

DOI: 10.11766/trxb201903130071

周玲红, 黄晶, 王伯仁, 李冬初, 柳开楼, 韩天富, 张会民. 南方酸化红壤钾素淋溶对施石灰的响应[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 457-467.  
ZHOU Linghong, HUANG Jing, WANG Boren, LI Dongchu, LIU Kailou, HAN Tianfu, ZHANG Huimin. Response of Acidifying Red Soil to Liming in Potassium Leaching in South China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 457-467.

## 南方酸化红壤钾素淋溶对施石灰的响应\*

周玲红<sup>1, 2</sup>, 黄晶<sup>1, 2†</sup>, 王伯仁<sup>1, 2</sup>, 李冬初<sup>1, 2</sup>, 柳开楼<sup>1, 3</sup>, 韩天富<sup>1</sup>,  
张会民<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. 湖南祁阳农田生态系统国家野外科学观测研究站, 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:** 为探究石灰施用的长期和短期效应对酸化红壤钾素的影响, 依托始于 1990 年的国家红壤肥力与肥料效益监测长期定位试验, 选取化肥氮磷配施 (NP)、氮磷钾配施 (NPK)、氮磷钾配施+半量秸秆还田 (NPKS) 及其增加常量石灰 (NPL、NPKL、NPKSL) 6 个处理。室内土柱淋溶试验设置 0 L、0.5 L、1 L 和 1.5 L 石灰施用量, 监测田间和淋溶后 0~50 cm 土层速效钾和缓效钾含量、pH 及淋溶液中钾离子 ( $K^+$ ) 含量的变化。结果表明: 1) 施用石灰 4 年后, 与 NPKS、NPK、NP 相比, 各处理均增加了相应土层的缓效钾含量; NPKSL 和 NPL 处理分别增加了 0~40 cm 和 0~10 cm 速效钾含量, 增幅分别为 2.06%~36.39% 和 27.26%。2) 石灰施用量相同, 各处理土壤累积  $K^+$  淋溶量由大到小依次为 NPKS 处理、NPK 处理和 NP 处理。施用石灰减少了 NPKS 和 NPK 处理淋溶液中累积  $K^+$  含量, 降幅为 18.10%~57.70%, 且  $K^+$  淋溶率也下降。3) 施石灰提高了表层土壤 pH; 土壤中钾素盈余情况下, 石灰当季施用量每增加 1 000  $kg \cdot hm^{-2}$ ,  $K^+$  淋溶损失率降低 11.7%; 施用石灰和施肥是显著影响平均淋溶  $K^+$  量和  $K^+$  累积淋溶量的主效应。可见, 施用石灰的短期和长期效应均能提高表层土壤 pH; 减少速效钾在剖面的运移, 增加剖面下层缓效钾的含量; 土壤淋溶  $K^+$  量、累积  $K^+$  淋溶量和  $K^+$  淋溶率均随土壤中速效钾含量的增加而增加, 随施用石灰而降低。合理的石灰用量能够有效降低酸化红壤  $K^+$  淋溶损失风险。

**关键词:** 长期施肥; 酸化红壤; 钾素; 石灰; 长期效应; 短期效应

**中图分类号:** S153      **文献标志码:** A

## Response of Acidifying Red Soil to Liming in Potassium Leaching in South China

ZHOU Linghong<sup>1, 2</sup>, HUANG Jing<sup>1, 2†</sup>, WANG Boren<sup>1, 2</sup>, LI Dongchu<sup>1, 2</sup>, LIU Kailou<sup>1, 3</sup>, HAN Tianfu<sup>1</sup>, ZHANG Huimin<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. Qiyang National Agro-Ecosystem Observation and Research Station, Qiyang, Hunan 426182, China; 3. National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Jiangxi Institute of Red Soil,

\* 国家自然科学基金项目 (41671301) 和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (161032019035, 161032020021) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41671301) and the Fundamental Research Funds for Central Non-profit Scientific Institution (Nos.161032019035 and 161032020021)

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

作者简介: 周玲红 (1991—), 女, 湖南郴州人, 硕士, 主要研究方向作物栽培学与耕作学。E-mail: 271905246@qq.com.

收稿日期: 2019-03-13; 收到修改稿日期: 2019-11-06; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-12-06

Jinxian, Jiangxi 331717, China)

**Abstract:** 【Objective】 To investigate long- and short-term effect of liming on soil potassium (K) in acidifying red soil, a long-term fertilization field experiment on soil fertility and fertilization effect in red soil was initiated in 1990. 【Method】 The long-term field experiment was designed to have treatments, i.e. application of chemical nitrogen and phosphorus fertilizer (NP), application of NP fertilizer plus liming (NPL), application of NPK (NPK), application of NPK plus liming (NPKL), application of NPK half of the designed rate and straw returning to make up the remaining half (NPKS), and application of NPKS plus liming (NPKSL), and four levels of liming (0 Lime, 0.5 Lime, 1 Lime and 1.5 Lime). Soil samples were collected from the treatments and packed into cylinders separately for indoor soil column leaching experiment. Potassium ion ( $K^+$ ) in leachate and readily available potassium (AK), slow available potassium (SAK) and pH in the 0~50 cm soil layer were monitored throughout the leaching experiment. 【Result】 Four years later after the initiation of the experiment, it was found that liming increased the content of SAK in the soil surface (0~10 cm) and subsurface layer (0~40 cm), by 2.06%~36.39% in Treatment NPKSL, and the content of AK in the 0~10 cm soil layer and the content of SAK in the 10~20cm and 40~50cm soil layers in Treatment NPL by 27.26% and 28.51%, 22.55%, respectively. In terms of  $K^+$  accumulation in leachate, the limed treatments displayed an order of  $NPKSL_E > NPKL_E > NPL_E$ , when liming was kept at the same level. Liming reduced  $K^+$  accumulation in leachate in Treatments  $NPKSL_E$  and  $NPKL_E$  by 18.10%~57.70% and hence  $K^+$  leaching rates, too. Liming increased soil pH in the surface soil layer. In the soil with K surplus, liming reduced  $K^+$  leaching rate by 11.7% for each 1 000  $kg \cdot hm^{-2}$  of lime applied. Apparently liming and fertilization are the main factors that significantly affect the mean leaching rate of  $K^+$  and  $K^+$  accumulation in leachate. 【Conclusion】 Obviously liming for a short or a long period of time can always increase soil pH in the surface soil layer, and retard vertical migration of AK in the profile, thus increasing the content of SAK in the lower soil layers. The amount of soil leaching  $K^+$ , cumulative  $K^+$  leaching and  $K^+$  leaching rate all increase with rising AK content in the soil and with declining liming rate. Liming rationally can effectively reduce the risk of K leaching loss in acidifying red soil.

**Key words:** Long-term fertilization; Acidifying red soil; Potassium; Lime; Long term effect; Short term effect

植物吸收的钾主要来自于土壤,我国土壤全钾的含量范围在  $0.5 \sim 25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 缺钾土壤总面积约为 0.23 亿  $\text{hm}^2$ , 在总耕地面积中钾缺乏程度一般(土壤速效钾含量  $50 \sim 70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和严重(土壤速效钾含量低于  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )约占 23%<sup>[1]</sup>。我国几种典型轮作制度下,土壤钾素平衡状况为:小麦-玉米轮作土壤钾素表观亏缺  $107.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 盈亏率 -44.7%; 早稻-晚稻轮作土壤钾素表观亏缺  $66.60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 盈亏率 -46.3%; 油菜-水稻/玉米/棉花轮作土壤钾素表观亏缺  $52.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 盈亏率 -33.7%<sup>[2]</sup>。

土壤中的钾以离子形态存在,其较强的移动性决定了土壤钾易通过淋溶而损失<sup>[3]</sup>。红壤是广泛分布于我国长江以南大部分地区的地带性土壤,约占我国土壤总面积 23%<sup>[4]</sup>。近年来,由于大量氮肥不合理的投入和大气酸沉降等因素导致土壤酸化加剧,红壤酸化问题也日益凸显。红壤酸化不仅影响作物生长,而且加速  $K^+$  的淋失<sup>[5]</sup>。我国南方红壤地区面临着土壤酸化和钾缺乏两大难题。因此,在由

施肥引起酸化的红壤上,研究  $K^+$  淋溶特性是保持土壤钾素肥力的重点。

施用石灰改良酸化土壤是一项快速且有效的农艺措施。酸化土壤施用石灰能提高土壤 pH, 土壤 pH 通过影响离子形态和数量、钾素的固定和释放、吸附和解吸来影响土壤溶液中钾素浓度<sup>[6]</sup>。酸化土壤施用石灰后, pH 增加,石灰中和了交换性铝,  $Al(OH)_x$  数量减少,  $Al^{3+}$  失去了电荷,晶层间隙扩大,并由  $Ca^{2+}$  占据了原来  $Al^{3+}$  的位置,而  $Ca^{2+}$  较易被  $K^+$  置换,于是  $K^+$  就较容易被吸附或固定<sup>[7]</sup>, 陈世军等<sup>[8]</sup>通过吸附-解析和淋溶试验也得出,石灰能增加植烟酸性土壤  $K^+$  的吸附量。但也有研究表明,施用石灰降低了耕层土壤交换性钾含量<sup>[9]</sup>。这可能是石灰施用量或施用时间长短不同,导致土壤吸附或固定  $K^+$  的量存在差异。陈竹君等<sup>[10]</sup>研究得出施用石灰影响土壤  $K^+/Ca^{2+}$  比而影响钾的吸附和解吸。在较低石灰用量或连续施用石灰的初期,由于  $Ca^{2+}$  对土壤吸附位的亲和力较  $K^+$  强,会提高土壤溶

液中  $K^+$  的活度, 提高作物对钾的吸收。但石灰施用过量时又会造成土壤溶液中  $K^+/Ca^{2+}$  比例失调<sup>[11]</sup>, 或增加土壤对钾的固定或淋溶<sup>[12]</sup>。

综上所述, 施用石灰对钾素淋失的影响还未能给出统一的结论, 且南方酸化红壤中钾素的淋失过程缺乏系统研究。在施石灰对酸化红壤进行改良的过程中, 仍需通过研究钾素淋失特征来找出阻控钾素损失的重要途径。因此, 本研究利用始于 1990 年的红壤肥力与肥料效益长期定位试验, 选择 3 个严重酸化处理 (NP、NPK、NPKS), 以及酸化后施用石灰改良处理 (NPL、NPKL、NPKSL), 一方面, 采集施用石灰 4 年后的田间剖面土样, 研究石灰的长期效应对土壤剖面钾素变化的影响; 另一方面, 采集施用石灰 4 年后的原状土柱, 进行室内模拟淋溶试验, 研究酸化红壤施用石灰对钾素淋溶的当季效应。以期为酸化红壤改良过程中石灰的合理施用及减缓钾素淋溶损失提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 石灰的长期效应试验

长期定位试验位于中国农业科学院祁阳红壤实验站 (111°52'E, 26°45'N), 始于 1990 年。该地区海拔 150~170 m, 地处中亚热带, 年均气温 18℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温 5 600℃, 年均降水量约 1 200 mm, 年蒸发量 1 470 mm, 无霜期 300 d, 年日照时数 1 610 h。供试土壤为第四纪红土母质发育的红壤, 采用小麦-玉米一年两熟轮作制, 无灌溉。

选取长期定位施肥试验 6 个处理: 1) 化肥氮磷配施 (NP), 2) 化肥氮磷配施+常量石灰 (NPL), 3) 化肥氮磷钾配施 (NPK), 4) 化肥氮磷钾配施+常量石灰 (NPKL), 5) 氮磷钾配合半量秸秆还田 (NPKS), 6) 氮磷钾配合半量秸秆还田+常量石灰 (NPKSL)。肥料用量为等氮量  $N\ 300\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 磷、钾肥用量为  $P_2O_5$ 、 $K_2O$  各  $120\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 氮肥为尿素 (含  $N\ 460\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 磷肥为过磷酸钙 (含  $P_2O_5\ 125\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 钾肥为氯化钾 (含  $K_2O\ 600\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。NP、NPK、NPKS 处理经过 21a 连续施肥, 土壤酸化导致作物无法正常生长, 于 2010 年开始进行施用石灰裂区处理 (NPL、NPKL、NPKSL)。施用的生石灰为粉状物, 粒径小于 0.5 mm, 主要成分为氧化钙 ( $CaO > 990\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 施用量为  $2\ 550\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,

撒施后表层 10 cm 土壤混匀。2010 年之后每隔四年施一次生石灰, NPKS 和 NPKSL 处理通过秸秆还田带入的钾素分别为  $29\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $64\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2014 年玉米收获后, 各处理采集 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm 共 5 个层次土壤样品, 测定各层土壤速效钾、缓效钾含量和 pH。本试验大田未施石灰裂区剖面土壤是连续 24 a 施肥的累积效应, 施用石灰的裂区则是 2010 年施石灰 4 a 后的残效。各处理 2010 年施用石灰前和 2014 年的表层 (0~20 cm) 土壤速效钾、缓效钾含量及 pH 见表 1。

### 1.2 石灰的短期效应-淋溶试验

淋溶试验于 2014 年 8—10 月在中国农业科学院祁阳红壤实验站实验室进行, 2014 年玉米收获后用内径为 5 cm (面积  $0.002\ \text{m}^2$ )、长为 60 cm 的镀锌钢管取各处理 (NP、NPL、NPK、NPKL、NPKS 和 NPKSL) 0~50 cm 原状土。各管原状土取回后, 底端用尼龙纱布覆盖, 柱子上端留 10 cm 作为灌用水, 下端用塑料瓶收集淋出液。管内不种任何作物。为弥补上述大田试验仅有一个石灰用量和施用时间的局限性, NPL、NPKL 和 NPKSL 原状土柱取回后在该石灰施用量 (Lime 为  $2\ 550\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 的基础上增加两个石灰用量的副处理: 减少 50% (0.5 Lime 为  $1\ 275\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 和增加 50% (1.5 Lime 为  $3\ 825\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 用量, 即淋溶试验共 3 组 ( $NP_E$ 、 $NPK_E$ 、 $NPKS_E$ ), 每组设置 4 个石灰施用量处理 (0  $L_E$ 、0.5  $L_E$ 、1  $L_E$ 、1.5  $L_E$ ), 3 次重复。淋溶试验各处理肥料总用量纯 N  $600\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $P_2O_5\ 240\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , NPK 和 NPKS 及其相应石灰施用量处理施用  $K_2O\ 240\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , NP 及其相应石灰施用量处理不施用钾肥。肥料与表土充分混匀, 各石灰处理在淋溶前将石灰施入土柱表层 0~15 cm。

按长期试验所在地多年平均降水量 1 200 mm 计算, 直径 5 cm 管的年降水量约为 2 400 mL。模拟 3 年的降水量 (7 200 mm) 对钾素淋溶的影响, 每管用 2 400 mL 蒸馏水淋洗 3 轮。每轮将 2400 mL 分成 10 份, 即每次 240 mL, 10 次为 1 轮, 每轮间隔 20 d, 再进行下一轮淋洗, 记录每轮淋溶液体积。3 轮淋溶结束后, 采集土柱 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm 的样品, 用于检测土壤速效钾、缓效钾含量和 pH 随土层深度的动态变化。浸提液中的  $K^+$  用火焰光度法测定, 土壤速效钾用  $1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{NH}_4\text{AC}$  浸提, 土壤缓效钾用  $1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{HNO}_3$  浸提<sup>[13]</sup>。

表 1 表层土壤速效钾、缓效钾含量及 pH

Table 1 Content of soil readily available potassium, slowly available potassium and pH in topsoil

年份 Year	处理 Treatment	AK / ( mg·kg <sup>-1</sup> )	SAK / ( mg·kg <sup>-1</sup> )	pH
2010	NP	55.40	82.22	4.39
	NPK	181.1	143.2	4.38
	NPKS	188.2	204.8	4.42
2014	NP	73.00±6.11d	156.7±16.68c	4.00±0.00c
	NPL	78.33±10.53d	160.7±21.94c	5.00±0.00a
	NPK	255.3±36.25ab	266.0±16.04a	4.33±0.33bc
	NPKL	181.5±23.50c	234.0±17.00ab	4.67±0.33ab
	NPKS	199.0±6.00bc	195.5±0.50bc	4.00±0.00c
	NPKSL	274.7±21.43a	230.7±4.67ab	5.00±0.00a

注: AK 代表速效钾; SAK 代表缓效钾; NP 代表氮磷; NPK 代表氮磷钾; NPKS 代表氮磷钾+半量秸秆还田; NPL 代表氮磷+常量石灰; NPKL 代表氮磷钾+常量石灰; NPKSL 代表氮磷钾+半量秸秆还田+常量石灰; 同列数据后不同字母代表处理间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ ), 下同。Note: AK stands for readily available potassium; SAK for slowly available potassium; NP for application of chemical nitrogen and phosphorus fertilizer; NPK for application of NPK; NPKS for application of NPK half of the rate plus straw returning to make up the remaining half; and NPKSL for NPKS plus liming. Data in the same column followed by different letters mean significant difference between treatments at the  $P < 0.05$  levels, respectively. The same below

### 1.3 数据统计与分析方法

钾素表观平衡 / ( kg·hm<sup>-2</sup> ) = ( 化肥钾+秸秆归还钾 )  
- 作物地上部钾携出量

钾肥表观利用率 / % = ( 施钾处理钾携出量 - 对照处理  
钾携出量 ) / 钾肥投入量 × 100<sup>[14]</sup>

K<sup>+</sup>淋溶率 / % = ( 施钾处理 K<sup>+</sup>累积淋溶量 - 不施钾处理  
K<sup>+</sup>累积淋溶量 ) / 施钾量 × 100<sup>[15]</sup>

经 Excel 2007 整理数据后, 采用 SPSS 12.5 软件进行不同处理之间方差分析 (ANOVA) 和多重比较 (采用邓肯 (Duncan) 新复极差法), 采用 Excel 2007 和 SigmaPlot 10.0 作图。

## 2 结果

### 2.1 施用石灰 4 a 后土壤速效钾、缓效钾和 pH 剖面变化特征

如图 1 所示, 速效钾含量在不施石灰处理 0~50 cm 土层中大小依次为: NPK、NPKS 和 NP, 随土层深度的增加速效钾含量显著降低 ( $P < 0.05$ ); 施用石灰 4 a 后 0~30 cm 速效钾大小依次为: NPKSL、NPKL 和 NPL。长期不施钾肥 (NP 和 NPL) 处理 0~50 cm 土壤速效钾含量均显著低于施钾处理 ( $P < 0.05$ )。

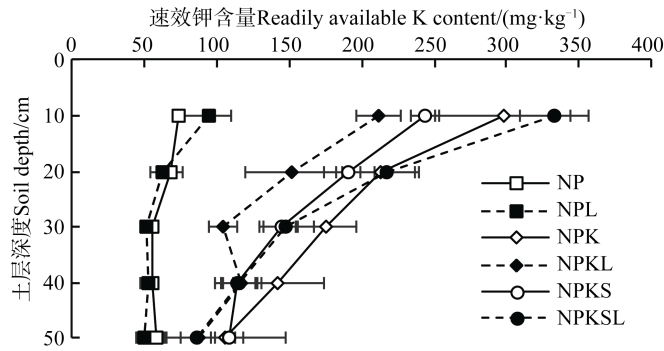
相比 NPKS 处理, NPKSL 处理增加了土壤 0~40 cm 土壤速效钾含量, 其中 0~20 cm 增幅最大, 为 13.76%~36.39%, 说明秸秆还田增加的土壤速效钾主要积累在 0~20 cm。与 NPK 处理相比, NPKL 处理 0~50 cm 速效钾含量降低了 17.24%~40.40%。

土壤缓效钾含量变化趋势与速效钾相同, 不施用石灰处理 0~20 cm 大小依次为: NPK、NPKS 和 NP; 施用石灰处理 0~10 cm 大小依次为: NPKSL、NPKL 和 NPL (图 2)。10~40 cm 土层 NPKSL 较 NPKS 增加了 9.46%~104.2%。相同施肥下, 施用石灰后降低了 0~10 cm 土层 NP 和 NPK 处理缓效钾含量, 分别降低了 19.26% 和 23.31%。

施用石灰提高了土壤 pH。与 NPKS 相比, NPKSL 处理 0~50 cm 土壤 pH 提高 0.43~1.24; 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤 pH, NPKL 较 NPK 分别提高了 0.23 和 0.45, NPL 较 NP 分别提高了 0.5 和 0.85, 差异显著 ( $P < 0.05$ )。各处理 20~50 cm 土壤 pH 随着土层深度增加而上升 (图 3)。

### 2.2 石灰短期效应对淋溶剖面土壤钾素含量和 pH 的影响

经过 3 轮淋溶后, 施用石灰降低了各处理 0~50 cm 土壤速效钾含量, 随土层深度增加速效钾含



注：误差线为标准误差，下同。Note: The error line stands for standard deviation, the same below

图 1 不同石灰用量下各施肥处理田间土壤剖面速效钾变化

Fig. 1 Change in content of readily available K in soil profiles relative to fertilization treatment and liming rate

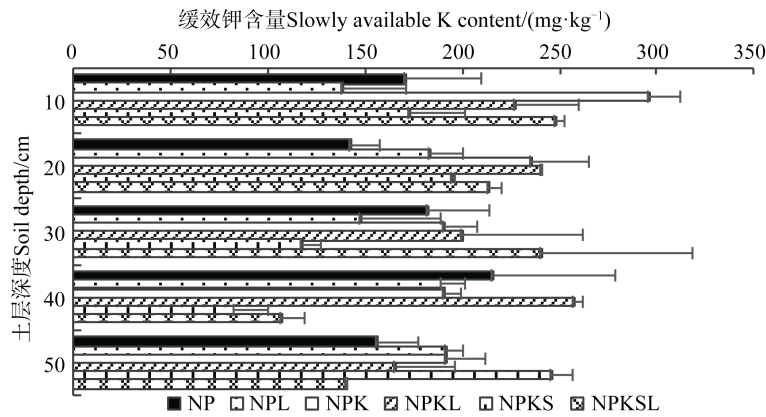


图 2 不同石灰用量下各施肥处理田间土壤剖面缓效钾变化

Fig. 2 Change in content of slowly available K in soil profiles relative to fertilization treatment and liming rate

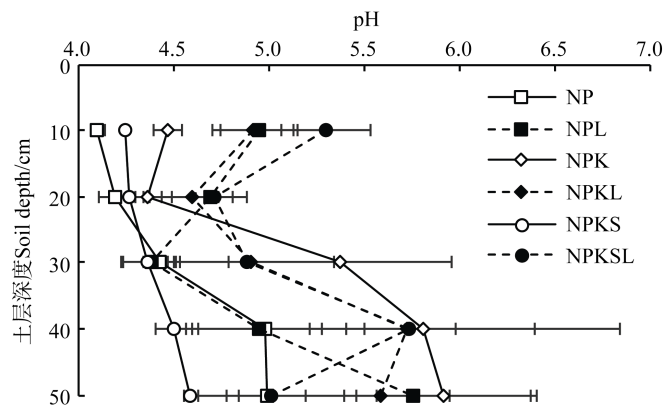
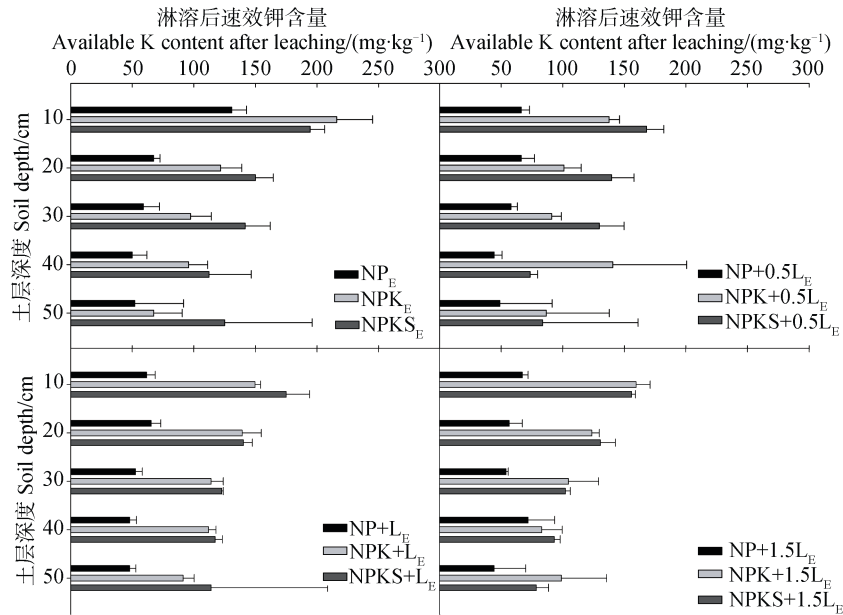


图 3 不同石灰用量下各施肥处理田间土壤剖面 pH 变化

Fig. 3 Change in soil pH in soil profile relative to fertilization treatment and liming rate

量呈下降趋势(图 4)。与未施石灰处理相比, NPKS<sub>E</sub>、NPK<sub>E</sub> 和 NP<sub>E</sub> (为区别石灰 Lime, L; 这里淋溶下标使用 Eluviation, E) 处理施用不同量石灰后, 0~10

cm 土壤速效钾含量分别降低了 9.95%~19.73%、26.08%~36.27%和 48.47%~52.81%, 不同石灰施用量间无显著差异。



注：下标 E 代表淋溶，L 代表石灰，0.5 L、L 和 1.5 L 是指石灰施用量分别为  $1\ 275\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $2\ 550\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $3\ 825\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，下同。Note: The subscript E stands for leaching, L stands for lime. 0.5 L, L, and 1.5 L refer to lime application rates of  $1\ 275\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $2\ 550\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , and  $3\ 825\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ . The same below

图 4 不同石灰用量下各施肥处理淋溶后土壤剖面速效钾变化

Fig. 4 Content of soil readily available K in soil profile after the leaching experiment relative to fertilization treatment and liming rate

经过 3 轮淋溶后，施用石灰增加了各处理 0~10 cm 土壤缓效钾含量(图 5)，NPKS 处理 0~50 cm 土壤中增幅为 2.11%~100.0%。与不施用石灰处理相比，NPK+0.5L<sub>E</sub> 和 NP+0.5L<sub>E</sub> 处理 0~10 cm 土壤缓效钾含量分别增加 39.16%和 46.60%。

3 轮淋溶后，各处理 pH 在 0~50 cm 土层呈 S 形变化，随石灰施用量的增加呈上升趋势(图 6)。与不施石灰的 NPKS<sub>E</sub>、NPK<sub>E</sub> 和 NP<sub>E</sub> 处理相比，相应施肥处理在增施石灰后显著提高了 0~10 cm 土壤 pH ( $P<0.05$ )，分别提高了 1.00~2.00、1.36~1.80 和 1.37~2.01 个单位，随着土层深度的增加，处理间的差异逐渐缩小，受石灰的影响变小。说明石灰的施用对表层(0~10 cm)以下土壤 pH 的影响有限。

### 2.3 石灰短期效应对 K<sup>+</sup>淋溶的影响

由表 2 可知，各处理淋溶液中的 K<sup>+</sup>浓度随着淋溶次数的增加而降低，不同施肥处理相同石灰施用量下平均 K<sup>+</sup>淋溶量均表现为：NPKS<sub>E</sub> > NPK<sub>E</sub> > NP<sub>E</sub>，且随土壤中速效钾含量的增加而增加。

施用石灰能降低 K<sup>+</sup>的淋溶。与不施石灰相比，施用石灰后 NPK<sub>E</sub> 施肥处理平均 K<sup>+</sup>淋溶量和累积 K<sup>+</sup>含量减少了 43.16%~57.70%，其中 0.5 L<sub>E</sub> 效果最好，

L<sub>E</sub> 次之；NPKS 施肥处理以 L<sub>E</sub> 和 1.5 L<sub>E</sub> 降低效果显著 ( $P<0.05$ )；NP+L<sub>E</sub> 处理均小于 NP<sub>E</sub> 处理。

土壤累积 K<sup>+</sup>淋溶量在不同施肥处理相同石灰施用量下大小依次为：NPKS<sub>E</sub>、NPK<sub>E</sub> 和 NP<sub>E</sub>，与 NP<sub>E</sub> 相比，NPKS<sub>E</sub> 和 NPK<sub>E</sub> 处理分别增加了 487.5%~1 270%和 720.5%~1 456%，NPKS<sub>E</sub> 较 NPK<sub>E</sub> 增加了 12.28%~117.4%。NP 处理由于无钾素投入，淋溶液中累积 K<sup>+</sup>含量显著低于其他处理 ( $P<0.05$ )，石灰施用量对 NP<sub>E</sub> 处理的累积淋溶 K<sup>+</sup>量无显著影响。

不同处理 K<sup>+</sup>淋溶率由大到小依次为 NPKS<sub>E</sub>、NPKS+0.5 L<sub>E</sub>、NPKS+ L<sub>E</sub> 和 NPKS+1.5 L<sub>E</sub>，与 NPKS<sub>E</sub> 处理相比，施用石灰处理 K<sup>+</sup>淋溶率降低了 19.26%~45.42%；NPK<sub>E</sub> 淋溶率最高，NPK+L<sub>E</sub> 和 NPK+1.5 L<sub>E</sub> 次之，NPK+0.5 L<sub>E</sub> 最低，其中 NPK+0.5 L<sub>E</sub> 较其他处理显著降低 K<sup>+</sup>淋溶率 ( $P<0.05$ )。

试验土柱中钾的来源主要包括土壤自身残留和施入的钾。假设施肥处理淋溶液中来自土壤自身残留的 K<sup>+</sup>含量等于 NP<sub>E</sub> 处理的 K<sup>+</sup>淋失量，那么施肥处理中来自外源钾(肥料、秸秆还田)的 K<sup>+</sup>淋失量可由其与 NP<sub>E</sub> 处理的差值来估算。在本试验条件下，NPKS<sub>E</sub>、NPKS+ L<sub>E</sub>、NPKS+0.5 L<sub>E</sub> 和

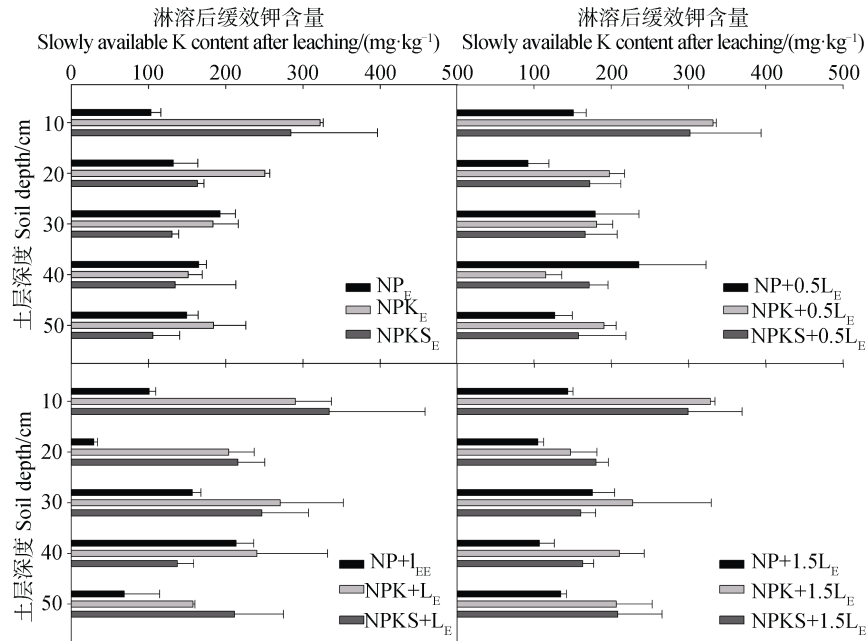


图 5 不同石灰用量下各施肥处理淋溶后土壤剖面缓效钾变化

Fig. 5 Content of soil slowly available K in profile after leaching relative to fertilization treatment and liming rate

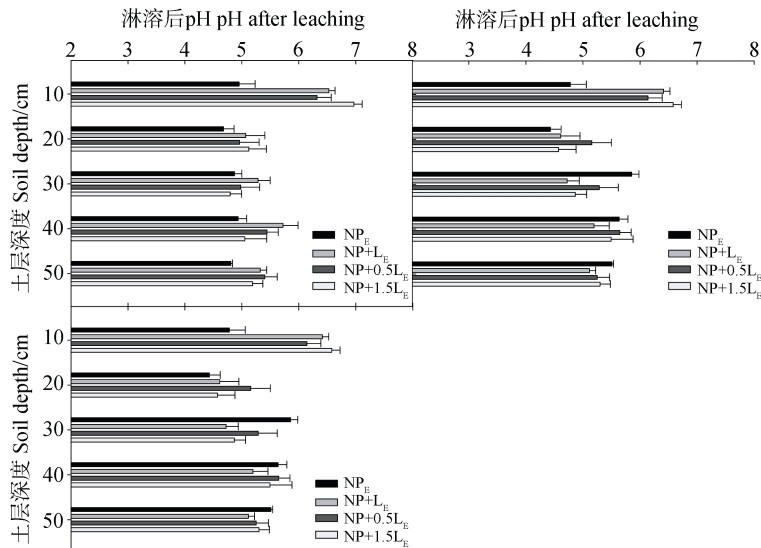


图 6 不同石灰用量下各施肥处理淋溶后土壤剖面 pH 变化

Fig. 6 Soil pH in soil profile after leaching relative to fertilization treatment and liming rate

NPKS+1.5 L<sub>E</sub> 处理通过外源钾产生的 K<sup>+</sup>累积淋失量分别为 195.8、106.9、158.1 和 113.7 kg·hm<sup>-2</sup>，分别占外源钾施用量的 98.33%、53.67%、79.39% 和 57.09%；NPK<sub>E</sub>、NPK+L<sub>E</sub>、NPK+0.5 L<sub>E</sub> 和 NPK+1.5 L<sub>E</sub> 处理分别为 172.9、76.93、65.47 和 90.23 kg·hm<sup>-2</sup>，分别占外源钾施用量的 86.82%、38.63%、32.88% 和 45.31%。可见施用石灰减少了外源钾的淋失率。

相关分析表明，各施肥处理 K<sup>+</sup>平均淋溶量、累积淋溶量和淋溶损失率均随着当季石灰用量的增加

呈下降趋势，NPKS<sub>E</sub> 处理的 K<sup>+</sup>平均淋溶量和 K<sup>+</sup>淋溶率与石灰用量呈显著和极显著相关，相关系数分别达 0.796 和 0.855。石灰施用量每增加 1 000kg·hm<sup>-2</sup>，K<sup>+</sup>平均淋溶量降低 7.9 kg·hm<sup>-2</sup>，K<sup>+</sup>淋溶损失率降低 11.7%。

当季施用石灰和不同施肥措施均是影响 K<sup>+</sup>平均淋溶量和 K<sup>+</sup>累积淋溶量的主效应（表 3），当季施用石灰对 K<sup>+</sup>淋溶率有显著影响（*P*<0.05），但当季施用石灰和不同施肥的交互作用对 K<sup>+</sup>平均淋溶量和 K<sup>+</sup>累积淋溶量无显著影响。



表 2 不同石灰施用量及施肥处理对淋溶液中 K<sup>+</sup>含量的影响Table 2 Effect of liming and fertilization on K<sup>+</sup> content in leachate relative to treatment / (kg·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	淋溶钾量 Leaching K <sup>+</sup>			平均淋溶钾	累积淋溶钾量
	第一轮	第二轮	第三轮	Average	Accumulation
	First round	Second round	Third round	leaching K <sup>+</sup>	leaching K <sup>+</sup>
NP <sub>E</sub>	7.76±0.65b	4.27±0.38cd	1.58±0.41c	4.54±0.23e	13.61±0.68e
NP+L <sub>E</sub>	2.99±0.98b	2.76±0.41d	1.59±0.39c	2.45±0.33e	7.34±1.00e
NP+0.5 L <sub>E</sub>	5.60±2.94b	5.46±2.4cd	2.38±0.68c	4.48±1.88e	13.43±5.63e
NP+1.5 L <sub>E</sub>	9.54±3.75b	3.88±0.44cd	2.37±0.69c	5.26±1.54e	15.78±4.63e
NPK <sub>E</sub>	74.66±8.84a	71.62±16.43a	40.24±8.05a	62.17±10.69ab	186.5±32.06ab
NPK+L <sub>E</sub>	42.30±17.82ab	26.04±10.87cd	15.93±2.09b	28.09±9.97de	84.27±29.9de
NPK+0.5 L <sub>E</sub>	35.10±14.70ab	25.83±3.57cd	17.98±1.39b	26.30±4.24de	78.9±12.71de
NPK+1.5 L <sub>E</sub>	51.79±19.18a	35.02±9.33bcd	19.20±4.33b	35.34±10.91cd	106.0±32.72cd
NPKE	75.00±17.89a	86.43±23.11a	48.00±7.62a	69.81±16.04a	209.4±48.12a
NPKE+L <sub>E</sub>	62.27±17.70a	33.15±7.66bcd	18.80±2.43b	38.07±9.23bcd	114.2±27.7bcd
NPKE+0.5 L <sub>E</sub>	72.86±10.67a	63.2±9.95ad	35.46±6.70a	57.18±8.99abc	171.5±26.97abc
NPKE+1.5 L <sub>E</sub>	70.27±7.51a	38.03±9.08bc	21.18±4.47b	43.16±6.90bcd	129.5±20.71bcd

表 3 不同石灰添加量和田间处理对 K<sup>+</sup>平均淋溶量、K<sup>+</sup>累积淋溶量和 K<sup>+</sup>淋溶率影响的方差分析Table 3 ANOVA of effects of liming and fertilization on mean leaching of K<sup>+</sup>, cumulative K<sup>+</sup> leaching and K<sup>+</sup> leaching rate

变量 Variable	钾平均淋溶量 Mean K <sup>+</sup> leaching	钾累积淋溶量 Cumulative K <sup>+</sup> leaching	钾淋溶率 K <sup>+</sup> leaching rate
L	0.016*	0.016*	0.023*
T	7.44×10 <sup>-8</sup> **	7.45×10 <sup>-8</sup> **	0.056
L×T	0.252	0.253	0.579

注: L: 添加生石灰; T: 田间不同施肥处理; \*: 差异显著 ( $P < 0.05$ ); \*\*: 差异极显著 ( $P < 0.01$ )。Note: L: Liming; T: Fertilization treatment in the field; \*: Significant difference ( $P < 0.05$ ); \*\*: Extremely significant difference ( $P < 0.01$ )

### 3 讨论

#### 3.1 酸性红壤 K<sup>+</sup>淋溶量随土壤钾库容量的增大而增加

本研究结果表明, 当季相同石灰施用量下 K<sup>+</sup> 平均淋溶量、累积淋溶量和淋溶率均表现为: NPKE > NPK<sub>E</sub> > NP<sub>E</sub> (表 2)。可能是由于秸秆还田能明显提高土壤速效钾含量<sup>[16]</sup>, 田间土壤速效钾含量愈大, 淋溶风险愈大<sup>[3]</sup>, 从而增加了 K<sup>+</sup> 淋溶量。本研究中长期秸秆还田 NPKS 和 NPKSL 表现出钾盈余, 盈余量分别为 63 和 6 kg·hm<sup>-2</sup>, 可能是因为 NPKS 和 NPKSL 处理钾的投入较多, 使钾输入超过了钾的输出。NPK 处理表现出钾盈余, 盈余量为 34 kg·hm<sup>-2</sup>,

NPKL 处理表现出 K 亏缺, 其亏缺量为 55 kg·hm<sup>-2</sup>, 主要是因为 NPKL 处理的产量相对较高, 通过作物收获带走了更多的钾<sup>[14]</sup>。施用石灰 4 a 后, NPKSL 较 NPKS 处理田间钾盈余量减少, 石灰短期效应表现为 K<sup>+</sup> 淋溶量和淋溶率增加。

Houle 等<sup>[9]</sup>通过连续施用石灰 10 a 后发现土壤 pH、阳离子交换量、盐基饱和度随着石灰用量的增加而增加, 0~20 cm 土层土壤的交换性钾含量降低。张龙辉等<sup>[17]</sup>也得出随着土壤酸度的降低, 降低了土壤速效钾的有效性。主要原因是石灰提高了土壤交换性钙含量, 造成土壤溶液中 K<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup> 比例失调, 增加钾的固定, 导致土壤速效钾含量降低<sup>[18]</sup>。张效朴和郑根宝<sup>[19]</sup>研究发现, 连续施用石灰的初期,



由于  $\text{Ca}^{2+}$  对土壤吸附位的亲和力较  $\text{K}^+$  强, 会增加土壤溶液中  $\text{K}^+$  的活度。文星<sup>[20]</sup>通过土培试验, 发现施用生石灰后, 土壤交换性钾和交换性钙镁显著提高, 这与本研究结果相似。石灰施用初期可显著提高土壤 pH<sup>[21]</sup>, 后期随着土壤黏粒中潜性酸释放和土壤缓冲性能作用, 其修复效果会随时间变化逐渐减弱<sup>[22]</sup>。但是吕波等<sup>[23]</sup>通过土培盆栽试验得出, 施用生石灰降低土壤速效钾含量。这与本研究结果有差异, 其主要原因可能与石灰施用量以及是否种植作物等有关<sup>[24]</sup>。且  $\text{K}^+$  作为可溶性养分, 其移动和淋失与土壤水分状况密切相关<sup>[25]</sup>。本研究中淋溶实验设计与实际降水强度及间隔不同, 这可能会影响  $\text{K}^+$  的淋溶。

林清火<sup>[24]</sup>研究砖红壤中钾的淋溶特征得出渗漏液中  $\text{K}^+$  浓度随着施肥量的增加而增加, 二者成正相关, 可能是因为增施钾肥使钾素的吸附平衡常数和缓冲容量降低。且施钾肥能有效补充作物带走的钾素,  $\text{K}^+$  的吸附位点相对稳定, 多余的  $\text{K}^+$  进入土壤溶液也不能被土壤胶体有效地吸附<sup>[25]</sup>。这与本研究结果相似, 长期氮磷钾肥配施结合秸秆还田 (NPKS)  $\text{K}^+$  淋溶较高, 而长期施用氮磷化肥, 造成钾素亏缺, 部分吸钾位点被其他阳离子占据, 当一定量的  $\text{K}^+$  进入土壤溶液中时就通过交换被土壤胶体有效吸附且相对较牢固<sup>[26]</sup>。

### 3.2 酸性红壤 $\text{K}^+$ 淋溶量随石灰的施用而降低

土壤酸化往往伴随着钾素的缺乏, 主要是由于  $\text{H}^+$  和  $\text{Al}^{3+}$  占据钾素交换位点, 易引起钾素的淋失<sup>[27]</sup>。酸化红壤上施石灰提高 pH, 改变土壤表面电荷吸附作用而影响钾素的淋失。朱宏斌等<sup>[28]</sup>在酸性红壤上施石灰, 土壤 pH 提高了 2 个单位。本试验施用石灰 4 a 后和当季施用分别提高 0~20 cm (图 3) 和 0~10 cm (图 6) 土壤 pH, 其中当季施用提高幅度为 1.00~2.01 个单位 (图 6), 土壤 pH 提高随石灰施用量增加呈增加趋势。

赵其国<sup>[29]</sup>得出  $\text{K}^+$  的吸附量随土壤 pH 降低而减少, pH 降低使钾不易进入复合体而大部分存留于土壤溶液中, 使得钾易淋失。董艳红等<sup>[3]</sup>通过对 14 种土壤  $\text{K}^+$  淋溶特征研究表明, 钾肥表观淋出率均与土壤 pH 呈显著负相关关系, 即土壤 pH 越小, 酸性越强,  $\text{K}^+$  淋溶量越大。这与本试验研究结果一致, 石灰当季效应减少了 NPKS<sub>E</sub> 和 NPK<sub>E</sub> 处理的淋溶  $\text{K}^+$  量和累积  $\text{K}^+$  淋溶量, 与不施用石灰相比, 二者分别

减少了 18.09%~45.47% 和 43.16%~57.70% (表 3)。可能是因为施用石灰通过中和土壤中  $\text{Al}^{3+}$  和  $\text{H}^+$ , 提高土壤 pH, 提供更多  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等阳离子交换位点<sup>[30]</sup>。本长期定位试验 2014 年研究结果表明, 与不施用石灰相比, 施石灰后土壤 pH 提高 0.5~1.0 个单位, 根际与非根际土壤交换性铝平均降低  $3.9 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 土壤交换性钙镁平均增加  $2.8 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。曾廷廷等<sup>[31]</sup>也得出相似结论。

施用石灰增加了土壤对钾的吸附<sup>[8]</sup>。在钾肥的基础上增施石灰, 钾的吸附平衡常数和最大缓冲容量均降低, 钾的最大吸附量均增大, 促进土壤对钾的固持, 提高钾的有效性<sup>[1]</sup>。本研究中与不施石灰相比, 施用石灰 4 a 后, NPK 和 NP 处理 20~50 cm 速效钾含量降低 (图 1), 土壤钾素向剖面下层的迁移减少, NPKS 和 NPK 处理 20~40 cm 缓效钾含量增加 (图 2), 剖面下层土壤钾的吸附增加。当季施用石灰淋溶后, 各处理 0~50 cm 土壤速效钾含量降低, 缓效钾含量增加 (图 4~图 5)。这可能是因为土壤中钾素处于一定的动态平衡, 当速效钾含量降低时会诱导缓效钾的释放<sup>[32]</sup>, 从而减少  $\text{K}^+$  在剖面运移量。

本研究结果表明, 当季施用石灰显著影响  $\text{K}^+$  平均淋溶量和累积淋溶量 ( $P<0.05$ ), 施肥处理对二者有极显著影响 ( $P<0.01$ ) (表 4)。这与林清火<sup>[24]</sup>研究结果相似。土壤中钾素盈余较高 ( $63 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 时, 石灰施用量每增加  $1000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{K}^+$  平均淋溶量降低  $7.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{K}^+$  累积淋溶量降低  $23.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{K}^+$  淋溶损失率降低 11.7%。酸化土壤施石灰后, 存在大量的钙、镁陪补离子, 交换性铝含量降低, 消除了铝的毒性, 增加了对  $\text{K}^+$  的吸附, pH 增加则吸附量也随之提高。但施用石灰过多, 容易造成土壤溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{K}^+$  比例失调, 抑制钾吸收<sup>[11]</sup>。

## 4 结 论

长期钾肥施用和秸秆还田, 与不施用钾肥相比, 能够提高酸化红壤 0~20 cm 土层速效钾和缓效钾含量。当季施用石灰可显著降低  $\text{K}^+$  平均淋溶量、累积淋溶量和淋溶损失率, 且石灰施用量在  $1275\sim2550 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  对钾素淋溶损失的降低效果更好。钾肥配施秸秆还田下, 土壤中钾素有盈余, 石灰施用

量每增加  $1\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 钾淋溶损失率降低 11.7%。因此, 合理的石灰用量能够有效降低酸化红壤钾素淋溶损失风险。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Han T F. Characteristics and mechanisms of potassium transformation in rhizosphere soil of red earth with acidification after lime application. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017. [韩天富. 酸化红壤施石灰后根际土壤钾素转化特征与机制. 北京: 中国农业科学院, 2017.]
- [ 2 ] The National Agro-tech Extension and Service Center (NATESC), Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Research of the evolution of arable land quality-summary of national arable land soil monitoring. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008. [全国农业技术推广服务中心, 中国农科院农业资源与区划所. 耕地质量演变趋势研究—国家级耕地土壤监测数据整编. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008.]
- [ 3 ] Dong Y H, Wang H Y, Zhou J M, et al. Preliminary study on potassium leaching characteristics of different soils. *Soils*, 2014, 46 ( 2 ): 225—231. [董艳红, 王火焰, 周健民, 等. 不同土壤钾素淋溶特性的初步研究. *土壤*, 2014, 46 ( 2 ): 225—231.]
- [ 4 ] Wang B R, Li D C, Zhou S W, et al. Quality evolution and fertilization technology of red soil. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2015. [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, 2015.]
- [ 5 ] Yi J X, Lü L X, Liu G D. Research on soil acidification and acidic soil's melioration. *Journal of South China University of Tropical Agriculture*, 2006, 12 ( 1 ): 23—28. [易杰祥, 吕亮雪, 刘国道. 土壤酸化和酸性土壤改良研究. *华南热带农业大学学报*, 2006, 12 ( 1 ): 23—28.]
- [ 6 ] Cai D, Xiao W F, Li G H. Advance on study of liming on acid soils. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 26 ( 9 ): 206—213. [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*, 2016, 26 ( 9 ): 206—213.]
- [ 7 ] Zhan L P, Li X K, Lu J W, et al. Research advances on influence factors of soil potassium movement. *Soils*, 2012, 44 ( 4 ): 548—553. [占丽平, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 土壤钾素运移的影响因素研究进展. *土壤*, 2012, 44 ( 4 ): 548—553.]
- [ 8 ] Chen S J, Pan W J, Meng Y S, et al. Effects of lime and polyacrylamide ( PAM ) on phosphorus and kalium adsorption, desorption and translocation in an acid soil. *Journal of Southwest China Normal University ( Natural Science Edition )*, 2012, 37 ( 6 ): 68—73. [陈世军, 潘文杰, 孟玉山, 等. 石灰和聚丙烯酰胺对植烟酸性土壤钾、磷吸附解析和迁移的影响. *西南师范大学学报 ( 自然科学版 )*, 2012, 37 ( 6 ): 68—73.]
- [ 9 ] Houle D, Duchesne L, Moore J D, et al. Soil and tree-ring chemistry response to liming in a sugar maple stand. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31 ( 6 ): 1993—2000.
- [ 10 ] Chen Z J, Wang Y Q, Zhou J B, et al. Quantity and intensity of potassium and its exchange relationship with calcium in sunlight greenhouse soils. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15 ( 5 ): 1078—1084. [陈竹君, 王益权, 周建斌, 等. 日光温室栽培土壤供钾状况及 K-Ca 吸附交换特性研究. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 ( 5 ): 1078—1084.]
- [ 11 ] Sims J T, Ellis B G. Adsorption and availability of phosphorous following the application of limestone to an acid, aluminous soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47 ( 5 ): 888—893.
- [ 12 ] Grove J H, Sumner M E, Syers J K. Effect of lime on exchangeable magnesium in variable surface charge soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45 ( 3 ): 497—500.
- [ 13 ] Bao S D. Analysis for soil and agrochemistry. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [ 14 ] Wang X H, Lü J L, Liu H. Potassium balance and use efficiency in grey desert soil under continuous wheat-maize-cotton crop rotation system. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 ( 1 ): 213—223. [王西和, 吕金岭, 刘骅. 灰漠土小麦-玉米-棉花轮作体系钾平衡与钾肥利用率. *土壤学报*, 2016, 53 ( 1 ): 213—223.]
- [ 15 ] Luo W, Lin Q H, Lin Z M, et al. Preliminary stimulated study on leaching of potassium in latosol. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18 ( 6 ): 93—96. [罗微, 林清火, 林钊沐, 等. 钾肥在砖红壤中的淋失特征初步模拟研究. *水土保持学报*, 2004, 18 ( 6 ): 93—96.]
- [ 16 ] Wang F, Lin C, Li Q H, et al. Increase effect of potassium supply and balance of yellow paddy soils through long-term different fertilization modes. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 ( 3 ): 669—677. [王飞, 林诚, 李清华, 等. 不同施肥措施提高南方黄泥田供钾能力及钾素平衡的作用. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3): 669—677.]
- [ 17 ] Zhang L H, Li Y H, Deng X H, et al. Dynamic change of soil pH and physicochemical properties after application of lime, green manure and biological organic fertilizer. *Acta Tabacaria Sinica*, 2019, 25 ( 3 ): 60—66. [张龙辉, 李源环, 邓小华, 等. 施用石灰和绿肥及生物有机肥后的酸性土壤 pH 和理化性状动态变化. *中国烟草学报*, 2019, 25 ( 3 ): 60—66.]
- [ 18 ] Zhang D, Hu Q, Du Y M, et al. Advances in acidification and improvement of tobacco planting soil. *Chinese*

- Tobacco Science, 2013, 34 (5): 113—118. [张东, 扈强, 杜咏梅, 等. 植烟土壤酸化及改良技术研究进展. 中国烟草科学, 2013, 34 (5): 113—118.]
- [ 19 ] Zhang X P, Zheng G B. Effect of continuous liming on crop growth and their absorption of nutrients. *Acta Pedologica Sinica*, 1987, 24 (4): 343—351. [张效朴, 郑根宝. 连续施石灰对作物生长及其养分吸收的影响. 土壤学报, 1987, 24 (4): 343—351.]
- [ 20 ] Wen X. Study the effects of several soil amendments on acid paddy soil and red soil. Changsha: Central South University, 2014. [文星. 几种土壤改良剂对酸性水稻土及红壤旱土的改良效果研究. 长沙: 中南大学, 2014.]
- [ 21 ] Hu M, Xiang Y S, Lu J W. Effects of lime application rates on soil acidity and barley seeding growth in acidic soils. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49 (20): 3896—3903. [胡敏, 向永生, 鲁剑巍. 石灰用量对酸性土壤酸度及大麦幼苗生长的影响. 中国农业科学, 2016, 49 (20): 3896—3903.]
- [ 22 ] Zhang Y, Deng X H, Yang L L, et al. Effects of different amendments application on remediation of acidic soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 (5): 330—334. [张瑶, 邓小华, 杨丽丽, 等. 不同改良剂对酸性土壤的修复效应. 水土保持学报, 2018, 32 (5): 330—334.]
- [ 23 ] Lü B, Wang Y H, Xia H, et al. Effects of biochar and other amendments on the cabbage growth and soil fertility in yellow-brown soil and red soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51 (22): 4306—4315. [吕波, 王宇函, 夏浩, 等. 不同改良剂对黄棕壤和红壤上白菜生长及土壤肥力影响的差异. 中国农业科学, 2018, 51 (22): 4306—4315.]
- [ 24 ] Lin Q H. Study of nitrogen and potassium leaching in the latosol. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2004. [林清火. 砖红壤中氮钾的淋溶特征研究. 重庆: 西南农业大学, 2004.]
- [ 25 ] Zhang S X, Liang Y J, Yang Y H, et al. Effects of fertilization on the growth of flue-cured tobacco P and K nutrition in the rhizosphere. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28 (7): 109—113. [张淑霞, 梁永江, 杨宇虹, 等. 施肥对烤烟生长及根际土壤磷钾养分的影
- 响. 中国农学通报, 2012, 28 (7): 109—113.]
- [ 26 ] Liao Y L, Zheng S X, Lu Y H, et al. Effects of long-term application of fertilizer and rice straw on potassium fixation of reddish paddy soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25 (1): 70—73, 95. [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. 水土保持学报, 2011, 25 (1): 70—73, 95.]
- [ 27 ] 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.
- [ 28 ] Zhu H B, Wang W J, Wu J, et al. Effect of combined application of zeolite and lime on acid red-yellow soil reclamation and crop production. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35 (1): 26—29. [朱宏斌, 王文军, 武际, 等. 天然沸石和石灰混用对酸性黄红壤改良及增产效应的研究. 土壤通报, 2004, 35 (1): 26—29.]
- [ 29 ] Zhao Q G. Temporal and spatial changes, mechanisms and regulation of soil degradation in red soil region of eastern China. Beijing: Science Press, 2002: 196—210. [赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及其调控. 北京: 科学出版社, 2002: 196—210.]
- [ 30 ] Hati K M, Swarup A, Mishra B, et al. Impact of long-term application of fertilizer, manure and lime under intensive cropping on physical properties and organic carbon content of an Alfisol. *Geoderma*, 2008, 148 (2): 173—179.
- [ 31 ] Zeng T T, Cai Z J, Wang X L, et al. Integrated analysis of liming for increasing crop yield in acidic soils. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50 (13): 2519—2527. [曾廷廷, 蔡泽江, 王小利, 等. 酸性土壤施用石灰提高作物产量的整合分析. 中国农业科学, 2017, 50 (13): 2519—2527.]
- [ 32 ] Ji H J, Zhang H Z, Zhang W L, et al. Farmland potassium balance in China: A review. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25 (6): 920—930. [冀宏杰, 张怀志, 张维理, 等. 我国农田土壤钾平衡研究进展与展望. 中国生态农业学报, 2017, 25 (6): 920—930.]

(责任编辑: 陈荣府)