

张万诚,马涛,郑建萌,等. 2014. 秋季水汽输送特征及其与云南降水的关系. 气象,40(3):336-348.

秋季水汽输送特征及其与云南降水的关系^{* 1}

张万诚¹ 马 涛¹ 郑建萌^{2,3} 杨琳晗⁴ 李 旭⁵

1 云南省气象科学研究所,昆明 650034
2 中国气象局兰州干旱气象研究所,兰州 730020
3 云南省气候中心,昆明 650034
4 云南大学大气科学系,昆明 650091
5 云南省昭通市气象局,昭通 657000

提 要: 利用云南 122 个测站 1961—2008 年秋季(9—11 月)降水量和同期 NOAA 提供的月平均再分析资料,分析了秋季各月降水与水汽通量、水汽通量散度的分布,以及环流异常对降水的影响。结果表明:11 月降水场与水汽通量场和水汽通量散度场耦合程度最高,10 月次之,9 月最小。在降水的空间分布型上,云南秋季降水与水汽通量输送、水汽通量散度的相关基本为一致的正相关;秋季降水量场与水汽通量场的时间变化趋势一致,水汽输送通量、水汽通量散度的变化直接影响降水的变化。云南秋季降水的多少主要是环流异常引起,当云南 9 月降水正异常时孟加拉湾季风偏强,副热带高压偏弱偏东,冷空气活跃,反之则出现负异常;当 10 月降水正异常时南支槽和西南季风活跃,影响云南的偏南暖湿气流强盛,反之则降水偏少;当 11 月南支槽和影响云南的冷空气活跃,云南降水偏多,反之则出现负异常。在水汽净收支方面,9 月纬向的净收入最大,而 10 月纬向的净收入减弱,11 月在西风带的控制之下,纬向净收支非常小。而经向上的水汽收支在 9—11 月有从支出到流入的转换。从云南正负异常年整层和低层水汽净收支看,除 11 月负异常年为水汽源外,其他都为水汽汇。用 ERA-Interim 再分析资料与 20CR 再分析资料计算的水汽误差较小,并且正负异常年水汽净收支变化一致。

关键词: 水汽收支, 水汽输送, 20CR 再分析资料, 对比分析, 云南, 秋季降水, 奇异值分解

中图分类号: P461 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2014. 03. 009

Charcteristics of Water Vapor Flux in Autumn and Its Relationship With Precipitation in Yunnan

ZHANG Wancheng¹ MA Tao¹ ZHENG Jianmeng^{2,3} YANG Linhan⁴ LI Xu⁵

1 Meteorological Science Institute of Yunnan Province, Kunming 650034
2 Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020
3 Yunnan Climate Centre, Kunming 650034
4 Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming 650091
5 Zhaotong Meteorological Office of Yunnan Province, Zhaotong 657000

Abstract: Using the monthly autumn precipitation data of 122 observation stations over Yunnan Province from 1961 to 2008 and the NOAA monthly mean reanalysis data, distributions of monthly precipitation and water vapor fluxes and water vapor flux divergence in autumn, as well as the effect of atmospheric circulation anomaly on precipitation are analyzed. The results show that, there exists the best coupling relationship of rainfall and water vapor flux, water vapor flux divergence in November, while in October it is the second, and in September it is the worst. There is a positive correlation between autumn precipitation

^{*} NSFC-云南联合基金重点项目(U1133603)、国家自然科学基金项目(40965006 和 41365007)、中国气象局干旱研究基金项目(IAM201202)和云南省基金项目(2012FB196)共同资助
2013 年 2 月 13 日收稿; 2013 年 11 月 11 日收修定稿
第一作者:张万诚,主要从事气候诊断分析及资料应用研究. Email:hhzth@sina.com

distribution, and water vapor flux and the divergence of water vapor flux in Yunnan. The autumn precipitation field is consistent with the time variation trend of water vapor flow field. The changes of water vapor flux and water vapor flux divergence directly affect the change of precipitation. The autumn precipitation amount is largely influenced by the atmospheric circulation anomaly. When September precipitation in Yunnan is abnormal, the monsoon in Bay of Bengal blows strongly, the subtropical high is by east and weak, and the cold air is active. Otherwise appears the negative anomaly. When rainfall in October is abnormal, southern trough and southwest monsoon are active, strengthening Yunnan's southerly warm and humid air flows, otherwise, precipitation is less. When in November the southern trough and the cold airs that influence Yunnan are active, more precipitation produces, otherwise, negative anomaly appears. Regarding the vapor net budget, the zonal net income in September is the largest, while zonal net income in October weakens. In November, under the control of the westerlies, the net income becomes very small. However, meridional water vapor income during September to November transfers from expenditure to inflows. Thinking from the whole-layer and low-level vapor net budget in positive and negative anomaly years in Yunnan, except for the November in negative anomaly years it is water vapor source, in all the other times it is moisture convergence. When calculating with ERA-Interim reanalysis data and 20CR reanalysis data, the water vapor error is found small, and the vapor net budget variations in positive and negative anomaly years are consistent.

Key words: moisture budgets, water vapor transfer, 20CR reanalysis data, comparative analysis, Yunnan, autumn precipitation, singular value decomposition

引 言

对于水汽的研究国内外早有涉及, Benton 等(1954)首先用所获得的探空资料分析了北美大陆上空的水汽输送情况和水分平衡。Starr 等(1955)的研究表明了水汽平流在区域水分平衡中起重要作用。Yatagai 等(1998)研究指出,水汽输送的异常及其辐合、辐散与降水有密切关系。谢义炳等(1959)最早研究了我国黄淮地区强降水过程与水汽输送的关系。近年来,针对水汽输送的研究,主要集中在西北地区、青藏高原及川渝地区等(陶诗言等,1999;徐祥德等,2002;蔡英等,2004;何华等,2003;周长艳等,2005;史玉光等,2008;齐庆华,2009;冯雷等,2008;刘德等,2005;刘晓冉等,2009;周晋红等,2011;林志强等,2011)。最近的研究表明索马里急流水汽输送强度与我国初夏6月的降水存在相关性,显著正相关区主要位于黄淮流域及华北一带,负相关区位于青藏高原东部(石文静等,2013)。

云南地处低纬高原地区,受东亚季风和南亚季风的共同影响,具有干湿季节分明,干季和雨季降水量差别大的特点。其中雨季(5—10月)降水量占全年降水量的85%左右,整个干季(11月至次年4月)

降水量仅占全年降水量的15%左右。由于云南所处的地理位置地形地貌复杂,高山、河谷、盆地相间分布,海拔高度差别明显,而云南的干季特别是春季回温快,风大,蒸发大。此时,如果上年秋季降水异常偏少,极易形成秋冬春连旱或者是秋冬春初夏连旱。由于秋季是云南降水第二多的季节,也是云南从雨季到干季过渡关键季节,秋季降水的多少直接影响到水库、塘坝蓄水的情况,进而影响到来年云南干季人畜饮水和大春作物的种植。因此,研究秋季降水的异常对当地的生产生活具有重要现实意义。

目前,对云南降水的研究已经取得了很多有价值的成果(严华生等,2002;杨亚力等,2011;张万诚等,2002;郑建萌等,2007;周国莲等,2007)。研究表明云南夏季旱涝的出现与水汽输送的强弱有关(何华等,2003;张万诚等,2012)。最近,对2009/2010年云南干旱成因的研究认为热带印度洋向云南地区的水汽输送减弱,导致云南降水偏少形成干旱(吕俊梅等,2012;张万诚等,2011)。对云南空中水资源的分析表明可降水量呈北多南少分布,并且夏季最大,秋季次之,冬季最小;在水汽输送方面,经向上的水汽输送对低纬高原地区的水汽净收入贡献较大,并且纬向水汽输送与经向水汽输送成反相关(马涛等,2011)。但是,水汽输送与云南秋季降水的关系如何

并不清楚。基于以上分析,本文研究旨在探寻秋季(9—11月)水汽通量和水汽通量散度场变化特征及其与云南秋季降水的联系。

1 资料与方法

1.1 资料选取

1961—2008 年云南 122 个站秋季(9—11月)逐月降水资料。

NOAA 提供的 20 世纪再分析资料,主要有 1961—2008 年月平均纬向风场(u)、经向风场(v)、比湿场(q)、地面气压场再分析资料,分辨率为 $2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$,以及 ERA-Interim 1979—2008 年的再分析资料,分辨率为 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 。

1.2 主要方法

单位气柱上整层大气水汽输送通量矢量由下式计算:

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} \mathbf{V} \cdot q dp \tag{1}$$

式中, q 为比湿, g 为重力加速度, p_s 为地面气压,均为常用变量, p_t 为大气顶处的气压,考虑到高层水汽少,本文取为 300 hPa。

由此可分别得到纬向、经向水汽输送通量矢量 Q_λ 和 Q_φ ,计算公式如下:

$$Q_\lambda = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} u q dp \tag{2}$$

$$Q_\varphi = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} v q dp \tag{3}$$

水汽通量散度可由下面公式计算:

$$c = \nabla \cdot \mathbf{Q} = \frac{\partial Q_\lambda}{\partial x} + \frac{\partial Q_\varphi}{\partial y} \tag{4}$$

式中, Q_λ 为纬向水汽通量, Q_φ 为经向水汽通量。

某一边界的水汽收支计算公式为:

$$Q_k = \sum_{i=1}^{m_k} (-1)^{k+1} Q_i l_i \tag{5}$$

式中, $k=1,2,3,4$ 分别代表西、东、南、北边界; m_k 表示第 k 边界划分成的段数; Q_i 和 l_i 分别为第 i 段边界的水汽通量输送和长度。

图 1 给出了水汽流入、流出云南的边界框图。其中将西边界设定为 AD 段,东边界设定为 BC 段,南边界设定为 DC 段,北边界为 AB 段。

另外,还应用了扩展的奇异值分解(ESVD)、相

关分析、合成分析和 t 检验方法(解明恩等,2000;黄嘉佑,2004;魏凤英,2007)。

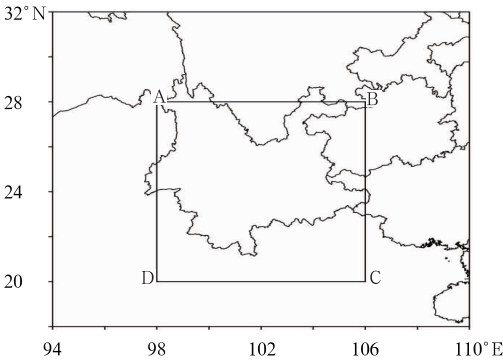


图 1 云南水汽输送的框图
Fig. 1 The polygon schematic diagram of water vapor transportation in Yunnan

2 秋季水汽的总体输送

从水汽通量(图 2a)中可以看出,影响云南秋季的水汽主要是来自南半球的东风水汽在 50°E 附近转向并越过赤道向东,在斯里兰卡南部转向北输送,经过孟加拉湾,以西南水汽输送进入云南;另一支阿拉伯海北部的偏西水汽,向东输送到达印度半岛北部,以偏西水汽输送的形式进入云南;另外副热带高压(以下简称副高)外围的偏东风水汽,沿副高外围以偏东南水汽输送影响云南。从多年平均的水汽通量散度上可看出(图 2b),东印度洋、孟加拉湾、南海以及北部湾至我国大部均为水汽辐合区域,这说明秋季云南总体上是一个水汽汇。

3 秋季水汽输送与云南降水的分布特征

秋季是云南从湿季到干季的过渡季节,9 和 10 月为雨季,11 月基本为干季。为了分析降水与水汽输送的关系,将降水场作为左场,水汽通量场和散度场作为右场,分别对 9、10 和 11 月的降水场和水汽通量场、水汽通量散度场做扩展奇异值分解(ESVD),探讨各个场之间的协同变化情况。

3.1 9 月降水场与水汽场的时空分布

从表 1 可以看出,云南 9 月降水量场与水汽通量、散度场间的整体相关非常好,前 5 个场的累计方

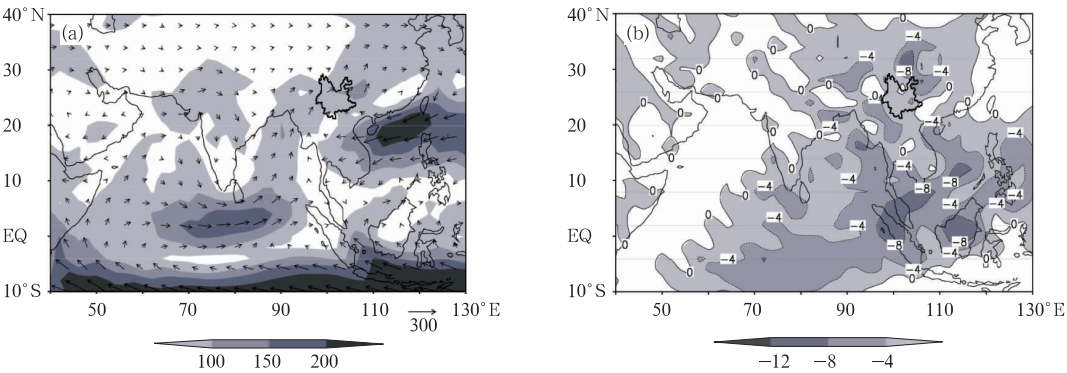


图 2 1961—2008 年秋季平均的整层积分水汽输送矢量分布(a, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 和水汽通量散度场(b, 单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
[(a)阴影区为水汽输送矢量大于 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区域, (b)阴影区为辐合区]

Fig. 2 Climatological mean vertically integrated water vapor transport pattern in autumn for 1961–2008 (a, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and its divergence (b, unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
[The regions where the magnitude of water vapor transport vector exceeds $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ are shaded in (a), the convergence areas are shaded in (b)]

表 1 前 5 对奇异值协方差贡献率(单位: %) 及其相应的时间系数					
Table 1 The ratio of covariance explained by the first five pairs of singular vectors and their time coefficients					
	第一	第二	第三	第四	第五
方差贡献率/%	38.88	10.94	8.23	6.05	4.19
累计方差/%	38.88	49.82	58.05	64.10	68.29
相关系数	0.70	0.72	0.79	0.75	0.78

差贡献率达 68.29%, 相关系数均通过 0.01 的显著性水平检验。从表中还可以看出, 第一奇异场解释协方差占 38.88%, 而第二奇异场的方差贡献率仅占 10.94%, 可见第一奇异场基本能解释 9 月降水场与水汽通量场和水汽通量散度场的协同变化, 因此取第一奇异场异类相关场进行分析。

在降水的空间分布型上(图 3a), 云南 9 月降水的相关基本为一致的正相关分布, 大部分相关系数都在 0.3 以上即图中的阴影区, 最大相关区为 0.5 主要位于昆明东北部、临沧、红河中部及丽江局部等地, 除普洱南部至西双版纳、德宏州、滇东南南部边缘、滇东局部及滇东北大部等区域没有通过 0.05 的显著性水平检验外, 其他各地均通过了 0.05 显著性水平检验。另外, 在滇东局部存在负相关, 但没有通过 0.05 显著性水平检验。从水汽通量的空间分布场可看出(图 3b), 在 80°E 以东、云南至中南半岛附近有一个异常反气旋式相关矢量场, 云南受孟加拉湾的西南水汽通量相关矢量影响, 并通过 0.05 的显著性水平检验, 云南的东北部受偏北水汽通量矢量

的影响, 在云南上空形成冷暖空气交汇。在水汽通量散度分布场上(图 3c), 负相关区主要位于印度半岛、孟加拉湾至云南, 以及华南沿海, 并且青藏高原东南部至云南通过 0.05 的显著性水平检验, 这表明这些区域为水汽辐合区, 有利于降水发生。这一空间分布型表明, 当孟加拉湾至中南半岛存在反气旋式水汽输送, 而云南处于异常的西南水汽输送, 并且与其上空水汽通量散度呈负相关即水汽通量散度为辐合时, 云南 9 月降水一致偏多。反之, 则降水偏少。

从第一分布型的时间系数变化上可以看出(图 3d), 左场与右场的时间变化趋势一致, 基本呈同位相变化, 两者的相关系数为 0.70, 通过了 0.01 的显著性水平检验, 表明水汽输送通量、水汽通量散度的变化直接影响降水的变化。从第一奇异场水汽通量 9 年滑动平均图可看出, 从 20 世纪 70 年代中期开始至 90 年代中期, 水汽通量处于上升阶段, 而从 90 年代中期以后至今则处于下降趋势, 结合时间系数的逐年和滑动变化来看, 第一奇异场水汽通量具有明显的年际及年代际变化。

3.2 10 月降水场与水汽场的时空分布

从表 2 可以看出, 云南 10 月降水量场与水汽通量、散度场间的前 5 个场的累计方差贡献率达 79.76%, 整体相关非常好并通过 0.01 的显著性水平检验。第一奇异场解释协方差占 46.16%, 而第二奇异场的方差贡献率仅占 19.03%。因此第一奇

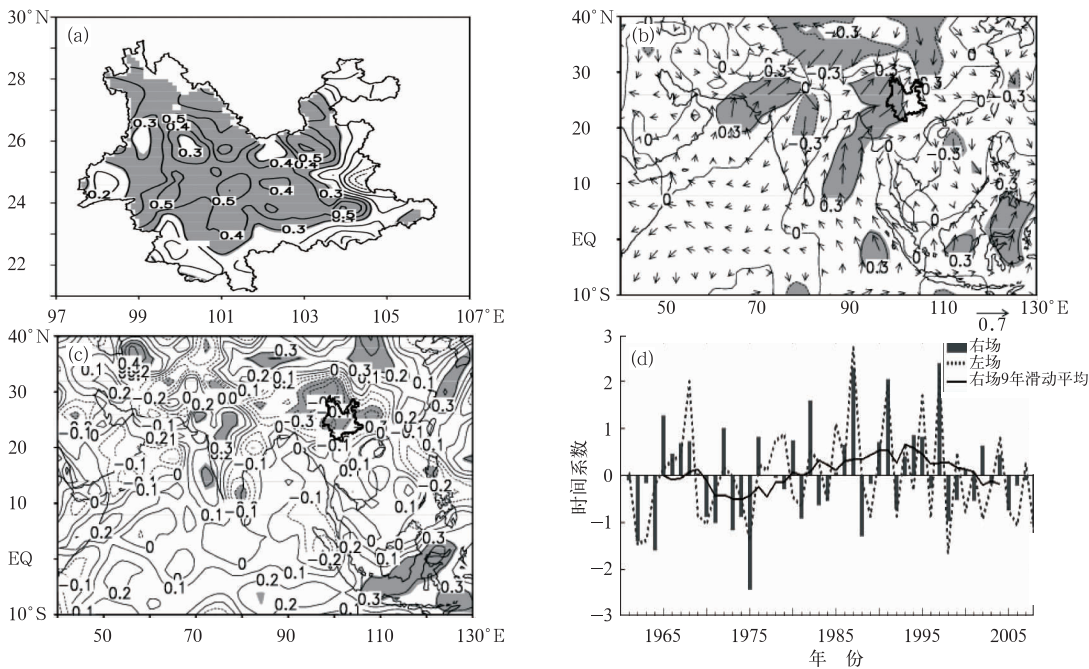


图 3 第一奇异场的异类相关系数及其时间系数

(a) 云南 9 月降水场 (单位: mm), (b) 水汽通量场 (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),
(c) 水汽通量散度场 (单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), (d) 对应的时间系数
(阴影区表示通过 0.05 显著性水平检验)

Fig. 3 The heterogeneous correlation coefficients and time coefficients of SVD1

(a) precipitation field of Yunnan in September (unit: mm), (b) water vapor flux field (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),
(c) water vapor flux divergence field (unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), (d) corresponding time coefficients
[Values shaded are statistically significant at 0.05 level in (a), (b) and (c)]

表 2 前 5 对奇异值协方差贡献及其相应的时间系数

Table 2 The ratio of covariance explained by the first five pairs of singular vectors and their time coefficients

	第一	第二	第三	第四	第五
方差贡献率/%	46.16	19.03	7.66	4.02	2.89
累计方差贡献率/%	46.16	65.19	72.85	76.87	79.76
相关系数	0.74	0.59	0.66	0.73	0.82

异场能解释 10 月降水场与水汽通量场和水汽通量散度场的协同变化,仍取第一奇异场异类相关场进行分析。

云南 10 月降水场与水汽通量和水汽通量散度场之间的相关均为一致的正相关分布(图 4a),除滇西北相关系数小于 0.3 外,大部分相关系数都在 0.3 以上,并通过了 0.05 的显著性水平检验,最高相关为 0.6 主要分布在滇中、滇西南局部地区。在水汽通量分布场上(图 4b),孟加拉湾至中南半岛为西南水汽相关矢量,云南受孟加拉湾的西南水汽输送影

响,通过 0.05 显著性水平检验的区域位于孟加拉湾北至云南南部;此外,还与阿拉伯海的异常西南水汽输送呈正相关,并通过 0.05 的显著水平检验。在水汽通量散度相关场(图 4c)上,负相关区主要位于孟加拉湾至云南,也通过 0.05 的显著性水平检验。这说明当阿拉伯海、孟加拉湾为西南水汽输送,云南受异常的西南水汽输送影响,并且孟湾至云南上空水汽通量为辐合时,云南 10 月降水一致偏多。反之,云南降水偏少。

从时间系数变化上可以看出(图 4d),两者的时间变化趋势基本一致,模态相关为 0.74,通过了 0.01 的显著性水平检验。在水汽通量 9 年滑动平均上,从 20 世纪 60 年代至 70 年代中期前,水汽通量从上升转为下降,从 70 年代中期后至 21 世纪初,水汽通量则处于上升和下降的交替变化,从 21 世纪初以后至今,则处于上升阶段。这说明水汽通量具有明显的年际及年代际变化。

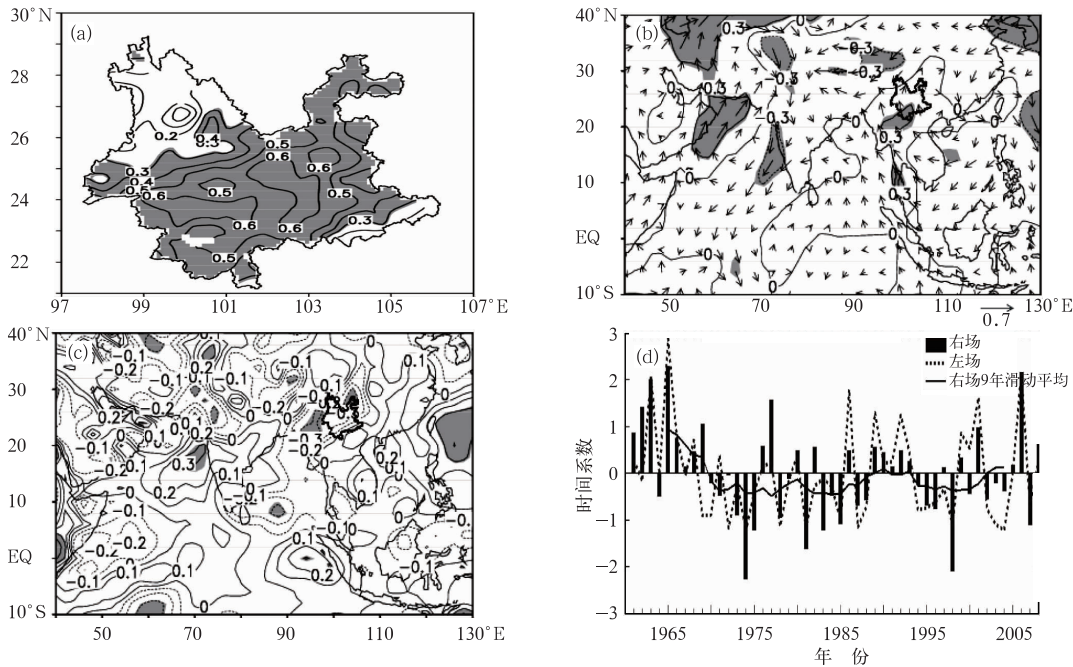


图 4 同图 3, 但为 10 月
Fig. 4 Same as Fig. 3, but for October

3.3 11 月降水场与水汽场的时空分布

云南 11 月降水量场与水汽通量、散度场间的整体相关很好(表 3), 前 5 个场的累计方差贡献率达 93.40%, 通过 0.01 的显著性水平检验。第一奇异场解释协方差占 68.06%, 而第二奇异场的方差贡献率仅占 17.79%, 可见第一奇异场能反映 11 月降水场与水汽通量场和水汽通量散度场的协同变化, 以第一奇异场异类相关场进行分析。

表 3 前 5 对奇异值协方差贡献
及其相应的时间系数

	第一	第二	第三	第四	第五
方差贡献率/%	68.06	17.79	3.51	2.37	1.67
累计方差贡献率/%	68.06	85.85	89.36	91.73	93.40
相关系数	0.69	0.73	0.81	0.79	0.75

云南 11 月降水场与水汽通量和水汽通量散度场之间均为全省一致的正相关(图 5a), 大部地区相关系数在 0.3 以上, 最大相关系数达 0.7, 大部区域通过 0.05 的显著性水平检验, 部分区域通过 0.01 的显著性水平检验。从图 5b 可看出, 孟加拉湾至中南半岛为异常气旋式相关矢量场, 云南受西南气流控

制, 该气旋式相关矢量场通过了 0.05 的显著性水平检验。而水汽通量散度分布场上(图 5c), 负相关区主要位于孟加拉湾、中南半岛至云南, 均通过 0.05 的显著性水平检验。这表明当孟加拉湾为西南水汽输送, 云南受异常的西南水汽输送影响, 孟加拉湾、中南半岛至云南上空水汽通量为辐合时, 云南 11 月降水一致偏多。反之, 则降水偏少。

11 月的模态相关为 0.69, 二者的时间变化趋势基本一致(图 5d), 通过了 0.01 的显著性水平检验。从图中还可看出, 从 20 世纪 60 至 70 年代中期前, 水汽通量从上升变为下降, 从 70 年代中期后至 20 世纪末期, 水汽通量则处于平稳变化, 而从 21 世纪初以来, 则进入上升趋势。说明水汽通量具有明显的年际及年代际变化。

4 云南秋季降水异常年的合成分析

从左场所对应的第一时间系数中挑选降水异常年, 取大于 1 倍标准差的年份为正异常年, 小于 1 倍标准差的年份为负异常年。则 9 月正异常年有: 1968、1985、1987、1991、1995、1997 年共 6 年, 负异常年有: 1962、1963、1970、1975、1998、2006、2008 年共 7 年; 10 月正异常年有: 1963、1965、1986、1989、1992、2001、2006 年共 7 年, 负异常年有: 1972、

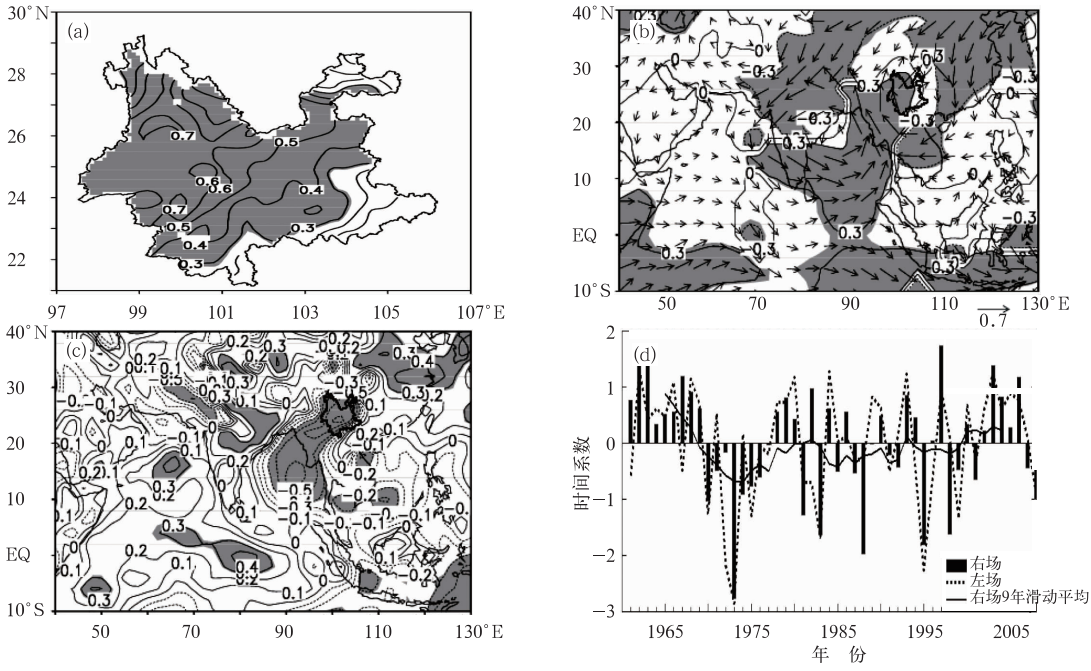


图 5 同图 3, 但为 11 月
Fig. 5 Same as Fig. 3, but for November

1974、1978、1981、1985、1987、1998、2003、2004 年共 9 年; 11 月正异常年有: 1970、1972、1973、1975、1983、1995、1999 年共 7 年, 负异常年有: 1962、1966、1968、1980、1984、1993、2003 年共 7 年。根据选取的正负异常年, 进行合成分析。

4.1 水汽输送异常对秋季降水正负异常的影响

从云南 9 月降水正异常距平(图 6a)上可看出, 降水偏多最大达到 90 mm, 最小为 30 mm 以下。降水场大部都通过 0.05 的显著性水平检验, 没有通过检验的均为差值较小的区域, 主要位于云南东部边沿。而负异常年降水偏少最大达 60 mm, 最小值在 30 mm 以内(图 6b)。大部分通过显著性水平检验。在正异常年水汽通量场(图 6c), 孟加拉湾为异常的西南水汽输送, 云南受来自孟加拉湾的异常西南水汽以及异常的偏北水汽共同影响, 而在水汽通量散度分布场(图 6c), 云南上空为水汽的辐合区, 并通过了 0.05 显著性水平检验, 这样的分布使云南降水偏多。而在负异常年的水汽通量输送场(图 6d), 云南主要为异常的偏东水汽影响, 同时云南处于辐散区(图 6d), 不利于水汽在云南辐合。

云南 10 月降水偏多年的水汽通量场(图 7a), 整个孟加拉湾为气旋式的水汽输送, 云南为孟加拉湾的异常偏南水汽影响, 而云南东部主要受偏北风

水汽输送影响; 同时, 孟加拉湾至云南上空为水汽的辐合区(图 7a), 冷暖空气同时在云南交汇, 造成云南降水异常偏多。而降水偏少年的水汽通量场(图 7b), 孟加拉湾至云南为反气旋式水汽输送, 云南为异常的西北水汽输送; 除了滇东南边沿外, 云南大部地区为水汽辐散区(图 7b)。

云南 11 月主要受孟加拉湾北部的偏西南水汽影响(图 8a), 通过了 0.05 的显著性水平检验; 从孟加拉湾到云南为水汽通量辐合带(图 8a), 也通过 0.05 显著性水平检验, 这样的分布使云南降水正异常。而降水负异常的水汽通量与降水正异常相反, 从印度半岛至孟加拉湾为反气旋式水汽输送, 云南主要是偏西风水汽输送(图 8b); 从孟加拉湾、中南半岛至云南、南海为水汽辐散区(图 8b), 并通过 0.05 显著性水平检验。

4.2 环流异常对降水的影响

从 9 月降水正异常年的合成 700 hPa 流场上可看出(图 9a), 孟加拉湾越赤道气流偏强, 印度半岛西北部为异常反气旋, 其东部至孟加拉湾为异常气旋, 气旋东部的西南风和越赤道气流汇合导致孟加拉湾西南季风偏强, 云南大部为异常的西南气流控制, 中国南方有异常气旋环流, 表明副高偏弱偏东, 滇东北有从高原东侧南下的异常东北气流, 这与

图 6c 的水汽输送是一致的。而降水负异常年印度半岛北部为异常气旋,印度南端和孟加拉湾南部为异常反气旋,孟加拉湾西南季风偏弱,中国东部有异常的反气旋环流(图 9b),表明副高偏强,云南大部为异常偏东气流控制,滇东北为副高西侧异常的偏南气流。可见,在降水正异常年孟加拉湾季风偏强,副高偏弱偏东,冷空气活跃,而降水负异常年孟加拉

湾季风偏弱,副高偏强偏西,冷空气不活跃。

在 10 月降水正异常年合成 700 hPa 流场上(图 10a),孟加拉湾西北部和东南部分别有气旋中心,表明南支槽和孟加拉湾西南季风偏强,云南东南部以南有异常反气旋,导致云南为异常偏南气流,中国南方为大范围偏北气流,冷空气偏强,这与图 7a 的水汽输送分布一致。在降水负异常年合成图上

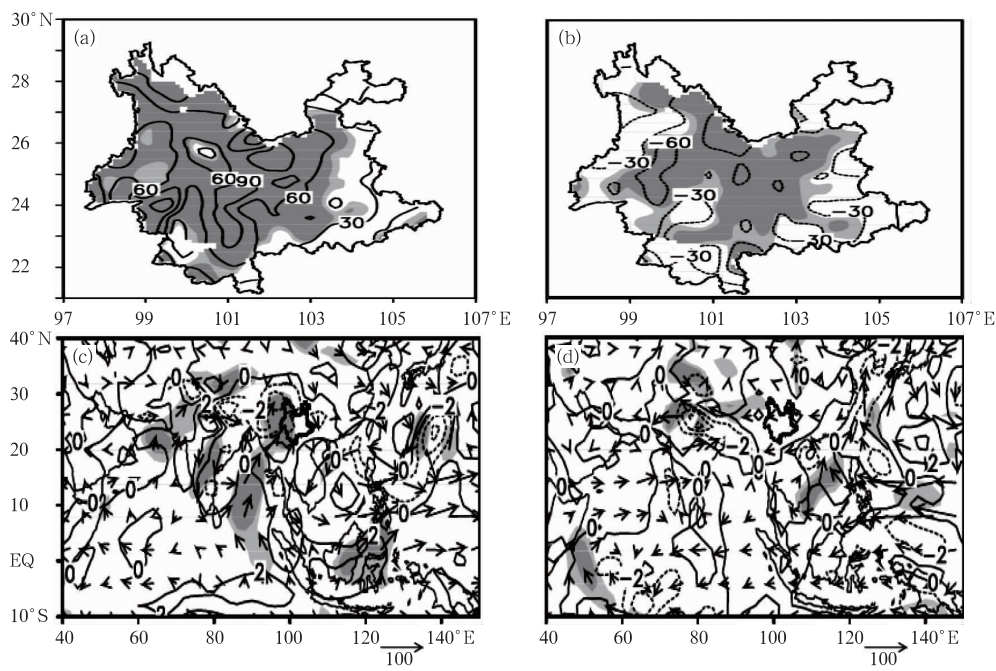


图 6 9 月异常年的合成分析
(a)和(b)分别为正负异常年的降水场距平(单位: mm), (c)和(d)分别为正负异常年的水汽通量场
(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和水汽通量散度场(单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
(阴影表示通过 0.05 显著性水平检验)

Fig. 6 Synthetic analysis of September abnormal year
precipitation anomaly field (unit: mm) in the positive (a) and negative (b) anomalous years, water vapor
flux field (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and water vapor flux divergence field (unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
in positive (c) and negative (d) anomalous years
(Shaded area for passing 0.05 significant test)

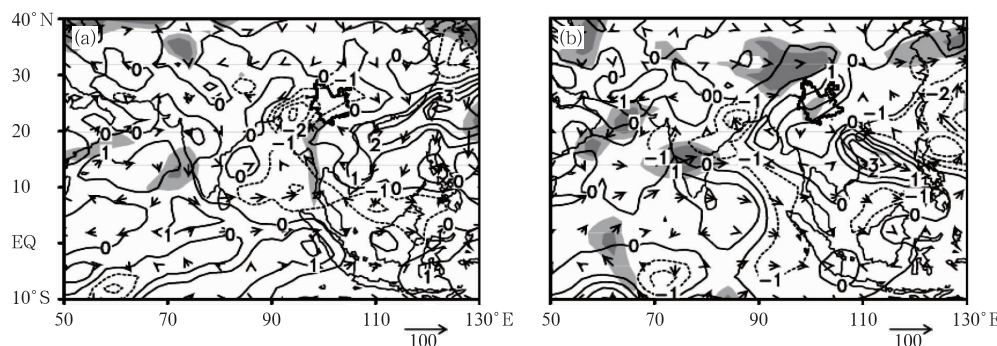


图 7 同图 6 后两图,但为 10 月
Fig. 7 Same as the latter two charts in Fig. 6, but for October

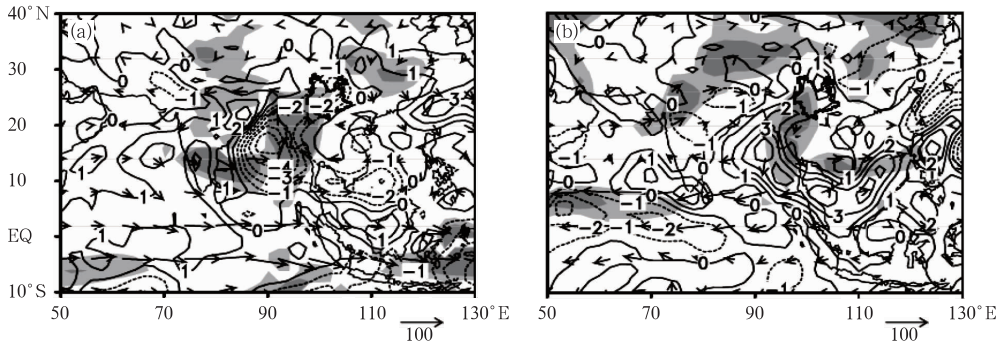


图 8 同图 7, 但为 11 月
Fig. 8 Same as Fig. 7, but for November

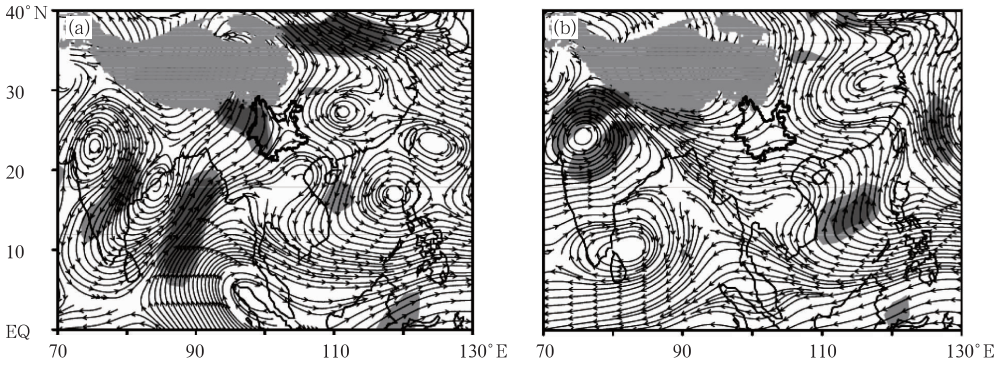


图 9 9 月异常年 700 hPa 环流场
(a) 正异常年, (b) 负异常年
(阴影为通过 0.05 显著性水平检验的区域)
Fig. 9 The 700 hPa circulation fields of anomalous years in September
(a) positive anomalous years, (b) negative anomalous years
(Areas passing 0.05 significant test is shadowed)

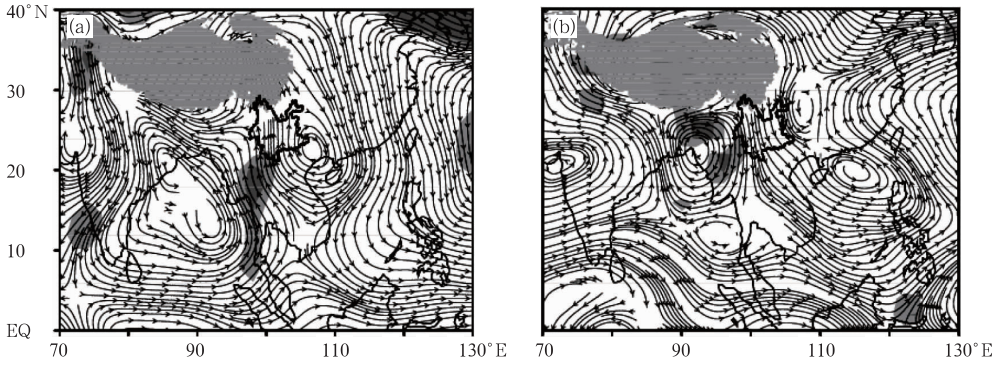


图 10 同图 9, 但为 10 月
Fig. 10 Same as Fig. 9, but for October

(图 10b), 孟加拉湾北部至中南半岛西北部为异常的反气旋环流, 云南西部为其外围的偏北气流, 高原东侧有南下到达滇东北的偏北气流, 这两支气流导致云南为异常偏北气流控制, 云南上空无异常冷暖气流的交汇。因此, 在降水正异常年南支槽和西南

季风活跃, 云南偏南暖湿气流强盛, 而降水负异常年南支槽不活跃, 云南为异常偏北风, 暖湿气流偏弱。
从 11 月降水正异常年 700 hPa 环流场上可看出(图 11a), 印度东岸为范围较大的异常气旋中心, 从南海南部也有一支东南气流汇合到气旋东部的偏

南气流中,孟加拉湾、中南半岛、云南西部为异常偏南气流控制,高原以东的中国地区为异常偏北气流,在这种环流形势下,南支槽和影响云南的冷空气活跃,云南上空有冷暖气流交汇,有利于云南的降水。负异常年印度半岛有反气旋环流中心,反气旋东部

的偏北、西北气流控制孟加拉湾、中南半岛、云南大部,云贵高原以东的中国地区为异常偏南气流。这种环流形势表明南支槽和影响云南的冷空气不活跃,云南降水偏少。

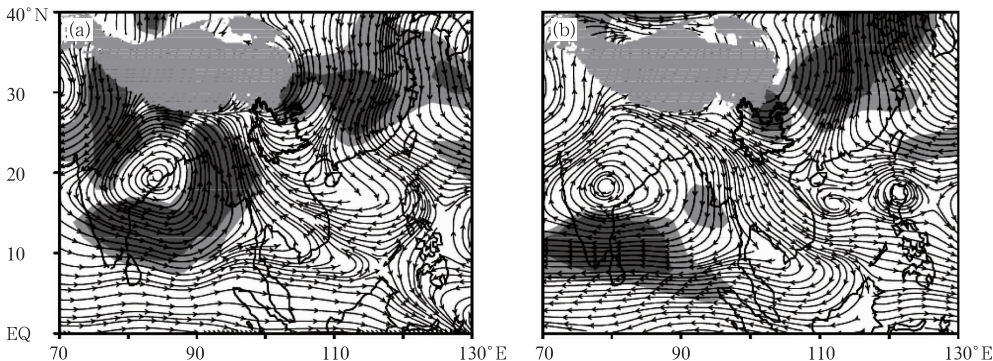


图 11 同图 9,但为 11 月
Fig. 11 Same as Fig. 9, but for November

4.3 正负异常年的水汽收支

应用式(5)计算秋季降水异常年流入、流出和滞留在云南的水汽量。表 4 为秋季各月降水负异常和正异常年云南水汽的收支情况。

从表 4 中可看出,9 月降水正异常年的西、东、南边界都为流入,正异常年西、南边界比负异常年流入偏多明显,说明正异常年西南季风比负异常年偏

强,而东边界负异常年流入更多,这是由于负异常年多与副高偏西对应。9 月西太平洋副高季节性南撤,当其偏西时往往控制云南上空,造成云南降水偏少,而其南侧的偏东气流使得云南东边界的水汽流入大。北边界正负异常年都为流出,正异常年流出得更少,说明正异常年北边界的偏北风活跃,入侵云南的冷锋切变较频繁。可见在正异常年云南上空产生降水的水汽条件和动力条件都比负异常年好。

表 4 正负异常年流入、流出云南的水汽比较 (单位: 10¹⁰ t)

Table 4 The inflow, outflow of water vapor in Yunnan (unit: 10¹⁰ t) in the Positive and negative anomalous years

月份	对流层	西边界	东边界	南边界	北边界	纬向	经向	净收支
9 月正异常年	地面至 700 hPa	5.36	8.62	6.53	-3.50	13.98	3.03	17.01
	地面至 300 hPa	9.95	5.80	8.47	-12.72	15.75	-4.25	11.50
9 月负异常年	地面至 700 hPa	2.62	9.97	3.57	-5.04	12.59	-1.47	11.12
	地面至 300 hPa	3.06	12.34	5.19	-14.12	15.40	-8.93	6.47
10 月正异常年	地面至 700 hPa	1.79	5.81	5.36	-3.41	7.60	1.95	9.55
	地面至 300 hPa	15.07	-8.13	8.27	-10.65	6.94	-2.38	4.56
10 月负异常年	地面至 700 hPa	2.80	4.47	3.66	-2.64	7.27	1.02	8.29
	地面至 300 hPa	15.97	-8.64	4.37	-9.53	7.33	-5.16	2.17
11 月正异常年	地面至 700 hPa	2.56	1.41	4.70	-1.72	3.97	2.98	6.95
	地面至 300 hPa	20.23	-19.53	8.39	-6.53	0.7	1.86	2.56
11 月负异常年	地面至 700 hPa	4.09	-2.71	4.91	-2.59	1.38	2.32	3.70
	地面至 300 hPa	16.70	-18.62	6.59	-6.34	-1.92	0.25	-1.67

注:表中正值表示水汽流入量,负值表示水汽流出量

10 月西边界的整层水汽流入较 9 月明显增加,这是由于高空西风带季节性南移影响云南造成的,东边界受西风带南移和副高的东退影响使整层水汽

由流入转为流出,东、西边界正负异常年的差异不大,纬向收支仍为净收入,但比 9 月明显减少。北边界仍为净流出,正负异常年差异也不大,差异最大的

是南边界,表明正异常年西风带上南支槽和西南季风比负异常年活跃。

从云南 11 月降水正负异常年的水汽量可看出,11 月云南上空的西风带比 10 月加强,正负异常年西边界整层的水汽通量流入比 10 月要大,东边界由于副高的进一步东退,流出量较 10 月大幅增加,但流入西边界的水汽量与东边界的流出基本相当。随着大气环流的调整,云南由湿季进入干季,降水明显减少,各边界正负异常年水汽通量的差异也明显减小,差异较大的是东、北边界的低层和西、南边界的整层,表明 11 月云南降水的主要影响系统是低层冷高压东南部的东北气流(冷空气)和西风带南支槽前的西南气流,在正异常年这些系统较负异常年活跃。

综上所述,在 9—11 月水汽的净收支上,9 月受季风和副高的影响,纬向的净收入非常大,10 月随着季风的减弱、西风带的南移影响和副高的东退,纬向的净收入有所减弱,11 月在西风带的控制之下,纬向上整层的水汽收支已经非常小。而经向的水汽收支在 9—11 月有从支出到略有流入的转换。从正负异常年整层和低层云南上空水汽的净收支看,除 11 月的负异常年为水汽源外,其他情况都为水汽汇。与 9—11 月降水的逐月减少一致,水汽收入也呈逐月减少的形势,并且无论整层还是低层都是正异常年大于负异常年。

5 再分析资料在云南水汽应用的对比探讨

关于几种再分析资料的代表性问题,许多专家作了研究,荀学义等(2011)的分析认为 ERA40 与 NCEP1 再分析资料在青藏高原地区具有相似性,在高原中部和南部地区 NCEP1 除 1980—1990 年在高层优于 ERA40 外,ERA40 在年际变化上更接近于探空资料;陈际龙等(2008)研究表明 ERA40 描述亚洲夏季风水汽输送年际、年代际变化的能力强于 NCEP1 再分析资料。最近,宋丰飞等(2012)对 ERA40、NCEP1 和 20CR 再分析资料对东亚夏季风区进行评估,认为除 NCEP1 在 1967 年之前存在偏差外,NCEP1、ERA40 和 20CR 再分析资料描述的东亚夏季风变率在其他时段高度一致;3 套资料在以纬向风为基础的东亚夏季风指数上的一致性,高

于以经向风为基础的东亚夏季风指数,其中以低层纬向风为基础的东亚夏季风指数的一致性最高;20CR 再分析资料可以较好地再现与东亚夏季风相联系的地表气温和降水年际变化特征,并且其描述的降水在孟加拉湾和长江流域较之另外两套再分析资料更接近观测结果。马涛等(2011)用云南丽江、昆明、腾冲、蒙自、思茅探空站计算的大气可降水量与用 20CR 再分析资料计算的可降水量分布趋势一致,具有从西北向南逐渐递增的特点,再分析资料计算的大气可降水量与实况比较接近;另外,任菊章等(2014)用云南昆明、丽江、大理、蒙自、德钦、腾冲、临沧、勐腊 8 个地基 GPS 水汽探测站的资料与用 NCEP1、NCEP2 再分析资料计算的水汽含量基本一致。

本文的上述结果是基于 20CR 再分析资料得到的,为进一步验证 20CR 再分析资料在云南的可用性,用 ERA-Interim 再分析资料进行对比,仍选取本文中 9—11 月降水正负异常年进行对比,考虑到 ERA-Interim 从 1979 年有资料,取 9 月的正异常年有 1985、1987、1991、1995、1997 年共 5 年,负异常年为 1998、2006、2008 年共 3 年;10 月正异常年有:1986、1989、1992、2001、2006 年共 5 年;负异常年有:1981、1985、1987、1998、2003、2004 年共 6 年;11 月正异常年有 1983、1995、1999 年共 3 年,负异常年是 1980、1984、1993、2003 年共 4 年。

表 5 是分别用 ERA-Interim 再分析资料与 20CR 再分析资料计算的各层水汽量差值情况,从表 5 中可看出,两套资料反映的云南西、东、南、北边界水汽的流入、流出是基本吻合的,并且误差都不大,说明对云南影响的趋势是一致的;在纬向、经向水汽输送方面,除 10 月正异常年经向上整层的水汽误差为 13.2×10^{10} t 最大外,其次是 9 月负异常年纬向、经向整层水汽误差分别为 8.36×10^{10} 和 8.45×10^{10} t 相对较大。从水汽净收支来看,正负异常年整层和低层云南上空水汽的净收支变化一致,如在表 4 中,11 月降水负异常时为水汽源,两套资料计算的水汽也为负值(表略)对应的也很好,其他情景时为水汽汇均较一致。另外,从表 5 还可看出水汽在对流层低层的误差很小,但整层的情况略偏大,总体来讲两套资料的误差不大。因此,本文的结果是可信的。

表 5 ERA-Interim 与 20CR 计算的正负异常年云南的水汽差 (单位: 10^{10} t)

Table 5 The positive and negative anomaly difference in Yunnan water vapor, calculated by ERA-Interim and 20CR data (unit: 10^{10} t)

月份	对流层	西边界	东边界	南边界	北边界	纬向	经向	净收支
9 月正异常年	地面至 700 hPa	-4.75	1.43	-0.50	1.89	-3.32	1.39	-1.93
	地面至 300 hPa	-3.81	-0.50	-0.12	6.05	-4.31	5.93	1.62
9 月负异常年	地面至 700 hPa	-6.57	1.08	2.19	1.68	-5.49	3.87	-1.62
	地面至 300 hPa	-9.59	1.23	3.86	4.59	-8.36	8.45	0.09
10 月正异常年	地面至 700 hPa	-3.86	0.17	4.53	2.47	-3.69	7.00	3.31
	地面至 300 hPa	-4.82	-3.01	8.97	4.26	-7.83	13.23	5.4
10 月负异常年	地面至 700 hPa	-2.36	0.00	2.38	1.98	-2.36	4.36	2.00
	地面至 300 hPa	-5.46	0.11	3.86	3.52	-5.35	7.38	2.03
11 月正异常年	地面至 700 hPa	-3.35	1.64	0.87	1.15	-1.71	2.02	0.31
	地面至 300 hPa	-7.57	2.75	1.86	2.74	-4.82	4.60	-0.22
11 月负异常年	地面至 700 hPa	-2.69	1.24	-0.03	1.60	-1.45	1.57	1.08
	地面至 300 hPa	-7.77	6.18	-0.92	2.08	-1.59	1.16	-0.43

6 结 论

通过以上分析,得到以下结论:

(1) 云南 11 月降水场与水汽通量场和水汽通量散度场耦合程度最高,其次是 10 和 9 月,表明影响 9、10 月降水的天气系统较复杂。

(2) 在降水的空间分布型上,云南秋季降水与水汽通量输送、水汽通量散度的相关基本为一致的正相关;秋季降水量场与水汽通量场的时间变化趋势一致,具有明显的年际及年代变化特征,表明水汽输送通量、水汽通量散度的变化直接影响降水的变化。

(3) 当 9 月云南降水偏多时孟加拉湾季风偏强,副高偏弱偏东,冷空气活跃;反之孟加拉湾季风偏弱,副高偏强偏西,冷空气不活跃。当 10 月降水偏多时南支槽和西南季风活跃,影响云南的偏南暖湿气流强盛;而云南降水偏少时南支槽不活跃,暖湿气流偏弱,云南为异常偏北风影响。当 11 月南支槽和影响云南的冷空气活跃,云南上空有冷暖气流交汇,有利于降水;而当南支槽和影响云南的冷空气不活跃,云南降水偏少。

(4) 在水汽净收支方面,9 月受季风和副高的影响,纬向的净收入非常大,而 10 月随着季风的减弱、西风带的南移影响和副高的东退,纬向的净收入减弱,11 月在西风带的控制之下,纬向的整层水汽收支已非常小。而经向上的水汽收支在 9—11 月有从支出到流入的转换。从云南正负异常年整层和低层上空水汽净收支来看,除 11 月负异常年为水汽源

外,其他均为水汽汇。

(5) 与 9—11 月降水的逐月减少一致,水汽收入也呈逐月减少的形势,并且无论整层还是低层都是正异常年大于负异常年。

(6) 用 ERA-Interim 再分析资料与 20CR 再分析资料计算的云南水汽误差不大,并且正负异常年水汽净收支变化一致。

参考文献

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候. 高原气象,23(1):1-10.

陈际龙,黄荣辉. 2008. 亚洲夏季风水汽输送的年际年代际变化与中国旱涝的关系. 地球物理学报,51(2):352-359.

冯雷,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. 高原气象,27(3):491-499.

黄嘉佑. 2004. 气象统计分析与预报方法. 北京:气象出版社,1-298.

何华,孙绩华. 2003. 云南冷锋切变暴雨过程的环流及水汽输送特征. 气象,29(4):48-52.

荀学义,胡泽勇,孙俊,等. 2011. 高原地区 ERA40 与 NCEP1 再分析资料对比分析. 气象科技,39(4):392-400.

刘德,李永华,高阳华,等. 2005. 重庆夏季旱涝的欧亚环流特征分析. 高原气象,24(2):275-279.

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

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

吕俊梅,踞建华,任菊章,等. 2012. 热带大气 MJO 活动异常对 2009—2010 年云南极端干旱的影响. 中国科学(地球科学),42(4):599-613.

马涛,张万诚,付睿. 2011. 云南空中水资源的季节变化研究. 成都信息工程学院学报,26(5):486-493.

齐庆华. 2009. 西北太平洋水汽输送异常及其与中国夏季降水的耦合模态. 海洋科学,33(9):35-41.

任菊章,孙绩华,李建,等. 2014. 青藏高原东缘 GPS 探测资料与 3 类再分析水汽资料的对比. 高原气象,待发表.

石文静,肖子牛. 2013. 近 60 年索马里急流越赤道水汽输送的变化特征及对中国初夏降水的影响. 气象,39(1):39-45.

史玉光,孙照渤. 2008. 新疆水汽输送的气候特征及其变化. 高原气象,27(2):310-319.

宋丰飞,周天军. 2012. 20CR 再分析资料在东亚夏季风区的质量评估. 大气科学,36(6):1207-1222.

陶诗言,伊兰. 1999. 青藏高原在亚洲季风区水分循环中的作用//陶诗言,陈联寿,徐祥德,等编著. 第二次青藏高原大气科学试验理论研究进展. 北京:气象出版社,204-214.

魏风英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京:气象出版社,1-296.

解明恩,张万诚. 2000. 云南短期气候预测方法与模型. 北京:气象出版社,1-290.

谢义炳,戴武杰. 1959. 中国东部地区夏季水汽输送个例计算. 气象学报,30(2):174-185.

徐祥德,陶诗言,王继红,等. 2002. 青藏高原一季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域负异常正异常异常的关系. 气象学报,60(3):259-265.

严华生,李艳,晏红明,等. 2002. 热带海温变化对云南初夏干湿转换季节雨量的影响. 热带气象学报,18(2):165-172.

杨亚力,杜岩,陈海山,等. 2011. ENSO 事件对云南及临近地区春末初夏降水的影响. 大气科学,35(4):729-738.

张万诚,汤阳,郑建萌,等. 2012. 夏季风水汽输送对云南夏季旱涝的影响. 自然资源学报,27(2):293-301.

张万诚,万云霞,任菊章,等. 2011. 水汽输送异常对 2009 年秋冬季云南降水的影响研究. 高原气象,30(6):1534-1542.

张万诚,郑建萌,解明恩. 2002. 典型相关方法在低纬高原汛期降水预报中的应用试验. 气象,28(6):32-34.

郑建萌,朱红梅,曹杰. 2007. 云南 5 月雨量与全球海温的关系分析研究. 云南大学学报,29(2):160-166.

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. 高原气象,24(6):880-888.

周国莲,宴红明. 2007. 云南近 40 年降水量的时空分布特征. 云南大学学报,29(1):55-61.

周晋红,李丽平,武捷. 2011. 山西春季典型干湿年份水汽输送特征差异. 气象,37(10):1270-1276.

Benton G S, Estoque M A. 1954. Water-vapor transform over the North American Continent. J Met,11(6):462-477.

Starr V P, White R M. 1955. Direct measurement of the hemispheric poleward flux of water vapor. Meteor Res,14:217-225.

Yatagai A, Yasunari T. 1998. Variation of summer water vapor transport related to precipitation over and around the arid region in the interior of the Eurasian Continent. J Meteor Soc Japan,76(5):799-815.