

林厚博, 游庆龙, 焦洋, 等. 2016. 青藏高原及附近水汽输送对其夏季降水影响的分析[J]. 高原气象, 35(2): 309–317.  
Lin Houbo, You Qinglong, Jiao Yang, et al. 2016. Water vapor transportation and its influences on precipitation in summer over Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings[J]. Plateau Meteorology, 35(2): 309–317. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00146.

## 青藏高原及附近水汽输送对其夏季降水影响的分析

林厚博<sup>1, 2</sup>, 游庆龙<sup>1, 2, 3</sup>, 焦洋<sup>1, 2</sup>, 闵锦忠<sup>1, 3</sup>

(1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044;

2. 南京信息工程大学中英气候变化与评估研究所, 南京 210044;

3. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

**摘要:** 利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的1979–2010年ERA-Interim再分析资料分析了青藏高原(下称高原)及附近夏季水汽输送通量分布情况, 并结合基于迄今为止最全面的地面观测数据形成的高分辨率降水资料分析出4条影响夏季高原降水的水汽通道: 西风带、阿拉伯海、孟加拉湾北部及南海通道。结果表明: 高原夏季降水量高值年(1979、1984、1996、1998、2002、2004、2007年)、低值年(1994、2001、2006年)与孟加拉湾北部通道水汽输送强弱年有较好对应。夏季西风带通道的影响较弱, 与其他3条低纬度通道的相关系数较小, 是相对独立的水汽通道, 主要影响高原西北部从狮泉河至塔里木盆地南侧地区; 孟加拉湾北部通道影响高原中南偏东部地区; 南海通道则对高原东南部以及中南部那曲、林芝、昌都、玉树等地区有影响; 而阿拉伯海水汽通道与其他水汽通道都呈负相关关系, 其中与孟加拉湾北部通道相关关系最显著, 相关系数达到–0.65, 该通道通过调节孟加拉湾北部通道和南海通道的向西水汽输送分量来影响高原中南偏西部地区的夏季降水。

**关键词:** 青藏高原; 水汽输送通量与通道; 降水

**文章编号:** 1000-0534(2016)02-0309-09 **中图分类号:** P461 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00146

### 1 引言

青藏高原(下称高原)是世界上最高的高原, 它对中国东部、西北干旱区、亚洲的气候和植被格局乃至全球气候变化都具有深刻的影响(吴国雄等, 2004; 莫申国等, 2004; 姚檀栋和朱立平, 2006; 郑度等, 2002; 过霁冰等, 2012), 一直倍受国内外气象学者们的关注。由于特殊的地形和所处的地理位置, 其降水空间分布的差异性显著(鲁春霞等, 2007)。然而水汽是形成降水的必要条件, 也是气象工作者研究降水不得不考虑的因子, 其输送状况对研究降水的成因和机理有着重要的意义(Xu et al, 2008; 丁一汇和胡国权, 2003; 李江林等, 2012; 田红英等, 2014; 李江平等, 2012)。同时, 高原及其周边地区也是中国

大部分地区灾害性天气气候的水汽输送关键区(施晓辉等, 2009)。20世纪90年代之前, 由于高原及附近的测站较少、观测手段较落后等因素, 使得对该地区水汽输送特征的认识不够深入。之后, 随着水汽观测站、气象观测站的兴建以及对卫星遥感资料、NCEP/NCAR等再分析资料的运用, 使水汽输送特征的研究逐渐深入起来。研究者们发现高原地区从地表到对流层上层的水汽分布特征总体呈现西北干、东南湿的分布形势, 其东南部是最明显的湿区(周长艳等, 2012; 郑新江等, 1997; 蔡英等, 2004)。第二次青藏高原大气科学试验理论研究首次提出了高原湿池的概念(陶诗言等, 2000), 指出高原湿池的水汽来源并不一定来自南海或者孟加拉湾, 并提出高原西南部水汽通道的重要性。江吉喜和范梅珠(2002)认为在雅鲁

收稿日期: 2014-07-01; 定稿日期: 2014-12-10

资助项目: 国家自然科学基金项目(41201072); 江苏特聘教授项目(R2013T07); 江苏省杰出青年基金项目(BK20140047); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 林厚博(1989–), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生, 主要从事气候变化与极端天气研究. E-mail: linhoubo@gmail.com

通讯作者: 游庆龙. E-mail: qinglong.you@nuist.edu.cn

藏布江上游和在甘孜理塘一带有2个湿中心,南北干湿分界线大体在33°N附近。梁宏等(2006a, 2006b)综合了NCEP/NCAR再分析资料、台站资料和GPS站的大气总水汽量观测资料,发现高原总水汽量存在与高原水汽输送路径关系密切的东南部、西南部和西北部3个大气水汽总量高值中心。占瑞芬等(2008)则通过高原地区大气红外探测器(AIRS)资料,发现夏季高原对流层上层水汽主要存在3类空间分布型,即全区一致型、高原东西偶极型和南北带状偶极型。周长艳等(2009)利用欧洲中心月平均再分析资料讨论了高原东部及邻近地区空中水汽的气候变化特征,发现1958—2001年该区年大气可降水量总体呈减少趋势,总水汽收入也呈减少趋势,伴随东亚夏季风的减弱,夏季风携带的南方水汽在高原东部及邻近地区扩展强度的减弱是整个区域水汽收入减少的主要原因。

高原及附近地区在水汽输送中起着重要的作用。因此,对其水汽输送的研究是值得开展的。目前此类研究较多讨论的是大气可降水量(蔡英等, 2004; 张少波等, 2015)、单层水汽输送通量(郑新江等, 1997; 陶诗言等, 2000; 许健民等, 1996),而使用从地表开始向上垂直积分的长时段水汽输送资料来研究高原附近地区水汽输送研究相对较少(周长艳等, 2005)。该方法可以综合体现深厚的气层中流场和湿度场,从而清晰显示出大尺度的环流系统和具有明显水汽输送特性的低空越赤道气流(周军等, 1998)。因此,本文通过计算垂直积分的水汽通量,从而分析高原及附近地区大尺度水汽输送空间配置的特征,并讨论不同水汽通道对高原降水的影响,这对认识高原水资源分布和利用具有重要的意义。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料选取

降水资料来自中国气象局气候研究开放实验室的基于2400余个中国地面气象台站观测资料,通过“距平逼近”方法插值建立的一套1961—2010年0.5°×0.5°经纬度分辨率的格点化数据集(吴佳和高学杰, 2013; Xu et al, 2009),再根据该格点资料选取74.75°E—104.25°E、26.75°N—40.25°N作为所研究高原的范围。结合欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的ERA-Interim再分析资料(Dee et al, 2011)1979—2010年1°×1°的月平均风场、比湿场以及地面气压场,对高原及附

近整层垂直积分的水汽输送特征进行研究。

### 2.2 方法简介

整层大气水汽输送通量公式为

$$Q = -\frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} \vec{V} q dp, \quad (1)$$

式(1)包括纬向和经向的水汽输送通量,即:

$$Q_{\text{纬向}} = -\frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} u q dp, \quad (2)$$

$$Q_{\text{经向}} = -\frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} v q dp, \quad (3)$$

其中: $\vec{V}$ 为各层大气的风速矢量; $q$ 为各层大气的比湿; $P_t$ 、 $P_s$ 分别为上界气压(取300 hPa)和地面气压; $g$ 为重力加速度。

## 3 高原夏季降水空间分布

从1979—2010年高原地区夏季降水空间分布(图1a)来看,高原地区降水呈现由其东南部向西北部递减的分布。降水量的最大值出现在高原东南部的三江源地区,超过210 mm;林芝以南雅鲁藏布江大拐弯区域、拉萨市以南和祁连山南坡为夏季多雨中心,其中心数值分别在180 mm、150 mm、120 mm以上。夏季降水最少的地区出现在高原北部柴达木盆地和西北部阿里喀喇昆仑山地

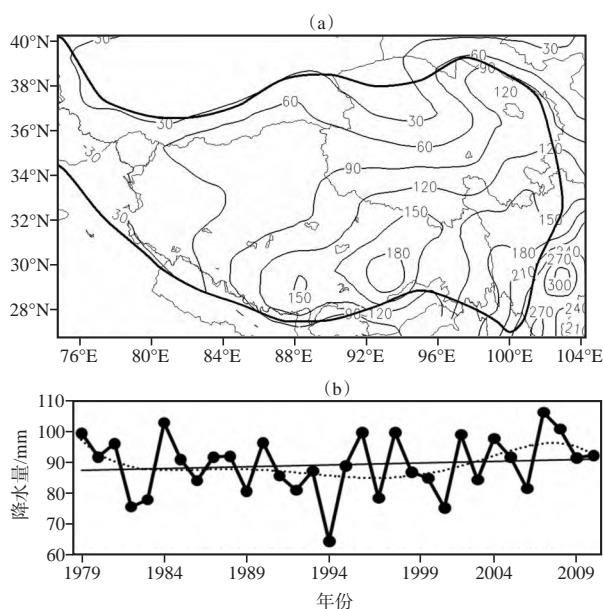


图1 1979—2010年高原夏季平均降水量(细等值线, 单位: mm)空间分布(a, 粗实线为3000 m高原轮廓线)及其逐年变化(b)

Fig. 1 Spatial distribution of average summer precipitation (a, thin contour is isohyet (unit: mm), thick line is 3000 m height line) and its change (b) over the Qinghai-Xizang Plateau during 1979—2010

区, 降水量不足 30 mm, 是高原夏季最干的地方。1979—2010 年夏季高原全区降水的变化(图 1b)呈弱增长趋势, 降水变率为  $1.18 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。高原地区夏季降水的年代际变化具有波动形式: 20 世纪 70 年代末至 80 年代初, 降水呈减少趋势; 之后至 80 年代末, 降水趋于稳定, 变化的幅度较小; 80 年代至 90 年代后期降水又一次呈现减少趋势, 在 1994 年降水的数值达到最小值, 这是否与 1994 年中国大范围干旱(詹维泰和乔旭霞, 1994)有联系, 还需进一步研究; 进入 21 世纪之后降水开始出现增加的趋势, 并在随后出现减少的变化。

#### 4 整层水汽输送对高原降水的影响

对于高原降水的影响因子, 不少学者也做过相关研究。鲁春霞等(2007)发现高原降水并非随海拔上升不断增大, 降水的海拔梯度效应在很大程度上受地形及水汽来源的共同作用而变得复杂; 刘雅勤(2007)认为高原冬、春季植被改善后, 通过影响地表反照率、改变地表温度、植被蒸散作用引起大气环流特别是季风环流发生变化, 最终导致高原夏季降水异常; 同时, 高原地区大气可降水量的分布和变化(蔡英等, 2004; 周长艳等, 2005)、高原水汽输送和分布(江吉喜等, 2002; 冯蕾和魏凤英, 2008)也是影响高原降水的重要因子。下面将着重分析高原周围整层水汽输送情况, 试图找出影响高原夏季降水的水汽通道及各水汽通道影响的不同区域。

##### 4.1 夏季平均水汽输送情况

利用 ERA-Interim 再分析资料计算了高原周围多年平均水汽输送情况(图 2)。夏季整层水汽输送以纬向输送为主, 源自南半球的强东风水汽输送越过赤道到达北半球低纬地区并转向形成一条强大的偏西风水汽输送大值带, 该水汽输送带经过阿拉伯海得到进一步加强, 而在越过印度地区时稍有减弱, 随后进入孟加拉湾, 其水汽量得到了补充。由于受到陆地地形的影响, 在孟加拉湾北部出现一小支水汽输送带向北影响高原, 剩下输送带主体经过老挝、越南等地区, 在南海东北部受到来自西太平洋副热带高压东南风水汽输送的影响, 转向成西南水汽输送带并穿过中国西南部、华南、华东等地区, 最后到达西北太平洋地区。

在中纬地区, 西风带处于  $30^\circ\text{N}$  以北, 在里海

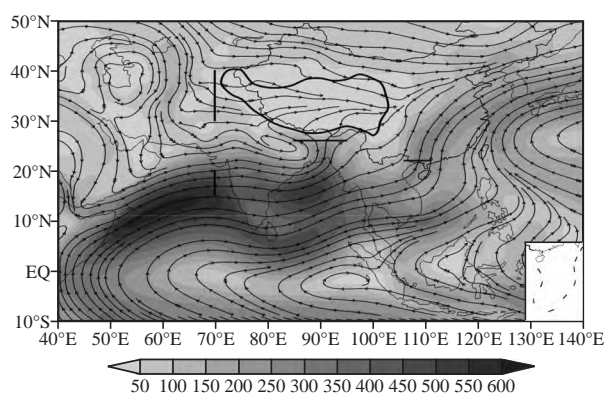


图 2 1979—2010 年高原周围夏季平均水汽通量流场(流线和阴影区, 单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 和所选的 4 条水汽通道的位置分布(短粗线)

Fig. 2 Averaged moisture transport vectors (stream and the shaded, unit:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) in summer around the Qinghai-Xizang Plateau for the period 1979—2010 and the distribution of four moisture paths (thick short line)

以东地区西风气流携带水汽分成两支, 一支向南输送至阿拉伯海北部, 受到低纬强的偏西风水汽输送影响, 向东转向携带水汽穿过青藏高原地区; 另一支穿过高原以北地区, 在高原东北部汇入低纬的水汽输送带。

##### 4.2 影响高原降水的水汽通道

从 1979—2010 年夏季水汽输送通量的均方差分布(图 3)可看出, 水汽输送均方差大值区出现在南海以及日本地区, 达  $120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  以上; 其次是孟加拉湾、我国东部以及阿拉伯海地区。这些地区水汽输送的年变化较大, 存在比较明显的旱涝之分。而高原上水汽输送均方差相对较小。

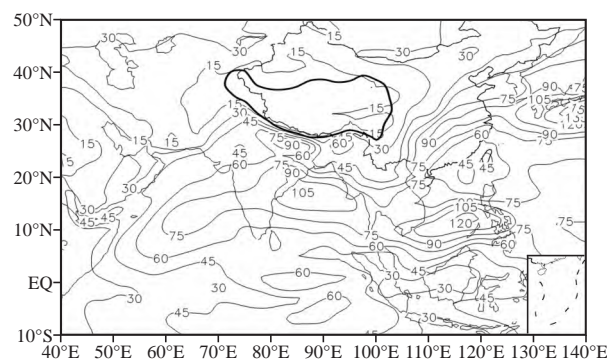


图 3 1979—2010 年夏季水汽输送通量的均方差分布(单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 3 The mean square error of averaged moisture transport vectors in summer during 1979—2010.

Unit:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$



由1979—2010年高原夏季降水与整层水汽通量的相关系数分布(图4a)可知,呈现显著正相关(通过0.05显著性水平检验)主要位于里海以东、高原南部孟加拉湾以北地区和老挝地区;负相关区位于中国东北地区、阿拉伯海东部—印度中部—孟加拉湾西部、泰国南侧印度尼西亚西北侧以及菲律宾南部和其东北部的西太平洋洋面上。

纬向水汽输送与高原夏季降水的关系(图4b),在里海东部的显著正相关区域变为弱的负相关;位于中国东北部的显著负相关位置和范围基本不变,高原南部和老挝地区的显著正相关的区

域扩大并延伸至阿拉伯海东北部和菲律宾东北部。泰国南侧印度尼西亚西北侧和菲律宾南部以及其东北部的显著负相关区域相连接。在经向水汽输送与降水的相关性(图4c)中,沿里海以东—阿拉伯海北部—阿拉伯海东南部—印度—印尼西侧—印尼—菲律宾东南侧地区呈现显著正相关和显著负相关相间的分布。

结合水汽通道与夏季大尺度水汽输送流线场(图2)相垂直以及水汽通道尽量靠近大陆等原则(李永华等,2010;周晓霞等,2008),确定了4条与高原夏季降水相联系的水汽通道(图2、表1):

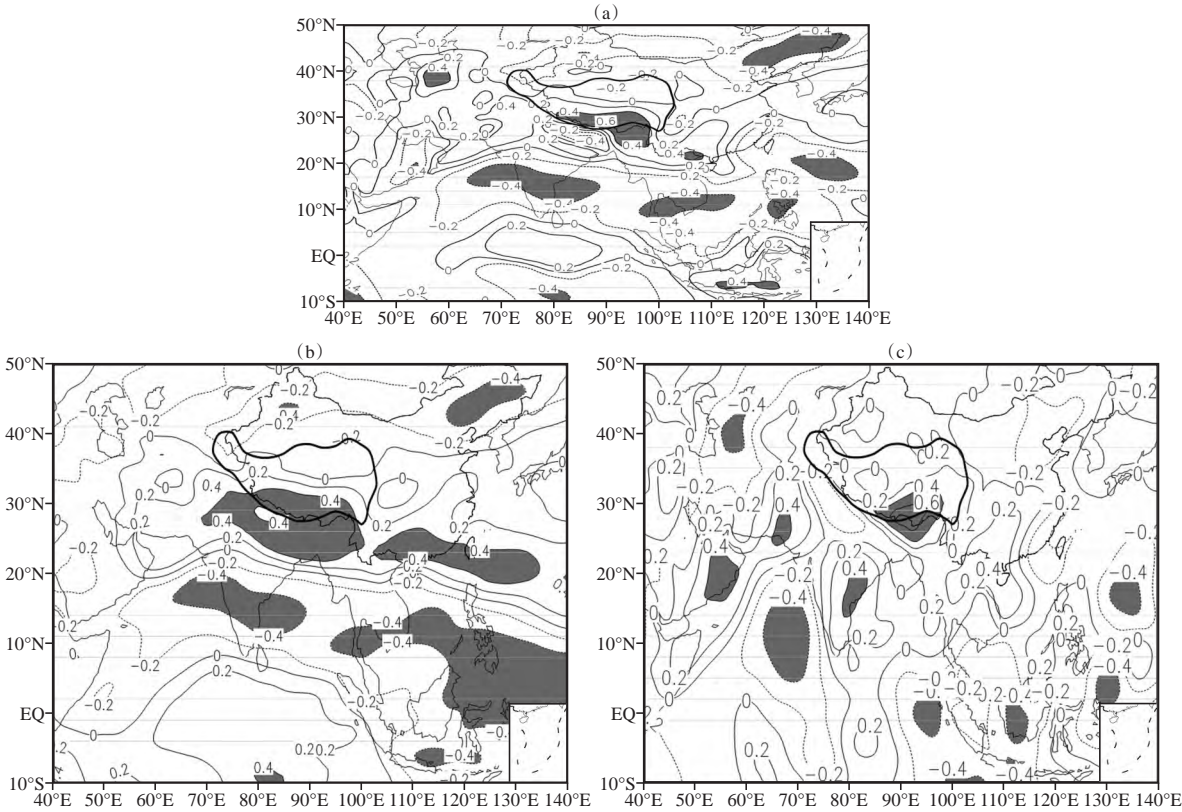


图4 1979—2010年高原夏季降水与水汽输通量场的相关分布  
(a) 矢量大小, (b) 纬向, (c) 经向, 阴影区表示通过0.05显著性水平检验

Fig. 4 Distribution of the correlation coefficients between the vapor transport and the precipitation in summer over the Qinghai-Xizang Plateau from 1979 to 2010. (a) magnitude of vectors, (b) zonal, (c) meridional.

The shaded areas have passed the confidence level at 0.05

表1 各水汽通道相关信息

Table 1 The relevant information of each moisture path

水汽通道	位置	平均值/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	均方差/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	与降水相关系数
西风带通道	30°N-40°N, 70°E	44.97	9.40	0.34
阿拉伯海通道	15°N-20°N, 70°E	498.66	66.06	-0.49*
孟加拉湾北部通道	26°N, 85°E-95°E	127.80	75.15	0.47*
南海通道	22°N, 106°E-111°E	49.99	59.82	0.46*

注: \*表示通过0.05显著性水平检验

西风带通道(纬向)、阿拉伯海通道(纬向)、孟加拉湾北部通道(经向)、南海通道(经向)。这些水汽通道分别表征了源自西风带、阿拉伯海、孟加拉湾以及南海的水汽对高原的输送。从各通道对水汽输送变化的均方差来看,阿拉伯海、孟加拉湾北部、南海通道的均方差较大,表明这3条低纬通道水汽输送的年际变化较大,相比之下西风带通道的水汽输送变化较小,输送相对稳定。

观察各水汽通道之间相关系数(表2)发现:西风带水汽通道与其他通道的相关系数较小,即其受其他通道的影响较弱,是相对独立的水汽通道。阿拉伯海水汽通道与其他水汽通道都呈负相关关系,其中与孟加拉湾水汽输送通道相关关系最显著,相关系数达到-0.65,其原因不难理解:阿拉伯海的水汽通道所表征的是水汽的纬向输送,当水汽通道强度加强时,位于该通道东北侧

的孟加拉湾北部通道和南海的经向水汽输送强度势必减弱;而西风带水汽向南的那支输送带受到阿拉伯海水汽通道加强的影响,向南输送的距离减少,从而使得到达高原西侧的水汽减少,即西风带水汽通道的强度减弱。反之,其他通道强度加强。

从4条变化曲线的多阶拟合曲线可以看出,西风带通道(图5a)、孟加拉湾北部通道(图5c)、南海通道(图5d)和阿拉伯海通道(图5b)强度变化趋势近似相反,这也验证了前面对于这4条通道两两相关性的解释。由此看来,阿拉伯海水汽通道强度对高原夏季降水的影响是通过影响其他3条水汽通道来间接作用于高原夏季降水。

比较高原夏季降水(图1b)与孟加拉湾水汽通道强度变化曲线(图5c)表明,两者变化的较大、较小值年份有很好的对应,如较大值年:1979、

表 2 各水汽通道之间相关系数

Table 2 The correlation coefficients among each moisture path

水汽通道	西风带通道	阿拉伯海通道	孟加拉湾北部通道	南海通道
西风带通道	1.00	-0.20	0.19	0.33
阿拉伯海通道	-	1.00	-0.65*	-0.31
孟加拉湾北部通道	-	-	1.00	0.49*
南海通道	-	-	-	1.00

注: \* 表示通过0.05显著性水平检验

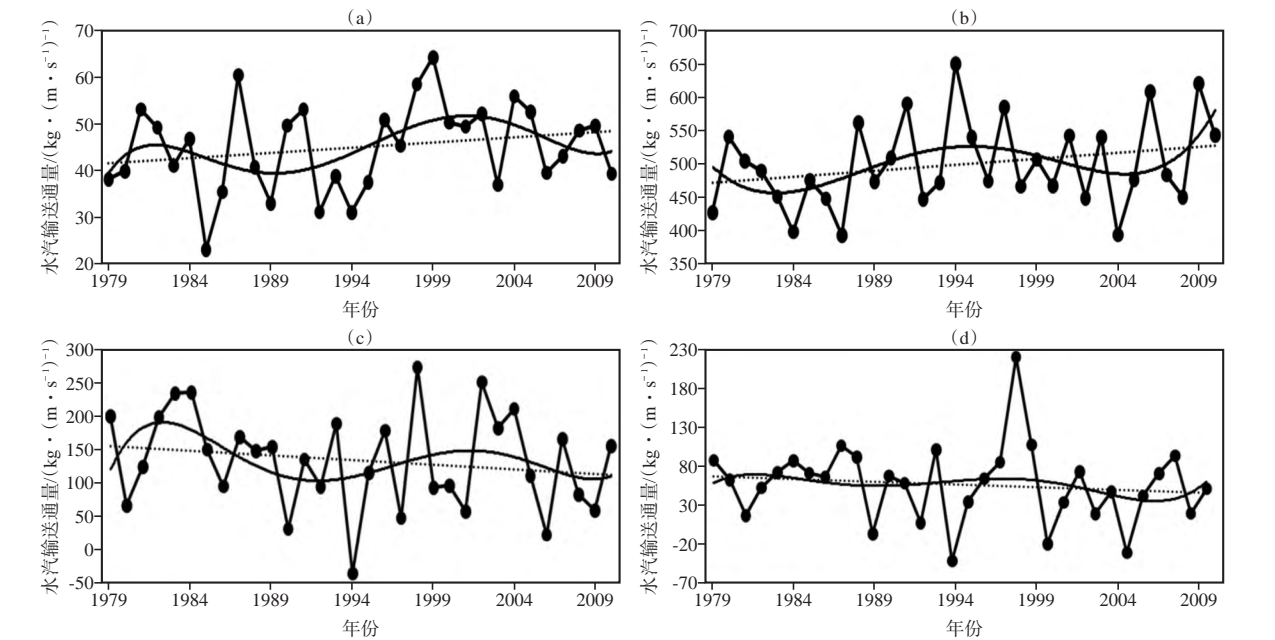


图5 1979—2010年西风带通道(a)、阿拉伯海通道(b)、孟加拉湾北部通道(c)及南海通道(d)水汽输送通量变化

Fig. 5 Intensity changes of the vapor transport paths about subpolar westerlies (a), Arabian sea (b), the northern side of Bay of Bengal (c), South China Sea (d) from 1979 to 2010

1984、1996、1998、2002、2004、2007年,较小值年:1994、2001、2006年。特别当西风带通道、孟加拉湾北部通道、南海通道水汽输送强度都处于最小值年(1994年)时,高原降水量也为极低值年。从降水量与通道强度的线性变化趋势来看,降水量和西风带通道强度呈现略微增长的趋势,而孟加拉湾北部通道和南海通道则呈现减弱的趋势,这说明高原全区降水是受各条主要水汽通道共同影响的结果。

## 5 各水汽通道对夏季降水的影响

为了进一步研究这些水汽通道对高原具体区域夏季降水的影响,利用各条水汽通道的强度与高原全区降水分布进行了相关分析。

对于西风带水汽通道(图6a)来说,其强度与

高原夏季全区降水的相关性没有通过0.05显著性水平检验,但在高原西北部形成一条西北—东南走向的正相关系数高值带,相关系数达0.3以上。阿拉伯海水汽通道(图6b)在高原中南部偏西的地方表现出显著的负相关。孟加拉湾北部水汽通道强度与降水(图6c)的显著正相关性分布于高原中南部的偏东地区;而在狮泉河地区呈现显著的负相关分布。南海通道(图6d)存在两个显著正相关分布区域,一个位于那曲、林芝、昌都、玉树等地区;另一个位于金沙江东侧至成都西侧地区。

比较图6并结合之前分析,当阿拉伯海水汽通道强度减弱时,孟加拉湾水汽通道和南海水汽通道响应加强,两者的经向和偏西方向的水汽输送加强,向北输送至高原的中南偏西部,使得该地区夏季降水增多,表现为图6b中的显著负相关分布。

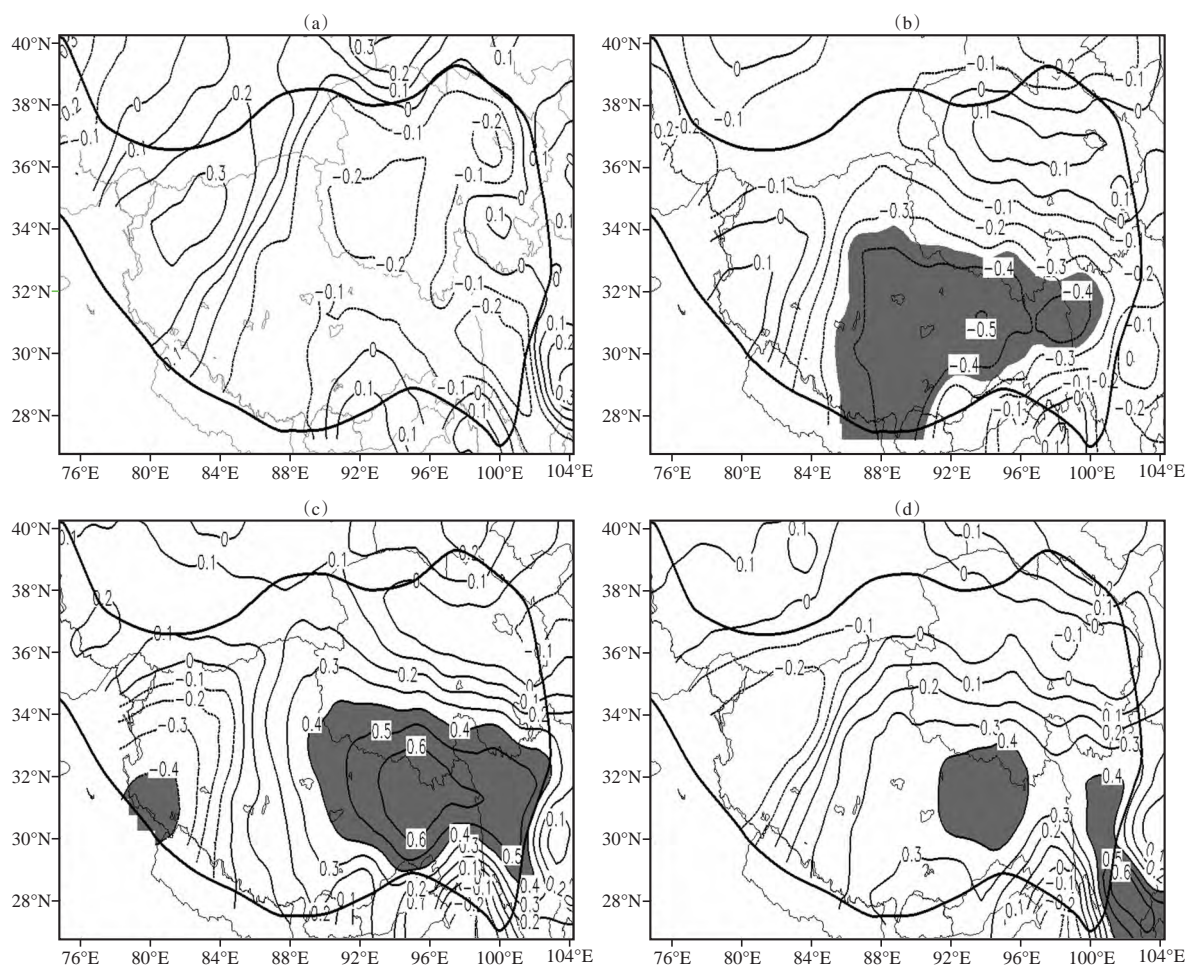


图6 1979—2010年西风带通道(a)、阿拉伯海通道(b)、孟加拉湾北部通道(c)及南海通道(d)水汽强度与高原夏季降水量的相关分布

阴影区表示通过0.05显著性水平检验

Fig. 6 The correlation distribution of intensity of each moisture path (a is subpolar westerlies, b is Arabian sea, c is the northern side of Bay of Bengal, d is South China Sea) and the precipitation in summer over the Qinghai-Xizang Plateau from 1979 to 2010. The shaded areas have passed the confidence level at 0.05



## 6 结论与讨论

(1) 高原夏季降水存在空间差异, 降水量较大值位于高原的东南部, 较小值区位于高原西北部和北部柴达木盆地。夏季降水年际变化呈现弱增长趋势, 变化率为 $1.18 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。

(2) 夏季高原周围水汽输送的纬向分量较大, 以低纬偏西风水汽输送为主要水汽带。其中从水汽输送的气候平均上看, 影响到高原夏季降水的水汽来自阿拉伯海、孟加拉湾、南海以及由西风带所携带的水汽。

(3) 通过分析水汽输送通量的均方差和与高原夏季降水的相关系数, 选取4条与高原夏季降水相联系的水汽输送通道: 西风带通道、阿拉伯海通道、孟加拉湾北部通道和南海通道。其中阿拉伯海水汽通道的强度最强, 通过先影响其他3个水汽通道, 其次间接影响高原夏季降水。

(4) 各通道对高原夏季降水的影响区域并不相同: 西风带通道的影响较弱, 主要影响高原西北部从狮泉河至塔里木盆地南侧地区; 孟加拉湾北部通道主要影响高原中南偏东部地区; 南海通道则主要对高原东南部以及中南部那曲、林芝、昌都、玉树等地区有影响; 而阿拉伯海水汽通道则是通过调节孟加拉湾北部通道和南海通道的向西水汽输送分量来影响高原中南偏西部地区的夏季降水。

本文对影响高原夏季降水的水汽输送通道进行分析, 找到与高原夏季降水有较好相关性的4个通道。本文只考虑了水汽这一种因素, 定性的分析了几条水气通道对于高原夏季降水分布的影响, 没有综合考虑地形、大尺度系统(大尺度环流、高低压等)、高原自身植被覆盖(张少波等, 2013)等影响因素。若要进一步了解水汽输送影响的物理机制还需要做定量分析, 为提高高原地区夏季降水的气候预测水平提供更多的线索和依据。

### 参考文献:

- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2011, 137 (656): 553 – 597.
- Xu X D, Shi X Y, Wang Y Q, et al. 2008. Data analysis and numerical simulation of moisture source and transport associated with summer precipitation in the Yangtze River Valley over China [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 100(1 – 4): 217 – 231.
- Xu Ying, Gao Xuejie, Shen Yan, et al. 2009. A daily temperature

dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. *Adv Atmos Sci*, 26(4): 763 – 772.

- 蔡英, 钱正安, 吴统文, 等. 2004. 青藏高原及周围地区大气可降水量的分布、变化与各地多变的降水气候 [J]. *高原气象*, 23 (1): 1 – 10. Cai Ying, Qian Zhangan, Wu Tongwen, et al. 2004. Distribution, changes of atmospheric precipitable water over Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings and their changeable precipitation climate [J]. *Plateau Meteor*, 23(1): 1-10.
- 丁一汇, 胡国权. 2003. 1998年中国大洪水时期的水汽收支研究 [J]. *气象学报*, 61(2): 129 – 145. Ding Yihui, Hu Guoquan. 2003. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods [J]. *Acta Meteor Sinica*, 61 (2): 129 – 145.
- 冯蕾, 魏凤英. 2008. 青藏高原夏季降水的区域特征及其与周边地区水汽条件的配置 [J]. *高原气象*, 27(3): 491 – 499. Feng Lei, Wei Fengying. 2008. Regional characteristics of summer precipitation on Tibetan Plateau and its water vapor feature in neighboring areas [J]. *Plateau Meteor*, 27(3): 491 – 499.
- 过霁冰, 徐祥德, 施晓晖, 等. 2012. 青藏高原冬季积雪关键区视热源特征与中国西南春旱的联系 [J]. *高原气象*, 31(4): 900 – 909. Guo Jibing, Xu Xiangde, Shi Xiaohui, et al. 2012. Characteristics of winter apparent heat source in the key area of snow cover on Qinghai-Xizang Plateau and spring drought in Southwest China [J]. *Plateau Meteor*, 31(4): 900 – 909.
- 江吉喜, 范梅珠. 2002. 青藏高原夏季TBB场与水汽分布关系的初步研究 [J]. *高原气象*, 21(1): 20 – 24. Jiang Jixi, Fan Meizhu. 2002. A primary study of the relationship between TBB fields and water vapor distribution over Qinghai-Xizang Plateau in summer [J]. *Plateau Meteor*, 21(1): 20 – 24.
- 李江林, 李照荣, 杨建才, 等. 2012. 近10年夏季西北地区水汽空间分布和时间变化分析 [J]. *高原气象*, 31(6): 1574 – 1581. Li Jianglin, Li Zhaorong, Yang Jiancai, et al. 2012. Analyses on spatial distribution and temporal variation of atmosphere water vapor over Northwest China in summer of later 10 years [J]. *Plateau Meteor*, 31(6): 1574 – 1581.
- 李江萍, 杜亮亮, 张宇, 等. 2012. 玛曲地区夏季强降水的环流分型及水汽轨迹分析 [J]. *高原气象*, 31(6): 1582 – 1590. Li Jiangping, Du Liangliang, Zhang Yu, et al. 2012. Analysis on circulation pattern and water vapor source of heavy precipitation in Maqu region [J]. *Plateau Meteor*, 31(6): 1582 – 1590.
- 李永华, 徐海明, 高阳华, 等. 2010. 西南地区东部夏季旱涝的水汽输送特征 [J]. *气象学报*, 68(6): 932 – 943. Li Yonghua, Xu Haiming, Gao Yanghua, et al. 2010. The characteristics of moisture transport associated with drought/flood in summer over the east of the Southwestern China [J]. *Acta Meteor Sinica*, 68 (6): 932 – 943.
- 梁宏, 刘晶森, 李世奎. 2006a. 青藏高原及周边地区大气水汽资源分布和季节变化特征分析 [J]. *自然资源学报*, 21(4): 526 – 534. Liang Hong, Liu Jingmiao, Zhang Jiancheng, et al. 2006a. Analysis of precipitable water vapor source distribution and its seasonal variation characteristics over Tibetan Plateau and its surroundings [J]. *Journal of Natural Resources*, 21 (4): 526 – 534.
- 梁宏, 刘晶森, 章建成, 等. 2006b. 青藏高原大气总水汽量的反演

- 研究[J]. 高原气象, 25(6): 1055–1063. Liang Hong, Liu Jingmiao, Zhang Jiancheng, et al. 2006b. Research on retrieval of the amount of atmospheric water vapor over Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 25(6): 1055–1063.
- 刘雅勤, 范广洲, 周定文, 等. 2007. 青藏高原冬、春植被归一化指数变化特征及其与高原夏季降水的联系[J]. 气象学报, 65(6): 959–967. Liu Yaqin, Fan Guangyi, Zhou Dingwen, et al. 2007. Variability of NDVI in winter and spring on the Tibetan Plateau and their relationship with summer precipitation[J]. Acta Meteor Sinica, 65(6): 959–967.
- 鲁春霞, 王菱, 谢高地, 等. 2007. 青藏高原降水的梯度效应及其空间分布模拟[J]. 山地学报, 25(6): 655–663. Lu Chunxia, Wang Ling, Xie Gaodi, et al. 2007. Altitude effect of precipitation and spatial distribution of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. J Mountain Science, 25(6): 655–663.
- 莫申国, 张百平, 程维明, 等. 2004. 青藏高原的主要环境效应[J]. 地理科学进展, 23(2): 88–96. Mo Shenguo, Zhang Baiping, Cheng Weiming, et al. 2004. Major environmental effects of the Tibetan Plateau[J]. Progress in Geography, 23(2): 88–96.
- 施晓晖, 徐祥德, 程兴宏. 2009. 2008年雪灾过程高原上游关键区水汽输送机制及其前兆性“强信号”特征[J]. 气象学报, 67(3): 478–487. Shi Xiaohui, Xu Xiangde, Cheng Xinghong. 2009. Premonitory of water vapor transport in the upstream key region over the Tibetan Plateau during the 2008 snowstorm disaster in South China[J]. Acta Meteor Sinica, 67(3): 478–488.
- 陶诗言, 陈联寿, 徐祥德, 等. 2000. 第二次青藏高原大气科学试验理论研究进展(二)[M]. 北京: 气象出版社, 106–112. Tao Shiyang, Chen Lianshou, Xu Xiangde, et al. 2000. Advances in Theoretical Research of Second Atmospheric Experiment over Tibetan Plateau (Vols. 2)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 106–112.
- 田红瑛, 田文寿, 雒佳丽, 等. 2014. 青藏高原地区上对流层一下平流层区域水汽分布和变化特征[J]. 高原气象, 33(1): 1–13. Tian Hongying, Tian Wenshou, Luo Jiali, et al. 2014. Characteristics of water vapor distribution and variation in upper troposphere and lower stratosphere over Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 33(1): 1–13. DOI: 10.7522/j.issn.1000–0534.2013.00074.
- 吴国雄, 毛江玉, 段安民, 等. 2004. 青藏高原影响亚洲夏季气候研究的最新进展[J]. 气象学报, 62(5): 528–540. Wu Guoxiong, Mao Jiangyu, Duan Anming, et al. 2004. Recent progress in the study on the impacts of Tibetan Plateau on Asian summer climate[J]. Acta Meteor Sinica, 62(5): 528–540.
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报, 56(4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese J Geophys, 56(4): 1102–1111.
- 许健民, 郑新江, 徐欢, 等. 1996. GMS-5水汽图象所揭示的青藏高原地区对流层上部水汽分布特征[J]. 应用气象学报, 7(2): 246–251. Xu Jianmin, Zhen Xinjiang, Xu Huan, et al. 1996. Upper tropospheric moisture distribution over the Tibetan Plateau as revealed from GMS-5 water vapor images[J]. J Appl Meteor Sci, 7(2): 246–251.
- 姚檀栋, 朱立平. 2006. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策[J]. 地球科学进展, 21(5): 459–464. Yao Tandong, Zhu Liping. 2006. The response of environmental changes on Tibetan Plateau to global changes and adaptation strategy[J]. Adv Earth Sci, 21(5): 459–464.
- 詹维泰, 乔旭霞. 1994. 1994年干旱天气气候分析[J]. 陕西气象, (6): 44–47. Zhan Weitai, Qiao Xuxia. 1994. Climate analytics of drought in 1994[J]. J Shaanxi Meteor, (6): 44–47.
- 占瑞芬, 李建平. 2008. 青藏高原地区大气红外探测器(AIRS)资料质量检验及揭示的上对流层水汽特征[J]. 大气科学, 32(2): 242–260. Zhan Ruifen, Li Jianping. 2008. Validation and characteristics of upper tropospheric water vapor over the Tibetan Plateau from AIRS satellite retrieval[J]. Chinese J Atmos Sci, 32(2): 242–260.
- 张少波, 陈玉春, 吕世华, 等. 2013. 青藏高原植被变化对中国东部夏季降水影响的模拟研究[J]. 高原气象, 32(5): 1236–1245. Zhang Shaobo, Chen Yuchun, Lü Shihua, et al. 2013. Numerical simulation of impact of vegetation in Qinghai-Xizang Plateau on summertime precipitation in eastern China[J]. Plateau Meteor, 32(5): 1236–1245. DOI: 10.7522/j.issn.1000–0534.2012.00119.
- 张少波, 吕世华, 奥银焕, 等. 2015. 基于风场季节变率的高原季风指数的定义及应用[J]. 高原气象, 34(4): 881–889. Zhang Shaobo, Lü Shihua, Ao Yinhuang, et al. 2015. A new plateau monsoon index based on wind dynamical normalized seasonality and its application[J]. Plateau Meteor, 34(4): 881–889. DOI: 10.7522/j.issn.1000–0534.2015.00067.
- 郑度, 林振耀, 张雪芹. 2002. 青藏高原与全球环境变化研究进展[J]. 地学前缘, 9(1): 95–102. Zheng Du, Lin Zhenyao, Zhang Xueqin. 2002. Progress in studies of Tibetan Plateau and global environmental change[J]. Earth Science Frontiers, 9(1): 95–102.
- 郑新江, 许健民, 李献洲. 1997. 夏季青藏高原水汽输送特征[J]. 高原气象, 16(3): 274–281. Zheng Xinjiang, Xu Jianmin, Li Xianzhou. 1997. Characteristics of water vapor transfer in upper troposphere over Qinghai-Xizang Plateau in summer [J]. Plateau Meteor, 16(3): 274–281.
- 周军, 薛宇峰, 刘宣飞. 1998. 1994年8月亚洲季风区水汽的源汇分布和输送[J]. 热带气象学报, 14(1): 92–97. Zhou Jun, Xue Yufeng, Liu Xuanfei. 1998. The source/sink distribution of water vapor with its transfer in Asian monsoon region in August, 1994[J]. J Trop Meteor, 14(1): 92–97.
- 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 2008. 影响华北汛期降水的水汽输送过程[J]. 大气科学, 32(2): 345–357. Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. 2008. Features of moisture transport associated with the precipitation over north China during July-August [J]. Chinese J Atmos Sci, 32(2): 345–357.
- 周玉淑, 高守亭, 邓国. 2005. 江淮流域2003年强梅雨期的水汽输送特征分析[J]. 大气科学, 29(2): 195–204. Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. 2005. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River Basins in 2003[J]. Chinese J Atmos Sci, 29(2): 195–204.



周长艳, 蒋兴文, 李跃清, 等. 2009. 高原东部及邻近地区空中水汽资源的气候变化特征[J]. 高原气象, 28(1): 55–63.

Zhou Changyan, Jiang Xingwen, Li Yueqing, et al. 2009. Features of climate change of water vapor resource over eastern region of the Tibetan Plateau and its surroundings[J]. Plateau Meteor, 28(1): 55–63.

周长艳, 李跃清, 李薇, 等. 2005. 青藏高原东部及邻近地区水汽输送的气候特征[J]. 高原气象, 24(6): 880–888. Zhou Changyan, Li Yueqing, Li Wei, et al. 2005. Climatological

characteristics of water vapor transport over eastern part of Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings[J]. Plateau Meteor, 24(6): 880–888.

周长艳, 唐信英, 李跃清. 2012. 青藏高原及周边地区水汽、水汽输送相关研究综述[J]. 高原山地气象研究, 32(3): 76–83.

Zhou Changyan, Tang Xinying, Li Yueqing, et al. 2012. Overview of the research on the water vapor and water vapor transport over the Tibetan Plateau and its surroundings[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 32(3): 76–83.

## Water Vapor Transportation and Its Influences on Precipitation in Summer over Qinghai-Xizang Plateau and Its Surroundings

LIN Houbo<sup>1, 2</sup>, YOU Qinglong<sup>1, 2, 3</sup>, JIAO Yang<sup>1, 2</sup>, MIN Jinzhong<sup>1, 3</sup>

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Institute of Climate Change and Evaluation between China and UK, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

3. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Based on the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Interim Reanalysis (ERA-Interim hereafter) from 1979 to 2010, the average water vapor transport flux distribution in summer over the Qinghai-Xizang Plateau (QXP hereafter) is calculated and studied. Combined with the high resolution observational data of the daily precipitation over the QXP, four moisture paths influencing the precipitation over the QXP are found, which are defined as the paths of westerly, Arabian Sea, the northern side of Bay of Bengal and South China Sea, respectively. Moreover, the area and function of these paths influencing precipitation process over the QXP have been analyzed and addressed. The results show that the years of both strong (1979, 1984, 1996, 1998, 2002, 2004, 2007) and weak (1994, 2001, 2006) precipitation over the QXP are consistent with the results reflected from path of the northern side of Bay of Bengal. Compared with the rest paths, the influence of the westerly path is weakest, which only has an role in the northwest QXP from Shiquanhe to the south of Tarim Basin; The northern side of Bay of Bengal path has an effect in the central-southeastern QXP; the path of the South China Sea dominates the southeastern and central-south of QXP such as Naqu, Linzhi, Changdu, Yushu and other regions; Arabian Sea path has negative correlations with the rest three paths, especially with the northern side of Bay of Bengal path ( $R = -0.65$ ,  $P < 0.05$ ). Furthermore, Arabian Sea path indirectly modulates the central-southwestern QXP by adjusting the intensity of both the northern side of Bay of Bengal path and South China Sea path. These results suggest that both the water vapor transport path and pattern of precipitation over the QXP is coherently connected.

**Key words:** The Qinghai-Xizang Plateau; Water vapor transport flux and paths; Precipitation