

DOI: 10.11766/trxb202304040125

刘芳禧, 方畅宇, 庾振宇, 高雅洁, 张江林, 鲁艳红, 廖育林, 曹卫东, 聂军, 屠乃美. 绿肥、秸秆和石灰联用对红壤性水稻土酸度特征和水稻产量的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61 (6): 1616–1627.

LIU Fangxi, FANG Changyu, YU Zhenyu, GAO Yajie, ZHANG Jianglin, LU Yanhong, LIAO Yulin, CAO Weidong, NIE Jun, TU Naimei. Effects of Green Manure, Rice Straw Return and Lime Combination on Soil Acidity and Rice Yield[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61 (6): 1616–1627.

绿肥、秸秆和石灰联用对红壤性水稻土酸度特征和水稻产量的影响^{*}

刘芳禧^{1, 2}, 方畅宇^{1, 2}, 庾振宇^{1, 2}, 高雅洁^{2, 3}, 张江林^{2, 3}, 鲁艳红^{2, 3},
廖育林^{2, 3}, 曹卫东⁴, 聂 军^{2, 3†}, 屠乃美^{1†}

(1. 湖南农业大学农学院, 长沙 410128; 2. 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 3. 农业部湖南耕地保育科学观测实验站, 长沙 410125;
4. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 长期耕作和施肥加快了红壤性水稻土壤酸化, 为研究绿肥、秸秆还田和石灰联用对水稻土壤酸度特征及水稻产量的影响, 基于 2016 年开始的长期定位微区试验, 探究不施肥 (CK)、化肥 (F)、化肥+紫云英+稻草还田 (GRF)、化肥+紫云英+稻草还田+石灰 (GRFL) 处理对水稻产量、红壤性水稻土壤不同形态酸、土壤盐基离子及土壤酸碱缓冲容量的影响, 解析土壤酸碱缓冲容量、交换性酸、有机质及交换性盐基离子之间的相关性。连续 7 年的微区试验结果表明, 与 F 处理相比, GRF 处理的早、晚稻产量分别提高了 19.9%和 5.1%, 7 年平均增产率分别为 12.8%和 5.9%; GRFL 处理的早、晚稻产量分别提高了 23.4%和 14.2%, 7 年平均增产率分别为 11.1%和 8.9%。CK、F 和 GRF 处理早、晚稻土壤 pH 均呈逐年下降的变化趋势, 而 GRFL 处理早、晚稻土壤 pH 呈先上升后下降的变化趋势, 下降幅度最小, 且一直处于较高水平。同时, 与 F 处理相比, GRF 与 GRFL 处理显著提高了早、晚稻土壤交换性 K⁺、交换性盐基离子总量和酸碱缓冲容量, GRF 与 GRFL 处理间无显著差异, 但 GRFL 处理各指标均有提高的趋势。相关分析表明, pH 与交换性酸、交换性 H⁺呈极显著负相关 ($P<0.01$), 与酸碱缓冲容量、交换性 Na⁺、交换性 Mg²⁺、交换性盐基离子总量呈极显著正相关 ($P<0.01$); 土壤酸碱缓冲容量主要与交换性酸、交换性 H⁺、交换性 Na⁺和交换性 Mg²⁺有关, 水稻产量与土壤酸度性质和养分作用有关, 就本研究而言, 土壤酸度性质的影响最大。研究结果表明, 翻压绿肥、秸秆还田可有效缓解稻田土壤的酸化并提高水稻产量, 增施石灰可增强其效果, 交换性酸、交换性 H⁺、酸碱缓冲容量、交换性 Na⁺、交换性 Mg²⁺、交换性盐基离子总量是影响土壤 pH 的主要因素。

关键词: 绿肥; 石灰; 秸秆; 水稻; 长期定位微区试验; 土壤酸度特征

中图分类号: S156 **文献标志码:** A

^{*} 国家自然科学基金金项目 (U19A2046)、国家重点研发计划项目 (2021YFD1700200)、现代农业产业技术体系建设专项资金项目 (CARS-22-G-11) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U19A2046), the National Key R&D Program of China (No. 2021YFD1700200) and the Special Fund Project for the Construction of Modern Agricultural Industrial Technology System (No. CARS-22-G-11)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: niejun197@163.com; tnm505@163.com

作者简介: 刘芳禧 (2000—), 女, 湖南娄底人, 硕士研究生, 主要从事土壤酸化改良及绿肥生产研究。E-mail: lfx@stu.hunau.edu.cn

收稿日期: 2023-04-04; 收到修改稿日期: 2023-07-08; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-09-21

Effects of Green Manure, Rice Straw Return and Lime Combination on Soil Acidity and Rice Yield

LIU Fangxi^{1,2}, FANG Changyu^{1,2}, YU Zhenyu^{1,2}, GAO Yajie^{2,3}, ZHANG Jianglin^{2,3}, LU Yanhong^{2,3}, LIAO Yulin^{2,3}, CAO Weidong⁴, NIE Jun^{2,3†}, TU Naimei^{1†}

(1. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China; 3. Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation(Hunan), Ministry of Agriculture, Changsha 410125, China; 4. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: 【Objective】 Long-term tillage and fertilization accelerate soil acidification of red loam rice. Thus, this study was designed to study the effects of green manure, straw return, and lime combination on the soil acidity characteristics of rice soil and rice yield. 【Method】 This study is based on the long-term positioning micro-area experiment started in 2016 to explore the effects of no fertilization (CK), chemical fertilizer (F), chemical fertilizer + milk vetch + rice straw return (GRF), chemical fertilizer + milk vetch + straw return (GRFL) treatment on rice yield and different forms of acid in red soil. The effects of soil salt-based ions and soil acid-base buffer capacity was resolved, and the correlation between soil acid-base buffer capacity, exchangeable acid, organic matter, and exchangeable salt-based ions was investigated. 【Result】 The results for seven consecutive years showed that compared with F treatment, the yield of early and late rice treated by GRF increased by 19.9% and 5.1%, respectively, and the average yield increase rate in 7 years was 12.8% and 5.9%, respectively. The yield of early and late rice treated by GRFL increased by 23.4% and 14.2%, respectively, and the average yield increase rate in 7 years was 11.1% and 8.9%, respectively. During this time, the soil pH of early and late rice treated with CK, F and GRF showed a decreasing trend year by year, while the soil pH value of GRFL treatment showed a trend of first increasing and then decreasing. Compared with F treatment, GRF and GRFL treatment significantly improved the exchangeable K, the total amount of exchangeable salt-based ions and the acid-base buffer capacity of early and late rice soil, and there was no significant difference between GRF and GRFL treatments, but all indexes of GRFL treatment showed an improvement trend. Correlation analysis showed that pH was negatively correlated with exchangeable acidity and exchangeable H^+ ($P < 0.01$) and positively correlated with acid-base buffer capacity, exchangeable Na^+ , exchangeable Mg^{2+} , and the total amount of exchangeable salt group ions ($P < 0.01$). Also, the soil acid-base buffer capacity was mainly related to the exchangeable acidity, exchangeable H^+ , exchangeable Na^+ and exchangeable Mg^{2+} . In addition, rice yield was related to soil acidity properties and nutrient effects, and the soil acidity properties had the greatest impact. 【Conclusion】 The results showed that rolling green manure and straw returning to the field could effectively alleviate the acidification of paddy soil and improve rice yield, and the addition of lime could enhance its effect, and the exchangeable acidity, exchangeable H^+ , acid-base buffer capacity, exchangeable Na^+ , exchangeable Mg^{2+} , and total exchangeable salt-based ions were the main factors affecting soil pH.

Key words: Green manure; Lime; Straw; Rice; Long-term positioning micro-area experiment; Soil acidity characteristics

土壤酸化是一个缓慢的自然过程，随着城市化和工业化进程的不断推进，土壤酸化进程加剧。在农田生态系统中，化学氮肥的不合理施用是导致农田土壤酸化的重要诱因。由农田土壤酸化引发的土壤质量下降、重金属毒害等问题使作物产量和品质降低^[1]，严重威胁农业生产的可持续性。目前，农田土壤酸化问题已经成为环境和土壤研究领域共同关注的热点之一。红壤性水稻土是我国重要的耕作

土壤资源，在我国中南地区广泛分布，该地区农业复种指数高、土壤干湿交替频繁、施肥量大，而长期耕作和施肥加速红壤性水稻土酸化，土壤酸化问题日益突出^[2]，已成为限制水稻产量的重要因素^[3]。因此，防止土壤酸化是保障粮食安全和土壤资源可持续利用的必要措施。

稻田冬季种植绿肥并在绿肥盛花期翻压还田是我国南方稻田绿肥生产利用的典型模式，已有大量

研究表明种植翻压绿肥能够促进主作物生长、改善土壤性状^[4-5]。绿肥还田可提高土壤有机质含量和酸碱缓冲能力,有利于阻控土壤酸化^[6]。此外,亦有研究表明^[7],稻草秸秆还田可通过有机阴离子的脱羧基化作用短期内提高酸性水稻土的土壤 pH,同时可补充土壤盐基离子,提高阳离子交换量,从而有利于缓解土壤酸化,提高水稻产量。刘琼峰等^[8]研究认为施用生石灰粉类改良剂对于酸性水稻土改良也具有较好的应用效果,但朱经伟等^[9]发现以单一石灰等改良剂为主的酸性土壤改良技术,较难保证改良效果的稳定持续性,长期施用还会引起土壤泛酸化,而多物料组合,如施用石灰并结合种植绿肥能表现出良好的互补性,具有改良酸性土壤的效果^[10]。廖萍^[11]研究表明秸秆还田配施石灰能够协同实现双季稻增产、土壤肥力提升与酸化改良。此外,在酸性土壤中进行绿肥翻压和秸秆还田时,配施适量石灰,还能中和有机物料分解过程产生的有机酸,促进绿肥和秸秆的腐解^[12]。邓小华等^[10]研究表明石灰、绿肥、生物有机肥三者配合施用可修复酸性土壤,进而实现烟草的提质增效。因此,前作种植绿肥的基础上增施土壤调理剂和配方肥等,是一种良好的集成调酸控酸、培肥改良土壤的综合治理模式^[7]。

目前国内外关于石灰改良酸性土壤的研究已较多,但关于绿肥、秸秆还田和石灰联合施用缓解水稻土酸化的效果及机制鲜有报道。本研究依托多年定位微区试验,综合比较紫云英绿肥、秸秆还田和石灰联合施用对双季稻产量、土壤交换性酸、交换性盐基离子和土壤酸碱缓冲能力的影响,进一步分析土壤酸碱缓冲容量、土壤酸度特征与水稻产量的关系,探究绿肥、秸秆还田和石灰联合利用缓解红壤性水稻土酸化的效果和机制,为南方稻田红壤酸化的可持续性改良和治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究基于 2016 年于湖南省土壤肥料研究所网室(28°11'51N, 113°05'4E)开始的微区定位试验开展。每个试验池(面积为 1.34 m×1.69 m=2.25 m²)为一个小区,试验池四面用水泥严格密封。试验土

壤为第四纪红色黏土发育的红黄泥。试验开展前土壤的初始性质^[13]为: pH 6.30, 全氮 1.90 g·kg⁻¹, 速效钾 111.00 mg·kg⁻¹, 有效磷 31.3 mg·kg⁻¹, 有机质 31.50 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

本试验共设置 4 个处理, 3 次重复, 随机区组排列: (1) 不施肥 (CK); (2) 化肥 (F); (3) 化肥+紫云英+稻草 (GRF); (4) 化肥+紫云英+稻草+石灰 (GRFL)。每季紫云英翻压前施用石灰 900 kg·hm⁻²; 除 CK 外的所有处理均施化肥, 各处理 N、P 和 K 肥分别用尿素、钙镁磷肥和氯化钾。早、晚稻的氮肥 (N) 用量分别为 150 kg·hm⁻² 和 180 kg·hm⁻²; 磷肥 (P₂O₅) 用量分别为 45 kg·hm⁻² 和 75 kg·hm⁻²; 钾肥 (K₂O) 用量分别为 90 kg·hm⁻² 和 120 kg·hm⁻²。氮肥分两次施用于移栽前 (70%) 和分蘖盛期 (30%); 磷全部做基肥施用; 钾肥分两次施用于移栽前 (50%) 和分蘖盛期 (50%)。基肥于插秧前一天施入, 并立即用铁齿耙耙入表土下 5 cm 深度。试验采用紫云英—早稻—晚稻种植制度, 早稻供试品种为湘早籼 32 号, 晚稻为深优 9586; 供试紫云英品种为湘紫 1 号。紫云英于每年 10 月中旬播种, 播种量为 37.5 kg·hm⁻², 紫云英在水稻移栽前 15 d 内翻压还田, 早晚稻收获后, 稻草还田量取三个重复的均值, 均匀抛撒。其他管理措施与当地管理保持一致。

1.3 样品采集与分析

每年 (2016—2022 年) 早、晚稻收获时, 按小区单收单晒稻谷, 分别称重测产。每年早、晚稻收获后, 取耕层 (0~20 cm) 土样, 按照五点取样法在每小区随机取五钻混合为 1 个复合土样, 混匀, 并去除石块和根茬等杂物, 置于干燥通风处自然风干后研磨过 20 和 100 目筛备用。

土壤测定指标包括土壤 pH (电位法, 水土比 5:1)、土壤交换性酸、交换性 H⁺ 和交换性 Al³⁺ (KCl 交换-中和和滴定法) 等。火焰分光光度法测定土壤交换性 K⁺、Na⁺, ICP-MS (电感耦合等离子体质谱仪) 测定土壤交换性 Ca²⁺、Mg²⁺ 含量, 交换性盐基离子为 K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺ 之和。土壤有机质 (SOM, 重铬酸钾氧化法)、全氮 (TN, 凯氏定氮法)、全磷 (TP, NaOH 熔融-钼蓝比色法)、全钾 (TK, NaOH 熔融-火焰光度计法)、有效磷 (AP, NaHCO₃ 浸提-

钼锑抗比色法)、速效钾(AK, NH_4OAC 浸提-火焰光度计法)的具体分析方法及操作步骤参考《土壤农业化学分析方法》^[14]和《土壤农化分析》^[15]。

土壤酸碱缓冲容量的测定原理为通过向土壤中加入不同量的外源酸和碱并测定平衡后土壤悬液的pH, 计算得到单位pH变化土壤所需酸/碱的量^[16]。

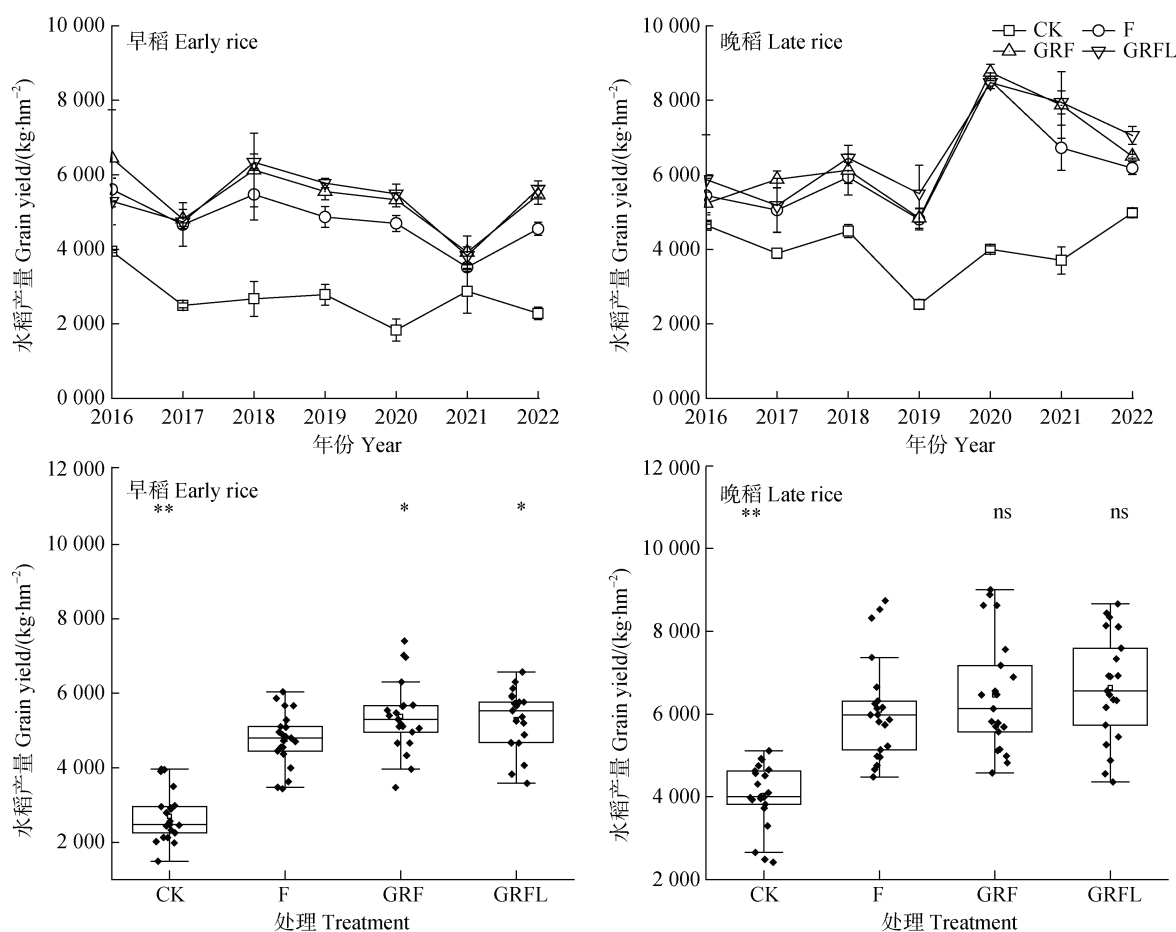
1.4 数据统计与分析

利用 Microsoft Excel 2010 和 Origin 2023 进行试验基础数据处理和作图, 用 SPSS 26.0 对试验数据进行方差分析和显著性检验, 处理间差异采用邓肯(Duncan)多重比较方法, 显著性水平为 0.05。

2 结 果

2.1 不同施肥处理对水稻产量的影响

由图 1 可知, 在早稻季, 随着年份的延长, 所有处理产量均呈现逐渐降低的趋势, GRFL 处理的水稻产量一直保持最高水平, 并表现为: $\text{GRFL} > \text{GRF} > \text{F} > \text{CK}$ 。在晚稻季, 与 F 处理相比, 2021 年、2022 年 GRF 和 GRFL 处理显著提高了产量 ($P < 0.05$)。2022 年 F、GRF 和 GRFL 处理的产量与 2016 年相比, 分别提高 13.5%、24.1%和 20.2%。与 F 处理相比, GRF 处理早、晚稻产量分别提高了



注: CK: 不施肥; F: 化肥; GRF: 化肥+紫云英+稻草; GRFL: 化肥+紫云英+稻草+石灰, *表示各处理与 F 处理间差异有统计学意义 ($P < 0.05$), **表示各处理与 F 处理间差异有统计学意义 ($P < 0.01$), ns 表示各处理与 F 处理间差异无统计学意义。下同。
Notes: CK: No fertilizer treatment; F: chemical fertilizer application with no amendment addition; GRF: chemical fertilizer + milk vetch + rice straw return; GRFL: chemical fertilizer + milk vetch + straw return. * means the significant differences ($P < 0.05$) of each treatment, ** means the significant differences ($P < 0.01$) of each treatment, when compared to F-treated; ns, not significantly different with F-treated. The same below.

图 1 不同施肥处理下 2016—2022 年早、晚稻产量及 7 年平均产量

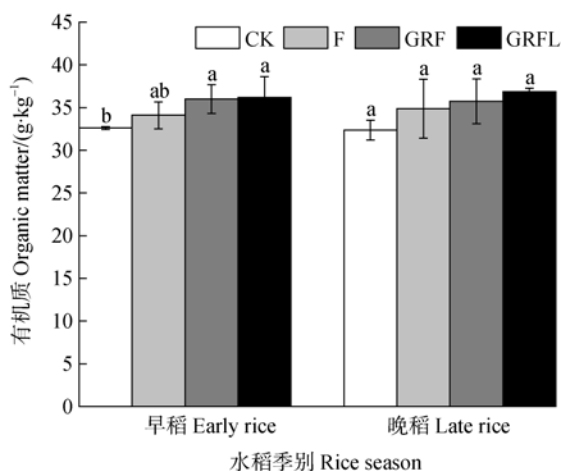
Fig. 1 Grain yield and 7-year average yields of early and late rice under different fertilization treatments from 2016 to 2022

19.9%和5.1%,GRFL处理早、晚稻产量提高了23.4%和14.2%。

CK、F、GRF和GRFL处理的历年早稻平均产量为2 697、4 769、5 380和5 297 kg·hm⁻²,历年晚稻平均产量为4 034、6 097、6 457和6 641 kg·hm⁻²。总体而言,2016—2022年连续7年GRF和GRFL处理的早、晚稻平均产量均高于F处理,早稻达显著性水平($P<0.05$),GRF的早、晚稻平均增产率分别为19.9%和5.1%,GRFL处理的早、晚稻平均增产率分别为11.1%和8.9%。试验结果表明化肥+绿肥+稻草是维持红壤性稻田持续高产的有效途径,增施石灰可进一步增强其效果。

2.2 不同施肥处理对土壤有机质的影响

在早稻季,与CK处理相比(图2),F、GRF和GRFL处理均不同程度地提高了土壤有机质含量,其中GRF和GRFL处理达到显著水平($P<0.05$)。在晚稻季,与CK处理相比,F、GRF和GRFL处理的土壤有机质含量有提高的趋势,但差异均未达显著水平($P>0.05$)。三个处理下早、晚稻土壤有机质含量均呈现出GRFL>GRF>F>CK的趋势。上述结果表明,化肥(F)、化肥+绿肥+稻草(GRF)、化肥+绿肥+稻草+石灰(GRFL)处理均有利于提高双季稻田土壤有机质含量,化肥+绿肥+稻草+石灰(GRFL)处理的提升效果最为明显。



注:图中字母不同表示相同稻季不同处理间数据差异显著($P<0.05$)。Note: Different letters in this figure indicate significant differences among different treatments of the same rice season at $P<0.05$.

图2 不同施肥处理下2022年土壤有机质含量

Fig. 2 Soil organic matter under different fertilization treatments in 2022

2.3 不同施肥处理对土壤pH的影响

整体上,随着试验年限的增加,不同处理pH所呈现的变化趋势基本一致(图3),早、晚稻土壤pH除GRFL处理,均呈逐年下降的变化趋势,表明土壤发生了进一步酸化,仅施化肥(F)处理早稻土壤pH的7年酸化速率为每年0.09个pH单位、晚稻土壤pH的酸化速率为每年0.14个pH单位,而GRFL处理呈先上升后下降的变化趋势,下降幅度最小,且一直处于较高水平。与仅施化肥(F)相比,GRF处理早、晚稻土壤pH分别增加0.23和0.14个单位,GRFL处理早、晚稻土壤pH分别增加0.64和0.63个单位。表明化肥+绿肥+稻草+石灰(GRFL)处理有效提高了土壤pH。

2.4 不同施肥处理对土壤交换性酸、交换性H⁺、交换性Al³⁺含量的影响

土壤交换性酸由交换性H⁺和交换性Al³⁺含量的总和表示。由表1可知,相比CK对照,F、GRF和GRFL处理均不同程度地降低了2022年早、晚稻收获期土壤的交换性H⁺、交换性Al³⁺含量及交换性酸含量,各指标均表现出GRFL<GRF<F<CK的趋势。与CK相比,GRFL处理显著降低了早稻成熟期土壤交换性Al³⁺含量、交换性H⁺和交换性酸含量;与F相比,GRF处理的早、晚稻土壤交换性H⁺、交换性Al³⁺含量及交换性酸含量无显著变化。

2.5 不同施肥处理对交换性盐基离子的影响

土壤交换性盐基总量由交换性K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺构成。与CK相比,各处理均提高了土壤交换性K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺及交换性盐基总量(表2)。在早稻收获期土壤中,相比单施化肥(F处理),GRF和GRFL处理显著提高了交换性K⁺含量,而土壤交换性Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺及交换性盐基总量有增加的趋势,但差异未达显著水平。在晚稻收获期,相比F处理,GRFL处理显著提高了土壤交换性K⁺、Ca²⁺含量,交换性盐基总量显著($P<0.05$)增加30.4%。相比F处理,GRF处理显著增加了晚稻收获期土壤交换性K⁺含量,土壤交换性盐基总量有增加的趋势,但差异未达到显著水平。表明化肥+化肥+绿肥+稻草、化肥+绿肥+稻草+石灰联合利用能不同程度地提高土壤交换性钾、钙、钠、镁离子和交换性盐基总量,化肥+绿肥+稻草+石灰联合利用的效果优于化肥+绿肥+稻草还田。

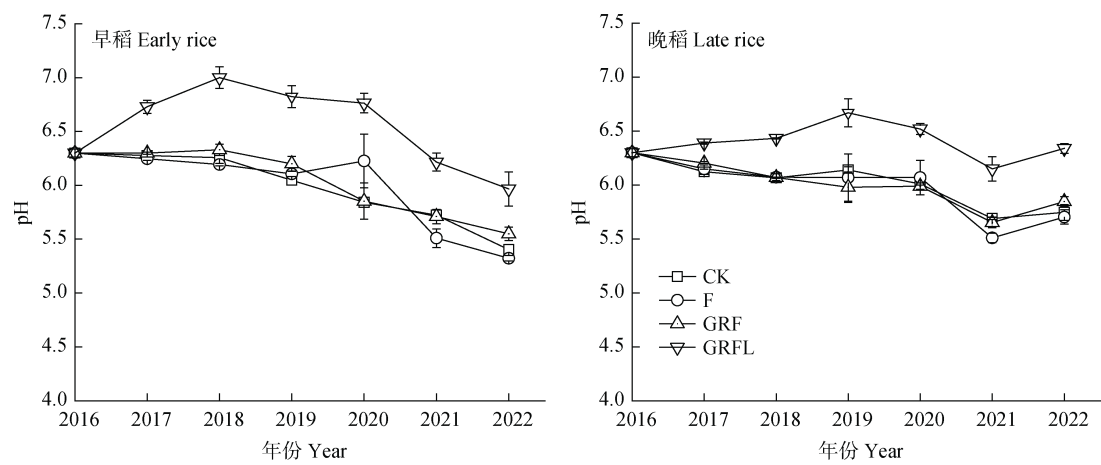


图 3 不同施肥处理下 2016—2022 年土壤 pH 变化趋势
Fig. 3 Trends in soil pH from 2016 to 2022 under different fertilization treatments

表 1 不同施肥处理下 2022 年交换性 H^+ 、 Al^{3+} 含量及交换性酸

Table 1 Exchangeable H^+ and Al^{3+} concentration and exchangeable acid under different fertilization treatments in 2022/ (cmol·kg ⁻¹)						
处理 Treatment	早稻 Early rice			晚稻 Late rice		
	交换性 H^+	交换性 Al^{3+}	交换性酸	交换性 H^+	交换性 Al^{3+}	交换性酸
	Exchangeable H^+	Exchangeable Al^{3+}	Exchangeable acidity	Exchangeable H^+	Exchangeable Al^{3+}	Exchangeable acidity
CK	0.30±0.03a	0.04±0.01a	0.34±0.02a	0.38±0.08a	0.14±0.05a	0.52±0.11a
F	0.29±0.03a	0.02±0b	0.32±0.03a	0.30±0.02ab	0.09±0.06a	0.43±0.06ab
GRF	0.29±0.02a	0.03±0.02ab	0.32±0.03a	0.28±0.04b	0.11±0.05a	0.39±0.08ab
GRFL	0.28±0.02a	0.02±0b	0.31±0.01a	0.27±0b	0.06±0.01a	0.33±0.02b

注：同一列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 的显著水平。下同。Note: Different letters in the same column indicate a significant difference between treatments at 0.05 level. The same as below.

表 2 不同施肥处理下 2022 年土壤交换性钾、钙、钠、镁离子和交换性盐基总量

Table 2 Soil exchangeable cations and total base-exchangeable ions under different fertilization treatments in 2022/ (cmol·kg ⁻¹)						
季别 Rice season	处理 Treatment	交换性钾 Exchangeable K ⁺	交换性钙 Exchangeable Ca ²⁺	交换性钠 Exchangeable Na ⁺	交换性镁 Exchangeable Mg ²⁺	交换性盐基总量 Total base-exchangeable ion
早稻 Early rice	CK	0.22±0.00b	2.07±0.19b	0.07±0.00a	0.52±0.2a	2.88±0.05b
	F	0.20±0.04b	4.22±0.96a	0.07±0.01a	0.77±0.24a	5.26±1.22a
	GRF	0.42±0.09a	2.97±0.26ab	0.06±0.00a	0.80±0.18a	4.25±0.35ab
	GRFL	0.40±0.08a	4.27±0.82a	0.06±0.01a	0.87±0.17a	5.60±0.99a
晚稻 Late rice	CK	0.15±0.01b	2.33±0.22b	0.19±0.01b	1.63±0.14a	4.73±0.09b
	F	0.20±0.04b	3.00±0.68b	0.25±0.01a	1.69±0.12a	5.16±0.68b
	GRF	0.33±0.03a	3.37±0.95ab	0.25±0.02a	1.76±0.11a	5.72±0.93ab
	GRFL	0.37±0.05a	4.31±0.39a	0.26±0.02a	1.80±0.14a	6.73±0.57a

2.6 不同施肥处理对酸碱缓冲容量的影响

2.6.1 不同施肥处理下的酸碱缓冲容量 土壤酸碱缓冲容量指单位土壤改变一个单位 pH 所需要的酸碱量,是决定土壤酸化速率的关键因素,酸碱缓冲容量越高,土壤抗酸化能力越强,能够有效减缓土壤酸化过程^[17]。图 4 为早、晚稻土壤酸碱滴定曲线,各处理整体均为倒“S”型曲线。由表 3 可知,土壤 pH 变化与外源添加量呈正相关,相关系

数为 0.92~0.99。早、晚稻收获期土壤酸碱缓冲容量均表现为:GRFL>GRF>F>CK。相比单施化肥(F)处理,GRF 处理早、晚稻收获期土壤酸碱缓冲容量分别增加 7.9%和 6.8%,GRFL 处理早、晚稻收获期土壤酸碱缓冲容量分别增加 15.8%和 26%。表明化肥+绿肥+稻草联合利用提高了土壤酸碱缓冲能力,在化肥+绿肥+稻草还田的基础上增施石灰可增强其效果。

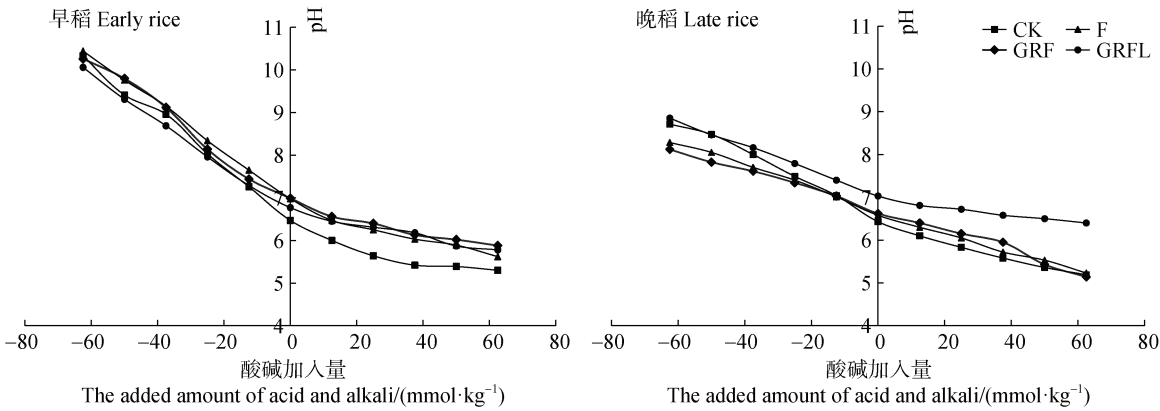


图 4 不同施肥处理下 2022 年土壤酸碱滴定曲线
Fig. 4 Soil acid buffer curve under different fertilization treatments in 2022

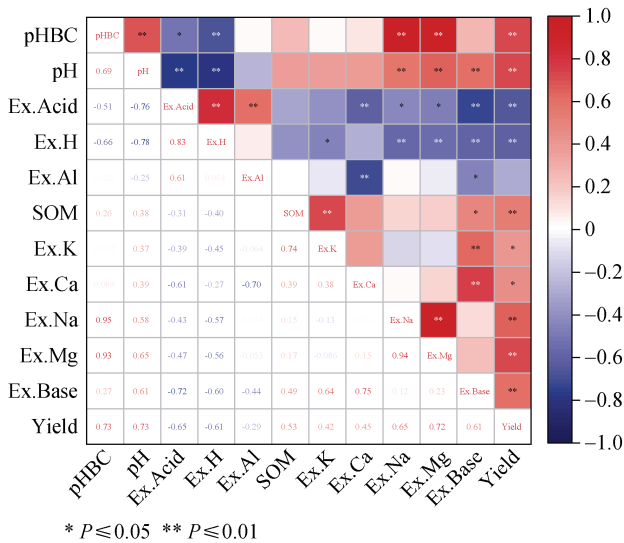
表 3 不同施肥处理下 2022 年土壤酸碱缓冲容量变化

Table 3 Soil acid buffering capacities under different fertilization treatments in 2022					
季别	处理	拟合方程			土壤酸碱缓冲容量
Rice season	Treatment	Fitting equation (y=ax+b)			Soil acid buffering capacities/
		a	b	R ²	(mmol·kg ⁻¹ ·pH ⁻¹)
早稻	CK	0.041	7.110	0.928	24.27
Early rice	F	0.040	7.507	0.944	25.32
	GRF	0.037	7.522	0.922	27.32
	GRFL	0.034	7.334	0.923	29.33
晚稻	CK	0.030	6.746	0.975	33.11
Late rice	F	0.025	6.714	0.995	39.68
	GRF	0.024	6.692	0.995	42.37
	GRFL	0.020	7.336	0.941	50.00

2.6.2 酸碱缓冲容量对产量、土壤酸度、养分含量和交换性能的影响 结合土壤酸度、养分含量和交换性能等进行相关分析(图 5)表明,酸碱缓冲容量与 pH、交换性 H^+ 、交换性 Na^+ 和交换性 Mg^{2+} 呈极显著正相关($P<0.01$); pH 与酸碱缓冲容量、交换性酸和交换性 H^+ 呈极显著负相关($P<0.01$),

与交换性 Na^+ 、交换性 Mg^{2+} 、交换性盐基离子总量呈极显著正相关($P<0.01$); 交换性酸与交换性 H^+ 和交换性 Al^{3+} 呈极显著正相关($P<0.01$), 与 pH、交换性 Ca^{2+} 和交换性盐基离子总量呈极显著负相关($P<0.01$), 与酸碱缓冲容量、交换性 Na^+ 、交换性 Mg^{2+} 呈显著负相关($P<0.05$); 有机质与交换性 K^+

呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与交换性盐基离子总量呈显著正相关 ($P<0.05$)。



注：pHBC—酸碱缓冲能力；pH—土壤 pH；Ex.Acid—交换性酸；Ex.H：交换性氢；Ex.Al：交换性铝；SOM：土壤有机质；Ex.K—交换性钾；Ex.Ca 交换性钙；Ex.Na—交换性钠；Ex.Mg—交换性镁；Ex.Base—交换性盐基离子总量；Yield：产量。Note：pHBC-Acid buffer curves；pH-Soil pH；Ex.Acid-Exchangeable acidity；Ex.H-Exchangeable H⁺；Ex.Al³⁺-Exchangeable Al³⁺；SOM：Soil organic matter；Ex.K-Exchangeable K⁺；Ex.Ca - Exchangeable Ca²⁺；Ex. Na-Exchangeable Na⁺；Exchangeable Mg²⁺；Ex.Base-Exchangeable base cations；Yield：Yield. * $P<0.05$ ；** $P<0.01$ 。

图 5 酸度指标与各影响因素的相关系数

Fig. 5 Correlation between acidity index and various influencing factors

3 讨论

3.1 不同施肥处理对水稻产量、土壤有机质的影响

随着土壤酸化问题日益严重，人们越来越关注土壤酸化对水稻生长的影响。本研究结果表明，酸性红壤连续 7 年种植翻压绿肥联合秸秆还田，或在此基础上增施石灰，相比单施化肥可显著提高双季稻产量（图 1），这与以往相关研究结果^[18-19]吻合，紫云英和稻草均为水田最直接的有机肥源，可更新和提高土壤有机质，改善土壤养分状况，对提高产量均有积极作用，此外，有研究表明，紫云英绿肥在水稻收获后，在土壤中的氮残留率为 29.4%~33.2%，显著高于化肥氮的残留率（14.1%）。这表明绿肥在养分供应方面具有较强的后效性，因此

可将紫云英还田作为增加晚稻产量的重要策略之一^[20]。同时，土壤物理和生物学性质产生显著变化也是有机质和产量提高的重要原因，在此基础上增施石灰，可改良土壤理化性质，通过降低土壤的容重，增加土壤孔隙，提升土壤的团聚性，可改善土壤的结构。此外，这种方法还可增加真菌的多样性和土壤有机碳的含量，提高土壤的生物活性和养分循环能力，从而改善作物的生长环境，并达到增产提质的目标；同时，通过降低土壤酸度，可有效减轻铝和其他重金属的毒害作用，同时补充钙和镁等养分，从而改善根系的生长环境。这种改善有助于促进根系的生长和营养吸收，进而提升植株的养分状况和整体生长状态，最终提高水稻的产量^[21-23]。亦有研究表明石灰和油菜秸秆还田均显著促进了早稻高产的形成，且二者具有显著的互作效应^[24]。本研究还发现，化肥+绿肥+秸秆+石灰联合施用可进一步增加晚稻产量（图 1）。这可能与土壤 pH、土壤交换性盐基离子总量进一步增加有关^[25-26]。

土壤有机质作为一种复杂的高分子芳香多聚化合物，含有大量的羧基、醇羟基、酚羟基等官能团，一方面增加了土壤负电荷点位，即阳离子交换量，另一方面对阳离子具有强吸附作用，增强了土壤对酸的缓冲能力^[27]。本研究表明化肥+绿肥+秸秆还田+石灰联合利用可显著提高土壤有机质含量（图 2），这与罗玲等^[28]、王娇等^[29]得出的结论一致。

3.2 不同施肥处理对水稻土壤酸度特征的影响

本研究发现长期施肥加快了红壤性水稻土酸化，而化肥+绿肥+秸秆还田联合利用能提高土壤 pH，增施石灰能进一步提高土壤 pH（图 3）。绿肥还田可显著提高土壤 pH，主要是由于绿肥的羧基和酚羟基的有机酸可缓冲土壤酸度并导致酸性土壤 pH 升高^[30]。但也有研究表明^[31]，施用绿肥造成土壤 pH 下降，导致土壤酸化的可能原因包括尿素水解和硝化过程中产生的硝酸根离子，以及绿肥腐解过程中产生的有机酸。造成这种差异的原因可能是绿肥植物种类或者是翻埋时间的不同。有研究表明秸秆或紫云英还田结合施用石灰有利于土壤酸化的改善^[32]，石灰类物质是改良酸性土壤常用的有效方法，它通过石灰自身的碱性中和表层土壤中的活性酸和潜性酸，提高土壤 pH，并生成氢氧化物沉淀，迅速有效地降低酸性土壤的酸度，同时，石灰类物

质与绿肥和秸秆配施可中和有机物料分解过程产生的有机酸,促进绿肥和秸秆的腐解过程^[33-34]。但石灰易复酸,长期施石灰可能会导致土壤 pH 先上升后下降^[23],这与本研究结果(图3)基本一致。

本研究结果显示化肥+绿肥+秸秆还田和化肥+绿肥+秸秆还田+石灰均可降低早、晚稻土壤交换性酸、交换性 H^+ 、交换性 Al^{3+} 和土壤酸碱缓冲容量(表1,表3)。绿肥和秸秆等有机物料投入土壤后,有机物与土壤间的质子交换作用、有机物的氨化、去羧基作用以及矿化过程中大量的盐基阳离子被释放出来,与土壤胶体表面吸附的 H^+ 、 Al^{3+} 等致酸阳离子发生交换反应,在增加土壤 pH、降低交换性酸含量的同时提高盐基饱和度和土壤酸碱缓冲能力^[35]。

单施有机肥、秸秆还田或单施石灰均可显著增加土壤阳离子交换量和交换性盐基离子总量^[26,35]。本研究结果表明绿肥+秸秆还田和绿肥+秸秆还田+石灰均可提高土壤交换性盐基离子,但两种联合方式的交换性盐基离子均无显著性差异(表2),无差异的原因一方面可能是施用钙镁磷肥和氯化钾给土壤带入了大量的钙元素和钾元素,从而显著提高了交换性 Ca^{2+} 和 K^+ 的含量,这导致不同有机物料配施石灰处理之间对土壤交换性 Ca^{2+} 和 K^+ 的调节作用差异减弱,另一方面秸秆中含有丰富的有机物质,当将秸秆添加至土壤中进行腐解时,会产生一定量的盐基离子。其中, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 以氧化物或碳酸盐的形式存在于土壤中。这些离子的存在促使土壤胶体形成更多的交换点位,从而促进非交换性 K^+ 向交换态 K^+ 的平衡转移,增加土壤中交换性 K^+ 的含量,而在有机物料和石灰的作用下,土壤中的交换性 Na^+ 受到较小的影响。这可能是因为钠元素本身的交换能力较弱所致^[36]。

3.3 酸碱缓冲容量对产量、土壤酸度、养分含量和交换性能的影响

相关分析表明,土壤酸碱缓冲容量主要与交换性酸、交换性 H^+ 、交换性 Na^+ 和交换性 Mg^{2+} 有关(图5),由此可知,绿肥、秸秆和石灰联用主要通过降低交换性酸和交换性 H^+ 、提高交换性 Na^+ 和交换性 Mg^{2+} 来减缓土壤酸化。酸碱缓冲容量、交换性酸、有机质及交换性能之间密切相关,通过提高有机质及交换性能,降低交换性酸含量从而提高酸碱缓冲容量,进而达到改良土壤酸化的目的^[37]。

相关研究表明,酸性土壤上施用生石灰有利于提高土壤钙、镁含量和氮的有效性^[38]。冬种紫云英可显著提高土壤全氮、有机质含量,同时,也可增加全磷、碱解氮和有效磷的含量,其原因是土壤碳氮具有耦合关系,伴随土壤有机质增加,土壤全氮和有效氮相应增加^[20,39]。土壤有机质中的腐殖质具有较强的吸附性和阳离子交换性能,可增强土壤缓冲性能^[40],而土壤缓冲性能和 pH 是影响土壤养分有效性的重要因素之一,对有机物质的分解和养分的释放有促进作用^[3]。此外,有研究^[16]表明,土壤酸碱缓冲容量与有效磷、阳离子交换量、有机质、碱解氮、全氮和全磷均呈极显著正相关。以上结果表明酸度特征与土壤养分含量之间相互促进,相互影响。本研究涉及的土壤养分为有机质与钾、钙、钠、镁等阳离子,相关性分析结果表明,土壤酸度性质及养分对水稻产量的影响大小排序为:酸碱缓冲容量=pH>交换性 Mg^{2+} >交换性酸=交换性 Na^+ >交换性盐基离子=交换性 H^+ >有机质>交换性 Ca^{2+} >交换性 K^+ >交换性 Al^{3+} ,以酸碱缓冲容量和 pH 最大,其次是交换性 Mg^{2+} 、交换性酸和交换性 Na^+ (图5),由此可见,土壤酸度性质和养分作用均可促进水稻产量的提升,就本文所测养分含量而言,土壤酸度性质的影响更大。

4 结 论

在本试验条件下,单施化肥加快了红壤性水稻土酸化,化肥+绿肥+秸秆还田和化肥+绿肥+秸秆还田+石灰联合利用均能提高水稻产量、土壤 pH、有机质、交换性能和酸碱缓冲容量,同时降低交换性酸含量,绿肥+秸秆还田+石灰对产量和土壤各项性质的影响均大于化肥+绿肥+秸秆还田。交换性酸、交换性 H^+ 、酸碱缓冲容量、交换性 Na^+ 、交换性 Mg^{2+} 、交换性盐基离子是影响土壤 pH 的主要因素。因此,相比于单施化肥,化肥+绿肥+秸秆还田和化肥+绿肥+秸秆还田+石灰联合利用既能提高产量、缓解土壤酸化,又能增加土壤养分有效性,以绿肥+秸秆还田+石灰联合利用效果最好。

参考文献 (References)

- [1] Wang W J, Yang Z J, Xu H Q. Overview of soil acidification research in China[J]. Journal of Anhui

- Agricultural Sciences, 2015, 43 (8): 54—56. [王文娟, 杨知建, 徐华勤. 我国土壤酸化研究概述[J]. 安徽农业科学, 2015, 43 (8): 54—56.]
- [2] Wang Z G, Zhao Y C, Liao Q L, et al. Spatio-temporal variation and associated affecting factors of soil pH in the past 20 years of Jiangsu Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (2): 720—727. [王志刚, 赵永存, 廖启林, 等. 近 20 年来江苏省土壤 pH 值时空变化及其驱动力[J]. 生态学报, 2008, 28 (2): 720—727.]
- [3] Wu D J, Yao D H, Wei Z Q, et al. A study on the effect of chemical fertilizer combined with soil conditioner on acidified red paddy soil[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2020, 42 (6): 1277—1284. [吴多基, 姚冬辉, 魏宗强, 等. 化肥配施土壤调理剂对酸化红壤性水稻土改良效果研究[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42 (6): 1277—1284.]
- [4] Wang H, Han S, Tang S, et al. Continuous multi-year application of Chinese milk vetch in paddy soil and its effect on soil aggregates distribution and their carbon and nitrogen content[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 (3): 868—880. [王慧, 韩上, 唐杉, 等. 紫云英翻压还田对稻田土壤团聚体组成及其碳氮的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60 (3): 868—880.]
- [5] Huang Z C, Yu Q G, Ye J, et al. Effects of long-term application of organic materials on soil nutrients in paddy fields[J]. Soils, 2023, 55 (2): 272—279. [黄郑宸, 俞巧钢, 叶静, 等. 有机物料长期施用对稻田土壤养分的影响[J]. 土壤, 2023, 55 (2): 272—279.]
- [6] Song C, Chun M X, Jin X Y, et al. The influence of the type of crop residue on soil organic carbon fractions: An 11-year field study of rice-based cropping systems in southeast China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 223: 261—269.
- [7] Ji W Y, Shan Y J. Discussion on cultivation mode of cultivated land fertility based on green manure planting[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2020, 61 (7): 1465—1467. [季卫英, 单英杰. 基于绿肥种植的耕地地力培育模式探讨[J]. 浙江农业科学, 2020, 61 (7): 1465—1467.]
- [8] Liu Q F, Jiang P, Li Z M, et al. Amelioration effects of liming on acid soil in main rice producing areas in Hunan[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2014(7): 29—32. [刘琼峰, 蒋平, 李志明, 等. 湖南省水稻主产区酸性土壤施用石灰的改良效果[J]. 湖南农业科学, 2014(7): 29—32.]
- [9] Zhu J W, Zhang Y G, Liu Q L, et al. Effects of application of lime and potassium humate on flue-cured tobacco yield and quality on newly recovered lands[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29 (2): 346—351. [朱经纬, 张云贵, 刘青丽, 等. 石灰与腐植酸钾配施对新平整土地烤烟产量和品质的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29 (2): 346—351.]
- [10] Deng X H, Huang J, Yang L L, et al. The synergistic effect of lime, green manure and bio-organic fertilizer on restoration of acid field and improvement of tobacco production efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25 (9): 1577—1587. [邓小华, 黄杰, 杨丽丽, 等. 石灰、绿肥和生物有机肥协同改良酸性土壤并提高烟草生产效益[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (9): 1577—1587.]
- [11] Liao P. Interaction effects of lime and straw returning on the yield of double cropping rice and soil properties [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2017. [廖萍. 石灰和稻草还田对双季水稻产量和土壤性状的互作效应[D]. 南昌: 江西农业大学, 2017.]
- [12] Zhang C L, Liu C Z, Li B Y, et al. The characteristics of decomposition and nutrient release of *Vicia villosa* under different fertilization treatments[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30 (7): 2275—2283. [张成兰, 刘春增, 李本银, 等. 不同施肥条件下毛叶苕子的腐解及养分释放特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30 (7): 2275—2283.]
- [13] Wang Y, Liang H, Li S, et al. Co-utilizing milk vetch, rice straw, and lime reduces the Cd accumulation of rice grain in two paddy soils in South China[J]. Science of the Total Environment 2022, 806: 150622.
- [14] Lu R K. Analytical methods for soil and agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.]
- [15] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [16] Hu T R, Ca Z J, Wang B R, et al. Changes in acid-base buffering characteristics of red soil under long-term different fertilizations[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022 (6): 48—54. [胡天睿, 蔡泽江, 王伯仁, 等. 长期不同施肥下红壤酸碱缓冲性能变化[J]. 中国土壤与肥料, 2022 (6): 48—54.]
- [17] Chen M Z, Li J, Liao H H, et al. Effects of application of shell powder at different rates on amelioration of latosol[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2021, 41 (6): 67—71. [陈敏忠, 李进, 廖辉煌, 等. 不同用量贝壳粉对酸性砖红壤的改良效果[J]. 热带农业科学, 2021, 41 (6): 67—71.]
- [18] Li F, Zhou F L, Huang Y N, et al. Effects of Chinese milk vetch and straw returning on soil fertility characters[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020 (3): 75—81. [李峰, 周方亮, 黄雅楠, 等. 紫云英和秸秆还田对土壤肥力性状的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020 (3): 75—81.]
- [19] Wang F, Wang L M, He C M, et al. Effects of continuous return of milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) and organic

- materials on stable yield, improved quality and efficiency in yellow-mud paddy field[J]. *Soils*, 2022, 54 (3): 455—463. [王飞, 王利民, 何春梅, 等. 紫云英与有机物料连续还田在黄泥田水稻稳产提质增效中的作用[J]. *土壤*, 2022, 54 (3): 455—463.]
- [20] Gao S J, Zhou G P, Cao W D. Effects of milk vetch (*Astragalus sinicus*) as winter green manure on rice yield and rate of fertilizer application in rice paddies in South China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26 (12): 2115—2126. [高嵩涓, 周国朋, 曹卫东. 南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(12): 2115—2126.]
- [21] Fang K M, Xiao X, Wang M L, et al. Intermediate test effect of agricultural lime on acid and cadmium contaminated paddy field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37 (26): 93—97. [方克明, 肖欣, 王美玲, 等. 农用石灰在酸性及镉污染稻田中试效果[J]. *中国农学通报*, 2021, 37 (26): 93—97.]
- [22] 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. [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.]
- [23] Liu J X, Cui J, Liu H B, et al. Research progress of soil amelioration of acidified soil by soil amendments[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12 (1): 173—184. [刘娟娟, 崔骏, 刘洪宝, 等. 土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12 (1): 173—184.]
- [24] Xiao X J, Yu P L, Zheng W, et al. Effects of rapeseed straw returning and lime application on early rice yield and soil properties in red soil paddy field[J]. *Crop Research*, 2021, 35 (1): 8—13, 21. [肖小军, 余跑兰, 郑伟, 等. 油菜秸秆还田配施石灰对红壤稻田早稻产量及土壤特性的影响[J]. *作物研究*, 2021, 35 (1): 8—13, 21.]
- [25] Zhang J T, Cao W D, Xu C X, et al. Effects of incorporation of milk vetch (*Astragalus sinicus*) on microbial populations and enzyme activities of paddy soil in Jiangxi[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012 (1): 19—25. [张珺潼, 曹卫东, 徐昌旭, 等. 种植利用紫云英对稻田土壤微生物及酶活性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2012 (1): 19—25.]
- [26] Huang Q Y, Lan H S, Tang S H, et al. Effects of applying alkaline materials on soil fertility and crop yield in rice-rice-vegetable rotation system[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020, 47 (7): 79—87. [黄巧义, 蓝华生, 唐拴虎, 等. 施用碱性物料对稻-稻-菜三熟耕作土壤肥力和作物产量的影响[J]. *广东农业科学*, 2020, 47 (7): 79—87.]
- [27] Hu T R, Cai Z J, Wang B R, et al. Swine manure as part of the total N source improves red soil resistance to acidification[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28 (11): 2052—2059. [胡天睿, 蔡泽江, 王伯仁, 等. 有机肥替代化学氮肥提升红壤抗酸化能力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28 (11): 2052—2059.]
- [28] Luo L, Pan H B, Zhong Q, et al. Effects of lime and organic fertilizer on acid soil of mango plantation and mango quality[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021 (3): 169—177. [罗玲, 潘宏兵, 钟奇, 等. 石灰和有机肥对芒果园酸性土壤的改良效果及对芒果品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021 (3): 169—177.]
- [29] Wang J, Wang H B, Zhao X M, et al. Effect of straw addition on acidity and buffering performance of soil with different organic contents[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34 (6): 361—368. [王娇, 王鸿斌, 赵兴敏, 等. 添加秸秆对不同有机含量土壤酸度及缓冲性能的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34 (6): 361—368.]
- [30] Wang Y, Liu E L, Wang Q Z, et al. Effects of milk vetch on cadmium and lead accumulation in rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27 (2): 189—193. [王阳, 刘恩玲, 王奇赞, 等. 紫云英还田对水稻镉和铅吸收积累的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27 (2): 189—193.]
- [31] Zhong J X, Tang H Q, Li Z Y, et al. Effects of combining green manure with chemical fertilizer on the bacterial community structure in Karst paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27 (10): 1746—1756. [钟菊新, 唐红琴, 李忠义, 等. 绿肥配施化肥对岩溶区水稻土壤细菌群落结构的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27 (10): 1746—1756.]
- [32] Lian Z C. Effects of green manure and straw incorporation on rice yield, nutrient uptake and soil fertility[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. [连泽晨. 绿肥和秸秆还田对水稻产量、养分吸收及土壤肥力的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.]
- [33] Li A, Wang X, Fan H L. Effects of four soil conditioners on alleviating aluminum toxicity in acid red soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014 (4): 7—11. [李昂, 王旭, 范洪黎. 4种土壤调理剂改良红壤铝毒害的效果研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2014 (4): 7—11.]
- [34] Feng T T, Wang M Y, Fu Y P, et al. Effect of different organic materials on the main quality indicators of soil and tobacco[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2016, 37 (5): 22—27, 33. [冯婷婷, 王梦雅, 符云鹏, 等. 不同有机物料对土壤和烟叶主要质量指标的影响[J]. *中国烟草科学*, 2016, 37 (5): 22—27, 33.]
- [35] Xie J, Liang F, Jiang G J, et al. Characteristics of soil acidity change and its influencing factors of red paddy soil under different fertilization patterns[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2020, 42 (3): 626—632. [谢军, 梁丰, 姜冠杰, 等. 不同培肥模式下红壤性水稻土的酸度变化特征及其影响因素[J]. *江西*

- 农业大学学报, 2020, 42 (3): 626—632.]
- [36] Guo C L, Li N, Peng J, et al. Direct returning of maize straw or as biochar to the field triggers change in acidity and exchangeable capacity in soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1205—1213. [郭春雷, 李娜, 彭靖, 等. 秸秆直接还田及炭化还田对土壤酸度和交换性能的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (5): 1205—1213.]
- [37] Li C P, Li X, Wang X, et al. Effect of the acidification environment on exchangeable cations and acid buffering capacity of weathering products of purple parent rock[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61 (1): 258—271. [李春培, 李雪, 汪璇, 等. 酸化环境对紫色母岩风化产物交换性盐基离子及其酸缓冲容量的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61 (1): 258—271.]
- [38] Hu M, Xiang Y S, Lu J W. Effects of lime application rates on soil pH and available nutrient content in acidic soils[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017 (4): 72—77. [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[J]. 中国土壤与肥料, 2017 (4): 72—77.]
- [39] Gao J S, Xu M G, Dong C H, et al. Effects of long-term rice-rice-green manure cropping rotation on rice yield and soil fertility[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39 (2): 343—349. [高菊生, 徐明岗, 董春华, 等. 长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 作物学报, 2013, 39 (2): 343—349.]
- [40] Li Y H, Deng X H, Zhang Z W, et al. Characteristics and driving factors of acid-base buffer of typical tobacco-planting soils in western Hunan Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27 (1): 109—118. [李源环, 邓小华, 张仲文, 等. 湘西典型植烟土壤酸碱缓冲特性及影响因素[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27 (1): 109—118.]

(责任编辑：陈荣府)