

引用格式:

刘栋, 岳伶俐, 吴友杰, 王辉. 长沙丘陵区油茶林地土壤蒸发的时空变化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(1): 63–70.

LIU D, YUE L L, WU Y J, WANG H. Spatiotemporal variation of soil evaporation in *Camellia oleifera* forest in hilly area of Changsha[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(1): 63–70.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 长沙丘陵区油茶林地土壤蒸发的时空变化

刘栋, 岳伶俐, 吴友杰\*, 王辉

(湖南农业大学水利与土木工程学院, 湖南 长沙 410128)

**摘要:** 2019年4—9月, 采用微型蒸渗仪测定长沙丘陵区油茶林地土壤蒸发量; 利用 ETgage 模拟蒸散仪监测林地局部蒸散量, 对比分析长沙丘陵地区土壤蒸发量的时空变化, 探讨土壤蒸发随气象因素和土壤含水量的变化关系。结果表明: 长沙丘陵区油茶林地土壤蒸发总量约为 192.15 mm, 日均为 1.05 mm; 不同空间位置上, 阳面、绝对阴面、相对阴面的土壤蒸发量依次减少, 平均值分别为 1.14、0.98 和 0.94 mm/d; 空气温度、地温、风速、太阳辐射强度、空气相对湿度对前期(4—5月)土壤蒸发量的影响依次减小, 空气温度、空气相对湿度、太阳辐射强度、地温、风速对中期(6—7月)土壤蒸发量的影响依次减小, 地温、太阳辐射强度、空气温度、风速、空气相对湿度对后期(8—9月)土壤蒸发量的影响依次减小; 前期土壤蒸发量与土壤含水量的相关性较小, 中期、后期土壤蒸发量与 5 cm 土层土壤含水量呈显著正相关, 土壤蒸发前缘主要发生于 0~5 cm 土层; 长沙丘陵区油茶林地局部蒸散量约为 2.12 mm/d, 局部油茶树蒸腾量约为 1.11 mm/d, ETgage 所测局部蒸散量与微型蒸渗仪测得的蒸发量变化趋势大体相同, 且两者呈显著正相关。

**关键词:** 油茶林地; 土壤蒸发量; 微型蒸渗仪; 模拟蒸散仪; 蒸散量; 蒸腾量; 长沙丘陵区

中图分类号: S794.4; S152.7<sup>+</sup>3 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2021)01-0063-08

### Spatiotemporal variation of soil evaporation in *Camellia oleifera* forest in hilly area of Changsha

LIU Dong, YUE Lingli, WU Youjie\*, WANG Hui

(College of Water Resources & Civil Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

**Abstract:** From April to September in 2019, the soil evaporation of *Camellia oleifera* forest in hilly area of Changsha was measured by micro lysimeter, and the local evapotranspiration of forest was monitored by ETgage simulated evapotranspiration sensor. The temporal and spatial changes of soil evaporation in hilly area of Changsha were compared and analyzed, and the relationship between soil evaporation and meteorological factors and soil water content was analyzed. The results showed that the total soil evaporation of *Camellia oleifera* forest in the hilly area of Changsha was about 192.15 mm, with a daily average of 1.05 mm; in different spatial positions, the soil evaporation on the sunny, absolute and relative shady surfaces decreased in turn, with an average of 1.14, 0.98 and 0.94 mm/d, respectively. In the early stage(April to May), the influence of air temperature, ground temperature, wind speed, solar radiation intensity and air relative humidity on soil evaporation decreased in turn; in the middle stage(June to July), the influence of air temperature, air relative humidity, solar radiation intensity, ground temperature and wind speed on soil evaporation decreased in turn; in the later stage(August to September), the influence of ground temperature, solar radiation intensity, air temperature, wind speed and air relative humidity on soil evaporation decreased in turn. The results showed that the correlation between soil evaporation and soil water content was small in the early stage, and there was a significant

收稿日期: 2020-10-02

修回日期: 2020-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809092); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ5257); 湖南农业大学青年科学基金项目(18QN20)

作者简介: 刘栋(1997—), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要从事农业工程与信息技术研究, liudong0622@126.com; \*通信作者, 吴友杰, 博士, 副教授, 主要从事作物高效用水及 SPAC 水分传输过程研究, wuyoujie@hunau.edu.cn

positive correlation between soil evaporation and soil water content in 5 cm soil layer in the middle and late stage, and the soil evaporation front mainly occurred in 0-5 cm soil layer; the local evapotranspiration of *Camellia oleifera* forest land in Changsha hilly area was about 2.12 mm/d, and the local transpiration of *Camellia oleifera* tree was about 1.11 mm/d. The trend of local evapotranspiration measured by ETgage was similar to that measured by micro lysimeter, with a significant positive correlation between the two methods.

**Keywords:** *Camellia oleifera* forest land; soil evaporation; micro lysimeter; simulated evapotranspiration meter; evapotranspiration; transpiration; Changsha hilly region

探究地区土壤蒸发时空变化规律对土壤-植物-大气连续体水分循环和水资源评价与管理具有重要的研究意义<sup>[1]</sup>。许多学者<sup>[2-3]</sup>探讨了土壤蒸发过程中影响因素与变量之间的关系,提出了针对不同土壤蒸发量的计算方法与模型应用于指导农业生产、科学灌溉等方面。研究<sup>[4-7]</sup>表明,利用微型蒸渗仪(ML)测定土壤蒸发是一种无扰动、简单有效的方法。马富亮等<sup>[8]</sup>在东北典型黑土区探究了微型蒸渗仪的适用性。EVETT等<sup>[9]</sup>研究了在裸地黏壤土上微型蒸发器是否封底对土壤蒸发的影响。ETgage模拟蒸散仪能够实时监测局部区域的蒸散量<sup>[10-12]</sup>,每发生0.254 mm的蒸散量记录1次,能够较好地对比分析土壤蒸发。

研究者们<sup>[13-14]</sup>对北方干旱区、半干旱区土壤蒸发规律展开了大量的系统研究,分析了土壤蒸发量与表层土壤含水量、气象因子和其他因素的关系,量化了土壤蒸发量,描述了其蒸发特征,并提出了适应该地区的参考模型。油茶具有许多工艺价值和药物价值,也是南方主要的经济作物<sup>[15-16]</sup>。由于长沙丘陵区油茶林地相比北方旱区水热资源更加丰富,管理较为粗放,同时,蒸散强烈、季节性干旱问题突出,研究土壤蒸发过程对于探明该区土壤水分平衡,指导科学灌溉和提高作物产量和品质具有重大意义。目前,针对长沙丘陵区经济果林土壤蒸发变化规律研究甚少。借用前人的研究成果或模型量化该地区土壤蒸发会产生较大误差,无法准确探究其规律。本研究中,利用ML、ECH<sub>2</sub>O土壤水分监测系统和ETgage模拟蒸散仪等实地定点监测长沙丘陵区油茶林地的土壤蒸发和林地环境因子,分析长沙丘陵地区油茶林地土壤蒸发的时空变化,探究土壤蒸发受气象因子的影响程度,探讨土壤含水量与土壤蒸发的关系,结合ETgage模拟蒸散仪验证土壤蒸发结果及其规律,旨在为制定合理的灌溉制度,减少和控制土壤蒸发的无效耗水,合理开发

利用水土资源和提高水资源利用率提供依据。

## 1 试验区概况

试验于2019年4—9月在国家油茶工程技术研究中心试验站进行。该站位于湖南省长沙市韶山南路658号(E113°06'45"、N28°11'45"),年平均气温17.2℃,年积温为5457℃,年均日照时数1529h,年均无霜期279d,年均降水量1361.6mm,4—6月为雨季,其降水量占全年的51%,属于典型亚热带季风性湿润气候。试验站内设有气象站,能进行气温、降水等气象因素的观测。试验区土壤为红壤,其土壤特性参数列于表1。

表1 试验区土壤的特性参数

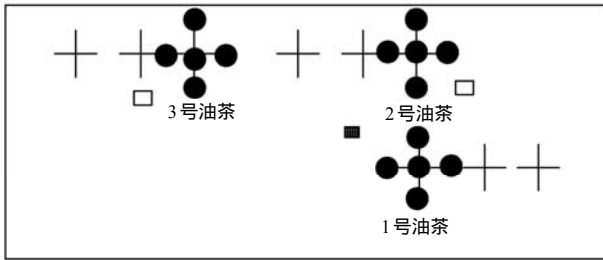
土层深度/cm	土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	饱和 含水量/%	田间 持水量/%
0~30	1.28	51	32
>30~60	1.49	41	33
>60~100	1.58	40	34

## 2 材料与方法

### 2.1 试验设计

试验采用随机分组方式布置,在同一坡度随机选择14~15棵生育状况相近且健康的油茶树划分为3个小区,在每个小区内选择1株生长良好的油茶树(均为生长4~5年),分别在其东、南、西、北、中5个方位埋设ML(由PVC管的内筒和外筒组成,内外筒直径分别为10、11cm,高度均为20cm),并在周围设置保护区。同时,在整个试验区布置2套土壤水分测定系统和1套ETgage模拟蒸散仪。布置方式如图1所示。根据植被覆盖面积、试验区地理位置及朝向,将树的东南方向划分为阳面,西北方向划分为相对阴面,中部方向划分为绝对阴面。根据油茶的春梢、夏梢和秋梢3个阶段,同时考虑耗水特征、生长状况及试验周期,将试验期划

分为 3 个阶段,前期(4—5 月)、中期(6—7 月)和后期(8—9 月)。



“十”示所选油茶;黑色实心圆示微型蒸渗仪;空心矩形示 ECH<sub>2</sub>O 土壤水分监测系统;网格矩形示 ETgage 模拟蒸散仪。

图 1 试验区的仪器布置

Fig.1 Layout of test area

## 2.2 测量指标与方法

### 2.2.1 土壤蒸发量测定

参照文献[14],利用不封底 ML(水分和热量可自由传输)进行土壤蒸发量测定。试验期内选择连续晴天,从 08:00 至 19:00 每隔 1 h 测量 1 次,记录日变化,用于计算蒸发量。同时,每天 19:00 测量 1 次,记录季节性变化。由于不可避免存在一定的人为和其他原因造成的数据误差,最终选择部分数据进行结果分析。

### 2.2.2 土壤含水量及地温测定

利用 ECH<sub>2</sub>O 土壤水分测定系统(Decagon)连续监测土壤含水量和温度。于深度 5、10、30 cm 的土层中埋设 ECH<sub>2</sub>O 传感器,分别测量各土层土壤含水量和土壤温度( $T_{soil}$ ),每 10 min 记录 1 次。采用取土烘干法对水分监测系统记录的数据进行校正。

### 2.2.3 试验区气象因子监测

通过试验站内气象站监测太阳辐射强度( $Q$ )、风速( $U$ )、空气相对湿度(RH)等;通过 ETgage 模拟蒸散仪监测记录空气温度( $T_{air}$ )。

### 2.2.4 试验区局部蒸散量监测

为了更好地分析对比土壤蒸发变化特征,利用单个 ETgage 模拟蒸散仪对局部油茶林地蒸散量( $ET_{local}$ )进行测定。 $ET_{local}$  与 ML 所测得的土壤蒸发量( $E$ )的差值即为油茶林地的蒸腾量( $T_{local}$ )。

## 2.3 数据处理和统计分析

运用 SPSS 25.0,选择单因素方差分析法、

Duncan 法检验、Pearson 相关性分析法和逐步回归分析等对数据进行统计分析。利用 Excel 2016 和 CAD 2007 绘图。

## 3 结果与分析

### 3.1 供试土壤蒸发量的时空变化

2019 年 4—9 月,长沙丘陵区油茶林土壤蒸发总量约为 192.15 mm,日均蒸发量为 1.05 mm。图 2 所示,试验区前期、中期、后期 3 个阶段土壤蒸发日变化曲线趋势大致相同,呈先增加后平缓回落再增加的双峰变化状态。前期,于 11:00 左右土壤蒸发量首次出现拐点,在 14:00 左右达到最大值,14:00—17:00 波动较小;中期,于 12:00 左右土壤蒸发量首次出现拐点,在 15:00 左右达到最大值;后期,于 12:00 左右达到最大值,缓慢回落后增长,在 14:00 左右再次出现拐点。3 个阶段土壤蒸发主要集中在 12:00—15:00,土壤蒸发速率均在 13:00 左右出现下降,这是由于进入蒸发消滞阶段或滞缓阶段。该阶段土壤表面相当干燥,蒸发基本不在土壤表面进行,此时土壤热通量发生作用,土壤中水分汽化,通过分子扩散作用由干燥表层逸出大气,一般速度极其缓慢。

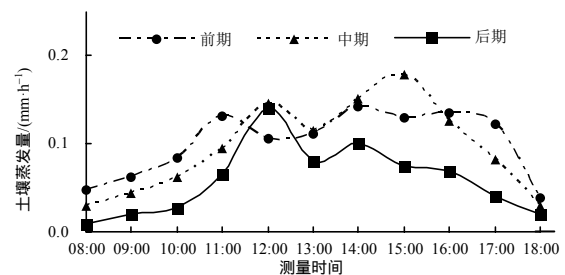


图 2 不同阶段长沙丘陵区油茶林土壤蒸发量的日变化

Fig.2 Diurnal variation of soil evaporation of *Camellia oleifera* forest at different stages in hilly area of Changsha

表 2 所示,前期、中期、后期的平均土壤蒸发量为 1.11、1.15、0.89 mm/d。不同阶段相对阴面、绝对阴面、阳面土壤蒸发量季节性变化趋势大致相同;阳面、绝对阴面、相对阴面的蒸发总量依次减少,平均值分别为 1.14、0.98、0.94 mm/d。绝对阴面的蒸发总量大于相对阴面,可能是绝对阴面的土壤含水量大于相对阴面的土壤含水量所致。阳面土壤蒸发量的最大值与最小值分别出现在中期和后期,6 月 14 日达到最大值,为 2.48 mm/d,再呈波动

降低,9月17日降到最小值,为0.20 mm/d;相对阴面和绝对阴面土壤蒸发量的最大值与最小值均集中在后期,均在7—9月呈现波动上升,9月8日达到最大值,分别为2.11、1.92 mm/d,再逐步降低,最小值分别出现在9月17日和9月24日,分别为0.17、0.23 mm/d。相对阴面和绝对阴面的土壤蒸发量差异无统计学意义( $P>0.05$ ),这是由于这2个空间位置蒸发主要受到土壤含水量的影响。试验期属于雨季,降水量较大,每次降水后,表层土壤含水量增加,

降雨事件的频繁发生,使得上层土壤中的水分完全能够满足土壤蒸发的需要,下层土壤中的水分不必补给上层土壤,土壤含水量相近,导致相对阴面和绝对阴面土壤蒸发量差异较小。中期,阳面与相对阴面和绝对阴面的蒸发量差异有统计学意义( $P<0.01$ )。这是由于中期受湿度影响较大所致,阳面相比绝对阴面和相对阴面无植被遮盖,辐照面积大,温度较高,导致阳面空气相对湿度较低。

表2 不同空间位置长沙丘陵区油茶林的土壤蒸发量

Table 2 Soil evaporation of *Camellia oleifera* forest at different spatial locations in hilly area of Changsha

mm/d

空间位置	前期土壤蒸发量						前期 均值	中期土壤蒸发量						
	04-30	05-01	05-02	05-20	05-24	05-27		06-14	06-18	06-24	06-25	06-26	06-27	06-28
阳面	1.58	1.15	1.38	0.85	0.64	1.92	1.25	2.48	1.95	1.12	1.68	1.84	1.85	0.76
相对阴面	1.08	0.78	1.02	0.83	0.48	1.51	0.95	1.44	0.82	0.45	0.87	1.00	1.00	0.66
绝对阴面	1.07	0.85	0.79	1.56	0.90	1.57	1.12	1.36	0.88	0.74	0.88	1.04	1.07	0.88
总均值	1.28	0.94	1.12	0.98	0.63	1.69	1.11	1.84	1.29	0.77	1.20	1.34	1.35	0.74

空间位置	中期土壤蒸发量						中期 均值	后期土壤蒸发量						
	06-30	07-01	07-02	07-19	07-20	07-21		07-22	07-23	08-30	08-31	09-05	09-06	09-07
阳面	1.14	1.47	1.58	1.96	0.26	1.19	1.47	1.92	1.51	1.60	0.45	1.22	1.23	1.17
相对阴面	0.63	1.06	1.08	1.36	0.28	0.75	0.96	1.28	0.91	1.45	0.59	1.33	1.41	1.32
绝对阴面	0.60	1.10	0.93	1.31	0.48	0.78	0.97	1.15	0.94	1.44	0.41	1.29	1.35	1.23
总均值	0.83	1.23	1.25	1.59	0.27	0.93	1.17	1.51	1.15	1.51	0.50	1.28	1.32	1.24

空间位置	后期土壤蒸发量												后期 均值	
	09-08	09-11	09-14	09-15	09-16	09-17	09-18	09-19	09-20	09-21	09-23	09-24		09-25
阳面	1.70	1.12	0.64	0.60	0.48	0.20	0.32	0.54	0.40	1.00	0.47	0.26	0.74	0.79
相对阴面	2.11	1.22	1.10	0.97	0.62	0.17	0.30	0.54	0.57	1.54	0.64	0.49	0.79	0.95
绝对阴面	1.92	1.13	0.99	1.04	0.77	0.54	0.50	0.96	0.88	1.52	0.69	0.23	0.47	0.96
总均值	1.91	1.16	0.90	0.84	0.59	0.30	0.35	0.62	0.57	1.32	0.58	0.34	0.70	0.89

总均值为15个ML测定值的平均值。

### 3.2 供试土壤蒸发量随气象因子和土壤含水量的变化

#### 3.2.1 土壤蒸发随气象因子的变化

由表3可知,总体上,3个阶段气象因子变化较为一致,风速日变化波动较大。前期、中期、后期08:00—18:00的 $Q$ 平均值分别为0.35、0.42、0.24 kW/m<sup>2</sup>,最大值分别于12:00、14:00、12:00左右出现; $T_{air}$ 平均值为24.08、31.96、34.27℃,最大值分别于13:00、15:00、16:00左右出现;RH最小值与

$T_{air}$ 最大值同时出现,呈先降后升的变化,RH平均值为57.76%、59.28%、56.86%; $U$ 平均值为0.09、0.19、0.25 m/s,在10:00—14:00波动最为剧烈; $T_{soil}$ 平均值为19.33、25.82、28.61℃,除前期的17:00、18:00外, $T_{soil}$ 均随时间从早到晚逐渐增加。地温峰值与蒸发峰值不同期,地温从08:00开始逐渐升高,土壤蒸发量同步上升,蒸发量达到峰值后,地温仍然持续增长,但土壤蒸发量进入递减阶段,这是由于土壤蒸发不断消耗水分,表层土壤含水量不断减小所致。

表 3 不同阶段长沙丘陵区油茶林地主要气象因子的日变化

Table 3 Diurnal variation of main meteorological factors in different stages of *Camellia oleifera* forest in hilly area of Changsha

阶段	时间	$Q/(kW \cdot m^{-2})$	$T_{air}/^{\circ}C$	RH/%	$U/(m \cdot s^{-1})$	$T_{soil}/^{\circ}C$	
前期	08:00	0.14	18.80	79.36	0.04	18.99	
	09:00	0.26	20.80	68.74	0.05	19.02	
	10:00	0.38	22.35	61.23	0.06	19.05	
	11:00	0.50	24.02	55.32	0.06	19.10	
	12:00	0.61	25.54	50.97	0.11	19.22	
	13:00	0.56	26.24	49.93	0.08	19.35	
	14:00	0.46	25.85	52.92	0.13	19.49	
	15:00	0.44	26.17	52.79	0.07	19.61	
	16:00	0.33	26.03	51.92	0.15	19.75	
	17:00	0.15	25.31	54.27	0.15	19.68	
	18:00	0.06	23.78	57.96	0.17	19.45	
	中期	08:00	0.18	26.80	80.08	0.02	25.38
		09:00	0.37	29.24	68.39	0.20	25.38
		10:00	0.50	31.41	61.56	0.22	25.42
		11:00	0.47	31.92	59.61	0.14	25.50
		12:00	0.59	32.40	58.23	0.19	25.60
		13:00	0.52	32.27	58.97	0.17	25.74
		14:00	0.76	33.97	51.55	0.36	25.90
15:00		0.57	34.48	50.35	0.35	26.08	
16:00		0.34	33.69	51.81	0.18	26.26	
17:00		0.25	33.47	52.43	0.19	26.34	
18:00		0.10	31.88	59.11	0.13	26.40	
后期		08:00	0.12	29.29	76.53	0.13	28.11
		09:00	0.21	31.17	68.68	0.13	28.11
		10:00	0.30	33.22	61.58	0.13	28.13
		11:00	0.34	34.05	58.00	0.38	28.23
		12:00	0.38	35.39	54.28	0.25	28.40
		13:00	0.32	35.46	53.30	0.25	28.59
		14:00	0.31	35.94	51.13	0.38	28.77
	15:00	0.28	36.18	50.45	0.38	28.93	
	16:00	0.24	36.68	49.28	0.50	29.05	
	17:00	0.14	35.46	49.50	0.25	29.15	
	18:00	0.06	34.13	52.73	0.00	29.20	

以图 2 和表 3 中的土壤蒸发量和气象因子数据作相关性分析,其相关系数列于表 4。3 个时期的土壤蒸发量均与  $T_{air}$  呈极显著正相关;前期、中期土壤蒸发量与 RH 呈极显著负相关;中期、后期土壤蒸发量都与  $Q$  呈显著正相关,与  $U$  呈极显著正相关;前期土壤蒸发量与  $T_{soil}$  呈显著正相关。当环境条件差异不大时,太阳辐射强度大,随之蒸发量也大。当空气相对湿度越大时,空气中水蒸气的实际压强越接近同温度下水的饱和气压,则土壤表层的水分蒸发越慢。空气温度对蒸发有很大影响,空气温度是大气中饱和水汽含量和水汽扩散的决定性因素。地温对于土壤水分的活跃程度具有一定的影响。中期、后期地区风速加大,由于风速连续不断的扰动靠近表层土壤的空气,将含水量接近饱和

的空气带离,代之以干燥的空气,使得土壤蒸发的过程加速。风速越大,则蒸发作用越强烈。

表 4 长沙丘陵区油茶林的土壤蒸发量与气象因素的相关性

Table 4 Correlation between soil evaporation and meteorological factors of *Camellia oleifera* forest in hilly area of Changsha

蒸发量	相关系数				
	$Q$	$T_{air}$	$U$	RH	$T_{soil}$
前期蒸发量	0.49	0.90**	0.48	-0.88**	0.72*
中期蒸发量	0.65*	0.84**	0.72**	-0.81**	0.44
后期蒸发量	0.75*	0.68**	0.81**	-0.54	0.15

“\*”“\*\*”分别示  $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 。

以图 2 和表 3 中的土壤蒸发量和气象因子数据作逐步回归分析,其多元逐步线性回归方程列于表 5。前期、中期、后期多元回归方程的决定系数分别为 0.82、0.89 和 0.91,可见所选气象因子对中、后期的土壤蒸发量解释程度较高。根据回归方程各气象因子的标准化系数(Beta 值)绝对值可知  $T_{air}$ (0.850)、 $T_{soil}$ (0.110)、 $U$ (0.080)、 $Q$ (0.012)、RH(0.006)对前期土壤蒸发量的影响程度依次减小; $T_{air}$ (3.191)、RH(3.018)、 $Q$ (0.623)、 $T_{soil}$ (0.574)、 $U$ (0.032)对中期土壤蒸发量的影响程度依次减小; $T_{soil}$ (2.788)、 $Q$ (2.596)、 $T_{air}$ (2.410)、 $U$ (0.333)、RH(0.138)对后期土壤蒸发量的影响程度依次减小。

表 5 长沙丘陵区油茶林的土壤蒸发量与气象因素的多元逐步线性回归方程

Table 5 Multiple stepwise linear regression equation of soil evaporation and meteorological factors of *Camellia oleifera* forest in hilly area of Changsha

阶段	多元回归方程	决定系数
前期	$E_{early} = -0.410 + 0.002Q + 0.011T_{air} - 0.002RH - 0.054U + 0.014T_{soil}$	0.82
中期	$E_{mid} = -4.782 + 0.149Q + 0.067T_{air} + 0.016RH - 0.016U + 0.067T_{soil}$	0.89*
后期	$E_{later} = -8.059 + 1.333Q - 0.055T_{air} + 0.001RH + 0.117U + 0.336T_{soil}$	0.91*

$E_{early}$ 、 $E_{mid}$ 、 $E_{later}$  分别为前期、中期、后期蒸发量;“\*”示  $P<0.05$ 。

### 3.2.2 土壤蒸发量随土壤含水量的变化

从表 6 可知,各阶段 5、10 cm 土层土壤含水量差异无统计学意义,均显著低于 30 cm 土层土壤含水量( $P<0.05$ );前期土壤蒸发量与土壤含水量的相关性较小,中期、后期土壤蒸发量与 5 cm 土层土壤含水量呈显著正相关。表明中期、后期土壤蒸

发量与表层土壤含水量关系较密切,亦说明土壤蒸发前线主要发生于0~5 cm土层。土壤含水量是土壤水分蒸发的来源,当土壤孔隙被水分充盈时,土壤供水充足,土壤水分以毛细管水的形式运动,土壤蒸发量大并且具有稳定性;当蒸发耗水使得土壤含水量小于毛细管破裂含水量时,土壤水分以薄膜水的形式运动,导致土壤蒸发量逐渐减少。

表6 长沙丘陵区油茶林的土壤含水量及土壤蒸发量与含水量的相关性

Table 6 Parameters of soil evaporation, soil water content and soil depth of *Camellia oleifera* forest in hilly area of Changsha

阶段	土层深度/cm	土壤含水量/%	土壤蒸发量与含水量的相关系数
前期	5	(32.15±6.24)b	0.18
	10	(33.43±3.51)b	0.31
	30	(41.97±4.22)a	0.06
中期	5	(30.75±1.92)b	0.95*
	10	(31.40±1.53)b	0.62
	30	(42.67±4.01)a	0.60
后期	5	(24.50±2.97)b	0.96*
	10	(24.02±3.70)b	0.92
	30	(29.62±1.18)a	0.82

同阶段内不同字母示不同土层深度间差异有统计学意义( $P<0.05$ );“\*”示 $P<0.05$ 。

### 3.3 $ET_{local}$ 与 $E$ 对比分析结果

2019年4—9月,长沙丘陵区油茶林地  $ET_{gauge}$  模拟蒸散仪所测得的  $ET_{local}$  约为 381.6 mm,日均值约为 2.12 mm,  $T_{local}$  日均值约为 1.11 mm。从图3可以看出,  $ET_{local}$  与  $E$  变化趋势大体相同。随着日出和气温升高,蒸腾速率上升,  $ET_{local}$  从 08:00 上升至 11:00, 达到第一个拐点,说明油茶林在这一

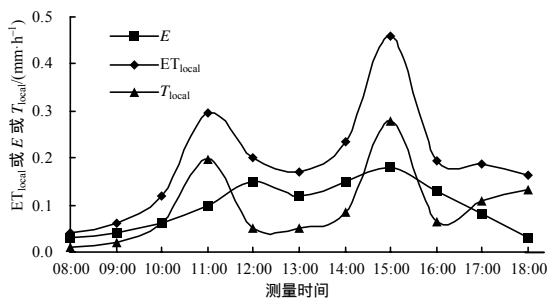


图3 长沙丘陵区油茶林的局部蒸散量( $ET_{local}$ )和蒸腾量( $T_{local}$ )与土壤蒸发量( $E$ )的日变化

Fig.3 Diurnal variation of local evapotranspiration( $ET_{local}$ ), transpiration( $T_{local}$ ) and soil evaporation( $E$ ) of *Camellia oleifera* forest in hilly area of Changsha

时段土壤蒸发与植物蒸腾旺盛;11:00 之后缓慢下降,13:00 出现最低值,这是由于土壤蒸发进入消滞阶段,并且此时气温高、空气饱和水汽压差大,导致油茶树气孔大量关闭,蒸腾作用减弱进入“午休”阶段;15:00 达到最大值;15:00 后,随着太阳净辐射的减弱、气温下降、空气饱和水汽压差的减小,  $ET_{local}$  逐渐减小。相关性分析表明,  $ET_{local}$  与  $E$  呈显著正相关(相关系数为 0.61,  $P<0.05$ )。

$T_{local}$  与  $ET_{local}$  波动趋势大体一致,但 17:00 后有差异。  $T_{local}$  日变化总的趋势是清晨较小,随着日出和气温升高,11:00 达到第一个拐点,再急剧下降到 12:00 后蒸腾作用进入“午休”阶段,  $T_{local}$  降到最低,14:00 后急剧上升到 15:00 基本达到峰值,再急剧下降到 16:00 后又缓慢回升,18:00 左右,太阳净辐射值较小(约为  $0.053 \text{ kW/m}^2$ ),但油茶林依然存在一定量的蒸腾作用。

## 4 结论与讨论

土壤蒸发存在 3 个阶段,即初期固定蒸发速率阶段、蒸发速率递减阶段和蒸发消滞阶段(或滞缓阶段)<sup>[17]</sup>。消滞阶段由于土壤表层相当干燥,而导致土壤中的液态水已经不能输送至土壤表面,使其基本无法进行蒸发。吴友杰等<sup>[14]</sup>研究发现,在西北干旱地区覆膜条件下,土壤蒸发量日均值为 1.02 mm/d。陈媛媛等<sup>[18]</sup>认为,湖南低山丘陵区杉木林土壤水分蒸发最大发生在 09:00—11:00。本研究中,2019年4—9月,长沙丘陵区油茶林土壤蒸发总量约为 192.15 mm,日均为 1.05 mm/d;前期、中期、后期的平均土壤日蒸发量为 1.11、1.15、0.89 mm/d;3 个阶段土壤蒸发主要集中在 12:00—15:00,土壤蒸发均在 13:00 左右出现平缓下降。

许多学者<sup>[19-20]</sup>认为,不同的坡向位置影响着地表接收的太阳辐射量、土壤含水量及植被覆盖程度,进而导致阳面、相对阴面和绝对阴面蒸发量的不同。常博等<sup>[21]</sup>发现,对于草地蒸散量而言,土壤含水量是导致在不同坡面上蒸散量不同的主要因素。土壤水分是影响蒸发的主导因素,土壤含水量作为土壤蒸发量的直接补给源,其值越大,则土壤蒸发量就越大<sup>[22]</sup>。本研究中,在不同空间位置上,相对阴面和绝对阴面的土壤蒸发量差异无统计学意义,可能与土壤含水量存在一定关系,同时在中

期阳面与相对阴面、绝对阴面的蒸发量差异有统计学意义,考虑主要受到湿度及该时期降水量较大等的影响。总体上,阳面、绝对阴面、相对阴面的土壤蒸发量依次减少,平均值分别为 1.14、0.98 和 0.94 mm/d,主要受不同坡向导致的空气流动、温度、相对湿度及土壤含水量等因素的影响。

前人<sup>[23-24]</sup>研究认为,地表 0~20 cm 的土层为土壤蒸发强烈的土层。戴军杰等<sup>[25]</sup>认为,红壤坡地土壤水分变化主要发生在 0~30 cm 土层。本研究中,前期土壤蒸发量与土壤含水量相关性较小,中期、后期土壤蒸发量与 5 cm 土层土壤含水量呈显著正相关,土壤蒸发前缘主要发生于 0~5 cm 土层。该结论与 WU 等<sup>[23]</sup>利用稳定同位素研究西北地区农田土壤蒸发的结论相似。

土壤蒸发受太阳辐射、温度、地温、湿度和风速等的影响<sup>[17,26]</sup>。吴友杰等<sup>[14]</sup>认为,影响土壤蒸发最主要因素是土壤含水量和太阳辐射;刘浩等<sup>[27]</sup>研究表明,土壤蒸发与太阳辐射、气温和相对湿度等主要气象因子均呈现良好的指数关系。本研究中,前期,空气温度、地温、风速、太阳辐射强度、空气相对湿度对土壤蒸发量的影响依次减小;中期,空气温度、空气相对湿度、太阳总辐射强度、地温、风速对土壤蒸发量的影响依次减小;后期,地温、太阳辐射强度、空气温度、风速、空气相对湿度对土壤蒸发量的影响依次减小。

长沙丘陵区油茶林地局部蒸散量约为 2.12 mm/d,局部蒸腾量约为 1.11 mm/d。ETgag 所测局部蒸散量与 ML 测得的蒸发量变化趋势大体相同,且两者呈显著正相关。蒸腾量与蒸散量波动趋势也大体一致,但 17:00 后有差异。

#### 参考文献:

- [1] 赵娜娜,刘钰,蔡甲冰,等.夏玉米裸间蒸发的田间试验与模拟[J].农业工程学报,2012,28(21):66-73. ZHAO N N, LIU Y, CAI J B, et al. Research on soil evaporation of summer maize by field measurement and model simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(21): 66-73.
- [2] PLAUBORG F. Evaporation from bare soil in a temperate humid climate-measurement using micro-lysimeters and time domain reflectometry[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 76(1): 1-17.
- [3] YANG D N, LI S E, KANG S Z, et al. Effect of drip irrigation on wheat evapotranspiration, soil evaporation and transpiration in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2020, 232: 106001.
- [4] BOAST C W, ROBERTSON T M. A "micro-lysimeter" method for determining evaporation from bare soil: description and laboratory evaluation 1[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(4): 689-696.
- [5] 鲍忠文,杜虎林,史学斌,等.用微型蒸渗仪测验根灌节水潜力的田间试验研究[J].中国沙漠,2013,33(1): 160-166. BAO Z W, DU H L, SHI X B, et al. A comparison between the rhizospheric irrigation and the drip irrigation by monitoring the soil evaporation with micro-lysimeters [J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(1): 160-166.
- [6] 高晓飞,史海珍,杨洁,等.微型蒸发器长度影响土壤蒸发测量值的试验研究[J].灌溉排水学报,2010,29(4): 11-15. GAO X F, SHI H Z, YANG J, et al. Effects of stainless steel micro-lysimeter lengths on soil evaporation measurement[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(4): 11-15.
- [7] 刘春伟,邱让建,孙亚卿,等.不同材料和尺寸微型蒸渗仪测定土壤蒸发量[J].中国农村水利水电,2018(6): 1-5. LIU C W, QIU R J, SUN Y Q, et al. The evaluation of soil evaporation by the micro-lysimeter with different material and size in maize and winter wheat field[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(6): 1-5.
- [8] 马富亮,朱小立,符素华,等.封底与不封底微型蒸发器测定东北典型黑土区土壤蒸发量差异性研究[J].灌溉排水学报,2016,35(12): 7-11. MA F L, ZHU X L, FU S H, et al. A comparative study of soil evaporativeness measured with the sealed and not sealed micro-lysimeter placed in the typical black soil area of northeast China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(12): 7-11.
- [9] EVETT S R, WARRICK A W, MATTHIAS A D. Wall material and capping effects on microlysimeter temperatures and evaporation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(2): 329-336.
- [10] STRAATMANN Z, STEVENS G, VORIES E, et al. Measuring short-crop reference evapotranspiration in a humid region using electronic atmometers[J]. Agricultural Water Management, 2018, 195: 180-186.
- [11] 李男,王峰,韩其晟,等.基于 ETgag 法对南疆膜下滴灌棉花灌溉制度优化的研究[J].塔里木大学学报,2020,32(2): 90-96. LI N, WANG F, HAN Q S, et al. Study on optimization of irrigation system of cotton field under film drip irrigation in southern Xinjiang based on ETgag method[J]. Journal of Tarim University, 2020, 32(2): 90-96.
- [12] 王峰,崔永生,李男,等.基于 ETgag 蒸散量的膜下滴灌棉田适宜灌水模式研究[J].塔里木大学学报,

- 2018, 30(3): 1-8.  
WANG F, CUI Y S, LI N, et al. Study on optimal film mulched drip irrigation model of cotton based on ETgage evapotranspiration measurement[J]. Journal of Tarim University, 2018, 30(3): 1-8.
- [13] 高壮壮, 刘海军, 张智郡, 等. 不同质地条件下土壤表层温度与土壤蒸发量的关系研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 42-48.  
GAO Z Z, LIU H J, ZHANG Z J, et al. Study on relation between soil surface temperature and soil relative evaporation of different soil texture[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(9): 42-48.
- [14] 吴友杰, 杜太生. 西北干旱区农田土壤蒸发量及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 110-116.  
WU Y J, DU T S. Evaporation and its influencing factors in farmland soil in the arid region of Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(12): 110-116.
- [15] 郭华, 周建平, 廖晓燕. 油茶籽的细胞形态和成分及水酶法提取工艺[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2007, 33(1): 83-86.  
GUO H, ZHOU J P, LIAO X Y. Technique of aqueous-enzyme method and the morphological structure and main components of cotyledon cells of *Camellia oleifera* Abel. seed[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2007, 33(1): 83-86.
- [16] 马力, 陈永忠, 彭邵锋, 等. 利用水作溶剂提取油茶粕中茶皂素的工艺研究[J]. 湖南农业大学学报, 2013, 39(S1): 91-93.  
MA L, CHEN Y Z, PENG S F, et al. Study on extraction of tea saponin from *Camellia oleifera* cake using water as extraction solven[J]. Journal of Hunan Agricultural University, 2013, 39(S1): 91-93.
- [17] 王政友. 土壤水分蒸发的影响因素分析[J]. 山西水利, 2003, 19(2): 26-27.  
WANG Z Y. Analyse of influence factors of soil evaporation[J]. Shanxi Water Resources, 2003, 19(2): 26-27.
- [18] 陈媛媛, 闫文德, 阳柏苏, 等. 杉木人工林地土壤水分蒸发的时空变化特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(7): 125-130.  
CHEN Y Y, YAN W D, YANG B S, et al. Spatial and temporal variation characteristics of soil moisture evaporation in Chinese fir plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(7): 125-130.
- [19] 刘佩贵, 夏艳, 尚熲廷. 不同质地裸土潜水蒸发估算方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 148-153.  
LIU P G, XIA Y, SHANG M T. Estimation methods of phreatic evaporation for different textures in bare soil area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(1): 148-153.
- [20] 石辉, 刘世荣. 森林土壤大孔隙特征及其生态水文学意义[J]. 山地学报, 2005, 23(5): 23-29.  
SHI H, LIU S R. The macroporosity properties of forest soil and its eco-hydrological significance[J]. Journal of Mountain Research, 2005, 23(5): 23-29.
- [21] 常博, 刘贤德, 王顺利, 等. 祁连山不同坡向草地蒸散量及其影响因子的分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(4): 90-95.  
CHANG B, LIU X D, WANG S L, et al. Study on grassland evapotranspiration at different slope orientation and its impact factors in Qilian Mountains[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 34(4): 90-95.
- [22] 穆家伟, 查天山, 贾昕, 等. 毛乌素沙地典型沙生灌木对土壤蒸发的影响[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(12): 39-45.  
MU J W, ZHA T S, JIA X, et al. Influence of typical sandy shrubs on soil evaporation in Mu Us Sandland, northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(12): 39-45.
- [23] WU Y J, DU T S, DING R S, et al. An isotope method to quantify soil evaporation and evaluate water vapor movement under plastic film mulch[J]. Agricultural Water Management, 2017, 184: 59-66.
- [24] 段浩, 赵红莉, 蒋云钟. 遥感 Penman-Monteith 模型中土壤含水量与土壤蒸发的关系[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(3): 31-47.  
DUAN H, ZHAO H L, JIANG Y Z. Assessment the relationship between soil evaporation and soil moisture using Remote Sensing Penman-Monteith model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(3): 31-47.
- [25] 戴军杰, 章新平, 吕殿青, 等. 南方红壤丘陵区樟树林土壤水分动态变化[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 123-131.  
DAI J J, ZHANG X P, LYU D Q, et al. Dynamics of soil water in *Cinnamomum camphora* forest in the red soil hilly region of South China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 123-131.
- [26] 段华平, 谢小立, 王凯荣. 红壤坡地茶园蒸腾及其影响因素研究[J]. 农村生态环境, 2002, 18(2): 19-23.  
DUAN H P, XIE X L, WANG K R. Transpiration of tea plants on red soil slopes and its influencing factors[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2002, 18(2): 19-23.
- [27] 刘浩, 孙景生, 段爱旺, 等. 日光温室萝卜棵间土壤蒸发规律试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 176-180.  
LIU H, SUN J S, DUAN A W, et al. Experiment on soil evaporation of radish in sunlight greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(1): 176-180.

责任编辑: 邹慧玲  
英文编辑: 柳正