0577-6619/2012/70(4)-0837-46 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

青藏高原东南部云状况与地表能量收支结构*

蔡雯悦[1,2,4] 徐祥德[2] 孙绩华[3]
CAI Wenyue[1,2,4] XU Xiangde[2] SUN Jihua[3]

1. 南京信息工程大学,南京,210044
2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京,100081
3. 云南省气象科学研究所,昆明,650034
4. 国家气候中心,北京,100081
1. *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044, *China*
2. *State Key Laboratory of Severe Weather*, *Chinese Academy of Meteorological Sciences* (*CAMS*), *Beijing* 100081, *China*
3. *Meteorological Institute of Yunnan Province*, *Kunming* 650034, *China*
4. *National Climate Center*, *Beijing* 100081, *China*

2011-04-08 收稿,2011-05-06 改回.

Cai Wenyue, Xu Xiangde, Sun Jihua. 2012. An investigation into the surface energy balance on the southeast edge of the Tibetan Plateau and the cloud's impact. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(4): 837-846.

Abstract The Tibetan Plateau and the Loess Plateau in spring and summer are the high value areas of solar total radiation and land-air temperature difference, as well as the anomalous areas of cloud covers in China. The structural characteristics of the surface energy balance (SEB) components in the Tibetan Plateau and the Sichuan Basin are investigated in this paper using the boundary layer integrated system observations at Dali, Linzhi, and Wenjiang flux station, from the angle of energy balance, to further understand the impact of clouds' status on the SEB components. The study indicates that on the southeast edge (Dali, Linzhi, Wenjiang) of the Tibetan Plateau, the sensible and latent heat ($H+LE$) were significantly correlated with the available energy (R_n-G_0), showing the basic feature of SEB closure, but there still was a discrete phenomenon of SEB non-closure, especially in the surface layer where the feature of SEB non-closure became more obvious with increasing surface flux and available energy. The low cloud cover in the southeastern part (Dali, Linzhi) of the Tibetan Plateau in spring and summer was significantly negatively related with the surface sensible heat flux, but its correlation with the latent heat flux was weak and uncertain. The correlation between the low cloud cover and the sensible heat flux in spring was more significant in the southeast edge (Dali, Linzhi) than in the Sichuan Basin region (Wenjiang) and, the low cloud in the plateau region played a "cooling" role in the surface layer energy budget and the low cloud cover was significantly positively correlated with the downward long-wave radiation. This result describes the heating feedback effect of the radiation forcing of low clouds on the land surface, i. e. the low cloud status in the Tibetan Plateau could be indirectly expressed with the downward long-wave radiation fluxes observed at flux towers. The analyses of the observations also suggest that the impact of low clouds on the SEB at Wenjiang station situated in the Chengdu plain was far less than that in the Tibetan Plateau. The research results suggest that high value areas of the downward long waveradiation associated with low clouds might be one of the important influential factors for the occurrence of the near-solar constant phenomenon in radiation observation in the plateau.

Key words Tibetan Plateau, Energy balance, Low cloud cover, Total cloud cover, Sensible heat, Radiation

---

* 资助课题:青藏高原对梅雨区水分循环及降水变异的影响(41130960)、中日政府间合作 JICA 计划、科技部国际合作项目(2009DFB20540)、科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006009)、灾害天气国家重点实验室自主研究项目(2009LASWZF02)、青藏高原及东侧观测布局关键技术研究(GYHY201006053)。

作者简介:蔡雯悦,主要从事大气湍流及大气边界层研究工作。E-mail: caiwenyue@sina.cn

摘 要 采用不同区域边界层综合观测系统,从地表能量收支平衡的视角,探讨青藏高原与四川盆地能量平衡各分量结构特征,进一步认识云状况对能量平衡分量的影响问题。研究表明,青藏高原东南部大理、林芝、温江各站地表通量感热、潜热与有效能源两项相关特征明显,即存在能量闭合基本特征,但能量收支仍存在不闭合离散现象,尤其随着近地层地表通量与有效能源的增大,其非闭合特征更加明显。青藏高原东南部(大理、林芝)春、夏季低云量与感热呈显著负相关,潜热则呈不确定特征。对于春季低云量与感热相关性,高原东南部(大理、林芝)远比四川盆地(温江)相关更为显著,高原区域低云量对上述近地层"能量收支"起"冷却"作用,且低云量与向下长波辐射呈显著的正相关,此研究结果描述了低云量对陆面辐射强迫的"加热"反馈效应,即高原区域低云量状况亦可用边界层通量塔向下长波辐射量来间接表征。观测分析结果亦表明平原该站低云量对向下长波辐射影响远不如高原区域。研究结果表明,青藏高原区域与低云量有关的向下长波辐射高值区可能是出现近太阳常数现象的重要因素之一。

关键词 青藏高原,能量收支,低云量与总云量,感热,辐射

中图法分类号 P422.4

1 引 言

青藏高原地-气系统的能量收支交换是研究大气能量循环的基本问题(沈志宝等,2002)。1979 年第一次青藏高原气象科学实验(QXPMEX),1982—1983 年青藏高原热源野外考察(季国良等,1985),1998 年 TIPEX 及 GEWEX 亚洲季风实验-青藏高原实验(GAME-Tibet)(王介民,1999),都将高原地表辐射平衡和热平衡的时空变化作为主要观测研究项目,在高原辐射气候的研究方面取得了重要的进展,揭示了许多有意义的观测事实(沈志宝等,1987;卞林根等,2001;章基嘉等,1988)。大量研究表明青藏高原大气热源状况与局地低云,例如对流云的相关特征有关。Flohn(1968)强调高原东南部巨大的积雨云对上层大气输送热量的烟囱效应;青藏高原地区的地-气相互作用非常明显,且云状况与平原地区存在明显差异(王可丽,1996)。夏季高原上低云量大,且以高大的积状云(浓积云和积雨云) 为主(沈志宝等,2002)。

高原上云不仅对地面具有温室效应,对地-气系统和地面-对流层系统同样具有温室效应(沈志宝等,2002)。地-气系统获得的净辐射及由辐射引起的不同加热分布都强烈地受云的影响(汪宏七等,1994)。青藏高原甘孜、改则、拉萨和那曲 4 站春季云的存在使地表净辐射减小 27.5 W/m^2,夏季云的存在使地表净辐射减小 20.8 W/m^2(王可丽,1996)。云净辐射强迫值约是 CO_2 加倍造成辐射效应的数倍,因此,云辐射强迫值变化会在气候反馈机制中起重要的作用(马晓燕等,2000)。对云辐射强迫的研究结果(马晓燕等,2000;王可丽等,2002;刘艳等,2002;Rossow,et al,1990;Harrison,et al,1990;Huang,et al,2006;Ramanathan,et al,1989)表明,虽然对于全球范围年平均来讲,云对地-气系统的辐射收支具有净的冷却效应,但就区域和季节来看,云的净辐射效应却是多变的,高山、沙漠、绿洲等复杂地形,云对气候环境的反馈作用(即云辐射强迫)的模式模拟存在很大的不确定性(陈勇航等,2008)。作为气候系统中描述地-气相互影响的关键热力因素,辐射能可通过地表能量平衡机制来驱动大气运动。因此,认识青藏高原地表辐射能收支时空变化对气候变化特征研究有重要意义。

2 观测站环境

本文选择 JICA 项目已建成的青藏高原东南部大理站(中国气象局)、林芝站(中国科学院)与温江站(中国气象局)为边界层通量观测试验研究关键站。

大理边界层通量观测系统位于大理国家气候观象站(25°42′N,100°11′E)内,海拔 1990.5 m。观测场四周环境基本可代表云贵高原西部山谷盆地地形地貌和植被特征,观测场主要为农田生态(杨智等,2001)。

林芝边界层通量观测系统建在山谷中(29°46′N,94°44′E),海拔 3327 m,观测场下垫面较为平坦,四周为林地,地表为高原草甸,生长状况良好。

温江地处亚热带湿润气候区,边界层通量观测站位于(30°42′N,103°50′E),海拔约 539 m,下垫面地势平坦,以农田生态为主。

3 观测站资料来源及处理方法

本文选取"JICA 中日气象灾害合作研究中心"项目数据集(Xu,et al,2008)中 2008 年大理、林芝、温江 3 个站边界层通量塔观测系统数据,即边界层观测系统向上、下长、短波辐射、超声风、温(10 次/s)、铁塔梯

度风、温、湿度数据、土壤热通量及土壤温、湿度等综合观测数据。采用卞林根、马永峰等质量控制软件系统,即湍流相关法计算感热(H)、潜热(LE)等参数。计算时进行噪声剔除(Kaimal,et al, 1963)、坐标系旋转修正(王春林等,2007)以及潜热通量 Web 订正。另外,数据处理可获取不同时间尺度平均值(10、30、60 min)以及日平均值和月平均值。另外,还选用中国国家气象信息中心发布的中国地面气候资料定时值数据集 2008 年总云量以及低云量逐时资料;中国地面气候资料日值数据集 1951—2010 年总云量、低云量、气温、0 cm 地温逐日资料;中国辐射月值数据集 1957—2010 年太阳总辐射月值资料。

4 青藏高原区域云状况与太阳辐射、地气温差空间分布特征

由图 1a、b 可见,春季青藏高原及其向东北延伸的黄土高原构成与地势高度相关的太阳总辐射高值显著区域,同时此中国区域"西高东低"的阶梯型大地形亦为春季地气温差的极值区,即太阳总辐射与陆气通量有关的地气温差高值区相吻合;由图 1c、d 可发现低云量与总云量高值区自中国东南沿海向西北方向延伸,构成了青藏高原区域低云量、总云量均显著高于同纬度季节性云状空间差异的特征,且春季青藏高原低云量与总云量均为同纬度的高值区

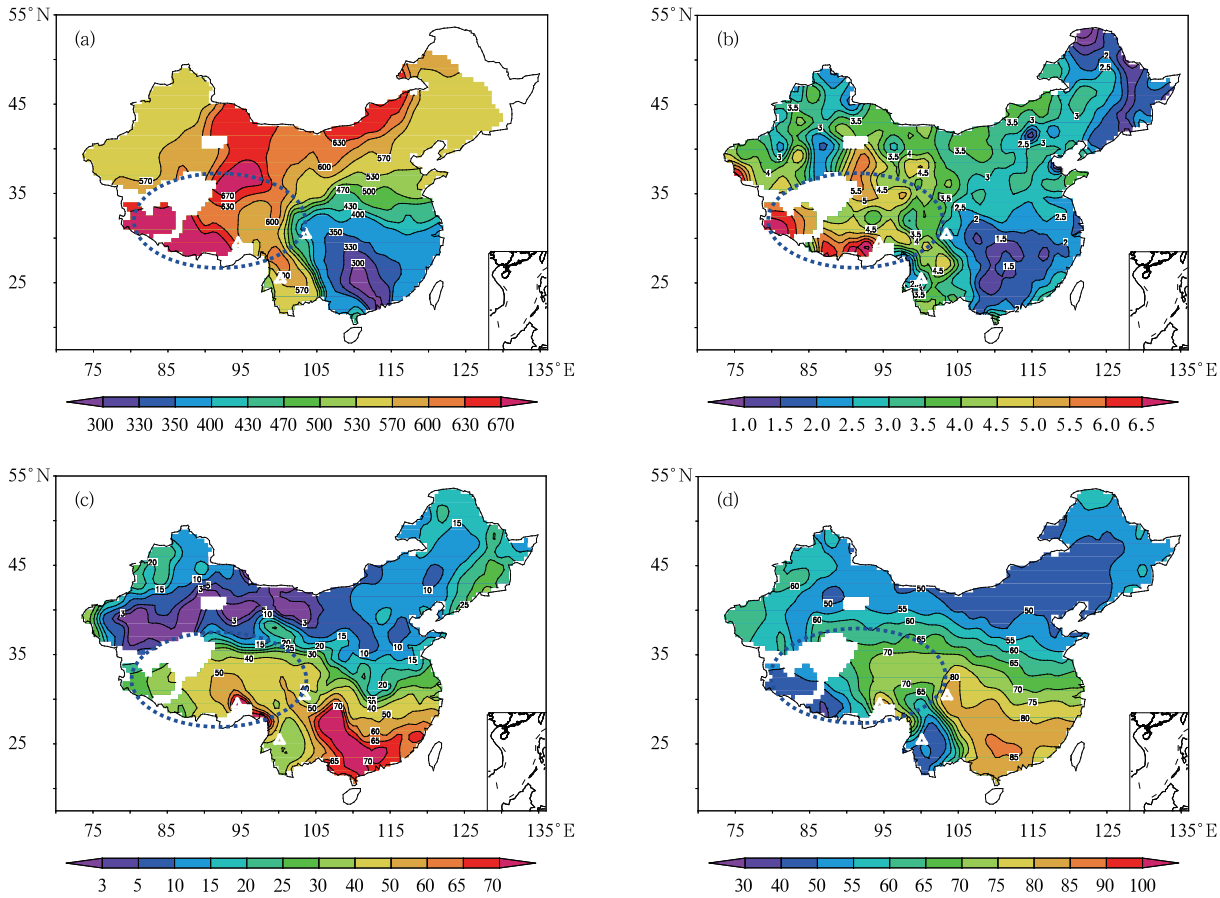

图 1 春季青藏高原区域云状况与太阳辐射、地气温差空间分布特征

(a. 太阳总辐射平均场(MJ/m^2;1957—2010 年) b. 地气温差平均场(℃;1951—2010 年)
c. 低云量平均场(%;1951—2009 年) d. 总云量平均场(%;1951—2009 年);
椭圆形虚线为高原主体范围)

Fig. 1 Spatial patterns of the spring-averaged (a) total solar radiation (W/m^2; 1957 - 2010), (b) land-air temperature difference (℃; 1951 - 2010), (c) low cloud cover (%; 1951 - 2009), and (d) total clouds cover(%; 1951 - 2009) in the Tibetan Plateau region and its adjacent areas

(图 1a—d 椭圆形虚线范围所示)。综上所述,从海-陆热力差异的季风驱动力的视角,认识青藏高原独特的云状况反馈影响,探讨阶梯型大地形高原区域辐射强迫及其感热通量的影响因素,亦为当前中国及东亚气候变化研究的关键。本文分析研究的 3 个边界层综合观测站,正处于上述高原及其周边云状、辐射以及地气温差分布的极值特征区。

5 青藏高原东南部感热与地表能量平衡各分量的相关特征

到达地表总辐射的时空分布受地理位置、太阳赤纬、大气透明度和云量等因素的影响(周明煜等,2000)。高原下垫面对大气的加热作用是由辐射过程和湍流过程的平衡决定的(周明煜等,2000)。前者是指地表吸收和射出短波和长波辐射的能量变化,后者则是指近地层吸收太阳辐射能以湍流方式向大气输送热量和水汽的能量消耗(周明煜等,2000)。假设将地表看作无限小的薄层,热容量为零,得到的热量必须和散发的热量平衡(约翰·M 华莱士等,2008)。下垫面的热平衡方程为

$$R_n - G_0 = H + LE \tag{1}$$

$$G_0 = G_1 + G_g \Delta Z \frac{\partial T_s}{\partial t} \tag{2}$$

$$R_n = R_D - R_U + R_{DL} - R_{UL} \tag{3}$$

式中,H(W/m^2)和 LE(W/m^2)分别为感热通量和潜热通量,G_0(W/m^2)为地表土壤热交换通量,R_n(W/m^2)为净辐射(又称辐射平衡),R_D(W/m^2)为太阳总辐射(向下短波辐射),R_U(W/m^2)为地表反射辐射(向上短波辐射),R_{DL}(W/m^2)为大气逆辐射(向下长波辐射),R_{UL}(W/m^2)为地面放出的长波辐射(向上长波辐射),G_1(W/m^2)为地表 0.04 m 深度处测得的土壤热通量,G_g(1.47×10^4 J/(m^3·K))是土壤的体积热容量,T_s(℃)是厚度为 0.04 m 的浅土层平均温度,ΔZ(m)为土壤厚度(取 0.04 m)。以上参数均为实测值。方程(1)的左边项($R_n - G_0$)和右边项($H + LE$)都可以称之为热源强度(周明煜等,2000)。

本文采用高原东南部(林芝、大理)与四川盆地温江站边界层通量观测系统资料,计算分析了上述能量平衡方程(1)中右边地表能量通量 $H + LE$(感热、潜热)与左边有效能源 $R_n - G_0$(净辐射、地表土壤热通量)中的各项。研究表明,感热、潜热通量与有效能源等能量平衡各分量相关特征受到不同地势高度(高原、平原)、不同下垫面特征的地-气过程的影响,形成了反映季节变化以及大气边界层状况的复杂性特征。从地表能量收支平衡的视角,进一步分析了大理、林芝与温江 3 个边界层通量观测站近地层地表通量($H + LE$)状况,图 2 为大理、林芝与温江 3 个边界层通量观测站春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)边界层通量与有效热源能量收支的相关散点图,可发现高原东南部各站具有明显的能量收支相关特征。大理、林芝与温江站的观测计算结果表明,3 个站存在能量收支基本平衡的特征,相关系数均在 0.82 以上(总样本数>1000),正比例函数回归线的斜率 ε 均在 0.43 以上,其中,ε 林芝明显低于大理、温江站。国际上的一些外场观测试验和 CO_2 通量网观测分析结果表明,观测资料能量平衡的不闭合在绝大多数情况下是普遍存在的现象,而这种不闭合的原因与非均匀下垫面所取的空间和时间尺度有关(Foken,2008)。有关研究表明,对于造成地表能量不平衡的物理机制尚待探讨,地表能量不闭合成因包括观测仪器误差与准确测量公式中各项或部分项能力不足,通量计算客观性描述问题,非均匀下垫面或地形热力差异引起的平流、小尺度对流等(Zhu, et al,2003;Brotzge, et al,2003;张宇等,2004)。本文计算结果表明,3 个站能量闭合程度均存在不同的离散度(图 2a—f),可见 3 个边界层通量站均存在能量收支不平衡的情况,尤其在($H + LE$)与($R_n - G_0$)两坐标高值区呈相关离散度辐射状的能量非闭合增大区。这表明由于林芝观测场山谷地形可能构成非均匀下垫面及其局地地形热力差异等因素在不同程度上影响了地表能量收支平衡及其两项相关图斜率特征。

为了描述能量通量与有效能源相关散点图中不同量值区间能量闭合程度差异,采用($R_n - G_0$)与($H + LE$)两项不同区间量值等级求取分段样本相关系数,由图 3 可见,($R_n - G_0$)与($H + LE$)两项量值等级变大,其相关系数呈下降和略升趋势。总体上,计算结果表明($R_n - G_0$)与($H + LE$)两项高量值区域,其相关性离散度大,能量闭合程度明显减弱。

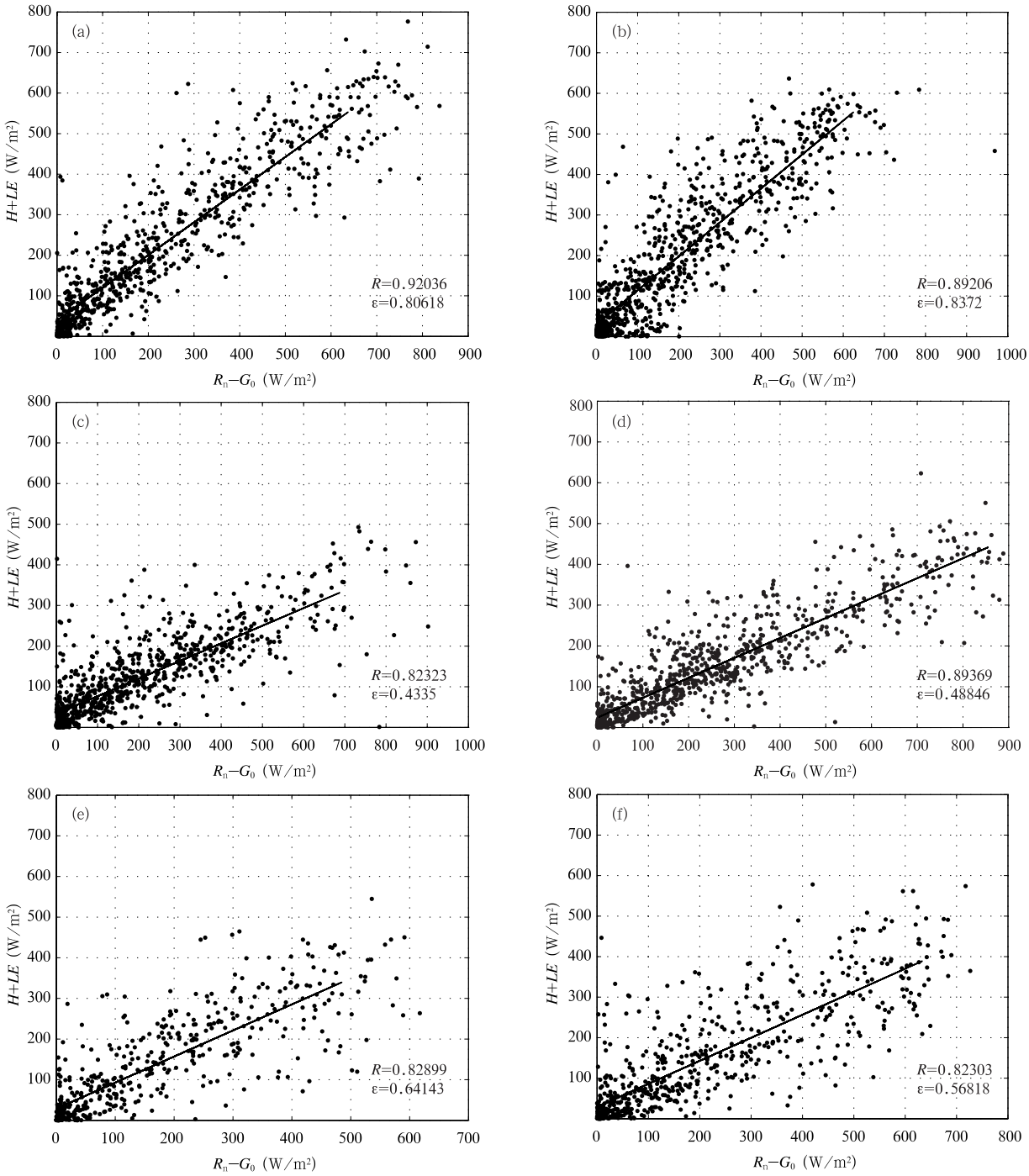

图 2　大理、林芝与温江 3 个站能量闭合特征相关散点图

(a. 春季大理,c. 春季林芝,e. 春季温江,b. 夏季大理,d. 夏季林芝,f. 夏季温江;
各站逐时各项资料样本数>1000)

Fig. 2　Scattergrams of $R_n - G_0$ vs. $H + LE$ (a, b) Dali, (c, d) Linzhi and (e, f) Wenjiang station in spring (a, c, e) and summer (b, d, f)

(The total numbers of the samples in the interval of 1 h for each figure are greater than 1000)

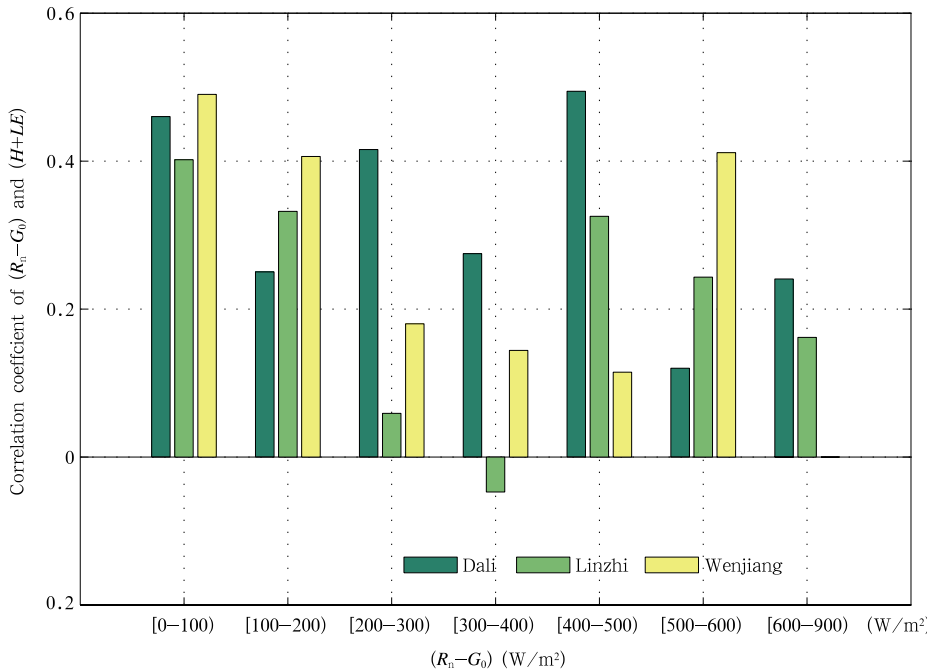

图 3 大理、林芝与温江春季($R_n - G_0$)与($H + LE$)
两项不同区间量值等级分段相关特征直方图
(逐时数据;大理春季各区间样本数 296、142、96、76、59、55、61;
林芝春季各区间样本数 394、158、114、82、64、30、44;
温江春季各区间样本数 245、88、63、49、40、117、1)

Fig. 3 Histogram of the corresponding correlation coefficient (the ordinate)
between ($R_n - G_0$) and ($H + LE$) (the abscissa) at Dali,
Linzhi and Wenjiang flux station in spring
Statistical sample numbers to [0 - 100), [100 - 200),
[200 - 300), [300 - 400), [400 - 500), [500 - 600),
[600 - 900) W/m² at Dali, Linzhi, and Wenjiang are 296,142,96,76,59,55,61;
394,158,114,82,64,30,44; and 245,88,63,49,40,117,1, respectively.
The magnitudes of ($R_n - G_0$) and ($H + LE$) used are in the 60-min time interval

6 青藏高原东南部云状况对陆面过程热量平衡辐射分量的影响

第 2 次青藏高原科学试验那曲地区雷达观测亦发现高原中东部对流云呈水平尺度小、垂直厚度高的柱状单体,且低云构成爆米花状云簇(周明煜等,2000)。本文选择高原东南部高原与盆地不同地形区域来重点探讨高原具有独特性的云状况对能量平衡方程中各项的相关特征及其反馈影响。

计算表明,在高原东南部(大理、林芝)春、夏季低云量与感热呈显著负相关,且与土壤湿度相关的潜热呈区域性正、负不确定的相关特征,对应相关系数分别为 - 0.22— - 0.47、- 0.43—0.34,其中,春季低云量与感热的相关性,高原东南部远比四川盆地的相关明显,该季节四川盆地低云少,相关系数偏小,且其对感热、潜热影响不明显。春、夏季总云量高原与平原区域相关性差异不显著,即均呈上述类似的相关关系。高原南侧林芝夏季低云量与感热、潜热均呈显著负相关,而春季低云量与感热呈显著负相关,与潜热则呈显著正相关。计算结果亦表明高原林芝站低云量与土壤湿度、地面空气湿度相关性较其他站(大理、温江)更为显著,且相关系数超过信度标准(90%)。

高原东南部(大理、林芝)春季、夏季低云量与感热、有效能源各项中净辐射、向下短波、向上短波以及地表土壤热通量均呈显著负相关,其相关系数均

显著高于信度标准,这表明高原区域低云量对近地层能量平衡过程起着低层"冷却"作用,其中 R_U 只与地表下垫面状况有关。上述相关仅能说明云状况影响地表加热从而间接影响 R_U 的特征,另外,春季、夏季低云量与向下长波辐射呈显著的正相关,这表明高原区域与低云量相关的向下长波辐射影响导致"温室效应"显著。总体而言与高原站相比,四川盆地温江春季低云量与能量平衡辐射各分量相关特征不明显。上述相关特征在温江站均不显著。高原与平原区域总云量均与有效能源辐射分量各项呈类似的显著相关特征,但低云量、总云量与向上长波辐射相关性相对较弱,相关系数均偏小。

表 1 低云量、总云量分别与能量平衡辐射各项以及地表土壤热通量线性拟合的相关系数
(日平均值数据,平均样本数为 78—92)

Table 1 The linear fitting correlation coefficients of the low and total cloud covers with various SEB radiation components and soil heat flux
(in terms of the daily averge with the sample number for averaging ranging from 78 to 92)

站点		向下短波辐射	向下长波辐射	向上短波辐射	向上长波辐射	地表热交换
低云量	大理(春)	-0.77454	0.67811	-0.76207	-0.11089	-0.23533
	林芝(春)	-0.43154	0.74709	-0.52136	0.27788	-0.15748
	温江(春)	-0.090186	0.035003	-0.78873	-0.051449	0.12492
	大理(夏)	-0.79917	0.87409	-0.52956	-0.18844	-0.33604
	林芝(夏)	-0.71611	0.78634	-0.72495	-0.21403	-0.36905
	温江(夏)	-0.080342	0.035211	-0.058251	0.015581	-0.27524
总云量	大理(春)	-0.74085	0.68029	-0.74225	-0.11199	-0.18203
	林芝(春)	-0.42245	0.71297	-0.51247	0.25746	-0.14065
	温江(春)	-0.63842	0.3181	-0.67686	-0.1472	0.066504
	大理(夏)	-0.73459	0.84425	-0.70456	-0.20599	-0.30811
	林芝(夏)	-0.71274	0.79566	-0.72184	-0.19032	-0.33851
	温江(夏)	-0.63876	0.26019	-0.61057	-0.48682	-0.47288

7 青藏高原东南部总辐射近太阳常数与低云量及其向下长波辐射相关特征

计算结果表明,春、夏季高原东南部林芝、大理及四川盆地温江边界层低云量与向下长波辐射相关特征不同,其中高原东南部林芝、大理低云量与向下长波辐射相关显著,相关系数在 0.59—0.76,超过信度标准(99%)(图 4),四川盆地温江两者相关性差。上述研究表明高原区域低云量状况亦可用边界层通量塔向下长波辐射量来间接表征,四川盆地区域两者相关性相对低。

至于高原与四川盆地低云量与向下长波辐射相关特征差异问题,由图 5 可见温江低云量显著少于大理、林芝,温江低云量少可能导致该区域低云量与向下长波辐射相关不明显,而林芝站低云量最高,其低云量与向下长波辐射的相关亦明显。计算表明春季高原南部林芝站低云量与所测向下长波辐射呈高相关特征,两者相关系数超过 0.63。因此,林芝低云量状况可采用林芝站边界层通量塔向下长波辐射量来间接描述。考虑林芝站处于高原南部,且春季低云量最多,本文选取林芝站分析低云对总辐射影响。

有关青藏高原和其他地区瞬时总辐射通量大于太阳常数的现象已有很多观测事实(陆龙骅等,1979,1998)。陆龙骅等(1979)已对出现总辐射大于太阳常数的可能原因作了分析。

由于云量增加对散射辐射有明显的增强作用,使总辐射的变化有别于直接辐射。本文采用林芝站向下长波辐射量来间接表征林芝站低云量状况,以揭示高原南部此类低云散射对超太阳常数的影响特征。考虑到太阳常数高值条件,选取林芝春季大于 1200 W/m^2 的太阳总辐射与对应时刻的向下长波辐射进行拟合,其中,太阳总辐射与向下长波辐射均采用边界层通量塔 10 min 观测数据。从图 6 可发现,林芝春季大于 1200 W/m^2 太阳总辐射与对应向下长波辐射呈显著正相关,相关系数可达 0.38,计算结果揭示了在接近或超太阳常数总辐射的状况下,随着与低云量有关的向下长波辐射增加,向下短

波辐射(总辐射)亦有显著增加趋势,两者呈显著正相关特征,即与低云量有关的向下长波辐射亦是接近或超太阳常数现象的重要成因之一。

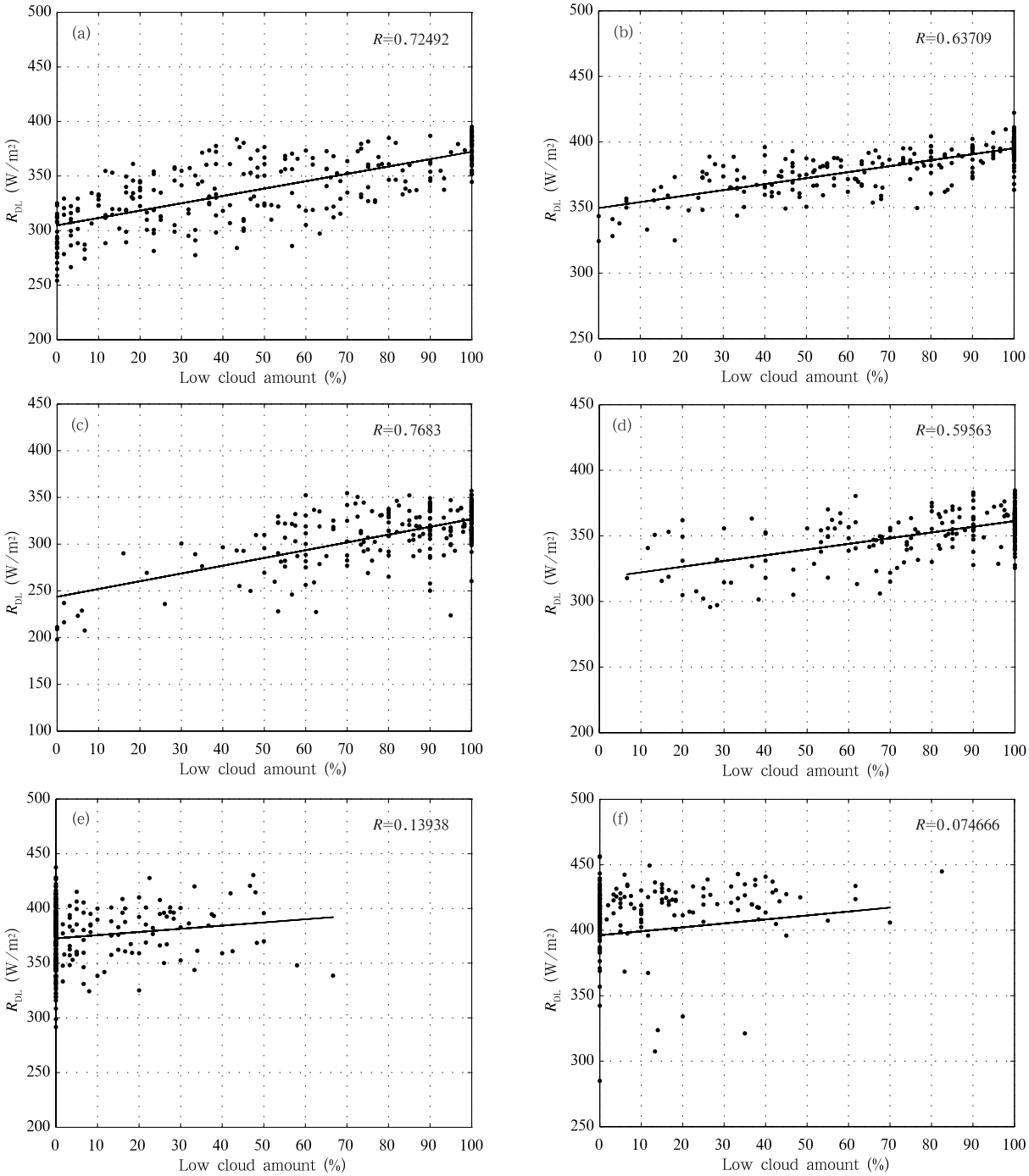

图 4 低云量与向下长波辐射相关散点图

(a. 春季大理,c. 春季林芝,e. 春季温江,b. 夏季大理,d. 夏季林芝,f. 夏季温江;6 h 平均值)

Fig. 4 Scattergrams of the low cloud cover vs. the downward long wave radiation flux at (a, b) Dali, (c, d) Linzhi and (e, f) Wenjiang station in spring (a, c, e) and summer (b, d, f) (Unit: %)

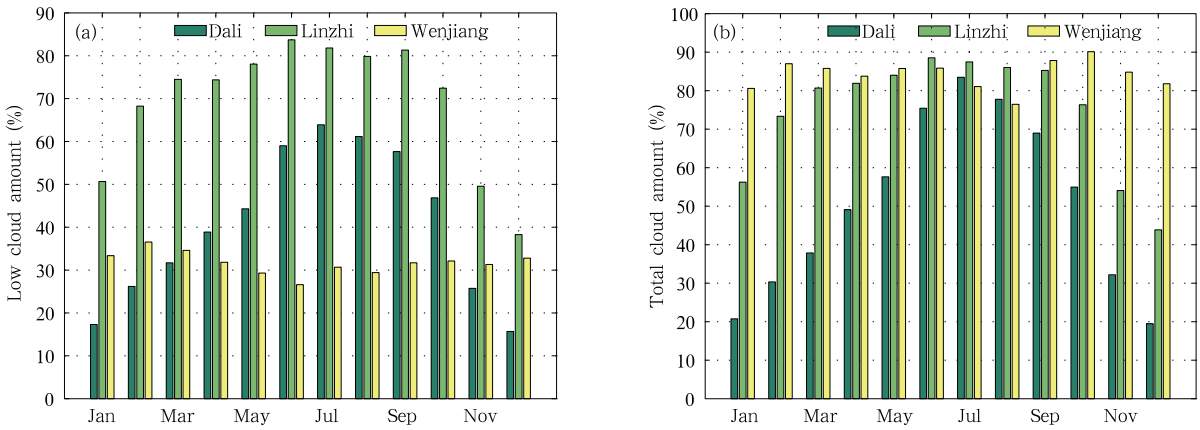

图 5 大理、林芝、温江 3 站低云量(a)、总云量(b)1951—2009 年平均月际变化特征

Fig. 5 Averaged monthly variations over 49 year (1951－2009) for the (a) low and (b) total cloud covers at Dali, Linzhi and Wenjiang station

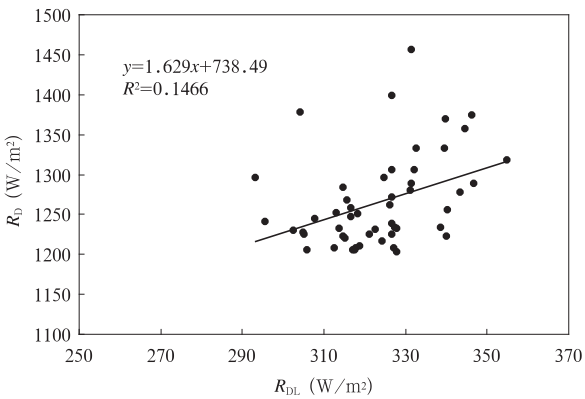

图 6 林芝站春季太阳总辐射与向下长波辐射相关散点图(R_D>1200 W/m² 样本)

Fig. 6 Scattergram of the spring total solar radiation flux vs. the downward long wave radiation flux at Linzhi station (for cases of R_D greater than 1200 W/m²)

8 结 论

基于高原东南部及四川盆地不同区域边界层综合观测资料,采用辐射、边界层通量及站点云量等综合分析技术途径,从地表能量收支平衡的视角,探讨青藏高原与四川盆地能量平衡各分量结构特征以及云状况对能量平衡分量的影响。通过高原区域能量平衡模型及区域云状况对其各分量相关特征分析得到如下结论:

(1)春季青藏高原及其向东北延伸的黄土高原构成了太阳总辐射、地气温差极值区,且高原春、夏季低云量与总云量均为同纬度的高值区。

(2)青藏高原东南部大理、林芝、温江 3 个站均具有显著的能量闭合特征,边界层感热、潜热通量($H+LE$)与有效能源(R_n-G_0)两者高值区非能量闭合特征更为明显。

(3)青藏高原东南部(大理、林芝)春、夏季低云量与感热呈显著负相关,潜热则呈区域性正、负不确定的相关特征。春季低云量对感热的相关高原东南部远比四川盆地明显,该季节四川盆地低云量少,相关系数偏小,且其对感热、潜热影响不明显。春、夏季总云量高原与平原区域相关性差异不明显。

(4)高原东南部(大理、林芝)春季与夏季低云量与有效能源净辐射、向下短波、向上短波以及地表土壤热通量均呈显著负相关,这表明高原低云量在近地层能量收支过程起着"冷却"作用,且低云量与向下长波辐射呈显著的正相关,表明低云量对低层地-气过程的辐射有强迫"加热"反馈效应。就总体而言低云量与向下长波辐射的相关,高原与平原差异较大,四川盆地温江春季低云量与能量平衡辐射各分量相关系数偏低或相关特征不确定。这表明高原区域与低云量相关的向下长波辐射影响效应显著,且高原区域低云量状况亦可用边界层通量塔向下长波辐射量来间接表征。

(5)由 1951—2009 年大理、林芝、温江 3 个站总云量、低云量历史平均月季变化特征可知,温江低云量显著比大理、林芝少,其中林芝站低云量最多,其低云量与向下长波辐射的相关亦最为显著,反之,温

江站低云量与向下长波辐射相关不明显,观测分析结果亦表明平原站低云量远不如高原区域多。

(6)本文采用林芝春季大于1200 W/m^{2}的太阳总辐射与对应时刻的向下长波辐射进行拟合,结果表明与低云相关的向下长波辐射可能与近太阳常数现象存在显著正相关,而小于1200 W/m^{2}的太阳总辐射与对应时刻的向下长波辐射进行拟合则相关特征不明显。

致谢:感谢卞林根、马永峰等质量控制软件系统的支持,感谢卞林根老师、魏凤英老师、马永峰师兄对本文提出的宝贵意见。

参考文献

卞林根,陆龙骅,逯昌贵等. 2001. 1998年夏季青藏高原辐射平衡分量特征. 大气科学,25(5):577-588

陈勇航,白鸿涛,黄建平等. 2008. 西北典型地域云对地气系统的辐射强迫研究. 中国环境科学,28(2):97-101

季国良,姚兰昌,王文华. 1985. 1982—1983年青藏高原热源野外考察概况. 高原气象,4(增刊):1-9

刘艳,翁笃鸣. 2002. 中国地区云对地-气系统辐射强迫温度效应的气候研究. 气象学报,60(6):766-773

陆龙骅,戴加洗. 1979. 唐古拉地区的总辐射和净辐射. 科学通报,24(9):400-404

陆龙骅,周国贤,张正秋. 1998. 1992年夏季珠穆朗玛峰地区的太阳直接辐射和总辐射. 太阳能学报,16(3):229-233

马晓燕,季国良. 2000. 利用ERBE资料分析中国地区云辐射强迫的时空变化. 高原气象,19(2):150-158

沈志宝,翁笃鸣,潘守文. 1987. 青藏高原热源观测实验概况//青藏高原气象科学实验文集(一). 北京:科学出版社,343pp

沈志宝,成天涛,王可丽. 2002. 青藏高原地面—对流层系统的能量收支. 高原气象,21(6):546-551

王介民. 1999. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从HEIFE到IMGRASS和GAME-Tibet/TIPEX. 高原气象,18(3):280-294

汪宏七,赵高祥. 1994. 云和辐射——(Ⅰ)云气候学和云的辐射作用. 大气科学,18(S1):910-921,923-932

王可丽. 1996. 青藏高原地区云对地表净辐射的影响. 高原气象,15(3):269-275

王可丽,吴国雄,江灏等. 2002. 青藏高原云-辐射-加热效应和南亚夏季风——1985年与1987年对比分析. 气象学报,60(2):173-180

王春林,周国逸,王旭等. 2007. 复杂地形条件下涡度相关法通量测定修正方法分析. 中国农业气象,28(3):233-240

杨智,刘劲松,朱以维等. 2010. 云贵高原西部大理地区近地层湍流特征分析. 大气科学学报,33(1):117-124

约翰·M华莱士,彼得·V霍布斯. 2008. 大气科学. 北京:科学出版社,486pp

章基嘉,朱抱真,朱福康等. 1988. 青藏高原气象学进展. 北京:科学出版社,268pp

周明煜,徐祥德,卞林根等. 2000. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究. 北京:气象出版社,125pp

张宇,吕世华,陈世强等. 2004. 绿洲边缘夏季小气候特征及地表辐射与能量平衡特征分析. 高原气象,24(4):527-533

Brotzge J A, Crawford K C. 2003. Examination of the surface energy budget: A comparison of eddy correlation and Bowen ratio measurement system. J Hydrometeor, 4(2): 160-178

Flohn H. 1968. Contributions to a meteorology of the Tibetan Highlands. Atmos Sci, (130): 120

Foken T. 2008. The energy balance closure problem: An overview. Ecol Appl, 18(6): 1351-1367

Harrison E F, Miunis P, Barkstrom B R, et al. 1990. Seasonal variation of cloud radiative forcing derived from the earth radiation budget experiment. J Geophys Res, 95(D11): 18687-18703

Huang J P, Wang Y J, Wang T H, et al. 2006. Dusty cloud radiative forcing derived from satellite data for middle latitude regions of East Asia. Prog Nat Sci, 16(10): 1084-1089

Kaimal J C, Businger J A. 1963. A continuous wave sonic anemometer-thermometer. J Appl Meteor, 2(1): 156-164

Ramanathan V, Cess R D, Harrison E F, et al. 1989. Cloud-radiative forcing and climate: Results from the earth radiation budget experiment. Science, 243(4887): 57-63

Rossow W B, Lacis A A. 1990. Global, seasonal cloud variations from satellite radiance measurements. Part Ⅱ: Cloud properties and radiative effects. J Climate, 3(11): 1204-1253

Xu X D, Zhang R H, Koike T, et al. 2008. A new integrated observational system over the Tibetan Plateau. Bull Amer Meteor Soc, 89(10): 1492-1496, doi: 10.1175/2008BAMS2557.1

Zhu Z L, Sun X M, Zhang R H. 2003. Statistical analysis and comparative study of energy balance components estimated using micrometeorological techniques during HUBEX/IOP 1998/99. Adv Atmos Sci, 20(2): 285-291