

胡杨(*Populus euphratica*)蒸腾耗水 对小降雨事件的响应

赵春彦^{1,2}, 司建华¹, 冯起¹, 鱼腾飞¹, 李培都^{1,2}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用内蒙古额济纳旗 1960—2010 年逐日降水量观测资料, 并连续监测了 2012—2013 年胡杨蒸腾速率和实时降水量, 研究了小降雨事件对荒漠河岸林胡杨蒸腾耗水的影响。结果表明: 50 年来额济纳旗小降雨事件占总降雨事件的比例达 90.63%。不同量级的小降雨事件对蒸腾速率的影响存在较大差异, 小于 1 mm 的降雨发生前蒸腾速率处于下降趋势, 降雨发生后蒸腾速率的下降幅度变小, 2 h 后开始缓慢上升; 1~4 mm 降雨发生前蒸腾速率呈大幅下降趋势, 降雨发生后 1~2 h 蒸腾速率基本不变, 降雨发生 3~4 h 后蒸腾速率显著上升。小降雨事件对胡杨蒸腾耗水量的影响存在明显的时滞效应, 0.2 mm 降水发生对其后各日蒸腾耗水量影响不大, 降雨发生当日蒸腾耗水量的变化仍延续前几天蒸腾耗水量的变化趋势; 0.4~0.8 mm 降雨量发生对其后 2 d 内胡杨蒸腾耗水量有微弱影响, 对 2 d 后的蒸腾耗水量影响不大; 1~4 mm 降雨发生后, 第 1 天胡杨的蒸腾耗水量显著降低, 但降雨后第 2 天胡杨蒸腾耗水量明显增加。降雨量和蒸腾速率的指数拟合关系表明小降雨事件对降雨后 4 h 胡杨蒸腾速率的影响最大; 对降雨后 1 h 的蒸腾速率影响较小。

关键词: 小降雨事件; 蒸腾耗水; 胡杨; 荒漠河岸林

文章编号: 1000-694X(2017)05-0942-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00097

中图分类号: Q948.11

文献标志码: A

0 引言

降水是植物重要的水分来源, 对维持植物的生长发育非常重要。但干旱半干旱区小降雨事件(≤ 5 mm) 占年总降雨频次的比例很大, 许多有关植物水分关系的研究认为小于 5 mm 的降雨仅能湿润植物叶片和土壤表层, 不能被植物的根系吸收利用, 因而是无效降雨^[1-2]。但是植物对水分的吸收利用不仅仅局限在根部, 叶片也是植物吸收利用水分的一个重要器官, Limm 等^[3]发现生态系统中 80% 的植物都存在叶片吸水现象, 而且叶片吸水在降雨过程中有重要意义^[4]。此外, 有研究认为被植物叶片吸收的水分能够更加及时地补充植物体内水分的亏缺, 比从根部吸收水分更加有效^[5]。因此, 在干旱环境中, 尽管小降雨事件的雨量很小, 但作为干旱半干旱区重要的输入性水分来源, 小降雨对植物的水分平衡关系具有重大意义, 其发生可能会对植物水分平衡起到一定的调节作用。植物蒸腾是植物和环境之

间物质交换和能量平衡的重要生理过程^[6-8], 目前对植物蒸腾的研究主要集中在尺度扩展^[9-11]、生理调节^[12]、环境响应^[13]、时空变异^[14]等方面。大多研究认为气温是影响蒸腾速率变化的关键因素, 但干旱半干旱地区由于降水稀少, 蒸发旺盛, 植物蒸腾耗水的影响因素相比于其他地区更加复杂, 植物对极端干旱环境的适应和响应也与其他地区有很大差异, 因而其他地区的一些研究成果很难适用于这一区域。研究干旱半干旱荒漠地区植物蒸腾对极端气候事件的响应有助于我们更加深刻地理解荒漠植物的水分利用策略及环境适应性。

近年来植物蒸腾对降雨事件的响应研究已取得了一些成果。曹文强等^[15]认为, 降雨对蒸腾有很大的制约作用, 因为降雨会增加空气湿度, 叶片内外的蒸汽压梯度降低, 降雨还会促使叶片气孔关闭, 蒸腾减弱。但也有研究发现, 降雨之后的几天, 蒸腾总量呈现明显的上升趋势^[16]。吴玉等^[17]研究了短生活史草本植物、长生活史草本植物、非潜水灌木和潜水

收稿日期: 2016-05-09; 改回日期: 2016-06-29

资助项目: 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC031)

作者简介: 赵春彦(1988—), 女, 甘肃天水人, 博士研究生, 主要从事干旱区生态水文研究。E-mail: zhaochunyan627@163.com

通信作者: 司建华(E-mail: jianhuas@lzb.ac.cn)

灌木对小降雨事件的响应,发现小降雨既可通过叶面绒毛被草本植物直接吸收利用,也可以通过增加微生境湿度、调节气孔导度、降低蒸腾而使灌木间接获益。但目前干旱半干旱区植物蒸腾速率对小降雨事件的响应研究较少,而且大多研究采用人工模拟降雨,受人为因素影响较大,多数研究成果缺乏长期的定位观测资料来支撑,而且荒漠河岸林生态系统植被蒸腾过程对小降雨事件的响应是否存在滞后效应也不清楚。此外,在全球气候变化的背景下,未来局部地区的降雨格局将发生变化,而干旱荒漠生态系统对气候变化的反馈起着重要作用^[18],研究荒漠河岸林蒸腾耗水对小降雨事件的响应有助于我们更加准确地预测全球气候变化背景下荒漠河岸林植物的水分利用策略。

本文以荒漠河岸林的建群种胡杨为研究对象,连续2年观测了自然降雨条件下胡杨的蒸腾速率,分析了胡杨蒸腾速率对小降雨事件的响应,旨在更好地理解小降雨事件对荒漠河岸林植物的生态意义及荒漠河岸林植物的水分适应策略。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究地位于黑河下游阿拉善荒漠生态水文实验研究站附近(42°02′00.07″N,101°02′59.41″E)。该区为典型的大陆性气候。多年平均气温 8.2 °C,极端最低气温 -37.6 °C; ≥ 0 °C 积温 4 073 °C,

≥ 10 °C 积温 3 695.0 °C^[19]。年降水量集中在 6—8 月,多年平均降水量 36.6 mm,年最大降水量 64 mm,最小降水量 7.0 mm。年平均蒸发量 3 505.7 mm,最高达 4 384.4 mm,为降水量的 100 倍,干旱指数高达 47.5^[20],是中国最干旱的地区之一^[21]。受自然因素和人为活动的叠加影响,有效土层薄,有机质缺乏,生产能力较低^[22],因而植被种类也较为贫乏,主要有胡杨(*Populus euphratica*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、芦苇(*Phragmites communis*)等,林间空地分布有苦豆子(*Sophana alopecuroides*)、苏枸杞(*Iycium ruthenicum*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)等^[23]。其中胡杨具有强大的根系,侧根发达,在 1 m 深的土层内向四周延伸,且吸水根系主要分布在水平方向 0~350 cm、垂直方向 0~80 cm,所占根量高达 96.8%^[21]。

1.2 试验材料

根据胡杨的分布特点,2012 年我们选择了距河岸 400 m 处胡杨集中分布区建立固定样地,样地大小 100 m×100 m,并用围栏围封作为固定样方长期观测。总调查胡杨 146 株,树高(11.2±2.4)m,胸径(45.9±14.4)cm。在此基础上,选择长势良好、冠形匀称、树干通直、冠幅适中、树皮光滑、无病虫害、人为影响小、无偏冠及严重枯枝现象的胡杨作为样树,样树的基本特征见表 1。

表 1 胡杨样树特征统计

Table 1 Characteristics of *populus euphratica* used in the experiment

年份	编号	胸径/cm	树高/m	冠幅/m ²	边材面积/cm ²
2012	1	43.30	8.40	35.28	282.68
	2	47.40	11.10	46.23	311.28
	3	52.50	9.60	42.33	360.08
2013	1	51.20	12.90	51.41	347.44
	2	49.40	9.20	37.53	300.16
	3	58.90	8.70	48.35	424.21

1.3 蒸腾速率的观测

胡杨单株尺度耗水采用澳大利亚 ICT 公司生产的热比率(Heat Ratio Method, HRM)树干茎流仪测定。选好样木后,在光滑无疤痕的树干胸径处(1.3 m)正北方用小刀将树干死树皮刮出一个长方形,刮树皮时不要损坏树干的韧皮部。然后用钻头

钻两个孔,两孔尽量保持平行并与树干保持垂直。首先将两个传感器探针纵向插入胡杨的木质部中,插入的深度相同,注意不要把探头弄弯,以免内部损坏,然后在两个探针之间的中点处插入一个加热元件,为了防止太阳直接辐射和短波辐射对热探针的影响及雨水接触探针,造成测量不准,采用内塑料膜及铝箔纸将其围住,并用胶布封好,然后封口处涂上

硅橡胶,防止水分进入。随着热脉冲释放热量,记录探针 t 时刻温度与 $t-1$ 时刻温度之差。蒸腾速率的计算参考 Burgess 等^[24]的计算方法。观测时间为2012年4月至11月,2013年4月至11月和观测间隔30 min。蒸腾耗水量的计算公式为:

$$F_s = \frac{24 \times V_s \times A_s \times 3600}{1000} \quad (1)$$

式中: F_s 为单株耗水量(mm); V_s 为液流速率($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); A_s 为样木边材面积(cm^2)。胡杨边材面积的大小与其水分的传输能力密切相关,是计算胡杨蒸腾耗水量的重要参数。对研究地样方内胡杨样本抽样调查,对边材、胸径进行多项式、线性、幂、指数等拟合,发现胡杨边材面积与胸径之间存在着高度指数相关关系, $y = 107.18e^{0.022x}$, $R^2 = 0.54$,其中 x 为胡杨胸径(cm), y 为胡杨边材面积(cm^2)。

1.4 降雨量的观测

采用国家气象信息中心整编的额济纳旗基准地面气象观测站1960—2011年逐日降水量观测资料

集,用于分析近50年来研究站小降雨事件发生频率的变化。2012—2013年使用自动雨量计记录降雨时间和降雨量,用于分析降雨前后蒸腾速率的变化。其中雾、露、霜量不计在总降水量之内。

2 结果与分析

2.1 小降水事件频数的年际变化特征

图1显示1960—2010年额济纳旗小降水事件频数。可以看出,1960—2010年小降水事件共发生了812次,占总降水事件的比例高达90.63%,平均每年发生15.92次。小降水事件频数总体呈增加趋势,尤其是90年代以后,小降水事件频数的上升趋势较明显,从1989年的9次增加到2003年的29次,增加2倍多。此外,小降水事件频数的变化具有明显的波动性,其中1995—2005年为小降水事件的多发期,占小降水事件发生总次数的25%,20世纪初小降雨事件增加趋势较为缓和,但是仍高于50年来的平均值。

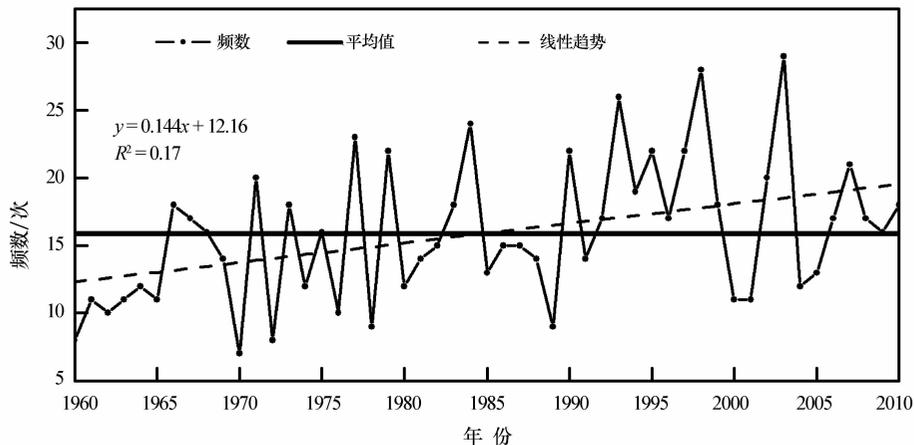


图1 小降水事件频数的年际变化特征

Fig. 1 Annual variation of small rainfall events

2.2 不同量级小降雨事件对胡杨蒸腾速率的影响

图2是小降雨事件发生前后各5 h胡杨蒸腾速率的变化,0代表小降雨事件发生的时刻,-1~-5代表小降雨事件发生前1~5 h,1~5代表小降雨事件发生后1~5 h。0.2 mm降雨发生前蒸腾速率处于逐渐下降趋势,当降雨事件发生后,蒸腾速率的下降幅度变小,2 h后开始缓慢上升。0.4 mm降雨发生前蒸腾速率也呈波动下降趋势,下降的幅度较缓,当降雨发生后,蒸腾速率迅速下降,2 h后缓慢上升。0.6 mm降雨事件发生前蒸腾速率呈大幅波动下降趋势,降雨发生后蒸腾速率下降幅度变小,降雨

后1~2 h蒸腾速率基本保持不变,以后略有上升,但总体仍呈下降趋势。0.8 mm降雨发生前蒸腾速率呈下降趋势,降雨发生1~2 h后蒸腾速率基本不变,随后开始上升。1 mm降雨发生前蒸腾速率同样呈大幅下降趋势,降雨发生后1~2 h蒸腾速率始终维持在一个较低的水平,降雨发生3 h后蒸腾速率略有增加。1~2 mm降雨发生前蒸腾速率迅速下降,降雨发生后下降速度变缓,4 h后蒸腾速率缓慢上升。2~3 mm降雨发生前期蒸腾速率呈显著降低趋势,当降雨发生后1~2 h,蒸腾速率呈现下降趋势,2 h以后蒸腾速率缓慢增加。3~4 mm降雨事件发生前蒸腾速率迅速下降,降雨发生后下降

幅度变缓,2 h 后缓慢增加。总之,不同量级的小降雨事件对蒸腾速率的影响存在差异,小于 1 mm 的小降雨事件对蒸腾速率的影响不大,小降雨事件发

生后胡杨蒸腾速率的变化不明显;1~4 mm 降雨对蒸腾速率的影响较大,降雨发生后 1~2 h 蒸腾速率维持在较低的水平,3~4 h 后蒸腾速率明显增加。

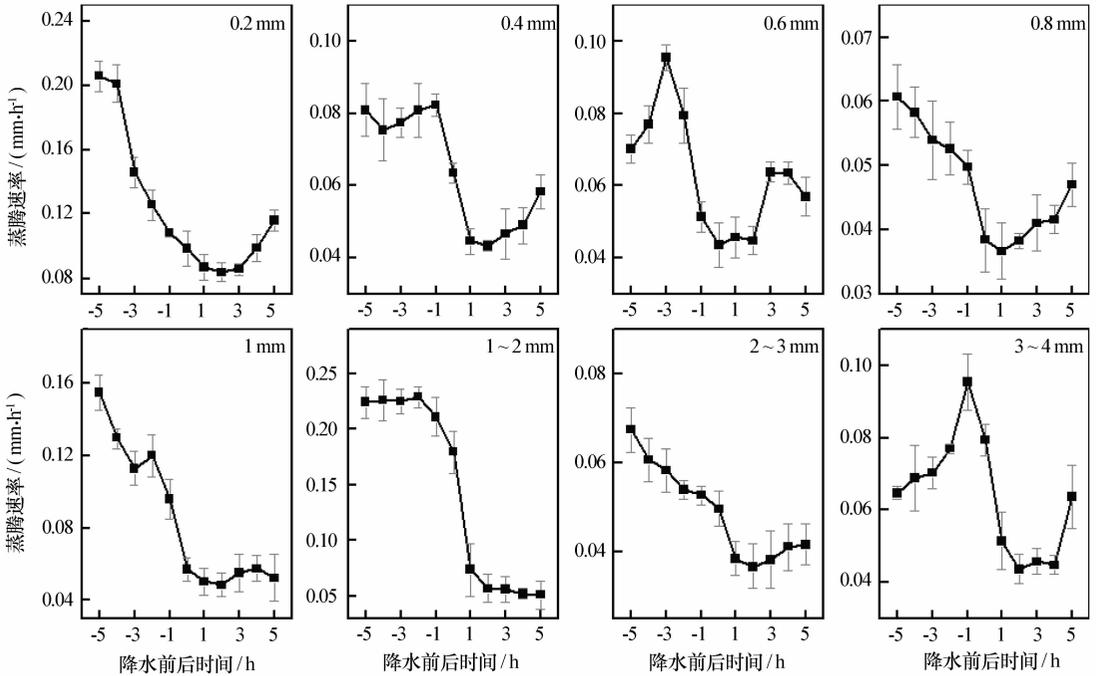


图 2 小降雨事件发生后胡杨蒸腾速率的变化

Fig. 2 The transpiration of *Populus euphratica* after small rainfall events

2.3 小降雨事件对胡杨蒸腾耗水影响的时滞分析

图 3 是小降雨事件发生前后各 5 d 胡杨蒸腾速率的变化,0 代表小降雨事件发生的日期,-1~-5 代表小降雨事件发生前 1~5 d,1~5 代表小降雨事件发生后 1~5 d。0.2 mm 降水发生前几天胡杨日蒸腾耗水量的变化没有明显的规律性,降雨发生当日蒸腾耗水量的变化仍延续前几天蒸腾耗水量的变化趋势。0.4 mm 降雨量发生前几天胡杨日蒸腾耗水量呈明显的下降趋势,降水发生后 3 d,蒸腾耗水量呈迅速增加趋势,3 d 后蒸腾耗水量增加的速率变缓。0.66~0.8 mm 降雨量发生前几日蒸腾耗水量呈波动下降趋势,降雨发生后 2 d 蒸腾耗水量显著增加,2 d 后增加的幅度变小,有些日期降雨发生后蒸腾耗水量呈波动增加趋势。1~2 mm 降雨发生前 2 d 胡杨蒸腾耗水量呈迅速下降趋势,降水发生后 1 d 内,蒸腾耗水量耗水仍呈下降趋势,但下降的幅度变小,降雨发生第 2 d,蒸腾耗水量迅速增加,3 d 后蒸腾耗水量呈波动变化。2~4 mm 降雨发生前期蒸腾耗水量呈下降趋势,降水发生后蒸腾耗水量迅速增加。可以看出小降雨事件对蒸腾速率的影响存在滞后效应。

2.4 小降雨事件和胡杨蒸腾速率的关系

以降雨量为自变量,降雨后 5 h 内的蒸腾速率为因变量,利用线性、指数、对数、多项式等对胡杨蒸腾速率与降水量进行拟合,选出最优方程来分析胡杨蒸腾速率对小降水事件的敏感程度(图 4)。由曲线拟合结果发现:胡杨蒸腾速率和降水量的指数拟合关系最好,且降雨量与降雨后 4 h 的蒸腾速率拟合关系最显著(经 *F* 检验达到极显著水平),说明小降雨事件对降雨后 4 h 树木蒸腾速率的影响最大。降雨量与降雨后 1 h 的蒸腾速率拟合关系最不显著,说明小降雨事件对降雨后 1 h 的蒸腾速率影响不大。小降雨事件对其后胡杨蒸腾速率的影响 4 h > 3 h > 5 h > 2 h > 1 h。

3 讨论

国内外干旱半干旱区小降雨事件在总降雨频次中占有很大比重,额济纳旗小降雨事件占总降雨频次的 90.63%,而且 1960—2010 年小降水事件发生频率率呈上升趋势,尤其是 90 年代以后,小降水事件发生频数显著上升。准格尔盆地南部小降雨事件的发生频率高达 81.37%^[25];古尔班通古特沙漠南

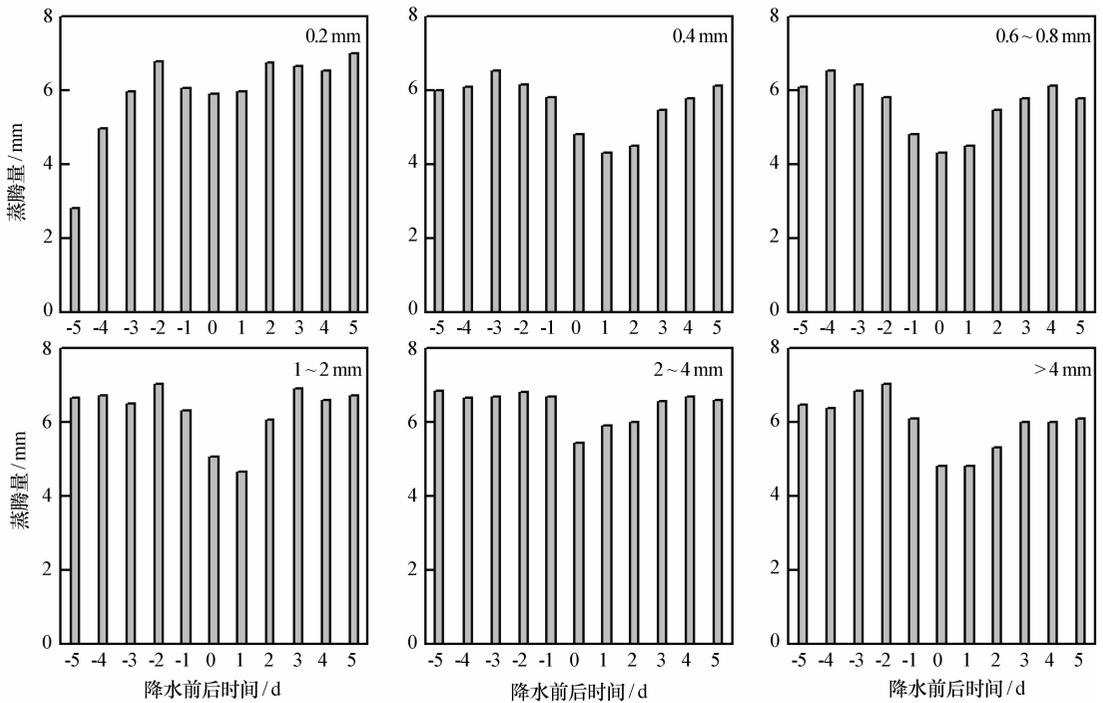


图 3 小降雨事件发生前后蒸腾耗水量的变化

Fig. 3 The changes of water consumption of transpiration after small rainfall events

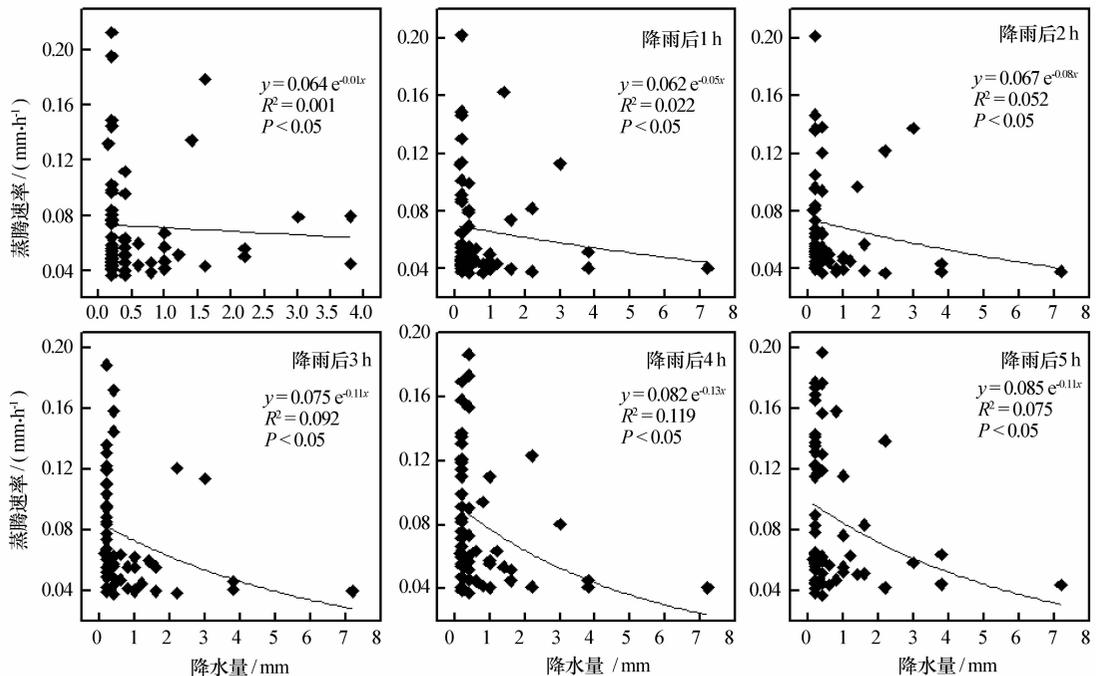


图 4 小降雨事件和胡杨蒸腾速率的关系

Fig. 4 The relations between transpiration of *Populus euphratica* and small rainfall events

缘小雨量降雨占总降雨频次的 89.8%^[26]。Loik 等^[27]对美国西部干旱半干旱区 316 个观测点的研究发现小降雨事件发生的频率为 47%。美国科罗拉多中心平原试验区近 33 年的小降雨事件占总降雨频次的 67%^[28]。在降水稀少、蒸发强烈的干旱区,高比例的小降雨事件是植物水分来源的一个重

要补充,会对干旱区生态系统产生积极影响,因此在分析植物水分平衡关系中决不能忽略小降雨事件的生态意义。

不同量级的小降雨事件对胡杨蒸腾速率的影响不同。王亚婷等^[26]对古尔班通古特沙漠南缘降雨模式和不同生活型植物对小降水事件的生理响应研

究表明 12 种植物对小雨量(≤ 5 mm)降雨有显著响应。本研究表明小于 1 mm 的降雨量不足以改变植物的蒸腾速率,因而小降雨事件发生后胡杨蒸腾速率的变化不明显,但降雨能够改变周围环境的相对湿度,从而导致植物蒸腾速率的微弱变化。1~4 mm 降雨发生后 1~2 h 蒸腾速率维持在较低的水平,3~4 h 后蒸腾速率明显增加,说明在干旱区 1~4 mm 的降雨量足以改变植物水势,引起植物蒸腾速率的变化。荒漠植物红砂的研究同样表明降水会显著地增加其蒸腾速率^[29]。但吴玉等^[17]研究了不同功能型荒漠植物对小降雨的光合响应发现降雨发生后,微生物湿度增加,蒸腾降低。池波^[13]也认为降雨会降低白天的蒸腾作用。这与本研究的结果存在差异。主要原因是额济纳旗小降雨事件主要集中在夏季,此时正值全年气温最高的季节,小降雨事件的发生对相对湿度的影响不显著,仅在降雨后 1~2 h 左右对空气相对湿度产生微弱影响,因而并没有导致蒸腾速率的下降,而是使其维持在一个较低的水平,但 1~2 h 后相对湿度恢复到原来的水平,而此时叶片残留的水分并没有完全蒸发掉,补充了先前叶片的水分亏缺,叶片水势上升,而小降雨对土壤水势的影响不大,因此叶片和土壤之间的水势差增加,蒸腾速率上升。因此,小降雨事件仅会在降雨后 1~2 h 内使植物蒸腾速率小幅下降,2 h 后会使其蒸腾速率增加。

小降雨事件对蒸腾速率的影响存在滞后效应。1 mm 内降水发生对其后各日蒸腾耗水量影响不大,降雨发生当日蒸腾耗水量的变化仍延续前几天蒸腾耗水量的变化趋势。1~4 mm 降雨的发生使植物第 1 天的蒸腾耗水量降低,但降雨后第二天胡杨蒸腾耗水量明显增加。在中国内蒙古草原上,Chen 等^[30]也发现植物对降水脉动事件的响应出现在降水脉动事件的后 1 d。在北美、南非、等地区的不同生态系统也发现了降雨对植物影响的滞后效应^[31-32],但降雨对不同生态系统影响滞后的时间有很大差异,如在草地生态系统中,滞后可达 1 年甚至数年^[33]。一般而言,气候的干旱程度决定了滞后的时间长短,轻度干旱下小降雨事件对蒸腾速率影响的时滞时间要小于重度干旱下的时滞时间^[34]。降雨量和蒸腾速率的指数拟合关系表明小降雨事件对降雨后 4 h 树木蒸腾速率的影响最大;对降雨后 1 h 的蒸腾速率影响不大。Xu 等^[35]发现美国加利福尼亚

州地中海气候区降水脉动和植物对降水的响应呈指数关系的时间延滞。植物蒸腾速率对小降雨事件的响应关系不但受当时环境因子的影响,而且与植物自身的生理特征有关,小降雨事件的发生是否能改善荒漠河岸林植物的水分特性以及在受到干旱胁迫时,在小降雨事件作用下植物是否能够恢复正常的生长发育等还有待于进一步的研究。

4 结论

不同量级的小降雨事件对蒸腾速率的影响存在差异,小于 1 mm 的小降雨事件对蒸腾速率的影响不大,小降雨事件发生后胡杨蒸腾速率的变化不明显;1~4 mm 降雨对蒸腾速率的影响较大,降雨发生后 1~2 h 蒸腾速率维持在较低的水平,3~4 h 后蒸腾速率明显增加。

小降雨事件对蒸腾速率的影响存在滞后效应,1~2 mm 降雨发生前 2 d 胡杨蒸腾耗水量呈迅速下降趋势,降水发生后 1 d 内,蒸腾耗水量仍呈下降趋势,但下降的幅度变小,降雨发生 1 d 后,蒸腾耗水量迅速增加,3 d 后蒸腾耗水量呈波动变化。2~4 mm 降雨发生前期蒸腾耗水量呈下降趋势,降水发生后蒸腾耗水量迅速增加。

胡杨蒸腾速率和降水量的指数拟合关系最好,小降雨事件对降雨后 4 h 树木蒸腾速率的影响最大,小降雨事件对降雨后 1 h 的蒸腾速率影响不大。

参考文献:

- [1] 徐炳成,山仑,黄瑾. 黄土丘陵区不同立地条件下沙棘光合生理日变化特征比较[J]. 西北植物学报, 2003, 23(6): 949-953.
- [2] Dougherty RL, Lauenroth WK, Singh JS. Response of a grassland cactus to frequency and size of rainfall events in a North American shortgrass steppe[J]. Journal of Ecology, 1996, 84: 177-183.
- [3] Limm E B, Simonin K A, Bothman A G, et al. Foliar water uptake: a common water acquisition strategy for plants of the redwood forest[J]. Oecologia, 2009, 161: 449-459.
- [4] Munne-bosch S. Direct foliar absorption of rainfall water and its biological significance in dryland ecosystems[J]. Journal of Arid environments, 2010, 74: 417-418.
- [5] Ben-Asher J, Alpert P, Ben-Zvi A. Dew is a major factor affecting vegetation water use efficiency rather than a source of water in the eastern Mediterranean area[J]. Water Resources Research, 2010, 46(10): 437-441.
- [6] 许文滔,赵平,王权,等. 基于树干液流测定值的马占相思(A-

- cacia mangium*)冠层气孔导度计算及数值模拟[J]. 生态学报, 2007(10): 4122—4131.
- [7] 黄德卫, 张德强, 周国逸, 等. 鼎湖山针阔叶混交林优势种树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2012(5): 1159—1166.
- [8] 梅婷婷, 赵平, 倪广艳, 等. 树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应[J]. 生态学报, 2012(22): 7018—7026.
- [9] Carroll A B, Pallardy S G, Galen C. Drought stress, plant water status and floral trait expression in fireweed, *Epilobium angustifolium* (Onagraceae)[J]. American Journal of Botany, 2001, 88: 438—446.
- [10] Sperry J S. Hydraulic constraints on plant gas exchange[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 104(1): 13—23.
- [11] Marx A, Kunstmann H, Schuettemeyer D, et al. Uncertainty analysis for satellite derived sensible heat fluxes and scintillometer measurements over Savannah environment and comparison to mesoscale meteorological simulation results[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(4): 656—667.
- [12] 王海珍, 韩路, 李志军, 等. 塔里木河上游胡杨与灰杨光合作用生理特性[J]. 生态学报, 2009(11): 5843—5850.
- [13] 池波. 大兴安岭北部兴安落叶松蒸腾耗水规律[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [14] 阮成江, 谢庆良. 土壤水分对沙棘成活率及抗逆生理特性的影响[J]. 应用与环境生物学, 2002, 8(4): 341—345.
- [15] 曹文强, 韩海荣, 马钦彦, 等. 山西太岳山辽东栋夏季树干液流通量研究[J]. 林业科学, 2004, 40(2): 174—177.
- [16] 陈立欣, 张志强, 李湛东, 等. 大连4种城市绿化乔木树种夜间液流活动特征[J]. 植物生态学报, 2010(5): 535—546.
- [17] 吴玉, 郑新军, 李彦. 不同功能型原生荒漠植物对小降雨的光合响应[J]. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2591—2597.
- [18] 吴绍洪, 赵宗慈. 气候变化和水的最新科学认知[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(3): 125—133.
- [19] 苏永红, 冯起, 吕世华, 等. 额济纳生态环境退化及成因分析[J]. 高原气象, 2004, 23(2): 264—270.
- [20] 鱼腾飞, 冯起, 司建华, 等. 极端干旱区多枝怪柳叶片气孔导度的环境响应模拟[J]. 植物生态学报, 2012, 36(6): 483—490.
- [21] 司建华, 常宗强, 苏永红, 等. 胡杨叶片气孔导度特征及其对环境因子的响应[J]. 西北植物学报, 2008, 28(1): 0125—0130.
- [22] 高松, 苏培玺, 严巧娣, 等. C₄ 荒漠植物猪毛菜与木本猪毛菜的叶片解剖结构及光合生理特征[J]. 植物生态学报, 2009, 33(2): 347—354.
- [23] 张小由, 龚家栋, 周茂先, 等. 应用热脉冲技术对胡杨和怪柳树干液流的研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(5): 585—590.
- [24] Burgess S S O, Adams M A, Turner N C, et al. An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants[J]. Tree Physiology, 2001, 21: 589—598.
- [25] 郑新军, 李嵩, 李彦, 等. 准噶尔盆地荒漠植物的叶片水分吸收策略[J]. 植物生态学报, 2011, 35(9): 893—905.
- [26] 王亚婷, 唐立松. 古尔班通古特沙漠不同生活型植物对小雨量降雨的响应[J]. 生态学杂志, 2009, 28(6): 1028—1034.
- [27] Loik M E, Breshears D D, Lauenroth W K, et al. A multiscale perspective of water pulses in dryland ecosystems: climatology and ecohydrology of the western USA[J]. Oecologia, 2004, 141: 269—281.
- [28] Sala O E, Lauenroth W K, Parton W J. Long-term soil water dynamics in the shortgrass steppe[J]. Ecology, 1992, 73: 1175—1181.
- [29] 种培芳, 姬江丽, 李毅, 等. 红砂(*Reaumuria soongorica*)对大气CO₂浓度升高及降水变化的光合生理响应[J]. 中国沙漠, 2017, 37(4): 714—723.
- [30] Chen S, Lin G, Huang J, et al. Dependence of carbon sequestration on the differential responses of ecosystem photosynthesis and respiration to rain pulses in a semiarid steppe[J]. Global Change Biology, 2009, 15(10): 2450—2461.
- [31] Wiegand T, Snyman H A, Kellner K, et al. Do grasslands have a memory: modeling phytomass production of a semiarid South African grassland[J]. Ecosystems, 2004, 7(3): 243—258.
- [32] O'Connor T G, Haines L M, Snyman H A. Influence of precipitation and species composition on phytomass of a semi-arid African grassland[J]. Journal of Ecology, 2001, 89(5): 850—860.
- [33] Schwinning S, Sala O E, Loik M E, et al. Thresholds, memory, and seasonality: understanding pulse dynamics in arid-semiarid ecosystems[J]. Oecologia, 2004, 141(2): 191—193.
- [34] Yahdjian L, Sala O E. Vegetation structure constrains primary production response to water availability in the Patagonian steppe[J]. Ecology, 2006, 87(4): 952—962.
- [35] Xu L, Baldocchi D D, Tang J. How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, 18: GB4002.

Responses of Transpiration of *Populus euphratica* to Small Rainfall Events in Desert Riparian Forest

Zhao Chunyan^{1,2}, Si Jianhua¹, Feng Qi¹, Yu Tengfei¹, Li Peidu^{1,2}

(1.Key Laboratory of Eco-hydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2.University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on daily precipitation data of meteorological station in Ejina during 1960–2010 and transpiration of *Populus euphratica* were monitored simultaneously with precipitation in 2012, 2013, respectively. Responses of transpiration to small rainfall events in desert riparian forest were studied. The results show that the frequency of small rainfall events reached 90.63%. The influence of small rainfall events on transpiration were changed with the amounts of rainfall. The transpiration was declined before <1 mm rainfall, but after rainfall the transpiration declined slowly, then increased after 2 h. The transpiration decreased significantly before 1–4 mm rainfall, after rainfall transpiration remain unchanged at first 1–2 h, then increase quickly after 3–4 h. The effects of small rainfall events on transpiration exist time lag effect. The 0.2 mm rainfall has a little effect on transpiration, the variation trend was same as the day before rainfall. The influence of 0.4–0.8 mm rainfall was not noticeable after two days. The 1–4 mm small rainfall events have a great influence on transpiration and led to the decrease of transpiration in the first day after rainfall and led to the increase of transpiration in the second day after rainfall. Transpiration of *populus euphratica* showed exponential correlation to small rainfall events and the influence of rainfall on transpiration was most significantly after 4 h and was not noticeable after 1 h.

Key words: small rainfall events; transpiration; *Populus euphratica*; desert riparian forest