

文章编号: 1001-8166(2005)09-1012-10

## 陇中黄土高原冬季地表辐射和能量平衡特征\*

杨启国, 杨兴国, 马鹏里, 王润元, 刘宏谊

(中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020)

**摘 要** 利用定西试验基地 2003 年 12 月至 2004 年 2 月获取的地气相互作用观测资料, 分析了陇中黄土高原冬季典型天气(晴天、阴天及雪天)和平均状况下的地表辐射能量平衡和土壤温度等微气象特征的日变化规律。结果表明, 在典型天气间微气象特征有较大差异, 但冬季的平均特征与晴天比较接近, 云和降雪的扰动影响有限。冬季地表能量平衡以感热输送为主, 土壤热通量为辅, 且普遍存在不平衡现象。冬季初的  $2/3$  时段净辐射及土壤热通量日总量基本为负值, 之后的  $1/3$  时段为正值。冬季地面加热场为热源。冬季土壤温度在地表及 20 cm 土壤层存在日变化, 30 cm 及以下土壤温度日变化很小。冬季地表日平均反射率基本在 0.20 ~ 0.25 之间变化, 平均值为 0.22。

**关 键 词** 陇中黄土高原 辐射平衡 能量平衡 感热

中图分类号: P442.4 文献标识码: A

陇中黄土高原地处甘肃省中东部、黄土高原西部, 面积 11.3 万 km<sup>2</sup> 以上, 占黄土高原总面积的 1/5, 海拔大多在 1 200 ~ 2 500 m 之间, 下垫面属黄土高原丘陵沟壑区, 植被低矮稀疏, 水土流失严重, 生态环境脆弱。位于青藏高原东侧, 身居欧亚大陆腹地的陇中黄土高原, 年均降水量在 200 ~ 600 mm 之间, 是我国干旱气候区和湿润气候区之间的重要天气气候过渡带, 也是气候变化的敏感带。陇中黄土高原具有的独特陆面特点和生态属性, 使得其地表反射特征和对太阳辐射的响应过程, 以及地气之间的能量循环过程有别于其它下垫面, 从而形成特殊的区域气候特征, 这必将对我国西北天气气候的形成和季风环流的活动, 乃至全球气候和大气环流的变化产生深刻影响。因此对这一地区近地层与大气间热力动力过程所表现的辐射能量交换特征的研究就显得尤为重要。此外, 陇中黄土高原处于我国的农牧交错带、资源潜力带和生态环境脆弱带, 如何实现自然资源的合理配置及恢复生态系统的良性循环已成为该区域社会经济可持续发展的首要问题<sup>[1, 2]</sup>。地表光热资源作为生态系统中最重要的自

然资源要素之一, 弄清其基本特征无疑可以为合理配置自然资源和生态环境的恢复建设提供科学依据。地表辐射收支和能量平衡正是地表光热资源特征的重要表现方面。

开展地表辐射收支和能量交换过程的研究也是陆面过程试验和地气相互作用研究的核心内容之一, 是改进陆面过程参数化方案和发展陆面过程模式的基础性工作<sup>[3, 4]</sup>。国际上自 20 世纪 80 年代以来开展的一系列涉及不同气候区不同下垫面及典型流域的大型陆面过程观测试验, 如 HAPEX-MOBIHY、FIFE、EFEDA、GEWEX 中的 BALTEX、GCIP、GAME、LBA、MAGS、MDB 和 LPB, 以及 BOREAS、HAPEX-Sahel、NOPEX 等, 均将确定地表辐射能量通量特征作为主要研究目标之一。国内与国际同步相继开展的 QXPMEX、HEIFE、TIPEX、Game-Tibet、Game-HUBEX、IMGRASS、NW C-ALIEX 等陆面过程试验, 下垫面类型包括青藏高原的湿润河谷、半干旱过渡带、高寒荒漠和高原草甸, 西北干旱地区黑河流域的绿洲、沙漠、戈壁和敦煌极端干旱区的荒漠戈壁, 中纬度半干旱草原, 东亚副热带半湿润地区的旱

\* 收稿日期: 2005-05-11; 修回日期: 2005-07-31。

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目“半干旱雨养农业区地气相互作用观测试验研究”(编号: 40205005)资助。

作者简介: 杨启国(1973-), 男, 甘肃白银人, 助理研究员, 主要从事干旱气象观测试验研究。E-mail: yangqq@gsma.gov.cn

田、稻田、森林和水体等<sup>[5-11]</sup>。近几年,还在内蒙古奈曼流动沙丘及农田生态系统<sup>[12]</sup>、祁连山海拔高寒草甸<sup>[13]</sup>、长江三角洲典型稻作区<sup>[14]</sup>、吉林通榆半干旱地区<sup>[15]</sup>等下垫面开展了地气相互作用的观测试验。在这些试验中,对下垫面的辐射能量平衡特征、热源状况、云和辐射与陆面过程的相互作用等进行了研究,并揭示了大量的观测事实。但是目前针对黄土高原地区典型下垫面尚未开展过系统的陆面过程观测试验和地气相互作用研究。此外上述试验的观测期一般都是在夏季进行的,进行周年连续观测试验的较少,因此对其它季节地气间辐射能量交换特征的认识存在不足。基于此背景,中国气象局兰州干旱气象研究所在其位于陇中黄土高原的定西干旱气象与生态环境试验基地建立了长期的地气相互作用观测系统。该系统于2003年6月正式建成,并实现了连续观测。本文正是利用此观测系统获取的地气相互作用试验资料,分析陇中黄土高原冬季农田地表辐射能量平衡的特征,以期为这一地区的相应研究作出贡献。

## 1 观测试验介绍

### 1.1 试验地点

观测试验点设在位于陇中黄土高原的中国气象局兰州干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境试

验基地(104°37′E, 35°35′N),与定西气象站相邻。海拔高度1896.7 m,年日照时间为2433 h,年平均气温6.7℃,0℃的积温为2998.3℃·h,10℃的积温为2360.5℃·h。近30年平均降水量386.0 mm,降水主要集中在5~10月,占年降水量的86.9%,平均无霜期140天。试验基地周围地势平坦,在当地主导风偏南、偏北风向的上下风方均是农田,无高层建筑物和树木,其下垫面过渡区(fetch)在观测点东南、南南东方向长约400 m,西北、北北西方向长有几公里,代表性较好,为观测高质量有效数据提供了必要的保障。试验基地冬季地表为无植被的裸地,基本代表了陇中黄土高原冬季农田的下垫面特征。

### 1.2 观测项目及仪器

观测项目主要包括地表各辐射分量观测、地表和土壤温度观测、土壤热通量观测,还有超声风速仪的风、温、湿脉动量和二氧化碳/水汽分析仪的CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O脉动量观测。辐射分量有总辐射、反射辐射、地表长波辐射和大气长波辐射,仪器安装在约1.5 m高的辐射架上,地表有2个温度感应头平行观测,土壤温度共6层,其深度分别为5、10、20、30、50、80 cm,3块土壤热流板各自埋设在距地表5 cm处,求其平均作为土壤热通量的值,超声和二氧化碳/水汽分析仪感应头在2.5 m高度处架设,各仪器的性能和观测精度见表1。

表1 试验观测主要仪器及技术参数

Table 1 The experimental instruments and main technical parameters

仪器名称(型号)	主要技术参数	仪器生产商
长波辐射表(PiR)	波长:3.5~50 μm;温度范围:-20~40	美国 Eppley 实验室
短波辐射表(PSP)	灵敏度4 μW/(W·m <sup>2</sup> );响应时间2 s;精度±1% 波长:0.2~4 μm;温度范围:-20~40;灵敏度9 μW/(W·m <sup>2</sup> ) 响应时间1 s;精度0.5%	
三维超声风速温度仪(CSAT3)	测量范围:风速0~30 m/s,风向±170° 工作温度范围:-30~50;分辨率:U <sub>x</sub> 、U <sub>y</sub> 为1 mm/s,U <sub>z</sub> 为0.5 mm/s 精度:<±2%;采样频率1~60 Hz	美国 Campbell 公司
二氧化碳/水汽分析仪(Li-7500)	采样频率5、10或20 Hz 工作温度范围:-25~50	美国 Li-cor 公司
热通量板(CN-81)	灵敏度:0.0191~0.0211 mV/(W·m <sup>2</sup> ) 热导率:0.35 Kcal/(m·h·℃);温度范围:-20~120	日本 EKO 公司
地温传感器(PH00)	测量范围为-40~50;分辨率0.1;精度±0.2	天津气象仪器厂

### 1.3 资料的获取及处理

观测数据的采集控制与处理由美国 Campbell 公司提供的相应软件完成,其中超声和二氧化碳/水汽分析仪设置频率为10 Hz,每30分钟输出一次通量值,其余观测项目每分钟输出一个平均值。常规

气象要素及天气现象由定西气象站日常业务观测。在观测中,对数据进行了严格的质量控制,确保了资料的有效性。观测系统运行至现在,排除仪器维护、供电故障等客观因素,总有效资料长度达到90%以上。根据本文研究目的,选取了2003年12月至

2004 年 2 月观测资料,对其进行了计算处理。其中净辐射计算如下式:

$$R_n = (R_{si} - R_{sr}) + (R_{la} - R_{lg}) \quad (1)$$

式中  $R_n$  为净辐射,  $R_{si}$  为总辐射,  $R_{sr}$  为反射辐射,  $R_{la}$  为大气长波辐射,  $R_{lg}$  为地面长波辐射, 单位均为  $W/m^2$ 。  $R_{si}$ 、 $R_{sr}$ 、 $R_{la}$ 、 $R_{lg}$  由辐射表直接测得。

地表潜热通量  $E$  和感热通量  $H$  用涡旋相关法来计算:

$$E = \overline{wq} \quad (2)$$

$$H = -\rho C_p (\overline{wT} + 0.84 \overline{Twq}) \quad (3)$$

式中  $\rho$  是空气密度,  $C_p$  是干空气定压比热( $1.004.67 J/(kg \cdot K)$ ),  $L$  是蒸发潜热( $2.4 \times 10^6 J/kg$ )  $\overline{w}$ 、 $\overline{q}$ 、 $\overline{T}$ 、 $\overline{Twq}$  分别均是风、温、湿脉动量的统计平均量,由观测系统直接处理输出。

## 2 结果与分析

### 2.1 典型天气下的地表辐射和能量平衡

为了获得不同天气对地表辐射和能量平衡的影响特征及相互间差异性的认识,筛选出典型天气个例进行分析。其中晴天选 2003 年 12 月 20 日,阴天选 2004 年 1 月 9 日,雪天则选 2004 年 1 月 7 日。

图 1 为陇中黄土高原冬季典型天气下地表辐射平衡的日变化特征比较。受不同天气状况的影响,地表辐射平衡分量的日变化特征具有很大的差异。晴天时,都表现出标准的日循环特征。总辐射、地表反射辐射和净辐射的日峰值分别为  $467.00$ 、 $94.90$  和  $217.00 W/m^2$ ;地表长波辐射白天基本都在  $300.00 W/m^2$  以上,夜晚则维持在  $280.00 W/m^2$  左右,日较差为  $110.50 W/m^2$ 。大气长波辐射全天基本无波动变化,辐射通量值维持在  $200 W/m^2$  左右,日较差仅为  $18.80 W/m^2$ 。总辐射、地表反射辐射、大气长波辐射、地表长波辐射及净辐射的日总量依次为  $9.00$ 、 $1.88$ 、 $19.05$ 、 $26.39$ 、 $-0.22 MJ/(m^2 \cdot d)$ 。净辐射日总量出现负值,是因为全天长波辐射所损失的热量超过了短波辐射所给予地表的热量。

阴天时,辐射平衡分量具有不规则的日循环特征。受云的影响,总辐射和地表反射辐射比晴天时显著减小,日总量分别为  $6.00$ 、 $1.17 MJ/(m^2 \cdot d)$ ,约是晴天时的  $2/3$ ;地表长波辐射在  $271.60 \sim 378.50 W/m^2$  之间变化,幅度与晴天时相当。阴天地表的辐射散热使得其日总量达到了  $26.15 MJ/(m^2 \cdot d)$  基本与晴天时持平,大气长波辐射受大气温湿度垂直分布等复杂因素的影响,具有明显的波动变化。日总量比晴天时显著增加,达到了  $21.05$

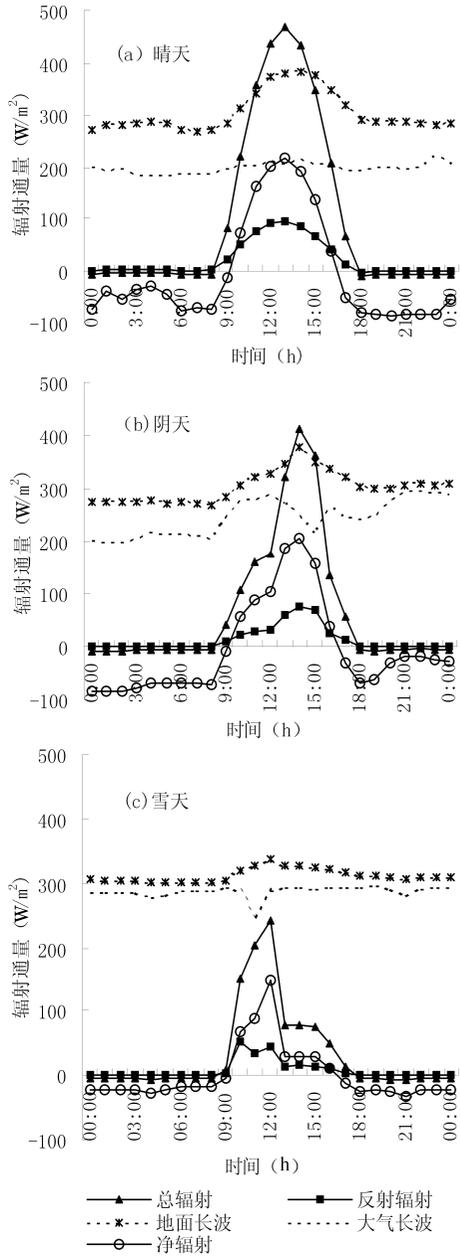


图 1 陇中黄土高原冬季典型天气地表辐射平衡日变化比较  
Fig.1 The daily variations comparison of surface radiation balance under typical weather condition in Loess Plateau of middle part Gansu in winter

$MJ/(m^2 \cdot d)$ ;净辐射的日总量为  $-0.28 MJ/(m^2 \cdot d)$ 。

雪天时,辐射平衡分量已没有明显的日循环特征,长波辐射也显著超过短波辐射。总辐射及反射辐射在量值上大大小于晴天,日总量分别为 2.96、0.68 MJ/(m<sup>2</sup>·d),仅是晴天时的 1/3 左右。地表长波辐射全天维持在 300 W/m<sup>2</sup> 左右,日总量为 26.95 MJ/(m<sup>2</sup>·d),比晴阴天时稍大。大气长波辐射比阴天时更加增大,全天基本维持在 290 W/m<sup>2</sup> 左右,只比地表长波略小,日总量也达到了 24.82 MJ/(m<sup>2</sup>·d)。由于雪天大气湿度增加,大气长波辐射强烈,加之地表积雪少,反射辐射并未显著增大,使得净辐射的日总量变为正值,为 0.15 MJ/(m<sup>2</sup>·d)。

图 2 为陇中黄土高原冬季典型天气地表能量平衡及 Bowen 比日变化比较。由图可见,晴天时,地表能量平衡分量具有典型的日循环形态,感热输送占据主导地位,日最大值为 150 W/m<sup>2</sup>,潜热通量都小于 30 W/m<sup>2</sup>,比感热小 2 个量级。但土壤热通量表现出很强烈的变化,量值上比潜热通量大一个量级,日最大值可达 80 W/m<sup>2</sup>。这些结果与同处半干

旱地区的吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验得到的结论<sup>[15]</sup>具有可比性。该站冬春季农田下垫面感热通量占到净辐射的 70%,居主导地位,潜热通量通常也小于 30 W/m<sup>2</sup>,与本试验结果类似。但土壤热通量本试验却比该站大很多,这说明下垫面特征的不同对地表能量的分配过程起着重要的调节作用。晴天潜热、感热和土壤热通量的日总量为 0.57、2.06 和 -1.12 MJ/(m<sup>2</sup>·d),地表能量不平衡程度严重。阴天时,地表能量依然以感热输送为主。潜热、感热和土壤热通量的日总量为 0.30、1.41 和 -0.90 MJ/(m<sup>2</sup>·d)。雪天时,潜热和感热基本持平,土壤热通量的变化显得平缓。潜热、感热和土壤热通量的日总量为 0.53、0.94 和 -0.02 MJ/(m<sup>2</sup>·d)。阴雪天地表能量不平衡程度比晴天要好。

关于地表能量不平衡现象,在国内外许多大型的陆面过程试验中都被观测到,并引起了许多从事边界层及地气相互作用研究者的极大关注<sup>[16,17]</sup>。据研究,在过去 10 年国际上有代表性的

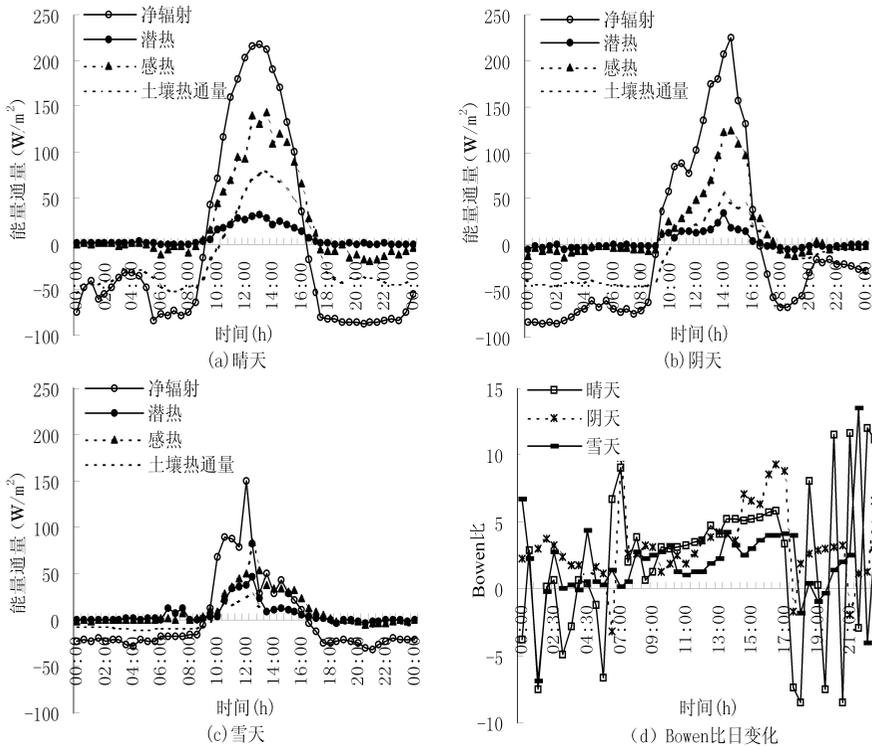


图 2 陇中黄土高原冬季典型天气地表能量平衡及 Bowen 日变化比较

Fig. 2 The daily variations comparison of surface energy balance and Bowen ratio under typical weather condition in Loess Plateau of middle part Gansu in winter

试验观测中,独立测量的潜热、感热和土壤热通量<sup>3</sup>个通量值的和仅占到独立测量到的净辐射的 70%~90%<sup>[18, 23]</sup>。能量不平衡现象的出现,一般归咎于独立测量的通量观测仪器的问题或者是低估了观测误差,诸如平流的产生、有限的高频响应、通量平均时段等<sup>[20, 21]</sup>,但是真正的原因目前尚无定论。本文中地表能量不平衡程度较严重,分析认为主要是仪器测量误差所致。一是超声测量误差。陇中黄土高原冬季干燥,大气中水分含量很低,用涡动相关原理难以准确测量潜热通量。此外加上在夜间由于稳定层结的存在,湍流交换很弱,感热和潜热的观测误差较大,更影响了能量平衡。因为在晴、阴、雪天的白天,能量不平衡部分只占到净辐射的 17%、6%和 33%。如加上夜间的积分值,则能量不平衡程度显著加大;二是土壤热通量观测误差。土壤热通量的准确观测对获得地表能量平衡是非常重要的,其测量误差主要出现在对地表和热流板之间的土壤热存储及热流板下深层土壤中潜热释放过程的忽略<sup>[22, 23]</sup>。在陇中黄土高原的冬季,土壤层中的水汽相变所产生的潜热释放量是有限的,但地表和热流板间的土壤层存储或释放热量的过程不应被忽视,而要准确订正这部分热量是很困难的。因此如何进一步改善观测误差,准确获得地表通量值,将是能量平衡研究的重点工作。

从典型天气 Bowen 比日变化看,晴天时 Bowen 比从上午日出后一直呈缓慢增加的趋势,至下午日落前至最大值,之后迅速下降,夜晚则呈现出剧烈的波动变化。阴雪天时 Bowen 比白天的总体变化趋势基本与晴天类似,但受复杂天气因素的影响,具有明显的波动变化,且夜晚的变化比晴天要平缓许多。这种变化与本试验夏季观测得到的 Bowen 比日变化呈抛物线型<sup>[24]</sup>是有很大不同的。晴、阴、雪<sup>3</sup>种天气下 Bowen 比的日平均值分别为 3.76、5.85 和 3.42,感热的输送量显著大于潜热。

地表与土壤温度的变化过程是对地表辐射和能量平衡结果的必然响应。从图 3 陇中黄土高原冬季典型天气地表与土壤温度的日变化看,地表、5 cm 和 10 cm 深土壤温度的日变化过程在晴天时表现为典型的准正弦曲线,峰值随深度增加而逐渐滞后。阴天时也表现出很强的日变化过程,形态与晴天相似但振幅比晴天时要大。雪天时,则表现出振幅很弱的不规则日变化形态,在不同天气下,20 cm 深土壤温度都表现出振幅很小的反相位变化,而 30 cm 及以下深度土壤温度已不再受太阳辐射变化的波动

影响,全天只是表现出单调的线性递减(如图 3e,以 80 cm 为例)。从图中可以看出,不同天气下土壤浅层 5~10 cm 都存在很强的温度梯度差,最大相差可达 15℃左右。白天温度梯度向下,土壤层存储热量,夜间温度梯度向上,土壤层释放热量。这层土壤存储和释放的热量恰是土壤热流板无法测量到的部分,因此影响了地表能量平衡状况。

## 2.2 冬季平均的辐射及能量平衡特征

陇中黄土高原冬季平均地表辐射和能量平衡特征与典型天气相比有何差别,云和降雪对其产生的扰动影响有多大,典型天气出现的地表能量不平衡现象在冬季是否普遍存在,对陆面过程参数化具有重要意义的地表反射率在冬季的变化特征如何,这些都是值得继续研究的问题。为此首先给出了陇中黄土高原冬季辐射平衡、能量平衡、地表和土壤温度及 Bowen 比的平均日变化特征(图 4)。从图中看出,冬季辐射平衡和能量平衡的平均日变化呈标准的抛物线型,与典型晴天的特征基本一致。只是由于云和降雪的扰动影响,使得各通量值被不同程度的削弱,冬季平均的地表及土壤温度日变化也与晴天时的特征很一致,地表和 5 cm、10 cm 土壤温度呈正弦曲线变化,20 cm 土壤温度反相位变化,30 cm 及以下深层土壤温度基本无日变化,冬季平均 Bowen 比日变化也与晴天在总体形态上保持了很好的一致,只是白天 Bowen 比的变化比晴天时显得陡峭,夜间波动则没有晴天剧烈。这是因为在陇中黄土高原冬季,大多数天气是晴天,阴雪天较少,云和降雪的扰动影响有限,因此冬季晴天的地表辐射和能量平衡特征就具有主导性,成为这一地区的背景特征。

冬季总辐射、反射辐射、地表长波辐射和大气长波辐射的辐射总量依次为 880.66、191.50、2453.73 和 1760.20 MJ/(m<sup>2</sup>·d),平均日总量依次为 9.68、2.13、26.96 和 19.34 MJ/(m<sup>2</sup>·d)。冬季地表能量依然以感热输送为主导地位,感热、潜热及土壤热通量的平均日总量依次为 1.51、0.49 和 -0.55 MJ/(m<sup>2</sup>·d)。冬季地表能量不平衡现象普遍存在,能量不平衡部分与净辐射的比值平均为 1.87。再从图 5(a)看,净辐射及土壤热通量日总量在冬季的 12 月和来年的 1 月基本都为负值,从 2 月份开始才变为正值,冬季净辐射日总量平均值为 -0.07 MJ/(m<sup>2</sup>·d)。按照地面加热场强度的定义( $R_n - G$ ,  $G$  为土壤热通量)<sup>[25]</sup>,陇中黄土高原冬季地面加热场为热源。地表净辐射日总量冬季为负值,在青藏高原和南极地区都被观测到,青藏高原地区净辐射冬

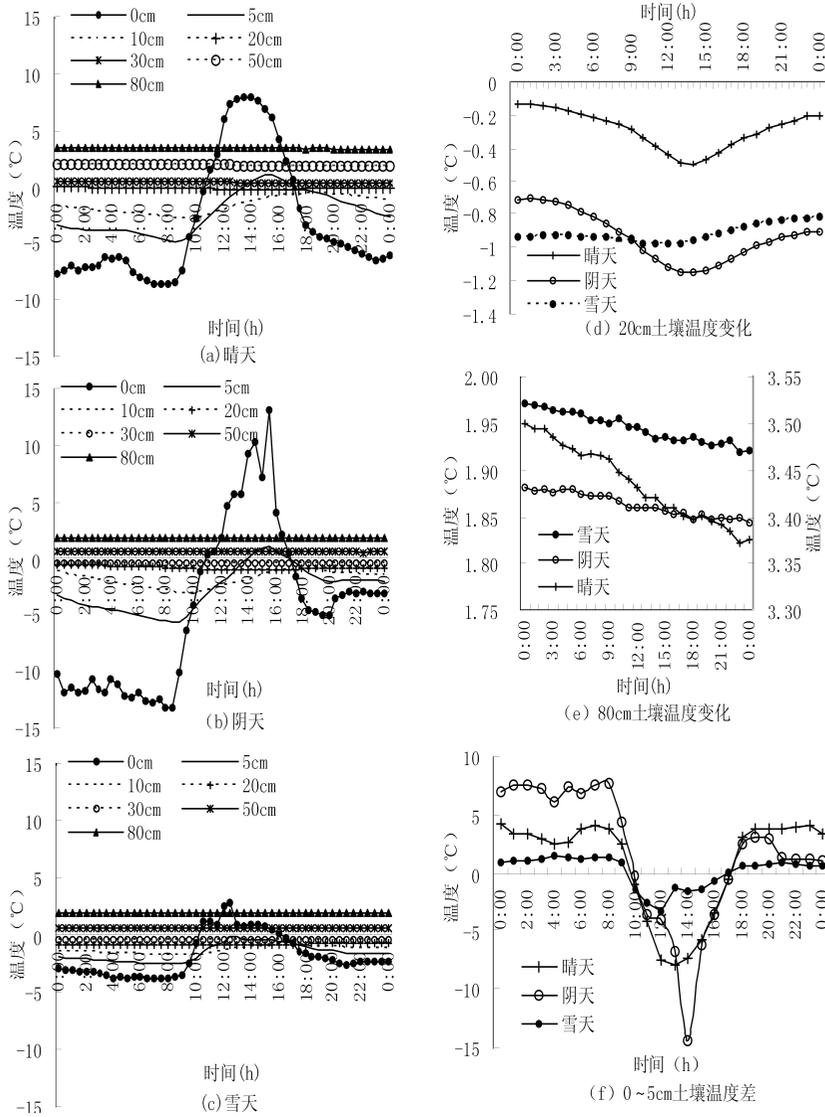


图3 陇中黄土高原冬季典型天气地表、土壤温度及0~5m土壤温差日变化比较

Fig.3 The daily variations comparison of surface temperature, soil temperature and different between 0~5 cm under typical weather condition in Loess Plateau of middle part Gansu in winter

季出现负值是因为长期积雪使反射率较大从而导致反射辐射比较强烈的缘故<sup>[25~27]</sup>。南极地区净辐射出现负值是因为在南极近地面辐射平衡中,长波辐射是主要的辐射分量,且全年地表长波辐射一直大于大气长波辐射加之冬季雪盖使地表短波反射辐射较大所致<sup>[28,29]</sup>。陇中黄土高原冬季地表不存在长期积雪,但是土壤热储量的大量释放使得地面长波

辐射比较强烈,全天地表损失的长波辐射能大于获得的短波辐射能,地表净辐射出现负值。从能量平衡的角度出发,冬季农田地表面散失的热储量只能是在其它季节存储的热量,它可以从土壤温度的变化中得到很好的印证。如图5a,b,从趋势上看,整个冬季随着时间推移土壤各层日平均温度一直都在递减,土壤温度沿深层到表层由浅而深传导,

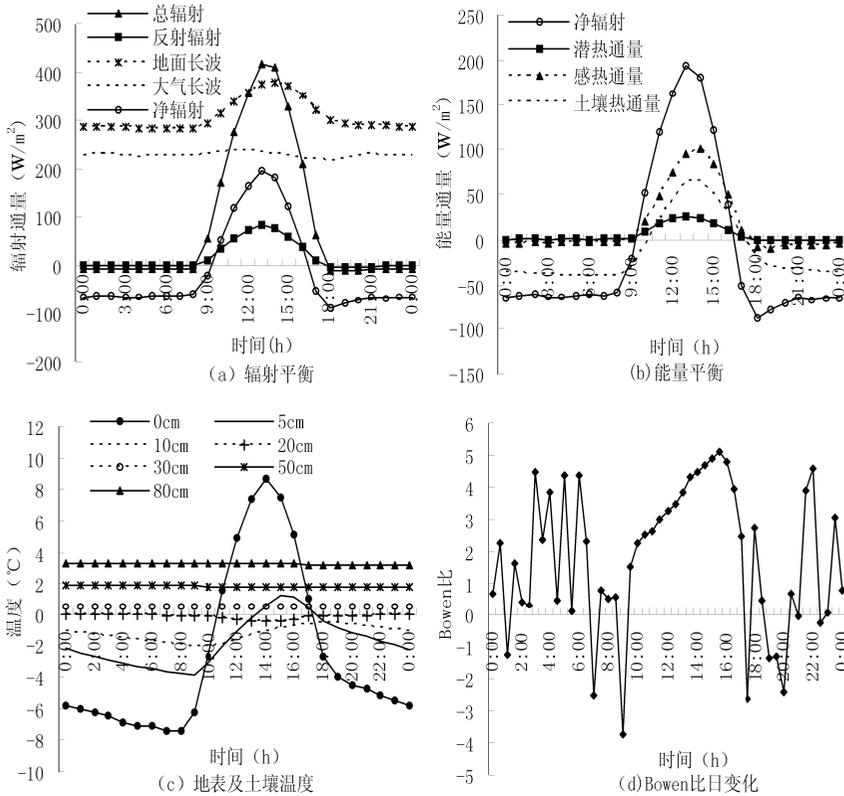


图 4 陇中黄土高原冬季辐射平衡、能量平衡、地表土壤温度及 Bowen 比日变化比较

Fig.4 The daily variation characteristic of radiation budget , energy balance , Bowen ration and soil temperature in Loess Plateau of middle part Gansu in winter

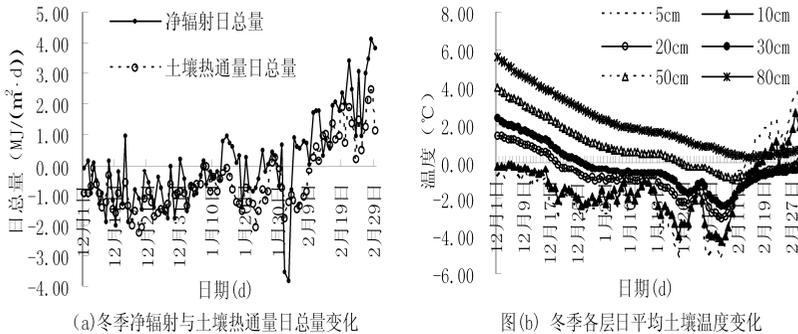


图 5 陇中黄土高原冬季净辐射、土壤热通量及各层日平均土壤温度变化

Fig.5 The variational characteristic of net radiation , soil heat flux and soil temperature in Loess Plateau of middle part Gansu in winter

储存在土壤层中的热量逐渐被释放。  
下垫面反射率的不同使地表获得的太阳辐射能

存在差异,从而会导致地表能量平衡的改变,这往往是形成小气候不同的主要原因。图 6 是陇中黄土高

原冬季地表反射率的日际变化特征。从图中可以看出,冬季地表日平均反射率相对稳定,基本上在0.20~0.25之间变化。这主要是由于冬季地表裸露,下垫面状况均一,加之地表层封冻,土壤湿度变化甚微,另外冬季总辐射强度总体较低,地表反射辐射量值有限,从而使地表反射率的日际变化很小。当有较大降雪过程时,日平均反射率可突增至0.80。整个冬季地表日平均反射率为0.22,大于当地夏季春小麦下垫面的0.17和裸地的0.20<sup>[24]</sup>,小于同处半干旱地区的吉林通榆农田下垫面的反射率0.30<sup>[15]</sup>。与青藏高原1982—1983年4个热源观测站观测到的冬季平均地表反射率(甘孜为0.25,拉萨为0.26,那曲为0.37,该则为0.30)<sup>[25,26]</sup>及青藏高原五道梁长期观测到的冬季地表反射率0.33<sup>[30]</sup>相比要小。比黑河试验中冬季绿洲的0.29和沙漠的0.34<sup>[31]</sup>更小。

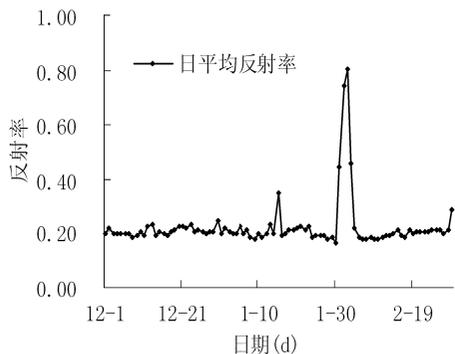


图6 冬季反射率日变化特征

Fig.6 The variational characteristic of diurnal average of surface albedo in winter

### 3 结论

陇中黄土高原冬季典型天气间地表辐射平衡、能量平衡、地表和浅层土壤温度的日变化特征具有较大差异,而深层土壤温度和Bowen比的日变化趋势基本一致。冬季平均特征与晴天比较接近,这说明云和降雪的扰动影响是有限的,晴天的微气象特征基本可以反映这一地区的背景特征。

陇中黄土高原冬季总辐射、反射辐射、地表长波辐射和大气长波辐射的辐射总量依次为880.66、191.50、2453.73和1760.20 MJ/(m<sup>2</sup>·d),平均日总量依次为9.68、2.13、26.96和19.34 MJ/(m<sup>2</sup>·d)。净辐射及土壤热通量日总量在冬季的12月和来年的1月基本都为负值,2月份则变为正值,冬季地面加热场为热源。冬季净辐射日总量为负值,是

土壤热储量的大量释放使地表长波辐射比较强烈,全天地表损失的长波辐射能大于获得的短波辐射能的结果。

陇中黄土高原冬季地表能量以感热输送为主导,潜热通量很小,一般不超过30 W/m<sup>2</sup>,但土壤热通量表现出很强烈的变化,比潜热通量要大。感热、潜热及土壤热通量的平均日总量依次为1.51、0.49和-0.55 MJ/(m<sup>2</sup>·d)。冬季地表能量普遍存在不平衡现象,能量不平衡部分与净辐射的比值平均为1.87。造成地表能量不平衡的原因,主要是仪器测量误差所致。

陇中黄土高原冬季地表、5 cm和10 cm深土壤温度的日变化过程表现为典型的准正弦曲线,峰值随深度增加而逐渐滞后,20 cm深土壤温度表现出振幅很小的反相位变化。深层土壤温度(30 cm及以下)基本无日变化。冬季土壤各层日平均温度随时间推移一直都在递减,并沿深层到表层位相由浅而深传导,土壤层中的潜热逐渐被释放。

陇中黄土高原冬季地表日平均反射率相对稳定,基本上在0.20~0.25之间变化,平均值为0.22。

### 参考文献(References):

- [1] Zhang Enhe, Huang Gaobao. Limited factors and solutions of agricultural sustainable development in Loess Plateau of Gansu province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(2): 9-13. [张恩和, 黄高宝. 甘肃黄土高原农业可持续发展的限制因素与克服途径[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 9-13.]
- [2] Li Mian, Yao Wenyi, Li Zhanbin. Progress of the effect of grassland vegetation for conserving soil and water on Loess Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(1): 74-80. [李勉, 姚文艺, 李占斌. 黄土高原草本植被水土保持作用研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 74-80.]
- [3] Hu Yingqiao. Research advance about the energy budget and transportation of water vapour in the Heihe area[J]. Advances in Earth Science, 1994, 9(4): 31-34. [胡隐樵. 黑河实验(HEIFE)能量平衡和水气输送研究进展[J]. 地球科学进展, 1994, 9(4): 31-34.]
- [4] Zhang Qiang, Cao Xiaoyan. The influence of synoptic conditions on the averaged surface heat and radiation budget energy over desert or Gobi[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(2): 245-253. [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): 245-253.]
- [5] Ye Duzheng, Gao Youxi. Meteorology of Tibetan Plateau[M]. Beijing: Sciences Press, 1979. [叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 1979.]
- [6] Hu Yingqiao, Gao Youxi, Wang Jiem in et al. Some achievements in scientific research during Heihe[J]. Plateau Meteorology, 1994, 13

- (3): 225-236. [胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 黑河实验 (HEIFE) 的一些研究成果 [J]. 高原气象, 1994, 13(3): 225-236.]
- [7] Zhou Mingyu, Xu Xiangde, Bian Lingen, et al. Observational Analysis and Dynamic Study of Atmospheric Boundary Layer on Tibetan Plateau [M]. Beijing: Meteorology Press, 2000. [周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2000.]
- [8] Wang Jiem in, Qiu Huasheng. Asian monsoon experiment and Tibetan Plateau experiment by China-Japan cooperation [J]. Journal of Chinese Academy of Sciences, 2000, 5: 386-388. [王介民, 邱华盛. 中日合作亚洲季风实验—青藏高原实验 (Game-Tibet) [J]. 中国科学院院刊, 2000, 5: 386-388.]
- [9] Zhang Yan. Study of energy and water cycle over Huaihai river basin [J]. Meteorological Technology, 1998, (4): 33-38. [张雁. 淮河流域能量与水循环试验和研究 [J]. 气象科技, 1998, (4): 33-38.]
- [10] Lü Daren, Chen Zuozhong, Wang Gengcheng et al. Inner Mongolia semi-arid grassland soil-vegetation-atmosphere interaction [J]. Climatic and Environmental Research, 1997, 2(3): 100-209. [吕达仁, 陈佐忠, 王庚辰, 等. 内蒙古半干旱草原土壤—植物—大气相互作用科学问题与实验计划概述 [J]. 气候与环境, 1997, 2(3): 100-209.]
- [11] Zhang Qiang, Huang Ronghui, Wang sheng et al. NW C-ALIEX and its research advances [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(4): 427-441. [张强, 黄荣辉, 王胜, 等. 西北干旱区陆—气相互作用试验 (NW C-ALIEX) 及其研究进展 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 427-441.]
- [12] Liu Huizhi, Hong Zhongxiang, Zhang Hongsheng et al. The turbulent characteristics in the surface layer over Dunhuang in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(3): 389-398. [刘辉志, 洪钟祥, 张宏升, 等. 内蒙古奈曼流动沙丘下垫面湍流输送特征初步研究 [J]. 大气科学, 2003, 27(3): 389-398.]
- [13] Li Yingnian, Zhao Liang, Gu Song et al. Energy Balance Features of the alpine meadows on the Habei Area (Northern Shores of the Qinghai Lake) [J]. Acta Aegrestia Sinica, 2003, 11(4): 289-295. [李英年, 赵亮, 占松, 等. 海北高寒草甸地区能量平衡特征 [J]. 草地学报, 2003, 11(4): 289-295.]
- [14] Lu Longhua, Cheng Yanjie, Bian Lingen, et al. A study on the turbulence fluxes of the surface layer CO<sub>2</sub>, sensitive and latent exchange over the typical rice field, Changjiang Delta [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(6): 751-759. [陆龙骅, 程彦杰, 卞林根, 等. 长江三角洲典型稻作区近地层二氧化碳等湍流通量的观测研究 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 751-759.]
- [15] Liu Huizhi, Dong Wenjie, Fu Congbin et al. The long term field experiment on aridification and the ordered human activity in semi-arid area at Tongye, Northeast China [J]. Climatic and Environmental Research, 2004, 9(2): 378-389. [刘辉志, 董文杰, 符凉斌, 等. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验 [J]. 气候与环境研究, 2004, 9(2): 378-389.]
- [16] Christian Bernhofer, Voget Rd and. Energy balance closure gaps—A methodical problem of eddy covariance measurement [A]. In: Proceeding of the Conference ICB [C]. Sydney, Australia: ICUC, 1999. 199-203.
- [17] Twine T E, Kustas W P, Norman J M et al. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 103: 279-300.
- [18] Heusinkveld B G, Jacobs A F G, Holtslag A A M et al. Surface energy balance closure in an arid region: Role of soil heat flux [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 122: 21-37.
- [19] Oncley S P, Foken T, Vogt R, et al. The energy balance experiment EBEX 2000 [A]. In: Proceedings of the 15th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Wageningen [C]. The Netherlands, American Meteorological Society, 2002. 1-4.
- [20] Foken T, Oncley S P. A report on the workshop: Instrumental and methodological problems of land-surface flux measurements [J]. Bulletin of American Meteorological Society, 1995, 76: 1191-1193.
- [21] Cleugh H A, Roberts T. Local-scale energy balances and microclimate in the desert ranges of central Australia [J]. Australia Meteorological Magazine, 1994, 43: 219-228.
- [22] Mayocchi C L, Bristow K L. Soil surface heat flux: some general questions and comments on measurements [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 75: 43-50.
- [23] Olyphant A J, Grimmond C S B, Zutter H N, et al. Heat storage and energy balance fluxes for a temperate deciduous forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 126: 185-201.
- [24] Yang Xingguo, Zhang Qiang, Wang Runyuan, et al. Experimental study on surface energy balance over Loess Plateau of middle part Gansu in summer [J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(6): 828-834. [杨兴国, 张强, 王润元, 等. 陇中黄土高原夏季地表能量平衡观测研究 [J]. 高原气象, 2004, 23(6): 828-834.]
- [25] Ji Guoliang, Zou Jiling, Lü Lanzhi. The seasonal variation of surface heating field over the northern Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 1997, 16(1): 1-9. [季国良, 邹基玲, 吕兰芝. 藏北高原地面加热场的季节变化 [J]. 高原气象, 1997, 16(1): 1-9.]
- [26] Ji Guoliang, Yao Lanchang, Yuan Fumao, et al. Winter's characteristic of surface and atmospheric heating field over Tibetan Plateau in 1982 [J]. Science in China (B), 1986, (2): 214-224. [季国良, 姚兰昌, 袁福茂, 等. 1982 年冬季青藏高原的地面和大气加热场特征 [J]. 中国科学 B 辑, 1986, (2): 214-224.]
- [27] Shen Zhibao, Liu Weimin. Surface energy balance over Tibetan Plateau in winter [J]. Plateau Meteorology, 1988, 7(1): 1-8. [沈志宝, 刘卫民. 冬季青藏高原地面辐射平衡 [J]. 高原气象, 1988, 7(1): 1-8.]
- [28] Bian Lingen, Lu Longhua, Lu Changgu et al. A study of radiative features at the great wall and Zhongshan stations of antarctic [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1998, 9(2): 160-168. [卞林根, 陆龙骅, 吕昌贵, 等. 南极长城站和中山站辐射特征的研究 [J]. 应用气象学报, 1998, 9(2): 160-168.]
- [29] Liu Shuhua, Xu Peng, Xiong Kang. Radiation balance and turbu-

- lent flux characteristics over Mizhuo Station in Antarctic[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1994, 52(1): 68-77. [刘树华, 于鹏, 熊康. 南极瑞穗站辐射平衡及湍流特征分析[J]. 气象学报, 1994, 52(1): 68-77.]
- [30] Ji Guoliang. Advanced in energy budget observation experiment over the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 1999, 18(3): 333-340. [季国良. 青藏高原能量收支观测实验的新进展[J]. 高原气象, 1999, 18(3): 333-340.]
- [31] Ji Guoliang, Zou Jiling. The seasonal variation of solar radiation budget over oases and desert in arid region[J]. Plateau Meteorology, 1994, 13(3): 323-329. [季国良, 邹基玲. 干旱地区绿洲和沙漠辐射收支的季节变化[J]. 高原气象, 1994, 13(3): 323-329.]

## THE CHARACTERISTIC OF SURFACE RADIATION AND ENERGY BALANCE IN LOESS PLATEAU OF MIDDLE PART GANSU IN WINTER

YANG Qi-guo, YANG Xing-guo, MA Peng-li, WANG Run-yuan, LIU Hong-yi  
(Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory  
of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** By using the land-atmosphere interaction measured data observed over Dingxi Arid Meteorology and Ecological Environment Experimental Station during December 2003 to February 2004, the characteristics of the daily variations of the surface radiation budget, energy balance, and soil temperature under different types of synoptic conditions (including a clear day, a cloud day and a snow day) and averaged conditions are analysed. The comparison of micrometeorological characteristics under the three types of synoptic conditions shows that there is much difference among features of radiation and energy budget under different synoptic conditions, the characteristics of the averaged daily variation in winter is very close to ones under the condition of a clear day because the influence of cloud and snow are limited. In winter, the sensible heat flux plays a leading role and the soil heat flux depends on it. However, there is a large imbalance in surface flux measurement. The daily value of net radiation and soil heat flux is negative in 2/3 times after winter comes, and it becomes positive in the rest time, so the surface heating field is heat source in winter. The diurnal variation of the soil temperature is just in the upper 20 cm layer soil. The soil temperature below 30 cm has very little diurnal variation. The diurnal average of surface albedo is varied between 0.20 and 0.25, and the mean of diurnal surface albedo is 0.22.

**Key words:** Loess plateau of middle part of Gansu province; Radiation budget; Energy balance; Sensible heat.