



有机氮部分替代化学氮肥对土壤有机氮组分的影响

高 鹏¹, 雷星宇², 鲁耀雄¹, 张 拓³, 龙世平², 崔新卫^{1*}, 彭福元^{1*}

(1. 湖南省农业科学院农业环境生态研究所, 湖南 长沙 410125; 2. 湖南省农业科学院核农学与航天育种研究所, 湖南 长沙 430125; 3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘 要: 为综合评价有机肥替代化肥应用效果, 指导南方稻田科学施肥, 研究了不同比例有机氮部分替代化学氮肥对土壤有机氮组分的影响。试验位于湖南省长沙县高桥镇湖南省农业科学院科研试验基地, 共设置 5 个处理: 单施化肥 (NPK); 15% 有机肥替代 (15M); 30% 有机肥替代 (30M); 45% 有机肥替代 (45M); 60% 有机肥替代 (60M)。2021 年晚稻收获后, 测定 0 ~ 20 cm 土层土壤全氮、可溶性有机氮、微生物生物量氮、有机氮组分含量。结果表明: 相比单施化肥, 有机氮部分替代化学氮肥显著提高了稻田耕层土壤的全氮含量, 在等量氮磷养分投入条件下, 15M、30M、45M 和 60M 处理相比单施化肥处理土壤全氮分别提高了 2.73%、10.93%、11.47% 和 20.77%; 有机氮部分替代化学氮肥提高了土壤可溶性有机氮和微生物生物量氮含量, 其中可溶性有机氮提高了 24.53% ~ 72.89%, 微生物生物量氮提高了 0.92% ~ 44.42%; 有机氮部分替代化学氮肥增加了土壤酸解氨基酸氮、酸解铵态氮和酸解氨基糖氮含量, 降低了土壤非酸解氮含量; 土壤全氮与可溶性有机氮、微生物生物量氮呈极显著正相关, 可溶性有机氮、微生物生物量氮均与土壤酸解铵态氮、酸解氨基酸氮、酸解氨基糖氮存在极显著正相关关系。相比单施化肥, 有机氮部分替代化学氮肥提高了土壤全氮、活性氮 (可溶性有机氮和微生物生物量氮) 以及酸解氮中酸解氨基酸氮、酸解铵态氮和酸解氨基糖氮的含量, 有利于提高土壤供氮能力。土壤酸解铵态氮、酸解氨基酸氮和酸解氨基糖氮是影响土壤活性氮的关键因子, 本研究中以 60M 处理替代化学氮肥培肥效果最优。

关键词: 有机肥替代化肥; 土壤有机氮组分; 土壤活性氮

氮素是作物生长不可或缺的营养元素, 土壤有机氮是土壤氮素存在的主要形态, 占土壤全氮的 90% 以上^[1]。土壤有机氮及其化学组分是影响土壤活性氮和土壤供氮能力的重要因素, 同时也是土壤矿质氮重要的源和库^[2-4]。土壤活性氮作为土壤有机氮中最活跃的组分, 影响着土壤有效氮的供应并在土壤氮素循环过程中扮演了至关重要的角色^[5-6]。土壤可溶性有机氮 (SON) 是土壤活性氮的重要组成部分, 它参与土壤氮素循环, 并调控土壤有效氮的供应^[7]。土壤微生物生物量氮 (MBN) 是土壤活性氮的重要组成部分, 同时也是土壤铵态氮、硝态氮以及 SON 氮库相互转化的驱动因素^[8]。土壤微生物活动影响土壤氮素循环, 驱动土壤氮素的矿化和

同化, 进而影响土壤有效氮的供应^[9]。土壤 SON 不仅可以为土壤微生物生长活动提供能量源泉, 而且是土壤有机氮矿化和土壤有效氮供应的重要基础^[10]。

施肥是提高土壤氮素供应、补充土壤氮库的重要措施, 有机肥的施加是提升土壤有机氮含量的重要手段, 相比化肥, 有机肥的肥效相对缓慢, 但持久性好且不容易流失, 对提升土壤肥力、改善土壤质量有重要意义^[11]。研究表明, 有机肥和化肥配合施用可以有效提高土壤全氮和各形态酸解有机氮组分的含量, 而且在一定程度上降低了非酸解态氮占全氮的比例, 酸解氨基酸氮、酸解氨基糖氮等其他形态氮占全氮的比例却有所提高^[12]。肖伟伟等^[13]研究发现长期有机肥配施化肥可以显著提高土壤酸解铵态氮、酸解氨基酸态氮以及非酸解有机氮的含量, 并且, 有机氮部分替代化学氮肥后, 土壤氨基酸态氮和酸解铵态氮占全氮的比例均在一定程度上减小, 王媛等^[14]研究结果也证实了这一现象。还有研究表明, 长期不同施肥下, 各施肥处理间各形态酸解氨基酸氮、酸解氨基糖氮、酸解未知

收稿日期: 2022-09-03; 录用日期: 2022-09-17

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (2021WK2008); 湖南省农业创新资金项目 (2022CX83); 湖南省科技创新项目 (2021RC2081)。
作者简介: 高鹏 (1990-), 助理研究员, 博士研究生, 从事土壤肥料与农业环境研究。E-mail: gaopeng@hunaas.cn。

通讯作者: 崔新卫, E-mail: cuixinwei168@163.com; 彭福元, E-mail: fuyuanpeng4118@hunaas.cn。



氮占全氮的比例变化很小,且各有机氮组分占全氮的比重始终处于动态平衡中^[15],这些结果说明不同施肥对土壤有机氮组分影响显著,但由于各个研究的土壤类型、肥料类型、种植制度、气候和环境等因素各不相同,导致目前的研究结果间差异较大。总体而言,目前针对有机氮部分替代化学氮肥下土壤有机氮组分的变化研究不多,因此,研究不同有机替代比例下土壤有机氮组成变化特征和土壤活性氮组分的变化可为调控土壤氮素供应、培肥土壤肥力、促进作物增产提供理论依据。

本研究依托湖南省农业科学院高桥试验基地的不同比例有机氮部分替代化学氮肥定位试验,分析不同施肥处理对土壤活性氮含量和有机氮组分及其占比的影响,进一步探究土壤活性氮和有机氮组分之间的相关关系和有机肥部分替代化肥的供氮潜力,为提升红壤稻田土壤氮素供应能力和综合肥力、指导科学施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验开始于2020年,地点位于湖南省长沙市长沙县高桥镇湖南省农业科学院试验基地(北纬30°28',东经114°25'),为亚热带季风气候区,光照充足、热量丰富、无霜期长、降水充沛。年平均日照时数为2080 h,日平均气温 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的总积温为5190 $^{\circ}\text{C}$,年降水量1400 mm,年蒸发量1500 mm,无霜期230~300 d。供试土壤为第四纪红土发育而成的红黄泥,其基础理化性状为pH 5.80、有机质23.63 g/kg、全氮1.62 g/kg、全磷0.56 g/kg、全钾18.08 g/kg,水解性氮164 mg/kg、有效磷6.9 mg/kg、速效钾86 mg/kg。采用水稻品种为“泰优390”和“玉针香”。

1.2 试验设计

试验设5个处理:100%氮磷钾化肥(NPK);15%有机肥替代化肥,以氮计(15M);30%有机肥替代化肥,以氮计(30M);45%有机肥替代化肥,以氮计(45M);60%有机肥替代化肥,以氮计(60M);磷钾不足时以单质化肥补齐。供试化肥为尿素(N 46%)、钙镁磷肥(P_2O_5 46%)、氯化钾(K_2O 60%),每季施用量为N 225 kg/hm^2 、 P_2O_5 135 kg/hm^2 、 K_2O 180 kg/hm^2 ,N : P_2O_5 : K_2O =5:3:4。有机肥为市售商品有机肥,来源于周边某大型有机肥厂,其含水量30%、干基养分含量为

N 26.8 g/kg、 P_2O_5 27 g/kg、 K_2O 18 g/kg。有机肥和过磷酸钙作基肥一次性施入,尿素按照4:3:3比例作基、蘖、穗肥施入,氯化钾预留150 kg/hm^2 作穗肥,其余作基肥施入。耕作模式为一季中稻+冬季绿肥,所有肥料均于水稻季施入,绿肥季每公顷播撒15 kg绿肥苕子,翌年5月翻入土壤整地备用。

1.3 样品采集与测定

试验于2021年10月水稻收获后采集耕层(0~20 cm)土壤样品,每个小区S型7点采样,剔除植物残体、石头和其他杂物后混合均匀,将采集的土壤样品一部分放入自封袋中,置于4 $^{\circ}\text{C}$ 保温箱带回实验室保存。土壤可溶性全氮采用紫外分光光度法测定,土壤铵态氮含量采用靛酚蓝比色法测定,土壤硝态氮含量采用酚二磺酸比色法测定^[16]。土壤SON的计算公式为:SON=可溶性全氮-(铵态氮+硝态氮)^[17]。根据Bremner^[18]的方法测定土壤有机氮的组分,采用MgO氧化蒸馏法测定土壤酸解铵态氮,采用三酮氧化、磷酸-硼砂缓冲液蒸馏法测定土壤酸解氨基酸氮,酸解铵态氮和酸解氨基酸氮采用磷酸-硼砂缓冲液蒸馏法进行测定;非酸解性氮为土壤全氮与酸解总氮的差值;酸解未知态氮为酸解总氮与酸解铵态氮、酸解氨基酸氮和酸解氨基酸糖氮的差值。土壤全氮含量采用浓硫酸消煮半微量凯氏定氮法,在实验室用全自动定氮仪进行测定。土壤MBN含量采用氯仿熏蒸法测定^[19]。

1.4 数据处理与分析

利用Excel 2010和SPSS 19.0对试验数据进行分析,运用Oringe 2016进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤全氮含量的影响

如图1所示,不同有机氮部分替代化学氮肥施用处理对土壤全氮含量影响差别很大,其中NPK处理含量最低,为1.83 g/kg,而60M处理全氮含量最高,达到了2.11 g/kg,较NPK处理增加了15.30%,各处理全氮含量由低到高为NPK<15M<30M<45M<60M,说明有机氮部分替代化学氮肥比例提高后,土壤全氮含量也逐步提高,15M处理相比NPK处理,全氮含量增加了0.05 mg/kg,但差异不显著,而30M、45M、60M处理全氮的含量分别为2.03、2.04、2.11 g/kg,均显著高于NPK处理,相比NPK处



理分别提高了 0.20、0.21、0.28 g/kg, 各处理全氮含量由低到高分别 1.83、1.88、2.03、2.04、2.11 g/kg, 较试验开始前 1.62 g/kg 分别提高了 0.21、0.26、0.41、0.42、0.49 g/kg, 说明施肥是提高土壤全氮含量的有效措施, 相比单独施用化肥, 施用有机肥等氮替代化学氮肥更有利于增加土壤氮储量, 且土壤全氮的含量随着有机肥替代比例的增加而同步增加 (图 1)。

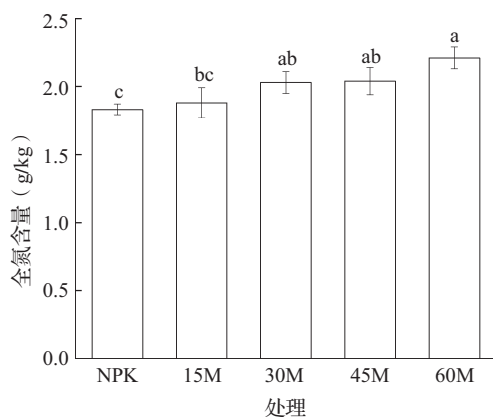


图 1 有机氮肥部分替代化学氮肥对土壤全氮含量的影响

注: 柱状图上不同的字母代表处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.2 不同施肥处理对土壤活性氮含量的影响

如表 1 所示, 不同施肥处理下, 土壤活性氮组分各不相同, 不同施肥处理土壤的 SON 和 MBN 含量由大到小均为 60M>45M>30M>15M>NPK。施用有机肥替代化肥的几个处理较 NPK 处理均提高了土壤 SON 含量, 低量有机肥 (15M) 替代处理土壤 SON 含量较 NPK 处理增加了 3.72 mg/kg, 但未达到统计学差异, 而 30M、45M 和 60M 处理相比 NPK 处理显著提高了 SON 含量 ($P<0.05$)。不同施肥处理下土壤 MBN 含量变化趋势与 SON 一致, 低量有机肥 (15M) 替代处理土壤 MBN 含量较 NPK 处理虽略有增加, 但未达到统计学差异, 而 30M、45M 和 60M 处理相比 NPK 处理增幅分别达 16.04%、26.71% 和 44.42%, 显著高于单施化肥 NPK 处理 (表 1)。有机肥等氮替代化肥后, 土壤 SON 和 MBN 占全氮比例均有提高的趋势, 且随着有机替代比例的提高, 土壤 SON 和 MBN 占全氮比例也同步提高 (表 1)。

表 1 不同施肥处理对土壤活性氮的影响

处理	可溶性有机氮		微生物生物量氮	
	含量 (mg/kg)	占全氮比例 (%)	含量 (mg/kg)	占全氮比例 (%)
NPK	15.16 ± 0.55c	0.83 ± 0.04c	78.16 ± 6.63c	4.28 ± 0.44c
15M	18.88 ± 1.10bc	1.01 ± 0.01b	78.88 ± 1.10c	4.21 ± 0.18c
30M	20.70 ± 0.66b	1.02 ± 0.01b	90.70 ± 0.66b	4.47 ± 0.15b
45M	25.71 ± 1.11a	1.26 ± 0.10a	99.04 ± 5.22ab	4.86 ± 0.46ab
60M	26.21 ± 0.98a	1.19 ± 0.07a	112.88 ± 6.61a	5.12 ± 0.44a

注: 同列数据后不同的字母表示处理间有显著差异 ($P<0.05$)。下同。

2.3 土壤有机氮组分含量及其在全氮中的占比

如表 2 所示, 有机肥部分替代化肥各处理的酸解总氮含量均高于 NPK 处理, 且其中替代比例较高的 3 个处理 (30M、45M、60M) 显著高于 NPK 处理。除 15M 外, 其余有机替代处理的非酸解氮含量均低于 NPK 处理, 且其中替代比例较高的 3 个处理 (30M、45M、60M) 显著低于 NPK 处理, 说明随着有机肥替代比例的提高, 土壤酸解总氮的含量也随之增加, 而土壤非酸解氮的含量却减少。

进一步分析发现, 有机氮部分替代化学氮肥可提高土壤酸解氨基酸氮、土壤酸解铵态氮和土

壤酸解氨基糖氮, 进而提高土壤酸解总氮的含量, 但有机替代处理相比单施化肥处理对酸解未知氮含量的影响不大, 各处理间无显著差异。与酸解总氮增加趋势相反, 有机替代处理降低了土壤非酸解氮的含量, 且随着替代比例增加而降低, 其中 30M、45M 和 60M 处理的非酸解氮含量显著低于 NPK 处理。有机替代相比单施化肥增加了酸解总氮的比例、降低了非酸解氮的比例, 增加了有机氮中活性氮的比重, 提高了有机氮的有效性。

如图 2 所示, 各施肥处理的酸解总氮占土壤

全氮的比例为 72.08% ~ 84.89%，说明酸解总氮是红壤稻田氮素的主要来源。本研究中，酸解氨基酸氮、酸解铵态氮、酸解氨基糖氮、酸解未知氮和非酸解氮分别占土壤全氮的 29.08% ~ 36.95%（平均 33.91%）、11.37% ~ 14.33%（平均 12.88%）、0.50% ~ 2.02%（平均 1.42%）、28.16% ~ 32.58%（平均 30.15%）和 15.11% ~ 27.02%（平均 21.64%），有机氮各形态的分布趋势为酸解氨基酸氮 > 酸解未

知氮 > 非酸解氮 > 酸解铵态氮 > 酸解氨基糖氮，其中酸解氨基酸氮、酸解未知氮和非酸解氮为有机氮的主要组分（图 2）。不同施肥不但显著改变了土壤有机氮各形态含量，而且也对土壤有机氮的各个组成部分产生显著影响。图 2 表明，有机替代处理提高了酸解氨基酸氮、酸解铵态氮和酸解氨基糖氮占全氮的比例，降低了非酸解氮占全氮的比例，对酸解未知氮占全氮的比例没有明显影响。

表 2 不同施肥处理下土壤有机氮各组分的含量 (mg/kg)

处理	酸解氨基酸氮	酸解铵态氮	酸解氨基糖氮	酸解未知氮	酸解总氮	非酸解氮
NPK	0.53 ± 0.01c	0.21 ± 0.00b	0.01 ± 0.00b	0.59 ± 0.04a	1.34 ± 0.03c	0.49 ± 0.07a
15M	0.60 ± 0.01b	0.23 ± 0.01b	0.01 ± 0.00b	0.53 ± 0.07a	1.37 ± 0.07c	0.51 ± 0.14a
30M	0.63 ± 0.01b	0.26 ± 0.02ab	0.04 ± 0.00a	0.59 ± 0.04a	1.61 ± 0.01b	0.42 ± 0.10b
45M	0.65 ± 0.01b	0.29 ± 0.02a	0.04 ± 0.22a	0.66 ± 0.01a	1.73 ± 0.01ab	0.31 ± 0.11c
60M	0.73 ± 0.01a	0.30 ± 0.02a	0.04 ± 0.00a	0.64 ± 0.09a	1.80 ± 0.10a	0.41 ± 0.11b

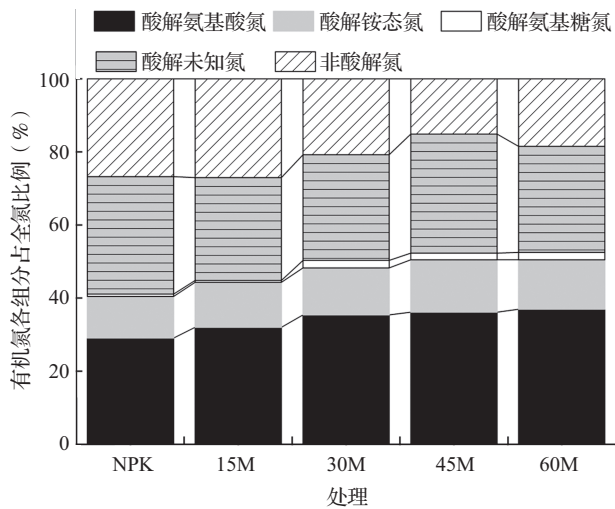


图 2 不同施肥处理下土壤有机氮各组分占土壤全氮的比例

2.4 不同施肥下土壤全氮、活性氮和有机氮组分相关性分析

相关分析（表 3）的结果表明，土壤全氮与土壤活性氮（SON、MBN）含量极显著正相关、相关系数分别为 0.810 和 0.781。SON、MBN 与有机氮各组分（酸解氨基酸氮、酸解铵态氮、酸解氨基糖氮、酸解未知氮）均存在显著的正相关关系（ $P<0.05$ ），其中 SON、MBN 与酸解铵态氮、酸解氨基酸氮、酸解氨基糖氮均呈极显著正相关。非酸解氮与酸解未知氮存在极显著负相关，并且与酸解铵态氮、酸解氨基酸氮等其他的氮素形态没有显著性相关。

表 3 不同施肥下土壤全氮、活性氮和有机氮组分相关关系

指标	可溶性有机氮	微生物生物量氮	酸解铵态氮	酸解氨基酸氮	酸解氨基糖氮	酸解未知氮	非酸解氮
全氮	0.810**	0.781**	0.879**	0.871**	0.542*	0.395	-0.050
可溶性有机氮	1	0.887**	0.927**	0.922**	0.688**	0.572*	-0.502
微生物生物量氮		1	0.903**	0.848**	0.735**	0.632*	-0.421
酸解铵态氮			1	0.935**	0.772**	0.477	-0.434
酸解氨基酸氮				1	0.596*	0.564*	-0.431
酸解氨基糖氮					1	0.335	-0.528
酸解未知氮						1	-0.736**

注：* 和 ** 分别表示在 5% 和 1% 水平相关显著。



3 讨论

3.1 不同比例有机氮替代化学氮肥对土壤不同形态氮素的影响

施肥是提升土壤氮素含量的重要手段,肥料的投入有助于维持土壤供氮水平、补充地力^[20]。外源氮素通过施肥措施进入土壤后主要去向包括作物吸收、土壤残留以及各种形态氮素损失。一般情况下,无机氮肥施入土壤后,其中一部分氮素可直接被作物吸收,其他部分氮素一般会通过各种不同的途径损失^[21]。然而,研究表明,有机肥施入土壤后,外源有机氮在土壤中的固持率高达 50% 以上,这些残留下来的有机态氮不易流失,固定在土壤中可大幅提高土壤有机氮的供应能力^[22]。MBN 和 SON 是影响土壤活性氮的重要因素,它们对于土壤氮素的循环、土壤有效氮的供应产生重大影响^[23-25]。农业生产中,有机肥料的施入可以大幅提升土壤 SON 的含量^[26]。本研究结果也证实了有机肥替代部分化肥施用可以有效提升土壤 SON 含量,且提升幅度随着替代比例的增加而增加,施用有机肥的各个处理相比单施化肥处理,SON 的含量均增加了 24.54% 以上。MBN 也是土壤活性氮库的重要组成部分,它参与并影响土壤氮素的循环过程,进而影响土壤有效氮的供应^[27]。本研究中,有机替代处理较单施化肥处理 MBN 含量均有增加,增幅为 0.92% ~ 44.42%。可以看出,有机氮替代化学氮肥施用对 MBN 的影响非常显著,且随着替代比例的增加而呈增加趋势,这可能是由于施用有机物料增加了土壤的能源物质,为土壤的微生物活动提供有效能源,微生物活性增加,加剧了微生物同化作用,使更多的氮素被微生物同化、吸收、利用,从而在土壤中固持,进而减少了土壤氮素的损失,增加了土壤氮储量^[28]。

土壤有机氮不同形态特征的转化和不同组分的占比都会显著影响土壤氮素的有效供应,而不同施肥处理也会显著影响土壤有机氮总量的含量及其各组分的占比^[29]。本研究中,不同施肥处理下,土壤有机氮的各个组分之间和占全氮的比例差异很大,与单施化肥相比,有机替代可显著提高土壤酸解铵态氮、土壤酸解氨基酸氮和酸解氨基糖氮含量,进而整体提高了土壤酸解总氮的含量,并显著降低了土壤非酸解氮的含量和其占土壤全氮的比例,施用有机肥的处理提高了土壤酸解铵态氮、酸

解氨基酸氮和酸解氨基糖氮占全氮的比例,这说明施用有机肥可以显著提高土壤有效氮的供应能力和水平,为作物生长提供有效养分支撑。有研究表明,稻田长期、连续施用有机肥可以显著增加土壤氮素含量并产生累积效应^[22]。还有研究表明,酸解氨基酸氮是土壤优先氮供应的中转站和能量库,是植物可吸收利用氮素的重要支撑^[30-31],因此,施用有机肥替代部分化肥对提高土壤氮素的矿化和增加土壤有效氮的供应、提高作物产量均具有重要意义。在农业生产中,有机肥部分替代化肥合理配施可以取长补短,既能发挥有机肥肥效持久、提升作物品质的优势,又可发挥化肥见效快、施用方便的特点,进而提升土壤综合肥力,促进作物增产。杨静等^[32]研究表明,有机肥配施无机肥可显著提高土壤全氮和有效氮含量,并增加土壤酸解氨基酸氮和铵态氮、硝态氮等有效形态氮含量,进而提高土壤供氮能力。

3.2 土壤活性氮与土壤有机氮组分的关系

本研究结果表明,土壤 SON 和土壤酸解铵态氮、酸解氨基酸氮及酸解氨基糖氮均呈显著正相关,可能是因为有机肥施入土壤后增加了 SON 和酸解有机氮组分含量;土壤中 SON 含量的动态变化受土壤微生物活动及代谢的影响。相关研究表明,土壤 MBN 含量和土壤有机氮组分之间的关系密切,MBN 含量的变化也影响土壤有机氮组分的变化及其占全氮的比例。党亚爱等^[33]分析了不同母质土壤有机氮的组分,结果表明土壤 MBN 与土壤有机氮组分中的酸解铵态氮、酸解氨基酸氮呈显著正相关,与土壤酸解未知氮没有显著性相关,这与本研究的结果趋于一致。另外的研究表明,长期施肥后土壤 MBN 与土壤酸解氨基酸氮和酸解铵态氮呈显著相关,而与酸解氨基糖氮和酸解未知氮之间没有显著相关^[34]。在湖南水稻土长期试验的结果为,土壤 MBN 与酸解有机氮和酸解氨基酸氮之间存在显著正相关关系^[35]。郝晓晖等^[36]研究结果表明,土壤酸解性氮与土壤 MBN 之间存在极显著正相关关系,且酸解氨基酸氮和酸解未知氮是影响 MBN 的关键因子。本研究中,土壤 MBN 与土壤酸解铵态氮、酸解氨基酸氮、酸解氨基糖氮均呈显著正相关关系,说明土壤 MBN 与土壤酸解有机氮组分显著相关。综上所述,土壤 MBN 与土壤有机氮各组分之间的相关性在不同场景下结果并不相同,这可能与土壤的质地、土壤类型及气候环境等因素



有关。

丛耀辉等^[37]研究结果表明,土壤酸解铵态氮是土壤活性氮和土壤可矿化氮的最主要来源。Lu等^[38]研究发现,在土壤中,酸解铵态氮作为一种不稳定态氮,是影响土壤活性氮的重要组分。本研究中,酸解铵态氮占土壤全氮的11.37%~14.33%(平均12.88%),且与SON和MBN呈极显著正相关,是影响土壤有效氮供应的重要组分,这与前人研究结果一致。Amelung等^[39]研究结果表明,酸解氨基酸氮显著影响土壤微生物代谢,对土壤固持氮具有重要意义。Bardgett等^[40]研究结果也表明,土壤有机氮中的酸解氨基酸氮是植物可吸收利用的有效氮来源。Werdin等^[41]研究结果表明,土壤有机氮中的酸解氨基酸氮是微生物吸收利用的有效氮。Atanasova等^[42]研究结果表明,土壤有机氮、土壤酸解氨基酸氮和土壤氨基糖氮均和土壤全氮呈正相关关系,本研究中,酸解氨基酸氮占土壤全氮的29.08%~36.95%,是土壤有机氮中占比最大的组分,且与土壤SON和土壤MBN含量呈极显著正相关,是影响土壤有效氮供应的关键组分。Wang等^[43]研究结果表明,土壤活性氮的供应主要来源于土壤有机氮中的酸解氨基酸氮。He等^[44]研究结果表明,土壤有机氮中的酸解氨基糖氮与土壤微生物活动密切相关,在一定程度上可以表征微生物残留物的含量。本研究中,酸解氨基糖氮平均仅占土壤全氮的1.42%,但也显著影响土壤活性氮的供应,可能是因为土壤酸解氨基糖氮的含量与土壤微生物数量及微生物活动紧密相关,微生物活动影响了土壤的碳氮代谢进程,进而影响土壤活性氮含量和供氮能力。

氮素施入土壤后,一部分经过微生物同化作用以有机氮形态暂时固定在土壤中,残留的部分有机氮又经微生物进一步转化,最终以微生物残体方式形成更为稳定的有机氮形态^[45]。本研究结果表明,相比单施化肥,有机氮部分替代化肥氮对土壤酸解未知氮含量的影响不大,但显著增加了土壤酸解氨基酸氮、酸解氨基糖氮和酸解铵态氮的含量,整体增加了酸解总氮的含量。另外,与单施化肥相比,有机养分替代部分化肥对酸解未知氮和酸解铵态氮占全氮的比例影响不大,但显著提升了酸解氨基酸氮和酸解氨基糖氮占全氮的比例,显著降低了土壤非酸解氮与土壤全氮的比值。有机氮替代化学氮肥整体提高了土壤酸解性有机氮组分的含量,尤其是

提高了土壤酸解氨基酸氮的含量,说明有机肥替代部分化肥有助于提升土壤供氮能力和土壤肥力,补充了酸解氨基酸氮,增加了土壤易矿化氮含量,对提升土壤易矿化有机氮库具有积极作用,增加了有机氮库容量,显著提高了土壤供氮能力^[46]。其中,60M处理的土壤全氮、酸解总氮、酸解氨基酸氮、酸解氨基糖氮、酸解铵态氮含量最高且酸解氨基酸氮含量占全氮比例也最高,是本研究中提升土壤氮素积累和供氮能力的最优模式。

4 结论

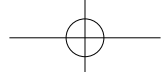
相比单施化肥,有机氮部分替代化学氮肥增加了土壤全氮的含量,15M、30M、45M和60M处理较NPK处理分别提高了2.73%、10.93%、11.47%和20.77%,说明土壤全氮的含量随着有机肥替代比例的增加而增加。

相比单施化肥,有机氮部分替代化学氮肥提高了土壤活性氮含量和SON和MBN占全氮比例,其中SON含量提高了24.53%~72.89%,MBN含量提高了0.92%~44.42%。

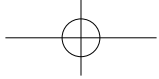
土壤全氮与SON、MBN呈极显著正相关,土壤酸解铵态氮、酸解氨基酸氮和酸解氨基糖氮是影响土壤SON和MBN的关键因子。

参考文献:

- [1] Gilmour J T. Predicting soil organic matter nitrogen mineralization [J]. Soil Science Society of America Journal, 2020, 85: 353-360.
- [2] 吴汉卿, 张玉龙, 张玉玲, 等. 土壤有机氮组分研究进展 [J]. 土壤通报, 2018, 49 (5): 1240-1246.
- [3] Noll L, Zhang S, Zheng Q, et al. Wide-spread limitation of soil organic nitrogen transformations by substrate availability and not by extracellular enzyme content [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 133: 37-49.
- [4] 任金凤, 周桦, 马强, 等. 长期施肥对潮棕壤有机氮组分的影响 [J]. 应用生态学报, 2017, 28 (5): 1661-1667.
- [5] 郭瑞华, 罗琰, 张腾昊, 等. 地上和地下植食者互作对水稻氮分配及土壤活性氮的影响 [J]. 土壤学报, 2017, 54 (2): 494-503.
- [6] 郭俊杰, 朱晨, 刘文波, 等. 不同施肥模式对土壤氮循环功能微生物的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27 (5): 751-759.
- [7] 周建斌, 陈竹君, 郑险峰, 等. 土壤可溶性有机氮及其在氮素供应及转化中的作用 [J]. 土壤通报, 2005, 36 (2): 244-248.
- [8] 李素新, 覃志杰, 刘泰瑞, 等. 模拟氮沉降对华北落叶松人



- 农林土壤微生物碳和微生物氮的动态影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34 (1): 268–274.
- [9] 符鲜, 杨树青, 刘德平, 等. 不同盐渍化土壤中微生物对氮肥的响应[J]. 植物营养与肥科学报, 2018, 24 (3): 661–667.
- [10] 王文颖, 李文全, 周华坤, 等. 高寒人工草地土壤可溶性有机氮库和无机氮库动态变化[J]. 生态环境学报, 2016 (1): 30–35.
- [11] 杨静, 聂三安, 杨文浩, 等. 不同施肥水稻土可溶性有机氮组分差异及影响因素[J]. 土壤学报, 2018, 55 (4): 955–966.
- [12] 郝小雨, 马星竹, 高中超, 等. 长期施肥下黑土活性氮和有机氮组分变化特征[J]. 中国农业科学, 2015, 48 (23): 4707–4716.
- [13] 肖伟伟, 范晓晖, 杨林章, 等. 长期定位施肥对潮土有机氮组分和有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46 (2): 274–280.
- [14] 王媛, 周建斌, 杨学云, 等. 长期不同培肥处理对土壤有机氮组分及氮素矿化特性的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43 (6): 1173–1180.
- [15] 李树山, 杨俊诚, 姜慧敏, 等. 有机无机肥氮素对冬小麦季潮土氮库的影响及残留形态分布[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32 (6): 1185–1193.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000: 157–163.
- [17] Chen C R, Xu Z H, Zhang S L, et al. Soluble organic nitrogen pools in forest soils of subtropical Australia[J]. Plant and Soil, 2005, 277: 285–297.
- [18] Bremner J M. Organic forms of nitrogen[M] // Methods of soil analysis. Madison: American Society of Agronomy, 1965: 1238–1255.
- [19] 林启美, 吴玉光, 刘焕龙, 等. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进[J]. 生态学杂志, 1999, 18 (2): 63–66.
- [20] 张电学, 韩志卿, 吴素霞, 等. 不同施肥制度对褐土有机氮及其组分的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32 (3): 201–206.
- [21] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45 (5): 778–783.
- [22] 高佳蕊, 方胜志, 张玉玲, 等. 东北黑土不同开垦年限稻田土壤有机氮矿化特征[J]. 中国农业科学, 2022, 55 (8): 1579–1588.
- [23] Chilima J, Huang G, Wu C F. Microbial biomass carbon trends in black and red soils under single straw application: effect of straw placement, mineral N addition and tillage[J]. Pedosphere, 2002, 12 (1): 59–72.
- [24] Long G Q, Jiang Y J, Sun B. Seasonal and inter-annual variation of leaching of dissolved organic carbon and nitrogen under long-term manure application in an acidic clay soil in subtropical China[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 146: 270–278.
- [25] Zhou J B, Chen X L, Zhang Y L, et al. Nitrogen released from different plant residues of the Loess Plateau and their additions on contents of microbial biomass carbon, nitrogen in soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30 (3): 123–128.
- [26] Chapman P J, Williams B L, Hawkins A. Influence of temperature and vegetation cover on soluble inorganic and organic nitrogen in a spodosol[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33 (7–8): 1113–1121.
- [27] Xia Y, Chen X, Zheng S, et al. Manure application accumulates more nitrogen in paddy soils than rice straw but less from fungal necromass[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2021, 319: 107575.
- [28] 戚瑞敏, 温延臣, 赵秉强, 等. 长期不同施肥潮土活性有机氮库组分与酶活性对外源牛粪的响应[J]. 植物营养与肥科学报, 2019, 25 (8): 1265–1276.
- [29] 李文军, 杨奇勇, 赵迪, 等. 洞庭湖水稻土有机氮组分及其与可矿化氮的关系特征[J]. 中国土壤与肥料, 2018 (5): 15–23.
- [30] 李文军, 曾细妹, 彭保发, 等. 洞庭湖区水稻土有机氮矿化的模型模拟[J]. 生态学杂志, 2019 (5): 1392–1401.
- [31] 李玥, 余亚琳, 张欣, 等. 连续施用炭基肥及生物炭对棕壤有机氮组分的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36 (10): 2903–2909.
- [32] 杨静, 林伟, 杨文浩, 等. 不同施肥水稻土可溶性有机氮变化速率及对细菌的响应[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40 (7): 1509–1518.
- [33] 党亚爱, 王立青, 张敏, 等. 黄土高原南北主要类型土壤氮组分相关关系研究[J]. 土壤, 2015, 47 (3): 490–495.
- [34] 李世清, 李生秀, 邵明安, 等. 半干旱农田生态系统长期施肥对土壤有机氮组分和微生物体氮的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37 (6): 859–864.
- [35] 彭佩钦, 仇少君, 童成立, 等. 长期施肥对水稻土耕层微生物生物量氮和有机氮组分的影响[J]. 环境科学, 2007, 28 (8): 1816–1821.
- [36] 郝晓晖, 刘守龙, 童成立, 等. 长期施肥对两种稻田土壤微生物量氮及有机氮组分的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40 (4): 757–764.
- [37] 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[J]. 土壤学报, 2016, 53 (2): 457–467.
- [38] Lu H, He H, Zhao J, et al. Dynamics of fertilizer-derived organic nitrogen fraction in a arable soil during a growing season[J]. Plant and Soil, 2013, 373 (1): 595–607.
- [39] Amelung W, Zhang X. Determination of amino acid enantiomers in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43 (4): 553–562.
- [40] Bardgett R D. Soil microbes compete effectively with plants for organic nitrogen inputs to temperate grasslands[J]. Ecology, 2002, 83 (5): 1277–1287.
- [41] Werdin N R, Stewart J R, Khan S A, et al. Soil amino acid composition across a boreal forest successional sequence[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41 (6): 1210–1220.
- [42] Atanasova E. Effect of nitrogen sources on the nitrogenous forms



- and accumulation of amino acid in head cabbage [J]. Plant Soil and Environment, 2008, 54 (2): 66-71.
- [43] Wang J S. Elevated amino sugar nitrogen concentrations in soil: a potential method for assessing fertility enhancement by actionhizal plants [J]. Symbiosis, 2010, 50 (1): 71-76.
- [44] He H B, Li X B, Zhang W, et al. Differentiating the dynamics of native and newly immobilized amino sugars in soil frequently amended with inorganic nitrogen and glucose [J]. European Journal of Soil Science, 2011, 62 (1): 144-151.
- [45] 宗海英, 王凯荣, 谢小立. 长期施肥对红壤性水稻土有机氮组分的影响 [J]. 应用生态学报, 2008, 19 (8): 1721-1726.
- [46] Nguyen T H, Shindo H. Effects of different levels of compost application on amounts and distribution of organic nitrogen forms in soil particle size fractions subjected mainly to double cropping [J]. Agricultural Sciences, 2011, 2 (3): 213-219.

Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer on soil organic nitrogen and active nitrogen

GAO Peng¹, LEI Xing-yu², LU Yao-xiong¹, ZHANG Tuo³, LONG Shi-ping², CUI Xin-wei^{1*}, PENG Fu-yuan^{1*} (1. Institute of Agro-Environment and Ecology, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha Hunan 410125; 2. Institute of Nuclear Agriculture Science and Space Breeding, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha Hunan 430125; 3. Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081)

Abstract: In order to comprehensively evaluate the application effect of organic fertilizer instead of chemical fertilizer and guide the scientific fertilization of rice fields in southern China, the effects of partial substitution of chemical nitrogen with different proportions of organic nitrogen on soil organic nitrogen components were studied. The experimental site located in the scientific research and test base of Hunan Academy of Agricultural Sciences, Gaoqiao town, Changsha county, Hunan province. Five treatments were set up: single fertilizer treatment (NPK), 15% organic fertilizer replacement treatment (15M), 30% organic fertilizer replacement treatment (30M), 45% organic fertilizer replacement treatment (45M), 60% organic fertilizer replacement treatment (60M). After the late rice harvest in 2021, the contents of total nitrogen, soluble organic nitrogen, microbial biomass nitrogen and organic nitrogen components in 0-20 cm soil layer were determined. The results showed that the partial substitution of organic nitrogen for chemical nitrogen significantly increased the total nitrogen content in the topsoil of paddy field compared with NPK treatment. Under the condition of equal nitrogen and phosphorus input, the total nitrogen content in the soil treated with 15M, 30M, 45M and 60M were increased by 2.73%, 10.93%, 11.47% and 20.77%, respectively, compared NPK treatment. The contents of soil soluble organic nitrogen and microbial biomass nitrogen were increased by 24.53%-72.89%, and 0.92%-44.42%, respectively. Partial substitution of organic nitrogen for chemical nitrogen increased the contents of acidolytic amino acid nitrogen, acidolytic ammonium nitrogen and acidolytic amino sugar nitrogen, and decreased the contents of non-acidolytic nitrogen. Soil total nitrogen was significantly positively correlated with soluble organic nitrogen and microbial biomass nitrogen, and soluble organic nitrogen and microbial biomass nitrogen were significantly positively correlated with soil acidolytic ammonium nitrogen, acidolytic amino acid nitrogen and acidolytic amino sugar nitrogen. Compared with single fertilizer application, partial substitution of organic nitrogen for chemical nitrogen increased the contents of total nitrogen, active nitrogen (soluble organic nitrogen and microbial biomass nitrogen), acidolytic amino acid nitrogen, acidolytic ammonium nitrogen and acidolytic amino sugar nitrogen in soil, which was beneficial to improving the nitrogen supply capacity of soil. Soil acidolytic ammonium nitrogen, acidolytic amino acid nitrogen and acidolytic amino sugar nitrogen are the key factors affecting soil active nitrogen. In this study, 60% organic fertilizer replacement treatment has the best fertilization effect.

Key words: organic fertilizer instead of chemical fertilizer; soil organic nitrogen fractions; soil active nitrogen