

亚热带季风区樟树蒸腾与气象因子之间的时滞效应

夏银华¹, 章新平^{1,2}, 戴军杰¹, 王锐¹, 罗紫东¹

(1.湖南师范大学地理科学学院,长沙 410081;2.湖南师范大学地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室,长沙 410081)

摘要:以亚热带地区常绿阔叶树种樟树(*Cinnamomum camphora*)为研究对象,利用 Grainer 热扩散式探针技术,于 2019 年 6 月至 2020 年 10 月测定了樟树小时尺度的蒸腾速率,并同步监测了气象因子和土壤含水量,分析了樟树蒸腾在日间不同时段与主要气象因子的关系、时滞的变化特征以及时滞校正对蒸腾预测模型的影响。结果表明:蒸腾在生长季(6—10 月)与太阳辐射的时滞回环呈逆时针,与饱和水汽压差和气温的时滞回环呈顺时针。利用 Gauss 方程拟合发现,2019 年与 2020 年生长季蒸腾平均滞后于太阳辐射 0.94 h,提前于饱和水汽压差和气温 2.60,2.61 h。这种时滞效应是蒸腾在日内不同阶段对气象因子的响应不同导致的,蒸腾在上升阶段(7:00—11:00)对太阳辐射变化的响应较下降阶段(17:00—21:00)敏感,而在上升阶段蒸腾对饱和水汽压差和气温变化的响应不如下降阶段敏感。蒸腾与太阳辐射、饱和水汽压差和气温的时滞效应存在明显的季节变化,2019 年与 2020 年的归一化时滞回环面积存在一定差异,但均在 10 月最大,8 月或 9 月最小。小时尺度上,土壤水分充足时,时滞随主要日均气象因子的增大而增大,土壤水分胁迫时,随主要日均气象因子的增大,时滞变化不明显。时滞校正后,太阳辐射和饱和水汽压差与蒸腾的回归方程的决定系数分别提高了 4%和 9%,运用主成分分析构造的综合气象因子对蒸腾模拟的决定系数提高了 7%,时滞校正可以提高蒸腾预测模型的精度。旨在加深对植物生理过程与环境变化过程关系的认识,并为提高蒸腾预测模型的精度提供依据。

关键词: 蒸腾; 时滞; 气象因子; 樟树

中图分类号: S175.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0194-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2021.05.027

Time-lag Effects Between Meteorological Factors and Transpiration of *Cinnamomum camphora* in the Subtropical Monsoon Region

XIA Yinhua¹, ZHANG Xinping^{1,2}, DAI Junjie¹, WANG Rui¹, LUO Zidong¹

(1.College of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081;

2.Hunan Key Laboratory of Geospatial Big Data Mining and Application, Changsha 410081)

Abstract: In this study, the hourly transpiration rate of *Cinnamomum camphora* was measured from June 2019 to October 2020 using the Grainer-type thermal dissipation probes. Meteorological factors and soil water content were simultaneously monitored during the study period. To deepen the understanding of the relationship between plant physiological changes and environmental changes, and to provide a basis for improving the accuracy of transpiration predicting model, this study analyzed the relationship between the transpiration of *C. camphora* and the main meteorological factors at different periods during the day. The variation characteristics of time lag and the change of hysteresis correction on the predicting model of transpiration were also investigated. The results showed that the time lag between transpiration and solar radiation is counterclockwise, and that between transpiration and saturated water vapor pressure or temperature is clockwise during the growing seasons (from June to October). Based on Gauss equations, it was found that on average transpiration in the growing seasons of 2019 and 2020 lagged behind solar radiation by 0.94 hours, and advanced by 2.60 and 2.61 hours on saturated vapor pressure difference and temperature. This time-lag effect was caused by the different responses of transpiration to meteorological factors at different stages of the day. In the rising stage (7:00—11:00), transpiration was more sensitive to changes of solar radiation than that in the descending stage (17:00—21:00). On the contrary, in the rising stage, transpiration was less sensitive to variation in saturated vapor pressure and temperature than that in the descending stage. The time-lag effects

收稿日期: 2021-04-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(41772373, 42001080)

第一作者: 夏银华(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事亚热带生态水文研究。E-mail: 939973367@qq.com

通信作者: 章新平(1956—), 男, 教授, 博士, 博导, 主要从事气候变化及水文研究。E-mail: zxp@hunnu.edu.cn

between transpiration and solar radiation or saturated vapor pressure or temperature had obvious seasonal variation. There were certain differences in the hysteresis loop area between the growing seasons of 2019 and 2020, but the maximum area appeared in October and the minimum area appeared in August or September. On the hourly scale, when soil moisture was sufficient, the hysteresis added with the increase of the main daily mean meteorological factors, but under soil moisture stress, the time lag did not change significantly with the increase of the major daily mean meteorological factors. After correcting time lag, the determinants of the regression equations of transpiration and solar radiation increased by 4% and 9%, and the coefficient of determination of the regression equations of transpiration and integrated meteorological factors constructed by principal component analysis increased by 7%. Therefore, eliminating time lag could improve the accuracy of transpiration predicting model.

Keywords: transpiration; hysteresis; meteorological factors; *Cinnamomum camphora*

蒸腾反映植物的水分状况及与环境的关系,影响生态系统的水量平衡^[1]。有研究^[2]表明,植物蒸腾与太阳辐射、饱和水汽压差、气温和相对湿度等蒸腾驱动因子之间有较强的相关性。但由于植物自身的水容调节作用 and 水分从根部运移到叶片的传输效率等因素的影响,植物蒸腾与驱动因子之间存在一种时滞效应,即它们的日内变化曲线峰值时间在几分钟到几小时不等^[3]。时滞效应表明了蒸腾并不一定是由当前的环境因子决定的,也有可能受之前环境因子的影响。时滞效应反映了树木调控树冠、根间水分传导能力的大小,可以反映植物的日间用水情况,对研究植物的蒸腾耗水和水分利用效率具有促进作用^[4]。

迄今为止,随着极端天气事件的日益频繁,研究植物蒸腾与环境因子的时滞效应成为关于植物用水的长期重要课题。许多学者对蒸腾与环境因子的时滞效应进行了研究,并取得了不同的研究结果。韩磊等^[5]发现,典型晴天下侧柏蒸腾滞后于太阳辐射 0.75 h,提前于饱和水汽压差和气温 0.75, 0.25 h。但蒸腾并不总是滞后于太阳辐射,例如, Liu 等^[6]发现,在干旱条件下,落叶松的蒸腾提前于太阳辐射。目前已有很多学者对时滞的影响因子进行研究,鱼腾飞等^[7]试图从夜间液流方面进行解释, Zhang 等^[4]从蒸腾与环境因子的变化速率着手研究,但对于时滞的影响因子仍没有统一的说法。杨洁等^[8]认为,蒸腾与环境因子间的时滞长短与树种有关,发现饱和水汽压差提前于辽东栎的蒸腾 1.97 h,滞后于刺槐的蒸腾 0.66 h;而太阳辐射滞后于辽东栎的蒸腾 0.21 h,提前于刺槐 1.14 h。时滞具有显著季节变化。O'Grady 等^[9]研究表明,桉树的蒸腾与饱和水汽压差在旱季的时滞较雨季大,但 Zeppel 等^[10]却得出了相反的结论,后者将这一差异归结于旱季较低的土壤含水量增加了土壤和根系之间的阻力;另外, Liu 等^[6]发现,落叶松的蒸腾与太阳辐射、饱和水汽压差之间的时滞从 9 月开始下降。很多学者对时滞校正进行了研究, Phillips 等^[3]发现,在忽略环境因子与蒸腾的时滞效应时会导致蒸腾的估测结

果产生高达 30% 的误差。由此可见,研究蒸腾与环境因子的时滞效应对于阐明蒸腾与环境因子的关系、提高预测模型的拟合精度具有重要意义。

樟树 (*Cinnamomum camphora*) 主要分布在我国长江流域以南地区,是亚热带常绿阔叶林的重要树种,也是城市绿化中的常用树种,具有相当高的经济价值,其对环境变化的响应比较敏感,如在水分不充足的干旱条件下蒸腾作用会受到抑制,出现大量落叶甚至死亡的现象^[11]。长沙地区是长江流域对全球气候变化响应极为敏感的区域,又因受复杂的地形地貌影响,旱涝灾害频发^[12]。此外,长沙地区受季风影响,全年降水分布不均,季节性干旱时有发生,有研究^[13]表明,长沙地区的季节性干旱发生的概率在 85% 以上,并且从 20 世纪 60 年代以来危害程度持续增加。对植物蒸腾与气象因子之间的时滞研究有利于理解植物对环境变化的生理响应,对准确测算植物蒸腾耗水以及对生态系统水量平衡的潜在效应具有重要意义^[5]。掌握蒸腾与气象因子的时滞效应及其控制因子,有助于更好地理解植物蒸腾与环境条件的联系,揭示不同环境条件下植物耗水的规律,能够提高植物对环境条件改变的适应能力。以往对亚热带地区樟树的相关研究主要集中在樟树的树干液流特征^[11]和蒸腾的模型模拟^[14]上,但这些研究几乎没有将日间蒸腾进行分段研究或考虑蒸腾与环境因子的时滞影响,考虑时滞方面的研究不仅对于认识植物蒸腾对亚热带季风区环境变化的响应至关重要,而且在理论上会提高蒸腾预测模型的精度。为了弥补以往研究的不足,加深对樟树生理过程与环境变化过程关系的认识,并为提高蒸腾预测模型的精度提供依据。本研究以亚热带地区的樟树为研究对象,利用热扩散式探针技术监测了樟树在 2019 年和 2020 年生长季 (6—10 月) 的蒸腾速率,结合主要的气象因子,分析了樟树在日间不同时段与气象因子的关系,探究了蒸腾与气象因子的时滞模式和时滞的变化特征,以及时滞校正对蒸腾预测模型的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省长沙市望城区八曲河村(28°22′09″N,112°45′43″E),平均海拔 50 m 左右,该地属于典型的亚热带季风气候,温和湿润,四季分明。多年平均气温 17.4 ℃,平均年积温 5 457.0 ℃。多年平均蒸发量为 902 mm,多年平均降水量为 1 447 mm,降水主要集中在 3—6 月,约占全年降水的 51.3%。7—8 月易受副热带高压控制,雨日不足 20 天,易出现季节性干旱。样地的土壤类型以红壤为主,质地为粉砂质黏壤土。样地的平均郁闭度在 0.8 以上,属于亚热带常绿阔叶林,其中 90% 以上树种为樟树(*Cinnamomum camphora*),根系分布集中在 1 m 以内,大部分根系(85%)分布在浅层 0—40 cm 内,水平根系很发达,樟树平均树龄为 15 年,平均树高为 11 m,林地伴生有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、桑树(*Morus allba*)等常绿针叶乔木,地面草本植物稀少。在样地中选择 8 棵生长状况良好的樟树进行观测,样树的基本特征见表 1。

表 1 观测样树的基本特征

编号	树高/ m	胸径/ cm	边材 厚度/cm	边材 面积/cm ²
ZS1	11	10.25	5.56	260.94
ZS2	12	10.79	5.95	292.10
ZS3	11	12.10	7.00	377.91
ZS4	11	10.98	6.09	303.69
ZS5	11	10.82	4.85	294.01
ZS6	11	9.55	4.45	224.17
ZS7	11	7.72	3.66	145.08
ZS8	9	9.39	4.39	216.35

1.2 樟树蒸腾的测定与计算

于 2019 年 6 月至 2020 年 10 月采用美国 Dynamax 公司的热扩散式探针(TDP,Dynamax Inc3,Houston,USA)测定系统对样树的蒸腾速率进行观测。在每棵样树离地面高约 1.3 m 处刮去表皮后使用配套钻头钻 2 个上下间隔约 40 mm 的孔,孔深根据边材厚度确定。将 2 根热扩散探针插入钻孔内,加热探针在上方,温差探针在下方。将探针根部以及电缆线固定在树干上,并与 12 V 直流电的电源连接。再用铝箔纸将探针及周围的树干包裹好,防止雨水进入和太阳光直射。用数据采集仪(Delta-T data logger,Delta-T UK)自动记录 2 探针间的温差,数据采集间隔为 10 s,且每 30 min 记录平均值。

温差变化反映树木的蒸腾速率,二者关系的经验公式^[15]为:

$$E_c=0.0119\times(\frac{\Delta T_{\max}-\Delta T}{\Delta T})^{1.231}\times\frac{A_s}{A_c}\tag{1}$$

式中: ΔT 为上下探针之间的瞬时温度差(℃); $\Delta T_{\max}$ 为蒸腾速率为 0 时上下探针间的瞬时温度差(℃); A_s 为樟树胸高处的边材面积(cm²); A_c 为樟树有效冠层投影面积(cm²); E_c 为单棵樟树的蒸腾速率(mm/h)。

1.3 气象因子和土壤含水量的测定

土壤体积含水量 SWC(%)采用布设在样地中心位置的云智能管式水分温度监测仪(RWET-100,中国)测定,仪器探头位于 0—100 cm 每隔 10 cm 处,监测精度分别为±2.5%,±0.5 ℃,监测时间自 2017 年 2 月起,数据采集时间间隔为 1 h,土壤含水量数据利用烘干称重法进行校正。Granier^[15]提出了计算林下土壤相对有效含水率(REW,relative extractable water)的方法,以反映土壤含水量对植物的影响,其计算公式为:

$$REW=\frac{SWC-SWC_{\min}}{SWC_{\max}-SWC_{\min}}\tag{2}$$

式中:SWC 为实测土壤含水量(%); $SWC_{\max}$ 为样地的田间持水量(%); $SWC_{\min}$ 为研究时段内最小的土壤含水量(%)。当 $REW<0.4$ 时,通常认为植物受到土壤水分胁迫^[15]。

气温 T (℃)、相对湿度 RH (%)、太阳辐射 R_s (w/m²)等气象数据采用安装在樟树林外 50 m 左右的开阔地上的微型自动气象站(WeatherHawk-232,USA)获取,数据采集频率均为 30 min/次。林地附近的饱和水汽压差 VPD(kPa)根据监测的温度和相对湿度计算得到^[16]。

1.4 Gauss 方程

采用 Origin 2018 多峰拟合中的 Gauss 方程对典型晴天的 E_c 、 R_s 、 T 和 VPD 的日变化进行拟合^[5]:

$$f(t)=y+\frac{A}{w\sqrt{\pi/2}}e^{-2(t-t_c)^2/w^2}\tag{3}$$

式中: $f(t)$ 为拟合函数的因变量 E_c 、 T 、 R_s 和 VPD; t 为时刻; t_c 为各变量达到峰值的时间; y 、 A 、 w 均为方程参数。

1.5 数据处理

目前蒸腾速率的计算多采用 Baseline 4.0(Ram Oren,Duck University,USA)软件,它可以将探针所测的温差数据转换为蒸腾速率,该软件根据温差变化的稳定性和软件自动识别的蒸腾零点进行校正^[17],得到较为准确的蒸腾速率。 E_c 与 R_s 、VPD 和 T 之间的时滞通过归一化的时滞回环图的面积进行量化,归一化将各变量数量级的影响从分析中除去,从而可以直接用回环面积来推断时滞的大小,即归一化面积越大时滞越长^[18]。其中时滞回环图的面积利用 Origin 8.0 中的多边形面积功能计算得到。主成分分析法是利用降维的方法,把多个指标转化为少数的综合

指标,综合气象因子由 SPASS 25 中的主成分分析得到。时滞校正采用错位对比分析法。

2 结果与分析

2.1 蒸腾与主要气象因子的日变化

在典型晴天,樟树蒸腾(E_c)与太阳辐射(R_s)、饱和水汽压差(VPD)和气温(T)的日变化不同步,用 Gauss 方程拟合其日变化过程(以 2019 年为例,图 1)。 E_c 的峰值明显滞后于 R_s ,提前于 VPD、 T ,其中 VPD 和 T 到达峰值的时间较为接近但有所差异。 E_c 与 R_s 几乎同时启动,上午 E_c 随着 R_s 的上升而上升,在 7:00 左右 R_s 达到 300 w/m^2 时, E_c 相对于 R_s 存在一定的滞后。当 R_s 到达峰值时, E_c 为 0.31 mm/h 只占峰值(0.33 mm/h)的 93.9%,午后 E_c 并不紧随 R_s 的下降而下降,而是仍然上升,经过约 2 h 到达峰值。 E_c 到达峰值时, VPD(2.2 kPa)和 T (33.5

$^{\circ}\text{C}$)分别占峰值(VPD 和 T 的峰值分别为 2.6 kPa 和 $34.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)的 84.6%和 97.1%。随着 VPD、 T 的持续增加,樟树受到了环境胁迫,蒸腾需求减小,气孔导度减小限制了液流传输, E_c 持续下降。可以发现,一日内 E_c 与各气象因子间并不总是正相关或负相关。比如,在 E_c 到达峰值之前, E_c 与 VPD 呈正相关,当 VPD 达到阈值约 2.1 kPa 之后, E_c 与 VPD 呈负相关,经过一段时间之后,二者又呈正相关关系。

2019 年与 2020 年 E_c 与气象因子的 Gauss 拟合结果见表 2,在 2019 年 E_c 到达峰值时刻滞后于 R_s 0.92 h ,提前于 VPD 和 T 的时间为 $2.83, 2.70\text{ h}$,在 2020 年 E_c 到达峰值时刻滞后于 R_s 的时间为 0.96 h ,提前于 VPD 和 T 的时间为 $2.37, 2.52\text{ h}$ 。 E_c 滞后于 R_s 的平均值为 0.94 h ,提前于 VPD 和 T 的平均值分别为 $2.60, 2.61\text{ h}$ 。

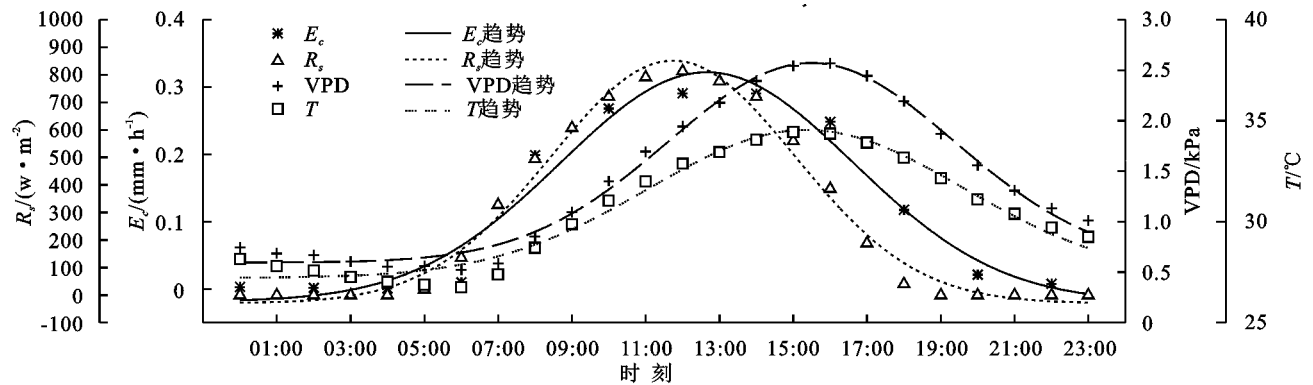


图 1 2019 年典型晴天蒸腾与气象因子的日变化

表 2 典型晴天蒸腾与气象因子的 Gauss 方程的拟合

变量	2019 年					2020 年				
	y	t_c	w	A	R^2	y	t_c	w	A	R^2
E_c	-0.02	13.66	7.92	3.38	0.96	-0.01	13.85	7.50	2.65	0.97
R_s	-29.65	12.74	6.60	7291.70	0.99	-17.87	12.84	6.20	5873.72	0.99
VPD	0.59	16.49	7.76	19.22	0.99	0.34	16.22	8.10	13.20	0.98
T	27.22	16.36	8.52	78.28	0.97	26.19	16.37	8.60	68.25	0.98

2.2 不同时段蒸腾对气象因子的响应

由于樟树在日间不同时段的蒸腾(E_c)对气象因子的响应不同,所以将整日的 E_c 与气象因子放在一起进行统计分析并不能准确揭示樟树 E_c 与气象因子之间的关系^[19]。根据 E_c 在一天内的变化特征并结合先前的研究^[20]结果,选取生长季(6—10 月)晴天数据,将白天划分为 3 个阶段,即 E_c 的上升阶段(7:00—11:00),高值阶段(12:00—16:00)和下降阶段(17:00—21:00),深入分析了小时尺度上 E_c 与气象因子太阳辐射(R_s)、饱和水汽压差(VPD)、气温(T)的时滞模式和线性关系(图 2)。典型晴天条件下, E_c 与主要气象因子间均呈现时滞回环(hysteresis loops)关系。 E_c 与 R_s 呈逆时针,与 VPD 和 T 呈顺时针。 E_c 的上升过程与下降过程不重合,当 E_c 达到饱和

值时,随着驱动因子的增加, E_c 不再增加。当驱动因子减小, E_c 不是立即减小而是逐渐衰弱,并沿着不同于上升过程的路径后退。

2019 年和 2020 年生长季各月日间不同阶段 E_c 与各气象因子的线性关系见表 3。 E_c 在各阶段与 R_s 、 T 、VPD 均呈正相关,且在各个阶段 E_c 与 R_s 的回归方程的决定系数始终较高($R^2>0.50$),表明 R_s 是 E_c 最主要的驱动因子。通过比较回归方程的系数发现,一天中的不同阶段 E_c 对气象因子变化的响应不同。 E_c 与 T 、VPD 的回归方程系数显示,在生长季各月回归方程的系数在上升阶段大于下降阶段,表明上午 E_c 对 T 、VPD 的变化响应更加敏感;而 E_c 与 R_s 的回归方程系数在上升阶段小于下降阶段,表明下午 E_c 对 R_s 的变化响应更加敏感。高值阶段 E_c 与 T 、VPD 之间

的相关性相对较弱($R^2<0.25$)。正是由于 E_c 对气象因子不同的响应速度导致了时滞的产生。

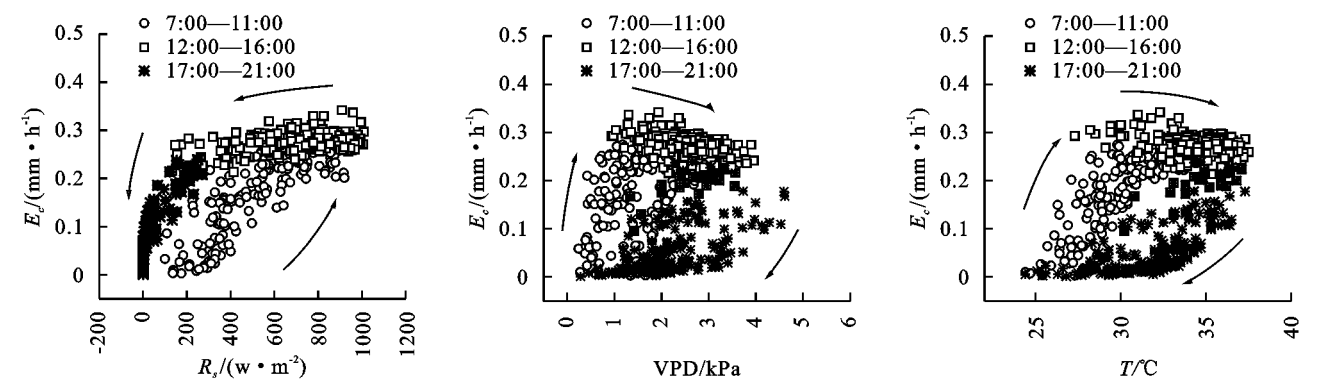


图 2 蒸腾 E_c 在日间不同阶段对太阳辐射 R_s 、饱和水汽压差 VPD 和温度 T 的响应

表 3 不同时段蒸腾与气象因子之间的回归关系

月份	气象因子	上升阶段			高值阶段			下降阶段		
		回归方程	<i>n</i>	R^2	回归方程	<i>n</i>	R^2	回归方程	<i>n</i>	R^2
6	<i>T</i>	$E_c=2.84T-1.42$	75	0.48	$E_c=1.18T-0.29$	75	0.12	$E_c=1.65T-1.09$	75	0.47
	VPD	$E_c=2.36VPD+0.17$	75	0.63	$E_c=0.60VPD+0.44$	75	0.12	$E_c=0.95VPD-0.10$	75	0.51
	R_s	$E_c=0.95R_s+0.05$	75	0.63	$E_c=0.57R_s+0.40$	75	0.60	$E_c=2.65R_s+0.07$	75	0.75
7	<i>T</i>	$E_c=2.17T-1.06$	75	0.48	$E_c=0.14T+0.60$	75	0.01	$E_c=1.90T-1.33$	75	0.37
	VPD	$E_c=1.56VPD+0.29$	75	0.50	$E_c=0.03VPD+0.71$	75	0.01	$E_c=1.26VPD-0.19$	75	0.50
	R_s	$E_c=0.67R_s+0.20$	75	0.51	$E_c=0.52R_s+0.54$	75	0.52	$E_c=2.42R_s+0.11$	75	0.82
8	<i>T</i>	$E_c=3.17T-1.98$	75	0.72	$E_c=1.00T-0.28$	75	0.25	$E_c=1.58T-1.12$	75	0.46
	VPD	$E_c=0.94VPD+0.17$	75	0.30	$E_c=0.05VPD+0.57$	75	0.01	$E_c=0.61VPD-0.09$	75	0.31
	R_s	$E_c=0.83R_s-0.01$	75	0.75	$E_c=0.29R_s+0.46$	75	0.37	$E_c=2.46R_s+0.11$	75	0.73
9	<i>T</i>	$E_c=1.20T-0.55$	75	0.52	$E_c=0.38T+0.03$	75	0.13	$E_c=0.46T-0.25$	75	0.48
	VPD	$E_c=1.08VPD-0.11$	75	0.56	$E_c=0.18VPD+0.23$	75	0.08	$E_c=0.36VPD-0.07$	75	0.57
	R_s	$E_c=0.56R_s-0.08$	75	0.72	$E_c=0.27R_s+0.19$	75	0.50	$E_c=2.22R_s+0.05$	75	0.71
10	<i>T</i>	$E_c=0.68T-0.17$	75	0.24	$E_c=-0.03T+0.32$	75	0.01	$E_c=0.24T-0.10$	75	0.62
	VPD	$E_c=0.43VPD+0.10$	75	0.11	$E_c=-0.11VPD+0.34$	75	0.05	$E_c=0.20VPD-0.01$	75	0.67
	R_s	$E_c=0.65R_s-0.11$	75	0.73	$E_c=0.44R_s+0.13$	75	0.62	$E_c=5.60R_s+0.02$	75	0.62

2.3 时滞效应的变化特征

将 2019 年和 2020 年生长季(6—10 月)各月晴天对应时刻的数据进行平均,绘制 E_c 与 T 、VPD、 R_s 的归一化的时滞回环(图 3)。由图 3 可知, E_c 与 3 个气象因子之间的回环形状各不相同,时滞回环存在于樟树生长的不同阶段。蒸腾各月时滞回环均保持相同的方向,即 E_c 与 R_s 的时滞回环始终呈逆时针,与 T 和 VPD 的时滞回环始终呈顺时针。同一气象因子时滞回环中 E_c 的变化节点相似, E_c 与 R_s 的回环中 E_c 在 7:00 左右上升,在 12:00 左右开始下降; E_c 与 T 或 VPD 的回环中, E_c 在 7:00 左右开始上升,在 16:00 左右开始下降。 E_c 与 T 、VPD、 R_s 的时滞回环的最大不同之处在于各月回环面积大小有所差异。通过计算归一化的时滞回环的面积(图 4)发现,2019 年与 2020 年 2 个生长季, E_c 与 3 个气象因子的时滞均在 10 月达到最大值,多在 8 月或 9 月达到最小值。2019 年 E_c 与 T 、VPD、 R_s 分别在 8 月、9 月、8 月达到时滞最小值,2020 年 E_c 与 T 在 8 月达到时滞最小值,与 VPD、 R_s 均在 9 月达到时滞最小值。2019 年与 2020 年

各月 R_s 、VPD 的时滞回环面积相差不大,但其他 3 个气象因子的时滞大小存在年际变化,2019 年各月 T 的时滞回环面积比 2020 年各月大。

2.4 不同土壤水分条件下的时滞变化

为分析在不同土壤水分条件下, E_c 与 R_s 、VPD 和 T 之间的时滞变化,以 0—40 cm 土层土壤有效含水率(REW)为依据,选取土壤水分胁迫时(日均 $REW<0.2$)和土壤水分充足时(日均 $REW>0.6$)的数据,将符合条件的晴天对应时刻数据进行平均,获得 E_c 与 R_s 、VPD 和 T 的日内变化(图 5)。在土壤水分充足和土壤水分胁迫时,均观测到 E_c 与 R_s 、VPD 和 T 之间存在时滞。因此,时滞的发生不受土壤水分状况的必然影响,但时滞随日均气象因子的变化随土壤水分条件的不同而变化。在土壤水分充足时,随日均 R_s 的增大,时滞增大。在土壤水分胁迫时,日均 R_s 变化前后,时滞没有明显变化。时滞随日均 VPD 和 T 的变化情况与其随日均 R_s 的变化情况一样,在土壤水分充足时,时滞均随日均 VPD、 T 的增大而增大,在土壤水分胁迫时,时滞随日均 VPD、 T 的变化情况不明显。

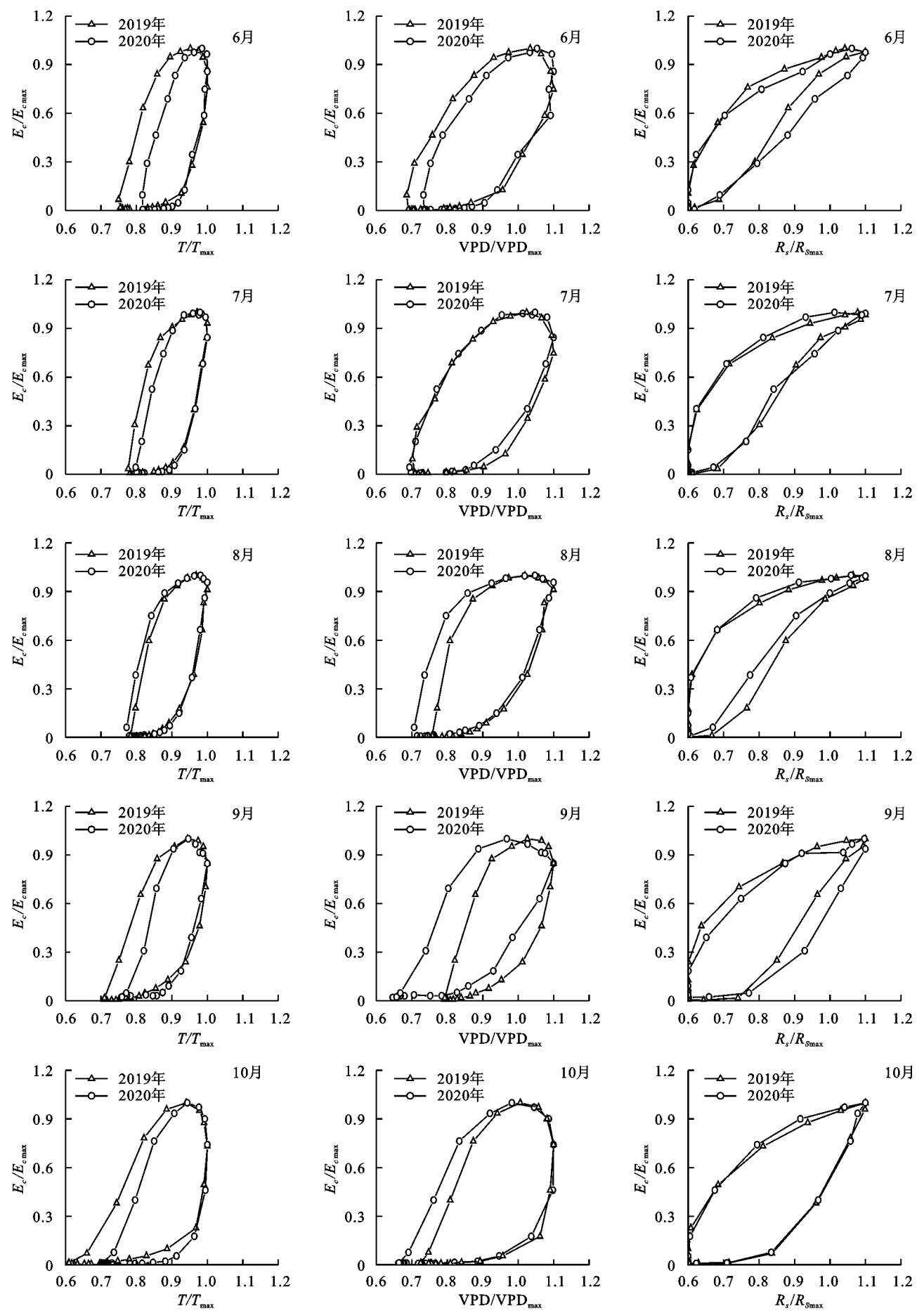


图3 生长季6—10月归一化的蒸腾与主要气象因子的时滞回环

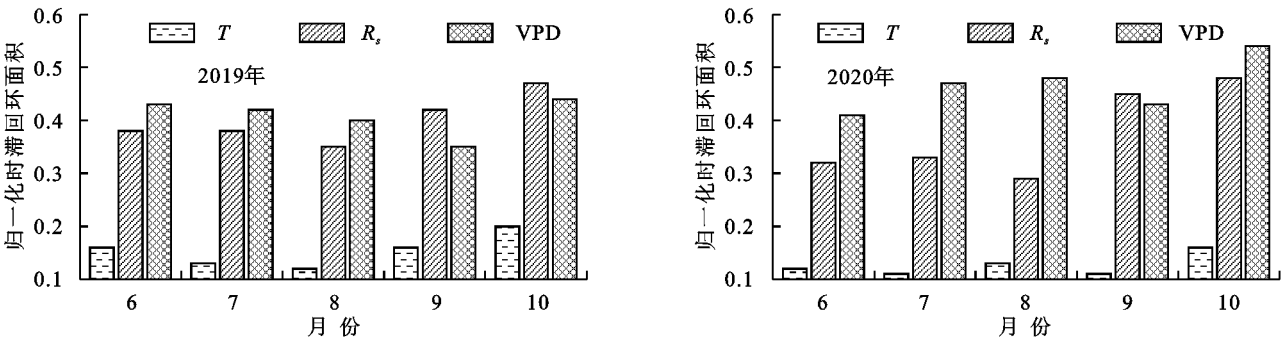
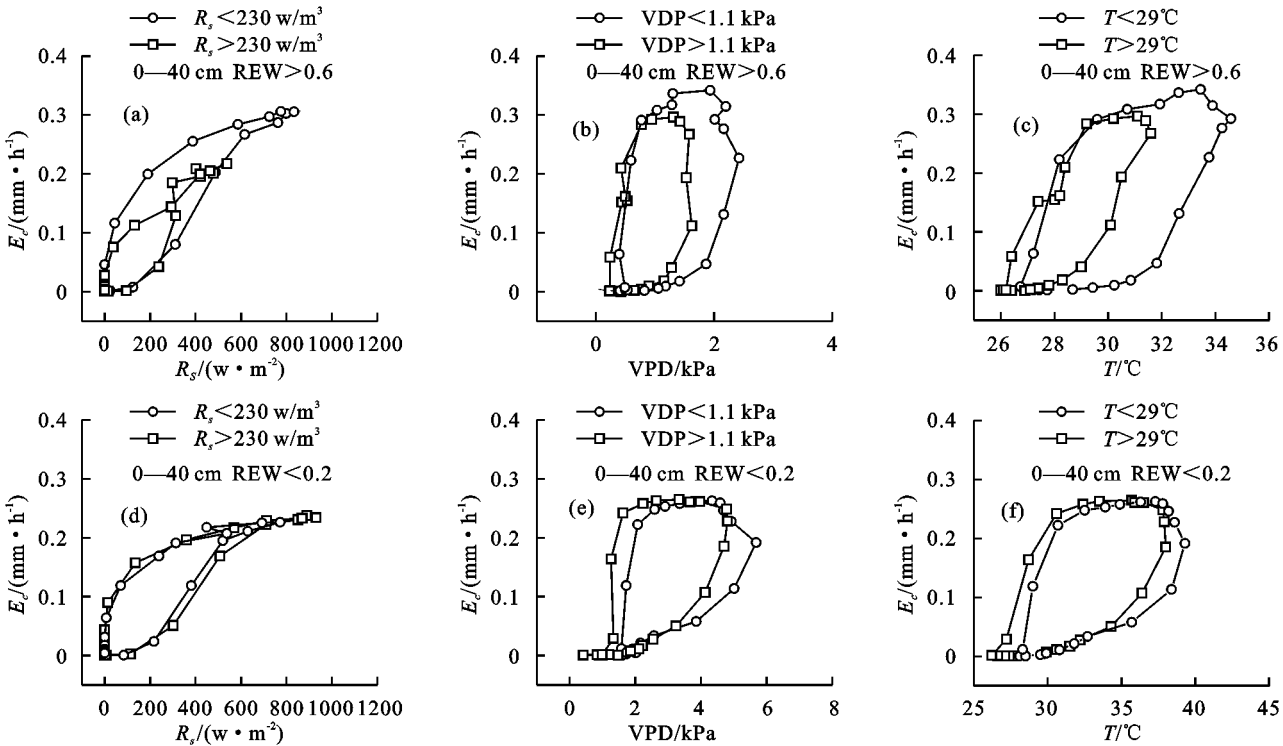


图 4 生长季 6—10 月归一化的蒸腾与主要气象因子的时滞回环的面积



注：同一土壤水分条件按照气象因子的日均值进行分级。

图 5 不同土壤水分条件下蒸腾 E_c 随太阳辐射 R_s 、饱和水汽压差 VPD 和气温 T 的变化

2.5 时滞校正对蒸腾模拟的影响

对包含和不包含时滞效应的气象因子数据进行主成分分析,得到各主成分与气象因子的特征值、百分率、累计百分率和载荷(表 4 和表 5)。由表 4 可知,不考虑时滞效应的主成分分析中,前 2 个主成分的累积百分率已达 94%,因此选取前 2 个主成分;时滞校正后的主成分分析中,前 2 个主成分的累积百分率已经达到 91%,因此选取前 2 个主成分。根据特征值和载荷计算得到不考虑时滞时第 1 主成分(W_{11})与第 2 主成分(W_{12})的表达式分别为: $W_{11}=0.20R_s+0.47T+0.51VPD-0.49RH$, $W_{12}=1.37R_s+0.52T+0.48VPD-0.52RH$ 。 T 、 VPD 、 RH 对 W_{11} 有较大权重贡献,因此 W_{11} 代表 $T-VPD-RH$ 因子; R_s 对 W_{12} 有较大的权重贡献,因此 W_{12} 代表 R_s 因子。时滞校正后第 1 主成分(W_{21})与第 2 主成分(W_{22})的表达式分别为: $W_{21}=0.46R_s+0.22T+0.45VPD-0.31RH$, $W_{22}=0.82R_s+1.67T+0.87VPD-$

$1.41RH$ 。 R_s 与 VPD 对 W_{21} 有较大的权重贡献,因此 W_{21} 代表 R_s-VPD 因子; T 与 RH 对 W_{22} 有较大的权重贡献,因此 W_{22} 代表 $T-RH$ 因子。

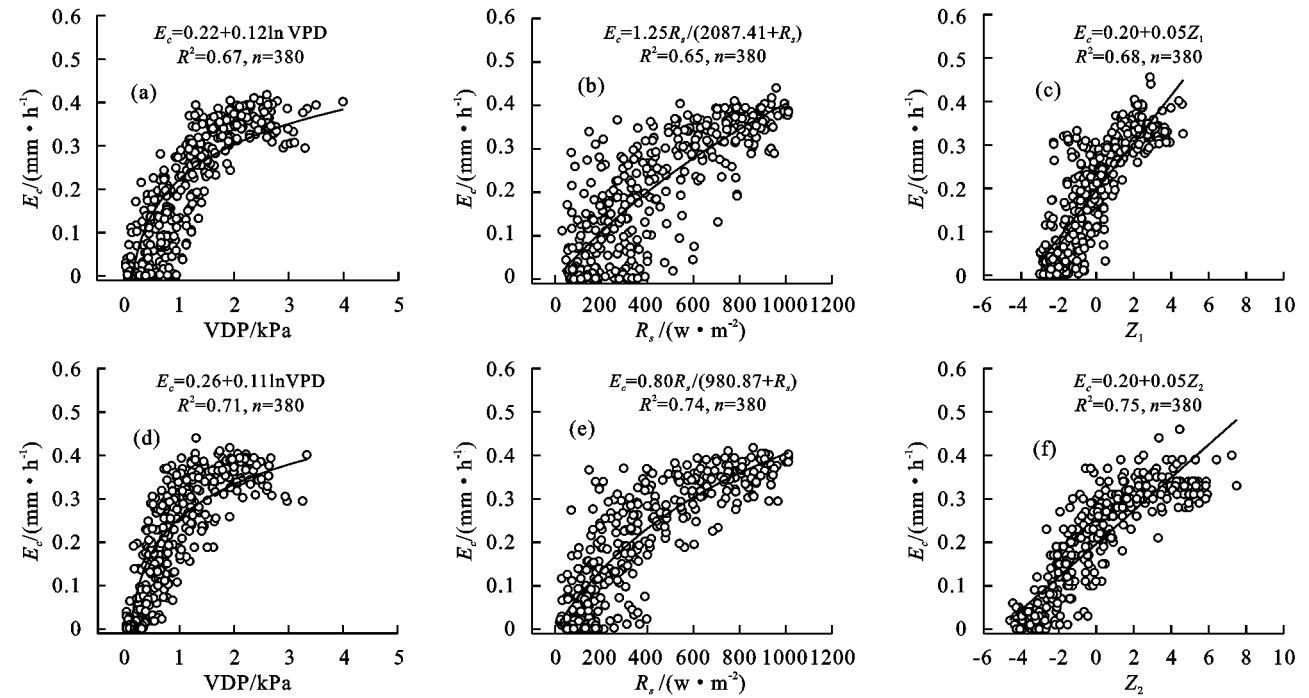
综合气象因子(Z)为原来 2 个主成分的加权组合,考虑了不同主成分的权重,也进一步减少了变量的个数。不考虑时滞与时滞校正后的综合气象影响因子的表达式分别为: $Z_1=(64W_{11}+30W_{12})/94$, $Z_2=(48W_{21}+43W_{22})/91$ 。对主要的单个气象因子与综合气象因子同 E_c 进行回归分析得到图 6,可以看出各因子与 E_c 的拟合关系均达到了显著水平。不考虑时滞时, VPD 、 R_s 、 Z_1 与 E_c 的决定系数分别为 0.67,0.65,0.68;时滞校正后, VPD 、 R_s 、 Z_2 与 E_c 的决定系数分别为 0.71,0.74,0.75。时滞校正后,各因子对 E_c 的拟合效果更好, VPD 、 R_s 和综合气象因子同 E_c 之间的决定系数分别提高了 4%,9%,7%。综上,气象因子对 E_c 的模拟中,考虑 E_c 与气象因子之间的时滞效应可以提高拟合精度。

表 4 气象因子各主成分的特征值和百分率

主成分	特征值		百分率/%		累积百分率/%	
	不考虑时滞	时滞校正	不考虑时滞	时滞校正	不考虑时滞	时滞校正
1	3.328	3.376	64.0	48.1	64.0	48.1
2	0.468	0.279	30.0	42.9	94.0	91.0
3	0.186	0.181	4.7	4.5	99.6	95.9
4	0.018	0.164	1.3	4.1	100.0	100.0

表 5 气象因子主成分的载荷与特征向量

项目	主成分	R_s		T		VPD		RH	
		不考虑时滞	时滞校正	不考虑时滞	时滞校正	不考虑时滞	时滞校正	不考虑时滞	时滞校正
载荷	1	0.36	0.85	0.87	0.41	0.94	0.83	−0.90	−0.58
	2	0.93	0.44	0.36	0.88	0.33	0.46	−0.35	−0.75
特征向量	1	0.20	0.46	0.47	0.22	0.51	0.45	−0.49	−0.31
	2	1.37	0.82	0.52	1.67	0.48	0.87	−0.52	−1.41



注：a、b、c 为不考虑时滞；d、e、f 为时滞校正后。
图 6 时滞校正前后饱和水汽压差 VPD、太阳辐射 R_s 与综合气象因子 Z 对蒸腾 E_c 的拟合

3 讨论

3.1 蒸腾与气象因子时滞回环的机理

在日间的不同时段,樟树的 E_c 作用对主要气象因子响应不同(图 2),这导致了 E_c 与气象因子之间形成了时滞回环。表 2 中 6—10 月各月 E_c 与各气象因子的关系在日间不同时段均表现出显著性差异,表明通过将白天划分为不同时段有利于获得 E_c 随环境因子的变化模式,这与 Bai 等^[21]的研究结果一致。上升阶段 E_c 随着 R_s 、VPD 和 T 的上升而迅速增加,主要气象控制因子是 R_s 和 T 。高值阶段随着 R_s 、VPD、 T 的上升, E_c 先保持不变,然后缓慢下降,这是樟树为了避免过度失水和阻止叶水势下降到危险水平,从而关闭气孔所导致的^[22]。此阶段 E_c 与各气象因子均无显著相关性。随着 R_s 、VPD、 T 的下降, E_c 逐渐减小。此阶段控制 E_c 的主

要气象因子是 R_s 和 VPD。另外, R_s 的回归方程的斜率在上升阶段较下降阶段偏小,其他 2 个气象因子回归方程的斜率在上升阶段均较下降阶段偏大,表明 E_c 在下午对 R_s 的响应较上午敏感。这与 Bai 等^[21]的发现不同; E_c 在上午对 VPD 和 T 的响应较下午敏感,这与 Chen 等^[21]和 Bai 等^[23]的发现一致,可能是因为樟树下午的水力阻力高于上午。 E_c 与气象因子的变化不同步导致了时滞的产生,本研究发现,樟树 E_c 与 R_s 之间的时滞呈逆时针变化。 R_s 在中午达到峰值,在同样的 R_s 条件下,下午的 E_c 高于上午,因此 E_c 与 R_s 间的时滞回环呈逆时针^[10]。然而在干旱条件下, R_s 与 E_c 之间也会形成顺时针的时滞回环。这是因为在早晨有限的土壤有效含水量条件下,植物气孔导度在很低的光照条件下达到光饱和。但

植物的储存水不足以维持光饱和点下的高 E_c , 所以关闭气孔导度, 导致 E_c 下降, 从而 E_c 提前于 R_s 达到峰值, 形成顺时针的时滞回环^[24]。 E_c 与 VPD 和 T 之间的时滞回环普遍呈顺时针变化, VPD 和 T 在下午达到峰值, 气孔敏感性增加。因此, 可以诱导植物气孔关闭, 导致水分利用减少, E_c 下降, 从而 E_c 和 VPD、 T 之间形成顺时针的时滞回环^[10]。

3.2 蒸腾与气象因子时滞的变化特征

E_c 与气象因子的时滞大小存在明显的季节变化, 时滞效应的季节性在很多研究^[6,24]中均有发现。本研究 E_c 与各气象因子的时滞也存在明显的季节变化, E_c 与各气象因子的时滞在 10 月达到最大值, 在 8 月或 9 月达到最小值。这可能是因为 10 月是樟树的生长末期, 樟树叶片开始衰老, 蒸腾作用减弱, E_c 与环境因子之间的时滞增加, 而 8—9 月是樟树的生长旺盛期, 蒸腾作用旺盛, 时滞减小。Xu 等^[25] 研究发现, 中国西北干旱地区, 胡杨的 E_c 与 VPD 的时滞没有明显的季节差异。但 Liu 等^[6] 认为, 9 月气温下降, 落叶松的 E_c 降低, 导致植物蒸腾失水的可能性减小, 所以落叶松与 R_s 和 VPD 的时滞在生长初期较大, 在 9 月开始减小。姚增旺等^[24] 发现, 民勤梭梭树 E_c 与 R_s 的时滞在 9 月和 5 月比其他月份大, 与 VPD 的时滞在 9 月达到最大值。他们将该现象归因于植物用水需求与水分供应不足之间的失衡。Zhang 等^[4] 认为, 时滞的季节性是由于夏季高温引起植物更高的水分需求导致水分供应不足, 面对夏季高温和更高的水分需求, 植物自身和土壤的水力学传导率起到至关重要的作用。水分传导率受到土壤阻抗和植物体内阻抗的限制, 因此, 水分的供给无法及时补给水分的消耗, 夏季植物的气孔比寒冷冬季更早关闭, 从而引起喀斯特地区落叶阔叶树种在夏季比冬季的时滞大。另外, 本研究通过对不同环境条件下 E_c 与气象因子之间的时滞环的研究发现, 樟树 E_c 与 R_s 、VPD 和 T 之间时滞的发生与土壤含水量没有必然的关系, 不论是否存在土壤水分胁迫, E_c 与 R_s 、VPD 和 T 之间均存在时滞。但不同土壤水分条件下时滞环随气象因子的变化存在差异性。杨洁等^[8] 也发现, 土壤水分是影响时滞效应的重要因素之一, 他们推测根系及树干对水分的吸收和传输效率会对蒸腾驱动因子的时滞产生直接影响, 较好的土壤水分状况因有利于水分吸收和传输从而导致蒸腾日变化峰值提早出现。

4 结论

(1) 通过利用 Gauss 方程对小时尺度的 E_c 与 R_s 、VPD 和 T 的拟合发现, E_c 与气象因子之间的日变化过程不完全一致, 存在时滞效应。在 2019 年与 2020 年生

长季, E_c 与 R_s 、VPD 和 T 之间的平均时滞为 0.94, 2.60, 2.61 h。 E_c 对 R_s 的响应在上升阶段更加敏感, 对 VPD、 T 的响应在下降阶段更加敏感。

(2) E_c 与气象因子之间的时滞存在明显的季节变化, 通过归一化时滞面积计算发现, 时滞多在 10 月达到最大值, 8 月或 9 月达到最小值。各气象因子与 E_c 之间的时滞大小不同, 2019 年与 2020 年 2 个生长季各月时滞有所差异。

(3) 在小时尺度上, 不同土壤水分条件下 E_c 与 R_s 、 T 、VPD 均存在时滞效应, 但在不同的土壤水分条件下, 这种时滞效应略有不同。土壤水分充足时, 时滞随日均气象因子的增大而增大, 土壤水分胁迫时, 时滞随日均气象因子的增大, 时滞变化不明显。

(4) R_s 、VPD 和综合气象因子在时滞校正前后均能较好地模拟樟树生长季的 E_c 。时滞校正后, R_s 和 VPD 与 E_c 的回归方程的决定系数分别提高了 4% 和 9%, 运用主成分分析构造的综合气象因子对 E_c 模拟的决定系数提高了 7%, 从而提高了 E_c 预测模型的精度。

参考文献:

- [1] 韩磊, 孙兆军, 展秀丽, 等. 宁夏河东沙区柠条植株叶片蒸腾对干旱胁迫的响应[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5): 756-761.
- [2] 贾国栋, 陈立欣, 李瀚之, 等. 北方土石山区典型树种耗水特征及环境影响因子[J]. 生态学报, 2018, 38(10): 3441-3452.
- [3] Phillips N, Oren R, Zimmermann R, et al. Temporal patterns of water flux in trees and lianas in a Panamanian moist forest[J]. *Trees*, 1999, 14(3): 116-123.
- [4] Zhang R F, Xu X L, Liu M X, et al. Hysteresis in sap flow and its controlling mechanisms for a deciduous broad-leaved tree species in a humid karst region[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(11): 1744-1755.
- [5] 韩磊, 展秀丽, 王芳, 等. 河东沙区侧柏树干液流与蒸腾驱动因子的时滞效应研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(8): 1417-1423.
- [6] Liu H, Guo J B, Liu Z B, et al. Time-Lag effect between sap flow and environmental factors of *Larix principis-rupprechtii* Mayr[J]. *Forests*, 2019, 10(11): 642-650.
- [7] 鱼腾飞, 冯起, 司建华, 等. 胡杨的夜间蒸腾: 来自树干液流、叶片气体交换及显微结构的证据[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(7): 8-16.
- [8] 杨洁, 吕金林, 何秋月, 等. 黄土丘陵区辽东栎和刺槐树干液流时滞效应与蒸腾特征的关联性[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2607-2613.
- [9] O'Grady A P, Eamus D, Hutley L B. Transpiration increases during the dry season: Patterns of tree water use in eucalypt open-forests of northern Australia[J]. *Tree Physiology*, 1999, 19(9): 591-597.

[10] Zeppel M J B, Murray B R, Barton C, et al. Seasonal responses of xylem sap velocity to VPD and solar radiation during drought in a stand of native trees in temperate Australia[J].Functional Plant Biology,2004,31(5):461-470.

[11] 罗紫东,关华德,章新平,等.亚热带樟树树干液流通量变化规律[J].热带地理,2016,36(4):658-665.

[12] 李景刚,李纪人,黄诗峰,等.基于 TRMM 数据和区域综合 Z 指数的洞庭湖流域近 10 年旱涝特征分析[J].资源科学,2010,32(6):1103-1110.

[13] 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.

[14] 戴军杰,章新平,罗紫东,等.长沙地区典型树木蒸腾对环境因子的响应及模拟[J].长江流域资源与环境,2021,30(3):699-711.

[15] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J].Tree Physiology,1987,3(4):309-320.

[16] Dingman S L. Physical hydrolog[M].Illinois: Waveland Press,2015:28-86.

[17] Oishi A C, Hawthorne D A, Oren R. Baseline: An open-source, interactive tool for processing sap flux data from thermal dissipation probes[J].SoftwareX,2016,18(5):139-143.

[18] Wang H L, Doerthe T, Chris S. Hysteretic response of sap flow in Scots pine (*Pinus sylvestris*) to meteorological forcing in a humid low-energy headwater catchment[J].Ecohydrology,2019,12(6):1-31.

[19] 陈琪,李远航,王琼琳,等.基于 Penman-Monteith 模型分时段模拟华北落叶松日蒸腾过程[J].中国水土保持科学,2019,17(5):54-64.

[20] 王尚涛.干旱绿洲区农田葡萄树蒸散耗水及水分利用策略研究[D].兰州:兰州大学,2019.

[21] Bai Y, Li X Y, Liu S M, et al. Modelling diurnal and seasonal hysteresis phenomena of canopy conductance in an oasis forest ecosystem[J].Agricultural and Forest Meteorology,2017,246:98-110.

[22] Chen L X, Zhang Z Q, Li Z D, et al. Biophysical control of whole tree transpiration under an urban environment in Northern China[J].Journal of Hydrology,2011,402(3/4):388-400.

[23] Bai Y, Zhu G F, Su Y H, et al. Hysteresis loops between canopy conductance of grapevines and meteorological variables in an oasis ecosystem[J].Agricultural and Forest Meteorology,2015,214/215:319-327.

[24] 姚增旺,褚建民,吴利禄,等.民勤绿洲荒漠过渡带梭梭树干液流的时滞特征[J].应用生态学报,2018,29(7):2339-2346.

[25] Xu S Q, Yu Z B. Environmental control on transpiration: A case study of a desert ecosystem in northwest China[J].Water,2020,12(4):1-16.

(上接第 193 页)

[12] Peng S Z, Li Z. Potential land use adjustment for future climate change adaptation in revegetated regions[J].Science of the Total Environment,2018,639:476-484.

[13] 任婧宇,彭守璋,曹扬,等.1901—2014 年黄土高原区域气候变化时空分布特征[J].自然资源学报,2018,33(4):621-633.

[14] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J].Earth System Science Data,2019,11(4):1931-1946.

[15] Wolf A, Callaghan T, Larson K. Future changes in vegetation and ecosystem function of the Barents Region[J].Climatic Change,2007,87:51-73.

[16] Smith B, Wårlind D, Arneth A, et al. Implications of incorporating N cycling and N limitations on primary production in an individual-based dynamic vegetation model[J].Biogeosciences,2014,11(7):2027-2054.

[17] 杨冰.基于不同分类方法土地利用/覆盖分类精度分析[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.

[18] 胡胜,曹明明,邱海军,等.CFSR 气象数据在流域水文模拟中的适用性评价:以灞河流域为例[J].地理学报,2016,71(9):1571-1586.

[19] 徐丽萍.黄土高原地区植被恢复对气候的影响及其互动效应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2008.

[20] Li G Q, Wen Z M, Guo K, et al. Simulating the effect of climate change on vegetation zone distribution on the loess plateau, Northwest China: Forests[J].2015,6(6):2092-2108.

[21] Peng S Z, Li Z. Incorporation of potential natural vegetation into revegetation programmes for sustainable land management[J].Land Degradation and Development,2018,29(10):3503-3511.

[22] Hirzel A H, Le Lay G. Habitat suitability modelling and niche theory[J].Journal of Applied Ecology,2008,45(5):1372-1381.

[23] Bean W T, Prugh L R, Stafford R, et al. Species distribution models of an endangered rodent offer conflicting measures of habitat quality at multiple scales[J].Journal of Applied Ecology,2014,51(4):1116-1125.

[24] Peng S Z, Zhao C Y, Xu Z L, et al. Restoration and conservation potential of destroyed Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forests in the Qilian Mountains of northwest China[J].Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,2016,21(2):153-165.