

# 连作对谷子土壤酶活性及养分的影响

妙佳源,李夏,周达,高扬,高小丽,  
王鹏科,高金锋,杨璞,冯佰利

(旱区作物逆境生物学国家重点实验室/西北农林科技大学,陕西杨凌712100)

**摘要:**为探明谷子连作对土壤环境的影响,分析不同连作年限对谷子土壤养分和酶活性的影响,本研究在4 a不施肥定位试验的基础上,设置连作2 a(T1)、连作3 a(T2)、连作4 a(T3)和轮作(CK)4个处理,分别测定了土壤养分、土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性及其变化。试验结果表明,与轮作(CK)相比,连作2 a(T1)、连作3 a(T2)和连作4 a(T3)分别减产6.9%、12.7%和35.6%,随着连作年限增加,减产幅度加大;连作土壤氮、磷含量降低,其中速效氮含量降低最为显著( $P < 0.05$ ),速效钾含量变化不显著( $P > 0.05$ ),土壤pH升高。连作条件下,土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性均呈现逐年降低的趋势,且随着连作年限增加,降低越显著,连作4 a(T3)显著低于其它处理( $P < 0.05$ )。

**关键词:**连作;土壤酶;土壤养分;谷子;连作障碍

**中图分类号:**S344.4; S154.2 **文献标志码:**A

## Effects of foxtail millet continuous cropping on soil enzyme activities and nutrients

MIAO Jia-yuan, LI Xia, ZHOU Da, GAO Yang, GAO Xiao-li,  
WANG Peng-ke, GAO Jin-feng, YANG Pu, FENG Bai-li

(State Key Laboratory of Crop Stress Biology for Arid Areas, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi China)

**Abstract:** In order to explore the effects of foxtail millet continuous cropping on soil environment, a 4-year located field experiment based on different continuous cropping years (T1:2 years, T2:3 years and T3:4 years) of foxtail millet without fertilization was conducted in the north semi-arid region. Foxtail millet rotated with legume crops was set as the control (CK). The soil nutrient, the enzyme activities of urease, alkaline phosphatase (ALP), sucrase and catalase were determined in the experiment. The results showed that compared with CK, the yields of T1, T2 and T3 were decreased by 6.9%, 12.7% and 35.6%, respectively. With the increase of the foxtail millet continuous cropping years, the yield of foxtail millet became decreased and soil pH went increased. Compared with CK, the contents of N and P were decreased, in particular the content of available N ( $P < 0.05$ ). The changes of available K were not significantly ( $P > 0.05$ ). The enzyme activities of urease, alkaline phosphatase (ALP), sucrase and catalase became decreased year after year under the continuous cropping, and the activity of each enzyme in T3 was significantly lower than that in other treatments ( $P < 0.05$ ).

**Keywords:** continuous cropping; soil enzyme; soil nutrient; foxtail millet; continuous cropping obstacle

谷子(*Setaria italica*)耐旱、耐贫瘠,主要分布在我国西北、华北和东北的干旱、半干旱地区<sup>[1]</sup>,是我国北方主要的粮食作物。但栽培技术落后,连作现象严重,导致病、虫、草害发生,影响谷子生产与产业发展。因此,探索谷子的茬口特性及其对土壤环

境的影响,提高谷子的产量和品质,对维护区域粮食平衡,增加人们食物多样性具有重要意义。

大量的生产实践表明,多年连作会引起连作障碍,导致作物病虫害加重<sup>[2]</sup>,长势变差,土壤肥效下降,土壤酶活性降低,引起作物产量和品质的下

收稿日期:2015-12-04

基金项目:国家谷子、糜子产业技术体系(CARS-07-12.5-A9);科技支撑计划(2014BAD07B03);陕西省科技厅难题攻关项目(2014KTZB02-03-03);陕西省小杂粮产业技术体系资助。

作者简介:妙佳源(1992—),男,陕西岐山人,硕士,主要从事作物高效栽培研究。E-mail:miaojiayuan@foxmail.com。

通信作者:冯佰利(1966—),男,陕西耀县人,教授,博士生导师,主要从事作物高产生态生理技术及小杂粮栽培、育种研究。E-mail:7012766@163.com。

降<sup>[3-4]</sup>。国内外研究者对部分大田作物连作障碍进行了研究,一些研究认为,连作不利于营养循环,会改变土壤理化性质<sup>[5]</sup>。刘建国等<sup>[6]</sup>、柴仲平等<sup>[7]</sup>和 Aparicio V 等<sup>[8]</sup>研究表明,长期连作会严重破坏棉花土壤结构,导致土壤养分失调,容重增大,孔隙度下降。崔瑞等<sup>[9]</sup>研究结果表明,连作严重降低花生产量,病虫害加重,早衰率提高,植株变矮,严重抑制生长发育。也有些研究认为,土壤酶活性的改变是作物多年连作产生连作障碍的主要因素,烤烟连作 5 a,明显降低了土壤脲酶活性<sup>[10]</sup>;唐江华等<sup>[11]</sup>研究表明,随着棉花连作年限的增加,其土壤碱性磷酸酶活性降低;马海燕<sup>[12]</sup>等研究表明,连作 5~7 a 非洲菊土壤真菌数量上升,细菌和放线菌数量和土壤酶活性下降,连作障碍明显。然而,目前国内针对谷子等杂粮作物连作土壤酶活性变化的研究尚未见相关报道。本试验旨在通过定位试验,研究谷子不同连作年限对土壤养分、酶活性和谷子产量的影响,为揭示谷子连作障碍提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地设在陕西杨凌西北农林科技大学农作一站。该地海拔 520 m 左右,年平均气温 12.9℃,年平均降水量 550.8 mm。主要降水集中在 7—9 月份,降水量约占年降水量的 60% 以上,年均蒸发量为 1 400 mm,属于半湿润易旱地区。

### 1.2 试验设计

2010—2013 年进行了连续定位试验,试验设 4 种植方式,分别为谷子连作 2 a T1(2012 年和 2013 年,每年均种一季谷子)、连作 3 a T2(2011—2013 年每年均种一季谷子)和连作 4 a T3(2010—2013 年连续种植 4 a 谷子),以轮作为对照 CK(2010—2013 年种植,轮作模式为谷子-荞麦-芸豆-谷子)。谷子品种为“晋谷 29 号”,荞麦品种为西农 9940,芸豆品种为小黑芸豆。小区面积 10 m<sup>2</sup>(2 m × 5 m),设 4 次重复,随机区组设计,于 6 月上、中旬种植,种植采用传统翻耕不施肥,全生育期不灌溉,进行常规的田间管理。

### 1.3 土样采集

在 2013 年,分别于播种期、苗期、抽穗期、灌浆期、成熟期,收获后 6 次采集各个处理土样,收获后采样用于测定土壤常规理化性质,其余样用于测定土壤酶活性。每个小区随机 3 点采集 0~20 cm 根际土并混合均匀,自然风干剔除杂物后用“四分法”形成 1.5 kg 土样。研磨过 0.8 mm 和 0.16 mm 筛

孔,4℃ 保存。

### 1.4 测定方法

土壤基本理化性质的测定<sup>[13]</sup>:全氮采用凯氏法消解-连续流动分析仪测定;速效氮采用 1.0 mol·L<sup>-1</sup> KCl 浸提-AA3 连续流动分析仪测定,所测速效氮为铵态氮;全磷用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub> 消解-硫酸钼锑抗比色法测定;速效磷采用 0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 浸提-硫酸钼锑抗比色法测定;速效钾采用 1.0 mol·L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法测定;pH 采用 1:2.5 土水比浸提-电位法测定。

土壤酶的测定:碱性磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法测定<sup>[14]</sup>,蔗糖酶活性用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定<sup>[14]</sup>,脲酶活性的测定采用苯酚钠比色法<sup>[15]</sup>,过氧化氢酶采用紫外分光光度法<sup>[16]</sup>。

### 1.5 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2013 和 SPSS 22.0 进行整理和统计分析。多重比较采用 Duncan's 新复极差法测验。

## 2 结果与分析

### 2.1 连作对谷子产量的影响

由图 1 可知,随着连作年限的增加,谷子产量显著降低,与轮作(CK)相比,连作 2 a(T1)、连作 3 a(T2)和连作 4 a(T3)分别减产 6.9%、12.7%和 35.6%。随着连作年限的增加,减产幅度增大。各处理间差异达显著性水平( $P < 0.05$ )。

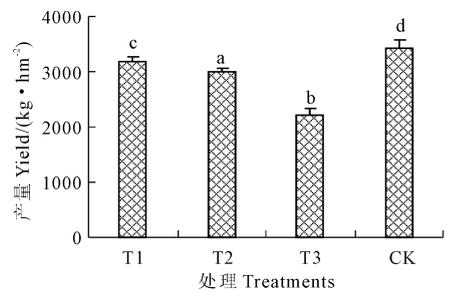


图 1 连作对谷子产量的影响

Fig. 1 Effects of continuous cropping on yields of foxtail millet

### 2.2 连作对根际土壤化学性质的影响

由表 1 可见,随着谷子连作年限的增加,全氮、速效氮、全磷和速效磷含量均有所降低,但不同连作年限各处理间全磷含量无显著差异( $P > 0.05$ ),各连作处理间速效氮含量差异显著( $P < 0.05$ )。CK 处理的全氮、速效氮和速效磷含量显著高于 T2 和 T3 处理,但与 T1 处理差异不显著( $P > 0.05$ );CK 处理的速效钾含量略低于 T1 处理( $P > 0.05$ ),显著低于 T2 和 T3 处理( $P < 0.05$ )。

表 1 不同连作年限下谷子根际土壤基本性质

Table 1 The basic properties of rhizosphere soils under different continuous cropping years

处理 Treatment	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> ) Total N	速效氮/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Available N	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> ) Total P	速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Available P	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Available K	pH
T1	0.98 ± 0.05ab	86.01 ± 1.89a	0.09 ± 0.02a	14.00 ± 0.67ab	130 ± 7.80ab	8.3a
T2	0.94 ± 0.01bc	78.50 ± 2.10b	0.08 ± 0.01a	13.08 ± 0.25b	138 ± 5.40c	8.4b
T3	0.85 ± 0.03c	69.03 ± 2.05c	0.08 ± 0.01a	9.67 ± 0.54c	137 ± 4.50bc	8.6c
CK	1.05 ± 0.06a	86.63 ± 1.50a	0.10 ± 0.01a	14.68 ± 0.71a	125 ± 4.51a	8.4b

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异在  $P < 0.05$  水平显著。

Note: Different small letters in the same column means significant difference at 0.05 probability.

### 2.3 连作对土壤酶活性的影响

不同连作年限及轮作谷子土壤脲酶活性随生育期均呈现先升后降的变化趋势(图 2),CK 处理的脲酶活性持续增大到灌浆期,而各连作处理在开花期后便开始降低。T3 处理各时期脲酶活性显著低于其它处理( $P < 0.05$ ),CK 处理在各生育期显著高于连作处理( $P < 0.05$ )。除播种期 T2 处理略高于 T1 外,在其它生育期各处理对土壤脲酶的影响表现为:CK > T1 > T2 > T3。

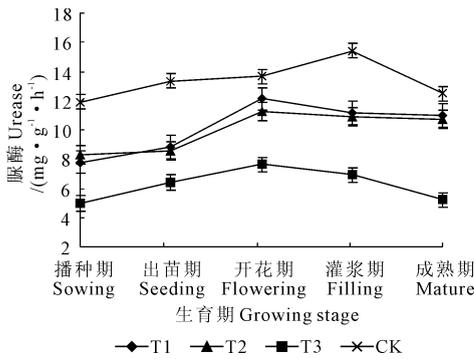


图 2 连作对土壤脲酶活性的影响

Fig.2 Effects of continuous cropping on urease activities in soil

不同种植处理下土壤碱性磷酸酶活性变化趋势大致相同,随着生育期的推进,不同年限连作及轮作谷子土壤碱性磷酸酶活性均呈现先升后降的变化过程(图 3)。T1 处理在各生育期均高于 CK 处理,而 T3 处理在各生育期均比 CK 处理低。随着连作年限的增加,土壤碱性磷酸酶活性呈逐渐降低趋势,即 T1 > T2 > T3。各处理间差异达显著性水平( $P < 0.05$ )。

由图 4 可知,T1 和 T2 处理蔗糖酶活性变化趋势与 CK 变化趋势大致相同,都呈现先降后升,在开花期以后又下降的变化趋势;T3 处理蔗糖酶活性则与 CK 不同,一直呈下降趋势。各生育时期 T2 和 T3 处理较 CK 处理之间差异显著( $P < 0.05$ )。在谷子整个生育期间土壤蔗糖酶平均活性依次为 T1: 47.35 mg·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>、T2:35.28 mg·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>、T3:30.53

mg·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>、CK:47.92 mg·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>,随着连作年限的增加,土壤蔗糖酶的活性逐渐降低,且均低于对照轮作(CK)处理。

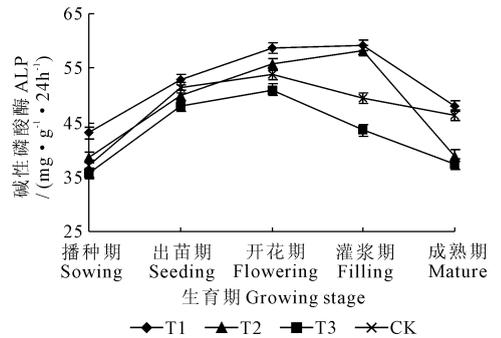


图 3 连作对土壤碱性磷酸酶活性的影响

Fig.3 Effects of continuous cropping on alkaline phosphatase activities in soil

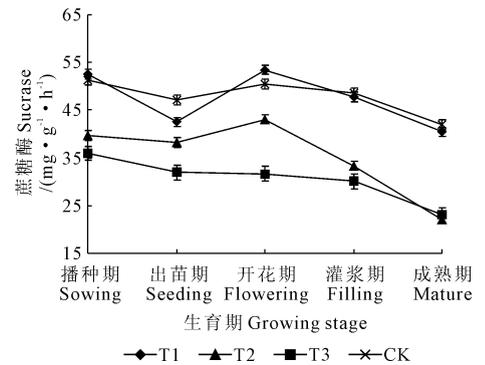


图 4 连作对土壤蔗糖酶活性的影响

Fig.4 Effects of continuous cropping on sucrose activities in soil

由图 5 可知,从播种到成熟,不同种植处理土壤过氧化氢酶活性变化不同。T1 和 CK 处理变化趋势一致,前期升高,自开花期后开始下降;T2 和 T3 处理在出苗期过氧化氢酶活性升高然后一直保持下降趋势,直到成熟期略有上升。在整个谷子生育期 T1 较 CK 处理间无显著差异( $P > 0.05$ ),T1 和 CK 处理土壤过氧化氢酶活性均高于 T2 和 T3,在开花期差异尤为显著,相对于 CK,T2 和 T3 分别降低 20.2% 和 29.0%。

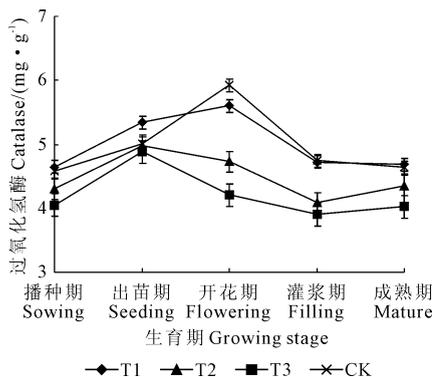


图 5 连作对土壤过氧化氢酶活性的影响

Fig.5 Effects of continuous cropping on catalase activities in soil

### 3 结论与讨论

本研究表明,谷子连作会降低产量,且连作时间越长减产越明显;连作对土壤养分和酶活性有显著影响。土壤养分和土壤酶活性是衡量土壤肥力水平和生理状况的重要指标,两者之间也存在着显著相关性,土壤酶参与土壤中的各种生物化学过程,如腐殖质的分解转化、土壤中化合物的氧化还原、水解转化等<sup>[17]</sup>,因此,土壤酶活性可以在一定程度上表征土壤肥力的大小,影响着土壤的代谢过程,是表征与评价土壤肥力的重要参数之一<sup>[18]</sup>。

连作会改变土壤微环境,对土壤养分产生一定的影响<sup>[19]</sup>,在不施肥情况下,谷子连作土壤氮、磷含量均呈降低趋势,且氮素降低更快。由于轮作 CK 处理中有豆科植物,在一定程度上减轻了土壤氮素的消耗,轮作 CK 处理土壤氮含量相对高于连作处理。连作 3 a(T2)和连作 4 a(T3)土壤速效钾含量显著高于轮作(CK),速效钾包括水溶性钾和交换性钾,当土壤中速效钾积累时会对土壤环境的渗透压产生改变,影响作物对  $K^+$  离子以及其它营养物质的吸收,从而影响作物的生长发育。谷子连作还显著增加了土壤的 pH 值,土壤 pH 经过 4 a 谷子连作后,pH 从 8.3 提升到 8.6,使土壤盐碱化,这可能与谷子根系对酸性阴离子元素的吸收和根系分泌物有关。

本研究表明,随着连作年限的增加,土壤脲酶活性逐年降低。土壤脲酶是一种专性酰胺酶,能酶促肽键的水解反应,脲酶活性在一定程度上反映了土壤供氮状况<sup>[20]</sup>。连作使其活性降低可能是因为土壤脲酶主要来源于微生物<sup>[21]</sup>,而多年连作使土壤微生物种群发生变化,使脲酶活性降低。对照轮作处理的土壤脲酶活性在各个生育期均高于连作处理,这可能是对照处理的前茬作物为芸豆,而豆科植物的固氮作用使土壤氮素含量增加,而土壤中氮素含量与土壤脲酶活性呈正相关<sup>[10]</sup>。

本研究表明,随着谷子连作年限的增加,土壤碱性磷酸酶活性呈逐渐降低趋势,其中 T3 相比于 T1 显著降低,而 T1 与 T2 处理的磷酸酶活性在全生育期的均值都大于 CK 处理。土壤碱性磷酸酶可以催化降解土壤中多种磷酸化合物,加速有机磷的脱磷速度,因此土壤磷酸酶活性对土壤的供磷水平具有关键作用<sup>[22]</sup>。谷子短期连作对土壤磷酸酶的活性影响不大,而长期连作会显著降低磷酸酶活性。

本研究表明,谷子连作会降低土壤蔗糖酶的活性,且连作年限越长活性越低。蔗糖酶是催化蔗糖水解成为葡萄糖和果糖的一种酶,可以增加土壤中易溶性营养物质,提高土壤的生物活性,反映土壤熟化程度<sup>[23]</sup>。蔗糖酶活性的降低使得土壤中易溶性营养物质减少,土壤熟化程度减低,不利于作物的生长发育,这可能是谷子连作产量降低的原因之一。

本研究表明,连作会降低过氧化氢酶活性,与轮作(CK)相比,连作 2 a(T1)略有降低,连作 3 a(T2)和连作 4 a(T3)的降低程度更为显著。土壤过氧化氢酶能催化分解过氧化氢形成水和氧气,解除由于植物或微生物代谢产生的过氧化氢对于生物和土壤的毒害作用<sup>[24-25]</sup>。随着谷子长期连作使过氧化氢水解反应受到抑制,根际土壤中过氧化氢毒害作用加重,这可能是谷子连作障碍发生的原因之一,短期连作对过氧化氢酶活性的抑制作用不显著;轮作能有效加强土壤氧化能力,提升过氧化氢分解能力。

连作障碍是土壤-微生物-植物-气候综合相互作用的结果,各类土壤酶的反应地物和产物之间也存在相互利用的关系<sup>[26]</sup>。因此仅从土壤酶活性这一单一指标变化还很难从机理上全面解释可能发生的连作障碍,且单一因素的研究很难全面完整地解释田间试验状况,谷子长期连作对土壤微生物类群、土壤物理化学性质及土壤酶活性的影响还需进一步深入研究。本研究表明,在连作不施肥条件下,谷子产量会逐年降低;连作影响土壤酶活性和主要养分含量,为维持地力,提高谷子产量,还需施用化肥;与豆科植物的轮作倒茬能在一定程度上补充土壤氮素亏缺,因此在谷子生产上应尽可能采用与豆科作物轮作倒茬。

#### 参考文献:

- [1] 林汝法,柴岩,廖琴,等.中国小杂粮[M].北京:中国农业科学技术出版社,2002.
- [2] 林蔚刚,胡立成,董丽华.连作对大豆生长发育及根际病虫害影响的初步分析[J].黑龙江农业科学,1997,(1):10-14.
- [3] 薛庆喜,杨思平,张玉春,等.不同作物茬口对连作大豆产量及农艺性状的影响[J].大豆科学,2009,28(1):72-75.

- 营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
- [7] 霍竹. 秸秆还田和氮肥施用对夏玉米生育及产量影响的研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2003.
- [8] 霍竹, 王璞, 付晋峰. 秸秆还田与氮肥施用对夏玉米物质生产的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 95-98.
- [9] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 618-623.
- [10] 杨治平, 周怀平, 李红梅. 旱农区秸秆还田秋施肥对春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 49-52.
- [11] 刘巽浩. 秸秆还田的机理与技术模式[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 14-15.
- [12] 仲爽, 李坤坤, 任安, 等. 不同水肥组合对玉米产量与耗水量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(2): 127-129.
- [13] 解文艳, 樊贵盛, 周怀平, 等. 秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 60-67.
- [14] 高金虎, 孙占祥, 冯良山, 等. 秸秆与氮肥配施对玉米生长及水分利用效率的影响[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(11): 116-120.
- [15] Lopez-Fando C, Pardo M T. Changes in soil chemical characteristics with different tillage practices in a semi-arid environment[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 104(2): 278-284.
- [16] Hemmat A, Eskandari I. Tillage system effects upon productivity of a dryland winter wheat-chickpea rotation in the northwest region of Iran[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 78(1): 69-81.
- [17] Huang Yilong, Chen Liding, Fu Bojie, et al. The wheat yields and water-use efficiency in the Loess Plateau: straw mulch and irrigation effects[J]. Agricultural Water Management, 2005, 72(3): 209-222.
- [18] 慕平. 黄土高原农田综合地力及碳汇特征对连续多年玉米秸秆全量还田的响应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
- [19] 高旺盛, 梁志杰, 崔勇. 美国农作制度可持续发展主要技术途径[J]. 中国农业信息, 2004, (12): 16.
- [20] 罗珠珠, 黄高宝, 张国盛. 保护性耕作对黄土高原旱地表土容重和水分入渗的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(4): 7-11.
- [21] 陈素英, 张喜英, 刘孟雨. 玉米秸秆覆盖麦田下的土壤温度和土壤水分动态规律[J]. 中国农业气象, 2002, 23(4): 34-37.
- [22] 马晓丽, 贾志宽, 肖恩时, 等. 渭北旱塬秸秆还田对土壤水分及作物水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5): 59-64.

(上接第 126 页)

- [4] 崔雯雯, 高小丽, 马瑞瑞, 等. 连作对糜子抽穗后光合特性和干物质积累的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(9): 55-60.
- [5] Bending G D, Putland C, Rayns F. Changes in microbial community metabolism and labile organic matter fractions as early indicators of the impact of management on soil biological quality[J]. Biology & Fertility of Soils, 2000, 31(1): 78-84.
- [6] 刘建国, 张伟, 李彦斌, 等. 新疆绿洲棉花长期连作对土壤理化性状与土壤酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 725-733.
- [7] 柴仲平, 梁智, 王雪梅, 等. 连作对棉田土壤物理性质的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(8): 192-195.
- [8] Aparicio V, Costa J L. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96: 155-165.
- [9] 崔瑞, 李玉荣. 花生重茬连作危害与合理轮作倒茬效果的调查研究[J]. 辽宁农业科学, 2008, (1): 18-20.
- [10] 孙冰玉, 于方玲, 元野, 等. 烤烟连作对耕层土壤理化性质和土壤脲酶的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(4): 1826-1827.
- [11] 唐江华, 徐文修, 王娇, 等. 作物茬口对棉花生长发育及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(11): 42-46.
- [12] 马海燕, 徐瑾, 郑成淑, 等. 非洲菊连作对土壤理化性状与生物性状的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(18): 3733-3740.
- [13] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [14] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [15] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1988.
- [16] 杨兰芳, 曾巧, 李海波, 等. 紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 207-210.
- [17] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [18] Allison V J, Condron L M, Peltzer D A, et al. Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef chronosequence, New Zealand[J]. Soil biology & biochemistry, 2007, 39(7): 1770-1781.
- [19] 高扬, 高小丽, 张东旗, 等. 连作对荞麦产量、土壤养分及酶活性的影响[J]. 土壤, 2014, 46(6): 1091-1096.
- [20] 孙光闻, 陈日远, 刘厚诚. 设施蔬菜连作障碍原因及防治措施[J]. 农业工程学报, 2005, 21(S): 184-188.
- [21] Stella A E, Max D C. Effect of soybean plant populations in a soybean and maize rotation[J]. Agronomy Journal, 2001, 93: 396-403.
- [22] 陈慧, 郝慧荣, 熊君, 等. 地黄连作对根际微生物区系及土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2755-2759.
- [23] 谷岩, 邱强, 王振民, 等. 连作大豆根际微生物群落结构与土壤酶活性[J]. 中国农业科学, 2012, 45(19): 3955-3964.
- [24] 高扬, 高小丽, 马瑞瑞, 等. 轮作连作荞麦田主要微生物类群及土壤酶活性变化[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(4): 47-53.
- [25] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 生物炭对土壤酶活性和糜子产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 146-158.
- [26] 王飞, 李世贵, 徐凤花, 等. 连作障碍发生机制研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (5): 6-13.