

DOI: 10.5846/stxb201907281588

李传金, 胡顺军, 郑博文. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 群落能量平衡及蒸散特征. 生态学报, 2021, 41(1): 92-100.

Li C J, Hu S J, Zheng B W. Energy balance and evapotranspiration characteristics of *Haloxylon ammodendron* community in the southern margin of the Gurbantunggut Desert. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 92-100.

古尔班通古特沙漠南缘梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 群落能量平衡及蒸散特征

李传金^{1,2,3}, 胡顺军^{1,2,*}, 郑博文^{1,2,3}

1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011

2 新疆阿克苏农田生态系统国家野外科学观测研究站, 阿克苏 843000

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 梭梭是北方荒漠区重要的固沙植物, 具有较强的荒漠环境适应能力。研究梭梭群落能量及蒸散变化对科学管理水资源、保护与建设生态植被等有重大意义。基于波文比自动观测系统在古尔班通古特沙漠南缘丘间地实时连续测定的 2018 年气象和能量数据, 运用波文比-能量平衡法对梭梭群落能量平衡和蒸散特征进行了分析。结果表明: 梭梭生长季(4—10 月) 太阳净辐射和土壤热通量的日变化呈单峰状分布, 净辐射通量最高值出现在 13:30 左右, 土壤热通量最大值出现时间比净辐射推迟 2 h, 波文比在梭梭生长旺盛期全天变化稳定, 萌发期和枯落期白天变化较小, 夜间波动较大, 湍流通量以显热通量为主; 在晴天和阴雨天条件下, 梭梭生长旺盛期的日蒸散量均明显大于萌发期和枯落期, 且日蒸散量在旺盛期呈双峰型, 萌发期和枯落期呈单峰型; 2018 年梭梭生长季蒸散量为 279.67 mm, 日均蒸散强度 1.31 mm/d, 梭梭群落的蒸散受到气象、自身生长特性以及土壤水分的影响, 4 月蒸散强度开始逐渐增大, 由于多阴雨天气导致 6 月的蒸散强度有所降低, 7 月达到最大, 9—10 月水分、温度等条件缺乏, 梭梭生理活动微弱, 蒸散强度急剧减小。

关键词: 波文比; 梭梭群落; 蒸散; 能量平衡

Energy balance and evapotranspiration characteristics of *Haloxylon ammodendron* community in the southern margin of the Gurbantunggut Desert

LI Chuanjin^{1,2,3}, HU Shunjun^{1,2,*}, ZHENG Bowen^{1,2,3}

1 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 Akesu National Station of Observation and Research for Oasis Agro-ecosystem, Akesu 843000, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: *Haloxylon ammodendron* is an important sand-fixing plant in the desert area of north China, which has a very strong ability to survive in high temperature, drought, severe cold and barren desert environment. Evapotranspiration, as the main component of water balance and energy balance in arid desert ecosystem, is an important link between its ecological process and hydrological process. It is of great significance to study the energy balance and evapotranspiration of *Haloxylon ammodendron* community for scientific management of water resources, protection and construction of ecological vegetation, improvement of ecological environment and maintenance of oasis stability. Based on the meteorological and energy data measured by the Bowen ratio system on the southern edge of the Gurbantunggut Desert in 2018, the energy balance and evapotranspiration characteristics of the *Haloxylon ammodendron* community were analyzed by Bowen ratio-energy balance

基金项目: 新疆水利科技专项资金项目(YF2020-08); 国家自然科学基金面上项目(41671032); 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB429902)

收稿日期: 2019-07-28; **网络出版日期:** 2020-11-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jhshunjun@aliyun.com

method. The results showed that during the growth period of *Haloxylon ammodendron*, the daily changes of solar net radiation and soil heat flux were distributed in a single peak. The highest value of net radiant flux appears at around 13:30 noon. The appearance time of the maximum value of soil heat flux had a hysteresis, which was delayed by 2 h than the net radiation. Bowen ratio changed steadily throughout the day in the strong growth period. For the germination period and the withering period, Bowen ratio was relatively stable in daytime, unstable during nighttime. *Haloxylon ammodendron* grew in an arid and waterless environment for a long time, and the evapotranspiration became smaller. Therefore, sensible heat energy transfer was main component in growth season. Under sunny and rainy days, the daily evapotranspiration in the strong growth period was significantly greater than that in the germination period and the withering period. The daily evapotranspiration showed a double-peak type in the strong growth period, a single-peak type in the germination period and the withering period. The evapotranspiration in the growing season of *Haloxylon ammodendron* was 279.67 mm, and the average daily evapotranspiration intensity was 1.31 mm/d. The evapotranspiration of *Haloxylon ammodendron* community was affected by weather, self-growth characteristics and soil moisture. The evapotranspiration intensity began to increase gradually in April and decreased in June due to rainy weather. The evapotranspiration reached its maximum in July. Because of the lack of moisture and temperature in September-October, the physiological state of *Haloxylon ammodendron* started to wither and fall, and the intensity of evapotranspiration decreased sharply.

Key Words: Bowen ratio; *Haloxylon ammodendron* community; evapotranspiration; energy balance

蒸散同时发生在地表能量传输过程和地表水文循环过程之中,并影响着地表生态系统和环境变迁。区域蒸散发包括水面蒸发、土壤蒸发和植被蒸腾,它受到气象因子(气温、气压、湿度等)、下垫面类型、地表结构及粗糙度等因素的影响^[1]。沙漠蒸散作为干旱区荒漠生态系统水量平衡和能量平衡的主要平衡项,是连接其生态过程和水文过程的重要纽带^[2]。古尔班通古特沙漠深居亚欧大陆腹地,是我国最大的以固定与半固定沙丘为主的沙漠,远离海洋,降水稀少,蒸发强烈,地下水位埋深大,土壤含水量低。梭梭是古尔班通古特沙漠分布最广的荒漠灌木,耐干旱、贫瘠、严寒和高温,抗盐碱和风沙,具有较强的荒漠环境适应能力^[3]。因此,研究梭梭群落蒸散发对防止干旱区沙漠水资源无谓耗散,揭示其水分循环和能量平衡特点,实现水、经济及生态的和谐发展等具有十分重要的意义。

波文比-能量平衡法是英国物理学家 Bowen^[4]提出的一种测定蒸散量的方法,其理论基础是地面能量平衡与近地层梯度扩散理论。该方法的物理概念明确,理论基础可靠,计算方法简单,对大气层没有特别的要求和限制,通常情况下精度较高,常作为检验其它蒸散量计算方法精度的判别标准^[5-7]。长期以来,国内外许多学者运用波文比-能量平衡法对干旱条件下不同植物的蒸散和热量平衡做了大量研究,闫人华等^[8]根据 2010 年 7—9 月波文比能量观测系统观测的天山北麓绿洲-荒漠过渡带芨芨草地的小气候资料,分析了该地区不同天气条件下地表能量及其能量分配日变化特征,结果表明晴天、阴天、雨天地表能量分量曲线分别呈单峰型、多峰型、偏峰型变化特征;司建华等^[9]利用波文比-能量平衡法对额济纳绿洲怪柳种群 2003 年 5—10 月的蒸散量进行了测定,结果表明在晴朗无云的条件下,蒸散速率日变化呈单峰型,蒸散与风速呈正相关;此外,张振宇等^[10]、高冠龙等^[11]、Peacock 等^[12]也利用波文比-能量平衡法分别对干旱地区向日葵、苦豆子、芦苇等植物的能量平衡及蒸散进行了试验分析,均取得了较好的研究成果。梭梭作为荒漠生态系统优势种^[13],有关梭梭林蒸散及能量平衡方面的研究却很少,张晓艳等^[14]利用涡度相关法测定了 2014 年 7 月—2015 年 6 月民勤绿洲-荒漠过渡带梭梭人工林的蒸散量,结果表明梭梭蒸散呈先增加后减小的趋势;王泽锋等^[3]利用水量平衡法测定了古尔班通古特沙漠南缘 2016 年梭梭生长季的蒸散量,结果表明蒸散特征呈多峰变化。目前对于古尔班通古特沙漠南缘梭梭群落能量平衡和蒸散的日、季节变化特征等都缺乏较为全面的认识 and 了解。

在前人研究的基础上,本文基于 2018 年古尔班通古特沙漠南缘站点的实际观测资料,利用波文比-能量平衡法,对该地区梭梭群落能量平衡分量特征、不同天气条件下的蒸散变化特征和季节蒸散规律进行全面分

析,进一步增强对古尔班通古特沙漠南缘梭梭群落能量循环及蒸散变化过程的基本认识,为梭梭群落植被保护、受损生态系统的恢复提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于古尔班通古特沙漠南缘(44°22.63' N, 87°55.21' E, 海拔 400 m 左右)(图 1)。该区属温带荒漠气候,年平均降水量 128.7 mm,冬春两季降水量约占全年降水量的 30%—45%,冬春季的积雪时间可达 4 个月;年潜在蒸发量约为 2000 mm;年平均气温 7.19℃,极端最高气温 41.5℃,极端最低气温 -37℃^[15-16]。土壤质地单一,为典型沙漠风沙土,土壤干容重 1.52—1.67 g/cm³,潜水位埋深 9—10 m^[17]。丘间地植被以梭梭为主,地表覆盖植被种类有 200 余种,多为角果藜、沙蒿以及叉毛蓬等草本植物和短命植物,部分地表覆盖有荒漠结皮^[16,18-19]。

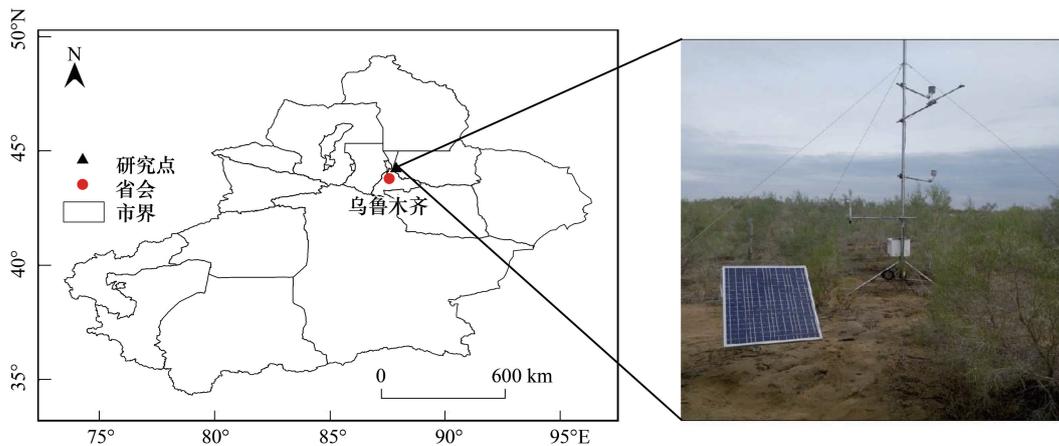


图 1 试验区位置及 Bowen 比仪器图

Fig.1 Test area location and Bowen ratio instrument

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

试验观测于 2018 年 4 月 1 日—10 月 31 日,在古尔班通古特沙漠南缘北沙窝试验场选择相对平坦开阔的丘间地安装 Bowen 比系统(Campbell Scientific Inc, USA),监测气象和辐射数据。该系统主要由数据采集器(CR100-XT)、净辐射仪(NRLITE)、高精度温湿度探头(083D-1-6)、风向传感器(020C-1-L25)、土壤热通量板(HFP01-L-L35)、风速传感器(010C-1-L25)等组成。数据采集器和传感器由蓄电池和太阳能板提供电能;净辐射仪安装在离地面 3.5 m 处;上下两层温湿度探头安装高度为离地面 3 m 和 5 m;风速探头安装高度为离地面 2 m;共有两个土壤热通量板,分别埋于地下 3 cm 和 5 cm。数据采集器设定 5 s 采集一次数据,取 10 min 的平均数作为一次记录。梭梭群落的植被盖度为 20%—30%,在梭梭生长旺盛期,平均冠幅为 199 cm × 192 cm^[3]。

1.2.2 数据处理方法

根据能量守恒原理,下垫面能量平衡方程为^[20]:

$$R_n = \lambda ET + H + G + AD + PH + M \quad (1)$$

式中, R_n 为净辐射量(W/m²); λET 为潜热通量(W/m²), λ 为汽化潜热(J/kg), ET 为蒸散量(kg m⁻² s⁻¹); H 为显热通量(W/m²); G 为土壤热通量(W/m²); AD 为由平流作用引起的能量水平交换量(W/m²); PH 为光合作用引起的能量转换量(W/m²); M 为其它能量转换量(W/m²)。

当下垫面均一,且面积较大时,气象要素的铅直梯度远比水平梯度大,由平流作用产生的能量水平交换项 AD 可略去不计。此外,由于 PH 项和 M 项的总和通常比测量能量平衡主要分量时的实际误差还要小,一般情况下也可以忽略,则式(1)可以简化为:

$$R_n = \lambda ET + H + G \quad (2)$$

根据边界扩散理论,蒸发面上的水汽、热量扩散可用以下方程描述:

$$\lambda ET = -\lambda_\rho K_w \left(\frac{0.622}{P} \right) \frac{\partial e}{\partial z} \quad (3)$$

$$H = -\rho C_p K_h \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4)$$

式中, ρ 为空气密度 (kg/m^3); P 为大气压 (kPa); C_p 为空气定压比热 ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$); K_w 和 K_h 分别为 λET 和 H 输送的湍流交换系数 (m^2/s); $\partial e/\partial z$ 为水汽压梯度 (kPa/m), $\partial T/\partial z$ 为温度梯度 ($^\circ\text{C}/\text{m}$)。

根据相似理论,假设 $K_w = K_h$,同时引用波文比 β ,即 H 与 λET 的比值,并将微分化为差分得:

$$\beta = \frac{H}{\lambda ET} = \frac{PC_p K_h}{0.622\lambda K_w} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta e} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (5)$$

式中, ΔT (上层温度减下层温度) 为两个高度的温度差 ($^\circ\text{C}$), ΔT 大于 0 表示逆温; Δe (上层湿度减下层湿度) 为两个高度的水汽压差 (kPa), Δe 大于 0 表示逆湿; γ 为湿度计系数 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$), 其计算公式为:

$$\gamma = \frac{PC_p}{0.622\lambda} \quad (6)$$

那么 λET 与 H 可以写为:

$$\lambda ET = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (7)$$

$$H = \frac{\beta(R_n - G)}{1 + \beta} \quad (8)$$

为消除波文比-能量平衡法在实际应用中出现较大的估算误差,满足以下条件之一的数据被剔除^[8]: 1) $\beta \rightarrow -1$; 2) $R_n - G > 0$ 时, $\Delta T > -(\lambda/\gamma C_p) \Delta e$; $R_n - G < 0$ 时, $\Delta T < -(\lambda/\gamma C_p) \Delta e$ 。缺失数据采用线性内插法进行补充。用 Excel 软件整理统计数据, Origin 软件制图。

2 结果与讨论

2.1 能量平衡分量日变化特征

选取 2018 年 4 月 13 日、7 月 28 日和 9 月 16 日 3 个晴天,作为梭梭萌发期、旺盛期和枯落期的典型日,分析古尔班通古特沙漠南缘丘间地梭梭群落能量平衡的日变化特征。

梭梭生长季晴天净辐射 (R_n) 日变化如图 2 所示。生长季各时期晴天 R_n 均呈单峰状分布,梭梭生长萌发期和旺盛期的 R_n 明显高于枯落期,这与白云岗等^[21]、马虹等^[22] 和颜廷武等^[23] 的研究结果一致。白天 R_n 随着太阳高度的增加而增加,最高值出现在 13:30 左右,梭梭生长萌发期最大值为 $544 \text{ W}/\text{m}^2$,旺盛期次之 ($482 \text{ W}/\text{m}^2$),枯落期最小 ($419 \text{ W}/\text{m}^2$)。由于太阳直射点南移,梭梭枯落期日平均净辐射通量最低,为 $71.14 \text{ W}/\text{m}^2$,分别为梭梭萌发期和旺盛期的 62.8% 和 59.6%。在沙漠生态系统中,从外界获得的能量主要是 R_n ,它是植被蒸散的热力驱动因子,用于沙漠植被蒸散消耗、加热土壤和空气热交换。

图 3 表示梭梭生长季土壤热通量 (G) 的日变化。由图发现, G 在日出前达到一天内的最小值,梭梭生长萌发期最小值为 $-32 \text{ W}/\text{m}^2$,旺盛期为 $-16 \text{ W}/\text{m}^2$,枯落期为 $-30 \text{ W}/\text{m}^2$ 。白天, G 随着 R_n 的增加而增加,变化明显,最大值出现在 15:30 左右,比 R_n 推迟 2 h,所呈现的滞后性与白云岗等^[21]、李英年等^[24] 和王建雷等^[25] 的研究结果一致;深夜时 G 相对有所升高,这可能与水汽凝结、升华(蒸发)耗热和地-气能量交换有关。梭梭萌

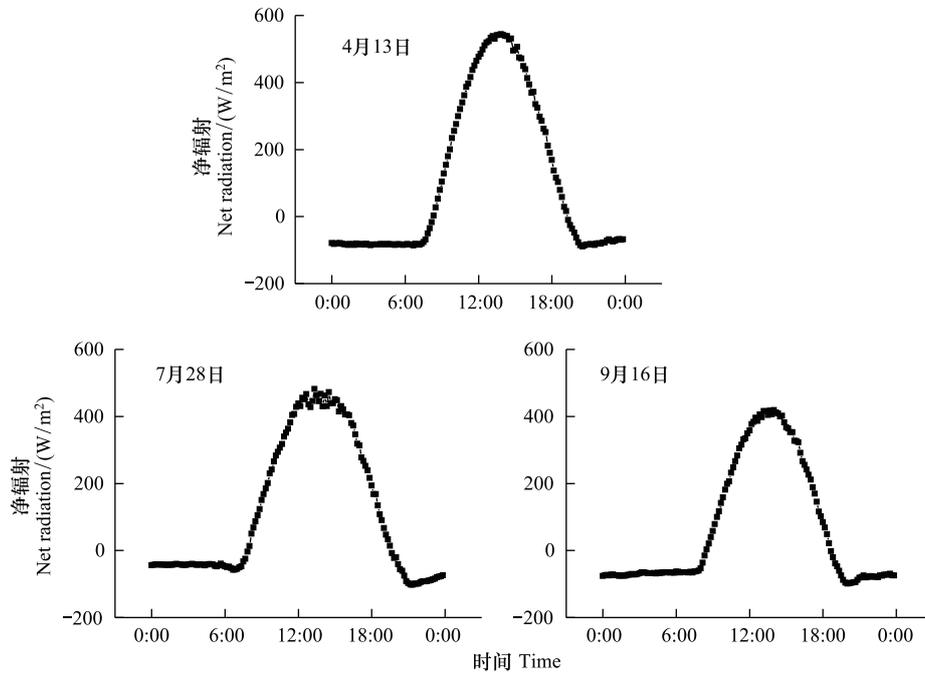


图 2 太阳净辐射典型日变化

Fig.2 Typical diurnal variation of solar radiation

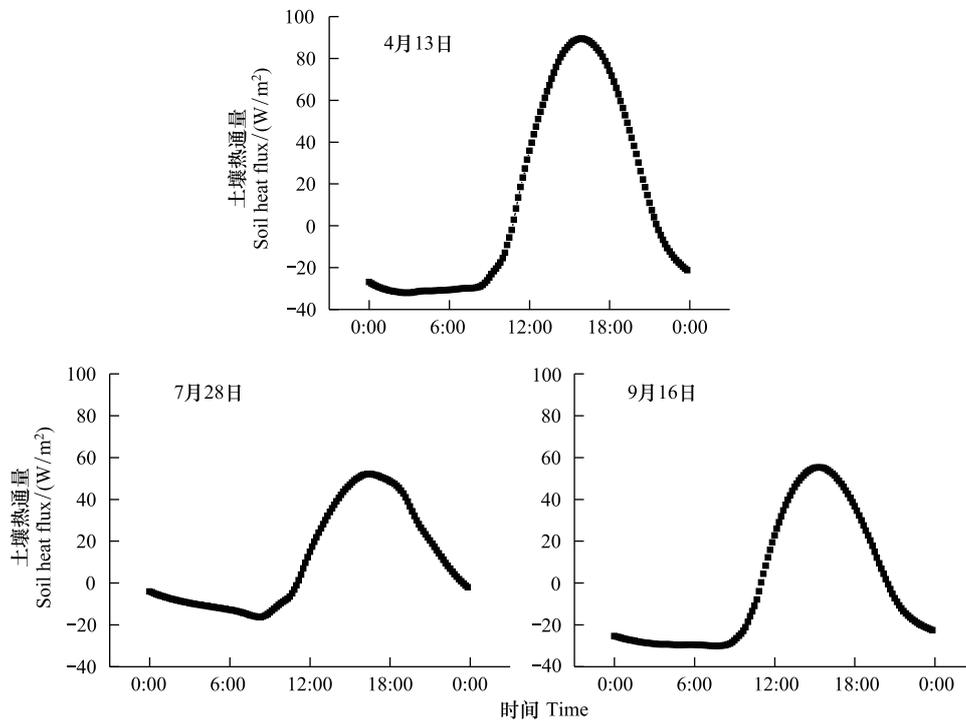


图 3 土壤热通量典型日变化

Fig.3 Typical diurnal variation of soil heat flux

发期 G 最大值为 90 W/m^2 , 枯落期 G 最大值为 55 W/m^2 , 旺盛期 G 最大值为 52 W/m^2 。整个生长季 G 从 11:00 后开始为正值, 吸收热量, G 在各阶段转为负值的时间不同, 萌发期和枯落期在 20:30—21:30 后转为负

值,而旺盛期持续吸收热量时间较长,直到 23:30 后 G 才转为负值。 G 在梭梭生长萌发期变化幅度较大,旺盛期和枯落期变化幅度小。在沙漠生态系统中, G 也是沙漠植被蒸散的驱动因子,它可以反映不同生态系统土壤温度变化特征以及气候特征,也可以反映土壤获得能量的强弱^[26]。因此,研究梭梭群落 G 的变化特征可以更好地了解该地区气候变化以及区域内能量收支平衡,为梭梭群落的生存防护提供参考价值。

波文比(β)为 H 和 λET 之比, H 大, λET 小,则 β 大于 1,反之, β 小于 1。图 4 表示梭梭生长季 β 日变化过程。由图看出,梭梭生长旺盛期 β 全天变化稳定,在夜间有轻微波动。梭梭生长萌发期和枯落期 8:00—18:30(白天)的 β 大小分别在 1.51—7.21 和 1.05—7.26 变化较小,而在 19:00—次日 07:00 波动较大,变化复杂。夜间 H 和 λET 数值较小,且在正负值之间变化相对频繁, H 和 λET 的微小变化都可能引起 β 的剧烈变化。梭梭生长萌发期、旺盛期和枯落期 β 大于 1 的占比分别为 50.7%、76.4% 和 45.2%,表明沙漠下垫面长期处于干旱状态,梭梭水分亏缺,蒸散受到抑制,湍流通量以 H 为主。 β 表征大气-地表能量交换特征,荒漠生态系统中 λET 和 H 之间具有重要的交互作用,在潜热蒸发消耗能量时,地表降温,地表与临近空气温差增大。因此,在干旱条件下荒漠生态系统中 H 占有主导地位^[27]。

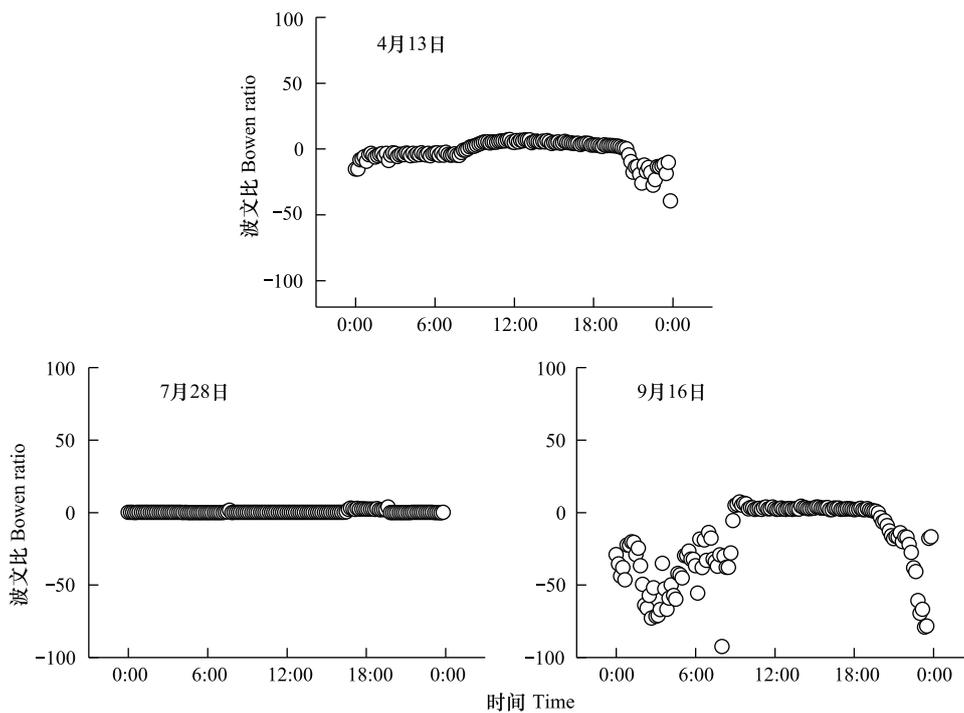


图 4 波文比典型日变化

Fig.4 Typical diurnal variation of the Bowen ratio

2.2 典型日蒸散特征

不同生长阶段、不同天气条件下梭梭群落蒸散量的日内变化如图 5 所示。从图中看出:旺盛期晴天(7月 28 日)和阴雨天(7月 24 日)蒸散量的日变化均呈双峰型曲线,且峰值明显,萌发期晴天(4月 13 日)、阴天(4月 18 日)和枯落期晴天(9月 16 日)、阴天(9月 24 日)变化趋势相似,呈波动幅度较小的单峰型曲线变化,且峰值均较小。

旺盛期晴天 8:00 左右,梭梭群落开始蒸散并迅速增大;12:00 左右蒸散强度达到最大(0.10 mm/h),随后蒸散强度呈微弱减小趋势,15:00 左右蒸散强度达到一天内的次高峰(0.09 mm/h),随后迅速减小,21:00 左右蒸散强度达到最小(-0.03 mm/h),由于气温的突然降低和空气湿度的增大,蒸散表现为凝结过程,此后蒸散强度有小幅度上升并维持在一个较低水平。晴天时上午和下午蒸散强度呈对称型,而阴雨天梭梭群落日蒸散表现得较为复杂,降雨时,虽然温度较低,但水分补充相对较充足,蒸散量仍然很大。在梭梭生长萌发期和

枯落期,阴天和晴天蒸散量日变化趋势相似,因受云、气温以及降雨等的影响,蒸散强度波动幅度小,在-0.02—0.02 mm/h 间变化,总体表现为日出前蒸散强度较低,日出后蒸散强度渐增,至日落后蒸散强度逐渐降低,20:00后,由于萌发期和枯落期气温、风速以及土壤水分的不同,导致蒸散强度略有差异。

2.3 季节蒸散特征

在梭梭整个生长季(4—10月),梭梭群落蒸散量为279.67 mm,日均蒸散强度1.31 mm/d,图6反映了梭梭群落蒸散强度的季节变化。如图所示,夏季(6—8月)蒸散量最大,春季(4—5月)次之,秋季(9—10月)最小;蒸散强度随梭梭不同生长阶段具有明显变化,4月至7月呈增加趋势,7月至10月呈减少趋势,最大值出现在7月,最小值出现在10月。4月平均蒸散强度0.83 mm/d,蒸散总量为24.93 mm;5月平均蒸散强度1.38 mm/d,并出现次高峰,蒸散总量为42.82 mm;6月梭梭进入生长旺盛期,但蒸散强度却减小到1.02 mm/d,蒸散总量降低至30.51 mm;7月和8月气温升高,梭梭处于生长旺盛期,蒸腾作用强烈,7月平均蒸散强度达到最大2.39 mm/d,且蒸散总量最大(74.02 mm)。9月气温降低,净辐射量减小,梭梭生长进入枯落期,蒸散强度急剧减小到0.82 mm/d,10月蒸散强度减小到0.62 mm/d。

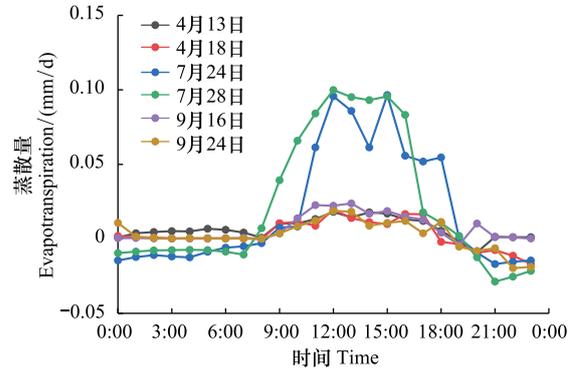


图5 典型日蒸散强度变化

Fig.5 Typical diurnal variation of evapotranspiration intensity

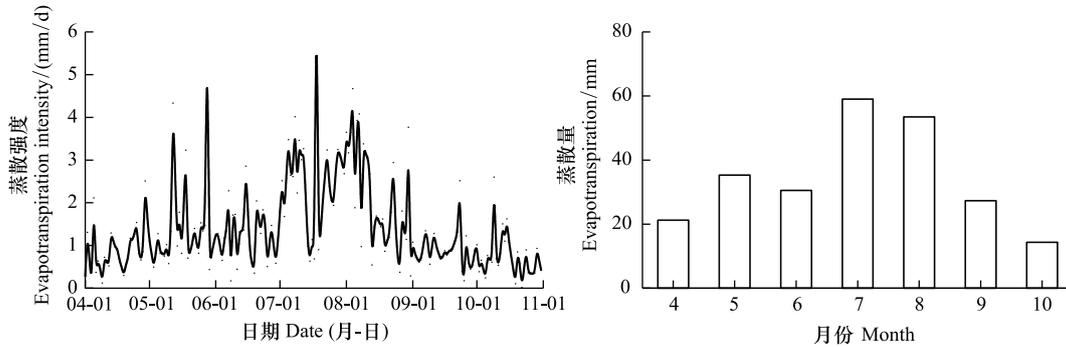


图6 梭梭群落蒸散季节变化

Fig.6 Seasonal variation of evapotranspiration

蒸散主要受气象、植物特性和土壤三大因素的影响,当土壤水分供应充分时,蒸散只取决于气象和植物因素,当土壤水分不充足时,蒸散受上述3种因素的制约^[28-30]。梭梭生长季0—400 cm 土体土壤贮水量(图7)变化在130—140 mm 之间,水分胁迫影响严重,梭梭群落的蒸散受到气象、自身生长特性以及土壤水分的影响。

梭梭在6月进入生长旺盛期,蒸散也进入旺盛阶段,从图6中明显看出6月的蒸散量却急剧下降到30.51 mm,且低于5月的蒸散量。这是因为4—5月随着 R_n 升高,冻土全面融化,蒸散逐月增加,6月30 d 中阴雨天气占据多数(图8),只有8 d 是晴天,由于光照

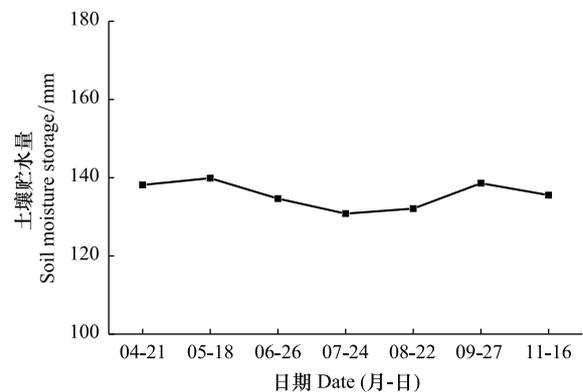


图7 土壤贮水量变化

Fig.7 Soil water storage change

条件不足, R_n 较 5 月份降低, 梭梭群落蒸散受到抑制; 由图 9 可以发现, 生长季 λET 和 H 占据了 R_n 的主体, 6 月 H 大于 λET , 即用于空气热交换的能量大于用于梭梭蒸散的能量, 所以 6 月蒸散总量呈现下降的趋势。受水分胁迫的影响, 梭梭整个生长时期的 H 大于 λET ; 7—8 月虽然 R_n 呈下降趋势, 但梭梭生长状况良好, 其生物学特性是这两个月蒸散量较大的主导因素, 且此阶段内 λET 大于 H , 与其余生长阶段相反。9—10 月梭梭进入生长枯落期, 随着水分、温度等条件的缺乏, 生理活动微弱, 蒸散也处于较低水平。梭梭蒸散的季节变化特征与干旱区草地^[10]、柽柳^[31] 蒸散的季节变化特征相类似。

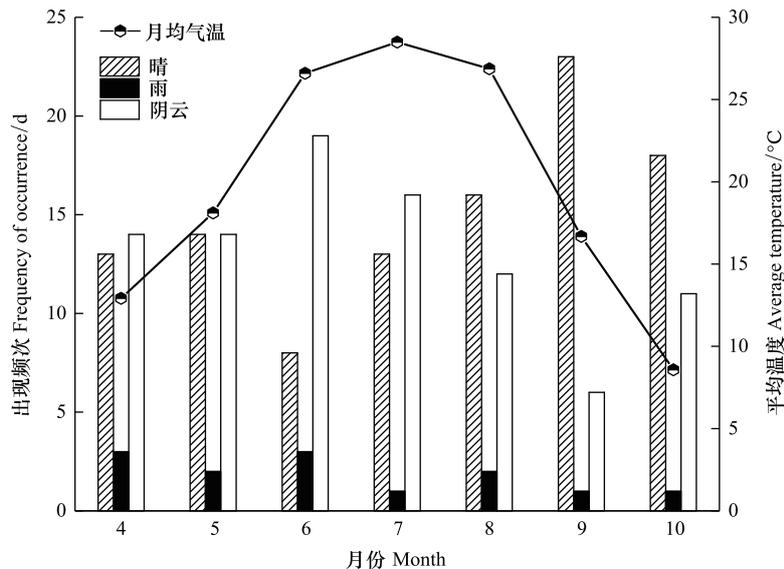


图 8 天气状况变化

Fig.8 Change in weather conditions

3 结论

(1) 梭梭生长季各时期净辐射的日变化均呈单峰状分布, 最高值出现在 13:30 左右, 萌发期和旺盛期的净辐射高于枯落期; 土壤热通量总体也呈单峰状分布, 最大值出现时间比净辐射滞后 2 h; 波文比在旺盛期全天变化稳定, 在萌发期和枯落期白天波动幅度小, 夜间波动较大, 且显热通量在生长时期内占据主导。

(2) 在晴天和阴雨天条件下, 旺盛期梭梭群落日内蒸散强度变化幅度较大, 呈双峰型曲线, 萌发期和枯落期变化幅度较小, 呈单峰型曲线; 旺盛期的日均蒸散强度大于萌发期和旺盛期。

(3) 2018 年古尔班通古特沙漠南缘梭梭群落生长季(4—10 月) 蒸散量为 279.67 mm, 日均蒸散强度 1.31 mm/d。季节蒸散总体呈夏季 > 春季 > 秋季的变化特征, 蒸散强度随梭梭不同生长阶段具有明显变化, 最大值、最小值分别出现在 7 月和 10 月。

参考文献 (References):

[1] 陈曦. 亚洲中部干旱区蒸散发研究. 北京: 气象出版社, 2012: 14-18.

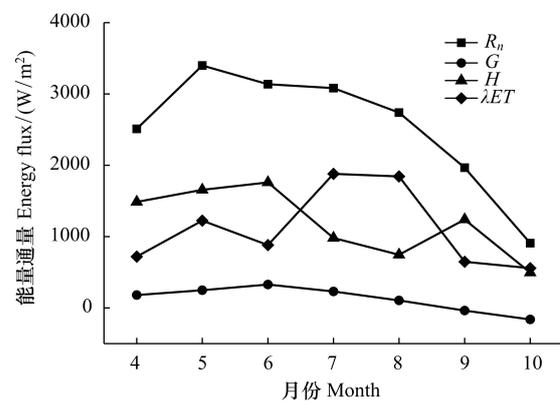


图 9 净辐射能的分配特征

Fig.9 Allocation of net radiant energy

R_n : 净辐射, net radiation; G : 土壤热通量, soil heat flux; H : 显热通量, sensible heat flux; λET : 潜热通量, latent heat flux

- [2] 许迪, 刘钰, 杨大文, 张宝忠. 蒸散发尺度效应与时空尺度拓展. 北京: 科学出版社, 2015: 1-7.
- [3] 王泽锋, 胡顺军, 李浩. 古尔班通古特沙漠南缘丘间地梭梭群落蒸散发特征. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1303-1309.
- [4] Bowen I S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review Journals Archive*, 1926, 27(6): 779-787.
- [5] 宋从和. 波文比能量平衡法的应用及其误差分析. 河北林学院学报, 1993, 8(1): 85-96.
- [6] Rana G, Katerji N. Evapotranspiration measurement for tall plant canopies: the sweet sorghum case. *Theoretical and Applied Climatology*, 1996, 54(3/4): 187-200.
- [7] Hao X C, Zhang Q, Yang Z S, Wang X W, Yue P, Han T, Wang S. A new method for drought monitoring based on land surface energy balance and its preliminary application to the Hedong region of Gansu province. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(5): 488-503.
- [8] 闫人华, 熊黑钢, 陈肖飞. 天山北麓绿洲-荒漠过渡带芨芨草草地地表能量通量研究. 生态学报, 2015, 35(5): 1350-1358.
- [9] 司建华, 冯起, 张小由, 张艳武, 苏永红. 极端干旱条件下柽柳种群蒸散量的日变化研究. 中国沙漠, 2005, 25(3): 380-385.
- [10] 张振宇, 刘丽娟, 李小玉. 干旱区膜下滴灌向日葵农田蒸散发特征. 中国生态农业学报, 2019, 27(8): 1195-1204.
- [11] 高冠龙, 张小由, 朱平, 赵虹. 极端干旱条件下苦豆子蒸散量日变化研究. 水土保持研究, 2015, 22(5): 279-283.
- [12] Peacock C E, Hess T M. Estimating evapotranspiration from a reed bed using the Bowen ratio energy balance method. *Hydrological Processes*, 2004, 18(2): 247-260.
- [13] Dai Y, Zheng X J, Tang L S, Li Y. Stable oxygen isotopes reveal distinct water use patterns of two *Haloxylon* species in the Gurbantonggut Desert. *Plant and Soil*, 2015, 389(1/2): 73-87.
- [14] 张晓艳, 褚建民, 孟平, 郑宁, 姚增旺, 王鹤松, 姜生秀. 环境因子对民勤绿洲荒漠过渡带梭梭人工林蒸散的影响. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2390-2400.
- [15] 朱海, 胡顺军, 陈永宝. 古尔班通古特沙漠南缘固定沙丘土壤水分时空变化特征. 土壤学报, 2016, 53(1): 117-126.
- [16] 周宏飞, 肖祖炎, 姚海娇, 李莉, 李原理. 古尔班通古特沙漠树枝状沙丘土壤水分时空变异特征. 水科学进展, 2013, 24(6): 771-777.
- [17] 陈永宝. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭群落——土壤系统水量平衡[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [18] 朱海, 胡顺军, 刘翔, 李浩, 李宜科. 不同龄阶梭梭根区土壤水分时空变化特征. 生态学报, 2017, 37(3): 860-867.
- [19] 钱亦兵, 张立运, 吴兆宁. 工程行为对古尔班通古特沙漠植被的破损及恢复. 干旱区研究, 2001, 18(4): 47-51.
- [20] 康绍忠, 粟晓玲, 杜太生. 西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式——以甘肃石羊河流域为例. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 226-229.
- [21] 白云岗, 张江辉, 董新光. 极端干旱区成龄葡萄园蒸散发研究. 中国农村水利水电, 2012, (7): 1-4.
- [22] 马虹, 陈亚宁, 李卫红. 荒漠河岸柽柳(*Tamarix chinensis*) 灌丛的能量平衡特征. 中国沙漠, 2014, 34(1): 108-117.
- [23] 颜廷武, 尤文忠, 张慧东, 魏文俊, 王睿照, 赵刚. 辽东山区天然次生林能量平衡和蒸散. 生态学报, 2015, 35(1): 172-179.
- [24] 李英年, 赵亮, 古松, 杜明远, 于贵瑞, 唐艳鸿, 加藤知道, 王勤学, 赵新全. 海北高寒草甸地区能量平衡特征. 草地学报, 2003, 11(4): 289-295.
- [25] 王建雷, 李英年, 王勤学, 杜明远, 薛晓娟, 张法伟. 祁连山海北地区两种高寒草甸植被类型的土壤热通量比较. 中国农业气象, 2010, 31(1): 19-24.
- [26] 张强, 曹晓彦. 敦煌地区荒漠戈壁地表热量和辐射平衡特征的研究. 大气科学, 2003, 27(2): 245-254.
- [27] Bagayoko F, Yonkeu S, Elbers J, Van De Giesen N. Energy partitioning over the West African savanna: Multi-year Evaporation and surface conductance measurements in Eastern Burkina Faso. *Journal of Hydrology*, 2007, 334(3/4): 545-559.
- [28] 刘绍民, 刘志辉, 王健. 新疆玛纳斯河流域玉米田蒸散量的估算研究. 灌溉排水, 1998, 17(1): 14-17.
- [29] 刘绍民, 刘志辉, 傅玮东. 作物农田蒸散发计算模型的研究. 生态学杂志, 1998, 17(4): 66-69.
- [30] 王菱, 倪建华. 以黄淮海为例研究农田实际蒸散量. 气象学报, 2001, 59(6): 784-794.
- [31] 张小由, 龚家栋, 周茂先, 司建华. 柽柳灌丛热量收支特性与蒸散研究. 高原气象, 2004, 23(2): 228-232.