

DOI: 10.11766/trxb202110300587

于雅茜, 裴久渤, 刘维, 王萌萌, 尹思佳. ^{13}C 富集玉米根、茎、叶添加对长期不施肥和施肥处理棕壤土壤呼吸的影响及其激发效应[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 1077–1087.

YU Yaxi, PEI Jiubo, LIU Wei, WANG Mengmeng, YIN Sijia. Effects of Root, Stem and Leaf of Maize Enriched by ^{13}C on Brown Earth's Respiration and Their Priming Effects Under Long-term Fertilization Conditions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(4): 1077–1087.

^{13}C 富集玉米根、茎、叶添加对长期不施肥和施肥处理棕壤土壤呼吸的影响及其激发效应*

于雅茜, 裴久渤[†], 刘维, 王萌萌, 尹思佳

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

摘要: 玉米根、茎、叶残体因含碳化学组分差异, 还田后对不同肥力土壤呼吸及激发效应的影响存在差异性, 为探究这种影响的田间差异性, 采用 ^{13}C 标记玉米秸秆示踪方法, 在沈阳农业大学棕壤长期定位试验站进行 540 d 田间培养试验, 共设置 8 个处理: 低肥土壤(LF+CK)、低肥土壤+根(LF+R)、低肥土壤+茎(LF+S)、低肥土壤+叶(LF+L)、高肥土壤(HF+CK)、高肥土壤+根(HF+R)、高肥土壤+茎(HF+S)、高肥土壤+叶(HF+L)。结果显示: (1) 培养期内, 土壤呼吸通量、秸秆碳对土壤 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放的贡献率均呈下降趋势; (2) 与不添加秸秆土壤相比, 低肥土壤添加根、茎、叶处理的土壤 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放累积量分别增加 134%、126%和 95%, 高肥土壤分别增加 157%、189%和 96%; (3) 根、茎在高肥土壤中对土壤 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放的贡献显著大于叶, 在低肥土壤中并无差异; (4) 秸秆不同部位还田均会引起高低肥土壤的正激发效应, 其中添加根、茎的激发效应显著强于叶, 而秸秆不同部位对两种肥力水平土壤的激发效应均无显著影响。综上, 秸秆不同部位还田对土壤呼吸的 CO_2 累积排放量影响显著; 玉米叶较玉米根、茎容易分解, 但由于土壤自身养分差异, 玉米叶还田初期在低肥土壤分解速率高于根、茎, 而在高肥土壤小于根、茎。因此细化秸秆还田对农田土壤呼吸有重要意义, 未来在秸秆还田研究中应考虑秸秆不同部位和土壤肥力间的交互影响。

关键词: 农田土壤呼吸; 土壤有机碳; 玉米不同部位秸秆还田; 稳定碳同位素示踪; 激发效应

中图分类号: S158 文献标志码: A

Effects of Root, Stem and Leaf of Maize Enriched by ^{13}C on Brown Earth's Respiration and Their Priming Effects Under Long-term Fertilization Conditions

YU Yaxi, PEI Jiubo[†], LIU Wei, WANG Mengmeng, YIN Sijia

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

* 国家自然科学基金项目(41807086)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41807086)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: peijiubo@syau.edu.cn

作者简介: 于雅茜(1997—), 女, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 从事土壤有机碳转化研究。E-mail: yuyaxi0605@163.com

收稿日期: 2021–10–30; 收到修改稿日期: 2022–05–10; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022–09–15

Abstract: 【Objective】 Due to the differences in carbon chemical components among maize residue s(root, stem and leaf), their return to cropland soils with different fertility levels will induce differences in soil respiration and priming. 【Method】 In order to explore these differences in the field, a 540-day *in-situ* field experiment with eight treatments of low fertilizer soil(LF+CK), low fertilizer soil + root (LF + R), low fertilizer soil + stem (LF + S), low fertilizer soil + leaf (LF + L), high fertilizer soil (HF+CK), high fertilizer soil + root (HF + R), high fertilizer soil + stem (HF + S) and high fertilizer soil + leaf (HF + L), was carried out at a long-term positioning station of brown earth in Shenyang Agricultural University using ^{13}C labeled maize straw tracing method. 【Result】 Results showed that (1) the contribution rates of soil respiration flux and straw carbon to soil $\text{CO}_2\text{-C}$ emission showed downward trends over the *in-situ* incubation period. (2) Compared to the treatment without straw, the cumulative $\text{CO}_2\text{-C}$ released from low fertility soil with root, stem and leaf increased by 134%, 126% and 95%, respectively, while that from high fertility soil increased by 157%, 189% and 96%, respectively. (3) The contributions of root and stem to soil $\text{CO}_2\text{-C}$ emission in high fertility soil were significantly greater than that of leaf, but there was no difference in low fertility soil. (4) Different parts of maize straw returning to the field could cause the positive priming effects in both high and low fertility soils. Meanwhile, the priming effects of adding root and stem were significantly stronger than that of adding leaf, showing root and stem would cause more positive priming effects of soil $\text{CO}_2\text{-C}$ than the leaf. Moreover, there was no significant effect on the priming effect between straw parts and soil fertility. 【Conclusion】 Overall, this study enriched the theory of cropland soil respiration induced by straw returning, suggesting that the interaction of straw parts and soil fertility on soil respiration should be considered in straw returning. **Key words:** Soil respiration from cropland; Soil organic carbon; Different parts of maize straw returning; Stable carbon isotopic tracing; Priming effect

近年来,随着温室效应不断加剧,全球气候变暖问题成为当今人类面临的重大难题^[1],与气候问题密切相关的碳循环机制已成为全球变化研究领域的前沿与热点问题^[2]。陆地生态系统碳循环是全球碳循环中最复杂、受人类活动影响最大的部分^[3],土壤作为陆地生态系统中最大的有机碳库^[4],不仅为植被生长提供养分,同时也以 CO_2 的形式向大气释放碳,这一过程又被称为土壤呼吸^[5]。因此,探究农田土壤呼吸对全球气候变化具有重要意义,并且迫在眉睫^[6]。

秸秆还田作为农田土壤培肥和固碳减排的重要措施之一,已成为国内外学者的研究热点^[7],其可以改善农田生态环境,提高土壤肥力及作物品质与产量^[8]。然而,有研究表明,秸秆施入土壤后也会增强土壤呼吸^[9],且受多种因素的影响,包括土壤性质(如有机质含量、质地、pH)、环境因素(如含水量、降水、温度)和外源有机物加入数量和类型^[10]等。武开阔等^[11]研究了秸秆不同还田量对土壤呼吸及土壤微生物量的影响,表明土壤呼吸强度与秸秆还田量呈正相关。不同肥力水平土壤由于本底所含有机碳含量的不同,导致土壤呼吸存在差异^[12]。Lai 等^[13]研究表明长期施用有机肥提高了土壤自身养分含量,同时也提高了土壤呼吸速率。吕真真等^[14]

研究表明土壤有机碳累计矿化量与土壤碳投入呈正相关,高肥土壤会提高土壤潜在可矿化有机碳量。此外,外源有机物(如秸秆)添加到土壤后可以直接影响土壤原有有机质分解,这一过程被称为激发效应^[15]。然而,秸秆不同部位(如根、茎、叶)因含有的化学组分和碳氮比不同^[16-17],施入土壤后的腐解速率将存在差异,其中叶含氮量高且由较多易分解的物质组成^[18],例如糖类和氨基酸等;茎主要由纤维素和半纤维素组成;而根含有较多的角质和木质素类物质,较叶、茎难分解^[19]。有研究表明,土壤添加的底物不同,对土壤有机质分解的影响不同^[20],如添加的底物难以分解时,微生物就会优先利用土壤有机质,从而加快土壤原有有机质分解,产生正激发效应,而添加易分解的底物时,土壤微生物会优先分解利用底物,从而降低对土壤原有有机质的分解,产生负激发效应^[21]。Shahbaz 等^[9]利用 ^{13}C 标记小麦根、茎、叶研究了秸秆不同部位添加对土壤有机质分解及激发效应影响的差异,来揭示不同部位秸秆矿化对激发效应影响存在的阈值,结果表明根矿化对激发效应增加的阈值最低。此外,有学者通过室内培养的方式开展了不同外源碳的添加对土壤有机质分解的影响,结果表明,易分解外源碳会抑制原土壤有机质分解,而较难分解的外源碳会

促进原土壤有机质的分解^[22]。秸秆不同部位还田后因其自身腐解速率存在差异,因此它们进入土壤后不仅会引起土壤呼吸的差异,也会造成土壤不同的激发效应,从而影响秸秆还田后评估土壤呼吸及其激发效应的准确性。然而,目前关于细化秸秆不同部位还田到不同肥力土壤后,评估土壤呼吸及其激发效应的研究仍然相对较少。

综上,目前关于秸秆还田后对土壤呼吸的研究较多,且多为室内培养试验或不同作物秸秆整株还田试验研究,而关于田间培养示踪作物秸秆(尤其是玉米秸秆)的不同部位残体还田,对土壤呼吸及其激发效应影响的细致研究相对较少。因此,本研究基于棕壤长期定位试验站,采用田间培养方式,结合 ^{13}C 同位素示踪技术,将玉米秸秆不同部位(根、茎、叶)分别施入高、低肥棕壤,旨在分析不同肥力条件下,玉米根、茎、叶残体添加对棕壤呼吸及激发效应影响的差异,以期细化玉米根、茎、叶残体添加对土壤呼吸的影响,为合理评估秸秆还田对土壤激发效应的影响以及优化秸秆分类还田提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

试验布置于沈阳农业大学棕壤肥料长期定位试验站(41.82°N, 123.57°E)。试验地地势平坦,海拔75 m,土壤为棕壤(筒育淋溶土,当地地带性土壤类型)。属于北温带大陆性季风气候区,冬季寒冷

干燥,夏季高温多雨。年平均气温7.5℃,年平均降水量706 mm,≥10℃积温为3350℃,无霜期为153 d。该试验站始建于1979年,施肥试验从1987年开始设置,一直持续至今。试验布置前,土壤有机质含量15.60 g·kg⁻¹,全氮1.00 g·kg⁻¹,全磷0.50 g·kg⁻¹,碱解氮67.40 mg·kg⁻¹,有效磷8.40 mg·kg⁻¹。种植作物及方式均为玉米(当地常用品种)连作。所用肥料均作为基肥施入土壤。每年4月25日左右施肥、播种,并按常规进行田间管理,9月25日前后进行小区测产、采样和收割,并对玉米秸秆进行清除,然后进行翻地^[23]。本试验选择其中两种施肥处理:低肥土壤(LF,长期不施肥)和高肥土壤(HF,每年施用含氮量为270 kg·hm⁻²的腐熟猪厩肥),两处理近五年平均产量分别为289.2、707.8 kg·hm⁻²。

土壤样品于2018年10月玉米收获后采集。利用五点法和四分法采集两处理0~20 cm表层土壤,剔除植物根系等杂质后,室内自然风干,磨碎过5 mm筛后保存备用(供试土壤性质见表1)。 ^{13}C 标记玉米根、茎、叶残体采自该试验站田间标记试验获得材料^[24]。玉米成熟后收获植株,分离根、茎、叶,分别冲洗各部位后,在105℃杀青30 min,然后60℃烘干8 h。烘干植物样用粉碎机粉碎,通过0.425 mm筛用于田间试验布置。取少量粉碎后的植物样再用球磨仪(Retsch MM200,德国)进行粉碎,过0.15 mm筛后利用元素分析-同位素比例质谱仪(EA-IRMS, Elementanalysis-Stable100 Isotope Ratio Mass Spectrometer, 德国)测定碳氮含量及 $\delta^{13}\text{C}$ 值(玉米各部位残体性质见表1)。

表1 供试土壤及 ^{13}C 标记玉米秸秆有机碳和全氮含量

Table 1 Contents of organic carbon and total nitrogen in tested soil and ^{13}C labeled maize straw

样品 Sample	有机碳 Organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	碳氮比 C/N	$\delta^{13}\text{C}$ 值 $\delta^{13}\text{C}$ value/‰	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	质地 Texture
LF	10.10	1.10	9.18	-17.88	1.32	黏壤
HF	17.80	2.20	8.09	-19.45	1.21	黏壤
R	407.50	12.50	32.60	209.00		
S	440.80	14.41	30.60	252.00		
L	428.00	12.50	34.24	235.00		

注: LF, 低肥土壤; HF, 高肥土壤; R, 根; S, 茎; L, 叶。下同。Note: LF, Low fertility soil; HF, High fertility soil; R, Root; S, Stem; L, Leaf. The same below.

1.2 田间培养试验布置

两种肥力土壤分别设添加玉米根(R)、茎(S)、叶(L)以及空白对照处理(CK,不添加任何残体),每个处理均设3次重复。首先分别称取各供试风干土1000g(相当于烘干土重)与10g(1%还田量,即按当地高产玉米全量还田比例计算)粉碎后的玉米根、茎、叶分别混匀,加入蒸馏水调整含水量达到70%田间持水量(CK只调整含水量达到70%田间持水量),装入田间培养“秸秆腐解-气体收集”装置(图1),于2019年5月初玉米播种前分别垂直埋入试验站相应处理的土壤耕层(0~20cm)中(管上部露出地表约10cm左右),管内不种植作物。平时PVC管口敞开,排水管控制阀打开,营造与田间环境相似的开放系统。样品采集时,用密封盖盖住管口,并将排水管控制阀关闭。另在地表放置3个10cm高(封底)的空PVC管用于校正环境CO₂的变化。

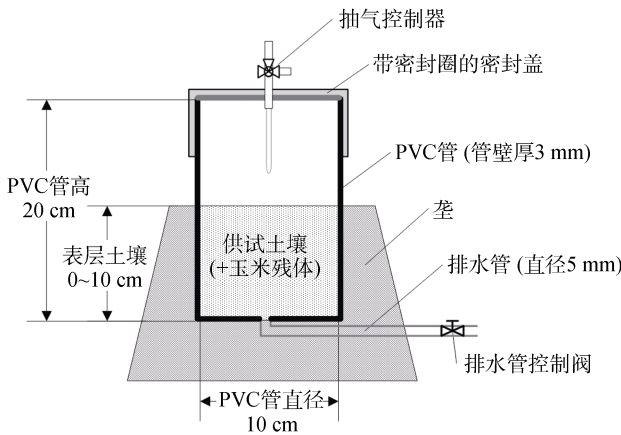


图1 试验装置断面示意图

Fig. 1 Section diagram of the test device

样品采集时间为田间培养试验布置后的第1、5、10、20、30、60、100、180和540天(原定最后一次采样时间为第360天,因受疫情影响改为第540天)。每次采集气体样品时间为上午8:00-11:30之间。采样当天8:00将所有PVC管口(包括3个空管)用密封盖盖住,并将排水管控制阀关闭。每40min对取样装置用注射器抽出40mL气体样品至集气袋,共抽取4次,同时利用土壤水热测定仪(IKA,德国)记录采样时段土壤水热状况。当气体样品采集结束后,打开密封盖和排水管控制阀,还原田间试验装置。采样结束后,将气体样品带回实

验室,进行相关指标的测定。

1.3 测定分析

将采集的CO₂气体样品利用气相色谱-同位素比例质谱联用仪(GC-IRMS,德国)测定样品CO₂浓度及其δ¹³C值。利用空管中测定的环境CO₂浓度及其δ¹³C值进行校正。

土壤呼吸通量(R_r)计算公式^[25-26]:

$$R_r = (C \times V \times M) / (22.4 \times W \times t) / S \quad (1)$$

式中, R_r 为当日CO₂呼吸通量(mg C·g⁻¹·m⁻²·d⁻¹); C 代表测定气体CO₂校正后浓度(ppm); V 代表气体的总体积(L,本研究中未装土10cm体积为785cm³), M 为碳原子的摩尔质量(12g·mol⁻¹), W 为管内土壤干重(g); t 为密闭时间(d); S 为PVC管横截面面积。某段时期内土壤呼吸CO₂累积通量的计算通过将得到的当日CO₂呼吸通量(R_r)进行时间上的梯形积分获取。

玉米不同残体碳对土壤呼吸CO₂-C的贡献百分比计算公式^[27-28]:

$$F_{\text{maize}} (\%) = (\delta^{13}\text{C}_{\text{add}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{ck}}) / (\delta^{13}\text{C}_{\text{maize0}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{ck}}) \times 100 \quad (2)$$

$$F_{\text{soil}} (\%) = 100 - F_{\text{maize}} \quad (3)$$

式中, $F_{\text{maize}} (\%)$ 代表“玉米残体+土壤”处理土壤释放的CO₂-C中来自残体碳的贡献比, $F_{\text{soil}} (\%)$ 代表“玉米残体+土壤”处理中来自原土壤释放的CO₂-C贡献比;δ¹³C_{add}和δ¹³C_{ck}分别代表“玉米残体+土壤”处理和对照处理土壤释放的CO₂-C的δ¹³C值(‰);δ¹³C_{maize0}代表初始添加玉米残体的δ¹³C值(‰)。

土壤CO₂-C的激发效应(PE)的计算^[29]:

$$\text{PE} = F_{\text{soil}} \times R_{\text{CO}_2\text{-Cadd}} - R_{\text{CO}_2\text{-Cck}} \quad (4)$$

式中, $R_{\text{CO}_2\text{-Cadd}}$ 和 $R_{\text{CO}_2\text{-Cck}}$ 分别为代表“玉米残体+土壤”处理和不添加残体对照处理CO₂-C的校正后实际释放通量; $F_{\text{soil}} \times R_{\text{CO}_2\text{-Cadd}}$ 代表“玉米残体+土壤”处理中CO₂-C来自原土壤释放通量。

1.4 数据处理

试验结果均以3次重复的平均值及标准差来表

示。所有数据均采用 Microsoft Office Excel 2019 和 Origin 2018 进行处理和绘图, SPSS 22.0 软件进行数据的统计分析 & 差异显著性检验。

2 结果

2.1 培养期内试验地水热条件变化

图 2 为培养时期内试验地水热条件变化。培养期内, 装置内采样时段土壤温度与试验地监测站监测土壤及环境温度变化趋势相一致, 均随着季节变化而改变, 培养 60 d (7 月) 时温度最高, 培养 180 d (11 月) 温度最低。试验地降水量及试验地土壤含水量的变化趋势一致, 但装置内土壤含水量对环境降水的响应存在一定滞后现象。

2.2 培养期内土壤呼吸情况

在培养期内, 各个处理土壤呼吸通量整体均呈

现随培养时间延长逐渐下降的趋势, 且玉米秸秆添加能显著提高土壤呼吸通量 ($P < 0.001$, 图 3a、图 3b)。LF+R、LF+S、LF+L 土壤呼吸通量峰值分别出现在第 30 天、第 5 天和第 1 天; HF+R、HF+S、HF+L 的土壤呼吸通量峰值均出现在第 10 天。

土壤 CO_2 累积排放量受秸秆部位及土壤肥力水平交互作用显著 ($P < 0.01$, 图 3c、图 3d)。随培养时间延长, 玉米秸秆各部位还田均显著提高了土壤呼吸 CO_2 累积排放量 ($P < 0.01$)。从整个培养期看, LF 表现为: $R > S > L > \text{CK}$, HF 表现为: $S > R > L > \text{CK}$ 。HF 各处理土壤呼吸 CO_2 累积排放量均高于 LF。两种肥力水平土壤 R、S 土壤 CO_2 累积排放量均要显著高于添加 L ($P < 0.05$)。与 CK 相比, 培养期末, LF+R、LF+S、LF+L 的土壤 CO_2 累积排放量分别增加了 134%、126% 和 95%, HF+R、HF+S、HF+L 分别增加了 157%、189% 和 87%。

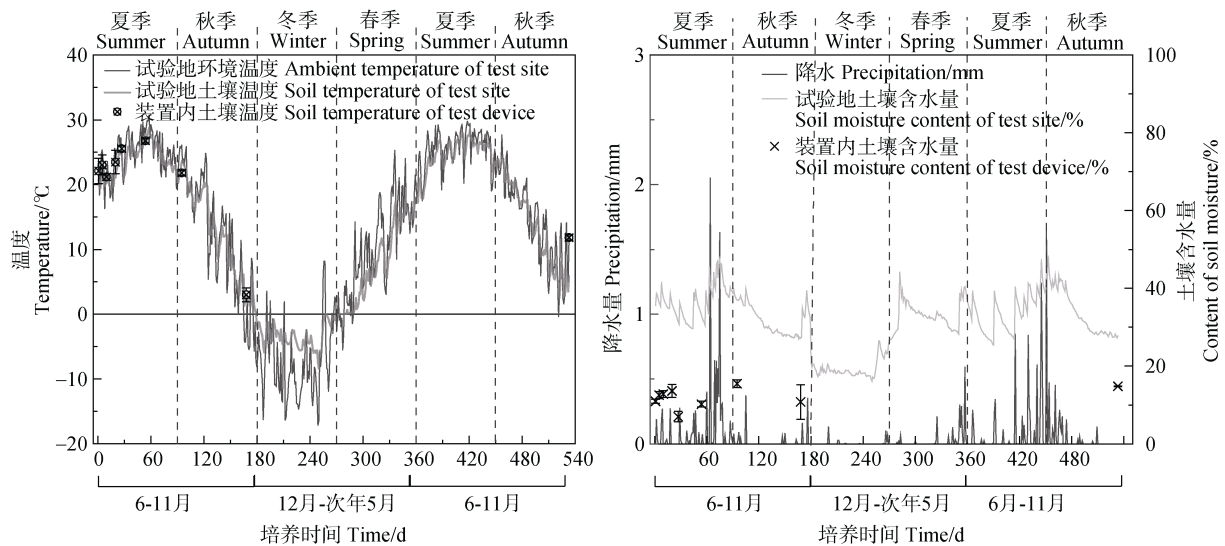


图 2 试验地土壤及环境和试验装置内土壤水热条件

Fig. 2 Hydrothermal conditions in the soil and surroundings of the experiment site and the soil in the tested device

2.3 培养期内土壤呼吸 $\text{CO}_2\text{-}\delta^{13}\text{C}$ 情况

随着培养时间延长, 添加玉米秸秆三个处理呼出 $\text{CO}_2\text{-}\delta^{13}\text{C}$ 均呈现先轻微上升再下降的趋势 (图 4)。LF 三个处理均在第 180 天达到最低点, HF+L 在第 100 天达到最低点, HF+S 和 HF+R 在 180d 达到最低点, 并且 LF 在 180d 后表现为 $R > L > S$, 而 HF 则表现为 $S > L > R$ 。

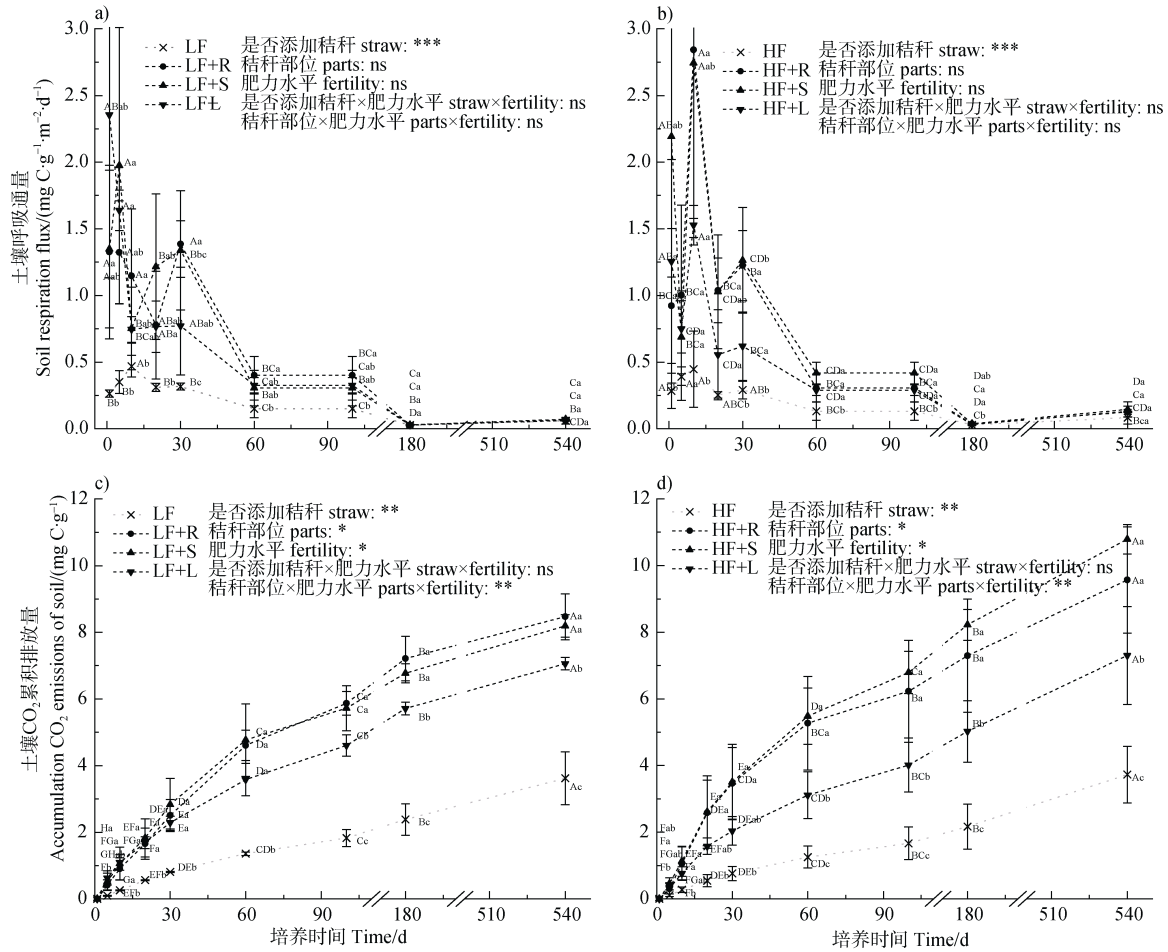
2.4 培养期内秸秆残体碳对土壤呼吸 $\text{CO}_2\text{-C}$ 贡献率变化

玉米秸秆残体碳贡献率 (图 5a、图 5b) 的整体

变化趋势同土壤呼吸 $\text{CO}_2\text{-}\delta^{13}\text{C}$ 变化 (图 4)。从累积贡献来看, R、S 较 L 对土壤呼吸 $\text{CO}_2\text{-C}$ 贡献率更大 (图 5c、图 5d); HF+R、HF+S 较 LF+R、LF+S 贡献率更大, HF+L 较 LF+L 贡献率低。

2.5 培养期内土壤呼吸 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的激发效应变化

激发效应受玉米秸秆不同部位影响显著 ($P < 0.001$, 图 6a、图 6b)。相较于培养后期, 初期 (0~20 d) 土壤 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的激发效应变化更强烈, 且峰值出现时期与土壤呼吸通量 (图 3a、图 3b) 的峰值出现时期一致。



注：不同大写字母表示同一处理不同时间土壤呼吸通量及 CO₂ 累计排放量差异显著 ($P < 0.05$)，不同小写字母表示同一时间不同处理土壤呼吸通量及 CO₂ 累计排放量差异显著 ($P < 0.05$)。* $P < 0.05$ ，** $P < 0.01$ ，*** $P < 0.001$ ，ns 为不显著。下同。Note: Different uppercase letter means the significant difference ($P < 0.05$) by soil respiration flux of the same treatment at different times; Different lowercase letter means the significant difference ($P < 0.05$) by soil respiration flux and cumulative CO₂ emission with different treatments at the same time. * means $P < 0.05$, ** means $P < 0.01$, *** means $P < 0.001$, ns means no significance. The same below.

图 3 ¹³C 标记玉米根、茎、叶添加后不同肥力土壤呼吸情况

Fig. 3 Soil respiration after adding ¹³C labeled maize root, stem and leaf in different fertility soil

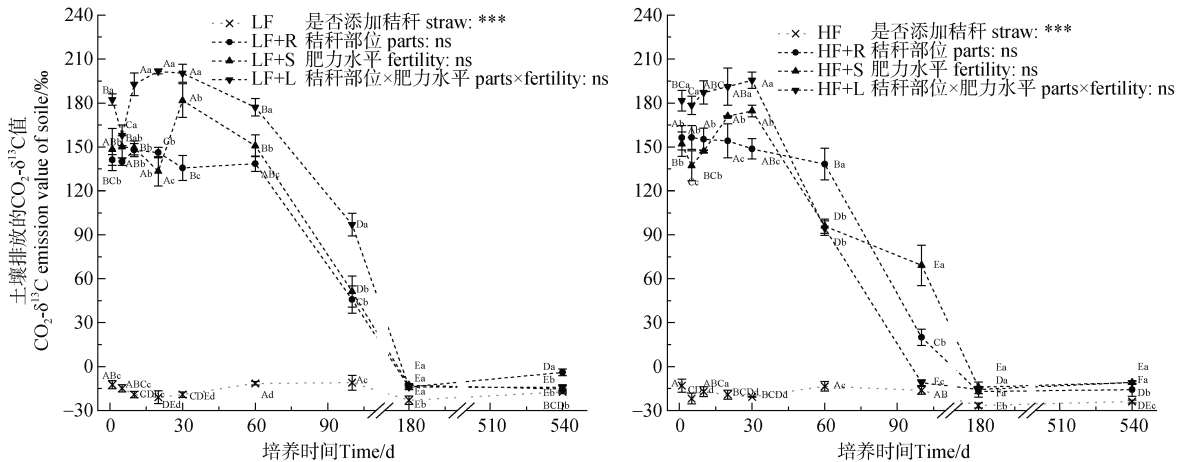
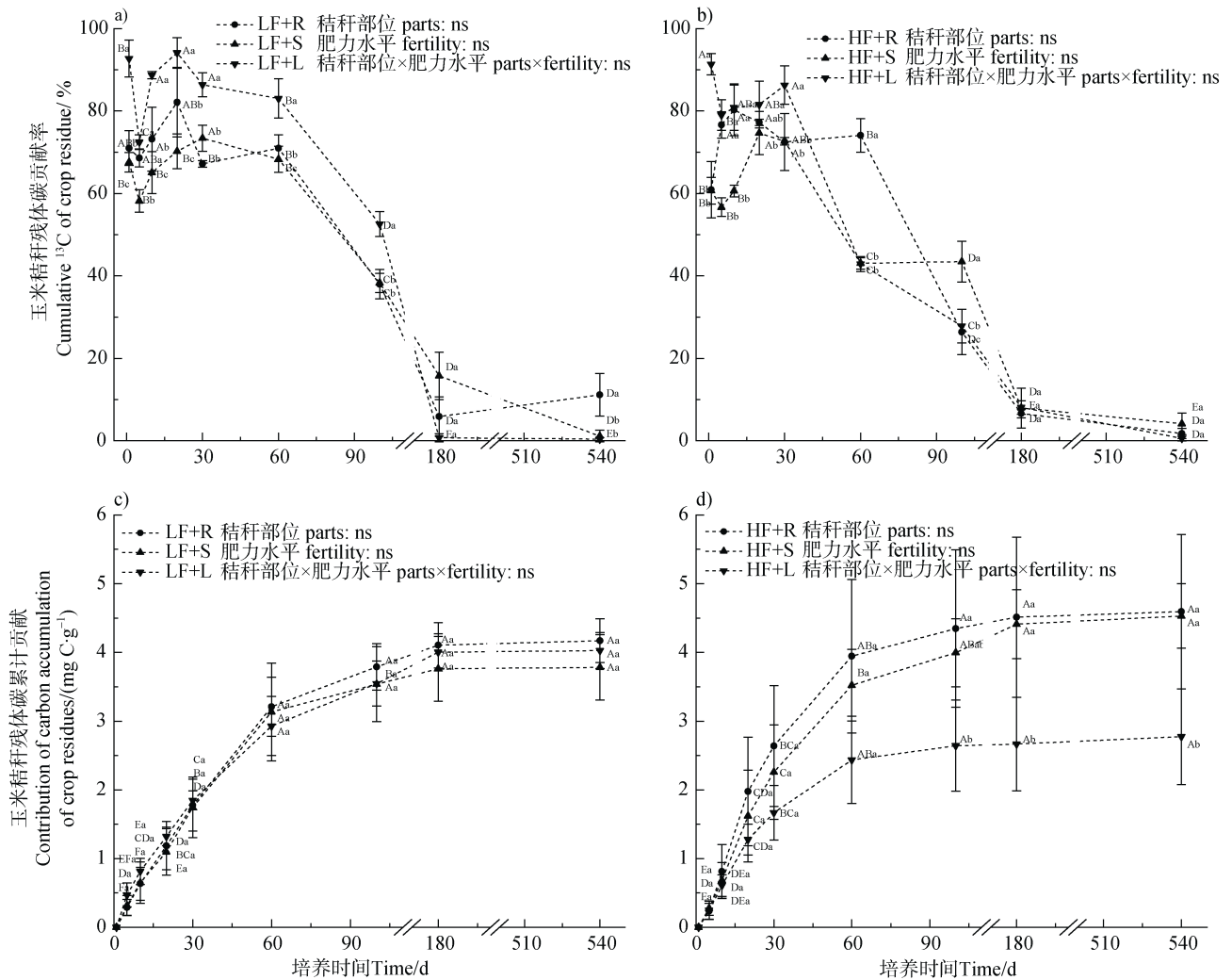


图 4 ¹³C 标记玉米根、茎、叶添加后不同肥力土壤排放 CO₂-δ¹³C 变化

Fig. 4 CO₂-δ¹³C values after adding ¹³C labeled maize root, stem and leaf in different fertility soil

图5 玉米秸秆残体碳对不同肥力土壤 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放的贡献率Fig. 5 $\text{CO}_2\text{-C}$ contribution rate derived by the residual carbon from different parts of maize straw in different fertility soil

土壤累积激发受秸秆部位 ($P < 0.01$) 及肥力水平 ($P < 0.001$) 影响显著 (图 6c、图 6d)。两种肥力水平土壤累积激发效应均表现为: $S > R > L$ 。培养末期, 同一肥力水平土壤下, 不同处理间累积激发并没有显著差异, HF+R、HF+S、HF+L、LF+R、LF+S 均为正激发效应, LF+L 为负激发效应。

在整个培养期, 玉米不同部位秸秆还田均能大幅提升土壤 $\text{CO}_2\text{-C}$ 总排放 (图 7), HF 各处理土壤原有机碳矿化量及总碳矿化量要高于 LF, 但 LF 玉米秸秆碳矿化量较 HF 高。只有 LF+R 和 LF+L 是减少了土壤原有机碳矿化量, 其他处理均在不同程度上提高了土壤原有机碳的矿化。培养结束时, LF+S、HF+R、HF+S、HF+L 土壤原有机碳矿化分别提高了 25%、27%、43%、6%。

3 讨论

3.1 玉米不同部位残体添加对不同肥力土壤呼吸的影响

土壤呼吸是土壤微生物分解同化土壤中活性有机质, 完成自身代谢并释放 CO_2 的过程, 与全球气候变化密切相关^[30]。玉米秸秆的添加提高了土壤活性碳组分含量, 为土壤微生物的代谢活动提供了丰富的碳源, 改善了土壤理化性质及环境, 显著增加了土壤微生物数量、活性及有机碳矿化强度^[31]。本研究中, 两种肥力水平土壤添加玉米秸秆后, 土壤呼吸通量及 $\text{CO}_2\text{-}\delta^{13}\text{C}$ 值均随时间逐渐下降, 这与 Shahbaz 等^[19]的研究结果一致。Shahbaz 等利用 ^{13}C 标记秸秆和 ^{14}C 标记 $0.04 \text{ mg C}\cdot\text{g}^{-1}$ 葡萄糖^[32]进行室内

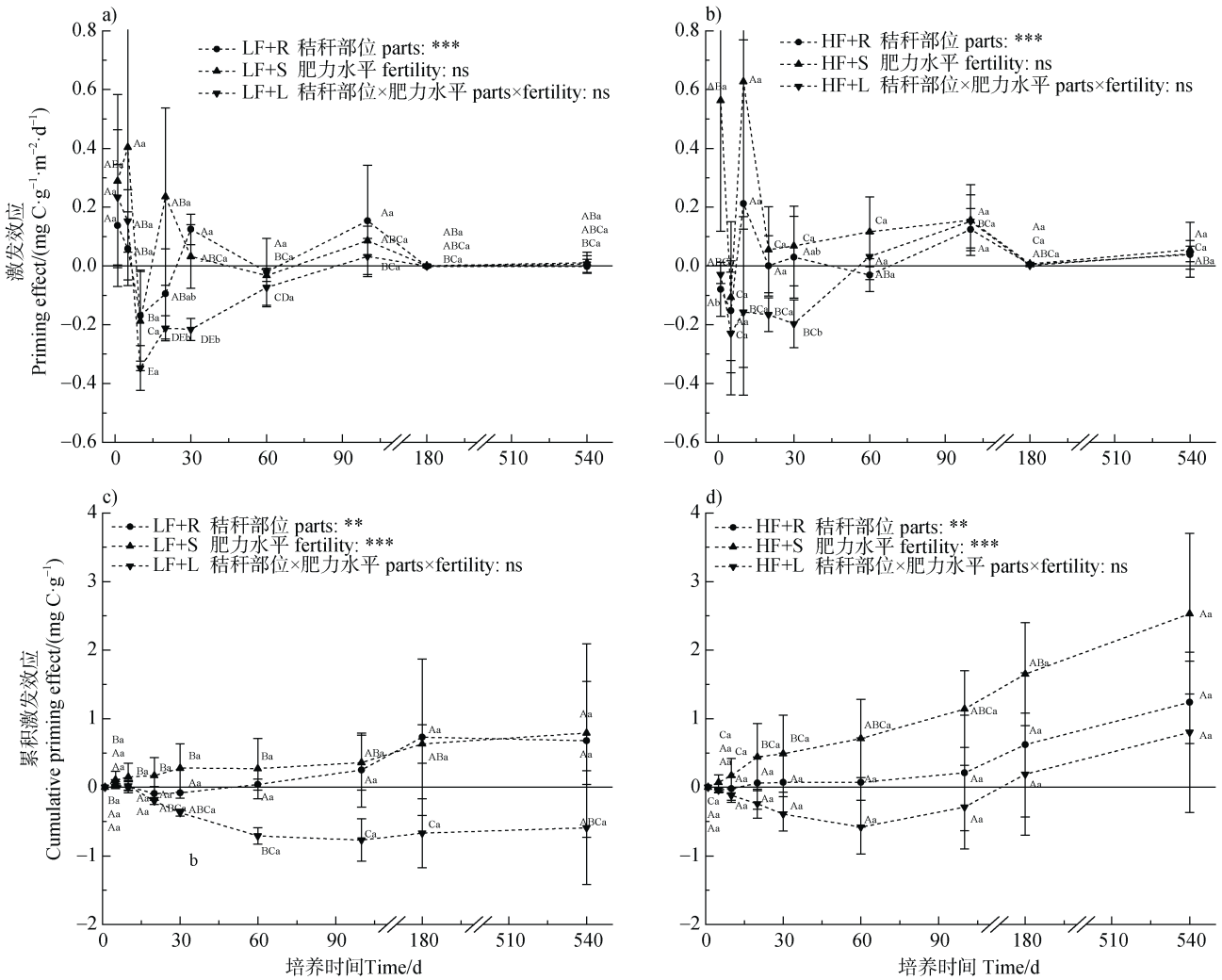


图 6 ^{13}C 标记玉米根、茎、叶添加后不同肥力水平土壤 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的激发效应

Fig. 6 $\text{CO}_2\text{-C}$ priming effects after adding ^{13}C labeled maize root, stem and leaf in different fertility soil

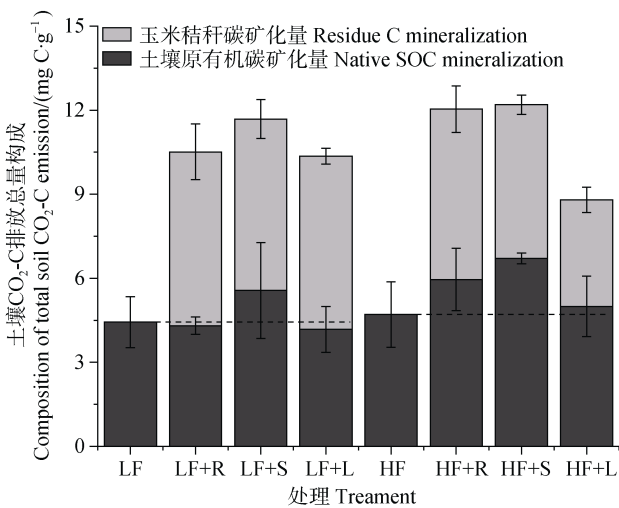


图 7 土壤 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放总量构成

Fig. 7 Composition of total soil $\text{CO}_2\text{-C}$ emission

培养研究外源碳分解阶段及激发效应，发现秸秆在 1~2 d 分解最剧烈，而本试验秸秆碳含量均大于 $400 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ，这是导致秸秆在 1~5 d 培养初期分解剧烈的原因（图 3a、图 3b）。在培养前期（60 d 前）土壤碳矿化速率较快，培养第 60 天时碳矿化量已占总矿化量的 34%~58%（图 3c、图 3d），主要是因为秸秆残体碳施入土壤后，微生物迅速利用外源碳，提高了微生物数量及活性，导致培养前期土壤矿化速率和矿化量激增。随着培养时间的推移（60 d 后，8—12 月），气温也逐渐降低，土壤微生物的活动减弱，多数秸秆已被微生物分解，剩余的外源碳不足以持续为前期激增的大量微生物提供所需养分，土壤有机碳矿化速率与土壤呼吸也随之降低^[33]。

秸秆部位不同也会导致土壤呼吸产生差异。培

养前期，添加叶土壤的呼吸通量变化幅度更大，后期则是根、茎变化幅度大于叶，主要是由于玉米叶易分解，还田后会在短期内提高土壤微生物数量及活性，但并不能长期、持续的为增加的微生物供能，导致后期土壤呼吸下降。Xu 等^[20]通过室内培养研究发现，1 年后根、茎和叶之间的矿化差异并不大，但本研究结果显示，在田间培养情况下，添加根、茎的土壤有机碳累积矿化量显著高于添加叶的土壤。

此外，土壤有机碳含量也是重要的本底条件，能够反映出土壤本身供给养分的差别以及对微生物利用的差别^[34]。培养初期（5 d 前），低肥土壤中叶分解速率高于高肥土壤，而根则相反（图 3a、图 3b），主要是叶含有较多易分解的成分，而根含有较多难分解的木质素，并且低肥土壤养分含量低于高肥土壤，因此更需要外源碳的补充^[17]，同时低肥土壤中的微生物会优先利用易分解的叶来补充土壤养分^[19]。对于 C/N 值较高的外源碳（本试验为玉米秸秆，C/N>30）施入土壤而言，高肥土壤因碳氮等养分丰富，因此受到的影响小于低肥土壤，从而表现出低肥土壤更倾向先利用外源秸秆碳^[17]。

3.2 玉米不同部位残体添加对不同肥力土壤呼吸激发效应的影响

在田间培养期间，培养前期土壤激发效应呈正激发效应，秸秆培养中期各个处理均出现负激发效应，后期低肥土壤又出现正激发效应（图 6a、图 6b）。Sullivan 和 Hart^[35]研究也发现了激发效应的类似变化：有机物料进入土壤后，激发效应随着培养时间延长呈现“U”型变化趋势，即初期与演替的后期呈现正激发效应，中期呈现负激发效应。这种变化的出现可能是因为培养初期土壤受土壤氮素可利用性的限制，而培养后期的土壤则受土壤养分（如磷）可利用性的限制^[36]，处于培养中期的土壤，受这两种元素的限制并不明显，具体原因还有待进一步探究。秸秆部位是影响土壤激发效应的重要因素，由于秸秆不同部位主要组成成分差异，还田后，含有更多易分解组分的叶引起土壤激发效应较根、茎更弱，这主要是由于叶易分解，还田后土壤微生物会优先利用外源秸秆碳，从而减缓对土壤原有机碳的矿化；土壤肥力水平差异是影响土壤激发效应的一个重要主导因素。在高肥土壤中，玉米根、茎、叶，均能诱导土壤的正激发效应，且程度都要大于低肥

土壤（图 6b、图 6c），表明激发效应受土壤自身有机碳含量影响，且呈正相关。

秸秆部位对土壤激发效应变化影响显著，同种肥力水平土壤中，添加玉米不同部位在某一培养时期会有显著差异（如低肥土壤培养第 20 天，高肥土壤培养第 15 天），但由于激发效应是外源有机物进入土壤后，引起土壤碳循环在短期内发生强烈变化^[37]，在培养最后一天时，高、低肥土壤中添加根、茎处理间累积激发并没有显著差异。不论土壤肥力水平如何，激发效应均呈现茎>根>叶，表明激发效应受外源碳的组成成分影响，在低肥土壤中添加叶的土壤呈负激发效应，即抑制了土壤原有机质分解，这与王浩等^[38]的研究结果一致，主要是叶含有更多的易分解成分，能在短期内释放出更多可利用碳来满足微生物对碳的需求，从而抑制了微生物对土壤原有机碳的矿化分解^[39-40]。

玉米秸秆还田会增加土壤 CO₂-C 排放，其中叶排放总量相较于根、茎较低（图 7）。高肥土壤中激发出的原土壤有机碳均大于低肥土壤，其中根和茎激发出的原有机碳更多，说明低肥土壤微生物会优先分解外源有机碳，进而抑制土壤原有机碳矿化，而叶相较于根茎对原土壤有机碳激发的能力较弱，这也反映了玉米秸秆还田可以提升低肥土壤的固碳减排能力，其中叶的减排效果较好。

4 结 论

土壤呼吸 CO₂ 累积排放量受还田玉米秸秆部位、土壤肥力及两者交互作用影响，其中添加根、茎高于叶，高肥土壤高于低肥。玉米秸秆不同部位对土壤激发效应影响显著，培养结束时，添加根、茎处理的累积激发效应均显著大于叶，其中高肥土壤均表现为正激发效应，而低肥土壤添加叶表现为负激发效应。总体而言，玉米秸秆还田有助于高肥土壤原有机碳的代谢更新，有利于低肥土壤减排，其中玉米叶更有助于土壤 CO₂ 减排，建议在秸秆还田中可以考虑不同部位秸秆还田的效应对不同肥力土壤有机碳矿化的影响。

参考文献 (References)

- [1] Khan I, Lei H D, Khan A, et al. Yield gap analysis of major food crops in Pakistan: Prospects for food

- security[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28 (7): 7994—8011.
- [2] Wang Y L, Zhou F, Zhang F, et al. Influence of biochar on soil respiration and soil organic carbon fractions[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30 (6): 920—928. [王月玲, 周凤, 张帆, 等. 施用生物炭对土壤呼吸以及土壤有机碳组分的影响[J]. *环境科学研究*, 2017, 30 (6): 920—928.]
- [3] Zhao N, Zhou L, Zhuang J, et al. Integration analysis of the carbon sources and sinks in terrestrial ecosystems, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41 (19): 7648—7658. [赵宁, 周蕾, 庄杰, 等. 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析[J]. *生态学报*, 2021, 41 (19): 7648—7658.]
- [4] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 10—21.
- [5] Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20 (1): 99—105. [周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20 (1): 99—105.]
- [6] Jiang B, Ma S L. Study on influencing factors of regional economic growth and carbon emissions—Take the three northeastern provinces as an example[J]. *Enterprise Economy*, 2020, 39 (11): 122—131. [姜博, 马胜利. 区域经济增长与碳排放影响因素研究——以东北三省为例[J]. *企业经济*, 2020, 39 (11): 122—131.]
- [7] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. *Science*, 2002, 298 (5601): 2173—2176.
- [8] Zhang R, Zhao X, Pu C, et al. Meta-analysis on effects of residue retention on soil N₂O emissions and influence factors in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (22): 1—6. [张冉, 赵鑫, 濮超, 等. 中国农田秸秆还田土壤 N₂O 排放及其影响因素的 Meta 分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31 (22): 1—6.]
- [9] Shahbaz M, Kuzyakov Y, Sanaullah M, et al. Microbial decomposition of soil organic matter is mediated by quality and quantity of crop residues: Mechanisms and thresholds[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53 (3): 287—301.
- [10] Wang B, Brewer P E, Shugart H H, et al. Soil aggregates as biogeochemical reactors and implications for soil-atmosphere exchange of greenhouse gases—A concept[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25 (2): 373—385.
- [11] Wu K K, Zhang Z, Wu Z J, et al. Effects of different amounts of straw return and nitrogen fertilizer application on soil CO₂ emission from maize fields[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33 (3): 664—670. [武开阔, 张哲, 武志杰, 等. 不同秸秆还田量和氮肥配施对玉米田土壤 CO₂ 排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33 (3): 664—670.]
- [12] Musafiri C M, Macharia J M, Kiboi M N, et al. Soil greenhouse gas fluxes from maize cropping system under different soil fertility management technologies in Kenya[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 301: 107064.
- [13] Lai R, Arca P, Lagomarsino A, et al. Manure fertilization increases soil respiration and creates a negative carbon budget in a Mediterranean maize (*Zea mays* L.) -based cropping system[J]. *Catena*, 2017, 151: 202—212.
- [14] Lü Z Z, Liu X M, Zhong J F, et al. Effects of long-term fertilization on mineralization of soil organic carbon in red paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52 (15): 2636—2645. [吕真真, 刘秀梅, 仲金凤, 等. 长期施肥对红壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52 (15): 2636—2645.]
- [15] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(11/12): 1485—1498.
- [16] Xu Y D, Ding X L, Li S Y, et al. Effect of maize-derived nitrogen supplementation on the total and microbial biomass nitrogen of brown earths with different fertility levels[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (20): 6818—6826. [徐英德, 丁雪丽, 李双异, 等. 不同肥力棕壤全氮和微生物量氮对外源玉米残体氮的响应[J]. *生态学报*, 2017, 37 (20): 6818—6826.]
- [17] Xie N H, An T T, Li S Y, et al. Distribution and sequestration of exogenous new carbon in soils different in fertility[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (4): 942—950. [谢柠桢, 安婷婷, 李双异, 等. 外源新碳在不同肥力土壤中的分配与固定[J]. *土壤学报*, 2016, 53 (4): 942—950.]
- [18] Hao M M, Hu H Y, Liu Z, et al. Shifts in microbial community and carbon sequestration in farmland soil under long-term conservation tillage and straw returning[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 136: 43—54.
- [19] Shahbaz M, Kuzyakov Y, Heitkamp F. Decrease of soil organic matter stabilization with increasing inputs: Mechanisms and controls[J]. *Geoderma*, 2017, 304: 76—82.
- [20] Xu Y D, Ding F, Gao X D, et al. Mineralization of plant residues and native soil carbon as affected by soil fertility and residue type[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19 (3): 1407—1415.
- [21] Shahbaz M, Kumar A, Kuzyakov Y, et al. Interactive priming effect of labile carbon and crop residues on SOM depends on residue decomposition stage: Three-source partitioning to evaluate mechanisms[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 126: 179—190.
- [22] Shahbaz M, Kuzyakov Y, Maqsood S, et al. Decadal nitrogen fertilization decreases mineral-associated and

- subsoil carbon: A 32-year study[J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28 (4): 1463—1472.
- [23] Wang J K, Liu S G, Li S Y. Effect of long-term plastic film mulching and fertilization on inorganic N distribution and organic N mineralization in brown earth[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 (6): 107—110. [汪景宽, 刘顺国, 李双异. 长期地膜覆盖及不同施肥处理对棕壤无机氮和氮素矿化率的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20 (6): 107—110.]
- [24] An T T, Wang J K, Li S Y, et al. Effect of fertilization and plastic film mulching on distribution of photosynthetically fixed carbon in maize: Explored with ^{13}C pulse labeling technique[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (5): 948—955. [安婷婷, 汪景宽, 李双异, 等. 用 ^{13}C 脉冲标记方法研究施肥与地膜覆盖对玉米光合碳分配的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50 (5): 948—955.]
- [25] Li B, Zhang J B, Li H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21 (8): 80—86. [李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21 (8): 80—86.]
- [26] Yang Y S, Chen G S, Wang X G, et al. Response of soil CO_2 efflux to forest conversion in subtropical zone of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (7): 1684—1690. [杨玉盛, 陈光水, 王小国, 等. 中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25 (7): 1684—1690.]
- [27] Coleman D C, Fry B. Carbon isotope techniques[J]. *Handbook of Stable Isotope Analytical Techniques*, 1991, 50 (4): 1043—1044.
- [28] Conrad R, Klose M, Yuan Q, et al. Stable carbon isotope fractionation, carbon flux partitioning and priming effects in anoxic soils during methanogenic degradation of straw and soil organic matter[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 49: 193—199.
- [29] Dimassi B, Mary B, Fontaine S, et al. Effect of nutrients availability and long-term tillage on priming effect and soil C mineralization[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 78: 332—339.
- [30] Kong P J, Zheng J, Luan L, et al. Effects of different types of straw returning on the bacterial community, organic carbon mineralization and maize yield in upland red soil[J]. *Environmental Science*, 2021, 42 (12): 6047—6057. [孔培君, 郑洁, 栾璐, 等. 不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42 (12): 6047—6057.]
- [31] Wang M Y, Fu Y P, Huang T T, et al. Effects of organic material application on organic carbon in and respiration of soil[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2018, 24 (2): 65—73. [王梦雅, 符云鹏, 黄婷婷, 等. 等碳量添加不同有机物料对土壤有机碳组分及土壤呼吸的影响[J]. *中国烟草学报*, 2018, 24 (2): 65—73.]
- [32] Shahbaz M, Kuzyakov Y, Sanaullah M, et al. Microbial decomposition of soil organic matter is mediated by quality and quantity of crop residues: Mechanisms and thresholds[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53 (3): 287—301.
- [33] Sun Z A, Zhang X, Hu Z J, et al. How different ratios of straw incorporation to nitrogen fertilization influence endogenous and exogenous carbon release from agricultural soils[J]. *Environmental Science*, 2021, 42 (1): 459—466. [孙昭安, 张轩, 胡正江, 等. 秸秆与氮肥比对农田土壤内外源碳释放的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42 (1): 459—466.]
- [34] Xu Y D, Sun L J, Lal R, et al. Microbial assimilation dynamics differs but total mineralization from added root and shoot residues is similar in agricultural Alfisols[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2020, 148: 107901.
- [35] Sullivan B W, Hart S C. Evaluation of mechanisms controlling the priming of soil carbon along a substrate age gradient[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 58: 293—301.
- [36] Cui Y X. Study on the characteristics and driving mechanisms of soil microbial nutrient limitation[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2020. [崔勇兴. 土壤微生物养分限制特征及驱动机制研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.]
- [37] Zhang Y Y, Mo F, Han J, et al. Research progress on the native soil carbon priming after straw addition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (6): 1381—1392. [张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. *土壤学报*, 2021, 58 (6): 1381—1392.]
- [38] Wang H, Yang Y, Xi D, et al. Impacts of labile organic carbon input on the priming effect of three forest soils in Wuyi Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40 (24): 9184—9194. [王浩, 杨钰, 刁丹, 等. 易分解有机碳输入量对武夷山不同林型土壤激发效应的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40 (24): 9184—9194.]
- [39] Wei F, Huang J H, Ma F X, et al. Effect of continuous straw returning on soil mineralizable carbon pool of long-term cotton-cropping field in oasis of Xinjiang[J]. *Soils*, 2017, 49 (2): 295—301. [魏飞, 黄金花, 马芳霞, 等. 持续棉秆还田对新疆棉田土壤可矿化碳库的影响[J]. *土壤*, 2017, 49 (2): 295—301.]
- [40] Miao S J, Qiao Y F, Wang W T, et al. Priming effect of maize straw addition on soil organic matter in yellow-brown soil[J]. *Soils*, 2019, 51 (3): 622—626. [苗淑杰, 乔云发, 王文涛, 等. 添加玉米秸秆对黄棕壤有机质的激发效应[J]. *土壤*, 2019, 51 (3): 622—626.]

(责任编辑: 卢萍)