影响, 为红壤坡耕地绿色低碳耕作模式构建与耕作措施优化提供理论依据。[方法] 通过设置横坡垄作(RT)、顺坡垄作(DT)、覆膜耕作(PM)和传统耕作(CT) 4 种典型耕作措施试验小区, 采用结构方程模型探究了土壤理化性状与土壤 CO₂ 排放间的响应关系, 并采用综合评价模型定量分析了不同耕作措施的降碳增产综合效益。[结果] RT 的土壤有机碳和全氮含量总体较高, 可显著增加土壤总孔隙度, 降低土壤容重($p < 0.05$), DT 则相反; PM 的土壤温度及含水率显著高于其余耕作措施, RT 和 DT 为代表的垄作措施显著高于 CT。在作物生育期内, 不同耕作措施的土壤 CO₂ 排放通量在 60.53~818.90 mg/(m²·h), 呈先升高后降低的波动趋势, 耕作措施间土壤 CO₂ 累计排放量大小关系为 PM>DT>CT>RT, RT 可显著减少 3.4%~22.4% ($p < 0.05$), 而作物生育期间为花粒期>穗期>苗期。降雨侵蚀对红壤坡耕地土壤 CO₂ 排放具有明显“Birch 效应”, 降雨侵蚀后耕作措施间土壤 CO₂ 排放通量大小关系为 DT>PM>CT>RT。红壤坡耕地主要通过调节土壤温度、土壤含水率、全氮和容重来影响土壤 CO₂ 排放通量。[结论] RT 对降低土壤 CO₂ 排放及增加作物产量具有积极作用, 可优先在南方红壤坡耕地进行推广。

关键词: 土壤 CO₂ 排放; 耕作措施; 红壤坡耕地; 作物生育期

中图分类号: S152; S153

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0140-10

Effects of tillage practices on soil CO₂ emissions in red soil sloping farmland

Yan Keyu^{1,2}, Li Jing^{1,2}, Chen Zhengfa^{1,2}, Duan Qingsong^{1,2}, Wang Daoxiang^{1,2}, Hu Yanmei^{1,2}

(1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Green Smart Agricultural Field and Carbon Emission Reduction Engineering Research Center of University in Yunnan Province, Kunming 650201, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the effects of various tillage practices on soil carbon dioxide (CO₂) emissions in red soil sloping farmland in order to establish a theoretical foundation for developing a sustainable, low-carbon farming model and optimizing agricultural practices in this type of terrain. [Methods] By setting up experimental plots for four typical tillage practices, including cross-slope ridge tillage (RT), down-slope tillage (DT), plastic mulching (PM), and conventional tillage (CT), a structural equation model was established to explore the relationship between soil physicochemical properties and soil CO₂ emissions. Additionally, a comprehensive evaluation model was utilized to quantitatively analyze the carbon reduction and yield increase benefits of different tillage practices. [Results] The soil organic carbon and total nitrogen contents of the soil in the RT treatment were generally higher, which significantly increased the total porosity of the soil and reduced soil bulk density ($p < 0.05$). Conversely, these parameters

收稿日期: 2024-05-07

修回日期: 2024-06-18

接受日期: 2024-06-27

资助项目: 云南省基础研究计划面上项目(202201AT070272); 云南省农业基础研究联合专项面上项目(202301BD070001-033); 云南省教育厅科学研究资助项目(2023Y1015); 云南省作物生产与智慧农业重点实验室开放基金课题(2022)

第一作者: 颜科宇(2000—), 男, 四川自贡人, 硕士研究生, 研究方向为水土生态工程。E-mail: y2803269927@126.com

通信作者: 陈正发(1985—), 男, 云南砚山人, 博士, 副教授, 主要从事水土生态工程、农业水土资源利用与保护研究。E-mail: chen Zhengfa2013@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

were the opposite in the DT treatment. The soil temperature and moisture content in the PM treatment were significantly higher than those in the other tillage practices, and the soil temperature and moisture content in the ridge treatments represented by RT and DT were significantly higher than those in CT. During the crop growth period, the soil CO₂ emission flux under different tillage practices ranged from 60.53 to 818.90 mg/(m² · h), showing a fluctuating trend of first increasing and then decreasing. The cumulative soil CO₂ emissions among the different tillage practices decreased in the order: PM > DT > CT > RT, with RT significantly reducing emissions by 3.4% to 22.4% ($p < 0.05$). The emission levels during the crop growth stages decreased in the order: granulation stage > ear stage > seedling stage. Rainfall erosion had a significant Birch effect on soil CO₂ emissions in red soil sloping farmland. After rainfall erosion, the soil CO₂ emission flux among different tillage practices decreased in the order: DT > PM > CT > RT in red soil sloping farmland. Soil CO₂ emission flux was mainly influenced by adjustments in soil temperature, soil moisture content, total nitrogen, and bulk density. [Conclusion] RT plays a positive role in reducing soil CO₂ emissions and increasing crop yield, is a favorable practice in southern red soil sloping farmland.

Keywords: soil CO₂ emissions; tillage practices; red soil sloping farmland; crop growth period

温室气体排放引发的气候变化和粮食安全问题已成为 21 世纪人类面临的重大挑战^[1]。二氧化碳(CO₂)作为主要的温室气体之一,在推动全球气候变化中发挥着重要的作用^[2]。其中,农业生产是温室气体的重要排放源,耕作实践过程中,不合理的耕作利用方式和土壤管理实践会显著增加土壤 CO₂ 排放速率,从而对温室效应产生不可忽视的影响^[3]。当前,应对气候变暖已成为全球的共识,绿色低碳发展已成为各个国家和地区的战略选择^[4]。因此,发展有效的农业实践,研究农业耕作过程中土壤 CO₂ 排放特征及其影响机制,对于促进农业土壤固碳减排、实现农业的可持续发展具有重要的指导意义。

土壤碳排放是陆地生态系统通过根系和微生物呼吸向大气中释放 CO₂ 的过程,其中,土壤有机碳是土壤 CO₂ 排放的主要碳源,其数量及质量是决定土壤 CO₂ 排放的关键因素^[5]。土壤温度、水分和全氮等理化性状可通过调节底物的有效性及微生物的活性相关途径,对矿质土壤中 CO₂ 排放的强度产生影响^[6-7]。研究表明,土壤温度及含水率是影响土壤 CO₂ 排放最重要的非生物因素^[8]。但 He 等^[9]的研究发现,土壤含水率的下降会降低土壤温度对 CO₂ 排放影响的敏感度,甚至可取代土壤温度成为主控因素。同时,由于土壤温度、土壤含水率以及土壤有机碳的质量和数量等多种土壤特性的混杂关系,会导致不同区域尺度下环境因素对土壤 CO₂ 排放的影响机制存在着一定的差异性^[10]。此外,据研究报道,耕作措施作为农田生态系统主要的人为干预措施,可通过改变土壤理化性状、生物属性及环境条件,进而对土壤 CO₂ 排放效应产生显著影响^[11]。免耕等保护性耕

作措施可通过改善土壤结构、减少土体破坏性扰动的方式,降低土壤 CO₂ 排放和增强固碳能力,但也会显著降低作物产量^[12]。其次,垄作措施通过改变土壤物理环境及空间微地形,调节土壤微生物活性,抑制土壤 CO₂ 排放,并有效促进表层土壤有机碳固存及作物产量提升^[13]。此外,覆膜可提高作物水分利用率、促进土壤微生物活性,对保障干旱和半干旱地区粮食安全具有重要作用^[14]。然而,覆膜较好的保温保墒能力,会加剧土壤 CO₂ 排放效应^[15]。因此,制定合理的农业耕地管理措施,对降低土壤 CO₂ 排放和提高作物产量至关重要。

红壤广泛分布于我国长江流域以南的低山丘陵地区,总面积 218 万 km²,约占全国土地面积的 22.7%^[16]。红壤区具有丰富的水热环境和优越的生物气候条件,耕地分布以坡耕地为主,是保障区域粮食安全的基础性资源。目前,红壤坡耕地常见的耕作措施包括:传统水平耕作、垄作、覆膜耕作等^[17-18]。然而,由于长期不合理的耕作造成红壤坡耕地土壤结构性能降低、土壤质量发生侵蚀性退化等问题、导致土壤养分循环和碳平衡机制发生严重改变^[17,19]。此外,关于降雨侵蚀作用下土壤 CO₂ 排放响应特征仍存在争议,以红壤坡耕地为研究对象的相关研究报道也相对少见。

目前,有关土壤理化性状变化对土壤 CO₂ 排放的影响方面已取得一些研究进展,但针对不同耕作措施条件下农田水土耦合过程对土壤 CO₂ 排放影响方面的研究还相对较少,特别是红壤坡耕地不同耕作措施条件下土壤 CO₂ 排放特征及影响机制尚不明确。为此,本研究以云南省红壤坡耕地为研究对象,设置横坡垄作、顺坡垄作、覆膜耕作和传统耕作 4 种典型耕作措施微试验小区,通过定位观测不同耕作措施下

作物全生育期土壤理化性状及 CO₂ 排放过程动态变化规律,探析耕作措施对红壤坡耕地土壤 CO₂ 排放的影响机制,并定量分析不同耕作措施下降碳增产的综合效益,由此优选出红壤坡耕地绿色低碳的耕作措施,以期红壤坡耕地绿色低碳耕作模式构建与耕作措施优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验于云南农业大学节水灌溉试验中心(25°07′56″N,102°44′51″E)进行,海拔高度 1 930 m。该区域属于低纬度高原季风气候,干冷同期,雨热同季。年平均日照约为 2 327.5 h,无霜期 308 d,年平均温度 14.9 ℃,多年平均降水量 1 000.5 mm,且主要集中在 5—10 月,年平均相对湿度 76%,是典型的雨养农业区。试验点所在区域是我国南方红壤区的重要组成部分,以红壤为主要土壤类型。供试土壤的基本性质如下:pH 值为 5.00,物理性黏粒(<0.01 mm)、物

理性砂粒(>0.01 mm)分别为 79.73%,20.27%,土壤质地按卡钦斯基制划分方法为中黏土,耕层土壤平均田间持水量为 27.43%,土壤有机碳、全氮、有效磷和速效钾含量分别为 13.01 g/kg,0.69 g/kg,3.50 mg/kg,73.21 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,在试验区布设传统耕作(CT)、覆膜耕作(PM)、横坡垄作(RT)、顺坡垄作(DT)4 种不同耕作措施处理微试验小区(具体操作见表 1),各处理重复 3 次。试验小区由不锈钢材质制造而成,尺寸为 160 cm(长)×80 cm(宽)×30 cm(深),参考我国南方红壤区坡耕地坡度分布特点,试验过程中小区坡度均设置为 10°,每个试验小区填充原状耕层土壤,厚度为 30 cm(红壤坡耕地耕层厚度一般 25~35 cm,故试验小区填土厚度设置为 30 cm)^[20]。此外,试验小区种植作物前,需进行灌水处理,使试验小区土壤自然沉降后土壤容重与自然状态下的红壤坡耕地基本保持一致。

表 1 不同耕作措施处理试验小区布置方式

Table 1 Arrangement of experimental plots for different tillage practices

处理	代码	耕作措施	垄宽/cm	垄高/cm	垄距/cm
覆膜耕作	PM	在传统耕作的基础上,分地块在坡耕地表面覆膜	不起垄		
横坡垄作	RT	作物垄的方向和地块坡向方向垂直	30	10	10
顺坡垄作	DT	作物垄的方向和地块坡向方向平行	20	10	10
传统耕作	CT	沿地块坡度方向不起垄种植作物	不起垄		

试验小区内种植的作物为玉米(*Zea mays* L.),供试品种为当地主栽玉米品种,播种采用种子穴播方式(垄面种植),种植密度约为 9 万株/hm²,横向株距 30 cm,纵向株距 40 cm。其中,静态箱底座安放处不种植作物,各试验小区共计种植 11 株玉米。玉米播种时间为 2023 年 6 月 21 日,收获期为 2023 年 10 月 30 日,同时将作物生育周期划分为苗期(6 月 21 日—8 月 5 日)、花粒期(8 月 5 日—9 月 15 日)和穗期(9 月 15 日—10 月 30 日)3 个生育阶段。试验种植过程中,各试验小区耕作管理严格参照我国南方红壤坡耕地玉米作物管理经验进行,以农家肥为基肥施入,施入量均为 400 kg/hm²,同时分别在 7 月 28 日与 9 月 6 日施加氮肥〔尿素(N 46%),施入量均为 150 kg/hm²〕。此外,研究区作物生育期与区域自然降雨侵蚀期重叠,为此分别在 3 次作物生育期先后各模拟两次降雨强度平均水平为 1.30,2.62 mm/min(代表中、高两个侵蚀强度等级)的降雨,先进行中雨强度的降雨模拟,再进行大雨强度的降雨模拟。每次降雨历时 60 min,并重点观测降雨侵蚀后土壤 CO₂ 排放特征。作物全生育期内试验区日降水量及气温变化情况如图 1 所示。

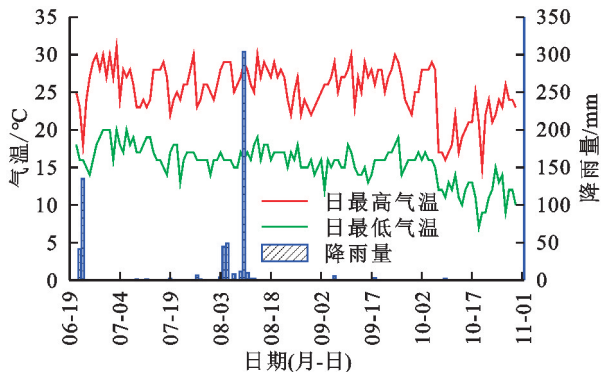


图 1 作物全生育期内试验区日降水量及气温变化

Fig. 1 Daily precipitation and temperature variation in the experimental area during the entire crop growth period

1.3 样品采集与测定方法

1.3.1 气体采集与测定 气体样品于作物播种后开始进行采样,采样周期一般间隔 1~7 d 一次,降雨侵蚀后连续 3 d 取样,主要测定坡耕地土壤 CO₂ 日排放通量,采样过程将持续到作物收获时结束。气体采集及分析采用“静态箱-气相色谱法”,静态暗箱由不透明的 PVC 板制成,长×高×宽分别为 35 cm×35 cm×50 cm。为防止阳光照射导致箱内温度剧烈变化,箱外表包裹隔热

材料;同时为保证箱体内气体均匀,箱体内顶部安置有搅拌气体的小风扇,气体采样口设置于顶部。静态箱底座在播前埋设于试验小区中(底座安放位置详见图2),入土深度约为15 cm,以减小对土壤内部环境的干扰,并定期清理底座周围杂草及凋落物。底座上端附有5 cm深的凹槽用以放置静态箱体,并在取样前注水密封以隔绝箱内外气体交换。采样时间均在当日北京时间09:00—11:00进行,分别在静态箱密封0,10,20,30 min后利用带有三通阀的60 ml医用注射器进行4次气体样品采集,每次采集50 ml气体样品注入气袋,随后带回实验室立即进行CO₂气体浓度分析。同时,每次采集气体时,测定0—6 cm土层土壤体积含水率(TDR300)和3 cm深度的土壤温度(JM624)。此外,采样时记录同时刻箱体顶部电子温度计测定的箱内温度。采集的气体样品浓度采用GS-8900A型气相色谱仪进行测定。

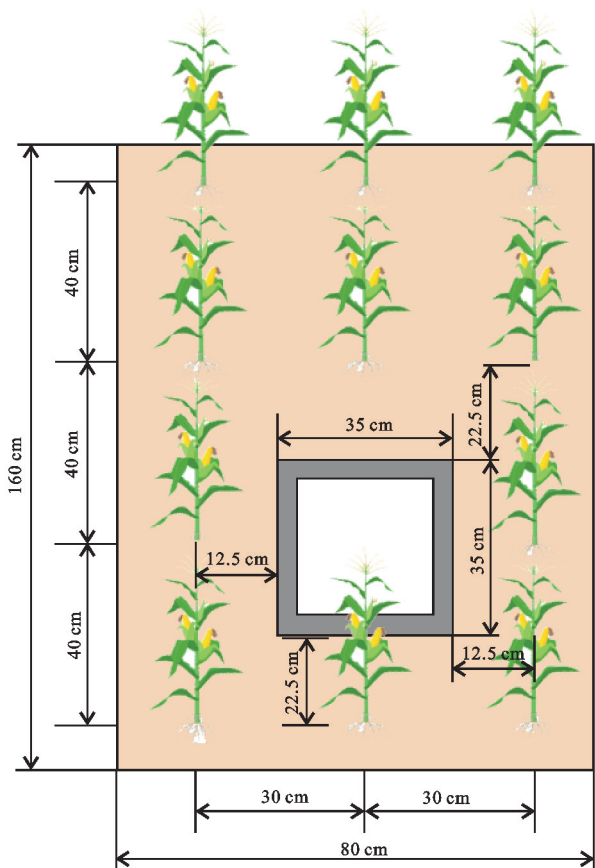


图2 静态箱底座安放位置

Fig. 2 Static chamber base placement

土壤温室气体CO₂排放通量计算式为:

$$F = \rho H \times \frac{273}{273 + T} \times \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中: F 为温室气体CO₂排放通量[mg/(m²·h)]; ρ 为标准状态下CO₂气体密度,取1.964 kg/m³; H 为静态箱的高度,取0.5 m; T 为采样过程中静态箱内的平

均温度(°C); dc/dt 为采样过程中静态箱内气体浓度随时间的变化率,根据0,10,20,30 min 4个时刻采集的气体浓度的线性回归斜率分析得到[mL/(m³·h)]。

土壤温室气体CO₂排放总量计算式为:

$$M = \sum_{i=1}^n \frac{24 \times (F_{i+1} + F_i) \times (t_{i+1} - t_i)}{2 \times 100} \quad (2)$$

式中: M 为温室气体CO₂排放总量(kg/hm²); F_{i+1}, F_i 为第*i*次温室气体CO₂排放通量[mg/(m²·h)]; n 为生育期内采样总次数; t_{i+1}, t_i 为第*i*次采样时间(d)。

1.3.2 土样采集与测定 在作物全生育期内,间隔10~15 d进行土壤采样。采样当天,须气体样品采集完成后再进行土样采集。采样过程中,沿坡面自上而下采用“S”形采样法,选取5个具有代表性的样点,对其0—30 cm土层进行采样,将采集的土样带回实验室自然风干用于土壤有机碳、全氮等化学指标测定。同时,采集土壤环刀(100 cm³)、铝盒样品,用于土壤容重、总孔隙度等土壤物理指标测定。其中,土壤有机碳采用重铬酸钾容量法-稀释加热法测定,全氮采用半微量凯氏定氮法测定,土壤容重及总孔隙度采用环刀法测定,土壤含水率采用烘干法测定。

1.3.3 植株取样及产量测定 在作物收获期,随机选取具有代表性的3~5棵植株作为成熟样品进行收获,收获后先进行自然风干处理后,再将其放置70 °C的烘箱中,烘干至恒重。根据样本质量平均值计算确定各试验小区作物籽粒产量,最终结果以每公顷作物产量(kg/hm²)计。

1.3.4 土壤CO₂排放强度及综合评价方法 土壤CO₂排放强度被用来衡量作物生产的生态效应,计算公式为:

$$CEI = \frac{M}{Yield} \quad (3)$$

式中:CEI为温室气体CO₂排放强度; M 为温室气体CO₂排放总量(kg/hm²); $Yield$ 为作物产量(kg/hm²)。

采用Z值综合评价红壤坡耕地不同耕作措施条件下土壤固碳效果、土壤CO₂排放减少效果、作物增产效果等效益指标,Z值最高者为最佳耕作措施。其计算公式为:

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \quad (4)$$

式中: Z_i 为第*i*个处理的标准化值(分数); X_i 为具体耕作措施下某一指标的测量值; \bar{X} 为所有耕作措施中某一指标的平均值; S 为所有耕作措施中某一指标的标准差。

1.4 数据分析方法

本研究基础数据处理与分析采用Microsoft Excel 2020和SPSS 20.0软件进行,利用单因素方差分析评价

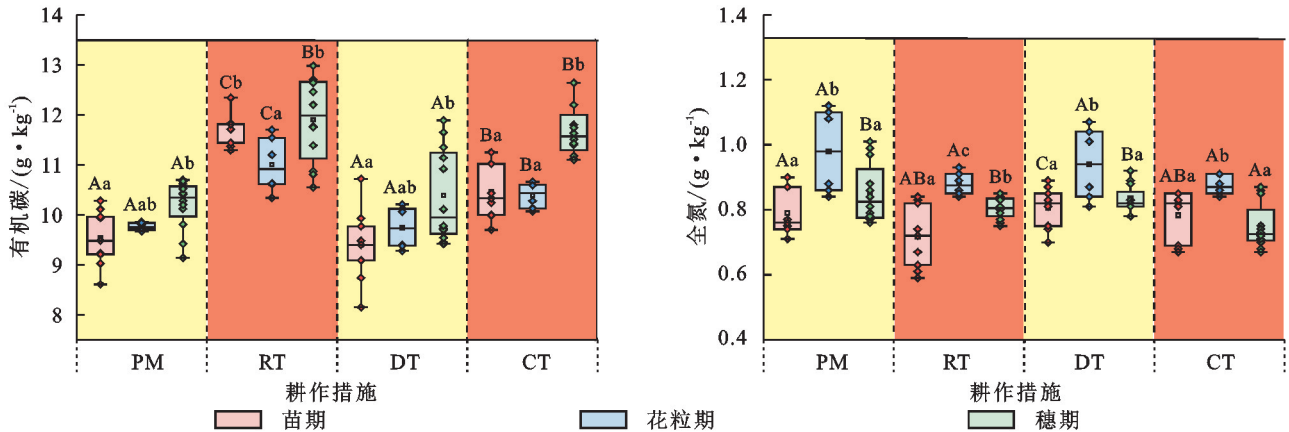
不同处理间各指标的差异显著性,采用 Origin 2021 软件进行相关图形绘制,采用 Amos Graphics 进行结构方程模型建模分析。

2 结果与分析

2.1 作物生育阶段土壤理化性状变化特征

2.1.1 土壤有机碳及全氮含量变化 图 3 为不同耕作措施条件下作物全生育期土壤养分含量动态变化特征,由图可知,在不同耕作措施及不同作物生育期间土壤养分特征存在较大差异性。对比不同耕作措施,在作物各生育期间 RT 的有机碳含量均显著大于其余 3 种耕作措施 ($p < 0.05$),大小关系总体表现为: RT > CT > DT > PM,其中有机碳含量在 DT 中的变幅最大,PM 中的变幅最小。其次,从整个生育期来看,全氮含量在耕作措施间的大小关系总体表现为:

PM > RT > DT > CT,其中,全氮含量在 PM 与 DT 两种耕作措施中,变幅相对较大,其余两种耕作措施中,变幅相对较小。对比不同作物生育期,4 种耕作措施条件下穗期的有机碳含量相比苗期均有显著提升 ($p < 0.05$),且穗期的有机碳离散程度均较高。农家肥及作物残留物的碳输入可能是作物生育期间有机碳增加的主要原因。在作物生育穗期时,RT 相比 PM,DT 与 CT 的有机碳含量分别增大 14.34%,12.70% 和 2.00% ($p > 0.05$)。同时,花粒期的全氮含量显著高于其余生育期 ($p < 0.05$),生育期间全氮含量大小总体表现为:花粒期 > 穗期 > 苗期。在作物生育花粒期时,PM 相比 RT,DT 与 CT 的全氮含量分别增大 11.36%,4.26% 和 12.00% ($p > 0.05$)。综上分析可表明,相比于其余耕作措施,RT 可有效降低土壤养分的退化,增强土壤固碳固氮能力。



注:图中不同小写字母表示同一耕作措施条件下不同生育期间差异显著 ($p < 0.05$),不同大写字母表示同一生育期不同耕作措施间差异显著 ($p < 0.05$),下同。

图 3 不同耕作措施条件下土壤养分含量动态变化

Fig. 3 Dynamics of soil nutrient content under different tillage practices

2.1.2 土壤容重及孔隙度变化 图 4 为不同耕作措施条件下作物全生育期土壤容重及总孔隙度动态变化特征。从图中可看出,相比总孔隙度,土壤容重在�不同耕作措施及作物生育期间差异性更显著。一般而言,土壤容重越大,土壤孔隙度越低。对比不同耕作措施,RT 相比其余 3 种耕作措施可显著降低土壤容重 ($p < 0.05$),增强土壤总孔隙度。从整个生育期来看,土壤容重在耕作措施间的大小关系总体表现为: PM > DT > CT > RT,总孔隙度大小关系反之,与上述土壤容重和总孔隙度的变化关系一致。其中,DT 在作物全生育期内土壤特征的离散程度最大,变幅最为明显,由此表明 DT 条件下土壤受外界影响响应程度总体较大。对比不同作物生育期,除 RT 与 CT 两种耕作措施外,其余两种耕作措施条件下穗期的土壤容重相比苗期均有显著增加的趋势,同时土壤总孔隙度也呈现相应下降的趋势。在作物生育穗

期时,DT 相比 PM,RT 与 CT 的土壤容重分别增大 0.71%,14.62% 和 9.30% ($p > 0.05$),总孔隙度分别减少 1.43%,13.73% 和 4.26% ($p > 0.05$)。综上分析可表明,RT 呈现出增大土壤总孔隙度的趋势,对降低土壤容重效果显著 ($p < 0.05$)。

2.1.3 土壤水分及温度变化 不同耕作措施条件下作物全生育期土壤水热因子的动态变化如图 5 所示。结果表明,作物全生育期内 4 种耕作措施条件下土壤含水率及土壤温度变化趋势相似,均呈现先升高后逐渐降低的波动趋势,且在 8 月中旬达到峰值,这与研究区季节及气候动态变化特征一致。降雨侵蚀之后,土壤含水率均会明显增加,土壤温度反之,且随时间的迁移均逐渐降低。对比不同耕作措施,土壤温度及土壤含水率分别分布在 11.12~23.59 °C,13.9%~38.02% 范围内,土壤温度大小关系总体表现为: PM > DT > RT > CT,土壤含水率表现为: PM > RT > DT > CT,

其中均以 PM 数值最大,CT 数值最小。对比不同作物生育期,花粒期由于研究区特殊的气候条件,表现出显著的水热条件优势,后随着作物生育阶段的推进

呈明显的下降趋势。综合分析可表明,PM 表现出较好的保水保温效应,其次为 RT 和 DT 为代表的两种垄作耕作措施,CT 的保水保温效应最差。

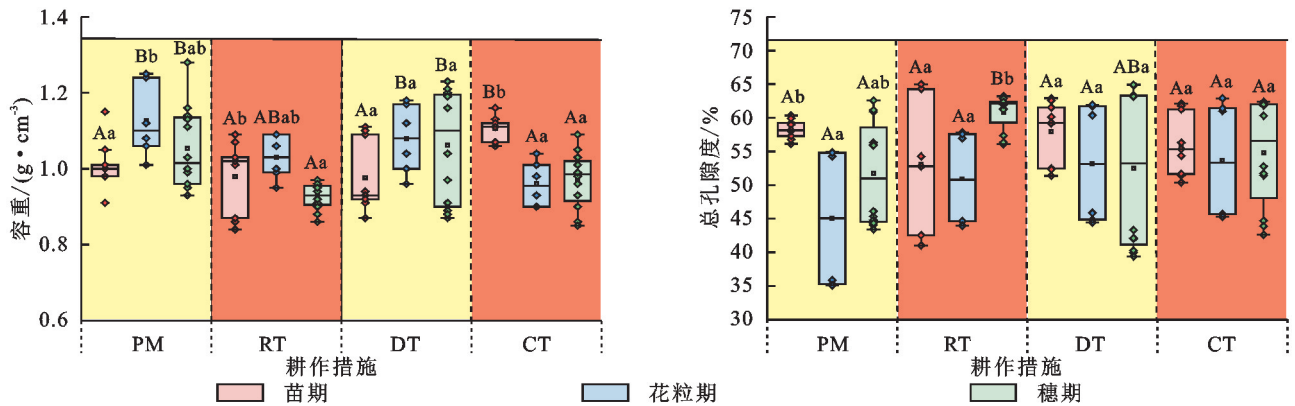


图4 不同耕作措施条件下土壤容重及总孔隙度动态变化

Fig. 4 Dynamics of soil bulk density and total soil porosity under different tillage practices

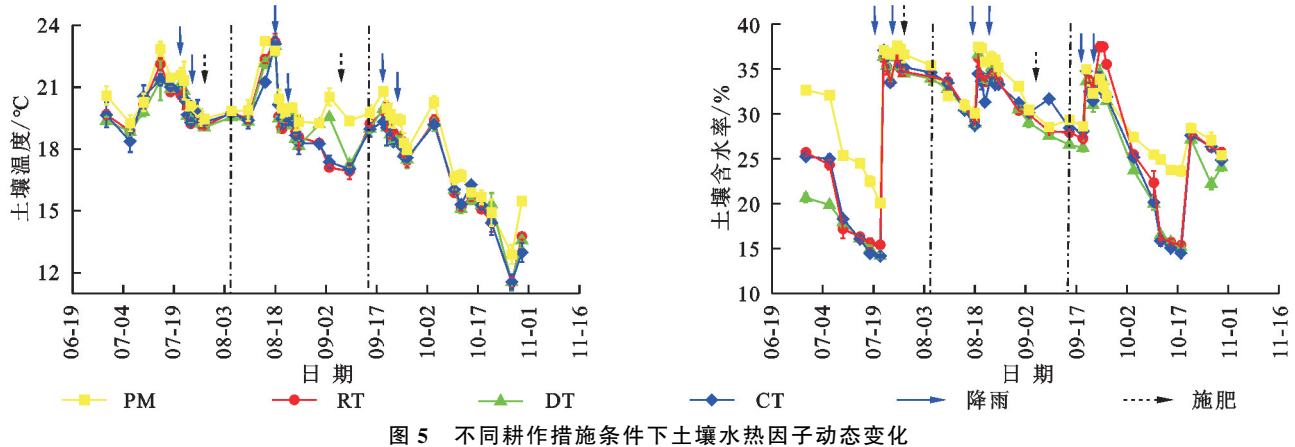


图5 不同耕作措施条件下土壤水热因子动态变化

Fig. 5 Dynamics of soil hydrothermal factors under different tillage practices

2.2 作物生育阶段土壤 CO₂ 排放特征

2.2.1 土壤 CO₂ 排放通量变化 不同耕作措施条件下作物全生育期土壤 CO₂ 排放通量如图 6 所示。由图可看出,作物全生育期内 4 种耕作措施条件下土壤 CO₂ 排放通量变化趋势基本一致。自苗期开始,土壤温度的升高与施肥、降雨等因素的综合影响导致土壤 CO₂ 排放通量持续上升,并在 8 月中下旬达到峰值,其中 DT 的土壤 CO₂ 排放通量为 818.90 mg/(m²·h),PM,RT 与 CT 相比 DT 分别减少为 2.16%,13.92%和 11.70%,8 月后随着温度的下降土壤 CO₂ 排放通量呈逐渐降低的趋势。从整个生育期来看,土壤 CO₂ 排放通量累计出现 8 次峰值,共有 6 次是由于降雨侵蚀产生的。对比降雨侵蚀前后,土壤发生侵蚀后 CO₂ 排放通量会发生明显的“骤增”现象,增幅为 19.42%~259.72%,并在发生降雨侵蚀 3 d 后恢复降雨前土壤 CO₂ 排放通量水平。其次,不同降雨强度间土壤 CO₂ 排放通量存在一定差异性,具体表现为随着降雨强度的增加,土壤 CO₂ 排放的响应程度显著增强,呈现出

土壤受大雨强度侵蚀后 CO₂ 排放通量大于受中雨强度侵蚀后 CO₂ 排放通量,其中,DT 与 PM 两种耕作措施在降雨侵蚀作用后,土壤 CO₂ 排放的激发作用较明显,而 RT 的激发作用较弱,CT 的激发作用介于二者之间。此外,土壤 CO₂ 排放通量在施用氮素后呈显著上升趋势,由此表明施肥对土壤 CO₂ 排放速率具有显著激发作用。

对比不同耕作措施,作物全生育过程的土壤 CO₂ 排放通量变化范围为 60.53~818.90 mg/(m²·h),其中 PM 的土壤 CO₂ 排放通量平均值为 423.414 mg/(m²·h),RT,DT 与 CT 相比 PM 分别减小 22.1%,1.8%,15.2%。此外,在未发生降雨侵蚀时,土壤 CO₂ 排放通量大小关系总体表现为:PM>DT>CT>RT,但由于降雨侵蚀对土壤结构环境的影响,导致土壤 CO₂ 排放通量大小关系发生改变,总体表现为:DT>PM>CT>RT。对比不同作物生育期,花粒期由于显著的水热条件优势,表现出较高的土壤 CO₂ 排放通量差异,且随着穗期土壤温度及土壤含水率的降低呈

明显的下降趋势。综合分析表明,PM 与 DT 的土壤 CO_2 排放通量较高,CT 与 RT 较低;花粒期土壤 CO_2 排放通量显著大于其余两种生育期。

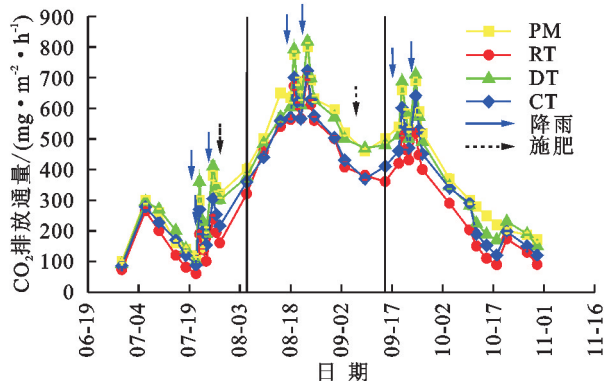


图 6 不同耕作措施条件下土壤 CO_2 排放通量动态变化

Fig. 6 Dynamics of soil CO_2 emission fluxes under different tillage practices

2.2.2 土壤 CO_2 累计排放量变化 图 7 为不同耕作措施条件下作物各生育期土壤 CO_2 累计排放量。由图可知,在不同耕作措施及不同作物生育期间土壤 CO_2 累计排放量差异均达到显著水平 ($p < 0.05$)。对比不同耕作措施,PM 的土壤 CO_2 累计排放量最大,为 12 379.55 kg/hm^2 ,其次为 DT 与 CT 两种耕作措施,分别为 11 958.88, 10 744.48 kg/hm^2 ,RT 的土壤 CO_2 累计排放量最少,为 9 602.51 kg/hm^2 ,RT,DT 与 CT 相比 PM 分别减少 22.4%, 3.4%, 13.2% ($p < 0.05$),耕作措施间作物各生育期的土壤 CO_2 累计排放量大小关系均表现为:PM > DT > CT > RT。对比不同作物生育期,花粒期由于水热条件优越及生物活动旺盛,加速了土壤中有机碳矿化分解过程,导致花粒期土壤 CO_2 累计排放量显著上升 ($p < 0.05$)。不同作物生育期间土壤 CO_2 累计排放量大小关系总体表现为:花粒期 > 穗期 > 苗期,差异显著 ($p < 0.05$)。综上分析表明,相比于其余耕作措施,RT 能显著减少土壤 CO_2 排放量 ($p < 0.05$)。

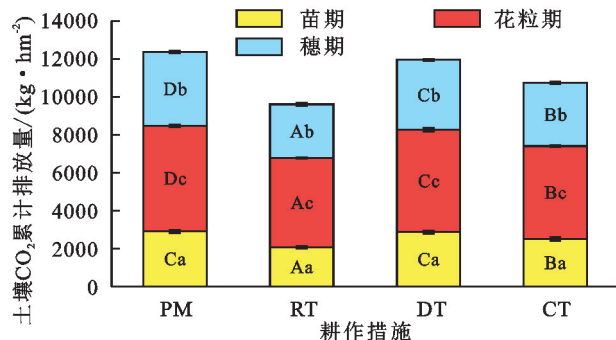


图 7 不同耕作措施条件下作物各生育期土壤 CO_2 累计排放量

Fig. 7 Cumulative soil CO_2 emissions during crop fertility under different tillage practices

2.3 不同耕作措施的土壤 CO_2 排放强度及综合评价

图 8 为不同耕作措施条件下作物产量及土壤 CO_2 排放强度指标,由图可知,在不同耕作措施间作物产量及土壤 CO_2 排放强度差异均达到显著水平 ($p < 0.05$)。对比不同耕作措施,作物产量分布范围为 12 668.56 ~ 13 459.99 kg/hm^2 ,其中 RT 的作物产量最大,相比 PM,DT 与 CT 分别增大 1.1%, 6.2%, 10.0% ($p < 0.05$),耕作措施间大小关系具体表现为:RT > PM > DT > CT。其次,可采用土壤 CO_2 排放强度 (CEI) 来反映作物生产过程中的生态效益及经济效益。由图可见,CEI 分布范围为 0.711 ~ 0.946,其中 RT 的 CEI 最小,比 CT,PM 与 DT 显著减少 18.7%, 23.3%, 24.4% ($p < 0.05$),耕作措施间大小关系表现为:DT > PM > CT > RT。此外,根据土壤有机碳、全氮等理化指标及土壤 CO_2 排放通量和作物产量计算不同耕作措施条件下 Z 值综合评分,评价综合结果见表 2。由表可知,RT 的 Z 值评分最高,其次为 PM,DT 与 CT 两种耕作措施的评分最低,且均为负值。综上分析表明,RT 可有效增大作物产量,降低 CEI,在保证作物产量的同时,显著降低了土壤 CO_2 排放对温室效应的贡献,从而有效地促进了生态效益,有利于绿色农业的可持续发展。然而,相对于其余耕作措施,DT 的 CEI 值最高,且作物产量较低,导致生态效益和经济效益显著下降。

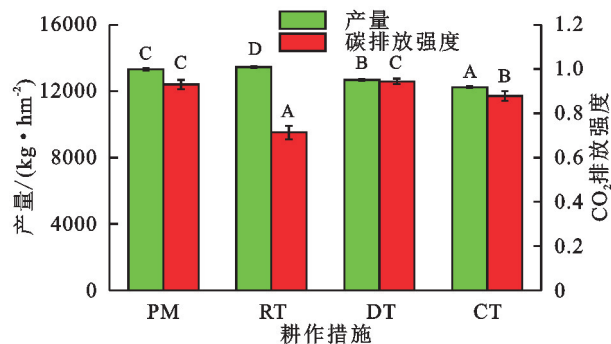


图 8 不同耕作措施条件下作物产量及 CO_2 排放强度

Fig. 8 Crop yield and CO_2 emission intensity under different tillage practices

3 讨论

3.1 耕作措施对土壤 CO_2 排放的影响

耕作实践可通过改变土壤理化性状,从而影响土壤 CO_2 排放^[6]。为探析土壤理化性状对红壤坡耕地土壤 CO_2 排放的影响机制,聚焦土壤总孔隙度、土壤温度、土壤含水率和有机碳等 6 个指标为观测变量与土壤 CO_2 排放通量建立结构方程模型,结果如图 9 所示。由图可知,土壤理化性状对土壤 CO_2 排放通量的总解释度为 84.4%,影响总效应为 2.224,表明该结构方程模型具有较强的解释能力。从结构方程模型

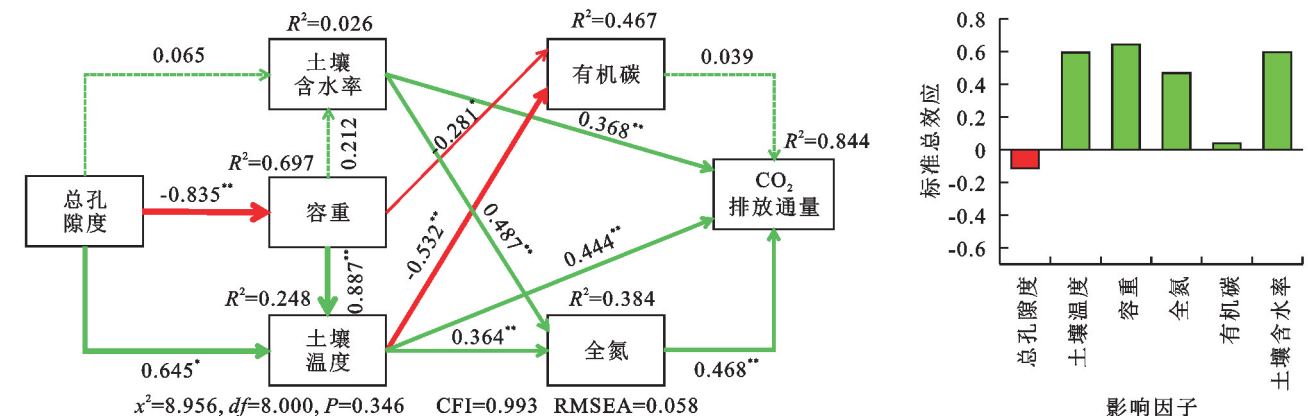
影响路径系数来看,土壤温度,土壤含水率,全氮含量对土壤 CO₂排放通量均呈极显著正向直接影响($p < 0.01$),有机碳呈正向直接影响($p > 0.05$);土壤总孔隙度与容重则通过影响土壤温度,间接影响土壤 CO₂排放通量。其次,从影响土壤 CO₂排放标准总效应可看出,土壤温度、容重、全氮和含水率对土壤 CO₂排放通量的影响总体较大,土壤孔隙度与有机碳相对较小,且除总孔隙度外,其余均为正向效应因子。总的来说,红壤坡耕地土壤孔隙度的减小,造成土壤容重的增大,土壤含水率和土壤温度的升高,同时全氮的施加,均会增加有机碳的矿化速率,造成有机碳含量的减少,该途径是导致土壤 CO₂排放通量增大的根本原因,这与 Li 等^[21]研究结果类似。但陈蕾等^[22]表明,土壤总孔隙度与土壤 CO₂排放通量呈显

著正相关,这与本研究结果相矛盾,这一结果主要是由于红壤质地为中黏土,黏粒分布较多,土壤总孔隙度组成以非毛管孔隙度为主(通气孔隙)^[23]。本研究红壤坡耕地耕作利用过程总孔隙度的增大可能主要是由于毛管孔隙度增大产生的,而其利用过程同时可能造成土壤非毛管孔隙度的减小,致使土壤透气性能降低,最终导致土壤 CO₂排放通量呈下降趋势,但该原因还需进一步研究验证。其次,相关研究表明,相比有机碳含量较低的土壤,微生物对有机碳含量较高的土壤表现出的敏感性通常更高,更易分解土壤有机物释放更多的 CO₂^[9]。但由于红壤可蚀性大、养分贫瘠、侵蚀作用严重,导致红壤坡耕地土壤有机碳含量低^[24]。这一原因可能是导致土壤有机碳非红壤坡耕地土壤 CO₂关键影响因子的主要原因之一。

表 2 不同耕作措施条件下各指标的 Z 值得分

Table 2 Z-scores for each indicator under different tillage practices

耕作措施	有机碳/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	容重/ (g · cm ⁻³)	总孔 隙度/%	土壤 温度/℃	土壤 含水率/%	CO ₂ 排放通量/ (mg · m ⁻² · h ⁻¹)	产量/ (kg · hm ⁻²)	综合 得分
PM	-0.93	0.97	-0.98	-1.20	1.33	1.39	-1.18	0.69	0.09
RT	1.18	-1.00	1.32	1.08	-0.35	-0.14	1.17	0.94	4.19
DT	-0.72	0.73	-0.48	-0.37	0.07	-0.98	-0.34	-0.44	-2.55
CT	0.48	-0.66	0.17	0.50	-1.05	-0.27	0.36	-1.20	-1.68



注: ** 代表相关程度在 $p < 0.01$ 显著性水平(双侧), * 代表相关程度在 $p < 0.05$ 显著性水平(双侧)。绿色和红色箭头分别代表正向效应和负向效应;实线和虚线分别代表显著效应和不显著效应;数字代表标准路径系数;箭头宽度与关系强弱成正比; R^2 代表通径解释度。

图 9 红壤坡耕地土壤理化性状对 CO₂排放影响的结构方程模型(SEM)及标准总效应

Fig. 9 Structural equation modeling (SEM) of the impact of soil physico-chemical properties on CO₂ emissions in red soil sloping farmland and standardized total effects.

从本文研究结果及上述结构化方程模型可知,RT 相比其余耕作措施可以增大土壤总孔隙度,降低土壤容重,有效改善土壤结构,抑制有机碳的矿化损失,因此土壤 CO₂排放通量总体较低。这与 Abrha 等^[25]研究结果相一致。然而,PM 在显著提升作物产量的同时($p < 0.05$),也显著增加了土壤 CO₂排放通量($p < 0.05$)。并且研究结果还显示,在 4 种耕作措施中 PM 的土壤 CO₂排放通量最大,此结果与 Zhao 等^[15]的研究结果一致。这主要是由于土壤温

度及土壤含水率是决定红壤坡耕地土壤 CO₂排放的关键因素,PM 通过形成表面薄膜形式的物理屏障,能够提升土壤保水和增温能力,为土壤有机碳矿化创造了适宜的水热环境。同时,Cao 等^[26]研究表明塑料薄膜作为隐形碳源,会刺激微生物活性,由此共同导致土壤 CO₂排放量显著增加($p < 0.05$)。其次,与 CT 相比,DT 也能显著提升作物产量($p < 0.05$),然而,它导致的土壤 CO₂排放强度最大。这种差异是由于研究区域异质性所导致的,当前的研究区域位于

坡耕地,作物生长期与该区域侵蚀期重叠,在作物生长过程中,降雨侵蚀对 DT 条件下土壤产生的扰动程度最大,容易引发土壤有机碳的流失和重新分布,造成土壤 CO₂排放量总体较大。因此,结合 Z 值评价结果综合分析,在耕作措施降碳增产方面,RT 的效果最佳,其次为 PM 和 CT,DT 的效果最差。

3.2 降雨侵蚀对土壤 CO₂排放的影响

土壤 CO₂排放的时空变化受降雨侵蚀的显著影响^[27]。降雨侵蚀事件会引起土壤水分状况迅速变化,从而刺激土壤有机碳矿化过程,导致土壤 CO₂排放通量出现显著提高后又迅速回落的迹象,该现象被称为“Birch 效应”^[28]。土壤“Birch 效应”已在不同生态系统被研究学者广泛证实,但土壤 CO₂排放通量对降雨改变的响应受土壤类型、降雨频率等诸多因素的调节^[29]。我国南方红壤区受降雨时空分布不均和气候变化等影响,雨季坡耕地则往往因降雨集中而发生严重的土壤侵蚀,造成土壤碳循环发生显著改变。因此,有必要对降雨侵蚀作用下不同耕作措施红壤坡耕地土壤 CO₂排放的响应特征展开研究,为深入了解降雨变化对坡耕地土壤碳平衡的影响提供数据支持。本研究发现,不同耕作措施条件下红壤坡耕地土壤在发生降雨侵蚀后,会导致土壤温度的“骤降”和土壤含水率的迅速升高,同时会造成土壤 CO₂排放通量的显著增加,且在 3 d 左右土壤 CO₂排放通量会恢复正常状态水平。该现象是由于红壤坡耕地土壤在发生降雨侵蚀时,可能会引发土壤团聚体破碎,造成团粒内释放有机碳等养分物质的“底物供给”机制^[28]。此外,土壤温度及土壤含水率的迅速改变,会刺激微生物代谢,促使其释放胞内物质,造成土壤“微生物胁迫”^[30]。由此共同导致土壤 CO₂排放出现明显的脉冲释放现象(土壤“Birch 效应”)。此外,进一步研究发现,不同的耕作措施土壤 CO₂排放通量对降雨侵蚀的响应程度存在差异。其中,DT 对降雨侵蚀的响应变幅最大,而 RT 的响应变幅最小。造成该差异的原因可能是由于 DT 形成的顺坡垄沟微地貌特征强化了土壤侵蚀的动力,从而引起对土壤有机碳的较大扰动,进而加剧了土壤有机碳的矿化损失,RT 反之。该研究还有待深入,今后应加强红壤坡耕地降雨侵蚀作用对土壤 CO₂排放影响机理方面的研究,进而从机理层面上认识降雨侵蚀条件下红壤坡耕地土壤 CO₂排放过程。

4 结论

(1) 对比不同耕作措施土壤理化性状指标,RT 的土壤有机质及全氮含量总体较高,对增大土壤总孔

隙度,减少土壤容重效果显著($p < 0.05$),DT 则相反;PM 的土壤温度及土壤含水率显著大于其余耕作措施,以 RT 和 DT 为代表的垄作措施土壤温度及土壤含水率显著大于 CT。

(2) 在作物生育期内,红壤坡耕地 4 种耕作措施条件下土壤 CO₂排放通量在 60.53~818.90 mg/(m²·h),呈先升高后降低的变化趋势;其中,PM 的土壤 CO₂累计排放量最大,为 12 379.55 kg/hm²,RT,DT 与 CT 相比 PM 分别减少 22.4%,3.4%,13.2%($p < 0.05$),耕作措施间大小关系总体表现为:PM>DT>CT>RT;此外,作物不同生育期间累计碳排放量大小差异显著($p < 0.05$),总体表现为:花粒期>穗期>苗期。

(3) 降雨侵蚀对红壤坡耕地土壤 CO₂排放具有明显“Birch 效应”,降雨侵蚀后耕作措施间土壤 CO₂排放通量总体表现为:DT>PM>CT>RT;其中,DT 对土壤“Birch 效应”的响应变幅最大,RT 的响应变幅最小。

(4) 结构方程模型分析表明,在作物全生育期土壤温度、土壤含水率、全氮和容重是影响红壤坡耕地土壤 CO₂排放的重要因素,土壤孔隙度的减小,造成容重的增大,土壤含水率和土壤温度的升高以及全氮的施加,均可增加有机碳的矿化速率,显著增大土壤 CO₂排放通量。

(5) 4 种耕作措施条件下作物产量分布在 12 668.56~13 459.99 kg/hm²,RT 的作物产量显著大于其余耕作措施($p < 0.05$),大小关系具体表现为:RT>PM>DT>CT;相反,土壤 CO₂排放强度大小关系总体表现为:DT>PM>CT>RT;对比不同耕作措施降碳增产的效益综合评分结果,RT 对降低土壤 CO₂排放及增加作物产量具有积极作用,可优先在南方红壤坡耕地进行推广。

参考文献 (References):

- [1] Zhang Q, Zhang Y H, Wang X M, et al. Change of tillage system affects the soil carbon pools characters, reduces carbon emissions and improves maize yield in the Loess Plateau[J]. European Journal of Agronomy, 2022,141: 126614.
- [2] Gayathri M, Raj A J. Seasonal assessment of biomass and carbon sequestration of herbaceous vegetation and litter layer in homegarden agroforestry system of Sam Higginbottom University of Agriculture, Technology and Sciences campus, Prayagraj, India[J]. International Journal of Plant & Soil Science, 2023,35(20):564-573.
- [3] Yang F, He F N, Li S C, et al. A new estimation of carbon emissions from land use and land cover change in China over the past 300 years[J]. Science of the Total

- Environment, 2023, 863:160963.
- [4] 邹才能,熊波,薛华庆,等.新能源在碳中和中的地位与作用[J].石油勘探与开发,2021,48(2):411-420.
Zou C N, Xiong B, Xue H Q, et al. The role of new energy in carbon neutral[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2):411-420.
- [5] Apostolakis A, Schöning I, Michalzik B, et al. Drivers of soil respiration across a management intensity gradient in temperate grasslands under drought[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2022, 124(1):101-116.
- [6] 刘源豪,杜旭龙,黄锦学,等.环境因子对矿质土壤呼吸影响的研究进展[J].应用生态学报,2023,34(10):2835-2844.
Liu Y H, Du X L, Huang J X, et al. Effect of environmental factors on mineral soil respiration: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(10):2835-2844.
- [7] 张忠学,李铁成,齐智娟,等.水氮耦合对黑土稻田土壤呼吸与碳平衡的影响[J].农业机械学报,2020,51(6):301-308.
Zhang Z X, Li T C, Qi Z J, et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil respiration and carbon balance in black soil paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6):301-308.
- [8] Feng J G, Wang J S, Song Y J, et al. Patterns of soil respiration and its temperature sensitivity in grassland ecosystems across China[J]. Biogeosciences, 2018, 15(17):5329-5341.
- [9] He P, Li L J, Dai S S, et al. Straw addition and low soil moisture decreased temperature sensitivity and activation energy of soil organic matter[J]. Geoderma, 2024, 442:116802.
- [10] Jian J S, Steele M K, Thomas R Q, et al. Constraining estimates of global soil respiration by quantifying sources of variability [J]. Global Change Biology, 2018, 24(9):4143-4159.
- [11] Zhang Q F, Li M, Shi R L, et al. Summer maize grain yield and soil carbon emission response to subsoiling before winter wheat sowing in the North China Plain [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2023, 69(8):1393-1404.
- [12] Yue K, Fornara D A, Heděnc P, et al. No tillage decreases GHG emissions with no crop yield tradeoff at the global scale[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 228:105643.
- [13] Jia S X, Zhang X P, Chen X W, et al. Long-term conservation tillage influences the soil microbial community and its contribution to soil CO₂ emissions in a Mollisol in Northeast China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(1):1-12.
- [14] 董云云,王飞,韩剑桥,等.地膜和秸秆覆盖对旱地农田土壤水分和大豆产量的影响[J].水土保持研究,2020, 27(3):364-371.
Dong Y Y, Wang F, Han J Q, et al. Effects of plastic film and straw mulching on soil moisture and soybean yield in dryland farmland [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3):364-371.
- [15] Zhao J H, Liu Z X, Lai H J, et al. The impacts of soil tillage combined with plastic film management practices on soil quality, carbon footprint, and peanut yield [J]. European Journal of Agronomy, 2023, 148:126881.
- [16] 储成,吴赵越,黄欠如,等.有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响[J].环境科学,2020, 41(5):2468-2475.
Chu C, Wu Z Y, Huang Q R, et al. Effect of organic matter promotion on nitrogen-cycling genes and functional microorganisms in acidic red soils[J]. Environmental Science, 2020, 41(5):2468-2475.
- [17] 蔡旭东,周怡雯,刘窑军,等.南方红壤区坡耕地不同耕作措施综合生态效益评价[J].水土保持研究,2020, 27(5):281-287.
Cai X D, Zhou Y W, Liu Y J, et al. Evaluation on comprehensive ecological benefit of different tillage measures on sloping land in red soil area of South China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5):281-287.
- [18] 王道祥,李建兴,王建文,等.耕作模式对红壤坡耕地典型作物不同生育期土壤入渗特性的影响[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2024,42(4):44-52.
Wang D X, Li J X, Wang J W, et al. The influence of tillage measures on soil infiltration characteristics at different growth stages of typical crops in red soil slopes farmland [J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences, 2024, 42(4):44-52.
- [19] 陈正发,李靖,段青松,等.基于 USLE 模型的云南省坡耕地土壤侵蚀和养分流失评价[J].农业工程学报, 2022, 38(16):124-134.
Chen Z F, Li J, Duan Q S, et al. Evaluation of soil erosion and nutrient loss of slope farmland in Yunnan Province using USLE model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(16):124-134.
- [20] 陈正发,史东梅,何伟,等.1980—2015 年云南坡耕地资源时空分布及演变特征分析[J].农业工程学报, 2019, 35(15):256-265.
Chen Z F, Shi D M, He W, et al. Spatio-temporal distribution and evolution characteristics of slope farmland resources in Yunnan from 1980 to 2015 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(15):256-265.

- [19] Ge J, Pitman A J, Guo W, et al. Impact of revegetation of the Loess Plateau of China on the regional growing season water balance[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020,24(2):515-533.
- [20] 赵倩倩,张京朋,赵天保,等.2000年以来中国区域植被变化及其对气候变化的响应[J].*高原气象*,2021,40(2):292-301.
Zhao Q Q, Zhang J P, Zhao T B, et al. Vegetation changes and its response to climate change in China since 2000[J]. *Plateau Meteorology*, 2021,40(2):292-301.
- [21] 张宝庆,田磊,赵西宁,等.植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究[J].*中国科学(地球科学)*,2021,51(7):1080-1091.
Zhang B Q, Tian L, Zhao X N, et al. Feedbacks between vegetation restoration and local precipitation over the loess plateau in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021,64(6):920-931.
- [22] 朱西存,赵庚星.局地不同下垫面对气象要素的影响及其气候效应[J].*中国生态农业学报*,2009,17(4):760-764.
Zhu X C, Zhao G X. Local influence of underlying surface on meteorological elements and associated climatic effect[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009,17(4):760-764.
- [23] Tang X, Cui Y, Li N, et al. Human activities enhance radiation forcing through surface albedo associated with vegetation in Beijing[J]. *Remote Sensing*, 2020,12(5):837.
- [24] Yu M, Wang G L, Pal J S. Effects of vegetation feedback on future climate change over West Africa[J]. *Climate Dynamics*, 2016,46(11):3669-3688.
- [25] 朱躲萍,叶辉,王军邦,等.青海三江源区高寒植被地表反照率变化及其辐射温度效应[J].*生态学报*,2022,42(14):5630-5641.
Zhu D P, Ye Hui, Wang G B, et al. Albedo changes of alpine vegetation and its radiative temperature effect in the three-river headwaters region of Qinghai[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(14):5630-5641.
- [26] Wang K, Zhao D S, Zhu Y, et al. Albedo-dominated biogeophysical warming effects induced by vegetation restoration on the Loess Plateau, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023,154:110690.

~~~~~  
(上接第149页)

- [21] Li Z X, Zhang Q Y, Li Z, et al. Responses of soil CO<sub>2</sub> emissions to tillage practices in a wheat maize cropping system: a 4-year field study[J]. *Field Crops Research*, 2023,294:108832.
- [22] 陈蕾,董希斌.抚育间伐强度对兴安落叶松林初冬时期土壤呼吸及理化性质的影响[J].*东北林业大学学报*, 2020,48(6):146-151.  
Chen L, Dong X B. Effect of tending thinning intensity on soil respiration and physicochemical properties of *larix gmelinii* forest during early winter[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020,48(6):146-151.
- [23] 金鑫,翟婷,汪蓬,等.黄土和红壤坡面侵蚀差异及其与土壤性质的关系[J].*水土保持学报*,2023,37(4):118-123.  
Jin X, Zhai T, Wang P, et al. Difference of slope erosion between loess and red soil and its relationship with soil properties[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(4):118-123.
- [24] Jin H F, Huang S S, Shi D M, et al. Effects of different tillage practices on soil stability and erodibility for red soil sloping farmland in Southern China[J]. *Agronomy*, 2023,13(5):1310.
- [25] Abrha H, Abraha B. Tillage and crop residue effects on soil carbon and moisture for wheat (*Triticum aestivum* L.) productivity in semiarid regions of tigray, Ethiopia[J]. *Asian Soil Research Journal*, 2023,7(4):20-32.
- [26] Cao J H, Li C J, Gao X D, et al. Agricultural soil plastic as a hidden carbon source stimulates microbial activity and increases carbon dioxide emissions[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023,198:107151.
- [27] Ray R L, Griffin R W, Fares A, et al. Soil CO<sub>2</sub> emission in response to organic amendments, temperature, and rainfall[J]. *Scientific Reports*, 2020,10:5849.
- [28] Inglia I, Alberti G, Bertolini T, et al. Precipitation pulses enhance respiration of Mediterranean ecosystems: the balance between organic and inorganic components of increased soil CO<sub>2</sub> efflux[J]. *Global Change Biology*, 2009,15(5):1289-1301.
- [29] Niu F R, Chen J, Xiong P F, et al. Responses of soil respiration to rainfall pulses in a natural grassland community on the semi-arid Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2019,178:199-208.
- [30] Huang H, Calabrese S, Rodriguez-Iturbe I. Variability of ecosystem carbon source from microbial respiration is controlled by rainfall dynamics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021,118(52):e2115283118.