

李燕培,王 静,林佳琦,等. 香蕉园间种甘薯对土壤物理性状和结构的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(5):205-211.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.05.033

香蕉园间种甘薯对土壤物理性状和结构的影响

李燕培,王 静,林佳琦,肖世祥,冯 斗,邓英毅,禰维言

(广西大学农学院,广西南宁 530005)

摘要:为揭示蕉园行间间种甘薯对土壤结构变化的影响,以及解决香蕉园多年连作单种产生的土壤结构差、保水保肥力下降等问题,以桂蕉 1 号为材料,设置香蕉与甘薯间种和香蕉单作 2 种不同的种植模式,通过测定土壤容重、孔隙度及团聚体稳定性等指标,比较分析蕉园间种甘薯对土壤结构的影响。结果表明,在 5 月至 9 月期间,与单作相比,蕉园间种甘薯可使土壤容重和固相组成降低,降幅分别为 3.28%~9.97%、1.24%~3.76%;使土壤孔隙度、土壤液相、气相占比升高,提升的幅度分别为 1.24~3.76、0.36~6.39、0.88~4.34 百分点;对于土壤团聚体的结构组成,间种甘薯促进了微团聚体向较大粒级的团聚体转化,使 $>2\text{ mm}$ 、 $0.25\sim2.00\text{ mm}$ 粒级的水稳定性团聚体含量增加,增幅分别为 1.15~13.01、0.60~21.69 百分点,同时使土壤 $0.053\sim<0.25\text{ mm}$ 、 $<0.053\text{ mm}$ 粒级的水稳性微团聚体含量下降,降幅分别为 1.78~22.47、0.24~1.17 百分点,因而使间种的土壤团聚体稳定性指标,土壤团聚体稳定率(W SAR)、 $R_{>0.25}$ 、平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)值等均显著高于单作,但团聚体破坏率(PAD)小于单作。研究结果表明,在蕉园行间间种甘薯可以提高土壤孔隙度,降低土壤容重,促进微团聚体向较大团聚体转变,具有显著提高土壤团聚体的稳定性以及改善土壤物理性状和结构的重要作用。

关键词:香蕉;甘薯;间作;土壤;物理性状;结构特性

中图分类号:S344.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)05-0205-07

香蕉(*Musanana* Lour.)是世界上贸易和交易量最大的几种水果之一^[1],主要分布在热带和亚热带的地区。中国是世界上第二大香蕉生产国,同时也是第一大香蕉消费国。在中国香蕉主要种植在广东省、广西壮族自治区、海南省、云南省等省区^[2],但是,近年来由于香蕉受枯萎病的严重危害,使香蕉种植业的可持续发展正遭受到毁灭性威胁,部分蕉园的枯萎病发病率达到 40%~80%^[3],严重的甚至超过 90%^[4]。香蕉枯萎病是一种土传性真菌病害,传播途径广泛,可以通过带病菌的土壤、雨水、劳作工具等传播蔓延^[5],受害植株幼龄期无明显症状,到成株期和抽蕾结实期,先从下部叶片边缘变黄向主脉扩展,叶片枯萎倒折在假茎旁,叶片由下到上相继发黄,直到顶叶死亡,最后全株枯死^[6-7]。

目前,传统的香蕉种植制度主要是常年连作单种,由此形成严重的连作问题,加之大量施用农药、化肥等^[8],造成土壤养分失衡、营养元素比例失调以及土壤理化性状下降、土壤容重及团聚体等结构恶化^[9];使土壤酸化^[10],植物自毒物质积累,土壤微生物多样性失调,病原微生物增加,病虫害发生加剧^[11]等问题。相关研究表明,轮作和间套作等种植模式对改善作物连作障碍和减轻土传病害发生有着重要的作用^[5],合理的间套作可以提高养分利用效率,改善土壤理化性质和质地结构,改善土壤微生物群落多样性,减少病虫害的发生^[12-13]。土壤团聚体是土壤结构的基本单位,是土壤的重要组成部分,影响着土壤各种物理和化学性质,在土壤中有“三大作用”,即保证和协调土壤的水肥气热、影响土壤酶的种类和活性、维持和稳定土壤疏松熟化层^[14]。土壤团聚体具有对外部环境的变化或者抵抗外力作用而保持其原有形态的能力,即为团聚体的稳定性,包括水稳定性、力学稳定性等。土壤团聚体稳定性是重要的物理性质^[15],影响着土壤水分、通气性、可蚀性等,从而影响作物的生长发育^[16]。不同的土地利用方式和类型影响着土壤团聚体的分布和稳定性、土壤孔隙度、土壤容重等物理性质和结构^[17-18]。相关

收稿日期:2021-10-31

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(编号:CARS-31);
广西创新驱动发展专项(桂科 AA18118028-8);广西壮族自治区
农业厅项目(编号:201401)。

作者简介:李燕培(1996—),男,广西贵港人,硕士研究生,主要从事
作物栽培技术与生理研究。E-mail:1274688649@qq.com。

通信作者:禰维言,博士,副教授,主要从事作物栽培生理与作物基因
工程研究。E-mail:xuanwy@gxu.edu.cn。

研究发现,玉米、大豆间作土壤团聚体平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)比单作和轮作分别提高了12%~36%、14%~39%^[19];在果园中种草和套种绿肥具有降低土壤容重、增加土壤孔隙度和改善土壤物理结构的作用^[20];玉米与马铃薯间作可以提高>2 mm和0.25~2.00 mm土壤团聚体比例,增强了土壤团聚体的稳定性^[21]。目前,对于蕉园间套种研究主要集中在对土壤肥力和微生物多样性方面的影响^[22-23],而对于蕉园土壤物理性质和结构的影响效应尚未见有研究报道。本研究通过在蕉园行间间种甘薯,旨在探明对土壤容重、土壤团聚体等物理性质和结构的影响效应,以期香蕉与甘薯间种模式的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试香蕉品种为桂蕉1号,甘薯品种为普薯32号。

1.2 试验实施

本试验于2020年1月至2021年9月期间进行,试验地位于广西壮族自治区崇左市扶绥县渠黎镇(107° 78'E, 22° 51'N),广西大学亚热带农科新城 CARS 国家香蕉产业技术体系试验示范基地。试验设置2个处理,香蕉单作和香蕉间种甘薯。香蕉种植株距2 m、行距为2.7 m,在间种处理的香蕉行间种植2行甘薯,甘薯株距为0.5 m、行距为1.0 m,每个处理的小区面积为81 m²,试验重复3次。香蕉田间管理与生产上的田间管理相同,按常规栽培措施进行施肥、灌溉和病虫害防治。

1.3 样品采集

分别与2021年5、6、7、8、9月在各处理小区采用随机取样的方法,进行土壤容重测定,采集0~20 cm土样约1 kg带回室内,将土块沿着自然结构轻轻剥开,使之成为10 mm的土块,除去动植物残体、石块和结核等,放置自然风干,用于土壤团聚体测定。土壤团聚体测定采用Elliott的方法^[24]。干筛法,称取100 g风干土,置于孔径依次为2、0.25、0.053 mm的筛套最上层,振荡10 min,收集各级筛上的土样并称质量,即获得>2 mm、0.25~2 mm、0.053~<0.25 mm、<0.053 mm的机械稳定性团聚体。湿筛法:根据各级干筛土壤团聚体比例配成50 g风干土样,将土样均匀铺撒在筛套最上层,筛套置于水桶中,在室温下浸润5 min,以30次/min和上下振幅3 cm在水中振荡2 min,将各级筛上的团聚体体

冲洗至烧杯中,即获得>2 mm、0.25~2 mm、0.053~<0.25 mm、<0.053 mm的水稳定性团聚体,将各级水稳定性团聚体烘干称质量。

1.4 测定项目与方法

土壤容重、土壤孔隙度、土壤三相比的计算公式如下^[25-27]:

$$(1) \rho = \frac{m \times 100}{V \times (100 + W)};$$

$$(2) f = 1 - \rho / \rho_s \times 100\%;$$

(3) 土壤三相比 = 固相:液相:气相 = (1 - 土壤孔隙度):(土壤重量含水量×容重):(土壤孔隙度 - 液相)。

式中: ρ 为土壤容重,g/cm³;m为环刀内湿土质量,g;V为环刀容积,cm³;W为环刀内土壤质量含水率,%;f为土壤孔隙度,%; ρ_s 为土壤比重,取2.65 g/cm³^[28]。

>0.25 mm团聚体含量($R_{>0.25}$)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、土壤团聚体破坏率(PAD)、土壤团聚体稳定率(WSAR)计算公式如下^[29-32]:

$$(4) R_{>0.25} = m_{>0.25} / m_T \times 100\%;$$

$$(5) MWD = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i \times W_i;$$

$$(6) GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right];$$

$$(7) PAD = (DR_{>0.25} - WR_{>0.25}) / DR_{>0.25} \times 100\%;$$

$$(8) WSAR = m_{WR_{>0.25}} / m_{DR_{>0.25}} \times 100\%。$$

式中: $m_{>0.25}$ 为大于0.25 mm团聚体质量,g; m_T 为各级团聚体总质量,g; \bar{X}_i 为各级团聚体的平均直径,mm; W_i 为各级团聚体的质量百分含量,%; $DR_{>0.25}$ 为干筛大于0.25 mm机械稳定性团聚体含量,%; $WR_{>0.25}$ 为湿筛大于0.25 mm水稳定性团聚体含量,%; $m_{WR_{>0.25}}$ 为湿筛大于0.25 mm机械稳定性团聚体重量; $m_{DR_{>0.25}}$ 为干筛大于0.25 mm水稳定性团聚体质量。

1.5 数据分析

测定数据采用Microsoft Excel 2010软件进行处理和作图,采用SPSS 26.0软件进行方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 蕉园间种甘薯对土壤容重及孔隙度的影响

土壤容重和孔隙度是衡量土壤质地和耕性特

点的重要指标,容重较小而孔隙度较大的土壤结构比较疏松,有利于作物根系生长和代谢活动。从表 1 可以看出,5—9 月期间,蕉园间种甘薯的土壤容重为 1.29 ~ 1.42 g/cm³,单作的土壤容重为 1.37 ~ 1.45 g/cm³,间种的土壤容重均小于单作,降幅为 3.28% ~9.97%,其中在 5、6 月,其差异达到显著或极显著水平,其余月份差异不显著;间种甘薯的土壤孔隙度为 46.44% ~51.51%,单作的为 45.21% ~48.29%,间种的土壤孔隙度较单作增幅为 1.24 ~3.76 百分点,其中在 5、6 月差异达到显著或极显著水平,其余月份差异未达显著水平。间种和单作处理在不同月份土壤的容重和孔隙度不同,其中在 7、8 月的土壤容重均大于其他月份,而在这 2 个月中的土壤孔隙度则是处于较低水平;间种的土壤孔隙度在 5、6、9 月均超过 50%,而在不同月份中单作的土壤孔隙度均小于 50%。结果表明,蕉园间种甘薯具有降低土壤容重和提高土壤孔隙度的良好效应。

表 1 蕉园间种甘薯对土壤容重及孔隙度的影响

月份	处理	容重 (g/cm ³)	孔隙度 (%)
5	间作	1.32b	50.16a
	单作	1.39a	47.49b
6	间作	1.32B	50.25A
	单作	1.42A	46.49B
7	间作	1.42a	46.44a
	单作	1.45a	45.21a
8	间作	1.38a	48.04a
	单作	1.43a	45.96a
9	间作	1.29a	51.51a
	单作	1.37a	48.29a

注:同列数据后不同小写、大写字母分别表示相同月份处理间差异显著($P<0.05$)、极显著($P<0.01$)。表 2 至表 5 同。

2.2 蕉园间种甘薯对土壤三相比的影响

土壤的固相、液相和气相等三相最优的比值为 2 : 1 : 1,三相比比例适宜,水与气协调有利于作物根系活动和对土壤养分的吸收利用;水气不协调如水多气少作物根系不能正常呼吸或水少气多作物根系不能吸收利用土壤中的养分均会抑制根系的正常发育^[33]。从表 2 可以看出,蕉园间种甘薯具有调整土壤三相比比例的作用,在 5—9 月期间,间种甘薯的土壤三相分别为 48.49% ~ 53.56%、31.65% ~39.73%、6.79% ~16.39%,单作的分别为 51.71% ~54.80%、28.09% ~39.30%、5.91% ~19.40%,间种的土壤固相较单作低,降幅为 1.24 ~3.76 百分点,其中

在 5、6 月间种和单作的土壤固相差异达到显著和极显著水平;在 5—8 月期间间种的土壤液相占比均比单作高,间种较单作的增幅为 0.36 ~6.39 百分点,而 9 月中间的种土壤液相占比低于单作,降幅为 1.12%,其中间种和单作之间土壤液相占比差异达到显著水平的只有 5 月,其余月份差异均未达显著水平;在 6—9 月中间种的土壤气相占比均高于单作,间种比单作增加的幅度为 0.88 ~4.34 百分点,而 5 月间作的土壤气相占比比较单作的低,但在 5—9 月期间不同月份中间种和单作的土壤气相占比差异均未达显著水平。除 5 月外,间种甘薯的蕉园土壤三相的比值均小于单作,更接近 2 : 1 : 1 的最适三相比,即水气更协调。

表 2 蕉园间种甘薯对土壤三相比的影响

月份	处理	土壤固相 (%)	土壤液相 (%)	土壤气相 (%)	三相比
5	间作	49.84b	34.47a	15.68a	3.18 : 2.20 : 1
	单作	52.51a	28.09b	19.40a	2.71 : 1.45 : 1
6	间作	49.75B	39.73a	10.52a	4.73 : 3.78 : 1
	单作	53.51A	38.85a	7.64a	7.00 : 5.09 : 1
7	间作	53.56a	39.66a	6.79a	7.89 : 5.84 : 1
	单作	54.80a	39.30a	5.91a	9.27 : 6.65 : 1
8	间作	51.96a	31.65a	16.39a	3.19 : 1.93 : 1
	单作	54.04a	30.48a	15.48a	3.49 : 1.97 : 1
9	间作	48.49a	35.66a	15.85a	3.06 : 2.25 : 1
	单作	51.71a	36.78a	11.51a	4.49 : 3.2 : 1

2.3 蕉园间种甘薯对土壤稳定性团聚体组成的影响

土壤团聚体的组成和性状是影响土壤结构和质地的重要因素,是评价土壤侵蚀、压实和板结等物理状态的主要指标。较大粒径的团聚体在改善土壤孔隙性、增强土壤通透性和抵抗土壤侵蚀等方面具有重要作用。土壤结构疏松、通气透水性能较好有助于作物根系生长活动^[33-34]。

蕉园行间间种甘薯对土壤不同粒级稳定性团聚体的组成有一定的调整作用。蕉园间种甘薯和单作的土壤稳定性团聚体粒径组成见表 3。在 5 月至 9 月期间,间种土壤 >2 mm 和 0.25 ~2 mm 粒级团聚体的占比分别为 56.45% ~64.89% 和 31.34% ~38.58%,单作的分别为 32.77% ~55.42% 和 36.21% ~54.45%,间种土壤 >2 mm 团聚体的组成占比各月均大于单作,间种较单作增加的增幅为 2.77 ~18.84 百分点,除 5 月外其差异均达到极显著水平,但间种的 0.25 ~2 mm 粒级团聚体的组成占

比各月均小于单作,间种较单作下降的降幅为 1.98 ~ 10.52 百分点,其中 6 月至 8 月二者之间的差异达到极显著或显著水平;在 0.053 ~ <0.25 mm 和 <0.053 mm 粒级组成方面,间种的组成占比分别为 3.46% ~ 6.91% 和 0.06% ~ 0.68%,单作的分别为 7.64% ~ 12.15% 和 0.34% ~ 1.13%,间种的均比单作的低,间种较单作下降的降幅分别为 0.74 ~ 8.59 百分点和 0.05 ~ 0.78 百分点,其中除了 5 月外间作和单作之间在 0.053 ~ <0.25 mm 粒级团聚体组成占比上的差异均达到显著或极显著水平,而在 <0.053 mm 粒级团聚体组成上的差异只有 8 月和 9 月的达到显著或极显著水平。结果表明,蕉园间种甘薯具有显著增加土壤 >2 mm 粒级稳定性团聚体的组成含量,减少 0.25 ~ 2 mm、0.053 ~ <0.25 mm 和 <0.053 mm 等粒级团聚体组成的作用,起到促进土壤微团聚体向大团聚体转化、明显改善土壤的通透性。

表 3 蕉园间种甘薯和单作不同粒级土壤稳定性团聚体的组成					
土壤稳定性团聚体的组成比例(%)					
月份	处理	>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.053 ~ <0.25 mm	<0.053 mm
5	间作	58.18a	34.23a	6.91a	0.68a
	单作	55.42a	36.21a	7.64a	0.73a
6	间作	62.46A	31.74B	5.64b	0.17a
	单作	49.73B	39.28A	10.72a	0.27a
7	间作	64.89A	31.34b	3.72B	0.06a
	单作	46.05B	41.85a	11.77A	0.34a
8	间作	56.45A	38.58b	4.62b	0.35b
	单作	43.09B	43.63a	12.15a	1.13a
9	间作	58.47A	37.62a	3.46B	0.15B
	单作	45.05B	42.18a	12.05A	0.47A

2.4 蕉园间种甘薯对土壤水稳定性团聚体组成的影响

土壤结构的好坏与土壤结构的大小、性状和肥力等特性相关,并与土壤结构的稳定性密切相关。土壤水稳性团聚体的组成是评价土壤结构的关键性指标之一^[35]。蕉园间种甘薯和不间种甘薯的单作土壤水稳定性团聚体粒径分布见表 4。在 5—9 月期间,蕉园间种甘薯土壤 >2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 粒级的水稳定性团聚体组成分别为 8.32% ~ 26.06% 和 54.09% ~ 64.33%,单作的分别为 7.17% ~ 21.56% 和 42.50% ~ 57.28%,与单作比较,6—9 月间种的土壤 >2 mm 粒级水稳定性团聚体的组成增幅为 1.15 ~ 13.01 百分点,差异达到显

著或极显著水平,除 6 月外在 0.25 ~ 2 mm 粒级的水稳定性团聚体组成上间种的均比单作的高,增幅为 0.60 ~ 21.69 百分点,其中在 5 月、7 月和 9 月其中的差异达到显著或极显著水平;在 0.053 ~ <0.25 mm 和 <0.053 mm 等粒级的水稳团聚体组成上,间种甘薯的占比分别为 17.85% ~ 23.38% 和 1.12% ~ 1.59%,单作的分别为 25.16% ~ 45.06% 和 1.22% ~ 2.65%,除 6 月外间种的均比单作的低,降幅分别为 1.78 ~ 22.47 百分点和 0.24 ~ 1.17 百分点,其差异除 5 月外均达到极显著或显著水平。结果显示,蕉园间种甘薯显著增加了土壤 >2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 粒级水稳定性团聚体的含量,降低了 0.053 ~ <0.25 mm 和 <0.053 mm 粒级的土壤水稳定性团聚体含量,具有促进土壤微团聚体向大团聚体转化,明显提高土壤 >0.25 mm 水稳性团聚体组成的作用。

表 4 蕉园间种甘薯和单作的土壤水稳定性团聚体组成					
		土壤水稳定性团聚体比例(%)			
月份	处理	>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.053 ~ <0.25 mm	<0.053 mm
5	间作	18.85b	56.29a	23.38a	1.48a
	单作	21.56a	51.55b	25.16a	1.72a
6	间作	26.06A	54.50a	17.85b	1.59a
	单作	14.74B	57.28a	26.76a	1.22b
7	间作	12.59a	64.33A	21.52B	1.57B
	单作	11.31b	50.33B	36.11A	2.25A
8	间作	24.76A	54.09a	19.74B	1.12B
	单作	11.76B	53.49a	32.46A	2.29A
9	间作	8.32a	64.19A	22.59B	1.72B
	单作	7.17b	42.50B	45.06A	2.65A

2.5 蕉园间种甘薯对土壤团聚体稳定性特征的影响

土壤团聚体的稳定性关系到土壤对环境的适应性和协调功能,是评价和衡量土壤抗蚀性能和土壤质量的重要因素^[36],其主要评价指标有土壤团聚体破坏率(PAD)、团聚体稳定率(W SAR)、>0.25 mm 粒径团聚体含量($R_{>0.25}$)、平均质量直径(MWD)及几何平均直径(GMD)等。从表 5 可以看出,5—9 月期间,间种土壤的 PAD 为 14.52% ~ 22.51%,小于单作的 19.05% ~ 41.77%,与单作相比,间作土壤 PAD 的月平均值降低了 28.36%,而且在 7—9 月期间其差异均达到显著或极显著水平;间种甘薯的土壤 W SAR、干筛和湿筛的 $R_{>0.25}$ 、MWD 与 GMD 等指标均大于单作,其中间种的 W SAR 月平均值比单作的增加了 14.63%,干筛和湿筛 $R_{>0.25}$ 的月平均值分

别比单作的提高了 7. 19% 和 21. 44% ,除 6 月 WSAR 外间种和单作其差异在 6—9 月中均达到显著或极显著水平;间种干筛和湿筛的 MWD 和 GMD 的月均值比单作的分别提高了 11. 96%、19. 71% 和 22. 59%、34. 80% ,除 5 月外不同月份的差异均达到

显著或极显著水平。因此,蕉园行间间种甘薯具有降低土壤团聚体的破坏率、提高土壤团聚体的稳定率、增加粒径 >0. 25 mm 团聚体含量和平均质量直径及其几何平均直径的显著效应,对于增强蕉园土壤团聚体的稳定性具有重要的作用。

表 5 间种和单作的土壤团聚体稳定性特征

月份	处理	PAD (%)	WSAR (%)	$R_{>0.25}$ (%)		MWD(mm)		GMD(mm)	
				干筛	湿筛	干筛	湿筛	干筛	湿筛
5	间作	18. 66a	39. 28a	92. 42a	75. 14a	1. 56a	1. 05a	1. 34a	0. 75a
	单作	20. 13a	37. 84a	91. 63a	73. 11a	1. 53a	1. 05a	1. 30a	0. 73a
6	间作	14. 52a	40. 89a	94. 19a	80. 55a	1. 61A	1. 16A	1. 43a	0. 87A
	单作	19. 05a	38. 87a	89. 01b	72. 01b	1. 45B	0. 98B	1. 20b	0. 69B
7	间作	20. 03b	38. 57a	96. 22A	76. 92A	1. 66A	1. 01A	1. 51A	0. 75A
	单作	29. 92a	33. 16b	87. 90B	61. 65B	1. 41B	0. 85B	1. 15B	0. 55B
8	间作	16. 79b	40. 05a	95. 03a	79. 08A	1. 57A	1. 13A	1. 40A	0. 84A
	单作	24. 55a	35. 68b	86. 72b	65. 25B	1. 37B	0. 89B	1. 09B	0. 59B
9	间作	22. 51B	36. 40A	96. 38A	74. 66A	1. 60A	0. 92A	1. 46A	0. 70A
	单作	41. 77A	26. 84B	87. 45B	50. 93B	1. 39B	0. 69B	1. 13B	0. 43B

2.6 蕉园间种和单作的土壤物理性状指标间的相关性分析

对于蕉园土壤不同粒级水稳性团聚体含量、水稳定性指标、物理性质之间的相关性进行分析发现, $R_{>0.25}$ 、>2mm 和 0. 25 ~ 2 mm 粒级水稳定性团聚体与 MWD、GMD、WSAR 呈极显著正相关,与 PAD 呈极显著负相关,0. 25 ~ 2 mm 粒级团聚体、 $R_{>0.25}$ 与土壤容重呈显著负相关,与土壤孔隙度呈显著正相关;0. 053 ~ <0. 25 mm、<0. 053 mm 粒级团聚体与 $R_{>0.25}$ 、MWD、GMD、WSAR 呈显著或极显著

负相关,与 PAD 呈显著或极显著正相关;MWD、GMD、WSAR 三者之间均呈极显著正相关,与 PAD 呈极显著负相关,0. 053 ~ <0. 25 mm 粒级团聚体与土壤容重呈显著正相关,与土壤孔隙度呈显著负相关; $R_{>0.25}$ 、GMD 与土壤孔隙度呈显著正相关,与土壤容重呈显著负相关(表 6)。因此,增加 >0. 25mm 粒级土壤团聚体的组成含量、降低 <0. 25mm 微团聚体的组成,在改良香蕉园土壤结构、降低容重增加土壤通透性能和提高土壤团聚体的稳定性等方面具有重要的作用效应。

表 6 湿筛条件下土壤物理性质指标相关性

项目	相关系数						
	$R_{>0.25}$	MWD	GMD	PAD	WSAR	容重	孔隙度
> 2 mm	0. 606 **	0. 838 **	0. 723 **	-0. 583 **	0. 561 **	-0. 077	0. 078
0. 25 ~ 2 mm	0. 768 **	0. 520 **	0. 649 **	-0. 754 **	0. 764 **	-0. 378 *	0. 378 *
0. 053 ~ <0. 25 mm	-0. 996 **	-0. 916 **	-0. 975 **	0. 950 **	-0. 936 **	0. 427 *	-0. 427 *
<0. 053 mm	-0. 705 **	-0. 710 **	-0. 699 **	0. 675 **	-0. 648 **	0. 268	-0. 269
$R_{>0.25}$		0. 935 **	0. 979 **	-0. 962 **	0. 948 **	-0. 407 *	0. 407 *
MWD			0. 970 **	-0. 910 **	0. 898 **	-0. 268	0. 268
GMD				-0. 936 **	0. 924 **	-0. 379 *	0. 379 *
PAD					-0. 991 **	0. 355	-0. 355
WSAR						-0. 303	0. 303

3 结论与讨论

本研究结果表明,与单作相比,蕉园间种甘薯可使土壤容重和固相组成降低,降幅分别为 3. 28 ~ 9. 97 百分点和 1. 24 ~ 3. 76 百分点;使土壤孔隙度、

土壤液相和气相占比升高,提升的幅度分别为 1. 24 ~ 3. 76、0. 36 ~ 6. 39、0. 88 ~ 4. 34 百分点;对于土壤团聚体的结构组成,间种甘薯促进了微团聚体向较大粒级的团聚体转化,使 > 2 mm 和 0. 25 ~ <2 mm 粒级的水稳定性团聚体含量增加,增幅分

别为 1.15 ~ 13.01 百分点和 0.60 ~ 21.69 百分点,同时使土壤 0.053 ~ <0.25 mm 和 <0.053 mm 粒级的水稳性微团聚体含量下降,降幅分别为 1.78 ~ 22.47、0.24 ~ 1.17 百分点,因而使间种的土壤团聚体稳定性指标 WSAR、 $R_{>0.25}$ 、MWD 和 GMD 等值均显著高于单作,但团聚体破坏率 PAD 小于单作。因此,在蕉园行间间种甘薯起到提高土壤的孔隙度,使土壤容重降低,促进微团聚体向较大团聚体转变的作用效应,具有显著提高土壤团聚体的稳定性以及改善土壤物理性状和结构的重要作用。

本研究结果与玉米和菜豆或大豆间作^[29,37]、柑橘和三叶草或黑麦草间作^[38]等的研究结果相似,均具有降低土壤容重和提高土壤团聚体稳定性的作用效应。土壤容重和土壤孔隙度是土壤结构的重要指标,土壤容重小,说明土壤比较疏松,通透性好^[38],并且土壤孔隙度大小对土壤的水分含量和保水性能具有重要影响,通常土壤孔隙度占比为 50% ~ 60% 比较适宜^[39];土壤三相比是反映土壤固、液、气是否协调的重要指标,三相比例适宜说明土壤的水气比较协调^[27]。蕉园的行间种植甘薯后其土壤容重和固相均小于单作,土壤孔隙度、液相和气相均大于单作,尤其是在夏季的 6—8 月期间作用效果更加显著,其原因是在夏季由于光照、温度和降水量均比春季和秋季大,甘薯茎叶生长较快、基本完全覆盖了蕉园的行间和株间,减少了强降水对表土层的冲刷和肥料的淋溶流失,更有利于香蕉根系的生长活动。

土壤结构和质地的好坏与土壤的团聚体组成、特性及其稳定性密切相关^[40]。通常土壤的 $R_{>0.25}$ 含量越高、MWD 和 GMD 越大,土壤团聚性越好,稳定性越高^[18];PAD 越低和 WSAR 越高,土壤结构越稳定,其抗侵蚀能力就越强^[30]。蕉园与甘薯间种后,土壤的 PAD 明显比单作的低,而 $R_{>0.25}$ 、MWD、GMD 和 WSAR 等均较单作的有显著提升,其主要原因是香蕉和甘薯 2 种作物根系相互作用,地下根系网络更加发达,土壤根系含量增加,其互相缠绕的固结作用使得土壤更加容易形成大团聚体^[41];发达的地下根系可以产生更加丰富的分泌物,增加了土壤碳源的种类和含量,为土壤微生物的繁殖活动提供良好的生长环境,使土壤微生物种群和数量增加,改善了土壤微生物的群落组成和结构^[42],使土壤微生物活动更加旺盛,分泌物质含量增加,并与真菌菌丝形成黏结网络^[43],这些均有利于土壤微团聚体向

大团聚体转变,从而增强了土壤团聚体的机械稳定性和水稳定性。南方夏季高温多雨,而且降水强度比较大,强降水对土壤表层冲刷严重,行间间种甘薯后,由于甘薯在夏季高温、多雨、强光照的条件下生长比较旺盛,发达的茎叶匍匐于地面,起到覆盖表土层、减少水土流失和土壤侵蚀的作用,减少了因雨水冲刷导致大团聚体向微团聚体的转变,具有增强土壤团聚体的稳定性及缓解集中雨水对土壤结构破坏的显著效应。此外,土壤有机质含量与土壤团聚体稳定性有着密切关系,通常土壤有机质含量越高,有机胶结物质越多,土壤团聚体稳定性就越强^[44],间作甘薯根茎叶枯萎腐烂后还田,增加了土壤腐殖质的含量,促进土壤团聚体颗粒有机质产生,并与微生物分泌物和矿物质形成新的团聚体核心,在土壤有机胶结物作用下形成大团聚体,使土壤大团聚体数量增加,从而提高了土壤团聚体的稳定性^[45],对于改良蕉园土壤结构具有显著效应。

前人也有在蕉园间种花生、大豆的研究报道^[22,46],但花生、大豆等作物的生物产量均比甘薯的低,而甘薯的茎叶和分枝均匍匐于地面生长,不会影响人和机械在田间进行其他劳动作业,因而甘薯作为蕉园间种作物比其他作物具有更多优势。

参考文献:

- [1] 胡小婵. 世界香蕉发展现状[J]. 世界热带农业信息, 2010(4): 7-11.
- [2] 李华平, 李云锋, 聂燕芳. 香蕉枯萎病的发生及防控研究现状[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 128-136.
- [3] 麦明晓, 黄惠琴, 鲍时翔. 香蕉镰刀菌枯萎病 4 号生理小种研究进展[J]. 中国生物防治, 2009, 25(增刊 1): 71-75.
- [4] Huang Y H, Wang R C, Li C H, et al. Control of *Fusarium* wilt in banana with Chinese leek[J]. European Journal of Plant Pathology, 2012, 134(1): 87-95.
- [5] 曾莉莎, 林威鹏, 吕顺, 等. 香蕉—甘蔗轮作模式防控香蕉枯萎病的持续效果与土壤微生态机理(I)[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(2): 257-266.
- [6] 王振中. 香蕉枯萎病及其防治研究进展[J]. 植物检疫, 2006, 20(3): 198-200.
- [7] 林时迟, 张绍升, 周乐峰, 等. 福建省香蕉枯萎病鉴定[J]. 福建农业大学学报, 2000, 29(4): 465-469.
- [8] 赵凤亮, 邹刚华, 单颖, 等. 香蕉园化肥施用现状、面源污染风险及其养分综合管理措施[J]. 热带作物学报, 2020, 41(11): 2346-2352.
- [9] 卢维宏, 张乃明, 包立, 等. 我国设施栽培连作障碍特征与成因及防治措施的研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(4): 651-658.
- [10] 李虹, 李汀贤, 赵凤亮, 等. 香蕉枯萎病发生区域土壤改良: 间作对热带土壤微生物区系和 pH 相关关系的影响[J]. 园艺与

- 种苗,2017,37(9):21-27.
- [11]侯 慧,董 坤,杨智仙,等. 连作障碍发生机理研究进展[J]. 土壤,2016,48(6):1068-1076.
- [12]苏本营,陈圣宾,李永庚,等. 间套作种植提升农田生态系统服务功能[J]. 生态学报,2013,33(14):4505-4514.
- [13]苏一诺,李孟滕,陈西文,等. 作物连作障碍及防控技术研究进展[J]. 黑龙江畜牧兽医,2019(9):44-48.
- [14]刘中良,宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报,2011,19(2):447-455.
- [15]王清奎,汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报,2005,36(3):415-421.
- [16]郭军玲,王虹艳,卢升高. 亚热带土壤团聚体测定方法的比较研究[J]. 土壤通报,2010,41(3):542-546.
- [17]卢金伟,李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究,2002,9(1):81-85.
- [18]李文龙,刘美英,李 雪,等. 植被恢复对采煤沉陷区土壤团聚体稳定性的影响[J/OL]. 煤炭科学技术,2021. (2021-05-21)[2021-09-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=MTKJ20210520002&uniplatform=NZKPT&v=hhPV5LJlyhbdUHfaOccXsQncqJlG6P8YU6EHlOuSPpCYr6PoYBZUU1-kdIvQRRa>.
- [19]Kihara J, Martius C, Bationo A, et al. Soil aggregation and total diversity of bacteria and fungi in various tillage systems of sub-humid and semi-arid Kenya[J]. Applied Soil Ecology,2012,58:12-20.
- [20]范光南,傅金辉,刘长全,等. 果园生草、套种绿肥对红壤幼龄果园土壤物理性状的影响[J]. 福建农业学报,1998,13(增刊1):95-99.
- [21]向 蕊,伊文博,赵 薇,等. 间作对土壤团聚体有机碳储量的影响及其氮调控效应[J]. 水土保持学报,2019,33(5):303-308.
- [22]吴宇佳,杨 春,雷 菲,等. 套种花生对香蕉园小气候和土壤理化性质的影响[J]. 福建农业学报,2020,35(3):337-343.
- [23]柳 影,丁文娟,曹 群,等. 套种韭菜配施生物有机肥对香蕉枯萎病及土壤微生物的影响[J]. 农业环境科学学报,2015,34(2):303-309.
- [24]Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1986,50(3):627-633.
- [25]江胜国. 国内土壤容重测定方法综述[J]. 湖北农业科学,2019,58(增刊2):82-86,91.
- [26]白 伟,孙占祥,张立祯,等. 耕层构造对土壤三相比和春玉米根系形态的影响[J]. 作物学报,2020,46(5):759-771.
- [27]郭海斌,冀保毅,王巧锋,等. 深耕与秸秆还田对不同质地土壤物理性状和作物产量的影响[J]. 河南农业大学学报,2014,48(4):505-511.
- [28]闫 雷,喇乐鹏,董天浩,等. 耕作方式对东北黑土坡耕地土壤物理性状及根系垂直分布的影响[J]. 农业工程学报,2021,37(1):125-132.
- [29]王 婷,王强学,李永梅,等. 玉米大豆间作对作物根系及土壤团聚体稳定性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2021,36(3):507-515.
- [30]张 宇,蒋代华,黄金兰,等. 粉垄耕作对赤红壤团聚体粒级分布和稳定性的影响[J]. 生态学杂志,2021,40(12):3922-3932.
- [31]谷 月,吴景贵. 施用有机物料对覆膜滴灌土壤团聚体及有机碳分布影响[J/OL]. 吉林农业大学学报,2021. (2021-05-12)[2021-09-08]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=JLNY20210511002&uniplatform=NZKPT&v=I5ES9GHA_QWAT3jT6gsfx5lHe70I5Cau8zP80a59wljqc9ZTlJFvxeTNzk11RaXz.
- [32]张玉铭,胡春胜,陈素英,等. 耕作与秸秆还田方式对碳氮在土壤团聚体中分布的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(9):1558-1570.
- [33]赵亚丽,刘卫玲,程思贤,等. 深松(耕)方式对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(13):2489-2503.
- [34]唐夫凯,崔 明,卢 琦,等. 喀斯特高原不同植被类型土壤团聚体稳定性及有机碳分布特征[C]//2015 海峡两岸水土保持学术研讨会论文集. 太原,2015:214-223.
- [35]聂文婷,胡 波. 土壤团聚体稳定性及其影响因素研究进展[C]//海峡两岸水土保持学术研讨会论文集. 武汉,2014:52-56.
- [36]李鉴霖,江长胜,郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学,2014,35(12):4695-4704.
- [37]张东昱,宋学林,何 斌,等. 不同种植模式对连作玉米土壤肥力及理化性状的影响[J]. 现代农业科技,2021(12):21-23.
- [38]付学琴,杨星鹏,陈登云,等. 南丰蜜橘果园生草栽培对土壤团聚体和有机碳特征及果实品质的影响[J]. 园艺学报,2020,47(10):1905-1916.
- [39]杨 博,屈忠义,孙慧慧,等. 粉垄耕作对河套灌区盐碱地土壤性质的影响[J]. 灌溉排水学报,2020,39(8):52-59.
- [40]路雨楠,徐殿斗,成杭新,等. 土壤团聚体中重金属富集特征研究进展[J]. 土壤通报,2014,45(4):1008-1013.
- [41]白录顺,范茂攀,王自林,等. 间作模式下玉米/大豆的根系特征及其与团聚体稳定性的关系[J]. 水土保持研究,2019,26(1):124-129.
- [42]宋亚娜,Marschner P,张福锁,等. 小麦/蚕豆、玉米/蚕豆和小麦/玉米间作对根际细菌群落结构的影响[J]. 生态学报,2006,26(7):2268-2274.
- [43]苑亚茹,韩晓增,李禄军,等. 低分子量根系分泌物对土壤微生物活性及团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(6):96-99.
- [44]陈津赛,孙玮皓,王广帅,等. 不同施氮量对麦田土壤水稳性团聚体和 N_2O 排放的影响[J]. 应用生态学报,2021,32(11):3961-3968.
- [45]杨 燕,张学鹏,宁堂原,等. 套作及秸秆还田对西兰花连作田土壤团聚体分布的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(S2):85-93.
- [46]匡石滋,张金妹,田世尧,等. 香蕉与大豆间作效应研究[J]. 广东农业科学,2011,38(7):63-65.