

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.02.001

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. 土壤, 2022, 54(2): 211–218.

烟田土壤酸化原因及调控技术研究进展^①

查宇璇¹, 冉茂², 周鑫斌^{1*}

(1 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2 中国烟草总公司重庆市公司烟草科学研究所, 重庆 400715)

摘要: 烟田土壤酸化问题已成为我国烟田土壤质量和烟草生产的主要限制因素, 然而, 到目前为止对烟田土壤酸化机理及调控技术尚缺乏系统性研究及总结, 极大地限制了我国烟田土壤酸化改良进程和烟叶可持续生产。本文综述了近几年来国内外烟田土壤酸化机理及调控技术的研究进展, 定量分析了不同致酸因子对烟田土壤酸化的贡献, 揭示了盐基离子的投入和输出不平衡 (输出 \gg 投入) 是导致烟田土壤酸化的主要原因。此外, 氮肥的不合理施用、不均衡的养分管理和酸沉降等也会加速烟田土壤酸化。在此基础上, 提出了相应的酸化调控措施: 施用石灰和碱性改良剂是最常用且有效的措施, 但必须注意的是, 在改良酸化土壤的同时要注重保护和修复土壤的微生态环境, 生物有机肥及农家肥等有利于保护和恢复土壤微生态。本文提出利用“碱度”作为酸碱平衡的杠杆, 来确定改良物料的施用量, 从而达到土壤酸碱平衡; 同时应按照不同区域土壤酸化程度实现精准分类降酸治理, 达到“精准降酸”, 既有效地解决土壤酸化问题, 又节约改良物料, 提高经济效益。

关键词: 烟田酸化; 盐基离子; 酸度改良; 碱度

中图分类号: S158.5 **文献标志码:** A

Research Progresses on the Causes of Soil Acidification in Tobacco Fields and Its Control

ZHA Yuxuan¹, RAN Mao², ZHOU Xinbin^{1*}

(1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2 Tobacco Scientific Research Institute of Chongqing Corporation, Chinese Tobacco Corporation, Chongqing 400715, China)

Abstract: Soil acidification has become a major limiting factor of soil quality and tobacco production in China, but there are little of systematic studies to summarize the mechanisms and control techniques of soil acidification in tobacco fields, which greatly limits the improvement of soil acidification and sustainable production of tobacco in China. This review summarizes the research progresses in acidification mechanisms of tobacco soils and its control in recent years. The quantitative analysis of the contribution of different acidogenic factors to soil acidification reveals that the imbalance of base cations input and output (output \gg input) is the main cause of soil acidification in tobacco fields. Furthermore, soil acidification is accelerated by the excessive nitrogen fertilization, unbalanced nutrient management and acid deposition. The management strategies are proposed with the application of lime and alkaline amendments as the most common and effective measures, meanwhile, the protection and restoration of soil microenvironment are also important in addition to the improvement of acidified soils, and the application of organic fertilizers such as bio-organic fertilizers and farmyard manures can protect and restore soil microenvironment. “Alkalinity” is proposed as a lever to determine the applied amount of amendments in order to achieve acid-base balance in soils. Meanwhile, the degree of soil acidity should be considered in different regions in order to achieve “accurate reducing acidity”, which can not only effectively solve the problem of soil acidification, but also save on amendments and improve economic efficiency.

Key words: Acidification of tobacco soils; Base cations; Amelioration of soil acidity; Alkalinity

土壤酸化是一个伴随土壤发生和发育的自然过程, 近几十年来高强度的人为活动大大加速了土壤酸化的进程, 降低土壤肥力和生产力, 危害生态环境和

农业生产, 在热带和亚热带地区的情况尤为严重^[1]。中国主要农作土壤 20 年间土壤 pH 平均下降 0.5 个单位^[2]。土壤是烟叶生产的重要载体和养分来源, 良好

①基金项目: 中国烟草总公司重庆市公司科技项目(B20221NY1314)资助。

* 通讯作者(zxbissas@swu.edu.cn)

作者简介: 查宇璇(1997—), 女, 山东东营人, 硕士研究生, 研究方向为烟田酸化与改良。E-mail: xuan2622@163.com

的土壤条件为生产优质烟叶提供了优良的基础^[3]。然而我国烟田土壤面临着严重的土壤酸化问题,极大地制约着烟区可持续发展。从重庆地区植烟土壤 pH 年际分布频率来看,与 2002 年相比,2012 年和 2018 年 pH<5.0 的强酸性土壤频率分别增加至 24.7% 和 16.1%, pH 5.0 ~ 5.5 的弱酸性土壤频率分别增加至 21.4% 和 20.3%, 而 pH 5.5 ~ 6.5 最适范围内的烟田土壤分布频率均降低^[4]。我国其他植烟地区同样面临土壤酸化的问题,湘西州主产烟县在长达 20 年的烟草种植后,土壤 pH 较种植 4 ~ 6 年的烟田显著降低了 1.79 个单位^[5]。重庆烟草种植区自 2002—2012 年长期连续的烟草种植后,土壤 pH 平均降低了 0.2 个单位^[6]。湘西龙山县植烟土壤在 2000—2015 年 15 年间土壤 pH 平均下降约 0.3 个单位^[7]。同时,贵州遵义地区强酸性植烟土壤比例从 1980—2005 年增加至 21.3%^[8]。2015 年湖南马龙县 pH<5.5 的酸性植烟土壤比例高达 61.21%^[9]。此外,2015 年我国湘西州植烟土壤 pH 在 4.17 ~ 8.17, 并有从西向东递减的趋势^[10], 2014 年四川省各植烟地区土壤 pH 同样在 4 ~ 8 之间,且空间分布零散,斑块化效应明显^[11]。因此,我国烟田土壤酸化问题不容小觑,长期的烟草种植导致烟田土壤均呈现酸化趋势, pH<5.5 的酸化土壤比例显著增多,且酸化土壤空间分布不均,探明烟田土壤酸化原因对于指导烟田土壤酸化防控具有非常重要的意义。

烟田土壤酸化会导致烟草减产、烤烟品质下降以及病害发生增加等问题,严重阻碍烟草对营养元素的吸收并易使营养元素流失,不利于烟草生长,造成土壤贫瘠,引起土壤肥力下降^[12], 而且还不利于微生物群落结构和功能的稳定。长期的烟草种植使土壤 pH 下降,但增加了土壤的潜性酸度,土壤 pH 主要受交换性酸影响,而交换性铝是土壤交换性酸的主体^[5]。pH 下降后, Al³⁺ 易从土壤交换位点和黏土颗粒上离解而导致土壤溶液 Al³⁺ 浓度升高^[13], 从而抑制作物根系生长并毒害烟草根部, pH 4.2 时该抑制能力达到最大^[14]。长期的烟草种植后,细菌数量及多样性随土壤 pH 下降显著降低^[15], 不利于土壤微生物之间的相互作用,其中与诱导疾病相关的微生物(如绿弯菌门)丰度增加^[16], 而与烟草细菌枯萎病发生率呈负相关的酸杆菌门和疣微菌门的数量减少^[17]。土壤 pH 4.5 ~ 5.5 时,病原体抑制荧光假单胞菌和枯草芽孢杆菌的生长和拮抗活性,促进烟草中致病基因 *PopA*、*PrahA* 和 *SolR* 的表达而抑制抗性基因表达,提高烟草细菌枯萎病^[18]和青枯病^[19]的发病率。此外,烟田酸化还会降低土壤中过氧化氢酶、脲酶、酸性磷

酸酶和转化酶的活性,刺激酚酸类有毒物质在土壤中积累^[15]。然而,到目前为止,对烟田土壤酸化的原因尚缺乏系统全面的研究分析,严重阻碍了酸化烟田的改良进展。中国是世界上主要的烟草生产国,常年持续的烟草种植造成了严重的土壤酸化。为此,本文综述了烟田土壤酸化的主要影响因素及机理,以为我国烟田土壤酸化治理提供理论及实践支撑,同时为我国烟田土壤生态系统保护和可持续发展提供技术支持。

1 烟田土壤酸化原因

1.1 盐基离子投入和输出不平衡是烟田土壤酸化的主要原因

盐基离子投入和输出不平衡是植烟土壤面临的关键问题。植烟土壤每年投入的盐基阳离子量为 270 kg/hm², 而地上烟草收获物从土壤中的去除量为 339.23 kg/hm², 是阴离子去除量的 7.57 倍,从而产生 H⁺ 12.52 kg/hm²^[6]。由于农田土壤盐基离子输出量约占输入量的 83.3%^[20], 由此计算出烟田土壤淋洗和流失的阳离子量约为 225 kg/hm²(图 1)。同时,烟叶采收及秸秆移出烟田后,土壤中的盐基离子也将被大量带出土壤。然而,土壤中的盐基离子却没有及时得到有效补充,为保持电荷平衡,将会加速水解,使土壤中产生大量 H⁺ 并吸附在土壤胶体上,因此烟田土壤逐步趋于酸化(图 2)。



图 1 烟田土壤阳离子投入与输出定量关系图

Fig. 1 Quantitative correlation between cation input and output in tobacco soil

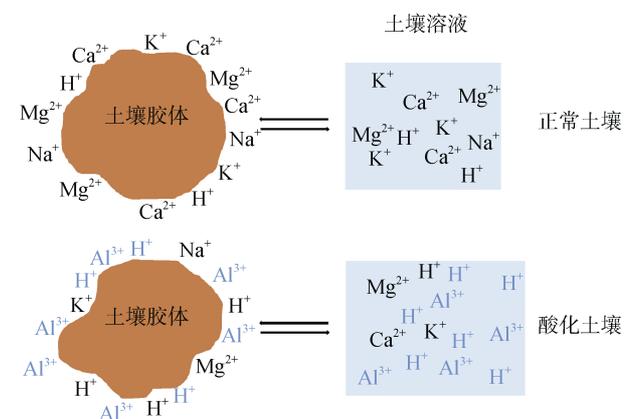


图 2 土壤阳离子交换示意图

Fig. 2 Diagram of soil cation exchanges

土壤中可利用的盐基阳离子库，通过凋落物分解、大气沉积和矿物风化进入土壤，通过植物吸收和浸出损失^[21](图 3)。由于土壤胶体吸附的可交换性盐基离子与土壤游离 H⁺ 进行离子交换，导致盐基离子被替代下来，接着被大量吸收和淋失，因此当输入土壤的盐基离子含量无法补偿淋洗和植物吸收的损失量时，土壤逐渐开始酸化，同时土壤中不断产生和累积的 H⁺ 也会加速盐基阳离子的置换和浸出^[22]。我国亚热带森林流域土壤中的 H⁺ 净输入量约为 1 395 mol/hm²，而与阳离子交换的实际 H⁺ 消耗量约为 703 mol/hm²，长期以来 H⁺ 的大量输入使其与盐基阳离子交换之间严重不平衡^[22]，使大量 H⁺ 留在土壤中而加速酸化并也加强了盐基阳离子的损失。盐基离子的耗竭不仅会降低土壤的酸碱缓冲能力，加速土壤酸化^[23]，而且当土壤盐基阳离子处于耗尽状态时，Al³⁺ 可能在缓冲酸化中起主要作用^[24]。当 pH<4.5 时，Al³⁺ 与盐基离子竞争土壤表面的吸附位

点，盐基离子将随着 Al³⁺ 溶解度增加而损失增加^[25]。此外，H⁺ 和 Al³⁺ 的释放还会影响作物中 Al³⁺ 耐受性基因的表达并对土壤产生毒性^[13]，阻碍植株根系伸长和地下部生物量累积。盐基离子损失的主要过程是：先从土壤胶体吸附位点离解进入土壤溶液中，然后随地表径流进入地表水而淋失，在重庆江津农田土壤中盐基离子淋失比例约为 48.4%^[26]。烟草对盐基离子的吸收不仅会消耗盐基离子，而且植物对养分的吸收通常是净产酸过程，进一步加剧了土壤酸化。祁阳红壤试验田 1991—1995 年和 2001—2005 年期间，盐基离子的吸收对年均 H⁺ 的贡献率分别为 36% 和 30%^[20]。重庆酸性紫色土农田水稻-休闲、水稻-小麦和玉米-小麦体系中，作物吸收带走的盐基离子分别占总输入量的 20%、26% 和 35%，产酸量占总产酸量的 71%~77%^[26]。盐基离子通过植物吸收和淋洗流失而输出，但缺少对烟田土壤中盐基离子的重新投入，因此导致盐基离子的输出量远大于投入量。

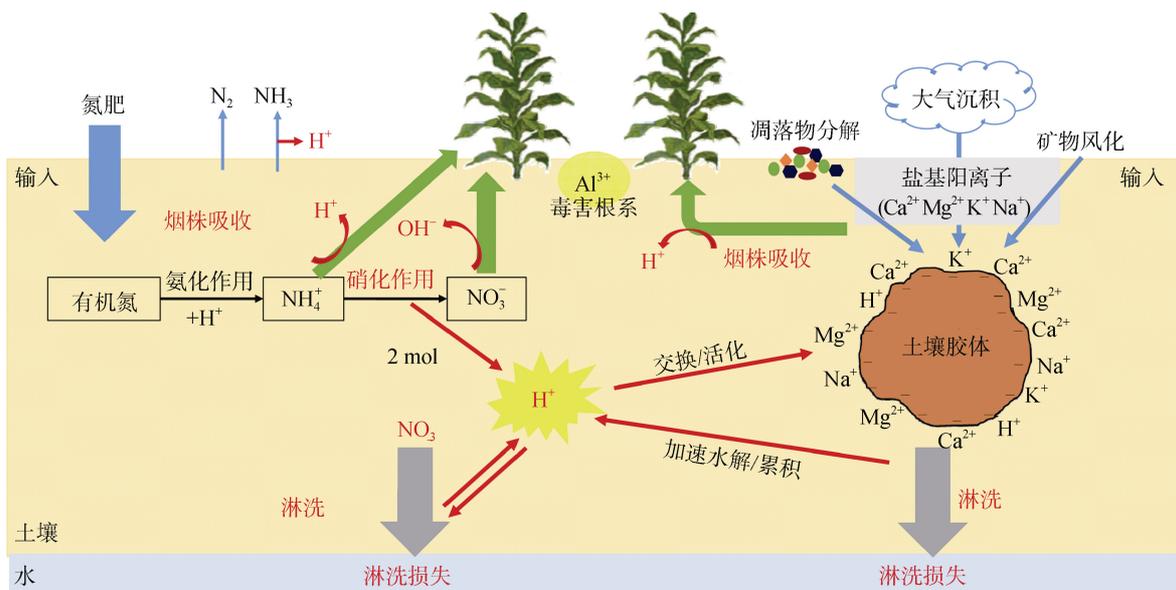


图 3 植烟土壤酸化成因及相互关系

Fig. 3 Causes and interrelationships of acidification in tobacco soil

为了探讨烟田土壤酸化的原因，Zhang 等^[6]定量分析了各致酸因子对于重庆地区烟田土壤酸化的贡献率(图 4)，结果表明，盐基离子(K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)总致酸贡献率高达 88.47%，其中交换性钙的致酸能力最高为 58.72%，交换性钾和镁的致酸能力分别为 19.59% 和 10.16%。同样地，我国马龙县烟田土壤交换性钙的致酸能力占 50.9%^[9]，龙山县植烟土壤交换性钙对 pH 的影响达 56.2%，交换性钙与交换性镁共同影响达 76.2%^[7]。因此，通过对不同影响因子致酸能力占比的计算，发现盐基阳离子在土壤酸化过程中起着至关重要

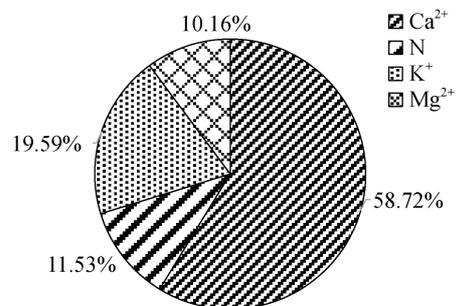


图 4 致酸因子对烟田土壤酸化的贡献率

Fig. 4 Contribution of acidogenic factors to acidification in tobacco soil

的作用,并且盐基离子输入和输出的不平衡是烟田土壤酸化的主要原因,这将为后期的改良奠定理论基础。

1.2 氮肥施用对烟田土壤酸化的影响

通过各影响因素致酸能力的定量分析可知,氮的致酸能力占比为 11.53%,为土壤酸化的第二大影响因素(图 4)。氮肥的投入可直接或间接地驱动土壤酸化(图 3)。氮素添加使全球土壤 pH 平均降低了 0.26 个单位^[27]。我国祁阳红壤、重庆紫色土和公主岭钙质黑土经历长期的氮肥施用后,土壤 pH 均显著下降,净 NO_3^- 淋失和 NH_4^+ 投入产生了大量的 H^+ ,其产量占总 H^+ 产量的 80%^[26]。烤烟在生长前期以吸收肥料氮为主,之后更多地转换为吸收土壤中氮,易导致肥料氮流失^[28]。 NH_4^+-N 是无机氮输入的主要形式, $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 是氮输出的主要形式^[21]。土壤氮循环中,通过氨化作用产生 1 mol NH_4^+ 消耗 1 mol H^+ ,而 1 mol NH_4^+ 氧化为 NO_3^- 会产生 2 mol H^+ ,因此硝化作用是主要的产酸过程^[29]。烟株生长前期吸收较少 NH_4^+-N 且不易淋溶,生育后期吸收 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 增多^[28],使土壤中硝化作用加强,同时也产生了大量 H^+ 。土壤硝化作用也是控制硝酸盐浸出的重要过程,当伴随硝酸盐浸出的盐基阳离子不足时,土壤中会浸出 NH_4^+ 和 H^+ 以保持电荷平衡^[30],同时氨挥发过程中也会有 H^+ 产生。氮肥添加后大量活化土壤表面和主要生根区土壤的盐基阳离子,降低土壤交换位点上阳离子的数量^[31],并且当土壤对氮的吸附能力有限时, NO_3^- 大量浸出后 H^+ 增多,使更多的盐基阳离子被 H^+ 取代^[32],伴随着 NO_3^- 从土壤表面的浸出损失,进一步加速土壤酸化。氮添加会显著降低表层土壤中可交换性钙和镁含量,其减少量分别为 25.4% 和 7.8%^[33]。美国北部地区土壤施用氮肥 30 年后,土壤 pH 显著下降,可交换盐基阳离子 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量分别下降约 44% 和 55%^[23]。此外,大量的盐基离子随着氮肥的施用而流失,氮肥施用后土壤溶液中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 分别增加至 63%、48% 和 137%,地表水中增加量分别达到 89%、14% 和 66%^[24]。在烟田土壤上也面临着同样的问题。我国遵义烟区长期偏施氮肥后,土壤胶粒中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等盐基离子易被 H^+ 置换,土壤养分失调并加速酸化,不利于烤烟的生长发育^[8]。烟田土壤氮肥施用后,经历氮循环的一系列过程不仅会向土壤中输入 H^+ ,还会加剧盐基离子的损失,加速土壤酸化。因此,氮肥的合理化施用也是缓解土壤酸化问题的重要措施。

1.3 养分非均衡化对烟田土壤酸化的影响

阴离子输入输出之间不均衡也是加速农田土

壤酸化的一个原因^[34]。酸性阴离子通过肥料和大气沉降进入土壤,而缺乏盐基离子的重新投入和补充,长期以往使盐基离子不断减少,酸性阴离子保留在土壤中,加剧土壤酸化。并且土壤中盐基离子的淋失也受阴离子影响,常伴随着 SO_4^{2-} 淋失^[35]。氮肥的过量施用且利用率低也会加速土壤酸化。我国每年氮肥施用量通常超过 $\text{N } 500 \text{ kg/hm}^2$ ^[2],而水稻、小麦和玉米的氮素吸收效率仅为 28.3%、28.2% 和 26.1%^[36],因此导致更多的氮素损失。烟田土壤氮肥利用率低的主要原因为肥料氮在烟田中的残留和径流以及淋洗损失。在湖南烟草试验田施氮量 90 ~ 150 kg/hm^2 条件下,烤烟氮肥当季利用率低至 21.68%, 27.65% ~ 30.51% 的肥料氮在土壤中残留,并且各种形式的损失量达总施氮量的 40.98% ~ 51.24%^[37]。因此,非均衡的养分管理对土壤酸化的影响也至关重要。

1.4 酸雨(酸沉降)对烟田土壤酸化的影响

酸雨对地表水、土壤、森林和植被等有严重的危害,是一个全球性的关键问题。在酸雨淋洗作用下,土壤养分被逐渐消耗,加剧盐基离子淋失和土壤酸化^[38]。我国森林土壤 pH 在 1980—2010 年期间平均下降了 0.36 个单位,其中大气沉降对总酸投入的贡献约占 84%^[39]。长期以来由于经济的快速发展和燃料消耗的增加,我国西南地区受酸沉降影响的范围逐步扩大。我国亚热带地区酸雨的频率为 97%,其中严重酸雨($\text{pH} < 4.5$)占 53%,并且每年酸雨中 H^+ 的输入量为 757 mol/hm^2 ^[21]。近些年来,由于我国对环境污染的控制使酸雨的 pH 有一定的提升。成都地区 1989—2008 年期间,降水 pH 增加了 0.7 个单位,并发现 Ca^{2+} 是中和降水中酸性物质的主要成分^[40]。1980—2018 年间酸雨 pH 回升至 5.88,硫沉降和氮沉降均呈下降趋势,同时盐基阳离子沉降和硫氮转化过程也在缓冲酸雨的酸度^[41]。虽然近些年酸雨问题在一定程度上得到了缓解,但仍持续影响着我国农田土壤的酸化,并且其影响效应是个长期的过程,因此关于酸雨对烟田土壤影响的定量分析仍需要进一步的探究。

2 烟田土壤酸化的改良及调控

2.1 施用石灰及碱性物料

施用石灰和碱性物料是改良土壤酸度最普遍有效的方式。石灰的施用可提高土壤 pH,增加耕地表土中可交换 Ca^{2+} 含量和盐基饱和度^[42],提高氮磷钾等营养元素的有效性^[43]。本文总结了以往文献试验数据,模拟了施用石灰对土壤酸化改良的定量关系

(图 5): 石灰的施用显著增加了土壤 pH, 并且石灰施用量与 pH 增加量呈显著正相关, pH 每增加 0.5 个单位需要石灰约 1.35 t/hm²。贵州黄壤试验中发现, pH<5.0 的烟田土壤 pH 每增加 0.1 个单位, 需用石灰约 2 t/hm²; 而 pH 5.2 ~ 5.8 的土壤 pH 每增加 0.1 个单位, 仅需用石灰约 0.4 t/hm² [44]。然而, 石灰对烟株根际土壤微生物有杀灭作用, 施用石灰后的烟株根际土壤细菌、真菌和放线菌数量较对照分别降低了 87.0%、89.8% 和 87.3% [45]。施用石灰还会减少烟株根际土壤微生物群落多样性与丰富度, 其中绿弯菌门、酸杆菌门和放线菌门等不同菌种表现出差异, 然而石灰分解也为微生物提供氮源, 使鞘脂单胞菌属、硝化螺旋菌属和黄杆菌属等与土壤氮循环有关的功能菌丰度显著增多 [46]。酸性条件下微生物的生长和拮抗活性均受到抑制 [18], 因此, 石灰可以通过提高土壤 pH 来抑制病原微生物活性, 控制烟株病害发生率, 其中烟草青枯病的防控率达到 49.9% [46], 烟草细菌枯萎病的控制率达到 31.09% [18], 并且石灰的杀菌作用也可以减少烟草土传病害根结线虫病和黑胫病的发生 [45]。由此可见, 石灰的施用对土壤微生物的影响具有两面性, 但在我国田间石灰改良酸性烟田土壤的同时却忽略了对微生态环境的影响。

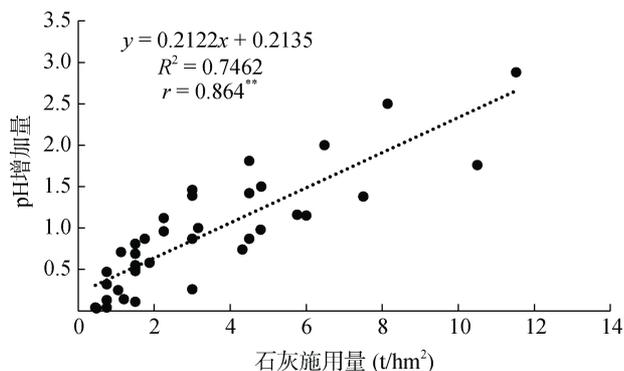


图 5 施用石灰对土壤酸化改良的影响

Fig. 5 Effect of lime application on soil acidification improvement

长期施用酸性以及生理酸性肥料或铵态氮肥会导致土壤营养元素不平衡, 因此也要注意增加碱性肥料如磷矿粉、钙镁磷肥等的施用, 补充钙、镁、钾等盐基离子 [47]。进贤红壤过量钙镁盐基投入后, 土壤 pH 较氮处理升高了 0.27 ~ 0.52 个单位 [48]。重庆地区烟田土壤中撒施白云石粉 1 500 kg/hm²、条施草木灰 900 ~ 1 050 kg/hm² 可使土壤 pH 提高至 5.5 以上, 并促进烟株根系生长, 活化土壤中有关酶及相关微生物 [49]。生物炭是改善烟田土壤理化性质和促进烟草吸收营养的关键物料, 加入烟草秸秆可显著降低土壤

中 H⁺ 和 Al³⁺ 含量, 提高土壤 pH 约 2 个单位 [15], 同时病原体青枯菌减少了 94.51%, 烟草细菌枯萎病发病率减少了 76.64% [50]。此外, 施用牡蛎壳粉末在预防烟草细菌枯萎病和改良土壤酸度方面比石灰和生物炭更有效 [51], 牡蛎壳土壤调理剂主要成分为 CaO, 具有调酸补钙的特点 [52]。施用牡蛎壳粉末将我国重庆彭水县烟田土壤的 pH 显著提高了 0.77 个单位, 并增加了细菌群落多样性, 烟草细菌枯萎病发病率降低了 36.67% [51]。目前, 石灰和碱性改良剂的施用不仅可以缓解烟田土壤酸化问题, 还可以改善烟草的生长环境, 有利于烟草高产优产, 但在碱性物料大量施用的同时也要关注土壤的微生态环境。

2.2 利用“碱度”作为土壤酸碱平衡的杠杆

孟红旗等 [53] 采用元素分析法来计算有机物料的碱度, 不同种类有机肥的碱度不同, 有机肥可有效控制农田土壤的酸度, 同时节约生产成本。因此, 利用“碱度”作为酸碱平衡的杠杆, 可有效精准地缓解土壤酸化问题。在重庆烟田土壤中, 由于氮肥施入产生了 1.93 kmol H⁺, 盐基离子的损失产生了 12.52 kmol H⁺, 最终土壤总酸输入量达到 H⁺ 14.45 kmol/hm² [6]。针对该土壤, 以不同物料的碱度、土壤 pH 和各致酸因子对烟田土壤酸化的贡献率, 本文通过不同物料碱度计算公式: 不同物料碱度 (cmol/kg) = (m_钙/20.04 + m_镁/12.15 + m_钾/39.10 - m_铝/30.97 - m_硫/16.03) × 100 [53], 提出了不同土壤 pH 的改良措施, 即针对 pH < 5.0 的强酸性土壤, 施用约 1.3 t/hm² 的石灰并配施 1 t/hm² 高温堆肥, 可使碱度达到 OH⁻ 16.77 kmol/hm², 同时恢复土壤的微生态环境; 对于 pH 5.0 ~ 5.5 的弱酸性土壤, 施用约 1 t/hm² 生物炭、2 t/hm² 高温堆肥和 0.5 t/hm² 钙镁磷肥, 其碱度之和达到 OH⁻ 14.85 kmol/hm², 可实现酸碱平衡, 并有利于土壤的微生态健康。因此, 针对不同酸化程度的土壤选择不同的物料及用量, 可使烟田土壤 pH 达到酸碱平衡, 实现烟田的“精准降酸”。

目前, 烟田土壤微生态环境的恢复也占据着十分重要的地位。施用有机肥可改善烤烟根际土壤环境和微生物的群落结构, 抑制病原菌的生长, 云南植烟土壤施用有机肥后细菌和放线菌数量较单施化肥分别增加 32.28% 和 24.48%, 青枯菌数量减少 28.74% [54]。有机肥还可使磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性分别增加 30.00%、20.78%、63.47% 和 38.19% [55], 有利于增加烟株根系活力。此外, 生物有机肥对控制作物病害的效果更为显著, 有研究表明, 施用生物有机肥增加了优势菌群数量和多样性, 并且石灰与生物有机肥配合施用后作物细菌枯萎病发病率仅为 14.27% [56]。同

时,草木灰处理后细菌和放线菌数量较常规化肥处理分别增加 61.55% 和 30.52%^[57]。添加生物炭也可增加变形菌门、酸杆菌门、接合菌门和担子菌门等细菌和真菌的数量^[58]。因此,根据不同地区土壤酸化程度,因地制宜、合理地利用“碱度”选择不同改良物料,不仅可以与酸化土壤达到酸碱平衡,还有利于恢复土壤微生态环境,提高土壤中相关酶活性并减少病害,最终有效地缓解烟田土壤酸化和微生态环境破坏的问题。

2.3 其他措施

轮作是改善土壤性质和植物健康的有效策略。玉米-烟草轮作方式下土壤 pH 显著高于连续烟草种植的土壤,钙含量也显著提高^[16],并可以抑制病原微生物活性,烟株细菌枯萎病下降至 23.56%^[17]。因此,在有条件的植烟地区可以选择轮作,不仅可以缓解土壤酸化,还可以改善土壤微生态环境,有效控制烟草病害。免耕覆盖秸秆或地膜覆盖技术也是缓解土壤酸化的一项措施^[49],广东南雄烟区植烟土壤覆膜处理后硝态氮径流损失量比裸地种植低 40%,显著减少了烟田氮素的径流损失^[59],从而提高氮肥利用率,减少硝酸盐的流失,进一步缓解土壤酸化。土壤中合适的水管理也十分重要,在半干旱地区适量水的加入在一定程度上也会提高土壤 pH,并削弱土壤中交换性阳离子对氮添加的负面响应,加速风化以及土壤表面凋落物的分解率,使更多阳离子释放到土壤中^[33]。因此,采用适宜的农艺措施,不仅可以减少土壤中氮素和盐基离子的流失,还可以向土壤中补充盐基离子,改善土壤微生物群落结构,缓解烟田土壤酸化和烟草病害等问题。

3 小结与展望

目前烟田土壤酸化问题在全国烟草种植区普遍存在,因此,探究烟田土壤酸化的致酸机理及调控措施非常必要。通过不同影响因子对烟田土壤酸化贡献率的定量分析,本研究认为盐基离子输入输出不平衡是我国烟田土壤酸化的主要原因。此外,氮肥的不合理施用、养管理不均衡,以及酸沉降等也会进一步加速酸化。施用石灰和碱性物料是调节烟田土壤酸化最方便有效的措施。与此同时,应关注土壤的微生态环境,采用生物有机肥或农家肥对土壤微生态环境进行恢复。利用“碱度”作为酸碱平衡的杠杆,针对不同酸化程度土壤采用不同的改良方式,可达到“精准降酸”的目的。虽然国内外关于烟田土壤酸化影响因子及机理的研究已获得了重要的进展,但仍有很多问

题没有得到有效解决。各致酸因子影响占比的定量分析应进一步加强,以平衡烟田土壤盐基离子输入输出为主,选用合适的肥料和改良剂及改良措施。针对我国烟田强酸性和弱酸性土壤区域分布不均问题制定不同改良措施,同时运用 GIS 数字化精准划分土壤酸化空间分区图,以实现退化单元精准识别,按照不同单元土壤酸化特点实现精准分类降酸治理,达到“精准降酸”。此外,我国农户对石灰等碱性物料的施用量过大,忽视了土壤微生态环境被破坏的问题,未来应将农艺措施与生物学知识相结合建立综合改良与调控技术,这不仅可以有效地控制烟田土壤酸化问题,还可以对土壤微生态环境进行恢复,实现对我国烟田酸化土壤长久有效的控制。

参考文献:

- [1] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 238-244.
- [2] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [3] 李军. 烟田土壤酸化现状与修复技术探讨[J]. 现代农业科技, 2017(21): 194-195.
- [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] 邓小华, 李源环, 周米良, 等. 武陵山地植烟土壤酸度特征及影响因素——以湖南省湘西自治州为例[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 304-309.
- [6] 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 International, 2016, 23(6): 5442-5450.
- [7] 唐韵, 向德明, 周清明, 等. 龙山县植烟土壤 pH 时空变异与影响因子研究[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 100-106.
- [8] 彭玉龙, 郑梅迎, 刘明宏, 等. 遵义烟田土壤 pH 的空间分布与演变特征[J]. 中国烟草科学, 2019, 40(3): 47-54.
- [9] 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.
- [10] 邓小华, 蔡兴, 张明发, 等. 喀斯特地区湘西州植烟土壤 pH 分布特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 308-313.
- [11] 陈玉蓝. 四川省植烟土壤酸度特征及其影响因素研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014.
- [12] 张东, 扈强, 杜咏梅, 等. 植烟土壤酸化及改良技术研究进展[J]. 中国烟草科学, 2013, 34(5): 113-118.
- [13] 尹永强, 何明雄, 邓明军. 土壤酸化对土壤养分及烟叶品质的影响及改良措施[J]. 中国烟草科学, 2008, 29(1): 51-54.
- [14] Zheng X B, Song W J, Guan E N, et al. Response in physicochemical properties of tobacco-growing soils and N/P/K accumulation in tobacco plant to tobacco straw

- biochar[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(2): 293–305.
- [15] Bai Y, Wang G, Cheng Y, et al. Soil acidification in continuously cropped tobacco alters bacterial community structure and diversity via the accumulation of phenolic acids[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 12499.
- [16] Niu J J, Rang Z W, Zhang C, et al. The succession pattern of soil microbial communities and its relationship with tobacco bacterial wilt[J]. *BMC Microbiology*, 2016, 16(1): 233.
- [17] Niu J J, Chao J, Xiao Y H, et al. Insight into the effects of different cropping systems on soil bacterial community and tobacco bacterial wilt rate[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2017, 57(1): 3–11.
- [18] Li S L, Liu Y Q, Wang J, et al. Soil acidification aggravates the occurrence of bacterial wilt in South China[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 703.
- [19] 王姣, 丁伟. 不同pH对烟草抗青枯病相关基因表达的影响[J]. *植物医生*, 2018, 31(8): 44–47.
- [20] Zeng M F, de Vries W, Bonten L T C, et al. Model-based analysis of the long-term effects of fertilization management on cropland soil acidification[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(7): 3843–3851.
- [21] Rosenstock N P, Stendahl J, van der Heijden G, et al. Base cations in the soil bank: Non-exchangeable pools may sustain centuries of net loss to forestry and leaching[J]. *SOIL*, 2019, 5(2): 351–366.
- [22] Yang J L, Zhang G L, Huang L M, et al. Estimating soil acidification rate at watershed scale based on the stoichiometric relations between silicon and base cations[J]. *Chemical Geology*, 2013, 337/338: 30–37.
- [23] Wang R Z, Dungait J A J, Buss H L, et al. Base cations and micronutrients in soil aggregates as affected by enhanced nitrogen and water inputs in a semi-arid steppe grassland[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 564–572.
- [24] Schroder J L, Zhang H L, Girma K, et al. Soil acidification from long-term use of nitrogen fertilizers on winter wheat[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(3): 957–964.
- [25] Lucas R W, Klaminder J, Futter M N, et al. A meta-analysis of the effects of nitrogen additions on base cations: Implications for plants, soils, and streams[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(2): 95–104.
- [26] 郝天象. 不同氮肥管理和种植体系的农田土壤酸化定量研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [27] Tian D S, Niu S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2): 024019.
- [28] 时向东, 刘喜庆, 王振海, 等. 利用¹⁵N示踪研究烤烟对氮素的吸收和分配规律[J]. *中国烟草学报*, 2013, 19(6): 55–58.
- [29] Han J P, Shi J C, Zeng L Z, et al. Effects of nitrogen fertilization on the acidity and salinity of greenhouse soils[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(4): 2976–2986.
- [30] Qian C, Cai Z C. Leaching of nitrogen from subtropical soils as affected by nitrification potential and base cations[J]. *Plant and Soil*, 2007, 300(1/2): 197–205.
- [31] Cusack D F, Macy J, McDowell W H. Nitrogen additions mobilize soil base cations in two tropical forests[J]. *Biogeochemistry*, 2016, 128(1/2): 67–88.
- [32] Lu X K, Mao Q G, Gilliam F S, et al. Nitrogen deposition contributes to soil acidification in tropical ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(12): 3790–3801.
- [33] Niu G X, Wang R Z, Hasi M, et al. Availability of soil base cations and micronutrients along soil profile after 13-year nitrogen and water addition in a semi-arid grassland[J]. *Biogeochemistry*, 2021, 152(2/3): 223–236.
- [34] 宋文峰, 王超, 陈荣府, 等. 长期不同施肥下小麦离子吸收对土壤酸化贡献能力的比较[J]. *土壤*, 2017, 49(1): 7–12.
- [35] 张倩, 高明, 徐畅, 等. 施氮对紫色土硝酸根和盐基离子耦合迁移的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 111–115.
- [36] Miao Y X, Stewart B A, Zhang F S. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31(2): 397–414.
- [37] 汪耀富, 邵孝侯, 孙德梅, 等. 基于微区设计的多雨地区烟田土壤氮素平衡研究[J]. *烟草科技*, 2019, 52(3): 18–25.
- [38] 袁玉波. 土壤酸度调节对烤烟生长发育和产质量的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- [39] Zhu Q C, de Vries W, Liu X J, et al. The contribution of atmospheric deposition and forest harvesting to forest soil acidification in China since 1980[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 146: 215–222.
- [40] Wang H, Han G L. Chemical composition of rainwater and anthropogenic influences in Chengdu, Southwest China[J]. *Atmospheric Research*, 2011, 99(2): 190–196.
- [41] 余倩, 段雷, 郝吉明. 中国酸沉降: 来源、影响与控制[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(3): 731–746.
- [42] Saarsalmi A, Tamminen P, Kukkola M, et al. Effects of liming on chemical properties of soil, needle nutrients and growth of Scots pine transplants[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(2): 278–285.
- [43] 张龙辉, 粟戈璇, 邓小华, 等. 改良剂施用对酸性植烟土壤养分的影响效应[J]. *中国烟草科学*, 2020, 41(5): 20–27.
- [44] 朱经伟, 李志宏, 刘青丽, 等. 石灰对酸化黄壤整治烟田土壤酸度的影响及其应用效果[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(3): 43–48.
- [45] 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.
- [46] 沈建平, 张明宇, 刘高峰, 等. 施用石灰氮对烟株根际土壤微生物区系的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(1): 75–82.

- [47] 魏国胜. 植烟土壤酸化机理及调控技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [48] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1109–1116.
- [49] 张东. 重庆烟区植烟土壤酸化现状及改良措施研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [50] Zhang C S, Lin Y, Tian X Y, et al. Tobacco bacterial wilt suppression with biochar soil addition associates to improved soil physiochemical properties and increased rhizosphere bacteria abundance[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 112: 90–96.
- [51] 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.
- [52] 严建辉. 牡蛎壳土壤调理剂对黄泥田花生产量及土壤酸化改良的影响[J]. 农学学报, 2019, 9(11): 17–20.
- [53] 孟红旗, 吕家珑, 徐明岗, 等. 有机肥的碱度及其减缓土壤酸化的机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1153–1160.
- [54] 蔡秋华, 赵正雄, 左进香, 等. 有机肥配施减量化肥对烤烟青枯病及其根际微生物的影响[J]. 烟草科技, 2018, 51(11): 20–27.
- [55] 施娴, 刘艳红, 王田涛, 等. 有机肥与烟草专用肥配施对植烟土壤微生物和土壤酶活性的动态变化[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1126–1131.
- [56] Wu K, Yuan S F, Wang L L, et al. Effects of bio-organic fertilizer plus soil amendment on the control of tobacco bacterial wilt and composition of soil bacterial communities[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(6): 961–971.
- [57] 蔡秋华, 黄俊杰, 林云红, 等. 草木灰对烤烟根际土壤微生物群落结构及功能多样性的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(11): 43–50.
- [58] Gao L, Wang R, Shen G M, et al. Effects of biochar on nutrients and the microbial community structure of tobacco-planting soils[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2017, 17(4): 884–896.
- [59] 王军, 陈能场, 詹振寿, 等. 不同种植方式对烟田氮素径流损失的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 68–73.