

应用 ¹³C 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

齐 鑫, 王敬国

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘 要:通过盆栽试验,研究了不同施氮 0、150 和 300 mg N·kg⁻¹ 水平下,冬小麦光合产物的分配和根系碳淀积量,分别在苗期、拔节期、花期和灌浆期用 ¹³CO₂ 脉冲标记 6 h,标记 6 h 后和生育期结束后破坏性取样,测定冬小麦地上部、根、土壤和土壤呼吸中的 ¹³C 含量。结果表明,净光合固定的 ¹³C 分配到地上部的比例从苗期 36.8%~94.1%增加到灌浆期的 39.9%~98.3%,施氮处理显著高于不施氮处理,而固定在地下部的 ¹³C 占冬小麦净吸收比例的 0.3%~30%,低氮处理显著高于高氮处理,转移到土壤中碳有 1%左右,最大值为 2.4%。整个生育时期,低氮处理冬小麦植株输入到土壤的碳量为 51.4 mg C·株⁻¹,显著高于不施氮处理的 36 mg C·株⁻¹ 和高氮处理的 34 mg C·株⁻¹。生育期结束后,通过直接称量根系干重的方法,估算不同施氮水平下小麦仍有 102、105 和 66 mg C·株⁻¹ 作为根系残体保留在土壤中,因此,在整个生育期结束后,在 3 个氮水平下冬小麦所固定的大气 CO₂ 的量分别是 138、156 和 100 mg C·株⁻¹。由此可见,低氮能增加从根系到土壤碳的累积量。

关键词:根系淀积;氮肥;冬小麦;¹³C;脉冲标记

中图分类号:Q945.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2524-07

Distribution and Translocation of Assimilated C Pulse-Labeled with ¹³C for Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.), as Affected by Nitrogen Supply

QI Xin, WANG Jing-guo

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: A pot experiment, with winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and ¹³C pulse labeling technique, was conducted to quantify the distribution and net translocation of the assimilated C from plants to soil, and investigate the effect of nitrogen(N) supply on rhizodeposition. Three levels of N fertilizer were prepared: 0 (no nitrogen), 150 (low nitrogen) and 300 mg N·kg⁻¹ (high nitrogen), and four growth stages of wheat plant were chosen for pulse-labeling with exposure to ¹³CO₂ in 6-hour for each. Prior to labeling, the soil was isolated from shoot by a PVC sheet. Destructive samplings were applied right after labeling and at the end of the growing season. The results indicated ¹³C distribution in shoots decreased from 36.8%~94.1% for the net assimilation at the seeding stage of winter wheat to 39.9%~98.3% for that at the grain filling stage of wheat and was lower in no nitrogen treatment than nitrogen applied. In other side, the proportion of 0.3%~30% retained in roots was higher at the low nitrogen rate than that at the higher one. The net assimilated C incorporated into soil was lower than 1%, with the maximum value 2.4%. Over the growing season, the estimated net plant C input into soil was 51.4 mg C·plant⁻¹ for low nitrogen treatment and significantly higher than 36 mg C·plant⁻¹ for no nitrogen and 34 mg C·plant⁻¹ for high nitrogen treatment. Based on total weight of root biomass at the harvest, winter wheat plant accumulated 102 mg C·plant⁻¹, 105 mg C·plant⁻¹ and 66 mg C·plant⁻¹ in root residues which were retained in soil after harvest for no nitrogen, lower nitrogen and high nitrogen treatments respectively. Therefore, total of carbon input to soil were 138 mg C·plant⁻¹, 156 mg C·plant⁻¹ and 100 mg C·plant⁻¹ after a growing season of plants for no, low and high nitrogen supply respectively. Our results demonstrated that in a pot experiment, low nitrogen application could significantly increase the accumulative net C input from root to soil.

Keywords: rhizodeposition; nitrogen; wheat; ¹³C; pulse-labeling

收稿日期: 2008-03-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(30471004)

作者简介: 齐 鑫(1977—), 女, 博士, 主要从事土壤有机碳方面的研究。E-mail: qixinluck@163.com

责任作者: 王敬国 E-mail: Wangjg@cau.edu.cn

土壤碳库在全球碳平衡中扮演重要角色,土壤碳库的改变对全球碳固持具有重要的影响^[1]。由于作物的连续输入和微生物呼吸,土壤碳库是动态变化的。除根和茎叶残留之外,活体植物分泌的根系淀积物也是土壤有机碳的重要来源^[2]。根系淀积是土壤碳循环中的重要环节^[3]。

土壤氮是严格限制植物生物量的主要因素之一,因此,氮肥及其对根际碳流的影响是非常相关的^[4]。一些文献指出氮肥对根系淀积有显著影响,但是氮肥的有效性和根系淀积并不是简单的关系。如 Liljeröth 等^[5]认为,提高氮肥的使用量可以刺激微生物对植物根际分泌物的利用,从而促进植物光合固定碳向地下碳库的转运。Zagal 等^[6]对大麦的研究发现,氮肥能够促进根系 ^{14}C 的淀积,而 Johansson^[7]利用 ^{14}C 脉冲标记法研究大麦发现,氮肥对根系淀积量没有显著影响。Paterson 和 Sim^[8]发现高氮和低氮对牧草的根系碳淀积没有什么不同。Kuz'yakov 和 Domanski^[9]认为高氮肥的施用量可以减少麦类作物光合固定碳向地下碳库的转运,氮肥导致同化碳向根系的转移降低,但是能增加总碳量,而氮的过量投入,则导致植物生长量下降,既浪费资源又污染环境,因此,其对土壤总碳的输入的预测是很难的。

农田氮素的主要来源是通过工业合成氨过程生产的肥料,工业固氮以及氮肥运输和施用需要大量的能耗。据估计,即使高效率的合成氨工艺过程,每固定 1 mol 的氮需要 0.4 mol 的碳,考虑到肥料的运输和施用,该系数可能高达 1.4^[10],这就意味着每生产和使用 1 t 尿素,就要向大气排放约 2 t 的 CO_2 。氮肥的过量施用和利用率不高是我国农业生产中普遍存在的问题。因而,通过对我国主要农业区之一的华北地区农田土壤碳氮在作物生产和土壤有机物质转化方面的相互作用机理及其对土壤固碳潜力的影响机制的研究,对通过氮素调控和改善土壤质量、提高水土资源的利用效率、控制温室气体的排放,具有十分重要的现实意义。

国外应用同位素示踪技术,定量研究作物地下部碳的转移,主要集中在小麦、大麦及牧草等^[11-14]。由于技术条件限制,国内在农田土壤碳平衡方面的研究主要集中在影响农田土壤呼吸的环境因素、秸秆分解动态及不同农作措施下土壤有机质含量及组成特征等方面^[15-19],对于农田土壤碳素平衡尚未进行系统的研究,特别是不同供氮水平下。为此,本文采用碳同位素示踪方法,定量研究冬小麦这一我国华北平原主要种

植物在不同供氮水平下的根系碳淀积量,获得冬小麦各个典型生育期根系碳淀积量数据,进而估算作物在整个生育期向土壤转移的总碳量,对积累我国农田土壤碳平衡研究的原始数据,提高我国农田土壤碳平衡的研究水平,对植物-土壤系统中地下部碳平衡过程的理解提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2006 年 4 月 5 日至 2006 年 6 月 5 日在中国农业大学农化网室内进行。试验土壤采自北京市海淀区东北旺农场(东经 116.2° , 北纬 39.56°),中国农业大学中德合作项目试验基地多年未耕作 0~30 cm 土层,土壤为潮土,基本理化性质如下:土壤容重 $1.45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,土壤 pH(CaCl_2) 7.45,有机碳 $11.48 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全 N $0.096 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;速效 P $21.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效 K $110 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

供试作物为冬小麦(*Triticum aestivum* L.),品种为京冬 8 号。小麦种子经 10% H_2O_2 处理后,浸泡在饱和 CaSO_4 过夜,然后移入垫有滤纸的培养皿中,0~4 $^\circ\text{C}$ 暗处理 40 d 进行春化处理。

1.2 方法

1.2.1 盆栽试验

采用内径 10 cm、高 25 cm 的 PVC 盆钵作盆栽用盆,每盆装过 4 mm 筛的风干土 2 000 g。设不施氮(N_0 , 0 $\text{mg N}\cdot\text{kg}^{-1}$),低氮(N_{150} , 150 $\text{mg N}\cdot\text{kg}^{-1}$)和高氮(N_{300} , 300 $\text{mg N}\cdot\text{kg}^{-1}$)3 个氮肥水平,分别以 50%氮肥作基肥,50%氮肥在拔节期追肥。所有处理均以磷酸二氢钙和硫酸钾作底肥,用量分别为 P_2O_5 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 K_2O 150 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。为隔离根际土,将肥料与土壤充分混匀后在特制直径 5 cm、高 15 cm 的尼龙袋(30 μm 筛)中装土 500 g,放置在盆钵中央,其余土壤装盆,浇水,使土壤含水量为田间持水量的 60%左右,将小麦种子播种于尼龙袋中央(土表下 2 cm),出苗后间为 1 株。

1.2.2 脉冲标记

脉冲标记法参照 Lu 描述^[20]。在冬小麦苗期、拔节期、花期和灌浆期进行标记,每次标记时,取各处理 6 盆冬小麦置于一个用透明有机玻璃板(透光率高于 85%)和能调节高度的铁架制成的标记箱内,横截面尺寸 40 cm $\times$ 80 cm,标记时,首先要将土壤与标记空气隔离。隔离前,在土壤与隔板间的空间中放入 1.0 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液,用于吸收土壤呼吸产生的 CO_2

(NaOH 溶液用量视土壤呼吸量而定);并把隔板和 PVC 柱的接合处用中性硅酮密封胶密封,防止 $^{13}\text{CO}_2$ 暴露于土壤中,只允许冬小麦地上部暴露在 $^{13}\text{CO}_2$ 空气中,接着将一个风扇和放有 ^{13}C 丰度为 98% 的 $\text{Ba}^{13}\text{CO}_3$ 的烧杯一同放入标记室内。标记于早晨 8 点开始,通过注射器向装有 $\text{Ba}^{13}\text{CO}_3$ 的烧杯中缓慢注入 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硫酸,使标记室内 CO_2 浓度达到 $400\text{ }\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$,开动风扇,混合标记室内空气。标记时间为 6 h。

1.2.3 取样与分析

在标记结束后,取出土壤呼吸采样器,盖上盖子带回室内,立即取出 3 个 PVC 柱进行破坏性采样,另外 3 个 PVC 盆钵放在离未标记植株 10 m 以外的地方继续生长,直到生育期结束再进行收获。取样时,用剪刀把冬小麦植株从基部剪断,在最短时间内把根系与土壤相分离,多人用肉眼把细根从土壤中挑出,尼龙袋中土壤充分搅拌后,用 4 分法采样,植株在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干,称重,用粉碎机粗磨后,选择一部分用球磨机磨细,土壤在通风处风干,后取 10 g 左右土壤加入 $4\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸去除无机碳后用去离子水洗至中性, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干,磨细,过 0.15 mm 筛待测。把收集土壤呼吸的 NaOH 溶液转移到三角瓶中,加入过量的 BaCl_2 ,形成 BaCO_3 沉淀,以酚酞作指示剂,用稀盐酸滴定,计算总呼吸产生的碳量。把 BaCO_3 沉淀用针筒吸入,接着吸入一定浓度硫酸,马上将针头插入到橡皮塞中,制备 CO_2 气体,把 CO_2 气体注入到 5 mL 真空采血瓶中,备用。以上制备样品分别在质谱仪(Delta $^{\text{plus}}\text{XP}$, Germany)中测定其 $\delta^{13}\text{C}$ 值。测定时,各样品的用量分别是:气体样品 $2\text{ }\mu\text{L}$ 左右,土壤样品 2.5 mg 左右,植株样品 0.15~0.20 mg 左右。土壤 pH 值、有机碳、全氮、速效磷和速效钾等采用常规方法测定。

1.2.4 计算和统计分析

(1) ^{13}C 丰度(%)的计算参照以下公式:

$$F_i = \frac{(\delta^{13}\text{C} + 1\ 000) \times R_{\text{PDB}}}{(\delta^{13}\text{C} + 1\ 000) \times R_{\text{PDB}} + 1} \times 100 \quad (1)$$

式中: F_i 为 ^{13}C 丰度,%; R_{PDB} 为碳同位素的标准比值(=0.011 237 2)

(2)进入各组分的 ^{13}C 量(Lu 等):

$$^{13}\text{C}_i = C_i \times \frac{(F_i - F_{nl})}{100} \times 1\ 000 \quad (2)$$

式中: $^{13}\text{C}_i$ 为 ^{13}C 量,mg; C_i 为各组分所含的碳量,g; nl 表示未标记。

(3)把小麦标记 6 h 后光合固定的 ^{13}C ,输入到地上部、根系、土壤有机碳和土壤呼吸中的总量,认为是小麦净吸收的 ^{13}C 量:

$$^{13}\text{C}_{\text{净吸收}}(\text{mg}) = (^{13}\text{C}_{\text{地上部}} + ^{13}\text{C}_{\text{根}} + ^{13}\text{C}_{\text{土壤有机碳}} + ^{13}\text{C}_{\text{土壤呼吸}})_{\text{day0}} \quad (3)$$

(4) ^{13}C 在各组分中的分配比例:

$$^{13}\text{C}_i\% = \frac{^{13}\text{C}_i}{^{13}\text{C}_{\text{净吸收}}} \times 100 \quad (4)$$

式中: $^{13}\text{C}_i\%$ 为该组分的 ^{13}C 量占小麦净吸收 ^{13}C 量的百分比, %。

(5)植株生长速率(PGR)

$$\text{PGR}(\text{mgC}\cdot\text{d}^{-1}) = C_i/\text{days} \quad (5)$$

(6)输入到土壤的总碳量(C_{soil})

贡献量 Contribution($\text{mgC}\cdot\text{株}^{-1}$)=

$$\frac{(^{13}\text{C}_{\text{soil}})_{\text{最终收获}}}{^{13}\text{C}_{\text{净吸收}}} \times \text{PGR} \quad (6)$$

式中: PGR 为植株绝对生长速率;days 为各时期生长天数,碳的累积量由贡献量相加得到。

本试验以不同氮肥用量为因素,每次取样 3 次重复,随机排列,采用 SAS 软件中的单因素 AVNOVA 进行方差分析,选择 LSD 法进行多重比较,显著水平采用 0.05。

2 结果与分析

2.1 施氮对冬小麦不同生育期地上部、地下部生物量及净光合固定 ^{13}C 的影响

由表 1 结果显示,3 种氮肥水平下,苗期收获时,不施氮处理的生物量显著高于施氮处理,而拔节期和花期收获时,无论是地上部生物量还是地下部生物量,均无显著差异。在灌浆期和最终收获时,地上部生物量均是施氮处理显著高于不施氮处理;地下部则是不施氮和低氮处理显著高于高氮处理。任何施氮水平下,小麦地上部生物量都呈灌浆期>收获期>花期>拔节期>苗期。在不施氮和高氮水平下,地下部生物量以拔节期为最大,而低氮条件下,地下部生物量则是灌浆期最大。

表 2 结果显示,在脉冲标记 6 h 后,花期收获时,小麦的净光合固定 ^{13}C 量无显著差异,而在苗期收获时,高氮处理净光合固定 ^{13}C 量显著高于不施氮处理,而在拔节期则相反,在灌浆期则是低氮处理最大。

2.2 标记 6 h 后 ^{13}C 在植株-土壤中的分配

在标记 6 h 后取样,测定地上部、根、土壤和土壤呼吸中的 ^{13}C 含量,计算其在各部分的分配,结果见表 3。

表 3 结果表明,在标记 6 h 后,净吸收的 ^{13}C 大部分保留在地上部。而在根中的分配则随着生育时期的进行而降低,不施氮处理从苗期的 7.8% 降到灌浆期

表 1 不同施氮水平下冬小麦不同生育时期的生物量

Tabel 1 The winter wheat biomass at different growing stages under different N supply						
生育期 Stage	地上部 Aboveground/g·株 ⁻¹			地下部生物量 Belowground Biomass/g·株 ⁻¹		
	N0	N150	N300	N0	N150	N300
苗期 Seedling	1.06±0.02a	0.75±0.03b	0.84±0.03b	0.22±0.01a	0.14±0.02b	0.20±0.00b
拔节期 Elongation	1.90±0.03a	1.95±0.05a	2.05±0.05a	0.38±0.05a	0.38±0.01a	0.38±0.02a
花期 Anthesis	2.85±0.09a	3.00±0.04a	3.00±0.04a	0.32±0.01a	0.30±0.05a	0.35±0.01a
灌浆期 Grain-filling	2.87±0.08b	3.61±0.18a	3.34±0.18ab	0.36±0.01a	0.39±0.03a	0.25±0.02b
收获 Harvesting	2.74±0.11b	3.27±0.12a	3.21±0.12a	0.25±0.01ab	0.26±0.03a	0.18±0.02b

注:1. N0,N150 和 N300 代表不施氮,低氮和高氮处理。2.同一栏中数据后面的不同字母表示显著水平达 5%,下同。

Note:1. N0,N150 and N300 denotes treatments of no N,low N and high N application respectively.2. Values followed by a different letter within the same column are significantly different at 0.05 level. The same below.

表 2 不同施氮水平下冬小麦不同生育时期的净光合固定 ¹³C 的量

Tabel 2 Net photosynthetical assimilation of ¹³C in winter wheat plants at each growth stage under different N supply

生育期 Stage	净同化 ¹³ C 量 net ¹³ C fixed/mg C·株 ⁻¹		
	N0	N150	N300
苗期 Seedling	3.42ab	1.98b	3.80a
拔节期 Elongation	3.87a	3.39ab	3.31b
花期 Anthesis	3.76a	4.75a	5.25a
灌浆期 Grain-filling	3.45b	4.96a	2.45b

表 3 标记 6 h 后,不同生育时期净同化 ¹³C 在冬小麦-土壤体系的分配

Table 3 Distribution of ¹³C in winter wheat-soil system at different growth stages after 6-hour labeling

处理 Treatment	净同化碳的分配 Allocation of net ¹³ C fixed/%			
	苗期 Seedling	拔节期 Elongation	花期 Anthesis	灌浆期 Grain-filling
地上部 Shoot				
N0	90.7±2.4a	95.6±1.2a	96.1±0.5a	98.3±0.9a
N150	94.1±2.3a	96.0±0.7a	72.8±2.3b	97.4±0.1a
N300	93.9±0.4a	95.0±1.0a	68.7±2.4b	97.8±0.2a
根 Root				
N0	7.8±1.6a	2.4±0.4a	2.5±0.5b	0.4±0.2b
N150	4.9±2.0a	2.3±0.5a	26.5±2.1a	1.7±0.1a
N300	5.4±0.9a	2.0±0.7a	30.0±2.4a	0.2±0.1b
土壤 Soil				
N0	1.6±0.6a	0.3±0.2a	1.2±0.4a	0.2±0.0a
N150	1.0±0.3a	0.2±0.1a	0.5±0.3a	0.2±0.1a
N300	0.7±0.5a	0.5±0.1a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
土壤呼吸 Soil Respiration				
N0	—	1.7±1.0a	0.3±0.0a	1.3±0.7a
N150	—	1.5±0.0a	0.3±0.1a	0.6±0.1a
N300	—	2.3±1.7a	0.2±0.0a	2.0±0.3a

注:数据为 3 株植物样的平均值,下同。

Note:The numbers are presented as the mean values of three plants at each labeling event. The same below.

的 0.4%,而施氮处理均在花期地下部分配达到最大,显著高于不施氮处理。低于 1%的光合产物在标记 6 h 后分配到土壤中,最大值在不施氮处理的苗期为 1.6%,高氮处理在生育后期几乎没有。土壤呼吸释放的 ¹³C 占植株光合吸收总量的 0.2%~2.3%,各处理间不显著。

2.3 生育期结束后 ¹³C 在植株-土壤中的分配

整个生育期结束后取样,测定地上部、根和土壤中的 ¹³C 含量,计算其在各部分的分配,结果见表 4。

表 4 结果显示,在生育时期结束后,与标记 6 h 相比,光合固定的 ¹³C 在地上部的分配显著降低,苗期和灌浆期施氮处理地上部显著高于不施氮处理。有 0.1%~5.4%的 ¹³C 仍存留在根系中,低氮水平高于其他两个处理,但没达到 5%的显著水平。整个生育期结

表 4 生育期结束后不同生育时期净同化 ¹³C 在冬小麦-土壤体系的分配

Table 4 Distribution of ¹³C in winter wheat-soil system at different growth stages at the end of growing season

处理 Treatment	净同化碳的分配 Allocation of net ¹³ C fixed/%			
	苗期 Seedling	拔节期 Elongation	花期 Anthesis	灌浆期 Grain-filling
地上部 Shoot				
N0	36.8±8.0b	33.4±4.4a	74.2±12.0a	39.9±3.6b
N150	72.8±6.8a	50.8±3.7a	64.5±3.2a	56.2±3.0a
N300	66.6±7.2a	53.8±7.6a	48.4±6.4a	56.1±3.8a
根 Root				
N0	2.7±0.4a	1.2±0.3a	1.1±0.3a	0.1±0.1a
N150	5.4±0.8a	2.4±0.5a	0.5±0.1a	0.1±0.1a
N300	3.5±0.6a	1.5±0.9a	0.3±0.1a	0.1±0.0a
土壤 Soil				
N0	0.6±0.2b	0.5±0.1ab	0.5±0.2a	1.0±0.2a
N150	2.4±0.2a	1.0±0.2a	0.6±0.0a	0.3±0.2ab
N300	0.7±0.5b	0.3±0.2b	0.1±0.1a	0.2±0.1b

束后,有0.1%~2.4%的¹³C保存在土壤中,苗期和拔节期低氮处理显著高于不施氮和高氮处理。

2.4 施氮对植株和根系生长速率的影响

根系和植株生长速率是根据整个生育期根系和植株生物量计算得到,显示在图1中。植株的生长速率从苗期的12 mg C·株⁻¹·d⁻¹增加到灌浆期的25 mg C·株⁻¹·d⁻¹后显著降低。而根系生长速率也呈现相同趋势,以拔节期为最大,达到3.73 mg C·株⁻¹·d⁻¹,而后显著降低。施氮处理在生育后期的生长速率显著高于不施氮处理,而对于根系的生长速率则是不施氮和低氮处理显著高于高氮处理。

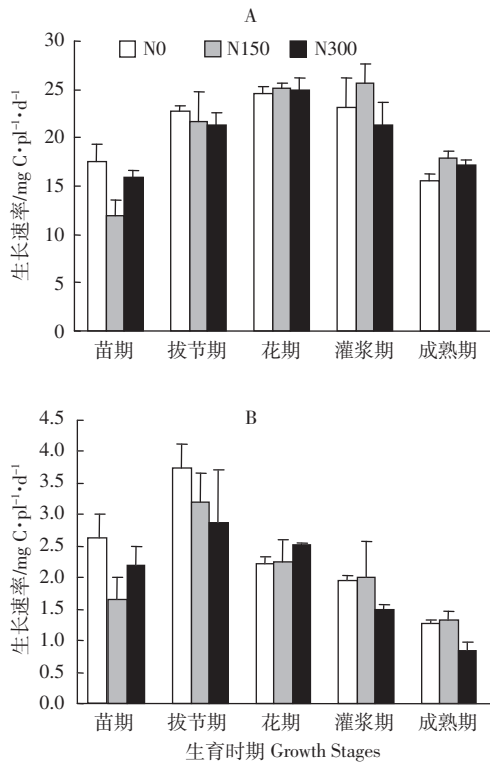


图1 不同施氮条件下冬小麦植株(A)和根系(B)生长速率
Figure 1 Rates of winter wheat plant growth at different development stages [The rate of total plant growth(A)and the rate of root growth(B)]

2.5 冬小麦吸收的C对土壤有机碳的贡献

在生育期结束后,冬小麦主要生育时期对土壤有机碳的贡献量和累积量见图2。冬小麦对土壤有机碳的贡献量以低氮处理为最大,从苗期的0.9 mg C·株⁻¹·d⁻¹降低到灌浆期的0.2 mg C·株⁻¹·d⁻¹。净固定碳的累积输入量由整个生育期的贡献量的累加得到,低氮处理在整个冬小麦生育期对土壤C的累计量达到51.4 mg C·株⁻¹,显著高于不施氮处理的36 mg C·株⁻¹和高氮处理的34 mg C·株⁻¹。

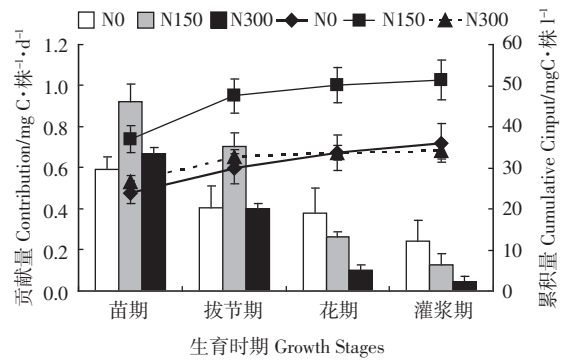


图2 不同生育时期冬小麦植株吸收的C对土壤有机碳的贡献量(柱)和各生育期累积量(线)
Figure 2 Contribution of photosynthates of winter wheat formed within 1 day at different development stages to soil organic C(bars). Also shown is the accumulation of the contributions over the growing season(line)

3 讨论

植物生长时期不同,光合产物的分配也不同。本试验中光合固定的¹³C大部分保留在植株地上部(表3和4),这与Keith^[21]对小麦的研究结果(50.4%~97.4%)和Lu^[20]对水稻的研究结果(45.3%~95%)比较接近,而且都随生长进程而逐渐向地上部分配。

Swinnen等^[22]用¹⁴C脉冲标记冬小麦和春大麦的结果显示,冬小麦分蘖期输入到地下部(根系和土壤)的碳占净¹⁴C的38.4%,拔节期为8.1%,抽穗期为5.2%,灌浆期为5.8%,完熟期4.4%;春大麦分别为28%,15.8%,6.8%,3.1%和2.1%。Martin和Kemp^[23]田间标记小麦,表明分蘖早期小麦输入到地下部的碳为23.8%,而分蘖后期为8.0%。而Lu^[20]用¹³C脉冲标记水稻,水稻分蘖期输入到地下的同化碳为32.1%,成熟期为2.4%。以上结果表明,作物同化的碳向地下部转移随生长进程而降低。本试验中冬小麦光合产物向地下部的输入比例同样随生长进程而减小(表2和3),表明在生长前期光合产物偏向于向地下的输送,利于根系生长,生育后期偏向于地上部,利于光合产物在子粒中的累积,这与以上结果非常一致。

在整个生育期,如根据田间实际种植密度4.5×10⁶株·hm⁻²计算,本试验估算,低氮水平下冬小麦输入到土壤中的碳大约231 kg C·hm⁻²,低于小麦^[21-24]的480~1305 kg C·hm⁻²,大麦^[22,24]的580~1650 kg C·hm⁻²及黑麦草^[10,26]的500~1660 kg C·hm⁻²,但是接近与Sager^[27]报道的牧草148~449 kg C·hm⁻²,高于Kuzakov^[28]报道的茼蒿180 kg C·hm⁻²和Lu^[20]对水稻的报道200 kg C·

hm^{-2} 。这些不同有可能是植物类型、标记方法、生长条件、试验技术和采样时间的不同造成的。输入到土壤中的总碳量应该包括植株收获后残留在土壤中的根系残体。基于 ^{13}C 的分配估算,不施氮、低氮和高氮处理的小麦根量分别是 26.8、35.4 和 28.4 $\text{mg C}\cdot\text{株}^{-1}$ 或者说是 120、160 和 127 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 而通过直接称量根系干重的方法估算大约有 102、105、和 66 $\text{mg C}\cdot\text{株}^{-1}$ 或者说是 459、472 和 297 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。如果基于冬小麦根系干重法,则冬小麦作物输入到地下部的总碳量大约是 138、156 和 100 $\text{mg C}\cdot\text{株}^{-1}$ 或者说是 621、703 和 450 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

我们的研究是基于氮肥对碳分配和根系淀积的影响。首先氮肥促进了植物生长,增加了植株的生长速率。特别在最终收获时,施氮的植株生物量显著高于不施氮处理。其次高氮对根系的生长产生了抑制作用,低氮处理的植株地下部生物量最大(表 1),根系碳占净同化碳的比例和占输入地下碳的比例均是高氮处理低于不施氮或低氮处理,说明氮素供应不足时,相对促进同化产物向根系分配,这也许是植物对养分胁迫的一种适应性。因为根系相对增加,能扩大养分的吸收面积,有利于植物获取土壤中的养分,进而影响碳从根系释放到土壤。我们的数据说明低氮处理能得到最大根量的同时,也在土壤中保留了最大的近期光合固定碳。同样 Kuzyakov 和 Domanski^[11]也认为施氮能降低净固定碳向地下部的转移,但能增加土壤固定的总碳量。

应用碳同位素脉冲标记技术研究植物在生育期内根系淀积的碳量,是基于标记当天吸收的 ^{13}C 规律,代表该生育期植物所吸收的光合碳的平均分配规律,即使在同一生育期内,光合碳的分配也可能出现变化,所以利用脉冲标记定量研究根系淀积碳量只能说是一个估算。不过在很多文献中都该方法成功估算了植物输入到地下的碳量^[8-9,20-21,24,27],这种估算对于研究整个生态系统尺度的碳平衡是有意义的^[2]。本试验与传统脉冲标记方法不同的地方是没有等到标记的 $^{13}\text{CO}_2$ 从土壤中释放完全后取样,由于植株和土壤微生物都喜欢利用标记的有机物质,标记的 $^{13}\text{CO}_2$ 的下降和消失不能说明标记物质进入到土壤是完全的^[20],因此传统脉冲标记方法提供的是新固定光合碳的分配^[29],在我们的试验中,生育期最后的光合分配代表了整个生育期后,冬小麦各生长阶段中形成的光合产物对植物和土壤中的净贡献,因此该方法能提供光合分配的季节性动态变化和植物碳对土壤的净输

入的信息。

4 结论

任何对大气 CO_2 净吸收和固定的措施都是对由化石燃烧而释放 CO_2 的抵消,也是对《京都议定书》的贡献,在研究中发现整个生育期结束后,冬小麦大约能固定大气 CO_2 的量达到 100~156 $\text{mg C}\cdot\text{株}^{-1}$, 冬小麦体系在全球碳估算中作为“碳汇”占有十分重要的地位。低施氮水平能增加根系淀积量,也说明氮肥的合理施用能增加土壤的碳固持。

参考文献:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304: 1623–1627.
- [2] Kuzyakov Y, Schneckenberger. Review of estimation of plant rhizodeposition and their contribution to soil organic matter formation[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2004, 50, 115–132.
- [3] Hütsch B W, Augustin J, Merbach W. Plant rhizodeposition—an important source for carbon turnover in soils[J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2002, 165: 397–407.
- [4] Nguyen C. Rhizodeposition of organic C by plants: mechanisms and controls[J]. *Agronomie*, 2003, 23: 375–396.
- [5] Liljeroth E, Baath E, Mathiasson I, et al. Root exudation and rhizoplane bacterial abundance of barley (*Hordeum vulgare* L.) in relation to nitrogen fertilization and root growth[J]. *Plant and Soil*, 1990, 127: 81–89.
- [6] Zagal E. Carbon distribution and nitrogen partitioning in a soilplant system with barley (*Hordeum vulgare* L.), ryegrass (*Lolium perenne* L.) and rape (*Brassica napus* L.) grown in a $^{14}\text{CO}_2$ atmosphere[J]. *Plant and Soil*, 1994, 166: 63–74.
- [7] Johansson G. Below-ground carbon distribution in barley (*Hordeum vulgare* L.) with and without nitrogen fertilization[J]. *Plant and Soil*, 1992, 144: 93–99.
- [8] Meharg A A, Killham K. A new method of quantifying root exudation in the presence of soil microflora[J]. *Plant and Soil*, 1991, 133: 111–116.
- [9] Kuzyakov Y, Domanski G. Carbon input by plants into the soils. Review[J]. *Plant Nutr Soil Sci*, 2000, 163: 421–431.
- [10] Schlesinger W H. Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism[J]. *Agri Ecosys Environ*, 2000, 82: 121–127.
- [11] Warembourg F R, Estelrich H D. Toward a better understanding of carbon flow in the rhizosphere: a time-dependent approach using carbon-14[J]. *Biol Fertil Soils*, 2000, 30: 528–834.
- [12] Swinnen J, Van Veen J A, Merckx R. ^{14}C pulse-labeling of field-grown spring wheat: an evaluation of its use in rhizosphere carbon budget estimations[J]. *Soil Biol Biochem*, 1994a, 26: 161–170.
- [13] Kuzyakov Y, Ehrensberger H, Stahr K. Carbon partitioning and below-ground translocation by *Lolium perenne*[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33: 61–74.
- [14] Frédéric Henry, Christophe Nguyen, Eric Paterson, et al. How does nitrogen availability alter rhizodeposition in *Lolium multiflorum* Lam.

during vegetative growth?[J]. *Plant and Soil*, 2005, 269:181–191.

- [15] 林心雄, 吴顺龄. 干旱和半湿润地区测定有机物分解速率的尼龙袋法[J]. 土壤, 1992, 24(6):315–318.

LIN Xin-xiong, WU Shun-ling. The method of nylon bag measuring organic matter decomposition rate in arid and semi-humid areas [J]. *Soils*, 1992, 24(6):315–318.

- [16] 崔玉亭, 韩纯儒, 卢进登. 集约高产农业生态系统有机物分解及土壤呼吸动态研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(1):59–64.

CUI Yu-ting, HAN Chun-ru, LU Jin-deng. Dynamics of organic material decomposition and soil respiration in intensive and high yield agroecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(1):59–64.

- [17] 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. 环境科学学报, 2006, 26(6):992–999.

MENG Fan-qiao, GUAN Gui-hong, ZHANG Qing-zhong, et al. Seasonal variation in soil respiration under different long-term cultivation practices on high yield farmland in the North China Plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(6):992–999.

- [18] 黄 斌, 王敬国, 龚元石, 等. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸与碳平衡的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1):156–160

HUANG Bin, WANG Jing-guo, GONG Yuan-shi, et al. Soil respiration and carbon balance in winter wheat and summer maize fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1):156–160.

- [19] 黄 斌, 王敬国, 金红岩, 等. 长期施肥对我国北方潮土碳储量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1):161–164

HUANG Bin, WANG Jing-guo, JIN Hong-yan, et al. Effects of long-term application fertilizer on carbon storage in calcareous meadow soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1):161–164.

- [20] Lu Y H, Watanabe A, Kimura M. Input and distribution of photosynthesized carbon in a flooded soil[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2002, 16:321–328.

- [21] Keith H, Oades J M, Martin J K. Input of carbon to soil from wheat plants[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1986, 18:445–449.

- [22] Swinnen J, Van Veen J A, Merckx R. Carbon fluxes in the rhizosphere of winter wheat and spring barley with conventional vs integrated farming[J]. *Soil Biol Biochem*, 1995, 27:811–820.

- [23] Martin J K, Kemp J R. The measurement of carbon transfers within the rhizosphere of wheat grown in field plots[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1986, 18:103–107.

- [24] Gregory P J, Atwell B J. The fate of carbon in pulse labelled crops of barley and wheat[J]. *Plant and Soil*, 1991, 136:205–213.

- [25] Swinnen J, Van Veen J A, Merckx R. Rhizosphere carbon fluxes in field-grown spring wheat: model calculations based on ^{14}C partitioning after pulse-labeling[J]. *Soil Biol Biochem*, 1994b, 26:171–182.

- [26] Van Ginkel J H, Gorissen A, Van Veen J A. Carbon and nitrogen allocation in *Lolium perenne* in response to elevated atmospheric CO_2 with emphasis on soil carbon dynamics[J]. *Plant and Soil*, 1997, 188:299–308.

- [27] Saggar S, Hedley C, Machay A D. Partitioning and translocation of photosynthetically fixed ^{14}C in grazed hill pastures[J]. *Biol Fertil Soils*, 1997, 25:152–158.

- [28] Kuzyakov Y, Siniakina S V, Ruehlmann J, et al. Effect of nitrogen fertilisation on below-ground carbon allocation in lettuce[J]. *J Sci Food Agric*, 2002, 82:1432–1441.

- [29] Lynch J M, Whipps J M. Substrate flow in the rhizosphere[J]. *Plant and Soil*, 1990, 129:1–10.