

# 长期施用钾肥和稻草对红壤双季稻田土壤供钾能力的影响\*

廖育林<sup>1, 2</sup> 鲁艳红<sup>1, 2</sup> 谢坚<sup>1, 2</sup> 聂军<sup>1, 2†</sup> 杨曾平<sup>1, 2</sup> 周兴<sup>1</sup>

(1 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125)

(2 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稻集约化种植下水稻产量、作物吸钾量和土壤供钾能力的影响。结果表明,施钾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,年平均吸钾量顺序为NPK+RS(施氮磷钾化肥+稻草)>NPK(施氮磷钾化肥)>NP+RS(施氮磷化肥+稻草)>CK(不施任何肥料)>NP(施氮磷化肥);长期不施用或施用不足量钾肥(CK、NP、NP+RS)会导致耕层土壤速效钾、缓效钾和全钾数量的亏缺。长期施用钾肥和稻草不仅有利于土壤伊利石含量的增加,而且有利于晶格不良伊利石向晶格良好伊利石的方向发展;施钾能增加土壤黏粒中的游离伊利石和伊利石的含量,长期施用钾肥和稻草会使土壤黏粒中的蛭石向伊利石转化。土壤钾素的容量-强度(Q/I)曲线参数可以解释长期施用钾肥和稻草处理土壤供钾能力强是由于这些处理的活性钾(-ΔK<sup>o</sup>)量高、专性吸附钾位(K<sub>x</sub>)多、有效钾强度(AR<sub>e</sub><sup>K</sup>)强、紧吸持K<sup>+</sup>量多,而潜在缓冲容量(PBC<sup>K</sup>)、吉布斯自由能(-ΔG)和阳离子交换系数(K<sub>c</sub>)较长期不施钾肥处理低。综上,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,而且对促进水稻对钾的吸收量、增强土壤的钾吸持能力、保持农田钾素平衡以及提高土壤供钾能力有重要作用。

**关键词** 长期施钾;红壤水稻土;产量;含钾黏土矿物;供钾能力

**中图分类号** S143.3; S153.6 **文献标识码** A

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。我国是一个钾肥资源相对匮乏的国家,土壤钾素供应不足已严重制约农业生产的发展<sup>[1-3]</sup>。因此,有关土壤供钾能力评价及长期施肥对土壤供钾能力影响的研究仍将是我国土壤肥料工作面临的一项长期而艰巨的任务。

土壤中的钾以不同的形态存在,土壤供钾能力主要由土壤中有效钾(水溶性钾和交换态钾)含量以及非交换态钾和矿物钾向有效钾转化速率及数

量等因素共同决定。有效钾一般情况下是当季作物吸钾的主要来源,因此,有效钾含量通常作为表征土壤钾素供应状况的重要指标。非交换性钾(或缓效钾)包括含钾矿物(如黑云母)晶格内的钾和含钾矿物(如蛭石等2:1型层状硅酸盐矿物)所固定的钾,主要靠库仑引力固持在次生矿物层间,具有较为复杂的结构,在一定条件下可以转化为交换性钾或土壤溶液钾。研究表明土壤中各形态钾可以相互转化,其转化的方向、程度和速率受诸多因素

\* 国家科技支撑计划项目(2013BAD07B11)、公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203013-06)和湖南省自然科学基金项目(2016JJ6063)资助 Supported by the National Key Technology R&D Program of China (No. 2013BAD07B11), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (No. 201203013-06) and the Natural Science Foundation of Hunan Province of China (No. 2016JJ6063)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: junnie@foxmail.com

作者简介:廖育林(1975—),男,湖南新化人,博士,副研究员,主要从事植物营养与施肥原理方面的工作。E-mail: ylliao2006@126.com

收稿日期:2016-07-20;收到修改稿日期:2016-09-17;优先数字出版日期(www.cnki.net):2016-10-10



影响<sup>[4-6]</sup>，其中矿物组成及其数量对土壤供钾能力或供钾潜力有至关重要的影响<sup>[6-9]</sup>。

关于土壤供钾能力的评价，国内外开展了很多研究<sup>[4-7]</sup>。钾对作物的有效性不仅与可利用的钾数量有关，且受土壤其他伴随离子的影响。因此，以物理化学为基础，用钾的活度比、钾位、强度因素、容量因素和位势缓冲容量等热力学参数及以钾的容量因子对强度因子作图的Q/I曲线已被广泛地应用于土壤供钾能力的评价<sup>[8]</sup>。

在已有研究中，对于水稻连作条件下土壤钾素形态变化及有效性转化、作物根系与土壤转化的相互作用过程以及有机和无机肥源钾在氧化还原作用下与土壤间的相互作用等机理尚未完全清楚。因而，开展水稻长期连作条件下土壤钾素形态变化和土壤含钾黏土矿物变化特征的研究，对于充分利用土壤自身供钾能力、合理配施有机和无机肥源钾来满足水稻对钾的需求具有重要意义<sup>[10-12]</sup>。本文主要研究红壤双季稻种植制度下长期施用钾肥和稻草还田对水稻产量、作物吸钾量、土壤钾素形态变化以及土壤主要黏土矿物的组成、数量和钾素容量与强度的影响，并探讨施用钾肥和稻草条件下土壤钾素形态变化特征、含钾黏土矿物转化与土壤中钾离子(K<sup>+</sup>)的吸附与解吸特性，以期对红壤双季稻田土壤的合理和有效施钾提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验点概况

农业部湖南耕地保育科学观测实验站双季稻长期肥料试验点位于湖南省望城县黄金乡(112°80' E, 28°37' N, 海拔高度为100 m)。试验于1981年开始，1981—2012年的年均降雨量为1 393 mm，年平均气温18℃，年平均无霜期大约为300 d。供试土壤为第四纪红土发育的水稻土(粉质轻黏土，土壤分类为普通筒育水耕人为土)。试验开始前耕层土壤基本性状为：pH 6.6，土壤有机质34.7 g kg<sup>-1</sup>，全氮 2.05 g kg<sup>-1</sup>，碱解氮 151.0 mg kg<sup>-1</sup>，全磷 0.66 g kg<sup>-1</sup>，有效磷 10.2 mg kg<sup>-1</sup>，全钾 14.2 g kg<sup>-1</sup>，速效钾 62.3 mg kg<sup>-1</sup>，缓效钾 173.8 mg kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

该长期肥料试验共设9个处理，3次重复，27个小区，为区组排列。每个小区面积为66.7 m<sup>2</sup>，小区之间用30 cm宽水泥埂隔开，区组之间的排水沟

宽度为50 cm，区组之间用水泥埂隔开，以避免灌溉水串灌和处理之间的交叉污染。研究选择了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150 kg hm<sup>-2</sup>(以N计)和晚稻180 kg hm<sup>-2</sup>(以N计)施入；磷肥按早、晚稻每季38.7 kg hm<sup>-2</sup>(以P计)施入；钾肥按早、晚稻每季99.6 kg hm<sup>-2</sup>(以K计)施入；稻草还田量按早、晚稻每季干稻草2.1 t hm<sup>-2</sup>施入(折合养分N 21.4 kg hm<sup>-2</sup>、P 2.8 kg hm<sup>-2</sup>和K 54.6 kg hm<sup>-2</sup>)。磷肥、钾肥和稻草在插秧前1 d施用，并混入土壤。氮肥分两次施入：50%的氮在插秧前1 d施入，余下50%的氮在分蘖初期施入。供试水稻品种(组合)早稻为常规稻，晚稻为杂交稻(每3~5年换一批当地主推早晚稻水稻品种)。早稻于4月底移栽，7月中旬收获；晚稻于7月中下旬移栽，10月下旬收获。秧苗生长期为30~35 d，早稻每穴栽插4~5株秧苗，晚稻每穴栽插1~2株秧苗，株行距20 cm×20 cm，冬季休闲，不进行灌溉和栽培作物，其他的田间管理措施与当地农民的大田管理相同。

### 1.3 样品采集与测试方法

1981—2012年期间，早、晚稻每小区单打单收称计实产，多点混合采集植株样品；植株样品中钾素含量采用火焰光度计法测定<sup>[13]</sup>。

土壤样品于2012年11月2日(晚稻收获后1周)，用具有刻度的管形取土器分别采集CK、NP、NPK、NP+RS和NPK+RS处理小区0~15 cm耕层土样，运回室内后，置于室温下风干，磨细过筛，贮存于密封广口瓶内备用。土壤全钾用NaOH熔融，火焰光度计法测定<sup>[13]</sup>；土壤缓效钾用1 mol L<sup>-1</sup>热HNO<sub>3</sub>浸提，火焰光度计法测定<sup>[13]</sup>；土壤速效钾用1 mol L<sup>-1</sup>中性NH<sub>4</sub>OAc浸提，火焰光度计法测定<sup>[13]</sup>；土壤容重采用自制的环刀(高15 cm、内径10 cm)进行测定，其他理化性状均采用常规方法测定<sup>[13]</sup>。

黏土矿物组成采用定向黏土制备的经典X-射线衍射法(XRD)<sup>[14]</sup>和数值图解法测定<sup>[15]</sup>。小于5 μm黏土的提取用吸管法分离，按X-射线衍射法分4项对提取的小于5 μm黏土进行载玻片样品制备。即：(1) 镁饱和甘油处理定向样品(EG

片)制备:称取1 g左右小于5  $\mu\text{m}$ 黏土样品放入加有2~3滴5%甘油的0.5 mol L<sup>-1</sup> MgCl<sub>2</sub>溶液中,用球状玻璃棒充分搅拌,称取0.05 g镁饱和甘油处理试样加入2~3 ml纯水,充分搅拌使其分散,吸出1.5 ml悬液,在洁净的平面载玻片上均匀铺开,静置晾干,制备成定向薄膜试样,做好的载玻片置于干燥器中保留24 h后待测;(2)钾饱和处理自然风干定向样品(K片)制备:在钾饱和试验处理中,称取5 g左右小于5  $\mu\text{m}$ 黏土样品放入1 mol L<sup>-1</sup> KCl溶液中,分别振荡和离心5 min,重复操作该步骤5次,然后用蒸馏水漂洗5次除去过量KCl,称取0.05 g钾饱和处理试样加入2~3 ml纯水,按(1)方法制成定向薄膜试样,自然风干约24 h待检测;(3)钾饱和处理后300℃处理定向样品(K<sub>300</sub>片)制备:将(2)方法中制成的样品放入马弗炉中缓慢加热至300℃恒温2 h,然后冷却至60℃左右取出,贮于盛有无水氯化钙的干燥器中待检测;(4)钾饱和处理后550℃处理定向样品(K<sub>550</sub>片)制备:把(2)方法中制成的样品放入马弗炉中缓慢加热至550℃恒温2 h,其余步骤同(3)方法;每项分析都要制备相应的样品,具体的制样方法详见用X射线衍射分析鉴定黏土矿物制备方法<sup>[16-17]</sup>。XRD分析所使用的仪器为Bruker D8衍射仪(Bruker, Aks, GmbH, 德国),由X射线发生器(PW 3373/00)、测角仪(PW3050/60)、计数器及自动记录装置组成,射线管阳极为铜靶(Cu K $\alpha$ 辐射),从2到15°2 $\theta$ 步宽对样品进行扫描。矿物的衍射峰面积用NEWMOD程序计算<sup>[18]</sup>。为便于比较,初始土壤(IS)和2012年土壤一起进行相关测定。

土壤样品钾的容量和强度关系采用Beckett<sup>[19]</sup>提出的方法测定。根据提取液加入前K<sup>+</sup>浓度与平衡液中K<sup>+</sup>浓度之差求出土壤K<sup>+</sup>得失量( $\Delta K$ ),由平衡液中K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>的浓度计算出活性钾( $-\Delta K^{\circ}$ )、专性吸附钾(K<sub>X</sub>)、有效钾强度(AR<sub>e</sub><sup>K</sup>)、潜在缓冲容量(PBC<sup>K</sup>)、吉布斯自由能( $-\Delta G$ )、紧吸持K<sup>+</sup>和阳离子交换系数(K<sub>C</sub>)等参数。

#### 1.4 数据处理

数据处理及分析采用Microsoft Excel 2003和DPS 7.5等数据处理系统。为反映长期试验的整体性和连续性,表1中水稻产量和钾吸收量数据为1981—2012年间32年64季水稻早、晚稻的平均数

据。表2中耕层土壤不同形态钾数量(kg hm<sup>-2</sup>)为单位面积(公顷)内15 cm土层不同形态钾(交换性钾、非交换性钾和全钾)含量(mg kg<sup>-1</sup>或g kg<sup>-1</sup>)与土层土壤容重(g cm<sup>-3</sup>)和土层深度(15 cm)的乘积。

## 2 结果

### 2.1 长期施用钾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。施钾能增加稻谷和稻草的产量,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处理较相应的NP和NP+RS处理早稻稻谷分别增加15.9%和12.5%,稻草增加21.3%和6.4%;晚稻稻谷分别增加17.5%和9.5%,稻草增加33.9%和16.6%。水稻从土壤中的钾吸收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(103.4 kg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>),其次是不施肥的对照处理(109.2 kg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)。NPK+RS和NP+RS处理中籽粒和稻草的平均钾素吸收量较相对应的NPK和NP处理的高,年平均钾素吸收量较NPK和NP处理分别增加了109.8 kg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>和81.26 kg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。稻草能替代化学钾肥满足水稻对钾素的需要,同时提高水稻产量;另外,稻草为水稻也提供了N、P和有机质等养分。

### 2.2 长期施用钾肥和稻草对耕层土壤不同形态钾数量的影响

施钾量较高的NPK和NPK+RS处理的交换性钾量明显高于其他处理(表2),32年水稻作物循环后,NPK+RS处理耕层土壤的交换性钾数量增加,而非交换性钾处于亏缺状态。32年NP+RS处理的非交换性钾下降了25 kg hm<sup>-2</sup>。与交换性钾和非交换性钾不同,32年种植水稻作物后所有处理耕层土壤全钾数量均下降。NP+RS处理全钾亏缺量最高(2 147 kg hm<sup>-2</sup>)。全钾的亏缺不能真实反映非交换性钾的土壤检测值,如NPK和NPK+RS处理耕层土壤交换性钾量增加,而全钾处于净亏缺,分别亏缺1 047 kg hm<sup>-2</sup>和1 373 kg hm<sup>-2</sup>。

### 2.3 长期施用钾肥和稻草对红壤水稻土含钾矿物组成的影响

从镁饱和甘油处理的小于5  $\mu\text{m}$ 黏粒衍射峰图

表1 长期施用钾肥和稻草对水稻产量和吸钾量的影响

Table 1 Effect of long-term application of K fertilizer and rice straw on yield and K uptake of rice

处理 Treatment	早稻 Early rice				晚稻 Late rice			
	稻谷产量 Grain yield (t hm <sup>-2</sup> )	稻草产量 Straw yield (t hm <sup>-2</sup> )	稻谷吸钾量 K uptake by grain (kg hm <sup>-2</sup> )	稻草吸钾量 K uptake by straw (kg hm <sup>-2</sup> )	稻谷产量 Grain yield (t hm <sup>-2</sup> )	稻草产量 Straw yield (t hm <sup>-2</sup> )	稻谷吸钾量 K uptake by grain (kg hm <sup>-2</sup> )	稻草吸钾量 K uptake by straw (kg hm <sup>-2</sup> )
CK	2.82eE	2.75eB	7.97dC	47.44dD	3.43eE	3.01eC	7.28eE	46.54dD
NP	4.78dD	3.57bAB	15.85cB	43.53eE	4.80dD	3.63bcBC	11.32dD	32.66eE
NPK	5.54bB	4.33aA	16.20bB	73.31cC	5.64bB	4.86aA	15.36bB	113.3bB
NP+RS	5.30cC	3.89abA	18.68aA	119.5bB	5.49cC	4.15abAB	13.52cC	61.53cC
NPK+RS	5.96aA	4.14abA	18.90aA	132.6aA	6.01aA	4.84aA	15.84aA	132.1aA

注: CK: 不施任何肥料, NP: 施氮磷化肥, NPK: 施氮磷钾化肥, NP+RS: 施氮磷化肥+稻草, NPK+RS: 施氮磷钾化肥+稻草; 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。下同 Note: CK: no fertilizer applied; NP: N and P fertilizers applied; NPK: N, P and K fertilizers applied; NP+RS: NP fertilizers plus rice straw; NPK+RS: NPK fertilizers plus rice straw; Different capital and small letters mean significant difference at the 1% and 5% levels, respectively. The same below

表2 长期施钾对2012年耕层土壤不同形态钾数量的影响

Table 2 Effect of long-term K fertilization on contents of different forms of K in the topsoil layer of reddish paddy soil in 2012 (kg hm<sup>-2</sup>)

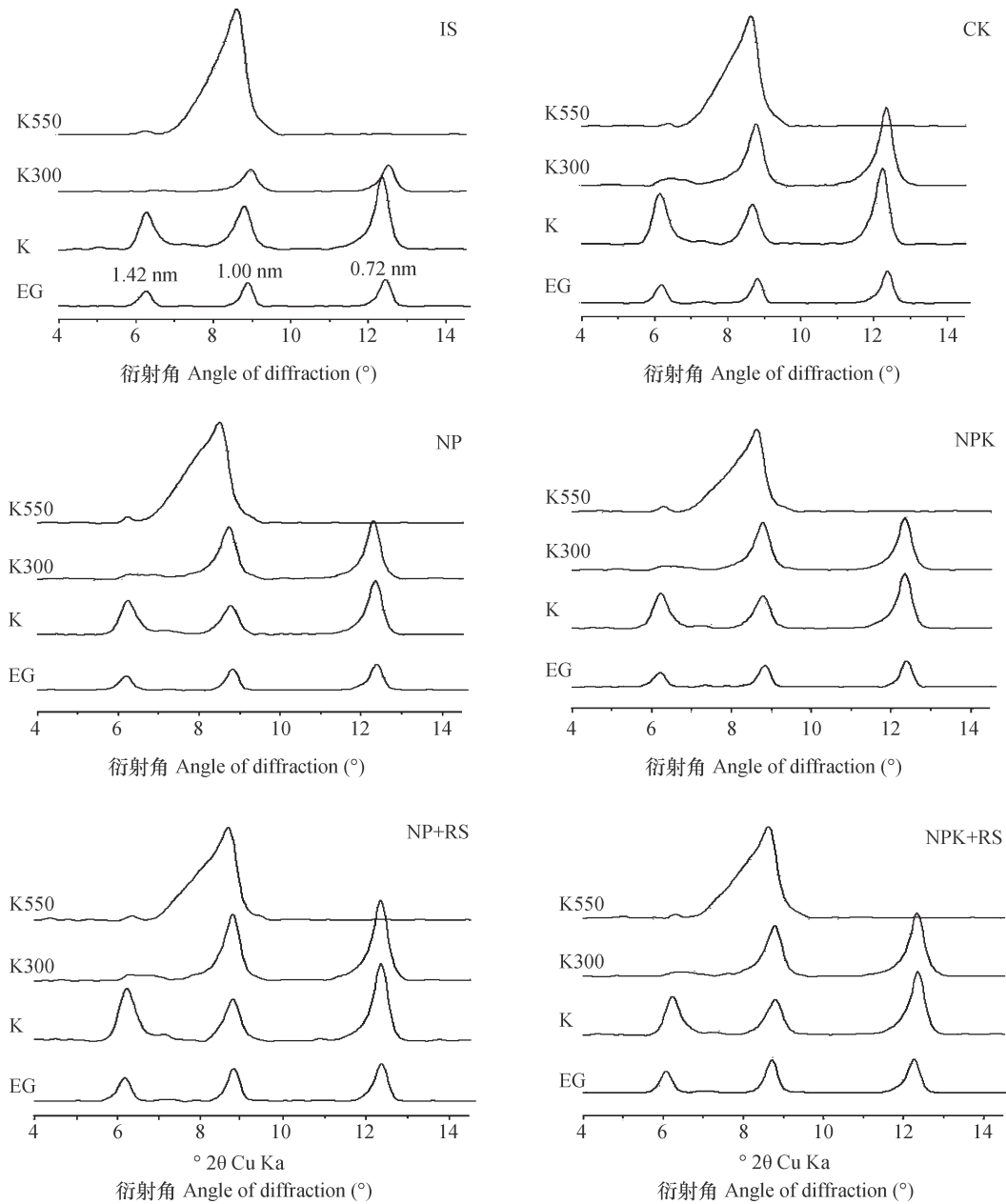
处理 Treatment	交换性钾 Exchangeable K	交换性钾亏缺量 Deficit of exchangeable K	非交换性钾 Non exchangeable K	非交换性钾亏缺量 Deficit of non exchangeable K	全钾 Total K	全钾亏缺量 Deficit of total K
IS	105	—	292	—	23 688	—
CK	94	-11	272	-20	22 600	-1 089
NP	95	-10	282	-10	23 136	-552
NPK	159	54	311	19	22 641	-1 047
NP+RS	77	-28	267	-25	21 541	-2 147
NPK+RS	210	105	281	-11	22 315	-1 373

注: IS: 初始土壤。下同 Note: IS: initial soil. The same below

谱(图1)可知,不同处理土壤具有相同的矿物组成。所有测试处理的衍射峰均出现在1.42 nm、1.00 nm和0.72 nm附近。镁饱和和甘油处理之后的衍射峰未移动,说明不同施肥土壤均不含膨胀黏土矿物。钾饱和处理之后,CK和NP处理土壤1.42 nm的蛭石-绿泥石(V/CH)相对峰强度增加,表明V/CH矿物间层中存在可交换性羟基离子。钾饱和后300℃热处理土壤中1.42 nm处向1.00 nm峰收缩移动,形成一个宽带;钾饱和后550℃热处理土壤中1.42 nm峰全部收缩成不对称的1.00 nm峰,证明土壤中存在介于绿泥石与蛭石类型的过渡矿物<sup>[20]</sup>。

根据各矿物特征峰的面积计算出各种黏土矿物峰面积的相对百分率(表3)。小于5 μm黏粒

部分中的主要矿物是蛭石-绿泥石(V/CH),占总衍射峰面积的35.99%~39.61%,其次是高岭石(KL)(25.12%~28.75%)、伊利石(IL)(14.37%~24.29%)和蛭石-绿泥石/伊利石混层矿物(ML)(14.41%~18.45%)。长期施用钾肥和稻草处理(NPK、NP+RS和NPK+RS)的V/CH、KL和ML衍射峰面积百分率低于不施用钾肥的(CK和NP)处理和初始土壤(IS),而伊利石衍射峰面积百分率大于不施钾肥处理(CK和NP)和IS。将伊利石衍射峰分离成两部分:1.42 nm附近的宽带峰(结晶不良伊利石,PCI)和1.00 nm处的窄带峰(晶格良好伊利石,WCI)。不同施肥处理对WCI和PCI衍射峰面积百分率有明显影响。长



注：EG：镁饱和和甘油处理定向样品（EG片），K：钾饱和和处理自然风干定向样品（K片），K300：钾饱和和处理后300℃处理定向样品（K300片），K550：钾饱和和处理后550℃处理定向样品（K550片）。Note: EG: Magnesium-saturated glycerin treated directional sample (EG slices), K: Potassium-saturated naturally-dried directional sample (K slices); K300: Post-potassium saturation treatment 300℃-treated directional sample (K300 slices); K550: Post-potassium saturation treatment 550℃-treated directional sample (K550 slices)

图1 不同施肥处理中黏粒部分 (< 5 μm) 的X—射线衍射图谱

Fig. 1 X-ray diffraction pattern of the clay fraction (< 5 μm) relative to fertilization treatment

期施用钾肥和稻草的WCI和PCI衍射峰面积百分率高于不施钾肥处理（NP和CK）和初始土壤，与不施用钾肥的NP处理相比，NPK、NP+RS和NPK+RS处理WCI衍射峰面积百分率分别增加135.46%、134.75%和143.97%，PCI衍射峰面积百分率分别

增加42.86%、28.48%和50.74%，且长期施用钾肥和稻草的NPK（28.69%）、NP+RS（30.85%）和NPK+RS（28.32%）处理WCI衍射峰面积占总伊利石衍射峰面积百分比明显高于不施用钾肥的CK（20.95%）、NP（19.62%）处理和初始土壤

表3 不同施肥处理中蛭石-绿泥石 (V/CH)、蛭石-绿泥石/伊利石混层矿物 (ML)、高岭石 (KL)、伊利石 (IL) 晶格良好伊利石 (WCI) 和晶格不良伊利石 (PCI) 衍射特征峰的百分比

Table 3 Percentage of diffraction characteristic peak of vermiculite-chlorite (V/CH), vermiculite-chlorite/illite mixed-layer (ML), kaolinite (KL), illite (IL), well-crystallized illite (WCI), and poorly crystallized illite (PCI) relative to fertilization treatments (%)

处理 Treatment	V/CH	ML	KL	IL	WCI	PCI
IS	38.09	18.21	27.60	16.10	4.20	11.90
CK	39.23	17.32	28.75	14.70	3.08	11.62
NP	39.61	18.45	27.57	14.37	2.82	11.55
NPK	36.17	15.57	25.12	23.14	6.64	16.50
NP+RS	37.30	15.26	25.98	21.46	6.62	14.84
NPK+RS	35.99	14.41	25.31	24.29	6.88	17.41

(26.09%)。此结果说明, 长期施用钾肥和稻草不仅有利于土壤伊利石含量的增加, 而且有利于晶格不良伊利石向晶格良好伊利石的方向发展。

连续32年种植64季水稻后, 由于不同施钾处理的伊利石峰面积百分率发生了变化, 土壤黏粒在实验室经钾饱和处理后, 所有钾饱和处理的游离伊利石峰面积均较未经钾饱和处理的面积增加(表4)。钾饱和处理后, CK处理的游离伊利石峰面积由未经钾饱和处理的11.92%增加至23.47%; NP处理的游离伊利石峰面积由未经钾饱和处理的13.49%增加至26.88%; NPK、NP+RS和NPK+RS

处理伊利石峰面积百分率由未经钾饱和处理的12.36%、12.94%和12.22%分别增加至26.71%、24.27%和26.44%。不同施肥处理对混层蛭石-绿泥石/伊利石矿物中伊利石层峰面积百分率也有明显影响(表4), 长期施用钾肥和稻草处理(NPK、NP+RS和NPK+RS)钾饱和处理后的混层蛭石-绿泥石/伊利石矿物中伊利石衍射峰面积百分率略高于未经钾饱和处理, 而长期不施钾肥处理(NP和CK)和初始土壤(IS)钾饱和处理后的混层蛭石-绿泥石/伊利石矿物中伊利石层峰面积百分率略低于未经钾饱和处理。所有处理钾饱和处理后的总伊

表4 不同施肥处理经钾饱和和未经钾饱和处理不同矿物中蛭石-绿泥石和伊利石衍射峰面积的百分比

Table 4 Percentage of diffraction peak area of vermiculite-chlorite and illite in K saturated and non K saturated minerals relative to fertilization treatment (%)

处理 treatment	游离伊利石衍射峰面积 <sup>①</sup>		混层蛭石-绿泥石/伊利石矿物的伊利石衍射峰面积 <sup>②</sup>		ML矿物中游离伊利石和层状伊利石的总衍射峰面积 <sup>③</sup>		ML矿物中游离蛭石-绿泥石(V/CH)和间层V/CH的总衍射峰面积 <sup>④</sup>	
	未经钾饱和 Non K saturated	钾饱和 K saturated	未经钾饱和 Non K saturated	钾饱和 K saturated	未经钾饱和 Non K saturated	钾饱和 K saturated	未经钾饱和 Non K saturated	钾饱和 K saturated
IS	11.50	22.33	49.50	47.33	37.20	41.05	37.89	30.07
CK	11.92	23.47	49.06	46.88	42.60	47.34	47.06	31.23
NP	13.49	26.88	49.47	48.89	43.58	48.06	36.93	29.16
NPK	12.36	26.71	52.88	59.37	55.58	58.34	33.34	27.90
NP+RS	12.94	24.27	50.44	51.62	44.04	46.84	38.96	33.53
NPK+RS	12.22	26.44	53.43	60.41	54.42	56.93	28.73	26.22

注Note: ①Diffraction peak area of free illite; ②Diffraction peak area of illite in ML (V/CH) minerals; ③Total diffraction peak area of free illite and layered illite minerals; ④Total diffraction (V/CH) peak area of free illite in V/CH and layered V/CH minerals

利石衍射峰面积百分率均高于未经钾饱和处理, 长期施用钾肥和稻草NPK、NP+RS和NPK+RS处理经钾饱和处理后的总伊利石衍射峰面积百分率分别较未经钾饱和处理增加4.97%、6.36%和4.61%; 而长期不施钾肥NP、CK处理和初始土壤分别增加10.28%、11.13%和10.35%。所有处理钾饱和处理后的总蛭石/绿泥石峰面积百分率均明显低于未经钾饱和处理, 长期施用钾肥和稻草NPK、NP+RS和NPK+RS处理经钾饱和处理后的总V/CH衍射峰面积百分率分别较未经钾饱和处理降低16.32%、13.94%和8.74%; 而长期不施钾肥NP、CK处理和初始土壤分别降低21.04%、33.64%和20.64%。上述结果说明, 长期施用钾肥和稻草能促进土壤矿物从蛭石向伊利石方向发展。

#### 2.4 长期施肥对红壤水稻土容量-强度 (Q/I) 参数的影响

连续32年种植64季水稻后, 不同施肥处理之间土壤- $\Delta K^\circ$ 表现出明显差异 (表5)。CK和NP处理耕层土壤- $\Delta K^\circ$ 值较小, 仅为0.1498  $\text{cmol kg}^{-1}$ 和0.1608  $\text{cmol kg}^{-1}$ , 说明长期不施肥和长期只施NP肥的条件下土壤溶液中的钾很少。长期施NPK和NPK+RS处理土壤- $\Delta K^\circ$ 值较大, 分别为0.218 1  $\text{cmol kg}^{-1}$ 和0.297 0  $\text{cmol kg}^{-1}$ , 说明长期施钾肥和钾与稻草配合施用有更多的钾素进入到土壤溶液。NPK+RS处理土壤- $\Delta K^\circ$ 值更大是因为除施入化学钾肥外, 每年施入土壤的稻草本身带入了一定量的钾素 (109.2  $\text{kg hm}^{-2}$ )。NP+RS处理土壤- $\Delta K^\circ$ 值高于单施化学NP肥处理, 但低于NPK和NPK+RS处理。

长期施用钾肥和稻草处理土壤中的专性吸附钾位 ( $K_x$ ) 较多 (表5)。 $AR_e^k$ 是衡量土壤易释放钾中钾素有效性或强度 (I) 的指标。本研究结果表明, 长期不施肥的CK处理和长期施NP处理的土壤 $AR_e^k$ 较小, 分别仅为0.007 8 ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )<sup>1/2</sup>和0.008 2 ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )<sup>1/2</sup>, 其中NP处理大于CK处理土壤; 长期施NPK和NPK+RS处理土壤 $AR_e^k$ 较大, 分别为0.014 5 ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )<sup>1/2</sup>和0.0168 ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )<sup>1/2</sup>。NP与稻草长期配合施用处理土壤 $AR_e^k$ 高于单施NP处理, 但明显低于NPK和NPK+RS处理。Schuffelen和van Schouwenburg<sup>[21]</sup>认为, 当 $AR_e^k$ 低于0.01 ( $\text{mol L}^{-1}$ )<sup>1/2</sup>时, 大部分的钾吸附在晶格层间交换位;  $AR_e^k$ 在0.01和0.1 ( $\text{mol L}^{-1}$ )<sup>1/2</sup>之间时, 大部分的钾吸附在边缘交换位; 高于0.1 ( $\text{mol L}^{-1}$ )<sup>1/2</sup>时, 大部分的钾吸附在平面交换位。由此可以判断, 长期不施肥的CK处理和长期只施NP化肥处理小区土壤的钾主要吸附在晶格层间交换位, 长期施用NPK、NP+RS和NPK+RS处理小区土壤的钾较多的部分被吸附在边缘交换位。

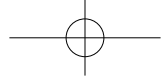
PBC<sup>K</sup>反映了土壤潜在缓冲容量, 即表示了一种土壤中土壤溶液保持K<sup>+</sup>强度的能力。比较不同处理小区耕层土壤的PBC<sup>K</sup>可以看出, CK和NP处理土壤的PBC<sup>K</sup>最大, 分别为19.67  $\text{cmol kg}^{-1}/(\text{cmol kg}^{-1})^{1/2}$ 和19.85  $\text{cmol kg}^{-1}/(\text{cmol kg}^{-1})^{1/2}$ , 其次是NPK和NP+RS处理, 分别为15.11  $\text{cmol kg}^{-1}/(\text{cmol kg}^{-1})^{1/2}$ 和15.48  $\text{cmol kg}^{-1}/(\text{cmol kg}^{-1})^{1/2}$ , NPK+RS处理的PBC<sup>K</sup>最低, 仅为14.29  $\text{cmol kg}^{-1}/(\text{cmol kg}^{-1})^{1/2}$ 。以上结果说明, 对于同一土壤而

表5 长期施用化肥和稻草对红壤水稻土容量-强度参数的影响

Table 5 Effect of long-term application of K fertilizer and incorporation of rice straw on Q/I parameters in reddish paddy soil

处理 Treatment	活性钾 <sup>①</sup> - $\Delta K^\circ$ ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	专性吸附钾 <sup>②</sup> $K_x$ ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	有效钾强度 <sup>③</sup> $AR_e^k$ ( $\text{cmol kg}^{-1}$ ) <sup>1/2</sup>	潜在缓冲容量 <sup>④</sup>	吉布斯自由能 <sup>⑤</sup>	阳离子交换系数 <sup>⑥</sup>	紧吸持K <sup>⑦</sup> ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )
				PBC <sup>K</sup> ( $\text{cmol kg}^{-1}/$ ( $\text{cmol kg}^{-1}$ ) <sup>1/2</sup> )	$-\Delta G$ ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )	$K_c$ ( $\text{mol L}^{-1}$ ) <sup>1/2</sup>	
CK	0.1498	0.1532	0.0078	19.67	15.34	2.83	0.0310
NP	0.1608	0.1624	0.0082	19.85	14.87	2.84	0.0292
NPK	0.2181	0.2194	0.0145	15.11	10.50	1.73	0.0426
NP+RS	0.1868	0.2099	0.0136	15.48	13.80	1.82	0.0463
NPK+RS	0.2970	0.2400	0.0168	14.29	9.79	1.64	0.0485

注Note: ①Labile K; ②Specific adsorption K; ③Intensity of available potassium; ④Potential buffering K capacity; ⑤Gibbs free energy; ⑥Gapon cation exchange selectivity coefficient; ⑦Tightly held K<sup>+</sup>



言，维持一个低钾浓度溶液的能力较维持一个高钾浓度溶液的能力强，同时表明，要提高CK和NP处理土壤溶液中钾浓度则需要施用大量的钾才行。

K和Ca+Mg交换自由能 ( $-\Delta G$ ) 指在标准状态下 ( $25^{\circ}\text{C}$ ) 等当量的K交换等当量的Ca+Mg所需要的能量，是衡量K和Ca+Mg化学势之差的一个指标。 $-\Delta G$ 越大，土壤对K的选择性吸附越强 (即 $K_c$ 越大)，作物对钾的吸收越困难，从而容易出现缺钾； $-\Delta G$ 越小，土壤对K的选择性吸附越弱，钾的植物有效性越高。一般而言，土壤易交换性钾含量高， $-\Delta G$ 低。长期不施钾土壤 (CK和NP)  $-\Delta G$ 较高，分别为 $15.34$ 和 $14.87 \text{ kJ mol}^{-1}$ ，长期施钾土壤 (NPK和NPK+RS)  $-\Delta G$ 较低，分别为 $10.50$ 和 $9.79 \text{ kJ mol}^{-1}$ 。Woodruff<sup>[22]</sup>的研究结果认为，当土壤 $-\Delta G$ 大于 $14.64 \text{ kJ mol}^{-1}$ 时，容易出现缺钾，而当 $-\Delta G$ 小于 $8.36 \text{ kJ mol}^{-1}$ 时，则可能钾素过多诱发缺钙。由此判断，长期不施肥的CK和NP处理土壤的 $-\Delta G$ 超过Woodruff研究的缺钾阈值，处于严重缺钾状态；NP+RS处理土壤的 $-\Delta G$ 接近缺钾阈值，处于缺钾状态；而NPK+RS处理土壤的钾素不缺乏，但长期下去可能会诱发缺钙<sup>[23]</sup>。

### 3 讨论

#### 3.1 长期施用钾肥和稻草对水稻产量和土壤钾库的影响

施钾是增加水稻产量的重要农业措施。本研究的结果表明，长期施用钾肥和稻草能增加水稻的产量，早晚稻稻谷产量随钾肥施用量的增加而增加；与NP处理相比，长期施用钾肥和稻草的NPK、NP+RS和NPK+RS处理早稻稻谷产量平均分别增加 $15.9\%$ 、 $10.9\%$ 和 $24.7\%$ ，晚稻分别增加 $17.5\%$ 、 $14.4\%$ 和 $25.2\%$ ；早稻和晚稻稻草产量平均分别增加 $21.3\%$ 、 $9.0\%$ 、 $16.0\%$ 和 $33.9\%$ 、 $14.3\%$ 、 $33.3\%$ 。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 ( $103.4 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )，其次是不施肥的对照处理 ( $109.2 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )。NPK+RS和NP+RS处理中籽粒和稻草的平均钾素吸收量较相对应的NPK和NP处理的高，年平均钾素吸收量较NPK和NP处理分别增加了 $109.8 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $81.26 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。比较表2中耕层土壤三种不同形态钾数量的亏缺

量，种植32年水稻作物后，所有处理耕层土壤的全钾数量均下降，且NP+RS处理全钾亏缺量最高，为 $2147 \text{ kg hm}^{-2}$ ；除NPK处理外，其他处理非交换性钾量均处于亏缺状态；交换性钾量只有施用钾肥量较高的NPK和NPK+RS处理处于盈余状态，其他处理为亏缺。红壤稻田土壤上，长期每年只施用 $4.2 \text{ t hm}^{-2}$ 稻草的NP+RS处理，不能满足水稻生长期间的钾素平衡，长期施用会造成土壤三种不同形态钾数量的亏缺，且由于每年较高稻谷 ( $10.79 \text{ t hm}^{-2}$ ) 和稻草产量 ( $8.04 \text{ t hm}^{-2}$ )，每年平均带走的钾素量为 $213.18 \text{ kg hm}^{-2}$ ，远远高于每年平均稻草钾素的输入量 $109.2 \text{ kg hm}^{-2}$ ，施稻草能部分满足水稻钾素的需要，同时提高水稻的产量。此外，稻草为水稻也提供了N、P养分和有机质等养分，是造成NP+RS处理三种不同形态钾亏缺量较大的主要原因<sup>[24]</sup>。

#### 3.2 长期施用钾肥和稻草对红壤水稻土供钾能力的影响

施钾不仅是一个植物营养问题，而且也是一个伊利石为主要含钾黏土矿物耕作土壤中黏粒保育的问题。肥料钾可以被植物吸收，但在每年水稻生长期间，伊利石充当了土壤—植物钾素供应的一种长期交换器。分解X-射线衍射图表明，黏土矿物比例随施肥处理不同而变化：长期施NP未改变高生产力条件下因稻株吸钾量高而导致的土壤中伊利石含量降低，但在长期种植双季稻的条件下，长期施用NP肥的基础上配施钾肥或稻草能提高土壤中的伊利石含量，而长期不施钾肥却使得土壤中的伊利石含量下降。本研究的结果与其他研究者的结果相似，长期施用钾肥能促进矿物蛭石向伊利石转化。据报道<sup>[25]</sup>，在26年肥料定位试验期间，不施钾肥导致伊利石含量大量减少，而致蒙脱石和层间伊利石-蒙脱石矿物增加。本研究中NPK、NP+RS和NPK+RS处理黏粒的伊利石衍射峰面积百分率高于不施肥CK处理和不施钾肥的NP处理，说明长期施钾增加了伊利石的形成。长期施用钾肥和稻草处理 (NPK、NP+RS和NPK+RS) 的WCI和PCI衍射峰面积百分率高于不施钾肥处理 (NP和CK) 和初始土壤，且长期施用钾肥和稻草NPK、NP+RS和NPK+RS处理的WCI衍射峰面积占总伊利石衍射峰面积百分比明显高于不施用钾肥的CK、NP处理和初始土壤。说明，长期施用钾肥和稻草不仅有利于



土壤伊利石含量的增加,而且有利于晶格不良伊利石向晶格良好伊利石的方向发展。

连续种植32年64季水稻之后,不同处理土壤钾Q/I曲线成分表现出明显差异,产生这些差异的原因可以从控制O/I曲线关系性质的土壤组分变化解释。控制溶液中 $K^+$ 量的有两种类型的土壤钾亲和位。O/I图的曲线部分(下部分)代表特殊吸附或 $K^+$ 与其他阳离子的交换位,即高 $K^+$ 亲和位;O/I图的直线部分(上部分)代表 $K^+-(Ca^{2+}+Mg^{2+})$ 交换反应,即低 $K^+$ 亲和位。Q/I曲线线性部分钾的相对亲和力受有机质含量和pH的影响。本研究证明,随着长期施用稻草处理土壤有机质含量的增加,耕层土壤的 $K(K_c)$ 亲和力下降,另一方面,随着长期施用稻草处理土壤有机质的增加,pH随长期施用稻草而下降;在一些土壤对 $Na^+-Ca^{2+}$ 交换的试验证明,土壤一价离子的相对亲和力以及表面电荷密度受pH降低而下降的影响较大<sup>[26]</sup>。也有研究注意到,有机质对K的亲和力低于土壤矿物<sup>[27]</sup>。Q/I曲线的下部通常与高亲和K位点有联系。在本研究中,高亲和K位点定义为中性 $1\text{ mol L}^{-1}\text{ NH}_4\text{OAc}$ 提取 $K^+$ 量减去Q/I曲线线性部分y截距测定的 $\Delta K^\circ$ 量。连续种植32年64季水稻之后,不同处理之间的最大差异在耕层土壤有机质含量方面。NP+RS和NPK+RS两个长期施用稻草处理的土壤有机质含量较高,CK和NP处理的土壤有机质含量较低<sup>[5]</sup>。数据表明,无有机质积累的CK和NP处理土壤中高亲和K量较低,且两种处理的数值接近。高有机质积累的NPK+RS处理耕层土壤,紧吸持 $K^+$ 的数量明显高于其他处理土壤。

评价土壤供钾能力的强弱时,除考虑土壤中植物吸收的有效钾量、含钾黏土矿物的组成、施钾量的多少和土壤钾吸附与解吸的数量与速率以及它们之间的交互效应等的作用外,还需要综合考虑其他因素对土壤供钾能力的影响,如土壤有机质含量的差异、碱性阳离子( $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$ )和pH变化等因素的影响。肥料长期定位试验具有常规试验不可比拟的优点,通过研究长期不同施肥模式对水稻产量、作物吸钾量、土壤钾素形态变化以及土壤主要黏土矿物的组成、数量和钾素容量与强度的影响,探讨了长期施用钾肥和稻草条件下土壤钾素形态变化特征、含钾黏土矿物转化及土壤中 $K^+$ 的吸附、解吸特性与施钾量之间的变化关系,可以深入

了解长期施用钾肥和稻草条件下,土壤供钾能力复杂的化学行为,预测施入土壤钾素的变化和土壤供给植物钾素营养的本质特征。本文仅就南方红壤水稻土双季稻种植制度下,长期施用钾肥和稻草对水稻产量、水稻吸钾量、耕层土壤中的不同钾素量、小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 黏粒中含钾黏土矿物的变化和土壤钾素容量-强度(Q/I)参数等进行了初步探讨,对于促进南方双季稻区科学合理施用钾肥具有一定的现实意义。但耕层土壤(0~15 cm)以下土层的供钾情况,不同处理中土壤的供钾能力和含钾黏土矿物的变化与水稻作物需钾有效性的关系等均有待做进一步研究。

## 4 结论

连续32年64季水稻种植条件下,长期施用化肥和稻草对集约化种植下双季稻产量、作物吸钾量和土壤供钾能力的影响较大:施钾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,长期不施用或施用不足量钾肥会导致土壤速效钾、缓效钾和全钾量的亏缺;长期施用钾肥和稻草有利于土壤伊利石含量的增加,且有利于晶格不良伊利石向晶格良好伊利石的方向发展;长期施用钾肥和稻草会使土壤黏粒中的蛭石向伊利石转化;长期施用钾肥和稻草处理活性钾( $-\Delta K^\circ$ )量高、专性吸附钾位( $K_x$ )多、有效钾强度( $AR_e^k$ )强、紧吸持 $K^+$ 量多,而潜在缓冲容量( $PBC^k$ )、吉布斯自由能( $-\Delta G$ )和阳离子交换系数( $K_c$ )较低是导致这些长期施钾处理供钾能力较强的主要原因。

**致谢** 感谢湖南省土壤肥料研究所郑圣先研究员在X-射线衍射峰判别和Q/I曲线参数计算中提供的方法和帮助。

## 参考文献

- [1] 黄绍文,金继运,王泽良,等.北方主要土壤钾形态及植物有效性研究.植物营养与肥料学报,1998,4(2):156-164  
Huang S W, Jin J Y, Wang Z L, et al. Native potassium forms and plant availability in selected soils from northern China (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(2): 156-164

- [ 2 ] 廖育林, 郑圣先, 黄建余, 等. 施钾对缺钾稻田土壤钾肥效应及土壤钾素状况的影响. 中国农学通报, 2008, 24 ( 2 ) : 255—260  
Liao Y L, Zheng S X, Huang J Y, et al. Effect of application of K fertilizer on potassium efficiency and soil K status in deficit K of paddy soil ( In Chinese ) . Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24 ( 2 ) : 255—260
- [ 3 ] Liao Y L, Zheng S X, Lu Y H, et al. Long-term effect of fertilizer and pig manure and rice straw application on rice yield, potassium uptake in plants and potassium balance in double rice cropping system. Frontiers of Agriculture in China, 2010, 4 ( 4 ) : 406—415
- [ 4 ] Scherer H W, Zhang Y S. Mechanisms of fixation and release of ammonium in paddy soils after flooding: III. Effect of the oxidation state of octahedral Fe on ammonium fixation. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2002, 165 ( 2 ) : 185—189
- [ 5 ] Liao Y L, Zheng S X, Nie J, et al. Long-term effect of fertilizer and rice straw on mineral composition and potassium adsorption in a reddish paddy soil. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12 ( 4 ) : 694—710
- [ 6 ] 廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 等. 长期施用化肥和稻草对双季稻田钾素运移的影响. 水土保持学报, 2013, 27 ( 5 ) : 199—204  
Liao Y L, Lu Y H, Xie J, et al. Effects of long-term application of chemical fertilizer and rice straw on potassium transport in double cropping rice field ( In Chinese ) . Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27 ( 5 ) : 199—204
- [ 7 ] 金继运. 我国北方土壤缺钾及钾肥应用的发展趋势//中国农业科学院土壤肥料研究所, 加拿大钾磷研究所北京办事处. 北方土壤钾素和钾肥效益. 北京: 中国农业科技出版社, 1994: 1—5  
Jin J Y. Development of potassium application and lack of soil potassium in North China// Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Peking Office of Canada Phosphorus and Potassium Institute. Soil K and yield responses in North China ( In Chinese ) . Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1994: 1—5
- [ 8 ] 郑圣先, 罗成秀, 戴平安. 湖南省主要稻田土壤供钾能力的研究. 中国农业科学, 1989, 22 ( 1 ) : 75—82  
Zheng S X, Luo C X, Dai P A. Potassium supplying capacity of main paddy soil in Hunan Province ( In Chinese ) . Scientia Agricultura Sinica, 1989, 22 ( 1 ) : 75—82
- [ 9 ] 范钦桢, 谢建昌. 长期肥料定位试验中土壤钾素肥力的演变. 土壤学报, 2005, 42 ( 4 ) : 591—599  
Fan Q Z, Xie J C. Variation of potassium fertility in soil in the long-term stationary experiment ( In Chinese ) . Acta Pedologica Sinica, 2005, 42 ( 4 ) : 591—599
- [ 10 ] 谢建昌, 周健民, Hardter R. 钾与中国农业. 南京: 河海大学出版社, 2000  
Xie J C, Zhou J M, Hardter R. Potassium in Chinese agriculture ( In Chinese ) . Nanjing: Hohai University Press, 2000
- [ 11 ] 陈防, 鲁剑巍, 万运帆, 等. 长期施钾对作物增产及土壤钾素含量及形态的影响. 土壤学报, 2000, 37 ( 2 ) : 233—241  
Chen F, Lu J W, Wan Y F, et al. Effect of long term potassium application on soil potassium content and forms ( In Chinese ) . Acta Pedologica Sinica, 2000, 37 ( 2 ) : 233—241
- [ 12 ] 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. 植物营养肥料学报, 2009, 15 ( 6 ) : 1373—1380  
Liao Y L, Zheng S X, Lu Y H, et al. Effect of long-term K fertilization on rice yield and soil K status in reddish paddy soil ( In Chinese ) . Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15 ( 6 ) : 1373—1380
- [ 13 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000  
Lu R K. Analytic methods for soil and agro - chemistry ( In Chinese ) . Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [ 14 ] Moore D E, Reynolds R C. X-ray diffraction and the identification of clay minerals. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1997
- [ 15 ] Lanson B. Decomposition of experimental X-ray diffraction patterns ( profile fitting ) : A convenient way to study clay minerals. Clays & Clay Minerals, 1997, 45 ( 2 ) : 132—146
- [ 16 ] 蒲海波. 用X射线衍射分析鉴定黏土矿物的方法. 勘察科学技术, 2011 ( 5 ) : 12—14  
Pu H B. Method of identifying clay mineral by X-ray diffraction analysis ( In Chinese ) . Site Investigation Science and Technology, 2011 ( 5 ) : 12—14
- [ 17 ] 张荣科, 范光. 黏土矿物X射线衍射定量分析方法与实验. 铀矿地质, 2003, 19 ( 3 ) : 180—185  
Zhang R K, Fan G. Quantitative analytic method and experiments of X-ray diffraction phase of clay minerals ( In Chinese ) . Uranium Geology, 2003, 19 ( 3 ) : 180—185
- [ 18 ] Reynolds R C. NEWMOD: a computer program for the calculation of one dimensional diffraction patterns of mixed layered clay minerals, 1985
- [ 19 ] Beckett P H T. Studies on soil potassium. II. The

- immediate Q/I relations of labile potassium in the soil. *Journal of Soil Science*, 1964, 15 (1): 9—23
- [20] Liu Y L, Zhang B, Li C L, et al. Long-term fertilization influences on clay mineral composition and ammonium adsorption in a rice paddy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72 (6): 1580—1590
- [21] Schouwenburg J C, van Schuffelen A C. Potassium-exchange behavior of an illite. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1963, 11: 13—22
- [22] Woodruff C M. Cation activities in the soil solution and energies of cationic exchange. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1955, 19: 98—99
- [23] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施用氮磷钾肥和石灰对红壤性水稻土酸性特征的影响. *土壤学报*, 2016, 53 (1): 202—212
- Lu Y H, Liao Y L, Nie J, et al. Effect of long-term fertilization and lime application on soil acidity of reddish paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (1): 202—212
- [24] 廖育林, 郑圣先, 聂军, 等. 长期施用化肥和稻草对红壤性水稻土非交换性钾释放动力学的影响. *土壤*, 2011, 43 (6): 941—947
- Liao Y L, Zheng S X, Nie J, et al. Effects of long-term application of fertilization and rice straw on release kinetics of non-exchangeable potassium in reddish paddy soil (In Chinese). *Soils*, 2011, 43 (6): 941—947
- [25] Tributh H, von Boguslawski E, van Lieres A, et al. Effect of potassium removal by crops on transformation of illitic clay minerals. *Soil Science*, 1987, 143 (6): 404—409
- [26] Pratt P F, Whittig L D, Grover B L. Effect of pH on the sodium-calcium exchange equilibria in soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1962, 26: 227—230
- [27] Salmon R C. Cation exchange reactions. *Journal of Soil Science*, 1964, 15 (2): 273—283

## Effects of Long-term Application of Chemical Potassium Fertilizer and Incorporation of Rice Straw on Potassium Supplying Capacity of Red Soil in Double Cropping Paddy Field

LIAO Yulin<sup>1, 2</sup> LU Yanhong<sup>1, 2</sup> XIE Jian<sup>1, 2</sup> NIE Jun<sup>1, 2†</sup> YANG Zengping<sup>1, 2</sup> ZHOU Xing<sup>1</sup>

(1 *Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China*)

(2 *Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Hunan), Ministry of Agriculture, Changsha 410125, China*)

**Abstract** 【Objective】 Based on a long term fertilization experiment (1981~2012) in a double-cropping paddy field in Hunan Province, effects of long-term application of chemical potassium (K) fertilizer and incorporation of rice straw on yield and K uptake of rice and soil K supplying capacity in the double-cropping paddy field under intensive cultivation were explored. 【Method】 Rice yield, K uptake by shoot of rice, soil K pool including exchangeable K, non-exchangeable K and total K, soil K mineralogical characteristics and soil K supply capacity were determined. 【Result】 Results show that application of chemical potassium fertilizer and/or incorporation of rice straw increased the yields of rice grains and rice straw. Potassium uptake by the shoot of rice was significantly increased with rising K application rate. In terms of mean annual K uptake by the shoot of rice, the treatments displayed a decreasing order of NPK+RS > NPK > NP+RS > CK > NP. Long-term application of nil or insufficient K fertilizer, like in Treatments CK, NP and NP+RS, caused depletion of exchangeable potassium, non-exchangeable potassium and total potassium in the topsoil. Long-term application of chemical K fertilizer and/or incorporation of rice straw not only increased the content of illite in soil clay, but also benefitted the transformation of poorly crystallized illite to well crystallized illite. The in-lab potassium saturation experiment on clay shows that K application increased the content of free illite and illite in clay of the soil, and expanded the diffraction peak area of



total illite in K saturated soil, but reduced that of total V/CH. Moreover, in Treatments NPK, NP+RS and NPK+RS, compared with non-K saturation, K saturation reduced the diffraction peak area of total V/CH by an extent, lower than that in Treatments NP and CK, which indicates that long-term application of K fertilizer and incorporation of rice straw helps transform vermiculite into illite. The K quantity/ intensity (Q/I) curve parameters can be used to explain that the high K supplying capacity of the treatments of long-term application of chemical K fertilizer and/or incorporation of rice straw is attributed to higher labile K content ( $-\Delta K^{\circ}$ ), more specific  $K^{+}$  adsorption sites ( $K_x$ ), higher available K intensity ( $AR_e^K$ ), and higher tightly-held  $K^{+}$  content. However, these treatments are lower than those K absent treatments in potential buffering capacity ( $PBC^K$ ), Gibbs free energy ( $-\Delta G$ ), and gapon cation exchange selectivity ( $K_C$ ). **【Conclusion】** Long-term application of K fertilizers and/or incorporation of rice straw in addition to conventional fertilization in doubling rice cropping paddy field will not only significantly increase and stabilize yield of the rice, but also promote K uptake by shoot of the rice, improves soil K holding capacity, maintain soil potassium balance and build up soil K supplying capacity.

**Key words** Long-term K fertilizer application; Reddish paddy soil; Yield; K-bearing clay minerals; Potassium supplying capacity

(责任编辑: 陈荣府)