

连作对马铃薯生长和土壤健康的影响及机制研究

焦润安^{1,2},徐雪风^{1,2},杨宏伟^{1,2},冯焕琴^{1,2},张舒涵^{1,2},张俊莲^{2,3},李朝周^{1,2},李 健⁴

(1.甘肃农业大学生命科学技术学院,甘肃 兰州 730070; 2.甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室,甘肃 兰州 730070;

3.甘肃农业大学园艺学院,甘肃 兰州 730070; 4.甘肃农垦条山集团,甘肃 白银 730400)

摘 要:以连作马铃薯土壤及不同连作年限马铃薯为材料,通过分析不同连作年限(分别连作 0、3、6 a)马铃薯生长发育及土壤健康各因素的变化,对连作马铃薯生长发育及土壤健康的变化及机制进行了探讨。结果表明,随连作年限增加,土壤有机质、速效磷含量以及土壤 pH 值逐渐降低,在连作 6 a 时,土壤有机质含量、速效磷含量和土壤 pH 值分别比对照下降了 50.72%、34.10%和 8.68%;碱解氮含量上升,在连作 3 a 和 6 a 时,碱解氮分别比对照升高了 84.62%、169.23%;土壤肥力相关酶活性下降,在连作 6 a 时,土壤中碱性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性分别比对照下降了 36.34%、35.72%、29.83%和 74.16%;酚酸类化感物质含量升高,在连作 6 a 时,土壤中羟基苯甲酸、香草酸、阿魏酸和总酚酸的含量比对照升高了 33.61%、31.30%、51.64%、40.57%;细菌和放线菌数量下降,真菌数量升高,在连作 6 a 时,细菌和放线菌数量比对照降低了 88.59%和 84.21%,真菌数量在连作 6 a 时比对照升高了 253.85%,说明连作造成土壤健康状况下降。研究还发现随着连作年限增加,马铃薯叶片 MDA 含量升高,连作 6 a 时 MDA 含量比对照增加了 142.47%,说明马铃薯叶片遭受了一定程度的脂质过氧化;马铃薯叶片相对叶绿素含量、净光合速率和气孔导度下降,连作 6 a 时分别比对照降低了 13.30%、13.98%和 50.00%;株高、茎粗、地上生物量和块茎产量逐渐下降,连作 6 a 时分别比对照下降了 42.49%、54.40%、58.35%和 61.79%,说明连作严重影响了马铃薯的光合能力和生长发育。可见,马铃薯连作导致了土壤理化性质恶化,代谢活力降低,养分失去平衡,土壤酚酸类物质大量累积,最终导致微生物群系发生变化,从而从整体上降低了土壤的健康状况,严重影响马铃薯生长发育。

关键词:连作;马铃薯;生长发育;土壤健康

中图分类号:S532 **文献标志码:**A

Study on the effect and its mechanism of continuous cropping on potato growth and soil health

JIAO Run-an^{1,2}, XU Xue-feng^{1,2}, YANG Hong-wei^{1,2}, FENG Huan-qin^{1,2},
ZHANG Shu-han^{1,2}, ZHANG Jun-lian^{2,3}, LI Chao-zhou^{1,2}, LI Jian⁴

(1. College of Life Sciences and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Key Laboratory of Crop Genetics and Germplasm Enhancement, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

4. Gansu Agricultural Reclamation Tiaoshan Farm, Baiyin, Gansu 730400, China)

Abstract: The soil and potatoes of different years from continuous cropping were used to analyze the growth changes of potato and factor variation of soil health from different years (0, 3, 6 years) of continuous cropping. The effect and its mechanism of continuous cropping on potato growth and soil health was reported in this paper. The results showed that as potato continuous cropping continued, soil organic matter content, available phosphorus content and pH value declined, with 50.72%, 34.10% and 8.68%’s decrease, respectively, compared with CK after 6 years’ continuous cropping. Available nitrogen content rised, with 84.62% and 169.23%’s increase, respectively, compared with CK after 3 and 6 years’ continuous cropping. Soil fertility-related enzyme activity declined

收稿日期:2017-03-17

修回日期:2017-05-02

基金项目:国家科技支撑计划课题项目(2012BAD06B03);“十三五”马铃薯产业体系(CARS-10-02A、CARS-10-07B)

作者简介:焦润安(1993-),男,甘肃通渭人,硕士研究生,主要从事植物逆境生理的研究。E-mail: jiaora0328@163.com

通信作者:李朝周(1963-),男,山东苍山人,教授,博士,主要从事植物抗性生理及相关领域的研究。E-mail: licz@gsau.edu.cn

gradually, with the decrease of alkaline phosphatase by 36.34%, urease by 35.72%, sucrase by 29.83% and catalase by 74.16%, compared with CK after 6 years' continuous cropping. Soil phenolic acids content (except P-hydroxybenzoic acid content) rised, with the increase of hydroxybenzoic acid by 33.61%, vanillic acid by 31.30%, ferulic acid by 51.64%, total phenolic acid by 40.57%, compared with CK after 6 years' continuous cropping. The number of soil bacteria and actinomycete declined while the number of fungi rised as continuous cropping continued, with the decrease of soil bacteria by 88.59%, actinomycete by 84.21%, and the increase of fungi by 253.85% compared with CK after 6 years' continuous cropping, which indicated the decline in soil health. MDA content of potato leaf rised, with 142.47% 's increase compared with CK after 6 years' continuous cropping, which indicated lipid peroxidation of potato leaves. Relative chlorophyll content, stomata conductance and net photosynthetic rate of potato leaf declined, with 13.30%, 13.98% and 50.00% 's decrease, respectively, compared with CK after 6 years' continuous cropping. Potato plant height, stem diameter, aboveground biomass and plant tuber yield declined, with 42.49%, 54.40%, 58.35% and 61.79% 's decrease, respectively, compared with CK after 6 years' continuous cropping, which indicated the photosynthetic capacity and growth of the potato seedlings were affected by continuous cropping. So it could be concluded that continuous cropping deteriorated the physical and chemical properties of the soil, reduced the fertility-related enzyme activity, maintained the nutrient imbalance and increased the content of phenolic acids, and finally changed the microbial composition of the soil. In a word, continuous cropping deteriorated the soils health as a whole, thus affected potato growth and development severely.

Key words: continuous cropping; potato; growth; soil health

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 是全球种植面积最大的蔬菜型作物之一^[1]。随着产业结构调整,马铃薯已成为我国西部地区稳产高效的优势作物,栽培面积不断扩大,并导致马铃薯连作种植越来越广泛,连作现象日益突出^[2]。马铃薯连作引起了土壤氮、磷、钾养分比例失衡^[3-4]、马铃薯生长发育减弱、病虫害现象加剧^[5-6]等一系列问题;究其原因,连作对土壤的影响为其根本原因,但连作对马铃薯土壤健康的影响及其机制还缺乏系统研究。

土壤健康是保证生态体系健康的基础,是农产品安全和人类健康的必要条件^[7]。目前国际上比较通用的土壤健康概念为土壤生态系统维持生物生产力、改善环境质量和促进动植物健康的能力^[8]。澳大利亚学者 Pankhurst 等提出了表征土壤健康的生态指标体系,主要包括微生物量、土壤病原菌、中型土壤动物区系、大型土壤动物区系、土壤酶和植物。这些评价土壤健康的生态指标为进一步研究土壤健康提供了更大的空间^[9-11]。Anderson 指出土壤健康应主要集中在土壤的生物成分上^[12-13]。康奈尔土壤健康评价系统则从物理指标、生物指标、化学指标 3 个方面评价农田土壤的综合健康状况^[14]。

自毒作用是作物自身的分泌物、茎、叶的淋溶物及残体分解产物所产生的有毒物质(化感物质)抑制根系生长发育,降低根系活力,改变土壤微生物环境,提高病原菌的繁殖速度,引起作物生长不

良、发病、甚至死亡的效应。从大量的研究中得出,酚酸类物质是引起连作障碍的重要的自毒物质^[15]。当前主要研究的自毒物质有对羟基苯甲酸、香草酸^[16]、阿魏酸^[17]等。

本试验以马铃薯不同连作年限的土壤为主要研究对象,结合不同连作年限马铃薯的农艺性状和幼苗的抗性生理,探讨了马铃薯不同连作年限土壤健康各因素的变化,分析了连作影响马铃薯生长发育及土壤健康的机制,旨在了解马铃薯连作过程中土壤健康各因素的变化规律及其与连作马铃薯生长发育的关系,为有效减轻马铃薯连作障碍,提高马铃薯块茎的产量、品质和改善土壤健康状况提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

马铃薯主栽品种大西洋,由甘肃省景泰县条山农场提供。

1.2 试验设计

试验在甘肃省景泰县条山集团马铃薯种植基地进行。实验选取马铃薯连作 0 a (前茬种植玉米)、连作 3 a 和连作 6 a 的大田进行种植,各连作田按“V”字型选取 3 个样方(即 3 次重复),各样方面积为 27 m² (1.35 m×10 m×2 垄),在种植前,各样方采用 5 点取样法,采集 0~30 cm 土层根区耕层土,将所得 5 个土样混匀后,仔细剔除植物残体、石头和

其他杂物,带回实验室用于土壤相关指标的测定;待马铃薯幼苗出土后 45 d,在各样方内取马铃薯幼苗基部第二、第三叶片进行相关生理指标测定。在收获前一周进行马铃薯农艺性状的测定。每个实验指标测定重复 3 次。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤理化性质测定 参照关松荫^[18]的方法,土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;土壤碱解氮采用碱解扩散法测定;土壤速效磷采用 NaHCO₃ 浸提,分光光度法测定;土壤 pH 值用酸度计法测定。

1.3.2 土壤肥力相关酶活性分析 参照关松荫^[18]的方法,脲酶活性采用苯酚钠—次氯酸钠比色法测定,结果以 24 h 后每克土壤(干重)中 NH₄₊-N 的毫克数表示;碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠法测定,结果以 24 h 后每克土壤中释放出酚的毫克数表示;蔗糖酶的活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,结果以 24 h 后每克土壤葡萄糖毫克数表示;过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定,其活性以每克土壤所消耗的 0.1 mol·L⁻¹ KMnO₄ 溶液的毫升数表示。

1.3.3 土壤酚酸类化感物质含量测定 土壤总酚酸含量测定采用磷钼酸—磷钨酸盐比色法测定^[19];对羟基苯甲酸、香草酸和阿魏酸含量采用高效液相色谱法测定^[20]。

1.3.4 土壤微生物数量分析 采用李坤^[21]的方法,稍作修改,测定土壤微生物数量:采用牛肉膏蛋白胨培养基培养细菌,改良后的高氏 1 号培养基培养放线菌(每 300 mL 培养基加 3%的重铬酸钾 1 mL,以抑制细菌和霉菌的生长),改良马丁氏培养基培养真菌(每 100 mL 培养基中加 1%孟加拉红水溶液 0.33 mL、1%链霉素 0.3 mL),每个处理的土样称取 5 g,加入装有 90 mL 无菌水的三角瓶中,振荡 45 min,即为 10⁻¹浓度的土壤样液,静置 1 min,再逐次稀释(细菌稀释至 10⁻⁵,放线菌稀释至 10⁻⁴,真菌稀释至 10⁻³),每个平板重复 3 次,平板涂布法接种,在恒温培养箱中培养,细菌在 28℃下培养 3 d,放线菌在 30℃下培养 7 d,真菌在 25℃下培养 5 d。

微生物数量计算公式:

菌数/土重=(同一稀释度 *N* 次重复的菌落平均数×稀释倍数 *n*)/土干重

1.3.5 光合生理指标和 MDA 含量测定 相对叶绿素含量:采用 SPAD-502 叶绿素仪测定;净光合速率、气孔导度:采用美国便携式 LI-6400 光合仪于上午 9:00—11:00 进行测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[22]。

1.3.6 农艺性状测定 株高:植株茎的最高部位距离土面的高度;茎粗:植株与土面交界处地上茎直径,用游标卡尺测量;根长:收获后用卷尺测量 5 条最长根,取平均值;生物量:收获时将完整植株整株挖出,120℃杀青 40 min 后,80℃恒温干燥箱中烘烤 12 h,称重;块茎产量:收获时用电子天平测定。

1.4 数据分析

采用 Excel 2007 软件进行数据处理和绘图,SPSS 17.0 软件进行处理间差异显著性分析,采用 Duncan 法进行处理间差异的多重比较,取 *P*<0.05 为显著性差异。

2 结果与分析

2.1 马铃薯连作对土壤理化性质的影响

随马铃薯连作年限增加,连作后土壤碱解氮含量升高,在连作 3 a 和 6 a 时,碱解氮分别比对照升高了 84.62%和 169.23%;pH 值分别比对照下降了 3.45%和 8.68%;速效磷和有机质含量显著下降,在连作 3 a 和 6 a 时,速效磷分别比对照下降了 19.69%和 34.10%,有机质分别比对照下降了 27.46%和 50.72%,可见土壤的养分比例失衡,理化性质变劣,尤其在连作 6 a 时较为严重(表 1)。

2.2 马铃薯连作对土壤肥力相关酶活性的影响

结果显示(图 1),随马铃薯连作年限增加,土壤中碱性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性均呈现显著下降(*P*<0.05)。在连作 3 a 和 6 a 时,碱性磷酸酶活性分别比对照下降了 18.21%和 36.34%,脲酶活性分别比对照下降了 19.24%和 35.72%,蔗糖酶活性分别比对照下降了 18.30%和 29.83%,过氧化氢酶活性分别为对照的 44.96%和 74.16%。

2.3 马铃薯连作对土壤酚酸类化感物质含量的影响

不同连作年限土壤中对羟基苯甲酸、香草酸、阿魏酸和总酚酸的含量测定的结果显示对羟基苯甲酸含量在连作 3 a 时大幅度升高,比对照高 73.77%,连作 6 a 时比对照高 33.61%;香草酸含量在连作 3 a 时比对照下降 29.01%,在连作 6 a 时高于对照 31.30%;阿魏酸和总酚酸含量随着连作年限的增长而增加,阿魏酸在连作 3 a 时含量增加,但与对照无显著差别,在连作 6 a 时都达到了显著差异水平,土壤中阿魏酸和总酚酸的含量分别比对照高 51.64%、40.57%(图 2A~D)。说明马铃薯连作后土壤中酚酸物质增加可能会对马铃薯产生自毒作用,影响马铃薯的生长。

表 1 马铃薯连作对土壤理化性质的影响

连作年限/a Continuous cropping duration	pH	碱解氮含量/(mg·kg ⁻¹) Available nitrogen content	速效磷含量/(mg·kg ⁻¹) Available phosphorus content	有机质含量/(g·kg ⁻¹) Organic matter content
0	8.03 ±0.050a	24.27 ±3.523c	46.60 ±2.320a	31.64 ±0.596a
3	7.75 ±0.025b	44.80 ±1.400b	37.42 ±0.228b	22.95 ±0.221b
6	7.33 ±0.026c	65.33 ±2.139a	30.71 ±0.994c	15.59 ±0.525c

注:表中数据为平均值±标准差,同列不同小写字母表示在 $P<0.05$ 下差异显著,下同。
Note: The data indicates mean±SD. Different small letters in the same column mean significant difference at $P<0.05$.The same below.

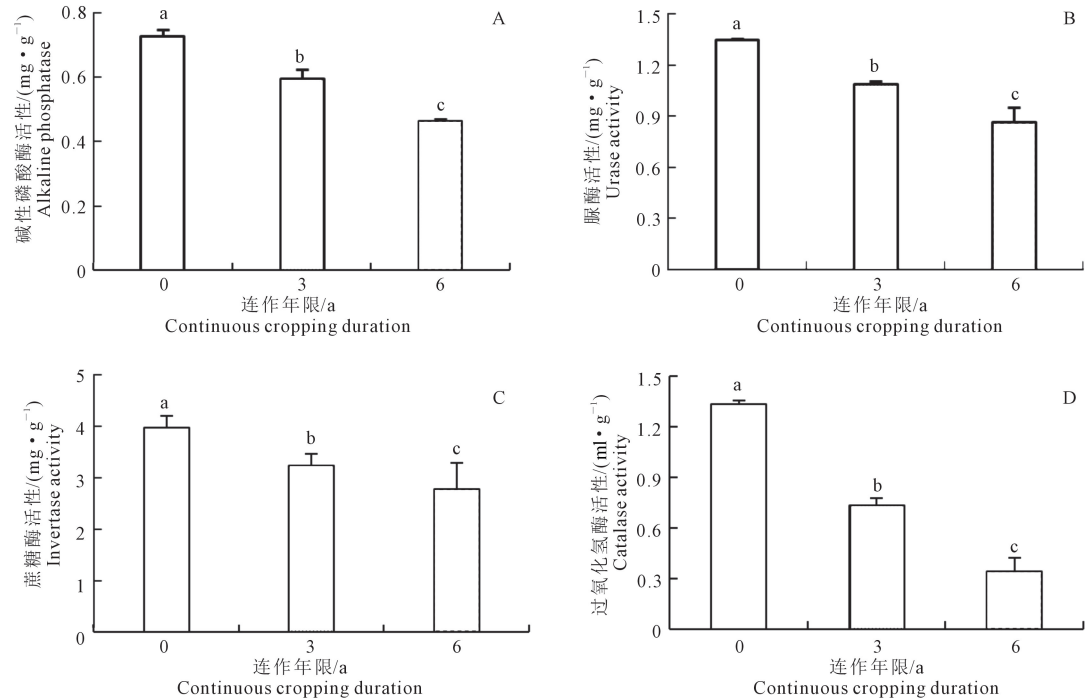


图 1 马铃薯连作对土壤肥力相关酶活性的影响

Fig.1 Effects of potato continuous cropping on soil fertility-related enzymes activity

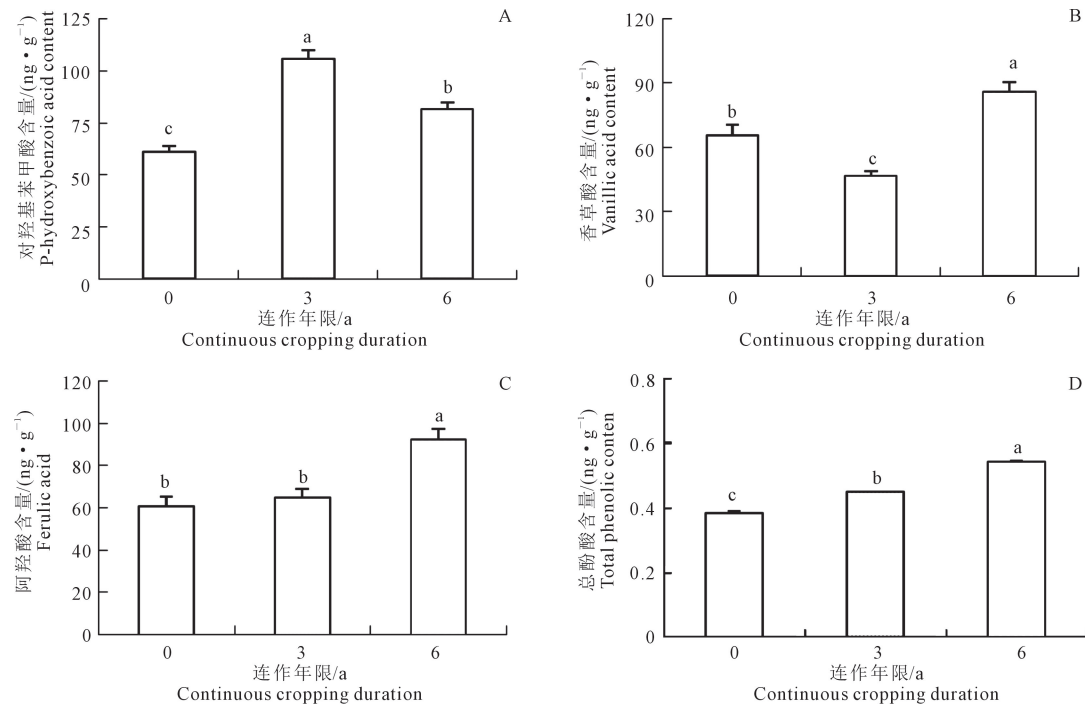


图 2 马铃薯连作对土壤酚酸类化感物质含量的影响

Fig.2 Effects of potato continuous cropping on soil phenolic acids contents

2.4 马铃薯连作对土壤微生物数量的影响

连作对马铃薯土壤微生物群落结构影响较大,土壤中细菌数量和放线菌数量呈下降趋势,细菌数量在连作 3、6 a 时比对照降低了80.61%、88.59%;放线菌数量在连作 3、6 a 时比对照降低了 50.00%,84.21%,土壤生物活性下降。真菌数量随连作年限增加显著上升,在连作 3 a 和 6 a 时分别比对照升高了96.15%和 253.85%(表 2)。

土壤中细菌与真菌数量的比值(B/F)可以表征土壤肥力大小^[23],随着连作年限的增加,B/F 值呈降低的趋势,连作 6 a 时最小,是对照(最大值)的 3.224%。由此看来连作年限增加相对抑制细菌繁

殖,改变了土壤微生物群落结构,削减了土壤肥力。

2.5 连作对马铃薯幼苗相对叶绿素含量、净光合速率、气孔导度和 MDA 含量的影响

连作显著影响了马铃薯幼苗的光合效率($P<0.05$),随着连作年限的增加,相对叶绿素含量、净光合速率、气孔导度均呈下降趋势,尤其在连作6 a 时分别比对照降低了 13.30%、13.98%和 50.00%(表 3)。连作后的马铃薯叶片 MDA 含量呈上升趋势。统计分析显示,与对照相比,连作 3 a 和 6 a 马铃薯的 MDA 含量分别增加了 41.93%和 142.47%,膜脂过氧化程度加重,对马铃薯植株产生危害(表 3)。

表 2 马铃薯连作对土壤微生物数量的影响

Table 2 Effects of potato continuous cropping on soil microorganism quantities

连作年限 Continuous cropping duration/a	细菌(B) Bacteria		放线菌 Actinomycete		真菌(F) Fungi		细菌/真菌 B/F
	数量 Amount	百分比 Percentage/%	数量 Amount	百分比 Percentage/%	数量 Amount	百分比 Percentage/%	
	$/(\times 10^6 \text{CFU} \cdot \text{g}^{-1})$		$/(\times 10^6 \text{CFU} \cdot \text{g}^{-1})$		$/(\times 10^6 \text{CFU} \cdot \text{g}^{-1})$		
0	8.77±1.36a	98.48	1.27±0.06a	1.42	0.87±0.06c	0.10	1011.54
3	1.70±0.61b	95.49	0.63±0.06b	3.56	1.70±0.10b	0.95	100.00
6	1.00±0.17c	95.18	0.20±0.10c	1.90	3.07±0.06a	2.92	32.61

表 3 连作对马铃薯幼苗相对叶绿素含量、净光合速率、气孔导度和丙二醛含量的影响

Table 3 Effect of continuous cropping on SPAD value, net photosynthetic rate, stomatal conductance and the content of MDA of potato seedling

连作年限/a Continuous cropping duration	相对叶绿素含量 SPAD value	净光合速率 Net photosynthetic rate $/(\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	气孔导度 Stomatal conductance $/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	丙二醛含量 MDA content $/(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW})$
0	51.37±0.71a	26.53±0.85a	0.68±0.05a	3.10±0.82c
3	48.20±0.70b	25.56±0.66a	0.58±0.03b	4.41±0.46b
6	44.53±0.32c	22.83±1.28b	0.34±0.05c	7.53±0.67a

2.6 连作对马铃薯农艺性状的影响

马铃薯株高、茎粗、地上生物量和块茎产量随连作年限的增加都有所下降,在连作 3 a 和 6 a 时马铃薯株高、茎粗、地上生物量和块茎产量分别比对

照下降了 8.17%、29.13%、28.04%、17.07%和 42.49%、54.40%、58.35%、61.79%。根长在连作 3 年时比对照显著增加了 14.46%,但在连作 6 年时比对照下降了 17.21%,达显著水平(表 4)。

表 4 连作对马铃薯农艺性状的影响

Table 4 Effect of continuous cropping on agronomic characters of potato

连作年限/a Continuous cropping duration	株高/cm Plant height	茎粗/cm Stem diameter	根长/cm Root length	地上部干重/ $(\text{g} \cdot \text{株}^{-1})$ Shoot dry weight/ $(\text{g} \cdot \text{plant}^{-1})$	块茎产量/ $(\text{g} \cdot \text{株}^{-1})$ Tuber yield/ $(\text{g} \cdot \text{plant}^{-1})$
0	40.40 ±1.08a	1.47 ±0.29a	19.37 ±0.76b	27.93 ±2.87a	532.00±6.63a
3	37.10 ±2.34b	1.04 ±0.05b	22.17 ±2.27a	20.10 ±4.52b	441.17 ±10.15b
6	23.23 ±0.25c	0.67 ±0.03c	16.03 ±1.53c	11.63 ±0.70c	203.28 ±11.23c

3 讨 论

植物生长的首要条件是拥有良好的土壤环境,土壤肥力的高低体现在土壤肥力相关酶活性的强弱、理化性质的优劣及土壤微生物群落的多样性等

方面^[24],这些指标是衡量土壤是否健康的关键指标。有研究得出连作会导致土壤理化性质和生物学活性的改变^[25],长期连作会导致土壤容重增大,土体紧实板结,结构性变差;还导致土壤孔隙度下降,透气性减弱,不利于农业生产实践。本文研究

结果表明,随马铃薯连作年限的增加,土壤碱解氮含量上升(表1),玉苏甫·买买提等^[26]研究得出碱解氮随着棉花连作年限的增加而有规律性的增加,与本文结果基本一致,究其原因可能与施肥措施密切相关;土壤pH值与土壤中微生物区系的变化密切相关,进而影响多种营养元素的转化方向、转化过程、形态及养分的有效性^[27],本文结果表明随着连作年限的增加,土壤pH值减小,说明土壤出现了酸化趋势。刘来等^[28]研究发现,长期连作会造成土壤pH值显著下降,引起土壤酸化,与本文结论一致,土壤pH值降低主要是由土壤酚酸含量的升高造成的,而土壤酚酸含量的增加会抑制土壤中磷元素转化的一些微生物的活动,降低土壤中磷酸酶活性,使得有效磷含量也随着pH值降低而降低。速效磷含量随着连作年限的增加明显下降,这与徐文修等^[25]在棉田土壤进行的试验结果一致,速效磷的含量下降还与连作条件下马铃薯对磷的吸收有关,连作时间越长,马铃薯对土壤营养元素的吸收越多,为了试验对照的需要,每年的施肥量一致,马铃薯对土壤营养元素的需求增加速率大于土壤中磷的有效化速率,导致速效磷含量随连作年限的增加而降低。本试验表明随连作年限增加,有机质含量明显下降。这些指标的变化使得土壤的养分比例失调,理化性质变劣,土壤健康状况下降,尤其在连作6a时较为严重(表1)。

土壤中的酶是表征土壤中物质、能量代谢水平和土壤健康水平的一个重要生物指标^[29],其活动直接影响土壤有机质的矿化和营养成分形态的转化,调节土壤养分对植物体的供给形态^[27],每一种酶的活性都指示一种生物循环过程^[30]。土壤肥力相关酶包括脲酶、磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶等,其活性是评价土壤健康的重要指标^[31]。土壤脲酶能促进尿素的水解,形成 NH_4^+ ,加速土壤中潜在养分的有效化,从而有利于植物的吸收和利用,其活性用来反映土壤氮素状况^[32]。磷酸酶是土壤中的主要水解酶类之一。蔗糖酶参与土壤有机碳生物循环,反映土壤中物质转化的速度,对增加土壤中易溶性营养物质起着重要的作用^[30]。本研究结果表明,马铃薯连作后土壤碱性磷酸酶活性、脲酶活性、蔗糖酶活性减弱(图1A~C),从而影响到营养元素的有效化,如速效磷含量下降;过氧化氢酶能够消除 H_2O_2 的危害,反映了土壤生化反应中氧化还原能力的大小^[30],本研究中马铃薯连作后此酶活性显著下降(图1D),表明连作多年后土壤消除 H_2O_2 的能力降低,使得有害物质积累,这也影响到其它酶活性的

降低。

连作条件下根系分泌物中的酚酸类化感物质在土壤中不断积累,引发自毒作用,影响种子萌发、植株生长、病原菌活性和土壤微生物组成^[17],本试验表明当马铃薯连作年限延长至6a时,土壤酚酸类化感物质含量(除对羟基苯甲酸外)显著升高(图2),造成土壤酸化,影响土壤肥力相关酶和微生物活性,这对土壤健康可能会带来一系列不良影响。

连作明显改变了土壤微生物量和种群分布,植物生长发育将做出适应性应答。有研究表明随着烟草连作年限的延长,细菌数量下降,青枯病病原菌数量减少,真菌数量增加^[27]。马铃薯连作表现出与烟草连作相似的变化,即随连作年限的增加,土壤细菌和放线菌数量下降,真菌数量升高(表2),表明连作促使土壤微生物环境从高肥的“细菌型”土壤向低肥的“真菌型”土壤转化。

由于连作导致根系生长的环境即土壤恶化,根系生长不良,从而导致矿质养分吸收受到影响,因而导致叶绿素含量下降。叶绿素含量降低会影响马铃薯在生长过程中叶片对光能的吸收转换利用,导致光合能力下降,从而使马铃薯叶片成熟较早、同化物积累量下降,造成植株生长下降,这是连作减产的原因之一^[33]。本研究表明,连作后马铃薯幼苗叶片的净光合速率下降,叶绿素相对含量、气孔导度也随之下降(表3),这些变化可能与较长年限的连作造成土壤肥力下降、营养供应缺乏有关,并由于土壤健康状况的恶化导致马铃薯幼苗受到胁迫作用。化感物质能够降低植物叶片中叶绿素含量和光合速率,特别是净光合速率,Patterson^[34]研究表明酚酸类物质会引起大豆叶片光合作用的能力与叶绿素含量的下降,显著地抑制大豆的生长;杉木的化感物质抑制幼苗营养生长期叶绿素的合成代谢,降低净光合速率、蒸腾速率和气孔导度,抑制幼苗生长^[35],本文中马铃薯表现出的随连作年限增加叶片净光合速率下降与连作过程中土壤化感物质积累可能具有密切的关联,这也是土壤健康影响马铃薯生长发育的一个方面。MDA含量通常反映细胞膜脂过氧化程度和植物遭受逆境伤害的程度;本研究发现,连作后马铃薯幼苗叶片MDA含量显著上升(表3),表明连作年限的增加会加重脂质过氧化程度。

农艺性状的高低能够最直观地反映植物受到胁迫程度。本研究结果表明,随着连作年限增加,马铃薯株高、茎粗、地上生物量和块茎产量逐渐下降;在连作6a时,土壤健康状况的重度恶化减弱了

马铃薯幼苗对逆境的防御性反应及抗逆境能力,从而抑制了马铃薯的生长发育,造成马铃薯株高、茎粗、地上部分重、块茎产量均显著低于对照(表 4)。

综上所述,马铃薯连作通过影响土壤理化性质、降低土壤肥力相关酶活性、增加土壤中酚酸类物质含量,改变土壤微生物组成,从而从整体上降低了土壤的健康状况,严重影响马铃薯生长发育。

参 考 文 献:

[1] 柳俊.我国马铃薯产业技术研究现状及展望[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(5):13-18.

[2] 裴国平,王蒂,张俊莲.马铃薯连作障碍产生的原因与防治措施[J].广东农业科学,2010,37(6):30-32.

[3] 吴凤芝,赵凤艳,刘元英.设施蔬菜连作障碍原因综合分析与防治措施[J].东北农业大学学报,2000,31(3):241-247.

[4] 喻景权,杜尧舜.蔬菜设施栽培可持续发展中的连作障碍问题[J].沈阳农业大学学报,2000,31(1):124-126.

[5] 回振龙,李朝周,史文煊,等.黄腐酸改善连作马铃薯生长发育及抗性生理的研究[J].草业学报,2013,22(4):130-136.

[6] 李继平,李敏权,惠娜娜,等.马铃薯连作田土壤中主要病原真菌的种群动态变化规律[J].草业学报,2013,22(4):147-152.

[7] 段莉丽.土壤健康微生物多样性评价指标体系的研究[D].石家庄:河北科技大学,2009.

[8] 钱登峰.华北土石山区典型植物群落土壤健康评价[D].重庆:西南大学,2007.

[9] Neher D A. Role of nematodes in soil health and their use as indicators[J]. Journal of Nematology, 2001.33(4): 161-168.

[10] Ritz K, Trudgill D L. Utility of nematode community analysis as an integrated measure of functional state of soils: Perspectives and challenges[J]. Plant and Soil, 1999,212(1): 1-11.

[11] 杨晓霞,周启星,王铁良. 土壤健康的内涵及生态指示与研究展望[J]. 生态科学,2007,26(4):374-380.

[12] Anderson TH. Microbial eco-hysiological indicators to asses soil quality[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 98: 285-293.

[13] 赵吉.土壤健康的生物学监测与评价[J].土壤,2006,38(2):136-142.

[14] 盛丰.康奈尔土壤健康评价系统及其应用[J].土壤通报,2014,45(6):1289-1296.

[15] 黄玉茜,韩立思,杨劲峰,等.花生植株和土壤水浸液自毒作用研究及土壤中自毒物质检测[J].生态学报,2012,32(19):6023-6032.

[16] 李培栋,王兴祥,李奕林,等.连作花生土壤中酚酸类物质的检测及其对花生的化感作用[J].生态学报,2010,30(8):

2128-2134.

[17] 杨瑞秀.甜瓜根系自毒物质在连作障碍中的化感作用及缓解机制研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2014.

[18] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986:260-360.

[19] 吴萼,徐宁,温美娟. 磷酸-磷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.

[20] 阮维斌,赵紫娟,薛健,等.高效液相色谱法检测与化感现象相关的 5 种酚酸[J].应用与环境生物学报,2001,7(6):609-612.

[21] 李坤.葡萄连作障碍机理及调控途径的研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2010.

[22] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000:173-174.

[23] 徐雪凤,李朝周,张俊莲.轮作油葵对马铃薯生长发育及抗性生理指标的影响[J].土壤,2017,49(1):83-89.

[24] 马玲,马琨,杨桂丽,等.马铃薯连作栽培对土壤微生物多样性的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(5):589-596.

[25] 徐文修,罗明,李大平,等.不同连作年限棉田土壤理化性质及微生物区系变化规律研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(3):134-138.

[26] 玉苏甫·买买提,满苏尔·沙比提,阿曼古丽·艾孜子.棉花连作对渭干河-库车河三角洲绿洲土壤理化性质的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(4):117-121.

[27] 孙冰玉.连作对烟田土壤酶活性、微生物种群数量及土壤理化性质的影响[D].哈尔滨:东北林业大学,2010.

[28] 刘来,黄保健,孙锦,等.大棚辣椒连作土壤微生物数量、酶活性与土壤肥力的关系[J].中国土壤与肥料,2013,(2):5-10.

[29] 方昉,吴承祯,洪伟,等.植物根际、非根际土壤酶与微生物相关性研究进展[J].亚热带农业研究,2007,3(3):209-215.

[30] 李秀玲,吕光辉,何雪芬.连作年限对土壤理化性质及酶活性的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(9):93-97.

[31] 马宁宁,李天成,武春成,等.长期施肥对设施菜田土壤肥力相关酶活性及土壤理化性状的影响[J].应用生态学报,2010,21(7):1766-1771.

[32] 康慧玲,刘淑英,王平,等.覆膜和灌溉对小麦秸秆还田土壤酶活性的影响[J].干旱区资源与环境,2017,31(5):163-167.

[33] 许楠,张会慧,李鑫,等.连作对烤烟生长特性和光合能力的影响[J].草业科学,2012,29(9):1435-1440.

[34] Patterson DT. Effects of allelopathic chemicals on growth and physiological response of soybean(*Glycine max*) [J]. Weed Sci, 1981,29(1):53-58.

[35] 王玉.放线菌剂对连作番茄生理生态及土壤微环境的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2012.