

不同连作年限对薏苡土壤特性、产量和品质的影响

李 蕾, 付敬锋, 魏 盛, 曾 涛, 韦海龙, 张 军, 程 乙, 宋 碧*

(贵州大学农学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: 为了探明连作年限对薏苡根际土壤特性、根系形态、产量和品质的影响, 以不同连作年限的薏苡为对象, 研究其根际土壤性质、根系形态、产量和品质的变化规律及其相关性。结果表明: 连作薏苡使土壤逐渐酸化, 全氮含量显著升高, 全磷、有效磷和速效钾含量显著降低, 有机质含量随连作年限的增加逐渐下降, 连作 6 年的土壤碱解氮含量比轮作降低 16.32% ~ 33.93%; 土壤细菌和放线菌数量明显减少, 真菌数量逐渐增加; 土壤蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性显著下降, 过氧化氢酶活性显著升高, 连作 6 年的土壤过氧化氢酶活性比轮作高出 30.18% ~ 38.98%; 随着连作年限的增加薏苡总根系长、总根系表面积、根系平均直径和根系总体积呈下降趋势; 连作 6 年薏苡的千粒重、结实率、每穴粒重和每穴粒数显著低于轮作, 连作年限每增加一年, 薏苡产量减少 632.276 kg/hm², 连作 6 年的薏苡减产 44.13% ~ 53.43%; 连作薏苡的可溶性糖、赖氨酸和支链淀粉含量降低, 连作对粗蛋白和粗脂肪含量的影响不显著。相关性分析结果表明, 连作薏苡的土壤有效磷、速效钾、有机质含量以及 pH 显著影响微生物数量; 过氧化氢酶活性与全磷、全钾、有效磷、速效钾含量和 pH 呈显著负相关, 蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性与细菌、放线菌数量以及全磷、全钾、有效磷、速效钾和 pH 呈显著正相关; 土壤理化性质中的有效磷和速效钾含量是影响产量和品质的主要因素。连作导致薏苡根际土壤化学性质和微生物环境恶化, 根系发育不良, 进而使产量和品质下降。

关键词: 薏苡; 连作; 土壤特性; 根系形态; 产量和品质

薏苡 (*Coix Lachryma-jobi* L.) 为一年生禾本科植物, 具有很高的营养价值和药用价值。贵州省兴仁市是全国最大的薏苡原产地, 种植面积达到 2.33 万 hm², 产量居全国第一^[1]。近年来受耕地面积下降的影响, 薏苡的连作现象日益严重, 连作障碍影响了薏苡产业的健康可持续发展。相关研究表明, 连作使土壤酸化明显, 土壤养分的有效性和肥力状况下降, 土壤中与营养循环有关的酶活性降低, 土壤养分循环能力下降, 微生物种群结构与功能单一化^[2-3]; 大豆长期连作使土壤中微生物多样性指数变低, 菌群结构发生明显改变, 土传病害增加, 根

系生长变差, 导致作物产量及品质降低^[4-5]; 花生根际土壤理化性质和微生物群落结构受连作障碍影响明显, 且连作过程中其根际土壤理化性质的变化与微生物群落结构变化具有显著相关性^[6]; 连作党参的产量和品质主要受土壤中的有机碳、全磷、有效磷、速效钾、脲酶和碱性磷酸酶活性的影响^[7]。综上所述, 前人对作物连作土壤特性和产量品质变化已有较多研究, 但有关薏苡连作对土壤环境和产量、品质影响鲜见报道。本文在研究不同连作年限对薏苡根际土壤环境、根系发育、产量和品质影响的基础上, 进一步探讨了薏苡根际土壤理化性质和酶活性、微生物数量的相互关系, 以期全面地了解土壤和薏苡产量、品质的连作反应, 为薏苡连作障碍的有效防治提供理论支撑与技术参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验地位于贵州省黔西南州兴仁市 (东经 105°、北纬 25°), 土壤类型为黄壤, 平均海拔为 1450 m, 年平均气温为 15.2℃, 年平均降水量为 1400 mm, 属于亚热带湿润季风气候。

收稿日期: 2022-05-22; 录用日期: 2022-07-16

基金项目: 国家自然科学基金 (32160516); 贵州省科技计划项目 (黔科合支撑 [2021] 一般 270); 贵州省粮油作物分子育种重点实验室项目 (黔科合中引地 [2023] 008); 贵州省高等学校功能农业重点实验室项目 (黔教技 [2023] 007); 贵州省特色粮油作物栽培与生理生态研究科技创新人才团队 (黔科合平台人才项目 [2019] 5613 号); 贵州省高层次创新型人才“百”层次人才项目 (黔科合平台人才 [2018] 5632 号)。

作者简介: 李蕾 (1997-), 硕士研究生, 研究方向主要为作物高产理论与技术。E-mail: lilei080620@163.com。

通讯作者: 宋碧, E-mail: sb6264@126.com。

1.2 试验方法

试验品种为兴仁小白壳,在兴仁市下山镇设置3个处理:连作2、3和6年,在城北办事处设置3个处理:轮作(2019—2021年期间种植模式为玉米-水稻-薏苡)、连作4和6年,3次重复。穴播,行距60 cm,穴距50 cm,种植密度33333穴/hm²,施肥量为N 225 kg/hm²、P₂O₅ 150 kg/hm²、K₂O 150 kg/hm²,氮肥30%作基肥,30%作分蘖肥,40%作穗肥;磷、钾肥全部作基肥。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤养分

薏苡成熟期在各小区取3穴有代表性的植株,将植株连根带土挖出,抖落根际土壤,收集混匀去除杂质,装于无菌自封袋内带回实验室,一部分自然条件下风干、磨碎,过2.00和0.147 mm筛,用于土壤养分和酶活性的测定,另一部分放于-80℃冰箱保存,用于土壤可培养微生物数量的测定。

参照鲍士旦《土壤农化分析》^[8]的方法测定土壤养分。土壤全氮采用凯氏定氮法,全磷采用NaOH熔融-钼锑抗比色法,全钾采用NaOH熔融-火焰光度法,碱解氮采用碱解扩散法,有效磷采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法,速效钾采用中性乙酸铵浸提-火焰光度法,有机质采用重铬酸钾氧化-容量法,pH值采用pH计测定。

1.3.2 土壤酶活性

过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法,脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法,酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法,蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法^[9]。

1.3.3 土壤微生物数量

稀释平板涂布法测定土壤细菌、真菌和放线菌的数量,细菌用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基,真菌用

马铃薯琼脂培养基,放线菌用改良高氏1号培养基。

1.3.4 根系形态

在薏苡拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期,各小区取3穴有代表性的植株,将根系剪下洗净,采用WinRHIZO根系形态分析系统测定每穴薏苡根系的总根长(cm/穴)、根系平均直径(cm/穴)、总根表面积(cm²/穴)和根系总体积(cm³/穴)。

1.3.5 产量和品质

在薏苡成熟期,田间测定实际产量,再分别取3穴有代表性的植株,风干后进行考种,测定10粒粒长和粒宽、每穴粒数、每穴粒重、千粒重和结实率[结实率(%)=(每穴总粒数-空瘪粒)/每穴总粒数×100]。籽粒样品风干后研磨成粉质,用于品质的测定。粗蛋白采用凯氏定氮法测定^[10],粗脂肪采用索氏抽提法测定^[11],支链淀粉采用双波法测定^[12],可溶性糖采用砷钼酸显色法测定^[13],赖氨酸采用茚三酮比色法测定。

1.4 数据统计分析

利用Excel 2010和Origin 2021进行数据整理与绘图,用SPSS 25.0进行统计分析,并以LSD法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同连作年限对薏苡根际土壤养分的影响

对不同连作年限薏苡根际土壤养分的分析(表1)可知,随着连作年限的延长,土壤全磷、有效磷、速效钾、有机质含量和pH呈下降趋势,且不同连作年限间差异显著;土壤全氮含量随连作年限的延长逐渐上升,连作6年时积累量最高,下山点和城北点分别为0.20和0.25 g/kg,比连作2年和轮作显著高了66.67%和19.05%。下山点有效磷和速效钾含量降幅较大,连作6年比2年分别显著降低了57.46%和57.85%,连作3年的碱解氮含量最低,为122.22 mg/kg,

表1 不同连作年限薏苡根际土壤养分含量变化

地点	连作年限	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	有机质 (g/kg)	pH
下山	2年	0.12 ± 0.02c	0.87 ± 0.02a	22.78 ± 0.40a	148.70 ± 0.75a	7.71 ± 0.16a	172.07 ± 2.61a	40.86 ± 0.61a	6.01 ± 0.09a
	3年	0.16 ± 0.02b	0.88 ± 0.01a	22.55 ± 0.27a	122.22 ± 0.43c	3.99 ± 0.73b	162.51 ± 4.15b	34.38 ± 2.27a	4.41 ± 0.07b
	6年	0.20 ± 0.01a	0.57 ± 0.01b	16.09 ± 0.47b	143.94 ± 3.05b	3.28 ± 0.31b	72.53 ± 2.15c	22.11 ± 5.11b	4.57 ± 0.09b
城北	轮作	0.21 ± 0.02b	1.25 ± 0.17a	26.49 ± 0.56a	217.85 ± 2.36a	7.22 ± 0.40a	185.71 ± 1.38a	52.92 ± 2.13a	6.67 ± 0.06a
	4年	0.23 ± 0.01b	0.78 ± 0.02b	19.42 ± 0.50c	152.57 ± 2.04c	5.42 ± 0.12b	100.61 ± 1.74b	50.36 ± 2.35a	5.41 ± 0.35b
	6年	0.25 ± 0.01a	0.74 ± 0.04b	21.55 ± 0.30b	182.30 ± 0.78b	2.23 ± 0.15c	69.30 ± 0.66c	50.17 ± 1.10a	4.84 ± 0.15c

注:相同地点同列数据间不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。表2、3、5同。

与连作2年相比显著降低了17.81%，连作6年的有机质含量比2年显著降低了45.89%。城北点连作4和6年的土壤全磷、有效磷、速效钾含量与轮作地块相比，分别显著降低了37.60%、24.93%、45.48%和40.8%、69.11%、62.68%，连作6年的土壤全钾和碱解氮含量比轮作分别显著降低了18.65%和16.32%，连作4和6年的有机质含量比轮作分别降低了4.84%和5.20%，但差异不显著。以上结果表明，连作导致薏苡根际土壤酸化，全氮含量增加，而全磷、全钾、有效磷和速效钾含量显著降低，土壤养分比例失调。

2.2 不同连作年限对薏苡根际土壤可培养微生物数量的影响

不同连作年限显著影响薏苡根际土壤微生物

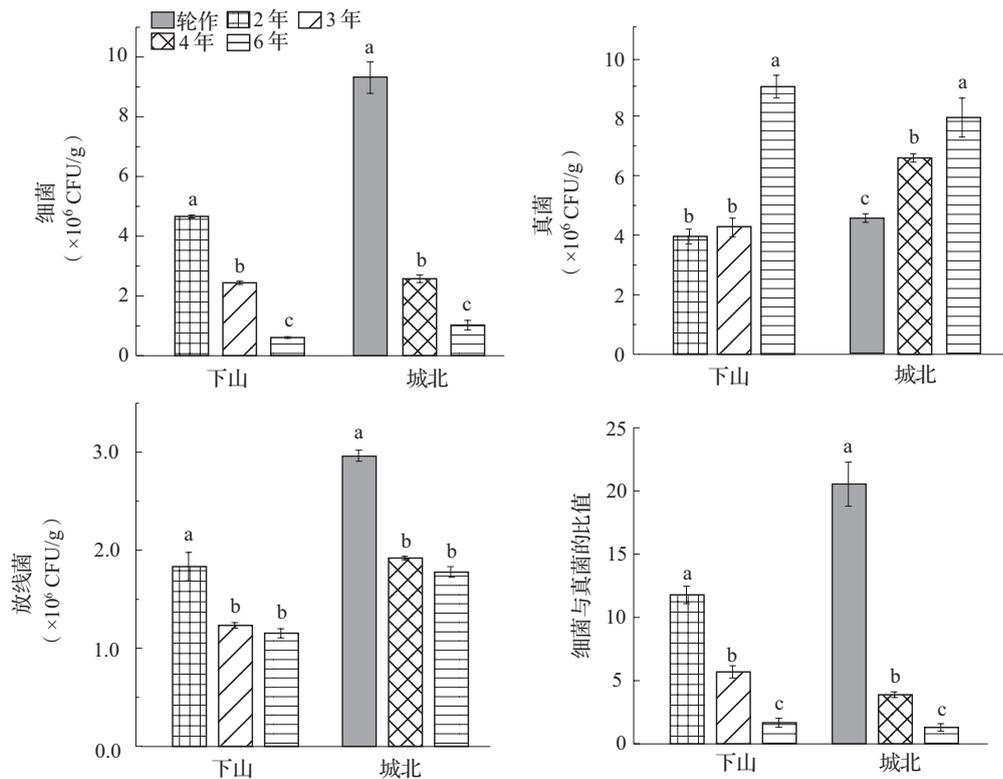


图1 不同连作年限薏苡根际土壤可培养微生物数量变化

注：图柱上相同地点不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.3 不同连作年限对薏苡根际土壤酶活性的影响

不同连作年限薏苡根际土壤酶活性变化存在显著差异 (图2)，随连作年限的延长，下山试验点过氧化氢酶活性呈先下降后上升的变化趋势，而城北试验点过氧化氢酶活性逐渐上升，脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶活性逐渐下降。下山连作6年的过氧化氢酶活性比连作3年显著高出10.59%，城北连作6年的过氧化氢酶活性比轮作显著高出63.87%。下山连作2年的脲酶和蔗糖酶活性最大，分别为1.00和

83.57 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{d})$ ，比连作6年分别显著高出了22.00%和26.55%。酸性磷酸酶活性下降趋势较平缓，连作6年的酸性磷酸酶活性比连作3年显著下降了18.63%。城北轮作脲酶和蔗糖酶活性比连作4、6年分别显著高了55.70%、60.13%和25.76%、26.82%，轮作处理酸性磷酸酶活性最大 [2.98 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{d})$]，连作4和6年比轮作分别显著降低了29.87%和49.33%。综上所述，连作降低了土壤脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶的活性，使过氧化氢酶活性升高。

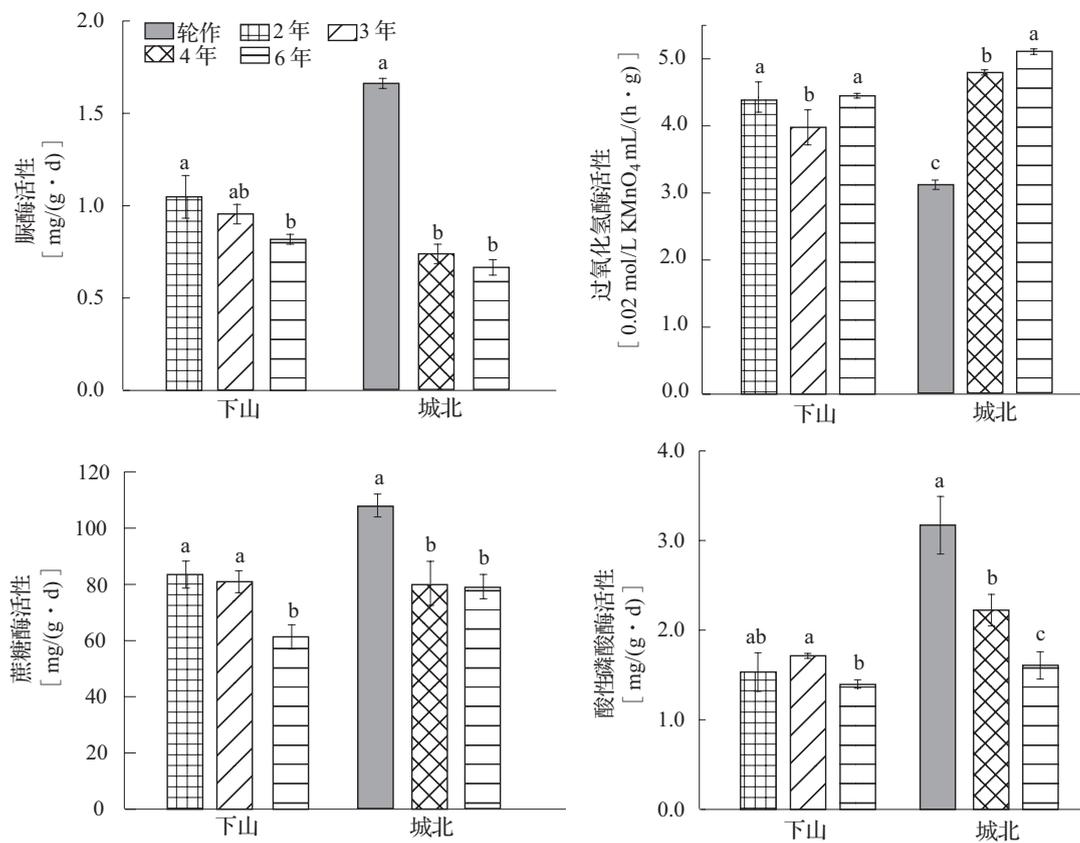


图2 不同连作年限薏苡根际土壤酶活性变化

2.4 不同连作年限对薏苡根系形态的影响

连作对薏苡各时期的根系生长影响显著(表2),随着连作年限的增加,薏苡总根系长、总根系表面积、根系平均直径和根系总体积呈逐渐下降的趋势。下山连作6年的薏苡根系生长最差,其次是城北连作6年,轮作薏苡各时期的根系形态指标显著高于各连作年限。2个试验地点的薏苡总根系长、根系平均直径、总根系表面积和根系总体积均在灌浆期达到最大。在灌浆期下山连作2年的总根长比6年显著高出27.76%,城北轮作总根长分别比连作4和6年高出28.98%和63.89%。下山连作2年的根系平均直径、总根系表面积和根系总体积比连作6年分别显著高出30.60%、67.69%和31.19%,城北轮作比连作6年分别显著高出33.14%、16.38%和27.09%。连作使薏苡根系生长不良,从而影响其对土壤养分的吸收。

2.5 不同连作年限对薏苡产量及产量性状的影响

通过对连作薏苡的产量及产量性状分析(表3)可知,随着连作年限的增加,2个试验地点的每穴

粒重、每穴粒数、千粒重、结实率和产量均呈下降趋势,且差异显著,10粒粒长和粒宽也有逐渐降低的趋势,但差异不显著。下山连作3年的每穴粒数和每穴粒重比连作2年分别显著降低了12.93%和14.55%,连作6年的每穴粒数、每穴粒重和结实率比连作2年分别显著降低了31.88%、41.69%和7.37%,明显减产41.70%。城北连作4和6年的每穴粒数比轮作分别显著降低了29.44%和32.65%,千粒重分别显著降低了15.32%和26.24%,每穴粒重分别显著降低了43.39%和53.43%,分别明显减产43.39%和53.43%。综上分析发现,连作年限显著影响薏苡产量,随连作年限延长,薏苡产量逐渐下降,因此以连作年限为自变量(x),产量和产量性状为因变量(y),进行回归分析(表4)发现,连作年限每延长1年,薏苡的每穴粒数减少145.74粒,千粒重和每穴粒重分别下降3.318和18.97g,结实率下降1.4%,薏苡的产量减少632.276 kg/hm²。可见连作会降低薏苡的每穴粒重、千粒重和结实率等产量性状,进而使薏苡的产量下降。

表 2 不同连作年限对薏苡根系形态的影响

地点	时期	连作年限	总根系长 (cm/穴)	根系平均直径 (cm/穴)	总根系表面积 (cm ² /穴)	根系总体积 (cm ³ /穴)	
下山	拔节期	2年	9857.31 ± 266.20a	8.61 ± 0.46a	4284.42 ± 424.90a	163.36 ± 33.15a	
		3年	6645.35 ± 95.99b	7.13 ± 1.23b	3619.29 ± 233.28b	151.69 ± 41.78b	
		6年	3910.77 ± 105.51c	6.64 ± 0.41b	2494.27 ± 171.96c	134.59 ± 31.72c	
	抽穗期	2年	11841.96 ± 640.71a	16.79 ± 0.10a	7596.25 ± 398.82a	421.05 ± 11.59a	
		3年	10984.02 ± 618.75a	16.00 ± 0.73a	7155.53 ± 327.25a	331.25 ± 25.26b	
		6年	9943.09 ± 643.92b	12.86 ± 0.30b	4529.85 ± 114.99b	285.58 ± 45.50b	
	灌浆期	2年	12387.19 ± 356.23a	23.07 ± 0.84a	10526.20 ± 442.87a	589.70 ± 55.42a	
		3年	11673.45 ± 381.25a	19.11 ± 0.30b	9698.52 ± 272.39b	429.32 ± 56.34b	
		6年	8947.86 ± 440.39b	15.26 ± 0.66c	6415.44 ± 216.84c	320.95 ± 19.73c	
	成熟期	2年	11940.11 ± 563.47a	17.65 ± 4.26a	8981.52 ± 326.03a	466.20 ± 44.49a	
		3年	10032.17 ± 643.98b	15.65 ± 3.36b	8714.53 ± 461.58a	388.92 ± 27.99b	
		6年	8602.85 ± 688.80c	8.59 ± 0.35c	5223.45 ± 366.35b	267.61 ± 46.55c	
	城北	拔节期	轮作	17726.77 ± 248.20a	12.68 ± 1.53a	7588.94 ± 158.45a	264.91 ± 34.15a
			4年	7703.75 ± 284.23b	8.31 ± 3.49b	3884.86 ± 99.07b	162.96 ± 54.18b
			6年	4815.26 ± 326.29c	6.04 ± 1.18c	2332.66 ± 206.42c	104.50 ± 43.26c
		抽穗期	轮作	33239.46 ± 381.55a	28.16 ± 2.72a	14311.49 ± 189.47a	619.70 ± 53.75a
			4年	22130.80 ± 481.77b	23.07 ± 2.84b	9441.35 ± 167.56b	408.28 ± 66.54b
			6年	14995.94 ± 394.41c	15.81 ± 3.31c	7600.69 ± 234.92c	372.15 ± 36.83c
灌浆期		轮作	35386.42 ± 716.19a	37.96 ± 1.51a	18302.67 ± 244.66a	835.52 ± 35.71a	
		4年	25130.80 ± 739.01b	28.39 ± 0.96b	12881.52 ± 490.17b	633.63 ± 18.01b	
		6年	12778.68 ± 837.34c	25.38 ± 2.34c	9882.98 ± 133.85c	609.16 ± 16.39b	
成熟期		轮作	31127.60 ± 592.17a	23.97 ± 0.88a	15196.80 ± 428.31a	489.63 ± 11.53a	
		4年	10132.17 ± 543.98b	15.65 ± 2.16b	8781.52 ± 561.58b	328.92 ± 27.99b	
		6年	10602.85 ± 588.50b	10.59 ± 1.35c	6223.45 ± 466.35c	267.61 ± 46.55c	

表 3 不同连作年限薏苡产量及产量性状的变化

地点	连作年限	10粒粒长 (cm)	10粒粒宽 (cm)	每穴粒数	千粒重 (g)	每穴粒重 (g)	结实率 (%)	产量 (kg/hm ²)
下山	2年	8.77 ± 0.15a	7.00 ± 0.85a	2723.00 ± 167.00a	77.12 ± 0.91a	199.75 ± 12.24a	95.33 ± 0.01a	6657.67 ± 407.89a
	3年	9.20 ± 0.78a	5.93 ± 0.40a	2371.00 ± 71.00b	76.52 ± 0.31a	170.69 ± 6.27b	94.00 ± 0.05a	5688.99 ± 208.87b
	6年	8.93 ± 0.15a	5.87 ± 0.42a	1855.00 ± 184.00c	71.27 ± 4.06b	116.47 ± 5.57c	88.33 ± 0.01b	3881.83 ± 185.66c
城北	轮作	10.17 ± 0.38a	7.07 ± 1.22a	2306.00 ± 131.00a	93.69 ± 3.08a	208.45 ± 6.84a	96.33 ± 0.02a	6947.53 ± 228.01a
	4年	9.23 ± 0.55ab	6.23 ± 0.12a	1627.00 ± 43.00b	79.34 ± 2.74b	118.00 ± 3.52b	91.33 ± 0.01b	3933.05 ± 117.27b
	6年	8.80 ± 0.52b	5.90 ± 0.61a	1553.00 ± 109.00b	69.11 ± 2.33c	97.07 ± 4.13c	89.00 ± 0.01c	3235.46 ± 137.67c

表 4 连作年限与薏苡产量及产量性状的回归关系

指标	回归方程	R ²
每穴粒数	y=2582.92-145.74x	0.478*
千粒重	y=89.45-3.32x	0.738**
每穴粒重	y=218.13-18.97x	0.856**
结实率	y=0.97-0.01x	0.927**
产量	y=7270.39-632.28x	0.856**

注: **表示在 P<0.01 水平相关性极显著; *表示在 P<0.05 水平相关性显著。表 6、7、8 同。

2.6 不同连作年限对薏苡品质的影响

从表 5 可知, 不同连作年限显著影响薏苡的品质。随着连作年限的增加, 薏苡的可溶性糖、赖氨酸和支链淀粉含量呈下降趋势, 部分处理间差异显著,

粗蛋白和粗脂肪含量呈先升后降的趋势。下山连作 6 年的薏苡可溶性糖和支链淀粉含量最低 (2.53% 和 33.38%), 比连作 2 年分别显著降低了 45.36% 和 7.64%, 连作 2 年的赖氨酸含量比连作 3 和 6 年分别显著提高了 21.74% 和 27.27%, 连作 3 年的粗蛋白含量最高 (14.09%), 比连作 6 年显著增加 19.41%。城北连作 4 和 6 年薏苡可溶性糖含量比轮作分别显著下降 37.15% 和 60.91%, 连作 4 和 6 年的薏苡支链淀粉、赖氨酸含量比轮作分别显著降低 21.01%、20.83% 和 27.39%、29.17%, 连作 4 年的薏苡粗脂肪含量最高 (5.78%), 比连作 6 年显著高出 16.96%。上述分析结果表明, 连作主要使薏苡的可溶性糖、支链淀粉和赖氨酸含量下降, 进而影响薏苡的品质。

表 5 不同连作年限薏苡品质变化 (%)

地点	年限	可溶性糖	支链淀粉	赖氨酸	粗蛋白	粗脂肪
下山	2 年	4.24 ± 0.17a	36.14 ± 4.68a	0.28 ± 0.02a	13.14 ± 0.58ab	4.90 ± 0.13a
	3 年	3.19 ± 0.42b	35.68 ± 4.00a	0.23 ± 0.03b	14.09 ± 0.83a	4.81 ± 0.19a
	6 年	2.53 ± 0.15c	33.38 ± 2.45a	0.22 ± 0.01b	11.80 ± 1.49b	4.50 ± 0.25a
城北	轮作	4.63 ± 0.35a	36.65 ± 2.62a	0.24 ± 0.03a	10.78 ± 0.85a	5.60 ± 0.17a
	4 年	2.91 ± 0.21b	28.95 ± 1.60b	0.19 ± 0.01b	11.69 ± 1.87a	5.78 ± 0.59a
	6 年	1.81 ± 0.44c	26.61 ± 4.47b	0.17 ± 0.02b	9.43 ± 2.73a	4.80 ± 1.15b

2.7 连作薏苡土壤理化性质、微生物数量和酶活性的相互关系以及对产量和品质的影响

2.7.1 不同连作年限下土壤理化性质和微生物数量的相关性分析

利用冗余分析法分析不同连作年限薏苡根际土壤微生物数量和土壤理化性质的关系, 如图 3 所示, 不同连作年限下的薏苡根际土壤理化性质变化与微生物数量变化之间存在显著相关性。位于第四象限的细菌和放线菌数量变化与速效钾、全钾、有效磷含量和 pH 呈显著正相关, 与全氮含量呈负相关, 与有机质含量的相关性不大; 位于第三象限的真菌数量与全氮含量呈正相关, 与剩余的土壤理化性质因子呈负相关。

2.7.2 不同连作年限薏苡根际土壤酶活性与微生物数量的相关性分析

土壤微生物数量与土壤酶活性的相关性分析表明 (表 6), 细菌数量与过氧化氢酶活性呈极显著负相关, 与蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性呈极显著正相关; 真菌与过氧化氢酶活性呈显著正相关, 与蔗糖酶和脲酶活性呈极显著负相关; 放线菌与过氧

化氢酶活性呈显著负相关, 与蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性呈极显著正相关, 薏苡连作使土壤中的微生物群落数量发生变化, 进而影响了土壤酶活性。

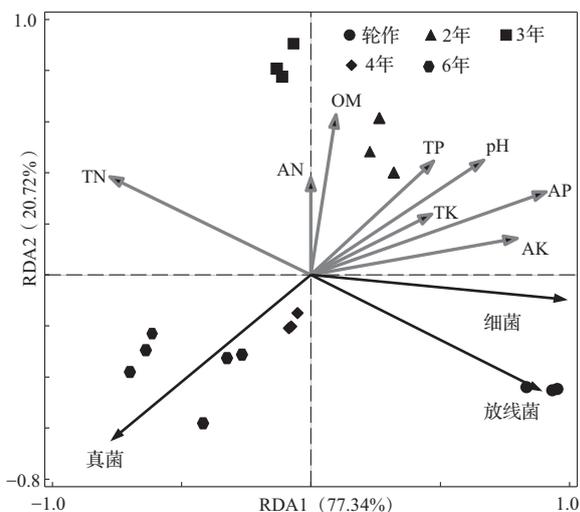


图 3 不同连作年限土壤理化指标与可培养微生物数量的相关性

注: OM、TN、TP、TK、AN、AP、AK 分别表示有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾。

表 6 土壤微生物数量和酶活性的相关关系

指标	细菌	真菌	放线菌	过氧化氢酶活性	蔗糖酶活性	脲酶活性	酸性磷酸酶活性
细菌	1.000						
真菌	-0.673**	1.000					
放线菌	0.880**	-0.395	1.000				
过氧化氢酶活性	-0.813**	0.566*	-0.555*	1.000			
蔗糖酶活性	0.845**	-0.605**	0.811**	-0.626**	1.000		
脲酶活性	0.942**	-0.603**	0.738**	-0.918**	0.773**	1.000	
酸性磷酸酶活性	0.759**	-0.310	0.793**	-0.655**	0.658**	0.702**	1.000

2.7.3 不同连作年限薏苡根际土壤理化性质与酶活性的相关性分析

土壤理化性质与土壤酶活性的相关性分析表明(表 7), 过氧化氢酶活性与全磷、全钾、速效钾含量呈极显著负相关, 与有效磷含量和 pH 呈显著负相关; 蔗糖酶活性与全氮含量相关性不显著, 与其余指标呈极显著和显著正相关; 除全氮和有机质含

量外, 脲酶活性与剩余 6 个指标呈极显著正相关; 酸性磷酸酶活性与全钾、有效磷、有机质含量呈显著正相关, 与全磷、碱解氮含量、pH 呈极显著正相关。以上说明土壤理化性质与酶活性之间存在显著的相关性, 二者相互作用, 影响着土壤养分转化, 连作使土壤酶活性下降, 土壤的养分供应受到抑制。

表 7 土壤理化性质和酶活性的相关关系

指标	过氧化氢酶活性	蔗糖酶活性	脲酶活性	酸性磷酸酶活性
全氮	0.270	-0.080	-0.276	0.262
全磷	-0.790**	0.874**	0.862**	0.777**
全钾	-0.632**	0.855**	0.749**	0.584*
碱解氮	-0.390	0.661**	0.591**	0.675**
有效磷	-0.537*	0.561*	0.684**	0.472*
速效钾	-0.763**	0.687**	0.791**	0.436
有机质	-0.067	0.641**	0.267	0.580*
pH	-0.533*	0.714**	0.754**	0.666**

2.7.4 不同连作年限薏苡根际土壤理化性质与产量及产量性状和品质的相关性分析

从表 8 中可知, 连作薏苡土壤理化性质与产量及产量构成因素和品质有着显著相关性, 其中全氮含量与结实率和可溶性糖含量呈显著负相关, 与每穴粒重、每次粒数、产量以及赖氨酸、支链淀粉、粗蛋白含量呈极显著负相关, 全磷和全钾含量与每穴粒重、千粒重、结实率、产量和可溶性糖含量呈

极显著正相关, 碱解氮含量与千粒重和粗脂肪含量呈显著正相关, 与粗蛋白含量呈显著负相关, 有效磷和速效钾含量与每穴粒重、每穴粒数、千粒重、结实率、产量、可溶性糖、赖氨酸和支链淀粉含量呈极显著正相关, 有机质含量与千粒重和粗脂肪含量呈显著和极显著正相关, pH 极显著影响每穴粒重、千粒重、结实率、产量和可溶性糖含量。

表 8 土壤理化性质与产量及产量性状和品质的相关性

指标	全氮	全磷	全钾	碱解氮	有效磷	速效钾	有机质	pH
每穴粒重	-0.674**	0.739**	0.739**	0.201	0.827**	0.965**	0.132	0.669**
每穴粒数	-0.853**	0.443	0.522*	-0.122	0.688**	0.852**	-0.151	0.405
千粒重	-0.096	0.875**	0.687**	0.579*	0.710**	0.708**	0.482*	0.796**
结实率	-0.566*	0.828**	0.836**	0.258	0.815**	0.968**	0.365	0.704**
产量	-0.674**	0.739**	0.739**	0.201	0.827**	0.965**	0.132	0.669**
可溶性糖	-0.566*	0.724**	0.657**	0.286	0.913**	0.885**	0.217	0.766**
赖氨酸	-0.727**	0.236	0.347	-0.087	0.661**	0.645**	-0.225	0.415
支链淀粉	-0.670**	0.458	0.341	-0.049	0.505*	0.665**	-0.266	0.317
粗蛋白	-0.613**	-0.041	-0.032	-0.563*	0.236	0.387	-0.373	-0.141
粗脂肪	0.413	0.319	0.329	0.476*	0.081	-0.021	0.702**	0.409

3 讨论

3.1 连作对薏苡根际土壤特性的影响

连作使土壤的养分比例失调,生物学环境恶化^[14]。通过对花生和草莓等作物的研究发现,连作使土壤pH降低,铵态氮和有效磷、有效钾的含量随连作年限增加而显著降低,全氮和有机质的含量呈现先升后降的趋势,土壤养分含量严重失衡^[6, 15]。本研究中,土壤速效钾和有效磷含量随连作年限的增加下降幅度较大,土壤逐渐酸化,全氮含量逐渐上升,全钾、全磷和有机质含量随连作年限的增加下降趋势较平缓,土壤中碱解氮含量则呈先下降后上升的趋势,但连作6年的碱解氮含量显著低于轮作,这表明长期连作不利于土壤肥力的维持,限制了薏苡的优质高产。

土壤微生物是作物根际微生态的重要组成部分,与土壤养分形成、能量转换以及有机物分解转化息息相关^[14]。连作明显改变了土壤中微生物的群落结构,使土壤中放线菌和细菌数量减少,真菌数量明显增加,真菌总数与细菌总数的比值显著增加,土壤由“细菌型”向“真菌型”转变^[16-17]。本研究结果发现,连作薏苡根际土壤中细菌和放线菌的数量减少,真菌数量增加,在一定程度上反映了土壤肥力下降,土传病害加重^[18]。有研究发现,土壤养分因子能够明显影响细菌和真菌群落结构,其中土壤真菌数量受速效钾含量的抑制,放线菌数量受磷酸酶活性和速效磷含量的抑制,细菌数量受蔗糖酶活性的促进^[19-20],本研究发现土壤中的全钾、速效钾、有效磷含量和pH对细菌和放线菌的数量变化有明显的促进作用,对真菌数量有明

显的抑制作用,表明土壤理化性质与微生物的生长代谢密切相关^[6],薏苡连作导致土壤理化性质改变,进而影响土壤微生物优势菌种的交替,使薏苡根际土壤微生态平衡遭到破坏,抑制了薏苡的生长发育。

土壤中的各种酶共同参与土壤养分的水解与转化,促进作物对土壤养分的吸收和利用^[14]。郑立伟等^[21]研究发现,随着连作年限的延长,甜瓜根际土壤中脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性呈降低趋势,过氧化氢酶活性呈现先降后增的趋势;有研究表明,土壤酶活性与土壤养分存在显著的相关关系,连作马铃薯土壤中的蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性与土壤肥力因子呈极显著正相关^[22]。本研究结果表明,随连作年限延长薏苡根际土壤中的脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶活性逐渐降低,且与细菌和放线菌数量、全磷、全钾、碱解氮、速效钾、有效磷含量和pH呈显著正相关,而过氧化氢酶活性增加,而且受到土壤中细菌、放线菌数量、磷钾养分含量以及pH的抑制,表明土壤酶活性与微生物群落和养分之间存在相互影响的关系,土壤酶活性在一定程度上反映了土壤肥力状况^[23],薏苡连作影响了土壤酶活性和微生物群落结构,显著降低了土壤生产力,不利于薏苡的种植。

3.2 连作对薏苡根系形态、产量和品质的影响

根系是保证作物水分和养分来源的主要器官,因此作物优质高产的形成需要良好的根系构型^[24]。连作导致土壤板结,通气透水性变差,抑制了作物根系的发育和延伸,对土壤中养分的吸收变差,进而抑制作物产量和品质的形成,有研究表明,烤烟连作年限越长,主根和侧根的生长发育越差,阻碍了

烤烟对水分和养分的吸收,导致烤烟长势变差^[25]。本研究发​​现薏苡根系的总根长、总根表面积、根系平均直径和根系总体积随着连作的延长而显著降低,说明连作使薏苡根系生长变劣,不能有效地给地上部提供营养物质和水分,进而使植株发育缓慢,产量和品质显著下降。樊芳芳^[26]研究发现,连作主要通过影响千粒重和单穗粒重来影响高粱的最终产量。本研究发​​现,不同连作年限对薏苡产量及产量性状都有明显的影响,连作显著降低了薏苡的千粒重、每穴粒重和每穴粒数,连作6年与轮作相比明显减产44.13%~53.43%。黄瓜^[27]、甜瓜^[28]等作物连作导致产量、维生素C、可溶性糖和游离氨基酸含量降低,有机酸和硝酸盐含量不断增加,进而影响单果质量及产量,使果实口感变差。本研究中连作显著降低了薏苡籽粒中可溶性糖、赖氨酸和支链淀粉的含量,使薏苡的营养品质降低,粗蛋白和粗脂肪含量也随着连作年限的延长呈先升后降的趋势,而且连作土壤中的全氮、全磷、全钾和速效性磷钾养分含量显著影响薏苡的产量和品质。土壤养分含量与作物产量品质息息相关,连作影响土壤主要养分含量,从而造成薏苡生长养分供给不足,进而对薏苡的产量和品质产生不利影响。

4 结论

薏苡连作造成土壤酸化,全氮含量增加,全磷、全钾和速效性养分含量明显降低,尤其是连作6年后土壤有效磷和速效钾养分含量比轮作显著降低了54.57%~69.11%和60.94%~62.68%;显著降低了土壤微生物数量,微生物群落由细菌型向真菌型转变,土壤脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶活性下降;降低薏苡各生育时期的总根系长、根系平均直径、总根系表面积和根系总体积;连作薏苡的每穴粒重、每穴粒数、千粒重、结实率显著下降,连作6年的薏苡产量比轮作显著下降44.13%~53.43%;连作6年后的薏苡籽粒可溶性糖、赖氨酸和支链淀粉含量降低明显;连作过程中根际土壤全磷、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质含量和pH与微生物数量和酶活性存在显著相关性,全磷、全钾、有效磷、速效钾含量以及pH显著影响薏苡的产量和品质。因此,常年连作薏苡会使根际土壤环境发生改变,影响根系对营养物质的吸收,最后导致薏苡产量和品质下降。

参考文献:

- [1] 杜仁凤. 兴仁县薏仁米产业可持续发展初探[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2018, 30(2): 45-46.
- [2] 冯国忠, 王寅, 焉莉, 等. 土壤类型和施氮量对连作春玉米产量及氮素平衡的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 444-455.
- [3] 王海斌, 陈晓婷, 丁力, 等. 连作茶树根际土壤自毒潜力、酶活性及微生物群落功能多样性分析[J]. 热带作物学报, 2018, 39(5): 852-857.
- [4] 崔张佳卉. 连作对不同年代育成大豆品种农艺性状和产量形成规律的影响[D]. 长春: 沈阳农业大学, 2018.
- [5] Liu Z X, Liu J J, Yu Z H, et al. Long-term continuous cropping of soybean is comparable to crop rotation in mediating microbial abundance, diversity and community composition[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 197: 104-503.
- [6] 石程仁, 禹山林, 杜秉海, 等. 连作花生土壤理化性质的变化特征及其与土壤微生物相关性分析[J]. 花生学报, 2018, 47(4): 1-6, 18.
- [7] 刘根霖. 连作年限对党参生长、土壤理化性状及酶活性的影响研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [9] 李振高. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [10] GB 5009.5—2010, 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S].
- [11] GB/T 14772—2008, 食品中粗脂肪的测定[S].
- [12] 何照范. 谷物淀粉组份分离及测试方法评述[J]. 粮食储藏, 1985(6): 32-38.
- [13] GB/T 5513—1985, 粮食、油料检验 还原糖和非还原糖测定法[S].
- [14] 耿贵, 杨瑞瑞, 於丽华, 等. 作物连作障碍研究进展[J]. 中国农学通报, 2019, 517(10): 36-42.
- [15] 王廷峰, 赵密珍, 关玲, 等. 江苏省不同区域草莓连作土壤养分及微生物区系分析[J]. 果树学报, 2019, 36(1): 86-93.
- [16] 古军霞, 李阳, 孙会改, 等. 连作对北沙参土壤养分、酶活性及微生物群落多样性的影响[J]. 中药材, 2021(10): 2270-2275.
- [17] 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.
- [18] 王礼科, 罗夫来, 王华磊, 等. 半夏不同连作年限土壤酶活性、微生物及化感物质的分析[J]. 中药材, 2021(4): 798-801.
- [19] 徐小军, 张桂兰, 周亚峰, 等. 甜瓜设施栽培连作土壤的理化性质及生物活性[J]. 果树学报, 2016, 33(9): 1131-1138.
- [20] 李玉娇, 刘星, 吴大付, 等. 温室黄瓜连作对土壤真菌数量和群落结构的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(1): 194-

- 204.
- [21] 郑立伟, 赵阳阳, 王一冰, 等. 不同连作年限甜瓜种植土壤性质和微生物多样性 [J]. 微生物学通报, 2022, 49 (1): 101-114.
- [22] 孙小花, 胡新元, 陆立银, 等. 黄土高原马铃薯不同连作年限土壤理化性质及微生物特性 [J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37 (4): 184-192.
- [23] 李忠, 江立庚, 唐荣华, 等. 连作对花生土壤酶活性、养分含量和植株产量的影响 [J]. 土壤, 2018, 50 (3): 491-497.
- [24] 张智勇, 董秀秀, 王绍明, 等. 不同连作障碍消减措施对新疆棉花根系形态生理特征的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25 (4): 918-925.
- [25] 李柘锦, 朱文桥, 黄坤, 等. 连作对烤烟农艺性状、根系形态与土壤养分的影响 [J]. 江苏农业科学, 2022, 50 (2): 67-72.
- [26] 樊芳芳. 连作对高粱生长及土壤环境的影响 [D]. 太原: 山西大学, 2016.
- [27] 杨玉惠, 杨思存, 王成宝, 等. 连作条件下不同施肥处理对设施黄瓜产量和品质的影响 [J]. 土壤, 2014, 46 (1): 83-87.
- [28] 徐小军, 王瑞, 张桂兰, 等. 连作对设施甜瓜生长和光合作用以及养分吸收和产量品质的影响 [J]. 果树学报, 2018, 35 (4): 449-457.

Effects of different continuous cropping years on soil characteristics, yield and quality of *Coix*

LI Lei, FU Jing-feng, WEI Sheng, ZENG Tao, WEI Hai-long, ZHANG Jun, CHENG Yi, SONG Bi* (College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025)

Abstract: In order to explore the effects of continuous cropping years on the rhizosphere soil characteristics, root morphology, yield and quality of *Coix*, *Coix* with different continuous cropping years was taken as the object, the changes and correlations of rhizosphere soil properties, root morphology, yield and quality of *Coix* were studied. The results showed that the soil with continuous cropping of *Coix* acidified gradually, the content of total nitrogen increased significantly, while the contents of total phosphorus, available phosphorus and available potassium decreased significantly, and the content of organic matter decreased gradually with the increase of continuous cropping years, the content of alkali-hydrolyzable nitrogen in soil after continuous cropping for 6 years was 16.32%–33.93% lower than that of crop rotation. The number of soil bacteria and actinomycetes reduced dramatically, but the number of fungus increased gradually. The activities of soil invertase, urease and acid phosphatase decreased significantly, while the activity of catalase increased significantly, and the catalase activity of continuous cropping for 6 years was 30.18%–38.98% higher than that of crop rotation. With the increase of continuous cropping years, the total root length, total root surface area, average root diameter and total root volume of *Coix* showed a downward trend. The 1000-grain weight, seed setting rate, grain weight and number of grains per hole were significantly lower in 6 years continuous cropping than those in rotation, and the yield of *Coix* reduced by 632.276 kg/hm² for each additional year of continuous cropping, the yield of *Coix* that had been cropped continuously for 6 years decreased by 44.13%–53.43%. The contents of soluble sugar, lysine and amylopectin decreased in continuous cropping *Coix*, and the effects of continuous cropping on crude protein and crude fat contents were not significant. The results of correlation analysis showed that the contents of soil available phosphorus, available potassium, organic matter and pH of continuous cropping *Coix* significantly affected the number of microorganisms. Catalase activity was significantly negatively correlated with total phosphorus, total potassium, available phosphorus, available potassium contents and pH, while sucrase, urease and acid phosphatase activities were significantly positively correlated with the number of bacteria and actinomycetes, as well as total phosphorus, total potassium, available phosphorus, available potassium and pH. In soil physical and chemical properties, the contents of available phosphorus and available potassium were the main factors affecting yield and quality. Continuous cropping worsened the chemical properties and microbial environment of *Coix* rhizosphere soil, and the root development was poor, which worsened the yield and quality.

Key words: *Coix*; continuous cropping; soil characteristics; root morphology; yield and quality