

不同施肥处理对光合碳在花生-土壤系统中分配的影响^①

李朋发^{1,2}, 江春玉¹, 李忠佩^{1,2*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:通过室内花生盆栽, 设置 NPK(常规氮磷钾施肥)、NPKS(常规氮磷钾加玉米秸秆)、NPKA(常规氮磷钾加腐殖酸)和 CK(不施肥对照)4 个不同的施肥处理, 采用 3 次 ^{13}C 脉冲标记的方法对不同施肥处理下光合碳在花生-土壤系统中的分配进行定量研究。结果表明: 不同施肥处理对标记期内花生总生物量影响不显著, 但是 NPKA 处理显著提升了花生根系生物量, 较 CK、NPK 和 NPKS 分别高 22.04%、19.47% 和 53.38%。NPKS 处理地上部 ^{13}C 丰度最高, 但土壤中 ^{13}C 丰度最低, NPKA 处理土壤中 ^{13}C 丰度最高。各处理地上部的 ^{13}C 含量无显著差异, NPKA 处理根系的 ^{13}C 含量显著高于 NPK 且土壤 ^{13}C 含量显著高于其他处理。NPKA 处理地上部的 ^{13}C 分配比例最低而土壤中分配比例最高, 根系 ^{13}C 分配比例与其他处理无显著差异, 根系与土壤 ^{13}C 分配比例之和显著高于其他处理。本研究表明腐殖酸能显著促进花生光合碳向地下部的转运。

关键词:花生; 光合碳; 施肥方式; ^{13}C 脉冲标记; 分配

中图分类号: S565.2 **文献标识码:** A

花生是我国重要的经济作物, 我国的花生种植面积近年来一直维持在 460 万 hm^2 以上, 年均花生产量超过 1 600 万 t ^[1]。在其他主要农作物的单产基本都逐年增高的背景下, 近年来, 花生单产却逐年下降, 2013—2015 年全国平均单产分别为 3 663.33、3 579.98、3 561.68 kg/hm^2 ^[2]。科学施肥是保障作物产量的基础^[3], 因此, 探索一种更加科学的肥料施用方式或是提升花生产量的重要手段。农作物秸秆中含有丰富的营养元素, 是重要的肥料资源^[4], 腐殖酸则因其良好的生物化学活性而成为了近年来较为热门的新型肥料品种^[5-6]。秸秆还田和腐殖酸处理对花生产量的影响研究较多, 且大部分研究结果都表明这两种施肥方式可显著提升花生产量^[7-8]。

光合作用是作物产量形成的根本途径^[9-10], 研究光合碳的分配对了解作物产量形成具有重要意义, 而厘清不同施肥下花生光合碳的固定及转运过程是判断施肥是否科学、合理的前提。近年来, 稳定性同位素标记技术的发展为研究光合碳在植物体内的转运提供了有力的技术支撑, 水稻^[11]、玉米^[12]、小麦^[13]光合碳的转运和分配被先后揭示, 为这些作物的科学栽培提供了科学支撑。例如, 刘萍等^[11]人的研究发现在水稻栽培中适量增施氮肥能提升水稻向土壤中有

机碳的输入; 安婷婷等^[12]人的研究证明了覆膜栽培可显著促进玉米光合碳的固定。但是, 花生光合碳在花生-土壤系统中的分配情况以及不同施肥处理尤其是农作物秸秆和腐殖酸这两种较为新型肥料的施用对光合碳分配的影响尚未见文献报道。因此, 本研究通过 ^{13}C 脉冲标记技术, 对不同施肥处理对光合碳在花生-土壤系统中的分配展开定量研究, 这对认识花生光合碳的固定、运转以及确定花生的科学施肥方式具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤样品采自中国科学院鹰潭农业生态试验站附近大田 0~20 cm 表层土, 土壤为发育自第四纪红黏土。该区年平均降水量 1 789 mm, 年蒸发量 1 318 mm, 年平均气温为 17.6 $^{\circ}\text{C}$, 无霜期在 258 d 左右, 属亚热带湿润季风气候区。2017 年 8 月选择代表性田块, 通过多点采样形成混合样品。样品经风干, 挑去细根和石块等, 磨细过 5 mm 筛备用。供试土壤基本理化性质为: pH 5.32, 有机碳 10.06 g/kg, 全氮 1.24 g/kg, 全磷 0.62 g/kg, 全钾 12.60 g/kg, 碱解氮 158.03 mg/kg, 有效磷 21.92 mg/kg, 速效钾 400.00 mg/kg。

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41771298)和国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB150501)资助。

* 通讯作者(zhpli@issas.ac.cn)

作者简介: 李朋发(1990—), 男, 湖北恩施人, 博士研究生, 主要研究方向为花生光合碳的分配与转化。E-mail: pfl@issas.ac.cn

供试花生品种为赣花五号。试验中所用氮肥为尿素、磷肥为钙镁磷肥、钾肥为氯化钾、秸秆为粉碎后过 40 目筛的玉米秸秆、腐殖酸提取自风化褐煤。腐殖酸提取方法采用国际腐殖酸协会(IHSS)推荐的方法。

1.2 试验设计

盆栽试验采用内径 25 cm、高 30 cm 的塑料盆, 每盆装过 5 mm 筛的风干土 5 kg。试验共设 4 个不同的施肥处理, 分别为 NPK、NPKS、NPKA 和对照 CK, 每个处理 6 盆, 3 盆连续脉冲标记处理, 3 盆作为不标记对照。各处理施肥方式如表 1 所示。尿素、钙镁磷肥、氯化钾和玉米秸秆都以基肥的方式拌入土壤中并充分混匀。向花盆中充分浇水, 各花盆浇水量一致。2 d 后, 将用过氧化氢表面消毒 30 min 并催芽 2 d 后的花生种子播在花盆中, 所选取的花生种子大小较为一致, 催芽 2 d 后出芽大小也较为一致。每个花盆播种 3 颗花生种子。出苗后 15 d 和 30 d, 向 NPKA 处理的 6 个花盆添加腐殖酸, 腐殖酸浓度为 C 100 mg/L, 每盆添加 100 ml。其他处理添加等量自来水。直至试验结束, 不再向各处理追加肥料, 农艺管理措施相同。

表 1 各处理施肥方式
Table 1 Fertilization method of each treatment

处理	氮(g/盆)	磷(g/盆)	钾(g/盆)	玉米秸秆(g/盆)	腐殖酸(ml/盆)
CK	0	0	0	0	0
NPK	0.70	0.36	0.52	0	0
NPKS	0.70	0.36	0.52	70	0
NPKA	0.70	0.36	0.52	0	100

1.3 脉冲标记

出苗后的第 40、60、80 天, 从各处理固定选择 3 盆花生进行脉冲标记。标记箱体为定制的有机玻璃箱, 规格为长×宽×高=105 cm×70 cm×100 cm, 玻璃箱顶部装有 2 个小型风扇, 并留有温度计和 4 个滴定管插孔。标记大体过程如下: ①将盆栽花生放入标记箱底座, 将 4 个 500 ml 的烧杯放置在底座上, 其中 2 个烧杯加入 $\text{Ba}^{13}\text{CO}_3$ (^{13}C 丰度为 99%) 5.3 g, 另 2 个烧杯加入等量 BaCO_3 ; ②在箱体内壁均匀、少量地涂抹一层肥皂水(箱体内壁水蒸气的凝结会大幅降低光照强度, 影响标记效率, 涂抹肥皂水可有效防止水蒸气在内壁的凝结), 将有机玻璃箱放在底座槽内, 向底座槽内注冷水密封, 启动风扇。先使花生光合 15 min 以消耗标记箱中原有的 CO_2 ; ③标记时先用黑布遮住整个有机玻璃箱, 通过特制的滴定管向装有 $\text{Ba}^{13}\text{CO}_3$ 的一个烧杯中注入 2 mol/L HCl 溶液 200 ml, 产生 800 μL 的 $^{13}\text{CO}_2$, 反应 5 min 后, 将黑布打开,

让花生在有机玻璃箱内进行光合作用; ④光合 50 min 后重复步骤③; ⑤步骤④完成以后分别向另外 2 个装有 BaCO_3 的烧杯中加入等量的 HCl 溶液, 两次加入时间同样间隔 50 min。⑥标记结束后, 取下有机玻璃箱, 通风一段时间后将花生放回原位。标记过程中用冰块降温, 温度控制在 35 $^{\circ}\text{C}$ 内。

1.4 样品采集与处理

出苗后第 90 d, 也就是第 3 次标记结束后第 10 d, 对花生进行破坏性采样。从花盆中轻轻拔出生花生以后, 将花生根系立即剪下, 地上部和根系用去离子水洗净以后放入烘箱中, 先调至 110 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min, 再调至 70 $^{\circ}\text{C}$ 恒温烘干。样品烘干以后, 称干物质质量; 用研钵完全磨碎, 过 100 目筛。花盆中的土壤充分混匀, 称总湿重, 每个花盆准确称取 10 g 后放入 70 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱, 烘干后计算含水量; 烘干的土样磨碎后过 80 目筛。样品全碳采用重铬酸钾容量法测定, $\delta^{13}\text{C}$ 值用同位素质谱仪(FlashEA-Delta Advantage)测定。

1.5 数据分析

一般情况下, 自然土壤或植物的自然丰度用 $\delta^{13}\text{C}$ 值来表示, 其计算公式如下:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{样品}}}{R_{\text{PDB}} - 1} \right) \times 1000 \quad (1)$$

式中: $R_{\text{样品}} = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{样品}}$, $R_{\text{PDB}} = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{PDB}}$, 取值为 0.011 237 2。通过 $R_{\text{样品}}$ 值和样品的全碳含量, 可以通过以下公式计算得到样品中的 ^{13}C 含量。

$$^{13}\text{C}_{\text{样品}} = \text{样品全碳} \times \left(\frac{R_{\text{样品}}}{1 + R_{\text{样品}}} \right) \quad (2)$$

$$^{13}\text{C}_{\text{净输入量}} = {}^{13}\text{C}_{\text{标记样品}} - {}^{13}\text{C}_{\text{未标记样品}} \quad (3)$$

数据由 Microsoft Excel 2013 进行整理, 分析均通过 SPSS 19.0 完成。

2 结果

2.1 不同施肥处理下花生生物量的差异

不同施肥处理下, 花生的总生物量和地上部生物量均无显著差异, 但在根系生物量上差异显著(表 2, $P < 0.05$)。NPKA 处理的根系生物量显著高于其他 3 组处理, 较 CK、NPK 和 NPKS 分别高 22.04%、19.47% 和 53.38%。NPKS 处理的根系生物量则显著低于其他 3 组处理, 常规 NPK 处理的根系生物量与 CK 相比无显著差异。

2.2 不同施肥处理下 ^{13}C 丰度的差异

NPKS 处理地上部 $\delta^{13}\text{C}$ 达 2 242.43‰, 显著高于其他处理($P < 0.05$), NPK 处理地上部 $\delta^{13}\text{C}$ 显著低于其他处理, NPKA 和 CK 处理地上部 $\delta^{13}\text{C}$ 居 NPKS

表 2 不同施肥处理下花生生物量(干物质量, g/盆)
Table 2 Peanut biomass under different fertilization treatments

处理	总生物量	地上部生物量	根系生物量
CK	9.27 ± 0.75 a	7.41 ± 0.67 a	1.86 ± 0.11 b
NPK	9.36 ± 1.13 a	7.46 ± 1.02 a	1.90 ± 0.15 b
NPKS	9.19 ± 1.24 a	7.72 ± 1.10 a	1.48 ± 0.15 c
NPKA	9.60 ± 0.72 a	7.33 ± 0.75 a	2.27 ± 0.16 a

注：地上部生物量包括茎、叶干物质量，总生物量为地上部与根系生物量之和；同列数据小写字母不同表示处理间差异达到 $P<0.05$ 显著水平，下表同。

表 3 不同施肥处理下标记花生植株与土壤中的 ^{13}C 丰度(‰)
Table 3 Abundance of ^{13}C in plants and soils under different fertilization treatments

处理	地上部	根系	土壤
CK	1 910.10 ± 183.45 b	1 558.17 ± 128.70 a	13.60 ± 2.91 b
NPK	1 311.98 ± 168.06 c	931.05 ± 119.56 b	16.22 ± 10.55 b
NPKS	2 242.43 ± 22.30 a	1 686.51 ± 286.72 a	1.96 ± 4.64 c
NPKA	1 860.65 ± 90.64 b	1 496.29 ± 233.32 a	31.30 ± 1.54 a

表 4 不同施肥处理下标记花生植株与土壤中的 ^{13}C 含量(mg)
Table 4 ^{13}C concentrations in plants and soils under different fertilization treatments

处理	地上部	根系	土壤	总量
CK	130.68 ± 11.75 a	33.18 ± 3.15 ab	75.63 ± 8.24 b	239.49 ± 23.12 ab
NPK	125.90 ± 24.00 a	26.52 ± 3.36 b	83.54 ± 23.05 b	235.97 ± 42.27 b
NPKS	161.04 ± 38.60 a	29.30 ± 3.05 ab	87.83 ± 14.97 b	278.18 ± 56.12 ab
NPKA	143.87 ± 10.87 a	37.23 ± 4.50 a	127.03 ± 20.86 a	308.13 ± 16.40 a

2.4 不同施肥处理下光合碳(^{13}C)分配比例的差异

NPKS、NPK 和 CK 地上部分光合碳(^{13}C)分配比例比较接近，在 53.41% ~ 57.62% 之间，差异不显著(表 5)；NPKA 处理地上部分光合碳(^{13}C)比例则显著低于其他处理，不足 50%。NPKS 处理的根系光合碳(^{13}C)比例显著低于 CK，而 NPKA、NPK 和 CK 之间，以及 NPK、NPKS 和 NPKA 之间均无显著差异。NPKA 处理的土壤光合碳(^{13}C)分配比例超过 40%，显著高于其他处理，NPKS、NPK 和 CK 之间差异不显著。

表 5 不同施肥处理下光合碳(^{13}C)的分配比例(%)
Table 5 Distribution ratios of photosynthetic carbon (^{13}C) under different fertilization treatments

处理	地上部	根系	土壤
CK	54.59 ± 0.35 a	13.86 ± 0.16 a	31.55 ± 0.42 b
NPK	53.41 ± 5.79 a	11.31 ± 0.59 ab	35.28 ± 6.01 b
NPKS	57.62 ± 2.29 a	10.68 ± 1.07 b	31.70 ± 1.33 b
NPKA	46.74 ± 3.70 b	12.14 ± 1.95 ab	41.12 ± 5.46 a

和 NPK 之间且无显著差异(表 3)。NPK 处理根系 $\delta^{13}\text{C}$ 同样显著低于其他处理，NPKS、NPKA 和 CK 的 $\delta^{13}\text{C}$ 差异不显著。NPKA 处理的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 显著高于其他处理，NPKS 最低，NPK 和 CK 的 $\delta^{13}\text{C}$ 差异不显著。

2.3 不同施肥处理下光合碳(^{13}C)含量的差异

不同施肥处理下，地上部分同化的光合碳(^{13}C)均无显著差异(表 4)。NPKA 处理的根系同化的光合碳(^{13}C)显著高于 NPK，但是 NPKA、NPKS 和 CK 之间，以及 NPKS、NPK 和 CK 之间则差异不显著。进入土壤的光合碳(^{13}C)在 NPKA 处理下最高，达 127.03 mg，其他处理之间无显著性差异。NPKA 同化光合碳(^{13}C)的总量显著高于 NPK 处理($P<0.05$)，NPKA、NPKS 和 CK 之间，以及 NPKS、NPK 和 CK 之间差异不显著。全部处理同化的光合碳(^{13}C)总量为 3 185.32 mg，3 次标记试验添加的 ^{13}C 总量为 4.19 g，计算得到本试验中 ^{13}C 的总回收率为 76.02%。

3 讨论

不同施肥处理对花生生物量的影响已多有报道^[14-15]，本研究中，不同施肥处理对花生总生物量和地上部生物量并无显著影响，可能有两方面的原因：①研究中采用的土壤肥力本身较高，即使不施肥，其本身的营养物质也满足花生在栽培期间正常生长发育的需求。②花生的栽培时间为 90 d，试验结束时，花生刚开始结荚。而在结荚之前，花生对 N、P、K 的需求均不足全生育期的 30%，结荚期和饱果期对 3 种养分的需求则超过 70%^[16]，也即在栽培期内，花生对营养物质的需求较低。因此，在本研究中，不同施肥处理对花生总生物量无显著影响。

研究发现，不同施肥处理下花生根系生物量具有显著性差异，NPKA 的根系生物量较 CK、NPK 和 NPKS 分别高 22.04%、19.47% 和 53.38%。这说明，在本研究中，腐殖酸的添加显著地促进了花生根系的生长发育，这与前人的研究一致^[17]。在其他作物上，也有类似的结论报道。例如，经过腐殖酸处理后的玉

米在移栽 2 个月后其根系长度较对照增加 23%^[18]。Canellas 等^[19]人也发现腐殖酸的施用能显著增加玉米根系的长度和侧生根的增殖位点。Adani 等^[20]人则发现施用腐殖酸能促进番茄根系干重增加 18%。关于腐殖酸促进植物根系生长的原理,目前主要认为是腐殖酸诱导了植物质膜 H^+ -ATPase 的含量,含植物质膜 H^+ -ATPase 的分生组织细胞是侧生根的前体,因此,质膜 H^+ -ATPase 的富集促进了侧生根的形成^[21]。Morozesk 等^[22]也在试验中发现施用腐殖酸可显著提高 H^+ -ATPase 活性。另外,本研究还发现,NPKS 处理的花生根系生物量显著低于其他处理,说明秸秆还田抑制了根系的生长发育,这可能是因为玉米秸秆在分解过程中产生的酚酸类物质会降低根系 SOD 酶活性,使根系活力下降,因而导致根系的生长被抑制^[23]。

在各处理下, ^{13}C 丰度均呈现出地上部>根系>土壤的规律。安婷婷等^[12]通过对玉米进行脉冲标记,发现在标记 1 d 后和 15 d 后,同一处理下 ^{13}C 丰度均为茎叶>根系>根际土壤>土体,本研究结果与此相似。Butler 等^[24]人在黑麦草上进行的脉冲标记也呈现相似的结果。地上部、根系和土壤中的 ^{13}C 丰度在不同施肥处理下表现出一定的差异性,可能原因:①施肥方式影响花生的光合效率,不同施肥处理下花生的光合效率有差异^[25];②施肥方式影响花生的生物量,若植株光合效率一致,则高生物量植株会使吸收的 ^{13}C 被稀释^[12];③施肥方式影响花生植株和土壤的呼吸速率^[26],致使标记的 ^{13}C 以不同的速率损失;④施肥方式影响植株的根际沉积^[27],造成不同施肥处理下标记的 ^{13}C 从花生植株损失到土壤中的速率不同。例如,NPKS 处理下土壤中的 ^{13}C 丰度显著低于其他处理,可能是因为秸秆中 C 元素含量很高^[28],为土壤中的微生物提供了丰富的碳源,微生物对花生根际沉积碳的代谢减弱,如酚酸类物质的根际沉积碳在根系的富集对花生造成化感作用,抑制花生的生长发育,这种负反馈机制使花生的根际沉积速率下降^[29]。以上因素既有可能单独影响 ^{13}C 丰度,也有可能综合影响。因此,造成不同施肥处理下不同部位 ^{13}C 丰度差异的成因较为复杂,有待进一步探索。

植株同化的 ^{13}C 以及转运到土体中的 ^{13}C 会因为植株和土壤微生物的呼吸而损失掉一部分^[12],被固定在植株和土壤中的 ^{13}C 总量与标记试验添加的 ^{13}C 总量之商为回收率。本试验中, ^{13}C 的回收率为 76.02%,与王群艳等^[30]在水稻上进行脉冲标记的回收率接近(不同生育期回收率在 72.0% ~ 81.0% 之间),但是显著高于在玉米(不同生育时期回收率在

38.65% ~ 64.01% 之间)^[12]和黑麦草(不足 50%)^[24]上进行脉冲标记的回收率。植物同化的光合碳通过根际沉积的方式部分转移到土壤中,为土壤微生物提供能量来源或者以有机物的形式存储在碳库中^[31]。花生同化的光合碳(^{13}C)在本试验中向土壤中的转移比例平均为(34.92 ± 5.36)%,高于水稻(各生育时期平均 20.3% ~ 21.2%,但抽穗期可达 46.8% ~ 50.0%)^[11]和玉米(苗期标记 15 d 后不足 4%)^[12]。这说明不同作物品种、同一作物品种的不同时期,光合碳向土壤中转移的比例具有很大差异。本试验中,3 次标记分别在花生的开花下针前期、开花下针末期和结荚前期进行,但是并未分开取样以研究不同时期下光合碳(^{13}C)在不同部位的分配比例,这需要在以后的研究中继续探索。地上部分固定的 ^{13}C 在不同处理之间差异不显著,但是 NPKA 处理的根系和土壤固定的 ^{13}C 均显著高于 NPK,NPKA 处理固定的总 ^{13}C 亦显著高于 NPK。计算不同处理下光合碳(^{13}C)在不同部位的分配比例也发现,NPKA 处理地上部的分配比例显著低于其他 3 个处理,而土壤中的分配比例正好相反。这说明 NPKA 处理能显著提高花生光合碳(^{13}C)向土壤中的转运。Canellas 等^[32]通过玉米栽培试验发现,腐殖酸处理较常规施肥能提升根际分泌的草酸含量 200% 以上,柠檬酸含量提升 150% 以上,酒石酸含量提升 300% 以上。通过一系列试验和论证,Canellas 和 Olivares^[33]得出结论:腐殖质的施用会影响植株的初级代谢和次生代谢,改变植株的根际分泌物。Canellas 等人的结论很好地解释了本试验中 NPKA 处理显著提升花生光合碳(^{13}C)在土壤中的分配比例。腐殖酸的施用能显著提升花生光合碳向地下部(尤其是土壤)的转移,在农业生产中,施用腐殖酸是否亦能有效提升光合碳向荚果的转移,从而提升花生产量,需要在以后的研究中进一步验证。另外,花生光合碳经过根系分泌进入土壤以后的进一步转运,包括微生物的利用等过程,目前亦尚不明确,需要深入研究。

4 结论

本研究利用 ^{13}C 脉冲标记定量研究了不同施肥处理下光合碳在花生-土壤系统中的分配。发现不同施肥处理对标记期内花生总生物量影响不显著,但是 NPKA 处理显著提升了花生根系生物量。在各施肥处理下, ^{13}C 丰度均为地上部>根系>土壤, ^{13}C 含量及分配比例均为地上部>土壤>根系。NPKA 处理地下部的 ^{13}C 含量及分配比例最高,说明施用腐殖酸能显著促进花生光合碳向地下部的转运。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴——2017 [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2017/indexch.htm>
- [2] 刘娟, 汤丰收, 张俊, 等. 我国花生生产技术现状及发展趋势研究[J]. 中国农学通报, 2017, 33(22): 13–18
- [3] 串丽敏, 何萍, 赵同科. 作物推荐施肥方法研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(1): 95–102
- [4] 陈中玉, 张祖立, 小白虎. 农作物秸秆的综合开发利用[J]. 农机化研究, 2007(5): 194–196
- [5] 梁宗存, 成绍鑫, 武丽萍. 煤中腐植酸与尿素相互作用机理的研究[J]. 燃料化学学报, 1999, 27(2): 176–181
- [6] 孙克刚, 张梦, 李玉顺. 腐植酸尿素对冬小麦增产效果及氮肥利用率的影响[J]. 腐植酸, 2016(3): 18–21
- [7] 唐晓雪, 刘明, 江春玉, 等. 不同秸秆还田方式对红壤性质及花生生长的影响[J]. 土壤, 2015, 47(2): 324–328
- [8] 刘兰兰, 史春余, 万勇善, 等. 腐植酸和氨基酸肥料对花生生长和产量的影响[J]. 山东农业科学, 2007(1): 67–68
- [9] 谭娟, 郭晋川, 吴建强, 等. 不同灌溉方式下甘蔗光合特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 150–158
- [10] 陈志德, 沈一, 刘永惠. 花生光合作用特性研究进展[J]. 农业科学与技术: 英文版, 2014, 15(6): 922–925
- [11] 刘萍, 江春玉, 李忠佩. ^{13}C 脉冲标记定量研究施氮量对光合碳在水稻-土壤系统中分布的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 567–575
- [12] 安婷婷, 汪景宽, 李双异, 等. 用 ^{13}C 脉冲标记方法研究施肥与地膜覆盖对玉米光合碳分配的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 948–955
- [13] 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[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2524–2530
- [14] 李孝刚, 王兴祥, 戴传超, 等. 不同施肥措施对连作花生土传病害及产量的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 930–933
- [15] 张幸果, 王允, 和小燕, 等. 施复合微生物肥和抗重茬肥对不同花生品种(系)光合特性、酶活性及产量的影响[J]. 河南农业大学学报, 2016, 50(6): 726–733
- [16] 张建发. 花生需肥特点及配方施肥技术[J]. 现代农村科技, 2011(15): 47
- [17] 罗奇祥. 腐植酸对大豆、花生、三叶草的根瘤以及干物质生产的影响[J]. 腐植酸, 1990(3): 39–44
- [18] Eyheraguibel B, Silvestre J, Morard P. Effects of humic substances derived from organic waste enhancement on the growth and mineral nutrition of maize[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(10): 4206
- [19] Canellas L P, Olivares F L, Okorokova-Façanha A L, et al. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H^+ -ATPase activity in maize roots[J]. Plant Physiology, 2002, 130(4): 1951
- [20] Adani F, Genevini P, Zaccheo P, et al. The effect of commercial humic acid on tomato plant growth and mineral nutrition[J]. Journal of Plant Nutrition, 1998, 21(3): 561–575
- [21] Jahn T, Baluska F, Michalke W, et al. Plasma membrane H^+ ATPase in the root apex: Evidence for strong expression in xylem parenchyma and asymmetric localization within cortical and epidermal cells[J]. Physiologia Plantarum, 1998, 104(3): 311–316
- [22] Morozesk M, Bonomo M M, Idc S, et al. Effects of humic acids from landfill leachate on plants: An integrated approach using chemical, biochemical and cytogenetic analysis[J]. Chemosphere, 2017, 184: 309
- [23] 华智锐, 李小玲. 玉米秸秆水浸液对商麦 5226 的化感作用研究[J]. 江西农业学报, 2017, 29(3): 28–32
- [24] Butler J L, Bottomley P J, Griffith S M, et al. Distribution and turnover of recently fixed photosynthate in ryegrass rhizospheres[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36(2): 371–382
- [25] 周录英, 李向东, 王丽丽. 氮、磷、钾、钙肥不同用量对花生光合性能及产量品质的影响[J]. 花生学报, 2006, 35(2): 11–16
- [26] 王才斌, 郑亚萍, 梁晓艳, 等. 施肥对旱地花生主要土壤肥力指标及产量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1300–1307
- [27] 高同彬. 施肥对根际沉积碳在土壤团聚体中分配的影响[J]. 黑龙江科学, 2013, 4(5): 24–27
- [28] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526–535
- [29] Li X G, Ding C F, Hua K, et al. Soil sickness of peanuts is attributable to modifications in soil microbes induced by peanut root exudates rather than to direct allelopathy[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 78: 149–159
- [30] 王群艳, 祝贞科, 袁红朝, 等. 不同生育期光合碳在水稻-土壤系统中的分配及输入效率[J]. 环境科学研究, 2016, 29(10): 1471–1478
- [31] 祝贞科, 沈冰洁, 葛体达, 等. 农田作物同化碳输入与周转的生物地球化学过程[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 5987–5997
- [32] Canellas L P, Teixeira J L R L, Dobbss L B, et al. Humic acids crossinteractions with root and organic acids[J]. Annals of Applied Biology, 2010, 153(2): 157–166
- [33] Canellas L P, Olivares F L. Physiological responses to humic substances as plant growth promoter[J]. Chemical & Biological Technologies in Agriculture, 2014, 1(1): 3

Effect of Different Fertilization Methods on Distribution of Photosynthetic Carbon in Peanut-soil System Using ^{13}C Pulse Labeling Technique

LI Pengfa^{1,2}, JIANG Chunyu¹, LI Zhongpei^{1,2*}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: ^{13}C pulse labeling technique was used to trace the fate of ^{13}C in peanut-soil system and assess the effect of different fertilization methods on the distribution of photosynthetic carbon. Four treatments were set up in this experiment, namely NPK (normal fertilization method), NPKS (normal fertilizer and corn straw), NPKA (normal fertilizer and humic acids) and CK (no fertilizer). Results showed that the differences were not significant in total peanut biomass among different treatments. However, the root biomass of NPKA was 22.04%, 19.47% and 53.38% higher than those of CK, NPK and NPKS, respectively. Abundance of ^{13}C in aboveground was highest in NPKS while NPKA had highest ^{13}C abundance in soil. ^{13}C concentration showed no significant difference among treatments in aboveground but concentration of NPKA was higher than NPK in roots and was highest in soil. Distribution ratio of ^{13}C of NPKA was lower than those of other treatments in aboveground and was highest in soil, showing that application of humic acids can significantly promote the transport of peanut photosynthetic carbon to the underground.

Key words: Peanut; Photosynthetic carbon; Fertilization method; ^{13}C pulse labeling; Distribution