

林志强,唐叔乙,何晓红,等. 西藏高原汛期水汽输送特征与降水异常[J]. 气象,2011,37(8):984-990.

西藏高原汛期水汽输送特征与降水异常^{*}

林志强 唐叔乙 何晓红 德 庆 文胜军

西藏自治区气象台,拉萨 850000

提 要: 利用 1979—2006 年 NCEP/NCAR 再分析资料计算垂直积分的整层水汽输送通量及水汽通量散度,分析西藏高原汛期 5—9 月水汽输送特征。结果表明:西藏高原汛期主要有两条水汽输送带,印度季风输送带和中纬度西风输送带;印度季风对汛期水汽输送起着决定性的作用,决定高原汛期开始时间和雨带的推进,水汽通量向北输送达到 $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,该经度上的测站将从南到北逐渐进入汛期;在水汽的空间分布上,高原南部边缘的 3 个水汽输送散度场中心恰好对应着高原的水汽输送通道,其形成与西藏高原的地形直接相关;西藏高原汛期降水主要可以分为 3 种雨型:全区型、东西型和南北型,并分别对应着不同的水汽输送异常:全区型时索马里越赤道急流水汽输送异常较强,高原区为水汽辐合区;东西型时西藏东南部为东北向输送异常,东南部水汽供应较常年偏弱;南北型时东南部水汽输送充足而错那以西地区水汽输送不足。

关键词: 水汽输送, 西藏高原, 汛期, 降水异常

Features of Water Vapor Transfer in Rainy Season and Their Relations to Rainfall Anomalies over Tibetan Plateau

LIN Zhiqiang TANG Shuyi HE Xiaohong DE Qing WEN Shengjun

Meteorological Observatory of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000

Abstract: The features of water vapor transfer in rainy season (May to September) are studied based on the NCEP/NCAR reanalysis data that are used to compute the vertically integrated water vapor flux and water vapor flux divergence from 1979 to 2006. The results have shown that the main features of the water vapor transfer over the Tibetan Plateau are one monsoon, two water vapor transfer channels and three important water vapor sources. The India summer monsoon which dominates the start time of plateau's rainy season and the motion rainfall bands, plays a decisive role in the Tibetan Plateau's rainy season water vapor transfer. The weather stations near the longitude that northern water vapor flux reached $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ would gradually come into the rainy season. The three centers of water vapor transfer divergence field in the southern border of the Tibetan Plateau are just corresponding to the plateau's water transfer channel, and its formation is related to the terrain of Tibetan Plateau. Rainfall anomalies in Tibetan rainy season can be mainly divided into three raining patterns, they are Whole Region Pattern, East-West Pattern and North-South Pattern. These patterns are related to different water vapor transfer anomalies. For example, when it is in the whole Region Pattern the anomaly of the Somali cross-equatorial flow zone is stronger.

Key words: water vapor transfer, Tibetan Plateau, rainy season, rainfall anomaly

* 国家自然科学基金(40865008)资助

2010 年 8 月 3 日收稿; 2011 年 3 月 2 日收修定稿

第一作者: 林志强,主要从事高原天气预报工作. Email: Linzq82@gmail.com

引 言

水汽是形成降水的最重要条件,学者对不同地区的水汽输送及其与旱涝的关系已经进行了很多研究^[1-6],青藏高原作为我国乃至东亚地区天气系统的上游,对东亚大气环流、气候变化乃至灾害性天气的形成和发展都有重要影响,其水汽输送特征尤其受到关注:苗秋菊等^[7]采用整层水汽输送通量诊断方法讨论了高原周边多雨中心的水汽输送结构;周长艳等^[8]利用 1980—1997 年垂直积分的整层水汽输送通量资料分析了青藏高原东部及其邻近地区水汽输送的气候特征;卓嘎等^[9]利用青藏高原夏季降水资料以及 NCEP 再分析资料分析高原上夏季降水与邻近地区水汽输送的相互关系,发现高原夏季降水与春季的水汽分布关系比降水与同期的关系更为密切;郑新江等^[10]使用 GMS-5 水汽图,综合分析 1995 年 6 月中旬至 7 月上旬青藏高原上空的水汽输送过程。

青藏高原的水汽输送状况是气象界研究的热点,不同时代的气象工作者使用不同的资料和方法分析了高原的水汽输送通道^[9-13],但对西藏高原的水汽输送与西藏降水的关系分析较少。本文利用 NCEP/NCAR 再分析资料,分析西藏高原汛期的整层水汽输送通量及水汽通量散度,试图揭示西藏高原汛期的水汽输送特征,描述出高原的主要水汽输送带及高原边界的水汽收支状况,并使用 EOF 分析方法分析汛期降水异常及其与水汽输送的关系,增加对西藏高原汛期水汽来源和输送的了解,为高原天气和气候分析预报提供着眼点。

1 资料和方法

本文使用的资料有:(1)1979—2006 年共 28 年 NCEP/NCAR 再分析资料 2.5°×2.5°的全球逐日平均风场、水汽场和地面气压场;(2)西藏高原 32 个气象观测站 1979—2006 年的 5—9 月逐日降水观测值,气象观测站的分布如图 1 所示。

在 p 坐标系中,单位时间通过单位面积,高为整层大气柱的总的水汽通量经向、纬向分量可用下式求得:

$$Q_u = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q u dp, \quad Q_v = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q v dp$$

式中, Q_u, Q_v 单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, p_s 为地面气压, p_t 为气柱顶,取为 300 hPa, q 为比湿, g 为重力加速度。整层积分时地形以下气柱的值不做质量累加。

水汽通量散度为

$$D = \frac{\partial Q_u}{\alpha \cos \varphi \partial \lambda} + \frac{\partial Q_v}{\alpha \partial \varphi}$$

式中, D 的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, α 为地球半径, φ 为纬度, λ 为经度。

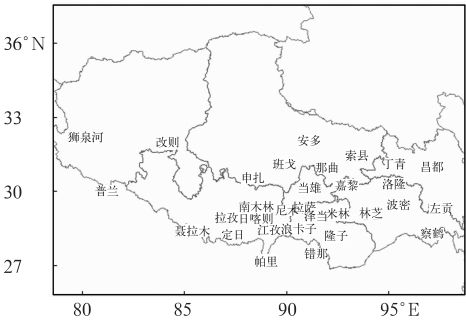


图 1 西藏高原气象观测站分布

Fig. 1 The distribution of meteorological stations over the Tibetan Plateau

2 西藏高原汛期降水场的特征

西藏高原属于典型的干湿季气候,5—9 月是高原的汛期,大部分测站降水量占年降水量的 80% 以上^[11]。使用 1979—2006 年西藏高原 32 个气象观测站 5—9 月汛期降水量,计算逐年各站的降水距平,对其进行 EOF 分析。表 1 是前 3 个特征向量对应的方差贡献及累计方差贡献。从表中可以看出第一特征向量方差贡献率已接近 50%,前三个特征向量的累加方差贡献率达 70% 左右,说明前三个特征向量基本反映了西藏高原的降水特征。

第一特征向量空间分布为“全区型”,除了高原西南部部分地区外,其余为正值(图 2a),反映了高原大部分汛期降水倾向性较好的一致性,同时表现了高原西南地区与其他地区一定程度上的降水不一致。第一特征向量表示第一类雨型,与文献^[11]的“全区干(湿)型”对应。当时时间系数为正时,第一特征向量为正,全区汛期降水分布为湿型,降水偏多,从第一特征向量对应的时间系数(图 2d)来看,1985 年至今大部分属于该类雨型,除了 1986, 1989, 1992, 1994, 1997, 2005, 2006 年之外,其余 12 年降

水量都较大;反之,当第一特征向量的时间系数为负时,第一特征量也为负,全区汛期降水分布为干型,降水偏少,如 1975,1983,1997 年等是这种分布型的典型年份。从历史纪录来看也证实了这一点,如 1983,1997,2006 年是西藏高原严重的旱灾年;而 1985,1991,1995,1998,2004 年都是西藏涝灾年^[14],

第一特征向量是西藏主要的降水异常类型。

表 1 前 3 个特征向量对应的方差贡献
Table 1 The variance contribution of the first three modes

	第一特征向量	第二特征向量	第三特征向量
方差贡献/%	48.9	12.9	8.5
累计方差贡献/%	48.9	61.8	70.3

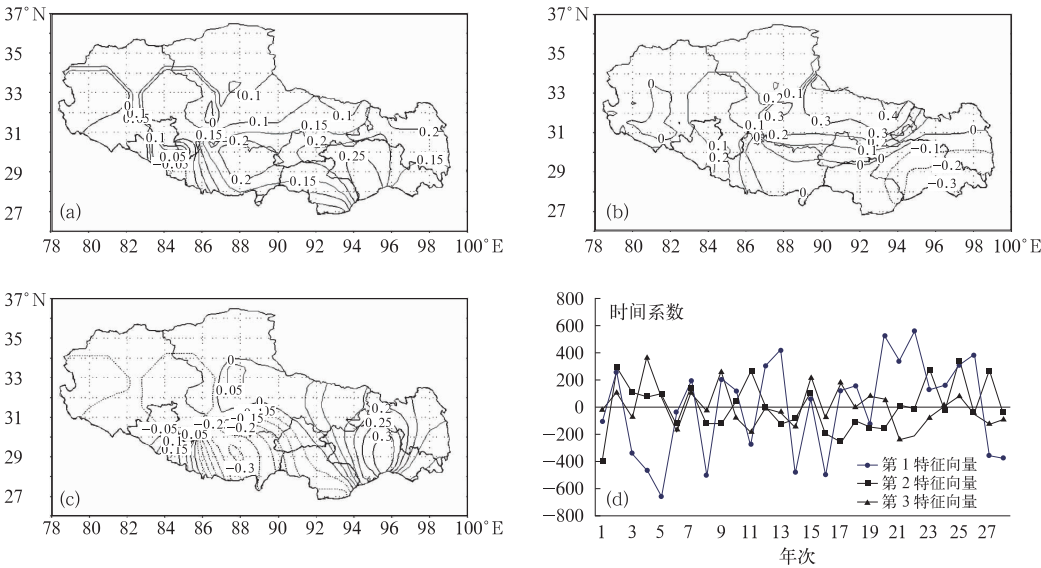


图 2 西藏高原汛期降水距平 EOF 分析的特征向量
(a) 第一特征向量; (b) 第二特征向量; (c) 第三特征向量; (d) 前三个特征向量时间系数
Fig. 2 The modes of Tibetan Plateau rainy season precipitation anomaly EOF analysis
(a) the first mode; (b) the second mode; (c) the third mode; (d) the temporal coefficients

第二特征向量空间分布为“东西型”,林芝地区为负值区,其他地区均为正值区(图 2b),反映了高原东南部地区与其他地区降水的反向分布特征。第二特征向量表示第二类雨型,对应于文献[11]的“东干(湿)西湿(干)型”,当第二特征向量为正时,林芝地区为少雨,其他地区为多雨;当第二特征向量为负时,林芝地区为多雨,其他地区少雨。

第三特征向量空间分布为“南北型”,基本上以雅鲁藏布江为界,北正南负(图 2c),反映出汛期降水的南北差异性,同时南边的聂拉木站表现出与其他站反向变化。第三特征向量表示第三类雨型,对应于文献[11]的“北湿(干)南干(湿)型”。当第三特征向量为正时,高原汛期降水分布为北多南少;反之,当第三特征向量为负时,高原汛期降水分布为北少南多。

值得注意的是,本文提到的第二特征向量在文献[11]中为第三特征向量,而本文提到的第三特征向量为其第二特征向量,这可能与两文使用的降水资料年份不一致、观测站数不同有关。

3 西藏高原汛期的水汽输送时空分布特征

3.1 水汽输送的空间分布

为了分析西藏高原汛期水汽输送的空间分布特征,计算了 1979—2006 年 28 年间 5—9 月整层水汽输送平均状况(图 3)。

由图 3a 可以看出,西藏地区汛期的水汽输送带主要有两条:

(1) 中纬度的西风气流输送,从欧洲大陆远道而来的水汽沿伊朗高压北侧的西北气流从帕米尔高原流经高原西北部后在川、陕附近与来自印度洋、南海的西南输送气流汇合流向江淮地区,这条水汽输送带也是高原上游系统影响江淮地区路径的北支。这条水汽输送带的水汽来源来自西风气流的上游,经过长途输送,以及高原西部的高海拔地形阻挡,进

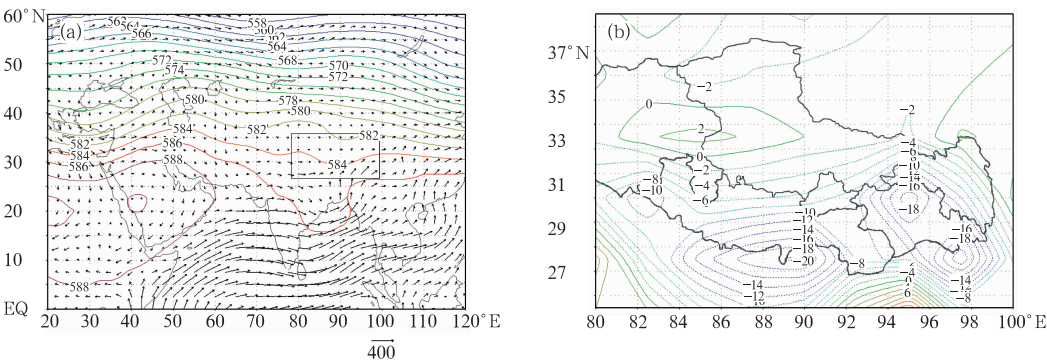


图 3 1979—2006 年西藏汛期平均水汽输送(a, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;方框为西藏高原区), 以及 1979—2006 年西藏汛期高原区水汽输送散度(b, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)

Fig. 3 (a) the average water vapor transfer in the Tibetan rainy season during 1979—2006 (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, the rectangle shows the Tibetan Plateau), and (b) the water vapor transfer flux divergence over the Tibetan Plateau (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)

入高原的水汽相当稀少。

(2) 以印度夏季风为载体的水汽输送带: 来自阿拉伯海的水汽在索马里越赤道急流的裹挟下穿越印度大陆与孟加拉湾水汽汇合, 沿夏季印度季风到达高原南部地区, 在 $85^{\circ} \sim 100^{\circ} \text{E}$ 之间进入高原, 在强大的印度季风西南气流的引导下经过四川后, 与经过云贵高原的季风分支汇合后向江淮流域输送, 这条水汽输送带是高原上游系统影响江淮地区路径的南支, 也是主要的影响路径。这条水汽输送带的水汽来源为阿拉伯海和孟加拉湾, 这是高原水汽输送的主要来源, 西藏汛期的大部分降水都来自于这条水汽输送带, 位于这条水汽输送带上的雅鲁藏布江沿线地区和西藏东部地区也成为西藏主要的农业耕作区。

在盛夏的部分时间(图略), 副高西进至 110°E 以西, 来自南海的水汽沿着副高西南侧的东南气流向西北输送, 在中南半岛与来自孟加拉湾的水汽东支汇合进入第二条水汽输送带, 经 $95^{\circ} \sim 100^{\circ} \text{E}$ 之间的三江流域进入高原东南部地区, 往往在西藏林芝地区或雅鲁藏布江中游河谷地带造成很强的降水。因此, 南海也是第二条水汽输送带的重要水汽来源。

从整层水汽输送通量散度(图 3b)来看, 西藏高原除阿里地区北部和那曲地区东部为水汽辐散区外, 其余均为水汽辐合区, 在西藏高原的边缘有 3 个中心, 最主要的辐合中心有两个, 分别位于亚东附近和位于缅甸与西藏自治区接壤处的雅鲁藏布江—布拉马特拉河谷附近, 这两个地方恰为主要的西藏高

原水汽通道^[12-13, 15]。另一处则位于聂拉木附近, 文献^[12]也曾指出高原雨季盛期仲巴、定日一带存在一条狭长水汽集中带, 这与文献^[10]通过水汽动画图像分析到的高原地区对流层上部水汽汇集的第二种方式也是一致的。这可能是因为: 这些地方在地形上恰好为喜马拉雅山脉的地形缺口处, 从低纬地区传送的水汽在夏季季风的引导下, 经过海拔低的印度大陆向北到达西藏高原南麓的喜马拉雅山脉, 在高大地形的阻挡下, 底层水汽沿着喜马拉雅山脉中段和喜马拉雅东段与横断山脉之间的雅鲁藏布江—布拉马特拉河谷等地形缺口进入高原, 在这些地形缺口水汽汇聚形成了显著的水汽辐合中心。水汽输送、地形和水汽积聚这三者之间的关系还有待进一步的研究。

区内的水汽输送辐合中心则位于林芝地区北部的念青唐古拉山脉南麓, 这个水汽辐合中心的形成原因与上述的类似, 水汽经过相对较低的林芝地区在高耸的念青唐古拉山脉南麓积聚后转向北部的昌都地区和东部的川西高原。

3.2 高原南侧的纬向水汽输送时间演变特征

从水汽的空间分布上可以看出, 汛期阿拉伯海、孟加拉湾是西藏高原最重要的水汽来源, 而来自低纬的充沛水汽主要是通过高原南侧向西藏高原输入的, 为了分析汛期期间水汽向西藏的输送时间演变特征, 绘制了高原南侧(27.5°N)的垂直积分水汽通量的时间剖面图(图 4)。

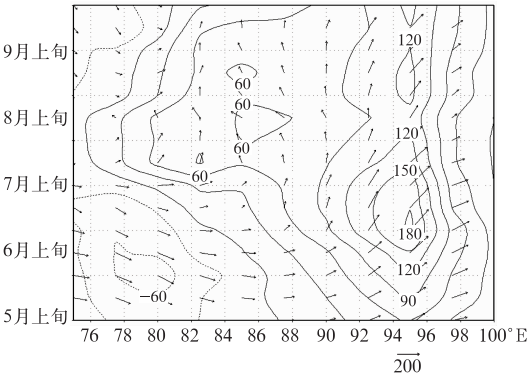


图 4 1979—2006 年 5—9 月沿高原南侧(27.5°N)气柱水汽经向输送通量经度-时间剖面图
单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 等值线为水汽通量经向分量
Fig. 4 The longitude-time section of water vapor transfer flux along the 27.5°N from May to September during 1979–2006
unit is $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, the contours show the meridional component

5 月初, 92°E 以东地区北向输送的水汽已经相当可观, 此时西藏东南部的察隅、波密、林芝、米林已经进入或即将进入雨季; 从平均状况来看, 水汽通量经向分量北向输送达到 $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 该经度上的测站将从南到北逐渐进入汛期; 6 月中旬随着印度季风的爆发, 西南风水汽输送显著加强, 在 85°E 附近的气流已经转向西南气流, 整个南边界的经向水汽输送均转为向北, 此时全区基本进入汛期, 95°E 附近有一个经向水汽极大中心, 通过南边界向北输送的水汽达到最大, 西藏东南部地区进入主汛期, 降水达到了最大值; 随着印度夏季风的建立, 气流逐渐转向偏南, 水汽输送的中心向西偏移, 在 7 月下旬、8 月上旬时, 水汽北向输送中心西移至 86°E 附近, 此时日喀则地区 and 那曲西部地区达到主汛期, 这与西藏地区的天气预报经验是吻合的; 在 7 月中旬至 9 月中旬这段时间内 80°~90°E 之间出现了较强的东南风水汽输送, 这是由印度东北部的气旋性环流造成的, 这股气流进入西藏后在盛行气流和地形的影响下, 为那曲地区、雅鲁藏布江西段的汛期降水带来了充足的水汽; 9 月下旬以后水汽输送逐渐减弱, 冬季环流建立, 80°E 以西地区的气流又转为西北气流, 高原大部分地区的汛期结束。

3.3 高原西侧的经向水汽输送时间演变特征

上文指出, 西藏汛期主要有两条水汽输送带, 中

纬度气流输送带虽然强度较弱, 但由于中纬度盛行西风气流, 这一水汽输送带全年非常稳定, 对高原西部和藏北地区来说也是降水的重要水汽贡献来源, 为了分析汛期期间这一水汽输送带的输送时间演变特征, 绘制了西藏西边界(77.5°E)的垂直积分水汽通量的时间剖面图(图 5)。

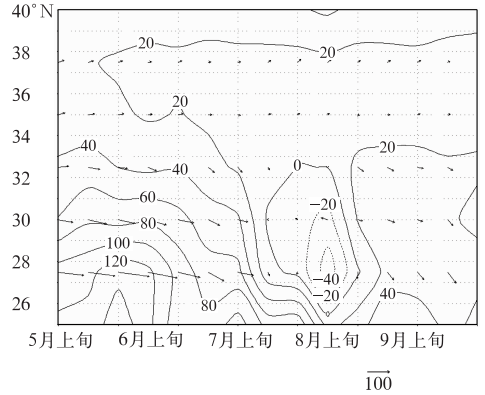


图 5 1979—2006 年 5—9 月沿高原西侧(77.5°E)气柱水汽经向输送通量纬度-时间剖面图
单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 等值线为水汽通量纬向分量
Fig. 5 The latitude-time section of water vapor transfer flux along the 77.5°E from May to September during 1979–2006
unit is $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, the contours show the zonal component

从西藏高原西边界的水汽输送(图 5)可以看出, 在中纬度盛行西风的影响下, 5 月上旬至 6 月下旬西藏西边界的水汽输送主要来自上游的西风气流, 且随着纬度的升高气流的含水量急剧减少, 其平均含水量不足南边界的 1/10; 7 月以后随着印度季风的爆发, 西风气流减弱, 西藏西边界的向东输送几乎为 0, 在 7 月中旬至 8 月中旬印度低压的北侧为东风气流, 因此 27°~32°N 出现了向西的水汽输送, 在这种情况下如果巴尔喀什湖大槽较强, 分裂冷空气到达新疆、西藏北部, 与这里的南部东风气流形成切变线, 配合西藏南边界输送的东南气流带来的水汽补充, 经常在阿里地区、那曲地区和日喀则地区形成较大的降水, 或者在羌塘草原形成低涡, 低涡东移后在西藏中东部形成降水, 少数能够移出高原在四川形成大降水; 9 月以后, 随着西风环流的加强, 西风气流输送重新建立。天气预报的经验表明, 西边界的水汽输送由于其含水量相当稀少, 对高原的降水贡献是很小的。

4 水汽输送异常与高原汛期降水异常的关系

为了讨论西藏汛期降水的异常型与水汽输送异常的联系, 先将降水 EOF 分解后的三个特征向量对应的三组时间系数进行标准化处理, 然后将逐年 5—9 月份水汽距平输送矢量场分别与三组标准化后的时间系数进行矢量点乘, 得到水汽异常输送在时间系数上的三个投影^[6], 他们分别代表了青藏高原汛期三类雨型所对应的水汽异常输送场(图 6)。

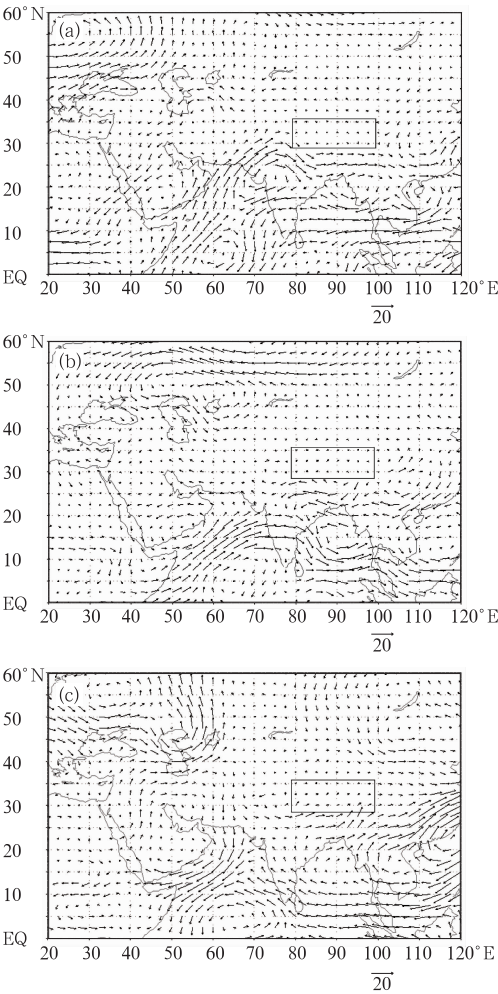


图 6 青藏高原汛期三类雨型所对应的水汽异常输送场
(a) 第一模态; (b) 第二模态; (c) 第三模态
方框为高原区, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Fig. 6 The water vapor transfer anomaly modes match with three precipitation patterns of Tibetan Plateau rainy season
(a) for the first mode; (b) for the second mode; (c) for the third mode
unit is $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, the rectangle shows the Tibetan Plateau

图 6a 中西藏地区水汽异常输送很小, 索马里越赤道急流水汽异常输送较强, 20°N 、 70°E 处为反气旋式水汽异常, 其北缘的西北气流将阿拉伯海的水汽输送至高原, 西藏西边界和南边界有较强水汽输送异常, 高原东边界有一东北水汽输送异常, 高原区为水汽异常辐合区。高原降水分布类型为第一型。

图 6b 中印度北部低涡环流, 印度南部为反气旋环流犹如抽水泵一般将索马里越赤道急流带来的水汽往孟加拉湾中部输送, 使输送往高原的阿拉伯海水汽不足; 孟加拉湾中部为反气旋环流, 西藏东南部为东北向输送异常, 为水汽辐散中心, 西藏东南部水汽供应明显较常年偏弱, 高原降水分布为第二型。

图 6c 中索马里越赤道急流异常为反向输送, 阿拉伯海的水汽无法往西藏南部输送, 90°E 以东为东南水汽输送, 以西为偏西气流输送, 西藏东南部地区水汽输送充足而错那以西地区水汽输送不足, 同时注意到 80°E 有弱东南水汽输送, 位于附近的聂拉木表现出了与其他站不同的降水特点, 高原降水分布为第三型。

索马里越赤道急流作为印度季风环流系统的重要成员, 反映了南北半球之间的质量和动量直接交换, 是阿拉伯海水汽向高原输送的动力来源, 是印度季风水汽输送带的重要组成部分, 是影响高原降水的重要因子^[16]。

5 结 论

(1) 青藏高原水汽输送主要有两条水汽输送带: 中纬度西风输送带和印度季风输送带。其中, 中纬度西风输送带水汽输送很弱, 印度季风输送带在高原汛期降水中起主要的作用。印度季风输送带的主要水汽源地为阿拉伯海和孟加拉湾, 盛夏时由于副高西伸, 南海水汽可以通过副高边缘的东南气流输送向高原。

(2) 位于印度季风输送带上, 高原南部边缘的三个水汽通量散度中心恰好对应着高原的水汽输送通道, 分别位于亚东、雅鲁藏布江—布拉马特拉河谷和聂拉木附近, 其形成与西藏高原的地形直接相关。

(3) 青藏高原汛期降水主要可以分为三种雨型, 并分别对应着不同的水汽输送异常: 全区型时索马里越赤道急流水汽输送异常较强, 高原区为水汽辐合区; 东西型时西藏东南部为东北向输送异常, 东

南部水汽供应较常年偏弱;南北型时东南部水汽输送充足而错那以西地区水汽输送不足。

(4) 索马里越赤道急流是印度季风水汽输送带的重要组成部分,是阿拉伯海的水汽向高原输送的动力来源。

参考文献

[1] 刘世祥,杨建才,陈学君,等. 甘肃省空中水汽含量、水汽输送的时空分布特征[J]. 气象,2005,31(1):50-54.

[2] 刘晓冉,杨茜,程炳岩. 2006 年川渝伏旱同期环流场和水汽场异常特征分析[J]. 气象,2009,35(8):27-34.

[3] 杨茜,李柯,廖代秀,等. 重庆地区空中水资源的时空分布特征[J]. 气象,2010,36(8):100-105.

[4] 汪秀清,陈长胜,石大明,等. 东北区夏季多雨年水汽异常输送特征[J]. 气象,2005,31(9):44-47.

[5] 黄玉霞,王宝鉴,王鹏祥. 青海高原夏季降水异常及其与水汽输送特征分析[J]. 气象,2006,32(1):18-23.

[6] 田红,郭品文,陆维松. 夏季水汽输送特征及其与中国降水异常的关系[J]. 南京气象学院学报,2002,25(4):496-502.

[7] 苗秋菊,徐祥德,施小英. 青藏高原周边异常多雨中心及其水汽输送通道[J]. 气象,2004,30(12):44-47.

[8] 周长艳,李跃清,李薇. 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,2005,24(6):880-888.

[9] 卓嘎,徐祥德,陈联寿. 青藏高原夏季降水的水汽分布特征[J]. 气象科学,2002,22(1):1-7.

[10] 郑新江,许建民,李献洲. 夏季青藏高原水汽输送特征[J]. 高原气象,1997,16(3):274-281.

[11] 周顺武,普布卓玛,假拉. 西藏高原汛期降水类型的研究[J]. 气象,2000,26(5):39-43.

[12] 黄福均,沈如金. 夏季风时期青藏高原地区水汽来源及水汽收支分析[M]//青藏高原气象科学实验文集编辑组. 青藏高原气象科学实验文集(二). 北京:科学出版社,1984:215-224.

[13] 章基嘉,朱抱真,朱福康,等. 青藏高原气象学进展[M]//青藏高原气象科学实验(1979)和研究. 北京:科学出版社,1988:195-197.

[14] 温克刚. 中国气象灾害大典(西藏卷)[M]. 北京:气象出版社,2008:8-19.

[15] Tetsuo Nakazawa,陈隆勋,等. Water budget analysis over the Tibetan Plateau during the northern summer in 1994[M]//第二次青藏高原大气科学试验理论研究进展(一). 北京:气象出版社,2000:104-117.

[16] 周顺武,假拉. 印度季风的年际变化与高原夏季旱涝[J]. 高原气象,2003,22(4):411-415.