

长期过量施氮及蔗叶还田对赤红壤蔗地土壤酸化的影响

黄金生¹, 孙明雪¹, 谭俊杰², 庞明¹, 曾艳¹, 聂雄峰¹,
卢红媚¹, 陈燕丽³, 周柳强¹, 朱晓晖^{1*}

(1 广西农业科学院农业资源与环境研究所 / 农业农村部华南植物营养与施肥技术科学观测实验站 / 国家农业环境南宁观测实验站, 广西南宁 530007; 2 广西民族师范学院, 广西崇左 532200; 3 广西壮族自治区土壤肥料工作站, 广西南宁 530000)

摘要: 【目的】评估不同施肥处理下广西蔗地土壤酸化特征, 为该地区土壤酸化阻控提供理论依据。【方法】依托始于 2008 年的长期定位试验, 选取不施肥对照 (CK)、推荐施肥 (OPT)、增施氮肥 (OPTN, 在 OPT 基础上增施 50% 氮) 和推荐施肥+蔗叶覆盖还田 (OPTS) 4 个处理, 分析连续 16 年不同施肥处理下土壤 pH、交换性酸、酸化速率、交换性盐基离子、阳离子交换量 (CEC)、酸碱缓冲容量和土壤养分等指标的变化特征。【结果】经过 16 年长期定位试验, 相较于初始土壤, CK、OPT、OPTN、OPTS 处理的土壤 pH 分别降低了 0.04、1.74、2.00、1.72 个单位, 土壤酸化速率依次为 0.16、9.62、10.41 和 9.81 kmol/(hm²·a)。CK 处理的土壤酸碱缓冲容量为 24.00 mmol/(kg·pH), 其余施肥处理的酸碱缓冲容量较 CK 提升 20.32%~26.77%, 其中 OPTS 处理提升幅度最大。与 OPT 处理相比, OPTN 处理的交换性酸、交换性铝及交换性氢含量分别提高 19.31%、15.25% 和 54.75%; 交换性盐基总量降低 14.03%, 盐基饱和度降低 15.10%; 土壤 pH 降低 0.26 个单位, 酸化速率提高 8.22%。与 OPT 处理相比, OPTS 处理的交换性酸及交换性氢含量分别提高 17.82% 和 69.27%; 交换性盐基总量提高 13.45%, 主要表现为交换性钙含量显著提高 26.22%; CEC 提高 12.67%, 但土壤 pH 和酸化速率无显著差异。增施氮肥处理下土壤全磷、速效磷和速效钾含量分别降低了 6.99%、11.06% 和 27.11%。蔗叶还田处理下土壤有机质、全氮、碱解氮含量分别提高 9.96%、12.32%、26.40%, 但土壤速效磷及速效钾含量分别降低了 17.15% 和 34.65%。从 5 年平均产量来看, 与 OPT 处理相比, OPTN 处理减产 6.23%, 而 OPTS 处理增产了 2.68%。【结论】长期过量施用氮肥显著增加土壤交换性氢和交换性铝含量, 降低交换性盐基总量, 增施的氮肥未被甘蔗有效利用, 进而加剧土壤酸化。长期蔗叶还田能有效提高交换性盐基总量、CEC 和有机质含量, 提升全氮和碱解氮含量, 改善土壤养分供给水平及酸碱调节能力。合理施用化肥联合蔗叶还田可作为广西赤红壤蔗地酸化管理的重要策略。

关键词: 长期定位试验; 甘蔗地; 增施氮肥; 蔗叶覆盖还田; 土壤酸化

Impacts of long-term excessive nitrogen fertilization and sugarcane leaf mulching and returning on soil acidification in lateritic red soil sugarcane fields

HUANG Jin-sheng¹, SUN Ming-xue¹, TAN Jun-jie², PANG Ming¹, ZENG Yan¹, NIE Xiong-feng¹,
LU Hong-mei¹, CHEN Yan-li³, ZHOU Liu-qiang¹, ZHU Xiao-hui^{1*}

(1 Agricultural Resource and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences / Nanning Observation and Experiment Station of National Agricultural Environment, Nanning, Guangxi 530007, China; 2 Guangxi Minzu Normal University, Chongzuo, Guangxi 532200, China; 3 Guangxi Zhuang Autonomous Region Soil and Fertilizer Work Station, Nanning, Guangxi 530000, China)

Abstract: 【Objectives】This study aimed to evaluate the soil acidification characteristics of sugarcane fields in Guangxi under different fertilization treatments and to provide a theoretical basis for mitigating soil acidification

收稿日期: 2025-08-08 接受日期: 2025-10-04

基金项目: 国家自然科学基金 (31860159); 广西“协同”行动计划 (桂科 XT2504240002); 广西自然科学基金 (2024GXNSFAA010513); 广西农业科学院基本科研业务专项 (桂农科 2025YP040; 桂农科 2026YT146); 广西重点研发计划 (桂科 AB21196049)。

联系方式: 黄金生 E-mail: hjsh2006@163.com; * 通信作者 朱晓晖 E-mail: Z_xiaohui_zh@163.com

in this region. **【Methods】** Based on a long-term field experiment initiated in 2008, four treatments were established: no-fertilizer control (CK), recommended fertilization (OPT), increased N application (OPTN, 50% higher nitrogen (N) application rate than OPT) and recommended fertilization combined with sugarcane leaf mulching and returning (OPTS). Soil pH, exchangeable acidity, acidification rate, exchangeable base cations, cation exchange capacity (CEC), soil acid-base buffering capacity (pHBC) and soil nutrients indicators were determined after 16 years under different fertilization treatments. **【Results】** After 16 years of long-term experiments, compared with the initial soil, soil pH under the CK, OPT, OPTN, and OPTS treatments decreased by 0.04, 1.74, 2.00, and 1.72 units, respectively. The corresponding soil acidification rates were 0.16, 9.62, 10.41, and 9.81 kmol/(hm²·a), respectively. The soil pHBC of the CK treatment was 24.00 mmol/(kg·pH). Compared with CK, the pH buffering capacity under the other fertilization treatments increased by 20.32%–26.77%, with the greatest increase observed in the OPTS treatment. Compared with the OPT treatment, the OPTN treatment increased exchangeable acidity, exchangeable aluminum (Al³⁺), and exchangeable hydrogen (H⁺) by 19.31%, 15.25%, and 54.75% respectively. The total exchangeable base cations of the OPTN decreased by 14.03%, and base saturation decreased by 15.10%. Soil pH decreased by 0.26 units, and the acidification rate increased by 8.22% under OPTN relative to OPT. Compared with the OPT treatment, the OPTS treatment increased exchangeable acidity and exchangeable H⁺ content by 17.82% and 69.27%, respectively. The total exchangeable base cations increased by 13.45%, mainly due to a 26.22% increase in exchangeable calcium content. CEC increased by 12.67%. However, there were no significant difference in soil pH and acidification rate. Under increased N fertilization, soil total phosphorus, available phosphorus, and readily available potassium contents decreased by 6.99%, 11.06%, and 27.11%, respectively. Under sugarcane leaf mulching and returning, soil organic matter, total N, and available N contents increased by 9.96%, 12.32%, and 26.40%, respectively, while available phosphorus and readily available potassium contents decreased by 17.15% and 34.65%, respectively. In terms of the 5-year average sugarcane yield, compared with the OPT treatment, the OPTN treatment resulted in a 6.23% reduction, while the OPTS treatment resulted in a 2.68% increase. **【Conclusions】** Long-term excessive N fertilization increased exchangeable H⁺ and Al³⁺ contents while reducing total exchangeable base cations. The increased fertilizer N was not efficiently utilized by sugarcane, further accelerating soil acidification. In contrast, long-term sugarcane leaf mulching and returning effectively increased total exchangeable base cations, CEC, and organic matter content, and improved soil nutrient supply and acid-base regulation capacity. Therefore, rational chemical fertilizer application combined with sugarcane residue mulching and returning can serve as an important strategy for managing soil acidification in lateritic red soil sugarcane fields in Guangxi.

Keywords: long-term field-position experiment; sugarcane field; increased nitrogen application; sugarcane leaf mulching and returning; soil acidification

土壤酸化是指土壤中氢离子浓度增加和盐基离子含量减少的过程, 是土壤质量退化的重要表现形式, 不仅危害土壤质量安全, 还会威胁作物生产。广西地区是我国主要的甘蔗生产地, 种植面积一直位居全国第一, 蔗糖产量占全国总量的 60% 以上^[1]。据调查, 广西甘蔗区土壤 pH 值平均为 4.52, 其中 pH<4.5 的强酸性土壤占比达 63.9%^[2]。这表明, 广西甘蔗区土壤酸化问题严重, 亟需采取有效措施以阻控该地区土壤酸化。

化学氮肥对提高作物产量发挥着重要作用, 但长期不合理施用氮肥有加刷土壤酸化的风险^[3]。如随

着化学氮肥施用量的增加, 茶园土壤 pH 呈现持续下降趋势^[4]。在甘蔗生产中, 农民为了追求更高产量, 过度依赖氮肥, 不断增加施氮量, 导致氮肥施用量过高。在广西地区, 甘蔗农田中氮肥施用量较大, 达 500~700 kg/hm², 远高于巴西、澳大利亚等甘蔗生产国, 而氮肥利用率低, 仅为 25%~35%, 甚至更低^[5-7]。长期过量施氮导致氮素损失严重, 在氮素转化过程中净氢离子量增多, 进而加速土壤酸化^[8]。然而, 目前在广西赤红壤甘蔗区, 关于过量施氮对土壤酸化影响的研究仍较少, 缺乏充分、明确的数据支撑, 其影响机制亟待系统阐明。

众多学者研究了在施用化肥基础上,通过作物残体还田缓解土壤酸化的效果^[9-11]。一般认为,作物残体还田能提高土壤有机质含量,补充盐基离子,增强土壤酸碱缓冲容量,从而有效改良酸性土壤^[12-14]。然而,蔡泽江^[15]研究表明,长期秸秆还田对土壤 pH 改善效果不显著,未能缓解红壤酸化。Liang 等^[16]通过整合性分析发现,在一定条件下,作物残体分解过程中产生的有机酸积累过多,可能会导致土壤酸化加剧。由此可见,受土壤类型、环境条件、还田形式、还田年限等多种因素的影响,秸秆还田对土壤酸化的调控作用尚未形成统一结论^[12, 16-17]。因此,基于长期定位实验,在特定区域及种植制度下研究不同施肥模式下土壤酸化特征具有重要的实际意义。

在广西地区,蔗叶资源丰富,年蔗叶干物质量约 806.8 万 t,且含有丰富的氮、磷、钾等多种养分,可作为还田原料加以利用,对推动该地区农业可持续发展具有重要意义^[18]。为了减少秸秆焚烧所引发的大气污染,国家出台了相关环保政策,限制秸秆露天焚烧,并积极推广蔗叶还田措施^[19-20]。然而,目前仍缺乏在较长时间尺度下系统评估蔗叶还田对土壤酸化影响的全面研究,多数研究仅关注对土壤 pH 的影响^[14, 21-22]。但 pH 仅仅是表观结果之一,若未考虑土壤缓冲体系对氢离子的中和作用,就无法客观评价土壤酸化状况^[23-24]。

因此,本研究基于长期田间定位试验,通过测定土壤 pH、土壤酸化速率及交换性酸等指标,全面评估土壤酸化程度。同时结合土壤有机质、交换性盐基离子及酸碱缓冲容量等指标,探讨土壤酸化调控机制,并评估不同施肥处理对土壤养分及甘蔗产量的影响。本研究旨在揭示长期过量施氮及蔗叶还田模式下土壤酸化特征,为土壤酸化严重地区的甘蔗生产提供合理的施肥策略。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验位于广西南宁市武鸣区广西农业科学院试验基地,经度 107°59'12",纬度 23°06'39",海拔为 79 m。该地区为亚热带季风气候,年平均气温 21.4℃,年日照时数 1695 h,年均降雨量 1450 mm,无霜期 348 天。供试土壤类型为砂页岩母质发育的赤红壤,试验开始前 0—20 cm 土层土壤有机质含量 16.22 g/kg,全氮 0.64 g/kg,全磷 0.49 g/kg,全钾 2.04 g/kg,碱

解氮 72.15 mg/kg,速效磷 9.08 mg/kg,速效钾 73.32 mg/kg,阳离子交换量 (CEC) 9.77 cmol/kg, pH 5.86。

1.2 试验设计

试验始于 2008 年 3 月,种植作物为甘蔗,甘蔗品种 2008—2010 年为新台糖 22 号,2011—2013 年为桂糖 28 号,2014—2016 年为桂糖 29 号,2017—2024 年为柳城 05136。甘蔗种植制度采用新植 1 年并宿根 2 年。本研究选取长期定位施肥试验中的 4 个处理,分别为:1) 不施肥对照 (CK),即不施任何肥料;2) 推荐施肥 (OPT),即按照表 1 所示施肥,平衡施肥;3) 增施氮肥 (OPTN),即氮肥施用量是 OPT 处理的 1.5 倍,磷钾肥施用量与 OPT 处理一致;4) 推荐施肥+蔗叶覆盖还田 (OPTS),即化肥施用量与 OPT 处理一致,同时进行蔗叶全量覆盖还田,具体方式为收获时将蔗叶移除小区,施肥盖土后,再将蔗叶覆盖于种植行上。蔗叶还田物料为上一季甘蔗生长产生的蔗叶及其尾梢(以下简称蔗叶)。以干重计,蔗叶还田量约为 11 t/hm²,典型蔗叶有机碳、全氮、全磷、全钾含量分别为 414.80、7.24、0.86、7.82 g/kg。试验采用完全随机设计,每处理设置 3 次重复,每个小区面积为 24 m²。试验所用氮肥为尿素 (N 46%),磷肥为钙镁磷肥 (P₂O₅ 18%),钾肥为氯化钾 (K₂O 60%)。OPT 处理在 2009—2014 年的施肥量根据上茬土壤速效养分水平和甘蔗产量等因素逐年调整,2015—2024 年施肥量保持不变(表 1),甘蔗种植及施肥方法参照谢如林等^[25]的相关研究。其他田间管理按照当地常规方法进行,甘蔗于 2024 年 12 月收获。

1.3 样本采集与分析

1.3.1 土壤样品采集与测定 采用“S”型取样法分别采集试验开始前耕层基础土样和 2024 年 12 月甘蔗收获后 1 周内 0—20 cm 土层样品。基础土样测定土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾含量,以及阳离子交换量 (CEC) 和 pH 值。收获后土壤样品测定土壤 pH、交换性酸、容重、盐基

表 1 推荐施肥 (OPT) 处理的年施肥量 (kg/hm²)

Table 1 Annual fertilizer application rates under the recommended fertilization (OPT) treatment

肥料 Fertilizer	2008	2009	2010	2011—2012	2013	2014	2015—2024
N	450	450	300	450	400	450	414
P ₂ O ₅	120	120	120	135	120	135	135
K ₂ O	300	217	217	257	257	257	240

离子、酸碱缓冲容量、有机质及土壤养分含量。测定方法主要参考《土壤农化分析》^[26], 具体如下:

土壤 pH 采用电位法测定, 土水比 1:2.5。土壤交换性酸和交换性氢采用氯化钾浸提—中和滴定法测定, 两者之差即为交换性铝含量。土壤 CEC 采用乙酸铵交换—滴定法测定。交换性钙、镁、钾和钠均采用乙酸铵浸提, 其中交换性钾、钠含量采用火焰光度法测定, 交换性钙、镁采用火焰原子吸收分光光度法测定。交换性盐基总量为交换性钙、镁、钾和钠含量之和。

酸碱缓冲容量采用酸碱滴定法测定^[27]。称取 4.00 g 风干土分别置于 11 个 50 mL 离心管中, 1~5 号离心管依次加入 20 mL 0.0025、0.0050、0.0100、0.0150、0.0200 mol/L NaOH 溶液; 6 号管加入 20 mL 去离子水; 7~11 号管分别加入与上述 NaOH 溶液等浓度等体积的 HCl 溶液。将土壤悬液振荡 1 h 后, 在室温下静置培养, 期间每日充分摇匀 1 次, 平衡 7 天后用 pH 计测定离心管中土壤溶液的 pH 值。分别以土壤 pH 值和酸碱添加量为纵坐标和横坐标 (横坐标>0 表示碱加入量, <0 表示酸加入量), 绘制酸碱缓冲曲线, 并对酸碱添加量和土壤 pH 值进行线性拟合, 直线斜率的倒数为土壤酸化缓冲容量 (pHBC)。计算公式如下:

$$\text{pHBC} = 1/k \quad (1)$$

式中, pHBC [mmol/(kg·pH)] 为土壤酸碱缓冲容量, k 为拟合线性方程的斜率。

其他多项土壤基础理化指标均参考《土壤农化分析》^[26]方法测定。

1.3.2 甘蔗产量测定 于 2024 年 12 月收获期将各小区甘蔗全部平地砍收, 去掉叶子和尾梢后称蔗茎重量, 折算为单位面积甘蔗产量。

1.4 数据处理

土壤酸化速率计算公式^[28-29]如下:

$$\text{AR} = (\Delta\text{pH} \times \text{pHBC} \times \text{BD} \times V) / T \quad (2)$$

式中, AR 为酸化速率 [kmol/(hm²·a)], ΔpH 为试验开始与试验结束时土壤 pH 的变化量, pHBC 为土壤酸碱缓冲容量 [mmol/(kg·pH)], BD 为土壤容重 (g/cm³), V 为某一深度下单位面积土壤体积 (m³/hm²), T 为试验年限 (a)。

盐基饱和度的计算公式如下:

$$\text{盐基饱和度 (\%)} = \frac{\text{交换性盐基总量 (cmol/kg)}}{\text{CEC (cmol/kg)}} \times 100 \quad (3)$$

甘蔗产量稳定性分别采用统计学中的变异系数

(CV) 和可持续产量指数 (SYI) 进行评价, 计算公式^[30]如下:

$$\text{SYI} = (\bar{y} - \sigma) / y_{\max} \quad (4)$$

$$\text{CV} = \sigma / \bar{y} \quad (5)$$

式 (4) 及 (5) 中, σ 为标准差 (kg/hm²), $\bar{y}$ 为平均产量 (kg/hm²), $y_{\max}$ 为所有年份中产量的最大值 (kg/hm²)。

采用 Excel 2016 对原始数据进行整理和计算, 利用 SPSS 27.0 软件进行方差分析及相关性分析, 除 5 年平均产量用双因素方差分析外, 其他变量均用单因素方差分析。采用 LSD 法进行多重比较, 当 $P < 0.05$ 时, 视为差异显著。数据呈现均为平均值 $\pm$ 标准差。所有图形均采用 Origin 2024 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥处理对土壤 pH 的影响

如图 1 所示, 与 2008 年试验初始土壤 pH 5.86 相比, OPT、OPTN 和 OPTS 处理的土壤 pH 分别降低了 1.74、2.00、1.72 个单位, CK 处理仅降低了 0.04 个单位。与 CK 相比, OPT、OPTN 和 OPTS 处理的土壤 pH 分别降低 1.71、1.96、1.68 个单位。与 OPT 处理相比, OPTN 处理的土壤 pH 显著降低 0.26 个单位, 而 OPTS 处理的土壤 pH 未发生显著变化。表明长期施用化肥能促进土壤酸化, 过量施氮会进

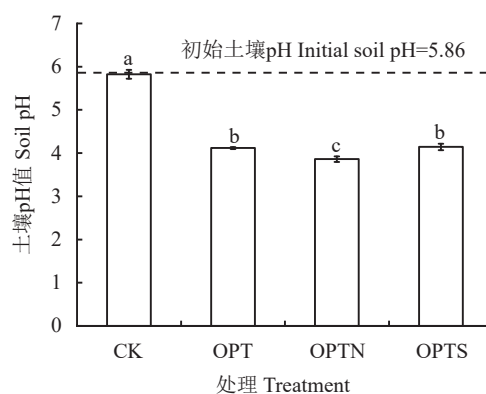


图 1 长期不同施肥处理下土壤 pH
Fig. 1 Soil pH under different long-term fertilization treatments

注: CK—不施肥对照; OPT—推荐施肥; OPTN—在 OPT 基础上增施 50% 氮; OPTS—推荐施肥+蔗叶覆盖还田。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: CK—No-fertilizer control; OPT—Recommended fertilization; OPTN—50% higher nitrogen application rate than OPT; OPTS—Recommended fertilization plus sugarcane leaf mulching and returning. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

一步显著降低土壤 pH, 而化肥施用配合蔗叶还田较推荐施肥不会显著降低土壤 pH 值。

2.2 长期不同施肥处理对土壤酸化速率的影响

如图 2 所示, 经 16 年长期定位试验后, CK、OPT、OPTN 和 OPTS 处理的土壤酸化速率依次为 0.16、9.62、10.41、9.81 kmol/(hm²·a)。与 CK 处理相比, 各施肥处理均显著提高土壤酸化速率。与 OPT 处理相比, OPTN 处理的土壤酸化速率提高 8.22%, 而 OPTS 处理的土壤酸化速率差异不显著。结果表明, 过量施用化学氮肥会加速土壤酸化, 而蔗叶还田降低土壤酸化速率的作用不显著。

2.3 长期不同施肥处理对土壤交换性酸的影响

如图 3 所示, 不同施肥处理显著影响土壤交换性酸、交换性氢和交换性铝的含量, 这些指标是导致土壤酸化的重要表征因子。不同施肥处理的交换性酸、交换性氢、交换性铝含量分别是 CK 处理的 11.01~13.14、4.37~7.39、13.34~15.38 倍。与 OPT 处理相比, OPTN 处理的土壤交换性氢、交换性铝及交换性酸含量分别提高了 54.75%、15.25%、19.31%。与 OPT 处理相比, OPTS 处理的交换性氢含量提高了 69.27%, 交换性铝含量无显著变化, 交换性酸含量提高了 17.82%。不同处理中, 交换性酸中主要以交换性铝为主, 所占比例在 74.53%~89.75%。与 CK 处理相比, OPT 与 OPTN 处理的交换性氢比例显著降低, 交换性铝比例显著提高。OPTS 处理与 CK 处理差异不显著。

2.4 长期不同施肥处理对土壤交换性盐基离子含量的影响

土壤盐基离子含量可以反映土壤阳离子的交换性能, 进而评估土壤的保肥和供肥能力。交换性盐基离子在缓冲土壤酸化中起重要作用。如表 2 所示, 与 CK 处理相比, 各施肥处理的土壤交换性钙和交换性镁含量均显著降低, 降低幅度分别为 61.49%~72.82%、46.77%~54.30%, 其中以 OPTS 处理的降幅最小。各施肥处理显著提高土壤交换性钾含量, OPT、OPTN、OPTS 处理分别提高了 175.00%、112.50%、125.00%, 而对交换性钠含量无显著影响。相较于 OPT 处理, OPTS 处理的土壤交换性钙含量提高了 26.22%, 但土壤交换性钾含量降低了 18.18%。相较于 OPT 处理, 增施氮肥 (OPTN 处理) 导致交换性盐基总量降低了 14.03%, 蔗叶还田处理 (OPTS 处理) 下交换性盐基总量提高幅度为 13.45%。OPTS 处理的 CEC 含量显著高于其余各处理, 较 OPT

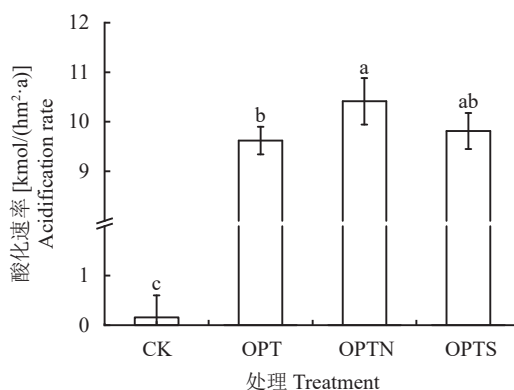


图 2 长期不同施肥处理下土壤酸化速率

Fig. 2 Soil acidification rate under different long-term fertilization treatments

注: CK—不施肥对照; OPT—推荐施肥; OPTN—在 OPT 基础上增施 50% 氮; OPTS—推荐施肥+蔗叶覆盖还田。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: CK—No-fertilizer control; OPT—Recommended fertilization; OPTN—50% higher nitrogen application rate than OPT; OPTS—Recommended fertilization plus sugarcane leaf mulching and returning. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

处理提高 12.67%, 而其余处理之间无显著差异。CK 处理的盐基饱和度最大, 说明 CK 处理下交换性盐基量占 CEC 的比例较大。与 OPT 处理相比, OPTN 处理的盐基饱和度降低了 15.10%, 而 OPTS 处理无显著差异。

2.5 长期不同施肥处理对土壤酸碱缓冲容量的影响

酸碱缓冲容量能够反映土壤对酸碱变化的缓冲能力, 其大小能反映土壤维持肥力水平和作物生长环境稳定性的能力。如图 4 所示, 不同施肥处理下的土壤缓冲曲线整体呈现 S 型, 在 -25~25 cmol/kg 范围变化幅度较大。如表 3 所示, 不同处理土壤平均酸碱缓冲容量为 24.00~30.43 mmol/(kg·pH)。相较于 CK 处理, 各施肥处理均显著提高土壤酸碱缓冲容量, 其中 OPT、OPTN 和 OPTS 处理分别提高 21.63%、20.32% 和 26.77%。与 OPT 处理相比, OPTN 和 OPTS 处理的土壤酸碱缓冲容量差异不显著。

2.6 长期不同施肥处理对土壤有机质及养分含量的影响

如表 4 所示, 长期不同施肥处理对土壤有机质及其他养分有显著影响。各施肥处理均显著提高了有机质、碱解氮、全磷、速效磷、速效钾含量, 提高幅度分别为 6.12%~16.70%、9.19%~38.02%、74.32%~87.41%、1243.18%~1521.28%、148.29%~279.91%。除 OPT 外, OPTN 和 OPTS 处理分别显著

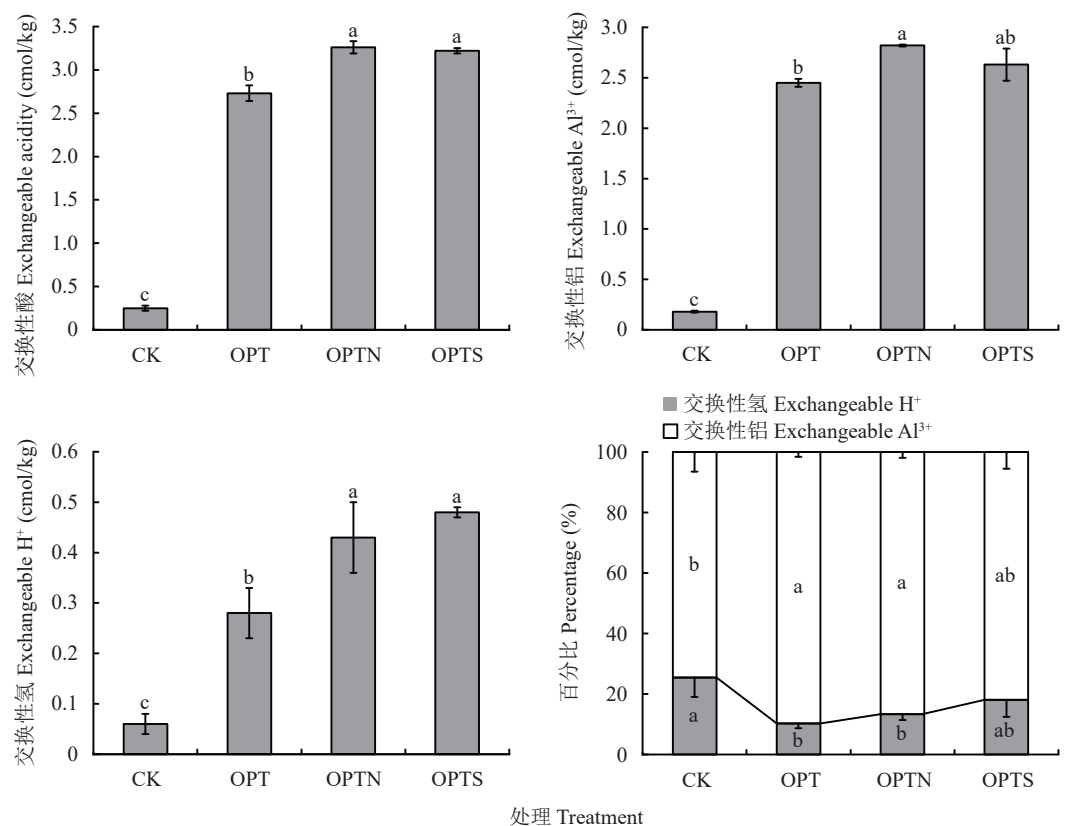


图 3 长期不同施肥处理下土壤交换性酸含量及交换性氢和交换性铝含量与比例
Fig. 3 Content of exchangeable acidity, and contents and percentages of exchangeable H⁺ and Al³⁺ under different long-term fertilization treatments

注: CK—不施肥对照; OPT—推荐施肥; OPTN—在 OPT 基础上增施 50% 氮; OPTS—推荐施肥+蔗叶覆盖还田。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$); 柱中不同小写字母表示同一指标处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: CK—No-fertilizer control; OPT—Recommended fertilization; OPTN—50% higher nitrogen application rate than OPT; OPTS—Recommended fertilization plus sugarcane leaf mulching and returning. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P<0.05$); different lowercase letters in the bars indicate significant difference among treatments for the same indicator ($P<0.05$).

表 2 长期不同施肥处理下交换性盐基离子、阳离子交换量和盐基饱和度
Table 2 Exchangeable base cations, cation exchange capacity (CEC) and base saturation under different long-term fertilization treatments

处理 Treatment	交换性钙 Exchangeable Ca ²⁺ (cmol/kg)	交换性镁 Exchangeable Mg ²⁺ (cmol/kg)	交换性钾 Exchangeable K ⁺ (cmol/kg)	交换性钠 Exchangeable Na ⁺ (cmol/kg)	交换性盐基总量 Total exchangeable bases (cmol/kg)	阳离子交换量 CEC (cmol/kg)	盐基饱和度 Base saturation (%)
CK	4.32±0.16 a	0.64±0.04 a	0.17±0.02 c	0.11±0.00 a	5.24±0.12 a	7.77±0.34 b	67.46±2.03 a
OPT	1.32±0.14 c	0.34±0.03 b	0.47±0.02 a	0.11±0.00 a	2.23±0.17 c	8.23±0.18 b	27.12±1.66 b
OPTN	1.17±0.05 c	0.29±0.02 b	0.36±0.02 b	0.09±0.03 a	1.92±0.08 d	8.36±0.62 b	23.02±1.38 c
OPTS	1.66±0.05 b	0.34±0.02 b	0.38±0.03 b	0.14±0.11 a	2.53±0.17 b	9.27±0.35 a	27.36±2.32 b

注: CK—不施肥对照; OPT—推荐施肥; OPTN—在 OPT 基础上增施 50% 氮; OPTS—推荐施肥+蔗叶覆盖还田。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: CK—No-fertilizer control; OPT—Recommended fertilization; OPTN—50% higher nitrogen application rate than OPT; OPTS—Recommended fertilization plus sugarcane leaf mulching and returning. Different lowercase letters after data in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

提高土壤全氮含量, 增幅分别为 8.14% 和 14.30%。各处理之间全钾含量无显著差异。与 OPT 处理相比, OPTN 处理下土壤有机质、全氮、碱解氮含量差异均不显著, 但土壤全磷、速效磷和速效钾含量分别降低了 6.99%、11.06% 和 27.11%。与 OPT 处理相比, OPTS 处理的土壤有机质、全氮、碱解氮含量分

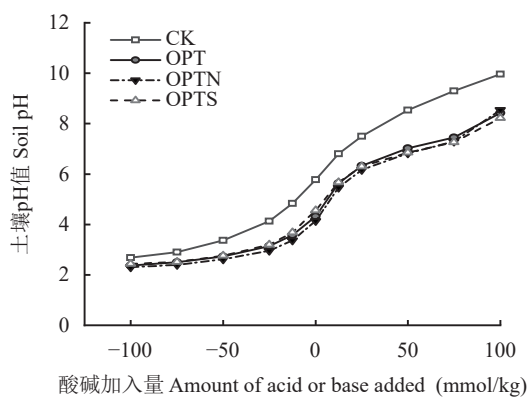


图 4 长期不同施肥处理下土壤酸碱缓冲能力滴定曲线
Fig. 4 Titration curves of soil acid-base buffering capacity under different long-term fertilization treatments

注：CK—不施肥对照；OPT—推荐施肥；OPTN—在 OPT 基础上增施 50% 氮；OPTS—推荐施肥+蔗叶覆盖还田。
Note: CK—No-fertilizer control; OPT—Recommended fertilization; OPTN—50% higher nitrogen application rate than OPT; OPTS—Recommended fertilization plus sugarcane leaf mulching and returning.

别提高了 9.96%、12.32% 和 26.40%，土壤全磷含量无显著变化，但土壤速效磷及速效钾含量分别显著降低了 17.15% 和 34.65%。

2.7 长期不同施肥处理对甘蔗产量的影响

如表 5 所示，相较于 CK 处理，各施肥处理在不同年份均显著提高甘蔗产量。与 OPT 处理相比，OPTN 处理在 2021、2022 和 2024 年的甘蔗产量分别显著下降 9.72%、8.99% 和 5.84%；OPTS 处理仅在 2023 年显著增产 6.83%，其他年份无显著差异。从 5 年平均产量来看，各施肥处理较 CK 处理的产量提高幅度为 59.27%~74.40%。与 OPT 处理相比，OPTN 处理的平均产量显著下降 6.23%，OPTS 处理平均产量提高了 2.68%。表明在推荐施肥的基础上长期过量施用氮肥反而会降低甘蔗产量，在推荐施肥基础上长期增加蔗叶还田有利于甘蔗产量的提升。表 6 表明，CK 处理的甘蔗可持续产量指数 (SYI) 最大，变异系数 (CV) 最小，表明不施肥条件下近 5 年的产量波动较小。不同施肥处理间的 SYI 及 CV 无显著差异。说明蔗叶还田及过量施氮对甘蔗稳产及可持续性无显著作用。

2.8 相关性分析

对本研究中 3 个施肥处理涉及的主要指标进行

表 3 长期不同施肥处理下土壤酸碱缓冲容量

Table 3 Soil acid-base buffering capacity under different long-term fertilization treatments			
处理 Treatment	酸碱缓冲曲线 Acid-base buffering curve	R^2	土壤酸碱缓冲容量 [mmol/ (kg·pH)] Soil acid-base buffering capacity
CK	$y=0.042x+5.98$	0.96	24.00±0.22 c
OPT	$y=0.034x+4.87$	0.92	29.19±0.68 ab
OPTN	$y=0.035x+4.74$	0.91	28.88±0.41 b
OPTS	$y=0.033x+4.86$	0.92	30.43±0.21 a

注：CK—不施肥对照；OPT—推荐施肥；OPTN—在OPT基础上增施50%氮；OPTS—推荐施肥+蔗叶覆盖还田。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: CK—No-fertilizer control; OPT—Recommended fertilization; OPTN—50% higher nitrogen application rate than OPT; OPTS—Recommended fertilization plus sugarcane leaf mulching and returning. Different lowercase letters after data in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

表 4 长期不同施肥处理下土壤有机质及其他养分含量变化

Table 4 Changes in soil organic matter and other nutrient contents under different long-term fertilization treatments							
处理 Treatment	有机质 (g/kg) Organic matter	全氮 (g/kg) Total N	碱解氮 (mg/kg) Alkali-hydrolyzable N	全磷 (g/kg) Total P	速效磷 (mg/kg) Available P	全钾 (g/kg) Total K	速效钾 (mg/kg) Available K
CK	17.27±0.46 c	0.87±0.01 c	65.40±1.87 c	0.44±0.02 c	4.28±0.32 d	1.89±0.07 a	39.00±2.50 d
OPT	18.33±0.22 b	0.89±0.02 bc	71.41±2.45 b	0.82±0.03 a	69.34±1.73 a	2.01±0.32 a	148.17±3.18 a
OPTN	18.68±0.39 b	0.93±0.02 b	76.95±5.10 b	0.77±0.02 b	61.67±1.14 b	2.20±0.22 a	108.00±2.00 b
OPTS	20.16±0.66 a	1.00±0.05 a	90.26±2.13 a	0.79±0.02 ab	57.44±0.66 c	2.18±0.32 a	96.83±0.29 c

注：CK—不施肥对照；OPT—推荐施肥；OPTN—在OPT基础上增施50%氮；OPTS—推荐施肥+蔗叶覆盖还田。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: CK—No-fertilizer control; OPT—Recommended fertilization; OPTN—50% higher nitrogen application rate than OPT; OPTS—Recommended fertilization plus sugarcane leaf mulching and returning. Different lowercase letters after data in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

表 5 2020—2024 年不同施肥处理下甘蔗产量 (kg/hm²)
Table 5 Sugarcane yield under different fertilization treatments in 2020–2024

处理 Treatment	2020	2021	2022	2023	2024	平均产量 Average yield
CK	57.55±1.22 c	56.07±1.07 c	55.31±2.51 c	58.30±2.60 c	57.29±1.04 c	56.90±1.05 d
OPT	109.78±6.98 ab	95.90±2.54 a	87.98±1.05 a	111.02±4.61 b	78.54±2.05 a	96.64±0.19 b
OPTN	104.87±1.53 b	86.58±1.22 b	80.07±2.86 b	107.67±0.80 b	73.96±2.76 b	90.63±1.07 c
OPTS	111.45±1.06 a	103.61±1.56 a	84.41±2.20 a	118.60±2.61 a	78.13±2.76 ab	99.24±0.19 a

注: CK—不施肥对照; OPT—推荐施肥; OPTN—在OPT基础上增施50%氮; OPTS—推荐施肥+蔗叶覆盖还田。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: CK—No-fertilizer control; OPT—Recommended fertilization; OPTN—50% higher nitrogen application rate than OPT; OPTS—Recommended fertilization plus sugarcane leaf mulching and returning. Different lowercase letters after data in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

表 6 不同施肥处理下甘蔗可持续产量指数及产量
变异系数 (2020—2024)
Table 6 Sustainable yield index (SYI) and coefficient of
variation (CV) of sugarcane yield under different
fertilization treatments (2020–2024)

处理 Treatment	可持续产量指数 SYI	变异系数 CV
CK	0.93±0.03 a	0.03±0.01 b
OPT	0.72±0.03 b	0.15±0.01 a
OPTN	0.70±0.02 b	0.17±0.02 a
OPTS	0.69±0.03 b	0.18±0.02 a

注: CK—不施肥对照; OPT—推荐施肥; OPTN—在OPT基础上增施50%氮; OPTS—推荐施肥+蔗叶覆盖还田。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: CK—No-fertilizer control; OPT—Recommended fertilization; OPTN—50% higher nitrogen application rate than OPT; OPTS—Recommended fertilization plus sugarcane leaf mulching and returning. Different lowercase letters after data in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

相关性分析 (表 7), 结果表明, 土壤 pH 与酸化速率和交换性铝含量呈负相关, 与交换性盐基离子总量呈正相关。土壤酸碱缓冲容量与交换性盐基离子总量、CEC 及有机质含量呈正相关。产量与土壤 pH 呈正相关, 与酸化速率及交换性铝含量呈负相关。

3 讨论

3.1 长期施用化学氮肥影响赤红壤蔗地酸化进程

本研究结果显示, 长期不施肥条件下土壤 pH 仅下降 0.04 个单位, 表明仅种植甘蔗而不施肥条件下, 土壤酸化进程较为缓慢。连续 16 年不同施肥处理使土壤 pH 降低了 1.72~2.00 个单位, 提高了土壤交换性氢与交换性铝的含量, 其土壤酸化速率远高于不施肥处理。本研究中 OPT 处理是根据养分平衡

原理设置的, 与许庆伟等^[31]的研究结果相类似, 该研究指出在玉米-榨菜轮作制度下, 优化施肥同样会加速紫色土酸化进程。另外有研究表明, 中国农田超过 55.1% 的氢离子产生可归因于氮肥施用^[3], 长期施用化学氮肥增加了土壤中活性酸度和潜在酸度, 加速了土壤酸化^[29, 32–33]。尽管不施肥对土壤酸化影响较小, 但是无法保证甘蔗产量, 需要通过施肥补充养分以满足作物生长发育需要。因此, 需通过制定合理的施肥策略来平衡作物高产和土壤酸化防控之间的矛盾。

本研究中, 尽管各施肥处理每年施用钙镁磷肥, 但土壤中交换性钙和交换性镁含量仍低于不施肥的土壤。其原因可能是施肥后土壤中氢离子含量显著增加, 使土壤中的钙离子解吸, 导致钙离子大量淋失^[34–35]; 交换性镁的流失可能与施用氯化钾有关, 由于钾离子与镁离子存在竞争吸附点位, 施钾肥会加速镁离子的流失^[36]。另外, 施肥处理相较于不施肥甘蔗生物量更大, 植株对土壤中钙、镁盐基离子吸收增加, 导致土壤中的交换性钙和镁含量随作物收获移除而降低。尽管不施肥处理的交换性盐基离子总量相对较高, 但 CEC 和有机质含量低于施肥处理, 同时, 不施肥土壤中微生物活性降低、氮磷钾等大量元素缺乏, 这些因素的共同作用可能导致不施肥处理的酸碱缓冲容量低于长期施肥处理^[37–38]。

3.2 长期过量施用氮肥加速赤红壤蔗地酸化进程

本研究中, 在推荐施肥基础上连续 16 年增施氮肥降低了土壤 pH, 提高了土壤酸化速率, 并增加了土壤交换性氢和交换性铝的含量, 显著加剧了土壤酸化进程, 这与我们预期结果一致。过量施用化学氮肥条件下, 施氮量远超过作物吸氮量, 导致土壤中氮素大量盈余。部分盈余氮以硝态氮形式在土壤中残留或者被淋溶, 使土壤中净氢离子含量增多,

表 7 土壤酸度、养分、盐基离子等指标相关性分析 (除 CK 外)

Table 7 Correlation analysis among soil acidity, nutrients, base cations and related indicators (except for CK)

指标 Index	pH	AR	Ex.Acid	Ex.H	Ex.Al	Ex.B.C	CEC	pHBC	SOM	Y
pH	1									
AR	-0.87**	1								
Ex.Acid	-0.44	0.54	1							
Ex.H	-0.22	0.45	0.93***	1						
Ex.Al	-0.79*	0.78*	0.77*	0.61	1					
Ex.B.C	0.85**	-0.61	-0.02	0.19	-0.48	1				
CEC	0.30	0.01	0.47	0.62	0.06	0.62	1			
pHBC	0.57	-0.13	0.26	0.49	-0.21	0.79*	0.70*	1		
SOM	0.31	0.01	0.55	0.72*	0.24	0.63	0.60	0.74*	1	
Y	0.84**	-0.74*	-0.44	-0.30	-0.78*	0.59	-0.01	0.51	0.08	1

注：AR—土壤酸化速率；Ex.Acid—交换性酸；Ex.H—交换性氢；Ex.Al—交换性铝；Ex.BC—交换性盐基离子总量；CEC—阳离子交换量；pHBC—酸碱缓冲容量；SOM—土壤有机质；Y—产量。*，**和***分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 。
Note: AR—Soil acidification rate; Ex.Acid—Exchangeable acidity; Ex.H—Exchangeable H⁺; Ex.Al—Exchangeable Al³⁺; Ex.BC—Total exchangeable base cations; CEC—Cation exchange capacity; pHBC—Acid-base buffering capacity; SOM—Soil organic matter; Y—Yield. *, **, and *** indicate $P<0.05$, $P<0.01$ and $P<0.001$, respectively.

从而加速土壤酸化进程^[8]。并且，在硝酸根淋溶的过程中，基于电荷平衡原理，大量阳离子也随之淋失，这是本研究中增施氮肥导致交换性盐基离子总量和盐基饱和度降低的主要原因^[8]。

过量施氮导致交换性盐基离子总量降低，意味着土壤胶体吸附致酸离子的能力减弱，从而降低土壤对外源酸的缓冲性能，进一步加速了土壤酸化^[31]。本研究相关性分析结果亦表明，土壤酸碱缓冲容量与交换性盐基离子总量呈正相关关系，尽管当前过量施氮条件下土壤酸碱缓冲容量尚未表现出显著下降，但随着时间推移，我们客观预测，增施氮肥将导致酸碱缓冲容量逐渐降低。本研究中，过量施氮处理的土壤 pH 低于 4.2 (图 1)，根据 Ulrich 土壤缓冲体系划分标准，该土壤已进入铝缓冲体系阶段，容易导致土壤中铝活化溶出，其毒性会对作物生长产生负面影响^[39]。综上，本研究证实合理的施氮水平对降低土壤酸化风险至关重要，而过量施氮则会显著加速土壤酸化进程。

3.3 长期蔗叶还田对赤红壤蔗地酸化进程未产生显著作用

在推荐施肥基础上实施蔗叶还田，未能显著降低土壤 pH 和酸化速率。这一结果可能与气候条件、土壤类型及还田物料性质等因素密切相关。如姜勇等^[40]基于吉林公主岭 25 年长期定位试验发现，秸秆还田可显著提高黑土有机质含量和交换性盐基总

量，提高了土壤 pH。而胡天睿等^[41]基于湖南省祁阳 30 年长期定位试验的研究结果表明，秸秆还田对红壤阳离子交换量、有机质含量及酸碱缓冲容量无显著影响，未能显著降低土壤 pH 及缓解土壤酸化。具体到本研究中的蔗叶还田处理，一方面蔗叶在土壤中分解过程会产生较多有机酸^[16]，同时蔗叶覆盖可以调节土壤温湿度，使土壤表面温度变化更为稳定，且保持较高的土壤湿度，这可能会促进微生物活动并加速有机酸形成，导致土壤中氢离子浓度升高，进而促进铝离子的释放并增加交换性酸含量^[42-43]。另一方面，长期施用蔗叶可补充土壤有机质和盐基离子，能够有效缓冲土壤酸化，且蔗叶腐解产物中会产生碱性物质能中和土壤溶液中的氢离子^[44-45]。可能是由于上述两方面的共同作用，蔗叶还田未显著降低土壤 pH 及酸化速率。

已有研究表明，作物残体还田可降低土壤交换性酸含量，可能主要通过降低交换性铝含量实现^[12, 23]，其机制在于活性有机碳能与铝离子结合，降低铝离子的活性，并促进其向土壤下层移动，从而减少耕层土壤交换性铝含量^[41, 46]。而本研究中蔗叶还田未能显著降低土壤交换性铝含量，推测与蔗叶碳氮比偏高且体积大，导致腐解速率慢有关，其对交换性铝的调控作用需要更长时间来实现^[47]。此外，增加蔗叶还田能够显著提高土壤总交换性盐基含量，且以提高交换性钙为主，这与部分研究^[12, 40]结果相一致。但

土壤交换性钾含量有所降低, 推测因蔗叶还田改善了耕层土壤结构, 增强了透水性和通气性^[43], 促进了钾离子的移动及作物吸收。

土壤酸碱缓冲容量反映了土壤对酸碱变化的稳定能力, 其大小直接关系到土壤肥力维持及作物生长环境稳定。本研究结果也显示, 蔗叶还田未显著提升土壤酸碱缓冲容量。已有研究显示, 在红壤 30 年定位试验中, 化肥加秸秆还田 (NPKS) 酸碱缓冲容量相较单施化肥 (NPK) 未增加, 推测与秸秆还田量不足以中和化学氮肥硝化作用释放的氢离子有关^[37], 与本研究结果相类似。在辽东低山丘陵区棕壤上的研究发现, 玉米秸秆直接还田较单施化肥提高酸碱缓冲容量达 13.69%, 其机制在于秸秆还田提高了土壤有机质、交换性盐基及 CEC^[13]。本研究也证实, 在施肥处理中酸碱缓冲容量高低与有机质含量、交换性盐基离子总量呈正相关。综上, 蔗叶还田可通过提高交换性盐基离子总量、CEC 及有机质含量, 保持较高的酸碱缓冲容量, 但目前对土壤 pH 和酸化速率无显著提升作用, 需要更长时间的验证。

3.4 长期过量施氮及蔗叶还田对土壤养分含量及甘蔗产量的影响

长期不同施肥对土壤养分含量具有显著影响。与推荐施肥处理相比, 增施氮肥降低了土壤全磷、速效磷及速效钾含量, 这可能是由于过量施用氮肥打破了土壤养分平衡, 作物对磷和钾的需求量增加, 加速了土壤中速效磷及速效钾的消耗。另外, 本研究中过量施氮条件下加速了土壤酸化, 而土壤酸化同样会促进土壤速效养分流失^[48]。惠晓丽等^[49]研究表明, 在连续 3 年不同施氮水平下, 随着施氮量增加, 土壤有效磷含量呈下降趋势。本研究中, 过量施氮肥导致甘蔗减产, 这与 Liang 等^[50]的研究结果一致, 即过高施氮量会导致水稻显著减产且氮肥利用率大幅下降。本研究中过量施用氮肥加速了土壤酸化, 降低了交换性盐基含量及速效磷和速效钾含量, 共同导致了甘蔗减产。Li 等^[51]的研究也证实, 当氮施用量从 340 kg/hm² 增至 500 kg/hm² 时, 甘蔗产量无显著变化, 且温室气体排放增加, 进一步表明合理施用氮肥是兼顾作物产量和生态环境安全的关键。

相比之下, 蔗叶还田处理显著提高了土壤有机质、全氮及碱解氮含量。蔗叶中本身富含有机物质和氮素养分, 且能为土壤微生物提供丰富碳源, 促进蔗叶和土壤有机物质的分解转化, 从而提高土壤

有机质和氮素养分水平^[52-53]。通常认为蔗叶本身含磷素和钾素养分, 蔗叶还田后, 可以补充土壤磷库和钾库^[54-55]。然而, 本研究中蔗叶还田处理未显著提高土壤全磷含量, 反而降低了速效磷和速效钾含量。我们推测是由于蔗叶还田后, 土壤有机质含量增多, 对钾离子的吸附和固定作用增强, 导致土壤中速效钾含量下降; 有机质在土壤中会分解释放有机酸, 这些有机酸又会活化土壤中的铁、铝氧化物, 从而增加对磷的固定, 导致土壤速效磷含量下降^[56]。另一方面, 蔗叶还田后土壤有机质和氮素养分协同升高, 促进了甘蔗对速效钾和速效磷的吸收, 导致土壤速效钾和速效磷含量下降^[57]。从产量效应来看, 因推荐施肥已考虑到养分供需平衡, 另外配合蔗叶还田仅于 2023 年显著提高了甘蔗产量, 从多年平均来看, 对产量有小幅度的提升作用, 这体现了蔗叶还田对于甘蔗产量的长期累积效应, 表明长期蔗叶还田是实现作物稳产甚至增产的有效措施。

本研究较系统地分析了过量施氮及蔗叶还田对土壤酸化相关指标的影响规律, 但其各指标之间的相互作用关系尚不清晰, 有待进一步系统研究, 以期广西赤红壤蔗地土壤酸化防治提供更全面的理论支撑。此外, 本研究已明确蔗叶还田对提升土壤氮素养分有明显优势。但蔗叶还田能否减少化学氮肥施用量及具体减量幅度, 仍需进一步通过田间试验量化分析, 为进一步优化施肥策略提供科学依据。

4 结论

经过 16 年长期定位试验, 在推荐施肥基础上增施氮肥后, 土壤 pH 显著下降 0.26 个单位, 土壤酸化速率提高 8.22%, 同时潜在酸度增加, 交换性盐基含量降低, 导致甘蔗减产 6.23%。表明在广西甘蔗区长期过量施用氮肥会显著加速土壤酸化。在推荐施肥基础上实施蔗叶还田后, 土壤 pH 值、酸化速率及交换性铝含量未发生显著变化, 但土壤交换性盐基总量提高 13.45%, 土壤 CEC 提高 12.67%, 土壤有机质含量提高 9.96%, 土壤全氮和碱解氮含量也有所增加, 保持较高的土壤缓冲能力, 甘蔗平均产量提高 2.68%。综上, 蔗叶还田虽未显著缓解土壤酸化, 但其与推荐施肥配合可改善土壤肥力及酸碱平衡潜力, 可作为广西赤红壤蔗地土壤酸化管理的一个重要策略。

参考文献:

[1] 观研天下. 中国甘蔗行业现状深度研究与发展趋势分析报告

- (2024—2031年)[R]. 2024.
- Guanyan Tianxia. In-depth research report on the current state and development trends of China's sugarcane industry (2024—2031)[R]. 2024.
- [2] 曾艳, 谢如林, 彭嘉宇, 等. 广西甘蔗主产区土壤酸化特征分析[J]. 南方农业学报, 2024, 55(9): 2623–2631.
 - Zeng Y, Xie R L, Peng J Y, *et al.* Acidification characteristics of soil in the main sugarcane planting areas in Guangxi[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2024, 55(9): 2623–2631.
 - [3] Zhu Q C, Vries W D, Liu X J, *et al.* Enhanced acidification in Chinese croplands as derived from element budgets in the period 1980–2010[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1497–1505.
 - [4] 王峰, 陈玉真, 尤志明, 等. 不同施氮量对两种茶园土壤硝化作用和 pH 值的影响[J]. 茶叶科学, 2015, 35(1): 82–90.
 - Wang F, Chen Y Z, You Z M, *et al.* Effects of different nitrogen application rates to nitrification and pH of two tea garden soil[J]. *Journal of Tea Science*, 2015, 35(1): 82–90.
 - [5] 王继华, 商贺阳, 杨少海. 我国甘蔗养分高效利用的研究进展[J]. 中国糖料, 2018, 40(6): 66–68, 72.
 - Wang J H, Shang H Y, Yang S H. Research progress on nutrient efficient utilization of sugarcane in China[J]. *Sugar Crops of China*, 2018, 40(6): 66–68, 72.
 - [6] 韦剑锋, 罗艺, 米超, 等. 应用¹⁵N标记对不同施氮方式甘蔗氮肥利用效率的研究[J]. 作物杂志, 2012, (1), 76–79.
 - Wei J F, Luo Y, Mi C, *et al.* Application of ¹⁵N labeling to study nitrogen fertilizer use efficiency in sugarcane under different nitrogen application methods[J]. *Crops*, 2012, (1), 76–79.
 - [7] 单翔宇, 谢如林, 李伏生. 氮肥运筹提升宿根蔗产量和氮素利用[J]. 热带作物学报, 2020, 41(12): 2446–2453.
 - Shan X Y, Xie R L, Li F S. Nitrogen fertilizer management improves ratoon cane yield and nitrogen utilization[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(12): 2446–2453.
 - [8] 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.
 - [9] 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.
 - [10] 李天娇, 刘红芳, 张淑香, 等. 玉米秸秆替代部分化肥提高黑土团聚体稳定性并改善土壤结构[J]. 植物营养与肥料学报, 2026, 32(3): 279–290.
 - Li T J, Liu H F, Zhang S X, *et al.* Replacing part chemical fertilizer with maize straw enhances the aggregate stability and improves structure of black soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2026, 32(3): 279–290.
 - [11] 刘芳禧, 刘畅宇, 庾振宇, 等. 绿肥、秸秆和石灰联用对红壤性水稻土酸化特征和水稻产量的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(6): 1616–1627.
 - Liu F X, Fang C Y, Yu Z Y, *et al.* Effects of green manure, rice straw return and lime combination on soil acidity and rice yield[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(6): 1616–1627.
 - [12] 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.
 - [13] 范庆峰, 盛诗涵, 杨春璐, 等. 玉米秸秆还田形式对辽东低山丘陵区旱田土壤酸化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(12): 2984–2990.
 - Fan Q F, Sheng S H, Yang C L, *et al.* Effects of different straw returning methods on the soil acidification of dryland in low mountain and hilly areas of Liaodong[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(12): 2984–2990.
 - [14] 宋日云, 陈超君, 孙少华, 等. 蔗叶还田方法对宿根蔗地一些土壤肥力因素的效应研究[J]. 广西蔗糖, 2008, (1): 18–19.
 - Song R Y, Chen C J, Sun S H, *et al.* Study on the effect of sugarcane leaf returning method on some soil fertility factors in perennial sugarcane fields[J]. *Guangxi Sugarcane and Canesugar*, 2008, (1): 18–19.
 - [15] 蔡泽江. 有机物料调控红壤化学氮肥致酸效应的差异与机制[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2019.
 - Cai Z J. Effectiveness and mechanisms of organic materials alleviating red soil acidification from chemical N fertilizer[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
 - [16] 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.
 - [17] Cheng J, Yang C Z, Zhang L, *et al.* The competitive effects of crop straw return and nitrogen fertilization on soil acidification[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2025, 388: 109638.
 - [18] 刘宇峰, 谭裕模. 广西蔗叶资源化利用现状分析与对策探讨[J]. 广西农学报, 2022, 37(5): 56–63.
 - Liu Y F, Tan Y M. Analysis of current situation and study of strategies for sugarcane leaf resource utilization in Guangxi[J]. *Journal of Guangxi Agriculture*, 2022, 37(5): 56–63.
 - [19] 毕于运, 高春雨, 王红彦, 等. 农作物秸秆综合利用和禁烧管理国家法规综述与立法建议[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(8): 1–10.
 - Bi Y Y, Gao C Y, Wang H Y, *et al.* A summarization of the national regulation of crop straw utilization and burning prohibition and the corresponding legislative proposals[J]. *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(8): 1–10.
 - [20] Huang L, Zhu Y H, Wang Q, *et al.* Assessment of the effects of straw burning bans in China: Emissions, air quality, and health impacts[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 789(4): 147935.
 - [21] Liu Y F, Tan Y, Liang D, *et al.* Effects of sugarcane leaf return and fertilizer reduction on maize growth, yield and soil properties in red soil[J]. *Plants (Basel)*, 2023, 12: 1029.
 - [22] 谢金兰. 蔗叶还田对甘蔗生长和一些土壤理化性状的效应研究[D]. 南宁: 广西大学硕士学位论文, 2007.

- Xie J L. Effect of cane-leaf returning on sugarcane growth and some soil characters[D]. Nanning: MS Thesis of Guangxi University, 2007.
- [23] 徐影, 李彦生, 刘晓冰, 等. 长期施肥改变玉米大豆轮作/连作黑土农田酸化速率和酸中和容量[J]. *土壤*, 2024, 56(4): 750–759.
- Xu Y, Li Y S, Liu X B, *et al.* Long-term fertilizer application alters acidification rate and acid-neutralizing capacity in corn and soybean rotational/continuous cropping systems of mollisol field[J]. *Soils*, 2024, 56(4): 750–759.
- [24] 柯琴, 韦向向, 赵隼宇, 等. 广西红壤区桉树林地土壤酸化特征及控酸技术初探[J]. *中国土壤与肥料*, 2024, (11): 49–56.
- Ke Q, Wei X X, Zhao J Y, *et al.* Study on soil acidification characteristics and acid control technology of *Eucalyptus* forest in Guangxi red soil region[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024, (11): 49–56.
- [25] 谢如林, 谭宏伟, 周柳强, 等. 不同氮磷施用量对甘蔗产量及氮肥、磷肥利用率的影响[J]. *西南农业学报*, 2012, 25(1): 198–202.
- Xie R L, Tan H W, Zhou L Q, *et al.* Effect of N fertilizer and P fertilizer amount on fertilizer use efficiency in sugarcane yield[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25(1): 198–202.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析(3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil agricultural chemistry analysis (3rd edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [27] 唐贤, 蔡泽江, 徐明岗, 等. 余江县水稻土剖面酸缓冲性能与酸化速率[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(6): 774–782.
- Tang X, Cai Z J, Xu M G, *et al.* Research on buffering capacity and acidification rate of paddy soil profiles in Yujiang County[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(6): 774–782.
- [28] Cai Z J, Wang B, 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.
- [29] 冀建华, 吕真真, 刘淑珍, 等. 长期施用化肥对南方稻田土壤酸化和盐基离子损失的影响[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(13): 2599–2611.
- Ji J H, Lü Z Z, Liu S Z, *et al.* Long-term application of chemical fertilizers induces soil acidification and soil exchangeable base cation loss on paddy in southern China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(13): 2599–2611.
- [30] 陈欢, 曹承富, 孔令聪, 等. 长期施肥下淮北砂姜黑土区小麦产量稳定性研究[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(13): 2580–2590.
- Chen H, Cao C F, Kong L C, *et al.* Study on wheat yield stability in Huaibei lime concretion black soil area based on long-term fertilization experiment[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(13): 2580–2590.
- [31] 许庆伟, 王洋, 李志琦, 等. 不同种植制度下施肥管理对紫色土的致酸效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(3): 407–418.
- Xu Q W, Wang Y, Li Z Q, *et al.* Effects of fertilization management on acidification of purple soil under different cropping systems[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(3): 407–418.
- [32] Zhang Y Y, Zhang S Q, Wang R Z, *et al.* Impacts of fertilization practices on pH and the pH buffering capacity of calcareous soil[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2016, 62(5–6): 432–439.
- [33] 李娟, 张立成, 章明清, 等. 长期施用尿素降低赤红壤旱地耕层pH的特征与预测[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(12): 2161–2171.
- Li J, Zhang L C, Zhang M Q, *et al.* Characteristics and prediction of topsoil acidification of latosolic red soil caused by long-term urea application[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(12): 2161–2171.
- [34] 陈建国, 张杨珠, 曾希柏, 等. 长期不同施肥对水稻土交换性钙、镁和有效硫、硅含量的影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(5): 2064–2067.
- Chen J G, Zhang Y Z, Zeng X B, *et al.* Effects of long-term various fertilization on exchangeable Ca and Mg, and available S and Si contents in paddy soils[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(5): 2064–2067.
- [35] 薛南冬, 廖柏寒, 周细红. 施氮对长沙地区两种水稻土铝及盐基离子溶出的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2001, 27(2): 134–138.
- Xue N D, Liao B H, Zhou X H. Effects of applications of N-fertilizers on release of Al and base cations from two rice paddy soils in Changsha[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2001, 27(2): 134–138.
- [36] 李延, 刘星辉, 庄卫民. 山地龙眼园土壤镁素淋失特点模拟[J]. *山地学报*, 2000, 18(3): 248–252.
- Li Y, Liu X H, Zhuang W M. The characteristics of leaching loss of magnesium in mountain soil of longan orchard[J]. *Journal of Mountain Science*, 2000, 18(3): 248–252.
- [37] 胡天睿, 蔡泽江, 王伯仁, 等. 长期不同施肥下红壤酸碱缓冲性能变化[J]. *中国土壤与肥料*, 2022, (6): 48–54.
- Hu T R, Cai Z J, Wang B R, *et al.* Changes in acid-base buffering characteristics of red soil under long-term different fertilizations[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022, (6): 48–54.
- [38] 杨文飞, 杜小凤, 顾大路, 等. 长期施肥对根系及土壤微生态环境、养分和结构的影响综述[J]. *江西农业学报*, 2020, 32(12): 37–44.
- Yang W F, Du X F, Gu D L, *et al.* Review of effects of long-term fertilization on root and soil micro-ecological environment, nutrients and structure[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2020, 32(12): 37–44.
- [39] Ulrich B. Natural and anthropogenic components of soil acidification[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1986, 6: 702–717.
- [40] 姜勇, 张勇勇, 李天鹏, 等. 玉米秸秆还田和有机配施提高黑土酸中和容量[J]. *地理学报*, 2022, 77(7): 1701–1712.
- Jiang Y, Zhang Y Y, Li T P, *et al.* Corn stalk return and manure amendment improve acid neutralizing capacity of a black soil in Northeast China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(7): 1701–1712.
- [41] 胡天睿, 蔡泽江, 王伯仁, 等. 有机肥替代化学氮肥提升红壤抗酸化能力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(11): 2052–2059.
- Hu T R, Cai Z J, Wang B R, *et al.* Swine manure as part of the total N source improves red soil resistance to acidification[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(11): 2052–2059.
- [42] 谭贤教, 彭李顺, 曹峥英, 等. 蔗叶还田对蔗田土壤生态和甘蔗生长发育影响的研究进展[J]. *农业与技术*, 2024, 44(21): 1–4.
- Tan X J, Peng L S, Cao Z Y, *et al.* Research progress on the impact of sugarcane residue mulching and returning on the soil ecosystem of sugarcane fields and the growth and development of sugarcane[J]. *Agriculture and Technology*, 2024, 44(21): 1–4.

- [43] 张子怡, 张洋, 文炯, 等. 秸秆还田影响农田土壤健康研究进展[J]. 土壤通报, 2025, 56(1): 284–290.
Zhang Z Y, Zhang Y, Wen J, *et al.* Advance in the effects of straw incorporation on soil health[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2025, 56(1): 284–290.
- [44] Lucas R W, Klaminder J, Futter M N, *et al.* A meta-analysis of the effects of nitrogen additions on base cations: Implications for plants, soils, and streams[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 262(2): 95–104.
- [45] 许映慧, 杜建军, 范如芹, 等. 秸秆腐解产物阻控红壤复酸化促进玉米生长[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(5): 826–839.
Xu Y H, Du J J, Fan R Q, *et al.* Straw decayed products inhibit re-acidification of red soils and improve maize growth[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(5): 826–839.
- [46] Li K W, Xu R K, Cai Z. Aluminum mobilization characteristics in four typical soils from different climate zones during their acidification [J]. *Plant and Soil*, 2024, 504: 29–46.
- [47] 代文才, 高明, 兰木羚, 等. 不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 188–199.
Dai W C, Gao M, Lan M L, *et al.* Nutrient release patterns and decomposition characteristics of different crop straws in drylands and paddy fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(2): 188–199.
- [48] Pang Z Q, Mo L F, Liu Q, *et al.* Soil acidification reduces flavonoids and key metabolites in sugarcane roots and rhizosphere leading to yield decline[J]. *Rhizosphere*, 2025, 33: 101028.
- [49] 惠晓丽, 马清霞, 王朝辉, 等. 基于旱地小麦高产优质的氮肥用量优化[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 233–244.
Hui X L, Ma Q X, Wang C H, *et al.* Optimization of nitrogen rate based on grain yield and nutrient contents in dryland wheat production[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(2): 233–244.
- [50] Liang H L, Gao S Y, Ma J X, *et al.* Effect of nitrogen application rates on the nitrogen utilization, yield and quality of rice[J]. *Food and Nutrition Sciences*, 2021, 12: 13–27.
- [51] Li Z T, Xu Q S, Lu Y N, *et al.* Reducing nitrogen fertilizer applications mitigates N₂O emissions and maintains sugarcane yields in South China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2025, 377.
- [52] 马子钰, 马文林. 秸秆还田对中国农田土壤固碳效应影响的研究[J]. 土壤, 2023, 55(1): 205–210.
Ma Z Y, Ma W L. Effects of straw returning on soil organic carbon in China's cropland-A meta-analysis[J]. *Soils*, 2023, 55(1): 205–210.
- [53] Blair N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia[J]. *Soil and Tillage Research*, 2000, 55(3-4): 183–191.
- [54] 王德鑫, 杜建军, 陈海斌, 等. 蔗叶还田下不同施肥模式对旱地红壤肥力及稳定性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(1): 254–263.
Wang D X, Du J J, Chen H B, *et al.* Effects of different fertilization modes on the fertility and stability of red soil in upland under sugarcane leaf returning to field[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2026, 43(1): 254–263.
- [55] Wang F L, Huang P M. Effects of organic matter on the rate of potassium adsorption by soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2001, 81(3): 325–330.
- [56] Yang X Y, Chen X W, Yang X T. Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 85–91.
- [57] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526–535.
Pan J L, Dai W A, Shang Z H, *et al.* Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5): 526–535.