

DOI: 10.11766/trxb202005070111

孙昭安, 张保仁, 何敏毅, 王开永, 胡正江, 陈清, 孟凡乔. 利用 ^{13}C 标记和自然丰度三源区分玉米根际 CO_2 释放[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1256–1266.

SUN Zhaoan, ZHANG Baoren, HE Minyi, WANG Kaiyong, HU Zhengjiang, CHEN Qing, MENG Fanqiao. Three-source Partitioning of CO_2 Emissions from Maize-planted Soil Using ^{13}C Labeling and Natural Abundance[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1256–1266.

利用 ^{13}C 标记和自然丰度三源区分玉米根际 CO_2 释放*

孙昭安^{1, 2}, 张保仁¹, 何敏毅², 王开永³, 胡正江³, 陈清², 孟凡乔^{2†}

(1. 潍坊学院生物与农业工程学院, 山东省高校生物化学与分子生物学重点实验室, 山东潍坊 261061; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室, 北京 100193; 3. 桓台县农业农村局, 山东桓台 256400)

摘要: 石灰性土壤中, 根际土壤释放的 CO_2 有三个来源, 即根源呼吸、土壤有机碳 (SOC) 分解和土壤无机碳 (SIC) 溶解, 三源区分土壤释放的 CO_2 是量化土壤碳平衡的前提。分别在玉米拔节期、抽穗期和灌浆期进行 7 h 的 $^{13}\text{CO}_2$ 脉冲标记, 经过 27 d 示踪期后破坏性取样, 测定 ^{13}C 标记与自然丰度处理中, 玉米地上部、根系、土壤和土壤 CO_2 的碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 利用 ^{13}C 示踪并结合自然丰度法区分玉米土壤 CO_2 的来源。研究结果显示, 随着玉米生长, 根源呼吸对土壤 CO_2 的贡献呈降低趋势, 从拔节期的 66.7% 降低至灌浆期的 25.8%。整个玉米旺盛生育期内 (从拔节期到生育期末), 根源呼吸和土壤总碳释放对土壤 CO_2 具有同等贡献, SOC 和 SIC 释放对土壤总碳释放的贡献率分别为 30% 和 20%。玉米生长对土壤的碳输入 (根系+根际沉积物) 超过土壤总碳 (SIC + SOC) 的释放, 总体表现为土壤碳汇。研究表明, SIC 溶解对全球碳库稳定性和调节 CO_2 浓度的影响非常重要, 若忽视石灰性土壤中 SIC 溶解, 则会高估 SOC 的分解, 进而影响 SOC 激发效应以及土壤碳平衡的评估。

关键词: ^{13}C 脉冲标记; 三源区分; 土壤有机碳; 土壤无机碳; 根源呼吸

中图分类号: S147; S154 文献标志码: A

Three-source Partitioning of CO_2 Emissions from Maize-planted Soil Using ^{13}C Labeling and Natural Abundance

SUN Zhaoan^{1, 2}, ZHANG Baoren¹, HE Minyi², WANG Kaiyong³, HU Zhengjiang³, CHEN Qing², MENG Fanqiao^{2†}

(1. Key Laboratory of Biology and Molecular Biology in University of Shandong, College of Biological and Agricultural Engineering, Weifang University, Weifang, Shandong 261061, China; 2. Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. Agricultural and Rural Bureau of Huantai County, Huantai, Shandong 256400, China)

Abstract: [Objective] In crop fields of calcareous soil, it is found that CO_2 released from rhizosphere may come from as many as three sources, i.e., root respiration, decomposition of soil organic carbon (SOC) and dissolution of soil inorganic C (SIC), so

* 国家自然科学基金项目 (31370527, 0870414) 和潍坊学院博士科研启动基金 (2019BS12) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 31370527, 0870414) and the Initial Scientific Research Fund of Doctors in Weifang University (No. 2019BS12)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: mengfq@cau.edu.cn

作者简介: 孙昭安 (1985—), 男, 山东济宁人, 博士, 讲师, 主要研究方向为土壤碳氮循环。E-mail: sun.zhaoan@163.com

收稿日期: 2020-05-07; 收到修改稿日期: 2020-07-18; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-08-20

partitioning of the released CO_2 by source is the premise of quantifying soil C balance. 【Method】 A pot experiment was designed and carried out to have 18 pots of summer maize (*Zea mays* L.), of which three had maize plants treated with $^{13}\text{CO}_2$ pulse-labeling for 7 hours, separately, at the elongation, heading and grain-filling stages, while in the other, the crop grew in nature as CK. On the 27th day (d) after each labeling, samples of the soils and plants were collected from the pots for analysis of total C and ^{13}C in shoot, root, soil and emitted soil CO_2 . Comparisons were made between the treated pots and CK, trying to partition the emitted CO_2 by source. 【Result】 Results show that the contribution of root respiration to soil CO_2 emission decreased from 66.7% at the elongation stage to 25.8% at the grain-filling stage. Over the whole vigorous vegetative growth period, root- and soil-derived CO_2 did not differ much in contribution to soil CO_2 emission, and the contribution of SOC decomposition and SIC dissolution to soil CO_2 emission reached about 30% and 20%, respectively. The contribution of maize growth to input of soil C in the form of roots and rhizodeposits was high enough compensate for the release of soil total C (SIC + SOC), hence the soil functioned as a C sink. 【Conclusion】 All the findings in this experiment demonstrate that SIC dissolution is more important than previously presumed in stabilizing the global C pool and regulating CO_2 concentration. If the contribution of SIC dissolution to soil CO_2 emission in calcareous soil were neglected, overestimation of the contribution of SOC decomposition is likely to occur, which will inevitably affect quantification of the priming effects of SOC and assessment of the soil C balance.

Key words: ^{13}C pulse-labeling; Three-source partitioning; SOC; SIC; Root-derived CO_2

土壤碳库包括有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 和无机碳 (Soil inorganic carbon, SIC) 库, 全球 1 m 深土层碳储量分别为 1 350 和 950 Pg C, SIC 含量以 CaCO_3 占绝对优势^[1]。我国 SIC 库储量 (60 Pg C) 是 SOC 库量 (50 Pg C) 的 1.2 倍, 主要分布在西北和华北地区^[2]。通常认为 SIC 较为稳定, 以往研究土壤碳循环多集中在 SOC 方面, 较少考虑 SIC 的作用^[3-4]。随着土壤碳循环研究的深入, 人们发现 SIC 也可以成为碳源 (碳酸盐溶解释放)^[4-5] 或碳汇 (次生性碳酸盐形成)^[3, 6-7]。然而, 以往大多数研究忽略了 SIC 溶解对土壤 CO_2 的贡献, 这可能导致对 SOC 分解的高估, 势必造成 SOC 激发效应评估的不确定^[8-9]。

土壤原有碳库背景值很大, 土壤碳库的短期变化相对较小, 很难直接通过测定土壤碳含量来定量土壤碳库的短期改变, 测定土壤 CO_2 的释放是其中比较有效的间接方法^[10]。在种植植物的石灰性土壤上, 土壤 CO_2 释放源有三个, 即外源根源呼吸以及土壤 SOC 分解和 SIC 溶解的释放, 三源区分 CO_2 是定量土壤碳平衡和 SOC 激发效应的前提。三源碳释放体系的存在, 给土壤 CO_2 区分研究带来挑战, 准确三源划分 CO_2 已成为土壤碳释放和平衡评估研究的难点^[11-12]。相对于传统的两源区分, 三源区分还缺乏系统研究, 在石灰性土壤上的研究更是较少^[13-14]。

本研究以华北平原石灰性农田土壤为研究对

象, 利用 ^{13}C 示踪结合自然丰度法, 区分玉米根际土壤 CO_2 的来源。研究在玉米关键生育期 (拔节期、抽穗期和灌浆期) 进行 $^{13}\text{CO}_2$ 脉冲标记, 先利用 ^{13}C 示踪技术量化玉米转移到地下各组分 (根系、SOC 和土壤 CO_2) 的光合碳量, 用两源法区分根际土壤释放 CO_2 中源于根系和土壤的比例^[15], 进而利用秸秆碳、SOC 和 SIC 之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 差异, 借助 ^{13}C 三元混合模型, 把土壤总碳的分解拆分为 SIC 溶解与 SOC 分解^[16-17], 以期提高华北石灰性农田土壤碳预算评估的准确性。

1 材料与方法

1.1 玉米种植

玉米盆栽在中国农业大学西校区温室进行。供试土壤取自中国农业大学曲周试验站农田 (0~20 cm), 为始成土, 具有粉质壤土结构 (砂粒 62%, 粉粒 28%, 黏粒 10%), 相关性质见表 1。土壤风干后, 磨碎、挑根, 过 5 mm 筛。每盆 (直径 20 cm×高度 35 cm) 装风干土 9.5 kg, 盆内土层深度约 27 cm。按 N 0.55、P 0.19、K 0.31 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 风干土的比例预拌肥料 (相当于耕层的田间肥料施用量), 作为底肥一次性施入。播种前先将玉米 (*Zea mays* L., 纪元 1 号) 种子放在清水中浸泡 12 h, 然后再取两粒浅埋入盆内土壤中。幼苗生长至三叶期时, 每盆留 1 株。用称重法控制土壤水分, 根据玉米不同生

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the test soil

土壤 Soil	有机碳 Soil organic C /(g·kg ⁻¹)	无机碳 Soil inorganic C /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	pH/ (水土比 2.5:1)	速效钾 Soil available K /(mg·kg ⁻¹)	Olsen-P /(mg·kg ⁻¹)	土壤容重 Soil bulk density /(g·cm ⁻³)	SOC- $\delta^{13}\text{C}$ /‰	SIC- $\delta^{13}\text{C}$ /‰
始成土 Cambisol	7.6	7.8	0.66	7.7	118	15.9	1.39	-22.2	-3.4

育期对水分的需求特点,分别在苗期(播种后 0~23 d)、拔节期(24~53 d)、抽穗期(54~66 d)和灌浆期(67~99 d)四个阶段,调整土壤含水量为田间持水量(0.31 g·g⁻¹)的 60%、70%~75%、75%~80%和 70%~75%。

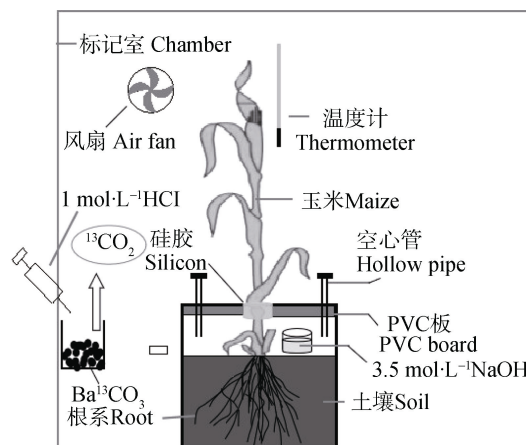
1.2 ¹³CO₂ 脉冲标记

分别在玉米出苗后 29 d(拔节期)、57 d(抽穗期)和 72 d(灌浆期)进行标记。每次选取 3 盆玉米,放入透明塑料制成的密闭标记室进行 ¹³CO₂ 脉冲标记^[15, 18](图 1)。(1)标记前,连接 CO₂ 吸收装置,让标记过程中根际呼吸产生的 ¹³CO₂ 汇聚在盆内;(2)将盆内土壤和隔板间的空气与标记室空气隔开,隔板和 PVC 柱的接合处用凡士林密封,并在玉米基部与隔板的间隙中涂上凡士林密封;(3)检查密闭性:将气球套在一空心管上,在另一端管口用吸耳球鼓气,根据气球膨胀状态判定密封性好坏,然后将空心管管口堵住;(4)将风扇、玉米植株和 ¹³C 丰度为 98% 的 Ba¹³CO₃ 放入标记室内,然后将整个标记室密封;(5)标记于上午 09:00 点开始,用注射器向装有 Ba¹³CO₃ 的烧杯中注入一定量 1 mol·L⁻¹ 的 HCl 溶液(根据 Ba¹³CO₃ 计算 HCl 的用量),然后开始标记。此后每隔一段时间,根据 CO₂ 检测仪的读数确定是否加入盐酸,当 CO₂ 的浓度低于 200×10⁻⁶ 时,向烧杯中注入 HCl,维持 CO₂ 浓度在 360×10⁻⁶ 左右,标记时间持续 7 h。

1.3 玉米根际 CO₂ 释放的取样和测定

在 27 d 的示踪期内(从玉米开始标记到破坏性取样),用中性硅酮胶对隔板和 PVC 盆的接合处进行密封,在茎与隔板的间隙同样涂抹真空绝缘硅树脂(图 1)。每 3 天更换 1 次 3.5 mol·L⁻¹ 的 NaOH 溶液,在 27 d 示踪期内共进行 9 次动态取样,定期用空气泵在土壤与隔板间注入一定量无 CO₂ 的空气,

为玉米地下部提供氧气。以酚酞作指示剂,用稀盐酸滴定 NaOH 溶液中未参加反应的 NaOH,根据稀盐酸和 NaOH 的体积、浓度,计算土壤 CO₂ 释放量。将过量 BaCl₂ 溶液加入到土壤 CO₂ 的 NaOH 溶液中,形成 BaCO₃ 沉淀,于 60 °C 下烘干至恒重,将每次取样的 BaCO₃ 沉淀等比例混合,搅拌混匀形成 BaCO₃ 沉淀悬浊液,用注射器先吸取适量悬浊液,然后吸取 3 mL 2 mol·L⁻¹ 的 H₂SO₄ 溶液,化学反应生成 CO₂,将针头立刻插入到带橡皮塞的 5 mL 真空采气瓶中,待注射器中生成的 CO₂ 达到 7 mL 时,拔出针头,把 CO₂ 注入到采气瓶中,用 DELTA^{plus} XP 型质谱仪测定 CO₂- $\delta^{13}\text{C}$ 值。

图 1 ¹³CO₂ 脉冲标记和土壤 CO₂ 吸收装置Fig. 1 Diagrams of the ¹³C pulse labeling and soil CO₂ absorption devices

1.4 植株与土壤的取样和测定

经过 27 d 的示踪期,分别在玉米出苗后 56、84 和 99 d 时,破坏性取样,从玉米基部剪断植株,将盆中土壤反复过 2 mm 筛,剔除根系、研磨,过 0.15 mm 筛,测定根系的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。取约 20 g 土壤置

于白色板上，剔除残留细根后加入 50 mL 的 $3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 溶液，用于去除土壤中的碳酸盐。充分搅拌并静止 2 d 后，以 $3000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速离心 3 min，将上清液倒掉，重复此过程，洗至上清液中性为止，并将酸化前的上清液倒回烧杯中，在 60°C 条件下烘干，研磨，过 0.15 mm 筛，用 DELTA^{plus} XP 型质谱仪测定 $\text{SOC}\text{-}\delta^{13}\text{C}$ 值。 $\text{SIC}\text{-}\delta^{13}\text{C}$ 值测定：在 70°C ，于真空系统中将土壤样品与 100% 的 H_3PO_4 反应 3 h，用 DELTA^{plus} XP 型质谱仪分析生成 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。碳同位素值采用 PDB(Peedee Belemnite) 标准。

1.5 计算方法

1) 量化地下部的的光合碳输入和两源区分根际 CO_2 释放 (^{13}C 脉冲标记法) [15, 19]。

分别在拔节期、抽穗期和灌浆期，对玉米进行 ^{13}C 脉冲标记后，地上部光合固定的 ^{13}C 转运到地下部各组分，包括根系、根际沉积物和土壤 CO_2 释放，则进入地下各组分的 ^{13}C 量为：

$$^{13}\text{C}_i = C_i \times \frac{(F_i - F_{\text{NL}})}{100} \times 1000 \quad (1)$$

式中， $^{13}\text{C}_i$ 和 C_i 分别为各组分的 ^{13}C 量 ($\text{mg}\cdot\text{pot}^{-1}$) 和 C 量 ($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)， F_i 和 F_{NL} 为各组分标记和不标记的 ^{13}C 百分含量。

各个时期输入到地下各组分的的光合碳量 ($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$):

$$\text{SC}_i = \Delta C_{\text{地上部}} \times \frac{^{13}\text{C}_i}{^{13}\text{C}_{\text{地上部}}} \quad (2)$$

式中， $\Delta C_{\text{地上部}}$ 为各生育时期内地上部的生物碳量变化，以地上部作为参照是考虑到地上部的生物碳量可以准确定量。

通过式 (2) 定量根源呼吸 (C_{Root})，进而土壤 CO_2 (C_{T}) 划分为土壤源 CO_2 (C_{Soil}) 和根源呼吸：

$$C_{\text{T}} = C_{\text{Root}} + C_{\text{Soil}} \quad (3)$$

$$1 = F_{\text{Root}} + F_{\text{Soil}} \quad (4)$$

式中， F_{Root} 和 F_{Soil} 分别为根源呼吸和土壤总碳释放

占根际释放 CO_2 的比值。

2) 根据玉米根碳、SOC 与 SIC 之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 差异 (分别为 -14.1% 、 -3.4% 和 -22.2%)，借助 ^{13}C 三元混合模型，进一步两源划分土壤源 CO_2 (^{13}C 自然丰度结合 ^{13}C 脉冲标记法) [16-17]。

$$F_{\text{Soil}} = F_{\text{SIC}} + F_{\text{SOC}} \quad (5)$$

$$\delta_{\text{CO}_2} = \delta_{\text{Root}} F_{\text{Root}} + \delta_{\text{SOC}} F_{\text{SOC}} + \delta_{\text{SIC}} F_{\text{SIC}} \quad (6)$$

式中， F_{SIC} 和 F_{SOC} 分别为 SIC 源和 SOC 源 CO_2 占根际 CO_2 释放的比值 (未知量)， δ_{CO_2} 、 δ_{Root} 、 δ_{SIC} 和 δ_{SOC} 分别为根际释放 CO_2 、根系、SIC 和 SOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (已知量)。

1.6 数据分析

采用 Excel 2013 软件作图，图数据的表达形式为平均值 \pm 标准误。方差分析采用 SPSS 17.0 软件计算。生物量、根系占植株干重的比值、光合 ^{13}C 分配在不同生育期之间的显著性差异分析比较采用最小显著差异法 (Least Significant Difference, LSD; $P < 0.05$ 水平)。

2 结 果

2.1 不同生育期玉米生物量变化

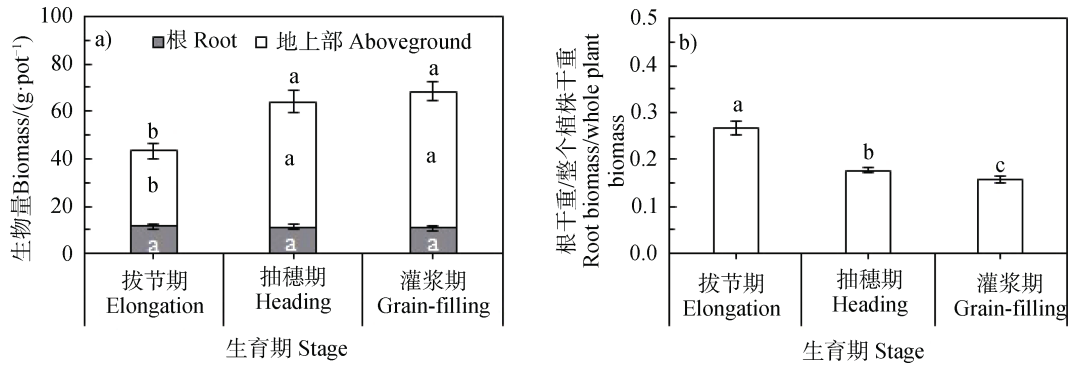
玉米从拔节到灌浆期，根系生物量无显著变化，而地上部和整个植株生物量在抽穗期达到最大，然后维持不变 (图 2a)。从拔节期到灌浆期，根系生物量/整个植株生物量的比值显著递减 (图 2b)。

2.2 玉米生长向地下部输入的光合碳

在玉米关键生育期进行 ^{13}C 脉冲标记，地上部保留了大部分的光合 ^{13}C ，并且随着玉米生长，地上部的 ^{13}C 分配比例显著增加，而输入到地下部的 ^{13}C 分配比例显著递减 (图 3)。从拔节期到灌浆期，玉米地上部输入到地下部各组分 (根系、根际沉积碳和根源呼吸) 的光合碳量呈递减趋势，拔节期的各组分碳输入显著高于后两个生育期，后两个生育期之间无显著差异 (图 4)。

2.3 两源和三源法区分玉米根际 CO_2 释放

基于 $^{13}\text{CO}_2$ 脉冲标记量化的根源呼吸量 (图 4)，玉米根际的 CO_2 可以划分为根源和土壤源 CO_2 。从玉米拔节期到灌浆期，根源呼吸占土壤 CO_2 的比例



注：不同小写字母表示同一组分不同生育期间的显著性差异 ($P < 0.05$)，下同。Note: Different lowercase letters indicate significant difference between growth stages at $P < 0.05$ level, the same below.

图 2 玉米各生育时期的生物量和根系占植株总重的比值

Fig. 2 Biomass and ratio of root/total in plant weight relative to maize growth stage

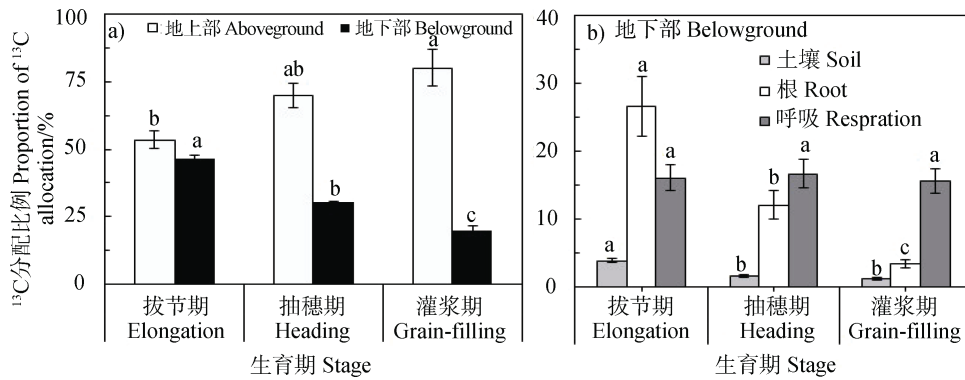


图 3 光合固定 ¹³C 在玉米—土壤系统中各组分中的分配

Fig. 3 Proportion of photosynthesized ¹³C in each component of the maize-soil system

呈降低趋势，即从拔节期的 66.7% 降低至灌浆期的 25.8%，在该生长阶段，根源呼吸累计排放量占土壤 CO₂ 的比例约为 50% (图 5)。

在两源法区分根际 CO₂ 的基础上 (图 5)，借助

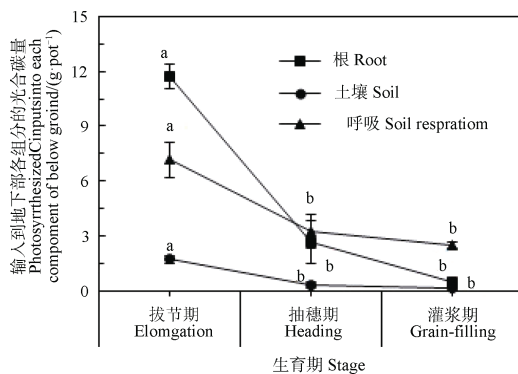
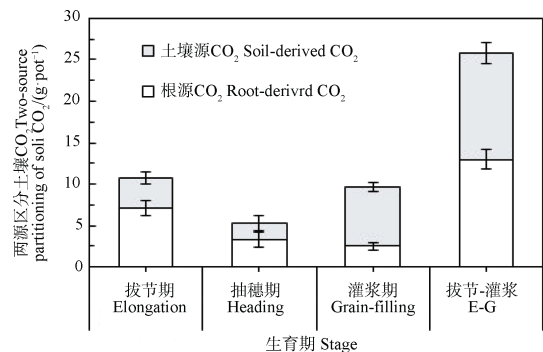


图 4 玉米在不同生育期内输入到地下各组分的碳量

Fig. 4 Photosynthesized C inputs into each component of the maize-soil system at various growth stages of maize

¹³C 三元混合模型 (¹³C 自然丰度法)，将土壤源 CO₂ 进一步拆分为 SOC 和 SIC 源 CO₂ (图 6)，发现 SOC



注：E-G 代表从拔节期到灌浆期，下同。Note: E-G stands for growth stage from elongation to grain-filling, the same below.

图 5 利用 ¹³CO₂ 脉冲标记两源区分玉米根际 CO₂ 释放

Fig. 5 Two-source partitioning of CO₂ emission from maize rhizosphere with the aid of ¹³CO₂ pulse labeling technique

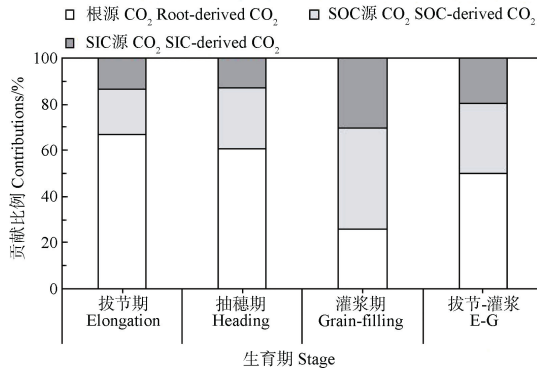


图 6 利用 $^{13}\text{CO}_2$ 脉冲标记结合自然丰度三源区分玉米根际 CO_2 释放

Fig. 6 Three-source partitioning of CO_2 emission from maize rhizosphere with the aid of $^{13}\text{CO}_2$ pulse labeling combined with ^{13}C natural abundance techniques

和 SIC 源 CO_2 占土壤 CO_2 的贡献比例在灌浆期较高 (SIC 和 SOC 源的贡献比例分别为 44.1% 和 30.1%), 在前两个生育期较小 (SIC 和 SOC 源的平均比例分别为 23.1% 和 13.2%)。从拔节期到灌浆期, SOC 和 SIC 源的累计 CO_2 占根际 CO_2 排放的贡献比例约为 30% 和 20%。

2.4 土壤碳收支平衡

从拔节期到生育期末, 玉米生长对土壤转移的光合碳量为 $17.1 \text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$ (根系+根际沉积物), 土壤本身碳 (SOC+SIC) 释放碳量为 $12.9 \text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$, 因此土壤净固定碳量为 $4.2 \text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$ (土壤光合碳输入量减去土壤本身碳释放; 图 7)。

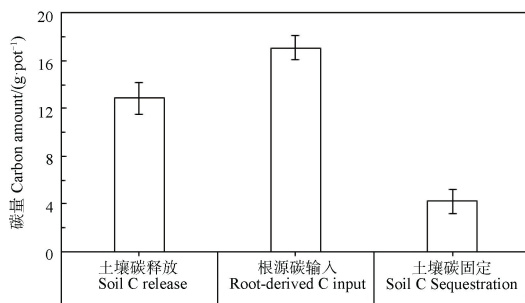


图 7 玉米从拔节到灌浆期间的土壤碳收支平衡

Fig. 7 Soil C budgeting in maize-planted soil from elongation to grain-filling stages

3 讨论

3.1 三源区分土壤 CO_2 的方法比较

区分土壤 CO_2 是量化根源呼吸和土壤本身碳释

放的前提, $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ 同位素可以有效划分 CO_2 的排放来源^[10, 12]。由于单一 $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ 通常仅可以两源区分土壤 CO_2 , 相对于传统的两源法, 三源法区分 CO_2 技术挑战较大, 一直是研究土壤有机质激发效应的难点。通过同位素三源区分土壤 CO_2 组分, 一般通过如下 7 种途径 (表 2): 1) 稳定同位素溯源软件^[20-21], 2) 附加法^[13-14], 3) ^{13}C 源合并和组合法^[22], 4) ^{13}C 和 ^{18}O 自然丰度法^[23], 5) ^{14}C 标记结合 ^{13}C 自然丰度^[11-12, 24], 6) ^{14}C 和 ^{13}C 双标记^[25-26], 以及 7) ^{13}C 标记和自然丰度^[16-17]。根据同位素线性混合模型, n 个同位素, 仅适用于精确区分 $n+1$ 个源的贡献比例^[20], 因此, 采用 ^{13}C 和 ^{14}C 两种 C 同位素 (^{14}C 标记结合 ^{13}C 自然丰度、 ^{14}C 和 ^{13}C 双标记), 可以较为精确三源区分土壤 CO_2 释放来源。在以上区分方法中, 最精准的是 ^{14}C 和 ^{13}C 双标记方法, 它可以克服 ^{13}C 自然丰度方法中同位素分馏效应的干扰, 也不需要特定的 C_3/C_4 植物和土壤条件^[25-26]。然而, ^{14}C 材料有一定辐射危害, 受到高度监管, 仅限于室内实验^[18]。与 ^{14}C 和 ^{13}C 双标记相比, 利用不同 ^{13}C 丰度的材料是一个替代方案, 例如本研究采用 ^{13}C 标记玉米和 ^{13}C 自然丰度方法三源区分的根际土壤 CO_2 ^[16-17]: 首先 ^{13}C 标记玉米量化根源呼吸和土壤源 CO_2 比例^[15], 然后借助 ^{13}C 三元混合模型 (^{13}C 自然丰度玉米), 将土壤源 CO_2 进一步划分为源于 SOC 和 SIC 的贡献比例。这个方法中由于土壤碳 (SOC 和 SIC) 与 ^{13}C 自然丰度根系之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 差异太小, ^{13}C 分馏效应存在一定不确定性^[22]。

3.2 碳酸盐溶解对土壤释放 CO_2 的贡献

通过对全球 23 篇关于 SIC 释放的文献整合分析, 发现 SIC 溶解对土壤总碳 (SIC+SOC) 释放的贡献在 3%~95% 之间, 平均值为 46%, 95% 置信区间分布为 37%~55% (表 3), 与本研究的结果接近, 即在玉米旺盛生长阶段 (从拔节到生育期末), SIC 源 CO_2 占土壤源 CO_2 的比例为 40% (图 6), 这就说明 SIC 溶解对稳定全球碳库和调节 CO_2 浓度方面非常重要^[27], 然而, 以往研究较少考虑 SIC 溶解对 CO_2 排放的贡献, 这将导致 SOC 分解的高估, 影响 SOC 激发效应的定量^[8-9, 28]。

随着我国农业集约化水平不断提高, 铵态氮肥和尿素用量也不断增加, 通过硝化作用产生 H^+ , 影响 CO_2 - HCO_3^- - CaCO_3 的弱酸平衡体系, 属于强酸

表 2 三源区分土壤释放 CO₂ 的方法比较Table 2 Comparison of the methods for partitioning soil CO₂ emission by three source

方法 Method	原理 Principle	优点 Advantage	缺点 Limitation	参考文献 Reference
稳定同位素溯源软件 Stable isotope analysis software	借助同位素溯源软件,量化土壤 CO ₂ 释放源的贡献范围	仅用 CO ₂ 和释放源之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 差异就可以量化 CO ₂ 的贡献范围	不能精确量化各释放源的贡献	[20-21]
¹³ C 和 ¹⁸ O 自然丰度 ¹³ C and ¹⁸ O natural abundance	测定土壤 CO ₂ 中的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 利用 ¹³ C 和 ¹⁸ O 质量平衡方程三源拆分土壤 CO ₂	不需要标记处理; 在基本假设下, 可以三源区分土壤 CO ₂ 的潜在贡献	仅限于 C 和 O 元素一起循环的系统; 同位素分馏效应导致区分的不确定性	[23]
¹⁴ C 标记结合 ¹³ C 自然丰度 ¹⁴ C labeling and ¹³ C natural abundance	将 C ₄ 源与 ¹⁴ C 标记秸秆同时添加到 C ₃ 土壤, 第一步根据土壤 ¹⁴ CO ₂ 活度两源区分 ¹⁴ C 秸秆和 C ₄ +SOC 的碳释放, 第二步借助 ¹³ C 三元模型进一步区分 C ₄ 与 SOC 的碳释放	可以精确区分土壤 CO ₂ 的贡献; ¹⁴ C 区分具有很高的测定灵敏度	¹⁴ C 材料有辐射危害, 受到高度监管, 实验废料的环境处理成本可能很高; ¹³ C 自然丰度法存在同位素分馏问题, 仅适用 C ₃ 与 C ₄ 源的组合	[11-12, 24]
¹⁴ C 和 ¹³ C 双标记 Double labeling of ¹⁴ C and ¹³ C	将 ¹³ C 标记秸秆与 ¹⁴ C 标记葡萄糖添加土壤, 第一步根据土壤 ¹⁴ CO ₂ 活度量化葡萄糖的释放, 第二步根据碳释放源和 CO ₂ 之间 $\delta^{13}\text{C}$ 差异进一步区分 SOC 和秸秆的释放	可以精确三源区分土壤释放的 CO ₂ ; ¹⁴ C 和 ¹³ C 标记材料可以克服 ¹³ C 分馏效应的区分干扰	需要 ¹³ C 和 ¹⁴ C 标记均匀材料; ¹⁴ C 材料有辐射危害, 受到高度监管, 实验废料的环境处理成本可能很高	[25-26]
¹³ C 标记和自然丰度 ¹³ C labeling and ¹³ C natural abundance	利用 ¹³ C 标记和自然丰度材料 (仅 ¹³ C 丰度不同, 其他化学组分相同) 添加土壤, 借助 ¹³ C 三元模型区分土壤 CO ₂ 释放	可以精确三源区分土壤 CO ₂ 释放的贡献	需要 ¹³ C 标记材料; 由于 SOC 与自然丰度材料之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 差异太小, 造成分馏效应对区分影响太大	[16-17]
C ₃ 和 C ₄ 源合并组合法 Combination of C ₃ and C ₄ sources in different treatments	对相近 $\delta^{13}\text{C}$ 值的 C ₃ /C ₄ 释放源进行合并和组合, 借助 ¹³ C 二元模型逐步拆分 CO ₂ 的贡献比例	在特定 C ₃ /C ₄ 的组合系统中, 可以三源区分土壤释放 CO ₂ 的贡献比例	要求有两对相近 $\delta^{13}\text{C}$ 值的不同碳源, 这两个相近 $\delta^{13}\text{C}$ 值源很难释放相同的 ¹³ C 信号; 同位素分馏效应	[22]
附加法 Additive approach	假设三源系统中 (外源碳添加下) 与两源系统中 (对照) 的 SOC 或 SIC 释放量相同	不需要碳同位素标记处理; 在特定假设下可以三源区分土壤释放 CO ₂ 的贡献	由于假设外源碳添加对土壤本身 SOC 或 SIC 释放无影响, 导致区分的不确定性; 同位素分馏效应	[13-14]

表 3 碳酸盐溶解对土壤 CO_2 释放的贡献比较Table 3 Contribution of carbonate dissolution to soil CO_2 emission

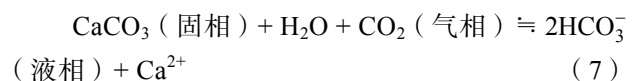
地点 Location	SIC/STC*		土壤类型 Soil type	方法 Method	参考文献 Reference
	土壤 Soil/%	CO_2 /%			
以色列 Israel	86	30	—	^{13}C 自然丰度法	[13]
斯洛文尼亚 Slovenia	—	14	薄层土	^{13}C 自然丰度法	[21]
美国 USA	96	13	沙漠土壤	^{13}C 自然丰度法	[29]
法国 France	74	27	黑色石灰岩土	^{13}C 自然丰度法	[30]
芬兰 Finland	—	53~70	泥炭土	^{13}C 自然丰度法	[31]
意大利 Italy	—	15~40	薄层土	^{13}C 自然丰度法	[32]
加拿大 Canada	28~34	62~74	灰棕淋溶土	^{13}C 自然丰度法	[33]
突尼斯 Tunisia	67	24~47	石灰性始成土	^{13}C 自然丰度法	[34]
澳大利亚 Australia	85	95	红色岩层土	^{13}C 自然丰度法	[35]
中国 China	45	31~85	壤土	^{13}C 自然丰度法	[36]
中国 China	38	24~38	壤土	^{13}C 自然丰度法	[37]
中国 China	50	54	壤土	土壤 HgCl_2 灭菌法	[38]
中国 China	42	27	壤土	土壤干烧法	[39]
斯洛文尼亚 Slovenia	—	17	黑色石灰薄层土	^{13}C 自然丰度法	[40]
日本 Japan	—	77	火山灰土	^{13}C 示踪法	[41]
日本 Japan	—	66	老成土	^{13}C 示踪法	[41]
比利时 Belgium	—	60	淋溶土	模型拟合	[42]
奥地利 Austria	—	2.7	锥形土和石灰薄层土	^{13}C 自然丰度法	[43]
中国 China	36	31	强发育湿润淋溶土	^{13}C 自然丰度法	[44]
法国 France	84	20~60	石灰性冲积土	^{13}C 自然丰度法	[45]
澳大利亚 Australia	13	52	苏打土	^{13}C 自然丰度法	[46]
中国 China	46	33	—	土壤 120°C 灭菌法	[47]
中国 China	46	35	—	土壤 120°C 灭菌法	[48]
中国 China	42	56	盐土	土壤 120°C 灭菌法	[49]
中国 China	50	58	碱土	土壤 120°C 灭菌法	[49]
平均值 Average value		46			
95%置信区间		37~55			
95% confidence intervals					

注：STC 代表土壤总碳。Note: STC represents total soil carbon.

与碳酸盐的直接反应，加剧碳酸盐的溶解^[37-39, 50]。因此，今后有必要量化氮肥投入对华北农田 SIC 溶解的影响，提高区域石灰性农田土壤碳预算的准确性。

石灰性土壤中存在 CO_2 (气相) - HCO_3^- (液相) - CaCO_3 (固相) 的三相平衡，SOC 分解、根源呼吸与 SIC 溶解/沉淀平衡之间存在耦合关系，体现

在 SOC 分解和根源呼吸产生的 CO_2 ，既可以驱动碳酸盐的溶解与释放，也可以与钙、镁离子结合形成次生性碳酸盐^[3-4, 7]：



本研究中, 根源呼吸占根际土壤 CO_2 的贡献比例为 50%。玉米生长增加土壤中 CO_2 分压, 可能加剧 SIC 的溶解与释放。此外, 根系生长也可以分泌质子和有机酸, 促进 SIC 的溶解^[13, 51]。因此, 玉米根际效应对 SIC 溶解的影响是不可忽视的。

3.3 玉米生长对土壤碳平衡的影响

尽管作物生长可以产生正根际效应, 促进 SOC 分解和 SIC 溶解, 但引发正根际效应的植物来源的有机碳(根际沉积碳和根系)并未被微生物完全分解释放到大气中, 残留部分可以补充因根际效应引起的 SOC 和 SIC 损失^[52], 在本研究中土壤碳收支平衡表现为碳汇。在石灰性土壤, 作物生长不仅可以贡献 SOC 的截存^[15, 53-54], 还可以贡献 SIC 的次生形成^[55], 但由于土壤 SIC 背景太大和 ^{13}C 检测限(约为 10^{-7} mol) 较高, 本研究在 SIC 中没有检测到标记的 ^{13}C 信号^[15], 今后可以考虑用检测限更加敏感的 ^{14}C (约为 10^{-13} mol) 来解决^[55-56]。

4 结论

对于石灰性土壤, 从玉米拔节期到生育期末, 根源呼吸和土壤总碳(SIC+SOC)释放对根际土壤 CO_2 释放的贡献比值为 1:1, SIC 溶解对土壤源释放 CO_2 的贡献比例约为 40%, 说明 SIC 溶解对于土壤碳库稳定和大气 CO_2 浓度调节具有双重作用。若忽视 SIC 溶解对土壤 CO_2 释放的贡献, 有可能导致对 SOC 分解的高估, 进而影响土壤碳平衡的评估。从拔节期到生育期末, 玉米生长对地下部的光合碳输入(根系+根际沉积物)超过土壤总碳(SIC+SOC)释放的损失, 土壤表现为碳汇。

参考文献 (References)

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304 (5677): 1623—1627.
- [2] Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15 (5): 330—332. [潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究[J]. *科技通报*, 1999, 15 (5): 330—332.]
- [3] Bughio M A, Wang P L, Meng F Q, et al. Neof ormation of pedogenic carbonate and conservation of lithogenic carbonate by farming practices and their contribution to carbon sequestration in soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2017, 180 (4): 454—463.
- [4] Zamanian K, Zarebanadkouki M, Kuzyakov Y. Nitrogen fertilization raises CO_2 efflux from inorganic carbon: A global assessment[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24 (7): 2810—2817.
- [5] Liu S S, Zhou L H, Li H, et al. Shrub encroachment decreases soil inorganic carbon stocks in Mongolian grasslands[J]. *Journal of Ecology*, 2020, 108 (2): 678—686.
- [6] Wang X J, Xu M G, Wang J P, et al. Fertilization enhancing carbon sequestration as carbonate in arid cropland: Assessments of long-term experiments in Northern China[J]. *Plant and Soil*, 2014, 380 (1/2): 89—100.
- [7] Dong X L, Singh B P, Li G T, et al. Biochar increased field soil inorganic carbon content five years after application[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 186: 36—41.
- [8] Chen L, Liu L, Qin S, et al. Regulation of priming effect by soil organic matter stability over a broad geographic scale[J]. *Nature Communications*, 2019, 10 (1): 5112.
- [9] Ahmad W, Dijkstra F A, Dalal R C, et al. Plant roots are more important than temperature in modulating carbon release in a limed acidic soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71 (4): 727—739.
- [10] Kuzyakov Y. Review: Factors affecting rhizosphere priming effects[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2002, 165 (4): 382—396.
- [11] Tian J, Pausch J, Yu G R, et al. Aggregate size and glucose level affect priming sources: A three-source-partitioning study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 97: 199—210.
- [12] Cui J, Ge T, Kuzyakov Y, et al. Interactions between biochar and litter priming: A three-source ^{14}C and $\delta^{13}\text{C}$ partitioning study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 104: 49—58.
- [13] Tamir G, Shenker M, Heller H, et al. Can soil carbonate dissolution lead to overestimation of soil respiration?[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75 (4): 1414—1422.
- [14] Fang Y Y, Singh B P, Farrell M, et al. Balanced nutrient stoichiometry of organic amendments enhances carbon priming in a poorly structured sodic subsoil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 145: 107800.
- [15] Sun Z A, Wu S X, Zhang Y W, et al. Effects of nitrogen fertilization on pot-grown wheat photosynthate partitioning within intensively farmed soil determined by ^{13}C pulse-labeling[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2019, 182 (6): 896—907.
- [16] Whitman T, Lehmann J. A dual-isotope approach to allow conclusive partitioning between three sources[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8708. <https://doi.org/10.1038/ncomms9708>.

- [17] Kerré B , Hernandez-Soriano M C , Smolders E. Partitioning of carbon sources among functional pools to investigate short-term priming effects of biochar in soil: A ^{13}C study[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 547: 30—38.
- [18] Sun Z , Chen Q , Han X , et al. Allocation of photosynthesized carbon in an intensively farmed winter wheat–soil system as revealed by $^{14}\text{CO}_2$ pulse labelling[J]. *Scientific Reports*, 8(1): 3160. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21547-y>.
- [19] Hafner S , Unteregelsbacher S , Seeber E , et al. Effect of grazing on carbon stocks and assimilate partitioning in a Tibetan montane pasture revealed by $^{13}\text{CO}_2$ pulse labeling[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18 (2): 528—538.
- [20] Phillips D L , Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources[J]. *Oecologia*, 2003, 136 (2): 261—269.
- [21] Plestenjak G , Eler K , Vodnik D , et al. Sources of soil CO_2 in calcareous grassland with woody plant encroachment[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12 (9): 1327—1338.
- [22] Kuzyakov Y , Bol R. Three sources of CO_2 efflux from soil partitioned by ^{13}C natural abundance in an incubation study[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2005, 19 (11): 1417—1423.
- [23] Lin G H , Ehleringer J R , Rygielwicz P T , et al. Elevated CO_2 and temperature impacts on different components of soil CO_2 efflux in Douglas-fir terracosms[J]. *Global Change Biology*, 1999, 5 (2): 157—168.
- [24] Blagodatskaya E , Yuyukina T , Blagodatsky S , et al. Three-source-partitioning of microbial biomass and of CO_2 efflux from soil to evaluate mechanisms of priming effects[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43 (4): 778—786.
- [25] Shahbaz M , Kumar A , Kuzyakov Y , et al. Priming effects induced by glucose and decaying plant residues on SOM decomposition : A three-source $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ partitioning study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 121: 138—146.
- [26] 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 and Biochemistry*, 2018, 126: 179—190.
- [27] Zamanian K , Kuzyakov Y. Contribution of soil inorganic carbon to atmospheric CO_2 : More important than previously thought[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25 (1): e1-e3. <https://doi.org/10.1111/gcb.14463>.
- [28] Meng F Q , Dungait J A J , Xu X L , et al. Coupled incorporation of maize(*Zea mays* L.) straw with nitrogen fertilizer increased soil organic carbon in Fluvic Cambisol[J]. *Geoderma*, 2017, 304: 19—27.
- [29] Stevenson B A , Verburg P S J. Effluxed CO_2 - ^{13}C from sterilized and unsterilized treatments of a calcareous soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38 (7): 1727—1733.
- [30] Bertrand I , Delfosse O , Mary B. Carbon and nitrogen mineralization in acidic , limed and calcareous agricultural soils: Apparent and actual effects[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39 (1): 276—288.
- [31] Biasi C , Lind S E , Pekkarinen N M , et al. Direct experimental evidence for the contribution of lime to CO_2 release from managed peat soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40 (10): 2660—2669.
- [32] Inglima 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_2 efflux[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15 (5): 1289—1301.
- [33] Ramnarine R , Wagner-Riddle C , Dunfield K E , et al. Contributions of carbonates to soil CO_2 emissions[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, 92 (4): 599—607.
- [34] Chevallier T , Cournac L , Hamdi S , et al. Temperature dependence of CO_2 emissions rates and isotopic signature from a calcareous soil[J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, 135: 132—139.
- [35] Lardner T , George S , Tibbett M. Interacting controls on innate sources of CO_2 efflux from a calcareous arid zone soil under experimental acidification and wetting[J]. *Journal of Arid Environments*, 2015, 122: 117—123.
- [36] Dong Y J. Carbon stock and stabilization in *Lou* soil[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Agricultural and Forestry University, 2013.[董燕婕. 壤土剖面不同碳库储量及释放特性研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013.]
- [37] Yu W J. Effects of application of nitrogen fertilizer on carbon emissions and their sources from calcareous soils[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Agricultural and Forestry University, 2018.[于伟家. 施用氮肥对石灰性土壤碳释放及其来源研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2018.]
- [38] Meng Y , Cai M , Shi Q Y , et al. Effects of nitrogen fertilizer application on carbon dioxide emission from calcareous soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46 (4): 948—954.[孟延, 蔡苗, 师倩云, 等. 氮肥用量对石灰性土壤二氧化碳释放的影响[J]. *土壤通报*, 2015, 46 (4): 948—954.]
- [39] Meng Y , Li X S , Hao P Q , et al. Effect of different N fertilizer applications on CO_2 emissions from *Lou* soil in Central Shaanxi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36 (9): 1901—1907.[孟延, 李雪松, 郝平琦, 等. 施用不同种类氮肥对陕西关中地区壤土碳释放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36 (9): 1901—1907.]
- [40] Čater M , Ogrinc N. Soil respiration rates and in natural beech forest (*Fagus sylvatica* L.) in relation to stand

- structure[J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2011, 47 (2): 221—237.
- [41] Dumale Jr W, Miyazaki T, Hirai K, et al. SOC turnover and lime-CO₂ evolution during liming of an acid andisol and ultisol[J]. *Open Journal of Soil Science*, 2011, 1(2): 49—53.
- [42] Buysse P, Goffin S, Carnol M, et al. Short-term temperature impact on soil heterotrophic respiration in limed agricultural soil samples[J]. *Biogeochemistry*, 2013, 112: 441—455.
- [43] Schindlbacher A, Borken W, Djukic I, et al. Contribution of carbonate weathering to the CO₂ efflux from temperate forest soils[J]. *Biogeochemistry*, 2015, 124: 273—290.
- [44] Zhang C H, Sun Y Y, Tang G Y, et al. Contributions of carbonates to carbon dioxide release from a calcareous soil in response to experimental warming[J]. *Soil Science*, 2019, 184 (2): 52—59.
- [45] Cardinael R, Chevallier T, Guenet B, et al. Organic carbon decomposition rates with depth and contribution of inorganic carbon to CO₂ emissions under a Mediterranean agroforestry system[J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71 (5): 909—923.
- [46] Fang Y Y, Singh B P, Collins D, et al. Nutrient stoichiometry and labile carbon content of organic amendments control microbial biomass and carbon-use efficiency in a poorly structured sodic-subsoil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2020, 56 (2): 219—233.
- [47] Ma J, Li Y M, Liu R. The abiotic contribution to total CO₂ flux for soils in arid zone[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2015, 12 (14): 11217—11244.
- [48] Ma J, Liu R, Li Y. Abiotic contribution to total soil CO₂ flux across a broad range of land-cover types in a desert region[J]. *Journal of Arid Land*, 2017, 9 (1): 13—26.
- [49] Wang Z Y, Xie J B, Wang Y G, et al. Biotic and abiotic contribution to diurnal soil CO₂ fluxes from saline/alkaline soils[J]. *Scientific Reports*, 10: 5396. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62209-2>.
- [50] Raza S, Miao N, Wang P Z, et al. Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26 (6): 3738—3751.
- [51] Tamir G, Shenker M, Heller H, et al. Dissolution and re-crystallization processes of active calcium carbonate in soil developed on tufa[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76 (5): 1606—1613.
- [52] Sun Y, Xu X L, Kuzyakov Y. Mechanisms of rhizosphere priming effects and their ecological significance[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38 (1): 62—75. [孙悦, 徐兴良, Kuzyakov Y. 根际激发效应的发生机制及其生态重要性[J]. *植物生态学报*, 2014, 38 (1): 62—75.]
- [53] An T T, Schaeffer S, Li S Y, et al. Carbon fluxes from plants to soil and dynamics of microbial immobilization under plastic film mulching and fertilizer application using ¹³C pulse-labeling[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80: 53—61.
- [54] Ge T D, Liu C, Yuan H Z, et al. Tracking the photosynthesized carbon input into soil organic carbon pools in a rice soil fertilized with nitrogen[J]. *Plant and Soil*, 2015, 392 (1/2): 17—25.
- [55] Gocke M, Pustovoytov K, Kuzyakov Y. Pedogenic carbonate recrystallization assessed by isotopic labeling: A comparison of ¹³C and ¹⁴C tracers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, 174 (5): 809—817.
- [56] Kuzyakov Y, Domanski G. Carbon input by plants into the soil. Review[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2000, 163 (4): 421—431.

(责任编辑: 卢 萍)