



石灰用量对水稻油菜轮作区土壤酸度、 土壤养分及作物生长的影响

闫志浩¹, 胡志华², 王士超¹, 槐圣昌¹, 武红亮¹, 王瑾瑜¹, 邢婷婷¹, 余喜初², 李大明², 卢昌艾¹

(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/中国农业科学院土壤质量重点实验室, 北京 100081;

²江西省红壤研究所/国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330046)

摘要:【目的】我国南方稻油轮作区土壤酸化趋势日趋严重, 降低了作物产量。研究酸性土壤施用石灰对土壤养分及作物生长的影响, 明确土壤速效养分、产量与作物养分吸收量对土壤 pH 的响应关系, 为水田两熟区酸化土壤改良提供理论依据。【方法】2015—2018 年在江西进贤县选择 pH 4.5 的水稻土, 以熟石灰作为酸性土壤改良剂, 开展田间定位试验。通过实验室模拟, 计算出获得不同土壤 pH 情况下的熟石灰用量, 试验设 6 个土壤 pH 梯度, 分别为 4.5、5.0、5.6、6.3、6.8、7.3, 2015 年匀地一年, 为保证各处理土壤 pH 与匀地一年后实测 pH 基本一致, 以一年为周期用熟石灰进行定量调整。【结果】(1) 随着石灰用量和土壤 pH 的增加, 土壤速效氮含量呈先增加后降低的趋势、交换性钙、交换性镁含量显著增加, 土壤速效钾、有效磷含量显著降低; (2) 随着石灰用量和土壤 pH 的增加, 作物产量呈先增加后降低的趋势。土壤 pH 6.4 时(相当于 6 145 kg·hm⁻² 熟石灰用量)油菜产量达到最高, 较土壤 pH 4.5 处理增加了 202.2%; 土壤 pH 6.8 时(相当于 7 474 kg·hm⁻² 熟石灰用量), 水稻产量达到最高, 较土壤 pH 4.5 处理增加了 61.2%。油菜、水稻产量降低 50% 时的酸害阈值分别为 4.7、4.2; (3) 土壤 pH 显著影响作物养分吸收量。随着熟石灰用量的增加, 油菜氮磷钾吸收量呈先增加后降低的趋势。2016—2018 年油菜氮磷钾吸收量与不施石灰处理相比, 施石灰处理平均增幅分别为 59.5%—181.4%、36.2%—188.8%、65.7%—198.9%; 水稻氮磷钾吸收量呈先增加后降低的趋势, 在 pH 6.8 左右水稻氮磷钾吸收量最大。2016—2018 年水稻氮磷钾吸收量与不施石灰处理相比, 施石灰处理平均增幅分别为 11.1%—88.6%、13.5%—68.5%、9.7%—66.1%。【结论】施用熟石灰的情况下, 随着土壤 pH 升高, 土壤速效氮、交换性钙镁等含量增加, 提高了产量, 促进了作物对氮磷钾养分的吸收。在本试验条件下, 稻油轮作区酸性土壤(pH 4.5)施用熟石灰的最佳用量为 6 500 kg·hm⁻² 左右, 改良土壤的目标为 pH 6.5 左右, 可获得我国南方稻油轮作区的作物稳定高产。

关键词: 土壤酸化; 土壤养分; 作物生长; 土壤 pH; 熟石灰; 水稻油菜轮作

Effects of Lime Content on Soil Acidity, Soil Nutrients and Crop Growth in Rice-Rape Rotation System

YAN ZhiHao¹, HU ZhiHua², WANG ShiChao¹, HUAI ShengChang¹, WU HongLiang¹, WANG JinYu¹,
XING TingTing¹, YU XiChu², LI DaMing², LU ChangAi¹

(¹Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Arable Land/Key Laboratory of Soil Quality, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;

²Jiangxi Institute of Red Soil/ National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330046)

收稿日期: 2019-06-06; 接受日期: 2019-09-18

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201503122)、中国农业科学院基本科研业务费专项(161013201952)

联系方式: 闫志浩, Tel: 17810264236; E-mail: zhyan1813@163.com. 通信作者卢昌艾, Tel: 010-82108703; E-mail: luchangai@caas.cn

Abstract: 【Objective】 Soil acidification is becoming more and more serious, which reducing crop yield in rice-rape rotation system of southern of China. In this study, the effects of lime application on soil nutrients and crop growth in acidic soil were studied, and the response relationship between soil available nutrients, yield and crop nutrient uptake to soil pH was clarified, so as to provide theoretical basis for the improvement of acidified soil in paddy fields. 【Method】 From 2015 to 2018, the paddy field with soil pH 4.5 was selected in Jinxian county, Jiangxi province, and hydrated lime was used as acid soil modifier. Through laboratory simulation, the amount of hydrated lime under different soil pH values was calculated. Then field experiments were carried out with six soil pH gradients of pH 4.5, pH 5.0, pH 5.6, pH 6.3, pH 6.8, and pH 7.3. In 2015, in order to ensure that the pH value of the treated soil was basically consistent with the measured pH value, one year after the soil was uniformly planted, the hydrated lime was used for quantitative adjustment with a period of one year. 【Result】 (1) With the amounts of lime and soil pH increase, the contents of soil available nitrogen increased first and then decreased, the content of soil exchangeable Ca^{2+} and exchangeable Mg^{2+} increased significantly, and the content of soil available potassium and available phosphorus decreased significantly. (2) With the increase of lime contents and soil pH, crop yield first increased and then decreased. At pH 6.4 (equivalent to the amount of 6 145 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ hydrated lime), the yield of rape reached the highest; compared with pH 4.5, the yield increased by 202.2%. At pH 6.8 (equivalent to the amount of 7 474 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ hydrated lime), the rice yield reached the highest; compared with pH 4.5, the yield increased by 61.2%. When the yield was reduced by 50%, the soil pH thresholds of rape and rice were 4.7 and 4.2, respectively. (3) Soil pH significantly affected crop nutrient uptake content. With the increase of the amount of hydrated lime, the nitrogen, phosphorus and potassium uptake contents in rape increased first and then decreased. The average increase of nitrogen, phosphorus and potassium uptake contents in rape from 2016 to 2018 was 59.5%-181.4%, 36.2%-188.8% and 65.7%-198.9%, respectively. The nitrogen, phosphorus and potassium uptake contents in rice first increased and then decreased. The uptake content of rice was the highest at pH 6.8. Compared with that without lime application the average increase of nitrogen, phosphorus and potassium uptake of rice from 2016 to 2018 was 11.1%-88.6%, 13.5%-68.5% and 9.7%-66.1%, respectively. 【Conclusion】 Under the application of lime conditioner, the contents of soil available nitrogen and exchangeable Ca^{2+} and exchangeable Mg^{2+} were increased with the increase of soil pH, which promoted the uptake of nitrogen, phosphorus and potassium nutrients of crops and increased the crop yield. Under the experiments conditions, the optimal dosage of lime in acid soil (pH 4.5) of rice -rape rotation system was about 6 500 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, which could obtain stable and high yield of crops in rice-rape rotation system of southern China.

Key words: soil acidity; soil nutrients; crop growth; soil pH; lime conditioner; rice-rape rotation

0 引言

【研究意义】土壤酸化是全世界面临的最大的农业环境问题之一^[1]。我国南方部分水稻土已出现不同程度的酸化^[2], 30%以上的稻田土壤 pH 低于 5.5, 且酸化面积与强度仍在加剧^[3]。水稻和油菜是耐酸性较强的作物, 但是在土壤酸化程度逐渐加剧的情况下, 水稻和油菜的生产也受到了明显的影响。因此, 明确土壤速效养分、作物养分吸收量及产量对石灰用量的响应关系, 对稻田土壤酸化改良具有重要意义。【前人研究进展】旱地土壤酸化对土壤养分含量变化和作物养分吸收的影响已有较多研究。一般认为, 旱地土壤速效氮在中性、微酸及微碱条件下有效性最高, 当土壤 pH 低于 6.0 时, 硝化速率明显下降, 土壤 pH 低于 4.5 时, 硝化作用基本停止^[4]。周娟等^[5]的研究也表明, 我国南方酸化土壤中可被作物吸收利用的有效态氮含量会随土壤 pH 的下降呈直线下降趋势。胡敏等^[6]用室内盆栽试验, 研究不同石灰用量对酸性土壤有效

养分含量影响的试验中表明, 熟石灰用量 $\leq 2.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 土壤硝态氮含量随熟石灰用量的增加而显著增加, 土壤铵态氮随着熟石灰用量的增加而减少; 当熟石灰用量 $> 0.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 速效钾含量随着石灰用量的增加而显著降低, 土壤有效磷含量随着熟石灰用量的增加先升高后降低。也有研究表明^[7], 旱地酸性植烟土壤与不施石灰处理相比, 施石灰处理土壤有效磷、速效钾含量均显著增加; 胡向丹等^[8]研究发现植烟土壤 pH 与速效磷之间不存在相关关系。前人研究结果有所差异, 可能是因为成土母质、耕作方式等不同引起的。大量研究一致表明土壤酸度较低是作物产量和养分吸收量降低的主要原因之一^[9-12]; 随着旱地和水田土壤 pH 增加, 油菜和水稻产量和养分吸收量显著性增加, 施用石灰提高土壤 pH 和交换性钙、交换性镁含量, 降低交换性铝含量, 是作物增产的主要原因^[13-16]。【本研究切入点】近年来, 长期施肥下旱地土壤酸化的趋势及其对作物产量影响的研究较多, 稻油轮作区通过添加熟石灰调节不同土壤酸度对土壤养分含量、作物

产量与作物养分吸收量的研究则较少。【拟解决的关键问题】本研究在江西进贤县开展稻油轮作试验，以水稻油菜为研究对象，分析石灰用量对土壤养分及作物养分吸收量影响，明确土壤速效养分、产量及作物养分吸收量对石灰用量的响应关系，为南方稻油轮作区土壤酸化改良和稻油高产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验于 2015—2018 年在江西省进贤县捉牛岗乡（116°27'E，28°37'N）稻油轮作定位试验田进行。试验地点属亚热带季风湿润气候，年平均气温 17.7℃，无霜期为 282 d，全年平均雨量 1 587 mm，最高和最低月平均气温分别为 7 月（29.8℃）和 1 月（5.1℃）。

表 1 初始土壤基本理化性状

Table 1 Soil basic physical and chemical properties

有机质	速效氮	有效磷	速效钾	全氮	交换性钙	交换性镁	pH
OM	Available N	Available P	Available K	Total N	Exchangeable Ca	Exchangeable Mg	
(g·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	
27.7	62.75	30.65	97.5	1.49	252.72	21.19	4.52

表 2 设置不同土壤 pH 下的石灰添加量

Table 2 Addition content of lime at different soil pH values

	pH					
	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
石灰用量 Addition content of lime (kg·hm ⁻²)	0	1492	3154	4815	6477	8139

种植制度为稻油轮作。油菜品种为丰油 730，于每年的 11 月初移栽，施用肥料分别为尿素、钙镁磷肥、氯化钾、硼砂，试验施肥量为：N 180 kg·hm⁻²、P₂O₅ 54 kg·hm⁻²、K₂O 81 kg·hm⁻²、硼肥 15 kg·hm⁻²；70% 氮肥、80% 钾肥、100% 磷肥、100% 硼砂作基肥施用，10% 氮肥作冬前苗期追施，20% 氮肥、20% 钾肥作油菜苔、花肥分期追施；株行距：40 cm×30 cm。水稻品种为隆两优 1988，于每年的 6 月初移栽，施用肥料分别为尿素、钙镁磷肥、氯化钾，施肥量分别为：N 180 kg·hm⁻²、P₂O₅ 120 kg·hm⁻²、K₂O 150 kg·hm⁻²；50% 氮肥、100% 磷肥、50% 钾肥作基肥施用，20% 氮肥作蘖肥施用，30% 氮肥、50% 钾肥作穗肥施用。株行距：20 cm×20 cm。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 植物样品采集与测定 油菜收获前采集植株

供试土壤为第四纪红黏土发育的中度潜育型水稻土，耕层土壤基本理化性状见表 1。

1.2 试验设计

试验共设 6 个 pH 梯度，分别为 pH 4.5、pH 5.0、pH 5.5、pH 6.0、pH 6.5 和 pH 7.0，每个处理设置 3 次重复，随机区组排列，小区面积 20 m²。在原有土壤 pH 4.5 的基础上，通过实验室模拟，计算出获得不同土壤 pH 值情况下的熟石灰用量，如表 2 所示，并充分将熟石灰与表层（0—15 cm）土壤混匀，2014—2015 年油菜季匀地试验后，测得各改良小区的土壤 pH 值分别为 4.5、5.0、5.6、6.3、6.8、7.3。为保证各处理土壤 pH 保持稳定，于每年稻前用熟石灰进行定量调整。各小区间使用隔水板隔开，地下埋深 40 cm，地上 20 cm；田间各小区的水分植保等管理措施与当地农民习惯保持一致。

地上部，每个小区取 5 株植物样，105℃杀青 30 min，70℃烘干至恒重，得到干物质重；水稻收获前采集植株地上部，每个小区取 10 株植物样，并将植株分为籽粒、茎、叶，于 105℃杀青 30 min，70℃烘干至恒重。植物样品磨碎过 0.5 mm 筛，采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法制备氮磷钾待测液，凯氏定氮法测全氮，钼锑抗比色法测全磷，火焰光度法测全钾^[17]。

1.3.2 土壤样品采集与测定 采用 5 点法取样。在作物移栽后 7、14、21 和 30 d 采集 0—15 cm 土层的土壤样品，并于 4℃保存，用于测定土壤速效氮含量（铵氮与硝氮含量）；在作物收获前，采集 0—15 cm 土层的土壤样品，土壤风干后过 2 mm 和 0.25 mm 筛备用。土壤 pH 采用玻璃电极法（水土比为 2.5 : 1）测定；速效氮采用 1 mol·L⁻¹ KCl 浸提，连续流动分析仪测定；有效磷采用 pH 8.5 0.5 mol·L⁻¹ 的 NaHCO₃ 浸提，

钼锑抗比色法测定；速效钾采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ 浸提，火焰光度法测定；土壤交换性钙镁采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ 浸提，ICP—MS 法测定^[17]。

油菜季小区处理土壤 pH 实测值分别为 pH 4.5、5.0、5.6、6.3、6.8、7.3；水稻季小区处理土壤 pH 实测值分别为 pH 4.5、5.0、5.5、6.0、6.8、7.3。

1.4 土壤 pH 阈值

利用土壤 pH 与作物产量之间的定量关系，确定作物最高产时的 pH 值为适宜值，作物最高产量下降一半（50%）时的 pH 值为酸害阈值。

1.5 数据处理与分析

作物养分吸收量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 籽粒产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) \times 籽粒养分含量 (%) + 秸秆产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) \times 秸秆养分含量 (%)。

数据分析采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 22 软

件进行数据统计分析，采用 Duncan 分析进行显著性检验，采用 Excel 2003 制作图表。

2 结果

2.1 土壤酸度对土壤速效养分含量的影响

2.1.1 土壤速效氮含量 由图 1 可知，随着石灰用量的增加与土壤 pH 的升高，油菜季土壤速效氮含量呈显著增加的趋势，与不施石灰处理相比，施石灰处理速效氮含量增幅为 6.3%—61.3%；随着油菜生育时期的延长土壤速效氮含量整体呈降低的趋势。随着石灰用量的增加与土壤 pH 升高，水稻季土壤速效氮含量呈先增加后降低的趋势，与不施石灰处理相比，施石灰处理速效氮含量增幅为 0.4%—27.8%，在 pH 6.8 左右速效氮含量达到最高，且随着水稻生育时期的延长土壤速效氮含量呈降低的趋势。

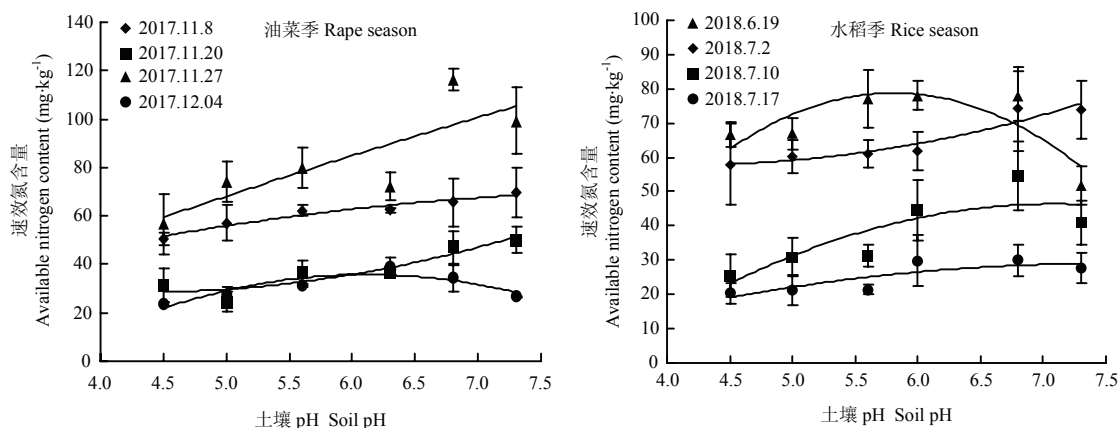


图 1 土壤 pH 与土壤速效氮含量的关系

Fig. 1 Relationship between soil pH and soil available nitrogen content

2.1.2 土壤速效钾、有效磷含量 由图 2 可知，随着土壤 pH 升高，油菜季和水稻季土壤速效钾、有效磷含量均显著降低 ($P < 0.01$)。油菜季土壤有效磷、速效钾含量较 pH 4.5 降幅分别为 11.6%—136.6%、10.1%—45.9%；随着土壤 pH 升高，水稻季土壤有效磷、速效钾含量均呈现降低的趋势，较 pH 4.5 降幅分别为 20.6%—72.7%、3.3%—31.8%。在相同 pH 水平下，油菜季有效磷、速效钾含量略高于水稻季。

2.2 土壤交换性钙镁含量

随着石灰用量的增加与土壤 pH 升高，水稻季与油菜季土壤交换性钙、交换性镁含量均呈极显著增加

的趋势。油菜季土壤交换性钙、交换性镁含量较 pH 4.5 增幅分别为 14.5%—414.7%、19.7%—93.6%；水稻季土壤交换性钙、交换性镁含量增幅分别为 9.8%—181.2%、1.4%—62.3% (图 3)。

2.3 作物产量

土壤 pH 与作物产量极显著正相关 ($P < 0.01$, 图 4)。随 pH 升高油菜产量呈先增加后降低的趋势，土壤 pH 6.4 时油菜产量达到最高，增幅为 1.9%—202.2%。与最高产量相比，pH 5.5 时产量降低 20.12%，pH 5.0 时产量降低 34.08%，pH 4.5 时产量降低 64.31%。根据油菜产量与土壤 pH 的函数关系可得，产量下降 50% 的酸害阈值为 pH 4.7。随 pH 上升水稻产量呈先增加

后降低的趋势, 土壤 pH 为 6.8 时水稻产量达到最高, 增幅为 3.8%—61.2%。与最高产量相比, pH 6.0 时产量降低 9.12%; pH 5.5 时产量降低 16.38%, pH 5.0 时产量降低 30.11%, pH 4.5 时产量降低 38.82%。根据

水稻产量与土壤 pH 的函数关系可得, 产量下降 50% 的酸害阈值为 pH 4.2。由此可知, 不同的作物对土壤酸度的敏感程度不同, 最高产量降低 50% 时的酸害阈值也不同。

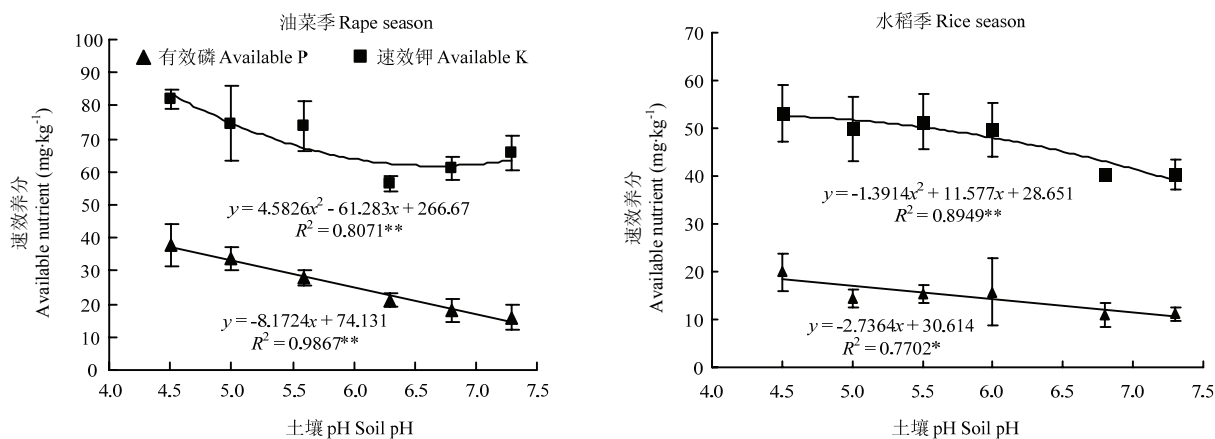


图 2 土壤 pH 与土壤有效磷、速效钾含量的关系

Fig. 2 Relationship between soil pH and available P, available K content

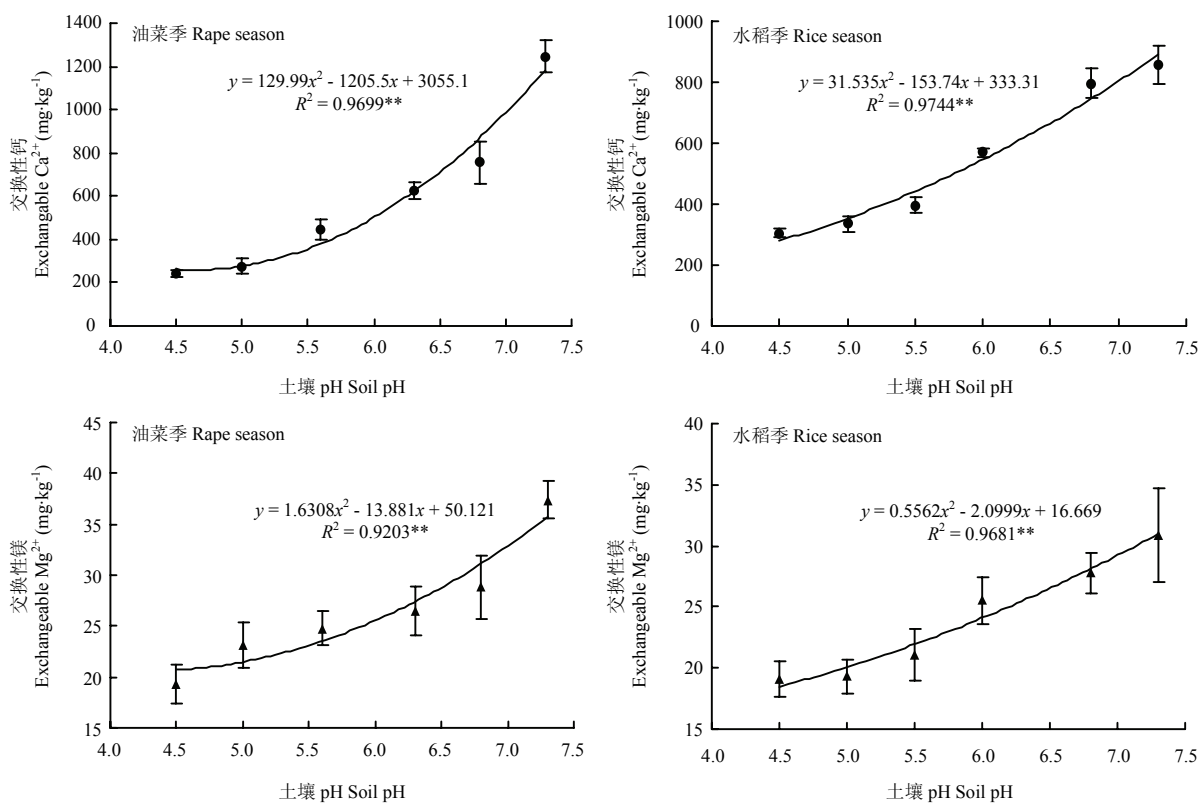


图 3 土壤 pH 与土壤交换性钙镁含量的关系

Fig. 3 Relationship between soil pH and exchangeable Ca²⁺ and Mg²⁺ content

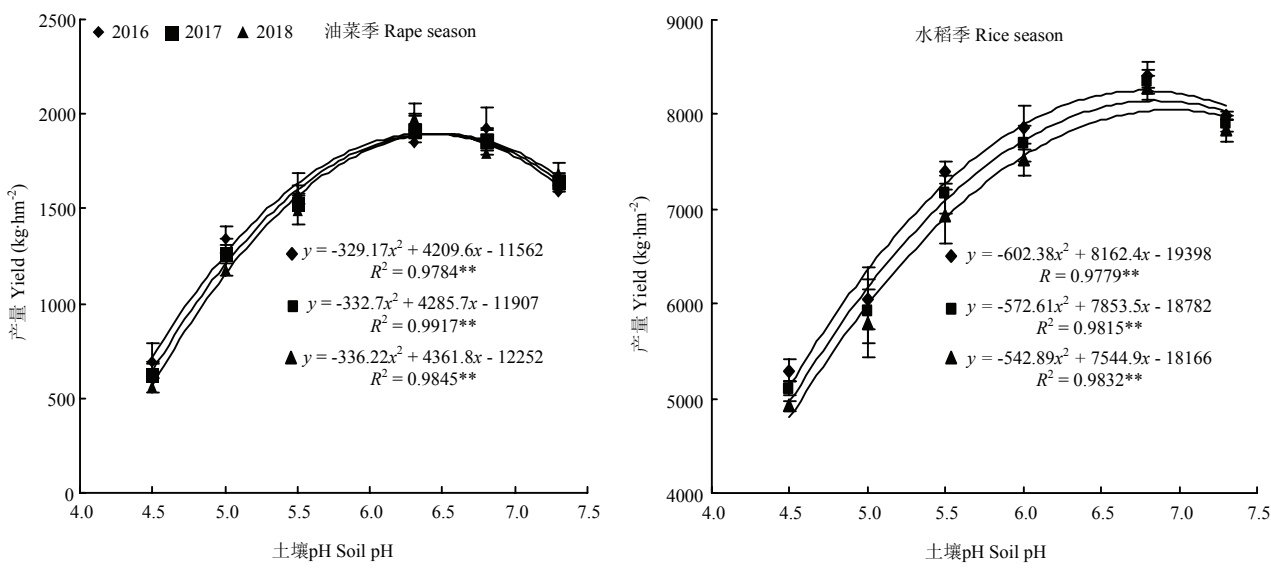


图 4 土壤 pH 与作物产量的关系
Fig. 4 Relationship between soil pH and crop yield

2.4 作物养分吸收量

土壤 pH 显著影响油菜和水稻氮磷钾吸收量 ($P<0.05$, 图 5)。在 pH 梯度范围内, 随着土壤 pH 升高油菜氮磷钾吸收量呈先增加后降低的趋势。2016—2018 年油菜氮磷钾平均吸收量与不施石灰处理相比, 施石灰处理增幅分别为 59.5%—181.4%、36.2%—188.8%、65.7%—198.9%。在 pH 梯度范围内, 随着土壤 pH 升高水稻氮磷钾吸收量呈先增加后降低的趋势, 在 pH 6.8 左右水稻氮磷钾吸收量最大。

2016—2018 年水稻氮磷钾平均吸收量与不施石灰处理相比, 施石灰处理增幅分别为 11.1%—88.6%、13.5%—68.5%、9.7%—66.1%。水稻季氮磷钾吸收量高于油菜季, 但水稻季施石灰处理与不施石灰处理相比, 养分吸收量增加幅度小于油菜季。

2.5 土壤 pH、土壤养分、作物养分吸收量和产量等指标间相关性分析

由表 3 可知, 油菜产量与氮钾吸收量、速效氮含量、交换性钙含量、土壤 pH 呈显著或极显著正

表 3 油菜季土壤 pH、土壤养分、养分吸收量和产量等指标间相关性分析
Table 3 Correlation analysis between soil pH, soil nutrient, nutrient uptake content and yield in rape season

	产量 Yield	吸氮量 N uptake content	吸磷量 P uptake content	吸钾量 K uptake content	速效氮 Available N	有效磷 Available P	速效钾 Available K	交换性钙 Exchangeable Ca ²⁺	交换性镁 Exchangeable Mg ²⁺
吸氮量 N uptake content	0.923**	1							
吸磷量 P uptake content	0.699	0.863*	1						
吸钾量 K uptake content	0.929**	0.946**	0.818*	1					
速效氮 Available N	0.881*	0.8	0.803	0.861*	1				
有效磷 Available P	-0.913*	-0.549	-0.920**	-0.660	-0.634	1			
速效钾 Available K	-0.897*	-0.697	-0.673	-0.969**	-0.737	0.863*	1		
交换性钙 Exchangeable Ca ²⁺	0.857*	0.888*	0.994**	0.837*	0.847*	-0.944**	-0.691	1	
交换性镁 Exchangeable Mg ²⁺	0.741	0.879*	0.973**	0.786	0.811	-0.910*	-0.639	0.988**	1
pH	0.874*	0.931**	0.950**	0.927**	0.929**	-0.992**	-0.812*	0.971**	0.948**

**表示在 1%水平相关性显著, *表示在 5%水平相关性显著。表 4 同 ** and * mean significant at the 1% and 5% level, respectively. The same as Table 4

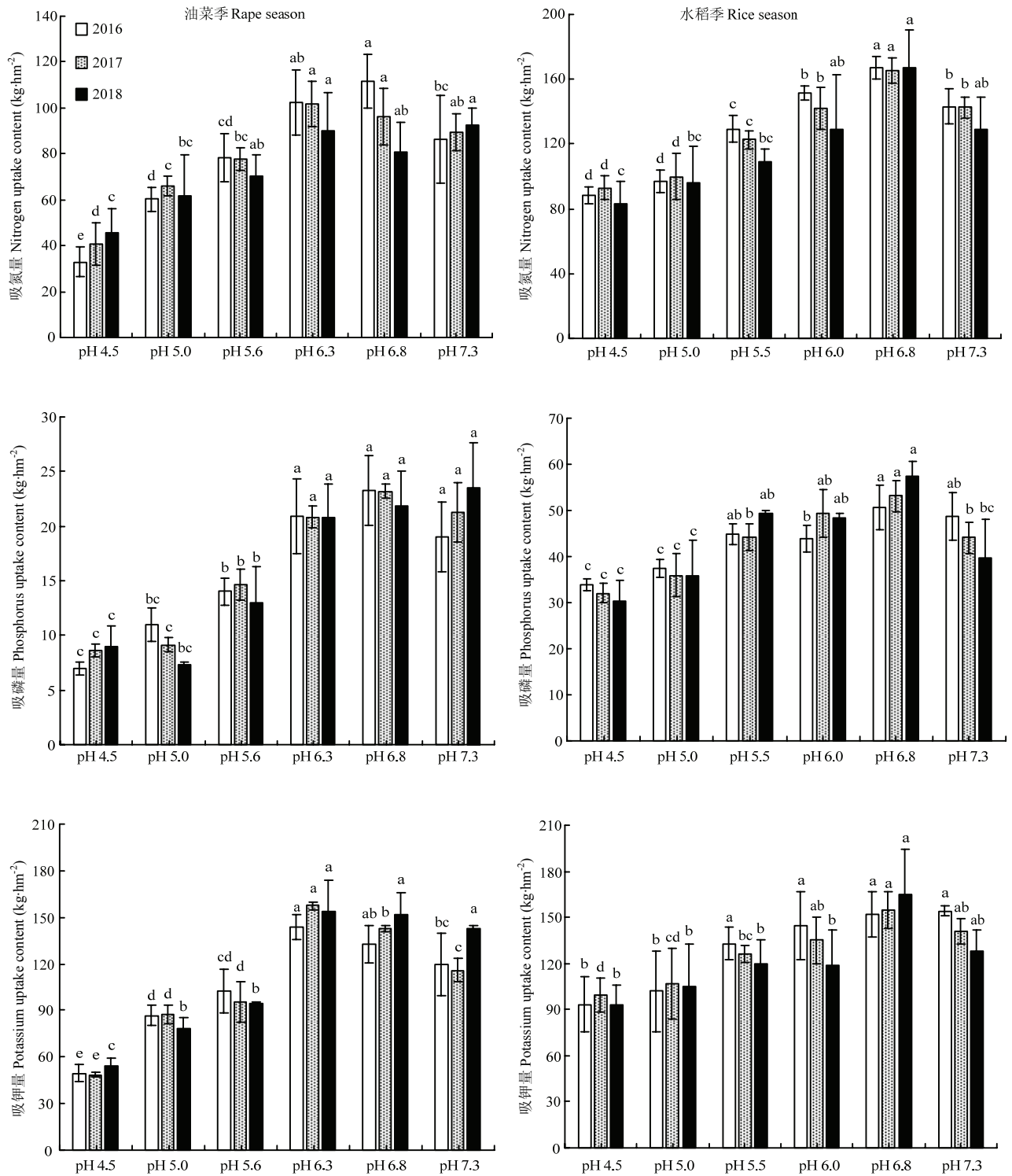


图 5 土壤 pH 与作物养分吸收量的关系

Fig. 5 Relationship between soil pH and crop nutrient uptake content

相关，与有效磷、速效钾呈显著负相关；油菜氮磷钾吸收量与交换性钙镁呈显著或极显著正相关；油菜吸钾量与土壤速效钾含量呈显著负相关、油菜吸

磷量与土壤有效磷含量呈显著负相关。水稻产量与氮磷钾吸收量、土壤速效养分之间的相关性跟油菜类似（表 4）。

表 4 水稻季土壤 pH、土壤养分、养分吸收量和产量等指标间相关性分析
Table 4 Correlation analysis between soil pH, soil nutrient, nutrient uptake content and yield in rice season

	产量 Yield	吸氮量 N uptake content	吸磷量 P uptake content	吸钾量 K uptake content	速效氮 Available N	有效磷 Available P	速效钾 Available K	交换性钙 Exchangeable Ca ²⁺	交换性镁 Exchangeable Mg ²⁺
吸氮量 N uptake content	0.914*	1							
吸磷量 P uptake content	0.791	0.858*	1						
吸钾量 K uptake content	0.858*	0.972**	0.870*	1					
速效氮 Available N	0.857*	0.966**	0.909*	0.920**	1				
有效磷 Available P	-0.784	-0.79	-0.574	-0.776	-0.641	1			
速效钾 Available K	-0.781	-0.819*	-0.466	-0.819	-0.649	0.910*	1		
交换性钙 Exchangeable Ca ²⁺	0.894*	0.853*	0.532	0.817*	0.714	-0.824*	-0.950**	1	
交换性镁 Exchangeable Mg ²⁺	0.896*	0.811	0.476	0.728	0.694	-0.768	-0.0891*	0.976**	1
pH	0.932**	0.836*	0.576	0.798	0.694	-0.878*	-0.923**	0.976**	0.959**

3 讨论

3.1 石灰用量对水稻油菜产量的影响

本研究表明,随着石灰用量的增加,土壤 pH 升高,油菜、水稻产量呈先增加后降低的趋势,该研究结果与曾勇军、陈平等^[18-19]的研究结果类似,但水稻产量增加幅度高于曾勇军等研究中双季稻产量增加幅度,这可能与本试验 pH 梯度较大有关;作物产量呈先增加的趋势,一方面可能是因为添加石灰提高交换性钙含量,降低交换性铝含量,减轻铝的毒害,改善作物生长环境,利于作物生长^[20];另一方面,土壤 pH>6 时,土壤氮素矿化速率增加、硝化速率增大,土壤速效氮含量增加,进而增加产量^[21-24];作物产量后呈现出降低的趋势,可能是因当石灰添加量>7 500 kg·hm⁻²时会造成铵态氮挥发,磷酸钙盐沉淀,土壤中钾、钙、镁等营养元素平衡失调,抑制作物对养分的吸收,导致作物减产^[25],因此,适宜的石灰用量对作物生长至关重要。本研究表明,油菜的适宜的 pH 为 6.4,水稻适宜 pH 为 6.8,其石灰施用范围是 4 000—7 500 kg·hm⁻²,本研究结果与前人研究结果^[10]一致,在施氮条件下,pH 6.5 处理水稻产量较高,水稻和油菜对中性偏碱环境的适应较强,适宜的环境 pH 范围为 6.0—7.4。

不同作物对土壤酸度的敏感程度不同,且酸害对作物产量降低幅度也有所不同^[5,26]。本研究结果显示,油菜产量下降 50% 时的酸害阈值为 pH 4.7;水稻产量下降 50% 时的酸害阈值为 pH 4.2。水稻油菜酸害阈值出现这种差异的原因可能是:(1)当 pH<5 时,

难溶性铝转变为交换性铝,植物会出现铝毒害症状,进而抑制植物生长,降低产量^[11-12];(2)在淹水条件下水稻土还原能力较强,水稻根系表面形成一层铁膜,受铝毒害作用较弱,旱地土壤还原性较水田弱,因此作为中等耐铝毒植物的油菜,其酸害阈值较水稻更高一些^[27]。

3.2 石灰性土壤改良剂对土壤速效养分与养分吸收量的影响

本研究表明,土壤 pH 与有效磷呈显著负相关关系($P<0.05$),与王光火等^[28]的研究结果相似,这可能是由于强酸性土壤加入石灰性调理剂导致土壤 pH 升高,交换性铝水解和羟基铝聚合物生成,增加对磷的吸持,降低了土壤有效磷含量。土壤 pH 与土壤速效钾呈显著负相关关系($P<0.05$),本研究结果与前人研究结果类似,有研究表明^[7],低量石灰(≤ 0.9 g·kg⁻¹)对土壤速效钾影响不大,但当熟石灰用量>0.9 g·kg⁻¹时,其含量随着熟石灰用量的增加而显著降低,可能是由于低 pH 促进了土壤缓效钾释放^[29-30],石灰性土壤调理剂的施用,造成土壤交换性钙增加,导致土壤速效钾固定增加^[31-32],其机理还需进一步研究。在研究中发现,在相同 pH 水平下,油菜季有效磷、速效钾含量略高于水稻季,这可能是因为水田条件下造成养分的流失。速效钾、有效磷与作物养分吸收量相关性分析显示,两两之间存在显著负相关关系($P<0.05$),这表明强酸性土壤添加石灰性调理剂提高土壤 pH 过程中,速效钾和有效磷对作物养分吸收量的贡献较小。

土壤 pH 与土壤交换性钙、交换性镁的相关分析

发现, 土壤 pH 与交换性钙、交换性镁存在显著正相关关系 ($P < 0.05$), 这是因为石灰的施入直接引入钙镁离子。随石灰用量的增加土壤速效氮含量呈先增加后降低的趋势, 这可能是因为土壤 pH 较低时, 氮素矿化作用基本停止, 有机态氮难转化为无机态氮^[33]、速效氮含量较低, 随石灰用量增加氮素矿化作用加速, 速效氮含量增加, 但当石灰过量时, 可能会导致铵态氮的挥发, 速效氮总量又会呈现降低的趋势; 土壤中交换性铝含量较高, 对植物产生了毒害, 限制了作物生物量, 降低作物养分吸收量。随石灰用量增加作物养分吸收量呈现先增加的趋势, 可能是因为加入石灰性调理剂后, 土壤盐基离子增加, 作物次生根发育, 硝化作用加速, 速效氮含量增加, 提高作物生物量, 增加作物养分吸收量^[16], 这一过程说明土壤 pH、交换性钙、速效氮含量对作物养分吸收量的贡献较大; 同时, 当熟石灰用量超过一定量时, 作物养分吸收量有降低的趋势, 这可能是因为原本严重酸化的土壤因石灰施用导致土壤 pH > 7 或接近 7 时, 高 pH 会抑制植物组织和器官的分化, 降低作物生物量, 从而作物养分吸收量降低^[34], 其机理还有待进一步研究。

4 结论

随着石灰用量的增加, 能显著提高土壤 pH, 增加土壤速效氮、交换性钙、交换性镁等含量, 提高作物产量, 从而增加作物养分吸收量。不同作物对土壤酸度的敏感程度不同, 土壤 pH 较低会对作物产生酸害, 油菜、水稻产量降低 50% 时的酸害阈值分别为 pH 4.7、4.2。随着石灰用量的增加, 不同作物的产量和养分吸收量提高幅度有所不同, 在 pH 为 6.4 (相当于 6 145 kg·hm⁻² 熟石灰用量) 和 6.8 (相当于 7 474 kg·hm⁻² 熟石灰用量) 时, 油菜、水稻的产量及养分吸收量达到最高。在本试验条件下, 水稻与油菜轮作区酸性土壤 (pH 4.5) 施用熟石灰的最佳用量为 6 477 kg·hm⁻², 改良土壤 pH 的目标约为 6.5 (6 477 kg·hm⁻²), 可实现我国南方水稻油菜轮作区作物达到稳定高产的目标。

References

- [1] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, SHEN J L, HAN W X, ZHANG W F, CHRITIE P, GOULDING K W T, VITOUSEK P M, ZHANG F S. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [2] 周晓阳, 徐明岗, 周世伟, Colinet Gilles. 长期施肥下我国南方典

型农田土壤的酸化特征. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1615-1621.

ZHOU X Y, XU M G, ZHOU S W, GILLES C. Soil acidification characteristics of typical farmland in south China under long-term fertilization. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1615-1621. (in Chinese)

- [3] 于天一, 孙秀山, 石程仁, 王才斌. 土壤酸化危害及防治技术研究进展. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3137-3143.

YU T Y, SUN X S, SHI C R, WANG C B. Advances in soil acidification hazards and control techniques. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(11): 3137-3143. (in Chinese)

- [4] 吕贻忠, 李保国. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2006.

LÜ Y Z, LI B G. *Soil Science*. Beijing: China Agriculture Press, 2006. (in Chinese)

- [5] 周娟, 袁珍贵, 郭莉莉, 屠乃美, 易镇邪, 李海林, 江巨鳌. 土壤酸化对作物生长发育的影响及改良措施. 作物研究, 2013, 27(1): 96-101.

ZHOU J, YUAN Z G, GUO L L, TU N M, YI Z X, LI H L, JIANG J A. Effects of soil acidification on crop growth and development and improvement measures. *Corp Research*, 2013, 27(1): 96-101. (in Chinese)

- [6] 胡敏, 向永生, 鲁剑巍. 石灰用量对酸性土壤 pH 值及有效养分含量的影响. 中国土壤与肥料, 2017(4): 72-77.

HU M, XIANG Y S, LU J W. Effects of lime application rates on soil pH and available nutrient content in acidic soils. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(4): 72-77. (in Chinese)

- [7] 唐明, 向金友, 袁茜, 谢冰, 程智敏, 蔡毅, 黄胜, 杨萃. 酸性土壤施石灰对土壤理化性质、微生物数量及烟叶产质量的影响. 安徽农业科学, 2015, 43(12): 91-93.

TANG M, XIANG Y S, YUAN Q, XIE B, CHENG Z M, CAI Y, HUANG S, YANG P. Effects of applying lime on physical and chemical properties, microbial quantities of acid soil and yield and quality of flue-cured tobacco. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(12): 91-93. (in Chinese)

- [8] 胡向丹, 邓小华, 王丰, 王少先, 马莹, 彭宇, 邓井青, 郭亚利. 黔西南州植烟土壤 pH 分布特征及其与土壤养分的关系. 安徽农业大学学报, 2014, 41(6): 1070-1074.

HU X D, DENG X H, WANG F, WANG S X, MA Y, PENG Y, DENG J Q, GUO Y L. Soil pH characteristics and its relation to soil nutrients in Qianxi'nan tobacco-growing region. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2014, 41(6): 1070-1074. (in Chinese)

- [9] HOLLAND J E, WHITE P J, GLENDINING M J, GOULDING K W T, MCGRATH S P. Yield responses of arable crops to liming-An

- evaluation of relationships between yields and soil pH from a long-term liming experiment. *European Journal of Agronomy*, 2019, 105: 176-188.
- [10] 喻崎雯, 马祖陆, 伊文超, 梁晓. 不同土壤 pH 对普通野生稻生理特性的影响. *安徽农业科学*, 2013, 41(2): 473-475, 478.
- YU Q W, MA Z L, YI W C, LIANG X. Effects of soil pH on physiological characteristics of *Oryza rufipogon* Griff. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(2): 473-475, 478. (in Chinese)
- [11] 吴道铭, 傅友强, 于智卫, 沈宏. 我国南方红壤酸化和铝毒现状及防治. *土壤*, 2013, 45(4): 577-584.
- WU D M, FU Y Q, YU Z W, SHEN H. Status of red soil acidification and aluminum toxicity in south China and prevention. *Soils*, 2013, 45(4): 577-584. (in Chinese)
- [12] KOCHIAN L V, HOEKENGA O A, PINEROS M A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55: 459-493.
- [13] 蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 徐明岗, 黄晶, 张会民. 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, XU M G, HUANG J, ZHANG H M. Effects of long-term fertilization on pH of red soil, crop yields and uptakes of nitrogen, phosphorous and potassium. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(1): 71-78. (in Chinese)
- [14] 武际, 郭熙盛, 王文军, 朱宏斌. 施用白云石粉对黄红壤酸度和油菜产量的影响. *中国油料作物学报*, 2006, 28(1): 55-58.
- WU J, GUO X S, WANG W J, ZHU H B. Effect of dolomite application on soil acidity and yield of rapeseed on yellow-red soil. *Chinese Journal of Oil Crops Sciences*, 2006, 28(1): 55-58. (in Chinese)
- [15] 曾廷廷, 蔡泽江, 王小利, 梁文君, 周世伟, 徐明岗. 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.
- ZENG T T, CAI Z J, WANG X L, LIANG W J, ZHOU S W, XU M G. Integrated analysis of liming for increasing crop yield in acidic soils. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(13): 2519-2527. (in Chinese)
- [16] 梅旭阳, 高菊生, 杨学云, 黄晶, 蔡泽江, 李冬初, 王伯仁, 柳开楼, 徐明岗, 张会民. 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, HUANG J, CAI Z J, LI D C, WANG B R, LIU K L, XU M G, ZHANG H M. The response of soil potassium availability in rhizospheric soil of winter wheat to acidified and limed red soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(6): 1568-1577. (in Chinese)
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. *Analysis of Soil Agrochemistry*. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000. (in Chinese)
- [18] 曾勇军, 周庆红, 吕伟生, 谭雪明, 潘晓华, 石庆华. 土壤酸化对双季早、晚稻产量的影响. *作物学报*, 2014, 40(5): 899-907.
- ZENG Y J, ZHOU Q H, LÜ W S, TAN X M, PAN X H, SHI Q H. Effects of soil acidification on the yield of double season rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(5): 899-907. (in Chinese)
- [19] 陈平平. 酸化土壤对水稻产量和氮素利用效率的影响途径研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
- CHEN P P. Research on the influence of acidified soil on rice yield and nitrogen use efficiency[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [20] 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. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(9): 206-213. (in Chinese)
- [21] 杨静, 谭永锋, 肖志强, 刘建华, 龙卫平, 匡大春, 韦赵海, 刘益仁. 不同剂量石灰对酸化稻田土壤养分含量及水稻产量的影响. *安徽农业科学*, 2015, 43(36): 175-176, 179.
- YANG J, TAN Y F, XIAO Z Q, LIU J H, LONG W P, KUANG D C, WEI Z H, LIU Y R. Effects of different application doses of lime on acidification paddy soil and rice yield. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(36): 175-176, 179. (in Chinese)
- [22] FAGERIA, N K, BALIGER V C. Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. *Advances in Agronomy*, 2008, 99: 345-399.
- [23] ZHENG S J. Crop production on acidic soils: Overcoming aluminum toxicity and phosphorus deficiency. *Annals of Botany*, 2010, 106: 183-184.
- [24] CHEN D M, LAN Z C, BAI X. Evidence that acidification induced declines in plant diversity and productivity are mediated by changes in below-ground communities and soil properties in a semi-arid steppe. *Journal of Ecology*, 2013, 101(5): 1322-1334.
- [25] ELISAL A A, SHAMSHUDDIN J, CHE F I, ROSLAN I. Increasing rice production using different lime sources on an acid sulphate soil in merbok, malaysia. *Tropical Agricultural Science*, 2014, 37(2): 223-247.
- [26] CAIRES E F, GARBUIO F J, CHURKA S, BARTH G, CORREA J C L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. *European Journal of*

- Agronomy*, 2008, 28(1): 57-64.
- [27] 周楠. 铝胁迫下油菜根系分泌物的分泌特性及其对根际环境的影响[D]. 金华: 浙江师范大学, 2010.
- ZHOU N. Rape (*Brassica napus* L.) root exudates characteristics and effects on rhizosphere soil under aluminum stress[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2010. (in Chinese)
- [28] 王光火, 朱祖祥. pH 对土壤吸持磷酸根的影响及其原因. 土壤学报, 1991, 28 (1): 1 -6.
- WANG G H, ZHU Z X. The effect of pH on phosphate adsorption in soils and its possible mechanism. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28 (1): 1-6. (in Chinese)
- [29] 岳龙凯. 长期施肥及不同下红壤钾素有效性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- YUE L K. Potassium availability of red soil with different pH under long-term fertilizations[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)
- [30] 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.
- [31] JASKULSKA I, JASKULAKI D, KOBIERSKI M. Effect of liming on the change of some agrochemical soil properties in a long-term fertilization experiment. *Plant Soil and Environment*, 2014, 60(4): 146-150.
- [32] VALENTINUZZI F, MIMMO T, CESCO S, AL MAMUN S, SANTNER J, HOEFER C, OBURGER E, ROBINSON B, LEHTO N. The effect of lime on the rhizospheric processes and elemental uptake of white lupin. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 118: 85-94.
- [33] BACKMAN J S K, HERMANSSON A, TEBBE C C. Liming induces growth of a diverse flora of ammonia-oxidising bacteria in acid spruce forest soil as determined by SSCP and DGGE. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(10): 1337 - 1347.
- [34] 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.
- 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. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)