杨文佳,马小晶,曹阳,等.不同有机肥对花生连作障碍的缓解效果及生态机制[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(5):60-69.
Yang W J, Ma X J, Cao Y, et al.Alleviation effects and ecological mechanisms of different organic fertilizers on peanut continuous cropping obstacles[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(5):60-69.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202507062

不同有机肥对花生连作障碍的缓解效果及生态机制

杨文佳[1],马小晶[2],曹阳[3*],金海锋[4*]

(1.中国农业大学 有机循环研究院(苏州),江苏 苏州 215100;2.中国农业大学 资源与环境学院,北京 100083;
3.西峡县农业农村局,河南 南阳 474550;4.西峡县西坪镇人民政府,河南 南阳 474591)

摘　要:[目的]本研究旨在探明连作障碍下不同有机肥在花生生产过程中的应用效果及机制。[方法]以河南省典型花生连作田块为研究对象,通过田间试验,设置不施肥(CK)、单施化肥(CF)、餐厨有机肥(KF)、鸡粪有机肥(JF)和猪粪有机肥(PF)5个处理,研究不同施肥措施对连作花生产量形成、病害发生、土壤理化性质、土壤酶活性及酚酸类自毒物质积累的影响。[结果]不同施肥处理对花生农艺性状和产量构成因素均产生显著影响,其中有机肥处理的主茎高、分枝数、单株荚果数、饱果数、百果重、百仁重均显著优于化肥和空白对照,PF和JF处理在提升花生产量方面表现突出,荚果产量分别较CK提高了39.4%和38.5%。施用有机肥显著降低了花生网斑病和褐斑病病情指数,以PF和JF处理的抑病效果最佳。土壤理化分析发现,有机肥显著提高了土壤pH与碱解氮、速效磷、速效钾及有机质含量,其中PF和JF处理效果更为明显,餐厨有机肥则在提高土壤有机质方面表现突出。施用有机肥后土壤中脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶活性均明显提高,PF处理各酶活性指标均为最高,脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶活性分别比CK提高了49.1%、40.1%、34.0%和20.6%。同时,有机肥显著降低了土壤中香草酸、阿魏酸和苯甲酸等自毒物质含量,PF和JF处理降幅最大,明显优于KF和CF处理。[结论]有机肥通过改善土壤理化性质、提升酶活性、抑制酚酸类物质积累及病害发生,多途径协同缓解花生连作障碍,其中猪粪和鸡粪有机肥综合效果最佳,值得在花生产区推广应用。

关键词:花生; 连作障碍; 有机肥; 产量; 土壤
中图分类号:S476　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)05-0060-10

Alleviation effects and ecological mechanisms of different organic fertilizers on peanut continuous cropping obstacles

Yang Wenjia[1], Ma Xiaojing[2], Cao Yang[3*], Jin Haifeng[4*]

(*1.Institute of Organic Recycling, China Agricultural University (Suzhou), Suzhou 215100, China; 2.College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3.Xixia County Agriculture and Rural Affairs Bureau, Nanyang 474550, China; 4.People's Government of Xiping Town, Xixia County, Nanyang 474591, China*)

Abstract: [Objectives] This study aimed to investigate the alleviating effects of different organic fertilizers on continuous cropping obstacles in peanut production and to explore the underlying ecological mechanisms. [Methods] A field experiment was conducted in a typical peanut continuous cropping field in Henan Province, China. Five treatments were established: no fertilizer (CK), chemical fertilizer alone (CF), kitchen waste organic fertilizer (KF), chicken manure organic fertilizer (JF), and pig manure organic fertilizer (PF). We assessed the effects of these treatments on peanut yield components, disease incidence, soil

收稿日期:2025-07-30　　**修回日期**:2025-09-17
基金项目:国家自然科学基金面上项目(32071552);江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BM2022006)
作者简介:杨文佳(ORCID: 0009-0003-3470-679X),硕士,农艺师,研究方向:有机废弃物资源化利用,E-mail: yangwenjia@slaas.cn
*通信作者:曹阳(ORCID:0009-0002-8052-5904),高级农艺师,E-mail:hncc_lmh@163.com;金海锋(ORCID:0003-0004-5785-1691),高级农艺师,E-mail:jinhfxx@163.com

physicochemical properties, soil enzyme activities, and the content of phenolic acid autotoxins. [Results]The fertilization treatments significantly influenced peanut agronomic traits and yield components. All organic fertilizer treatments resulted in significantly greater main stem height, number of branches, pods per plant, full pods per plant, 100-pod weight, and 100-kernel weight compared to the CF and CK treatments. The PF and JF treatments were particularly effective, increasing pod yield by 39.4% and 38.5%, respectively, compared to CK. Organic fertilizer application also significantly reduced the disease indices for peanut leaf spot and brown spot, with the PF and JF treatments showing the strongest disease suppression. Soil analysis revealed that organic fertilizers significantly enhanced soil pH, available nitrogen, phosphorus, potassium, and organic matter content. The PF and JF treatments were most effective in improving overall soil fertility, while the KF treatment was particularly effective in elevating soil organic matter. Furthermore, organic fertilizers significantly increased the activities of urease, acid phosphatase, catalase, and polyphenol oxidase. The PF treatment led to the highest activities for all enzymes, showing increases of 49.1%, 40.1%, 34.0%, and 20.6% over CK, respectively. Meanwhile, organic fertilizers significantly reduced the soil concentrations of the autotoxic phenolic acids vanillic acid, ferulic acid, and benzoic acid. The PF and JF treatments achieved the greatest reductions, outperforming the KF and CF treatments. [Conclusions]Organic fertilizers alleviated peanut continuous cropping obstacles through multiple pathways: improving soil physicochemical properties, enhancing enzyme activities, reducing phenolic acid accumulation, and suppressing disease incidence. Among the fertilizers tested, pig manure and chicken manure organic fertilizers exhibited the most comprehensive benefits and are recommended for widespread adoption in peanut production regions.

Keywords: Peanut, Continuous cropping obstacle, Organic fertilizer, Yield, Soil

花生连作障碍在生产中普遍存在,严重影响作物产量和品质[1]。长期连续种植导致植株矮小、结荚减少、荚果变小,产量显著下降[2],其根源在于土壤理化性状和生物学过程的退化。首先,养分失衡和地力衰退尤为突出。连续种植多年后,速效磷、速效钾及中微量元素显著减少,如4年连作后速效磷和钾含量分别下降53%和41%,硼、锌含量亦显著降低[3-4]。同时,土壤酶活性降低,养分循环受阻[5]。其次,连作破坏了土壤微生物平衡,有益菌减少、有害真菌滋生,进一步削弱土壤肥力和作物抗病性[6]。

除了养分和微生物因素外,酚酸类化感物质的积累被认为是连作障碍的重要机制。研究表明,花生连作土壤中对羟基苯甲酸、香草酸和香豆酸等物质随年限增加显著积累[7-8]。这些物质不仅抑制根系生长和酶活性,降低种子萌发率,还能破坏细胞膜,促进病原真菌入侵,加剧病害[6,9-10]。酚酸累积还会导致土壤酸化,为病原滋生创造条件。因而,化感作用与病害高发形成叠加效应,共同导致连作障碍。面对连作引发的土壤退化,传统依赖化学肥料的方式效果有限,甚至可能加剧问题。长期过量施肥会破坏团粒结构,造成板结和盐渍化,土壤有机质下降、有益菌受抑,抗病能力减弱[11-12]。相比之下,有机肥因含有丰富的有机质和有益微生物,可改善土壤理化性状,恢复微生物平衡,从而缓解连作障碍[13]。已有研究证实,有机肥能有效降低根部病害,提升花生产量[14]。因此,有机废弃物的肥料化利用不仅在养分补充方面具有优势,对恢复土壤健康和稳定产量具有战略意义。

近年来,国内外学者从不同角度探索花生连作障碍的成因与调控措施,逐渐形成共识:连作障碍是土壤理化退化与微生物失衡的耦合结果[15]。在防治措施上,一方面,轮作和休耕被证明能改善土壤养分和微生物群落,如花生-棉花轮作能有效抑制病原菌,显著提高产量[16]。另一方面,有机改良物料与微生物菌剂在田间应用也展现出良好效果。例如,施用腐植酸有机肥不仅改善理化性质,还能提升酶活性和微生物多样性,从而促进花生产量和品质提高[15]。短期定位试验表明,适当的土壤管理可逆转因连作导致的酶活性下降和真菌滋生[17]。此外,耐连作品种的选育、拮抗微生物的应用、生物炭和有机基质改良等措施也取得积极进展[14]。尽管已有不少探索,但仍存在不足:首先,不同类型有机肥对连作障碍的缓解效果缺乏系统比较,特别是长期作用机制和适用条件尚不明确;其次,连作土壤中有益微生物对不同有机营养源的响应,以及酚酸等自毒物质的降解过程尚缺乏深入研究。因此,本研究选择多种有机肥处理连作花生土壤,从产量、病害发生、酶活性、养分状况及酚酸累积等方面系统评估其缓解效果。通过比较不同有机肥的作用差异与机制,本研究旨在为花生连作障碍的防控提供新证据,并为有机

肥替代部分化肥、恢复土壤健康和保障稳产高产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试花生品种为鲁花14号,该品种属早熟直立大花生品种,生育期130 d左右,夏播100 d左右;疏枝型,株高35 cm左右,对花生网斑病(*Phoma arachidicola*)和褐斑病(*Cercospora arachidicola*)呈中度抗性。供试化肥由尿素、重过磷酸钙和氯化钾配制而成,供试有机肥均为商品有机肥,包括餐厨有机肥、猪粪有机肥和鸡粪有机肥。其中餐厨有机肥由中国农业大学有机循环研究院(苏州)提供,猪粪有机肥购自杭州萧山汇仁复合有机肥料有限公司,鸡粪有机肥购自南通生物有机肥有限公司。供试有机肥的基础养分信息如表1所示。

表1 供试肥料养分含量

Table 1 Basic information of different fertilizers

肥料种类 Fertilizer type	pH值 pH	全氮/% Total N	全磷/% Total P	全钾/% Total K	有机质/% Organic matter
餐厨有机肥 Kitchen waste organic fertilizer	4.56	2.58	0.48	0.40	94.43
猪粪有机肥 Pig manure organic fertilizer	8.90	2.91	1.17	2.14	49.96
鸡粪有机肥 Chicken manure organic fertilizer	8.74	3.20	0.22	1.32	60.00

1.2 试验地概况

试验地位于河南省南阳市西峡县西坪镇,属暖温带大陆性季风气候,年均气温15.1 ℃,年均降雨量830 mm,年均无霜期为236.2 d,年均日照2019 h。供试田块为长期连作花生地,连作年限已超10年。土壤质地为黄棕壤,基础理化性质为:pH 6.8、有机质11.2 g/kg、碱解氮64.3 mg/kg、速效磷18.7 mg/kg、速效钾105.2 mg/kg。

1.3 研究方法

试验于2024年4-8月开展,采用随机区组设计,共设5个处理,分别为不施肥(CK)、常规化肥(CF)、餐厨有机肥(KF)、猪粪有机肥(PF)和鸡粪有机肥(JF),每处理重复3次,每小区为1次重复。小区面积为30 m^2,区组间设1 m宽隔离带并埋设40 cm深防渗隔板,花生种植密度1.5×10^5穴/hm^2。常规化肥施用量为尿素260.9 kg/hm^2、重过磷酸钙204.5 kg/hm^2、氯化钾175.0 kg/hm^2,餐厨有机肥的施用量为4.65 t/hm^2,猪粪有机肥施用量为4.12 t/hm^2,鸡粪有机肥施用量为3.75 t/hm^2。所有肥料采用条施做底肥一次性施入,生育期间精细管理。

1.4 测定项目及调查方法

1.4.1 病害发生情况调查

在花生成熟期对花生网斑病与褐斑病的发生情况进行调查。调查操作于2024年8月24日上午8:00-10:00露水干后进行,避免环境湿度对病斑识别的干扰,每个小区随机采取10株花生调查其主茎上的全部叶片。病情按照发生严重程度分为5级[9],具体病情分级指标详见表2。利用花生叶部病害的分级数据计算不同施肥处理下的病情指数,计算公式为:

$$病情指数=\frac{\sum 各级病叶数\times 各级代表级值}{调查总叶数\times 最高级代表级值}$$

1.4.2 花生农艺性状调查

于2024年8月25日在每个小区中分别选取具

表2 花生网斑病和褐斑病分级标准

Table 2 Grading criteria for peanut web blotch and brown spot

病害分级 Disease scale	病情描述 Disease description	
	网斑病	褐斑病
0	叶片无病斑	叶片无病斑
1	病斑面积占叶面积≤5%	单叶病斑≤5个且直径<1 mm
2	5%<病斑面积占叶面积≤15%	病斑6~10个或部分直径1~2 mm
3	15%<病斑面积占叶面积≤25%	病斑>10个或直径>2 mm
4	25%<病斑面积占叶面积≤50%	病斑连片致叶损25%~50%
5	病斑面积占叶面积>50%	叶损>50%或叶片脱落

有代表性的植株10株,调查其单株分枝数,并利用钢尺测定每株植株的主茎高和第一侧枝长度。

1.4.3　产量及产量构成因素调查

以小区收获后全部风干荚果质量计产,产量指标进行室内考种,调查单株荚果数、单株饱果数、百果重和百仁重。

1.4.4　土壤性质测定

每小区选取长势均一的植株5株,抖落非根际土壤后,用无菌毛刷收集附着于根表0~4 mm的根际土,混合为1个样本。样品过2 mm筛后分装处理,其中新鲜土样保存于-40 ℃超低温冰箱用于微生物及酶活性检测;风干土样于阴凉避光处晾置7 d后研磨过100目筛,用于化学性质分析。

土壤pH和EC值采用电位法测定,有机质含量通过重铬酸钾外加热法消解测定,碱解氮、有效磷和速效钾含量分别利用碱解扩散法、碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法、乙酸铵浸提-火焰光度计法测定[18]。

脲酶活性测定以尿素为底物,称取1.00 g风干土样,于37 ℃下与缓冲尿素溶液共育24 h,通过靛酚蓝显色法测定生成的铵态氮浓度,结果以mg NH_4^+/g/h表示[14]。酸性磷酸酶活性以对硝基苯yl磷酸酯为底物,在37 ℃下反应1 h,采用比色法测定反应释放的对硝基苯酚含量,结果以mg PNP/g/h表示。过氧化氢酶活性以土壤分解H_2O_2所消耗的高锰酸钾体积为指标,采用$KMnO_4$滴定法计算反应速率,折算为mg $KMnO_4$/g/h。多酚氧化酶活性则以邻苯二酚为底物,在30 ℃条件下反应1 h后测定氧化产物的吸光值,以mg/g/h表示。所有测定均设3次重复,取平均值进行分析[7]。

土壤中香草酸、阿魏酸和苯甲酸的含量采用高效液相色谱法测定[9]。取风干并过100目筛的土壤样品2.00 g,加入25 mL体积分数为80%的甲醇-水混合溶液,在恒温振荡器中以180 r/min振荡提取2 h。提取液经8000 r/min离心10 min后,取上清液通过0.22 μm有机滤膜过滤,供上机分析。色谱分析采用Agilent 1260 Infinity II型高效液相色谱仪,配备C18反相色谱柱(250 mm × 4.6 mm,5 μm);流动相为甲醇和0.1%磷酸水溶液,采用梯度洗脱模式,流速1.0 mL/min,柱温30 ℃,检测波长280 nm,进样体积20 μL。通过对香草酸、阿魏酸和苯甲酸3种对照品配置系列标准溶液绘制标准曲线进行定量分析,测定结果以干土质量计,单位为mg/kg。

1.5　数据处理与分析

利用Excel 2019软件对原始数据进行统计,采用DPS 18.1软件通过邓肯新复极差法对数据进行单因素方差分析,图片绘制使用Origin 2025软件。

2　结果与分析

2.1　不同肥料对花生植株农艺性状的影响

由表3可见,施肥均显著改善了花生植株的农艺性状,且有机肥优于化肥。猪粪有机肥(PF)和鸡粪有机肥(JF)效果最显著,餐厨有机肥(KF)次之,化肥(CF)仅优于对照。在主茎高度上,PF和JF分别较CK提高23.3%和21.6%,KF提高14.2%,CF仅提高6.4%。分枝数改善更为明显,PF和JF相对于CK分别提升50.0%和46.0%,KF为32.6%,而CF仅16.7%。在第一侧枝长度方面,PF和JF增幅分别达38.7%和36.0%,其增幅高于KF的23.8%和CF的12.6%($P<0.05$)。

表3　不同肥料对花生植株农艺性状的影响

Table 3　Effects of different fertilizer on agronomic traits of peanut plants

处理 Treatments	主茎高/cm Main stem height	第一侧枝长/cm First lateral branch length	单株分枝数/个 Single plant branch number
CK	31.13±0.40d	13.03±0.21d	4.20±0.10d
CF	33.13±0.25c	14.67±0.15c	4.90±0.10c
KF	35.57±0.45b	16.13±0.25b	5.57±0.15b
JF	37.83±0.35a	17.73±0.15a	6.13±0.15a
PF	38.37±0.35a	18.07±0.15a	6.30±0.10a

注:同列不同小写字母代表差异显著($P<0.05$)。

Note:Different lowercase letters within the same column indicated significant differences ($P<0.05$).

2.2　不同肥料对花生产量及产量构成因素的影响

由表4可见,各施肥处理均显著提高了花生产量及其构成指标,其中有机肥效果最为突出。与CK相比,猪粪有机肥(PF)和鸡粪有机肥(JF)处理的单株荚果数和饱果数均提高40%以上,百果质量和百仁质量也分别提升14.3%和15.4%以

上,表现出显著的增产优势($P<0.05$)。餐厨有机肥(KF)增幅次之,单株荚果数和饱果数分别提高27.7%和30.2%,百果质量和百仁质量分别提高约10.4%和11.1%;化肥(CF)的改善作用最弱,各项指标的增幅仅5.7%~16.2%。在最终产量方面,PF和JF处理分别比CK增产39.4%和38.5%;KF提高27.6%,而CF仅为15.7%。总体来看,有机肥处理在产量构成因素和产量上均显著优于CF和CK,尤其是PF与JF表现最优,凸显了有机肥在提升花生产量方面的优势。

表4 不同肥料对花生产量及产量构成因素的影响

Table 4 Effects of different fertilizer on peanut yield and yield components

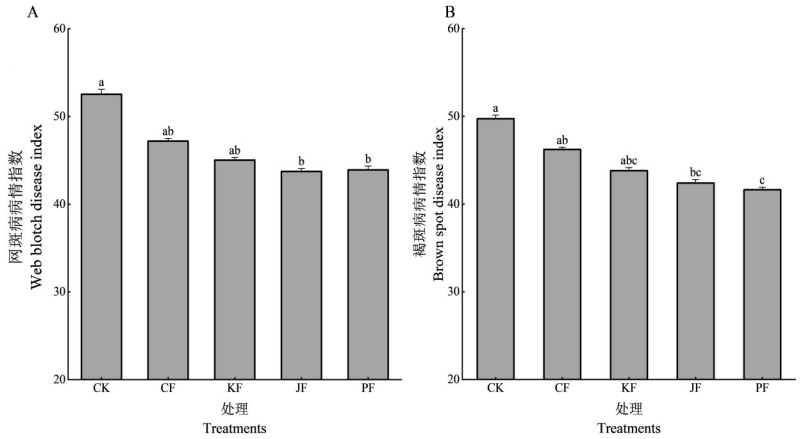
处理 Treatments	单株荚果数/个 Single plant pods	单株饱果数/个 Single plant plump	百果质量/g 100 pods weight	百仁质量/g 100 nuts weight	荚果产量/(kg/hm²) Yield
CK	21.20±0.25d	14.80±0.20d	127.77±0.25d	72.30±0.20d	2 098.01±12.64d
CF	24.63±0.31c	17.03±0.15c	135.00±0.21c	76.57±0.21c	2 428.25±14.69c
KF	27.07±0.25b	19.27±0.15b	141.03±0.25b	80.30±0.20b	2 676.34±10.42b
JF	30.03±0.25a	21.00±0.20a	146.03±0.15a	83.43±0.15a	2 905.77±8.40a
PF	30.33±0.21a	21.17±0.15a	146.23±0.21a	83.87±0.15a	2 923.93±7.33a

注:同一列不同小写字母代表差异显著($P<0.05$)。

Note:Different lowercase letters within the same column indicated significant differences ($P<0.05$).

2.3 不同肥料对花生叶部病害发生的影响

由图1可见,施用有机肥能够有效降低两种病害的病情指数,其中猪粪有机肥(PF)和鸡粪有机肥(JF)处理表现出最优的抑病效果。在网斑病发生方面(图1A),CK处理的病情指数显著高于其余各施肥处理($P<0.05$),说明在长期连作障碍背景下,未施肥条件下病害压力较大。相较而言,化肥处理(CF)的病情指数虽有一定降低,但与CK相比差异并不显著。餐厨有机肥(KF)处理的病情指数为44.1,比CF略低;而JF和PF处理的病情指数分别为43.10和41.83,显著低于CK和CF处理($P<0.05$)。褐斑病的发生趋势与网斑病基本一致(图1B)。CK处理的病情指数为49.1,CF处理为45.0,虽有所下降,但差异不大。KF处理为42.4,JF为41.5,而PF处理最低,仅为40.9,与CK相比下降16.6。KF、JF和PF处理间无显著差异,但均显著低于CK($P<0.05$)。



不同小写字母代表差异显著($P<0.05$)

Different lowercase letters indicated significant differences ($P<0.05$)

图1 不同肥料下花生网斑病和褐斑病病情指数

Fig.1 Effects of different fertilizers on disease indices of peanut web blotch and brown spot

2.4 不同肥料对土壤性质的影响

由表5可见,不同肥料均显著改善了土壤理化性质,其中有机肥整体优于化肥。土壤pH值在CK和KF处理下仍处于微酸性水平,而JF和PF

表5　不同肥料对土壤理化性质的影响

Table 5　Effects of different fertilizer application on soil properties

处理 Treatment	pH值 pH	EC/(mS/cm)	碱解氮/(mg/kg) Available N	有效磷/(mg/kg) Available P	速效钾/(mg/kg) Available K	有机质/(g/kg) Organic matter
CK	6.70±0.01c	0.28±0.01d	60.80±0.20e	18.13±0.15d	104.87±0.36cd	11.20±0.10d
CF	6.90±0.02bc	0.33±0.01c	67.87±0.36c	21.07±0.25ab	108.50±0.40bc	12.60±0.10c
KF	6.73±0.01c	0.30±0.01cd	65.00±0.30d	20.37±0.21bc	100.87±0.25d	17.20±0.10a
JF	7.18±0.03ab	0.39±0.01b	72.33±0.25a	19.43±0.21bc	114.23±0.30ab	15.87±0.15ab
PF	7.28±0.02a	0.43±0.01a	70.00±0.20b	22.50±0.20a	116.97±0.36a	15.00±0.10b

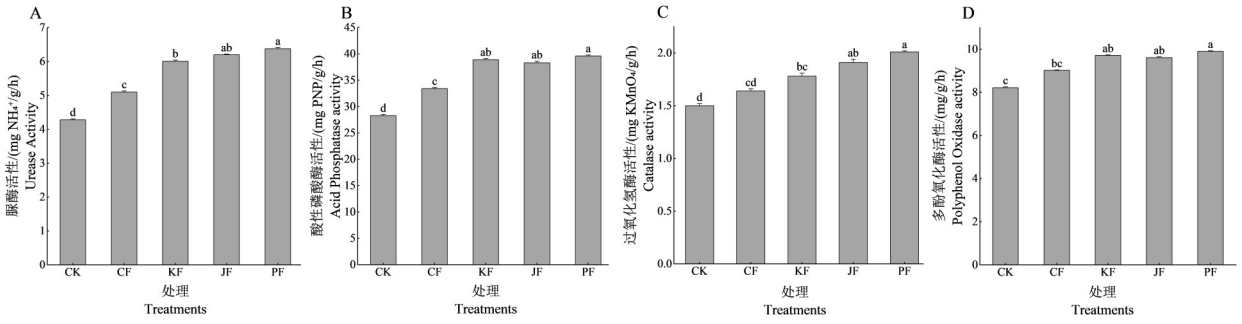
注:同列不同小写字母代表显著性差异($P<0.05$)。

Note:Different lowercase letters within the same column indicated significant differences ($P<0.05$).

显著提升至弱碱性水平,有利于改善酸化土壤。电导率(EC)在PF和JF处理中分别提高约53.6%和39.3%,虽显著高于CK($P<0.05$),但仍处于安全范围,说明畜禽粪肥能有效释放养分。在氮素供应方面,所有施肥处理均显著高于CK,其中JF增幅最大,约为19.0%,显示出增强土壤氮素积累的优势。有效磷在PF中最高,相对于CK提升了24.1%,表明猪粪在补磷方面效果突出,而JF较低,可能与其自身含磷量有关。速效钾含量则以PF和JF最佳,相对于CK分别提高11.7%和9.0%,显著高于CF和KF。在有机质方面,各处理均显著增加,其中KF提升幅度最大,为53.6%,JF和PF也显著优于CK和CF。

2.5　不同肥料对土壤酶活性的影响

从图2可以看出,不同施肥处理对土壤酶活性均产生了显著影响。在脲酶活性方面,与CK相比,化肥(CF)处理增幅达19.2%;KF、JF和PF处理脲酶活性进一步提高,相对于CK分别提高了40.4%、44.9%和49.1%。其中,PF处理显著高于其它所有处理($P<0.05$),JF与KF次之(图2A)。在酸性磷酸酶活性方面,CK处理下该酶活性最低,CF相对于CK提高了18.2%。KF、JF与PF均显著高于CK和CF($P<0.05$),增幅达37.7%~40.1%,其中PF处理略高于其余处理,表明其在促进有机磷转化方面更具优势(图2B)。施肥显著提升过氧化氢酶活性,KF、JF与PF处理相对CK分别提高18.7%、27.3%和34.0%。尤其有机肥处理表现出显著优势,表明其有助于提升土壤氧化还原稳态和微生物活力(图2C)。多酚氧化酶活性与酚酸类物质降解和抗病能力相关。本试验中,CK处理活性最低,KF、JF和PF处理较CK分别提高17.2%、17.0%和20.6%。其中,PF处理显著高于CK和CF,KF与JF表现接近,均显著优于化肥和对照(图2D)。



不同小写字母代表差异显著($P<0.05$)

Different lowercase letters indicated significant differences at ($P<0.05$)

图2　不同肥料对土壤酶活性的影响

Fig. 2　Effects of different fertilizer application on soil enzyme activities

2.6　不同肥料对土壤连作障碍特征因子的影响

从表6中可以看出,不同施肥处理显著影响了花生连作土壤中典型酚酸类自毒物质的积累水平。其中,香草酸含量在CK处理时最高,CF和

KF相对CK分别下降12.4%和25.8%;JF和PF较CK分别降低30.9%和34.0%($P<0.05$)。在阿魏酸含量方面,CK处理最高,CF处理与其他没有显著差异。而PF处理较CK降低了31.5%,JF和KF处理分别下降28.3%和22.0%($P<0.05$)。在苯甲酸含量方面,与CK相比,PF处理苯甲酸含量降低27.4%,JF降低24.5%,KF和CF则分别下降17.9%和10.4%。

表6 不同肥料对土壤酚酸类物质含量的影响

Table 6 Effects of different fertilizer application on soil phenolic acid contents **mg/kg**

处理 Treatments	香草酸 Vanillic acid	阿魏酸 Ferulic acid	苯甲酸 Benzoic acid
CK	0.97±0.02a	1.27±0.02a	1.06±0.02a
CF	0.85±0.02ab	1.11±0.02ab	0.95±0.01ab
KF	0.72±0.01bc	0.99±0.02b	0.87±0.02bc
JF	0.67±0.01c	0.91±0.01c	0.80±0.01c
PF	0.64±0.01c	0.87±0.01c	0.77±0.01c

注:同列不同小写字母代表显著性差异($P<0.05$)。

Note:Different lowercase letters within the same column indicated significant differences at ($P<0.05$).

3 讨论

花生长期连作会打破土壤原有的生物-化学循环平衡,导致土壤酸化、养分失调和微生物群落紊乱,作物生长受抑、产量和品质下降。本试验结果表明,施用不同种类有机肥均显著改善了连作花生的生长环境,与不施肥或单施化肥相比,有机肥处理显著提高了花生产量、降低叶部病害发生,并优化土壤理化和生物学特性。这些表观效果背后反映出有机肥在缓解连作障碍方面的多重机制共同作用,使连作土壤恢复更健康的生态平衡。

首先,有机肥提供了持续释放的养分和有机质,改善了连作土壤的肥力基础和花生植株营养状况,这是产量显著提升的直接原因之一。陈德乐等[19]研究发现,与只施化肥的连作处理相比,持续施用有机肥可明显缓解连作花生产量下降问题,在长期试验中甚至使第5季花生荚果产量提高约18.2%,接近轮作水平。充足而均衡的养分供应促进了花生的生长发育和根系养分吸收,也有利于根瘤固氮功能的发挥,从而增强连作花生的生长势和结荚能力[11]。张翔等[20]同样指出,在合理施用氮磷钾的基础上增施有机肥能显著提高连作花生产量,增幅可达8%~15%,不同类型有机肥料在增产效果上总体趋于一致,但因原料特性差异可能存在细微差别。例如,林新坚等[21]比较了猪粪、鸡粪和麸酸发酵有机肥,发现三者均显著增产,但以麸酸有机肥处理的花生产量最高,土壤中微生物总量也最大。这表明有机肥原料的养分含量和活性有机质组成可能会影响其培肥效果,但通常来讲有机肥的使用基本均能改善连作土壤的养分供给能力并促进花生生物产量提升。

有机肥施用还通过重建土壤微生物区系来抑制连作病害的发生。在本研究中,猪粪和鸡粪等畜禽粪源有机肥处理的网斑病、褐斑病病情指数显著降低,体现出优于化肥的生物抑病效果。这一现象源于有机肥促进了有益微生物在花生根际的繁殖定殖,形成了对病原菌的天然拮抗屏障[14]。连续施用有机肥能显著提高连作花生根际有益微生物的数量和多样性,其中放线菌、假单胞菌、芽孢杆菌等拮抗类群大量增加。这些微生物一方面通过竞争空间和养分抑制病原菌定殖,另一方面产生抗生物质和酶类直接拮抗病原,有效降低土传病害的侵染压力[22]。此外,有机肥改善植株营养状况和根际环境,使花生植株更健壮、抗病性增强,这也有助于降低病害发生[23]。

进一步分析,土壤理化性质的改善为上述增产和抑病效应提供了基础支撑。有机肥普遍显著提升了连作土壤有机质含量,并对土壤酸碱度和养分有效性产生积极影响。长期连作往往导致土壤有机碳匮乏和酸化,从而抑制有益微生物活性[14],而施用有机肥能够为土壤输入新鲜有机碳源,补充大量腐殖质,土壤pH值回升,中和了连作酸化趋势[19]。本研究中猪粪和鸡粪有机肥处理显著提高了土壤pH,这种土壤酸碱度的改善不仅有利于花生养分吸收,也创造了更有益微生物生长的环境。同时,有机肥释放的大量养分,如速效氮、磷、钾及微量元素等改善了连作土壤养分失衡状况,维持了养分动态平衡。土壤养分条件的优化使花生根系在连作土壤中依然能获得充足养分供应,并促进根瘤菌固氮作用,从而保障了植株健壮生长和高产。

土壤酶活性的显著提高是衡量土壤生物活力恢复和生态功能改善的重要标志[24]。有机肥处理

下连作土壤中的酶促反应加快,具体表现为脲酶、酸性磷酸酶等养分循环相关酶活性显著高于化肥处理。这表明有机肥促进了土壤中氮、磷的矿化和转化,加速养分周转供给植物利用[25]。过氧化氢酶活性的提高则反映土壤抗氧化能力增强,微生物代谢更为旺盛,土壤环境的氧化还原稳态得到维持。尤为关键的是,多酚氧化酶活性在有机肥施用后明显提升。这种酶与土壤中酚酸类等自毒物质的降解密切相关,也被认为与土壤抑病性提高有关。酶活性的普遍提高说明有机肥可能恢复了连作土壤中微生物的功能多样性和代谢潜力,各类养分循环和降解代谢过程得以加强。这种土壤生物学功能的重建对于打破连作障碍、恢复土壤健康具有决定性作用。

最后,有机肥在降低连作土壤自毒性物质累积方面发挥了独特的调控作用。花生连作土壤中常见的酚酸类化感物质,如香草酸、阿魏酸、苯甲酸等过量积累是导致连作障碍的重要机理之一。本研究中,不同有机肥处理均显著降低了这些酚酸的土壤残留含量,其中以猪粪和鸡粪有机肥处理的降幅最大。其机制在于有机肥输入大量异养微生物和酶促因子,加速了酚酸类物质的降解和转化。土壤微生物代谢被认为是决定酚酸物质在土壤中含量多少和持续时间长短的关键因素[26]。当土壤有机质丰富、微生物活跃时,酚酸在土壤中可被迅速降解,不致长期蓄积危害植物。有机肥料,尤其是腐熟粪肥,往往自带一批能够分解酚酸等有机毒物的功能微生物,它们进入土壤后大量繁殖,直接以这些酚类物质为碳源进行代谢,从源头上清除了自毒因子[24]。除了微生物直接降解外,有机肥提升的多酚氧化酶等酶系也参与了酚酸的氧化分解,使土壤中酚酸类物质难以积累到有毒水平。此外,土壤微生物区系的改善会影响植物根系的分泌行为。张国栋等[27]研究发现,添加富含微生物的有机物料能够改变连作植物根系的分泌物组成,降低其中自毒酚酸物质的含量。这意味着健康的土壤微生物环境不仅加速降解已有的自毒物质,还可通过植物-微生物反馈机制减少新自毒物质的产生。由此可见,有机肥通过多途径协同作用,大幅缓解了连作土壤中化感物质积累对花生根系的胁迫,为作物连作生长创造了更友好的化学环境。

由此可见,不同有机肥在缓解花生连作障碍方面展现出共性机制,即通过补充养分和有机质改良土壤肥力,并可能通过促进有益生物繁衍构建抑病微生物区系,增强酶活性和刺激降解过程来清除自毒物质,从而实现增产增效和病害抑制的综合效应。这与国内众多研究结论一致,即持续施用有机培肥措施可有效恢复连作土壤的健康状况,增强其养分供给和病害自防能力[19]。当然,不同类型的有机肥原料在作用效果上也存在一定差异。猪粪和鸡粪有机肥的氮、磷、钾等速效养分含量较高,能迅速改善土壤养分条件并促进花生生长,因此在增产和抑病方面效果更突出。而餐厨有机肥有机质含量较高,但矿质养分较少,短期内对产量提升作用相对有限,但在提高土壤有机质水平和改良土壤长期肥力方面更具优势。正如本研究中餐厨堆肥处理虽增产幅度略低于畜禽粪肥,但显著提高了土壤有机质含量,这体现了不同有机源在土壤改良上的侧重点差异。总体来看,各种有机肥都能不同程度地缓解连作障碍。对于特定土壤和作物,应根据限制因子的主次来选择适宜的有机肥源,例如养分失衡严重时侧重养分含量高的有机肥,病害突出时可选择含有功能微生物的生物有机肥等,以期发挥最佳修复功效。需要注意的是,作物种类和土壤条件不同可能导致有机肥作用表现不一,因此,在推广有机肥缓解连作障碍技术时,应结合具体生产条件进行优化调整。

需要指出的是,本研究主要基于一个生长季的田间试验结果,能够较好反映有机肥在短期内的作用效果,但对于其长期效应仍缺乏系统验证。后续工作有必要开展长期定位试验,并结合微生物群落分析和经济成本评估,以全面揭示不同有机肥在持续应用条件下的稳定性、可行性及推广潜力。

4　结论

本研究通过田间试验系统评估不同有机肥对连作花生产量、病害发生及土壤环境的影响。结果表明,餐厨有机肥在提高土壤有机质方面表现突出,猪粪和鸡粪有机肥更有利于提高花生产量,改善土壤理化性质和酶活性,降低网斑病和褐斑病发生程度,并显著减少土壤中香草酸、阿魏酸和

苯甲酸等自毒物质的积累,综合效应优于化肥处理和空白对照。

参 考 文 献

[1]李小雪,庄舜尧,刘明.过氧化物对连作花生土壤化学性质和微生物群落的影响[J].土壤,2025,57(1):132-140.
Li X X, Zhuang S Y, Liu M. Effects of peroxides on chemical properties and microbial communities of peanut continuous-cropping soils[J].Soils,2025,57(1):132-140.

[2]丁迪,刘涵,汪江涛,等.间作、轮作对连作花生植株生长、产量及品质的改善效应[J].华北农学报,2024,39(6):115-124.
Ding D, Liu H, Wang J T, et al. Improving effects of intercropping and rotation on plant growth, yield and quality of continuous cropping peanut [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2024,39(6):115-124.

[3]司贤宗,张翔,索炎炎,等.功能微生物对土壤理化性质及花生产量与品质的影响[J].花生学报,2024,53(4):58-65.
Si X Z, Zhang X, Suo Y Y, et al. Effect of functional microorganism on soil physical-chemical properties and peanut yield-quality[J]. Journal of Peanut Science,2024,53(4):58-65.

[4]张海楼,何志刚,于涛,等.微量元素对连作花生生长及产量的影响[J].河南农业科学,2014,43(1):44-47.
Zhang H L, He Z G, Yu T, et al. Effects of microelements on the growth and development and yield of continuous cropping peanut[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2014,43(1):44-47.

[5]张广彩,李菁,梁兆君,等.不同花生轮作模式对土壤酶活性的影响[J].花生学报,2024,53(3):21-27,41.
Zhang G C, Li J, Liang Z J, et al. The impact of different peanut crop rotation patterns on soil enzyme activity[J]. Journal of Peanut Science,2024,53(3):21-27,41.

[6]谢星光,陈晏,卜元卿,等.酚酸类物质的化感作用研究进展[J].生态学报,2014,34(22):6417-6428.
Xie X G, Chen Y, Bu Y Q, et al. A review of allelopathic researches on phenolic acids[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(22):6417-6428.

[7]田培聪,高洁,王趁,等.香草酸对花生植株生长、产量构成因素及根际土壤环境的影响[J].中国油料作物学报,2023,45(5):1006-1015.
Tian P C, Gao J, Wang C, et al. Effects of vanillic acid on growth and yield components of peanut and its rhizosphere soil [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2023,45(5):1006-1015.

[8]黄玉茜.花生连作障碍的效应及其作用机理研究[D].沈阳农业大学,2011.
Huang Y Q. Studies on Effects of Continuous Cropping Obstacle on Growth of Peanut and Its Mechanism[D].Shenyang Agricultural University ,2011.

[9]戴传超,张伟.有益微生物缓解花生连作障碍机理研究进展[J].微生物学杂志,2022,42(1):1-8.
Dai C C, Zhang W. Research progress on the beneficial microbe-mediated alleviation of peanut continuous cropping obstacle[J]. Journal of Microbiology,2022,42(1):1-8.

[10]张春杨,赵倩,刘红,等.微生物降解植物化感物质酚酸的研究进展[J].微生物学通报,2024,51(2):402-418.
Zhang C Y, Zhao Q, Liu H, et al. Research advances in microbial degradation of phenolic acids with allelopathic effects [J]. Microbiology China,2024,51(2):402-418.

[11]张勇勇,冯良山,赵凤艳.化肥有机替代对连作花生产量和根瘤固氮的影响[J].农业资源与环境学报,2024,41(3):539-548.
Zhang Y Y, Feng L S, Zhao F Y. Effects of organic fertilizer substituting chemical fertilizer on yield and nitrogen fixed by root nodules of continuous cropping peanut [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41 (3) : 539-548.

[12]程晓娇,王虎山,张智勇,等.有机肥部分替代化肥对不同土壤连作棉花根系的影响[J].棉花学报,2024,36(5):431-446.
Cheng X J, Wang H S, Zhang Z Y, et al. Effects of partial organic substitution for chemical fertilizer on the root system of cotton continuous cropping in different soil types[J]. Cotton Science,2024,36(5):431-446.

[13]刘欣宇,卢江,孟璇,等.不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析[J].环境科学,2023,44(8):4647-4654.
Liu X Y, Lu J, Meng X, et al. Analysis on change in soil organic carbon content of farmland in Yangtze River economic belt under different fertilizing measures [J]. Environmental Science,2023,44(8):4647-4654.

[14]刘金光,李孝刚,王兴祥.连续施用有机肥对连作花生根际微生物种群和酶活性的影响[J].土壤,2018,50(2):305-311.
Liu J G, Li X G, Wang X X. Effects of successive application of organic fertilizers on rhizosphere microbial populations and enzyme activities of monoculture peanut[J].Soils,2018,50(2):305-311.

[15]Li Y, Fang F, Wei J L, et al. Humic acid fertilizer improved soil properties and soil microbial diversity of continuous cropping peanut: a three-year experiment [J]. Scientific Reports,2019,9, 12014.

[16]Cui F Y, Li Q, Shang S T, et al. Effects of cotton peanut rotation on crop yield soil nutrients and microbial diversity[J]. Scientific Reports, 2024,14:28072.

[17]Yu T B, Hou X Q, Fang X Y, et al. Short-term continuous monocropping reduces peanut yield mainly via altering soil enzyme activity and fungal community [J]. Environmental Research, 2024,245:117977.

[18]鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000(3):22-113.
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis 3rd[M]. Beijing:China Agriculture Press,2000(3):22-113.

[19]陈德乐,王兴祥,张亚楠,等.持续施用生物有机肥对花生产量和根际细菌群落的影响[J].土壤,2021,53(3):537-544.
Chen D L, Wang X X, Zhang Y N, et al. Effect of persistent application of bioorganic fertilizer on peanut yield and rhizosphere bacterial community [J]. Soils, 2021, 53 (3) :

537-544.

[20]张翔,毛家伟,司贤宗,等.不同种类有机肥与钼肥配施对连作花生生长发育及产量、品质的影响[J].中国油料作物学报,2014,36(4):489-493.
Zhang X, Mao J W, Si X Z, et al. Effects of different organic fertilizer combined with molybdenum fertilizer on growth, yield and quality of peanut[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014,36(4):489-493.

[21]林新坚,王飞,蔡海松,等.不同有机肥源对土壤微生物生物量及花生产量的影响[J].中国生态农业学报,2009,17(2):235-238.
Lin X J, Wang F, Cai H S, et al. Effects of different organic fertilizers on soil microbial biomass and yield of peanut[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2009,17(2):235-238.

[22]刘佳琪,常瑞雪,李彦明,等.堆肥防治土传病害作用机理及其影响因素研究[J].中国环境科学,2023,43(2):722-734.
Liu J Q, Chang R X, Li Y M, et al. Research on mechanism and influencing factors of control soil-borne diseases by compost [J]. China Environmental Science,2023,43(2):722-734.

[23]夏桂敏,樊龙江,黄亚男,等.有机无机肥配施改善辽西北风沙区花生氮素积累、产量及品质[J].中国油料作物学报,2025,47(2):450-460.
Xia G M, Fan L J, Huang Y N, et al. Combined application of organic and inorganic fertilizers improve N accumulation, yield, and quality of peanut in the wind sand area of Northwestern Liaoning [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2025,47(2):450-460.

[24]王禹薇,封英建,田振泽,等.不同除草剂减量措施对玉米田土壤酶活性的影响[J].核农学报,2025,39(9):2049-2060.
Wang Y W, Feng Y J, Tian Z Z, et al. Effects of different herbicide reduction strategies on soil enzyme activity in maize fields[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2025, 39 (9):2049-2060.

[25]刘子楷,刘翠平,杨寒星,等.生物有机肥对沙化潮土玉米生长及土壤性状的影响[J].河南农业大学学报,2025,59(2):295-305.
Liu Z K, Liu C P, Yang H X, et al. Effects of bio-organic fertilizer on maize growth and soil properties in sandy tidal soil [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2025, 59(2): 295-305.

[26]谢勇俊,秦文连,周婧,等.火龙果连作土壤细菌多样性与酶活性对酚酸类代谢产物的响应特征[J].农业生物技术学报,2025,33(1):30-42.
Xie Y J, Qin W L, Zhou J, et al. Response characteristics of bacterial diversity and enzyme activity in continuous cropping soil of pitaya(*Hylocereus undatus*) to phenolic acid metabolites [J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2025, 33 (1): 30-42.

[27]张国栋,展星,李园园,等.有机物料发酵流体和堆肥对苹果连作土壤环境及平邑甜茶幼苗生物量的影响[J].生态学报,2015,35(11):3663-3673.
Zhang G D, Zhan X, Li Y Y, et al. Effects of anaerobic and aerobic fermentation of organic materials on continuous cropping soil environment and Malus hupehensis seedling biomass[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(11):3663-3673.

(编辑:马荣博)