

黄河中游强暴雨过程的中低纬度 环流特征和水汽输送*

董立清 任金声

(国家气象中心,北京 100081)

徐瑞珍 王建忠

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

利用 1981~1991 年 6~9 月气象资料,用合成分析方法研究了黄河中游强暴雨过程. 根据环流特征,它可归纳为汛期暴雨型和非汛期暴雨型两大类. 重点分析了每种类型的水汽通量、水汽通量散度、风矢量等的分布. 结果表明,两种类型中,水汽源地,输送路径以及辐合强度等都有很大的差异.

关键词:黄河中游;暴雨系统;环流特征;水汽输送.

引 言

暴雨是在几种尺度系统相互作用的情况下发生发展的,而大尺度环境条件对这种过程有明显的制约作用. 为做好暴雨预报,对这种相互作用进行深入研究是十分必要的^[1].

黄河中游强暴雨过程的大尺度环流特征,一般都以中高纬度西风带系统作为环流分型的基础^[2],如单阻型、双阻型等,重点放在冷空气活动上. 而中低纬度系统即副热带高压、赤道辐合带、热带气旋等的活动、强弱及其相互配置对暴雨形成的影响多限于个例分析. 中国处于亚洲季风区,水汽条件、水汽输送及其和大尺度环流的关系与暴雨密切相关. 本文用合成分析方法研究了黄河中游强暴雨过程与中低纬度大尺度环流条件和水汽输送的联系.

1 黄河中游地区的暴雨过程及环流特征

本文所指的黄河中游地区指兰州至郑州之间的干流区和直接或间接流入这一区间的各支流流域. 暴雨过程划分标准是:按照国家气象中心出版的逐日历史天气图,在 24h(08

* 本文由 85-906 科技攻关项目 08 课题资助.

1995-02-20 收到,1995-07-06 收到修改稿.

~08 时)降雨量图上,在研究区域内出现的相邻 3 站雨量大于或等于 50mm,则定义为一次强暴雨过程,持续两天或以上者定义为一次持续性强暴雨过程.根据这个标准,1981~1991 年 6~9 月共出现 11 次强暴雨过程(见表 1),平均每年 1 例,其中 3 次为持续性强暴雨过程.

本文采用合成方法分析两类暴雨的环流特征,即首先对每次过程进行客观分析,然后对相应的格点值取平均.风矢量剖面图中的垂直速度是采用 O'Brien 的垂直速度计算方法,即运用等压面上的连续方程并考虑散度订正后计算出来的结果.

表 1 黄河中游地区 11 次强暴雨过程(1981~1991 年 6~9 月)

Table 1 11 cases of torrential rain over the middle reaches of the Yellow River
(from June to September, 1981~1991)

序号	起止日期	暴雨类型	影响系统	暴雨位置	日降雨极值 (mm)
1	1981-08-09~10	汛期型 暴雨过程	西风槽,切变线	渭水中下游地区	60
2	1981-08-14~16	汛期型 持续性暴 雨过程	西风槽, 低涡切变	14~15 日位于陕西洛河至 泾河的中上游地区,其中洛 河上游为大暴雨区 15~16 日东移至晋中,豫东 北和冀西南一带地区	127
3	1982-07-29~08-01	汛期型 持续性暴 雨过程	低涡	7 月 29~30 日位于陕西洛 河和泾河流域,7 月 30 日至 8 月 1 日东移至晋南和豫北 段的黄河两岸	193
4	1983-09-07~08	汛期型 暴雨过程	西风槽, 低涡	由陕西泾河下游向东沿黄 河两岸伸向鲁西南、向北 扩展至晋中和冀西南一带 地区,其中大暴雨区位于 郑州附近地区	139
5	1984-06-05~08	非汛期型 暴雨过程	西风槽, 低涡切变	山西运城至渭水下游地区	102
6	1984-07-10~11	汛期型 暴雨过程	西北涡和切变线	无定河下游至陕西洛河中 游,汾河中游至冀西南一 带地区	61
7	1985-08-23~25	汛期型 持续性暴 雨过程	西风槽, 低涡切变	稳定在鄂托克旗—东胜— 呼和浩特一带地区	88
8	1986-07-09~10	汛期型 持续性暴 雨过程	切变线, 低涡切变	渭水下游	78
9	1986-09-08~09	非汛期型 暴雨过程	西风槽, 切变线	渭水中下游	82
10	1987-06-21~22	非汛期型 暴雨过程	西风槽, 暖性切变	晋中地区	64
11	1988-07-03~04	非汛期型 暴雨过程	西风槽, 低涡切变	渭水中下游	67

根据 500 hPa 中低纬度天气系统的分布特征,将暴雨过程发生期间的环流形势概括为汛期暴雨型和非汛期暴雨型两大类. 汛期暴雨型共有 7 例,其中 6 例出现于 7~8 月,1 例出现于 9 月上旬. 非汛期暴雨型共有 4 例,2 例出现于 6 月,9 月上旬和 7 月初各出现 1 例. 即汛期暴雨型主要出现于盛夏,非汛期暴雨型主要出现于夏初或夏末.

1.1 汛期暴雨型

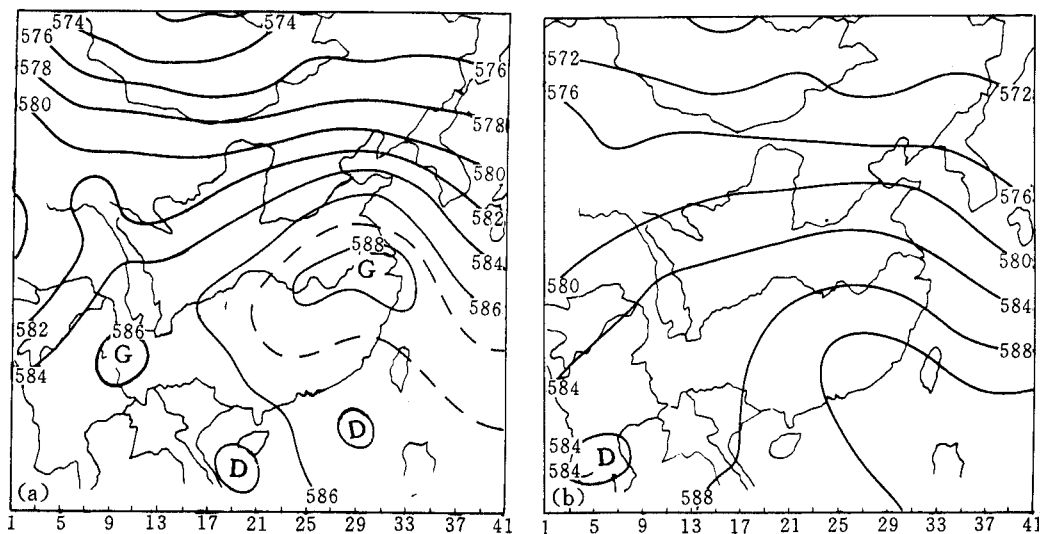


图 1 汛期暴雨型(a)和非汛期暴雨型(b)500 hPa 合成图

Fig. 1 The composite map at 500 hPa; (a) flood period rainstorm type (b) non-flood period rainstorm type

图(1a)为汛期暴雨型 500 hPa 平均环流,其主要特征是:副热带高压(简称副高)主体呈块状位于华东和华中地区,副高中心在安徽南部,脊线位于 $30^{\circ}\sim 31^{\circ}\text{N}$,588 dgpm 等高线控制着长江中下游两岸地区,西脊点在湖北中部. 赤道辐合带位于南海地区 ($17^{\circ}\sim 22^{\circ}\text{N}$)且呈东西带状,南海东北部有一低压中心;且配有一明显的东风倒槽伸向闽、赣一

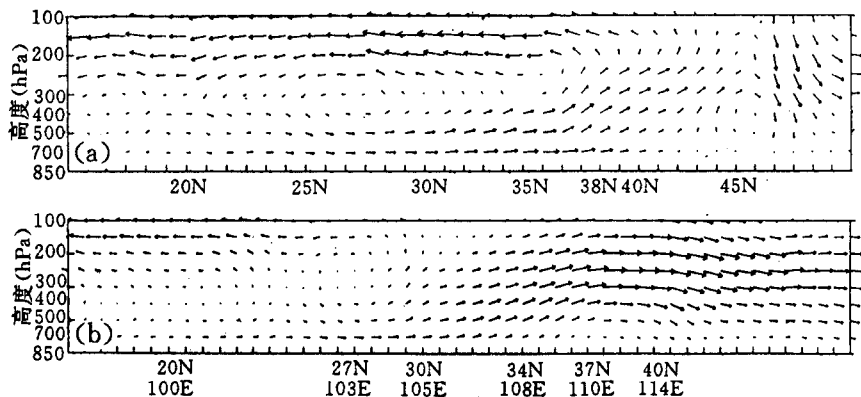


图 2 汛期暴雨型(a)和非汛期暴雨型(b)垂直剖面图

Fig. 2 As in Fig. 1, but for the vertical cross-section

带,海南岛西南方也有一低压中心.中纬度 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 西风带环流比较平直,仅在青海东部有一西风槽存在,其后有明显的高压脊相伴,表明该槽可以提供产生暴雨所需的冷空气条件.

根据汛期暴雨型对流层中低层水汽输送的特点,绘制了汛期暴雨型沿 110°E 上的经圈垂直环流,如图 2(a)所示.中低纬度有 3 个环流圈,但直接和暴雨的生成有关系的是位于 $22^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$ 上空的庞大的反环流圈,环流中心大约位于 28°N 上空的 350 hPa,伸展高度达 150 hPa.环流圈北侧的上升气流扩展到 44°N ,这支上升气流大约从 700 hPa 开始向上爬升,进入黄河中游南界后,400 hPa 以上气流向北的水平分量逐渐减小,在 300~250 hPa 开始出现向南分量,以后向南爬升;400 hPa 以下的气流继续向北爬升,而且上升分量逐渐增大,水平分量逐渐减小.一般在 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 上空的 300~200 hPa 之间的向北分量逐渐为 0,仅有向上的垂直运动.这支爬升气流和垂直上升区覆盖了整个黄河中游,是暴雨形成的关键条件.值得注意的是位于 $35^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$ 上空深厚的上升气流,当它到达 300~250 hPa 后开始向南偏转,随即出现下沉分量,然后又继续向南爬升.这个下沉分量和其下面的上升气流之间容易形成不稳定层结,这是暴雨增幅的有利条件,是和强暴雨过程主要发生在秦岭以北到 38°N 的地区相符合的.

1.2 非汛期暴雨型

图(1b)为非汛期暴雨型 500 hPa 平均环流图.副高呈西北—东南走向,且主体异常庞大.588 dgpm 等高线控制着江南大部、华南、南海北部,其北界仅位于长江中游沿岸,比汛期暴雨型偏南 2~4 个纬距.中纬度西风带环流也比较平直,其上多短波小槽活动.等高线的走向表明,西南地区东部盛行西南气流.

该型对流层中低层水汽输送总体上呈西南—东北向,故沿缅甸的耶城、中国的延安、大庆作垂直剖面图(图 2b).如图所示, 15°N 以北的中低纬度仅有一个完整的反环流圈,它大约位于 $25^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$,水平尺度仅有汛期暴雨型相应环流圈的 1/3 左右,中心大约位于 27°N 、 103°E 上空的 350 hPa,纬度和高度与汛期暴雨型基本一致.所不同的是环流圈北侧的爬升气流仅有一小部分在 200 hPa 附近出现向南分量,逐渐返回低纬度地区,而大部分继续向北爬升.进入黄河中游南界后(34°N)风速骤然加大,并在 300~200 hPa 出现急流带,其在 38°N 附近转为水平流动, 40°N 附近开始出现下沉分量,逐渐向北下滑. $34^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$ 上空一致的爬升气流,为暴雨的发生提供了上升运动条件,对流层上层的水平急流带则提供了高层辐散条件.

2 水汽输送

2.1 汛期暴雨型的水汽输送

如图 3(a)所示,850 hPa 上台湾东部洋面有一个大的水汽通量中心,中心值达 $122\times 10^{-4}\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$,通过这个中心有一条水汽通量轴线,从台湾东部一直延伸到黄河中游东南部,其值大都在 $75\times 10^{-4}\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ 以上.和其相对应有一支最大风速带,其源于东海南部,经闽北、浙南、赣北、鄂到达黄河中游.从水汽通量和风矢量分布上来看,这是一支很强的水汽输送带,称为 A 支水汽输送带.以 34°N 、 104°E 和 34°N 、

114°E 之间的连线 EF 表示黄河中游南界. 从流场上看, 通过 EF 线段进入黄河中游的水汽全部来自东海南部, 即由 A 支水汽输送带输送. 输送的水汽在黄河中游产生辐合, 尤以渭水流域辐合较强(图略).

在 700 hPa 上(图 3b)最大的水汽通量区位于四川东部、陕南一带, 中心在陕西安康附近, 其值达 $76 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$. 通过这个中心的水汽通量轴线从南海西北部延伸到川东、陕南、山西一带, 和其相对应亦有一支最大风速带, 它源于孟加拉湾经中南半岛进入南海, 而后转向偏北, 经海南东部海面、粤西、桂东、黔、川东进入黄河中游^[3]. 从

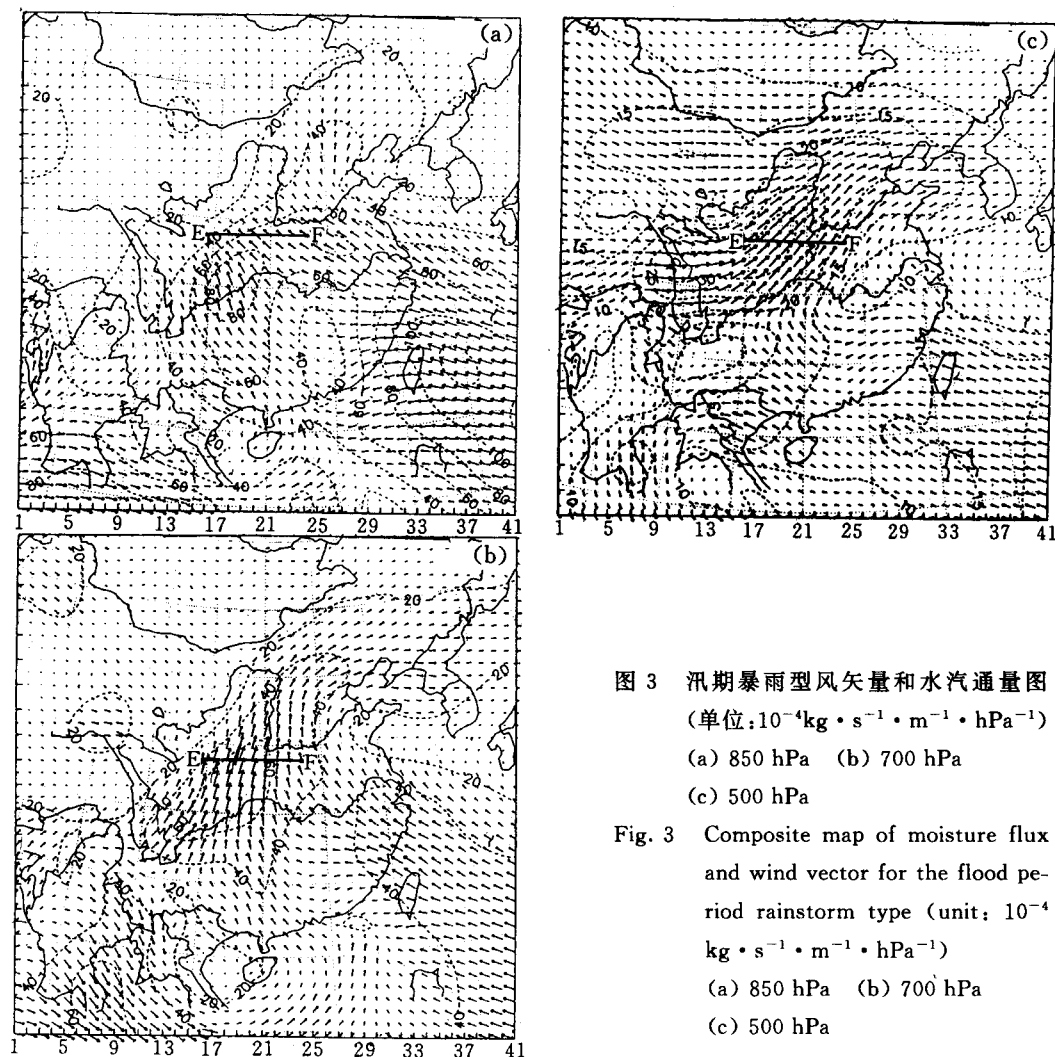


图 3 汛期暴雨型风矢量和水汽通量图
(单位: $10^{-4} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)
(a) 850 hPa (b) 700 hPa
(c) 500 hPa

Fig. 3 Composite map of moisture flux and wind vector for the flood period rainstorm type (unit: $10^{-4} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)
(a) 850 hPa (b) 700 hPa
(c) 500 hPa

水汽通量和风矢量分布上来看, 这也是一支比较强的水汽输送带, 称为 B 支水汽输送带. A 支水汽输送带向上伸展到了 700 hPa, 但其北段大部向右偏转至黄河下游^[4]; 另外从陕西安康的水汽通量中心有一通量舌伸向四川西南部, 和它相对应的一支西南气流源于孟加拉湾北部, 先向东、以后转向东北, 经四川盆地西部伸向黄河中游西南部(称为 C 支输送带). 从流场上看, 通过黄河中游南界 EF 线段进入黄河中游的水汽由上述三支输送带

完成. EF 线段自西向东共有 9 个格点, 通过第 1~2 个格点的水汽来源于孟加拉湾, 第 3~7 个格点来源于南海北部, 第 8~9 个格点来源于东海南部. 上述三个方面水汽通量之比为 18 : 63 : 19(表 2), 显然接近 2/3 的水汽源地为南海北部, 即由 B 支水汽输送带输送. 水汽通量散度分布和 850 hPa 大体相似, 所不同的是辐合较强的渭水流域辐合值一般仅为 850 hPa 的 $\frac{1}{2}$ 左右.

表 2 进入黄河中游南界 1~9 各格点上的水汽通量(单位: $10^{-4}\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)

Table 2 The moisture flux entering 1~9 grid points of the southern boundary of the middle reaches of the Yellow River (in $10^{-4}\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)

	高度 (hPa)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	合计	(%)
汛期暴雨型	850	32.1	42.3	53.6	62.9	68.2	69.7	70.3	72.5	76.3	547.9	43
	700	38.3	51.2	61.7	67.1	66.8	61.7	55.0	49.1	44.5	495.4	39
	500	29.6	30.6	31.2	30.7	28.7	26.0	23.3	20.8	18.2	239.1	18
非汛期暴雨型	850	11.6	16.3	23.0	29.0	33.6	39.2	47.2	55.5	60.7	316.1	30
	700	33.9	42.7	50.1	54.1	54.6	53.4	52.3	52.2	52.3	445.6	41
	500	30.7	32.0	33.0	35.4	35.9	35.6	35.1	35.2	35.7	308.6	29

表 3 黄河中游 1~9 各格点上最大水汽通量散度(单位: $10^{-9}\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$)

Table 3 The maximum divergence of the moisture flux at the 1~9 of the middle reaches of the Yellow River (in $10^{-9}\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$)

	高度 (hPa)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	合计	(%)
汛期暴雨型	850	33.0	42.3	42.2	34.2	27.9	22.4	16.2	12.1	9.0	239.3	56
	700	22.1	19.4	16.8	14.5	14.7	16.5	16.4	13.1	8.4	141.9	33
	500	4.8	4.0	5.0	6.7	7.5	7.1	5.7	4.6	3.8	49.2	11
非汛期暴雨型	850	21.4	32.7	35.6	30.0	20.2	12.9	14.3	17.7	19.0	203.8	56
	700	16.7	13.9	12.5	12.6	14.1	12.0	10.4	9.0	10.7	111.9	31
	500	6.1	5.6	5.2	5.6	6.2	6.2	6.2	3.5	2.7	47.3	13

在 500 hPa 上(图 3c), 较大的水汽通量区位于四川北部、陕南一带, 中心在四川松潘附近, 其值为 $32 \times 10^{-4}\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$. 通过中心的水汽通量轴线及其相对应的 C 支最大风速带, 起于青藏高原南部, 经四川北部到达黄河中游. 从流场上来看, 通过黄河中游南界 EF 线段的水汽, 第 1~7 个格点来源于青藏高原南部, 第 8~9 个格点来源于南海东北部, 沿着副高边缘到达黄河中游东部. 这两方面的水汽通量之比为 84 : 16(表 2), 即大多数水汽来源于青藏高原南部, 由 C 支水汽输送带输送. 水汽辐合很弱, 中心位于陕北的中部, 辐合值仅为 850 hPa 的 $\frac{1}{6}$ 左右.

由表 2 可知, 暴雨期间对流层中下层 3 层等压面上从 850 hPa 进入黄河中游南界的水汽最多, 约为 3 层之和的 43%; 700 hPa 次之, 约为 39%; 500 hPa 最少, 约为 18%. 由此可见, 水汽输送主要集中在对流层中下层的 700 hPa 以下. 值得注意的是 700 hPa 量值较大, 仅比 850 hPa 少 4%. 水汽通量辐合 3 层之比为 56 : 33 : 11(见表 3), 显然也是集中在

700 hPa 以下,但以 850 hPa 为代表的对流层下层占一半以上.

汛期暴雨型还有一种特殊情况,就是当有热带气旋在东南沿海登陆时,中低纬度环流形势、水汽输送与上述平均环流有很大的差异.如图 4 所示,500 hPa 上热带风暴或减弱后的低气压环流覆盖了江南南部和华南东部,副高北抬到长江以北地区.700、850 hPa 形势与 500 hPa 相似.在这种形势下副高和低压环流之间存在一支强劲的、伸展到整个对流层中下层的东南—西北向的急流带,3 层水汽通量中心最大值均为平均环流的 2 倍以上.这支水汽输送带相当于 A 支.东海中部和北部的水汽由急流带输送到黄河中游.热带风暴登陆后随即伸入内陆,此时若其北部的副高稳定少动,则黄河中游西部就可能相对是一常定槽区,在这种形势下水汽可不断的向黄河中游输送,并在槽前辐合,产生持续性强降雨过程.

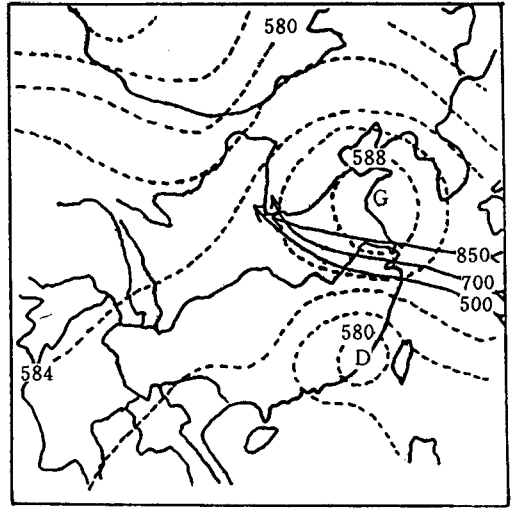


图 4 热带气旋登陆东南沿海时的环流特征和水汽输送(单位: $10^{-4}\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$)

Fig. 4 Composite map of 500 hPa geopotential height and moisture transfer during the landing of the typhoon on the Southeast China (unit: $10^{-4}\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$)

2.2 非汛期暴雨型的水汽输送

由图 5 可见,850 hPa 黄河以南地区仅有一个水汽通量中心,其位于黔湘交界处,中心最大值达 $175 \times 10^{-4}\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$,是汛期暴雨型台湾东部洋面中心值的 1.4 倍.通过中心有一南南西—北北东走向的水汽通量轴线,和其相对应有一支最大风速带,它源于孟加拉湾中部,向东伸展,经中南半岛东北部、北部湾伸向广西、贵州,其后经川东、鄂西直抵黄河中游南部(东路).从流场上看,通过黄河中游南界 EF 线段的水汽全部由这支水汽输送带输送.水汽通量散度分布表明,较大的水汽通量辐合区也位于渭水流域.

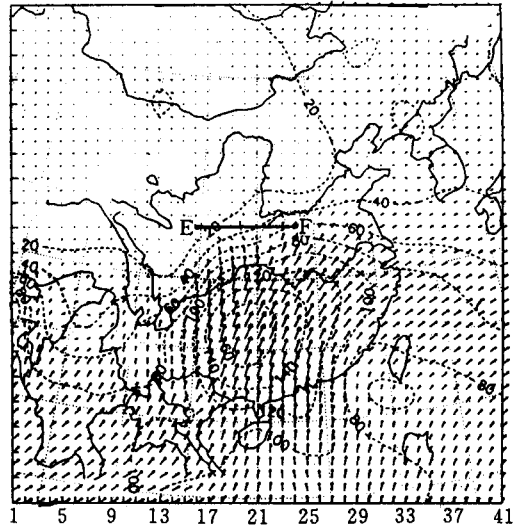


图 5 非汛期暴雨型风矢量和水汽通量图(单位: $10^{-4}\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$)

Fig. 5 Composite map of moisture flux and wind vector for the non-flood period rainstorm type (unit: $10^{-4}\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$)

700 hPa 上水汽通量分布(图略)和 850 hPa 相似,黄河以南也仅有一个水汽通量中心,最大值为 $116 \times 10^{-4}\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$,比 850 hPa 明显偏弱,其位置比 850 hPa 偏西北 3 个纬距.通过中心

的水汽通量轴线及其相对应的最大风速带呈西南—东北走向,其源于孟加拉湾中北部,经中南半岛北部进入我国西南地区以后继续向北伸展,经四川盆地到达黄河中游(中路)。从流场上看,通过黄河中游南界 EF 线段的水汽全部由这支水汽输送带输送。渭水流域仍是黄河中游较大辐合区,但其值比 850 hPa 偏小 $1/3$ 左右。

从水汽通量和最大风速带的分布可以看出,500 hPa 上水汽输送带的南段比 700 hPa 向西北移动了 2 个纬距(图略),其源于孟加拉湾北部、青藏高原南部,经云南西部、西藏东部、四川到达黄河中游(西路)。但是水汽通量辐合较弱,辐合中心位于渭水上游,中心最大值仅为 850 hPa 上的 $1/6$ 。

如表 2 所示,暴雨期间对流层中下层 3 层等压面上以 700 hPa 进入黄河中游南界的水汽最多,约为 3 层之和的 41%;850 和 500 hPa 大致相当。3 层等压面上水汽通量辐合之比为 56 : 31 : 13(表 3),以 850 hPa 辐合最强,700 hPa 次之。

3 结 论

黄河中游暴雨季节开始于 6 月,结束于 9 月,主汛期出现于 7~8 月。汛期暴雨型暴雨主要出现于 7~8 月份,个别年份推迟到 9 月上旬;非汛期暴雨型暴雨主要出现于夏初或夏末,个别年份延长到 7 月上旬。这和大气环流的季节性演变的迟早有关。

汛期暴雨型水汽既来自东南季风,又来自西南季风,而且来自东南季风的明显多于西南季风。具体是由 A、B、C 3 支水汽输送带从不同层次同时将水汽分别从东海南部、南海北部、孟加拉湾输送到黄河中游。当有热带气旋在我国东南沿海登陆并伸入内陆时,对流层中低层的水汽全部来源于东海中部和北部,均由一支偏东风急流输送。而非汛期暴雨型水汽主要来自西南季风,具体是由 3 支水汽输送带分别取东路、中路、西路三条路径、从不同层次同时将孟加拉湾中部、中北部、北部的水汽向黄河中游输送。

汛期暴雨型对流层中低层水汽通量、水汽通量辐合总体来看都高于非汛期暴雨型。水汽通量辐合都自下而上减少,850、700、500 hPa 3 层辐合值之比大致为 10 : 6 : 2,在 850、700 hPa 上辐合较大区都位于渭水流域。水汽通量的分布不同之处是,汛期暴雨型以 850 hPa 最大,非汛期暴雨型以 700 hPa 最大。

参 考 文 献

- 1 丁一汇. 暴雨和中尺度气象学问题. 气象学报, 1994, 52(3) : 275~282.
- 2 中国科学院大气物理研究所等. 黄河中下游盛夏暴雨预报的初步研究. 北方灾害性天气科研协作经验交流会, 技术报告汇编, 1976, 186~200.
- 3 沈如桂, 罗绍华, 陈隆勋. 盛夏季风环流与我国降水的关系. 1980 年热带天气会议论文集, 1982, 102~105.
- 4 伊兰, 陶诗言. 亚洲季风的水汽输送特征. 大气科学发展暨海峡两岸天气气候学术研究会论文摘要汇编, 1994, 35.

THE LOW-AND MID-LATITUDE CIRCULATION CHARACTERISTICS AND MOISTURE TRANSFER DURING THE RAINSTORMS PERIOD IN THE MIDDLE REACHES OF THE HUANGHE RIVER

Dong Liqing Ren Jinsheng

(*National Meteorological Center, Beijing 100081*)

Xu Ruizhen Wang Jianzhong

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

Based on the meteorological data from June to September, 1981~1991, a study on low-and mid-latitude circulation characteristics and moisture transfer during the rainstorms period in the middle reaches of the Huanghe River is made by composite analysis.

According to the circulation systems associated with 11 cases of extremely torrential rains, two types of rainstorm processes would be summarized. One appears in the flood season (mid-summer), another is in the early or late summer. The distributions of moisture flux, divergence of moisture flux and wind vector for the two types are analysed, respectively. The results show that there are great differences in the source regions, transport tracks and convergence intensities of water vapour between the two types of rainstorms.

Key words: The middle reaches of Huanghe River; Rainstorms; Circulation characteristics; Water vapour transfer.