

石灰用量对酸化稻田土壤酸度和水稻产量的影响

胡现荣¹, 范存敏¹, 吴萍萍², 王静², 李帆², 李敏²

(1. 安徽省当涂县农技推广中心, 安徽当涂 243100; 2. 安徽省农业科学院

土壤肥料研究所/安徽养分循环与资源环境省级实验室, 安徽合肥 230031)

摘要 石灰施用是改善稻田土壤酸化、提高水稻产量的有效途径之一。在沿江平原酸化水稻田进行大田试验, 分析石灰用量(750~3 750 kg/hm²)与土壤 pH、水稻产量以及经济效益之间的关系。结果表明, 与对照不施石灰相比, 随着石灰用量的增加, 土壤 pH 增加 0.16~0.33 个单位。石灰用量在 750~3 000 kg/hm² 时能够不同程度提高水稻产量构成因素及实际产量, 其中 2 250 kg/hm² 用量时水稻增产效果最佳; 而较高用量 3 350 kg/hm² 则不利于水稻生长。种植水稻收益随石灰用量的增加而降低, 750 kg/hm² 用量下增收效果最佳。

关键词 石灰; 酸化; 水稻; 产量; 效益

中图分类号 S511 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)08-0022-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.08.006



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Lime Dosage on Acidification of Paddy Soil and Rice Yield

HU Xian-rong¹, FAN Cun-min¹, WU Ping-ping² et al (1. Agricultural Technology Extension Center of Dangtu County, Dangtu, Anhui 243100; 2. Soil and Fertilizer Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences/Anhui Provincial Key Laboratory of Nutrient Cycling, Resource & Environment, Hefei, Anhui 230031)

Abstract Lime application is one of the effective methods to improve soil acidification and increase rice yield. A field experiment was carried out in the acidified paddy field along the Yangtze plain to determine the relationship between the lime amount (750~3 750 kg/hm²) and soil pH, rice yields and economic benefits. The results showed that, compared with CK, the soil pH values increased by 0.16~0.33 units with the increases of lime dosage. Under the lime amount of 750~3 000 kg/hm², the yield components and actual rice yields were enhanced in varying degrees, in which the highest increase of rice yield was observed when the amount of lime was 2 250 kg/hm²; However, higher amount of 3 350 kg/hm² was not conducive to the growth of rice. The incomes of rice cultivation decreased with the increases of lime dosage, and the effect of increasing income was the best under the dosage of 750 kg/hm².

Key words Lime; Acidification; Rice; Yield; Benefit

近几十年来由于人为活动增强导致酸沉降增加, 农业系统中氮肥过量施用和植物收获带走阳离子等, 大大加速了土壤酸化进程。据统计, 从 20 世纪 80 年代到现在, 我国土壤酸化情况越来越严重, 耕地土壤酸化已成为我国粮食主产区高强度农业利用下粮食持续稳定高产的重要限制因素^[1]。土壤酸化也是目前我国水稻田存在的主要障碍因素之一。土壤酸化易造成土壤板结、养分流失和重金属活化等危害, 严重影响生态环境和制约农业生产^[2]。土壤酸化的加剧还会导致磷酸根离子与酸性土壤中大量存在的 Fe³⁺ 和 Al³⁺ 等金属离子或金属氧化物发生沉淀被固定, 难以被植物吸收利用, 从而降低土壤中养分生物有效性^[3]。

土壤酸化会导致土壤理化和生物学性质发生改变, 从而直接或者间接影响作物生长和产量。不同的作物酸度敏感性不同, 水稻是一种耐酸能力强的植物, 但是在土壤酸化程度逐渐加剧的情况下, 水稻生产也会受到明显影响。例如, 南方稻油轮作区的田间试验表明, 对于初始 pH 4.5 的酸性土壤, 改良至土壤 pH 6.8 时水稻产量达到最高, 而水稻产量降低 50% 时的酸害阈值为 4.2^[4]。还有研究通过土壤 pH-作物产量 S 型曲线计算得出, 水稻的酸害阈值为 pH 5.07^[5]。土壤酸化导致作物减产主要与土壤中交换性酸、氢含量过高有

关, 土壤中重金属(铝、锰)活化产生铝毒、锰毒等, 对作物产生毒害^[6]; 同时, 酸化土壤中交换性盐基离子淋失, 与养分转化有关的微生物数量减少, 导致土壤养分缺乏, 作物所需大量营养元素供应不足^[7], 也使得作物生长受限。

目前在农业生产中, 应用较多的土壤酸度改良材料主要有石灰、粉煤灰、生物炭、碱性肥料和有机物料等, 其中石灰是国内外农业中应用最普遍的改良材料。石灰类改良材料主要有生石灰(CaO)、熟石灰[Ca(OH)₂]和石灰石粉(CaCO₃)等, 相同用量下生石灰的施用效果最显著。有报道指出, 在土壤 pH 5.64 水稻田中, 施用石灰 3 000 kg/hm² 可实现稻谷增产 14.74%, 调酸改土和增产增收效果显著^[8]。在 pH 5.0 左右的酸化水稻田施用石灰可以使土壤 pH 提高 0.50~1.81 个单位, 水稻增产 3.62%~13.29%^[9]。但也有研究发现, 在南方典型双季稻种植区施用石灰后, 土壤 pH、有效磷和碱解氮含量提高, 但不利于水稻稳产^[10]。水稻产量对石灰施用的响应因试验区域土壤类型、基础地力、施用量等条件不同而表现出不同结果。鉴于此, 笔者以沿江平原酸化水稻田为研究对象, 通过大田试验, 明确不同石灰用量对土壤酸度、水稻产量以及经济效益的影响, 以期为试验区域土壤质量提升、水稻可持续生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 大田试验在沿江平原当涂县进行。当涂县位于安徽省东部、长江下游东岸, 是全国主要商品粮生产基地之一。气候类型为北亚热带季风气候, 具有温和湿润、雨量充沛、四季分明、光照充足等特点。试验地土壤为黄棕

基金项目 安徽省重点研究与开发计划项目(2022107020004); 安徽省产业技术体系项目(2021-711)。

作者简介 胡现荣(1974—), 男, 安徽当涂人, 高级农艺师, 从事农技推广和农产品质量安全研究。

收稿日期 2022-05-05; 修回日期 2022-06-13

壤性水稻土,由下蜀黄土母质发育而来,主要种植制度为水稻—油菜。试验前土壤基础理化性质为 pH 5.48,有机质 25.8 g/kg,碱解氮 128 mg/kg,有效磷 19.2 mg/kg,速效钾 94 mg/kg。

1.2 试验材料 所用生石灰购自市场,钙含量 527 g/kg,镉等重金属含量符合 GB/T 23349—2020《肥料中砷、镉、铅、汞含量的测定》的标准要求。

1.3 试验设计 试验设置不同石灰用量共 6 个处理,其中对照为不施石灰(CK)、施石灰 750 kg/hm²(L1 处理)、施石灰 1 500 kg/hm²(L2 处理)、施石灰 2 250 kg/hm²(L3 处理)、施石灰 3 000 kg/hm²(L4 处理)、施石灰 3 750 kg/hm²(L5 处理)。试验设 3 个重复,各小区面积 20 m²。

石灰在稻田整地时一次性施入。具体为在水稻种植前 7 d,将石灰均匀地撒施在耕地土壤表面,然后翻耕 20 cm 左右使其与表层土壤充分混匀;平衡 7 d 后开始水稻种植。水稻品种选择当地常规品种,施肥、打药、灌水等田间管理措施同农民习惯。

水稻季各处理施肥量一致,N-P₂O₅-K₂O 用量为 180-90-90 kg/hm²,所用肥料类型为 45% 复合肥(15-15-15)和尿素(含 N 46%)。其中,基肥时施复合肥 600 kg/hm²,尿素 78 kg/hm²;孕穗期追施尿素 117 kg/hm²。试验田按小区作田埂分隔开,每个小区设单独进水沟。

1.4 测定方法 水稻收获时,各小区单打、单晒、单独计产,并分小区采集 8~10 株代表性水稻植株样品,考察水稻产量构成因素,包括单位面积有效穗数、穗粒数、结实率及千粒

重等。

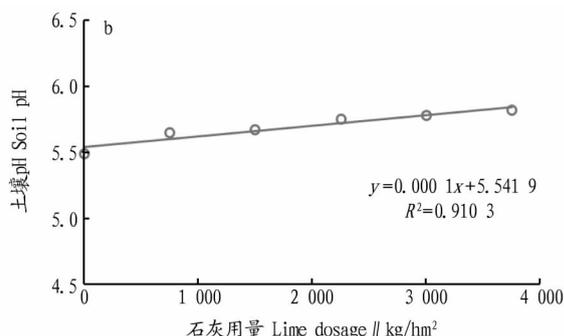
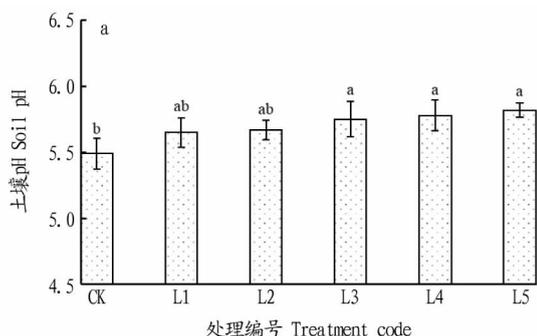
收获后采集表层土壤样品,相关指标测定方法依据《土壤农化分析》^[11]。土壤 pH 按照水土比 2.5:1.0 浸提,电极法测定,有机质采用重铬酸钾外加热法,碱解氮用碱解扩散法,有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定,速效钾采用 1.0 mol/L NH₄OAc 浸提—火焰光度法测定。

1.5 数据统计 各处理水稻产值由水稻产量乘以稻谷当年平均收购价所得。投入成本根据化肥与石灰用量来计算,其中复合肥、尿素和石灰的价格分别按 3.2、2.5 和 0.6 元/kg 折算,同时计入人工、农药、机械等基础费用。收益以当年水稻产值去除投入成本计算。产投比为水稻产值与投入成本比值。

采用 Excel 2019 和 SPSS 18.0 软件对数据进行处理分析;单因素方差分析(one-way ANOVA)采用 Duncan's 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理土壤酸度比较 供试区域土壤初始 pH<5.5,属于酸性土壤。由图 1 可知,随石灰用量的增加,土壤 pH 表现出逐渐升高的趋势。相较于 CK 处理,施用石灰处理的土壤 pH 增加 0.16~0.33 个单位,其中 L3、L4 和 L5 处理与 CK 间差异达显著水平($P<0.05$)。对石灰用量与土壤 pH 进行线性回归分析发现,两者间呈极显著正相关。回归方程为 $y(\text{土壤 pH})=0.0001x(\text{石灰用量})+5.5419$,即石灰用量每增加 100 kg/hm²,土壤 pH 约增加 0.01 个单位。



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercases indicated significant differences at 0.05 level.

图 1 不同处理土壤 pH(a) 比较及拟合曲线(b)

Fig.1 Comparison of soil pH(a) and fitting curve(b) of different treatments

2.2 不同处理水稻产量及构成因素比较 水稻的穗粒数和有效穗数是影响水稻产量的主要限制因子。由表 1 可知,L3 处理有效穗数最高,较 CK 处理提高 5.2%,其次是为 L1、L2 和 L4 处理,增加幅度在 2.7%~4.0%,L5 处理的有效穗数与 CK 处理较接近。施用石灰处理的每穗总粒数较 CK 提高 2.3%~4.6%。结实率表现出明显提高的为 L3 处理,而 L5 处理则较 CK 处理降低 3 个百分点。L1、L3 处理千粒重较高,分别较 CK 处理提高 3.5%和 2.7%。总体来看,L3 处理在提高有效穗数、结实率和千粒重等产量构成因素方面表现较优。相应地,L3 处理的理论产量也最高,较 CK 处理提高 20.1%;

L1、L2、L4 处理的理论产量较对照增加幅度在 9.5%~12.7%,而 L5 处理理论产量与对照较接近。由此可见,在微酸水稻土上施用适量石灰能提高水稻有效穗数、穗粒数和千粒重,从而提高增产潜力。

水稻产量结果表明(图 2),相较于对照 CK,L3 和 L1 处理分别增产 11.1%和 10.5%,其次是 L2 和 L4 处理,增产幅度分别为 9.0%和 6.7%,差异均达显著水平($P<0.05$);而 L5 处理水稻产量表现出降低趋势,较 CK 显著减产 5.8%。

以水稻产量 y 为因变量,石灰用量 x 为自变量,进行回归分析,得到方程 $y=-0.0003x^2+1.0967x+8103.3$ 。方程的

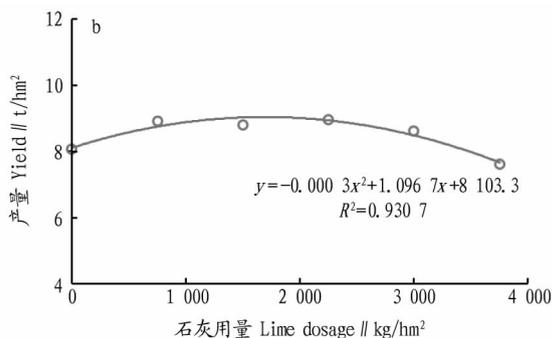
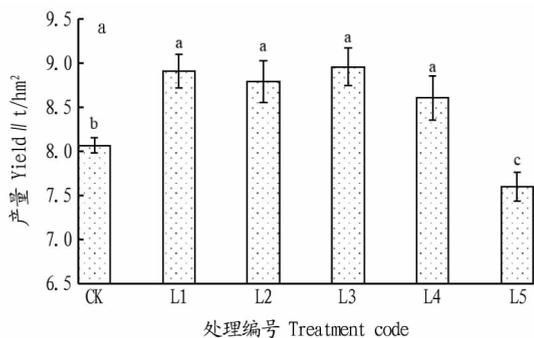
决定系数 $R^2=0.9307$ ($P<0.01$), 表明 x 对 y 存在极显著相关性, 该回归方程能够反映水稻产量变化与石灰用量之间的关系。随着石灰用量的增加, 水稻产量总体上表现出先增后降的抛物线趋势, 在 L3 处理达到峰值。可见, 该试验区域石灰

用量在 $750\sim 3\,000\text{ kg/hm}^2$ 时能够不同程度提高水稻产量, 其中 $2\,250\text{ kg/hm}^2$ 用量时水稻增产效果最佳; 而过高用量 $3\,350\text{ kg/hm}^2$ 则不利于水稻生长。

表 1 不同处理水稻产量及其构成因素的比较

Table 1 Comparison of rice yield and its component factors of different treatments

处理编号 Treatment code	有效穗数 Effective ears 万/hm ²	穗粒数 Grains per ear 粒/穗	结实率 Seed-setting rate//%	千粒重 1 000-grain weight//g	理论产量 Theoretical yield kg/hm ²
CK	287.6	131	85	25.8	8 262
L1	299.2	134	87	26.7	9 313
L2	296.2	136	87	26.0	9 112
L3	302.5	136	91	26.5	9 921
L4	295.3	137	86	26.0	9 046
L5	288.1	136	82	25.6	8 225



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercases indicated significant differences at 0.05 level.

图 2 不同处理水稻产量 (a) 比较及拟合曲线 (b)

Fig.2 Comparison of rice yield and fitting curves of different treatments

2.3 不同处理水稻经济效益比较 由表 2 可知, 各处理水稻产值在 $19\,000\sim 22\,400\text{ 元/hm}^2$, 其中 L1 和 L3 处理水稻产值较高, 其次是 L2 和 L4 处理, CK 和 L5 处理产值处于较低水平。随着石灰用量的增加, 成本投入逐渐升高, 由 CK 处理中的 $7\,808\text{ 元/hm}^2$ 升高至 L5 处理中的 $10\,258\text{ 元/hm}^2$ 。水稻收益在 L1 处理最高, 较 CK 处理增收 $1\,627\text{ 元/hm}^2$; 其次是 L2 和 L3 处理, 分别增收 837 和 764 元/hm^2 , L4 和 L5 处理中水稻收益表现出负增长趋势, 分别较 CK 处理减少 610 和

$3\,616\text{ 元/hm}^2$ 。各处理产投比在 $1.9\sim 2.7$, 其中 L1 和 CK 处理的产投比较高, 产投比较低的为 L4 和 L5 处理。

该研究结果表明, 在酸化水稻土上施用适宜用量的石灰具有一定的经济效益, 而过量施用石灰会导致水稻收益不同程度的降低。因此, 在施用石灰治理水稻田时, 需要综合考虑水稻增产与成本投入之间的平衡关系。该研究区域适宜的石灰用量在 $750\sim 2\,250\text{ kg/hm}^2$, 随着石灰用量增加, 收益增加值降低, 其中 750 kg/hm^2 用量处理表现出最佳的增收效果。

表 2 不同处理水稻种植产值与效益比较

Table 2 Comparison of rice planting output value and benefits of different treatments

处理编号 Treatment code	产值 Output value 元/hm ²	投入 Input 元/hm ²	收益 Income 元/hm ²	增收 Increase income 元/hm ²	产投比 Input-output ratio
CK	20 167	7 808	12 359	—	2.6
L1	22 283	8 298	13 986	1 627	2.7
L2	21 983	8 788	13 196	837	2.5
L3	22 400	9 278	13 123	764	2.4
L4	21 517	9 768	11 749	-610	2.2
L5	19 000	10 258	8 743	-3 616	1.9

3 讨论

该研究结果表明, 在酸性土壤中, 石灰用量与土壤 pH 之间呈现极显著的线性关系, 这与以往的研究结论一致^[12]。

石灰添加可以有效中和土壤中的活性酸和潜性酸, 并降低交换性 Al^{3+} 含量和提高交换性 Ca^{2+} 含量, 从而缓解土壤酸化^[4]。

该研究中,随石灰施用量的增加,水稻产量总体上表现出先增后降的抛物线趋势。水稻生产受到土壤酸化的影响,有研究表明,随着浇灌水的 pH 降低,与产量相关的水稻农艺性状显著降低^[13]。土壤酸化可使水稻减产降幅达 20%^[14]。这可能是因为酸化土壤中存在大量 Al^{3+} 和 H^+ 等交换性阳离子,一方面对植物的根系产生毒害,降低植物对营养元素的吸收能力;另一方面,土壤 pH 下降,土壤微生物生长和活动也受到抑制,从而影响了土壤养分循环和有机质的分解过程,导致供肥能力下降^[15]。在适宜用量范围内,施用石灰引入钙离子,增加土壤盐基饱和度,直接提高土壤 pH,降低了土壤交换性酸和交换性铝含量,减轻铝的毒害^[16];同时,土壤 pH>6 时,土壤的生物活性和养分循环能力相应增加,土壤氮素矿化速率增加,提高土壤速效氮含量^[7],从而改善改善植株营养和生长状况,提高作物产量。

不同试验地点的适宜石灰用量不同,杨静等^[12]报道显示,pH 5.0 左右的酸性稻田中,施用 600~750 kg/hm² 石灰时水稻增产 4.41%~4.62%。而在稻油轮作区酸性土壤(pH 4.5)的研究表明,石灰施用 6 500 kg/hm² 左右可获得我国南方稻油轮作区的作物稳定高产^[4]。该研究中,石灰适宜用量在 750~3 000 kg/hm²,2 250 kg/hm² 用量时水稻增产幅度最大。水稻产量对石灰用量的响应不同可能与土壤初始 pH、有机质、阳离子交换量等理化性质有关。

该研究结果表明,在石灰用量过高(3 750 kg/hm²)的情况下,水稻产量表现出降低趋势。闫志浩等^[4]也发现,当石灰添加量>7 500 kg/hm² 时作物减产,这可能是因为过量施用石灰可能会导致铵态氮的挥发,加速有机质的分解,或者抑制参与氮素转化的功能菌活性,从而降低矿质氮含量^[17];同时外源钙的过量输入可能导致土壤中钾、钙、镁等营养元素平衡失调,钙离子还会与磷酸根离子结合,生成难溶于水的磷酸钙盐沉淀,抑制作物对养分的吸收^[18]。有研究表明,当土壤交换性钙含量超过 11.8 cmol/kg 时,作物就会减产^[19]。因此,使用石灰进行酸性水稻田改良时需要注意用量,避免过度使用不利于水稻生长。

从经济效益方面来看,石灰用量在 750~2 250 kg/hm² 时,随石灰用量增加收益逐渐降低;而石灰用量大于 2 250 kg/hm² 时,水稻收益表现出负增长。除了石灰材料本身的成本之外,田间实际施用石灰时额外产生的人力成本也是影响水稻收益的关键因素之一。大多数石灰材料为粉末状,且遇水放热易灼伤皮肤,进一步增加了施用难度。较高

用量的石灰常伴随投入成本的大幅增加。因此,在施用石灰治理水稻田时,需要综合考虑水稻增产与成本投入之间的平衡关系,该研究中 750 kg/hm² 用量下增收效果最佳。

4 结论

沿江平原 pH 5.49 的酸性水稻田中,石灰用量在 750~3 000 kg/hm² 时能够不同程度提高水稻产量,其中 2 250 kg/hm² 用量时水稻增产效果最佳;而过高用量 3 350 kg/hm² 处理则不利于水稻生长。随着石灰用量增加,水稻种植收益增加值降低,750 kg/hm² 用量下增收效果最佳。因此,在施用石灰治理酸化水稻田时,需要综合考虑水稻增产与成本投入之间的平衡关系。

参考文献

- [1] 李继红.我国土壤酸化的成因与防控研究[J].农业灾害研究,2012,2(6):42-45.
- [2] 张福锁.我国农田土壤酸化现状及影响[J].民主与科学,2016(6):26-27.
- [3] HONG C,LU S G.Does biochar affect the availability and chemical fractionation of phosphate in soils? [J].Environmental science and pollution research,2018,25(9):8725-8734.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 吴道铭,傅友强,于智卫,等.我国南方红壤酸化和铝毒现状及防治[J].土壤,2013,45(4):577-584.
- [7] FAGERIA N K,BALIGAR V.Chapter 7 ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production [J].Advances in agronomy,2008,99:345-399.
- [8] 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.
- [9] 潘香玉.施用石灰对稻田土壤 pH 值、水稻产量和重金属积累的影响[J].农业工程技术,2020,40(35):15-18.
- [10] 马国柱,屠乃美,方畅宇,等.有机无机肥配施锌肥和石灰对双季稻产量及土壤养分特性的影响[J].水土保持学报,2020,34(4):171-177.
- [11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [12] 杨静,谭永锋,肖志强,等.不同剂量石灰对酸化稻田土壤养分含量及水稻产量的影响[J].安徽农业科学,2015,43(36):175-176,179.
- [13] 曾勇军,周庆红,吕伟生,等.土壤酸化对双季早、晚稻产量的影响[J].作物学报,2014,40(5):899-907.
- [14] 袁珍贵,陈平平,唐琨,等.土壤酸化对晚稻产量的影响及品种耐酸性比较[J].作物研究,2014,28(6):585-588.
- [15] 周娟,袁珍贵,郭莉莉,等.土壤酸化对作物生长发育的影响及改良措施[J].作物研究,2013,27(1):96-102.
- [16] 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.
- [17] 唐琨,朱伟文,周文新,等.土壤 pH 对植物生长发育影响的研究进展[J].作物研究,2013,27(2):207-212.
- [18] AZMAN E A,JUSOP S,ISHAK C F,et al.Increasing rice production using different lime sources on an acid sulphate soil in Merbok, Malaysia [J].Pertanika journal of tropical agricultural science,2014,37(2):223-247.
- [19] 曾廷廷.红壤区作物产量对酸化的响应及 pH 阈值[D].贵阳:贵州大学,2017.