

长期施肥对红壤稻田土壤固定态铵的影响

彭英湘¹, 陈安磊², 黄威², 王卫², 谢小立²

(1. 湖南省环境监测中心站, 湖南, 长沙 410014; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南, 长沙 410125)

摘要 利用红壤稻田施肥定位试验, 研究了水稻关键生育期及经休闲期后土壤固定态铵(FA)的动态变化规律。结果表明, 稻田土壤 FA 含量范围为 128.6 mg/kg~235.1 mg/kg, 占土壤全氮的比值为 5.8%~10.5%。水稻生育期是土壤 FA 的积累阶段, 各施肥处理土壤 FA 提高幅度为 12.7%~49.0%, 其中长期不施钾肥的处理(N、NP)土壤 FA 含量升高幅度显著高于施钾肥或者钾肥配施有机肥的处理($p<0.05$)。土壤 FA 年均含量大小规律为: N>NP>NPK>NPKC>JS。休闲期土壤 FA 含量出现明显降低现象, 平均降低幅度为 18.8%, 其中长期不施钾肥土壤 FA 降低幅度显著高于长期施用钾肥及有机肥的土壤(平均高出 126.3%)。分析认为 N 的分段施用方式(基肥、蘖肥和穗肥)是土壤 FA 在水稻生育期持续提高的关键原因, 钾肥的投入促进水稻对 N 素的吸收, 从而减少土壤 FA 量, 稻田杂草对 FA 的利用可能是休闲期土壤 FA 显著降低的主要原因。

关键词 长期施肥 红壤稻田 休闲期稻田 水稻生育期 固定态铵

中图分类号 S506 文献标识码 A 文章编号 1000-0275(2013)03-0376-05

Effect of Long-term Fertilization on Fixed Ammonium in a Red Paddy Soil

PENG Ying-xiang¹, CHEN An-lei², HUANG Wei², WANG Wei², XIE Xiao-li²

(1. Environmental Monitoring Center of Hunan Province, Changsha, Hunan 410014, China;

2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of

Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China)

Abstract The purpose of this study was to investigate the seasonal variation of soil fixed ammonium (FA) content during rice growth period and fallow season in a long-term fertilization field experiment. The result showed that the content of soil FA ranged from 128.6 mg/kg to 235.1 mg/kg, and FA/TN ranged from 5.8% to 10.5%. The content of soil FA was increasing constantly during the rice growth period, the rate of soil FA growth ranged from 12.7% to 49.0%, and soil FA in N or NP treatment was significantly higher than other treatments ($p<0.05$). The content of FA reduced by 18.8% averagely during fallow period, and reduced ratio of soil FA in treatments with no K fertilizer was significantly higher than that with chemical K fertilizer and organic matter application. The key reason of increasing FA during rice growth was the nitrogen application pattern (base fertilizer, fertilizer for tillering and head sprouting), chemical K fertilizer application affected soil FA thorough reducing the content of soil NH_4^+ , and nitrogen absorption by the weed might be the main reason of FA reducing during the fallow season.

Key words long-term fertilization; red paddy soil; fallow season of paddy field; growth period of rice; fixed ammonium

固定态铵(fixed ammonium, FA)是土壤氮素的组成部分, 是土壤中有效性氮的来源之一。研究认为 2:1 型矿物的种类和含量与铵的浓度是决定土壤中 FA 含量的两个最主要的因子, 凡影响两因子的因素都将影响土壤中的 FA 含量^[1]。对于同一种土壤, 土壤 FA 主要受施肥的影响^[2,3], 有研究表明施用高量有机肥能增加土壤 FA 含量^[2], 但有机肥的施用也提高了微生物对氮的固定, 降低土壤晶格对铵的固定^[4]。有研究认为, K 肥施用限制了 FA 的释放^[2,5]。K 肥施用除对 FA 的封闭作用, 还抑制硝化细菌的活性从而抑制 FA 的释放。另外, 长期施 K 能提高土壤中伊利石的含量^[6], 进而影响土壤对 NH_4^+ 的固定和释放。土壤 FA 与土壤溶液中其他形态氮素保持着动态平衡, 土壤对 NH_4^+ 的吸附和释放在很大程度上取决于土壤溶液中 NH_4^+ 和 K^+ 的浓度, 不同的施肥措施主要通过影响作物的吸收过程来影响土壤 FA 的, 这也是不同研究中施

肥对 FA 影响不尽相同的主要原因。

红壤稻田土壤 FA 占全氮的比例较大, 目前对 FA 的研究多集中在不同土壤类型和层次的变化规律及其影响因素, 对水稻生育期 FA 的动态变化对施肥的响应也多有报道^[1-5]。而对于稻田休闲期前后 FA 的变化差异研究较少, 而南方红壤双季稻田休闲期长(6-7 个月), 休闲期杂草的生物量较高^[6], 而杂草的 NPK 养分来源主要是土壤中养分, 杂草生长对休闲期土壤 FA 的影响尚不清楚。本研究基于南方红壤稻田长期施肥定位试验, 研究水稻关键生育期以及经休闲期后不同施肥模式下土壤 FA 的动态变化情况, 结合休闲期杂草的 N 吸收情况, 弄清南方红壤稻田土壤 FA 的动态变化规律, 为红壤稻田合理施用氮肥提供科学依据。

1 材料与方法

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费项目(编号 201203030)。

作者简介:彭英湘(1976-),女,湖南永州人,工程师,硕士,主要从事土壤化学和环境污染治理与监测方面的研究;通讯作者:陈安磊(1977-),男,助理研究员,硕士,主要从事稻田土壤环境方面的研究。

收稿日期:2013-01-04, 修回日期:2013-04-17

1.1 试验地概况

供试土壤为第四纪红色粘土发育的水稻土(中国土壤系统分类:简育水耕人为土 FAO/Uneso:Hydrgric Anthrosols), 来自中国中科院桃源农业生态试验站, 施肥制度为长期定位试验田(试验开始于 1990 年)。试验前(1990 年)土壤基本肥力性状为:有机碳 15.4 g/kg, 全氮 1.88 g/kg, 速效钾 74.3 mg/kg, 全钾 12.8 g/kg, pH 5.74。

本研究共选用大田试验的 5 个处理:(1) 单施氮肥(N); (2) 施氮、磷肥(NP); (3) 施氮、磷、钾肥(NPK); (4) 在施 NPK 肥的基础上, 早、晚稻稻草全部归田, 冬季种植的紫云英在春耕前翻压入泥作为早稻基肥(NPKC); (5) 2/3 N、P 肥 + 1/3K 肥 + 1/2 秸秆还田(JS)。试验完全随机区组排列, 每处理 3 次重复, 小区面积为 33.2 m²。供试肥料为尿素(N: 45%)、过磷酸钙(P₂O₅: 12%)和氯化钾(K₂O: 60%)。施肥情况: 1990-1996 年为 N 262.5 kg/hm², P 39.3 kg/hm², K 137.0 kg/hm², 1997-2010 年为 N 182.3 kg/hm², P 39.3 kg/hm², K 197.2 kg/hm²。磷、钾肥都作为基肥, 氮肥施用分为 3 个时期:基肥(移栽前 1d)、分蘖肥(移栽后 15d 内)和穗肥(抽穗期施用), 各占全年施氮量的 40%、55%和 5%。

1.2 供试样品

于 2009 年早稻分蘖期(5 月 18 日)、齐穗期(6 月 6 日)、成熟期(7 月 20 日)、晚稻分蘖期(8 月 27 日)、齐穗期(9 月 17 日)、成熟期(10 月 12 日)和下一年春耕前(2010 年 4 月 16 日)取各小区表层(0 cm-20 cm)混合土样, 其中春耕前土样作为稻田休闲期后的土壤样品。水稻生育期所采土样经风干后过 100 目用于测定土壤 FA, 春耕前所采土样风干后过 20 目、60 目和 100 目筛分别用于土壤速效钾、有机碳(SOC)、土壤全氮(TN)和土壤 FA 的测定。

于春耕前(2010 年 4 月)取各处理小区杂草样品, 取样面积为 1 m², 每个小区 3 次重复。测杂草鲜重及含水量, 杂草样品经杀青烘干后粉碎, 用于测定杂草 N 含量。

1.3 测试、分析方法

FA 的测定采用 Silva-Bremner 法^[7]。称取过 100 目土样 1.000 g, 置于 100 ml 离心管中, 加入 20 ml 次溴酸钾(KOBr)溶液, 盖上盖子, 摇匀后静置 2 h, 水浴加热煮沸 5 min, 冷却静置过夜, 离心, 倾弃上清液。加入 1.0 mol/L 的 KCl 溶液 40 ml, 振荡数秒后离心(3500 r/min)10 min, 倾弃上清液, 用同样的方法再洗一次, 然后在洗净的土样中加入 20 ml HF(5 mol/L)-HCl(1 mol/L), 振荡 24 h, 用定氮仪进行蒸馏定氮, 标准酸滴定。测定出的 NH₄⁺-N 含量, 即为该土样的 FA 含量。

按常规分析方法测定土壤和植株养分^[8]。土壤有机碳、全 N 和速效钾分别采用 K₂Cr₂O₇ 氧化法、开氏法和乙酸铵浸提法测定, 杂草样品 N 含量采用 H₂SO₄-H₂O₂ 氧化法测定。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 和 SAS6.2 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对稻田土壤固定态铵(FA)的影响

长期不同施肥模式对土壤 FA 的影响具有显著差异。表 1 的结果表明, 施用氮肥或氮磷肥(N 和 NP 处理)20 年后, 土

壤 FA 处于最高水平, 施钾肥后(NPK 处理)土壤 FA 含量显著降低(降低幅度为 20.2% p<0.05), 而秸秆等有机肥的施用也显著降低了土壤 FA 的含量(表 1)。春耕前各施肥处理 FA 的大小规律为 NP>N>NPK>NPKC>JS。

表 1 施肥 20 年后土壤 FA 含量及其占 TN 的比例

处理	FA(mg/kg)	FA 占全氮比例(%)
N	163.8 ± 3.2 b	9.1 ± 1.2a
NP	186.9 ± 2.4 a	10.5 ± 2.9a
NPK	149.1 ± 1.8 c	8.3 ± 0.9ab
NPKC	142.8 ± 1.8 d	6.0 ± 0.4bc
JS	132.3 ± 3.2 e	5.8 ± 0.6c

注:表中的同列不同字母表示差异达 5%显著水平, 下同。样品为春耕前。

土壤 FA 所占全氮的比例也有相似的规律(表 1)。不施钾肥(N、NP 处理)土壤 FA/TN 比值与施钾土壤相比平均高出 31.9%, 其中长期施用氮磷肥(NP 处理)土壤 FA/TN 处于最高水平, NPK 处理土壤 FA/TN 比值显著降低(降低幅度为 21.1% p<0.05), 而秸秆等有机肥的施用也显著降低了土壤 FA/TN 的比值, 且处于最低水平。FA/TN 的大小规律为 NP>N>NPK>NPKC>JS。

2.2 稻田土壤 FA 的变化动态

水稻生育期的监测结果表明, 土壤 FA 是一个动态变化的过程, 其含量与施肥和水稻生长期密切相关(图 1)。总体来看, 除 NPK、NPKC 处理在早稻收获期出现土壤 FA 下降现象外, 土壤 FA 在水稻生育期处于积累阶段, 晚稻收获期各施肥处理土壤 FA 含量与早稻分蘖期相比提高幅度为 12.7%~49.0%, 整体呈现升高趋势。

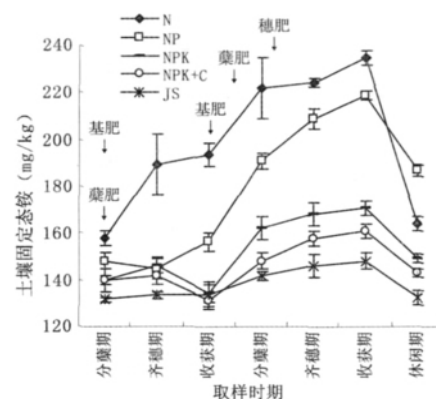


图 1 施肥 20 年后不同处理土壤 FA 含量的变化趋势

水稻生长期间, 单施氮肥或氮磷肥土壤 FA 含量显著高于其他处理, 其中 N 处理土壤 FA 一直处于最高水平(p<0.05), 平均高出 NP 处理 14.4%。JS 处理土壤 FA 含量一直处于最低水平, 与早稻分蘖期含量相比, 土壤 FA 在水稻生育期变化幅度为 -0.6%~12.0%, 增幅平缓。NPK 和 NPKC 处理土壤 FA 含量在早稻收获期出现降低现象, 而在晚稻分蘖期呈现快速增长, 之后增长平缓。各施肥处理土壤 FA 含量高低呈以下规律: N>NP>NPK>NPKC>JS, 即随着氮磷钾肥配合程度的提高, 土壤 FA 呈下降趋势, 而有机肥的施用进一步促进土壤 FA 的降低, 在晚稻生育期降低幅度达到显著水平(p<0.05)。

经过休闲期后土壤 FA 含量都有较大幅度的降低(表 2), 从 FA 的下降幅度来看, N 处理的 FA 下降幅度最大, 显著高

于其他施肥处理($p < 0.05$),其次为 NP 和 NPK 处理,在水稻生育期土壤 FA 经过休闲期后降低幅度分别为 14.6% 和 12.6%。有机肥处理(NPKC 和 JS 处理)FA 由经过休闲期后平均降低 11.0%。

表 2 施肥 20 年后不同施肥处理土壤理化性质及其休闲期土壤 FA 变化

处理	速效钾 (mg/kg)	全氮 (g/kg)	有机碳 (g/kg)	休闲期 FA 土壤 FA 年均 减少量(%)	含量(mg/kg)
N	42.9 ± 10.2d	1.81 ± 0.26b	18.9 ± 2.8b	30.3 ± 2.0a	198.0 ± 1.5a
NP	55.0 ± 13.7cd	1.86 ± 0.45b	19.4 ± 3.4b	14.6 ± 1.6b	179.3 ± 1.3b
NPK	79.4 ± 13.7bc	1.81 ± 0.20b	19.9 ± 3.5b	12.6 ± 2.6b	152.9 ± 1.6c
NPKC	197.7 ± 17.4a	2.39 ± 0.19a	26.7 ± 1.5a	11.3 ± 1.0b	146.0 ± 0.7d
JS	91.7 ± 19.1b	2.31 ± 0.30a	23.1 ± 1.1ab	10.7 ± 4.1b	138.1 ± 0.9e

2.3 稻田土壤 FA 影响因素分析

固定态铵是重要的土壤氮库,在土壤供氮及作物氮营养上有重要作用,其固定及释放与土壤理化性质及矿物学特征密切相关^[9],如土壤质地、粘粒含量、粘粒矿物类型、土壤水分状况、有机质、 K^+ 和 NH_4^+ 浓度等。本研究中土壤质地、粘粒含量等背景一致,不同施肥土壤有机质、 K^+ 和 NH_4^+ 等变化可能是导致土壤 FA 含量差异形成的关键原因。

目前关于 SOC 与 FA 相关性还没有一致结论^[10,11],一般认为有机质被土壤粘粒吸附,阻塞了晶层内外离子通道,使 NH_4^+ 难以进入层间。但值得注意的是,如果无法区分施肥是通过影响 NH_4^+ 含量变化还是通过 SOC 变化来对 FA 产生影响,就可能由土壤 NH_4^+ 的浓度高低决定 SOC 与 FA 相关性的现象^[12]。本研究中出现有机碳含量提高,土壤 FA 降低的现象(表 2),SOC 对 FA 的吸附起到一定阻碍作用,但两者间无显著相关性($r = -0.721$, $n = 5$),可见土壤 FA 还受到其他因素的影响。

土壤环境中 NH_4^+ 和 K^+ 浓度对 FA 的影响以及两者间的竞争作用主要受作物生长及施肥的影响,最终表现为作物吸收养分的输出量上,研究施肥与稻田 N 素输入、输出的关系是分析 FA 影响因素的重要手段。本研究稻田 N 的输入包括化肥、绿肥和稻草氮的输入,N 的输出包括稻草和稻谷氮的输出(表 3)。从 N 的输出量可以看出,随着 PK 的投入,稻草、稻谷携带出的氮量逐渐提高,即水稻从土壤中吸收的 N 素量提高,从总量上减少土壤环境中 NH_4^+ 浓度,从而降低了土壤 FA 含量。NPK 处理与 NP 处理相比, K 肥投入后稻草、稻谷携带出的氮量提高幅度仅为 4.8%,但土壤 FA 含量降低幅度达到显著水平(图 1,表 2),由此可以推论出土壤环境中 NH_4^+ 浓度减少对降低 FA 起到一定作用,而 K^+ 浓度对抑制 NH_4^+ 的固定应该起到关键作用。JS 处理输出/输入值最高,土壤环境中较低 NH_4^+ 浓度可能是土壤 FA 一直处于最低水平的重要原因。NPK+C 处理 N 素输出/输入值最低,而 FA 含量仅高于 JS 处理(图 1),可见该处理抑制土壤 FA 含量的机制不同,需要进一步分析。

休闲期杂草对土壤 N 素的吸收利用可能是休闲期稻田土壤 FA 降低的原因之一。休闲期稻田杂草的生物量较大(表 4),各施肥处理杂草地上部生物量在 1008 kg/hm²-4795kg/hm² 之间。杂草 N 的积累量在 14.8 kg/hm²-71.7 kg/hm² 之间,稻田杂草主要为禾本科的看麦娘,土壤供氮为其氮养分的重要来

源,结合休闲期土壤 FA 的降低现象可以看出(表 2),土壤 FA 是休闲期杂草吸收氮的重要来源之一。

表 3 稻田系统年际 N 素输入输出量

处理	N 输入量(kg/hm ²)			N 输出量(kg/hm ²)		输出/输入
	化肥	绿肥	稻草	稻草	稻谷	
N	209.2	0	0	38.8	81.8	0.58
NP	209.2	0	0	54.4	101.3	0.74
NPK	209.2	0	0	54.4	108.7	0.78
NPKC	209.2	119.0	101.2	78.8	145.1	0.52
JS	139.5	0	32.4	64.7	119.0	1.07

注:表中数据为 1990-2010 年平均值。

表 4 冬闲期杂草地上部生物量及氮积累量(单位 kg/hm²)

处理	地上部生物量	N 积累量
N	1008 ± 125bc	16.1 ± 4.7b
NP	2386 ± 344b	29.4 ± 1.4b
NPK	1359 ± 370bc	14.8 ± 1.0b
NPKC	4795 ± 1167a	71.7 ± 0.9a
JS	2194 ± 1477b	35.9 ± 3.0b

3 讨论

3.1 长期施用钾肥对土壤 FA 含量的影响

从本试验水稻生长期土壤 FA 的含量动态来看,钾肥施用后土壤固定铵的能力呈显著降低趋势(图 1),其他定位试验也发现长期施用钾肥能降低土壤 FA 含量^[5]。钾肥施用能降低土壤 FA,一方面是 K^+ 与 NH_4^+ 具有较小的水化能及相近的离子半径,对于 2:1 型粘土矿物的层间专性吸附点存在竞争现象,层间专性吸附点被 K^+ 占据的越多,矿物对 NH_4^+ 的固定越少。另一方面,还存在钾肥施用后降低土壤 NH_4^+ 含量的现象,这可能是导致 FA 降低的另一个重要原因。以往的定位试验研究表明,氮肥与磷钾肥配合施用能提高氮肥的农学利用率,偏施氮肥处理氮的农学利用率极低(仅为 2.8%),而与磷、磷钾肥配合施用后其农学利用率分别提高到 8.8% 和 13.1%,JS 处理(减少 1/3 N 施入量)农学利用率最高^[13],而其 FA 含量呈现相反的规律,JS 处理 FA 含量处于最低水平。可推论偏施氮肥降低氮肥利用效率,土壤中 NH_4^+ 含量高,但缺少 K^+ 对吸附点的竞争,提高了 NH_4^+ 被土壤粘土矿物层固定的风险,从而导致在水稻生育期施用 N 肥的土壤 FA 含量较高。而钾肥施用后,一方面由于 K^+ 与 NH_4^+ 相互竞争吸附位的物理化学作用减少 NH_4^+ 被土壤粘土矿物层固定的机会,另一方面 K 肥显著的促进水稻生长,如 NPK 与 NP 相比,早、晚稻水稻生物量的积累量分别高出 19.0% 和 13.9%,促进水稻对氮的吸收^[14],从而降低了土壤 FA 含量。另外,有机肥投入能显著提高土壤微生物固定氮量^[4],减少土壤环境中 NH_4^+ 含量水平,是有机肥施用后进一步降低土壤对铵的固定能力的原因。可见,无论作物还是微生物都是通过对 NH_4^+ 吸收或者固持作用来降低土壤中 NH_4^+ 含量从而降低 FA 含量的。但 K^+ 和 NH_4^+ 对吸附点的竞争作用还存在争议^[15,16],这应与水稻生长过程中对两者的吸收动态密切相关。

3.2 土壤 FA 动态变化分析

一般而言,水稻移栽前通过施基肥来补充氮素,FA 含量较高,其后随着水稻生长和生物量增加,对氮素的吸收导致 FA 释出,至灌浆期达到最低,至黄熟收获期又略有升高。本

研究与一般情况相异,土壤 FA 在水稻生育期间呈升高趋势。

这可能与本定位试验的 N 肥施肥模式相关。本定位试验 N 肥分段施用,早稻分为基肥(早稻移栽前)和蘖肥(移栽后 15d 施用),晚稻除基肥、蘖肥外,还在孕穗初期施用穗肥。研究表明,土壤对铵的固定发生在施肥后很短的时间内,加入的 NH_4^+ 在几分钟内固定量达 50% 以上^[17,48],而粘土最高铵固定量在一天内达到最高水平^[19],而之后的固定铵量可以忽略不计。因此,水稻生育期内 N 肥的分次施用对土壤 FA 起到补充作用,可能是本试验土壤 FA 在水稻生育期持续升高的原因之一。另一方面,水稻生育期稻田淹水可能是土壤 FA 提高的另一个重要原因。旱地土壤含水量的提高会导致土壤 FA 明显降低^[20],而稻田土壤淹水后出现土壤 FA 升高的现象^[21],分析认为土壤 FA 升高与淹水后 Eh 降低密切相关^[22],在低 Eh 条件下 Fe^{3+} 降低会导致晶格中负电荷较高,从而加大层状硅酸盐矿物对 NH_4^+ 的吸附固定作用^[23]。但土壤环境中 NH_4^+ 含量是土壤 FA 含量增加的基础,因此本定位试验的 N 的施用方式(基肥、蘖肥和穗肥)可能是土壤 FA 持续提高的重要原因。

不可忽略的是温度可能也对土壤 FA 有影响。晚稻生育期内温度明显高于早稻,高温情况促进土壤有机 N 的分解,从而改变了非固定态 NH_4^+ 与固定态 NH_4^+ 的动态平衡,可能提高了土壤中 FA 的含量。由此推测,经过休闲期后土壤 FA 含量都有较大幅度的降低(图 1),可能与温度降低也有很大的关系。另外,南方稻田休闲期跨越秋、冬、春 3 季节,期间水分变化幅度大,稻田干湿交替频繁,一方面水分的干湿交替是影响稻田 N_2O 排放的关键因素,促进了包括土壤 FA 在内的土壤氮素的转化利用。另一方面,休闲期相对于水稻生育期土壤含水量显著降低,稻田土壤处于好氧状态下,土壤 Eh 升高,减小了层状硅酸盐矿物对 NH_4^+ 的固定能力,都能降低土壤 FA 的含量。

值得注意的是休闲期稻田杂草对土壤氮素(土壤包括土壤 FA)的吸收利用(表 4)。杂草氮吸收量和 FA 减少量之间没有显著的相关关系($p>0.05$),可见除土壤 FA 外,杂草吸收的氮还有其他来源。另外,有机肥处理(NPKC 和 JS 处理)休闲期杂草 N 积累量明显高于长期施用化肥的处理,但其 FA 减少量远低于施用化肥的土壤,这也说明影响杂草生长及杂草 N 积累量的因素 - 土壤供氮机制产生了差异,而且休闲期杂草生物量差异显著($P<0.05$,表 4),可以推论出影响杂草生长的养分限制因素已经产生。不同施肥土壤影响休闲期杂草 N 积累的主要养分限制因子还不清楚,而杂草在春耕时直接翻耕入田,而这部分杂草积累的 C、N 量较高,应对红壤稻田 N 素转化、运移起到较大的影响。因此,本定位试验需进一步关注相关休闲期杂草生长与土壤养分的相互作用关系,弄清杂草生长对休闲期稻田养分积累、转化的影响。

3.3 稻田 N 素平衡对土壤 FA 的影响

土壤氮主要以有机氮的形态存在,本定位实验的以往研究表明,随着全氮含量的提高,土壤矿化量增高^[24],本研究中土壤 FA 含量和其占全氮的比例随着全氮含量升高反而呈现下降趋势(表 1,表 2),与土壤 TN 有负相关关系($r=-0.739$, $n=5$),但并未达到显著水平($p<0.05$)。可见土壤矿化出的高

量无机氮对土壤 FA 的固定并没有起到促进作用,而钾肥和有机肥投入后土壤速效钾含量的提高(表 2)对土壤 FA 的降低也没有显著的作用($r=-0.648$, $n=5$)。分析其原因,主要是作物生长过程中土壤 K^+ 、 NH_4^+ 、矿化氮等因素处于动态变化中,不同施肥措施下动态变化差异较大,单一的分析 K^+ 、 NH_4^+ 或者矿化量的高低无法解释施肥措施对 FA 的影响,应从作物养分吸收和养分供应间的平衡开展施肥对土壤 FA 固定与释放的相关分析。

值得注意的是,虽然有机氮肥(绿肥和稻草)的大量投入降低了稻田 N 的输出率(表 3),但是残留在土壤中的氮主要是有机态氮。土壤中活性有机氮(MBN 和 DON)成分显著提高^[25],可能是土壤 FA 含量及其所占全氮比值进一步降低的重要原因之一。JS 处理土壤 FA 含量一直处于最低水平,在整个水稻生育期变化平缓(图 1),其原因主要是该处理受稻草、稻谷携带出土壤的 N 量较高影响(表 3),投入 N 的农学利用效率高,是通过大幅降低土壤 NH_4^+ 浓度来降低土壤 FA 的。可见施肥是影响土壤 FA 的重要措施,而不同施肥对土壤 FA 的影响机制不同,要综合分析土壤 N 素平衡、 K^+ 、 NH_4^+ 浓度动态变化、休闲期杂草等因素,才能确定不同施肥方式下 FA 的动态变化的驱动机制。

4 结论

南方红壤稻田水稻关键生育期及经休闲期后土壤固定态铵的动态变化表明,水稻生长期间是土壤固定态铵积累阶段,整体呈现持续升高趋势,随着氮肥和磷、钾肥的配合施用,土壤固定态铵含量逐渐降低,但其含量都显著大于化肥和有机肥配合施用的土壤,而氮肥的分段施用(基肥、蘖肥和穗肥)可能是土壤固定态铵在水稻生育期持续提高的关键原因。

休闲期是土壤固定态铵的消耗阶段,在水稻生育期间,土壤固定态铵提升幅度高的土壤,其在休闲期降低幅度也高。休闲期稻田杂草对土壤固定态铵的利用可能是休闲期土壤固定态铵显著降低的主要原因。长期不施钾肥的土壤,固定态铵可利用量明显高于长期施用钾肥及有机肥的土壤。

参考文献:

- [1] 文启孝,程励,陈碧云.我国土壤中的固定态铵[J].土壤学报,2000,37(2):145-156.
- [2] 韩晓日,郭鹏程,陈恩凤,等.长期施肥对土壤固定态铵含量及其有效性影响[J].植物营养与肥料学报,1998,4(1):29-36.
- [3] 刘晓宏,郝明德.长期轮作施肥对土壤固定态铵释放动力学的影响研究[J].植物营养与肥料学报,2000,6(4):471-475.
- [4] 仇少君,彭佩钦,李玲,等.盆栽条件下红黄泥微生物生物量氮和固定态铵的动态变化[J].中国农业科学,2007,40(3):524-531.
- [5] 刘艳丽,胡锋,张斌.长期施钾肥水稻土对铵离子吸附特征及其影响因素的研究[J].土壤,2008,40(4):575-579.
- [6] 林新坚,王飞,王长方,等.长期施肥对南方黄泥田冬春季杂草群落及其 C、N、P 化学计量的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(5):573-577.
- [7] Silva J A, Bremner J M. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils [J].Soil Science Society of America Journal,1966,30(5):587-594.
- [8] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学

- 技术出版社,1978.
- [9] Rolf Nieder, Dinesh K B, Heinrich W S. Fixation and defixation of ammonium in soils: a review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(1): 1-14.
- [10] 王鸿斌,高 强,赵兰坡.吉林省主要土壤类型固定态铵含量及其影响因素研究[J].*玉米科学*,2010,18(5):96-98,104.
- [11] Zhang Y Z, Liao J P, Sun Y H, et al. Fixed ammonium in major types of paddy soils in Hunan Province, China[J]. *Pedosphere*, 2003,13(3): 199-208.
- [12] Liu Y L, Zhang B, Li C L, et al. Long-term fertilization influences on clay mineral composition and ammonium adsorption in rice paddy soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(6): 1580-1590.
- [13] 陈安磊,谢小立,文菡玉,等.长期施肥对红壤稻田表层土壤氮储量的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(18): 5059-5065.
- [14] 周卫军,王凯荣,张光远.有机无机结合施肥对红壤稻田土壤氮素供应和水稻生产的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 914-921.
- [15] 封 克,汤 炎,汪小丽,等.钾对铵离子在蛭石矿物表面吸附与层间固定的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(1): 77-80.
- [16] 王火焰,周健民,陈小琴,等.氮磷钾肥料在土壤中转化过程的交互作用 :硫酸铵在水稻土中的转化[J].*土壤学报*,2005,42(1): 70-77.
- [17] Kowalenko CG. Nitrogen transformations and transport over 17 months in field fallow microplots using 15N[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1978 (58): 69-76.
- [18] Kowalenko CG, Cameron DR. Nitrogen transformations in an incubated soil as affected by combinations of moisture and temperature and adsorption-fixation of ammonium [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1976, 56(2): 63-70.
- [19] Chantigny MH, Angers DA, Morvan T, et al. Dynamics of pig slurry nitrogen in soil and plant as determined with 15N [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(2): 637-643.
- [20] Gouveia GA, Eudoxie GD. Distribution of fertiliser N among fixed ammonium fractions as affected by moisture and fertiliser source and rate[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44(1): 9-18.
- [21] Schneiders M, Scherer HW. The influence of "puddling" on redox potential, fixation and release of nonexchangeable ammonium and its effect on rice growth in flooded soils. In: Van Ittersum MK, Venner GEGT, van den Geijn SC, Jetten TH (eds) *Proceedings of the 4th ESA Congress, Veldhoven-Wageningen, The Netherlands 7-11 July, 1996*, European Society of Agronomy, p374-375.
- [22] Zhang YS, Scherer H. Ammonium fixation by clay minerals in different layers of two paddy soils after flooding[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(2):152-156.
- [23] Stucki J W, Golden D C, Roth C B. Effects of reduction and reoxidation of structural iron and clay swelling[J]. *Clays Clay Miner*, 1984, 32(5): 350-356.
- [24] 陈安磊,王凯荣,谢小立,等.长期有机养分循环利用对红壤稻田土壤供氮能力的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13 (5): 838-843.
- [25] 黄 威,陈安磊,王 卫,等.长期施肥对稻田土壤活性有机碳和氮的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(9): 1854-1861.

·错误更正·

由于本刊编辑工作不细心，送印刷厂排版的 2013 年第 34 卷第 2 期 130 页表 1 中的 1949—1981 年数据复制变为 1985—2011 年的数据。现特此更正(左边为错误表 1,右边为正确表 1),并向作者和广大读者致歉!

本刊编辑部

表 1 1949-2011 年南方水稻面积、单产和总产量变化情况

年份	面积 (万 hm ²)	单产 (kg/hm ²)	总产量 (万 t)	年份	面积 (万 hm ²)	单产 (kg/hm ²)	总产量 (万 t)
1949	2477.4	1898.9	4704.3	1949	2477.4	1898.9	4704.3
1953	2724.7	2516.8	6857.5	1953	2724.7	2516.8	6857.5
1957	3022.5	2714.9	8205.8	1957	3022.5	2714.9	8205.8
1961	2500.6	2049.2	5124.2	1961	2500.6	2049.2	5124.2
1965	2809.9	2955.8	8305.5	1965	2809.9	2955.8	8305.5
1969	2870.3	3132.8	8992.0	1969	2870.3	3132.8	8992.0
1973	3329.3	3442.5	11461.0	1973	3329.3	3442.5	11461.0
1977	3354.8	3585.0	12027.0	1977	3354.8	3585.0	12027.0
1981	3134.3	4299.7	13476.5	1981	3134.3	4299.7	13476.5

数据来源 根据历年《中国农业统计年鉴》数据整理。

表 1 1949-2011 年南方水稻面积、单产和总产量变化情况

年份	面积 (万 hm ²)	单产 (kg/hm ²)	总产量 (万 t)	年份	面积 (万 hm ²)	单产 (kg/hm ²)	总产量 (万 t)
1949	2477.4	1898.9	4704.3	1985	2981.0	5253.9	15661.6
1953	2724.7	2516.8	6857.5	1989	3002.8	5640.5	16937.4
1957	3022.5	2714.9	8205.8	1993	2758.1	5798.8	15993.5
1961	2500.6	2049.2	5124.2	1997	2808.6	6244.6	17538.7
1965	2809.9	2955.8	8305.5	2001	2495.5	6166.2	15387.5
1969	2870.3	3132.8	8992.0	2005	2485.9	6137.4	15256.7
1973	3329.3	3442.5	11461.0	2009	2461.7	6511.1	16028.3
1977	3354.8	3585.0	12027.0	2010	2453.1	6430.2	15773.8
1981	3134.3	4299.7	13476.5	2011	2453.4	6507.5	15965.6

数据来源 根据历年《中国农业统计年鉴》数据整理。