

作物产量对土壤 pH 的响应差异及其影响因素

连旭东^{1,2}, 张璐^{2*}, 刘思汝³, 蔡泽江², 郑磊⁴, 张强⁴, 周建利^{1*}, 徐明岗^{2,3,5}

(1 长江大学农学院, 湖北荆州 434025; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 农业农村部耕地质量监测与评价重点实验室, 北京 100081; 3 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所 / 海南省热带作物营养重点实验室, 广东湛江 524091; 4 金正大生态工程集团股份有限公司, 山东临沭 276700; 5 山西农业大学生态环境产业技术研究院, 山西太原 030031)

摘要:【目的】土壤酸化是耕地质量退化的突出问题, 研究主要农作物产量对土壤 pH 的响应及其影响因素, 为土壤酸化防治提供理论依据。【方法】通过“中国知网”、“Web of Science”数据库, 分别以玉米 (maize)、水稻 (rice)、小麦 (wheat)、大豆 (soybean)、土壤 pH (soil pH)、作物产量 (yield) 为关键词, 获取 1980—2020 年已公开发表的文献数据。基于国内外大田试验, 分析了玉米、水稻、小麦、大豆产量与土壤 pH 的关系, 运用 Sigmoid 函数计算作物酸害阈值, 结合皮尔逊相关性分析与偏相关分析, 明确作物酸害阈值的主要影响因素。

【结果】1) 4 种作物产量伴随土壤 pH 降低均呈“S”型降低趋势; 玉米、大豆、小麦和水稻产量 95% 的酸害阈值分别为 pH 5.87、5.34、5.32 和 4.21。2) 作物相对产量与交换性铝呈显著负相关, 与土壤 pH、交换性钙、钙铝比、有机质、有效磷、化学氮肥施用量呈显著正相关。当土壤 pH 大于酸害阈值时, 作物产量与有机质、有效磷呈显著正相关, 当土壤 pH 小于酸害阈值时, 作物产量与土壤 pH、交换性钙、钙铝比呈显著正相关, 与交换性铝呈显著负相关。3) 偏相关分析表明, 剔除有机质影响后, 相对产量与 pH 的相关系数升高 0.207, 交换性铝与相对产量的相关系数升高 0.072; 剔除有效磷影响后, 相对产量与 pH 的相关系数升高 0.085, 交换性铝与相对产量的相关系数升高 0.147; 剔除施氮量影响后, 相对产量与 pH 的相关系数升高 0.026, 交换性铝与相对产量的相关系数降低 0.009。有效磷、有机质和化学氮肥施用量是影响作物产量对土壤 pH 响应的关键因素。

【结论】当土壤 pH 低于酸害阈值时, 较高的有效磷和有机质含量可降低土壤 pH 对作物产量的不利影响, 即有效磷和有机质含量越高, 作物酸害越轻。

关键词: 酸害阈值; 作物产量; 土壤 pH; 整合分析; 有机质; 有效磷; 氮肥施用

Response of crop yield to soil pH and the influencing factors

LIAN Xu-dong^{1,2}, ZHANG Lu^{2*}, LIU Si-ru³, CAI Ze-jiang², ZHENG Lei⁴,
ZHANG Qiang⁴, ZHOU Jian-li^{1*}, XU Ming-gang^{2,3,5}

(1 College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434025, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Cultivated Land Quality Monitoring and Evaluation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China; 3 Hainan Key Laboratory of Tropical Crop Nutrition / Institute of South Tropical Crops, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, Guangdong 524091, China; 4 Jinzhengda Ecological Engineering Group Co., LTD., Linshu, Shandong 276700, China; 5 Institute of Eco-Environmental Industrial Technology, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

Abstract: 【Objectives】Acidification is one of the prominent problems leading to degeneration of soil quality. We studied the pH thresholds of main crop production and the influence factors, to provide theoretical basis for soil acidification control. 【Methods】Taking maize, rice, wheat, soybean, soil pH and crop yield as the key words, literatures published from 1980 to 2020 were searched in Database of CNKI and Web of Science. Based on

收稿日期: 2023-03-10 接受日期: 2023-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1901601, U19A2046, 41977104); 海南省热带作物营养重点实验室开放课题项目 (21KLTCN01); 泰山产业领军人才工程项目 (LJNY201818)。

联系方式: 连旭东 E-mail: lxdalxn1998@outlook.com。

* 通信作者 张璐 E-mail: zhanglu01@caas.cn; 周建利 E-mail: zhjl1233@163.com

field experiments at home and abroad, the relationship between the yield of corn, rice, wheat and soybean and soil pH was analyzed. Sigmoid function was used to calculate the crop acid damage threshold, and Pearson correlation analysis and partial correlation analysis were combined to identify the main influencing factors of crop acid damage threshold. 【 Results 】 1) The yield of four crops showed an “S” shape with the decrease of soil pH. The acid damage thresholds of 95% yield of maize, soybean, wheat and rice were 5.87, 5.34, 5.32 and 4.21, respectively. 2) Crop yield was negatively correlated with soil pH, exchangeable acid, exchangeable Al ($P<0.05$), and positively correlated with exchangeable Ca, Ca-Al ratio, organic matter, available P, N application amount ($P<0.05$). When soil pH was higher than the acid damage threshold, crop yield was positively correlated with organic matter and available P ($P<0.05$); when soil pH was lower than the acid damage threshold, crop yield was positively correlated with soil pH, exchangeable Ca and Ca-Al ratio, and negatively correlated with exchangeable Al ($P<0.05$). 3) Partial correlation analysis showed that removing the influence of organic matter increased the correlation coefficient (r) of relative yield with pH by 0.207, increased the r of exchangeable Al with relative yield by 0.072; removing the influence of available P increased the r of relative yield with pH by 0.085, and increased the r of exchangeable Al with relative yield by 0.147; removing the influence of N application rate increased the r of relative yield with pH by 0.026, and the r of exchangeable Al with relative yield by 0.009. Available P, organic matter and chemical N application rate are the key factors affecting the response of crop yield to soil pH. 【 Conclusions 】 When soil pH is lower than the acid damage threshold, the content of available P and organic matter affect the response of crop yield to soil pH, the higher the available P and organic matter, the less the acid damage to crop yield.

Key words: acid damage threshold; crop yield; soil pH; integrated analysis; organic matter; Available phosphorus; nitrogen application

土壤酸化是当前我国农田土壤质量退化的突出问题^[1], 1990—2010 年我国主要耕地土壤 pH 下降 0.5 个单位^[2], 研究表明, 氮肥的过度施用是加剧农田土壤酸化的主要原因之一^[3], 如湖南祁阳红壤旱地定位试验监测发现, 施用化肥 20 年后土壤 pH 由 5.7 下降至 4.5^[2]。土壤酸化导致营养元素缺乏 (如 P、K、Mg 和 Ca), 有害元素活性增加 (如铝等), 从而限制作物生长。Nagy 等^[4]依托长期定位试验研究发现, 当土壤 pH 为 6.20~6.87, pH 每降低 0.10 个单位, 玉米产量平均减产 515 kg/hm²。Zhu 等^[5]通过数据整合分析, 发现如果氮肥投入以每年 1% 的速度增加, 预测的土壤平均 pH 将下降约 1.00 个单位, 预计从 2010—2050 年作物相对产量损失约增加 4%~24%。当土壤 pH 低于 5.5 时, 交换性铝含量显著增加, 作物出现酸害现象^[6]。由此可见, 当土壤 pH 低于某一阈值时, 产量显著降低, 该值对土壤酸化改良、提高作物产量具有重要意义。水稻、小麦和玉米是我国最主要的三大粮食作物, 大豆是我国最主要的油料和蛋白作物之一^[7]。由于不同作物对酸害的敏感性不同, 作物酸害的临界土壤 pH 也有所差异^[8]。梁文君等^[9]通过盆栽试验进行线性—平台方程拟合,

发现在第四纪红土、红砂岩和板页岩 3 种母质土壤上玉米酸害阈值分别为 5.48、5.54、5.82; 周志刚等^[10]通过田间试验, 采用施用生物炭的方法, 将土壤 pH 由 5.46 调整到 6.76, 得出大豆在潮土上的酸害阈值为 5.89; Liu 等^[11]通过石灰改良酸性土壤的田间试验发现, 小麦在 4 种不同初始性质的土壤上的酸害阈值分别为 4.30、4.60、4.70、5.60, 这表明作物酸害阈值在很大程度上也受土壤性质的影响, 这就给酸化土壤改良和提高作物产量带来了不确定性。铝毒是酸化土壤限制作物生长的主要因素之一, 土壤性质可以改变活性铝对 pH 的响应, 如施用磷肥显著降低了土壤交换性铝的含量, 高磷能缓解植物的铝毒害^[12]; Christopher 等^[13]研究表明, 当土壤溶液 Ca/Al 低于 1.0 时, 对树木生长或营养生长的不利影响风险为 50%; 而当土壤溶液 Ca/Al 低于 0.2 时, 对树木生长或营养生长的不利影响风险为 100%。因此, 作物产量对土壤 pH 的响应受到作物类型和土壤性质的共同影响。目前对多位点、多种作物类型的全方面作物酸害阈值研究还较少, 且作物产量对土壤 pH 响应的影响因素研究较为匮乏。本研究基于国内外大田试验研究, 构建玉米、水稻、小麦和大豆

4种作物产量与土壤 pH 的响应关系曲线, 获得不同作物的酸害阈值, 并分析作物产量对土壤 pH 响应的影响因素, 为酸化土壤改良和产能提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 建立数据库

本研究数据来源于“中国知网”、“Web of Science”数据库; 搜索关键词: 玉米 (maize)、水稻 (rice)、小麦 (wheat)、大豆 (soybean)、土壤 pH (soil pH)、作物产量 (yield)。搜索年份限制为 1980—2020 年。数据筛选条件: 1) 同时有作物产量-pH 对应数据; 2) 施肥为 NPK 平衡施肥; 3) 土壤环境没有受到污染; 4) 同一试验中土壤 pH 变化应大于 0.5 个单位; 数据库内容包括: 文献基本信息 (作者、年限、题目、期刊、页码)、研究地点信息 (采样地点、经纬度、年均温、年降水、土壤类型、土壤质地)、土壤初始性质 (容重、土壤 pH、交换性钙、交换性铝、交换性酸、有机质、全氮、全磷、全钾、阳离子交换量、碱解氮、有效磷、有效钾等)、处理信息 (试验类型、试验年限、重复数、施肥类型、施肥量等)、作物信息 (作物类型、品种、产量等)、作物收获后土壤性质 (容重、土壤 pH、交换性钙、交换性铝、交换性酸、有机质、全氮、全磷、全钾、阳离子交换量、碱解氮、有效磷、有效钾等)。选择土壤酸性指标 (土壤 pH、交换性钙、交换性铝、交换性酸) 和土壤肥力指标 (有机质、有效磷、化学氮肥施用量), 进行作物酸害阈值影响因素分析。

1.2 土壤 pH-作物产量模型拟合

为了尽量减少土壤类型、气候、田间管理等的影响, 作物产量选择相对产量^[14-15], 计算方法为:

$$Y = Y_t / Y_m \times 100$$

式中: Y 为相对产量, Y_t 为试验中每个处理产量, Y_m 为试验中最大产量。

为了消除不同试验采用不同水土比测定土壤 pH 的误差, 统一换算为 $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}(1:2.5)}$, 换算方法为:

$$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}(1:5)} = -0.52 + 1.06 \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}(1:1)}^{[16]}$$

$$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}(1:2.5)} = -0.51 + 1.06 \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}(1:5)}^{[17]}$$

$$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} = 1.65 + 0.86 \text{pH}_{\text{CaCl}_2}^{[18]}$$

通过 Sigmoid 函数进行曲线拟合, 来评估相对产量对土壤 pH 的响应, 该函数通常用于模拟生物量生长^[19]:

$$Y_{\text{pH}_i} = a_i / \{1 + \exp[-(\text{pH} - \text{pH}_{1/2,i})/b_i]\}$$

式中: i 表示作物类型, 即玉米、水稻、小麦和大豆; Y_{pH} 表示给定 pH 下的相对产量; a 、 b 、 $\text{pH}_{1/2}$ 为回归分析得出的模型系数。系数 a 决定了不受酸化影响的估计最大相对作物产量, b ($b < 0$) 决定了与 pH 关系的非线性斜率, $\text{pH}_{1/2}$ 表示产量等于最大产量的 50% 时的 pH。注意, Y_{pH} 被定义为不受酸化影响的估计最高作物产量的一个部分, 它不等于每个试验中最高产量 (系数 a 可能低于 1), 因为品种和管理等其他因素仍可能造成产量差距。

将作物产量等于作物最高产量的 95%、50% 的 pH 分别定义为作物开始出现减产的临界 pH, 达到最高产量一半时的 $\text{pH}^{[5]}$, 计算公式为:

$$\text{作物产量 95\% 的 pH} = \text{pH}_{1/2} - [(\text{LN}0.05) \times b]$$

$$\text{作物产量 50\% 的 pH} = \text{pH}_{1/2} - [(\text{LN}1) \times b]$$

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2019 建立数据库, 采用 Sigma Plot 10.0 软件对 pH-作物产量关系进行拟合以及制作图表, 采用 SPSS 25 软件进行数据统计分析, 采用 Pearson 相关分析方法, 在 5% 和 1% 显著水平上分析作物产量与土壤性质之间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 作物产量对土壤 pH 的响应

通过 Sigmoid 函数, 获得作物相对产量与土壤 pH 响应关系曲线 (图 1), 4 种作物产量 95%、50% 的酸害阈值玉米为 5.87、3.74, 水稻为 4.21、3.76, 小麦为 5.32、4.38, 大豆为 5.34、4.57 (表 1)。这表明, 玉米、大豆、小麦和水稻开始减产的 pH 分别为 5.87、5.34、5.32、4.21, 此值可作为酸化土壤改良的目标 pH。

2.2 土壤酸性指标、土壤肥力指标、土壤 pH、作物产量之间相关性分析

相关性分析显示, 作物产量与交换性铝显著负相关, 与交换性钙、钙铝比、有机质、有效磷、化学氮肥施用量显著正相关; 土壤 pH 与交换性酸、交换性铝和有机质显著负相关, 与交换性钙、钙铝比、有效磷、化学氮肥施用量显著正相关 (表 2)。因此, 土壤 pH 是影响作物产量的关键因素之一, 且土壤 pH 与作物产量同时受到土壤交换性酸、交换性铝、交换性钙、钙铝比、土壤有机质、有效磷、化学氮肥施用量的影响。

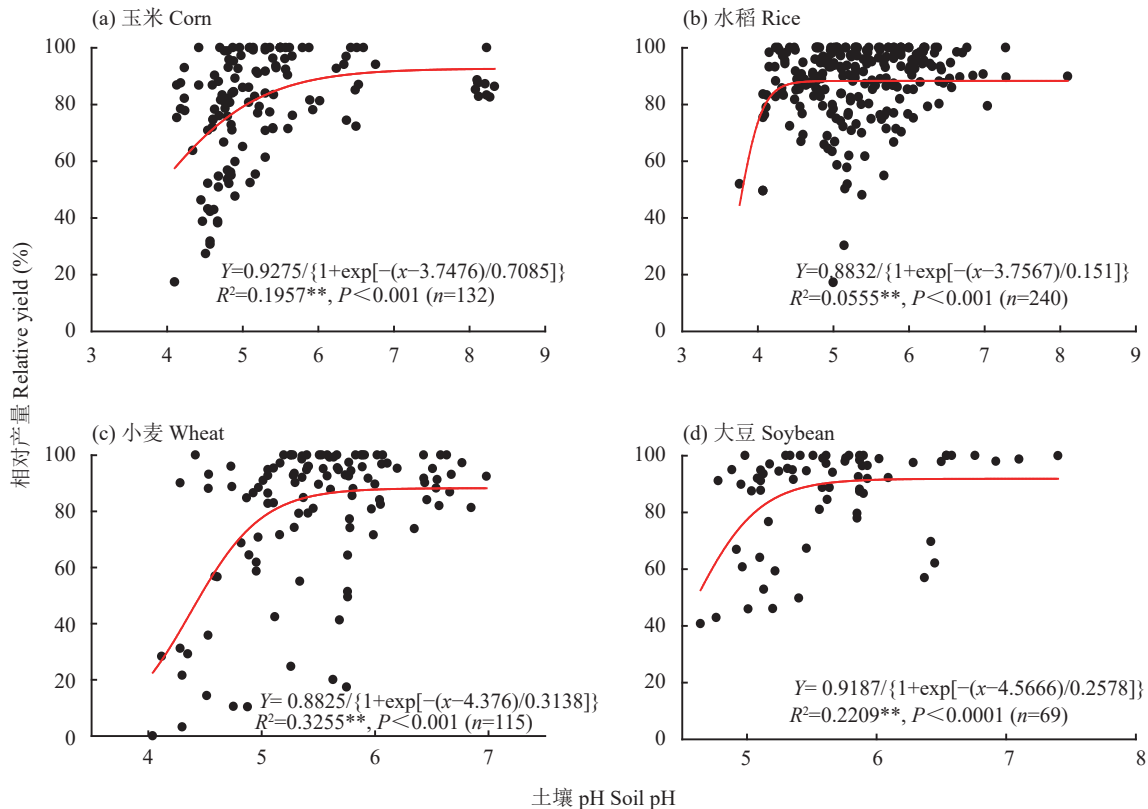


图 1 主要作物产量与土壤 pH 的响应关系曲线

Fig. 1 Response curves of main crop yields with soil pH

表 1 主要作物相对产量为 95% 和 50% 的 pH 阈值
Table 1 pH threshold for 95% and 50% of the relative yield of main crops

作物类型 Crop type	95%相对产量 95% relative yield	50%相对产量 50% relative yield
玉米 Maize	5.87	3.74
水稻 Rice	4.21	3.76
小麦 Wheat	5.32	4.38
大豆 Soybean	5.34	4.57

当土壤 pH 大于酸害阈值时, 相关性分析表明相对产量与 pH 无相关性, 土壤 pH 与交换性酸、交换性铝、有机质显著负相关, 与交换性钙、钙铝比、有效磷显著正相关; 相对产量与有机质、有效磷显著正相关性 (表 3)。当土壤 pH 小于酸害阈值时, 相关性分析表明相对产量与土壤 pH 显著正相关, 土壤 pH 和相对产量与交换性铝显著负相关, 与交换性钙、钙铝比显著正相关 (表 3)。因此, 在作物不出现酸害的条件下, 影响作物产量的主要是土壤肥力指标, 其中有机质是影响水稻和大豆产量的主要因素, 化学氮肥施用量是影响小麦的主要因素 (表 4); 在作物出现酸害的条件下, 影响作物产量的主要是土壤酸性指标, 其中交换性酸、交换性铝、钙铝比

是影响玉米产量的主要因素, 交换性铝、交换性钙是影响小麦产量的主要因素, 交换性酸、交换性铝是影响大豆产量的主要因素 (表 4)。

2.3 土壤酸性指标、土壤肥力指标、作物产量及土壤 pH 之间偏相关性分析

偏相关性分析显示, 剔除有机质影响后 (表 5), 相对产量与 pH 的相关系数升高 0.207, 与交换性铝的相关系数增加了 0.072, 而交换性铝与 pH 的相关系数降低 0.289。这表明在低有机质土壤中, 作物产量对 pH 和交换性铝的响应变强, 增加了作物的铝毒害风险。因此在相同 pH 条件下增加土壤有机质含量能降低作物的铝毒害风险。剔除有效磷影响后 (表 6), 相对产量与 pH 的相关系数升高 0.085, 与交换性铝的相关系数升高 0.147, 而 pH 与交换性铝的相关系数降低 0.023。这表明在低有效磷土壤中, 作物产量对 pH 和交换性铝的响应变强, 增加了作物的铝毒害风险。因此在相同 pH 条件下增加土壤有效磷的含量能降低作物的铝毒害风险。剔除化学氮肥施用影响后 (表 7), 相对产量与 pH 的相关系数升高 0.026, 与交换性铝的相关系数降低 0.009, 而交换性铝与 pH 的相关系数升高 0.049, 这表明过量的施用

表 2 作物相对产量与土壤性质及施氮量的相关性

Table 2 Correlation of relative yields with soil properties and nitrogen application rate

指标 Index	RY	pH	Ex-A	Ex-Al	Ex-Ca	Ca/Al	SOM	AP	N-fertilizer
RY	1	0.295**	-0.088	-0.254*	0.235**	0.323*	0.280**	0.182**	0.171**
pH	0.295**	1	-0.292**	-0.720**	0.553**	0.591**	-0.195**	0.235**	0.124*
Ex-A	-0.088	-0.292**	1	0.695**	-0.514**	-0.105	-0.494	-0.395**	0.168
Ex-Al	-0.254*	-0.720**	0.695**	1	-0.401**	-0.513**	0.031	0.195	0.329**
Ex-Ca	0.235**	0.553**	-0.514**	-0.401**	1	0.221	-0.007	0.427**	0.039
Ca/Al	0.323*	0.591**	-0.105	-0.513**	0.221	1	-0.005	-0.266	-0.004
SOM	0.280**	-0.195**	-0.494	0.031	-0.007	-0.005	1	-0.302**	0.264**
AP	0.182**	0.235**	-0.395**	0.195	0.427**	-0.266	-0.302**	1	-0.176*
N-fertilizer	0.171**	0.124*	0.168	0.329**	0.039	-0.004	0.264**	-0.176*	1

注: RY—相对产量; Ex-A—交换性酸; Ex-Al—交换性铝; Ex-Ca—交换性钙; Ca/Al—钙铝比; SOM—土壤有机质; AP—有效磷; N-fertilizer—化学氮肥施用量。**和*分别为0.01和0.05水平上显著相关(双测)。

Note: RY—Relative yield; Ex-A—Exchangeable acid; Ex-Al—Exchangeable Al; Ex-Ca—Exchangeable Ca; Ca/Al—Ratio of exchangeable Ca and Al; SOM—Soil organic matter; AP—Available P; N fertilizer—Chemical N fertilizer application rate. **, and * indicate the correlation reaching 0.01, and 0.05 significant levels (double measure).

表 3 土壤 pH 小于和大于酸害阈值时作物相对产量与土壤性质的相关性

Table 3 Correlation of relative crop yields and soil properties when soil pH is less and higher than the acid damage threshold

土壤 Soil	指标 Index	pH	Ex-A	Ex-Al	Ex-Ca	Ca/Al	SOM	AP	N-fertilizer
土壤pH小于酸害阈值 Soil pH less than the acid damage threshold	RY	0.082	0.223	-0.287	-0.026	-0.127	0.248**	0.168*	0.125
	pH	1	-0.278*	-0.749**	0.473**	0.987**	-0.308*	0.214**	0.077
	<i>n</i>	358	53	37	63	9	149	175	196
土壤pH大于酸害阈值 Soil pH higher than the acid damage threshold	RY	0.416**	-0.061	-0.301*	0.265*	0.307*	0.238	0.169	0.113
	pH	1	-0.209	-0.803**	0.686**	0.472**	0.029	0.179	-0.146
	<i>n</i>	178	60	61	63	52	27	75	80

注: RY—相对产量; Ex-A—交换性酸; Ex-Al—交换性铝; Ex-Ca—交换性钙; Ca/Al—钙铝比; SOM—土壤有机质; AP—有效磷; N-fertilizer—化学氮肥施用量; *n*—样本数。**和*分别为0.01和0.05水平上显著相关(双测)。

Note: RY—Relative yield; Ex-A—Exchangeable acid; Ex-Al—Exchangeable Al; Ex-Ca—Exchangeable Ca; Ca/Al—Ratio of exchangeable Ca and Al; SOM—Soil organic matter; AP—Available P; N-fertilizer—Chemical N fertilizer application rate. **, and * indicate the correlation reaching 0.01, and 0.05 significant levels (double measure).

表 4 不同作物相对产量和土壤 pH 与酸害驱动因素的相关性

Table 4 Correlation of relative yields of different crops with soil pH and driving factors of acid damage

作物 Crop	土壤 Soil	指标 Index	pH	Ex-A	Ex-Al	Ex-Ca	Ca/Al	SOM	AP	N-fertilizer
玉米 Maize	总数据 Total	RY	0.339**	-0.885**	-0.656**	0.283	0.314*	0.077	0.383	0.368**
		pH	1	-0.906**	-0.595**	0.767**	0.478*	-0.654**	0.177	0.718**
		<i>n</i>	132	26	44	44	43	33	58	68
	土壤pH小于酸害阈值 Soil pH less than the acid damage threshold	RY	-0.065	-	-	-	-	0.18	0.299	-0.255
		pH	1	-	-	-	-	-0.849**	-0.105	0.86**
		<i>n</i>	24	0	0	0	0	20	20	68

续表 4 Table 4 continued

作物 Crop	土壤 Soil	指标 Index	pH	Ex-A	Ex-Al	Ex-Ca	Ca/Al	SOM	AP	N-fertilizer
水稻 Rice	土壤pH大于酸害阈值 Soil pH higher than the acid damage threshold	RY	0.437**	-0.885**	-0.656**	0.283	0.314*	0.165	0.405*	0.232
		pH	1	-0.906**	-0.595**	0.767**	0.478*	-0.009	0.315	0.023
		<i>n</i>	108	26	44	44	43	13	38	53
	总数据 Total	RY	0.188**	-0.65**	-0.645**	0.000	0.47	0.323**	0.1	0.121
		pH	1	-0.836**	-0.835**	0.702**	0.793*	0.218*	0.282**	0.123
		<i>n</i>	240	41	41	59	8	106	112	137
	土壤pH小于酸害阈值 Soil pH less than the acid damage threshold	RY	0.119	-0.265	-0.254	0.000	0.47	0.323**	0.095	0.072
		pH	1	-0.795**	-0.792**	0.702**	0.793*	0.218*	0.28**	0.126
		<i>n</i>	230	33	33	59	8	106	108	127
	土壤pH大于酸害阈值 Soil pH higher than the acid damage threshold	RY	0.614	-0.51	-0.503	-	-	-	0.893	0.608
		pH	1	-0.273	-0.243	-	-	-	0.93	0.086
		<i>n</i>	10	8	8	0	0	0	4	10
小麦 Wheat	总数据 Total	RY	0.449**	-0.194	-0.935**	0.893**	0.7	0.374	0.315*	0.233
		pH	1	-0.205	-0.959**	0.95**	0.899**	0.354	0.344	0.149
		<i>n</i>	115	12	8	8	8	18	46	44
	土壤pH小于酸害阈值 Soil pH less than the acid damage threshold	RY	0.116	0.653	-	-	-	0.514	0.354	0.366*
		pH	1	-0.978	-	-	-	-0.093	0.7**	0.262
		<i>n</i>	70	3	0	0	0	8	25	32
土壤pH大于酸害阈值 Soil pH higher than the acid damage threshold	RY	0.567**	-0.199	-0.935**	0.893**	0.699	0.206	0.139	0.032	
	pH	1	-0.283	-0.959**	0.95**	0.898**	0.045	-0.112	-0.184	
	<i>n</i>	45	9	8	8	8	10	21	12	
大豆 Soybean	总数据 Total	RY	0.362**	0.274	-0.942*	0.535*	-	0.151	0.152	-0.246
		pH	1	-0.531**	-0.793	0.968**	-	0.213	0.281	-0.139
		<i>n</i>	69	34	5	15	0	19	34	27
	土壤pH小于酸害阈值 Soil pH less than the acid damage threshold	RY	0.139	0.598*	-0.99**	0.514	-	0.125	0.105	-0.139
		pH	1	-0.892**	-0.827	0.998**	-	0.241	-0.284	0.057
		<i>n</i>	44	17	4	7	0	15	22	22
土壤pH大于酸害阈值 Soil pH higher than the acid damage threshold	RY	0.406*	0.253	-	0.028	-	0.606	-0.128	0.098	
	pH	1	0.231	-	0.568	-	0.96*	0.465	0.662	
	<i>n</i>	25	17	0	11	0	4	12	5	

注: RY—相对产量; Ex-A—交换性酸; Ex-Al—交换性铝; Ex-Ca—交换性钙; Ca/Al—钙铝比; SOM—土壤有机质; AP—有效磷; N-fertilizer—化学氮肥施用量; *n*—样本数。“-”表示没有数据。**和*分别为0.01和0.05水平上显著相关(双测)。

Note: RY—Relative yield; Ex-A—Exchangeable acid; Ex-Al—Exchangeable Al; Ex-Ca—Exchangeable Ca; Ca/Al—Ratio of exchangeable Ca and Al; SOM—Soil organic matter; AP—Available P; N-fertilizer—Chemical N fertilizer application rate. “-” indicates no data. ** and * indicate the correlation reaching 0.01, and 0.05 significant levels (double measure).

化学氮肥后, 作物产量对 pH 和交换性铝的响应变强, 增加了作物的铝毒害风险。因此在相同 pH 条件下控制化学氮肥的施用量能降低作物的铝毒害风

险。因此, 土壤肥力指标(有机质、有效磷)和化学氮肥施用量是影响土壤酸性指标对土壤作物产量与 pH 响应的关键因素。

表 5 剔除有机质影响前后土壤酸性指标、土壤肥力指标、土壤 pH 及相对产量偏相关系数
Table 5 Partial correlation coefficient of soil acidity index, soil fertility index, soil pH and relative yield before and after removing the influence of SOM

变量 Variable	指标 Index	R Y	pH	Ex-A	Ex-Al	Ex-Ca	Ca/Al	SOM
不剔除有机质影响 Not removing SOM influence	R Y	1.000	-0.002	-0.368	0.501	0.359	-0.470	0.187
	pH		1.000	-0.715*	-0.783	-0.544	0.793*	-0.739*
	Ex-A			1.000	0.276	0.168*	-0.279**	0.165*
	Ex-Al				1.000	0.745	-0.987	0.774
	Ex-Ca					1.000	-0.702	0.699
	Ca/Al						1.000	-0.825*
	SOM							1.000
剔除有机质影响 Removing SOM influence	R Y	1.000	0.205	-0.412	0.573	0.325	-0.570	
	pH		1.000	-0.892**	-0.494	-0.058	0.481	
	Ex-A			1.000	0.238	0.074	-0.256	
	Ex-Al				1.000	0.451	-0.975**	
	Ex-Ca					1.000	-0.311	
	Ca/Al						1.000	
	SOM							1.000

注: RY—相对产量; Ex-A—交换性酸; Ex-Al—交换性铝; Ex-Ca—交换性钙; Ca/Al—钙铝比; SOM—土壤有机质。**和*分别为0.01和0.05水平上显著相关(双测)。

Note: RY—Relative yield; Ex-A—Exchangeable acid; Ex-Al—Exchangeable Al; Ex-Ca—Exchangeable Ca; Ca/Al—Ratio of exchangeable Ca and Al; SOM—Soil organic matter. ** and * indicate the correlation reaching 0.01, and 0.05 significant levels, respectively (double measure).

表 6 剔除有效磷影响前后土壤酸性指标、土壤肥力指标、土壤 pH 及相对产量偏相关系数
Table 6 Partial correlation coefficient of soil acidity index, soil fertility index, soil pH and relative yield before and after removing the influence of AP

变量 Variable	指标 Index	R Y	pH	Ex-A	Ex-Al	Ex-Ca	Ca/Al	AP
不剔除有效磷影响 Not removing AP influence	R Y	1.000	0.716**	-0.375*	-0.632**	0.431**	0.427**	-0.047
	pH		1.000	-0.111	-0.916**	0.599**	0.720**	-0.501**
	Ex-A			1.000	-0.098	-0.496**	-0.254	-0.444**
	Ex-Al				1.000	-0.542**	-0.666**	0.634**
	Ex-Ca					1.000	0.913**	-0.492**
	Ca/Al						1.000	-0.656**
	AP							1.000
剔除有效磷影响 Removing AP influence	R Y	1.000	0.801**	-0.443**	-0.779**	0.468**	0.525**	
	pH		1.000	-0.431**	-0.893**	0.467**	0.599**	
	Ex-A			1.000	0.266	-0.916**	-0.807**	
	Ex-Al				1.000	-0.342*	-0.428**	
	Ex-Ca					1.000	0.898**	
	Ca/Al						1.000	
	AP							1.000

注: RY—相对产量; Ex-A—交换性酸; Ex-Al—交换性铝; Ex-Ca—交换性钙; Ca/Al—钙铝比; AP—有效磷。**和*分别为0.01和0.05水平上显著相关(双测)。

Note: RY—Relative yield; Ex-A—Exchangeable acid; Ex-Al—Exchangeable Al; Ex-Ca—Exchangeable Ca; Ca/Al—Ratio of exchangeable Ca and Al; AP—Available P. ** and * indicate the correlation reaching 0.01, and 0.05 significant levels, respectively (double measure).

表 7 剔除化学氮肥施用量前后土壤酸性指标、土壤肥力指标、土壤 pH 及相对产量的偏相关系数
Table 7 Partial correlation coefficient of soil acidity index, soil fertility index, soil pH and relative yield before and after removing the influence of N application rate

变量 Variable	指标 Index	R Y	pH	Ex-A	Ex-Al	Ex-Ca	Ca/Al	N-fertilizer
不剔除施氮量影响 Not removing N application rate influence	R Y	1.000	0.628**	-0.740**	-0.822**	0.473**	0.268	0.203
	pH		1.000	-0.438**	-0.873**	0.504**	0.797**	-0.058
	Ex-A			1.000	0.780**	-0.720**	-0.148	-0.666**
	Ex-Al				1.000	-0.715**	-0.592**	-0.263
	Ex-Ca					1.000	0.412	0.678**
	Ca/Al						1.000	-0.131
	N-fertilizer							1.000
剔除施氮量影响 Removing N application rate influence	R Y	1.000	0.654**	-0.828**	-0.813**	0.466**	0.304	
	pH		1.000	-0.640**	-0.922**	0.742**	0.798**	
	Ex-A			1.000	0.840**	-0.489**	-0.318	
	Ex-Al				1.000	-0.756**	-0.655**	
	Ex-Ca					1.000	0.687**	
	Ca/Al						1.000	

注: RY—相对产量; Ex-A—交换性酸; Ex-Al—交换性铝; Ex-Ca—交换性钙; Ca/Al—钙铝比; N-fertilizer—化学氮肥施用量。**和*分别为0.01和0.05水平上显著相关(双测)。

Note: RY—Relative yield; Ex-A—Exchangeable acid; Ex-Al—Exchangeable Al; Ex-Ca—Exchangeable Ca; Ca/Al—Ratio of exchangeable Ca and Al; N-fertilizer—Chemical N fertilizer application rate. ** and * indicate the correlation reaching 0.01, and 0.05 significant levels, respectively (double measure).

3 讨论

3.1 4种作物酸害阈值

本研究结果显示, 4种作物酸害阈值分别为玉米(5.87)、大豆(5.34)、小麦(5.32)、水稻(4.21)(表1)。其中玉米、大豆、小麦酸害阈值在5.50左右, 水稻酸害阈值最低, 表明粮食作物在土壤pH降低到5.50可能就会发生明显减产。周世伟^[20]调查发现2005—2010年我国粮食产量与土壤pH呈负相关关系, 土壤pH=5.50时, 粮食减产972 kg/hm², 土壤pH=5.00时, 粮食减产1216 kg/hm², 这一结果与本研究结果相似。而Zhu等^[5]整合分析了多个长期试验数据发现, 作物酸害阈值为小麦5.90、玉米5.10、水稻5.00; Fageria等^[21]研究表明, 作物酸害阈值为小麦6.30、大豆5.60、玉米5.40、水稻4.90。以上结果与本研究结果相近, 表明水稻是4种作物中最为耐酸的作物。在酸化条件下水稻在受到铝胁迫时, 主要通过有机酸螯合、细胞壁固定和根屏障等外部排斥机制与内部耐铝机制来抵御酸害^[22-24]。其中外部排斥机制利用细胞壁和其他器官作为屏障, 将Al³⁺排除在植物细胞之外, 以避免Al³⁺的植物毒性,

而内部耐铝机制主要依靠Al³⁺与细胞质中的有机化合物(主要是有机酸, 如苹果酸、柠檬酸和草酸等)络合形成稳定的配合物, 将进入细胞的活性铝转变为不溶或微溶的形式, 降低对作物的有害影响^[25-28]。而水稻在铝胁迫下能增加根尖OsFRDL4的表达量, 促进分泌更多的柠檬酸, 此外还会降低NRATI基因的表达量, 增加根部的伸长, 进而提高耐铝能力^[29]。同时因为水稻在长期淹水厌氧条件下, 水田中硝化作用较早地弱, NH₄⁺较NO₃⁻含量高, 而Zhao等^[30]研究表明, NH₄⁺与Al³⁺存在协同作用, NO₃⁻与Al³⁺存在拮抗作用。其可能的机制是NH₄⁺通过直接和间接质子与Al³⁺竞争细胞壁的阳离子结合位点^[31-32], 从而使得水稻较其他谷物有更强的耐酸能力。但是水稻酸害阈值为4.21, 远小于Zhu等^[5]和Fageria等^[21]的研究结果(5.00、4.90), 这可能受到了土壤养分的影响。臧小平等^[33]在酸性硫酸盐土壤中施用磷矿粉研究发现, 在土壤pH低至4.5以下时, 水稻产量出现明显的下降; Shamsun等^[34]、Liu等^[35]、Ai等^[36]研究发现, 在土壤pH低至4.4以下时, 水稻产量出现明显下降, 其土壤有机质含量很高, 达到28.38~52.00 g/kg; Swain等^[37]研究发现, 在土壤pH低至5.3时, 水稻

出现明显减产,其土壤有机质仅为 4.29~7.78 g/kg。这表明有机质仍是影响作物产量以及酸害阈值的重要因素。

本研究发现,玉米和小麦酸害阈值分别为 5.87 和 5.32 (表 1);蔡泽江^[38]进行盆栽试验,得出小麦和玉米的酸害阈值分别为 6.03 和 5.92,发现当土壤 pH 低于酸害阈值时,每降低一个 pH 单位,小麦和玉米的生物量分别下降 40.0% 和 25.7%,表明玉米比小麦更加耐酸。Baquy 等^[39]研究发现,玉米在第四纪红土的 pH 阈值为 4.73^[39];Baquy 等^[40]研究发现,红壤中种植的小麦的 pH 阈值为 5.29^[40]。研究还表明,在铝胁迫下,植物能分泌大量有机酸,有机酸与铝离子形成螯合物,大大降低铝的生物毒性。小麦根系能分泌苹果酸,玉米根系能分泌柠檬酸,而柠檬酸螯合 Al 的能力强于苹果酸^[41]。各研究结果的差异可能与供试土壤的母质、试验条件、管理措施等因素有关,应该综合考虑影响因素,有针对性地研究不同物种的耐酸能力。

3.2 作物酸害阈值的影响因素

土壤酸化会导致土壤中铝生物毒性增加,而铝毒会改变细胞膜通透性,物质外泄作用加强,进而抑制植物和微生物的生长,导致作物产量、植物和土壤微生物的丰度和多样性下降^[42-43],因此明确影响作物产量对土壤 pH 响应的因素对抑制土壤酸化和提高作物产量具有重要意义。

3.2.1 有机质影响作物产量对 pH 的响应 本研究发现,有机质是影响作物产量对土壤酸化响应的重要因素之一,在作物未出现酸害的情况下土壤有机质含量与土壤 pH 呈显著负相关关系,作物出现酸害后土壤有机质含量与土壤 pH 之间没有显著相关性。然而在中性及微碱性土壤环境条件下,微生物活动较高,有利于土壤有机质的矿化,但 pH 低于 4.5 时不利于有机质的矿化^[44]。梁颂捷等^[45]研究发现,土壤 pH 为 4.6~7.5 时,随 pH 降低土壤有机质矿化程度增加。刘杰等^[46]的研究则表明土壤 pH 变化与有机质含量之间没有明显相关性。土壤有机质是土壤微生物活动的底物和植物生长的养分源^[47],受到微生物活动的影响。此外,土壤有机质含量还与气候因素、农田管理措施、土壤粘粒含量等因素密切相关^[48]。研究结果的差异可能是因为土壤母质、水热条件、田间管理等诸多因素的影响太大。这表明有机质与土壤 pH 之间可能不仅仅是单纯的线性关系,探讨有机质与 pH 之间的关系需要考虑土壤酸度、土壤类型、地理因素等多种因素的影响。

研究表明,随着土壤有机质含量的增加,土壤中对生物毒性强的交换性铝或无机吸附态羟基铝会与土壤中的有机质发生络合作用,形成无(少)毒的有机络合态铝,降低作物受到的铝毒害^[49]。Wang 等^[50]向小麦施用有机肥后通过冗余分析发现,土壤 pH 和有机质解释了铝形态变异的 84%,有机质决定了土壤活性铝的形态变化。因此在较高有机质水平下,作物会大大增加耐酸耐铝能力,使得作物在较低的土壤 pH 水平下仍然有较高的产量,即有机质能降低作物的酸害阈值。

3.2.2 有效磷对作物酸害阈值的影响 本研究中相关性分析结果显示,土壤有效磷与作物产量和 pH 显著正相关,偏相关分析结果表明有效磷能影响作物产量对土壤 pH 的响应,这可能与磷能降低作物铝毒害风险有关。万延慧等^[51]通过溶液培养试验发现高磷可缓解铝对大豆的毒害作用,一种原因可能是在营养液中一部分磷与铝结合生成磷酸铝盐沉淀,降低了介质中铝的浓度,从而减轻了铝的毒害作用;另一种原因可能是由于在大豆植株内部铝与磷形成沉淀,降低了铝的毒害。温元波^[52]研究发现,黄壤交换性铝随着磷酸盐的加入明显降低,而 $\text{Al}(\text{PO}_4)_3$ 离子含量不断升高,进而形成磷酸铝化合物。朱美红^[53]通过对荞麦根际土壤铝形态的研究发现,施磷促使土壤中的交换态铝向吸附态铝转化。磷酸根与土壤中的铝离子形成铝-磷复合物沉淀后,土壤中的活性铝含量降低,使荞麦根系所受铝毒害降低。同时磷参与碳水化合物的生成与分解,促进了作物对碳水化合物的运输,对作物光合作用及生长发育有着重要的作用,进而影响作物的产量^[54]。因此,土壤有效磷是影响作物酸害阈值的重要因素之一。

3.2.3 施氮量对作物酸害阈值的影响 近几十年来人为活动加速了土壤酸化的进程^[8],其中过量的化学氮肥施用是一个重要的因素。湖南祁阳定位试验的监测结果显示,长期单施化肥 20 年后土壤 pH 由 5.7 下降至 4.5^[2]。长期(26 年)施用氮肥(尿素),黑土 pH 降低了 0.82 个单位,因为脲酶将尿素分解为碳铵,经过硝化作用向土壤释放出 H^+ ,而硝态氮不能很快被作物全部利用,会在土壤中积累。一方面 NO_3^- 能够形成硝酸,使土壤周围 pH 进一步降低。耕作年限越长,土壤的酸度会越低^[55];另一方面 NO_3^- 与金属阳离子结合形成硝酸盐,造成氮素淋失,降低氮素利用率。蔡泽江等^[56]通过长期定位试验发现,随着年限延长施用化学氮肥会导致土壤 pH 不断降低,玉米和小麦产量也随之不断降低。Deng 等^[57]

通过 3 年的尿素和控释肥试验发现, 小麦和玉米分别在施 N 150 和 200 kg/hm² 处理下产量达到最高, 此后随施氮量增加产量开始下降, 此外, 每施 N 1 kg, 土壤 pH 就下降 0.0004~0.0012 个单位。这表明随着施用化学氮肥的量和年限增加, 作物在较高 pH 下就会出现产量降低的现象, 提高作物的酸害阈值。

本研究发现, 化学氮肥施用量与土壤 pH 显著负相关, 与作物相对产量显著正相关(表 2), 这与前人研究结果相同。但在本研究中玉米作物的化学氮肥施用量与土壤 pH 显著正相关, 其他 3 种作物的化学氮肥施用量与土壤 pH 相关性不显著(表 4)。铵态氮肥施入土壤后, 发生硝化作用产生 H⁺, 造成土壤酸化, 而以尿素为代表的酰胺基氮肥, 施入土壤后首先会转化为铵态氮消耗 H⁺, 再发生硝化作用产生 H⁺^[58-60]。数据整合分析显示, 在不同作物上化学氮肥对土壤 pH 的影响表现不同, 原因可能是土壤 pH 不仅受到氮肥施用量的影响, 氮肥品种也是其影响因素。因此, 探究施用氮肥对土壤酸化的影响应同时从施用量和肥料种类着手。

3.2.4 土壤活性铝对作物酸害阈值的影响 研究表明, 土壤酸化会导致土壤铝活性的增加, 而铝的生物毒性是造成作物减产的主要原因^[61]。本研究显示, 有效磷与交换性铝没有显著相关性(表 2), 也有研究发现, 土壤中活性铝结合磷酸根离子形成植物难利用的磷酸铝化合物, 降低了土壤磷的有效性^[62], 同时也降低了土壤活性铝的含量。这表明磷虽然可以与活性铝结合, 降低铝活性, 但其可能并不是降低铝活性的最重要因素, 也可能有其他因素的影响。本研究显示, 有机质与交换性铝相关性也不显著(表 2), 然而许多研究结果表明, 有机质分解产生的有机酸、酚等化合物能与铝形成稳定的复合体降低土壤中的活性铝含量, 而与有机物复合的铝对植物生长基本没有生物毒性, 因此能显著减轻铝对作物的毒害^[63]。这表明土壤活性铝的含量可能受到 pH、有机质、有效磷等多种因素的共同影响, 在这些因素驱动下, 土壤活性铝会转变成其他铝形态存在于土壤中。因此, 缓解土壤酸化, 降低作物产量损失, 应从研究土壤铝形态转化的主要驱动因素, 降低铝生物毒性入手。

4 结论

土壤 pH 是影响作物产量的关键因素之一, 玉

米、大豆、小麦和水稻产量 95% 的酸害阈值分别为 5.87、5.34、5.32、4.21, 作物酸害阈值受到土壤酸性指标(交换性酸、交换性铝、交换性钙和钙铝比)和土壤肥力指标(有机质、有效磷)及化学氮肥施用量的共同影响。

在 pH 未达到酸害的土壤中, 提高土壤有机质和有效磷含量, 适当增加氮肥用量可以保证较高的作物产量。随着土壤酸化加剧, 需要提高土壤 pH, 降低铝活性, 才能保证较高的作物产量。

参 考 文 献:

- [1] 陈平平. 酸化土壤对水稻产量与氮利用效率的影响途径研究[D]. 湖南长沙: 湖南农业大学博士学位论文, 2015.
Chen P P. Effects of acidified soil on rice yield and nitrogen use efficiency[D]. Changsha, Hunan: PhD Dissertation of Hunan Agricultural University, 2015.
- [2] Meng H Q, Xu M G, Lü J L, *et al.* Quantification of anthropogenic acidification under long-term fertilization in the upland red soil of south China[J]. *Soil Science*, 2014, 179: 486-494.
- [3] Guo J H, Lü X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327: 1008-1010.
- [4] Nagy J. The effect of soil pH and precipitation variability during the growing season on maize hybrid grain yield in a 17 year long-term experiment[J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2011, 59(1): 60-67.
- [5] Zhu Q C, Liu X J, Hao T X, *et al.* Cropland acidification increases risk of yield losses and food insecurity in China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 256(11): 113-145.
- [6] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, *et al.* Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(2): 260-270.
- [7] 胡忆雨, 朱颖璇, 杨雨豪, 等. 1951—2015年中国主要粮食与油料作物种植结构变化分析[J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(11): 183-196.
Hu Y Y, Zhu Y X, Yang Y H, *et al.* Change of planting structure of main grain and oil crops in China from 1951 to 2015[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(11): 183-196.
- [8] 徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 160-167.
Xu R K, Li J X, Zhou S W, *et al.* Scientific problems and technical measures of soil acidification control in Chinese farmland[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 160-167.
- [9] 梁文君, 蔡泽江, 宋芳芳, 等. 不同母质发育红壤上玉米生长与土壤 pH、交换性铝、交换性钙的关系[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(8): 1544-1550.
Liang W J, Cai Z J, Song F F, *et al.* Relationship between maize growth and soil pH, exchangeable aluminum and exchangeable calcium in red soil with different parent materials[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8): 1544-1550.
- [10] 周志刚, 王小利. 生物黑炭施用对黄淮海地区大豆产量和土壤肥力的影响[J]. *耕作与栽培*, 2016, (2): 5-7.

- Zhou Z G, Wang X L. Effects of bioblack carbon application on soybean yield and soil fertility in Huang-Huai-Hai area[J]. *Tillage and Cultivation*, 2016, (2): 5–7.
- [11] Liu D L, Helyai K R, Conyers M K, *et al.* Response of wheat, triticale and barley to lime application in semi-arid soils[J]. *Field Crops Research*, 2004, 90(2): 287–301.
- [12] Bache B W, Crooke W M. Interactions between aluminium, phosphorus and pH in the response of barley to soil acidity[J]. *Plant and Soil*, 1981, 61(3): 265–375.
- [13] Christopher S C, David F G. Use of calcium/aluminum ratios as indicators of stress in forest ecosystems[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(2): 209–226.
- [14] Bai Z, Li H, Yang X, *et al.* The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types[J]. *Plant Soil*, 2013, 372(1/2): 27–37.
- [15] Colwell J D. The estimation of the phosphorus fertilizer requirements of wheaten southern New South Wales by soil analysis[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1963, 3(10): 190–197.
- [16] Libohova Z, Wills S, Odgers N P, *et al.* Converting pH 1: 1 H₂O and 1: 2 CaCl₂ to 1: 5 H₂O to contribute to a harmonized global soil database[J]. *Geoderma*, 2014, 213: 544–550.
- [17] 吴淑娟, 任运涛, 吴彩霞, 等. 草地土壤pH测定方法比较研究[J]. *土壤通报*, 2018, 49(2): 343–348.
- Wu S J, Ren Y T, Wu C X, *et al.* Comparative study on determination methods of soil pH value in grassland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(2): 343–348.
- [18] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 5(2): 202–214.
- [19] Overman A, Sanderson M, Jones R. Logistic response of bermudagrass and bunchgrass cultivars to applied nitrogen[J]. *Agronomy Journal*, 1993, 85(3): 541–545.
- [20] 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: 中国农业科学院博士后研究报告, 2017.
- Zhou S W. Characteristics of red soil acidification and acid damage threshold of main crops under long-term fertilization[D]. Beijing: Post-doctoral Research Report of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.
- [21] 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.
- [22] Kochian, L V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1995, 46(1): 237–260.
- [23] Kochian L V, Hoekenga O A, Pineros M A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 2004, 55(1): 459–493.
- [24] Fang S, Hou X, Liang X. Response mechanisms of plants under saline-alkali stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 667458.
- [25] Koyama H, Takita E, Kawamura A, *et al.* Over expression of mitochondrial citrate synthase gene improves the growth of carrot cells in Al-phosphate medium[J]. *Plant and Cell Physiology*, 1999, 40(5): 482–488.
- [26] Ma J F, Chen Z C, Shen R F. Molecular mechanisms of Al tolerance in gramineous plants[J]. *Plant Soil*, 2014, 381(1/2): 1–12.
- [27] Ma J F. Role of organic acids in detoxification of aluminum in higher plants[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2000, 41(4): 383–390.
- [28] Ishikawa S, Wagatsuma T, Sasaki R, *et al.* Comparison of the amount of citric and malic acids in Al media of seven plant species and two cultivars each in five plant species[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, 46: 751–758.
- [29] 王斌, 朱晓芳, 沈仁芳, 等. 水稻品种间铝耐性差异的探究[J]. *土壤学报*, 2017, 54(4): 958–966.
- Wang B, Zhu X F, Shen R F, *et al.* Differences in aluminum tolerance among rice varieties[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(4): 958–966.
- [30] Zhao X Q, Shen R F. Interactive regulation of nitrogen and aluminum in rice[J]. *Plant Signaling and Behavior*, 2013, 8(6): 69–77.
- [31] Zhao X Q, Shen R F, Sun Q B, *et al.* Ammonium under solution culture alleviates aluminum toxicity in rice and reduces aluminum accumulation in roots compared with nitrate[J]. *Plant Soil*, 2009, 315(1/2): 107–121.
- [32] Chen Z C, Zhao X Q, Shen R F, *et al.* The alleviating effect of ammonium on aluminum toxicity in *Lespedeza bicolor* results in decreased aluminum-induced malate secretion from roots compared with nitrate[J]. *Plant Soil*, 2010, 337(s1/2): 389–398.
- [33] 臧小平, 张承林, 孙光明, 等. 酸性硫酸盐土壤上施用磷矿粉对水稻养分有效性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(2): 203–207.
- Zang X P, Zhang C L, Sun G M, *et al.* Effects of phosphate powder on nutrient availability of rice in acid sulfate soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2003, 9(2): 203–207.
- [34] Shamsun N, Sohela A, Md M I, *et al.* Effect of magnesium on crop yields within maize-green manure-T. aman rice cropping pattern on acid soil[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 61(10): 1381–1392.
- [35] Liu X Y, Qu J J, Li L Q, *et al.* Can biochar amendment be an ecological engineering technology to depress N₂O emission in rice paddies?—A cross site field experiment from South China[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 42: 168–173.
- [36] Ai C, Liang G Q, Sun J W, *et al.* The alleviation of acid soil stress in rice by inorganic or organic ameliorants is associated with changes in soil enzyme activity and microbial community composition[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(4): 465–477.
- [37] Swain D K, Rautaray S K, Ghosh B C. Alkaline coal fly ash amendments are recommended for improving rice-peanut crops[J]. *Dinavica Section B-Soil and Plant Science*, 2007, 57: 3, 201–211.
- [38] 蔡泽江. 长期施肥下红壤酸化特征及影响因素[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2010.
- Cai Z J. Characteristics and influencing factors of red soil acidification under long-term fertilization[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [39] Baquy M A, Li J Y, Jiang J, *et al.* Critical pH and exchangeable Al of four acidic soils derived from different parent materials for maize crops[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(4): 1490–1499.
- [40] Baquy M A, Li J Y, Xu C Y, *et al.* Determination of critical pH and

- Al concentration of acidic ultisols for wheat and canola crops[J]. *Solid Earth*, 2017, 8(1): 149–159.
- [41] 邓晓霞, 李月明, 姚堃妹, 等. 植物适应酸铝胁迫机理的研究进展[J]. *生物工程学报*, 2022, 38(8): 2754–2766.
- Deng X X, Li Y M, Yao K S, *et al.* Research advances in the adaptation mechanisms of plants to aluminum acid stress[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2012, 38(8): 275–2766.
- [42] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, *et al.* Biochar effects on soil biota: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812–1836.
- [43] Ishikawa S, Wagatsuma T, Ikarashi T. Comparative toxicity of Al^{3+} , Yb^{3+} , and La^{3+} to root-tip cells differing in tolerance to high Al^{3+} in terms of ionic potentials of dehydrated trivalent cations[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1996, 42(3): 613–625.
- [44] 吕贻忠, 李保国. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- Lü Y Z, Li B G. *Soil science*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [45] 梁颂捷, 林毅, 朱其清, 等. 福建植烟土壤pH与土壤有效养分的相关性[J]. *中国烟草科学*, 2001, 22(1): 25–27.
- Liang B J, Lin Y, Zhu Q Q, *et al.* Correlation between pH value of tobacco-growing soil and soil available nutrients in Fujian Province[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2001, 22(1): 25–27.
- [46] 刘杰, 张杨珠, 曾希柏, 等. 不同施肥结构和调理剂对侵蚀红壤的修复效应[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 152–156.
- Liu J, Zhang Y Z, Zeng X B, *et al.* Remediation effects of different fertilization structures and conditioning agents on eroded red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4): 152–156.
- [47] Fernández F G, Sorensen B A, Villamil M B. A comparison of soil properties after five years of no-till and strip-till[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(4): 1339–1346.
- [48] Liu Y, Lü J S, Zhang B, *et al.* Spatial multi-scale variability of soil nutrients in relation to environmental factors in a typical agricultural region, eastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 450/451: 108–119.
- [49] 吕焕哲, 王凯荣, 谢小立, 等. 有机物料对酸性红壤铝毒的缓解效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 637–641.
- Lü H Z, Wang K R, Xie X L, *et al.* Mitigation effect of organic materials on aluminum toxicity in acidic red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, 13(4): 637–641.
- [50] Wang L, Clayton R B, Tian W, *et al.* Effects of fertilization practices on aluminum fractions and species in a wheat soil[J]. *Journal of Soils Sediments*, 2016, 16: 1933–1943.
- [51] 万延慧, 年海, 严小龙. 大豆种质耐低磷与耐铝毒部分指标及其相互关系的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(2): 199–204.
- Wan Y H, Nian H, Yan X L. Study on some indexes of tolerance to low phosphorus and aluminum toxicity in soybean germplasm and their relationship[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2001, 7(2): 199–204.
- [52] 温元波. 磷石膏对黄壤酸性和铝形态的影响及机制研究[D]. 贵州贵阳: 贵州大学硕士学位论文, 2020.
- Wen Y B. Effect and mechanism of phosphogypsum on acidity and form of aluminum in yellow soil[D]. Guiyang, Guizhou: MS Thesis of Guizhou University, 2020.
- [53] 朱美红. 磷提高荞麦耐铝性的作用和机理研究[D]. 浙江金华: 浙江师范大学硕士学位论文, 2009.
- Zhu M H. Study on the effect and mechanism of phosphorus on improving aluminum resistance of buckwheat[D]. Jinhua, Zhejiang: MS Thesis of Zhejiang Normal University, 2009.
- [54] Marschner H, Kirkby E A, Engels C, *et al.* Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47(9): 1255–1263.
- [55] 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.* Effects of long-term application of chemical fertilizer and organic fertilizer on acidity of black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(5): 1221–1223.
- [56] 蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 等. 长期施肥对红壤pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 71–78.
- Cai Z J, Sun N, Wang B R, *et al.* Effects of long-term fertilization on pH, crop yield and nutrient uptake of nitrogen, phosphorus and potassium in red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(1): 71–78.
- [57] Deng M H, Ma H, Sadehpour A, *et al.* Responses of crop production and soil health to chemical nitrogen fertilization in a maize-wheat rotation system[J]. *Frontiers Environmental Science*, 2023, 11: 1239842.
- [58] Phillip B, Babou O J, Armand R K, *et al.* Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin[J]. *Plant and Soil*, 1997, 197(1): 61–69.
- [59] Jackie L S, 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*[J]. 2011, 75(3): 957–964.
- [60] 文帮勇, 杨忠芳, 侯青叶, 等. 江西鄱阳湖地区土壤酸化与人为源氮的关系[J]. *现代地质*, 2011, 25(3): 562–568.
- Wen B Y, Yang Z F, Hou Q Y, *et al.* Relationship between soil acidification and anthropogenic nitrogen in Poyang Lake area of Jiangxi Province[J]. *Geoscience*, 2011, 25(3): 562–568.
- [61] 谢会雅, 陈舜尧, 张阳, 等. 中国南方土壤酸化原因及土壤酸性改良技术研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2021, (2): 104–107.
- Xie H Y, Chen S Y, Zhang Y, *et al.* Research progress of soil acidification causes and soil acid improvement technology in South China[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2021, (2): 104–107.
- [62] 肖厚军, 王正银. 酸性土壤铝毒与植物营养研究进展[J]. *西南农业学报*, 2006, (6): 1180–1188.
- Xiao H J, Wang Z Y. Research progress of aluminum toxicity and plant nutrition in acid soil[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2006, (6): 1180–1188.
- [63] 陈梅, 陈亚华, 沈振国, 等. 猪粪对红壤铝毒的缓解效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(2): 173–176.
- Chen M, Chen Y H, Shen Z G, *et al.* Alleviating effects of pig manure on aluminum toxicity in red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2002, 8(2): 173–176.