霍文,智协飞,杨帆,等.塔克拉玛干沙漠人工绿地与自然沙地能量收支差异研究[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(3):1-9. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.03.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



塔克拉玛干沙漠人工绿地与自然沙地 能量收支差异研究

霍 文^{1,2},智协飞^{2,3*},杨 帆¹,周成龙¹,王 豫¹,宋美琪¹,潘红林¹, 买买提艾力·买买提依明¹,何 清¹

(1.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/新疆塔克拉玛干沙漠气象国家野外科学观测研究站/中国气象局塔克拉玛干 沙漠气象野外科学试验基地/新疆沙漠气象与沙尘暴重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830002;

2.南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室,江苏 南京 210044;

3.南京大气科学联合研究中心,江苏 南京210044)

摘 要:利用 2013 年塔克拉玛干沙漠自然沙地和人工绿地的辐射能量观测数据,解析不同 下垫面能量收支的差异。结果表明:(1)辐射各分量参数日变化特征显著,地面长波辐射(U_{LR})日尺 度最大差值为 50 W·m⁻²。(2)土壤湿度是引发地表反照率产生差异的主控因子之一,滴灌是沙漠 中人工绿地水分供给的主要方式,促进了沙漠土壤含水率的提升,从而影响了地表反照率的变 化。(3)净辐射(R_n)在白天与夜间耗能形式不同,白天以感热通量(H)为主,夜晚以地表土壤热通 量(G₀)为主。在植被生长周期,潜热通量(L_E)耗能份额会有所递增,耗能比增加了 1.5%。(4)地表 能量平衡比率(E_{BR})在绿地的波动幅度大于沙地,沙地的 E_{BR}上升速率要大于绿地。绿地夏季闭合 率最高,沙地春、夏季闭合率最高。

关键词:辐射;人工绿地;自然沙地;能量闭合;塔克拉玛干沙漠

中图分类号:P425.55 文献标识码:A 文章编号:1002-0799(2022)03-0001-09

沙漠是地球陆地表面一种极具代表性的下垫面 形式,因其反照率高、沙粒热容效率高等独特的土壤 物理属性,形成了与其他下垫面形式不同的典型能 量收支特征。为此,很多学者致力于沙漠区域能量收 支的研究^[1-6]。能量收支的研究受到多国学者的重 视,特别是其对全球气候变化与生态系统的影响研 究显得十分重要。Brown^[7]利用全球能量收支的估算 进而评估未来全球变暖的趋势。孙昭萱^[8]与岳平^[9]研

收稿日期:2021-10-18;修回日期:2021-12-29

究和探讨了我国黄土高原因能量收支延伸的气候特征与土壤参数化问题。我国著名的黑河试验(HEIFE)与内蒙古半干旱试验也不乏能量收支的研究^[10-12]。Holtslag^[13]利用大气—土壤—植被耦合模型研究了粗糙度对通量和边界层发展的影响。Jochum^[14]利用(EFEDA)数据,通过数值预报模型的网格化计算了整个研究区域的平均通量,并指出潜热通量边界影响效应。

试验数据是科学研究的基础,从20世纪80年 代起,以WCRP(水文大气先行性实验)为先导,同 时在IGBP(国际地圈生物圈计划)的协同组织 下,世界各国开展了各种针对性的大型陆面过程实 验,其中北美17项、欧洲14项、亚洲9项、非洲5 项、澳大利亚4项、南美2项^[15]。北半球气候过程地面 实验(NOPEX)^[16]、欧洲沙漠化地区陆面研究计划

基金项目:国家自然科学基金项目(41975010、41905009、41875023); 中央级公益性科研院所基本科研业务费(IDM2021001、IDM2018004) 作者简介:霍文(1981一),男,副研究员,主要从事沙漠边界层气象探 测研究。E-mail:huowenpet@idm.cn

通信作者:智协飞(1965—),男,教授,主要从事数值天气预报、季风动力学、短期气候预测、气候变化等方向的研究。E-mail:zhi@nuist.edu.cn

(EFEDA)和黑河试验(HEIFE)都是国际上具有代表 性的观测试验。黑河试验是我国最早的陆面过程野 外试验,它开创了我国陆面过程研究的先河,也是亚 洲第一次国际合作进行的大型陆面过程试验,被列 为世界气候研究计划(WCRP)、水文大气先行性实 验(HAPEX)和国际地圈生物圈计划(IGBP)中的一 部分^[15-17]。另外,我国还开展了"中国西部环境和生 态科学研究计划"、"西北干旱区陆—气相互作用观 测试验研究(NWC-ALIEX)"^[15-18]。中国气象局乌鲁 木齐沙漠气象研究所研究团队从 21 世纪初一直关 注塔克拉玛干沙漠的边界层气象问题,持续开展沙 漠边界层综合观测试验,取得一些研究成果^[19-22]。

本文研究基于沙漠区域小气候观测试验,利用 连续的辐射能量观测数据阐述了研究区域的地表能 量收支特征,从局地气候的角度揭示了由于人类影 响而产生的地表能量格局改变。这种精细化、小尺度 的沙漠区域小气候地表收支与能量平衡的细微甄 别,有助于增强对沙漠区域不同地表格局能量辐射 平衡特征规律的理解,同时也为沙漠陆面模式或者 区域气候模式的参数化方案改进提供基础支撑。

1 观测系统与方法介绍

1.1 自然沙地观测系统

自然沙地观测系统以 10 m 梯度为基准, 监测 要素含温度(T)、湿度(H)、风向(W_r)、风速(W_s)、大 气压(P)、四分量辐射系统、土壤表层探测系统(T、 H、热通量 SHF、CO₂)等。涡动相关观测系统配备有 CSAT3 型超声风速仪^[15],LI-COR7500 型 CO₂/H₂O 水汽分析仪等传感器,数据采集频率 10 Hz(图 1)。



图1 自然沙地涡动相关观测系统与四分量 辐射观测系统

1.2 人工绿地观测系统

80 m 梯度系统,探测层次为 0.5、1、2、4、10、20、 32、47、63、80 m,探测要素为风向风速、温度、湿度。 土壤监测系统包括土壤探测系统,其中温度探测层 次为 0、-2、-5、-10、-20、-40、-80、-160 cm;湿度探测层次为 0、-2、-5、-10、-20、-40、-80、-160 cm, 热通量探测层次为 0、-2、-5、-10、-20、-40、-80 cm。研究级基准辐射站为太阳跟踪器、总辐射、散射辐射、天空长波辐射、地面长波辐射、地表反射辐射、T空长波辐射、地面长波辐射、电表反射辐射、UV-A、UV-B 紫外辐射、直接辐射、日照时数传感器、光和有效辐射等。10 m 处安装 IRGASON 一式涡动相关传感器,80 m 处安装 CSAT3+7500A 分体式涡动相关传感器,测定 CO₂/H₂O 在空气中的摩尔密度、三维风速、超声虚温(声场温度)以及大气压、空气温度指标(图 2)。



图 2 人工绿地 80 m 梯度观测系统、BSRN 辐射 观测系统、涡动相关观测系统

1.3 计算方法

净辐射 R_n计算公式:

$$R_{\rm n} = (D_{\rm R} - U_{\rm R}) + (D_{\rm LR} - U_{\rm LR}) .$$
 (1)

式中,*D*_R为太阳总辐射,*U*_R为反射辐射,*D*_{IR}为大气 长波辐射,*U*_{IR}为地面长波辐射。

地表能量平衡方程计算公式:

$$R_{\rm n}-G_0=H+L_{\rm E}.$$
 (2)

式中, R_n 为地表净辐射; G_0 为表层土壤热通量;H为 感热通量; L_E 为潜热通量。

观测数据采用了阳坤和王介民(2008)基于土壤 温湿资料计算地表土壤热通量的新算法(TDEC)计 算 *G*₀(表层土壤热通量)。其中感热通量 *H* 与潜热通 量 *L*_E的计算基于湍流观测数据计算:

$$H=rC_{\rm p}\overline{W'q'} , \qquad (3)$$

 $L_{\rm E}=lrC_{\rm p}\overline{W'q'}$. (4) 式中,r为空气密度; $C_{\rm p}$ 为定压比热;l为蒸发潜热; q'与 q'分别代表位温和比湿的脉动量;W'为垂直

风速的脉动量。 能量平衡闭合计算公式:

$$E_{\rm BR} = \frac{a(H+L_{\rm E})}{a(R_{\rm n}-G_{\rm 0}-S)} , \qquad (5)$$

$$D=R_{\rm n}-G_0-H-L_{\rm E}.$$
 (6)

式中,*E*_{BR}为能量平衡比(无量纲);*D*为能量平衡残 差;*H*为感热通量;*L*_E为潜热通量;*R*_n:净辐射;*G*₀为 土壤热通量,单位均为W·m⁻²。其中,*S*为冠层热储 量,自然沙地 S 为零,人工绿地植被均为低矮稀疏的 固沙灌木,属于干旱区草地生态系统冠层,S本身值 很小,且不易测量,因此本文在分析能量闭合时忽略 不计^[15]。

2 特征解析

2.1 地表辐射参数

辐射能量各参数时间尺度变化特征显著,契合 辐射收支基本规律。太阳总辐射(*D*_R)、反射辐射(*U*_R) 在沙地与绿地变化趋势类同,夏季为高峰季节,7月 为峰值月,地面长波辐射(*U*_{IR})在不同下垫面反馈不 同,沙地与绿地日尺度最大差值为 50 W·m⁻²。

地表反照率(Surface Albedo)是上述差异的主 控因子,其性质决定了下垫面对辐射的吸收特征。因 观测地点临近,可忽略太阳高度角的影响,自然沙地 在年尺度内具有很好的均一性,因此反照率相对稳 定(图 3a)。人工绿地反照率(图 3b)月尺度变化波动 大,在植被生长周期 6—10 月,反照率位于低值区。 由于滴灌活动改善了沙漠地表水分条件,提高了土 壤湿度,导致了反照率值减少。图 4 给出了土壤湿度 对反照率的影响。绿地土壤湿度月平均日变化明显 比沙地复杂。沙地 20 cm 土壤湿度表征效应滞后于 5 cm,这符合土壤水分传递基本特征。而研究区域的 人工绿地主要集中在两侧高大沙丘之上,受地形影 响,水分的传递被重力条件与地形条件共同支配,地



形条件增加了重力向下的矢量,因此更多的水分易 先往深层传递,再随地形扩散,从沙垄向垄间迁移。 这就引发了人工绿地表层土壤湿度滞后于深层土壤 的现象。



2.2 地表能量通量参数

从图 5 可知, 全年自然沙地 R_n小于人工绿地 (12 月除外)。沙地夜间最小值(-95 W·m⁻²)低于绿 地(-90 W·m⁻²),出现在 10 月;沙地最大值(405 W· m⁻²)低于绿地(452 W·m⁻²),出现在 7 月。R_n 日正负 值更替规律表现出很强的季节性,以夏季 7 月为例, 绿地负转正更替时刻为 5:30,沙地为 6:30;绿地正 转负更替时刻为 18:00,沙地为 18:30,沙地存在滞 后效应。同理,以冬季 1 月为例,R_n 负转正更替时 刻绿地为 08:00、沙地为 08:30;反之正转负,绿



地为 15:30 沙地 14:30。*R*_n夏季日尺度正值区长, 冬季夜间负值区长, 符合季节特征规律。

*G*₀的日变化趋势呈单峰分布,*G*₀峰值出现时间 比*R*_n提前 1.5 h。沙地 *G*₀小于绿地,这是由于绿地 在生长期土壤水分条件优于沙地,影响了两种下垫 面的土壤热传导率而造成的。不同下垫面、不同层次 *G*₀的月平均日变化凸显了时间尺度特征。日间,热 量传输方向由表层到深层垂直向下,以午后为分界 点,热量传输强度递减。夜间由于地表辐射冷却,热 量传输方向由深层到表层垂直向上。绿地的 *G*₀日振 幅大于沙地,绿地土壤热导率和热容量受到植被与 水分条件影响,导致绿地单位时间内更多的热量与 能量被传递。

绿地 H 与沙地 H 变化趋势一致,在不稳定季节 (春、夏)高,在稳定季节(秋、冬)低。在湍流发展强烈 的夏季,绿地 6月 H 小于沙地 H、7月基本一致,8 月绿地小于沙地,极值出现在 6月,沙地 H 最大值 为 198.6 W·m²,绿地 H 最大值为 175.3 W·m²。日间 随着时间推移,辐射强度递增,地表增温速率大于空 气增温速率,产生向上的热对流,有利于 H 增大。沙 地与绿地的地表温度差异不大,但受植被热容量的 制约,两种下垫面近地面空气温度存在明显的位相 差,致使湍流强度产生差异,因此自然沙地的感热通 量要大于人工绿地¹⁵。

L_E的主控因子为水分条件,塔克拉玛干沙漠腹 地常年极端干旱,L_E为低值区是常态。沙地 6—7 月 L_E有显著提升,6月平均日峰值达 82 W·m⁻²,7 月平 均日峰值达 58.3 W·m⁻²,这可能受到局地环流的影响^[23]。在人工绿地的生长与成熟周期,绿地 $L_{\rm E}$ 大于沙地。绿地 $L_{\rm E}$ 6—7月为峰值周期,由观测资料可知 6月降水量累计值为 23.9 mm,7月累计降水量为5.2 mm,可见,降水是影响 $L_{\rm E}$ 变化的主导因素之一。绿地 $L_{\rm E}$ 与沙地 $L_{\rm E}$ 日尺度变化规律与 H 类似,这里不再赘述。在植被覆盖区域,日间随着太阳辐射的增强,温度递增,植被凝结水和土壤表层水随着蒸腾作用变为水汽,并在垂直方向上扩散,因此, $L_{\rm E}$ 在正午左右达到最大值。午后因蒸发强烈,绿地由液态向气态转化的水汽量不断减弱,其垂直输送强度也相应递减,导致 $L_{\rm E}$ 趋于减少,在夜间达到最低值^[15]。

2.3 地表能量分配格局

在了解研究区域的地表能量特征参数变化规律 的基础上,进一步剖析各个特征参数的能量分配格 局,有助于深入了解研究区的净辐射耗能比(图 6、 图 7)。沙漠地区夜间层结稳定,日间湍流旺盛,日出 日落时段属于稳定期与不稳定期的转换期,耗能比 易出现跳跃值,此时, R_n 在低值区,客观映射了耗能 比的不稳定期。自然沙地净辐射的主要耗能形式以 $H 和 G_0 为主, H 最大, L_E 最小^[15]。研究区域,日间辐$ 射强度大,空气含水率低,地表水分条件差,能量传递由上至下,耗能形式以 H 为主;夜间大气多为稳定状态,缺乏外部能量输送,地表在日间储存的能量 $由下向上释放,耗能形式以 <math>G_0$ 为主。

研究区域的界域尺度小于塔克拉玛干沙漠,因 此在沙漠大尺度的控制下,能量分配的基本格局是





图 7 自然沙地不同季节能量分配日动态

一致的(绿地与沙地)。绿地日尺度 L_E 的耗能比大于 沙地,沙地 L_E 的耗能比受水分条件限制,处于一个 稳定状态。如图 8 所示,绿地日尺度(L_E)的耗能比增 加了 1.5%。同为干旱区,敦煌戈壁(L_E)的耗能比为 3.8%,H 为主要耗能形式^[24]。相反,水分条件优越的华 北平原耗能比以 L_E 为主^[25]。



2.4 地表能量闭合特征

郭建侠等^[20]指出能量平衡残差 D 可以较为全面地评估出由于观测测量原因以及误差项所导致的能量平衡差,其正负值及阈值区间变化体现了能量的不平衡程度^[15]。研究区域内,沙地 D 值与绿地阈值区间存在明显差异。在冬季,沙地 D 值范围为 -0.23~91.69 W·m⁻²,绿地为-21.34~74.36 W·m⁻²;在夏季沙地 D 值范围为 -56.52~23.16 W·m⁻²,绿地 为-99.48~91.09 W·m⁻²。下垫面的不同,地表加热与冷却速率不同,从而导致了地表与大气之间温度差表征不同,因此,不同下垫面 D 值区间范围存在异

同。以白天为例,沙地地表状态均一性强,地表沙地 在辐射条件下加热快,空气加热速率慢,明显的地气 温差形成热对流,造成湍流活动强烈,因此在日尺度 范围内,正午 D 值接近极大值,在日出前后或者午 后时段接近 0,而这个时段即为日尺度内能量闭合 率较高时段。受植被影响绿地 D 值夏季最小、冬季 最大(图 9、图 10)。

由图 11 可知,绿地能量闭合线性回归的拟合系数 R² 夏季最优,为 0.541,冬季最差,为 0.298。春、秋季拟合系数 R² 略低于夏季。沙地能量闭合线性回归的拟合系数 R² 春、夏最优,为 0.882,冬季最差,为 0.669。研究区域的夏季闭合率最高,冬季最低,且 其不闭合率在绿地>50%,在沙地接近 50%。人工绿地的不闭合率低于自然沙地,D 值较小也印证了这一点。由于小地形起伏及下垫面条件的共同影响,不同下垫面的闭合情况存在明显的差异特征^[15]。人工 绿地秋季拟合系数 R² 为 0.526,出现过闭合状态,也 是由于日出时能量不稳定、观测值跳跃引起的(图 11)。

图 12 为绿地与沙地白天和夜间的能量闭合状态。白天沙地能量闭合线性回归的拟合系数 *R*² 春季 最优,为 0.851,其他三季依次为:夏(0.756)、秋(0.771)、冬(0.660)。可见白天拟合系数 *R*² 比全天低,因此,沙地日间是负贡献。绿地能量闭合线性回归的拟合系数 *R*² 秋季最优为0.450,其他三季依次为:春(0.4)、夏(0.294)、冬(0.174)。同理,绿地日间



图 11 人工绿地(a)与自然沙地(b)不同季节地表能量的闭合状况

也是负贡献,且贡献率更大。在夜间,绿地与沙地有 效能量与湍流能量的回归散点值更接近0,说明研 究区域的夜间闭合率为正贡献。

3 讨论

在沙漠极度干旱背景下,基于观测试验,诠释了 自然状态下沙漠地表与人工绿地的能量各分量的差 异,原因归纳如下: (1)由于人类活动,建设了人工绿地,改变了地 表反照率、增加了储热量、地表蒸发增加导致了反射 通量在入射通量中的比例、改变了净辐射能量分配, 造成能量收支差异。

(2)自然沙地加热速率快,形成地气温差,引发 垂直热对流,形成了以大气感热通量为主能量分配 格局。人工绿地的植被改善了水分条件,引起了实际 蒸发增强,形成了温度差异,在日间与夜间促进了局





地环流的形成,触发了潜热通量增大、感热通量减小。

因此,在极端干旱的沙漠区,在人为活动的影响 下,人工绿地成为下垫面性质改变的典型案例,下垫 面格局的改变成为能量平衡参数规律性表征的主要 归因;人工绿地温度、湿度的变化,形成不同于自然 沙地的演变规律;温差效应引发在垂直和水平方向 上局地风环流,从而改变感热通量、潜热通量的传输 特征规律,最终导致不同下垫面的能量收支差异^[15]。

4 主要结论

(1)自然沙地与人工绿地之间的 U_{IR} 日尺度最 大差值为 50 W·m⁻²,植被区地表反照率 6、10 月是 客观反映的低值时段,这是由于滴灌是沙漠中人工 绿地水分供给的主要方式,促进了沙漠土壤含水率的提升,从而影响了地表反照率的变化。春、夏季是绿地 H 与沙地 H 的高值季节,6月是极值出现期,其中沙地(H)极大值为 198.6 W·m⁻²,绿地 H 极大值为 175.3 W·m⁻²。植被生长与成熟周期,绿地 $L_{\rm E}$ 日尺度震荡幅度较沙地更为强烈,相对于沙地增加了 15%。研究区域 $R_{\rm n}$ 的主要耗能是 H 与 $G_{\rm 0}$,其中白天 以 H 为主导,夜间以 $G_{\rm 0}$ 为主导。

(2)日间与夜间的大气稳定条件决定了 E_{BR}的 波动幅度,在日间沙地 E_{BR}递增速率大于绿地,在夜 间绿地 E_{BR}变化幅度大于沙地,这是由不同下垫面 能量平衡参数之间的差异引发的。沙地 D 值日尺度 变化特征显著,与之相较,绿地 D 值日周期内变化 趋势复杂。从日尺度上看,在能量转换的关键时段,即日出或日落时刻,D值波动大;从季节尺度看,不稳定季节(春、夏)D值变化幅度明显大于稳定季节(秋、冬)。

(3)研究区域的夏季闭合率最高,冬季最低,且 其不闭合率在绿地>50%,在沙地接近50%。对于全 天闭合率贡献而言,沙地与绿地均为负贡献,且绿地 负贡献影响更大;在夜间沙地与绿地均为正贡献。

参考文献:

- [1] 张强, 王胜, 卫国安. 西北地区戈壁局地陆面物理参数的 研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 616-623.
- [2] 缪启龙,温雅婷,何清,等.沙漠腹地春夏季近地层大气 湍流特征观测分析[J].中国沙漠,2010,30(1):167-174.
- [3] 温雅婷,焦冰,缪启龙,等.塔克拉玛干沙漠腹地近地层 湍流能谱特征分析 [J]. 中国沙漠,2012,32 (6):1716– 1722.
- [4] 王延慧,何清,杨兴华,等.塔克拉玛干沙漠北缘地表能 量收支特征[J].沙漠与绿洲气象,2014,8(3):34-41.
- [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] 杨帆, 王顺胜, 何清, 等.塔克拉玛干沙漠腹地地表辐射 与能量平衡[J].中国沙漠, 2016, 36(5): 1408-1418.
- [7] BROWN P T, CALDEIRA K.Greater future global warming inferred from Earth's recent energy budget[J]. Nature, 2017, 552(7683):45–50.
- [8] 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[J].中国沙漠,2011,31(5):1302-1308.
- [9] 岳平,张强,赵文,等.黄土高原地表能量闭合特征及土 壤通量参数化[J].冰川冻土,2012,34(3):583-590.
- [10] 胡隐樵.黑河试验(HEIFE)能量平衡和水汽输送研究进展[J].地球科学进展,1994,9(4):30-34.
- [11] 胡隐樵, 左洪超. 黑河试验(HEIFE) 研究获重大成果[J]. 中国科学院院刊, 1996, 11(6): 447-451.
- [12] 吕达仁,陈佐忠,王庚辰,等.内蒙古半干旱草原土壤— 植被—大气相互作用—科学问题与实验计划概述[J].气 候与环境研究,1997,2(3):199-209.
- [13] HOLTSLAG A, EK M. Simulation of surface fluxes and boundary layer development over the pine forest in HAPEX-MOBILHY [J].Journal of Applied Meteorology, 2010,35(2):202-213.
- [14] JOCHUM M, BRUIN H D, HOLTSLAG A, et al.Areaaveraged surface fluxes in a semiarid region with

partly irrigated land:lessons learned from EFEDA[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2006,45(6):856–874.

- [15] 霍文.塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地与自然沙地局地气 候差异研究[D].南京:南京信息工程大学,2020.
- [16] HALLDIN S, GOTTSCHALK L, GRIEND A, et al. NOPEX—a northern hemisphere climate processes land surface experiment[J].Journal of Hydrology, 1998, 212(1-4): 172-187.
- [17] NICHOLSON S E, TUCKER C J.Desertification, drought, and surface vegetation: An example from the West African Sahel [J].Bull Amer Meteor Soc, 1998, 79 (5): 815-819.
- [18] 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.
- [19] HUO W, HE Q, YANG F, et al. Observed particle sizes and fluxes of Aeolian sediment in the near surface layer during sand -dust storms in the Taklamakan Desert [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 130 (3-4): 735-746.
- [20] ZHOU C, YANG F, MAMTIMIN A, et al. Wind erosion events at different wind speed levels in the Tarim Basin [J].Geomorphology, 2020, 369(1):107386.
- [21] YANG Fan, HE Qing, HUANG Jianping, et al. Desert environment and climate observation network over the Taklimakan Desert [G].Bulletin of the American Meteorological Society, 2021, 102(5), E1172-E1191.
- [22] WANG M,XU X,XU H,et al.Features of the deep atmospheric boundary layer over the Taklimakan Desert in the summertime and its influence on regional circulation [J].Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124.
- [23] HUO W, YANG F, ZHI X, et al. Comparative study on the difference in meteorological monitoring between constructed green land and natural sandy Land [J]. Sustainability, 2022, 14(3): 1076–1096.
- [24] 刘宏谊,杨兴国,张强,等.敦煌戈壁冬夏季地表辐射与 能量平衡特征对比研究[J].中国沙漠,2009,29(3):558-565.
- [25] 张永强,刘昌明,于强贾,等.华北平原典型农田水、热与 CO₂通量的测定[J].地理学报,2002,57(3):335-344.
- [26] 郭建侠, 卞林根, 戴永久.玉米生育期地表能量平衡的多时间尺度特征分析及不平衡原因的探索[J].中国科学: D辑, 2008, 38(9): 1103–1111.

Energy Budget Difference Between Artificial Green Land and Natural Sandy Land in Taklimakan Desert

HUO Wen^{1,2}, ZHI Xiefei^{2,3}, YANG Fan¹, ZHOU Chenglong¹, WANG Yu¹, SONG Meiqi¹, PAN Honglin¹, Ali Mamtimin¹, HE Qing¹

(1.Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration / National Observation and Research

Station of Desert Meteorology, Taklimakan Desert of Xinjiang / Taklimakan Desert Meteorology

Field Experiment Station of China Meteorological Administration / Xinjiang Key Laboratory of Desert Meteorology and Sandstorm, Urumqi 830002, China;

2.Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education(KLME), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

3.Nanjing Joint Center for Atmospheric Research(NJCAR), Nanjing 210044, China)

Abstract Based on the radiation energy observation data of natural sandy land and artificial green space in Taklimakan Desert in 2013, the differences of energy budget of different underlying surfaces were analyzed. The results show that: (1) The diurnal variation of radiation components is significant, and the maximum diurnal difference of Surface Upward Longwave Radiation (*ULR*) is 50 W·m⁻².(2) Soil moisture is one of the main controlling factors causing the difference of surface albedo. Drip irrigation is the main way of water supply for artificial green space in desert, which promotes the improvement of soil moisture content in desert, thus affecting the change of surface albedo.(3) Net radiation (R_n) has different energy dissipation forms in daytime and at night. Sensible heat flux (H) dominates in daytime, while surface soil heat flux (G_0) dominates in night. During the vegetation growth cycle, the latent heat flux (L_E) energy consumption increased by 1.5%.(4) The fluctuation range of land surface energy balance ratio (*EBR*) in green land was larger than that in sandy land, and the *EBR* of sandy land increased faster than that of green land. The closure rate of green land was the highest in summer, while that of sandy land was the highest in spring and summer.

Key words radiation; artificial green vegetation land; natural sandy land; energy budget; Taklimakan Desert