

长江流域水汽收支与高原水汽输送 分量“转换”特征^{*}

苗秋菊 徐祥德 张胜军

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

摘 要

文中采用“箱体”模型边界的整层水汽输送特征描述长江流域梅雨带水汽收支总体效应,发现长江流域夏季降水与“箱体”模型整层水汽输送收支总量呈显著相关;青藏高原动力、热力强迫构成周边水汽输送特殊流型结构,大地形动力强迫导致高原周边水汽输送在高原南侧与东侧存在经向或纬向不同分量的水汽流型,且它们分别对长江流域梅雨带“箱体”模型水汽收支具有重要的影响。研究还发现高原南侧经向水汽输送与高原东侧纬向水汽输送分量之间呈显著相关特征,此研究揭示了长江流域洪涝过程上游高原周边关键区水汽输送不同分量间的“转换”特征,且此类水汽输送流型对夏季长江全流域各区域降水具有不同程度影响。上述高原周边水汽输送经向-纬向分量间的相互“转换”效应,是认识长江流域异常洪涝过程形成的关键环节之一。高原周边水汽输送分量相关结构及区域边界水汽收支问题将为长江流域洪涝预报提供科学依据。

关键词: 青藏高原,水汽输送分量,区域洪涝。

1 引 言

青藏高原东南部是长江、黄河等江河的发源地,研究该区域水汽输送及其分量相关结构特征对长江上游空中水资源及中国南水北调、三峡工程等具有重要的现实意义。高原周边水汽输送及其水汽源对长江流域洪涝灾害形成影响显著,上述水汽输送及其与气候异常的相关分析将成为长江上游水资源及其南水北调工程的设计及江河源头生态环境保护的重要科学依据之一。长江洪涝预报的关键环节之一是梅雨带得以维持所需持续水汽输送的机理。

近年来的研究表明,高原在季风环流演变中有十分重要的作用^[1];而且,高原的非绝热加热对于季风环流和行星尺度环流的维持起重要作用^[2];数值模拟试验表明高原上空异常加热将导致南亚高压、副热带高压和亚洲大陆低压的异常^[3,4]。

Flohn^[5]根据卫星云图估算高原地区积雨云密度,强调了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。第一次青藏高原科学试验揭示出高原上空具有激发对流发展十分有利的温湿与环流场特征。青藏高原整体年平均积雨云出现次数是中国其他区域整体平均的 2.5 倍^[6]。第二次青藏高原科学试验期间那曲地区雷达观测亦发现高原中部存在水平尺度小、垂直厚度高的柱状对流单体。长江洪涝过程中青藏高原地区中部和东部出现“爆米花”状对流云频发现象,且连续成串从高原中部或东部发生、发展的对流云团族呈显著东移的特征,使高原成为中国东部洪涝的对流云系统重要源地之一。1991 和 1998 年长江流域出现了罕见的持续性大暴雨引发洪水,其胚胎云系可以追溯到高原中部地区^[7]。值得思考的问题是,高原频发东移的对流云系及长江流域暴雨系统的上游敏感区水汽输送是如何构成的?

青藏高原作为全球最高的大地形,其南侧来自印度洋、南海等地区的异常暖湿气流携带了大量的水汽,经地形爬升或强迫绕流为高原中部对流云发

* 初稿时间:2003 年 12 月 31 日;修改稿时间:2004 年 2 月 20 日。

资助课题:国际科技合作重点项目“中日合作高原及周边地区水份循环过程观测试验研究”(2003CB71-6806)和科技部“长江荆江河段洪水预警公共信息平台的建设及应用”项目。

作者简介:苗秋菊,女,1971 年生,硕士,副研究员,研究方向:天气气候学。

展提供了水汽条件,且使高原东南部降水十分丰富。同时,一部分水汽随偏西气流输送到下游长江流域。徐祥德、陶诗言等^[8]指出青藏高原地区是中国长江

流域梅雨带水汽输送西边界重要的水汽“转运站”(图1)。本文重点研究梅雨带高原周边水汽流“转运站”是如何形成的?

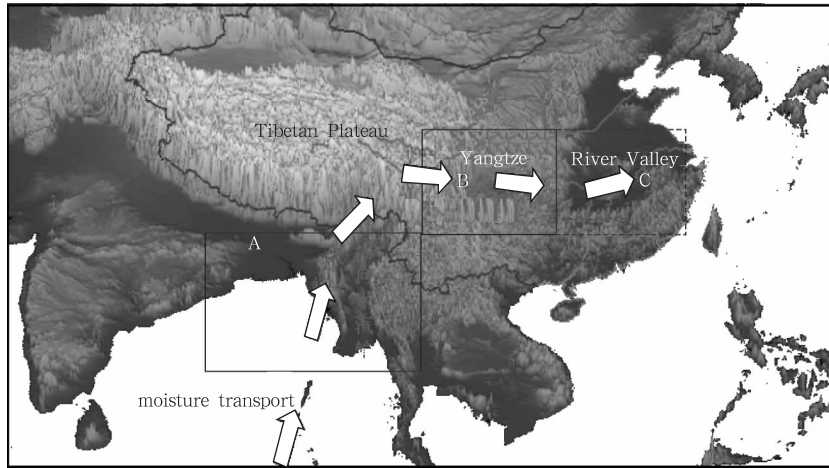


图1 青藏高原水汽“转运站”效应与长江流域梅雨带水汽收支关键敏感区(A,B,C)示意

Fig.1 Schematic diagram of moisture transfer post effect over Tibetan Plateau and moisture budget key areas (A, B, C) for Meiyu belt of Yangtze River valley

梅雨带上游水汽输送是否与长江流域洪涝过程存在显著相关? 长江流域洪涝过程水汽收支总体效应是否与高原南侧来自低纬海洋经向水汽输送存在显著联系? 高原周边不同水汽通量分量之间是否存在“转换”的内在联系? 高原南侧经向分量向高原东侧纬向水汽输送分量“转换”特征对长江流域旱涝过程有多大程度的影响? 上述高原周边水汽输送关键敏感区水汽输送特征亦是探讨梅雨期长江流域洪涝等异常气候的关键因素之一。

本文根据高原水汽“转运站”特征分别定义了A,B两个水汽输送关键区,即偏南水汽输送在高原东南部拐弯前后经过的两个区域。A区(15°~25°N,80°~100°E)为高原南侧水汽通量 qv 分量关键区;B区(25°~35°N,100°~110°E)为高原东侧长江上游水汽通量 qu 分量关键区。另外,C区(25°~35°N,110°~120°E)为长江中下游整层水汽收支“箱体”模型计算范围。

2 青藏高原周边关键区经向与纬向水汽输送分量相关特征

根据上述高原周边水汽输送 qu, qv 分量关键区特征,采用NCEP/NCAR再分析资料(1958~1997年),分析从地面(p_s)到300 hPa厚度整层大气的水

汽输送特征,其中,整层纬向水汽输送(Q_u)和整层经向水汽输送(Q_v)的计算方法如下:

$$Q_u(x, y, t) = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} q(x, y, p, t) u(x, y, p, t) dp$$

$$Q_v(x, y, t) = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} q(x, y, p, t) v(x, y, p, t) dp$$

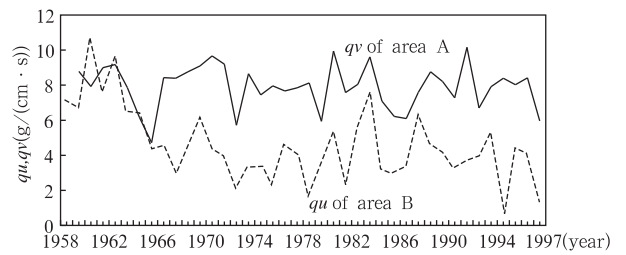


图2 高原周边关键区(A,B区)整层水汽输送率年际变化曲线(g/(cm·s))

Fig.2 Interannual change curves of whole layer moisture flux components for key areas (A:qv,B:qu) around the Plateau

分析上述A,B区内整层水汽输送 qu, qv 分量的年际变化特征(图2),发现高原南侧(A区) qv 分量与其东侧(B区) qu 分量年际变化趋势相似,尤其20世纪60年代中期以来两者同位相特征显著,其相关系数为0.36,达到了0.95的信度水平。此研

究结果揭示出高原周边水汽输送分量“转换”特征,即高原南侧的偏南水汽输送在高原地形动力强迫下转向,成为高原东侧偏西水汽输送。

3 夏季长江流域“箱体”模型边界水汽收支效应

用“箱体”模型描述长江流域梅雨期水汽收支年际变化特征,其主体框架(C区)覆盖长江中下游梅雨带及其对流系统区域。具体计算方法如下:

$$Q_W = \sum_{y=\varphi_1}^{\varphi_2} Q_u(\lambda_1, y, t) \quad Q_E = \sum_{y=\varphi_1}^{\varphi_2} Q_u(\lambda_2, y, t)$$

$$Q_S = \sum_{x=\lambda_1}^{\lambda_2} Q_u(x, \varphi_1, t) \quad Q_N = \sum_{x=\lambda_1}^{\lambda_2} Q_u(x, \varphi_2, t)$$

$$Q_T = Q_W - Q_E + Q_S - Q_N$$

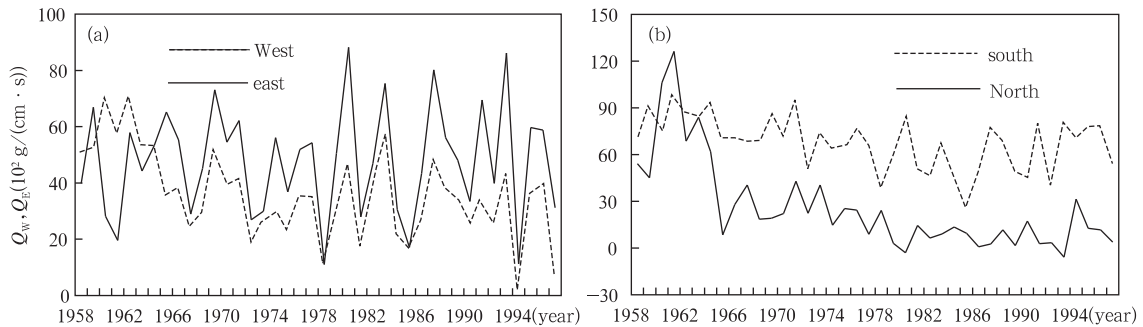


图3 长江中下游区域边界整层水汽收支年际变化

(a. 东西边界, b. 南北边界)

Fig. 3 Interannual change curves of moisture budget at the boundaries of Middle and Lower Reaches of Yangtze River valley

(a. East and west, b. North and south)

江流域梅雨带水汽收支过程,此类水汽输送特征与徐祥德、陈联寿等^[9]提出的长江流域梅雨带遥相关源汇结构综合模型相吻合。Xu等^[10]分析的1998年暴雨过程长江流域区域边界水汽收支状况与此有类似的特征。

进一步分析上述“箱体”模型各边界水汽收支总量与长江中下游夏季降水的年际变化特征(图4)可见,“箱体”模型区域夏季水汽收支总量与长江中下游地区降水呈同位相年际变化特征,即两条曲线年际变化趋势相似,其相关系数达0.715,超过了0.99的信度检验。由此可见,上述“箱体”模型整层水汽收支总量年际变化可揭示出长江中下游洪涝过程演变特征,尤其上述分析结果可描述出“箱体”模型边界水汽输入特征亦是形成长江中下游洪涝过程的关

其中 Q_W, Q_E, Q_S, Q_N 分别为长江中下游区域西、东、南、北4个边界水汽收支, Q_T 为区域边界总体水汽收支, $\varphi_1, \varphi_2, \lambda_1, \lambda_2$ 分别为各边界对应的纬度和经度。

分析“箱体”各边界整层水汽输送流入、流出状况(图3a,b),长江中下游“箱体”模型以西边界、南边界流入水汽为主,东边界为流出边界,北边界有时流入,有时流出,且北边界水汽输送量远远小于南边界。综合分析图3a,b,整层西边界水汽流入主体反映高原南侧来自低纬海洋的经向水汽输送分量(A区)转为高原东侧纬向水汽输送分量(B区)的水汽流入过程,整层南边界水汽为来自低纬海洋的水汽输入,整层北边界有时存在来自北方西太平洋中高纬的水汽流入,而“箱体”东边界则为整层水汽流出口。图3梅雨带整层水汽输送“箱体”模型概括了长

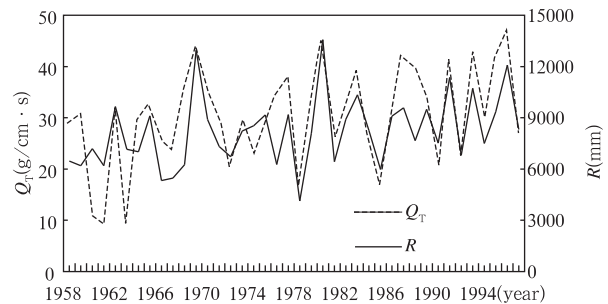


图4 长江中下游夏季降水(R)与区域边界总体水汽收支年际变化

Fig. 4 Interannual change curves of precipitation(R) in Middle and Lower Reaches of Yangtze River valley and the whole moisture budget at the regional boundaries

键影响因素。本文还将进一步探讨影响夏季长江流域“箱体”整层水汽收支的上游水汽输送关键敏感区及其水汽流型特征。

4 长江流域“箱体”模型水汽收支与水汽输送分量场相关特征

采用 NCEP 再分析资料分别对整层水汽输送 qu, qv 分量与长江中下游地区“箱体”模型水汽收支进行诊断分析,由图 5 可见,与长江中下游地区夏季整层水汽收支相关显著的水汽通道主体部分由两类不同分量构成,即南-北向水汽输送 qv 分量高相关

区(图 5a)位于青藏高原南侧,其体现了来自孟加拉湾、印度洋的水汽输送;另外,在华南亦有一大范围高相关区,此特征描述了长江流域水汽收支与来自南海的偏南水汽输送的相关关系。东-西向水汽输送 qu 分量正相关高值区(图 5b)则呈自青藏高原指向长江流域的带状特征。图 5a, b 中高相关区与图 1 中高原南侧 A 区及高原东侧 B 区密切相关;表明高原南侧 A 区及其东侧 B 区水汽输送分量均为长江流域夏季降水的重要影响因素,亦揭示了长江流域夏季旱涝过程高原南侧与东侧关键区水汽输送分量的“转换”关系。

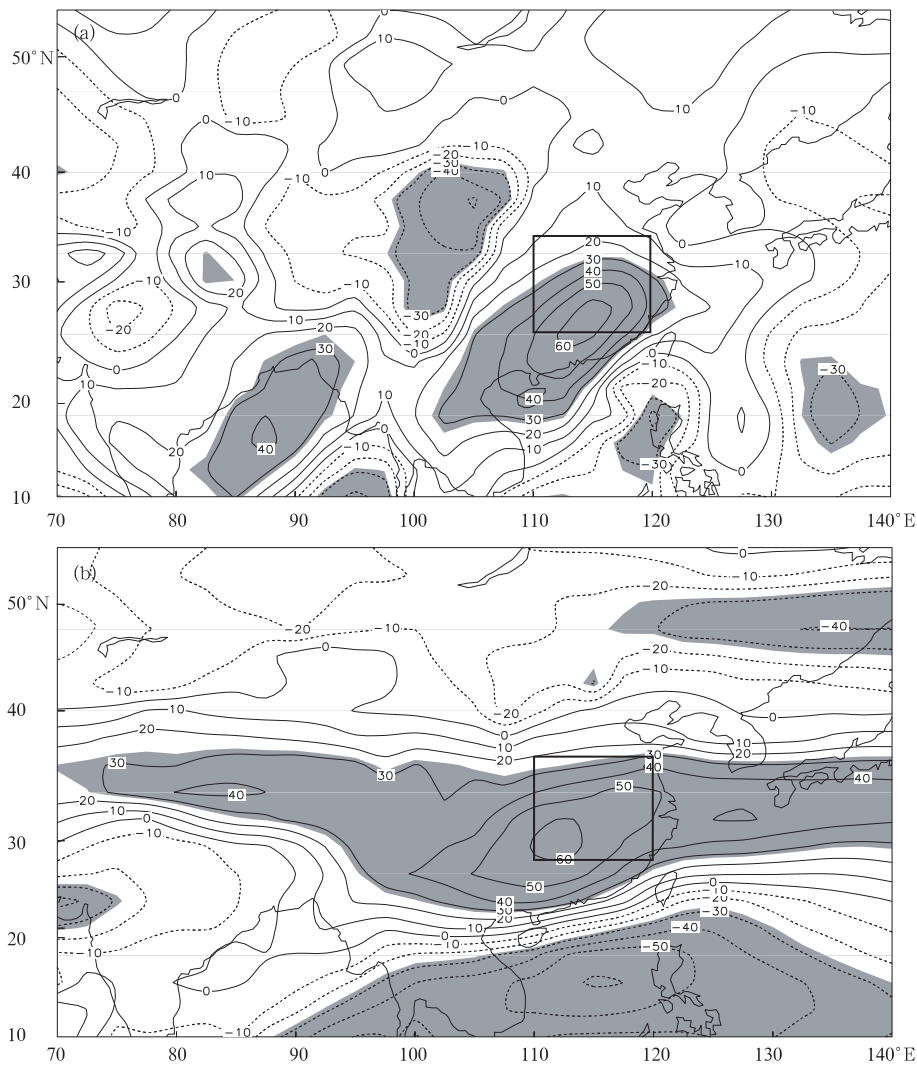


图 5 长江流域中下游地区“箱体”模型水汽收支与整层水汽通量分量相关分布(%)
(a. 长江中下游地区“箱体”模型水汽收支与整层经向水汽输送 qv 场相关, b. 长江中下游地区“箱体”模型水汽收支与整层纬向水汽输送 qu 场相关;
方框为长江中下游地区位置;阴影区为超过 0.9 信度区)

Fig. 5 Correlation fields of moisture budget of box model for Middle and Lower Reaches of Yangtze River valley (the square area) with the meridional (a) /zonal (b) component of whole layer water vapor flux (shaded areas denote where the correlation is significant to a confidence level more than 0.9)

5 水汽输送经向与纬向分量的“转换”特征

文中还分析了与长江流域梅雨带直接相关的长江中下游地区水汽输送纬向分量与东亚经向水汽输送分量场的相关特征(图 6)。图中存在两个显著的相关高值区,一个位于青藏高原南侧南亚地区,中国云南南部及广西等地区(正相关);另一个位于长江

中下游地区北侧华北、河套一带(负相关)。这表明与长江流域梅雨带密切相关的纬向水汽输送与上述南—北两侧经向水汽流汇合“转换”特征密切相关,即南北两支以经向水汽输送为主的水汽流在长江流域转为以纬向偏西水汽输送为主的水汽流。

另外,还分析了上述长江流域洪涝过程关键敏感区(高原南侧A区)经向水汽输送分量与东亚纬

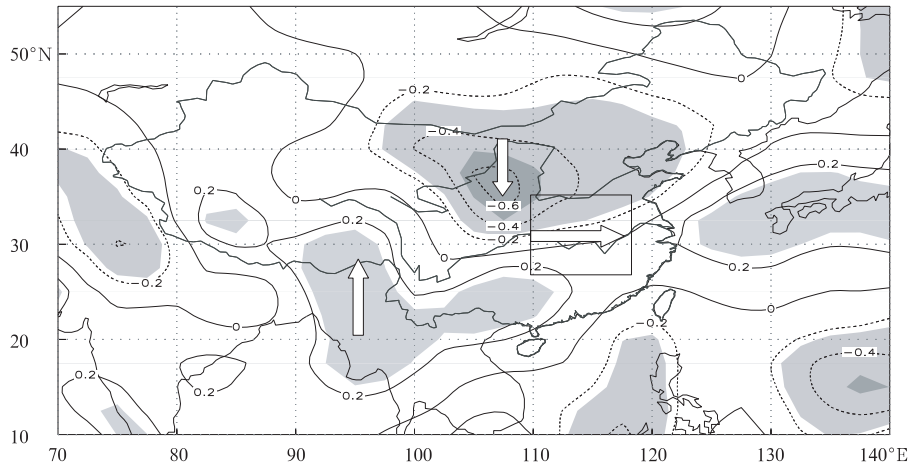


图 6 夏季长江中下游地区(图中实线框)500 hPa q_u 分量年际变化与东亚 q_v 分量场的相关分布(100%)

(图中箭头描述了水汽输送经向与纬向分量的“转换”特征,阴影为超过 0.9 信度区)

Fig. 6 Correlation fields of moisture flux q_u component of middle and lower reaches of Yangtze River valley (the square area) with the q_v component in Asian region (shaded areas denote where the correlation is significant to a confidence level more than 0.9)

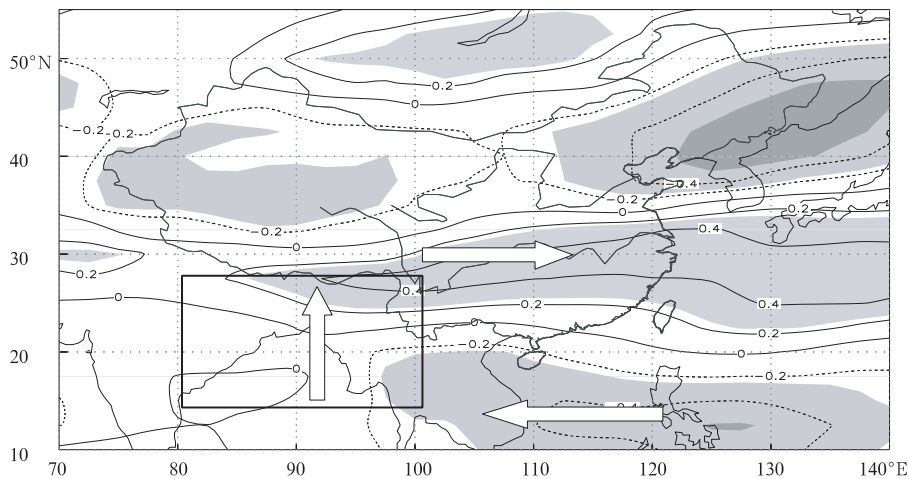


图 7 夏季高原南侧关键区(A区:图中方框) q_v 年际变化与东亚 q_u 分量场相关分布(100%)

(图中箭头描述了纬向与经向水汽输送分量的“转换”特征,阴影为超过 0.9 信度区)

Fig. 7 Correlation fields of moisture flux q_v component of key area A (the square area) with the q_u component in Asian region (shaded areas denote where the correlation is significant to a confidence level more than 0.9)

向水汽输送分量场的相关分布,由图 7 可见,从高原东南侧到东海包括整个长江流域在内呈显著东西向带状区相关高值区,上述相关场特征进一步揭示了长江流域东-西向梅雨带水汽输送与高原南侧自孟加拉湾、印度洋的暖湿气流经向分量向纬向“转换”特征密切相关。另外,高原南侧 A 区 qv 分量与南海—中南半岛带状区域呈负相关特征,可见高原南侧经向水汽输送亦与南海—中南半岛偏东水汽流密切相关,此计算结果进一步证实了类似徐祥德、陈联寿等^[9]提出的南海—高原—长江流域远距离水汽输送模型。

6 高原周边各关键区水汽输送分量与夏季降水区域性相关特征

分析高原南侧和东侧关键区水汽输送分量与高原及其下游各区域夏季降水的相关特征(表 1)可见,青藏高原、四川、长江中下游地区夏季降水与高原东侧 B 区纬向水汽输送分量的相关均较显著,与高原南侧(A 区)经向水汽输送相关显著的地区为长江上游四川地区和长江中下游地区,即长江全流域,这可能与南面来自海洋的水汽输送主体在高原东南部拐弯并深入中国东部地区有关。四川地区靠近水汽通道“拐弯”处,其降水与高原南侧经向水汽输送分量及其东侧纬向水汽输送分量的相关均较为显著;长江中下游地区夏季降水与高原南侧、东侧 500 hPa 层的水汽输送 qu, qv 分量的相关较整层水汽输送更为显著。

7 结论

通过诊断分析研究了青藏高原周边地区水汽输

表 1 高原 A 和 B 区关键区水汽输送分量与高原及其下游各区域夏季降水的相关系数(100%)

Table 1 Correlation coefficient of moisture flux components of key area A and B with summer rainfall of Tibetan Plateau and its downstream areas

	青藏高原地区 夏季降水	四川地区 夏季降水	长江中下游地 区夏季降水
A 区水汽输送 qv 分量(500 hPa)	0.140	0.233	0.393
B 区水汽输送 qu 分量(500 hPa)	0.357	0.520	0.399
A 区整层水汽输 送 qv 分量	0.134	0.285	0.196
B 区整层水汽输 送 qu 分量	0.442	0.467	0.204

送分量结构特征及不同区域水汽输送分量对长江流域梅雨期降水的影响,得到如下主要结论:

(1) 长江流域夏季降水与该区域“箱体”模型整层水汽收支总量呈显著相关。

(2) 长江流域洪涝过程青藏高原周边经向与纬向整层水汽输送分量相关显著,即长江流域梅雨带上游高原南侧与东侧存在经向与纬向水汽输送分量关键敏感区。

(3) 梅雨带降水过程高原周边水汽输送经向与纬向分量之间存在“转换”的相关关系,且高原大地形强迫是两者“转换”特征形成的重要动力因素,这进一步揭示出高原周边水汽流“大拐弯”处水汽输送“转运站”特征。

(4) 高原周边水汽输送分量间的“转换”过程对梅雨带整层水汽收支总体效应及长江流域洪涝灾害形成具有重要作用。

参考文献

- [1] Tetsuzo Yasunari, Kanehira A, Koike T. Seasonal and internal variability of snow cover over the Tibetan Plateau and associated atmospheric circulation changes. The Second Session of International Workshop on TIPEX-GAME/Tibet, 2000, Kunming
- [2] Huang R H. Numerical simulation of three-dimensional teleconnections in the summer circulation over the northern Hemisphere. *Adv Atmos Sci*, 1985, 2:81-92
- [3] Qian Y F, et al. Numerical simulation of heating anomaly effects of Tibetan Plateau on circulation in summer. *Acta Meteor Sinica*, 1992, 6:70-81
- [4] 吴国雄, 孙岚, 刘辉等. 陆面感热和潜热输送对感盛夏降水和副高分布的影响. 见:中国科学院大气物理研究所编. 东亚季风和中国暴雨. 北京:气象出版社, 1998. 161~169
Wu Guoxiong, Sun Lan, Liu Hui, et al. Impacts of sensible and latent heat flux over land surface on summer precipitation and subtropical high. *Asian monsoon and Chinese torrential rain*. Beijing: China Meteorological Press, 1998. 505pp
- [5] Flohn H. Contributions to a meteorology of the Tibetan Highlands. *Atmos Sci Paper*, 1968, 130:120-130
- [6] 戴加洗. 青藏高原气候. 北京:气象出版社, 1990. 365pp
Dai Jiashi. *Tibetan Plateau Climate*. Beijing: China Meteorological Press, 1990. 365pp
- [7] 徐祥德, 周明煜, 陈家宜等. 青藏高原地-气过程动力热力结构综合物理图象. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31(5):428~440
Xu Xiangde, Zhou Mingyu, Chen Jiayi et al. A comprehensive physical pattern of land-air dynamic and thermal structure on the Qinghai-Xizang Plateau. *Science in China (Series D) (in Chinese)*, 2002. Vol. 45 No. 7: 577-594
- [8] 徐祥德, 陈联寿, 王秀荣等. 长江流域梅雨带水汽输送源汇集

构. 科学通报, 2003, 48(21): 2288~2294

Xu Xiangde, Chen Lianshou, Wang Xiurong, Miao Qiuju and Tao Shiyan. Moisture transport sourcesink structure of the Meiyu rain belt along the Yangtze River valley. Chinese Science Bulletin 2004 Vol. 49 No. 2 181-188

- [9] 徐祥德, 陶诗言, 王继志等. 青藏高原—季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系. 气象学报, 2002, 60(3): 258~264

Xu Xiangde, Tao Shiyan, Wang Jizhi, et al. The relationship between water vapor transport features of Tibetan Plateau—monsoon “large triangle” affecting region and drought—flood abnormality of China. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2002, 60(3): 258—264

- [10] Xu Xiangde, Miao Qiuju, Wang Jizhi, et al. The water vapor transport model at the regional boundary during Meiyu Period. Adv Atmos Sci, 2003, 20(2): 333—342

WHOLE LAYER WATER VAPOR BUDGET OF YANGTZE RIVER VALLEY AND MOISTURE FLUX COMPONENTS TRANSFORM IN THE KEY AREAS OF THE PLATEAU

Miao Qiuju Xu Xiangde Zhang Shengjun

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

One of key scientific issues in Yangtze River flood forecasts is the persistent water vapor transport to maintain the rain belt and its mechanism. Therefore the moisture source and its transfer sensitive region are the clues to the flood forecast in China. Some studies show that the dynamic and thermal effects of the Tibetan Plateau play an important role to the Asian monsoon activities, and they are also the key factors for water vapor transport mechanism for the Meiyu rain belt in the Yangtze River valley. The region in the south of Plateau exist a distinct warm/wet airflow from the Indian Ocean, the South China Sea and the tropical West Pacific. Under the dynamic and thermal effects of the plateau, the southerly water vapor flow from the lower latitudes turns right to Yangtze River valley at the southeast of Tibetan Plateau during its northward transit. Which form the specific water cycle process in the plateau peripheral areas. This is the conception of water vapor transport “forwarding station”, put forward by Prof. Xu xiangde.

In this paper, a “box” model is adopted to discuss the whole layer water vapor budget feature at the edges of middle and lower reaches of Yangtze River valley. The results show that the main input part of water vapor transport in summer is from south and west edges with the main output part at the east edge. Of course, the composite water vapor budget of the region has close relationship with the regional rainfall.

Moisture flux components are analyzed in the key areas south and east to the Plateau. It's found that the northward water vapor component in the south of the Plateau is correlated significantly to the eastward in the east of the Plateau. Furthermore, the influencing areas of these two kinds of moisture flux components are discussed. The results show that they can both affect on different degree the summer rainfall, as well as the composite water vapor budget of downstream regions. These results not only verify further the opinion of water vapor transport “forwarding station”, but also reveal that the moisture flux components transform effect possesses influence on the summer rainfall of Yangtze River valley. This is one of the key factors to understand the causes of regional flood and will provide some scientific proof for flood forecast of Yangtze River valley.

Key words: Tibetan Plateau, Moisture flux component, Regional flooding.