

不同轮作和氮肥分配季节下土壤氮素供应 和油菜氮素吸收差异

卜容燕, 任涛, 廖世鹏, 李小坤, 丛日环, 张洋洋, 鲁剑巍*
(华中农业大学资源与环境学院/华中农业大学微量元素研究中心, 湖北武汉 430070)

摘要:【目的】土壤氮素供应受到土地利用方式影响, 明确土壤氮素供应特性是合理施肥的基础。研究不同轮作方式下油菜季土壤氮素供应特征和油菜氮素吸收规律, 可以为油菜氮肥施用提供科学依据。【方法】本试验为同田对比田间试验, 采用裂区试验设计, 主处理为两种轮作方式, 即水旱轮作(水稻-油菜轮作)和旱地轮作(棉花-油菜轮作); 副处理为氮肥(N 150 kg/hm²)施用季节。每种轮作方式下设3个氮肥施用季节处理, 分别为: 1) 两季均不施氮肥(N₀₋₀); 2) 水稻/棉花季施氮, 油菜当季不施氮(N₁₅₀₋₀); 3) 水稻/棉花季不施氮, 油菜当季施氮(N₀₋₁₅₀)。通过原位矿化培养方法测定油菜不同生育期土壤氮素净矿化量, 同时测定油菜在不同生育期内氮素吸收量。【结果】与两季均不施氮相比, 油菜季施氮, 稻油轮作下土壤氮净矿化累积量显著增加 101.2 kg/hm², 油菜氮素吸收增加 76.8 kg/hm²; 棉油轮作条件下, 土壤氮净矿化累积量显著增加了 110.0 kg/hm², 油菜氮素吸收增加 96.2 kg/hm²。从分配比例上分析, 在油菜苗期—薹期, 稻油轮作土壤氮素净矿化量占累计矿化量的 52.3%, 棉油轮作为 64.5%, 棉油轮作高于稻油轮作; 然而在油菜花期—成熟期, 稻油轮作土壤氮素净矿化量高于棉油轮作。与土壤氮素净矿化相一致, 在油菜苗期—薹期, 棉油轮作油菜氮素吸收量比稻油轮作高 37.1 kg/hm², 棉油轮作有利于油菜前期氮素吸收; 而油菜生长后期稻油轮作比棉油轮作多吸收氮素 18.2 kg/hm²。稻油轮作有利于油菜后期氮素吸收。【结论】棉油轮作条件下, 残留棉花叶片养分释放快, 有利于油菜生长前期(苗期—薹期)土壤氮素供应; 而稻油轮作条件下, 残留水稻根茬养分释放慢则有利于油菜生长后期(花期—成熟期)土壤氮素供应。因此棉油轮作有利于油菜前期生长, 稻油轮作有利于油菜后期生长。稻油轮作条件下在油菜生长前期可适量增加氮肥供应, 后期降低氮肥供应; 棉油轮作下在油菜生长前期适量降低氮肥供应, 后期增加氮肥供应。

关键词: 轮作; 土壤氮素矿化; 氮素吸收; 油菜

Difference of soil nitrogen supply and rapeseed nitrogen uptake under different rotation systems and seasonal distribution of nitrogen fertilizer

BU Rong-yan, REN Tao, LIAO Shi-peng, LI Xiao-kun, CONG Ri-huan, ZHANG Yang-yang, LU Jian-wei*
(College of Resources and Environment/Microelement Research Center of Huazhong Agricultural University, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: 【Objectives】Rapeseed production efficiency heavily relies on reasonable nitrogen (N) supply. The objective was to unravel the soil N turnover and rapeseed N uptake in two common rotation systems, which would provide guidance for the N fertilizer management. 【Methods】A split plot experiment was conducted at the Experiment Farm in Huazhong Agricultural University, Wuhan, China. The main treatments were composed of two rotation systems, that was rice-rapeseed rotation (RR) and cotton-rapeseed rotation (CR). The sub-treatments were the application season of nitrogen fertilizers, included: 1) no nitrogen application in both seasons(N₀₋₀); 2) N 150 kg/hm² only in rice or cotton(N₁₅₀₋₀); 3) N 150 kg/hm² only in rapeseed season(N₀₋₁₅₀). The net soil nitrogen mineralization amount in different growing stages of rapeseed were measured using *in situ* minerali-

收稿日期: 2018-03-15 接受日期: 2018-05-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0200108); 国家“油菜产业技术体系”养分管理与面源污染治理岗位(CARS-12)资助。

联系方式: 卜容燕 E-mail: burongyan@mail.hzau.edu.cn; * 通信作者 鲁剑巍 E-mail: lunm@mail.hzau.edu.cn

zation culture method, and the N uptake in the corresponding stages of rapeseed were measured at the same time. 【 **Results** 】 The capacity of soil N supply and the total N uptake of rapeseed were considerably enhanced by N fertilizer application. Compared to zero N fertilizer input, the net soil N mineralization accumulations were increased by 101.2 kg/hm² in RR and 110.0 kg/hm² in CR, respectively, and rapeseed N uptake were increased by 76.8 kg/hm² in RR and 96.2 kg/hm² in CR, respectively, when N 150 kg/hm² was applied only in rapeseed season. From the distribution proportion, the net soil N mineralization during rapeseed growth period (seedling–stem-elongation period) in CR was more than that in RR, which accounted for 64.5% and 52.3%, respectively; while this tendency was inverted in the late growth stage of rapeseed (flowering–maturity period). The trend of rapeseed N uptake was similar to the net soil N mineralization. The rapeseed N uptake in CR was 37.1 kg/hm² more than that in RR during rapeseed growth period (seedling–stem-elongation period), while 18.2 kg/hm² less than that in RR during the late growth stage of rapeseed (flowering–maturity period), suggesting CR is conducive for rapeseed N uptake in early stages while RR is beneficial to the rapeseed N uptake in late season. 【 **Conclusions** 】 In the cotton–rapeseed rotation system, the rapid release of nutrients from the residual cotton leaves is beneficial to the N supply in the early growth stage of rapeseed; while in the rice–rapeseed rotation, the slow release of nutrients from rice root residues is beneficial to the N supply in the late growing stage of rapeseed. Thus the N fertilizer should be more applied on the early growing stages of rapeseed in the rice–rapeseed rotation, and in the late stages of rapeseed in the cotton–rapeseed rotation.

Key words: rotation system; mineralization of soil nitrogen; nitrogen uptake; rapeseed

水旱轮作(水稻与油菜轮作)和旱地轮作(棉花、玉米、大豆与油菜轮作)是我国常见的油菜轮作模式。高强度种植方式下,土壤养分消耗较大,恢复期较短,合理施肥已成为提高油菜产量和维持地力的重要措施^[1]。长江流域油菜主产区进行的大量田间试验结果表明合理施肥可以显著提高油菜产量,其中氮、磷、钾肥的贡献率分别为72.2%、27.2%和13.1%,氮肥的贡献率最大^[2]。合理施用氮肥能显著增加油菜株高、分枝数、角果数和生物学产量;施用不足或者过量均会制约油菜产量,降低氮肥收益^[3]。

明确土壤氮素供应和作物对氮素的需求是合理施氮的关键。土壤中92%~98%的氮以有机态存在,需通过矿化作用转化为无机态氮后才能被作物吸收利用^[4]。土壤有机氮矿化是在微生物参与下进行的,有机物质量(有机酸含量、蛋白质构成等)^[5]、土壤性质(土壤pH、通气性等)^[6]、微生物活性(微生物的种类和群落构成)、外界环境(温度和水分含量)^[7]以及土地管理措施(轮作方式、翻耕等)^[8]等都是影响土壤氮素供应的重要因素。轮作方式对土壤氮素转化的影响是多方面的。不同于旱地轮作,水旱轮作存在明显的季节间干湿交替,从而形成特有的土壤物理、化学和生物学性质^[9]。水旱轮作土壤保水性能优于旱地轮作,不仅有利于土壤有机质的积累,也改变了土壤活性有机质的含量和组成,从而影响土壤

氮素供应^[10-12]。Rathke等^[13]研究还表明,前茬作物残留在土壤的有机质含量和有效性是影响当季土壤氮素供应和作物养分吸收的重要因素。轮作方式不同,土壤水分管理以及前季作物残留明显不同,研究两种轮作方式下油菜季土壤的氮素供应特点和油菜的养分吸收规律对指导油菜的氮肥施用具有极其重要的意义。因此我们采用原位矿化培养法对水旱轮作和旱地轮作两种轮作方式下油菜生长季土壤氮素矿化量和作物氮素吸收量进行动态监测,研究不同轮作方式对土壤氮素矿化和油菜氮素吸收的影响,以期对油菜氮肥科学管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

田间试验于2012年6月—2014年5月在湖北省武汉市华中农业大学田间试验基地(30°28′40.7″N, 114°28′35.4″E)进行,该地区属于亚热带季风湿润气候,雨热同期,年均气温15~17℃,年均降雨量1400~1570 mm。试验田土壤类型为黄棕壤,土壤的机械组成为12%砂粒(2~0.02 mm)、58%粉粒(0.02~0.002 mm)和30%粘粒(<0.002 mm)。0—20 cm土层土壤基本理化性质为pH 7.40、有机碳6.72 g/kg、全氮0.72 g/kg、铵态氮4.60 mg/kg、硝态氮1.79 mg/kg、速效磷7.16 mg/kg、速效钾181 mg/kg。

1.2 试验设计

本研究为同一田块内的对比田间试验。在华中农业大学试验基地选取一块地力均匀的旱地作为试验田,该田长和宽均为 40 m。在布置试验之前,先用翻耕机将整块田翻耕一遍(翻耕深度为 30 cm),然后再用小型的旋耕机旋耕一遍,以保证该试验田地力均匀,土壤理化性质一致。旋耕完以后在试验田的中间做一个 100 cm 宽,高于地面 30 cm 的水泥田埂将田块分为两块小区,其中一块小区用作水稻-油菜轮作(rice-rapeseed,简称 RR)种植,另一块小区用作棉花-油菜轮作(cotton-rapeseed,简称 CR)种植。

本试验采用裂区试验设计,主处理为两种轮作方式,即水旱轮作(水稻-油菜轮作)和旱地轮作(棉花-油菜轮作);副处理为氮肥(N 150 kg/hm²)施用季节。每种轮作方式下设 3 个氮肥施用季节处理,分别为:1)两季均不施氮肥(N₀₋₀);2)水稻/棉花季施氮,油菜当季不施氮(N₁₅₀₋₀);3)油菜前季不施氮,油菜当季施氮(N₀₋₁₅₀)。另外本试验中水稻、棉花和油菜各处理磷、钾肥用量保持一致,分别为 75 和 120 kg/hm²,同时为了保证棉花和油菜的正常生长,各小区增施 15 kg/hm²硼砂。每个处理设 3 次重复,小区面积 20 m²,随机区组排列。水稻季氮肥分基肥、分蘖肥和穗肥 3 次施用,施用比例分别为 50%、35% 和 15%;棉花季氮肥分为基肥、苗肥、花铃肥和补桃肥 4 次施用,施用比例分别为 45%、10%、30% 和 15%;油菜季氮肥分为基肥、越冬肥和薹肥 3 次施用,施用比例分别为 60%、20% 和 20%。各个小区水稻、棉花和油菜磷肥和硼肥全部基施,水稻季钾肥 70% 做基肥,30% 做分蘖肥;棉花季钾肥 60% 做基肥,40% 做花铃肥;油菜季钾肥 60% 做基肥,20% 做越冬肥,20% 做薹肥。

水稻采用育苗移栽,移栽密度为 20 万兜/hm²;棉花采用营养钵育苗移栽,移栽密度为 5 万株/hm²;

油菜采用苗床育苗,移栽密度为 10 万株/hm²。本试验所采用的作物品种及作物的移栽和收获时间如表 1 所示。田间管理按照常规的栽培技术要求进行,病虫害及杂草的防治同湖北省农田管理措施一致。按照农民习惯水稻收获后留根茬 5—10 cm,在油菜移栽前,利用旋耕机将根茬翻埋到土壤中;棉花收获后除了落叶掉落在土壤表面,其余部分全部移出试验田。

1.3 样品采集与测定

土壤基本理化性质在水稻和棉花移栽前,以整个试验田块为采样单元,采用“S”形取样方法在试验田块内采集 15 点 0—20 cm 土壤。作为基础土壤样品,风干过筛,供土壤基础理化性质分析用。土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;全氮采用浓 H₂SO₄ 消化—流动注射分析仪测定;速效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定;速效钾采用 1 mol/L NH₄OAc 浸提—火焰光度法测定;pH 按照水土比 2.5 : 1, pH 计测定^[14]。

油菜季土壤无机氮动态监测:在油菜移栽前 1 天、冬前期、越冬期、薹期、花期、角果期和成熟期采用“S”形取样的方法在试验田块内采集 6 点 0—20 cm 土壤,过 5 mm 筛混合均匀测定无机氮含量。

油菜季土壤原位矿化量动态监测:参考田昆等^[15]原位矿化培养方法,采用原位矿化培养装置以油菜不同生育期(移栽—冬前期,冬前期—越冬期,越冬期—薹期,薹期—花期,花期—角果期,角果期—成熟期)为时段,在每个小区设 3 个定位点(距离油菜根系 8—10 cm 处)定位监测油菜在不同生育期内土壤氮素净矿化量。每个培养时段起始时在 3 个定位点各埋入两组培养装置,一组培养装置立刻取出测定装置里面土壤无机氮含量,另一组培养装置密封培养,在培养时段结束时取出测定培养装置里土壤的无机氮含量。由于本试验是采用密封培养,而

表 1 2012—2014 年不同轮作方式下作物的品种和试验生育期
Table 1 Crop cultivars and growing period in the two rotation systems during 2012—2014

年份 Year	作物 Crop	品种 Cultivar	移栽日期 Transplanting date	收获日期 Harvest date
2012—2013	水稻 Rice	扬两优 6 号 Yangliangyou6	2012-06-01	2012-09-23
	棉花 Cotton	棉优 11 号 Mianyou11	2012-06-01	2012-11-03
	油菜 Rapeseed	华油杂 9 号 Huayouza9	2012-11-06	2013-05-30
2013—2014	水稻 Rice	扬两优 6 号 Yangliangyou6	2013-06-18	2013-10-02
	棉花 Cotton	棉优 11 号 Mianyou11	2013-06-18	2013-10-29
	油菜 Rapeseed	华油杂 9 号 Huayouza9	2013-11-01	2014-05-05

且油菜生长期间内较大降雨并不多, 田间只有油菜移栽当天和移栽后第三天用自来水进行定根灌溉, 对灌溉的影响因素已通过试验设计人为排除, 故油菜季每一计算时段内耕层土壤的氮淋失量可以忽略不计。因此以培养后土壤无机氮含量与培养前土壤无机氮含量差值表示为该培养时间段土壤氮的净矿化量。

油菜样品采集与分析: 分别在油菜的苗期、越冬期、薹期、花期、角果期和成熟期在每个小区随机选择 6 株油菜地上部样品, 分器官于 105℃ 杀青 30 min, 然后所有样品经过 60℃ 烘干磨细过筛用于氮素含量测定。采用浓 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消化后用连续流动注射分析仪 (德国 SEAL, AA3) 测定氮含量。

试验进程和取样时间见图 1。

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 数据表和 SPSS17.0 软件进行分析整理; 用最小显著性法 (LSD) 检验数据差异的显著性水平 ($P < 0.05$)。所有图形均用 Origin2017 软件进行绘制。

2 结果与分析

2.1 油菜生长季土壤无机氮的动态变化

油菜生长季土壤无机氮含量呈现明显的季节性

变化 (图 2)。油菜当季不施肥, 土壤无机氮含量在苗期缓慢增加, 在薹期快速增加, 并在花期达到最大。轮作方式不同, 土壤无机氮含量变化趋势有所不同, 在花期以前棉油轮作高于稻油轮作, 但是之后趋势相反。不同年份间土壤无机氮含量变化趋势有所不同, 在 2012—2013 年度试验中棉油轮作下苗期土壤无机氮含量增加了 2.0 kg/hm^2 , 但在 2013—2014 年度试验中下降了 1.7 kg/hm^2 。施用基肥和越冬肥后油菜季土壤无机氮含量在短时间内显著增加, 之后迅速降低; 但是追施薹肥后土壤无机氮含量变化不显著。与不施氮肥处理变化趋势相同, 在薹期以前, 棉油轮作条件下油菜季土壤无机氮含量高于稻油轮作。从薹期到花期, 稻油轮作土壤无机氮含量平均增加了 2.0 kg/hm^2 , 而棉油轮作土壤无机氮含量则没有明显的变化。虽然在花期以后两种轮作模式下土壤无机氮含量都表现为下降的趋势, 但是稻油轮作下土壤无机氮含量下降速率小于棉油轮作, 稻油轮作下土壤无机氮含量高于棉油轮作。

2.2 油菜生长季土壤氮素净矿化量

轮作方式、前季氮肥用量和油菜季氮肥投入均显著影响土壤氮素净矿化量 (图 3)。在油菜当季不施氮情况下, 棉油轮作比稻油轮作平均高 10.5%。棉油轮作下油菜苗期—薹期土壤氮素净矿化量为 21.5 kg/hm^2 , 占到总矿化量的 64.5% (表 2); 稻油轮作下

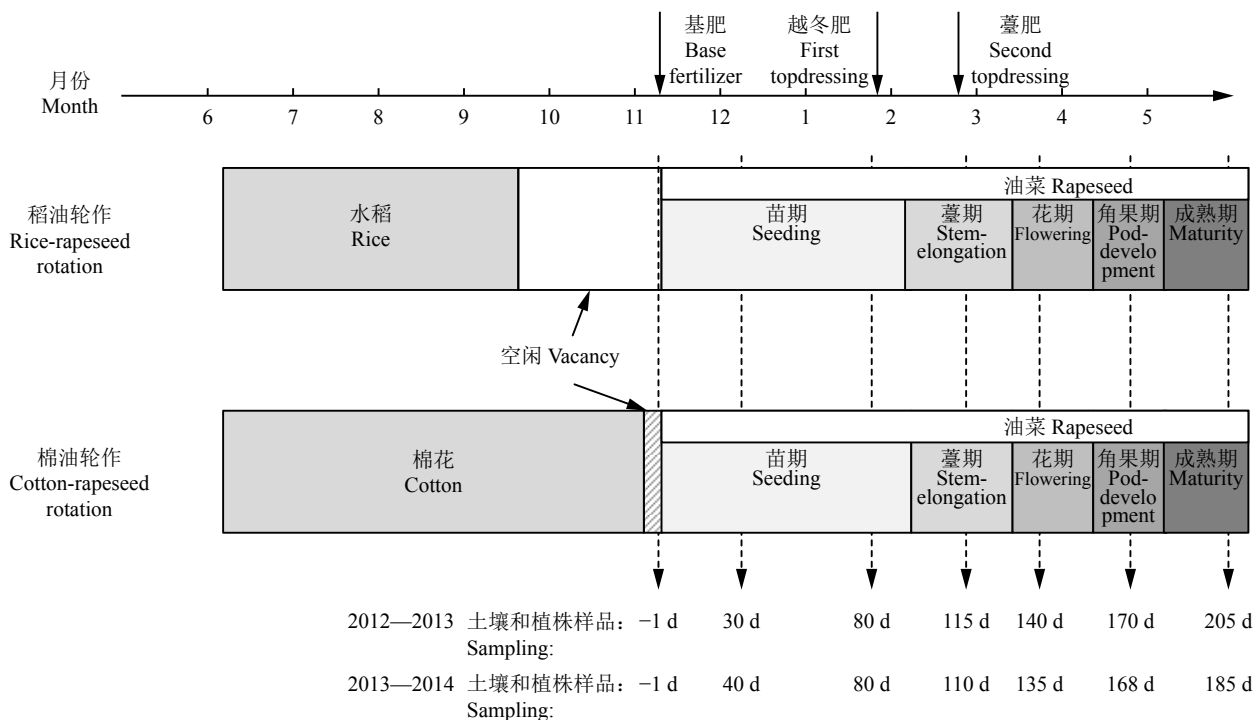


图 1 2012—2014 年稻油和棉油轮作油菜季试验进程及取样安排示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment progress in the rice-rapeseed and cotton-rapeseed rotation during 2012–2014

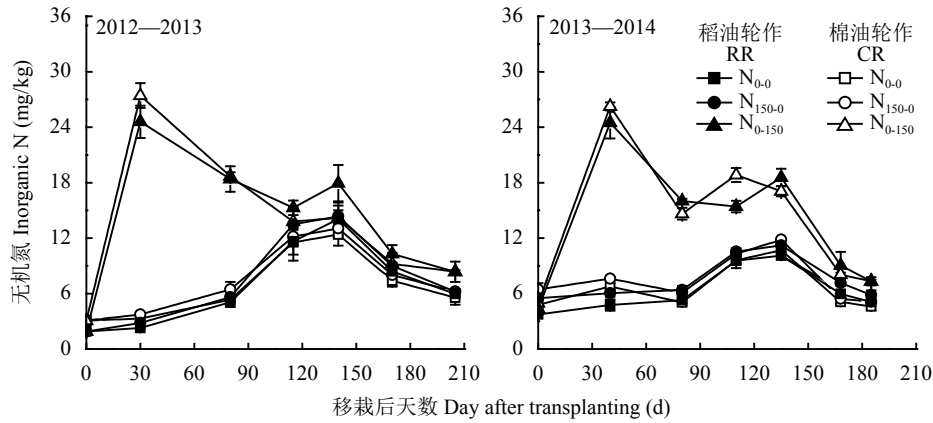


图 2 2012—2014 年油菜季不同氮肥处理 0—20 cm 土壤无机氮含量的动态变化

Fig. 2 Dynamics of soil inorganic N under the rapeseed growing period in the rice-rapeseed (RR) and cotton-rapeseed (CR) rotation during 2012–2014

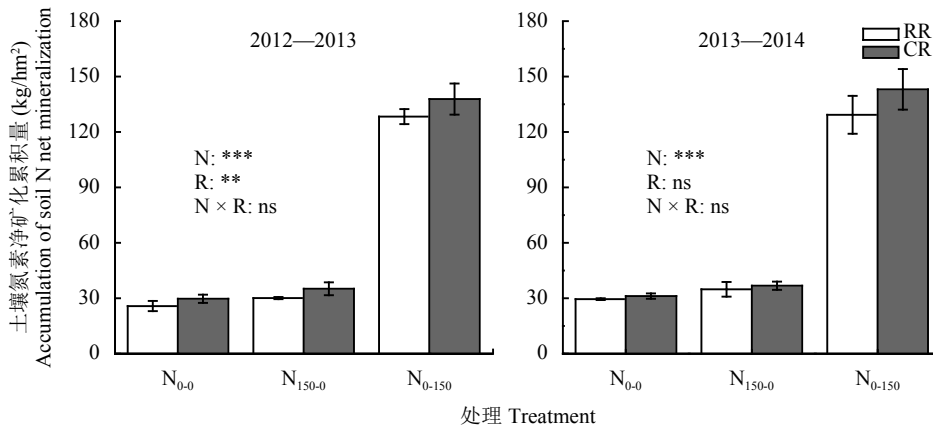


图 3 2012—2014 年稻油轮作 (RR) 和棉油轮作 (CR) 方式下油菜生长季土壤氮素累积矿化量
Fig. 3 The accumulation of soil N mineralization under the rapeseed season in rice-rapeseed (RR) and cotton-rapeseed (CR) rotation during 2012–2014

[注 (Note): N—氮肥 N fertilizer; R—轮作 Rotation; ***— $P < 0.001$; **— $P < 0.01$; ns—Not significant.]

油菜生长前期 (苗期—薹期) 土壤氮素净矿化量为 15.8 kg/hm^2 , 占到总矿化量的 52.3%。油菜前季施氮 150 kg/hm^2 , 稻油和棉油轮作土壤氮素净矿化累积量平均增加 4.8 和 5.5 kg/hm^2 。当季氮肥投入是影响土壤氮素矿化的主要因素, 油菜季施氮 150 kg/hm^2 后稻油和棉油轮作土壤氮素净矿化累积量平均增加 101.2 和 110.0 kg/hm^2 。从分配比例上看, 两种轮作方式土壤氮素净矿化量均在苗期最高, 占到土壤氮素累积矿化量的 50% 以上; 其次在花期, 占到土壤氮素累积矿化量的 13%~23%。与不施氮处理变化趋势一致, 油菜当季施氮, 棉油轮作条件下油菜季土壤氮素净矿化量在油菜生长前期高于稻油轮作; 在油菜生长后期低于稻油轮作。

2.3 油菜氮素积累量

油菜氮素积累动态呈现先增加后降低的变化趋

势, 在角果期达到最大 (图 4)。前季作物、前季氮肥用量和油菜季氮肥投入均影响油菜氮素积累量。不施氮处理稻油轮作下油菜氮素累积量平均为 24.6 kg/hm^2 , 棉油轮作为 25.7 kg/hm^2 。油菜氮素吸收量在角果期时比例最大, 其次是花期和薹期。在油菜当季不施氮情况下, 水稻季和棉花季氮肥投入分别增加油菜氮素吸收量 3.0 和 3.6 kg/hm^2 。其中水稻季氮肥投入主要增加薹期和花期的氮素吸收量, 而棉花季氮肥投入主要增加苗期的氮素吸收量。相对于不施氮肥处理, 油菜季施氮 150 kg/hm^2 , 稻油轮作和棉油轮作条件下油菜氮素吸收量平均增加了 76.8 和 96.2 kg/hm^2 , 油菜当季氮肥投入是增加油菜氮素吸收量的主要影响因素。油菜当季施氮 150 kg/hm^2 后, 油菜的各个生育期内氮素吸收量都显著增加, 其中在苗期和薹期的氮素吸收量增加的比例最高。两种轮作方式下油菜氮素吸收量具有明显阶段性特征,

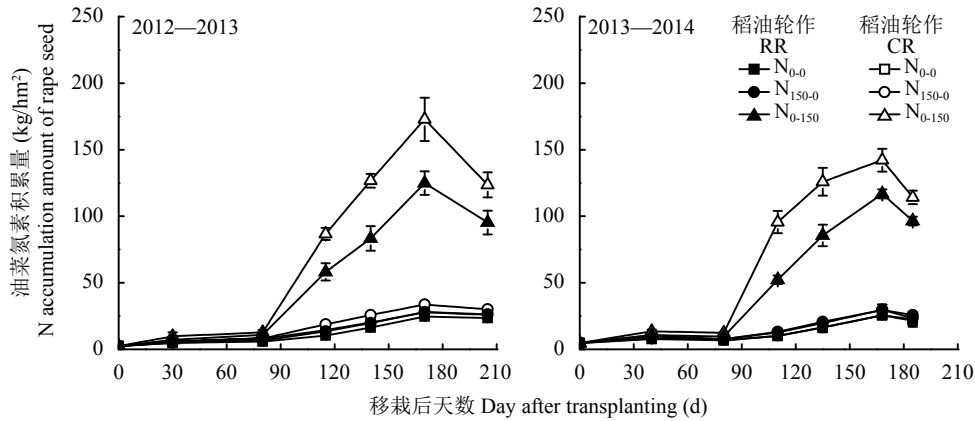


图 4 2012—2014 年稻油轮作和棉油轮作方式下不同氮肥处理油菜氮素吸收量动态

Fig. 4 Dynamics of rapeseed N uptake under different N treatments in rice-rapeseed(RR) and cotton-rapeseed(CR) rotation during 2012-2014

主要表现在棉油轮作下油菜在生长前期(苗期—薹期)积累的氮素占到生育期氮素吸收总量的 55.2%, 显著高于稻油轮作下油菜在该生育期内的氮素吸收比例(46.9%); 但是在油菜生长后期(花期—角果期)稻油轮作下油菜氮素吸收量占生育期氮素吸收总量比例要显著高于棉油轮作(表 3)。油菜进入成熟期以后, 氮素积累量下降, 棉油轮作氮素积累下降大于稻油轮作。

3 讨论

稻油轮作和棉油轮作是我国长江流域油菜的主要种植方式。本研究表明, 轮作方式对油菜季土壤氮素净矿化产生明显影响, 棉油轮作油菜季土壤氮素净矿化量明显高于稻油轮作, 李忠佩等^[16]研究也证实了本研究结果。除了总的矿化量不同, 本研究还表明两种轮作模式下油菜季土壤氮素净矿化阶段特征明显, 在油菜生长前期(苗期—薹期)棉油轮作土壤氮素净矿化量明显高于稻油轮作, 在油菜生长后期(花期—成熟期)稻油轮作土壤氮素矿化量高于棉油轮作。轮作方式不同, 油菜季的残留存在明显差异。残茬数量和质量的差异会对土壤有机质积累与矿化产生深远影响^[17]。研究表明, C/N 比低的有机物质矿化率高, 矿化速率快, 在土壤中释放速率较快; C/N 比高的矿化慢, 释放也慢^[18-20]。Singh 等^[21]对不同 C/N 比有机物料进行田间腐解试验表明, 绿肥(C/N 比低)在培养前期释放速率是水稻根茬(C/N 比高)的 5 倍多。黄伟生等^[22]研究结果表明进入土壤中作物残茬的数量表现为水田 > 水旱轮作 > 旱地。在本试验条件下水稻根茬还田干物质量为 1747~2515 kg/hm²(含氮量为 6.2~14.5 kg/hm²), C/N 比为 106.6; 棉花叶片

为 450~1644 kg/hm²(含氮量为 2.8~27.6 kg/hm²), C/N 为 24.7。这些大量的作物残茬投入会促进土壤活性有机质组分的累积, 从而影响了土壤氮素供应。水稻根茬碳氮比含量高, 含有大量的木质素和纤维素等不易分解的成分, 而棉花落叶碳氮比低, 主要由碳水化合物和多糖类易分解的物质组成, 在一定的时间内棉花叶片增加了土壤氮素供应能力, 而水稻根茬可能会固定一部分无机氮, 降低土壤氮素供应能力。这可能是影响土壤氮素矿化量的主要原因, 棉花叶片分解快提供了油菜前期的养分供应, 水稻根茬养分释放慢增加了油菜后期的养分供应。在本试验条件下, 油菜当季投入氮肥以后, 增加了水稻前季作物对油菜氮素吸收的贡献, 说明油菜当季氮肥投入, 降低了水稻根茬 C/N 比, 有利于水稻根茬养分释放供油菜吸收利用, 这也很好验证了这部分推测。此外, 不同于旱地轮作, 水旱轮作季节间的干湿交替, 形成了特有的农田土壤理化性质, 从而影响了土壤养分供应^[23-24]。有研究表明与旱地轮作相比, 水旱轮作转化初期土壤水分“落干”的过程促进了土壤氮素的生物固持^[25]。另外水田转化为旱地时, 水田表层的泥浆结构土壤易板结, 土壤通气性差, 不利于土壤氮素矿化和油菜苗期的根系生长^[26]。但是不可忽视的是, 轮作方式不同引起的土壤理化性质的改变对土壤氮素供应的影响是多方面的, 因此在后续的研究中还需要进行一步探索研究。植物氮素吸收与土壤氮素供应是相对应的。

轮作方式不同, 油菜生长季土壤氮素供应和油菜养分吸收有差异。2012—2013 年度试验中, 不论油菜当季是否施氮, 油菜氮吸收量均表现为在油菜生长前期(苗期—薹期)棉油轮作下土壤氮素供应能

表 2 2012—2014 年棉油轮作和稻油轮作方式下油菜不同生育阶段的土壤氮素矿化量 (mg/kg)

处理 Treatment	轮作 Rotation	苗期 Seedling			薹期 Stem-elongation			花期 Flowering			角果期 Pod-development			成熟期 Maturity		
		2012—2013	2013—2014	2012—2013	2013—2014	2012—2013	2013—2014	2012—2013	2013—2014	2012—2013	2013—2014	2012—2013	2013—2014	2012—2013	2013—2014	
N ₆₀	稻油轮作 RR	6.21 ± 1.61	8.85 ± 2.12	7.36 ± 0.62	6.16 ± 1.34	7.74 ± 1.06	6.87 ± 0.64	3.37 ± 0.54	5.50 ± 1.71	1.09 ± 0.28	2.08 ± 0.42					
	棉油轮作 CR	9.57 ± 0.52	10.31 ± 1.18	10.83 ± 1.97	8.13 ± 0.48	6.76 ± 0.79	6.02 ± 0.90	1.69 ± 0.18	4.00 ± 0.96	0.85 ± 0.26	2.71 ± 0.73					
N _{150.0}	稻油轮作 RR	7.41 ± 1.25	11.08 ± 2.57	8.34 ± 1.01	7.51 ± 1.14	8.53 ± 1.52	8.07 ± 1.15	3.85 ± 0.87	6.17 ± 0.34	1.99 ± 0.69	2.01 ± 0.25					
	棉油轮作 CR	12.89 ± 1.42	13.64 ± 1.78	11.56 ± 1.30	8.62 ± 0.21	7.88 ± 0.96	7.39 ± 0.62	1.22 ± 0.11	4.18 ± 0.15	1.58 ± 0.32	2.95 ± 0.15					
N _{6.150}	稻油轮作 RR	84.65 ± 7.33	67.99 ± 3.41	8.60 ± 0.65	20.63 ± 1.39	21.59 ± 2.94	21.42 ± 4.81	8.60 ± 1.02	16.84 ± 1.41	4.89 ± 1.15	2.42 ± 0.60					
	棉油轮作 CR	96.48 ± 9.82	78.83 ± 5.73	12.04 ± 1.89	24.47 ± 1.17	19.52 ± 1.64	19.49 ± 2.11	6.24 ± 0.78	16.02 ± 3.81	3.54 ± 0.64	4.26 ± 0.13					
氮肥 N fertilizer (N)		<0.001***	0.311	<0.001***	<0.001***	<0.001***	<0.001***	<0.001***	<0.001***	<0.001***	<0.005**					
轮作 Rotation (R)		<0.001**	<0.001***	0.140	<0.001***	0.046*	0.006**	0.001***	0.299	0.121	<0.001***					
N × R		0.359	0.984	0.741	0.483	0.299	0.049*	0.114	0.874	0.860	0.084					

注 (Note) : *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ***— $P < 0.001$.

表 3 2012—2014 年棉油轮作和稻油轮作方式下油菜不同生育期氮素积累量占总积累量的比例 (%)

处理 Treatment	轮作 Rotation	苗期 Seeding			薹期 Stem-elongation			花期 Flowering			角果期 Pod-development		
		冬前期 Pre-over wintering	越冬期 Over wintering	越后期 Over wintering	2012—2013	2013—2014	2012—2013	2013—2014	2012—2013	2013—2014	2012—2013	2013—2014	
N ₆₀	稻油轮作 RR	11.13 ± 1.08	22.06 ± 2.55	3.73 ± 2.11	—	18.65 ± 5.61	13.01 ± 2.99	24.49 ± 3.27	25.06 ± 5.71	33.59 ± 1.96	35.52 ± 5.76		
	棉油轮作 CR	11.50 ± 2.59	30.01 ± 5.03	9.09 ± 1.88	—	23.96 ± 5.45	12.89 ± 6.10	20.29 ± 6.18	25.21 ± 1.90	27.46 ± 4.57	35.59 ± 7.18		
N _{150.0}	稻油轮作 RR	10.11 ± 0.38	21.13 ± 2.02	5.79 ± 2.88	—	25.12 ± 4.27	18.51 ± 4.38	21.73 ± 5.94	25.41 ± 1.37	29.61 ± 4.32	29.70 ± 3.90		
	棉油轮作 CR	10.70 ± 1.28	29.17 ± 2.80	6.86 ± 2.67	—	32.30 ± 4.82	17.38 ± 3.67	20.32 ± 5.58	23.58 ± 1.75	23.46 ± 2.00	33.51 ± 3.93		
N _{6.150}	稻油轮作 RR	3.97 ± 0.45	7.30 ± 0.46	3.03 ± 0.74	—	37.84 ± 4.47	36.58 ± 1.80	20.18 ± 6.61	28.63 ± 6.75	33.27 ± 2.52	26.62 ± 5.76		
	棉油轮作 CR	4.48 ± 0.65	8.05 ± 0.69	1.74 ± 0.75	—	42.77 ± 2.35	58.53 ± 3.21	23.19 ± 2.43	21.27 ± 2.06	26.58 ± 2.70	11.42 ± 3.76		
氮肥 N fertilizer (N)		<0.001***	<0.001***	0.007**	—	<0.001***	<0.001***	0.905	0.958	0.115	<0.001***		
轮作 Rotation (R)		<0.001***	0.001***	0.097	—	0.021*	0.003**	0.732	0.126	0.001***	0.151		
N × R		0.441	0.062	0.041*	—	0.904	<0.001***	0.506	0.262	0.973	0.019*		

注 (Note) : “—”表示作物没有吸收氮素 Represent the amount of N uptake by rapeseed is negative. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ***— $P < 0.001$.

力大于稻油轮作, 油菜氮素吸收量高于稻油轮作; 在油菜生长后期(花期—角果期) 稻油轮作条件下土壤氮素供应能力和油菜氮素吸收量均高于棉油轮作。在油菜整个生育期内水旱轮作下油菜氮素吸收明显低于旱地轮作。Meelu 等^[27]研究也发现水旱轮作条件下小麦生长季土壤氮素固定能力大于旱地轮作, 产量低于旱地轮作。但是在本试验条件下 2013—2014 年度试验中表现有所不同, 虽然棉油轮作油菜在冬前期生长速率较快, 但是在油菜越冬期由于降雨量较少, 土壤含水量不足, 土壤氮素矿化能力下降, 导致不施氮处理油菜生长发育受阻, 叶片大量脱落, 影响了油菜的前期物质积累。尽管在越冬期以后较好的天气情况促进油菜的生长, 但是由于前期物质积累不充分, 在后期与稻油轮作下油菜的生长速率差异不大, 因此两种轮作方式下油菜氮素总积累量差异不显著。油菜作为我国重要的油料作物, 虽然目前关于油菜氮肥管理方面的研究比较多, 但是多集中在对当季作物的研究上, 往往忽视了轮作土壤养分的供应特点。由以上分析可知, 科学的氮肥管理需要充分考虑轮作方式对土壤氮素供应的影响, 稻油轮作条件下油菜生长前期土壤氮素供应能力较差, 可以在油菜生长前期增加氮肥投入, 促进水旱轮作条件下油菜的生长; 而在油菜花期棉油轮作条件下土壤氮素供应能力下降, 低于稻油轮作, 此时可以增加氮肥供应, 从而促进油菜的养分积累。

4 结论

稻油和棉油轮作方式下油菜季土壤氮素供应和油菜氮素吸收存在明显差异。当季氮肥投入是影响油菜季土壤氮素供应的主要因素, 相对于不施氮处理, 水稻和棉花季氮肥投入分别增加土壤氮素累积矿化量 4.8 和 5.5 kg/hm²; 而油菜季施氮 150 kg/hm² 时, 水旱轮作下氮素净累积矿化量显著增加 101.2 kg/hm², 旱地轮作条件下显著增加 110.0 kg/hm²。当季氮肥投入是影响油菜季作物氮素吸收的主要因素, 相对于不施肥处理, 前季氮肥投入增加油菜季氮素吸收量 2.9~4.1 kg/hm², 而当季氮肥投入在稻油和棉油轮作中分别增加了氮素吸收量 76.8 和 96.2 kg/hm²。两种轮作方式下油菜前季作物残留物不同影响了油菜季土壤氮素供应, 棉花叶片残留增加油菜生长前期(苗期—薹期) 土壤氮素供应; 水稻根茬增加了油菜生长后期(花期—成熟期) 土壤氮素供应。因此在稻油轮作条件下, 油菜生长前期土壤氮素供

应较低; 而棉油轮作条件下, 油菜生长后期土壤氮素供应较低。对于上述土壤供氮和油菜氮素吸收特点, 可以根据轮作方式不同对油菜氮肥进行优化管理。稻油轮作条件下油菜生长前期可适量增加氮肥供应, 后期降低氮肥供应; 棉油轮作下油菜生长前期适量降低氮肥供应, 后期增加氮肥供应。

参 考 文 献:

- [1] Rathke G W, Christen O, Diepenbrock W. Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter rapeseed (*Brassica napus* L.) grown in different crop rotations[J]. *Field Crops Research*, 2005, 94: 103–113.
- [2] 邹娟, 鲁剑巍, 陈防, 等. 氮磷钾硼肥施用对长江流域油菜产量及经济效益的影响[J]. *作物学报*, 2009, 35(1): 87–92.
Zou J, Lu J W, Chen F, et al. Effect of nitrogen, phosphorus, potassium, and boron fertilizers on yield and profit of rapeseed (*Brassica napus* L.) in the Yangtze River Basin[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(1): 87–92.
- [3] 邹娟, 鲁剑巍, 陈防, 等. 冬油菜施氮的增产和养分吸收效应及氮肥利用率研究[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(4): 745–752.
Zou J, Lu J W, Chen F, et al. Study on yield increasing and nutrient uptake effect by nitrogen application and nitrogen use efficiency for winter rapeseed[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(4): 745–752.
- [4] 查春梅, 颜丽, 郝长红, 等. 不同土地利用方式对棕壤有机氮组分及其剖面分布的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(1): 22–26.
Zha C M, Yan L, Hao C H, et al. Effect of different land use systems on the form and distribution of organic nitrogen in brown soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(1): 22–26.
- [5] Wivstad M, Dahlin A S, Grant C. Perspectives on nutrient management in arable farming systems[J]. *Soil Use and Management*, 2005, 21: 113–121.
- [6] Bertrand I, Delfosse O, Mary B. Carbon and nitrogen mineralization in acidic, limed and calcareous agricultural soil: Apparent and actual effects[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 276–288.
- [7] Ros G H. Predicting soil N mineralization using organic matter fractions and soil properties: A re-analysis of literature data[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 45: 132–135.
- [8] Bu R Y, Lu J W, Ren T, et al. Particulate organic matter affects soil nitrogen mineralization under two crop rotation systems[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(12): 1–17.
- [9] Li C F, Yue L X, Kou Z K, et al. Short-term effects of conservation management practices on soil labile organic carbon fractions under a rape-rice rotation in central China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 119: 31–37.
- [10] Cookson W, Abaye D A, Marschner P, et al. The contribution of soil organic matter fractions to carbon and nitrogen mineralization and microbial community size and structure[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 1726–1737.
- [11] 石孝均. 水旱轮作体系中的养分循环特征[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2003.
Shi X J. Characteristics of nutrient cycling in the rice-wheat rotation

- system[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2003.
- [12] 李忠佩, 杨德涌. 不同利用年限红壤水稻土有机碳和养分含量的粒级分布变化[J]. *土壤学报*, 2009, 46(1): 70–77.
- Li Z P, Yang D Y. Distribution of organic carbon and nutrient contents in particle-size fractions of a cultivation chronosequence of paddy soils in subtropical China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 70–77.
- [13] Rathke G W, Behrens T, Diepenbrock W. Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter rapeseed (*Brassica napus* L.): A review[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2006, 117(2–3): 80–108.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- Lu R K. Soil and agricultural chemistry analysis methods[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [15] 田昆, 常凤来, 莫剑锋, 等. 原状土就地培养取样法定位研究田间土壤氮动态变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(2): 143–147.
- Tian K, Chang F L, Mo J F, *et al.* Application of in-situ technique at field to study the N dynamic of soils[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(2): 143–147.
- [16] 李忠佩, 吴晓晨, 陈碧云. 不同利用方式下土壤有机碳转化及微生物群落功能多样性变化[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(8): 1712–1721.
- Li Z P, Wu X C, Chen B Y. Changes in transformation of soil organic carbon and functional diversity of soil microbial community under different land use patterns[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(8): 1712–1721.
- [17] Wang J G, Bakken L R. Competition for nitrogen during decomposition of plant residues in soil: Effect of spatial placement of N-rich and N-poor plant residues[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 29: 153–162.
- [18] Ramnarine R, Voroney R P, Wagnerriddle C, *et al.* Conventional and no-tillage effects on the distribution of crop residues and light fraction organic matter[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(1): 74–80.
- [19] Singh A, Ghoshal N, Singh K P. Variations in soil microbial biomass and crop roots due to differing resource quality input in a tropical dryland agroecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 76–86.
- [20] 黄伟生, 彭佩钦, 苏以荣, 等. 洞庭湖区耕地利用方式对土壤活性有机碳的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(3): 756–760.
- Huang W S, Peng P Q, Su Y R, *et al.* Soil active organic carbon of farmland under different uses in Dongting Lake Region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(3): 756–760.
- [21] 谭文峰, 朱志雄, 刘凡, 等. 江汉平原不同土地利用方式下土壤团聚体中有机碳的分布与积累特点[J]. *自然环境学报*, 2006, 21(6): 973–980.
- Tan W F, Zhu Z X, Liu F, *et al.* Organic carbon distribution and storage of soil aggregates under land use change in Jiangnan Plain, Hubei Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(6): 973–980.
- [22] 申小冉, 吕家珑, 张文菊, 等. 我国三种种植制度下农田土壤有机碳、氮关系的演变特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(4): 121–126.
- Shen X R, Lü J L, Zhang W J, *et al.* Changes in soil organic carbon and total nitrogen and its relationship under three typical cropping systems in China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(4): 121–126.
- [23] Compton J E, Boone R D. Soil nitrogen transformation and the role of light fraction organic matter in forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 933–943.
- [24] 范明生, 樊红柱, 吕世华, 等. 西南地区水旱轮作系统养分管理存在问题分析与策略建议[J]. *西南农业学报*, 2008, 21(6): 1564–1568.
- Fan M S, Fan H Z, Lü S H, *et al.* The current status of nutrient management and strategy in paddy rice–upland crop rotation in southwest China[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 21(6): 1564–1568.
- [25] 张薇, 王子芳, 王辉, 等. 土壤水分和植物残体对紫色水稻土有机碳矿化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(6): 1013–1019.
- Zhang W, Wang Z F, Wang H, *et al.* Organic carbon mineralization affected by water content and plant residues in purple paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(6): 1013–1019.
- [26] Hadas A, Kautsky L, Goek M, *et al.* Rate of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36: 255–266.
- [27] Meelu O P, Beri V, Sharma K N, *et al.* Influence of paddy and corn in different rotations on wheat yield, nutrient removal and soil properties[J]. *Plant and Soil*, 1979, 51: 51–57.