

DOI: 10.5846/stxb201305101015

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. 生态学报, 2015, 35(5): 1350-1358.

Yan R H, Xiong H G, Chen X F. Characteristics of land surface energy over *Achnatherum splendens* grassland in the oasis-desert ecotone of Northern Piedmont of Tianshan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1350-1358.

天山北麓绿洲-荒漠过渡带芨芨草地地表能量通量研究

闫人华^{1,2,3}, 熊黑钢^{2,3,*}, 陈肖飞¹

1 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008

2 北京联合大学应用文理学院, 城市科学系, 北京 100083

3 新疆大学, 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要: 利用天山北麓绿洲-荒漠过渡带芨芨草地的小气候实测资料, 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, 并进一步探讨了潜热与其它地表能量的关系。结果表明: 晴天各地表能量分量曲线呈“单峰型”, 阴天表现为峰谷频繁交替的“多峰型”, 雨天则显示为“偏峰型”。由于该区以晴天为主, 阴雨天气发生频率少, 平均情况下的各能量曲线变化与晴天基本一致。任何天气条件下能量传输均以潜热(LE)为主, 其次为感热(H)和土壤热通量(G)。观测期内 LE/R_n 平均值介于沙漠和绿洲之间, 很好地在能量分配上体现出自身的过渡性。各种天气条件下能量分配的日动态变化趋势基本一致, 白天均以潜热为主, 夜间则有所不同。 LE/R_n 、 H/R_n 、 G/R_n 曲线白天变化平稳, 夜间持续波动, 日出和日落后波动最为剧烈。其中, 日出时刻以 LE/R_n 和 G/R_n 曲线波动最为强烈, 且两者峰谷互补。因辐射强度和日照时数的不同, 不同天气条件下曲线早、晚剧烈变化开始时间也有所差别。晴天、平均、阴天(8:00—18:00)波文比依次减小, 且均小于 1, 表明它们在白天能量分配均以潜热为主。而雨天波文比则表现出较大的波动性, 整体呈上升趋势。 LE 与 R_n 、 H 、 G 相关性程度均表现为: 晴天与平均相当, 阴次之, 雨天最小。

关键词: 地表能量; 绿洲-荒漠过渡带; 波文比法; 能量分配

Characteristics of land surface energy over: *Achnatherum splendens* grassland in the oasis-desert ecotone of Northern Piedmont of Tianshan Mountains

YAN Renhua^{1,2,3}, XIONG Heigang^{2,3,*}, CHEN Xiaofei¹

1 Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2 College of Arts and Sciences of Beijing Union University, Beijing 100083, China

3 Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Abstract: Oasis-desert ecotone that lies between oasis and desert is bridgehead of the advance and retreat of Oasis (desert), which is ecological fragile zone taking on the trend of degradation. Its special characteristics of the surface energy exchange has a profound impact on the formation and development of the regional ecological environment. Therefore, better studying the law of surface energy transmission of oasis-desert ecotone can provide the scientific foundation of establishing the micro-climate model of the ecotone, achieving the optimal allocation of natural resources and promoting sustainable development of oasis. Based on the observed data of the experiment carried out in the oasis-desert ecotone of northern piedmont of Tianshan Mountains from July to September in 2010, the characteristics of the daily variations of the surface

基金项目: 国家自然科学基金(41171165); 国家教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队项目(IRT1180); 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(IDHT20130322); 国家自然科学基金(41261049)

收稿日期: 2013-05-10; **网络出版日期:** 2014-04-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xhg1956@sohu.com

energy balance, energy distribution and the relationship between latent heat and other surface energy were analysed. The results show that there are many differences in the daily variations of the surface energy under different weather conditions. Each energy component curve appears as ‘single peak’ type on clear day, whose circadian variation is significant. Affect by the variation of cloudiness, the curve of overcast day displays as ‘multiple peak’ type with peak and valley frequently alternating. Influenced by the precipitation change, the curve of rainy day manifests ‘partial peak’ type. Owing to the precipitation, the curve of average is basically consistent with the clear day. Unlike the most previous experimental results of the arid areas, the latent heat (LE) is the main energy transmission of the oasis-desert zone under any weather conditions, followed by sensible heat (H) and soil heat flux (G). The LE/R_n of sunny day reaches 72.4%. Due to the complement of the soil heat flux (G), LE/R_n of overcast day is up to 131%. As the transitional hydrothermal property and the dry-heat air transported by advection from desert, the average value of LE/R_n (58.8%) was much larger than Hexi Corridor desert, Dunhuang gobi for the same period in the arid zone, while smaller than the irrigated wheat area of oasis. That the average LE/R_n is between desert and oasis well reflects the transitional character of energy distribution. The daily changing trends of energy distribution under any weather condition are basically in accordance; energy of daytime is latent heat mainly and night is different. The curve of G/R_n , H/R_n and LE/R_n in daytime is smooth, that fluctuate continually in night, however, the most violent in sunrise and sunset. The LE/R_n and G/R_n curve of sunrise fluctuations strongest, which display the peak-valley complementarity. The Bowen ratio (8:00—18:00) of the clear, average and overcast day decreases in turn. They are less than 1, indicating that energy distribution are mainly the latent heat in the daytime. However, the rainy day shows greater volatility with the upward trend as a whole. The correlation coefficients between LE and other energy including R_n , H , G are different due to weather condition. They are all highly correlated in clear days, followed by cloudy days and rainy days, while in clear days they show similar to the average condition.

Key Words: land surface energy; oasis-desert ecotone; the bowen ratio method; energy distribution

地表和大气之间的相互耦合作用将直接影响到区域和全球的气候变化^[1],而以地表热量平衡为主的能量传递过程则是地-气之间相互作用研究的主要内容。因为地表能量的传输一方面是地-气耦合过程的能量纽带,另一方面也是影响地面温度、水份输送及植被生长发育与生态系统生产力的重要因素^[2-3]。因此,对能量平衡特征的研究一直是地理学、生态学、大气科学等学科领域的重点研究方向之一。自 20 世纪 80 年代以来,国内外进行的许多观测试验均将地表能量平衡过程列为主要内容之一,涉及高原、山地、荒漠、戈壁、森林、草原等不同下垫面,较好地揭示了这些下垫面的不同能量传输规律^[4-7]。然而目前涉及绿洲-荒漠过渡带这一特殊区域,以及其与干旱区其它下垫面之间能量对比分析的研究仍需深入。

绿洲荒漠过渡带是处于绿洲与荒漠之间,受绿洲生态系统与荒漠生态系统的双重影响且具有敏感退化趋势的生态脆弱带,是绿洲与荒漠进退消涨的桥头堡^[8]。而其自身特殊的热量循环特征深刻影响着该区域生态环境的形成。因此,搞清楚这一区域地表热量运动的基本特征是建立过渡带微气候模型、实现自然资源优化配置和促进绿洲可持续发展的科学基础。本文利用新疆天山北麓绿洲荒漠过渡带的天然芨芨草地能量观测数据,分析该区不同天气条件下的地表能量平衡特征及其能量分配规律,以深化对绿洲荒漠过渡带能量循环过程的基本认识,为进一步探究过渡带维持其特殊生境的能量环境提供科学依据。

1 研究区概况

本观测场布设在天山北麓,准噶尔盆地东南缘的新疆奇台县西北部万木春林场附近的大面积天然芨芨草地,其向北 1 km 与我国第二大沙漠——古尔班通古特沙漠邻接,属典型的绿洲-荒漠过渡带。实验观测于 2010 年 7—9 月进行。该地区年平均气温 5℃,年平均风速 2.9 m/s,多年平均降水量 150 mm,而潜在年蒸发量高达 2 100 mm 以上,年日照时数 2933.6 h,年无霜期 158 d,属温带大陆性干旱半干旱气候。

试验区为面积约 21 km²的天然芨芨草地,主要植物为多年密丛生禾本科草本植物芨芨草(*Achnatherum splendens*),总盖度 30%左右,其间稀疏分布有苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、猪毛菜(*Salsola collina* Pall)等小型植物,土壤为沙质土,地下水埋深 3—5 m。

2 研究方法

2.1 数据采集

本研究主要观测项目有辐射(包括总辐射、净辐射)、空气温湿度、风速风向、土壤温湿度、土壤热通量。仪器采用英国 Delta-T 公司生产的波文比能量观测系统。各项数据利用自动数据采集器每 30 min 采集 1 次。采集记录下的数据储存在数据采集器内,由计算机导出。空气温湿度和风速风向探头分两层布设,在芨芨草灌层以上 0.5、2.5 m 各布设 1 层。在地下 5、10、15、20、40、60、80、100 cm 各层布置土壤温湿度探头,土壤热通量板埋设在地表以下 5 cm。仪器布置点(89°26'E, 44°11'N, 海拔 611 m)距试验区边界 1510—3534 m,满足风浪区长度与安装高度之比大于 100:1 的要求^[9]。

2.2 地表能量的计算

波文比能量平衡法是国际上广泛采用的一种精度较高的能量估算方法,许多学者也对该方法适用的可靠性进行了讨论^[10-14],为此方法在观测和计算的的实际应用中就如何更好地提高精度提供了许多可借鉴的经验。

地表能量平衡方程表示为:

$$R_n = LE + H + G \quad (1)$$

式中,地表土壤热通量 G 不仅指土壤热通量板测定的热通量,还应包括土壤热通量板到地表的土壤热储存^[15]。因此,地表土壤热通量 G 将利用 5 cm 深土壤热通量观测值校正到地表计算得到^[16]:

$$G = G_s + C_s \frac{\partial T}{\partial t} \Delta Z \quad (2)$$

绿洲-荒漠过渡带这一非均匀下垫面因绿洲和荒漠的地表热力性质差异引起局地环流,产生量级较小但作用十分关键的垂直平流,并伴随热量的输送,形成垂直感热平流热通量^[17]。引入近地层垂直感热平流输送后,(1)式可改写为

$$R_n = LE + H_o + H_{vad} + G \quad (3)$$

而垂直感热平流 H_{vad} 由下式计算得到:

$$H_{vad} = -\rho C_{pzrwr} \frac{\Delta T}{\Delta Z} \quad (4)$$

感热通量 H_o (湍流输送) 和潜热通量 LE 计算如下^[18]:

$$LE = \frac{R_n - G - H_{vad}}{1 + \beta} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{H_o}{LE} = \frac{\rho C_p K_h \frac{\Delta T}{\Delta Z}}{\rho L K_w \frac{\Delta q}{\Delta Z}} = \gamma \frac{K_h \Delta T}{K_w \Delta e} \quad (6)$$

$$H_o = \beta LE \quad (7)$$

式中, R_n 为净辐射通量 (W/m^2), 由辐射仪直接测出; LE 为潜热通量 (W/m^2); $H (=H_o + H_{vad})$ 为感热通量 (W/m^2), 包括湍流和平流输送; H_{vad} 为垂直感热平流; G 为地表土壤热通量 (W/m^2); G_s 为 5 cm 深土壤热通量, 由土壤热通量板直接测出; C_s 为土壤容积热容量 (J/m^3); $\frac{\partial T}{\partial t}$ 为地温随时间的变化率; ΔZ 为地表到土壤热通量观测处的土壤厚度; w_r 是近地层 Z_r 高度的垂直速度, $\Delta T/\Delta Z$ 是近地层 Z_r 高度处的温度梯度; β 波文比; $\gamma = \frac{CPP}{LE}$, 是湿度计常数; ρ 为空气密度 (kg/m^3), P 大气压 (hPa) 和 C_p 定压比热 ($4.184 \times J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$); L 为汽化潜热

$(4.184 \times J \cdot g^{-1})$; ε 为水分子与干空气分子重量的比值(取 0.622); Δt 和 Δe 分别为两个高度的空气温度差($^{\circ}C$)、实际水汽压差(hPa); K_h 、 K_w 分别是热量湍流交换系数和水汽湍流交换系数。

在以往下垫面均匀情况下的研究中,依据相似性原理,公式 6 中的热量湍流交换系数(K_h)与水汽湍流交换系数(K_w)相等,即 $\beta = \gamma \frac{\Delta t}{\Delta e}$,但本研究区下垫面不均一,天气差异较大,明显 $K_h \neq K_w$,因此需要对 $\frac{K_h}{K_w}$ 进行层结稳定度修正,具体方法见文献^[19-20]。

2.3 数据处理

文中所用的数据质量控制方法如下:首先根据水汽通量的过程曲线特征分析,划定阈值,剔除异常值;其次,参考文献^[21,11],为消除波文比法在实际应用中出现 R_n 和 G 的误差在计算 LE 过程中的逐步累积, LE 误差较大时,可能与实际方向相反等不足,满足以下条件之一的数据应当剔除:① $\beta \rightarrow 0$ ② $R_n - G > 0$ 时, $\Delta T > -(L/rC_p) \Delta q$; $R_n - G < 0$ 时, $\Delta T < -(L/rC_p) \Delta q$ 。被剔除时刻的资料采用线形内插法补充。

3 结果与分析

3.1 地表能量日内变化

受不同天气条件的影响,地表能量日变化特征差异显著。同时,该区以晴天为主,阴雨天较少,因此选取典型晴天 13d(总云量<2 成)、阴天 5d(总云量>8 成)、降雨天 1d(>1.2 mm/h)数据作为样本,分别计算各天气状况下能量通量的日内平均半小时值,对比分析它们的地表能量日变化特征,以揭示不同天气条件对地表能量传输特征的影响。

3.1.1 晴天日内变化特征

净辐射(R_n)、潜热(LE)、感热(H)及土壤热通量(G)均表现出明显的昼夜差异,曲线呈单峰型变化(图 1)。日出后, R_n 由负值转为正值,并逐渐增大至 14:00 达到最大值 $534.54 W/m^2$,之后逐渐降低至日落转为负值。 LE 日变化曲线与 R_n 相吻合,中午达到最大值 $370.50 W/m^2$ 。虽然 LE 在日落后转为负值,从蒸发潜热转变为凝结潜热,但午夜后,则转为较小的正值,表明此时仍有一定量的蒸散。 H 白天为正值,晚间为负值,说明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冷却造成地表温度小于气温,从而出现感热

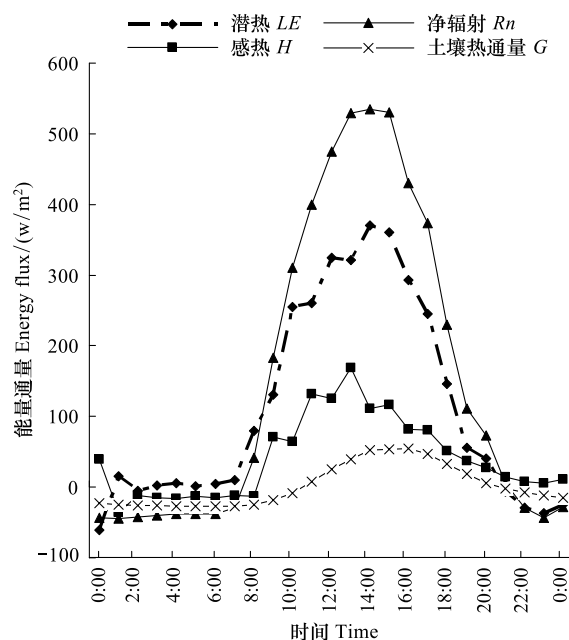


图 1 晴天地表能量日内变化特征

Fig.1 Feature of daily variation of surface energy of clear day in splendens grassland

向下输送的现象。 G 变化较为平缓,极差仅为 $82.13 W/m^2$,其峰值($56.77 W/m^2$)时间较 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。

R_n 、 LE 、 H 、 G 的日积分值分别是 $13.18 \times 10^6 J/m^2$ 、 $9.54 \times 10^6 J/m^2$ 、 $3.50 \times 10^6 J/m^2$ 、 $0.14 \times 10^6 J/m^2$,表明无论是日变化趋势还是日积分值,晴天能量主要以潜热输送占主导地位,占 R_n 的 72.4%;其次为 H ,占 26.6%;最小为 G ,仅占 1.1%。这与干旱区张掖西北部的绿洲荒漠过渡带^[8] H 所占比例最大的情况有很大不同(表 1),因为本区的植被覆盖度指数是张掖试验区 2.67 倍,晴天植物蒸腾相对强烈,潜热输送较大。同样由于敦煌荒漠戈壁^[3] 和鼎新戈壁^[22] 地区地表光秃,降水量少, H 占主导地位, LE 占 R_n 的比例仅分别为芨芨草地的 2%、11%。而陇中黄土高原观测实验区为旱作农田区^[2],故晴天 LE 占主导地位,但比例仍低于芨芨草地。这充分表明,下垫面植被覆盖状况的不同对地表能量的分配过程起着重要的调节作用。

表 1 夏季晴天不同下垫面状况下 LE/R_n 、 H/R_n 值Table 1 LE/R_n 、 H/R_n of different underlying surface of clear day in summer

下垫面类型 Types of underlying surface	潜热/净辐射 Latent heat/Net radiation (LE/R_n)	感热/净辐射 Sensible heat/Net radiation (H/R_n)
敦煌荒漠戈壁 Dunhuang Gobi	1.64	83.60
鼎新戈壁 Dingxin Gobi	8.10	86.80
陇中黄土高原 Loess Plateau of middle part Gansu	54.97	29.13
张掖绿洲荒漠过渡带 Zhangye oasis-desert ecotone	9.84	66.57
绿洲荒漠过渡带芨芨草地 Splendens grassland in oasis-desert ecotone	72.4	26.6

3.1.2 阴天日内变化特征

阴天,云层对辐射的扰动影响加大,随着云量大小的波动,使得以晴天为背景的能量标准单峰日循环曲线在白天先后被分割为多个波峰、波谷,呈现峰谷起伏式变化(图2)。 R_n 、 LE 、 H 的最大峰值都出现在 12:00 左右,分别为被削弱为晴天的 36.89%、39.74%、29.77%。 G 的最大值出现时间则滞后 1 h,为 4.79 W/m^2 ,仅是晴天的 8.74%。除 12:00—13:00 外,全天 G 均小于 0,表明在阴天土壤主要作为热源,向大气释放热量,以补偿 R_n 的不足。

LE 、 H 、 G 日积分值分别为 2.26×10^6 J/m^2 、 0.37×10^6 J/m^2 、 -0.93×10^6 J/m^2 ,占 R_n 的 133%、22%、-55%。之所以出现 LE 所占比值大于 1,而 G 的比值为负数,是因为土壤持续向大气释放能量,以补充对蒸散供给能量的不足,从而造成 LE 大于 R_n 。这也是阴天过渡带芨芨草地相比敦煌荒漠戈壁地区、鼎新戈壁、陇中黄土高原等不同下垫面所特有的现象(表2)。由于芨芨草地土壤比热容大,自身含有的热储存量较多,阴天为蒸散提供了充足的热量,从而使得 LE 大于 R_n , G 的比值也为较大的负数。上述情况也充分表明芨芨草地土壤具有一定的“能量缓存”作用即晴天储存热量,阴天释放热量。

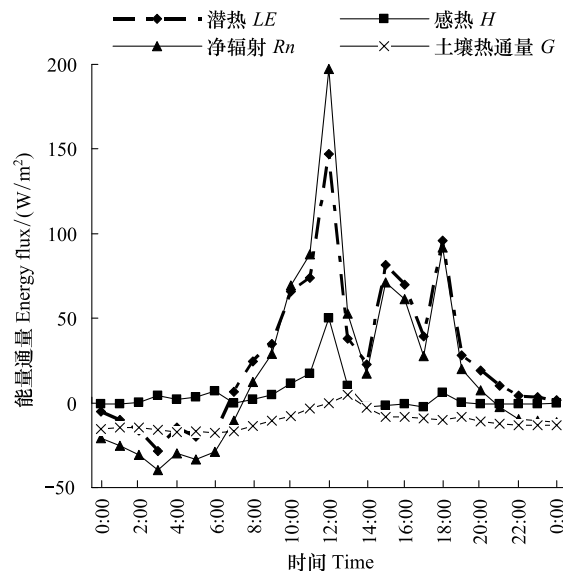


图 2 阴天地表能量日内变化特征

Fig.2 Feature of daily variation of surface energy of overcast day in splendens grassland

表 2 夏季阴天不同下垫面状况下 LE/R_n 、 H/R_n 值Table 2 LE/R_n 、 H/R_n of different underlying surface of overcast day in Summer

下垫面类型 Types of underlying surface	潜热/净辐射/% Latent heat/Net radiation (LE/R_n)	感热/净辐射/% Sensible heat/Net radiation (H/R_n)
敦煌荒漠戈壁 Dunhuang gobi	2.73%	155.60%
鼎新戈壁 Dingxin Gobi	-6.30%	102.20%
陇中黄土高原 Loess Plateau of middle part Gansu	57.65%	27.16%
绿洲荒漠过渡带芨芨草地 Splendens grassland in oasis-desert ecotone	133.04%	21.77%

3.1.3 雨天日内变化特征

雨天在 6:00 左右出现中雨,至 11:00 左右降水停止,天气开始转晴。由于受降水的影响,各能量分量推迟到 11:00 才开始迅速上升,比晴天滞后 3 h,使得各能量曲线呈偏峰型。 R_n 、 H 在 15:00 才达到峰值,分别是晴天的 1.13 倍、1.59 倍,说明在干旱区由于雨后天晴,空气清新,云量和混浊物较少,净辐射强度大,导致地气之间瞬时能量交换速率加快(图3)。同时, R_n 达到峰值 1 h 后, LE 迅速达到峰值 328.40 W/m^2 ,与晴天峰值相当,表明虽然雨天气温较低,但由于水份供给条件的改善和净辐射强度大,草地蒸散进程仍然强烈。而 G

则在降雨期间保持负值,土壤向大气传输热量,并在雨停后的12:30左右跌入谷底(-128.89 W/m^2),即此时土壤向地表及大气传送大量能量,以促使 LE 峰值的出现。

3.1.4 平均日内变化特征

观测期内平均情况下地表能量平衡的日变化表现为标准的抛物线型,在形态上与晴天基本吻合,说明在干旱区绿洲荒漠过渡带,平均地表能量平衡受云和降水的影响是有限的,晴天对其具有一定的代表性(图 4)。但由于云和降水的干扰,使得 R_n 、 LE 、 H 、 G 的峰值较晴天分别被削弱 23.97%、42.58%、8.80%、18.78%。

平均状况下过渡带芨芨草地 LE/R_n 值远大于夏季同期的干旱区河西走廊沙漠^[23]、敦煌戈壁,而低于绿洲灌溉小麦区^[23](表 3)。前两者气候极端干旱,地表植被稀疏,几近光秃,生态系统持水、滞水能力较差,水份严重稀缺,因而感热占主导地位。过渡带芨芨草地在能量分配上则更好地表现出自身的过渡性,潜热占主导地位。因为一方面过渡带芨芨草地在水热性质上介于绿洲和荒漠之间,也就表现出能量分配上的中间性,使得 LE/R_n 值大于沙漠、戈壁区;另一方面在因绿洲、沙漠热力性质差异形成的局地环流作用下,沙漠通过水平平流将大量的干热空气输送到绿洲前缘——绿洲荒漠过渡带的上空,使得过渡带的温度梯度减小,湿度梯度增大,从而促使其感热通量减少,潜热比重增加并占主导地位。而绿洲灌溉小麦区受自身植被覆盖好和人工灌溉、耕作的影响,土壤湿度和植被含水较多,蒸散旺盛,能量传输主要通过潜热的形式,且潜热所占比例高于芨芨草地。过渡带芨芨草地 LE/R_n 值略大于同处绿洲荒漠过渡带的芦苇地^[24],因为后者年均降水量仅为芨芨草地的 1/4,可供蒸散的水份相对较少,潜热交换所占比重较小。

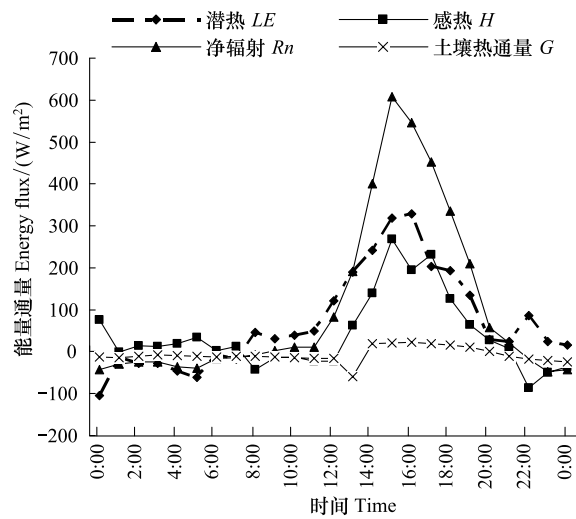


图 3 雨天地表能量日内变化特征
Fig.3 Feature of daily variation of surface energy of rainy day in splendens grassland

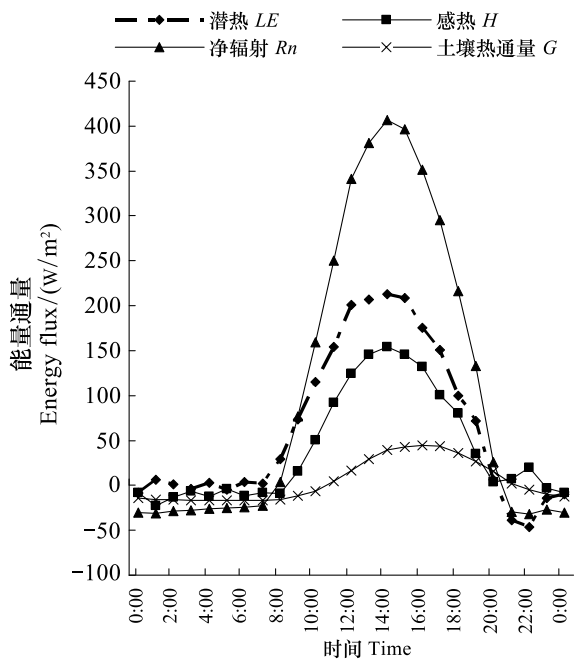


图 4 平均情况下地表能量日内变化特征
Fig.4 Feature of daily variation of average surface energy in splendens grassland

表 3 夏季不同下垫面类型平均状况下的 LE/R_n 、 H/R_n 值

Table 3 LE/R_n 、 H/R_n of different underlying surface of the average in summer

下垫面类型 Types of underlying surface	潜热/净辐射/% Latent heat/Net radiation (LE/R_n)		感热/净辐射/% Sensible heat/Net radiation (H/R_n)	
河西走廊沙漠 Hexi Corridor desert	6.70%		88%	
敦煌荒漠戈壁 Dunhuang gobi	3.80%		86%	
绿洲荒漠过渡带芦苇地 Phragmites grassland in oasis-desert ecotone	49.6%		46.2%	
绿洲荒漠过渡带芨芨草地 Splendens grassland in oasis-desert ecotone	58.9%		36.9%	
绿洲春小麦 Irrigated wheat area in oasis	60—79%		7—20%	

3.2 地表能量分配日内动态变化

不同天气条件下能量分配的日动态变化趋势基本一致,白天均以 LE 为主,表现为 $LE/Rn > H/Rn > G/Rn$ (图 5)。夜间则有所不同,前半夜(20:30—24:00)晴天和平均状况均以 LE 为主, G 次之, H 比例最小,表明前半夜它们仍存在一定的蒸散量(图 5)。而阴天和雨天同期则以感热占主导地位(图 5)。除雨天外,其它天气条件下的后半夜(24:00—次日 8:00)能量分配均以 G 占主导地位,体现出此时土壤已成为夜间草地 SPAC 系统的主要热源。

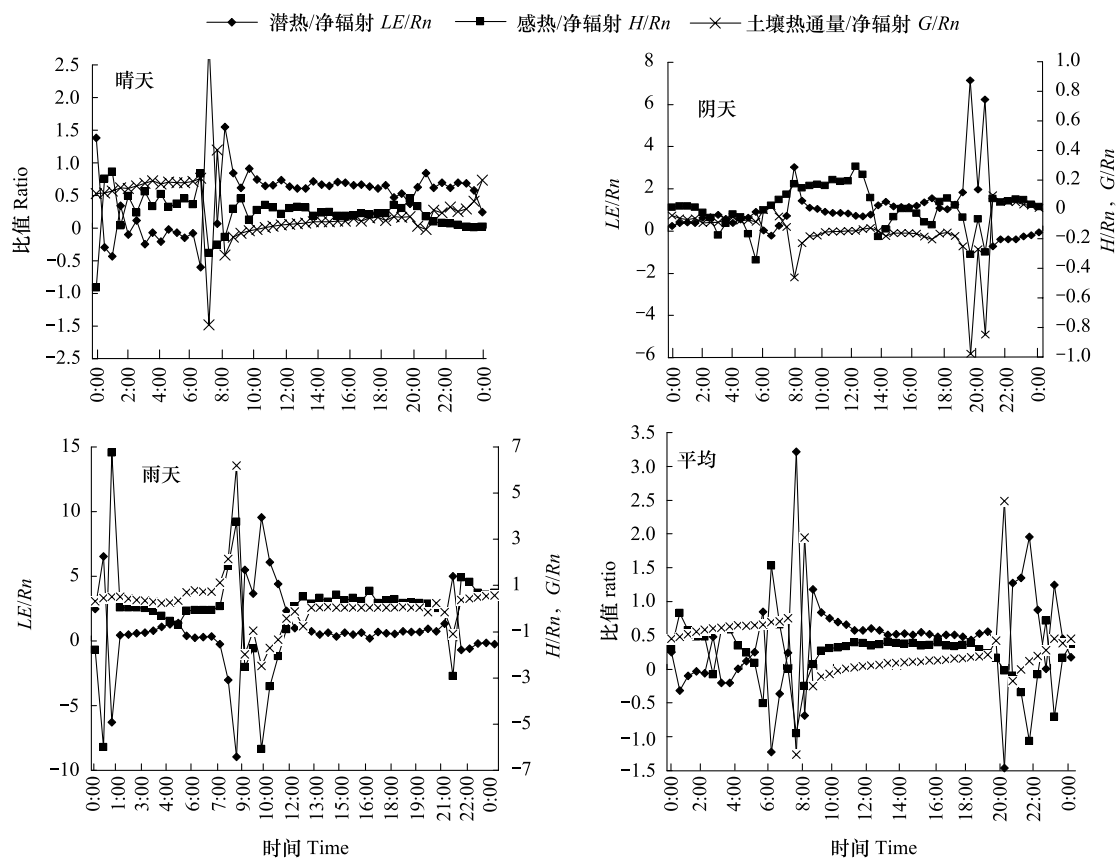


图 5 不同天气条件下地表能量分配日动态变化

Fig.5 Daily variation of energy distribution under different weather conditions

各种天气背景下白天 LE/Rn 、 H/Rn 、 G/Rn 曲线均变化平稳,波动幅度较小。而夜间除 G/Rn 在后半夜变化相对平稳外,各曲线一直在持续波动,变化幅度较大。在日出和日落前后伴随着草地系统热源在大气和土壤之间的转化,各能量传输方向和大小发生改变,使得各曲线早、晚发生跳跃式变化,出现较大的波峰或波谷(图 5),其中早晨日出时刻以 LE/Rn 和 G/Rn 曲线波动最为剧烈,且两者峰谷互补。这是因为一方面,经过夜间的凝结,日出时土壤和植被表面露水较多,可供蒸散潜热的水份较为充足;另一方面,此时 Rn 虽由负值转为正值,但能量较为微弱,远小于方向为负的土壤热通量(G)对蒸散能量的供给,而此时潜热数值几乎等于 Rn 与 G 之和,从而使得 LE/Rn 远大于 1,雨天甚至接近于 10,致使曲线产生剧烈突变。这也是此时 LE/Rn 与 G/Rn 曲线峰谷互补的原因。阴天因为太阳辐射弱,日照时数少,曲线早、晚剧烈变化开始时间较平均分别延后和提前 0.5 h。雨天各能量分量曲线均向右偏移,致使早、晚曲线突变时间较平均分别向后推延约 1.5 h。晴天则由于辐射强度大,日照时数多,造成早、晚曲线突变时间较平均分别提前 0.5 h 和延迟 4 h。

3.3 波文比(β)日内变化

波文比是反映芨芨草地吸收净辐射能量在湍流潜热和感热上的分配比例^[25]。晴天、平均、阴天(8:00—18:00)波文比依次减小,且均小于 1,表明它们在白天能量分配均以潜热为主(图 6),这与能量分配日变化曲

线反映的情况一致。平均状况下波文比变化态势和晴天较为一致,只是数值略大于晴天,说明该地区由于降水稀少,云量较小,能量分配表现出以晴天为背景的特征。阴天波文比波动幅度最小,尤其在 13:30 以后,始终在 0 值附近徘徊,主要是由于全天 R_n 和气温变化缓和,日较差较小的缘故。而雨天则表现出较大的波动性,整体呈上升趋势。在 8:00—12:00 期间,由于受上午雨水的影响, $R_n < 0$,造成波文比也为负值,12:00 由负值转为正值,并继续升高,甚至出现大于 1,最大值接近 4 的情况。

3.4 潜热 (LE) 与 R_n 、 H 、 G 之间的关系

LE 与 R_n 、 H 、 G 线性相关性均呈现为晴天与平均相当,阴天次之,雨天最小(表 4)。因为与晴天 ($T_{\text{气}} = 30.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $RH = 35.4\%$) 相比,阴天受 ($T_{\text{气}} = 21.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $RH = 75.5\%$) 云量大的影响,气温较低,致使蒸散与 R_n 、 H 、 G 的相关性较晴天减小,从而使得作为蒸散的能量实质——潜热与其它能量的相关系数小于晴天。而雨天 ($T_{\text{气}} = 17.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $RH = 71.2\%$) 则因降水的影响,气温最低,相对湿度较大,进而在很大程度上削弱了 LE 与 R_n 、 H 、 G 的相关性。因为在干旱区过渡带阴雨天气较少,主要为晴朗天气,所以平均状况下潜热 (LE) 与其它地表能量之间的关系程度略小于晴天,而大于阴天和雨天。

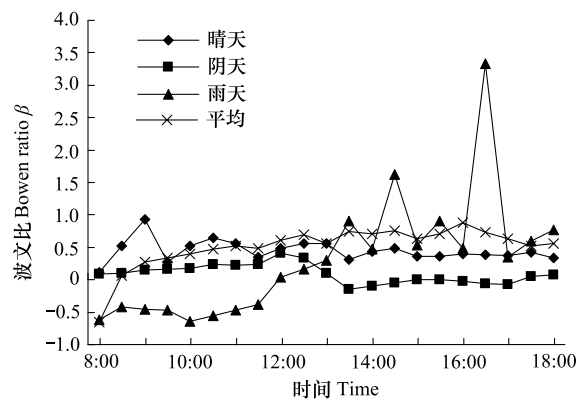


图 6 不同天气条件下 β 日内变化特征
Fig.6 Daily variation of β under different weather conditions

表 4 潜热 (LE) 与其它地表能量之间的相关系数

能量 Energy flux	晴天 Sunny day	阴天 Overcast day	雨天 Rainy day	平均 Average
潜热 Latent heat	0.9897 **	0.9827 **	0.8605 **	0.9828 **
土壤热通量 Soil heat flux	0.8334 **	0.6762 **	0.3521	0.7912 **
感热 Sensible heat	0.9085 **	0.6269 **	0.4603 **	0.9463 **

* 代表 $P < 0.05$, 较为显著; * * 代表 $P < 0.01$, 极其显著

4 结论与讨论

(1) 晴天各地表能量分量均表现出早晚低、中午高的变化规律,促使日变化曲线呈现“单峰型”。阴天受云量较大的影响,各能量分量明显削弱,且出现峰谷频繁交替,使得日变化曲线表现为“多峰型”。雨天受降水的影响,气温较低,各能量分量的峰值出现时间较晚,导致曲线整体向右发生偏移,称之为“偏峰型”。

(2) 在不同天气条件下,绿洲荒漠过渡带能量均以潜热输送占主导地位,这与以往许多干旱半干旱区试验研究发现 H 占大部分的情况有很大不同,主要是由于降水和植被覆盖度的不同而引起的。其中,阴天 LE 总量甚至大于 R_n 的 33%。平均状况下 LE 占 R_n 的 58.9%,远大于沙漠、戈壁,而低于绿洲,体现出自身在能量分配上的过渡性。

(3) 不同天气条件下绿洲-荒漠过渡带能量分配的日变化趋势基本一致,白天均以潜热为主,夜间则有所不同。 G/R_n 、 H/R_n 、 LE/R_n 曲线白天变化平稳,夜间持续波动。而由于草地系统能量来源在大气和土壤之间的转换,导致各曲线在日出和日落前后发生跳跃式剧烈变化。其中,日出时刻以 LE/R_n 和 G/R_n 曲线波动幅度最大,且两者峰谷互补。因辐射强度和日照时数的不同,曲线早、晚剧烈变化开始时间阴天较平均分别延后和提前 0.5 h,晴天较平均分别提前 0.5 h 和延迟 4 h。雨天能量曲线因降水整体右移,导致早、晚剧变时间较平均都向后推延约 1.5 h。

(4) 晴天、平均、阴天 (8:00—18:00) 波文比数值依次减小,且均小于 1,表明它们在白天能量分配均以

LE 为主,这与能量日积分值和能量分配日变化曲线反映的规律一致。晴天和平均情况波文比变化较为一致,阴天因净辐射和气温日较差较小而波动最小,雨天则表现出较大的波动性,整体呈上升态势。

(5) 除雨天外, LE 与 R_n 、 H 、 G 线性相关性均达到极其显著性水平。总体上,相关程度由大到小顺序为:晴天>平均>阴天>雨天。阴天受云量影响,气温较晴天低 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,导致潜热与其它地表能量的相关系数小于晴天。而雨天气温最低,相对湿度较大,致使潜热与其它地表能量相关性最小。

本文以实测气象资料为基础,运用订正后的波文比能量平衡法计算了绿洲-荒漠过渡带芨芨草地的各地表能量通量,探讨了不同天气条件下该区的地表能量及其分配日动态特征。积累更丰富的观测资料,定量研究包含云量、降水等环境因子与各能量变化的关系,建立它们之间的关系模型,以解释云量、降水因子对地表能量交换变化的影响机制,将是进一步研究的方向。

参考文献 (References):

- [1] 阳伏林,周广胜. 内蒙古温带荒漠草原能量平衡特征及其驱动因子. 生态学报, 2010, 30(21): 5769-5780.
- [2] 杨兴国,张强,王润元,马鹏里,杨启国,刘宏宜. 陇中黄土高原夏季地表能量平衡观测研究. 高原气象, 2004, 23(6): 828-834.
- [3] 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.
- [4] 杨娟,周广胜,王云龙,王玉辉. 内蒙古克氏针茅草原生态系统-大气通量交换特征. 应用生态学报, 2008, 19(3): 533-538.
- [5] 王澄海,黄波,潘保田. 祁连山地区能量平衡特征的模拟分析研究. 冰川冻土, 2010, 32(1): 78-82.
- [6] 张新建,袁辉,陈妮娜,邓璐丽,于小舟,盛雪娇. 长白山阔叶红松林能量平衡和蒸散. 应用生态学报, 2011, 22(3): 607-613.
- [7] 孙昭萱,张强. 黄土高原半干旱区陆面温度和能量的气候特征分析. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1302-1308.
- [8] 张凯,王润元,张强,司建华,杨启国,刘宏宜,王鹤龄. 绿洲荒漠过渡带夏季晴天地表辐射和能量平衡及小气候特征. 中国沙漠, 2007, 27(6): 1055-1061.
- [9] Wieringa J. Representative roughness parameters for homogeneous terrain. Boundary-Layer Meteorology, 1993, 63(4): 323-363.
- [10] Dolman A J. A multiple-source land surface energy balance model for use in general circulation models. Agricultural and Forest Meteorology, 1993, 65(1/2): 21-45.
- [11] 黄妙芬. 绿洲荒漠交界处波文比能量平衡法适用性的气候学分析. 干旱区地理, 2001, 24(3): 259-264.
- [12] Todd R W, Evett S R, Howell T A. The Bowen-ratio energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 103(4): 335-348.
- [13] Jensen M E, Burman R D, Allen R G. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70. New York: American Society of Civil Engineer, 1990: 80-112.
- [14] 吴锦奎,丁永建,王根绪,山崎佑介,田隆平. 干旱区人工绿洲间作农田蒸散研究. 农业工程学报, 2006, 22(9): 16-20.
- [15] 岳平,张强,杨金虎,李宏宇,孙旭映,杨启国,张建忠. 黄土高原半干旱草地地表能量通量及闭合率. 生态学报, 2011, 31(22): 6866-6876.
- [16] 肖瑶,赵林,李韧,姚济敏. 青藏高原腹地高原多年冻土区能量收支各分量的季节变化特征. 冰川冻土, 2011, 33(5): 1033-1039.
- [17] 张强,李宏宇,赵建华. 垂直平流输送和土壤热储存补偿对黄土高原地表能量平衡的修正. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2012, 55(4): 580-589.
- [18] 梁捷宁,张镭,张武,史晋森. 黄土高原半干旱区地表能量不闭合及其对二氧化碳通量的影响. 物理学报, 2013, 62(9): 99203-99203.
- [19] 刘树华,刘和平. 不同下垫面湍流输送计算方法的研究. 应用气象学报, 1996, 7(2): 229-237.
- [20] Dyer A J. A review of flux-profile relationships. Boundary-Layer Meteorology, 1974, 7(3): 363-372.
- [21] 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.
- [22] 王慧,胡泽勇,马伟强,李栋梁. 鼎新戈壁下垫面近地层小气候及地表能量平衡特征季节变化分析. 大气科学, 2008, 32(6): 1458-1470.
- [23] 郑海雷,王介民,米谷俊颜,大龙英治,黄子琛,赵松岭. 河西走廊沙漠和绿洲下垫面生态条件下能量交换若干特征. 生态学报, 2000, 20(1): 88-92.
- [24] 司建华,冯起,张艳武,常宗强,张凯. 荒漠-绿洲芦苇地蒸散量及能量平衡特征. 干旱区研究, 2010, 27(2): 160-168.
- [25] 张强,赵映东,王胜,马芳. 极端干旱荒漠区典型晴天大气热力边界层结构分析. 地球科学进展, 2007, 22(11): 1150-1159.