

徐 栋,孔 莹,王澄海. 西北干旱区水汽收支变化及其与降水的关系[J]. 干旱气象,2016,34(3):431-439, [XU Dong, KONG Ying, WANG Chenghai. Changes of Water Vapor Budget in Arid Area of Northwest China and Its Relationship with Precipitation[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(3):431-439], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-03-0431

西北干旱区水汽收支变化及其与降水的关系

徐 栋,孔 莹,王澄海

(甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,半干旱气候变化教育部重点实验室,
兰州大学大气科学学院,甘肃 兰州 730000)

摘 要:利用 NCEP 资料计算并分析 1961—2010 年西北干旱区(35°N—50°N,73°E—105°E)经纬向水汽输送、蒸发和水汽辐合辐散的变化特征,以及它们与同期西北干旱区降水之间的关系。结果显示:(1)西北干旱区冬、春、秋季经向水汽输送为净输入,纬向为净输出,总水汽输送为净输入。夏季经、纬向水汽输送均为净输出;(2)1961—2010 年,西北干旱区各季节降水均增加,冬、春季降水增加显著,夏、秋季降水增加不显著。冬季纬向水汽净输出减少,导致西北干旱区冬季总水汽输送增加;春、秋季经向净输入减少和夏季经向净输出增加,导致春、夏、秋季总水汽输送减少;(3)1961—2010 年,西北干旱区各季节蒸发量显著增加,且夏季增加趋势最显著;(4)各季节水汽通量散度显著减小,水汽辐合加强,且夏季水汽辐合增强最明显;(5)蒸发增大和水汽辐合增强是西北干旱区降水增加的主要原因,但外部水汽输送变化也会影响降水变化。

关键词:西北干旱区;降水;水汽输送;蒸发;水汽辐合

文章编号:1006-7639(2016)-03-09-0431 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-03-0431

中图分类号:P467

文献标识码:A

引 言

空气中的水汽集中在地球表面附近,在大气中所占的比例很小,平均而言水汽在大气中仅占 0.1%~3%,却是大气中最活跃的成分。水汽对气候和天气有重要影响,它在大气中的三相变化使大气中的能量发生改变,是形成云和降水的物质基础。中国西北地区(35°N—50°N,73°E—106°E)深居东亚内陆,处在青藏高原的北部和东北部^[1],因其位于高原北侧的气流辐散下沉带上,又远离海洋,干旱少雨,是中蒙干旱区的主体部分。

研究表明,随着全球变暖,干旱区气候发生了明显变化,过去 100 a 中全球干旱半干旱地区变得越来越干^[2-5]。从 20 世纪 60 年代开始,西非的半干旱地区降水持续 30 a 减少,其中 Sahel 地区的降水量减少 20%~40%;全球极端干旱区域的面积翻了一倍^[6];干旱半干旱地区因干旱造成的沙漠化面积扩张 10%~20%^[7]。施雅风等^[8]研究表明,全球大

幅度变暖,水循环加快,影响降水和蒸发,中国西北部从 19 世纪小冰期结束以来 100 a 左右处于波动性变暖变干过程中。Zhai 等^[9]研究表明 1951—2000 年间中国西部年降水和季节降水显著增加,极端降水事件也显著增加。王澄海等^[10]研究表明河西西部、南疆等地降水呈下降趋势,表现出与中国东部相同的趋势;而青海高原、天山以北地区和沙漠盆地等地呈现出上升趋势。

由于西北地区区内缺少河流、湖泊等水源,其外部输送是水汽重要来源,因而干旱区降水与外来的水汽联系紧密。西北地区水汽输送主要来自孟加拉湾、南海及西伯利亚和蒙古国方向^[11],且存在明显季节差异,春季西北区水汽来源主要是西北区东部;而夏季水汽则主要来自西北区西部^[12-13]。造成春季、夏季西北区水汽输送通道差异的原因,一方面与中高纬度的大气环流长波槽脊的季节性调整有关;另一方面则与东亚季风及印度季风的季节性转换有很大关系^[12]。何金海等^[14]研究指出,多雨年,

收稿日期:2015-12-22;改回日期:2016-01-26

基金项目:国家自然科学基金(41471034),中国气象局行业专项(GYHY201506001,CCSF2014)及兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2016-194)共同资助

作者简介:徐栋(1990-),男,硕士,主要从事干旱区气候研究. E-mail: xud2009@lzu.edu.cn

通讯作者:王澄海. E-mail: wch@lzu.edu.cn

来自北冰洋的偏西风距平输送气流和源于孟加拉湾及西太平洋的偏南风距平输送气流在西北东部地区汇合,而少雨年则正好相反,西北地区没有水汽的流入。

西北地区的水汽输送与东亚季风相关,东亚夏季风西北影响区降水的水汽来源于南风水汽通量;强夏季风年,到达东亚夏季风西北影响区的水汽通量显著增加,该区降水偏多,弱夏季风年则相反^[15]。在其他地区,降水与水汽输送关系紧密,Evans 等^[16]研究发现,纬向水汽通量给东新月沃地(the eastern Fertile Crescent region)带来更多的水汽,但经向水汽通量对于该地降水影响更大。另外一些研究表明^[17-19],冷锋过境往往存在增强的、狭长的水汽输送带,这种水汽输送带跟强降水和强降雪密切相关^[20-22]。

水汽辐合辐散也能影响降水,Starr 等^[23]早在 1958 年研究表明局地水汽含量与水汽输送通量的辐合(辐散)密切相关。Chen 等^[24]也研究表明东亚季风区水汽输送通量的辐合、辐散与 OLR 分布很一致;黄荣辉等^[25]研究也指出东亚季风区夏季降水与水汽的辐合、辐散有关。丁一汇等^[26]研究表明,1998 年长江流域大洪水期的强降水过程与水汽辐合的极大值密切相关,降水的强弱与水汽辐合的强弱变化一致。Qian 等^[27]在暴雨预报模型中加入水汽散度和水汽涡度参数,能够极大地提高暴雨中心位置的预测准确率。Bosilovich 等^[28]研究指出美国中部降水减少时对应水汽辐散增强。因此,水汽通量的辐合辐散是表征降水变化的一重要物理量。

降水的形成是由水汽和局地辐合等因素共同作用的结果,大部分的研究一般从环流角度来分析干旱区的水汽来源,或者往往只考虑干旱区水汽输送,而忽略蒸发和水汽辐合辐散的影响。本文结合水汽输送、蒸发和局地辐合辐散分析它们的综合作用对西北干旱区各季节降水的影响,以期揭示西北干旱区各季节降水变化的原因。

1 资料与方法

1.1 资料

资料主要有:(1)全球降水气候学中心(GPCC)提供的 1961—2010 年月平均降水资料(简称 GPCC),分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$;(2)美国国家环境预测中心(NCEP)和大气研究中心(NCAR)的 NCEP/NCAR 1961—2010 年经向风、纬向风、比湿数据资料,分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$;(3)欧洲中期数值预报中心(ECWMF)的 ERA40 1961—2002 年经向风、纬向

风、比湿数据资料,分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

1.2 方法

1.2.1 水汽输送的计算方法

为研究某一区域水汽输送,定义该区域某一方向整层水汽通量输入和输出之差为进入该区域内的水汽净输送,正为净输入,负为净输出(图 1)。

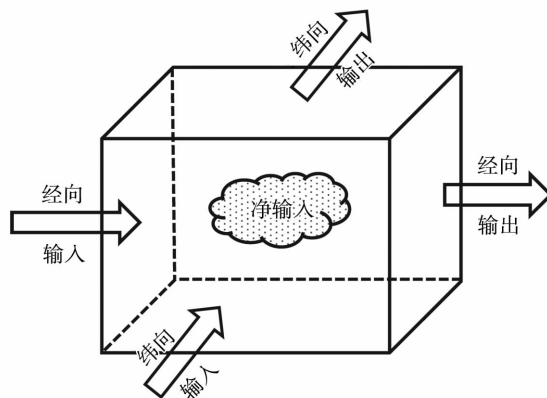


图 1 水汽输送示意图

Fig. 1 Sketch map of water vapor transport

计算公式如下:

$$\Phi = \int_{L_{in}}^{p_t} \frac{q_{in} \cdot V_{in}}{g} dp dL_{in} - \int_{L_{out}}^{p_t} \frac{q_{out} \cdot V_{out}}{g} dp dL_{out} \quad (1)$$

其中 p_s 、 p_t 分别为地面气压和顶层气压, q_{in} 和 q_{out} 分别为输入和输出边界的比湿, V_{in} 和 V_{out} 分别为输入和输出边界的风速, g 为重力加速度, L 为边界长度。

1.2.2 水汽通量散度的计算方法

大气中的水汽汇聚过程可通过水汽输送通量散度计算,水汽输送通量散度由平流项和散度项两部分组成,其单位气柱的数学表达式为:

$$\nabla \cdot \vec{Q} = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} \vec{V} \cdot \nabla q \cdot dp + \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q \cdot (\nabla \cdot \vec{V}) \cdot dp \quad (2)$$

式中 $V = (u, v, w)$ 。 u 和 v 分别为纬向风和经向风分量, w 为垂直速度, q 为比湿, p_s 为地面气压, p_t 为大气上界气压, g 为重力加速度。公式第一项为平流项,第二项为散度项。

2 西北干旱区水汽输送量变化及与降水的关系

这里所指西北干旱区范围为 $35^\circ \text{N} - 50^\circ \text{N}$,

73°E—105°E, 见图2方框区。该区域年降水在200 mm左右, 为中蒙干旱区主体, 是世界上最干旱的地区之一。由于西北干旱区本身并不存在大的河流、湖泊等水源, 水汽主要从外界输入, 因而外界水汽输送变化对于干旱区降水有重要影响。

赵天保等^[29]研究表明, NCEP 和 ERA-40 2套再分析资料基本上都能反映出中国区域温度场和降水场的时空分布; 郑旭程等^[30]指出, 2套资料对热力状况的描述在非洲及欧亚大陆上相似性较大, 主要差别在青藏高原地区。

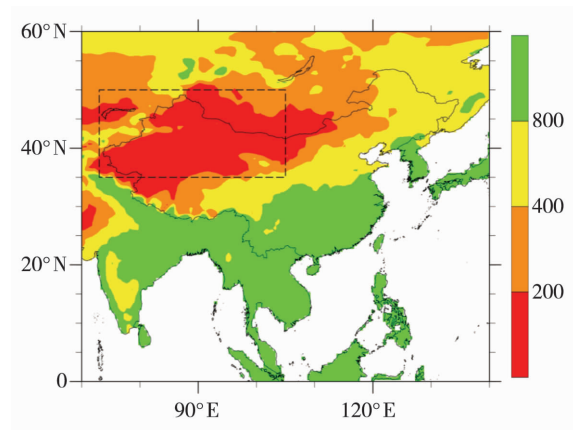


图2 中国地区陆地降水分布(单位:mm)

Fig.2 Spatial distribution of land precipitation in China (Unit:mm)

蒋贤玲等^[31]利用 NCEP 数据分析了 1948—2009 年全球典型干湿变化区域水汽收支的时间变化特征。基于该研究, 本文主要采用 NCEP 资料计算整层(1 000 ~ 300 hPa)水汽输送, 同时将 ERA40 资料计算的总水汽输送量与 NCEP 资料计算的结果对比(图3), 由于 ERA40 资料最多到 2002 年 8 月, 所以分析 1961—2001 年共同时间段。从图3可以看出, 冬、夏、秋季 2 种资料的水汽输送趋势一致, 但春季趋势相反, 秋季 2 种资料的水汽输送平均值相差最大; 各季节 2 种资料的计算结果年变化同步。进一步计算各季 2 种资料水汽输送量间的相关系数, 冬、春、夏、秋季的相关系数分别为 0.68、0.33、0.36 和 0.41, 均通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验, 说明 2 种资料的计算结果近似。冬季和夏季 NCEP 和 ERA40 资料的计算结果无论是趋势还是年变化都有很好的一致性, 春季一致性相对较差, 秋季平均值差异较大, 但春、秋、年变化一致性很好, 鉴于 ERA40 资料不包括 2003—2010 年时间段, 因而本文主要利用 NCEP 资料进行计算。

图4为西北干旱区各季节水汽输送量和降水的年变化。从月平均值来看, 西北干旱区水汽输送和降水有明显的月变化, 并且经向水汽输送明显大于纬向水汽输送, 水汽输送量级为 $10^4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 比 Sun 等^[32]算出的东北地区水汽输送量级($10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

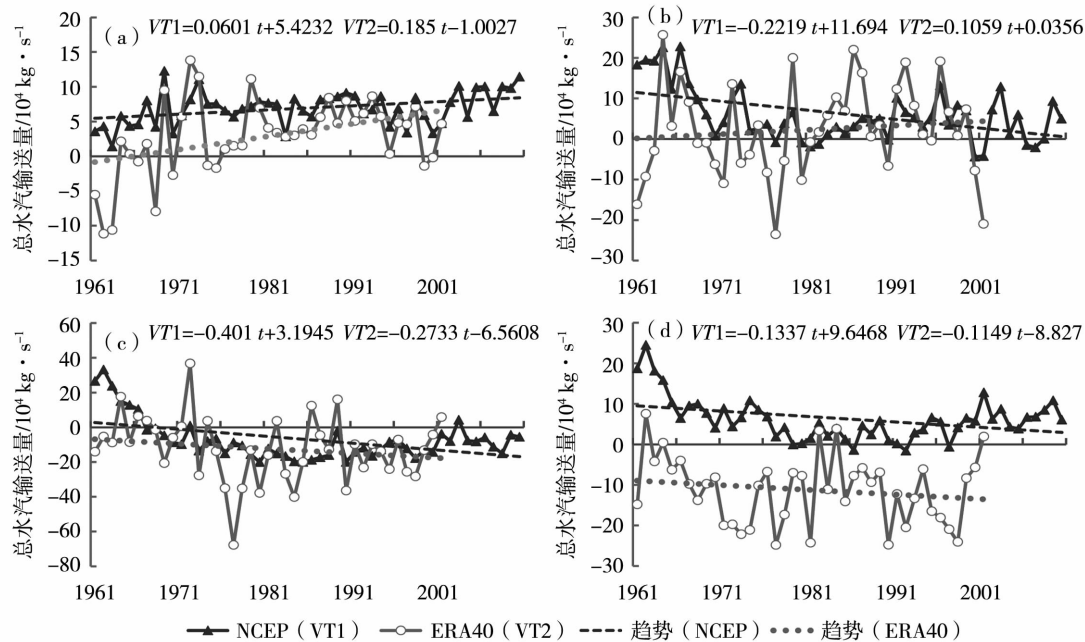


图3 基于 ERA40 和 NCEP 资料计算的西北干旱区各季节总水汽输送量对比

(a) 冬季, (b) 春季, (c) 夏季, (d) 秋季

Fig.3 Comparison of total water vapor transport calculated by ERA40 and NCEP datasets in arid region of northwest China

(a) winter, (b) spring, (c) summer, (d) autumn

小得多。西北干旱区降水呈现明显的夏季风降水特点,最大降水出现在6—8月。经向水汽输送呈现冬季风特点,经向水汽输送在冬、春、秋季均为正值,说明冬、春、秋季经向水汽输送为净输入,而夏季经向水汽输送减小为负值并达到最小值,净输入转换为净输出。纬向水汽输送为净输出,并在5月和9月达到极小值。由于经向输送明显大于纬向输送,总输送应该与经向输送的变化一致,即呈现冬季风特点,冬、春、秋为净输入,夏季为净输出,说明冬季、春季和秋季外部水汽大量输入西北干旱区,夏季水汽

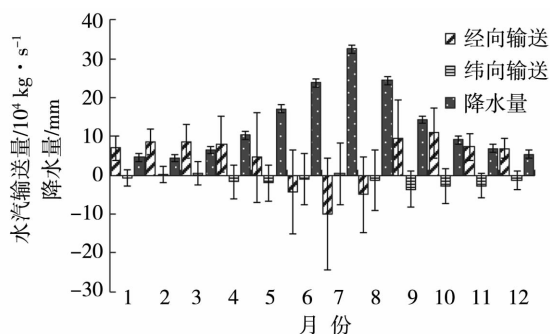


图4 西北干旱区水汽输送量和降水月变化及其标准差

Fig.4 Monthly variations and their standard deviations of water vapor transport and precipitation in arid area of northwest China

从干旱区往外输出。从标准差来看,降水的标准差较小,说明月降水年际波动较小。经、纬向月水汽输送量标准差较大,表明水汽输送具有较大的年际波动,并且夏季波动比其他季节明显偏大。

图5给出西北干旱区水汽输送量和降水距平各季节的年际变化,表1给出它们的年代际变化趋势及显著性检验。冬季经向水汽输入变化不显著,纬向水汽输出显著减少,总体水汽输入显著增加,降水也显著增加,冬季纬向输出减少是降水显著增加的原因;春季经向水汽输送1981年之前急剧减小,之后变化趋于平缓,纬向输出缓慢增加。总的来说,春季经向水汽输入显著减小,而纬向输送变化不显著,总水汽输入显著减少,降水却显著增加。这种情况说明春季其他因素(如蒸发、水汽局地辐合等)对降水有很大影响;夏季经、纬向和总水汽输送1986年之前呈减小趋势,1986年后呈增加趋势,总体上三者均为下降趋势,经向与总水汽输送下降趋势显著,纬向输送下降趋势不显著,降水呈不显著增加,说明夏季降水还受其他因素影响;秋季经向水汽输入显著减小,纬向输出变化不显著,总水汽输入显著减少,降水呈不显著增加,同样其他因素影响了秋季降水。水汽输送冬季增加,春、夏、秋季减小,这与蒋贤玲等^[31]的研究结果一致。

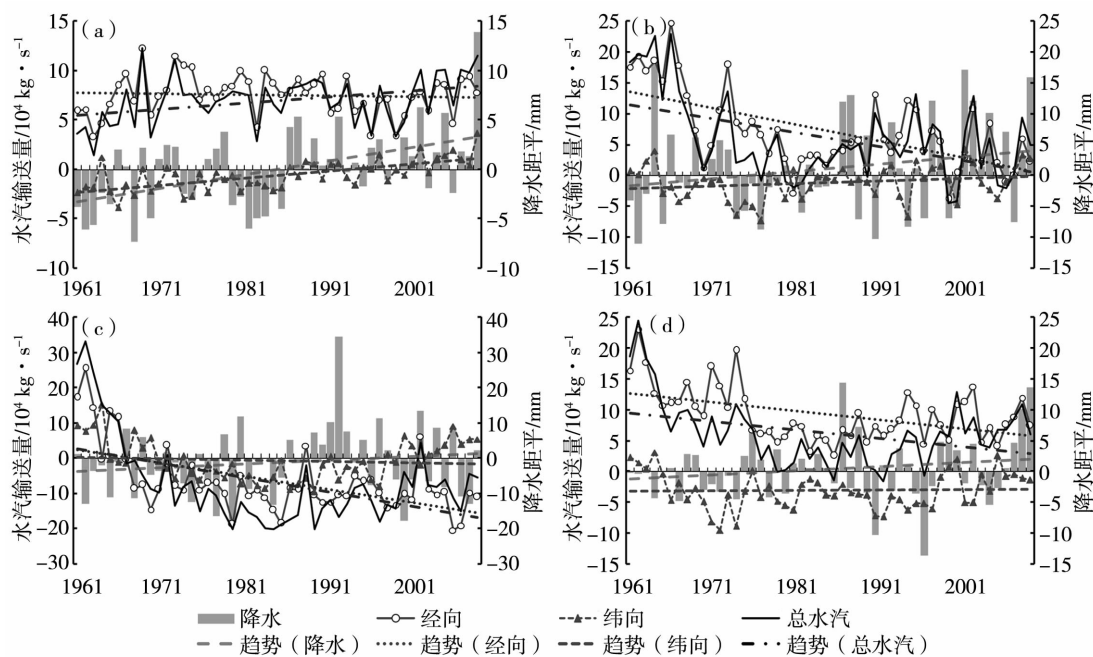


图5 西北干旱区各季节水汽输送量和降水距平的年际变化

(气候平均态为1971—2000年的平均值(下同))

(a)冬季,(b)春季,(c)夏季,(d)秋季

Fig.5 Annual variation of water vapor transport and precipitation anomaly in four seasons in arid area of northwest China (Long term monthly means derived from data during 1971—2000 (the same below))

(a) winter, (b) spring, (c) summer, (d) autumn

表1 西北干旱区各季节水汽输送量、蒸发量、水汽通量散度和降水的年代际变化趋势

Tab.1 The decadal trends of water vapor transport, evaporation, vapor flux divergence and precipitation in arid area of northwest China

	水汽经向输送 / $10^4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	水汽纬向输送 / $10^4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	水汽总输送 / $10^4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	蒸发 / $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	水汽通量散度 / $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	降水 / $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$
冬季	-0.10	0.70 ***	0.60 ***	0.44 ***	-0.72 ***	1.34 ***
春季	-2.60 ***	0.38	-2.22 **	3.35 **	-1.26 ***	1.14 *
夏季	-3.66 ***	-0.35	-4.01 **	3.99 ***	-1.40 ***	1.01
秋季	-1.40 ***	0.06	-1.34 *	2.92 ***	-0.49 *	0.66

注: *, **, *** 分别通过 $\alpha=0.1, 0.05, 0.01$ 的显著性检验

总的来说,经向水汽是净输入,纬向水汽是净输出,经向水汽输送是西北干旱区水汽主要来源。冬季纬向水汽输出减少是冬季水汽增加的原因,而经向水汽输入减少是其他季节水汽减少的原因。冬季总水汽输入的增加是冬季降水增加的主要原因,其他季节总水汽的变化并不能决定降水变化,降水显然还受其他因素影响,因而仅仅考虑外部水汽输送并不能解释降水变化的原因。

3 西北干旱区蒸发量变化及与降水的关系

西北干旱区水汽不仅依赖外部水汽输入,局地蒸发也是干旱区水汽的重要来源。采用 Penman 公式计算西北干旱区的潜在蒸发,图6为西北干旱区蒸发量和降水量的月变化。从月平均变化看出蒸发量变化与降水一致,6—8月最大,呈现夏季风特征,并且蒸发量标准差较平均值小。

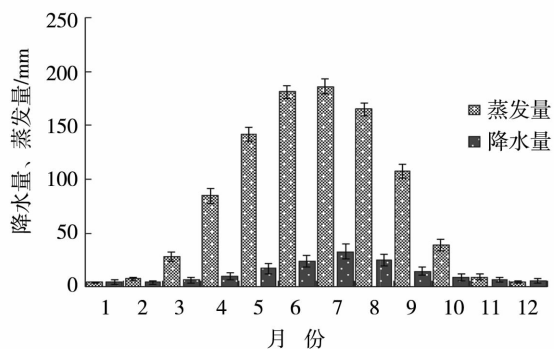


图6 西北干旱区蒸发量和降水量月变化及其标准差

Fig.6 Monthly variations of evaporation and precipitation and their standard deviations in arid area of northwest China

图7 为西北干旱区蒸发距平和降水距平各季节

的年代际变化,表1给出它们的年代际变化趋势,可以看出,各季节蒸发量都呈增加趋势且均通过显著性检验,夏季蒸发增加速率最快。虽然各季节降水也是增加的,但降水增加最多的是冬季。从蒸发和降水的年代际变化来看,冬季降水与蒸发位相一致;春、夏季降水与蒸发位相相反;秋季1990年代之前,降水与蒸发位相关系不明显,1991年以后降水与蒸发明显反位相。

综合外部水汽总输送和局地蒸发来看,冬季外部水汽总输入和局地蒸发均显著增加,即空气水汽增加,降水增加;春季外部水汽总输入显著减少而蒸发显著增加,降水也显著增加,说明春季蒸发作用强,空气中水汽显著增加,从而导致降水显著增加。夏、秋季虽然与春季类似,外部水汽总输入显著减少而蒸发显著增加,但降水增加却不显著,说明外部水汽输送减少和蒸发增加的作用相当,空气中水汽增加并不显著,降水也不会显著增加。外部总水汽输送与蒸发的变化,是西北干旱区降水变化的主要原因。外部总水汽输入减少但降水增加,说明西北干旱区蒸发形成的降水占总降水比率增加,即降水再循环率增加,这与王澄海等^[33-34]的研究结论一致。

4 西北干旱区水汽通量散度变化及其与降水的关系

降水变化不仅与空气中的水汽含量变化相关,也与水汽的辐合辐散关系密切,将一个地区整层(1 000~300 hPa)水汽通量散度的平均值作为该地区总体水汽辐合辐散的表现,图8是西北干旱区水汽通量散度和降水量的月变化。西北干旱区1月和12月水汽通量散度为负值,其余月份均为正值,9月水汽通量散度达最大值。说明西北干旱区总体上是一个水汽辐散区,这是西北干旱区常年少雨的原因之一。

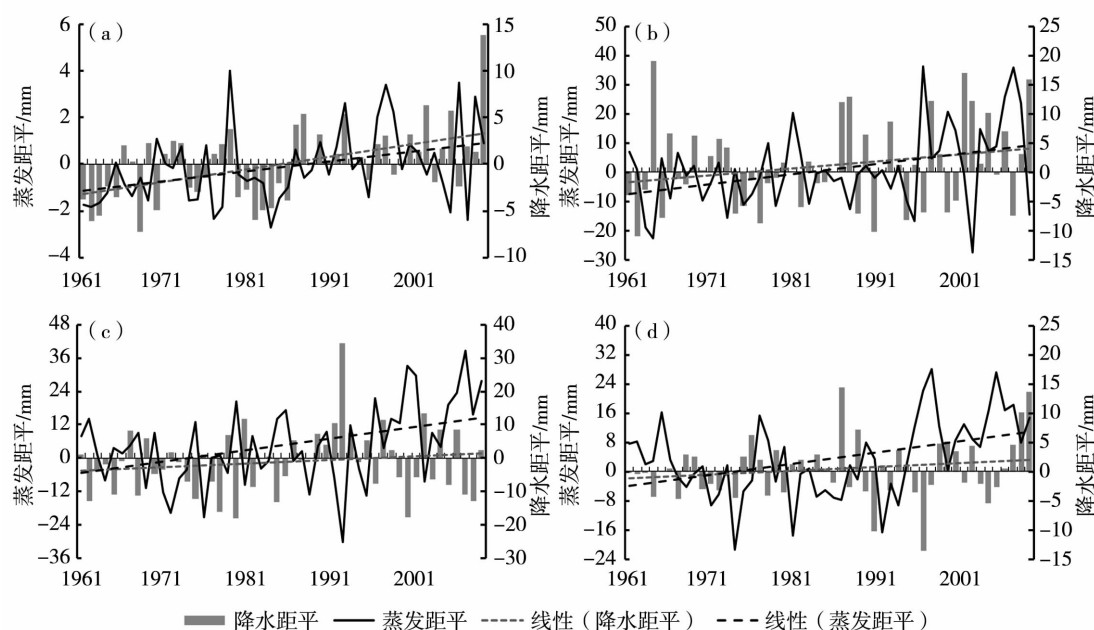


图7 西北干旱区各季节蒸发距平和降水距平的年际变化

(a)冬季, (b)春季, (c)夏季, (d)秋季

Fig. 7 Annual variations of evaporation and precipitation anomalies in four seasons in arid area of northwest China

(a) winter, (b) spring, (c) summer, (d) autumn

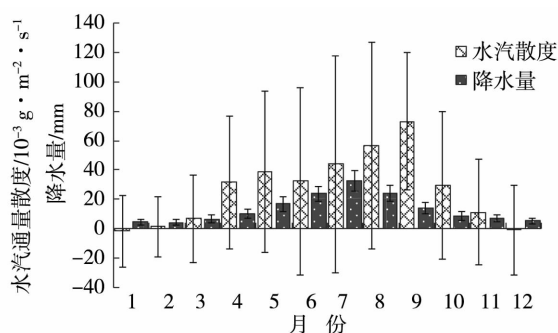


图8 西北干旱区水汽通量散度和降水量月变化及标准差

Fig. 8 Monthly variations of water vapor flux divergence and precipitation and their standard deviations in arid area of northwest China

图9是西北干旱区各季节水汽通量散度和降水距平的年际变化。各季节平均水汽通量散度均在减小,根据水汽通量散度定义,水汽通量散度减小意味着该区域水汽辐合加强、辐散减弱。结合表1的变化趋势,各季节中水汽通量散度减小趋势均显著,其中冬季、春季、夏季通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,秋季通过 $\alpha=0.1$ 的显著性检验,夏季水汽通量散度减小趋势最明显。对比降水来看,西北干旱区各季节水汽辐合均显著增强,但降水只在冬季和春季显著增加,单独考虑局地辐合、辐散变化也不能完全解释降水变化原因。

表2给出水汽输送、蒸发和水汽通量散度与降水的相关系数,可以看出单一变量与降水的相关性并不好,总水汽输送量冬季与降水的相关系数为0.56,通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,其他季节总水汽输送量与降水的相关系数在0.2以下,相关性均未通过显著性检验;冬季蒸发量与降水的相关系数为0.3,通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,春、夏季蒸发量与降水有显著负相关,相关系数分别为-0.32和-0.56,通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,秋季蒸发量与降水负相关不显著;冬、春季的水汽通量散度与同期降水的相关系数分别为-0.58和-0.42,均通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,夏季和秋季分别为不显著的正相关和负相关。冬季降水与水汽输送和水汽通量散度相关系数大小相当,且均较降水与蒸发的大,说明水汽输送增加和水汽辐合增强是降水增加的主要原因,降水与蒸发的相关系数小但也通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,说明蒸发增加也能促进降水形成,冬季降水增加是三者的共同作用。春季与降水相关性最好的是水汽通量散度,说明水汽辐合增强是造成降水增加的主要原因,蒸发与降水呈现负相关说明蒸发较大时降水较少,影响蒸发的因素(如温度、辐射、风速等)可能会抑制降水的形成。夏季降水仅与蒸发呈显著负相关,说明影响蒸发的因素也能显著影响降水。秋季降水与三者的相关系

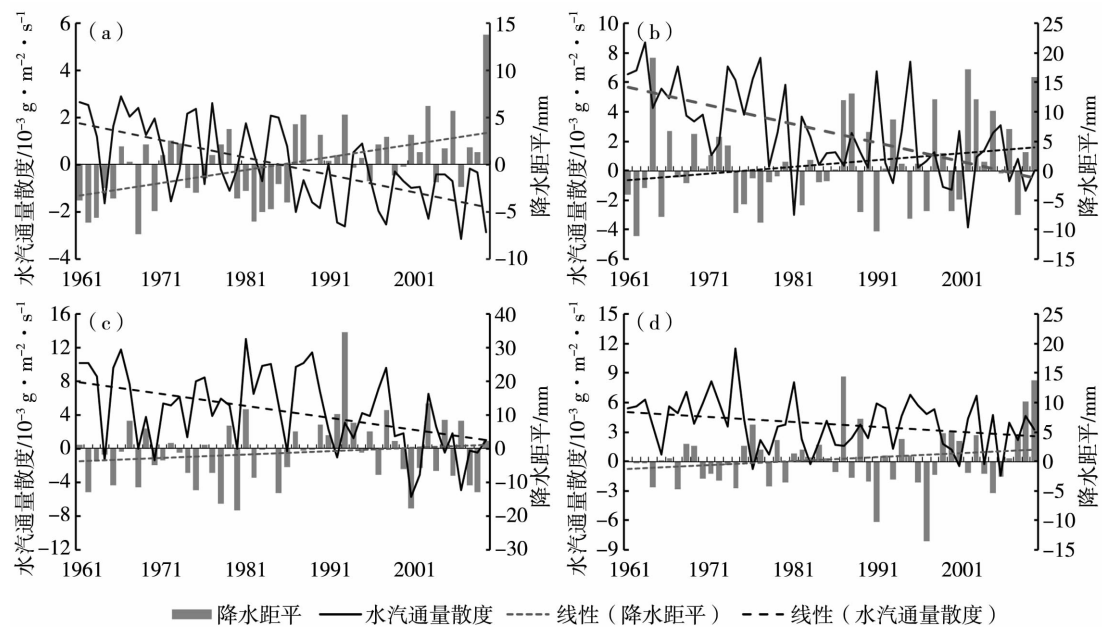


图9 西北干旱区各季节水汽通量散度和降水距平的年际变化

(a)冬季,(b)春季,(c)夏季,(d)秋季

Fig.9 Annual variation of vapor flux divergence and precipitation anomaly in four seasons in arid area of northwest China

(a) winter, (b) spring, (c) summer, (d) autumn

表2 西北干旱区各季节总水汽输送量、蒸发和水汽通量散度与降水的相关系数

Tab.2 Correlation coefficients between total vapor transport, evaporation, vapor flux divergence and precipitation in four seasons in arid area of northwest China

	冬季	春季	夏季	秋季
总水汽输送	0.56 ***	0.19	-0.16	0.15
蒸发	0.30 **	-0.32 **	-0.55 ***	-0.15
水汽通量散度	-0.58 ***	-0.42 ***	0.15	-0.22

注:***, ** 分别表示通过 $\alpha=0.01, 0.05$ 的显著性检验

数均未通过显著性检验,说明这3个因素并非秋季降水变化的主要原因。

综上所述,蒸发增加和水汽辐合增强能够促进西北干旱区降水增加,是降水的正强迫,但是外部水汽输送变化能够极大地抵消这种作用,尤其在夏、秋季。西北干旱区冬季总水汽输送量增加、蒸发量增加和水汽通量散度减小对冬季降水均有促进作用,因而冬季降水显著增加;春季总水汽输入减少抑制春季降水形成,而蒸发增大和水汽通量散度减小能促进降水形成,因而春季降水也显著增加;夏季水汽输出增大和蒸发增强影响降水形成,但由于水汽辐合增强,降水略有增加;秋季水汽输送量、蒸发量和水汽通量散度对于降水的单因素相关不明显,秋季降水变化不显著。

5 结 论

(1)西北干旱区外部水汽输送特征和变化季节差异明显。总水汽输送呈现冬季风特征,冬、春、秋季总水汽输送为净输入,夏季为净输出。经向水汽输送是西北干旱区水汽主要来源,冬季总水汽输送增加的原因是纬向水汽输出减少,而经向水汽输入减少是春、夏、秋季总水汽输送减少的主要原因。

(2)西北干旱区各季节蒸发均显著增强,但蒸发与降水的关系有明显的季节性差异。冬季蒸发与降水呈现同位相变化且显著正相关;春、夏季蒸发与降水反位相变化且呈显著负相关;秋季蒸发与降水1991年前关系不明显,1991年以后降水与蒸发是明显的反位相变化,但总体来说蒸发与降水相关不显著。

(3) 西北干旱区水汽通量散度 1961—2010 年间各季节均呈显著减小趋势 ($-0.49 \sim -1.4 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$), 夏季减小趋势最大。水汽通量散度变化表明西北干旱区水汽辐合加强、辐散减弱; 水汽通量散度与降水冬、春季相关性好, 而夏、秋季相关性差。

(4) 西北干旱区外部水汽输送和蒸发影响空气中的水汽含量, 水汽辐合辐散能够影响降水的形成条件。冬季外部水汽输送和蒸发呈显著增加趋势, 水汽通量散度呈显著减小趋势, 空气中水汽含量增大, 水汽辐合上升运动强烈, 降水显著增加。春季外部水汽输送显著减少, 但蒸发和水汽辐合显著增强, 降水增加显著。夏季水汽输出显著增加, 秋季水汽输入显著减少, 虽然蒸发显著增加且辐合上升运动强烈, 但夏、秋降水增加不显著。

参考文献

- [1] Li Z, Chen Y, Shen Y, et al. Analysis of changing pan evaporation in the arid region of Northwest China[J]. *Water Resour Res*, 2013, 49:2205–2212.
- [2] Nicholson S E, Tucker C J, Ba M B. Desertification, drought and surface vegetation: An example from the West African Sahel[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79:815–829.
- [3] Nicholson S E. Climatic and environmental changes in Africa during the last two centuries[J]. *Climate Res*, 2001, 17:123–144.
- [4] Nicholson S E, Grist J P. A conceptual model for understanding rainfall variability in the West African Sahel on interannual and interdecadal timescales[J]. *Inter J Climate*, 2001, 21:1733–1757.
- [5] Narisma G T, Foley J A, Licker R, et al. Abrupt changes in rainfall during the twentieth century[J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34(6): 710–714.
- [6] Dai A, Lamb P J, Trenberth K E, et al. The recent Sahel drought is real[J]. *Int J Climatol*, 2004, 24(11):1323–1331.
- [7] Reynolds J F, Smith D M, Lambin E F, et al. Global desertification: Building a science for dry-land development[J]. *Science*, 2007, 316(5826):847–851.
- [8] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(3):19–226.
- [9] Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. Trends in Total Precipitation and Frequency of Daily Precipitation Extremes over China[J]. *J Climate*, Doi:10.1175/JCLI-3318.1.
- [10] 王澄海, 王式功, 杨德保, 等. 西北春季降水的基本和异常特征[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2002, 37(3):104–111.
- [11] 魏娜, 巩远发, 孙娟. 西北地区近 50 a 降水变化及水汽输送特征[J]. *中国沙漠*, 2010, 6(30):1450–1457.
- [12] 王秀荣, 徐祥德, 王维国. 西北地区春、夏季降水的水汽输送特征[J]. *高原气象*, 2007, 26(4):749–758.
- [13] 王可丽, 江灏, 赵红岩. 中国西北地区水汽的平流输送和辐合输送[J]. *水科学进展*, 2006, 17(2):164–169.
- [14] 何金海, 刘芸芸, 常越. 西北地区夏季降水异常及其水汽输送和环流特征分析[J]. *干旱气象*, 2005, 23(1):10–16.
- [15] 王宝鉴, 黄玉霞, 何金海, 等. 东亚夏季风期间水汽输送与西北干旱的关系[J]. *高原气象*, 2004, 23(6):912–918.
- [16] Evans J P, Smith R B. Water Vapor Transport and the Production of Precipitation in the Eastern Fertile Crescent[J]. *J Hydrometeor*, 2006, 7:1295–1307.
- [17] Newell R E, Newell N E, Scott C. Tropospheric rivers a pilot study[J]. *Geophys Res Lett*, 1992, 19:2401–2404. Doi:10.1029/92GL02916.
- [18] Zhu Y, Newell R E. A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers[J]. *Mon Wea Rev*, 1998, 126:725–735.
- [19] Ralph F M, Dettinger M D. Storms, floods and the science of atmospheric rivers[J]. *Eos Trans Amer Geophys Union*, 2011, 92: 265–266.
- [20] Neiman P J, Ralph F M, White A B, et al. The statistical relationship between upslope flow and rainfall in California's coastal mountains: Observations during CALJET[J]. *Mon Wea Rev*, 2002, 130:1468–1492.
- [21] Ralph F M, Neiman P J, Wick G A. Satellite and CALJET aircraft observations of atmospheric rivers over the eastern North Pacific Ocean during the winter of 1997/98[J]. *Mon Wea Rev*, 2004, 132: 1721–1745.
- [22] Rivera E R, Dominguez F, Castro C L. Atmospheric rivers and extreme cool season precipitation events in the Verde River basin of Arizona[J]. *J Hydrometeor*, 2014, 15:813–829.
- [23] Starr V P, Peixoto J P. On the global balance of water vapor and the hydrology of deserts[J]. *Tellus*, 1958, 10:188–194.
- [24] Chen T C, Tzeng R Y. Global-scale intraseasonal and annual variation of divergent water vapor flux[J]. *Meteor Atmos Phys*, 1990, 44:133–151.
- [25] 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 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[J]. *大气科学*, 1998, 4(22): 460–469.
- [26] 丁一汇, 胡国权. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究[J]. *气象学报*, 2003, 2(61):129–145.
- [27] Qian W H, Jun D, Shan X L. Incorporating the Effects of Moisture into a Dynamical Parameter: Moist Vorticity and Moist Divergence[J]. *Weather and Forecasting*, 2015, 30:1411–1428.
- [28] Bosilovich M G, Chern J D, Mocko D, et al. Evaluating Observation Influence on Regional Water Budgets in Reanalyses[J]. *J Climate*, 2015, 28:3631–3649.
- [29] 赵天保, 符淙斌. 中国区域 ERA-40、NCEP-2 再分析资料与观测资料的初步比较与分析[J]. *气候与环境研究*, 2006, 1(11):14–32.
- [30] 郑旭程, 陈海山. 全球春、夏陆面热力状况变化特征: NCEP/NCAR 与 ERA40 再分析资料的比较[J]. *大气科学学报*, 2012, 35(1):41–50.
- [31] 蒋贤玲, 马柱国, 巩远发. 全球典型干湿变化区域水汽收支与降水变化的对比分析[J]. *高原气象*, 2015, 34(5):1279–1291.
- [32] Sun B, Zhu Y L, Wang H J. The recent interdecadal and interannual variation of water vapor transport over eastern China[J]. *Adv*

- Atmos Sci, 2011, 28: 1039 – 1048, doi: 10.1007/s00376-010-0093-1.
- [33] Wang C, Guo Y. Precipitable water conversion rates over the Qinghai – Xizang (Tibet) Plateau: changing characteristics with global warming[J]. Hydrol Processes, 2012, 26: 1509 – 1516.
- [34] Guo Y P, Wang C H. Trends in precipitation recycling over the Qinghai – Xizang Plateau in last decades[J]. Journal of Hydrology, 2014, 517(19): 826 – 835.

Changes of Water Vapor Budget in Arid Area of Northwest China and Its Relationship with Precipitation

XU Dong, KONG Ying, WANG Chenghai

(Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province,
Key Laboratory for Semi – Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of
Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: With global temperature increasing, climate in arid areas also has a marked change. Based on NCEP reanalysis datasets, the characteristics and changes of meridional and zonal water vapor transportation, evaporation, water vapor convergence and divergence in the arid areas ($35^{\circ}\text{N} - 50^{\circ}\text{N}$, $73^{\circ}\text{E} - 105^{\circ}\text{E}$) of northwest China during 1961 – 2010 were analyzed, at the same time, their relationships with rainfall were also discussed. Conclusions are as follows: (1) The meridional vapor transportation was net input in winter, spring and autumn over the arid area of northwest China, whereas the zonal vapor transportation was net output, the total vapor transportation was also net input. In summer, both the meridional and zonal transportation were net outputs. Precipitation in the northwest arid area increased in each season during 1961 – 2010, and the increasing trend was significant in winter and spring, but it was not obvious in summer and autumn. The decrease of zonal water vapor net output in winter resulted in an increase of total water vapor transport. While the decrease of zonal water vapor net input in spring and autumn as well as the increase of zonal water vapor net output in summer caused the reduction of total water vapor input in spring, summer and autumn. (3) The evaporation increased significantly in each season in the northwest arid areas, and the increasing rate was the biggest in summer. (4) The water vapor flux divergence decreased significantly in each season, which meant the convergence of water vapor became stronger, especially in summer. (5) Considering the effect of water vapor transport, evaporation and water vapor convergence, the increase of evaporation and water vapor convergence was the main positive driving force to precipitation in northwest arid area, but external vapor transportation could also affect precipitation there.

Key words: northwest arid area of China; precipitation; water vapor transport; evaporation; vapor convergence