

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.03.019

闫静, 时仁勇, 王昌军, 等. 不同改良剂对酸性烟田的改良效果及其对烤烟生长的影响. 土壤, 2023, 55(3): 612–618.

不同改良剂对酸性烟田的改良效果及其对烤烟生长的影响^①

闫静¹, 时仁勇^{1*}, 王昌军², 李德成¹, 李九玉¹, 徐仁扣¹, 孙光伟², 李建平², 陈振国², 孙敬国^{2*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 湖北省烟草科学研究院, 武汉 430030)

摘要: 为比较不同改良剂的烟田应用效果, 本研究通过田间试验探究了碱渣、牡蛎粉和石灰 3 种改良剂对酸性烟田土壤酸度、烤烟产量与品质及经济效益的影响。结果表明, 3 种改良剂施用均有效提高土壤 pH, 降低交换性酸和可溶性铝(Al)的含量, 提升土壤交换性盐基阳离子含量。碱渣对土壤酸度的改良效果最佳, 可使土壤 pH 提高 0.38 个单位, 交换性酸和可溶性 Al 含量降低 90.9% 和 39.8%。同时, 碱渣处理中土壤交换性 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 含量分别增加了 72.8% 和 91.9%。随着土壤性质的改善, 3 种改良剂均促进了烤烟的生长, 提升了烟叶产量与内在品质。3 种改良剂使烟叶产量增加 6.0%~9.5%, 上等烟比例提高 4.0%~16.9%, 产值增加 11.7%~19.5%, 净增收益增加 4 593.00~9 270.30 元/hm², 其中碱渣的增产增收幅度最大。此外, 改良剂的施用优化了烤烟化学成分组成, 其中牡蛎粉处理烟叶的品质最佳。总体看, 利用碱渣改良酸性烟田具有广泛的应用前景, 但在实际应用中, 需注意控制碱渣 Na 和 Cl 元素含量。

关键词: 酸性烟田; 碱渣; 牡蛎粉; 石灰; 土壤酸度; 烤烟

中图分类号: S156.2 **文献标志码:** A

Effects of Different Amendments on Soil Acidity and Tobacco Growth in Acidic Tobacco Field YAN Jing¹, SHI Renyong^{1*}, WANG Changjun², LI Decheng¹, LI Jiuyu¹, XU Renkou¹, SUN Guangwei², LI Jianping², CHEN Zhenguo², SUN Jingguo^{2*}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 Hubei Academy of Tobacco Science, Wuhan 430030, China)

Abstract: In this paper, the effects of alkaline slag, oyster powder and lime on acid tobacco soil acidity, flue-cured tobacco yield and quality were investigated through field experiments. The results show that all amendments effectively promote soil pH, reduce the contents of exchangeable acidity and soluble Al, and increase soil exchangeable base cations. Alkaline slag has the best effect on soil acidity, which increases soil pH by 0.38 units, decreases exchangeable acid and soluble Al by 90.9% and 39.8%, and increases exchangeable Ca²⁺ and Mg²⁺ by 72.8% and 91.9%, respectively. With the improvement of soil properties, all three amendments promote the growth of flue-cured tobacco, and increase the yield and intrinsic quality of tobacco leaves. With the application of amendments, the yield of tobacco leaves is increased by 6.0%–9.5%, the proportion of top-grade tobacco leaves is increased by 4.0%–16.9%, the output value is increased by 11.7%–19.5%, and the net increase income is increased by 4 593.00–9 270.30 yuan/hm². Alkaline slag presents the greatest improvement on tobacco yield and income, which is consistent with its effect on soil acidity. In addition, the application of amendments optimizes the chemical composition of flue-cured tobacco leaves, and among all the treatments, tobacco leaves treated with oyster powder has the best inherent quality. In conclusion, the use of alkaline slag to improve acid tobacco field presents a broad application prospect, however, more attentions should be paid to controlling Na and Cl contents in alkaline slag in practical application.

Key words: Acid tobacco field; Alkaline slag; Oyster powder; Lime; Soil acidity; Tobacco

①基金项目: 中国烟草总公司重点科技项目(110201902005)、江苏省自然科学基金项目(BK20191103)和国家自然科学基金项目(41907019)资助。

* 通讯作者(ryshi@issas.ac.cn; sunjg596@hotmail.com)

作者简介: 闫静(1989—), 女, 山西晋中人, 硕士研究生, 主要从事土壤酸化与调控研究。E-mail: 406251260@qq.com

烟草是我国重要的经济作物,其产量与品质与土壤酸碱度密切相关^[1]。酸性或微酸性(pH 5.5 ~ 6.5)土壤环境更适宜优质烟草的生长发育。研究表明,我国不同地区连续多年种植烟草后,烟田土壤 pH 呈现明显下降趋势^[2-3], pH < 5.0 的强酸性和 5.0 < pH < 5.5 的弱酸性植烟土壤比例升高^[4-5]。第二次全国土壤普查结果显示,我国 2.4% 的植烟土壤 pH 低于 4.5, 18.6% 的植烟土壤 pH 介于 4.5 ~ 5.5, 这些酸性土壤的理化性质差,铁铝及重金属活性高,抑制了根系对养分的吸收^[6]。此外,土壤酸化也是烟草青枯病爆发的重要诱因^[7]。可见,烟田土壤酸化严重影响烤烟产量与品质,亟需有效的调控措施,提升酸性烟田土壤质量,恢复其生产力。

施用碱性物料是改良酸性土壤的常用方法。石灰是传统的酸性土壤改良剂,可与土壤中的酸性物质发生中和反应,提高土壤 pH,促进 Al³⁺ 水解生成沉淀,进而缓解植物铝毒害,提高作物产量^[8]。施用 1 500 kg/hm² 的生石灰可使安徽烟稻轮作酸性水稻土 pH 提高 0.52 个单位^[6]。此外,石灰中丰富的 Ca²⁺ 可与土壤交换性 Al³⁺ 发生交换反应,增加土壤中交换性 Ca²⁺ 的含量,降低交换性 Al³⁺ 含量,进一步改善土壤酸化状况。然而,石灰作为不可再生资源,长期大量施用不仅会导致石灰资源的耗竭也会引发土壤板结、养分失衡、土壤微生物数量降低等问题^[9],最终导致土壤肥力下降。

近年来,随着可持续发展观念的深化,工农业碱性副产品逐渐被用于酸性土壤改良,其中碱渣和牡蛎粉两类新型改良剂展现出较为广泛的应用前景。碱渣

是氨碱法纯碱的副产品,呈碱性,富含钙镁营养元素。研究表明添加 4 g/kg 碱渣可使酸性茶园土壤 pH 提高 0.5 个单位,交换性酸降低 75% 以上^[10]。Shi 等^[11]将碱渣用于林下酸性土壤改良,发现施用 5 t/hm² 和 10 t/hm² 碱渣 3 a 后,表层土壤 pH 仍可提高约 0.7 和 1.5 个 pH 单位,交换性酸降低 48% 以上。然而,目前碱渣对酸性烟田土壤的改良和增产增收效果尚不清楚。由牡蛎壳经粉碎煅烧制成的牡蛎粉主要成分为碳酸钙和氧化钙,在中和土壤酸度的同时可补充大量钙离子。有研究将牡蛎粉用于酸性烟田土壤改良,结果发现,牡蛎粉可使土壤 pH 提高 0.77 个单位,烟草青枯病发病率降低 36.67%,烟叶增产 9.3%,相较于石灰,牡蛎粉在改良酸性烟田和预防烟草青枯病发病方面展现出一定优势^[12-13]。目前基于工农业副产品形成的酸性土壤改良剂种类繁多,但对不同改良剂的改良效果与经济效益缺少田间条件下的对比研究。本文选取碱渣、牡蛎粉和石灰作为研究对象,通过大田试验比较了 3 种改良剂对酸性烟田的改良效果和对烤烟产量、品质及其经济效益的影响。研究结果可为酸性烟田改良剂的筛选与应用提供参考,助力烟农增产增收。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和改良剂

试验田块位于湖北省利川市(30°29' N, 108°93' E),年均气温 12.3 °C,无霜期 232 d,年均降水量为 1 300 mm。供试烟田地势平坦,灌溉条件良好。供试土壤为碳酸盐母质发育黄棕壤,其基本理化性质见表 1。

1.2 田间试验设计

田间试验共设置 4 个处理:①不施改良剂的对照组;②1 500 kg/hm² 石灰;③1 500 kg/hm² 牡蛎粉;④ 3 750 kg/hm² 碱渣。每个处理设 3 次重复。改良剂施用方式为土壤表层均匀撒施后 20 cm 旋耕 3 次混匀,起垄机起垄,垄高 20 cm。小区面积 26.4 m²,种植 40 株烟苗,种植行距为 0.12 m,株距为 0.55 m。烟草品种选用云烟 87,打顶株高 110 ~ 118 cm,生育期 110 ~ 115 d。各处理土壤施肥量均按纯氮 90 kg/hm²

表 1 供试土壤基本性质
Table 1 Basic properties of tested soil

| pH | 交换性盐基阳离子(mmol/kg) | | | | 有机质 (g/kg) | 碱解氮 (mg/kg) | 速效钾 (mg/kg) | 交换性 H ⁺ (mmol/kg) | 交换性 Al (mmol/kg) |
|------|-------------------|-----------------|------------------|------------------|---------------|----------------|----------------|---------------------------------|---------------------|
| | K ⁺ | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | | | | | |
| 4.89 | 5.69 | 1.34 | 26.75 | 2.54 | 28.5 | 139.65 | 263.19 | 1.71 | 11.14 |

所用石灰购自湖北恩施一家石灰厂公司,主要成分为生石灰(CaO),成本价格为 500 元/t。牡蛎粉购自安徽国祯生态科技公司,pH 11.9, CaO、MgO 和 SiO₂ 含量分别为 190、17 和 42 g/kg,成本价格为 1 300 元/t。碱渣为连云港碱业有限公司免费提供,pH 为 8.50,碱度 822 cmol/kg, CaO、MgO、SiO₂ 和 Cl⁻ 含量分别为 243.5、59.3、44.6 和 59.6 g/kg^[14]。碱渣和牡蛎粉中重金属含量均低于中国(2018 年)用于农业的污水污泥标准。

施用烟草专用肥(N:P:K 为 1:1:2), 磷肥和钾肥则按 N:P₂O₅:K₂O=1:2:3 比例通过施用过磷酸钙和硝酸钾进行补齐。2021 年 5 月 6 日移栽, 2021 年 7 月 6 日打顶, 2021 年 7 月 15 日进行第一次采烤。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤 各小区土壤样品通过多点取样均匀混合法, 分别在烤烟移栽前和采摘结束后采集植株周围表层(0~20 cm)土壤样品, 样品经风干、去杂、研磨后, 过 10 目和 60 目孔筛备用。测定指标包括: 土壤 pH(电位测定法, 1:2.5 土水质量比)、交换性酸(KCl 浸提, 酸碱滴定法)、交换性盐基阳离子(乙酸铵浸提, Ca²⁺ 和 Mg²⁺测定采用原子吸收分光光度法, K⁺ 和 Na⁺ 测定采用火焰光度法)、可溶性单核 Al 和聚合态 Al(8-羟基喹啉比色法), 具体测定方法参见文献[15-16]。

1.3.2 烟草 按照 YC/T 142—2010《烟草农艺性状调查测量方法》^[17], 分别在烟株生长团棵期、打顶期测定株高、茎围、最大叶长和最大叶宽等农艺性状。每小区随机观测记录 5 棵烟株并挂牌标记。

烟叶成熟时, 各小区分别分批单采单烤成熟烟叶。烟叶采摘后均匀放入烤房中, 按照变黄阶段—定色阶段—干筋阶段的三段式量化烘烤工艺进行挂牌烘烤调制。烘烤完成后按照国家标准进行挑选分级, 称重获得产量和上等烟比例, 并按照湖北省利川市烟叶收购价格核计各小区烟叶均价和产值(产量×均价), 根据改良剂成本估算净增收益。收集烤后中部烟叶为测定样品, 45℃条件下烘干磨细过 60 目孔筛, 参照国家烟草专卖局行业标准, 通过连续流动分析仪分别测定烟叶烟碱、总氮、还原糖、总糖、钾以及氯含量^[18]。

1.4 数据分析

数据使用 Excel 和 SPSS 20.0 进行多重比较、方

差分析等相关统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂对土壤酸度和可溶性铝含量的影响

土壤 pH 和交换性酸分别是土壤酸度的强度和容量指标。由表 2 可知, 施用酸性土壤改良剂后, 烟田土壤 pH 均有所提高, 土壤交换性酸含量相应降低。在烟苗移栽前, 各处理土壤 pH 高低顺序为碱渣>石灰>牡蛎粉>对照; 烤烟采摘结束后, 各处理土壤 pH 高低顺序为: 碱渣>牡蛎粉>石灰>对照。各处理土壤交换性酸含量大小与土壤 pH 高低顺序呈相反趋势。这是由于改良剂通过碱性物质中和土壤酸度, 提高土壤 pH, 进而促使交换性 Al 发生水解和沉淀反应, 降低交换性 Al 含量^[15]。

3 种改良剂中, 碱渣对土壤酸度的改良效果最好, 在移苗前和采收后分别使土壤 pH 提高 0.39 和 0.15 个单位, 交换性 Al 含量降低 90.9% 和 55.3%。按施用量计算, 单位碱渣施用量对土壤酸度的改良效果与石灰的效果相当(施用量 1 500 kg/hm², pH 提高 0.16 个单位)。因此, 本研究中碱渣改良土壤酸度效果优于石灰应归因于其相对较高的施用量。烟苗种植后, 碱渣对土壤酸度的改良效果有所降低, 说明烤烟种植过程中存在土壤复酸化过程。石灰对土壤酸度的改良效果在前期优于牡蛎粉, 后期弱于牡蛎粉。可见, 牡蛎粉改良土壤酸度的持效性优于生石灰。该现象与姬佳旗^[13]的研究结果一致, 其原因可能是石灰中碱性物质以 CaO 为主, 反应活性高, 易被消耗或淋失, 而牡蛎粉中含有部分碳酸盐, 与土壤酸反应相对缓慢。

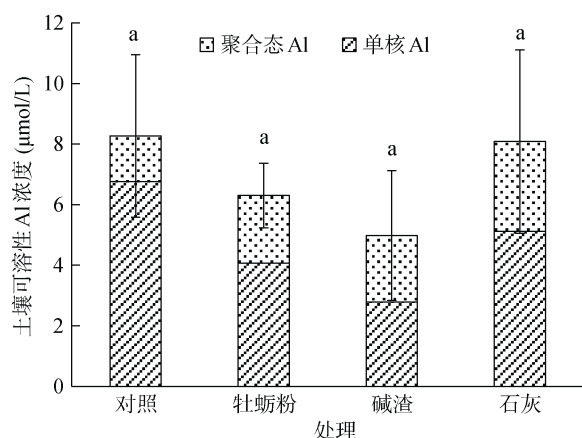
可溶性 Al 是导致酸性土壤植物铝毒害的直接原因^[19]。土壤溶液 Al 的存在形态可分为单核 Al 和聚

表 2 添加不同酸性土壤改良剂对烟田土壤交换性酸的影响
Table 2 Effects of different acid soil amendments on soil exchangeable acids in tobacco field

| 采样时期 | 处理 | 土壤 pH | 交换性 H ⁺ (mmol/kg) | 交换性 Al (mmol/kg) |
|------|-----|---------------|------------------------------|------------------|
| 移栽前 | 对照 | 4.89 ± 0.23 a | 1.71 ± 0.52 ab | 11.14 ± 5.33 a |
| | 牡蛎粉 | 4.99 ± 0.14 a | 1.89 ± 0.30 a | 8.09 ± 2.19 a |
| | 碱渣 | 5.28 ± 0.14 a | 0.91 ± 0.43 b | 1.01 ± 0.13 b |
| | 石灰 | 5.05 ± 0.16 a | 1.32 ± 0.48 ab | 7.73 ± 4.25 a |
| 收获后 | 对照 | 5.01 ± 0.22 a | 0.89 ± 0.22 a | 12.01 ± 5.47 a |
| | 牡蛎粉 | 5.12 ± 0.09 a | 0.85 ± 0.04 a | 9.76 ± 3.34 a |
| | 碱渣 | 5.16 ± 0.11 a | 0.74 ± 0.25 a | 5.37 ± 2.73 a |
| | 石灰 | 5.07 ± 0.26 a | 0.82 ± 0.27 a | 10.89 ± 5.25 a |

注: 表中同列数据小写字母不同表示同一采样时期不同处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平, 下表同。

合态 Al。通常认为,单核 Al 是毒害植物的主要形态,其中以 Al^{3+} 的植物毒害作用最强。研究表明,当 Al^{3+} 浓度高于 $4 \mu\text{mol/L}$ 时,植物根系即可表现出铝毒效应^[20]。图 1 表明,施用碱渣、牡蛎粉和石灰分别使土壤溶液单核 Al 浓度降低 58.7%、39.9% 和 24.4%,一定程度上降低了土壤可溶性总 Al 浓度。随着土壤 pH 增加,土壤溶液 Al 逐渐发生水解、聚合、沉淀等反应,其浓度呈指数降低。3 种改良剂中碱渣处理土壤 pH 最高,因此其溶液 Al 浓度最低。各改良剂处理土壤溶液中聚合态 Al 浓度均略有增加(图 1),这与土壤 pH 提升促进单核 Al 的聚合反应有关。



(图柱上方小写字母相同表示处理间差异不显著($P>0.05$))

图 1 不同酸性土壤改良剂对烟田土壤可溶性铝浓度的影响

Fig. 1 Effects of different amendments on soil soluble aluminum in tobacco field

2.2 不同改良剂对土壤交换性盐基阳离子的影响

土壤交换性盐基阳离子含量是酸性土壤肥力的重要体现。3 种改良剂对土壤交换性盐基阳离子具有不同程度的影响。碱渣、石灰和牡蛎粉分别使土壤交换性 Ca^{2+} 含量增加 72.8%、43.6%、8.7%。此外,碱渣一定程度上提高了土壤交换性 Mg^{2+} 和 Na^+ 含量,石灰和牡蛎粉则对土壤交换性 Mg^{2+} 和 Na^+ 含量影响

不大(表 3)。单位施用量下,石灰对土壤交换性 Ca^{2+} 的提升效果优于碱渣。这与 3 种改良剂中 Ca、Mg 元素含量及存在形态有关,石灰 Ca 含量较碱渣和牡蛎粉高,而碱渣中 Mg 含量显著高于石灰和牡蛎粉。牡蛎粉对土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量影响相对较小的原因可能还与牡蛎粉中 Ca、Mg 元素以碳酸盐形式存在,反应速度相对较慢有关^[21]。相较于对照处理,3 种改良剂处理土壤交换性 K^+ 含量略有降低。一方面,改良剂中大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 置换交换性 K^+ ,促使 K^+ 淋溶损失;另一方面,改良剂施用促进了烟草生长,增加了烟草根系对土壤 K^+ 的吸收。因此,在施用碱渣、石灰或牡蛎粉改良酸性烟田的同时需注意钾肥的补充。土壤表面负电荷密度是衡量酸性土壤保肥能力的重要指标。表 3 表明,碱渣和石灰施用分别使土壤有效负电荷量(ECEC)增加 19.8% 和 15.4%,增强了酸性烟田土壤的保肥能力,牡蛎粉则对土壤 ECEC 影响不大。土壤 ECEC 增加的原因,一方面是土壤 pH 提升导致土壤可变负电荷量增加;另一方面,碱渣中 SO_4^{2-} 等阴离子的专性吸附也对土壤有效负电荷密度的增加有所贡献^[22]。

2.3 不同改良剂对烤烟生长的影响

由表 4 可知,碱渣、牡蛎粉和石灰处理均促进了团棵期和打顶期烤烟的生长,其中碱渣处理效果最佳,可使团棵期烟株株高、茎围、最大叶长和叶宽分别提高 13%、15%、7.5% 和 3.4%,使打顶期烟株株高、茎围、最大叶长和叶宽分别提高 11%、25%、5.7% 和 12%。石灰和牡蛎粉在团棵期和打顶期烤烟生长的促进效果有所不同。石灰处理烤烟在团棵期的生长状况略优于牡蛎粉处理,而牡蛎粉处理打顶期烤烟生长状况略优于石灰处理。这一规律与不同时期石灰和牡蛎粉对土壤酸度的改良效果一致。可见,石灰在烤烟生长前期可更好地改良土壤酸度,促进烤烟生长,而牡蛎粉在后期可更好地发挥改良作用。

表 3 不同改良剂对烟田土壤表面交换性盐基阳离子含量的影响

Table 3 Effects of different amendments on soil exchangeable base cations and ECEC in tobacco field

| 处理 | 交换性盐基阳离子(mmol/kg) | | | | ECEC (mmol/kg) |
|-----|-------------------|----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| | K^+ | Na^+ | Ca^{2+} | Mg^{2+} | |
| 对照 | 5.69 ± 1.62 a | 1.34 ± 0.25 ab | 26.75 ± 3.61 b | 2.54 ± 0.22 b | 49.17 ± 4.46 ab |
| 牡蛎粉 | 4.34 ± 0.77 a | 1.06 ± 0.24 b | 29.07 ± 1.82 b | 2.58 ± 0.26 b | 47.02 ± 1.93 b |
| 碱渣 | 3.57 ± 0.70 a | 2.32 ± 0.74 a | 46.22 ± 4.61 a | 4.88 ± 0.91 a | 58.91 ± 6.27 a |
| 石灰 | 5.50 ± 2.26 a | 0.99 ± 0.19 b | 38.41 ± 9.80 ab | 2.82 ± 0.59 b | 56.76 ± 8.13 ab |

表 4 不同酸性土壤改良剂对烤烟团棵期和打顶期植株农艺性状的影响
Table 4 Effects of different amendments on agronomic traits of flue-cured tobacco plants at cluster and topping stages

| 生育期 | 处理 | 株高(cm) | 茎围(cm) | 最大叶长(cm) | 最大叶宽(cm) |
|-----|-----|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| 团棵期 | 对照 | 31.84 ± 1.98 b | 4.55 ± 0.80 a | 45.16 ± 2.79 a | 29.26 ± 1.66 a |
| | 牡蛎粉 | 33.83 ± 1.18 ab | 4.89 ± 0.69 a | 47.49 ± 2.39 a | 30.47 ± 2.82 a |
| | 碱渣 | 36.08 ± 1.40 a | 5.25 ± 0.63 a | 48.54 ± 3.61 a | 30.28 ± 3.00 a |
| | 石灰 | 35.46 ± 1.13 a | 5.38 ± 0.55 a | 48.53 ± 3.09 a | 30.13 ± 3.66 a |
| 打顶期 | 对照 | 122.50 ± 3.62 c | 10.51 ± 1.25 b | 77.39 ± 3.68 a | 25.20 ± 3.38 a |
| | 牡蛎粉 | 130.83 ± 1.90 b | 12.46 ± 1.23 ab | 82.41 ± 4.87 a | 27.53 ± 5.19 a |
| | 碱渣 | 135.63 ± 2.49 a | 13.17 ± 1.22 a | 81.78 ± 4.12 a | 28.26 ± 4.64 a |
| | 石灰 | 129.63 ± 3.27 b | 11.06 ± 1.06 ab | 77.00 ± 3.22 a | 25.59 ± 3.70 a |

2.4 不同改良剂对烤烟品质的影响

烤烟中化学成分组成是影响烟叶内在品质的重要因素。钾对烤烟的燃烧性具有积极作用,烟碱含量影响烟气香味,总氮决定了烤烟的吸食劲头和刺激性,还原糖可提高烤烟的醇和度,氯含量影响烟叶的弹性、膨胀性等物理性质。表 5 表明,3 种改良剂处理显著降低了烟叶烟碱和总氮含量,氮碱比增加,趋近于优质烤烟的水平(烟碱 1.50% ~ 3.50%、总氮 1.50% ~ 4.0%、氮碱比 0.8 ~ 1.2)^[23],其中碱渣和牡蛎粉处理中烟叶烟碱和总氮均符合优质烟叶标准。牡蛎粉和石灰显著降低了烟叶总糖和还原糖含量,使其趋于优质水平(总糖 18.00% ~ 22%^[24]、还原糖 18% ~ 24%^[25]),而碱渣处理则呈相反趋势。3 种改良剂处理烟叶中还原糖与烟碱的比例仍趋于优质水平(8 ~ 12)^[23]。

碱渣和牡蛎粉处理中烟叶钾含量明显低于对照和石灰处理,说明在施用碱渣和牡蛎粉改良酸性烟田

过程中需加强钾肥投入。由于碱渣中氯含量(59.6 g/kg)较高^[14],施用碱渣处理使烟叶中总氯的含量较对照增加近两倍,但仍处于质控范围之内(< 0.60%)。根据烤烟化学成分质量评价体系^[25]对各处理烟叶品质综合评价表明,3 种改良剂均一定程度上提升了烤烟的品质,其中牡蛎粉处理中烟叶质量评分最高,其次为石灰,碱渣对烟叶内在品质的提升作用相对较弱。

2.5 不同改良剂对烤烟经济效益的影响

表 6 表明,碱渣、牡蛎粉和石灰均显著提高了烟叶产量,其中碱渣对烟叶增产效果最佳(增产 9.5%)。碱渣、牡蛎粉和石灰均提高了上等烟比例,其中牡蛎粉和碱渣处理与对照差异显著,并且牡蛎粉处理上等烟比例最高,较对照提高 9 个百分点。按照烟草行业不同等级烟叶收购价格计算,碱渣、牡蛎粉和石灰分别使烟叶均价提高 9.1%、7.4% 和 3.3%。产值比较发现,碱渣处理烟田产值最高,其次为牡蛎粉和石灰处理。考虑不同改良剂成本计算净增收益,碱渣处理

表 5 不同酸性土壤改良剂对烟叶化学成分及指标评分的影响
Table 5 Effects of different amendments on chemical constituents and index scores of flue-cured tobacco leaves

| 处理 | 总糖 (%) | 还原糖 (%) | 烟碱 (%) | 总氮 (%) | 氯 (%) | 钾 (%) | 糖碱比 | 氮碱比 | 总分 |
|-----|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------|------|-----------|
| 对照 | 31.71 ± 0.02 b | 26.46 ± 0.08 b | 4.62 ± 0.36 a | 2.57 ± 0.11 a | 0.19 ± 0.01 b | 1.71 ± 0.02 b | 5.73 | 0.55 | 630 ~ 666 |
| 牡蛎粉 | 30.52 ± 0.15 d | 23.54 ± 0.61 d | 3.34 ± 0.13 c | 2.09 ± 0.06 b | 0.18 ± 0.01 b | 1.58 ± 0.02 c | 7.05 | 0.62 | 700 ~ 726 |
| 碱渣 | 34.86 ± 0.72 a | 28.04 ± 0.12 a | 2.95 ± 0.08 d | 1.77 ± 0.02 c | 0.56 ± 0.05 a | 1.41 ± 0.02 d | 9.51 | 0.60 | 650 ~ 668 |
| 石灰 | 31.13 ± 0.07 c | 24.98 ± 0.19 c | 3.77 ± 0.13 b | 2.14 ± 0.02 b | 0.10 ± 0.00 c | 1.81 ± 0.01 a | 6.63 | 0.56 | 680 ~ 716 |

表 6 不同酸性土壤改良剂对烤烟产量与经济效益的影响
Table 6 Effects of different amendments on yield and quality of flue-cured tobacco leaves

| 处理 | 产量 (kg/hm ²) | 上等烟比例 (%) | 均价 (元/kg) | 产值 (万元/hm ²) | 净增收益 (元/hm ²) |
|-----|--------------------------|----------------|-----------|--------------------------|---------------------------|
| 对照 | 2 318.85 ± 57.15 c | 53.19 ± 1.88 b | 20.53 | 4.76 | - |
| 牡蛎粉 | 2 456.85 ± 18.3 b | 62.18 ± 0.56 a | 22.04 | 5.41 | 4 593.00 |
| 碱渣 | 2 540.25 ± 19.8 a | 59.72 ± 1.99 a | 22.39 | 5.69 | 9 270.30 |
| 石灰 | 2 505.45 ± 28.5 a | 55.31 ± 0.65 b | 21.21 | 5.31 | 4 784.70 |

烟田净增收益达 9 270.30 元/hm², 是石灰和牡蛎粉处理 2 倍左右。由于牡蛎粉成本远高于石灰, 因此, 牡蛎粉处理烟田虽然产值高于石灰处理, 但其净增收益却略低于石灰。综合看, 碱渣相较于石灰和牡蛎粉提升酸性烟田烤烟产量和品质效果相当甚至更优, 加之作为氨碱法制碱工业副产品, 碱渣具有成本低廉优势。因此, 碱渣改良酸性烟田经济效益最高, 更有助于烟农实现增产增收。

3 讨论与结论

近年来, 酸沉降、过量氮肥施用以及烤烟收获, 使得长期植烟土壤呈现明显酸化趋势^[2]。施用碱性改良剂是改良酸性烟田、提高烤烟产量与品质、助力烟农增产增收的重要措施^[26]。碱渣作为一类新型酸性土壤改良剂, 已有研究将其应用于农田、茶园、林地的酸性土壤改良, 并取得显著成效^[10-11, 27]。本研究率先将碱渣应用于酸性烟田改良, 改良效果和增产增收效益显著。

土壤可溶性 Al 和交换性 Al 是酸性土壤抑制烟草生长的关键限制因素^[28]。研究表明, 适宜优质烤烟生长的土壤 pH 为 5.5 ~ 6.5^[1], 此时土壤交换性 Al 和可溶性 Al 含量极低, 对烤烟根系生长影响较小。本研究中, 单位施用量的碱渣与石灰对土壤酸度的改良效果相当。施用 3 750 kg/hm² 的碱渣可使土壤 pH 升至 5.28, 交换性 Al³⁺ 降至 1.0 mmol/kg, 可溶性单核 Al 浓度低于 3 μmol/L, 此时土壤活性 Al 对烤烟生长的限制作用较弱^[28]。施用 1 500 kg/hm² 的石灰和牡蛎粉的酸性烟田土壤 pH 在 5.0 左右, 交换性 Al³⁺ 含量可达 8.0 mmol/kg, 存在限制烤烟生长的可能^[28], 因此, 需进一步提高石灰和牡蛎粉的施用量。

相较于石灰和牡蛎粉, 碱渣能够同时提高土壤交换性 Ca²⁺、Mg²⁺ 含量以及 ECEC, 起到平衡养分和提升土壤保肥能力的作用。牡蛎粉和生石灰则仅能提高土壤交换性 Ca²⁺ 含量, 长期施用极易引起土壤盐基阳离子养分的失衡, 导致土壤地力下降^[29]。值得注意的是, 碱渣处理土壤中交换性 Na⁺ 呈增加趋势, 而 K⁺ 有所降低。这可能会对烟草生长过程中的营养状况产生不利影响。因此, 在施用碱渣改良酸性烟田时需注意控制其 Na⁺ 含量, 同时注意钾肥的补充。

随着土壤性质的改善, 3 种改良剂均一定程度上促进了烤烟的生长, 提升了烟叶产量和内在品质。碱渣对烤烟的增产效果最佳, 牡蛎粉则更有利于烤烟品质的提升。3 种改良剂处理烟叶中烟碱、总氮、总钾含量均呈下降趋势。牡蛎粉和石灰处理中还原糖、总

糖以及总氯含量同样明显降低。这可能与土壤 pH 的提升有关。已有研究表明, 在酸性 pH 范围内, 烟叶中烟碱、总氮、总钾含量均与土壤 pH 呈负效应关系^[30]。潘金华等^[31]在对皖南旱坡地红壤烟田的改良研究中得到相似结果。与石灰和牡蛎粉处理相反, 碱渣增加了烟叶中还原糖和总糖含量, 说明碱渣相较于牡蛎粉和石灰对烟草碳代谢途径可能存在不同影响^[32], 该影响机制有待从生理角度进一步探明。烟草对氯敏感, 碱渣中氯含量较高, 导致烟叶总氯含量大幅增加。研究表明, 适量施用氯肥, 能够促进烟株生长, 增强抗逆能力, 改善烟叶产量和品质^[33]。但氯过量会严重影响烤烟的品质甚至导致烟叶氯中毒。因此, 在实际应用碱渣改良酸性烟田土壤时, 需严格控制碱渣氯含量, 避免影响烤烟生长与品质。综合考虑经济效益, 碱渣成本低廉, 净增收益远高于牡蛎粉和石灰, 具有较为广泛的应用前景, 但在改良酸性烟田过程中需注意控制其钠和氯的含量, 同时增加钾肥用量。

参考文献:

- [1] 李银科, 王菲, 羊波, 等. 土壤 pH 值对烟叶化学成分和品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(12): 98-100.
- [2] Zhang Y T, He X H, Liang H, et al. Long-term tobacco plantation induces soil acidification and soil base cation loss[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(6): 5442-5450.
- [3] 时仁勇, 王昌军, 闫静, 等. 武陵秦巴山区不同母质植烟土壤抗酸化性能研究[J]. 土壤学报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20220126.1724.004.html>.
- [4] 陈洁菲, 查宇璇, 杨超, 等. 重庆市石柱县烟田土壤肥力演变与施肥区划[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1207-1214.
- [5] 周子方, 解燕, 易克, 等. 马龙植烟土壤 pH 值分布特征及其主控因素研究[J]. 中国土壤与肥料, 2019(5): 8-13.
- [6] 张玲玉, 赵学强, 李家美, 等. 水稻和两种野生植物对酸性硫酸盐土耐性及矿质元素吸收[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 403-413.
- [7] Li S L, Liu Y Q, Wang J A, et al. Soil acidification aggravates the occurrence of bacterial wilt in South China[J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 703.
- [8] 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[J]. 中国农业科学, 2017, 50(13): 2519-2527.
- [9] 樊祖清, 李红丽, 芦阿虔, 等. 施用石灰氮对烟株生长和根际土壤微生物区系的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(6): 60-66.
- [10] 黄兰芬, 李九玉, 陈中华, 等. 碱渣和生物质灰配施改良酸性土壤的效果初探[J]. 中国南方果树, 2014, 43(4): 65-67.
- [11] Shi R Y, Lai H W, Ni N, et al. Comparing ameliorative effects of biomass ash and alkaline slag on an acidic Ultisol

- under artificial *Masson pine*: A field experiment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 297: 113306.
- [12] Shen G H, Zhang S T, Liu X J, et al. Soil acidification amendments change the rhizosphere bacterial community of tobacco in a bacterial wilt affected field[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, 102(22): 9781–9791.
- [13] 姬佳旗. 牡蛎壳粉调节土壤 pH 及控制烟草青枯病的效果研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [14] Li J Y, Wang N, Xu R K, et al. Potential of industrial byproducts in ameliorating acidity and aluminum toxicity of soils under tea plantation[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(5): 645–654.
- [15] 李九玉, 徐仁扣, 季国亮. 8-羟基喹啉(pH8.3)分光光度法测定酸性土壤中的可溶性铝[J]. *土壤*, 2004, 36(3): 307–309.
- [16] 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, 2000.
- [17] 国家烟草专卖局. 烟草农艺性状调查测量方法: YC/T 142—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [18] 王瑞新. 烟草化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [19] Yamamoto Y. Aluminum toxicity in plant cells: Mechanisms of cell death and inhibition of cell elongation[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2019, 65(1): 41–55.
- [20] Singh S, Tripathi D K, Singh S, et al. Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: A review[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 137: 177–193.
- [21] 陈文韬. 牡蛎壳组成特性及其综合利用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- [22] 李九玉, 王宁, 徐仁扣. 工业副产品对红壤酸度改良的研究[J]. *土壤*, 2009, 41(6): 932–939.
- [23] 黄化刚, 班国军, 陈垚, 等. 多孔改良剂对毕节烟区土壤性状及烤烟产质量的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1427–1437.
- [24] 张其龙, 石慧, 李辉, 等. 湘西烟叶常规化学成分的聚类分析与综合评价[J]. *广州化工*, 2010, 38(5): 28–31.
- [25] 赵禁, 金立新, 徐克全, 等. 48 项元素指标对烟草品质的影响[J]. *四川地质学报*, 2017, 37(1): 149–154, 158.
- [26] 查宇璇, 冉茂, 周鑫斌. 烟田土壤酸化原因及调控技术研究进展[J]. *土壤*, 2022, 54(2): 211–218.
- [27] Zhao W R, Li J Y, Deng K Y, et al. Effects of crop straw biochars on aluminum species in soil solution as related with the growth and yield of canola (*Brassica napus* L.) in an acidic Ultisol under field condition[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(24): 30178–30189.
- [28] 张淑婷. 铝离子影响烟草青枯病发生的机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [29] 闫志浩, 胡志华, 王士超, 等. 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[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(23): 4285–4295.
- [30] 杜舰, 张锐, 张慧, 等. 辽宁植烟土壤 pH 值状况及其与烟叶主要品质指标的相关分析[J]. *沈阳农业大学学报*, 2009, 40(6): 663–666.
- [31] 潘金华, 庄舜尧, 史学正, 等. 施用改良剂对皖南旱坡地土壤性状及烤烟产量和品质的综合效应[J]. *土壤*, 2016, 48(5): 978–983.
- [32] Zhang L, Zhang X T, Ji H W, et al. Metabolic profiling of tobacco leaves at different growth stages or different stalk positions by gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 116: 46–55.
- [33] He N Z, Sun J W. Effect of P-K-fertilizer with a low Cl content on the yield and quality of aromatic and Sun-cured tobacco[J]. *Fertilizer Research*, 1991, 29(3): 289–294.