

DOI: 10.11766/trxb201303210133

# 长期有机无机肥配施对水稻产量 及土壤有效养分影响\*

高菊生<sup>1,2</sup> 黄晶<sup>1,2,3†</sup> 董春华<sup>1,2</sup> 徐明岗<sup>1</sup> 曾希柏<sup>4</sup> 文石林<sup>1,2</sup>

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部作物营养与肥料重点实验室/农业部面源污染控制重点实验室,北京 100081)

(2 中国农业科学院衡阳红壤实验站/祁阳农田生态系统国家野外试验站,湖南祁阳 426182)

(3 湖南农业大学资源环境学院,长沙 410128)

(4 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** 利用中国农业科学院红壤实验站开始于 1982 年的水稻长期定位试验,研究长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤速效氮、磷、钾含量的动态变化(1982—2011 年)特征。29 年研究结果表明:长期有机无机肥配施(NPKM)能提高水稻产量,培肥地力。长期施用化肥(NPK)导致水稻产量降低。稻谷产量随着施肥量的增加而增加。在等氮投入情况下,增施化学磷肥的增产效应要高于化学钾肥,且早稻表现尤为明显;长期单施有机肥和单施化肥对稻谷产量的影响没有显著差异。随着施肥时间的延长,各处理水稻产量差异越显著。各施肥处理土壤碱解氮增加速率表现为慢-快-慢三个阶段,有机肥的施用相较单施化肥,能够显著提高土壤碱解氮含量( $p < 0.05$ )。土壤有效磷的累积主要与化学磷肥的施用有关,各施肥处理土壤有效磷历年平均含量变化趋势为:NPKM、NPM、PKM > NPK > M、NKM( $p < 0.01$ );土壤速效钾以有机肥和化学钾肥配施的处理(NPKM、NKM、PKM)增加最快,单施化学肥料的处理(NPK)增加最慢。随着氮、磷施用量的增加,土壤中氮、磷素出现盈余,但 NPKM 处理相比其他处理能够有效降低盈余量;各处理土壤中钾素均表现为亏缺状态,红壤性水稻田至少每年应补充投入钾素  $200 \text{ kg hm}^{-2}$  才能基本维持土壤钾素平衡。

**关键词** 长期施肥;有机无机肥配施;水稻产量;土壤有效养分;土壤养分平衡

**中图分类号** S158.1 **文献标识码** A

水稻是我国种植面积最大的粮食作物,其产量高低直接影响到我国粮食安全和社会稳定<sup>[1]</sup>。长期以来,为提高水稻产量,人们一直将施肥作为水稻生产最重要的物化技术措施。我国传统农业十分重视有机肥的使用,它具有促进作物增产、改善品质、提升土壤质量等作用,但存在肥效慢、养分含量低、施用量大费劳力及增产效果差等缺点。而化学肥料虽有增产快、养分高、用量少等优点,但因人们过度施用已造成粮食生产成本低、土壤质量退化、农业面源污染严重等问题<sup>[2]</sup>。因此,如何合理施肥,提高作物产量、维持和提高土壤肥力,是人们长期以来关注的问题。有关长期不同施肥措施,尤其是长期有机肥和化肥配施对农作物产量、土壤肥

力的影响,国内外学者已做了大量研究<sup>[3-7]</sup>,研究表明,有机肥或有机无机肥配合的长期施用能够较好地维持和提高农作物产量及土壤肥力。现有南方红壤丘陵区水稻长期定位试验所用的有机肥基本为猪粪、稻草和紫云英等,以牛粪为有机肥源的较少<sup>[8]</sup>。中国农业科学院红壤实验站于 1982 年在湖南省祁阳县官山坪村设置了有机肥(牛粪)和化肥不同组合的长期定位试验。该地区为典型的红壤低山丘陵区,多为中低产田,为此,本研究在已有水稻长期施肥试验的基础上,研究长期施用牛粪、化肥及牛粪与化肥配施对水稻产量、土壤速效养分的影响,同时对长期不同施肥后土壤养分平衡进行估算,旨在揭示不同施肥模式与红壤稻田水稻产量、

\* 公益性行业(农业)科研专项(201203030,201103005)、国家科技支撑计划项目(2012BAD05B05)和农业部面源污染控制重点实验室开放基金项目(20130104)资助

† 通讯作者,E-mail: huangjing1718@aliyun.com

作者简介:高菊生(1963—),男,湖南祁阳人,高级农艺师,研究方向为水稻、旱地长期定位试验及作物栽培与土壤培肥。1984 年至今,一直负责该试验的管理、收产、取样等工作。E-mail: gjusheng@163.com

收稿日期:2013-03-21;收到修改稿日期:2013-05-15

土壤速效养分含量及土壤养分平衡的关系,为红壤丘陵区中低产田高效施肥提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

于 1982 年开始进行有机肥、无机肥配施长期定位试验,地点设在湖南省祁阳县官山坪中国农科院红壤实验站内稻田(E 111°52'32", N 26°45'42"),土壤为第四纪红土母质发育的红壤性稻田,试验开始时 0~20 cm 土壤基本理化性状为:pH 5.97,有机质 19.8 g kg<sup>-1</sup>,全氮 1.5 g kg<sup>-1</sup>,碱解氮 158.0 mg kg<sup>-1</sup>,全磷 0.48 g kg<sup>-1</sup>,有效磷 9.6 mg kg<sup>-1</sup>,全钾 14.2 g kg<sup>-1</sup>,速效钾 65.9 mg kg<sup>-1</sup>,属中低肥力水平。

### 1.2 试验方法

1982 年试验开始时设 6 个处理,即:(1)化肥磷、钾肥 + 有机肥(PKM);(2)化肥氮、钾肥 + 有机肥(NKM);(3)化肥氮、磷肥 + 有机肥(NPM);(4)

有机肥(M);(5)化肥氮、磷、钾肥(NPK);(6)化肥氮、磷、钾肥 + 有机肥(NPKM);2000 年开始增加一个对照不施肥处理(CK)。小区面积 1.8 m × 15 m = 27 m<sup>2</sup>,重复 3 次,随机排列,各小区内均用水泥埂分隔。种植模式为稻-稻-冬闲。1982 年早稻进行匀地试验,小区产量变异系数 2.98%,符合试验要求,1982 年晚稻正式开始试验。有机肥为腐熟牛粪(养分含量为多年测定平均值,含 N 0.32%,含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.25%,含 K<sub>2</sub>O 0.15%),化肥为尿素(含 N46%)、过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>12%)、氯化钾(含 K<sub>2</sub>O60%)。所有肥料均作底肥一次性施入。各处理肥料用量见表 1。

水稻收获时,各小区单打单晒,测定稻谷产量;各小区于每年晚稻收获后,按“S”形取样法取 4 个点,取 0~20 cm 土层混合样,自然风干后过 20 目筛,用于土壤理化性质测定。土壤碱解氮采用碱解扩散法测定,有效磷用 Olsen 法测定,速效钾用醋酸铵浸提—火焰光度法测定<sup>[9]</sup>。

表 1 各处理每季水稻肥料施用量

Table 1 Fertilizer application rates of the treatment for the rice season(kg hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	牛粪	化肥 Chemical fertilizer		
	Cattle manure	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
PKM	22 500	0	56.3	33.8
NKM	22 500	72.5	0	33.8
NPM	22 500	72.5	56.3	0
M	22 500	0	0	0
NPK	0	72.5	56.3	33.8
NPKM	22 500	72.5	56.3	33.8

### 1.3 数据处理

土壤养分表观平衡(apparent balance, AB)指在某段时间内,以肥料形式施入土壤中的养分量与水稻吸收的养分量的差值,AB = IF-Ut,其中 Ut 为地上部吸收的养分总量(kg hm<sup>-2</sup>),IF 为施入土壤的肥料总量(kg hm<sup>-2</sup>),本研究不考虑通过种子、灌溉水、作物根茬、降水和干沉降等途径进入土壤的养分量,也不考虑通过蒸发、淋失等途径损失的养分量。因未对历年的水稻植株样进行养分含量测定,所以根据湖南省望城冲垌田红壤性水稻土长期不同施肥处理的稻谷和秸秆养分含量<sup>[10]</sup>,进行水稻地上部吸收养分总量的估算。采用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行处理和绘图,采用 DPS 6.5 统计分析软件对数据进行差异显著性检验(LSD 法)。

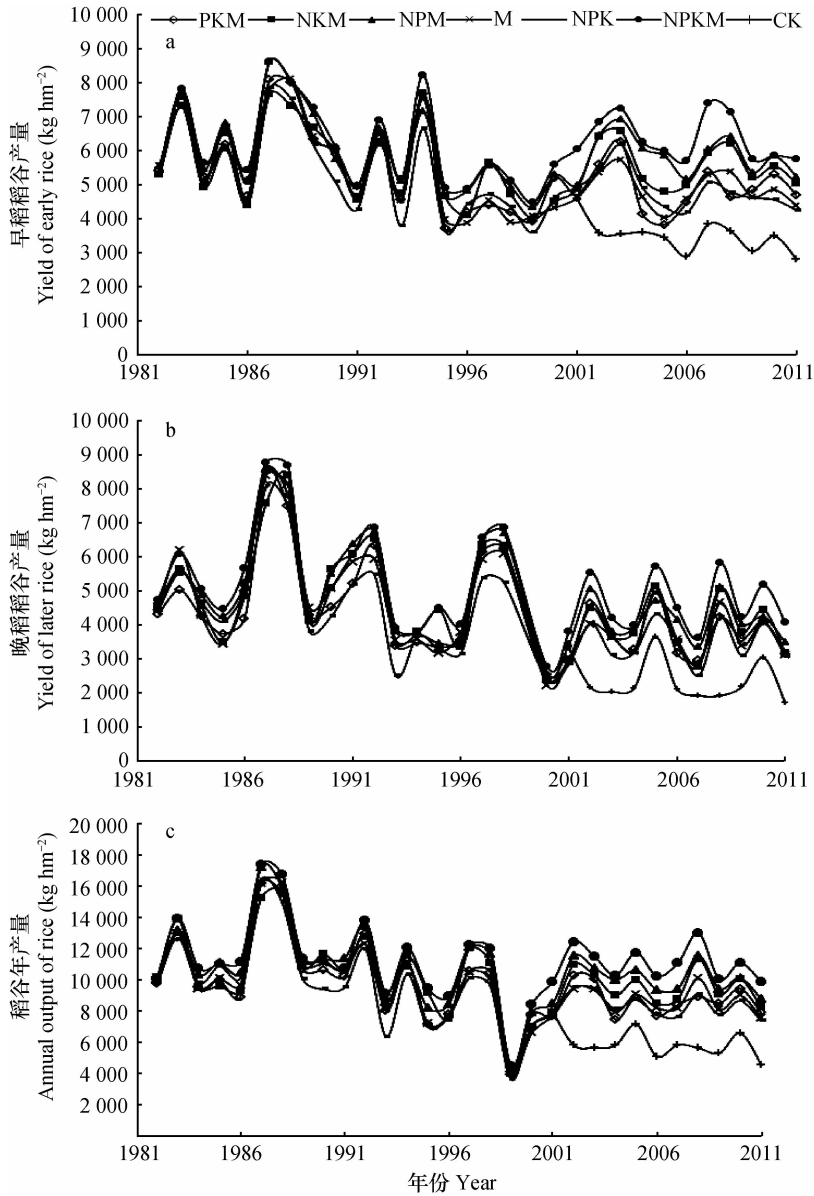
## 2 结果

### 2.1 长期有机无机肥配施对水稻产量影响

由图 1a 可见,各处理早稻产量年际变化较大,不同处理早稻产量随试验时间所呈现的变化趋势一致。试验开始前 5 年,不同施肥处理间的早稻产量差异较小,从 1987 年开始,不同施肥措施对早稻产量的影响逐渐增大。对照不施肥处理,早稻产量明显低于其他施肥处理;除个别年份外,NPKM 处理的早稻产量一直保持最高水平;其他施肥处理的早稻产量随施肥年份呈现的规律不明显。NPKM、NPM、NKM、PKM、M、NPK 和 CK 处理的历年早稻平均产量分别为 6 189、5 911、5 557、5 346、5 281、

5 181 和 3 490 kg hm<sup>-2</sup>。等氮投入的 NPKM、NPM 和 NKM 3 个处理历年早稻平均产量变化趋势为 NPKM > NPM > NKM ( $p < 0.05$ ), 说明早稻增施化学磷肥增产效果要好于增施化学钾肥; PKM、M 和 NPK 3 个处理的历年早稻产量显著低于其他施肥处理, 该

3 个处理间的差异不显著, 说明即使在施用有机肥的基础上增施化学磷、钾肥, 不能明显增加早稻稻谷产量, 在养分投入量相同的情况下, 有机肥和化肥对于早稻产量的影响效果一致。



注: 1999年未种植晚稻 Note: No later rice in 1999

图1 不同施肥处理水稻产量变化

Fig. 1 Changes in rice yield relative to fertilization treatment

各处理晚稻产量随施肥年份的起伏波动较大 (图 1b), 不同处理同一年份的晚稻产量低于早稻, 各处理晚稻产量随施肥时间所呈现的变化趋势和早稻有所区别。对照不施肥处理, 晚稻产量明显低于其他施肥处理; NPKM 处理的晚稻产量始终保持最高水平; NPK 处理随着施肥时间的延长呈下降趋

势, 连续单施化肥 7 年后, 即从 1989 年开始, 除个别年份外, 其晚稻产量逐渐低于其他施肥处理; 其他各施肥处理晚稻产量在一定范围内起伏变化, 未见明显规律。不同施肥处理间历年晚稻平均产量的高低和早稻有所不同, NPKM、NPM、NKM、M、PKM、NPK 和 CK 处理的历年晚稻平均产量分别为 5 171、

4 830、4 693、4 541、4 421、4 261 和 2 435 kg hm<sup>-2</sup>。等氮投入的 NPKM、NPM 和 NKM 3 个处理历年晚稻平均产量变化趋势为 NPKM > NPM, NKM ( $p < 0.05$ ), NPM 和 NKM 2 个处理间未见明显差异,晚稻增施磷肥或增施钾肥对产量的影响效果一致; PKM、M 和 NPK 3 个处理的历年晚稻平均产量变化趋势为 M, PKM > NPK ( $p < 0.05$ ), M 和 PKM 处理间差异不显著,在养分投入量相同的情况下,单施有机肥较单施化肥有利于提高晚稻稻谷产量。

不同施肥处理年产量的变化趋势和晚稻相似(图 1c)。随着施肥时间的延长,不同施肥处理稻谷年产量的差异逐渐呈现出来。对照不施肥处理,其水稻产量明显低于其他施肥处理, NPKM 处理的水稻产量一直保持最高水平; NPK 处理随着施肥时间的延长呈下降趋势,其水稻产量逐渐低于其他施肥处理。 NPKM、NPM、NKM、M、PKM、NPK 和 CK 处理的历年平均产量分别为 11 188、10 580、10 093、9 671、9 619、9 300 和 5 925 kg hm<sup>-2</sup>。不同处理历

年平均产量变化趋势为: NPKM > NPM > NKM > M, PKM > NPK > CK ( $p < 0.05$ )。水稻历年平均产量随施氮量的增加而增加;等氮条件下,同时增施化学磷、钾肥的增产效果要优于单独增施化学磷肥或钾肥,增施化学磷肥较增施化学钾肥更有利于水稻产量提高;长期单施有机肥较单施化肥增产效果更好。

将试验开始以来的历年水稻产量分 3 个阶段(表 2),可以看出,随着试验时间的延长,各处理间的水稻产量呈下降趋势,不同阶段水稻产量对不同施肥处理的响应基本一致。以增量施肥处理(NPKM)的产量始终表现最高;化学氮磷肥或氮钾肥配施有机肥处理(NPM 和 NKM)的产量高于不施化学氮肥或单施化肥处理(PKM、M 和 NPK),且增施化学磷肥的增产效应要高于化学钾肥,在早稻表现尤为明显;不施化学氮肥或单施化肥处理(PKM、M 和 NPK)的产量处于最低水平,且单施化肥和单施有机肥之间在不同阶段的产量基本没有差异。

表 2 不同施肥处理不同阶段稻谷年均产量

Table 2 Annual mean rice yield relative to fertilization treatment and period (1982—2011, kg hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	1982—1990			1991—2000			2001—2011		
	早稻产量 Yield of early ice	晚稻产量 Yield of late rice	年产量 Annual output	早稻产量 Yield of early ice	晚稻产量 Yield of late rice	年产量 Annual output	早稻产量 Yield of early ice	晚稻产量 Yield of late rice	年产量 Annual output
PKM	6 381b	5 146c	11 527c	4 925cd	4 517b	8 990c	4 881d	3 750cd	8 631d
NKM	6 163b	5 467bc	11 630c	5 064bc	4 842a	9 422b	5 509c	3 938bc	9 446c
NPM	6 652a	5 639ab	12 291ab	5 334ab	4 836a	9 686b	5 830b	4 163b	9 993b
M	6 391b	5 560b	11 951bc	4 758de	4 504b	8 812c	4 848d	3 737cd	8 585d
NPK	6 226b	5 365bc	11 592c	4 636e	4 079c	8 307d	4 822d	3 505d	8 327d
NPKM	6 730a	5 893a	12 623a	5 536a	5 081a	10 109a	6 341a	4 655a	10 996a
CK	—	—	—	—	—	—	3 490e	2 435e	5 925e

注:同列数据后不同字母代表处理间差异达显著水平 ( $p < 0.05$ ) Note: Data in same column followed by different letters mean significant difference at the 0.05 level, respectively

## 2.2 长期有机无机肥配施对土壤有效养分的影响

土壤碱解氮含量水平代表着土壤供氮强度,反映当季作物可利用的氮含量。经过 29 年连续种植和施肥,除对照不施肥外,其他各处理土壤碱解氮含量均有不同程度的增加(表 3),且表现为前期(试验开始至 1994 年)增加慢,平均每年增加 0.7 ~ 3.7 mg kg<sup>-1</sup>,1994 年至 1998 年增加较快,平均每年增加 6.5 ~ 32.5 mg kg<sup>-1</sup>;1998 年之后,各施肥处理土壤碱解氮均表现为略微下降。从试验开始至 1996 年,各施肥处理间土壤碱解氮含量差异不明显,1996 年

之后, NPK 处理的土壤碱解氮含量显著低于其他施用了有机肥的各个处理 ( $p < 0.05$ ),而施用有机肥的各处理之间的土壤速效氮含量变化趋势相似,且差异较小,各施肥处理历年平均含量在 121.7 ~ 147.3 mg kg<sup>-1</sup>之间。

长期不同施肥后,各处理土壤有效磷变化幅度随施肥种类和方法不同有较大差异(图 2),明显分为 3 个水平档次:不施化学磷肥的 M 和 NKM 处理对土壤有效磷增加较少,其土壤有效磷含量比较稳

表 3 不同施肥处理土壤碱解氮含量

Table 3 Alkalysable-N content in different fertilization treatments (1982—2011, mg kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	1982	1984	1986	1988	1990	1994	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2011	平均 Average
M	82.8	94.4	76.4	95.5	98.5	109.1	271.6	180.2	154.7	142.6	177.4	176.7	140.9	140.8	179.3	141.4a
NKM	82.8	146.2	89.1	91.0	84.3	165.5	126.8	237.7	192.3	156.5	171.4	178.2	148.5	147.7	192.2	147.3a
NPM	82.8	90.9	89.1	82.8	112.5	109.8	138.8	192.6	—	149.6	182.8	180.5	154.6	155.4	175.4	135.5a
PKM	82.8	92.2	89.5	97.4	95.2	89.9	192.9	219.7	201.3	157.1	168.3	177.4	169.1	149.8	176.2	143.9a
NPKM	82.8	—	87.6	97.2	95.2	114.7	169.3	163.1	177.2	156.5	190.4	176.7	147.0	147.0	186.9	142.3a
NPK	82.8	91.4	90.3	88.0	102.3	89.5	218.9	115.3	136.0	116.5	137.1	140.1	118.0	117.9	181.5	121.7b
CK											115.8	122.6	112.0	99.9	119.8	114.0

注:同列数据后不同字母代表处理间差异达显著水平 ( $p < 0.05$ ) Note: Data in same column followed by different letters mean significant difference at the 0.05 level, respectively

定,每年分别递增 0.26 和 0.17 mg kg<sup>-1</sup>;NPK 处理中施用了化学磷肥,未配合施用有机肥,其土壤有效磷含量增加较快,较试验开始时增加了 7.0 倍;有机肥和化学磷肥配施的 NPM、PKM 和 NPKM 处理,其土壤有效磷含量增加最快,分别较试验开始时增加了 10.2 倍、11.2 倍和 11.5 倍。同时施用化学磷

肥和有机肥的处理(NPM、PKM 和 NPKM)的历年平均土壤有效磷含量显著高于施用了化学磷肥但未配施有机肥的 NPK 处理( $p < 0.01$ ),未施用化学磷肥但施用了有机肥的处理(M 和 NKM)的土壤有效磷含量显著低于施用了化学磷肥的处理( $p < 0.01$ )。

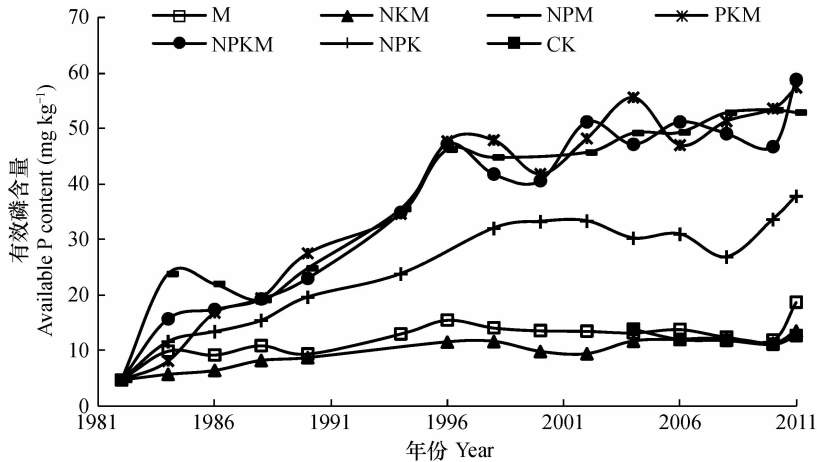


图 2 不同施肥处理土壤有效磷含量变化

Fig. 2 Change in available P content relative to fertilization treatment

长期不同施肥对水田土壤速效钾的影响,以有机肥配施化学钾肥的处理增加最快,单施化学肥料的处理增加最慢(图 3)。有机肥和化学钾肥配施能提高土壤速效钾水平,NKM、PKM 和 NPKM 处理土壤速效钾平均含量较单施化肥的 NPK 处理分别增加了 43、40 和 36 mg kg<sup>-1</sup>,增幅分别达 26.1%、24.1% 和 22.0%,显著高于不施化学钾肥的 NPM 和单施化肥的 NPK 处理( $p < 0.05$ );未施化学钾肥的 M 和 NPM 处理土壤速效钾平均含量较单施化肥的 NPK 处理分别增加了 25 mg kg<sup>-1</sup>和

8 mg kg<sup>-1</sup>,单施有机肥处理土壤速效钾历年平均含量显著高于单施化肥处理( $p < 0.05$ ),长期单施有机肥相较单施化肥能有效增加土壤速效钾含量。

### 2.3 稻谷年产量与土壤有效养分的相关性

为了进一步探讨长期不同施肥处理对水稻生长发育的影响,对水稻年产量和土壤速效养分进行了相关性分析(表 4)。长期不同施肥后,水稻年产量与土壤碱解氮和有效磷含量均呈现负相关。长期单施化肥的 NPK 处理,其水稻年产量与土壤碱解

氮和有效磷含量呈现显著负相关,不施用化学氮肥的 PKM、M 和 CK 处理的水稻年产量与土壤碱解氮

含量也呈现显著负相关。

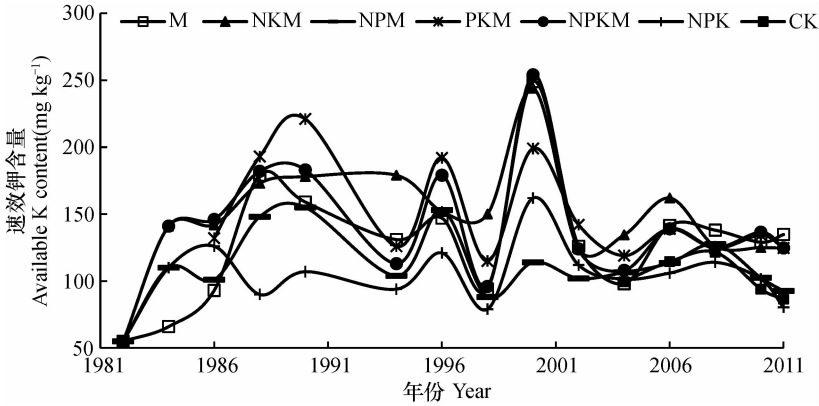


图 3 不同施肥处理土壤速效钾含量变化

Fig. 3 Change in available K content relative to fertilization treatment

表 4 不同施肥处理稻谷年产量与土壤有效养分的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of rice yield with soil available nutrients relative to fertilization treatment

处理 Treatment	碱解氮 Alkalyisable N	有效磷 Available P	速效钾 Available K
PKM	-0.52 *	-0.44	0.19
NKM	-0.36	-0.22	-0.05
NPM	-0.38	-0.35	0.26
M	-0.56 *	-0.41	-0.07
NPK	-0.64 **	-0.55 *	-0.32
NPKM	-0.42	-0.21	-0.11
CK	-0.98 **	-0.36	0.04

\*, 在 5% 水平相关性显著 Significant at the 5% level; \*\*, 在 1% 水平相关性显著 Significant at the 1% level

### 2.4 不同施肥处理下土壤氮磷钾素表现平衡

土壤养分平衡是作物高产稳产的基础,从各处理年均氮磷钾素养分收支情况可以看出(表 5),施肥和作物吸收的差异导致土壤中氮磷钾素收支不同。长期不施肥(CK)土壤中氮素平均每年亏缺 80.6 kg hm<sup>-2</sup>;施氮量为 145 kg hm<sup>-2</sup>时,PKM、NPK 和 M 处理土壤中氮素平均每年亏缺 13.3 ~ 66.2 kg hm<sup>-2</sup>;当施氮量增至 290 kg hm<sup>-2</sup>时,NKM、NPM 和 NPKM 处理的土壤中氮素出现盈余,在有机肥和化肥均平衡施用的情况下(NPKM 处理),土壤中氮素盈余量较 NKM 和 NPM 处理分别降低 55.2% 和 19.0%。不施磷肥的 CK 处理,平均每年带走磷 37.2 kg hm<sup>-2</sup>;施磷量为 56.3 kg hm<sup>-2</sup>时,仍不能满足水稻对磷素的需求,NKM、M 和 NPK 处理的土壤中磷素平均每年亏缺 13.9 ~ 18.4 kg hm<sup>-2</sup>,磷肥施用量加倍后,PKM、NPM 和 NPKM 处理的土壤中磷素平均每年盈余 19.0 ~ 47.7 kg hm<sup>-2</sup>,NPKM 处理土壤中磷素盈余

量较 PKM 和 NPM 处理分别降低 60.1% 和 39.6%。和氮磷不同,无论施钾与否,各处理土壤钾素均表现明显的亏缺,与不施肥相比较,钾肥的施用加速了土壤中钾的消耗,施肥处理平均每年亏缺钾素 160.7 ~ 218.0 kg hm<sup>-2</sup>。

### 3 讨论

长期试验设计施肥量不足导致水稻产量低。不同施肥处理的早稻和年度产量均表现为随着施肥量的增加而增加。有机无机肥配施水稻(早稻、晚稻)产量均能保持相对较高,这与前人的研究结果一致<sup>[11]</sup>。单施化肥(NPK)或有机肥(M)处理,其水稻产量随着施肥时间的延长,与高产处理(NPKM)之间的差异逐渐增大,可能是由于其施肥量仅为 NPKM 处理的 50%,同时也与水稻品种的需肥特征有关,目前使用的水稻品种大多是以高产

表 5 不同施肥处理土壤氮、磷、钾素表观平衡

Table 5 Apparent balance of soil N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O relative to fertilization treatment (1982—2011, kg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	N			P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			K <sub>2</sub> O		
	施入量 Input	移除量 Output	收支 Budget	施入量 Input	移除量 Output	收支 Budget	施入量 Input	移除量 Output	收支 Budget
PKM	145.0	158.3	-13.3	112.6	64.9	47.7	67.6	240.9	-173.3
NKM	290.0	216.8	73.2	56.3	74.7	-18.4	67.6	263.7	-196.1
NPM	290.0	249.5	40.5	112.6	81.1	31.5	33.8	231.7	-197.9
M	145.0	211.2	-66.2	56.3	74.0	-17.7	33.8	194.5	-160.7
NPK	145.0	202.9	-57.9	56.3	70.2	-13.9	33.8	251.8	-218.0
NPKM	290.0	257.2	32.8	112.6	93.6	19.0	67.6	268.2	-200.6
CK	0.0	80.6	-80.6	0.0	36.4	-36.4	0.0	85.5	-85.5

为主要育种目标的条件下选育出来的,其品种存在对养分的奢侈吸收现象<sup>[12]</sup>,在低肥料投入的情况下,水稻产量受限,这与前人的研究结果基本一致<sup>[13]</sup>。长期不同施肥结果表明,有机无机配施(NPKM)具有最高的产量可持续系数<sup>[14]</sup>。早稻施磷具有明显的增产效果及经济效应<sup>[15]</sup>,因此,在等氮投入情况下,增施化学磷肥的增产效应要高于化学钾肥,且早稻表现尤为明显。单施化肥(NPK)、单施有机肥(M)和不施化学氮肥(PKM)3个处理的产量水平接近,且随着施肥时间的延长,2001—2010年这一阶段的产量水平已显著低于其他施肥处理( $p < 0.05$ ),氮是限制农业生态系统生产力最重要的营养元素,氮肥的效益可达到作物增产的76%<sup>[1]</sup>,氮投入量较其他施肥处理减少50%是造成这一结果的主要原因。张发明等<sup>[16]</sup>通过不同牛粪施用量与化肥配施对水稻产量的影响研究表明,随着施氮量的增加,稻草产量、稻谷产量、稻草吸氮量、稻谷吸氮量和植株总吸氮量均有明显增加。Edmeades<sup>[17]</sup>对国外14个持续时间20~120 a不等的长期定位试验的研究结果发现,长期施用化肥或有机肥,两者之间对作物生产力没有显著影响。

长期施肥提高土壤养分含量,无论施化肥还是有机肥均对土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量有提升作用。不同施肥处理土壤碱解氮含量在试验前期上升比较平缓,处理间差异较小,这与前人的研究结果一致<sup>[18]</sup>。随着施肥时间的延长,施用有机肥较化肥有显著提高土壤碱解氮含量的效果<sup>[19-21]</sup>,马力等<sup>[22]</sup>研究表明,长期施肥使表层土壤氮素累积量明显增加,0~20 cm土层,施有机肥处理的含氮量普遍高于施化肥处理。长期施用化学氮肥虽然能够提高土壤供氮能力,但是真正能增加土壤有机氮

库、显著提高土壤供氮能力并使土壤在供氮方式上具有渐进性和持续性的只有施用有机肥。这种供氮方式更适合作物根系对氮的吸收利用,这是有机肥优于化肥的原因之一<sup>[23]</sup>。有机肥与化肥配施对于提高土壤氮素含量具有重要意义,这既能快速提高土壤中有效氮的含量,又能长久保存土壤氮素。长期施肥29年的结果表明,南方红壤稻田,随着化学磷肥的施用,土壤有效磷含量明显提高,施入的化肥磷在土壤中累积较多,土壤全磷、有效磷含量提高幅度较大,而施入的有机肥磷在土壤中累积较少,土壤全磷、有效磷提高较少<sup>[24]</sup>。施用化学磷肥导致土壤有效磷含量增加的原因在于,水溶性磷肥施入土壤后,虽然其中一部分很快转化为难溶性磷形态,难于为作物吸收利用,但另一部分被土壤吸附或存在于土壤溶液中,保持着有效状态,可为当季作物吸收利用<sup>[25]</sup>。且施用化学磷肥的基础上增施有机肥,其增加土壤有效磷的效果更加显著。原因可能是,一方面有机肥本身含有一定数量的磷,以有机磷为主,这部分磷易于分解释放;另一方面有机肥施入土壤后可增加有机质含量,而有机质可减少无机磷的固定,并促进无机磷的溶解<sup>[26]</sup>。施用有机肥和含钾化肥或两者配施均能提高土壤速效钾含量<sup>[27]</sup>,有机肥和化学钾肥配施,或单施有机肥,其增加土壤速效钾含量的效果要好于单施化肥,可能是由于有机肥中钾素有效转化率高于化学钾肥,与水溶性化学钾肥相比,有机肥速效钾和缓效钾被土壤固定程度明显降低,故在土壤中有效性较高<sup>[28]</sup>。

水稻生长需要一定的养分,其产量和品质与施用的养分种类、养分量、土壤供给养分的能力和气候条件密切相关。有关研究结果表明,水稻产量对

土壤肥力呈现显著正相关关系,表明土壤肥力越高,水稻所吸收土壤的养分就越多,水稻的产量也就越高<sup>[29]</sup>。也有研究表明,土壤养分中除有效磷和 pH 外,其他养分和作物产量均无显著相关,土壤酶活性和作物产量之间的相关性优于土壤养分和作物产量之间的相关性<sup>[30]</sup>。在本研究中,29 年不同施肥处理,基本表现为水稻产量和土壤养分呈负相关,单施化肥的 NPK 处理呈现显著负相关关系。主要原因可能是,本试验的设计施肥量为 20 世纪 80 年代的常规施肥量,远低于湖南地区现在的常规施肥量,早、晚稻两季共计施用纯 N 352.5 kg hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 135 kg hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 352.5 kg hm<sup>-2</sup><sup>[31]</sup>,因此不同施肥处理的水稻产量均呈降低趋势。而各施肥处理的土壤养分含量,随着施肥年限的增加而增加。所以出现了历年水稻产量与土壤养分呈负相关的结果。说明在中低肥力水平的稻田,肥料长期投入不足,虽然土壤肥力水平能够有一定的提高,但水稻的稳产、高产得不到保证。

不施肥(CK)处理下,作物吸收养分量是土壤基础肥力和环境的综合表现,一定程度上可反映土壤供肥能力。通过分析得出,红壤水稻土年均供养能力大约为 N 80.6 kg hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 36.4 kg hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 85.5 kg hm<sup>-2</sup>,作物消耗大量土壤养分,养分平衡为负平衡,就土壤肥力基础而言,水稻要获得高产需要投入一定量养分。随着氮、磷施用量的增加,水稻对氮、钾的吸收量增加,土壤中氮、磷素出现盈余,盈余量和前人对该地区养分平衡的计算结果相当<sup>[32]</sup>。施氮量在 290 kg hm<sup>2</sup> 的水平下,土壤中氮素盈余较多,增加氮素渗漏、挥发等损失的风险。但 NPKM 处理的盈余量较 NKM 和 NPM 处理要低,说明在农业生产中,必须重视化肥、有机肥施用的合理比例,以及氮、磷、钾营养元素之间的平衡,这样既避免不足而影响作物产量,也要防止奢侈过剩而造成环境污染。同样,当磷肥用量超过作物需求,可使磷在土壤中累积,导致土壤速效磷含量增加,长此以往会造成土壤中磷素向下迁移,从而对环境构成威胁<sup>[33]</sup>。在相同的施磷水平下,NPKM 处理土壤中磷素盈余量较 PKM 和 NPM 处理要低,说明 NPKM 可视为较为理想的施肥模式。随着农产品质量的改善,作物单产水平的提高,复种指数的增加,氮、磷肥用量的加大以及种植户将作物秸秆作为燃料和家畜饲草或为易于耕作将其燃烧均已导致农田生态系统处于负钾素平衡状态,土壤缺钾问题越来越严重<sup>[34]</sup>。廖育林等<sup>[35]</sup>通过在丘陵红黄

泥田上的试验研究,指出每季水稻施 K<sub>2</sub>O 112.5、150 和 187.5 kg hm<sup>-2</sup>条件下,土壤钾素平衡出现亏缺。本试验每年两季水稻施钾(K<sub>2</sub>O) 33.8~67.6 kg hm<sup>-2</sup>的条件下,土壤钾素亏缺约 200 kg hm<sup>-2</sup>,说明至少每年应补充投入钾素 200 kg hm<sup>-2</sup>才能基本维持土壤钾素平衡。

## 4 结 论

连续 29 年长期不同施肥后,稻谷产量随着施肥量的增加而增加,以 NPKM 处理产量始终保持最高;在有机无机肥配施等氮投入下,增施化学磷的增产效果优于增施化学钾;单施化肥与单施有机肥下稻谷产量差异不明显。施肥能明显提高土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量,施用有机肥能显著增加土壤碱解氮含量,施用化学磷肥更能促进有效磷的累积,有机肥和化学钾肥配施能迅速提高土壤速效钾含量;NPKM 处理最能有效降低养分盈余,且各处理均需补充钾素,不能低于 200 kg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。因此,在农业生产实际中,NPKM 处理是较理想的施肥模式,但必须要考虑氮、磷、钾养分的均衡性。

致 谢 该长期试验由刘更另院士设计并一直在刘更另院士指导下进行。在研究过程中得到了黄鸿翔研究员、张会民研究员的大力支持。参加研究的还有秦道珠、李菊梅等同志,在此一并致谢。

## 参 考 文 献

- [1] 陈立云,肖应辉,唐文帮,等. 超级杂交稻育种三步法设想与实践. 中国水稻科学,2007,21(1):90—94. Chen L Y, Xiao Y H, Tang W B, et al. Prospect and practice of three-procedure breeding on super hybrid rice (In Chinese). Chinese Journal of Rice Science, 2007, 21(1): 90—94
- [2] 周江明. 有机-无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 234—240. Zhou J M. Effect of combined application of organic and mineral fertilizers on yield, quality and nitrogen uptake of rice (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(1): 234—240
- [3] Liang B, Yang X Y, He X H, et al. Effects of 17-year fertilization on soil microbial biomass C and N and soluble organic C and N in loessial soil during maize growth. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(2): 121—128
- [4] 廖育林,郑圣炆,聂军,等. 长期施用化肥和稻草对红壤水稻土肥力和生产力持续性的影响. 中国农业科学, 2009, 42(10): 3541—3550. Liao Y L, Zheng S X, Nie J, et al. Effects of long-term application of fertilizer and rice straw on soil fertility and sustainability of a reddish paddy soil productivity (In Chi-



- nese). *Scientia Agricultural Sinica*, 2009, 42(10): 3541—3550
- [ 5 ] Zhang H M, Xu M G, Shi X J, et al. Rice yield, potassium uptake and apparent balance under long-term fertilization in rice-based cropping systems in southern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 88: 341—349
- [ 6 ] Parham J A, Deng S P, Da H N, et al. Long-term cattle manure application in soil II. Effect on soil microbial populations and community structure. *Biological and Fertility of Soils*, 2003, 38(4): 209—215
- [ 7 ] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, 2007, 291(1/2): 275—290
- [ 8 ] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥对南方黄泥田水稻子粒与土壤锌、硼、铜、铁、锰含量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(5): 1056—1063. Wang F, Lin C, Li Q H, et al. Effects of long-term fertilization on contents of Zn, B, Cu, Fe and Mn in rice grain and soil in yellow paddy fields of southern China (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5): 1056—1063
- [ 9 ] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2000. Bao S D. *Analytical methods for soil and agro-chemistry* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [ 10 ] 徐明岗, 梁国庆, 张夫道, 等. *中国土壤肥力演变*. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006. Xu M G, Liang G Q, Zhang F D, et al. *Chinese fertility evolution*, Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2006
- [ 11 ] 高菊生, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期施用化肥对红壤旱地作物和水稻产量影响. *中国农学通报*, 2008, 24(1): 286—292. Gao J S, Li J M, Xu M G, et al. The Effects of long-term chemical fertilizers on yield of upland crops and paddy rice in red soil (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(1): 286—292
- [ 12 ] 敖和军, 王淑红, 邹应斌, 等. 不同施肥水平下超级杂交稻对氮、磷、钾的吸收累积. *中国农业科学*, 2008, 41(10): 3123—3132. Ao H J, Wang S H, Zou Y B, et al. Characteristics of nutrient uptake and utilization of super hybrid rice under different fertilizer application rates (In Chinese). *Scientia Agricultural Sinica*, 2008, 41(10): 3123—3132
- [ 13 ] 张奇春, 王光火, 方斌. 不同施肥处理对水稻养分吸收和稻田土壤微生物生态特性的影响. *土壤学报*, 2005, 42(1): 116—121. Zhang Q C, Wang G H, Fang B. Influence of fertilization treatment on nutrients uptake by rice and soil ecological characteristics of soil microorganism in paddy field (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1): 116—121
- [ 14 ] 李忠芳, 徐明岗, 张会明, 等. 长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续性特征. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1264—1269. Li Z F, Xu M G, Zhang H M, et al. Sustainability of crop yields in China under long-term fertilization and different ecological conditions (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1264—1269
- [ 15 ] 鲁艳红, 廖育林, 黄铁平, 等. 湖南省不同区域早稻施磷效应及土壤有效磷丰缺指标研究. *中国农学通报*, 2011, 27(5): 94—99. Lu Y H, Liao Y L, Huang T P, et al. Study on response of early rice to P application and abundance and deficiency indices of soil available P in different regions of Hunan province (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(5): 94—99
- [ 16 ] 张发明, 毛昆明, 刘宏斌, 等. 不同量有机肥与化肥配施对水稻氮素吸收利用的影响. *云南农业大学学报*, 2011, 26(5): 694—699. Zhang F M, Mao K M, Liu H B, et al. Effects of the application of different levels manure and fertilizers on nitrogen uptake and utilization of rice (In Chinese). *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2011, 26(5): 694—699
- [ 17 ] Edmeades D C. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 66(2): 165—180
- [ 18 ] 朱兆良. 关于土壤氮素研究中的几个问题. *土壤学进展*, 1989, 17(2): 1—9. Zhu Z L. Some problem of soil nitrogen research (In Chinese). *Progress of Soil Science*, 1989, 17(2): 1—9
- [ 19 ] 徐祖祥. 西湖平原区连续 13 年定位施肥对麦、稻产量及土壤肥力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 16—21. Xu Z X. Influences of consecutive 13-year long-term fertilization on yields of rice and wheat and soil fertility in Xihu Plain (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(1): 16—21
- [ 20 ] 黄东迈, 朱培立, 王志明. 耕作土壤有机态氮内循环中几个问题的高榷. *土壤学报*, 2002, 39(增刊): 100—108. Huang D M, Zhu P L, Wang Z M. Discussion on several aspects of internal cycling of organic nitrogen in cultivated soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(Suppl): 100—108
- [ 21 ] 王伯仁, 徐明岗, 文石林, 等. 长期施肥红壤氮的累积与平衡. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(增刊): 29—34. Wang B R, Xu M G, Wen S L, et al. The cumulative and balance of nitrogen in red soil after long-term fertilization (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(Suppl): 29—34
- [ 22 ] 马力, 杨林章, 颜廷梅, 等. 长期施肥水稻土氮素剖面分布及温度对土壤氮素矿化特性的影响. *土壤学报*, 2010, 47(2): 286—294. Ma L, Yang L Z, Yan T M, et al. Profile distribution and mineralization characteristics of nitrogen in relation to temperature in paddy soil under long-term fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(2): 286—294
- [ 23 ] 杨生茂, 李凤民, 索东让, 等. 长期施肥对绿洲农田土壤生产力及土壤硝态氮积累的影响. *中国农业科学*, 2005, 38(10): 2043—2052. Yang S M, Li F M, Suo D R, et al. Effect of long-term fertilization on soil productivity and nitrate accumulation in Gansu oasis (In Chinese). *Scientia Agricultural Sinica*, 2005, 38(10): 2043—2052
- [ 24 ] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 543—551. Zhang G R, Li J M, Xu M G, et al. Effects of chemical fertilizer and organic manure on rice yield and soil fertility (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 543—551
- [ 25 ] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期不同施肥对旱地红壤性质和作物生长的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 97—100, 144. Wang B R, Xu M G, Wen S L. Effect of long time fertilizers

- application on soil characteristics and crop growth in red soil upland(In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):97—100, 144
- [26] 赵晓齐, 鲁如坤. 有机肥对土壤磷素吸附的影响. *土壤学报*, 1991, 28(1):7—13. Zhao X Q, Lu R K. Effect of organic manures on soil phosphorus absorption (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(1):7—13
- [27] 徐祖祥. 长期定位施肥对水稻、小麦产量和土壤养分的影响. *浙江农业学报*, 2009, 21(5):485—489. Xu Z X. Effect of long-term located fertilization on the yields of rice and wheat and soil nutrient (In Chinese). *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2009, 21(5):485—489
- [28] 周晓芬, 张彦才, 李巧云. 有机肥料对土壤钾素供应能力及其特点研究. *中国生态农业学报*, 2003, 11(2):61—63. Zhou X F, Zhang Y C, Li Q Y. The K supplying capability and characteristics of organ fertilizers to soil (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(2):61—63
- [29] 罗霄, 李忠武, 叶芳毅, 等. 基于 PI 指数模型的南方典型红壤丘陵稻田土壤肥力评价. *地理学报*, 2011, 31(4):495—499. Luo X, Li Z W, Ye F Y, et al. Paddy soil fertility assessment in typical red soil hilly region of southern China based on PI model (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(4):495—499
- [30] 王灿, 王德建, 孙瑞娟, 等. 长期不同施肥方式下土壤酶活性与肥力因素的相关性. *生态环境*, 2008, 17(2):688—692. Wang C, Wang D J, Sun R J, et al. The relationship between soil enzyme activities and soil nutrients by long-term fertilizer experiments (In Chinese). *Ecology and Environment*, 2008, 17(2):688—692
- [31] 侯红乾, 冀建华, 刘光荣, 等. 南方红壤区稻—稻连作体系下氮肥减施模式研究. *中国水稻科学*, 2012, 26(5):555—562. Hou H Q, Ji J H, Liu G R, et al. On the model of nitrogen-reduction in double-rice cropping region in red soil area of south China (In Chinese). *Chinese Journal of Rice Science*, 2012, 26(5):555—562
- [32] 阿拉腾希胡日. 典型红壤区农田养分平衡估算及环境影响——以祁阳县为例. 北京: 中国农业科学院, 2010. A la teng X H R. Nutrient balance estimates and environmental impact in typical red soil region in Qiyang County (In Chinese). Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010
- [33] 王月立, 张翠翠, 马强, 等. 不同施肥处理对潮棕壤剖面磷素累积与分布的影响. *土壤学报*, 2013, 50(4):135—142. Wang Y L, Zhang C C, Ma Q, et al. Effect of fertilization on accumulation and profile distribution of phosphorus in aquatic brown soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4):135—142
- [34] 唐旭, 陈义, 吴春艳, 等. 大麦长期肥料效率和土壤养分平衡. *作物学报*, 2013, 39(4):665—672. Tang X, Chen Y, Wu C Y, et al. Fertilizer efficiency and soil apparent nutrient balance for Barley under long-term fertilization (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(4):665—672
- [35] 廖育林, 郑圣先, 聂军, 等. 不同类型生态区稻-稻种植制度中钾肥效应及钾素平衡研究. *土壤通报*, 2008, 39(3):612—618. Liao Y L, Zheng S X, Nie J, et al. Potassium efficiency and balance of the rice-rice cropping system in different types of ecosystems (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3):612—618

## EFFECTS OF LONG-TERM COMBINED APPLICATION OF ORGANIC AND CHEMICAL FERTILIZERS ON RICE YIELD AND SOIL AVAILABLE NUTRIENTS

Gao Jusheng<sup>1,2</sup> Huang Jing<sup>1,2,3†</sup> Dong Chunhua<sup>1,2</sup> Xu Minggang<sup>1</sup> Zeng Xibai<sup>4</sup> Wen Shilin<sup>1,2</sup>

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer/Key Laboratory of Nonpoint Source Pollution Control, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

(2 Red Soil Experimental Station of CAAS in Hengyang/National Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Qiyang, Qiyang, Hunan 426182, China)

(3 College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

(4 Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract** A long-term fertilization field experiment on rice has been going on since 1982 in the Red Soil Experiment Station of CAAS to investigate effects of combined application of organic and chemical fertilizers on crop yield and contents of soil available nitrogen, phosphorus and potassium. Results show that higher fertilization rate raised crop yield. Long-term application of organic and chemical fertilizer (NPKM) could increase the rice yield, and enrich the soil fertility. If long-term application chemical fertilizer (NPK), the rice production will reduce. In treatments the same in N application rate, amendment of phosphate fertilizer was higher than amendment of potash fertilizer, in yield-raising effect and it was particularly obvious with early rice. No significant difference was observed between treatments receiving for long organic fertilizer only and chemical fertilizer only in yield-raising effect. With the experiment going on and on, differences between treatments got more and more significant. In all the treatments, alkalisable-N increasing rates showed a similar trend, low-high-

low. Organic fertilizer was better than chemical fertilizer in raising alkalisable-N content ( $p < 0.05$ ). Accumulation of soil available phosphorus was mainly related to application of chemical phosphate fertilizer. In terms of the mean content of soil available P of the years, the treatments displayed an order of NPKM, NPM and PKM  $>$  NPK  $>$  M and NKM ( $p < 0.01$ ). Soil available K increased the fastest in Treatments NPKM, NKM and PKM and the slowest in Treatment NPK. With increased N and P fertilizers application rate, surplus of nitrogen and phosphorus appeared in soil. However, Treatment NPKM was better than all the others in mitigating the surplus. Potassium deficit was observed in all the treatments, suggesting that to maintain the basic balance of soil potassium, at least  $200 \text{ kg hm}^{-2}$  of  $\text{K}_2\text{O}$  should be supplemented in red soil paddy fields annually.

**Key words** Long-term fertilization; Combined application of organic and inorganic fertilizers; Rice yield; Soil available nutrient; Soil nutrient balance

(责任编辑: 卢 萍)