

青藏高原地面辐射平衡和热量平衡考察概况*

高原及山地气象学

翁笃鸣

潘守文

沈志宝

(南京气象学院) (南京大学) (兰州高原大气物理研究所)

青藏高原隆起对我国、亚洲乃至整个北半球的大气环流和天气气候形成起着重要的作用,受到气象学界的普遍重视。其中特别是高原地面对大气的加热作用,更是研究的中心议题之一。因此,在第一次青藏高原气象科学实验期间(1979年5—8月),高原地面热源观测就成了实验的重要组成部分。组织了一批科研人员深入高原腹地进行定点野外考察,并取得了大量实测资料,为研究高原地面辐射平衡和热平衡状况及其季节变化特点创造了条件。现就野外考察概况及取得的主要研究成果简介如下。

一、野外考察概况

野外考察在1979年5—8月间进行。在高原不同地区共设立了6个观测点,分别代表各种自然景观条件(表1)。此外,为了突出青藏高原地面加热特点,还在平原地区设立了对照点(在南京),在拉萨附近的贡嘎还进行了短期对比观测。在格尔木站还利用四种滤光片(JB₂、CB₂、MB₁₁、HB₁₆)进行太阳直接辐射的分光观测。有的站还进行了

表1 青藏高原各考察站点的地理位置、下垫面状况和观测日期

站名	经度 (E)	纬度 (N)	海拔 高度(米)	下垫面 状况	观测日期 (月·日)
狮泉河	80°05'	32°30'	4278	荒漠草地	5.17—8.31
双湖	89°00'	32°38'	4920	荒漠草地	5.21—8.31
那曲	92°03'	31°29'	4507	草地	5.22—8.31
拉萨	91°03'	29°40'	3633	草地	5.6—8.31
林芝	94°28'	29°34'	3000	湿草地	5.11—8.31
格尔木	94°54'	36°54'	2808	盐渍土	5.15—7.6
格尔木	94°48'	36°24'	2841	戈壁	6.28—8.31

地面反射率的流动对比观测。

观测项目和所使用的仪器可见表2。观测时间按地方平均太阳时进行,日间(04—20时)每两小时观测一次,夜间只在00时观测。整个考察期间共取得了数十万个原始数据。

表2 观测项目和所使用仪器

观测项目	所使用仪器
太阳直接辐射 S	日产MS-52型直接辐射表
天空散射辐射 D	日产MS-42型天空辐射表和MB-11型遮光架
总辐射 Q 地面反射辐射 R _g	日产MR-21型反射率表
地面向上长波辐射 U 大气逆辐射 G	美制PIR型精密红外辐射表
地面辐射平衡 B	日产CN-11型净辐射表
各高度空气温度和湿度(20、50、150、200厘米)	国产通风干湿球表(阿斯曼)
地面温度(包括最高、最低)	国产地面温度表(包括最高、最低)
地中温度(5、10、15、20、40、80、160厘米)	国产曲管地温表、直管地中温度表、遥测地温表
土中热通量 H	日产CN-81型土壤热流板
各高度风速(0.5、1.0、2.0、3.0、5.0米)	日产遥测多点风速仪
降水	国产雨量筒
蒸发量	国产小型蒸发皿
日照	国产日照计

二、资料、图集和成果

本次科学考察的主要成果之一是编制了青藏高原1979年5—8月地面辐射平衡和热量平衡各分量旬、月总量图集,以及编印两集高原辐射平衡观测和梯度观测资料。图集包括辐射平衡和热量平衡各分量以及日照等12个项目共192幅图。这是根据各考察点和国家日射站的实测资料,通过经验或半经验途径制订气候计算方法,应用国家气象站网常规气象资料计算并绘制出来的。所用方法包括:

* 本文有删节,参考文献略,全文请见《青藏高原及山地气象会议文集》(英文版)。

1. 总辐射旬平均日总量

$$Q = S_0(a + bS_1) \quad (1)$$

式中Q为旬平均总辐射日总量; S_0 为旬平均天文辐射日总量; S_1 为旬平均日照百分率;

a、b为经验系数。为了提高精度, 计算分7个区域进行。各区域划分及a、b系数可见表3。验算结果, 总辐射旬、月总量的计算误差分别为6.0%和4.5%。

表 3

总辐射计算中各区经验系数a、b值

区 名	塔里木盆地	河西走廊	高原中、西部	高原东南部及雅鲁藏布江、河谷	高原东部	高原东部边缘及四川盆地	云 贵
代 表 站	喀什、和田、若羌、敦煌	民 勤	狮泉河、双湖、格尔木、那曲	拉萨、林芝	昌都、玉树、西宁	兰州、阿坝、成都、绵阳、威宁	昆明、腾冲
相关系数	0.935	0.896	0.860	0.939	0.915	0.890	0.776
a	0.247	0.166	0.277	0.314	0.223	0.190	0.231
b	0.461	0.425	0.588	0.527	0.555	0.518	0.464

2. 地表反射率是根据《中华人民共和国自然地图集》中的土壤、地貌等图幅以及青藏高原自然地理综合考察资料, 并参照中华人民共和国资源卫星影像地图, 确定本区域内 2×2 经纬度网格点上的反射率, 还考虑了季节变化的影响。相对计算误差在10%以内。

3. 有效辐射

$$F = \delta[6T_0^4 - \sigma T^4(A + Bn + Ce)] \quad (2)$$

式中F为有效辐射, T_0 、T分别为旬平均地面和空气温度, n为旬平均总云量, e为旬平均水汽压(毫巴), δ 为比辐射系数, 取0.95, σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, A、B、C为经验系数。计算分三个区进行, 各区经验系数可见表4。应当指出, 按本式得出的是有效辐射平均通量密度, 要计算旬总量还需乘以每旬的时间(以分表示)。上述经验公式的旬、月总量平均相对误差, 分别为6.3%和4.5%。

4. 在计算出总辐射、地表反射率和有效辐射之后, 辐射平衡(净辐射)B可按辐射平衡方程

$$B = Q(1 - A) - F \quad (3)$$

的余项算出。式中A即为地表反射率。据检验, 旬、月辐射平衡总量的平均相对误差依次为9.7%和4.9%。

5. 热平衡各分量的计算中, 感热交换量P采用

$$P = \rho c_p c_D V_{10}(T_0 - T) \quad (4)$$

式中 ρ 为测点地面空气密度, c_p 为空气定压比热, 取0.24卡/克·度, c_D 为拖曳系数, V_{10} 为10米高处风速(米/秒), T_0 、T分别为地面和空气温度。计算旬总量时还需乘以旬

表 4 有效辐射计算式中各区经验系数A、B、C值

区 域	高原主体及周围干燥地区	高原东部及东南部	高原东侧平原
代 表 站	格尔木、双湖、狮泉河、那曲	拉萨、林芝	南京
A	0.548	0.631	0.838
B	0.164	0.200	0.063
C	0.022	0.0084	0.0021

内时间(14400分)。

系数 c_D 采取倒算方法经验地加以确定。对高原地区(海拔高度在2800米以上), 经验公式为

$$c_D = 0.00112 + \frac{0.10}{V_{10}} \quad (5)$$

对于低于2800米的高原边缘地区, 取内插公式

$$c_D = 0.00112 + \frac{0.10}{V_{10}} - 0.0362 \frac{(b - 720)}{280} \quad (6)$$

式中b为计算点的本站气压(毫巴)。

6. 蒸发耗热(潜热)LE采用余项法计算, 即

$$LE = B - P - H \quad (7)$$

式中B为辐射平衡, P为感热交换量, H为土中热交换量。同时还用Bowen比法独立地加以检验, 表明两者结果比较一致。按两种方法计算的潜热量间的相关系数达到0.89, 平均绝对差值为0.2千卡/厘米²·月。

7. 土中热交换可按

$$H = 9.8 + 8.9\Delta\theta_{5-20}$$

计算, 式中 $\Delta\theta_{5-20}$ 为地中 5 厘米和 20 厘米的温度差。

8. 热源强度定义为地面通过感热和潜热输送对大气加热的特征量, 由 B-H 计算得出。

热平衡图组的计算误差, 经闭合热平衡方程检验, 一般在 15% 以下, 平均为 10%, 基本上达到了一般的精度要求。图集明显地揭示出高原夏季辐射场和地面加热场的最主要特点。

三、高原地面辐射平衡和热量平衡场的基本特征

整个 1979 年夏季期间, 高原主体部分始终是一个总辐射的高中心, 5—8 月各月总量都在 15 千卡/厘米²·月以上, 其中尤以高原西部更大 (超过 20 千卡/厘米²·月), 是地球上总辐射量最大的地区之一。相应地, 高原上的辐射平衡月总量也较大。在雨季前的 5 月, 一般都在 6 千卡/厘米²·月以上, 高中心在高原中部 30°N、90°E 附近, 中心数值超过 8 千卡/厘米²·月。进入雨季后, 在高夜雨率的影响下, 由于地面反射率和有效辐射的减小, 7 月辐射平衡反而明显加强, 高中心移至藏南雅鲁藏布江河谷一带, 最大值高于 10 千卡/厘米²·月。

辐射平衡分布形势的季节转换特点, 在拉萨辐射平衡日总量演变曲线中同样明显地反映出来 (参见《气象》1983 年第 7 期第 4 页图 4)。可以看出, 从旱季到雨季, 曲线有明显的跃变现象。在 6 月 17 日进入雨季后, 辐射平衡日总量由旱季的 200 卡/厘米²·日左右, 一下子跃增为 300 卡/厘米²·日左右。这种现象正好与有效辐射显著变小相呼应, 同时也与夜雨所造成的云状况的日变化特点有关。

高原地面加热场特点与辐射平衡分布十分相似。计算表明, 各站点各月热源总量与辐射平衡总量的相关系数都在 0.99 以上。1979 年 5—8 月, 整个高原为一较强热源, 其分布的基本形势是: 由高原中部、南部有一高值脊伸向高原东北边缘, 中心在雅鲁藏布江流域, 最大值在 7 月可达 9 千卡/厘米²·月以上。四川盆地、柴达木盆地至塔里木盆地南缘为低值带 (图 1)。热源强弱因季节转换而有所变化, 但分布形势大体不变。由旱季 (5 月) 进入雨季 (6 月 17 日以后), 因地面辐射平衡增加而热源加强。如以 7 月和 5 月热源量差值表示其演变程度, 则除东部部分

地区略有减小外, 高原其余地区地表热源都有不同程度的加强, 其中尤以南部雅鲁藏布江流域最为显著。

初步分析一下高原夏季地面热源强度与同期 600 毫巴等压面高度和温度的分布, 可

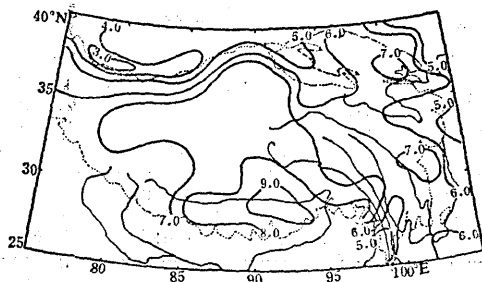


图1 青藏高原 7 月地面热源分布 (千卡/厘米²·月)

清楚地看出它们之间的联系。一般规律是地面热源的高中心 (或高值带) 总是与该等压面高度的低值区和高温区相对应。这说明地面加热场对气压系统的影响是相当明显的。

高原地面对大气加热的总特点是, 在旱季除高原东南部比较湿润地区和四川盆地及其西北部外, 都以感热加热为主, 感热对地面热源的贡献都大于 50%, 整个 90°E 以西地区都在 70% 以上, 塔里木盆地和柴达木盆地则可超过 90%。在雨季, 感热贡献普遍减小, 整个高原东半部都小于 50%, 特别是雅鲁藏布江流域和四川盆地感热贡献可降至 20—30%。只有高原西部和北部边缘荒漠地区仍以感热为主。

图 2、图 3 分别给出了高原感热和潜热自旱季 (5 月) 至雨季 (7 月) 的变化情况 (7 月减 5 月)。由图 2 可看出, 进入雨季后高原上感热普遍减小的情况, 而图 3 则说明潜热显著增长的特点。最大变化区都落在高

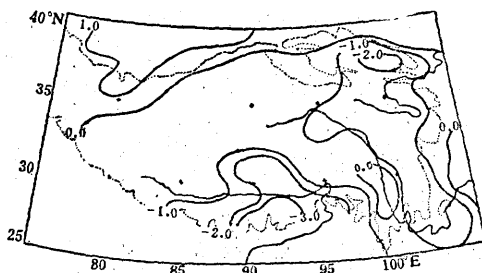


图2 青藏高原 7 月和 5 月地面感热总量之差 (千卡/厘米²·月)

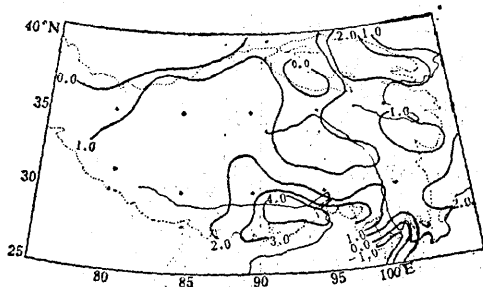


图3 青藏高原7月和5月地面潜热总量之差
(千卡/厘米²·月)

原南部雅鲁藏布江流域一带。这说明正是在这一地区干湿季交替的影响最明显。

根据热平衡资料倒算出各站的空气拖曳系数 C_D 。表明在高原主体部分 C_D 值大致在 $4-5 \times 10^{-3}$ 之间。一般分布特点是东部大于西部，河谷大于平坦地段，最大值可达 9×10^{-3} 。 C_D 值还随季节变化，由5月至7、8月有一定程度的增大。

四、高原辐射和热状况的若干观测事实

1. 观测结果表明，在高原夏季太阳总辐射通量密度超过太阳常数 (1.98 卡/厘米²·分) 是比较常见的现象。在6个考察站的定时观测中就曾出现过15次。这是在适当云天条件下，直接辐射和散射辐射有利结合的结果 (表略)。测得的最大的总辐射通量密度为 2.18 卡/厘米²·分 (拉萨7月2日12时)。此值要比1976年在唐古拉山区测得的最大值 2.30 卡/厘米²·分小。但从分析拉萨的日射自记记录来看，曾记录到极端最大的散射为 1.00 卡/厘米²·分，而正午日面无云时直接辐射通量密度一般可达到 $1.40-1.50$ 卡/厘米²·分。因此，总辐射的最大值还有可能达到 $2.40-2.50$ 卡/厘米²·分。自记记录还表明，在11—13时之间，出现散射辐射超过 0.70 卡/厘米²·分的有20天，每次都可持续半小时左右。因此只要在这段时间中从云隙中露出日光，地面就可观测到超过太阳常数的总辐射通量。所以这无疑是高原辐射气候的重要特点之一。

2. 与此相联系的，曾观测到很大的辐射平衡值。在拉萨测得极端最大的辐射平衡通量 1.60 卡/厘米²·分，正好与最大总辐射通量 2.18 卡/厘米²·分同时出现。就我们所知，这是迄今为止，在地面日射观测中得到的实测最大辐射平衡值。观测是可靠的。为了说明这一点，表5列出了同时刻各分量实

测值。由于各分量均系实测，在辐射平衡中它们之间有微小的不闭合是很自然的。此外，在其它测点还有6次出现辐射平衡超过 1.30 卡/厘米²·分的纪录。这些都大大超过了文献上记载的最大辐射平衡值 (在帕米尔高原1956年7—8月， 110 卡/厘米²·分)。

表5 1979年7月2日12时实测辐射平衡
各分量值(卡/厘米²·分)

项 目	直接 辐射 S _d	散射 辐射 D	总辐 射 Q	反射 辐射 R _k	地面向 上辐射 U	大气逆 辐射 G	辐射 平衡 B
通量密度	1.39	0.81	2.18	0.40	0.75	0.58	1.60

我们还测得地面上最大的有效辐射通量。文献上已知的有效辐射最大值 0.44 卡/厘米²·分是出现在中亚沙漠地区。考察期间高原上的那曲、狮泉河、拉萨等站的有效辐射先后共10次达到或超过此值，在那曲 (5月26日12时) 曾出现 0.50 卡/厘米²·分的极值。

3. 分析了高原及其边缘地区的大气透明度状况，绘制出高原地区大气透明度系数 P_2 的分布图 (图4)，首先揭示出海拔高度对大气透明度的影响。在高原主体部分绝对气质下的大气透明度系数 P_2 可达 0.76 以上，而在四川盆地和塔里木盆地只在 0.56 以下，相差十分悬殊。高原上的大气透明度系数在时间上的变化 (无论是日变化或季节变化) 都要比平原上稳定。

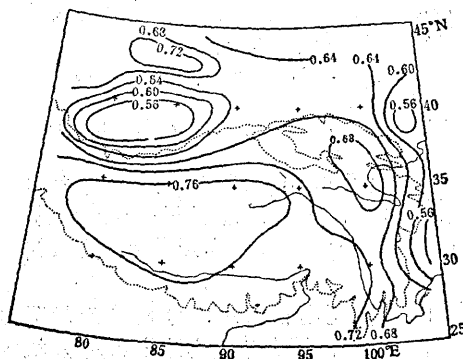


图4 青藏高原8月大气透明度系数 P_2 (订正到绝对气质下) 分布

此外，在格尔木站还用滤光玻璃片更细致地观测了尘埃和水汽对太阳辐射的削弱，得到一些有意义的结果。

4. 初步研究表明，晴空条件下辐射平衡各分量随测点海拔高度变化的规律十分清楚。它们可用一组经验公式相当精确地表现

出来。

直接辐射和总辐射随高度按指数关系递增,而散射辐射则按负指数律递减。经验公式形式为

$$Q = Q_0 \exp[a_Q(1 - \frac{p}{p_0})]$$

$$S' = S_0' \exp[as(1 - \frac{p}{p_0})]$$

$$D = D_0 \exp[ad(\frac{p}{p_0} - 1)]$$

式中 S_0' 、 Q_0 、 D_0 分别为海平面直接辐射、总辐射和散射辐射值; a_Q 、 as 、 ad 为经验系数; p 、 p_0 分别为测点和海平面气压。

对于有效辐射和大气逆辐射,则可由

$$F = F_\infty \left[1 - \frac{d}{H+d+1} \right]$$

及

$$G = G_0 e^{-\alpha H}$$

满意地反映出它们随测点海拔高度的变化。式中 F 为测点有效辐射; G 、 G_0 则为到达测点和海平面的大气逆辐射; H 为测点高度; F_∞ 、 d 、 α 为经验系数,其中 F_∞ 具有外延的大气上界散逸散射的性质。

有的工作还比较了1979年高原科学实验期间的资料和第一次全球大气科学试验计划(FGGE)中季风试验(MONEX)的全部辐射观测资料,结果发现,不论在青藏高原还是印度次大陆或印度洋洋面上,大气逆辐射都能满足下列经验式

$$G = \epsilon_0 \sigma T_a^4 (1 + 0.200 - 0.005e)n]$$

其中 $\epsilon_0 = 0.649 + 0.313 \lg \frac{p}{p_0} + 0.217 \lg e$

式中 T_a 为百叶箱气温(K); e 为地面水汽压(毫巴); n 为平均总云量; p 、 p_0 分别为测点和海平面气压, σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数。

5. 我们还比较系统地分析了云状况对辐射平衡各分量的影响。统计出各种云状对直接辐射的透射系数,以及各种云状阴天下的散射辐射、大气逆辐射、有效辐射以及辐射平衡通量密度的大小。同时,还分析了各级总云量下辐射平衡各分量日总量的变化曲线(见《气象》1983年第7期第4页图3)。云量对各时次通量密度的影响也有类似特点。

6. 青藏高原主体部分5—8月实测地表反射率在16—28%之间。它的月际变化主要

与雨季前后地面湿润状况的改变有关,随着雨季来临,降水增多,土壤上层湿度增加,植被开始生长,于是反射率明显下降。图5给出了拉萨地面反射率随土壤湿度变化情况是比较典型的。在有的站点(如那曲等地),发现地表反射率与旬、月降水量间也有较好的联系。野外考察表明,高原地面的实际反射率一般要比以前某些估计低10%左右。

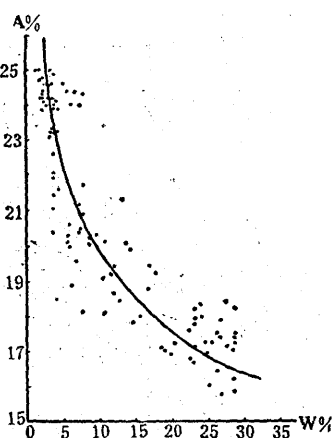


图5 拉萨日平均反射率与土壤湿度的关系

与雨季前后地面湿润状况的改变有关,随着雨季来临,降水增多,土壤上层湿度增加,植被开始生长,于是反射率明显下降。图5给出了拉萨地面反射率随土壤湿度变化情况是比较典型的。在有的站点(如那曲等地),发现地表反射率与旬、月降水量间也有较好的联系。野外考察表明,高原地面的实际反射率一般要比以前某些估计低10%左右。

7. 通过实测得到比较完整的各站晴空条件下辐射平衡各分量的典型日变化曲线,还得到了实测的地面和地中各深度的热通量日变化曲线等。

通过梯度观测,对高原近地层物理状况有了较多的了解,其中包括各种气象要素的廓线、湍流交换系数大小、层结稳定度特点、地表粗糙度参数等。在考察过程中特别对计算热平衡各分量的各种现有方法进行了多方面的试验和比较。

结 束 语

我国第一次青藏高原气象科学实验热源考察,基本上取得了预期的结果,成绩是应当肯定的。但是也存在某些不足,首先本次考察只在夏季进行。因此,所得结果尚不能反映高原热状况的全年特征,特别是关于高原地面冬季的冷热源问题还需作进一步的研究。其次,高原旱季地面空气十分干燥,加之风沙较大,对通风干湿表的观测精度有较大影响,给以后的资料分析、处理带来一定困难。此外,现有的计算热平衡各分量通量的方法,无论是热平衡法,还是各种类型的扩散法、相似理论法等,在高原条件下使用都有一定局限性,因此,从理论和实际上研究适合于高原的计算公式,是今后继续开展高原热源研究的关键。最后,考察点的数量显然还远远不够。仪器装备的自动化、遥测化水平也不够。这些都有待于未来加以克服。