

DOI: 10.11766/trxb201705090045

# 长期施肥及石灰后效对不同生育期玉米根际钾素的影响\*

韩天富<sup>1, 2</sup> 王伯仁<sup>1, 2</sup> 张会民<sup>1, 2†</sup> 黄晶<sup>1, 2</sup> 李冬初<sup>1, 2</sup> 蔡泽江<sup>1, 2</sup>  
柳开楼<sup>1, 3</sup> 蔡岸冬<sup>1</sup> 徐明岗<sup>1, 2</sup>

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081)

(2 中国农业科学院, 祁阳农田生态系统国家野外观测站, 湖南祁阳 426182)

(3 江西省红壤研究所, 国家红壤改良工程技术研究中心, 江西进贤 331717)

**摘要** 依托祁阳红壤旱地定位施肥试验(始于1990年), 选取施氮磷(NP)、氮磷+石灰(NPCa)、氮磷钾(NPK)、氮磷钾+石灰(NPKCa)、氮磷钾配施秸秆(NPKS)、氮磷钾配施秸秆+石灰(NPKSCa) 6个处理, 采集玉米不同生育期根际与非根际土壤, 测定其钾、钙、镁、铝含量和pH。结果表明: 与NP处理相比, 施钾处理(NPK和NPKS)根际和非根际土壤速效钾含量显著提高。NP、NPK和NPKS处理根际速效钾在拔节期和灌浆期均处于亏缺状态, 亏缺率分别平均为18.2%、34.2%和26.4%。与对应不施石灰处理相比, NPKCa和NPKSCa处理根际土壤速效钾含量在苗期分别降低46.0 mg kg<sup>-1</sup>和26.5 mg kg<sup>-1</sup>, 非根际分别降低68.5 mg kg<sup>-1</sup>和56.0 mg kg<sup>-1</sup>; 从拔节期至收获期, 根际速效钾含量平均升高25.2 mg kg<sup>-1</sup>和33.7 mg kg<sup>-1</sup>, 非根际略微降低。NPCa、NPKCa和NPKSCa处理根际土壤速效钾盈亏率与不施石灰相比, 整个生育期分别平均提高8.6%、33.2%和19.3%。根际和非根际土壤速效钾含量与相对应缓效钾含量、钾饱和度、K<sup>+</sup>/(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)和K<sup>+</sup>/Al<sup>3+</sup>呈极显著正相关关系。缓效钾和钾饱和度相对变化率(交换性钙镁相对变化率)与速效钾相对变化率呈极显著正(负)相关关系。长期施氮磷钾肥基础上施石灰(NPKCa和NPKSCa) 4年以后, 根际土壤速效钾、缓效钾含量及钾饱和度均提高(苗期除外), 根际土壤交换性钙镁含量提高幅度低于非根际, 最终缓解根际土壤钾素的亏缺。

**关键词** 长期施肥; 红壤; 石灰; 钾; 根际与非根际

**中图分类号** S156.6 **文献标识码** A

南方红壤约占全国土地面积的21.8%, 是我国粮食主产区之一<sup>[1]</sup>。但是, 由于该地区土壤酸化较严重、土壤矿物类型以高岭石为主、气候高温多雨以及人为管理措施不当等因素, 导致土壤供钾能力低且钾素易被流失、淋洗, 限制了该地区粮食增产潜力的发挥。施石灰是目前改良南方酸化土壤最简易有效的措施, 石灰通过中和土壤酸度, 改善土壤的物理、化学和生物学性质, 进而提高土壤养分

有效性<sup>[2]</sup>。钾在根际微区内富集或亏缺的程度和区域大小, 可反映土壤供钾特征<sup>[3]</sup>。施钾肥可保持或提高土壤速效钾和缓效钾含量, 不施钾肥土壤速效钾和缓效钾含量均出现一定程度的降低<sup>[4]</sup>。土壤钾素有效性与土壤pH关系密切。蔡泽江等<sup>[5]</sup>研究表明, 施用化学氮肥处理(除氮磷钾配施处理外)钾素吸收量与土壤pH均呈极显著正相关关系。土壤pH的变化直接影响土壤对钾素的吸附能

\* 国家自然科学基金项目(41371293, 41671301)和国家重点研发计划项目(2016YFD0300901)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41371293 and 41671301) and the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0300901)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhanghuimin@caas.cn

作者简介: 韩天富(1989—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤培肥与改良研究。E-mail: hantianfu123@126.com

收稿日期: 2017-05-09; 收到修改稿日期: 2017-07-05; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-07-19

力<sup>[6-8]</sup>，而施石灰改良酸化土壤最直接的结果是快速提高土壤pH<sup>[9]</sup>。Curtin和Smillie<sup>[10]</sup>通过室内和大田试验证明，施用石灰可降低土壤溶液中钾的含量；Jeandavid等<sup>[11]</sup>研究表明，一次性施用石灰10年以后，表层土壤交换性钾随着石灰用量的增加而降低。Reitemeier<sup>[12]</sup>指出，石灰可提高交换性钾含量，降低水溶性钾含量；也有人研究得出，施石灰土壤速效钾增加8~17 mg kg<sup>-1</sup><sup>[13]</sup>。而Fischer等<sup>[14]</sup>对奥地利和德国的62个定位试验研究得出，施用石灰对钾素基本无影响，Anikwe等<sup>[15]</sup>也得出相似结果。钾的有效性与Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和Al<sup>3+</sup>密切相关，Pierre和Bower<sup>[16]</sup>研究表明，高钙土壤严重抑制作物对钾素的吸收。酸化土壤施石灰可将大量的Al<sup>3+</sup>和羟基铝离子转为沉淀，减少与钾素竞争吸附位点，增加钾素有效性<sup>[17]</sup>。此外，钾素有效性的高低还受根际与非根际土壤钾素的影响，Riley和Barber<sup>[18]</sup>研究发现，玉米根系周围的土壤中出现钾的亏缺区；许曼丽和刘芷宇<sup>[19]</sup>报道了有效钾累积与亏缺的梯度变化与土壤类型、钾素含量水平以及土壤水分状况和作物不同生育阶段密切相关。目前，针对施用石灰及其后效是如何通过影响土壤pH、交换性钙镁和酸度等指标，进而影响根际与非根际钾素有效性的相关机理尚不明确，且结合玉米不同生育时期进行的研究较欠缺。因此，本研究利用红壤长期定位施肥试验，通过测定土壤不同形态钾素、交换性钙镁、交换性铝含量和pH，探讨长期施肥基础上施石灰后，玉米根际与非根际土壤钾素在不同生育期的动态变化特征及其主要影响因素，旨在为酸化红壤正确施用石灰及钾素培育提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本试验在中国农业科学院祁阳红壤实验站(111.52° E, 26.45° N)完成，具体温度、降雨等气候条件见文献[5]。土壤初始(1990年)理化性质为：有机质11.5 g kg<sup>-1</sup>，全氮1.07 g kg<sup>-1</sup>，全磷0.52 g kg<sup>-1</sup>，全钾13.7 g kg<sup>-1</sup>，碱解氮79.0 mg kg<sup>-1</sup>，有效磷13.9 mg kg<sup>-1</sup>，速效钾104.0 mg kg<sup>-1</sup>，pH 5.7，阳离子交换量8.99 cmol kg<sup>-1</sup>，交换性酸和交换性铝分别为0.27 cmol kg<sup>-1</sup>和0.17 cmol kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

本研究选取旱地长期定位施肥试验的6个处理：1) 氮磷配施(NP)，2) 氮磷配施+石灰(NPCa)，3) 氮磷钾配施(NPK)，4) 氮磷钾配施+石灰(NPKCa)，5) 氮磷钾配施秸秆(NPKS)，6) 氮磷钾配施秸秆+石灰(NPKSCa)。肥料用量为氮肥N 300 kg hm<sup>-2</sup>，磷、钾肥用量为P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 各120 kg hm<sup>-2</sup>，其中，玉米施肥量占总施肥量的70%，小麦占总施肥量的30%。氮肥用尿素(含N46%)，磷肥用过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12.5%)，钾肥用氯化钾(含K<sub>2</sub>O 60%)。肥料在小麦、玉米播种前作基肥一次性施入。NP、NPK和NPKS处理土壤酸化并导致作物产量严重下降，于2010年进行裂区处理，各小区施肥量在原有基础上减半，在裂区的一个小区增施生石灰(主要成分是CaO，粉状物，粒径以小于0.5 mm为主) 2.55 t hm<sup>-2</sup>，均匀撒施至相应小区，每隔四年施一次，裂区施石灰前NP、NPK和NPKS处理速效钾含量分别为：70.0 mg kg<sup>-1</sup>、206.5 mg kg<sup>-1</sup>和225.5 mg kg<sup>-1</sup>。各小区面积为98 m<sup>2</sup>，各处理玉米长势见文献[20]。在2013年10月冬小麦种植前采集0~20 cm土层土壤样品，测定土壤养分含量，结果见表1。此外，秸秆还田处理为该小区小麦、玉米地上部1/2还田，其余部分全部移出小区，不考虑还田秸秆带入的氮磷钾养分。

### 1.3 土壤样品采集与分析

分别于2014年4月中旬玉米播种后15 d(苗期)、45 d(拔节期)、75 d(灌浆期)和收获后4次取样，根际土样采集方法参考Riley和Barber<sup>[18]</sup>的抖根法，将各小区分为3个亚区(3次假重复)，在每个亚区随机选取5点，挖取具有完整根系的土体，先轻轻抖落大块不含根系的土壤，然后用力将根表面附着的土壤全部抖落，记为根际土壤(Rhizosphere soil, RS)；同时，用土钻在相应玉米行间采集土壤(0~20 cm)，按四分法保留1/2为非根际土壤(Bulk soil, BS)，自然风干，过1 mm筛备用，每个土样重复测定2次。

土壤pH按液：土=2.5：1(无CO<sub>2</sub>去离子水)，用pH计(FE28，梅特勒)测定。速效钾按10：1液土比用1.0 mol L<sup>-1</sup>中性NH<sub>4</sub>OAc浸提，缓效钾按10：1液土比用1.0 mol L<sup>-1</sup>热HNO<sub>3</sub>浸提量减去速效钾含量，两者均用火焰光度计(PF6410，

表1 供试土壤化学性质 (2013年)

Table 1 Basic chemical properties of the soil in the experiment (2013)

处理 Treatments	有机质 <sup>①</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	全钾 <sup>②</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 <sup>③</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	有效磷 <sup>④</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	速效钾 <sup>⑤</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	缓效钾 <sup>⑥</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	pH
NP <sup>1)</sup>	15.9	13.3	68.9	24.2	51.0	166.5	4.4
NPCa <sup>2)</sup>	18.3	13.8	94.1	32.4	56.0	181.5	4.6
NPK <sup>3)</sup>	17.2	15.2	86.1	27.5	217.5	257.5	4.3
NPKCa <sup>4)</sup>	17.0	14.3	99.1	24.3	161.0	261.5	5.6
NPKS <sup>5)</sup>	17.9	13.7	78.0	30.3	232.0	228.0	4.4
NPKSCa <sup>6)</sup>	20.0	13.6	80.7	23.1	251.5	171.0	5.0

注：1) 氮磷配施，2) 氮磷配施+石灰，3) 氮磷钾配施，4) 氮磷钾配施+石灰，5) 氮磷钾配施秸秆，6) 氮磷钾配施秸秆+石灰。下同 Note: 1) Chemical nitrogen and phosphorus, 2) NP plus lime, 3) NP and potassium, 4) NPK plus lime, 5) NPK plus straw, 6) NPKS and lime. ①Soil organic matter (SOM), ②Total potassium (TK), ③Alkalytic nitrogen (AN), ④Available phosphorus (AP), ⑤Readily available potassium (RAK), ⑥Slowly available potassium (SAK). The same below

上海精科)测定。阳离子交换量(CEC)采用1.0 mol L<sup>-1</sup>中性NH<sub>4</sub>OAc连续浸提法测定。交换性钾用1.0 mol L<sup>-1</sup>中性NH<sub>4</sub>OAc连续浸提—火焰光度计测定；交换性钙、镁用1.0 mol L<sup>-1</sup>中性NH<sub>4</sub>OAc连续浸提—原子吸收仪(AA-6300C, 岛津)测定。交换性铝采用1 mol L<sup>-1</sup> KCl交换—中和滴定法测定<sup>[21]</sup>。

#### 1.4 数据处理

盈亏率(Gain and loss rate, GLR)反映养分在植物根际土壤的富集和亏缺强弱,同时也反映了植物根际效应的强弱。根际土壤速效钾盈亏率(%)=[(根际土壤速效钾含量-非根际土壤速效钾含量)/非根际土壤速效钾含量]×100, GLR>0表示养分富集, GLR<0表示养分亏缺<sup>[22]</sup>。

钾饱和度(Potassium saturation, KS)(%)=(交换性钾/CEC)×100。

石灰引起土壤养分(速效钾、缓效钾、钾饱和度和、交换性钙镁)含量的相对变化率(%)=[(施石灰处理土壤养分含量-对应不施石灰处理土壤养分含量)/对应不施石灰处理土壤养分含量]×100。

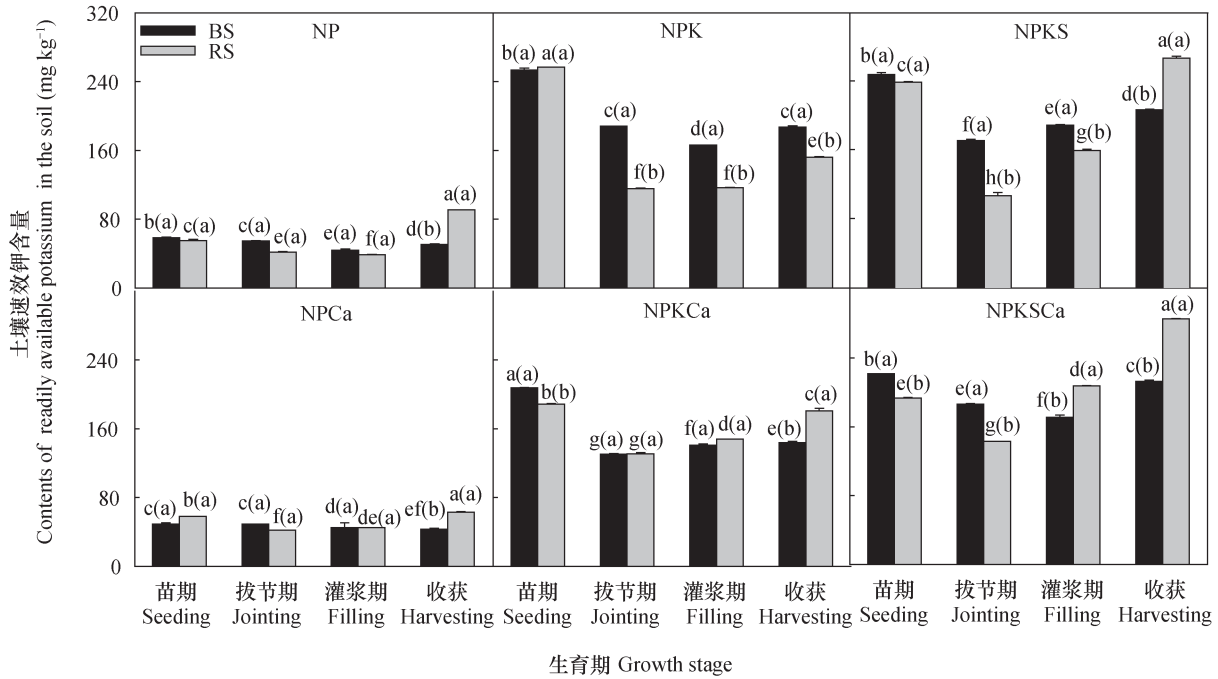
试验数据用SigmaPlot10.0和SPSS 20.0系统软件进行作图、差异性检验(最小显著差异法, LSD)和相关性分析。

## 2 结果

### 2.1 玉米不同生育期根际与非根际土壤速效钾含量变化

不同施肥处理根际与非根际土壤速效钾含量存在差异,但是变化特征基本相同(图1)。随着玉米生育期的延长,根际与非根际速效钾含量均呈现先降低后缓慢升高的趋势,根际表现更显著。各施肥处理非根际土壤速效钾含量均在拔节期最低,根际土壤速效钾含量在拔节期和灌浆期均较低。与NP相比,施钾处理(NPK和NPKS)玉米不同生育期根际与非根际土壤速效钾含量均显著提高,根际和非根际分别平均提高120.4 mg kg<sup>-1</sup>和149.6 mg kg<sup>-1</sup>,在苗期提高最多,增幅分别为329.1%和351.4%。随着玉米生长,根际土壤速效钾含量显著低于非根际,与苗期相比, NP、NPK和NPKS处理在拔节期和灌浆期根际速效钾含量均下降,降幅分别平均为27.2%、30.2%和54.9%。玉米收获以后,根际速效钾均有一定程度的上升,与灌浆期相比,各处理分别提高了32.5 mg kg<sup>-1</sup>、36.0 mg kg<sup>-1</sup>和107.5 mg kg<sup>-1</sup>。

施石灰4年以后,速效钾含量整体变化特征与相应不施石灰处理相比略有不同。在苗期,相比不施石灰, NPKCa和NPKSCa处理根际与非根际土壤速



注：BS表示非根际土壤，RS表示根际土壤；小写字母表示同一施肥处理不同时期根际与非根际差异达5%的显著水平，括号中小写字母表示同一施肥和时期根际与非根际差异达5%的显著水平，误差线表示SD值 Note: BS stands for bulk soil and RS for rhizosphere soil; The lowercase letters indicate the significant difference between rhizosphere and bulk soil at same fertilization treatment but at difference stage ( $p < 0.05$ ), the lowercase letters in brackets indicate the significant difference between rhizosphere and bulk soil in the same fertilization treatment and stage ( $p < 0.05$ ), the error bars mean value of SD

图1 不同生育期玉米根际与非根际土壤速效钾含量

Fig. 1 Contents of soil readily available potassium (RAK) in rhizosphere and bulk soil of maize at different growth stages

效钾含量均显著降低，根际分别降低 $46.0 \text{ mg kg}^{-1}$ 和 $26.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ，非根际速效钾含量分别降低 $68.5 \text{ mg kg}^{-1}$ 和 $56.0 \text{ mg kg}^{-1}$ 。从拔节期至收获期，NPKCa和NPKSCa处理根际速效钾含量较相应不施石灰处理平均升高 $25.2 \text{ mg kg}^{-1}$ 和 $33.7 \text{ mg kg}^{-1}$ ，NPKCa非根际速效钾下降 $41.8 \text{ mg kg}^{-1}$ ，NPKSCa非根际速效钾无显著变化。NPCa与NP处理各时期对应速效钾

含量差异不显著。与不施石灰相比，施石灰处理（NPKCa和NPKSCa）玉米非根际速效钾含量在整个生育期均降低，根际出现先降低后升高趋势。

### 2.2 玉米不同生育期根际土壤速效钾盈亏率变化

不同施肥处理根际土壤速效钾盈亏率存在差异，总体特征表现为先降低后升高趋势（图2）。不施石灰情况下，NP、NPK和NPKS处理根际速效

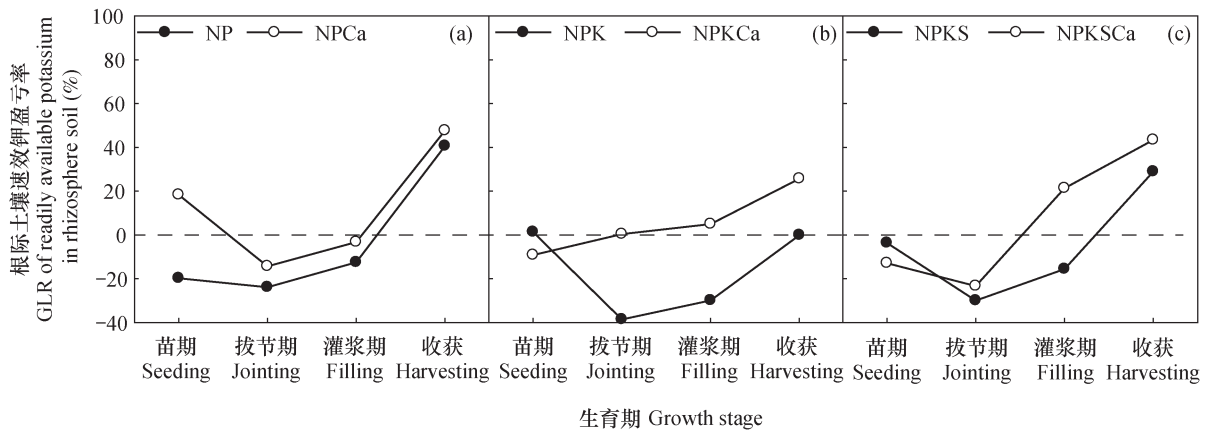


图2 不同生育期根际土壤速效钾盈亏率

Fig. 2 Gain and loss rate (GLR) of RAK in rhizosphere soil at different growth stages



钾盈亏率在苗期分别为-6.0%、1.4%和-3.6%；从拔节期至灌浆期，根际速效钾均处于亏缺状态，亏缺率分别平均为18.2%、34.2%和26.4%；在收获期出现上升，与拔节期相比分别上升64.4%、20.1%和66.2%，且NP和NPKS处理根际速效钾出现富集现象。

施石灰4年以后，各处理不同生育期（除苗期以外）根际土壤速效钾盈亏率变化规律与相应不施石灰处理相似，NPCa、NPKCa和NPKSCa处理在玉米拔节期盈亏率均最小，分别为-14.3%、0.4%和-23.3%；在灌浆期分别为-3.2%、5.0%、21.3%，NPKSCa和NPKCa处理根际土壤速效钾出现富集现象；收获后均呈富集状态，富集率分别为47.7%、25.7%和43.2%。与不施石灰相比，对应施石灰处理均提高根际土壤速效钾的盈亏率（施钾处理除苗期以外），整个生育期分别平均提高8.6%、33.2%和19.3%，减轻了根际土壤速效钾的亏缺。

### 2.3 土壤速效钾与缓效钾、交换性钙镁、酸度等指标相关性

土壤速效钾含量不仅受缓效钾含量影响，

而且与交换性钙镁、交换性铝含量以及 $K^+/(Ca^{2+}+Mg^{2+})$ 等指标密切相关。通过表2可知，在K(-)Ca(-)（即NP处理）情况下，土壤速效钾含量与交换性 $K^+/Al^{3+}$ 呈显著正相关关系（ $p < 0.05$ ）。在K(-)Ca(+)（NPCa处理）情况下，土壤速效钾含量与交换性铝含量呈显著负相关关系（ $p < 0.05$ ）。在K(+)Ca(-)（NPK和NPKS处理）情况下，土壤速效钾含量与缓效钾含量呈显著正相关关系（ $p < 0.05$ ），与交换性 $K^+/Al^{3+}$ 呈极显著正相关关系（ $p < 0.01$ ）。在K(+)Ca(+)（NPKCa和NPKSCa处理）情况下，速效钾含量与缓效钾含量、交换性 $K^+/(Ca^{2+}+Mg^{2+})$ 、交换性 $K^+/Al^{3+}$ 及钾的饱和度均呈极显著正相关关系（ $p < 0.01$ ）。全部处理进行相关性分析可知，速效钾含量与缓效钾含量、交换性 $K^+/(Ca^{2+}+Mg^{2+})$ 、交换性 $K^+/Al^{3+}$ 以及钾的饱和度均呈极显著正相关关系（ $p < 0.01$ ）。

石灰引起的根际、非根际缓效钾和钾饱和度相对变化率（交换性钙镁相对变化率）与相应的速效钾相对变化率呈极显著正（负）相关关系（图3）。由图4（b、c、h和i）可知，在氮磷钾配施

表2 速效钾含量与土壤相关影响因子的皮尔森相关性

Table 2 Pearson's correlation coefficients between soil relevant affecting factors and RAK content

项目 Items	缓效钾 <sup>①</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	pH	交换性铝 <sup>②</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	交换性钙镁 <sup>③</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	钾饱和度 <sup>④</sup> (%)	交换性 (钾/钙镁) <sup>⑤</sup> (%)	交换性 (钾/铝) <sup>⑥</sup> (%)
K(-)Ca(-) <sup>1)</sup> (n=8)	-0.103	0.429	-0.310	0.357	0.446	0.526	0.960*
K(-)Ca(+) <sup>2)</sup> (n=8)	0.626	0.349	-0.954*	0.010	-0.268	0.743	0.910
K(+ )Ca(-) <sup>3)</sup> (n=16)	0.847**	0.261	-0.214	-0.175	-0.338	0.653	0.761*
K(+ )Ca(+) <sup>4)</sup> (n=16)	0.992**	0.359	-0.475	-0.241	0.909**	0.926**	0.898**
T <sup>5)</sup> (n=48)	0.962**	0.032	-0.144	-0.210	0.515**	0.812**	0.735**

注：1) NP处理，2) NPCa处理，3) NPK和NPKS处理，4) NPKCa和NPKSCa处理，5) 所有处理。n：样品数量；\*\*和\*分别表示在1%和5%水平下显著相关。Note: 1) Treatment NP, 2) Treatment NPCa, 3) Treatments NPK and NPKS, 4) Treatments NPKCa and NPKSCa, 5) All treatments. n: sample size, \*\* and \* means significant difference at the 1% and 5% level, respectively.

①Slowly available potassium (SAK), ②Exchangeable aluminum ( $Al^{3+}$ ), ③Exchangeable calcium and magnesium ( $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ ), ④Potassium saturation (KS), ⑤ $K/(Ca^{2+}+Mg^{2+})$ , ⑥ $K/Al^{3+}$

（NPK和NPKS）情况下，从拔节至收获期，施石灰引起根际缓效钾和钾饱和度相对变化率均高于非根际对应时期，缓效钾相对变化率分别平均为14.6%（根际）和0.3%（非根际），钾饱和度相对变化率分别平均为37.4%（根际）和2.6%（非

根际）。结合图3（a和c）相应方程关系可知，两者（缓效钾和钾饱和度）平均相对变化率对应速效钾平均相对变化率均表现为：根际（20.7%和33.6%）高于非根际（-2.9%和24.2%）。其次，各时期根际土壤交换性钙镁的相对变化率均低于

非根际对应时期 (图4 (d) ~ 图4 (f))，整个生育期分别平均为：27.5% (根际) 和111.6% (非根际)，结合图3 (b) 相应方程关系可知，交换性钙镁平均相对变化率对应速效钾平均相对变化率表现为：根际 (23.5%) 高于非根际 (-13.2%)。与上述三者 (缓效钾、钾饱和度和交换性钙镁) 相对对应根际速效钾平均相对变化率均为正值且高于对应

的非根际，表明，在长期施氮磷钾肥基础上施石灰 (NPKCa和NPKSCa) 4年以后，根际土壤速效钾、缓效钾含量和钾饱和度均提高 (除苗期以外)，非根际交换性钙镁含量提高幅度高于根际。在缺钾处理上 (NP) 施石灰，不同时期根际与非根际缓效钾和钾饱和度的相对变化率无明显规律 (图4 (a)、图4 (d) 和图4 (g))。

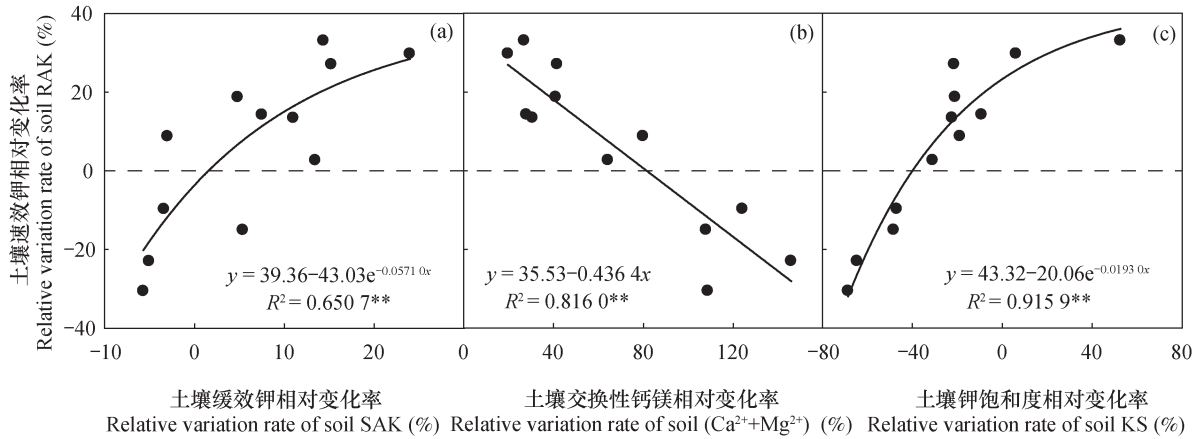


图3 土壤缓效钾、交换性钙镁、钾饱和度相对变化率与速效钾相对变化率的关系

Fig. 3 Relationships of RAK with soil slowly available potassium (SAK), exchangeable calcium and magnesium ( $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ ), potassium saturation (KS), in relative variation rate

### 3 讨论

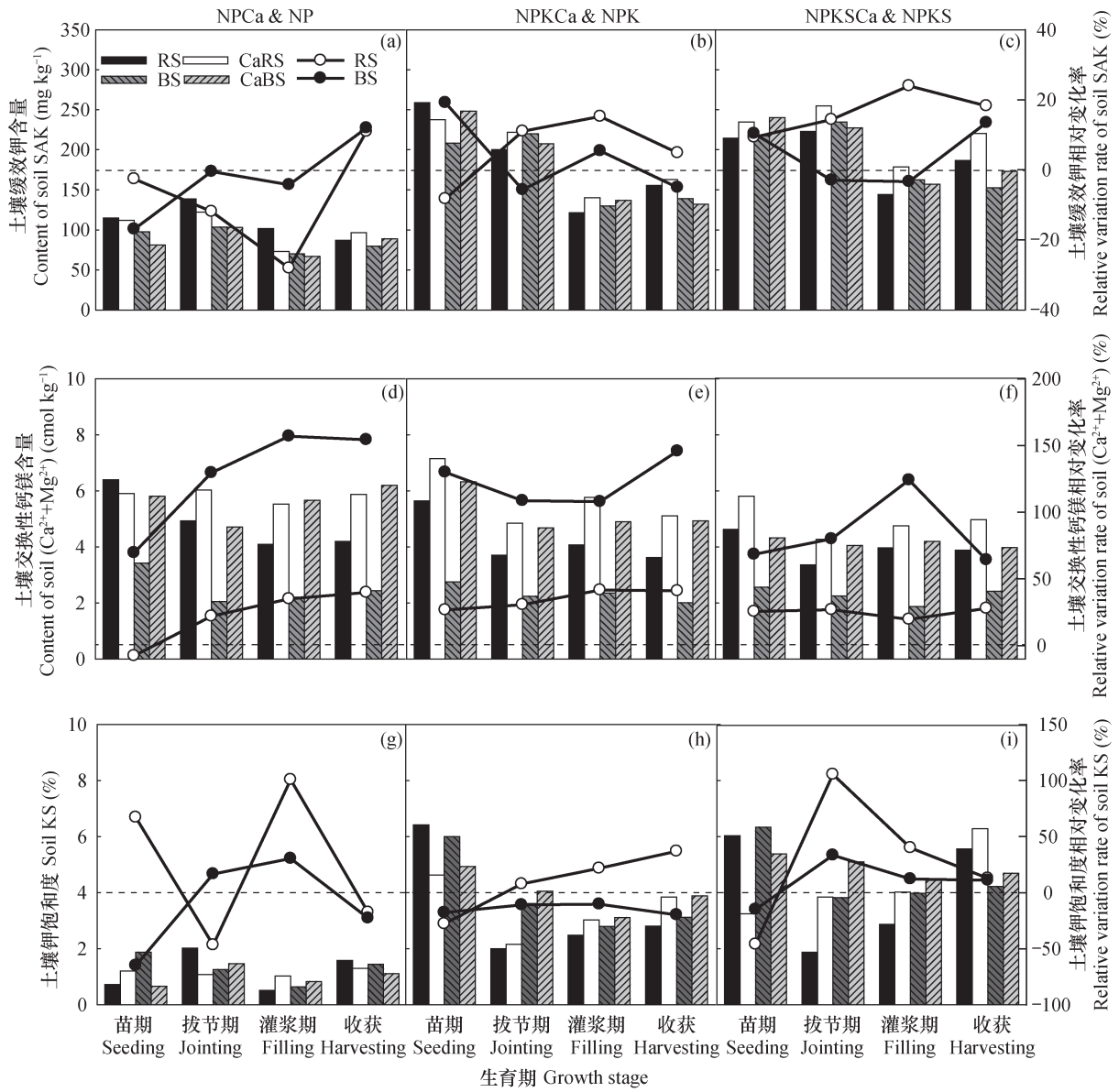
#### 3.1 石灰后效对根际与非根际速效钾含量的影响

一般情况下，玉米对养分需求量表现为生长初期较少，随着时间的推移，在生殖器官分化期达到高峰，至成熟阶段又渐趋减少<sup>[3]</sup>。土壤速效钾含量变化趋势与玉米的生长密切相关，玉米苗期吸钾能力弱，需钾量少，根际与非根际土壤速效钾含量可维持较高水平 (图1)。随着玉米的生长 (拔节期至灌浆期)，吸钾能力逐渐变强，需钾量增加，根际与非根际速效钾均呈降低趋势。养分的胁迫和协同作用对作物生长产生一定的影响<sup>[3]</sup>，导致在缺钾和施钾情况下出现不同结果，NP处理严重缺钾，抑制玉米正常生长，减少对钾素的需求量；相反，施钾 (NPK和NPKS) 促进玉米的生长，增加对钾素的需求量，导致根际缺钾更严重。在速效钾含量低的酸性土壤上施石灰，易引发离子竞争而诱发缺钾<sup>[23]</sup>，在玉米苗期 (图1)，施石灰4年以后根际与非根际土壤速效钾含量均降低，这主要是因为施石灰显著提高玉米产量，且产量与吸钾量呈

极显著正相关关系 ( $R^2=0.85$ ,  $n=190$ )<sup>[20]</sup>，进而促进土壤钾素的消耗，施石灰后第3年土壤速效钾含量变化与上述结果基本一致 (表1)。与不施石灰相比，施石灰4年后根际速效钾含量变化较小，主要是由于添加石灰以后土壤溶液中含有较多的 $Ca^{2+}$ ， $Ca^{2+}$ 主要的运移方式为质流，且玉米需钙量相比钾较少，使根际 $Ca^{2+}$ 含量显著高于非根际，促进离子间的交换并竞争根系表面钾素吸附位点，最终提高根际速效钾含量<sup>[24]</sup>；其次是施石灰处理通过改良土壤酸化和改善土壤理化性质，促进玉米更好地生长，加速水分循环，使钾离子随水分向根际转移<sup>[22]</sup>。收获期以后，根际与非根际土壤速效钾含量均较高，根际速效钾含量增加更显著，这可能与取样时间有关，收获期的土样是在玉米收获后10 d采集的，根系已经枯萎，有更多的钾离子回流进入土壤中<sup>[25]</sup>，导致根际土壤速效钾含量升高更加明显。

#### 3.2 不同施肥及石灰后效对根际速效钾盈亏率的影响

长期不同施肥处理下，玉米根际土壤速效钾基本处于亏缺状态 (图2)。玉米在苗期需水和钾量



注：CaRS：施石灰处理根际土壤，CaBS：施石灰处理非根际土壤 Note: CaRS means rhizosphere soil with liming and CaBS bulk soil with liming

图4 不同生育期土壤缓效钾、交换性钙镁、钾饱和度含量与相对变化率

Fig. 4 The contents and relative variation rate of SAK, exchangeable calcium and magnesium (Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>), and potassium saturation (KS) at different growth stages

较少，吸钾能力较弱，根际与非根际相差不大，根际土壤速效钾盈亏率基本接近于零。随着玉米的生长，在拔节期，NP、NPK、NPKS根际速效钾均呈亏缺状态，主要因为，此时玉米的营养生长需要大量的钾素，且酸化导致根系发育不完整以及根系分泌物种类不全而出现钾素的营养临界期<sup>[26]</sup>，导致根际速效钾供不应求，加重了钾素的亏缺。亏缺程

度表现为：NPK > NPKS > NP，主要是因为增施钾肥玉米的生物量和产量均提高<sup>[20]</sup>，需消耗大量的钾素，增施秸秆提高了土壤钾素含量，在一定程度上缓解钾素的亏缺<sup>[27]</sup>。在施氮磷钾基础上增施石灰（NPKCa和NPKSCa）4年以后，与不施石灰处理相比，根际速效钾的盈亏率均有一定程度的提升，尤其是在拔节期和灌浆期（图2），主要原因是施

石灰改良酸化后玉米生长较好,在这两个时期水分循环更快,促进钾素随水分向根际迁移<sup>[22]</sup>;其次,较丰富二价离子( $\text{Ca}^{2+}$ )的质流可促进溶液钾的富集<sup>[28]</sup>,有助于补充 $\text{K}^+$ 水平,并促进 $\text{K}^+$ 从较高浓度向较低浓度区域扩散<sup>[29]</sup>。此外,施石灰减少钾素的淋失<sup>[30]</sup>,增加钾素的固持,而这部分钾可以被作物吸收利用<sup>[2]</sup>。缺钾(NP)情况下施与不施石灰,土壤因缺钾导致玉米均不能正常生长,导致需钾量减少,盈亏率变化不明显;此外,在酸性土壤施石灰,层间复合羟基铝减少,导致晶层塌陷的同时也可能形成楔形位,在低钾干燥条件下,水化 $\text{Ca}^{2+}$ 可脱水进入楔形位,减少对钾的固定<sup>[31]</sup>。

### 3.3 缓效钾、钾饱和度、交换性钙镁、交换性铝和pH对速效钾的影响

缓效钾是维持土壤速效钾含量在一定水平的重要因素之一。本试验结果表明,石灰后效提高根际土壤缓效钾的相对变化率(苗期除外)(图4(b)和图4(c)),即石灰处理增加缓效钾含量,且缓效钾含量与速效钾含量呈极显著正相关关系,表明石灰后效作用下根际土壤缓效钾含量提高,进而缓解根际土壤速效钾的亏缺。钾饱和度的高低反映土壤钾素的丰缺状况,石灰后效(苗期除外)可一定程度上提高根际钾饱和度及其相对变化率(图4(h)~图4(j)),进而缓解根际土壤钾素的亏缺;而钾饱和度与土壤固钾率呈极显著负相关关系<sup>[32]</sup>,根际土壤钾饱和度的提高可抑制钾素的固定,增加作物对钾吸收的机率。在缺钾的土壤上(NP),石灰后效对缓效钾和钾饱和度影响较弱,因为,此时缺钾成为限制速效钾含量变化的主要因素。交换性钙镁对根际钾素盈亏有一定的影响,首先,石灰后效下非根际交换性钙镁含量提高幅度高于根际,大量的 $\text{Ca}^{2+}$ 将与 $\text{K}^+$ 竞争土壤胶体表面吸附交换位点,增加土壤溶液中 $\text{K}^+$ 的含量<sup>[33]</sup>,由于扩散和质流的作用使其不断向根际转移,最终缓解根际土壤速效钾的亏缺。本研究也表明,速效钾含量与交换性 $\text{K}^+/\text{Al}^{3+}$ 呈正相关关系。酸化常伴随着钾素的缺乏,主要是由于 $\text{H}^+$ 和 $\text{Al}^{3+}$ (致酸离子)占据钾素交换位点,易引起钾素的淋失<sup>[34]</sup>。施石灰4年以后,交换性铝显著低于未施石灰处理(本文未列出数据),降低了 $\text{Al}^{3+}$ 与 $\text{K}^+$ 竞争吸附位点,增加土壤的固钾能力,在一定程度上减少钾素的淋失<sup>[30]</sup>。根际和非根际速效钾含量与pH无显著相关

性,主要原因可能在于本研究选取的pH梯度比较窄,玉米不同生育期速效钾含量变化范围较宽,其具体原因有待进一步研究。

## 4 结 论

红壤旱地连续24年不同施肥处理(NP、NPK和NPKS)下,玉米根际土壤速效钾含量均处于亏缺状态。相比不施石灰,在施钾肥基础上施石灰(NPKCa和NPKSCa)4年以后,玉米非根际土壤速效钾含量在整个生育期均降低,根际出现先降低后升高趋势;在缺钾处理上施石灰(NPCa)4年以后,根际、非根际不同生育期速效钾含量均无显著变化。缓效钾含量、钾饱和度、 $\text{K}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 和 $\text{K}^+/\text{Al}^{3+}$ 对速效钾含量均有正向影响作用。施氮磷钾肥基础上增施石灰(NPKCa和NPKSCa)4年以后,一定程度上缓解根际土壤钾素的亏缺。

## 参 考 文 献

- [1] 徐明岗,田有国. 耕地质量演变趋势研究. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008: 163—177  
Xu M G, Tian Y G. Research of tillage land quality evolution (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008: 163—177
- [2] 蔡东,肖文芳,李国怀. 施用石灰改良酸性土壤的研究进展. 中国农学通报, 2010, 26(9): 206—213  
Cai D, Xiao W F, Li G H. Advance on study of liming on acid soils (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(9): 206—213
- [3] 陆景陵. 植物营养学(上册). 第2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2007  
Lu J L. Plant nutrition (I) (In Chinese). 2nd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2007
- [4] Zhang H M, Xu M G, Zhu P, et al. Effect of 15-year-long fertilization on potassium quantity/intensity relationships in black soil in northeastern China. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, 42(11): 1289—1297
- [5] 蔡泽江,孙楠,王伯仁,等. 长期施肥对红壤pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 71—78  
Cai Z J, Sun N, Wang B R, et al. Effects of long-term fertilization on pH of red soil, crop yields and uptakes of nitrogen, phosphorous and potassium (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2011, 17



- (1): 71—78
- [ 6 ] 张效年, 赵安珍. 土壤电化学性质的研究——X. 红壤胶体的表面性状和离子专性吸附对表面电荷性质的影响. 土壤学报, 1988, 25 (2): 164—174  
Zhang X N, Zhao A Z. Studies on electrochemical properties of soils X. Charge characteristics of red soils as affected by surface properties of the soil and specific adsorption of ions (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1988, 25 (2): 164—174
- [ 7 ] 徐明岗. 恒电荷土壤与可变电荷土壤 $K^+$ 的吸附特性. 土壤肥料, 2002 (2): 13—17  
Xu M G. Study on characteristics of  $K^+$  adsorption by constant charge soils and variable charge soils (In Chinese). Soil and Fertilizer, 2002 (2): 13—17
- [ 8 ] 胡红青, 贺纪正, 高彦征.  $K^+$ 浓度、pH和离子强度对湖北省几种土壤吸附 $K^+$ 的影响. 华中农业大学学报, 1999, 18 (3): 229—233  
Hu H Q, He J Z, Gao Y Z. Influence of  $K^+$  concentration, pH and ionic strength on  $K^+$  adsorption of the seven kinds of soil in Hubei Province (In Chinese). Journal of Huazhong Agricultural University, 1999, 18 (3): 229—233
- [ 9 ] Haling R E, Simpson R J, Delhaize E, et al. Effect of lime on root growth, morphology and the rhizosphere of cereal seedlings growing in an acid soil. Plant and Soil, 2010, 327 (1/2): 199—212
- [ 10 ] Curtin D, Smillie G W. Effects of liming on soil chemical characteristics and grass growth in laboratory and long-term field-amended soils. Plant and Soil, 1986, 95 (1): 15—22
- [ 11 ] Jeandavid M, Louis D, Rock O. Soil properties and maple-beech regeneration a decade after liming in a northern hardwood stand. Forest Ecology & Management, 2008, 255 (8/9): 3460—3468
- [ 12 ] Reitemeier R F. Soil potassium. Advances in Agronomy, 1951 (3): 113—164
- [ 13 ] 于世举. 石灰改良酸性土壤的效果. 现代农业科技, 2012 (1): 278—278  
Yu S J. Effect of lime on acid soil (In Chinese). Modern Agricultural Science and Technology, 2012 (1): 278—278
- [ 14 ] Fischer S, Koch H J, B ü rcky K. Effect of liming central European loess soils on soil extractable phosphorus and potassium as determined by electro-ultrafiltration. Archives of Agronomy & Soil Science, 2015, 61 (6): 725—736
- [ 15 ] Anikwe M, Eze J C, Ibudialo A N. Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) in a degraded Ultisol in Agbani, Enugu Southeastern Nigeria. Soil & Tillage Research, 2016, 158: 32—38
- [ 16 ] Pierre W H, Bower C A. Potassium absorption by plants as affected by cationic relationships. Soil Science, 1943, 55 (1): 23—36
- [ 17 ] 金继运, 刘荣乐. 土壤肥力与肥料. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1998: 220—223  
Jin J Y, Liu R L. Soil fertility and fertilizers (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1998: 220—223
- [ 18 ] Riley D, Barber S A. Bicarbonate accumulation and pH changes at the soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) root-soil interface. Soil Science Society of America Journal, 1969, 33 (6): 905—908
- [ 19 ] 许曼丽, 刘芷宇. 土壤—根系微区养分状况的研究 II. 钾离子的富集与亏缺. 土壤学报, 1983, 20 (3): 295—302  
Xu M L, Liu Z Y. The nutrient status of soil-root interface II. The accumulation and depletion of potassium (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1983, 20 (3): 295—302
- [ 20 ] 王伯仁, 李冬初, 周世伟, 等. 红壤质量演变与培肥技术. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2014: 204—207  
Wang B R, Li D C, Zhou S W, et al. Red soil quality evolution and fertilization technology (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2014: 204—207
- [ 21 ] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000  
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [ 22 ] 梅旭阳, 高菊生, 杨学云, 等. 红壤酸化及石灰改良影响冬小麦根际土壤钾的有效性. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (6): 1568—1577  
Mei X Y, Gao J S, Yang X Y, et al. The response of soil potassium availability in rhizospheric soil of winter wheat to acidified and limed red soil (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22 (6): 1568—1577
- [ 23 ] Tisdale S L, Nelson W L, Beaton J D. Soil fertility and fertilizers. London: Collier Macmillan Publishers, 1985
- [ 24 ] Schneider A. Short-term release and fixation of K in calcareous clay soils. Consequence for K buffer power prediction. European Journal of Soil Science, 1997, 48 (3): 499—512
- [ 25 ] 王笋, 鲁剑巍, 张文君, 等. 田间土壤钾素有效性影响因素及其评估. 土壤, 2012, 44 (6): 898—904  
Wang Z, Lu J W, Zhang W J, et al. Influential factors

- on soil available potassium evaluation in agriculture (In Chinese). *Soils*, 2012, 44 (6): 898—904
- [26] 吴敏, 钱晓刚, 苏跃, 等. 玉米钾素营养临界期试验研究. *种子*, 2005, 24 (2): 65—67  
Wu M, Qian X G, Su Y, et al. Research on critical period of potassium nutrition in maize (In Chinese). *Seed*, 2005, 24 (2): 65—67
- [27] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 不同种植制度下长期施钾与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响. *中国农业科学*, 2007, 40 (1): 133—139  
Tan D S, Jin J Y, Huang S W, et al. Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40 (1): 133—139
- [28] Barber S A. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. *Soil Science*, 1962, 93 (1): 39—49
- [29] Barber S A. Potassium availability at the soil-root interface and factors influencing potassium uptake// Munson R D. Potassium in agriculture. Madison, Wis., USA: American Society of Agronomy. 1985: 309—335
- [30] Pearson R W. Soil acidity and liming in the humid tropics. Cornell International Agriculture Bulletin No. 30. Cornell University, Ithaca, N. Y. 1975: 66
- [31] 王家玉. 土壤非交换性钾的研究. *土壤学进展*, 1991 (2): 9—17  
Wang J Y. Research on non-exchangeable potassium in soil (In Chinese). *Advances in Soil Science*, 1991 (2): 9—17
- [32] 张会民, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期施肥条件下土壤钾素固定影响因素分析. *科学通报*, 2009, 54 (17): 2574—2580  
Zhang H M, Xu M G, Zhang W J, et al. Analysis of influencing factors of soil potassium fixation under long term fertilization (In Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54 (17): 2574—2580
- [33] Nolan C N, Pritchett W L. Certain factors affecting the leaching of potassium from sandy soils. *Proceedings Soil & Crop Science Society of Florida*, 1960: 139—145
- [34] Wolde Z. A review on evaluation of soil potassium status and crop response to potassium fertilization. *Journal of Environment and Earth Science*, 2016, 8 (6): 38—44

## Effect of Long-term Fertilization and Residual Effect of Liming on Potassium in Rhizosphere of Maize Relative to Growth Stage of the Crop

HAN Tianfu<sup>1, 2</sup> WANG Boren<sup>1, 2</sup> ZHANG Huimin<sup>1, 2†</sup> HUANG Jing<sup>1, 2</sup> LI Dongchu<sup>1, 2</sup> CAI Zejiang<sup>1, 2</sup>  
LIU Kailou<sup>1, 3</sup> CAI Andong<sup>1</sup> XU Minggang<sup>1, 2</sup>

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China)

(2 National Observation Station of Qiyang Agri-ecology System, CAAS, Qiyang, Hunan 426182, China)

(3 National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Jiangxi Institute of Red Soil, Jinxian, Jiangxi 331717, China)

**Abstract** 【Objective】 In attempt to provide a theoretical basis for amelioration of acidified red soil through liming and build-up of potassium (K) pool, efforts have been made to explore residual effect of liming on K in rhizosphere and bulk soil in maize field at different maize growth stages in acidified red soil.

【Method】 From a long-term fertilization experiment (Started in 1990), designed to have six treatments, including chemical nitrogen and phosphorus (NP), NP plus lime (NPCa), NPK, NPK plus lime (NPKCa), NPK plus straw (NPKS), and NPKS plus lime (NPKSCa) and conducted on a tract of upland maize field of red soil in Qiyang, Hunan Province, samples of rhizosphere and bulk soils were collected in the maize field at the seedling stage, jointing stage, filling stage and harvesting stage of the crop in 2014 for analysis of contents of different forms of K, pH and contents of exchangeable calcium and magnesium ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ), and exchangeable aluminum ( $\text{Al}^{3+}$ ). 【Result】 Results show that 1) compared with Treatment NP, Treatments NPK and NPKS were obviously or  $120.4 \text{ mg kg}^{-1}$  and  $149.6 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectively,

higher in readily available K (RAK) content in both rhizosphere and bulk soils, however, Treatments NP, NPK and NPKS, all suffered K deficiency in rhizosphere at the jointing and filling stages, with deficit being 18.2%, 34.2% and 26.4%, respectively; 2) comparison of Treatments NPKCa and NPKSCa with Treatments NPK and Treatment NPKS, respectively, shows that liming lowered RAK content, respectively, by 46.0 mg kg<sup>-1</sup> and 26.5 mg kg<sup>-1</sup> in rhizosphere soil and respectively, by 68.5 mg kg<sup>-1</sup> and 56.0 mg kg<sup>-1</sup> in bulk soil at the seedling stage, and increased RAK content in rhizosphere by 25.2 mg kg<sup>-1</sup> and 33.7 mg kg<sup>-1</sup>, respectively, but reduced the content slightly in bulk soil during the period from jointing to harvesting; comparison of Treatments NPCa, NPKCa and NPKSCa with their corresponding non-liming treatments shows that liming increased soil RAK gain and loss rate in rhizosphere soil by 8.6%, 33.2% and 19.3%, respectively, over the whole growing season; 3) soil RAK content in both rhizosphere and bulk soil was significantly and positively related to the corresponding slowly AK (SAK), potassium saturation (KS),  $K^+ / (Ca^{2+} + Mg^{2+})$  and  $K^+ / Al^{3+}$ , and SAK was in ultra-significantly positive relationship and KS in ultra-significantly negative relationship with RAK in relative variation rate. 【Conclusion】 Four years after liming in the farmland, under long-term N, P and K fertilization, it is found that liming has increased the contents of RAK and SAK and KS in rhizosphere soil (except at the seedling stage) and the content of  $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$  in rhizosphere soil, but not so significantly as in bulk soil, thus eventually alleviating RAK deficiency in rhizosphere soil.

**Key words** Long-term fertilization; Red soil; Lime; Potassium; Rhizosphere and bulk soil

(责任编辑：陈荣府)