

## 小麦和玉米生长对土壤碳输入和输出的贡献

孙昭安, 朱彪, 张译文, 李梦雨, 孟凡乔

### 引用本文:

孙昭安, 朱彪, 张译文, 等. 小麦和玉米生长对土壤碳输入和输出的贡献[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(10): 2257–2265.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0295>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 生物炭施用对小麦和玉米幼苗根际和非根际土壤中Pb、As和Cd生物有效性的影响研究

黄黎粤, 丁竹红, 胡忻, 陈逸珺

*农业环境科学学报*. 2019, 38(2): 348–355 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0463>

### 玉米根系、根鞘性状与镉吸收的品种差异研究

于子昊, 李胜宝, 赵晓玲, 李明锐, 李博, 何永美, 陈建军, 湛方栋

*农业环境科学学报*. 2021, 40(4): 747–755 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0733>

### 转cry1Ab和epsps基因玉米C0030.3.5对土壤古菌丰度和多样性的影响

王晶, 王蕊, 朱珂, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林, 李刚, 田秀平

*农业环境科学学报*. 2017, 36(10): 2048–2057 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0446>

### 田间老化生物质炭对潮土氨挥发的影响

廖霞, 刘德燕, 陈增明, 何铁虎, 牛玉慧, 丁维新

*农业环境科学学报*. 2021, 40(6): 1326–1336 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1414>

### 生物炭对水稻根际微域土壤Cd生物有效性及水稻Cd含量的影响

张丽, 侯萌瑶, 安毅, 李玉浸, 林大松, 朱丹妹, 秦莉, 霍莉莉

*农业环境科学学报*. 2017, 36(4): 665–671 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1363>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孙昭安, 朱彪, 张译文, 等. 小麦和玉米生长对土壤碳输入和输出的贡献[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(10): 2257–2265.

SUN Z A, ZHU B, ZHANG Y W, et al. Contributions of wheat and maize growth to soil carbon input and output[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(10): 2257–2265.



开放科学 OSID

# 小麦和玉米生长对土壤碳输入和输出的贡献

孙昭安<sup>1,2</sup>, 朱彪<sup>3</sup>, 张译文<sup>4</sup>, 李梦雨<sup>1</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; 4. 山东省招远市农业农村局农业技术推广中心, 山东 招远 265499)

**摘要:**在农业生态系统中, 区分土壤外源碳输入和内源碳输出是量化土壤碳平衡的前提。借助碳同位素方法, 可以精确区分不同碳源对土壤有机碳(SOC)和二氧化碳(CO<sub>2</sub>)的贡献, 一方面定量根际沉积碳对土壤碳的输入, 另一方面还可以量化根系生长对SOC分解的根际激发效应, 进而提高土壤碳平衡评估的精确度。本文整合了关于小麦和玉米<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C示踪实验的文献, 对作物-土壤系统光合碳分配、向地下部碳输入量、根际土壤CO<sub>2</sub>区分以及根际激发效应进行分析, 最终明确了小麦和玉米生长对土壤碳输入和输出的贡献。在作物-土壤系统中, 小麦光合碳分配到地上部、根系、土壤和土壤释放CO<sub>2</sub>的平均比例分别为73.1%、12.5%、4.6%、9.8%, 玉米分别为68.4%、16.0%、4.6%和11.1%。小麦和玉米通过根系和根际沉积碳对土壤碳输入量均值分别为1 058 kg·hm<sup>-2</sup>和1 025 kg·hm<sup>-2</sup>, 其中根际沉积碳占地下输入的贡献均值分别为0.45和0.38。小麦和玉米根源呼吸占根际土壤CO<sub>2</sub>释放的贡献值均达到50%以上, 分别为51.3%和56.7%。小麦和玉米生长促进SOC的分解, 根际激发效应平均值分别为172%和15%, 若采用传统根去除法来区分土壤呼吸, 根际激发效应则会被忽略, 这可能导致根源呼吸的高估。小麦和玉米生长过程中释放的净根际沉积碳占地下部净碳输入(根系+根际沉积物)比例分别为27%和22%, 如果利用传统洗根法, 这部分光合碳量就无法量化, 导致输入到地下部的光合碳量被低估。

**关键词:**小麦; 玉米; 根际沉积; 根源呼吸; 根际激发效应

**中图分类号:** S512.1; S513    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-2043(2021)10-2257-09    **doi:** 10.11654/jaes.2021-0295

## Contributions of wheat and maize growth to soil carbon input and output

SUN Zhaoan<sup>1,2</sup>, ZHU Biao<sup>3</sup>, ZHANG Yiwen<sup>4</sup>, LI Mengyu<sup>1</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 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, Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China; 4. Agricultural Technology Extension Center of Zhaoyuan Agricultural and Rural Bureau, Zhaoyuan 265499, China)

**Abstract:** In agroecosystem, partitioning exogenous C input and endogenous C release is a prerequisite for quantifying soil C balance. The contribution of different C sources to soil organic C (SOC) and soil CO<sub>2</sub> can be accurately distinguished using the C isotope method. This method can not only quantify soil C input in the form of rhizodeposition but can also estimate the rhizosphere priming effects on SOC decomposition, which increases the accuracy of soil C balance assessments. Through a survey of the literature on <sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C tracer experiments, the study analyzed photosynthetic C allocation, belowground C input, different contributions of soil CO<sub>2</sub> emission, and rhizosphere priming

收稿日期: 2021-03-11    录用日期: 2021-06-09

作者简介: 孙昭安(1985—), 男, 山东济宁人, 博士, 讲师, 主要从事农田土壤碳循环研究。E-mail: sun.zhaoan@163.com

\*通信作者: 孟凡乔 E-mail: mengfq@cau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201204); 潍坊学院博士科研启动基金项目(2019BS12)

**Project supported:** The National Key Research and Development Program of China(2016YFD0201204); The Initial Scientific Research Fund of Doctors in Weifang University(2019BS12)

effects. The results showed that the photosynthesized C of wheat allocated to aboveground, roots, SOC, and soil CO<sub>2</sub> emissions were 73.1%, 12.5%, 4.6%, 9.8% of the net assimilated C, respectively, and those of maize were 68.4%, 16.0%, 4.6%, and 11.1%, respectively. The amounts of the photosynthetic C transferred into soil were 1 058 kg · hm<sup>-2</sup> and 1 025 kg · hm<sup>-2</sup> by wheat and maize, among which the contribution of rhizodeposition was 0.45 and 0.38, respectively. The contribution of root-derived respiration to total soil CO<sub>2</sub> emissions in wheat- and maize-planted soils accounted for 51.3% and 56.7%, respectively. The growth of wheat and maize showed positive rhizosphere priming effects on SOC decomposition, with average magnitudes of 172% and 15%, respectively. If the traditional root exclusion method was used to distinguish soil respiration, the positive rhizosphere priming effects would be ignored, which might lead to the overestimation of root-derived respiration. The net rhizodeposition during the growth of wheat and maize accounted for 27% and 22% of the net belowground C input (root + rhizodeposition), respectively. If the traditional root washing method was used, rhizodeposition could not be quantified, resulting in an underestimation of the net belowground C input.

**Keywords:** wheat; maize; rhizodeposition; root-derived respiration; rhizosphere priming effect

农田土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)的主要来源是作物源碳(>99%),作物光合碳对SOC的贡献包括两个部分:一是作物残体碳(秸秆和根系)的输入,二是植物生长过程中以根际沉积物形式对SOC的贡献<sup>[1-3]</sup>。作物残体对SOC的贡献已经得到了充分的研究,例如HAN等<sup>[4]</sup>通过整合分析发现,在过去30 a,华北平原农艺管理水平的提高导致农田0~20 cm和20~40 cm土层SOC储量分别提高了73%和56%。由于SOC背景值太大,农作物当季的根际沉积碳部分相对很小,因此不能使用传统洗根法来定量作物生长对土壤碳输入的贡献<sup>[1-5]</sup>。孙昭安等<sup>[6]</sup>发现如果利用传统洗根法,无法定量冬小麦根际沉积对SOC的贡献,导致冬小麦季向土壤的光合碳净输入量被低估58%。这是由于根际沉积物碳含量远低于土壤背景碳含量,而传统洗根法无法区分土壤中的“植物新碳”和“土壤老碳”,导致目前关于小麦和玉米生长对农田土壤碳输入的量化仍然比较模糊<sup>[7-10]</sup>。

农田SOC含量背景值太大,而SOC短期变化相对较小,很难直接通过差值法来量化SOC的短期改变,而是间接通过区分土壤内源SOC分解和外源碳输入来量化<sup>[11]</sup>。根际土壤CO<sub>2</sub>释放的贡献源有两个,分别为根源呼吸(活根呼吸+微生物以根际沉积物为底物的呼吸)和SOC分解,两源区分是量化土壤碳输出和碳平衡的前提<sup>[1-2]</sup>。研究SOC分解输出的传统方法包括成分综合法、根去除法和生物量外推法等,这些区分方法对土壤干扰大<sup>[12]</sup>。非同位素方法(例如根去除法)虽然可以区分根源呼吸和SOC分解对土壤释放CO<sub>2</sub>的贡献,但是忽略了作物根系生长对SOC分解的根际激发效应,这可能导致对土壤本身碳输出评估的不准确<sup>[13]</sup>。

借助<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C标记和<sup>13</sup>C自然丰度方法不仅可以精

确区分土壤CO<sub>2</sub>释放中源于根系和土壤的部分,还可以量化根际沉积对SOC形成的贡献,进而定量分析SOC的输入、输出和收支平衡<sup>[1-2,14]</sup>。目前广泛应用于量化植物地下部碳输入的主要有4种碳同位素方法(表1):<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C连续标记法<sup>[15-16]</sup>、<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C单次脉冲标记法<sup>[17-8]</sup>、<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C重复脉冲标记法<sup>[17-18]</sup>和<sup>13</sup>C自然丰度法<sup>[19-20]</sup>。在以上区分方法中,最精准的是植物地上部<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C连续标记法,它可以克服<sup>13</sup>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<sub>3</sub>/C<sub>4</sub>植物和土壤条件,光合固定的<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C在植物-土壤系统中的分配等于总光合碳的分配,可以准确量化植物输入到地下部各个组分的碳量<sup>[15-16]</sup>。然而,<sup>14</sup>C材料有一定辐射危害,受到高度监管,仅限于室内实验<sup>[8]</sup>。在诸多碳同位素中,<sup>13</sup>C不需要安全防护,且<sup>13</sup>C与<sup>12</sup>C的性质差异,比<sup>14</sup>C与<sup>12</sup>C要小,因而<sup>13</sup>C被视为更可靠的示踪物<sup>[21]</sup>。与连续标记法相比,脉冲标记比较容易掌握,设备要求简单、费用低,能够提供植物各生育时期光合碳的分配信息<sup>[1,8,14]</sup>。虽然一次脉冲标记得到的碳同位素分配信息不能代表植物整个生育期,但只要在植物生育期内进行一系列标记,就可以合理地估计植物输入地下各组分的碳量<sup>[1,8,14]</sup>。国内外研究者在小麦和玉米碳同位素脉冲标记研究方面获得了很多数据,但由于标记方法和实验条件不同,所获得的实验结果有很大差异,且可比性差,亟需进行整合分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

利用中国知网检索关键词“<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C”和“小麦/玉米”、“根际呼吸”和“小麦/玉米”,利用Web of Science数据库检索关键词“<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C”和“Wheat/Maize”、“Rhizosphere respiration”和“Wheat/Maize”,查阅了1980年至

表1 碳同位素区分土壤CO<sub>2</sub>和SOC来源的方法比较Table 1 Comparison of the methods for partitioning soil CO<sub>2</sub> emission and SOC sources

方法 Method	原理 Principle	优点 Advantage	缺点 Limitation	参考文献 Reference
<sup>13</sup> C/ <sup>14</sup> C连续标记 <sup>13</sup> C/ <sup>14</sup> C continuous labeling	从植物第一片叶开始到收获结束,在控温控湿的密闭标记室内,不间断连续供给恒定浓度的 <sup>13</sup> CO <sub>2</sub> / <sup>14</sup> CO <sub>2</sub> ;标记植物地上部,通过区分植物(被标记)和土壤(未被标记)来源的碳,来量化植物光合碳对SOC和土壤CO <sub>2</sub> 的贡献。	标记 <sup>13</sup> C/ <sup>14</sup> C在植物-土壤系统中的分配等于总光合碳的分配,可以准确量化植物输入到地下部各个组分的碳量。	标记室内的温度、湿度和 <sup>13</sup> CO <sub>2</sub> / <sup>14</sup> CO <sub>2</sub> 浓度必须控制,设备的要求和价格很高;连续标记法持续时间长,标记成本很高,不适合野外实验。	[15-16]
<sup>13</sup> C/ <sup>14</sup> C单次脉冲标记 <sup>13</sup> C/ <sup>14</sup> C single pulse labeling	在密闭标记室内,一次性加入标记碳,以 <sup>13</sup> CO <sub>2</sub> / <sup>14</sup> CO <sub>2</sub> 形式短时间标记植物地上部,仅持续数小时,移出标记室,经过一段示踪时间后破坏性取样,通过光合 <sup>13</sup> C/ <sup>14</sup> C分配乘以植物生物碳的生长率来定量光合碳对地下部各个组分的输入。	比较容易掌握,设备要求简单,费用低,能够提供植物各生育时期光合碳的分配信息;在植物生育期内进行一系列标记,就可以合理地估计植物输入地下各组分的碳量,适合野外实验。	一次脉冲标记得到的碳同位素分配信息不能代表植物整个生育期。	[7-8]
<sup>13</sup> C/ <sup>14</sup> C重复脉冲标记 <sup>13</sup> C/ <sup>14</sup> C repeated pulse labeling	重复脉冲标记介于单次和连续标记之间,在植物生长期多次进行单次脉冲标记,然后生育期末收获。	设备和单次脉冲标记相同,适合在室内和田间标记,克服了单次标记不均匀和连续标记成本昂贵的缺陷,标记 <sup>13</sup> C/ <sup>14</sup> C的分配等于总光合碳的分配。	标记均匀度不好控制,如果植物不同碳组分标记不均匀,则标记 <sup>13</sup> C/ <sup>14</sup> C的分配不能代表总光合碳的分配。	[17-18]
<sup>13</sup> C自然丰度 <sup>13</sup> C natural abundance	长期种植C <sub>3</sub> 与C <sub>4</sub> 植物的土壤有机碳具有明显的δ <sup>13</sup> C值差异,把C <sub>4</sub> 植物种在长期连续种植C <sub>3</sub> 植物的土壤中(反之亦然),借助两源模型区分土壤CO <sub>2</sub> 释放。	不需要碳同位素标记处理,工作量和费用较低,适合野外实验。	找到一块一直以来都种植C <sub>3</sub> 或C <sub>4</sub> 植物的土壤并非易事,限制了该方法的推广;同位素分馏效应导致区分结果的不确定性。	[19-20]

2020年间全球小麦和玉米的<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C示踪相关的文献,通过以下4个标准对收集后的文献进行再次筛选:小麦和玉米的<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C光合碳分配要基于植物-土壤-CO<sub>2</sub>整个系统的分配;小麦和玉米生长向土壤碳输入的量化要覆盖整个生育期;根源和土壤源呼吸划分基于同位素法与非同位素法;根际激发效应量化是基于相对量。按照以上标准,分别筛选出38篇小麦和33篇玉米<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C示踪的文献,其中10篇小麦和11篇玉米<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C示踪的文献用于核算光合碳在作物-土壤-CO<sub>2</sub>整个系统的去向(附表1,实验样本数分别为29个和12个,扫描文章首页OSID码浏览);11篇小麦和14篇玉米<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C示踪的文献用于定量作物光合碳向土壤的输入量(附表2,实验样本数分别为23个和20个,扫描文章首页OSID码浏览);19篇小麦和14篇玉米根际土壤CO<sub>2</sub>释放区分的文献用于量化根源和土壤源呼吸的比例(附表3,实验样本数分别为42个和34个,扫描文章首页OSID码浏览);8篇小麦和5篇玉米根际激发效应文献(附表4,实验样本数分别为20个和9个,扫描文章首页OSID码浏览)。

## 1.2 数据分类方法

遵循如下思路,对小麦和玉米的<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C示踪研究数据进行归纳整理:作物光合碳去向分为地上部、根系、土壤和土壤CO<sub>2</sub>释放4个部分(图1);作物生长向地下部的净光合碳输入分为根系和根际沉积碳(图

2);分别基于同位素法与非同位素法(图3)、盆栽与田间实验(图4)来整理根源呼吸和土壤碳分解两个组分的比例及作物生长对SOC分解的根际激发效应程度(图5)。

## 1.3 光合碳分配、土壤碳输入和根际激发效应的计算

### 1.3.1 光合碳分配

作物净固定的<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C量为植物、土壤和土壤呼吸中<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C之和,各个碳库的<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C在作物-土壤-CO<sub>2</sub>整个系统中的分配比例为(以<sup>13</sup>C标记为例):

$${}^{13}A_i = {}^{13}C_i / {}^{13}C_{\text{净吸收}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:<sup>13</sup>A<sub>i</sub>为各个碳库的<sup>13</sup>C量占净吸收<sup>13</sup>C量的百分比, %。

### 1.3.2 土壤碳输入

小麦和玉米光合碳转运到地下各组分,一部分光合碳通过根源呼吸返回到大气中,剩余的光合碳(根系和根际沉积碳)为土壤净输入光合碳量:

$$C_{\text{土壤净输入}} = C_{\text{根系}} + C_{\text{根际沉积碳}} \quad (2)$$

式中: $C_{\text{土壤净输入}}$ 、 $C_{\text{根系}}$ 和 $C_{\text{根际沉积碳}}$ 分别为分配到地下部、根系和根际沉积碳库的碳量, kg·hm<sup>-2</sup>。

### 1.3.3 根际激发效应

$$D = (C_{\text{SOC-种植物}} - C_{\text{SOC-不种植物}}) /$$

$$C_{\text{SOC-不种植物}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $D$ 为根际激发效应程度, %;  $C_{\text{SOC-种植物}}$ 和 $C_{\text{SOC-不种植物}}$ 分别为种植和不种植植物土壤的SOC释放量。

## 1.4 统计方法

采用Excel 2013软件完成数据整理和作图,包括计算小麦和玉米光合碳在植物-土壤系统中的分配、向地下的净输入、根源呼吸占土壤总呼吸的比例以及根际激发效应的均值、标准差和95%置信区间分布。

## 2 结果与分析

### 2.1 小麦和玉米生长对土壤碳输入的贡献

#### 2.1.1 小麦和玉米光合碳在作物-土壤系统中的分配

小麦和玉米光合碳绝大多数保留在地上部(分配比例均值分别为73.1%和68.4%,95%的置信区间分别为63.1%~83.0%和63.4%~73.3%;图1),约1/3的光合碳转移到地下部(均值分别为27%和32%),这部分光合碳用于根系建成的比例最高(均值分别为12.5%和16.0%,95%的置信区间分别为5.8%~19.2%和11.9%~20.1%),比例最小的为以根际沉积物形式进入SOC的部分(均值分别为4.6%和4.6%,95%的置信区间分别为1.3%~7.9%和1.7%~7.4%),其次为根源呼吸释放到大气部分(均值分别为9.8%和11.1%,95%的置信区间分别为5.5%~14.0%和7.4%~14.8%)。

#### 2.1.2 小麦和玉米生长向地下部转移的光合碳量

小麦和玉米生长向地下输入的净光合碳量(根系生物量碳和根际沉积碳)均值分别为1 058 kg·hm<sup>-2</sup>和1 025 kg·hm<sup>-2</sup>,95%的置信区间分别为810~1 307 kg·hm<sup>-2</sup>和311~1 742 kg·hm<sup>-2</sup>(图2a和2b)。小麦和玉米通过根际沉积物输入到土壤的光合碳量的均值分别

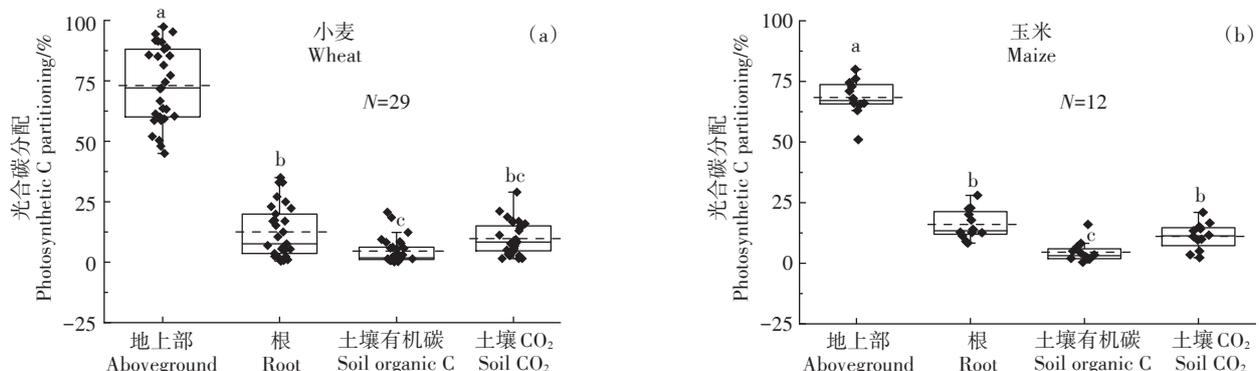
为610 kg·hm<sup>-2</sup>和439 kg·hm<sup>-2</sup>,占向地下转移光合碳量比值的均值分别为0.45和0.38,95%的置信区间分别为0.34~0.56和0.28~0.49(图2c)。

### 2.2 玉米和小麦生长对土壤CO<sub>2</sub>释放的影响

#### 2.2.1 根源呼吸和土壤本身碳分解对土壤CO<sub>2</sub>释放的贡献

玉米和小麦根源呼吸对土壤CO<sub>2</sub>释放的贡献主要分为非同位素和同位素法来量化,在非同位素法条件下,小麦根际土壤CO<sub>2</sub>释放的根源呼吸和土壤本身碳分解的贡献均值分别为42.1%和57.9%(95%的置信区间分别为34.2%~50.1%和49.9%~65.8%;图3a),在同位素法条件下,小麦根际土壤CO<sub>2</sub>释放的两者的贡献均值分别为47.9%和52.1%(95%的置信区间分别为39.1%~56.7%和43.3%~60.9%;图3b);在非同位素法条件下,玉米根源呼吸和土壤碳分解对土壤CO<sub>2</sub>的贡献均值分别为52.9%和47.1%(95%的置信区间分别为39.8%~66.1%和34.0%~60.3%;图3c),在同位素法条件下,两者对土壤CO<sub>2</sub>的贡献均值分别为62.7%和37.3%(95%的置信区间分别为51.3%~74.1%和25.9%~48.7%;图3d)。

在田间实验条件下,小麦根源呼吸和土壤碳分解对土壤CO<sub>2</sub>释放的贡献均值分别为39.6%和60.4%(95%的置信区间分别为32.7%~46.4%和53.6%~67.3%;图4a),在盆栽实验条件下,两者对土壤CO<sub>2</sub>释放的贡献均值分别为52.3%和47.7%(95%的置信区间分别为42.7%~61.8%和38.2%~57.3%;图4b)。在田间实验条件下,玉米土壤CO<sub>2</sub>释放源于根源呼吸和

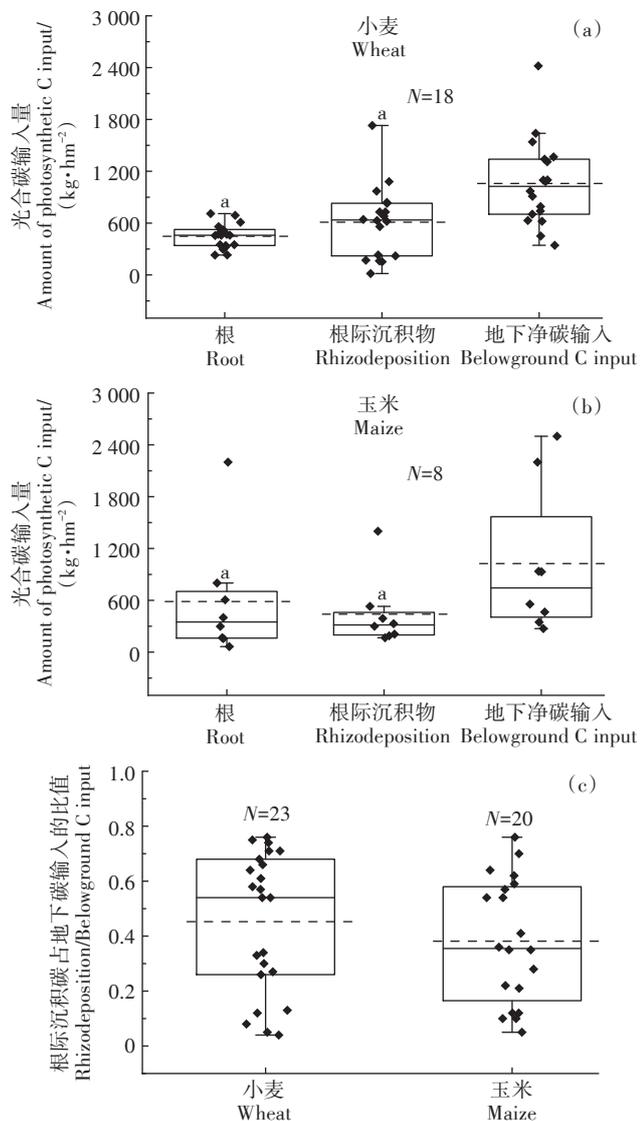


箱式图中的实线和虚线分别表示中位数值和平均值,箱式图顶部和底部边界分别代表所有数据的75%和25%,上部和下部误差线分别代表所有数据的95%和5%。下同。不同小写字母表示光合碳在不同组分之间的显著性差异( $P<0.05$ )

The solid and dashed lines in the box plots represent the median and average values, respectively, the top and bottom edges of the box represent 75 and 25 percentiles of all data, respectively, the top and bottom error bars represent 95 and 5 percentiles, respectively. The same below. Different lowercase letters indicate significant differences of photosynthetic carbon among different components at  $P<0.05$  level

图1 小麦和玉米光合碳在作物-土壤系统中的分配

Figure 1 Allocation of photosynthesized carbon in the wheat- and maize-soil system



不同小写字母表示根和根际沉积物之间的显著性差异( $P<0.05$ )  
Different lowercase letters indicate significant differences between root-  
and rhizodeposit-C at  $P<0.05$  level

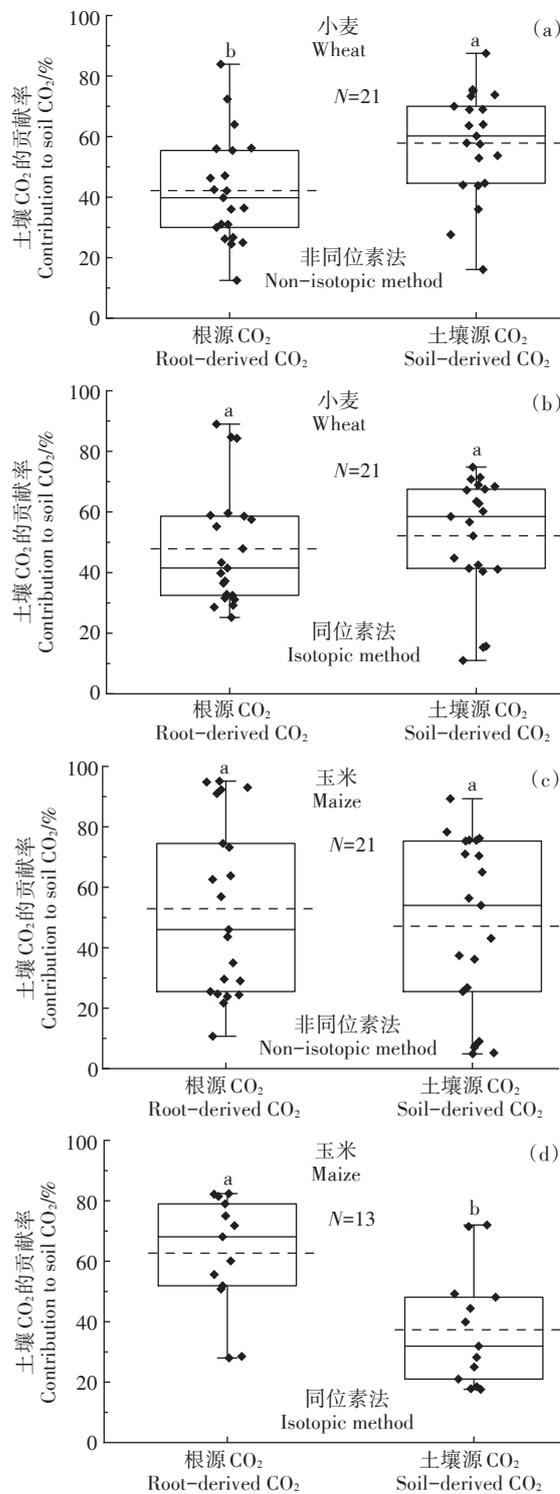
图2 小麦和玉米通过根际沉积碳形式输入的碳量以及占地下部输入的比例

Figure 2 Amount of the rhizodeposited carbon from wheat and  
maize and its proportion in belowground carbon input

土壤碳分解的平均比例分别为47.4%和52.6%(95%的置信区间分别为34.1%~60.6%和39.4%~65.9%;图4c);在盆栽条件下,玉米根源呼吸和土壤碳分解占土壤 $\text{CO}_2$ 释放比例分别为67.0%和33.0%(95%的置信区间分别为56.1%~78.1%和21.9%~44.0%;图4d)。

### 2.2.2 小麦和玉米生长对SOC分解的根际激发效应

小麦根际激发效应程度的平均值为172%,95%置信区间为106%~237%,其中仅有一个负根际激发效应值,为-37%,正根际激发效应范围为18%~

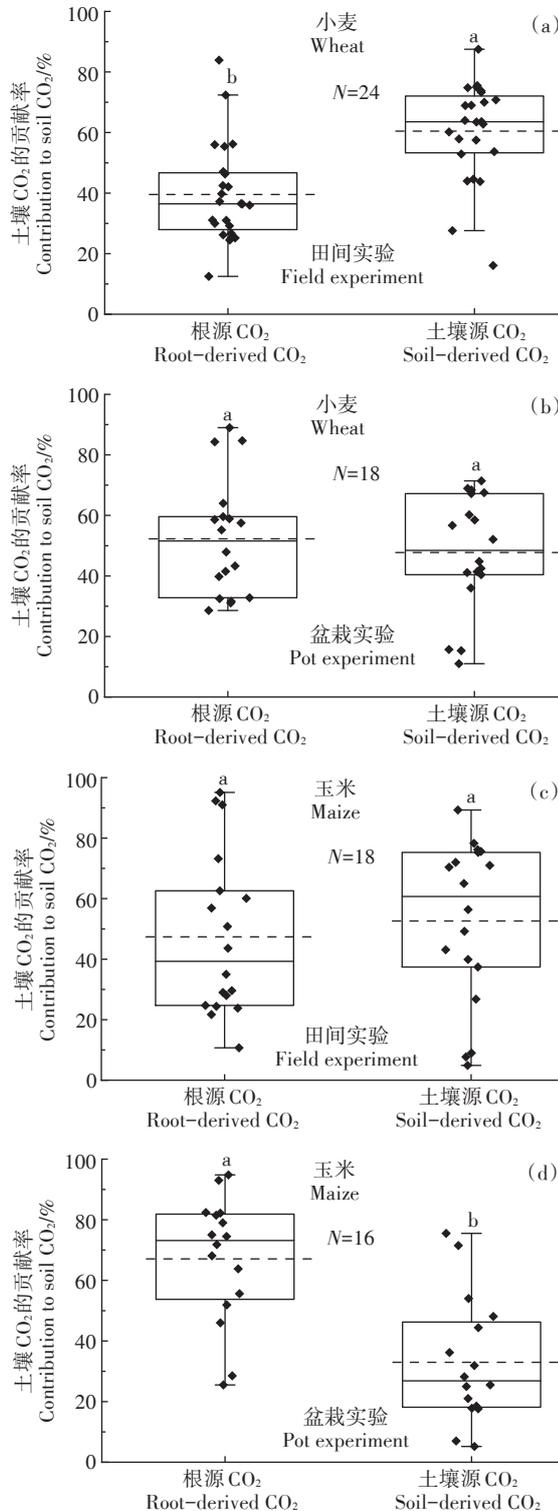


不同小写字母表示根源和土壤源 $\text{CO}_2$ 贡献之间的显著性差异( $P<0.05$ )

Different lowercase letters indicate significant differences between root- and soil-derived  $\text{CO}_2$  at  $P<0.05$  level

图3 利用非同位素法和同位素法量化根源呼吸和SOC分解对土壤 $\text{CO}_2$ 释放的贡献

Figure 3 Contribution of root-derived respiration and SOC decomposition to soil  $\text{CO}_2$  quantified by non-isotope and isotope methods



不同小写字母表示根源和土壤源CO<sub>2</sub>贡献之间的显著性差异(P<0.05)  
Different lowercase letters indicate significant differences between root- and soil-derived CO<sub>2</sub> at P<0.05 level

图4 田间和盆栽条件下量化根源呼吸和SOC分解对土壤CO<sub>2</sub>释放的贡献

Figure 4 Contribution of root-derived respiration and SOC decomposition to soil CO<sub>2</sub> emission under field and pot conditions

461%;玉米根际激发效应程度的平均值为15%,95%置信区间为-28%~57%,其中负根际激发效应范围为-38%~-7%,正根际激发效应范围为5.5%~126%(图5)。

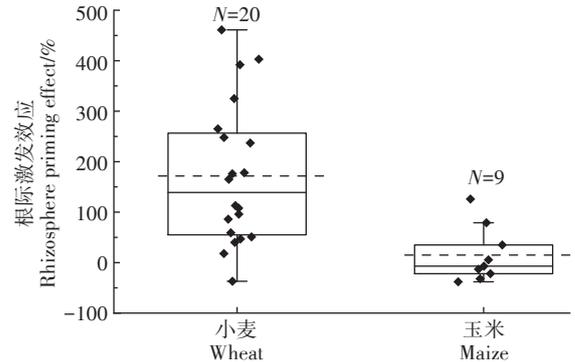


图5 小麦和玉米生长对SOC分解的根际激发效应  
Figure 5 Rhizosphere priming effects of wheat and maize on SOC decomposition

### 3 讨论

#### 3.1 小麦和玉米光合碳在作物-土壤系统中的分配

本文通过整合分析发现小麦和玉米地下部的光合碳分配比例分别约为27%和32%,其中分配到根系组织建成的比例最高,其次为根源呼吸释放,以根际沉积碳形式输入到土壤的组分最小(图1)。这与PAUSCH等<sup>[2]</sup>对农作物的<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C标记实验整合分析结果中的分配趋势类似,即约32%的农作物净光合碳(不包括地上部呼吸)分配到地下部,其中分配到根系、土壤和根源呼吸的比例分别为15.2%、4.5%和12.1%。农作物一般随着作物生长而逐渐减少向地下的碳分配<sup>[1,8,22]</sup>,例如孙昭安等<sup>[6]</sup>通过整合分析发现,小麦向地下部的碳分配由分蘖期的48%下降到灌浆期的9%。这是由于农作物(包括小麦、玉米、大麦和水稻)在生长前期光合碳偏向于向地下部转运,利于根系组织生长和根系对矿质养分的吸收及能量代谢,生育后期则偏向于地上部,利于光合碳在籽粒中的累积<sup>[1,8,22]</sup>,例如SUN等<sup>[8]</sup>通过整合分析发现小麦和大麦在生长前期有近30%的净光合碳用于根系建成,但成熟期仅3%用于根系组织建成,其余光合碳通过根源呼吸及根际沉积物途径损失。然而,大多数小麦和玉米的<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C示踪研究在营养期,分别在播种后不到150 d和60 d,尤其对于连续标记,植株处于幼苗期(播种后不到30 d),这可能导致对地下部碳分配的高估。因此,在全生育期标记可以提高地下光合碳

分配评估的精确度<sup>[1,9]</sup>。在华北地区,冬小麦和夏玉米的生长周期达到230 d和100 d,为了量化冬小麦和夏玉米整个生育期的地下部光合碳分配,本课题组在冬小麦和夏玉米的全生育期内进行了一系列脉冲标记<sup>[7-9]</sup>。

### 3.2 小麦和玉米光合碳向地下部的输入

在农田土壤中,外源有机碳的输入除了秸秆还田和残留根系外,还包括冬小麦和夏玉米生长以根际沉积物形式对SOC的贡献。本研究通过整合分析得出,小麦向地下部净输入碳量(根系和根际沉积碳)的平均值为 $1\ 058\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图2),此结论低于KUZYAKOV等<sup>[23]</sup>总结的谷类作物(小麦和大麦)的结果( $1\ 520\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),这可能是由于本研究整合分析的小麦根生物碳量较小( $448\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),远低于KUZYAKOV等<sup>[23]</sup>总结的根生物碳量( $1\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),以往的研究表明根系生物量和根际沉积物量呈显著正相关,因此根系生物量越高,输入到地下的根际沉积碳量也越多<sup>[15,24-25]</sup>。基于本课题组借助<sup>13</sup>CO<sub>2</sub>脉冲标记对冬小麦<sup>[7]</sup>和夏玉米<sup>[9]</sup>的量化结果,在华北平原冬小麦和夏玉米的周年种植体系下,冬小麦和夏玉米生长季通过根际沉积物形式对SOC的贡献碳量达到 $874\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (冬小麦 $610\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ +夏玉米 $264\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ),这部分根际沉积碳最终成为SOC的一部分。因此,量化冬小麦和夏玉米整个生长季向地下净输入碳量可以进一步解析农业集约化导致华北平原SOC增加的原因。

目前华北地区是我国最重要的粮田生产区域,冬小麦和夏玉米产量约占全国的2/3和1/3。由于几千年的传统耕作和恶劣的自然环境(如洪水、干旱和盐碱化),该地区农田SOC水平较低,增加华北农田SOC水平一直是一项挑战<sup>[26-27]</sup>。HAN等<sup>[28]</sup>通过整合分析发现秸秆还田措施能够快速提升农田0~20 cm土层SOC储量,在过去30 a, SOC固定速率为 $0.35\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。胡春胜等<sup>[29]</sup>通过秸秆还田碳输入减去土壤异养呼吸碳输出来估算华北农田碳平衡,发现华北农田生态系统正在以 $0.77\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度损失碳,低于本课题组的定量结果(冬小麦和夏玉米周年生产当季固碳速率 $3.9\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )<sup>[7,9]</sup>。这可能是由于在土壤碳输入方面,这个方法忽略了根系和根际沉积碳的输入,导致对土壤碳输入量的低估<sup>[29]</sup>,如果忽略根际沉积碳,小麦和玉米地下部净输入碳量会被低估58%和31%(图2);在土壤碳输出方面, SOC分解才是土壤碳输出,而胡春胜等<sup>[29]</sup>把土壤异养呼吸(SOC分解+根际沉积碳的分解)作为土壤碳输出,可能导致土壤碳输

出的高估。借助<sup>13</sup>C示踪技术定量冬小麦和夏玉米对地下部各组分的碳输入,可为优化土壤CO<sub>2</sub>排放估算模型、制定区域减排措施提供参考依据。

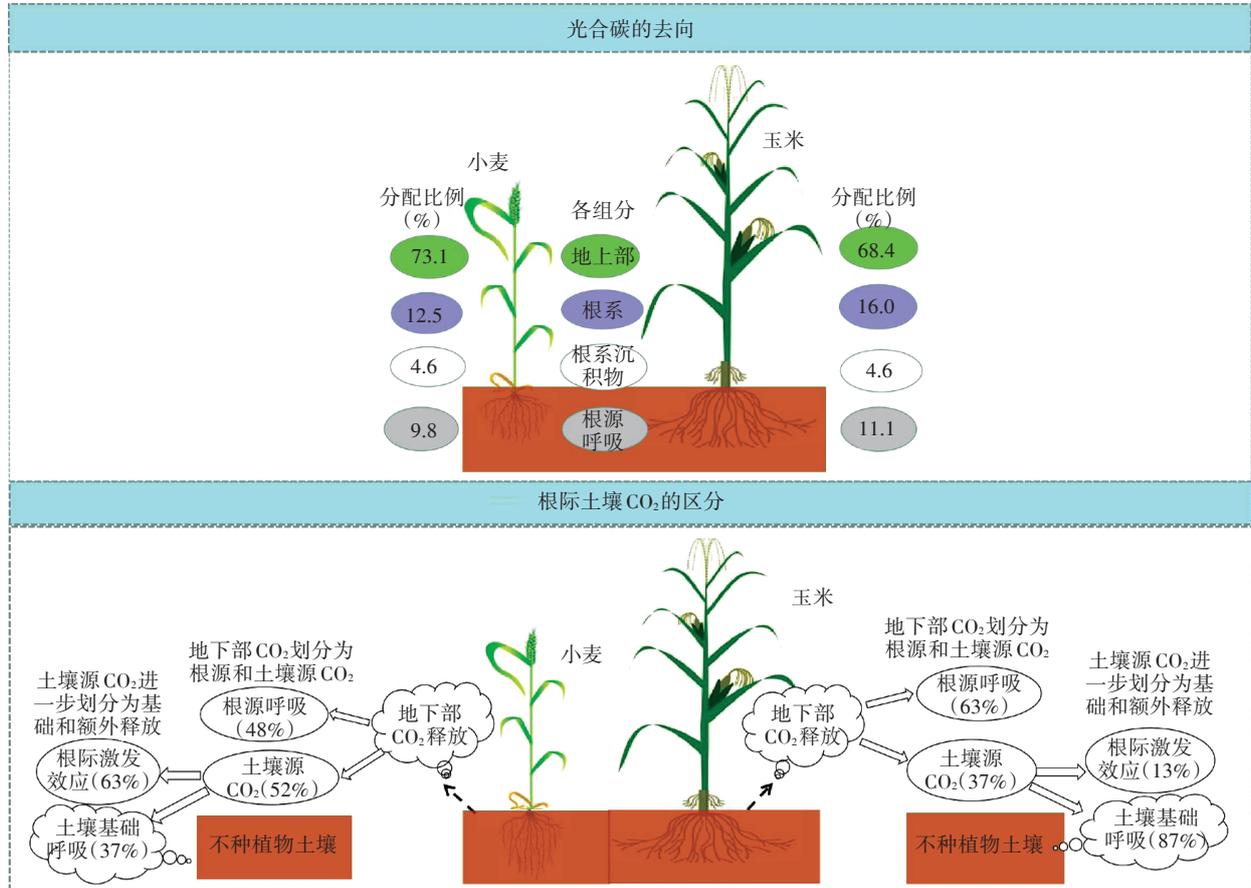
### 3.3 根系生长对土壤碳释放的贡献及影响

根系呼吸是CO<sub>2</sub>排放通量的重要贡献途径,为了量化土壤碳的输出,必须将其与土壤有机质周转分解的CO<sub>2</sub>分开考虑<sup>[11]</sup>。在种植小麦和玉米的土壤上,区分根源和土壤源CO<sub>2</sub>的方法主要分为同位素法和非同位素法,同位素法主要有<sup>13</sup>C自然丰度、<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C脉冲标记法和<sup>13</sup>C连续标记法,非同位素法有根去除法和间接模拟法(扫描文章首页OSID码浏览)。理论上,根际激发效应在大部分情况下会促进SOC的分解,同位素法可以量化根际激发效应额外释放的碳量,而传统方法则忽略了根际激发效应<sup>[13]</sup>,例如,通过整合关于小麦和玉米<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C示踪实验的文献,发现小麦和玉米生长导致土壤碳额外释放量占土壤碳总释放量的比例分别为63%和13%(图6)。因此,如果用传统根去除法(非同位素方法)区分土壤CO<sub>2</sub>释放,会导致根际激发效应被忽略,与同位素方法相比,可能会高估根源呼吸对土壤CO<sub>2</sub>释放的贡献<sup>[30]</sup>。使用同位素标记法区分土壤CO<sub>2</sub>释放通常更为准确。

根际土壤微生物活性和微生物群落组成均高于非根际土壤,此效应主要是由根际沉积碳输入引起的,这部分活性根际沉积碳导致根际土壤微生物的数量是非根际土壤微生物的数量的19~32倍<sup>[31]</sup>。本文整合分析结果显示,根际沉积碳输入约占净光合碳的5%(图1),小麦和玉米整个生长季以根际沉积形式输入的碳量分别为 $610\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $439\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图2)。本文通过整合分析发现,小麦和玉米根际激发效应不仅可以促进SOC的分解,呈现正根际激发效应,也可以抑制SOC的矿化,产生负根际激发效应,但是,小麦和玉米正根际激发效应比负根际激发效应的次数更为频繁(图5)。负的根际激发效应程度不可能低于100%,因为负的根际激发效应达到100%,相当于SOC没有分解,这种情况在自然界是不存在的,一般负的激发效应程度在-30%~-10%;正的激发效应可以在100%以上,甚至在200%~400%,根际激发效应引发的对SOC的分解在全球碳循环中起着重要作用<sup>[31-33]</sup>。

## 4 结论

(1)通过整合分析小麦和玉米光合<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C向地下部各组分去向的文献,发现小麦和玉米分别转运27%



地上部 = 籽粒+秸秆;小麦和玉米光合碳在作物-土壤整个系统中的分配模式图基于图1绘制;

小麦和玉米根际土壤 CO<sub>2</sub> 的区分模式图基于图3b、图3d和图5绘制

Aboveground = grain+straw; The distribution pattern diagram of photosynthetic carbon of wheat and maize in the crop-soil system was drawn based on figure 1; The difference pattern diagram of CO<sub>2</sub> in rhizosphere soil of wheat and maize was drawn based on figures 3b, 3d and 5

图6 小麦和玉米生长对土壤碳输入和输出的贡献模式图

Figure 6 Contribution pattern diagram of wheat and maize growth to soil carbon input and output

和32%的光合<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C(地上部+根系+土壤+根源呼吸)到地下部,分配到根系的组分最高(小麦为12.5%,玉米为16%),其次为根源呼吸的组分(9.8%和11.1%),最小为土壤的组分(4.6%和4.6%)。

(2)通过整合分析关于小麦和玉米向地下部输入光合碳量的<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C示踪文献,发现小麦和玉米生长对土壤的净输入碳量分别为1 058 kg·hm<sup>-2</sup>和1 025 kg·hm<sup>-2</sup>(根系和根际沉积碳),利用洗根法量化时,会导致根际沉积碳量被忽略,导致小麦和玉米向土壤净输入碳量分别被低估45%和38%;小麦和玉米根系生长均可促进土壤有机碳的分解,根际激发效应大小分别为172%和15%。

参考文献:

[1] KUZYAKOV Y, SCHNECKENBERGER K. Review of estimation of

plant rhizodeposition and their contribution to soil organic matter formation[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2004, 50(1): 115-132.

[2] PAUSCH J, KUZYAKOV Y. Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(1): 1-12.

[3] JONES D L, NGUYEN C, FINLAY R D. Carbon flow in the rhizosphere: Carbon trading at the soil-root interface[J]. *Plant and Soil*, 2009, 321(1/2): 5-33.

[4] HAN D, WIESMEIER M, CONANT R T, et al. Large soil organic carbon increase due to improved agronomic management in the North China Plain from 1980s to 2010s[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 987-1000.

[5] LIU Y, GE T, ZHU Z, et al. Carbon input and allocation by rice into paddy soils: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 133: 97-107.

[6] 孙昭安, 陈清, 韩笑, 等. <sup>13</sup>C脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入[J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2837-2844. SUN Z A,

- CHEN Q, HAN X, et al. Estimation of winter wheat photosynthesized carbon distribution and allocation belowground via  $^{13}\text{C}$  pulse-labeling [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6):2837-2844.
- [7] SUN Z, WU S, ZHANG Y, et al. Effects of nitrogen fertilization on pot-grown wheat photosynthate partitioning within intensively farmed soil determined by  $^{13}\text{C}$  pulse-labeling[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2019, 182(6):896-907.
- [8] 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*, 2018, 8:3160.
- [9] MENG F, DUNGAIT J A J, ZHANG X, et al. Investigation of photosynthate-C allocation 27 days after  $^{13}\text{C}$ -pulse labeling of *Zea mays* L. at different growth stages[J]. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2):755-764.
- [10] 齐鑫, 王敬国. 应用 $^{13}\text{C}$ 脉冲标记方法研究不同施氮量对冬小麦净光合碳分配及其向地下输入的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2524-2530. QI X, WANG J G. Distribution and translocation of assimilated C pulse-labeled with  $^{13}\text{C}$  for winter wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by nitrogen supply[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2524-2530.
- [11] KUZUYAKOV Y. Sources of  $\text{CO}_2$  efflux from soil and review of partitioning methods[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(3):425-448.
- [12] 耿元波, 史晶晶.  $^{13}\text{C}$ 在草原土壤呼吸区分中的应用[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6):1044-1052. GENG Y B, SHI J J. Application of the stable isotope  $^{13}\text{C}$  in the partitioning of soil respiration in grassland[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6):1044-1052.
- [13] 何敏毅, 孟凡乔, 史雅娟, 等. 用 $^{13}\text{C}$ 脉冲标记法研究玉米光合碳分配及其向地下的输入[J]. 环境科学, 2008, 29(2):2446-2453. HE M Y, MENG F Q, SHI Y J, et al. Estimating photosynthesized carbon distribution and inputs into belowground in a maize soil following  $^{13}\text{C}$  pulse-labeling[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(2):2446-2453.
- [14] MO F, ZHANG Y Y, LI T, et al. Fate of photosynthesized carbon as regulated by long-term tillage management in a dryland wheat cropping system[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 138:107581.
- [15] GE T, LIU C, YUAN H, 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.
- [16] 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.
- [17] VERBURG P S J, KAPIZKE S E, STEVENSON B A, et al. Carbon allocation in *Larrea tridentata* plant-soil systems as affected by elevated soil moisture and N availability[J]. *Plant and Soil*, 2014, 378(1/2):227-238.
- [18] WERTH M, KUZUYAKOV Y. Root-derived carbon in soil respiration and microbial biomass determined by  $^{14}\text{C}$  and  $^{13}\text{C}$ [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(3):625-637.
- [19] KUMAR A, KUZUYAKOV Y, PAUSCH J. Maize rhizosphere priming: Field estimates using  $^{13}\text{C}$  natural abundance[J]. *Plant and Soil*, 2016, 409:87-97.
- [20] 孙昭安, 赵诣, 朱彪, 等. 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):988-997. SUN Z A, ZHAO Y, ZHU B, et al. Rhizosphere effects of maize on inorganic and organic carbon release in calcareous soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(4):988-997.
- [21] SIMARD S W, DURALL D M, JONES M D. Carbon allocation and carbon transfer between *Betula papyrifera* and *Pseudotsuga menziesii* seedlings using a  $^{13}\text{C}$  pulse-labeling method[J]. *Plant and Soil*, 1997, 191(1):41-55.
- [22] ZANG H, XIAO M, WANG Y, et al. Allocation of assimilated carbon in paddies depending on rice age, chase period and N fertilization: Experiment with  $^{13}\text{CO}_2$  labelling and literature synthesis[J]. *Plant and Soil*, 2019, 445(1):113-123.
- [23] KUZUYAKOV Y, DOMANSKI G. Carbon input by plants into the soil. Review[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2000, 163(4):421-431.
- [24] LU Y, WATANABE A, KIMURA M. Input and distribution of photosynthesized carbon in a flooded rice soil[J]. *Global Biogeochem Cy*, 2002, 16(4):1-8.
- [25] TIAN J, PAUSCH J, FAN M, et al. Allocation and dynamics of assimilated carbon in rice-soil system depending on water management[J]. *Plant and Soil*, 2013, 363(1/2):273-285.
- [26] HAN D, SUN Z, LI F, et al. Changes and controlling factors of cropland soil organic carbon in North China Plain over a 30-year period [J]. *Plant and Soil*, 2016, 403(1/2):437-453.
- [27] THOMSON A M, IZAURRALDE R C, ROSENBERG N J, et al. Climate change impacts on agriculture and soil carbon sequestration potential in the Huang-Hai Plain of China[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2006, 114(2):195-209.
- [28] HAN X, XU C, DUNGAIT J A J, et al. Straw incorporation increases crop yield and soil organic carbon sequestration but varies under different natural conditions and farming practices in China: A system analysis[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(7):1933-1946.
- [29] 胡春胜, 王玉英, 董文旭, 等. 华北平原农田生态系统碳过程与环境效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10):1515-1520. HU C S, WANG Y Y, DONG W X, et al. Carbon processes and environmental effects on agro-ecosystem in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(10):1515-1520.
- [30] KUZUYAKOV Y, EHRENSBERGER H, STAHR K. Carbon partitioning and below-ground translocation by *Lolium perenne*[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(1):61-74.
- [31] CHENG W, JOHNSON D W, FU S. Rhizosphere effects on decomposition: Controls of plant species, phenology, and fertilization[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(5):1418-1427.
- [32] KUZUYAKOV Y. Review: Factors affecting rhizosphere priming effects [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2002, 165(4):66-70.
- [33] HUO C, LUO Y, CHENG W. Rhizosphere priming effect: A meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 111:78-84.