

陈 丽,焦 健,朱绍丹,等. 油橄榄对牧草间作与干旱胁迫交互作用的根系生理响应[J].江苏农业学报,2019,35(6):1434-1440.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2019.06.024

油橄榄对牧草间作与干旱胁迫交互作用的根系生理响应

陈 丽¹, 焦 健¹, 朱绍丹¹, 李朝周^{2,3}, 唐 红¹, 孙 萍²

(1.甘肃农业大学林学院,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.甘肃农业大学甘肃省干旱生境作物学重点实验室,甘肃 兰州 730070)

摘要: 采用盆栽试验研究了牧草间作与干旱胁迫交互作用对油橄榄根系生理的影响,设置4种土壤含水量(18%、15%、12%和9%),以18%土壤含水量为对照,在各水分条件下栽种油橄榄幼苗的盆内分别进行3种间作牧草的处理,即间作苜蓿、间作红三叶、同时间作苜蓿和红三叶,以不间作为对照。对油橄榄根系在不同牧草间作与干旱胁迫条件下的多个生理指标进行测定及相关性分析,并采用隶属函数法进行不同牧草间作的抗旱性比较。结果表明:(1)随着土壤含水量的减少,油橄榄根系活力、根系含水量呈显著降低趋势,间作牧草后其降低幅度减小;(2)随着干旱加剧,油橄榄根系相对电导率、丙二醛含量逐步升高,油橄榄根系受到氧化胁迫,而间作红三叶和间作苜蓿均显著抑制了相对电导率和丙二醛的升高;(3)间作牧草后,除超氧化物歧化酶(SOD)活性增加不显著,油橄榄根系脯氨酸含量、可溶性糖含量、过氧化物酶(POD)活性和过氧化氢酶(CAT)活性比对照显著增加;(4)隶属函数法分析结果表明,间作牧草能明显增强盆栽油橄榄幼苗根系的抗旱性,且以间作红三叶效果较好。

关键词: 油橄榄; 牧草间作; 干旱胁迫; 根系生理; 隶属函数分析

中图分类号: S727.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)06-1434-07

Root physiological response of olive to the interaction of pasture intercropping and drought stress

CHEN Li¹, JIAO Jian¹, ZHU Shao-dan¹, LI Chao-zhou^{2,3}, TANG Hong¹, SUN Ping²

(1.College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2.College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3.Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Pot-culture experiment was conducted to study the interactive effects of intercropping pasture and drought stress on root physiology of olive. Four kinds of soil moisture content (18%, 15%, 12% and 9%) were set up, and 18% soil water content was used as control. Under different water conditions, three intercropping treatments were set up within the pots of olive seedlings: intercropping alfalfa, intercropping red clover, intercropping alfalfa and red clover, with no intercropping as the control. The physiological indices of olive root system under different intercropping and drought stress conditions were measured, and the correlation was analyzed. The drought resistance of different intercropping methods was compared by using the subordinate function analysis. The results showed that with the decrease of soil water content, the

root activity and relative water content of olive root decreased significantly, and the reduction rate was slowed down by intercropping pasture. As the stress of drought was intensified, the olive root relative conductivity and malondialdehyde content (MDA) gradually increased, the olive root was subjected to oxidative stress caused by drought, while intercropping red clover and intercropping alfalfa significantly inhibited relative conductivity and MDA content.

收稿日期:2019-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(31660223); 甘肃省农牧厅农业科技创新项目(GNCX-2016-28); 甘肃农业大学学科建设专项基金项目(GAU-XKJS-2018-115、GAU-XKJS-2018-174)

作者简介: 陈 丽(1994-),女,甘肃庄浪人,硕士研究生,研究方向为果树生理生态。(E-mail)1449435073@qq.com

通讯作者: 李朝周, (E-mail)licz@gsau.edu.cn

The proline content, soluble sugar content, the peroxidase (*POD*) activity and catalase (*CAT*) activity of olive root increased significantly by intercropping pasture, while the superoxide dismutase (*SOD*) activity was not significantly increase. The results of subordinate function analysis showed that intercropping pasture could significantly enhance the drought resistance of potted olive seedling, and the effect of intercropping red clover was better.

Key words: *Olea europaea*; pasture intercropping; drought stress; root physiology; subordinate function analysis

油橄榄(*Olea europaea* L.)为木樨科木樨榄属的常绿乔木,又名齐墩果,原产于地中海沿岸国家,具有很高的经济价值和生态效益,是世界著名的优质木本油料兼果用树种,其油素有黄金液体之称,生命周期长,根系发达,还具有涵养水源、防止水土流失等生态特点^[1-3]。甘肃省白龙江沿岸是中国油橄榄三大适生区之一,但陇南油橄榄多种植于山地,灌溉条件较差,影响了油橄榄的生长发育,因此干旱缺水问题已成为制约当地油橄榄生产最为重要的环境因素之一^[4]。

干旱是植物面临的一种主要环境胁迫,通过影响植物水分状况制约植物的各种生理代谢活动^[5]。根系是植物吸收土壤水分和养分以及代谢的重要器官,是植物地上部分赖以生存的基础。当干旱胁迫发生时,植物根系会最先感知并迅速产生化学信号向地上部传递,促使气孔关闭以减少水分蒸腾^[6]。为了保护自身免受伤害,植物进化出了有效的抗氧化系统,如抗氧化酶和非酶抗氧化物质以及渗透调节物质等^[7],并通过自身形态和生理生化特征的调整以适应变化后的土壤水分环境^[8]。因此根系生理代谢与植物抗旱性之间有极其密切的关系。

间作牧草是对果园实施全园或行间生草覆盖的一种现代化可持续发展的果园土壤管理模式,具有改善土壤结构和微生物群落,提升保水蓄水能力,调节果园微环境,改善果实着色和品质,减轻果园病害等作用^[9-13],已成为欧美和日本等地果园主要的土壤管理方法^[14-15]。豆科作物的固氮作用可以使土壤氮含量升高,减少对氮肥的需求,因此生产上豆科与非豆科作物的间作在中国最为普遍^[16-17]。

由于根系生长的特殊性,目前国内有关间作牧草对油橄榄根系生理的研究相对较少。笔者前期研究主要集中在间作牧草对油橄榄果园土壤理化性质^[9]、果园生态环境^[18]以及果实品质^[19]等方面,本研究旨在探讨间作牧草和干旱胁迫对油橄榄根系生理的交互作用,以期为提高油橄榄的抗旱性,进而为提高田间油橄榄的种植效益提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用树龄2年的油橄榄苗,品种为莱星(*Lecion*,原产地意大利)。间作牧草种类为紫花苜蓿(*Medicago sativa* L,品种 *Algonuin*)和红三叶(*Trifolium pratense* L,品种为岷山),草种购于甘肃省农业科学院。试验用土壤为壤土,速效氮含量 24 mg/kg,速效磷含量 240 mg/kg,速效钾含量 130 mg/kg,pH 值 7.9。

1.2 试验设计

采用双因素试验设计。(1)间作处理:间作紫花苜蓿,间作红三叶,同时间作紫花苜蓿和红三叶,以不间作作为对照(CK)。(2)干旱胁迫处理:将上述每一种间作模式的油橄榄苗通过控制浇水量进行不同程度的干旱胁迫,3种干旱胁迫处理为轻度干旱胁迫(土壤含水量 15%)、中度干旱胁迫(土壤含水量 12%)和重度干旱胁迫(土壤含水量 9%),以正常浇水(土壤含水量 18%)作为对照(CK_w)。共 4×4 种处理(即 16 种处理),每盆栽种 1 株油橄榄苗,每个处理 3 个重复,共 48 盆。

于 2018 年 5 月在甘肃农业大学林学院实验室进行,花盆规格为 30 cm×40 cm(内径×高度)。培养前期(5 月 1 日-7 月 21 日)采用称质量法控制土壤含水量在 18%左右。7 月 1 日在花盆内点播相应草种,7 月 21 日间作紫花苜蓿和红三叶已充分生长且基本覆盖花盆,同日开始进行干旱胁迫处理,于每天上午 8:00-10:00 补充水分使各处理维持上述 4 种土壤含水量(对应的田间持水量于下午 1:30 左右测定,测定结果分别为 73.3%±7.2%、55.8%±6.9%、46.6%±6.5%和 17.5%±5.7%)。经过持续两个多月的干旱胁迫及牧草间作处理,于 10 月 5 日取油橄榄根系测定相关指标。

1.3 根系生理指标测定

根系含水量的测定采用烘干法^[20],根系活力测定采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法^[20],过氧化氢酶

(CAT)活性测定采用紫外吸收法^[21],过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法^[21],超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑(NBT)法^[21],丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法^[21],可溶性糖含量测定采用蒽酮法^[21],脯氨酸含量测定采用酸性茚三酮比色法^[21],相对电导率测定参照令凡等的方法^[22]。

1.4 数据处理方法

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS20.0 软件进行数据处理、统计分析和制图,并用 Duncan's 法对差异显著性进行多重比较($P < 0.05$)。采用模糊数学隶属函数法对各间作处理进行抗旱性比较,参考

赵阳等^[23]的方法进行各指标隶属度的计算。

2 结果与分析

2.1 间作牧草与干旱胁迫对油橄榄根系活力和根系含水量的影响

在相同的间作模式下,油橄榄根系活力和根系含水量均随土壤含水量的降低而逐步下降。与 CK_w 相比,重度干旱胁迫(土壤含水量 9%)处理组不间作、间作苜蓿、间作红三叶和间作苜蓿+红三叶的油橄榄根系活力降幅最大,分别降低了 28.68%、14.02%、15.62%、18.8%,根系含水量降幅同样达到最大,分别下降 24.03%、20.96%、12.82%、23.93%(图 1)。

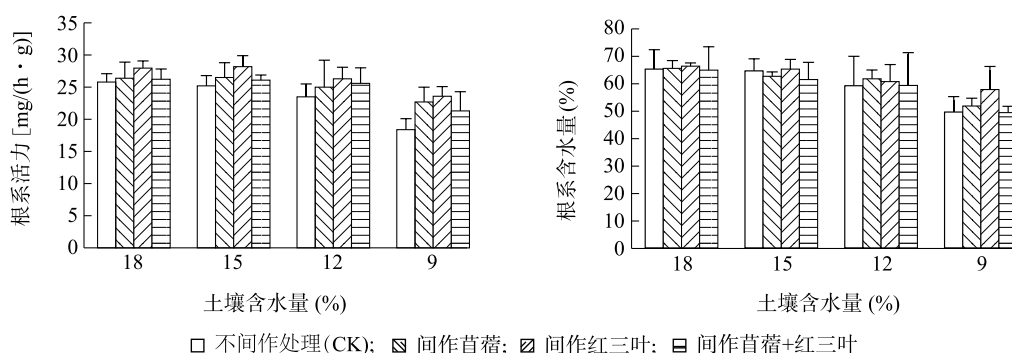


图 1 间作牧草与干旱胁迫对油橄榄根系活力和根系含水量的影响

Fig.1 Effects of intercropping pasture and drought stress on olive root activity and root water content

与不间作对照(CK)相比,间作苜蓿、间作红三叶和间作苜蓿+红三叶的油橄榄根系活力皆有所增加,且以间作红三叶处理增加幅度最大;在不同土壤含水量(18%、15%、12%和9%)下间作红三叶处理的根系活力分别比 CK 提高 8.41%、11.90%、11.91%和 28.26%。油橄榄根系含水量在 9% 的土壤含水量下,仅间作苜蓿+红三叶处理低于 CK 0.43%,间作红三叶处理显著高于 CK 16.61%,而间作苜蓿仅高于 CK 4.47%,与 CK 间差异不显著。

2.2 间作牧草与干旱胁迫对油橄榄根系相对电导率及丙二醛含量的影响

如图 2 所示,不同间作处理的油橄榄根系相对电导率随着干旱程度的加剧呈逐渐升高趋势,且差异显著($P < 0.05$)。不同水分条件下,与 CK_w 相比,不间作处理组的油橄榄根系相对电导率随干旱加剧,增幅由 126%增至 238%,均显著高于间作苜蓿和间作红三叶处理,而与间作苜蓿+红三叶处理无显著差异;间作苜蓿、间作红三叶处理在重度干旱胁迫

下分别高出 CK_w 228%、216%。相同干旱胁迫下,与 CK 相比,间作牧草处理的根系相对电导率随土壤含水量降低而减小,间作苜蓿处理在重度干旱胁迫(9%)下根系相对电导率低于 CK 7.8%,间作红三叶则降低了 8.49%。说明随干旱加剧间作红三叶处理的根系膜损伤最小。

不同间作的油橄榄根系 MDA 含量随干旱胁迫加剧而增加,且差异显著($P < 0.05$)。土壤含水量为 9% 时,不间作和间作苜蓿+红三叶处理的 MDA 含量与 CK_w 相比分别显著增加了 141%和 127%,而间作苜蓿、间作红三叶的增幅分别为 76.7%、47.7%,明显低于不间作和间作苜蓿+红三叶处理。间作苜蓿与间作红三叶处理 MDA 在土壤含水量为 9% 时分别低于 CK 25.86%、35.36%;而间作苜蓿+红三叶处理在重度干旱胁迫下与 CK 差异不明显。说明不间作牧草的根系细胞膜脂过氧化程度较重,而间作牧草能一定程度上减轻膜脂过氧化程度,间作苜蓿和间作红三叶效果较为显著。

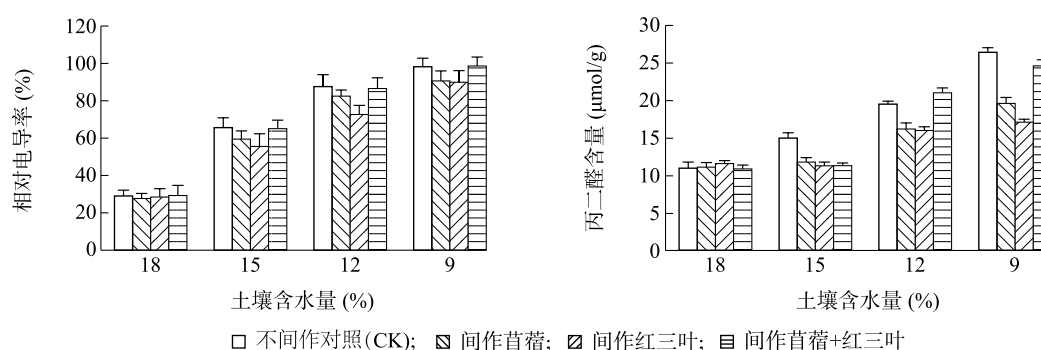


图2 间作牧草与干旱胁迫对油橄榄根系相对电导率和丙二醛含量的影响

Fig.2 Effects of intercropping pasture and drought stress on olive root relative conductivity and malondialdehyde (MDA) content

2.3 间作牧草与干旱胁迫对油橄榄根系渗透调节物质含量的影响

可溶性糖含量较高,说明细胞渗透调节能力较强,抗旱性较好。油橄榄根系可溶性糖含量在间作不同牧草与干旱胁迫的交互作用下,呈现单峰型变化趋势(图3),表现出显著差异($P<0.05$)。不间作处理的油橄榄根系可溶性糖含量在中度干旱胁迫处理下低于 CK_w , 间作苜蓿+红三叶处理降幅为40.8%,而间作苜蓿和间作红三叶处理的可溶性糖含量则分别比正常浇水对照提高了26.6%和14.1%。间作苜蓿和间作红三叶处理可溶性糖含量均高于CK,且在中度干旱胁迫(12%)下高出51.4%

和20.66%。说明间作苜蓿和间作红三叶的油橄榄根系细胞渗透调节能力高于间作苜蓿+红三叶和不间作对照。

不同间作处理的油橄榄根系脯氨酸含量随着土壤干旱加剧而增加(图3)。间作苜蓿和间作红三叶处理脯氨酸含量在重度干旱(9%)时分别达到最大增幅21.14%和16.19%,间作苜蓿+红三叶处理为8.48%。相同干旱胁迫下,间作苜蓿和间作红三叶处理的脯氨酸含量均高于CK,且随着干旱胁迫的加剧分别由0.88%、1.15%增至7.58%、3.47%,而间作苜蓿+红三叶的脯氨酸含量仅在18%、15%的土壤含水量下分别高于CK 2.69%、12.36%。

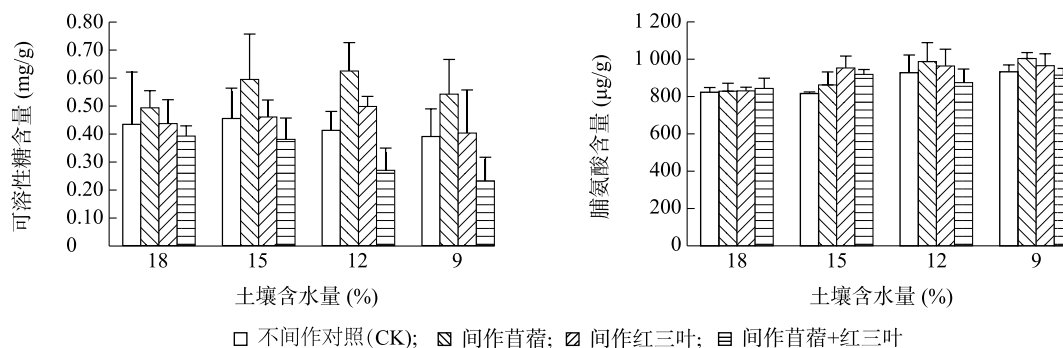


图3 间作牧草与干旱胁迫对油橄榄根系渗透调节物质含量的影响

Fig.3 Effects of intercropping pasture and drought stress on olive root osmotic adjustment substance contents

2.4 间作牧草与干旱胁迫对油橄榄根系抗氧化酶活性的影响

各间作处理的油橄榄根系SOD、POD和CAT活性随干旱胁迫的加剧整体上均呈先升后降的变化,不同间作处理干旱胁迫下POD和CAT活性差异显著($P<0.05$),SOD活性差异不显著(图4)。不同干旱胁迫下,油橄榄根系SOD活性仅不间作处理时差异显著,其余处理无明显变化;不间作的油橄榄根系

POD和CAT活性在重度干旱(9%)下分别下降16.74%和25.56%;而间作苜蓿、间作红三叶和间作苜蓿+红三叶处理的POD活性在不同干旱胁迫下均显著高于 CK_w ,CAT活性仅在土壤含水量为9%、间作苜蓿+红三叶时低于 CK_w (9.92%)。

相同干旱胁迫下,间作苜蓿、间作红三叶和间作苜蓿+红三叶处理的SOD活性均随干旱加剧而高于CK。间作苜蓿、间作红三叶和间作苜蓿+红三叶处

理的 *POD* 活性在中度干旱 (12%) 下达到峰值, 分别比 CK 增加 28.05%、33.94%、14.08%, 而 *CAT* 活性除间作苜蓿+红三叶外与 CK 差异较小, 间作苜蓿、

间作红三叶处理 *CAT* 活性在重度干旱胁迫下均显著高于 CK。说明间作牧草比不间作能增加干旱胁迫下根系抗氧化酶活性。

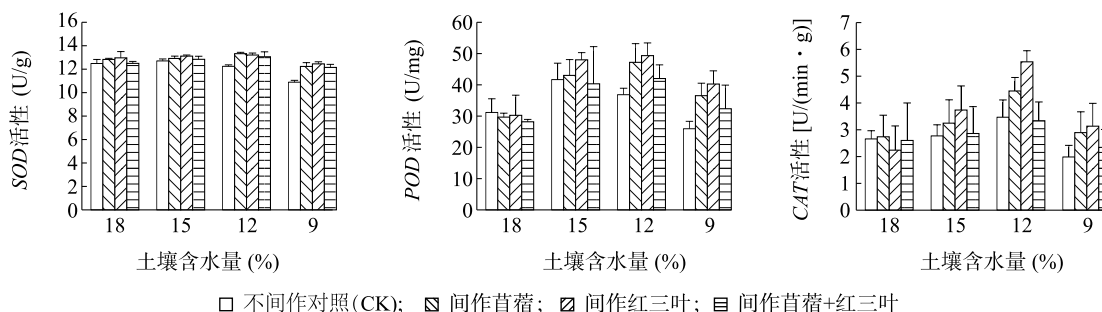


图 4 间作牧草与干旱胁迫对油橄榄根系抗氧化酶活性的影响

Fig.4 Effects of intercropping pasture and drought stress on olive root antioxidant enzymes activity

2.5 间作牧草与干旱胁迫下油橄榄根系生理生化指标的相关性分析

油橄榄根系在间作牧草和干旱胁迫下, 其根系活力与根系含水量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$) (表 1)。相对电导率与根系含水量、根系活力呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$)。MDA 含量与根系含水量、根系活力呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 与相对电导率呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。脯氨酸含量与根系

含水量呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 与相对电导率呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。SOD 活性与根系含水量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 与根系活力呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与 MDA 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$)。POD 活性与 SOD 活性呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。CAT 活性与 SOD 活性呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 与 POD 活性呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。

表 1 间作牧草与干旱胁迫下油橄榄根系生理指标的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of the olive root physiological indices under intercropping pasture and drought stress

相关指标	根系含水量	根系活力	相对电导率	MDA 含量	可溶性糖含量	脯氨酸含量	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性
根系含水量	1.000								
根系活力	0.771 **	1.000							
相对电导率	-0.802 **	-0.670 **	1.000						
MDA 含量	-0.799 **	-0.795 **	0.860 **	1.000					
可溶性糖含量	0.372	0.050	-0.212	-0.425	1.000				
脯氨酸含量	-0.632 **	-0.468	0.710 **	0.443	0.201	1.000			
SOD 活性	0.594 *	0.792 **	-0.381	-0.637 **	0.343	-0.086	1.000		
POD 活性	0.062	0.262	0.280	-0.146	0.368	0.458	0.672 **	1.000	
CAT 活性	0.068	0.199	0.172	-0.117	0.430	0.487	0.607 *	0.829 **	1.000

* 表示显著相关 ($P < 0.05$), ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

2.6 间作牧草与干旱胁迫下油橄榄根系生理指标的隶属函数分析

应用隶属函数法对间作牧草油橄榄根系各抗旱性生理指标进行隶属函数分析。平均隶属度综合反映了根系抗旱能力的大小, 其值越大则抗旱性越强。表 2 表明, 平均隶属度排序为: 间作红三叶 > 间作苜蓿 > 间作苜蓿+红三叶 > 不间作, 间作红三叶的平均

隶属度为 0.679。可以认为, 间作红三叶的油橄榄根系抗旱性最强, 间作苜蓿次之, 间作苜蓿+红三叶第三, 不间作最弱。

3 讨论

根系活力是反映根系生命活动的基本生理指标, 影响植物对土壤水分和养分的吸收、根系合成代

表 2 间作牧草与干旱胁迫下油橄榄根系生理指标的隶属函数分析
Table 2 Subordinate function analysis of olive root physiological indices under intercropping pasture and drought stress

处理	根系含水量	根系活力	相对电导率	丙二醛含量	可溶性糖含量	脯氨酸含量	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性	平均隶属度	抗旱排序
间作红三叶	0.776	0.828	0.521	0.805	0.593	0.594	0.840	0.685	0.472	0.679	1
间作苜蓿	0.642	0.618	0.453	0.711	0.715	0.554	0.734	0.542	0.379	0.593	2
间作苜蓿+红三叶	0.554	0.654	0.405	0.613	0.220	0.377	0.718	0.418	0.225	0.465	3
不间作对照	0.607	0.492	0.402	0.547	0.486	0.308	0.489	0.340	0.207	0.431	4

谢和地上部分的同化作用^[24]。植物根系相对含水量是评价植物耐旱能力的一个指标,反映植物根系的保水能力。本研究结果表明,油橄榄根系活力随着干旱胁迫的加剧而降低,间作牧草后,其降低速率明显低于不间作对照,且以间作红三叶的效果最好。说明间作牧草能增加地表覆盖度,减少水分散失,保证根系内新陈代谢所需水分,从而使根系维持较高的根系活力。重度干旱胁迫下根系含水量明显下降,间作红三叶的根系含水量显著高于不间作对照,而间作苜蓿、间作苜蓿+红三叶与不间作对照之间无显著差异,这与董守坤等^[25]研究结果相似。

相对电导率是反映干旱胁迫下植物细胞质膜透性的指标,干旱胁迫使得植物细胞受到不同程度的伤害,相对电导率升高。张庆华等^[26]研究结果表明,抗旱性差的草莓相对电导率随干旱胁迫加剧而上升。王艳婷等^[27]研究发现间作牧草能明显降低土壤电导率。这与本研究结果一致,随着干旱胁迫的加剧,油橄榄根系相对电导率均呈显著增加的趋势,而间作牧草后增加速率明显低于对照,说明重度干旱胁迫对根系细胞产生了一定的伤害,而间作牧草能够有效降低干旱对油橄榄根系的伤害。丙二醛(MDA)是脂质过氧化作用的主要产物之一,其含量的高低在一定程度上反映脂膜氧化作用水平和膜结构的受害程度^[28]。在干旱胁迫下,植物MDA含量增幅越小,抗旱性越强,反之越弱^[4]。本研究结果表明干旱胁迫使得油橄榄根系MDA含量大幅升高,而间作牧草能显著降低MDA含量,且以间作苜蓿和红三叶的效果最好,说明间作牧草能降低细胞膜脂过氧化作用对根系的伤害。

脯氨酸、可溶性糖是植物在适应逆境胁迫过程中起重要作用的渗透调节物质^[29]。前人研究结果表明根系在适度土壤干旱胁迫下可通过积累渗透调节物质增强细胞的渗透调节能力,是植物在逆境胁迫下的一种保护性反应^[30]。本研究结果表明,不间

作处理的油橄榄根系在轻度干旱胁迫下,可溶性糖含量明显升高,而重度干旱胁迫下有所降低;间作苜蓿、红三叶处理在不同干旱胁迫下油橄榄根系可溶性糖含量均显著高于不间作对照,而间作苜蓿+红三叶处理低于不间作对照,原因可能是间作苜蓿+红三叶增加了对土壤水分与养分的竞争,使得油橄榄根系细胞渗透调节能力降低,从而可溶性糖含量降低。闫江艳等^[31]研究发现干旱胁迫下黍稷根系脯氨酸含量增加,且随着干旱胁迫加剧,增加的幅度也随之增大,这与本研究结果一致。油橄榄根系的脯氨酸含量随着土壤水分的降低呈上升趋势,且间作牧草的脯氨酸含量高于不间作对照。从以上研究结果可以推断,间作牧草能有效增加干旱胁迫下油橄榄根系渗透调节物质含量,从而增强根系的保水能力^[32]。

在逆境胁迫下,植物组织内活性氧的产生和清除平衡遭到破坏,造成氧化胁迫,导致细胞脂质过氧化。蔡顺香等^[33]研究指出植物在持续干旱胁迫下可通过酶保护系统和非酶抗氧化剂来缓解膜脂过氧化,以适应逆境胁迫。SOD、POD和CAT是植物酶促防御系统的3种重要酶,它们协同作用可以有效地清除有害物质,维持体内的活性氧代谢平衡,保护膜结构^[5,32]。本研究发现油橄榄根系SOD、POD、CAT活性随着干旱胁迫加剧而呈先增后减的趋势,间作牧草处理SOD活性在土壤含水量为12%、9%时显著高于不间作对照,而POD、CAT活性在不同程度干旱胁迫下均显著高于不间作对照,说明间作牧草能够提高重度干旱胁迫下油橄榄根系SOD、POD、CAT活性,这与桂世昌等^[34]研究结果相似。说明间作牧草能增强重度土壤干旱胁迫下油橄榄根系活性氧清除能力。

综上所述,干旱胁迫下不同牧草间作对油橄榄根系生理的作用是不同的。重度干旱胁迫下,间作牧草有助于提高根系活力和根系含水量,减轻干旱

胁迫的伤害。间作牧草的油橄榄根系脯氨酸和可溶性糖含量对于干旱胁迫的响应水平较高,表明细胞能快速增加渗透调节物质以抵御干旱胁迫造成的脂质过氧化伤害。同时,间作牧草的油橄榄根系通过提高抗氧化酶活性,减缓干旱胁迫下细胞膜脂损伤程度,从而降低对根系细胞伤害。各指标相关性及隶属函数分析结果表明间作牧草能增强油橄榄根系抗旱性,且以间作红三叶效果较好。

参考文献:

- [1] 邓明全,俞 宁.油橄榄引种栽培技术[M].北京:中国农业出版社,2011.
- [2] 谢碧秀,马建英,杨泽身,等.油橄榄果渣多酚分离纯化及抗氧化活性[J].江苏农业科学,2017,45(5):178-182.
- [3] 李自龙,徐雪凤,焦 健,等.不同品种油橄榄离体叶片对渗透胁迫的生理响应及其抗旱机制[J].西北植物学报,2014,34(9):1808-1814.
- [4] 冯焕琴,自 龙,焦 健,等.松土对干旱胁迫下油橄榄抗性生理及土壤环境因子的影响[J].西北植物学报,2015,35(12):2513-2521.
- [5] 闫秀峰,李 晶,季元祖.干旱胁迫对红松幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J].生态学报,2008,36(4):1343-1346.
- [6] 赵国靖,徐伟洲,郭亚力,等.达乌里胡枝子根系形态特征对土壤水分变化的响应[J].应用与环境生物学报,2014,20(3):484-490.
- [7] 潘 昕,邱 权,李吉跃,等.干旱胁迫对青藏高原6种植物生理指标的影响[J].生态学报,2014,34(13):3558-3567.
- [8] 丁 红,张智猛,戴良香,等.干旱胁迫对花生根系生长发育和生理特性的影响[J].应用生态学报,2013,24(6):1586-1592.
- [9] 焦润安,焦 健,李朝周.生草对油橄榄园土壤性质和油橄榄成花生理的影响[J].草业学报,2018,27(7):133-144.
- [10] 刘富庭,张林森,李雪薇,等.生草对渭北旱地苹果园土壤有机碳组分及微生物的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):355-363.
- [11] 曹 铨,沈禹颖,王自奎,等.生草对果园土壤理化性状的影响研究进展[J].草业学报,2016,25(8):180-188.
- [12] 李会科,李金玲,王雷存,等.种间互作对苹果/白三叶复合系统根系生长及分布的影响[J].草地学报,2011,19(6):960-968.
- [13] 梅立新,李会科.渭北旱地苹果园生草小气候效应研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(1):187-192.
- [14] 陈学森,毛志泉,姜远茂,等.果园生草培肥地力技术[J].中国果树,2017(3):1-4.
- [15] 熊忠华,黎鑫林,刘 勇,等.不同生草间作对柑橘根系活力及枝梢生长的影响[J].生物灾害科学,2017,40(1):14-18.
- [16] STEENWERTHK, BELINAKM. Cover crops and cultivation: Impacts on soil N dynamics and microbiological function in a Mediterranean vineyard agroecosystem[J]. Applied Soil Ecology, 2008, 40(2):370-380.
- [17] 汤东生,秀洪学,董玉梅,等.种间互作的生态效应Ⅱ.与蚕豆间作对作物生长的影响[J].西北农业学报,2012,21(4):60-64.
- [18] 焦润安,刘高顺,焦 健,等.生草栽培对白龙江干热河谷地带油橄榄园小气候的影响[J].草地学报,2018,26(3):770-780.
- [19] 焦润安,焦 健,李朝周,等.果园生草及灌水对油橄榄果实产量及品质的影响[J].西北农业学报,2018,27(8):1161-1172.
- [20] 李 玲,李娘辉,蒋素梅.植物生理学模块实验指导[M].北京:科学出版社,2009.
- [21] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [22] 令 凡,焦 健,李朝周,等.不同油橄榄品种对低温胁迫的生理响应及抗寒性综合评价[J].西北植物学报,2015,35(3):508-515.
- [23] 赵 阳,赵曼利,焦润安,等.陇南油橄榄主栽品种对干旱胁迫的生理响应及抗性综合评价[J].热带作物学报,2017,38(9):1620-1627.
- [24] 靳 容,张爱君,史新敏,等.干旱胁迫下钾对甘薯幼苗光合特性及根系活力的影响[J].江苏农业学报,2014,30(5):992-996.
- [25] 董守坤,赵 坤,刘丽君,等.干旱胁迫对春大豆叶绿素含量和根系活力的影响[J].大豆科学,2011,30(6):949-953.
- [26] 张庆华,向发云,曾祥国,等.干旱胁迫下不同品种草莓生理响应及抗旱性评价[J].北方园艺,2018,42(2):30-37.
- [27] 王艳廷,冀晓昊,吴玉森,等.我国果园生草的研究进展[J].应用生态学报,2015,26(6):1892-1900.
- [28] 裴 斌,张光灿,张淑勇,等.土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J].生态学报,2013,33(5):1386-1396.
- [29] 杨宏伟,李自龙,梁恕坤,等.间作百喜草对油橄榄根际微环境及抗旱生理的影响[J].应用与环境生物学报,2016,22(3):455-461.
- [30] 单长卷,徐新娟,王光远,等.冬小麦幼苗根系适应土壤干旱的生理学变化[J].植物研究,2007,27(1):55-58.
- [31] 闫江艳,张永清,冯晓敏,等.干旱胁迫及复水对不同黍稷品种根系生理特性的影响[J].西北植物学报,2012,32(2):348-354.
- [32] 赵曼利,杜启兰,焦 健,等.盐胁迫对不同品种油橄榄抗盐性生理指标的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2016,45(1):19-25.
- [33] 蔡顺香,颜明娟,林 琼,等.黑麦草根系抗氧化系统和细胞质膜透性对土壤中砷胁迫的响应[J].福建农业学报,2012,27(2):162-166.
- [34] 桂世昌,杨 峰,张宝艺,等.干旱胁迫下扁穗牛鞭草根系保护酶活性变化[J].草业学报,2010,19(5):278-282.

(责任编辑:张震林)