

# 水旱轮作下根区与非根区黄褐土钾素动态研究

李小坤<sup>1</sup>, 鲁剑巍<sup>1\*</sup>, 吴礼树<sup>1</sup>, 陈防<sup>2</sup>, 丛日环<sup>1</sup>, 廖志文<sup>1</sup>, 姜存仓<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 华中农业大学资源与环境学院, 湖北武汉 430070; <sup>2</sup> 中国科学院武汉植物园, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 采用分室根箱试验, 研究了油菜—水稻轮作条件下黄褐土根区与非根区土壤钾素动态变化特征, 以期为土壤供钾机制研究及合理的根际养分调控提供依据。结果表明, 轮作前季(油菜季)前期, 根区土壤水溶性钾和交换性钾首先出现相对亏缺; 随着油菜生长和吸钾强度的增大, 根区非交换性钾含量也显著降低, 非根区内、中、外区土壤水溶性钾向根区迁移, 交换钾和非交换钾向水溶钾转化, 含量均逐渐降低, 且距根区越近, 降低幅度越大。轮作后季(水稻季)前期, 淹水促进了水溶性钾向根区的扩散, 非根区外区水溶钾和交换性钾含量明显降低; 随着水稻生长和吸钾强度增大, 根区与非根区土壤水溶钾和交换性钾含量降低至一定程度时就不再减少, 而非交换性钾显著降低。说明作物吸收的钾主要来自于根区, 并由非根区钾逐渐向根区迁移, 距根区越近, 对作物吸钾量的贡献越大。在一个轮作期内, 非交换性钾是黄褐土主要供钾形态, 其次是交换性钾和水溶性钾。

**关键词:** 油菜—水稻轮作; 黄褐土; 根区; 钾素形态; 转化

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2009)04-0850-07

## Potassium dynamics in root-zone and non root-zone in yellow cinnamon soil with paddy-upland rotation

LI Xiao-kun<sup>1</sup>, LU Jian-wei<sup>1\*</sup>, WU Li-shu<sup>1</sup>, CHEN Fang<sup>2</sup>, CONG Ri-huan<sup>1</sup>, LIAO Zhi-wen<sup>1</sup>, JIANG Cun-cang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

<sup>2</sup> Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Potassium dynamics in the root-zone and the non root-zone in yellow cinnamon soil with a rapeseed-rice rotation system was studied through a rhizobox device to provide evidence for research on soil K supplying mechanism and reasonable control of rhizosphere nutrition. The results show that soil water soluble K and exchangeable K in the root-zone are reduced at early stage of rapeseed growth under the rapeseed-rice rotation. Along with rapeseed growth and K uptake, soil non-exchangeable K in the root-zone are also decreased significantly. Soil water soluble K in the inner (0-20 mm), middle (20-40 mm) and outer (40-60 mm) parts of the non root-zone are moved forward to the root-zone. Soil exchangeable K and non-exchangeable K are transformed to water soluble K and decreased gradually. In the early stage of rice growth, water-log cultivating practice promotes the diffusion of soil water soluble K from the non root-zone to the root-zone and transition of exchangeable K to water soluble K. Along with the growth of rice and more K uptake, soil non-exchangeable K in each part is decreased significantly, while soil water soluble K and exchangeable K are not decreased. These results indicate that K uptake by crops is mainly contributed by the root-zone, and K in the non root-zone can be moved to the root zone gradually depending on the distance. Within the rotation system, soil non-exchangeable K is the main potassium source, followed by soil exchangeable K and water soluble K.

**Key words:** rapeseed-rice rotation; yellow cinnamon soil; root-zone; potassium forms; transformation

收稿日期: 2008-08-20 接受日期: 2008-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(40571090)资助。

作者简介: 李小坤(1979—)男, 湖北襄樊人, 博士研究生, 研究方向为土壤肥力。E-mail: lixiaokun@webmail.hzau.edu.cn

\* 通讯作者 E-mail: lujianwei@mail.hzau.edu.cn

钾是植物生长所必需的营养元素,也是土壤中含最高的大量营养元素,在地壳所有矿质营养元素中居第4位<sup>[1]</sup>。土壤中钾的形态可分为水溶性钾、交换性钾、非交换性钾和结构钾,就对作物的有效性而言,水溶性钾和交换性钾称为速效钾、非交换性钾称为缓效钾、而结构钾则称为无效钾<sup>[2]</sup>。各种形态钾之间可以相互转化,并处于一个动态的平衡体系中。作物需钾总量中只有一小部分在根表附近以交换态钾和水溶态钾存在。随着 $K^+$ 被不断吸收利用,产生了一个径向的垂直于根轴的钾的浓度梯度<sup>[3]</sup>,从而形成了非根际钾向根部扩散的动力。作物生长状况和土壤含水量都是影响钾向根系扩散的重要因素<sup>[4]</sup>。研究钾在土壤中的迁移和形态变化有助于了解钾的土壤化学行为和指导合理施肥。以往关于钾扩散迁移的研究多数是集中在田间土壤剖面上的淋溶迁移<sup>[5-6]</sup>;也有一些关于钾在肥际微域中的迁移和转化的研究,如:董元彦<sup>[7]</sup>利用室内培养试验研究了在施用 $KH_2PO_4$ 时钾的迁移及扩散系数;杜振宇等<sup>[8]</sup>采用室内土柱培养试验,研究了不同施用量和培养时间下钾在肥际微域中的迁移和转化,但很少有涉及到作物生长对钾的形态转化和迁移影响的报道。

水旱轮作是我国重要的作物种植系统,由于作物收获每年从土壤中带走钾量高达200~360 kg/hm<sup>2</sup>,而钾肥的投入远不能维持钾素平衡<sup>[9]</sup>,农田钾素亏缺已成为农业生产持续发展的限制因素之一<sup>[10]</sup>。本研究采用分室根箱试验,研究了油菜—水稻轮作条件下黄褐土根区与非根区土壤不同形态钾素含量变化特征,揭示水旱轮作条件下根区与非根区土壤不同形态钾素变化规律,以期土壤供钾机制研究及进行合理的根际养分调控提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验方法

根箱试验所用土壤为第四纪Q3黄土母质发育而成的黄褐土,取自湖北省襄樊市襄北农场水稻田犁耕层(0—20 cm)。质地为粘土,pH值6.9,有机质14.9 g/kg,水溶性钾5.5 mg/kg,交换性钾82.8 mg/kg,非交换性钾608.8 mg/kg,矿物钾15.2 g/kg。供试作物品种为甘蓝型双低油菜华双4号,杂交水稻两优培九。

所用根箱长×宽×高为140 mm×160 mm×170 mm,分为三室,中间(内室)为根区土壤,左右两室(外室)为非根区土壤,外室按距根区的距离分为内

区(距根区0—20 mm)、中区(距根区20—40 mm)和外区(距根区40—60 mm),形成7个等分(20 mm)的区域。根箱用二级PVC板切割、焊接而成,各室之间均由孔径为30 μm的尼龙网隔开。将风干后土壤过2 mm筛,称取4.0 kg,与肥料拌匀后装入根箱,每区土壤约0.57 kg。

试验采用油菜—水稻轮作方式进行。设不种作物(对照)和种作物2个处理,4次重复。轮作前季种植油菜,每千克土施N 0.2 g、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.15 g、MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.25 g、CaCl<sub>2</sub> 0.1 g,肥料品种分别为分析纯尿素、NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O和CaCl<sub>2</sub>;微量元素肥料采用1000倍阿农营养液配方<sup>[11]</sup>,每千克土加1.0 mL;各处理均不施用钾肥。氮肥均以1/3基施,剩余2/3平均分成两次以营养液追施,磷、钙、镁、微肥等一次性基施。油菜季结束后,取出各区土壤,收集根区油菜根系,将各区土壤与水稻季基肥拌匀后还原至各区,施肥用量同油菜季(7区平均分配单独施用),静置3 d,然后浇水、播种。

种作物处理根区每盆播5粒种子,10 d后定苗2棵。油菜季每隔2~3 d浇一次水,浇水量根据称重法而定,保持土壤含水量在25%左右,蒸馏水从根箱四角的管子导入。水稻季蒸馏水从表面浇入,在整个生育期基本保持表面有一浅层水。油菜季于2005年12月3日施基肥、播种,根据油菜植株生长进程在2006年2月23日和4月4日分2次追施氮肥,5月28日油菜收获。水稻季各处理与油菜季相应处理在同一根箱中进行,于6月30日施基肥、播种,根据生育进程在8月15日和9月14日分2次追施氮肥,11月11日收获。

### 1.2 土样采集与测试分析方法

油菜和水稻生长期各取土样3次,前2次根据作物的生长情况(生物量大小)来确定取样时间,第3次在作物收获后取样。具体取样时间为:油菜季3次取样分别在2006年2月18日、5月4日和5月29日,然后取出根系;水稻季3次取样分别在8月27日、9月27日和1月11日,并取出根系。

采用长450 mm、直径为6 mm的圆柱形螺旋取样器垂直插入各区土壤,随机取点5个,混合均匀后原样测定各种形态钾。这种取样方法对作物根系的影响很小,可保证作物正常生长。

土壤水溶性钾按10:1水土比用蒸馏水浸提,速效性钾按10:1液土比用1.0 mol/L中性NH<sub>4</sub>OAc浸提,酸溶性钾按10:1液土比用1.0 mol/L的热HNO<sub>3</sub>浸提,全钾用NaOH熔融浸提,过滤后用火焰光度计

测定。同时测定土壤含水量,换算成风干土样中各种形态钾含量。

土壤交换性钾 = 速效性钾 - 水溶性钾;

土壤非交换性钾 = 酸溶性钾 - 速效性钾;

土壤矿物钾 = 全钾 - 酸溶性钾。

试验数据的差异显著性水平( $P < 0.05$ )通过最小显著法(LSD)进行检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 水溶性钾

油菜—水稻轮作下,不种作物处理(CK)土壤水溶性钾含量在轮作前季(油菜季)有先升高后降低的趋势,轮作后季(水稻季)变化不大。轮作结束时,CK土壤水溶性钾含量与试验前相比增加2.6 mg/kg。

图1看出,油菜季前期(油菜播种后77 d),种作物处理根区水溶性钾含量与CK相比降低12.2 mg/kg,降幅为44.9%,差异达显著水平;非根区内、中、外区降低了2.1、2.8、0.7 mg/kg,降幅分别为7.6%、10.3%和2.7%,差异不明显,说明由于油菜生长吸钾导致根区首先出现相对亏缺。油菜季中期(油菜播种后153 d),种作物处理根区和非根区内、

中区土壤水溶性钾含量与CK相比降低12.4和10.3、5.6 mg/kg,降幅分别为54.3%和45.2%、24.7%,差异均达显著水平,说明随着油菜的生长,吸钾强度增大,非根区水溶钾逐渐向根区迁移,也出现相对亏缺。油菜季末期(油菜播种后178 d),种作物处理根区和非根区内区土壤水溶性钾含量与CK相比,降幅分别为44.3%和38.5%,与中期相比略有降低;但非根区中区和外区降幅分别为28.2%和15.5%,明显比中期高,说明根区水溶钾含量降低至一定程度时就不再减少,而非根区水溶钾继续向根区迁移被吸收利用。

图1还看出,轮作后季水稻季前期(油菜播种后263 d,水稻播种后57 d),种作物处理根区和非根区内、中、外区土壤水溶性钾含量与CK相比降幅分别为75.9%和52.6%、28.4%、25.0%,明显高于油菜季末期,说明水稻季淹水促进了非根区水溶钾向根区的扩散。水稻季中期(油菜播种后292 d,水稻播种后87 d),各区水溶性钾含量与CK相比降幅分别为76.5%和49.2%、28.8%、20.2%,与水稻季前期相差不大,说明此阶段水稻吸收利用的主要是其他形态的钾。水稻季末期(油菜播种后341 d,水稻播种后131 d)与中期表现一致。

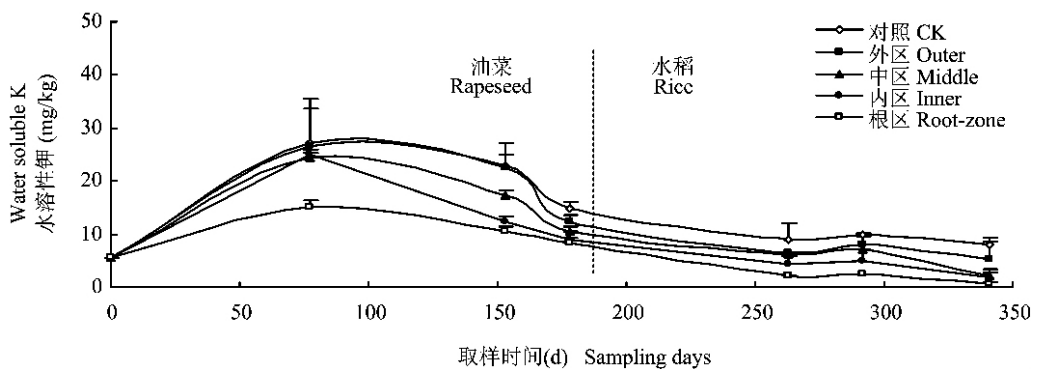


图1 油菜—水稻轮作条件下根区与非根区土壤水溶性钾变化

Fig.1 Dynamics of soil water soluble K in the root-zone and non root-zone under rapeseed-rice rotation

### 2.2 交换性钾

油菜—水稻轮作下,不种作物处理交换性钾含量在轮作前季(油菜季)前期变化不大,油菜季后期有降低的趋势;轮作后季(水稻季)有降低的趋势。轮作结束时,CK交换性钾含量与试验前土壤相比降低12.3 mg/kg(图2)。

油菜季前期,种作物处理根区交换性钾首先出现相对亏缺。油菜季中期,随着油菜生长和吸钾强

度的增大,非根区水溶钾逐渐向根区迁移,非根区土壤交换性钾则向水溶性钾方向转化被吸收利用,也逐渐出现相对亏缺。油菜季末期,各区交换性钾继续向水溶钾转化,被作物吸收利用。水稻季前期,非根区水溶钾向根区的扩散速度增加,钾素平衡被打破,交换性钾向水溶钾方向转化。水稻季中期随着水稻的生长和吸钾强度增大,根区和非根区交换性钾降低至一定程度时也不再减少,与水溶性钾一致。

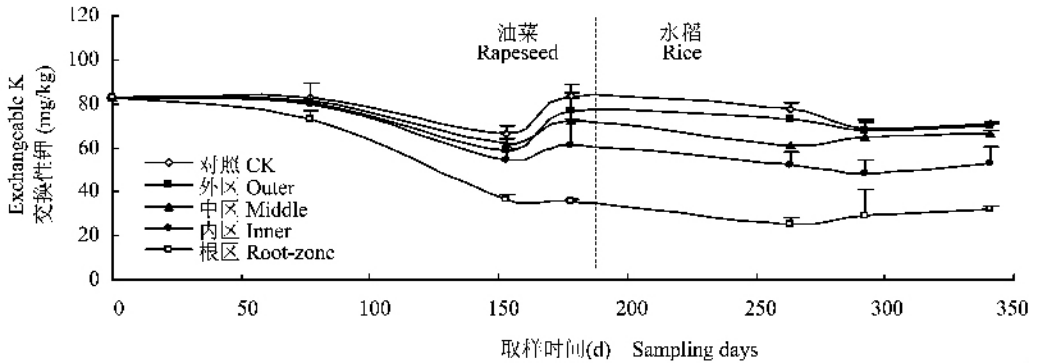


图2 油菜—水稻轮作条件下根区与非根区土壤交换性钾变化

Fig.2 Dynamics of exchangeable K in root-zone and non root-zone soil under rapeseed-rice rotation

### 2.3 非交换性钾

图3表明,油菜—水稻轮作下,不种作物处理非交换性钾含量在油菜季有先降低后升高的趋势;水稻季变化与油菜季相同。轮作结束后,CK非交换性钾含量与试验前土壤相比增加3.5 mg/kg。油菜季前期,种作物处理各区非交换性钾与CK相比无显著变化;油菜季中期,随着油菜生长和吸钾强度的增大,根区和非根区内区非交换性钾首先出现亏缺;

油菜季末期,非根区中区、外区非交换性钾含量大幅度降低,说明其向水溶性钾转化,被作物吸收利用。种水稻后,前期水稻生长量不大,从土壤中吸收的钾不多,各区非交换性钾含量与油菜季末期相比变化不大;水稻季中期随着水稻的生长和吸钾强度增大,根区和非根区非交换性钾显著降低;水稻季末期,各区非交换性钾含量继续降低。

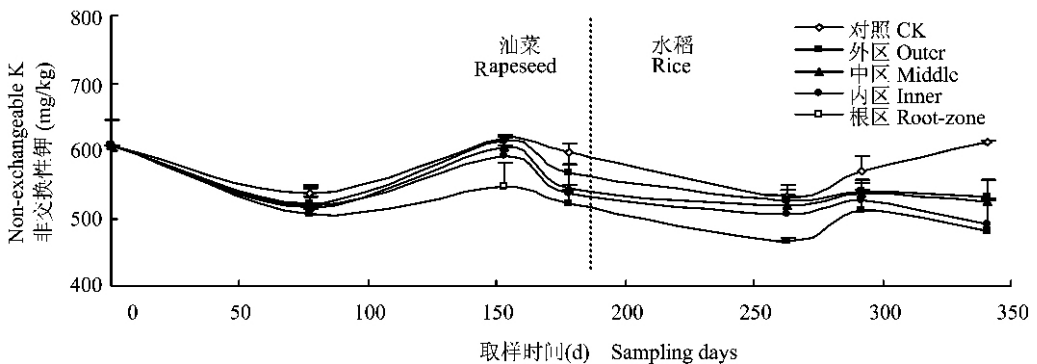


图3 油菜—水稻轮作条件下根区与非根区土壤非交换性钾变化

Fig.3 Dynamics of non-exchangeable K in root-zone and non root-zone soil under rapeseed-rice rotation

### 2.4 作物吸钾来源

油菜—水稻轮作后,从根区与非根区土壤各形态钾素含量的变化(表1)可以看出,根区土壤水溶性钾、交换性钾和非交换性钾含量降低程度显著高于非根区。非根区土壤距根区越近,水溶钾、交换钾和非交换钾含量降低的程度越大(即非根区内区>中区>外区)。由于作物吸钾,各区土壤均表现出非交换性钾降低量最大,其次是交换性钾和水溶性钾。整个轮作期作物从土壤中带走钾量为220.7 mg/pot,根据各形态钾素相对减少量可计算出土壤钾的相对亏损量为475.4 mg/pot,明显高于作物吸钾量。

## 3 讨论

### 3.1 土壤钾素形态转化的影响因素

土壤各形态钾之间可以相互转化,并处于一个动态的平衡体系中。土壤干湿状况和肥料施用等因素对这一平衡产生一定影响<sup>[12]</sup>。本试验看出,轮作前季(油菜季)前期,不种作物处理(CK)土壤水溶性钾含量有升高的趋势,交换性钾变化不大,非交换钾性含量降低,可能由于肥料的施入,促进了土壤钾素平衡向水溶钾方向移动。Zhou等<sup>[13]</sup>研究表明,NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>的施用可促进含钾矿物层间钾的释放;

表 1 油菜—水稻轮作后根区与非根区土壤不同形态钾素含量 (mg/kg)

Table 1 Contents of soil potassium in the root-zone and non root-zone under rapeseed-rice rotation

位置 Position	水溶性钾 Water soluble K		交换性钾 Exchangeable K		非交换性钾 Non-exchangeable K		合计 Sum	
	含量	减少	含量	减少	含量	减少	减少	比例
	Content	Decrease	Content	Decrease	Content	Decrease	Decrease	Proportion
对照 CK	8.1		70.5		612.3			
非根区 Non root-zone								
外区 Outer	5.3	-2.8 a	69.7	-0.8 a	530.9	-81.4 a	-84.9 a	16.8%
中区 Middle	2.2	-5.9 b	66.3	-4.2 a	523.1	-89.2 ab	-99.3 a	19.7%
内区 Inner	1.7	-6.4 b	52.6	-17.9 b	491.9	-120.4 bc	-144.6 b	28.6%
根区 Root-zone	0.7	-7.4 c	32.0	-38.5 c	481.9	-130.4 c	-176.3 c	34.9%

注 (Note): 同一列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant at 5% level.

铵态氮肥可增加土壤水溶性钾含量, 主要是因为铵离子对钾的代换作用所致<sup>[14]</sup>。油菜季后期, CK 处理水溶性钾和交换性钾含量略有降低, 非交换性钾含量升高, 说明肥料对钾释放的影响是有限的, 稳定后平衡又向固钾的方向移动。水稻季前期, 由于淹水和肥料的双重作用, 各形态钾无显著变化。CK 处理各形态钾的变化也可能与本研究采用原样条件下测定各种形态钾素含量有关。土样干湿程度对测定的影响很大, 其结果是上升还是下降, 依土壤钾的具体转化过程而定。这与王火焰<sup>[15]</sup>的研究结果一致。

### 3.2 作物生长吸钾形成浓度梯度, 引起钾的扩散

已有研究表明, 扩散是钾供应的主要机理<sup>[16]</sup>。只有存在浓度梯度的时候, 钾才会扩散。肥料施入土壤后, 特别是在集中施用(条施、穴施、带施等), 会在肥料附近造成一个特殊的环境, 称之为“肥际微域”<sup>[17]</sup>。肥际微域中钾的浓度是整个土体的数倍或十几倍, 形成了较大的浓度梯度。不同的施钾量、不同的培养时间及陪伴离子等因素对水溶性钾、交换性钾和非交换性钾含量在肥际微域中的分布有显著影响<sup>[8, 18]</sup>。本研究中, 钾的浓度梯度产生是作物生长本身引起的。轮作前季(油菜季)前期, 油菜生长量小, 从土壤中吸收的钾不多, 根区水溶性钾和交换性钾首先出现相对亏缺; 随着油菜的生长及对钾的需求量的增加, 根区水溶性钾浓度越来越低, 与非根区形成一定浓度梯度, 导致非根区水溶性钾向根区扩散, 同时交换性钾和非交换性钾向水溶性钾方向转化, 因而含量也显著降低。非根区土壤距根区越近, 其水溶性钾、交换性钾和非交换性钾降低程度越大。可见, 作物的特性, 如生长率、对养分的需求量、根系密度等, 都是影响钾向根系扩散的重要因素。

### 3.3 水旱轮作对土壤钾素迁移转化与作物有效性

### 影响

钾在土壤中扩散的途径是充满了水的孔隙, 因而其扩散速率与土壤孔隙度和土壤含水量有关<sup>[19]</sup>。轮作前季种植油菜和轮作后季种植水稻时, 土壤含水量的差异较大, 因而对钾的扩散有较大的影响。旱作条件下, 由于土壤速效钾的扩散能力有限, 当作物优先吸收根际附近的水溶性钾和交换性钾后, 在离根际较远处的速效钾不能及时扩散到根际附近, 根际土壤中的非交换性钾的释放对作物钾供应必然会起重要的作用, 因而油菜季末期根区土壤非交换性钾含量显著降低。种植水稻后, 根区钾浓度与非根区有一定浓度梯度, 淹水促进了非根区钾向根区的扩散, 同时交换性钾向水溶钾转化, 前人也有类似研究结果<sup>[20]</sup>; 也可能随着淹水还原, 稻田氧化还原电位降低, 变价元素的化学形态发生变化,  $Fe^{3+}$ 、 $Mn^{4+}$  和  $SO_4^{2-}$  含量降低,  $Fe^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$  和  $S^{2-}$  含量升高, 这些转化增加了钾的有效性<sup>[21]</sup>。可见, 采用轮作方式进行稻田种植在提高根区土壤钾素有效性上具有重要的意义。

随着水稻吸钾强度的增强, 水溶性钾和交换性钾降低至一定程度时就不再降低; 但非交换性钾降低显著, 说明水稻吸收利用的主要是非交换态钾, 也与黄褐土矿物组分主要以 2:1 型粘土矿物为主有关, 这与王波等研究结果一致<sup>[22]</sup>。

### 3.4 土壤钾素植物有效性评价

本研究条件下, 各区土壤水溶性钾、交换性钾和非交换性钾的减少量明显高于作物从土壤中带走的钾, 说明可能有一部分土壤钾转化成 1.0 mol/L 热  $HNO_3$  不能浸提出来的钾。姜存仓<sup>[23]</sup>研究表明, 各区土壤减少量多出的那部分钾可能被吸附到矿物钾。土壤钾库中各形态钾的转化关系十分复杂, 也

可能是由于不同形态钾素连续测定中存在的系统误差造成的。因此, 采用不同化学形态钾素变化量直接累加来评价土壤钾素的收支平衡有待进一步研究。

目前, 有关土壤钾素肥力评价仍有一些尚未解决的问题。杨振明等<sup>[24]</sup>认为, 把作物吸收的速效性钾、缓效性钾以外的钾(即 1.0 mol/L 热 HNO<sub>3</sub> 不能浸提出来的钾)看作是矿物钾的观点有待进一步商榷; 王火焰等<sup>[25]</sup>研究表明, 依靠土壤速效钾和缓效钾值的变化来评估农田土壤钾素有效性, 结果会严重偏低。用目前的化学方法还不能将非交换性钾和矿物钾严格区别开来。有人建议将目前普遍应用的非交换性钾(即 1.0 mol/L 热 HNO<sub>3</sub> 浸提的钾)称为非交换性钾 I, 而将非交换性钾 II、III……统称为 1.0 mol/L 热 HNO<sub>3</sub> 不能浸提出来的钾<sup>[24]</sup>; 也有研究者认为, 用改进的四苯硼钠法可以较准确地测定土壤中有效钾的变化<sup>[26]</sup>, 这说明对土壤钾素植物有效性评价的研究还需进一步加强。

#### 参考文献:

- [1] 黄绍文, 金继运. 土壤钾形态及其植物有效性研究进展[J]. 土壤肥料, 1995, (5): 23-29.  
Huang S W, Jin J Y. Advance of potassium forms and plant availability[J]. Soils & Fert., 1995(5): 23-29.
- [2] 黄绍文, 金继运, 王泽良, 程明芳. 北方主要土壤钾形态及其植物有效性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 156-164.  
Huang S W, Jin J Y, Wang Z L, Cheng M F. Native potassium forms and plant availability in selected soils from northern China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4(2): 156-164.
- [3] Munson R D. 农业中的钾[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 261-262.  
Munson R D. Potassium in agriculture[M]. Beijing: Science Press, 1995. 261-262.
- [4] Grimme H. 通过土壤迁移是向作物根系供应钾素的主要因素[A]. 谢建昌, 土壤钾素的动态[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1986.  
Grimme H. Transport through soil is the main approach that soil supply K to plant root[A]. Xie J C. Dynamics of soil potassium[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1986.
- [5] Ganesthamurthy A N, Biswas C R. Movement of potassium in an ustochrept soil profile in a long-term fertilizer experiment[J]. J. Agric. Sci., 1983, 102: 393-397.
- [6] 鲁如坤, 时正元, 赖庆旺. 红壤长期施肥养分下移特征[J]. 土壤, 2000, 32(1): 27-29.  
Lu R K, Shi Z Y, Lai Q W. Characteristics of down-movement of nutrients under long term fertilization in red paddy soil[J]. Soils, 2000, 32(1): 27-29.
- [7] 董元彦. 磷钾在红壤中的迁移及扩散系数[J]. 华中农业大学学报, 1995, 14(3): 247-252.  
Dong Y Y. Transport and diffusive coefficient of phosphate and potassium in red soil[J]. J. Huazhong Agric. Univ., 1995, 14(3): 247-252.
- [8] 杜振宇, 周健民. 钾在红壤肥际微域中的迁移[J]. 土壤学报, 2005, 42(6): 1035-1039.  
Du Z Y, Zhou J M. Movement of potassium in fertilizer microsites in red earth[J]. Acta Pedol. Sin., 2005, 42(6): 1035-1039.
- [9] Fan M S, Jiang R F, Liu X J *et al.* Interactions between non-flooded mulching cultivation and varying nitrogen inputs in rice-wheat rotations[J]. Field Crops Res., 2005, 91(2-3): 307-318.
- [10] 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, (5): 244-254.  
Xie J C, Zhou J M. Advance of soil potassium research and K fertilizer application[J]. Soils, 1999, (5): 244-254.
- [11] 西北农业大学. 农业化学研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
Northwestern Agricultural University. Research methods of agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [12] 朱永官, 罗家贤. 我国南方某些土壤对钾素的固定及其影响因素[J]. 土壤, 1993, 25(2): 64-67.  
Zhu Y G, Luo J X. Potassium fixation and effect factors in selected soils from southern China[J]. Soils, 1993, 25(2): 64-67.
- [13] Zhou J M, Huang P M. Kinetics and mechanisms of monoammonium phosphate-induced potassium release from selected potassium-bearing mineral[J]. Can. J. Soil Sci., 2006, 86(5): 799-811.
- [14] 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.  
Fan Q Z. Influence of ammonium on release and fixation of potassium in soil[J]. Acta Pedol. Sin., 1993, 30(3): 245-252.
- [15] 王火焰. NPK 肥料在土壤中的交互作用与养分的形态转化[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所博士学位论文, 2001.  
Wang H Y. Interaction of NPK fertilizers during their transformation in soil[D]. Nanjing: PhD dissertation of Institute of Soil Sciences, CAS, 2001.
- [16] 徐明岗, 张一平, 张君常, 孙本华. 两种土壤中钙镁磷钾向根系的运移机理[J]. 中国农业科学, 1996, 29(5): 76-82.  
Xu M G, Zhang Y P, Zhang J C, Sun B H. Mechanisms for the movement of Ca, Mg, P and K to plant roots growing in two soil[J]. Sci. Agric. Sin., 1996, 29(5): 76-82.
- [17] 鲁如坤. “微域土壤学” 一个可能的土壤学新分支[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 287-288.  
Lu R K. Microzone soil science - A possible new branch of soil science[J]. Acta Pedol. Sin., 1999, 36(2): 287-288.
- [18] Du Z Y, Zhou J M, Wang H Y *et al.* Potassium movement and transformation in an acid soil as affected by phosphorus[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2006, 70(6): 2057-2064.
- [19] 徐明岗, 张一平. 土壤养分扩散的影响因素及其相互关系[J]. 土壤学进展, 1995, 23(3): 13-20.  
Xu M G, Zhang Y P. Influence factors of soil nutrients diffusion and

- their relation[J]. *Progr. Soil Sci.*, 1995, 23(3): 13-20.
- [20] Mengel K, Braunschweig Von L C. The effect of soil moisture upon the availability of potassium and its influence on the growth young maize plants (*Zea mays* L.) [J]. *Soil Sci.*, 1972, 114: 142-148.
- [21] Dobermann A, Cassman K G, Mamaril C P *et al.* Management of phosphorus, potassium, and sulfur in intensive, irrigated lowland rice [J]. *Field Crops Res.*, 1998, 56(1-2): 113-138.
- [22] 王波, 杨振明, 鲍士旦. 水稻耐低钾基因型的筛选及吸钾特性的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(1): 85-88.  
Wang B, Yang Z M, Bao S D. Study on screening rice genotypes tolerant to low-K and their absorbing potassium[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1999, 5(1): 85-88.
- [23] 姜存仓. 不同基因型棉花对钾的反应差异及其机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学博士学位论文, 2006.  
Jiang C C. Different effects and mechanisms of potassium on varied cotton genotypes[D]. Wuhan: PhD dissertation of Huazhong Agricultural University, 2006.
- [24] 杨振明, 王波, 鲍士旦, 史瑞和. 耗竭条件下冬小麦的吸钾特点及其对土壤不同形态钾的利用[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(1): 43-49.  
Yang Z M, Wang B, Bao S D, Shi R H. The property of potassium uptake by winter wheat and the utility of different potassium fractions of soils after depletion[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1998, 4(1): 43-49.
- [25] 王火焰, 朱树国, 周健民, 等. 常规方法准确测定土壤有效钾素变化可能性的探讨[J]. *土壤通报*, 2006, 37(5): 954-960.  
Wang H Y, Zhu S G, Zhou J M *et al.* A discussion on the possibility of accurate quantifying the variation of available K in the soils by common method[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2006, 37(5): 954-960.
- [26] 王火焰, 朱树国, 周健民, 等. 运用四苯硼钠法准确测定土壤有效钾素变化的初步探讨[J]. *土壤*, 2007, 39(2): 231-237.  
Wang H Y, Zhu S G, Zhou J M *et al.* Accurate quantification of variation of available K in soil with NaBPh<sub>4</sub> extraction method[J]. *Soils*, 2007, 39(2): 231-237.