

马铃薯连作障碍与土壤环境因子变化相关研究

徐雪风^{1,2}, 回振龙^{1,2}, 李自龙^{1,2}, 张俊莲¹, 李朝周^{1,2}

(1. 甘肃省作物遗传改良和种质创新重点实验室, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学园艺学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 取不同连作年限(连作 0、3、5、7 年)的土壤测定其生物和非生物环境因子, 并采用盆栽的方法获取不同连作年限的马铃薯幼苗, 测定其生长发育指标及抗性生理指标, 以探究马铃薯不同连作年限土壤生物和非生物环境因子的变化。结果表明: 随着连作年限的增加, 土壤含盐量、碱解氮含量和土壤容重逐年上升, 在连作 7 年时分别比对照高 348.31%、228.57% 和 5.39%; 在连作 5 年和 7 年时, 速效磷、速效钾和有机质含量显著下降, 连作 7 年时比对照下降 27.43%、31.27% 和 38.30%; 土壤中酚酸类化感物质含量(除对羟基苯甲酸外)显著增加; 在连作 5 年和 7 年时, 香草酸分别高于对照 24.87%、19.82%; 阿魏酸和总酚酸含量在连作 7 年分别达到对照的 270.2%、374.9%; 土壤中脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶和转化酶活性显著下降, 其中转化酶活性在连作 3、5、7 年时其活性分别下降为对照的 78.6%、70.8% 和 48.1%; 细菌和放线菌数量显著减少, 连作 7 年时分别比对照下降 26.67% 和 10.85%; 马铃薯幼苗叶片叶绿素含量、抗氧化酶活性、根系活力和净光合速率显著下降, MDA 含量和活性氧产生速率显著升高。从整体上看马铃薯连作 5 年和 7 年幼苗生长发育受到显著抑制, 说明连作障碍达到显著水平, 这与上述土壤各环境因子的变化是相对应的, 这可能就是连作障碍的直接原因。马铃薯连作 5 年和 7 年时, 由于土壤菌类组成、关键酶活和理化性状的改变及酚酸类化感物质含量的显著增加, 造成了一系列生物和非生物环境胁迫, 从而导致连作障碍的发生。

关键词: 马铃薯; 连作障碍; 土壤酶活性; 土壤微生物; 抗性生理

中图分类号: S532.048 **文献标志码:** A

Relationship between potato continuous cropping obstacle and soil environmental factors

XU Xue-feng^{1,2}, HUI Zhen-long^{1,2}, LI Zi-long^{1,2}, ZHANG Jun-lian¹, LI Chao-zhou^{1,2}

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

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

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

Abstract: This study aims to investigate the effect of potato continuous cropping on soil properties, thus clarifying factors contributing to continuous cropping obstacles, using pot culture experiments. We analyzed soil properties including microbiological compositions, fertility, physicochemical properties and contents of phenolic acid and allelochemicals of potato continuous cropping soil, and performance of potato seedlings. The results indicated that soil salinity, alkaline hydrolysis nitrogen content and soil bulk density increased, as the continuous cropping prolonged. Activities of urease, catalase, alkaline phosphatase and invertase decreased markedly when continuous cropping lasted for 5 and 7 years, while the quantity of soil's bacteria and actinomycetes decreased. The content of chlorophyll, activities of antioxidase, root activity and net photosynthetic rate decreased significantly when the continuous cropping lasted for 5 and 7 years. As a whole, continuous cropping obstacle was not obvious when continuous cropping lasted for 3 years. But potato continuously cropping lasted for 5 and 7 years, a series of biotic and abiotic stresses were triggered due to increasing of compositions of

收稿日期: 2014-05-20

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAD06B03); 国家马铃薯产业技术体系(CARS-10-P18); 甘肃省科技重大专项(1102NKDM025)和甘肃省农牧厅项目(GNSW-2012-21)

作者简介: 徐雪风(1991—), 女, 陕西富平人, 在读硕士研究生, 主要从事植物逆境生理的研究。E-mail: sharongoon@163.com。

通信作者: 张俊莲(1961—), 女, 山西代县人, 教授, 主要从事作物遗传育种与栽培生理方面的研究。E-mail: zhangjunlian77@163.com。

soil fungi, and the activity of key enzyme, the changes of physicochemical properties, and phenolic acid and allelochemicals contents, resulting in continuous cropping obstacle.

Keywords: potato; continuous cropping obstacle; allelochemicals; soil enzyme activity; soil microorganism; stress physiology

马铃薯是一种高产粮食作物和重要经济作物,然而由于马铃薯大面积集中种植等因素,现已出现产量降低、品质变劣、生长发育状况变差的现象,此即连作障碍^[1-5]。连作障碍产生的原因非常复杂,它是植物和土壤两者相互作用的结果,其发生原因主要基于植物化感物质的释放和累积、土壤微生物组成的失衡以及土壤理化性状的改变等几个方面^[6-7]。国内外对连作障碍的研究主要集中在水稻、西红柿、茄子、花生等作物^[5-9],但马铃薯连作障碍与土壤环境因子之间的关联还少见系统全面的研究报道。

化感作用是指一种植物(包括微生物)通过向环境释放一些化学物质来影响周围植物和微生物生长的现象,其中自毒作用是化感作用的一种特殊形式,为植物通过根系分泌释放或根茬腐解后产生有毒化学物质,进而对同种植物种子萌发和生长起抑制作用的现象^[10-11]。植物毒素一方面来源于根系分泌的有毒物质,另一方面来源于土壤微生物对土壤中植物残留物的分解,进入土壤中的分泌物和腐解物在生物和非生物因素作用下不断分解转化,产生酚酸等化感物质^[12-13]。研究较多的自毒物质为对羟基苯甲酸、香草酸和阿魏酸,它们均为酚酸类化感物质^[13-14]。

土壤酶一般吸附在土壤胶体表面或呈复合体存在,部分存在于土壤溶液中,通常测定转化酶、碱性磷酸酶等酶的活性来表征土壤酶活性。土壤酶参与土壤有机质的分解、合成以及氮、磷、钾等物质的循环,其活性强度随土壤理化性质、有机物含量等因素的变化而变化^[15-16]。然而关于马铃薯连作障碍中土壤化感物质累积及土壤关键酶活性变化对马铃薯生长发育的研究还缺乏系统研究。

本试验以马铃薯不同连作年限的土壤为主要研究对象,结合马铃薯的生长发育状况,对马铃薯在不同连作年限土壤中酚酸类化感物质积累、土壤酶活变化、土壤微生物菌群组成变化、马铃薯幼苗抗性生理进行了探讨,旨在了解马铃薯连作过程中土壤各环境因子的变化规律及其与马铃薯连作障碍的关系,为有效减轻马铃薯连作障碍,提高马铃薯块茎的产量、品质和保持土地的可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采于甘肃省景泰县条山集团马铃薯种植基地,土壤类型为灰钙土。选择连作年限分别为3、5、7年的土壤,以近三年未种植过马铃薯的土壤作为对照(前茬种植玉米,连作年限0年),采用5点法取样,采集0~20 cm根区耕层土,混匀后,一部分用于种植马铃薯,另一部分用于各土壤环境因子测定。

1.2 供试材料

普通农用马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)品种陇薯3号。

1.3 试验设计

试验材料采用盆栽方式培养,于盆内分别加入上述不同连作年限的土壤。盆内各栽种含一个顶芽的马铃薯块茎,于温室内进行培养。每日光照时间10~12 h,温室温度白天19℃~26℃,晚上12℃~16℃,光照强度为320~500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 土壤理化性状分析 参照关松荫的方法^[17],其中土壤pH值测定采用土:水=1:5酸度计法;土壤容重用环刀法;土壤水溶性盐总量用质量法;土壤有机质采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7-\text{H}_2\text{SO}_4$ 消煮、 FeSO_4 容量法;土壤碱解氮用碱解扩散法;土壤速效磷用0.5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 法测定;速效钾用中性乙酸铵浸提、火焰光度法。

1.4.2 土壤酚酸类化感物质含量和酶活性分析 土壤总酚酸含量测定采用吴萼等^[18]的方法;对羟基苯甲酸、香草酸和阿魏酸含量采用阮维斌等^[19]的方法;脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定,结果以24 h后每克土壤(干重)中 NH_4^+-N 的毫克数表示^[17];过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法测定,其活性以每克土所消耗的0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KMnO_4 溶液的毫升数表示^[17];碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠法,结果以24 h后每克土壤中释放出酚的毫克数表示^[17];转化酶的活性用3,5-二硝基水杨酸比色法测定,以24 h后每克土葡萄糖毫克数表示^[17]。

1.4.3 土壤微生物含量分析 采用李坤^[20]的方法

测定土壤微生物含量:细菌分离采用牛肉膏蛋白胨培养基,放线菌分离采用高氏 1 号培养基,真菌分离采用改良的马丁氏培养基(每 1 000 mL 培养基中加 1% 孟加拉红水溶液 3.3 mL、1% 链霉素 3 mL),在超净工作台上,每个连作年限土壤样品称取 10 g,加入装有 90 mL 无菌水的三角瓶中,振荡 30 min,即得 10⁻¹浓度的土壤溶液,静置 1 min,再依次稀释(细菌稀释至 10⁻⁵,放线菌稀释至 10⁻⁴,真菌稀释至 10⁻³)。用稀释平板涂布法依次接种到细菌、放线菌和真菌培养基中,3 次重复。接种后倒置于 28℃~30℃ 恒温培养箱内培养,及时观察计数,最后计算每克干土中的微生物数量。

微生物数量计算公式:菌数/土重=(同一稀释度几次重复的菌落平均数×稀释倍数)/土干重。

1.4.4 生长发育指标分析 株高:收获前 5~7 d 测定,株高以植株茎最高部位距土面的高度为准,用直尺测量;茎粗:以植株与土面交界处地上茎直径代表,用游标卡尺测量;地上茎分枝数和匍匐茎数量:收获后目测;根长:收获后用直尺测量最长 5 条根长度,取平均值表示。

1.4.5 抗性生理指标分析 马铃薯发芽 30 天后,取马铃薯幼苗充分生长的叶片进行各项生理指标的测定。叶绿素含量:乙醇提取法^[21];净光合速率:采

用美国便携式 LI-6400XT 光合-荧光仪进行;根系活力:TTC 法^[21];丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量:硫代巴比妥酸法^[21];过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性:紫外吸收法^[21];超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性:分光光度法,以抑制氮蓝四唑(Nitro-blue tetrazolium, NBT)光化还原一半的酶量为一个酶活力单位^[21];超氧阴离子(Superoxide anion,)产生速率:羟胺氧化法^[22];过氧化氢(Hydrogen peroxide, H₂O₂)产生速率:林植芳等^[23]的方法。

1.4.6 数据分析 各项实验重复 3~5 次,采用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行处理和绘图,采用 SPSS 17.0 统计分析软件对数据进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 马铃薯连作对土壤理化性状的影响

马铃薯不同连作年限土壤 pH 值随连作年限增加呈下降趋势。土壤容重则随着连作年限增加呈上升趋势,连作 3、5 年和 7 年土壤容重分别比对照升高了 2.23%、4.62% 和 5.39%。土壤含盐量分别比对照上升了 147.45%、212.41%、348.31%。碱解氮含量比对照增加了 47.50%、125.75%、228.57%;土壤速效磷、速效钾和有机质含量变化为连作 3 年比对照高,之后显著下降且低于对照(表 1)。

表 1 马铃薯连作对土壤理化性状的影响

Table 1 Effect of potato continuous cropping on soil physicochemical properties

年限 Duration /a	pH 值 pH Value	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	含盐量 Salt content /(g·kg ⁻¹)	碱解氮含量 Alkali - hydrolyzable N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷含量 Available P content /(mg·kg ⁻¹)	速效钾含量 Available K content /(mg·kg ⁻¹)	有机质含量 Organic matter content /(g·kg ⁻¹)
0(CK)	8.32±0.015a	1.298±0.002d	1.273±0.057d	32.97±0.208d	26.50±0.265b	127.07±0.115b	14.70±0.100b
3	8.00±0.012b	1.327±0.002c	3.150±0.144c	48.63±0.231c	42.73±0.208a	162.53±0.153a	16.57±0.115a
5	7.84±0.010c	1.358±0.001b	3.977±0.060b	74.43±0.231b	21.47±0.115c	115.57±0.115c	11.33±0.058c
7	7.66±0.006d	1.368±0.001a	5.707±0.045a	108.33±0.321a	19.23±0.153d	87.33±0.153d	9.07±0.058d

注:不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。
Note: Different letters mean significant difference at $P<0.05$ level, similarly hereinafter.

2.2 马铃薯连作对土壤酚酸类化感物质含量的影响 研究测定了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,结果显示对羟基苯甲酸含量在连作 3 年大幅度升高,比对照高 99.99%,连作 5 年仍显著高于对照,但连作 7 年时与对照无显著差异;香草酸含量在连作 3 年时比对照显著下降 36.47%,在连作 5 年和 7 年时分别显著高于对照 24.87%、19.82%。阿魏酸和总酚酸含量在连作 3 年时含量与对照无显著差别,在连作 5 年和 7 年时显著升高,其中连作 7 年土壤中阿魏酸和

总酚酸的含量分别达到对照的 270.2%、374.9%(图 1A~D)。

2.3 马铃薯连作对土壤酶活性的影响

马铃薯连作土壤中脲酶和碱性磷酸酶的活性以连作 3 年最高,比对照分别高 18.655%、14.49%,之后随连作年限的增加显著下降(图 2A、B)。土壤过氧化氢酶活性连作 3 年与对照差别不显著,之后随着连作年限增加显著下降(图 2D)。转化酶活性的变化表现为随连作年限的增加显著下降,在连作 3、5、7 年时其活性分别下降为对照的 78.6%、70.8% 和

48.1% (图 2C)。

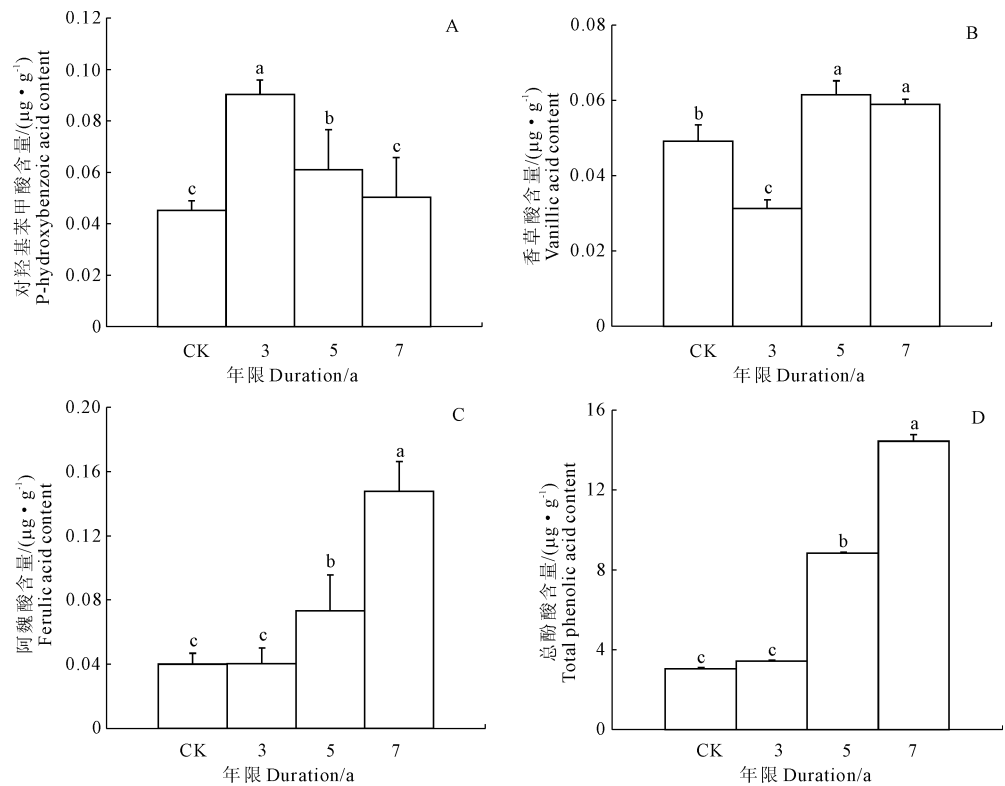


图 1 马铃薯连作对土壤酚酸类物质含量的影响

Fig.1 Effect of potato continuous cropping on soil phenolic acids contents

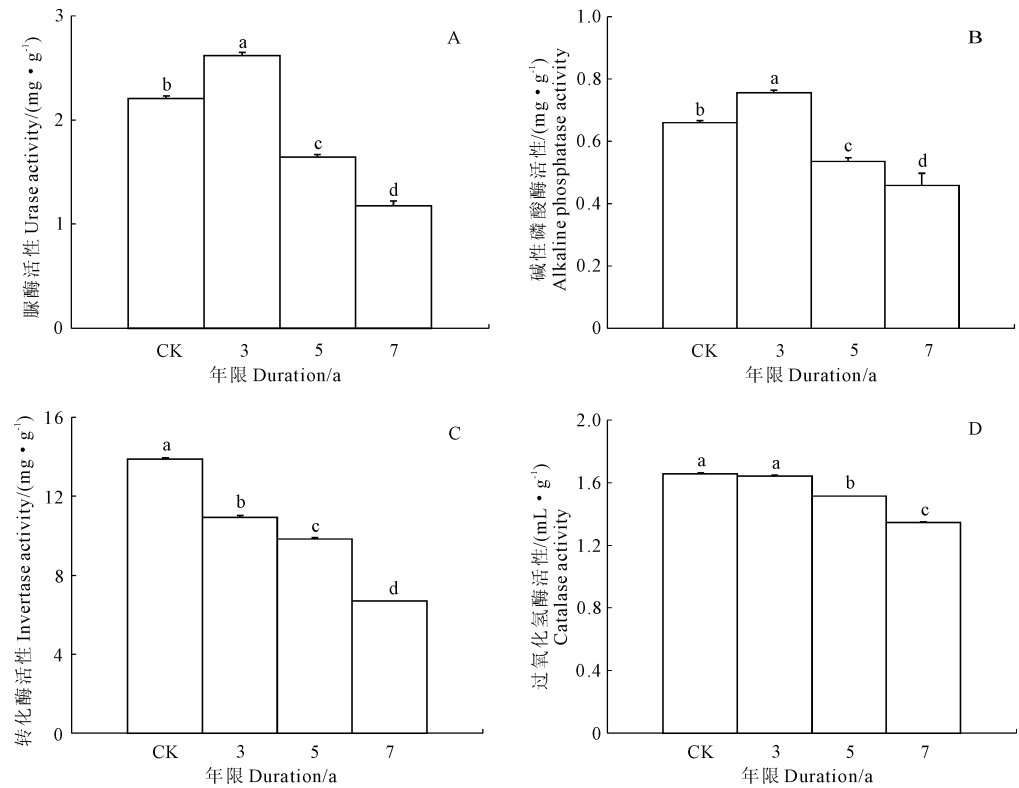


图 2 马铃薯连作对土壤酶活性变化的影响

Fig.2 Effect of potato continuous cropping on activity of enzymes in soil

2.4 马铃薯连作对土壤微生物数量的影响

马铃薯连作土壤中细菌数量在连作 3 年时与对照无显著差异,在连作 5 年和 7 年时则比对照下降 20.80%、47.35% (图 3A)。放线菌的数量以连作 3

年时最高,比对照高 9.41%,之后显著下降(图 3B)。真菌的数量则随着连作年限的增加而增加,连作 3、5、7 年分别比对照增加 72.82%、107.77% 和 176.70% (图 3C)。

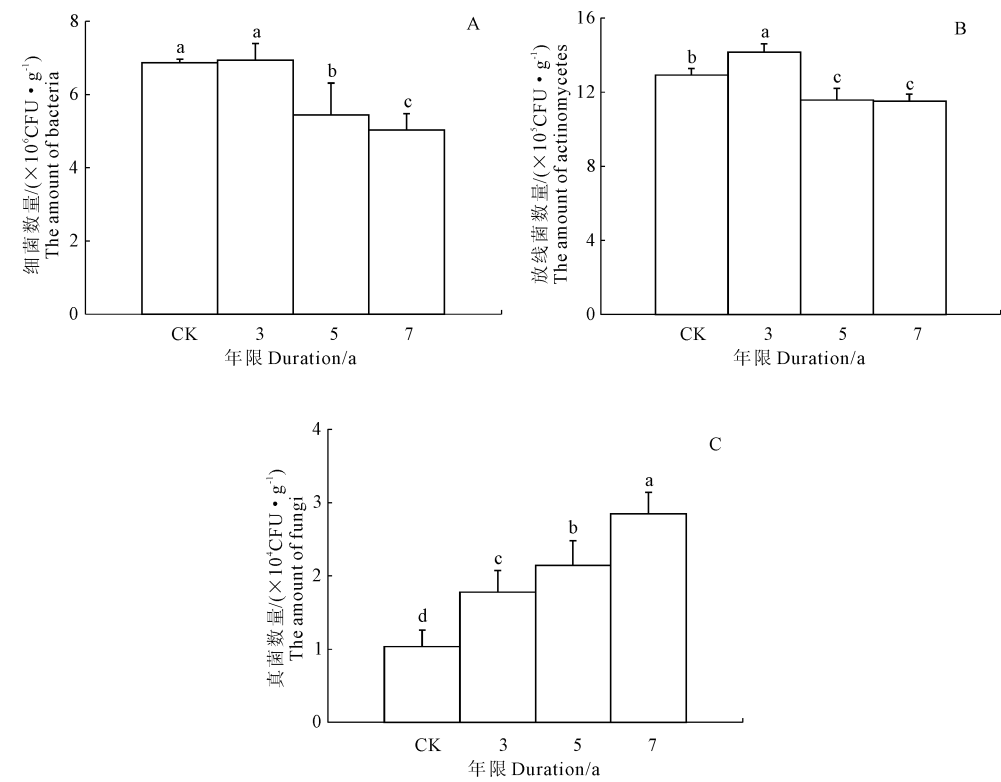


图 3 马铃薯连作对土壤微生物数量变化的影响

Fig.3 Effect of potato continuous cropping on quantity of soil microorganism

2.5 连作对马铃薯幼苗生长发育状况的影响

随着连作年限的增加,除根长外马铃薯幼苗的生物量、株高、茎粗、地上茎分枝数和匍匐茎数在连作 3 年时均显著升高,高于对照 16.09%、37.88%、18.57%、27.51%、28.89%,之后下降并显著低于对照(表 2)。可见幼苗生长发育状况总的表现为连作 3 年最好,连作 5 年和 7 年变差,其中尤以连作 7 年最差,其生物量、株高和根长分别降为对照的 62.7%、69.4%和 62.8%。

2.6 连作对马铃薯幼苗叶绿素含量、根系活力、叶片净光合速率和丙二醛含量的影响

马铃薯幼苗叶片叶绿素含量、根系活力和净光合速率在连作 3 年时显著升高,分别比对照高 2.61%、6.14%、33.71%,之后显著下降,连作 7 年最低,低于对照 36.73%、81.43%、67.54% (图 4A ~ C),MDA 含量随连作年限的增加逐年显著升高,比对照高 16.91%、71.36%、103.18% (图 4D)。

表 2 连作对马铃薯幼苗生长发育的影响

Table 2 Effect of continuous cropping on growth and development of potato seedlings

年限 Duration /a	生物量/(g·株 ⁻¹) Biomass /(g·plant ⁻¹)	株高 Plant height /cm	茎粗 Stem diameter /cm	地上茎分枝数 Branch number of aerial stem	匍匐茎数 Procumbent stem's number	根长 Root length /cm
0(CK)	34.19 ± 0.310ab	37.57 ± 1.576b	0.70 ± 0.030b	9.67 ± 1.528b	12.67 ± 2.082b	10.87 ± 0.666a
3	39.69 ± 1.049a	51.80 ± 5.225a	0.83 ± 0.020a	12.33 ± 1.155a	16.33 ± 1.528a	11.33 ± 0.416a
5	28.10 ± 0.894b	30.24 ± 0.989c	0.69 ± 0.015b	8.67 ± 0.577c	10.00 ± 1.000c	8.43 ± 0.416b
7	21.45 ± 0.553c	26.06 ± 0.990d	0.59 ± 0.022c	6.33 ± 0.577d	7.33 ± 1.528d	6.83 ± 0.252c

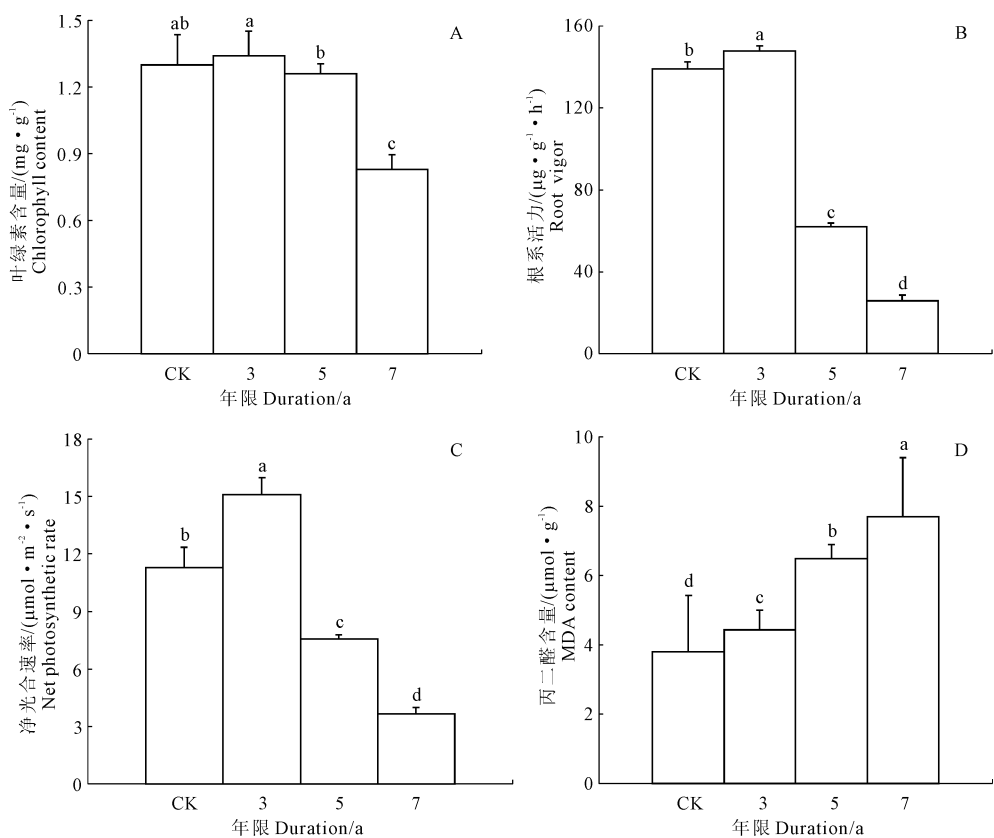


图 4 连作对马铃薯叶片叶绿素含量、幼苗根系活力、净光合速率及丙二醛含量的影响
Fig.4 Effect of continuous cropping on chlorophyll content, net photosynthetic rate, malondialdehyde of leaves and root vigor in potato seedlings

2.7 连作对马铃薯幼苗叶片抗氧化酶活性和活性氧水平的影响

马铃薯连作 3 年的幼苗叶片过氧化氢酶 (CAT) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性比对照升高 50.38%、9.42%, 但当马铃薯连作至 5 年和 7 年时, 幼苗叶片 CAT 和 SOD 活性显著降低并低于对照 (图 5A, B)。连作 3 年时 O₂⁻ 和 H₂O₂ 产生速率与对照无显著差异, 连作至 5 年和 7 年时显著升高 (图 5C, D)。

3 讨 论

随着马铃薯产业的发展和集约化经营, 马铃薯连作已十分普遍。前人的许多研究结果表明连作导致土壤理化性质和生物学特征的改变^[24-27], 本文研究结果显示, 马铃薯连作至 5 年和 7 年时, 土壤 pH 值、有机质含量、速效磷含量、速效钾含量下降, 土壤容重、含盐量、碱解氮含量上升 (表 1), 土壤有机质作为衡量土壤肥力的一个重要指标, 其研究一直十分活跃^[33-40]。由于不同的连作年限, 在施肥及养分吸收和需求方面有所不同, 导致氮、磷、钾比例失衡, 有机质等含量的变化都会受到不同程度的影响。这可能是连作 5 年和 7 年时马铃薯生长发育

恶化 (表 2) 的重要原因之一; 然而作物连作对土壤造成的影响不仅有土壤理化性状的改变, 也有土壤生物学性状的改变^[24-25], 其中化感物质和土壤酶活是两个重要因素。化感物质种类繁多, 它们不仅影响邻近植物的生长发育, 也影响到土壤酶活、微生物数量和土壤养分状况, 进而影响到植物的营养和生长发育。本研究显示, 当马铃薯连作年限延长至 5 年和 7 年时, 土壤酚酸类化感物质含量 (除对羟基苯甲酸外) 显著升高 (图 1A ~ D)。土壤中酶活性强弱, 影响土壤供肥能力大小, 反映土壤中多种生化过程的强度, 因此土壤酶活可以作为评价土壤生物学活性、土壤肥力和土壤生产力的重要指标之一。通过研究土壤酶活性及其引起的土壤代谢的变化, 可揭示土壤代谢作用强度及其适应外界环境和维持植物生长的能力^[15]。土壤肥力关键酶包括脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶和转化酶脲酶等, 其中脲酶可以促进土壤中含氮有机化合物尿素的酰胺肽键的水解, 生成的氨则是植物氮素营养来源之一, 因此土壤脲酶活性常用于表征土壤的氮素营养情况^[16]。磷酸酶能促进有机磷化合物的分解, 为植物提供有效磷素, 土壤磷酸酶活性的高低可以反映土壤速效磷

的供应状况^[16]。过氧化氢酶催化过氧化氢分解生成分子氧和水,减轻过氧化氢过量累积对植物的危害^[28]。转化酶可使不能被植物吸收的蔗糖分解成果糖和葡萄糖,对增加土壤中易溶性营养物质起着重要作用^[29],可见土壤酶活性的下降在一定程度上表明土壤状况的恶化^[30]。本文的结果显示,

土壤中脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶和转化酶的活性在连作 5 年和 7 年时皆有显著下降(图 2A – D),说明连作 3 年和对照土壤为“细菌型”,而连作 5 年和 7 年土壤为“真菌型”^[28],由此可以认为连作 5 年和 7 年的土壤供肥能力显著下降,尤以连作 7 年的土壤最为严重。

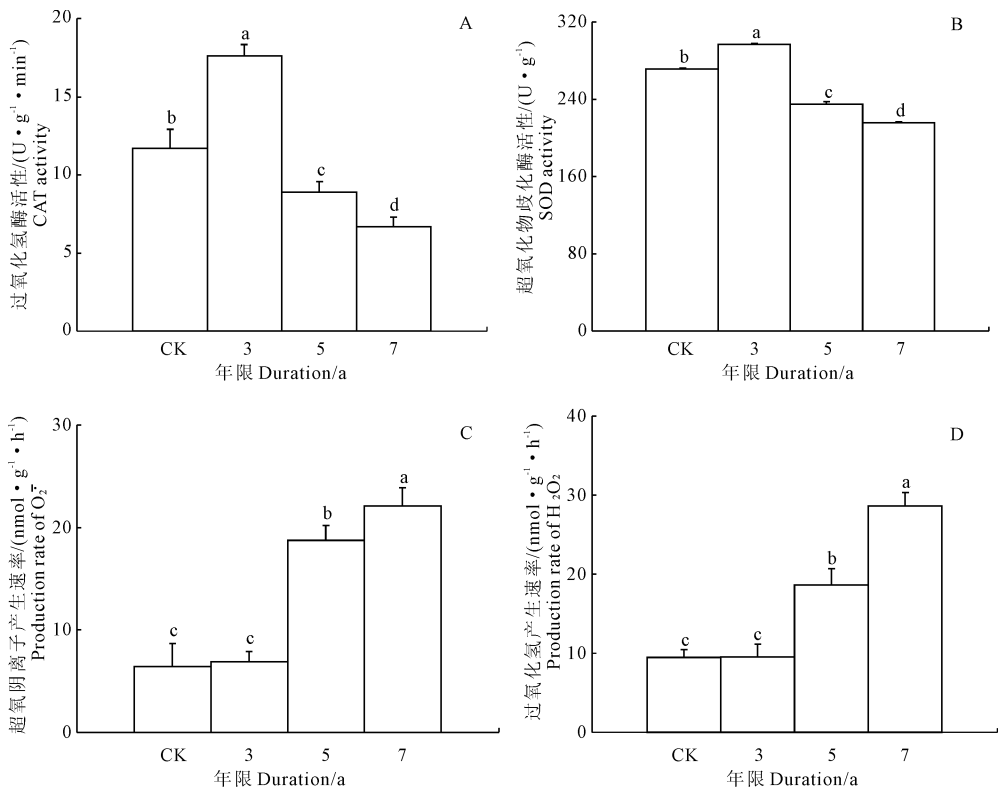


图 5 连作对马铃薯幼苗叶片抗氧化酶活性和活性氧产生速率的影响

Fig.5 Effect of continuous cropping on activity of antioxidative enzyme and the rate of reactive oxygen species in leaves of potato seedlings

叶绿素是植物体内重要的光合色素,其含量变化直接影响植物的光合效率和光合产物累积。当连作持续至 5 年和 7 年时,马铃薯幼苗叶片中叶绿素含量(图 4A)、叶片净光合速率和生物量显著降低(图 4C,表 2),根系活力显著下降(图 4B),生长受到显著抑制(表 2)。丙二醛(MDA)是植物细胞内脂质过氧化的产物,其累积量反映植物遭受逆境伤害程度,本研究结果显示马铃薯幼苗叶片 MDA 含量随连作年限增加而升高(图 4D),表明连作年限的增加会加重脂质过氧化程度。

过氧化氢酶(CAT)和超氧化物歧化酶(SOD)为植物细胞内的重要保护酶,它们与其它抗氧化酶和抗氧化物质协同作用,共同防御产生过量的活性氧及自由基^[31]。本文的结果表明连作 5 年和 7 年时 CAT 和 SOD 活性显著下降(图 5A – B),而活性氧水平显著升高(图 5C – D)。而过量的活性氧与自由基

可对细胞膜及许多生物大分子产生破坏作用^[32],这些变化说明马铃薯连作至 5 年和 7 年时,已使得幼苗在生理上产生了一系列不利改变。结合叶片脂质过氧化产物 MDA 累积量增加,叶绿素含量、净光合速率和根系活力下降(图 4A – D)和生长发育恶化(表 2),可以认为马铃薯在连作年限增加至 5 年和 7 年时,幼苗遭受到的逆境伤害增大,并在很大程度上影响了其正常的生长发育。

4 结 论

马铃薯连作至 5 年和 7 年可造成土壤化感物质累积,土壤养分、土壤酶活和土壤微生物群失调等一系列问题,致使土壤生物和非生物环境显著恶化,并在很大程度上减弱了马铃薯幼苗的防御性反应及抗逆境能力,引起活性氧产生速率增高和脂质过氧化产物过量累积等生理反应,影响马铃薯植株的生长

发育,从而造成马铃薯的连作障碍。简言之,马铃薯连作至一定年限后可造成来自土壤的生物和非生物环境胁迫,从而导致连作障碍的发生。

参 考 文 献:

[1] 秦舒浩,张俊莲,王 蒂,等.集雨限灌对旱作马铃薯产量及水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2009,28(4):93-95.

[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,(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].东北农业大学报,2000,31(3):241-247.

[4] 郑良永,胡剑非,林昌华,等.作物连作障碍的产生及防治[J].热带农业科学,2005,25(2):58-62.

[5] Murphy C E, Lemerle D. Continuous cropping systems and weed selection[J]. Euphytica, 2006,148:61-73.

[6] Huang H C, Chou C H, Erickson R S. Soil sickness and its control [J]. Allelopathy Journal, 2006,18(1):1-21.

[7] Yu J Q, Shou S Y, Qian Y R, et al. Autotoxic potential of cucurbit crops[J]. Plant Soil, 2000,223:147-151.

[8] 许艳丽,李春杰,李兆林.玉米连作、迎茬和轮作对田间杂草群落的影响[J].生态学杂志,2004,23(4):37-40.

[9] 时 鹏,高 强,王淑平,等.玉米连作及其施肥对土壤微生物群落功能多样性的影响[J].生态学报,2010,30(22):6173-6182.

[10] 胡元森,吴 坤,李翠香,等.酚酸物质对黄瓜幼苗及枯萎病菌菌丝生长的影响[J].生态学杂志,2007,26(11):1738-1742.

[11] 张淑香,高子勤,刘海玲.连作障碍与根际微生态研究Ⅲ.土壤酚酸物质及其生物学效应[J].应用生态学报,2000,11(5):741-744.

[12] Maniével S, Thierry D, Franois P. Effect of phenolic acids in soil under and between rows of a prior sorghum (*Sorghum bicolor*) crop on germination, emergence, and seedling growth of peanut (*Arachis hypogea*)[J]. Journal of Chemical Ecology, 2000,26(3):625-637.

[13] Jose C L, María de los AB, Osvaldo P, et al. Sugarcane micropropagation and phenolic excretion[J]. Plant Cell, 2001,65:1-8.

[14] 喻景权,松井佳久.豌豆根系分泌物自毒作用的研究[J].园艺学报,1999,26(3):175-179.

[15] 符裕红,黄宗胜,喻理飞.岩溶区典型根系地下生境类型中土壤酶活性研究[J].土壤学报,2012,49(6):1202-1209.

[16] 李晨华,贾仲君,唐立松,等.不同施肥模式对绿洲农田土壤微生物群落丰度与酶活性的影响[J].土壤学报,2012,49(3):567-574.

[17] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.

[18] 吴 粤,徐 宁,温美娟.磷钨酸-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.

[19] 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.

[20] 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.

[21] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导[M].广州:华南理工大学出版社,2007.

[22] 王爱国,罗广华.植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系[J].植物生理通讯,1990,(6):55-57.

[23] 林植芳,李双顺,林桂珠,等.衰老叶片和叶绿体中 H₂O₂ 的累积与膜脂过氧化化的关系[J].植物生理学报,1988,14(1):16-22.

[24] 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.

[25] 张子龙,王文全.植物连作障碍的形成机制及其调控技术研究进展[J].生物学杂志,2010,27(5):69-72.

[26] 高 群,孟宪志,于洪飞.连作障碍原因分析及防治途径研究[J].山东农业科学,2006,(3):60-63.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等.长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J].植物营养与肥料学报,2003,9(4):406-410.

[30] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等.土壤质量与土壤质量指标及其评价[J].生态学报,2006,26(3):901-913.

[31] Li C Z, Wang D, Wang G X. The protective role of cobalt on membrane protective systems of potato seedlings leaves during osmotic stress[J]. Botanical Bulletin of Academia Sinica, 2005,46:119-125.

[32] 焦 健,李朝周,黄高宝.乙烯产生抑制剂对高温胁迫下蚕豆幼苗叶片的保护作用[J].植物生态学报,2006,30(3):465-471.

[33] 谢德体,曾尧廷.水田自然免耕土壤肥力特征的研究[J].中国农业科学,1990,23(1):37-44.

[34] 杨东方,李学垣.双季稻复种轮作与连作对土壤有机质性状影响的研究[J].中国农业科学,1990,23(2):51-56.

[35] 李映强,曾尧廷.不同耕作制下水稻土有机质变化及其团聚作用[J].土壤学报,1991,28(4):404-409.

[36] 王维敏,张镜清,王文山,等.黄淮海地区农田土壤有机质的研究[J].中国农业科学,1988,21(1):19-26.

[37] 文启孝.我国土壤有机质和有机肥料研究现状[J].土壤学报,1989,26(3):255-261.

[38] 杨秀华,黄玉俊.不同培肥措施下黄潮土肥力变化定位研究[J].土壤学报,1990,27(2):186-194.

[39] 曾希柏,刘建华.稻田土壤有机质及氮磷钾养分平衡的监测研究[J].土壤通报,1993,24(3):115-117.

[40] 曾希柏.潞育性水稻土有机无机氮肥配比对土壤养分平衡的影响[J].土壤通报,1995,26(5):210-212.