第 45 卷 第 2 期　　气 象 学 报　　Vol. 45, No. 2
1987 年 5 月　　ACTA METEOROLOGICA SINICA　　May, 1987

夏季印度季风环流系统与我国长江上游区域性持续暴雨的关系*

周静亚　成秋影**
（北京大学地球物理系）

提　　要

本文对夏季 6—8 月我国长江上游地区 56 次区域性持续暴雨过程进行了统计分析。指出它们与夏季印度季风环流系统之间存在着密切的联系。给出暴雨期间印度—孟加拉湾地区的温压场和有关气象要素分布的平均形势，计算了暴雨日雨量与其前 24 h气象要素的相关系数，从而说明长江上游暴雨与印度季风环流系统的相关关系，并指出主要的季风环流影响系统和关键区。

一、引　　言

夏季发生在我国长江上游主要是四川及其附近地区的暴雨过程，由于地理位置的特点，造成暴雨的天气系统和物理因子是复杂的。它可能受到西风带系统、西太平洋副热带高压脊、青藏高原上的系统、印度热带季风环流以及复杂的地形作用等多方面因素的影响。本文着重对长江上游出现区域性持续暴雨与印度季风环流之间的联系进行分析讨论。

关于印度季风活动与我国降水的关系，已有过一些论述[1-3]。但对于长江上游暴雨的影响，尚需进行更具体的研究。关于印度季风系统，T. N. Krishnamurti 等曾提出过有关的九个成员[4]。徐淑英等也讨论过影响我国夏季风活动的一些天气系统[5]。本文主要分析长江上游暴雨与印度—孟加拉湾区域季风系统的联系。

为了使所得结果更具有代表性，选取多次长江上游暴雨过程的平均状态结合相关统计的分析结果来进行讨论。具体的做法是：根据中央气象台每日 08 时(北京时)24 h 雨量图，凡雨区位于长江上游主要是四川及其附近地区，四川境内有三个以上测站 24 h雨量达到暴雨的程度($R_{24}\geqslant 50$ mm)，且川内暴雨持续两天以上者，做为一次长江上游区域性持续暴雨(本文简称长江上游暴雨)。自 1971 年—1983 年期间共选出 56 例。对和这 56 次暴雨过程相对应的印度季风环流系统的平均形势进行了分析，给出不同层次有关气象要素的平均图。计算出暴雨日雨量(M，为出现暴雨测站雨量的平均值)与前 24 h印度—孟加拉湾各站有关气象要素的相关系数，并绘出分布图，从而得出长江上游暴雨与印度季风环流的具体联系，且可做为暴雨预报的参考依据。

二、夏季长江上游出现区域性持续暴雨期间，印度季风环流系统的基本特征

* 1) 本文于 1984 年 9 月 7 日收到，1985 年 9 月 14 日收到修改稿。
2) 该文系中国科学院科学基金资助课题。
** 成秋影同志现已调至北京气象学院工作。

首先，分析了长江上游暴雨发生和持续期间印度季风环流系统的基本形势。我们对暴雨出现前24 h和暴雨发生当日(即出现暴雨的第一天,下文同）的季风环流形势分别进行了分析。对印度—孟加拉湾区域不同层次的有关气象要素,做出包括850 hPa,700 hPa,500 hPa和200 hPa等压面的温压场、湿度场、风场(u,v分量)的平均图。据此可以看出暴雨发生前和发生当日印度季风环流的基本特征。下面仅给出有代表性的图来予以说明。

1．暴雨发生前24 h印度季风环流系统的基本形势

在850 hPa等压面上(图1 a),印度中部—孟加拉湾区域,季风槽发展东伸,槽线位置约在25°N—18°N,呈WNW—ESE走向,有较强的季风低压活动，低压平均位置在孟加拉湾北部及印度东北部沿海附近。这是明显的印度季风活跃期的环流形势。值得注意的是在印度季风槽南侧的热带西风气流中，尚有槽脊的活动,平均状态是:在印度半岛20°N以南地区(简称印度南部)，东岸为暖性低槽区，西岸为冷性高脊前部所控制。上述环流形势与作者曾提出的长江上游暴雨个例分析的形势[6]极为相似，而南部槽脊的东移变化对我国西南地区的暴雨是有影响的。

在500 hPa等压面上(图略),印度中部亦为明显的季风槽发展东伸的形势。

在高层200 hPa等压面上(图1 b)，印度中部季风槽区上空是一个东西向的高压区,它与青藏高原上的高压并未合成一体，中间在喜马拉雅山麓尚有一狭窄的低压带。印度南部东岸为暖性高压脊，西岸为冷性倒槽区。

湿度的分布情况(图略),在850 hPa层露点(T_d)在季风槽区较高，以季风低压的左前侧(印度中部的那格浦尔即42867站附近）和季风低压北侧的雅-布河谷地区(42410站)为最高,约18℃以上,向南减小。在500 hPa层上,露点分布与此相似，反映出这些地区的湿层是深厚的。

高层风场(u)的特征是在200 hPa等压面上,印度上空皆为东风气流所控制(见图

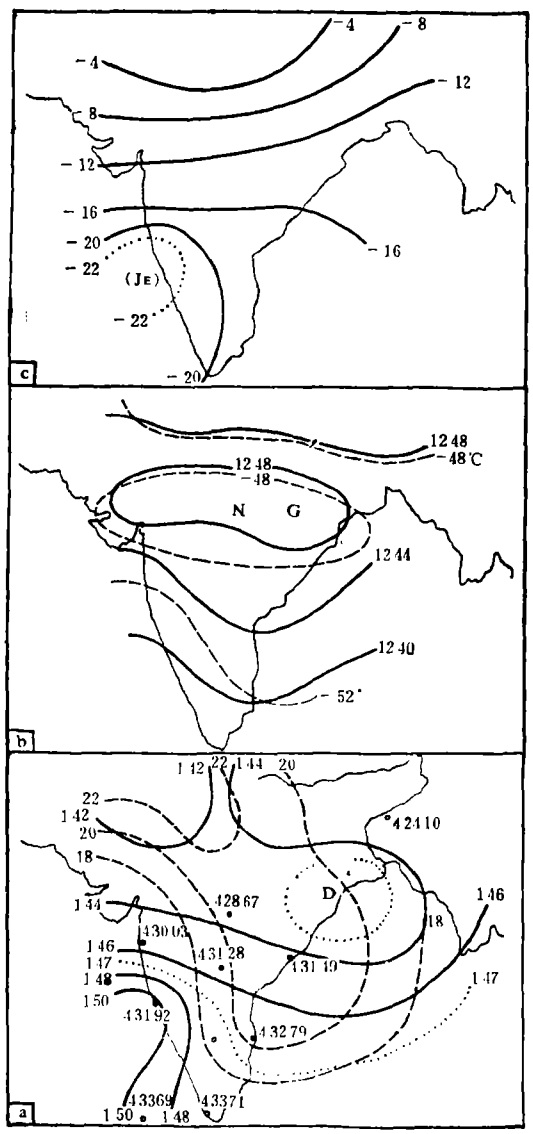


图 1 暴雨前印度季风系统的平均形势
(a. 850 hPa 温压场,b. 200 hPa 温压场,c. 200 hPa 风场(u)；实线，等高线(10 gpm),等风速线 (m/s)，虚线，等温线(℃))

1 c)，风速自北向南增大，至 18°N以南达 16 m/s 以上，在 10°—15°N 的印度西岸，风速在 20 m/s以上，最大值为 23 m/s(43192 站)，在其北侧风速梯度也较大。故此处约近于高空东风急流中心，其东为急流入口区。高空东风急流的强度与位置皆与印度季风环流的活动密切相关，对长江上游暴雨亦有重要影响。

2．暴雨发生的当日(第一天)，印度季风环流系统的基本形势

将暴雨发生当日的季风环流形势（图 2)与暴雨前形势(图1)对比，说明其主要特征及变化。

1）各层温压场的平均形势

在暴雨发生的当日，低层的季风低压已西移至陆上并减弱（见图 2 a)。中层季风槽也向西北方向收缩(图略)。而季风槽南侧西风气流中的槽脊却明显的东移和发展了。850 hPa 层高压脊移至印度半岛中央呈南北向，而低槽则位于孟加拉湾西部，这样，在印度—孟加拉湾区域环流的经向度显著加大，从孟加拉湾直至中南半岛西部，皆为强盛的西南气流所控制（见图 2 a)，这对向我国西南地区输送暖湿空气极为有利。

在高空 200 hPa 层上，印度中部高压已与高原高压合并但向南伸展(见图 2 b)，成为自东北伸向西南的高压脊。因而在孟加拉湾的高空为东北气流所控制。

2）印度南部凉气流的分析

从 850 hPa 温压场(图 2 a)看出，这时孟加拉湾高温高湿空气已向较高纬度移动，原在印度西岸的凉空气却明显东伸。下面进一步分析这支气流的性质。

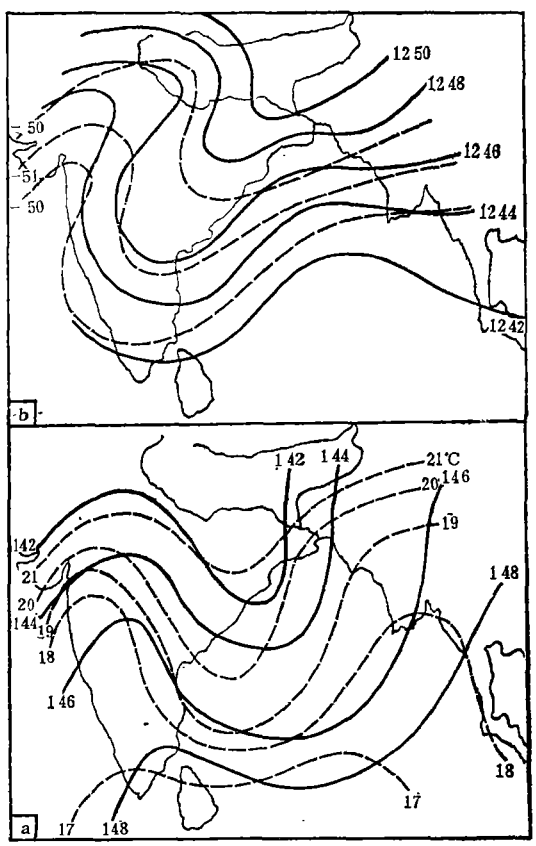


图 2　暴雨发生第一天印度季风系统的平均形势
(a. 850 hPa 温压场，b. 200 hPa 温压场，实线：等高线(10 gpm)，虚线：等温线(°C))

暴雨发生当日 850 hPa层上风速(u)的分布见图 3。可以看到，在印度南部大约10°—16°N附近有一支较强的西风气流自阿拉伯海伸至印度东岸，风速可达 10 m/s 以上，大于 8 m/s 的风速区已伸至孟加拉湾中部。这支气流所到之处，气温是降低的。在 24 h 变温图上(图 4)表示出在 850 hPa 和 500 hPa 层负变温区与偏西气流的高值区十分吻合。降温最大处也正在风速最大区附近，降温幅度约 1 °C 左右，分布很有规律。在图 4 中，等露点线较前一日北抬，在 16°—19°N 之间密集，沿东西向形成近似露点锋的形式，最低露点区在南部东岸，与负变温区也是很一致的。而露点在 24 h 内降低最大区亦在此处附近约 1°C以上(图略)。因此，可以判定确有一支自阿拉伯海东移过来的低温、低露点的凉气流，它可以延伸到 500 hPa 的高度。这一支凉气流的北沿似以露点表现的更为清楚。凉空气

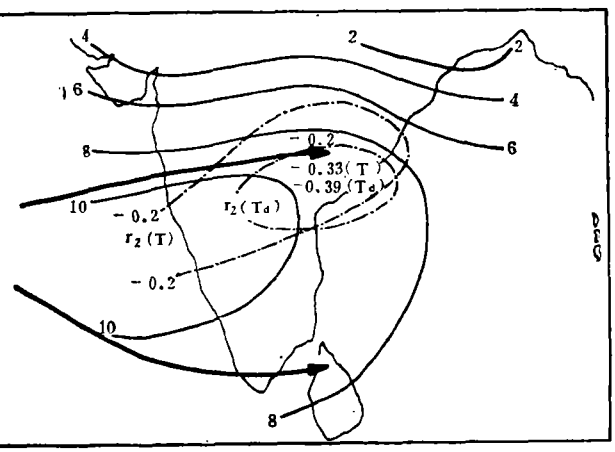


图 3 850 hPa等压面上风速(u)的分布与索马里低空急流
(实线：等风速线(m/s)，矢线：索马里低空急流，点划线：温度、露点相关系数(r_2)为0.2的等值线)

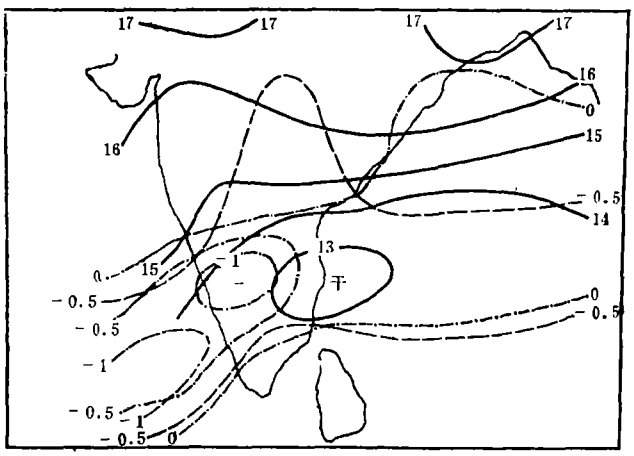


图 4 850 hPa 等压面上露点分布与 24 h 变温的分布
(实线：等露点线(℃)，虚线：850 hPa ΔT_{24} 等值线(℃)，点划线：500 hPa ΔT_{24} 等值线(℃))

的最强中心约在印度半岛南端及其附近海域上(大致在 12°N 以南，75°—90° E 一带区域)。

将这支气流与 Findlater[7]提出的索马里低空急气流的位置进行比较(图 3)，可以看出这支凉气流与 6—7 月索马里急流的位置及指向是非常一致的。所以，这支来自阿拉伯海低纬经印度南端东伸至孟加拉湾的凉气流，可能是与索马里低空急流的活动相联系的。

这支凉气流的东移影响到印度南部槽脊的发展和季风环流的变化，也与我国西南地区的暴雨有密切联系。在这支凉气流的前端(以 43149 站为主)，表现出集中存在有多种气象要素的高相关中心，(下文将详细讨论)。概括地说从 850 hPa，700 hPa 和 500 hPa 三层的情况都可看出，在这支气流的前沿，西风风速愈大、温度与露点愈低，长江上游暴雨的日雨量也愈大。

3) 孟加拉湾上空的季风环流圈

综上所述，在暴雨出现的当日，印度季风环流经向度加大，孟加拉湾上空，低层为强盛的西南气流，高空为强东北气流。其走向为自印度南端至我国西南地区。这时暖平流北移，最大正变温区在孟加拉湾北部和雅-布河谷附近，并向我国西南地区延伸。而印度南部冷高脊发展，孟加拉湾南部转为向北的冷平流。这样，在孟加拉湾上空存在着一个季风环流圈，其低层西南季风气流及自孟加拉湾南部北进的冷平流，将高温高湿空气输送到北方，上升至高空，以东北气流南移，至印度南端凉空气区下沉。而我国长江上游恰位于这一季风环流圈的上升气流区，因此出现大范围持续性暴雨。

4) 高空热带东风急流的变化

200 hPa层东风急流减弱，急流中心已看不到，印度西岸东风风速明显减小，东岸风速却加大，这可能与孟加拉湾上空东北气流加强有关。在高空东风气流中，还存在有几个高

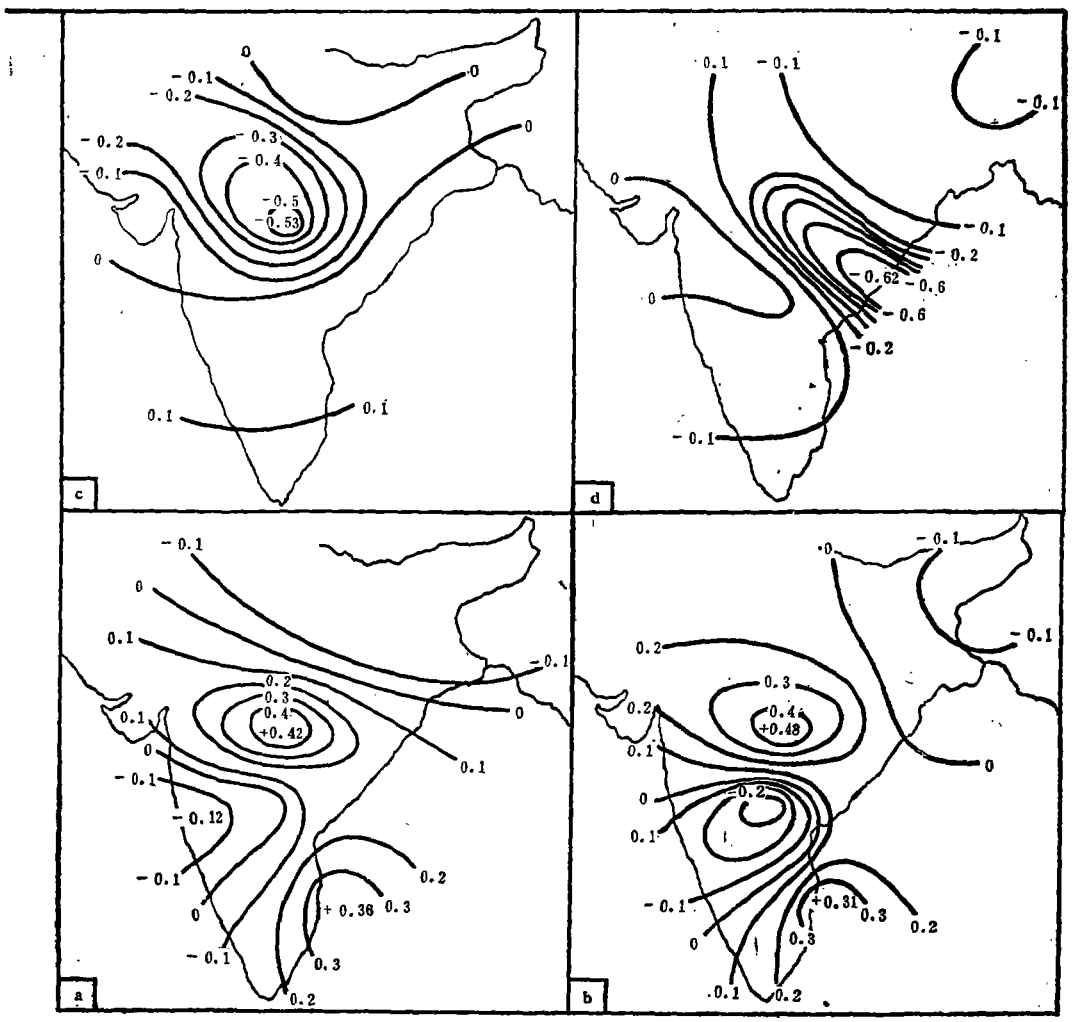


图 5　暴雨第一天相关系数(r_1)的分布

(a. 850 hPa温度相关系数$r_1(T)$, b. 850 hPa露点相关系数$r_1(T_d)$, c. 500 hPa等压面高度相关系数$r_1(H)$, d. 200 hPa风速(u)相关系数$r_1(u)$)

值中心，表明东风气流的结构是复杂的。

三、长江上游暴雨的日雨量与印度季风系统气象要素的相关分析

为了进一步了解长江上游暴雨究竟与印度季风系统的哪些部位及哪些要素具有密切关系，我们做了有关的相关统计分析。

在季风环流控制下的印度——孟加拉湾地区选出具有 30 次以上观测记录的 18 个测站，将暴雨出现第一天的 24 h 雨量 M_1 与其前 24 h 各测站气象要素分别计算相关系数(简称该要素的相关系数 r_1)，绘出不同层次各种要素相关系数的分布图(图 5)，从而看出相关区与季风系统的配置关系。同样做出暴雨第二天日雨量 M_2 与前 24 h 各种气象要素

相关系数 r_2 的分布图(图 6)。现仅就相关显著者来讨论。

1．暴雨第一天主要相关系数 r_1 的分布

从图 5 (a,b)中看出在 850 hPa 层上,温度及露点的相关系数分布是非常相似的。在印度中部有一个正相关区,最大中心在 42867 站,$r_1(T)$为+0.42,$r_1(T_d)$为+0.48。这正与季风槽相对应,位于季风低压的左前方。此处的暖湿空气愈强,长江上游暴雨的日雨量愈大。在印度南部东岸亦为正相关区,最大值 $r_1(T)$为+0.36,$r_1(T_d)$为+0.31。这是与南部低槽相对应的。而在印度南部西岸,有一负相关区东伸,露点负相关中心在 43128 站,$r_1(T_d)$为−0.35。这与自阿拉伯海伸至西岸的凉气流相关联。此外,在季风低压北侧雅-布河谷区有风速 u 的正相关区,最大中心值为+0.42(图略),这说明聚集在河谷的暖湿空气要通过适当的风场发生作用,西风愈强时,暴雨量愈大。

500 hPa 等压面高度相关系数的分布(图 5 c),有一个显著的负相关区自印度西北部伸向中部,负值中心亦在 42867 站(−0.53),即季风槽愈深,暴雨量亦愈大。

在高空 200 hPa 层上,特别引人注意的是风速(u)的相关分布(图 5 d),在印度中部至东岸一带是一个非常显著的负相关区,负中心值达−0.62,此处正位于热带东风急流入口区的右侧。由此可见高空热带东风急流的位置、强度及风速的分布特征对长江上游暴雨有非常重要的作用。此外,200 hPa 等压面高度相关系数的分布以及温度相关系数的分布都与暴雨有显著联系。所以,200 hPa 等压面环流特征是有重要意义的。

将相关系数通过显著性检验者选出,一般多集中在几个测站,可将其定为指标站。此外,又求出几个要素的多元线性回归方程,现将此列于表 1 和表 2 。可做为分析和预报的参考依据。

2．暴雨第二天主要相关系数 r_2 的分布

从 850 hPa,700 hPa,500 hPa 等压面高度相关系数的分布看出,在印度半岛的中央都有一个呈南北向的正相关区(图略),说明季风槽的填充、减弱和原在西岸的高压脊东移发展对暴雨的持续是有利的。

从图 6 看出印度中部和南部的温度正相关区已不明显,而原在西岸的负相关区向东延伸且加强(−0.33)。在印度中央,露点的正负相关区同时东移,正相关减弱,负相关加强。这表明季风槽暖湿空气的影响在减小,而自阿拉伯海东伸的凉气流的作用却明显增强。如前所

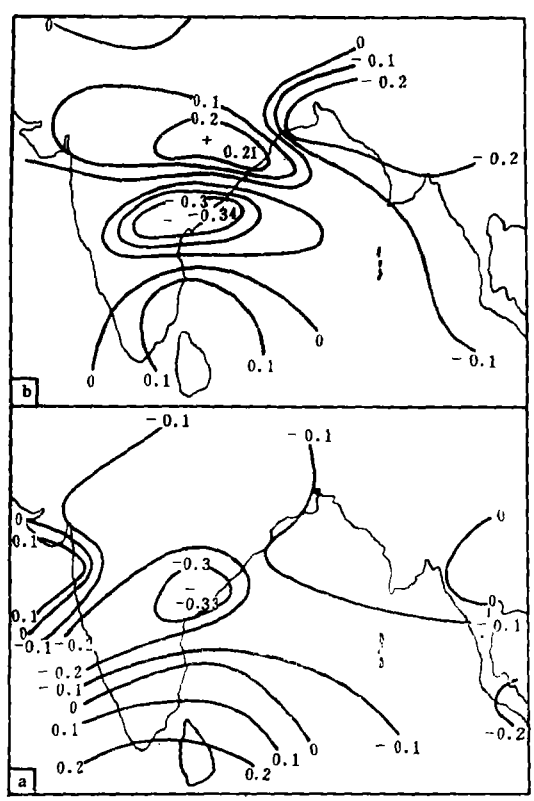


图 6 暴雨第二天相关系数(r_2)的分布
(a. 850 hPa温度相关系数 $r_2(T)$,
b. 850 hPa露点相关系数 $r_2(T_d)$)

表 1　长江上游暴雨发生前24 h 有关要素的相关系数及回归方程

站号	要素	相关系数(r_1)	回归方程	信度(α值)
42867	T_{850}	+0.42	$M_1=-29.28+5.31T_{850}$	0.01
	T_{d850}	+0.48	$M_1=0.11+4.57T_{d850}$	0.01
	H_{500}	−0.53	$M_1=1093.9-1.75H_{500}$	0.01
	u_{500}	−0.34	$M_1=75.29-1.79u_{500}$	0.05
	u_{200}	−0.31		0.05
43128	T_{d850}	−0.35	$M_1=160-4.99T_{d850}$	0.05
	T_{d500}	−0.42	$M_1=55.25-2.88T_{d500}$	0.05
43003	v_{850}	+0.33	$M_1=74.32+2.41v_{850}$	0.05
	v_{700}	+0.35	$M_1=77.23+2.28v_{700}$	0.05
	T_{200}	−0.39		0.05
	H_{200}	−0.33		0.05
43279	H_{700}	+0.37	$M_1=-1378.26+4.69H_{700}$	0.05
	T_{200}	+0.34		0.05
	H_{200}	+0.37		0.05
	T_{850}	+0.30	$M_1=-21.19+5.01T_{850}$	0.05
	T_{d850}	+0.31	$M_1=37.89+3.07T_{d850}$	0.05
	H_{850}	+0.30	$M_1=-664.05+5.99H_{850}$	0.05
43149	H_{200}	+0.37		0.05
	u_{200}	−0.62		0.01
42110	u_{700}	+0.43		0.01
	u_{850}	+0.32		0.05

(H:等压面高度(10gpm)，T:温度(℃)，T_d: 露点(℃)，u,v:风速(m/s))

表 2　多元线性回归方程

站号(或层次)	要素	多元线性回归方程	α值
42867	T_{850},T_{d850},H_{500}	$M_1=-201.5+1.5T_{850}+4.1T_{d850}+0.31H_{500}$	0.01
	T_{850},T_{d850},u_{500}	$M_1=-43.3+2.4T_{850}+4.1T_{d850}-1.34u_{500}$	0.01
	T_{d850},H_{500},u_{200}	$M_1=-349.9+4.73T_{d850}+0.6H_{500}-0.51u_{200}$	0.01
	T_{850},T_{d850},u_{500}, u_{200}	$M_1=-44.5+2.8T_{850}+3.2T_{d850}-1.4u_{500}-0.6u_{200}$	0.01
43128	T_{d850},T_{d500} v_{500}	$M_1=83.7-0.9T_{d850}-2.0T_{d500}+2.4v_{500}$	0.05
43279	T_{850},T_{d850} H_{850}	$M_1=-574.5+2.5T_{850}+1.8T_{d500}+3.4H_{850}$	0.05
700hPa	u_{42410},v_{43003} H_{43279}	$M_1=-1770.5+0.1u_{42410}+3.5v_{43003}+5.9H_{43279}$	0.05
850hPa	T_{d42867},v_{43003} u_{42410}	$M_1=62.7+0.08T_{42867}+3.6v_{43003}+2.2u_{42410}$	0.05

述，在暴雨当日，这支凉气流已抵达印度东岸。引人注意的是有多种要素的最大相关中心都位于这支气流的前沿，集中在其前端的 43149 站。将这些相关中心值列于下面：

850 hPa：$u(+0.27)$，$v(+0.36)$，$T(-0.33)$，$T_d(-0.39)$，$H(+0.27)$

700 hPa：$u(+0.35)$，$v(+0.35)$，$T(-0.29)$，$T_d(-0.26)$，$H(+0.25)$

500 hPa：$u(+0.25)$，$v(+0.39)$，$T(-0.25)$，$H(+0.13)$

由此看出：在这支凉气流的前端，有许多要素的高相关中心存在且分布极有规律，即：此处的风速愈大、温度愈低、露点愈低以及印度半岛上的高压脊愈强时，长江上游的暴雨量亦愈大。这充分说明阿拉伯海凉气流经印度南部抵孟加拉湾时，对印度季风环流的变化和我国长江上游暴雨都有着非常重要的影响。

200 hPa 层上风速(u)相关系数分布与前相似，指关系数减小(−0.36)，这与东风急流的减弱是相对应的。

四、重要的季风影响系统及关键区

综合以上分析，可以得出，印度季风系统内与长江上游暴雨相关显著的主要系统有：(1) 印度季风槽与季风低压，(2) 季风槽南侧热带西风气流中的槽脊活动，(3) 阿拉伯海低纬东伸的凉气流，(4) 印度高空 200 hPa 层南伸的高压脊，(5) 高空热带东风急流。

将上述季风系统的影响，通过某些要素相关系数的分布反映出来，归纳出几个关键区：(1) 印度中部以 42867 站为指标站。主要反映季风槽区深厚暖湿空气及低槽强度的影响。(2) 印度南部西岸以 43192 站和 43128 站为指标站，是反映西岸冷高脊和阿拉伯海凉气流作用的地区。(3) 印度南部东岸，以 43279 站和 43149 站为指标站，反映低层暖低槽及阿拉伯海凉气流抵达东岸时的情况，也是指示高空热带东风急流影响的重要地区。(4) 雅-布河谷地带，以 42410 站为指标站，主要反映河谷暖湿空气聚集区的风场作用。

五、结 语

根据以上分析，得出以下结论：

1. 夏季 6—8 月我国长江上游区域性持续暴雨与印度季风环流系统存在着密切的联系。暴雨是发生在印度季风槽发展和季风低压活动的印度季风活跃期。

2. 提出与长江上游暴雨紧密相关的季风影响系统，特别是可能与索马里低空急流相联系的阿拉伯海凉气流的重要影响以及高空热带东风急流的显著作用。这些系统相互配合，在暴雨期间，孟加拉湾上空存在着一个自西南走向东北的季风环流圈。北侧上升支气流有利于长江上游出现持续性暴雨。

3. 计算出长江上游暴雨日雨量与季风系统有关气象要素相关系数的分布，得到相关显著的关键区和指标站。

4. 所得相关系数与回归方程，可做为长江上游暴雨 24 h 雨量预报的参考依据。

参 考 文 献

[1] 四川省气象局科研所等，五至六月西南低涡的发展及其与四川暴雨的关系，青藏高原气象论文集 (1975—1976)，283—290，1977。

[2] 罗绍华，1980 年夏季风对长江中下游降水的影响，全国热带夏季风学术会议文集，124—136 云南出版社，1982。

[3] 张敬业，经向流型下夏季风对四川暴雨的贡献，全国热带夏季风学术会议文集，335—340，云南出版社，1982。

[4] Krishnamurti, T. N., and H. N., Bhalme, Oscillations of a monsoon system, part I. observational aspects, *J. Atamos. Sci.* **33**, 10, 1937—1954, 1976.

[5] 徐淑英等，1979 年季风系统振荡的初步分析，青藏高原气象科学实验文集 (二)，90—98，科学出版社，1984。

[6] 周静亚等，盛夏低纬环流演变与西南涡发展的初步分析，热带环流和系统学术会议论文集，203—215. 海洋出版社，1982。

[7] Findlater, 1971: Mean monthly air flow at low levels over the western Indian Ocean, Geophys. Mem., No. 115, *HMSO*, London.

THE RELATIONSHIP BETWEEN INDIAN MONSOON SYSTEMS IN SUMMER AND THE CONTINUOUS HEAVY-RAIN OVER UPPER REACHES OF THE CHANGJIANG

Zhou Jingya　Cheng Qiuying*

(Department of Geophysics, Peking Uninersity)

Abstract

In this paper, the continuous heavy-rains over upper reaches of the Changjiang during June-August are analyzed. They are closely related with the Indian Monsoon Systems. The average synoptic situations and the average distributions of some meteorological elements over Bengal Bay during the period of heavy-rain are exhibited. The correlation coefficients between the meteorological elements and the rainfall, the main Monsoon influence systems and the key regions are denoted, which may be used as a reference for the forecasting of rainfall in 24 hours.

*Present affiliation: Beijing Institute of Meteorology.

《中期天气预报》评介(仇永炎等)

这是我国出版的第一册有关中期天气预报方面的书籍。此书出版，具有填补空白的重大意义。

该书主要是介绍中期天气预报的理论基础知识，因此侧重于阐述大气环流中期变化的物理过程，并不侧重于预报方案的建立。

综观全书，内容涉及面较广，取材丰富，体系完整，组织恰当，反映了近一、二十年来这方面科研的新成果、进展和重大问题，有观点、有特色，是近年来出版的最优秀的气象学书籍之一，对从事短期、中期天气预报业务工作及数学、科研工作者都值得一读。

黄士松