

熊湖, 郑顺林, 张德银, 等. 轮作与连作对马铃薯生长及土壤酶活性的影响 [J]. 福建农业学报, 2022, 37 (1): 25–32.

XIONG H, ZHENG S L, ZHANG D Y, et al. Potato Growth and Soil Enzyme Activities as Affected by Rotation or Continuous Cropping Cultivation [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37 (1): 25–32.

轮作与连作对马铃薯生长及土壤酶活性的影响

熊湖¹, 郑顺林^{2,3*}, 张德银^{1*}, 向竹清², 杜勇利¹, 廖霏霏¹

(1. 宜宾市农业科学院高粱薯类研究所, 四川 宜宾 644000; 2. 四川农业大学农学院/农业农村部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川 成都 611130; 3. 农业农村部薯类作物遗传育种重点实验室/成都久森农业科技有限公司, 四川 新都 610500)

摘要:【目的】探究长期轮作与连作对马铃薯生长发育及土壤酶活性的影响。【方法】采用连续5年定点试验, 以正茬马铃薯为对照, 研究马铃薯和玉米轮作、普通连作(马铃薯春作)、强化连作(马铃薯春秋连作)对马铃薯植株形态、土壤酶活性、土壤全量养分与速效养分的影响。【结果】普通连作与强化连作降低了马铃薯株高、茎粗和总叶面积, 增加了根系长度, 而轮作可增加马铃薯株高、茎粗和总叶面积大小, 且随着生育期推进差异更加显著; 整体上土壤酶活性大小为正茬薯作>马铃薯和玉米轮作>普通连作>强化连作, 除脲酶外, 其余酶活性在马铃薯整个生育期均为上升趋势, 马铃薯和玉米轮作相比普通连作与强化连作增幅更大; 土壤中速效养分受连作方式影响较大, 其中成熟期马铃薯和玉米轮作土壤中碱解氮、速效钾和速效磷分别高于普通连作4.98%、6.79%、16.38%, 高于强化连作13.02%、15.21%、16.12%, 生育期前后养分含量差异也更大。【结论】通过轮作可以提高土壤酶活性, 加速土壤中速效养分转化, 促进马铃薯植株生长发育, 从而缓解长期连作对马铃薯的胁迫作用。

关键词: 马铃薯; 连作; 轮作; 土壤酶; 土壤养分

中图分类号: S 532

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2022) 01-0025-08

Potato Growth and Soil Enzyme Activities as Affected by Rotation or Continuous Cropping Cultivation

XIONG Hu¹, ZHENG Shunlin^{2,3*}, ZHANG Deyin^{1*}, XIANG Zhuqing², DU Yongli¹, LIAO Feifei¹

(1. Sorghum and Potato Research Institute, Yibin Academy of Agricultural Sciences, Yibin, Sichuan 644000, China; 2. Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest of China, Ministry of Agriculture/College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China; 3. Key Laboratory of Tuber Crop Genetics and Breeding, Ministry of Agriculture/Chengdu Jiuse Agriculture Co., Ltd., Xindu, Sichuan 610500, China)

Abstract: 【Objective】Effects of rotation or continuous cropping potatoes on the plant growth and soil chemical and biochemical properties were studied. 【Method】A 5-year fix-point experiment was conducted to compare the effects of a potato-maize rotation cultivation, the commonly practiced continuous annual planting of potatoes in spring, and an intensified continuous spring and autumn cropping in a same year on the morphological indices of the potato plants as well as the enzyme activities and total effective and available nutrients in the soil. 【Result】Both common and the intensified continuous cropping caused reductions on the plant height, stem girth, and leaf area but an increase on the root length in comparison with control. On the other hand, the rotation cultivation of potatoes and maize raised those first 3 indicators in increasing differentiations from the other cropping practices along with growth of the plants. Meanwhile, the enzyme activities in the soil were higher than the continuous cropping fields, especially the intensified continuous cropping one. In addition, the available nutrients were also significantly affected by the cultivation practices. For instance, at time of crop maturation, the total nitrogen, total potassium, and total phosphorus in the soil, where the cultivation was conducted by rotating potato and maize

收稿日期: 2021-08-11 初稿: 2021-11-22 修改稿

作者简介: 熊湖 (1992-), 男, 硕士, 研究实习员, 研究方向: 作物栽培技术研究 (E-mail: 475832961@qq.com)

* 通信作者: 郑顺林 (1974-), 男, 博士, 博士生导师, 研究方向: 马铃薯高产技术研究 (E-mail: 248977311@qq.com); 张德银 (1968-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 农业技术推广 (E-mail: pszdy@126.com)

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0200808); 四川省育种攻关及配套项目 (2016NYZ0051-5、2016NYZ0032); 四川马铃薯创新团队支持项目 (2016NYZ0051-5、2016NYZ0032)

crops, were 4.98%, 6.79%, and 16.38%, respectively, higher than those in the soil under the common continuous cropping, and 13.02%, 15.21%, and 16.12%, respectively, higher than those under the intensified continuous cropping. 【Conclusion】 Rotation cultivation of potatoes and maize significantly promoted the potato plant growth and development, enhanced the soil enzyme activity, and accelerated the transformation of available nutrients in soil to materially reduce the stress on the plants incurred by long-term continuous cropping.

Key words: Potato; continuous cropping; rotation; soil enzyme; soil nutrients

0 引言

【研究意义】马铃薯作为我国除水稻、小麦、玉米外的第四大主要粮食作物，种植面积广泛，并且种植规模还在不断扩大，然而由于我国耕地面积限制，马铃薯集约化种植越来越普遍，导致马铃薯连作现象日益严重^[1]。马铃薯长期连作会产生严重的连作障碍，土壤环境发生恶化，影响马铃薯正常的生长发育，从而导致马铃薯块茎产量下降，品质劣化^[2]。探讨轮作与连作对马铃薯生长及土壤酶活性的影响对马铃薯健康种植具有重要意义。【前人研究进展】导致连作障碍的原因有很多，伊承苗等^[3]在对连作苹果研究中认为酚酸是类物质是引起苹果连作障碍的一个重要原因，熊湖等^[4]也证明了减少酚酸有利于马铃薯的生长发育。候乾等^[5]研究发现马铃薯长期连作会导致土壤中酶活性显著下降，降低马铃薯对土壤养分的吸收利用效率，认为这是导致马铃薯产量下降的重要原因之一。也有大量研究表明土壤理化结构被破坏同样是引起连作障碍的重要原因之一，数据显示长期连作引起土壤养分失调，土壤 pH 下降，限制作物对土壤养分和水分的吸收，最终导致作物品质与产量下降^[6, 7]。【本研究切入点】轮作被认为是缓解连作障碍最有效的措施之一，有研究报道表明大蒜和烤烟轮作可以通过大蒜的根系分泌抑菌物降低烟草黑胫病^[8]，而玉米-水稻轮作可以提高根际与非根际土壤的脲酶活性及硝态氮含量，有利于氮素有效性的提高^[9]。然而目前马铃薯轮作相关研究较少，关于轮作对马铃薯生长发育

与土壤酶活性影响的机理尚不明确。【拟解决的关键问题】通过长期定点轮作与连作试验，研究长期连作对各生育期马铃薯生长发育的影响，分析不同栽培模式下马铃薯土壤酶活性与土壤养分含量变化，以期为实际生产中通过轮作缓解马铃薯连作障碍提供一定的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试马铃薯品种为原种川芋 117，玉米品种为正红 6 号。

1.2 试验方法

试验在四川农业大学实验基地进行，前茬未栽培过茄科类作物。土壤类型为水稻土，基础肥力为全氮 2.68 g·kg⁻¹，碱解氮 142.16 mg·kg⁻¹，全磷 0.58 g·kg⁻¹，有效磷 17.42 mg·kg⁻¹，全钾 13.22 g·kg⁻¹，速效钾 109.24 mg·kg⁻¹，有机质 20.86 g·kg⁻¹，pH 5.32。于 2015 年春季开始种植，按照表 1 方法连续种植至 2019 年取样测定，其中各小区面积 3 m×4 m，马铃薯种植密度为 90 000 株·hm⁻²，玉米 45 000 株·hm⁻²，栽培管理按照常规方法进行。取样时期为马铃薯前期、花期、块茎膨大期与成熟期，每个处理取样重复 3 次，土壤选择根际土壤，用抖土法收集^[10]并将各土壤混匀后风干过 1.00 mm 筛保存待测。

1.3 测定项目与方法

选择长势一致的植株测定其单株的株高、茎粗、总叶面积和根长。土壤酶活性测定参考关松荫^[10]的方法，其中脲酶采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定；

表 1 试验处理
Table 1 Tested crop cultivation treatments

年份 Years	对照 Control	普通连作 Potato continuous cropping	马铃薯和玉米轮作 Potato maize rotation cropping	强化连作 Potato intensified continuous cropping
2015	—	春薯 Spring Potato	春薯 Spring Potato	春薯-秋薯 Spring Potato - Autumn Potato
2016	—	春薯 Spring Potato	玉米 Corn	春薯-秋薯 Spring Potato - Autumn Potato
2017	—	春薯 Spring Potato	春薯 Spring Potato	春薯-秋薯 Spring Potato - Autumn Potato
2018	—	春薯 Spring Potato	玉米 Corn	春薯-秋薯 Spring Potato - Autumn Potato
2019	正茬薯作 Normal planting	春薯 Spring Potato	春薯 Spring Potato	春薯-秋薯 Spring Potato - Autumn Potato

多酚氧化酶采用邻苯三酚比色法测定；蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定；酸性磷酸酶采用磷酸苯二钠法测定；过氧化氢酶采用紫色分光光度法测定，FDA 水解酶采用荧光素法测定。

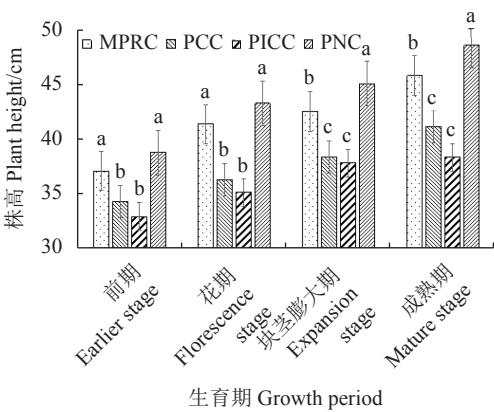
土壤养分含量的测定参照土壤农化分析^[11]的方法。其中，土壤全氮采用凯氏定氮法，土壤全磷采用磷钼蓝比色法，土壤全钾测定采用火焰光度计法，碱解氮测定采用碱解扩散法，速效磷采用 $\text{NH}_4\text{F}-\text{HCl}$ 法测定，速效钾测定采用 NH_4OAc 浸提后的火焰分光光度法。

采用 Excel2010 软件对数据进行处理和绘图；采用 DPS7.05 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 轮作与连作对马铃薯形态特征的影响

2.1.1 株高 轮作与连作对马铃薯株高的影响结果如图 1，在整个生育期期间，马铃薯平均株高均为正茬薯作 > 马铃薯和玉米轮作 > 普通连作 > 强化连作，正茬薯作在前期和花期株高分别比马铃薯和玉米轮作高 4.58%、4.59%，两者差异不显著，在块茎膨大期和成熟期分别高于马铃薯和玉米轮作 5.91%、6.01%，两者达到显著差异；正茬薯作和马铃薯和玉米轮作的株高显著高于普通连作与强化连作，而普通连作在四个生育期内株高分别高于强化连作 4.08%、3.14%、1.48%、6.89%，但差异均不显著。整体上，不同栽培方式下株高随着生育期推进差异逐渐增大。



注：MPRC，马铃薯和玉米轮作；PCC，普通连作；PICC，强化连作；PNC，正茬薯作。图柱上方小写字母不同表示处理间差异达到显著水平 ($P<0.05$)，下同。

Note: MPRC: potato-maize rotation cropping; PCC: potato continuous cropping; PICC: potato intensified continuous cropping; PNC: potato normal planting. Different lower case letters above columns indicate significant differences between treatments. Same for following figures.

图 1 轮作与连作对马铃薯株高的影响

Fig. 1 Effects of rotation and continuous cropping on potato plant height

2.1.2 茎粗 如图 2 所示，在马铃薯整个生育期内茎粗均以正茬薯作最高，在成熟期之前与马铃薯和玉米轮作茎粗差异不显著，至成熟期时有显著性差异，前期与花期普通连作茎粗大于强化连作，块茎膨大期与成熟期则相反，除前期外两者均差异显著；马铃薯和玉米轮作、强化连作、正茬薯作均在前期至花期间茎粗提升幅度最大，分别上升了 17.04%、9.44%、15.22%，而强化连作在花期至块茎膨大期之间提升最高，为 16.34%，后期时也有较强上升趋势，表明在强化连作下马铃薯植株茎秆长势较弱，生长旺盛期向后推移。

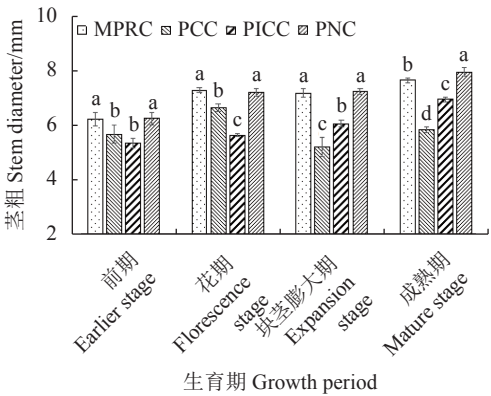


图 2 轮作与连作对马铃薯茎粗的影响

Fig. 2 Effects of rotation and continuous cropping on potato stem girth

2.1.3 总叶面积 在整个生育期间，马铃薯平均株总叶面积均为正茬薯作 > 马铃薯和玉米轮作 > 普通连作 > 强化连作，同时，从图 3 可以发现，随着生育期推进各组栽培方式总叶面积大小差距增大。在前期，正茬薯作比其他三种栽培方式总叶面积大小高 4.58%、13.12%、17.93%，成熟期为 6.02%、18.01%、26.75%，除前期外，正茬薯作与马铃薯和玉米轮作差异均不显著，普通连作与强化连作除成熟期外差

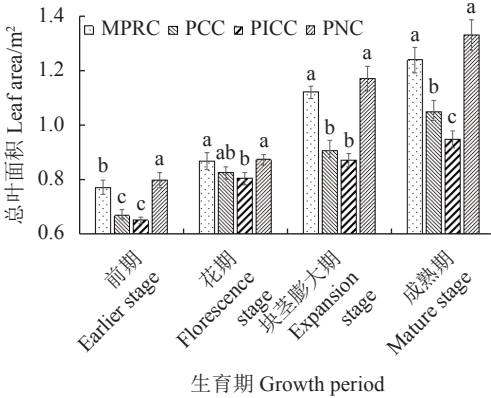


图 3 轮作与连作对马铃薯总叶面积的影响

Fig. 3 Effects of rotation and continuous cropping on potato leaf area

异均不显著，表明普通连作与强化连作均导致马铃薯总叶面积减少。

2.1.4 根长 如图 4 所示，随着生育期推进，各组马铃薯根长成熟期比前期提高 25.44%、23.25%、29.99%、21.61%，以强化连作模式下根系提升幅度最大，同时在整个生育期根长也是最长，除花期外均与其他 3 组达到显著性差异。普通连作根长在前期、花期、成熟期均为最低，至成熟期时与其他各组差异显著，而马铃薯和玉米轮作与正茬薯作在整个生育期除块茎膨大期之外差异不显著，表现为普通连作导致马铃薯根长缩短，而强化连作条件下根长显著增长。

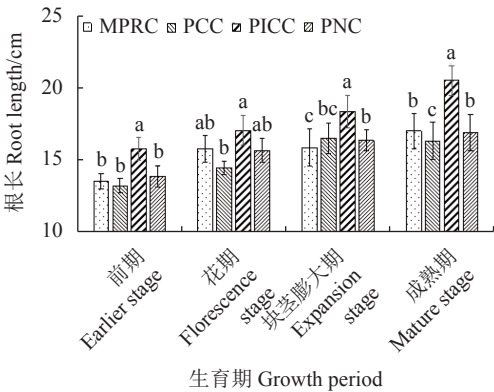


图 4 轮作与连作对马铃薯根长的影响

Fig. 4 Effects of rotation and continuous cropping on potato root length

2.2 轮作与连作对马铃薯土壤酶活性的影响

2.2.1 抗逆性酶 过氧化氢酶对过氧化氢有促进加速分解的作用，土壤中积累过量的过氧化氢会对马铃薯产生毒害作用^[12]。在整个生育期内，马铃薯和玉米轮作与普通连作过氧化氢酶活性如表 2 所示，整体表现为先降后升，强化连作为一直下降，而正茬薯作酶活性表现为一直上升；前期 4 种栽培方式下土壤过氧化氢酶活性接近，无显著性差异，至成熟期马铃薯和玉米轮作过氧化氢酶活性与普通连作间无显著差异，强化连作酶活性显著低于其他栽培方式，正茬薯作显著高于其他栽培方式，说明 3 种连作方式下土壤过氧化氢酶活性均降低，而强化连作下降幅度更大。

4 种栽培方式土壤 FDA 水解酶活性在前期差异显著，前期至花期酶活性分别提高了 20.85%、37.26%、92.45%、16.15%，花期至成熟期提高-8.10%、6.74%、2.16%、22.51%，除正茬薯作外均以前期至花期提升幅度最大，而花期至成熟期变化幅度则较小，表明在连作条件下，马铃薯生育前期对土壤 FDA 酶活性影响较强，而后期影响较小。在马铃薯整个生育期内正茬薯作土壤 FDA 水解酶活性均显著高于其他栽培方式，而其他三种栽培方式酶活性大小差值较小，差异变化也不明显。

在马铃薯整个生育期内，多酚氧化酶活性除正

表 2 轮作与连作对马铃薯土壤抗逆性酶活性的影响

Table 2 Effects of rotation and continuous cropping on potato resistance enzyme activities in soil

指标 Index	处理 Treatment	前期 Earlier stage	花期 Florescence stage	块茎膨大期 Expansion stage	成熟期 Mature stage
过氧化氢酶 Catalase/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{h}^{-1}$)	MPRC	2.73±0.24 a	1.88±0.19 c	1.79±0.03 b	2.35±0.07 b
	PCC	2.63±0.11 a	1.97±0.23 bc	1.89±0.14 b	2.34±0.25 b
	PICC	2.76±0.55 a	2.24±0.08 b	1.89±0.06 b	1.24±0.15 c
	PNC	2.58±0.76 a	2.48±0.15 a	2.61±0.16 a	3.02±0.12 a
FDA水解酶 Hydrolase/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	MPRC	9.4±0.25 b	11.36±0.23 bc	10.96±0.64 b	10.44±0.50 c
	PCC	7.89±0.42 c	10.83±0.35 c	12.56±0.91 b	11.56±0.95 c
	PICC	6.49±0.53 d	12.49±0.98 ab	11.56±0.41 b	12.76±0.70 b
	PNC	10.9±0.68 a	12.66±0.76 a	13.86±0.71 a	15.51±015 a
多酚氧化酶 Polyphenol oxidase/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 20\text{min}^{-1}$)	MPRC	266.90±29.51 b	387.75±43.37 a	483.51±12.38 ab	436.74±45.09 b
	PCC	282.46±27.22 ab	360.39±53.31 b	431.98±56.99 b	366.26±10.27 c
	PICC	290.71±7.67 a	324.68±39.01 b	360.07±46.55 c	310.56±17.65 d
	PNC	228.6±13.13 c	415.95±28.86 a	529.92±67.09 a	587.22±39.27 a

注：同类同列数据后小写英文字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)，下表同。

Note: Different lowercase English letters after the same column of data indicate significant differences ($P<0.05$). Same for following table.

茬薯作一直上升外，马铃薯和玉米轮作、普通连作、强化连作均为先增后降，在块茎膨大期酶活性达到最大值。前期酶活性大小为强化连作>普通连作>马铃薯和玉米轮作>正茬薯作，成熟期为正茬薯作>马铃薯和玉米轮作>普通连作>强化连作，前后期表现相反，同时随着生育期推进，各组间的差异性也逐渐显著。前期至成熟期各组酶活性分别上升 63.63%、29.66%、6.82%、156.87%，整个生育期内酶活性整体上均为上升趋势，但各组上升幅度差异明显，表现为受连作影响越强上升幅度越低。

2.2.2 转化酶 轮作与连作对马铃薯土壤转化酶活性的影响如表 3 所示，强化连作土壤中的磷酸酶活性在前期显著低于其余三组，而其余各组间差异较小，整个生育期内各组土壤磷酸酶活性均呈上升趋势，其中以马铃薯和玉米轮作与正茬薯作上升幅度最大，前期至成熟期提升了 40.43% 和 44.68%，成熟期时显著高于普通连作与强化连作。除正茬薯作在前期至花期酶活性提升最大外，其余各组均在花期

至块茎膨大期提升最大，磷酸酶活性在块茎膨大期至成熟期变化幅度均较小。4 种栽培方式下土壤蔗糖酶活性载前期差异均不显著，整体上酶活性表现为随生育期先降后升的趋势，马铃薯和玉米轮作在前期与花期酶活性低于普通连作与强化连作，之后则显著高于普通连作与强化连作，正茬薯作下蔗糖酶活性至花期后均高于其余各组，正茬薯作与马铃薯和玉米轮作成熟期相较前期酶活性上升 22.93% 和 54.00%；普通连作与强化连作则下降 25.61% 和 26.88%，两种栽培方式在整个生育期内差异均不显著，表明连作导致土壤蔗糖酶活性受到抑制，而马铃薯和玉米轮作下抑制作用得到缓解。四种栽培方式土壤脲酶活性随着生育期推进表现出的变化趋势均为先降后升，前期至块茎膨大期酶活性下降，至成熟期酶活性有一定回升，整体上为降低，但各组变化幅度差异较大，成熟期酶活性相较前期分别下降 8.09%、34.55%、21.96%、11.40%，大小为正茬薯作>马铃薯和玉米轮作>普通连作>强化连作，且相互差异显著。

表 3 轮作与连作对马铃薯土壤转化酶活性的影响
Table 3 Effects of rotation and continuous cropping on potato invertase activity in soil

指标 Index	处理 Treatment	前期 Earlier stage	花期 Florescence stage	块茎膨大期 Expansion stage	成熟期 Mature stage
磷酸酶 Phosphatase/ (mg·g ⁻¹)	MPRC	0.47±0.02 a	0.53±0.02 b	0.65±0.02 a	0.66±0.05 a
	PCC	0.48±0.03 a	0.49±0.01 c	0.56±0.04 b	0.59±0.02 b
	PICC	0.42±0.02 b	0.47±0.02 c	0.54±0.01 b	0.55±0.03 b
	PNC	0.47±0.02 a	0.62±0.03 a	0.63±0.08 a	0.68±0.1 a
蔗糖酶 Sucrase/ (mg·g ⁻¹)	MPRC	27.75±3.71 a	25.77±1.47 c	31.53±4.83 a	34.11±4.01 b
	PCC	30.4±1.14 a	28.67±2.17 bc	19.13±3.71 b	21.94±2.43 c
	PICC	32.28±0.81 a	27.99±4.28 b	20.30±4.31 b	23.60±5.99 c
	PNC	30.2±2.05 a	30.68±1.27 a	39.74±3.74 a	46.53±4.34 a
脲酶 Urease/ (mg·g ⁻¹)	MPRC	1.52±0.02 c	1.30±0.01 b	1.19±0.05 b	1.40±0.08 b
	PCC	1.85±0.03 b	1.18±0.03 c	1.14±0.02 b	1.21±0.04 c
	PICC	1.51±0.05 c	1.24±0.09 bc	1.15±0.05 b	1.18±0.05 d
	PNC	2.01±0.06 a	1.79±0.06 a	1.74±0.04 a	1.78±0.05 a

2.3 轮作与连作对马铃薯土壤养分的影响

马铃薯前期成熟期根际土壤养分如表 4 所示，全氮、全磷、全钾在前期受到不同栽培方式的影响较小，各组间差异较小，规律不明显，可能是因为前期土壤中养分受施肥影响，此时作物对土壤养分影响较小。成熟期土壤中全氮与碱解氮相较前期均为下降，不同栽培模式下降幅度不同，正茬薯作全

氮和碱解氮下降 12.94%、9.75%，下降幅度最大，但含量仍显著高于其他栽培方式，两个时期马铃薯和玉米轮作全氮与碱解氮均高于普通连作与强化连作。前期至成熟期土壤全磷小幅度上升，前后大小规律一致，普通连作与强化连作速效磷上升 30.82%、28.11%，相较马铃薯和玉米轮作与正茬薯作提升幅度高 20% 以上。前期正茬薯作中全钾显著低于其他

表 4 轮作与连作对马铃薯土壤养分的影响
Table 4 Effects of rotation and continuous cropping on potato nutrients in soil

指标 Index	前期 Earlier stage				成熟期 Mature stage			
	MPRC	PCC	PICC	PNC	MPRC	PCC	PICC	PNC
全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	2.13±0.14 b	2.06±0.07 b	2.08±0.07 b	2.42±0.03 a	1.99±0.10 bc	1.82±0.05 c	1.83±0.08 c	2.10±0.03 ab
碱解氮 Alkeline-N/ (mg·kg ⁻¹)	121.17±0.29 c	119.67±0.58 c	113.33±3.18 c	133.17±4.04 a	113.01±1.73 ab	114.33±2.02 b	106.17±4.04 c	120.17±1.50 a
全磷 Total phosphorus/ (g·kg ⁻¹)	0.57±0.01 a	0.53±0.01 b	0.52±0.01 b	0.53±0.01 b	0.57±0.01 ab	0.56±0.01 b	0.56±0.01 b	0.59±0.02 a
速效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	19.13±1.84 a	15.10±2.39 b	14.36±1.18 b	19.78±1.36 a	19.39±1.01 b	19.76±1.00 b	18.40±0.70 c	21.22±1.69 a
全钾 Total potassium/ (g·kg ⁻¹)	13.02±0.22 a	13.02±0.22 a	13.15±0.12 a	12.31±0.18 b	11.83±0.21 b	11.72±0.11 b	12.67±0.28 a	12.96±0.68 a
速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)	65.59±3.60 d	84.53±4.57 b	108.99±4.34 a	71.10±2.51 c	97.95±5.75 a	52.20±2.15 c	53.76±2.88 c	62.43±1.44 b

三种栽培方式，马铃薯和玉米轮作、普通连作、强化连作之间全钾含量无显著性差异，至成熟期后除正茬薯作全钾含量提高 5.32%，其他三种栽培方式全钾含量不同程度下降；前期强化土壤中速效钾含量大小为强化连作>普通连作>马铃薯和玉米轮作>正茬薯作，各组之间均达到显著差异，至成熟期后除马铃薯和玉米轮作速效钾含量上升 33.04% 外，其他各组含量均不同程度下降，普通连作与强化连作之间差异不显著，马铃薯和玉米轮作显著高于其他各组。

3 讨论

研究表明，轮作和连作对作物的生长发育影响显著，在玉米^[13]、大豆^[14]、番茄^[15]中均有报道表明轮作处理干物质积累，总叶面积，叶面积指数及产量方面均优于连作处理，也有报道表明连作明显降低了马铃薯地上和地下部生物量，增加了总根长、根表面积、根尖数和根冠比，且随着连作年限的延长，生物量下降越大^[16]。植物的形态指标直观反映了自身生长发育的状况^[17]，本次试验中轮作与连作对马铃薯株高、茎粗、总叶面积以及根长影响显著，其中株高、茎粗、总叶面积大小均以正茬薯作最大，马铃薯和玉米轮作次之，而普通连作与强化连作显著低于马铃薯和玉米轮作，这与徐雪风^[18]试验结果相似，表明连作抑制了马铃薯地上部整体生长发育，这可能与长期连作导致土壤养分结构单一化有关，作物对土壤养分吸收是一个相互的过程，不同作物对土壤养分需求有所差异^[19]，长期连

作马铃薯导致土壤中有利物质减少，自毒物质增加，从而抑制了马铃薯正常生长，而在本试验中通过轮作玉米，使得土壤养分结构丰富化，马铃薯株高、茎粗以及总叶面积相较连作有所提高，说明在一定程度上轮作缓解了连作障碍。马铃薯和玉米轮作处理下马铃薯根长与正茬薯作差异不显著，强化连作下马铃薯根长长度显著增加，这可能是由于长期连作导致土壤中氮、磷、钾等大量元素缺失引起的现象^[20]，马铃薯需要更加发达的根系来吸收土壤的中养分以满足生长需求，这是植物对逆境的自然反应，但本研究成熟期普通连作马铃薯根长相较正茬薯作下降，与他们的结果不同，原因可能与连作年限有关，同时土壤的肥力保存能力、松散程度、黏结性也对根系生长有一定的影响^[21]。

土壤酶活性可以揭示土壤中生化代谢作用强度以及对外界环境的适应能力^[22]，轮作与连作导致土壤酶活性发生变化，是引起作物生长发育改变的重要因素之一^[23]。土壤酶活性具体变化与土壤酶自身功能有很大的关系，在本试验中，成熟期 6 种土壤酶活性均以正茬薯作最高，其余三组整体上以强化连作酶活性最低，前后变化幅度也较小，说明长期连作会导致土壤酶活性降低，这可能与土壤中微生物族群构成有关^[24]，在长期连作条件下，土壤环境单一化，土壤有益菌如硝化细菌等向有害菌转化^[25]，该类微生物的减少导致脲酶等转化酶的活性降低，使得土壤养分转化效率降低，引起土壤养分结构单一化，而这又可能引起作物自毒物质的大量积累，导致氨化细菌等数量降低，从而使过氧化氢酶等抗

逆性酶活性降低, 导致土壤清除有害物质的能力下降, 两者交互作用进一步加重了连作逆境效应, 最终抑制了马铃薯的生长发育。马铃薯和玉米轮作中各土壤酶活性相较普通连作有所提高, 说明轮作可以修复土壤酶的活性, 但是通过同一轮作模式恢复土壤酶活性的能力有限, 并没有恢复到正茬薯作水平。

各组栽培方式下土壤全氮、全磷、全钾前期差异较小, 至成熟期全氮与全钾下降, 全磷上升, 但变化幅度均较小, 这可能是因为马铃薯是块茎播种, 前期生长发育养分主要来源于自身块茎转化, 前期对于土壤养分需求较少, 土壤养分主要来源于施肥, 因此养分的变化不明显。马铃薯和玉米轮作模式下全量养分均高于两种连作模式, 速效养分变化也更加强烈, 表明马铃薯和玉米轮作模式下马铃薯对土壤养分吸收更加活跃, 但是整体水平仍高于连作, 表明轮作模式下土壤由全量养分向可被作物直接吸收的速效养分转化的速率更高, 更有利于马铃薯正常生长发育, 这可能与作物连作引起的自毒作用有关^[26], 植物残体在土壤中分解产生有毒物质^[27], 导致土壤环境恶化, 长期连作导致土壤中酚酸等致毒物质大量积累, 造成土壤微生物结构失调, 土壤酶活性降低, 使得土壤养分无法转化为可被作物直接吸收利用的速效养分。

4 结论

在马铃薯不同栽培模式试验中, 普通连作与强化连作降低了马铃薯株高、茎粗、总叶面积大小, 提高了根长, 土壤酶活性受到抑制, 土壤养分转化换率下降, 强化连作比普通连作表现更加显著。马铃薯和玉米轮作通过提高土壤酶活性, 促进土壤养分的转化, 在一定程度减轻连作对马铃薯生长发育的抑制作用, 从而缓解连作障碍。

参考文献:

- [1] 周华兰, 彭亚丽, 李婷, 等. 马铃薯连作对土壤理化性质和生物学特性的影响 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45 (6): 611-616.
- ZHOU H L, PENG Y L, LI T, et al. Effects of potato continuous cropping on soil physicochemical and biological properties [J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2019, 45 (6): 611-616. (in Chinese)
- [2] 顾松松, 熊兴耀, 谭琳, 等. 土壤微生态与马铃薯连作障碍机制的研究进展 [J]. 中国农学通报, 2018, 34 (30): 42-45.
- GU S S, XIONG X Y, TAN L, et al. Soil microorganisms and the mechanism of potato continuous cropping obstacle: Research progress [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34 (30): 42-45. (in Chinese)
- [3] 尹承苗, 王玫, 王嘉艳, 等. 苹果连作障碍研究进展 [J]. 园艺学报, 2017, 44 (11): 2215-2230.
- YIN C M, WANG M, WANG J Y, et al. The research advance on apple replant disease [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2017, 44 (11): 2215-2230. (in Chinese)
- [4] 熊湖, 郑顺林, 龚静, 等. 液态有机肥对酚酸胁迫下马铃薯生长发育和土壤酶活性影响 [J]. 水土保持学报, 2019, 33 (3): 254-259, 267.
- XIONG H, ZHENG S L, GONG J, et al. Effects of liquid organic fertilizer on potato growth and soil enzyme activities under phenolic acid stress [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33 (3): 254-259, 267. (in Chinese)
- [5] 侯乾, 王万兴, 李广存, 等. 马铃薯连作障碍研究进展 [J]. 作物杂志, 2019 (6): 1-7.
- HOU Q, WANG W X, LI G C, et al. Advances in the research on potato continuous cropping obstacles [J]. *Crops*, 2019 (6): 1-7. (in Chinese)
- [6] 郭世丰, 王雪, 朱彪. 马铃薯连作障碍机理及防治对策 [J]. 现代农业科技, 2016 (17): 81, 83.
- GUO S F, WANG X, ZHU B. Mechanism and control measures of potato continuous cropping obstacles [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016 (17): 81, 83. (in Chinese)
- [7] 郝智勇. 马铃薯连作障碍形成原因及调控措施 [J]. 安徽农学通报, 2017, 23 (8): 40, 45.
- HAO Z Y. Causes and control measures of potato continuous cropping obstacle [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2017, 23 (8): 40, 45. (in Chinese)
- [8] 刘有聪, 张立猛, 焦永鸽, 等. 大蒜与烤烟轮作对烟草黑胫病的防治效果及作用机理初探 [J]. 中国烟草学报, 2016, 22 (5): 55-62.
- CHUAN Y C, ZHANG L M, JIAO Y G, et al. Control effects of tobacco and garlic rotation on tobacco black shank and a preliminary study on the inhibition mechanism [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2016, 22 (5): 55-62. (in Chinese)
- [9] 吴杨潇影, 姜振辉, 杨京平, 等. 玉米-水稻轮作和水稻连作土壤根际和非根际氮含量及酶活性 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (4): 535-543.
- WU Y X Y, JIANG Z H, YANG J P, et al. Nitrogen content and enzyme activity in rhizosphere and non-rhizosphere soils of paddy field under maize-rice rotation and rice continuous monocropping [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25 (4): 535-543. (in Chinese)
- [10] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 傅丽君, 赵士熙, 王海, 等. 4种农药对土壤微生物呼吸及过氧化氢酶活性的影响 [J]. 福建农业大学学报, 2005, 34 (4): 441-445.
- FU L J, ZHAO S X, WANG H, et al. Effects of four pesticides on catalase activity in soil and soil respiration [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2005, 34 (4): 441-445. (in Chinese)
- [13] 闫宇婷, 宋秋来, 闫超, 等. 连作秸秆还田下玉米氮素积累与氮肥替

- 代效应研究 [J]. 作物学报, 2021, 48(4): 1-15.
- YAN Y T, SONG Q L, YAN C, et al. Study on nitrogen accumulation and nitrogen substitution effect of Maize under continuous cropping straw returning [J]. *Journal of crops*, 2021, 48(4): 1-15. (in Chinese)
- [14] 丁素荣, 周学超, 刘迎春, 等. 内蒙古东南部地区玉米大豆轮作效应研究 [J]. 大豆科学, 2021, 40 (1): 39-44.
- DING S R, ZHOU X C, LIU Y C, et al. Study on the effect of maize and soybean rotation in southeastern Inner Mongolia [J]. *Soybean Science*, 2021, 40 (1): 39-44. (in Chinese)
- [15] 李小霞, 靳鲲鹏, 李万星, 等. 旱地番茄连作障碍机理研究进展 [J]. 北方农业学报, 2020, 48 (1): 35-40.
- LI X X, JIN K P, LI W X, et al. Research progress of mechanism of continuous cropping obstacles of tomatoe in dryland [J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2020, 48 (1): 35-40. (in Chinese)
- [16] 张文明, 邱慧珍, 刘星, 等. 连作对马铃薯根系生物学特征和叶片抗逆生理的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32 (4): 20-23, 52.
- ZHANG W M, QIU H Z, LIU X, et al. Effect of continuous cropping on morphology and physiological characteristics of potato root and leaf [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32 (4): 20-23, 52. (in Chinese)
- [17] 呼红梅, 王莉. 水肥耦合对谷子幼苗形态和生理指标的影响 [J]. 生态学杂志, 2015, 34 (7): 1917-1923.
- HU H M, WANG L. Effects of coupling water and fertilizer on physio-morphological indices of foxtail millet at seedling stage [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34 (7): 1917-1923. (in Chinese)
- [18] 徐雪凤, 李朝周, 张俊莲. 轮作油菜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.
- XU X F, LI C Z, ZHANG J L. Effects of oil-sunflower rotation on growth and resistance physiology indexes of potato [J]. *Soils*, 2017, 49 (1): 83-89. (in Chinese)
- [19] 孙乐乐, 查建军, 马志帅, 等. 不同作物对采煤复垦区表层土壤养分及酶活性的影响 [J]. 西南农业学报, 2019, 32 (9): 2085-2089.
- SUN L L, ZHA J J, MA Z S, et al. Effects of different crops on surface soil nutrients and enzyme activity in coal mining reclamation area [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32 (9): 2085-2089. (in Chinese)
- [20] 邓红艳. 连作对烤烟生长及土壤氮磷钾养分的影响 [J]. 农业与技术, 2015, 35 (10): 37-38.
- DENG H Y. Effects of continuous cropping on Flue-cured Tobacco Growth and soil nitrogen, phosphorus and potassium nutrients [J]. *Agriculture and Technology*, 2015, 35 (10): 37-38. (in Chinese)
- [21] 徐雪凤, 回振龙, 李自龙, 等. 马铃薯连作障碍与土壤环境因子变化相关研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33 (4): 16-23.
- XU X F, HUI Z L, LI Z L, et al. Relationship between potato continuous cropping obstacle and soil environmental factors [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33 (4): 16-23. (in Chinese)
- [22] 焦峰, 吕淑敏, 汪昊, 等. 三江平原草甸土水田土壤酶活性的演变特征 [J]. 安徽农业科学, 2019, 47 (23): 174-176.
- JIAO F, LÜ S M, WANG H, et al. Evolution characteristics of soil enzyme activities in different types of paddy fields in Sanjiang plain [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47 (23): 174-176. (in Chinese)
- [23] 王菲, 王建宇, 贺婧, 等. 压砂瓜连作对土壤酶活性及理化性质影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33 (5): 108-114.
- WANG F, WANG J Y, HE J, et al. Investigation on the effects of continuous cropping of Xisha water melon on the soil enzyme activities and physical-chemical properties [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33 (5): 108-114. (in Chinese)
- [24] 张志龙, 陈效民, 曲成闯, 等. 生物质炭对黄瓜连作土壤中微生物量碳氮及酶活性的影响 [J]. 生态学杂志, 2019, 38 (5): 1384-1391.
- ZHANG Z L, CHEN X M, QU C C, et al. Effects of biochar addition on soil microbial biomass C, N and enzyme activities in cucumber continuous cropping [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38 (5): 1384-1391. (in Chinese)
- [25] 徐继磊, 张友杰, 叶协锋, 等. 不同连作年限下烤烟不同生育期土壤微生物区系动态研究 [J]. 安徽农业科学, 2018, 46 (18): 105-108.
- XU J L, ZHANG Y J, YE X F, et al. Dynamics of the soil microbial flora at different growing stages of flue-cured tobacco under continuous cropping years [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46 (18): 105-108. (in Chinese)
- [26] 万年鑫. 马铃薯不同连作方式下根际土壤效应及自毒作用研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.
- WAN N X. Effect of autotoxic effects of potato and different potato continuous cropping ways on rhizosphere soil[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2017.
- [27] 郭晓燕, 陶国峰, 张露, 等. 毛红椿凋落叶水浸液自毒作用研究 [J]. 核农学报, 2019, 33 (12): 2499-2508.
- GUO X Y, TAO G F, ZHANG L, et al. Autotoxicity of aqueous extracts from *Toona ciliata* var. *pubescens* leaf litter [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33 (12): 2499-2508. (in Chinese)

(责任编辑: 于洪杰)