# 长期定位施肥条件下土壤钾素化学研究进展*

张会民[1,2,3], 吕家珑[1], 李菊梅[2], 徐明岗[2], 刘红霞[3]

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;
2 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;
3 河南科技大学 农学院, 河南 洛阳 471003)

[摘 要] 介绍了长期定位施肥对土壤钾素形态和钾素平衡、土壤含钾矿物含量和转化, 以及土壤水溶性钾、交换性钾、非交换性钾和全钾含量的影响, 综述了长期定位施肥条件下土壤钾素固定、非交换性钾释放、$K^+$ 吸附和解吸的特性, 并对土壤钾素容量和强度($Q/I$)关系曲线评价长期定位施肥土壤钾素的有效性进行了总结, 最后指出了长期定位施肥条件下土壤钾素化学研究存在的问题及以后的研究方向。

[关键词] 长期定位施肥; 钾素化学; 固定; 释放; 吸附; 解吸
[中图分类号] S158.2 [文献标识码] A [文章编号] 1671-9387(2007)01-0155-06

# Research progress in soil potassium chemistry under long-term fertilization condition

ZHANG Hui-min[1,2,3], LU Jia-long[1], LI Jü-mei[2], XU Ming-gang[2], LIU Hong-xia[3]

(1 *College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
2 *Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*;
3 *College of Agronomy, Henan University of Science and Technology, Luoyang, He'nan* 471003, *China*)

**Abstract**: Effects of long-term fertilization on potassium balance, the content and transformation of K-bearing minerals, and the contents of water soluble K, exchangeable K, non-exchangeable K, and total K in soils are introduced. The characteristics of potassium fixation, release of non-exchangeable K, and $K^+$ adsorption and desorption in soils under long-term fertilization condition are reviewed. This article also summarizes the evaluation of soil potassium availability with quantity-intensity ($Q/I$) parameters after long-term fertilization. Besides, existing problems and further research on soil potassium chemistry under long-term fertilization condition are also discussed.

**Key words**: long-term fertilization; potassium chemistry; fixation; release; absorption; desorption

钾不仅是土壤中含量最高的大量营养元素, 而且是植物必需的营养元素之一。在正常情况下植物吸钾量一般超过吸磷量, 与吸氮量相近, 而喜钾作物需钾量则高于需氮量[1-2]。我国土壤全钾含量为 0.5～25.0 g/kg, 而我国耕地中缺钾土壤总面积高达 0.23 亿 $hm^2$, 一般缺钾(土壤速效钾含量 50～70 mg/kg)和严重缺钾(土壤速效钾含量< 50 mg/kg)土壤面积占总耕地面积的 23%[3-4], 尤其是在我国南方稻麦轮作区缺钾现象表现更为突出。我国北方地区缺钾现象虽然没有南方严重, 但也有施用钾肥可增产的报道[5]。随着我国农业生产水平的不断提高和高产品种的推广, 加之土壤钾有效补充方式之一的有机肥施用量逐年下降, 土壤缺钾面积逐渐扩大。在许多地区, 土壤缺钾已成为限制农业发展的主要因素之一, 而我国又是一个钾肥资源短缺的国家。因此, 土壤钾素化学研究显得尤为重要。关于土壤钾

* [收稿日期] 2005-12-27
[基金项目] 国家农业土壤肥力与肥料效益野外观测重点试验站项目; 国家 973 重点基础研究发展规划项目(2005CB121102)
[作者简介] 张会民(1969- ), 男, 河南宜阳人, 副教授, 博士, 主要从事作物营养及土壤肥力研究。E-mail: zhhm2007@163.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

素研究进展的报道较多[1, 6-11], 而有关长期定位施肥条件下, 土壤钾素化学研究的进展尚未见报道。

肥料长期定位试验信息量丰富、数据准确可靠、解释力强, 具有常规试验不可比拟的优点, 所以其能系统地研究土壤肥力演变和肥效变化规律, 克服因气候年变化对肥效的影响, 能对土壤中养分的平衡、作物对肥料的反应、施肥对土壤肥力的影响、轮作施肥制度的建立和合理施肥等问题进行长期和系统的定位研究, 并做出科学评价, 为农业的可持续发展提供决策依据[12]。本文就长期定位施肥对土壤钾素形态变化、固定和释放, 以及对土壤粘土矿物含量及转化影响的研究进行综述, 旨在为钾肥的合理分配和施用及土壤钾素化学研究提供参考。

## 1 长期定位施肥对土壤钾素形态及钾素平衡的影响

根据钾存在的化学形态及其对植物有效性和测定方法不同, 可以把土壤中的钾分为水溶性钾、交换性钾、非交换性钾和矿物态钾[13]。土壤中各种形态的钾处于动态平衡之中, 长期定位施肥影响土壤不同形态钾素的含量。长期不施钾(包括有机肥)或钾肥施用量不足, 土壤非交换性钾、交换性钾和水溶性钾含量均降低, 而土壤全钾含量降低或变化不明显[14-15]。熊明彪等[16]的研究结果表明, 在紫色土 0~20 cm 和 20~40 cm 土层中, 各施钾处理的水溶性钾、交换性钾(非特殊吸附态钾和特殊吸附态钾)含量下降均不明显, 不施钾处理则呈明显下降趋势。长期施用钾肥(包括有机肥)或化肥和有机肥配合施用, 土壤交换性钾和非交换性钾含量均升高[15, 17-18]。刘树堂等[15]对潮土 25 年的长期定位施肥试验研究表明, 单施有机肥或有机肥配施无机氮肥, 均能明显提高土壤缓效钾的含量; 无机钾肥与氮肥配施能显著提高水溶态钾的含量。姚源喜等[17]的研究表明, 22 年定位施肥后, 以氮钾肥处理提高非石灰性潮土中水溶性钾、非特殊吸附态钾、特殊吸附态钾、矿物态钾含量最多, 依次分别比对照提高 5.49 倍、1.13 倍、2.47 倍和 1.11 倍。长期定位施肥还影响土壤不同粒级颗粒中不同形态钾的含量。Kozlova 等[19]的研究结果表明, 在 30 年定位施肥试验中, 与 NP 处理相比, 所有施钾处理(NPK、有机肥、有机肥+NPK)砂壤生草灰化土粉粒和粘粒部分的交换性钾和非交换性钾含量均显著增加。

长期定位施肥影响土壤钾素的平衡状况。长期不施钾肥或施钾量较低均导致土壤钾素出现亏缺, 施用足量化学钾肥并配合有机肥可维持土壤钾素平衡, 甚至出现盈余。Srivastava 等[20]研究了玉米-小麦-饲用豇豆轮作体系下, 长期定位施肥(27 年)对印度新德里典型 Ustochrept 土壤钾素释放特性的影响, 结果表明, 所有施肥处理中作物携带走的钾素量超过施入的钾素量, 总体上钾素的平衡呈现亏缺状态。张爱君等[21]的研究表明, 长期(18 年)不施钾肥或仅施化学钾肥, 黄潮土钾素平衡始终处于亏缺状态, 有机厩肥-无机化肥配合施用, 土壤钾素可达平衡有余; 在长期定位施肥第 1 年, NP 处理的土壤速效钾含量即达到"最低值", 长期定位施肥 10 年后, NPK 处理土壤速效钾含量趋于稳定。Regmi 等[22]研究了尼泊尔连续 20 年水稻-水稻-小麦连作施肥试验中土壤肥力的变化, 结果表明, NPK 处理和有机肥处理的钾素平衡均处于亏缺状态, 钾素的亏缺量分别为 62.3 和 15.2 kg/(hm$^2$·a)。

## 2 长期定位施肥对土壤含钾矿物含量及转化的影响

长期不施钾肥(包括有机肥), 土壤伊利石逐渐风化转化为蒙脱石和富含蒙脱石的层间矿物[23-25]。长期定位施肥还影响土壤不同粒级颗粒中粘土矿物的含量, Kozlova 等[19]的研究结果表明, 在 30 年长期定位施肥试验中, 与 NP 处理和 NPK 处理相比, 有机肥(FYM)处理和有机肥+NPK(FYM+NPK)处理砂壤生草灰化土细粉粒部分的不稳定矿物含量均增加, 而伊利石含量均降低; 有机肥(FYM)处理粉粒土壤的绿泥石含量降低。Shaimukhametov 等[26]采用 X 射线衍射技术研究了长期定位施肥(63 年)对俄罗斯典型的 Serozem 土壤粘土矿物颗粒组成的影响, 结果表明, 土壤钾素耗竭将导致粘粒中水云母矿物的风化, 同时形成有膨胀结构的矿物。刘冬碧等[27]的研究表明, 无论施钾与否, 在麻砂泥田粘土矿物组成中, 水云母含量下降, 波长 1.4 nm 矿物含量相应上升, 矿物类型由以蛭石为主转变为以波长 1.4 nm 矿物为主, 这主要是由于土壤钾、镁等营养元素长期"入不敷出"所致; 白散泥田土壤粘土矿物组成变化不明显; 灰油砂土粘粒中, 随着水云母含量上升, 波长 1.4 nm 矿物含量相应下降, 这可能主要是粗粒云母类矿物在表层风化的结果。然而, Singh 等[28]也采用 X 射线衍射技术, 研究了英国洛桑试验站 Broadbalk 小麦连作试验中土壤层状硅酸盐矿物含量的变化, 结果表明, 尽管经过长达 153 年的小麦连作施肥, 土壤粘粒中云母矿物含量无任何

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

变化。由此可见, 有关长期定位施肥对土壤含钾矿物含量及转化的影响研究, 尚需随着矿物分析技术精度和准度的提高而继续深入。

## 3　长期定位施肥对土壤钾素固定特性的影响

土壤钾素的有效性受土壤中许多物理化学过程所控制, 其中土壤对钾素的固定作用是最重要的过程之一[29]。一般认为, 土壤对外源钾的固定指受 2∶1型粘土矿物层间钾与交换性钾和水溶性钾之间动态平衡控制的物理化学过程, 粘土矿物类型、有机质含量、pH、CEC、土壤水分状况、钾离子饱和度和土壤培肥措施及耕作方式等均是影响这一过程的主要因素[30-35]。长期定位施肥可通过影响上述因素中的 1 个或几个因素从而影响土壤钾素的固定特性, 其中有关长期定位施肥对土壤有机质含量影响的报道较多。张夫道等[36]的研究表明, 通过 12 年长期定位施肥, 一年一熟种植制度下的黑土有机质含量提高 1. 7%～ 2. 7%; 一年两熟种植制度下的红壤有机质含量增加 5. 9%; 一年三熟(蔬菜- 水稻- 水稻轮作) 种植制度下的水稻土有机质含量增加 49. 35%。土壤阳离子交换量(CEC) 与土壤有机质含量和粘粒含量存在高度的相关性[37-38], 所以长期定位施肥不仅使土壤有机质含量增加, 而且也有可能使 CEC 增加。Gao 等[39]的研究表明, 连续 18 年施用养牛场有机肥后, 加拿大典型 Haploboroll 土壤(0～ 15 cm 土层) 总有机碳(TOC) 含量和 CEC 均明显增加。Sardi 等[40]的研究表明, 土壤腐殖质含量、pH、粘粒矿物类型及粘粒中的 CEC 均能影响土壤钾素的固定量。另外, 对于酸性红壤而言, 长期施肥会影响土壤 $Ca^{2+}$ 和 $Mg^{2+}$ 的含量及 $K^+$ 的饱和度, 进而影响土壤钾素的固定量。徐明岗等[41]的研究表明, 经过 14 年的定位施肥, N 处理和 NPK 处理中的土壤交换性 $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$ 含量较开始施肥时分别下降 84. 5%, 65. 4% 和 78. 7%, 63. 9%; 而有机肥处理的土壤交换性 $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$ 含量较开始施肥时分别增加 49. 2% 和 43%。目前, 关于长期定位施肥对土壤钾素固定特性影响的研究报道较少, 长期施用钾肥或有机肥会使土壤钾素的固定量降低, 而施用氮肥一般不降低土壤钾素的固定量[26, 42]。Shaimukhametov 等[26]的研究表明, 长期定位施肥(63 年) 及轮作会影响俄罗斯典型的 Serozem 土壤钾素的固定量, 其中 NPK 处理和有机肥处理的土壤钾素固定量小于不施肥处理, 轮作处理的土壤钾素固定量最高, 且高于不施肥处理。

## 4　长期定位施肥对土壤非交换性钾释放特性的影响

非交换性钾是土壤钾库中对作物钾营养起重要作用的组分。非交换性钾释放指粘土矿物层间钾缓慢扩散进入液相的过程, 其释放速率决定着土壤的供钾能力。非交换性钾释放动力学性质在土壤供钾能力评价中有着非常重要的作用。鲍士旦等[43-45]较为系统地研究了一些土壤中钾素的状况及其与作物生长的关系发现, 大麦生长总量和总吸钾量与来自非交换性钾的量密切相关, 在总吸钾量中来自非交换性钾的量占 61%～ 80. 1%; 水稻吸钾总量中约有 39. 0%～ 72. 7% 来自土壤非交换性钾; 黑麦草吸钾总量中约有 50%～ 80% 来自非交换性钾。在自然条件下, 土壤非交换性钾的释放受土壤矿物学性质、土壤颗粒大小、干湿和冻融交替过程、植物根系及微生物活动、土壤溶液中 $K^+$ 浓度和非交换性钾含量、施肥等因素的影响。长期定位施肥通过影响其中的某些因素而影响土壤非交换性钾的释放, 增施钾肥或有机肥或二者配合施用均可提高土壤非交换性钾的释放速率。Singh 等[46]的研究表明, 连续 7 年种植作物而不施牛粪时, 印度典型 Haplustert 土壤非交换性钾释放量从最初的 236 mg/kg 下降到 195 mg/kg; 当施用 4, 8 和 16 t/hm$^2$ 牛粪时, 土壤非交换性钾的释放量分别为 229, 245 和 246 mg/kg; 施用牛粪加速了土壤钾的矿化, 导致土壤的可支持性降低。Srivastava 等[20]研究了玉米- 小麦- 饲用豇豆轮作体系下, 长期定位施肥(27 年) 对印度新德里典型 Ustochrept 土壤钾素释放特性的影响, 结果表明, 抛物线扩散方程能够描述土壤非交换性钾在 $CaCl_2$ 溶液中的释放速率, 不同施肥处理的土壤非交换性钾释放速率常数($b$) 不同, 其中 0～ 15 cm 土层中 NP 处理的 $b$ 值最小, NPK+ 有机肥处理的 $b$ 值最大。Mercik 等[47]的研究表明, 连续 20 年不施钾肥作物依然能从波兰典型的 Haplic 淋溶土中(0～ 70 cm 土层) 吸收的钾量为 50 kg/(hm$^2$·a), 这主要是由于土壤非交换性钾的释放所致, 土壤非交换性钾的减少量为 41 kg/(hm$^2$·a)。

## 5　长期定位施肥对土壤 $K^+$ 吸附和解吸特性的影响

土壤水溶性 $K^+$ 和交换性 $K^+$ 是土壤钾库中最活跃的组分, $K^+$ 在固液相间的转化速率与数量取决

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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的固钾能力。在作物生长过程中,土壤中可被作物吸收的钾主要包括溶解在土壤溶液中的钾、吸附(弱结合力)在土壤颗粒表面的钾,有时还包括吸附(强结合力)在粘土矿物晶体边缘的钾和粘粒矿物层间的钾(非交换性钾)。影响土壤 $K^+$ 吸附和解吸的因素有土壤温度、pH、粘粒含量、土壤矿物组成、土壤水分状况、施肥及重金属污染等[48-52]。长期定位施肥可通过影响上述其中 1 个或几个因素而影响土壤 $K^+$ 的吸附和解吸。长期施用 N 和 NP 肥会导致土壤对钾的特殊吸附位点($K_X$)增加[51],说明长期施肥能提高土壤对 $K^+$ 的吸附能力,从而提高了土壤的保钾能力。长期定位施肥影响土壤 $K^+$ 吸附和解吸的平衡时间和平衡量。熊明彪等[53]的研究表明,不同施肥处理的紫色土 $K^+$ 吸附和解吸反应分别在 24~32 min 和 46~64 min 达到平衡,吸附和解吸平衡量分别为 141~192 cmol/kg 和 116~175 cmol/kg; CEC 及粘粒含量是影响吸附平衡时间、吸附平衡量的主要因素; CEC 和交换钾量是影响解吸平衡时间、解吸平衡量的重要因素; 长期(10 年)不同施肥处理对土壤 CEC、粘粒含量及交换钾量产生影响,从而影响了紫色土 $K^+$ 吸附和解吸平衡时间及吸附和解吸平衡量。

## 6 长期定位施肥对土壤钾素容量和强度关系($Q/I$)的影响

评价土壤钾素对作物的有效性不仅要考虑土壤钾素的瞬时供应强度($I$),而且还应考虑钾素的长期供应容量($Q$)和释放速率($R$)。Beckett[54]首次利用 $Q/I$ 关系曲线评价土壤的钾素状况。国内外的研究[55-57]指出,测定土壤钾素 $Q/I$ 关系曲线可获得一系列有用的钾热力学参数,平衡溶液中钾离子的活度比 $AR_e^K$ 可作为平衡时钾素有效性高低的度量,平衡前后溶液中钾素的浓度差 $\pm\Delta K$ 可作为衡量土壤中有效钾多寡的指标,钾位缓冲容量 $PBC^K$ 可用于度量土壤保持钾位势能力的大小。通过研究长期定位施肥条件下土壤钾素 $Q/I$ 关系,对评价长期耕种条件下土壤供钾特性和钾肥的合理施用有非常重要的意义。有研究[57-58]表明,长期施用钾肥,土壤钾的 $AR_e^K$ 增加, $\pm\Delta K$ 的绝对值增加, $PBC^K$ 变化不大。Rupa 等[58]的长期肥料试验(27 年)结果表明,不同施肥处理的 $AR_e^K$ 大小顺序为: NPK+ 有机肥> NPK> 对照> N > NP; NPK+ 有机肥处理和 NPK 处理的 $-\Delta K$ 绝对值增加,说明有较多的钾释放到土壤溶液中。酸性土壤长期施用石灰会使 $AR_e^K$ 减小, $PBC^K$ 增加, $\pm\Delta K$ 绝对值增加,这主要是因为施用石灰增加了土壤的 CEC[57]。不同耕作制度及氮肥用量也会影响土壤钾素的 $Q/I$ 曲线参数。Evangelou 等[59]的研究表明,美国肯塔基州典型的粉质壤土经过 16 年的不同定位施肥和不同耕作制度处理,其中施氮肥且免耕土壤和不施氮肥且免耕土壤(0~10 cm 土层)的活性 $K^+$ 含量和 $AR_e^K$ 均最大,不施氮肥且采用传统耕作方式土壤(0~5 cm)的 $PBC^K$ 值最大,而不施氮肥且免耕土壤(0~5 cm)的 $PBC^K$ 值最小。另外,长期施用含 $SO_4^{2-}$ 的化肥,水稻土钾素 $AR_e^K$ 值较高, $\pm\Delta K$ 的绝对值较大; 而长期施用含 $Cl^-$ 的化肥,水稻土钾素的 $AR_e^K$ 值较低, $\pm\Delta K$ 的绝对值较小; 不同阴离子处理下水稻土的 $PBC^K$ 值也以 $SO_4^{2-}$ 处理较大, $Cl^-$ 处理较小,但它们间的差异相对较小,说明不同阴离子处理,水稻土对外源钾的缓冲能力虽然在一定程度上受阴离子类型的影响,但这种影响相对较弱[60]。

## 7 结语与展望

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土壤钾素的平衡及形态变化、固定特性和非交换性钾的释放特性,可以深入了解长期耕种条件下土壤钾素复杂的化学行为,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。一般而言,长期不施钾肥或有机肥,或钾肥施用量较少,均能导致土壤各种形态钾含量降低,导致土壤钾素平衡处于亏缺状态; 而施用钾肥或有机肥,或化肥与有机肥配施均能增加土壤一些形态钾的含量,保持土壤钾素的平衡。钾素具体变化情况因土壤类型、施肥量和耕作制度的不同而异。有关长期定位施肥对土壤含钾矿物含量及转化影响的研究结果不一致,还有待随着矿物分析技术准确性的进一步提高而继续深入研究。长期定位施肥通过影响土壤粘粒含量、粘粒矿物组成、有机质含量、pH、CEC 和钾离子饱和度等其中的 1 个或几个因素,从而影响土壤钾素的固定、非交换性钾的释放、$K^+$ 的吸附和解吸特性。

长期定位施肥条件下关于土壤碳、氮、磷的研究较多,而关于土壤钾素化学的研究报道相对较少,且多数钾的研究又集中在长期定位施肥对土壤钾素平衡、土壤水溶性钾、交换性钾、非交换性钾和全钾含量变化的影响方面,而关于长期定位施肥条件下土

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

壤供钾特性研究在国内尤其显得比较薄弱, 这可能是由于国内的肥料长期定位试验虽然数量多、分布广, 但与国外相比, 时间尚短, 部分试验站还面临着缺少经费的问题, 以后随着国家对肥料长期定位试验研究越来越重视, 应加强长期定位施肥条件下土壤钾素化学的研究, 尤其是以下几个方面值得深入研究: (1) 长期定位施肥对土壤钾素固定的影响及其机理; (2) 长期定位施肥对土壤非交换性钾释放动力学的影响及其机制; (3) 长期定位施肥对土壤 $K^+$ 吸附和解吸特性的影响及其机理。

**致谢**: 本论文的部分分析在农业部植物营养与养分循环重点开放实验室完成, 在此表示感谢。

## [参考文献]


[1] 金继运. 土壤钾素研究进展[J]. 土壤学报, 1993, 30(1): 94-101.

[2] Sparks D L. Kinetics of ionic reactions in clay minerals and soils[J]. Adv Agron, 1985, 38: 231-246.

[3] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国化肥区划[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1986.

[4] 鲁如坤. 我国土壤氮磷钾的基本状况[J]. 土壤学报, 1989, 26(3): 280-286.

[5] 王泽良, 金继运, 程明芳, 等. 北方不同土壤的钾素状况及土壤钾素平衡[C]//谢建昌, 周健民, Hardter R, 等. 北方土壤钾素肥力及其管理. 北京: 中国农业科技出版社, 1995: 17-24.

[6] 杨振明, 阎飞, 韩丽梅. 土壤钾素研究的新进展[J]. 吉林农业大学学报, 1998, 20(3): 99-106.

[7] Kirkman J H, Basker A, Surapaneni A, et al. Potassium in the soils of New Zealand—a review[J]. New Zealand J Agri Res, 1994, 37: 207-227.

[8] 谢建昌, 周健民. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展[J]. 土壤, 1999, 31(5): 244-245.

[9] 梁成华, 魏丽萍, 罗　磊. 土壤固钾与释钾机制研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 679-684.

[10] 徐晓燕, 马毅杰, 张瑞平. 土壤中钾的转化及其与外源钾相互关系的研究进展[J]. 土壤通报, 2003, 34(5): 489-492.

[11] 潘大伟, 梁成华, 杜立宇. 土壤含钾矿物的释钾研究进展[J]. 土壤通报, 2005, 36(2): 253-258.

[12] 傅高明, 李纯忠. 土壤肥料的长期定位试验[J]. 世界农业, 1989(112): 22-25.

[13] Sparks D L. Potassium dynamics in soils[J]. Adv Soil Sci, 1987, 6: 1-63.

[14] Lal S, Mathur B S, Sinha K. Effect of long-term fertilization, manuring and liming of an Alfisol on maize, wheat and soil properties- III. Forms of potassium[J]. J Indian Soc Soil Sci, 1990, 38: 21-26.

[15] 刘树堂, 刘培利, 王　锋, 等. 冬小麦-夏玉米轮作中长期定位施肥的土壤钾素变化研究[J]. 河北农业科学, 2005, 9(1): 10-14.

[16] 熊明彪, 舒　芬, 宋光煜, 等. 多年定位施肥对紫色土钾素形态变化的影响[J]. 四川农业大学学报, 2001, 19(1): 44-47.

[17] 姚源喜, 刘树堂, 郇恒福. 长期定位施肥对非石灰性潮土钾素状况的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 241-244.

[18] 孙伟红, 劳秀荣, 魏志强. 秸秆与氮磷肥长期配施对土壤钾素形态的影响[J]. 中国农学通报, 2004, 20(3): 159-168.

[19] Kozlova O N, Lukin S M, Sokolova T A, et al. The contribution of different particle-size fractions to the supply of sandy loam Soddy-Podzolic soil with exchangeable and unexchangeable potassium[J]. Eurasian Soil Sci, 2000, 33(2): 165-172.

[20] Srivastava S, Rupa T R, Swarup A, et al. Effect of long-term fertilization and manuring on potassium release properties in a Typic U stochrept[J]. J Plant Nutr Soil Sci, 2002, 165: 352-306.

[21] 张爱君, 马　飞, 张明普. 黄潮土的钾素状况与钾肥效应的长期定位试验[J]. 江苏农业学报, 2000, 16(4): 237-241.

[22] Regmi A P, Ladha J K, Pathak H, et al. Yield and fertility trends in a 20-year rice-rice-wheat experiment in Nepal[J]. Soil Sci Soc Am J, 2002, 66: 857-867.

[23] M ∅berg J P, Dissing N J. Mineralogical changes in soils used for potassium-depletion experiments for some years in pots and in the field[J]. Acta Agriculture Scandinavica, 1983, 33: 21-27.

[24] Dissing N J, M ∅berg J P. The influence of K-depletion on mineralogical changes in pedons from two field experiments and in soils from four pot experiments[J]. Acta Agriculture Scandinavica, 1984, 34: 391-399.

[25] Tributh H, van Boguslawski E, van Lieres A, et al. Effect of potassium removal by crops on transformation of illitic clay minerals[J]. Soil Sci, 1987, 143: 404-409.

[26] Shaimukhametov M S H, Mamadaliev G N. The effect of long-term fertilization on the potassium status and mineralogy of clay particles in typical Serozem[J]. Eurasian Soil Sci, 2003, 36(9): 994-1002.

[27] 刘冬碧, 鲁剑巍, 万运帆, 等. 长期施钾对湖北省几种土壤粘土矿物组成影响的初步研究[J]. 湖北农业科学, 1999(6): 27-30.

[28] Singh B, Goulding W T. Changes with time in the potassium content and phyllosilicates in the soil of the Broadalk continuous wheat experiment at Rothamsted[J]. Eur J Soil Sci, 1997, 48: 651-659.

[29] Ningappa N, Vasuki N. Potassium fixation in acid soils of Karnakat[J]. J Indian Soc Soil Sci, 1989, 37: 391-392.

[30] Walker G F. On the differentiation of vermiculites and smectites in clays[J]. Clay Miner Bull, 1957, 3: 154-163.

[31] Singh P. Some soil character and potash fixing power of paddy soils[J]. J Indian Soc Soil Sci, 1975, 23: 123-124.

[32] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 55-99.

[33] 封　克, 殷士学, 张山泉, 等. 矿物钾在作物营养中的意义[J]. 土壤通报, 1992, 23(2): 58-60.

[34] Nielsen J, Dissng. Fixation and release of potassium and am-


© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

monium ions in Danish soils[J]. Plant Soil, 1972, 36(1): 71-88.

[35] 范钦桢 铵对土壤钾素释放、固定的影响[J]. 土壤学报, 1993, 30(3): 246-251.

[36] 张夫道, 张淑香, 赵秉强, 等. 不同土壤不同种植制度下土壤肥力与肥料效益演变研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(增刊): 9-15.

[37] Manrique L A, Jones C A, Dyke P T. Predicting cation exchange capacity from soil physical and chemical properties[J]. Soil Sci Soc Am J, 1991, 55: 787-794.

[38] Thompson M L, Zhang L H, Kazemi M, et al. Contribution of organic matter to cation exchange capacity and specific surface area of fractionated soil materials[J]. Soil Sci, 1989, 148: 250-257.

[39] Gao G, Chang C. Changes in CEC and particle size distribution of soils associated with long-term annual applications of cattle feedlot manure[J]. Soil Sci, 1996, 161: 115-120.

[40] Sardi K, Csitari G. Potassium fixation of different soil types and nutrient levels[J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 1998, 29(11-14): 1843-1850.

[41] 徐明岗, 文石林, 李菊梅, 等. 红壤特性与高效利用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2005: 180-183.

[42] Liu Y J, Laird D A, Barak P. Release and fixation of ammonium and potassium under long-term fertility management[J]. Soil Sci Soc Am J, 1997, 61: 310-314.

[43] 鲍士旦, 马建锋. 土壤钾素供应状况的研究: Ⅲ. 几种不同土壤中钾固定与释放[J]. 南京农业大学学报, 1988, 11(3): 74-78.

[44] 鲍士旦, 史瑞和. 土壤钾素供应状况的研究: Ⅱ. 土壤供钾状况与水稻吸钾间的关系[J]. 南京农学院学报, 1984, 8(4): 70-78.

[45] 鲍士旦, 史瑞和. 土壤钾素供应状况的研究: Ⅰ. 江苏省几种土壤的供钾状况与禾本科作物(大麦)对钾吸收能力的关系[J]. 南京农学院学报, 1982, 6(1): 59-66.

[46] Singh M, Tripathi A K, Reddy D D. Potassium balance and release kinetics of non-exchangeable K in a Typic Haplustert as influenced by cattle manure application under a soybean-wheat system[J]. Aust J Soil Res, 2002, 40: 533-541.

[47] Mercik S, Stepien W, Labetowicz J. The fate of nitrogen, phosphorus and potassium in long-term experiments in Skierniewice[J]. J Plant Nutr Soil Sci, 2000, 163: 273-278.

[48] Ioannou A, Dimirkou A, Doula M, et al. Kinetics of potassium desorption by Alfisols of Greece[J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 1994, 25(9-10): 1355-1372.

[49] Doula M, Ioannou A, Dimirkon A. Thermodynamics of potassium exchange in calcium bentonite(Ca-b)[J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 1995, 26(9-10): 1353-1545.

[50] 王 玉, 张一平. 垄土不同粒级组分 $K^+$ 吸附研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 241-247.

[51] Sharma K N, Harjit S, Bhandari A L. Influence of long term fertilization on potassium adsorption kinetics parameters[J]. J Potassium Res, 1994, 10(4): 368-379.

[52] Tu C, Zhang C R, Chen H M, et al. Effects of heavy metal pollution on potassium behavior in Typic Udic Ferrisol[J]. Pedosphere, 2000, 10(1): 21-30.

[53] 熊明彪, 田应兵, 宋光煜, 等. 紫色土 $K^+$ 吸附解吸动力学研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(3): 354-361.

[54] Beckett P H T. Studies on soil potassium: Ⅱ. The immediate $Q/I$ relations of labile potassium in the soil[J]. J Soil Sci, 1964, 15(1): 9-23.

[55] Rao A S, Adinarayana V, Rao I V S. Quantity-intensity relationships of potassium in representative soils of Andhra Pradesh[J]. J Indian Soc Sci, 1984, 32: 240-243.

[56] Roy H K, Kumar A, Sarkar A K. Quantity-intensity relations of potassium in a representative acid sedentary soil of Ranchi[J]. J Indian Soc Sci, 1991, 39: 175-177.

[57] Sparks D L, Liebhardt W C. Effect of long-term lime and potassium applications on quantity-intensity ($Q/I$) relationships in sandy soil[J]. Soil Sci Soc Am J, 1981, 45: 786-790.

[58] Rupa T R, Srivastava S, Swarup A, et al. The availability of potassium in Aeric Haplaquept and typic Haplustert as affected by long-term cropping, fertilization and manuring[J]. Nutrient cycling in Agroecosystems 2003, 65: 1-11.

[59] Evangelou V P, Blevins R L. Effect of long-term tillage systems and nitrogen addition on potassium quantity-intensity relationships[J]. Soil Sci Soc Am J, 1988, 52: 1047-1054.

[60] 曾希柏, 刘更另. $SO_4^{2-}$ 和 $Cl^-$ 对稻田土壤养分及其吸附解吸特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 187-193.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net