

青藏高原“三江源地区”雨季水汽输送特征^{*1}

李生辰¹ 李栋梁² 赵平³ 张国庆⁴

LI Shengchen¹ LI Dongliang² ZHAO Ping³ ZHANG Guoqing⁴

1. 青海省气象台, 西宁, 810001
2. 南京信息工程大学, 南京, 210044
3. 中国气象科学研究院, 北京, 100081
4. 青海省气象科学研究所, 西宁, 810001

1. Qinghai Meteorological Observatory, Xining 810001, China

2. NIM, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

3. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

4. Institute of Qinghai Meteorological Science, Xining 810001, China

2007-08-08 收稿, 2008-04-11 改回.

Li Shengchen, Li Dongliang, Zhao Ping, Zhang Guoqing. 2009. The climatic characteristics of vapor transportation in rainy season of the origin area of three rivers in Qinhai-Xizang Plateau. Acta Meteorologica Sinica, 67(4):591—598

Abstract Using NCEP/NCAR data and 40 years precipitation data of Qinhai-Xizang Plateau meteorological stations. The results showed that the main water resource of the origin area of three rivers (Changjiang, Huanghe, Lancangjiang) in Plateau is the southwest wet airflow by East Asia and Indian monsoon and the secondly is the west airflow from Middle Asia high pressure of west boundary and the third one is the north airflow in the westerlies. These three different airflows of large-scale circulation background influx to the three rivers in Plateau and make this region lie in the convergence area of vapor from June to September. At the same time the ground layer of the source of three rivers in Plateau maintain stationary weather systems such as shear and vortex and so on under the dynamic effect of large topography of Qinhai-Xizang Plateau and form the source of rivers in this area being perpetual rainfall. The vapor flux of main importing boundary of the source of three rivers in Plateau present descending trend in near 40 years and will influence on the precipitation change of the origin area of three rivers in the future.

Key words Qinhai-Xizang Plateau, Origin area of three rivers, Vapor transportation

摘要 利用40年NCEP/NCAR再分析资料和青藏高原三江源地区的降水资料,分析了三江源地区的水汽输送特征。研究表明:在东亚和印度季风驱动下的西南暖湿气流是三江源地区空中主要水汽来源,其次是来自西边界中东高压中的偏西气流和西风带中的偏北气流,这3种大尺度环流背景的气流汇集到三江源区,使该地区6—9月处在水汽辐合区内,同时在高原大地形的动力作用下,三江源地区近地面层维持定常的切变、低涡等天气系统,源源不断的降水为这一区域形成江河源头创造了条件。在水汽输入的各边界中,南边界季节变化特征显著,冬、春季水汽输入量小,夏、秋季水汽输入量大,9月达到全年的最大值。西边界的水汽输入量季节变化特征不明显,一年四季有水汽输入。北边界冬、春季水汽输入量小,夏、秋季水汽输入量大,6月达到全年的最大值。水汽输出主要在东边界。从三江源地区空中净水汽输入(输出)量收支的月际变化来看,6—9月水汽是收入的,5月收支平衡,10月到次年4月水汽是支出的,三江源地区的这种净水汽输入(输出)量收支的月际变化与该地区降水量的月际变化基本一致。冬、春季以西边界的水汽输入为主,夏、秋季以南边界的水汽输入为主。青藏高原三江源地区主要水汽输入边界的水汽通量近40年来呈现减少的变化趋势,这将影响到三江源地区未来的降水变化。

关键词 青藏高原, 三江源地区, 水汽输送

中图法分类号 P468.0⁺²⁴ P467

* 资助课题:国家自然科学基金(40665002,40475038),科技部2004年度社会公益研究专项资金“三江源地区人工增水潜力研究”。

作者简介:李生辰,主要从事高原天气预报和气候预测方面的工作。Email: qhxnls@yaho.com.cn

1 引言

青藏高原三江源自然保护区(简称三江源区)位于青藏高原腹地的青海省南部,著名的长江、黄河及国际河流澜沧江发源于此,故得名“三江源”或“中华水塔”。地理位置(31°39′—36°16′N, 89°24′—102°23′E),流域面积 $3.631 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。降水量最多的地方位于三江源区的东南部,降水量最少的地方位于西北部的唐古拉地区。三大江河的源头集中在青海省南部的青藏高原中部,在青藏高原大地形的动力作用下,来自高原北侧的偏北气流和高原南侧的偏南气流往往在青藏高原中部的三江源区形成辐合,这种流场有利于三江源区成为低涡、切变线等天气系统最活跃的地区,这些低值系统为三江源区水汽辐合提供了非常好的动力条件(代加洗等,1990)。一个地区降水的变化和分布与输送到该地区的水汽有着直接关系(Liu, et al, 2003a, 2003b; 陈艳等, 2006),频繁的降水为该地区提供了充足的水源,那么三江源区及其周围的水汽输送具有怎样的特征,这是本文所关心的问题。

水汽的输送与大尺度环流和季风的的活动密切相关(黄荣辉等,1998; Zhang, 2001; Ian, et al, 1988),高原地区由于巨大的地形阻挡了来自高原以南地区的水汽输送,根据徐祥德等(2002)的研究,来自低纬度异常的暖湿气流在高原东南部转向长江流域,高原地区是影响中国区域及其下游相关区域洪涝的偏南水汽输送的关键区。周长艳等(2005)采用从地表面开始垂直积分的水汽输送,讨论了青藏高原东部及邻近地区水汽输送的气候特征,提出该区域的水汽输送具有明显的季节变化特征,这种差异和季风环流演变有密切的关系。苗秋菊等(2005)分析了青藏高原周边异常多雨中心的水汽输送,这些异常降水中心具有水汽输送多通道交叉的综合特征。王鹏祥等(2006)通过分析青海高原旱涝年空中水汽收支后指出:青海空中水汽有增加趋势,水汽收支均有“盈余”。王可丽等(2006)重点分析了三江源地区特别是长江和黄河流域多雨和少雨年的环流差异与水汽变化之间的关系。本文利用三江源地区气象站的降水资料和 NCEP/NCAR 再分析气候资料,着重分析三江源地区的水汽输送气候特征及该地区降水的水汽源问题。

2 资料和方法

本文选用的气象资料主要是青海省三江源自然保护区自 1965 年以来有降水记录的 19 个气象站 1965—2004 年共 40 年的逐日平均降水量,这 19 个站是五道梁、沱沱河、曲麻来、治多、杂多、囊谦、玉树、清水河、同仁、甘德、达日、班玛、久治、玛沁、玛多、兴海、同德、泽库、河南(图 1)。1965—2004 年逐日 NCEP/NCAR 再分析资料的日平均的纬向风分量(u)、经向风分量(v)、比湿(q)、地面气压(p_s)和气温(T)。对水汽输送整层的垂直积分计算,主要取 5 层即地面、600、500、400、300 hPa。

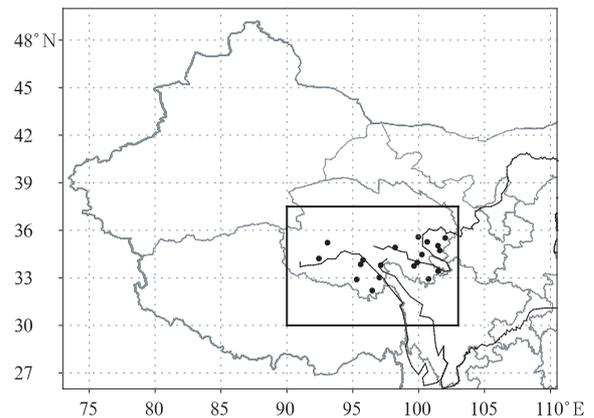


图 1 青藏高原“三江源”地区 19 个站点分布
Fig. 1 Distribution of the elected weather stations in the origin area of three rivers of the Qinghai-Xizang Plateau

2.1 水汽输送通量的计算

一个区域水汽通量的输入和输出是影响该区域气候的主要因素,在国外用 NCEP/NCAR 再分析资料对某一区域水汽通量进行计算已有许多工作(Cullather, et al, 2000; Roads, et al, 2000; Sminov, et al, 1998),因此本文利用逐日 NCEP/NCAR 再分析资料计算三江源区及周围的水汽通量,由于三江源区海拔高度在 3500 m 以上,所以垂直积分取了 5 层。单位气柱大气水汽输送通量矢量 Q 的计算公式为 $Q = Q_\lambda(\lambda, \varphi, t)i + Q_\varphi(\lambda, \varphi, t)j$, 其中,纬向水汽输送通量:

$$Q_\lambda(\lambda, \varphi, t) = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_T} q(\lambda, \varphi, p, t) \cdot u(\lambda, \varphi, p, t) dp$$

经向水汽输送通量

$$Q_\varphi(\lambda, \varphi, t) = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_T} q(\lambda, \varphi, p, t) \cdot v(\lambda, \varphi, p, t) dp$$

单位:kg/(m·s),垂直积分范围均是从地面气压 p_s 到 p_T , p_T 取 300 hPa, q 为比湿, g 为重力加速度。我们先计算 1965—2004 年逐日的水汽输送通量及水汽输送通量散度,然后再把每日的水汽通量及水汽通量散度作气候平均。

2.2 边界水汽通量的计算

为了更好地了解三江源区空中水汽的收支情况,在 NCEP/NCAR 再分析资料 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 水平网格上,取 $(30^\circ-37.5^\circ\text{N}, 90^\circ-102.5^\circ\text{E})$ 的方框, 30°N 和 37.5°N 分别是三江源地区的南、北边界, 90°E 和 102.5°E 分别是西、东边界,由于南北边界是 6 个点,东西边界是 4 个点,误差范围在 $\pm 10\%$ 以内(Liu, 2003 a, 2003 b)。计算了 1965—2004 年共 40 年的各边界气候月平均水汽输送通量,具体计算公式为:

区域南边界水汽输送总量

$$Q_S(\varphi, t) = \int_{\varphi_W}^{\varphi_E} Q_\varphi(\lambda, \varphi, t) \cdot a \cos\varphi d\lambda$$

区域北边界水汽输送总量

$$Q_N(\varphi, t) = - \int_{\varphi_W}^{\varphi_E} Q_\varphi(\lambda, \varphi, t) \cdot a \cos\varphi d\lambda$$

区域西边界水汽输送总量

$$Q_W(\lambda, t) = \int_{\varphi_S}^{\varphi_N} Q_\lambda(\lambda, \varphi, t) \cdot a d\varphi$$

区域东边界水汽输送总量

$$Q_E(\lambda, t) = - \int_{\varphi_S}^{\varphi_N} Q_\lambda(\lambda, \varphi, t) \cdot a d\varphi$$

输送进入区域内的总水汽量

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

3 三江源区雨季水汽输送特征

3.1 三江源区降水季节变化特征

图 2 是三江源区 40 年平均降水的季节变化曲线,三江源区的降水主要集中在 6—9 月,1—3 月降水量非常少,平均月降水量不足 15 mm;5 月开始明显增加,7 月的降水量达到全年的最大值,为 97 mm。10 月明显减小,11—12 月为全年降水量最小时期,表明三江源区的降水量有着显著的单峰型年变化特征。三江源区 6—9 月的降水量占年降水量的 76%,因此将 6—9 月定为三江源区的雨季是合适的,这个季节充沛的降水,是三江源区源头形成的关键,提供这样充沛降水的空中具有怎样的水汽输送特征是本文分析的重点。

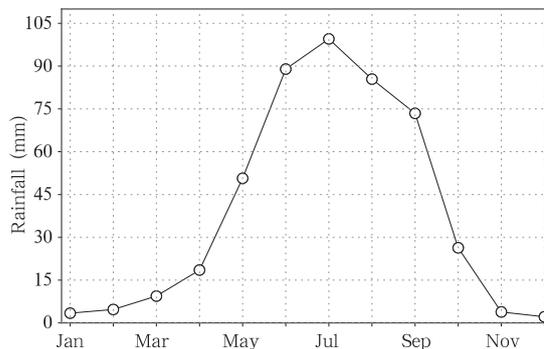


图 2 三江源区 19 站 40 年平均逐月降水量(单位:mm)

Fig. 2 The monthly mean precipitation of the origin area of three rivers in recent 40 years(unit:mm)

3.2 三江源地区水汽输送特征

从三江源区雨季(6—9 月,下同)40 年平均的整层水汽通量矢量场(图 3a)明显看到,来自南半球较大的水汽通量矢量在索马里越赤道后转为西南气流,经阿拉伯海向帆到达印度洋,一部分与菲律宾越赤道气流汇合后向中国大陆地区延伸,另一部分水汽通量在孟加拉湾转成偏北方向后向青藏高原地区输送,形成最强的偏南水汽输送带。值得关注的是,三江源区(图中方框区域)南部有较强的偏南水汽通量矢量,并形成明显的水汽通量矢量梯度,西风带的水汽通量矢量相对要小得多,表明了在该地区有明显的水汽辐合。根据 Ian 等(1988)的结论,在对流层高层,高原地区是较强的偏西水汽通量矢量,由于整层平均,三江源区上空水汽通量以弱的偏西矢量为主。从雨季 40 年平均的整层流场(图 3b)明显看到有 3 股气流汇集到三江源区,一股是由孟加拉湾经西藏到达三江源区的西南气流,由南边界输送到三江源区,一股是来自中亚咸海、里海经高原西部到达的偏西气流,由西边界进入三江源区,还有一股是来自高纬地区的西风带,经新疆和青海北部到达的西北气流,从北边界进入三江源区。这 3 股气流与大尺度环流的天气系统有关,西南气流源自副热带高压西部和印度热低压东北部的偏南气流,偏西气流来自中东高压的西北部,西北气流来自西风带,3 种不同性质的气流汇集在高原的 35°N 附近。同时由于高原大地形的动力作用,使该地区 6—9 月经常维持切变线、低涡等天气系统,加上有源源不断的水汽输送,降水频繁产生,形成了长江、黄河、澜沧江的源头。

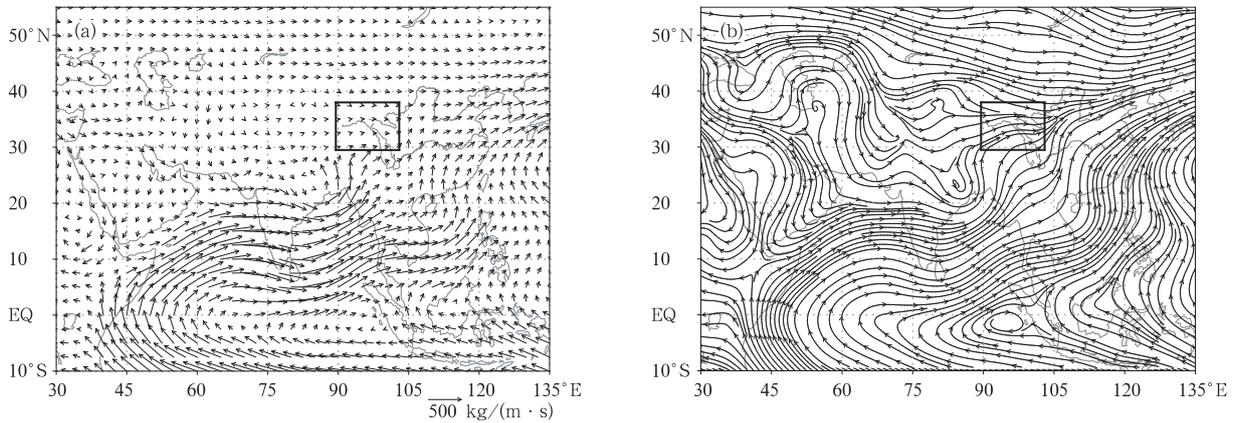


图3 1965—2004年6—9月气候平均的整层水汽通量矢量场(a)和流场(b)

(小矩形框为三江源地区(30°—37.5°N, 90.0°—102.5°E))

Fig. 3 Climatological mean vertically integrated water vapor transport pattern (a) and stream (b) in June–September for 1965–2004 (The square frames are the origin area of three rivers (30°–37.5°N, 90.0°–102.5°E))

通过上述分析可以看到,不同背景下大尺度环流系统水汽交汇是三江源区水汽输送的基本特征。南边界是来自低纬度地区的暖湿气流,西边界是来自中纬度地区的气流,北边界是来自高纬度地区的干冷气流,3种不同性质的气流汇集构成了三江源区特殊的水汽结构及水汽输送特征。东边界没有水汽输入。

4 三江源地区雨季水汽收支特征

图4为三江源地区40年各边界平均逐月整层水汽通量的收支演变图。南边界水汽是输入的,季节变化明显。1—2月几乎没有水汽从南边界进入三江源区,3—4月有少量净水汽输入,5月明显增加,6月达到次高值,净水汽输入量为 30.0×10^6 kg/s,7—8月略减少,9月达到全年的最大值,净水汽输入量为 35.0×10^6 kg/s。11月净水汽输入量迅速减少,到12月净输入量为零。西边界,水汽全年是输入的,没有明显的季节变化。水汽输入量始终稳定在 $(10.0-20.0) \times 10^6$ kg/s,9月是全年的最大值。北边界,水汽也是输入的,1—2月净水汽输入量小,3—5月开始增加,6月达到全年的最大值,净水汽输入量为 15.0×10^6 kg/s,7月开始减小。东边界,全年的净水汽输入量为负,即水汽是输出的。7、8月输出量最小为 26.0×10^6 kg/s,10月输出量最大为 52.0×10^6 kg/s,6月是输出量的次高值。上述分析表明:三江源区净水汽输入主要是南边界、西边界和北边界,与高原东部(四川、重庆地

区)相比(陈艳等,2006)不同的是,高原东部的水汽输入边界是南边界和西边界。其中南边界的净水汽输入量在夏季贡献最大,与三江源区的降水一样,季节变化显著。表明来自高原南侧的西南气流的强弱变化对三江源区的降水影响明显,与中国长江中、下游地区的水汽输入以南边界为主是一致的(周玉淑等,2005;谢安等,2002;Xu, et al, 2003),这股西南气流与东亚和印度洋季风的强弱变化关系密切(任宏利等,2004)。其次是西边界的净水汽输入量,虽然年变化特征没有南边界明显,但一年四季有持续稳定的水汽输送,尤其春、冬季贡献最大。北边界的净水汽输入量最小,季节变化明显。东边界没有水汽

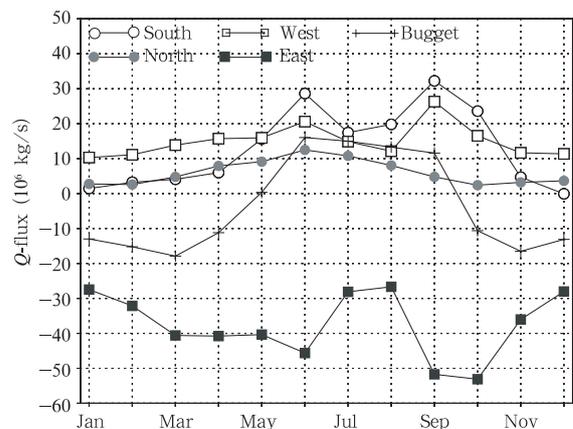


图4 1965—2004年三江源地区

各边界40年平均逐月水汽通量(10^6 kg/s)

Fig. 4 Climatological monthly mean water budget of water vapour and net budgets in June–September for 1965–2004 in the origin area of three rivers

输入,主要是水汽输出。从各边界总体的输入量来看,1—4月三江源地区的净水汽输入量是负的,5月收支平衡,6—9月净水汽输入量是正的,10—12月净水汽输入量是负的。从水汽输入量的季节来看,冬、春季以西边界的水汽输入为主,夏、秋季以南边界的水汽输入为主。

5 三江源区降水的水汽源

为了解高原三江源地区降水的水汽来源问题,利用高原三江源地区降水与同期水汽通量合成矢量进行了相关计算(图5),相关性最好的区域有3个,一个是西藏北部和青海南部地区,另一个区域是巴尔喀什湖至里海的北部,较小的区域是青藏高原西部的帕米尔地区,相关系数均达到0.4以上,信度通过95%的检验。与图3、图4的结果相比,进一步表明高原三江源地区降水的水汽源主要在南、西、北3个方向,三江源地区的降水分布和变化与这3个区域的水汽输送有关。为了更好地了解长江、黄河流域降水的水汽输送问题,将高原三江源地区分成东西两个部分,以巴颜喀拉山为界,以西部分是长江流域,以东部分是黄河流域,图6是长江源头流域降水量与水汽通量的相关场,基本特征与整个三江源地区(图5)完全一致,相关高的地区主要在长江源头流域的南、西、北部3个区域。

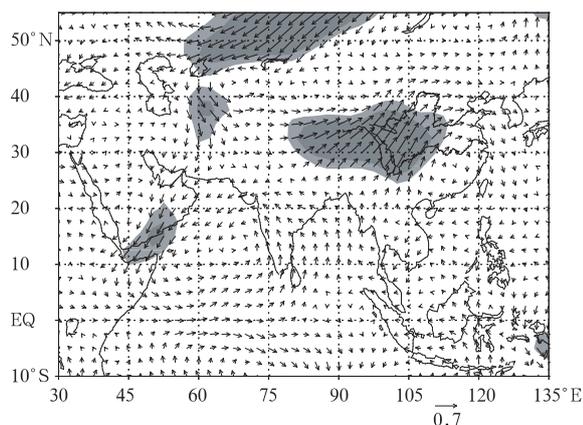


图5 6—9月(1965—2004年)三江源地区降水与整层水汽通量合成相关矢量
(阴影区域是相关系数超过0.7的范围)

Fig. 5 Correlation between precipitation of the origin area of three rivers of the Qinghai-Xizang Plateau and mean vertically integrated water vapor transport in June—September for 1965—2004

(The regions where connections exceeds 0.7 are shaded)

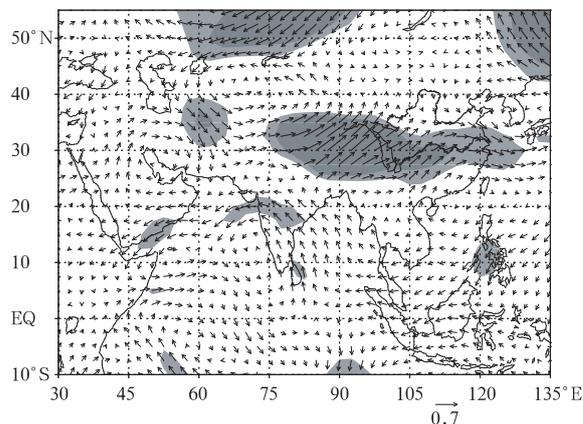


图6 6—9月(1965—2004年)长江源头流域降水与整层水汽通量合成相关矢量
(阴影区域是相关系数超过0.7的范围)

Fig. 6 Correlation between precipitation of the source regions of Changjiang River of the Qinghai-Xizang Plateau and mean vertically integrated water vapor transport in June—September for 1965—2004

(The regions where connections exceeds 0.7 are shaded)

图7是黄河源头流域降水量与水汽通量合成矢量的相关场,相关高的地区主要在黄河流域及以南地区和巴尔喀什湖及以北地区,与三江源以西地区的水汽通量相关不高,表明长江源头流域降水的水汽来自南、西、北3个方向,黄河源头流域降水的水汽来源主要是南、北2个方向。

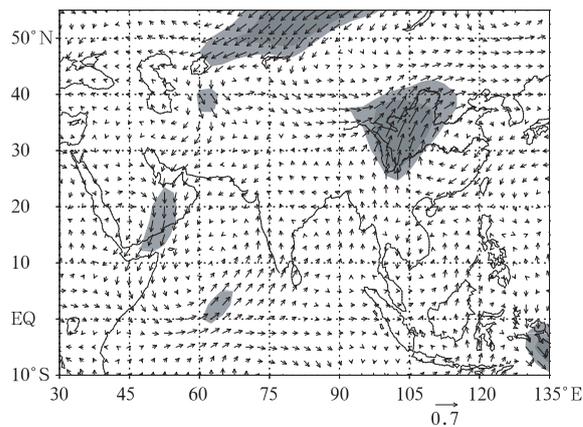


图7 6—9月(1965—2004年)黄河源头流域降水与整层水汽通量合成相关矢量
(阴影区域是相关系数超过0.7的范围)

Fig. 7 Correlation between precipitation of the source regions of the Huanghe River of the Qinghai-Xizang Plateau and mean vertically integrated water vapor transport in June—September for 1965—2004

(The regions where connections exceeds 0.7 are shaded)

6 三江源区各边界水汽输送的变化特征

为了进一步分析三江源区各边界水汽通量的变化特点,图 8 给出 40 年来各边界 6—9 月累计水汽通量时间序列的演变。

通过南边界进入三江源地区的水汽量近 40 年平均为 98.1×10^6 kg/s,总体呈波动式减少趋势(图 8a),减少幅度为每 10 年 7.7×10^6 kg/s(8%),这一线性趋势的相关系数达到 0.3425,超过了 0.05 的显著性水平检验。南边界净水汽通量最大的年份是 1979 年,达到 151.2×10^6 kg/s,超出正常年景 54.1%;最少年份是 1994 年为 47.6×10^6 kg/s,比正常年景偏少 51.5%。偏多、偏少年景相差 105.6%。

40 年来进入南边界的水汽量的变化可分为 2 个阶段:第 1 阶段为 20 世纪 90 年代以前,相对较多,25 年中 64% 的年份偏多;有 9 年(占 36%)偏少。第 2 阶段为 90 年代以后的相对偏少时期,16 年中仅 3 年偏多,13 年偏少。最后 10 年(1996—2005 年)进入南边界的水汽量仅占正常年的 75%。

40 年平均通过西边界进入三江源地区的水汽量 73.8×10^6 kg/s,总体呈缓慢下降趋势(图 8b),下降幅度为每 10 年 4.7×10^6 kg/s(6.4%),线性趋势的相关系数达到 0.3455,超过了 0.05 的显著性水平检验。与图 8a 比较,西边界水汽通量的减少量小于南边界。西边界净水汽通量最大出现在 2003 年为 98.8×10^6 kg/s,超出正常年景 33.9%;最少年

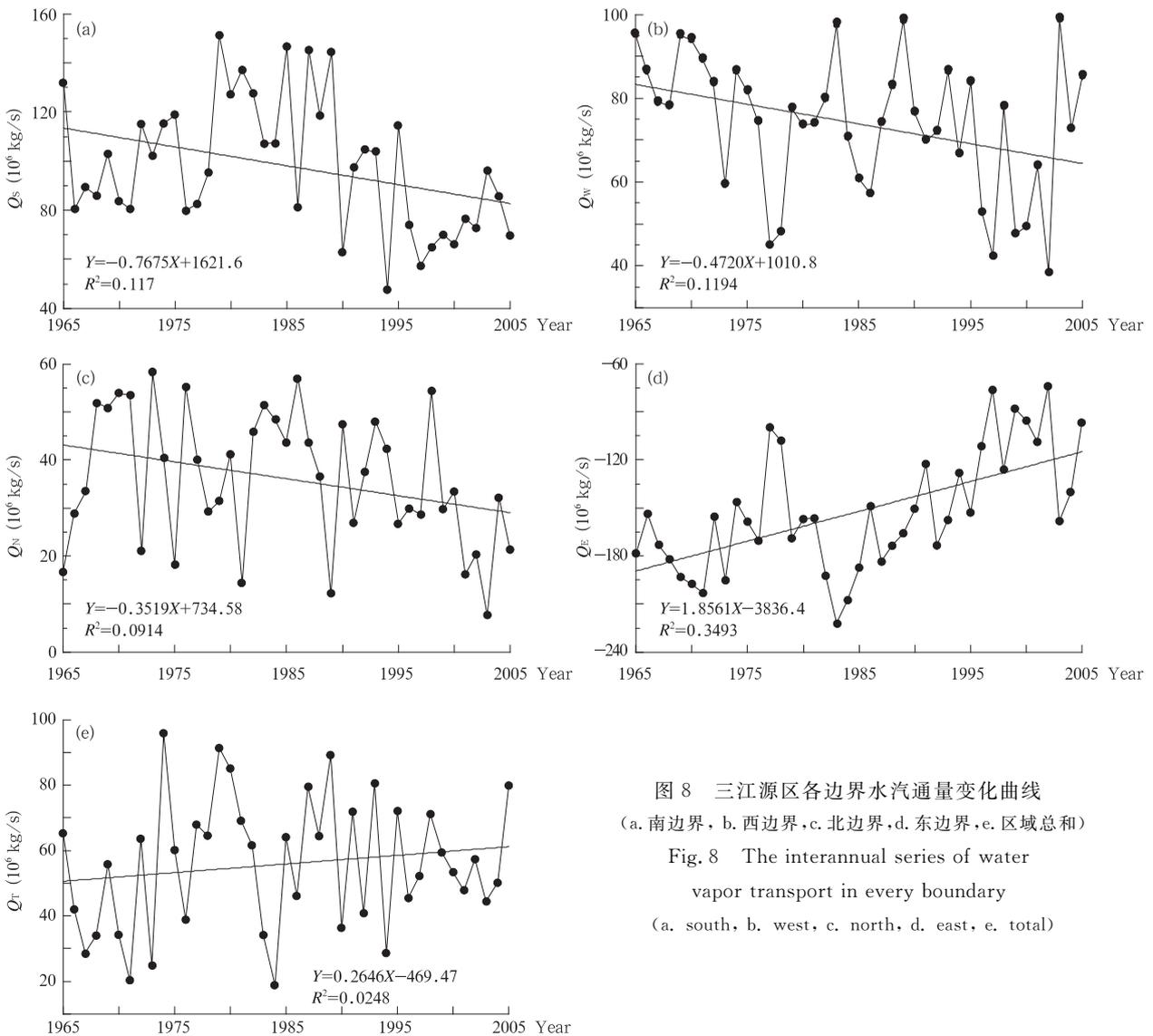


图 8 三江源区各边界水汽通量变化曲线
(a. 南边界, b. 西边界, c. 北边界, d. 东边界, e. 区域总和)
Fig. 8 The interannual series of water vapor transport in every boundary
(a. south, b. west, c. north, d. east, e. total)

是2002年,为 38.4×10^6 kg/s,比正常年景偏少48%。西边界水汽通量在年代际时间尺度上主要表现为下降趋势,也可分3个阶段:第1个阶段1965—1977年,快速下降;第2阶段1977—1989年,缓慢上升;第3阶段1989—2002年,快速减少。从各年代来看,就第1个10年(1965—1974年)明显偏多15%,后1个10年偏少15%。

图8c表示的北边界净水汽通量是指由西北气流所输入的水汽通量,40年平均为 36.1×10^6 kg/s。总体呈逐渐减少趋势。减少幅度是每10年 3.5×10^6 kg/s (9.7%),但线性趋势的相关系数只有0.3023,达不到显著性检验水平,即通过北边界进入三江源的水汽的减少量不明显。对区域水汽贡献量最大的1973年达 58.1×10^6 kg/s,超出正常年景60.9%;最小的2003年仅为 7.7×10^6 kg/s,比正常年景偏少78.7%。偏多、偏少年景相差140%,年际变化非常明显。北边界的水汽主要来自西风带中的北风分量,虽然风速大,但由于来自北方的空气过于干燥,比湿太小,使其成为三江源区水汽通量输入最小的边界。通过北边界进入三江源的水汽的变化以1987年为界可分为2个阶段,1987年以前,风速大,进入的水汽量多,1987年以后,气候明显变暖,西北气候转型(李林等,2004),风速减小,进入的水汽量少。

东边界上西风远远大于东风,流出的水汽通量大于流入的,是三江源地区输出水汽的主要边界,总体为负值(图8d)。负值的绝对值越大,表示流出的越多。时间序列变化趋势呈上升表示通过东边界流出的水汽在减少,即由距平东风所带入东边界的水汽在显著增加,对三江源的水汽汇起到正贡献。从时间序列变化趋势来看,输出减少幅度较大,每年达 18.6×10^6 kg/s(12%),线性趋势的相关系数达到0.5910,通过了0.001的显著性水平检验。即通过东边界流出三江源的水汽在明显减少。东边界水汽输出最大在20世纪60年代中期至70年代中期,1983年为 -222.1×10^6 kg/s,超出正常年景45.9%;输出最小的是2002年为 -74.1×10^6 kg/s,比正常年景偏少51.3%。偏多、偏少年景相差97.2%。最近10年流出东边界的水汽量仅占正常年的71%。

近40年平均通过南、西、北3个边界进入三江源的水汽为 208×10^6 kg,而通过东边界流出的水汽为 152.2×10^6 kg,即有净的盈余 55.8×10^6 kg。这个盈余是相对三江源区的雨季而言,对于青藏高原以外地区,这里是水汽的汇。随着气候变暖,这个净的盈余量在增加,前10年(1965—1974年)净盈余 46.4×10^6 kg,后10年(1996—2005年)净盈余增加到 56.1×10^6

kg。这反映了三江源不仅仅是江河之源,还是水汽之源。三江源地区总的水汽量呈弱的增加趋势(图8e),增加幅度为每10年 2.6×10^6 kg/s。比较4个边界的输入、输出量可以发现,三江源地区总水汽量的增加主要是通过东边界的“节流”所得。南、西、北3个边界是三江源地区水汽的来源,3个边界的输入都在不同程度的减少。即“开源”负贡献。

在第4节的分析中我们知道,南边界是三江源区雨季水汽净输入量最大的边界,南边界净水汽通量逐渐减少,对三江源区的降水将会产生重要影响,李林等(2004)利用1962—2001年三江源区的降水资料分析结果表明,40年来三江源区的年降水量呈现出减少趋势。李生辰等(2007)通过对近34年青藏高原地区降水资料的分析表明:青藏高原从区域降水变化上看,高原上 33° — 35° N及祁连山区呈减少趋势,西藏和柴达木盆地呈增加趋势,而且增加的幅度比较大,在青藏高原上高海拔地区的降水在减少,而低海拔地区的降水在增加。三江源地处青藏高原主体的高海拔地区,降水呈减少趋势。说明三江源区降水的减少主要是因为南边界的净水汽输入量减少的缘故。

7 结论与讨论

(1) 三江源区雨季降水量主要来自南边界的西南气流,其次是西边界的偏西气流和北边界的西北气流,这3种不同性质的气流带来的水汽汇集到三江源区,是三江源地区形成降水的水汽来源,构成了高原三江源区特殊的水汽结构及水汽输送特征。西南气流是在东亚和印度洋季风的驱动下进入三江源区的,表明东亚和印度洋季风的强弱变化将影响三江源区的降水。

(2) 三江源区南、西、北边界水汽是净收入的,其中南边界的水汽输入量最大,季节变化特征显著,冬、春季水汽输入量小,夏、秋季水汽输入量大,9月达到全年的最大值,净水汽输入量为 35.0×10^6 kg/s。西边界的水汽输入量季节变化特征不明显,一年四季有水汽输入,水汽输入量始终稳定在 $(10.0—20.0) \times 10^6$ kg/s。北边界的水汽输入量季节变化特征明显,冬、春季水汽输入量小,夏、秋季水汽输入量大,6月达到全年的最大值,净水汽输入量为 15.0×10^6 kg/s。水汽输出主要在东边界,10月输出量最大为 52.0×10^6 kg/s。

(3) 从三江源区净水汽输入(输出)量的月际变化来看,6—9月水汽是净收入的,5月收支平衡,10月—次年4月水汽是净支出的。三江源区的这种净水汽输入(输出)量收支的月际变化与降水量的月际

变化基本一致。三江源区冬、春季以西边界的水汽输入为主,夏、秋季以南边界的水汽输入为主。

(4) 长江源头流域空中水汽源来自南、西、北 3 个方向,黄河源头流域空中水汽源主要在南、北 2 个方向。

(5) 三江源区水汽通量各边界的趋势变化中,水汽输入量的南、西、北边界近 40 年来呈现减少的趋势,水汽输出的东边界也是减少趋势。三江源地区总水汽表现出较小增加趋势的主要原因是东边界水汽输出的减少。

References

- Chen Yan, Ding Yihui, et al. 2006. The impact of water vapor transport on the summer monsoon onset and abnormal rainfall over Yunnan Province in May. *Chinese J Atmos Sci* (in Chinese), 30(1):25-37
- Cullather R I, Bromwich D H, Serrze M C. 2000. The atmospheric hydrologic cycle over the Arctic basin from reanalysis. Part I: Comparison with observations and previous studies. *J Climate*, 13, 923-947
- Dai Jiayi, et al. 1990. The climate of Qinghai-Xizang plateau (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 52pp
- Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. 1998. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 22(4): 460-469
- Ian Simmonds, Daohua Bi, Pandora Hope. 1988. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer. *J Climate*, 12:1353-1367
- Li Lin, Zhu Xide, Wang Qingchun, et al. 2004. Climate changes over headwater of the Three-River-Area and its effect on ecological environment. *Meteor Mon* (in Chinese), 30(8):18-21
- Li Shengchen, Xu Liang, Guo Yingxiang, et al. 2007. Change of annual precipitation over Qinghai-Xizang Plateau and sub-regions in recent 34 years. *J Desert Res* (in Chinese), 27(2):307-314
- Liu Jinliang, Ronald E Stewart. 2003a. Water vapor fluxes over the Saskatchewan river basin. *J Hydrometeorol*, (4):944-959
- Liu Jinliang, Ronald E Stewart, Kit K Szeto. 2003b. Moisture transport and other hydrometeorological features associated with the severe 2000/01 drought over the western and central Canadian Prairies. *J Climate*, 15:305-319
- Roads B A. 2000. NCEP-NCAR and ECMWF reanalysis surface water and energy budgets for the Mississippi River basin. *J Hydrometeorol*, (1):88-94
- Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. 2002. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. *J Glaciology Geocryology* (in Chinese), 24(3): 219-226
- Sminov V, Moore G W K. 1998. Spatial and temporal structure of atmospheric water transport in the Mackenzie River basin. *J Climate*, 12:681-696
- Wang Keli, Cheng Guodong, Ding Yongjian, et al. 2006. Characteristics of water vapor transport and atmospheric circulation for precipitation over the source region of the Yellow and Yangtze rivers. *J Glaciology Geocryology*, 28(1):8-14
- Wang Penxian, Wang Baojian, Huang Yuxia, et al. 2006. Distribution and changing character of water vapor over Qinghai Plateau in summer in recent 43 years. *Plateau Meteorol* (in Chinese), 25(1):60-65
- Xie An, Mao Jianguy, Song Yanyun, et al. 2002. Climatological characteristics of moisture transport over Yangtze basin. *Quart J Appl Meteorol* (in Chinese), 13(1): 67-77
- Xu Xiangde, Tao Shiyan, Wang Jizhi, et al. 2002. The relationship between water vapor transport features of Tibetan Plateau-Monsoon "Large Triangle" affecting region and drought-abnormality of China. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 60(3):257-266
- Xu Xiangde, Miao Qiuju, Wang Jizhi, et al. 2003. Transport model at the region alboundary during the Meiyu period. *Adv Atmos Sci*, 20:333-342
- Zhang Renhe. 2001. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China. *Adv Atmos Sci*, 18(5):1005-1017
- Zhou Changyan, Li Yuqing, Li Wei. 2005. Climatological characteristics of water vapor transport over eastern part of Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings. *Plateau Meteorol* (in Chinese), 24(6):881-887
- Zhou Yushu, Gao Shouting, et al. 2005. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basins in 2003. *Chinese J Atmo Sci* (in Chinese), 29(2):195-204

附中文参考文献

- 陈艳, 丁一汇等. 2006. 水汽输送对云南夏季风爆发及初夏降水异常的影响. *大气科学*, 30(1):25-37
- 代加洗等. 1990. 青藏高原气候. 北京: 气象出版社, 52pp
- 黄荣辉, 张振洲, 黄刚等. 1998. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别. *大气科学*, 22(4): 460-469
- 李林, 朱西德, 汪青春等. 2004. 三江源地区气候变化及其对生态环境的影响. *气象*, 30(8):18-21
- 李生辰, 徐亮, 郭英香等. 2007. 近 34 年青藏高原年降水变化及其分区. *中国沙漠*, 27(2):307-314
- 苗秋菊, 徐祥德, 施小英. 2005. 青藏高原周边异常多雨中心及其水汽输送通道. *气象*, 30(12):45-47
- 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. *冰川冻土*, 24(3): 219-226
- 王鹏祥, 王宝, 黄玉霞等. 2006. 青海高原近 43 年夏季水汽分布及演变特征. *高原气象*, 25(1):60-65
- 王可丽, 程国栋, 丁永建. 2006. 黄河、长江源区降水变化的水汽输送和环流特征. *冰川冻土*, 28(1):8-14
- 谢安, 毛江玉, 宋谈云等. 2002. 长江中下游地区水汽输送的气候特征. *应用气象学报*, 13(1): 67-77
- 徐祥德, 陶诗言, 王继志等. 2002. 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*, 60(3):257-266
- 周长艳, 李跃青, 李微等. 2005. 青藏高原东部及邻近地区水汽输送的气候特征. *高原气象*, 24(6):881-887
- 周玉淑, 高守亭等. 2005. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析. *大气科学*, 29(2):195-204