

# 长期施肥对双季稻田钾素吸收和水溶性钾动态变化的影响

鲁艳红 廖育林 谢 坚 杨曾平 聂 军\*

(湖南省土壤肥料研究所 / 农业部湖南耕地保育科学观测实验站, 长沙 410125)

**摘要:** 以红壤双季稻区长期定位施肥试验(1981~2012年)为基础,研究了长期施用化肥和稻草对双季水稻集约化种植下3年期间(2010~2012)水稻产量、作物吸钾量、田面水和不同土层渗漏水中钾动态变化及钾素平衡的影响。结果表明,施钾肥能增加水稻稻谷和稻草的产量;水稻从土壤中的吸钾量随钾肥施用量的增加而显著增加,年平均吸钾量  $NPK+RS>NPK>NP+RS>CK>NP$ ;各处理田面水的钾浓度差异主要表现在施肥后的前40天,早、晚稻中田面水的钾浓度随施肥时间的延长逐渐下降,施肥后第40天,各处理田面水的钾浓度高低差异不大;三个施钾处理不同深度土层的渗漏水钾浓度均随施肥时间的延长而逐渐下降,而不施钾肥的NP和CK两处理随施肥时间的延长变化幅度较小;在水稻施肥后的70天期间,三个施钾处理随着土层深度的增加,渗漏水钾浓度呈下降的变化趋势;早、晚稻三个土层各处理不同时间渗漏水平均钾浓度的高低顺序均为  $NPK+RS>NPK>NP+RS>CK>NP$ ;除  $NPK+RS$  处理处于钾盈余外,其它4个处理均处于钾素亏缺状态。试验结果说明,在施氮磷肥的基础上,配施钾肥和稻草还田不仅能提高水稻高产、稳产的能力,而且对促进钾素养分循环、保持农田钾素平衡、提高土壤钾素肥力有重要的作用。

**关键词:** 长期施肥;红壤水稻土;产量;钾素运移;钾素平衡



钾是植物生长所必需的大量营养元素,在农业生产中具有不可替代的重要作用。众所周知,土壤水溶性  $K^+$  是土壤钾库中最活跃的组分,  $K^+$  在固液相间的转化速率及数量取决于  $K^+$  与土壤固相表面的作用方式,并决定着肥料  $K^+$  进入土壤后的去向和土壤固  $K^+$  能力。

钾在土壤-植物体系中不形成有机态,几乎不进入大气。钾随水的迁移流动比磷强,比氮弱,循环途径也比氮少<sup>[1]</sup>。氮和磷进入水系循环,有两个消极的问题,不仅养分大量流失,而且造成水体的污染;相反,钾不会造成水体的富营养化,一旦钾从土壤溶液转入水系循环时,大部分将流失。土壤溶液的  $K^+$  或被淋洗,或被植物和土壤吸收,有许多因子影响着土壤中  $K^+$  的移动,其中包括土壤阳离子交换量、土壤 pH、施钾的方法和施钾量及植物对  $K^+$  的吸收。施入的钾肥或原有的土壤溶液钾移动和淋失的数量与土壤质地,降雨强度、持续时间和频率,钾肥用量和施用方法,地面覆盖情况,土壤 pH,钾肥品种和其它一起施用的肥料品种等影响因素有关<sup>[2]</sup>。

有时在作物对钾肥反应与土壤测试值之间的相关性不好,可归因于作物从底土吸收了钾。在河南封丘土壤上进

行的定位试验表明,土壤虽含钾不高,但不施钾处理经过3年种植后,钾肥效果仍不明显,看来与耕层以下土壤的供钾有关<sup>[3]</sup>。

在农业生态系统中,钾的平衡是指钾的投入与支出之间的差别状况。大量试验结果表明,在目前施肥情况下,农田三要素的平衡中,钾素一般处于亏缺状态,有的还严重亏缺。由于钾素收支不平衡,土壤钾的消耗加剧,因此缺钾矛盾日益暴露<sup>[4]</sup>。

本文就红壤双季稻种植制度下,施用钾肥和稻草还田对水稻产量、作物吸钾量、田面水和不同土层渗漏水中钾动态变化及钾素平衡的影响进行了初步探讨,对了解钾素养分在土壤固相表面的作用机理及评价土壤保持、供应钾素能力有重要的理论与实践意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点概况

长期肥料试验点位于湖南省望城县黄金乡(北纬  $28^{\circ}37'$ , 东经  $112^{\circ}80'$ , 海拔高度为 100 米)。试验于 1981

项目来源:本研究由国际植物营养研究所(IPNI)项目资助。

作者简介:鲁艳红(1974-),女,湖北武穴人,副研究员,博士,主要从事植物营养与作物施肥研究。

\*通讯作者:聂军(1972-),男,湖南沅江人,研究员,博士,主要从事土壤与植物营养研究。

年开始, 1981~2012 年的年均降雨量为 1393 毫米, 年平均气温 18℃, 年平均无霜期大约为 300 天。供试土壤为第四纪红土发育的水稻土(粉质轻粘土, 土壤分类为普通筒育水耕人为土)。试验开始前 0~15 厘米土壤基本性状为: pH 值 6.6, 土壤有机质 34.7 克/公斤, 全 N 2.05 克/公斤, 碱解 N 151.0 毫克/公斤, 全 P 0.66 克/公斤, 有效 P 10.2 毫克/公斤, 全 K 14.2 克/公斤, 交换性 K 62.3 毫克/公斤。

## 1.2 试验方法

该长期肥料试验共设 9 个处理, 在本研究中选择了 5 个处理: (1)CK(不施任何肥料); (2)NP(施氮、磷化肥); (3)NPK(施氮、磷、钾化肥); (4)NP+RS(施氮、磷化肥 + 稻草); (5)NPK+RS(施氮、磷、钾化肥 + 稻草)。氮、磷和钾化肥品种分别是尿素、过磷酸钙和氯化钾。在 1981~2012 年期间, 氮肥按早稻 10 公斤 N/亩和晚稻 12 公斤 N/亩施入; 磷肥按早、晚稻每季 2.58 公斤 P/亩施入; 钾肥按早、晚稻每季 6.64 公斤 K/亩施入; 稻草还田量按早、晚稻每季干稻草 140 公斤/亩施入。全部的磷肥、钾肥和稻草在插秧前 1 天施入, 氮肥分两次施入: 50% 在插秧前 1 天施入, 50% 在分蘖始期施入。

于 2010 年试验前耕作准备期的干土状态下, 利用螺旋钻钻孔(孔径 3.5 厘米, 孔深分别为 30 厘米、60 厘米和 90 厘米), 再将自行研制的 PVC 取水管分别垂直埋入并压实复原土壤, 用以提取不同深度土层(20~30 厘米、50~60 厘米和 80~90 厘米)的渗漏水。2010~2012 年连续 3 年于早、晚稻基肥施入后的第 1 天、第 3 天、第 7 天、第 14 天、第 29 天、第 40 天和第 70 天采集渗漏水水样, 同时采集田面水水样。

## 1.3 样品测试与数据分析

每小区单打单收称计实产, 多点混合采集植株样品;



水样和植株样品中钾素含量采用火焰光度计法测定<sup>[5]</sup>。

K 素表观输入-输出平衡计算公式:  $K_{ap} = K_{inp} - (K_{up} - K_{rec})$ , 式中:  $K_{ap}$  是表观钾素平衡(公斤/亩·年),  $K_{inp}$  是通过化肥、稻草、秧苗、雨水和灌溉水输入的钾素量(公斤/亩·年),  $K_{up}$  是稻草和稻谷吸收的钾素量(公斤/亩·年),  $K_{rec}$  是通过稻桩和根茬残留循环的钾素量(公斤/亩·年)。

稻草、秧苗、雨水和灌溉水输入的钾素量为 2010~2012 年试验期间 3 年测定的平均值。渗漏水和田面水中的钾素浓度也为试验期间 3 年测定的平均值。

数据处理及分析采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 7.5 等数据处理系统。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期施用化肥和稻草对水稻产量和吸钾量的影响

研究期间早晚稻稻谷和稻草的平均产量及钾素吸收量见表 1。施钾肥能增加水稻稻谷和稻草的产量, 早、晚稻稻谷的产量高低顺序均为  $NPK+RS > NPK > NP+RS > NP > CK$ 。施化肥钾的 NPK 和 NPK+RS 处理比相应

表 1 长期施钾对水稻产量和水稻 K 吸收量的影响

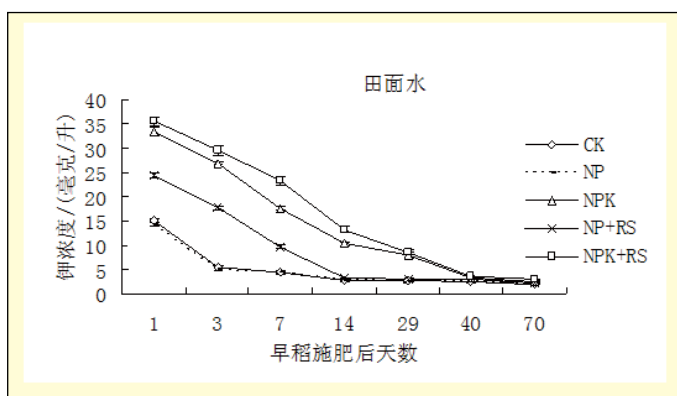
(公斤/亩)

处 理	早 稻				晚 稻			
	稻谷产量	稻草产量	稻谷吸钾量	稻草吸钾量	稻谷产量	稻草产量	稻谷吸钾量	稻草吸钾量
CK	200eE	194cC	0.42cC	2.98dD	247eE	217cC	0.51dD	3.23dD
NP	327dD	243bBC	1.01bB	2.21eE	339dD	256bcC	0.87cC	2.28eE
NPK	405bB	316aA	1.15aA	7.56bB	405bB	350aAB	1.12aAB	7.98bB
NP+RS	367cC	269abAB	1.07bAB	4.81cC	389cC	294bBC	1.02bB	5.23cC
NPK+RS	439aA	305aAB	1.16aA	8.56aA	471aA	379aA	1.19aA	9.00aA

注: 同列数据后不同小写和大写字母分别表示差异达 5% 和 1% 显著性水平。

的 NP 和 NP+RS 处理早稻稻谷产量分别增加 23.88% 和 19.60%，稻草产量分别增加 29.86% 和 13.12%；晚稻稻谷分别增加 19.45% 和 20.89%，稻草产量分别增加 36.72% 和 28.80%。水稻从土壤中吸收钾的量随钾肥施用量的增加而显著增加。不施钾肥的 NP 处理钾素吸收量最低 (6.36 公斤/亩·年)，其次是不施肥的对照处理 (7.14 公斤/亩·年)。NPK+RS 和 NP+RS 处理中籽粒和稻草的平均钾素吸收量比相对应的 NPK 和 NP 处理的高，施稻草能够满足水稻钾素的需要，同时提高水稻的产量。另外，稻草为水稻也提供了 N、P 养分和有机质等养分。

## 2.2 长期施用化肥和稻草对田面水钾浓度的影响



46.3%、15.3% 和 10.8%；施肥后第 70 天早稻分别增加 48.5%、32.1% 和 12.8%，晚稻分别增加 19.9%、12.4% 和 6.5%。钾素输入量的不同是造成各处理间田面水钾浓度差异的主要原因。

## 2.3 长期施用化肥和稻草对不同深度渗漏水钾浓度的影响

从图 2 可以看出，三个施钾处理不同深度土层的渗漏水钾浓度均随施肥时间的延长而逐渐下降，而不施钾肥的 NP 和 CK 两处理随施肥时间的延长变化幅度较小。在水稻施肥后的 70 天期间，20-30 厘米土层的渗漏水钾浓度 NPK+RS 处理早稻在 5.26~17.63 毫克/升之间变化，

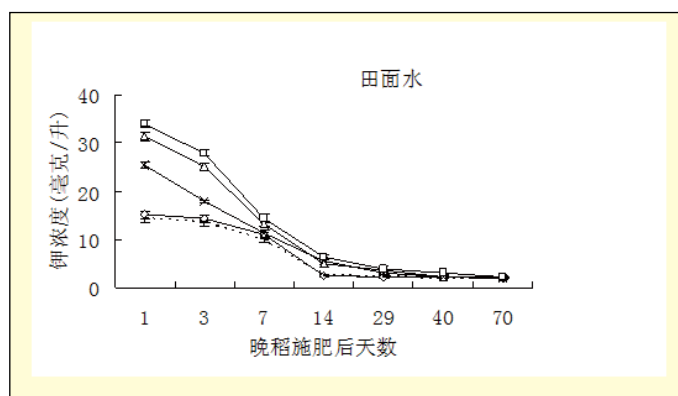


图 1 施肥处理水稻生长期田面水溶液钾浓度

从图 1 中可以看出，各处理田面水的钾浓度差异主要表现在施肥后的前 40 天，早、晚稻中田面水的钾浓度随施肥时间的延长而逐渐下降，施肥后第 40 天，各处理田面水的钾浓度高低差异不大，早稻在 2.34~3.43 毫克/升之间，晚稻 2.03~2.97 毫克/升之间。早、晚稻各处理不同时间田面水钾浓度的高低顺序为 NPK+RS>NPK>NP+RS>CK>NP。与不施钾肥的 NP 处理中田面水钾浓度相比，施肥后第 1 天早稻 NPK+RS、NPK 和 NP+RS 处理分别增加 148.7%、133.6% 和 70.0%，晚稻分别增加 137.7%、119.9% 和 77.9%；施肥后第 3 天早稻分别增加 493.2%、441.0% 和 255.7%，晚稻分别增加 108.6%、86.1% 和 34.0%；施肥后第 7 天早稻分别增加 445.8%、314.1% 和 127.0%，晚稻分别增加 45.3%、34.5% 和 14.3%；施肥后第 14 天早稻分别增加 391.8%、280.7% 和 21.5%，晚稻分别增加 154.7%、105.7% 和 129.8%；施肥后第 29 天早稻分别增加 244.9%、220.8% 和 27.3%，晚稻分别增加 82.6%、67.0% 和 43.1%；施肥后第 40 天早稻分别增加 46.6%、38.5% 和 26.5%，晚稻分别增加

晚稻在 4.81~15.89 毫克/升之间变化；NPK 处理早稻在 3.25~9.65 毫克/升之间变化，晚稻在 3.93~15.04 毫克/升之间变化；NP+RS 处理早稻在 2.65~7.45 毫克/升之间变化，晚稻在 2.45~8.64 毫克/升之间变化；NP 处理早稻在 0.02~0.32 毫克/升之间变化，晚稻在 0.36~0.93 毫克/升之间变化；CK 处理早稻在 0.02~0.35 毫克/升之间变化，晚稻在 0.41~0.85 毫克/升之间变化。在水稻施肥后的 70 天期间，50~60 cm 土层的渗漏水钾浓度 NPK+RS 处理早稻在 4.29~12.33 毫克/升之间变化，晚稻在 4.31~12.12 毫克/升之间变化；NPK 处理早稻在 2.93~7.15 毫克/升之间变化，晚稻在 2.37~8.68 毫克/升之间变化；NP+RS 处理早稻在 1.63~4.72 毫克/升之间变化，晚稻在 2.08~7.85 毫克/升之间变化；NP 处理早稻在 0.20~1.19 毫克/升之间变化，晚稻在 0.47~1.63 毫克/升之间变化；CK 处理早稻在 0.18~1.40 毫克/升之间变化，晚稻在 0.52~1.60 毫克/升之间变化。在水稻施肥后的 70 天期间，80~90 cm 土层的渗漏水钾浓度 NPK+RS 处理早稻在 3.44~7.75 毫克/升之间变化，晚稻在 3.30~6.91 毫克/升之间变



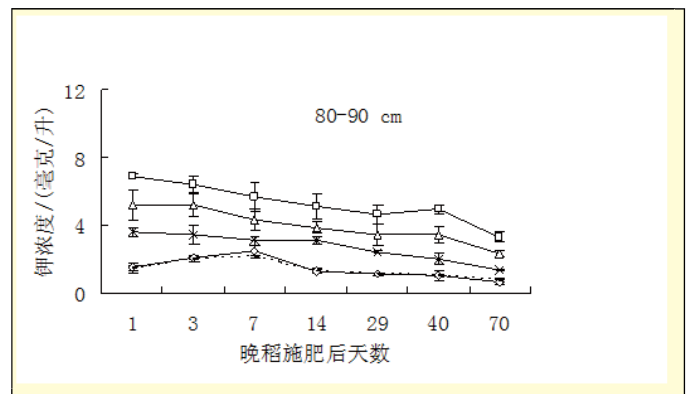
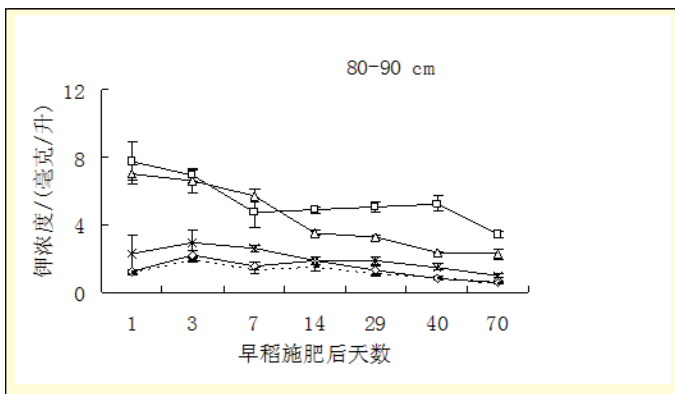
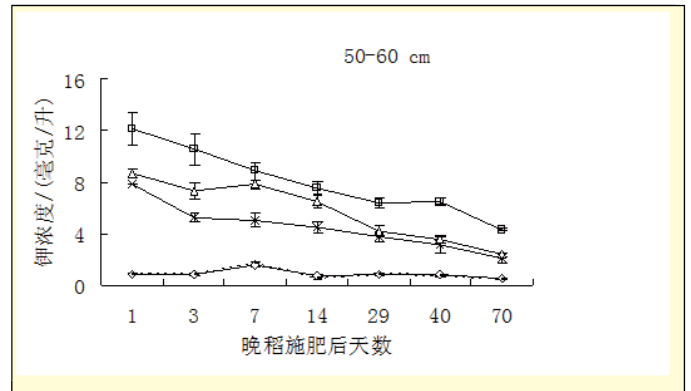
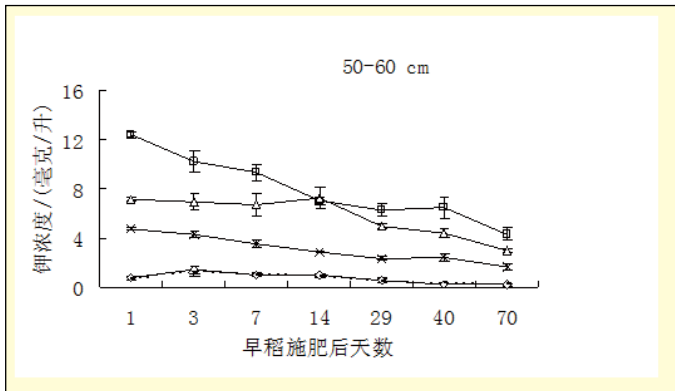
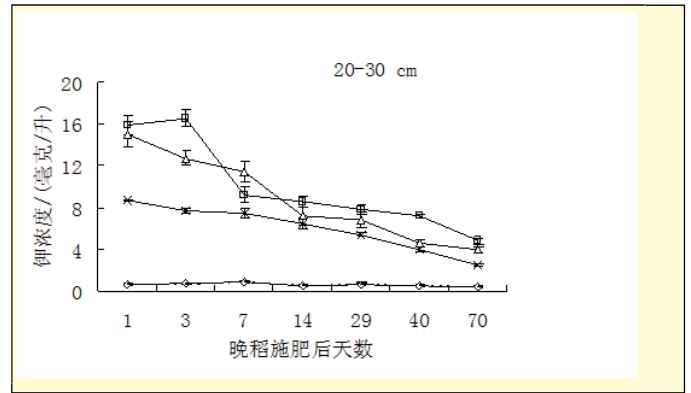
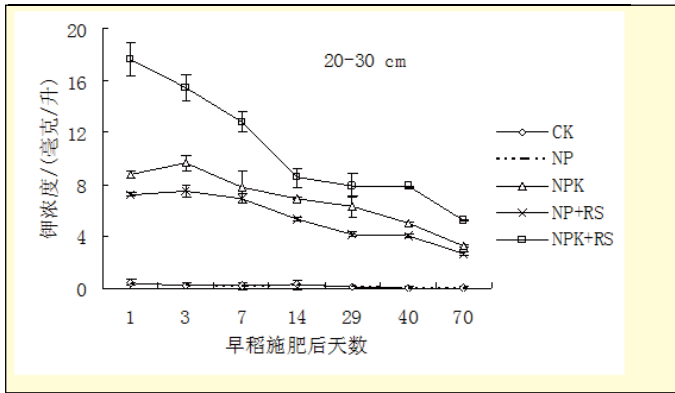


图2 施肥处理水稻生长期间不同土层水溶液钾浓度



化；NPK处理早稻在2.27~7.04毫克/升之间变化，晚稻在2.30~5.18毫克/升之间变化；NP+RS处理早稻在1.00~2.90毫克/升之间变化，晚稻在1.34~3.62毫克/升之间变化；NP处理早稻在0.52~1.90毫克/升之间变化，晚稻在0.70~2.16毫克/升之间变化；CK处理早稻在0.57~2.17毫克/升之间变化，晚稻在0.68~2.51毫克/升之间变化。水稻生育期间，三个施钾处理随着土层深度的增加，渗漏水钾浓度呈下降的变化趋势。早、晚稻三个土层各处理不同时间渗漏水平均钾浓度的高低顺序均为：NPK+RS>NPK>NP+RS>CK>NP。

## 2.4 长期施用化肥和稻草对钾素平衡的影响

3年平均每年通过化肥、稻草、秧苗、灌溉水和雨水输入K量分别为13.3、7.3、0.2、1.0和0.4公斤/亩·年(表2)。水稻年均吸钾量大小顺序为NPK+RS>NPK>NP+RS>CK>NP。通过稻桩和根茬残留循环的钾素量大小顺序与水稻年吸钾量一致。在NPK+RS处理中通过施化肥钾和稻草增加的钾素超过了水稻植株移出的钾素,处于正钾素平衡4.0公斤/亩·年,其它处理均处于负钾素平衡,CK处理的负钾素平衡最低(4.9公斤/亩·年),依次为NP、NP+RS和NPK处理。水稻植株吸收的钾主要保留在稻草中(表1),稻草的循环使用能改变钾素的平衡。

晚稻中田面水的钾浓度随施肥时间的延长而逐渐下降,施肥后第40天,各处理的钾浓度高低差异不大,早稻在2.34~3.43毫克/升之间,晚稻2.03~2.97毫克/升之间。地表径流发生的钾素流失风险主要出现在施肥后的40天内。各处理中田面水钾浓度差异会导致相同径流量而损失的钾量存在差异,钾素输入量的不同是造成各处理间田面水钾浓度差异的主要原因。

从降水和灌溉所带入的钾量与淋洗和径流损失平衡的状况,有人认为,两者是基本平衡的,可是当淋洗损失很大时,则是亏缺的<sup>[8]</sup>。本试验中三个施钾处理不同深度土层的渗漏水钾浓度均随施肥时间的延长而逐渐下降,而不施钾肥的NP和CK两处理随施肥时间的延长变化幅度较

表2 长期施用化肥和稻草不同处理的年表观K平衡 (公斤/亩)

处理	年输入钾量					年吸钾量		
	化肥	稻草	秧苗	灌溉水	雨水	吸收	循环*	表观K平衡
CK	0	0	0.2	1.0	0.4	7.1	0.6	-4.9
NP	0	0	0.2	1.0	0.4	6.7	0.5	-4.6
NPK	13.3	0	0.2	1.0	0.4	17.8	1.6	-1.4
NP+RS	0	7.3	0.2	1.0	0.4	12.1	0.9	-2.3
NPK+RS	13.3	7.3	0.2	1.0	0.4	19.9	1.8	4.0

\*通过稻桩和根茬残留循环的钾素养分

## 3 结论与讨论

施钾肥能增加水稻稻谷和稻草的产量,施化肥钾的NPK和NPK+RS处理比相应的NP和NP+RS处理早稻稻谷产量分别增加23.88%和19.60%,晚稻稻谷产量分别增加19.45%和20.89%;施稻草的NP+RS和NPK+RS处理比相应的NP和NPK处理早稻稻谷产量分别增加12.45%和8.57%,晚稻稻谷产量分别增加14.73%和16.12%。该结果比本试验田1981-2007年的平均结果增加的幅度大,这可能与高产水稻品种的推广和长期施用钾肥及植物耗钾造成处理间土壤钾素含量差异的逐年增大有关<sup>[4, 6-7]</sup>。水稻从土壤中的吸钾量随钾肥施用量的增加而显著增加,年平均吸钾量顺序为NPK+RS>NPK>NP+RS>CK>NP。

土壤溶液中的钾以阳离子形态存在,当被土壤胶体吸附后,不易被淋失。一般说来,溶解在表面径流水中的K的损失较淋洗损失低得多。本试验的结果表明,各处理田面水的钾浓度差异主要表现在施肥后的前40天,早、

小。在水稻施肥后的70天期间,三个施钾处理随着土层深度的增加,渗漏水钾浓度呈下降的变化趋势。早、晚稻三个土层各处理不同时间渗漏水平均钾浓度的高低顺序均为:NPK+RS>NPK>NP+RS>CK>NP。

15年定位试验的研究结果表明,在红壤稻田粮食3熟制农田中,每茬作物施K<sub>2</sub>O 4.3公斤/亩后,或每茬施1000公斤/亩有机肥及150公斤/亩稻草均不能维持农田钾素的平衡,推荐有机肥加施K<sub>2</sub>O 7.5公斤/亩处理为红壤稻田粮食轮作制中既能获得作物高产又能提高土壤钾素肥力的最佳施肥处理,每茬施K<sub>2</sub>O 9.6公斤/亩是单施化肥条件下的推荐施钾量<sup>[9]</sup>。本试验的结果也表明,除NPK+RS处理处于钾盈余外,其它4个处理均处于钾素亏缺状态。

综上所述,在目前水稻种植条件下,坚持有机肥和化学钾肥配合施用的原则,能促进水稻高产和作物对钾素养分的吸收,同时促进了钾素养分循环,保持农田钾素平衡,提高土壤钾素肥力。





## 参考文献

- [1] Alfaro M A, Jarvis S C, Gregory P J. Factors affecting potassium leaching in different soils[J]. *Soil Use and Management*, 2004, 20(2): 182-189.
- [2] 周健民, 范钦桢, 谢建昌. 农田养分平衡与管理[M]. 南京: 河海大学出版社, 2000.
- [3] 范钦桢. 铵对土壤钾素释放、固定影响的研究[J]. *土壤学报*, 1993, 30(3): 245-252.
- [4] 廖育林, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 长期施钾对双季稻种植制度下红壤水稻土水稻产量及土壤钾素状况的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1373-1380.
- [5] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [6] 廖育林, 郑圣先, 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[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(10): 3541-3550.
- [7] 廖育林, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 长期施用化肥和稻草对红壤性水稻土钾素固定的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 70-73, 95.
- [8] Dobermann A, Cassman K G, Stacuz P C, et al. Fertilizer inputs, nutrient balance, and soil nutrient supplying power in intensive, irrigated rice systems II Effective soil K supplying capacity [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1996, 46: 11-21.
- [9] 姜丽娜, 詹长庚, 符建荣, 等. 长期施肥对钾肥效应及农田钾平衡和土壤钾肥力的影响[C]. 中国土壤学会. 迈向 21 世纪的土壤科学, 北京: 中国环境科学出版社, 1999.