

贾晓鹏,马启民,龙银平,等.以中型蒸渗仪监测的库布齐沙漠人工林土壤蒸发量[J].中国沙漠,2022,42(1):211-222.

以中型蒸渗仪监测的库布齐沙漠 人工林土壤蒸发量

贾晓鹏¹,马启民²,龙银平²,王海兵³

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化重点实验室,甘肃 兰州 730000; 2.成都信息工程大学 资源环境学院,四川 成都 610225; 3.内蒙古农业大学 沙漠治理学院,内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要:人工造林对库布齐沙漠的生态有重要影响,量化沙地土壤蒸发对开展人工林建设具有重要意义。利用蒸渗仪对库布齐沙漠银肯沙林场的土壤蒸发进行测定,但受外界因素的影响,蒸渗仪观测的数据会有异常值,通过自适应窗口阈值法对观测数据进行处理。再利用气象观测系统获取相关气象数据,分析土壤蒸发与气象因子的关系。结果表明:小时尺度上,蒸渗仪获取的降水与雨量筒获取的降水量之间的决定系数为0.93,平均误差和均方根误差分别为-0.00078、0.11 mm,探测率、击中率及Heidke指数分别为0.75、0.9、0.8;日尺度上,两者的决定系数为0.99,平均误差和均方根误差分别为-0.02、0.66 mm,探测率、击中率及Heidke指数分别为0.94、0.85、0.85。两个时间尺度下,该方法在处理蒸渗仪的异常数据取得了较好的结果。研究时段内林场的土壤蒸发量为93.87 mm,集中在7—9月,最大日蒸发量为16.5 mm;降水为264.88 mm,也集中在7—9月,最大日降水量约35 mm,沙地人工林土壤蒸发占降水的35.4%。沙漠人工植被区影响土壤蒸发的主要气象因子是降水和太阳辐射,风速对土壤蒸发的影响不大。

关键词:库布齐沙漠;蒸渗仪;AWAT;土壤蒸发;气象因子

文章编号:1000-694X(2022)01-211-12

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00212

中图分类号:S715.4

文献标志码:A

0 引言

土壤蒸发是水循环的基本组成部分,在植物生长过程中,不同植物的裸间土壤蒸发可占蒸散量的24%—37%^[1]。在干旱半干旱区,土壤蒸发量直接影响沙区植被的水分利用^[2],在缺水地区量化土壤蒸发对植被建设极其重要。目前,学者对区域的蒸散和植被的蒸腾研究很多,但对土壤蒸发的研究相对较少。土壤蒸发最直接的观测方法是利用蒸渗仪测定^[3],大型蒸渗仪价格昂贵、分辨率低且很难在野外开展试验^[4],有的甚至破坏了原状土结构^[5-6];微型蒸渗仪应用最多的是一种可移动的小型圆柱器皿,需要定期更换土柱且受外界影响较大^[7-9]。中型蒸渗仪与大型蒸渗仪类似,不用更换土柱且精度高,用太阳能板驱动即可在野外实现长期连续观测。不论采用哪种观测方法,蒸渗仪有可能受大

风、暴雨、动物等影响而产生振动,造成观测数据异常。如果不加以控制将会给观测结果带来较大的误差,目前数据平滑处理方法主要有滑动平均^[10]、AWAT(Adaptive Window and Adaptive Threshold)滤波^[10]、Synchro滤波^[11]、Wavelet滤波^[12]、Savitzky-Golay滤波^[13]等。无论采用哪种方法,都需要假设降雨和蒸发不会同时发生,并且还要确定两个参数:一是蒸渗仪在某一时间段内重量变化可以忽略不计,即时间窗口大小;二是在相近的两个时间窗口内重量差小于某一阈值时结果将被舍弃,大于这一阈值的值将被保留。此阈值确定后,再计算降雨和蒸散发或蒸发。一般这两个参数会取某一固定的值,但这会引起较大的误差^[13]。AWAT滤波法较好地解决了这两个参数取值问题,将两个参数约束在一定的区间内,但该方法在不同研究区对结果的验证还需

收稿日期:2021-12-01; 改回日期:2022-01-11

资助项目:成都信息工程大学人才引进项目(KYTZ202113);科技兴蒙重点专项(KJXM-EEDS-2020006);四川省重点研发计划项目(2020YFS0356)

作者简介:贾晓鹏(1982—),男,山东临沂人,副研究员,主要从事陆面生态水文过程研究。E-mail:jiaxp@lzb.ac.cn

通信作者:马启民(E-mail:mqm@cuit.edu.cn)

进一步的研究,并且国内一些研究者并未对蒸渗仪测定的土壤蒸发数据进行验证^[14-18],这会对观测的土壤蒸发结果造成一定的影响。

库布齐沙漠是西北干旱区向东部湿润区过渡的关键区,沙漠中的沙土不仅有利于雨水快速入渗,阻止径流形成,而且能够有效抑制沙面蒸发损失,为地表植被提供水源保证,是当地生态环境建设的“储水罐”。当前对沙地的土壤蒸发研究主要在腾格里沙漠^[3]、毛乌素沙地^[19]、古尔班通古特沙漠^[20-22]、科尔沁沙地^[23-25]、塔克拉玛干沙漠^[26-28]、浑善达克沙漠^[29],对库布齐沙漠土壤蒸发的观测数据匮乏,影响土壤蒸发的主要气象因子有哪些,对这些问题的研究尚在初期阶段。因此,量化沙地土壤蒸发,探析影响它的主要气象因子对当地生态建设具有重要的现实意义,也可为土壤蒸发模拟提供重要的数据基础^[30]。

本文通过高精度中型蒸渗仪获取了2014年7—11月库布齐沙漠中段银肯沙林场的土壤蒸发观测资料,研究目的是:①利用AWAT法对蒸渗仪观测的数据进行处理,通过定量指标和分类指标对结果进行验证,以期得到更好的结果;②利用气象数据分析土壤蒸发过程中的主要影响因素;③进一步了解库布齐沙漠人工林土壤蒸发过程,为沙地人工林建设提供理论依据。

1 站点介绍与试验设计

1.1 站点概况

试验于2014年7月20日至11月20日在库布齐沙漠中段罕台川流域展旦召分场银肯沙进行,站点坐标为40°11′03″N、109°55′17″E,海拔1 229 m。银肯沙林场建于1984年,是展旦召分场最大的作业区。范围东至罕台川西岸,西至西柳沟东岸,南至青达门乡岳家沟,北至库布齐沙漠大小敖包一带。东西长16 km,南北宽8 km,经营面积约11 600 hm²^[31]。植被以人工灌木为主,主要有柠条和沙柳,土壤类型以沙土为主。站点距达拉特旗气象站26 km,根据该气象站观测资料显示,该区年平均气温6.1℃,极端最高气温40.2℃,极端最低气温-34.5℃;多年平均降水量304 mm,降水集中在7—9月;年潜在蒸发量2 161.4 mm,远大于多年平均降水量;4—9月太阳辐射量占全年辐射量的65%;年平均风速3.2 m·s⁻¹,最大风速25 m·s⁻¹,西风频次最

多,主要发生在春季^[32]。

1.2 试验方案

在试验点布置一套全自动中型蒸渗仪(SFL-900, UMS, 德国),将原位土柱装载到蒸渗仪中,用于观测土壤蒸发(蒸渗仪表面为裸土)。距蒸渗仪20 m处,架设一个雨量筒,用于验证蒸渗仪测定的降水。雨量筒距地面1.5 m,精度为0.1 mm,口径20 cm,观测时间与蒸渗仪同步。蒸渗仪内径30 cm,深100 cm,蒸发表面积为0.0707 m²。假若降水使得蒸渗仪的总重量增加了1 kg,水的密度为1 000 kg·m⁻³,那么蒸渗仪里水位的高度增加约14.15 mm,即为相应雨量。同理,假若蒸渗仪的总重量减少了1 kg,则表示蒸发了14.15 mm水分。蒸渗仪最大重量支持300 kg,精度为1 g。距蒸渗仪1 m处有一个排水给水罐,容积为15 L,与蒸渗仪圆柱桶连接,用于容纳和补给蒸渗仪圆柱桶内的土壤水分。排水给水罐底部也有一个电子天平,最大称重20 kg,精度为0.5 g。在距离蒸渗仪圆柱桶2 m处,与蒸渗仪底部水势传感器同样的深度,安装了一个田间参考水势传感器,用于和蒸渗仪底部水势传感器进行对比,进而触发双向泵的开关,确定吸水管的水流方向,以保证蒸渗仪圆柱桶内的土壤水分与外界保持一致。当蒸渗仪里的土壤水含量大于外界的土壤时,控制开关自动打开,双向泵把水吸到排水储水罐中;当蒸渗仪里的土壤水含量小于外界的土壤时,控制开关又会自动打开,双向泵将排水储水罐里的水吸到蒸渗仪中。可将蒸渗仪里的土壤和外界土壤视为一个连续的整体,确保同样深度土壤水的水势一致(图1A)。仪器由太阳能板供电,数据采集器采用澳大利亚生产的DT80型号,采样频率间隔为5 s,存储间隔为1 min。此外,观测站点还架设了气象站,观测变量有气温、湿度、风速、辐射等,采样间隔为10 s,每10 min记录一次平均值,以上所有仪器的观测时间均为北京时间(图1B)。

2 研究方法

2.1 数据处理方法

假设降水和蒸发不会同时发生,相同时间间隔,蒸渗仪重量的变化就是蒸发或者降水。可以用下式表示:

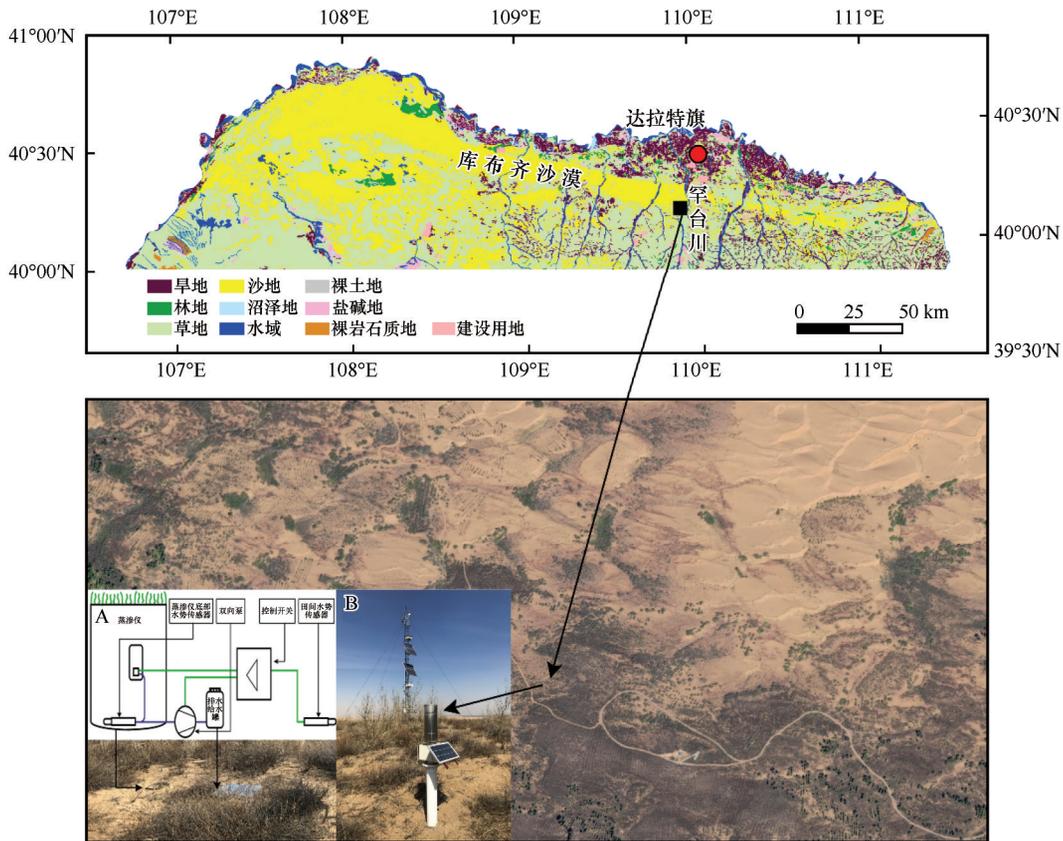


图 1 蒸渗仪结构(A)与气象观测系统(B)

Fig.1 The lysimeter (A) and meteorological observation system (B)

$$P = \begin{cases} 0 & \Delta M \leq 0 \\ \Delta M & \Delta M > 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E = \begin{cases} 0 & \Delta M \geq 0 \\ \Delta M & \Delta M < 0 \end{cases}$$

式中： P 为降水(mm)；因为蒸渗仪表面为裸土，此时 E 为土壤蒸发(mm)； ΔM 为相邻两个时刻蒸渗仪重量的差(kg)。

在理想的状态下，用两个相邻时刻的数值差就可以计算出降水量和蒸发量，但在环境复杂的野外，简单的做差求和会给结果带来较多误差。例如，在大风、持续下雨的天气，蒸渗仪受到非受迫性震动会出现许多异常值^[33]。在AWAT方法中，首先选取一个最大时间窗口 w_{max} ，采用 K 阶多项式法对时间窗口内的观测数据变化量进行多项式拟合，求得均方根误差 $S_{res,i}$ 和信号强度 B_i ；其次，根据均方根误差与观测值标准差计算自适应窗口大小；最后，根据时间窗口内观测值的 t 分布和均方根误差计算自适应阈值，用大于阈值的滑动平均值来确定蒸发和降水^[10]。

在给定的最大时间窗口内(w_{max})，利用 K 阶多项式拟合蒸渗仪重量变化量(即当前时刻重量与上一

时刻重量之差，后文将其简称为观测值)。多项式的阶数要高以保证它能很好地拟合时间窗口内的数据，但也要尽可能地低来减少数据的噪声，防止过度拟合。为了满足这两个要求需选择一个最佳方案，即 Akaike's information criterion(AIC)准则解决了这一问题^[34-35]。 K 阶多项式和 AIC 表达式分别如式(2)和式(3)：

$$Y_i(t) = \sum_{j=0}^k a_j t^j \quad (2)$$

式中： $Y_i(t)$ 为拟合值； t 表示时间， $t_i - (w_{max} - 1)/2 \leq t \leq t_i + (w_{max} - 1)/2$ ； a_j 为多项式系数； k 为多项式的阶数。在AWAT方法中， k 最大设定为6，这是为了防止过度拟合。例如在大风、强降水天气时，拟合的多项式的阶数会很高。

$$AIC = r \ln(SSQ/r) + 2n + \frac{2n(n+1)}{r-n-1} \quad (3)$$

式中： r 是所选时间窗口中数据的个数，为奇数； SSQ 为观测值与拟合值的最小残差平方和； n 为模型的独立参数个数， $n=k+1$ 。当观测值与模拟值存在相当大的差异时，差异在式(3)右边第一项会体现出来；当观测值与模拟值的差异很小时，差异在

式(3)右边的第二项得到体现;式(3)的第三项是修正项,推理过程可参考文献[35]。

当利用最少的参数计算出来的 AIC 值最小,模型最佳,也就确定了拟合的多项式。但最佳模型拟合的所有数据是不是在合理范围内,是不是存在过度拟合的情况,还需要对每个拟合值进行评价,评价指标如下式:

$$S_{res,i} = \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{j=1}^r (y_j - \hat{y}_j)^2} \quad (4)$$

$$S_{dat,i} = \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{j=1}^r (y_j - \bar{y}_j)^2} \quad (5)$$

$$B_i = \frac{S_{res,i}}{S_{dat,i}} = \sqrt{1 - R_i^2} \quad (6)$$

式中: y_j 为观测值; \hat{y}_j 为拟合值; \bar{y}_j 为时间窗口内所有观测数据的平均值; $S_{res,i}$ 为观测值与模拟值的均方根误差; $S_{dat,i}$ 为观测值的标准差; B_i 用以度量多项式对观测数据的拟合程度, $B_i=0$ 时说明多项式完全拟合了所有数据, $B_i=1$ 时说明多项式无法拟合这些数据; R_i^2 为决定系数。每个观测值的时间窗口大小可以由以下表达式确定:

$$w_i(B_i) = \max(w_{min}, B_i \cdot w_{max}) \quad (7)$$

式中: w_{min} 和 w_{max} 分别为最小和最大时间窗口宽度,与观测数据的时间间隔有关,确定的时间窗口应都在这一区间,这两个值是根据经验取的,本文中 $w_{min}=1 \text{ min}$, $w_{max}=31 \text{ min}$ 。

每个观测值的滑动时间窗口确定以后,还需要确定阈值的大小,以下是确定自适应阈值的表达式:

$$\delta_i = \begin{cases} \delta_{max} & S_{res,i} \cdot t_{97.5,r} \geq \delta_{max} \\ S_{res,i} \cdot t_{97.5,r} & \delta_{min} < S_{res,i} \cdot t_{97.5,r} < \delta_{max} \\ \delta_{min} & S_{res,i} \cdot t_{97.5,r} \leq \delta_{min} \end{cases} \quad (8)$$

式中: δ_{min} 和 δ_{max} 是蒸渗仪重量变化的最小和最大阈值; $t_{97.5,r}$ 是自由度为 $r-1$ 、置信水平为 95% 的 t 分布分位数; δ_i 位于 $[-S_{res,i} \cdot t_{97.5,r}, S_{res,i} \cdot t_{97.5,r}]$ 区间,其观测值和多项式拟合值之间的差异不显著,也就是 95% 的数据在这个区间内可以很好地拟合。由此,重量变化大于 δ_i 认为是可用数据,而小于 δ_i 则认为蒸渗仪无法识别该重量。将 δ_i 限定在 δ_{min} 、 δ_{max} 之间有两个原因:① δ_{min} 为蒸渗仪的观测最小重量,重量变化小于仪器最低精度时蒸渗仪无法识别;② 用 δ_{max} 剔除大风、暴雨等天气下的噪声。该方法建议 δ_{min} 要稍高于仪器的观测最小重量, δ_{max} 为 3 倍的 δ_{min} ,本文中 $\delta_{min}=1 \text{ g}$, $\delta_{max}=3 \text{ g}$ 。最后通过 ΔM (式 1) 的变化量计算降

水和蒸发,再计算出逐时、逐日的降水和蒸发量。

2.2 数据验证方法

以雨量筒观测的降水数据为基准,对蒸渗仪测得的数据进行验证,两者时间序列同步。降水验证标准分别采用定量指标和分类指标对蒸渗仪测定的降水与雨量筒观测的降水两者之间的一致性进行评价与分析。

定量指标包括均方根误差 ($RMSE$) 和平均误差 (ME)。 $RMSE$ 的计算方法同式(4), ME 的计算方法如下:

$$ME = \sum_{i=1}^n (P_L - P_w) / n \quad (9)$$

式中: P_L 为蒸渗仪测定的降水; P_w 为雨量筒观测的降水; n 为样本的总体数量。

分类指标包括探测率 (probability of detection, PD)、击中率 (frequency of hit, FH)、Heidke 指数 (Heidke's skill score, HSS)。 PD 和 FH 的值在 (0, 1), 越大表示效果越好; PD 越高表示蒸渗仪对降水事件的漏报程度越小; FH 越高表示蒸渗仪对降水事件的空报程度越小。 HSS 的值介于 (-1, 1), 它是兼顾探测率和击中率的一个综合指标。如果 HSS 小于 0, 说明蒸渗仪计算的数值对降水的分类估计能力低于随机估计; 如果 HSS 大于 0, 则说明蒸渗仪测定的数值对降水分分类估计的能力强于随机估计; 如果 HSS 等于 1, 说明蒸渗仪计算的数值对降水的分类估计是最好的, 这一指标适用于各种概率的降水事件估计中^[36-37]。分类指标的定义和计算方法用式(10)、(11)、(12)计算,以雨量筒观测的降水为基准,利用表 1 来进行判断,方法介绍详见文献[38]。

$$PD = n_{11} / (n_{11} + n_{01}) \quad (10)$$

$$FH = n_{11} / (n_{11} + n_{10}) \quad (11)$$

$$HSS = \frac{2(n_{11}n_{00} - n_{10}n_{01})}{(n_{11} + n_{01})(n_{01} + n_{00}) + (n_{11} + n_{10})(n_{10} + n_{00})} \quad (12)$$

表 1 降水两类估计联表

Table 1 Contingency table for accuracy of Lysimeter rainfall estimates

蒸渗仪测定的降水	雨量筒观测的降水	
	有雨	无雨
有雨	n_{11}	n_{10}
无雨	n_{01}	n_{00}

3 结果与分析

3.1 验证结果

从图2可以看出,蒸渗仪探测并且击中到了绝大多数时刻的降水事件。小时尺度上,选取了两次连续的降水事件和两次大雨事件。7月22日(图2A),02:00、03:00、08:00、12:00以及15:00,蒸渗仪探测的降水稍大于雨量筒观测的降水。04:00、05:00、09:00、17:00,蒸渗仪探测的降水稍小于雨量筒观测的降水,只有13:00与雨量筒观测的降水相等,都为0.7 mm。但07:00、10:00、11:00蒸渗仪没有探测到

降水事件,06:00时探测到了降水,但雨量远远小于雨量筒观测的降水,仅为0.02 mm。8月9日(图2B)有一次大雨事件和一次小雨事件,蒸渗仪探测的大雨事件都高于雨量筒观测的降水,大雨事件相差约3.4 mm,但小雨事件两者雨量相当,分别为1.7、1.76 mm。同样8月27日(图2C)蒸渗仪探测的结果都相对较好。在9月1日(图2D)不同程度的降水事件中,蒸渗仪的测定结果也相对较好,并且命中了所有降水事件,误差均在1 mm以内。可以看出,在不同程度的降水事件中,蒸渗仪探测的降水与观测的降水相当,空报的降水事件很少。

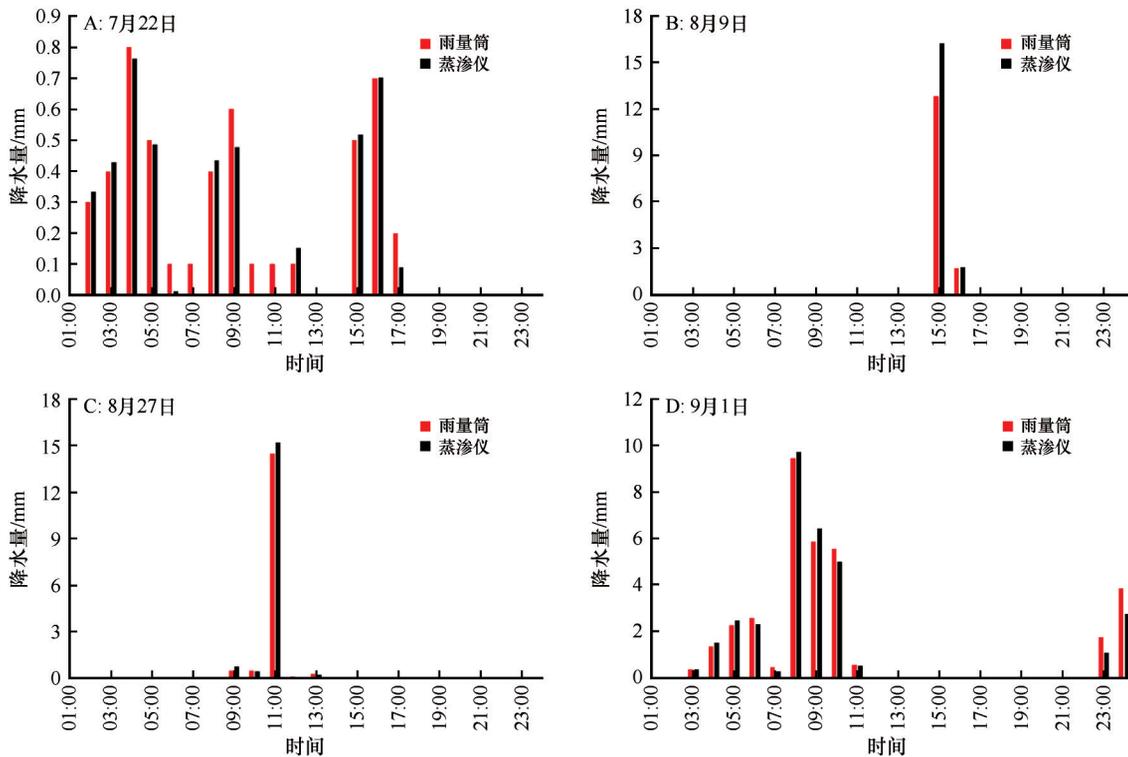


图2 雨量筒降水量与蒸渗仪降水量的小时变化对比

Fig.2 Comparison of hourly variations in rain gauge rainfall and lysimeter rainfall

从图3可以看出,蒸渗仪测定的降水明显偏大的天数一共有4天(7月29日、7月31日、8月9日、8月27日),比雨量筒观测的分别多了1.02、3.52、3.4、1.14 mm;蒸渗仪测定的降水明显偏小的天数一共有4天(8月3日、9月1日、9月11日、10月29日),比雨量筒观测的分别少了1.44、1.64、3.69、1 mm,其他雨天的日降水量误差均在1 mm以内。整个研究时段,蒸渗仪测定的降水总量(共264.88 mm)近似等于雨量筒观测的降水总量(共264.7 mm)。

由图4可以看出,在小时尺度上,蒸渗仪降水量与雨量筒降水量的总体变化趋势一致,决定系数达

0.93(图4A)。同样,在日尺度上,两者的变化趋势也一致,决定系数达0.99(图4B)。不论是小时还是日尺度,两者的降水时序趋势基本一致。

由表2可以看出,小时尺度上的 ME 和 $RMSE$ 分别为 -0.00078 、 0.11 mm,误差很小。蒸渗仪测定的降水成功探测到了大多数的降水事件,探测率为0.75,并且命中程度很高,击中率达0.9; HSS 综合指数达0.8,说明蒸渗仪探测率和击中率都很高。日尺度上, ME 和 $RMSE$ 分别为 -0.02 、 0.66 mm,比小时尺度的大。日尺度的探测率要大于小时尺度上的,高达0.94;但击中率要稍小于小时尺度上的,为0.85;

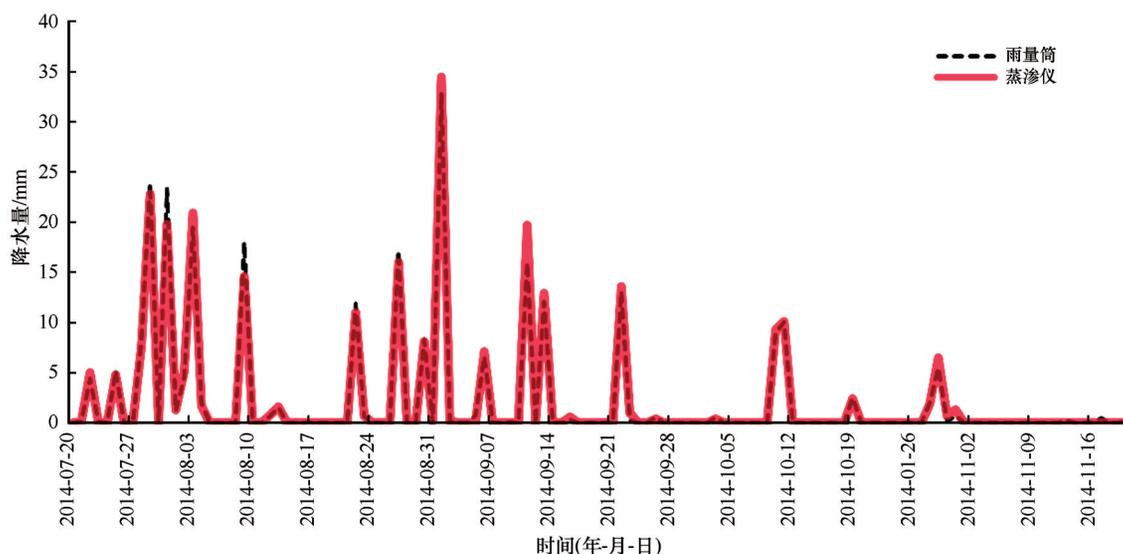


图3 雨量筒降水量与蒸渗仪降水量的日变化对比

Fig.3 Comparison of daily variations in rain gauge rainfall and lysimeter rainfall

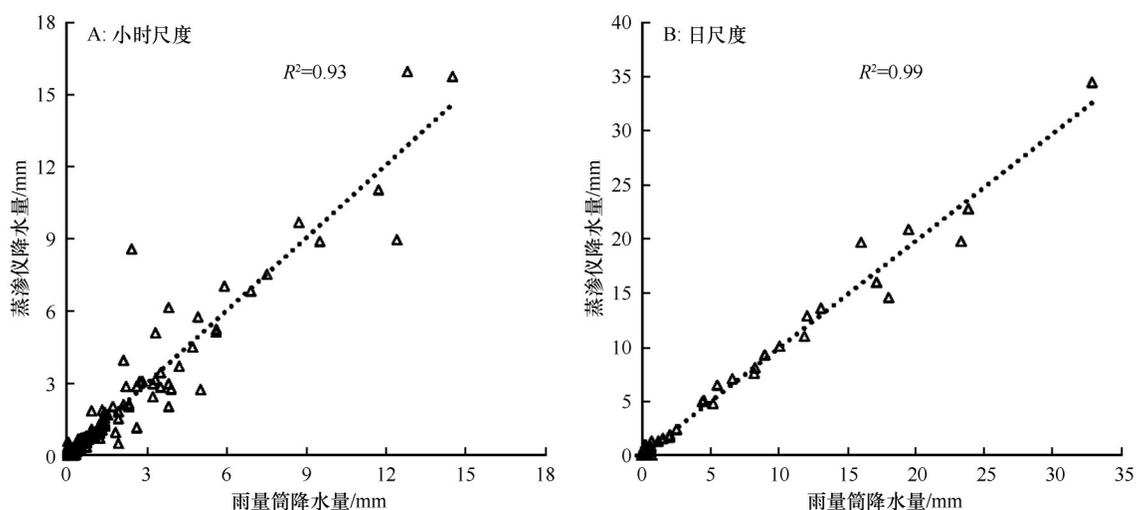


图4 小时和日尺度的雨量筒降水量与蒸渗仪降水量的时序散点图

Fig.4 Scatter plots of rain gauge rainfall and lysimeter rainfall respectively at hourly and daily scale

表2 蒸渗仪计算降水量的精度指标

Table 2 Assessment of the calculated rainfall from lysimeter

时间	ME/mm	RMSE/mm	PD	FH	HSS
小时尺度	-0.00078	0.11	0.75	0.90	0.80
日尺度	-0.02	0.66	0.94	0.85	0.85

综合指数HSS稍大于小时尺度上的,为0.85。总体上,不论是小时尺度还是日尺度,蒸渗仪的探测率和击中率都很高,说明AWAT方法计算的降水数据是可靠的。

3.2 土壤蒸发及其与气象因子的关系

利用蒸渗仪测定的降水数据得到了很好的验

证,那么计算的土壤蒸发数据也是可靠的。整个研究时段,土壤蒸发量为93.87 mm,集中在7—9月,日最大土壤蒸发量为16.5 mm;降水为264.88 mm,也集中在7—9月,最大日降水约35 mm,沙地人工林区土壤蒸发占同期降水的35.4%。土壤蒸发主要发生在降雨后的一天时间内,之后如果没有发生降水事件土壤日蒸发都较小,不足1 mm,其他时间土壤蒸发几乎为零。例如8月17日、9月28日、10月1日前后几日无降水事件发生时,土壤蒸发非常小,这说明沙地土壤蒸发水分主要来自降水。

为了进一步了解沙地土壤蒸发与气象因子之间关系,又因为土壤蒸发主要发生在雨后,选取了雨后当天(7月29日)和雨后第二天(8月10日、8月

28日、9月12日、9月24日)分析不同时期的土壤蒸发与气象因子的关系。根据统计分析,小时尺度上,土壤蒸发与风速不相关,土壤蒸发与相对湿度、气温以及太阳辐射的相关性系数分别为-0.55、0.55、0.85,且都通过了显著性检验($P < 0.05$)。晴天(8月28日、9月24日)土壤蒸发先于气温达到一天中的最大值,土壤蒸发与土壤湿度不是同一时间点达到极值,蒸发先达到最大值,而后相对湿度达到最小值。土壤蒸发与太阳辐射的相关性最好,蒸发主要发生在14:00前后,晴天土壤蒸发稍滞后太阳辐射1小时达到一天中的最大值(图5)。其他天气条件下,土壤蒸发与太阳辐射的变化趋势基本一致,并且相关性要高于其他气象因子与土壤蒸发的相关性。同样,日尺度上土壤蒸发与风速不相关,

它与降水、相对湿度、气温以及太阳辐射之间都通过了显著性检验($P < 0.05$),相关性系数分别为0.21、-0.18、0.20、0.22,土壤蒸发与降水和太阳辐射的相关性最好(图6)。因此可以看出,除降水外,影响土壤蒸发的主要气象因子是太阳辐射,而风速对土壤蒸发的影响不大。

4 讨论

尽管AWAT方法得到了很好的验证,但计算的降水和蒸发仍然存在一定误差。研究表明,雨量筒观测的降水数据也存在一定的误差^[39-40],观测站点所用的雨量筒分辨率为0.1 mm,本研究使用的蒸渗仪的分辨率为1 g,换算以后约为0.014 mm。当降水小于0.1 mm时,雨量筒的传感器就无法感应到,

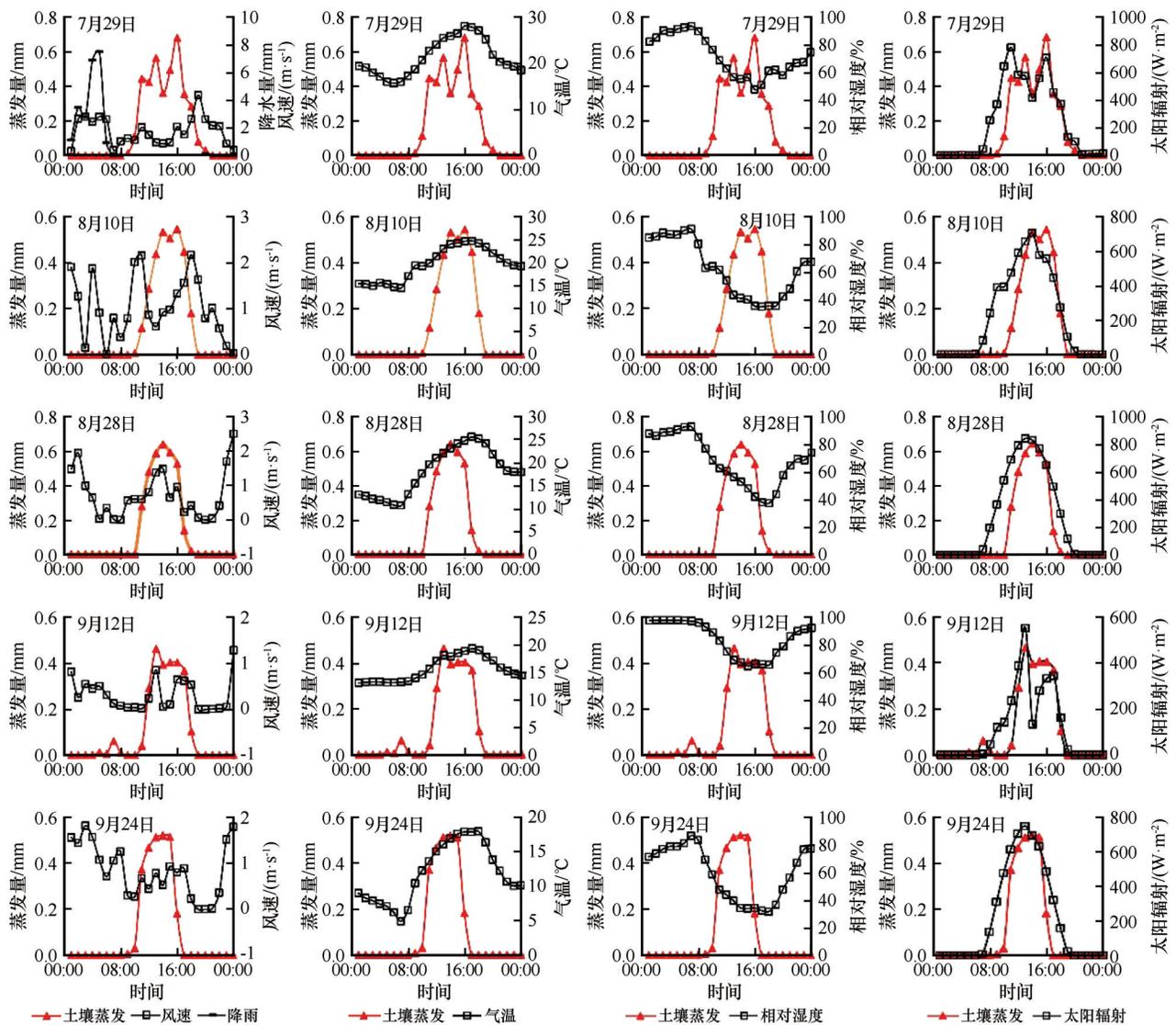


图5 小时蒸发与气象因子的关系

Fig.5 Relationships between hourly soil evaporation and meteorological factors

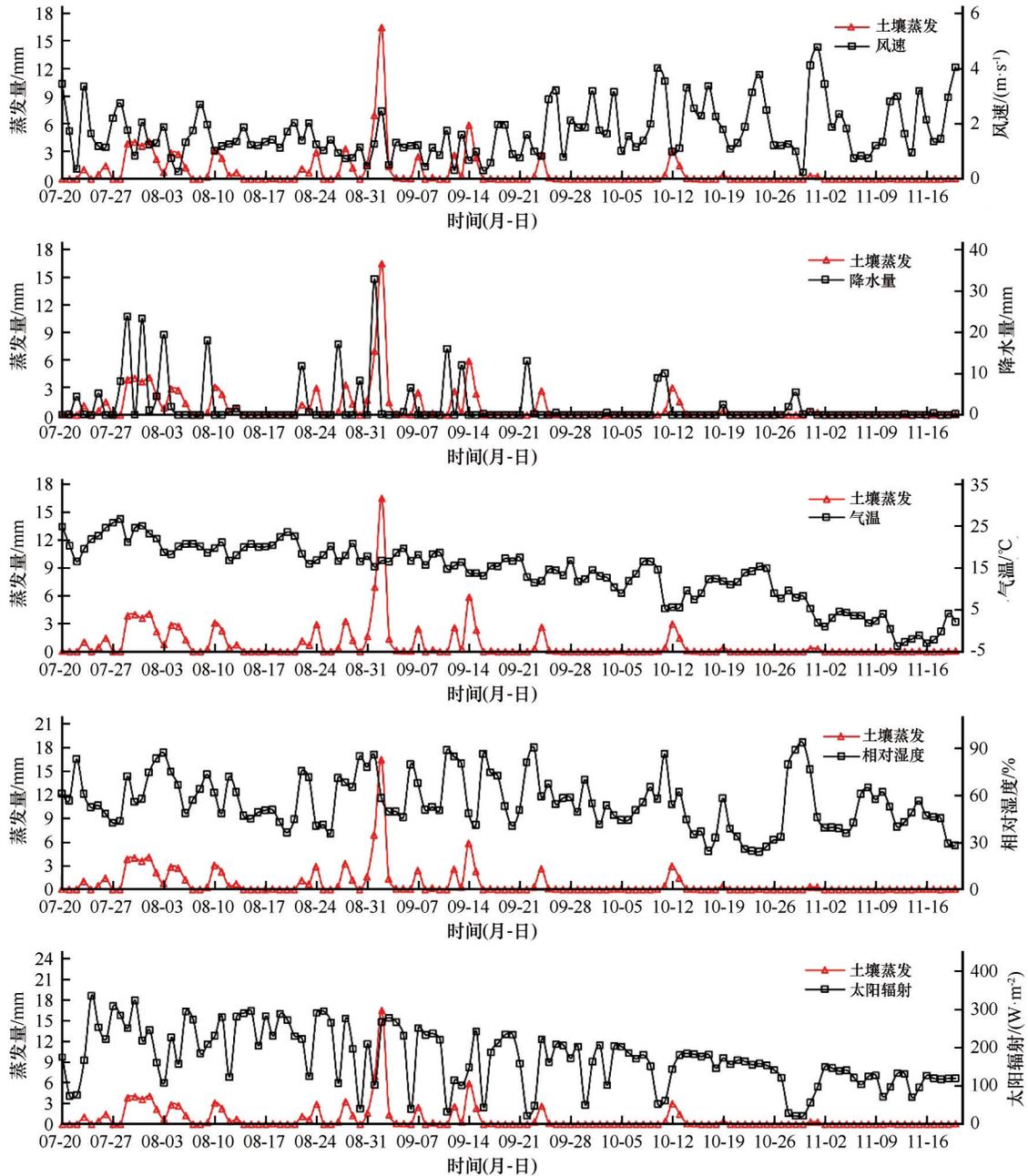


图6 日蒸发与气象因子的关系

Fig.6 Relationships between daily soil evaporation and meteorological factors

而蒸渗仪的分辨率高,可以观测到很小的降水事件,或者非降水事件,例如露、雾、风沙、动物的触碰等的发生,都有可能影响整个系统。例如:在干旱半干旱地区,非降水性的水分能够被土壤和植被吸收^[41-42],这会影响蒸渗仪的重量变化。再者AWAT方法计算的降水和蒸发与所取时间窗口的大小和蒸渗仪的精度有关,也就是该方法中的 w 和 δ 取值。在仪器精度确定以后,影响观测的结果就是所取时间窗口的大小。Gebler等^[43]利用该方法对德国的莱茵河谷的蒸散和降水监测进行分析,发现蒸渗仪测

定的降水和雨量筒观测的降水也存在差异,蒸渗仪测定的总降水要比雨量筒观测的降水高16.4%。Ruth等^[4]利用该方法对瑞士东北部的图尔河流域的草地蒸散进行研究,发现蒸渗仪测定的总降水要比雨量筒观测的降水高17.6%。Hannes等^[11]利用多组蒸渗仪对德国的拜德朗地区的农田和草地蒸散进行研究,也发现蒸渗仪测定的总降水要比雨量筒观测的降水高。Gebler等的研究中 $w_{min}=11\text{ min}$, $w_{max}=61\text{ min}$, $\delta_{min}=0.055\text{ kg}$, $\delta_{max}=0.24\text{ kg}$,最大阈值约为最小阈值的5倍;Ruth等的研究中 $w_{min}=1\text{ min}$, $w_{max}=$

31 min, $\delta_{\min}=0.0012$ kg, $\delta_{\max}=0.015$ kg, 最大阈值约为最小阈值的13倍; Hannes 等的研究中 $w_{\min}=1$ min, $w_{\max}=31$ min, $\delta_{\min}=0.0081$ mm, $\delta_{\max}=0.24$ mm, 最大阈值约为最小阈值的30倍。两者的差异可能与其所取的时间窗口大小和阈值有关, Hannes 等^[11]认为这种差异与雨量筒架设的高度和雨量筒本身的精度有关。Peters 等^[10]建议 $w_{\min}=1$ min, $w_{\max}=31$ min, δ_{\max} 最大阈值约为最小阈值 δ_{\min} 的3倍。由表3可以看出, 不同时间窗口下, 计算的降水量和蒸发量各不相同, 整体差异较大。这说明在处理大风、暴雨天气等异常数据时, 时间窗口的大小会影响数据结果。时间窗口为31 min时, 利用AWAT方法计算的降水量和雨量筒观测的降水量基本相等, 但Peter 等^[10]认为时间窗口为31 min时有待进一步的验证。也就是说该方法应用在其他研究区时, 需用雨量筒的观测数据对该方法进行验证, 从而得到精度相对较高的土壤蒸发或蒸散发数据。在观测的降水量准确的前提下, 本文研究中蒸渗仪的表面裸土距系统顶部还有约6 cm的高度。如遇到短时暴雨天气时, 表面雨水因不能快速下渗, 大雨接触到蒸渗仪顶部的水面会使雨水溅到蒸渗仪外部, 从而影响整个系统的水量平衡, 进而对蒸发的测定造成影响。也有研究发现, 不同材料制作的蒸渗仪, 规格不同, 所测定的土壤蒸发也会不同^[44-47]。在本研究中整个土柱主要成分是沙土, 蒸渗仪的材质是合金, 两者的导热差异明显, 这也可能影响土壤蒸发测定结果。因此, 获取精确的土壤蒸发研究, 还需从验证数据、仪器本身, 特别是数据处理方法等方面去考虑。

表3 不同AWAT窗口下的降水量和蒸发量
Table 3 Rainfall and evaporation under different windows in the AWAT algorithm

气象因子	AWAT窗口/min		
	11	21	31
蒸发量/mm	105.53	98.95	93.87
降水量/mm	274.62	267.03	264.88

张志山等^[3]在腾格里沙漠东南缘中国科学院沙坡头站对人工植被区的土壤蒸发进行测定, 研究时段为2003年5—10月, 测得的裸地土壤总蒸发93.8—111.6 mm, 并且雨后的土壤蒸发占总蒸发的比例很大, 非降雨时期土壤日蒸发很小, 一般在0.52 mm以

下。本文测得库布齐沙漠中段(2014年7月20日至11月20日)的裸土蒸发为93.87 mm, 雨后的土壤蒸发也很大, 非降雨时期, 土壤蒸发也很小, 两者的结果基本一致, 其他研究者在干旱区测得的土壤日蒸发平均也都在1 mm左右^[48-50]。从图5、6分析得到, 土壤蒸发与降水、气温、相对湿度、太阳辐射显著相关, 土壤蒸发与风速不相关。周学雅等^[23]对科尔沁草地裸间土壤蒸发进行观测, 发现土壤蒸发与饱和水汽压差、净辐射、风速显著相关, 与气温显著不相关。问晓梅^[51]对半干旱区的农田间土壤蒸发进行研究, 发现利用蒸发皿测得的土壤蒸发与相对湿度、温度显著相关, 与风速不相关; 利用超声观测的土壤蒸发与气温、相对湿度显著相关, 与风速也不相关。土壤蒸发与气象因子的相关性差异可能与每个研究区的气象因子差异较大有关, 也可能是所测的裸间植被类型差异较大所致。例如, 本文的裸土裸间植被主要是柠条, 其他两个研究区的裸间植被分别是草地和农田。艾鹏睿等^[52]对干旱区枣棉间作模式下的土壤蒸发进行研究, 发现植被类型对土壤蒸发的影响较大。

5 结论

利用SFL-900蒸渗仪对库布齐沙漠银肯沙林场的土壤蒸发进行了观测, 再通过AWAT方法处理异常数据, 最后利用定量指标和分类指标对蒸渗仪的观测数据进行了验证, 得到以下结论: 小时尺度上, 蒸渗仪获取的降水与雨量筒获取的降水两者决定系数为0.93, 平均误差和均方根误差分别为-0.00078、0.11 mm, 探测率(PD)、击中率(FH)及Heidke指数(HSS)分别为0.75、0.9、0.8。日尺度上, 两者的决定系数为0.99, 平均误差和均方根误差分别为-0.02、0.66 mm, 探测率、击中率及Heidke指数分别为0.94、0.85、0.85。两种时间尺度下, 该方法在处理蒸渗仪的异常数据取得了较好的结果, 为研究沙地人工林土壤蒸发提供了重要且又精确的观测数据。研究时段内, 林场的土壤蒸发量为93.87 mm, 集中在7—9月, 日最大蒸发量为16.5 mm。降水为264.88 mm, 也集中在7—9月, 最大日降水约35 mm, 沙地人工林区土壤蒸发占同期降水的35.4%。通过对土壤蒸发与气象要素的相关性进行分析, 日尺度上, 沙漠人工植被区的土壤蒸发主要受降水和太阳辐射的影响, 风速对土壤蒸发的影响不大。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李新荣,马凤云,龙立群,等.沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J].中国沙漠,2001,21(3):217-227.
- [3] 张志山,王新平,李新荣,等.沙漠人工植被区土壤蒸发测定[J].中国沙漠,2005,25(2):243-248.
- [4] Ruth C E, Michel D, Hirschi M, et al. Comparative study of a long-established large weighing lysimeter and a state-of-the-art mini-lysimeter[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-10.
- [5] 张志山,李新荣,赵洋,等.沙坡头生态水文学研究进展及水量平衡自动模拟监测系统[J].中国沙漠,2018,38(6):1119-1135.
- [6] 高云飞,赵传燕,王清涛,等.祁连山中部亚高山草地作物系数估算[J].中国沙漠,2016,36(5):1419-1425.
- [7] 杨宪龙,魏孝荣,邵明安.不同规格微型蒸渗仪测定土壤蒸发的试验研究[J].土壤通报,2017,48(2):343-350.
- [8] 陈永宝,胡顺军,朱海,等.古尔班通古特沙漠南缘梭梭(*Haloxylon ammodendron*)群落土壤蒸发特征[J].中国沙漠,2016,36(1):190-198.
- [9] 赵丽雯,赵文智,吉喜斌.西北黑河中游荒漠绿洲农田作物蒸腾与土壤蒸发区分及作物耗水规律[J].生态学报,2015,35(4):1114-1123.
- [10] Peters A, Nehls T, Schonsky H, et al. Separating precipitation and evapotranspiration from noise: a new filter routine for high-resolution lysimeter data[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(3): 1189-1198.
- [11] Hannes M, Wollschläger U, Schrader F, et al. High-resolution estimation of the water balance components from high-precision lysimeters[J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2015, 12(1): 569-608.
- [12] Ramier D, Berthier E, Andrieu H. An urban lysimeter to assess runoff losses on asphalt concrete plates[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2004, 29(11/12): 839-847.
- [13] Schrader F, Durner W, Fank J, et al. Estimating precipitation and actual evapotranspiration from precision lysimeter measurements[J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 19: 543-552.
- [14] 吴锦奎,陈军武,吴灏,等.疏勒河上游高寒草甸蒸散对比研究[J].地理科学,2013,47(1):63-70.
- [15] 吴友杰,杜太生.西北干旱区农田土壤蒸发量及影响因子分析[J].农业工程学报,2020,36(12):110-116.
- [16] 刘志伟,李胜男,张寅生,等.青藏高原高寒草原土壤蒸发特征及其影响因素[J].干旱区资源与环境,2019,33(9):89-95.
- [17] 樊才睿,李畅游,孙标,等.呼伦贝尔地区不同土地利用下土壤蒸发野外试验研究[J].节水灌溉,2015(1):4-7.
- [18] 张梦迪,张立锋,陈之光,等.土壤蒸发和植被蒸腾对三江源退化高寒草甸蒸散的影响[J].生态学报,2021,56(18):1-15.
- [19] 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.
- [20] 陈永宝,胡顺军,朱海,等.古尔班通古特沙漠南缘梭梭(*Haloxylon ammodendron*)群落土壤蒸发特征[J].中国沙漠,2016,36(1):190-198.
- [21] 龙桃,熊黑钢,李宝富,等.灌溉前后沙质裸地表层土壤蒸发量的时空变异性[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):1-16.
- [22] 翟翠霞,马健,李彦.古尔班通古特沙漠风沙土土壤蒸发特征[J].干旱区地理,2007,30(6):805-811.
- [23] 周学雅,王安志,关德新,等.科尔沁草地裸间土壤蒸发[J].中国草地学报,2014,36(1):8.
- [24] 王海玲,刘延玺,郑明,等.科尔沁沙地甸子地土壤蒸发的野外试验研究[J].人民黄河,2011,33(7):103-105.
- [25] 王冠丽,刘廷玺,孙铁军,等.沙地土壤蒸发能力的气象影响因子辨析及沙地土壤蒸发量特点分析[J].中国农村水利水电,2008,15(7):1-4.
- [26] 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.
- [27] 张建国,孙树国,徐新文,等.塔里木沙漠公路防护林土壤盐结皮化学特征及其对土壤蒸发的影响[J].干旱区资源与环境,2010,24(4):174-179.
- [28] 孙树国,张建国,徐新文,等.塔克拉玛干地区土壤质地以及灌溉水水量及水质对土壤蒸发的影响[J].土壤通报,2009,40(6):19-23.
- [29] 王志强,朝伦巴根,柴建华.浑善达克沙地人工植被覆盖下土壤蒸发的模拟研究[J].中国生态农业学报,2007,41(6):44-47.
- [30] 童雅琴,王佩,李小雁,等.黑河流域高寒草甸生态系统水分收支及蒸散发拆分研究[J].生态学报,2018,38(20):7400-7411.
- [31] 曹建义.大林场:鄂尔多斯市造林总场[J].内蒙古林业,2006,1(2):37-39.
- [32] 马启民,王海兵,贾晓鹏.库布齐沙漠人工柠条(*Caragana korshinskii*)林地表辐射特征[J].中国沙漠,2021,41(5):52-59.
- [33] Nolz R, Kammerer G, Cepuder P. Interpretation of lysimeter weighing data affected by wind[J]. Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 2013, 176(2): 200-208.
- [34] Akaike H. A new look at the statistical model identification [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6): 716-723.
- [35] Hurvich C M, Tsai C L. Regression and time series model selection in small samples[J]. Biometrika, 1989, 76(2): 297-307.
- [36] Hu Q F, Yang D W, Wand Y T, et al. Accuracy and spatio-temporal variation of high resolution satellite rainfall estimate over the Ganjiang River Basin [J]. Science China, 2013, 56(4): 853-865.
- [37] 罗阳,赵伟,翟景秋.两类天气预报评分问题研究及一种新评分方法[J].应用气象学报,2009,20(2):129-136.
- [38] Ebert E F, Janowiak J E, Kidd C. Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numeri-

- cal model[J].*Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(1):47-64.
- [39] 王彬彬,孙雪,刘春玲.称重式降水传感器与雨量筒降水量误差分析[J].*农业与技术*,2013,33(2):157.
- [40] 郑勤,陈仁升,韩春坛,等.祁连山 TRwS204 与中国标准雨量筒降水观测对比研究[J].*高原气象*,2018,37(3):747-756.
- [41] Zhang Q, Wang W Y, Yang F L, et al.Characteristics of dew formation and distribution, and its contribution to the surface water budget in a semi-arid region in China [J].*Boundary-Layer Meteorology*,2015,154(2):317-331.
- [42] Huang L, Zhang Zh S.Effect of rainfall pulses on plant growth and transpiration of two xerophytic shrubs in a revegetated desert area: Tengger Desert, China[J].*Catena*,2016,137:269-276.
- [43] Gebler S, Hendricks H-J, Pütz T, et al.Actual evapotranspiration and precipitation measured by lysimeters: a comparison with eddy covariance and tipping bucket [J].*Hydrology and Earth System Sciences*,2015,19(5):2145-2161.
- [44] 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.
- [45] Todd R W, Evett S R, Howell T A, et al.Soil Temperature and water evaporation of small steel and plastic lysimeters replaced daily[J].*Soil Science*,2000,165(11):890-895.
- [46] 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(10):16-23.
- [47] 孙宏勇,刘昌明,张喜英,等.不同长度 micro-lysimeters 对测定土壤蒸发的影响[J].*西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2003,31(4):167-170.
- [48] 王会肖.砂土土壤蒸发的测定与模拟[J].*中国农业气象*,1997(4):29-35.
- [49] 樊引琴,蔡焕杰,王健.冬小麦田棵间蒸发的试验研究[J].*灌溉排水学报*,2000(4):2-5.
- [50] 屈艳萍,康绍忠,王素芬,等.液流-株间微型蒸渗仪法测定新疆杨蒸发蒸腾量适用性分析[J].*干旱地区农业研究*,2014,32(3):88-94.
- [51] 问晓梅.半干旱地区降露水和蒸发特征研究[D].北京:中国气象科学研究院,2009.
- [52] 艾鹏睿,马英杰,马亮.干旱区滴灌枣棉间作模式下枣树棵间蒸发的变化规律[J].*生态学报*,2018,38(13):4761-4769.

Soil evaporation monitored with medium-lysimeter in an artificial forest in the Hobq Desert, China

Jia Xiaopeng¹, Ma Qimin², Long Yinping², Wang Haibing³

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 3. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: Accurately quantifying soil evaporation on sandy land is of great significance for developing of plantation construction for restoring the ecology of the Hobq Desert. In this study, lysimeter was used to measure soil evaporation of an artificial forest in the Yinkensha Forest Farm in the Hobq Desert. However, due to the influence of external factors, the data observed by the lysimeter would have abnormal values. The Adaptive Window and Adaptive Threshold method (AWAT) was used to process the lysimeter data. Meteorological variables were measured synchronously to assess their influences on soil evaporation. The following results were obtained: on an hourly scale, the coefficient of determination between the precipitation captured by the lysimeter and the precipitation obtained by the rain gauge was 0.93, and the average error and the root mean square error were -0.00078 mm and 0.11 mm, respectively. The probability of detection, frequency of hit, and Heidke's index score were 0.75, 0.9, and 0.8 respectively; On the daily scale, the coefficient of determination, average error and root mean square error were 0.99, -0.02 mm, and 0.66 mm, respectively. The probability of detection, frequency of hit, and Heidke's index score were 0.94, 0.85, and 0.85, respectively. The above statistics suggest the AWAT method had achieved in processing abnormal data from the lysimeter. During the study period, the soil evaporation of an artificial forest farm was 93.87 mm, mainly concentrated in July-September, with a maximum daily evaporation of 16.5 mm; precipitation was 264.88 mm, also concentrated in July-September, with a maximum daily precipitation of about 35 mm. The soil evaporation of sandy plantations accounted for 35.4% of precipitation. The main meteorological factors affecting soil evaporation in desert artificial vegetation areas were precipitation and solar radiation, and wind speed had little effect on soil evaporation.

Key words: Hobq Desert; lysimeter; AWAT; soil evaporation; meteorological factors