

DOI: 10.11766/trxb201911210581

孙昭安, 赵诣, 朱彪, 陈清, 曹慧, 何敏毅, 孟凡乔. 玉米生长对石灰性土壤无机碳与有机碳释放的根际效应[J]. 土壤学报, 2021, 58 (4): 998–1007.

SUN Zhaoan, ZHAO Yi, ZHU Biao, CHEN Qing, CAO Hui<sup>1</sup>, HE Minyi, MENG Fanqiao. Rhizosphere Effects of Maize on Inorganic and Organic Carbon Release in Calcareous Soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (4): 998–1007.

## 玉米生长对石灰性土壤无机碳与有机碳释放的根际效应\*

孙昭安<sup>1, 2</sup>, 赵诣<sup>2</sup>, 朱彪<sup>3</sup>, 陈清<sup>2</sup>, 曹慧<sup>1</sup>, 何敏毅<sup>2</sup>, 孟凡乔<sup>2†</sup>

(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. 北京大学生态研究中心, 城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 利用 IsoSource 模型三源区分玉米根际土壤 CO<sub>2</sub> 释放来源 (根源呼吸、土壤无机碳与有机碳释放), 研究玉米根际效应对石灰性土壤无机碳与有机碳释放的影响。在玉米拔节期 (24~53 d)、抽穗期 (54~66 d) 和灌浆期 (67~99 d) 末分别破坏性取样, 测定根系、土壤有机碳和无机碳的 <sup>13</sup>C 含量等指标; 自拔节期开始至生育期末, 每隔 3d 测定种植玉米与不种玉米的土壤呼吸 CO<sub>2</sub> 量以及 <sup>13</sup>C-CO<sub>2</sub> 含量。结果表明, 利用 IsoSource 软件三源区分土壤 CO<sub>2</sub> 的排放, 土壤 CO<sub>2</sub> 排放累计量以根源呼吸贡献为主 (48.0%), 其次为土壤有机碳 (31.2%), 最小为土壤无机碳 (20.8%)。玉米对土壤无机碳与有机碳释放均表现为正根际效应, 从拔节期至生育期末, 种植玉米土壤有机碳与无机碳的释放分别较不种植土壤多 65% 和 156%。土壤无机碳对于稳定全球碳库和调节大气 CO<sub>2</sub> 浓度具有重要意义, 若忽视石灰性土壤无机碳对土壤 CO<sub>2</sub> 释放的贡献, 有可能高估土壤有机碳的分解。

**关键词:** 根际效应; 三源区分土壤 CO<sub>2</sub>; 土壤有机碳分解; 土壤无机碳溶解; 根源呼吸

**中图分类号:** S147; S154      **文献标志码:** A

## Rhizosphere Effects of Maize on Inorganic and Organic Carbon Release in Calcareous Soils

SUN Zhaoan<sup>1, 2</sup>, ZHAO Yi<sup>2</sup>, ZHU Biao<sup>3</sup>, CHEN Qing<sup>2</sup>, CAO Hui<sup>1</sup>, HE Minyi<sup>2</sup>, MENG Fanqiao<sup>2†</sup>

(1. Key Laboratory of Biochemistry 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. Institute of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, and Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** [Objective] In calcareous soil, CO<sub>2</sub> in rhizosphere soil comes from at least three sources, i.e., respiration of roots, decomposition of soil organic C (SOC) and dissolution of soil inorganic C (SIC). Owing to technical limitations in partitioning

\* 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项目 (2019BS12) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 31370527, 0870414) and 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, 男, 山东济宁人, 博士, 讲师, 主要研究方向为农田土壤碳氮循环。E-mail: sun.zhaoan@163.com

收稿日期: 2019-11-21; 收到修改稿日期: 2020-05-20; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-07-28

CO<sub>2</sub> by source, how rhizosphere effects affect SOC decomposition and SIC dissolution is still an issue not yet clarified. Therefore, an in-lab pot experiment using calcareous soil collected from a farmland of North China to grow maize in an attempt to investigate rhizosphere effects of summer maize plants on release of CO<sub>2</sub> from SOC and SIC, using the IsoSource model to partition CO<sub>2</sub> in the rhizosphere by source. 【Method】At the end of the elongation (24-53 days), heading (54-66 days) and grain-filling (67-99 days) stages of the summer maize, destructive sampling of maize rhizospheres was carried out separately for analysis of content of <sup>13</sup>C from root, SOC and SIC, separately. During the period from the beginning of the elongation stage to the end of the maize growth stage, soil respiration and <sup>13</sup>C content in the soil with or without maize planted was monitored at a three-day interval with the aid of the IsoSource software. 【Result】Results show that to the total soil CO<sub>2</sub> emission, root respiration contributed 48.0%, SOC did 31.2% and SIC did 20.8%. During the period from the elongation stage to the end of the summer maize season, CO<sub>2</sub> emission from SOC and from SIC in the pot with maize planted was 65% and 156% higher than their respective ones in the pot without maize planted. 【Conclusion】This experiment indicates that SIC plays a significant role in stabilizing global C pool and regulating atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. If the contribution of SIC to soil CO<sub>2</sub> emission in calcareous soils is ignored, the amount of CO<sub>2</sub> from SOC decomposition may be overestimated, which will inevitably affect quantification of the priming effects of SOC. This study will help reduce uncertainties in of soil C budgeting for farmlands of calcareous soil in North China.

**Key words:** Rhizosphere effects; Three-source partitioning of soil CO<sub>2</sub>; Decomposition of soil organic carbon; Dissolution of soil inorganic carbon; Root-derived respiration

在石灰性土壤上,以往研究认为土壤无机碳(soil inorganic carbon, SIC)比较稳定,土壤 CO<sub>2</sub> 释放仅来自土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)分解,较少考虑无机碳酸盐溶解对土壤 CO<sub>2</sub> 释放的贡献,尤其随着氮肥的高投入施用,导致酸化作用,加剧 SIC 的溶解<sup>[1-3]</sup>。孟延等<sup>[1]</sup>通过土壤培养试验发现,在整个培养期内的 SIC 释放比例高达 1/2 以上,并且施用氮肥加剧土壤无机碳的释放。在华北平原农田石灰性土壤上, SIC 含量较高(5~10 C g·kg<sup>-1</sup>),几乎与 SOC 含量接近,对于土壤碳释放有重大影响<sup>[4-5]</sup>,而此前对该地区 SIC 分解研究较少,有必要分析该区域 SIC 溶解对土壤 CO<sub>2</sub> 释放的贡献。

考虑到土壤 SOC 库太大,短期内 SOC 矿化量相对土壤原有 SOC 含量而言太小,不能通过直接测定 SOC 含量的变化来研究 SOC 的短期周转,而是利用测定土壤 CO<sub>2</sub> 排放量来量化 SOC 的矿化程度<sup>[6]</sup>。然而,大部分土壤覆盖植被,其根源呼吸(根系呼吸和根系沉积物的分解)对土壤 CO<sub>2</sub> 排放也有一定的贡献,因此种植植物的土壤 CO<sub>2</sub> 排放包括根源呼吸和土壤微生物呼吸<sup>[7]</sup>。在富含碳酸盐的石灰性土壤上,土壤本身碳的释放不仅包括 SOC 矿化,还包括无机碳酸盐溶解和分解,导致有植物土壤的 CO<sub>2</sub> 释放源达到三个,即根源呼吸、SOC 分解和 SIC 溶解和分解。在石灰性土壤上,区分与量化根际土壤 CO<sub>2</sub>

组分已成为全球变化生态研究的难点,目前还缺乏系统研究<sup>[8-9]</sup>。这是由于根据同位素线性混合模型, n 个同位素,仅适用于区分与量化 n+1 个源的贡献比例<sup>[10]</sup>。对于源头数量超过 n+1 个的研究情形, IsoSource 模型可以计算潜在的贡献比例<sup>[11]</sup>。如 Plestenjak 等<sup>[12]</sup>基于大气 CO<sub>2</sub>、SOC 与 SIC 源之间的 δ<sup>13</sup>C 值差异,利用 IsoSource 模型三源区分石灰性土壤 CO<sub>2</sub> 的排放,定量 SOC、SIC 和大气 CO<sub>2</sub> 来源的贡献比例。

本研究以华北地区农田石灰性土壤 CO<sub>2</sub> 释放为研究对象,采用玉米盆栽试验,利用根系碳、土壤有机碳与无机碳之间的 δ<sup>13</sup>C 差异,基于 <sup>13</sup>C 同位素质量守恒原理,采用 IsoSource 模型分析 <sup>13</sup>C 自然丰度、三源区分土壤 CO<sub>2</sub> 的组分特征,进而量化根源呼吸、SOC 分解和 SIC 溶解和分解对土壤 CO<sub>2</sub> 释放的贡献率,明确玉米根际效应对石灰性土壤无机碳与有机碳释放的影响,以期为华北平原农田土壤温室气体减排与土壤肥力提升提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 夏玉米种植

试验于中国农业大学西校区温室进行。所选 PVC 盆大小为直径 20 cm×高度 35 cm。供试土壤取

自中国农业大学曲周试验站农田表层土壤(0~20 cm), SOC 和 SIC 的  $\delta^{13}\text{C}$  值分别为  $-22.2\%$  和  $-3.4\%$ 。供试土壤为始成土, 具有粉质壤土结构(砂粒 62%, 粉粒 28%, 黏粒 10%), 相关土壤参数为: SOC 和 SIC 含量分别为  $7.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $7.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 全氮为  $0.66 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 土壤 pH 为 7.7 (水土比为 2.5:1), 速效钾为  $118 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效磷为  $15.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤风干后, 磨碎、挑根、再过 5 mm 筛。每盆装风干土 9.5 kg, 盆内土层深度约 27 cm。两粒玉米种子 (*Zea mays* L., 纪元 1 号) 直接播于盆内, 风干土按 N 0.55、P 0.19、K 0.31  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  土壤比例预拌肥料(相当于耕层的田间肥料施用量), 作为底肥一次性施入。玉米种子播种前放在清水中浸泡 12 h, 然后再浅埋入土壤中。幼苗生长至三叶期时, 每盆留 1 株。用称重法控制土壤水分, 根据玉米不同生育期对水分的需求特点, 分别在苗期(播种后 0~24 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( $0.31 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 的 60%、70%~75%、75%~80% 和 70%~75%。在夏玉米生长期间, 根据病虫害情况, 喷洒必要的农药。

### 1.2 土壤 $\text{CO}_2$ 释放的取样和测定

从玉米播种后第 24 天开始, 用中性硅酮胶对隔板和 PVC 盆的接合处密封, 此外, 在茎与隔板的间隙涂上真空绝缘硅树脂(图 1)。每 3 d 更换 1 次  $3.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 NaOH 溶液, 定期采用空气泵在土壤与隔板间注入一定量无  $\text{CO}_2$  的空气(图 2), 为玉米地下部提供氧气。同时收集 3 个未种植物土壤的  $\text{CO}_2$  释放。以酚酞作指示剂, 用稀盐酸滴定土壤  $\text{CO}_2$  的 NaOH 溶液中未反应的 NaOH, 根据稀盐酸和 NaOH 的体积、浓度, 计算土壤  $\text{CO}_2$  释放量。将过量  $\text{BaCl}_2$  溶液加入到土壤  $\text{CO}_2$  的 NaOH 溶液中, 形成  $\text{BaCO}_3$  沉淀, 将  $\text{BaCO}_3$  沉淀  $60^\circ\text{C}$  下烘干至恒重, 用 DELTA<sup>plus</sup> XP 型质谱仪分析种植和未种植玉米土壤  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值。

### 1.3 根系与土壤的取样和测定

分别在玉米出苗后第 56、84 和 99 天时, 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, 挑出根系, 进行烘干和研磨, 过 0.15 mm 筛, 用作根系  $\delta^{13}\text{C}$  值的测定。取约 20 g 土壤置于白色板上, 挑去残留细根, 然后, 在土壤中加入  $3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 HCl 溶液 50 mL, 用于去除土壤中的碳酸盐。充分搅拌均匀并静止 2 d 后, 放入离心机中以  $3000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  的转

速离心 3 min, 将上清液倒掉, 重复此过程, 用 pH 试纸检测上清液的 pH, 洗至中性为止, 并将酸化前的上清液倒回烧杯中, 在  $60^\circ\text{C}$  条件下烘干、研磨、过 0.15 mm 筛, 用 DELTA<sup>plus</sup> XP 型质谱仪测定 SOC- $\delta^{13}\text{C}$  值。SIC- $\delta^{13}\text{C}$  值测定: 在  $70^\circ\text{C}$ , 通过在真空系统中将土壤样品与 100% 的  $\text{H}_3\text{PO}_4$  反应 3 h, 生成  $\text{CO}_2$ - $\delta^{13}\text{C}$  值用 DELTA<sup>plus</sup> XP 型质谱仪分析。碳同位素采用 PDB (Peedee Belemnite) 标准。

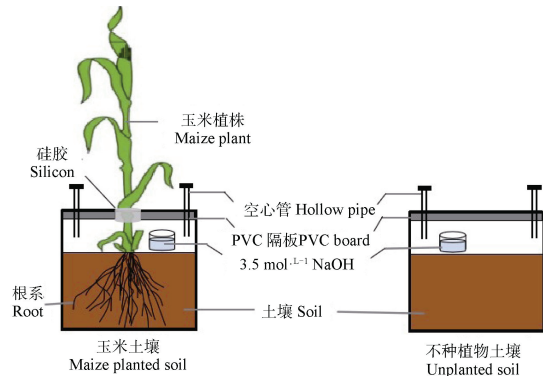


图 1 种植与未种植物土壤的  $\text{CO}_2$  吸收装置示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of  $\text{CO}_2$  absorption device in planted and unplanted soils

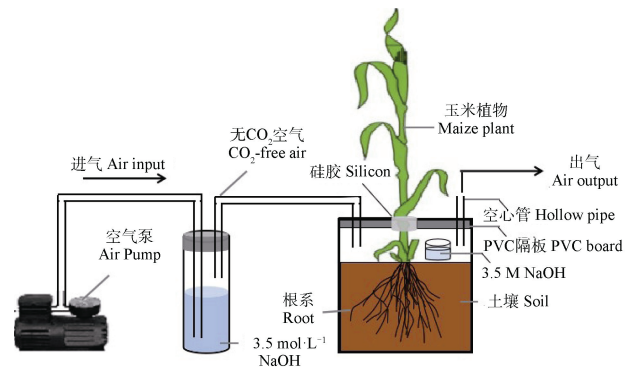


图 2 注入无  $\text{CO}_2$  空气装置示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of the  $\text{CO}_2$ -free air injection device

### 1.4 数据分析

(1) 无植物条件下两源区分  $\text{CO}_2$  组分。石灰性土壤  $\text{CO}_2$  排放主要来源于 SOC 分解和 SIC 溶解, 本研究 SOC- $\delta^{13}\text{C}$  值偏负 ( $-22.2\%$ ), SIC- $\delta^{13}\text{C}$  值偏正 ( $-3.4\%$ ), 基于同位素平衡原理, 利用线性方程两源区分  $\text{CO}_2$  组分:

$$1 = f_{\text{SIC}} + f_{\text{SOC}} \quad (1)$$

$$\delta_t = \delta_{\text{SIC}} f_{\text{SIC}} + \delta_{\text{SOC}} f_{\text{SOC}} \quad (2)$$

式中,  $f_{\text{SOC}}$  和  $f_{\text{SIC}}$  分别代表 SOC 和 SIC 释放碳量占土壤  $\text{CO}_2$  组分的比值 (未知量);  $\delta t$ 、 $\delta_{\text{SOC}}$  和  $\delta_{\text{SIC}}$  分别代表土壤  $\text{CO}_2$ 、SOC 和 SIC 的  $\delta^{13}\text{C}$  值 (已知量)。

(2) 区分玉米土壤  $\text{CO}_2$  排放的三个来源。在石灰性土壤上, 玉米土壤的  $\text{CO}_2$  释放来源于 SOC 分解、SIC 溶解和根源呼吸。根据根系碳、SOC 与 SIC 之间的  $\delta^{13}\text{C}$  差异 (分别为  $-14.1\text{‰}$ 、 $-3.4\text{‰}$  和  $-22.2\text{‰}$ ), 对上面的方程组进一步扩展至三种来源的土壤  $\text{CO}_2$  排放<sup>[12]</sup>:

$$1 = f_{\text{SIC}} + f_{\text{SOC}} + f_{\text{Root}} \quad (3)$$

$$\delta_t = \delta_{\text{SIC}} f_{\text{SIC}} + \delta_{\text{SOC}} f_{\text{SOC}} + \delta_{\text{Root}} f_{\text{Root}} \quad (4)$$

式中,  $f_{\text{SOC}}$ 、 $f_{\text{SIC}}$  和  $f_{\text{Root}}$  分别代表来源 SOC、SIC 和根源呼吸的  $\text{CO}_2$  量占土壤  $\text{CO}_2$  组分的比值 (未知量);  $\delta t$ 、 $\delta_{\text{SOC}}$ 、 $\delta_{\text{SIC}}$  和  $\delta_{\text{Root}}$  分别代表土壤  $\text{CO}_2$ 、SOC、SIC 和根系的  $\delta^{13}\text{C}$  值 (已知量)。这个由两个方程和三个未知数组成的不确定方程系统, 通过 IsoSource 软件计算求解, 三源区分土壤  $\text{CO}_2$  组分<sup>[11]</sup>。

(3) 根际效应。利用式 (1) 和式 (2) 区分和量化玉米根际 SOC 释放  $\text{CO}_2$ -C 量, 同时减去未种植植物的 SOC 释放的  $\text{CO}_2$ -C 量, 即可得出净增加的  $\text{CO}_2$ -C 量<sup>[13-14]</sup>:

$$PE_{\text{SOC}}(\%) = \frac{(C_{\text{SOC}}^{\text{Planted}} - C_{\text{SOC}}^{\text{Unplanted}})}{C_{\text{SOC}}^{\text{Unplanted}}} \times 100 \quad (5)$$

式中,  $PE_{\text{SOC}}(\%)$  代表 SOC 的根际效应,  $C_{\text{SOC}}^{\text{Planted}}$

代表玉米根际土壤中 SOC 释放的  $\text{CO}_2$ -C 量,  $C_{\text{SOC}}^{\text{Unplanted}}$  为未种植植物对照土壤中 SOC 释放的  $\text{CO}_2$ -C 量。

根源呼吸增加土壤  $\text{CO}_2$  的分压、以及根系分泌质子和有机酸, 可能加剧碳酸盐的溶解:

$$PE_{\text{SIC}}(\%) = \frac{(C_{\text{SIC}}^{\text{Planted}} - C_{\text{SIC}}^{\text{Unplanted}})}{C_{\text{SIC}}^{\text{Unplanted}}} \times 100 \quad (6)$$

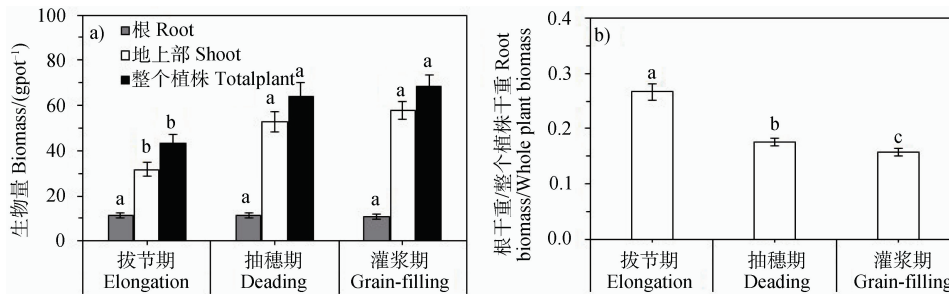
式中,  $PE_{\text{SIC}}(\%)$  代表对 SIC 溶解的根际效应,  $C_{\text{SIC}}^{\text{Planted}}$  为代表玉米根际土壤中 SIC 释放的  $\text{CO}_2$ -C 量,  $C_{\text{SIC}}^{\text{Unplanted}}$  为未种植植物对照土壤中 SIC 释放的  $\text{CO}_2$ -C 量。

采用 Excel 2013 软件作图。方差分析采用 SPSS 17.0 软件计算。同一组分不同生育期的生物量、根系占植株干重的比值、土壤  $\text{CO}_2$  的累计排放量和根际效应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 不同生育期夏玉米的生物量

随着玉米的生长, 从拔节期至抽穗期, 地上部与整个植株的生物量干重呈显著增加趋势, 然后保持稳定 (图 3a), 根系干重在拔节期达到最大, 然后保持不变。夏玉米的根系干重占植株总重的比值随生育期的增长而显著降低, 由拔节期的 0.27 降低至灌浆期的 0.16, 降低幅度达 41% (图 3b)。



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

图 3 玉米各生育期的生物量和根系占植株总重的比值 (平均值  $\pm$  标准差,  $n=3$ )

Fig. 3 Biomass and root/total plant in weight (mean  $\pm$  SD,  $n=3$ ) relative to growing stage of maize

### 2.2 土壤 $\text{CO}_2$ 的排放速率与 $\delta^{13}\text{C}$ 值

从玉米播种后第 24 天开始, 直至生育期末 (播

种后第 99 天), 每隔 3 d 测定一次土壤  $\text{CO}_2$  排放。

对于未种植植物的土壤而言, 土壤  $\text{CO}_2$  的排放速率

自始至终保持在  $0.08 \sim 0.11 \text{ C g} \cdot \text{pot}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ , 变化范围较小; 而对于种植玉米的土壤而言, 土壤  $\text{CO}_2$  的排放速率由播种后第 24 天的  $0.30 \text{ C g} \cdot \text{pot}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ , 增加至第 44 天的  $0.44 \text{ C g} \cdot \text{pot}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ , 第 44~56 天在  $0.40 \sim 0.44 \text{ C g} \cdot \text{pot}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  内波动, 从第 60~99 天, 土壤  $\text{CO}_2$  排放速率持续下降, 下降幅度为 46% (图 4)。

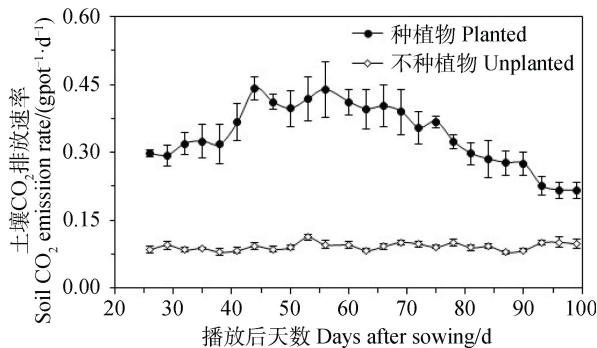


图 4 土壤  $\text{CO}_2$  排放速率的动态变化 (平均值  $\pm$  标准差,  $n=3$ )

Fig. 4 Dynamics of soil  $\text{CO}_2$  emission rate (mean  $\pm$  SD,  $n=3$ )

### 2.3 三源区分土壤 $\text{CO}_2$ 组分

从玉米播种后第 24~99 天期间, 种植和未种植玉米土壤  $\text{CO}_2$ - $\delta^{13}\text{C}$  值的变化范围分别在  $-15.3 \sim -13.7$  和  $-17.7 \sim -16.5$  之间 (图 5a)。玉米土壤  $\text{CO}_2$  排放分别来源于根源呼吸、SOC 分解和 SIC 溶解释放。IsoSource 软件计算表明, 土壤  $\text{CO}_2$  组分来源以根源呼吸贡献为主, 平均贡献率为 43.5%~50.3%, 其次来源于 SOC 分解 (26.7%~38.1%), 最小源于 SIC 溶解 (18.4%~25.1%; 图 5b)。

土壤  $\text{CO}_2$  各组分的累计释放在玉米拔节期最大, 灌浆期最小 (表 1)。在玉米各生育期, 根源呼吸的累计量对土壤  $\text{CO}_2$  排放的贡献率最大 (46.7%~

48.4%), 其次为来源于 SOC 的分解 (29.9%~33.7%), 最小源于 SIC 的释放贡献 (19.6%~21.8%)。自拔节期至生育期末, 根源呼吸、SOC 分解与 SIC 溶解的累计碳释放量对土壤  $\text{CO}_2$  的贡献率分别为 48.0%, 31.2% 和 20.8% (表 1)。

### 2.4 玉米的根际效应

在种植玉米的情况下, 从土壤  $\text{CO}_2$  中减去根源呼吸, 即得到土壤原有碳 (SIC+SOC) 释放的  $\text{CO}_2$ -C 量, 将其与未种植植物土壤  $\text{CO}_2$ -C 量作差减, 便可计算得到玉米的根际效应。自拔节至生育期末, 根际效应对土壤碳的释放呈正效应, 导致土壤多释放  $6.3 \text{ C g} \cdot \text{pot}^{-1}$  (图 6)。

自拔节至收获, 玉米根际正激发效应增加土壤本身碳释放程度近 90%, 相当于土壤碳释放当量为  $0.66 \text{ C g} \cdot \text{pot}^{-1}$ , 根际效应对土壤总碳释放的促进程度在拔节期最大 (140.2%), 灌浆期最小 (61.0%; 图 7a 和图 7b)。玉米根际效应对石灰性土壤碳释放的影响, 可以进一步区分为 SOC 和 SIC 释放的影响, 从拔节期至生育期末, 对 SOC 与 SIC 的激发碳量分别为  $3.1 \text{ C g} \cdot \text{pot}^{-1}$  和  $3.2 \text{ C g} \cdot \text{pot}^{-1}$  (图 7c 和图 7e), 对应的 SOC 和 SIC 的正激发效应程度为 65% 和 156% (图 7d 和图 7f)。

## 3 讨论

### 3.1 SIC 溶解和分解对土壤 $\text{CO}_2$ 释放的贡献

在富含碳酸盐的石灰性土壤上, 以往研究认为 SIC 比较稳定, 土壤  $\text{CO}_2$  释放仅来自 SOC 分解, 较少考虑碳酸盐溶解对土壤  $\text{CO}_2$  释放的贡献<sup>[1-2]</sup>。然而, 关于 SIC 溶解对土壤  $\text{CO}_2$  释放贡献的影响, 近 10 年来国内外已有一些相关研究, 室内培养或者田

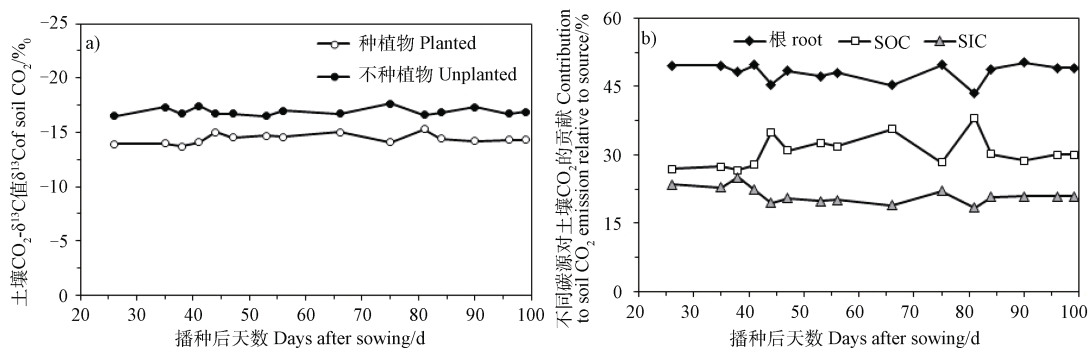


图 5 土壤  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值和不同碳源的平均贡献率

Fig. 5  $\delta^{13}\text{C}$  of soil  $\text{CO}_2$  and average contributions to soil  $\text{CO}_2$  emission relative to C source

表 1 不同来源土壤 CO<sub>2</sub> 的累计排放量和贡献比例 (平均值±标准差, n=3)

Table 1 Cumulative emission of CO<sub>2</sub> and contribution rate (mean±SD, n=3) to soil CO<sub>2</sub> relative to source

生育期 Growth stages	不同来源土壤 CO <sub>2</sub> 的排放量 Soil CO <sub>2</sub> emissions from different sources / (g·pot <sup>-1</sup> )				贡献比例 Contribution rate / %		
	总计 Total	根系 Root	SOC	SIC	根系 Root	SOC	SIC
	拔节期 Elongation	10.7±0.31a <sup>2)</sup>	5.2±0.15a	3.2±0.08a	2.3±0.08a	48.3±0.04a	29.9±0.14c
抽穗期 Heading	4.9±0.43c	2.3±0.20c	1.7±0.15b	1.0±0.08c	46.7±0.06b	33.7±0.08a	19.6±0.02c
灌浆期 Grain-filling	9.7±0.56b	4.7±0.27b	3.0±0.14a	2.0±0.12b	48.4±0.07a	31.3±0.65b	20.8±0.05b
拔节~灌浆 E-G <sup>1)</sup>	25.4±1.09	12.2±0.53	7.9±0.34	5.3±0.23	48.0±0.02	31.2±0.20	21.0±0.06

注: 1) E-G 代表从拔节期到灌浆期, 下同; 2) 同列不同小写字母表示不同生育期间的差异显著 (P<0.05)。Note: 1) E-G represents from elongation to grain-filling stages, the same below. 2) Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between growth stages at P<0.05 level.

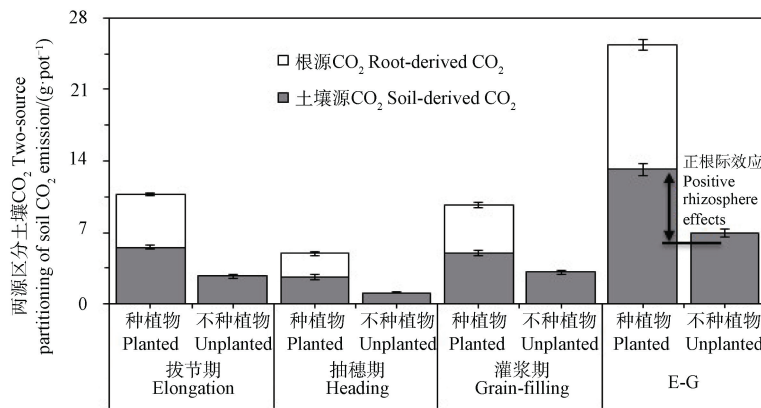
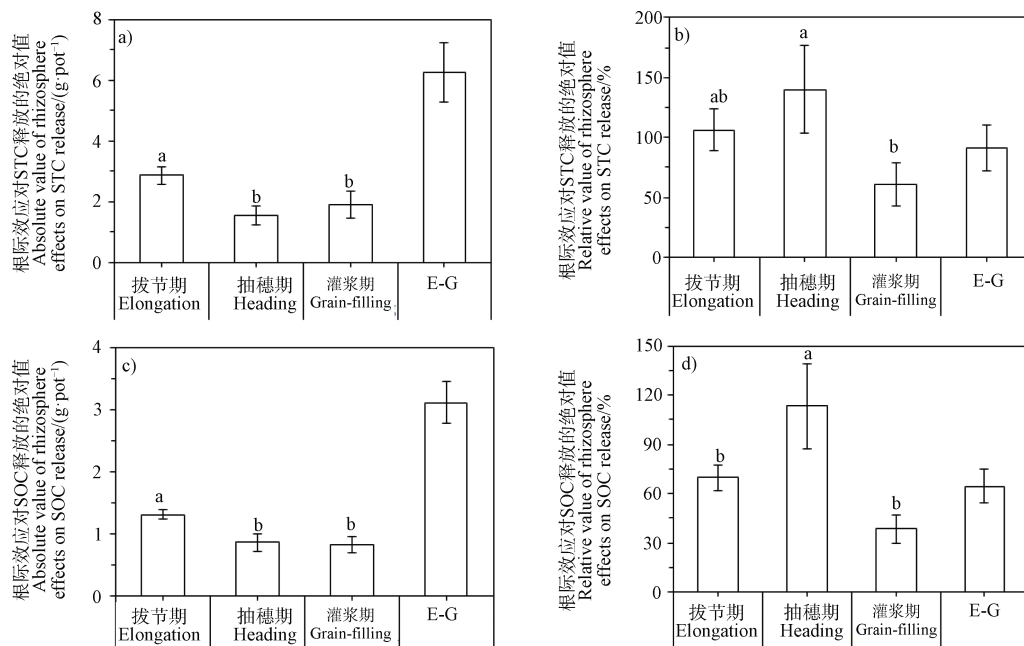
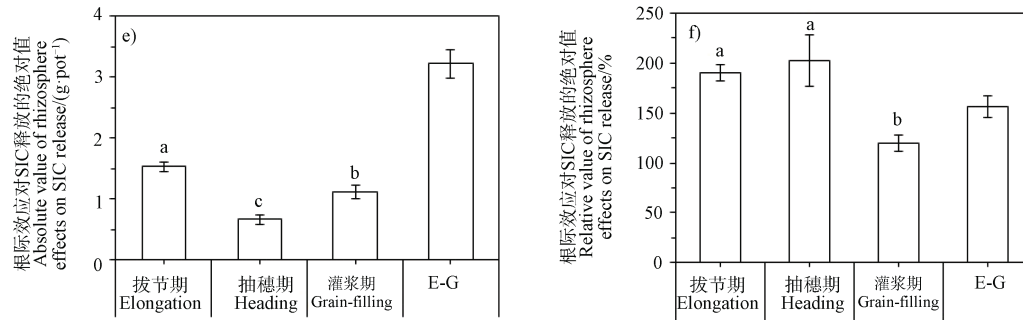


图 6 玉米各生育期的根际呼吸与土壤碳释放的 CO<sub>2</sub> 量 (平均值 ± 标准差, n=3)

Fig. 6 Cumulative amounts (mean ± SD, n=3) of root and soil-derived CO<sub>2</sub> relative to growth stage of maize





注: STC 代表土壤总碳,下同。Note: STC represents total soil carbon, the same below.

图 7 玉米根际效应对 STC、SOC 和 SIC 释放绝对值和相对值的影响 (平均值  $\pm$  标准差,  $n=3$ )

Fig. 7 Absolute and relative values of maize rhizosphere effects (mean  $\pm$  SD,  $n=3$ ) on release of STC, SOC and SIC

间原位条件下的研究发现, 约有 13%~85% 的  $\text{CO}_2$  来自碳酸盐的溶解<sup>[15-18]</sup>, 平均贡献比例为 43%, 与本研究结果接近: 自玉米拔节至生育期末, 土壤源  $\text{CO}_2$  释放有 40% 来自 SIC (表 2)。因此, SIC 在稳定全球碳库和调节  $\text{CO}_2$  浓度方面, 与 SOC 同样具有重要作用。若忽视碳酸盐溶解对土壤  $\text{CO}_2$  释放的贡献, 则导致不能准确量化 SOC 的矿化。

根据同位素质量守恒模型, 用两个方程去解三个碳源的贡献率 (未知数) 非常困难。本研究借助 IsoSource 软件, 可以计算土壤  $\text{CO}_2$  中源自三个碳源的相对贡献率的可能范围及其平均值<sup>[11-12]</sup>。然而, IsoSource 软件未考虑稳定同位素值及分馏因子等的变异和不确定性, 模型的容差参数 (tolerance) 的调整会带来贡献范围较大变化<sup>[11]</sup>。本研究采用是不

表 2 碳酸盐土壤中 SIC 释放对土壤  $\text{CO}_2$  贡献的比较

Table 2 Comparison of  $\text{CO}_2$  release from SIC to soil  $\text{CO}_2$  emission in carbonate soils

地点 Location	土壤 Soil (SIC/STC*) /%	$\text{CO}_2$ (SIC/STC) /%	土壤类型 Soil type	时间长度 Duration /d	方法 Method	参考文献 References
美国	96	13	沙漠土壤	14	$^{13}\text{C}$ 自然丰度法	[15]
法国	74	27	黑色石灰岩土	91	$^{13}\text{C}$ 自然丰度法	[19]
以色列	86	30	—	56	$^{13}\text{C}$ 自然丰度法	[18]
加拿大	28~34	62~74	灰棕淋溶土	14	$^{13}\text{C}$ 自然丰度法	[17]
突尼斯	67	24~47	石灰性始成土	28	$^{13}\text{C}$ 自然丰度法	[20]
澳大利亚	85	95	红色岩层土	11	$^{13}\text{C}$ 自然丰度法	[21]
芬兰	—	53~70	泥炭土	0.25	$^{13}\text{C}$ 自然丰度法	[22]
意大利	—	15~40	薄层土	6	$^{13}\text{C}$ 自然丰度法	[23]
斯洛文尼亚	—	14	薄层土	400	$^{13}\text{C}$ 自然丰度法	[12]
中国	38	24~38	壤土	10	$^{13}\text{C}$ 自然丰度法	[24]
中国	45	31~85	壤土	32	$^{13}\text{C}$ 自然丰度法	[16]
中国	50	54	壤土	46	土壤 $\text{HgCl}_2$ 灭菌法	[25]
中国	42	27	壤土	46	土壤干烧法	[26]
平均值		43				
95%置信区间		27~57				
本研究		40				

同碳源对土壤 CO<sub>2</sub> 的平均贡献率。从拆分来看, SIC 释放占据土壤本身碳 (SIC+SOC) 释放的比例为 40%, 无机碳释放贡献较预想的要大, 但与关于 SIC 释放对土壤 CO<sub>2</sub> 贡献的 13 篇文章整合结果近似: 无机碳释放贡献的 95% 置信区间为 27%~57% (表 2)。基于利用 n 个同位素种类, 可精确计算 n+1 个源的贡献原理, 今后研究可以考虑利用 <sup>14</sup>C 连续标记植物与 <sup>13</sup>C 自然丰度结合来精确三源区分根际土壤 CO<sub>2</sub> 组分的贡献 (根源呼吸、SIC 与 SOC 释放): 首先量化土壤 CO<sub>2</sub>-<sup>14</sup>CO<sub>2</sub>, 为根源呼吸释放; 其次定量土壤 CO<sub>2</sub>-<sup>13</sup>CO<sub>2</sub>, 源于 SOC 和 SIC 的释放, 根据 <sup>13</sup>C 同位素质量守恒, 可以计算 SOC 和 SIC 的贡献率。此外, 氮肥对石灰性土壤无机碳释放的影响很大, 较以前认为的更为重要, 例如 Zamanian 等<sup>[3]</sup> 发现施肥提高了土壤碳酸盐溶解与释放 CO<sub>2</sub>, 每施 1 kg N 导致 0.21 kg C 的 SIC 释放。然而, 在华北地区大量氮肥施用引起的土壤酸化是否会导致土壤无机碳的释放? 目前尚少见报道。所以, 今后有必要深入研究该区域氮肥对土壤无机碳释放的影响。

### 3.2 根源呼吸对土壤 CO<sub>2</sub> 释放的贡献

在石灰性土壤上, 本研究首次利用 <sup>13</sup>C 自然丰度法, 通过 IsoSource 软件区分三源根际土壤 CO<sub>2</sub> 组分, 发现在整个玉米旺盛生长期 (拔节期~生育期末), 源于根源呼吸比例约为 50% (表 1)。这与何敏毅<sup>[27]</sup> 在盆栽玉米上利用 <sup>13</sup>C 脉冲标记法定量结果近似, 根源呼吸占土壤 CO<sub>2</sub> 的比例为 52%。Kuzakov 和 Cheng<sup>[28]</sup> 也发现利用 <sup>14</sup>C 脉冲标记法与 <sup>13</sup>C 自然丰度法量化根源呼吸碳量, 得到的结果是一致的。在玉米盆栽条件下, 杨兰芳和蔡祖聪<sup>[29]</sup> 以及李建敏等<sup>[30]</sup> 通过非同位素法 (分根箱法和根去除法) 发现, 从拔节期至生育期末, 玉米根源呼吸占土壤 CO<sub>2</sub> 的比值在 65% 以上, 远高于本研究的结果。这可能是由于 SOC 释放量相对要少导致的: 以上两个试验用土量较少, 是本研究的 1/2~2/3, 以及未考虑根际效应的影响。因此, 不同试验条件和区分方法导致测定的根源呼吸/土壤 CO<sub>2</sub> 的比值差异较大, 不利于各研究结果之间的比较和整合分析。例如, 在田间条件下, 蔡艳等<sup>[31]</sup> 利用根去除法测得的玉米全生育根源呼吸对土壤 CO<sub>2</sub> 的平均贡献率为 46%, 与本研究接近, 而 Kumar 等<sup>[32]</sup> 在田间条件下, 利用 <sup>13</sup>C 自然丰度法区分玉米土壤 CO<sub>2</sub> 组分, 发现源于根源呼吸的比例为 25%, 是本研究结果的 1/2。

### 3.3 根际效应对土壤碳释放的影响

玉米的正根际效应促进了土壤原有碳的释放, 在玉米整个旺盛生长期, 增加程度约为 90%。这略高于何敏毅<sup>[27]</sup> 在盆栽玉米上利用 <sup>13</sup>C 脉冲标记法的结果 (80%), 可能由于何敏毅<sup>[27]</sup> 未考虑根际效应对 SIC 溶解的促进作用。在本研究中, 玉米的产生正根际效应促进 SOC 的分解, 是由于玉米根际沉积物可以为根际微生物提供大量活性碳源, 增加微生物数量和活性, 促进微生物胞外酶的分泌和活性<sup>[14]</sup>。在玉米不同生育时期, 根际效应程度是不同的, 可能是由于各生育期的根际沉积物的组成和分泌量不同, 导致对根际微生物的影响产生差异<sup>[27, 33]</sup>。

本研究还发现, 根际效应不仅影响 SOC 的分解, 也加剧 SIC 的溶解, 这是由于石灰性土壤中存在着 CO<sub>2</sub>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-CaCO<sub>3</sub> 平衡 (碳酸途径), 主要受土壤中 CO<sub>2</sub> 分压、pH 和水分控制<sup>[3, 5, 9, 34]</sup>:



根源呼吸增加土壤中 CO<sub>2</sub> 分压。在本研究, 玉米土壤 CO<sub>2</sub> 释放来源于根源呼吸比例约为 50%, 导致式 (7) 平衡向右进行, 促进碳酸盐的溶解<sup>[3, 5, 9]</sup>。此外, 根系也可能分泌质子和有机酸<sup>[35]</sup>, 加剧碳酸盐的溶解。说明在根际环境中, 石灰性土壤无机碳释放对调节 CO<sub>2</sub> 浓度方面是不可忽视的, 在本研究, 根际效应对 SIC 溶解和分解的影响高达 156%。

## 4 结 论

在整个玉米旺盛生长期 (自拔节期至生育期末), 土壤 CO<sub>2</sub> 释放来源于根系、土壤有机碳与无机碳的比值分别为 5:3:2。因此, 在富含碳酸盐的石灰性土壤上, 若忽视 SIC 溶解对土壤 CO<sub>2</sub> 释放的贡献, 则导致对 SOC 矿化量的高估。玉米自拔节至收获, 由于正根际效应, 使得土壤原有碳的释放增加了近 90%, 相当于土壤碳释放当量为 0.66 C g·kg<sup>-1</sup>。由于根际效应导致 SOC 与 SIC 的净增加释放量相当, 进一步说明根际效应对石灰性土壤无机碳释放的影响不可忽视。

### 参考文献 (References)

- [1] 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.]
- [ 2 ] Li X S, Sajjad Raza, Liu Z J, et al. Effects of application of nitrogen fertilizer and nitrification inhibitor on carbon dioxide emissions from calcareous soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36 (8): 1658-1663. [李雪松, Sajjad Raza, 刘占军, 等. 氮肥及硝化抑制剂配合施用对石灰性土壤二氧化碳释放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36 (8): 1658-1663.]
- [ 3 ] Zamanian K, Zarebanadkouki M, Kuzyakov Y. Nitrogen fertilization raises CO<sub>2</sub> efflux from inorganic carbon: A global assessment[J]. Global Change Biology, 2018, 24 (7): 2810-2817
- [ 4 ] Shi X X, Zhao Y, Zhang L, et al. Effects of different agricultural practices on soil carbon pool in North China Plain[J]. Environmental Science, 2017, 38(1): 301-308. [石小霞, 赵诣, 张琳, 等. 华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响[J]. 环境科学, 2017, 38 (1): 301-308.]
- [ 5 ] Bughio M A, Wang P, Meng F, 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
- [ 6 ] Meng F, Dungait J A J, Xu X, et al. Coupled incorporation of maize (*Zea mays* L.) straw with nitrogen fertilizer increased soil organic carbon in Fluvisol Cambisol[J]. Geoderma, 2017, 304: 19-27
- [ 7 ] Huo C, Luo Y, Cheng W. Rhizosphere priming effect: A meta-analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 111: 78-84
- [ 8 ] Meng F, Dungait J A J, Zhang X, et al. Investigation of photosynthate-C allocation 27 days after <sup>13</sup>C-pulse labeling of *Zea mays* L. at different growth stages[J]. Plant and Soil, 2013, 373 (1/2): 755-764
- [ 9 ] Sun Z, Wu S, Zhang Y, et al. Effects of nitrogen fertilization on pot-grown wheat photosynthate partitioning within intensively farmed soil determined by <sup>13</sup>C pulse-labeling[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2019, 182 (6): 896-907
- [ 10 ] Werth M, Kuzyakov Y. Three-source partitioning of CO<sub>2</sub> efflux from maize field soil by <sup>13</sup>C natural abundance[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2010, 172 (4): 487-499
- [ 11 ] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources[J]. Oecologia, 2003, 136 (2): 261-269
- [ 12 ] Plestenjak G, Eler K, Vodnik D, et al. Sources of soil CO<sub>2</sub> in calcareous grassland with woody plant encroachment[J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12(9): 1327-1338
- [ 13 ] Zhu B, Gutknecht J L M, Herman D J, et al. Rhizosphere priming effects on soil carbon and nitrogen mineralization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 76: 183-192
- [ 14 ] Sun Y, Xun 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.]
- [ 15 ] Stevenson B A, Verburg P S J. Effluxed CO<sub>2</sub>-<sup>13</sup>C from sterilized and unsterilized treatments of a calcareous soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38 (7): 1727-1733
- [ 16 ] Dong Y J. Carbon stock and stabilization in Lou soil[D]. Yangling, Shannxi: Northwest Agricultural and Forestry University, 2013. [董燕婕. 壤土剖面不同碳库贮量及释放特性研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013.]
- [ 17 ] Ramnarine R, Wagner-Riddle C, Dunfield K E, et al. Contributions of carbonates to soil CO<sub>2</sub> emissions[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012, 92(4): 599-607
- [ 18 ] 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
- [ 19 ] Bertrand I, Delfosse O, Mary B. Carbon and nitrogen mineralization in acidic, limed and calcareous agricultural soils: Apparent and actual effects. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39 (1): 276-288
- [ 20 ] Chevallier T, Cournac L, Hamdi S, et al. Temperature dependence of CO<sub>2</sub> emissions rates and isotopic signature from a calcareous soil. Journal of Arid Environments, 2016, 135: 132-139
- [ 21 ] Lardner T, George S, Tibbett M. Interacting controls on innate sources of CO<sub>2</sub> efflux from a calcareous arid zone soil under experimental acidification and wetting[J]. Journal of Arid Environments, 2015, 122: 117-123
- [ 22 ] Biasi C, Lind S E, Pekkarinen N M, et al. Direct experimental evidence for the contribution of lime to CO<sub>2</sub> release from managed peat soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40 (10): 2660-2669
- [ 23 ] 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<sub>2</sub> efflux[J]. Global Change Biology, 2009, 15 (5): 1289-1301
- [ 24 ] Yu W J. Effects of application of nitrogen fertilizer on carbon emissions and their sources from calcareous soils[D]. Yangling, Shannxi: 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.]

- [ 25 ] Meng Y, Cai M, Shi Q Y, et al. Effect of ammonium sulfate application on CO<sub>2</sub> emissions from four different soils in Loess plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34 ( 7 ): 1414–1421. [孟延, 蔡苗, 师倩云, 等. 施用硫酸铵对黄土高原地区不同类型土壤 CO<sub>2</sub> 释放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34( 7 ): 1414–1421.]
- [ 26 ] Meng Y, Li X S, Hao P Q, et al. Effect of different N fertilizer applications on CO<sub>2</sub> 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.]
- [ 27 ] He M Y. Estimating photosynthesized carbon distribution and inputs into belowground in a maize soil following <sup>13</sup>C pulse-labeling[D]. Beijing : China Agricultural University, 2007. [何敏毅. 用 <sup>13</sup>C 脉冲标记法研究玉米光合碳分配及其向地下的输入[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.]
- [ 28 ] Kuzyakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33 ( 14 ): 1915–1925
- [ 29 ] Yang L F, Cai Z C. Soil respiration during maize growth period affected by N application rates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 ( 1 ): 9–15. [杨兰芳, 蔡祖聪. 玉米生长中的土壤呼吸及其受氮肥施用的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42 ( 1 ): 9–15.]
- [ 30 ] Li J M, Ding W X, Cai Z C. Effects of nitrogen fertilization on soil respiration during maize growth season[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21 ( 8 ): 2025–2030. [李建敏, 丁维新, 蔡祖聪. 氮肥对玉米生长季土壤呼吸的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21 ( 8 ): 2025–2030.]
- [ 31 ] Cai Y, Ding W X, Cai Z C. Soil respiration in a maize-soil ecosystem and contribution of rhizosphere respiration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 ( 12 ): 4273–4280. [蔡艳, 丁维新, 蔡祖聪. 土壤-玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献[J]. *生态学报*, 2006, 26 ( 12 ): 4273–4280.]
- [ 32 ] Kumar A, Kuzyakov Y, Pausch J. Maize rhizosphere priming: Field estimates using <sup>13</sup>C natural abundance[J]. *Plant and Soil*, 2016, 409 ( 1/2 ): 87–97.
- [ 33 ] Derrien D, Marol C, Balesdent J. The dynamics of neutral sugars in the rhizosphere of wheat. An approach by <sup>13</sup>C pulse-labelling and GC/C/IRMS[J]. *Plant and Soil*, 2004, 267 ( 1 ): 243–253.
- [ 34 ] Zhang Y, Zhang L, Wu W L, et al. Impact of land use and fertilization measures on soil C stock in farming-grazing interlacing zone of Inner Mongolia, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 ( 4 ): 930–941. [张煜, 张琳, 吴文良, 等. 内蒙农牧交错带地区土地利用方式和施肥对土壤碳库的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53 ( 4 ): 930–941.]
- [ 35 ] Zhou L L. Proton and organic acids exudated by faba bean, soybean and maize and their significance in interspecific facilitation on phosphorus uptake by intercropping[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. [周丽莉. 蚕豆、大豆、玉米根系质子和有机酸分泌差异及其在间作磷营养中的意义[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.]

( 责任编辑: 檀满枝 )