

盐生荒漠地表水热与二氧化碳通量的 季节变化及驱动因素

刘 冉^{1,2}, 王勤学³, 唐立松¹, 李 彦^{1,*}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 阜康荒漠生态站, 绿洲生态与荒漠环境重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

2 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3 日本国立环境研究所, 筑波 305-8506, 日本)

摘要:以古尔班通古特沙漠南缘原始盐生荒漠为对象, 利用涡度相关法, 对原始盐生荒漠地表水热、二氧化碳通量进行了连续观测, 对通量的季节变化、浅层土壤水分条件改变对盐生荒漠植物群落水汽、二氧化碳通量以及水分利用效率的影响进行了系统的分析。结果表明: 净辐射通量、潜热通量和二氧化碳通量都具有明显的季节变化趋势, 而显热通量的季节变化不明显。在有效能量的分配上, 显热通量是有效能量的主要输出项。在降水影响期和非影响期, 二氧化碳通量没有明显的变化; 而在非降水影响期潜热通量明显降低, 表明土壤水分处于亏缺状态, 但二氧化碳通量并没有降低的趋势, 而与前期保持高度的一致性。以此可以推断, 该荒漠盐生植物群落并不以降水为主要水分来源, 降水后水汽通量和二氧化碳通量变化的不一致性是原始盐生荒漠独特植物特征决定的。降水影响期原始盐生荒漠植物群落的水分利用效率低于非影响期, 是由于降水后土壤蒸发迅速增加, 而植物蒸腾与光合并未随之增加造成的。

关键词: 涡度相关; 二氧化碳通量; 潜热通量; 显热通量; 水分利用效率

文章编号: 1000-0933(2009)01-0067-09 中图分类号: Q142, Q948.1 文献标识码: A

Seasonal variation in water, heat and CO₂ fluxes and its driving forces over a saline desert

LIU Ran^{1,2}, WANG Qin-Xue³, TANG Li-Song¹, LI Yan^{1,*}

1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Fukang Station of Desert Ecology & Key Lab. of Oasis Ecology and Desert Environment, Urumqi 830011, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3 National Institute for Environmental Studies, Tsukuba 3050053, Japan

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 0067 ~ 0075.

Abstract: We studied the seasonal variation in carbon dioxide, energy and water vapor fluxes over a saline desert in western China using the eddy covariance technique. The plant community over the desert consisted of an over-storey dominated by *T. ramosissima* with sparse under-storey herb plants. Measurements presented here cover 6 month period from May to October. The following questions were addressed: (1) How did R_n , F_c , LE and H varied seasonally? (2) How did F_c and LE responded to environmental factors after raining events? (3) How did WUE varied after raining events? LE , R_n , and F_c exhibited a clear seasonal pattern. But H did not. R_n was highest ($120 - 160 \text{ W/m}^2$) in mid-summer (June-August); the daily average of R_n was $72.87 \pm 28.3 \text{ W/m}^2$. The daily average of H was $40.8 \pm 23 \text{ W/m}^2$. In contrast, values of LE were very low ($< 30 \text{ W/m}^2$), and peak values appeared after rainfall, the daily average of LE was $29.13 \pm 13.3 \text{ W/m}^2$. Obviously all available energy was dissipated as sensible, rather than latent heat.

In early May 2004, new leaf development was in progress, the respiratory processes were dominating, and the Saline

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40725002); 亚洲太平洋地区环境创新战略项目环境综合监测子课题(APETS)

收稿日期: 2008-05-26; 修订日期: 2008-10-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyan@ms.xjb.ac.cn

Desert was a weak sink of carbon flux. By late May, plant came into the rapid growth; strong net sink activity started and lasted until the end of September. At the end of October the Saline Desert was net source of carbon. For the entire growing period, the Saline Desert was a weak sink, with a net sink estimated at only about -136mg/m^2 .

During wet and dry periods after rain events, F_c displayed no obvious difference, the relationship between F_c and photosynthetically active radiation was described well by a hyperbolic fit, with the r^2 values greater than 0.70, there appeared to be only PAR effect on F_c . However, in contrast to latent heat flux, variation in LE was rather different during the two periods. In wet period, the size of the rainfall pulse was positively related to the magnitude of the flux, the peak daytime LE was 238W/m^2 whereas the maximum LE was approximately 100W/m^2 in dry period, there appeared to be precipitation effect on LE . Low ecosystem WUE values measured during the wet period may be explained by soil evaporation, which resulted in the enhancement of LE .

Key Words: eddy covariance; carbon flux; latent flux; sensible flux; WUE

随着全球气候变化的加剧,陆地生态系统的碳通量和水热通量的研究越来越受关注^[1~5]。涡度相关技术(eddy covariance technique)是目前测定地-气交换最好的方法之一,已经广泛地应用于估算陆地生态系统中的物质与能量交换^[6,7]。然而已有的研究主要集中在森林、农田、草地等生态系统的通量交换研究^[8],利用该技术对于干旱半干旱地区的物质与能量通量的连续观测并不太多^[9~11],在干旱地区,相关研究仅仅局限在夏季湍流通量的观测,缺乏对地气间物质和能量通量的连续观测与研究^[12]。

干旱区气候干燥、植被稀疏、光热资源丰富、生态系统脆弱,降水分配不均、水是区域内自然生态系统的主要限制因子。近20年来,位于天山北坡洪积冲积扇与古尔班通古特沙漠南缘的大面积干旱区域,表现出降水增多的明显趋势^[13]。同时,干旱区植物为了适应干旱气候,形成了不同的生理生态特征,以往在该地区的研究仅仅局限在单一的土壤呼吸和植物光合作用的测定,植物个体水分关系和抗旱生理特性等方面的研究,其中又以多枝柽柳、梭梭等建群种的抗旱生理指标的观测实验研究较为常见^[14,15]。在此背景下,以在原始盐生荒漠地表利用涡度相关法观测的全生长季(2004年5~10月)通量数据为基础,分析水热、二氧化碳通量的季节变化;在植物生长旺盛期(7~8月份),跟踪自然降水过程,利用微型蒸散仪观测降水后土壤蒸发的变化,分析浅层土壤水分条件的改变对原始盐生荒漠水汽、二氧化碳通量以及水分利用效率的影响。以期揭示气象条件对于干旱生态系统的水汽、二氧化碳通量的影响,探索干旱荒漠区生态系统对气候变化的独特响应,为预测全球气候变化背景下原始盐生荒漠碳源、碳汇功能的变化以及水汽、二氧化碳通量模型的参数确定奠定相关科学基础。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于天山博格达峰北麓,古尔班通古特沙漠南缘的绿洲-荒漠交错带,该地属三工河冲积平原中下部,东经 $87^{\circ}6'$,北纬 $44^{\circ}7'$,海拔475m,属于典型温带荒漠气候,夏季炎热干燥,冬季寒冷,年平均气温 $5\sim 7^{\circ}\text{C}$,年日照总量2532.5h,年降水量为 $100\sim 200\text{mm}$,主要集中在5~9月份,占全年降水量的70%~80%,年潜在蒸发量约为 $1000\sim 2000\text{mm}$,干燥度为4~8,无霜期为174d,全年地下水位在2.9~5.3m之间波动。研究区土壤为盐碱土,由于潜水位较高,潜水可直接到达地表而蒸发,地表有严重的积盐现象,地表多生长着以柽柳科植物为建群种的盐生植物群落,植被高度在1.2~2.1m,植被盖度约为20%。

1.2 研究方法

与日本国立环境研究所合作建设的通量观测仪器安装在 $800\times 800\text{m}$ 的原始盐生荒漠群落的中央,仪器到主来风向一边的距离不少于400m,仪器包括用于测定风速和温度脉动的三维超声风速仪和热电偶温度脉动仪(Ultrasonic Anemometer, Model: STA-5055, KAIJO Corporation, Tokyo, Japan),用于测定 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 密度脉动的红外线 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 气体分析仪(LI-7500, LI-COR, USA)。通量仪器安装在距地表3m处,脉动信号采样频率

为 10HZ,数据通过 CR23X(Campbell Scientific, USA)数据采集器收集。观测仪器周围还配有小气候观测系统,同步进行气象要素观测,通过 CR23X(Campbell Scientific, USA)数据采集器每 30min 自动记录气温、降雨量、光合有效辐射、净辐射、分层土壤温度和土壤湿度等。

在原始盐生荒漠选取无植被覆盖的盐土,将由 PVC 管制作的高 15.2 cm、内径 15.6 cm 的微型蒸散仪垂直压入土壤内,然后取出盛有未扰动原状土柱的微型蒸散仪,底部土壤削平,用聚乙烯胶带封底,用精度为 1 g 的电子天平称重,每天 9:00 左右对微型蒸散仪进行称重,前日与当日同时刻 2 次重量的差值为其土壤蒸发量,每次称重后,将 PVC 管埋入土中,使其表面与附近土壤持平,每次观测取 10 个重复。

1.3 数据处理

(1) WPL 修订

用红外气体分析仪观测的 CO_2 气体浓度是质量密度,并非它的摩尔质量比,如果大气的温度、压力、湿度发生变化均会引起大气中 CO_2 气体质量密度的变化。因此为了消除水热传输对 CO_2 通量的影响,需要对通量数据进行 WPL 校正^[16]:

$$E = (1 + \mu\sigma) [\overline{w'\rho v'} + (\overline{\rho v'/T}) \overline{w'T'}]$$

$$Fc = \overline{w'\rho c'} + \mu(\overline{\rho c'/\rho}) \overline{w'\rho v'} + (1 + \mu\sigma) (\overline{\rho c'/T}) \overline{w'T'}$$

式中, μ 为干空气与水汽分子量的比值; σ 为水汽与干空气密度的比值; w 为垂直风速; Fc 为二氧化碳通量。

(2) 缺失数据插补

白天生态系统净二氧化碳通量对光合有效辐射的响应关系用 Michaelis-Menten 模型拟合^[17]:

$$Fc = \frac{\alpha \times \beta \times PPFD}{\alpha \times PPFD + \beta} - \gamma$$

式中, α 为生态系统的初始量子效率(曲线的初始斜率), β 为光饱和时的净生态系统交换(即: $PPFD \rightarrow \infty$ 时,净生态系统交换的渐进值), γ 为表观暗呼吸速率(即: $PPFD \rightarrow 0$ 时净生态系统交换值)。

夜间由于大气层结通常比较稳定,湍流交换比较微弱,为了得到较为可靠的夜间通量数据,本研究以摩擦风速为 0.1m/s 作为剔除不合理数据的阈值,夜间生态系统净二氧化碳通量对 5cm 土壤温度的响应关系用下式进行拟合:^[18]

$$Fc = b_1 \times \exp(b_2 \times Ts)$$

式中, b_1, b_2 为参数, T_s 为 5cm 土壤温度。

(3) 能量闭合分析

焐度相关法观测数据的质量常用线性回归方程进行检验,回归方程为 $(H + LE) = s \times (Rn + G) + b$,其中 Rn 为净辐射能, G 为土壤热通量和群落的热储量(由于植被低矮稀疏群落热储量可以忽略不计), H 为感热通量, LE 为潜热通量 (W/m^2), s 为直线回归斜率, b 为截距,能量闭合的理想状况为 $s = 1, b = 0$ 。对 2004 年原始盐生荒漠全生长季的数据做能量闭合分析(图 1),回归斜率 $s = 0.66, R^2 = 0.87$ 能量有明显的闭合现象,造成能量不闭合的原因可能有以下几点:(1)空间取样误差;(2)忽略了埋放土壤热通量板以上的土壤热储能;(3)仪器测量可能产生的系统偏差等。

(4) WUE 的计算方法

本研究中,生态系统水分利用效率(WUE)的定义为生态系统的 CO_2 通量(Fc , 负值表示碳吸收,正值表示碳排放)与同一时期水汽通量(ET , 包括植物的蒸腾与土壤的蒸发)的比^[19~21],即: $WUE = -Fc/ET$, 由于早上(08:00 左右)和晚上(19:30 左右)水汽通量和二氧

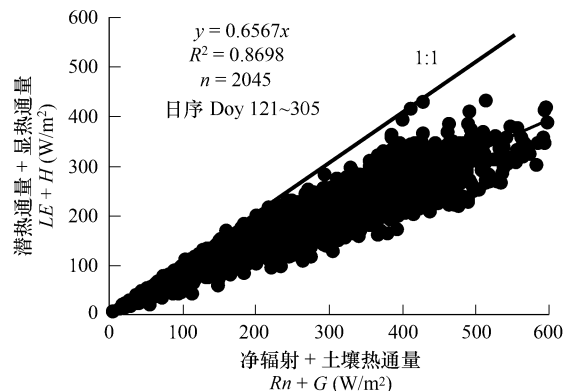


图 1 2004 年原始盐生荒漠全生长季能量闭合分析

Fig. 1 Energy balance for 2004 growing season

化碳通量均在 0 值附近,此时的 F_c 与 ET 的比值很大或者很小,但这并不能说明生态系统 WUE 很大或者很小^[19]。所以采用日间 08:30 ~ 20:00 的数据来计算并分析 WUE 的变化。

所有数据处理过程和作图分别利用 SPSS11.5 和 Origin7.5 完成。

2 结果与分析

2.1 盐生荒漠气象要素的季节变化特征

图 2 给出原始盐生荒漠地表植被生长季的光量子通量密度、空气温度、5cm 土壤温度和降水量的季节动态特征。从图中可以看出,光量子通量密度,空气温度和 5cm 土壤温度变化模式基本一致,都具有明显的季节动态变化。2004 年生长季光量子通量密度,空气温度和 5cm 土壤温度均值分别为 $460.21 \mu\text{mol photon} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 18.56°C , 19.18°C , 降水量在生长季的分布时间和强度明显不均,其中最大降水量出现在 7 月份,全年降水量为 173.3mm,略高于多年降水平均值(150mm)。

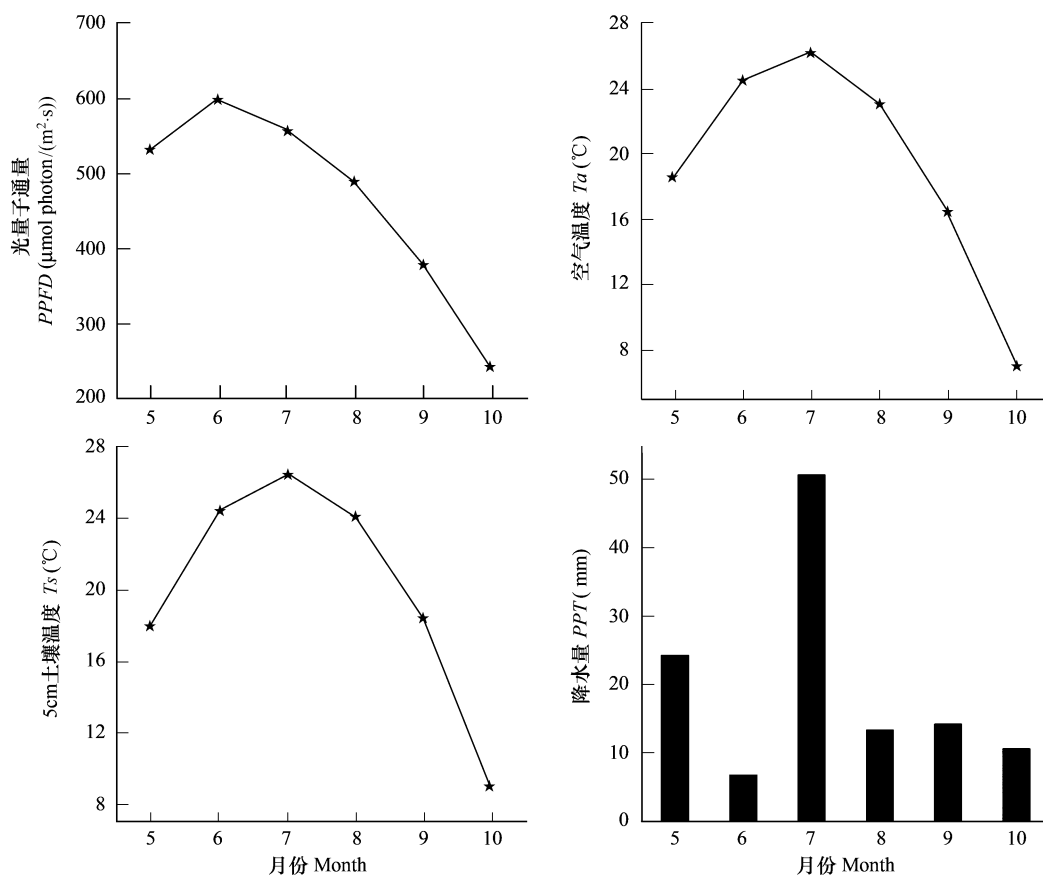


图 2 2004 年生长季月均光量子通量(PPFD)、空气温度、5cm 土温和月累积降雨量的变化特征

Fig. 2 Monthly variation of PPFD, T_a , $T_s(5\text{cm})$ and PPT during the growing season

2.2 原始盐生荒漠水热、二氧化碳通量的变化特征

净辐射(R_n)作为土壤-植被-大气系统物质传输的外部驱动能量,主要以显热通量(H)和潜热通量(LE)的形式加热大气边界层底部,也有部分能量以土壤热通量的形式进入土壤,起到土壤增温作用。图 3 为日均净辐射能、感热通量、潜热通量和二氧化碳通量在生长季的变化过程。从图中可以看出,除了显热通量在生长季的变化较为平稳,没有明显的季节变化,其他通量的季节变化趋势明显。随着太阳高度角的变化,净辐射能逐渐增大,在 7、8 月份达到最大值,随后净辐射能逐渐减小,各个月的变化依次为:7 月 > 8 月 > 6 月 > 5 月 > 9 月 > 10 月份,全生长季的平均净辐射通量密度 $72.87 (\text{W}/\text{m}^2)$ 。潜热通量在生长季的变化近似呈单峰型,在生长季初期逐渐增加,7 月份达到最大,之后则逐渐减少,日均最大值为 $89.88 (\text{W}/\text{m}^2)$,出现在 DOY204

(32.6mm 降水后),日均潜热通量为 $29.06(\text{W}/\text{m}^2)$,显热通量为 $40.8(\text{W}/\text{m}^2)$,显然在有效能的分配上,显热通量是主要的能量输出项。

二氧化碳通量在 5 月下旬吸收量明显增大,植物进入快速生长阶段,表现为较强的二氧化碳吸收,在 8 月份二氧化碳吸收量达到最大随后逐渐减小,9 月下旬植物处于衰亡阶段,光合能力明显下降,荒漠植物固定的二氧化碳量和生态系统呼吸释放的二氧化碳量(植物呼吸和土壤呼吸)相当,均表现为较弱的二氧化碳吸收或是释放。在生长季的大部分时间里,荒漠地表均表现为二氧化碳的吸收,其吸收高峰在 6 月份(DOY153-182)和 8 月份(DOY214-244),全生长季二氧化碳吸收量为 $-223(\text{g}/\text{m}^2)$ 。

2.3 浅层土壤水分条件的变化对潜热通量、二氧化碳通量和水分利用效率的影响

为分析浅层土壤水分条件的变化对原始盐生荒漠潜热通量、二氧化碳通量的影响,在植物生长旺盛阶段(7~8 月份)选取了 3 次自然降水过程,分别是 DOY188(6.4mm)、DOY202(32.6mm)和 DOY217(7mm)。在降水后第 2 天,利用自制的 Micro-Lysimeter 观测土壤蒸发数据,区别降水事件对土壤蒸发的影响期和非影响期。由图 4 可以看出,在降水后的 3~4d,土壤蒸发的变化相对平稳($<0.5\text{mm}/\text{d}$),此时亦可以作为降水影响期和非影响期的分界线。图 5 为降水影响期和非影响期日均二氧化碳通量与潜热通量、PAR 的关系,由图中可以看出,无论是降水影响期还是非影响期二氧化碳通量与光合有效辐射均保持高度的一致性,在地方时 14:00 左右达到吸收的最大值,随后随着光合有效辐射的减小,二氧化碳通量逐渐减小,在地方时 19:00 左右,二氧化碳通量从吸收转变成了释放。二氧化碳通量与潜热通量在降水影响期和非影响期的变化比较明显,在降水影响期,二氧化碳通量与潜热通量的变化趋势一致,此时进行光合作用的荒漠盐生植物并非表现出水分胁迫,在降水非影响期,潜热通量有明显下降,表明土壤水分出现亏缺,而此时的二氧化碳通量并没有随着潜热通量的变化而变化,与前期保持高度一致性。

图 6 为全生长季脉冲降水后影响期和非影响期原始盐生荒漠水热通量的变化以及二氧化碳通量与 PAR 的关系,从图中可以看出,在降水影响期潜热通量和显热通量相当,甚至超过了显热通量而成为有效能量的主要输出项,在降水非影响期,显热通量是潜热通量的数倍,成为能量的主要输出项。二氧化碳通量与 PAR 的关系在降水影响期和非影响期均符合很好的直角双曲线关系,从拟合参数(表 1)可以看出,在降水非影响期最大二氧化碳交换量大于降水影响期。从潜热通量和二氧化碳通量的变化可以看出,降水是潜热通量的主要驱动因子,而光合有效辐射是二氧化碳通量的主要驱动因子(拟合系数均大于 0.7),植物的光合能力不受降

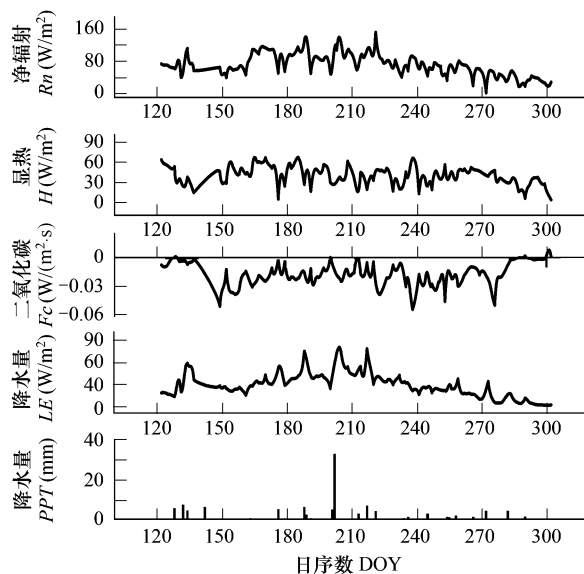


图 3 2004 年生长季日均净辐射(R_n)、显热通量(H)、潜热通量(LE)和二氧化碳通量(F_c)的季节变化特征

Fig.3 The variation of daily mean R_n , H , LE and F_c during the growing period of 2004

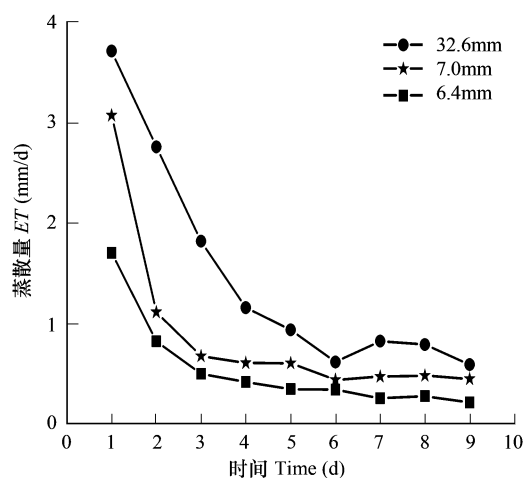


图 4 3 次降水发生后日蒸发量变化特征

Fig.4 The variation of daily evapotranspiration after three rain events

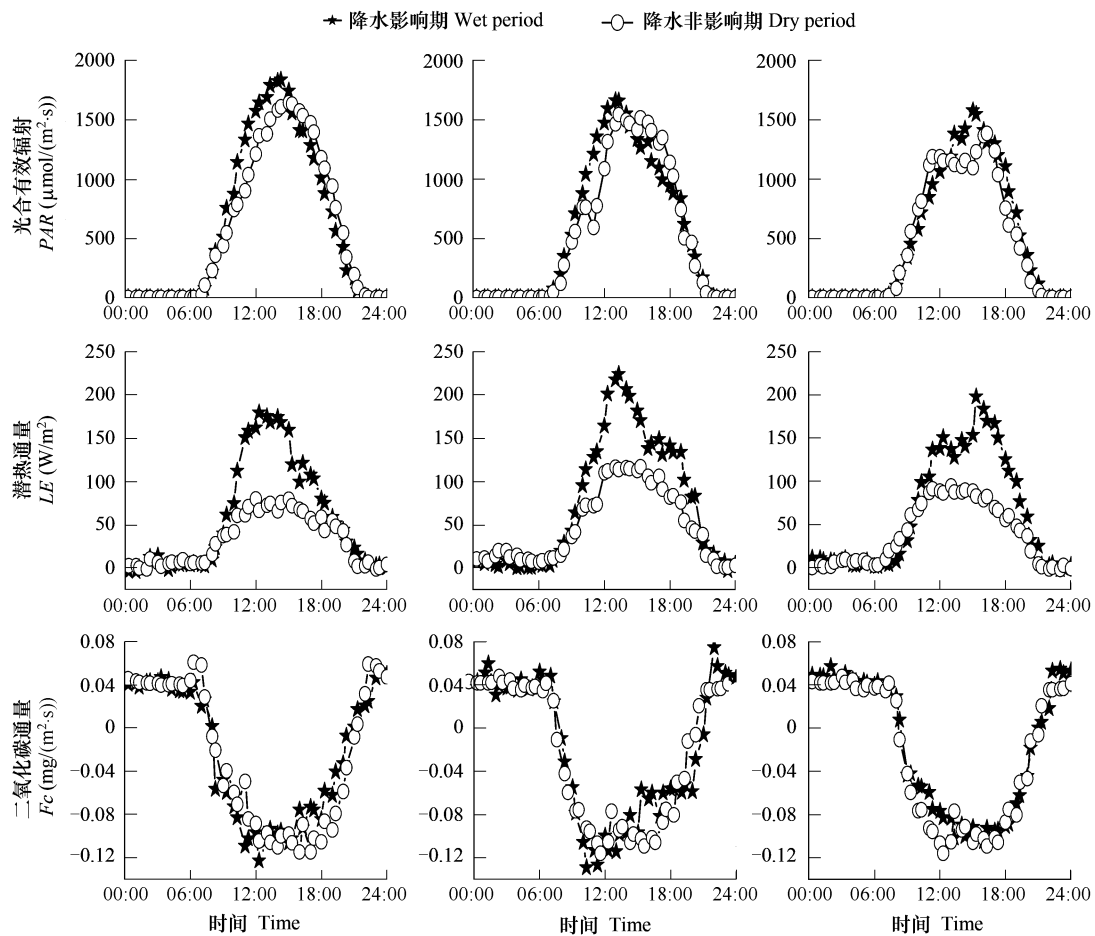


图5 3次降水影响期和非影响期日均二氧化碳通量与潜热通量和 PAR 的关系

Fig.5 The relationship of F_c , LE and PAR of the two periods after rain events

水的影响也说明了该荒漠盐生植物的生存和生理活动的维持并非以降水为主要水源,潜热通量的增加主要是来自降水后土壤蒸发的增加。

对3次自然降水后原始盐生荒漠水分利用效率(WUE)进行比较,如图7所示在降水影响期的水分利用效率明显低于非影响期,由于水分利用效率是生态系统二氧化碳通量与水汽通量的比值,即: $WUE = -F_c/ET$,由图5可知,降水影响期和非影响期水汽通量的变化是造成 WUE 变化的原因。

表1 利用 Michaelis-Menten 方程对 F_c 与 PAR 的关系拟合得到的参数比较

Table 1 Values of paraments of the retangular hyperbolic responses of F_c to incident PAR

项目 Item	α (mgCO ₂ /umolPhotons)	β (mgCO ₂ /(m ² ·s))	γ (mgCO ₂ /(m ² ·s))	n	R^2
降雨影响期 Wet period	0.00034 ± 0.00005	0.154 ± 0.006	0.034 ± 0.004	350	0.70
降雨非影响 Dry period	0.00039 ± 0.00005	0.222 ± 0.009	0.031 ± 0.005	360	0.78

3 讨论与结论

古尔班通古特沙漠南缘的桉柳科盐生荒漠群落,长期面临严重的水分匮乏(年均降雨量仅为150mm),按照通常情况,在降水过后,土壤水分条件改变,可以促进植物的光合作用,增加二氧化碳的吸收量,然而本研究结果表明,在降水后的影响期和非影响期,二氧化碳通量并没有明显的变化,在降水非影响期潜热通量有明显的降低,此时亦表明土壤水分处于匮乏状态,二氧化碳通量并没有减小的趋势,而与前期保持高度的一致性,该结果与 LAW 等人^[22]在对 FLUXNET 通量数据分析后得出的水汽通量与二氧化碳通量总是保持密切相关这

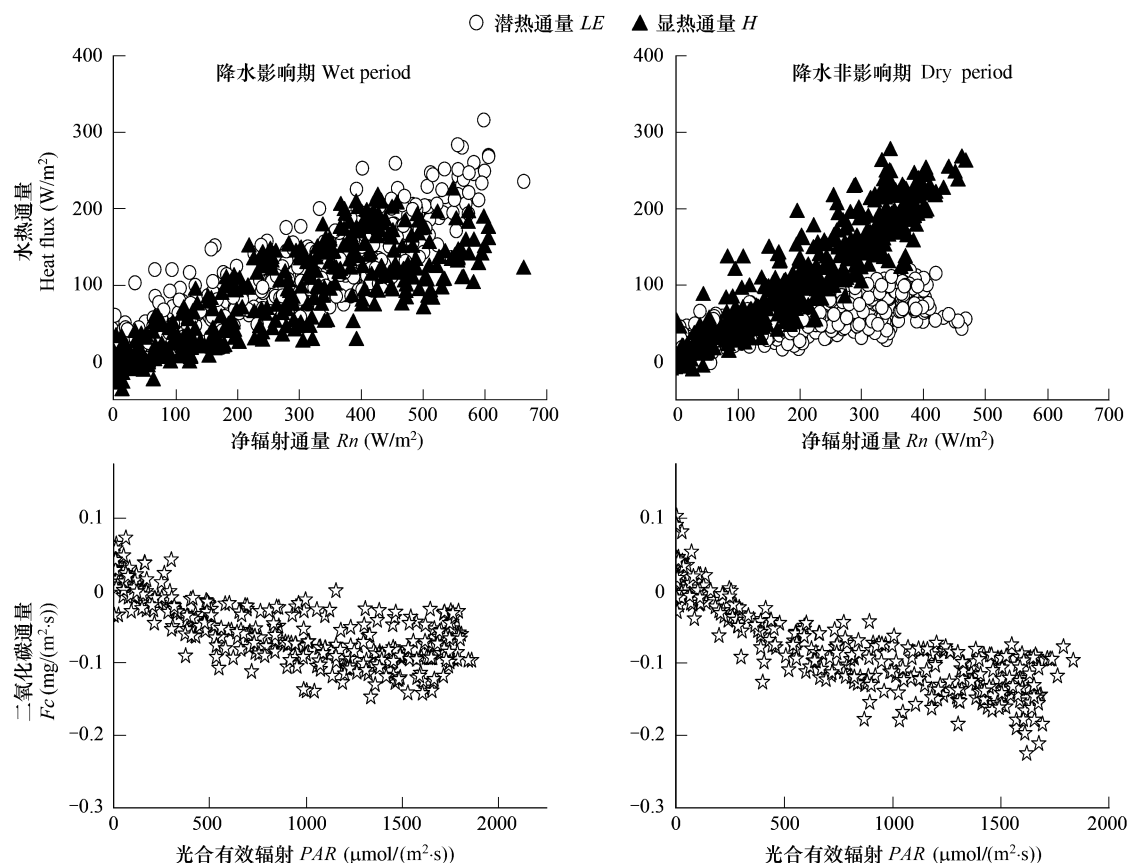


图6 降水影响期和非影响期水热通量的变化以及二氧化碳通量与 PAR 的关系

Fig. 6 The variation of heat fluxes and the relationship between F_c and PAR after rain events

一结论相违背。结合本研究区植物的特点,我们认为,造成二氧化碳通量与潜热通量变化不一致的原因是该荒漠群落的建群种多枝桉柳属于深根型植物,生存主要依赖于稳定的地下水。Sala 等^[23,24]的研究表明,这类植物的有效吸收根基本不受浅层土壤水分匮乏的影响,对稳定地下水的依赖使得其光合作用长期维持在正常水平^[22]。许皓等对该研究区建群种桉柳科植物个体生理方面的研究也表明该植物的生理活动不受浅层土壤水分的变化影响,而是靠稳定的地下水使其生理活动维持在一定水平^[25]。由于该荒漠群落植被覆盖度低,降水后潜热通量明显增加可能是由于较大的浅层土壤水分蒸发导致的,而二氧化碳通量的水分制约主要来自植物有效吸收根所感受到的水分状况——地下水位上部的湿润区水分。可见,潜热通量和二氧化碳通量是由不同土层深度的水分条件所制约,这直接导致了二者变化的不一致性。

水分利用效率一直是荒漠地区研究的重点,由于对水分利用效率的定义和理解不同,或者是采用仪器及试验方法的不同,其结果表达也各不相同^[21]。本研究, WUE 的定义为生态系统净二氧化碳通量与同一时期水汽通量(ET , 包括植物的蒸腾与土壤的蒸发)的比^[19~21], 即: $WUE = -F_c/ET$ 。对降水影响期和非影响期的水分利用效率进行比较发现,在降水影响期原始盐生荒漠水分利用效率明显低于降水非影响期,这是因为

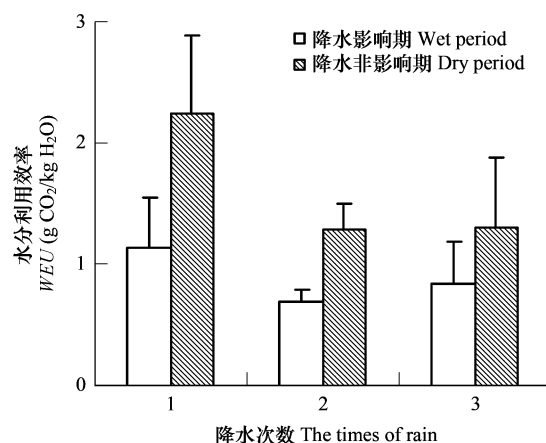


图7 降水影响期和非影响期日均水分利用效率的比较

Fig. 7 The comparison of daily mean WUE during the two periods after rain events

降水后土壤水分充足,水汽通量增加的缘故,然而该水分并没有被植物所利用,即在水分还没有到达植物有效吸收根所在的深度时就以土壤蒸发的形式重新回到大气中,直接造成了生态系统的水分利用效率低下。但是这并不能说明荒漠盐生植物本身(个体尺度或生理水平)的水分利用效率低,只是其水分利用与效率不受直接降水的影响。

本文的研究仅仅局限在原始盐生荒漠的一个生长季水汽、二氧化碳通量的变化以及对降水的响应,这并不能说明在全球气候变化背景下,年内及年际间降水在时间及强度上的分配对原始盐生荒漠水热,二氧化碳通量的影响,虽然该荒漠的优势种并非以降水为生理活动的主要水分来源,但是降水时间和格局的变化可能会影响植物群落的组成与结构,从而影响生态系统水汽和二氧化碳通量的变化,因此对年际间降雨时间及强度的分配对荒漠群落水热,二氧化碳通量的影响是下一步研究的重点。

从上述结果可以看出:(1)原始盐生荒漠二氧化碳通量、潜热通量、净辐射能具有明显的季节变化特征,在有效能量的分配上,感热通量是其主要能量输出项;(2)植物的光合能力并非受到降水的影响说明了该荒漠盐生植物的生存和生理活动的维持并非依赖于降水,潜热通量的增加主要是来自降水过后土壤水分蒸发的增加;(3)降水影响期原始盐生荒漠水分利用效率低于降水非影响期,是由于降水后土壤蒸发增加导致的水汽通量增加。

References:

- [1] Adams J M, Faure I, Faure L, *et al.* Increase in terrestrial carbon storage from the Last Glacial Maximum to the present. *Nature*, 1999, 348: 711—714.
- [2] Baldocchi D D, Fagle E, Gu L H, *et al.* Fluxnet: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 201, 82: 2415—2434.
- [3] IPCC. Land Use, Land-Use Change, and Forestry Climate Change 2001: impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [4] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, *et al.* Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, 414: 169—172.
- [5] Wever L A, Flanagan L B, Carlson P J. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and surface conductance in northern grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 112: 31—49.
- [6] Houghton R A, Davidson A E, Woodwell G M. Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystem in the global carbon balance. *Global Biogeochem Cys*, 1998, 12: 25—34.
- [7] Berbigier P, Jean-Marc B, Patricia M. CO₂ and water vapor fluxes for 2 years above Euroflux forest site. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 183—197.
- [8] Huang Y. Study on carbon budget in terrestrial and marginal sea ecosystems of China. Chinese Academy of Sciences Institute Published, 2002, 17 (2): 104—107.
- [9] Veenendaal E M, Kolle O, Lloyd J. Seasonal variation in energy fluxes and carbon dioxide exchange for a broad-leaved semi-arid savanna (Mopane Woodland) in Southern Africa. *Global Change Biology*, 2004, 10: 318—328.
- [10] Scott R L, Edwards E A, Shuttleworth W J, *et al.* Interannual and seasonal variation in fluxes of and carbon dioxide from a riparian woodland ecosystem. *Agric For Meteor*, 2004, 122 (1): 65—84.
- [11] Baldochi D, Xu L, Kiang N. How plant functional-type, weather, seasonal drought, and soil physical properties alter water and energy fluxes of an oak-grass savanna and an annual grassland. *Agric For Meteor*, 2004, 123 (1): 13—39.
- [12] Liu H Z, Tu G, Dong W J, *et al.* Seasonal and diurnal variations of the exchange of water vapor and CO₂ between the land surface and atmosphere in the Semi-Arid Area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30: 108—118.
- [13] XU G Q, Wei W S. Climate change of Xinjiang and its impact on eco-environment. *Arid Land Geograph*, 2004, 27 (1): 14—18.
- [14] Zhang Y M, Pan B R and Yin L K. Seed morphology of Tamaricaceae in China arid areas and its systematic evolution. *Journal of Plant Resources and Environmen*, 1998, 7(2): 22—27.
- [15] Li X Y, Zhang X M, He X Y, Zeng F J, Thomas F M, Foetzi A. Drought stress and irrigation effects on water relations of *Tamarix ramosissima* in the Qira Oasis. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2004, 28(5): 644—650.
- [16] Webb E K, Pearman G, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Q J Roy Meteorol Soc*,

1980, 106: 85—100.

- [17] Falge E, Baldocchi D, Olson R, *et al.* Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107: 43—69.
- [18] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8:315—323.
- [19] Zhu Z L, Sun X M, *et al.* Rapid measurements of CO₂ flux density and water use efficiency of cropcommunity. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (9): 1684—1686.
- [20] Wang S S, Zhu Z L, Sun X M. Characteristics of energy exchange in Lhasa, Tibet. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(4): 359—364.
- [21] Baldocchi D. Measuring and modeling carbon dioxide and water vapor exchange over a temperate broad- leaved forest during the 1995 summer drought. *Plant Cell and Environment*, 1997, 20(9): 1108—1122.
- [22] Law B E, Falge E, Gu L, *et al.* Environmental controls over carbon Dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 92—120.
- [23] Sala A, Smith S D. Water use by *Tamarix ramosissima* and associated phreatophytes in a Mojave desert floodplain. *Ecological Applications*, 1996, 6 (3): 888—898.
- [24] Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U. Plant roots: the hidden half. New York: Marcel I ekker, Inc, 1996. 823—844.
- [25] Xu H, Li Y. Water Use Strategies and Corresponding Leaf Physiological Performance of Three Desert Shrubs. *Acta Bot Borea1-Occident Sin*, 2005,25(7): 1309—1316.

参考文献:

- [8] 黄耀. 中国陆地和近海生态系统碳收支研究. *中国科学院院刊*,2002,17(2):104~107.
- [12] 刘辉志,涂钢,董文杰,等. 半干旱地区地气界面水汽和二氧化碳通量的日变化及季节变化. *大气科学*,2006,30:108~118.
- [13] 徐贵青,魏文寿. 新疆气候变化及其对生态环境的影响. *干旱区地理*,2004,27(1):14~18.
- [14] 张元明,潘伯荣,尹林克. 中国干旱区柽柳科植物种子形态特征及其系统学意义. *植物资源与环境学报*, 1998,7(2): 22~27.
- [15] 李向义,张希明,何兴元,曾凡江, Thomas F M, Foetzki A. 绿洲前沿地区多枝柽柳水分关系的特征及灌溉的影响. *植物生态学报*,2004, 28(5):644~650.
- [19] 朱治林,孙晓敏,等作物群体 CO₂ 通量和水分利用效率的快速测定. *应用生态学报*,2004,15(9):1684~1686.
- [20] 王树森,朱治林,孙晓敏. 拉萨地区农田能量物质交换特征. *中国科学 D 辑*,1996,26(4):359~364.
- [25] 许皓,李彦. 3 种荒漠灌木的用水策略及相关的叶片生理表现. *西北植物学报*,2005,25 (7):1309~1316.