

任冉,单婵,张羽,等,2017. 夏季云贵高原地区降水特征及云水资源的匹配[J]. 气象,43(3):315-322.

夏季云贵高原地区降水特征及云水资源的匹配^{*1}

任冉¹ 单婵² 张羽³ 丁维新¹ 顾源¹ 娄丹⁴

1 江苏省仪征市气象局,仪征 211400

2 江苏省气象服务中心,南京 210044

3 贵州省贵阳市气象局,贵阳 550000

4 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

提 要: 基于云贵高原地区 1961—2010 年高分辨率(0.5°×0.5°)逐日降水格点资料,分析了云贵高原及东、西两个区域的夏季降水变化特征。并结合欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 1979—2010 年 ERA-Interim 再分析资料,计算了其夏季水汽输送通量和净水汽收支。结果表明:(1) 云贵高原夏季平均降水分布不均匀,存在区域差异:云贵高原西部的中部为降水量低值区,其向南、向西逐渐增加;东部由其东南部向西北部递减的分布形式。(2) 将云贵高原分成两个区域,东、西部区域的降水都呈增加的趋势,降水量较高的区域降水增长速度较快。(3) 大气中的水汽从云贵高原南边界和西边界进入,从北边界和东边界流出,全区以净水汽输出为主,输出值与降水的变化都呈增长趋势。其中东部水汽为净输入;西部为净输出,向各区域的水汽输送量逐渐增加与各区降水量呈增长趋势变化同样相一致。(4) 影响西部夏季降水的水汽主要源于孟加拉湾北部、南海北部和横断山到四川盆地地区,而东部水汽主要来自南海北部和四川盆地西部。

关键词: 云贵高原, 云水资源, 水汽输送与收支

中图分类号: P339

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.03.007

Spatio-Temporal Characteristics of Precipitation and Water Vapor Resource over the Yunnan-Guizhou Plateau in Summer

REN Ran¹ SHAN Chan² ZHANG Yu³ DING Weixin¹ GU Yuan¹ LOU Dan⁴

1 Yizheng Meteorological Office of Jiangsu, Yizheng 211400

2 Jiangsu Meteorological Service Centre, Nanjing 210044

3 Guiyang Meteorological Bureau, Guiyang 550000

4 Collaborative Innovation Centre on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Based on high resolution (0.5°×0.5°) daily precipitation data from 1961 to 2010, the spatio-temporal characteristics of summer rainfall over the eastern, western and whole Yunnan-Guizhou Plateau (hereafter YGP) were investigated. Besides, using the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Interim Reanalysis data (ERA-Interim hereafter) from 1979 to 2010, we examined the average water vapor flux over the YGP in summer. The results show that the distribution of climatological annual precipitation in YGP is uneven. A dry center is located in the middle of the western YGP and it increases gradually southward and westward. Meanwhile, precipitation over the eastern YGP decreases from southeast to northwest. The YGP is divided into eastern YGP (EYGP) and western YGP (WYGP). The precipitation over the two parts increases with higher increase rate of rainfall. In terms of water vapor

* 国家自然科学基金项目(41330529 和 41175077)共同资助

2015 年 12 月 30 日收稿; 2016 年 9 月 18 日收修定稿

第一作者:任冉,主要从事短期气候诊断与预测研究. Email:nuist_renran@163.com

transport, it mainly transports from southern and western boundaries to northern and eastern boundaries of the YGP. The whole YGP acts as a water vapor source annually. The net water vapor is positive in EYGP but negative in WYGP. The precipitation, however, increases over both regions. The water vapor over the WYGP is mainly from the northern part of the Bay of Bengal, the northern South China Sea and the area from the Hengduan Mountains to Sichuan Basin. As for the EYGP, the moisture is mainly from the northern South China Sea and western Sichuan Basin.

Key words: Yunnan-Guizhou Plateau, water vapor resource, water vapor transport flux and budget

引 言

云贵高原位于我国西南部、青藏高原的东南侧。其西起横断山脉,北邻四川盆地,东到湖南省雪峰山。总面积达 $5.6 \times 10^5 \text{ km}^2$,包括了云南省东部,贵州全省,广西壮族自治区西北部和四川、湖北、湖南等省边境,是我国南北走向和东北—西南走向两组山脉的交汇处,地势西北高、东南低,海拔在 400~3500 m,是中国的第四大高原(郑小波等,2010)。云贵高原位于长江上游,其降水的气候变化和云水资源分布,不仅影响着云贵高原本身的气候的变化,同时也影响着长江下游乃至我国东部人口的水资源利用问题。因此对其进行探索和研究具有极为重要的意义。

由于地处低纬高原,受季风的影响,具有明显的干、湿季特征(秦剑等,1997)。同时也因复杂的地形,云贵高原有干热的河谷也有常年积雪的高山,其海拔落差之大造成降水的不均匀分布。前人也因此对云贵高原降水的气候变化做了不少很有价值的工作(肖子牛等,2016)。陶云和何群(2008)利用了云南 122 个测站逐年降水量观测资料分析了降水的时空变化特征,发现 1961—2006 年云南降水量夏秋减少,春、冬季增加;王维佳和赵兴炳(2012)使用云贵高原地区 8 个站的地基 GPS 资料分析了其上空的可降水量的特征,发现全年云贵高原可降水量较丰富达 8000 mm 以上。可降水量在湿季远远大于干季,在 7 月达到最高值;2 月位于最低值。王雪峰等(2010)使用常规气象站逐日降水量定义了站点强降水和极端降水阈值,发现云贵高原汛期强降水和极端降水阈值地理分布差异较大,与汛期降水量关系不大,而与站点海拔高度显著负相关。但对于云水资源的研究来说,只分析降水的变化是远远不够的。云水资源的分布和水汽的输送等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。Lin et al(2016)通过分析影响青藏高原的两个大气环流场对高原水汽输送的调节作用,并指出了垂直方向上水汽进出青藏高原 4 条边界的较详细信息。Draxler and Hess(1998)开发了供质点轨迹、扩散及沉降分析用的综合模式 HYSPLIT_4.9。因此使用该模式,对云贵高原水汽的源地以及各源地水汽贡献进行定量分析(江志红等,2011)。这也可以为提高云贵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。特别是利用从地表开始向上垂直积分的长时段水汽输送(马京津和高晓清,2006;黄荣辉和陈际龙,2010;徐祥德等,2003;周长艳等,2005;张万诚等,2014)来研究云贵高原地区的水汽输送研究相对较少。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)。因此本文结合降水的变化特征,计算了垂直积分的水汽通量,分析了云贵高原地区大尺度水汽输送空间配置的特征,这对在全球气候变暖的背景条件下,研究云贵高原降水的变化特征以及认识高原水资源分布和利用具有极其重要的意义,为探讨该地区云水资源的气候变化及应对措施提供依据。

1 资料和方法

1.1 资料

降水资料选取中国气象局气候研究开放实验室基于 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(50 a) $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 经纬度分辨率的格点化数据集(吴佳和高学杰,2013;Xu et al,2009),根据该格点资料选取 $23^\circ \sim 27^\circ \text{N}$ 、 $100^\circ \sim 110^\circ \text{E}$ 作为所研究云贵高原的范围。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 (32 a) 月平均 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 U 、 V 风场和比湿场以及地面气压场, 来研究云贵高原及附近整层垂直积分的水汽输送特征。

1.2 方法

采用一元线性回归、多项式拟合、 t 检验等相关统计方法 (魏凤英, 1999) 计算云贵高原夏季降水的空间分布和趋势变化。

$$y(t) = ct + b \quad (1)$$

$$Q = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} \mathbf{V}q dp \quad (2)$$

$$Q_{\text{纬}} = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} uq dp \quad (3)$$

$$Q_{\text{经}} = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} \omega q dp \quad (4)$$

$$F_{\text{纬}} = \int Q_{\text{纬}} a d\Phi \quad (5)$$

$$F_{\text{经}} = \int Q_{\text{经}} a \cos\Phi d\lambda \quad (6)$$

$$D_{\text{总}} = \sum (F_{\text{纬}}, F_{\text{经}}) \quad (7)$$

用一元线性回归方程来描述气候要素的变化趋势 (张家宝和史玉光, 2002), 即式 (1) 中: t 为年序列; c, b 为经验常数, 可通过最小二乘法计算求取, 其中 c 表示线性方程的斜率, 并用 $c \times 10$ 来表示降水的线性变化趋势。 $c \times 10$ 为正 (负) 表示增加 (减小) 趋势, 0 表示无变化趋势。式 (2) 是整层大气水汽输送通量公式: 该式包括纬向 [式 (3)] 和经向 [式 (4)] 的水汽输送通量。其中, \mathbf{V} 为各层大气的风速矢量, q 是各层大气的比湿, p_t, p_s 分别为上界气压 (取 300 hPa) 和地面气压, g 是重力加速度。并以箱法从边界纬向 [式 (5)]、经向 [式 (6)] 水汽收支以及区域水汽净收支 [式 (7)] 等方面计算了区域水汽收支特征。式中, Φ 为纬度, λ 为经度, a 为地球半径 (王平等, 2010; 解承莹等, 2014)。计算中人为设定水汽收支为正值时表示水汽向云贵高原输送, 负值时表示水汽输出高原。为了进一步分析云贵高原的水汽收支情况, 将云贵高原以 105°E 为分界线, 分为东西两个区域来分析 (郭慧等, 2013)。

2 近 32 年云贵高原夏季降水变化

总体来说, 云贵高原夏季降水相对较为充沛, 大部分区域 32 年夏季平均降水量达 729.71 mm, 但

降水在区域分布上存在着明显的不一致性 (图 1)。位于高原东部即贵州省内降水主要呈由西南部向北部和东北部逐渐递减的分布趋势; 而位于云南省内的云贵高原西部平均降水量相对较大, 降水偏多: 从云南省的西南部向其中部年平均降水量逐渐递减, 在云南省中部和东部 (云、贵两省交界处) 各存在一个平均降水量低值中心。

对于云贵高原地区降水来说, 其变化具有显著的区域性。根据郭慧等 (2013) 应用经验正交函数和旋转经验正交函数方法对我国西部降水分区情况, 将从云贵高原东部和西部两个区域来对云贵高原地区降水变化进行研究。

从云贵高原全区夏季降水变化情况来看 (图 2a), 降水量呈增加趋势, 趋势值达 $21.26 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。图中明显看出云贵高原整体的降水振幅变化之大, 夏季降水的最大值出现在 1979 年, 降水达 796.6 mm; 而在 1989 年夏季降水最少, 只有 473.87 mm。

再从两个区的降水多少来看, 东部夏季平均降水量达 827.13 mm, 明显大于西部区域的 632.29 mm。同时东部降水变化趋势 [$33.78 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] 也较西部 [$8.74 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] 更大, 即降水较大的区域, 其年平均降水量的增长趋势也较大。对于云贵高原的东部地区 (图 2b), 其平均降水的年代际变化与全区大体一致, 都是在 20 世纪 80 年代呈减少趋势, 在 20 世纪 90 年代末到 21 世纪初变化相对稳定变化幅度较小, 之后变化振幅开始增大。出现这种现象很可能是东部区域降水量占全区比重较大, 其变化趋势应与全区的年平均降水量变化相近。相比之下, 西部地区的年降水量 (图 2c) 在 80 年代末到 90 年代初和 21 世纪之后变化幅度较大, 其他年代中变化相对平缓。

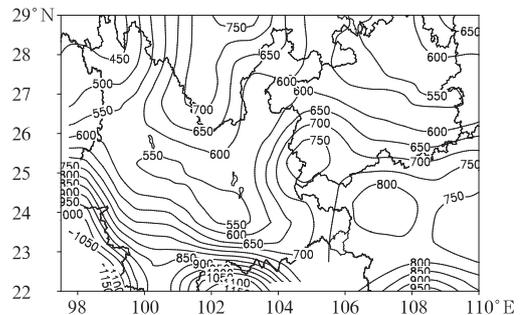


图 1 云贵高原夏季平均降水量空间分布图 (单位: mm)

Fig. 1 Distribution of summer mean precipitation over the Yunnan-Guizhou Plateau (unit: mm)

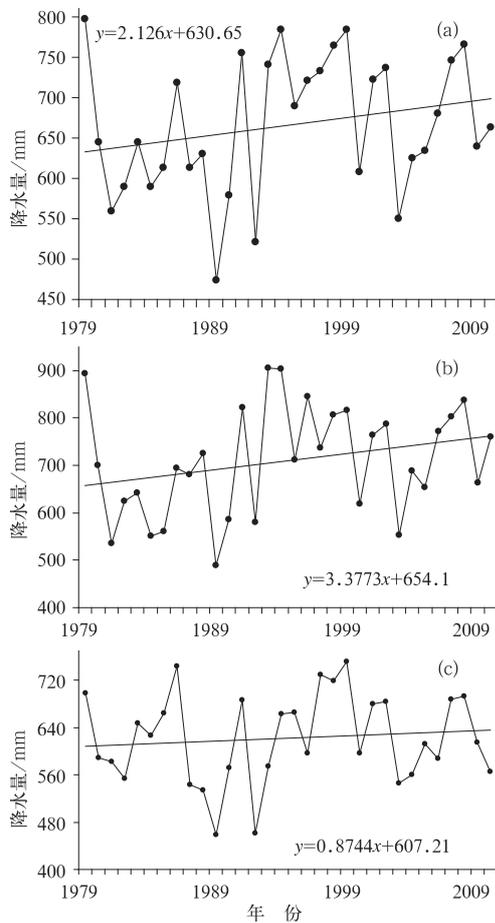


图 2 1979—2010 年云贵高原全区(a)和东区(b)、西区(c)夏季降水量逐年变化

Fig. 2 Annual variation of summer mean precipitation over the whole (a), eastern (b) and western (c) Yunnan-Guizhou Plateau during 1979–2010

云贵高原夏季降水的气候分布和变化存在明显的区域性。这种夏季降水大振幅的变化对生活在此居民的生产和生活来说,带来较大的不确定性和不可防范性。这种降水的变化与当地的云水资源的分布和输送是紧密不可分割的。为了探究此种降水分布格局的原因,下文将从云贵高原的云水资源气候分布和变化的角度进行探究。

3 影响云贵高原夏季降水的水汽条件

水分的循环是全球气候系统中十分重要的过程,而大气中的云水作为大气水循环的一个重要环节,对区域性降水的发生和影响是密不可分的。云贵高原地区的降水主要集中在夏季,而夏季极端降

水多发,易导致山洪泥石流灾害,因此很有必要对该地区夏季大气水汽输送情况和降水量的关系进行讨论。这对云贵地区的洪涝与干旱的预警和防治有重大的指导意义。

3.1 云贵高原地区水汽收支变化特征

首先,利用 ERA-Interim 再分析资料计算了云贵高原地区夏季多年平均的水汽输送情况(图 3)。可以看出,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,这条水汽输送带经过阿拉伯海得到了进一步加强,而在越过印度地区(陆地)时稍有减弱,随后进入孟加拉湾,其水汽量得到了补充。考虑到地形的影响作用,位于云贵高原西侧的那支水汽输送带受到高原地形的阻挡,其强度受到很大的削弱。而偏南的输送带经过老挝、越南等地区,在南海北部受到来自西太平洋东南向水汽输送的影响,转向成西南水汽输送带并穿过中国西南部、华南和华东等地区,最后到达西北太平洋地区。

为了定量研究云贵高原地区的水汽输送的特征,计算了高原全区的水汽收支情况(图 4,表 1)。全区的水汽净收支以水汽向外输出为主,年平均输出量达 $1.1 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 1)。图 4a 中,全区的水汽净输送逐年呈增长趋势,趋势达 $1.3 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (表 2)。在这 32 年间,水汽有逐渐从向高原外部输出转向逐渐输入的变化趋势。这种增加趋势与全区降水的逐年增加是一致的。

大气中的水汽主要从云贵高原地区的南边界和西边界进入并从北边界和东边界输送出高原。水汽从南边界进入云贵高原较西边界变化幅度较大,且平均值稍大,平均水汽输送值分别为 57.0×10^6 和 $48.2 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。对于两个水汽输出边界来说,东边界的水汽输出量明显大于北边界。纬向上水汽以净输出为主;经向上以输入为主。全区主要受到来自南面的水汽影响。

通过计算云贵高原东、西两个区域的水汽输送收支情况(表 1,表 2)表明,两个区域的水汽净收支都呈增长趋势,即水汽向各区输送的量在逐渐增多,给降水的形成创造了更有利的条件,这和各区降水呈增长趋势的变化相一致。

云贵高原东部地区水汽向高原呈现净输入,平均年输入量达 $1.1 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$;而其西部地区为

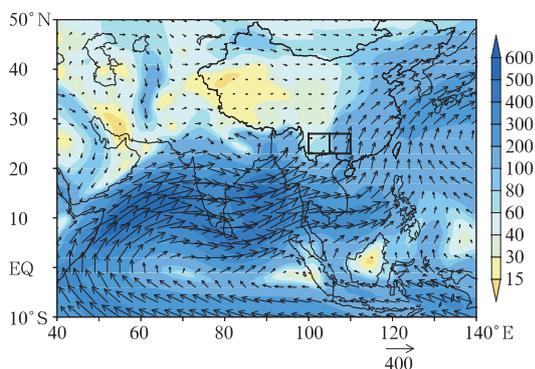


图 3 1979—2010 年云贵高原周围夏季平均水汽通量场(单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 3 Averaged moisture flux in summer around the Yunnan-Guizhou Plateau during 1979 to 2010 (unit: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

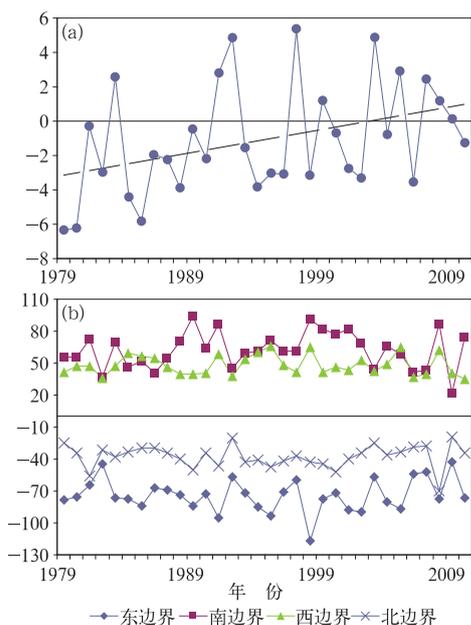


图 4 1979—2010 年云贵高原全区(a)、各边(b)夏季平均水汽净输送变化(单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 4 Net transport variation of summer average water vapor over the whole Yunnan-Guizhou Plateau (a) and around all boundaries (b) during 1979—2010 (unit: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

水汽的净输出,平均年输出量为 $2.2 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。且水汽通过东部南、北边界的输送值都比北部地区的大。在图 3 中也可明显看出云贵高原的东部水汽的输送量明显大于西部。对比两区降水可以发现:从降水水汽输送通量场的分布形式上看出两者有着惊人的相似性,云贵高原西部西南侧为高大地形阻挡,夏季水汽由云贵高原西南侧输送至此,被地形拦

截形成水汽的爬坡效应,水汽在云贵高原的西南坡抬升降水,在图 1 中表现为云贵高原西南部降水等值线由西南至东北递减,且降水梯度较大;图 3 中则表现为水汽集中在西部的西南侧,当富足水汽绕过该高地形后移经东部形成丰富的水汽输送区,这也造成了东部大于西部的平均降水量这一事实。

表 1 1979—2010 年云贵高原夏季平均水汽收支量(单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 1 Summer average water vapor budget over the Yunnan-Guizhou Plateau during 1979—2010 (unit: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

	西部地区	东部地区	全区
东边界	-62.7	-74.1	-74.1
南边界	25.6	36.8	62.4
西边界	48.2	62.7	48.2
北边界	-13.3	-24.3	-37.6
总输出	-76.0	-98.4	-111.7
总输入	73.8	99.5	110.6
区域净收支	-2.2	1.1	-1.1

表 2 1979—2010 年云贵高原夏季水汽收支线性趋势 [单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]

Table 2 Linear trend of summer water vapor budget over the Yunnan-Guizhou Plateau during 1979—2010 [unit: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]

	西部地区	东部地区	全区
东边界	1.7*	0.9*	0.9*
南边界	0.1	0.9*	1.1*
西边界	-0.2*	-1.7*	-0.2*
北边界	-0.6*	0.2*	-0.4*
总输出	1.1*	-0.8*	0.5*
总输入	-0.1	1.1*	0.8*
区域净收支	1.0*	0.5*	1.3*

注: * 为通过 0.10 显著性检验水平。

Note: * represents that having passed the 0.10 level of significance test.

3.2 影响降水的大气水汽输送分布

水汽输送通量在云贵高原的东、西部存在和降水量相类似的分布形式。各区的降水受到哪些区域的水汽输送的影响呢?为此,将全区、东部区域和西部区域的夏季降水量和大气水汽输送场的矢量模做了相关得到图 5。

对于全区的夏季降水量(图 5a),相关系数正值区主要位于云贵高原以南、以西区域:孟加拉湾北部和南海北部,即当孟加拉湾和南海北部地区的水汽输送加强时云贵高原的降水量将会增多。系数的负值区位于云贵高原的北侧,横断山到四川盆地地区。这是由于云贵高原西边界和南边界是水汽的主要区域,当孟加拉湾北部和南海北部的水汽输送加强时水汽分别从西边界和南边界进入云贵高原的量值增

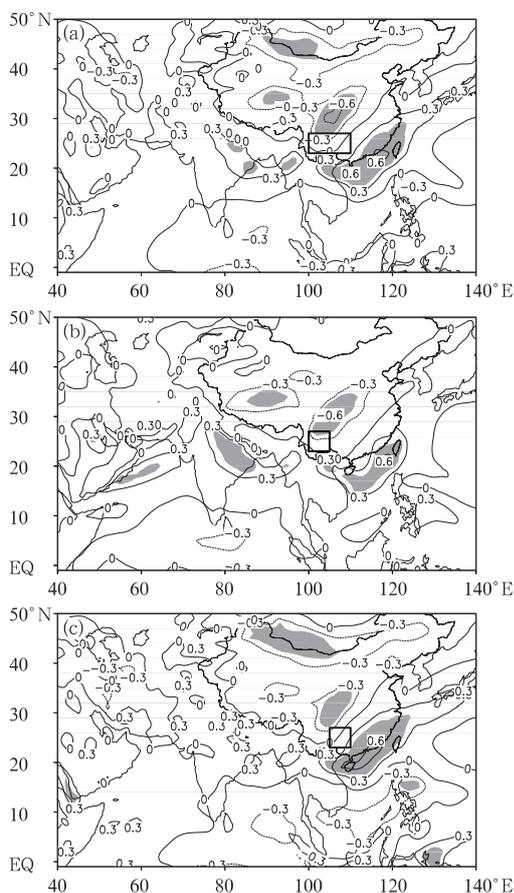


图 5 1979—2010 年云贵夏季全区(a)、西区(b)和东区(c)降水与水汽输送通量场的相关分布(阴影为通过 0.05 的显著性水平检验)

Fig. 5 Distribution of correlation coefficients between vapor transport flux and precipitation in summer over the whole (a), western (b) and eastern (c) Yunnan-Guizhou Plateau during 1979—2010 (The area having passed the 0.05 level of significance test is shaded)

大导致降水增加;而当高原北部的水汽输送加强会引起更多的水汽向着高原外部输送,降水减少。

结合前面的结论发现:在图 3 中,从孟加拉湾流经的那支水汽带在云贵高原西部的西侧受到地形阻挡作用,绝大多数水汽爬坡形成降水,造成图 1 中西部地区西侧和南侧具有较大降水梯度的分布形式出现,而真正进入西部腹地的降水量相对较少;而同样是图 3 中的水汽输送带受到高大地形阻挡,在高原南侧形成绕流,在云贵高原东部地区的南侧转向通过东部区域向东北方向输送并不断形成降水,进而逐渐减弱,这一过程导致了图 1 中东部区域夏季降水由西南向东北方向逐渐减少的分布形式。

对比图 5b 和 5c 可以看出,云贵高原西部地区降水主要与阿拉伯海北部、孟加拉湾西北部、南海北部存在正相关关系;与青藏高原北部和横断山四川盆地的大部分地区存在负相关关系。而东部地区降水主要受南海北部地区水汽输送正的影响以及四川盆地西部的负影响。相比较而言,进入云贵高原西部的水汽主要来自位于阿拉伯海北部、孟加拉湾北部和南海北部;而东部水汽主要来自南海北部。

3.3 云贵高原上空 500 hPa 层的风速变化

尽管近 32 年,两区的降水和净水汽输送量都呈

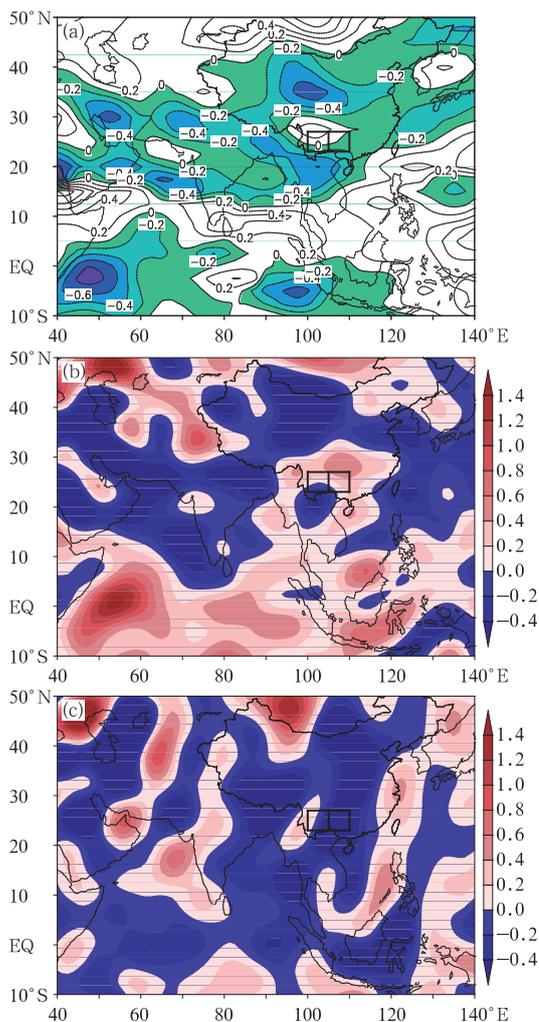


图 6 云贵高原及其四周 500 hPa 层 2000—2010 年与 1979—2010 年平均全风速(a)、纬向风速(b)和经向风速(c)的差值场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Differences of the average wind speed (a), zonal wind speed (b), meridional wind speed (c) at 500 hPa between the periods of 2000—2014 and 1979—2010 over the Yunnan-Guizhou Plateau and the surrounding areas (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

增加趋势,但是留意可以发现,不论是降水还是水汽输送量在21世纪里都存在一定的减弱趋势,而中国气象局发布的《中国气候变化监测公报2014》(中国气象局气候变化中心,2015)上也提到南亚季风指数、相对湿度以及全国近地面风速在近10年的减弱现象。其中,云贵高原的水汽输送是一个动力输送过程,其减弱的原因分析离不开对该动力过程的分析,相对湿度也是反映干湿状况的一个物理量,对水资源的变化有一定的指示作用。早在2010年Hardwick et al(2010)和Simmons et al(2010)都发现了全球大部分地区存在温度升高但相对湿度却减少的变化事实。云贵高原周边的地表的相对湿度在2000年之后迅速减小(You et al,2015)。因此,分析了500 hPa层的风速变化。以2000年为分界时间点。2000年之后500 hPa层的全风速相对于近32年的年平均,在云贵高原水汽上游大部分区域全风速都较弱(图6a);对于纬向风(图6b),2000年之后的时间段中,云贵高原水汽输送的上游区域,风速相对减少较多,从源头阻断了水汽向云贵高原输送;而云贵高原四周大部分地区的经向风在2000年之后的变化也处于减弱的状态,尤其是高原水汽输送主要来源的南边界以南(图6c)。经向风的减弱可能是导致向云贵高原降水减少以及输送水汽减少的直接原因。

4 结论与讨论

基于高分辨率降水资料,分析了云贵高原夏季降水的特征。并通过计算,统计分析了云贵高原夏季水汽输送通量的变化与分布以及该地区夏季水汽的收支情况,发现水汽的输送路径与两个区域的降水分布以及变化趋势上有很好的—致性。对本文主要结论讨论如下:

(1) 全区夏季降水量呈 $21.26 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的趋势增长。且云贵高原夏季平均降水分布不均匀,存在区域差异性。位于高原东部即贵州省内降水主要呈由西南部向北部和东北部逐渐递减的分布趋势,云贵高原的降水分布情况与青藏高原的降水分布特征(鲁春霞等,2007)比较相似;而位于云南省内的云贵高原西部平均降水量相对较大,降水偏多:从云南省的西南部向其中部年平均降水量是逐渐递减,在云南省中部和东部(云、贵两省交界处)各存在一个平均降水量低值中心。

(2) 将云贵高原分成东部和西部两个区域,发现东部夏季平均降水量达 827.13 mm ,明显大于西部区域的 632.29 mm 。两个区域的降水都呈增加的趋势,降水量较高的区域[东部, $33.78 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;西部, $8.74 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]降水增长速度也高于较低区域。

(3) 分析云贵高原上云水资源的分布变化特征发现:位于东部地区的云水资源含量较西部的更加丰富、充足。这与两个区域降水的分布形式是一致的。从水汽的输送方面来看,大气中水汽从云贵高原南边界和西边界进入高原,从北边界和东边界出高原,全区以净水汽输出为主,输出值呈增长趋势。云贵高原东部水汽为净输入西部为净输出,水汽向各区域的输送量逐渐增加与各区降水量呈增长趋势变化一致。

然而对于云贵高原的水汽输送的垂直项和其影响因素在本文中尚未分析,这也是找到调节降水多少以及其分布情况的最根本的影响因素,也是下一步研究需要关注的一方面。

(4) 云贵高原降水主要与孟加拉湾北部、南海北部和横断山到四川盆地地区的水汽输送通量的大小有关。进入云贵高原西部的水汽主要来自阿拉伯海北部、孟加拉湾北部和南海北部;而东部水汽主要来自南海北部。本文对影响云贵高原降水变化的水汽输送条件做了一定程度的相关性分析,找到了进入云贵高原东、西部水汽源地大致位置。但是这里只是做了定性的研究,还不能回答影响云贵高原地区降水的水汽源地的范围以及各源地水汽对该地区的贡献占多少比重等问题。这些问题还有待进一步研究。

参考文献

- 郭慧,李栋梁,林纾,等,2013.近50多年来我国西部地区降水的时空变化特征[J].冰川冻土,35(5):1165-1175.
- 黄荣辉,陈际龙,2010.我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异[J].大气科学,34(6):1035-1045.
- 江志红,梁卓然,刘征宇,等,2011.2007年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析[J].大气科学,35(2):361-371.
- 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.
- 马京津,高晓清,2006.华北地区夏季平均水汽输送通量和轨迹的分析[J].高原气象,25(5):893-899.
- 秦剑,据建华,解明恩,1997.低纬高原天气气候[M].北京:气象出版社:1-20.
- 陶云,何群,2008.云南降水量时空分布特征对气候变暖的响应[J].

- 云南大学学报:自然科学版,30(6):587-595.
- 王平,范广洲,董一平等,2010.四川空中水资源的稳定性与可开发性研究[J].自然资源学报,25(10):1762-1776.
- 王维佳,赵兴炳,2012.地基GPS遥测云贵高原可降水量特征[J].安徽农业科学,40(1):445-447.
- 王雪峰,郑小波,黄玮,等,2010.近47年云贵高原汛期强降水和极端降水变化特征[J].长江流域资源与环境,19(11):1350-1355.
- 魏凤英,1999.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社.
- 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他资料的对比[J].地球物理学报,56(4):1102-1111.
- 肖子牛,石文静,段玮,2016.云南夏季降水量在21世纪初的突变减少及原因分析[J].气象,42(3):261-270.
- 解承莹,李敏姣,张雪芹,2014.近30a青藏高原夏季空中水资源时空变化特征及其成因[J].自然资源学报,29(6):979-989.
- 徐祥德,陈联寿,王秀荣,等,2003.长江流域梅雨带水汽输送源-汇结构[J].科学通报,48(21):2288-2294.
- 张家宝,史玉光,2002.新疆气候变化及短期气候预测研究[M].北京:气象出版社:103-105.
- 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[J].气象,40(3):336-348.
- 郑小波,罗宇翔,段长春,等,2010.云贵高原近45年来日照及能见度变化及其成因初步分析[J].高原气象,29(4):992-998.
- 中国气象局气候变化中心,2015.中国气候变化监测公报(2014)[R].北京:科学出版社.
- 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.
- 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.
- 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, 137(656):553-597.
- Draxler R R, Hess G D, 1998. An overview of HYSPLIT_4 modeling system for trajectories dispersion and deposition[J]. Aust Meteor Mag, 47:295-308.
- Hardwick Jones, Westra R S, Sharma A, 2010. Observed relationships between extreme sub-daily precipitation, surface temperature, and relative humidity[J]. Geophys Res Lett, 37, L22805.
- Lin Houbo, You Qinglong, Zhang Yuqing, et al, 2016. Impact of large-scale circulation on the water vapor balance of the Tibetan Plateau in summer[J]. Int J Climatol. DOI:10.1002/joc.4626.
- Simmons A J, Willett K M, Jones P D, et al, 2010. Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets[J]. J Geophys Res, 115(D1):1-21.
- 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.
- You Q, Min J, Lin H, et al, 2015. Observed climatology and trend in relative humidity in the central and eastern Tibetan Plateau [J]. J Geophys Res Atmos, 120:3610-3621.