

珠穆朗玛峰北坡特殊地形下太阳辐射特征的初步研究

白建辉¹ 邹捍² 李爱国² 马舒波² 贾京京²
李鹏² 王维² 霍翠萍²

1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室, 北京 100029

2 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘要 2006年5月27日~6月30日, 对珠穆朗玛峰北坡的太阳辐射和气象参数进行了综合测量, 主要包括总辐射、反射辐射、大气辐射、地面长波辐射、净辐射、温湿度和风速等。珠峰北坡的各个辐射量和气象参数都表现出明显的、非对称的日变化规律。珠峰北坡的太阳辐射远高于我国的平原地区, 总辐射大于太阳常数的现象经常被观测到。研究发现, 各个辐射量在9时都表现了一日最大的增长率, 并因此导致了此时段及以后时段气温的增加和风速的快速增长, 因而珠峰北坡特殊的地形对于地面接收到的辐射特征以及通过辐射过程对气温、大气运动等都产生了非常显著的作用。研究特殊地形条件下的辐射特征、辐射—地表—大气之间的相互作用以及地表和大气对于辐射作用的响应是非常重要的, 它将有助于对局地物质与能量交换过程深入、全面的了解。

关键词 短波辐射 长波辐射 净辐射 太阳常数 风

文章编号 1006-9585 (2008) 03-0225-13 **中图分类号** R122.2+5 **文献标识码** A

Primary Study on the Characteristics of Solar Radiation at a Specific Topography of the North Slope of the Mount Qomolangma

BAI Jian-Hui¹, ZOU Han², LI Ai-Guo², MA Shu-Po², JIA Jing-Jing²,
LI Peng², WANG Wei², and HUO Cui-Ping²

1 *Laboratory for Middle Atmosphere Layer and Globe Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract Solar radiation and meteorological parameters were measured at the north slope of the Mount Qomolangma during 27 May to 30 June 2006. The measured parameters are solar global radiation, reflective radiation, atmospheric radiation, terrestrial radiation, net radiation, temperature, humidity and wind. All radiative and meteorological parameters displayed evident and asymmetric diurnal variations. Solar radiation at the north slope of the Mount Qomolangma was much higher than the plain region, and the phenomena of solar global radiation exceeded solar constant were often occurred. The study showed that all radiative parameters exhibited a daily maximum of increasing rate at 0900 LST. And it caused the increase of air temperature and the fast increase of wind speed from then on. So, the specific topography at the north slope of the Mount Qomolangma led to evident effects on solar ra-

收稿日期 2006-11-20 收到, 2008-02-20 收到修定稿

资助项目 中国科学院重要方向项目 KZCX3-SW-231

作者简介 白建辉, 男, 1964年出生, 博士, 副研究员, 主要从事大气物理、大气化学方面研究。E-mail: bjh@mail.iap.ac.cn

diations arriving at the ground, air temperature and air-mass moving by different radiation processes. It is very important to study the characteristics of solar radiation, the interaction between radiation, earth's surface and the atmosphere, the response of the earth and the atmosphere to solar radiation at the specific topography. It will help us to understand the exchanging process of mater and energy deeply and thoroughly.

Key words shortwave radiation, long-wave radiation, net radiation, solar constant, wind

1 引言

世界第一高峰珠穆朗玛峰（以下简称珠峰），傲立于喜马拉雅山浩瀚如海的群峰之中，它不仅由于其雄伟、高大的自然奇观而著称于世，同时也为研究高山环境和独特地形条件下的辐射特征及物质与能量交换规律提供了良好的天然场所。

中国科学院及有关单位曾开展了对珠峰的多次综合科学考察，如 1959 年和 1966~1968 年，获得了珠峰不同年代、不同时间跨度的宝贵资料，包括太阳辐射和气象参数等，以及对该地区辐射和气象特征的科学认识^[1,2]。

太阳辐射作为地球上最基本和最重要的能量来源，控制着整个地球及不同区域的能量供给和分配。针对不同区域的地表、植被和大气等特征，太阳辐射还控制和调节着不同区域的气候及气候变化、物质交换等过程。因此，综合测量与详细研究珠峰地区的辐射与气象特征、辐射对于局地气象特征形成的影响和作用等具有重要意义和价值。

2 实验简介

2006 年 5 月 27 日~6 月 30 日，对珠峰北坡山谷的太阳辐射和气象等参量进行了综合测量。在其大体为南北走向的山谷中设立了 3 个测量点，分别为：1) 最南端 A 点，位于珠峰大本营附近（28°07'54"N，86°51'18"E），海拔 5 171 m；2) 中间 B 点，位于北坡山谷的工作营地（28°10'6"N，86°50'24"E），海拔 5 050 m；3) 最北端 C 点，位于绒布寺外河谷（28°14'42"N，86°49'6"E），海拔 4 765 m。珠峰北坡地势大致为南高北低（见图 1）。在工作营地（B 点），仪器设备等配备最全，资料取得也最为完整，本文主要讨论该点的测量结果。工作营地以及绒布寺外河谷下垫面大部分

是表面比较光滑的碎石、沙土以及少量的棕色杂草，沿山谷而下靠西面山坡有一条小河，河水略带浅灰色。东西两侧均有山顺河谷排列，相对高度约 1 000 m 左右，整体上东面山普遍高于西面山，坡度也较大。粗略估算东、西两面山的坡度大致分别为 70~80°、40~50°。另外，东西两面山的最大遮蔽角分别为 33°和 13°。两侧山坡上基本没有植被，零星有一些很低的杂草。两侧山的顶部及其遮荫处有少量积雪，南方的珠峰绝大部分为积雪覆盖。珠峰北坡山谷南北方向比较开阔，没有遮挡。

太阳辐射仪器采用 Campbell 科学公司 Kipp & Zonen 太阳辐射产品，包括向上和向下的 2 个短波和 2 个长波辐射表，表头型号分别为 CM21、CG4，采样频率为 10 Hz。测量的辐射量包括总辐射、反射辐射、大气长波辐射、地面长波辐射和净辐射。辐射表高度约 1.5 m。此次实验使用了芬兰 Vaisala 公司 MAWS 产品；另外还配备了美国 Campbell 公司 CSAT3 三维超声风速仪和 LI-COR 公司的 LI-7500 CO₂/H₂O 分析仪，在 2 和 8 m 的高度上均安有感应探头。为了本项目组数据的可比性，本文气象数据使用 LI-COR 在 2 m 处的气象资料，其水平风速测量偏差 < ±4.0 cm·s⁻¹，采样频率为 10 Hz。辐射和气象数据的采集由专用数据采集器（CR5000）进行采集和存储，存储的数据包括 1 min 和 0.5 h 的平均值。辐射和气象等仪器每日 24 h 连续运行，并有专人维护。

3 初步实验结果和分析

由于具有海拔较高、空气稀薄、大气洁净和地理纬度较小等多种因素，珠峰地面接收到的太阳辐射能量比较高。本文太阳辐射的取值包括小时平均值（时均值）和日总量，时间采用当地时间。

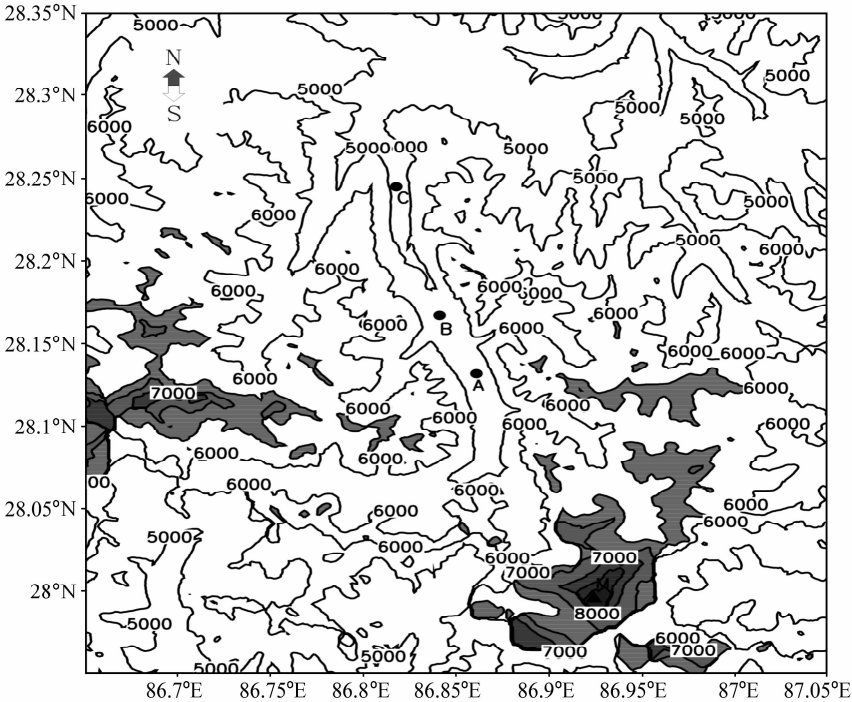


图 1 珠峰北坡的地形
Fig. 1 Topography of the north slope of the Mt. Qomolangma

3.1 短波辐射

此次测量的短波辐射包括太阳总辐射 (E_g) 和反射辐射 (E_r)，图 2 给出 2006 年 5 月 27 日～6 月 30 日珠峰北坡的太阳短波辐射。实验期间的天气状况大致为：绝大部分日期不同时段都有云，且云量不等。6 月 12～20 日期间，白天云量较少（云量最大值小于 4），17 日有薄卷云。22～30 日期间，白天云量较多且多变，并有间歇性的阵雨、小雨、小雪等。观测表明，总辐射和反射辐射在晴天均表现出比较一致、有规律的日变化特征。有云天气，由于云的衰减（如散射和反射等）作用，总辐射和反射辐射均表现出无规律、但比较一致的日变化特征。另外，由于东西两面山的遮蔽，观测点的太阳辐射明显受到了不同程度的影响。观测期间，辐射表感应面接受太阳辐射的时间大约在 5:30～19:30，每日太阳总辐射的最大值多出现在 12 和 13 时，个别日期出现在 11 时。受东、西面山不同遮蔽的影响，总辐射和反射辐射的日变化表现出不同程度的非对称性，即上午的快速增长和下午的缓慢下降，具体表现为 7 和 9 时的两次较大的增长率以及 19 时出现的一日最大的减小率。两者在 6～7 时较大的增长率主要源于

散射辐射从零开始并逐渐增强；8～9 时的日最大增长率则是由于东面山的遮蔽恰在 7:59 前后消失，太阳总辐射中的直接辐射由零突然激增；18～19 时最大的减小率主要是由于西面山的遮蔽，其遮蔽开始时间大约在 17:54 左右，因此 18～19 时已经没有直接辐射。总辐射和反射辐射分钟平均值的日变化特征类似倒 U 型，即在东西两面山的遮蔽消失和产生前后，短波辐射有突变（图略）。从东西两面山的遮蔽影响，也反映出珠峰北坡散射辐射占总辐射的比例较小，其绝大部分是直接辐射。6 月总辐射和反射辐射每小时平均值分别为 518.2 和 98.8 $W \cdot m^{-2}$ ，最大值分别为 1 361.2 和 259.4 $W \cdot m^{-2}$ ，其时均值已接近太阳常数 1 367 $W \cdot m^{-2}$ 。取 30 min 平均值，6 月份的总辐射和反射辐射的最大值分别为 1 369.0 和 260.3 $W \cdot m^{-2}$ ，出现时间均为 6 月 6 日的 12:30，此时总辐射已超出太阳常数，主要原因是受到了日面周围薄云的散射增强作用。前几次珠峰地区的实验中也多次观测到地面太阳辐射超出太阳常数的现象，如在 5 km 测点总辐射曾达到 1 511.8 $W \cdot m^{-2}$ 。6 月绝大部分日期（约占 93%）每日总辐射时均最大值均高于 1 000 $W \cdot m^{-2}$ ，其最小值

为 6 月 28 日的 $937.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。6 月总辐射分钟平均值的最大值为 $1\,683.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，出现在 6 月 26 日的 11:23（此时段云量为 9 成，薄云），高出太阳常数 23.1%。6 月实验期间，总辐射分钟平均最大值有 18 d 超出太阳常数（见图 3）。以 6 月 6 日为例，在 10:45~13:53 时段，总辐射分钟平均值共有 65 次超出太阳常数，10 和 12 时云量（薄云）分别为 6 和 8 成。陆龙骅等^[3]和卞林根等^[4]在青藏高原的辐射观测中也多次观测到类似现象。因此，珠峰地区的太阳辐射非常强，明显高于我国平原地区，这主要是由于其海拔较高（日地距离较小）、大气稀薄（各种成分浓度较低）、洁净（污染物浓度较低）和水汽含量较低。针对此次实验及周边地形的具体情况，总辐射超出太阳常数现象最主要和重要的原因是日面周围薄云的散射增强作用。6 月 12~21 日，基本上全天或正午前后云量都为 1，总辐射最大值的平均值为 $1\,172.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。5 月 30 日、6 月 5 日、6 月 23 日和 6 月 26 日的总辐射大于 $1\,600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，其 11~13 时的云量较薄，大多在 7~8 成，其平均值为 $1\,649.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，因此测点附近云的散射增强作用可以高达 $477.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，约是反射辐射 6 月小时平均值的 1.84 倍。平原地区如北京附近（中国科学院大气物理研究所香河站（ $39^{\circ}45'\text{N}$ ， $116^{\circ}58'\text{E}$ ）的观测数据表明，2005 年 6 月总辐射时均的最大值和平均值分别为 999 和 $462.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从 6 月总辐射时均的最大值及其平均状况来看，珠峰的辐射均远高于平原的北京地区，其总辐射时均的

月平均和最大值分别是平原的 1.12 和 1.36 倍，即总辐射时均的月平均和最大值珠峰比北京分别高 55.3 和 $362.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，其时均最大值之差已经达到香河时均月平均的 78.2%。

2006 年 6 月，珠峰总辐射日总量的月平均值和最大值分别为 26.6 和 $32.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。同样给出平原地区香河的资料作为比较，香河站 2005 年 6 月总辐射日总量的月平均和最大值分别为 20.0 和 $30.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。因此，珠峰总辐射日总量的月平均和最大值分别是平原的 1.33 和 1.06 倍。总体而言，珠峰总辐射在分钟平均、时均和日总量等方面均很强，其最大值和平均值远高于平原地区。为了对比的客观性，以月平均日总量作为评价标准，珠峰总辐射高出平原地区约 33%，即月总量差值为 $198.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。1956 年 6 月珠峰总辐射的月平均日总量为 $28.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[1]。

珠峰地区的辐射组成（直接辐射和散射辐射占总辐射的比例）如何？此次没有测量直接和散射辐射，因此，以 1959 年珠峰地区（绒布寺）的观测结果为例：其总辐射年总量组成中直接辐射（占 76%）超过散射辐射，6 月直接辐射占总辐射的比例约为 68.5%^[1]。我国平原地区的香河，2005 年 6 月的直接辐射占总辐射的比例约为 43%，远小于珠峰地区的比值。平均而言，由于珠峰地区大气气柱中的物质总含量（气溶胶、水汽等）远小于平原地区，因而其辐射组成与平原地区存在较大差别，表现为珠峰地区以直接辐射为主，而平原地区以散射辐射为主。

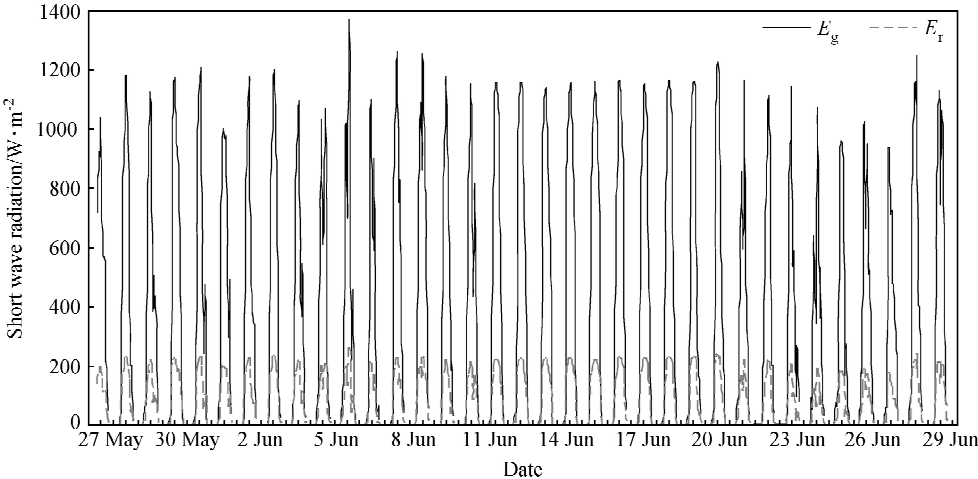


图 2 2006 年 5 月 27 日~6 月 30 日珠峰的太阳短波辐射
Fig. 2 Solar shortwave radiation at the Mt. Qomolangma during 27 May — 30 Jun 2006

珠峰地面的反射辐射在量值上远小于总辐射，其在晴天和云天的日变化特征与总辐射在晴天和云天的日变化特征基本类似。实际上，反射辐射的变化特征以及反射辐射与总辐射的关系都主要取决于地表的组成和特性（或地表反射率）。6月，珠峰反射辐射时均的平均值和最大值分别为 98.8 和 $259.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，2005 年 6 月平原地区的香河反射辐射时均的平均值和最大值分别为 75.5 和 $151.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。因此，前者的平均值和最大值分别是后者的 1.31 和 1.71 倍。珠峰反射辐射 6 月月平均日总量的平均、最大和最小值分别为 5.2 、 6.5 和 $3.4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ，香河 2005 年 6 月月平均日总量的平均和最大值分别为 3.3 和 $4.9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。前者的平均值和最大值分别是后者的 1.60 和 1.32 倍，这表明珠峰地区地表反射的太阳辐射能量远远大于平原地区。虽然两地的地表特征不同（因

而地表反射率也不同），海拔高度差别较大，两地的反射辐射似乎没有多少可比性，但仅从量值上，珠峰和平原地区地表反射辐射的显著差别对了解珠峰地表的辐射特性以及局地气候都具有一定的参考价值。

图 4 给出实验期间每日总辐射和反射辐射时均值的变化率。可以发现一个与平原地区不同而又有趣的现象：1) 总辐射和反射辐射时均值的变化率都在 7 和 9 时出现峰值，且 9 时都为最大值。比较后还发现，7 时的变化率表现为总辐射大于反射辐射，而 9 时则为反射辐射大于总辐射。总辐射和反射辐射变化率在 6~7 时的增加主要是太阳散射辐射由 0 逐渐增加所致；7 时后，太阳高度角逐渐增大，大约到 8:59 东面山的遮挡作用突然消失，引起测点的太阳辐射（主要是直射）激增，因而产生了 8~9 时总辐射和反射辐射最大的增长

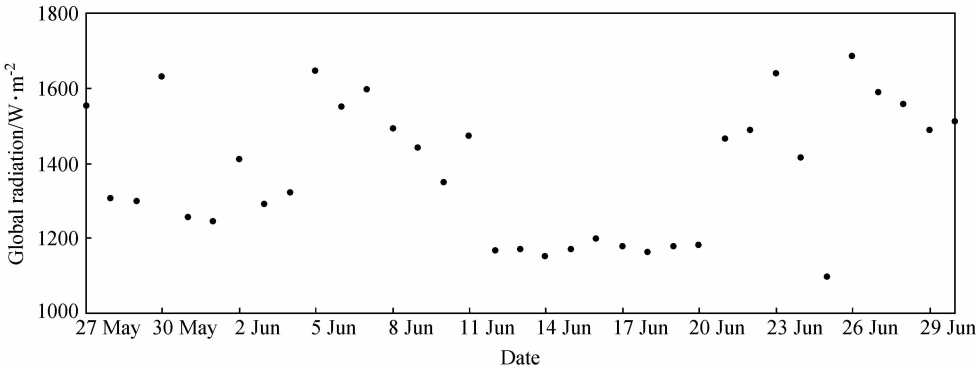


图 3 2006 年 5 月 27 日~6 月 30 日珠峰太阳总辐射分钟平均值的最大值
Fig. 3 The maximum of minute average of solar global radiation at the Mount Qomolangma during 27 May—30 June 2006

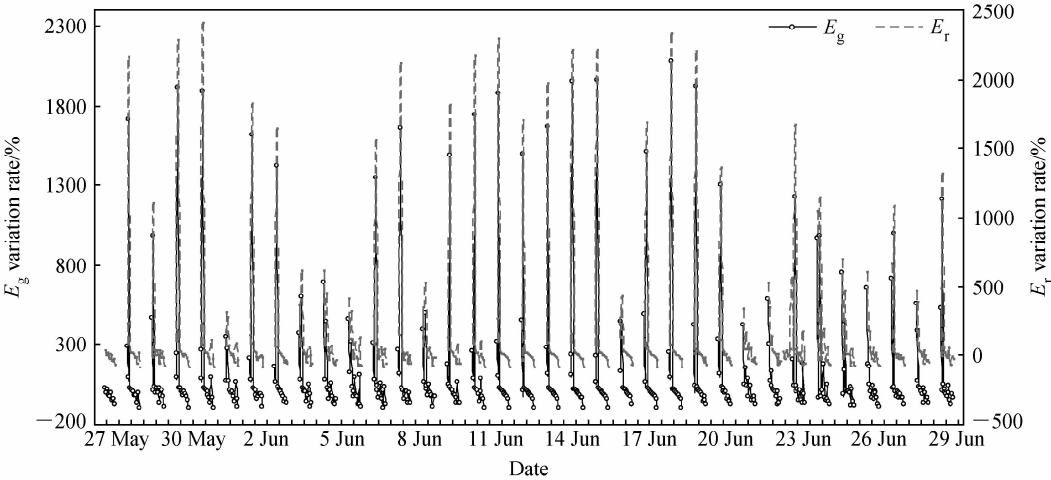


图 4 2006 年 5 月 27 日~6 月 30 日珠峰太阳短波辐射的变化率
Fig. 4 Variation rate of solar shortwave radiation at the Mount Qomolangma during 27 May—30 Jun 2006

率。2) 大多数日期特别是晴天, 在 18~19 时表现出明显大于临近时段并为一日最大的减少率, 这主要是由于西面山的遮蔽作用 (约在 17:54) 导致了此时段总辐射和反射辐射的锐减。因此珠峰北坡独特、东西非对称的地形结构造成了总辐射和反射辐射 9 时最大的增长率以及 19 时最大的减小率。可见, 珠峰北坡 B 区域的地形明显影响到了该区域的辐射特征。平原地区 (如香河), 晴天总辐射和反射辐射变化率的日变化为逐渐减小。

6 月, 珠峰地面反射率 (反射辐射与总辐射之比, E_r/E_g) 时均的平均值、最大值、最小值分别为 19.5%、29.2% 和 11.4%, 其日变化特征整体上表现出正午前的高值和正午的低值, 在 13 时左右达到一个最低值 (早晨和傍晚受地形影响点除外, 见图 5)。为便于对比, 给出我国平原地区 (香河) 地面反射率的日变化特征: 晴天, 2005 年各月大多表现为 U 型曲线, 即早晚高中午低, 但不同月份变化幅度不同; 其他天气, 日变化比较复杂或没有明显的日变化。地面反射率的 U 型日变化特征主要与地表或下垫面的组成、太阳高度角等有关。6 月香河地面反射率时均的平均值、最大值、最小值分别为 17.0%、21.7% 和 13.5%。仔细观察珠峰地面反射率的日变化特征, 发现一个与均一下垫面反射率日变化显著不同而又普遍的现象, 即其在每日 7 时、8 时出现一个最小值或极小值; 在 18 时分别出现最大值或极大值

(符合反射率的日变化规律) 后, 在 19 时却出现一个极小值 (个别日期, 由于云的影响, 这种规律被不同程度地破坏), 其原因主要是由于观测地点东西两面山遮蔽的影响。日出后 8 时及 18 时之后, 测点只接收到太阳的散射辐射, 因此, 8 时之前及 18 时之后的反射率实际上反映了地表对散射辐射的反射率。由于地表对总辐射 (主要是直接辐射) 和散射辐射反射能力的显著差别, 缺少直射导致了北坡地表反射率显著下降的独特日变化特征。明确而言, 珠峰北坡地表对于总辐射的反射率显著大于对散射辐射的反射率。计算表明, 6 月总辐射和反射辐射时均值的变化率在 8 时是一个极小值点, 分别为 77.9% 和 74.8%; 在 19 时是另一个极小值点, 分别为 73.9% 和 73.1%, 与上面的分析是一致的。计算还表明, 6 月反射率时均值的变化率在 8 时和 19 时都是极小值 (都为 -2.7%)。此现象说明, 珠峰 B 区域及其他特殊地形条件下的辐射特征有其特殊性, 在观测和理论研究方面应给予高度重视。

反射率日值 (反射辐射与总辐射日总量之比) 的平均、最大和最小值分别为 19.4%、20.3% 和 17.9%。观测地点周围的下垫面主要由灰白色较圆滑的石块 (可能是以前河水冲刷形成, 目前已是干涸的河床)、沙土、少量杂草组成, 6 月反射率的平均值与寇有观等^[1] 20 世纪 70 年代观测的珠峰北坡河滩卵石的反射率 19% 比较一致。由此可

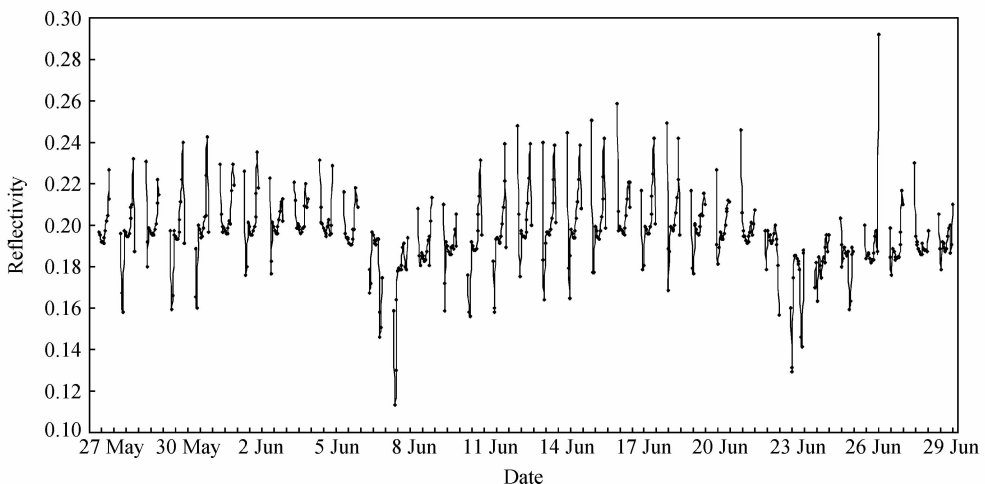


图 5 2006 年 5 月 27 日~6 月 30 日珠峰反射率时均值的日变化

Fig. 5 Daily variation of hourly average of surface reflectivity at the Mt. Qomolangma during 27 May—30 Jun 2006

知，珠峰北坡地表反射率没有太大变化，即珠峰北坡地表的自然状况几十年来变化不大。华北平原香河站辐射观测场地为绿草覆盖，由于地表特征的差别，珠峰地面反射率月均（日值）的平均值和最大值均略高于 2005 年 6 月平原地区香河的相应值（16.6%和 18.3%）。

3.2 长波辐射和有效辐射

此次实验测量了珠峰北坡的长波辐射和净辐射，长波辐射包括向下的大气（长波）辐射（ E_{ld} ）和地面向上的长波辐射（ E_{lu} ）。大气辐射与气温和大气中的水汽含量有关，地面长波辐射与地面温度直接相关。图 6 给出实验期间长波辐射时均值的变化情况。较好的晴天，大气辐射和地面长波辐射日变化规律明显，如 6 月 12~20 日；云天，它们的日变化则比较复杂。（向下的）大气辐射日最大值一般出现在 15 和 16 时，个别日期由于受云、水汽的影响会有一些差别。地面（向上的）长波辐射日最大值大多出现在 13 和 14 时，略迟于每日总辐射最大值的出现时间（这是由于太阳辐射能量被地表物质吸收，然后以长波辐射释放需要一定的时间），但也有一些出现在 12 时。多数情况下，在每日最大值出现的时间方面，地面长波辐射早于大气长波辐射约 1~3 h，它反映了太阳辐射能量作用于地表的过程（太阳辐射能量被地表物质吸收，地表物质以长波辐射形式向

外释放能量）和作用于大气的过程（大气吸收地面的长波辐射以及向下释放）之间存在着明显差别，即太阳辐射作用于地表和大气后，地表释放出长波辐射的最大效应早于大气约 1~3 h。这一特征对详细了解珠峰北坡大气运动、物质与能量交换的规律都是非常重要的。在量值和日变化幅度上，地面长波辐射都远大于大气辐射。6 月，珠峰大气辐射时均的平均值、最大值和最小值分别为 261.6、339.0 和 205.3 $W \cdot m^{-2}$ ，地面长波辐射时均的平均值、最大值和最小值分别为 376.4、544.9 和 291.7 $W \cdot m^{-2}$ 。月平均日总量方面，珠峰大气辐射的平均值、最大值和最小值分别为 22.6、26.4 和 19.2 $MJ \cdot m^{-2}$ ，地面长波辐射的平均值、最大值和最小值分别为 32.5、33.9 和 30.7 $MJ \cdot m^{-2}$ 。1966 年 5 月 23 日 6 时至 24 日 6 时在中绒布冰川（5 440 m）测量的大气逆辐射日总量为 18.4 $MJ \cdot m^{-2}$ 〔1〕，接近此次测量的最低值。从 6 月 12~20 日与 6 月 24~30 日的长波辐射的对比可以看出，云对于大气和地面长波辐射的量值及其日变化特征等都有明显的影响。珠峰 6 月大气辐射与地面长波辐射月平均日总量的比值为 69.5%，小于藏北高原五道梁（35°13'N，93°05'E，海拔 4 612 m）相应值 76.1%〔5〕，这主要是由于大气气柱中物质（如水汽、气溶胶等）含量随海拔高度增加而减少的缘故〔5〕。

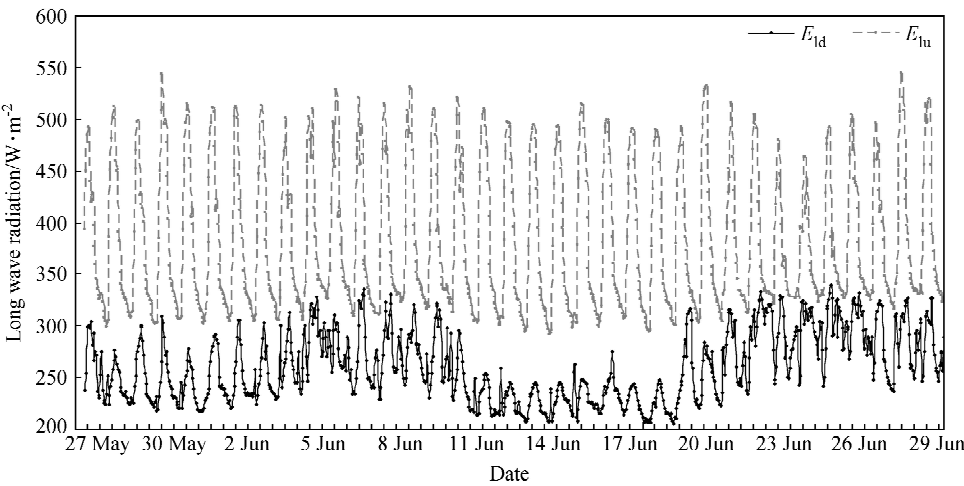


图 6 同图 2，但为长波辐射
Fig. 6 Same as Fig. 2, but for longwave radiation

香河 2005 年 6 月大气辐射日总量的平均、最大和最小值分别为 16.9 、 18.7 和 $15.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ，因而珠峰北坡的大气辐射明显高于平原地区，其平均值和最大值分别是北京的 1.3 和 1.4 倍。

地面有效辐射指地面上的长波净辐射，它是地面降温的支配因素，主要由地面温度和大气中的温度、水汽含量决定^[6]。有效辐射是下垫面长波辐射与大气逆辐射之差。珠峰北坡地面有效辐射的日变化主要表现为 6 时、7 时的最小值（以及晚上的低值）和 12 时、13 时的最大值，此特征在较好的晴天比较明显，如 12~20 日；在云天由于受到云的影响则比较复杂，如 24~30 日，但仍表现出明显的日变化特征（图 7）。另外，云对地面有效辐射在量值上有很大影响，并表现为有效辐射晴天（如 12~20 日）明显高于云天（如 24~30 日）。珠峰 6 月有效辐射时均的平均值、最大值和最小值分别为 114.8 、 266.3 和 $9.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，其日总量的平均值、最大值和最小值分别为 9.9 、 13.0 和 $5.9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。1966 年 5 月 23 日 6 时至 24 日 6 时在中绒布冰川测量的长波辐射平衡日总量为 $9.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[1]，在此次有效辐射观测值的范围内。仔细对比每日有效辐射和净辐射时均最大值的出现时间，发现两者基本是同步的。另一方面，地面长波辐射与大气辐射之比的日变化表现为早晚的低值和 12 时左右的最大值，该比值在 6 月的平均值、最大值和最小值分别为 1.5 、 2.2

和 1.0 。观测发现该比值同样较大程度上受云的影响，表现为云天（如 24~30 日）的比值明显小于晴天（如 12~20 日）。地气系统的能量主要来源于太阳辐射，其损失则主要为短波和长波向外的支出，即表现为地面的反射辐射和有效辐射，6 月它们与总辐射的比值分别为 0.196 和 0.221 ，五道梁地区的相应值分别为 0.286 和 0.336 。因此，珠峰地区地表的净长波辐射占总辐射的比例大于地表反射率，这与青藏高原地区长波辐射的特征——地面长波辐射的净放射在地表辐射平衡的能量支出部分中居首位是一致的^[5]。

对比短波净辐射与长波净辐射白天（7~18 时）的时均值，发现短波净辐射远大于长波净辐射，6 月短波净辐射与长波净辐射时均之比的平均值、最大值和最小值分别为 2.8 、 5.4 和 0.1 。测量表明，珠峰在白天得到的净辐射能量都来自短波辐射。白天时段，珠峰的净辐射和有效辐射在量值上存在显著差别，净辐射大约是有有效辐射的 1.8 倍。

3.3 净辐射

净辐射 (E_n) 指地面接收到的长短波辐射与地面出射的长短波辐射之差，即 $E_n = E_g + E_{ld} - E_r - E_{lu}$ 。净辐射日变化大多表现为 8~9 时由负变正，12 和 13 时达到一天的最大值，每日 18~19 时由正变负，最大的负值出现在夜间 20 时至次日 3 时。有云天气，净辐射的量值及其日变化特征

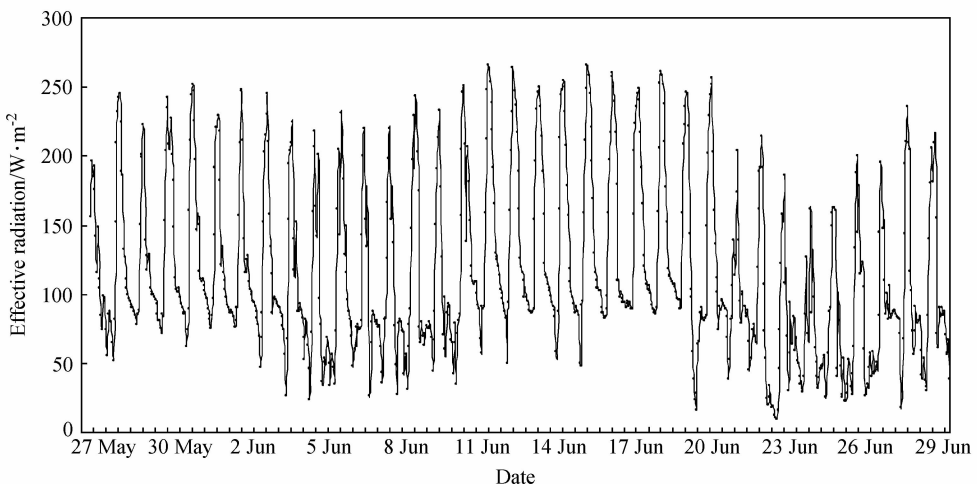


图 7 同图 2，但为有效辐射

Fig. 7 Same as Fig. 2, but for effective radiation

表 1 藏北高原五道梁站和珠峰的辐射参量比较

Table 1 Radiation parameters of Wudaoliang station in the northern Tibetan Plateau and the Mt. Qomolangma

地点	地面长波辐射/ MJ · m ⁻²	大气逆辐射/ MJ · m ⁻²	地面有效辐射/ MJ · m ⁻²	净辐射/ MJ · m ⁻²	地表反照率/ %	总辐射/ MJ · m ⁻²
五道梁	27.62	20.42	7.20	18.84	23.0	34.10
珠峰	32.50	22.60	9.90	11.40	19.4	26.60

都受到不同程度的影响，其正负值之间的转换时间也会有一些变化（图 8）。2006 年 6 月珠峰净辐射时均的平均值、最大值和最小值分别为 132.7、870.9 和 -128.9 W · m⁻²，净辐射时均最大值出现在 6 月 6 日的 13 时。观测期间，净辐射每日的最大值有 15 d 大于 700 W · m⁻²；除 6 月 28 日外，净辐射每日的最大值都大于 600 W · m⁻²。6 月珠峰净辐射日总量的平均值、最大值和最小值分别为 11.4、13.8 和 8.3 MJ · m⁻²，其白天（6 ~ 19 时）日总量的平均值为 14.2 MJ · m⁻²。1959 年 6 月珠峰绒布寺辐射平衡月平均日总量为 15.3 MJ · m⁻²[1]。正的净辐射月平均日总量表明珠峰北坡地面在 6 月获得净的能量或热量，且珠峰北坡地面 6 月白天月平均以及每个白天也是获得净能量。1966 年 5 月 23 日 6 时至 24 日 6 时在中绒布冰川测量的辐射平衡日总量为 18.1 MJ · m⁻²[1]，高于此次观测值，其原因可能与不同的下垫面、海拔高度、大气和天气状况等多种因素有关。

为了了解珠峰地区的辐射特性，表 1 给出五道梁站 1994 年 7 月（晴天）一些辐射量（可参考

文献 [7]）的平均值[8]作为参考，同时给出珠峰 6 月的相应值。

3.4 辐射对温度和湿度的影响

珠峰北坡气温的日变化表现为早晚的低值和午后的最大值，一日的最低值出现在 6 和 7 时，最高值多出现在 13 时左右，晴天日变化特征明显，云天日变化则要复杂一些（图 9）。6 月气温的平均值、最高值和最低值分别为 7.1、14.8 和 -1.5 ℃。相对湿度的日变化为早晚的高值和午后的最低值，一日之中的最高值出现在 6 和 7 时，最低值出现在 13 和 14 时，晴天日变化特征明显，云天日变化则较为复杂。相对湿度的最大值可达 94%，最小值为 9%。可以发现，气温的日变化与有效辐射、净辐射日变化基本类似。仔细对比每日时均值的变化，发现气温最高值出现时间滞后于地面长波辐射和净辐射最大值出现时间约 2 h，个别日期滞后 1 或 3 h。从气温及地面长波辐射最大值出现时间的差别上，可以清楚地看到太阳辐射能量在太阳→地表→大气的传输和交换过程，以及能量在地气间传输、交换所需的时间。平均

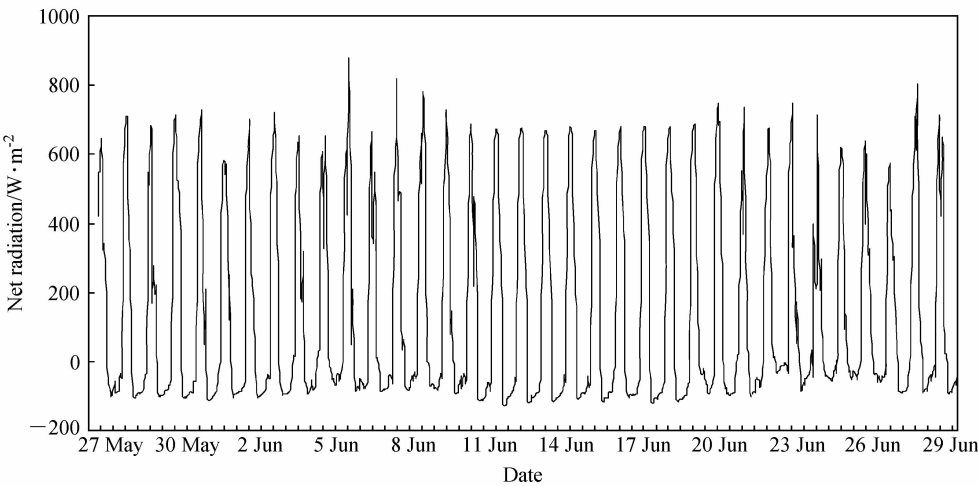


图 8 同图 2，但为净辐射

Fig. 8 Same as Fig. 2, but for net radiation

而言,地表物质吸收太阳辐射并以长波辐射向外释放达到极大值的时间早于大气吸收来自地面的长波辐射并向下释放达到极大值的时间约 2 h。

珠峰 6 月地面水汽压时均的平均值、最大值和最小值分别为 0.5、0.7 和 0.1 kPa, 香河 2005 年 6 月地面水汽压时均的平均值、最大值和最小值分别为 2.0、3.0 和 0.8 kPa。以平均值作为比较, 珠峰地面的水汽压仅是平原的 25%, 即珠峰大气中的水汽含量远低于我国平原地区, 且两者是量级上的差别。

综上所述, 珠峰地区表现出强烈的太阳直接辐射和反射辐射, 其中也包括强烈的紫外辐射 (UV) (根据以往研究结果和此次考察体验), 以及非常低的地面水汽压 (即大气中水汽含量非常少), 使得当地环境与我国平原地区差别较大。

3.5 辐射对风的影响

珠峰北坡的风主要表现为沿山谷 (主要为南北方向) 方向的南风 and 北风 (冰川风)。晴天条件, 每天有 2 个南风极大值, 第一次为 5 时、6 时左右, 风速极大值大约 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 第 2 次风速极大值也是一日的最大值, 大约出现在 16 时、17 时左右, 6 月时均最大风速可以达到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 第 2 次风向转变约在 8~10 时或 9~11 时左右 (第 1 次风向转变多在 4~5 时), 且其转变较快, 之后便维持一个较高的风速, 一直到夜间 (如在 22~0 时) 风速快速减小, 并转为北风, 6 月北风最大值可以达到 $6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。云的影响, 将使白天的

风速显著减小且日变化规律比较复杂 (图 9)。可以发现, 珠峰北坡的风速南风远大于北风 (图 9, 南风为正, 北风为负), 且可清楚看出每日风向转变的规律。比较风速和气温最大值出现的时间, 发现风速最大值的出现时间滞后 2 h 左右。珠峰北坡风向在晴好天气 8~10 时前后的转变以及风速的同步快速增加, 应该是该区域能量较大、变化较快的结果。如前所述, 珠峰白天的总辐射远高于反射辐射, 净短波辐射远高于净长波辐射, 因此, 短波辐射在白天处于主导和支配地位。总辐射、反射辐射、地面长波辐射和净辐射时均值的变化率都在 9 时达到一日的最大值, 而大气辐射没有这一明显的规律, 且其变化率是最小的。6 月总辐射、反射辐射、地面长波辐射、大气辐射和净辐射时均值变化率的最大值分别为 2 087%、2 327%、27%、28% 和 16 231%, 即 8~9 时短波辐射的变化率远大于长波辐射的变化率 (为避免偶然因素带来的误差, 给出 6 月的平均状况)。6 月总辐射、反射辐射、地面长波辐射、大气辐射和净辐射时均变化率的最大值也都出现在 9 时, 其平均值分别为 1 099.5%、1 260.1%、19.8%、2.1% 和 475.7%。且 6 月净短波辐射和净长波辐射时均变化率的最大值也都出现在 9 时, 其平均值分别为 1 068.4% 和 71.1%。可见, 正是由于长短波辐射以及净长短波辐射能量在 9 时快速、最大的增加, 导致了此时段 (及之后) 风速的快速增加。另外, 反射率时均的变化率也在 9 时达到

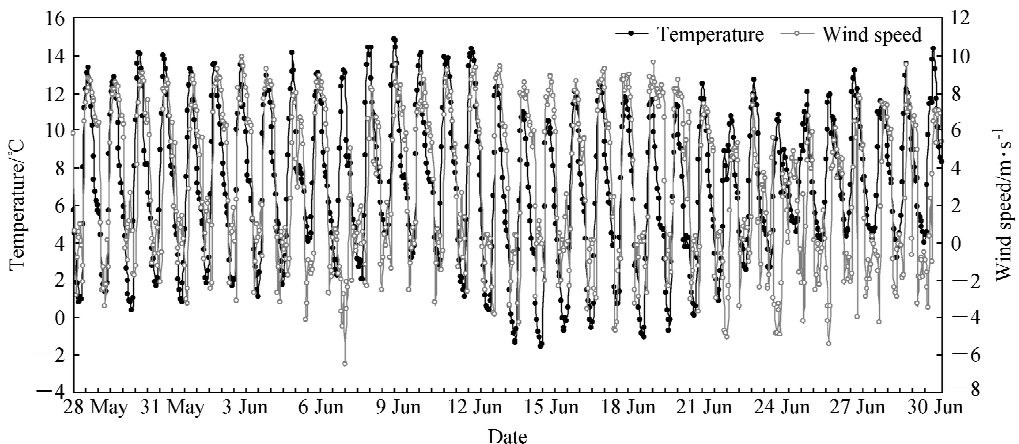


图 9 2006 年 5 月 28 日~6 月 30 日珠峰北坡温度和风速

Fig. 9 Temperature and wind speed at the north slope of the Mt. Qomolangma during 28 May—30 Jun 2006

一日的最大值，即 8~9 时由于东面山遮蔽的突然消失，导致此时段大部分辐射量一日内的最大增长，它表明了珠峰北坡的地形结构对于各辐射量的变化特征及相应的局地温湿度、大气运动等的变化规律都产生了重要且显著的影响。综合来看，正是由于珠峰北坡特有的地形结构造成了各个辐射量在 9 时时段的最大增长，随之而来的是气温的增加以及随后的风向转变和风速的快速增加。它表明：1) 辐射能量的重要性；2) 辐射对于气象参量（温湿度等）和大气运动的重要作用；3) 地形结构和特点对于近地面辐射和气象参量的变化特征，特别是太阳辐射能量作用到地表和大气并产生最大作用效果具有重要且不容忽视的作用。

3.6 辐射和气象参数的月平均

取珠峰辐射和气象参数时值的月平均及其变化率来分析它们的月平均日变化特征。各辐射量都有明显的日变化特征；在量值和日变化幅度上， $E_g > E_n > E_{lu} > E_{ld} > E_r$ 。日变化形状的非对称，即 8~10 时的快速增加以及 15~19 时的缓慢降低反映了东西两面山的不同作用。因而要重视研究山地特殊地形对各种太阳辐射量的影响。珠峰气温的日变化为 8 时后较快的增加，14 时达到一日的最大值，然后缓慢下降。风速的日变化表现为 3~7 时的缓慢增加，然后下降到 9 时的低值；10 时之后有一个快速增长，一直到 16 和 17 时的最大值，然后缓慢下降。气温和风速的日变化同样是不对称的，这反映了太阳辐射以及辐射日变化不对

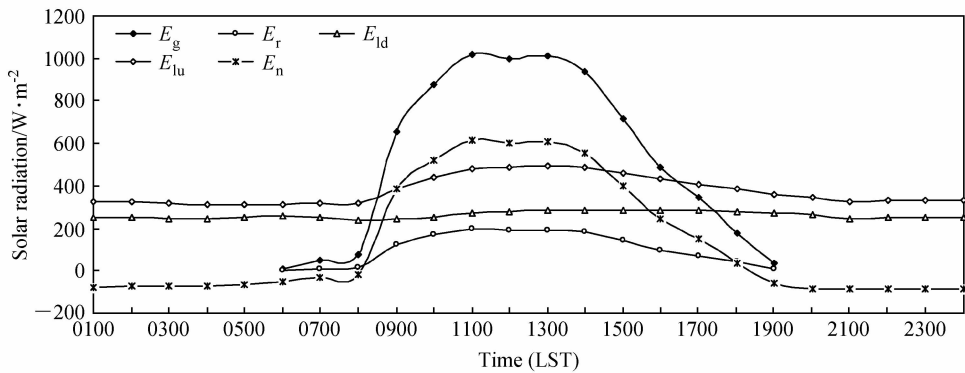


图 10 2006 年 6 月珠峰北坡太阳辐射月平均日变化
Fig. 10 Daily variations of monthly averages of solar radiation at the north slope of the Mt. Qomolangma in Jun 2006

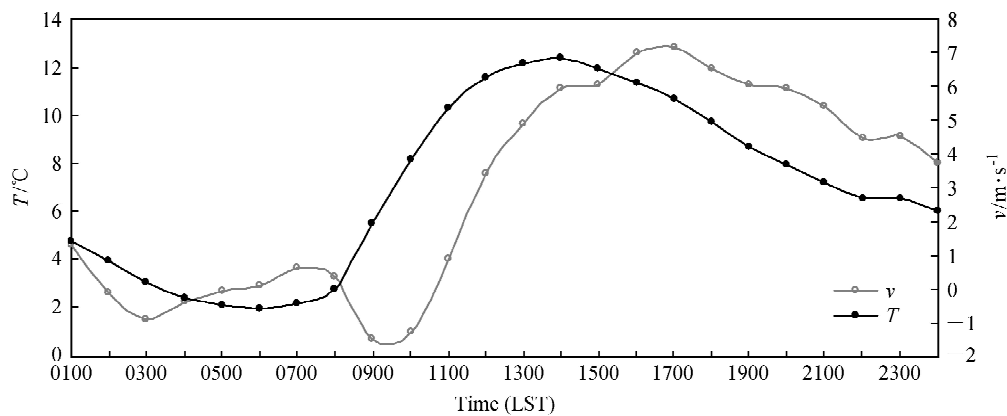


图 11 2006 年 6 月珠峰北坡温度和风速的月平均日变化
Fig. 11 Daily variations of monthly averages of temperature and wind speed at the north slope of the Mt. Qomolangma in Jun 2006

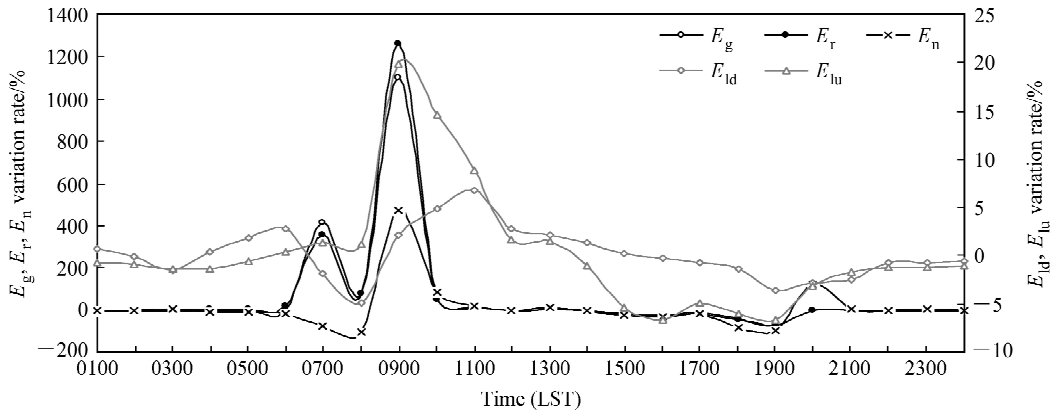


图 12 2006 年 6 月珠峰北坡太阳辐射变化率的月平均日变化
Fig. 12 Daily variations of monthly averages of variation rate of solar radiation at the north slope of the Mt. Qomolangma in Jun 2006

称对它们的重要作用。气温与辐射的增大基本同步，风速要晚 2 h。气温达到一日最大值滞后辐射约 3 h，风速又滞后气温约 3 h，这同样反映出了长、短波辐射对于气温、大气运动的不同作用以及珠峰大气对辐射作用的时间响应。3~7 时时段内，地面长波辐射变化幅度不大（先略微下降而后略微增加），大气辐射缓慢增加（图 10），南风风速由最大逐渐减弱并转为北风（图 11），之后北风缓慢增加，气温逐渐降低到 6 时的低值，然后升高。此阶段地表继续向外散发能量，大气逐渐降温（3~6 时），珠峰主峰地区大气逐渐冷却而收缩，所以南风减弱。6 时气温达到最低，大气密度达到最大，由于主峰区域与其周边区域大气的密度差异，大气转为由主峰区域向下运动，从而风速发生转变。因而，此阶段长波辐射和大气的冷缩过程对于地面风的变化起着支配作用。

最后，计算了辐射量和气象参数 6 月时均逐时的变化率：各辐射量均在 8~9 时达到一日最大的变化率（图 12），即总辐射的快速增加导致了各辐射量的增加，净短波和净长波辐射也在 8~9 时出现一日最大的变化率（图略）。气象参数的变化率：温度的最大变化率出现在 9 时；风速的最大变化率也出现在 9 时，是风向由南风转变为北风后的增长，这表明此时段短波辐射能量的快速增加导致了局地区域大气改变运动方向以及之后风速的继续增加。因此，8~9 时辐射量的快速增长引起了气象参量此时段及以后的快速增加。由于太阳辐射对于气候和大气运动的重要作用，详细研究珠峰北坡特殊地形条件下的辐射特征及辐射

对于局地气候和大气运动的影响是非常重要和必要的。

4 结论

2006 年 6 月在珠峰北坡进行了辐射、气象等综合、连续观测，初步得到了总辐射、反射辐射、大气辐射、地面长波辐射、净辐射、反射率、温度和湿度、风向和风速等的变化特征。观测发现总辐射超过太阳常数的现象，珠峰北坡的辐射（包括总辐射、反射辐射和大气辐射）比较强，远高于我国的平原地区。6 月珠峰北坡白天和全天的净辐射都是正值，表明有净能量输入。各辐射量在量值和日变化幅度上满足 $E_g > E_n > E_{lu} > E_{ld} > E_r$ 。各辐射量以及反射率的日变化表现出明显的非对称性，即上午增长快，下午减弱慢；珠峰北坡特殊的地形结构——非对称性（东面山高而陡，西面山相对低而缓）及其遮蔽作用造成了测点区域各辐射量以及反射率日变化的非对称性。各辐射量的变化率也反映了地形对辐射的影响及影响程度，它们均在 9 时出现极大值，同时也是全天的最大值。多数情况下，地面长波辐射每日最大值的出现时间早于大气长波辐射约 1~3h。因此，应该重视特殊地形对于辐射特征及其变化规律影响的研究。

珠峰北坡的温度和湿度、风向和风速等的日变化特征比较明显，但气温和风速的日变化同样是不对称的，它反映了珠峰北坡辐射日变化的不对称已显著影响到局地的气象参数和大气运动状

态。气温和风速在早晨或上午的增长以及午后达到最大值的时间上均滞后于辐射量的增长和最大值出现的时间。一般，风速最大值的出现时间滞后气温约 2 h，而气温又滞后辐射 2 h。

研究表明，太阳辐射能量作用于地表、大气的过程存在着差别，且地表以及大气对辐射能量的响应过程和时间上也显著不同。各辐射量在 9 时的快速增长，主要是短波辐射的最大增长造成了珠峰北坡风速在同一时段及之后的快速增加。珠峰北坡特殊的地形通过对辐射的作用也影响或改变了局地温度、风等气象参量的日变化特征和规律。

因此，进一步开展珠峰独特地形条件下的辐射、气象参量的长期、综合观测，对于全面和详细地了解珠峰及其周围类似地形的辐射和气象特征、特别是辐射对于大气运动、物质与能量交换过程的作用将具有非常重要的科学意义和价值。

参考文献 (References)

[1] 寇有观，曾群柱，谢维荣，等. 珠穆朗玛峰地区的太阳辐射. 气象与太阳辐射 (珠穆朗玛峰地区科学考察报告，1966—1968). 北京：科学出版社，1975. 118~132
Kou Youguan, Zeng Qunzhu, Xie Weirong, et al. Solar radiation in the region of the Everest. *Meteorology and Solar Radiation (Scientific Investigation Report of the Everest, 1966—1968)* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1975. 118~132

[2] 高登义. 珠穆朗玛峰北坡历年气象考察概况. 气象与环境 (珠穆朗玛峰科学考察报告，1975). 北京：科学出版社，1980. 1~3
Gao Dengyi. Introduction of past meteorological investigations in the North slope of the Everest. *Meteorology and Environ-*

ment (Scientific Investigation Report of the Everest, 1975) (in Chinese). Beijing: Science Press. 1980. 1~3

[3] 陆龙骅，周国贤，张正秋. 1992 夏季珠穆朗玛峰地区太阳直接辐射和总辐射. 太阳能学报，1998，**3**：229~232
Lu Longhua, Zhou Guoxian, Zhang Zhengqiu. Direct and global solar radiations in the region of Mt. Qomolangma during the summer 1992. *Acta Energiæ Solaris Sinica* (in Chinese), 1998, **3**: 229~232

[4] 卞林根，陆龙骅，逯昌贵，等. 1998 年夏季青藏高原辐射平衡分量特征. 大气科学，2001，**25**：576~588
Bian Linggen, Lu Longhua, Lu Changgui, et al. The characteristics of radiation balance components of the Tibetan plateau in the summer of 1998. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25**：576~588

[5] 季国良，江灏，吕兰芝. 青藏高原的长波辐射特征. 高原气象，1995，**14**：451~458
Ji Guoliang, Jiang hao, Lü Lanzhi. Characteristics of long wave radiation over the Qinghai—Xizang Plateau. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1995, **14**：451~458

[6] 王永生等编著. 大气物理学. 北京：气象出版社，1987. 202
Wang Yongsheng, et al. *Atmospheric physics* (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 1987. 202

[7] 朱德琴，陈文，刘辉志，等. 我国西北典型干旱区和高原地区地表辐射能量收支特征的比较. 气候与环境研究，2006，**11**：683~690
Zhu Deqin, Chen Wen, Liu Huizhi, et al. The comparison of surface radiation budget between typical arid region in northwest China and Plateau region. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11**：683~690

[8] 季国良，吕兰芝，邹基玲. 藏北高原太阳辐射能收支的季节变化. 太阳能学报，1995，**16**：340~345
Ji Guoliang, Lü Lanzhi, Zou Jiling. The seasonal variation of surface radiation energy budget over the Northern Tibetan Plateau. *Acta Energiæ Solaris Sinica* (in Chinese), 1995, **16**：340~345