广东农业科学 2019，46（8）：86-96
Guangdong Agricultural Sciences doi：10.16768/j.issn.1004-874X.2019.08.012

刘文清，崔广娟，王芳，曾莉莎，吕顺，杜彩娴，范镇夷，黄秉智.香蕉-甘蔗轮作对土壤养分含量及酶活性的影响[J].广东农业科学，2019，46（8）：86-96.

香蕉-甘蔗轮作对土壤养分含量及酶活性的影响

刘文清[1]，崔广娟[1]，王 芳[1]，曾莉莎[1]，吕 顺[1]，杜彩娴[1]，范镇夷[1]，黄秉智[2]

（1.东莞市香蕉蔬菜研究所，广东 东莞 523061；
2.广东省农业科学院果树研究所，广东 广州 510640）

摘 要：【目的】研究香蕉与甘蔗轮作不同年限后，土壤养分含量和酶活性等指标的变化，从土壤养分层面探索香蕉-甘蔗轮作模式缓解连作障碍机制。【方法】设置两个田间试验，一是连作蕉地轮作甘蔗试验，包括连作多年的蕉地（CK）和连作蕉地轮作甘蔗1年（GZ1）、2年（GZ2）、3年（GZ3）4个处理；二是轮作甘蔗后回种香蕉试验，包括连作蕉地轮作甘蔗2年（GZ2）和轮作2年甘蔗后回植香蕉1年（XJ1）、2年（XJ2）、3年（XJ3）4个处理，测定不同年限养分含量和土壤酶活性等共24个指标。【结果】土壤pH值随着轮作甘蔗年限的增加呈现下降的趋势，随着回种香蕉年限的增加呈现增加的趋势；而土壤转化酶（Inv）、脲酶（Ure）、多酚氧化酶（PPO）、纤维素酶（Cel）等土壤酶活性和有效磷、有效钾、有效硫、有效硼等养分含量则相反，随着轮作甘蔗年限的增加呈现增加的趋势，回种香蕉后呈现下降的趋势；这些指标能较好地反映香蕉-甘蔗轮作过程中土壤质量变化。香蕉枯萎病发病率与土壤pH值呈正相关，与土壤酶中Cel活性与土壤养分中NO_3^--N、K、S、B含量呈负相关。轮作甘蔗可较好改善土壤质量，其中土壤Inv、Ure、PPO、Cel活性指标GZ2比CK显著升高，土壤养分NO_3^--N、P、K、S、B含量及Ca/Mg等指标GZ2比CK分别升高146.13%、18.61%、22.70%、45.48%、214.63%和37.64%；连作蕉地轮作甘蔗2年回种香蕉3年后，土壤质量严重恶化，其中土壤Inv、Ure、PPO、Cel活性指标XJ3比GZ2显著下降，NO_3^--N、S、Zn、B等养分含量指标XJ3比GZ2分别下降45.18%、38.97%、19.05%、72.09%，除Cel活性和AA含量及Ca/Mg指标外，其他指标低于或接近于CK水平。【结论】连作蕉地轮作甘蔗可以提高土壤酶活性和养分含量等改善土壤理化性状，从而缓解香蕉连作障碍；连作蕉地轮作甘蔗2年后土壤理化性状即可得到有效改善，轮作甘蔗2年后回种香蕉3年为宜。

关键词：香蕉；甘蔗；连作障碍；轮作；养分含量；土壤酶活性；枯萎病

中图分类号：S158.3；S344.1 **文献标志码**：A **文章编号**：1004-874X（2019）08-0086-11

Effect of Banana-SugarcaneRotation on Soil Nutrient Content and Enzyme Activity

LIU Wenqing[1], CUI Guangjuan[1], WANG Fang[1], ZENG Lisha[1], LU Shun[1],
DU Caixian[1], FAN Zhenyi[1], HUANG Bingzhi[2]

（1. *Dongguan Banana and Vegetable Institute, Dongguan* 523061，*China;*
2. *Institute of Fruit Ttree Research, Guangdong Academy of Agriculture Sciences, Guangzhou* 510640, *China*）

Abstract:【Objective】The experiment was conducted to explore the changes of soil nutrient contents and enzyme activities after different years of banana-sugarcane rotation and to explore the mechanism of banana-sugarcane rotation mode to alleviate continuous cropping obstacles from soil nutrient level.【Method】Two field trials were conducted to

收稿日期：2019-05-24
基金项目：东莞市社会科技发展项目（20185071011598, 2013108101043）；广东省科技计划项目（2012B020410005）；广东省现代农业产业技术体系创新团队建设专项资金；国家重点研发计划项目（2017YFD0202105）
作者简介：刘文清（1964—），男，硕士，高级农艺师，研究方向为香蕉蔬菜栽培，E-mail：lwq010101@sina.com
通信作者：吕顺（1971—），男，硕士，高级农艺师，研究方向为香蕉蔬菜病害防控，E-mail：shunlv@qq.com

determine a total of 24 indicators(including contents of nutrients and soil enzyme activities etc.) of different years. One was the experiment of sugarcane rotation in banana fields. There were four treatments:continuous cropping bananas for many years(CK), bananas monocropping-1 year of sugarcane rotation(GZ1), bananas monocropping-2 years of sugarcane rotation (GZ2), bananas monocropping-3 years of sugarcane rotation(GZ3). The other was the experiment of replanting bananas after sugarcane rotation. Four treatments were designed as follows 2 years of rotation(GZ2), GZ2-1 year of banana replanting(XJ1), GZ2-2 years of banana replanting(XJ2), GZ2-3 years of banana replanting(XJ3). 【Result】The soil pH value showed a decreasing trend with the increase of sugarcane rotation years , and an increasing trend with the increase of banana replanting years. The soil enzyme activities such as soil invertase(Inv), urease(Ure), polyphenol oxidase (PPO), cellulose(Cel), and the available phosphorus(P), available potassium(K), available sulphur(S) and available boron(B) tended to increase with the increase of sugarcane rotation years, and tended to decreased with the increase of bananare planting years. These indicators could better reflect the changes of soil quality during banana-sugarcane rotation. The incidence of banana wilt was positively correlated with soil pH, and negatively correlated with Cel activity, contents of NO_3^--N, K, S and B in the soil. Sugarcane Rotation could improve soil quality better. Comparing with the CK, the soil invertase, urease, polyphenol oxidase and cellulose activities increased significantly in GZ2, and the contents of NO_3^--N, P, K,S, B and Ca/Mg increased by 146.13%, 18.61%, 22.70%, 45.48%, 214.63% and 37.64%, respectively. After 2 years of rotation and 3 years of replanting banana, however, soil quality deteriorates severely. Comparing with the GZ2, the activities of Inv，Ure，PPO and Cel were significantly decreased in XJ3, the contents of NO_3^--N，S，Zn and B decreased by 45.18%, 38.97%, 19.05% and 72.09%, respectively. Except for Cel activity, AA content and Ca/Mg, other indicators were lower or close to those of CK. 【Conclusion】Sugarcane rotation of sugarcane in continuous cropping banana in fields can increase soil enzyme activity and nutrient contents and improve soil physical and chemical properties. Therefore, banana continuous cropping obstacles can be alleviated. The soil physical and chemical properties can be effectively improved after continuous cropping of sugarcane for 2 years. After sugarcane rotation for 2 years, then it is advisable to plant bananas for 3 years.

Key words：banana；sugarcane；continuous cropping obstacles；rotation；nutrient content；soil enzyme activity；Fusarium wilt

【研究意义】香蕉（*Musa* spp.）是芭蕉科芭蕉属草本植物，不仅是世界上最重要的水果之一，而且是一些发展中国家的主要食物来源，是仅次于水稻、小麦和玉米的世界第四大粮食作物[1]。据统计，2017 年全国香蕉种植面积 35.103 万 hm^2，香蕉产量达 1 116.98 万 t，占水果总产量的 4.43%[2]。但在香蕉生产中，由于长期连作种植，造成土壤质量退化，土壤营养元素失衡，土壤酶活性降低，作物生育期延长，产量降低，品质变差等连作障碍[3]；同时，由于土壤中病原菌不断积累，香蕉枯萎病等土传病害加重，严重制约了香蕉产业的发展[4]。

【前人研究进展】目前，已报道选用抗病品种或砧木、改善栽培制度（轮作）、生物防治、调节土壤 pH、增施有机肥或有机物料等多种克服连作障碍有效措施[5]，其中轮作是一种可以有效避免连作障碍的种植模式，可以增加生物多样性，维持土壤生境平衡，改善土壤肥力和土壤结构，提高土壤酶活性，减少虫害以及土传病害，提高作物产量等作用[6]。黄光荣[7]、阳显斌[8]研究表明蒜烟轮作烤烟根际土壤养分有效性升高，土壤酶活性增加，增加烟叶产量，改善烟叶质量；盖志佳等[9]发现大豆 - 玉米轮作提高了 0~30 cm 土层土壤养分含量；Laura 等[10]的试验同样证明了大豆与小麦轮作之后，显著增加了土壤中有机碳的含量；王涛等[11]研究表明不同作物轮作对土壤理化性质的影响和缓解连作障碍的效果不同；符建平等[12]试验了 5 种不同蔬菜轮作体系，其中葱 - 萝与番茄轮作处理积累的有机质和全氮最多，花椰菜与番茄轮作处理的速效养分含量最高；孙展新[13]研究表明，随棉花连作年限的增加，棉田土壤中总酚含量不断增加，棉花轮作小麦、苜蓿能够调节长期连作土壤中的酶活性，降低土壤的生物毒性，而以轮作小麦对土壤过氧化物酶活性和蔗糖酶活性影响较大，小麦轮作棉花处理中过氧化氢酶和脲酶活性最高，中性磷酸酶活性在棉花和苜蓿轮作处理中最高。而香蕉与韭菜、水稻、木薯、茄子、菠萝等作物轮作，均有效改善了土壤中的连作障碍[14-18]。其中香蕉 - 韭菜、香蕉 - 水稻水旱轮作对香蕉枯萎病防效最好，但

是韭菜、茄子等蔬菜作物市场需求量相对较小，且栽培模式与香蕉差异大，水稻、木薯效益较低，菠萝适宜种植区域窄，这些作物难以满足香蕉连片大规模生产，阻碍其大面积推广。

【本研究切入点】甘蔗是喜温喜光作物，也是华南地区广泛种植的农作物之一，与香蕉种植模式相近，且需求量大，种植经济效益较好，适合规模化生产。据清代屈大均著的《广东新语》记载："增城之西洲，人多种蕉，种至三四年，即尽伐以种白蔗。白蔗得种蕉地，益繁盛甜美。而白蔗种至二年，又复种蕉"[19]。文中记载的香蕉与甘蔗轮作模式，为种植香蕉 3~4 年后再轮作甘蔗 2 年再复种香蕉，周而复始。前期的研究表明[20-21]，该轮作模式对香蕉枯萎病有良好的控制效果，香蕉 – 甘蔗轮作可调控土壤中酸杆菌目、假单胞菌目和土壤红杆菌目等特定种类细菌的变化，降低病原尖孢镰刀菌数量，从而减轻香蕉枯萎病的发生，结合此结果，本研究试图探明香蕉 – 甘蔗轮作后土壤养分含量、根系分泌自毒物质和土壤酶类活性的变化。【拟解决的关键问题】研究连作蕉地轮作甘蔗不同年限及回种不同年限的香蕉后，土壤养分元素和酶活性的变化，进一步从土壤养分层面探索香蕉 – 甘蔗轮作模式缓解连作障碍机制，为建立合理的香蕉轮作体系提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

田间试验位于广东省东莞市沙田镇中围村（113° 9′ E，23° 8′ N），该地属南亚热带季风气候，光照时间长，雨量充足，地势以冲积平原为主，土壤质地为轻黏壤土且较疏松，土层深厚，有机质丰富。供试甘蔗品种为广东黄皮果蔗；香蕉品种为农科 1 号，该品种为广州市农业科学研究院选育的中抗香蕉枯萎病品种。

1.2 试验方法

试验一：连作蕉地轮作甘蔗试验，与曾莉莎等[20]的研究为同一试验。即在东莞沙田选择连片香蕉地，分别种植多年香蕉后轮作 1~3 年甘蔗，包括连作香蕉多年(CK)、多年连作香蕉地 – 轮作甘蔗 1 年(GZ1)、多年连作香蕉地 – 轮作甘蔗 2 年（GZ2）、多年连作香蕉地 – 轮作甘蔗 3 年（GZ3）4 个处理。

试验二：连作蕉地轮作甘蔗后回植香蕉试验，与林威鹏等[21]的研究为同一试验。即在东莞沙田连片香蕉地，连作多年香蕉轮作甘蔗 2 年后回种 1~3 年香蕉，包括香蕉连作地 – 轮作甘蔗 2 年（GZ2）、香蕉连作地 – 轮作甘蔗 2 年 – 回种农科 1 号 1 年（XJ1）、香蕉连作地 – 轮作甘蔗 2 年 – 回种农科 1 号 2 年（XJ2）、香蕉连作地 – 轮作甘蔗 2 年 – 回种农科 1 号 3 年（XJ3）4 个处理。

每个处理 3 次重复，随机区组排列，每个处理小区长 50 m、宽 5 m，面积 250 m^2，小区之间由畦沟分隔开。

栽培方式：香蕉高畦深沟，双行种植，行距 2.6 m，株距 2.4 m，畦面宽 4.5 m，畦深 0.7 m，沟宽 0.5 m，常规方法种植管理。甘蔗每米植蔗沟约种 12 个芽，每公顷有效茎约 75 000 条，以品字形或双轨窄幅排放，种茎与土壤紧贴，芽向排向两侧。种前施足基肥，常规方法种植管理。

1.3 土壤样品采集及测定

2013 年 10 月在香蕉抽蕾挂果期（甘蔗收获期），于试验地每个小区内采用五点取样法取样，在距植株 20~30 cm 的根围，采表层 0~20 cm 土壤（去掉 0~5 cm 的表土），室内风干过筛备用。

土壤样品送到中国农业科学院测试，采用 ASI[22-23]方法测定土壤的 pH 值、有机质（OM）、交换性酸（AA）、铵态氮（NH_4^+–N）、硝态氮（NO_3^-–N）、总氮（N）、交换性钙（Ca）、交换性镁（Mg），有效磷（P）、有效钾（K）、有效硫（S）、有效铁（Fe）、有效铜（Cu）、有效锰（Mn）、有效锌（Zn）、有效硼（B）。

土壤含水量测定参照 GB7172–87。土壤中总酚酸（Phenolic acid，PHA）含量测定采用磷钼酸 – 磷钨酸盐比色法[24]。土壤酶活性测定方法按照李振高的方法[25]，其中过氧化氢酶（Catalase，CAT）采用高锰酸钾滴定法，多酚氧化酶（Polyphenol oxidase，PPO）采用没食子素比色法，转化酶（Invertase，Inv）采用硫代硫酸钠比色法、脲酶（Urease，Ure）采用比色法、碱性磷酸酶（Alkaline phosphatase，ALP）采用比色法、纤维素分解酶（Cellulase，Cel）采用比色法。

试验数据采用 EXCEL2003、SPSS21.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 香蕉地轮作甘蔗不同年限后土壤养分含量和酶活性的变化

2.1.1 香蕉地轮作甘蔗不同年限后养分含量、pH和交换性酸的变化 由图 1 可知，连作蕉地轮作甘蔗 1 年后土壤部分养分含量发生较剧烈变化。其中轮作甘蔗 1 年的土壤（GZ1）与多年连作的香蕉地（CK）相比，土壤中硝态氮（NO_3^-–N）、总氮、有效硼含量小幅下降，分别下降 25.87%、17.57% 和 14.63%; 而交换性钙、交换性镁、有效铜、有效锰、有效锌含量大幅上升，比 CK 分别上升 66.46%、102.08%、25.00%、79.25%、123.53%。

从图 1 可以看出，多年连作的香蕉地轮作甘蔗后土壤有效养分含量总体升高。其中土壤中有效磷、有效钾、有效硫含量均呈现随轮作甘蔗年限的增加而升高的趋势，GZ1、GZ2、GZ3 有效磷含量比 CK 分别增加 20.10%、18.61%、81.39%，有效硫含量比 CK 分别增加 18.22%、45.48%、114.02%，而有效钾含量 GZ1 基本保持不变，GZ2、GZ3 比 CK 分别增加 22.70%、24.70%；土壤中 NO_3^-–N、N、B 含量和 Ca/Mg 随着轮作甘蔗年限的增加呈先降后升的趋势，GZ2 和 GZ3 土壤 NO_3^-–N、N、B 含量和 Ca/Mg 比 CK 分别增加 146.13% 和 224.80%、95.83% 和 125.72%、214.63% 和 407.32%、37.04% 和 105.56%；土壤中 Ca 含量随着轮作甘蔗年限的增加呈先升高后回落再升高的趋势，GZ2 和 GZ3 土壤 Ca 含量比 CK 分别增加 37.04%、105.56%；土壤中 Mg 含量随着轮作甘蔗年限的增加呈先升后降趋势，GZ2 和 GZ3 土壤 Mg 含量比 CK 降低 22.92% 和 39.41%；而 Zn 含量随着轮作甘蔗年限的增加呈先升后降趋势，但均高于连作地；土壤中 NH_4^+–N、OM、Fe、Cu、Mn 含量在轮作地与连作地之间没有明显变化趋势。土壤 pH 值随着轮作甘蔗年限的增加呈现下降的趋势；而土壤交换性酸含量相反，随着轮作甘蔗年限的增加呈上升的趋势。

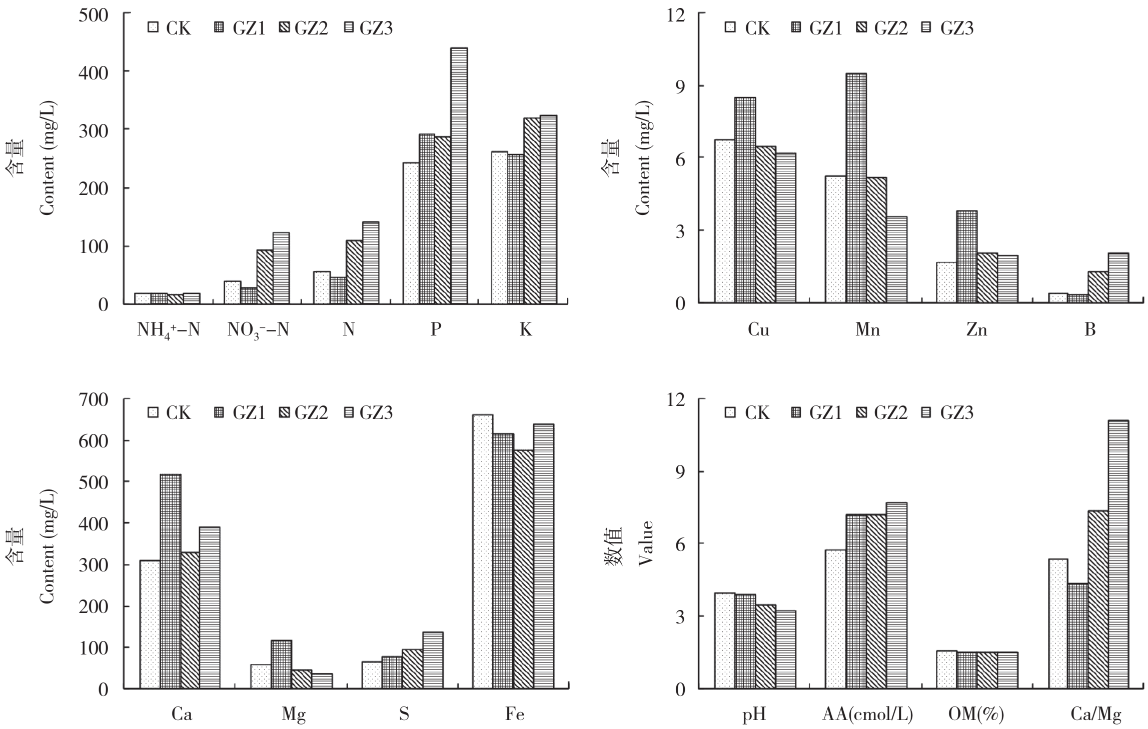

图 1 香蕉地轮作不同年限甘蔗后土壤因子的变化

Fig. 1 Changes of soil factors after sugarcane rotation in banana field for different years

2.1.2 香蕉地轮作甘蔗不同年限后土壤酶活性和酚酸含量的变化 土壤酶一般是指土壤中具有生物催化能力的一些特殊蛋白质类化合物的总称，其活性的高低，可作为判断土壤肥力的指标之一。由表 1 可知，连作蕉地土壤与轮作甘蔗土壤不同酶之间活性存在显著差异。与连作蕉地土壤相比，

土壤转化酶、脲酶活性在轮作甘蔗 1 年后基本保持不变,但在轮作甘蔗2年(GZ2)和3年(GZ3)后，均显著增加，比 CK 分别增加 48.05% 和 118.94、50.71% 和 124.46%，两种酶随着轮作甘蔗年限的增加而呈增加的趋势。多酚氧化酶活性 GZ1 比 CK 显著降低 41.62%，而 GZ2 和 GZ3 多酚氧化酶活性比 CK 分别增加 42.55% 和 44.45%，总体呈现先降低后增加的趋势。而轮作甘蔗地土壤过氧化氢酶活性与连作蕉地差异并不明显。土壤碱性磷酸酶活性在轮作甘蔗 1 年显著升高，但随着甘蔗种植年限的增加，酶活性又下降到香蕉连作的水平。土壤纤维素酶活性轮作甘蔗地显著高于连作蕉地。土壤总酚酸含量波动较大，除 GZ2 与 CK 相比变化不明显外，GZ1 和 GZ3 均显著低于连作蕉地。

表 1　香蕉 – 甘蔗轮作不同年限后土壤酶活性和酚酸含量变化

Table 1　Changes of soil enzyme activity and phenolic acid content after banana–sugarcane rotation for different years

处理 Treatment	转化酶 Invertase (mL/g)	过氧化氢酶 Catalase (mL/g)	脲酶 Urease (mg/100g·3h)	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase (mg/100g)	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase (μg/g·h)	纤维素酶 Cellulase (mg/100mL)	酚酸 Phenolic acid (μmol/g)
CK	89.61 ± 3.36c	3.93 ± 0.02ab	85.68 ± 3.35c	33.63 ± 1.08b	0.91 ± 0.08b	0.17 ± 0.02c	2.95 ± 0.02a
GZ1	85.05 ± 9c	4.31 ± 0.14a	80.74 ± 9.02c	19.63 ± 1.55c	1.96 ± 0.05a	1.43 ± 0.12ab	2.29 ± 0.01c
GZ2	132.67 ± 2.73b	3.54 ± 0.05b	129.13 ± 2.7b	47.94 ± 1.01a	0.58 ± 0.06b	2.15 ± 0.3a	2.81 ± 0.08a
GZ3	196.19 ± 10.51a	3.86 ± 0.12ab	192.32 ± 10.6a	48.58 ± 2.16a	0.99 ± 0.14b	1.32 ± 0.07b	2.49 ± 0.01b

注：同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences.

2.2　蕉地轮作甘蔗 2 年后回种香蕉不同年限后土壤养分含量和酶活性变化

2.2.1　蕉地轮作甘蔗 2 年后回种香蕉不同年限后土壤养分含量、pH 和交换性酸的变化　由图 2 可知，多年连作蕉地轮作甘蔗 2 年后回种香蕉不同年限后，土壤养分有效含量总体上呈现降低的趋势，不同指标变化有所不同。与甘蔗地（GZ2）相比，有机质（OM）、氨态氮（NH_4^+–N）随着

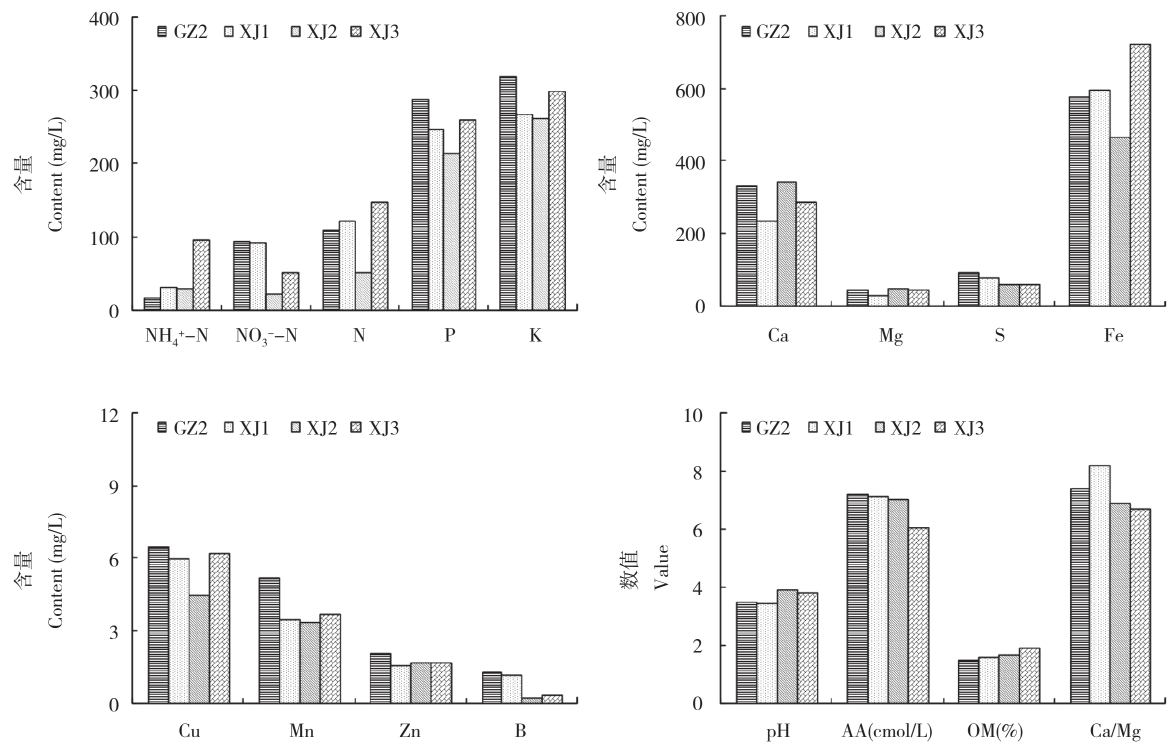

图 2　轮作 2 年甘蔗与回种不同年限香蕉土壤因子的变化

Fig. 2　Changes of soil factors after two years of sugarcane rotation and banana replanting for different years

回种香蕉年限的增加呈升高的趋势，其中回种3年的香蕉地（XJ3）比GZ2分别增加27.63%、500.63%；土壤中硝态氮（NO_3^-–N）、有效磷、有效钾、有效硼、有效硫、有效锰、有效锌含量和Ca/Mg均呈下降的趋势，XJ3比GZ2分别下降45.18%、9.41%、6.41%、72.09%、38.97%、28.85%、19.05%和9.46%。土壤pH值随着回种香蕉年限的增加呈升高的趋势；而土壤交换性酸含量相反，随着回种香蕉年限的增加呈降低的趋势。

2.2.2 蕉地轮作甘蔗2年后回种香蕉不同年限后土壤酶活性和酚酸含量的变化　由表2可知，与甘蔗地GZ2相比，回种香蕉2年（XJ2）后土壤中转化酶、脲酶、多酚氧化酶和纤维素酶活性显著下降，继续回种香蕉，土壤酶的活性继续下降，XJ3比GZ2分别降低41.08%、42.26%、59.24%、68.84%。而过氧化氢酶与碱性磷酸酶在回种香蕉前后无明显变化。土壤的酚酸含量在XJ1和XJ2与GZ2无显著差异，但在XJ3时显著上升，比GZ2增加22.06%。

表2　蕉地轮作甘蔗两年后回种香蕉不同年限后土壤酶和酚酸的变化

Table 2　Changes of soil enzymes and phenolic acids after two years of sugarcane rotation in banana fields and of bananas replanting for different years

处理 Treatment	转化酶 Invertase (mL/g)	过氧化氢酶 Catalase (mL/g)	脲酶 Urease (mg/100g·3h)	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase (mg/100g)	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase (μg/g·h)	纤维素酶 Cellulase (mg/100mL)	酚酸 Phenolic acid (μmol/g)
GZ2	132.67 ± 2.73a	3.54 ± 0.05a	129.13 ± 2.7a	47.94 ± 1.01a	0.58 ± 0.06b	2.15 ± 0.3a	2.81 ± 0.08b
XJ1	137.65 ± 5.18a	3.76 ± 0.04a	133.89 ± 5.22a	32.38 ± 1.46b	0.83 ± 0.09ab	1.29 ± 0.11bc	2.69 ± 0.02b
XJ2	111.5 ± 2.82b	3.74 ± 0.11a	107.76 ± 2.81b	23.05 ± 2.29c	0.89 ± 0.22ab	1.38 ± 0.02b	2.7 ± 0.05b
XJ3	78.17 ± 1.14c	3.61 ± 0.01a	74.56 ± 1.15c	19.54 ± 0.42c	0.5 ± 0.03b	0.67 ± 0.29c	3.43 ± 0.06a

注：同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences.

2.3　香蕉–甘蔗不同土壤指标及枯萎病发病率相关性分析

2.3.1 香蕉–甘蔗轮作土壤不同理化指标之间相关性分析　连作香蕉地轮作甘蔗及轮作甘蔗后回种香蕉土壤不同指标的Pearson相关性分析结果见表3。从表3可以看出，不同土壤酶活性之间存在一定相关性。Inv、Ure、PPO活性之间呈显著或极显著正相关，CAT活性与ALP活性存在极显著正相关（r=0.96，P=0.002），Cel活性与其他5种酶的活性之间不存在显著相关。

土壤养分含量与土壤酶活性之间存在一定相关性。如硝态氮（NO_3^-–N）、有效硫、有效硼含量与Inv、Ure、PPO活性之间存在显著或极显著正相关，有效磷含量与Inv、Ure活性之间存在显著正相关，有效钾含量与PPO活性呈显著正相关，Ca/Mg与Inv、Ure活性之间存在极显著正相关。

不同养分含量之间也存在一定相关性。硝态氮（NO_3^-–N）含量与总氮、有效钾、有效硫含量呈显著正相关，与有效硼含量及Ca/Mg之间存在极显著正相关，有效钾含量与总氮、有效硼含量呈显著正相关，有效磷含量与有效硫、有效硼含量呈显著或极显著正相关，有效硫含量还与Ca/Mg、有效硼含量呈显著或极显著正相关。

土壤pH值、AA含量与其他指标之间有密切联系。土壤pH值与土壤酶中Inv、Ure、PPO活性之间存在显著或极显著负相关，与土壤养分中硝态氮（NO_3^-–N）、总氮、有效钾、有效硫、有效硼含量及Ca/Mg比值之间存在显著或极显著负相关。土壤AA含量与土壤酶中Inv、Ure、Cel活性之间存在显著正相关，与土壤养分中有效硫含量呈显著相关。

酚酸是根系主要分泌物，土壤中PHA与土壤酶中ALP活性和土壤中AA含量呈显著负相关，与土壤养分中OM、NH_4^+–N含量呈显著正相关。

2.3.2 香蕉–甘蔗轮作土壤不同理化指标与香蕉枯萎病发病率之间相关性分析　根据我们前期同一研究可知[20–21]，连作蕉地枯萎病平均发病率为49.15%；连作蕉地分别轮作甘蔗1年、2年和3年后,下茬香蕉枯萎病发病率分别为17.86%、1.79%和1.79%;轮作甘蔗2年后及回种香蕉1年、2年和3年后,下茬香蕉枯萎病发病率分别为1.79%、21.93%、25.80%。香蕉枯萎病发病率与土壤不同指标的Pearson相关性分析结果见表3。从表3可以看出,香蕉枯萎病发病率（DI）与土壤酶中Cel

表 3　香蕉－甘蔗轮作土壤指标及发病率间相关性

Table 3　Correlation between soil indicators and incidence during banana－sugarcane rotation

指标 Index	CAT	Ure	PPO	ALP	Cel	PHA	pH	AA	OM	NH_4^+–N	NO_3^-–N
Inv	−0.23	1.00**	0.77*	−0.18	0.43	−0.41	−0.89**	0.76*	−0.50	−0.44	0.86**
CAT		−0.24	−0.45	0.96**	−0.34	−0.63	0.42	0.02	−0.20	−0.28	−0.44
Ure			0.77*	−0.19	0.43	−0.41	−0.90**	0.76*	−0.49	−0.44	0.86**
PPO				−0.41	0.51	−0.16	−0.80*	0.48	−0.67	−0.55	0.84**
ALP					−0.08	−0.75*	0.35	0.22	−0.29	−0.36	−0.40
Cel						−0.40	−0.54	0.78*	−0.54	−0.42	0.46
PHA							0.20	−0.74*	0.73*	0.77*	−0.11
pH								−0.68	0.42	0.25	−0.99**
AA									−0.59	−0.53	0.57
OM										0.96**	−0.41

指标 Index	N	P	K	Ca	Mg	Ca/Mg	S	Fe	Cu	Mn	Zn	B	DI
Inv	0.49	0.75*	0.60	−0.06	−0.53	0.92**	0.90**	−0.21	−0.27	−0.41	−0.22	0.94**	−0.67
CAT	−0.59	0.13	−0.61	0.73*	0.81*	−0.41	−0.03	0.12	0.63	0.70	0.72*	−0.30	0.30
Ure	0.49	0.75*	0.61	−0.07	−0.54	0.93**	0.89**	−0.21	−0.28	−0.42	−0.23	0.94**	−0.68
PPO	0.40	0.56	0.76*	−0.16	−0.49	0.63	0.78*	−0.09	−0.06	−0.23	−0.23	0.86**	−0.64
ALP	−0.60	0.14	−0.53	0.84**	0.87**	−0.41	0.02	−0.05	0.64	0.79*	0.85**	−0.25	0.08
Cel	0.14	0.21	0.52	0.19	−0.04	0.25	0.43	−0.55	−0.01	0.13	0.27	0.47	−0.89**
PHA	0.41	−0.38	0.18	−0.67	−0.46	−0.10	−0.47	0.46	−0.32	−0.49	−0.62	−0.30	0.39
pH	−0.73*	−0.68	−0.75*	0.23	0.59	−0.86**	−0.83*	0.00	0.13	0.38	0.22	−0.97**	0.77*
AA	0.17	0.58	0.40	0.36	−0.04	0.57	0.73*	−0.50	−0.02	0.05	0.31	0.69	−0.86**
OM	0.26	−0.34	−0.16	−0.33	−0.16	−0.14	−0.57	0.36	−0.35	−0.39	−0.35	−0.53	0.47

指标 Index	NO_3^-–N	N	P	K	Ca	Mg	Ca/Mg	S	Fe	Cu	Mn	Zn	B	DI
NH_4^+–N	−0.22	0.46	−0.24	0.02	−0.36	−0.20	−0.08	−0.46	0.51	−0.21	−0.34	−0.30	−0.38	0.31
NO_3^-–N		0.76*	0.70	0.79*	−0.26	−0.61	0.84**	0.83*	0.13	−0.07	−0.37	−0.26	0.97**	−0.71*
N			0.48	0.73*	−0.47	−0.69	0.71*	0.45	0.46	−0.20	−0.56	−0.43	0.63	−0.44
P				0.64	0.38	−0.09	0.69	0.94**	0.28	0.23	0.00	0.20	0.79*	−0.61
K					−0.10	−0.48	0.65	0.70	0.18	−0.08	−0.29	−0.18	0.74*	−0.76*
Ca						0.85**	−0.29	0.25	−0.06	0.62	0.79*	0.91**	−0.10	−0.25
Mg							−0.73*	−0.23	0.03	0.74*	0.95**	0.91**	−0.52	0.15
Ca/Mg								0.77*	−0.04	−0.46	−0.67	−0.46	0.87**	−0.56
S									0.04	0.12	−0.07	0.10	0.93**	−0.74*
Fe										0.48	0.09	0.02	0.01	0.26
Cu											0.88**	0.81*	−0.07	−0.05
Mn												0.94**	−0.31	−0.03
Zn													−0.17	−0.24
B														−0.74*

注：* 表示差异显著，** 表示差异极显著。

Note：* represents significant difference, ** represents extremely significant difference.

活性呈极显著负相关（r=−0.89，P=0.003），与土壤 AA 含量呈极显著负相关（r=−0.86，P=0.006），与土壤 pH 值呈显著正相关（r=0.77，P=0.027），与土壤养分中 NO_3^-–N、有效钾、有效硫、有效硼含量呈显著负相关（相关系数和显著性分别为：r=−0.71，P=0.049；r=−0.76，P=0.030；r=−0.74，P=0.034；r=−0.74，P=0.038）。

3　讨论

同一块土地上长期连续种植同一种作物或近缘作物，容易造成产量降低、品质变劣、生育状况变差等连作障碍[5]。其中香蕉长期连作易引起香蕉产量下降、质量降低、植株生长缓慢、生育期延长、枯萎病发病率持续增加等状况，造成

严重经济损失，制约了香蕉产业的发展。引起连作障碍的原因多种多样，其中土壤理化性状劣变、自毒物质作用、微生态环境失衡引起土传病害等及其协同作用是造成连作障碍主要因子[26]。轮作是避免和减少连作障碍及土传病害发生的一种传统而有效的农业种植模式，合理轮作可以调节土壤养分有效性等土壤理化性状，消减自毒物质积累，改善微生态环境，减轻病害发生[11, 27–29]。

土壤理化性状劣变主要体现在土壤养分有效性降低、土壤养分失衡和土壤酶的活性降低，前人研究表明，香蕉多年连作易引起土壤养分失衡，合理轮作可提高土壤质量。赵艳等[3]、钟爽等[30]、陈明智等[31]研究发现，随着连作年限的增加，土壤有机质和 pH 值出现不同程度的下降，土壤速效磷、速效钾等大量元素含量出现强烈的富集，土壤交换性钙和有效铜出现不同程度的富集，有效硼、有效硫、有效锌出现不同程度的亏缺，香蕉长期连作改变了蕉园土壤中的养分比例，导致土壤中营养元素比例失调，从而影响了香蕉生长。香蕉轮作木薯、茄子、菠萝、甘蔗、辣椒、冬瓜可有效提高土壤养分有效性，改善土壤质量[14, 18, 32–33]。本研究结果表明，土壤 pH 随着甘蔗轮作年限增加而降低，随着回种香蕉年限的增加呈升高趋势；相反，土壤交换性酸、硝态氮、有效磷、有效钾、有效硫、有效锌、有效硼含量和 Ca/Mg 比值随着甘蔗轮作年限增加而增加，随着回种香蕉年限的增加呈降低的趋势。这些指标能较好地反映了香蕉 – 甘蔗轮作和连作土壤质量的变化和效果。

土壤酶是土壤中的重要组成成分之一，其活性的高低在植物生长过程中发挥着重要的作用[34]，土壤酶活性在一定程度上反映了土壤所处的状况，且对环境等外界因素引起的变化较敏感，是反映土壤生态系统变化的敏感指标，可作为衡量土壤肥力水平的指标[35–36]。之前有研究发现，随着连作年限的增加，土壤中的酶活性存在下降的趋势[37]。杨威等研究发现，与黄瓜单一种植相比，轮作条件下土壤酶活性及养分含量均明显提高，脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性在 3 个采样时间点分别提高 20% 以上[38]。刘敏等研究丹参栽培地轮作期间土壤酶的变化，发现不同酶种类变化趋势存在差异，碱性磷酸酶和多酚氧化酶活性均有降低的趋势，而碱性磷酸酶则是先降低后升高，脲酶和过氧化氢酶活性呈上升趋势[39]。陈明智等[31]研究了连栽香蕉园土壤酶活性的变化，发现多年连作蕉园土壤过氧化氢酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶活性呈现先降后升的趋势。而蕉地轮作韭菜后，磷酸酶、转化酶、脲酶及纤维素酶活性显著升高[40]；轮作木薯 3 年后土壤过氧化氢酶和脲酶活性均显著增加，而蔗糖酶活性却显著降低[14]。本研究结果表明，在香蕉 – 甘蔗轮作土壤中转化酶、脲酶、多酚氧化酶、纤维素酶活性随着甘蔗轮作年限增加而增加，随着回种香蕉年限的增加而呈降低的趋势。这些酶指标也较好地反映了香蕉 – 甘蔗轮作和连作土壤质量的变化和效果。

土传病害加重是连作主要障碍之一，轮作可通过调节某些土壤酶和理化指标，调控某些土传病害发生。董鲜研究表明，NO_3^-–N 处理可增加植株抗病相关的 Ca、Mg、Fe、Mo 矿质元素的吸收，诱导香蕉苗木质素形成，使其木质化程度增加，从而维持较高的光合作用，保持较高的抗病水平[41]。姬华伟等研究表明，锌离子可能通过降低香蕉尖孢镰刀菌镰刀菌酸产量有效降低香蕉枯萎病的发病率[42]。赖朝圆等研究表明，土壤 pH 值、速效磷含量和可培养细菌数量均与可培养尖孢镰刀菌数量呈显著负相关关系[33]。本研究结果表明，香蕉枯萎病发病率与土壤 pH 值呈正相关，与土壤酶中纤维素酶活性、交换性酸含量、与土壤养分中硝态氮（NO_3^-–N）、有效钾、有效硫、有效硼含量呈负相关。结果印证了与董鲜、赖朝圆等的发现，但与赖朝圆[33]的结果土壤 pH 值与可培养尖孢镰刀菌数量呈显著负相关关系相反。充分说明枯萎病的危害程度与土壤养分含量和酶的活性有密切关系。

本研究中，连作蕉地轮作甘蔗 2、3 年后，pH 值逐年下降，土壤中转化酶、脲酶、多酚氧化酶、纤维素酶活性呈持续升高趋势，交换性酸、硝态氮、有效磷、有效钾、有效硫、有效锌、有效硼等养分含量和 Ca/Mg 比值呈持续增大的趋势，说明轮作甘蔗有效地提高了土壤质量。相对连作蕉地，轮作甘蔗 2 年（GZ2）后，硝态氮、有效磷、有效钾、有效硫、有效锌、有效硼含量和 Ca/Mg 比值等指标已得到较大改善；土壤中转化酶、脲

酶、多酚氧化酶、纤维素酶活性 GZ2 比连作蕉地（CK）显著升高，并且 GZ2 对香蕉枯萎病已取得较好防控效果。因此，多年连作蕉地轮作甘蔗 2 年即可取得较好提高土壤质量的效果。由于香蕉的效益相对甘蔗高，在以香蕉为主的香蕉－甘蔗轮作中，结合香蕉抗病品种，轮作甘蔗 2 年是一个较好的选择。这与古人的实践一致[19]，与香蕉－菠萝[18]轮作年限相近，比香蕉－木薯[14]轮作效果好。

本研究中，轮作甘蔗 2 年回种香蕉 2 年（XJ2）后土壤转化酶、脲酶、纤维素酶活性和交换性酸含量、Ca/Mg 比值仍高于连作蕉地，但多酚氧化酶、pH 值和硝态氮、有效磷、有效钾、有效硫、有效硼等养分含量低于或接近于连作蕉地水平，土壤质量开始恶化；回种香蕉 3 年（XJ3）后除纤维素酶活性和交换性酸含量及 Ca/Mg 比值高于连作蕉地水平外，其他指标低于或接近于连作蕉地水平，香蕉枯萎病发病率也升高[20]，土壤质量已严重恶化，再继续种植严重影响香蕉生长和发育。因此，轮作甘蔗 2 年后回种香蕉以 3 年为宜。

4 结论

综上所述，土壤中转化酶、脲酶、多酚氧化酶、纤维素酶活性，pH 值、交换性酸含量和硝态氮、有效磷、有效钾、有效硫、有效锌、有效硼等养分含量及 Ca/Mg 比值等能比较客观反映香蕉－甘蔗轮作土壤质量变化的指标；根据这些指标的变化，多年连作蕉地轮作甘蔗 2 年即可较好地改善土壤质量，减轻连作障碍；轮作甘蔗 2 年后，回种香蕉以 3 年为宜。本研究为香蕉－甘蔗轮作模式的进一步研究和生产上香蕉枯萎病防控提供参考。

参考文献（References）：

[1] ROUX N, TOLOZA A, RADECKI Z, ARIAS FJZL, DOLEŽEL J. Rapid detection of aneuploidy in *Musa* using flow cytometry［J］. *Plant CellReports*, 2003,21(5):483–490. doi:10.1007/s00299-002-0512-6.

[2] 国家统计局 . 国家数据［EB/OL］.（2017–07）［2019–05–24］http://data.stats.gov.cn/index.htm.
National bureauof statistics of China.National data［EB/OL］.（2017–07）［2019–05–24］http://data.stats.gov.cn/index.htm.

[3] 赵艳，张晓波，阮云泽，王雅楠 . 海南省不同地区连作年限对香蕉园土壤养分及线虫数量的影响［J］. 江苏农业科学，2015,43(4):315–317. doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2015. 04.113.
ZHAO Y, ZHANG X B, YUN Z R, WANG Y N. Effects of continuous cropping time on soil nutrients and nematode population of banana garden in different areas of Hainan Province［J］. *Jiangsu Agricultural Science*, 2015,43(4):315–317. doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2015.04.113.

[4] 黎永坚，于莉. 香蕉枯萎病发病机制及其防治技术研究［J］.中国农学通报，2006,22(8):515–519. doi:10.3969/j.issn.1000–6850.2006.08.126.
LI Y J, YU L. The study on the pathogenesis and control of banana vascular wilt［J］. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006,22(8):515–519. doi:10.3969/j.issn.1000–6850.2006.08.126.

[5] 李天来，杨丽娟 . 作物连作障碍的克服——难解的问题［J］. 中国农业科学，2016,49(5):916–918. doi: 10.3864/j.issn.0578–1752.2016.05.011.
LI T L, YANG L J. Overcoming continuous cropping obstacles—the difficult problem［J］. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016,49(5):916–918. doi: 10.3864/j.issn.0578–1752.2016.05.011.

[6] 李小霞，靳鲲鹏，曹晋军，李万星，李丹 . 轮作制度对土壤生态的影响研究进展［J］. 现代农业科技，2019(6):154–155,159.
LI X X, JIN K P, CAO J J, LI W X, LI D. Research progress on effect of crop rotation system on soil ecology［J］. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(6):154–155,159.

[7] 黄光荣 . 烟蒜轮作增产增效的作用与评价［D］. 贵阳：贵州大学，2008.
HUANG G R. Smoke garlic round the function and the evaluation which make to boost production to increase an effect［D］. Guiyang: Guizhou University, 2008.

[8] 阳显斌. 烟蒜轮（套）作对植烟土壤连作障碍减缓作用及机理研究［D］. 成都：四川农业大学，2016.
YANG X B. The allevaiation mechanism of tobacco–garlic rotation and interplanting on soil continuous cropping obstacles［D］. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2016.

[9] 盖志佳，吴嘉彧，张敬涛，刘婧琦，蔡丽君，杜佳兴，赵桂范，陈磊，吴俊江 . 大豆玉米持续轮作免耕对土壤养分及作物产量的影响［J］. 中国农学通报，2019,35(5):100–106.
GAI Z J, WU J Y, ZHANG J T, LIU Q Q, CAI L J, DU J X, ZHAO G F, CHEN L, WU J J. Effects of continuous rotation and no–till of soybean–corn on soil nutrients and crop yield［J］. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019,35(5):100–106.

[10] LAURA L. V E, KATELYN A. C, ADAM H, ANNE V, DAVID C. H.Long–term tillage and crop rotation effects on soil quality, organic carbon, and total nitrogen［J］. *Canadian Journal of Soil Science*, 2014, 94(3):303–315.

[11] 王涛，乔卫花，李玉奇，奥岩松 . 轮作和微生物菌肥对黄瓜连作土壤理化性状及生物活性的影响［J］. 土壤通报，2011,42(3):578–583. doi：10.19336/j.cnki.trtb.2011.03.013.
WANG T, QIAO W H, LI Y Q, AO Y S. Effects of rotation and microbial fertilizers on the properties ofcontinuous cucumber cropping soil［J］. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011,42(3):578–583. doi：10.19336/j.cnki.trtb.2011.03.013.

[12] 符建平，张丽红，王芳，王铁臣，吕建，李志强，高丽红 . 日光

温室不同蔬菜轮作体系对土壤环境的影响[J]华北农学报,2008,23(S2):334–339.

FU J P, ZHANG L H, WANG F, WANG T CH LU J, LI Z Q GAO L H.Effects of vegetable rotation systems on the soil environment in greenhouse [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008,23(S2):334–339.

[13] 孙新展 . 不同种植模式对缓解棉花连作障碍的化感作用机制[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.

SUN X Z. Allelopathy of different cropping patterns on alleviating continuous cropping obstacke of cotto [D]. Shihezi: Shihezi University, 2018.

[14] 柳红娟, 黄洁, 刘子凡, 阮云泽, 杨金明 . 木薯轮作年限对枯萎病高发蕉园土壤抑病性的影响[J]. 西南农业学报, 2016,29(2):255–259. doi:10.16213/j.cnki.acjas.2016.02.008.

LIU H J, HUANG J, LIU Z F, RUAN Y Z, YANG J M. Effects of different years of cassava rotation on soil disease suppression in high incidence banana [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(2): 255–259. doi:10.16213/j.cnki.acjas.2016.02.008.

[15] 洪珊, 剧虹伶, 阮云泽, 卢明, 王蓓蓓, 赵艳, 邓燕, 尹黎燕 . 茄子与香蕉轮作配施生物有机肥对连作蕉园土壤微生物区系的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017,15(1):78–85. doi:10.13930/j.cnki.cjea.160609.

HONG S, JU H L, RUAN Y Z, LU M, WANG B B, ZHAO Y, DENG Y, YIN L Y. Effect of eggplant–banana rotation with bioorganic fertilizer treatment on soil microflora in banana continuouscropping orchard [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017,15(1):78–85. doi:10.13930/j.cnki.cjea.160609.

[16] 辛侃, 赵娜, 邓小垦, 董存明, 李荣, 阮云泽 . 香蕉 – 水稻轮作联合添加有机物料防控香蕉枯萎病研究[J]. 植物保护, 2014,40(6):36–41 doi:10.3969/j.issn.0529–1542.2014.06.007.

XIN K, ZHAO N, DENG X K, DONG C M, LI R, RUAN Y Z. Effects of rice rotation incorporated with organic materials on suppression of banana Fusarium wilt disease [J]. *Plant Protection*, 2014,40(6): 36–41. doi:10.3969/j.issn.0529–1542.2014.06.007.

[17] HUANG Y H, WANG R C, LI C H. Control of Fusariumwilt in banana with Chinese leek [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2012,134(1):87–95. doi: 10.1007/s10658–012–0024–3.

[18] WANG B B, LI R, RUAN Y Z. Pineapple–banana rotation reduced the amount of Fusariumoxysporum more than maize–banana rotation mainly through modulating fungal communities [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015,86: 77–86. doi:10.1016/j.soilbio.2015.02.021.

[19] 赵飞, 倪根金, 章家恩. 广东增城市农业遗产的调查研究[J].古今农业, 2012(3): 52–62.

ZHAO F, NI G J, ZHANG J E. Investigation on agricultural heritage in Zengcheng City of Guangdong [J]. *Ancient and modern agriculture*, 2012(3): 52–62.

[20] 曾莉莎, 林威鹏, 吕顺, 王芳, 夏玲, 刘文清, 伍朝荣, 周建坤, 杜彩娴, 蔡昆争, 刘建平.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, 2019,27(2):257–266. doi: 10.13930/j.cnki.cjea.180361.

ZENG L S, LIN W P, LYU S, WANG F, XIA L, LIU W Q, WU C R, ZHOU J K, DU C X, CAI K Z, LIU J P. The continual effect and soil microbial ecology mechanism of banana–sugarcane rotation to control Fusarium wilt of banana (Ⅰ)[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(2): 257–266. doi: 10.13930/j.cnki.cjea.180361.

[21] 林威鹏, 曾莉莎, 吕顺, 伍朝荣, 王芳, 周建坤, 刘文清, 蔡昆争, 杜彩娴, 夏玲 . 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(Ⅱ)[J]. 中国生态农业学报, 2019,27(3): 348–357. doi: 10.13930/j.cnki.cjea.180362.

LIN W P, ZENG L S, LYU S, WU C R, WANG F, ZHOU J K, LIU W Q, CAI K Z, DU C X, XIA L. Continual effect and mechanism of banana–sugarcane plantation on control of Fusarium wilt (Ⅱ)[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019,27(3):348–357. doi: 10.13930/j.cnki.cjea.180362.

[22] HUNTER A H. Laboratory and greenhouse techniques for nutrientsurvey to determine the soil am endm ents required for optim umplant growth [R]. 1980, *USA: M im eograph Agro Service International,* Florida.

[23] 杨俐苹, 金继运, 梁鸣早, 程明芳, 黄绍文 . ASI 法测定土壤有效 P、K、Zn、Cu、Mn 与我国常规化学方法的相关性研究[J]. 土壤通报, 2000,31(6):277–279. doi:10.3321/j.issn:0564–3945.2000.06.010.

YANG L P, JIN J Y, LIANG M Z, CHENG M F, HUANG SH W. Correlation of ASI method for determination of P, K, Zn, Cu, Mn with conventional methods used in China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(6):277–279. doi:10.3321/j.issn:0564–3945.2000.06.010.

[24] 吴萼, 徐宁, 温美娟. 磷钼酸–磷钨酸盐比色法测定土壤中总酚酸含量[J].环境化学, 2000,19(1):67–72. doi:10.3321/j.issn:0254–6108.2000.01.012.

WU E, XU N, WEN M J. The measurement of total phenolic acids in soil by phosphomolybdic phosphotungstic acid phenol reagent colorimery [J]. *Environmental chemistry*, 2000,19(1):67–72. doi:10.3321/j.issn:0254–6108.2000.01.012.

[25] 李振高, 骆永明, 滕应 . 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

LI Z G, LUO Y M, TENG Y. Soil and environmental microorganism research method. [M]. Beijing: Science Press, 2008.

[26] 耿贵, 杨瑞瑞, 於丽华, 吕春华, 李任任, 王宇光 . 作物连作障碍研究进展[J]. 中国农学通报, 2019,35(10):36–42.

GENG G, YANG R R, YU L H, LV CH H, LI R R,WANG Y G. Crop continuous cropping obstacles: research progress [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(10):36–42.

[27] 孙吉庆, 盛萍萍, 陈可, 李敏 . 蔬菜作物轮作对西瓜连作土壤微生物种群和土壤酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2011(16):20–22.

SUN J Q, CHENG P P, CHEN K, LI M. Effects of vegetable crops rotation on microbial population and enzyme activity in replant soil used for watermelon production [J]. *Northern Horticulture*, 2011(16):20–22.

[28] 张子龙, 李凯明, 杨建忠, 缪作清, 李世东, 侯俊玲, 王文全 . 轮作对

三七连作障碍的消减效应研究［J］. 西南大学学报（自然科学版），2015,37(8):39-46. doi: 10.13718/j.cnki.xdzk.2015.08.007.

ZHANG Z L, LI K M, YANG J ZH, MIU Z Q, LI SH D, HOU J L, WANG W Q. Effects of crop rotation for reducing continuous cropping obstacles in Panax notoginseng cultivation［J］. *Journal of Southwest University (Natural Science)*, 2015,37(8):39-46. doi: 10.13718/j.cnki.xdzk.2015.08.007.

［29］宋尚成, 李敏, 刘润进 . 种植模式与土壤管理制度对作物连作障碍的影响［J］. 中国农学通报, 2009,25(21):231-235.

SONG J CH, LI M, LIU R J. Effects of plant patterns and soil managements on crop replant diseases［J］. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(21):231-235.

［30］钟爽, 何应对, 韩丽娜, 周兆禧, 臧小平, 王必尊, 金志强 . 连作年限对蕉园土壤氮磷钾养分的影响［J］. 广东农业科学, 2011,38(23):64-67. doi:10.3969/j.issn.1004-874X.2011.23.021.

ZHONG SH, HE Y D, HAN L N, ZHOU ZH X, ZANG X P, WANG B Z, JIN ZH Q. Effect of continuous banana-cropping on soil N, P and K nutrients［J］. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(23):64-67. doi:10.3969/j.issn.1004-874X.2011.23.021.

［31］陈明智, 吴蔚东, 李雯, 邓万刚, 孔令伟, 王亚弟, 张世鹏 . 多年连栽香蕉园土壤养分与酶活性变化［J］. 生态环境, 2008,17(3):1221-1226. doi:10.3969/j.issn.1674-5906.2008.03.067.

CHEN M ZH, WU W D, LI W, DENG W G, KONG L W, WANG Y D, ZHANG SH P. Change of soil nutrients and enzyme activities of banana plantations after successive planting［J］. *Ecological and Environment*, 2008,17(3):1221-1226. doi:10.3969/j.issn.1674-5906.2008.03.067.

［32］洪珊 . 茄子与香蕉轮作配施生物有机肥缓解蕉园连作障碍土壤微生物机制研究［D］. 海口: 海南大学, 2017.

HONG S. Effect of eggplant-banana rotation with bioorganic fertilizer treatment on soil microflora in banana continuous cropping orchard［D］. Haikou: Hainan University, 2017.

［33］赖朝圆, 杨越, 陶成圆, 王一鸣, 郭继阳, 王蓓蓓, 阮云泽, 赵艳 . 不同作物 – 香蕉轮作对香蕉生产及土壤肥力质量的影响［J］. 江苏农业学报, 2018,34(2):64-71. doi:10.3969 /j.issn.1000-4440.2018.02.011.

LAI C Y, YANG Y, TAO C Y, WANG Y M, GUO J Y, WANG B B, RUAN Y Z, ZHAO Y. Effects of replanted banana after rotation of different crops on banana production and soil fertility quality［J］. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2018,34(2):64-71. doi:10.3969 /j.issn.1000-4440.2018.02.011.

［34］BADIANE N N Y, CHOTTE J L, PATE E, MASSE D, ROULAND C. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural andimproved fallows in semi-arid tropical regions［J］. *Applied Soil Ecology*, 2001,18(3): 229-238.

［35］王理德, 王方琳, 郭春秀, 韩福贵, 魏林源, 李发明 . 土壤酶学研究进展［J］. 土壤, 2016,48(1):12-21. doi:10.13758/j.cnki.tr.2016.01.002.

WANG L D, WANG F L, GUO C X, HAN F G, WEI L Y, LI F M. Review: progress of soil enzymology［J］. *Soils*, 2016,48(1):12-21. doi:10.13758/j.cnki.tr.2016.01.002.

［36］曹慧, 孙辉, 杨浩, 孙波, 赵其国 . 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展［J］. 应用与环境生物学报, 2003,9(1):105-109. doi:10.3321/j.issn:1006-687X.2003.01.025.

CAO H, SUN H, YANG H, SUN B, ZHAO Q G. A review: soil enzyme activity and its indication for soil quality［J］. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(1):105-109. doi:10.3321/j.issn:1006-687X.2003.01.025.

［37］孙秀山, 封海胜, 万书波, 左学青 . 连作花生田主要微生物类群与土壤酶活性变化及其交互作用［J］. 作物学报, 2001,27(5):617-621. doi:10.3321/j.issn:0496-3490.2001.05.010.

SUN X S, FENG H S, WAN S B, ZUO X Q. Changes of main microbial strains and enzymes activities in peanut continuous cropping soil and their interactions［J］. *Acta Agronomica Sinica*,2001,27(5): 617-621. doi:10.3321/j.issn:0496-3490.2001.05.010.

［38］杨威, 闫海霞, 刘廷武, 李师默, 张贝贝, 罗玉明. 黄瓜和草菇轮作对后茬黄瓜根围细菌多样性及土壤酶活性的影响［J］.江苏农业科学, 2018, 46(5):124-128.

YANG W, YAN H X, LIU Y W, LI S M, ZHANG B B,LUO Y M. Effects of cucumber-straw mushroom rotation on bacterial diversity and enzyme activities in cucumber rhizosphere soils［J］. *Jiangsu Agricultural Science*, 2018,46(5):124-128.

［39］刘敏, 严铸云, 王瑞婷, 伍艳华, 王萌 . 四川中江丹参栽培地轮作期间土壤酶活性变化研究［J］. 辽宁中医杂志, 2012(8):1593-1595.

LIU M, YAN Z Y, WANG R T, WU Y H, WANG M. Changes of soil enzyme activities during cultivation rotation of salvia miltiorrhiza in Zhongjiang, Sichuan province［J］. *Liaoning Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2012(8):1593-1595.

［40］黄永红 . 韭菜对香蕉枯萎病的防控效果及其作用机理的研究［D］. 长沙: 湖南农业大学 , 2011.

HUANG Y H. The effect and mechanism of Chinese leek(Allium tuberosum) on the control of banana Fusarium Wilt［D］. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011.

［41］董鲜 . 土传香蕉枯萎病发生的生理机制及营养防控效果研究［D］. 南京: 南京农业大学 , 2014.

DONG X. Study on physiologicalmechanisms of soil-borne banana Fusarium wilt occurrence and nutrients control effect of wilt disease［D］. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.

［42］姬华伟, 郑青松, 董鲜, 周金燕, 沈其荣, 郭世伟 . 铜、锌元素对香蕉枯萎病的防治效果与机理［J］. 园艺学报, 2012,39(6):1064-1072.

JI H W, ZHENG Q S, DONG X, ZHOU J Y, SHEN Q R, GUO SH W. Effects and mechanism of copper and zinc elements on controlling Fusarium-wilt disease of banana［J］. *Acta Horticulturae Sinica*, 2012,39(6):1064-1072.

（责任编辑　杨贤智）