

陈 丽,焦 健,朱绍丹,等. 牧草间作对干旱胁迫下油橄榄根系形态特征的影响[J].江苏农业学报,2020,36( 1 ):39-46.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2020.01.006

## 牧草间作对干旱胁迫下油橄榄根系形态特征的影响

陈 丽<sup>1</sup>, 焦 健<sup>1</sup>, 朱绍丹<sup>1</sup>, 李朝周<sup>2,3</sup>, 唐 红<sup>1</sup>, 孙 萍<sup>2</sup>, 独肖艳<sup>1</sup>

(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:** 为了揭示干旱胁迫下间作牧草对油橄榄根系的影响,采用盆栽试验方法,设置4种水分条件(土壤含水量分别为18%、15%、12%、9%,以18%土壤含水量作为对照),各水分条件下以不间作为对照,油橄榄幼苗盆内分别进行3种间作牧草处理,即间作苜蓿、间作红三叶、间作苜蓿+红三叶。对油橄榄在牧草间作与干旱胁迫条件下的多个根系形态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处理下油橄榄的抗旱性比较。结果表明:(1)轻度水分胁迫促进油橄榄根系总长度和根系生物量的增大,干旱胁迫加剧则显著降低了根系的总根长、根平均直径、总表面积、总根体积,间作牧草后降低幅度减小。(2)间作牧草明显增加油橄榄根系生物量、比根长、比根面积,以间作红三叶处理最为显著。(3)随着土壤含水量减小,油橄榄根系组织密度增大,间作苜蓿和间作苜蓿+红三叶处理在重度干旱胁迫下高于不间作对照。(4)相关分析及隶属函数分析结果表明间作牧草能够增强油橄榄根系的耐旱性,间作红三叶处理的油橄榄根系抗旱性较强。

**关键词:** 牧草间作; 干旱胁迫; 油橄榄; 根系形态

**中图分类号:** S667.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)01-0039-08

## Effects of pasture intercropping on root morphological characteristics of olive under drought stress

CHEN Li<sup>1</sup>, JIAO Jian<sup>1</sup>, ZHU Shao-dan<sup>1</sup>, LI Chao-zhou<sup>2,3</sup>, TANG Hong<sup>1</sup>, SUN Ping<sup>2</sup>, DU Xiao-yan<sup>1</sup>

(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 reveal the effects of pasture intercropping on olive roots under drought stress. Four water conditions(the soil water content was 18%, 15%, 12% and 9%) and three intercropping treatments(intercropping alfalfa, intercropping red clover, intercropping alfalfa+red clover) were set up in this study. The root morphological indices of olive under the conditions of different pasture intercropping and drought stress were measured, and the correlation was analyzed. In addition, the subordinate function method was used to compare the drought resistance of olive under different pasture intercropping treatments. The results showed that the increase of total root length and root biomass was promoted under mild water stress. With the increase of drought stress, the total root length, root average diameter, total surface area and total root volume of olive decreased significantly, while the decreasing range was reduced by intercropping pasture. The root biomass, specific root length and specific root area of olive were significantly increased by intercropping pasture. The effect of intercropping red clover was the most significant. With the decrease of soil water content, the root tissue density of olive increased. Moreover, the root tissue density in the

收稿日期:2019-07-09

基金项目:甘肃农业大学学科建设专项基金项目(GAU-XKJS-2018-115、GAU-XKJS-2018-174);国家自然科学基金项目(31660223);甘肃省农牧厅农业生物技术研究与应用开发项目(GNSW-2016-28)

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研究。(E-mail)1449435073@qq.com

通讯作者:焦 健,(E-mail)jiaoj@gsau.edu.cn

ter, total surface area and total root volume of olive decreased significantly, while the decreasing range was reduced by intercropping pasture. The root biomass, specific root length and specific root area of olive were significantly increased by intercropping pasture. The effect of intercropping red clover was the most significant. With the decrease of soil water content, the root tissue density of olive increased. Moreover, the root tissue density in the

treatments of intercropping alfalfa and intercropping alfalfa + red clover was higher than that in control under severe drought stress. The results of correlation analysis and subordinate function indicated that intercropping pasture could enhance the drought resistance of olive root, and it was stronger in the treatment of intercropping red clover.

**Key words:** pasture intercropping; drought stress; *Olea europaea*; root morphology

油橄榄 (*Olea europaea* L.), 木樨科木樨榄属, 常绿果树, 是世界著名的四大木本油料经济树种之一, 原产地中海沿岸。油橄榄树形美观, 根系发达, 具有保持水土、涵养水源和调节气候的作用<sup>[1-2]</sup>。陇南是中国油橄榄一级适生区, 但油橄榄多种植于山地, 由于抚育管理粗放, 独特的气候条件及灌溉条件限制, 使得干旱成为油橄榄产量低而不稳的主要影响因素之一, 开展提高油橄榄抗旱性研究, 增加油橄榄产量已成为主要研究目标。

根系是植物吸收水分、养分及代谢的重要器官, 也是植物地上部分赖以生存的基础。土壤水分是影响植物生长、根系形态结构和分布特征的重要因素<sup>[3-4]</sup>。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散失<sup>[5]</sup>, 并通过改变根系形态来适应逆境伤害<sup>[6]</sup>。不同干旱胁迫对根系生长的影响不一致, 充分的水分供应有利于根系生长和根系生物量增大<sup>[7]</sup>。轻度干旱胁迫促进总根长、根表面积增加, 但降低根平均直径<sup>[8]</sup>。类芦的根系长度、根表面积、根系生物量在中度干旱胁迫下达到最大<sup>[9]</sup>。干旱胁迫加剧则会不同程度地抑制紫花苜蓿<sup>[10]</sup>、水稻<sup>[11]</sup>、苹果砧穗组合<sup>[12]</sup>和胡杨幼苗<sup>[13]</sup>的根系生长。说明不同植物其根系形态对干旱胁迫的响应不同, 研究不同土壤水分状况下植物根系形态的可塑性对于提高油橄榄干旱适应机制, 增强其抗旱性具有重要意义。

牧草间作是应用于果园的一种现代化土壤管理模式, 具有培肥地力、减少水土流失、调节果园小气候、改善果实着色和品质、增加生物多样性、减轻果园病虫害等优点<sup>[14-19]</sup>。李会科等<sup>[16]</sup>研究结果表明间作白三叶、黑麦草区苹果树平均有效根长、密度高于清耕区, 间作牧草促进了苹果树 <2 mm 径级根系的发育。王小龙等<sup>[20]</sup>也发现行内间作黑麦草和紫花苜蓿均可显著提高不同时期和不同土层的葡萄根系长度和根系表面积。牧草间作现多在南方柑橘、苹果、梨等果园推广。

目前由于油橄榄的立地条件、根-土系统的非直观性和根系研究方法的局限性, 我们前期对油橄榄的研究主要集中在间作牧草对油橄榄果园土壤理化

性质<sup>[2]</sup>、果园生态环境<sup>[18]</sup>以及果实品质<sup>[21]</sup>影响等方面, 对油橄榄根系影响的研究相对较少。为此, 本研究通过盆栽试验, 间作不同牧草来比较油橄榄根系形态对土壤含水量的响应, 揭示牧草间作对油橄榄的抗旱性的影响, 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

试验于 2018 年 5 月在甘肃农业大学林学院进行, 试验材料为甘肃省陇南市经济林研究院富江油橄榄苗木基地提供的油橄榄幼苗, 树龄 2 年, 品种莱星 (*Leccion*, 原产地意大利), 挑选根系生长基本一致的裸根苗进行盆栽实验。试验草种紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 品种 Algonuin 和红三叶 (*Trifolium pratense* L.) 品种岷山购于甘肃省农业科学院, 两种牧草为陇南油橄榄果园实验基地所采用的间作牧草。花盆规格为 30 cm×40 cm (内径×高度)。试验土壤为壤土, 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、土壤容质量 1.35 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计

采用双因素试验设计。(1) 间作处理, 间作密度 150 株/盆, 花盆内点播相应草种, 以不间作为对照 (CK)。间作紫花苜蓿, 记作间作苜蓿; 间作红三叶, 记作间作红三叶; 同一花盆内同时间作紫花苜蓿和红三叶, 记作间作苜蓿+红三叶。(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: 正常浇水 (土壤含水量 18% 左右) 作为对照, 记作 CK<sub>w</sub>、轻度干旱胁迫 (土壤含水量 15% 左右)、中度干旱胁迫 (土壤含水量 12% 左右) 和重度干旱胁迫 (土壤含水量 9% 左右)。共 16 种处理, 每盆栽种 1 株油橄榄苗, 每处理 3 个重复, 共 48 盆。

培养前期 (5 月 1 日-7 月 21 日) 采用称质量法将土壤含水量控制在 18% 左右。7 月 21 日间作牧草已充分生长且基本覆盖花盆, 开始干旱胁迫处理,

于每天上午8:00-10:00补充水分,各处理控制相应的土壤含水量(即4种土壤含水量分别控制在18%、15%、12%和9%左右,对应的田间持水量于下午1:30左右测定,分别为 $73.3\% \pm 7.2\%$ 、 $55.8\% \pm 6.9\%$ 、 $46.6\% \pm 6.5\%$ 和 $17.5\% \pm 5.7\%$ )。经过持续2个多月的干旱胁迫及牧草间作处理,于10月5日挖取油橄榄根系测定相关指标。

### 1.3 根系形态指标测定

将根系分别放入1.0 mm孔径的钢筛,自来水冲洗干净,吸水纸吸干根系表面水分。用数字化扫描仪Epson scanner对各处理的根系进行扫描,采用加拿大产Win-RHIZOTM 2008a根系图像分析软件对扫描后的根系图像进行形态指标分析,测得总根长(*TRL*)、根平均直径(*RAD*)、根表面积(*RSA*)、根体积(*RV*)。扫描后的根系样品105℃下杀青20 min,80℃下烘至恒质量,称量根系生物量(*RB*)。计算比根长(*SRL*)、比根面积(*SRA*)、组织密度(*TD*)。比根长 =  $TRL / RB^{[22]}$ ,比根面积 =  $RSA / RB$ ,组织密度 =  $RB / RV^{[23]}$ 。

### 1.4 数据处理

用Microsoft Excel 2010和SPSS 20.0软件进行数据处理和制图,Duncan's法对根系形态指标差异显著性进行多重比较( $P < 0.05$ )和相关性分析,模

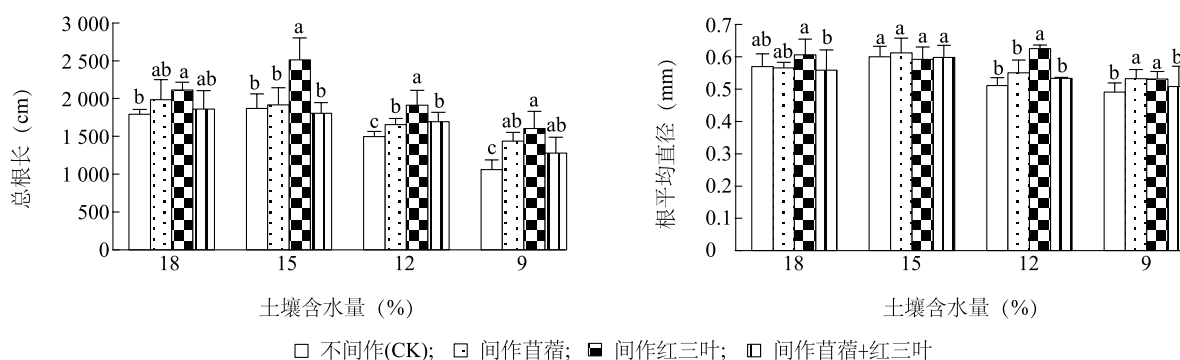
糊数学隶属函数法对油橄榄各间作处理的根系形态指标进行抗旱性比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 间作牧草与干旱胁迫对油橄榄总根长和根平均直径的影响

如图1所示,同种间作模式下,与CK<sub>W</sub>(土壤含水量18%)相比,轻度干旱胁迫(土壤含水量15%)下,间作红三叶处理总根长增幅最大(18.97%),中度与重度干旱胁迫则抑制了根长的增加,重度干旱下(土壤含水量9%)不间作对照总根长降幅最大(40.77%),间作红三叶降幅最小(24.14%)。重度干旱胁迫下根平均直径间作苜蓿处理降幅最小(6.04%),其次为间作苜蓿+红三叶(9%),不间作降幅最大(13.91%),且与CK<sub>W</sub>有显著差异。

在不同土壤含水量(18%、15%、12%和9%)下,间作苜蓿和间作红三叶处理的根长均高于不间作对照(CK),且在重度干旱胁迫下分别增加35.53%和50.96%,间作苜蓿+红三叶处理高于CK 55.43%。间作苜蓿、间作红三叶和间作苜蓿+红三叶的根平均直径在中度与重度干旱下均高于CK,且在重度干旱胁迫下差异显著( $P < 0.05$ ),分别增加8.44%、8.36%、3.59%。



不同小写字母表示同一土壤含水量下不同间作处理各指标显著差异( $P < 0.05$ )。

图1 间作牧草与干旱胁迫对油橄榄总根长和根平均直径的影响

Fig.1 Effects of intercropping pasture and drought stress on olive total root length and average diameter

### 2.2 间作牧草与干旱胁迫对油橄榄总根表面积和总根体积的影响

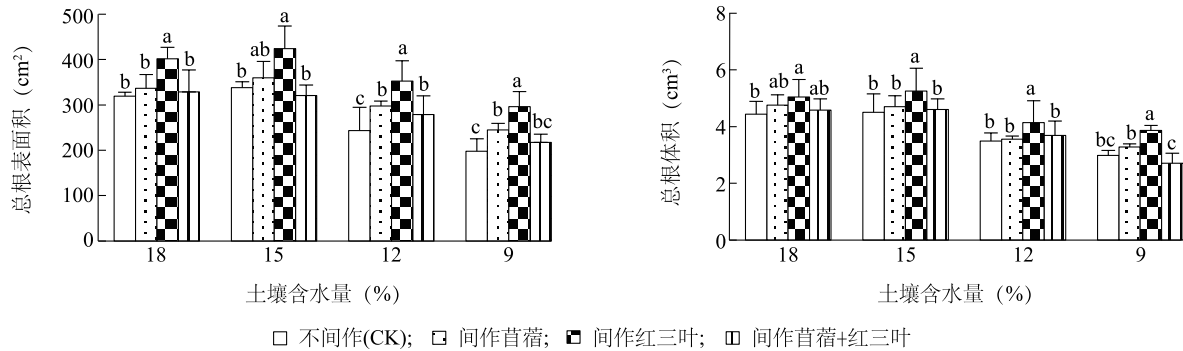
由图2可知,不间作、间作苜蓿、间作红三叶、间作苜蓿+红三叶处理的根表面积和根体积在重度胁迫下均显著低于CK<sub>W</sub>( $P < 0.05$ ),不间作对照根表面积降幅最大(37.99%),间作红三叶处理降幅最小

(26.27%);根体积同样以间作红三叶处理降幅最小(23.22%),间作苜蓿+红三叶降幅最大(40.91%)。

在重度干旱胁迫(土壤含水量9%)下,间作红三叶处理油橄榄根系表面积显著高于不间作对照(CK)49.55%( $P < 0.05$ ),间作苜蓿、间作苜蓿+红三叶处理分别高于CK 23.65%和9.79%;根体积仅间作苜蓿+

红三叶处理低于CK,间作苜蓿和间作红三叶处理均高于CK,且间作红三叶处理增幅最大(29.55%)。说

明间作苜蓿和间作红三叶处理相对于不间作能较好地提高油橄榄根系表面积和根体积。



不同小写字母表示同一土壤含水量下不同间作处理各指标显著差异( $P < 0.05$ )。

图2 间作牧草与干旱胁迫对油橄榄总根表面积和总根体积的影响

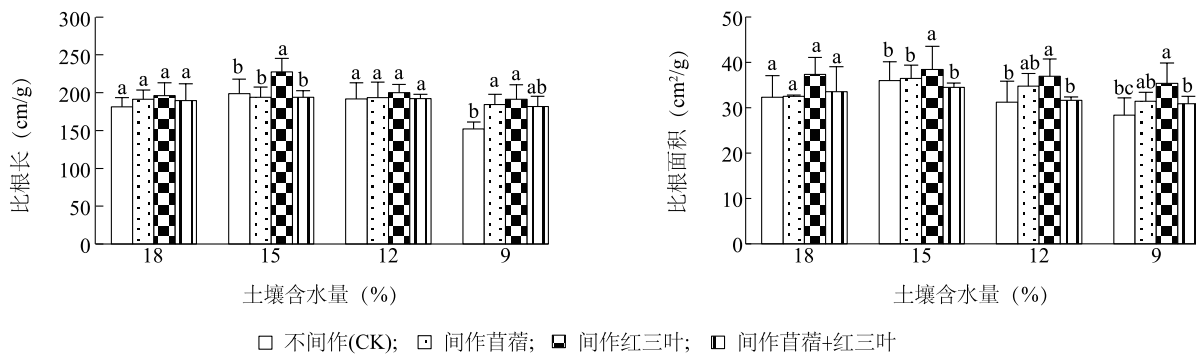
Fig.2 Effects of intercropping pasture and drought stress on olive total root surface area and total root volume

### 2.3 间作牧草与干旱胁迫对油橄榄根系比根长和比根面积的影响

不间作对照与间作牧草处理的比根长和比根面积随干旱胁迫加剧呈单峰型变化趋势,均在轻度干旱胁迫时达到最大值(图3)。轻度干旱胁迫下,比根长除间作红三叶处理显著高于CK<sub>w</sub> 15.94% ( $P < 0.05$ )外,不间作、间作苜蓿和间作苜蓿+红三叶处理相比于CK<sub>w</sub>无显著差异,比根面积则以不间作和间作红三叶与CK<sub>w</sub>无显著差异。随胁迫加剧,重度干旱胁迫下,不间作对照比根长和比根面积相比于

CK<sub>w</sub>降幅达到最大值( $P < 0.05$ ),分别为16.15%和12.23%,间作牧草处理比根长和比根面积降低幅度不明显。

重度干旱胁迫下,间作牧草处理的油橄榄根系比根长较CK差异显著( $P < 0.05$ ),间作苜蓿、间作红三叶和间作苜蓿+红三叶处理达到最大增幅,分别提高了21.47%、25.85%、19.53%;比根面积增幅同样达到最大值,分别高于CK 10.82%、24.68%、8.88%,以间作红三叶处理效果最好。



不同小写字母表示同一土壤含水量下不同间作处理各指标显著差异( $P < 0.05$ )。

图3 间作牧草与干旱胁迫对油橄榄根系比根长和比根面积的影响

Fig.3 Effects of intercropping pasture and drought stress on olive specific root length and specific root area

### 2.4 间作牧草与干旱胁迫对油橄榄根系生物量与根系组织密度的影响

如图4所示,不间作、间作苜蓿和间作苜蓿+红三叶的油橄榄根系生物量随干旱程度加剧呈逐渐降低趋势,重度干旱胁迫下相比于CK<sub>w</sub>达到最大降

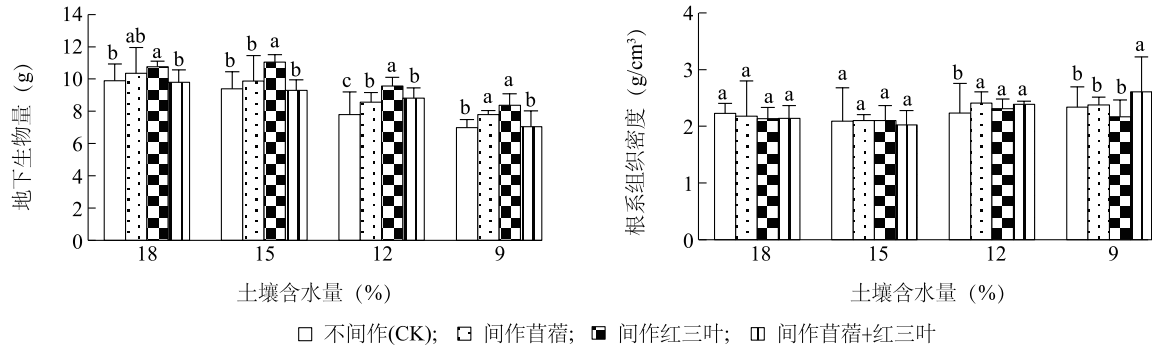
幅,显著降低了29.34%、24.77%、21.7% ( $P < 0.05$ ),间作红三叶处理降幅最小(1.42%);而根系组织密度变化趋势与根系生物量相反,在重度干旱胁迫下不间作对照、间作牧草处理均高于CK<sub>w</sub>。根系生物量的降幅低于根系体积,说明根系生物量较



根体积对根系组织密度的影响较小。

间作苜蓿+红三叶根系生物量在中度干旱胁迫下显著高于 CK,重度干旱胁迫下间作苜蓿和间作红三叶处理较 CK 显著增加了 11.58%、19.95% ( $P <$

0.05)。根系组织密度在中度干旱胁迫下间作牧草处理均显著高于 CK ( $P < 0.05$ ),重度干旱胁迫下仅间作苜蓿和间作苜蓿+红三叶处理达到峰值,分别高于 CK 1.5%和 11.35%,间作红三叶则低于 CK 7.4%。



不同小写字母表示同一土壤含水量下不同间作处理各指标显著差异 ( $P < 0.05$ )。

图4 间作牧草与干旱胁迫对油橄榄根系生物量与根系组织密度的影响

Fig.4 Effects of intercropping pasture and drought stress on olive root biomass and root tissue density

## 2.5 干旱胁迫下油橄榄根系形态指标间的相关性

由表1可知,不同干旱胁迫条件下,间作牧草处理的油橄榄根系形态指标间均存在相关性。总根长与根平均直径、根表面积、根体积、根系生物量、比根长均呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与根系组织密度呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),与比表面积呈显著正相关( $P < 0.05$ );根系直径与根表面积、根体积、根系生物量、比根长、比表面积呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与组织密度呈极显著负相关( $P < 0.01$ );根表面积与根体积、根系生物量、比根长、比表面积呈极显著正相

关( $P < 0.01$ ),与根系组织密度呈极显著负相关( $P < 0.01$ );根体积与根系生物量、比根长、比表面积呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与根系组织密度呈极显著负相关( $P < 0.01$ );根系生物量与组织密度呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),与比根长和比表面积呈极显著正相关( $P < 0.01$ );比根长和比表面积两者呈显著正相关( $P < 0.05$ )。由此可知,根系总根长、平均直径、表面积和体积对根系生物量形成与积累具有非常重要的作用。

表1 间作牧草与干旱胁迫条件下油橄榄根系形态指标间的相关性

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

相关指标	总根长	根平均直径	根表面积	根体积	根系生物量	根系组织密度	比根长	比表面积
总根长	1.000							
根平均直径	0.798 **	1.000						
根表面积	0.970 **	0.875 **	1.000					
根体积	0.925 **	0.816 **	0.941 **	1.000				
根系生物量	0.955 **	0.818 **	0.960 **	0.969 **	1.000			
根系组织密度	-0.641 **	-0.622 *	-0.680 **	-0.840 **	-0.686 **	1.000		
比根长	0.861 **	0.627 **	0.781 **	0.657 **	0.683 **	-0.429	1.000	
比表面积	0.834 *	0.844 **	0.899 **	0.750 **	0.747 **	-0.571 *	0.599 *	1.000

\* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

## 2.6 基于隶属函数的不同间作处理油橄榄根系抗旱性排序

以油橄榄根系形态的 8 个指标,应用隶属函数

法对 4 种间作方式进行了综合评价(表 2)。平均隶属度综合反映了根系抗旱能力的大小,其值越大,表明抗旱性越强。4 种间作方式抗旱性排序为间作红

三叶>间作苜蓿>间作苜蓿+红三叶>不间作对照,说明间作红三叶处理油橄榄抗旱性最强,不间作对照

油橄榄抗旱性最弱。

表 2 间作牧草和干旱胁迫下橄榄根系形态指标的隶属函数分析结果

Table 2 Subordinate function analysis of olive root morphology indexes under intercropping pasture and drought stress

处理	总根长 (cm)	根平均直径 (cm)	根表面积 (cm <sup>2</sup> )	根体积 (cm <sup>3</sup> )	根系生物 量(g)	组织密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比根长 (cm/g)	比表面积 (cm <sup>2</sup> /g)	平均 隶属度	抗旱 性排序
间作红三叶	0.671	0.806	0.755	0.733	0.727	0.686	0.860	0.266	0.688	1
间作苜蓿	0.474	0.494	0.614	0.536	0.533	0.516	0.541	0.419	0.516	2
间作苜蓿+红三叶	0.412	0.391	0.485	0.466	0.432	0.496	0.425	0.457	0.446	3
不间作对照	0.340	0.339	0.430	0.451	0.377	0.384	0.359	0.342	0.378	4

### 3 讨论

植物根系生长发育及形态特征是其生物学特征与环境因素共同作用的结果,根系分布对策对植物的生长、存活、繁殖等极为重要<sup>[23]</sup>。前人研究结果表明,土壤水分亏缺条件下,小麦<sup>[24]</sup>、水稻<sup>[25]</sup>等根系生长受阻。吴敏等<sup>[26]</sup>研究发现轻度干旱对栓皮栎细根数量、长度、表面积以及体积的增加具有促进作用,而中度和重度干旱则抑制了细根的生长。赵国靖等<sup>[7]</sup>则指出水分短期变化对胡枝子根系平均直径的影响较小,单立山等<sup>[27]</sup>研究红砂根系后也得出相似结论。本研究结果表明,不间作处理的油橄榄根系总根长和平均直径在轻度干旱胁迫下增加但无显著变化,干旱胁迫加剧后则显著降低,与柏彦超等<sup>[8]</sup>研究结果不一致,可能是植物、水分条件的差异导致的;间作牧草处理总根长和平均直径在不同干旱胁迫下表现不同,中度与重度干旱胁迫下均显著高于不间作对照,且以间作红三叶处理增幅最大,与王小龙等<sup>[20]</sup>研究结果相似,说明间作牧草能有效地促进根系向土壤深处伸长,抑制干旱逆境对油橄榄根系的伤害。

根系表面积和总体积可以反映根系的潜在吸收能力。李玉英等<sup>[28]</sup>研究指出种间互作增加了蚕豆与玉米的根表面积和根系体积,扩大了植物根系吸收水分与养分的生态位。这与本研究结果相似,不间作对照的油橄榄根表面积和根体积在轻度干旱胁迫下达到峰值,重度干旱下显著降低,间作牧草处理的根表面积和根体积重度干旱下都显著降低,但均高于不间作对照,表明适度水分胁迫有利于提高油橄榄根系的吸收能力<sup>[29]</sup>,干旱胁迫限制了根系横向

与纵向生长,但间作不同牧草对根系的作用不同,间作红三叶能够明显提高油橄榄根系的吸收能力。比根长和比表面积是指示根系生理活性的重要指标,与土壤资源有效性密切相关,可综合反映植物吸收资源的能力及粗细根比例<sup>[30-32]</sup>。比根长和比表面积大的植物细根多,对养分和水分的获取更为有利<sup>[12]</sup>。植物粗根主要起着支持和运输作用,细根负责水分和养分的吸收以及细胞分裂素等物质的合成,也是菌根形成的场所<sup>[33-35]</sup>。本研究结果表明:正常供水时,间作牧草的油橄榄比根长和比根面积均高于不间作对照,且随干旱胁迫加剧不同程度地减小,重度胁迫时均高于不间作对照,表明干旱胁迫后间作牧草的油橄榄通过增加比根长和比表面积等适应策略产生更多细根,扩大油橄榄根系生长发育的空间以此获取更多水源。

土壤水分状况是限制植物生长发育与分布的主要环境因素,直接影响植物根系生物量形成<sup>[36]</sup>。本研究发现,不同水分处理后,不间作牧草的油橄榄地下生物量在正常浇水时最高,重度干旱时则显著低于其他水分处理,表明严重干旱胁迫限制了油橄榄根系生物量的积累。干旱胁迫加剧后,间作苜蓿、间作红三叶和间作苜蓿+红三叶处理油橄榄根系生物量相比于不间作对照降幅明显减小,这表明间作牧草不仅没有抑制油橄榄根系生长,相反在土壤水分匮乏时可减少地面水分蒸腾,对水分与养分的竞争刺激油橄榄根系体积增大以获取更多的资源,进而促进油橄榄根系生物量的累积。严芳等<sup>[37]</sup>也发现在茶园间作白三叶能够显著增加茶树根系生物量。组织密度与根的生理活动紧密相连,可作为反映植物资源获取与生长生存策略的重要参数<sup>[23,38-39]</sup>。较

高的组织密度表明根系对土壤养分、水分具有较强的吸收能力<sup>[31]</sup>。与单作相比,间作白三叶的苹果根系总生物量密度、根长密度、根表面积皆呈现增加的趋势<sup>[16]</sup>。干旱胁迫促进了不间作对照、间作苜蓿和间作苜蓿+红三叶处理油橄榄根系组织密度增长,在重度干旱时组织密度均达到最大值,而间作红三叶处理则显著低于其他间作处理。组织密度是根系生物量和根系体积共同作用的结果,且受物种和外界条件的影响,间作红三叶处理的油橄榄根系具有较大的总根体积和地下生物量,对水土资源的竞争力增大,进而可能降低了油橄榄根系组织密度。

综上所述,随干旱胁迫加剧,油橄榄总根长、根平均直径、总根表面积、总根体积、根系生物量、比根长和比根面积显著下降,而间作牧草促进了根系增长,减缓了干旱胁迫对油橄榄根系的伤害,且不同牧草间作在干旱胁迫下对油橄榄根系形态的作用不尽相同。重度干旱胁迫下,间作红三叶的油橄榄仅根平均直径和根系组织密度较小,其余根系形态指标均最大。间作苜蓿和间作苜蓿+红三叶处理的油橄榄根系组织密度高于不间作对照,而间作红三叶处理则显著低于不间作对照。油橄榄根系形态各指标在间作牧草与干旱胁迫下表现出显著相关性,隶属函数分析结果表明间作牧草的油橄榄根系形态相比于不间作对照,具有更好的耐旱性和形态可塑性,且以间作红三叶处理的耐旱性最好。原因可能是红三叶根系较浅,与油橄榄根系的水分竞争较小,而苜蓿根系较深,与油橄榄根系的水分竞争较强,导致油橄榄根系发育较差。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 洪光宇,鲍雅静,周延林,等. 退化草原羊草种群根系形态特征对水分梯度的响应[J]. 中国草地学报, 2013, 35(1): 73-78.
- [4] 马守臣,徐炳成,王和洲,等. 根系冗余对小麦籽粒产量和水分利用效率的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(3): 305-308.
- [5] JIA W, ZHANG J. Stomatal movements and long-distance signaling in plants[J]. Plant Signaling and Behavior, 2008, 3: 772-777.
- [6] 丁 红,张智猛,戴良香,等. 不同抗旱性花生品种的根系形态发育及其对干旱胁迫的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5169-5176.
- [7] 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.
- [8] 柏彦超. 不同水、氮条件对水稻生长及部分生理特征的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2008.
- [9] 蔡丽平,吴鹏飞,侯晓龙,等. 类芦根系对不同强度干旱胁迫的形态学响应[J]. 中国农学通报, 2012, 28(28): 44-48.
- [10] 李文尧,张岁岐,丁圣彦,等. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5140-5150.
- [11] 郝树荣,郭相平,王为木,等. 水稻分蘖期水分胁迫及复水对根系生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007(1): 149-152.
- [12] 张 洁,高琛稀,宋春晖,等. 干旱胁迫对不同苹果砧穗组合根系形态与生理特性的影响[J]. 西北农业学报, 2015, 24(12): 92-99.
- [13] 白海霞,张荣华,张现慧,等. 不同水分处理对胡杨幼苗根系生长特征的影响[J]. 林业资源管理, 2015(5): 61-66.
- [14] 焦润安,张舒涵,李 毅,等. 生草影响果树生长发育及果园环境的研究进展[J]. 果树学报, 2017, 34(12): 1610-1623.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [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,闫士朋,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] 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.
- [20] 王小龙,刘凤之,史祥宾,等. 行内生草对葡萄根系生长和土壤营养状况的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(S1): 230-237.
- [21] 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.
- [22] SAIDI A, OOKAWA T, HIRASAWA T. Responses of root growth to moderate soil water deficit in wheat seedlings [J]. Plant Production Science, 2010, 13(3): 261-268.
- [23] 卓鸣秀,闫晓俊,熊德成,等. 福建建瓯万木林自然保护区 8 种樟科树种的细根形态特征[J]. 亚热带资源与环境学报, 2018, 13(2): 22-27.
- [24] 刘锦春,钟章成. 水分胁迫和复水对石灰岩地区柏木幼苗根系生长的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6439-6445.
- [25] 梁银丽. 土壤水分和氮磷营养对冬小麦根系生长及水分利用的调节[J]. 生态学报, 1996, 16(3): 258-264.
- [26] 吴 敏,张文辉,周建云,等. 干旱胁迫对栓皮栎幼苗细根的生长与生理生化指标的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4223-4233.

- [27] 单立山,李毅,张荣,等.降雨格局变化对白刺幼苗根系形态特征的影响[J].生态学报,2017,37(21):7324-7332.
- [28] 李玉英,胡汉升,程序,等.种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响[J].生态学报,2011,31(6):1617-1630.
- [29] 赵忠,成向荣,薛文鹏,等.黄土高原不同水分生态区刺槐细根垂直分布的差异[J].林业科学,2006,42(11):1-7.
- [30] 段桂芳,单立山,李毅,等.红砂幼苗根系形态特征对降水格局变化的响应[J].草业学报,2016,25(10):95-103.
- [31] 韦兰英,上官周平.黄土高原白羊草、沙棘和辽东栎细根比根长特性[J].生态学报,2006,26(12):4164-4170.
- [32] OSTONEN I, PÜTTSEPPÜ, BIEL C, et al. Specific root length as an indicator of environmental change [J]. Plant Biosystems, 2007, 141(3): 426-442.
- [33] PORFIRIO S, SILVA M, CABRITA M J, et al. Reviewing current knowledge on olive (*Olea europaea* L.) adventitious root formation [J]. Scientia Horticulturae, 2016, 198: 207-226.
- [34] ZERROUK I Z, BENCHABANE M, KHELIFI L, et al. A *Pseudomonas* strain isolated from date-palm rhizospheres improves root growth and promotes root formation in maize exposed to salt and aluminum stress [J]. Journal of Plant Physiology, 2016, 191: 111-119.
- [35] ESSSENSTAT D M, CALDWELL M M. Competitive ability is linked to rates of water extraction: a field study of two arid land tussock grasses [J]. Oecologia, 1989, 71: 1-7.
- [36] MOTZO R, ATENNE G, DEIDDA M. Genotypic variation in durum wheat root systems at different stages of development in a mediterranean environment [J]. Euphytica, 1993, 66: 197-206.
- [37] 严芳,娄艳华,陈建兴,等.间作白三叶草对茶园温湿度和茶树根系生长的影响[J].热带作物学报,2017,38(12):2243-2247.
- [38] 熊德成,黄锦学,杨智杰,等.亚热带6种树种细根序级结构和形态特征[J].生态学报,2012,32(6):1888-1897.
- [39] OSTONEN I, LOHMUS K, HELMISAARI H S, et al. Fine root morphological adaptations in Scots pine, Norway spruce and silver birch along a latitudinal gradient in boreal forests [J]. Tree Physiology, 2007, 27(11): 1627-1634.

(责任编辑:张震林)