

文章编号:2095-6134(2021)04-0567-09

简报

不同天气条件下古尔班通古特沙漠南缘梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 群落能量通量日变化特征^{*}

李传金^{1,2,3}, 胡顺军^{1,2†}
(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, 新疆 阿克苏 843000; 3 中国科学院大学, 北京 100049)
(2019 年 10 月 15 日收稿; 2020 年 3 月 19 日收修改稿)

Li C J, Hu S J. Diurnal variation of energy flux of *Haloxylon ammodendron* community in the southern margin of Gurbantunggut Desert under different weather conditions[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2021, 38(4): 567-575.

摘 要 基于 2018 年夏季在古尔班通古特沙漠南缘采用波文比系统实测的气象及能量资料,分析该区不同天气条件下梭梭群落能量特征及能量分配的日变化特征。结果表明:1) 该区夏季晴天和多云天各能量曲线变化趋势基本一致,呈单峰型,土壤热通量最小,晴天和多云天感热略高于潜热;阴天能量传输以感热为主;雨天整体热通量最小,且各能量曲线呈多峰形变化,能量传输以潜热为主。2) 白天,波文比值雨天最小,且小于 1,晴天、多云天、阴天依次增大,且大于 1;夜间,晴天、阴天、多云天、雨天的波文比值依次增大,均小于 1。3) 不同天气条件下能量分配曲线白天变化平稳,夜间波动显著,日出和日落前后波动最为剧烈;因不同天气条件下辐射强度和日照时数的不同,曲线早、晚剧烈变化开始时间有所不同。
关键词 能量平衡;能量分配;荒漠植物群落;波文比;天气条件
中图分类号:P933 文献标志码:A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2021.04.017

Diurnal variation of energy flux of *Haloxylon ammodendron* community in the southern margin of Gurbantunggut Desert under different weather conditions

LI Chuanjin^{1,2,3}, HU Shunjun^{1,2}
(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, Xinjiang, China;
3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Based on the meteorological and energy data measured by the Bowen ratio system on the southern edge of the Gurbantunggut Desert in the summer of 2018, the diurnal variation of the energy exchange and its components of the *Haloxylon ammodendron* community under different

^{*} 新疆水利科技专项(YF2020-08)、国家自然科学基金(41671032)和国家重点基础研究发展计划项目(2013CB429902)资助
[†] 通信作者, E-mail: xjhshunjun@aliyun.com

weather conditions was analyzed. The results show: 1) The diurnal curve of energy exchange is highly similar unimodal type in sunny and cloudy days in this area. Soil heat flux is the smallest, while sensible heat is slightly higher than latent heat in sunny and partly cloudy days. In cloudy days sensible heat energy transfer is the main component. In rainy days, the overall heat flux is the smallest and characterized by multi-modal curve, in which latent heat transmission is the dominated component. 2) The daytime Bowen ratio is below 1 and the smallest in rainy days. It exceeds 1 in other three weather conditions, increasing from sunny, partly cloudy to cloudy days. During nighttime, the Bowen ratios are lower than 1 in all the days, increasing from sunny, cloudy, partly cloudy to rainy days. 3) The energy partitioning curve is relatively stable in daytime and unstable during nighttime. It fluctuates dramatically in twilight, which differs in starting time among the diverse weather conditions.

Keywords energy balance; energy partitioning; desert community; Bowen ratio; weather condition

地表与大气间的相互作用是区域水循环的驱动因素之一^[1-3]。沙漠地区极端的干旱气候和特殊的下垫面条件,使其地表辐射收支和能量分配过程与其他地区存在明显差异,形成特有的地-气交换过程^[4-5],陆面通过响应太阳辐射突出大气的加热作用,这对中国西北气候的形成、季风环流乃至全球气候和大气环流的变化过程都有一定程度的影响^[6-7]。地表能量交换过程是地-气之间相互作用的主要内容,在地气耦合过程中起到纽带作用^[8]。众多研究结果^[5,9-10]表明,干旱沙漠地区不同天气条件下的能量平衡特征呈现不同变化,对不同天气条件下能量平衡特征的研究有利于完整认识和评价大气物理要素及气候变化与沙漠之间的能量转换。

目前,诸多学者针对中国巴丹吉林沙漠^[5,11]、塔克拉玛干沙漠^[7,12]、毛乌素沙地^[13-14]等的能量平衡特征开展了大量研究,如马宁等^[5]选取巴丹吉林沙漠腹地陆面和湖面两种下垫面,对比分析辐射收支和能量分配的异同;李帅等^[7]对塔克拉玛干沙漠流动沙区近地层的辐射收支特征进行分析,发现云和沙尘对其影响明显;李玉灵等^[14]研究毛乌素沙地樟子松人工林热收支的日变化进程,结果表明潜热通量与土壤热通量日变化明显。这些研究成果丰富了学界对荒漠地区陆面过程特征的认识。位于新疆准噶尔盆地中央的古尔班通古特沙漠,因其为中国面积最大的固定半固定沙漠、植物种类众多且区系分布广泛而受到各界学者重点关注^[15-17]。魏文寿等^[18-19]分析该沙漠夏季能量平衡特征,结果表明在相对均质的沙漠地表层,白天以感热、夜间以潜热形式向大气输送能量,感热通量占热通量的主导地位。塔依尔等^[20]

对该沙漠南部流动沙区夏季晴天能量输送的日变化进程进行分析,结果表明净辐射大部分用于感热通量,另一部分用于向地下传输,少部分则用于潜热输送。以往的研究主要关注古尔班通古特沙漠单一天气条件下的能量特征,未对不同天气条件下的能量平衡特征以及同一天气条件下不同能量平衡分量的特征进行深入对比和分析。

因此,本文利用 2018 年在古尔班通古特沙漠南缘采用波文比系统实测的气象及能量数据,解析晴天、阴天、多云天、雨天 4 种不同天气条件下,古尔班通古特沙漠南缘梭梭群落能量平衡各分量的差异,回答波文比值是否有明显差异、能量平衡各分量分配日变化呈现何种变化特征的问题,以增强对古尔班通古特沙漠梭梭群落能量循环过程的基本认识。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

观测场布设在古尔班通古特沙漠南缘北沙窝(44°22.63' N, 87°55.21' E, 海拔 460 m),深入沙漠约 5 km。与同纬度其他地区相比,该地夏季偏干燥炎热,冬季偏冷,年均气温 6.6℃,年均降水量 90~150 mm,多集中在 5—9 月,5—9 月降水量占全年降水量的 70%~80%,年蒸发能力 2 000 mm 左右,几乎无地表径流;土壤为沙质土,地下水埋深大于 8 m^[21]。北沙窝地貌类型以南北走向的树枝状沙垄为主,表现为固定、半固定沙丘。植被覆盖较好,丘间地以梭梭为主,并生长有沙漠绢蒿(*Seriphidium santolinum*)、尖喙牻牛儿苗(*Erodium oxyrrhynchum*)、多型大蒜芥(*Sisymbrium polymorphum*)和碱蓬(*Suaeda glauca*)等草本植物

及其他灌木,沙垄上生长有白梭梭(*Haloxylon persicum*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、蛇麻黄(*Ephedra distachya*)及大量的短命植物^[22-23]。

1.2 研究方法

根据能量守恒原理,下垫面能量平衡方程^[24]为

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

式中: R_n 为净辐射量 (W/m^2); λE 为潜热通量 (W/m^2), λ 为汽化潜热 (J/kg), E 为蒸散量 ($kg/(m^2 \cdot s)$); H 为显热通量 (W/m^2); G 为土壤热通量 (W/m^2); AD 为由平流作用引起的能量水平交换量 (W/m^2); PH 为光合作用引起的能量转换量 (W/m^2); M 为其他能量转换量 (W/m^2)。

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,则原方程可以简化为

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

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:

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

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

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 ($J/(kg \cdot K)$); K_w 和 K_h 分别为潜热和显热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 ($^{\circ}C/m$)。

根据相似理论,假设 $K_w = K_h$,同时引用波文比 β ,即感热通量与潜热通量的比值,并将微分化为差分得

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \frac{\rho C_p K_h}{0.622 \lambda K_w} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta e} = \gamma \frac{\Delta t}{\Delta e}, \quad (5)$$

式中: Δt (上层温度减下层温度)为 2 个高度的温度差 ($^{\circ}C$), Δt 大于 0 表示逆温; Δe (上层湿度减下层湿度)为 2 个高度的水汽压差 (kPa), Δe 大于 0 表示逆湿; γ 为湿度计系数 ($kPa/^{\circ}C$),其计算公式为

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

那么感热通量与潜热通量^[25]可以写为

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

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

1.3 数据来源及处理

试验观测于 2018 年 6—8 月进行,在古尔班通古特沙漠南缘北沙窝选择相对平坦开阔的丘间地安装波文比系统(Campbell Scientific Inc., USA),监测太阳净辐射、土壤热通量、空气温湿度、水汽压和风速。该波文比系统主要由数据采集器(CR100-XT)、净辐射仪(NRLITE)、高精度温湿探头(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 2 层温湿探头分别安装在离地面 3 m 和 5 m 处,风速探头安装高度为离地面 2 m,土壤热通量板分别埋于地下 3 cm 和 5 cm 处。数据采集器设定 5 s 采集一次数据,取 10 min 的平均值作为一次记录值。

文中采用的数据质量控制方法主要包括异常值剔除、绝对值限制、波文比拒绝域分析、湿度探头精度分析^[24,26-27]。由于恶劣天气、人为干扰或仪器故障等原因可能导致传感器失灵,出现不合理数据,增加水汽估算结果的不准确性,因此在实际计算中应予以剔除。 β 的拒绝域随着水汽压差 Δe 的变化而变化, Δe 越小, β 处于拒绝域的可能性越大,不合理数据量越多。湿度探头精度不足是影响该研究区应用波文比-能量平衡法的主要因素,湿度探头的测量精度应比所测水汽压梯度小 1 到数个数量级^[28]。为尽量避免波文比法在实际应用中出现较大的估算结果误差,满足以下条件之一的数据都应被剔除^[26]: 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。

本文采用 Origin 2017 软件绘图, Excel 2019 软件进行数据统计及处理,并对不同天气的相同能量进行 t 检验,采用 SPSS 软件对相同天气内的不同能量进行单因素方差分析检验。

2 结果与讨论

2.1 古尔班通古特沙漠南缘夏季环境因素的变化特征

古尔班通古特沙漠南缘 2018 年夏季(6—8 月)各环境因子的变化特征如图 1 所示,气温 6 月上旬迅速上升,6 月中旬至 8 月中旬呈高温震荡状态,8 月下旬开始呈下降趋势,降雨日及降雨后

相邻日的气温明显下降,日平均气温为 26.27℃,最高、最低气温分别为 31.41、16.25℃;饱和水汽压差 6 月上旬至 6 月下旬呈上升趋势,7 月上旬至 8 月中旬期间几乎未发生降雨事件,呈波动下

降趋势,8 月中旬随着降雨的出现使饱和水汽压差上升;夏季阶段合计 14 d 出现降雨事件,平均次降雨量为 1.42 mm,最大降雨量出现在 8 月 12 日和 8 月 23 日,均为 3.5 mm。

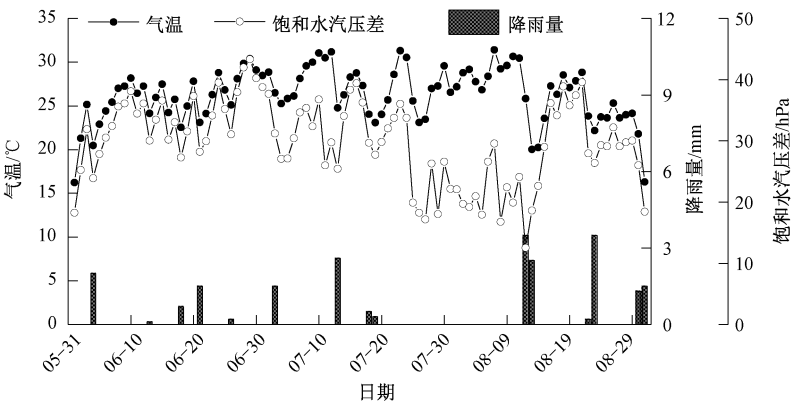


图 1 研究区夏季气温、降雨量、饱和水汽压差的变化特征
Fig. 1 Variation of temperature, rainfall, and vapor pressure deficit in summer

不同天气下气温的日变化曲线具有明显差异(图 2 (a)),晴天与阴天夜间气温接近,低于雨天和多云天夜间的气温。白天,晴天的温度最高,多云天次之,晴天、多云天、阴天及雨天的温度都在 20℃以上,由于受降雨的影响,14:00 至日落雨天的温度低于阴天时的温度,与净辐射的变化规律相对应。饱和水汽压差在晴天、多云天、阴天、雨

天的夜间呈下降趋势,白天,晴天和多云天的变化幅度最大,阴天次之,雨天最小且呈波动变化,无明显峰值(图 2 (b))。晴天、多云天和阴天平均饱和水汽压差分别为 28.17、33.49 和 28.8 hPa,雨天平均饱和水汽压差为 19.9 hPa,表明晴天、多云天、阴天空气干燥程度大于雨天的空气干燥程度。

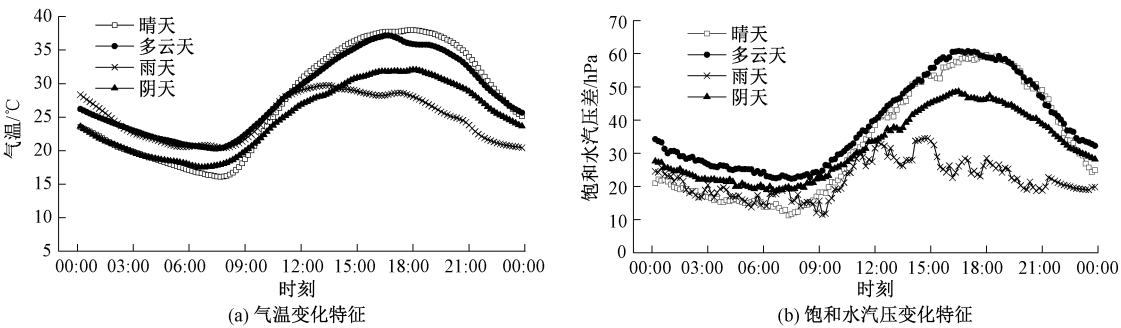


图 2 不同天气条件下气温与饱和水汽压差的变化特征
Fig. 2 Variation of air temperature and vapor pressure deficit under different weather conditions

2.2 梭梭群落能量通量日内变化

梭梭群落能量日变化特征因受不同天气条件的影响而呈现显著差异。选取古尔班通古特沙漠南缘夏季典型晴天(总云量<30%)8 d,多云天(30%<总云量<70%)11 d,阴天(总云量>70%)8 d,雨天 2 d 的数据作为样本,分别整理各天气状况下能量通量的日内每 10 min 一次的记录值,对比分析它们的能量分量日变化特征,以揭示不同天气条件对梭梭群落能量传输特征的影响。

2.2.1 晴天梭梭群落能量通量日内变化特征

晴天净辐射(R_n)、潜热(λE)、感热(H)及土壤热通量(G)均表现出明显的昼夜差异(图 3 (a))。日出前 R_n 值小于 0,日出(08:00)后 R_n 由负值转为正值且增速最大,至 14:20 达到最大值 455.04 W/m² 后迅速降低,日落时转为负值,曲线总体表现为单峰型。 λE 和 H 日曲线变化呈现为先增加后降低趋势,与 R_n 变化趋势相吻合;白天为正值,夜间为负值,夜间有轻微波动, H 在 14:10 达到最大值 263.81 W/m²,全天

平均 H 值为 59.41 W/m^2 , 高于平均 λE 值 40.40 W/m^2 , 表明晴天时用于空气热交换的能量略高于用于梭梭群落蒸散的能量。 λE 白天为蒸发潜热, 夜晚为凝结潜热, H 在白天能量传输方向为地表指向大气, 而夜间强烈的地面辐射造成

下层气温小于上层气温, 从而出现 H 向下输送的现象。 G 变化较为平缓, 最大值 (45.84 W/m^2) 出现在 16:10, 较 R_n 滞后约 2 h。 白天 G 大于 0, 表明土壤为热汇, 吸收热量; 夜间小于 0, 土壤为热源, 放出热量。

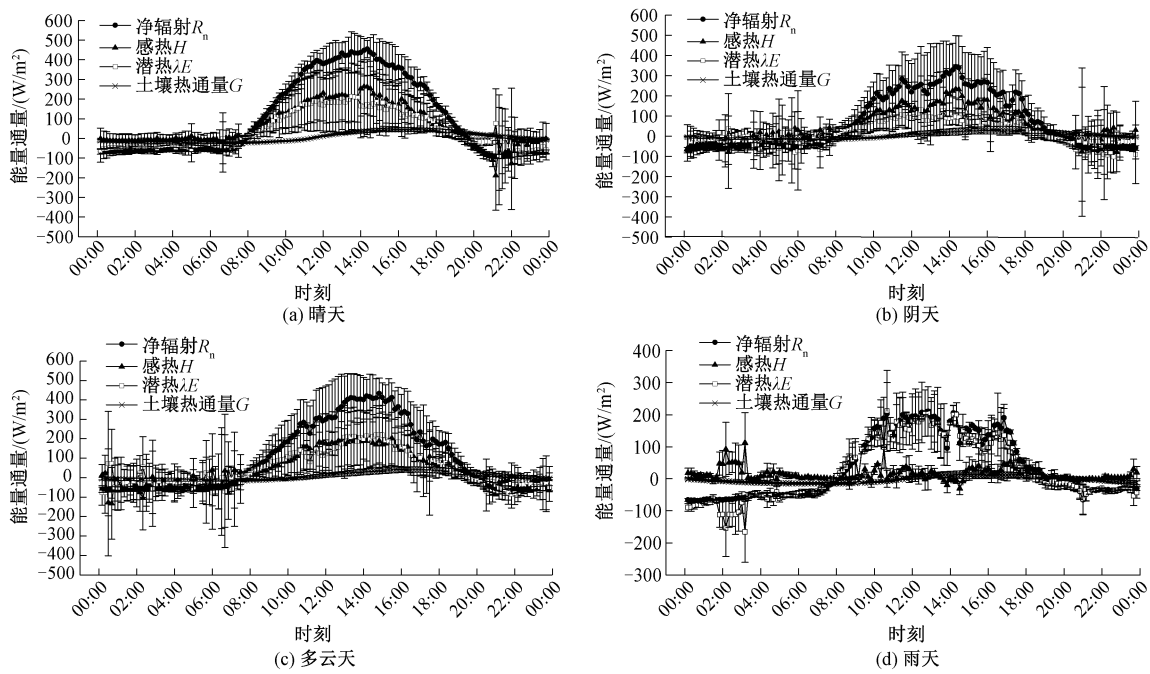


图 3 不同天气条件下梭梭群落能量日内变化特征

Fig. 3 Diurnal variation of the energy exchange components of the *H. ammodendron* community under different weather conditions

晴天呈现的能量平衡特征与塔依尔等^[18]的研究结果一致, 且与塔克拉玛干沙漠^[7,12]、巴丹吉林沙漠^[5]等干旱地区的能量平衡特征相类似, 但与其他干旱区的能量日内分配特征有一定的差异性(图 4 (a))。梭梭群落 λE 占 R_n 的比值低于绿洲荒漠过渡带芨芨草地^[26], 高于塔克拉玛干沙漠北缘荒漠区^[12]与塔里木河下游荒漠河岸桉柳灌丛^[29], 这是因为塔克拉玛干沙漠北缘荒漠区无植被覆盖, 而本试验区的植被覆盖度

为 20%^[22], 晴天植物蒸腾相对强烈, 潜热输送较大。 H 占比与塔克拉玛干沙漠北缘荒漠区和塔里木河下游荒漠河岸桉柳灌丛相当, 约为绿洲荒漠过渡带芨芨草地数值的 2 倍, 这是因为观测区域都是干旱区, 地表植被稀疏, 多为旱生灌木和藜科植物, 生态系统持水、滞水能力较差, 水分严重亏缺, 也表明下垫面植被覆盖程度与植被种类组成对地表能量的分配过程起着重要的调节作用。

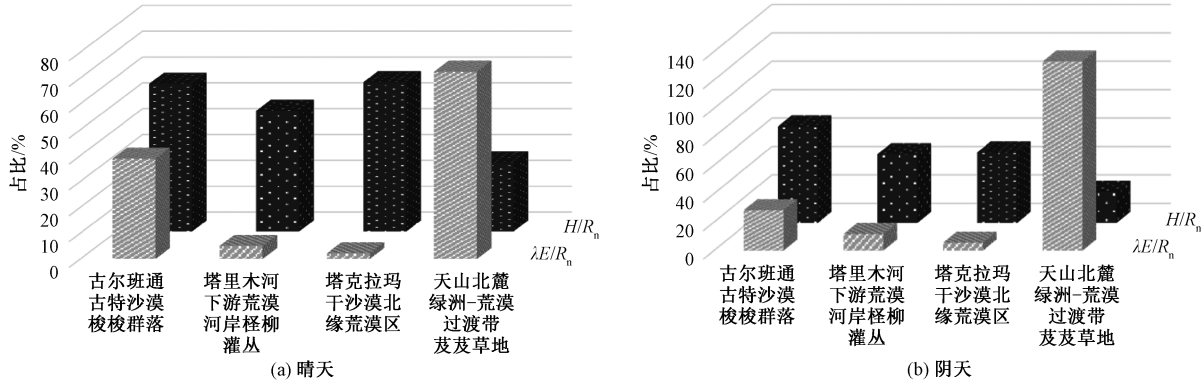


图 4 晴天、阴天不同地区能量日内分配特征

Fig. 4 Comparison of diurnal energy partitioning in sunny and cloudy days among 4 sites

2.2.2 阴天梭梭群落能量通量日内变化特征

相较于晴天,阴天由于云层对辐射的扰动影响加大,使得能量通量特征略显复杂(图 3(b))。 R_n 整体变小,波峰值 344.05 W/m^2 ,出现在 14:20,被削弱为晴天的 75.61%。随着云量大小的波动, R_n 分别在 11:30、15:50 达到次波峰,分别为 282.62 和 270.55 W/m^2 。 H 起伏变化特征与 R_n 相对应,且峰值(233.55 W/m^2)明显,表明阴天由于气温及光照等的影响,梭梭群落蒸散受到极大影响,辐射能量主要用于空气热交换, H 占据主导地位。 G 变化趋势与晴天相同,在 16:50 出现最大值(29.51 W/m^2),较 R_n 峰值时间滞后约 2.5 h,表明阴天对 G 的影响不明显。

阴天各地区 λE 占 R_n 的比值表现特征与晴天相似(图 4(b)),绿洲荒漠过渡带 λE 占比高于塔克拉玛干沙漠北缘、古尔班通古特沙漠南缘梭梭群落和塔里木河下游河岸怪柳灌丛的 λE 占比。梭梭群落、怪柳灌丛和塔克拉玛干荒漠 λE 占 R_n 比值分别约为绿洲荒漠过渡带芨芨草地 λE 占 R_n 比值的 25%、9% 和 4%,这是因为芨芨草地植被盖度为 30%^[26],大于梭梭群落、怪柳灌丛的植被盖度,而塔克拉玛干沙漠北缘荒漠区无植被覆盖,且芨芨草属于草本植物,梭梭、怪柳等是灌木植物,所以在同等天气条件下芨芨草更易进行蒸散活动;干旱荒漠区的土壤类型以风沙土为主,持水性能极差,芨芨草地的土壤湿度远大于干旱的荒漠区,土壤湿度对湍流通量影响显著,土壤湿度越大,潜热呈上升趋势^[30]。

2.2.3 多云天梭梭群落能量通量日内变化特征

多云天各能量通量曲线变化特征与晴天极为相似(图 3(c))。 R_n 、 λE 、 H 均呈现白天为正值,夜间为负值。 R_n 、 λE 、 H 最大值分别为 433.90 、 222.47 、 205.35 W/m^2 ,分别为晴天的 95.35%、104.95% 和 77.84%。 G 变化平缓,在 16:10 出现最大值(42.45 W/m^2),较 R_n 出现峰值时间(14:50)滞后约 1.5 h。 R_n 、 λE 、 H 、 G 的日积分值分别为 8.29×10^6 、 3.73×10^6 、 4.06×10^6 和 $0.64\times 10^6\text{ J/m}^2$,其中 λE 、 H 、 G 分别占 R_n 的 45.00%、48.97% 和 7.72%。

2.2.4 雨天梭梭群落能量通量日内变化特征

降雨对辐射的扰动影响显著,曲线在白天呈现峰谷起伏式变化(图 3(d))。0:00—8:00, R_n 增加的速率较晴天高,白天 R_n 值大于零,且出现 4 次波峰,峰值分别为 203.21 、 210.36 、

205.34 、 190.58 W/m^2 ,整体上 R_n 值较晴天和阴天偏小,雨天 R_n 的削减力度最强,阴天次之,多云天最小。

由于雨天的温度梯度较小或方向相反,致使 H 较小或出现负值,其值在零值上下波动; G 的绝对值较小,日积分值为 $-0.20\times 10^6\text{ J/m}^2$,为 R_n 的 -0.06% ,土壤向地表及大气传输能量,因此,雨天的能量分配以 λE 为主。 λE 变化趋势相比其他天气较为复杂,且与 R_n 的大小及变化趋势极为吻合,对应 R_n 波峰值的 λE 值分别是 211.79 、 204.87 、 199.50 和 135.68 W/m^2 ,占比分别为 104.22%、97.39%、97.15% 和 71.19%。由于降雨量、降雨时段、植被种类以及土壤类型等不同,梭梭群落雨天的能量通量日变化特征区别于塔克拉玛干沙漠北缘^[12]、芨芨草地^[26] 和怪柳灌丛^[29] 的能量变化特征。

经 t 检验,晴天和阴天的 R_n 、 G 、 λE 均无显著性差异, H 有显著性差异;晴天和多云天的 H 、 λE 无显著性差异, R_n 、 G 有显著性差异;多云天和阴天的 R_n 、 G 、 λE 无显著性差异, H 有显著性差异。

经单因素方差统计检验(表 1),晴天和多云天除 H 与 λE 无显著性差异外, R_n 与 H 、 λE 、 G 以及 G 与 H 、 λE 均有显著性差异;阴天内 R_n 与 H 、 λE 与 H 、 G 与 λE 无显著性差异,而 R_n 与 λE 、 G 以及 H 与 G 有显著性差异;雨天的 R_n 、 G 、 λE 、 H 均无显著性差异。

表 1 不同天气条件下各能量通量的差异

Table 1 Differences in energy flux components under different weather conditions

能量通量	差异显著性(0.05)			
	晴天	阴天	多云天	雨天
R_n	a	a	a	a
H	b	ab	b	a
λE	b	bc	b	a
G	c	c	c	a

2.3 波文比日内变化

波文比是指 H 与 λE 之比,当 β 大于 1 时,表明 H 大于 λE ,当 β 小于 1 时,表明 λE 大于 H 。不同天气条件下波文比日内变化特征如图 5 所示。除雨天外,白天(8:30—20:30) β 值均大于 1 且阴天最大,表明白天 R_n 多用于 H ,能量以进行空气热交换为主,阴天最为明显。夜间 β 值均小于 1,说明净辐射能量多用于梭梭群落蒸散;后半夜 β 值多云天、阴天、晴天依次减小。晴天、阴天和多

云天的 β 值极差分别为 8.29、8.52 和 5.36。波文比呈现结果与前面能量分配日变化曲线反映的结果相吻合。雨天全天 β 值小于 1,且变化幅度小,

极差仅为 1.59;除雨天外,其他天气条件下波文比均有大幅度波动,这与马迪等^[11]在巴丹吉林沙漠得到的研究结果相同。

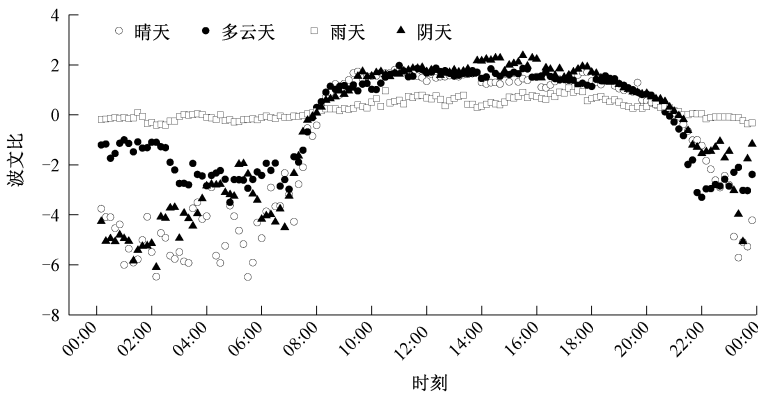


图 5 不同天气条件下波文比日内变化特征
Fig. 5 Diurnal variation of β under different weather conditions

2.4 梭梭群落能量分配日内变化特征

不同天气条件下梭梭群落能量分配日变化特征如图 6 所示。能量的转化与分配取决于地表特征与环境条件的变化^[12,26]。古尔班通古特沙漠南缘的气候特征主要表现为降水少、

蒸发量大,晴天、多云天和阴天能量分配比出现明显转折的时间相同,为 8:00 和 20:00 附近,雨天因为太阳辐射弱、日照时数少,曲线早、晚剧烈变化开始时间较其他天气分别延后和提前 0.5 h。

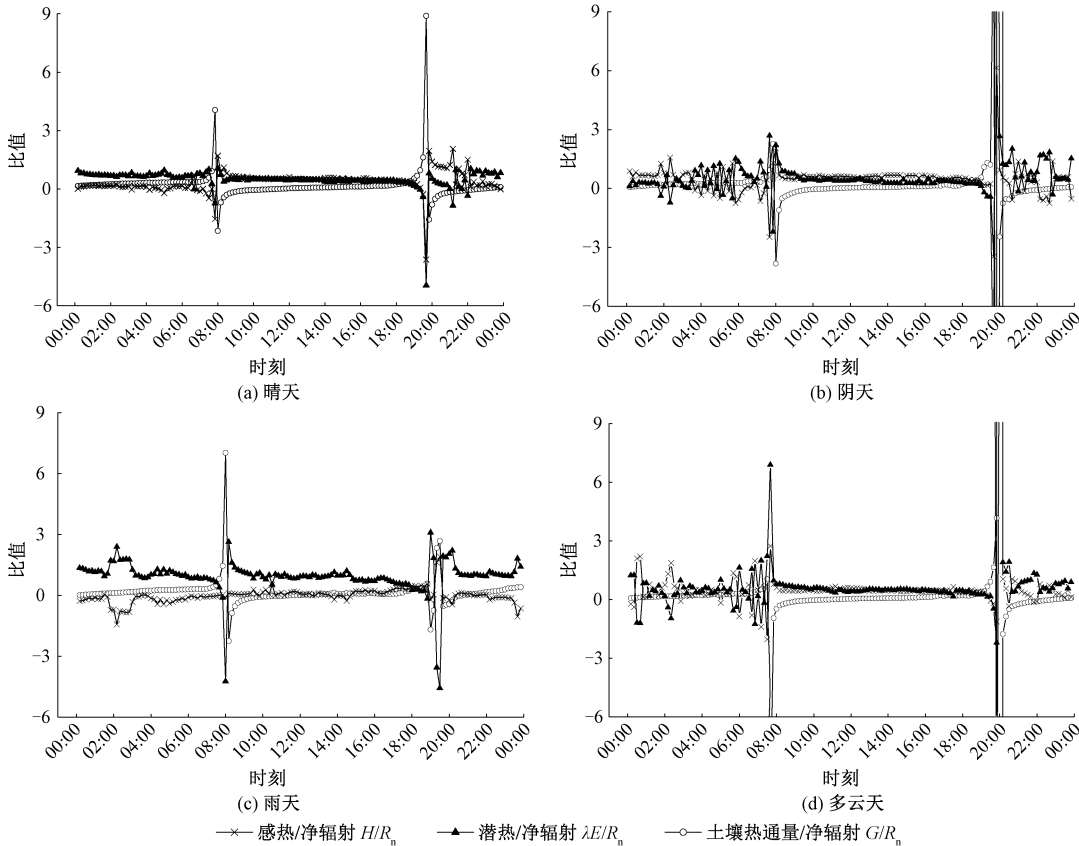


图 6 不同天气条件下梭梭群落能量分配日变化特征
Fig. 6 Diurnal variation of energy flux components of *H. ammodendron* community under different weather conditions

晴天、多云天背景下白天(8:00—20:00)均呈现为 $H/R_n > \lambda E/R_n > G/R_n$,这与曹寰琦等^[12]在塔克拉玛干沙漠北缘晴天时的研究结果一致;晴天前半夜(20:00—0:00) λE 、 H 波动起伏强烈,后半夜(0:00—8:00)变化平稳,呈现 $\lambda E/R_n > G/R_n > H/R_n$,多云天也具有一定幅度的波动。晴天、多云天共同表现为 λE 和 H 为主要的能量消耗形式, G 形式的能量消耗小。阴天白天 $H/R_n > \lambda E/R_n > G/R_n$,夜间 G 变化平稳,由于受到风速和大气稳定度的影响, λE 和 H 波动强度明显。降雨直接影响陆面 H 和 λE 的日积分^[11],雨天白天 $\lambda E/R_n > H/R_n > G/R_n$,虽然气温相对其他天气较低,但由于水分供给条件的改善,使地表及梭梭群落蒸散活动强烈; $\lambda E/R_n > 1$ 的情况出现较多,一般降雨前后时刻 $\lambda E > R_n$,因为 R_n 、光照强度等在降雨前后较低,是 λE 瞬间增大所导致的。由式(4)可知,雨天温度梯度变小或方向改变,导致 H 减少或出现负值,因此夜间呈现 $\lambda E/R_n > G/R_n > H/R_n$ 。

3 结论

本文利用 2018 年在古尔班通古特沙漠南缘采用波文比系统实测的气象及能量数据,分析 4 种不同天气条件下该地区梭梭群落的能量平衡特征及能量分配日变化规律,得到以下几点结论:

1) 受夏季不同天气影响,古尔班通古特沙漠南缘梭梭群落能量日变化特征呈现显著差异:晴天和多云天各能量曲线变化趋势基本一致,呈单峰型;能量特征均表现为土壤热通量最小,晴天和多云天感热略高于潜热。阴天能量传输以感热为主。降雨对辐射影响显著,雨天各能量曲线特征呈多峰形变化,能量传输以潜热为主。

2) 晴天、多云天和阴天波文比值的日内变化曲线分为 3 个时期,日出(8:00)前为剧烈波动阶段,白天(8:00—20:00)为平稳变化阶段,日落(20:00)后为波动下降阶段。雨天的波文比值日内变化曲线最为平稳,且全天波文比值小于 1。

3) 晴天、多云天和阴天背景下白天均呈现为感热占比最高,潜热占比次之,土壤热通量占比最小,夜间受到风速和大气稳定度的影响呈现显著波动;雨天全天潜热占比最大,潜热为主要的能量消耗形式。晴天、多云天和阴天能量分配比出现明显转折的时间为 8:00 和 20:00 附近,雨天曲线早、晚剧烈变化开始时间较其他天气分别延后和提前 0.5 h。

参考文献

- [1] Sellers P J, Dickinson R E, Randall D A, et al. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere [J]. Science, 1997, 275 (5299): 502-509.
- [2] Yang X P, Ma N N, Dong J F, et al. Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, Western China [J]. Quaternary Research, 2010, 73 (1): 10-19.
- [3] Dou J X, Zhang Y P, Yu G R, et al. Interannual and seasonal variations of energy and water vapor fluxes above a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, SW China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 3099-3109.
- [4] 张强,王胜. 夏季绿洲生态环境对荒漠背景地表能量过程的扰动[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2459-2466.
- [5] 马宁,王乃昂,黄银洲,等. 巴丹吉林沙漠腹地夏季不同天气条件下陆-湖面辐射收支与能量分配特征对比[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 796-809.
- [6] 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[J]. 大气科学, 2003, 27(2): 245-254.
- [7] 李帅,胡列群,何清,等. 塔克拉玛干沙漠腹地地表辐射收支特征研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 1035-1044.
- [8] Yang T, Wang X Y, Zhao C Y, et al. Changes of climate extremes in a typical arid zone: Observations and multimodel ensemble projections [J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(D19): D19106.
- [9] 李建刚,奥银焕,李照国. 夏季不同天气条件下沙漠辐射和能量平衡的对比分析[J]. 地理科学进展, 2012, 31 (11): 1443-1451.
- [10] 张文斌,买买提艾力·买买提依明,何清,等. 塔克拉玛干沙漠腹地土壤热通量变化特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1666-1671.
- [11] 马迪,吕世华,奥银焕,等. 巴丹吉林沙漠不同下垫面辐射特征和地表能量收支分析[J]. 高原气象, 2012, 31 (3): 615-621.
- [12] 曹寰琦,何清,金莉莉,等. 塔克拉玛干沙漠北缘夏秋冬地表能量平衡闭合特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35 (4): 830-839.
- [13] 贺文君,松田昭美,神近牧男. 毛乌素沙地辐射平衡的年变化特点[J]. 内蒙古林业科技, 1996, 3/4: 43-46.
- [14] 李玉灵,王林和,张国盛,等. 毛乌素沙地樟子松人工林热量平衡的研究[J]. 内蒙古林学院学报, 1998, 20(4): 31-35.
- [15] 钱亦兵,吴兆宁. 古尔班通古特沙漠环境研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [16] Luo Q H, Chen Q M, Ning H S, et al. Chronosequence-based population structure and natural regeneration of *Haloxylon ammodendron* plantation in the southern edge of the Gurbantunggut Desert, Northwestern China [J]. Russian Journal of Ecology, 2017, 48(4): 364-371.
- [17] Zhu H, Hu S J, Yang J S, et al. Spatio-temporal variation of soil moisture in a fixed dune at the southern edge of the

Gurbantunggut Desert in Xinjiang, China [J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(5): 685-700.

[18] 魏文寿, 董光荣. 沙漠层辐射热量传输的界面过程研究: 以古尔班通古特沙漠为例[J]. 沉积学报, 1999, 17(S1): 840-845.

[19] Wei W S. Respondecence and feedback of modern sand deserts to climate change: a case study in Gurbantunggut Desert [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(12): 1137-1142.

[20] 塔依尔, 吕新, 杨利勇. 石河子垦区沙漠和绿洲下垫面生态条件下能量交换特征[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 478-482.

[21] 胡顺军, 陈永宝, 朱海. 古尔班通古特沙漠南缘融雪水土壤入渗量[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1007-1015.

[22] 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特征[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1303-1309.

[23] 钱亦兵, 吴兆宁, 张立运, 等. 古尔班通古特沙漠短命植物的空间分布特征[J]. 科学通报, 2007, 52(19): 2299-2306.

[24] 康绍忠, 粟晓玲, 杜太生, 等. 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[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 226-233.

[25] 李阳, 景元书, 李根, 等. 低丘红壤区集水区和田块尺度农田能量平衡特征比较[J]. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2393-2403.

[26] 闫人华, 熊黑钢, 陈肖飞. 天山北麓绿洲-荒漠过渡带芨芨草地地表能量通量研究[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1350-1358.

[27] 宋从和. 波文比能量平衡法的应用及其误差分析[J]. 河北林学院学报, 1993, 8(1): 85-96.

[28] 吴家兵, 关德新, 张弥, 等. 涡动相关法与波文比-能量平衡法测算森林蒸散的比较研究: 以长白山阔叶红松林为例[J]. 生态学杂志, 2005, 24(10): 1245-1249.

[29] 马虹, 陈亚宁, 李卫红. 荒漠河岸桉柳(*Tamarix chinensis*)灌丛的能量平衡特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 108-117.

[30] 马英赛, 孟宪红, 韩博, 等. 黄土高原土壤湿度对地表能量和大气边界层影响的观测研究[J]. 高原气象, 2019, 38(4): 705-715.