

夏季青藏高原东南部水汽收支气候特征及其影响^{* 1}

施小英¹⁾²⁾ 施晓晖¹⁾

¹⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

²⁾(中国科学院研究生院,北京 100039)

摘 要

采用 1961—2005 年 NCEP/NCAR 再分析资料,研究了夏季青藏高原东南部水汽收支的气候特征及其影响效应。结果表明:夏季青藏高原东南部总体上是一个水汽汇区,平均总收入为 $39.9 \times 10^6 \text{ kg/s}$ 。东亚夏季风的建立、推进对青藏高原东南部的水汽输入有重要影响,而青藏高原东南部的水汽输出则与夏季我国东部雨带的推进过程密切相关。该区对周边地区的水汽收支有重要影响,是向我国西北地区东部、长江中下游地区输送水汽的重要通道,青藏高原东南部的水汽“转运站”效应是长江中下游流域洪涝和北方夏季干旱异常的关键因子之一。青藏高原东南部、北边界夏季水汽收支均具有准两年周期振荡特征,并分别与长江中下游、西北地区东部夏季降水的准两年振荡特征具有一定的联系。

关键词:青藏高原东南部;水汽收支;夏季降水

引 言

青藏高原(以下简称高原)位于印度季风区北部和东亚季风区的西部,对我国和东亚的天气与气候有着重要影响,高原对水汽输送的影响一直是气象学界关注的焦点之一,近年来在这方面的研究已经取得了丰硕成果^[1-4]。有关研究表明:高原动力、热力强迫是周边水汽输送特征流型形成的重要原因之一,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,对长江流域梅雨带水汽收支具有重要的影响^[5]。任宏利等^[6]指出西北春季多雨年,南面海洋上有异常偏东水汽流经四川盆地附近到达西北东部。马岚等^[7]则发现了高原东南部长江上游地区水汽输送净量与径流量之间具有显著相关性。上述研究表明,高原东南部在水汽输送中起到了重要作用。研究水汽收支变化对局地降水的影响已开展了不少工作^[8-11],然而专门针对高原东南部水汽收支特征的相关研究并不多,为此,本文将进一步考察高原东南部水汽收支的气候特征及其影响效应。

1 资料和方法

本文采用的资料有:① 1961—2005 年的 NCEP/

NCAR 全球逐日再分析资料, $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 网格,包括风场、比湿、高度场和地面气压;② 我国 160 站 1961—2005 年逐月降水资料。

选取 $22.5^\circ \sim 35^\circ \text{N}$, $97.5^\circ \sim 110^\circ \text{E}$ 作为高原东南部(主要包括四川、云南两省);选取 $22.5^\circ \sim 35^\circ \text{N}$, $110^\circ \sim 120^\circ \text{E}$ 作为长江中下游;选取 $35^\circ \sim 42.5^\circ \text{N}$, $97.5^\circ \sim 110^\circ \text{E}$ 作为我国西北地区东部(如图 1 所示)。

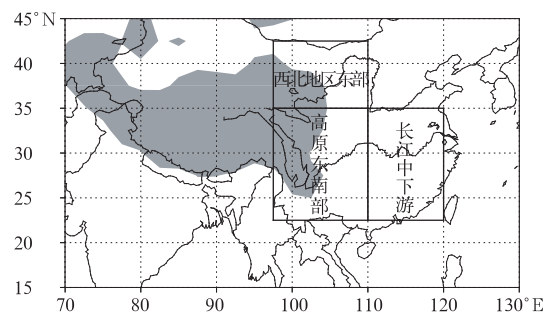


图 1 高原东南部、长江中下游、西北地区东部区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the southeast part of Tibetan Plateau, mid-lower reaches of the Yangtze River and the eastern part of Northwest China

从地面到 300 hPa 厚度的整层纬向水汽输送 (Q_u) 及经向水汽输送 (Q_v) 以及边界积分水汽输送

* 国家自然科学基金项目(90502003,40675059)和科技部社会公益项目(2005DIB3J057)共同资助。

2007-02-09 收到,2007-08-02 收到再改稿。

等的计算方法参见文献[5]。

2 青藏高原东南部水汽收支的气候特征

首先将1961—2005年的资料进行多年平均,然后分别计算高原东南部各边界及区域气候平均的4—8月逐候水汽收支(图2)。其中大于0的值表示在该边界输入水汽,小于0的值表示在该边界输出水汽,总收支大于0表示该区域获得水汽,小于0表示该区域失去水汽。

从图2中可以看出,西边界和南边界为高原东南部水汽输入边界。其中5月第2候之前以西边界水汽输入为主,5月第2候以后,南边界取代西边界成为主要的水汽输入边界。一般情况下,5月中旬以后,随着南海夏季风的爆发,东亚季风环流建立,在对流层低层,夏季风向北推进,将孟加拉湾和南海上空大量的水汽带入到高原东南部地区。表明东亚夏季风的建立和推进与高原东南部的水汽收支之间具有较为密切的联系。从图2中还可以看到,南边界的水汽输入在7月第2候达到最大,之后随着夏季风的继续北推,南边界水汽输入逐渐减小。西边界的水汽输入在7月之前很稳定,之后逐渐减弱,到8月第2候达到最低值,接着开始有所增加,这与东亚夏季风的向北推进也是一致的。

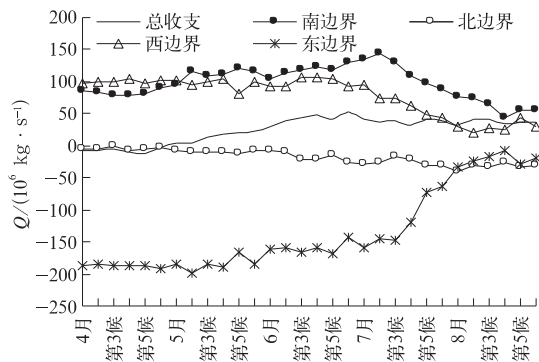


图2 高原东南部气候平均4—8月逐候水汽收支演变

Fig. 2 Duration curves of climatological mean water vapor budget over the southeast part of Tibetan Plateau from April to August

图2显示,东边界和北边界的水汽收支基本上都是负值,表明东边界和北边界是高原东南部的水汽输出边界。相对而言,北边界的水汽输出量比东边界的小,尤其是在8月以前,东边界的水汽输出比

北边界大得多,这与我国东部地区华南前汛期降水以及长江中下游的梅雨可能具有一定的联系。7月第2候以后,东边界的水汽输出迅速减弱,而从8月第1候开始,北边界的水汽输出超过了东边界,这恰好对应于华北雨季的开始。东、北边界水汽输出随时间的变化与我国东部雨带的逐渐北移进程基本上是一致的。

就区域总收支而言,从5月第1候开始,高原东南部的区域水汽收支由负值转为正值,即高原东南部从水汽源区转为水汽汇区。这一变化表明,随着南海夏季风在5月的爆发,高原东南部的区域水汽收支明显增加。

综上所述,东亚夏季风的建立、推进对高原东南部的的水汽输入有重要影响,而高原东南部的水汽输出则与夏季我国东部雨带的推进过程密切相关。

3 青藏高原东南部水汽收支对周边区域的影响效应

为探讨高原东南部水汽收支对周边区域的影响,本文选取了其东侧长江中下游、其北侧西北地区东部两个区域进行分析。表1给出了高原东南部及其周边区域气候平均的6月1日—8月31日日平均侧边界整层水汽输送及区域总收支情况。其中负值表示输出,正值表示输入,总收支正值表示获得水汽,负值表示失去水汽。

表1 高原东南部、长江中下游以及西北地区东部侧边界水汽收支及区域总收支(单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 1 Budgets of four boundaries and the corresponding regional total budgets over the southeast part of Tibetan Plateau, mid-lower reaches of Yangtze River and the eastern part of Northwest China (unit: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

区域	总收支	南边界	北边界	西边界	东边界
高原东南部	39.9	91.4	-20.6	68.3	-99.2
长江中下游	47.1	143.6	-56.4	99.2	-139.3
西北地区东部	-3.4	20.6	-3.5	39.4	-60.1

由表1可见,夏季,高原东南部、长江中下游、西北地区东部3个区域均以西、南边界为水汽输入边界,而以东、北边界为水汽输出边界。日平均的情况下,高原东南部($39.9 \times 10^6 \text{ kg/s}$)、长江中下游($47.1 \times 10^6 \text{ kg/s}$)的水汽总收支均为正值,即为水汽汇区,而西北地区东部的的水汽总收支为负值($-3.4 \times 10^6 \text{ kg/s}$),即为水汽源区。平均而言,每秒有 $99.2 \times$

10^6 kg 的水汽从高原东南东边界流入长江中下游地区,其中特殊年份长江中下游西边界(即高原东南部东边界)的水汽贡献更为显著,如 1998 年长江中下游大洪水期间,平均每秒有 115.9×10^6 kg 的水汽从西边界流入该区,而从南边界流入该区的水汽仅为 101.6×10^6 kg。气候平均状况下,每秒有 20.7×10^6 kg 的水汽从高原东南部的北边界流入西北地区东部,高原东南部同样是西北地区东部重要的水汽源之一。上述分析结果表明,高原东南部水汽输送对长江中下游和西北地区东部的水汽收入均具有重要的影响。

为进一步了解高原东南部水汽收支对周边区域的影响效应,本文利用 1961—2005 年 160 站逐月降水资料,选取其中 18 个站(衢县、南昌、杭州、安庆、上海、合肥、南京、东台、蚌埠、阜阳、清江、徐州、长沙、常德、武汉、宜昌、信阳、安康)作为长江中下游地区代表站,计算该区域逐年夏季降水量距平,挑选其中负距平最大的 8 年和正距平最大的 8 年分别作为长江中下游典型旱、涝年,即 1961,1964,1966,1967,1976,1978,1981,1985 年作为典型旱年,1969,1980,1983,1991,1996,1998,1999,2003 年作为典型涝年,并对典型旱、涝年合成的高原东南部及周边区域水汽收支特征进行了分析。计算结果表明,6 月 1 日—8 月 31 日长江中下游流域西边界来自高原东南部的日平均水汽收入,涝年为 123.5×10^6 kg/s,旱年为 89.9×10^6 kg/s(气候平均为 99.2×10^6 kg/s),南边界上的水汽收入,涝年为 159.1×10^6 kg/s,旱年为 134.3×10^6 kg/s(气候平均为 143.6×10^6 kg/s)。由此可见,南边界的水汽收入对长江中下游流域夏季降水起到关键的作用,但涝年西边界上的水汽收入变化幅度远大于南边界,表明高原东南部的水汽输送对洪涝异常的贡献也是不可忽视的。而旱年,南边界的水汽收入变化比西边界的变化更为明显,这表明,长江中下游夏季降水偏少的主要原因是西太平洋副热带高压(以下简称副高)位置偏南,导致南海的水汽不能输送到该区域所致。高原东南部北边界的水汽支出,涝年为 9.8×10^6 kg/s,旱年为 35.4×10^6 kg/s,接近气候平均值的 1.75 倍(气候平均为 20.6×10^6 kg/s),而长江中下游流域旱年一般对应我国北方降水偏多,因此高原东南部水汽输送对北方地区夏季降水的贡献也十分显著。

上述结果表明,长江中下游流域旱、涝年高原东南部及其周边区域水汽收支情况有明显差异,而水

汽输送异常与环流异常紧密相关,从长江中下游旱涝年 500 hPa 位势高度场合成分布可以发现,涝年西太平洋副高位置偏西,强度偏强;旱年则副高位置偏东,强度偏弱(图略)。图 3 给出了长江中下游旱、涝年 500 hPa 合成风场的差值分布(涝年 - 旱年),可以看出,涝年我国东部的北方地区为北风差值,说明涝年水汽的向北输送偏弱;而南方地区则以差值西风为主,有更多的水汽通过高原东南部向东输送到长江中下游地区,这样副高西北边缘的西南暖湿气流主要在长江中下游流域一带辐合,有利于该区域出现较大的降水。相反,旱年我国东部的北方为南风差值,将更多的水汽输送到我国的北方地区,南部为东风差值,即通过高原东南输送到长江中下游地区的水汽也减少,这样不利于水汽在长江中下游流域辐合,从而使该区域的降水偏少。从图 3 还可以看到,我国南方及以东洋面为反气旋式差值环流,其与 500 hPa 高度场反映的涝年副高位置偏西,强度偏强的特征亦十分吻合。典型旱涝年的环流形势合成分析表明,高原东南部向东(北)输入水汽多时,长江中下游对应涝(旱)年,大气环流和东亚夏季季风系统成员的异常在其中起到了重要的作用。

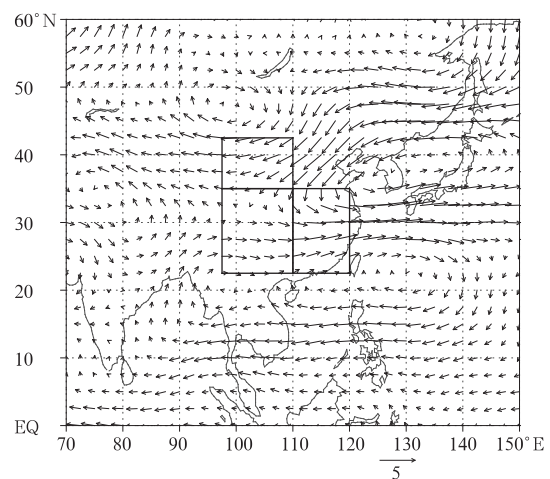


图 3 长江中下游旱涝年合成 500 hPa 差值风场分布(单位:m/s)

Fig. 3 Difference of composed 500 hPa winds for flooding years from those for drought years of the mid-lower reaches of the Yangtze River (unit: m/s)

图 4 给出了夏季高原东南部东边界、北边界水汽支出与我国夏季降水的相关分布。从图 4a 可见,高原东南部东边界水汽收支与我国夏季降水的显著正相关区主要位于其上游的高原南部地区以及下游

的长江中下游地区,而显著负相关区则主要位于西北地区东部。高原东南部北边界水汽收支与我国夏季降水的相关系数分布表明,从高原东南部偏南地区一直到长江中下游地区为带状分布的显著负相关

区,而高原东南部偏北地区以及西北地区东部则为显著正相关区(图4b)。这一相关分析结果进一步证实,高原东南部水汽输出对我国夏季降水具有重要影响。

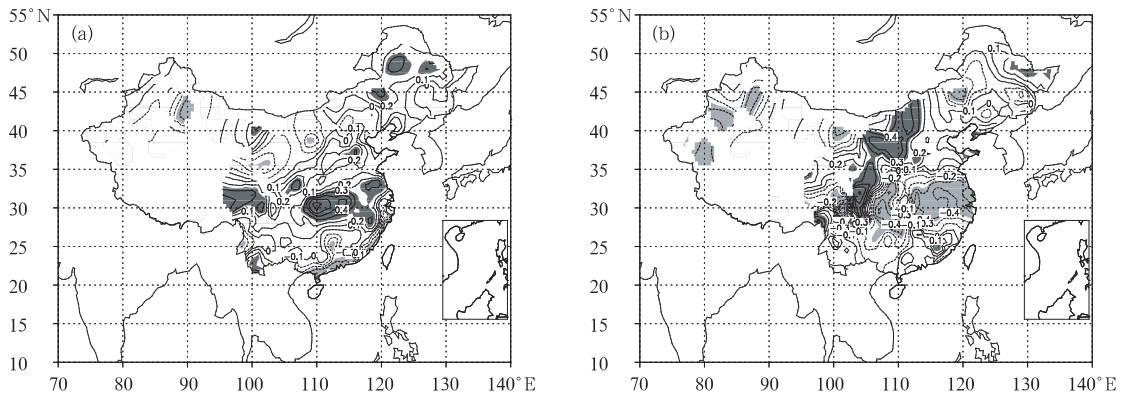


图4 高原东南部东边界(a)及北边界(b)水汽收支与我国夏季降水的相关分布
(浅、深阴影分别为超过90%信度检验的负、正相关区域)

Fig. 4 Correlation fields of moisture budget at east (a) and north (b) boundary over the southeast part of Tibetan Plateau with precipitation of China in summer
(negative/positive correlations over 90% level are lightly/heavily shaded, respectively)

分析表明:长江中下游地区涝年,高原东南部向东输送的水汽显著偏多,向北输送的水汽则偏少;相反,长江中下游地区旱年,高原东南部向东输送的水汽偏少,向北输送的水汽则显著偏多。通过相关分析发现,高原东南部东边界的水汽收支与长江中下游夏季降水呈显著正相关,与西北地区东部夏季降水呈显著负相关,而北边界水汽收支则与西北地区东部夏季降水正相关显著,与长江中下游降水负相关显著。

4 青藏高原东南部区域边界水汽收支及周边区域夏季降水的准两年周期振荡

有关研究表明热带海温、季风降水和环流存在

2~3年周期的变化^[12-16],研究也发现东亚季风区的季风降水同样存在着准两年周期振荡现象^[17-21]。黄荣辉等^[22]研究结果揭示了我国东部夏季降水具有2~3年周期变化特征,并且认为降水的这种周期振荡与东亚上空夏季风水汽输送通量的准两年周期振荡密切相关。

为了研究高原东南部边界水汽收支与其周边区域夏季降水的年际变化规律,本文对1961—2005年逐年夏季平均高原东南部东、北边界的水汽收支(图5)以及长江中下游、西北地区东部区域平均夏季降水分别进行了功率谱分析(图略)。

从图5a中可清楚看出,在周期为2.5年处功率谱估计值为最大峰值且明显超过95%信度的白噪声

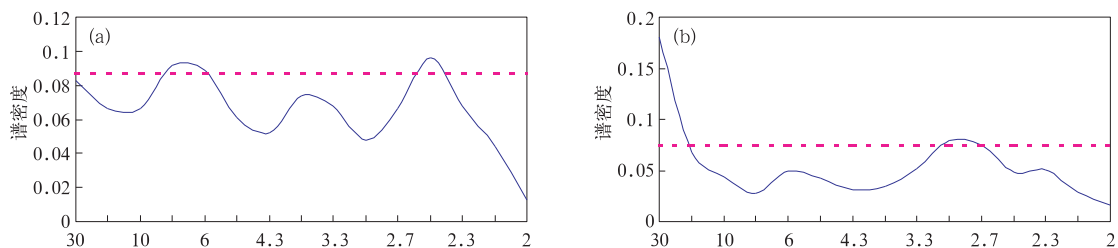


图5 夏季高原东南部东边界(a)和北边界(b)水汽收支的功率谱
(虚线为 $\alpha=0.05$ 的白噪声标准谱)

Fig. 5 Power spectrum of moisture budget at east (a) and north (b) boundary over the southeast part of Tibetan Plateau in summer (dashed line denotes the standard spectrum of white noise at $\alpha=0.05$)

音标准谱,从而可以确定夏季高原东南部东边界的水汽输出存在 2~3 年的周期振荡。分析高原东南部北边界水汽收支的功率谱(图 5b)可以发现,高原东南部北边界水汽收支同样具有 2~3 年的周期振荡。另外,在 15~30 年周期范围内,功率谱估计值均超过标准谱,表明高原东南部北边界水汽收支还具有明显的年代际变化。

长江中下游地区夏季降水和西北地区东部夏季降水的功率谱(图略)同样显示,长江中下游夏季降水在 2.3 年周期处功率谱估计值最大,在周期 3.3 年处功率谱亦达到标准谱;西北地区东部夏季降水在 3 年处功率谱估计值最大,且在 2.7~3.0 年周期之间两者的功率谱估计值均超过了标准谱,西北地区东部夏季降水在 2.1~2.3 年周期处亦超过标准谱,因此可以确定长江中下游地区和西北地区东部的夏季降水亦均存在 2~3 年的周期振荡。

通过上述功率谱分析,可以发现高原东南部东、北边界的夏季水汽输出以及长江中下游、西北地区东部的夏季降水均具有 2~3 年周期的准两年振荡,由高原东南部东边界的水汽收支与长江中下游夏季降水的年际变化(图略)可见,两者基本上呈同位相年际变化特征,其相关系数达 0.4788(通过 99% 的信度检验);而高原东南部北边界的水汽收支与西北地区东部夏季降水的年际变化同样具有较为明显的同位相变化特征,两者的相关系数为 0.3755,可以通过 95% 的信度检验。表明长江中下游、西北地区东部夏季降水的准两年周期振荡分别与高原东南部东、北边界的准两年周期振荡具有一定的联系。

5 结 论

1) 夏季青藏高原东南部是一个水汽汇区,夏季平均收入为 39.9×10^6 kg/s。南海夏季风爆发前,以西边界水汽输入为主,爆发后则以南边界的输入为主,东边界为主要输出边界。东亚夏季风的建立、推进对高原东南部的水汽输入有重要影响,而高原东南部的水汽输出则与夏季我国东部雨带的推进过程密切相关。

2) 青藏高原东南部的水汽收支对周边地区有重要影响,该区域是向西北地区东部、长江中下游地区输送水汽的重要通道。长江中下游地区涝年,高原东南部向东输送的水汽显著偏多,向北输送的水汽则偏少;相反,长江中下游地区旱年,高原东南部

向东输送的水汽偏少,向北输送的水汽则显著偏多。相关分析结果亦表明,高原东南部东边界的水汽收支与长江中下游夏季降水呈显著正相关,与西北地区东部夏季降水呈显著负相关;而北边界水汽收支则与西北地区东部夏季降水呈显著正相关,与长江中下游降水呈显著负相关。

3) 青藏高原东南部东、北边界夏季水汽收支具有 2~3 年的周期变化,即具有准两年周期振荡特征,其分别与长江中下游地区、西北地区东部夏季降水的准两年周期振荡密切相关。

参 考 文 献

- [1] 陶诗言, 伊兰. 青藏高原在亚洲季风区水分循环中的作用 // 第二次青藏高原大气科学试验理论进展. 北京: 气象出版社, 1999: 204-214.
- [2] Xu Xiangde, Miao Qiuju, Wang Jizhi, et al. Transport model at the regional boundary during the Meiyu period. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20: 333-342.
- [3] 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.
- [4] 徐祥德, 陈联寿, 王秀荣, 等. 长江流域梅雨带水汽输送源-汇结构. *科学通报*, 2003, 48(21): 2288-2294.
- [5] 苗秋菊, 徐祥德, 张胜军. 长江流域水汽收支与高原水汽输送分量“转换”特征. *气象学报*, 2005, 63(1): 93-99.
- [6] 任宏利, 张培群, 李维京, 等. 中国西北东部地区春季降水及其水汽输送特征. *气象学报*, 2004, 62(3): 365-373.
- [7] 马岚, 许熙, 高云, 等. 1997、1998 年长江上游地区水汽输送及其与径流量之间关系的对比分析. *应用气象学报*, 2000, 11(4): 491-498.
- [8] 丁一汇, 胡国权. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究. *气象学报*, 2003, 61(2): 129-145.
- [9] 胡国权, 丁一汇. 1991 年江淮暴雨时期的能量和水汽循环研究. *气象学报*, 2003, 61(2): 146-163.
- [10] 周玉淑, 高守亭, 邓国. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析. *大气科学*, 2005, 29(5): 195-204.
- [11] 谢安, 毛江玉, 宋焱云, 等. 长江中下游地区水汽输送的气候特征. *应用气象学报*, 2002, 13(1): 67-77.
- [12] Mooley D A, Parthasarathy B. Fluctuation in all-India summer monsoon rainfall during 1871—1978. *Climate Change*, 1984, 6: 287-301.
- [13] Meehl G. The annual cycle and interannual variability in the tropical Pacific and Indian Ocean region. *Mon Wea Rev*, 1987, 115: 27-50.
- [14] Yasunari T, Suppiah R. Some Problems on the Interannual Variability of Indonesian Monsoon Rainfall // Theon J S, Fugono Deepak N, Hampton Va. *Tropical Rainfall Measurements*. 1988: 113-122.
- [15] Kiladis G N, Van Loon H. The Southern Oscillation. Part VII: Meteorological anomalies over the Indian and Pacific sectors associated with the extremes of the oscillation. *Mon Wea Rev*, 1988,

- 116;120-136.
- [16] Yasunari T. Impact of Indian monsoon on the coupled atmosphere/ocean system in the tropical Pacific. *Meteor Atmos Phys*, 1990, 44: 29-41.
- [17] Ropelewski C F, Halpert M S, Wang X. Observed tropospheric biennial variability and its relationship to the Southern Oscillation. *J Climate*, 1992, 5: 594-614.
- [18] Miao J H, Lau K-M. Interannual variability of East Asian monsoon rainfall. *Quart J Appl Meteor*, 1990, 1:377-382.
- [19] Tian S F, Yasunari T. Time and space structure of interannual variations in summer rainfall over China. *J Meteor Soc Japan*, 1992, 70:585-596.
- [20] 殷宝玉,王连英,黄荣辉.东亚夏季风降水的准两年振荡及其可能的物理机制//黄荣辉.灾害性气候的过程及诊断文集.北京:气象出版社,1996:96-205.
- [21] Chang C P, Zhang Y S, Li T. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. I, II. *J Climate*, 2000, 13:4310-4340.
- [22] 黄荣辉,陈际龙,黄刚,等.中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因.大气科学,2006,30(4):545-560.

Climatological Characteristics of Summertime Moisture Budget over the Southeast Part of Tibetan Plateau with Their Impacts

Shi Xiaoying¹⁾²⁾ Shi Xiaohui¹⁾

¹⁾ (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract

Climatological characteristics of water vapor budget over the southeast part of Tibetan Plateau and their impacts on ambient areas in summer are investigated based on NCEP/NCAR reanalysis data for the period from 1961 to 2005. The result shows that the southeast part of Tibetan Plateau is a moisture sink, under the seasonal average of summer condition, the water vapor net budget is 39.9×10^6 kg/s. The establishment and advance of Asian summer monsoon play an important role in the incoming water vapor of the southeast part of Tibetan Plateau, and the outgoing moisture is closely associated with the advance and retreat of rain belt of East China. The southeast part of Tibetan Plateau, as the moisture transport channel to the east of Northwest China and mid-lower reaches of the Yangtze River, plays a great role in the moisture budget around it. The southeast part of Tibetan Plateau, as a transferring station, is one of the key factors to the flooding anomalies of precipitation in mid-lower reaches of the Yangtze River and the drought anomalies in North China. By power spectrum analysis, it is found that there is quasi-biennial oscillation in the interannual variations of moisture budgets at east/north boundary over the southeast part of Tibetan Plateau and summer precipitation of mid-lower reaches of the Yangtze River/eastern part of Northwest China. An in-phase inter-annual variation are shown by the moisture budgets at east boundary over the southeast part of Tibetan Plateau and the summer precipitation of mid-lower reaches of the Yangtze River, and the same to moisture budgets at north boundary and the summer precipitation of eastern part of Northwest China. It shows that the quasi-biennial oscillation of moisture budgets at east boundary is closely association with that of precipitation in mid-lower reaches of the Yangtze River, and the quasi-biennial oscillation of moisture budgets at north boundary is closely association with that of precipitation of the eastern part of Northwest China.

Key words: the southeast part of Tibetan Plateau; water vapor budget; summer precipitation