

# 鹰潭红壤站花生连作-肥料长期定位试验研究 30 年<sup>①</sup>

骆永明, 吴宇澄, 涂晨, 滕应, 刘五星, 王译, 李振高

(土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135)

**摘要:** 长期定位试验对探索农业可持续性和生态环境演化规律具有重要科学价值。位于中国科学院红壤生态实验站、从 1996 年开始的花生连作-肥料长期定位试验包括氮磷钾化肥处理(CF)、猪粪有机肥处理(PM)及相应的微量元素施肥处理等, 迄今已连续开展了 30 年。本文综合公开发表的文献, 从土壤理化性质变化趋势、花生连作障碍发生与防治、花生品质、土壤微生物群落响应、土壤环境质量、土壤健康评价等若干方面总结了该长期定位试验取得的主要研究进展, 并基于试验自身特点, 考虑到当前面临的全球变化、新污染物等挑战, 提出了花生连作-肥料长期试验的未来研究方向。

**关键词:** 花生连作; 施肥; 长期定位试验; 红壤; 土壤健康

中图分类号: S-3 文献标志码: A

## Thirty Years of Peanut Continuous Cropping-Fertilization Experiment at Yingtan Ecological Experimental Station of Red Soil

LUO Yongming, WU Yucheng, TU Chen, TENG Ying, LIU Wuxing, WANG Yi, LI Zhengao

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)

**Abstract:** Long-term field experiments are invaluable in exploration of agricultural sustainability and ecosystem evolution over a long period. The peanut continuous cropping-fertilization experiment, located at the Ecological Experimental Station of Red Soil, Chinese Academy of Sciences, was established in 1996 and has lasted for 30 years. The experiment comprises four treatments, i.e., chemical fertilizers alone (CF), combined CF and trace element fertilizers (CF-T), pig manure (PM), and combined PM and trace element fertilizers (PM-T). In this article, the advances obtained from the long-term experiment were summarized based on literature analysis. These were mainly associated with soil physicochemical properties, continuous cropping obstacle control, peanut quality, soil microbial responses, soil environment quality, and soil health assessment. In the future, the research should focus on topics in related to the experimental treatment as well as the ongoing global changes and emerging environmental problems.

**Key words:** Peanut continuous cropping; Fertilization; Long-term field experiment; Red soil; Soil health

花生是我国南方红壤地区重要的经济作物。据统计, 江西省花生播种面积在保持 18 万 hm<sup>2</sup> 左右的同时, 其单产已从 2000 年的 2 245 kg/hm<sup>2</sup> 增加到 2023 年的 3 170 kg/hm<sup>2</sup>, 总产量从 40.4 万 t 增长到 57.8 万 t<sup>[1]</sup>。同一土壤长期种植花生, 可能导致连作障碍, 表现为花生生长不良、病虫害发生、产量下降等, 严重影响花生种植经济效益。土壤理化性质恶化、化感自毒作用及土壤微生物区系失衡等可能是导致花生连作障碍的主要原因<sup>[2]</sup>, 其防治技术包括间套作其他作物、化学处理、培育抗病品种、施加生防菌剂等<sup>[3]</sup>。施肥在

提高花生产量、品质的同时, 也是缓解连作障碍及防治土传病害的重要手段<sup>[4]</sup>。但现有研究多依托发生障碍的大田或盆栽试验, 鲜有开展严格受控的红壤地区花生连作-肥料长期试验, 以帮助认识较长时间尺度下连作障碍机理、土壤质量演变规律及次生环境效应。

长期定位试验是研究农业生态系统长期演化趋势的重要手段<sup>[5]</sup>。著名的英国洛桑实验站运行超过百年的试验有 7 个, 对农田元素循环、生物多样性、作物病害、环境污染等领域的研究起到了重要的推动力

①基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42530717)资助。

作者简介: 骆永明(1962—), 男, 浙江义乌人, 博士, 研究员, 主要从事土壤环境与修复研究。E-mail: ymluo@issas.ac.cn

用<sup>[6]</sup>。20世纪八九十年代, 我国依托野外台站陆续开展了多个农业长期定位试验<sup>[7]</sup>, 其中位于中国科学院红壤生态实验站、于1996年开始的花生连作-肥料长期定位试验至今已连续开展30年, 在花生连作的成因和防治、长期施肥的土壤和生态效应、土壤环境质量演变等方面取得了一系列研究成果, 为红壤地区旱作农业的可持续发展提供了重要科技支撑。本文基于相关文献, 综合介绍了中国科学院红壤生态实验站30年花生连作-肥料长期定位试验所取得的科学发现, 并对未来的发展方向进行了展望。

## 1 花生连作-肥料长期定位试验概况

该长期定位试验位于中国科学院红壤生态实验站(鹰潭红壤站,  $116^{\circ}55'30''E$ ,  $28^{\circ}15'20''N$ )。该区属中亚热带, 气候温热多雨, 年平均气温 $17.6^{\circ}\text{C}$ , 年平均降水量1794.7 mm。站区土壤类型属于黏化-暗红富铝湿润富铁土(Argic-Rhodic Alliti-Udic Ferrosols), 在长期定位试验布设前是长有稀疏茅草和马尾松的荒地。

表 1 花生连作-肥料长期定位试验方案

Table 1 Design of peanut continuous cropping-fertilization experiment

试验处理	供试化肥种类和用量( $\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ )	供试猪粪有机肥用量( $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ )	供试微肥种类及用量( $\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ )
氮磷钾化肥(CF)	尿素 45; 钙镁磷肥 45; 氯化钾 135	-	-
氮磷钾化肥+微量元素(CF-T)	尿素 45; 钙镁磷肥 45; 氯化钾 135	-	硼砂 15; 钼酸铵 0.3; 硫酸锌 9
猪粪有机肥(PM)	钙镁磷肥 14; 氯化钾 45	1.69	-
猪粪有机肥+微量元素(PM-T)	钙镁磷肥 14; 氯化钾 45	1.69	硼砂 15; 钼酸铵 0.3; 硫酸锌 9

注: 在已发表文献中各试验处理的代号略有不同, 在本文中, 统一以CF代表氮磷钾化肥处理, PM代表猪粪有机肥处理。供试化肥均为市售化肥, 包括尿素(含N 460 g/kg)、钙镁磷肥(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 140 g/kg)、氯化钾(含K<sub>2</sub>O 600 g/kg)。供试猪粪有机肥从实验站周边养殖场收集, 猪粪用量以CF处理的等氮量折算; 因猪粪中磷和钾的含量较低, 另配施钙镁磷肥和氯化钾, 以使CF和PM处理中施入的氮、磷、钾总量保持一致。



图 1 鹰潭红壤站花生连作-肥料长期定位试验鸟瞰图

Fig. 1 A bird view of peanut continuous cropping-fertilization experiment at Yingtan Ecological Experimental Station of Red Soil

## 2 主要研究发现

### 2.1 土壤理化性质变化趋势

试验开始时(1996年4月), 土壤基础理化性质为: pH 3.90, 交换性总酸度 4.72 cmol/kg, 交换性氢含量 1.01 cmol/kg, 交换性铝含量 3.71 cmol/kg,

为保证试验地土壤的均质性, 在确定为长期试验点后, 对该区域的土地进行了开垦和平整(将底土层改为表土层)。

试验始于1996年, 每年种植一季花生, 4月中旬播种, 8月中旬收获, 冬季休闲。共设4个施肥处理: 氮磷钾化肥(CF)、氮磷钾化肥+微量元素(CF-T)、猪粪有机肥(PM)、猪粪有机肥+微量元素(PM-T), 具体施肥方案如表1所示。每个处理4个重复(小区), 每个小区的面积为30 m<sup>2</sup>, 各小区随机排列, 相互之间以混凝土保护带隔离(图1)。所有肥料在每年花生播种前作基肥一次性施入。花生品种为赣花5号, 常规田间管理包括查苗补种、中耕除草和水分管理等。每年8月花生收获后, 记录花生植株生物量和花生产量, 采集土壤样品开展常规理化分析并做长期保存。同时, 不定期开展花生品质、土壤微生物群落、土壤环境质量等方面的研究。由于并非所有研究都涉及微量元素处理, 本文主要介绍氮磷钾化肥(CF)和猪粪有机肥(PM)两个处理的对比及其进展。

土壤有机质含量 8.44 g/kg, 阳离子交换量(CEC) 9.95 cmol/kg, 全氮、全磷、全钾含量分别为 0.61、0.27、14.9 g/kg, 碱解氮含量 45.1 mg/kg, 有效磷含量低于检出限, 速效钾含量 93.2 mg/kg<sup>[8]</sup>。长期试验期间, 该旱地红壤的理化性质随着不同的施肥处理发生了明显变化(表2)。

表 2 长期花生连作-施肥对部分土壤性质的影响  
Table 2 Effects of peanut continuous cropping and fertilization on selected edaphic factors

土壤性质	1996 年	CF 处理			PM 处理		
		2005 年 <sup>[8]</sup>	2016 年 <sup>[8]</sup>	2023 年 <sup>[10]</sup>	2005 年 <sup>[8]</sup>	2016 年 <sup>[8]</sup>	2023 年 <sup>[10]</sup>
pH	3.90	4.91 ± 0.18	4.98 ± 0.16	5.16 ± 0.04	5.64 ± 0.26	5.98 ± 0.19	5.99 ± 0.12
有机质(g/kg)	8.44	15.6 ± 1.66	12.7 ± 1.66	13.7 ± 1.21	18.7 ± 0.51	13.4 ± 0.97	17.5 ± 0.61
全氮(g/kg)	0.61	0.90 ± 0.09	0.87 ± 0.09	0.83 ± 0.05	1.14 ± 0.09	0.94 ± 0.04	1.08 ± 0.02
全磷(g/kg)	0.27	0.41 ± 0.09	0.49 ± 0.05	0.53 ± 0.04	1.03 ± 0.07	1.24 ± 0.24	1.27 ± 0.03
全钾(g/kg)	14.9	12.3 ± 0.66	11.5 ± 1.07	14.0 ± 0.14	11.5 ± 0.35	13.4 ± 0.81	13.0 ± 0.77
CEC(cmol/kg)	9.95	11.8 *	-	10.5 ± 0.37	13.5 *	-	12.3 ± 0.26

注: \*表示 2008 年数据。

**2.1.1 酸度** 在最初数年, 土壤 pH 呈现快速上升的态势, CF 和 PM 两处理间开始出现显著差异<sup>[9]</sup>。连作 10 年后(2005 年), CF 与 PM 处理土壤 pH 分别为 4.91 和 5.64; 连作 21 年后(2016 年), CF 与 PM 处理分别为 4.98 和 5.98<sup>[8]</sup>; 连作 28 年后(2023 年), CF 与 PM 处理分别为 5.16 和 5.99<sup>[10]</sup>, 表明当前土壤 pH 已逐渐稳定。CF 处理中土壤 pH 的增加可能与钙镁磷肥施用有关, 而 PM 处理更高的 pH 主要与猪粪有机肥自身碱性性质有关(本试验中猪粪有机肥多年平均 pH 为 8.5)。此外, 连作 13 年后(2008 年)各处理的交换性酸, 尤其是交换性铝与初始土壤相比显著下降, PM 处理的下降幅度较 CF 处理更大<sup>[9]</sup>, 这印证了施用猪粪有机肥导致的有机质增加有降低交换性铝的作用。

**2.1.2 土壤有机质** 试验开展初期(1996—2006 年)土壤有机质含量快速提高<sup>[8]</sup>, 近年来含量相对稳定。连作 28 年后(2023 年), CF 和 PM 处理的土壤有机质含量分别为 13.7 和 17.5 g/kg<sup>[10]</sup>, 分别较 1996 年提高了 62% 和 107%, 充分体现有机肥提高土壤肥力水平的作用。Si 等<sup>[11]</sup>进一步分析了土壤有机质的组成, 发现 PM 处理更能增加土壤有机质中的活性有机碳组分(包括溶解性有机碳、微生物量生物量碳和易氧化有机碳)。

**2.1.3 阳离子交换量** 连作 13 年后(2008 年)CF 和 PM 处理的 CEC 分别为 11.8 和 13.5 cmol/kg<sup>[12]</sup>; 28 年后(2023 年)分别为 10.5 和 12.3 cmol/kg<sup>[10]</sup>。施用猪粪有机肥显著提高了土壤 CEC, 这可能与猪粪导致的土壤腐殖质积累有关。

**2.1.4 土壤养分** 花生连作有效提升土壤养分。王小兵等<sup>[12]</sup>分析了试验开展后 13 年(1996—2008 年)间土壤氮、磷、钾含量水平的变化, 发现 PM 处理土壤全氮、全磷含量快速提升, 而 CF 处理仅全氮含量有所增加。近 10 年来(2016 年至今), 土壤全量养分

变化幅度不大(表 2)。值得关注的是, 虽然 CF 和 PM 处理为等氮量施肥, 但连作 28 年后(2023 年), 两个处理的全氮含量出现了显著差异, 这可能是猪粪有机肥中主要以有机态氮为主, 较 CF 处理中的铵态氮肥更倾向于在土壤中积累所致。

土壤中的磷素可能是受长期连作和施肥影响最为明显的养分。试验过程中, 土壤全磷含量始终保持增长态势, 前期增长较快而后期趋缓。施用猪粪有机肥对土壤全磷及有效磷含量的影响极为明显<sup>[12]</sup>。2023 年, PM 处理全磷含量是 CF 处理的 2.4 倍<sup>[10]</sup>, 有效磷含量则达 CF 处理的 10 倍以上<sup>[13]</sup>, 说明猪粪有机肥导致的磷累积效应远高于无机肥。

## 2.2 花生连作障碍的发生与花生品质

试验开始后的前 5 季(1996—2000 年)花生产量呈波动中略有增长的趋势, 2000 年后产量逐年下降。1996 年首季, CF 和 PM 处理花生产量经折算后分别为 2.42 和 3.54 t/hm<sup>2</sup>。在第 17 季(2012 年), 两个处理的花生产量分别下降至 0.21 和 1.38 t/hm<sup>2</sup>, 远低于当年全省平均水平(2.79 t/hm<sup>2</sup>), 表现出较为明显的连作障碍<sup>[14]</sup>。但在试验期间, PM 处理花生产量始终高于 CF 处理。Chen 等<sup>[8]</sup>测定了连作 21 年后(2016 年)的花生产量, PM 处理每试验小区的产量约为 12 kg, 是 CF 处理的 2 倍, 显示出施用猪粪有机肥对改善连作障碍症状的效果。

王小兵等<sup>[15]</sup>研究了连作 12 年后花生发病规律并分离其病原菌, 结果表明, 所有处理下花生均有不同程度的病害, CF 处理小区花生生长至结荚期时发病率高达 68%, PM 处理发病率在 8% 左右。花生荚果产量与土传病害发病率之间的强负相关关系, 证实土传病害是花生连作障碍的主要因子<sup>[16]</sup>。青枯病是连作花生的主要病害, 其病原菌鉴定为青枯雷尔氏菌(*Ralstonia solanacearum*)。进一步研究发现, 花生根系分泌物中主要含有丙三醇、苯甲酸、3,5-二甲基苯

甲醛、苯乙酮、硬脂酸、棕榈酸和乳酸等 7 种物质, 其中苯乙酮的浓度对花生青枯病原菌有明显的调节作用<sup>[17]</sup>。王小兵等<sup>[18]</sup>还分离得到了 1 株花生茎秆内生细菌 *Bacillus amyloliquefaciens*, 其对青枯病的防治有一定效果。

施用猪粪有机肥有助于提高花生的营养价值。对连作第 17 年(2012 年)收获的花生进行分析, 发现 PM 处理具有更高的粗蛋白和粗脂肪含量, 分别较 CF 处理增加了 14.7% 和 2.6%。此外, 油酸与亚油酸的比值(O/L)是衡量油脂健康性和稳定性的重要指标, PM 处理小区花生的 O/L 为 1.68, 高于 CF 处理的 1.62, 具有更高的营养价值和更长的保存期限<sup>[14]</sup>。

但猪粪有机肥并不总有利于提高花生品质。对 2012 年收获的花生进行分析, 发现 PM 处理中花生仁 Cd 含量(2.92 mg/kg)是 CF 处理(0.55 mg/kg)的 5.3 倍<sup>[14]</sup>, 超过现行 GB 2762—2022《食品安全国家标准食品中污染物限量》<sup>[19]</sup>中规定的花生 0.5 mg/kg 的限值。PM 处理小区花生中较高的 Cd 含量与土壤中 Cd 的富集趋势(详见 2.4 部分)一致, 提示长期施用猪粪有机肥存在潜在的食品安全风险。

### 2.3 土壤微生物群落的响应

微生物是土壤生态系统的重要组成部分。长期定位试验对微生物群落的影响是土壤生态研究的热点。在本试验开展的 30 年间, 分子指纹图谱(如变性梯度凝胶电泳(DGGE)等)、高通量测序、组学等分析技术不断迭代, 推动了土壤微生物研究的深入开展。王小兵等<sup>[20]</sup>采用平板计数和 DGGE 方法对连作 13 年(2008 年)的花生根际土壤进行了分析, 发现 PM 处理花生根际的真菌数量较低, 而细菌和放线菌数量显著高于 CF 处理; 各处理中随着花生生育期进程推进青枯菌数量有所增加。Liu 等<sup>[21]</sup>和 Chen 等<sup>[8]</sup>分别采用焦磷酸测序和 MiSeq 测序技术对连作 17 年(2012 年)和 21 年(2016 年)的土壤细菌群落进行了解析。前者发现, PM 处理较 CF 处理有更高的细菌丰富度和多样性, 两个处理土壤中均以变形菌(Proteobacteria)、放线菌(Actinobacteria)等为优势菌门。后者发现施用猪粪有机肥降低了花生根际青枯病原菌 *Ralstonia* 的相对丰度, 而根际有益微生物丰度增加, 这可能是 PM 处理花生连作障碍得到缓解的原因之一。最近, 安文文<sup>[22]</sup>采用高通量 qPCR 芯片技术, 对连作 28 年(2023 年)土壤中微生物与碳、氮等元素循环有关的功能基因进行了分析, 发现施用猪粪有机肥显著促进了土壤中反硝化基因的相对丰度, 显示长期不同施肥对旱地红壤微生物功能潜力的影响。

### 2.4 土壤环境质量变化

近 30 年来, 农田土壤环境质量问题逐渐得到全社会的重视, 长期定位试验为研究环境污染物在农田土壤中的积累趋势提供了关键支持。依托本长期试验, 陆续开展了对重金属、微塑料等污染物分布和形态特征的研究, 以揭示不同施肥制度对旱地红壤环境质量的影响。

**2.4.1 重金属** Wang 等<sup>[14]</sup>分析了连作 17 年后(2012 年)土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 的含量, 发现 PM 处理中 Cu、Zn、Cd 的含量显著高于 CF 处理。这可能与猪粪含有一定量 Cd 有关(该年度施用猪粪中 Cd 含量为  $(7.91 \pm 0.06)$  mg/kg), 而相应化肥中的 Cd 含量均在 0.1 mg/kg 左右。Si 等<sup>[11]</sup>测定了连作 23 年后(2019 年)土壤中 Cd 的含量, 获得了相近的结果(CF 处理为  $(0.36 \pm 0.03)$  mg/kg, PM 处理为  $(1.52 \pm 0.09)$  mg/kg)。PM 处理土壤中 Cd 含量是 CF 处理的 4.2 倍, 远超农用地土壤风险筛选值( $0.3 \text{ mg/kg}$ ,  $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ )<sup>[23]</sup>, 距风险管制值( $2.0 \text{ mg/kg}$ ,  $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ )<sup>[23]</sup>已较为接近。进一步采用 BCR 连续提取法分析土壤中 Cd 的形态, 发现 PM 处理中弱酸提取态占比(F1,  $43.6\% \pm 2.73\%$ )较 CF 处理( $23.0\% \pm 1.66\%$ )大幅增加, 同时易氧化有机结合态(F3)总量也有所提高。这表明猪粪有机肥的长期输入一方面增加了土壤有效态 Cd 含量, 另一方面导致 Cd 的固持, 但总体上体现为 Cd 暴露风险的增加。

**2.4.2 微塑料** Yang 等<sup>[24]</sup>调查了连作 23 年(2018 年)土壤中微塑料的数量, 发现每千克施用猪粪有机肥的土壤含有  $43.8 \pm 16.2$  个微塑料颗粒, 远高于未施用猪粪土壤中的  $16.4 \pm 2.7$  个; 对比发现, 猪粪中含有  $1250 \pm 640$  个塑料颗粒, 土壤和猪粪中所含微塑料的类型和成分相似; 经计算, PM 处理土壤中微塑料平均积累速率是  $(3.50 \pm 1.71) \times 10^6$  个/(hm<sup>2</sup>·a)。这表明长期施用猪粪有机肥可能引发微塑料等新污染物的环境风险。

### 2.5 土壤健康状态评价

基于前述土壤数据, 可以评估花生长期连作后土壤的健康状况。Si 等<sup>[25]</sup>采用最小数据集方法, 根据 pH、有机质、全氮、全磷、碱解氮和有效磷 6 个参数进行评价, 发现长期连作下 PM 处理的土壤肥力健康指数为 0.747, 猪粪有机肥改善土壤肥力的效果较氮磷钾化肥(0.216)更为突出。另外, 采用修正的重金属潜在生态风险指数(mERI)方法进行评估, 发现土壤中 4 种重金属的潜在生态风险依次为 Cd > Cu > Pb > Zn; 不同施肥处理下, 后 3 种重金属的潜在生态风

险指数  $E_r^i$  均小于 40, 处于低污染水平; 但在 PM 处理土壤中 Cd 的  $E_r^i$  达到 174, 比 CF 处理土壤高出了 3.3 倍 ~ 4.0 倍, 表明长期施用猪粪处理土壤 Cd 已达到重污染水平<sup>[26]</sup>。

## 2.6 基于长期试验土壤样品的其他研究

多年的花生连作及施肥措施形成了两种性质不同的旱地红壤(表 2), 这些土壤样品可为研究农田土壤关键生态过程及机理提供重要支撑。例如, 安文文等<sup>[10]</sup>研究了 5 种红壤旱地常用除草剂对土壤细菌群落的影响, 发现 CF 处理土壤细菌群落的多样性和群落结构更易受除草剂影响, 而 PM 处理土壤细菌群落相对不敏感, 这可能与 PM 处理中较高的土壤有机质含量导致较强的吸附性能, 从而降低了除草剂的有效性有关。董攀月等<sup>[27]</sup>发现, CF 和 PM 处理两种土壤中除草剂阿特拉津的环境归趋存在差异, 调节土壤 pH 显著促进阿特拉津的生物降解。

## 3 花生连作–肥料长期定位试验的未来研究方向

生态系统的变化常常缓慢而微妙, 需要足够的时间才能显现出来, 设立长期定位试验的目的正在于此。随着社会环境的变化和认识的发展, 长期定位试验也可超越原有的主旨, 服务于新的科学问题<sup>[28]</sup>。如上文所述, 鹰潭红壤站花生连作–肥料长期定位试验 30 年来, 在连作障碍防治、红壤质量演变、生态环境效应等不同方面获得许多重要发现。试验的第 4 个 10 年即将开始, 需要在坚持原有方案的同时, 提出新的科学假设, 回答新的科学问题。建议未来在以下方面开展重点研究。

### 3.1 微量元素施肥的生态效应

酸性土壤中有效态钼含量偏低<sup>[29]</sup>。硼、锌等微量元素参与作物的正常生理过程。本长期试验设立了添加硼砂、硫酸锌、钼酸铵的处理, 为观测微量元素施肥的长期生态效应提供了关键支撑。当前已观察到土壤中相关微量元素含量(如钼)的增加, 其对作物养分摄取、土壤碳氮循环过程、微生物群落功能产生何种影响? 这些问题的解答可为客观评估南方红壤区微量元素施肥的综合效益提供科学依据。

### 3.2 红壤固碳潜力与机制

长期试验为研究农田土壤固碳潜力与速率提供了不可替代的资源<sup>[30]</sup>。长期花生连作与不同施肥已导致旱地红壤有机质的积累和微生物群落变化, 鉴于土壤微生物与固碳的紧密关系, 在 30 年不同强度碳

输入情况下, 旱地红壤有机质的积累趋势如何? 稳定性如何变化? 微生物、土壤矿物在土壤固碳中分别发挥什么作用? 这些问题的解答将为阐明南方旱地红壤有机质演化规律作出贡献。

### 3.3 传统与新污染物长期监测

许多土壤微宇宙研究发现, 与其他主要类型土壤相比, 红壤中有机污染物如多环芳烃<sup>[31]</sup>、除草剂<sup>[32]</sup>、抗生素<sup>[33]</sup>、微塑料<sup>[34]</sup>等降解速率缓慢, 可能出现更高的生态环境风险。前期数据表明, 花生连作–肥料定位试验 30 年后, 随猪粪有机肥输入的 Cd、抗生素/抗性基因、微塑料等已在土壤中发生积累。未来应依托现有试验, 通过持续监测、设立新试验等方式, 对这些传统或新污染物在旱地红壤田间条件下的环境行为、转化机制与风险效应等进行长期追踪与深入分析。

## 4 结语

运行超过 50 年的长期农业生态试验被认为是经典试验<sup>[4]</sup>。以此观之, 鹰潭红壤站花生连作–肥料长期定位试验仍有广阔的发展空间, 其价值仍待挖掘, 而科学理论和分析技术的进步将为科学新发现的产生提供持续动力。未来, 鹰潭红壤站花生连作–施肥长期定位试验应遵循长期试验一般性原则, 适时纳入时代变化因素, 为我国南方红壤区旱作农业及农业环境保护持续贡献科技力量。

## 参考文献:

- [1] 江西省统计局. 江西统计年鉴: 2024 [M/OL]. 北京: 中国统计出版社, 2024. <https://tjj.jiangxi.gov.cn/col/col38595/index.html>.
- [2] 滕应, 任文杰, 李振高, 等. 花生连作障碍发生机理研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 259–265.
- [3] 李孝刚, 张桃林, 王兴祥. 花生连作土壤障碍机制研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 266–271.
- [4] Chen D L, Wang X X, Zhang W, et al. Persistent organic fertilization reinforces soil-borne disease suppressiveness of rhizosphere bacterial community[J]. Plant and Soil, 2020, 452(1): 313–328.
- [5] Rasmussen P E, Goulding K W T, Brown J R, et al. Long-term agroecosystem experiments: Assessing agricultural sustainability and global change[J]. Science, 1998, 282(5390): 893–896.
- [6] 赵方杰. 洛桑试验站的长期定位试验: 简介及体会[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(5): 147–153.
- [7] 孙波, 朱兆良, 牛栋. 农田长期生态过程的长期试验研究进展与展望[J]. 土壤, 2007, 39(6): 849–854.
- [8] Chen W, Teng Y, Li Z G, et al. Mechanisms by which organic fertilizer and effective microbes mitigate peanut

- continuous cropping yield constraints in a red soil of South China[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 128: 23–34.
- [9] 王小兵, 骆永明, 李振高, 等. 长期定位施肥对亚热带丘陵地区红壤旱地质量的影响 I. 酸度[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 98–102.
- [10] 安文文, 杨中芹, 陈禹竹, 等. 5种除草剂对旱地红壤细菌群落的影响研究[J]. 生态与农村环境学报, 2025, 41(10): 1358–1366.
- [11] Si S C, Li Y, Tu C, et al. Responses of labile organic carbon and extractable cadmium fractions in an agricultural soil following long-term repeated application of pig manure and effective microbes[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2022, 109(2): 304–309.
- [12] 王小兵, 骆永明, 李振高, 等. 长期定位施肥对红壤旱地土壤有机质、养分和 CEC 的影响[J]. 江西农业学报, 2011, 23(10): 133–136.
- [13] 司绍诚, 涂晨, 吴宇澄, 等. 长期连续施用猪粪的旱地红壤肥力健康与花生产量研究[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(4): 480–487.
- [14] Wang X B, Liu W X, Li Z G, et al. Effects of long-term fertilizer applications on peanut yield and quality and plant and soil heavy metal accumulation[J]. Pedosphere, 2020, 30(4): 555–562.
- [15] 王小兵, 骆永明, 刘五星, 等. 红壤连作花生青枯病发病规律及病原菌分离[J]. 花生学报, 2010, 39(2): 6–10.
- [16] 王小兵, 骆永明, 李振高, 等. 长期定位施肥对红壤地区连作花生生物学性状和土传病害发生率的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 725–730.
- [17] 王小兵, 骆永明, 刘五星, 等. 花生根分泌物的鉴定及其化感作用[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2803–2808.
- [18] 王小兵, 骆永明, 刘五星, 等. 花生青枯病内生拮抗细菌的鉴定、抗菌活性及其田间防效[J]. 中国生物防治学报, 2011, 27(1): 88–92.
- [19] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [20] 王小兵, 骆永明, 刘五星, 等. 红壤连作花生不同生育期根际微生物区系变化研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2011, 32(4): 23–27, 38.
- [21] Liu W X, Wang Q L, Wang B Z, et al. Changes in the abundance and structure of bacterial communities under long-term fertilization treatments in a peanut monocropping system[J]. Plant and Soil, 2015, 395(1): 415–427.
- [22] 安文文. 除草剂对旱地红壤碳氮循环相关微生物的影响研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2025.
- [23] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [24] Yang J, Li R J, Zhou Q, et al. Abundance and morphology of microplastics in an agricultural soil following long-term repeated application of pig manure[J]. Environmental Pollution, 2021, 272: 116028.
- [25] Si S C, Wu Y C, Li Y, et al. Divergent soil health responses to long-term inorganic and organic fertilization management on subtropical upland red soil in China[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110486.
- [26] 司绍诚. 典型亚热带耕地和高寒草地土壤质量变化和健康评估研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
- [27] 董攀月, 陈禹竹, 曾军, 等. 不同施肥处理下旱地红壤中阿特拉津的环境归趋及其调控研究[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1201–1209.
- [28] Janzen H H. Long-term ecological sites: Musings on the future, as seen (dimly) from the past[J]. Global Change Biology, 2009, 15(11): 2770–2778.
- [29] 刘铮, 朱其清, 徐俊祥, 等. 中国土壤中钼的含量与分布规律[J]. 环境科学学报, 1990, 10(2): 132–137.
- [30] 赵永存, 徐胜祥, 王美艳, 等. 中国农田土壤固碳潜力与速率: 认识、挑战与研究建议[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 191–197.
- [31] Ren G D, Teng Y, Ren W J, et al. Pyrene dissipation potential varies with soil type and associated bacterial community changes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 103: 71–85.
- [32] 杨中芹, 陈禹竹, 饶雷振, 等. 三种农田土壤中阿特拉津矿化及细菌群落响应的比较研究[J]. 土壤学报, 2025, 62(6): 1711–1721.
- [33] Shen D H, Gu X, Zheng Y Y, et al. The fate of erythromycin in soils and its effect on soil microbial community structure[J]. Science of the Total Environment, 2022, 820: 153373.
- [34] Han Y J, Teng Y, Wang X, et al. Soil type driven change in microbial community affects poly(butylene adipate-co-terephthalate) degradation potential[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(8): 4648–4657.