

红壤酸化及石灰改良影响冬小麦根际土壤钾的有效性

梅旭阳^{1,2,3}, 高菊生^{2,3}, 杨学云^{1*}, 黄晶^{2,3}, 蔡泽江^{2,3}, 李冬初^{2,3},
王伯仁^{2,3}, 柳开楼^{2,4}, 徐明岗^{2,3}, 张会民^{2,3*}

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 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, 耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081;
3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 祁阳农田生态系统国家野外科学观测研究站, 湖南祁阳 426182;
4 江西省红壤研究所, 国家改良工程技术研究中心, 江西进贤 331717)

摘要:【目的】了解初始酸度对石灰改良红壤钾素有效性的效应, 为酸化红壤改良提供依据和支撑。【方法】利用湖南祁阳典型的第四纪红土, 制备 pH 分别为 4.0、4.5、4.8、5.2 的土壤。每个酸度土壤的一半加石灰改良至 pH 6.0 (石灰改良处理), 另一半不变 (酸化对照), 以该土壤进行了小麦盆栽试验。每盆内放入一个尼龙网根袋, 袋内添加供试红壤 150 g, 其余放置袋外, 共 1.65 kg。小麦生长 80 天后收获, 调查了小麦生物量和钾吸收量, 测定比较了小麦根际和非根际土壤不同形态的钾含量变化。【结果】1) 冬小麦生物量 (地上部和根部) 与供试土壤初始 pH 显著正相关 ($P < 0.05$), 也与钾吸收量显著正相关 ($P < 0.05$)。石灰改良处理冬小麦生物量均显著高于相应的酸化对照, 并随供试土壤初始 pH 升高而显著升高。2) 不同酸化土壤冬小麦根际土壤速效钾含量均随 pH 升高显著降低, 非根际土壤的速效钾含量显著高于相应的根际土壤 (除 pH 4.0 外)。石灰改良处理根际土壤速效钾含量均显著低于相应的酸化对照, 且非根际土壤显著高于根际土, 非根际土壤速效钾含量随初始 pH 升高而显著下降。3) 不同酸化土壤冬小麦根际土壤钾离子饱和度随 pH 升高而显著下降, 非根际土壤钾离子饱和度则随 pH 升高呈增加趋势。石灰改良处理土壤各处理根际土钾离子饱和度均显著低于非根际土, 非根际土钾离子饱和度与酸化对照的变化趋势一致。4) 不同酸化处理红壤冬小麦生物量与根际速效钾亏缺量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 冬小麦根际土壤速效钾亏缺率和冬小麦吸钾量、根际钾离子饱和度亏缺率均呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 而石灰改良处理根际土壤速效钾亏缺率则与初始 pH 呈显著负相关 ($P < 0.05$)。【结论】在本试验的 pH 范围内, 酸化条件下, 根际土壤速效钾含量随 pH 降低而升高, 而冬小麦吸钾量及生物量均随 pH 升高而升高。表明酸化红壤影响冬小麦钾养分吸收的主导因素是土壤的酸度。施石灰降低了土壤的酸度, 提高酸化红壤作物产量和吸钾量。红壤施用石灰校正酸化应在 pH 降到 5.0 之前进行。酸化红壤石灰改良后, 还应注意适量补充钾肥。

关键词: 红壤; 酸化; 根际土; 石灰; 钾有效性

中图分类号: S156.6; S158 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2016)06-1568-10

The response of soil potassium availability in rhizospheric soil of winter wheat to acidified and limed red soil

MEI Xu-yang^{1,2,3}, GAO Ju-sheng^{2,3}, YANG Xue-yun^{1*}, HUANG Jing^{2,3}, CAI Ze-jiang^{2,3}, LI Dong-chu^{2,3},
WANG Bo-ren^{2,3}, LIU Kai-lou^{2,4}, XU Ming-gang^{2,3}, ZHANG Hui-min^{2,3*}

(1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agric-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, Shaanxi; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 3 National Observation Station of Qiyang Agri-ecology System, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Qiyang, Hunan 426182, China; 4 National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Jiangxi Institute of Red Soil, Jinxian, Jiangxi 331717, China)

收稿日期: 2016-03-09 接受日期: 2016-06-06

基金项目: 国家自然科学基金 (41371293, 41671301); 国家“973”计划 (2011CB100501); 国家公益性行业 (农业) 科研专项 (201203030) 资助。

作者简介: 梅旭阳 (1989—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事长期施肥与土壤钾素有效性方面研究。E-mail: mxybl@126.com

* 通信作者 Tel: 029-87080050, E-mail: xueyunyang@nwsuaf.edu.cn; Tel: 010-82105039, E-mail: zhanghuiimin@caas.cn

Abstract: [Objectives] Understanding the effect of soil initial acidity on the potassium availability will provide basis to remediate acidified soil. **[Methods]** A typical quaternary red clay soil in Qiyang County, Hunan Province, was acidified into soil pH gradient of 4.0, 4.5, 4.8 and 5.2 (refer to acidified). For each pH gradient, half of the soil was added with lime to regulate the pH to a final value of 6 (refer to limed). A winter wheat pot experiment was then conducted using the treated soils. A nylon root bag was placed inside each pot, 150 g soil was placed inside the nylon root bag and total 1.65 kg of the treated red soil was add into the pot. Wheat biomass and potassium uptake were investigated after 80 days' growth of winter wheat, and the changes of potassium content in different forms of rhizospheric and bulk soils of winter wheat were measured and compared.

[Results] 1) The biomass of winter wheat (roots and shoots) was significantly higher in all the limed treatments than in the corresponding acidified treatments; The biomass was positively and significantly ($P < 0.05$) correlated to the soil initial pH value for both acidified and limed soils, but it was only positively and significantly ($P < 0.05$) correlated to the potassium uptake for acidified treatments. 2) The concentration of soil available potassium was markedly higher in bulk soils than those in corresponding rhizospheric soils for both sets of soils except for acidified soil of pH 4.0 where the same value was observed; soil available potassium in rhizospheric soils of acidified treatment and in bulk soils of limed declined with increasing initial soil pH value. 3) Soil potassium ion saturation was significantly higher in bulk soils than in corresponding rhizospheric soils for both sets of the soils; Soil potassium ion saturation in rhizospheric soils of acidified treatment declined with increasing soil pH value; whereas it showed an increasing trend in bulk soils of both acidified and limed treatments. 4) The winter wheat biomass was positively and significantly ($P < 0.01$) correlated to the deficit of soil available potassium in rhizospheric soil for acidified soils, and the deficit rate of soil available potassium in rhizospheric soil was positively and significantly ($P < 0.01$) correlated to either the potassium uptake by winter wheat, or the deficit rate of potassium ion saturation of rhizospheric soil for acidified soils. whereas, a significant positive ($P < 0.05$) correlation was observed between the deficit rate of soil available potassium and its initial soil pH value in rhizospheric soil for limed soil. **[Conclusions]** Within the pH range of the experiment, available potassium in rhizospheric soil is increased with the decreasing soil pH value, but the amount of potassium uptake by winter wheat seedlings and their biomass will increase with increasing soil pH. This discrepancy has suggested that it is soil acidity that governing potassium absorption of winter wheat on acidified red soil, rather than soil available potassium. Lime application could reduce the acidity of soil, therefore efficiently enhance the growth of winter wheat and the amount of the potassium absorption. Liming should be carried out best before the pH value dropped down to 5.0, and after liming, appropriate amount of potassium containing fertilizer is needed to ensure the desired soil available potassium level.

Key words: red soil; soil acidification; rhizospheric soil; lime; availability of potassium

红壤总面积 5690 万公顷, 是我国南方最重要的土壤类型之一^[1]。大多数红壤有机质含量低, 铝含量高, 保肥保水性能差^[2], 严重缺钾^[3-4]。大量施用化肥^[3,5-9]和频繁酸雨^[10-11]加快了红壤酸化速度^[12], 扩大了酸化面积, 进一步加剧了土壤钾素有效性低的问题^[13]。施用石灰是阻控土壤酸化^[14], 提高红壤生产力的有效措施^[15]。施用石灰不仅可以中和酸化红壤的活性酸和潜性酸, 而且可增加有效阳离子交换量^[2], 提高钾的有效性^[10]。因此研究红壤酸化及其改良、校正过程中钾素的有效性对提高红壤生产力有重要理论意义和实践价值。钾的有效性指的是能被植物吸收利用的程

度^[16]。钾养分通过植物根系吸收进入植物体, 而根系通过吸收和物质分泌作用改变了根际土壤的化学组成、物理结构和生物学性质, 进而影响土壤中钾养分有效性。根际是围绕于植物根系周围很小的土壤微域。受根系生理活动的影响, 在物理、化学和生物特性上不同于非根际土壤(本体土壤)的特殊区域^[17]。由于根际微域内的有效养分为实际有效养分, 能直接为根系吸收, 决定着作物实际吸收的养分量, 而非根际土壤中的有效养分只是潜在有效养分, 还需要通过迁移等供应过程才能被根吸收^[18]。根际有效钾养分状况的变化可直接反映其生物有效性和植物对

钾养分利用能力的大小^[19]。李小坤^[20]在红壤性水稻土上的研究表明,在水旱轮作条件下,作物首先吸收利用根区土壤水溶性钾,随着作物生长和吸钾强度的增大,根区土壤交换性钾和非交换性钾向水溶性钾转化。在养分缺乏土壤上,作物可分泌质子及有机酸等促进根区土壤养分有效化^[21];但丛日环等^[22]在红壤上的研究表明,无论是否加入外源钾,有机酸的存在均加快了根际交换性钾向水溶性钾的转化,可能原因是有机酸主要通过增加可变电荷土壤表面的净负电荷来增加土壤对 K^+ 的吸附量。持续作物种植导致红壤钾素耗竭,严重降低土壤供钾水平和作物生长,钾肥施用可以提高根际与非根际土壤交换性钾和缓效钾含量,也有效提高了作物产量^[23]。李小梅^[24]的研究显示,根际土壤钾养分含量随钾肥用量的增加表现为先增大后逐渐减少,表明其并不和施钾量成正比提高。但也有研究显示,红壤在各种施钾水平下,根际交换性钾和缓效钾均出现亏缺^[25]。王益福和洪祯瑞^[26]的研究表明,果园铺草覆盖能显著提高红壤根际钾养分有效性,可能原因是铺草区其根际土壤微生物的种群比深耕、浅耕区丰富,且数量众多。酸化在一定程度上可增加红壤钾元素的溶解度,但由于钾离子代换能力小于氢、铝离子,容易被从土壤胶体中置换出来,从而加速了其向土壤溶液中的转化,也更易于从土壤中淋溶^[18,27],使得土壤中钾营养元素的有效性更低^[28]。大量研究表明,施用石灰可通过降低红壤酸度,进而提高酸化红壤钾养分有效性^[24,29-33]。但是不同酸化程度土壤及其经施石灰改良后,初始酸度对土壤及根际钾素有效性的影响尚不清楚,而有关于种植冬小麦条件下,在某一具体 pH 范围内施石灰改良酸化红壤对提高钾的有效性起作用则没有涉及。本试验采用盆栽根际袋法,研究不同程度酸化红壤及其经施用石灰矫正酸度后,对冬小麦根际和非根际土壤钾素有效性的影响,以便于了解初始酸度对石灰改良红壤钾素有效性的效应,寻求石灰改良酸化红壤最佳时机,为酸化红壤有效改良提供依据和支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤母质为第四纪红土,采自中国农业科学院祁阳红壤试验站附近的自然植被恢复人工落叶松林地(E 111°52', N 26°45', 海拔 120 m),多点采集 0—20 cm 土样,带回实验室风干并混合均匀,挑出杂质,过 20 目筛。土壤 pH 值为 4.3,通过酸碱滴定法^[34],测定土壤的酸碱缓冲容量,然后取适量土样

分为四部分,通过添加石灰和硫酸调节为 4 个 pH 梯度土壤(4.0、4.5、4.8、5.2),分别置于 4 个大塑料桶中,室温下保持土壤水分在 70% 田间持水量,培养一年使其 pH 达到稳定。培养结束后取出土样并风干,磨细过筛(20 目),测定缓冲容量和土壤理化性质(表 1),备用。

表 1 供试土壤基本化学性质

Table 1 Basic chemical properties of acidified soils

酸度 Soil pH	阳离子交换量 CEC [cmol (+)/kg]	有机质 OM (g/kg)	速效钾 Avail.K (mg/kg)	缓效钾 Slowly avail.K (mg/kg)	全钾 Total K (g/kg)
4.0	9.6	14.4	62.0	176.0	17.4
4.5	9.4	12.9	66.0	191.0	17.4
4.8	9.1	12.4	61.0	191.0	17.2
5.2	9.1	12.1	56.0	191.0	17.6

1.2 试验处理

盆栽试验:盆栽试验分两组,共 8 个处理,第一组直接用表 1 中 4 个 pH 梯度的土样(4 个处理,代号为 Acidified);用石灰将表 1 中 4 个 pH 梯度的土样的 pH 调节到 6.0 做为第二组处理(代号为 Limed),其目的在于消除土壤中铝毒^[35]和冬小麦作物伤害^[36]。在 pH 为 4.0、4.5、4.8 和 5.2 时石灰用量分别为 3.4、1.9、1.0 和 0.7 g/kg 土。校正 pH 后土样放置平衡 10 天^[2]。

盆栽试验在温室中进行,温室位于湖南祁阳红壤试验站内。试验用盆直径 12 cm,高 15 cm。每盆装土 1.65 kg。装盆前每盆施尿素 0.35 g、过磷酸钙 1.78 g、氯化钾 0.27 g,混匀,取出其中 150 g 土装入直径 3 cm、高 12 cm 的尼龙纱网根袋中(300 目),置于盆中央,然后将其余 1.5 kg 土装入盆中。每个处理重复 3 次。全部盆装好后放置 2 天,然后在每盆的根袋中播入已催芽的冬小麦种子 10 粒,确保最后有 6 株冬小麦苗。加蒸馏水使每盆土壤水分达到田间持水量的 70%,并每隔 3~4 天称重加水保持水分稳定。盆栽小麦生长时间为 2014 年 11 月 13 日至 2015 年 2 月 2 日收获,共历时 80 天。冬小麦生长期间大部分天数为多云天气,温度在 1℃~23℃ 之间。

冬小麦生长结束后(植物地下部生长充满根袋),用剪刀紧挨土面将植株剪下,并仔细地拣出根袋中的所有小麦根系,分别洗净、烘干后称重。根袋中土样去掉表面 2 cm 土,收集袋内其余土作为根际土(Rhizospheric Soil-RS),将根袋外的土混匀,四分法

取样做为非根际土 (Bulk Soil-BS)。将所有土样风干, 磨细过 20 目筛备用。

1.3 测定方法

土样缓效钾用 1 mol/L HNO₃ 煮沸法提取^[37]; 交换性钾用 1 mol/L NH₄OAC 浸提^[37]; 植株全钾用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮。所有提取液或消煮待测液中的钾含量均用火焰光度法测定^[36]。土壤 pH 用电位法测定^[37]; 土壤阳离子交换量 (CEC) 用乙酸铵法测定^[37]; 土壤有机质测定用重铬酸钾外加热容量法^[37]; 缓冲容量用酸碱滴定法进行测定^[34]。

1.4 数据计算与统计分析

冬小麦吸钾量 (g/pot) = 植株干重 (g/pot) × 植株钾含量 (%) + 根系干重 (g/pot) × 根钾含量 (%)

根际钾素富集率 (%) = (根际土钾含量 - 非根际土钾含量) / 非根际土钾含量 × 100

富集率 (Enrichment ratio, ER) 表示根际对土壤营养元素的富集程度, 反映根际效应的强弱^[38]。

根际速效钾亏缺率 (%) = (非根际速效钾含量 - 根际速效钾含量) / 非根际速效钾含量 × 100

根际钾离子饱和度亏缺率 (%) = (非根际钾离子饱和度和 - 根际钾离子饱和度) / 非根际钾离子饱和度 × 100

采用 Excel 2003 作图, SPSS 20.0 软件进行统计分析, LSD 法多重比较。

2 结果与分析

2.1 酸化及石灰改良土壤冬小麦生物量

酸化处理红壤冬小麦生物量在 pH 4.0~4.8 之间随 pH 升高而显著升高, pH 4.8 和 pH 5.2 土壤间无显著差异 (图 1)。施石灰改良处理冬小麦生物量也随土壤初始 pH 升高显著升高, 且均显著高于相应的酸化土壤, 在 pH 4.0、4.5、4.8 和 5.2 时分别提高 180.7%、37.4%、26.0%、29.4% (图 1)。

2.2 酸化及石灰改良土壤冬小麦吸钾量

酸化土壤冬小麦吸钾量变幅为 1.2~38.0 mg/pot, 施石灰土壤冬小麦吸钾量变幅为 14.4~47.3 mg/pot, 均随 pH 或初始 pH 升高而显著增加 (图 1)。且后者的吸钾量在 pH 4.0、4.5、4.8 和 5.2 时均显著高于前者, 增幅分别达 1076.9%、37.7%、20.5%、24.9%。

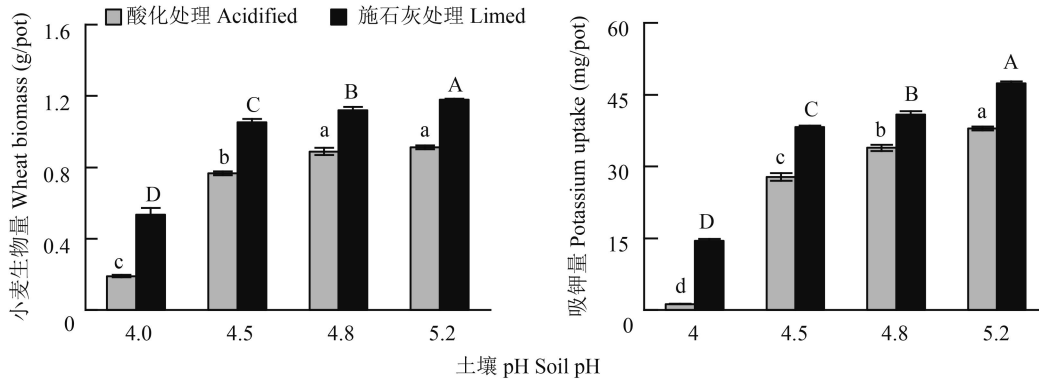


图 1 酸化红壤及其经石灰改良至 pH 6.0 后红壤冬小麦生物量和钾吸收量

Fig. 1 Winter wheat biomass and K uptake in red soils before and after remediation with lime to pH 6

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示酸化处理红壤各 pH 水平间差异显著 Different lowercase letters above the bars indicate the significant differences between pH level treatments in acidified soils at $P < 5\%$ level; 柱上不同大写字母表示石灰改良后冬小麦生物量及吸钾量在不同初始 pH 水平处理间差异显著 Different capital letters on top of the bars indicate the significant differences of winter wheat biomass or potassium uptake with pH levels (acidified) or with different initial pH levels (limed) at $P < 5\%$.]

2.3 酸化及石灰改良土壤速效钾变化

不同酸化处理冬小麦根际土壤速效钾含量在 65.3~135.3 mg/kg 之间, 在 pH 4.0~4.8 范围内随 pH 升高显著降低, pH 4.8 和 pH 5.2 则无显著差异。非根际土壤速效钾含量范围为 107.0~127.0 mg/kg, 表现为 pH 4.0 > pH 4.8 = pH 5.2 > pH 4.5 (图 2)。在 pH 4.0 下, 根际土壤速效钾显著高于非根际土,

根际富集率达 6.1%; 在 pH 4.5、pH 4.8、pH 5.2 处理中, 根际土壤速效钾表现为亏缺, 亏缺率分别为 28.3%、44.0%、43.0%。

施石灰改良处理根际土壤速效钾含量在 39.7~45.0 mg/kg 之间。初始 pH 为 5.2 的处理根际土壤速效钾显著高于其它 3 个处理, 后三者无显著差异。非根际土壤速效钾变幅为 104.0~124.3 mg/kg, 有明

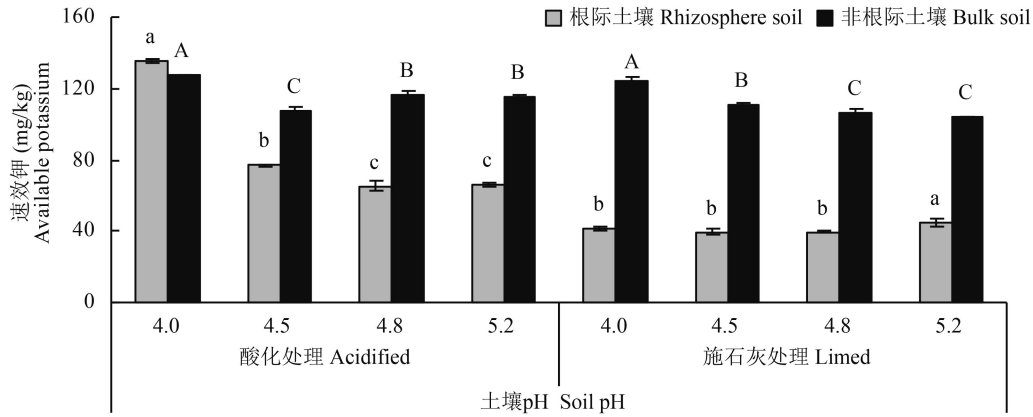


图 2 酸化红壤及其经石灰改良至 pH 6.0 后冬小麦收获时根际和非根际土壤速效钾含量

Fig. 2 Available K content in rhizospheric and bulk soil in acidified red soils before and after lime remediation to pH 6 at winter wheat harvest

[注 (Note) : 柱上不同小写字母表示酸化处理或施石灰处理下根际土壤速效钾红壤各 pH 水平间差异显著 Different lower case letters on top of the bars indicate the significant differences of soil available potassium between rhizospheric soils with different pH levels (acidified) or with different initial pH levels (limed) at $P < 5\%$; 柱上不同大写字母表示酸化处理或石灰处理下非根际土壤速效钾在不同初始 pH 水平处理间差异显著 Different capital letters on top of the bars indicate the significant differences of soil available potassium between bulk soils with pH levels (acidified) or with different initial pH levels (limed) at $P < 5\%$.]

显随 pH 升高而下降的趋势, 但初始 pH 5.2 和 pH 4.8 土壤无显著差异。施石灰改良处理根际土壤速效钾均显著低于其对应的非根际土壤, pH 4.0、4.5、4.8 和 5.2 处理根际土壤速效钾亏缺率分别达 66.8%、64.0%、62.8% 和 56.7% (图 2)。

2.4 酸化及石灰改良土壤缓效钾变化

酸化处理下根际土壤缓效钾变幅为 85.3~153.3 mg/kg, 根际土壤缓效钾在 pH 4.0 与 pH 4.5 处理间显著降低, 而在 pH 4.8 与 pH 5.2 处理间显著升高, 在

pH 4.5 和 pH 4.8 处理间差异不显著。非根际土壤缓效钾介于 76.3~116.3 mg/kg 之间, 表现为 pH 4.8 > pH 4.0 > pH 5.2 > pH 4.5 (图 3)。pH 4.0 和 pH 4.8 处理中非根际土壤缓效钾显著高于根际土, 根际亏缺率分别达 6.3% 和 26.7%; 但在 pH 4.5 和 pH 5.2 处理中根际土壤缓效钾显著高于非根际土, 根际富集率达 14.8% 和 63.7%。

施石灰处理根际土壤缓效钾变幅为 98.7~160.3 mg/kg, 随初始 pH 升高显著升高 (图 3); 缓效钾和初始 pH 极显著正相关 ($y = 53.75 \text{ pH} - 112.07$,

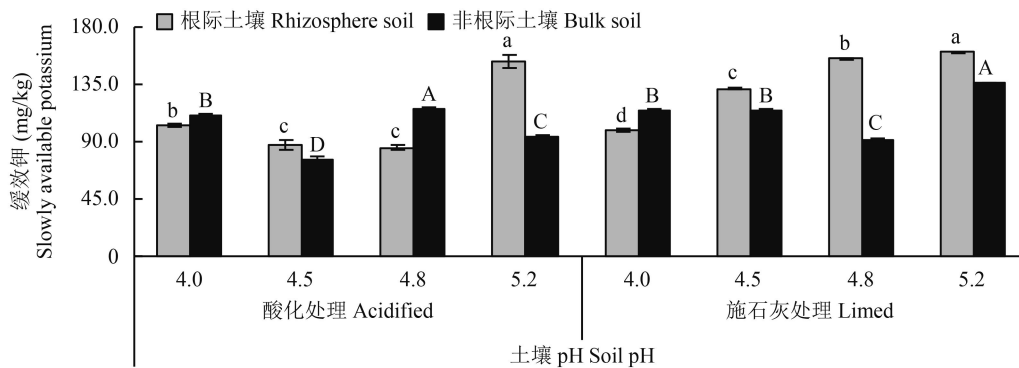


图 3 酸化红壤及其经石灰改良至 pH 6.0 后冬小麦收获时根际和非根际土壤缓效钾含量

Fig. 3 Slowly available potassium content in rhizospheric and bulk soil in acidified red soils before and after lime remediation to pH 6 at winter wheat harvest

[注 (Note) : 柱上不同小写字母表示酸化处理或施石灰处理下根际土壤缓效钾 pH 水平间差异显著 Different lower case letters on top of the bars indicate the significant differences of soil slowly available potassium between rhizospheric soils with different pH levels (acidified) or with different initial pH levels (limed) $P < 5\%$; 柱上不同大写字母表示酸化处理或施石灰处理下非根际土壤缓效钾在不同初始 pH 水平处理间差异显著 Different capital letters on top of the bars indicate the significant differences of soil slowly available potassium between bulk soils with pH levels (acidified) or with different initial pH levels (limed) at $P < 5\%$.]

$R^2 = 0.9325^{**}$)。非根际土壤缓效钾变幅为 91.7~136.0 mg/kg, 表现为 $\text{pH } 5.2 > \text{pH } 4.5 \geq \text{pH } 4.0 > \text{pH } 4.8$ 。在 $\text{pH } 4.0$ 下非根际土壤缓效钾显著高于根际土值, 根际亏缺率达 14.0%; 在 $\text{pH } 4.5$ 、 $\text{pH } 4.8$ 和 $\text{pH } 5.2$ 下根际土壤缓效钾显著高于非根际土, 根际富集率分别达 14.5%、69.5%、17.9%。

2.5 酸化及石灰改良土壤钾离子饱和度变化

酸化处理根际土壤钾离子饱和度变幅为 1.5%~4.3%, 随初始 pH 升高显著下降; 非根际土壤钾离子饱和度介于 4.3%~4.6% 间, 随 pH 升高呈升高趋势, $\text{pH } 5.2$ 处理非根际土壤钾离子饱和度显著高于 $\text{pH } 4.8$ 处理, 且两者均显著高于 $\text{pH } 4.0$ 和 $\text{pH } 4.5$ 处理 (图 4)。 $\text{pH } 4.5$ 、 4.8 和 5.2 处理根际土壤钾离子饱和度亏缺率分别达 48.8%、64.4%、67.4%。

施石灰改良处理根际土壤钾离子饱和度变幅为

1.5%~1.6%, 但各处理间无显著差异。非根际土钾离子饱和度变化趋势与酸化处理后变化相一致 (图 4), 各处理均低于改良前相对应的酸化土壤, 变幅为 3.6%~4.4%。各处理根际土壤钾离子饱和度均显著低于对应的非根际土, $\text{pH } 4.0$ 、 4.5 、 4.8 和 5.2 处理根际钾离子饱和度亏缺率分别达 58.3%、55.6%、63.2%、65.9%。

2.6 土壤钾素、土壤 pH 和作物生长指标的关系

表 2 给出了根际土壤速效钾亏缺率与冬小麦吸钾量、根际土壤钾离子饱和度亏缺率、初始 pH 的关系, 可以看出在酸化处理后红壤上, 冬小麦根际土壤速效钾亏缺率和冬小麦吸钾量与根际钾离子饱和度亏缺率呈极显著正相关; 施石灰改良处理根际土壤速效钾亏缺率和初始 pH 呈显著负相关 (表 2)。

酸化处理后, 冬小麦生物量与根际速效钾亏缺

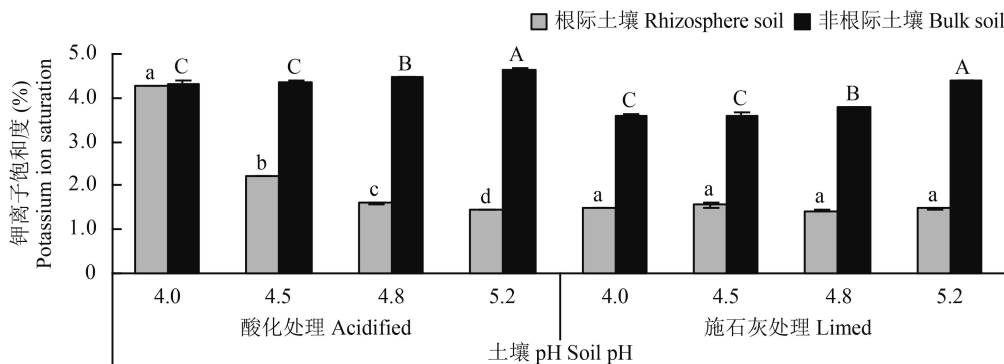


图 4 酸化处理及其经石灰改良至 $\text{pH } 6.0$ 后冬小麦收获时根际和非根际土壤钾离子饱和度

Fig. 4 Potassium ion saturation in rhizospheric and bulk soil in acidified red soils before and after lime remediation to $\text{pH } 6$ at winter wheat harvest

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示酸化处理或施石灰处理后根际土壤钾离子饱和度各 pH 水平间差异显著 Different lower case letters on top of the bars indicate the significant differences of soil potassium ion saturation between rhizospheric soils with different pH levels (acidified) or with different initial pH levels (limed) at $P < 5\%$; 柱上不同大写字母表示酸化处理或施石灰处理后非根际土壤钾离子饱和度在不同初始 pH 水平处理间差异显著 Different capital letters on top of the bars indicate the significant differences of soil potassium ion saturation between bulk soils with pH levels (acidified) or with different initial pH levels (limed) at $P < 5\%$.]

表 2 根际土壤速效钾亏缺率与冬小麦吸钾量、根际钾离子饱和度亏缺率、初始 pH 的线性相关

Table 2 Linear correlation of soil available K deficit rate as a function of K uptake, deficit rate and K^+ saturation (DRKS) in rhizospheric soil and initial pH

处理 Treatment	X	Slope	r	P
酸化处理 Acidified	冬小麦吸钾量 K uptake (mg/pot)	69.29	0.986	0.01
	根际钾离子饱和度亏缺率 DRKS (%)	1.30	0.995	0.01
石灰改良 Limed	初始酸度 Initial pH	-11.38	0.928	0.05

量呈极显著正相关 (图 5), 而施石灰改良后冬小麦生物量与土壤根际速效钾亏缺量呈显著负相关。

3 讨论

酸化土壤由于 pH 下降, 土壤中正电荷增加, 吸附在土壤胶体上的钙、镁、钾等阳离子被置换而随雨水淋失, 同时土壤结构也发生改变而导致土壤肥力下降, 影响作物生长。曾勇军等^[39]研究发现随着土壤 pH 的下降, 双季早、晚稻始穗期推迟, 生育期延长, 产量降低。张昌爱等^[40]通过盆栽试验模拟酸化条件下油菜根系的生理生态变化情况, 发现根的

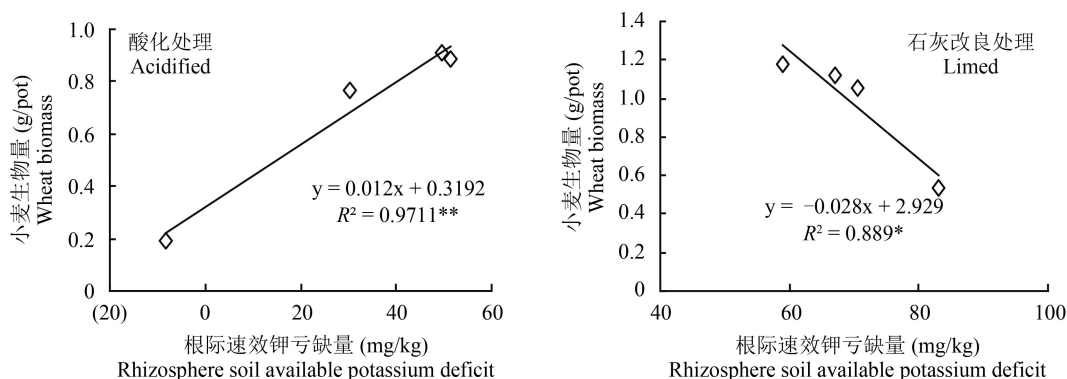


图 5 冬小麦生物量与根际速效钾亏缺量的关系

Fig. 5 The relationship between biomass of winter wheat and the deficit of soil available K

生物量、根系活力、根体积、根长度、根系的营养吸收量均受土壤酸化的影响。于天一等^[41]研究发现旱地红壤酸化导致玉米产量连年下降。周海燕^[42]研究发现小麦-玉米轮作体系下,酸化土壤限制了作物生长,导致作物产量极显著下降。土壤酸化使作物生长环境条件变差,过酸的土壤造成许多营养元素的有效性降低,使得土壤的宜种性降低,影响农业的可持续发展。本试验结果与上述研究结果类似。红壤酸化以后,冬小麦生长受到抑制,土壤酸度越高,抑制越严重(图 1)。一方面可能是随 pH 降低,过多的 H⁺ 影响叶绿素含量及根系活力^[43];另一方面,土壤酸化导致高活性铝的含量大幅度增加,铝毒害加剧了冬小麦生长受害的程度^[44]。同样地,冬小麦生长的抑制导致了其对钾素的吸收的减少(图 1),这在其它研究中也有报道^[35,36]。酸化处理冬小麦生物量在 pH 4.8 与 5.2 间无显著差异,而两者的吸钾量差异显著,可能和相对较高的 pH 条件下冬小麦根系受到胁迫相对较小有关。施用石灰矫正 pH 到 6.0 的处理均显著提高了冬小麦生物量和吸钾量,这是由于施石灰有效降低了土壤酸度,减轻了铝毒危害,促进了次生根发育,增强了冬小麦根系对水分和钾养分的吸收。冬小麦生物量和吸钾量随初始 pH 升高而升高可能和钾素等养分供应有关,因为矫正强酸化红壤需要加入的石灰量势必增大,过多的石灰施入可导致土壤钾素及磷等有效性降低^[45-47]。

与过多施入石灰导致土壤钾素及磷等有效性降低不同,酸化处理根际土壤速效钾随 pH 降低而升高是由于低 pH 促进了土壤缓效钾释放;酸化及施石灰处理根际土壤速效钾显著低于非根际土壤,是由于作物吸收导致的根际土壤钾素消耗所致^[48](图 2)。但酸化处理 pH 4.0 时冬小麦根际土壤速效钾含量显著高于非根际(图 2),一方面可能由于在 pH 4.0 下土壤

处于铝缓冲体系,铝大量溶出,Al³⁺ 是阳离子通道阻断剂,可阻断冬小麦根细胞的 K⁺ 通道^[49],因而降低了作物对钾素的吸收;另一方面,低 pH 促进了土壤缓效钾的释放。施石灰处理中,非根际土壤速效钾含量呈现出随初始 pH 升高而降低的趋势,可能是由于随 pH 升高,冬小麦生物量显著增加,蒸腾作用消耗水分较多,导致土壤钾素随水分(质流)向根际土壤迁移。和速效钾类似,酸化处理根际土壤缓效钾在 pH 4.0 和 4.5 间显著降低是因为作物钾吸收量显著增加,在 pH 4.5 和 4.8 间无显著差异可能因为两者酸度相差较小所致。而在 pH 5.2 下根际土壤缓效钾显著高于其它 3 个处理,同样地可能是因为这个处理 pH 相对较高,根系所受胁迫较小,生长消耗水分较多使土壤钾素随水分(质流)由非根际土壤向根际土壤迁移,非根际土壤缓效钾较低也支持这一解释。施石灰改良处理下随初始 pH 值升高,根际土壤缓效钾出现富集,但非根际土壤缓效钾则随 pH 升高而降低,显然也是由于钾素随作物蒸腾作用增加而随水移动导致的。

针对钾养分的富集或缺乏,相关分析发现,酸化条件下冬小麦根际土壤速效钾亏缺率和冬小麦吸钾量及根际钾离子饱和度亏缺率极显著正相关,是因为随 pH 升高,冬小麦受胁迫程度降低,其生长和吸钾强度增加,从而对根际土壤速效钾消耗增加,冬小麦生物量随之增加。施石灰处理根际土壤速效钾亏缺率与初始 pH 呈显著负相关及其与小麦生物量的关系,则可能是因为施石灰导致土壤速效钾固定增加^[45-46],其机理需要做进一步研究。

4 结论

1) 红壤酸化和石灰改良条件下土壤速效钾基本呈现出根际高于非根际,而钾离子饱和度则与之相

反, 但二者均受初始 pH 的显著影响。不同酸化土壤冬小麦根际土壤速效钾、钾离子饱和度均随土壤 pH 升高显著下降; 施石灰改良后不同初始 pH 处理根际土壤速效钾、钾离子饱和度均显著低于对应的非根际土值。

2) 酸化严重限制了冬小麦植株生长及对钾的吸收, pH 越低抑制作用越大, 钾的生物有效性越低。不同 pH 下添加石灰均显著提高冬小麦生物量及吸钾量, 在 pH 低于 5.0 时, 添加石灰改良红壤提升冬小麦根际钾生物有效性的效应随初始 pH 升高逐渐降低。根际速效钾与钾离子饱和度可以较好的反映冬小麦的吸钾量, 但酸化和石灰改良的反映效果不同。因此, 研究红壤根际钾素能够较好的指导该地区钾素高效利用。

参 考 文 献:

- [1] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报, 2013, 33 (24): 7615–7622.
Zhao Q G, Huang G Q, Ma Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its counter measures[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (24): 7615–7622.
- [2] Osei B A. Effects of different lime application rates and time on some chemical properties of an acid soil in Ghana[J]. Soil Use & Management, 1995, 11 (1): 25–29.
- [3] Zhang H M, Wang B R, Xu M G. Effects of inorganic fertilizer inputs on grain yields and soil properties in a long-term wheat-corn cropping system in south China[J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 2008, 39 (11): 1583–1599.
- [4] Dobermann A, Cruz P S, Cassman K G. Fertilizer inputs, nutrient balance, and soil nutrient-supplying power in intensive, irrigated rice systems. I. Potassium uptake and K balance[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1996, 46 (1): 1–10.
- [5] 黄国勤, 王兴祥, 钱海燕, 等. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J]. 生态环境, 2004, 13 (4): 656–660.
Huang G Q, Wang X X, Q H Y, *et al.* Negative impact of inorganic fertilizers application on agriculture environment and its countermeasures[J]. Ecology and Environment, 2004, 13 (4): 656–660.
- [6] Conyers M K, Tang C, Poile G J, *et al.* A combination of biological activity and the nitrate form of nitrogen can be used to ameliorate subsurface soil acidity under dryland wheat farming[J]. Plant & Soil, 2011, 348 (2): 155–166.
- [7] Valentinuzzi F, Mimmo T, Cesco S, *et al.* The effect of lime on the rhizospheric processes and elemental uptake of white lupin[J]. Environmental & Experimental Botany, 2015, 118: 85–94.
- [8] Covalada S, Pajares S, Gallardo J F, *et al.* Effect of different agricultural management systems on chemical fertility in cultivated tepetates of the Mexican transvolcanic belt[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 129 (4): 422–427.
- [9] 徐仁扣, Coventry D R. 某些农业措施对土壤酸化的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21 (5): 385–388.
XU R K, Coventry D R. Soil acidification as influenced by some agricultural practices[J]. Agro-environmental Protection 2002, 21 (5): 385–388.
- [10] 曾希柏. 红壤酸化及其防治[J]. 土壤通报, 2000, 31 (3): 111–113.
Zeng X B. Acidification of red soils and control methods[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2000, 31 (3): 111–113.
- [11] 陈梅, 沈其荣. 猪粪对红壤铝毒的缓解效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8 (2): 173–176.
Chen M, Shen Q R. Amelioration of aluminum toxicity on wheat plants grown in acid red soil by pig manure[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8 (2): 173–176.
- [12] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, *et al.* Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 15 (2): 260–270.
- [13] 朱青, 陈正刚, 尹迪信, 等. 中国西南地区坡地钾素平衡及管理措施探讨[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (6): 772–777.
Zhu Q, Wang Z J, Chen Z G, *et al.* Potassium balance and management on sloping land in southwest China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12 (6): 772–777.
- [14] Calba H, Zonkeng C, Ngonkeu E L M, *et al.* Responses of maize grain yield to changes in acid soil characteristics after soil amendments[J]. Plant & Soil, 2006, 284 (1): 45–57.
- [15] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327 (5968): 1008–1010.
- [16] 和林涛. 长期施肥土壤-作物体系钾素动态变化研究[D]. 重庆: 西南大学硕士论文, 2008.
He L T. Study on dynamic change of potassium in soil-plant system under long-term fertilization[D]. Chongqing: Master Thesis of Southwest University, 2008.
- [17] 张福锁, 曹一平. 根际动态过程与植物营养[J]. 土壤学报, 1992, 29 (3): 239–250.
Zhang F S, Cao Y P. Rhizospheric dynamics and plant nutrition[J]. Acta Pedologica Sinica, 1992, 29 (3): 239–250.
- [18] Barber S A. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach[J]. Journal of Applied Bacteriology, 1974, 37: 583–593.
- [19] 邹春琴, 李振声, 李继云. 小麦对钾高效吸收的根系形态学和生理学特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7 (1): 36–43.
Zou C Q, Li Z S, Li J Y. Study on difference in morphological and physiological characters of wheat varieties to potassium[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7 (1): 36–43.
- [20] 李小坤. 水旱轮作条件下根区与非根区土壤钾素变化及固定释放特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学博士论文, 2009.
Li X K. Study on the dynamics of soil potassium in root zone and non-root zone and the characteristic of potassium fixation-release under paddy-upland rotation[D]. Wuhan: PhD Dissertation of Huangzhong Agricultural University, 2009.
- [21] 施卫明. 根系分泌物与养分有效性[J]. 土壤, 1993, 25 (5): 252–256.
Shi W M. Root exudates and nutrition availability[J]. Soils, 1993, 25 (5): 252–256.
- [22] 丛日环, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 不同水分状况对红壤和黄褐土速效钾含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (5): 1072–1077.

- Cong R H, Li X K, Lu J W, *et al.* Effects of water conditions on available potassium contents in red soil and yellow-cinnamon soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15 (5): 1072–1077.
- [23] 周六凤. 不同种植方式下红壤和黄褐土的供钾能力与施钾效果研究[D]. 武汉: 华中农业大学硕士论文, 2009.
- Zhou L F. Study on soil K-supplying potential and potassium application effect on red soil and yellow cinnamon soil under different planting patterns[D]. Wuhan: Master Thesis of Huazhong Agricultural University, 2009.
- [24] 李小梅. 钾素水平对油茶林养分积累、果实产量和含油量的影响[D]. 南昌: 江西农业大学硕士论文, 2014.
- Li X M. Effects of potassium levels on nutrient accumulation, fruit yield and oil content of *Camellia oleifera*[D]. Nanchang: Master Thesis of Jiangxi Agricultural University, 2014.
- [25] 胡国松, 曹志洪, 周秀如, 等. 烤烟根际土壤中钾素及微素行为的研究[J]. *中国烟草学报*, 1993, (1): 1–11.
- Hu G S, Cao Z H, Zhou X R, *et al.* Studies on the behaviour of potassium and trace elements in rhizospheric soil of flue-cured tobacco[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 1993, (1): 1–11.
- [26] 王益福, 洪祯瑞. 皖南红壤丘陵茶园土壤养分与根际微生物活动的关系[J]. *茶叶科学*, 1986, 6 (1): 29–34.
- Wang Y F, Hong Z R. Relationship between the soil nutrients and rhizospheric microbial activity in the soil of tea gardens in laterite hilly region of south Anhui[J]. *Journal of Tea Science*, 1986, 6 (1): 29–34.
- [27] 张桃林, 李忠佩, 王兴祥. 高度集约农业利用导致的土壤退化及其生态环境效应[J]. *土壤学报*, 2006, 43 (5): 843–850.
- Zhang T L, Li Z P, Wang X X. Soil degradation and its eco-environmental impact under highly-intensified agriculture[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 (5): 843–850.
- [28] 易杰祥, 吕亮雪, 刘国道. 土壤酸化和酸性土壤改良研究[J]. *华南热带农业大学学报*, 2006, 12 (1): 23–28.
- Yi J X, Lü L X, Liu G D. Research on soil acidification and acidic soil's melioration[J]. *Journal of South China University of Tropical Agriculture*, 2006, 12 (1): 23–28.
- [29] 陈祖箴. 酸性红壤施石灰对甘蔗养分状况某些酶活性及生长的影响[J]. *热带亚热带土壤科学*, 1994, 3 (1): 21–26.
- Chen Z C. Effects of lime application to acid red soil on nutrient status, enzyme activities[J]. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1994, 3 (1): 21–26.
- [30] 唐莉娜, 熊德中. 酸性土壤施石灰对土壤性质与烤烟品质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11 (3): 81–83.
- Tang L N, Xiong D Z. Effects of applying lime on the properties of acid soil and the leaves quality in flue-cured tobacco[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11 (3): 81–83.
- [31] 何锦林, 谭红. 酸性黄壤施石灰对白三叶草养分影响的研究[J]. *中国草地*, 1995, (3): 34–37.
- He J L, Tan H. Effect of liming on white clover nutrient value in acid yellow earth[J]. *Grassland of China*, 1995, (3): 34–37.
- [32] 蔡东, 肖文芳, 李国怀. 施用石灰改良酸性土壤的研究进展[J]. *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[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26 (9): 206–213.
- [33] 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[J]. *土壤学报*, 1987, 24 (4): 243–251.
- Zhang X P, Zheng G B. Effect of continuous liming on crop growth and their absorption of nutrients[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1987, 24 (4): 243–251.
- [34] 孙波, Moreau R, Poss R, 等. 第四纪红粘土发育的红壤在施用石灰和石膏后元素的淋溶特征[J]. *土壤学报*, 2000, 37 (1): 50–61.
- Sun B, Moreau R, Poss R, *et al.* Characteristics of element leaching of red soil derived from quaternary red clay supplied with lime and gypsum[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37 (1): 50–61.
- [35] 蔡泽江. 长期施肥下红壤酸化特征及影响因素[D]. 北京: 中国科学院硕士论文, 2010.
- Cai Z J. Acidification characteristics of red soil under long-term fertilization and effect factors[D]. Beijing: Master Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [36] 姜军, 徐仁扣, 赵安珍. 用酸碱滴定法测定酸性红壤的pH缓冲容量[J]. *土壤通报*, 2006, 37 (6): 1247–1248.
- Jiang J, Xu R K, Zhao A Z. Determination of pH buffer capacity of acid red soils by acid-base titration[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37 (6): 1247–1248.
- [37] 鲁如坤, 史陶均. 农业化学手册[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- Lu R K, Shi T J. *Agricultural chemical manual*[M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [38] 马斌, 周志宇, 张彩萍, 等. 超旱生灌木根际土壤磷的含量特征[J]. *草业学报*, 2005, 14 (3): 106–110.
- Ma B, Zhou Z Y, Zhang C P, *et al.* The character of phosphorus concentration in rhizospheric soil of super xerphytic shrubs[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14 (3): 106–110.
- [39] 曾勇军, 周庆红, 吕伟生, 等. 土壤酸化对双季早、晚稻产量的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40 (5): 899–907.
- Zeng Y J, Zhou Q H, Lü W S, *et al.* Effect of soil acidification on the yield of double season rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40 (5): 899–907.
- [40] 张昌爱, 劳秀荣. 模拟酸化条件下油菜根系的生理生态变化[J]. *中国农学通报*, 2003, 19 (3): 79–81.
- Zhang C A, Lao X R. Effect on rape roots of soil's mimicry acidifying in green shed[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2003, 19 (3): 79–81.
- [41] 于天一, 李玉义, 逢焕成, 等. 长期不施磷肥对旱地红壤养分比例与玉米产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2010, (2): 25–28.
- Yu T Y, Li Y Y, Feng H C, *et al.* Effect of long-term phosphorus fertilization to up land red soil nutrients ratio and maize yield[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010, (2): 25–28.
- [42] 周海燕. 胶东集约化农田土壤酸化效应及改良调控途径[D]. 北京: 中国农业大学博士论文, 2015.
- Zhou H Y. Effect of cropland soil acidification and remediation in Jiaodong of Shandong Province[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2015.
- [43] 童贯和, 程滨, 胡云虎. 模拟酸雨及其酸化土壤对冬小麦幼苗生物量和某些生理活动的影响[J]. *作物学报*, 2005, 31 (9): 1207–1214.
- Tong G H, Cheng B, Hu Y H. Effect of simulated acid rain and its acidified soil on the biomass and some physiological activities of

- wheat seedlings[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31 (9): 1207–1214.
- [44] 黄巧云, 李学垣, 徐凤琳. 土壤酸化过程中铝的形态与冬小麦缺钙和铝毒发生的条件[J]. *华中农业大学学报*, 1995, 14 (2): 147–153.
- Huang Q Y, Li X Y, Xu F L. Relationship of active aluminum forms during soil acidification with calcium deficiency and aluminum toxicity for wheat[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 1995, 14 (2): 147–153.
- [45] Curtin, D, Smillie G W. Effects of liming on soil chemical characteristics and grass growth in laboratory and long-term field-amended soils[J]. *Plant and Soil*, 1986, 95 (1): 15–22.
- [46] Jaskulska I, Jaskliski D, kobierski M. Effect of liming on the change of some agrochemical soil properties in a long-term fertilization experiment[J]. *Plant Soil and Environment*, 2014, 60 (4): 146–150.
- [47] Valentinuzzi F, Mimmo T, Cescos, *et al.* The effect of lime on the rhizospheric processes and elemental uptake of white lupin[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 118: 85–94.
- [48] 李小坤, 鲁剑巍, 吴礼树等. 油菜-水稻轮作下根区与非根区红壤性水稻土钾素变化研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47 (3): 508–514.
- Li X K, Lu J W, Wu L S, *et al.* Dynamics of potassium in root-zone and non-root-zone red paddy soil under rapeseed-rice rotation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (3): 508–514.
- [49] 肖厚军, 王正银. 酸性土壤铝毒与植物营养研究进展[J]. *西南农业学报*, 2006, 19 (6): 1180–1188.
- Xiao H J, Wang Z Y. Advance on study of aluminum toxicity and plant nutrition in acid soils[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 19 (6): 1180–1188.