

doi: 10.11838/sfsc.20170305

西南黄壤性水稻土长期不同施肥模式下 作物产量及氮肥利用率演变特征

刘彦伶^{1,2}, 李 渝^{1,2}, 张雅蓉^{1,2}, 张文安^{1,2}, 蒋太明^{2,3*}

(1. 贵州省土壤肥料研究所, 贵州 贵阳 550006; 2. 农业部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站, 贵州 贵阳 550006; 3. 贵州省农业科学院, 贵州 贵阳 550006)

摘 要: 为了解西南黄壤性水稻土长期施肥效应, 通过连续 19 年长期定位试验, 分析了西南黄壤性水稻土单施化肥 (NPK)、单施有机肥 (M)、1/2 有机肥和 1/2 化肥配施 (0.5MNPk)、全量有机肥和全量化肥配施 (MNPk) 4 种施肥模式对作物产量、氮肥利用率的影响及变化特征。结果表明: 长期施用化肥或有机肥可显著增加作物产量, NPK、M、0.5MNPk、MNPk 比 CK 分别显著增产 56.2%、57.8%、65.0%、74.0%; 各施肥处理氮肥偏生产力 (PFP_N)、氮肥内部利用率 (IE_N)、氮肥回收利用率 (RE_N)、氮肥累积利用率 (ARE_N) 分别为 10.9 ~ 20.7 kg · kg⁻¹、44.7 ~ 53.8 kg · kg⁻¹、13.6% ~ 19.6%、12.0% ~ 16.9%, 均以 0.5MNPk 最高, MNPk 最低, 高量氮肥施用导致氮肥利用率较低; 长期单施化肥处理氮肥利用率随时间保持持平或呈下降趋势, 施用有机肥的各处理氮肥利用率随时间呈显著上升趋势, 尤其是氮肥累积利用率呈极显著上升趋势。长期施用有机肥尤其是有机无机配施作物产量稳定且氮肥利用率稳步提高。因此, 常年高量施氮的黄壤性水稻土可适量减少氮肥用量, 相应的进行有机无机肥料的合理配施是提高作物产量和肥料利用率的有效措施。

关键词: 黄壤性水稻土; 长期施肥; 产量; 氮肥利用率; 演变特征

中图分类号: S147.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257(2017)03-0020-08

氮肥施用是作物高产的必要措施, 据联合国粮农组织 (FAO) 统计, 1961 ~ 2009 年全球氮肥用量 (以 N 计) 从 116 万 t 增加到 1 050 万 t, 增加了 9.1 倍, 而中国在同期内氮肥用量增加 67.9 倍, 氮肥用量从占世界氮肥总用量的 5% 上升到 35%^[1], 我国已成为世界最大的氮肥消费国。然而, 过量的氮肥投入不仅不能使作物持续高产, 反而会造成氮素大量损失, 引起地下水硝酸盐污染、湖泊富营养化和温室气体排放增加等诸多问题^[2-4]。因此, 2015 年国家发布的《“十三五”农业可持续发展规划》中, 提出化肥减施增效、农业资源可持续利用的发展战略, 努力实现化肥“零增长”下肥料高效

利用的宏伟目标。

氮肥利用率是评价农田氮肥施用经济效益和环境效应的重要指标。张福锁等^[5]通过分析国内粮食主产区 1 333 个田间试验的结果表明, 目前我国主要粮食作物的氮肥利用率在不同地区间的变异很大, 变幅在 10.8% ~ 40.5% 之间, 平均为 27.5%。肥料利用率不仅受到气候因素、土壤条件和作物品种等影响, 而且还存在当季利用和后季利用问题, 短期内评价肥料的利用率与长期试验的结果存在很大差异^[6-7]。长期定位施肥试验跨越了较长的时间尺度, 经历了不同气候年份、不同作物品种^[6], 是准确评估肥料利用率、施肥对土壤肥力和环境质量影响的重要研究平台^[8]。农业部贵州耕地保育与农业环境科学观测试验站是我国西南地区重要的长期定位试验点, 主要开展黄壤肥力与肥效的长期监测, 具有较强的地域代表性。因此, 本文以该试验点长期定位试验为基础, 研究长期不同施肥模式对作物产量和氮肥利用效率的影响, 分析变化特征, 旨在为西南黄壤性水稻土肥料合理施用提供理论依据。

收稿日期: 2016-03-21; **最后修订日期:** 2016-07-29

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201203030); 贵州省农业科学院自主创新专项; 黔农科院自主创新专项 (2014007 号); 贵州省科技计划项目: 黔科平台 [2013] 4002 号; 贵州省科技厅省院联合基金项目: 黔科合 LH 字 [2015] 7079 号。

作者简介: 刘彦伶 (1989-), 女, 贵州安顺人, 硕士研究生, 研究实习员, 主要从事土壤养分及植物营养方面的研究。E-mail: lyl890615@163.com。

通讯作者: 蒋太明, E-mail: jtm532@163.com。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

黄壤性水稻土肥力长期定位试验始于 1995 年, 位于贵州省贵阳市小河经济技术开发区贵州省农科院内 (106°07'E, 26°11'N), 地处黔中黄壤丘陵区, 平均海拔 1 071 m, 年平均气温 15.3 °C, 年降水量 1 100 ~ 1 200 mm, 年平均日照时数 1 354 h, 相对湿度 75.5%, 全年无霜期 270 d 左右。定位试验区的成土母质为三叠系灰岩与砂页岩风化物。试验设 14 个处理, 本研究选取其中 5 个处理: (1) 不施肥 (CK); (2) 全量氮磷钾肥 (NPK); (3) 全量有机肥 (M); (4) 减 1/2 有机肥 + 减 1/2 氮磷钾肥 (0.5MNPk); (5) 全量有机肥 + 全量氮磷钾肥 (MNPk)。试验采用大区对比试验, 各试验处理面积 201 m² (35.7 m × 5.6 m), 不设重复。

化肥选用尿素 (N 46%)、普钙 (P₂O₅ 16%) 和氯化钾 (K₂O 60%)。常规用量为每年施 N 330.0 kg · hm⁻²、P₂O₅ 72.1 kg · hm⁻²、K₂O 137.0 kg · hm⁻²、有机肥 122.2 t · hm⁻², 有机肥为新鲜牛粪 (试验至今有机肥平均含 C 10.4%, N 2.7 g · kg⁻¹, P₂O₅ 1.3 g · kg⁻¹, K₂O 6 g · kg⁻¹), 除 MNPk 处理氮肥施用量不同外, 其余施氮小区的氮素施用量相同。种植制度为一年一季水稻, 播种前按处理分别施用氮磷钾肥或配施有机肥作基肥, 施化肥处理在水稻生长期中追肥 2 次尿素。种植的水稻品种为: 金麻粘 (1993 ~ 1998 年)、农虎禾 (1999 ~ 2001 年)、香两优 875 (2007 ~ 2008 年)、汕优联合 2 号 (2009 年) 和茂优 601 (2010 ~ 2013 年), 2002 ~ 2006 年由于试验基地灌溉设施损毁, 无法满足水稻种植, 改种玉米。1995 ~ 2013 年各处理年均肥料投入量见表 1。

表 1 试验处理与施肥量 (kg · hm⁻²)

处理	肥料施用总量		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	0	0	0
NPK	330.0	72.1	137.0
M	330.0	158.9	733.2
1/2M + 1/2NPK	330.0	115.5	435.1
MNPk	660.0	231.0	870.2

1.2 样品采集与分析

试验站对处理区每季作物的秸秆和籽粒产量进

行测定, 作物秸秆与籽粒养分含量通过文献参考和近几年实际分析测试结果相结合进行估算^[9]。籽粒与秸秆样品, 用 H₂SO₄ - H₂O₂ 消化, 凯氏定氮法测定其全氮含量。

1.3 计算公式和统计分析

肥料利用率是反映肥料投入与作物生长关系的重要指标, 国内外通用的肥料利用率的定量指标有回收利用率 (Recovery efficiency, RE)、内部利用率 (Inner efficiency, IE)、农学利用率 (Agronomic efficiency, AE)、偏生产力 (Partial factor productivity of applied, PFP) 和累积利用率 (Accumulated recovery efficiency, ARE) 等, 这些指标从不同侧面评价作物对肥料的利用情况^[10-12], 考虑到长期定位试验空白处理产量一般随时间呈下降趋势, 用差减法计算出的肥料利用率会表现出逐年增加的趋势^[13], 因此, 本文仅选取氮肥偏生产力、氮肥内部利用率、氮肥回收利用率、氮肥累积利用率作为研究对象。作物吸氮量及氮肥利用率^[10-12]按照以下公式计算:

作物地上部分吸氮量 (kg · hm⁻²) = 籽粒产量 × 籽粒含氮量 + 秸秆产量 × 秸秆含氮量;

氮肥偏生产力 (PFP_N) (kg · kg⁻¹) = 作物籽粒产量 / 施氮量;

氮肥内部利用率 (IE_N) (kg · kg⁻¹) = 作物籽粒产量 / 作物地上部分总吸氮量;

氮肥回收利用率 (RE_N) (%) = (作物地上部分总吸氮量 - 空白区地上部分总吸氮量) / 施氮量 × 100。

氮肥累积利用率 (ARE_N) (%) = (∑作物地上部分总吸氮量 - ∑空白区地上部分总吸氮量) / ∑施氮量 × 100。

数据统计与分析采用 Excel 2007、Sigmaplot 10.0 和 Spass 20 软件进行, 处理间差异显著性检验采用 Duncan's 新复极差检验法。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥处理对作物产量的影响

总的来看, 长期不施肥处理 (CK) 产量显著低于各施肥处理 (表 2), NPK、M、0.5MNPk、MNPk 处理的 19 年平均产量分别比 CK 显著增产 56.2%、57.8%、65.0%、74.0%。受气候条件、作物品种、管理因素等影响, 各处理产量年际间变化较大, CK 处理产量在 1 025 ~ 6 090 kg · hm⁻² 之间浮动

(图 1A), 平均为 $4\ 137\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, NPK 处理产量在 $1\ 550 \sim 10\ 118\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间浮动, 平均值为 $6\ 461\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 全量有机肥配施化肥处理 (MNPK) 产量大多集中在 $6\ 000 \sim 8\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右, 均值为 $7\ 198\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。1995 ~ 2013 年, 各施肥处理间作物产量平均值无显著差异, 但随着试验年限的增加, 不同施肥处理间产量差异逐渐显现。1995 ~ 2001 年间各施肥处理之间产量虽无显著差异, 但单施化肥

处理 (NPK) 最高, 单施有机肥处理 (M) 最低; 2002 ~ 2006 年由于灌溉设施损毁, 改种玉米, 各施肥处理以全量有机肥配施化肥处理 (MNPK) 产量最高, M 处理最低; 2007 ~ 2013 年水稻产量比试验初始几年有所提高, 0.5MNPK 和 MNPK 处理产量无显著差异, 但均分别比 NPK 处理显著增产 14.1% 和 25.4%, M 处理随着施肥年限的增加, 产量逐渐高于 NPK 处理, 但是差异不显著 (表 2)。

表 2 不同施肥处理的作物产量 (kg · hm⁻²)

时间 (年)		CK	NPK	M	0.5MNPK	MNPK
1995 ~ 2001	水稻	3 149 b	4 886 a	4 446 ab	4 789 a	4 682 ab
	CV (%)	32.65	34.64	27.09	31.37	27.59
2002 ~ 2006	玉米	4 544 b	7 839 a	7 718 a	8 156 a	8 410 a
	CV (%)	19.22	18.79	17.88	15.84	12.70
2007 ~ 2013	水稻	4 725 c	6 887 b	7 711 ab	7 856 a	8 639 a
	CV (%)	22.37	10.14	11.66	10.34	7.60
1995 ~ 2013	作物	4 137 b	6 461 a	6 527 a	6 827 a	7 198 a
	CV (%)	28.66	27.08	29.67	28.57	28.78

注: 同行不同小写字母表示 $P < 0.05$ 差异显著水平, 下同。

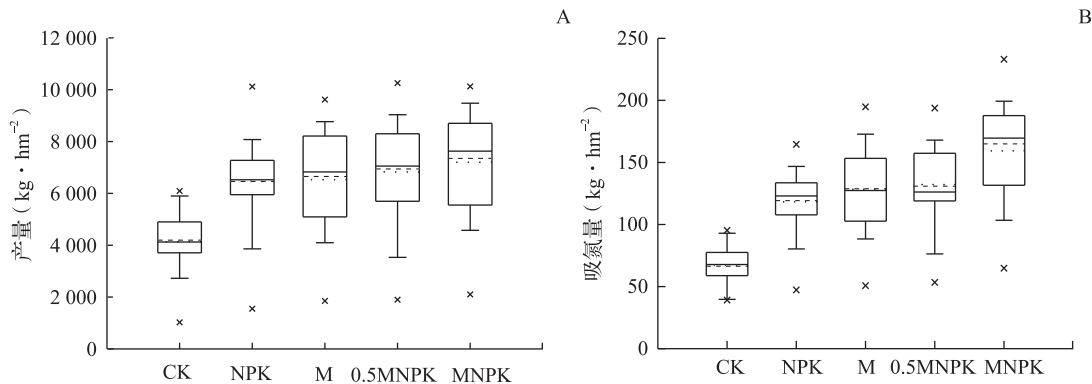


图 1 不同施肥处理作物产量和吸氮量的变化范围 (1995 ~ 2013)

2.2 长期不同施肥处理对作物吸氮量的影响

同作物产量一样, 各处理吸氮量受施氮量、氮肥形态、气候因素等影响, 年际间变化较大。总的来看 (图 1B), CK 处理吸氮量为 $39.1 \sim 95.3\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均为 $67.4\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著低于各施肥处理。同等施氮量下, 各处理之间吸氮量表现为 $0.5\text{MNPK} > \text{M} > \text{NPK}$, 但无显著差异。1995 ~ 2013 年, 高施氮量的 MNPK 处理平均吸氮量分别比 CK、NPK、M、0.5MNPK 显著提高 136.5%、34.6%、24.1%、20.6%。各施肥处理间吸氮量差异性在不同时间段表现不一致。1995 ~ 2001 年间各施肥处理水稻吸氮量无显著差异, MNPK 处理最高, M 处理最

低; 2002 ~ 2006 年间, 同等施氮量的几个处理间吸氮量无显著差异, 但施用有机肥的处理 (M, 0.5MNPK) 吸氮量高于单施化肥的处理 (NPK), 高施氮量 MNPK 处理玉米吸氮量显著高于其他处理; 2007 ~ 2013 年, 施用有机肥的 M、0.5MNPK、MNPK 处理吸氮量分别比 NPK 显著提高 17.9%、19.0%、40.9%, 高施氮量的 MNPK 处理吸氮量比 M 和 0.5MNPK 分别显著提高 19.9% 和 18.5% (表 3)。

上述结果说明, 施用化肥或有机肥都能显著提高作物产量, 同等施氮量条件下, 单施化肥处理 (NPK) 在试验前期 (1995 ~ 2001 年) 具有较好的增产效果, 但长期单施化肥增产效应逐渐减弱, 从变

异系数来看, NPK 处理各阶段变异系数都较大, 说明其各时间段稳产性较差。单施有机肥处理 (M) 在试验前期平均产量和吸氮量均最低, 但随着施肥年限的增加, 2007 ~ 2013 年水稻平均产量高于单施化肥处理。有机肥配施化肥处理 (0.5MNPk) 在试

验的各个时期作物产量和吸氮量都较高, 且变异系数比 NPK 和 M 处理小, 稳产性较好。高施氮量的 MNPk 处理, 其产量 19 年平均值得高于其他各施肥处理, 但差异不显著, 而其吸氮量显著高于其他施肥处理, 说明作物对氮素存在奢侈吸收的现象。

表 3 不同施肥处理的吸氮量

(kg · hm⁻²)

时间 (年)		CK	NPK	M	0.5MNPk	MNPk
1995 ~ 2001	水稻	56.5 b	105.9 a	93.3 a	102.3 a	117.6 a
	CV (%)	17.5	29.2	20.9	26.0	22.3
2002 ~ 2006	玉米	79.6 c	132.5 b	158.6 b	157.9 b	202.9 a
	CV (%)	18.9	20.4	18.8	15.2	8.7
2007 ~ 2013	水稻	69.6 d	120.7 c	141.9 b	143.6 b	170.1 a
	CV (%)	23.3	11.5	10.2	12.7	7.7
1995 ~ 2013	作物	67.4 c	118.4 b	128.4 b	132.2 b	159.4 a
	CV (%)	23.9	21.7	26.9	24.6	25.1

2.3 长期施肥对氮肥利用率的影响

氮肥偏生产力 (PFP_N) 指单位投入的氮肥所能产生的籽粒产量。高施氮 MNPk 处理 PFP_N 一直低于其他处理, 平均仅为 10.9 kg · kg⁻¹, 同等施氮量的条件下, NPK 处理在试验前期 PFP_N 高于施用有机肥的处理, 但随着施肥年限的增加, 施用有机肥的 M 和 0.5MNPk 处理 PFP_N 逐渐高于 NPK 处理 (图 2A)。总的来看, NPK、M、0.5MNPk 处理 19 年 PFP_N 无显著差异, 平均为 20.0 kg · kg⁻¹, 其中以 0.5MNPk 处理最高, 三者分别比 MNPk 处理显著提高 79.8%、81.7%、89.9% (表 4)。

氮肥内部利用率 (IE_N) 指作物单位吸收的氮量所能生产的籽粒产量。同等施氮量下, 种植水稻期间, NPK、M、0.5MNPk 处理 IE_N 相差不大, 种植玉米期间 NPK 处理 IE_N 较其他两个处理有所提高 (图 2B)。高施氮的 MNPk 处理 IE_N 一直低于其他各处理, 平均为 44.7 kg · kg⁻¹。总的来看, NPK、M、0.5MNPk 3 个处理 IE_N 无显著差异, 平均比 MNPk 处理显著提高 6.97 kg · kg⁻¹。

氮肥回收利用率 (RE_N) 指施用的氮肥能被作物利用的比例。NPK 处理在试验前期较高, 但随着施肥年限增加 RE_N 逐渐低于 M 和 0.5MNPk 处理, M

处理 RE_N 随时间呈不断增加趋势, 虽前期较低, 中后期与 0.5MNPk 处理无明显差异, 0.5MNPk 处理在各时期 RE_N 都较高, 而 MNPk 处理则在各时期都低于其他施肥处理 (图 2C)。总的来看, 各处理 19 年 RE_N 平均值最高仅为 19.6%, 说明 80% 以上的氮素留在土壤中或者以其他途径损失, 没有被作物充分利用, 0.5MNPk 处理 RE_N 与 M 处理无显著差异, 但显著高于 NPK 处理和 MNPk 处理, M 和 0.5MNPk 处理 RE_N 分别比 MNPk 处理显著提高 4.9 和 6.0 个百分点。

氮肥累积利用率 (ARE_N) 是指一段时间内作物累积从土壤中吸收的氮素量与累积施入土壤中的氮素量的比值, 它可以消除年际间的差异和肥料的后效, 时间越长, 氮肥的利用率越稳定, 更能说明氮肥利用的真实情况^[14]。在试验初始几年, NPK 处理 ARE_N 比其他各处理都高, 但随着试验的持续进行, M 和 0.5MNPk 处理 ARE_N 逐渐高于 NPK 处理, MNPk 处理 ARE_N 一直显著低于其他各处理, 平均为 12.0% (图 2D)。总的来看, 各处理 ARE_N 19 年平均值为 12.0% ~ 16.9%, 0.5MNPk 处理与 NPK 处理无显著差异, 均显著高于 M 处理, NPK、M、0.5MNPk 处理 ARE_N 分别比 MNPk 处理显著提高 4.3、2.7、4.9 个百分点。

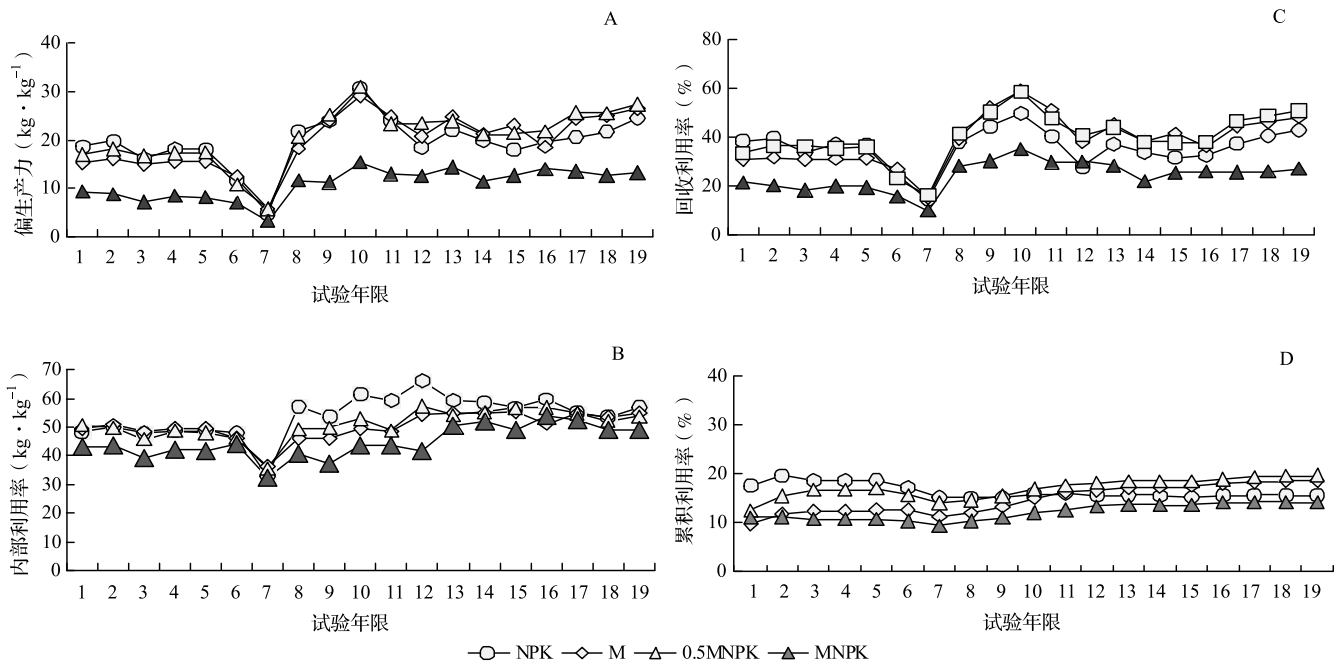


图 2 长期不同施肥处理的氮肥利用率

表 4 不同施肥处理的氮肥利用率

	NPK	M	0.5MNPK	MNPK
氮肥偏生产力 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	19.6 a	19.8 a	20.7 a	10.9 b
CV (%)	27.1	29.7	28.6	28.8
氮肥内部利用率 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	53.8 a	50.3 a	50.9 a	44.7 b
CV (%)	13.6	9.3	10.1	12.6
氮肥回收利用率 (%)	15.4 bc	18.5 ab	19.6 a	13.6 c
CV (%)	30.0	37.4	32.2	33.3
氮肥累积利用率 (%)	16.3a	14.7 b	16.9 a	12.0 c
CV (%)	9.1	20.0	11.9	13.7

值得说明的是各处理在试验进行第7年(2001年)氮肥利用率出现一个低谷,其原因可能是由于气候和灌溉问题导致水分供应不足,因而作物减产较严重。以上结果说明,过量投入的氮肥并不能被作物充分吸收,肥料利用率显著降低,在施氮量 $330 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下,单施化肥处理在试验初期氮肥利用率高于施用有机肥处理,但随着施肥年限的增加,施用有机肥处理氮肥利用率却逐渐高于单施化肥处理。总体来看,适宜的施氮量下,有机肥与化肥配施比单施化肥或单施有机肥更能有效提高氮肥利用率。

2.4 氮肥利用率的演变特征

不同处理氮肥利用率随时间变化趋势不一致。NPK 处理除 IE_N 随时间呈上升趋势外, PFP_N 、 RE_N 呈

持平状态, ARE_N 随时间呈显著降低。施用有机肥的几个处理不同类型氮肥利用率均随时间呈显著上升趋势,尤其是 ARE_N 呈极显著上升趋势。 PFP_N 、 RE_N 、 ARE_N 均以 M 处理年上升速率最快,每年分别增长 $0.69 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、0.77 个百分点、0.50 个百分点, MNPK 处理最小,每年分别增长 $0.39 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、0.40 个百分点、0.25 个百分点。上述结果说明,随着施肥年限的增加,单施化肥处理的氮肥利用率基本呈持平状态,而施用有机肥可逐年提升氮肥利用率, M 处理氮肥利用率年增长速率最快, 0.5MNPK 处理次之, MNPK 处理最小。单施化肥处理 ARE_N 随时间呈显著下降趋势,而施用有机肥各处理的 ARE_N 则随时间呈极显著上升趋势,说明单施化肥处理氮肥后效较差,而施用有机肥具有较好的氮肥后效。

表5 不同施肥处理氮肥利用率随时间变化趋势及参数

	处理	R^2 (n)	变化趋势	斜率
PFP _N	NPK	0.12 (19)	持平	0.32
	M	0.44 ** (19)	上升	0.69
	0.5MNPk	0.37 ** (19)	上升	0.64
	MNPk	0.48 ** (19)	上升	0.39
IE _N	NPK	0.30 * (19)	上升	0.71
	M	0.31 * (19)	上升	0.46
	0.5MNPk	0.35 * (19)	上升	0.54
	MNPk	0.46 ** (19)	上升	0.68
RE _N	NPK	0.01 (19)	持平	-0.08
	M	0.40 * (19)	上升	0.77
	0.5MNPk	0.30 * (19)	上升	0.61
	MNPk	0.23 * (19)	上升	0.40
ARE _N	NPK	0.55 ** (19)	下降	-0.19
	M	0.90 ** (19)	上升	0.50
	0.5MNPk	0.69 ** (19)	上升	0.30
	MNPk	0.76 ** (19)	上升	0.25

注: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ 。

3 讨论

长期施用化肥或有机肥是提高作物产量的有效措施, NPK、M、0.5MNPk、MNPk 比 CK 分别显著增产 56.2%、57.8%、65.0%、74.0%。但是, 不同施肥处理作物产量年际间波动较大, 其原因主要与气候、管理水平和作物品种、土壤肥力有关^[15], 这与前人在红壤^[16]、黑土^[17]、褐潮土^[15]、潮土^[18]等长期试验结果一致。本研究中, 在同等施氮量条件下, 连续施肥 19 年后, NPK、M、0.5MNPk 几个处理间作物产量及氮肥利用率均以 0.5MNPk 最高, NPK 最低, 这与前人的研究结果一致^[19-21]。各施肥处理氮肥偏生产力和氮肥回收利用率分别为 10.9 ~ 20.7 kg · kg⁻¹ 和 13.6% ~ 19.6%, 与全国水稻氮肥偏生产力 26.0 ~ 54.2 kg · kg⁻¹^[10] 和氮肥回收利用率 27.1% ~ 35.6%^[22] 相比, 本试验区域氮肥利用率较低, 其原因是氮肥利用率与施肥量呈显著负相关关系, 我国水稻单季平均施氮量为 180 kg · hm⁻²^[23-24]。而本研究中, 施氮量高达 330 kg · hm⁻², MNPk 处理甚至高达 660 kg · hm⁻²。

不同施肥处理的作物产量和氮肥利用率随时间变化不一致。单施化肥处理 (NPK) 仅在试验初期

有较好的增产效果, 但其持续性较差, 而单施有机肥处理 (M) 虽然试验初期产量较低, 但是却表现出随试验进行产量不断增加的趋势。其原因是化学肥料施入的主要是速效养分, 在短时间内即可发挥其肥效, 被作物吸收利用, 而施入的有机肥需要一定时间矿化为有效养分才能被作物吸收利用, 随着施肥年限的增加, 施用有机肥处理的土壤耕层氮库不断增加, 氮素养分的有效性和供应能力不断提高, 耕层有效氮的活性库不断扩大, 同时还可减少氮素向深层的迁移和累积, 进而提高养分的作物有效性, 促进作物生长, 提高作物产量和氮肥利用率^[25-27]。有机肥配施化肥处理表现出较好的增产效果和稳产性, 与大多数研究者结论一致^[28-29], 其原因可能是有机肥与化肥配施能显著地降低稻田氨挥发, 并且有机肥中的大量微生物吸收无机氮肥并变成自身的有机体, 能起到暂时保肥的作用, 既防止肥劲过猛又防止养分流失, 在同等施氮量条件下, 相比单施化肥或单施有机肥可提高氮肥利用率。

氮肥利用率随时间的演变特征表明: NPK 处理氮肥利用率随时间呈持平或下降趋势, 施用有机肥的处理随时间呈上升趋势, 尤其是氮肥累积利用率随时间变化呈极显著上升趋势, 氮肥后效非常明显, 这主要与有机肥长效持久累积的肥效有关。关于长期施肥下不同施肥处理产量和氮肥利用率随时间的变化特征, 前人已有相关研究^[30-34], 李虹儒^[35]对黑土、褐土、潮土、瘠土、紫色土、黄棕壤、红壤和水稻土上 15 ~ 24 年 13 个点氮肥利用率演变特征分析发现, 各个点 NPK、MNPk 处理随时间变化趋势不一致, 红壤性水稻土和黄棕壤性水稻土上 NPK 和 MNPk 处理氮肥利用率随时间均呈缓慢下降趋势, 而灰黄泥田 MNPk 处理则呈缓慢上升趋势。不同处理在不同地区不同土壤类型上对氮肥利用率的影响不一致, 主要受土壤性质和轮作制度等因素的影响。

本研究中, 高施氮的 MNPk 处理虽能显著提高作物吸氮量和作物产量, 但作物产量与 0.5MNPk 处理并无显著差异, 其氮肥利用率显著低于其他施氮处理, 0.5MNPk 处理 PFP_N、IE_N、RE_N、ARE_N 分别比 MNPk 处理显著增加 9.8 kg · kg⁻¹、6.2 kg · kg⁻¹、6 个百分点、4.9 个百分点, 符合氮肥利用率随施氮量增加而降低的规律, 过高的肥料施用量不能带来相对等的产量增加值, 除被植株部分

吸收外, 多余的氮素均通过淋溶、固定、挥发等途径损失掉, 过高的养分供应还会导致作物徒长, 易倒伏以及虫害增强, 同时造成作物对肥料的奢侈吸收而不能有效地转化到籽粒中^[36], 说明氮肥高量投入并不能使作物持续增产, 反而造成肥料资源浪费、经济效益下降, 且极可能带来很大的环境风险。

4 小结

本研究中, 氮肥施用量偏高, 因此其利用率低于全国平均水平。高施氮量的 MNPK 处理虽能获得较高的产量, 但由于其施氮量过高, 氮肥利用率比其他各处理都低。同等施氮量条件下, NPK 处理前期产量和氮肥利用率较高, M 处理则是前期产量和氮肥利用率较低, 但随着施肥年限的增加产量和氮肥利用率持续增加, 并逐渐超过 NPK 处理, 0.5MNPK 处理在试验的各个阶段产量和氮肥利用率都较高, 且氮肥利用率也随时间呈现上升趋势。因此, 综合考虑产量和肥料利用率两个因素, NPK、M、0.5MNPK、MNPK 几种施肥制度中, 在有机肥与化肥配合施用的基础上, 适当降低肥料用量 (0.5MNPK) 不仅可以获得较高的产量, 提高氮肥利用率, 且其作物产量稳产性和可持续性较高, 还可有效防止肥料损失及因肥料过量施用而带来的环境问题, 兼具经济和环境双重效益, 是贵州黄壤性水稻土地区减肥增效施肥制度的发展方向。

参考文献:

- [1] FAO. Statistical databases [EB/OL]. (2012-08-21). <http://faostat.fao.org/site/575/default.aspx#ancor>.
- [2] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, et al. Nitrogen cycles past, present, and future [J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70 (2): 153-226.
- [3] 朱兆良. 中国土壤氮素研究 [J]. *土壤学报*, 2009, 45 (5): 778-783.
- [4] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106 (9): 3041-3046.
- [5] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. *土壤学报*, 2008, 45 (5): 915-924.
- [6] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 等. 长期施肥对潮土土壤磷素利用与积累的影响 [J]. *中国农业科学*, 2006, 39 (1): 102-108.
- [7] Tang X, Li J M, Ma Y B, et al. Phosphorus efficiency in long-term (15 years) wheat-maize cropping systems with various soil and climate conditions [J]. *Field and Crops Research*, 2008, 108: 231-237.
- [8] 蔡祖聪, 钦绳武. 华北潮土长期试验中的作物产量、氮肥利用率及其环境效应 [J]. *土壤学报*, 2006, 43 (6): 885-891.
- [9] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 I. 农田养分支出参数 [J]. *土壤通报*, 1996, 27 (4): 145-151.
- [10] 吕鹏, 张吉旺, 刘伟, 等. 施氮量对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17 (4): 852-860.
- [11] 宇万太, 姜子绍, 赵鑫, 等. 不同施肥制度对肥料利用率的影响 [J]. *土壤通报*, 2009, 40 (1): 122-126.
- [12] 唐旭, 吴春艳, 杨生茂, 等. 长期水稻-大麦轮作体系土壤供氮能力与作物需氮量研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17 (1): 79-87.
- [13] 杨宪龙, 同延安, 路永莉, 等. 农田氮肥利用率计算方法研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26 (7): 2203-2212.
- [14] 杜君, 秦鱼生. 长期施肥下紫色土小麦肥料利用率及增产效应 [J]. *西南大学学报 (自然科学版)*, 2011, 33 (5): 88-94.
- [15] 李秀英, 李燕婷, 赵秉强, 等. 褐潮土长期定位不同施肥制度土壤生产功能演化研究 [J]. *作物学报*, 2006, 32 (5): 683-689.
- [16] 王伯仁, 徐明岗, 文石林, 等. 长期施肥对红壤旱地作物产量及肥料效益影响 [J]. *中国农学通报*, 2008, 24 (10): 322-326.
- [17] Kunzova E, Hejzman M. Yield development of winter wheat over 50 years of FYM, N, P and K fertilizer application on black earth soil in the Czech Republic [J]. *Field and Crops Research*, 2009, 111: 226-234.
- [18] 马常宝, 卢昌艾, 任意, 等. 土壤地力和长期施肥对潮土区小麦和玉米产量演变趋势的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18 (4): 796-802.
- [19] Wang Y C, Wang E L, Wang D L, et al. Crop productivity and nutrient use efficiency as affected by long-term fertilisation in North China Plain [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 86: 105-119.
- [20] 张广凯, 宋祥云, 刘树堂, 等. 长期定位施肥对小麦-玉米氮素利用及产量品质的影响 [J]. *华北农学报*, 2015, 30 (4): 157-161.
- [21] 吴萍萍, 刘金剑, 周毅, 等. 长期不同施肥制度对红壤稻田肥料利用率的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14 (2): 277-283.
- [22] 冯洋, 陈海飞, 胡孝明, 等. 高、中、低产田水稻适宜施氮量和氮肥利用率的研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (1): 7-16.
- [23] 曾祥明, 韩宝吉, 徐芳森, 等. 不同基础地力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45 (14): 2886-2894.
- [24] 王秀斌, 徐新朋, 孙刚, 等. 氮肥用量对双季稻产量和氮

- 肥利用率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (6): 1279-1286.
- [25] 王淑英, 樊廷录, 丁宁平, 等. 长期施肥下黄土旱塬黑垆土供氮能力的变化 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (6): 1487-1495.
- [26] 李文军, 彭保发, 杨奇勇. 长期施肥对洞庭湖双季稻区水稻土有机碳、氮积累及其活性的影响 [J]. 中国农业科学, 2015, 48 (3): 488-500.
- [27] 高菊生, 黄晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响 [J]. 土壤学报, 2014, 51 (2): 315-324.
- [28] 张爱君, 魏猛, 唐忠厚, 等. 基于黄潮土长期定位试验的作物产量演变特征分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30 (3): 336-340.
- [29] 黄晶, 张杨珠, 刘淑军, 等. 水稻产量对长期不同施肥和环境的响应 [J]. 中国生态农业学报, 2015, 23 (11): 1367-1376.
- [30] 罗龙皂, 李渝, 张文安, 等. 长期施肥下黄壤旱地玉米产量及肥料利用率的变化特征 [J]. 应用生态学报, 2013, 24 (10): 2793-2798.
- [31] 黄绍敏. 长期不同施肥模式下潮土肥力演变规律与持续利用研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2006.
- [32] 段英华, 徐明岗, 王伯仁, 等. 红壤长期不同施肥对玉米氮肥回收率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (5): 1108-1113.
- [33] Debarati B, Purakayastha T J, Bhar L M, et al. Impact of integrated management on yield sustainability in relation to soil quality under a rice-wheat cropping system [J]. National Academy Science Letters, 2014, 37 (1): 25-31.
- [34] Ranjan B, Pandey A K, Gopinath K A, et al. Fertilization and crop residue addition impacts on yield sustainability under a rainfed maize-wheat system in the Himalayas [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 86 (1): 21-32.
- [35] 李虹儒. 长期施肥下我国粮食作物氮肥利用率变化特征 [D]. 吉林: 东北农业大学, 2008.
- [36] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略 [J]. 中国农业科学, 2002, 35 (9): 1095-1103.

The dynamic of crop yield and nitrogen use efficiency under different long-term fertilization patterns in paddy soil from yellow earth in Southwest China

LIU Yan-ling^{1,2}, LI Yu^{1,2}, ZHANG Ya-rong^{1,2}, ZHANG Wen-an^{1,2}, JIANG Tai-ming^{2,3*} [1. Guizhou Institute of Soil and Fertilizer, Guiyang Guizhou 550006; 2. Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation and Agriculture Environment (Guizhou), Ministry of Agriculture, Guiyang Guizhou 550006; 3. Guizhou Academy of Agriculture Science, Guiyang Guizhou 550006]

Abstract: In order to understand the effect of long-term fertilization on dynamics of crop yield, nitrogen use efficiency, five treatments including NPK, M (manure), 0.5MNP (1/2M + 1/2NPK), MNP and CK (no fertilizer) were carried out based on 19 years' long-term fertilizer experiment in paddy soil from yellow field in Guizhou province. The results showed that long-term application of chemical fertilizer or organic fertilizer significantly increased crop yield, the crop yield of NPK, M, 0.5MNP, MNP treatments were increased by 56.2%, 57.8%, 65.0%, 74.0%, respectively, compared with CK. The partial factor productivity of applied N (PFP_N), inner efficiency of applied N (IE_N), recovery efficiency of applied N (RE_N), accumulated recovery efficiency of applied N (ARE_N) of different fertilization treatments were 10.9 ~ 20.7 $kg \cdot kg^{-1}$, 44.7 ~ 53.8 $kg \cdot kg^{-1}$, 13.6% ~ 19.6%, 12.0% ~ 16.9%, respectively. 0.5MNP treatment had the highest N use efficiency and MNP had the lowest, which indicated that high N application rate resulted in lower N use efficiency. The different type of N use efficiency of NPK treatment were unchanged or decreased with time, while the N use efficiency in treatments with manure were significantly increased with time, especially the ARE was significantly increased with time. Long-term application of manure, especially manure combined with chemical fertilizers, had stable crop yield and the nitrogen fertilizer utilization rate increased steadily. Therefore, reasonable application of chemical fertilizer coupled with organic manure is an effective measure to improve crop yield, fertilizer use efficiency, and could reduce the amount of N fertilizer in the perennial high amount of paddy soil from yellow field.

Key words: paddy soil from yellow field; long-term fertilization; crop yield; N use efficiency; evolution characteristics