

DOI: 10.11766/trxb201706230077

不同轮作模式下氮肥用量对土壤有机氮组分的影响*

贾倩 廖世鹏 卜容燕 张萌 任涛[†] 李小坤 丛日环 鲁剑巍

(华中农业大学资源与环境学院, 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要 通过三年六季的田间定位试验, 对比研究了水旱轮作(水稻/油菜)和旱地轮作(棉花/油菜)下氮肥用量对土壤有机氮含量及其组分的影响。结果表明, 经过三年轮作后, 周年轮作氮肥投入超过 300 kg hm^{-2} (以纯氮计, 下同)的处理 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤全氮含量明显增加。与不施氮处理相比, 周年氮肥用量为 300 kg hm^{-2} 和 375 kg hm^{-2} 水旱轮作处理 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤全氮含量增加了 $13.6\% \sim 23.5\%$, 而旱地轮作处理则增加了 $15.0\% \sim 23.0\%$, 土壤酸解态氮含量增加是土壤全氮变化的主要原因。两种轮作模式下土壤酸解态氮含量无显著差异, 但土壤酸解态氮各组分的变化却不相同。水旱轮作中酸解铵态氮增加的比例(33.8%)低于旱地轮作(53.9%), 但其酸解未知态氮含量增加的比例(36.0%)高于旱地轮作(16.6%)。综上所述, 周年氮肥合理施用能明显提高土壤有机氮含量, 水旱和旱地轮作下土壤酸解态氮库各组分变化差异明显。根据不同轮作模式下土壤有机氮库转化特点, 优化氮肥施用对于提高作物产量和氮肥利用率具有重要意义。

关键词 氮肥; 水旱轮作; 旱地轮作; 全氮; 土壤酸解态氮

中图分类号 S153.6^{*2} **文献标识码** A

土壤中的氮素主要以有机形态存在, 有机氮只有通过矿化转化为无机氮才能被植物吸收利用, 因此, 深入研究土壤有机氮库的组成及其转化对于理解土壤氮素供应、优化农业生产中氮肥投入具有重要作用。土壤有机氮组分受土壤类型、肥料种类、用量以及耕作管理等多种因素的影响。李强等^[1]比较了我国南方不同地带性水稻土有机氮的组成发现, 土壤有机氮各组分占全氮比例与区域纬度呈线性相关, 自然环境在土壤有机氮结构组成中起决定作用, 而人为耕作管理则对土壤有机氮含量影响更大。作为重要的人为管理措施, 化肥和有机肥的施用能明显提高土壤有机氮含量^[2-3], 然而, 不同肥料种类对土壤有机氮组分影响并不相同。富东英等^[4]研究发现, 长期施入土壤中化肥氮主要向酰胺态氮转化, 秸秆氮向氨基糖态氮转化最多, 有机肥氮则向氨基酸态氮转化率最大。轮作制度等也

会对土壤有机氮组分产生明显影响, 周年轮作中不同种植季节环境条件的差异、有机残落物(包括落叶、根茬和根系分泌物等)以及土壤微生物量和活性等均会影响土壤有机氮的含量及其组分。李小涵等^[5]研究指出豆科作物和谷类作物轮作促进了土壤有机氮累积; 与玉米连作相比, 玉米/玉米/大豆轮作能显著增加土壤氨基酸态氮含量^[6]; 与水田相比, 旱地增加土壤酸解铵态氮的效果最明显, 而林地则主要增加了土壤酸解氨基酸态氮和氨基糖态氮^[7]。并且, 不同轮作制度下土壤有机氮对化肥和有机肥的响应不同, 李萌等^[8]研究发现, 水稻季施用猪粪替代化学氮肥对氨基酸态氮、酸解未知态氮和非酸解氮影响较大, 而小麦季则对酸解未知态氮的影响较大, 并指出稻麦轮作不同种植季节的环境条件可能是造成这种差异的重要原因。由此可见, 轮作制度的差异显著影响土壤有机氮含量及其

* 国家自然科学基金项目(41401324)和国家油菜产业技术体系建设专项(CARS-13)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41401324) and the Earmarked Fund for China Agriculture Research System (No. CARS-13)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: rentao@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 贾倩(1990—), 女, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事作物养分管理与土壤肥力研究。E-mail: fuyue@webmail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2017-06-23; 收到修改稿日期: 2017-08-17; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-09-01

组成,但目前的研究往往关注某一轮作制度中化肥和/或有机肥施用对土壤有机氮的影响,而忽略不同轮作制度对土壤有机氮组分影响。

水旱轮作是我国重要的耕作制度之一,水旱轮作中频繁的干湿交替影响了土壤的物理、化学和生物学特性,进而影响了土壤氮素供应和转化,也增加了水旱轮作体系氮肥管理的复杂性。无机氮是表征旱地土壤氮素供应的重要指标,然而在水旱轮作中,尤其是水稻种植中,土壤无机氮测试值并不能有效表征土壤氮素供应^[9],因此,深入理解水旱轮作中土壤氮素转化特征对于完善其氮肥管理具有重要意义。有机氮作为土壤氮素供应的基础,是理解整个氮素转化的关键。干湿交替是水旱轮作的典型特征,水分改变显著影响了土壤有机氮组分^[8,10]。徐阳春等^[11]在水稻/小麦轮作中的研究表明,施用有机肥和化肥对土壤有机氮组分贡献差异明显。李强等^[1]和王晋等^[12]分别调查了地带性分布、种植年限以及耕作方式对我国水田土壤有机氮组分的影响,然而与我国水旱轮作区域土壤的复杂性相比,目前关于水旱轮作体系土壤有机氮转化的研究略显不足,并且,目前的研究结果主要源于多点的调查比较,对于土壤基础情况以及整个过程的了解不足,因此,本研究将一块田地一分为二,分别为水旱(水稻/油菜)和旱地(棉花/油菜)轮作,分析经过连续三年六季作物种植后不同氮肥用量对两种轮作模式下土壤有机氮组分的影响,以期揭示水旱轮作下土壤氮素的演变规律及供氮特点,为水旱轮作体系氮肥管理提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2012—2015年在湖北省武汉市华中农业大学校内定位试验基地(30°28′10″N, 114°21′21″E)进行,属亚热带湿润季风气候,年均降水量1 269 mm,且多集中在6—8月。年均气温15.8~17.5℃,年无霜期一般为211~272 d,年日照总时数1 810~2 100 h。

供试土壤为黄棕壤(铁质湿润淋溶土),土壤基础理化性质为:pH 6.71,有机质24.2 g kg⁻¹,全氮0.72 g kg⁻¹,铵态氮4.60 mg kg⁻¹,硝态氮1.79 mg kg⁻¹,有效磷7.16 mg kg⁻¹,速效钾180.5 mg kg⁻¹,土壤机械组成(质量分数)为:黏粒

18.9 g kg⁻¹、粉粒44.9 g kg⁻¹和砂粒36.2 g kg⁻¹,属于黏壤土。

1.2 试验设计

试验采用裂区试验设计,主处理为不同轮作模式,分别为水稻/油菜(Rice/Rapeseed,简称RR)和棉花/油菜轮作(Cotton/Rapeseed,简称CR)。将一块试验田一分为二,1/2为水旱轮作,另1/2为旱地轮作,两种轮作间以1m宽的田埂隔开,防止水稻季灌溉对棉田造成的影响。副处理为不同氮肥用量,分别为(1)N₀₋₀,水稻、棉花季和油菜季均不施用氮肥,(2)N₀₋₁₅₀,水稻、棉花季不施用氮肥,油菜季氮肥用量为150 kg hm⁻²(以纯氮计,下同),(3)N₁₅₀₋₀,水稻、棉花季氮肥用量为150 kg hm⁻²,油菜季不施用氮肥,(4)N₁₅₀₋₁₅₀,水稻、棉花季及油菜季均施用氮肥,氮肥用量均为150 kg hm⁻²,(5)N₁₅₀₋₂₂₅,水稻、棉花季氮肥用量为150 kg hm⁻²,油菜季氮肥用量为225 kg hm⁻²,(6)N₂₂₅₋₁₅₀,水稻、棉花季氮肥用量为225 kg hm⁻²,油菜季为150 kg hm⁻²。每个副处理3次重复,完全随机区组排列,小区面积为20 m²。每个小区均设有单独的排灌水口,单排单灌,避免小区间串水串肥。

各小区的磷、钾肥用量相等,分别为水稻、棉花季施用75 kg hm⁻²(以P₂O₅计,下同)、120 kg hm⁻²(以K₂O计,下同),油菜季施用75 kg hm⁻²磷肥、120 kg hm⁻²钾肥及15 kg hm⁻²硼砂。供试肥料分别为尿素(含46% N)、过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)、氯化钾(含K₂O 60%)和硼砂(含B 11%)。水稻季氮肥按照基肥50%、分蘖肥35%和穗肥15%的比例施用,棉花季氮肥按照基肥45%、苗肥10%、花铃肥30%和盖顶肥15%的比例施用,油菜季氮肥则按照基肥60%、越冬肥20%和薹肥20%的比例施用。每季作物磷、钾和硼肥均按推荐方法施用。

水稻、棉花和油菜均采用育苗移栽方式。供试水稻品种为“扬两优6号”,一般在每年5月初育苗,6月初移栽,移栽密度为20万兜 hm⁻²,9月底至10月初收获;棉花品种为“棉优11号”,通常在每年5月初育苗,5月底移栽,移栽密度为5万株 hm⁻²,棉花生育期较长,一般10月底至11月初收获;试验第一年供试油菜品种为“中双11号”,之后均为“华油杂9号”,油菜选在每年的10月初育苗,10月下旬至11月初移栽,移栽密度为10万

株 hm^{-2} ，次年的5月上旬收获。试验中的农事操作，包括整地、病虫草害的防治等均按照推荐方法进行，整个试验过程中未出现明显的病虫草害。根据区域种植特点，不同作物残茬管理略有不同，水稻收获时约有5~10 cm根茬残留在土壤中，剩余的地上部秸秆则全部移出试验田；棉花和油菜则在收获时将根茬一并拔出，移出试验田，但在棉花和油菜生长过程中普遍存在落叶的现象，大量落叶残留在土壤中。

1.3 样品采集与测定

土壤样品：在2012年试验开始前在整个田块采用“S”型取样方法采集0~20 cm土壤样品，立即过2 mm筛并混匀，一部分土样采用1 mol L^{-1} KCl浸提—连续流动分析仪（AA3，Seal公司，德国）测定土壤无机氮（ NH_4^+-N 和 NO_3^--N ）含量，剩余土样风干后备用。2015年油菜收获后采集各小区0~20 cm土壤样品，一部分样品立即测定土壤无机氮含量，剩余的样品则风干备用。同时选取2012年试验开始前土壤样品以及2015年油菜收获后各小区土壤样品，测定其全氮和有机氮含量。土壤全氮采用浓硫酸消煮—凯氏半微量定氮法测定；土壤有机氮分级采用Bremner方法^[13]；土壤酸解态氮采用6 mol L^{-1} HCl酸解—凯氏半微量定氮法测定；酸解铵态氮采用MgO蒸馏法测定；酸解铵态氮+氨基糖态氮采用磷酸盐-硼酸盐缓冲液蒸馏法测定；酸解氨基酸态氮采用茚三酮氧化、磷酸盐-硼酸盐缓冲液蒸馏法测定；未知态氮、未酸解氮和氨基糖态氮则采用差减法求得。

植物样品：每季作物收获时在每个小区随机选取连续两行共8株植物样品带回实验室，去离子水洗净后，将水稻样品分为稻谷和秸秆两个部位，棉花样品分为叶片、茎秆、棉壳、棉絮和棉籽五个部位，油菜样品分为茎秆、角壳和籽粒三个部位，105℃杀青30 min，60℃烘干至恒重后，称量、计算各处理地上部干物重。之后将各部位样品粉碎过筛，采用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 消煮—连续流动分析仪（AA3，Seal公司，德国）测定植株各部位氮含量，进而计算植物地上部吸氮量。

1.4 数据处理

土壤—植物体系氮素表现平衡计算公式参考Ju等^[14]研究：

氮素表现平衡 = 氮素输入 - 氮素输出

其中，氮素输入包括：试验前0~20 cm土壤无

机氮含量、化学氮肥、移栽基本苗及灌溉水带入氮素；氮素输出包括：作物地上部带走氮素及收获后0~20 cm土壤无机氮残留

试验数据采用Excel 2010和SPSS 20.0进行计算和统计分析，在 $p < 0.05$ 水平上利用最小显著性差异法（LSD）法进行差异显著性检验，利用OriginPro8.5软件进行绘图。

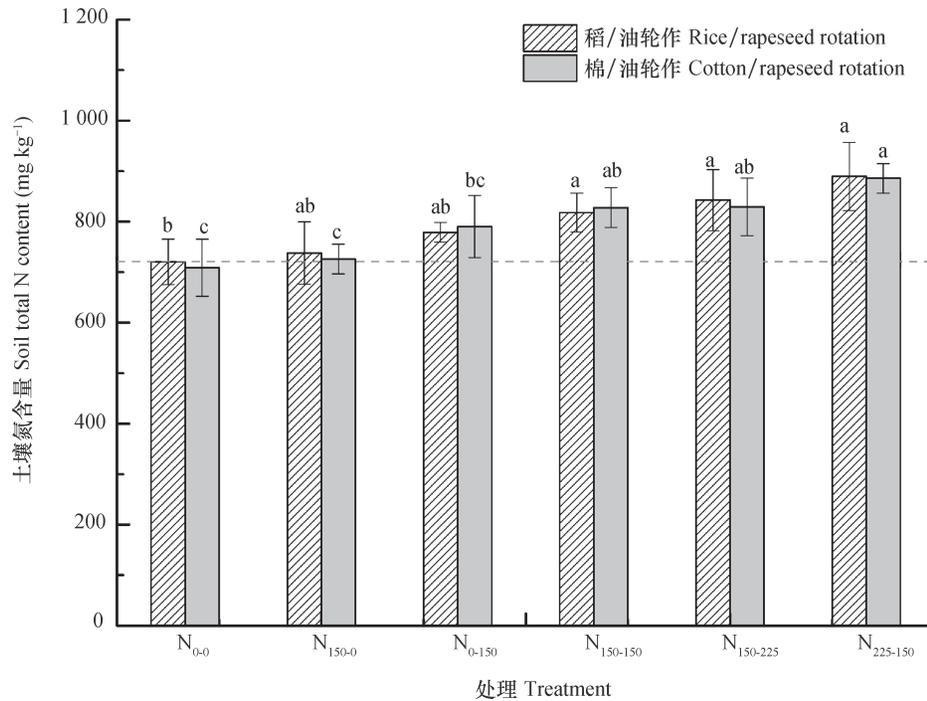
2 结 果

2.1 不同轮作模式和氮肥用量下土壤全氮含量

氮肥施用是影响土壤全氮含量的主要因素，随着氮肥用量的增加，土壤全氮含量呈增加的趋势（图1）。经过三年六季轮作后，与对照处理（ N_{0-0} ）相比，周年仅施用150 kg hm^{-2} 的处理（ N_{150-0} 和 N_{0-150} ）土壤全氮含量并无明显增加，而周年施用超过300 kg hm^{-2} 处理土壤全氮含量明显提高。与初始土壤全氮含量相比，当周年施氮量超过300 kg hm^{-2} 时，水旱和旱地轮作中 $\text{N}_{150-150}$ 、 $\text{N}_{150-225}$ 和 $\text{N}_{225-150}$ 处理土壤全氮含量分别增加了13.6%、17.0%、23.5%和15.0%、15.2%、23.0%。方差分析结果表明，氮肥用量显著影响土壤全氮含量（ $F=128.2 > F_{0.05}$ ），而轮作模式并未对土壤全氮含量产生明显的影响（ $F=0.172 < F_{0.05}$ ）；在相同氮肥用量情况下，水旱和旱地轮作土壤全氮含量无明显差异，两者的交互作用不显著（ $F=0.376 < F_{0.05}$ ）。

2.2 不同轮作模式和氮肥用量下土壤总酸解态氮及未酸解态氮含量

连续施用氮肥提高了土壤中总酸解态氮含量，随着氮肥用量的增加土壤总酸解态氮含量呈增加的趋势，稻油轮作中周年氮肥用量超过300 kg hm^{-2} 处理土壤总酸解态氮含量明显高于其他低氮处理，轮作模式对土壤总酸解态氮含量无明显影响（表1）。与初始土壤相比，连续三年不施用氮肥处理（ N_{0-0} ）和周年氮肥用量为150 kg hm^{-2} 处理（ N_{150-0} 和 N_{0-150} ）土壤总酸解态氮含量变化不显著，甚至略有降低；而周年氮肥用量超过300 kg hm^{-2} 时，两种轮作模式下土壤总酸解态氮含量分别增加了77.3~128.2 mg kg^{-1} 和87.9~138.5 mg kg^{-1} 。未酸解态氮是土壤氮库中较为稳定的组分，其含量占土壤全氮的53.0%~64.3%。经过三年六季轮作后氮肥施用对其含量影响较小，高氮处理（ $\text{N}_{150-225}$



注：横坐标N_{a-b}表示不同氮肥处理，其中a表示水稻、棉花季氮肥用量，b表示油菜季氮肥用量；图中虚线表示试验开始前土壤全氮含量；同一种轮作模式下不同小写字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$) Note: The symbols on the X axis represent different N fertilization treatments, where a stands for N fertilizer application rate in the rice or cotton season and b for N fertilizer application rate in the winter rapeseed season; The dash line represents the initial soil total N content; Different capital letters in the same rotation mean significant differences between N treatments by LSD test ($p < 0.05$)

图1 不同轮作模式和氮肥处理0~20 cm土壤全氮含量

Fig. 1 Soil total N content in the 0~20 cm soil layer relative to N treatments and rotation mode

表1 不同轮作模式和氮肥处理油菜收获后0~20 cm土壤总酸解态氮及未酸解态氮含量

Table 1 Soil total acidolysable and non-acidolysable N content in the 0~20 cm soil layer after rapeseed harvest relative to N treatment and rotation mode

处理 Treatment	总酸解态氮 Total acidolysable N (mg kg ⁻¹)		未酸解态氮 Non-acidolysable N (mg kg ⁻¹)	
	稻/油轮作 Rice/Rapeseed	棉/油轮作 Cotton/Rapeseed	稻/油轮作 Rice/Rapeseed	棉/油轮作 Cotton/Rapeseed
N ₀₋₀	270.9b (-6.8)	270.5b (-7.2)	449.1a (6.2)	438.2a (-4.7)
N ₁₅₀₋₀	287.2b (9.5)	272.2b (-5.5)	450.7a (7.8)	453.4a (10.5)
N ₀₋₁₅₀	278.4b (0.7)	294.1ab (16.4)	500.4a (57.5)	496.2a (53.3)
N ₁₅₀₋₁₅₀	355.0a (77.3)	365.6a (87.9)	462.7a (19.8)	462.2a (19.3)
N ₁₅₀₋₂₂₅	383.9a (106.2)	381.2a (103.5)	458.6a (15.7)	448.1a (5.2)
N ₂₂₅₋₁₅₀	405.9a (128.2)	416.2a (138.5)	483.3a (40.4)	469.5a (26.6)

方差分析 ANOVA

氮肥用量 N rate (N)	*	ns
轮作模式 Rotation (R)	ns	ns
氮肥用量 × 轮作模式 (N × R)	ns	ns

注：同一列不同字母表示不同氮肥处理间差异显著 ($p < 0.05$)；括号内数值表示与2012年作物种植前土壤初始值相比，土壤酸解态氮和未酸解态氮含量的变化量；*表示 $p < 0.05$ ，ns表示差异不显著；下同 Note: Different capital letters in the same column mean significant differences between N treatments by LSD test ($p < 0.05$)；The values in brackets indicate variation of soil total acidolysable N and non-acidolysable N content against the initial values of the soil before the experiment in 2012；* stands for $p < 0.05$ ，and ns for no significant difference. The same below

和 $N_{225-150}$)土壤未酸解态氮含量仅增加了5.2~40.4 mg kg^{-1} , 氮肥施用和轮作模式均未对土壤未酸解态氮含量产生明显影响。

2.3 不同轮作模式和氮肥用量下土壤酸解态氮各组分含量

施用氮肥不仅影响了土壤总酸解态氮含量, 土壤酸解态氮各组分含量也发生了明显变化(表2)。土壤酸解氨基酸态氮、氨基糖态氮、酸解铵态氮和酸解未知态氮分别占土壤总酸解态氮的35.1%~43.2%、5.5%~10.5%、34.1%~43.5%和9.2%~20.8%, 氮肥用量显著影响了土壤酸解氨基酸态氮、酸解铵态氮和酸解未知态氮的含量。随着周年氮肥投入量的增加, 土壤酸解态氮的这三个组分含量均明显增加, 两种轮作模式下均以周年氮肥用量为 375 kg hm^{-2} 处理的含量最高。轮作模式对土壤酸解态氮的这三个组分含量无明显影响, 但两种轮作模式下土壤酸解态氮三个组分的变化差异明显。与 N_{0-0} 处理相比, 稻/油和棉/油轮作下酸解氨基酸态氮、酸解铵态氮和酸解未知态氮含量分别增加了18.8%~41.2%、44.8%~49.4%、

147.8%~195.6%和24.9%~33.2%、75.0%~88.4%、49.7%~75.1%, 稻/油轮作中酸解铵态氮变化小于棉/油轮作, 而酸解未知态氮含量变化则高于棉/油轮作。与土壤初始酸解态氮各组分相比, 当周年氮肥用量超过 300 kg hm^{-2} 时, 土壤酸解氨基酸态氮、酸解铵态氮和酸解未知态氮含量均有不同程度增加, 其中, 酸解氨基酸态氮含量增加幅度最小, 酸解未知态氮含量增幅最大。在相同氮肥用量下, 稻/油轮作中酸解铵态氮增加的幅度小于棉/油轮作, 而酸解未知态氮含量增加的幅度则高于棉/油轮作。施用氮肥后酸解氨基糖态氮含量略有下降, 与土壤初始值(21.3 mg kg^{-1})相比, 两种轮作模式下氨基糖态氮含量均无明显变化。

从土壤总酸解态氮含量和各酸解有机态氮组分线性回归的斜率可以看出(图2), 同一土壤经过三年六季的不同耕作后, 水旱和旱地轮作下土壤增加的总酸解态氮在酸解有机氮各组分的变化略有不同, 稻/油轮作中酸解氨基酸态氮、酸解铵态氮和酸解未知态氮中分配的比例分别为31.5%、33.8%和36.0%, 而棉/油轮作中三个组分分配的比例则分

表2 不同轮作模式和氮肥处理油菜收获后0~20 cm土壤酸解态氮各组分含量

轮作模式 Rotation	处理 Treatment	酸解氨基酸态氮 Amino acid N (mg kg^{-1})	酸解氨基糖态氮 Amino sugar N (mg kg^{-1})	酸解铵态氮 Ammonium N (mg kg^{-1})	酸解未知态氮 Unidentified acidolysable N (mg kg^{-1})
稻/油轮作 Rice/rapeseed rotation	N_{0-0}	113.5c (-19.4)	28.5a (7.2)	101.9c (7.3)	27.0d (-1.3)
	N_{150-0}	103.0c (-29.9)	28.8a (7.5)	113.9c (19.3)	41.4c (13.1)
	N_{0-150}	114.9c (-18.0)	21.6c (0.3)	116.3c (21.7)	25.6d (-2.8)
	$N_{150-150}$	129.0b (-3.9)	27.0ab (5.7)	135.6b (41.0)	63.4b (35.1)
	$N_{150-225}$	134.8b (1.9)	21.7c (0.4)	147.6ab (53.0)	79.8a (51.5)
棉/油轮作 Cotton/rapeseed rotation	N_{0-0}	116.7c (-16.2)	26.0a (4.7)	92.3d (-2.3)	35.4d (7.1)
	N_{150-0}	103.3c (-29.6)	28.0a (6.7)	99.2d (4.6)	41.7c (13.4)
	N_{0-150}	113.4c (-19.5)	21.4bc (0.1)	126.6c (32.0)	32.8d (4.5)
	$N_{150-150}$	133.9b (1.0)	23.3b (2.0)	158.9b (64.3)	49.5b (21.2)
	$N_{150-225}$	145.8ab (12.9)	20.9c (-0.4)	161.5b (66.9)	53.0b (24.7)
	$N_{225-150}$	155.5a (22.6)	24.8b (3.5)	173.9a (79.3)	62.0a (33.7)
方差分析 ANOVA					
氮肥用量 N rate (N)		*	ns	*	*
轮作模式 Rotation (R)		ns	ns	ns	ns
氮肥用量 × 轮作模式 (N × R)		ns	ns	ns	ns

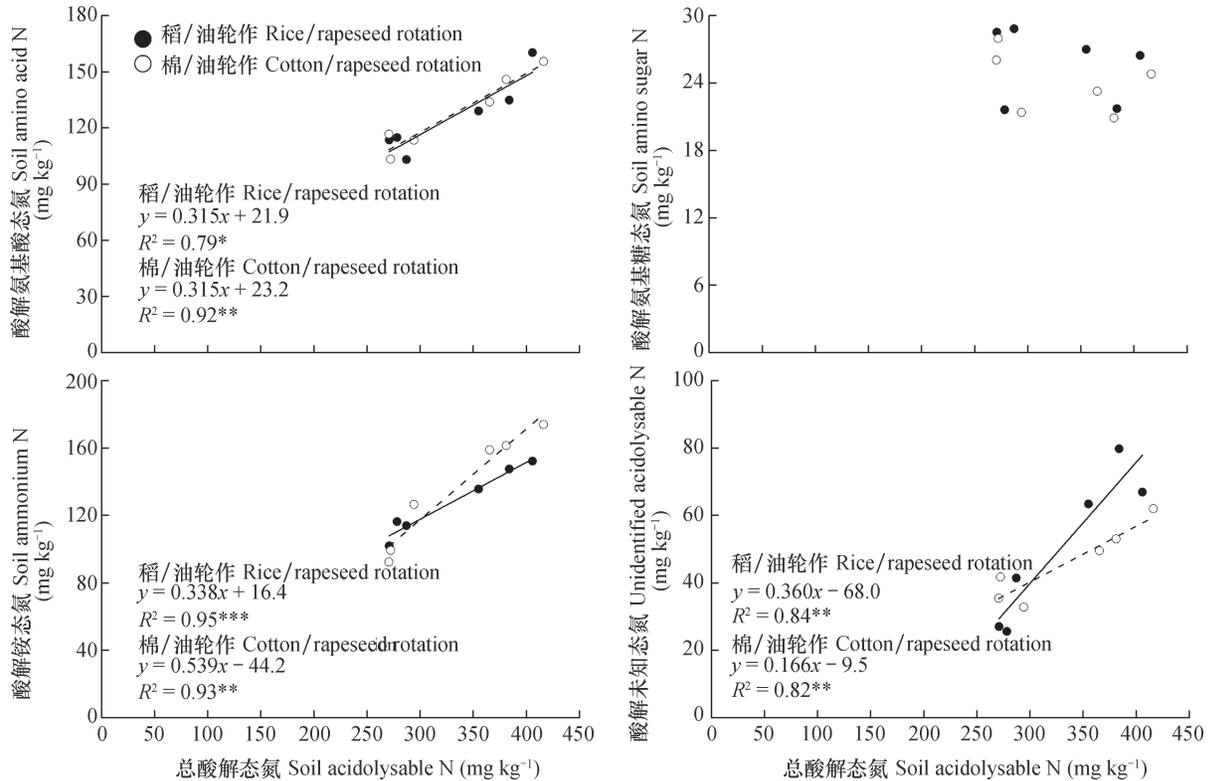


图2 不同轮作模式下土壤总酸解态氮含量与酸解有机态氮各组分的关系

Fig. 2 Relationships between soil total acidolysable N content and soil acidolysable N fractions relative to rotation mode

别为31.5%、53.9%和16.6%，两种轮作模式下土壤酸解铵态氮和酸解未知态氮分配比例差异明显。

2.4 不同轮作模式和氮肥用量下土壤—植物体系周年氮素平衡

表3汇总了水稻/油菜和棉花/油菜轮作下不同氮肥处理2012—2015年氮素表观平衡。氮肥投入和作物氮素吸收是整个体系氮素输入和输出的主要途径，稻/油轮作中灌溉水同样是不能忽视的氮素来源，这也是造成稻/油轮作中表观氮素盈余高于棉/油轮作的重要原因。周年不施氮处理，氮素表观平衡为负值，尤其是棉/油轮作中，其氮素表观平衡为 $-226.7 \text{ kg hm}^{-2}$ 。周年氮肥用量为 150 kg hm^{-2} 处理土壤氮素盈余略有增加，但在棉/油轮作中其表观氮素平衡依然为负值。仅有周年氮肥投入超过 300 kg hm^{-2} 时，两个轮作体系下化学氮肥投入能满足作物氮素吸收，其氮素平衡均表现为盈余，尤其是稻/油轮作中其氮素盈余达 $319.9 \sim 463.8 \text{ kg hm}^{-2}$ ，明显高于棉/油轮作。

从两种轮作模式下土壤表观氮素盈余、土壤全氮以及有机氮组分的相关关系矩阵（图3）中可以看出，表观氮素盈余与土壤全氮、酸解态氮、酸

解氨基酸态氮、酸解铵态氮以及酸解未知态氮含量均呈现显著正相关关系，决定系数 R^2 分别为0.69、0.69、0.58、0.57和0.80，而与土壤未酸解态氮以及酸解氨基糖态氮含量无明显相关。同样，随着土壤全氮含量的增加，土壤酸解态氮以及酸解氨基酸态氮、铵态氮和未知态氮含量呈现直线增加的趋势。

3 讨论

3.1 轮作模式和氮肥用量对土壤全氮含量的影响

氮肥是影响土壤全氮含量的主要因素，本研究中，当水稻/油菜和棉花/油菜轮作中周年氮肥投入超过 300 kg hm^{-2} 时，经过三年六季种植后土壤全氮含量明显增加。这与已报道的一些研究结果^[15-16]类似，海伦实验站长期定位试验布置的第四年，单施氮肥处理土壤全氮含量增加了 0.12 g kg^{-1} ^[16]。然而在一些长期定位试验^[17-18]中也发现，长期偏施氮肥或化肥对土壤全氮含量并无明显作用。不同试验点长期施用化肥对土壤全氮含量的影响不同，这可能与区域气候特点、土壤性质、施肥制度以及栽培管理等措施有密切的关系。Christopher和

表3 不同轮作模式和氮肥处理2012—2015年氮素表观平衡

Table 3 Apparent N balance of the period from 2012 to 2015 relative to N treatment and rotation mode

轮作模式 Rotation	处理 Treatment	氮素投入 N input (kg hm ⁻²)				氮素支出 N output (kg hm ⁻²)		表观氮素平衡 Apparent N balance (kg hm ⁻²)
		试验前土壤无机氮 N _{min} before experiment	秧苗 Seedling	氮肥 N fertilizer	灌溉水 Irrigation	收获后土壤无机氮 N _{min} after harvest	作物吸收 Crop N uptake	
稻/油轮作 Rice/rapeseed rotation	N ₀₋₀	16.7	17.7	0	137	14.4	237.2	-76.0
	N ₁₅₀₋₀	16.7	17.7	450	137	14.9	436.0	173.5
	N ₀₋₁₅₀	16.7	17.7	450	137	19.0	507.4	87.7
	N ₁₅₀₋₁₅₀	16.7	17.7	900	137	21.4	722.3	319.9
	N ₁₅₀₋₂₂₅	16.7	17.7	1 125	137	21.6	828.3	438.7
	N ₂₂₅₋₁₅₀	16.7	17.7	1 125	137	20.7	805.1	463.8
棉/油轮作 Cotton/rapeseed rotation	N ₀₋₀	16.7	12.8	0	0	11.8	259.3	-226.7
	N ₁₅₀₋₀	16.7	12.8	450	0	13.1	570.2	-93.4
	N ₀₋₁₅₀	16.7	12.8	450	0	18.1	571.6	-118.0
	N ₁₅₀₋₁₅₀	16.7	12.8	900	0	20.6	882.0	24.9
	N ₁₅₀₋₂₂₅	16.7	12.8	1 125	0	22.7	951.3	166.9
	N ₂₂₅₋₁₅₀	16.7	12.8	1 125	0	22.0	1 047.0	85.6

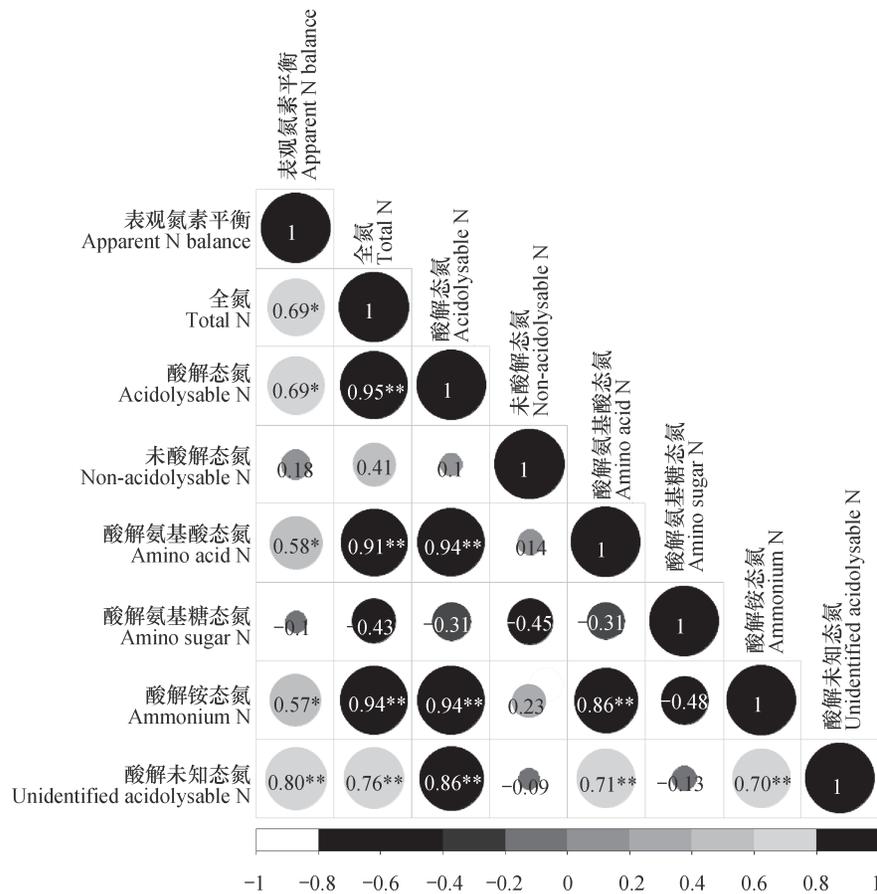


图3 两种轮作模式下表观氮素平衡、土壤全氮以及土壤有机氮各组分的相关关系矩阵

Fig. 3 Correlation matrix between apparent N balance, soil total N and soil organic N fraction relative to rotation mode

Lal^[19]指出氮肥施用提高了土壤有机质含量,这主要是由于氮肥投入增加了还田秸秆以及有机残落物量。在本研究中,尽管作物秸秆被全部移除,但水稻根茬、棉花和油菜落叶是不容忽视的。在本试验第二年,评估水稻根茬和棉花落叶还田生物量分别为1 653~3 072 kg hm⁻²和335~1 971 kg hm⁻²。虽然在本研究中未直接测定油菜落叶的生物量,若以花期油菜叶片表征潜在的落叶生物量,两种轮作模式下落叶的干物质重分别为595~3 979 kg hm⁻²和650~4 740 kg hm⁻²,该值略高于刘晓伟等^[20]研究中的油菜落叶生物量(2 162 kg hm⁻²,占油菜植株干物质总量的13.3%)。从周年总的残落物量来看,随着氮肥用量的增加,显著提高了有机残落物还田的生物量,尤其是周年氮肥用量超过300 kg hm⁻²处理,残落物的还田量要高于低氮处理。同样,从整个轮作体系三年的表观氮素盈余来看,仅有当周年化学氮肥投入超过300 kg hm⁻²时,整个轮作体系才表现出明显的氮素盈余。本研究未测定两种轮作体系的氮素去向,并且表观氮素平衡

也仅仅考虑了0~20 cm的土层,事实上两种轮作模式下氮素去向差异明显^[21],尤其是在旱地轮作中氮素会向下层土壤迁移。尽管两种轮作模式下土壤—植物体系氮素平衡评估不够精确,但从表观氮素盈余和土壤全氮含量的变化可以看出,随着表观氮素盈余的增加,土壤全氮含量呈明显增加的趋势,说明仅有在水稻、棉花季和油菜季均合理施用氮肥才能维持或提高土壤肥力,对于基础肥力较低的土壤,单纯依靠一季施用化肥显然不利于土壤肥力的提升。因此,本研究在土壤初始全氮含量(0.72 g kg⁻¹)较低情况下,通过三年连续施用氮肥(周年氮肥投入超过300 kg hm⁻²)后土壤全氮含量明显增加。尽管很多研究^[12, 22]表明,淹水有利于土壤有机氮的保存,水旱轮作土壤全氮增加速率高于旱地轮作,但在本研究条件下,水稻/油菜和棉花/油菜轮作土壤全氮含量并无明显差异,这可能是由于本试验开展时间相对较短,两种轮作模式下土壤有机质含量并无明显增加,并且整个轮作体系周年氮素盈余不高所致。

表4 不同轮作模式和氮肥处理2013—2014年作物干物质重

Table 4 Dry matter weight of crop residue relative to N treatment and rotation mode during 2013/2014 season

处理 Treatment	稻/油轮作Rice/rapeseed rotation		棉/油轮作Cotton/rapeseed rotation	
	水稻根茬 Rice root residue (kg hm ⁻²)	油菜叶片 Oilseed rape leaves (kg hm ⁻²)	棉花落叶 Cotton fallen leaves (kg hm ⁻²)	油菜叶片 Oilseed rape leaves (kg hm ⁻²)
N ₀₋₀	1 653	595	335	650
N ₁₅₀₋₀	2 503	784	1 410	776
N ₀₋₁₅₀	1 737	3 306	388	3 764
N ₁₅₀₋₁₅₀	2 515	3 494	1 491	3 891
N ₁₅₀₋₂₂₅	3 072	3 979	1 659	4 746
N ₂₂₅₋₁₅₀	3 048	3 562	1 971	3 970

注:油菜叶片为花期样品,此时已有老叶衰老脱落 Note: Leaves of oilseed rape were sampled during flowering period, when old leaves began to fall

3.2 轮作模式和氮肥用量对土壤有机氮组分的影响

本研究中,氮肥施用显著提高了土壤酸解态有机氮的含量,但未酸解态有机氮含量则未明显增加,表现出土壤未酸解态有机氮库的变化滞后于酸解态有机氮库。张玉树等^[23]对不同种植年限果园土壤有机氮组分的调查也表现出类似结果,经过2年种植后,土壤全氮和总酸解态氮含量均明显增加,但未酸解态氮含量在两年内并未发生明显变

化,仅有当种植年限超过10年后,土壤总酸解态氮和未酸解态氮含量均明显增加。作为土壤氮库中较为活跃的组分,酸解有机氮极易受到人为管理措施的影响,黄东迈等^[24]发现施肥1~2年后,残留的化肥氮转化为较为稳定的有机氮形态,进一步¹⁵N试验表明,施入土壤中的肥料氮首先转化为氨基酸态氮和酸溶性未鉴定态氮^[25]。未酸解氮则是土壤中较为稳定、难矿化的有机氮组分,它的变化往往

较为缓慢。姬景红等^[10]研究指出,当土壤全氮含量超过 3.30 g kg^{-1} 时,土壤酸解有机氮含量随着全氮含量增加而降低,减少的酸解有机氮主要转化为难矿化的未酸解态氮保存在土壤中,这也间接表明了,当土壤全氮含量较低时,残留氮素首先进入土壤酸解态有机氮库,随着其含量的不断增加,易矿化的酸解态有机氮库则进一步转化为未酸解态氮,从而促进了土壤全氮含量的提升。

本试验中,氨基酸态氮和酸解铵态氮占土壤全氮的比例接近,分别为 $14.0\% \sim 18.0\%$ 和 $13.0\% \sim 19.6\%$,其所占比例高于酸解未知态氮($3.3\% \sim 9.5\%$)和氨基糖态氮($2.5\% \sim 4.0\%$),这与前人^[1, 12]对我国南方不同地带性及不同种植年限水田土壤有机氮组分的调查结果略有不同。本研究中,酸解未知态氮所占的比例偏低,这可能主要与本试验土壤全氮含量较低有关。尽管水稻/油菜和棉花/油菜两种轮作模式下土壤酸解态有机氮各组分含量并无明显差异,但两种轮作模式下土壤酸解态有机氮各组分的变化不同。稻/油轮作中酸解铵态氮的比例低于棉/油轮作,这与张玉玲等^[7]对比不同土地利用方式下土壤有机氮组分的结果类似。有研究^[1, 26]表明,酸解铵态氮主要源于土壤中交换性铵态氮以及土壤中酰胺、羟氨基酸等含氮有机物的分解,其中,土壤固定态铵是酸解铵态氮的重要来源^[27]。稻/油轮作条件下的干湿交替有利于土壤固定态铵的释放^[28],这可能是导致其酸解铵态氮分配比例低于棉/油轮作的重要因素。酸解未知态氮是土壤酸解有机氮库中难矿化的组分,它主要由非 α -氨基酸氮、脂肪胺和芳胺等生物有效性低的物质组成^[23, 28],由于它的矿化速率很低,通常容易在土壤中累积。王晋等^[12]研究表明,随着种植年限的增加水田酸解未知态氮含量逐渐增加,而旱地则呈相反的趋势,这与本研究类似,稻/油轮作表现出高的酸解未知态氮累积。尽管在本研究中两种轮作模式下土壤全氮含量无明显差异,但稻/油轮作中土壤酸解未知态氮的比例明显高于棉/油轮作,那么随着种植年限的增加,水旱轮作土壤全氮含量将高于旱地轮作。对于氨基糖态氮而言,两种轮作模式下的变化均很小,这与很多已报道的研究结果^[1, 8, 12]类似。氨基糖态氮占土壤全氮比例很低,且受人为管理的影响较小,这是由于氨基糖态氮主要源于微生物细胞壁的残留物,它反映的是已死亡的微生物积累量而不是土壤中现存的

微生物量。

从绝对数量来看,稻/油和棉/油轮作经过三年六季种植后土壤全氮和酸解态有机氮含量无明显差异,但两种轮作模式下土壤酸解态有机氮库各组分的变化差异明显。姜慧敏等^[29]在水稻上的研究表明,酸解铵态氮和氨基酸态氮对于外源化肥氮的转化起到了“暂时库”和“过渡库”的作用,并且它们与土壤氮素矿化潜势关系密切,而酸解铵态氮对可矿化氮亦有直接贡献^[30],此外,也有研究指出,氨基酸态氮是植物吸收氮素的主要来源^[31],因此,土壤有机氮库组分变化可能会引起两种轮作模式下土壤氮素供应能力不同。Ren等^[32]研究指出,水旱轮作中油菜季土壤氮素供应明显低于旱地轮作。然而,关于易矿化的酸解态有机氮库在水旱轮作体系氮肥管理中的应用及评价较少,其对于水旱轮作体系氮素供应及作物氮素吸收的贡献亦不明确,而土壤易矿化有机氮组分对于外源氮肥投入的响应非常敏感,因此,深入探索易矿化有机氮组分在水旱轮作体系氮肥管理中的应用对于进一步优化其氮肥管理将具有重要意义。

4 结 论

周年轮作中氮肥合理施用是维持或提高土壤肥力的基础,仅有当水稻、棉花季和油菜季周年氮肥用量超过 300 kg hm^{-2} 时,整个土壤—植物体系表现出明显的氮素盈余和积累,从而促进土壤全氮和酸解性有机氮含量的增加。经过三年耕作后,两种轮作模式下土壤全氮及有机氮组分含量并无明显差异,但两种轮作模式下酸解态有机氮库组分的变化差异明显,稻/油轮作表现出高酸解未知态氮的积累,而棉/油轮作则呈现出高酸解铵态氮的积累。深入研究水旱轮作模式下易矿化有机氮组分对于土壤氮素供应及作物氮素吸收贡献,对于优化和完善水旱轮作体系氮肥管理具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 李强,王晋,庄舜尧.我国南方不同地带性水稻土有机氮组分变化.土壤,2015,47(5):940—946
Li Q, Wang J, Zhuang S Y. Soil organic nitrogen composition in paddy fields varied with latitude in Southern China (In Chinese). Soils, 2015, 47(5): 940—946
- [2] 宋震震,李絮花,李娟,等.有机肥和化肥长期施用对

- 土壤活性有机氮组分及酶活性的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (3): 525—533
- Song Z Z, Li X H, Li J, et al. Long-term effects of mineral versus organic fertilizers on soil labile nitrogen fractions and soil enzyme activities in agricultural soil (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 (3): 525—533
- [3] Li S X, Wang Z H, Miao Y F, et al. Soil organic nitrogen and its contribution to crop production. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13 (10): 2061—2080
- [4] 富东英, 田秀平, 薛菁芳, 等. 长期施肥与耕作对白浆土有机态氮组分的影响. *农业环境科学学报*, 2005, 24 (6): 1127—1131
- Fu D Y, Tian X P, Xue Q F, et al. Effects of long-term culture fertilization and tillage patterns on the speciation of organic nitrogen in Albic soil (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24 (6): 1127—1131
- [5] 李小涵, 王朝辉, 郝明德, 等. 黄土高原旱地种植体系对土壤水分及有机氮和矿质氮的影响. *中国农业科学*, 2008, 41 (9): 2686—2692
- Li X H, Wang Z H, Hao M D, et al. Effects of cropping systems on soil water, organic N and mineral N in dryland soil on the Loess Plateau (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41 (9): 2686—2692
- [6] Yan L, Li H, Zhang J, et al. Response of organic nitrogen in black soil to long-term different fertilization and tillage practices in Northeast China. *Soil & Water Research*, 2016, 11 (2): 124—130
- [7] 张玉玲, 陈温福, 虞娜, 等. 长期不同土地利用方式对潮棕壤有机氮组分及剖面分布的影响. *土壤学报*, 2012, 49 (4): 740—747
- Zhang Y L, Chen W F, Yu N, et al. Effect of long-term land use on fractionation and profile distribution of organic nitrogen in aquatic brown soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (4): 740—747
- [8] 李萌, 王昌全, 李冰, 等. 猪粪替代氮肥对稻麦轮作条件下土壤有机氮组分的影响. *土壤*, 2016, 48 (3): 449—454
- Li M, Wang C Q, Li B, et al. Effects of pig manure replacing nitrogen fertilizer on soil organic nitrogen components under rice-wheat rotation (In Chinese). *Soils*, 2016, 48 (3): 449—454
- [9] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China. *Field Crops Research*, 2006, 96 (1): 37—47
- [10] 姬景红, 张玉龙, 黄毅, 等. 灌溉方式对保护地土壤有机氮组分及剖面分布的影响. *水土保持学报*, 2007, 21 (6): 99—104
- Ji J H, Zhang Y L, Huang Y, et al. Effect of different irrigation methods on forms and profile distribution of soil organic nitrogen in protected field (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21 (6): 99—104
- [11] 徐阳春, 沈其荣, 茆泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒级中酸解有机氮含量与分配的影响. *中国农业科学*, 2002, 35 (4): 403—409
- Xu Y C, Shen Q R, Mao Z S. Contents and distribution of forms of organic N in soil and particle size fractions after long-term fertilization (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35 (4): 403—409
- [12] 王晋, 庄舜尧, 朱兆良. 不同种植年限水田和旱地土壤有机氮组分变化. *土壤学报*, 2014, 51 (2): 286—294
- Wang J, Zhuang S Y, Zhu Z L. Fractions of soil organic nitrogen in paddy and upland soils relative to cropping history (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (2): 286—294
- [13] Stevenson F J. Nitrogen—organic forms//Page A L. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. Madison: America Society of Agronomy, 1982: 625—641
- [14] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain. *Environment Pollution*, 2006, 143 (1): 117—125
- [15] Jagadamma S, Lal R, Hoeftr G, et al. Nitrogen fertilization and cropping systems effects on soil organic carbon and total nitrogen pools under chisel-plow tillage in Illinois. *Soil & Tillage Research*, 2007, 95 (1/2): 348—356
- [16] 隋跃宇, 张兴义, 焦晓光, 等. 长期不同施肥制度对农田黑土有机质和氮素的影响. *水土保持学报*, 2005, 19 (6): 190—193
- Sui Y Y, Zhang X Y, Jiao X G, et al. Effect of long-term different fertilizer applications on organic matter and nitrogen of black farmland (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19 (6): 190—193
- [17] 陈安磊, 谢小立, 文苑玉, 等. 长期施肥对红壤稻田氮储量的影响. *生态学报*, 2010, 30 (18): 5059—5065
- Chen A L, Xie X L, Wen W Y, et al. Effect of long term fertilization on soil profile nitrogen storage in

- a reddish paddy soil (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (18): 5059—5065
- [18] 赵丹丹, 王俊, 付鑫. 长期定位施肥对旱作农田土壤全氮及其组分的影响. *水土保持学报*, 2016, 30 (4): 303—307
Zhao D D, Wang J, Fu X. Effect of long-term fertilization on soil total nitrogen and its fractions in dryland farming system (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (4): 303—307
- [19] Christopher S F, Lal R. Nitrogen management affects carbon sequestration in North American cropland soils. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2007, 26 (1): 45—64
- [20] 刘晓伟, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 直播冬油菜干物质积累及氮磷钾养分的吸收利用. *中国农业科学*, 2011, 44 (23): 4823—4832
Liu X W, Lu J W, Li X K, et al. Dry matter accumulation and N, P, K absorption and utilization in direct seedling winter oilseed (*Brassica napus* L.) (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44 (23): 4823—4832
- [21] 王敬国, 林杉, 李保国. 氮循环与中国农业氮管理. *中国农业科学*, 2016, 49 (3): 503—517
Wang J G, Lin S, Li B G. Nitrogen cycling and management strategies in Chinese agriculture (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49 (3): 503—517
- [22] Li Z P, Liu M, Wu X C, et al. Effects of long-term chemical fertilization and organic amendments on dynamics of soil organic C and total N in paddy soil derived from barren land in subtropical China. *Soil & Tillage Research*, 2010, 106 (2): 268—274
- [23] 张玉树, 张金波, 朱同彬, 等. 不同种植年限果园土壤有机氮组分变化特征. *生态学杂志*, 2015, 34 (5): 1229—1233
Zhang Y S, Zhang J B, Zhu T B, et al. Characteristics of soil organic nitrogen components of orchards with different planting ages (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34 (5): 1229—1233
- [24] 黄东迈, 朱培立, 高家骅. 有机、无机态肥料氮在水田和旱地的残留效应. *中国科学 (B辑)*, 1982 (10): 907—912
Huang D M, Zhu P L, Gao J H. Residual effects of organic and inorganic fertilizer nitrogen on paddy and upland soil (In Chinese). *Science in China (Series B)*, 1982 (10): 907—912
- [25] 黄东迈, 朱培立. 有机氮各化学组分在土壤中的转化与分配. *江苏农业学报*, 1986, 2 (2): 17—25
Huang D M, Zhu P L. Transformation and distribution of organic nitrogen forms in soil (In Chinese). *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 1986, 2 (2): 17—25
- [26] Schulten H R, Schnitzer M. The chemistry of soil organic nitrogen: A review. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 26 (1): 1—15
- [27] 沈其荣, 史瑞和. 不同土壤有机氮的化学组分及其有效性的研究. *土壤通报*, 1990, 22 (2): 54—57
Shen Q R, Shi R H. Studies on the chemical composition of different soil organic nitrogen and its availability (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1990, 22 (2): 54—57
- [28] Nieder R, Benbi D K, Scherer H W. Fixation and defixation of ammonium in soils: A review. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47 (1): 1—14
- [29] 姜慧敏, 李树山, 张建峰, 等. 外源化肥氮素在土壤有机氮库中的转化及关系. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (6): 1421—1430
Jiang H M, Li S S, Zhang J F, et al. Transformation of external chemical nitrogen in soil organic nitrogen fractions and their relationship (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 (6): 1421—1430
- [30] 丛耀辉, 张玉玲, 张玉龙, 等. 黑土区水稻土有机氮组分及其对可矿化氮的贡献. *土壤学报*, 2016, 53 (2): 457—467
Cong Y H, Zhang Y L, Zhang Y L, et al. Soil organic nitrogen components and their contributions to mineralizable nitrogen in paddy soil of the black soil region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (2): 457—467
- [31] Bardgett R D, Streeter T C, Bol R. Soil microbes compete effectively with plants for organic nitrogen inputs to temperate grasslands. *Ecology*, 2003, 84 (5): 1277—1287
- [32] Ren T, Li H, Lu J W, et al. Crop rotation-dependent yield responses to fertilization in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *The Crop Journal*, 2015, 3 (5): 396—404

Effects of Nitrogen Application Rate on Fractionation of Soil Organic Nitrogen Relative to Crop Rotation Mode

JIA Qian LIAO Shipeng BU Rongyan ZHANG Meng REN Tao[†] LI Xiaokun CONG Rihuan LU Jianwei
(College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China)

Abstract A 3 a field experiment, consisting of 6 croppings, was conducted to investigate effects of N fertilization on content and fractionation of soil organic N relative to N application rate and crop rotation mode, paddy/upland (rice/rapeseed, RR) rotation and upland (cotton/rapeseed, CR) rotation. Results show that after the 3 years of crop rotations cultivations, soil total N content in the 0 ~ 20 cm soil layer increased remarkably in plots more than 300 kg hm⁻² in N input. Compared with CK (No N fertilization, N₀₋₀), soil total N content increased by 13.6% ~ 23.5% and 15.0% ~ 23.0%, respectively, in the treatments 300 kg hm⁻² and 375 kg hm⁻² in N application rate under either RR or CR rotation. The increase in soil total acidolysable N content accounted for most of the increase in soil total N. Although no significant difference in soil total acidolysable N content was observed between plots under RR and CR rotations, fractionation of the soil acidolysable N varied between plots. The proportion of soil acidolysable ammonium N increased by 33.8% in the plots under RR rotation, much lower than that (53.9%) in the plots under CR rotation, but the increment of unidentified soil acidolysable N in proportion was higher in plots under RR rotation (36.0%) than that (16.6%) in the plots under CR rotation. To sum up, reasonable N fertilization may significantly increase soil organic N content. Fractionation of the soil organic N pool varies sharply between plots under RR and CR rotations. It is, therefore, of important significance to optimize N fertilization for high crop yield and high N utilization efficiency in the light of the characteristics of soil organic N transformation under different rotation systems.

Key words Nitrogen fertilizer; Paddy-upland rotation (RR); Continuous upland rotation (CR); Soil total N; Soil acidolysable nitrogen

(责任编辑: 陈荣府)