DOI: 10.11766/trxb201209100360

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*

安婷婷　汪景宽†　李双异　付时丰　裴久渤　李　慧
（沈阳农业大学土地与环境学院土壤肥力研究室，沈阳　110866）

摘　要　基于沈阳农业大学棕壤长期定位试验站不同施肥与地膜覆盖处理，采用原位 $^{13}CO_2$ 脉冲标记的方法示踪了 ^{13}C 在玉米-土壤系统中的转移与分配，探讨了施肥与地膜覆盖对玉米光合碳动态变化的影响。结果表明：玉米-土壤系统光合固定碳转移较快，且分配差异较大，其 $\delta^{13}C$ 值在标记 1 d 表现为茎叶 > 根 > 根际土壤 > 土体，且同一施肥处理下传统栽培高于覆膜栽培。标记 15 d 玉米植株和根际土壤 $\delta^{13}C$ 值降低，而土体 $\delta^{13}C$ 值却略有升高。传统栽培不施肥处理对 ^{13}C 富集程度最大，其中茎叶和根 $\delta^{13}C$ 值在标记 1 d 分别为 1 568‰和 598‰；标记 15 d 为 178‰和 147‰。玉米-土壤系统 ^{13}C 固定比例在标记 1 d 和 15 d 分别为 64.01% 和 38.65%，且 ^{13}C 分配按茎叶、根、根际土壤、土体顺序依次降低。覆膜施有机肥处理显著提高了光合固定 ^{13}C 数量及 ^{13}C 在玉米和土壤中的分配比例，是促进 ^{13}C 同化与分配的主要方式。

关键词　脉冲标记；^{13}C 标记；施肥；地膜覆盖；光合碳
中图分类号　S154.4　　**文献标识码**　A

碳是植物体主要组成元素，也是土壤有机质重要组成部分。植物通过光合作用吸收大气中的 CO_2，将光合固定的碳输送到植物体各个部位，并通过根系转移到土壤，再经土壤微生物的作用以 CO_2 或 CH_4 等气体的形式释放到大气，或以有机质形式固定在土壤中[1]。光合作用是大气圈、生物圈和土壤圈碳循环的起点，是大气-植物-土壤系统碳循环的重要组成部分。

施肥与地膜覆盖改变了农田土壤的生态环境和养分状况，进而影响了农田土壤碳循环过程。已有许多关于施肥与地膜覆盖对棕壤有机碳组分影响的研究报道[2-8]，但关于施肥与地膜覆盖对光合碳在植物-土壤系统中分配与转化的影响还不甚清楚，主要是因为传统的有机碳测定方法无法区分新合成的光合碳与土壤原来的有机碳。稳定碳同位素示踪技术是研究植物碳固定、分配及转移的重要手段，由于 ^{13}C 具有安全、稳定，易操作等优点，被广泛应用在生物地球化学过程的研究中[9]。因此本文利用田间原位 $^{13}CO_2$ 脉冲标记的方法探讨施肥与地膜覆盖对玉米光合碳分配的影响，这对于全面认识植物-土壤间碳循环具有重要意义。

1　材料与方法

1.1　供试土壤与试验设计

^{13}C 脉冲标记试验于 2011 年在沈阳农业大学棕壤长期定位试验站（北纬 41°49′，东经 123°34′）内进行。该站处于大陆季风区，年均温为 8.0 ℃，年均降水量为 705 mm，海拔为 75 m，土壤属中厚层棕壤（简育淋溶土）。该长期定位试验开始于 1987 年春天，当时土壤有机质含量为 15.6 g kg^{-1}，全氮为 1.0 g kg^{-1}，全磷为 0.5 g kg^{-1}，碱解氮为 67.4 mg kg^{-1}，有效磷为 8.4 mg kg^{-1}。每小区面积为 69 m^2，分传统栽培（不地膜覆盖）与地膜覆盖（以下简称“覆膜”）栽培两组，每施肥处理设 3 次重复，随机排列。连作作物为玉米（当地常用品种），每年 4 月 25 日左右播种、施肥和覆膜，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，并对玉米茎秆及残留地膜进行清除，然后进行翻地（根系都保留在土壤中）。本次标记试验选用 3 个施肥处

* 国家自然科学基金项目（41171237）、中国科学院战略性先导科技专项（XDA05050501）资助
† 通讯作者，E-mail：j-kwang@163.com
作者简介：赵龙山（1985—），男，甘肃古浪县人，博士，主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail：zls@nwsuaf.edu.cn
收稿日期：2012-07-05；收到修改稿日期：2013-01-23

理,即传统栽培的对照(不施肥,CK)、中量有机肥与氮磷化肥配施($M_2N_2P_1$,年施有机肥折合 N 135 kg hm^{-2},化肥 N 135 kg hm^{-2}和 P_2O_5 67.5 kg hm^{-2})、高量有机肥和氮磷肥化肥配施($M_4N_2P_1$,年施有机肥折合 N 270 kg hm^{-2},化肥 N 135 kg hm^{-2}和 P_2O_5 67.5 kg hm^{-2}),以及与之相对应的地膜覆盖栽培处理(CK - M、$M_2N_2P_1$ - M、$M_4N_2P_1$ - M)。施用的有机肥为猪厩肥,其有机质含量为 150 g kg^{-1}左右,全氮为 10 g kg^{-1};施用的化肥为商品氮肥(尿素,含 N 46%)和磷肥(磷素二铵,含 P_2O_5 45%)。各处理土壤的基本理化性质(2011 年)见表 1。

表 1 各处理土壤基本理化性质(2011 年)

Table 1 Basic characteristics of the soil samples from the various treatments of the experiment (in 2011)

处理 Treatment		有机碳 TOC(g kg^{-1})	$\delta^{13}C$ 值 $\delta^{13}C$(‰)	全氮 TN(g kg^{-1})	碳氮比 C/N
传统栽培	$M_4N_2P_1$	14.8	-19.30	2.2	6.7
No mulching	$M_2N_2P_1$	11.9	-19.11	1.8	6.6
	CK	9.00	-18.44	1.2	7.5
覆膜栽培	$M_4N_2P_1$ - M	15.4	-19.86	2.0	7.7
6.5	Plastic film mulching	$M_2N_2P_1$ - M	12.4	-19.76	1.9
	CK-M	9.50	-18.68	1.2	7.9

注:CK、$M_2N_2P_1$、$M_4N_2P_1$ 分别代表不施肥、中量有机肥与氮磷肥配施、高量有机肥和氮磷肥配施处理;M 覆膜栽培。下同 Note: CK, $M_2N_2P_1$ and $M_4N_2P_1$ denotes respectively no fertilization, medium organic manure combined with nitrogen and phosphate fertilizer, high organic manure combined with inorganic nitrogen and phosphate fertilizer under no mulching; M denotes plastic film mulching. The same below

1.2 脉冲标记

试验玉米品种为富有农乐(中密植型),于 2011 年 4 月 25 日播种。在玉米生长进入苗期后开始标记(6 月 4 日)。每个处理选择 20 株玉米进行^{13}C 脉冲标记,同时选择 20 株玉米作为 $\delta^{13}C$ 对照。为防止标记$^{13}CO_2$ 污染,对照处理(未标记^{13}C 的玉米)必须距离标记玉米至少 5m 以上[10]。本试验用 30 ml 盐酸(2 mol L^{-1})与 1.89 mg $Na_2{}^{13}CO_3$(99 atom% ^{13}C,SIGMA-ALDRICH)产生$^{13}CO_2$ 气体,使标记室内 CO_2 气体浓度达到 400 μl L^{-1}。标记室由透明的农用地膜和可调节高度的支架制成,其长 × 宽分别为 2.2 m × 0.5 m。标记前将风扇、CO_2 分析仪、4 个装有等量 $Na_2{}^{13}CO_3$ 的烧杯和 1 个装有 $Na_2{}^{12}CO_3$ 的烧杯放入标记室,然后密封。标记选择晴天,于早晨 8 点开始。标记前先利用氢氧化钠吸收装置吸收标记室内的$^{12}CO_2$,以提高$^{13}CO_2$ 的吸收同化率[11]。用 CO_2 分析仪监测标记室内 CO_2 浓度,当其降至 80μl L^{-1}左右时,关闭氢氧化钠吸收装置阀门,向其中一个装有 $Na_2{}^{13}CO_3$ 的烧杯加入盐酸(30 ml, 2 mol L^{-1}),开启风扇,使室内新产生的$^{13}CO_2$ 分布均匀,标记开始。当室内$^{13}CO_2$ 浓度再次降至 80μl L^{-1}左右时(大约 0.5 ~ 1 h),向第二个烧杯加入同量盐酸。以此步骤分别向第三和第四个 $Na_2{}^{13}CO_3$ 烧杯加入同量盐酸。最后向 $Na_2{}^{12}CO_3$ 烧杯中加入盐酸(30 ml,2 mol L^{-1}),促进室内$^{13}CO_2$ 同化,减少$^{13}CO_2$ 的损失,提高^{13}C 固定率。当 CO_2 浓度降至 80μl L^{-1}左右时,将标记室移走[12],整个标记过程结束。

1.3 样品采集与制备

分别于标记后的第 1 天和第 15 天随机选取每个处理(包括标记和未标记处理)的两株玉米,从基部剪断,挖出根系,并采集每株玉米土体和根际土壤(根周围 2 mm 内)。玉米根、茎叶经冲洗后,在 105℃杀青 30 min,然后在 60℃烘干 8 h,称重并计算根、茎叶生物量。烘干的玉米茎叶和根用混和型研磨仪(Retsch MM 200,德国)粉碎研磨,风干土壤样品用研钵研磨(过 100 目筛),供测定其有机碳含量和 $\delta^{13}C$ 值[12-13]。

1.4 分析方法

植物和土壤样品的有机碳、氮含量及 $\delta^{13}C$ 值用 EA-IRMS(元素分析仪-同位素比例质谱分析联用仪,Elementar vario PYRO cube-IsoPrime100 Isotope Ratio Mass Spectrometer,德国)测定。其基本原理和测定过程为:样品经高温燃烧后(燃烧管温度为 920℃,还原管温度为 600℃),通过 TCD(Thermal Conductivity Detector)检测器测定有机碳、氮含量,

剩余气体经 CO_2/N_2 排出口(Vent)通过稀释器进入质谱仪,在质谱仪上测定 $\delta^{13}C$ 值。

1.5　数据处理

玉米光合固定^{13}C 进入根、茎叶、根际土壤和土体中(不考虑呼吸损失),各组分固定^{13}C 量(mg)计算公式如下:

$$^{13}C_i = C_i \frac{(F_l - F_{ul})}{100} \times 1000$$

式中,C_i 为各组分碳量(g);F_l 为标记组分^{13}C 丰度(%);F_{ul}为不标记组分^{13}C 丰度(%)。

各组分^{13}C 分配比例(%):

$$P^{13}C_i = \frac{^{13}C_i}{^{13}C_{固定}} \times 100$$

式中,$^{13}C_{固定}$为根、茎叶、根际土壤和土体固定^{13}C 量之和。

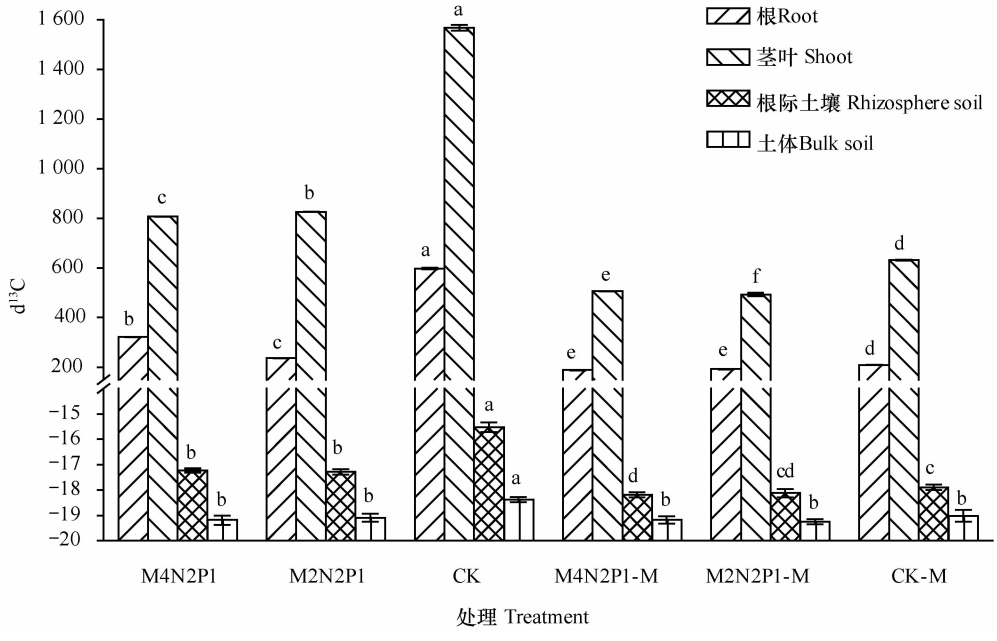
^{13}C 固定百分比(%)为玉米-土壤系统光合固定^{13}C 总量占加入该系统^{13}C 总量的百分比。

采用 Microsoft Excel 2003 和 Origin 8.0 软件对数据进行处理和绘图,采用 SPSS 11.5 统计分析软件中的邓肯法对数据进行差异显著性检验。

2　结　果

2.1　施肥与地膜覆盖对玉米和土壤^{13}C 丰度动态变化的影响

脉冲标记后光合固定^{13}C 在玉米-土壤系统中进行转移与分配,传统栽培玉米植株和土壤^{13}C 丰度受施肥措施的影响显著。由图 1 可以看出,光合固定碳转移较快,脉冲标记 1 d 后传统栽培玉米植株 $\delta^{13}C$ 值表现为茎叶 > 根,其中茎叶 $\delta^{13}C$ 值是根的 2.5 倍以上,且 CK 处理茎叶 $\delta^{13}C$ 值达到 1 568‰,根为 598‰,显著高于 $M_4N_2P_1$ 和 $M_2N_2P_1$ 处理($p < 0.05$)。乔云发等[14]也发现缺素处理地上部的 $\delta^{13}C$ 值较大。传统栽培土壤中 $\delta^{13}C$ 值表现为根际土壤 > 土体,CK 处理根际土壤与土体分别比施有机肥处理高 10.00% 和 4.00%。覆膜栽培玉米-土壤系统各组分 $\delta^{13}C$ 值分布与传统栽培一致,即茎叶 > 根 > 根际土壤 > 土体,且 CK-M 处理高于 $M_2N_2P_1$-M 处理和 $M_4N_2P_1$-M 处理,但土体各处理间差异不显著。相同施肥方式同一组分^{13}C 丰度同时也受栽培



注:不同小写字母表示不同处理同一组分 $\delta^{13}C$ 值差异显著($p < 0.05$)。下同 Note: Different lowercase letters indicate significant differences in $\delta^{13}C$ value between different treatments of the same component ($p < 0.05$). The same below

图 1　施肥与覆膜对玉米-土壤系统中各组分 $\delta^{13}C$ 值的影响(^{13}C 标记后 1 d)

Fig. 1　Effects of fertilization and plastic film mulching on $\delta^{13}C$ values of all the components of the maize-soil system (1 day after ^{13}C-labelling)

方式的影响,表现为传统栽培 > 覆膜栽培。因此可以看出传统栽培不施肥处理各组分对光合固定新碳的富集程度最大。

脉冲标记 15 d 玉米植株 $\delta^{13}C$ 值发生明显变化,其根和茎叶 $\delta^{13}C$ 值均低于 180‰(见图 2)。除 $M_4N_2P_1$ 处理根 $\delta^{13}C$ 值高于茎叶和 CK-M 处理根际土壤 $\delta^{13}C$ 值低于土体外,其余处理 $\delta^{13}C$ 值同样表现为茎叶 > 根 > 根际土壤 > 土体,且同一施肥处理同一组分 $\delta^{13}C$ 值表现为传统栽培 > 覆膜栽培(见图 2)。传统栽培 CK 处理同一组分 $\delta^{13}C$ 值显著高于施有机肥处理。覆膜栽培土壤 $\delta^{13}C$ 值按 CK-M、$M_4N_2P_1$-M、$M_2N_2P_1$-M 依次降低,而根和茎叶 ^{13}C 丰度以 $M_2N_2P_1$-M 处理最大,其次为 CK-M 和 $M_4N_2P_1$-M 处理,这可能与 $M_2N_2P_1$-M 处理玉米生物量变化最大有关。脉冲标记后光合同化的碳主要以呼吸与根际沉积物等形式损失,玉米根和茎叶的 $\delta^{13}C$ 值迅速下降。标记 15 d 与标记 1 d 相比茎叶 $\delta^{13}C$ 值平均下降了 82.07%,根下降了 54.68%。两次采样根际土壤 $\delta^{13}C$ 值平均减少 0.55‰,其中传统栽培减少 1.31‰,覆膜栽培减少 0.78‰,而土体 $\delta^{13}C$ 值却出现相对富集的趋势,土体平均增加 0.37‰。

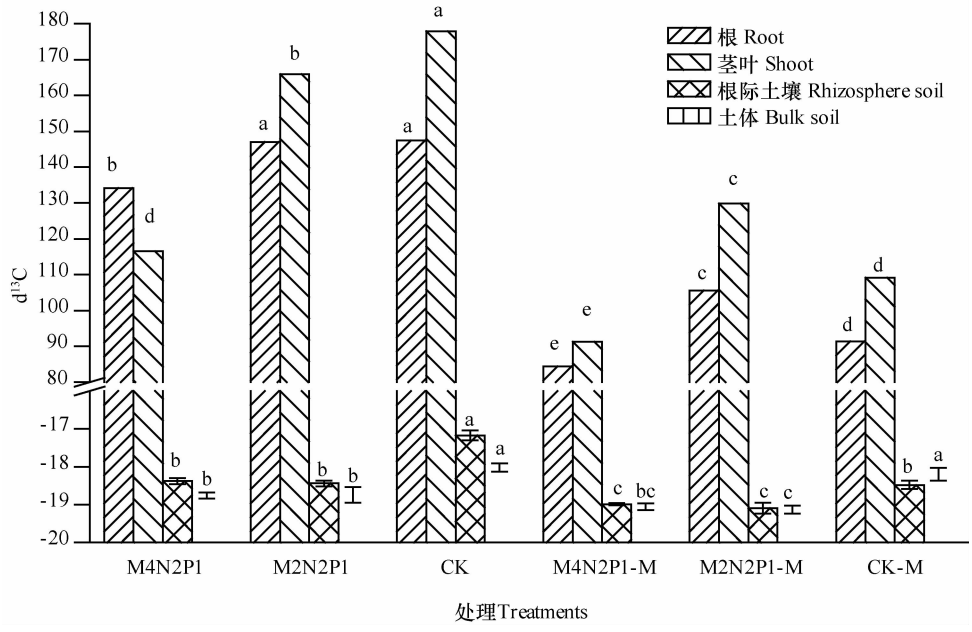


图 2 施肥与覆膜对玉米-土壤系统中各组分 $\delta^{13}C$ 值的影响(^{13}C 标记后 15 d)

Fig. 2 Effects of fertilization and plastic film mulching on $\delta^{13}C$ values of all the components of the maize-soil system (15 days after ^{13}C-labelling)

2.2 施肥与地膜覆盖对玉米与土壤 ^{13}C 分配动态变化的影响

为进一步分析植物-土壤系统中新固定 ^{13}C 动态变化及分配情况(见表 2 和表 3),本研究以单位面积计算施肥与覆膜条件下玉米植株-土壤系统各组分固定 ^{13}C 数量(^{13}C mg m^{-2})及其分配比例。标记 1 d 同一处理各组分固定 ^{13}C 量表现为茎叶 > 根 > 根际土壤 > 土体(见表 2),其中茎叶 ^{13}C 分配比例达到 85.00% 以上,根比例为 4.76% ~7.71%,根际土壤平均为 5.20%,土体小于 1.13%(见表 3),且 ^{13}C 固定比例在 49.98% ~79.91%。传统栽培 CK 处理 ^{13}C 固定比例达 79.91%,而 $M_2N_2P_1$ 与 $M_4N_2P_1$ 仅为 54.31% 和 49.98%,且 CK 处理各组分 ^{13}C 含量明显高于施有机肥处理。覆膜栽培各施肥处理固定 ^{13}C 比例平均为 66.62%,且 $M_4N_2P_1$-M 与 $M_2N_2P_1$-M 处理各组分 ^{13}C 含量显著高于 CK-M 处理(除茎叶各处理间差异不显著)。覆膜施有机肥处理各组分 ^{13}C 分配大于与之相对应的传统栽培施有机肥处理,而覆膜不施肥处理(CK-M)各组分 ^{13}C 含量小于传统栽培不施肥处理(CK)处理。

标记 15 d 玉米-土壤系统光合同化 ^{13}C 主要集中分配在茎叶(占 85.34%)中,其次为根、根际土壤和土体(分别为 7.90%、3.88% 和 2.88%)。传统栽培各施肥处理固定 ^{13}C 量仍以 CK 处理为主,其次为 $M_2N_2P_1$ 和 $M_4N_2P_1$ 处理。传统栽培 CK 处理和 $M_2N_2P_1$ 处理玉米植株 ^{13}C 含量分别是 $M_4N_2P_1$ 处理的 1.41 倍和 1.43 倍,$M_2N_2P_1$ 处理和 $M_4N_2P_1$ 处理土壤 ^{13}C 含量分别比 CK 处理低 49.09% 和

37.91%。覆膜栽培 $M_2N_2P_1$-M 处理固定^{13}C量最大,其次为 $M_4N_2P_1$-M 处理,CK-M 处理固定^{13}C量最少,且 $M_2N_2P_1$-M 处理玉米植株和土壤的^{13}C含量都最高。从标记 1 d 至标记 15 d,CK 处理同化的^{13}C损失最大,其次为 CK-M 处理,$M_2N_2P_1$-M 处理^{13}C损失最少。$M_2N_2P_1$-M 处理有助于光合同化^{13}C在玉米植株、土壤及玉米-土壤整个体系的积累。

表 2　标记后玉米-土壤系统各组分^{13}C含量的动态变化

Table 2　Dynamics of ^{13}C content in all the components of the maize-soil system after labeling(^{13}C mg × m^{-2})

处理 Treatments	根 Root	茎叶 Shoot	根际土壤 Rhizosphere soil	土体 Bulk soil
标记 1 d(D 1)				
$M_4N_2P_1$	31.85 ± 0.28 b	349.7 ± 9.74 d	29.17 ± 1.25 ab	2.39 ± 0.52 bc
$M_2N_2P_1$	24.80 ± 1.03 c	399.3 ± 4.02 c	23.59 ± 0.25 b	1.27 ± 0.14 c
CK	42.38 ± 1.21 a	581.5 ± 14.55 a	33.62 ± 0.95 a	3.11 ± 0.05 b
$M_4N_2P_1$-M	33.76 ± 2.19 b	492.2 ± 0.02 b	30.21 ± 1.26 ab	6.33 ± 0.99 a
$M_2N_2P_1$-M	30.97 ± 2.14 b	488.0 ± 11.24 b	30.83 ± 4.85 a	5.34 ± 1.07 a
CK-M	25.43 ± 0.98 c	491.7 ± 9.28 b	15.46 ± 2.52 c	1.95 ± 0.34 c
标记 15 d(D 15)				
$M_4N_2P_1$	22.76 ± 1.77 bc	186.8 ± 7.77 e	10.01 ± 0.11 c	6.70 ± 0.77 b
$M_2N_2P_1$	25.14 ± 0.69 b	275.0 ± 7.28 c	8.54 ± 0.09 c	5.16 ± 0.93 b
CK	19.96 ± 0.50 cd	276.3 ± 2.01 c	19.78 ± 0.45 a	7.13 ± 0.83 b
$M_4N_2P_1$-M	30.64 ± 1.73 a	313.2 ± 16.94 b	15.29 ± 0.51b	14.69 ± 2.10 a
$M_2N_2P_1$-M	33.59 ± 1.80 a	364.1 ± 13.17 a	15.83 ± 1.42 b	15.40 ± 1.92 a
CK-M	17.84 ± 0.88 d	220.2 ± 1.44 d	5.65 ± 1.28 d	7.37 ± 0.63 b

注:不同小写字母表示同一组分不同处理^{13}C含量的差异显著($p < 0.05$)

Note: Different lowercase letters represented significant differences of the same component between different treatments for the amount of ^{13}C of the same component ($p < 0.05$)

表 3　标记后玉米-土壤系统^{13}C的分配

Table 3　Distribution of ^{13}C in the maize-soil system after labeling

处理 Treatments	^{13}C 分配比例 Percentage of ^{13}C in plant/soil system(%)				^{13}C 固定百分比 Percentage of fixed ^{13}C (%)
	根 Root	茎叶 Shoot	根际土壤 Rhizosphere soil	土体 Bulk soil	
标记 1 d(D 1)					
$M_4N_2P_1$	7.71	84.65	7.06	0.58	49.98
$M_2N_2P_1$	5.52	88.94	5.25	0.28	54.31
CK	6.42	88.02	5.09	0.47	79.91
$M_4N_2P_1$-M	6.00	87.50	5.37	1.13	68.05
$M_2N_2P_1$-M	5.58	87.91	5.55	0.96	67.15
CK-M	4.76	91.98	2.89	0.37	64.66
标记 15 d(D 15)					
$M_4N_2P_1$	10.06	82.56	4.42	2.96	27.37
$M_2N_2P_1$	8.01	87.62	2.72	1.64	37.96
CK	6.18	85.50	6.12	2.21	39.09
$M_4N_2P_1$-M	8.20	83.79	4.09	3.93	45.22
$M_2N_2P_1$-M	7.83	84.89	3.69	3.59	51.89
CK-M	7.11	87.71	2.25	2.93	30.37

3 讨 论

由于^{13}C同位素具有安全、稳定、方便、可靠等优点，^{13}C脉冲标记成为研究碳固定、分配与转化的重要手段，能够动态监测光合碳的去向。与以往试验相比，本试验在田间进行原位标记，标记的效率较高（标记1d后^{13}C累积固定率在50% ~80%），更能真实反映光合碳在土壤-植物系统的动态分配情况。标记后，玉米植株主要依靠叶片的光合作用将^{13}C固定在植物体内，并在植物-土壤系统中进一步分配（本研究未考虑土壤和玉米呼吸作用，因为在田间难以操作与控制）。标记1 d同一处理^{13}C丰度变化表现为茎叶 > 根 > 根际土壤 > 土体。Butler[13]在根系活跃生长的苗期对黑麦草进行标记，标记后1 d得出的结果与本研究相似。传统栽培施有机肥处理玉米植株^{13}C丰度显著低于不施肥处理，这是因为施有机肥处理苗期生物量（平均为9.70 g株$^{-1}$）显著高于不施肥处理（平均为5.28 g株$^{-1}$），在加入等量的$^{13}CO_2$之后，分配到每株玉米的^{13}C含量减少，生物量的增加相当于稀释的作用[14]。覆膜栽培相同施肥处理各组分$\delta^{13}C$值与传统栽培相比，表现为覆膜栽培 < 传统栽培，覆膜条件下有机肥与无机肥的施用提高了土壤有机质含量，改善了土壤的养分状况，且覆膜栽培具有增温、保墒、调肥等效应[2-3]，增加了玉米的生物量，玉米的生物量增加对^{13}C起到了稀释作用。

标记后光合碳分配到地下部用于根系生长，不断以根际沉积物[15]的形式损失^{13}C；同时根和茎叶呼吸也释放^{13}C；再加上玉米不断生长，生物量继续增加，未标记部分同化^{13}C，稀释了玉米光合固定的^{13}C，因此导致了15 d后玉米植株$\delta^{13}C$值的下降。传统栽培CK处理标记15 d根和茎叶$\delta^{13}C$值下降幅度最大，这与该处理根和茎生物量增加（分别增加76.22%和272.5%）最快有关。虽然覆膜栽培CK-M处理根和茎叶$\delta^{13}C$值下降幅度大于施有机肥处理，但根和茎叶$\delta^{13}C$值变化受生物量的影响不大（CK-M根和茎叶生物量分别增加51.3%和133.7%，而覆膜施有机肥处理分别增加99.1%和194.1%），其变化机理有待进一步研究。Bulter等[13]在黑麦草标记后的1,2,3,5,8 d分别进行采样，根$\delta^{13}C$值表现出先降低后增加再降低的趋势。而乔云发等[14]研究认为玉米标记7 d后$\delta^{13}C$值增加。尹云峰等[15]在水稻生长的120 d后采样发现根和茎叶的$\delta^{13}C$值差异较小。植物种类，示踪期长短，物候期等均会对^{13}C值产生影响[16-19]。本研究是在标记15 d后才进行第二次采样，采样时间间隔较长，未能对$\delta^{13}C$值细微变化进行跟踪。

本研究玉米光合固定^{13}C量主要指根、茎叶、根际土壤和土体固定^{13}C之和。许多研究表明标记1 ~2 h后土壤即可检测到^{13}C[20-21]。本研究发现在标记后1 d土壤^{13}C分配比例达到了5.86%，其中$M_4N_2P_1$处理达到了7.64%，说明光合碳在玉米-土壤系统的分配与转化速度非常迅速。其他研究者[22]也发现玉米和蚕豆固定^{13}C比例为41% ~67%（其中地上部同化^{13}C占56% ~86%），黑麦草不足50%[13]，柳枝稷为42% ~79%[23]。本研究发现脉冲标记后不同处理有38.65% ~64.01%光合碳固定在植物-土壤系统中；标记1 d玉米88.17%光合碳分布在地上部，5.83%在土壤中；标记15 d茎叶和土壤^{13}C分配比例为85.34%和6.76%，这与Fan等[22]的研究结果相似。因为牧草具有较大的植物根系，根部比茎固定更多^{13}C[21]。Chaudhary等[23]研究认为柳枝稷标记后24 h内茎叶固定碳损失31% ~70%。Butler等[13]发现黑麦草在标记8 d后茎叶、根和土壤^{13}C分配比例为70%、20%、10%。土壤-植物系统^{13}C的分配在标记后第一个星期，尤其是第24 ~48 h作用显著[20]。冬小麦低氮处理地下部^{13}C分配显著高于高氮处理[18]。玉米氮肥充足供应同化^{13}C总量是氮肥稀释供应和去离子水供应处理的10倍[24]。单种与混种对蚕豆^{13}C的同化没有显著影响，但对玉米的影响显著[22]。石灰施用促进了^{13}C在牧草茎的分配，而在根的分配却减少[25]。因此^{13}C光合碳的分配主要受植物类型、标记时间和管理方式的影响。

标记1 d，传统栽培不施肥处理光合固定碳最大（达到660.6 mg m^{-2}），其次为覆膜各处理，传统栽培施有机肥处理最小（为431.0 mg m^{-2}）。CK处理根、茎叶、根际土壤、土体的$\delta^{13}C$值分别为598‰、1 567‰、-15.54‰和-18.38‰，极显著高于其他处理，因此玉米-土壤系统光合固定^{13}C量也最大。由于覆膜及施有机肥后土壤具有适宜的温度、水分和养分条件，玉米植株的生物量较大，提高了^{13}C在植物-土壤系统内固定的数量。标记后光合碳在体内进行再分配，随着植物的生长，光合固定^{13}C量逐渐减少（见表3）。标记15 d光合固定^{13}C总量平均减少了40.88%，其中茎叶减少了42.33%，这主要是由茎叶呼吸损失引起的[23]。对比两次^{13}C在土壤中

的分配结果发现，根际土壤^{13}C分配减少，而土体^{13}C分配却增加，说明根际土壤固定的新碳不断向土体转移。标记 15 d 覆膜施有机肥处理（$M_4N_2P_1$-M 和 $M_2N_2P_1$-M）玉米植株、土壤及整个系统光合固定^{13}C量损失最少，覆膜及施有机肥处理生物量积累较快是影响光合碳分配的因素之一。玉米茎叶通过光合作用将加入植物-土壤系统^{13}C固定，然后向下运送至根系，根系以根际分泌物的形式输入到根际土壤并不断向土体扩散。根际沉积物主要由根系分泌物（包括小分子物质例如单糖、氨基酸或有机酸等）、根毛脱落物、死亡根系等组成[23]，不同覆膜与施肥处理根际沉积物组成的差异及根际微生物呼吸有可能影响玉米-植物系统^{13}C的分配，其影响机制有待进一步研究。玉米光合固定^{13}C通过根系将根际沉积物输入土壤，被土壤微生物所吸收和利用，其^{13}C在土壤中分配、固定及其与微生物的作用机制是今后深入研究的重点。

4　结　论

本研究表明$^{13}CO_2$脉冲标记是研究施肥与覆膜方式下玉米光合碳固定与分配的有效手段。传统栽培不施肥处理根、茎叶、根际土壤和土体 $\delta^{13}C$ 值最大。玉米光合碳在植物-土壤体系内分配与转化非常迅速，脉冲标记 1 d 和 15 d 分别有 5.83% 和 6.76% 光合碳分配在土壤中。覆膜施有机肥是提高玉米苗期光合碳固定及其在土壤-植物系统转化的最主要的方式。本研究仅对根系活跃生长的苗期光合碳分配进行分析和讨论，拔节期和抽雄期光合碳的分配及固定将在今后做进一步的探讨。

参 考 文 献

[1] 王智平，陈全胜. 植物近期光合碳分配及转化. 植物生态学报，2005，29(5)：845—850. Wang Z P, Chen Q S. Recently photosynthesized carbon allocation and turnover: A minor review literature (In Chinese). Acta Phytoecologica Sinica, 2005, 29(5): 845—850

[2] 张继宏，汪景宽，须湘成，等. 覆膜栽培条件下有机肥对土壤氮和玉米生物量的影响. 土壤通报，1990，21(4)：162—166. Zhang J H, Wang J K, Xu X C, et al. Effect of plastic film and fertilization on soil nitrogen and corn biomass (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1990, 21(4): 162—166

[3] 薛菁芳，汪景宽，李双异，等. 长期地膜覆盖和施肥条件下玉米生物产量及其构成的变化研究. 玉米科学，2006，14(5)：66—70. Xue J F, Wang J K, Li S Y, et al. Studies on changes of corn biomass yield and its components under the condition of long-term plastic film-mulching and fertilization (In Chinese). Journal of Maize Sciences, 2006, 14(5): 66—70

[4] 侯晓杰，汪景宽，李世朋. 不同施肥处理与地膜覆盖对土壤微生物群落功能多样性的影响. 生态学报，2007，27(2)：654—661. Hou X J, Wang J K, Li S P. Effects of different fertilization and plastic-mulching on functional diversity of soil microbial community (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 654—661

[5] 安婷婷，汪景宽，李双异，等. 施用有机肥对黑土团聚体有机碳的影响. 应用生态学报，2008，19(2)：369—373. An T T, Wang J K, Li S Y, et al. Effects of manure application on organic carbon in aggregates of black soil (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 369—373

[6] 于树，汪景宽，李双异. 应用 PLFA 方法分析长期不同施肥处理对玉米地土壤微生物群落结构的影响. 生态学报，2008，28(9)：4221—4227. Yu S, Wang J K, Li S Y. Effect of long-term fertilization on soil microbial community structure in corn field with the method of PLFA (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4221—4227

[7] 汪景宽，李丛，于树，等. 不同肥力棕壤溶解性有机碳、氮生物降解特性. 生态学报，2008，28(12)：6165—6171. Wang J K, Li C, Yu S, et al. The biodegradation of dissolved organic carbon and nitrogen in brown earth with different fertility levels (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6165—6171

[8] 李世朋，蔡祖聪，杨浩，等. 长期定位施肥与地膜覆盖对土壤肥力和生物学性质的影响. 生态学报，2009，29(5)：2489—2498. Li S P, Cai Z C, Yang H, et al. Effects of long-term fertilization and plastic film covering on some soil fertility and microbial properties (in Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2489—2498

[9] 金剑，王光华，刘晓冰，等. 作物生育期内光合碳在地下部的分配及转化. 生态学杂志，2008，27(8)：1393—1399. Jin J, Wang G H, Liu X B, et al. Allocation and transformation of photosynthetic carbon in belowground part of crops during their growth period: A review (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(8): 1393—1399

[10] Lu Y H, Watanabe A, Kimura M. Carbon dynamics of rhizodeposits, root-and shoot-residues in a rice soil. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(9): 1223—1230

[11] 沈其荣，殷士学，杨超光，等. ^{13}C 标记技术在土壤和植物营养研究中的应用. 植物营养与肥料学报，2000，6(1)：98—105. Shen Q R, Yin S X, Yang C G, et al. Application of ^{13}C labeling technique to soil science and plant nutrition (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(1): 98—105

[12] McMahon S K, Williams M A, Bottomley P J, et al. Dynamics of microbial communities during decomposition of carbon-13 labeled ryegrass fractions in soil. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(4): 1238—1247

[13] Butler J L, Bottomley P J, Griffith S M, et al. Distribution and turnover of recently fixed photosynthate in ryegrass rhizospheres. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(2): 371—382

[14] 乔云发，韩晓增，赵兰坡. 长期定量施肥对玉米光合碳分配的影响. 水土保持学报，2010，24(4)：208—212. Qiao Y F,

Han X Z, Zhao L P. The respond of photosynthetic carbon allocation of maize to long-term fertilization (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 208—212

[15] 尹云峰, 杨玉盛, 高人,等. 植物富集^{13}C 标记技术的初步研究. 土壤学报, 2010, 47(4): 790—793. Yin Y F, Yang Y S, Gao R, et al. A preliminary study on phyto-enrichment ^{13}C labeling technique (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(4): 790—793

[16] Kuzyakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(14): 1915—1925

[17] Kuzyakov Y, Siniakina S V, Ruehlmann J, et al. Effect of nitrogen fertilization on below-ground carbon allocation in lettuce. Journal of the Science Food and Agriculture, 2002, 82(13): 1432—1441

[18] 齐鑫, 王敬国. 应用^{13}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. 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}C for winter wheat (*Trticum aestivums* L.), as affected by nitrogen supply (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(6): 2524—2530

[19] 何敏毅, 孟凡乔, 史雅娟, 等. 用^{13}C 脉冲标记研究玉米光合碳分配及其向地下的输入. 环境科学, 2008, 29(2): 446—453. He M Y, Meng F Q, Shi Y J, et al. Estimating photosynthesized carbon distribution and inputs into belowground in maize soil following ^{13}C pulse-labeling (In Chinese). Environmental Science, 2008, 29(2): 446—453

[20] Leake J R, Ostle N J, Rangel-Castro J I. Carbon fluxes from plants through soil organisms determined by field $^{13}CO_2$ pulse-labelling in an upland grassland. Applied Soil Ecology, 2006, 33(2): 152—175

[21] Kaštovská E, Šantrůčková H. Fate and dynamics of recently fixed C in pasture plant-soil system under field conditions. Plant and Soil, 2007, 300 (1/2): 61—69

[22] FanF L, Zhang F S, Qu Z, et al. Plant carbon partitioning below ground in the presence of different neighboring species. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(9): 2266—2272

[23] Chaudhary D R, Saxena J, Lorenz N, et al. Distribution of recently fixed photosynthate in a switchgrass plant-soil system. Plant Soil Environment, 2012, 58(6): 249—255

[24] WerthM, Kuzyakov Y. Assimilate partitioning affects ^{13}C fractionation of recently assimilated carbon in maize. Plant and Soil, 2006, 284(1/2): 319—333

[25] Rangel-Castro J I, Prosser J I, Nick O, et al. Flux and turnover of fixed carbon in soil microbial biomass of limed and unlimed plots of an upland grassland ecosystem. Environmental Microbiology, 2005, 7(4): 544—552

EFFECT OF FERTILIZATIONAND PLASTIC FILM MULCHING ON DISTRIBUTION OF PHOTOSYNTHETICALLY FIXED CARBON IN MAIZE: EXPLORED WITH ^{13}C PULSE LABELING TECHNIQUE

An Tingting Wang Jingkuan† Li Shuangyi Fu Shifeng Pei Jiubo Li Hui

(*Research Lab of Soil Fertility, College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University*, × *Shenyang* × 110866, × *China*)

Abstract The in-situ $^{13}CO_2$ pulse labeling technique was used to trace the fate of ^{13}C in maize-soil system and asses the effect of fertilization and plastic film mulching on the dynamics of photosynthetically fixed carbon by maize planted in the long-term Brown Earth Experiment Station in Shenyang Agricultural University. Results show that the carbons were quickly translocated and distributed unevenly in the maize-soil system on D 1 (the first day after labeling), showing an order of shoots > roots > rhizosphere soil > bulk soil, and unmulched > mulched in δ^{13}C value. The δ^{13}C values declined in maize plants and rhizosphere soil, but slightly increased in bulk soil with the time passing by from D 1 to D 15. Treatment CK was the highest in ^{13}C enrichment with average δ^{13}C value in shoots and roots reaching 1 568‰ and 598‰, respectively, on D 1 and 178‰ and 147‰, respectively, on D 15. The ^{13}C fixed in the maize plants accounted for 64.01% of the total in the system on D 1 and for 38.65% on D 15. The distribution of ^{13}C showed a declining trend in the order of shoots > roots > rhizosphere soil > bulk soil in the plant-soil system. The experiment clearly demonstrated that the treatment of mulching plus organic manure significantly increased photosynthetical fixation of ^{13}C and the allocation of ^{13}C in maize plant and soil, which means that it is an important practice to improve carbon assimilation and distribution in the maize-soil system.

Key words Pulse labeling; ^{13}C labeling; Fertilization; Plastic film mulching; Photosynthetically fixed carbon

(责任编辑:檀满枝)