

陇南地区土壤水分及气象因子对油橄榄树干液流的响应特征

赵梦炯^{1,2}, 吴文俊^{1,2}, 马超¹, 戚建莉^{1,2}, 姜成英^{1,2*}, 陈炜青^{1,2}

(1. 甘肃省林业科学研究院, 甘肃 兰州 730020; 2. 国家林业和草原局 油橄榄工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730020)

摘 要:在初步掌握油橄榄树干液流的变化规律基础上,探索土壤水分、气象因子与树干液流的关系。结果表明,油橄榄树茎流量随太阳辐射强度增大而呈现迅速降低的趋势,随空气相对湿度的增加逐渐减小,与空气温度呈正相关关系,由于高温抑制作用,空气温度>29.78℃时,茎流量有小幅下降的趋势,土壤温度在 12.51℃~25.06℃时,油橄榄树茎流量随土壤温度升高而缓慢增大,但当土壤温度>30.86℃时,油橄榄树茎流量也会逐渐下降。通过分析油橄榄茎流速率与气象因子之间的关系,构建了多元线性回归模型,生产上可根据此模型推导出油橄榄树的潜在茎流量,以此为依据提出合理的节水补灌制度。

关键词:油橄榄;树干液流;气象因子;土壤水分

中图分类号:S152.75 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2020)05-0104-06

Influence of Soil Moisture and Meteorological Factors on Stem Sap Flow of Olive in Southern Gansu

ZHAO Meng-jiong^{1,2}, WU Wen-jun^{1,2}, MA Chao¹, QI Jian-li^{1,2}, JIANG Cheng-ying^{1,2*}, CHEN Wei-qing^{1,2}

(1. Gansu Academy of Forestry Sciences, Lanzhou 730020, Gansu, China;

2. Center for Olive Research and Technology of National Forestry and Grassland Administration, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: The objectives of this study were to understand the variation regularities of trunk sap flow of olive trees (*Olea europaea*) occurring in southern Gansu, and to investigate the relationship of the sap flow with soil moisture and meteorological factors. The results showed that the sap flow decreased rapidly with the increase of the intensity of solar radiation, decreased gradually with the increase of air relative humidity. The sap flow was positively correlated with atmospheric temperature. When the temperature was higher than 29.78℃, due to the inhibition effect, the sap flow tended to slightly decline. The sap flow slowly increased with the soil temperature in the range of 12.51℃ to 25.06℃. It would be decreased gradually when the soil temperature was higher than 30.86℃. A multiple linear regression model was constructed by analyzing the relationship between the sap flow rate and meteorological factors. The model could be used to calculate the potential sap flow in practical production, and to manipulate a reasonable water-saving irrigation system.

Key words: olive; sap flow; meteorological factor; soil moisture

油橄榄(*Olea europaea*)也称齐墩果,属木樨科(Oleaceae)、木樨榄属(*Olea*)的常绿阔叶乔木,果实形似橄榄且果肉内富含油脂^[1],是一种耐旱、高产、

适应性强的优质木本油料树种。油橄榄原产于西亚和地中海区域,我国于 1964 年引进并推广种植^[2]。目前,我国有关其他经济林树种蒸腾耗水、树干液流

收稿日期:2019-09-23 修回日期:2020-07-22

基金项目:2018 年度甘肃科技计划项目:中国—土耳其油橄榄种质资源收集、评价、利用技术研究(18YF1WA017);陇原青年创新人才扶持计划“油橄榄耗水规律及早作栽培技术研究”。

作者简介:赵梦炯,高级工程师。研究方向:经济林栽培。E-mail:zmj.413@163.com

* 通信作者:姜成英,研究员。研究方向:经济林。E-mail:jcytxb@126.com

方面的研究较多,大部分学者在探讨树体蒸腾耗水规律的计算或测定方法等方面,由于蒸腾速率测定技术条件的局限性和研究目的不同,使得部分研究成果缺乏实用性^[3]。国外学者在油橄榄蒸腾耗水方面做了较多工作,以色列、希腊、西班牙等国家的林业专家对水分与油橄榄产量之间的关系进行了系统的研究,建立灌溉模型,可根据不同的气候及物候期确定灌溉量,并采用滴灌等灌溉措施节水^[4-5]。刘兴芬等^[6]在攀西干旱河谷地区针对不同品种设计不同水分胁迫试验,研究水分胁迫对油橄榄幼树生长的影响,王怡等^[7]从光合、生理、生化方面入手,探讨3个油橄榄品种对水分胁迫的适应性差异及水分胁迫对油橄榄光合响应特征和生理生化特征的影响。我国针对油橄榄树干液流特征及蒸腾耗水等方面的研究较少,油橄榄在各生长发育阶段不断从土壤中吸收水分,以保证水分和营养物质在体内正常输送,表现出不同的需水特征^[8]。甘肃油橄榄主要种植区陇南气候是夏雨型,冬春两季少雨干旱,这与油橄榄原产地(地中海沿岸地区)冬雨型气候相反^[9]。因此,陇南地区降雨情况尚不能满足油橄榄生长发育所需水分,而本区仅少数的油橄榄园具备灌溉条件,在油橄榄需水的关键时期得不到水分补给是导致油橄榄产量低而不稳定的关键因素。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于隶属陇南市武都区林草局的油橄榄示范园(104°94'E,33°43'N)。该种植园立地条件较好,坡向朝南,日照充足,海拔高度1 079 m,年平均气温 13.7℃,绝对最高气温 40℃,最低气温 -8.6℃,全年无霜期为 150~270 d,年平均湿度 61%~71%,年降水日数平均为 150~270 d;年降水量 474~900 mm,降水主要集中在 6—9 月;年日照时数 1 911.7 h,约占可照时数的 25%;该种植园土壤属于侵蚀性褐土类,成土母质多为千枚岩、石灰岩、砾岩、页岩等的分化物,pH 值 7.8^[8],土壤养分含量见表 1。

表 1 试验地土壤养分含量

Table 1 Soil nutrient content in the test plots					
(mg · kg ⁻¹)					
养分	速效 K	有效 P	碱解 N	有效 Zn	有效 B
含量	146.00	38.90	56.00	1.80	0.79

1.2 试验材料

试验树品种为‘莱星’,栽植规格为 4 m×5 m,均为常规水肥管理。‘莱星’是陇南地区的主栽良

种,特选择具有代表性品种作为试验材料。油橄榄树为经济果树,为了通风透光提高产量并便于后期经营管理,树形通常都修剪成“开心型”,树体主干高度一般控制在 80~100 cm 及以下(表 2)。因此无法在胸径 1.3 m 处测量,只能在树干离地面 20 cm 处插入茎流仪探针。

1.3 研究方法

1.3.1 树茎流量测定 油橄榄树茎流量采用热扩散式茎流仪(FLGS-TDP)测定。每 60 s 数据扫描 1 次,0.5 h 记录 1 次平均值,昼夜持续观测。

1.3.2 土壤水分动态监测 采用负压式土壤湿度计(也称负压计或张力计),精度为 2.5 kPa,测定土壤水吸力。在距油橄榄树根部 0.5 m 处挖纵剖面,在土壤深度为 30、40 cm 范围内布设张力计,在试验期内每隔 24 h 观测 1 次。拟合土壤水分特征曲线选择 Gardner 模型的形式 $S = a^{\theta} - b$ 进行拟合处理^[7],其中 S 为吸力值(MPa), θ 为体积含水率(%),a、b 为拟合参数。

表 2 试验树生长特征

Table 2 Growth characteristics of test trees			
编号	主干高度/cm	树高/m	冠幅/m×m
1	54.00	2.98	4.55×5.27
2	69.00	3.78	4.67×4.73
3	45.00	3.91	4.98×5.19

1.3.3 气象因子观测 试验期间运用自动气象站实时监测环境因子,与茎流系统同时安装,测定太阳辐射、空气温度、空气相对湿度、风向、风速。采集时间每 60 s 数据扫描 1 次,0.5 h 记录 1 次平均值,与热扩散式茎流仪(FLGS-TDP)保持同步。

1.3.4 边材面积测定 采用生长锥测定试验树体的边材宽度,计算树干边材面积,平均误差不超过 ±3%,这样的误差在测树工作中是允许的。

1.4 数据处理

数据采用 Excel2010 软件和 SPSS17.0 软件进行相关、回归等分析。

2 结果与分析

2.1 土壤水分含量对油橄榄树体茎流量关系

2.1.1 土壤水分特征曲线 土壤层中水分含量的变化主要是降水入渗、土壤蒸发、植物根系吸水造成的,植物根系有效程度最终取决于土壤水势的高低,而不是土壤含水量^[9]。土壤水分的特征曲线映射出土壤含水状态,当负压水头的吸力值接近 0 刻度时,土壤水分接近于饱和状态^[10]。可根据土壤水分土特征曲线查得基质势值,从而判断对植物从土壤中吸收水分的有效程度^[11]。本研究分析本园地土壤

含水量与土壤水势的相关数据,得到模型参数 a 和 b 的确切拟合值。最终获得土壤水势与土壤含水量的函数关系为 $y = 5.320 4x^{-1.733} (R^2 = 0.538 7)$ (图 1)。

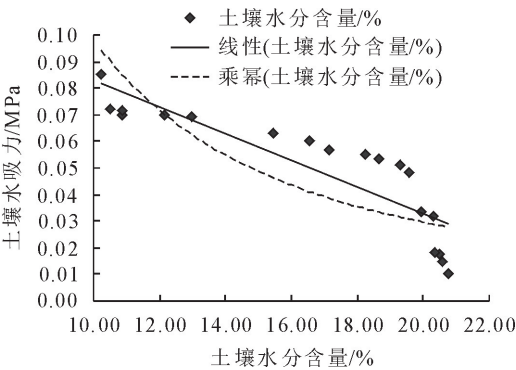


图 1 土壤水分特征曲线

Fig. 1 Soil moisture characteristic curve

2.1.2 树干茎流量日动态对土壤水分的响应 分析不同土壤含水率的变化规律与油橄榄树茎流量关

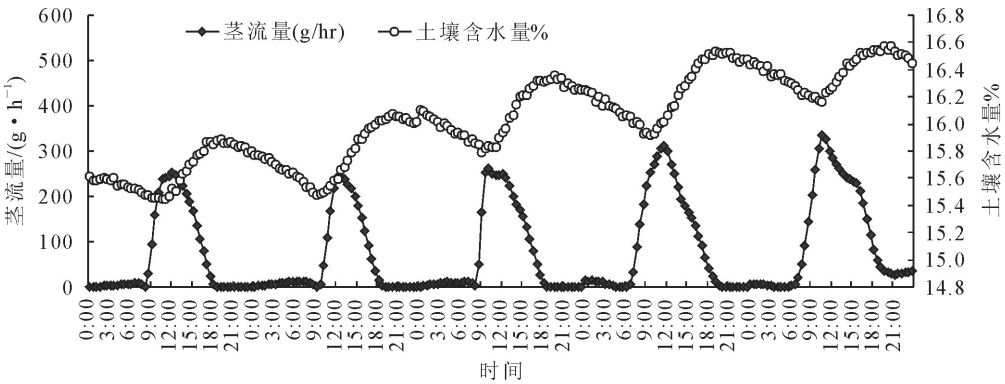


图 2 不同土壤含水量下油橄榄树茎流变化规律

Fig. 2 Variations of stem sap flow of the olive trees under different soil moisture contents

2.1.3 树干茎流量日动态对不同深度土壤水势的响应 土壤水势的变化直接影响油橄榄树茎流量的变化^[13],土壤水势在 0.01~0.05 MPa(图 3),油橄榄树茎流量峰值随着土壤吸力升高而增加,而在 0.05~0.07 MPa 则相反。分析 30 cm 处的土壤水势与油橄榄树茎流量峰值发现,30 cm 处的土壤水势与油橄榄树茎流量峰值呈现 3 次曲线关系, $R^2 = 0.60$ 。土壤水势在 0.01~0.06 MPa,油橄榄树茎流量峰值随着土壤吸力增大随之增大;但是土壤吸力 >0.06 MPa 后,茎流量峰值反而呈现下降的变化趋势。对土壤深度为 40 cm 的土壤水势与油橄榄树茎流量峰值进行分析,土壤水势在 0.04~0.052 MPa 内油橄榄树茎流量峰值随着土壤水势升高而增加,土壤水势 >0.052 MPa,树茎流量峰值随着土壤水势的升高而呈现下降的变化趋势^[8]。

2.2 油橄榄树体茎流速率日、月变化规律

油橄榄作为较抗旱树种,在各生长发育期如花芽分化、开花、坐果期,灌溉不及时直接影响开花坐

系发现,油橄榄树茎流量日变化呈现出夜晚较低、白天较高的单峰型变化曲线(图 2)。试验选取 4 月连续 5 d 的油橄榄树茎流量和土壤含水率的均值进行分析,当降雨量大于土壤蒸发量时产生负数,如 5 月等,而 6 月降雨量小于土壤蒸发量则产生正数,日照时数、有效积温与土壤蒸发量成正比^[12]。在每天的 00:00—07:30,油橄榄树茎流量维持在 0~41.74 g · h⁻¹ 之间的较低范围,而土壤含水量逐渐减少,从 15.61%到 15.52%。自 8:30 后随着时间的推移,油橄榄树茎流量开始增大,土壤含水量的变化趋势相反。在 9:00 之后油橄榄树茎流量开始快速增长,在 10:00—15:00,油橄榄树茎流量急剧增大,其中 14:00 油橄榄树茎流量为 258.87 g · h⁻¹,相比 8:30 增长了 257.18 g · h⁻¹,这一时段为 1 d 中树茎流量增长最快速期;15:30 时油橄榄树茎流量开始缓幅下降,直到 18:00 达到较小水平,维持在 24.87~79.72 g · h⁻¹ 间,土壤含水量开始增大到 16.06~16.53%。

果率。在日、月时间尺度上,用树干液流量表示蒸腾量是了解树体的实际水分状况的基础,许多研究表明,利用树体生理指标可以判别其缺水状况并应用于灌溉决策,但生理指标的测定容易受外界环境因素的影响,因此测定树体日、月时间尺度的液流量,为油橄榄树体精准灌溉提供了技术支持和保障。

2.2.1 树体茎流速率日变化规律 油橄榄树茎流速率昼夜变化幅度较大(图 4),22:30 至翌日 8:00 的树体茎流速率为 1 d 内最低状态,茎流速率平均为 $7.26 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。清晨茎流速率增加最快时刻出现在 9:00—9:30,12:00—13:30 树茎流速率达到峰值,随后出现小幅下降,约 6.59%。19:00 后开始大幅下降,直到 22:30 降到较低稳定的状态^[14]。

2.2.2 树体茎流速率月变化规律 油橄榄树体日均茎流速率在 9 月最大,8 月次之,但茎流速率峰值 8 月 $>$ 9 月,9 月树茎流速率开始增大的时刻比 8 月滞后 0.5 h。油橄榄树 7 月的茎流速率峰值最高。油橄榄树茎流日累计量呈现出 9 月 $>$ 8 月 $>$ 7 月 $>$

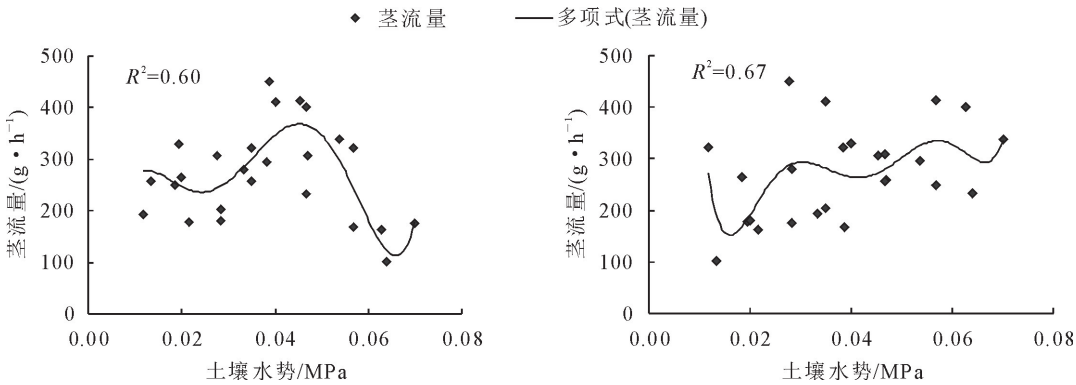


图3 土层 30~40 cm 处的土壤水势和油橄榄树体茎流量峰值的关系

Fig. 3 Relationship between soil water potential at the depth of 30~40 cm and peak stem sap flow of the olive trees

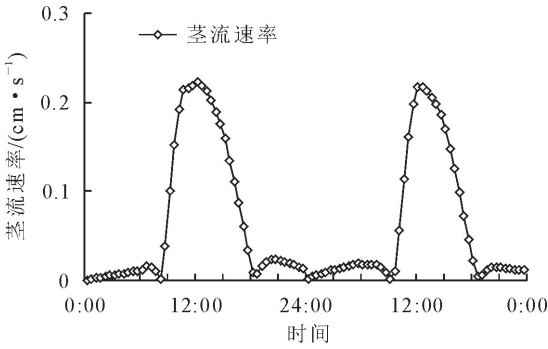


图4 油橄榄树茎流速率日变化曲线

Fig. 4 Diurnal variation curve of stem flow rate of the olive trees

表3 不同月份油橄榄树茎流速率

Table 3 Stem sap flow rate of the olive trees in different months

月份	日均茎流速率 /(cm·s ⁻¹)	茎流速率峰值 /(cm·s ⁻¹)
1月	2.15×10 ⁻³	0.18×10 ⁻³
2月	2.07×10 ⁻³	0.61×10 ⁻³
3月	4.55×10 ⁻³	2.75×10 ⁻³
4月	19.75×10 ⁻³	3.31×10 ⁻³
5月	15.87×10 ⁻³	3.77×10 ⁻³
6月	18.06×10 ⁻³	4.98×10 ⁻³
7月	23.76×10 ⁻³	5.56×10 ⁻³
8月	26.91×10 ⁻³	4.52×10 ⁻³
9月	29.28×10 ⁻³	4.46×10 ⁻³
10月	17.07×10 ⁻³	4.04×10 ⁻³
11月	3.60×10 ⁻³	3.97×10 ⁻³
12月	3.14×10 ⁻³	2.50×10 ⁻³

4月>6月>10月>5月>3月>11月>12月>1月>2月的规律(表3)。

2.3 油橄榄树茎流量与气象因子的响应关系

油橄榄树液流的变化与空气相对湿度、空气温度、太阳辐射强度、土壤温度以及风速这些气象因子息息相关^[13]。采用3次曲线拟合方程对油橄榄树茎流量与太阳辐射强度的关系进行分析(表4),太阳辐射强度为836.98 W·m⁻²油橄榄树茎流量达

到最大。经分析发现油橄榄树茎流量随空气相对湿度的增加而逐渐减小,树茎流量和空气温度关系分析采用的3次曲线拟合方程中 $R^2=0.314(n=748)$,并求得空气温度 $<10.04^{\circ}\text{C}$ 时,油橄榄树茎流量降到了最小值,空气温度在 $12.68^{\circ}\text{C}\sim 30.54^{\circ}\text{C}$ 时,树茎流量变化与空气温度成反比,当空气温度 $>31.00^{\circ}\text{C}$ 时,树茎流量小幅下降。土壤温度在 $12.51^{\circ}\text{C}\sim 25.06^{\circ}\text{C}$ 内,树茎流量随着土壤温度的升高而逐渐增大。当土壤温度 $>30.86^{\circ}\text{C}$ 时,树茎流量逐渐下降。树茎流量与风速二者相关性较低 $R^2=0.17(n=748)$,说明风速对油橄榄树茎流量的影响较小。

2.3.1 油橄榄树茎流量与气象因子相关关系 分析油橄榄树茎流量与环境因子的相关性发现(表5),太阳辐射强度与树茎流量关系最为密切,其次是空气温度,树茎流量与其呈极显著正相关,而空气相对湿度与油橄榄树茎流量呈现负相关,油橄榄树茎流量与风速相关性较低,风速与油橄榄树茎流量呈正相关。整个测量周期油橄榄树茎流量与环境因子的相关密切程度,大小顺序依次为:太阳辐射>空气温度>空气湿度(负相关)>土壤湿度>风速。由此可见,在不同的大气环境下,油橄榄树茎流量有所差异,但太阳辐射强度和空气温度是影响油橄榄树干液流的主导气象因子^[15]。

2.3.2 树茎流量与气象因子关系模型研究 采用逐步线性回归分析法对气象因子与油橄榄树茎流量进行分析,树茎流量对各气象因子变化的响应可以通过多元线性回归模型来实现^[8]。以太阳辐射强度 X_1 、空气相对湿度 X_2 、空气温度 X_3 、土壤温度 X_4 和风速 X_5 为自变量,油橄榄树茎流量 Y 作为因变量,建立多元线性回归模型 $R^2=0.854$,参见方程:

$$Y=2.53X_1-7.02X_2+17.62X_3+33.16X_4+30.52X_5-236.02 \quad (1)$$

由于空气湿度、风速及土壤温度与油橄榄树茎

流量相关性低于太阳辐射强度和空气温度,因此风速、空气相对湿度和土壤温度在逐步线性回归中被剔除。通过逐步线性回归分析法得到的方程(2) ($R^2=0.848$):

$$Y=2.45X_1+64.02X_2-926.6 \tag{2}$$

选择2016年4月16日和17日的气象数据作为测试数据,运用以上2个多元线性回归模型,模拟出油橄榄树茎流量的日变化曲线,方程(1)和方程(2)的模拟分别为模拟1和模拟2。从图5中可以看出,在6月4日12:00前,模拟1与模拟2的值与实测值基本吻合,在12:00—13:30模拟1与模拟2

的值比实测值略低,其中12:00差值较大,分别为 $232.82\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $193.03\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$;15:30—19:00模拟1与模拟2的值比实测值偏高,在19:00之后模拟1与模拟2的值比实测值略低,由于实测油橄榄树的土壤含水量变化对茎流量也会产生影响,所以预测曲线峰值略为滞后。对2种预测的值与实测值进行对比分析发现,模拟2的值与实测值差异较小。因此,将2016年5月至8月的气象参数带入方程(2),模拟计算出油橄榄树在5—8月时间段内的茎流量,5—8月时间段内模拟的油橄榄树日均茎流量与实测值相对误差分别为4.65%、8.2%、8.74%、8.02%^[8]。

表 4 气象因子与油橄榄树茎流量的拟合方程

Table 4 Fitting equation of meteorological factors and stem sap flow of the olive trees

模型	R^2	df	F 值	方程
太阳辐射强度	0.415	808	25.54	$Y=491.206+5.029x-0.012x_2+0.001x_3$
空气湿度	0.345	748	43.470	$Y=2362.32+5.16x-1.429x_2+0.012x_3$
空气温度	0.314	748	37.925	$Y=1231.92-262.9x+16.25x_2-0.22x_3$
土壤温度	0.72	748	3.501	$Y=160.76x-2.83x_2-0.0002x_3-1379.91$
风速	0.17	748	16.881	$Y=130.86+212.16x-68.79x_2-12.07x_3$

表 5 油橄榄树茎流量与气象因子的相关分析

Table 5 Correlation analysis of stem sap flow and meteorological factors of the olive trees

	茎流量	空气温度	土壤温度	空气湿度	太阳辐射	土壤湿度	风速
茎流量	1	0.544 **	0.162 *	−0.540	0.800 **	0.058	0.404 **
空气温度		1	0.792 **	−0.711 **	0.353 **	0.645 **	0.537 **
土壤温度			1	−0.422 **	−0.092	0.926 **	0.355 **
空气湿度				1	−0.394 **	−0.274 **	−0.499 **
太阳总辐射					1	−0.132 *	0.270 **
土壤湿度						1	0.192 **
风速							1

注: **表示 $P<0.01$ 。

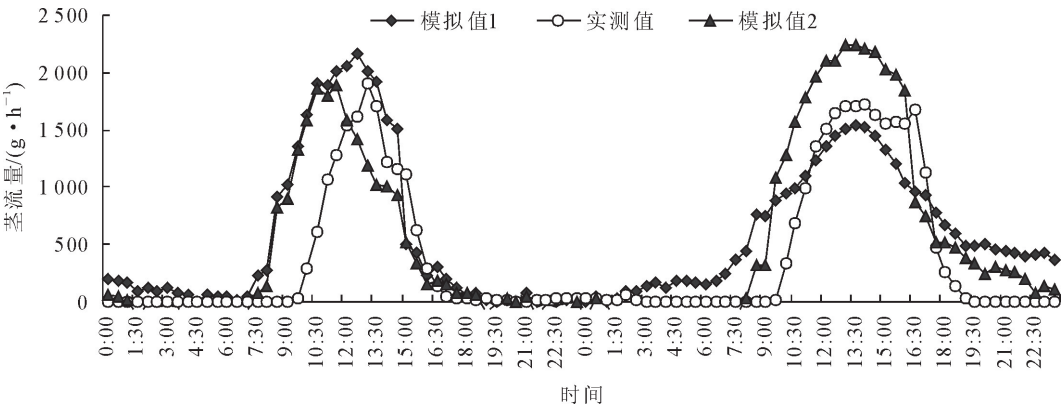


图 5 模拟油橄榄树茎流量与实测油橄榄树茎流量日变化曲线

Fig. 5 Daily variation curves of simulated stem sap flow and measured flow of the olive trees

3 结论与讨论

利用热扩散技术和小型自动气象站等对油橄榄茎流量、土壤水分和气象因子进行观测^[16],得到土壤含水量、土壤水势与油橄榄茎流之间的关系;同时

在气象因子与油橄榄茎流量的关系构建多元线性回归模型,对油橄榄茎流量进行模拟,并对模拟结果进行验证^[17]。研究发现,随着太阳辐射强度的增大,油橄榄树叶片气孔打开,树茎流量随着太阳辐射强度增大而呈现快速降低趋势,这是可能由于较高太

阳辐射强度使得空气温度同步升高,油橄榄树冠层温度也在升高,使得油橄榄树体开启保护机制^[18-19]。油橄榄树茎流量随着空气湿度的增加而逐渐减小,当空气湿度升高导致空气中的水汽压同时增大,使得叶片气孔腔的水汽梯度逐渐变小,树体茎流量出现下降现象^[20]。空气温度 29.78℃为临界值,温度高于临界值导致叶片气孔闭合同时树体茎流速率缓降。随着种植园土壤温度的变化而水势随之改变,油橄榄树根部吸水力随土壤温度升高而增强。当土壤温度>30.86℃时,油橄榄树根部吸收水分的能力会受到抑制^[21]。

试验通过回归分析建立了油橄榄树茎流量与气象因子的多元线性回归模型,可根据采集的气象数据推导出油橄榄树的潜在茎流量,为油橄榄树体水分需求提供理论依据,及时了解某一阶段油橄榄树耗水规律,在此基础上为油橄榄树及时合理地进行补灌。

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,2000.

[2] 赵梦炯. 油橄榄配方施肥技术的研究[D]. 兰州:兰州大学,2015.

[3] 岳广阳,张铜会,刘新平,等. 热技术方法测算树木茎流的发展及应用[J]. 林业科学,2006,42(8):102-108.

YUE G Y,ZHANG T H,LIU X P,*et al.* Development and application of thermal methods in measuring stem sap flow[J]. Scientia Silvae Sinicae,2006,42(8):102-108. (in Chinese)

[4] FERNANDEZ J E, GREEN S R, CASPARI H W, *et al.* The use of sap flow measurements for scheduling irrigation in olive, apple and Asian pear trees and in grapevines[J]. Plant and Soil,2008,305(1/2):91-104.

[5] MORENO F, FERNÁNDEZ J E, CLOTHIER B E, *et al.* Transpiration and root water uptake by olive trees[J]. Plant and soil,1996,184(1):85-96.

[6] 刘兴芬,朱建明. 不同水分胁迫对油橄榄生长指标的影响[J]. 中国林副特产,2010(3):8-11.

LIU X F,ZHU J M. The influence of different water stress on the growth index of *Olea europaea* [J]. Forest By-Product and Speciality in China,2010(3):8-11. (in Chinese)

[7] 王怡. 水分胁迫对 3 个油橄榄品种光合及生理特性的影响[D]. 雅安:四川农业大学,2012.

[8] 孙雨婷. 阿克苏地区枣树茎流变化特征及影响因子研究[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学,2013.

[9] 闫西清,汪淑筠. 陇南地区油橄榄栽培技术[J]. 甘肃林业科技,2005(1):50-53.

[10] 姜成英,苏瑾,陈炜青,等. 甘肃省白龙江河谷地带油橄榄园经营管理现状及存在问题[J]. 甘肃林业科技,2013,38(1):28-30.

[11] 黄晓波,高冰可. 土壤水分特征曲线研究综述[J]. 农技服务,

2016,33(4):22-23,27.

[12] 金鹰,王传宽,桑英. 三种温带树种树干储存水对蒸腾的贡献[J]. 植物生态学报,2011,35(12):1310-1317.

JIN Y,WANG C K,SANG Y. Contribution of stem water storage to daily transpiration of three temperate trees in northeastern China[J]. Chin. J. Plan. Ecolo.,2011,35(12):1310-1317. (in Chinese)

[13] 吴陆滢,赵从举,徐文娟,等. 幼龄桉树茎流特征及其对环境因子的响应[J]. 西北林学院学报,2015,30(5):46-52.

WU Z Y,ZHAO C J,XU W X,*et al.* Characteristics of the sap flow rate of the young *Eucalyptus* and its response to environmental factors[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(5):46-52. (in Chinese)

[14] 罗斐,杨承,宋街明. 烟地土壤蒸发与径流量研究[J]. 吉林农业:学术版,2010(8):96-97.

[15] 殷秀辉,程飞,张硕新. 油松树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 西北林学院学报,2011,26(5):24-28.

YIN X H,CHENG F,ZHANG S X. Variation of stem sap flow of *Pinus tabulaeformis* and its impact factors[J]. Journal of Northwest Forestry University,2011,26(5):24-28. (in Chinese)

[16] 冯永建,马长明,王彦辉,等. 华北落叶松人工林蒸腾特征及其与土壤水势的关系[J]. 中国水土保持科学,2010,8(1):93-98.

FENG Y J,MA C M,WANG Y H,*et al.* Du apeng relationship between the characteristics of transpiration of *Larix principirupprechtii* forest and soil water potential[J]. Science of Soil and Water Conservation,2010,8(1):93-98. (in Chinese)

[17] 赵梦炯,姜成英,吴文俊,等. Cu、Zn 制剂对油橄榄容器苗生长和根系的影响[J]. 林业科学研究,2017,30(4):693-699.

ZHAO M J,JIANG C Y,WU W J,*et al.* Effects of Cu and Zn preparations on the growth and root system of olive container seedlings[J]. Forest Research,2017,30(4):693-699. (in Chinese)

[18] WULLSCHLEGER S D, HANSON P J, TODD D E. Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow techniques[J]. Forest Ecology and Management,2001,143(1/3):205-213.

[19] 陈婧,马履一,段劼,等. 不同环境因子对黄连木 1 年生苗耗水规律的影响[J]. 西北林学院学报,2014,29(2):6-11.

CHEN J,MA L Y,DUAN J,*et al.* Effects of different environmental factors on water consumption of one-year-old *Pistaciachinensis* seedlings [J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(2):6-11. (in Chinese)

[20] 张艺,史宇,余新晓,等. 北京山区典型森林生态系统土壤水文特征研究[J]. 水土保持通报,2012,32(3):62-67.

ZHANG Y,SHI Y,YU X X,*et al.* Research on soil hydrological characteristics of typical forest ecosystem in Beijing mountainous area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2012,32(3):62-67. (in Chinese)

[21] 刘晶. 基于热环境的广州住区静态水景设计策略研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.