

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0490

宋佳承, 焦润安, 王天, 焦健, 李朝周. 不同水分条件下间作牧草对油橄榄幼苗根系生理及根系形态的影响. 草业科学, 2020, 37(6): 1140-1149.

SONG J C, JIAO R A, WANG T, JIAO J, LI C Z. Effects of grass intercropping on root physiology and morphology of olive seedlings under varying water conditions. Pratacultural Science, 2020, 37(6): 1140-1149.

不同水分条件下间作牧草对油橄榄幼苗根系生理及根系形态的影响

宋佳承^{1,2}, 焦润安^{1,2}, 王天^{1,2}, 焦健³, 李朝周^{1,2}

(1. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省作物遗传改良和种质创新重点实验室, 甘肃 兰州 730070;
3. 甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 探究不同水分条件下间作牧草对油橄榄 (*Olea europaea*) 根系生理和形态的影响, 为优化油橄榄园生草模式, 加强果园生态管理提供科学可行的理论指导, 本研究以两年龄油橄榄品种“豆果”为试材, 设置 3 组间作牧草处理: 百喜草 (*Paspalum notatum*)、白三叶 (*Trifolium repens*) 和无草; 对 3 组间作处理分别进行灌水量处理, 即每次分别灌溉 300、350、400、450 和 500 mL, 采样后测定油橄榄根系各项生理和形态指标。结果显示: 1) 间作牧草提高了油橄榄幼苗的根系活力, 根系活跃吸收面积以及活跃吸收面积与总吸收面积的比值; 整体上降低了油橄榄根系超氧阴离子产生速率、丙二醛含量, 提高了超氧化物歧化酶、过氧化物酶以及过氧化氢酶活性; 增加了根系脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量, 增强了渗透调节功能。2) 间作牧草对于增加油橄榄幼苗根系总根长、表面积、根体积和根尖数效果较为明显, 此外, 根平均直径在间作牧草条件下有增粗的趋势; 间作牧草亦可提高了根干重、地上部干重和根冠比。比较各处理的效果, 以在油橄榄园内间作百喜草且每次 450 mL 灌水量下油橄榄根系生长发育最佳。

关键词: 油橄榄; 不同水分; 间作牧草; 根系形态; 根系生理

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2020)06-1140-10

Effects of grass intercropping on root physiology and morphology of olive seedlings under varying water conditions

SONG Jiacheng^{1,2}, JIAO Run'an^{1,2}, WANG Tian^{1,2}, JIAO Jian³, LI Chaozhou^{1,2}

(1. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

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

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

Abstract: In the present study, the effects of intercropping grasses on the physiology and morphology of olive roots were examined under different water conditions to provide scientific and feasible guidance for optimizing the grass pattern and strengthening the ecological management of olive orchards. The experiment used the 2-year-old *Olea europaea* variety "Arbequina" as the test material and divided the material into three groups, including planted *Paspalum notatum* and *Trifolium repens* and no grass treatment as the control. Different amounts of irrigation were used each time, including 300, 350, 400, 450, and 500 mL. After sampling, the physiological and morphological indexes of olive roots were measured. The

收稿日期: 2019-09-20 接受日期: 2019-12-09

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

第一作者: 宋佳承 (1994-), 男, 甘肃庆阳人, 在读硕士生, 研究方向为植物逆境生理。E-mail: 1029365010@qq.com

通信作者: 李朝周 (1963-), 男, 山东临沂人, 教授, 博士, 研究方向为植物逆境生理。E-mail: licz@gsau.edu.cn

results demonstrated that 1) intercropping with grass improved the root vigor, the active absorbing surface area, the ratio of the active absorbing surface area to the total absorbing surface area of the olive roots, and intercropping grasses reduced the superoxide anion production rate and malondialdehyde (MDA) content of olive root, increased the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT), and the content of proline, soluble protein, and soluble sugar in the olive root, thus enhancing the root osmotic adjustment function; 2) intercropping grasses significantly improved the total root length, surface area, root volume, and root tip number of the olive roots, and the root average diameter indicated an increasing tendency when the two species of grasses were intercropped. Intercropping grasses could also increase root dry weight, shoot dry weight, and root-to-shoot ratio. Based on a comparison of these treatments, intercropping *P. notatum* with 450 mL of irrigation each time demonstrated the best growth and development of the olive roots.

Keywords: olive; water conditions; intercropping grass; root morphology; root physiology

Corresponding author: LI Chaozhou E-mail: licz@gsau.edu.cn

油橄榄 (*Olea europaea*) 为木犀科木犀榄属 (*Olea*) 植物, 常绿阔叶乔木树种, 比较耐干旱, 是世界主要的四种木本油料植物之一^[1-2]。油橄榄也是亚热带重要的经济林木, 主要分布于地中海国家, 希腊、意大利、突尼斯、西班牙为集中产地^[3]。在我国, 油橄榄林是陇南地区重要的农林复合系统, 在当地具有极高的社会、经济和生态效益^[4], 可提供橄榄油、橄榄果、保健品以及工业原料等产品^[5-6]。

在果园中间作牧草通常是选取一种或多种草本植物(如多年生豆科或禾本科牧草), 将其作为土壤覆盖种植于果树行间或者整个果园中, 这是一种生态果园栽培模式。1939年以前, 在乌克兰南部的一些果园, 就已经采用这种草被方式^[7], 20世纪40年代之后, 这一栽培模式在国外就得到迅速发展。目前, 欧洲部分国家、美国及日本实施生草栽培的果园面积占果园总面积的55%~70%^[8]。在果园中天然或者人工种植的草种, 都会对果园的土壤以及果树生长有调节作用, 比如可以调节果园土壤的温度, 减少因昼夜或者季节引起的温度变化, 牧草经过刈割覆盖后再腐解, 有利于提高土壤有机质含量, 也能够改善土壤理化性质和生物学性质, 防止水土流失, 促进根系生长发育, 进而促进果树的生长和发育, 提高果树单株产量, 改善果实品质。20世纪90年代以后, 在研究农林复合系统的相互作用机制时, 国内外学者发现, 树木组分和作物组分之间的地下竞争要比地上竞争更为激烈^[9-10], 系统组分之间的竞争主要是地下根系统的相互作用^[11]。研究表明, 生草能够提高果园土壤有效养分含量和土壤酶活性^[12-14], 增加土壤微生物数量^[15]; 焦润安等^[16]研究了生草栽

培对油橄榄园小气候的影响。基本上, 关于果园间作牧草方面的研究主要集中在土壤效应、果园小气候和果树的产量与品质等方面, 而关于生草栽培对油橄榄根系生理和根系形态的改善机制尚不清楚。鉴于此, 本研究分析不同水分条件下间作牧草对油橄榄根系生理和形态的影响, 探究牧草栽培种间养分、水分互作机理, 优化油橄榄园生草的模式, 以为油橄榄园生草管理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

油橄榄盆栽试验在甘肃农业大学基础实验教学中心植物生物技术实验室进行, 油橄榄苗来自于甘肃省陇南市武都区大堡油橄榄园, 供试品种为豆果 (*Arbequina*, 原产地西班牙), 树龄两年。

1.2 试验设计

试验选取生长良好、状况相同的油橄榄苗, 于2017年4月5日进行移栽, 采用25 cm × 20 cm (口径 × 高) 的花盆种植, 每盆栽植1株。种植时施第四元素复合肥料 (N-P₂O₅-K₂O 为28-6-6, 肥料购于兰州全鑫农资公司), 为了避免水分和肥料散失, 每个花盆都配有塑料的托盘, 盆内土壤取自油橄榄种植园内, 移栽后进行充分灌溉, 待苗木恢复正常生长后, 于2017年4月26日种植牧草。将所有花盆分成3组, 第I组: 种植百喜草 (*Paspalum notatum*), 品种为 Pensacola A33; 第II组: 种植白三叶 (*Trifolium repens*), 品种为海发 (Haifa); 第III组: 不种草。草种均购买于兰州兴陇草业技术服务有限公司。同时对3组处理进行灌水量试验, 设5

个灌水梯度处理, 分别为 300、350、400、450 和 500 mL, 每处理 3 次重复, 共 45 盆。根据植株的水分状况每 4~5 d 灌溉 1 次, 使其土壤含水量保持在 10%~25%。

2017 年 11 月 7 日采集根系, 分别选择 3 组油橄榄苗采集油橄榄根系及根际土, 剪取带有细根的根系, 然后将根系装入塑料袋中, 标注, 密封。测定根系生理及根系形态的相关指标。

1.3 指标测定及方法

根系生理指标测定: 参照邹琦^[17]的方法测定根系含水量、根系活力、根系吸收面积、脯氨酸含量、可溶性蛋白含量以及可溶性糖含量, 采用羟胺氧化法^[18]测定超氧阴离子($\cdot\text{O}_2^-$)产生速率, 采用 TBA 法^[18]测定丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量, 采用 NBT 光还原法^[18]测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性, 采用愈创木酚法^[18]测定过氧化物酶(peroxidase, POD)活性, 采用紫外吸收法^[18]测定过氧化氢酶(catalase, CAT)活性。

根系形态指标测定: 将清洗干净的根系用吸水纸吸干表面的水分。使用根系扫描仪 Espon scanner 对各处理的根系分别进行扫描, 在扫描完

成后, 运用 Win-RHIZO 2008a 根系图像分析软件对得到的根系图像进行形态指标的相关分析。根据分析可以得到根系的数量、根长、根表面积、体积以及平均直径。在根系形态特征扫描完成后, 对不同处理的根系进行称量, 得到根系的鲜重, 然后将所有根系及其地上部分别放入 65 °C 的烘箱烘干至恒重, 得到不同处理的根干重和地上部干重。根据根系和地上部干重可以计算出各处理下根系的根冠比。

1.4 数据分析

采用 SPSS 19.0 对所测数据统计分析, 用平均值和标准误表示测定结果, 对同一生草处理不同灌水量进行单因素方差分析, 并用 Duncan 法对各测定数据进行多重比较; 采用 Excel 2013 制做图表。

2 结果

2.1 不同水分条件下生草对油橄榄根系含水量和根系活力的影响

间作百喜草和白三叶降低了油橄榄根系含水量, 随灌水量的增加, 根系含水量呈增加趋势, 但增幅相对较小(表 1)。根系活力表现为, 300 mL

表 1 不同水分条件下生草对油橄榄根系含水量和根系活力的影响

Table 1 Effects of different grasses on water content and root vigor of olive root under different water conditions

生草类型 Grass type	灌水量 Irrigation/ mL	根系含水量 Root water content/%	根系活力 Root vigor/ $[\mu\text{g}\cdot(\text{h}\cdot\text{g})^{-1}]$	总吸收面积 Total absorbing surface area(A_t)/ m^2	活跃吸收面积 Active absorbing surface area (A_a)/ m^2	活跃吸收面积: 总吸收面积 $A_a : A_t/\%$
百喜草 <i>Paspalum notatum</i>	300	66.521 ± 0.051c	34.405 ± 1.083a	0.762 ± 0.002ab	0.385 ± 0.003a	50.52
	350	69.871 ± 1.252bc	34.313 ± 1.854a	0.765 ± 0.001a	0.387 ± 0.007a	50.59
	400	73.604 ± 4.695b	34.052 ± 2.454a	0.755 ± 0.003b	0.379 ± 0.007a	50.20
	450	79.372 ± 0.698a	34.016 ± 0.024a	0.748 ± 0.002c	0.375 ± 0.002a	50.13
	500	80.353 ± 0.454a	33.461 ± 1.034b	0.755 ± 0.002b	0.375 ± 0.001a	49.67
白三叶 <i>Trifolium repens</i>	300	71.274 ± 1.328a	25.606 ± 0.135c	0.762 ± 0.010a	0.383 ± 0.016a	50.26
	350	71.942 ± 0.966a	32.275 ± 0.912a	0.763 ± 0.004a	0.381 ± 0.002a	49.93
	400	73.564 ± 2.055a	29.445 ± 2.269b	0.771 ± 0.011a	0.379 ± 0.006a	49.15
	450	73.801 ± 2.139a	28.493 ± 0.318b	0.768 ± 0.010a	0.377 ± 0.006a	49.09
	500	73.869 ± 1.482a	28.376 ± 0.224b	0.757 ± 0.001a	0.376 ± 0.004a	49.67
无草 No grass	300	72.179 ± 0.219b	37.371 ± 1.112a	0.745 ± 0.006a	0.366 ± 0.002a	49.13
	350	82.678 ± 0.085a	23.446 ± 0.256b	0.746 ± 0.002a	0.362 ± 0.001b	48.53
	400	82.941 ± 1.458a	12.602 ± 1.741c	0.753 ± 0.002a	0.361 ± 0.001c	47.94
	450	83.006 ± 0.608a	10.045 ± 0.711c	0.747 ± 0.001a	0.359 ± 0.003d	48.06
	500	83.623 ± 3.673a	10.396 ± 0.273c	0.745 ± 0.002a	0.358 ± 0.001d	48.05

同列不同小写字母表示同种生草类型不同水分梯度间差异显著($P < 0.05$); 表 2、表 3 同。

Different lowercase letters within the same column indicate significant differences between the different water gradients for the same grass type at the 0.05 level; this is applicable for Table 2 and Table 3 as well.

灌水量下无草高于间作牧草，在 350~500 mL 灌水量范围内间作百喜草和白三叶均提高了油橄榄根系活力，其中间作百喜草的提高幅度最大。根系总吸收面积在 3 种处理间差异不明显，但间作牧草处理整体上提高了油橄榄根系活跃吸收面积，由此也提高了活跃吸收面积与总吸收面积的比值，从根系活跃吸收面积角度分析，间作牧草提升了油橄榄根系的吸收性能，且间作百喜草的效果最好。

2.2 不同水分条件下生草对油橄榄根系·O₂⁻产生速率和 MDA 含量的影响

相比于无草，间作百喜草和白三叶整体降低了油橄榄根系·O₂⁻产生速率和 MDA 含量 (图 1)，·O₂⁻产生速率和 MDA 含量在 3 种间作处理下均随着灌水量的升高呈先降低后升高趋势，间作百喜

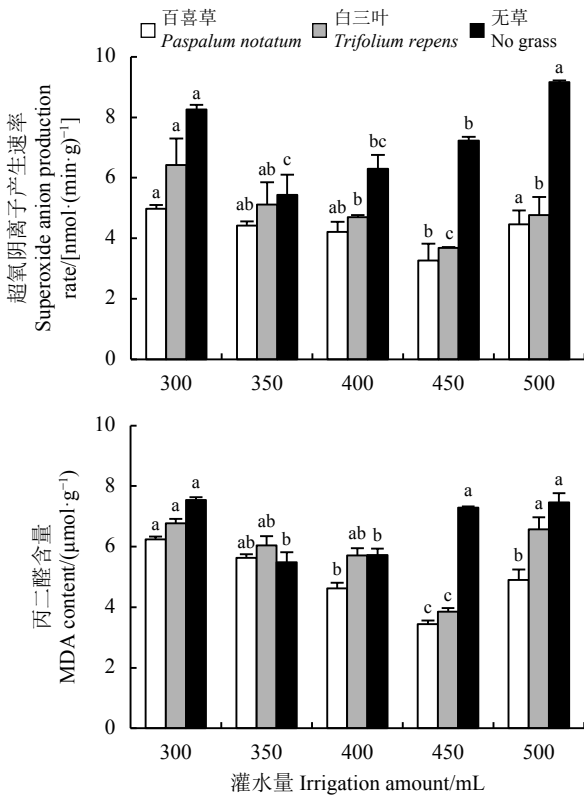


图 1 不同水分条件下生草对油橄榄根系超氧阴离子(·O₂⁻)产生速率和 MDA 含量的影响

Figure 1 Effects of different grasses on superoxide anion production rate and MDA content in olive root system under different water conditions

同种生草类型不同小写字母表示不同水分梯度间差异显著 ($P < 0.05$)；图 2、图 3 同。

Different lowercase letters indicate significant differences between the different water gradients for the same grass type at the 0.05 level; this is applicable for Figure 2 and Figure 3 as well.

草、白三叶和无草均分别在 450、450 和 350 mL 时最低；在 450 mL 灌水量时，根系·O₂⁻产生速率在间作百喜草和白三叶处理分别比无草低 54.7% 和 48.9%，MDA 含量分别比无草低 52.7% 和 47.2%。总体上，无草处理的最适灌水量在 350 mL，随着灌水量的增加，土壤水分过多会引起根系自由基积累。

2.3 不同水分条件下生草对油橄榄根系抗氧化酶活性的影响

随着灌水量的增加，3 种抗氧化酶活性均呈现先降低后升高的趋势 (图 2)。相较于无草处理，百

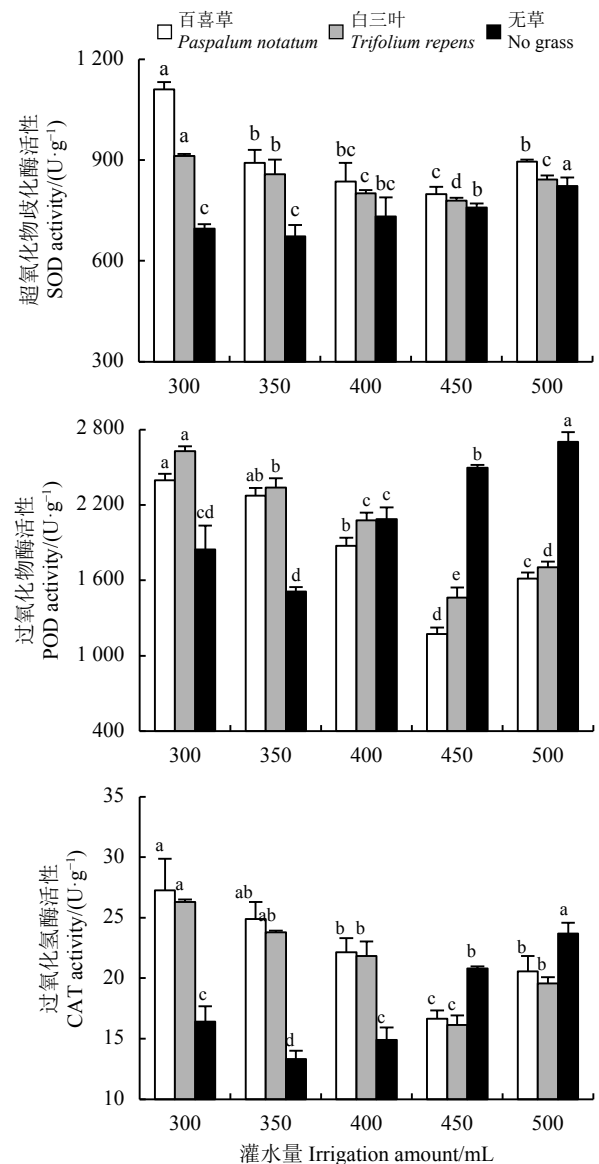


图 2 不同水分条件下生草对油橄榄根系抗氧化酶活性的影响

Figure 2 Effects of different grasses on antioxidant enzyme activity in the olive root system under varying water conditions

喜草和白三叶明显提高了油橄榄根系 SOD 活性, 无草处理下 SOD 活性在灌水 350 mL 时最小, 分别比间作百喜草和白三叶低 24.5% 和 21.6%; 间作百喜草和白三叶处理的 SOD 活性在灌水 450 mL 时最小, 分别比无草高 5.31% 和 2.78%。间作牧草整体上明显提高了油橄榄根系 POD 和 CAT 活性 (图 2), 间作百喜草和白三叶处理下 POD 和 CAT 活性均在 450 mL 灌水量时最小, 而无草处理下 POD 和 CAT 活性均在灌水 350 mL 时最低。

2.4 不同水分条件下生草对油橄榄根系渗透调节物质含量的影响

间作百喜草和白三叶均明显提高了油橄榄根系脯氨酸含量, 随着灌水量的增加持续降低, 而无草处理呈现先降低后升高趋势, 在 450 mL 灌水量时最小, 比间作百喜草和白三叶较无草处理脯氨酸含量分别升高 21.6% 和 18.3% (图 3)。间作牧草整体上明显增加了根系可溶性蛋白和可溶性糖含量, 随着灌水量的增加, 间作牧草处理的可溶性蛋白和可溶性糖含量均持续降低, 而无草处理呈现先降低后升高趋势, 在 450 mL 灌水量时最低。在 450 mL 灌水量时, 可溶性蛋白含量在间作百喜草和白三叶处理下较无草分别增加 21.4% 和 10.5%, 可溶性糖含量在间作百喜草和白三叶处理下较无草增加不明显。总的来说, 间作百喜草和白三叶处理从整体上提高了油橄榄根系脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量, 且间作百喜草的效果最好。

2.5 不同水分条件下生草对油橄榄根系形态指标的影响

随着灌水量的增加, 间作百喜草和白三叶的油橄榄根长表现为先增加后减小, 最大值在 400 mL 灌水量, 而无草处理的根长随灌水量的增加而持续减小, 可知适当的干旱会促进根系的延伸 (表 2)。整体上看, 间作百喜草和白三叶对于增大油橄榄根系表面积、体积的效果较为明显, 3 种处理随着灌水量的增加均呈现先增大后减小趋势, 间作百喜草、白三叶以及无草处理分别在 400、400 和 300 mL 处最高。随着灌水量的增加, 根平均直径表现出间作百喜草和白三叶使油橄榄根系变细的趋势, 且都在 450 mL 灌水量下有最小值, 而无草处理的根平均直径随灌水量的增加而增大。间作牧草处

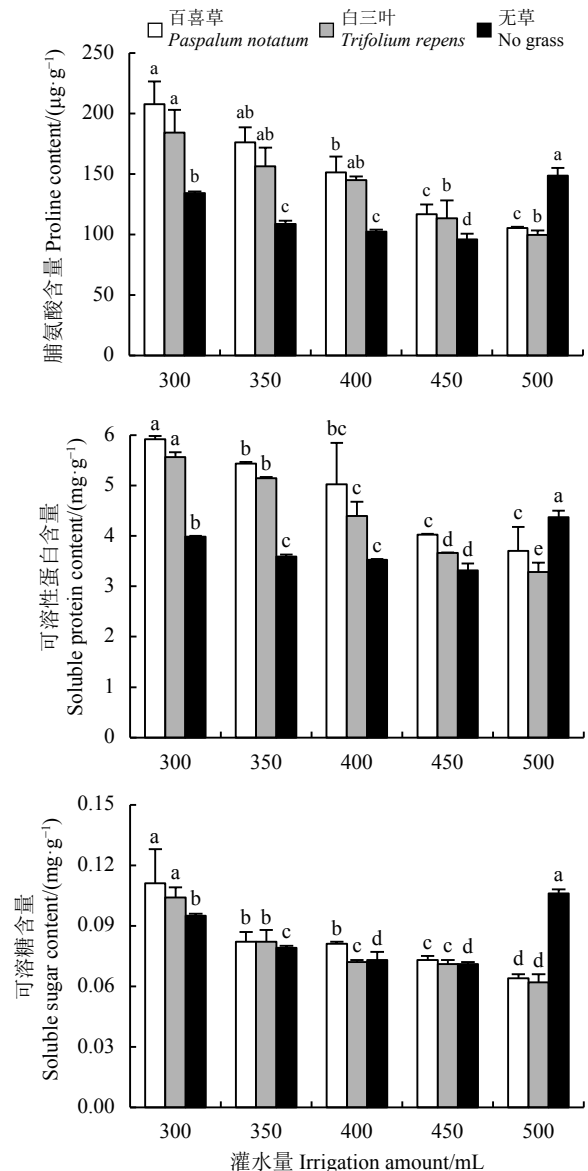


图 3 不同水分条件下生草对油橄榄根系渗透调节物质含量的影响

Figure 3 Effects of different grasses on the content of osmotic regulating substances in the olive root system under varying water conditions

理下的油橄榄根尖数随着灌水量的增加均表现出先增大后减小的趋势, 最大值均出现在 400 mL 灌水量时, 而无草处理的根尖数随灌水量增加而持续减小。

在 400 mL 灌水量下, 间作百喜草和白三叶处理下的根长较无草分别增加了 110% 和 71.6%, 根表面积较无草分别增加了 23.8% 和 10.8%, 根体积较无草分别增大了 60.8% 和 51.2%, 根尖数较无草分别增加了 55.1% 和 35.9%。整体上看, 间作百喜草效果较好。

表 2 不同水分条件下生草对油橄榄根系形态指标的影响
Table 2 Effects of different grasses on the olive root morphology under varying water conditions

生草类型 Grass type	灌水量 Irrigation/mL	根长 Total root length/cm	根表面积 Surface area/cm ²	根体积 Volume/cm ³	平均直径 Average diameter/mm	根尖数 Root tip number
百喜草 <i>Paspalum notatum</i>	300	535.6 ± 15.2d	548.5 ± 35.7c	13.9 ± 0.9d	2.11 ± 0.56a	384.5 ± 33.2c
	350	829.8 ± 64.7c	645.5 ± 36.6b	21.6 ± 3.7c	2.09 ± 0.22a	594.5 ± 19.1b
	400	1 231.3 ± 66.9a	810.7 ± 72.3a	29.1 ± 1.2a	1.88 ± 0.11b	781.5 ± 30.4a
	450	1 016.9 ± 10.1b	725.7 ± 20.0a	27.2 ± 1.2ab	1.63 ± 0.02c	766.5 ± 29.8a
	500	948.2 ± 28.2b	721.6 ± 66.3a	26.1 ± 1.4b	1.74 ± 0.09bc	705.5 ± 48.8a
白三叶 <i>Trifolium repens</i>	300	528.6 ± 23.1d	310.4 ± 19.9c	12.4 ± 0.2c	1.94 ± 0.19a	249.1 ± 14.1c
	350	713.1 ± 46.3c	620.1 ± 32.9b	19.9 ± 1.9b	1.89 ± 0.02a	575.5 ± 30.6b
	400	1 006.2 ± 51.1a	725.9 ± 24.1a	27.4 ± 3.2a	1.88 ± 0.01a	685.2 ± 29.9a
	450	903.2 ± 48.5ab	682.9 ± 22.9a	24.6 ± 2.2a	1.53 ± 0.05b	656.1 ± 19.9a
	500	825.4 ± 31.4b	601.1 ± 31.4b	23.9 ± 1.0ab	1.57 ± 0.02b	623.5 ± 34.9a
无草 No grass	300	787.4 ± 33.5a	719.0 ± 74.0a	23.6 ± 1.3a	1.45 ± 0.01b	666.5 ± 12.0a
	350	720.5 ± 57.8a	699.4 ± 65.9a	23.1 ± 1.9a	1.47 ± 0.01ab	654.0 ± 49.5a
	400	586.3 ± 60.9b	654.8 ± 67.7a	18.1 ± 2.2b	1.58 ± 0.18a	504.1 ± 17.1b
	450	547.9 ± 29.6d	486.2 ± 13.0b	17.3 ± 1.1b	1.59 ± 0.15a	346.5 ± 34.6c
	500	474.9 ± 35.4d	424.4 ± 17.9c	15.6 ± 1.3c	1.55 ± 0.10a	345.0 ± 28.3c

2.6 不同水分条件下生草对油橄榄根系生物量的影响

间作百喜草和白三叶在整体上明显增加了油橄榄的根干重和地上部干重，并且均在 400 mL 灌水量处有最大值，随着灌水量的增加，间作牧草处理下的根干重和地上部干重均呈先增大后降低趋势，而无草处理的根干重和地上部干重均随灌水量的增加持续降低，以 300 mL 灌水量最高 (表 3)。

间作百喜草、白三叶和无草处理的油橄榄根冠比分别在 400、400 和 300 mL 灌水量条件下最高，且整体上表现出间作百喜草和白三叶有提高油橄榄根冠比的作用。

在 400 mL 灌水量下，油橄榄幼苗的根干重在间作百喜草和白三叶处理下分别比无草高 39.1% 和 29.8%，地上部干重分别高 11.1% 和 8.06%，根冠比分别高 25.2% 和 20.1%。可知，间作百喜草效

表 3 不同水分条件下生草对油橄榄根系生物量的影响
Table 3 Effects of different grasses on the olive root biomass under varying water conditions

生草类型 Grass type	灌水量 Irrigation/mL	根干重 Root dry weight/g	地上部干重 Shoot dry weight/g	根冠比 Root to shoot ratio
百喜草 <i>Paspalum notatum</i>	300	3.827 ± 0.004c	12.021 ± 0.071c	0.318 ± 0.002d
	350	4.255 ± 0.143b	12.572 ± 0.114b	0.338 ± 0.011b
	400	4.792 ± 0.153a	13.173 ± 0.036a	0.363 ± 0.005a
	450	4.373 ± 0.266ab	12.824 ± 0.207b	0.341 ± 0.007b
	500	4.109 ± 0.073b	12.625 ± 0.077b	0.325 ± 0.001c
白三叶 <i>Trifolium repens</i>	300	3.569 ± 0.129c	11.733 ± 0.061d	0.304 ± 0.017c
	350	3.997 ± 0.031b	12.015 ± 0.099c	0.332 ± 0.002b
	400	4.473 ± 0.148a	12.821 ± 0.112a	0.349 ± 0.012a
	450	4.273 ± 0.135a	12.465 ± 0.195b	0.343 ± 0.014a
	500	4.076 ± 0.011b	12.018 ± 0.078c	0.339 ± 0.001ab
无草 No grass	300	3.915 ± 0.008a	12.573 ± 0.148a	0.311 ± 0.004a
	350	3.842 ± 0.104a	12.369 ± 0.014b	0.310 ± 0.004a
	400	3.447 ± 0.235b	11.865 ± 0.507bc	0.291 ± 0.067ab
	450	3.115 ± 0.109b	11.173 ± 0.226c	0.278 ± 0.017b
	500	2.712 ± 0.146c	10.924 ± 0.103c	0.248 ± 0.003c

果较好。

3 讨论与结论

3.1 不同水分条件下生草对油橄榄根系生理的影响

根系作为植物吸收水分和养分的主要器官,其生长动态极易受到环境条件的影响,因此,根系生理特征在研究植物生长发育方面尤为重要^[19]。杨宏伟等^[20]在对油橄榄根际微环境的研究中发现,间作百喜草能够提高油橄榄根系活力。本研究发现,间作百喜草和白三叶降低了油橄榄根系含水量,可知间作百喜草和白三叶造成了牧草与油橄榄根系之间的水分竞争。从整体上看,间作牧草显著提高了油橄榄根系活力和根系活跃吸收面积,而根系总吸收面积在3种间作处理间差异不明显,从根系活跃吸收面积的角度来分析,间作牧草能够有效提升油橄榄根系的吸收性能,进而使油橄榄根系能够吸收更多的养分,且间作百喜草效果最佳。

高等植物生命活动过程中均会产生活性氧自由基,但是其能够被抗氧化酶如SOD、POD和CAT有效地消除^[21-22]。抗氧化酶系统、 $\cdot\text{O}_2^-$ 产生速率和MDA含量以及渗透调节物质含量受到多种因素的影响,如不同水分条件,以及外部土壤环境的改变,均会使其发生变化。李芳东等^[23]研究发现,生草处理提高了苹果(*Malus domestica*)叶片衰老过程中SOD和POD活性,使 $\cdot\text{O}_2^-$ 和MDA含量保持相对较低的水平。也有研究表明,间作百喜草抑制了油橄榄叶片 $\cdot\text{O}_2^-$ 产生速率和MDA含量的上升,增强了SOD、POD和CAT活性^[20]。本研究结果与前人研究结果相似,相较于无草,间作牧草显著降低了油橄榄根系 O_2^- 产生速率和MDA含量(图1),在450 mL灌水量时最小,间作百喜草和白三叶处理下的根系 $\cdot\text{O}_2^-$ 产生速率较无草分别降低了54.7%和48.9%,MDA含量较无草分别降低了52.7%和47.2%。间作牧草整体上提高了油橄榄根系SOD、POD和CAT活性(图2),随着灌水量的增加,3种抗氧化酶活性均呈现先降低后升高的趋势,在450 mL灌水量时活性最低,而无草处理下在350 mL灌水量时最低。可知在无草处理下,土壤内水分在较低的灌水量就达到饱和,继续灌水

会造成根系氧亏缺,引起根系自由基积累,造成油橄榄幼苗根系氧化损伤,而间作百喜草和白三叶能够吸收多余的土壤水分,改善土壤的透气和透水性能,有效缓解水分过多对根系造成的损伤,其中间作百喜草的效果最为显著。

植物体在干旱或水涝逆境形成的水分胁迫下,体内可主动积累各种无机或有机物质来提高细胞液浓度,降低渗透势,提高细胞吸水或保水能力,从而适应水分胁迫环境^[24]。史祥宾等^[25]研究表明,行间自然生草能够显著提高葡萄(*Vitis vinifera*)植株可溶性糖和可溶性蛋白含量。从本研究结果可知,间作牧草整体上显著增加了油橄榄根系脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量(图3),这也与杨宏伟等^[20]研究结果相似。随着灌水量的增加,间作牧草处理的油橄榄幼苗根系渗透调节物质持续降低,而无草处理呈现先降低后升高趋势,这是因为无草处理下过多的水分对油橄榄根系造成了水分胁迫,最终导致渗透调节系统紊乱,而间作处理牧草与油橄榄根系之间存在水分竞争,牧草可以吸收多余水分,使渗透调节系统保持相对平衡。在450 mL灌水量时,间作百喜草处理的根系脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量较无草分别升高了21.6%、21.4%和2.82%。总的来说,间作百喜草和白三叶处理从整体上提高了油橄榄根系渗透调节物质含量,进而增强根系渗透调节功能,有助于根系在较高的水分含量下正常生长发育,且间作百喜草的效果最好。

3.2 不同水分条件下生草对油橄榄根系生长发育的影响

根系对土壤中水分的变化响应较为敏感,当土壤水分发生变化时,植物根系会在形态上产生一系列变化,这直接影响着根系吸收土壤中养分和水分的能力^[26-27]。严芳等^[28]和李会科等^[29]在研究中发现果园间作白三叶(*Trifolium repens*)比单作显著增加了茶树(*Camellia sinensis*)与苹果幼树根系生物量、总根长、表面积、体积、平均直径、根尖数。孙文泰等^[30]研究表明,覆草处理可有效促进苹果根系生长,尤其是细根的生长。而Zamora等^[31]对美洲山核桃(*Carya illinoensis*)/棉花(*Gossypium hirsutum*)复合系统的研究发现,地下部分的竞争作用使棉花根系发育受到显著影响,棉花总根长降

低。本研究结果与前者相似, 间作百喜草和白三叶整体上对于增大油橄榄根系总根长、表面积、根体积和根尖数的效果较为明显, 随着灌水量的增加均呈现先增大后减小趋势, 最大值在 400 mL 灌水量时, 而无草处理的各形态指标随着灌水量的增加而减小。在较低的灌水量下, 间作处理的牧草与油橄榄幼苗根系竞争土壤水分, 使油橄榄根系水分亏缺, 导致各形态指标均低于无草处理, 而在灌水量较高的情况下, 无草处理各指标下降的原因可能是由于水涝发生, 从而导致根系活力降低甚至部分衰亡, 间作牧草能够有效调节土壤中水分平衡, 促进根系生长。随着灌水量的增加, 间作百喜草和白三叶使油橄榄根平均直径降低, 根系变得细而长, 有助于提高根系与土壤接触面积, 使其能够吸收更深层土壤水分和养分。本研究结果与 Zamora 等^[31]的不同, 可能是由于美洲山核桃处于该复合系统主导地位, 竞争能力明显优于棉花, 抑制了棉花根系的生长发育。

根冠比是植物根系干重与地上部干重的比值, 它能反映出植物体的生长状况, 以及外界环境条件对其根系与地上部分生长的不同影响^[32]。本研究结果表明, 间作百喜草和白三叶在整体上显著增加了油橄榄的根干重、地上部干重和根冠比, 随着灌水量的增加, 间作牧草处理下各指标均呈现先升后降的变化趋势, 而无草处理则持续降低。间作百喜草处理在 400 mL 灌水量下效果最佳, 根干重、地上部干重和根冠比分别较无草处理增大了 39.1%、11.1% 和 25.2%。

综上, 间作牧草提高了油橄榄幼苗的根系活力, 根系活跃吸收面积以及活跃吸收面积与总吸收面积的比值; 整体上降低了油橄榄根系·O₂⁻产生速率、MDA 含量, 提高了抗氧化酶活性和渗透调节物质含量; 提高了油橄榄幼苗根系总根长、表面积、根体积和根尖数、根干重、地上部干重和根冠比。可见, 间作百喜草促进了油橄榄幼苗根系的生长发育, 且在 450 mL 灌水量时效果最佳。

参考文献 References:

- [1] 邓煜. 从油橄榄引种看我国木本食用油料产业的发展. 经济林研究, 2010, 28(4): 119-124.
DENG Y. Development of edible woody oil industry in China based on olive introduction. Non-wood Forest Research, 2010, 28(4): 119-124.
- [2] RUAN X, ZHU X M, HUA X, WANG S Q, BAI C Q, ZHAO Q. Characterisation of zero-trans margarine fats produced from camellia seed oil, palm stearin and coconut oil using enzymatic interesterification strategy. *International Journal of Food Science and Technology*, 2014, 49(1): 91-97.
- [3] 周庆宏, 刘模, 任匀. 油橄榄种植技术. 农村实用技术, 2013(10): 11-12.
ZHOU Q H, LIU M, REN Y. Olive planting technology. *Applicable Technologies for Rural Areas*, 2013(10): 11-12.
- [4] BORJA V M, I. LÓPEZ C D M, SALAZAR H. Dendrometric analysis of olive trees for wood biomass quantification in Mediterranean orchards. *Agroforestry Systems*, 2014, 88(5): 755-765.
- [5] DIXON R K. Agroforestry systems: Sources of sinks of greenhouse gases. *Agroforestry Systems*, 1995, 31: 99-116.
- [6] MICHAEL D H, GERARDO M, MARIA R M L, JOAO H N P, ANNA S. Current extent and stratification of agroforestry in the European Union. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2017, 241: 121-132.
- [7] ANNE R. The effects of herbicide soil management systems and nitrogen fertilizer on the eating quality of Cox's Orange Pippin apples. *Journal of Horticultural Science*, 1986, 61(4): 447-456.
- [8] 寇建村, 杨文权, 韩明玉, 陈奥, 李冰, 张维. 我国果园生草研究进展. 草业科学, 2010, 27(7): 154-159.
KOU J C, YANG W Q, HAN M Y, CHEN A, LI B, ZHANG W. Research progress on interplanting grass in orchard in China. *Pratacultural Science*, 2010, 27(7): 154-159.
- [9] ONG C K, CORLETT J E, SINGH R P, BLACK C R. Above and below ground interactions in agroforestry systems. *Forest Ecology and Management*, 1991, 45(1/4): 45-57.
- [10] 秦树高, 吴斌, 张宇清. 林草复合系统地下部分种间互作关系与化感作用研究进展. 草业学报, 2011, 20(2): 253-261.
QIN S G, WU B, ZHANG Y Q. A review of belowground interspecific interactions and allelopathy in silvopasture systems. *Acta*

- Prataculturae Sinica, 2011, 20(2): 253-261.
- [11] 郭忠录, 钟诚, 蔡崇法, 丁树文, 王中敏. 等高植物篱/大豆间作根系相互作用对生长和氮素吸收利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2008(1): 59-64.
GUO Z L, ZHONG C, CAI C F, DING S W, WANG Z M. Effect of root interaction on growth and N uptake in a hedgerow and soybean intercropping system. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008(1): 59-64.
- [12] 吴玉森, 张艳敏, 冀晓昊, 张芮, 刘大亮, 张宗营, 李文燕, 陈学森. 自然生草对黄河三角洲梨园土壤养分、酶活性及果实品质的影响. 中国农业科学, 2013, 46(1): 99-108.
WU Y S, ZHANG Y M, JI X H, ZHANG R, LIU D L, ZHANG Z Y, LI W Y, CHEN X S. Effects of natural grass on soil nutrient, enzyme activity and fruit quality of pear orchard in Yellow River Delta. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(1): 99-108.
- [13] 孙计平, 张玉星, 吴照辉, 李英丽, 王国英, 张江红. 生草配合施用有机肥对省力高效梨园土壤的培肥效应研究. 草业学报, 2017, 26(4): 80-88.
SUN J P, ZHANG Y X, WU Z H, LI Y L, WANG G Y, ZHANG J H. Effects of cover cropping and organic fertilizer on soil nutrients in a pear orchard. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(4): 80-88.
- [14] PALESE A M, VIGNOZZI N, CELANO G, AGNELLI A E, XILOYANNIS C. Influence of soil management on soil physical characteristics and water storage in a mature rainfed olive orchard. [Soil and Tillage Research](#), 2014, 144: 96-109.
- [15] LAURENT A S, MERWIN I A, THIES J E. Long-term orchard groundcover management systems affect soil microbial communities and apple replant disease severity. Plant and Soil, 2008, 304(1): 209-225.
- [16] 焦润安, 刘高顺, 闫士朋, 焦健, 李朝周. 生草栽培对白龙江干热河谷地带油橄榄园小气候的影响. 草地学报, 2018, 26(3): 770-780.
JIAO R A, LIU G S, YAN S P, JIAO J, LI C Z. Effect of sod-culture on the microclimate of olive orchard in Bailong River dry-hot valley region. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(3): 770-780.
- [17] 邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2000.
ZOU Q. Plant Physiology Experiment Guide. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000.
LI H S. Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiments. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [19] FREITAS T A S, BARROSO D, CARNEIRO J G A. Dinâmica de raízes de espécies arbóreas: Visão da literatura. *Ciência Florestal*, 2009, 18(1): 133-142.
- [20] 杨宏伟, 李自龙, 梁恕坤, 焦健, 李朝周. 间作百喜草对油橄榄根际微环境及抗旱生理的影响. 应用与环境生物学报, 2016, 22(3): 455-461.
YANG H W, LI Z L, LIANG S K, JIAO J, LI C Z. Influences of intercropping *Paspalum notatum* on the olives rhizosphere microenvironment and drought resistant physiology. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2016, 22(3): 455-461.
- [21] FOYER C H, DESCOURVIÈRES P, KUNERT K J. Protection against oxygen radicals: An important defence mechanism studied in transgenic plants. Plant, Cell and Environment, 2010, 17(5): 507-523.
- [22] BOWLER C, MONTAGUE M, INZE D. Superoxide dismutase and stress tolerance. [Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology](#), 1992, 43: 83-116.
- [23] 李芳东, 吕德国, 杜国栋, 秦嗣军. 果园生草对苹果叶片衰老过程中生理特性的影响. 中国南方果树, 2013, 42(4): 27-30.
LI F D, LYU D G, DU G D, QIN S J. Effect of sod culture in orchard on physiological characteristics of apple leave senescence. South China Fruits, 2013, 42(4): 27-30.
- [24] 马一泓, 王术, 于佳禾, 赵晨, 贾宝艳, 黄元财, 王岩, 王韵, 徐铨. 水稻生长对干旱胁迫的响应及抗旱性研究进展. 种子, 2016, 35(7): 45-49.
MA Y H, WANG S, YU J H, ZHAO C, JIA B Y, HUANG Y C, WANG Y, WANG Y, XU Q. Responses of drought stress in plant growth and study advances on drought resistance in rice. Seed, 2016, 35(7): 45-49.
- [25] 史祥宾, 刘凤之, 王孝娣, 王宝亮, 郑晓翠, 魏长存, 何锦兴, 王海波. 自然生草对‘贵人香’葡萄产量、品质与枝条抗寒性的影响. 中国果树, 2016(2): 36-39.
SHI X B, LIU F Z, WANG X D, WANG B L, ZHENG X C, WEI C C, HE J X, WANG H B. The effect of natural grass on the

- yield, quality and cold resistance of 'Guirenxiang' grape. *China Fruits*, 2016(2): 36-39.
- [26] 孙文泰, 马明, 董铁, 刘兴禄, 赵明新, 尹晓宁, 牛军强. 地表覆盖对陇东旱塬苹果根系生长与越冬前后树体贮藏营养的影响. *果树学报*, 2016, 33(11): 1367-1378.
SUN W T, MA M, DONG T, LIU X L, ZHAO M X, YIN X N, NIU J Q. Effects of mulching on root growth and nutrient reservation in overwintering apple trees grown in the dry area of eastern Gansu. *Journal of Fruit Science*, 2016, 33(11): 1367-1378.
- [27] 王劲松, 樊芳芳, 郭珺, 武爱莲, 董二伟, 白文斌, 焦晓燕. 不同作物轮作对连作高粱生长及其根际土壤环境的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2283-2291.
WANG J S, FAN F F, GUO J, WU A L, DONG E W, BAI W B, JIAO X Y. Effects of different crop rotations on growth of continuous cropping sorghum and its rhizosphere soil micro-environment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(7): 2283-2291.
- [28] 严芳, 娄艳华, 陈建兴, 郑生宏, 何卫中. 间作白三叶草对茶园温湿度和茶树根系生长的影响. *热带作物学报*, 2017, 38(12): 2243-2247.
YAN F, LOU Y H, CHEN J X, ZHENG S H, HE W Z. The effect of intercropping *Trifolium repens* on temperature humidity and growth of tea root system in tea plantation. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2017, 38(12): 2243-2247.
- [29] 李会科, 李金玲, 王雷存, 曹卫东, 梅立新. 种间互作对苹果/白三叶复合系统根系生长及分布的影响. *草地学报*, 2011, 19(6): 960-968.
LI H K, LI J L, WANG L C, CAO W D, MEI L X. Effects of interspecific interaction on the growth and distribution of roots in apple-white clover intercropping system. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(6): 960-968.
- [30] 孙文泰, 董铁, 刘兴禄, 赵明新, 尹晓宁, 牛军强, 马明. 覆盖处理苹果细根分布与土壤物理性状响应关系研究. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(2): 88-95.
SUN W T, DONG T, LIU X L, ZHAO M X, YIN X N, NIU J Q, MA M. The relationship between root distribution of apple and soil physical properties by different ground covering approaches. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(2): 88-95.
- [31] ZAMORA D S, JOSE S, NAIR P K R. Morphological plasticity of cotton roots in response to interspecific competition with pecan in an alley cropping system in the southern United States. *Agroforestry Systems*, 2007, 69(2): 107-116.
- [32] 王艳哲, 刘秀位, 孙宏勇, 张喜英, 张连蕊. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 282-289.
WANG Y Z, LIU X W, SUN H Y, ZHANG X Y, ZHANG L R. Effects of water and nitrogen on root/shoot ratio and water use efficiency of winter wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3): 282-289.

(责任编辑 苟燕妮)