

郑志远, 韦志刚, 李振朝, 等. 2016. 中国西北三类典型裸土下垫面地表宽波段发射率变化特征研究 [J]. 大气科学, 40 (6): 1227–1241. Zheng Zhiyuan, Wei Zhigang, Li Zhenchao, et al. 2016. A study of variation characteristics of surface broadband emissivity over three typical bare soil underlying surfaces in northwestern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (6): 1227–1241, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15273.

中国西北三类典型裸土下垫面地表宽波段 发射率变化特征研究

郑志远^{1,2} 韦志刚^{1,2} 李振朝³ 文小航^{4,2} 陈辰^{1,2}

1 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 北京师范大学珠海分校未来地球研究院, 珠海 519087

3 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000

4 成都信息工程大学大气科学学院高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225

摘 要 利用 2013 年我国西北戈壁、沙漠和黄土塬区三类典型裸土下垫面野外观测试验资料, 探究了上述地区地表向下、向上长波辐射 (DLR & ULR)、地表温度 (LST) 和地表宽波段发射率 (LSBE) 的变化特征, 结果表明: 黄土站地表 ULR 和 LST 明显比戈壁和沙漠站偏低; 戈壁宽波段发射率 (GbBE)、沙漠宽波段发射率 (DeBE) 和黄土宽波段发射率 (LoBE) 具有明显的变化特征, 尤其是日变化特征; 观测期内 GbBE、DeBE 和 LoBE 平均值分别约为 0.926 ± 0.0452 、 0.916 ± 0.0419 和 0.881 ± 0.049 。三站点地表宽波段发射率的数值大小和变化特征与陆面模式中所指定的参数化情况不符。地表发射率会受站点周围环境和当时气象条件等因素的影响, 表层土壤湿度被认为是一个非常重要的影响因子, 将来的野外观测试验中需加强相关影响要素的观测与分析。

关键词 干旱半干旱区 野外观测试验 地表宽波段发射率 典型下垫面

文章编号 1006-9895(2016)06-1227-15

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15273

A Study of Variation Characteristics of Surface Broadband Emissivity over Three Typical Bare Soil Underlying Surfaces in Northwestern China

ZHENG Zhiyuan^{1,2}, WEI Zhigang^{1,2}, LI Zhenchao³, WEN Xiaohang^{4,2}, and CHEN Chen^{1,2}

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875

2 Future Earth Research Institute, Beijing Normal University Zhuhai Campus, Zhuhai 519087

3 Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

4 Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

Abstract A field observational experiment on ground surface downward longwave radiation (DLR), upward longwave radiation (ULR), and land surface temperature (LST) was conducted at three man-made sites at Gobi, desert, and bare loess zones in 2013 in Gansu Province. In the present study, variation characteristics of surface longwave radiation (LR), LST and surface broadband emissivity over Gobi (GbBE), desert (DeBE), and loess (LoBE) underlying surfaces are

收稿日期 2015-09-22; **网络预出版日期** 2016-01-05

作者简介 郑志远, 男, 1986 年出生, 博士研究生, 主要从事大气边界层观测、陆气相互作用及区域气候数值模拟方面的研究。E-mail:

zhiy Zheng@outlook.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41275011、41375001、41405063

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41275011, 41375001, 41405063)

analyzed based on the observations collected in the experiment. Results show that the ULR and LST at the Loess site are lower than that at Gobi and desert sites. Surface broadband emissivity at each site has obvious variation characteristics, especially the diurnal cycle feature. Daily averages of surface broadband emissivity at GbBE, DeBE, and LoBE are approximately 0.926 ± 0.0452 , 0.916 ± 0.0419 , and 0.881 ± 0.049 , respectively. The values and variation characteristics of observed land surface emissivity are not consistent with that in land surface models. Land surface emissivity can be affected by environmental factors and weather condition. Land surface soil moisture is a significant factor influencing surface emissivity in arid and semi-arid region. More relatively influential factors should be measured and analyzed in the future in field observational experiments.

Keywords Arid and semi-arid area, Field observational experiment, Land surface broadband emissivity, Typical underlying surface

1 引言

全球陆地表面近 1/4 为干旱半干旱区, 且在各 大洲均有分布, 这些地区因其脆弱的生态系统导致 其对全球变化异常敏感 (Rotenberg and Yakir, 2010; Huang et al., 2012)。因此, 全球干旱半旱区的气候 变化是目前全球环境变化研究中不可或缺的重要 的一部分。在全球变暖背景下, 过去的 100 年中, 气候趋暖是上述地区最主要的特征, 尤其是半干旱 区, 对全球年平均陆地气温贡献可达 44.46% (Huang et al., 2012)。地表温度是太阳辐射、陆地、海洋和 大气等多圈层之间相互作用的综合结果, 它是影响 地表长波辐射收支、地表和大气之间物质能量交 换、数值预报、大气环流及气候变化等研究的重要 物理、化学和生物参数 (刘三超等, 2007; 翟俊等, 2013)。地物的辐射温度、比辐射率 (又名发射率) 和环境辐照度是影响地表温度的基本因素。研究表 明, 地表发射率对地表温度影响很大。

物体发射率指物体的辐射能力与相同温度下 黑体的辐射能力之比, 该比值称为该物体的发射率 或黑度, 也称为辐射率或比辐射率 (Van de Griend et al., 1993)。地表发射率是反映地表热辐射特性的一个 重要参数, 其精度直接影响着地表向上发射的长 波辐射量的精度, 进而影响地表净辐射和地表温度 的计算精度, 它在反演地表温度时非常重要。因此, 地表发射率的差异决定着不同地表状况下的长波 辐射能量分配 (Melesse et al., 2008; Abramowitz et al., 2012), 进而影响整个地表的辐射收支与能量平 衡 (French et al., 2008; Edwards, 2009)。在城市小 气候特征研究中, 城市和农村地表比辐射率的明显 差别对城市热岛强度的判断至关重要 (Bradley et al., 2002; Stathopoulou et al., 2007; Wang et al., 2005)。 此外, 我们还可以利用地表发射率对植被绿色信息 不敏感的特性来准确地表征某一地区的地表植被

覆盖度 (French and Inamdar, 2010)。如前所述, 地 表发射率是决定地表辐射收支的决定性地表物理 和生化参数之一, 因此定量分析不同地表覆盖类型 的地表发射率时空演变特征, 弄清和理解影响地表 发射率变化的因子, 对准确描述陆表信息特征, 陆 表与大气之间能量交换, 驱动全球及区域气候模 型, 支持国家有关环境政策和优化资源配置等方面 均具有至关重要的作用。

地表发射率除具有明显的波谱特征外 (Nerry et al., 1990), 其主要与地表类型和物体的表面状态密 切相关, 并且随着地表覆盖物、地表粗糙度、土壤 湿度、土壤质地、土壤纹理、矿物成分、土壤粒子 尺度、物体表面氧化层、物体表面杂质或涂层的不同 而存在显著的变化 (Van de Griend et al., 1991)。 不同的土地覆被类型是这些因素的综合反映结果, 地表比辐射率随着土地覆被类型的变化而改变, 并 与下垫面植被和土壤比例密切相关 (Pinker et al., 2009)。目前, 已有的研究大多是从卫星反演的角 度研究星下点或复杂区域下垫面平均地表发射率, 或者研究各卫星反演波段的地表发射率特征 (Humes et al., 1994; Hewison, 2001; Peres and DaCamara, 2004; Jiang et al., 2006)。微波比辐射 率指在微波频率范围内物体发射辐射与相同温 度下黑体的发射辐射之比。何文英和陈洪滨 (2009) 通过利用 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 卫星上同步扫描的 VIRS (红外和可见 光) 与 TMI (微波) 资料以及微波辐射传输模式 反演了中国江淮和黄淮地区陆面微波比辐射 率, 同时结合 MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) 提供的地表类型数据, 分析了上 述两地区不同地表微波比辐射率的时空变化特 征。何文英等 (2010) 基于地表微波辐射率观测试 验, 探讨了草地、裸土、沙地和水面四种不同下垫 面的地表微波比辐射率的变化特征以及降雨前后

比辐射率的昼夜变化特征。何文英等(2011)和王永前等(2013)分别基于 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer—Earth Observing System) 和 MODIS 同步观测的微波和红外资料,反演了青藏高原地区陆面微波比辐射率的时空变化特征,结合 MODIS 反演的地表类型资料,分析该地区陆地微波比辐射率随地表类型、微波频率及其不同时间尺度的变化特征。王新生等(2012)利用美国 NASA 的卫星资料分析了我国地表发射率的时空分布特征,发现西北荒漠地区是我国地表发射率最小的区域。翟俊等(2013)利用 EOS-MODIS Earth (Observing System—MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) 比辐射率产品分析研究了 2000~2011 年中国地表比辐射的时空分布特征,结果表明全国地表比辐射率取值区间较小,仅为 0.9610~0.9760,土地覆被类型的空间分布决定了比辐射率的空间格局特征。胡菊昃等(2013)用 102F 卫星测量了我国西北沙源区各类型地表的发射率,结果表明不同地表类型发射率差异显著,同种类型地表发射率因物理特征不同会呈现规律性差异,发射率在时间尺度上具有稳定性。

陆地表面具有非均一性特征,由于遥感理论知识和技术应用上的一些困难,比如遥感观测 n 个光谱波段可建立 n 个等式,但是方程共有 $n+1$ 个未知数,方程不闭合,以及如何消除大气对微波信号衰减的影响,导致目前卫星遥感反演相关参数时仍有较大的不确定性(Jiménez-Muñoz et al., 2006; Li et al., 2013)。孙毅义和李治平(2001)研究了自然地表红外辐射的方向特征,实地测量了发射率随观测天顶角的变化,分别对卫星资料反演地面温度和地面辐射测量做了红外发射率的观测天顶角修正。与此同时,通过卫星遥感资料反演得到的地表发射率为窄波段地表发射率,而数值模式中计算地表长波辐射时需要全波段域上的宽波段发射率。用窄波段发射率代替宽波段发射率在计算地表长波辐射时必然会带来明显的误差(Wang et al., 2005),因此需要某种算法将通过卫星遥感观测获得的窄波段发射率转换成实际所需的宽波段发射率。已有研究指出,地表宽波段发射率可以表示为几个窄波段发射率的线性组合(Ogawa et al., 2002, 2003; Wang et al., 2005; Liang et al., 2013)。刘永强等(2011)采用 Yang et al. (2008)提供的半理论半经验公式估算了塔克拉玛干沙漠地区的地表发射

率应为 0.91, 小于数值模式中给定的发射率值。吴莹和王振会(2012)回顾了微波地表发射率反演的国内外研究进展及其研究中存在的问题,并对这些方法的优缺点进行了评价。Li et al. (2013)回顾了目前用卫星遥感资料反演地表发射率的几种不同的方法,并将其归类为以下三种:(1) (半)经验或理论方法 [(Semi-) Empirical or Theoretical Methods]; (2) 多通道温度发射率分离 (Multi-Channel Temperature Emissivity Separation Methods, 简称 TES) 方法; (3) 基于物理的方法 (Physically Based Methods, 简称 PBMs)。类似的通过卫星遥感资料反演地表发射率及其反演算法的研究工作还有许多,不胜枚举。

鉴于地表发射率并未被精确测量出来,利用气候模型模拟区域和全球气候变化时,模型中不同土地覆盖类型的发射率往往被设置为一个固定的典型值,缺少随时间和地表过程变化而变化的信息(Wood et al., 1998; Jin and Liang, 2006; van den Broeke et al., 2008),通常称之为发射率常数假定(Jin and Liang, 2006),比如在陆面模型 Community Land Model Version 4.0 & 4.5 中分别规定裸土和湿地地表发射率为 0.96,冰川和雪为 0.97 等(Oleson et al., 2010, 2013)。Prata (1993)、刘东琦和王介民(1999)以及张仁华(1999)通过研究认为在 8~12 μm 波段,典型陆地表面比辐射率每变化 0.01,会带来遥感反演的地表温度 2 K 的差异。van den Broeke et al. (2008)对地表长波净辐射估算的研究表明,由于冰雪具有较高的比辐射率,比辐射率不变的假设会带来长波净辐射的明显低估。在干旱半干旱地区,裸土具有较低的比辐射率,在这些地区比辐射率的高估更容易发生,会明显降低干旱半干旱地区净辐射的估算精度(Jin and Liang, 2006)。Jin and Liang (2006)研究结果显示,数值模式中将地表发射率设定为常数会引起地表辐射收支产生明显偏差,尤其是在干旱半干旱地区,这会对地表辐射收支估算带来较大偏差。忽略不同地表覆盖类型比辐射率之间差异以及它们的时空变化特征必然会对地表能量平衡的估算产生较大偏差,因此为了更好地模拟陆地气候特征,作为数值模式中重要的输入参数,精确的宽波段地表发射率是必需的(Jin and Liang, 2006)。

综上所述,目前地表发射率仍主要是通过卫星遥感观测手段获得,针对某一地表覆盖类型反演出一个

与之相对应的地表发射率,同一地表覆盖类型得出一个固定值,其不具有时空变化特性(Snyder and Wan, 1998)。基于卫星遥感观测地表覆盖类型反演得到的地表发射率对地表覆盖类型的反演误差和不确定性非常敏感。同时,针对一些地表覆盖类型,当观测角度大于 45° 时,先前只对发射率进行简单的随观测角的线性修正。由于地表发射率存在很大的时空变化特征,同时我们又缺乏对发射率随卫星观测角度而变化的认识,因此导致在干旱半干旱地区地表发射率的误差和不确定性会更大(Wan et al., 2002),进而会引起地表辐射收支产生明显偏差,尤其是在干旱半干旱地区(Jin and Liang, 2006)。

裸土宽波段地表发射率的研究十分稀少,通过野外试验观测进行地表宽波段发射率测量和特征分析的研究基本是空白的。陆面模型中裸土地表发射率的参数化方案在我国西北干旱半干旱地区的适用性究竟如何,目前也尚不清楚。因此,为了准确地反演我国西北地区地表温度和地表长波辐射,以便可以更好地模拟地表能量平衡和气候特征,获取高精度的区域典型下垫面宽波段地表发射率是必需的。在相关项目的支持下,近年来,我们已经进行了我国西北干旱半干旱地区陆气相互作用观测试验(the Field Experiment on Air-Land Interaction in the Arid Area of Northwest China, 简称为 NWC-ALIEX)(Zhang et al., 2002a, 2002b; Zhang and Huang, 2004; 张强等, 2005; 郑志远等, 2014; Zheng et al., 2015),该试验针对我国西北地区典型裸土下垫面(戈壁、沙漠和黄土)进行了野外观测试验。本文利用收集到的地表辐射和地表温度资料,试图探究我国西北戈壁、沙漠和黄土地区地表宽波段发射率的时空演变特征,为将来优化改进或发展建立适合该地区的地表发射率参数化方案,改进由于模式中参数化方案误差而可能引起的地表温度、能量分量等的计算偏差,发展干旱地区具有区域特色的参数化方案和区域模式的改进提供参考。这不仅可以推动我国西北地区陆—气相互作用的研究,促进天气和气候模式对西北干旱半干旱地区的天气和气候模拟及预测的能力,也有助于合理开发和利用自然资源,保护和改善生态环境,实现人与自然和谐相处。

2 观测试验及研究方法

2.1 观测站点简介

在 NWC-ALIEX 项目的资助下,我们于 2013

年的加强观测期(Intensive Observational Periods, 简称 IOP)在我国西北地区戈壁、沙漠和黄土塬区三类典型裸土下垫面下进行了野外加强观测试验,收集地表辐射和地表温度等资料,用以探究上述地区地表辐射和宽波段发射率的时空演变特征,文中所用时间均为地方时。王超等(2010)、Zhou and Huang(2011)和黄荣辉等(2013)对 NWC-ALIEX 观测试验的试验仪器和试验数据质量做过系统评估和详细分析,结果显示此项目所支持的野外观测试验所采集到的数据资料真实可信,可用于西北地区典型下垫面的陆面过程特征分析研究。本章节将对试验站点、所用仪器及数据资料做简要介绍。

2.1.1 戈壁站

戈壁观测站位于甘肃省西部敦煌绿洲西侧的双墩子戈壁地区,该站点在塔克拉玛干沙漠东端,位于北纬 $40^\circ 10'$ 、东经 $94^\circ 31'$,海拔高度 1150 m(如图 1 所示)。站点周围被沙漠、戈壁包围,距离敦煌绿洲边缘最近距离大约为 7 km,距离偏南边的鸣沙山大约 20~30 km,深居内陆,远离海洋,年平均降水量约为 39 mm(王胜等, 2004),气候十分干旱。试验场地为平坦的沙石戈壁(表面较多石子,下面以细沙为主),场地周围为下垫面均一、平坦的典型戈壁滩。该地区温度日较差较大,白天有记录的最高地表温度为 333.15 K,有记录的最高气温高达 316.75 K,最低气温曾达到 244.65 K。该地区天空少云,太阳辐射强,日照充足,年无霜期 178 天,同时该地区多风,为沙尘暴多发区之一(韦志刚等, 2005)。有关该站点的更多信息,可参见文献张强等(2005)、黄荣辉等(2013)以及郑志远等(2014)。

本站点试验所用仪器为荷兰 Kipp & Zonen 公司生产的 CNR-1 净辐射四分量观测仪[见图 1; 光谱范围: $4.5\sim 42\ \mu\text{m}$; 灵敏度为 $4.38\ \mu\text{V}(\text{W m}^{-2})^{-1}$; 精度为 $10\ \text{W m}^{-2}$],上海自动化仪表有限公司生产 WZP-015S 铂热电阻 PT100 地表温度观测仪(测量范围: $-50\sim 150^\circ\text{C}$; 精度: $R_0=100\pm 0.12\ \Omega$; 允许热偏差: $\pm 0.005|t|^\circ\text{C}$, $|t|$ 为感温原件实测温度绝对值; 热响应时间 $<5\ \text{s}$),共 3 组,数据采集器为澳大利亚 dataTaker 公司生产的 DT600。观测站点地方时与北京时间相差 1 小时 42 分。各仪器观每日观测时间范围为当地时间 00:00~23:30,每半个小时记录一次数据,此数值为数据记录时刻前后 10 分钟的平均值。本文所用地表长波辐射和地表温度资料起止日

期为 2013 年 5 月 1 日至 7 月 31 日, 共计 92 d。

2.1.2 沙漠站

沙漠观测站位于甘肃省西部敦煌市南部的鸣沙山—月牙泉景区内的沙山上, 该站点周围被小沙山所包围, 观测站点位于北纬 $40^{\circ}05'$ 、东经 $94^{\circ}40'$, 海拔高度 1180 m, 站点场地为细小、平坦、均一的沙粒所覆盖 (如图 1 所示)。沙漠站的气候类型和环境特征与戈壁站相似。极端干旱, 降水少, 蒸发强, 气温波动幅度大是该地区的主要特征。

本站点试验所用仪器为美国 Eppley Laboratory 公司生产的 Precision Infrared Radiometer 净辐射四分量观测仪[见图 1; 简称 PIR; 光谱范围: $3.5\sim 50\ \mu\text{m}$; 灵敏度为 $3.78\times 10^{-6}\ \text{V}(\text{W m}^{-2})^{-1}$; 精度 5%], 上海自动化仪表有限公司生产 WZP-015S 铂热电阻 PT100 地表温度观测仪 (同戈壁站), 共 3 组, 数据采集器为澳大利亚 dataTaker 公司生产的 DT600。观测站点地方时与北京时间相差 1 小时 41 分。各仪器观每日观测时间范围为当地时间 00:00~23:30, 每半个小时记录一次数据, 此数值为数据记录时刻前后 10 分钟的平均值。本文所用地表长波辐射和地表温度资料起止日期为 2013 年 7 月 8 日至 10 月 13 日, 共计 98 d。

2.1.3 黄土站

黄土观测站位于甘肃省东南部平凉市白庙塬贾洼乡农田中, 观测站点位于北纬 $35^{\circ}35'$ 、东经 $106^{\circ}42'$, 海拔高度 1592 m, 站点场地为平坦、裸露、均一的黄土所覆盖, 观测期间观测站点被周围玉米所包围 (如图 1 所示)。该地区土壤主要有壤土和泥土所组成, 在上层 40 cm 的土壤主要由 78% 的泥土, 4% 的粘土和 18% 的细沙所组成 (Zhang et al., 2014)。黄土站位于半干旱半湿润区, 最高空气温度 307 K, 最低气温 249 K。最近 60 年, 年平均气温和降雨量分别为 279 K 和 510 mm, 无霜期 170 d, 年总日照时数 2452 h。

本站点试验所用仪器为荷兰 Kipp & Zonen 公司生产的 CNR-4 净辐射四分量观测仪[见图 1; 光谱范围: $4.5\sim 42\ \mu\text{m}$; 灵敏度为 $7.46\ \mu\text{V}(\text{W m}^{-2})^{-1}$; 精度为 $10\ \text{W m}^{-2}$], 上海自动化仪表有限公司生产 WZP-015S 铂热电阻 PT100 地表温度观测仪 (同戈壁站), 共 3 组, 数据采集器为美国 Campbell 公司生产的 CR3000。观测站点地方时与北京时间相差 45 分钟。各仪器观每日观测时间范围为当地时间 00:00~23:30, 每半个小时记录一次数据, 此数值

为数据记录时刻前后 10 分钟的平均值。本文所用地表长波辐射和地表温度资料起止日期为 2013 年 7 月 25 日至 8 月 23 日, 共计 30 d。

2.2 计算理论和方法

物体发射率 ε_{λ} 可定义为在给定波长 λ (单位: μm) 和温度 T (单位: K) 下, 物体的辐射出射度 $R_{\lambda}(T)$ 与相同温度相同波长下绝对黑体的辐射出射度 $B_{\lambda}(T)$ 的比值, 如下所示:

$$\varepsilon_{\lambda}(T) = \frac{R_{\lambda}(T)}{B_{\lambda}(T)}, \quad (1)$$

其中, $B_{\lambda}(T)$ 可由普朗克定律 (Planck's law) 得出, 如下所示:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(\frac{hc}{K\lambda T}) - 1]}, \quad (2)$$

依据斯蒂芬—玻尔兹曼定律 (Stefan-Boltzmann law), 黑体的总辐射强度可由普朗克函数在由 0 到 ∞ 的整个波长域上积分而得到, 因此有:

$$B_B(T) = \sigma T^4 = \int_0^{\infty} B_{\lambda}(T) d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(\frac{hc}{K\lambda T}) - 1]} d\lambda, \quad (3)$$

其中, $B_B(T)$ 为黑体在一定温度下在全波段上所辐射出的总能量; σ 为斯蒂芬—玻尔兹曼常数 (Stefan-Boltzmann's constant), $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ \text{W m}^{-2}\ \text{K}^{-4}$; λ 为波长, 单位为 μm ; T 为物体温度, 单位为 K; h 为普朗克常数 (Planck constant), $h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J s}$; c 为光速, $c = 3.00 \times 10^8\ \text{m s}^{-2}$; K 为玻尔兹曼常数 (Boltzmann constant), $K = 1.38 \times 10^{-22}\ \text{J K}^{-1}$ 。然而, 自然界中的大部分物体是灰体并非黑体, 因此公式 (3) 可写为

$$B(T) = R(T) = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \varepsilon(\lambda, \theta) \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(\frac{hc}{K\lambda T}) - 1]} d\Omega d\lambda, \quad (4)$$

其中, $B(T)$ 和 $R(T)$ 为自然物在一定温度 T 下的辐射出射度, Ω 为立体角。发射率 $\varepsilon(\lambda, \theta)$ 与观测角度有关, 很多学者做了大量工作来研究在整个红外区域观测角度对表面发射率的影响 (Labed and Stoll, 1991; Lagouarde et al., 1995; Snyder et al., 1997; Jupp, 1998; Sobrino and Cuenca, 1999; McAtee et al., 2003)。基于之前研究可知, 目前关于角度对发射率影响的重要性问题一直有争议。因此, 本文中我

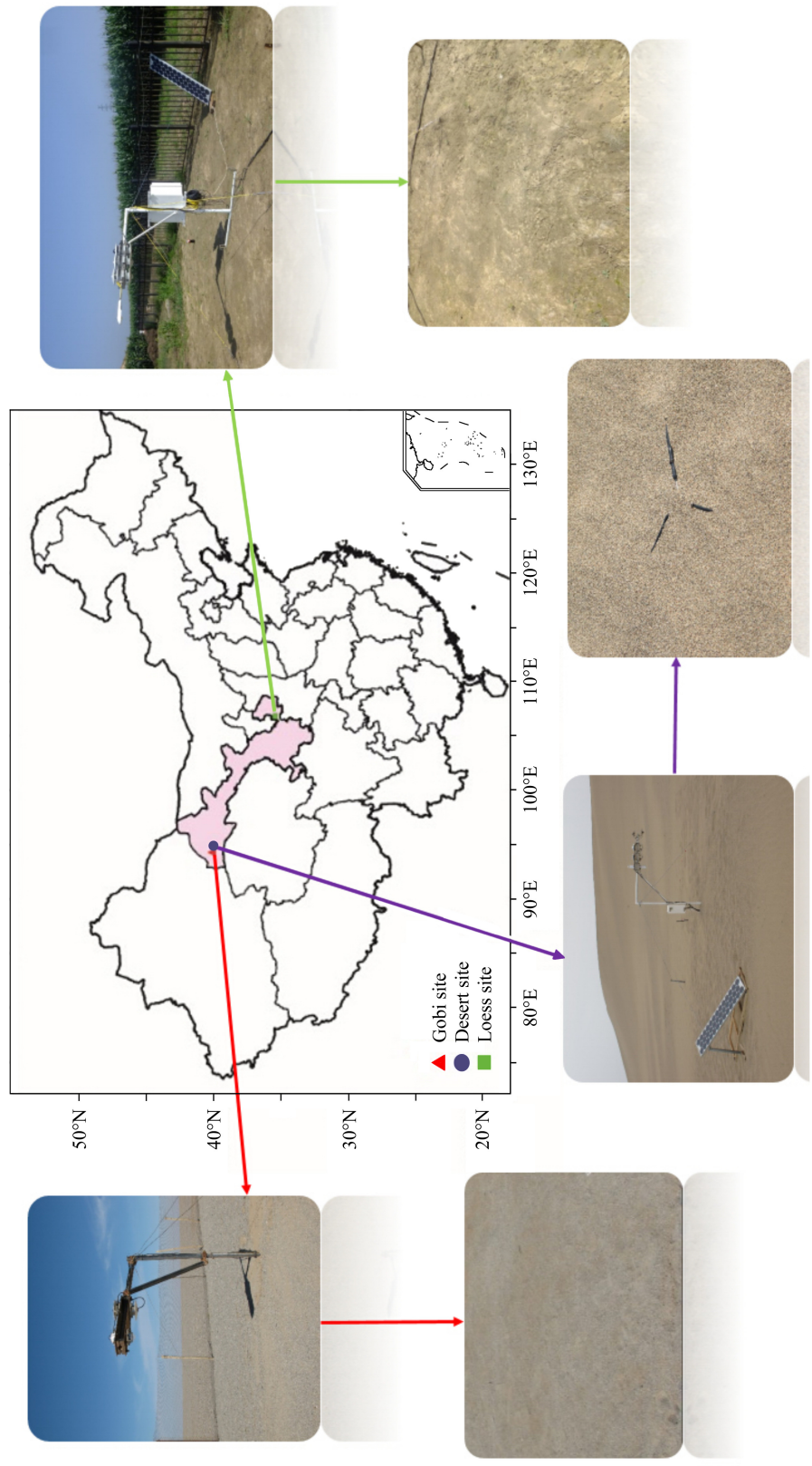


图 1 2013 年中国西北地区野外加强观测期 (IOP) 观测试验站点及试验仪器空间分布图
Fig. 1 Spatial distribution of sites and the measurement instruments used in the field observational experiment in northwestern China during the IOP (Intensive Observational Periods) in 2013

们只考虑波长对表面发射率的影响。

根据公式 (3) 和 (4), 自然物的辐射出射度可为

$$R(T) = \varepsilon_{\text{BRD}} B_b(T) = \varepsilon_{\text{BRD}} \sigma T^4, \quad (5)$$

其中, ε_{BRD} 为在物体在整个热红外波段上的宽波段发射率。因此可得:

$$\varepsilon_{\text{BRD}} = \frac{R(T)}{B_b(T)}. \quad (6)$$

依据经典热辐射传输理论, 地表向上长波辐射与地表温度、地表宽波段发射率和天空向下长波辐射有关, 由此可得

$$L_{\uparrow} = \sigma T_{\text{rad}}^4 = (1 - \varepsilon_g) L_{\downarrow} + \varepsilon_g \sigma T_g^4, \quad (7)$$

其中, $L_{\uparrow}$ 为向上长波辐射 (1.5 m 处观测), $L_{\downarrow}$ 为天空向下长波辐射 (1.5 m 处观测), ε_g 为地表宽波段发射率, T_{rad} 为辐射/亮度温度, T_g 为地表温度。根据基尔霍夫定律 (Kirchhoff's law), 黑体表面吸收率等于发射率。此处, 我们近似假设公式 (7) 中吸收率等于发射率。公式 (7) 中右边第一项为地表反射的天空向下的长波辐射, 第二项为地表发射的长波辐射。

从公式 (7) 中, 我们可得到地表宽波段发射率:

$$\varepsilon_g = \frac{L_{\uparrow} - L_{\downarrow}}{\sigma T_g^4 - L_{\downarrow}}, \quad (8)$$

其中, ε_g 既是式 (6) 中的 ε_{BRD} 。我们利用公式 (8) 计算三站点典型下垫面的宽波段发射率。

3 结果分析

3.1 地表长波辐射和地表温度变化特征

图 2 为 2013 年加强观测期戈壁、沙漠和黄土三个观测站点地表长波辐射变化特征图, 三站点地表向下长波辐射 (Downwards Longwave Radiation, 简称 DLR) 和地表向上长波辐射 (Upwards Longwave Radiation, 简称 ULR) 变化波动较小, 数值上 ULR 大于 DLR。观测期内, 戈壁站地表 DLR 变化范围为 209.3~455.3 W m^{-2} , 均值 357.4 W m^{-2} , ULR 变化范围为 319.8~722.2 W m^{-2} , 均值 478.5 W m^{-2} ; 沙漠站地表 DLR 变化范围为 240.2~455.9 W m^{-2} , 均值 352.1 W m^{-2} , ULR 变化范围为 314.5~722.3 W m^{-2} , 均值 472.5 W m^{-2} ; 黄土站地表 DLR 变化范围为 316.1~542.6 W m^{-2} , 均值 375.1 W m^{-2} , ULR 变化范围为 365.7~542.6 W m^{-2} , 均值 429.9 W m^{-2} 。干旱区的戈壁站和沙漠站, 地理位置相距

较近, 周围环境大体相同, 观测期内天气状况基本一致, 因此两站点 DLR 和 ULR 大体一致, 相差不大。相比戈壁和沙漠站, 半干旱区黄土站所处地理纬度较低, 架设在农田之中, 且观测期内降雨过程较多, 温度较低, 故地表长波辐射量相对较小, 尤其是 ULR, 这可能与该站点降水较多导致地表温度较低有关。图 3 给出了三站点地表温度 (Land Surface Temperature, 简称 LST) 变化特征图, 观测期内, 三站点 LST 变化规则, 无较大波动, 戈壁站最低 LST 为 275.2 K, 最高 LST 为 338.5 K, 平均 LST 为 303.5 K; 沙漠站最低 LST 为 273.8 K, 最高 LST 为 339.4 K, 平均 LST 为 303.0 K; 黄土站最低 LST 为 285.4 K, 最高 LST 为 314.4 K, 平均 LST 为 296.2 K。黄土站平均 LST 比其他两站 LST 低大约 8 K, 这可能也是导致其 ULR 相对较小的原因。

3.2 地表发射率变化特征

根据卫星遥感观测和实验室测量结果, 在 8~12 μm 范围内裸土和岩石的光谱发射率变化区间为 0.7~1.0, Ogawa et al. (2002) 研究指出裸土地表宽波段发射率变化非常大。先前根据 MODIS 卫星遥感观测数据研究也表明, 在土地贫瘠和沙漠地区 3~14 μm 波段范围内土壤和沙子光谱发射率变化区间为 0.78~0.98 (Wang et al., 2005)。根据以上研究成果, 结合 2013 年野外观测站点实际情况, 保留更多有效试验数据, 本文中三站点地表宽波段发射率变化范围控制在 0.800~0.999 之间。

为便于描述, 后文中将戈壁宽波段发射率 (Gobi Broadband Emissivity)、沙漠宽波段发射率 (Desert Broadband Emissivity) 和黄土宽波段发射率 (Loess Broadband Emissivity) 分别简称为 GbBE、DeBE 和 LoBE。图 4 为戈壁、沙漠和黄土下垫面地表宽波段发射率概率分布特征图, 三站点概率分布图 (图 4) 清晰地说明了的地表宽波段发射率的数值分布情况, 三站点宽波段发射率变化范围较为宽泛, 在控制范围内均有分布。戈壁站 GbBE 值集中分布在 0.926 左右, 沙漠站 DeBE 集中分布在 0.916 左右, 而黄土站 LoBE 则主要分布在 0.881 左右, 基本围绕均值分布, 但均表现为向小值一侧偏的分布特征, 尤其是黄土站表现更为明显。图 5 分别给出了戈壁、沙漠和黄土下垫面地表宽波段发射率日平均变化特征图。如图 5 所示, 观测期内三站点 GbBE、DeBE 和 LoBE 日均值也具有明显的变化特

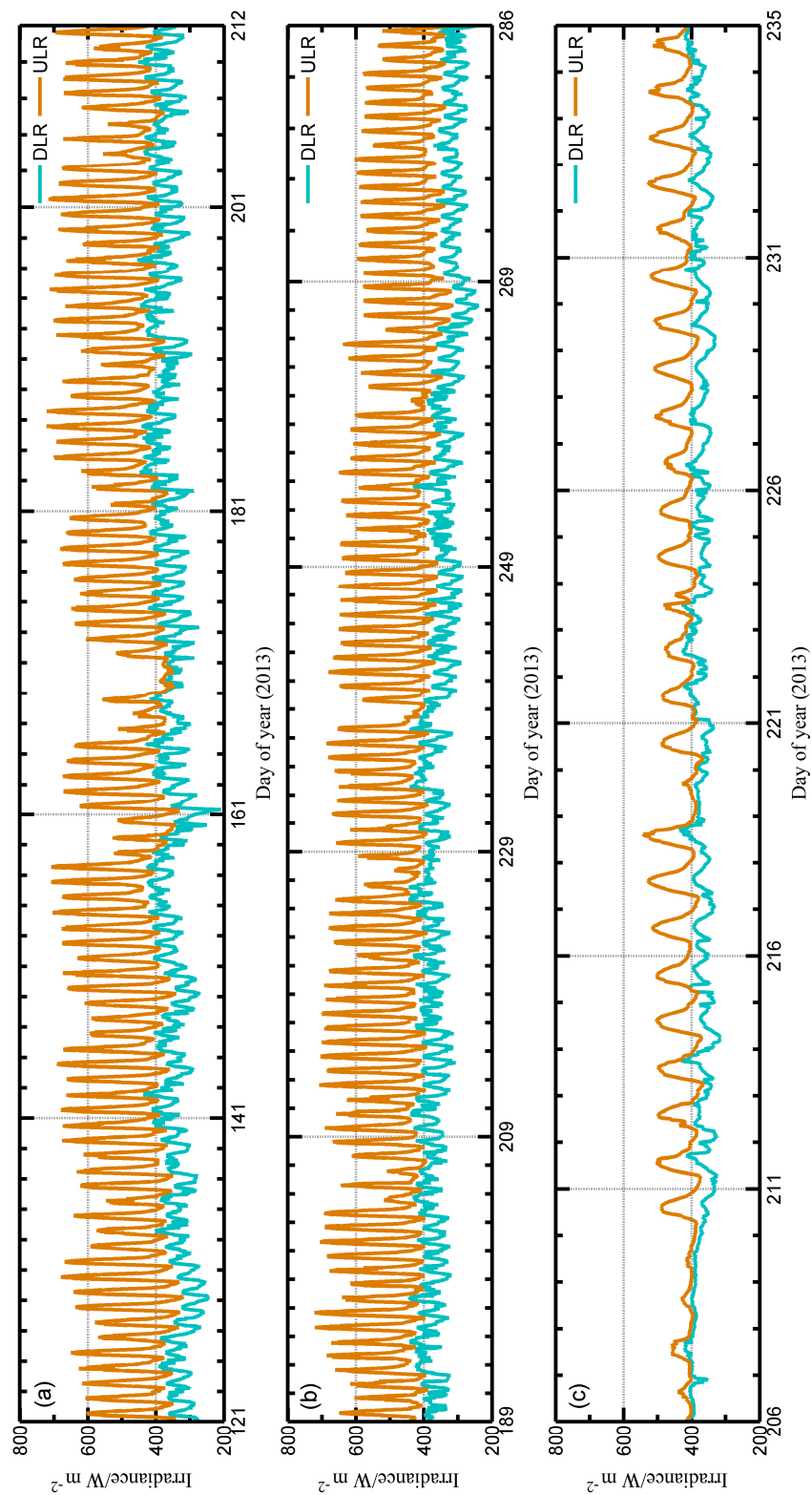


图 2 野外加强观测期 (a) 戈壁站、(b) 沙漠站和 (c) 黄土站三站点地表向下长波辐射 (DLR)、向上长波辐射 (ULR) 变化特征。单位: W m^{-2}

Fig. 2 Variation characteristics of DLR (Downward Longwave Radiation) and ULR (Upward Longwave Radiation) irradiance during the IOP at (a) the Gobi site, (b) the desert site, and (c) the loess site. Units: W m^{-2}

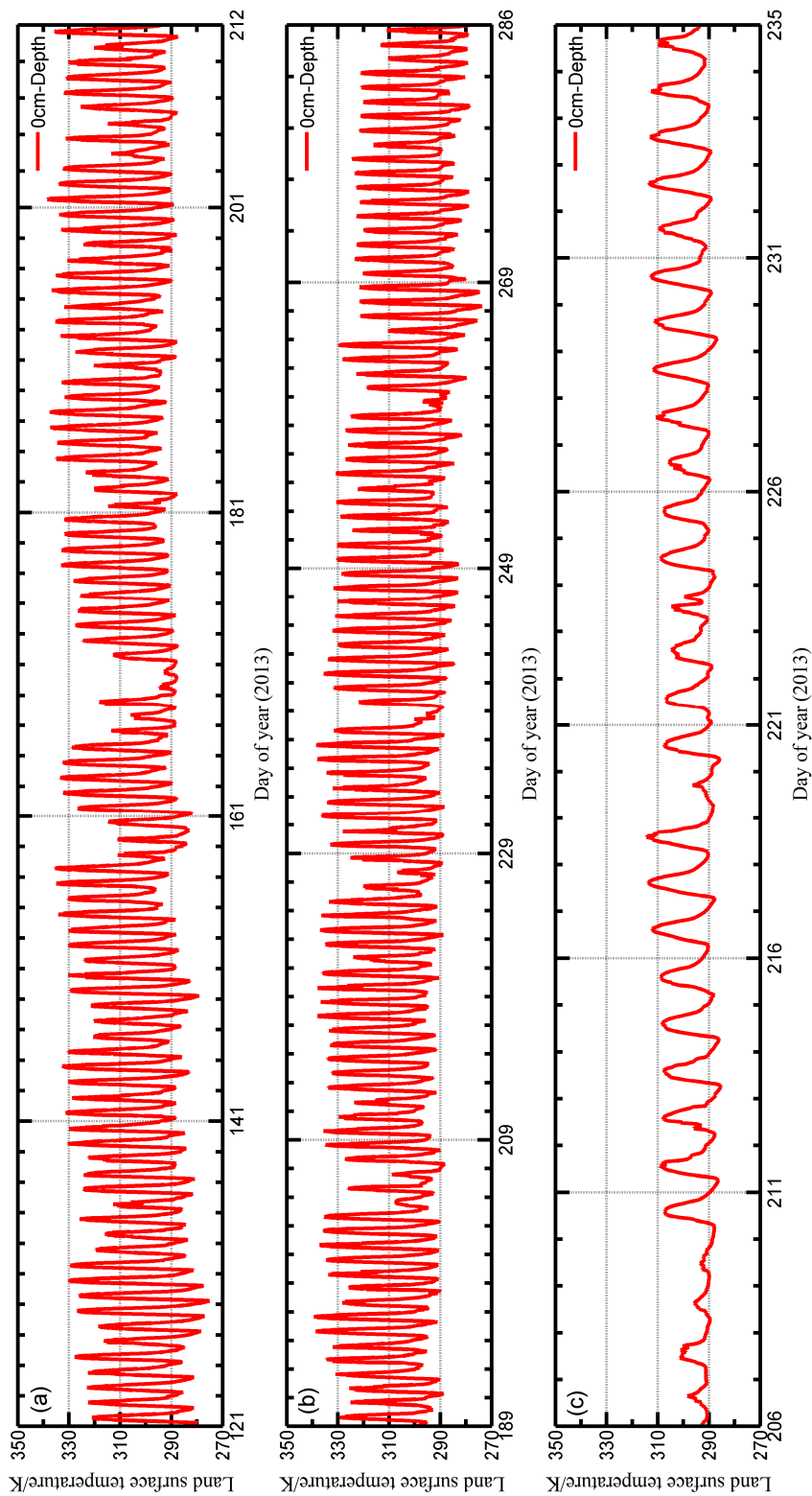


图 3 野外加强观测期 (a) 戈壁站、(b) 沙漠站和 (c) 黄土站三站点地表温度 (LST; 单位: K) 变化特征
Fig. 3 Variation characteristics of land surface temperature (LST, units: K) during the IOP at (a) the Gobi site, (b) the desert site, and (c) the loess site

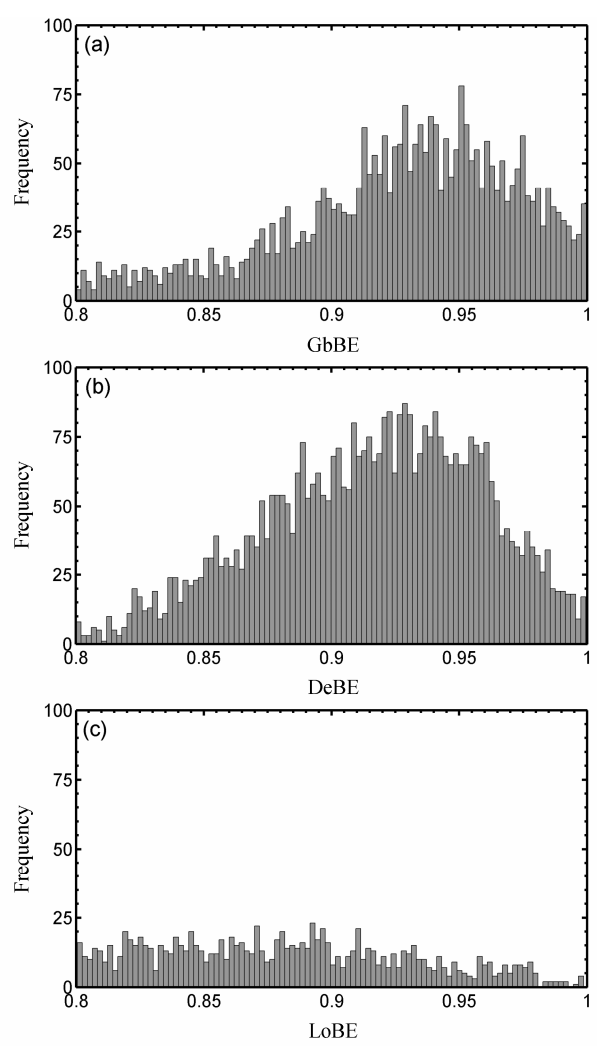


图4 野外加强观测期 (a) 戈壁站、(b) 沙漠站和 (c) 黄土站地表宽波段发射率 (分别简称 GbBE、DeBE 和 LoBE) 概率分布特征
Fig. 4 Probability distribution of land surface broadband emissivity during the IOP at (a) the Gobi site (GbBE), (b) the Desert site (DeBE), and (c) the Loess site (LoBE)

征, 其中 GbBE 最大值为 0.999, 最小值为 0.800, 平均值为 0.926; DeBE 最大值为 0.999, 最小值为 0.800, 平均值为 0.916; LoBE 最大值为 0.998, 最小值为 0.800, 平均值为 0.881。LoBE 比 GbBE 和 DeBE 略小, 根据观测期实时天气状况监测日志记录显示, 黄土站在观测期内降雨过程较为频繁, 降雨引起表层土壤湿度增大可能是导致 LoBE 较小的一个重要的原因, 有待日后更多的试验去验证, 并定性和定量地去解释其影响机理。由此可知, 地表发射率日平均值并非为一定值, 且实测值小于陆面模式 CLM 指定裸土发射率值 0.96 (Oleson et al., 2010, 2013)。观测期内有关该三站点宽波段发射率

的更多统计信息详见表 1 和表 2。

表 1 戈壁、沙漠和黄土观测站点地表宽波段发射率统计特征分析表

Table 1 Statistics characteristics of the values of land surface broadband emissivity at Gobi, desert, and loess field observational site, respectively

	地表宽波段发射率统计特征				
	最大值	最小值	平均值	方差	标准差
戈壁站	0.999	0.800	0.926	0.0020	0.0452
沙漠站	0.999	0.800	0.916	0.0018	0.0419
黄土站	0.998	0.800	0.881	0.0024	0.0490

表 2 戈壁、沙漠和黄土观测站点地表宽波段发射率日均值统计特征分析表

Table 2 Statistics characteristics of the daily average values of land surface broadband emissivity at Gobi, desert, and loess field observational site, respectively

	地表宽波段发射率日平均统计特征				
	最大值	最小值	平均值	方差	标准差
戈壁站	0.962	0.849	0.926	0.00082	0.0287
沙漠站	0.962	0.860	0.915	0.00033	0.0184
黄土站	0.929	0.814	0.878	0.00054	0.0233

3.3 典型晴天地表发射率变化特征

图 6 为三站点典型晴天条件下地表宽波段发射率日变化特征分析图。三站点典型晴天具体日期为戈壁站: 2013 年 7 月 15 日; 沙漠站: 2013 年 7 月 19 日; 黄土站: 2013 年 8 月 4 日。如图 6a、c 和 e 所示, 三站点一天中 GbBE、DeBE 和 LoBE 具有明显的日变化特征, 一天之中发射率的数值也非一成不变, 概率分布图 (图 6b、d、和 f) 也说明了一天中 GbBE、DeBE 和 LoBE 的数值分布情况, 更多统计信息详见表 3。

表 3 典型晴天下戈壁、沙漠和黄土观测站点地表宽波段发射率统计特征分析表

Table 3 Statistics characteristics of the values of land surface broadband emissivity in a typical clear day at Gobi, desert, and loess field observational site, respectively

	典型晴天地表宽波段发射率日变化统计特征				
	最大值	最小值	平均值	方差	标准差
戈壁站 (2013 年 7 月 15 日)	0.997	0.845	0.930	0.0013	0.0361
沙漠站 (2013 年 7 月 19 日)	0.982	0.884	0.928	0.0005	0.0230
黄土站 (2013 年 8 月 4 日)	0.957	0.821	0.897	0.0008	0.0288

综上所述, 由图 4、图 5 和图 6 可知, 三个观测站点 GbBE、DeBE 和 LoBE 具有明显变化特征, 且不同下垫面各具特点, 这除了下垫面覆被类型之间的差异之外, 还可能与当时站点周围环境和气象

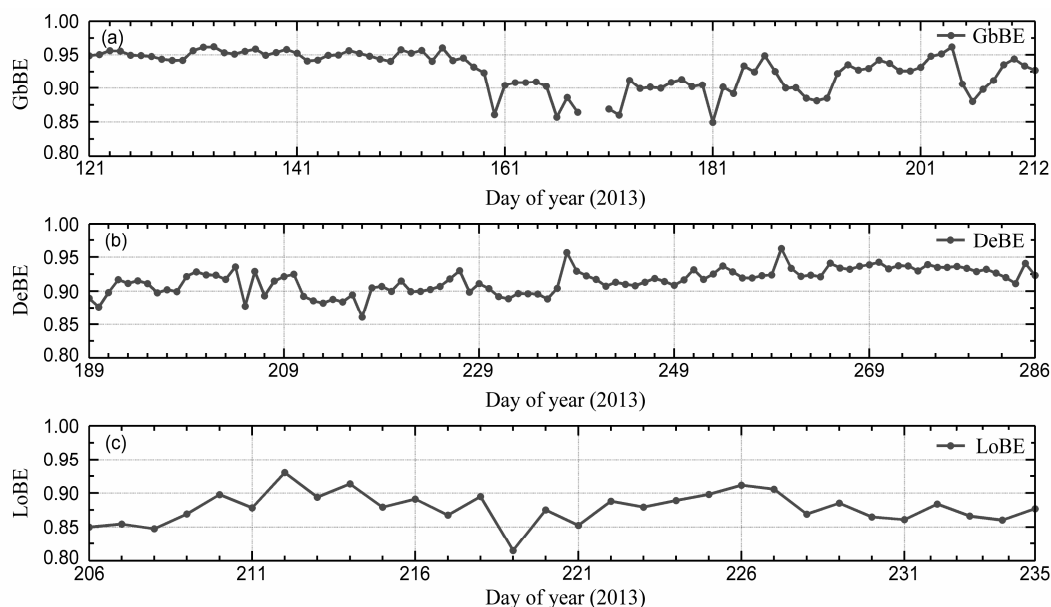


图 5 野外加强观测期 (a) 戈壁站、(b) 沙漠站和 (c) 黄土站地表宽波段发射率日平均变化特征

Fig. 5 Variation characteristics analysis of daily average land surface broadband emissivity during the IOP at (a) the Gobi site, (b) the Desert site, and (c) the Loess site

条件等因素有关,进而引起的地表发射率日变化。我国西北地区戈壁、沙漠和黄土等典型下垫面覆被类型较为稳定,近百年尺度内变化很小,因此下垫面变化因素可基本忽略不计。月、日时间尺度上的发射率变化很可能是受到了当时周围环境和天气状况影响所致,但因野外试验条件所限,本次观测试验所收集的资料只能分析地表宽波段发射率的变化特征及数值大小,暂且不能准确给出具体影响因子及其影响机制。不过,我们认为表层土壤湿度可能是一个非常重要的影响因子,待日后试验中加以补充观测再分析土壤湿度与发射率之间的关系。

4 讨论

本文旨在采用野外测量方式,直接利用试验观测得到的地表长波辐射和地表温度资料,依据斯蒂芬—玻尔兹曼定律计算地表宽波段发射率。理论基础和研究方案是正确可行的,再有观测仪器准确的前提下,试验方式和试验结果也应是可信的。然而,地表温度是一个很模糊的概念,到底是测什么,怎么测,目前仍无统一认识,也没有一个准确的概念,有较大争议。目前,国内外测量地表温度的方法主要有四种,分别为玻璃液体温度表、铂电阻地温传感器、红外温度传感器和红外辐射计,四种方法各有优缺点。玻璃液体温度表是最初使用的,后来被铂电阻温度传感器代替,红外温度传感器和红外辐

射计是近几年才发展起来的,但是它们都会受到外界因素影响,比如太阳辐射、天气状况、周围环境和观测角度等因素的影响,随后验证哪种测量方式更加准确的工作大量涌现(黄妙芬等,2005;程昌玉等,2010;储呈敏等,2014)。

根据斯蒂芬—玻尔兹曼定律计算长波辐射,地表温度此处可理解为土壤 0 cm 温度,或者说就是土壤 0 cm 温度,亦或是土壤 0 cm 和表层空气的平均值,即地表薄薄一层(土壤)的温度。一个物体向外发射能量,是由其温度决定,这个温度就是热力学温度或动力学温度。当物体处于热力平衡或准热力平衡状态时,物体内外温度一致,则表面温度即可用于计算其辐射能量。若将地球视为一个质点,地球表面向外发射的长波辐射理应由其表面温度决定。针对陆地表面,陆地表面向外发射的能力就应该由陆地表层温度决定(土壤、城市、植被等),那用直接接触式测量应该是最准确的。

本次试验中我们采用的均是国际知名仪器公司生产的仪器(美国 Eppley Laboratory 公司和荷兰 Kipp & Zonen 公司),它们应均已得到 WMO(World Meteorological Organisation)予以授权并承认,排除仪器运行故障及人为操作不当等可不控制因素的影响,试验仪器的测量结果应是准确无误的。鉴于目前科学技术和技术制造水平的限制,试验仪器并非十分完美,仪器设计和工作时或多或少仍会受

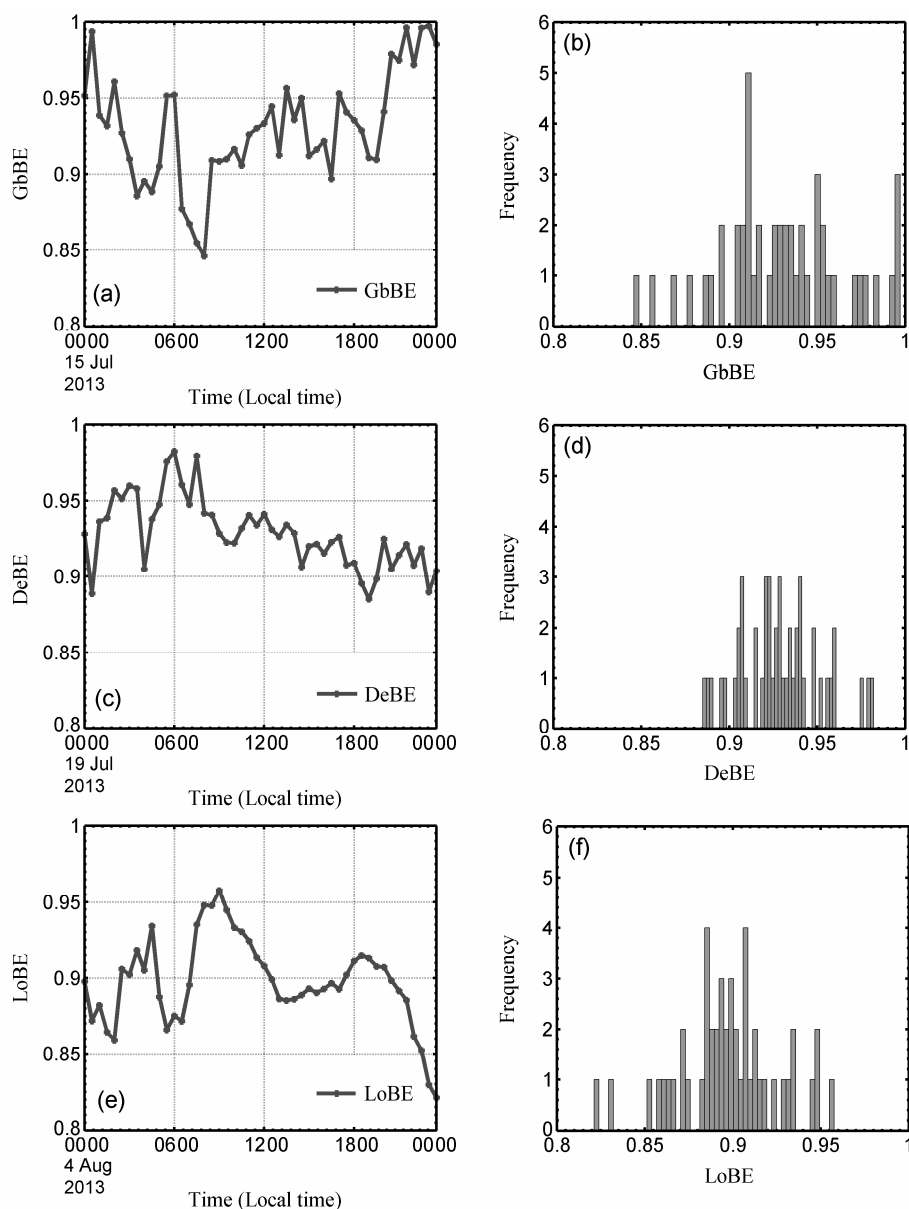


图6 野外加强观测期典型晴天 (a、b) 戈壁站、(c、d) 沙漠站和 (e、f) 黄土站地表宽波段发射率日变化特征分析

Fig. 6 Variation characteristics analysis of land surface broadband emissivity in a typical clear day during the IOP at (a, b) the Gobi site, (c, d) the Desert site, and (e, f) the Loess site

外界不可控的因素影响,科学家和工程师一直在致力于使观测仪器最大限度的接近物体的真实情况。作者也认为能做到目前这样已经非常难能可贵了,同时我们也非常期待科技和制造水平的提升,使测量更加真实可靠。

5 结论

本文利用 2013 年在我国西北地区三类典型裸土下垫面(戈壁、沙漠和黄土塬)观测站进行野外

加强观测试验时收集的地表长波辐射和地表温度资料,分析研究了上述地区地表长波辐射和地表宽波段发射率的变化特征,结果如下:

(1) 戈壁、沙漠和黄土三个观测站点地表长波辐射和地表温度变化波动较小,DLR 量值分别为 $209.3 \sim 455.3 \text{ W m}^{-2}$ 、 $240.2 \sim 455.9 \text{ W m}^{-2}$ 和 $316.1 \sim 542.6 \text{ W m}^{-2}$; ULR 分别为 $319.8 \sim 722.2 \text{ W m}^{-2}$ 、 $314.5 \sim 722.3 \text{ W m}^{-2}$ 和 $365.7 \sim 542.6 \text{ W m}^{-2}$; LST 分别为 $338.5 \sim 275.2 \text{ K}$ 、 $339.4 \sim 273.8 \text{ K}$ 和 $314.4 \sim$

285.4 K。因受地理位置, 周围环境及观测期内天气过程等因素影响, 黄土站 ULR 和 LST 明显比戈壁和沙漠站偏低。

(2) 戈壁、沙漠和黄土下垫面地表宽波段发射率具有明显的变化特征, 尤其是日变化特征。观测期内 GbBE、DeBE 和 LoBE 平均值分别约为 0.926 ± 0.0452 、 0.916 ± 0.0419 和 0.881 ± 0.049 。发射率的数值大小和变化特征与陆面模式中所指定的参数化情况不符。

(3) 地表发射率并非一成不变, 它会受到站点周围环境和当时气象条件等因素的影响, 后续野外观测试验中还需加强相关要素的观测与分析, 以便找到影响发射率变化的主要因素。土壤湿度很可能是一个非常重要的影响因子, 但影响机理目前尚不清楚, 将来还需更多的试验去发现与验证。

致谢 感谢审稿专家及《大气科学》编辑部对本文所提的宝贵意见。感谢中国科学院寒区旱区环境与工程研究所寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室旭宏高级工程师对本文中所用野外台站观测试验仪器的安装与维护及试验数据的采集与整理等工作中给予的帮助。本文的完成与大家的鼎力相助密不可分, 在此表示衷心的感谢。

参考文献 (References)

- Abramowitz G, Pouyanné L, Ajami H. 2012. On the information content of surface meteorology for downward atmospheric long-wave radiation synthesis [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39 (4): L04808, doi:10.1029/2011GL050726.
- Bradley A V, Thornes J E, Chapman L, et al. 2002. Modelling spatial and temporal road thermal climatology in rural and urban areas using a GIS [J]. *Climate Res.*, 22 (1): 41–55, doi:10.3354/cr022041.
- Edwards J M. 2009. Radiative processes in the stable boundary layer. Part I. Radiative aspects [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 131 (2): 105–126, doi:10.1007/s10546-009-9364-8.
- French A N, Schmugge T J, Ritchie J, et al. 2008. Detecting land cover change at the Jornada Experimental Range, New Mexico with ASTER emissivities [J]. *Remote Sens. Environ.*, 112 (4): 1730–1748, doi:10.1016/j.rse.2007.08.020.
- French A N, Inamdar A. 2010. Land cover characterization for hydrological modelling using thermal infrared emissivities [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 31 (14): 3867–3883, doi:10.1080/01431161.2010.483491.
- Hewison T J. 2001. Airborne measurements of forest and agricultural land surface emissivity at millimeter wavelengths [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39 (2): 393–400, doi:10.1109/36.905247.
- Huang J P, Guan X, Ji F. 2012. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 12 (12): 5391–5398, doi:10.5194/acp-12-5391-2012.
- Humes K S, Kustas W P, Moran M S, et al. 1994. Variability of emissivity and surface temperature over a sparsely vegetated surface [J]. *Water Resour. Res.*, 30 (5): 1299–1310, doi:10.1029/93WR03065.
- Jiang G M, Li Z L, Nerry F. 2006. Land surface emissivity retrieval from combined mid-infrared and thermal infrared data of MSG-SEVIRI [J]. *Remote Sens. Environ.*, 105 (4): 326–340, doi:10.1016/j.rse.2006.07.015.
- Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A, Gillespie A, et al. 2006. Improved land surface emissivities over agricultural areas using ASTER NDVI [J]. *Remote Sens. Environ.*, 103 (4): 474–487, doi:10.1016/j.rse.2006.04.012.
- Jin M L, Liang S L. 2006. An improved land surface emissivity parameter for land surface models using global remote sensing observations [J]. *J. Climate*, 19 (12): 2867–2881, doi:10.1175/JCLI3720.1.
- Jupp D L B. 1998. Directional radiance and emissivity measurement models for remote sensing of the surface energy balance [J]. *Environ. Modell. Software*, 13 (3–4): 341–351, doi:10.1016/S1364-8152(98)00039-5.
- Labeled J, Stoll M P. 1991. Angular variation of land surface spectral emissivity in the thermal infrared: Laboratory investigations on bare soils [J]. *Remote Sens. Environ.*, 12 (11): 2299–2310, doi:10.1080/01431169108955259.
- Lagouarde J P, Kerr Y H, Brunet Y. 1995. An experimental study of angular effects on surface temperature for various plant canopies and bare soils [J]. *Agric. Forest Meteorol.*, 77 (3–4): 167–190, doi:10.1016/0168-1923(95)02260-5.
- Li Z L, Wu H, Wang N, et al. 2013. Land surface emissivity retrieval from satellite data [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 34(9–10): 3084–3127, doi:10.1080/01431161.2012.716540.
- Liang S L, Zhao X, Liu SH, et al. 2013. A long-term Global Land Surface Satellite (GLASS) data-set for environmental studies [J]. *Int. J. Digital Earth*, 6 (S1): 5–33, doi:10.1080/17538947.2013.805262.
- McAtee B K, Prata A J, Lynch M J. 2003. The angular behavior of emitted thermal infrared radiation (8–12 μm) at a semiarid site [J]. *J. Appl. Meteorol.*, 42 (8): 1060–1071, doi:10.1175/1520-0450(2003)042<1060: TABOET>2.0.CO;2.
- Melesse A M, Frank A, Nangia V, et al. 2008. Analysis of energy fluxes and land surface parameters in a grassland ecosystem: A remote sensing perspective [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 29 (11): 3325–3341, doi:10.1080/01431160701442153.
- Nerry F, Labeled J, Stoll M P. 1990. Spectral properties of land surfaces in the thermal infrared: 1. Laboratory measurements of absolute spectral emissivity signatures [J]. *J. Geophys. Res.*, 95 (B5): 7027–7044, doi:10.1029/JB095iB05p07027.
- Ogawa K, Schmugge T, Jacob F, et al. 2002. Estimation of broadband land surface emissivity from multi-spectral thermal infrared remote sensing [J]. *Agronomie*, 22 (6): 695–696, doi:10.1051/agro:2002055.
- Ogawa K, Schmugge T, Jacob F, et al. 2003. Estimation of land surface window (8–12 μm) emissivity from multi-spectral thermal infrared remote sensing—A case study in a part of Sahara desert [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (2): 1067, doi:10.1029/2002GL016354.2003.
- Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G B, et al. 2010. Technical description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM) [R]. NACR/TN-503+STR/NACR Tech. Note, 36–60.
- Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G B, et al. 2013. Technical description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM) [R]. NACR/TN-487+STR/NACR Tech. Note, 46–70.
- Peres L F, DaCamara C C. 2004. Land surface temperature and emissivity

- estimation based on the two-temperature method: Sensitivity analysis using simulated MSG/SEVIRI data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 91 (3–4): 377–389, doi:10.1016/j.rse.2004.03.011.
- Pinker R T, Sun D L, Hung M P, et al. 2009. Evaluation of satellite estimates of land surface temperature from goes over the United States [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 2009, 48 (1): 167–180, doi:10.1175/2008JAMC1781.1
- Prata A J. 1993. Land surface temperatures derived from the advanced very high resolution radiometer and the along-track scanning radiometer: 1. Theory [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 98 (D9): 16689–16702, doi:10.1029/93JD01206.
- Rotenberg E, Yakir D. 2010. Contribution of semi-arid forests to the climate system [J]. *Science*, 327 (5964): 451–454, doi:10.1126/science.1179998.
- Snyder W, Wan Z M, Zhang Y L, et al. 1997. Thermal infrared (3–14 μm) bidirectional reflectance measurements of sands and soils [J]. *Remote Sens. Environ.*, 60 (1): 101–109, doi:10.1016/S0034-4257(96)00166-6.
- Snyder W C, Wan Z M. 1998. BRDF models to predict spectral reflectance and emissivity in the thermal infrared [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36 (1): 214–225, doi:10.1109/36.655331.
- Sobrino J A, Cuenca J. 1999. Angular variation of thermal infrared radiation for some natural surfaces from experimental measurements [J]. *Appl. Opt.*, 38 (18): 3931–3936, doi:10.1364/AO.38.003931.
- Stathopoulou M, Cartalis C, Petrakis M. 2007. Integrating corine land cover data and landsat TM for surface emissivity definition: Application to the urban area of Athens, Greece [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 28 (15): 3291–3304, doi:10.1080/01431160600993421.
- Van de Griend A A, Owe M, Groen M, et al. 1991. Measurement and spatial variation of thermal infrared surface emissivity in a savanna environment [J]. *Water Resour. Res.*, 27 (3): 371–379, doi:10.1029/90WR02616.
- Van de Griend A A, Owe M. 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 14 (6): 1119–1131, doi:10.1080/01431169308904400.
- van den Broeke M, Smeets P, Ettema J, et al. 2008. Surface radiation balance in the ablation zone of the west Greenland ice sheet [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 113 (D13): D13105, doi:10.1029/2007JD009283.
- Wan Z M, Zhang Y L, Zhang Q C, et al. 2002. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 83 (1–2): 163–180, doi:10.1016/S0034-4257(02)00093-7.
- Wang K C, Wan Z M, Wang P C, et al. 2005. Estimation of surface long wave radiation and broadband emissivity using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) land surface temperature/emissivity products [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 110 (D11): D11109, doi:10.1029/2004JD005566.
- Wood E F, Lettenmaier D P, Liang X, et al. 1998. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS) phase 2 (c) red-Arkansas river basin experiment: 1. Experiment description and summary intercomparisons [J]. *Global Planet. Change*, 19 (1–4): 115–135, doi:10.1016/S0921-8181(98)00044-7.
- Yang F L, Mitchell K, Hou Y T, et al. 2008. Dependence of land surface albedo on solar zenith angle: Observations and model parameterization [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47 (11): 2963–2982, doi:10.1175/2008JAMC1843.1
- Zhang Q, Cao X Y, Wei G A, et al. 2002a. Observation and study of land surface parameters over Gobi in typical arid region [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 19 (1): 121–135, doi:10.1007/s00376-002-0039-3.
- Zhang Q, Wei G A, Huang R H, et al. 2002b. Bulk transfer coefficients of the atmospheric momentum and sensible heat over desert and Gobi in arid climate region of Northwest China [J]. *Sci. China Ser. D*, 45 (5): 468–480, doi:10.1360/02yd9049.
- Zhang Q, Huang R H. 2004. Water vapor exchange between soil and atmosphere over a Gobi surface near an oasis in summer [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43 (12): 1917–1928, doi:10.1175/JAM2171.1.
- Zhang T T, Wen J, Wei Z G, et al. 2014. Land-atmospheric water and energy cycle of winter wheat, Loess Plateau, China [J]. *Int. J. Climatol.*, 34 (10): 3044–3053, doi:10.1002/joc.3891.
- Zheng Z Y, Dong W J, Li Z C, et al. 2015. Observational study of surface spectral radiation and corresponding albedo over Gobi, desert, and bare loess surfaces in northwestern China [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120 (3): 883–896, doi:10.1002/2014JD022516.
- Zhou D G, Huang R H. 2011. Characterization of turbulent flux transfer over a Gobi surface with quality-controlled observations [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 54 (5): 753–763, doi:10.1007/s11430-010-4055-3.
- 程昌玉, 梁海河, 王柏林. 2010. 红外与铂电阻地表温度测值分析对比 [J]. *气象科技*, 38 (4): 450–455. Cheng Changyu, Liang Haihe, Wang Bolin. 2010. Comparison analysis of ground surface temperature records from Pt and infrared sensors in different weather conditions [J]. *Meteor. Sci. Technol.* (in Chinese), 38 (4): 450–455, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2010.04.010.
- 储呈敏, 马尚昌, 张素娟, 等. 2014. 地表温度测量方法研究综述 [J]. *电子设计工程*, 22 (6): 187–192. Chu Chengmin, Ma Shangchang, Zhang Sujuan, et al. 2014. Summary of the study on land surface temperature measurement [J]. *Electronic Design Engineering* (in Chinese), 22 (6): 187–192, doi:10.3969/j.issn.1674-6236.2014.06.057.
- 何文英, 陈洪滨. 2009. 中国江淮、黄淮地区陆面微波比辐射率的变化特征 [J]. *遥感技术与应用*, 24 (3): 297–303. He Wenying, Chen Hongbin. 2009. The characteristics of microwave emissivity over land of Chinese Jianghuai–Huanghuai region [J]. *Remote Sens. Technol. Appl.* (in Chinese), 24 (3): 297–303.
- 何文英, 陈洪滨, 宣越健, 等. 2010. 几种地表微波比辐射率变化特征的地面观测 [J]. *地球物理学进展*, 25 (6): 1983–1993. He Wenying, Chen Hongbin, Xuan Yuejian, et al. 2010. Field Measurements of the surface microwave emissivity for different surface types [J]. *Progress in Geophysical* (in Chinese), 25 (6): 1983–1993, doi:10.3969/j.issn.10042903.2010.06.013.
- 何文英, 陈洪滨, 孙强, 等. 2011. 青藏高原地表微波比辐射率的反演与分析 [J]. *遥感技术与应用*, 26 (6): 735–741. He Wenying, Chen Hongbin, Sun Qiang, et al. 2011. The characteristics of microwave surface emissivity over Tibetan Plateau [J]. *Remote Sens. Technol. Appl.* (in Chinese), 26 (6): 735–741.
- 胡菊吻, 唐世浩, 董立新, 等. 2013. 我国西北沙源区地表热红外发射率特征分析 [J]. *红外与毫米学报*, 32 (6): 550–554. Hu Juyang, Tang Shihao, Dong Lixin, et al. 2013. Analysis of thermal infrared emissivity for sand dust source regions in Northwest China [J]. *J. Infrared Millim.*

- Waves (in Chinese), 32 (6): 550–554, doi:10.3724/SP.J.1010.2013.00550.
- 黄妙芬, 刘绍民, 刘素红, 等. 2005. 地表温度和地表辐射温度差值分析 [J]. 地球科学进展, 20 (10): 1075–1082. Huang Miaofen, Liu Shaomin, Liu Suhong, et al. 2005. A study of the difference between true surface temperature and radiometric surface temperature [J]. Adv. Earth Sci. (in Chinese), 20 (10): 1075–1082, doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2005.10.005.
- 黄荣辉, 周德刚, 陈文, 等. 2013. 关于中国西北干旱区陆—气相互作用及其对气候影响研究的最近进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 189–210. Huang Ronghui, Zhou Degang, Chen Wen, et al. 2013. Recent progress in studies of air–land interaction over the arid area of Northwest China and its impact on climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 189–210, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12303.
- 刘东琦, 王介民. 1999. 利用 ATSR/ERS-1 资料研究复杂下垫面比辐射率的变化 [J]. 大气科学, 23 (5): 613–622. Liu Dongqi, Wang Jiemin. 1999. Estimation of the angular variation of the land heterogeneous areas with the ATSR/ERS-1 data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (5): 613–622, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.05.12.
- 刘三超, 柳钦火, 高懋芳, 等. 2007. 波谱响应函数和波宽对地表温度反演的影响 [J]. 遥感信息, 2007(5): 3–6. Liu Sanchao, Liu Qinhuo, Gao Maofang, et al. 2007. A study on effects of spectral response function and band width on land surface temperature inversion [J]. Remote Sens. Inform. (in Chinese), 2007 (5): 3–6, doi:10.3969/j.issn.1000-3177.2007.05.001.
- 刘永强, 何清, 张宏升, 等. 2011. 塔克拉玛干沙漠腹地地气相互作用参数研究 [J]. 高原气象, 30 (5): 1294–1299. Liu Yongqiang, He Qing, Zhang Hongsheng, et al. 2011. Studies of land–atmosphere interaction parameters in Taklimakan Desert hinterland [J]. Plat. Meteor. (in Chinese), 30 (5): 1294–1299.
- 孙毅义, 李治平. 2001. 地面热红外发射率的天顶角变化效应 [J]. 气象学报, 59 (3): 373–376. Sun Yiyi, Li Zhiping. 2001. Dependence of infrared emissivity on view zenith angle for natural ground surfaces [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 59 (3): 373–376, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2001.03.013.
- 王超, 韦志刚, 李振朝. 2010. 敦煌戈壁气象塔站资料的质量控制 [J]. 干旱气象, 28 (2): 121–127. Wang Chao, Wei Zhigang, Li Zhenchao. 2010. A quality control routine for Dunhuang Gobi meteorology tower data [J]. J. Arid Meteor. (in Chinese), 28 (2): 121–127, doi:10.3969/j.issn.1006-7639.2010.02.002.
- 王胜, 张强, 卫国安. 2004. 敦煌干旱区一次降水过程陆面特征模拟 [J]. 干旱气象, 2004, 22 (4): 46–50. Wang Sheng, Zhang Qiang, Wei Guo'an. 2004. Simulation of land-surface characteristic under precipitation condition in Dunhuang arid region [J]. Arid Meteor. (in Chinese), 22 (4): 46–50, doi:10.3969/j.issn.1006-7639.2004.04.010.
- 王新生, 徐静, 柳菲, 等. 2012. 近 10 年我国地表比辐射率的时空变化 [J]. 地理学报, 67 (1): 93–100. Wang Xinsheng, Xu Jing, Liu Fei, et al. 2012. Spatial–temporal changes of land surface emissivity in China from 2001 to 2010 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 67 (1): 93–100.
- 王永前, 施建成, 刘志红, 等. 2013. 基于 AMSR-E 的微波波段地表发射率反演—以青藏高原为例 [J]. 中国科学: 地球科学, 43 (2): 271–279. Wang Yongqian, Shi Jiancheng, Liu Zhihong, et al. 2013. Retrieval algorithm for microwave surface emissivities based on multi-source, remote-sensing data: An assessment on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Sci. China Earth Sci., 56 (1): 93–101, doi:10.1007/s11430-012-4501-5.
- 韦志刚, 文军, 吕世华, 等. 2005. 黄土高原陆—气相互作用预试验及其晴天地表能量特征分析 [J]. 高原气象, 24 (4): 545–555. Wei Zhigang, Wen Jun, Lv Shihua, et al. 2005. A primary field experiment of land–atmosphere interaction over the Loess Plateau and its ground surface energy in clear day [J]. Plat. Meteor. (in Chinese), 24 (4): 545–555, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2005.04.013.
- 吴莹, 王振会. 2012. 被动微波遥感反演地表发射率研究进展 [J]. 国土资源遥感, 24 (4): 1–7. Wu Ying, Wang Zhenhui. 2012. Advances in the study of land surface emissivity retrieval from passive microwave remote sensing [J]. Remote Sens. Land Res. (in Chinese), 24 (4): 1–7, doi:10.6046/gtzyyg.2012.04.01.
- 翟俊, 刘纪远, 刘荣高, 等. 2013. 2000–2011 年中国地表比辐射率时空格局及影响因素分析 [J]. 资源科学, 35 (10): 2094–2103. Zhai Jun, Liu Jiyan, Liu Ronggao, et al. 2013. Spatial–temporal patterns and important factors driving and surface emissivity in China, 2000–2011 [J]. Res. Sci. (in Chinese), 35 (10): 2094–2103.
- 张仁华. 1999. 对于定量热红外遥感的一些思考 [J]. 国土资源遥感, 11 (1): 1–6. Zhang Renhua. 1999. Some thinking on quantitative thermal infrared remote sensing [J]. Remote Sens. Land Res. (in Chinese), 11 (1): 1–6, doi:10.3969/j.issn.1001-070X.1999.01.001.
- 张强, 黄荣辉, 王胜, 等. 2005. 西北干旱区陆—气相互作用试验 (NWC-ALIEX) 及其研究进展 [J]. 地球科学进展, 20 (4): 427–441. Zhang Qiang, Huang Ronghui, Wang Sheng, et al. 2005. NWC-ALIEX and its research advances [J]. Adv. Earth Sci. (in Chinese), 20 (4): 427–441, doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2005.04.008.
- 郑志远, 韦志刚, 李振朝, 等. 2014. 敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率参数化研究 [J]. 大气科学, 38 (2): 297–308. Zheng Zhiyuan, Wei Zhigang, Li Zhenchao, et al. 2014. Study of parameterization of surface albedo of bare soil over the Gobi desert in the Dunhuang region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 297–308, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13147.