

青藏高原出射长波辐射特征分析^{*}

苏文颖 毛节泰 纪飞

(北京大学地球物理系暴雨监测与预报国家重点实验室, 北京 100871)

摘 要 对青藏高原地区1月、4月、7月和10月高时空分辨率的出射长波辐射(OLR)时间序列进行了谱分析。将各点的功率谱分为三类: 第一类代表日变化(周期 ≤ 1 d), 另外两类分别为天气过程($2 \text{ d} \leq \text{周期} \leq 10 \text{ d}$)和低频(周期 $> 10 \text{ d}$)变化; 将高原分为6个区域, 对区域平均的各季节OLR时间序列进行功率谱分析和显著性检验, 结果表明: 1、4、10月份高原上以日变化为主; 而7月份日变化、天气尺度变化和低频变化的贡献相当。显著性分析表明高原上最为显著的周期为1 d周期, 2~4 d的天气尺度振荡也较明显。6~8 d和10~13 d处虽有明显的谱峰, 但只有少数地区和个别季节其谱值能超过95%的信度检验。

关键词: 出射长波辐射; 谱分析; 青藏高原; 显著性检验

1 引言

全球大气对热带热源的响应是大气环流中最重要的问题。对流活动是这种响应的主要机制, 对流不仅伴有大量的凝结潜热释放, 并且是将热量、动量和水汽由行星边界层传入自由大气最有效的途径。研究对流活动所用的资料有两种: 一种是利用降水资料作为深对流的代用参数^[1], 另一种是用出射长波辐射(OLR)数据集研究对流的变化^[2~5]。OLR是从宇宙空间观测到的地气系统的射出长波辐射, 主要决定于云顶和下垫面的温度。由于OLR取决于云顶温度, 而云顶温度又取决于对流强度, 深对流的云顶温度低, OLR值小, 浅对流则反之。所以OLR在一定程度上可以揭示对流活动的强度^[6,7]。

青藏高原(以下简称“高原”)是一个耸立在对流层中空的大陆块, 它犹如“大气海洋”中的一个巨大岛屿, 对四周大气起着明显的热源作用。这种作用强烈影响高原及其邻近地区的大气环流, 也决定了高原及其邻近地区的天气气候特征。青藏高原上全年约有70%以上的日子有对流云出现, 对流云主要出现在高原中、东部地区, 其中高原中部32°N附近为高原上全年对流云出现频率最高的地区; 其次是藏东南地区和位于印度东北部的迪布鲁加尔、高哈蒂一带; 高原西部狮泉河一带, 对流活动较弱。青藏高原对流云的季节变化表现为: 7月最多, 1月最少, 4月增加最快, 10月明显减少。但这种季节变化特点, 存在地区差异^[8]。钱正安等^[9]利用1979年5~8月逐日13~17时的泰罗斯-N气象卫星可见光云图, 分别统计雨季前(5月1日~6月17日)和雨季中(6月18日~8月31日)青藏高原上对流云出现的相对频数分布。发现雨季前对流云主要集中在高原东南部, 昆仑山区和喜马拉雅山西段, 出现频率高达95%以上, 几乎每天都

有对流云; 申扎地区和柴达木盆地对流云较少出现。进入雨季后, 除昆仑山区外, 对流云的频数都有不同程度的增加, 喜马拉雅山中段、雅鲁藏布江流域及帕米尔高原一带尤为明显。雨季中, 高原 35°N 以北及羌塘高原地区仍比较干燥, 各代表站对流云日变化明显, 午后对流云 (特别是积云) 明显发展, 而夜间及清晨对流云则较少出现, 其中积云和积雨云的最高频数分别出现在 14 时和 20 时; 而在较潮湿的高原东部及雅鲁藏布江流域, 各代表站对流云频数的日变化则不太明显, 在夜间及清晨仍有对流云强烈发展。

由于资料所限, 以往对高原地区的对流研究只限于个别月份和区域, 无法给出高原全局各个月份完整的对流图像。谢安等^[10]利用 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的 OLR 日平均资料分析了青藏高原及其附近地区的周期振荡特征。但由于资料的时间分辨率较低, 无法给出日变化的特征。我们利用高时空分辨率的 GMS 5 卫星资料 (分别为 1 h 和 12 km) 反演所得高原上 1996 年 8 月至 1997 年 12 月的 OLR 资料^[11], 分析了高原地区各个季节的对流特征。

2 青藏高原对流特征分析

2.1 方法简述

利用 GMS5 卫星高时空分辨率的资料, 反演得到时间分辨率为 1 h 的 OLR 资料。对于缺测的时次, 利用前后两天同一时刻的 OLR 资料, 平均后给出该时次的 OLR。利用 1996 年 8 月至 1997 年 12 月的 OLR 时间序列 ($f_{\text{OLR},t}$, $t=1, 2, \dots$, 总天数 $\times 24$), 计算各月的功率谱。首先计算不同波数 k 的傅里叶系数:

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n f_{\text{OLR},t} \cos \frac{2\pi k}{n} (t-1), \quad (1)$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n f_{\text{OLR},t} \sin \frac{2\pi k}{n} (t-1), \quad (2)$$

k 的取值为 1, 2, $\dots$, $[n/2]$, $[\]$ 表示取整。然后计算不同波数 k 的功率谱值:

$$S_k^2 = \frac{1}{2} (a_k^2 + b_k^2). \quad (3)$$

波数 k 与周期有如下对应关系:

$$T_k = k / n. \quad (4)$$

将各点所得的功率谱值按周期分为三类: 第一类代表周期小于等于 1 d 的日变化, 第二类代表周期介于 2~10 d 之间的天气尺度变化, 第三类代表周期大于 10 d 的低频变化。计算这三类变化的功率谱占总功率谱的百分比, 了解百分比分布有助于研究各种变化的相对贡献, 特别是周期 ≤ 1 d 的日变化贡献, 揭示对流发展的强度。以下分析了 1997 年 1 月、4 月、7 月和 10 月的日变化、天气尺度变化和低频变化的功率谱及百分比分布。

2.2 日变化

1 月份整个高原地区的功率谱值不到 $300 (\text{W m}^{-2})^2$, 高原北边塔克拉玛干沙漠和高原中东部地区的功率谱值较大, 而高原南边恒河、布拉马普特拉河和三江流域的功率谱较小。黄河流域和可可西里山以南地区日变化功率谱在总谱中所占的比例较高, 在 60% 以上。高原主体地区的比例在 50% 以上, 但高原南部边界处的比例较低, 在 30%

以下(图1)。4月份高原上日变化功率谱较大的区域集中在高原西南部,三江流域和恒河流域的值仍较小。4月份日变化在总功率谱中所占比重较大,大部分地区的比例在50%以上,高原西南部、恒河流域、雅布河谷和三江流域的比值超过60%,只有黄河湟水流域、巴颜喀拉山与阿尼玛卿山地区的比值较低,在50%以下(图略)。7月份高原上的功率谱有所增加,特别是恒河流域、布拉马普特拉河流域、柴达木盆地和高原西部的增加较多。从百分比图来看,此时比值最高的区域为可可西里山西北部地区,在50%以上。比值在40%以上的区域集中在恒河流域、布拉马普特拉河流域和35°N线附近。其他地区的比值均在40%以下(图2)。10月份高原主体上的功率谱值大部分在 $300 (\text{W m}^{-2})^2$ 以下,只有雅鲁藏布江流域的功率谱值较高。高原北边塔克拉玛干沙漠和柴达木盆地的功率谱最大,在 $600 (\text{W m}^{-2})^2$ 以上,另外恒河流域的功率谱也较大。百分比图的分布与功率谱图的分布很相似,塔克拉玛干沙漠和柴达木盆地的比值在70%以上,雅鲁藏布江流域的比值在60%以上,恒河流域的比值较低,小于40%(图略)。

2.3 天气尺度变化

1月份高原上天气尺度功率谱最大区域集中在北边塔克拉玛干沙漠,谱值在 $300 (\text{W m}^{-2})^2$ 以上。高原主体地区的天气尺度功率谱基本在 $200 (\text{W m}^{-2})^2$ 以下。就所占比例而言,高原主体上大部分地区的比值在40%以下,但高原北边塔克拉玛干沙漠、高

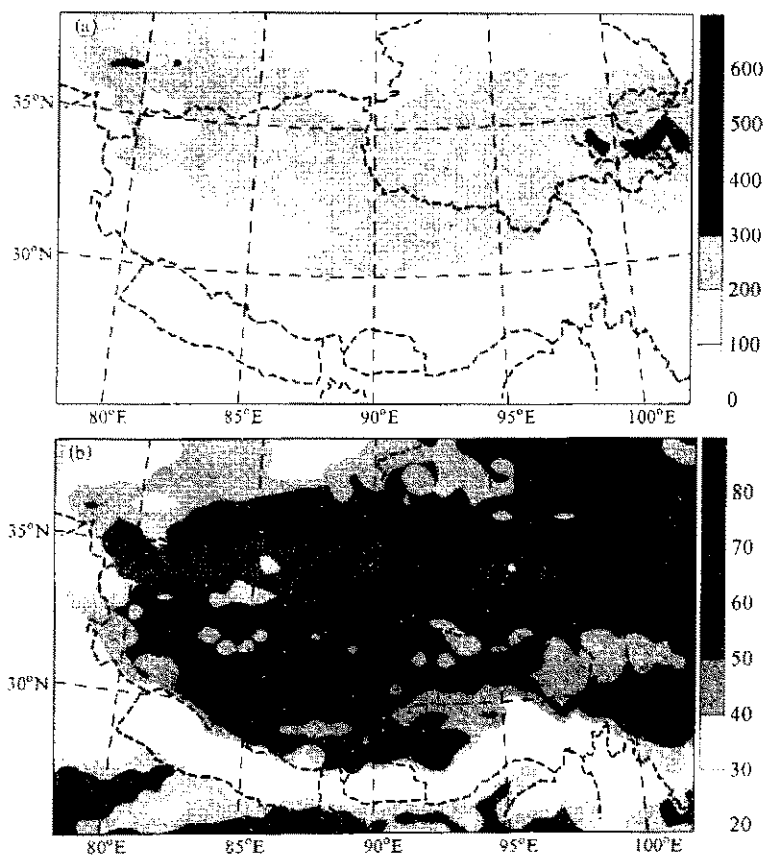


图1 1月份高原上日变化功率谱(a) [单位: $(\text{W m}^{-2})^2$] 和其占总功率谱的百分比(b)

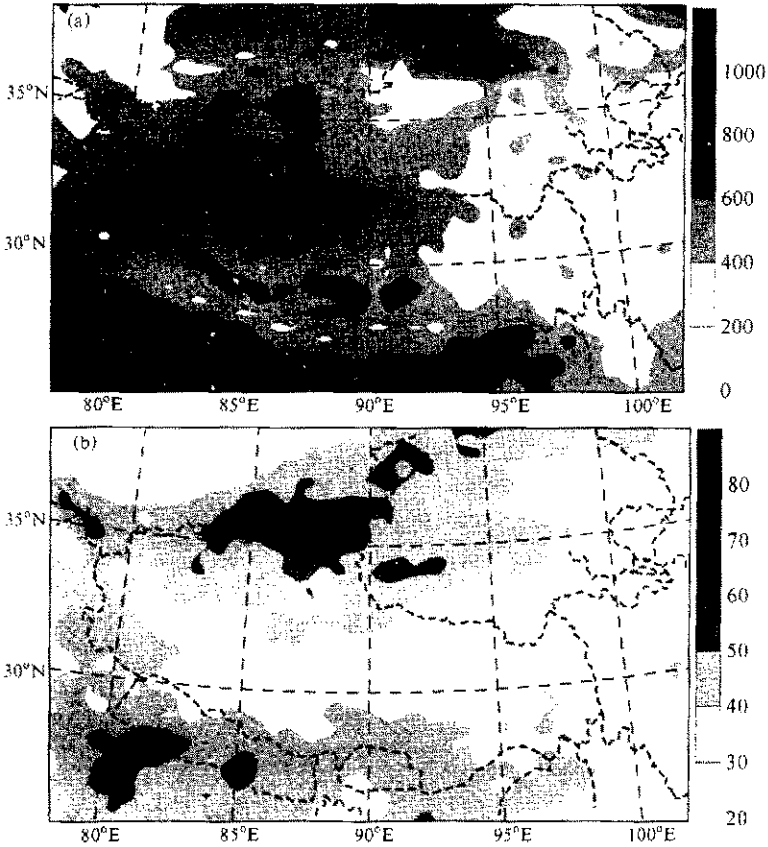


图2 7月份高原上日变化功率谱 (a) [单位: $(W m^{-2})^2$]和其占总功率谱的百分比 (b)

原南部边界附近和雅布河谷地区的百分比较高, 在 50% 以上 (图 3)。4 月份高原上天气尺度功率谱较大的区域集中在高原中部、塔克拉玛干沙漠、黄河湟水流域和高原南部边界处, 谱值在 $200 (W m^{-2})^2$ 以上。恒河上游和三江流域的值较小, 在 $100 (W m^{-2})^2$ 以下。从百分比图上可见, 高原东部的比值较高, 在 30% 以上, 其中黄河湟水流域、念青唐古拉山两侧及不丹以南地区的比值在 40% 以上。高原西边的比值较低, 一般不超过 30% (图略)。7 月份天气尺度功率谱较大的区域包括塔克拉玛干沙漠、柴达木盆地、高原西部和恒河上游, 谱值在 $600 (W m^{-2})^2$ 以上。高原南部边界附近、三江流域和高原东部地区的谱值较低, 在 $400 (W m^{-2})^2$ 以下, 这些地区天气尺度功率谱值占总谱的比值也较低, 在 30% 以下, 而其他地区的比值在 30% 以上 (图 4)。10 月份高原上天气尺度谱值较大的区域集中在恒河流域, 高原主体地区的谱值一般不超过 $200 (W m^{-2})^2$ 。黄河源头、唐古拉山地区和高原南部地区的比值较大, 超过 40%, 柴达木盆地、雅鲁藏布江流域的比值较小 (图略)。

2.4 低频变化

1 月份高原上的低频谱值较小, 一般不超过 $40 (W m^{-2})^2$, 所占比例也较小, $30^{\circ}N$ 以南大部分地区的比值在 10% 以上, 而 $30^{\circ}N$ 以北大片地区的比值不到 10%, 如图 5

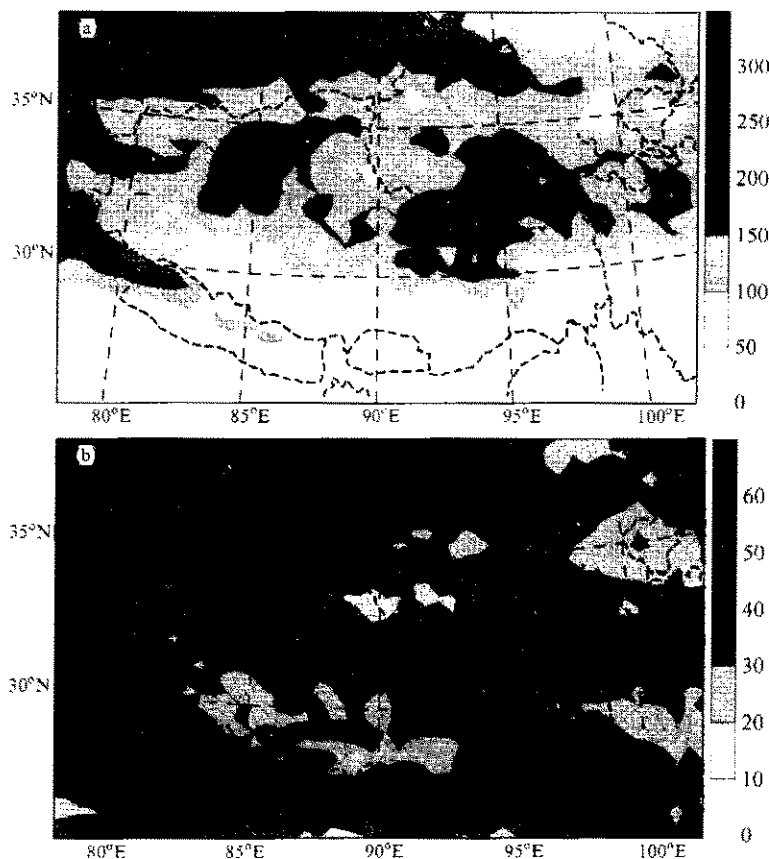


图3 1月份高原上天气尺度功率谱 (a) [单位: $(W m^{-2})^2$] 和其占总功率谱的百分比 (b)

所示。4月份低频谱值较大的区域出现在高原北部边界和可可西里山以北地区, 最大值超过 $100 (W m^{-2})^2$, 但其占总功率谱的比值并不大, 一般在 20% 以下, 其他大部分地区的比值在 10% 以下 (图略)。7月份低频谱值较大的区域集中在雅鲁藏布江流域, 三江流域、雅布河谷和恒河中游, 谱值在 $500 (W m^{-2})^2$ 以上, 这些地区低频谱对总谱的贡献超过 30%, 雅布河谷和三江流域甚至有小块地区的比值在 40% 以上。可可西里山南北两侧和恒河上游的比值较低, 在 20% 以下, 如图 6 所示。10月份低频谱值较大的区域为塔克拉玛干沙漠和恒河上游地区, 高原主体大片地区的谱值较低。低频变化对总谱的贡献一般不超过 20%, 比值在 10% 以上的地区集中在高原南部和高原最西边 (图略)。

由以上分析可见, 1月份高原主体以日变化为主, 其对总谱的贡献超过 50%, 而天气尺度的贡献一般在 40% 以下, 但高原北部塔克拉玛干沙漠、高原最西端和高原西南边界至雅鲁藏布江一带则以天气尺度变化为主。低频变化在整个高原上都比较小, 其对总谱的贡献表现为南部大、北部小。4月份高原主体仍以日变化为主, 特别是高原西部和南部地区, 其对总谱的贡献超过 50%, 有些地区甚至在 60% 以上。而天气尺度变化的贡献较小, 高原东部天气尺度对总谱的贡献大于西部的贡献。低频变化对总谱的贡献不超过 20%, 比值较大的区域出现在高原北部。7月份日变化占总谱比值在 50% 以上

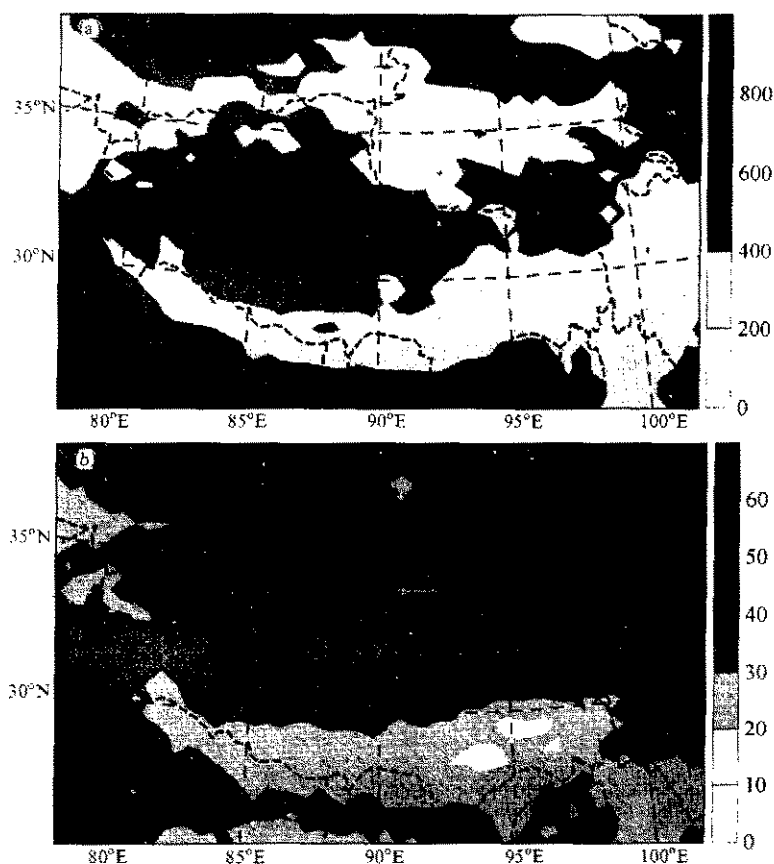


图4 7月份高原上天气尺度功率谱 (a) [单位: $(W m^{-2})^2$]和其占总功率谱的百分比 (b)

的区域很少, 只有可可西里山附近和恒河上游有小块区域的比值在 50% 以上, 其他地区的比值均不超过 50%。天气尺度变化对总谱的贡献显著增加, 30°N 以北地区的比值基本都在 30% 以上。7 月份的低频变化明显加强, 特别是在雅鲁藏布江流域、雅布河谷和三江流域处的贡献较大, 在 30% 以上。10 月份高原上以日变化为主, 高原主体大部分地区日变化对总谱的贡献超过 50%, 北部地区和雅鲁藏布江流域的比值更大。恒河流域、雅布河谷和三江流域的比值较小, 但天气尺度变化对这些地区的贡献相对较大, 在 40% 以上。另外念青唐古拉山北部地区天气尺度的贡献也在 40% 以上。低频变化的贡献不超过 20%, 高原南部和西部的比值相对较高。7 月份高原上日变化、天气尺度变化及低频变化对总谱的贡献相当, 这主要是由于 7 月份高原进入雨季, 受西南季风影响较大, 高原以南为印度季风槽和季风低压, 大量水汽由孟加拉湾向高原输送, 使得高原上特别是南部地区的天气尺度变化及低频变化的贡献增加。这种影响一直持续到 10 月份, 但强度有所减弱。而 1 月份和 4 月份天气尺度变化及低频变化的影响相对较小。

3 显著性检验

为进一步研究高原上各个季节和区域的周期特征, 将高原分成 6 个部分, 纬向以

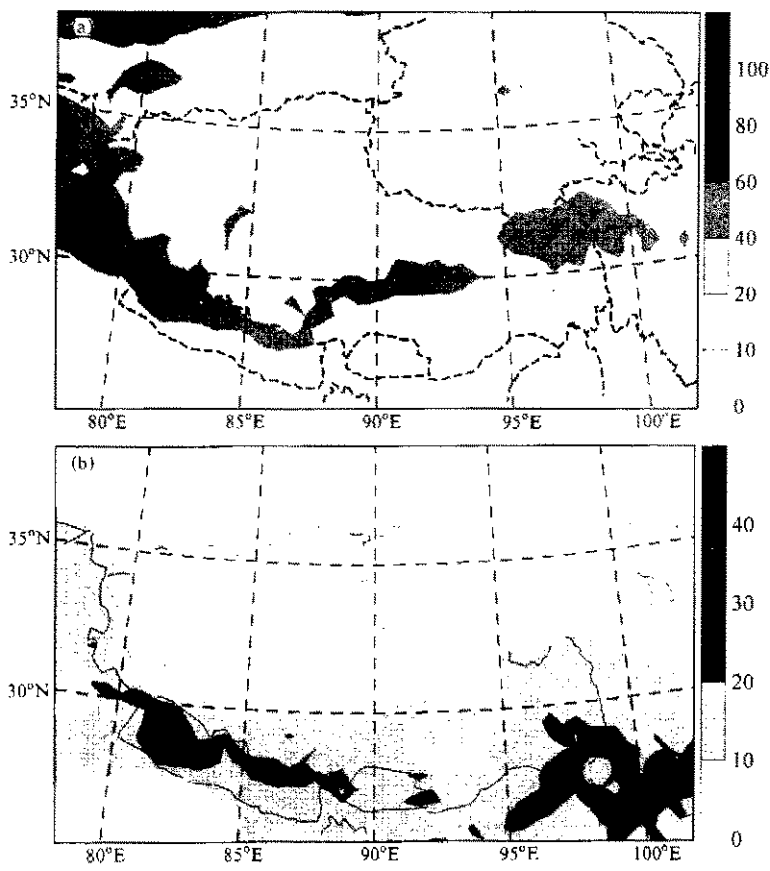


图5 1月份高原上低频变化功率谱 (a) [单位: (W m^{-2})]和其占总功率谱的百分比 (b)

32.5°N 为界分为上下两部分, 经向以 85°E、95°E 为界分为西、中、东部, 将这 6 个部分从西到东、从北到南分别记为 1、2、3、4、5、6 区。对高原各个季节每个区域的 OLR 资料进行区域平均后, 给出这 6 个区域各个季节(12、1、2 月, DJF)、(3、4、5 月, MAM)、(6、7、8 月, JJA)、(9、10、11 月, SON)的 OLR 时间序列, 序列长度 n 为各季节的天数乘 24。计算 OLR 时间序列的落后自相关系数 $r(i)(i=0, 1, 2, \cdots, m)$, m 为最大后延长度, 此处取 $m = n / 2$ 。所得 OLR 时间序列落后一个时刻的自相关系数有较大的正值, 适合用红噪声过程进行显著性检验。有了不同季节各区域 OLR 时间序列的落后自相关系数后, 利用梯形公式求粗谱估计, 然后对粗谱加以平滑给出功率谱密度值。同时计算了信度为 95% 的红噪声谱。图 7 和图 8 给出了 DJF 季节和 JJA 季节的计算结果。根据不同季节各个区域的功率谱密度及相应的红噪声谱, 归纳总结出了每个区域各个季节的主要周期和次要周期, 结果列于表 1。所谓主要周期是指该周期越过 95% 的信度检验, 而次要周期是指虽然该周期并未越过信度检验, 但在该周期处有明显的谱峰, 且与红噪声谱的差异不大。

从表 1 中可见, DJF 季节 32.5°N 以北主周期以日变化周期和天气尺度周期为主, 中西部次周期为 7~8 d 和 11~12 d; 32.5°N 以南西部的主周期为 10~12 d 和 3~4 d,

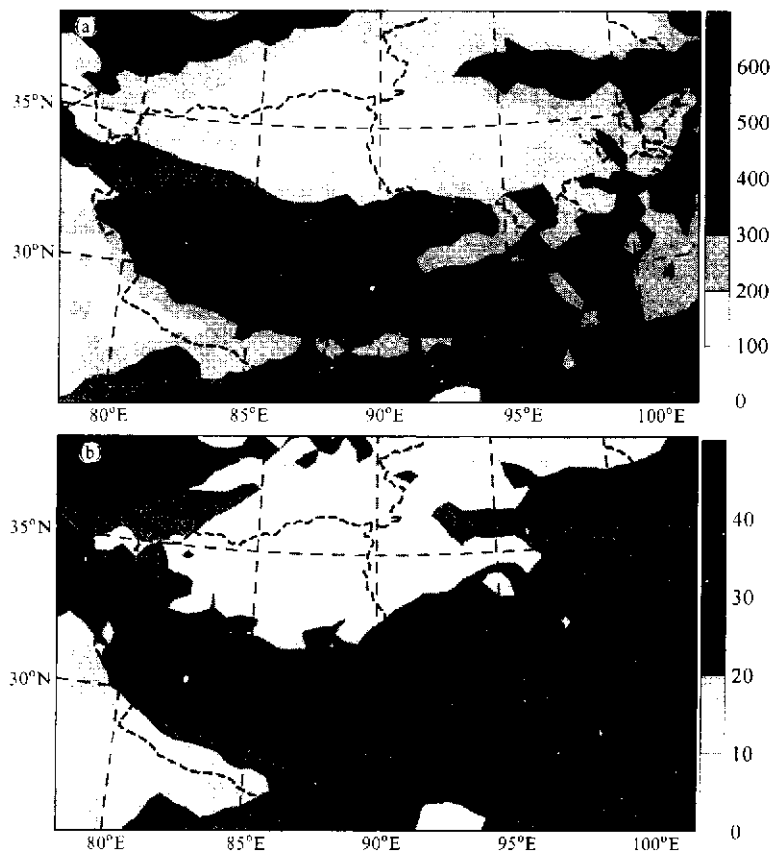


图 6 7 月份高原上低频变化功率谱 (a) [单位: $(W\ m^{-2})^2$]和其占总功率谱的百分比 (b)

表 1 高原上各个季节各个区域的主、次周期 d

季节		DJF	MAM	JJA	SON
区域					
1 区	主周期	1、2~4、5	1、2~4	1、10~13	1、2
	次周期	7~8、11~12	6、10	2~4	6~7、13
2 区	主周期	1、2~5	1、6、3~4	1、2~4	1、3~4
	次周期	8、11	11~12	11~13、5~7	5、6
3 区	主周期	1、3~4、5	1、5、2~3	1、2~4、6	1、3~4
	次周期	2	6	10~11	6、10
4 区	主周期	10~12、3~4	1、2~3	1、2~3、5~7	3~6、1
	次周期	1、5、7~8	5~7、10~12	11~12	2
5 区	主周期	1、4	1、2~3	1	4~5、1、3
	次周期	5、8、11~12	6、10	6~7、13	7、13
6 区	主周期	1、4、5、8	5~6、1、2~3	1、2~3、4~5	7~8、4、1
	次周期	11~12	13	5~6、7~8	5、13

而中、东部主周期仍以日变化周期和天气尺度周期为主，次周期为 8 d 和 11~12 d。MAM 季节高原上各个区域的主周期为日变化周期和天气尺度周期，次周期以 6 d 和 10~13 d 为主。JJA 季节 32.5°N 以北主周期除日变化周期外，西部 10~13 d 周期和东部 6 d 周期也很显著，次周期西部为 2~4 d，中部为 5~7 d、11~13 d，东部为 10~11 d；

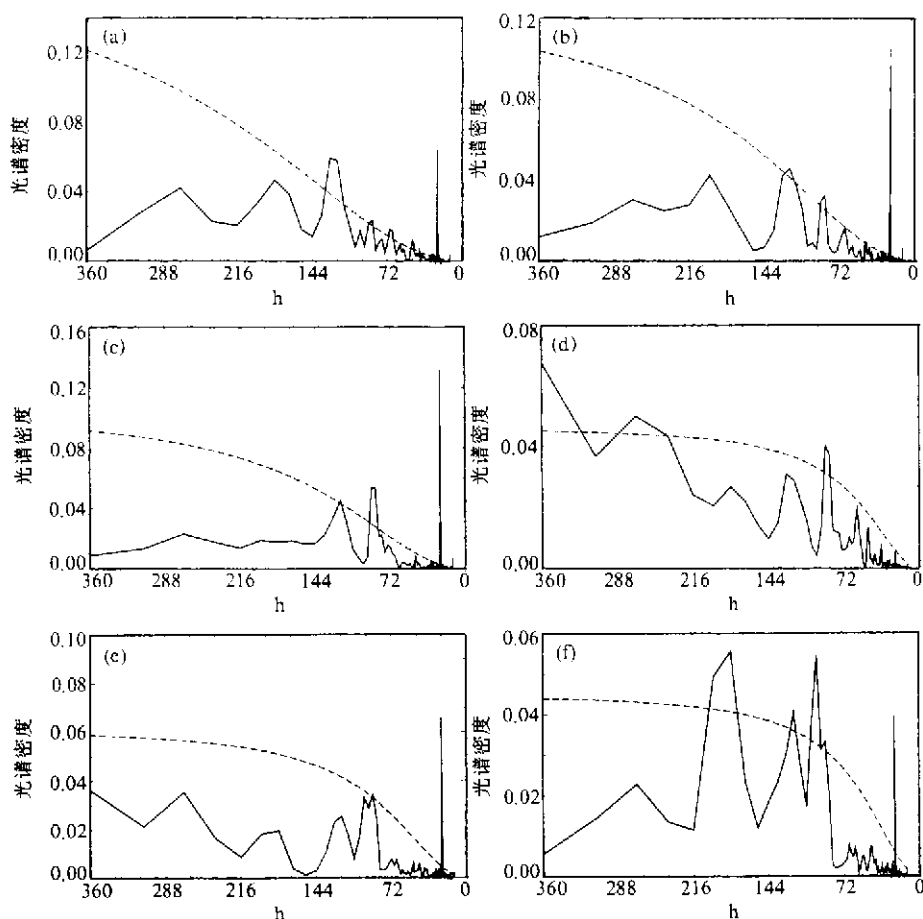


图7 高原上 DJF 季节区域平均的 OLR 时间序列的功率谱 (实线为功率谱密度, 虚线为红噪声谱)
(a) 1 区; (b) 2 区; (c) 3 区; (d) 4 区; (e) 5 区; (f) 6 区

32.5°N 以南都有明显的 1 d 周期, 西部 2~3 d、5~7 d 和东部 2~3 d、4~5 d 的周期也较明显, 次周期西部为 11~12 d, 中部为 6~7 d、13 d, 东部为 5~6 d、7~8 d。SON 季节 32.5°N 以北主周期有 1 d 周期和 2~4 d 周期, 次周期西部为 6~7 d、13 d, 中部为 5 d、6 d, 东部为 6 d、10 d。32.5°N 以南都有明显的 1 d 周期, 另外西部 3~6 d, 中部 3~5 d 和东部 4 d、7~8 d 的周期也较显著。次周期西部为 2 d, 中部为 7 d 和 13 d, 东部为 5 d 和 13 d。由以上分析可见, 高原上最为显著的周期为 1 d 周期, 2~4 d 的天气尺度振荡也较明显。6~8 d 和 10~13 d 处虽有明显的谱峰, 但只有少数地区和个别季节其谱值能超过 95% 的信度检验, 大部分 6~8 天和 10~13 天振荡表现为次周期。

陆龙骅等^[10]利用高原地区 8 个测站 1979 年 6~8 月 19 时各标准等压面上高度和温度的实测资料进行谱分析, 指出准 8 天振荡是 1979 年夏季东亚地区的主要中期过程。黄福钧等^[11]对 1979 年 7~8 月高原面平均日雨量资料所作的功率谱分析表明, 降水存在着准一周和准两周振荡周期。上述工作由于受资料的限制, 都没有涉及到日变化和 2~5 d 的天气尺度变化, 但从我们的计算结果可见, 高原上这两种尺度的振荡是很显

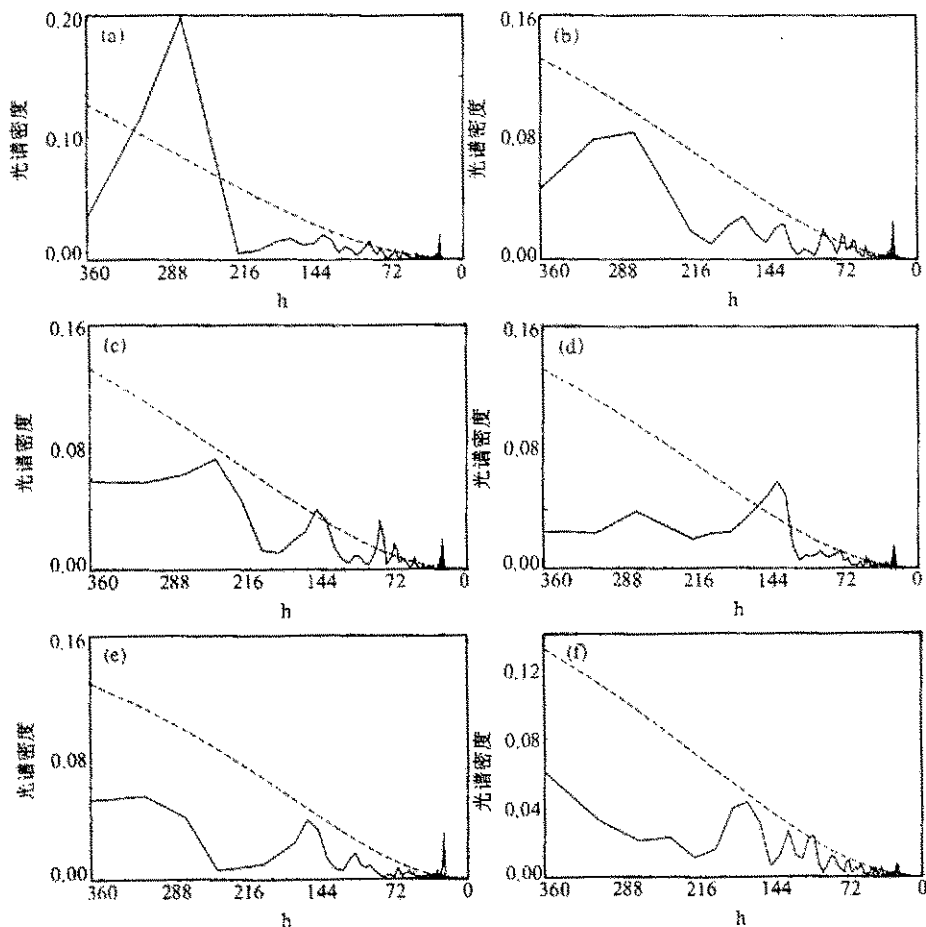


图8 高原上 JJA 季节区域平均的 OLR 时间序列的功率谱 (实线为功率谱密度, 虚线为红噪声谱)
(a) 1 区; (b) 2 区; (c) 3 区; (d) 4 区; (e) 5 区; (f) 6 区

著的。相比之下, 准一周和准两周的振荡不如日变化和 2~5 d 变化明显。

4 结论

用 OLR 时间序列作为对流研究的指标, 对 OLR 时间序列的谱分析表明: 从总的趋势上来看高原上 1、4、10 月份以日变化为主, 天气尺度次之, 低频变化的贡献最小; 而 7 月份日变化、天气尺度变化和低频变化的贡献相当。冬季主要表现为天气尺度背景下的局地对流天气, 而夏季则表现为行星尺度、天气尺度和中小尺度系统的共同作用。但在某些月份, 局部区域的变化情况与上述规律有一定的差异, 并且各种变化的贡献在不同的地理位置上也有一定的差异。显著性分析表明高原上最为显著的周期为 1 d 周期, 2~4 d 的天气尺度振荡也较明显。6~8 d 和 10~13 d 处虽有明显的谱峰, 但只有少数地区和季节其谱值能超过 95% 的信度检验。高原上除了已经发现的一天、准一周和准两周周期外, 还存在非常明显的 2~4 d 的周期。

参 考 文 献

- 1 Gray, W. M. and R. W. Jacobson, Jr., Diurnal variation of deep convection, *Mon. Wea. Rev.*, 1977, **105**, 1171~1188.
- 2 Webster, P. J. and G. L. Stephens, Tropical upper-tropospheric extended cloud, inferences from winter MONEX, *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**, 1521~1541.
- 3 Liebmann, B. and D. L. Hartmann, Interannual variation of outgoing IR associated with tropical circulation changes during 1974~78, *J. Atmos. Sci.*, 1982, **39**, 1153~1162.
- 4 Nitta, T., Long-term variations of cloud amount in the western Pacific region, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1986, **64**, 373~389.
- 5 Ardanuy, P. E. and H. L. Kyle, El Niño and outgoing longwave radiation: Observation from Nimbus-7 ERB, *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**, 415~433.
- 6 Fu Rong et al., Behavior of deep convective clouds in the tropical pacific deduced from ISCCP Radiance, *J. Climate*, 1990, **3**, 1129~1151.
- 7 Salby, M. L. et al., Analysis of global cloud imagery from multiple satellite, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1991, **72**, 467~480.
- 8 叶笃正、高由禧等, 青藏高原气象学, 北京: 科学出版社, 1979, 76.
- 9 钱正安、张世敏、单扶民, 1979年夏季高原地区对流云的分析, 青藏高原气象科学实验文集(一), 北京: 科学出版社, 1984, 243~257.
- 10 谢安、叶谦、陈隆勋, 青藏高原及其附近地区大气周期振荡在OLR资料上的反映, 气象学报, 1989, **47**, 272~278.
- 11 苏文颖, 青藏高原云辐射特征研究, 北京大学博士学位论文, 1998.
- 12 陆龙骅、朱福康等, 1979年夏季青藏高原地区的中期振荡特性, 青藏高原气象科学实验文集(二), 北京: 科学出版社, 1984, 140~151.
- 13 黄福钧等, 1979年盛夏青藏高原雨季中断和活跃及其与印度季风的关系, 青藏高原气象科学实验文集(一), 北京: 科学出版社, 1984, 203~217.

An Analysis of Outgoing Longwave Radiation Characteristics for Tibetan Plateau

Su Wenying, Mao Jietai and Ji Fei

(State Key Laboratory of Severe Storm Research, Geophysics Department of Peking University, Beijing 100871)

Abstract Spectral analysis was applied to outgoing longwave radiation (OLR) series of January, April, July and October for the Tibetan Plateau. The temporal and spatial resolutions of the OLR series were 1 hour and 12 km respectively. The spectral density was divided into three categories: the first was for diurnal variation (period ≤ 1 day); the other two were for synoptic (2 day $\leq$ period ≤ 10 day) and low frequency (period > 10 day) variation. Then the Tibetan Plateau was divided into six areas and spectral analysis and significant test were carried out for area averaged OLR series. The results show that in January, April and October diurnal variation was dominant and in July diurnal variation, synoptic variation and low frequency variation had about the same values over the Tibetan Plateau. The most significant period was 1 day and 2~4 day period was also significant. Although there were obvious peaks over 6~8 day and 10~13 day period, only a few areas and seasons could pass the 95% degree of confidence.

Key words: outgoing longwave radiation; harmonic analysis; Tibetan Plateau; significant test