

DOI: 10.11689/sc.2024032602 CSTR: 32179.14.sc.2024032602

苏亚飞, 包文彬, 李彦生, 等. 农田土壤酸化: 原理、危害及缓解措施[J]. 土壤与作物, 2025, 14(1): 1–14.

SU Y F, BAO W B, LI Y S, et al. A review of soil acidification: principles, risk and mitigation measures in farmland[J]. Soils and Crops, 2025, 14(1): 1–14.

# 农田土壤酸化: 原理、危害及缓解措施

苏亚飞<sup>1,4</sup>, 包文彬<sup>1,2,3</sup>, 李彦生<sup>1</sup>, 于镇华<sup>1</sup>, 刘晓冰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土地保护与利用全国重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150081; 2. 兴安盟农牧局农田建设和黑土地保护服务中心, 内蒙古自治区兴安盟 137400; 3. 东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江哈尔滨 150030; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 土壤酸化是农田土壤退化的表现形式之一, 影响作物生产。自然条件下, 土壤酸化是一个非常缓慢的过程, 但由于人类活动引起的酸沉降, 尤其是化肥过量施用和不合理耕作等因素, 农田土壤酸化趋势正在加速。本文阐述了造成土壤酸化的基本原理, 综述了不同国家及地区长期定位试验针对土壤酸化的研究结果, 分析了我国农田土壤酸化趋势; 总结了不同类型农田土壤酸化对土壤微生物、土壤理化性质和作物生长的危害; 梳理了不同控制类实验的研究结果, 讨论了施用碱性土壤改良剂、生物炭和有机肥对缓解土壤酸化的作用; 最后展望了农田土壤酸化研究需要加强的可能方向。

**关键词:** 土壤酸化; 酸化危害; 缓解措施; 作物生产

中图分类号: S154.1

文献标识码: A

## A review of soil acidification: principles, risk and mitigation measures in farmland

SU Yafei<sup>1,4</sup>, BAO Wenbin<sup>1,2,3</sup>, LI Yansheng<sup>1</sup>, YU Zhenhua<sup>1</sup>, LIU Xiaobing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Black Soils Conservation and Utilization, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China; 2. Farmland Construction and Black Soil Protection Service Center, Agriculture and Animal Husbandry Bureau of Hinggan League, Hinggan League 137400, China; 3. College of Resources and Environments, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Soil acidification is one form of farmland soil degradation and poses a threat to crop production. Under natural conditions, soil acidification is a relatively slow process. However, anthropogenic activities, such as acid deposition, especially excessive fertilization and improper farming managements have accelerated acidification process. This review elucidates the fundamental principles behind soil acidification, assesses the research findings from long-term field experiments on soil acidification in different countries or regions, and analyzes the trend of acidification of farmland soils in China. The paper summarizes the adverse effect of soil acidification on different types of agricultural soils regarding soil microorganisms, soil physicochemical properties, and crop growth. The results of different control experiments are integrated and effects of alkaline soil amendments, biochar, and organic fertilizers in mitigating soil acidification are discussed. Meanwhile, possible research avenues on soil acidification in farmland which need to be strengthened are prospected.

**Keywords:** soil acidification; hazard; mitigation; crop production

## 0 引言

土壤酸化是指土壤 pH 值降低的现象, 其本质是由于自然或人为活动导致土壤中质子 ( $H^+$ ) 增加, 土

收稿日期: 2024-03-26; 修回日期: 2024-06-19.

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2021YFD1500803).

第一作者简介: 苏亚飞 (2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向为作物耕作与栽培. E-mail: suyafei22@mails.ucas.ac.cn.

通信作者: 李彦生 (1983-), 男, 副研究员, 主要从事作物耕作与栽培、作物生理生态研究. E-mail: liyansheng@jga.ac.cn.

壤溶液中  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$  等碱性离子损失, 导致土壤酸中和容量 (ANC) 降低的过程<sup>[1-2]</sup>。土壤酸化是土壤质量退化的一种表现形式, 影响作物生育和产量。全国第二次土壤普查将农田土壤按照酸性类型分为弱酸性土壤 (pH 5.5~6.5)、酸性土壤 (pH 4.5~5.5) 和强酸性土壤 (pH $\leq$ 4.5)<sup>[3]</sup>。

土壤酸化主要由酸雨和酸性物质的沉降、酸性肥料的施用和作物对土壤养分的吸收等因素引起<sup>[4]</sup>。自然条件下的酸化过程非常缓慢, 需要数百万年到数亿年的时间, 但人类活动会加速土壤酸化进程。自工业革命以来, 由于人类活动对地球环境影响不断增强, 特别是工业的迅速发展、农业生产过程中化学肥料的大量施用等使得土壤酸化速率明显增加。对全球酸性土壤面积进行评估后发现, 地球无冰覆盖陆地总面积的 30% 为酸性土壤, 而大约 60% 的酸性土壤位于热带和亚热带地区<sup>[5]</sup>。其中热带和亚热带地区土壤的母质在高温高湿条件下更容易发生化学风化, 形成的  $Al_2O_3$  等次生矿物会通过水解产生氢离子, 同时强烈的降雨会导致碱性阳离子大量淋失, 不合理的管理措施则会加剧土壤的酸化。目前, 我国处于热带和亚热带的华南地区 pH $<$ 5.5 的耕地土壤面积高达 55%。而由于受大气酸沉降、过量施氮和不合理的田间管理措施等因素影响, 我国其他地区耕地土壤酸化面积同样显著增加。近 30 年来东北地区、黄淮海和长江中下游区 pH $<$ 5.5 的耕地面积占比分别增加了 2.61%、2.24% 和 14.93%<sup>[6]</sup>。

土壤酸化会加速降低土壤中盐基离子浓度和土壤肥力, 造成营养元素大量淋失并导致作物减产, 对农田生态系统造成许多不利影响<sup>[7]</sup>。同时, 土壤 pH 值的降低还会提高重金属化合物在土壤溶液中的溶解度, 从而活化重金属。例如, 土壤酸化后  $Al^{3+}$  和  $Mn^{2+}$  等重金属离子对作物的毒性明显提高<sup>[8]</sup>。重金属活性增加的同时, 作物所需养分含量和产量也随之降低<sup>[9-10]</sup>。长期的土壤酸化还会改变土壤微生物群落结构特征, 降低土壤微生物多样性, 许多功能性土壤微生物和土壤酶活性受到抑制<sup>[11]</sup>。同时, 土壤酸化会破坏土壤结构, 造成土壤板结, 降低土壤松度, 不利于植物扎根<sup>[12]</sup>。本文综述了土壤酸化的原因、危害以及缓解土壤酸化的措施, 为土壤资源可持续利用提供理论和技术途径。

## 1 农田土壤酸化原因

### 1.1 酸沉降类型及其引起的土壤酸化

酸沉降是土壤酸化的原因之一。德国科学家 Junge 等<sup>[13]</sup> 提出, 当大气中  $CO_2$  和纯水在 10℃ 达到电解平衡时 pH 值为 5.6, 因此降雨的 pH 是否小于 5.6 成为判断酸雨的标准。酸沉降包括湿沉降和干沉降, 湿沉降通常是指雨、雪、露、霜等 pH $<$ 5.6 的降水; 干沉降是指大气中酸性物质, 例如粉尘颗粒物、氮氧化物和 气态硝酸等, 直接通过气体吸附、微粒碰撞和重力沉降等形式而不经过降水转移到土壤中的过程<sup>[14]</sup>。酸性污染物的主要来源是化石燃料的燃烧和农业生产活动中释放的硫化物及氮氧化物等<sup>[15-16]</sup>。酸沉降的前体物质 ( $SO_2$ 、 $NO_x$ ) 在土壤中的循环转化很大程度上加剧了土壤酸化, 随着化石燃料的燃烧、工业废气和汽车尾气等排放的增加, 活性氮和  $SO_2$  被大量释放, 大气中有 90% 的  $SO_2$  和 70% 的  $NO_x$  来源于煤炭的燃烧<sup>[17]</sup> (图 1)。

全球范围内都存在酸沉降现象, 预估全球每年的氮沉降量为 68 Tg, 硫沉降量达到 221.7 Tg<sup>[18]</sup>。随着我国工业和农业的快速发展, 酸沉降问题也日益突出, 我国  $SO_2$  的排放量在 2006 年达到最高值 32 Tg,  $NO_x$  在 2012 年排放量达到最高值 28 Tg<sup>[19]</sup>。排放到大气中的致酸物质会随着降雨进入农田等生态系统造成污染, 但由于经济布局等原因, 不同地区之间存在差异, 其中酸沉降严重的地区集中在华北平原、东南沿海地区和西南地区。氮沉降通量呈现自东南沿海向西北内陆逐渐减少的趋势, 其中华北地区农业活动集中、化肥投入量大, 是我国氮沉降量最高的地区, 年沉降量达  $56 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 华东地区降水丰富, 氮沉降以湿沉降为主, 沉降量为  $42 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 西南地区沉降量仅次于以上两个地区, 氮沉降量为  $38 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ <sup>[20]</sup>。我国降水中的主要阴离子为  $SO_4^{2-}$ , 在西南地区  $SO_4^{2-}$  占酸沉降总阴离子沉降量最高达 70% 以上, 年沉降量达  $35 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 华东地区在厦门市洪文站观测到年沉降量为  $43 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 其中酸沉降的贡献值达到 84%; 西南、东南和东北地区土壤酸化最为明显, 土壤 pH 值下降幅度分别为 0.63、0.55 和 0.50 个单位。随着酸雨

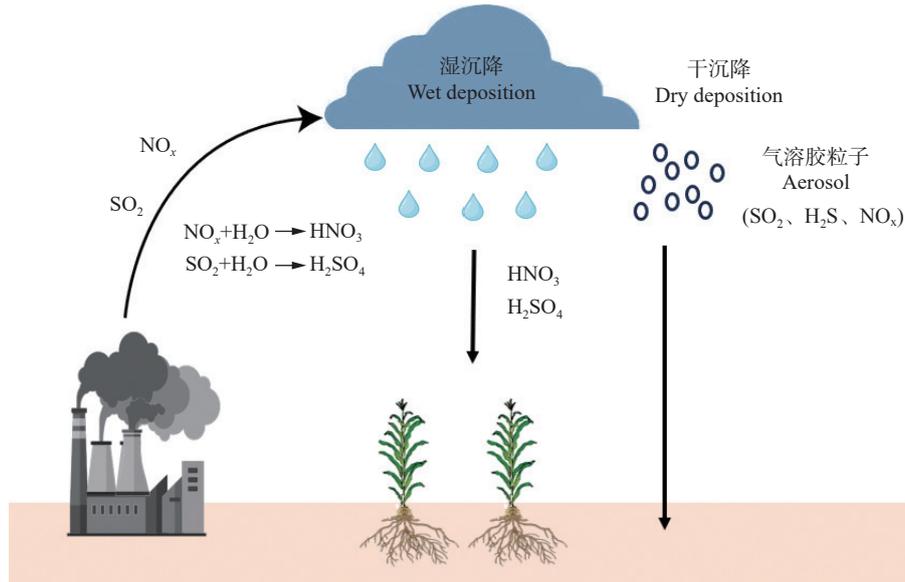


图 1 大气干、湿酸沉降原理示意图

Fig. 1 Conceptual diagram illustrating the main processes of atmospheric dry and wet acid deposition

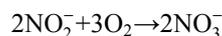
污染的改善,  $\text{SO}_4^{2-}$  年沉降量平均下降  $0.68 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ , 但是氮沉降量仍在持续增加, 对我国亚热带和热带土壤 pH 值进行 Meta 分析发现, 氮沉降对土壤 pH 值降低的响应明显高于硫沉降<sup>[21]</sup>。

### 1.2 酸沉降对土壤酸化贡献

含硫、氮的酸沉降物质会导致土壤养分含量的下降和盐基阳离子的淋失, 重金属离子  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  等毒性的增加, 加剧土壤酸化<sup>[22]</sup>。瑞典南部中性森林土壤经过 48 年酸沉降使其表层土壤 pH 值下降约 0.8 个单位。洛桑试验站长期定位试验表明, 自 1883 年之后的 110 ~ 140 年内, 酸沉降引起林地土壤 pH 值由 6.2 降低到 3.8, 同时期的草地土壤 pH 值则由 5.2 降低到 4.2<sup>[23]</sup>。尽管近年来发达国家酸性气体排放量有所下降, 但是全球整体排放量仍不容乐观。我国南方黄红壤地区已成为世界上除北美和欧洲之外的第三大酸雨区<sup>[24]</sup>。虽然酸沉降是引起土壤酸化的重要原因, 但整体上对目前日益突出的土壤酸化问题的贡献有限。有研究表明, 单位面积上酸性物质的沉降量仅为肥料施用产生酸性物质质量的 4%。直接或间接施用氮肥会产生  $35 \sim 50 \text{ kmol}(\text{H}^+) \cdot \text{hm}^{-2}$ , 然而在年降水量为 2 000 mm 的条件下, 酸沉降只能贡献  $0.05 \sim 2.0 \text{ kmol}(\text{H}^+) \cdot \text{hm}^{-2}$ 。这意味着氮肥施用导致的土壤酸化, 至少是酸雨的 20 倍<sup>[25-26]</sup>。

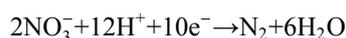
### 1.3 化肥施用导致土壤酸化

施用化肥, 尤其是氮肥是导致耕地土壤酸化的重要原因。利用 Meta 分析方法系统总结 106 项涉及氮添加的研究结果表明, 施氮使全球土壤 pH 值平均降低了 0.26 个单位<sup>[27]</sup>。土壤中氮循环过程包括硝化作用、反硝化作用和氨挥发等过程。硝化作用是铵 ( $\text{NH}_3$  或  $\text{NH}_4^+$ ) 在土壤微生物氨氧化细菌 (AOB) 和氨氧化古菌 (AOA) 的催化作用下氧化成  $\text{NO}_3^-$  的过程, 也就是  $\text{NH}_4^+$  被氧化成  $\text{NO}_3^-$  的过程。其中, 肥料氮在土壤中的硝化作用是影响土壤 pH 值的重要原因。

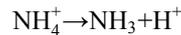


硝化作用中 1 mol 有机含氮化合物会产生 2 mol  $\text{H}^+$ , 是诱导土壤酸化过程发生的重要原因<sup>[28]</sup>。土壤中施入大量氮肥会在很大程度上会提高  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$  的含量, 而土壤中  $\text{NH}_4^+$  的含量越高, 硝化作用越会加速土壤酸化进程<sup>[29]</sup>。

反硝化作用是微生物将硝酸盐还原成氮气或气态含氮化合物的过程:



其本质需要消耗 1 mol H<sup>+</sup>。此外, 氨挥发过程中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>会在碱性环境分解为氨气:



氨挥发过程会产生 1 mol H<sup>+</sup>导致土壤酸化<sup>[30]</sup>。

不同类型的氮肥对土壤酸化会产生不同的影响。铵态氮肥中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>与盐基阳离子 Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>等发生置换, 使盐基阳离子更容易从土壤中淋失, 降低土壤对酸化的缓冲作用。而硝态氮肥产生的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>会在土壤溶液中通过电荷平衡与金属阳离子结合造成淋失<sup>[9, 27]</sup>。氮肥中硫酸铵产生的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>最多, 使土壤 pH 值下降最明显, 尿素更容易挥发导致用于硝化反应的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>较少 (图 2)。因此, 尿素对土壤的酸化作用比硫酸铵和硝酸铵小。在对黑钙土施加 5 种不同类型氮肥的对比研究发现, 土壤 pH 值下降幅度的顺序为: 硫酸铵 > 硝酸铵 > 尿素 > 缓释尿素 > 碳酸氢铵<sup>[31]</sup>。合理的施用氮肥可以刺激植物的养分吸收和生长, 但高氮负荷会导致硝酸盐和碱性阳离子流失, 土壤中 H<sup>+</sup>和 Al<sup>3+</sup>浓度增加, 从而导致土壤酸化<sup>[32]</sup>。

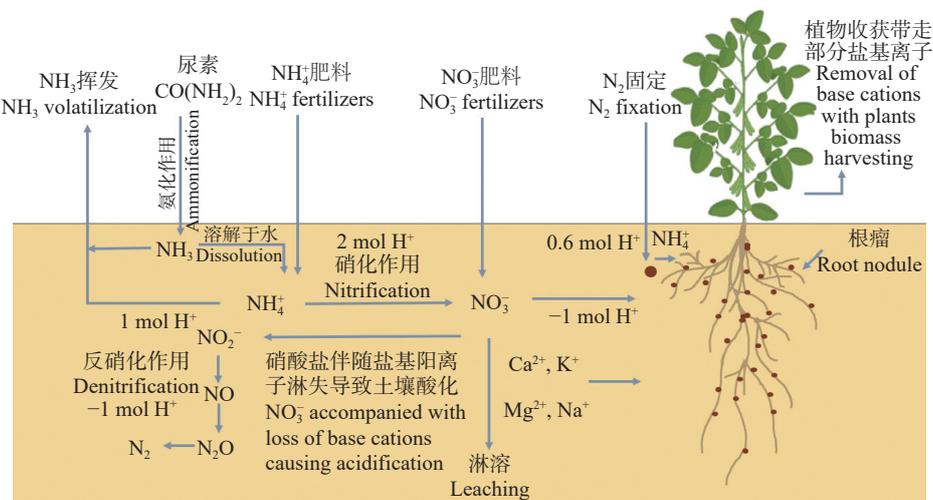


图 2 肥料氮导致土壤酸化原理示意图 (以豆科作物为例)

Fig. 2 Conceptual diagram illustrating the main principle of soil acidification induced by nitrogen fertilizers (using leguminous crops as an example)

#### 1.4 不同作物及种植方式引起的土壤酸化

为了维持电荷平衡, 作物在吸收钾、钙、铵态氮、金属阳离子和硝态氮阴离子等养分元素时会释放等量的 H<sup>+</sup>或 OH<sup>-</sup>。通常植物对阳离子的吸收会高于阴离子, 产生 H<sup>+</sup>数量也大于 OH<sup>-</sup>, 因此植物吸收养分元素的过程为产酸过程。尽管植物产酸量远不及施用化肥对土壤造成的酸化作用影响, 但也不能忽视<sup>[33]</sup>。种植作物的种类不同对土壤酸化速率的影响也不同。茶树在生长发育过程中根系会吸收大量 Al<sup>3+</sup>, 同时释放大量 H<sup>+</sup>, 因此比其他作物更容易导致土壤酸化<sup>[34]</sup>。上世纪 80 年代末中国农业科学院抽样调查发现我国茶园高产区土壤 pH 值小于 4 的茶园占 12.5%; 90 年代针对我国三大茶叶产区江苏省、浙江省、安徽省的样本调查显示, 土壤 pH 值小于 4 的茶园数量上升到 44%<sup>[35]</sup>。土壤酸化也会随茶树种植年限的增加而加剧, 通过总结对 23 个茶园不同种植年限的研究结果表明, 不同种植年限 (<5、5~15、15~25、25~35、>35 年) 的茶园 pH 值分别为: 4.51、4.33、4.31、4.12、4.02<sup>[36]</sup>, 说明连续多年种植的茶树土壤 pH 值会明显下降。

与非豆科植物相比, 豆科植物会加速土壤酸化的进程。因为种植豆科植物不但使有机酸在大豆根部大量累积, 同时豆科植物共生生物固氮作用形成的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>会产生 H<sup>+</sup>, 使得土壤 pH 值下降程度更大<sup>[37]</sup>。澳大利亚田间长期定位试验结果表明, 小麦连作使土壤 pH 值下降 1.32 个单位, 而小麦与羽扇豆轮作会使土壤 pH 值下降 1.62 个单位<sup>[38]</sup>。Xu 等<sup>[39]</sup>在黑龙江省黑土地连续种植 10 年大豆的研究发现, 豆科作物更倾向于吸收 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>, 不断移除土壤中交换性 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>, 明显降低了土壤酸碱缓冲容量, 使土壤 pH 值显

著降低 4.6%。王笃超等<sup>[40]</sup>发现黑土经过 7 年的大豆连作处理, 土壤 pH 值下降了 0.96 个单位。在土壤 pH 值达到阈值之前, 随着连作年限越长土壤酸化越严重, 但是在达到阈值后土壤 pH 值会稳定<sup>[41]</sup>。澳大利亚地区连续种植超过 30 年的三叶草, 土壤 pH 值下降了大约 1 个单位。尼日利亚西部地区在连续种植 8 年玉米后土壤 pH 值下降 1.1 个单位, 其中连作前 3 年土壤 pH 值下降最快, 之后稳定在 5.5 左右<sup>[42]</sup>。水稻连作 23 年后土壤也出现 pH 值下降现象, 并最终稳定在 5.35 左右<sup>[43]</sup>。Fageria 等<sup>[44]</sup>研究发现不同作物连作导致土壤酸化阈值具有一定差异, 其中大豆阈值为 5.6、玉米为 5.4、水稻为 4.9、小麦为 6.3。需要指出的是, 由连作导致的土壤酸化的研究中往往伴随着作物产量的显著下降。

### 1.5 我国粮食主产区耕地土壤酸化趋势

Guo 等<sup>[26]</sup>在 *Science* 上发表了针对中国土壤酸化研究的相关报道, 引起了国内外的广泛关注, 并指出施加氮肥是导致近年我国土壤酸化的主要原因, 耕地利用程度越高的土壤酸化越严重。研究表明过量施用化肥使得我国各地土壤的 pH 值平均下降了 0.13 ~ 0.80 个单位。黄淮海地区主要土壤类型潮土和西北黄土高原塬土的土壤 pH 值平均降低了 0.43 个单位。南方谷类作物种植地区红壤 pH 值平均下降 0.27 个单位。重庆谷类作物种植地区的紫色土 pH 值下降 0.78 个单位。

作为我国粮食主产区东北的黑土区也开始出现酸化现象, 集中分布在黑龙江省东部和东北部地区<sup>[45]</sup>。与南方酸性的红壤和黄壤不同, 近年来由于长期垦殖和化肥施用导致的黑土酸化成为黑土退化的重要指征。通过对近 30 年典型黑土 pH 变化进行总结分析发现, 黑土区土壤在 1988—1991 年平均 pH 值为 7.08, 2002—2006 年为 6.58, 2012—2016 年为 6.49, 到 2021 年平均为 6.29, 整体上呈不断下降趋势<sup>[46-47]</sup>。汪景宽等<sup>[48]</sup>对主要集中在黑龙江省、吉林省、辽宁省以及内蒙古自治区东四盟地区的黑土区耕地土壤 pH 值变化进行分析发现, pH 值在 <4.5 的极强酸性耕地占 12.8%, 4.5 ~ 5.5 的强酸性耕地占 13.7%, 5.5 ~ 6.5 的弱酸性耕地占 43.6%, 不同黑土类型耕地土壤 pH 值的顺序为: 草甸土 (6.7) > 水稻土 (6.32) > 棕壤 (6.26) > 黑土 (5.98) > 暗棕壤 (5.91) > 白浆土 (5.84)。长期定位试验表明, 哈尔滨地区的典型黑土因长期 (1979—2006 年) 大量施用氮肥导致土壤 pH 值由 7.1 下降至 5.7<sup>[49]</sup>。在连续施用 25 年化肥后, 吉林省黑土区土壤 pH 值显著下降了 1.4 个单位<sup>[22]</sup>。因此, 黑土土壤酸化已不容忽视。

## 2 农田土壤酸化对土壤生态的危害

### 2.1 土壤微生物活性、丰度和多样性

土壤微生物在土壤有机质分解、养分循环等过程中发挥着重要作用。土壤酸化会降低土壤微生物活性, 降低微生物的多样性和丰富度, 破坏土壤生态<sup>[50]</sup>。Meng 等<sup>[51]</sup>利用 Meta 分析方法分析了全球范围土壤 pH 值下降对土壤微生物的影响, 结果表明土壤 pH 值平均下降 0.24 个单位, 土壤微生物呼吸、微生物量碳和微生物量氮分别降低 14.7%、9.6% 和 12.1%。

微生物中细菌占其总数的 70% ~ 90%, 在土壤中分布广、数量多, 并具有固氮、解磷、解钾等功能<sup>[52]</sup>。土壤 pH 值在降低 0.24 个单位后, 微生物群落中细菌生物量显著下降 16.4%<sup>[51]</sup>。洛桑实验站关于淋溶土的研究中发现, 土壤 pH 值为 8.3 与 pH 值为 4.0 的土壤相比, 细菌群落数量提升 4 倍, 多样性增加 2 倍<sup>[53]</sup>。而土壤微生物硝化细菌、反硝化细菌等参与氮循环的细菌对植物的生长发育至关重要。单晓冉等<sup>[54]</sup>通过 Biolog 法对比 5 种固氮菌生长曲线发现, 土壤 pH 值低于 3.5 ~ 4.0 时固氮菌丰度和活性显著降低。

硝化作用主要通过氨氧化细菌 (AOB) 和氨氧化古菌 (AOA) 完成。Bru 等<sup>[55]</sup>分析了 107 份 pH 值在 4.2 ~ 8.3 的土壤样品发现, 酸性土壤中 AOA 相对丰度随 pH 降低而降低, 且土壤 pH 值对 AOA 的影响大于 AOB。通过对棕壤土进行长期的低量和高量氮肥处理发现, 土壤 pH 值由 4.96 分别降低至 4.36 和 4.20, AOA 丰度分别减少 30% 和 32%<sup>[56]</sup>。*nirS* 型反硝化细菌在土壤中大约占 0.4%, 是调控反硝化作用限制步骤的关键细菌<sup>[57]</sup>。长期连续施用氮肥后东北黑土 pH 降低 0.99 个单位, *nirS* 型反硝化细菌丰度和多样性分别降低 14.7% 和 14.4%<sup>[58]</sup>。土壤酸化同样会影响其他微生物养分含量。在对 86 篇文献进行 Meta 分析的结果表明, 氮添加使土壤 pH 值减小 4.1%, 微生物量磷显著降低 13.2%<sup>[59]</sup>。

## 2.2 土壤重金属的活化

土壤酸化过程中  $H^+$  会与土壤中重金属离子进行交换并释放, 导致土壤中重金属离子的富集和活性的增加<sup>[60]</sup>。土壤溶液 pH 值每降低 1 个单位, 土壤溶液中的重金属浓度就会增加 2 倍<sup>[61]</sup>。铝是地壳含量第三大元素,  $Al^{3+}$  溶解度随土壤 pH 值的降低而显著增加; 世界上有超过 30% 的农田耕地的土壤 pH 值  $< 5.5$ , 所以铝胁迫在全球范围都是限制作物生产的重要因素<sup>[62]</sup>。在湖南省旱地红壤长期施用化肥后, 土壤 pH 值降低 1.56 个单位, 土壤交换性  $Al^{3+}$  随之增加  $6.71 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[63]</sup>。通过营养液的模拟实验研究表明, 土壤 pH 值下降 1 个单位,  $Al^{3+}$  浓度会增加 1 000 倍<sup>[64]</sup>。

肥料中含有植物生长所必需的  $Mn^{2+}$ , 但当  $Mn^{2+}$  含量  $> 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  同样会造成环境污染, 影响植物的正常生长发育<sup>[65]</sup>。钟晓兰等<sup>[66]</sup> 研究表明, 当土壤 pH 值由 7.20 下降到 6.42 时, 土壤中镉的活化率增加了 0.34% ~ 3.29%。盆栽试验中设置土壤 pH 值由 6.78 下降至 3.32 时, 交换态镉、铅含量分别增加了 41% 和 21%。土壤酸化后导致的重金属离子浓度升高会毒害作物根系, 胁迫作物生长并降低作物的产量和品质。土壤 pH 值小于 5.5 时会使  $Al^{3+}$  积累, 破坏作物细胞质膜, 影响细胞壁和信号转导途径的功能, 导致小麦根伸长被抑制 53% ~ 87%, 同时发现酸性土壤中  $Al^{3+}$  的累积会使小麦籽粒产量下降超过 54%<sup>[67]</sup>。土壤中高浓度的镉和铬会抑制植物根和茎的生长, 降低养分利用效率, 在作物中累积造成粮食安全风险。红壤土壤 pH 值降低 1.67 个单位后, 土壤中有效镉含量提高  $0.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 镉活化率达到 96%, 在小麦籽粒中富集系数提高了 30 倍<sup>[68]</sup>。

## 2.3 土壤肥力质量的恶化

土壤酸化是在自然、人为等共同作用因素下土壤 pH 值下降的过程, 酸化过程极大程度上影响着土壤理化性质。酸化后的土壤中  $H^+$  含量升高, 吸附在土壤胶体上的盐基离子会被  $H^+$  置换并随水淋失, 进而使得土壤肥力下降<sup>[69]</sup>。对酸化红壤农田长期监测后发现, 该地区  $H^+$  总产出量为  $5\ 152 \text{ mol}(H^+) \cdot \text{hm}^{-2}$ , 用于中和  $H^+$  而淋失的盐基离子高达  $3\ 842 \text{ mol}(H^+) \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[70]</sup>。随着土壤酸化的加剧, 土壤中有效态氮含量持续下降, 当土壤 pH 值由 8.0 降低至 5.3 时, 有效性氮/全量氮的比值下降达 64%<sup>[71]</sup>。同时, 土壤酸化会使磷酸盐转化为易于淋溶的可溶性磷酸盐, 造成土壤中磷的大量流失。例如, 当土壤 pH 值由 9.0 降低至 4.0 时磷的淋失量增加 22.2%<sup>[72]</sup>。此外, 土壤 pH 值  $< 5$  时, 由于土壤中铁离子和铝离子的活性增加并与磷酸盐形成沉淀物, 土壤中磷的有效性降低。

土壤酸化影响土壤化学性质的同时, 还会破坏土壤结构, 造成土壤板结和土壤压实, 降低土壤团聚体稳定性并减小土壤孔隙度<sup>[34]</sup>。对酸化茶园红壤研究中发现, 土壤 pH 值减小 0.68 个单位, 土壤容重显著增加 13.2%, 土壤孔隙度降低 12.2%<sup>[73]</sup>。土壤 pH 值降低还会降低土壤团聚体稳定性, 团粒结构更易受到破坏<sup>[74]</sup>。王鹏飞等<sup>[75]</sup> 发现酸化土壤 pH 值降低 1.08 个单位, 土壤团聚体含量减小 15%, 土壤全氮、有效磷含量分别降低 45% 和 55%。东北黑土土壤 pH 值从 6.64 降低到 5.32, 土壤团聚体稳定性降低 13.4%, 团聚体破坏率增加 12.9%<sup>[76]</sup>。

# 3 缓解土壤酸化的措施

## 3.1 碱性土壤改良剂

添加石灰类碱性物质如生石灰、石灰石等是改良酸性土壤的传统方法。石灰中的主要成分为  $CaCO_3$ , 施加至土壤后  $CaCO_3$  会与土壤溶液中  $H^+$  解离出  $Ca^{2+}$  和  $CO_3^{2-}$ ,  $CO_3^{2-}$  水解后生成  $OH^-$  可实现缓解土壤酸化的作用。此外, 解离反应生成的  $Ca^{2+}$  还会与土壤胶体颗粒上吸附的重金属离子发生交换作用, 通过将重金属转化为不易被植物吸收的不易溶解形式, 比如具有强烈毒性的 As(III) 的  $HAsO_3^{2-}$  在加入石灰后会转化为 As(V) 的沉淀物  $Ca_3(AsO_4)_2$ , 来降低酸化土壤重金属离子的溶解度, 进一步缓解土壤酸化的危害<sup>[77-78]</sup>。盆栽试验中按照每千克盆栽土中 0.5 ~ 2 g 石灰调理剂的比例添加后, 土壤 pH 值增加了 0.06 ~ 0.44 个单位, 交换性  $Al^{3+}$  含量下降 37% ~ 69%, 实现提高土壤 pH 值并减轻  $Al^{3+}$  毒害的作用<sup>[79]</sup>。鲁艳红等<sup>[80]</sup> 通过对早、晚稻水稻土研究发现, 施用氮磷钾化肥时配施石灰, 土壤 pH 值分别会提高 0.3 和 0.4 个单位。

除石灰类改良剂外,白云石、磷石膏等含钙碱性物质  $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2, \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$  的工矿业废弃物再利用也得到了广泛关注及应用。这些工矿业副产物中含有的碱性物质不仅可以中和土壤中的酸性成分,同时价格低廉而且运输方便,为大范围应用提供可能<sup>[81]</sup>。余跑兰等<sup>[82]</sup>在酸化茶园红壤中白云石粉施用量为  $1\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时,土壤 pH 值增加 0.49 个单位,交换性  $\text{Al}^{3+}$  降低 30%,实现酸化土壤改良目标。稻田长期定位试验发现,施加以磷石膏为原料的硅钙钾镁肥  $1\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  使土壤 pH 值提高 0.3~0.7 个单位<sup>[83]</sup>。李九玉等<sup>[84]</sup>对比了碱渣、赤泥、磷石膏和粉煤灰 4 种工矿业副产物对酸性红壤改良效果,结果表明 4 种碱性改良剂均有提高土壤 pH 值的作用,整体表现为:碱渣、赤泥>磷石膏>粉煤灰。但是,这些工业副产品往往含有大量的重金属元素,会造成环境污染,难以治理。例如,碱渣和磷石膏 Cu 含量分别达到  $65\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,粉煤灰中 Zn 含量为  $126\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,赤泥 Cr 含量高达  $359\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,所以这些工业副产品在用于酸化土壤改良时需要进一步进行研究和评判<sup>[85]</sup>。

### 3.2 生物炭

生物炭是在作物秸秆热解 ( $>400\text{ }^\circ\text{C}$ ) 后产生的一种富碳的多孔碱性物质。生物炭含有丰富的盐基阳离子,可以提高土壤的阳离子交换量 (CEC),降低土壤交换性酸含量,改善土壤对养分离子的吸持能力,实现提高土壤 pH 值改良酸性土壤的目标<sup>[86-87]</sup>。一般而言,玉米秸秆制成的生物炭盐基阳离子量最高为  $58\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其次为大豆秸秆 ( $50\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 和水稻秸秆 ( $45\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[88]</sup>。Zhang 等<sup>[89]</sup>利用 Meta 分析方法总结了 142 个研究结果,表明酸化土壤添加生物炭后 pH 值会显著提高 12%,作物产量增加 57%。Chintala 等<sup>[90]</sup>在酸化土壤中加入  $156\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  玉米秸秆生物炭后,土壤 pH 值提高 1.36 个单位,CEC 提高 142%,交换性酸含量降低  $3.52\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。通过盆栽实验按酸化土壤重量 2.5% 的比例施入生物炭后,土壤容重降低 7.1%,土壤 pH 值提高 0.8 个单位,CEC 提高 9%,达到显著缓解土壤酸化的目的<sup>[91]</sup>。

此外,生物炭因其吸附性和多孔性可以有效提高土壤持水能力和孔隙度,通过改善土壤物理性质来缓解土壤酸化<sup>[92]</sup>。在新西兰农场酸性土壤中加入玉米秸秆制成的生物炭  $17.3\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  后,土壤团聚体稳定性提高了 17%,土壤 pH 值则增加 0.3 个单位<sup>[93]</sup>。不同作物的秸秆生物炭的改良效果也不相同,豆科植物秸秆要比非豆科秸秆制成的生物炭碱度更高。例如,豌豆秸秆 pH 值 (10.26) > 大豆秸秆 pH 值 (9.02) > 油菜秸秆 pH 值 (8.00) > 水稻 pH 值 (7.69),这可能是豆科植物秸秆生物炭对酸化土壤的改良效果更好的原因<sup>[88]</sup>。尽管生物炭具有环境效益及增加农业收入的潜力,但生物炭的成本远高于传统肥料,高额投入的成本制约了生物炭被广泛应用<sup>[94]</sup>。此外,生物质原料选择不当、制备条件和制备方法不当,使得生物炭本身也具有一定的环境风险。例如,随着热解温度的升高会造成与有机物结合的重金属的释放,提高生物炭中重金属的含量<sup>[95]</sup>。

### 3.3 有机肥

腐熟动物粪肥是农业生产中重要的有机肥来源,一般呈中性或微碱性,对于缓解土壤酸化具有明显作用<sup>[30]</sup>。利用 Meta 分析方法对 141 个研究进行量化总结,结果发现与化肥相比,施用有机肥后土壤 pH 值平均增加 3.3%,而作物产量则平均提高了 7.6%<sup>[96]</sup>。不同来源粪肥其碱度具有明显差异,其中腐熟鸡粪碱度 ( $188\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 腐熟人粪碱度 ( $148\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 腐熟猪粪碱度 ( $130\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 腐熟牛粪碱度 ( $122\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 腐熟驴粪碱度 ( $109\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 腐熟马粪碱度 ( $103\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[97]</sup>。将腐熟牛粪、鸡粪和猪粪按照  $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  的添加量加入淋溶土壤中,土壤 pH 值分别提高了 1.31、1.89 和 1.84 个单位,交换性酸的含量则分别降低 93%、95% 和 96%<sup>[98]</sup>。

盐基离子可以中和土壤中过多的  $\text{H}^+$  进而起到有效缓解土壤酸化的作用。有机肥中的有机物质可以补充由于作物秸秆及籽粒等移除造成的盐基离子损失,同时还能增强对土壤中现存盐基离子的吸附作用,提高土壤的酸碱缓冲能力,减缓土壤的酸化<sup>[97]</sup>。黑土长期施加有机肥 ( $0.25\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) 后,盐基阳离子含量比仅施用化肥处理增加 18.35%,土壤 pH 值提高 0.38 个单位<sup>[99]</sup>。而在水稻土中通过无机肥配施腐熟鸡粪,土壤 pH 值可以提高 0.7 个单位,土壤阳离子交换量提高 39%<sup>[100]</sup>。但并不是有机肥施加量越多越好,Vo 等<sup>[101]</sup>盆栽试验表明,腐熟鸡粪在低等、中等、高等 (每盆添加 336 g、672 g、1 008 g) 3 个施用水平

下,中等施加量土壤 pH 值提高最大,为 2.53 个单位。施加化肥时未被完全利用的氮残留也是造成土壤酸化的重要因素,而施加腐熟动物粪肥可以增加氮肥利用效率,减少氮在土壤中的累积,达到缓解土壤酸化的目标。在 4 个试验点连续施用有机肥后,氮肥利用效率最高可达 70%,减少土壤中氮含量的同时改善土壤酸化<sup>[102]</sup>。但与化肥相比,有机肥具有养分含量低且释放缓慢的缺点。低量有机肥添加不仅达不到控酸效果也不能满足作物养分需求<sup>[103]</sup>。动物粪肥中含有重金属,大量施用腐熟动物粪肥可能会对土壤造成重金属污染风险<sup>[104]</sup>。连续 10 年施用腐熟猪粪的耕地表层土壤中 Cd、Cr、Pb 等重金属含量是对照的 1.20 ~ 17.5 倍<sup>[104-105]</sup>。因此,如何科学施用腐熟动物粪肥,达到控酸增产的目标仍然需要细致研究。

### 3.4 其他措施

除上述缓解土壤酸化的主要措施外,还有氮肥减施、施用硝化抑制剂、种植绿肥等措施被用来缓解土壤酸化问题。氮肥过量施用是土壤酸化的主要原因之一,我国作物氮肥利用率仅在 30% 左右,而欧美等发达国家作物氮肥利用率可以达到 40%<sup>[106]</sup>。因此,减量施氮或添加氮肥增效剂成为国内外缓解土壤酸化研究的热点。硝化抑制剂是通过抑制调控硝化过程的氨氧化细菌或亚硝酸盐氧化菌的活性,实现抑制铵态氮转化为硝态氮,从而增加氮肥利用效率<sup>[107]</sup>。玉米和小麦等作物在栽培过程中,施用硝化抑制剂处理的氮肥利用效率可以提高 6% ~ 11%,土壤 pH 值提高 0.13 ~ 0.20 个单位<sup>[108]</sup>。连续 3 年氮肥减施田间试验研究表明,减氮 20% 处理,40% 处理土壤 pH 值分别显著提高 0.13 和 0.14 个单位<sup>[109]</sup>。但也有研究表明,在不施氮肥条件下,土壤 pH 值变化并不明显,所以通过减施氮肥来缓解土壤酸化的作用可能有限<sup>[110]</sup>。此外,氮肥减施有降低作物产量的风险。研究表明,黑土减施氮肥 10% 后玉米产量降低了 1.3%<sup>[111]</sup>;在红壤减氮 20% 后玉米和小麦产量分别降低 9.2% 和 7.1%<sup>[112]</sup>,这可能是减施氮肥没有被种植者广泛采纳的重要原因。

国内外关于作物秸秆还田对土壤酸化影响的研究已经有大量报道。一般认为秸秆还田会有效增加土壤有机质从而提高土壤 pH 值<sup>[113]</sup>。黑土连续多年作物秸秆还田处理土壤有机质含量可提高 16% ~ 30%,土壤 pH 值随之提高了 0.12 ~ 0.28 个单位<sup>[114]</sup>。作物秸秆中含有盐基离子,目前种植者广泛采取的作物秸秆离田处理方式导致土壤盐基离子大量损失,降低了土壤的抗酸能力。根据计算,玉米和大豆秸秆中约含有的盐基离子 ( $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$ ) 量平均为 38.1 和 60.7  $kg \cdot hm^{-2}$ <sup>[39]</sup>。大豆秸秆连续 4 年秸秆离田处理比还田处理土壤 pH 值降低 0.45 个单位<sup>[115]</sup>。在温度较高地区秸秆腐解速度较快,而在东北等低温冷凉地区秸秆分解速度慢,对春季播种具有一定影响,农民一般选择直接焚烧处理秸秆,加剧了土壤酸化的趋势。此外,Liang 等<sup>[116]</sup>通过对 145 个田间试验进行 Meta 分析后发现,秸秆还田可能加剧农田土壤酸化,秸秆还田对土壤酸化缓解的措施有待进一步验证。

绿肥是新鲜植物翻压还田后的肥料,通过微生物分解后能够有效提高土壤有机质含量和抗酸能力<sup>[117]</sup>。经过 11 年绿肥处理的土壤 pH 值比不施加绿肥处理显著提高 0.32 个单位<sup>[118]</sup>。龙志威<sup>[119]</sup>认为绿肥中尤其是豆科绿肥,其植物根系上的根瘤菌能固定氮气,提高土壤有机质从而缓解土壤酸化。单施绿肥改良周期长、见效慢,所以绿肥一般选择与其他土壤改良剂配施。单施绿肥提高土壤 pH 值 0.16 个单位,而绿肥与微生物菌剂和生物炭配施分别使土壤 pH 提高 0.56 和 0.97 个单位<sup>[119]</sup>。

## 4 展 望

土壤酸化一直是个不可忽视的问题,包括黑土在内的耕地土壤酸化速率有增加趋势。这无疑会为粮食生产造成巨大压力,给农田可持续发展造成隐患,如何有效的缓解土壤酸化成为亟需解决的农业生产问题之一。国内外研究者针对不同类型土壤提出了不同的缓解和防治酸化的措施,例如南方红壤通过施用石灰来缓解土壤酸化,提升土地肥力;黄淮海地区和西北地区通过合理的耕作措施和土壤改良剂改善土壤状况;东北黑土区则可利用增施有机肥、合理轮作等措施来缓解土壤酸化,提高土壤生产能力。

有效缓解农田土壤酸化需要采取适当且合理的施肥制度,优化种植制度和土壤管理制度。农田土壤酸化的研究仍然有很多工作需要开展:(1) 施加化肥尤其是氮肥对土壤酸化贡献极大,针对不同作物和土壤类型优化氮肥的最佳施用量,在保证作物产量的同时提高作物对肥料的利用效率;(2) 豆科作物与非豆科

作物致酸机理研究仍需加强, 探索不同致酸作物合理种植制度, 实现通过不增加外源添加物的前提下缓解土壤酸化; (3) 新型土壤改良剂研发工作进展仍然较为缓慢, 需要加大这方面的研发工作, 以寻找成本低廉同时绿色安全的解决方案; (4) 不同生产区域农田土壤酸化趋势的系统监测工作需要进一步加强; (5) 与改良剂或材料配套的精准和轻简化施用技术研发工作需要同步开展, 为大面积缓解农田土壤酸化提供有效的技术手段。

## 参考文献 (References):

- [1] VAN BREEMEN N, DRISCOLL C T, MULDER J. Acidic deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters[J]. *Nature*, 1984, 307: 599–604.
- [2] 徐影, 于镇华, 李彦生, 等. 土壤酸化成因及其对农田土壤-微生物-作物系统影响的研究进展 [J]. *土壤通报*, 2024, 55(2): 562–572.  
XU Y, YU Z H, LI Y S, et al. Research progresses on soil acidification and its effects on soil microorganism-crop systems in agricultural soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(2): 562–572.
- [3] 赵学强, 潘贤章, 马海艺, 等. 中国酸性土壤利用的科学问题与策略 [J]. *土壤学报*, 2023, 60(5): 1248–1263.  
ZHAO X Q, PAN X Z, MA H Y, et al. Scientific issues and strategies of acid soil use in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1248–1263.
- [4] GOULDING K W T. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom[J]. *Soil Use and Management*, 2016, 32(3): 390–399.
- [5] VON UEXKÜLL H R, MUTERT E. Global extent, development and economic impact of acid soils[J]. *Plant and Soil*, 1995, 171(1): 1–15.
- [6] 杨帆, 贾伟, 杨宁, 等. 近 30 年我国不同地区农田表层土壤的 pH 变化特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(7): 1213–1227.  
YANG F, JIA W, YANG N, et al. Spatio-temporal variation of surface soil pH of farmland in different regions of China in the past 30 years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(7): 1213–1227.
- [7] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展 [J]. *土壤*, 2015, 47(2): 238–244.  
XU R K. Research progresses in soil acidification and its control[J]. *Soils*, 2015, 47(2): 238–244.
- [8] DAI Z M, ZHANG X J, TANG C, et al. Potential role of biochars in decreasing soil acidification-A critical review[J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 581/582: 601–611.
- [9] BOWMAN W D, CLEVELAND C C, HALADA L, et al. Negative impact of nitrogen deposition on soil buffering capacity[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 767–770.
- [10] 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.
- [11] ZHANG X M, LIU W, ZHANG G M, et al. Mechanisms of soil acidification reducing bacterial diversity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 81: 275–281.
- [12] PERNES-DEBUYSER A, TESSIER D. Soil physical properties affected by long-term fertilization[J]. *European Journal of Soil Science*, 2004, 55(3): 505–512.
- [13] JUNGE C E, CHAGNON C W, MANSON J E. A World-wide Stratospheric Aerosol Layer[J]. *Science*, 1961, 133: 1478–1479.
- [14] 庄翔宇. 酸处理对花岗岩土壤矿质元素释放及其细菌群落特征的影响 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.  
ZHUANG X Y. Effects of acid treatment on mineral element release and bacterial community characteristics in granite soil [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2016.
- [15] YANG Y H, JI C J, MA W H, et al. Significant soil acidification across Northern China's grasslands during 1980s–2000s[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(7): 2292–2300.
- [16] ZHAO Y, DUAN L, XING J, et al. Soil acidification in China: is controlling SO<sub>2</sub> emissions enough?[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(21): 8021–8026.
- [17] 郭平. 三峡库区酸沉降特征及其对森林土壤的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016.  
GUO P. Characteristics of acid deposition in Three Gorges Reservoir Area and its influence on forest soil [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [18] 王攀. 基于化学计量学的宁东燃煤电厂周围大气氮硫沉降生态效应研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2020.  
WANG P. Study on ecological effects of atmospheric nitrogen and sulfur deposition around ningdong coal-fired power plant based on chemometrics [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020.
- [19] 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.  
YU Q, DUAN L, HAO J M. Acid deposition in China: sources, effects and control[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(3): 731–746.

- [20] 何瑞亮, 蒋勇军, 张远瞩, 等. 重庆市近郊大气无机氮、硫沉降特征及其来源分析 [J]. 生态学报, 2019, 39(16): 6173–6185.  
HE R L, JIANG Y J, ZHANG Y Z, et al. Characteristics and sources of atmospheric inorganic nitrogen and sulfur deposition in the suburbs of Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16): 6173–6185.
- [21] 侯思宇, 于兴娜, 龚克坚, 等. 重庆市大气降水污染及其沉降特征 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(10): 4100–4107.  
HOU S Y, YU X N, GONG K J, et al. Pollution and deposition characteristics of precipitation in Chongqing[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(10): 4100–4107.
- [22] 金修宽. 农田水氮碳调控土壤酸化及其作用效应研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2018.  
JIN X K. Study on the regulation of soil acidification by farmland water, nitrogen and carbon and its effect [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018.
- [23] BLAKE L, GOULDING K W T, MOTT C J B, et al. Changes in soil chemistry accompanying acidification over more than 100 years under woodland and grass at Rothamsted Experimental Station, UK[J]. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50(3): 401–412.
- [24] 邓琳璐. 耕作方式对黑土酸度变化的影响 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2013.  
DENG L L. Effect of tillage methods on acidity change of black soil [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2013.
- [25] ZHANG X M, GUO J H, VOGT R D, et al. Soil acidification as an additional driver to organic carbon accumulation in major Chinese croplands[J]. *Geoderma*, 2020, 366: 114234.
- [26] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
- [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] YAN P, SHEN C, FAN L C, et al. Tea planting affects soil acidification and nitrogen and phosphorus distribution in soil [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 254: 20–25.
- [29] TONG D L, XU R K. Effects of urea and  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  on nitrification and acidification of ultisols from southern China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(4): 682–689.
- [30] 曾沐梵. 长期施肥导致农田土壤酸化的机制及缓解策略 [D]. 北京: 中国农业大学, 2017.  
ZENG M F. Mechanism and mitigation strategy of farmland soil acidification caused by long-term fertilization [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [31] 田圣贤. 氮化合物添加对草地土壤盐基离子和酸缓冲性能的影响 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2018.  
TIAN S X. Effects of nitrogen compounds addition on the buffering properties of base ions and acids in grassland soil [D]. Shenyang: Shenyang University, 2018.
- [32] LI Q Q, LI S, XIAO Y, et al. Soil acidification and its influencing factors in the purple hilly area of southwest China from 1981 to 2012[J]. *Catena*, 2019, 175: 278–285.
- [33] 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.  
SONG W F, WANG C, CHEN R F, et al. Comparison of contribution of wheat ionic uptake to soil acidification under long-term different fertilization[J]. *Soils*, 2017, 49(1): 7–12.
- [34] ALEKSEEVA T, ALEKSEEV A, XU R K, et al. Effect of soil acidification induced by a tea plantation on chemical and mineralogical properties of Alfisols in Eastern China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2011, 33(2): 137–148.
- [35] 樊战辉, 唐小军, 郑丹, 等. 茶园土壤酸化成因及改良措施研究和展望 [J]. 茶叶科学, 2020, 40(1): 15–25.  
FAN Z H, TANG X J, ZHENG D, et al. Study and prospect of soil acidification causes and improvement measures in tea plantation[J]. *Journal of Tea Science*, 2020, 40(1): 15–25.
- [36] 曾廷廷, 席亚楠, 王静, 等. 基于文献计量的不同植茶年限茶园土壤养分特征分析 [J]. 贵茶, 2022(2): 20–27.  
ZENG T T, XI Y N, WANG N, et al. Analysis of soil nutrient characteristics of different tea plantation ages based on bibliometric data[J]. *Journal of Guizhou Tea*, 2022(2): 20–27.
- [37] 汪吉东, 许仙菊, 宁运旺, 等. 土壤加速酸化的主要农业驱动因素研究进展 [J]. 土壤, 2015, 47(4): 627–633.  
WANG J D, XU X J, NING Y W, et al. Progresses in agricultural driving factors on accelerated acidification of soils[J]. *Soils*, 2015, 47(4): 627–633.
- [38] 徐仁扣, Coventry D R. 某些农业措施对土壤酸化的影响 [J]. 农业环境保护, 2002(5): 385–388.  
XU R K, Coventry D R. Soil acidification as influenced by some agricultural practices[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2002(5): 385–388.
- [39] XU Y, YU Z H, LI Y S, et al. Removal of crop ion components in relation to mollisol acidification under long-term management[J]. *Agronomy*, 2024, 14(1): 191.
- [40] 王笃超. 不同有机物料对连作大豆土壤肥力及生物学性质的影响 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.  
WANG D C. Effects of different organic materials on soil fertility and biological properties of continuous cropping soybean [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2018.

- [41] 周世伟. 长期施肥下红壤酸化特征及主要作物的酸害阈值 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.  
ZHOU S W. Acidification characteristics of red soil and acid damage threshold of main crops under long-term fertilization [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.
- [42] LAL R. Long-term tillage and maize monoculture effects on a tropical Alfisol in western Nigeria. I. Crop yield and soil physical properties[J]. *Soil and Tillage Research*, 1997, 42(3): 145–160.
- [43] 谷丽丽. 长期定位施肥及水田连作对农田土壤中磷赋存形态的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.  
GU L L. Effects of long-term fixed fertilization and continuous cropping in paddy fields on phosphorus forms in farmland soil [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [44] FAGERIA N K, BALIGAR V C. Growth and nutrient concentrations of common bean, lowland rice, corn, soybean, and wheat at different soil pH on an inceptisol[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1999, 22(9): 1495–1507.
- [45] 曾庆辉. 土壤酸化作用对磺胺类抗生素环境行为影响 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.  
ZENG Q H. Effect of soil acidification on environmental behavior of sulfonamides [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2018.
- [46] 武红亮, 王士超, 槐圣昌, 等. 近 30 年来典型黑土肥力和生产力演变特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1456–1464.  
WU H L, WANG S C, HUAI S C, et al. Evolutionary characteristics of fertility and productivity of typical black soil in recent 30 years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1456–1464.
- [47] BA Z D, WANG J F, SONG C W, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients in black soil areas of Northeast China[J]. *Agronomy Journal*, 2022, 114(4): 2021–2026.
- [48] 汪景宽, 徐香茹, 裴久渤, 等. 东北黑土地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战 [J]. *土壤通报*, 2021, 52(3): 695–701.  
WANG J K, XU X R, PEI J B, et al. Current situations of black soil quality and facing opportunities and challenges in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(3): 695–701.
- [49] 张喜林, 周宝库, 孙磊, 等. 长期施用化肥和有机肥料对黑土酸度的影响 [J]. *土壤通报*, 2008, 39(5): 1221–1223.  
ZHANG X L, ZHOU B K, SUN L, et al. Black soil acidity as affected by applying fertilizer and manure[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(5): 1221–1223.
- [50] SHEN W S, NI Y Y, GAO N, et al. Bacterial community composition is shaped by soil secondary salinization and acidification brought on by high nitrogen fertilization rates[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 108: 76–83.
- [51] MENG C, TIAN D S, ZENG H, et al. Global soil acidification impacts on belowground processes[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(7): 074003.
- [52] 韩文炎, 王皖蒙, 郭赟, 等. 茶园土壤细菌丰度及其影响因子研究 [J]. *茶叶科学*, 2013, 33(2): 147–154.  
HAN W Y, WANG W M, GUO Y, et al. Bacterial abundance of tea garden soils and its influencing factors[J]. *Journal of Tea Science*, 2013, 33(2): 147–154.
- [53] ROUSK J, BÄÄTH E, BROOKES P C, et al. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil[J]. *The ISME Journal*, 2010, 4(10): 1340–1351.
- [54] 单晓冉, 吴立珠, 章家恩, 等. 不同功能微生物生长过程对酸胁迫的响应 [J]. *土壤通报*, 2023, 54(1): 117–125.  
SHAN X R, WU L Z, ZHANG J E, et al. Acid resistance of different functional microbial strains and changes in their growth curve under acid stress[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(1): 117–125.
- [55] BRU D, RAMETTE A, SABY N P A, et al. Determinants of the distribution of nitrogen-cycling microbial communities at the landscape scale[J]. *The ISME Journal*, 2011, 5(3): 532–542.
- [56] 罗培宇, 樊耀, 杨劲峰, 等. 长期施肥对棕壤氨氧化细菌和古菌丰度的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3): 678–685.  
LUO P Y, FAN Y, YANG J F, et al. Influence of long-term fertilization on abundance of ammonia oxidizing bacteria and Archaea in brown soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(3): 678–685.
- [57] KANDELER E, DEIGLMAYR K, TSCHERKO D, et al. Abundance of narG, nirS, nirK, and nosZ genes of denitrifying bacteria during primary successions of a glacier foreland[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72(9): 5957–5962.
- [58] 胡晓婧, 刘俊杰, 于镇华, 等. 东北黑土 nirS 型反硝化细菌群落和网络结构对长期施用化肥的响应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(1): 1–9.  
HU X J, LIU J J, YU Z H, et al. Response of nirS-type denitrifier community and network structures to long-term application of chemical fertilizers in a black soil of Northeast China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(1): 1–9.
- [59] 王艳杰, 武林辉, 耿必苗, 等. 整合分析氮添加对土壤有机磷转化的影响 [J]. *湖北农业科学*, 2023, 62(8): 60–68.  
WANG Y J, WU L H, GENG B M, et al. Integrated analysis of the effect of nitrogen addition on soil organic phosphorus transformation[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2023, 62(8): 60–68.
- [60] LIAO B H, GUO Z H, PROBST A, et al. Soil heavy metal contamination and acid deposition: experimental approach on two forest soils in Hunan, Southern China[J]. *Geoderma*, 2005, 127(1/2): 91–103.
- [61] ABDU N, ABDULLAHI A A, ABDULKADIR A. Heavy metals and soil microbes[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2017, 15(1):

- 65–84.
- [62] RYAN P R, DELHAIZE E. The convergent evolution of aluminium resistance in plants exploits a convenient currency[J]. *Functional Plant Biology*, 2010, 37(4): 275.
- [63] 蔡泽江. 长期施肥下红壤酸化特征及影响因素 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.  
CAI Z J. Acidification characteristics and influencing factors of red soil under long-term fertilization [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [64] KOPITTKE P M, BLAMEY F P C. Theoretical and experimental assessment of nutrient solution composition in short-term studies of aluminium rhizotoxicity[J]. *Plant and Soil*, 2016, 406(1): 311–326.
- [65] DUCIC T, POLLE A. Transport and detoxification of manganese and copper in plants[J]. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 2005, 17(1): 103–112.
- [66] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 模拟酸雨对土壤重金属镉形态转化的影响 [J]. *土壤*, 2009, 41(4): 566–571.  
ZHONG X L, ZHOU S L, LI J T, et al. Effect of Simulated Acid Rains on Cd form Transformation in Contaminated Soil[J]. *Soils*, 2009, 41(4): 566–571.
- [67] HALING R E, SIMPSON R J, DELHAIZE E, et al. Effect of lime on root growth, morphology and the rhizosphere of cereal seedlings growing in an acid soil[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1): 199–212.
- [68] 刘景. 长期施肥对农田土壤重金属的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.  
LIU J. Effect of long-term fertilization on heavy metals in farmland soil [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2009.
- [69] 于天一, 孙秀山, 石程仁, 等. 土壤酸化危害及防治技术研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33(11): 3137–3143.  
YU T Y, SUN X S, SHI C R, et al. Advances in soil acidification hazards and control techniques[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(11): 3137–3143.
- [70] DONG Y, YANG J L, ZHAO X R, et al. Soil acidification and loss of base cations in a subtropical agricultural watershed[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 827: 154338.
- [71] 余涛, 杨忠芳, 唐金荣, 等. 湖南洞庭湖区土壤酸化及其对土壤质量的影响 [J]. *地学前缘*, 2006, 13(1): 98–104.  
YU T, YANG Z F, TANG J R, et al. Impact of acidification on soil quality in the Dongting Lake Region in Hunan Province, South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(1): 98–104.
- [72] DEVAU N, HINSINGER P, LE CADRE E, et al. Fertilization and pH effects on processes and mechanisms controlling dissolved inorganic phosphorus in soils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(10): 2980–2996.
- [73] 李艳春, 汪航, 李兆伟, 等. 几种改良措施对酸化茶园土壤理化性质和微生物群落结构的影响 [J]. *茶叶科学*, 2022, 42(5): 661–671.  
LI Y C, WANG H, LI Z W, et al. Ameliorative effect of several measures on soil physicochemical properties and microbial community structures in acidified tea gardens[J]. *Journal of Tea Science*, 2022, 42(5): 661–671.
- [74] 张辉, 宋琳, 陈晓琳, 等. 土壤退化的原因与修复作用研究 [J]. *海洋科学*, 2020, 44(8): 147–161.  
ZHANG H, SONG L, CHEN X L, et al. Study on the causes and remediation of soil degradation[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(8): 147–161.
- [75] 王鹏飞, 田滔, 张应华, 等. 复配改良剂对设施酸化土壤及团聚体的影响 [J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(12): 167–176.  
WANG P F, TIAN T, ZHANG Y H, et al. Effect of compound amendments on acidified soil and aggregate in greenhouse[J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, 44(12): 167–176.
- [76] 姚俊红. 酸化对黑土团聚体有机碳含量及微生物群落的影响 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.  
YAO J H. Effects of acidification on organic carbon content and microbial community of black soil aggregates [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023.
- [77] ABD EL-AZEEM S A M, AHMAD M, USMAN A R A, et al. Changes of biochemical properties and heavy metal bioavailability in soil treated with natural liming materials[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(7): 3411–3420.
- [78] MOON D, DERMATAS D, MENOUNOU N. Arsenic immobilization by calcium–arsenic precipitates in lime treated soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 330(1/2/3): 171–185.
- [79] 蒙园园, 石林. 矿物质调理剂中铝的稳定性及其对酸性土壤的改良作用 [J]. *土壤*, 2017, 49(2): 345–349.  
MENG Y Y, SHI L. Stability of aluminum in mineral conditioners and amelioration on acid soil[J]. *Soils*, 2017, 49(2): 345–349.
- [80] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施用氮磷钾肥和石灰对红壤性水稻土酸性特征的影响 [J]. *土壤学报*, 2016, 53(1): 202–212.  
LU Y H, LIAO Y L, NIE J, et al. Effect of long-term fertilization and lime application on soil acidity of reddish paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1): 202–212.
- [81] 殷会德, 石岩. 改良剂对土壤酸化修复研究与展望 [J]. *耕作与栽培*, 2016(6): 68–72.  
YIN H D, SHI Y. Research and prospect of amendment on soil acidification and remediation[J]. *Tillage and Cultivation*, 2016(6): 68–72.
- [82] 余跑兰, 孙永明, 李小飞, 等. 施用白云石粉对茶园土壤酸化及茶叶品质与产量的影响 [J]. *茶叶通讯*, 2020, 47(1): 46–51.  
YU P L, SUN Y M, LI X F, et al. Effects of dolomite powder application on tea garden soil acidification, tea quality and yield[J]. *Journal of Tea Communication*, 2020, 47(1): 46–51.

- [83] 付强强, 沈彦辉, 高璐阳. 矿物型土壤调理剂生产及应用效果 [J]. *肥料与健康*, 2020, 47(6): 21–25.  
FU Q Q, SHEN Y H, GAO L Y. Production technology and application effect of mineral soil conditioner[J]. *Fertilizer and Health*, 2020, 47(6): 21–25.
- [84] 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.  
LI J Y, WANG N, XU R K. Amelioration of industrial by-products on soil acidity in red soil[J]. *Soils*, 2009, 41(6): 932–939.
- [85] 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.
- [86] GUL S, WHALEN J K, THOMAS B W, et al. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 206: 46–59.
- [87] BRASSARD P, GODBOUT S, RAGHAVAN V. Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: key parameters and mechanisms involved[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181: 484–497.
- [88] YUAN J H, XU R K. Effects of biochars generated from crop residues on chemical properties of acid soils from tropical and subtropical China[J]. *Soil Research*, 2012, 50(7): 570.
- [89] ZHANG S W, ZHU Q C, DE VRIES W, et al. Effects of soil amendments on soil acidity and crop yields in acidic soils: a world-wide meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118531.
- [90] CHINTALA R, MOLLINEDO J, SCHUMACHER T E, et al. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60(3): 393–404.
- [91] 徐振华. 生物炭对中国北方酸化土壤的改性研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.  
XU Z H. Study on Modification of Acidified Soil by Biochar in Northern China [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [92] SHI R Y, LI J Y, NI N, et al. Understanding the biochar's role in ameliorating soil acidity[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(7): 1508–1517.
- [93] HERATH H M S K, CAMPS-ARBESTAIN M, HEDLEY M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol[J]. *Geoderma*, 2013, 209/210: 188–197.
- [94] POURHASHEM G, HUNG S Y, MEDLOCK K B, et al. Policy support for biochar: review and recommendations[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2019, 11(2): 364–380.
- [95] XIANG L, LIU S H, YE S J, et al. Potential hazards of biochar: the negative environmental impacts of biochar applications[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 420: 126611.
- [96] DU Y D, CUI B J, ZHANG Q, et al. Effects of manure fertilizer on crop yield and soil properties in China: a meta-analysis[J]. *Catena*, 2020, 193: 104617.
- [97] 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.  
MENG H Q, (LÜ/LV/LU/LYU) J L, XU M G, et al. Alkalinity of organic manure and its mechanism for mitigating soil acidification[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(5): 1153–1160.
- [98] ANO A, UBOCHI C. Neutralization of soil acidity by animal manures mechanism of reaction[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2007, 6(4): 364–368.
- [99] 林涵. 长期不同施肥对黑土酸度变化的影响 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2014.  
LIN H. Effects of Long-term Different Fertilization on Acidity Change of Black Soil [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2014.
- [100] 汪吉东, 张永春, 俞美香, 等. 不同有机无机肥配合施用对土壤活性有机质含量及 PH 值的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2007, 23(6): 573–578.  
WANG J D, ZHANG Y C, YU M X, et al. Effect of combined organic and inorganic fertilizer on labile organic matter and acidity of soil[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2007, 23(6): 573–578.
- [101] VO M H, WANG C H. Effects of manure composts and their combination with inorganic fertilizer on acid soil properties and the growth of muskmelon (*Cucumis melo*L.)[J]. *Compost Science and Utilization*, 2015, 23(2): 117–127.
- [102] DUAN Y H, XU M G, WANG B R, et al. Long-term evaluation of manure application on maize yield and nitrogen use efficiency in China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(4): 1562–1573.
- [103] 陈爽, 李先平, 章志航, 等. 不同商品有机肥大量及中微量养分释放规律研究 [J]. *土壤通报*, 2022, 53(4): 882–889.  
CHEN S, LI X P, ZHANG Z H, et al. Comparison of the releasing patterns of nutrients from different commercial organic fertilizers[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(4): 882–889.
- [104] 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析 [J]. *环境科学*, 2020, 41(2): 986–996.  
MU H Y, ZHUANG (C/Z), LI Y M, et al. Heavy metal contents in animal manure in China and the related soil accumulation risks[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(2): 986–996.
- [105] 何腾兵, 黄会前, 付天岭, 等. 施用 10 年猪粪肥的黄壤剖面重金属分布及风险评价 [J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(2): 789–794.  
HE T B, HUANG H Q, FU T L, et al. Analysis of the heavy metal risk content rate through the vertical profile of the yellow soil a decade

- late due to the swine manure application[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(2): 789–794.
- [106] 王学敏, 刘兴, 郝丽英, 等. 秸秆还田结合氮肥减施对玉米产量和土壤性质的影响 [J]. *生态学杂志*, 2020, 39(2): 507–516.  
WANG X M, LIU X, HAO L Y, et al. Effects of straw returning in conjunction with different nitrogen fertilizer dosages on corn yield and soil properties[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(2): 507–516.
- [107] 余锋. 脲酶/硝化抑制剂对水稻产量和温室气体排放的影响 [D]. 扬州: 扬州大学, 2023.  
YU F. Effects of urease/nitrification inhibitors on rice yield and greenhouse gas emissions[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.
- [108] Sajjad Raza. 黄土高原土壤氮肥配施硝化抑制剂的效应研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.  
SAJJAD R. Study on the effect of nitrogen fertilizer combined with nitrification inhibitor in Loess Plateau soil [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [109] 叶盛嘉, 郑晨萌, 张影, 等. 氮肥减量配施有机肥对豫中地区冬小麦-夏玉米轮作生产力和土壤性质的影响 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(6): 900–912.  
YE S J, ZHENG C M, ZHANG Y, et al. Effects of reduced chemical nitrogen input combined with organic fertilizer application on the productivity of winter wheat and summer maize rotation and soil properties in central Henan Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(6): 900–912.
- [110] 李强, 高纪超, 朱平, 等. 化肥有机替代对黑土土壤肥力的影响—基于30年长期定位试验 [J]. *中国土壤与肥料*, 2023(9): 28–33.  
LI Q, GAO J C, ZHU P, et al. Effects of organic substitution of chemical fertilizer on soil fertility of black soil based on 30 years long-term fertilization experiment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023(9): 28–33.
- [111] 胡娟, 吴景贵, 孙继梅, 等. 氮肥减量与缓控肥配施对土壤供氮特征及玉米产量的影响 [J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 116–120+194.  
HU T, WU J G, SUN J M, et al. Effects of reduced nitrogen fertilization and its combined application with slow and controlled release fertilizers on soil nitrogen characteristics and yield of maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4): 116–120+194.
- [112] 刘四义, 韩燕来, 李培培, 等. 施肥管理措施对潮土和红壤作物氮素利用效率与病虫害发生的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(6): 1013–1024.  
LIU S Y, HAN Y L, LI P P, et al. Effects of fertilizer managements on crops nitrogen use efficiency and disease incidence in fluvo-aquic and red soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(6): 1013–1024.
- [113] CAI Z J, XU M G, ZHANG L, et al. Decarboxylation of organic anions to alleviate acidification of red soils from urea application[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(8): 3124–3135.
- [114] 耿明昕, 关松, 孟维山, 等. 秸秆还田与生物炭施用影响黑土有机质并缓解土壤酸化 [J]. *吉林农业大学学报*, 2023, 45(2): 178–187.  
GENG M X, GUAN S, MENG W S, et al. Effects of straw returning and biochar application on soil organic matter and mitigate soil acidification of black soil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2023, 45(2): 178–187.
- [115] 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.  
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.
- [116] LIANG F, LI B Z, VOGT R D, et al. Straw return exacerbates soil acidification in major Chinese croplands[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 198: 107176.
- [117] 曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 等. 中国绿肥科研60年回顾与未来展望 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1450–1461.  
CAO W D, BAO X G, XU C X, et al. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1450–1461.
- [118] CHEN S, XU C M, YAN J X, 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.
- [119] 龙志威. 有机肥配施与土壤酸化改良措施的田间应用—以秭归县柑橘园为例 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.  
LONG Z W. Field application of combined application of organic fertilizer and soil acidification improvement measures—a case study of citrus orchard in Zigui County [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.