

施氮水平对油菜生育后期氮素吸收积累和分配的影响

张 叶, 聂凌利, 邢 蔓, 王晓丹, 周冰倩, 刘蓓姝, 官春云*, 官 梅*

(湖南农业大学国家油料改良中心湖南分中心, 湖南 长沙 410128)

摘 要:以湘油 15 为材料, 应用 ^{15}N 示踪技术, 在盆栽条件下设置两个施氮水平, 通过比较研究油菜初花期、盛花期、终花期、角果发育期、成熟期的干物质积累、氮素积累和分配以及 ^{15}N 丰度, 以揭示油菜生育后期根系对氮肥的吸收特性和氮素的再分配规律, 为油菜高效氮肥管理和高产栽培提供理论依据。结果表明: 在油菜发育后期, 根的氮素累积量变化不大, 茎的氮素累积量的变化呈现单峰模式, 在盛花期达到最大值。叶片氮素累积量从初花期到终花期显著下降; 角果粒氮素累积量呈 S 形曲线, 终花期之前缓慢增加, 终花期至结果发育期快速增加, 其后略有增加; 茎秆中氮素累积量从盛花期开始缓慢降低; 角果皮在终花期积累至最高, 其后逐渐下降; 角果果瓣在终花期后略有降低, 但变幅不大。在低施氮水平 (T1 处理) 下, 油菜生育后期有 61.98% 的氮素来自土壤, 38.02% 的来自肥料, 所有器官中氮素来源于土壤中的比例高于来自肥料中的比例; 在高施氮水平 (T2 处理) 下, 油菜生育后期总积累的氮素来自肥料氮的比例为 52.69%, 高于来自土壤的比例 (47.31%), 其中角果粒和茎秆中积累的氮素来自肥料的比例显著高于来自土壤的比例, 根、角果皮和角果果瓣中积累的氮素来自肥料和土壤的比例相接近。油菜生育后期对氮素仍然有较大的需求量, 也具有较强的氮素吸收与累积能力。

关键词: 油菜; 施氮量; 生育后期; 氮素; 吸收; 分配

氮素是影响油菜产量的重要因素之一^[1-4], 不仅影响营养体的构建和氮素累积, 为油菜生育后期提供更多可利用的氮源, 同时对作物后期生殖器官的形成和氮素积累有着非常重要的作用^[5]。延长土壤氮素的供应周期, 维持土壤无机氮的含量, 对最大干物质增长速率和氮素积累有促进作用^[6-8], 同时能增加作物的产量和氮素利用效率^[9-12]。较高的氮素吸收量和较高的营养体的再分配效率能显著增加籽粒产量。油菜开花后, 根、茎、叶等营养器官中的氮素转运和后期根系的氮素吸收是油菜角果生长发育所需氮素的主要来源。因此, 了解油菜生育后期氮素的再分配规律和根系的吸收特性, 对于氮肥的合理利用和提高产量至关重要, 可为油菜生育后期氮肥的施用和高产高效栽培提供理论依据。许多前人的研究结果表明, 全量氮素易造成氮素损失, 导致生育后期缺氮脱肥, 制约干物质合成能

力^[6]。作物生育中后期稳定释放氮素能实现氮素供应间有效接力, 从而提高产量、干物质积累和氮素利用率^[13-14]。一般禾谷类作物的营养器官中的氮素 60% 以上再分配至籽粒中^[15-17], 保证花后土壤氮素供应充足的情况下, 营养器官的再分配比例降低至 50%^[18]。黄亿等^[19]研究大麦时发现, 大麦籽粒氮素的积累量有 18.23% ~ 73.43% 来自花后根系氮素的吸收和转移。Malagoli 等^[20]通过大田油菜研究表明, 籽粒中氮素主要来源于营养器官的再分配和根系吸收, 分别占 73% 和 27%。虽然作物在生育后期根系对氮素的吸收量相对减少, 油菜的根系活力明显降低^[21-22], 但是有研究表明, 花期和蕾薹期吸收的氮素最高, 而且花期吸收的氮素在成熟期有 62.9% 和 50.8% 分配至籽粒中, 在角果期吸收的氮素一开始有 43.1% 和 41.7% 分配至角果中, 至成熟期角果期吸收的氮素有 58.3% 和 55.7% 转移至籽粒中^[23-24], 大量研究已经表明, 油菜苗期需要大量氮素, 但在生育中后期, 油菜仍需要吸收一定的土壤氮素, 从而促进氮素养分在油菜中向籽粒转运和再分配^[20, 25-26]。这说明油菜生育后期吸收的氮素对油菜角果的氮素营养有至关重要的作用。目前氮素吸收和转运特征在禾谷类作物上研究较多, 有关油菜后期的氮素吸收、转运与分配以及

收稿日期: 2020-07-07; 录用日期: 2020-10-09

基金项目: 国家科技支撑计划 (2014 BAD11 B03); 国家油菜产业技术体系 (CARS-13)。

作者简介: 张叶 (1996-), 男, 湖南常宁人, 硕士研究生, 研究方向为作物栽培。E-mail: 1554974935@qq.com。

通讯作者: 官春云, E-mail: guancy2011@aliyun.com; 官梅, E-mail: 972696327@qq.com。

氮素代谢特性等的研究报道较少。本试验应用 ^{15}N 示踪技术, 在盆栽条件下设置两个施氮水平, 比较研究了油菜在初花期、盛花期、终花期、角果发育期、成熟期的干物质积累、氮素积累和分配特性, 以期揭示油菜生育后期的氮素吸收、转运和利用规律, 为油菜生育后期的合理施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2015 年 9 月 ~ 2016 年 5 月在湖南省长沙市湖南农业大学耘园基地防雨棚进行, 试验土壤为水稻-油菜轮作土, 土壤基本理化性质为: pH 值 5.7, 有机质 23.1 g/kg, 全氮 1.45 g/kg, 全磷 0.75 g/kg, 碱解氮 129.1 mg/kg, 有效磷 10 mg/kg, 速效钾 280 mg/kg。

1.2 供试品种和试验设计

供试油菜品种为湘油 15, 由湖南农业大学国家油料改良中心湖南分中心提供。应用 ^{15}N 示踪技术, 在盆栽条件下设置两个施氮水平。T1 处理: 施氮量为每盆 N 0.8 g, 即每盆施丰度为 5.18% 的 ^{15}N 标记尿素 1.714 g, 作基肥一次施入。T2 处理: 施氮量为每盆 N 1.2 g, 即每盆施丰度为 5.18% 的 ^{15}N 标记尿素 2.571 g, 作基肥一次施入。

土培盆钵上沿直径 28 cm, 下底直径 20 cm, 高 18 cm。内装过筛风干土 6 kg。盆底密封, 防止水分和养分淋失。10 月 11 日播种, 11 月 8 日每盆移栽 1 株健壮幼苗。正常供氮处理 (T2 处理) 施肥量为: N 0.2 g/kg、 P_2O_5 0.1 g/kg、 K_2O 0.1 g/kg; T1 处理施氮量为 T2 的三分之二, 其他肥料施用均一致, 所有肥料均做底肥一次施入。每个处理种植 30 盆。

1.3 取样时间与方法

在油菜初花期 (播种后 150 d)、盛花期 (播种后 161 d)、终花期 (播种后 170 d)、角果发育期 (播种后 186 d)、成熟期 (播种后 202 d) 采集油菜整株鲜样, 将采集的油菜鲜样洗净, 分部位称重, 放入烘箱中 105℃ 杀青 30 min, 然后 60℃ 烘干至恒重, 测干物质质量。油菜生育期内及时收集落叶。将烘干样品用球磨机磨碎过筛后分别用 Isoprime 100 型同位素比质谱仪 (英国) 和 Elementar Vario PYRO cube 型元素分析仪 (德国) 测定氮含量及 ^{15}N 丰度。

有关计算公式^[17]如下:

氮素累积量 (mg/株) = 干物质质量 × 氮含量

^{15}N 原子百分超 = 样品或 ^{15}N 标记肥料的 ^{15}N 丰度 - ^{15}N 天然丰度

植株 (器官) 氮素来自肥料的比例 (%) = 样品中 ^{15}N 原子百分超 / 标记肥料中 ^{15}N 原子百分超 × 100

植株某一段时期吸氮量 = 下一个时期氮素累积量 - 上一个时期氮素累积量

植株 (器官) 吸收的肥料氮 (mg/株) = 植株 (器官) 吸氮量 (mg/株) × 植株 (器官) 氮素来自肥料的比例 (%)

植株 (器官) 氮素来自土壤的比例 (%) = 1 - 植株 (器官) 氮素来自肥料的比例 (%)

植株 (器官) 吸收的土壤氮 (mg/株) = 植株 (器官) 吸氮量 - 植株 (器官) 吸收的肥料氮

各器官氮素分配比例 (%) = 器官氮素 / 单株总氮 × 100

1.4 数据统计与分析

所有数据均用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 对数据处理分析, 采用单因素方差分析 ($P < 0.05$), LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 油菜生育后期氮含量动态变化

由图 1 可知, 不论是 T1 还是 T2 处理, 茎中氮含量在生育后期不断下降, 在成熟期分别降至 1.14% 和 1.55%。角果皮中氮含量在盛花期达到最大, 分别为 4.42% 和 4.85%, 之后不断下降。根中的氮含量则在初花期至盛花期下降明显, 之后变化不大。角果粒中的氮含量在盛花期至终花期上升明显, 但在角果发育期随着干物质重的增加, 稀释效应逐渐明显, 氮含量的增加速率减小, 之后有略微的下降, 成熟期角果粒中的氮含量为 4.77% 和 4.78%。

2.2 油菜生育后期氮素累积量动态变化

图 2 显示了不同氮素供应条件下油菜生育后期 (花角期) 不同器官的氮素累积量动态。由图 2 可知, 不同氮素供应水平对不同器官氮素累积动态变化的趋势影响不明显, 均表现为叶片氮素累积量从初花期到终花期显著下降; 角果粒氮素累积量呈 S 形曲线, 终花期之前缓慢增加, 终花期至结果发育期快速增加, 其后略有增加; 茎秆中氮素累积量从盛花期开始缓慢降低; 角果皮在终花期积累至最高, 其后逐渐下降; 角果果瓣在终花期后略有

降低, 但变幅不大。氮素供应水平显著影响各器官中氮素积累总量和变幅, T1 和 T2 处理的叶片初花期氮素积累量分别为 405.35 和 675.12 mg/株, 在花角期氮素积累量不断下降, 且在盛花期至终花期减少量最大, 两者分别为 268.72 和 464.59 mg/株; 角

果皮在终花期积累量达到最高, T1 和 T2 处理分别为 184.22 和 275.38 mg/株; 角果粒在成熟期的氮素积累量达到最高, T1 和 T2 处理分别为 460.99 和 540.78 mg/株。

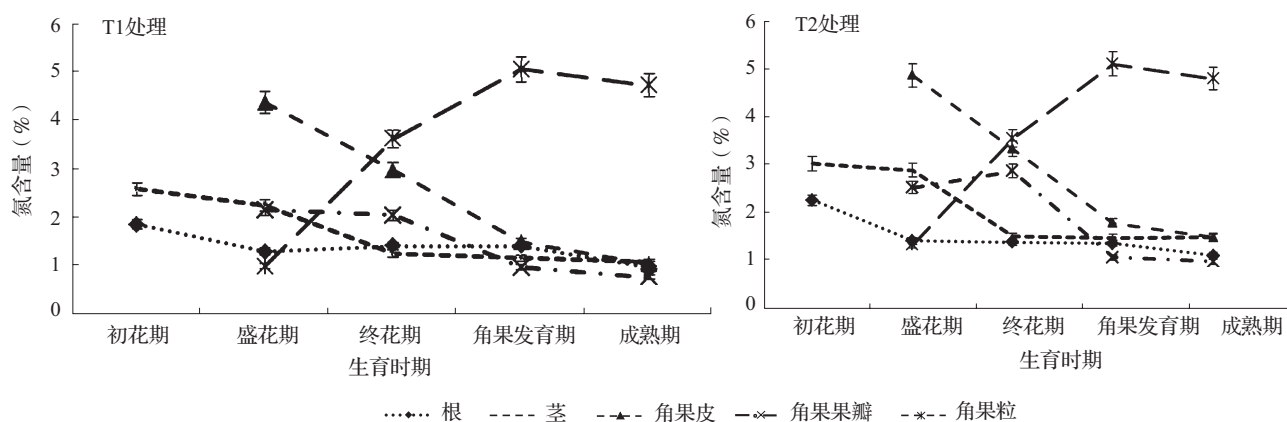


图1 油菜氮含量动态变化

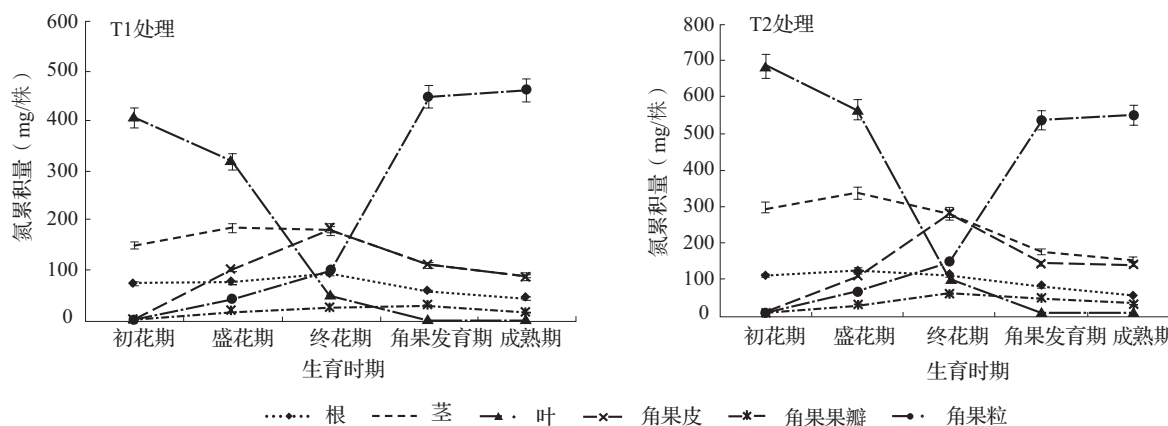


图2 油菜后期不同器官氮素积累动态

2.3 成熟期不同来源氮素在不同器官中的分配

从表1中可以看出, 油菜收获时植株吸收积累的氮素大部分会分配转移至角果粒中, T1 和 T2 处理的氮素在角果粒中的分配比例分别为 66.28% 和 60.61%。T1 和 T2 处理下, 植株中氮素分配比例由高到低为角果粒 > 茎 > 角果皮 > 根 > 角果果瓣, 相对而言, T2 处理比 T1 处理降低了氮素在角果粒中的分配比例, 增加了氮素在茎秆和角果皮中的分配比例。在氮素来源方面, 成熟期的油菜不同器官间, 土壤氮和肥料氮所占的比例因施氮水平的不同而有所差别。在 T1 处理下, 油菜有 61.98% 的氮素来自土壤中氮, 38.02% 来自施入的肥料, 所有器官中氮素来源于土壤中的比例高于来自肥料中的比

例。在 T2 处理下, 油菜总积累的氮素来自肥料氮的比例为 52.69%, 高于来自土壤的 47.31%, 其中角果粒和茎秆中积累的氮素来自肥料的比例显著高于来自土壤的比例, 根、角果皮和角果果瓣中积累的氮素来自肥料和土壤的比例相接近。

2.4 油菜生育后期氮素吸收情况

从表2中可以看出, 油菜在生育后期(花角期)仍然吸收和积累氮素, T1 和 T2 处理, 油菜生育后期吸收积累的氮素分别占全生育期总积累量的 10.60% 和 12.56%。施氮量不同的处理生育后期不同阶段氮素吸收存在差异, 在始花期至盛花期阶段, T1 和 T2 处理, 油菜分别从土壤吸收 28.79 和 45.58 mg/株, 占油菜整个生育期吸

表 1 油菜成熟期不同器官氮素分配情况以及氮素来源

		根		茎		角果皮		角果果瓣		角果粒	
	处理	分配量	分配比例	分配量	分配比例	分配量	分配比例	分配量	分配比例	分配量	分配比例
		(mg/株)	(%)	(mg/株)	(%)	(mg/株)	(%)	(mg/株)	(%)	(mg/株)	(%)
总氮	T1	43.16a	6.21	91.13a	13.10	84.90a	12.21	15.32a	2.20	460.99a	66.28
	T2	47.40b	5.31	146.86b	16.46	133.24b	14.93	23.98b	2.69	540.78b	60.61
肥料氮	T1	16.08a	6.08	44.05a	16.66	32.32a	12.22	5.80a	2.19	166.19a	62.85
	T2	21.60b	4.59	89.56b	19.05	65.89b	14.01	11.89b	2.53	281.23b	59.81
土壤氮	T1	27.08a	6.28	47.08a	10.92	52.58a	12.20	9.53a	2.21	294.80a	68.39
	T2	25.80b	6.11	57.31b	13.58	67.35b	15.96	12.09b	2.86	259.55b	61.49

注：不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

收氮素的 3.65% 和 4.17%；盛花期至角果发育前期（终花期）吸收的氮素占整个油菜中氮素的 5.29% 和 6.53%；在角果发育成熟阶段，油菜植株在 T1 处理下可以增加 13.13 mg/株，在 T2 处理下增加 20.37 mg/株。

表 2 油菜生育后期氮素吸收动态变化

处理	氮吸收	始花期 - 盛花期	盛花期 - 角果发育前期	角果发育前期 - 角果发育后期
T1	吸收量 (mg/株)	28.79a	41.72a	13.13a
	吸收率 (%)	3.65	5.29	1.66
T2	吸收量 (mg/株)	45.58b	71.38b	20.37b
	吸收率 (%)	4.17	6.53	1.86

3 讨论

3.1 油菜生育后期氮素源库关系变化

氮素作为活跃的元素，在作物的生长发育阶段，植株内的氮素处于不断的吸收、同化、转运和分配的动态中^[23-24, 27]。前人研究表明^[28-30]，花后，作物体内在初花前积累的氮素大量从营养器官再分配到籽粒中，氮素的源库关系基本是：根、茎、叶为氮源，而生殖器官是唯一的氮库。本试验着重研究油菜生育后期氮素源库关系的变化，结果表明，在初花期至盛花期，最大的氮素存储器官——叶片是此时的唯一氮“源”器官，氮素不断从叶片中转移至根、茎和角果中，并且在此阶段油菜的氮素再分配活动相对较缓慢，氮素的转移量相对较小。花期后半段，叶和茎同时作为氮“源”转移氮素至其余的器官，且不论 T1 和 T2 处理均是叶中的氮素转运量大于茎。氮库方面，不同器官的转入量不同，不同氮素水平均表现为角果皮 > 角果

粒 > 角果果瓣 > 根。从终花期即角果发育前期开始，根、茎、叶以及角果均成为氮“源”，氮素会不断转运至角果粒中，而在 T1 处理下，依旧有部分氮素转移至角果果瓣，而在 T2 处理下则角果果瓣也是氮“源”之一，只是转运量相对较小。从角果出现开始，角果就成为了主要的氮素“库”，氮素不断转移至角果。但在盛花期至角果完全成型的这段时间，角果皮作为光合中心，是主要的氮素聚集地，而此时的角果粒尚未成形，可提供的库容量较小，氮素累积量增速较小。待角果光合能力达到最大时不断制造生产光合产物并转移至角果粒中，扩大角果粒的库容量，同时角果皮此时作为最大的氮源不断将氮素转移至角果粒，故此时角果粒中氮素累积量快速增长。而在角果发育后期角果粒干物质基本不再增加，可利用的氮素也大幅度减少，角果粒中的氮素累积量增加较小。因此油菜角果粒的氮素累积量呈“S”形的变化曲线。

3.2 油菜氮含量动态变化

在油菜盛花期之后，根、茎、叶基本已经停止生长，甚至干物质有所下降，生殖生长开始占据主导地位，随着不同器官的氮素转出，氮含量不断降低。而角果皮在角果发育中期达到最大之后不再增加，角果发育前期存储的氮素不断转移至角果粒中，导致角果皮的氮含量不断降低。而在角果粒中，前期因为氮素累积的增加，干物质相对增加较慢，所以氮含量快速增加，由于角果干物质积累呈现“S”形曲线，当角果干物质积累达到最大积累速度时，稀释效应逐渐明显，氮含量增加略微减慢。而在角果发育后期，含氮量略微下降。

3.3 油菜生育后期的氮素吸收特性

耕作层是大量土壤矿物氮的富集地^[31]。作物

整个生育期吸收的氮素主要是肥料氮和土壤氮, 它们的比例为 1:2^[32-33]。本试验利用 ¹⁵N 同位素示踪法研究得到, 油菜在 T1 处理下对土壤氮的吸收量大于肥料氮, 增加氮肥施用量能减少土壤氮素的吸收比例, 实现对土壤肥力的保持。同时从油菜生育后期氮素的吸收动态变化可以看出, 在油菜生育后期, 油菜依旧需要从土壤中吸收 10.60% 和 12.56% 的氮素, 这与王小燕等^[34]的研究结果一致。并且在油菜生育的整个阶段, 一次性施肥的效果远远不如分段定量施肥, 宋海星等^[35]的研究表明, 油菜在不同生育时期吸收的氮素有所不同, 但是需要量均在 10% 以上, 加之氮素的损失随着施入时间的增加不断增加。在油菜生育后期土壤供应的氮素非常有限。在油菜生育中后期增加土壤无机氮含量, 有利于籽粒灌浆结实, 优化角果发育和单株生产力^[36-37], 从而提高籽粒产量。

3.4 油菜氮肥适宜施用量

油菜对肥料氮的依赖性较高, 氮肥施用虽降低了氮素利用率, 但明显改善了油菜的生长状况^[38-41]。于飞等^[42]研究表明, 氮肥的施入显著影响油菜的生长及干物质累积, 也显著影响油菜生长前期的养分吸收。但是氮肥施用不宜过量, 过量施氮不但会造成油菜贪青晚熟, 也会显著增加土壤氮挥发损失, 降低氮肥利用率, 从而带来一些环境问题, 特别是氮淋失造成地下水污染和农田氮氧化物排放导致全球变暖等问题^[43-45]。本试验 T1 处理施氮量是正常施氮量 (T2 处理) 的三分之二, 氮肥减施条件下, 除角果粒盛花期的氮含量显著低于 T2 处理, 生育后期的其他时期氮含量基本相同, 但是氮累积量 T1 处理均显著低于 T2 处理, 表明即使是湘油 15 这样的氮高效品种对肥料氮也具有很高的依赖性。

4 结论

油菜生育后期仍然有较强的氮素吸收与累积能力, 其吸收和积累的氮素占全生育期氮素积累总量的 10.60% ~ 12.56%, 这一时期吸收和积累的氮素有利于延缓后期衰老, 同时向角果粒转运的比例高。

油菜籽粒的氮素累积量呈“S”形曲线, 花期是氮素存储准备时期, 大量存储氮素在角果皮中, 有利于籽粒氮素快速增加阶段的氮素供应。

油菜生育后期, 随着肥料氮素的损失和吸收, 土壤的有效氮素供应不足, 结合油菜生育后期油

菜在花角期的需肥特性, 在油菜生育后期追施总需氮量 10% 左右的氮肥有利于促进油菜高产和氮效率。

参考文献:

- [1] 冷锁虎, 单玉华, 周宝梅. 氮素营养对油菜成熟期生物产量的调控 [J]. 中国油料作物学报, 2000, 22 (2): 53-56.
- [2] Asare E, Scarisbrick D H. Rate of nitrogen and sculpture fertilizers on yield, yield components and seed quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Field Crops Research, 1995, 44 (1): 41-46.
- [3] Dreccer M F, Schapendonk A H C M, Slafer G A, et al. Comparative response of wheat and oilseed rape to nitrogen supply: absorption and utilization efficiency of radiation and nitrogen during the reproductive stages determining yield [J]. Plant and Soil, 2000, 220: 189-205.
- [4] Rathke G W, Christen O, Diepenbrock W. Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown in different crop rotations [J]. Field Crops Research, 2005, 94 (2-3): 103-113.
- [5] Andersson A, Johansson E, Oscarson P. Nitrogen redistribution from the roots in post-anthesis plants of spring wheat [J]. Plant and Soil, 2005, 269: 321-332.
- [6] 周宝元, 王新兵, 王志敏, 等. 不同耕作方式下缓释肥对夏玉米产量及氮素利用效率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (3): 821-829.
- [7] Zhou W L, Lou Y S, Ren L X, et al. Application of controlled-release nitrogen fertilizer decreased methane emission in transgenic rice from a paddy soil [J]. Water, Air and Soil Pollution, 2014, 225 (3): 1897-1901.
- [8] Gao X, Li C L, Zhang M, et al. Controlled release urea improved the nitrogen use efficiency, yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) on silt loamy soil [J]. Field Crops Research, 2015, 181: 60-68.
- [9] 何杰, 李冰, 王昌全, 等. 不同施氮处理对水稻油菜轮作土壤氮素供应与作物产量的影响 [J]. 中国农业科学, 2017, 50 (15): 2957-2968.
- [10] 王寅, 冯国忠, 张天山, 等. 控释氮肥与尿素混施对连作春玉米产量、氮素吸收和氮素平衡的影响 [J]. 中国农业科学, 2016, 49 (3): 518-528.
- [11] 王素萍, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 控释尿素与尿素配施对油菜籽产量、经济效益和土壤无机氮含量的影响 [J]. 中国油料作物学报, 2013, 35 (3): 295-300.
- [12] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响 [J]. 水土保持学报, 2016, 30 (2): 155-161.
- [13] 张敬昇, 李冰, 王昌全, 等. 不同控氮比掺混肥对土壤无机氮与脲酶及冬小麦产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34 (4): 159-164.

- [14] 梁靖越, 张敬昇, 王昌全, 等. 控释尿素对小麦籽粒产量和氮素利用率的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(1): 157-164.
- [15] Palta J A, Fillery I R P. N application increases pre-anthesis contribution of dry matter to grain yield in wheat grown on a duplex soil[J]. Australian Journal of Agricultural and Research, 1995, 46(3): 507-518.
- [16] Masoni A, Ercoli L, Mariotti M, et al. Post-anthesis accumulation and remobilization of dry matter, nitrogen and phosphorus in durum wheat as affected by soil type[J]. European Journal of Agronomy, 2007, 26: 179-186.
- [17] 晏娟, 沈其荣, 尹斌, 等. 应用¹⁵N示踪技术研究水稻对氮肥的吸收和分配[J]. 核农学报, 2009, 23(3): 487-491.
- [18] Rosolem C A, Kato S M, Machado J R, et al. Nitrogen redistribution to sorghum grains as affected by plant competition[J]. Plant and Soil, 1993, 155/156: 199-202.
- [19] 黄亿, 李廷轩, 张锡洲, 等. 氮高效利用基因型大麦氮素转移及氮形态组分特征[J]. 中国农业科学, 2015, 48(6): 1151-1161.
- [20] Malagoli P, Laine P, Rossato L, et al. Dynamics of nitrogen uptake and mobilization in field-grown winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) from stem extension to harvest[J]. Annals Botany, 2005, 95(5): 853-861.
- [21] 肖时运, 刘强, 荣湘民, 等. 不同施氮水平对苜蓿产量、品质及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 913-917.
- [22] 陈军文, 刘强, 荣湘民, 等. 氮磷钾不同配比对饲用稻威优198产量及糙米蛋白含量的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(3): 522-529.
- [23] Séverine S, Nathalie M J, Christian J, et al. Dynamics of exogenous nitrogen partitioning and nitrogen remobilization from vegetative organs in pea revealed by¹⁵N *in vivo* labeling throughout[J]. Plant Physiology, 2005, 137(4): 1463-1473.
- [24] 张振华, 宋海星, 刘强, 等. 油菜生育期氮素的吸收、分配及转运特性[J]. 作物学报, 2010, 36(2): 321-326.
- [25] 刘涛, 鲁剑巍, 任涛, 等. 适宜氮水平下冬油菜苗期不同叶位叶片光合氮分配特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(18): 3232-3541.
- [26] Gombert J, Le D F, Lothier J, et al. Effect of nitrogen fertilization on nitrogen dynamics in oilseed rape using¹⁵N-labeling field experiment[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2010, 173: 875-884.
- [27] 张振华. 油菜体内氮素再分配与氮素生理效率的关系研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
- [28] 时向东, 时映, 王瑞宝, 等. 稳定氮同位素示踪技术在烟草研究中的应用[J]. 中国烟草学报, 2008, 14(1): 51-57.
- [29] 魏海燕, 张洪程, 杭杰, 等. 不同氮素利用效率基因型水稻氮素积累与转移的特性[J]. 作物学报, 2008, 34(1): 119-125.
- [30] 郑成岩, 于振文, 王西芝, 等. 灌水量和时期对高产小麦氮素积累、分配和转运及土壤硝态氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1324-1332.
- [31] 左青松, 杨海燕, 冷锁虎, 等. 施氮量对油菜氮素积累和运转及氮素利用率的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(3): 511-518.
- [32] Blankenau K, Olls H. Effect of different crop densities of winter wheat on recovery of nitrogen in crop and soil within the growth period[J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 2001, 186: 151-156.
- [33] 王月福, 姜东, 于振文, 等. 氮素水平对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响及其生理基础[J]. 中国农业科学, 2003, 36(5): 513-520.
- [34] 王小燕, 于振文. 不同施氮量条件下灌溉量对小麦氮素吸收转运和分配的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3015-3024.
- [35] 宋海星, 彭建伟, 刘强, 等. 不同氮素生理效率油菜生育后期氮素再分配特性研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(6): 1858-1864.
- [36] 明日, 鲁剑巍, 任涛, 等. 施氮提高直播冬油菜主序不同部位角果生产力[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(3): 355-361.
- [37] 王寅, 李雅颖, 鲁剑巍, 等. 栽培模式对直播油菜生长、产量和养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 597-607.
- [38] 张晓龙, 何俊龙, 宋海星, 等. 播期、密度和施肥量对直播油菜重要农艺性状与产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(5): 70-74.
- [39] 张洋洋, 鲁剑巍, 邹娟, 等. 冬油菜施钾的增产效果和肥料利用率研究[J]. 中国土壤与肥料, 2013(5): 51-55.
- [40] 焦峰, 吕淑敏, 李响, 等. 氮肥管理对¹⁵N标记水稻秸秆氮吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(2): 154-158.
- [41] 张智, 乔艳, 刘东海, 等. 氮肥减施对油菜产量、氮素吸收与利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(2): 140-145, 183.
- [42] 于飞, 周健民, 王火焰, 等. 不同氮肥对油菜生长和养分吸收的影响[J]. 土壤肥料, 2005(1): 20-22, 41.
- [43] 山楠, 赵同科, 杜连凤, 等. 华北平原中部夏玉米农田不同施氮水平氨挥发规律[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4): 32-40.
- [44] 岳克, 钟雯瑾, 宋晓, 等. 新型氮肥对潮土冬小麦产量及氮肥利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4): 130-139.
- [45] 张海星, 常生华, 贾倩民, 等. 禾豆间作与施氮对河西地区青贮玉米产量及水氮利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3): 51-62.

Effects of nitrogen application level on nitrogen uptake, accumulation and distribution in oilseed rape during late growing period

ZHANG Ye, NIE Ling-li, XING Man, WANG Xiao-dan, ZHOU Bing-qian, LIU Bei-shu, GUAN Chun-yun*, GUAN Mei* (Hunan Branch of National Oil Improvement Center of Hunan Agricultural University, Changsha Hunan 410128)

Abstract: The experiment was carried out in the canopy. Xiang You 15 was regarded as our experiment material, and the ^{15}N tracer technique was taken. Two nitrogen levels were set up under the condition of potted plant, the accumulation of dry matter, nitrogen accumulation and distribution and ^{15}N abundance during the rapeseed early flowering, full bloom, final flowering, bean stage and mature period were compared and researched to reveal the absorption characteristics of nitrogen fertilizer and the redistribution of nitrogen in the root system of rapeseed, and to provide a theoretical basis for efficient nitrogen management and high-yield cultivation of rapeseed. The results showed that: in the late stage of rape, the amount of nitrogen accumulation in the root was not significant, and the change of nitrogen accumulation in the stem showed the single peak mode, which reached the maximum during the flowering period. The amount of nitrogen accumulation of leaves decreased significantly not in the early flowering period but in the final flowering stage. The amount of nitrogen accumulation in the silique showed the S pattern, which increased slowly before the final flowering period, after that increased rapidly until the fruiting period, and then increased a little. The amount of nitrogen accumulation in the stem from the flowering period began slowly. The pod skin accumulated to the highest in the final flowering period, then gradually decreased. The pod carpel decreased slightly after the final flowering period, but the change was small. At the low level of nitrogen, 61.98% of the rape nitrogen came from soil, and 38.02% came from fertilizer, which indicated that the proportion of nitrogen from the soil was higher than that from fertilizer. In the high nitrogen level, the percentage of total accumulated nitrogen of rapeseed from fertilizer was 52.69%, compared with the 47.31% from the soil, and the percentage of the accumulation of nitrogen in silique and stem was significantly higher than from the soil. The proportion was close for root, pod skin and pod carpel in the accumulation of nitrogen in soil or fertilizer. In the later stage of rapeseed, there was still a large demand for nitrogen, but also had a strong ability to absorb and accumulate nitrogen.

Key words: rapeseed; nitrogen application; late development stage; nitrogen; absorption; distribution