

长期连作蔗地土壤养分时空分异特征的产量限制因子识别

邓军^{1,2}, 艾静², 王禹童², 刀静梅², 赵勇², 叶松², 邓燕³✉, 张福锁¹✉

¹ 中国农业大学资源与环境学院/养分资源高效利用全国重点实验室, 北京 100094; ² 云南省农业科学院甘蔗研究所, 云南开远 661699; ³ 西南大学资源环境学院, 重庆 400715

摘要: 【目的】揭示长期连作蔗地土壤化学性质的分异特征及其与产量的关系, 识别制约甘蔗产量提升的关键土壤因子, 为蔗地可持续管理提供科学依据。【方法】采用空间代替时间试验, 分析不同连作种植年限 CK (0 a)、T1 (1 a)、T2 (10—19 a)、T3 (20—29 a) 和 T4 (> 35 a) 下甘蔗产量及 0—60 cm 土壤剖面 (0—20、20—40、40—60 cm) 的化学性质 (pH、有机质、速效氮磷钾及全量、有效态微量元素等) 演变规律。采用因子分析法、相关系数法及内梅罗指数法评价土壤综合肥力 (IFI)。最后, 运用极端梯度提升 (XGBoost) 和随机森林 (RF) 2 种机器学习模型, 量化土壤化学指标对甘蔗产量的相对重要性。【结果】(1) 长期连作导致甘蔗产量显著下降 ($P < 0.05$), 连作 > 35 a 处理较 CK 降幅达 13.68%, 并引发土壤化学性质的劣化。(2) 长期连作导致土壤酸化加剧, 且具有显著的土层特异性。与 CK 比, 连作 > 20 a 土壤 pH 均值降至 4.60; 土壤亚表层 (20—40 cm) 酸化最严重, 连作 20—29 a 和 > 35 a 处理下该层 pH 较 CK 显著下降。(3) 土壤养分呈现明显的“表聚性”和部分元素的累积效应。0—20 cm 表层土中有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷显著高于其他层; 随连作年限延长, 速效钾、有效锌出现显著积累, 其中表层增幅分别为 320.47% 和 164.13%。(4) 土壤综合肥力指数随土层深度增加而显著递减, 虽长期连作提升表层土的平均肥力, 但加剧深层土肥力的不稳定性与空间异质性。(5) XGBoost 和 RF 模型分析一致表明, 20—40 cm 土层的 pH 是决定甘蔗产量的首要限制因子, 其重要性贡献率远超表层速效养分及其他指标。【结论】长期连作下蔗地土壤呈现表层养分富集、亚表层严重酸化的时空分布特征, 20—40 cm 土层的酸化是制约甘蔗生产力提升的核心障碍因子。生产实践中应从表土层施肥转向针对亚表层土壤酸化的深层改良与调控。

关键词: 甘蔗; 养分平衡; 土壤酸化; 亚表层酸化; 产量驱动因子; 机器学习

Identification of Yield-Limiting Factors Associated with Spatiotemporal Differentiation of Soil Nutrients in Long-Term Continuous Sugarcane Cultivation Fields

DENG Jun^{1,2}, AI Jing², WANG YuTong², DAO JingMei², ZHAO Yong², YE Song², DENG Yan³✉, ZHANG FuSuo¹✉

¹ College of Resources and Environment Sciences, China Agricultural University/National Key Laboratory of Efficient Utilization of Nutrient Resources, Beijing 100094; ² Sugarcane Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kaiyuan 661699, Yunnan; ³ College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715

Abstract: 【Objective】This study aimed to reveal the spatiotemporal variation in characteristics of soil chemical properties and their relationship with sugarcane yield under long-term continuous cropping, identify the key soil factors limiting sugarcane productivity, and provide a scientific basis for sustainable soil management in sugarcane fields. 【Method】A space-for-time

收稿日期: 2026-01-15; 接受日期: 2026-05-14

基金项目: 云南省“兴滇英才支持计划”(XDYC-CYCX-2022-0049)、云南省科技计划项目基础研究专项(202401AT070045)、热带作物生物育种全国重点实验室自主课题项目(SKLTCB-YAAS-2025-04)

联系方式: 邓军, E-mail: dj@yaas.org.cn. 通信作者邓燕, E-mail: dyan0907@swu.edu.cn. 通信作者张福锁, E-mail: zhangfs@cau.edu.cn

substitution approach was adopted with five continuous cropping duration treatments: CK (0 a), T1 (1 a), T2 (10-19 a), T3 (20-29 a), and T4 (>35 a). Sugarcane yield and soil chemical properties within the 0-60 cm profile (stratified into 0-20, 20-40, and 40-60 cm layers) were systematically analyzed, including pH, soil organic matter (OM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), alkali-hydrolyzable nitrogen (AN), available phosphorus (AP), available potassium (AK), and available micronutrients contents. The integrated fertility index (IFI) was calculated using factor analysis combined with correlation coefficient analysis and the Nemerow composite index method. Two machine learning algorithms-Extreme Gradient Boosting (XGBoost) and Random Forest (RF)-were employed to quantify the relative contribution of individual soil chemical indicators to sugarcane yield. 【Result】 (1) Long-term continuous cropping significantly reduced sugarcane yield ($P<0.05$), with a 13.68% decline observed in the T4 treatment (>35 years) compared with the CK, and induced deterioration in soil chemical properties. (2) Soil acidification was intensified under continuous cropping, exhibiting significant layer-specific characteristics. Compared with the control (CK), the mean soil pH decreased to 4.60 after more than 20 years of continuous cropping. The subsurface layer (20-40 cm) exhibited the most severe acidification, with pH values significantly lower than the CK in the T3 and T4 treatment groups. (3) Soil nutrients exhibited obvious surface enrichment and accumulation of certain elements. The contents of soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, alkali-hydrolyzable nitrogen, and available phosphorus in the surface layer (0-20 cm) were significantly higher than in deeper layers. Prolonged continuous cropping led to significant accumulation of available potassium and available zinc, increasing by 320.47% and 164.13%, respectively, in the surface layer. (4) The soil integrated fertility index (IFI) decreased significantly with soil depth. Although long-term continuous cropping improved average fertility in the surface layer, it exacerbated the variability and spatial heterogeneity of fertility in deeper soil layers. (5) Both XGBoost and RF analyses consistently identified soil pH in the 20-40 cm layer as the primary limiting factor determining sugarcane yield, with a relative importance contribution substantially greater than that of surface available nutrients and other soil indicators.

【Conclusion】 Under long-term continuous sugarcane cultivation, soils exhibited a spatiotemporal soil pattern characterized by surface nutrient enrichment and severe subsurface acidification. Acidification in the 20-40 cm soil layer constitutes the core obstacle restricting sugarcane productivity. In practical production, management strategies should shift from surface-oriented nutrient application to deep amelioration targeting subsurface acidification.

Key words: sugarcane; nutrient balance; soil acidification; subsurface acidification; yield driving factor; machine learning

0 引言

【研究意义】甘蔗 (*Saccharum officinarum* L.) 作为全球重要的糖料和生物质能源作物^[1], 其产业可持续发展对保障全球食糖稳定供给、优化能源结构及维系区域经济韧性具有不可替代的战略价值。在中国, 超过 85% 的食糖原料来源于甘蔗, 产业高度集中于广西、云南等蔗区^[2]。然而, 受限于耕地资源和传统种植模式, 甘蔗长期连作已成为中国蔗地的主导生产方式, 由此引发的连作障碍问题日益凸显, 主要表现为蔗区地力衰退、甘蔗病虫害加剧以及单产提升缓慢, 严重制约糖业可持续发展^[3-5]。在甘蔗单产亟待突破的背景下, 连作导致的土壤环境劣化已成为限制产能提升的“瓶颈”。因此, 深入解析长期连作下土壤养分的演变特征, 建立精准的产量限制因子识别模型, 对制定科学的土壤改良策略、打破连作障碍具有极其重要的意义。【前人研究进展】土壤化学性质的劣化被认为是作物生产力下降的核心驱动力^[5]。甘蔗作为高生物量作物, 对养分尤其是钾 (K) 需求强烈^[6]。在连

作环境下, 若土壤养分失衡, 极易造成特定养分库的严重亏缺和元素间的比例失调^[7]; 其次, 长期依赖化学氮肥的投入, 叠加作物根系分泌物和养分吸收过程, 会持续向土壤输入 H^+ , 导致土壤酸化加剧^[8]。这种酸化不仅直接抑制根系发育, 还显著降低磷 (P)、钙 (Ca)、镁 (Mg) 等养分有效性, 并活化铝 (Al)、锰 (Mn) 等元素^[9], 从而形成一个由酸化、养分失衡和离子毒害构成的复杂化学胁迫网络^[10], 最终协同抑制甘蔗生长发育。此外, 传统的评价方法多侧重于单一指标或线性关系, 难以全面解析土壤多因子间的复杂交互作用。尽管已有大量研究关注连作障碍的成因, 但多将视野局限于表层土壤 (0—20 cm), 忽略了土壤性质劣化过程存在的显著垂直分异特征^[11-12]。甘蔗根系虽可深扎 1 m 以上, 但其主要的吸收根群密集分布于 0—40 cm 的土层^[13-14]。表层土壤 (0—20 cm) 作为耕作与施肥的直接作用层, 直接承受着最多的养分吸收、肥料输入和农事耕作扰动^[11,15], 其土壤化学性质的改变最为迅速和剧烈。此外, 降水和灌溉加剧了养分淋溶, 尤其是由氮肥施用和根系泌酸

驱动的酸化过程会持续向下迁移^[8]，从而改变亚表层（20—40 cm）乃至更深层的土壤环境。亚表层不仅是甘蔗生长中后期水分和养分获取的重要储备区，其环境的优劣直接关系到根系健康与深扎能力^[16-17]。【本研究切入点】当前，对土壤养分库在垂直维度上的重新分配规律、酸化纵向迁移及其与产量衰退的内在关系缺乏系统性的定量认知，导致对连作障碍机制的理解存在盲区，极大限制了精准、高效改良策略的制定。同时，面对土壤生态系统的高度非线性、多重共线性及复杂交互作用，传统的线性模型（如相关性分析、多元线性回归）其解释力与预测力均显不足^[18]。近年来，以极端梯度提升（eXtreme gradient boosting, XGBoost）算法模型和随机森林（random forest, RF）为代表的机器学习算法，为此类复杂问题的解析提供新范式^[19-20]。【拟解决的关键问题】利用“空间代替时间”^[21]的田间试验，结合综合肥力指数评价与机器学习算法（XGBoost 和 RF），系统分析不同连作年限蔗地 0—60 cm 剖面土壤化学性质的演变规律。同时，探讨土壤养分及酸化的垂直分异特征，精准识别并量化在不同土层深度上制约甘蔗生产力的关键限制因子，以期突破甘蔗连作障碍、实现针对不同土层的

分层调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在云南省临沧市耿马傣族佤族自治县（以下简称“耿马县”）开展（图 1）。耿马县地处中国西南边陲（23°21′—24°01′N，98°48′—98°54′ E），位于横断山脉南延段，海拔介于 450.0—3 233.5 m。耿马县是中国糖料蔗核心生产基地和生产保护区之一，蔗糖产业是县域经济的支柱。耿马县甘蔗种植历史超过 40 年，甘蔗种植面积连续 5 年稳定在 2.50 万 hm² 以上，其中 2024—2025 榨季甘蔗种植面积为 2.74 万 hm²，工业入榨甘蔗原料 235.46 万 t，出糖率 13.43%，产糖量 31.62 万 t，蔗糖产业综合产值 103 亿元，甘蔗入榨量、产糖量稳居云南省第一，是甘蔗主产区最具代表性的地区之一。研究区域选择在耿马县甘蔗产业最集中的耿马镇，该区域是云南省典型的丘陵山地蔗区，属亚热带季风气候，多年平均气温 20.3℃，年积温 6 867.6℃，年平均日照时数 2 169 h，年平均降水量 1 316.6 mm，2024—2025 年榨季甘蔗种植面积为 7 771.12 hm²，工业入榨甘蔗原料 62.30 万 t。

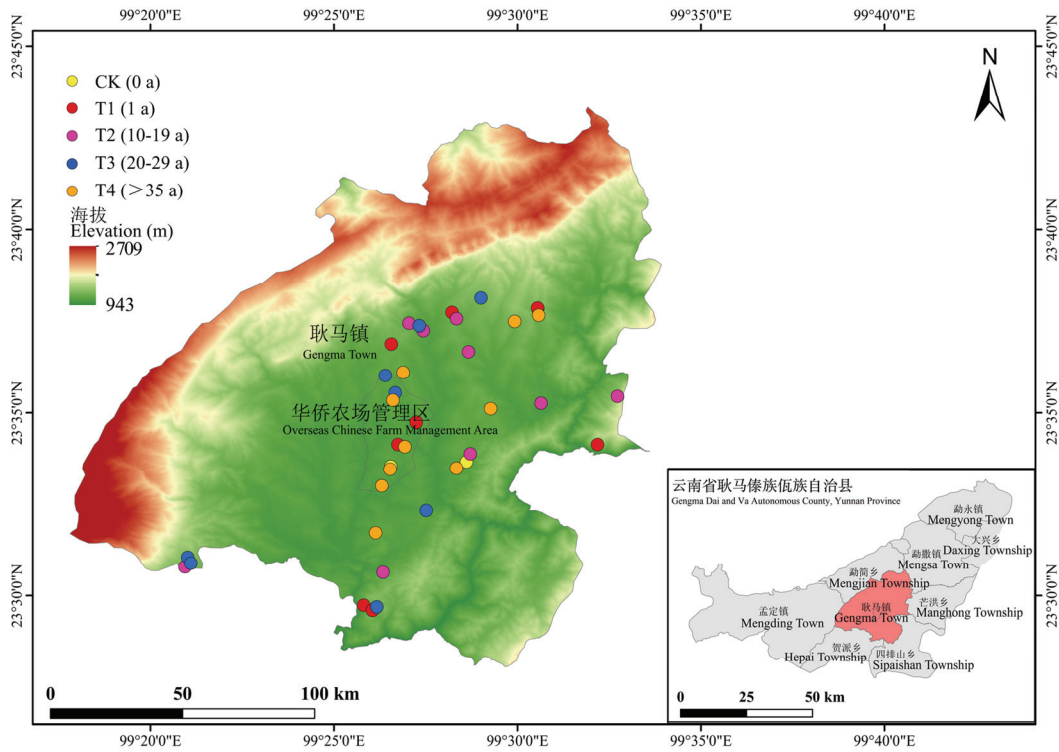


图 1 采样点分布图
Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.2 试验设计

1.2.1 取样地调研 本研究于 2022 年 2 月（甘蔗成熟期）在耿马县耿马镇进行，为探究甘蔗长期连作的影响，采用空间代替时间^[21]的策略构建连作年限梯度。选取了 5 种具有代表性的地块：长期未受耕作扰动的邻近次生林地作为对照（CK，n=3），以及 4 组不同连作年限的甘蔗地，分别为新种植的蔗地（T1，1 a，n=8）、中短期连作（T2，10—19 a，n=8）、长

期连作（T3，20—29 a，n=8）和极长期连作（T4，> 35 a，n=9）。为确保各处理间的可比性，所有选定的甘蔗地块均具有相似的海拔、土壤类型和地形特征，各蔗地统一种植当地主栽甘蔗品种云蔗 081609。农艺管理措施保持一致，包括行距 1.2 m、播种密度 120 000—180 000 芽/hm²。所有甘蔗地均在种植时采用一次性施肥，施肥种类为甘蔗测土配方肥料（N-P₂O₅-K₂O=26-12-6），施用量为 1 200 kg·hm⁻²（表 1）。

表 1 耿马镇蔗区不同年代甘蔗施肥情况调度表
Table 1 Historical fertilization practices for sugarcane in Gengma Town

年份 Year	肥料类型 Fertilizer type	常规施肥次数及施肥量 Fertilization schedule and application rate	施肥总量 Total fertilizer applied (kg·hm ⁻²)	氮磷钾养分总投入量 Total NPK input (kg·hm ⁻²)
2016—2022	复合肥（总养分 44%，N-P ₂ O ₅ -K ₂ O=26-12-6） Compound fertilizer (total nutrients 44%, N-P ₂ O ₅ -K ₂ O = 26-12-6)	一次性施肥：肥料全部用于基肥施用 Single application: all applied as basal fertilizer	1 200	528
2004—2015	复合肥（总养分 25%，N-P ₂ O ₅ -K ₂ O=10-10-5）+尿素（含 N 46%） Compound fertilizer (total nutrients 25%, N-P ₂ O ₅ -K ₂ O = 10-10-5) + urea (46% N)	二次施肥：基肥施 1 200 kg·hm ⁻² 复合肥，追肥施 600 kg·hm ⁻² 尿素 Two applications: basal application of 1 200 kg·hm ⁻² compound fertilizer; topdressing with 600 kg·hm ⁻² urea	1 800	576
1980—2003	尿素（含 N 46%）+过磷酸钙或钙镁磷肥（含 P ₂ O ₅ 12%）+氯化钾（含 K ₂ O 60%） Urea (46% N) + single superphosphate or calcium magnesium phosphate (12% P ₂ O ₅) + potassium chloride (60% K ₂ O)	三次施肥：基肥施 300 kg·hm ⁻² 尿素+750 kg·hm ⁻² 过磷酸钙或钙镁磷肥+300 kg·hm ⁻² 氯化钾，第一次追肥施 600 kg·hm ⁻² 尿素，第二次追肥施 300 kg·hm ⁻² 尿素 Three applications: basal application of 300 kg·hm ⁻² urea +750 kg·hm ⁻² single superphosphate or calcium magnesium phosphate+300 kg·hm ⁻² potassium chloride; first topdressing: 600 kg·hm ⁻² urea; second topdressing: 300 kg·hm ⁻² urea	2 250	822

1.2.2 土壤样品采集 在每个试验地块内，沿“S”形路线随机选取 5 个采样点进行采样，具体为人工挖土壤剖面再分层（0—20、20—40、40—60 cm）取土壤样品。将来自同一地块、同一土层的 5 份土壤样品充分混合，组成一份混合土壤样品。采用四分法取约 4 kg 混合样，装入已标记的透气布袋中，带回实验室。土壤样品自然风干，剔除植物根系和石块，研磨后过筛，分别用于不同指标测定。其中 1 kg 混匀后的鲜土样剔除杂质后风干、研磨过 1 mm 土样分样筛测定 pH、碱解氮、有效磷、速效钾、有效态铁、有效态锰、有效态铜和有效态锌，过 0.149 mm 筛用来测定土壤全氮、全磷、全钾、有机质。

1.3 样品测定与分析

1.3.1 甘蔗农艺性状与产量测定 土壤取样前，在每个蔗地研究区域内随机选取 20 株具有代表性的甘蔗植株，进行农艺性状的连续测量。茎长使用塔尺测量

从地面到甘蔗生长点的距离；茎径使用电子游标卡尺在蔗茎中部测量。有效茎数通过在样地内测量 10 m 行长内的有效茎数量，并结合平均行距换算为单位面积的有效茎数。理论蔗糖分通过手持式糖度计测定从 20 株甘蔗中部钻取的混合蔗汁的锤度（Brix，Bx）。蔗糖分根据下式计算。

蔗糖分（Sucrose content，%）=Brix（%）×1.0825–7.703

实际产量通过在每个蔗地研究区域内随机选取一个 12 m²（每行 5.0 m×1.2 m，共 2 行）的样方，将样方内所有甘蔗按当地原料蔗收获标准砍收后称取鲜重，最终折算为产量（t·hm⁻²）。

1.3.2 土壤理化性质测定 土壤样品理化性质测定方法参照《土壤农化分析》^[22]，pH 采用 pH 计电位法（水土比为 2.5 : 1.0）测定；有机质采用高温外热重铬酸钾氧化容量法—外加热测定；全氮采用半微量凯氏法测定；全磷土壤经 HClO₄-H₂SO₄ 消解后，采用钼

锑抗比色法测定；采用火焰光度计测定全钾含量；碱解氮采用 $1.0\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}$ 碱解扩散法测定；速效磷采用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ 浸提，钼锑抗比色法测定；速效钾采用 $1.0\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NH}_4\text{CH}_3\text{CO}_2$ 浸提，火焰光度法测定；有效态铁、锰、铜和锌用 DTPA 浸提，原子吸收光谱仪测定。

1.4 参评指标选取

为构建土壤肥力综合评价体系，本研究遵循指标的系统性、可获取性原则，并参照已有研究^[23-26]优先选用能直接反映土壤供肥能力的化学指标。最终，确定土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾和 pH 共 8 项指标，用于后续的多方法综合评价。

1.5 数据处理与统计分析

1.5.1 土壤综合肥力评价 为全面评估不同连作年限土壤肥力的演变特征，本研究分别采用基于模糊数学的综合评价法（fuzzy comprehensive evaluation, FCE）^[27]和能够反映土壤最小养分限制律的修正内梅罗指数法（modified nemerow index, MNI）^[28]进行计算与对比。

1.5.1.1 模糊综合评价法 该方法通过构建隶属度函数和确定权重集，将定性的土壤肥力指标转化为定量的综合指数。计算公式如下：

$$\text{IFI}=\sum_{i=1}^n W_i P_i$$

式中， W_i 与 P_i 分别为第 i 项评价指标的权重系数和隶属度值； n 为评价指标个数。综合土壤肥力指数（integrated fertility index, IFI）取值在 0—1，其值越高，表明综合土壤肥力质量越好。

（1）隶属度（ P_i ）的确定：依据土壤学原理及各指标的生态效应，分别建立“S”形或抛物线形隶属度函数，将各指标实测值转换为 0—1 的无量纲隶属度值。

（2）权重（ W_i ）的确定：为避免单一赋权方法

的片面性，本研究采用 2 种客观赋权法分别计算权重，进而获得 2 种基于不同权重体系的综合肥力指数^[26-29]：

①因子分析法（factor analysis, FA）：基于主成分分析原理，以各指标公因子方差占总公因子方差的比例确定权重，计算得出的指数记为基于因子分析法的综合肥力指数（IFI-FA）。

②相关系数法（correlation coefficient, CC）：计算某项指标与其他所有指标相关系数的平均值，经归一化处理后作为该指标权重，计算得出的指数记为基于相关系数法的综合肥力指数（IFI-CC）。

1.5.1.2 修正的内梅罗指数法 该方法能够有效凸显限制性最强的“短板”因子能较好地反映最小因子定律（Liebig's law of the minimum）^[30]。计算过程包含分肥力系数计算与综合指数合成 2 步。

（1）分肥力系数（ IFI_i ）的确定：参考全国第二次土壤普查养分分级标准^[30]（表 1），建立各指标的分段评价函数。将土壤属性实测值转化为分肥力系数（ F_i ）。该系数经标准化后介于 0—3，值越大表示该单项指标越优，且当测定值超过分级上限时，不再增加，以符合作物对养分需求的实际规律。

$$\text{IFI}_i=\begin{cases} \frac{X}{X_a} & X\leq X_a \\ \frac{X-X_a}{X_c-X_a}+1 & X_a < X\leq X_p \\ \frac{X-X_a}{X_c-X_a}+2 & X_c < X\leq X_p \\ 3 & X> X_p \end{cases}$$

式中， IFI_i 为分肥力系数， X 为该属性测定值， X_a 与 X_p 分别为分级标准下、上限， X_c ：介于分级标准上、下限间。属性值分级标准（ X_a 、 X_c 、 X_p ）主要参考第二次全国土壤普查标准（表 2）。通过该方法标准化后， IFI_i 参数值介于 0—3。

表 2 土壤各属性分级标准值
Table 2 The grading standard of soil properties

分级 Grade	有机质含量 Organic matter content (g·kg ⁻¹)	全氮含量 Total nitrogen content (g·kg ⁻¹)	全磷含量 Total phosphorus content (g·kg ⁻¹)	全钾含量 Total potassium content (g·kg ⁻¹)	碱解氮含量 Alkali-hydrolyzable nitrogen content (mg·kg ⁻¹)	速效磷含量 Available phosphorus content (mg·kg ⁻¹)	速效钾含量 Available potassium content (mg·kg ⁻¹)	pH	
								>7	<7
X_a	10	0.75	0.4	5	60	3	40	8.5	4.5
X_c	20	1.50	0.6	20	120	10	100	8.0	5.5
X_p	30	2.00	1.0	25	180	20	150	7.5	6.5

(2) 综合肥力指数 (IFI) 的计算: 采用修正的内梅罗公式计算综合肥力, 公式如下:

$$IFI = \sqrt{\frac{(IFI_{\text{mean}})^2 - (IFI_{\text{imin}})^2}{2} \times \left(\frac{n-1}{n}\right)}$$

式中, IFI 为土壤综合肥力, IFI_{mean} 与 IFI_{imin} 分别为土壤各属性分肥力均值与最小值; n 为评价指标个数。

1.6 数据处理与分析

试验数据采用 WPS Office 软件进行整理与预处理。所有统计分析在 R (version 4.4.3) 环境中完成, 所有图形采用 ggplot2 包绘制。

1.6.1 差异性统计检验 为明确不同处理 (连作年限、土层深度等) 对土壤理化性质及甘蔗产量的影响, 首先对数据进行正态分布检验 (Shapiro-Wilk test) 和方差齐性检验 (Levene's test), 根据检验结果选择相应的统计方法:

(1) 参数检验: 对于满足正态分布的数据, 采用单因素方差分析 (One-way ANOVA)。若方差齐性满足, 采用 LSD 法或 Tukey 法进行多重比较; 若方差不齐, 则采用 Welch's ANOVA 结合 Tamhane's T2 法进行事后检验。

(2) 非参数检验: 对于不满足正态分布假设的数据, 采用 Kruskal-Wallis 非参数检验; 若组间差异显著, 进一步采用 Wilcoxon 秩和检验进行两两比较, 并使用 Benjamini-Hochberg (BH) 法对 P 值进行校正以控制假阳性率。

上述分析显著性水平设定为 $\alpha=0.05$, 结果均以差异显著性字母标记法在图表中展示。

1.6.2 关键限制因子的识别与验证 为精准识别制约甘蔗产量的关键土壤限制因子并量化其相对贡献, 本研究构建极端梯度提升 (XGBoost) 和随机森林 (RF) 2 种回归预测模型进行交叉验证分析。

将各土层的土壤化学指标设为预测变量, 甘蔗产量设为响应变量。利用 caret 包对模型进行训练, 均采用 10 次重复的 10 折交叉验证 (Repeated 10-fold Cross-validation) 策略进行超参数寻优和模型性能评估, 以增强模型的泛化能力和稳健性。

(1) XGBoost 模型: 基于树模型的提升算法, 通过计算特征的增益 (Gain) 来衡量各土壤指标的重要性。

(2) RF 模型: 作为对比验证, 通过计算预测均方误差的增加率 (% , IncMSE) 来评估变量重要性。

以 2 种模型重要性排序均靠前的指标, 作为关键

限制因子, 以确保结果的可靠性和稳健性。

2 结果

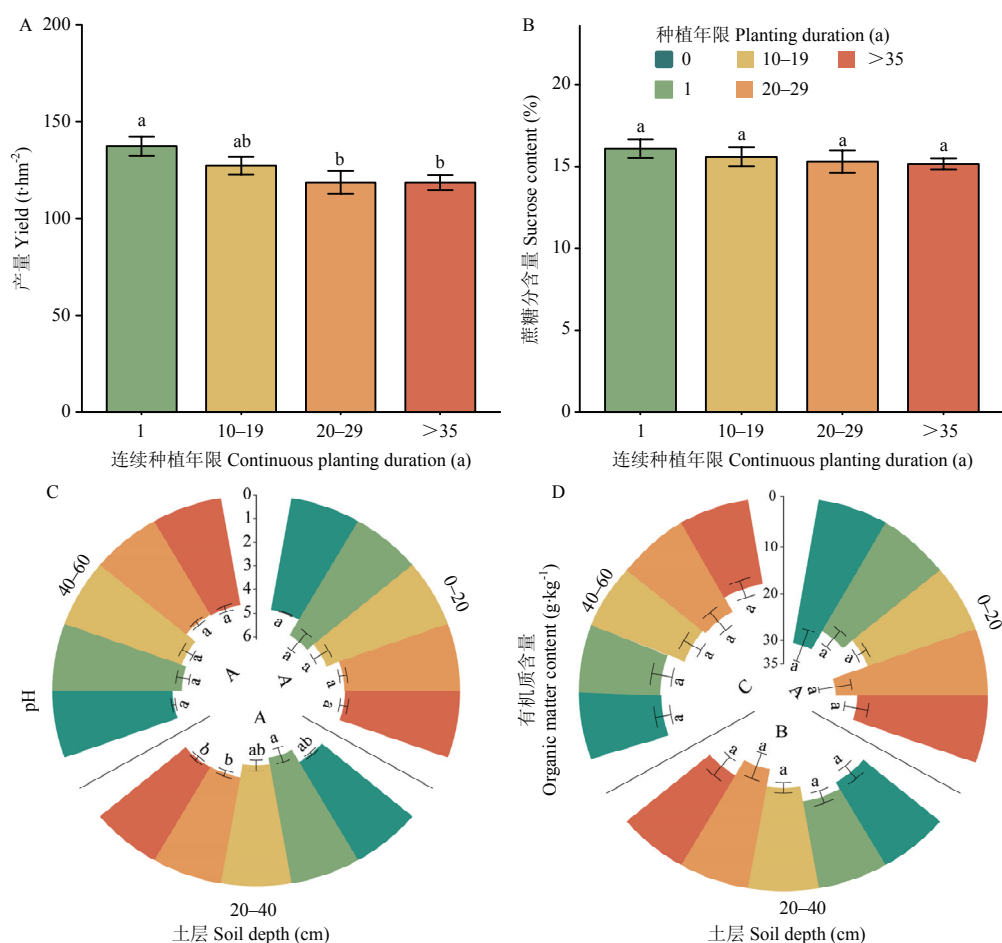
2.1 不同连作年限下甘蔗产量和蔗糖分

由图 2 可知, 随连作年限的延长, 甘蔗产量和蔗糖分均呈现下降趋势, 但二者对连作的响应程度不同。在产量方面 (图 2-A), 连作年限对甘蔗产量具有显著影响 ($P<0.05$)。新植蔗 (1 a) 的平均产量最高, 为 $137.31 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著高于连作 20—29 a 和 >35 a 的蔗地; 随连作年限增加, 产量逐渐降低, 连作 10—19 a、20—29 a 和 >35 a 的平均产量分别为 127.29 、 118.65 和 $118.52 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与新种植的蔗地相比, 连作 >35 a 蔗地的甘蔗产量降幅达 13.68% 。从样本极值来看, 研究区域新种植的蔗地最高产量达 $155.58 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而连作 >35 a 地块最低产量仅为 $92.12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 表明长期连作对甘蔗产量的抑制作用明显。在蔗糖分方面 (图 2-B), 各处理间蔗糖分差异未达显著水平 ($P>0.05$)。新种植的蔗地 (1 a)、连作 10—19 a、20—29 a 和 >35 a 的蔗地平均蔗糖分分别为 16.10% 、 15.60% 、 15.32% 和 15.15% 。这表明在同一种植品种条件下, 连作年限并非影响甘蔗糖分积累的主导因素, 同一品种在不同连续种植蔗地上蔗糖分差异不显著。

2.2 不同连作年限蔗地不同土壤 pH 及有机质含量

由图 2-C 可知, 研究区域土壤总体呈酸性 ($\text{pH}<7.0$), 长期连作导致土壤酸化加剧, 但具有明显的阶段性和土层特异性。在垂直分布上, 土壤 pH 随土层深度的增加而降低, 0—20、20—40 和 40—60 cm 土层的平均 pH 分别为 5.01 、 4.88 和 4.86 。进一步分析表明, 土壤酸化过程主要集中在亚表层 (20—40 cm)。与新种植的蔗地 (1 a, $\text{pH}=5.38 \pm 0.84$) 相比, 连作 20—29 a ($\text{pH}=4.56 \pm 0.31$) 和 >35 a ($\text{pH}=4.53 \pm 0.16$) 的 20—40 cm 土层 pH 显著下降 ($P<0.05$); 而土壤表层 (0—20 cm) 和深层 (40—60 cm) 的 pH 在整个观测期内虽有波动, 但未表现出统计学上的显著差异 ($P>0.05$)。

由图 2-D 可知, 不同连作年限下不同土层的土壤有机质 (OM) 含量差异均未达到显著水平 ($P>0.05$)。在整个土壤剖面上, 与新种植的蔗地 (1 a, $20.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 比, OM 平均含量随年限延长呈“先下降再回升再下降”的趋势, 在连作 20—29 a 时达到峰值 ($25.97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 至 >35 a 时回落至 $22.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与初始森林土 ($22.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 水平接近。在垂直分布上, OM 表



不同小写字母表示同一指标不同连作年限间差异显著 ($P < 0.05$)。0 a 表示未种植甘蔗的对照土壤, 1、10—19、20—29、>35 a 分别表示连作 1 年、10—19 年、20—29 年和 35 年及以上; A、B、C 分别表示 0—20、20—40、40—60 cm 土层显著性差异。下同

Different lowercase letters indicate significant differences among different continuous cropping years for the same indicator ($P < 0.05$). 0 a represents control soil without sugarcane planting; 1 a, 10—19 a, 20—29 a, and >35 a represent continuous cropping for 1 year, 10—19 years, 20—29 years, and 35 years or more, respectively; A, B, and C represent 0-20 cm, 20—40 cm, and 40—60 cm soil layers, respectively. The same as below

图 2 不同连作年限下甘蔗产量 (A)、蔗糖分 (B) 和不同土层土壤 pH (C) 及有机质含量 (D)

Fig. 2 Sugarcane yield (A), sucrose content (B), soil pH (C) and organic matter content (D) in different soil layers under different continuous cropping years

现出显著的表聚现象, 含量随土层深度增加而急剧降低。0—20 cm 土层 OM 均值最高 ($27.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 分别是 20—40 cm ($21.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 40—60 cm ($18.31 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 土层的 1.26 和 1.48 倍。

2.3 不同连作年限蔗地不同土层土壤大量元素含量

土壤全氮 (TN)、全磷 (TP) 和全钾 (TK) 含量受连作年限的影响较小, 主要受土层深度的显著影响。不同连作种植年限下蔗地 0—20、20—40 和 40—60 cm 土层中 TN 含量分别为 0.14%、0.12% 和 0.11%, 不同种植年限下 0—20 cm 土层蔗地 TN 含量整体上显著高于 20—40 cm 和 40—60 cm 土层 (图 3-A)。不

同连作种植年限下, 蔗地 TP 含量在 0—20、20—40 和 40—60 cm 土层中分别为 0.06%、0.04% 和 0.04%, 其中连作 20—29 a 的蔗地 0—20 cm 土层 TP 含量显著高于 20—40 和 40—60 cm 土层, 连作 >35 a 的蔗地 0—20 cm 土层 TP 含量显著高于 40—60 cm 土层 (图 3-B)。TK 含量在不同土层深度和连作年限中相对稳定。在 0—20、20—40 和 40—60 cm 土层中, TK 含量均值为 1.69%, 种植 0、1、10—19、20—29 和 >35 a 蔗地中 TK 含量分别为: 1.72%、1.45%、1.63%、1.86% 和 1.78%, 新植 1 a 蔗地中 TK 含量最低 (图 3-C)。

土壤速效养分对连作年限和土层深度的响应更为

敏感, 且呈现出强烈的空间异质性。随着连作年限的增加, 碱解氮 (AN) 含量在不同土层表现出显著变化, 新植 1 a 蔗地不同土层中 AN 含量最低, 随连作年限增加逐渐累积。在垂直分布上, 0—20、20—40 和 40—60 cm 土层的 AN 含量分别为 127.06、115.66 和 89.08 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 0—20 cm 土层中 AN 显著高于其他土层 (图 3-D)。有效磷 (AP) 含量在不同土层和连作年限中显示出显著变化。在 0—20 cm 土层中 AP 含量最高

19.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于 20—40 cm (7.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 40—60 cm (5.95 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 土层中 AP 含量, 表明磷在土壤中主要集中在耕作层 (图 3-E)。速效钾 (AK) 含量在不同土层和连作年限中变化较大, 长期连作最显著影响是导致土壤 AK 含量大幅累积。在 0—20、20—40 和 40—60 cm 土层中, AK 含量分别为 234.44、176.30 和 154.88 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 表层 (0—20 cm) 土壤 AK 含量显著高于其他土层 (图 3-F)。

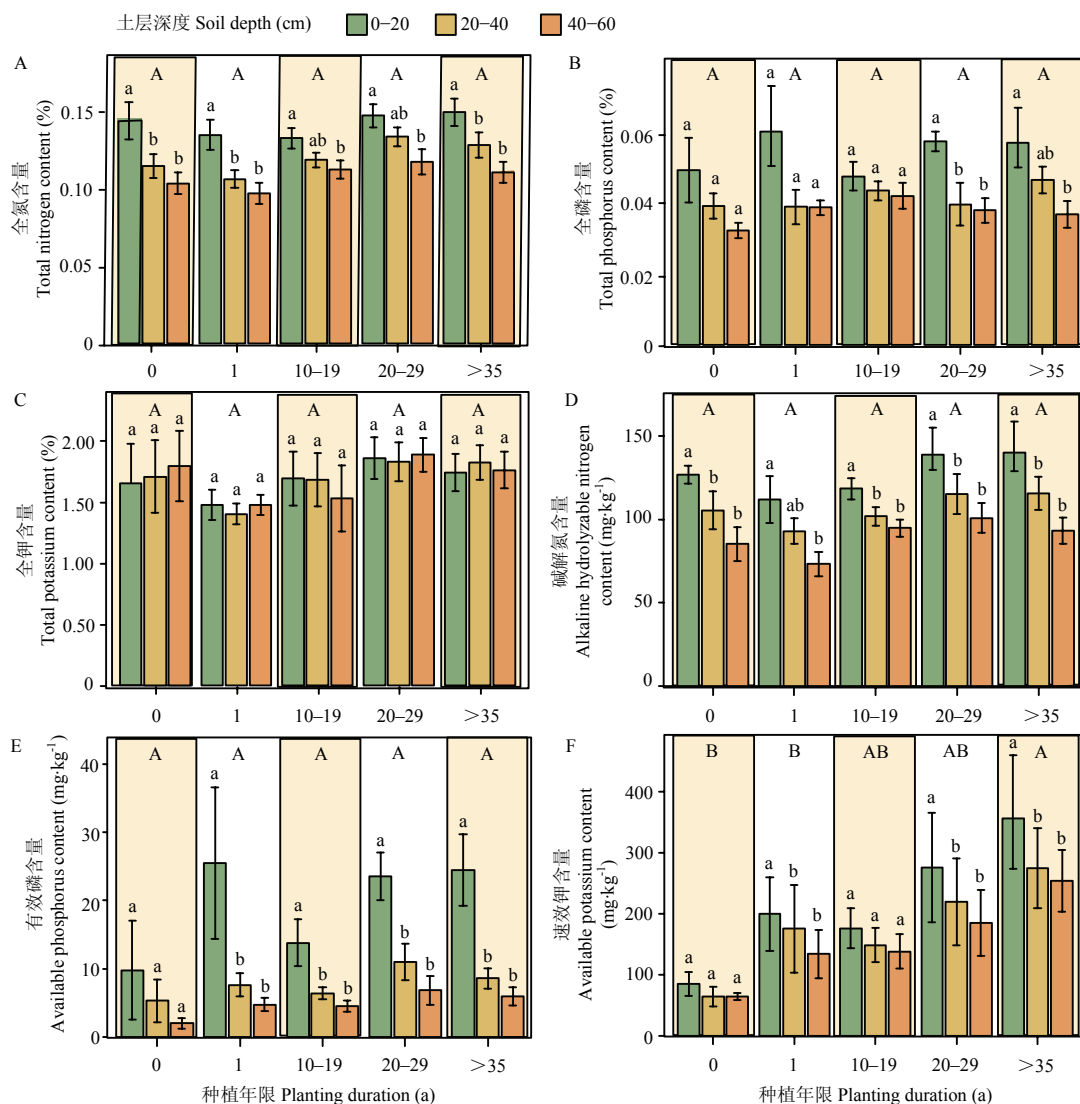


图 3 不同连作年限下各土层土壤大量元素含量

Fig. 3 Soil macronutrient contents in different soil layers under different continuous cropping years

2.4 不同连作年限蔗地不同土层土壤微量元素含量

由图 4 可知, 长期连作甘蔗对土壤微量元素 (Fe、Mn、Cu、Zn) 有效态含量的影响存在显著差异, 且

不同元素在垂直剖面上的分布特征各异。土壤有效 Fe 含量随连作年限的增加呈先升高后降低的趋势, 但组间差异未达到显著水平 ($P>0.05$)。在垂直分布上,

有效 Fe 含量表现出明显的表层富集特征,即含量随土层深度增加而极显著降低 ($P<0.01$) (图 4-A)。与有效 Fe 相似,有效 Mn、Cu 含量也表现出表层富集特征现象,其含量随土层深度的增加而降低,且差异未达到显著水平 ($P>0.05$) (图 4-B、C)。土壤有效 Zn 含量随连作年限的延长呈增加趋势。在 0—20、

20—40 cm 土层中,连作 >35 a 的土壤有效 Zn 含量显著高于次生林地土壤 (0 a) ($P<0.05$),而不同连作年限间甘蔗土壤有效 Zn 含量无显著差异 ($P>0.05$)。同时,土壤有效 Zn 具有极显著的表层富集特征 ($P<0.01$),其含量在 0—20 cm 耕作层显著高于亚表层、深层土壤 (图 4-D)。

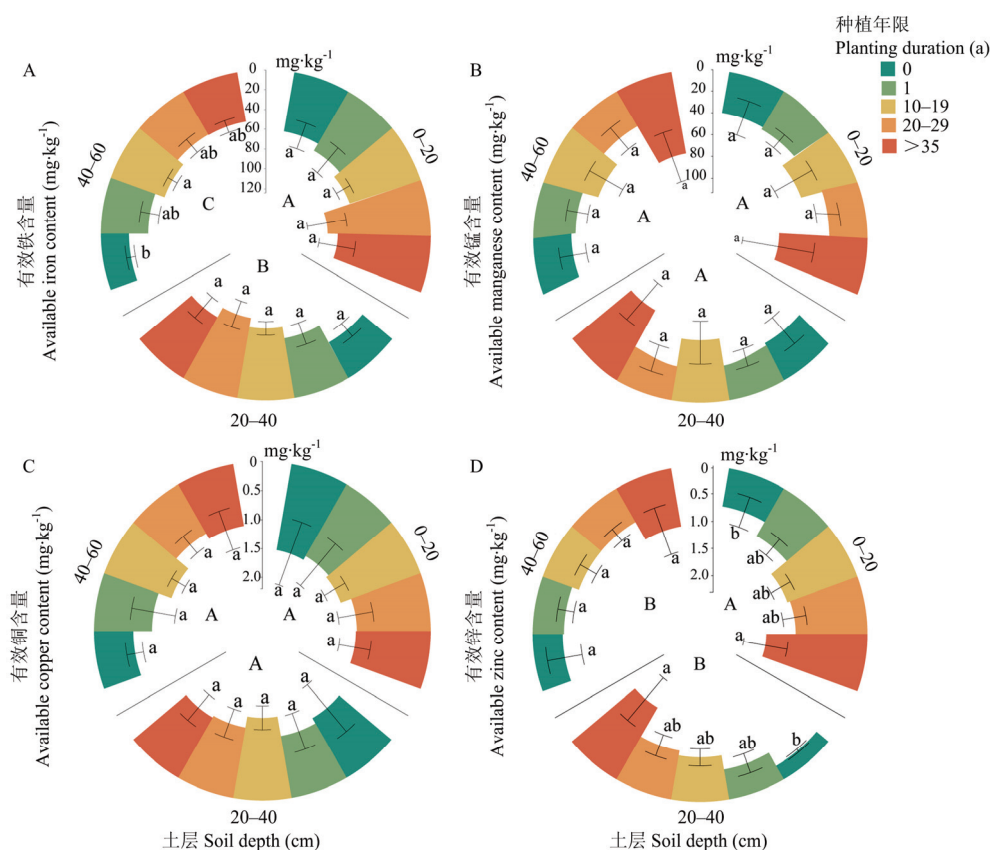


图 4 不同连作年限下各土层土壤微量元素含量

Fig. 4 Soil micronutrient contents in different soil layers under different continuous cropping years

2.5 土壤综合肥力指数的时空动态

利用因子分析法 (IFI-FA)、相关系数加权法 (IFI-CC) 及修正内梅罗指数法 (MNI) 3 种评价模型, 对不同连作年限及土层深度的土壤肥力进行综合评估。结果表明, 3 种方法得出的评价结果具有高度一致性 (图 5)。从垂直分布特征看, 土壤综合肥力随土层增加呈显著递减趋势 ($P<0.05$)。以因子分析法为例, 0—20 cm 表层土壤的 IFI 均值 (2.02 ± 0.53) 显著高于 20—40 cm (1.66 ± 0.47) 和 40—60 cm (1.42 ± 0.45) 土层。相关系数加权法和修正内梅罗指数法也显示相同的规律, 其中修正内梅罗指数在 0—

20 cm 土层均值达 1.49 ± 0.51 , 显著优于中、下层土壤 (均值分别为 1.18 和 1.02)。这表明研究区域土壤肥力具有明显的表聚性, 养分主要集中在耕作层。从时间演变特征看, 连作年限对土壤肥力具有明显的阶段性影响。在 0—20 cm 表层, 土壤肥力随连作年限延长总体呈上升趋势。以修正内梅罗指数法为例, 连作 >35 a 的蔗地平均值最高 (1.766), 其次为 20—29 a (1.581), 均高于次生林地土壤 (0 a, 1.334)。上述结果表明, 长期施肥管理措施有助于提升表层土壤肥力指数。然而, 值得注意的是, 在长期连作 (>35 a) 处理中, 土壤肥力指数的波动范围显著增大 (修正内

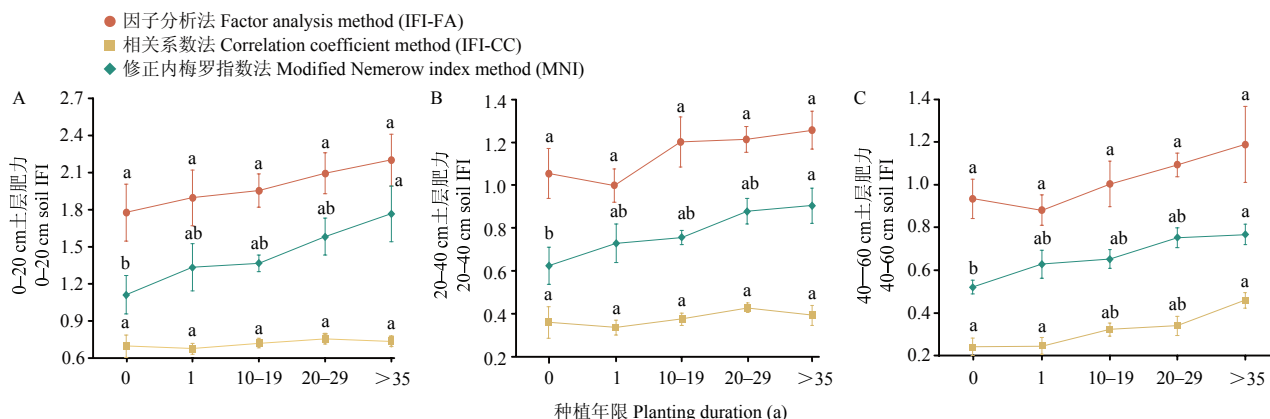


图 5 不同连作年限 0—20、20—40 和 40—60 cm 土层土壤肥力

Fig. 5 Soil Fertility as influenced by continuous cropping duration and soil depth (0—20, 20—40, 40—60 cm)

梅罗指数极值范围 0.730—2.863), 反映出长期连作虽提升平均土壤肥力, 但也加剧地块间土壤质量的空间异质性与不稳定性。

2.6 机器学习模型的特征重要性分析

基于各土层内所有变量的重要性累加, 分析发现不同土壤深度对甘蔗产量预测的综合贡献(图 6-A), 土壤垂直空间对产量的影响存在显著异质性。极端梯度提升(XGBoost)模型的结果显示, 20—40 cm 土层对产量形成的贡献度最大, 达到 57.5%; 其次为 0—20 cm 土层(26.8%)和 40—60 cm 土层(15.7%)。随机森林(RF)模型也表现出相似趋势, 20—40 cm 与 40—60 cm 土层贡献度最高, 均超 50%。这进一步证实了亚表层土壤环境(尤其是 20—40 cm)是当前甘蔗生产中的主要限制层位。

通过对模型中所有土壤理化指标的相对重要性进行评估(图 6-B), 结果揭示, 2 种模型均识别出土壤 pH 是影响甘蔗产量的首要因素。在 XGBoost 模型中, pH 的相对重要性为 56.65%, 远高于其他所有因子。其次为 AK(16.37%)、AN(4.56%)和 Mn(4.49%)。与此类似, RF 模型亦显示 pH 具有显著的重要性(94.61%), 但其后依次为 Mn 和 TN。

为进一步明晰具体限制因子, 依据 XGBoost 模型对各土层变量的重要性排序(图 6-C), 20—40 cm 土层的 pH (Gain 0.495, 即分裂增益)是影响产量的最关键单一变量。此外, 表层土壤(0—20 cm) AK 及 pH, 深层土壤(40—60 cm)的 Mn 与 AN 含量也表现出较高的相对重要性。综合分析揭示, 亚表层土壤(20—40 cm)的理化性状, 特别是 pH, 是当前甘蔗生产

中的主要限制层位和首要限制因子。

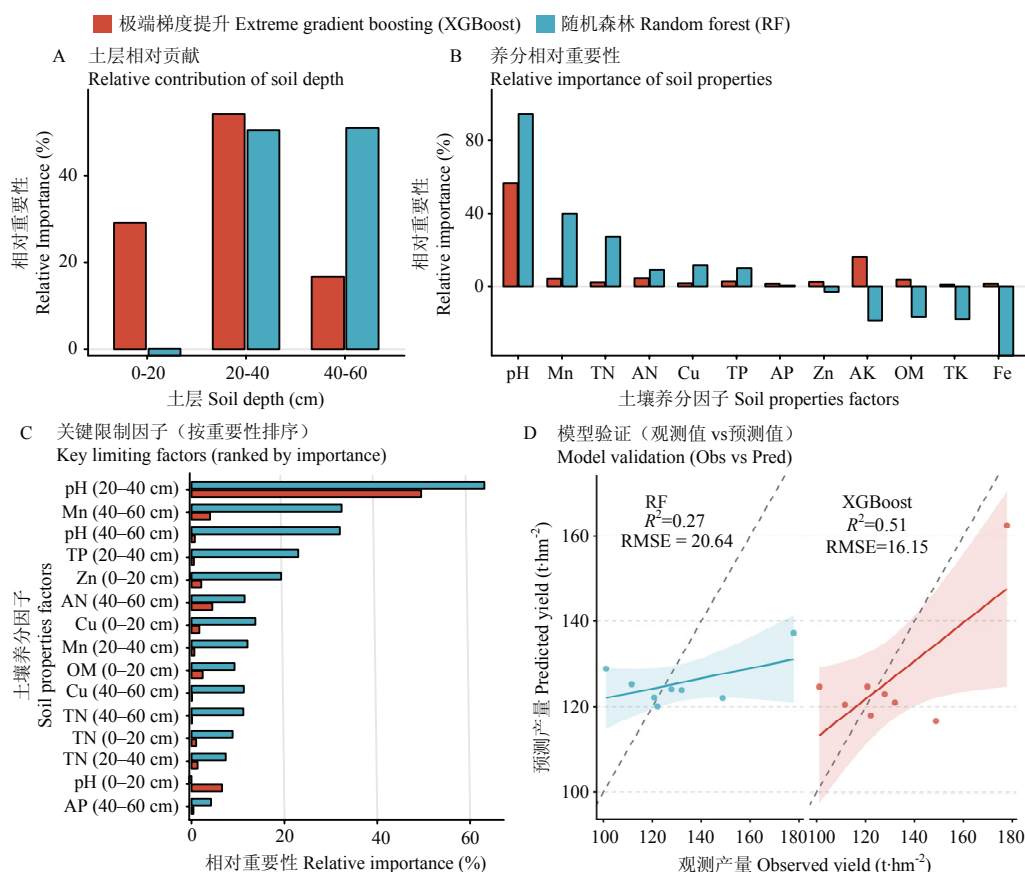
基于土壤养分数据的甘蔗产量预测模型验证结果表明(图 6-D), XGBoost 模型在拟合精度与稳定性上均显著优于 RF 模型。XGBoost 模型的决定系数(R^2)为 0.51, 均方根误差(RMSE)为 16.15 t·hm⁻²; 相比之下, RF 模型的解释能力较弱($R^2=0.27$), 且预测误差较高(RMSE=20.64 t·hm⁻²)。这表明 XGBoost 模型对产量变异具有更强的解释能力。

3 讨论

在集约化农业体系下, 单一作物长期连作引发的土壤生态功能退化与作物生产力衰退, 是全球农业可持续发展面临的共性挑战^[31-33]。本研究通过系统分析不同连作年限下甘蔗产量、蔗糖分、土壤剖面化学性质及综合肥力的演变规律, 并结合 XGBoost 与 RF2 种模型, 揭示驱动甘蔗连作障碍的关键土壤因子。结果表明, 长期连作导致甘蔗产量显著下降, 并引发土壤化学性质的系统性变化, 其核心特征为整个土壤剖面(尤其是 20—40 cm 亚表层)的酸化及伴随的养分失衡。

3.1 长期连作蔗田土壤酸化特征与养分库的垂直分异

本研究发现, 随连作年限的延长, 甘蔗产量显著下降(从新植蔗 1 a 的 137.31 t·hm⁻² 降至>35 a 的 118.52 t·hm⁻²), 与全球许多集约化作物系统中观察到的连作障碍现象一致^[32-33]。作物产量衰退并非单一养分匮乏所致, 而是土壤化学环境系统性劣化的结果^[4]。其中最突出的问题是土壤剖面的整体酸化。与次生林



A: 不同土层对产量预测的相对重要性贡献; B: 各土壤养分指标的相对重要性; OM: 有机质; TN: 全氮; TP: 全磷; TK: 全钾; AN: 碱解氮; AP: 有效磷; AK: 速效钾; Fe: 有效态铁, Mn: 有效态锰, Cu: 有效态铜; Zn: 有效态锌; C: 关键限制因子的重要性排序, 变量名称后缀数字表示所属土层深度 (如“AN_20—40”表示 20—40 cm 土层的碱解氮); D: 模型预测值与实测值的拟合验证, 虚线为 1:1 参考线, 实线为线性拟合线, 阴影区域为 95% 置信区间, R^2 为决定系数, RMSE 为均方根误差 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。橙色代表 XGBoost 模型, 蓝色代表 RF 模型

A: Relative importance contribution of different soil layers to yield prediction; B: Relative importance of soil nutrient indicators; OM: Organic matter; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; TK: Total potassium; AN: Alkali-hydrolyzable nitrogen; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium; Fe: Available iron; Mn: Available manganese; Cu: Available copper; Zn: Available zinc; C: Importance ranking of key limiting factors, in which the numeric suffix of each variable name indicates the corresponding soil layer depth (e.g., “AN_20-40” denotes alkali-hydrolyzable nitrogen in the 20-40 cm soil layer); D: Validation of model performance by fitting predicted values against measured values, where the dashed line represents the 1:1 reference line, the solid line represents the linear regression fit, the shaded area represents the 95% confidence interval, R^2 is the coefficient of determination, and RMSE is the root mean square error ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$). Orange and blue represent the XGBoost and RF models, respectively

图 6 基于 XGBoost 和 RF 的甘蔗产量预测模型性能比较及土壤驱动因子重要性

Fig. 6 Performance comparison of XGBoost and RF models for sugarcane yield prediction and importance of soil driving factors

地相比, 长期连作 (20 a) 后土壤 pH 均降至 4.60, 显著低于初始水平。这一趋势与长期化学氮肥施用引入大量 H^+ ^[10], 以及作物移除过程中盐基离子的持续耗竭密切相关^[9,34]。尤为重要的是, 笔者的研究发现酸化并非仅限于表层, 而是在整个 0—60 cm 的甘蔗根区内均有显著体现, 其中以 20—40 cm 亚表层的酸化幅度最为突出。

在酸化驱动下, 土壤养分库呈现表聚性与非均衡性。受限于 P、K 等元素较差的移动性及浅施习惯^[12], 大量养分滞留在 0—20 cm 表层, 但其垂直移动性差, 导致根系主要分布区 (20—40 cm) 的有效供应不足。

同时, IFI 随土层增加而下降, 量化了垂直方向上地力的系统性衰退。这与养分交互与拮抗理论相吻合, 在酸性环境下, 过量的活性 Mn、Fe 离子可能对作物产生毒害, 并抑制对 K、Ca、Mg 等必需元素的吸收^[35-36], 从而形成复杂的多重胁迫, 最终限制甘蔗生长发育。

3.2 土壤亚表层酸化及其对甘蔗产量的影响

本研究利用 XGBoost 与 RF 模型的交叉验证识别出 20—40 cm 土层的 pH 是预测影响甘蔗产量的最主要的因子, 这一发现揭示连作障碍中一个常被忽视的机制——酸化垂直迁移与亚表层富集。传统上, 土壤管理多聚焦于 0—20 cm 的耕作层。然而, 甘蔗作为深

根系作物, 其中后期水分和养分吸收极大地依赖于亚表层土壤环境^[12,36-38]。本研究结果表明, 长期连作导致的土壤酸化已向下游迁移, 严重破坏关键根区的生态功能。亚表层土壤的酸化可能通过多种机制加剧连作障碍。首先, 它直接损害根系的健康和功能, 抑制其向下深扎和吸收深层养分的能力, 使作物在干旱胁迫下更为脆弱。其次, 酸性环境会显著增加交换性铝 (Al^{3+}) 的浓度, 对根系产生直接毒害, 并降低磷、钼等元素的有效性^[35,39]。本研究中, 与酸化同步出现的有效锰在深层土壤的积累 (如 40—60 cm 土层在 > 35 a 时达 $76.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 进一步佐证了酸性条件下微量元素溶出带来的潜在毒害风险^[40]。因此, 20—40 cm 土层的酸化不仅仅是表层问题的延伸, 而是构成了一个独立的、更为隐蔽且危害巨大的限制层。忽视对这一土层的土壤改良, 可能是甘蔗单产提升缓慢的重要原因之一。

3.3 土壤综合肥力评价与产量演变的非协同关系及成因

尽管长期连作体系中基于化学指标计算的 IFI 呈现升高趋势, 但甘蔗产量却显著下降。本研究结果揭示这一“高肥力、低产出”非协同演变背后的生态学机制, 其本质是传统的化学评价体系掩盖了土壤生物有效性下降与环境胁迫加剧的真实状况^[41]。一方面, 长期单一施用化肥, 特别是磷肥, 其当季利用率通常低于 20%^[42]。大量未被利用的磷素会在表层土壤中累积, 被土壤矿物固定或形成难溶性磷酸盐^[43]。在化学测定时, 这部分累积的磷仍会计入速效磷或全磷总量, 从而在数字上显著提高 IFI 的计算结果。同样, 微量元素也可能因施肥或环境变化而累积。这种累积仅仅是元素在土壤库中的总量增加, 并不代表植物能有效吸收利用, 从而形成“高库存、低供给”的评价偏差。另一方面, 根据利比希最小因子定律, 作物产量并非由养分总分决定, 而是由最缺乏的限制因子决定^[44]。在本研究中, 通过机器学习模型识别出, 亚表层 (20—40 cm) 的强酸化是最主要的限制因子。说明无论表层土壤累积了多少 N、P、K (提高 IFI), 只要亚表层 pH 这一关键因子未被改善, 它就会对整个甘蔗生长发育过程形成抑制。极低的 pH 会直接毒害根系, 活化土壤中的铝离子 (Al^{3+}), 对根尖产生毒害作用, 抑制根系伸展和功能^[9]。

生物有效性的丧失与化学固定, 高 IFI 往往反映的是土壤养分的库容量, 而非植物可利用的有效性。在强酸性条件下, 大量的 P 被 Fe、Al 氧化物固定为

难溶性磷酸盐^[39]; 同时, 阳离子交换量 (CEC) 降低导致 Ca、Mg 等盐基离子淋失。因此, 即便化学分析显示的养分储量很高即较高的 IFI 值, 根系实际能吸收的有效性养分较低, 最终导致甘蔗产量下降。随连作年限的增加, 土壤酸化导致 Mn、Al 等金属元素的溶解度呈指数级增加, 致使在生理层面, 过量的 Mn^{2+} 和 Al^{3+} 对甘蔗根系具有强烈的细胞毒性^[9,38]。此时, 土壤化学指标的升高不再代表肥力的提升, 而是标志着化学胁迫的加剧。因此, 传统的 IFI 评价体系因缺乏对物理障碍、酸度阈值及离子毒害的加权考量, 在云南酸性红壤区存在显著的失真风险。

3.4 基于机器学习的表层钾素亏缺与亚表层酸化的协同限制效应及管理模式转变

除 pH 外, 模型识别出 0—20 cm 土层的速效钾是仅次于酸化的关键限制因子。这反映甘蔗作为典型喜钾作物与云南蔗区长期施钾肥不足之间的供需不匹配。在长期连作体系下, 土壤矿物钾的释放速率难以匹配作物的移除速率, 导致土壤速效钾库的逐年下降^[45]。表层钾素亏缺与亚表层酸化协同限制甘蔗产量的形成。一方面, 亚表层 (20—40 cm) 的酸化障碍限制甘蔗根系的下扎深度和广度, 迫使根系集中于土壤表层^[43]; 另一方面, 根系密集的表层土壤却面临严重的钾素亏缺, 直接限制作物的光合产物运输与糖分积累^[46]。钾素亏缺与亚表层酸化的协同负效应构成连作后期甘蔗产量呈非线性急剧下降的生理生态基础。

本研究应用 XGBoost 和 RF 模型, 克服传统统计方法在处理高维、非线性土壤数据时的局限^[18-20]。2 种算法均表现出卓越的预测性能, 并交叉验证 20—40 cm 土层 pH 的核心影响。这种一致性极大地增强本研究结论的可靠性。机器学习模型的优势在于其能够量化多个因子的相对贡献, 并从大量候选变量中精准识别关键限制因子^[20]。XGBoost 和 RF 模型均显示, 20—40 cm 土层 pH 的重要性远超其他土壤养分指标。这为未来甘蔗优化管理措施的制定和推广应用提供重要支撑。在资源有限的情况下, 阻控亚表层土壤酸化应成为缓解连作障碍最优先的干预因子。这种方法为未来精准挖掘甘蔗产量潜力提供理论依据。

4 结论

甘蔗长期连作易导致蔗地土壤养分表层富集、亚表层酸化的垂直分异。在 > 35 a 的连作周期下, 甘蔗产量衰退幅度达 13.68%, 土壤化学性质发生显著的垂直重构: (1) 0—20 cm 表层土壤虽出现有效磷、锌

等养分的富集, 但土壤速效钾库持续耗竭; (2) 土壤酸化随连作年限增加而向下迁移, 加剧 20—40 cm 亚表层酸化 (pH 均值降至 4.60), 构成制约甘蔗根系下扎的垂直障碍层; (3) 基于 XGBoost 和 RF 模型交叉验证, 亚表层土壤酸化对甘蔗产量的决定作用远超土壤表层 N、P、K 含量, 这揭示连作障碍的核心机制在于亚表层酸化限制深层甘蔗根系功能。因此, 破解甘蔗连作障碍的策略必须从单纯的表层 (0—20 cm) 养分平衡管理转向亚表层 (20—40 cm) 关键根区的酸化阻控与耕层构造协同优化。

参考文献 References

- [1] Wacławowski A J, Sato P M, Lembke C G, Moore P H, Souza G M. Sugarcane for bioenergy production: An assessment of yield and regulation of sucrose content [J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2010, 8(3): 263-276.
- [2] 李杨瑞. 现代甘蔗学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
Li Y R. Modern Sugarcane Science [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010. (in Chinese)
- [3] Garside A L, Smith, M A, Chapman L S, Hurney A P, Magarey R C. The yield plateau in the Australian sugar industry: 1970-1990[C]// *Proceedings of The Australian Society of Sugar Cane Technologists*. Townsville, Australia, 1994, 16: 27-35.
- [4] 吴静妮. 土壤理化性质与甘蔗连作障碍的相关性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
Wu J N. Study on effects of continuous cropping obstacle on growth of the sugarcane and the rhizosphere soil properties [D]. Nanning: Guangxi University, 2016. (in Chinese)
- [5] Tilman D, Cassman K G, Matson P A, Naylor R, Polasky S. Agricultural sustainability and intensive production practices [J]. *Nature*, 2002, 418(6898): 671-677.
- [6] Tayade A S, Ponnaiyan G, Shareef A. Integrated nutrient management in sugarcane[C]// *Recent Scientific Advances in Sugarcane Cultivation for Doubling Farmers Income*. New Delhi: Dilpreet Publishing House, 2022: 290-301.
- [7] 杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全. 连作对党参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(11): 6387-6398.
Yang Y, Li H L, Ma K L, Yu F F, Niu S Q. Effect of continuous cropping on the physicochemical properties, microbial activity, and community characteristics of the rhizosphere soil of *Codonopsis pilosula* [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(11): 6387-6398. (in Chinese)
- [8] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W, Vitousek P M, Zhang F S. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [9] Von Uexküll H R, Mutert E. Global extent, development and economic impact of acid soils [J]. *Plant and Soil*, 1995, 171(1): 1-15.
- [10] Chen Z C, Huang C F. Sustainable utilization of acid soils [J]. *Plant and Soil*, 2024, 504(1): 1-3.
- [11] Jobbágy E G, Jackson R B. The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants [J]. *Biogeochemistry*, 2001, 53(1): 51-77.
- [12] 卜明娜, 杨习文, 滕政凯, 胡乃月, 张烁, 王春艳, 杨键, 梁文宪, 马文奇, 贺德先, 周苏玫. 不同灌水条件下分层施肥对土壤养分垂直分布与小麦根系生长和功能的影响[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(11): 2125-2142. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2024.11.007.
Bu M N, Yang X W, Teng Z K, Hu N Y, Zhang S, Wang C Y, Yang J, Liang W X, Ma W Q, He D X, Zhou S M. Effects of layered fertilization under different irrigation conditions on vertical distribution of soil nutrients and root growth and function of wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(11): 2125-2142. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2024.11.007. (in Chinese)
- [13] 赵引, 李国安, 夏江宝, 薄丽媛, 毛晓敏. 覆膜和灌水量对制种玉米根系分布及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(15): 104-114.
Zhao Y, Li G A, Xia J B, Bo L Y, Mao X M. Effects of film mulching and irrigation amount on the root distribution and yield of seed-maize [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(15): 104-114. (in Chinese)
- [14] 匡自有, 王静梅, 杨绍林, 艾静, 王禹童, 张仲富, 李如丹, 邓军, 赵勇. 甘蔗及其近缘种蔗茅和割手密不同生长角度根系分布及宿根性分析[J]. *热带作物学报*, 2025, 46(3): 648-661.
Kuang Z Y, Dao J M, Yang S L, Ai J, Wang Y T, Zhang Z F, Li R D, Deng J, Zhao Y. Analysis of root distribution at different growth angles and Ra-tooning characteristic in sugarcane and its related germplasms *Erianthus arundinaceus* and *Saccharum spontaneum* [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2025, 46(3): 648-661. (in Chinese)
- [15] 罗俊, 林兆里, 阙友雄, 张华, 李诗燕, 罗会, 张才芳, 陈建峰. 不同耕整地方式对甘蔗耕层结构特性及产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(6): 824-836.
Luo J, Lin Z L, Que Y X, Zhang H, Li S Y, Luo H, Zhang C F, Chen J F. Effect of tillage mode on soil structure characteristics of plough layer and sugarcane yield [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(6): 824-836. (in Chinese)
- [16] Smith D M, Inman-Bamber N G, Thorburn P J. Growth and function of the sugarcane root system [J]. *Field Crops Research*, 2005, 92(2/3):

- 169-183.
- [17] 罗俊, 林兆里, 阙友雄, 李诗燕, 姚坤存, 姜永, 张华, 陈建峰. 耕作深度对蔗地土壤物理性状及甘蔗产量的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 405-412.
- Luo J, Lin Z L, Que Y X, Li S Y, Yao K C, Jiang Y, Zhang H, Chen J F. Effect of subsoiling depths on soil physical characters and sugarcane yield [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 405-412. (in Chinese)
- [18] Jeong J H, Resop J P, Mueller N D, Fleisher D H, Yun K, Butler E E, Timlin D J, Shim K M, Gerber J S, Reddy V R, Kim S H. Random forests for global and regional crop yield predictions [J]. PLoS ONE, 2016, 11(6): 1-15.
- [19] Heung B, Bulmer C E, Schmidt M G. Predictive soil parent material mapping at a regional-scale: A Random Forest approach [J]. Geoderma, 2014, 214/215: 141-154.
- [20] Chen T Q, Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system [C]//Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco California USA. ACM, 2016: 785-794.
- [21] Walker L R, Wardle D A, Bardgett R D, Clarkson B D. The use of chronosequences in studies of ecological succession and soil development [J]. Journal of Ecology, 2010, 98(4): 725-736.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [23] 骆东奇, 白洁, 谢德体. 论土壤肥力评价指标和方法[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 202-205.
- Luo D Q, Bai J, Xie D T. Research on evaluation norm and method of soil fertility [J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(2): 202-205. (in Chinese)
- [24] 陈均权, 马驰远, 胡鑫, 李朵, 郭艳琦, 刘灿, 周凯, 郑太辉. 有机无机肥配施调控红壤稻田土壤肥力、生态化学计量特征及产量[J]. 中国农业科学, 2025, 58(23): 4952-4965. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2025.23.011.
- Chen J Q, Ma C Y, Hu X, Li D, Guo Y Q, Liu C, Zhou K, Zheng T H. Effects of incorporation of inorganic-organic fertilizers on soil fertility, ecological stoichiometric characteristics, and yields of rice cropping system in the red soil region of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(23): 4952-4965. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2025.23.011. (in Chinese)
- [25] 郑立臣, 宇万太, 马强, 王永宝. 农田土壤肥力综合评价研究进展 [J]. 生态学报, 2004, 23(5): 156-161.
- Zheng L C, Yu W T, Ma Q, Wang Y B. Advances in the integrated evaluation of farmland fertility [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 156-161. (in Chinese)
- [26] 赵蛟, 徐梦洁, 庄舜尧, 林振清. 基于模糊综合评价法的建瓯市毛竹林地土壤肥力评价[J]. 土壤通报, 2018, 49(6): 1428-1435.
- Zhao J, Xu M J, Zhuang S Y, Lin Z Q. Evaluation of soil fertility of *Phyllostachys pubescens* forest in Jian'ou based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(6): 1428-1435. (in Chinese)
- [27] Qi Y B, Darilek J L, Huang B, Zhao Y C, Sun W X, Gu Z Q. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China [J]. Geoderma, 2009, 149(3/4): 325-334.
- [28] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 90(1): 25-45.
- [29] 王远鹏, 黄晶, 孙钰翔, 柳开楼, 周虎, 韩天富, 都江雪, 蒋先军, 陈金, 张会民. 近 35 年红壤稻区土壤肥力时空演变特征: 以进贤县为例[J]. 中国农业科学, 2020, 53(16): 3294-3306. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2020.16.008.
- Wang Y P, Huang J, Sun Y X, Liu K L, Zhou H, Han T F, Du J X, Jiang X J, Chen J, Zhang H M. Spatiotemporal variability characteristics of soil fertility in red soil paddy region in the past 35 years: A case study of Jinxian County [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(16): 3294-3306. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2020.16.008. (in Chinese)
- [30] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- National Soil Census Office. Chinese Soil [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998. (in Chinese)
- [31] Pang Z Q, Tayyab M, Kong C B, Liu Q, Liu Y M, Hu C H, Huang J W, Weng P Y, Islam W, Lin W X, Yuan Z N. Continuous sugarcane planting negatively impacts soil microbial community structure, soil fertility, and sugarcane agronomic parameters [J]. Microorganisms, 2021, 9(10): 2008.
- [32] Matson P A, Parton W J, Power A G, Swift M J. Agricultural intensification and ecosystem properties [J]. Science, 1997, 277(5325): 504-509.
- [33] 苏浩, 张锐澎, 吴思炫, 姚槐应, 李雅颖. 连作障碍产生机理及防控现状[J]. 土壤, 2024, 56(2): 242-254.
- Su H, Zhang R P, Wu S X, Yao H Y, Li Y Y. Mechanisms of continuous cropping obstacles and current situation of prevention and control [J]. Soils, 2024, 56(2): 242-254. (in Chinese)
- [34] 苏亚飞, 包文彬, 李彦生, 于镇华, 刘晓冰. 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, Yu Z H, Liu X B. A review of soil acidification: Principles, risk and mitigation measures in farmland [J]. Soils and Crops, 2025, 14(1): 1-14. (in Chinese)
- [35] 徐仁扣, 李科伟. 基于铝化学行为的土壤酸化与调控研究[J]. 土壤, 2025, 57(6): 1252-1261.
- Xu R K, Li K W. Researches on soil acidification and its regulation focusing on aluminum chemical behaviors [J]. Soils, 2025, 57(6): 1252-1261. (in Chinese)
- [36] Foy C D, Chaney R L, White M C. The physiology of metal toxicity in plants [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1978, 29: 511-566.
- [37] Boschiero B N, Mariano E, Torres-Dorante L O, Sattolo T M S, Otto R, Garcia P L, Dias C T S, Trivelin P C O. Nitrogen fertilizer effects on sugarcane growth, nutritional status, and productivity in tropical acid soils [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2020, 117(3): 367-382.
- [38] Holland J E, Bennett A E, Newton A C, White P J, McKenzie B M, George T S, Pakeman R J, Bailey J S, Fornara D A, Hayes R C. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review [J]. Science of the Total Environment, 2018, 610/611: 316-332.
- [39] Lovera L H, de Souza Z M, Esteban D A A, de Oliveira I N, Farhate C V V, de Souza Lima E, Panosso A R. Sugarcane root system: Variation over three cycles under different soil tillage systems and cover crops [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 208: 104866.
- [40] Kochian L V, Piñeros M A, Hoekenga O A. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity [J]. Plant and Soil, 2005, 274(1): 175-195.
- [41] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, Cui Z L, Ma W Q, Chen X P, Jiang R F. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- [42] Baligar V C, Fageria N K, He Z L. Nutrient use efficiency in plants [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2001, 32(7/8): 921-950.
- [43] Holford I C R. Soil phosphorus: Its measurement, and its uptake by plants [J]. Australian Journal of Soil Research, 1997, 35(2): 227-240.
- [44] 杨俐苹, 金继运, 自由路, 黄绍文, 程明芳. 土壤养分综合系统评价法与平衡施肥技术研究回顾与展望[J]. 中国农业科学, 2007, 40(增刊): 3156-3162.
- Yang L P, Jin J Y, Bai Y L, Huang S W, Cheng M F. Review and prospects of systematic evaluation of soil nutrient status and balanced fertilization technique [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(Suppl.): 3156-3162. (in Chinese)
- [45] Bokhtiar S, Sakurai K. Effects of organic manure and chemical fertilizer on soil fertility and productivity of plant and ratoon crops of sugarcane [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2005, 51(3): 325-334.
- [46] Marschner H. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants [M]. 3rd ed. London; Waltham, MA: Academic Press, 2012.

(责任编辑 李秋雨)