

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.05.013

李晓宇, 李金, 毕润学, 等. 玉米秸秆集中深还田对旱地土壤 CO₂ 排放特征的影响. 土壤, 2024, 56(5): 1027–1033.

玉米秸秆集中深还田对旱地土壤 CO₂ 排放特征的影响^①

李晓宇, 李金, 毕润学, 金鑫鑫, 范庆锋, 邹洪涛*

(沈阳农业大学土地与环境学院/农业农村部东北耕地保育重点实验室/土肥高效利用国家工程研究中心, 沈阳 110866)

摘要: 为探究秸秆深还条件下不同还田量对土壤 CO₂ 排放的影响, 于田间微区试验设置 3 个处理, 分别为 CK(无秸秆还田)、T1(全量还田, 10 500 kg/hm²)、T2(倍量还田, 21 000 kg/hm²), 通过 LI-8100A 土壤碳通量自动测定仪测定土壤 CO₂ 排放速率并探究其影响因素。结果表明: ①秸秆还田提高了 CO₂ 排放速率, 其中倍量还田与全量还田的 CO₂ 累积排放量明显大于无秸秆还田($P<0.01$), 分别增加了 92.53% 和 61.95%; ②各处理 CO₂ 排放速率在土壤温度为 30 °C、24% 含水量时达到最大, 且土壤温度与水分的双因素拟合模型相较于单因素模型更好(R^2 为 0.488 ~ 0.583), 说明 CO₂ 排放速率受土壤温度和水分共同调控; ③还田 100 d 后秸秆干物质残留量为 25.54% ~ 28.21%, 其腐解程度与 CO₂ 累积排放量显著正相关, 且秸秆腐解后, 增加了土壤有机碳、微生物生物量碳、有效磷、速效钾含量, 促进了 CO₂ 排放。综上所述, 土壤 CO₂ 排放特征受土壤温度、含水量及其他土壤养分共同作用, 且秸秆还田量的增加, 能够提升土壤养分, 增加 CO₂ 排放, 促进土壤呼吸。

关键词: 秸秆深还田; 秸秆还田量; CO₂ 排放; 秸秆腐解

中图分类号: S156 **文献标志码:** A

Effects of Corn Straw Concentrated Deep Returning on Soil CO₂ Emission in Dry Land

LI Xiaoyu, LI Jin, BI Runxue, JIN Xinxin, FAN Qingfeng, ZOU Hongtao*

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation (Northeast China), Ministry of Agriculture and Rural Affairs/National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110866)

Abstract: In order to investigate the effects of different amounts of straw returned to the field on soil CO₂ emission under deep returning condition, an field micro-area experiment was conducted, in which 3 treatments were set, namely CK (no straw returned), T1 (full straw returned, 10 500 kg/hm²), and T2 (double straw returned, 21 000 kg/hm²), soil CO₂ emission rate was measured by LI-8100A automatic soil carbon flux analyzer, and its influencing factors were investigated. The results showed that: 1) Straw returning significantly increased CO₂ emission rate, with the cumulative CO₂ emissions from double and full straw returning significantly higher than those from no straw returning ($P<0.01$), which increased by 92.53% and 61.95%. 2) CO₂ emission rates reached the maximum at 30 °C (temperature) and 24% (moisture) under all treatments, and the two-factor fitting model of temperature and moisture was better ($R^2 = 0.488-0.583$) than the single-factor model, indicating that CO₂ emission rate was jointly regulated by temperature and moisture. 3) The residual dry matter of straw was 25.54%-28.21% after 100 d of field return, and its degree of decomposition was significantly positively correlated with the cumulative CO₂ emission. The decomposition of straw increased soil organic carbon, microbial biomass carbon, available phosphorus and potassium contents, which promoted CO₂ emission. In conclusion, the characteristics of soil CO₂ emissions are affected by soil temperature, moisture and other nutrients, and the increase of straw returned to the field can promote soil nutrients, CO₂ emission and soil respiration.

Key words: Deep straw returning; Amounts of straw returned; CO₂ emission; Straw decomposition

土壤碳库是陆地生态系统碳库的主要组成部分, 其中的 CO₂ 浓度产生显著影响^[1]。据统计, 土壤表层碳储量巨大且较为活跃, 其微小变化都有可能对大气层 1 cm 的有机碳储量可达大气圈的 1.9 倍和生物圈

①基金项目: 辽宁省应用基础研究计划项目(2022JH2/101300173、2022JH2/101300175)资助。

* 通讯作者(zht@syau.edu.cn)

作者简介: 李晓宇(1998—), 女, 山西临汾人, 博士研究生, 主要从事土壤改良研究。E-mail: l_xiaoyu599@163.com

的 2.7 倍,且以土壤呼吸方式进入大气的 CO_2 约占 6.5%^[2],是温室气体的主要来源之一^[3]。而在农田生态系统中,土壤呼吸存在较大的时空变异^[4],在作物生长季不仅会受到温度、水分及土壤理化性质的影响,秸秆还田与耕作方式等田间管理措施也很大程度上改变了 CO_2 的排放特征^[5]。

我国作为农业大国,各类作物产生的秸秆资源丰富,其中玉米秸秆产量最大且逐年增加^[6]。东北地区作为全国范围内的重点粮仓,在 2018 年该地区的玉米秸秆数量位居全国首位^[7]。有研究表明秸秆还田作为外源碳还入能够培肥土壤,提升土壤质量^[8],同时实现秸秆资源的再循环利用^[9]。但是,不同秸秆还田方式下, CO_2 的排放也各有差异。李晓莎等^[10]研究表明,在玉米灌浆收获期,秸秆还田能抑制土壤呼吸熵,减少 CO_2 的排放。然而也有学者指出,旱田土壤秸秆还田受水分调控能够影响根系下扎,有利于根系微生物繁殖与活动,且 CO_2 排放受季节的影响明显,温度为主要调控因素,适宜的温度、水分促进土壤呼吸^[11-12]。另外,王丹蕾^[13]通过研究不同秸秆还田深度下 CO_2 的排放,发现 20 ~ 40 cm 深层还田与覆盖和浅还相比, CO_2 的排放量相对较少;朱晓晴等^[14]对秸秆不同土层还田研究表明,30 ~ 40 cm 土层深度下进行还田, CO_2 的排放量较小。因此,与秸秆覆盖、秸秆浅还等传统还田相比,秸秆深还田能有效降低 CO_2 的排放。与此同时,秸秆深还能够打破土壤的亚耕层,使作物根系容易下扎,在大量秸秆还田的前提下,不影响出苗率,对作物生长是一种更加有效的秸秆还田方式^[15]。

在不同还田量下,有研究指出 CO_2 的累积排放量通常会随着秸秆添加量的增加而增加^[16],但大多集中在全量还田范围内^[17-18],且与秸秆深还结合的研究较少,缺乏较为系统的研究。因此,为了解决秸秆大量堆积问题,同时响应碳达峰碳中和提出的固碳减排目标,本试验设计了深还条件下不同秸秆还田量处理,探究玉米生长期间对 CO_2 排放的影响,以期为农田土壤呼吸研究提供理论依据与数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2021 年 5 月 11 日至 10 月 1 日在沈阳农业大学科研试验基地内(41.82°N, 123.57°E)进行。供试土壤类型为棕壤,试验土壤基本理化性质:有机质含量 8.87 g/kg,全氮含量 0.66 g/kg, pH 6.45,土壤容重 1.34 g/cm³,速效钾含量 107.37 mg/kg,有效磷

含量 14.14 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于 2021 年 5 月 11 日进行玉米播种,采用微区布置,每个小区面积为 2.08 m²(1.52 m × 1.37 m),小区玉米分两垄种植,每垄 4 株玉米等距种植。根据秸秆还田量的不同共设置 3 个试验处理,分别为 CK(无秸秆还田)、T1(全量还田, 10 500 kg/hm²)、T2(倍量还田, 21 000 kg/hm²),每个处理布置 3 个小区,位置随机分布。将玉米秸秆切成 3 ~ 5 cm,分两垄集中还入 20 ~ 40 cm 土层,垄宽 35 cm,还田区域占小区面积约 50%。秸秆中氮磷钾养分含量分别为 5.13、0.43 和 0.48 g/kg,氮磷钾肥分别为尿素(含 N 量 46%)、磷酸二铵(含 N 量 18%, P₂O₅ 含量为 46%)、硫酸钾(K₂O 含量为 51%),在播种时作为基肥一次性施入,各处理保证施入的所有外源物质(玉米秸秆+施肥)氮磷钾总量相同(N: 240 kg/hm²; P₂O₅: 75 kg/hm²; K₂O: 105 kg/hm²)。

1.3 样品采集与测定方法

1.3.1 土壤 CO_2 排放速率的测定 采用 LI-8100A 土壤碳通量自动测定仪(Li-Cor, Lincoln, NE, USA)测定土壤 CO_2 排放速率。为了尽量减少对土壤的扰动影响测量结果,在开始试验前 2 ~ 3 d,将用来放置测定仪的土壤环(PVC)置于小区中心处(测定土壤总呼吸),均匀插入土壤中,并在环内插入长度为 15 cm 的地温计,每个处理 3 个重复,每个重复测定 3 次,以变异系数衡量测定结果的可取程度。前期测定频率为两天一次,两周过后一周测量一次,如遇到降雨天气,在原本测量的基础上,于降雨后第二天进行加密测量。测量时间为上午 10:00—12:00,测定土壤气体的同时测定土壤温度和土壤含水量。土壤温度依据地温计读数,土壤含水量采用 TDR 水分测量仪进行测量。土壤 CO_2 累积排放量(CE)计算公式为:

$$CE = \sum_{i=1}^n \left[(F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 60 \times 60 \times 24 \times 10^{-6} \times 44 \right] \quad (1)$$

式中:CE 为土壤 CO_2 累积排放量, g/m²; F_i 为第 i 次测定土壤 CO_2 排放速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; $t_{i+1} - t_i$ 为连续两次测定间隔时间, d; n 为测定的总次数。

1.3.2 秸秆腐解率的测定 采用尼龙网袋法测定秸秆腐解率^[19]。按照还田量的不同,称取 10 g 和 20 g 玉米秸秆各 9 份(与上述试验中采用的秸秆一致)分别装入 30 cm × 30 cm 的 300 目尼龙网袋中,于试验开始前将其置于相对应试验处理小区 30 cm 左右的土层中。在试验开始后的第 30、60 和 100 天取样,

每个处理每次取出 3 袋, 取出清洗后在 60 ℃ 烘干, 用失重法计算秸秆腐解率 R , 进而折算还田后秸秆残留量 Q , 计算公式为:

$$R = [1 - M_f \times (1 + W_i) / M_i] \times 100\% \quad (2)$$

$$Q = (1 - R) \times S \quad (3)$$

式中: R 为秸秆腐解率, %; M_i 为初始秸秆质量, g; W_i 为初始秸秆在 60 ℃ 烘干后测得的含水量, %; M_f 为腐解后 60 ℃ 烘干测得的秸秆质量, g; Q 为还田后秸秆残留量, kg/hm²; S 为初始秸秆还田量, kg/hm²。

1.3.3 土壤养分测定 土壤样品于玉米收获期采集, 挑除根系等残杂后一部分自然风干, 一部分置于 -20 ℃ 冰箱冷冻保存。土壤总有机碳 (SOC) 和全氮 (TN) 采用元素分析仪测定^[20], 微生物生物量碳 (MBC) 采用氯仿熏蒸浸提法测定^[21], 土壤碱解氮 (AN)、有效磷 (AP) 和速效钾 (AK) 等速效含量测定参考文献^[22]。

1.4 数据处理与统计分析

试验所有数据均使用 Excel 2019 进行初步统计计算; 使用 SPSS Statistics 25 进行单因素方差分析, 通过 LSD 和 Duncan 法分析数据间的差异性; 使用 Origin 2019 软件对数据进行图表分析。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田量对 CO₂ 排放速率的影响

图 1 为玉米播种后, 不同秸秆还田量处理的土壤 CO₂ 排放速率动态变化。由图可知, 3 个处理 CO₂ 排放速率整体变化趋势基本一致, 表现为先小范围波动下降, 随后逐步上升且在第 23 天(6 月 16 日)达到峰值, 此时 CK、T1、T2 处理的 CO₂ 排放速率分别为 6.18、11.26、13.73 μmol/(m²·s); 之后 CO₂ 排放速率快速下降后又波动上升, 在第 53 天(7 月 16 日)出现第二次峰值, 此次峰值略低于第一次峰值, CK、T1、T2 处理分别为 5.85、11.23、11.69 μmol/(m²·s); 在两次峰值之后, CO₂ 排放速率波动下降, 有接近平稳的趋势。在整个测量期间, 各处理除个别点外, CO₂ 排放速率总体表现为 T2>T1>CK, 且 T1 和 T2 处理远大于 CK 处理, 表明秸秆还田能够明显提高田间土壤 CO₂ 排放速率, 且随着秸秆还田量的增加而提升。

2.2 不同秸秆还田量对 CO₂ 累积排放量的影响

由图 2 可知, 随着秸秆还田量的增加, CO₂ 累积排放量也随之增加, CK、T1 和 T2 处理的 CO₂ 累积排放量分别为 1 597.10、2 586.33 和 3 074.95 g/m²,

T1、T2 处理比 CK 分别增加了 61.95% 和 92.53%。3 个处理之间差异均显著($P<0.05$), 其中 T1、T2 处理与 CK 呈现出极显著差异($P<0.01$)。

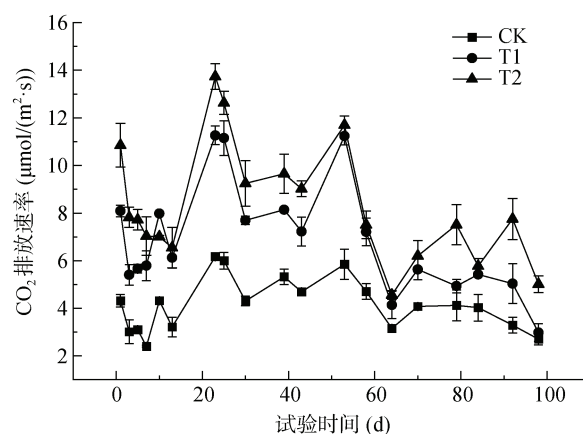
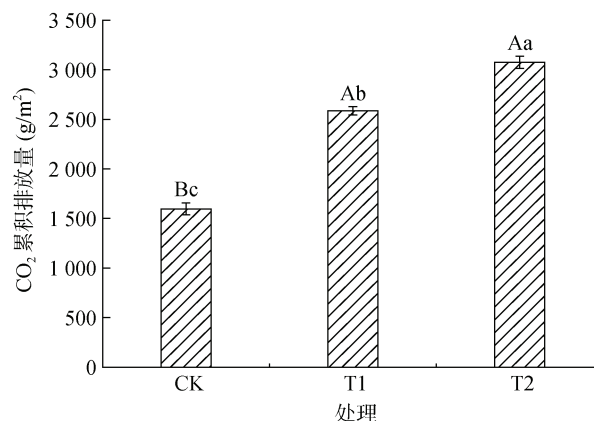


图 1 不同处理 CO₂ 排放速率的动态变化

Fig. 1 Dynamics of CO₂ emission rates under different treatments



(图中小写字母不同表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平, 大写字母不同表示处理间差异达 $P<0.01$ 显著水平)

图 2 不同处理 CO₂ 累积排放量

Fig. 2 Cumulative CO₂ emissions under different treatments

2.3 不同秸秆还田量下土壤 CO₂ 排放影响因素

2.3.1 土壤温度对 CO₂ 排放速率的影响 图 3 为测量 CO₂ 排放时测得的土壤温度的动态变化。CK、T1 和 T2 处理的土壤温度变化范围和趋势基本一致, 呈现为先下降, 后逐步波动上升, 在第 64 天达到最高, 此时 CK、T1 和 T2 处理土壤温度分别为 33.5、33.3 和 35.3 ℃, 之后逐渐下降。为了更好地探究土壤温度对田间 CO₂ 排放速率的影响, 本试验采用多项式方程进行曲线拟合, 在多次模拟中发现三次方程拟合效果最好, 可以更好地反映土壤温度与 CO₂ 排放速率之间的关系。如图 4 所示, 在试验期间土壤温度范围内, CO₂ 排放速率在低温时随温度升高出现小范围的降低, 之后随着土壤温度升高呈现出先升高后

降低的趋势,且各处理变化相同。另外,根据拟合曲线可以看出,当土壤温度发生变化时,CK 处理的 CO_2 排放速率一直维持在较低水平,而还田量越高的处理,其 CO_2 排放速率变化越大。

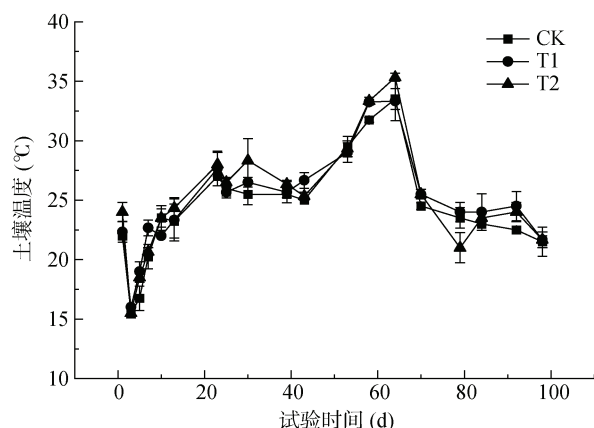


图 3 不同处理土壤温度的动态变化

Fig. 3 Dynamics of soil temperatures under different treatments

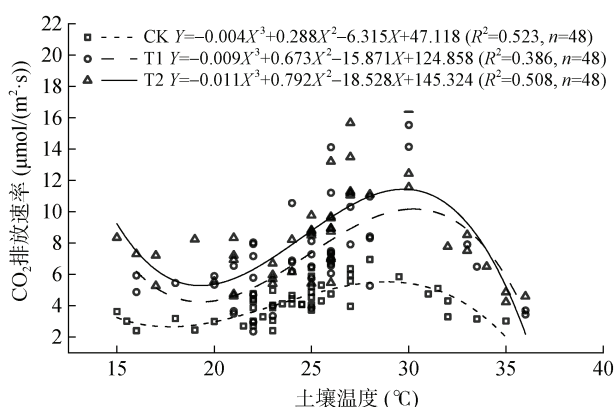


图 4 不同处理土壤温度与 CO_2 排放速率拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of temperatures and CO_2 emission rates under different treatments

2.3.2 土壤含水量对 CO_2 排放速率的影响 图 5 为测量 CO_2 排放时测得的土壤含水量的动态变化。土壤含水量的变化,主要受降雨影响,所有处理含水量变化趋势基本一致,在降雨后会有大幅度升高。在整个观测期,CK、T1 和 T2 处理土壤含水量的变化范围分别为 11.79% ~ 34.86%、12.46% ~ 34.03% 和 11.31% ~ 34.48%,各处理之间差异较小。本文选用二次方程能较好拟合土壤含水量与 CO_2 排放速率之间的关系,能更好地分析不同含水量条件下,土壤 CO_2 排放速率的变化情况。如图 6 拟合曲线所示,CK、T1 和 T2 处理的 CO_2 排放速率与土壤含水量之间先后呈现正相关与负相关关系,结合拟合方程观察,其土壤水分临界点分别为 24.14%、23.67% 和 23.43%,且在临界点处 T2 处理 CO_2 排放速率最高,而在含水

量较低和较高时,各处理 CO_2 排放速率差异不大,表明在不同含水量条件下,倍量还田处理的 CO_2 排放速率变化更为明显。

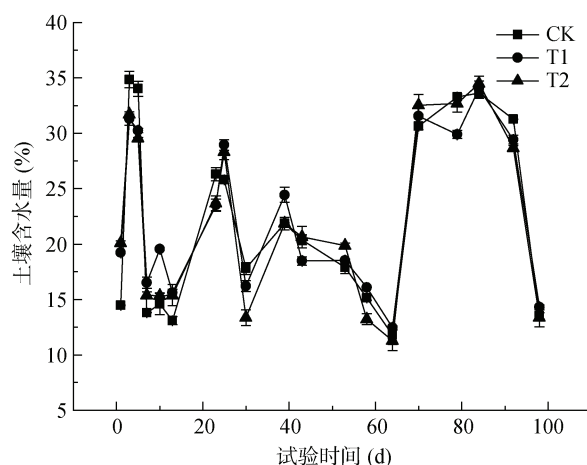


图 5 不同处理土壤含水量的动态变化

Fig. 5 Dynamics of soil moistures under different treatments

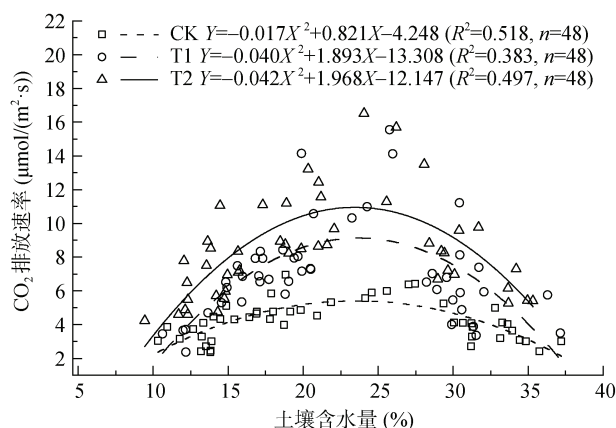


图 6 不同处理土壤含水量与 CO_2 排放速率拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of soil moistures and CO_2 emission rates under different treatments

2.3.3 水热综合因素对 CO_2 排放速率的影响 土壤温度与含水量作为单独因子存在时对 CO_2 排放速率产生较大影响,而两因子间也联系紧密,相互作用。本文将温度(T)与含水量(W)作为自变量, CO_2 排放速率作为因变量(Y),建立双因素复合模型进行曲面拟合,如图 7 所示,其拟合参数见表 1。曲面拟合结果发现,双因素拟合系数较大于单因素拟合,表明土壤温度和含水量共同作用于 CO_2 排放速率的变化,土壤温度及含水量适中时 CO_2 排放速率更大。

2.3.4 秸秆腐解率对 CO_2 累积排放量的影响 由图 8A 可知,秸秆腐解前期快后期慢,在第 30 天腐解率约为 50%,根据腐解率大小及折线斜率,可以发现倍量还田的秸秆腐解程度与速率均大于全量还田。与此同时,根据尼龙网袋试验中得出的腐解率,粗略

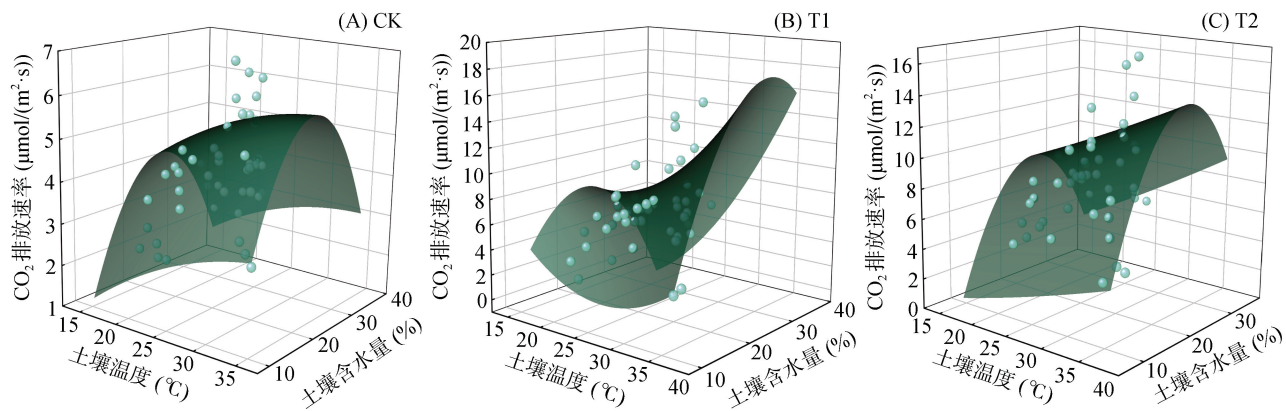


图 7 土壤温度和含水量与 CO₂ 排放速率拟合曲面
Fig. 7 Fitting surface of soil temperature and moisture with CO₂ emission rate

表 1 不同处理水热双因素复合模型的拟合参数
Table 1 Fitting parameters of soil temperature-moisture composite models under different treatments

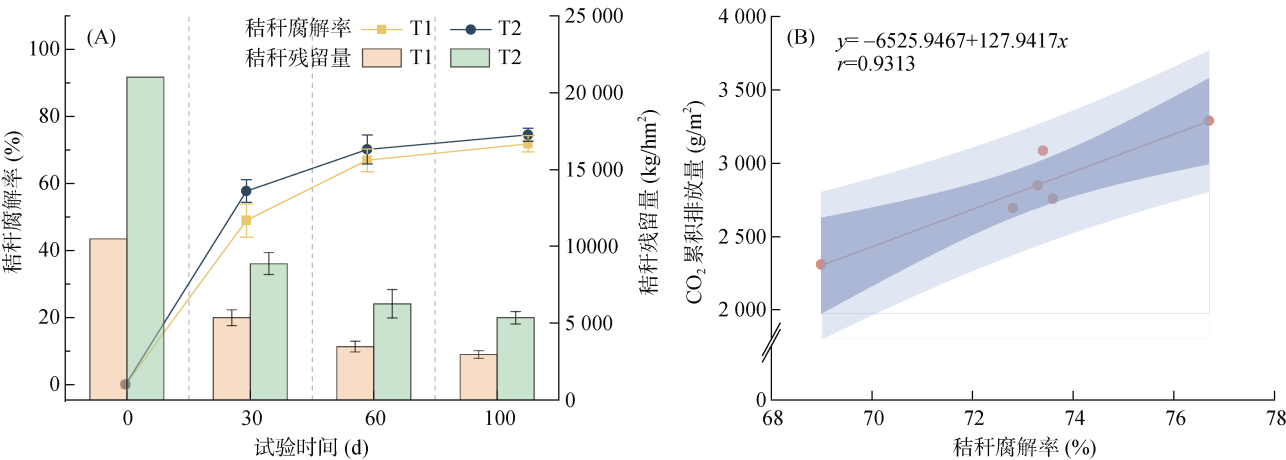
处理	z	a	b	c	d	R ²
CK	-8.232	-0.001	0.273	-0.015	-0.003	0.566
T1	12.913	0.961	-1.700	-0.034	0.025	0.488
T2	-15.436	0.005	0.052	-0.041	0.001	0.583

注：拟合方程为 $Y=z+aW+bT+cW^2+dT^2$ ，Y 为土壤 CO₂ 排放速率，W 为土壤含水量，T 为土壤温度。

估算秸秆还田处理中秸秆残留量，可以看出倍量还田秸秆残留量有明显降低，100 d 后秸秆干物质残留量

约为初始还田量的 25.54%。图 8B 为 100 d 后的秸秆腐解率与 CO₂ 累积排放量的线性回归图($r=0.9313$)，由图可知两者之间呈现出较为显著的线性关系，表明 CO₂ 累积排放量与秸秆腐解程度息息相关。

2.3.5 土壤养分对 CO₂ 累积排放量的影响 对各处理 0~40 cm 土层土壤 SOC、TN、MBC、AN、AP 和 AK 与 CO₂ 累积排放量作相关性分析，可知 CO₂ 累积排放量与 SOC、MBC、AP、AK 之间存在显著的正相关关系($P<0.05$)，与 AN 之间呈现并不显著的负相关关系($P>0.05$)。

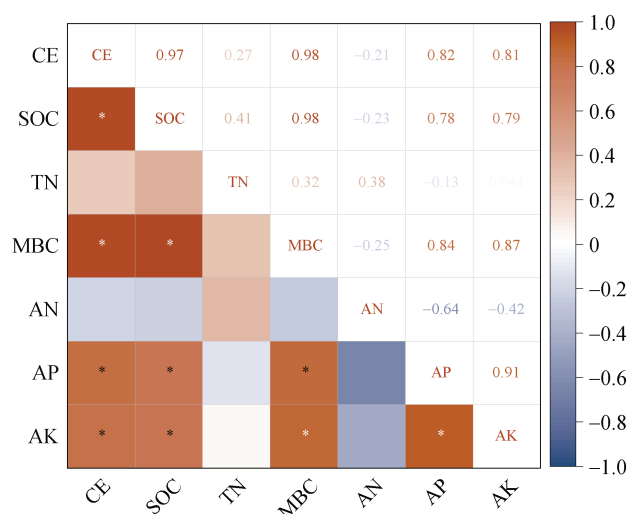


(图 A 为 100d 内的秸秆腐解率及其残留量；图 B 为 100d 后的秸秆腐解率与 CO₂ 累积排放量的回归分析)
图 8 秸秆腐解变化与 CO₂ 累积排放量的关系
Fig. 8 Relationship between straw decomposition change and soil cumulative CO₂ emission

3 讨论

土壤呼吸是田间 CO₂ 排放的主要方式，土壤中排放的 CO₂ 很大程度上是所有生物参与分解有机物质从而进行物质与能量交换的综合产物^[23]。本文中两个秸秆还田处理的 CO₂ 排放速率均大于对照处理，这与人研究结果^[24]一致，究其原因一方面可能是

秸秆作为碳源物质，其分解后矿化以 CO₂ 形式排出^[25]，本文中秸秆还田量较大的处理其腐解速率较快，进而在整个生长期 CO₂ 累积排放量也较高；另一方面土壤呼吸受有机碳库驱动，秸秆的施入很大程度上提高了土壤活性碳组分，对 CO₂ 的排放起到了正向作用^[26]。另外，关于 CO₂ 排放速率的季节波动，宋秋来等^[27]的研究发现，玉米生长期 CO₂ 排放速



(CE: CO₂ 累积排放量; SOC: 土壤有机碳; TN: 全氮; MBC: 微生物生物量碳; AN: 碱解氮; AP: 有效磷; AK: 速效钾; * 表示相关性显著($P < 0.05$))

图 9 CO₂ 排放速率与 0~40 cm 土层土壤养分之间的相关性

Fig. 9 Correlation between soil cumulative CO₂ emission and nutrients in 0–40 cm soil layer

率呈现先升高后下降的趋势,其峰值出现在拔节至抽雄期。而本文中各处理的 CO₂ 排放速率在前期有小范围的下降,随后才出现与上述研究一致的结果,这可能是由于试验期间土壤温度与水分条件不同以致 CO₂ 排放速率在部分趋势上出现差异。

土壤温度对于调控土壤中微生物活性以及植物根系的生长发育具有重要作用,被认为是影响土壤 CO₂ 排放的主要因素。有研究表明,土壤温度与 CO₂ 排放速率之间可采用多种拟合关系解释其相关性,其中指数模型与二次方程模型效果较好^[28]。本文的研究结果与此有所不同,本文采用了三次方程拟合模型,其不同点主要是在温度较低时出现了一段 CO₂ 排放速率较高的情况,可能是因为试验前期在温度较低时土壤呼吸对降雨天气含水量变化的响应,玉米苗期适宜的含水量促使作物生长,间接影响土壤中微生物活性,从而增加了土壤 CO₂ 的排放速率^[29]。土壤含水量作为影响 CO₂ 排放速率的另一重要因子,能够影响土壤孔隙调节土壤的通气透水能力,进而影响土壤微生物群落的数量及结构^[30]。有研究提出,当单方面考虑含水量与 CO₂ 排放速率之间的关系时,线性、指数和二次方程可以用来解释两者之间部分关联^[31]。本文通过二次方程拟合两者之间关系,其 R^2 范围为 0.383~0.518。刘平奇等^[32]对东北黑土土壤呼吸的研究中,同样采用了二次方程模型分析了土壤水分与 CO₂ 排放之间的关系,结果显著两者大致呈现

负相关。而本文中两者之间二次函数关系明显,CO₂ 排放速率随含水量先升高后降低,该结果与前者不一致。这可能是因为土壤含水量范围不同,本试验采用的棕壤与黑土相比,只有当含水量较大的时候,才呈现出负相关关系,其原因可能是土壤水分太多,孔隙度减小,抑制了微生物的呼吸作用。土壤温度和含水量与 CO₂ 排放之间的单因素作用用来解释与 CO₂ 的相关关系,其 R^2 范围为 0.383~0.523,而通过双因素共同作用,其拟合系数可达到 0.488~0.583。综合考虑土壤温度与水分对 CO₂ 排放的影响,可以看出双因素复合模型的拟合效果好于单因素的拟合效果。当温度在 25~30 °C 范围内、含水量为 23% 左右时,正值玉米生长的拔节抽穗期,CO₂ 排放速率 T2>T1>CK 较为明显,此时玉米根系生长较快,秸秆还田量的不同可能增加了根系生物量^[33],根系分泌物的变化促进根系呼吸速率,增加了土壤呼吸^[34]。

外源秸秆碳输入量不同引起的土壤养分的变化会驱动土壤碳循环的代谢过程^[35]。本研究中, MBC 和 SOC 与 CO₂ 累积排放量显著正相关(图 9),可能是因为秸秆输入量的增加显著提升了 SOC 和 MBC 等土壤碳组分含量,进而刺激胞外酶活性参与碳水化合物的分解;另外秸秆深还田能够使深层土壤疏松,促进根系生长,增加了深层土壤根源碳的输入,有利于参与碳循环的微生物类群生长繁殖,进而增加土壤 CO₂ 排放^[36]。但是随着秸秆还田量的增加,可能会造成一些速效养分的消耗。本文土壤碱解氮含量降低,其原因可能是秸秆腐解与微生物生长之间发生争氮现象,微生物生长受到氮限制作用^[37]。

4 结论

1) 秸秆深还田提高了土壤 CO₂ 排放速率,且随秸秆还田量的增加,CO₂ 排放速率提高,倍量还田与全量还田均显著高于无秸秆还田;CO₂ 排放速率受土壤温度和水分共同调控,具体表现为土壤温度与水分的双因素拟合模型优于单因素模型。

2) 随秸秆还田量增加,倍量还田秸秆腐解速率加快,提高了 0~40 cm 土层的养分含量,且土壤中 SOC、MBC、AP、AK 与 CO₂ 累积排放量呈显著正相关关系。

参考文献:

- [1] 刘强,梁鑫,董佩丽,等. 不同施肥措施对黄土丘陵区农田土壤有机碳组分和碳库管理指数的影响[J]. 土壤, 2023, 55(2): 446–452.

- [2] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010, 464(7288): 579–582.
- [3] Li H, Qiu J J, Wang L G, et al. Modelling impacts of alternative farming management practices on greenhouse gas emissions from a winter wheat–maize rotation system in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(1/2): 24–33.
- [4] 夏龙龙, 遆超普, 朱春梧, 等. 中国粮食生产的温室气体减排策略以及碳中和实现路径[J]. *土壤学报*, 2023, 60(5): 1277–1288.
- [5] 张国, 王效科. 我国保护性耕作对农田温室气体排放影响研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4): 872–881.
- [6] 石祖梁, 王飞, 王久臣, 等. 我国农作物秸秆资源利用特征、技术模式及发展建议[J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(5): 8–16.
- [7] 张晓庆, 王梓凡, 参木友, 等. 中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(9): 30–41.
- [8] 张迎春, 王萍, 刘亚龙, 等. 长期种植作物对中国农田土壤有机碳影响的 Meta 分析[J]. *土壤学报*, 2024, 61(6): 1628–1638.
- [9] 隽英华, 何志刚, 刘慧屿, 等. 秸秆还田与氮肥运筹对农田棕壤微生物生物量碳氮及酶活性的调控效应[J]. *土壤*, 2023, 55(6): 1223–1229.
- [10] 李晓莎, 武宁, 刘玲, 等. 不同秸秆还田和耕作方式对夏玉米农田土壤呼吸及微生物活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1765–1771.
- [11] 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.
- [12] 丁瑞霞, 王维钰, 张青. 两种轮作模式下秸秆还田对土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(8): 1106–1118.
- [13] 王丹蕾. 秸秆还田深度对玉米–土壤系统中光合碳的固定及 CO₂ 排放的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [14] 朱晓晴, 安晶, 马玲, 等. 秸秆还田深度对土壤温室气体排放及玉米产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(5): 977–989.
- [15] 董建新, 丛萍, 刘娜, 等. 秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体分布特征的影响[J]. *土壤学报*, 2021, 58(4): 921–934.
- [16] Zhao X M, He L, Zhang Z D, et al. Simulation of accumulation and mineralization (CO₂ release) of organic carbon in chernozem under different straw return ways after corn harvesting[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 156: 148–154.
- [17] 高晓梅, 刘晓辉, 于森, 等. 秸秆还田量对半干旱褐土区氮素淋溶及春玉米产量的影响[J]. *山东农业科学*, 2021, 53(10): 64–71.
- [18] 刘高远, 和爱玲, 杜君, 等. 玉米秸秆还田量对砂姜黑土酶活性、微生物生物量及细菌群落的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(5): 1033–1040.
- [19] 马永财, 滕达, 衣淑娟, 等. 秸秆覆盖还田及腐解率对土壤温湿度与玉米产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(10): 90–99.
- [20] 闵秀云, 武君, 高春亮, 等. 基于元素分析仪测定土壤有机碳的不同前处理方法对比研究[J]. *盐湖研究*, 2020, 28(4): 64–70.
- [21] 林启美, 吴玉光, 刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(2): 63–66.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [23] 李元鸿, 赵蕊, 袁心洁, 等. 祁连山七一冰川梯度因子四季变化特征与土壤呼吸关联性分析[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(7): 1610–1618.
- [24] Wu G, Ling J, Xu Y P, et al. Effects of soil warming and straw return on soil organic matter and greenhouse gas fluxes in winter wheat seasons in the North China Plain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 356: 131810.
- [25] Li J H, Li H, Zhang Q, et al. Effects of fertilization and straw return methods on the soil carbon pool and CO₂ emission in a reclaimed mine spoil in Shanxi Province, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195: 104361.
- [26] Chen Z M, Xu Y H, Fan J L, et al. Soil autotrophic and heterotrophic respiration in response to different N fertilization and environmental conditions from a cropland in Northeast China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 110: 103–115.
- [27] 宋秋来, 王峭然, 冯延江, 等. 寒地玉米秸秆还田条件下土壤 CO₂ 排放与土壤温度的关系[J]. *黑龙江农业科学*, 2017(1): 28–33.
- [28] 游璟. 果菇套作系统秸秆还田量对土壤养分及 CO₂ 排放的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [29] 李中韬. 寒地旱作秸秆还田腐解规律及土壤 CO₂ 排放的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- [30] 郭海斌. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦–夏玉米一年两熟农田土壤生物性状和作物生长的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
- [31] Lai L M, Zhao X C, Jiang L H, et al. Soil respiration in different agricultural and natural ecosystems in an arid region[J]. *PLoS One*, 2012, 7(10): e48011.
- [32] 刘平奇, 张梦璇, 王立刚, 等. 深松秸秆还田措施对东北黑土土壤呼吸及有机碳平衡的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(5): 1150–1160.
- [33] 高飞, 董树亭, 刘鹏, 等. 不同秸秆还田量对夏玉米根系特性及产量的影响[C]//2017 年中国作物学会学术年会论文集. 河北保定, 2017: 174–175.
- [34] 郭茹. 旱区农田秸秆碳和氮肥施用的固碳减排效应及水氮利用机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- [35] 蔡丽君. 秸秆长期免耕覆盖对黑土有机碳和微生物碳代谢的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- [36] 温美娟, 杨思存, 王成宝, 等. 不同耕作和秸秆还田方式对灰钙土土壤理化性状、酶活性及玉米产量的影响[J/OL]. *生态学杂志*. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20240314.1803.012>.
- [37] 于洋, 张常仁, 杨雅丽, 等. 长期免耕和秸秆覆盖量对黑土碳氮含量及碳氮循环相关酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(3): 695–704.