

单株油蒿蒸腾耗水特征及其与环境因素的关系

高浩^{1,2}, 秦树高^{1,2}, 朱林峰^{1,2}, 范冬庆^{1,2}, 陈东^{1,2}, 杨路明^{1,2}

(1. 北京林业大学 水土保持学院 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083; 2. 北京林业大学 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: [目的] 探究油蒿的蒸腾耗水规律及其对环境因子的响应, 旨在为固沙植被建设提供科学依据。[方法] 利用野外大型称重式蒸渗仪于 2014 年 6—9 月底对单株油蒿的蒸腾过程进行连续观测, 并同步监测了土壤含水量及相关气象因子。[结果] 油蒿单日蒸腾强度曲线在晴天表现为双峰曲线, 而在阴雨天双峰曲线不明显; 研究期间, 单株油蒿蒸腾耗水量为 101.66 mm, 日平均蒸腾强度为 0.83 mm/d。蒸渗仪内土壤蒸发量 106.05 mm, 日平均土壤蒸发强度为 0.87 mm/d, 试验期间蒸散量占降雨量的 82.98%。降雨可以维持油蒿正常生长, 并对土壤水分进行一定补充; 油蒿蒸腾强度与空气相对湿度($p < 0.01$)、空气温度($p < 0.01$)、太阳净辐射($p < 0.01$)和 20 cm 深度土壤体积分含水量($p < 0.05$)具有很好的相关性, 且相关性依次减小。[结论] 油蒿蒸腾耗水日变化明显, 其蒸腾速率受土壤水分状况、气象条件及自身生理特征等因素的影响。

关键词: 毛乌素沙地; 油蒿; 蒸腾; 环境因素; 蒸渗仪

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)02-0076-06

中图分类号: Q945.17

文献参数: 高浩, 秦树高, 朱林峰, 等. 单株油蒿蒸腾耗水特征及其与环境因素的关系[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 76-81. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.015

Characteristics of Water Consumption of *Artemisia Ordosica* Through Transpiration and Its Relationships with Environmental Factors

GAO Hao^{1,2}, QIN Shugao^{1,2}, ZHU Linfeng^{1,2},
FAN Dongqing^{1,2}, CHEN Dong^{1,2}, YANG Luming^{1,2}

(1. Yanchi Ecology Research Station of the Mu Us Desert, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Beijing Forestry University, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Water consumption of *Artemisia ordosica* through transpiration was measured and its responses to environmental factors were researched to provide some hints for construction of sand-fixing vegetations. [Methods] The dynamic transpiration of *Artemisia ordosica* was continuously measured using a large-scale weighing lysimeter, and the soil moisture content and related meteorological factors were synchronously monitored. [Results] Mean daily transpiration intensity of *Artemisia ordosica* performed a bimodal curve in sunny days; while in rainy days, the mean daily transpiration intensity performed unimodal curve. Water consumption of *Artemisia ordosica* was 101.66 mm during the study period, averaged 0.83 mm/d per day. Soil evaporation in the lysimeter was 106.05 mm, about 0.87 mm/d. The evapotranspiration accounted for 82.98% of rainfall in the study period. Transpiration intensity of *Artemisia ordosica* were significantly correlated with environmental factors of relative air humidity ($p < 0.01$), atmospheric temperature ($p < 0.01$), net radiation ($p < 0.01$), soil water content at 20 cm depth ($p < 0.05$) in a decreased rank. [Conclusion] Daily transpiration of *Artemisia ordosica* varied distinctly, and the transpiration rate was affected by soil moisture condition, meteorological factors and its own physical characteristics.

Keywords: Mu Us Desert, *Artemisia ordosica*; transpiration; environmental factors; lysimeter

蒸腾耗水是植物利用水分的重要过程之一, 对其生长和生理活动有着重要的意义, 在土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 水热传输过程中占有及其重要的地位, 是农学、林学、气象学、水文学和生态学等相关学

科共同关注的重要问题之一^[1]。水分是中国干旱半干旱沙区植物生长发育的最主要限制因子^[2],研究植物的蒸腾耗水规律,是了解植物对环境适应性的重要内容。近20 a来,随着对植物蒸腾研究的深入,先进的蒸腾观测手段不断出现,如叶面尺度上的植物蒸散率(porometer)分析技术、个体尺度上的树干液流(sap flow)技术、田间尺度上的波文比(bowen ratio)与涡度相关(eddy correlation)技术以及景观尺度上的闪烁(scintillo-meter)技术等。植物生理生态学家也做了大量的有关植被与水分关系的研究,例如对植物冠层叶水势、气孔阻力、蒸腾变化规律和水分生理与抗旱生理的研究,但较侧重于研究植物本身生理特征,而对环境因子考虑较少^[3-5]。

油蒿(*Artemisia ordosica*)广泛分布于内蒙古、陕西、甘肃和宁夏等地^[6],是半干旱沙区最重要的固沙植物之一^[7],研究其蒸腾耗水及其与环境因子的关系,是确定适宜植被水分承载力的重要依据,可以为该区植被恢复建设提供科学指导。目前对于油蒿蒸腾耗水规律以及蒸腾特征与环境因子和土壤含水量关系的认识还不明确,学者们曾用气孔计测定了油蒿叶片的蒸腾速率,研究了油蒿生理特征及环境因子对油蒿蒸腾的影响^[8-9],但是气孔计只能测定短时间的蒸腾速率,很难连续测定长时间的蒸腾量。也有学者们利用茎流仪研究了油蒿的蒸腾特征,黄磊等^[10]研究了宁夏沙坡头人工油蒿的茎流速率与环境因子之间的关系,李思静等^[11]研究了宁夏盐池地区油蒿的茎流及其环境控制因子,然而油蒿局部茎干的液流并不能准确地表征整株油蒿的蒸腾特征^[12]。采用水量平衡原理计算植物蒸腾的大型称重式蒸渗仪,可以连续精确地刻画出整个植株的蒸腾过程,在植物水分耗散研究中已得到广泛运用,宁夏沙坡头利用蒸渗仪对油蒿蒸散规律做了一些研究^[13-16],但是关于油蒿蒸腾对环境因子响应的研究相对较少。本研究利用大型称重式蒸渗仪于2014年6—9月底连续测定了单株油蒿蒸腾耗水量,分析油蒿蒸腾特征及蒸腾强度与太阳辐射、空气温度和空气相对湿度等气象因子以及土壤含水量的关系,对于揭示油蒿的干旱适应机制具有一定的意义,可为该区固沙植被建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站(37°40′48″—37°43′48″N,107°12′—107°12′36″E),该站位于毛乌素沙地西南缘,属于典型的中温带大陆型季风气候。站区土壤主要为沙壤

土,土壤容重约为1.6 g/cm³。该地区干燥多风,盛行西北风,年平均风速2.6 m/s,年平均大风日数21 d,年平均气温8.1℃,年平均无霜期139 d。研究区气候干旱,年平均降水量275 mm(1954—2013年),降雨分布不均,主要集中在6—9月,蒸发量高达2 100 mm,年降雨分布不均,多集中在7—9月,约占全年降雨量的62%。地下水位深8 m,土壤水分主要靠大气降水补给。该区植被属于温带草原荒漠带,以沙生和旱生植被为主,主要分布有油蒿、沙柳(*Salix psammophila*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、杨柴(*Hedysarum mongolicum*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、甘草(*Glycyrriza uralensis*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)、赖草(*Leymus secalinus*)等。

1.2 观测方法

油蒿是研究区主要的建群植物,5 a生的油蒿群落分布广泛,密度约为0.5株/m²。本研究选择1株5年生、大小平均、生长状况良好的油蒿,株高0.92 m,冠幅1.74 m²,于2013年4月初植入蒸渗池内,栽植后充足浇水,使之成活并正常生长并于2014年6月开始试验。仪器采用西安理工大学生产的野外大型称重式蒸渗仪,蒸渗系统包括土体系统、称量系统、土壤剖面温度测量系统、土壤剖面水势测量系统、渗漏量测量系统和数据采集系统。蒸渗池表面积2.25 m²,土体总深度1.2 m,底部装有0.3 m厚的反滤层,箱底做成1:40的斜坡以保证渗入砂层的水分及时通过排水口流出。称重分辨率±0.01 mm水深(22.5 g重量变化)。渗漏量通过蒸渗仪底部的聚酯软管导入容器内,利用渗漏量测量系统与蒸散同步测定。在试验地设立两套规格与配置相同的蒸渗仪,一套用以监测油蒿蒸散耗水状况,另一套作裸沙处理监测土壤蒸发。仪器四周栽植有油蒿和沙柳,以使试验地更接近自然环境。蒸渗仪观测频率为每0.5 h一次,于2014年6—10月进行全天连续观测。试验期间利用全自动小型气象站同时观测气象因子,包括温度、风速、气压、相对湿度、净辐射和降雨量等,观测频率与蒸渗仪一致。通过ECH2O-5TE土壤温湿度探头测定蒸渗仪内土壤体积含水量,测量深度分别为20、40、60 cm,测量周期为0.5 h。

1.3 数据处理

蒸渗池内土壤及植物蒸散耗水的计算,根据水量平衡方程:

$$T_i = \frac{m_{t-1} - m_t}{\rho A \Delta t} \quad (1)$$

式中: T_i ——单位时间段蒸渗池内水分蒸散强度(栽植油蒿为土壤蒸发量与油蒿蒸腾量之和,无油蒿对照处理即为土壤蒸发量)(mm/h); m_{t-1} , m_t —— $t-1$ 时刻和 t 时刻蒸渗仪土体水质量(g); Δt —— $t-1$ 与 t 时刻之间的时间间隔(h); ρ ——水的密度(g/cm^3); A ——蒸渗仪箱体表面积(cm^2)。栽植油蒿的蒸渗仪蒸散量和裸沙对照处理的蒸发量之差作为油蒿的蒸腾耗水量。

对油蒿蒸腾强度和太阳净辐射、空气温度、空气相对湿度以及土壤含水量等各环节因子求取每小时的平均值,分析蒸腾强度和环境因子的动态变化及其相关性,通过多元线性逐步回归法分析各环境因子对蒸腾强度的影响。

2 研究结果

2.1 油蒿蒸腾的日变化过程

2.1.1 晴天蒸腾动态变化 每月选取 5 个晴天(白天日平均空气温度大于 $20\text{ }^\circ\text{C}$,白天日平均净辐射大于 $400\text{ W}/\text{m}^2$),对油蒿每小时的蒸腾速率取平均值进行分析(图 1)。由图 1 可以看出,各月晴天油蒿的蒸腾速率有所不同,6—9 月晴天的最大蒸腾速率分别为 0.10, 0.14, 0.15 和 0.09 mm/h,平均蒸腾强度为 0.03, 0.04, 0.03 和 0.03 mm/h。每个月晴天蒸腾强度的日变化过程基本一致,蒸腾过程线都表现为双峰曲线,白天从清晨 6:00 开始,太阳辐射迅速增强,空气温度开始升高,蒸腾强度开始逐渐升高,正午 11:00—13:00 出现下凹现象,该时段蒸腾作用先减小后增加,这也就是植物的“午休”现象,从下午 13:00 开始蒸腾强度快速下降。

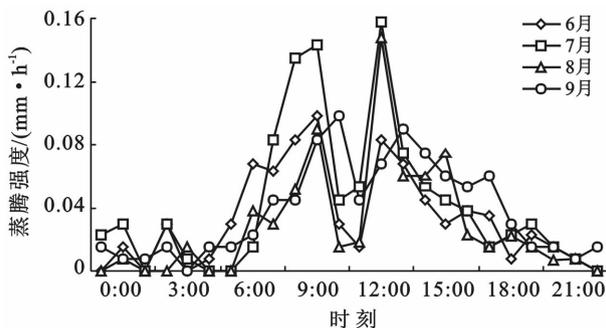


图 1 各月晴天油蒿蒸腾强度变化

2.1.2 阴雨天蒸腾动态变化 每月选取了 3 个阴雨天(白天日平均空气温度小于 $15\text{ }^\circ\text{C}$,白天日平均净辐射小于 $200\text{ W}/\text{m}^2$),对每小时油蒿的蒸腾强度取平均值进行分析,结果如图 2 所示。由于空气温度、太阳辐射等相关环境因子较低,阴天植物的蒸腾作用较

微弱,蒸腾强度最大值均未超过 $0.08\text{ mm}/\text{h}$,选取 6—9 月的阴天平均蒸腾强度分别为 0.01, 0.02, 0.02, 0.02 mm/h。植物蒸腾强度曲线整体表现为单峰曲线,未发现“午休”现象,由于阴雨天气象因子变化起伏不定,同时可能有不连续的降雨发生,白天蒸腾强度随时间的变化波动较大。

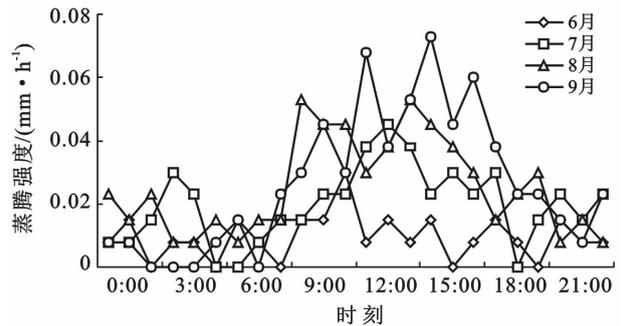


图 2 各月阴天油蒿蒸腾强度变化

2.2 油蒿蒸腾耗水及其与环境因子的关系

2.2.1 环境因子的动态变化 研究区年降雨集中,主要发生在 6—10 月,从 6 月 1 日到 9 月 30 日的历年平均降雨量为 209.1 mm(1954—2012 年),试验期间的降雨量为 250.3 mm,为较湿润年份。研究区 2014 年 6 月 1 日—9 月 31 日(日序列 DOY152—273)共降雨 55 日次(图 3)。6—9 月降雨量分别为 45.72, 68.83, 67.56 和 68.17 mm(表 1),其中降雨最大的一次为 27.69 mm(8 月 27 日,DOY239),降雨量 $>20\text{ mm}$ 的有 3 次(6 月 3 日、8 月 27 日、9 月 22 日,日序列 DOY154, 239, 265),占降雨量的 30.65%,降雨量 $<10\text{ mm}$ 的多达 44 日次,占降雨总量的 27.42%,研究区降雨主要以小到中雨为主,且降雨主要集中在 7—9 月,约占试验期间降雨量的 81.73%。

表 1 研究区各月降雨统计

月份	6 月	7 月	8 月	9 月
降雨日次	10	13	14	18
降雨量/mm	45.72	68.83	67.56	68.17

试验期间蒸渗仪内油蒿的蒸腾耗水量为 101.66 mm,土壤蒸发量为 106.05 mm,蒸散量约为降雨量的 82.98%,试验期间降雨可以满足油蒿的正常生长。试验期间环境因子和油蒿蒸腾变化如图 3 所示,净辐射、风速、空气温度和空气相对湿度均为日均值。试验期内最大日平均温度为 $27.31\text{ }^\circ\text{C}$ (7 月 31 日,日序列 212),最低温度为 $10.76\text{ }^\circ\text{C}$ (9 月 23 日,日序列 266),平均温度为 $19.01\text{ }^\circ\text{C}$;空气相对湿度最大达到了 95.11%(9 月 22 日,日序列 265),最小为 20.35%

(6月9日,日序列160),平均空气相对湿度为59.25%;净辐射和风速在观测期的平均值分别为339.67 W/m²,2.36 m/s。降雨只能补给表层土壤水分,发生降雨时20 cm土壤含水量会发生较大波动,40 cm土壤含水量在发生连续降雨时才会产生波动。由图3可以看出,试验期间仅发生了两次波动(7月8

日至7月22日,日序列189—203;9月25—30日,日序列268—273),而60 cm土壤含水量在观测期内始终保持稳定。观测期间最大蒸腾强度为1.36 mm/d(6月7日,日序列158),最小0.1 mm/d(9月22日,日序列265),日平均蒸腾强度为0.83 mm/d,蒸渗仪土体内未发生深层渗漏。

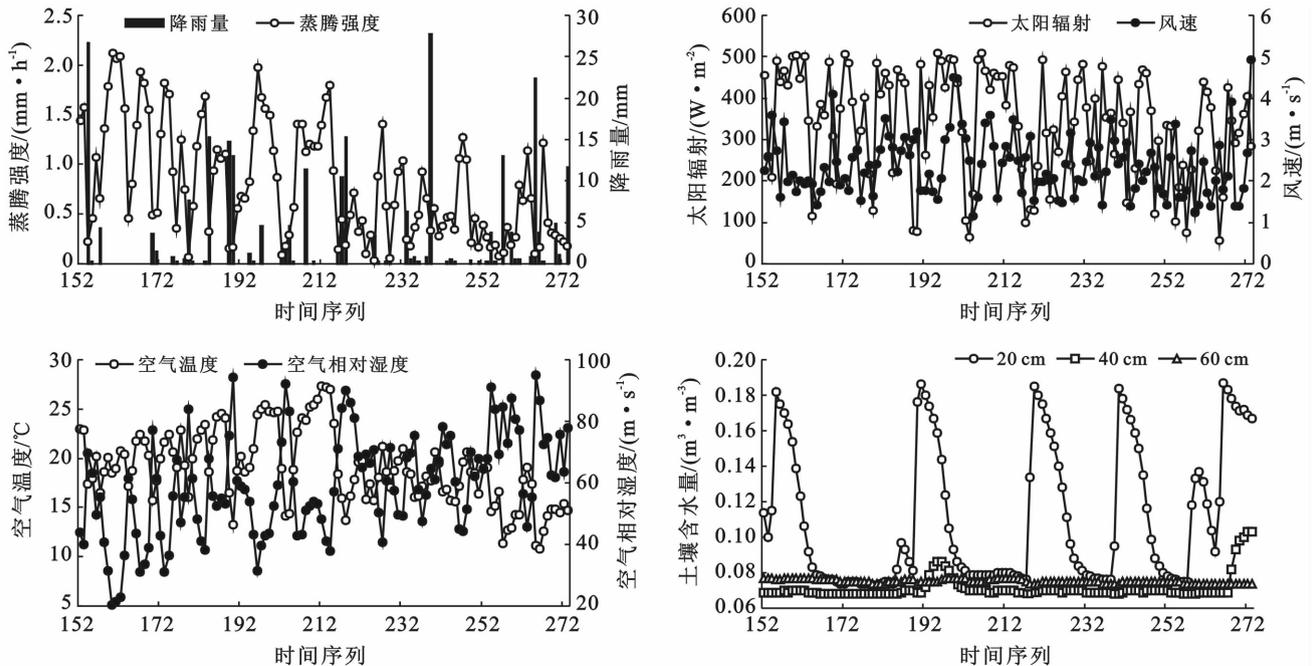


图3 环境因子与油蒿蒸腾强度动态变化

2.2.2 蒸腾强度影响因素分析 对试验期间所测定的日蒸腾强度(T_i)与同期的太阳净辐射(R_n)、空气温度(T)、空气相对湿度(R_h)、风速(V)和20 cm(SWC20)、40 cm(SWC40)土壤含水量进行相关分析(表2)。结果表明,油蒿蒸腾强度 T_i 与 R_n , T , R_h 极显著相关($p < 0.01$),其中与 R_n 和 T 呈正相关,而与 R_h 呈负相关;与20 cm土壤含水量呈显著相关

($p < 0.05$),但是相关系数较低($R = 0.181$),土壤含水量与油蒿蒸腾强度的关系较为复杂,当土壤含水量较低时,其为植物蒸腾强度的限制因子,在湿润的情况下,气象因子是蒸腾强度主要的影响因子。各影响因子对油蒿 T_i 的影响显著性强弱排序为: $R_h > T > R_n > SWC20$ (表2)。其中 T_i 与 R_n , T 和 R_h 具有较好的线性关系,线性拟合的 R 分别达到了0.661,0.714,0.897。

表2 油蒿蒸腾强度与各影响因子的相关关系

影响因子	R_n	T	R_h	V	SWC20	SWC40
R	0.661**	0.714**	-0.897**	0.134	0.181*	-0.071
sig	0.000	0.000	0.000	0.141	0.046	0.436

注: * 表示在0.05水平(双侧)上显著相关($p < 0.05$); ** 表示在0.01水平(双侧)上显著相关($p < 0.01$)。

3 讨论与结论

学者们^[3,9]曾先后利用气孔计测定了植物叶片的蒸腾速率,研究了植物与水分的关系,但是这些研究主要侧重于对植物本身生理特征的研究,例如对植物冠层叶水势、气孔阻力、水分利用效率、植物水分生理与抗旱生理的研究,由于油蒿叶片的特殊性,测量难

度较大,在这方面的研究较少,同时气孔计法只适合短时间的测定,不能长期连续监测。也有学者们利用茎流仪对油蒿个别枝条的液流进行了研究,并分析了其与环境因子的关系,但是由于光照等环境因子及枝条生长状况等造成的差异,依此估算整个植株的蒸腾存在较大的误差,个别枝条的局部液流并不能准确地说明整株植物的蒸腾情况。大型蒸渗仪可以连续精

确地刻画出整个植株的蒸散过程,但是如何区分植物蒸腾和土壤蒸发有着一定的难度,因此学者们大多仅仅是利用蒸渗仪测定植物的蒸散耗水量。张志山等^[16]对沙坡头人工植被区的蒸发蒸腾的研究表示,沙区有植被覆盖的土壤蒸发量略微小于无植被覆盖的土壤蒸发量,但是它们的差别不明显。也有研究通过覆盖蒸渗仪表面裸露土体从而测量植物的蒸腾量。本研究基于大型称重式蒸渗仪测定油蒿蒸散量,并通过与裸沙土壤蒸发对比,忽略了植被覆盖对土壤蒸发产生的影响,同时没有考虑到两台蒸渗仪内土体含水量的差别是否造成土壤蒸发量的不同,得到了整株油蒿的蒸腾耗水过程,并分析了蒸腾特征及其与相关气象因子和土壤含水量的关系。

油蒿蒸腾耗水日变化明显,晴天时蒸腾强度从早上 6:00 开始迅速升高,在正午 11:00—13:00 出现短暂的蒸腾强度减弱现象。这是由于中午温度急剧升高,蒸腾作用加快,油蒿吸收的水分无法供应其蒸腾耗水,为减少水分散失,叶片气孔关闭,蒸腾作用暂时减弱,这也就是植物的“午休”现象。其他的研究也发现了相同的规律^[17-20]。黄磊等^[10]选取了一天对油蒿的液流速率进行了研究,提出油蒿液流速率为典型的单峰曲线,没有“午休”的现象,但是没有提出只选取一天进行研究的依据,其结果不具有典型性和代表性。李思静等^[11]通过茎流计测定油蒿液流速率没有明显的“午休”现象,这可能是由于只选取了生长季初期连续的 3 d 进行了研究,其结果也不能完全说明油蒿是否具有“午休”的现象,同时由于油蒿植株枝条之间的差异性,个别枝条液流速率的变化规律并不能完全说明整株油蒿的蒸腾规律。本研究综合考虑了气象因素,每个月选取了 5 个典型的晴天进行研究,其结果也具有一定的代表性。而对于干旱区中间锦鸡儿 (*Caragana intermedia*)、旱柳 (*Salix malsudana*) 和沙柳等的研究并没有发现“午休”现象,油蒿和其他植物种相比,属于轻蒸腾午休型植物^[17],其可以在一天中太阳辐射最强烈的时间段降低蒸腾失水,这可能是油蒿具有较强的抗旱能力的主要原因之一^[21-24]。也有研究^[11]表明油蒿日蒸腾速率不存在明显的“午休”现象,这是因为油蒿蒸腾强度的变化与其所处的环境条件以及当时的气象条件密切相关,研究对象所处的生境条件差异可能导致了结果的不同。

植物蒸腾速率的大小受土壤水分状况、气象条件以及植物自身的生理特征等影响,已有研究表明,影响植物蒸腾的主要气象因子有净辐射、气温和空气相对湿度^[22]。杨劫等^[3]对库布齐沙地油蒿蒸腾特征的研究发现,油蒿蒸腾速率与有效光辐射、气温和大气

相对湿度显著相关,而气温则是主导因子。黄磊等^[10]对沙坡头人工植被区油蒿茎流的研究表明影响油蒿茎流速率的气象因子大小顺序为:太阳辐射>饱和水汽压>相对湿度>空气温度>风速。而李思静等^[11]对宁夏盐池县油蒿茎流的研究表明非水分胁迫期对油蒿茎流速率影响的气象因子大小顺序为:饱和水汽压>平均空气温度>太阳辐射>相对湿度。本研究表明,油蒿蒸腾强度与净辐射、气温和空气相对湿度极显著相关($p < 0.01$),各环境因子对蒸腾强度的影响大小顺序为:空气相对湿度>空气温度>太阳净辐射,空气相对湿度与油蒿蒸腾强度的相关性最高,这可能是由于试验期间降雨较多,为湿润年份,空气相对湿度较大的原因。虽然在不同研究中影响蒸腾强度的主导因子不尽相同,但太阳辐射、空气温度和空气相对湿度始终是影响油蒿蒸腾强度的最重要的环境因子。影响蒸腾强度的环境因子不是独立存在的,各因子之间相互制约与协调,太阳辐射作为各环境因子变化的驱动力,决定了气温和空气相对湿度的高低。环境因子对油蒿蒸腾强度的影响机制比较复杂,仍需深入研究。

土壤含水量也是影响油蒿蒸腾强度的另一个重要的环境因素。已有研究^[12]表明,土壤含水量对油蒿蒸腾的影响较为复杂,土壤含水量较低时,蒸腾强度的高低是由土壤水分决定,而在土壤含水量较高时,油蒿蒸腾主要受气象因子的影响。本研究发现,20 cm 深度土壤含水量对油蒿蒸腾强度具有显著影响($p < 0.05$),这是由于降雨下渗深度一般不超过 20 cm,而油蒿根系又主要集中分布在 0—40 cm 土层中^[24],该层土壤水分是油蒿生长生活的主要水分来源,因此植物蒸腾耗水对该层土壤含水量的变化反应最为敏感。试验期间,研究区降雨量为 250.3 mm,大于历年同期降雨量(209.1 mm,1954—2012 年),属于较湿润的年份,降雨可以维持油蒿正常生长,并对土壤水分进行一定补充。本研究研究了湿润年油蒿的蒸腾特征,缺乏对于干旱年油蒿的蒸腾观测,在今后的研究中需注重研究不同水分条件年限下的蒸腾特征。

[参 考 文 献]

- [1] 孟平,张劲松,王鹤松,等. 苹果树蒸腾规律及其与冠层微气象要素的关系[J]. 生态学报,2005,25(5):1075-1081.
- [2] 岳广阳,张铜会,赵哈林,等. 科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿茎流及蒸腾特征[J]. 生态学报,2006,26(10):3205-3213.
- [3] 贺康宁,田阳,张光灿. 刺槐日蒸腾过程的 Penman-Monteith 方程模拟[J]. 生态学报,2003,23(2):251-258.

- [4] 苏培玺,赵爱芬,张立新,等. 荒漠植物梭梭和沙拐枣光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征[J]. 西北植物学报,2003,23(1):11-17.
- [5] 王静,程积民,万惠娥,等. 黄土高原芨芨草光合与蒸腾作用的初步研究[J]. 草业学报,2003,12(6):47-52.
- [6] 龚吉蕊,张立新,赵爱芬,等. 油蒿(*Artemisia ordosica*)抗旱生理生化特性研究初报[J]. 中国沙漠,2002,22(4):387-392.
- [7] 张军,黄永梅,焦会景,等. 毛乌素沙地油蒿群落演替的生理生态学机制[J]. 中国沙漠,2007,27(6):977-983.
- [8] 杨宝珍,刘志茂. 油蒿(*Artemisia ordosica*)的蒸腾作用及其群落的水分状况[J]. 植物生态学报,1994,18(2):161-170.
- [9] 丁越岩,杨劼,张仲平,等. 毛乌素沙地主要建群植物蒸腾耗水特性的研究[J]. 中国草地学报,2011,33(4):37-43.
- [10] 黄磊,张志山. 荒漠人工植被区柠条和油蒿茎干液流动态研究[J]. 中国沙漠,2011,31(3):683-688.
- [11] 李思静,查天山,秦树高,等. 油蒿(*Artemisia ordosica*)茎流动态及其环境控制因子[J]. 生态学杂志,2014,33(1):112-118.
- [12] 刘昌明,张喜英,由懋正. 大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J]. 水利学报,1998,29(10):36-39.
- [13] 冯金朝,陈荷生,康跃虎,等. 腾格里沙漠沙坡头地区人工植被蒸散耗水与水量平衡的研究[J]. 植物学报,1995,37(10):815-821.
- [14] 王新平,李新荣,康尔泗,等. 沙坡头地区固沙植物油蒿、柠条蒸散状况的研究[J]. 中国沙漠,2002,22(4):363-367.
- [15] 张志山,李新荣,王新平,等. 沙漠人工植被区的蒸发蒸腾[J]. 生态学报,2005,25(10):2484-2490.
- [16] 张志山,李新荣,何明珠,等. 沙漠人工植被蒸渗池测定及蒸腾量推算[J]. 草业学报,2006,15(6):32-37.
- [17] 苏培玺,赵爱芬,张立新,等. 荒漠植物梭梭和沙拐枣光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征[J]. 西北植物学报,2003,23(1):11-17.
- [18] 王静,程积民,万惠娥,等. 黄土高原芨芨草光合作用与蒸腾作用的初步研究[J]. 草业学报,2003,12(6):47-52.
- [19] 赵萍,孙向阳,黄利江,等. 生长季毛乌素沙地沙生植物蒸腾规律及其与环境因子间关系[J]. 林业科学研究,2004,17(12):67-71.
- [20] 马阔东,高丽,闫志坚,等. 库布齐沙地三种植物光合、蒸腾特性和水分利用效率研究[J]. 中国草地学报,2010,32(2):116-120.
- [21] 格日乐,特木其勒,高润宏. 库布齐沙漠几种固沙树种环境适应性的初步研究[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版,2011,32(1):80-83.
- [22] 李红丽,董智,丁国栋,等. 浑善达克沙地植物蒸腾特征的研究[J]. 干旱区资源与环境,2003,17(5):135-140.
- [23] 杨劼,高清竹,乌力吉,等. 库布齐沙地油蒿(*Artemisia ordosica*)蒸腾作用特征及其与环境因子的关系[J]. 内蒙古大学学报:自然科学版,1999,30(3):372-376.
- [24] 赵灿,张宇清,秦树高,等. 3种典型沙生灌木 NPP 及其分配格局[J]. 北京林业大学学报,2014,36(5):62-67.

(上接第 75 页)

- [8] 吴家森,张金池,黄坚钦,等. 浙江省临安市山核桃产区林地土壤有机碳分布特征[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2013,39(4):413-420.
- [9] 王正加,黄兴召,唐小华,等. 山核桃免耕经营的经济效益和生态效益[J]. 生态学报,2011,31(8):2281-2289.
- [10] 吴家森. 山核桃人工林土壤有机碳变化特征[D]. 江苏南京:南京林业大学,2014.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999.
- [12] Arevalo C B M, Bhatti J S, Chang S X, et al. Ecosystem carbon stocks and distribution under different land use in north central Alberta[J]. Forest Ecology and Management, 2009,257(8):1776-1785.
- [13] Batlle B L, Batjes N H, Bindraban P S. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010,137(1):47-58.
- [14] Wu Jiasen, Jiang Peikun, Chang S X, et al. Dissolved soil organic carbon and nitrogen were affected by conversion of native forests to plantations in subtropical China[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2010,90(1):27-36.
- [15] 叶晶,吴家森,张金池,等. 不同经营年限山核桃林地枯落物和土壤的水文效应[J]. 水土保持通报,2014,34(3):87-91.
- [16] 安韶山,李国辉,陈利顶. 宁南山区典型植物根际与非根际土壤微生物功能多样性[J]. 生态学报,2011,31(18):5225-5234.
- [17] 张成娥,杜社妮,白岗栓,等. 黄土塬区果园套种对土壤微生物及酶活性的影响[J]. 土壤与环境,2001,10(2):121-123.