

杨树防护林土壤蒸发及其影响因素

李 伦, 刘海军, 高壮壮, 杨 丽, 冯东雪

(北京师范大学 水科学研究院 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875)

摘 要: [目的] 研究杨树林地土壤蒸发规律, 探索估算林下土壤蒸发量的方法, 为林业高效率和用水和研究水循环规律提供理论支撑。[方法] 利用 20 cm 蒸发皿和微型蒸发器测量杨树林下水面和土壤蒸发量, 分析气象要素与林下土壤和水面蒸发的关系。测量土面温度和蒸发皿水体温度, 计算两者温度差相对值 (RT), 以水面蒸发量为参考计算土壤相对蒸发量 (RE), 分析 RE 与 RT 的关系, 进而建立估算土壤蒸发量的经验公式。[结果] 太阳辐射是影响林下土壤及水面蒸发量最主要的因素, 温度、相对湿度和风速等气象要素与土壤蒸发的相关性较差; 随着林下土壤与水面温度差相对值 RT 的增大, 相对蒸发量 RE 逐渐减小, 当 RT 增大到约 0.11 后, RE 趋近于常数 0.164, 认为此时土壤的蒸发已经进入水汽扩散阶段。[结论] 杨树防护林下土壤相对蒸发量随土壤与水体温度差相对值的增加而逐渐减小, 后趋于常数。经验证本研究提出的方法和建立的公式可较好地估算土壤蒸发, 为土壤蒸发量的原位测算提供了新的手段。

关键词: 杨树防护林; 土壤蒸发量; 微型蒸发器; 水面蒸发量; 气象要素

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)06-0082-07

中图分类号: S271

文献参数: 李伦, 刘海军, 高壮壮, 等. 杨树防护林土壤蒸发及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 82-88. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.012; Li Lun, Liu Haijun, Gao Zhuangzhuang, et al. Soil evaporation and its influencing factors under poplar shelterbelts [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 82-88.

Soil Evaporation and Its Influencing Factors Under Poplar Shelterbelts

Li Lun, Liu Haijun, Gao Zhuangzhuang, Yang Li, Feng Dongxue

(Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City

Technology, College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] Soil evaporation under poplar shelterbelts was investigated, and the in situ soil evaporation estimating method was developed, in order to provide support for water cycle pattern and efficient water use research in forestry. [Methods] Soil evaporation and water surface evaporation under the forest were measured by micro-lysimeters and the standard 20 cm evaporation pan. Reference water temperature in the pan and soil temperatures were also measured. Then the relative evaporation (RE), the ratio of soil evaporation to pan evaporation, and the relative temperature difference (RT), the ratio of temperature difference between soil and water temperature to water temperature were calculated. [Results] The solar radiation was the major factor for the evaporations of the under-forest soil and water surface. Air temperature, humidity, and wind speed have poor correlation with soil evaporation because of the low soil water content. The relationship between RE and RT could be described with a two-stage function, RE decreased with the RT increasing for RT being less than 0.11, after that the RE approached a constant of 0.164, indicating a water vapor diffusion process. [Conclusion] Under poplar shelterbelts, RE decreases gradually with the growth of RT and eventually tends to be a constant. The developed method was validated using an independent

收稿日期: 2021-06-16

修回日期: 2021-08-14

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“低压喷灌水肥多过程运动机理与高效协同调控”(51939005); 国家重点研发计划项目(2017YFD0201500); 111 引智基地项目(B18006)

第一作者: 李伦(1998—), 男(汉族), 吉林省梨树县人, 硕士研究生, 研究方向为节水与水资源高效利用技术。Email: 202021470012@mail.bnu.edu.cn.

通讯作者: 刘海军(1975—), 男(汉族), 陕西省富平县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水文过程及现代节水灌溉理论和技术研究。Email: shanxiljhj@bnu.edu.cn.

data set with relative error of less than 2%, indicating an excellent predication of soil evaporation. Therefore, this study provides a new method for the estimation of soil evaporation and the developed method can be used to estimate soil evaporation.

Keywords: poplar shelterbelts; soil evaporation; micro-lysimeter; water surface evaporation; meteorological factors

杨树(*Populus* spp.)作为我国北方地区主要的人工林树种,被广泛用于公路、铁路防护林以及城市绿化等方面^[1-3]。其生长对水、光、热等条件都具有较高的要求^[4-5]。我国北方多为干旱、半干旱区,水资源短缺,蒸发作用强烈^[2]。蒸发作为缺水地区耗水量的重要组成部分,直接影响着当地的水文循环、土壤水分的变化情况,也影响着杨树的正常生长发育^[6-7],缺水地区杨树大面积种植的可持续性引起越来越多的关注。定量计算林间土壤蒸发量,研究土壤蒸发现律及其测量技术对于林间水分管理以及作物耗水规律的研究具有重要的意义。国内外许多学者从水文学、气象学等不同的角度,对土壤蒸发过程及其影响要素进行研究并建立了定量的计算方法。Fox^[8]基于能量平衡方程,利用土壤与理想干土柱表面温差与日累计风速建立了土壤蒸发的估算公式;Ben-Asher等^[9]对Fox的模型进行了改进,引入积分的概念,利用土表温差与风速建立了相对蒸发量的计算方法;Alvenas等^[10]以土壤热流的计算公式为基础,建立了土面蒸发的估算公式;张建国等^[11]分析了土壤蒸发与水面蒸发的关系,通过一维平差处理对防护林土壤蒸发进行估算;高壮壮等^[12]利用不同水分条件下土壤表层温度的差异,建立了以饱和土壤为参考的不同水分条件下土壤蒸发量的估算公式。目前,对于土壤蒸发量的估算多数都是建立在理论模型的基础上,模型的准确性、适用性需要根据实际的应用条件进行调整和检验;模型计算时所需的参数较为复杂;模型的推广受到当地气候、下垫面等条件的影响。林下土壤蒸发不仅受到土壤本身条件的影响,同时受到林木覆盖等影响,以上公式直接利用会造成较大的误差。本试验以河北省邢台市大曹庄国家级种子试验站东侧道路两旁的杨树林为研究对象,利用微型蒸发器和20 cm蒸发皿对林下水面及土壤的实际蒸发量进行测量,分析防护林地的气候特征,以水面蒸发为参考,建立估算土壤蒸发量的公式,探求估算林下土壤蒸发量的简便方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2019年8—10月在河北省邢台市宁晋县大

曹庄国家级种子试验站(37°29′49.25″N,114°55′40.59″E,海拔26 m)进行。试验站东侧为406乡道,杨树防护林种植于公路两侧,单侧防护林宽15 m。研究区1981—2018年的年平均降水量在218~666 mm,多年平均降水量为430 mm,2019年降水量为499.6 mm;多年气温平均值为13.03℃,平均值日照时长为2 428 h,无霜期约250 d^[1,13]。研究区地势平坦、土质肥沃。防护林地0—60 cm的土壤均为粉壤土(表1)。杨树树种为速生107杨(*Populus* × *euramericana* cv. ‘Neva’);树龄为10 a;平均树高为15.6 m;平均胸径17.3 cm;平均冠幅为2.25 m;防护林内杨树的株距约为3.0 m,行间距约为3.5 m;林区无灌溉条件,春秋季节进行修剪。

表1 研究区土壤性质

深度/cm	机械组成			田间持水量/ (cm ³ · cm ⁻³)	容重/ (g · cm ⁻³)
	黏粒/%	粉粒/%	砂砾/%		
0—20	9.68	61.19	29.12	36.99	1.54
20—40	9.83	61.77	28.40	35.86	1.35
40—60	13.87	66.97	19.16	37.30	1.44

1.2 试验设计

1.2.1 蒸发量和温度测量 在防护林行间中心处布置3个20 cm蒸发皿和自制的6套微型蒸发器(micro-lysimeter, ML),测量水面的蒸发量及林下原状土的蒸发量。微型蒸发器由PVC管加工而成,其中内管高度为150 mm,壁厚为3 mm,内径为104 mm;外管内径为120 mm,固定于行间,方便取出和放回内筒,同时能够避免更换土壤时对土体的破坏^[14-16]。用微型蒸发器取原状土样时,将内管垂直压入土中,带土整体挖出后用保鲜膜封底,用皮筋及胶布固定。每日上午7:00用精度为0.01 g的电子天平测量蒸发皿及微型蒸发器的质量,3个蒸发皿与其前1日的质量之差的均值为前1日的林下水面蒸发量,6套微型蒸发器与前一日的质量之差的均值为前1日的土壤蒸发量。为了保证试验的精度,每次测量后,将20 cm蒸发皿内的水补充到深度为20 mm,并测量蒸发皿质量,每2 d更换微型蒸发器中的土壤,雨后要更换微型蒸发器中的土壤^[17-18]。

土壤表层温度数据及蒸发皿内水体的温度采用TT-T-24型热电偶进行测量。在蒸发皿水面下约

10 mm处布置 3 根温度传感器,在每个微型蒸发器内土壤表层 5—10 mm 处埋设 3 根温度传感器,采集器为 CR1000(campbell scientific, USA),采集频率为 10 s,记录 5 min 的平均值。

1.2.2 气象数据的采集 气象数据使用试验站自动气象站进行采集,包括温度、辐射、风速、降水等,采集器为 CR1000x(campbell scientific, USA),采集频率为 10 s,记录 10 min 的平均值。由于饱和水汽压差(VPD)与蒸发关系紧密,计算了日均 VPD,计算公式为^[1]:

$$\text{VPD}=0.6108 \exp\left(\frac{17.27}{t+237.3}\right) \times \left(1-\frac{H_r}{100}\right) \quad (1)$$

式中:VPD 为日均饱和水汽压差(kPa); H_r 为日均相对湿度(%); t 为日均气温($^{\circ}\text{C}$)。

1.3 数据处理

1.3.1 林下土壤相对蒸发量(RE) 水面蒸发量反映了试验环境下大气的蒸发能力。为了消除每日蒸发能力变化的影响,计算了土壤相对蒸发量 RE(relative soil evaporation),其值为时段内林地土壤蒸发量与水面蒸发量的比值,即:

$$\text{RE}=\frac{E_a}{E_0} \quad (2)$$

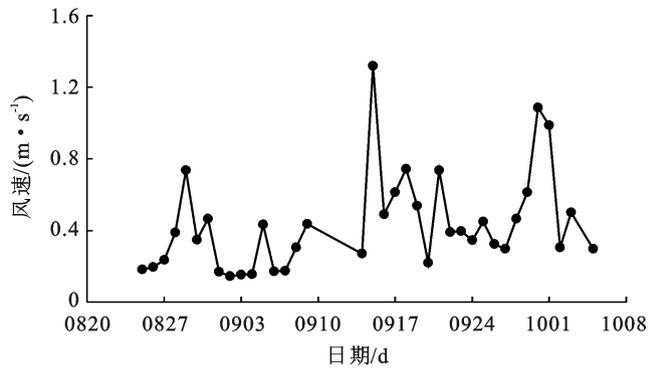
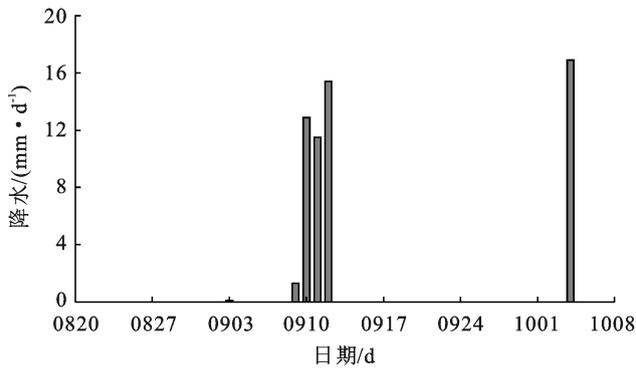


图 1 试验期间降雨及风速的变化过程

1.3.4 数据分析 试验数据采用 Microsoft Excel 2019 和 Origin 2021 软件进行处理、作图和曲线拟合,利用 SPSS 25.0 对各气象要素与蒸发量进行相关性分析。为了评估所建立的模型的精度,采用均方根误差(RMSE)、平均相对误差(MRE)和纳什效率系数(NSE)进行评估^[19]。

$$\text{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (5)$$

$$\text{MRE}=\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)}{O_i} \times 100\% \quad (6)$$

式中: E_a 为林地土壤日蒸发量(mm); E_0 为日水面蒸发量(mm)。

1.3.2 林下土壤与水面温度差相对值(RT) 土壤蒸发会影响表层温度,因此基于土壤表层温度的变化来估算土壤蒸发量。将某一时段内的林地土壤表层温度与该时段内水的温度相减,得到该时段内土壤与水的温度差值 ΔT 。为了消除绝对温度的影响,采用温度差的相对值,计算公式为温度差除以该时段上水的平均温度。

$$\Delta T = \bar{T}_a - \bar{T}_0 \quad (3)$$

$$\text{RT} = \frac{\Delta T}{\bar{T}_0} \quad (4)$$

式中: ΔT 为时段土壤与水面温度差值($^{\circ}\text{C}$); \bar{T}_a 为林地土壤表层的时段平均温度($^{\circ}\text{C}$); \bar{T}_0 为水面的时段平均温度($^{\circ}\text{C}$); RT 为该时段上的土壤温度差相对值。

1.3.3 干扰性数据筛选 本试验为露天试验,降雨会对试验结果造成影响,数据分析时剔除了 9 月 9—13 日及 10 月 4 日降水量较大日期的数据(图 1),除此之外还剔除了仪器出现故障的 9 月 20—25 日的数据。

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{\text{ave}})^2} \quad (7)$$

式中: P_i 为第 i 个拟合值; O_i 为第 i 个实测值; O_{ave} 为实测平均值; n 为拟合值或实测值个数。

2 结果与分析

2.1 林下土壤和水面蒸发量及温度的日变化过程

图 2 为试验期间林下土壤及水面的日蒸发量和两者日均温度随时间的变化曲线。由图 2 可知,试验期间防护林内土壤及水面总的蒸发量分别为 31.37

和 87.84 mm。和土壤蒸发相比,水面的日蒸发量变化更为剧烈,最大蒸发量为 4.21 mm/d,日最小值不足 0.5 mm/d;而土壤的日蒸发量较为稳定,

在 1 mm/d 左右波动。土壤和水面温度在试验期间变化趋势一致,随着时间推移,温度呈现逐渐降低的趋势。

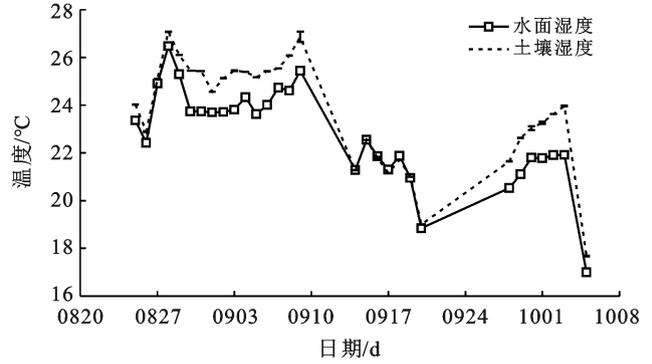
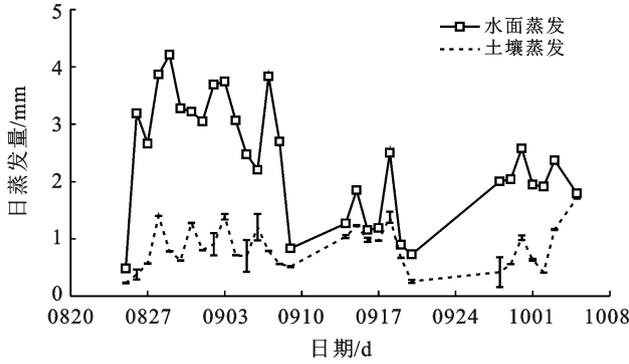


图 2 试验期间土壤、水面的日蒸发量及日均温度的变化过程

2.2 蒸发量与气象要素的关系

对气象要素与林下土壤及水面的日蒸发量分别进行相关性分析,结果详见表 2。由表 2 可以看出,林下水面蒸发与日总辐射及当日最高气温均呈现极为显著的正相关关系,相关系数分别为 0.761、0.575;水面蒸发与日均气温呈现出较为显著的正相关关系,相关系数为 0.373;土壤蒸发仅与日总辐射存在显著的相关关系,相关系数为 0.331。辐射和空气温度为热力因子,为蒸发过程提供能量,可以通过控制水体能量的变化来影响蒸发。试验期间的土壤及水面的蒸

发量与日均风速的相关关系均不显著。风速为动力因子,主要通过影响水汽分子的扩散速度影响蒸发,日均风速较低时,蒸发量受风速影响较小,但是当日均风速较大时,两者的蒸发量有明显提高(如 8 月 29 日、9 月 15 日和 9 月 30 日)。水面蒸发与日均饱和水汽压差呈现显著的正相关关系,与日均相对湿度呈现显著的负相关关系,相关系数分别为 0.579 和 -0.397,土壤蒸发与两者相关关系不显著。空气湿度和饱和水汽压差为水分因子,可以通过影响大气及物体表面的水汽压差来影响蒸发。

表 2 气象要素与土壤及水面蒸发量相关分析结果

项目	相关分析指标	日均温度	日最高温度	日均相对湿度	日总辐射	日均风速	日均饱和水汽压差
水面蒸发	Pearson 相关性	0.373 *	0.575 **	-0.397 *	0.761 **	-0.165	0.579 *
	显著性(双侧)	0.023	0.000	0.015	0.000	0.329	0.003
	样本数 N	37	37	37	37	37	37
土壤蒸发	Pearson 相关性	-0.241	-0.050	-0.234	0.331 *	0.147	0.148
	显著性(双侧)	0.151	0.767	0.164	0.046	0.386	0.383
	样本数 N	37	37	37	37	37	37

注:“*”表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,“**”在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

2.3 相对蒸发量 RE 与温度差相对值 RT 的关系

充分供水条件下,水体的温度主要受到气象条件的影响。但是当土壤中的水分逐渐消耗、含水量逐渐下降时,土壤蒸发量也逐渐下降,这时由于蒸发量的下降造成土壤温度比充分供水条件下的温度高,土壤蒸发条件下的温度和充分供水条件下的温度差与土壤蒸发量是相关的。为了寻求能最大程度反映土壤蒸发量的温度差,本研究分别分析了 8 月 25 日至 10

月 7 日数据测量期间数据较好的 26 d 的日均相对温度、白天 8:00—18:00, 10:00—16:00 时与 12:00—14:00 平均相对温度差值 RT 与日相对蒸发量 RE 的关系(见图 3)。由图 3 可以看出,基于拟合公式的决定系数(R^2), 12:00—14:00 时平均的 RT 与日相对蒸发量 RE 拟合效果(图 3)要优于其他时段。

2.4 土壤蒸发量公式拟合与验证

从图 3 可以看出,利用 12:00—14:00 时的平均

温度差相对值 RT 与日相对蒸发量 RE 所建立的关系估算土壤蒸发量的效果最好(回归公式的决定系数 R^2 最大)。但是对于图中建立的三次函数,随着 RT 的继续增大,RE 会逐渐降低,甚至会出现小于 0 的情况,与实际不符。由图 3 可知,开始时随着 RT 的增大,RE 快速减小,当 RT 大于某一值时,RE 逐渐趋近于一个常数,因此本文用分段函数拟合。为了满足模

型建立和验证使用的数据相互独立,选择将试验期间的蒸发及温度数据分为 A 组(9 月 14 日至 10 月 5 日,共 14 日)和 B 组(8 月 25 日至 9 月 9 日,共 12 日)其中 A 组数据用于关系拟合,B 组数据用于所建立关系的验证。利用 A 组数据拟合的公式如式(8),拟合曲线如图 4 所示,利用 B 组数据验证结果如图 4 所示,模型检验指标 RMSE,MRE 和 NSE 详见表 3。

$$RE = \begin{cases} 127.1RT^3 + 20.36RT^2 - 8.959RT + 0.766 & (RT < 0.11) \\ 0.164 & (RT \geq 0.11) \end{cases} \quad (R^2 = 0.9) \quad (8)$$

式中:RE 为日土壤相对蒸发量; RT 为日 12:00—14:00 平均温度差相对值。

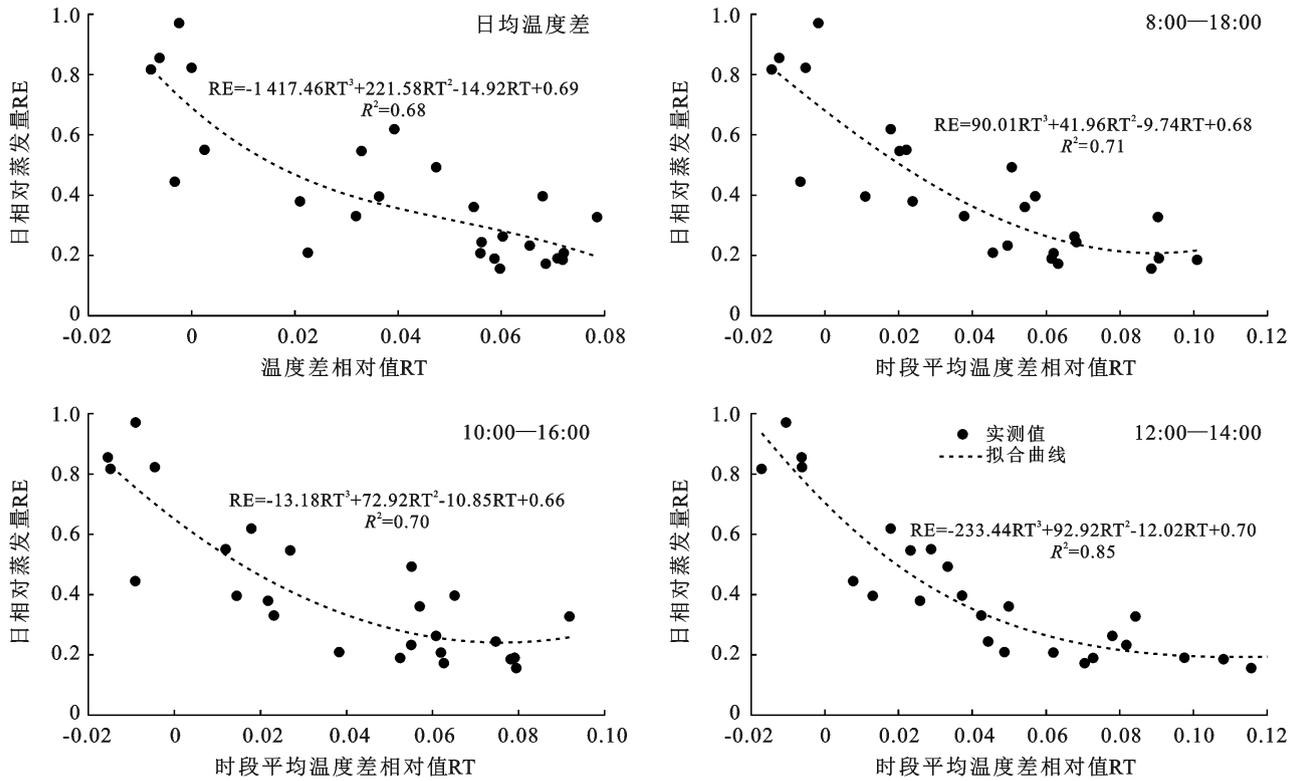


图 3 日相对蒸发量 RE 与日不同时间段平均相对温度差值 RT 的关系

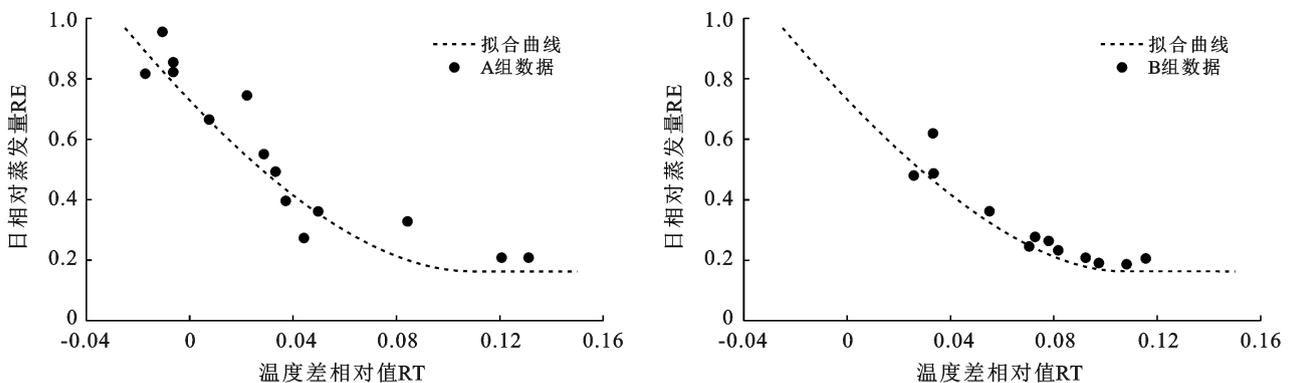


图 4 日相对土壤蒸发量 (RE) 和温度差相对值 (RT) 的拟合曲线 (A 组) 及曲线验证 (B 组)

通过 A 组数据建模和 B 组数据验证的结果看出,实测和估算的日相对蒸发量 RE 的 R^2 均达到了 0.9, RMSE 分别为 0.087, 0.043, MRE 的绝对值小于 10%, NSE 均大于 0.9, 表明该拟合公式可用于计算试验区林下土壤蒸发量。

表 3 A, B 组数据的模型检验指标

检验指标	R^2	均方根误差 (RMSE)	平均相对误差 (MRE)/%	纳什效率系数 (NSE)
A 组	0.90	0.087	-0.93	0.93
B 组	0.90	0.043	1.46	0.96

3 讨论

气象条件是土壤蒸发的驱动因子^[20]。刘丽霞等^[21]研究得出,对土壤蒸发影响的气象因子排序为:太阳辐射>空气相对湿度>风速>气温;同时莫康乐等^[5]认为,气候因子对土壤蒸发的影响与土壤水分条件有关,在土壤含水量较低条件下,土壤蒸发与大气因子间的相关性不明显。本研究显示,虽然土壤与水面蒸发量有相同的变化趋势,但是两者与各气象要素的相关性并不一致。总辐射是影响林下土壤及水面蒸发最主要的影响因素,这与多数研究结论一致^[22-24]。穆家伟等^[25]的研究也显示在湿润期,油蒿沙柳样地土壤蒸发与太阳辐射存在正相关趋势,但是在干旱期土壤蒸发与太阳辐射并不显著。本研究条件下,水面蒸发与太阳辐射、饱和水汽压差和温度显著相关,说明这 3 个气象要素是驱动蒸发的主要因素。韩生生等^[26]研究发现,微型蒸发器的蒸发具有明显的日变化规律,日出后蒸发速率不断升高至午间达到最大值后逐渐下降,并在晚间保持在相对较低的状态,午间蒸发速率(11:00—13:00)与日总蒸发量的线性拟合效果较好。本试验中,通过不同时段 RT 与 RE 间关系的建立也发现午间(12:00—14:00)两者的拟合效果最好,随着时间范围的扩大,拟合效果逐渐变差($R_{12-14}^2 > R_{8-18}^2 > R_{10-16}^2 > R_{日均}^2$),这进一步说明蒸发过程主要受辐射的影响,午间辐射高,蒸发量最大。但是土壤蒸发与所有的气象条件相关性均较差,这主要是由于试验期间,除了降雨后的部分时间,大部分时间表层土壤比较干燥,土壤中可供蒸发的水分较少,削弱了这些气象因子对土壤蒸发的影响。统计结果显示风速与林下水面及土壤的相关性都不显著,而看出在风速较大时,蒸发也受到风速的影响(图 2, 8 月 29 日、9 月 15 日和 9 月 30 日),这也表明风速是影响蒸发重要的主要因子之一,但是由于防护林本身就具有防风的作用,大部分时候林内风速都比较小,对于

水汽扩散速率的促进作用有限,只有在风速较大的时候,风速对蒸发的影响才能够表现出来。刘国水等^[22]研究发现日蒸发量与日平均风速的关系并不明显,并认为风速对蒸发量的影响与尺度的变化有关,在小时尺度上蒸发量与风速的关系明显上升;韩鹏飞等^[27]的研究也显示了小时尺度上风速与蒸发的关系更好。

土壤蒸发对土壤温度的影响使得利用土壤温度变化估算土壤蒸发成为可能。马己安等^[6]以一次供水的不同表面条件的土壤与水面进行对比,将裸地的蒸发过程划分为 3 个阶段,将压砂地土壤蒸发划分为 2 个阶段。高壮壮等^[12]以一次供水与充分供水条件下的土壤蒸发为研究对象,发现两者的温度差相对值随着蒸发过程的进行逐渐增大,当蒸发进行到水汽扩散阶段时,温度差相对值趋于稳定。本试验中,基于温度差变化将 RE 变化过程分为了两个阶段。在第一阶段,初始时,土壤含水量相对较高,土壤水分供水相对充足,蒸发对土壤温度影响小,土壤与水面温度差值不大,RT 接近于 0;随后土壤含水量的降低,蒸发所利用的辐射能量逐渐减少,部分辐射能量转化为感热通量提高了温度,这时 RT 逐渐增加,RE 也逐渐减小;当 RT>0.11 后,RE 趋近常数 0.164,此时土壤中的液态水分含量极低,土壤蒸发进入到水汽扩散阶段,土壤温度已不受土壤含水量的影响,而主要受辐射的影响^[28]。

使用微型蒸发器进行土壤蒸发测定简单实用,但是在应用过程中仍然面临着一些问题亟待解决。微型蒸发器无法测定植物根系吸收水分造成的土壤水分变化的过程^[29],未来可进一步结合植物蒸腾耗水进行研究,整体分析杨树防护林蒸散发过程。不同土壤质地条件下,土壤含沙量,土壤孔隙、热容量等性质的不同会改变土壤水分的运动特征进而影响土壤表层温度及蒸发量^[6,12,26],本文仅研究了粉壤土条件下的防护林土壤蒸发,条件比较单一,今后可改变土壤质地,研究其对蒸发的影响。含水量是影响土壤蒸发的重要条件,不少学者从含水量的角度研究了蒸发量与含水量间的变化规律^[2,6,20-21,26]。本文主要尝试利用水面及土表温度差相对值来建立估算土壤蒸发量的经验公式,但是土壤含水量的测定对土壤蒸发规律的研究以及划分蒸发阶段有十分重要的意义,在今后的土壤蒸发量估算的研究中,将 ML 内的土壤含水量纳入测定范围。

4 结论

(1) 林下影响水面蒸发的气象因素排序为辐射、饱和水汽压差和温度;但是林下土壤含水量总体较低,使得土壤蒸发与气象要素关系较弱。

(2) 林下土壤相对蒸发量 RE 随土壤与水体温度差相对值 RT 变化过程可以分为两个阶段:RE 随 RT 的增加逐渐减小,当 RT 大于 0.11 时,RE 趋近于常数 0.164,认为此时蒸发过程已经进入到水汽扩散阶段。

(3) 构建了基于土壤—水体温差的土壤蒸发量公式,经验证估算的土壤蒸发量与实测的土壤蒸发量接近($R^2=0.9$),因此本研究提出的方法为原位测量并估算林下土壤蒸发提供了新思路。

[参 考 文 献]

- [1] 刘海军,高壮壮,冯东雪,等.杨树耗水特征及其主要影响要素分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2019,55(5):662-668.
- [2] 康满春,蔡永茂,王小平,等.表层阻力和环境因素对杨树(Populus sp.)人工林蒸散发的控制[J].生态学报,2016,36(17):5508-5518.
- [3] Zhou Jie, Zhang Zhiqiang, Sun Ge, et al. Response of ecosystem carbon fluxes to drought events in a poplar plantation in Northern China [J]. Forest Ecology Management, 2013,300:33-42.
- [4] Petzold R, Schwarzel K, Feger K H. Transpiration of a hybrid poplar plantation in Saxony (Germany) in response to climate and soil conditions [J]. European Journal of Forest Research, 2011,130(5):695-706.
- [5] 莫康乐,张志强,陈立欣,等.永定河沿河沙地杨树人工林林下土壤蒸发研究[J].四川农业大学学报,2013,31(1):32-36.
- [6] 马己安,冯克鹏,李王成,等.基于水面蒸发量的宁夏中部干旱带土壤蒸发量估算研究[J].灌溉排水学报,2020,39(10):35-41.
- [7] 刘静,崔学明,郭永贞,等.两种杨树防护林减少土壤蒸发作用的对比研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2006,27(4):62-67.
- [8] Fox M J. A technique to determine evaporation from dry stream beds [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1968,7(4):697-701.
- [9] Benasher J, Warrick A W, Matthias A D. Bare-soil evaporation determined in situ by infrared thermometry [J]. Journal of Hydrology, 1984,69(1/4):325-334.
- [10] Alvenas G, Jansson P E. Model for evaporation, moisture and temperature of bare soil: Calibration and sensitivity analysis [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997,88(1/4):47-56.
- [11] 张建国,孙树国,徐新文,等.塔克拉玛干沙漠公路防护林棵间土壤蒸发及蒸发量估算[J].水土保持通报,2011,31(1):145-148,248.
- [12] 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.
- [13] 杨丽,刘海军,唐晓培,等.气候变化下河北省宁晋县参考作物蒸散量变化趋势及敏感性分析[J].灌溉排水学报,2021,40(1):97-105.
- [14] 刘钰.微型蒸发器田间实测麦田与裸地土面蒸发强度的试验研究[J].水利学报,1999(6):45-50.
- [15] 李王成,王为,冯绍元,等.不同类型微型蒸发器测定土壤蒸发的田间试验研究[J].农业工程学报,2007,23(10):6-13.
- [16] 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.
- [17] Zhao Peng, Li Sien, Li Fusheng, et al. Comparison of dual crop coefficient method and Shuttleworth-Wallace model in evapotranspiration partitioning in a vineyard of northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2015,160:41-56.
- [18] Agam N, Evett S R, Tolk J A, et al. Evaporative loss from irrigated interrows in a highly advective semi-arid agricultural area [J]. Advances in Water Resources, 2012, 50: 20-30.
- [19] 李艳.不同施氮水平对喷灌冬小麦—夏玉米农田土壤水氮迁移转化及其利用率影响的研究[D].北京:中国农业大学,2015.
- [20] 李艳,刘海军,黄冠华.麦秸覆盖条件下土壤蒸发阻力及蒸发模拟[J].农业工程学报,2015,31(1):98-106.
- [21] 刘丽霞,王辉,孙栋元,等.绿洲农田防护林系统土壤蒸发特征研究[J].干旱区资源与环境,2008(1):162-166.
- [22] 刘国水,刘钰,蔡甲冰,等.农田不同尺度蒸散量的尺度效应与气象因子的关系[J].水利学报,2011,42(3):284-289.
- [23] 李菊,刘允芬,杨晓光,等.千烟洲人工林水汽通量特征及其与环境因子的关系[J].生态学报,2006,26(8):2449-2456.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 韩生生,刘苏峡,宋献方,等.西沙赵述岛地表蒸散发试验[J].地理研究,2021,40(1):172-184.
- [27] 韩鹏飞,王旭升,胡晓农,等.巴丹吉林沙漠湖泊水面蒸发与气象要素的动态关系[J].干旱区研究,2018,35(5):1012-1020.
- [28] 雷志栋.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1998.
- [29] Kool D, Agam N, Lazarovitch N, et al. A review of approaches for evapotranspiration partitioning [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014,184:56-70.