

徐栋, 李若麟, 王澄海. 2016. 全球变暖背景下亚非典型干旱区降水变化及其与水汽输送的关系研究 [J]. 气候与环境研究, 21 (6): 737-748. Xu Dong, Li Ruolin, Wang Chenghai. 2016. Characteristics of precipitation changes and relationships with water vapor transport in typical arid regions of Asia and Africa under global warming [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (6): 737-748, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15256.

全球变暖背景下亚非典型干旱区降水变化及其 与水汽输送的关系研究

徐栋 李若麟 王澄海

甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

摘要 分析比较了中蒙 (35°N~50°N, 75°E~105°E)、中亚 (28°N~50°N, 50°E~67°E) 和北非 (15°N~32°N, 17°W~32°E) 三个典型干旱区水汽输送特征的异同, 及其 1961~2010 年间的降水时空变化, 分析了水汽来源和输送变化及其可能原因。结果显示, 由于受不同的气候系统影响, 中蒙、北非和中亚干旱区的降水在年内变化上有着显著不同。中蒙和北非干旱区降水呈现夏季风降水的特征; 而中亚干旱区降水则为更多受到冬季风的影响。1961~2010 年, 随着全球气温上升, 中蒙干旱区冬季纬向水汽输送增加而经向输送减少, 总水汽输送增加; 中亚干旱区冬季纬向输送减少而经向增加, 总水汽输送减少; 北非干旱区冬季纬向输送增加而经向输送减少, 总水汽输送增加。夏季中蒙和北非干旱区经向、纬向输送均减小, 中亚干旱区夏季纬向输送减少而经向减少, 总输送增加。相应的, 中蒙干旱区年、冬季和夏季降水分别以 4.2、1.3 和 1.0 mm/10 a 的趋势增加; 而中亚干旱区冬季 (1.2 mm/10 a) 和夏季 (0.1 mm/10 a) 降水增加, 年降水则呈减少趋势 (-0.8 mm/10 a); 北非干旱区年降水和夏季降水分别以 0.5 mm/10 a 和 0.1 mm/10 a 的速率增加。冬季中蒙干旱区主要水汽来源是水汽经向输送, 而中亚干旱区水汽主要为纬向输送, 经纬向水汽均为净输出是北非干旱区降水极少的主要原因, 平均总水汽输送量约为 -9.48×10^4 kg/s。冬季低纬度和高纬度环流通过定常波影响干旱区冬季降水。中蒙和中亚干旱区冬季降水主要受西太平洋到印度洋由南向北的波列影响, 北非干旱区冬季降水主要和北大西洋上空由北到南的波列相联系。各干旱区的降水对海温变化有着不同的响应: 中蒙干旱区冬季降水与冬季太平洋西海岸和印度洋海温呈显著正相关, 夏季与海温相关不显著; 中亚干旱区与地中海和阿拉伯海温相关, 且与阿拉伯海温为正相关。

关键词 干旱区 降水 环流 水汽输送 时空变化

文章编号 1006-9585 (2016) 06-0737-12

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15256

Characteristics of Precipitation Changes and Relationships with Water Vapor Transport in Typical Arid Regions of Asia and Africa under Global Warming

XU Dong, LI Ruolin, and WANG Chenghai

Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province /College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

收稿日期 2015-11-13; 网络预出版日期 2016-04-15

作者简介 徐栋, 男, 1990 年出生, 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

资助项目 国家自然科学基金 41471034, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201506001, 中国气象局行业专项 CCSF2014

Funded by National Nature Science Foundation of China (Grant 41471034), Public Welfare Industry (Meteorological) Research Project (Grant GYHY201506001), Industry Special Project of China Meteorological Administration (Grant CCSF2014)

Abstract Climate in arid regions is sensitive and vulnerable, and has obviously changed under global warming. In this paper, climatic characteristics in three typical arid regions, i.e. the China-Mongolia arid region (CM) (35°N–50°N, 75°E–105°E), the central Asia arid region (CA) (28°N–50°N, 50°E–67°E), and North Africa arid region (NA) (15°N–32°N, 17°W–32°E), are analyzed. The features of annual and interannual precipitation variations and abrupt precipitation changes have been analyzed in these regions. Relationships between precipitation and SST (Sea Surface Temperature) and circulation are discussed. Furthermore, changes in precipitation and water vapor transport before and after the years of abrupt precipitation changes have also been discussed. The results indicate that in the context of global warming, more precipitation occurs in the summer in CM and NA; on the other hand, precipitation in CA is largely concentrated in the winter and spring. During the period of 1961–2010, annual precipitation in CM increased, winter and summer precipitation increased while annual precipitation decreased in CA, annual and summer precipitation increased in NA. Accordingly, annual, winter, and summer precipitation increased at a rate of 4.2, 1.3, and 1.0 mm/10 a respectively in CM. Winter (1.2 mm/10 a) and summer (0.1 mm/10 a) precipitation increased but annual precipitation decreased (–0.8 mm/10 a) in CA. Annual and summer precipitation increased at a rate of 0.5 mm/decade and 0.1 mm/10 a respectively, while winter precipitation didn't change obviously in NA. In the winter, meridional water vapor transport provides the primary water vapor supply for the arid zone in CM; zonal water vapor transport is the major water vapor source for CA; the water vapor supply for the NA arid region comes either from the zonal or from meridional moisture transport, and the average total water vapor output in NA is about -9.48×10^4 kg/s. Thereby decreases in net water vapor flux in NA is the major reason for NA drought. General circulation from the tropics to the Arctic can affect precipitation in arid regions through stationary wave activities. Winter precipitation in CM and CA are related to wave trains originated from the western Pacific Ocean and Indian Ocean. Winter precipitation in NA is positively correlated with wave trains propagating across the North Atlantic. However, rainfall response to SST is different in different regions selected for the present study. Winter rainfall in CM is significantly positively correlated with the West Pacific and Indian Ocean SST but the correlation turns insignificant in the summer. Rainfall in central Asia is closely related to the Mediterranean and Arabian Sea SSTs with a positive correlation with Arabian Sea SST but a negative correlation with the Mediterranean SST in the winter and a positive correlation in the summer. Rainfall in NA is related to the Mediterranean and the western Atlantic SST.

Keywords Arid regions, Precipitation, General circulation, Water transport, Spatial and temporal change

1 引言

干旱区是降水少、土壤水分含量较低的区域, 主要包括干旱、半干旱和半湿润气候的地区。干旱区占地球陆地表面的 41%, 并且有超过三分之一的世界人口 (Mortimore, 2009)。对于形成干旱气候的原因, 一般认为有以下几种因素: 一是由于位于副热带地区的 Hadley 环流的下沉运动造成的, 干旱区主要分布在南北纬 30°附近, 处于 Hadley 环流的下沉区; 二是位于山脉背风坡的下沉运动造成的; 三是远离海洋, 缺乏水汽形成的; 四是环流发生异常, 从而使降水天气系统变得缺乏造成的 (Barry, 1985)。Druyan (1989) 又从海温的角度对引起干旱气候的原因进行了分析, 认为海温引发的环流异常可以是干旱持续的原因。除此之外, Charney (1975) 还提出了一种极端的干旱理论, 生物—地球物理正反馈维持理论, 认为干旱化会使得植被减

少, 引起反照率增加, 从而使得干旱区与周围环境形成温度梯度, 在干旱区形成下沉气流, 增强干旱程度等。

研究表明, 随着全球变暖, 干旱区气候也发生了明显的变化, 过去 100 年中全球干旱半干旱地区变得越来越干 (Nicholson et al., 1998; Nicholson, 2001; Narisma et al., 2007)。从 20 世纪 60 年代开始, 西非的半干旱地区降水持续 30 年减少, 其中 Sahel 地区的降水量减少了 20%~40%; 全球极端干旱区域的面积翻了一倍 (Dai et al., 2004); 干旱半干旱地区因干旱造成的沙漠化面积扩张了 10%~20% (Reynolds et al., 2007)。

然而, 由于影响干旱区的气候差异, 使得不同干旱区的气候变化有着明显的区域性。Hulme (1996) 对全球 9 个主要的干旱区 (美国西南部干旱区、亚洲西南部干旱区、东亚中部干旱区、非洲北部干旱区、非洲撒哈拉干旱区、非洲合恩干旱区、非洲南部干旱区、澳大利亚干旱区、南美巴塔哥尼

亚干旱区) 1900~1994 年的降水量变化特征进行了分析, 分析结果表明在全球变暖的大背景下, 这 9 个地区近百年来来的降水量变化出现了明显的差异性, 9 个干旱区并没有表现出一致干湿趋势。具体地, 撒哈拉干旱区的降水变率为 $-21\%/100 \text{ a}$, 巴塔哥尼亚干旱区和澳大利亚干旱区的降水变率分别为 $18\%/100 \text{ a}$ 和 $14\%/100 \text{ a}$ 。马柱国和符淙斌(2007)的研究发现, 在全球变暖背景下, 20 世纪下半叶以来全球范围内的干湿变化趋势具有明显的区域化差异, 非洲大陆、欧亚大陆、澳洲大陆和南美大陆近 1951~2002 年主要以干旱化趋势为主, 其中非洲大陆和欧亚大陆的干旱化趋势最为剧烈; 北美大陆在 1976 年以后表现为变湿趋势, 南美大陆存在 30 年左右的干湿振荡周期, 但最近仍然处于干化的时段, 澳洲大陆的变化与之类似。

上述研究揭示出在全球变暖的背景下, 不同干旱区降水变化有着显著的差异性。虽然造成干旱区降水变化差异的原因是复杂的, 但是, 降水产生的根本原因是大气中水汽的输送和来源。因此, 本文试图通过水汽来源及水汽输送变化的分析, 探讨干旱区降水变化的原因, 并分析干旱区降水和大气环流及其海温之间的关系。

2 资料与方法

2.1 资料

本文使用的资料主要有: (1) 美国全球降水气候学中心(GPCC)提供的 1961~2010 年的月平均降水资料, 简称 GPCC 资料, 分辨率均为 0.5° (纬度) $\times 0.5^\circ$ (经度); (2) 美国 NOAA 提供的 1961~2010 年全球历史气候网(GHCN)的气温数据资料, 简称 GHCN 资料, 分辨率均为 0.5° (纬度) $\times 0.5^\circ$ (经度), 以及分辨率均为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度) GPCP 降水资料; (3) 美国国家环境预测中心(NCEP)和大气研究中心(NCAR)提供的 1961~2010 年经向风、纬向风、比湿数据资料, 简称 NCEP 资料, 分辨率均为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度)。降水资料还有东英吉利大学提供的分辨率为 5° (纬度) $\times 5^\circ$ (经度) 的 CRU 降水资料。

2.2 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(Bento and Estoque, 1954; Schmitz

and Mullen, 1996), 正为净输入, 负为净输出。计算公式如下:

$$\Phi = \int_{L_{in}} \int_{p_0}^{p_t} \frac{q_{in} V_{in}}{g} dp dL - \int_{L_{out}} \int_{p_0}^{p_t} \frac{q_{out} V_{out}}{g} dp dL, \quad (1)$$

其中, p_0 、 p_t 分别为地面气压和顶层气压, q 为比湿, V 为该方向的风场, g 为重力加速度, L 表示边界长度, 下标 in、out 分别代表输入与输出。该方法对于使用月平均数据而可能造成非线性项贡献的损失, 根据 Rosen et al. (1979)、Mariotti et al. (2002) 在以往工作中已进行的量纲分析, 非线性项贡献是可以忽略的。

3 亚非干旱区降水的基本特征及其变化

本文采用 GPCC 全球降水场上 1961~1990 年的年平均降水量, 按照年降水量在 $0\sim 200 \text{ mm}$ 为干旱区、 $200\sim 400 \text{ mm}$ 为半干旱区、 $400\sim 800 \text{ mm}$ 为半湿润区、 800 mm 以上为湿润区的定义划分(图 1), 分区的大致界限与 Tannehill (1947) 绘制的全球主要干旱半干旱分布图中干旱区的范围较为一致, 也与最广为应用的 Hulme and Marsh (1990) 根据蒸发与降水比值绘制的全球干旱半干旱分布图中干旱区的范围基本一致。

由图 1, 三个干旱区年平均降水均在 200 mm 以下, 是全球极端干旱地区, 其中北非 ($15^\circ\text{N}\sim 32^\circ\text{N}$, $17^\circ\text{W}\sim 32^\circ\text{E}$)、中亚干旱区 ($28^\circ\text{N}\sim 50^\circ\text{N}$, $50^\circ\text{E}\sim 67^\circ\text{E}$) 均处于 Hadley 环流下沉支; 而中蒙干旱区 ($35^\circ\text{N}\sim 50^\circ\text{N}$, $75^\circ\text{E}\sim 105^\circ\text{E}$) 位于欧亚大陆中部, 远离海洋, 水汽难以达到; 中亚干旱区处于青藏高原西部, 南部距离印度洋较近。三个干旱区代表了两类主要的干旱区成因, 故本文选取以上区域作为研究对象。

图 2 表示三个干旱区 1961~2010 年的降水年变化。由于大部分干旱区观测站点稀少, 为了保证降水资料的客观性, 图 2 给出了 CRU、GPCP 和 GPCC 三种资料的结果。由图可见, 中蒙、中亚和北非干旱区降水具有明显的年变化, 其中, 中蒙干旱区降水集中在 6~8 月, 北非干旱区降水集中于 7~9 月, 这两个地区的降水主要集中在夏季, 按照 Wang et al. (2012) 的划分, 这两个地区属于夏季风降水; 而中亚降水则主要发生在 12~4 月, 和中蒙、北非地区相反, 属于冬季风降水。平均而言,

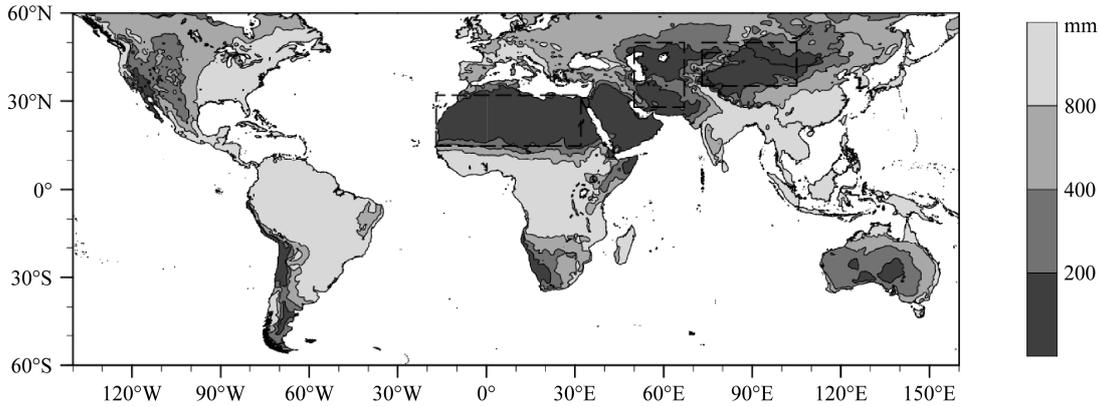


图 1 全球年平均降水量分布, 虚线框为研究的干旱区

Fig. 1 Distribution of global precipitation, the boxes enclosed by dashed lines represent the target regions of the present study

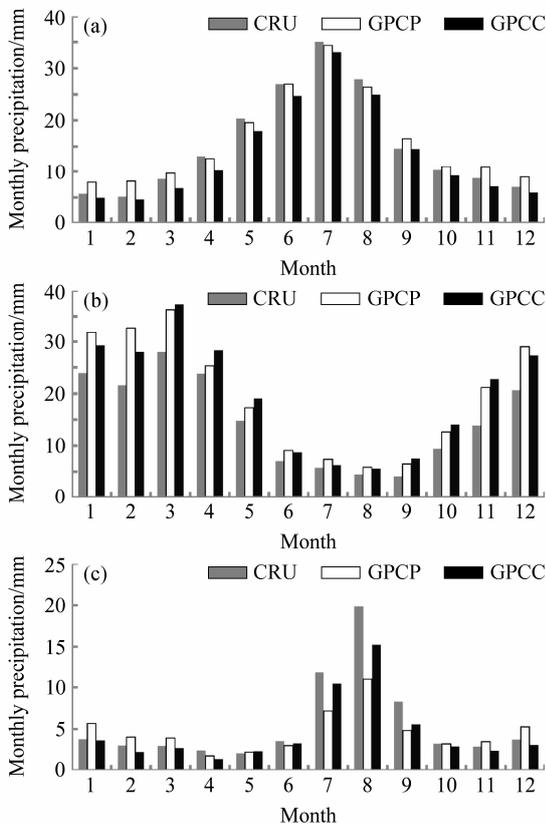


图 2 亚非干旱区降水年变化: (a) 中蒙干旱区; (b) 中亚干旱区; (c) 北非干旱区

Fig. 2 Annual variations of precipitation in Afro-Asian arid regions based on CRU (Climate Research Units), GPCP (Global Precipitation Climatology Project), and GPC (Global Precipitation Climatology Center) datasets during 1961–2010: (a) China-Mongolia arid region (CM); (b) central Asia arid region (CA); (c) North Africa arid region (NA)

北非干旱区的降水明显少于中蒙干旱区。图 2 也显示出, 三种资料的年变化特征基本一致, 量级也基本相近, 因此本文此后的分析都基于 GPC 资料。

表 1 给出了亚非干旱区四季降水量平均值和标准差。可以看出, 三个干旱区年降水量均在 200 mm 以下, 中蒙干旱区平均年降水为 159 mm, 夏季降水量和降水差异最大; 中亚干旱区平均年降水为 183 mm, 冬季和春季降水最多, 降水差异也相对较大; 北非干旱区平均年降水为 55 mm, 夏季降水最多、变化大。也即, 上述干旱区的降水变率在降水集中的时段年际变化大。

表 1 中亚典型干旱区降水量的平均值和标准差。

Table 1 Averages and standard deviations of precipitation in Afro-Asian arid regions during 1961–2010 mm

季节	中蒙降水量		中亚降水量		北非降水量	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
冬季	14.3	3.9	69.8	15.6	9.0	3.8
春季	33.9	7.4	65.6	16.6	6.5	3.0
夏季	80.7	9.7	17.1	5.6	29.0	8.6
秋季	30.3	5.1	30.3	9.2	10.0	4.7

随着全球温度上升, 亚非干旱区气温、降水也发生着显著变化。图 3 给出了 GPC 和 GHCN 资料计算的 1961~2010 年的气温与降水的年际变化。可以看出, 亚非干旱区气温呈现一致增加的趋势, 气温变率在 0.17 °C/10 a。其中, 中蒙干旱区的冬季气温上升最为显著 (0.54 °C/10 a), 夏季为 0.26 °C/10 a; 中亚冬季气温变率为 0.28 °C/10 a, 夏季为 0.29 °C/10 a; 北非冬季气温变率为 0.17 °C/10 a, 夏季为 0.27 °C/10 a。根据 IPCC 报告 (Hartmann et al., 2013), 1951~2012 年全球平均增温速率为 0.12 °C/10 a, 干旱区增温快于全球平均速率。

随着气温的升高, 干旱区的降水也发生了显著变化 (图 3), 中蒙干旱区年、冬季和夏季降水分别

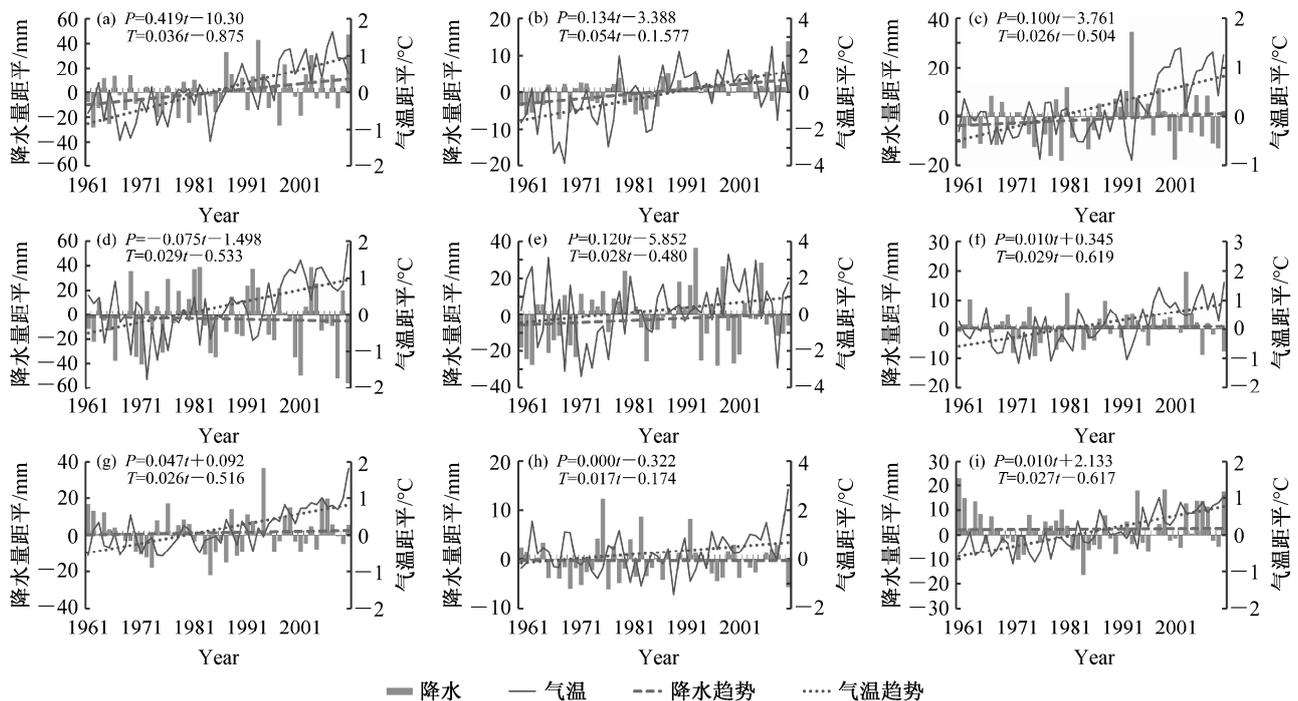


图3 1961~2010年中蒙（第一行）、中亚（第二行）、北非（第三行）干旱区降水和气温年际变化：（a、d、g）年；（b、e、h）冬季；（c、f、i）夏季

Fig. 3 Interannual variations of precipitation and temperature during 1961–2010 in CM (the first line), CA (the second line), and NA (the third line): (a, d, g) Annual; (b, e, h) December, January, and February (DJF); (c, f, i) June, July, and August (JJA)

以 4.2、1.3 和 1.0 mm/10 a 速率增加，冬季降水增加显著大于夏季，中蒙干旱区降水增加速率大于同纬度的 30°N~60°N 平均降水增加速率 1.1 mm/10 a (Mitchell and Jones, 2005)；中亚干旱区年降水 0.8 mm/10 a 速率减少，冬季降水增速 (1.2 mm/10 a) 高于夏季 (0.1 mm/10 a)，与 30°N~60°N 平均降水增加速率相反；北非干旱区冬季降水和夏季降水变化不大，但年增速在 0.5 mm/10 a 左右，这与同纬度（热带）的降水速率整体以 -4.2 mm/10 a 减少的趋势 (Becker et al., 2013) 相反。由此可见干旱区降水对温度升高的响应更为明显，且不同干旱区的降水对升温的响应各不相同。

图 3 反映出，中蒙干旱区的降水和气温都呈现出上升趋势。中蒙干旱区冬季气温上升，降水增加，气温和降水每十年分别增加 4.11% 和 9.37%；与冬季相同，夏季气温上升降水也呈增加趋势，气温和降水每十年分别增加 1.59% 和 1.25%。冬季降水增加的速率快于气温上升速率，夏季气温上升速率快于降水上升速率。由此可见，冬季降水对温度上升的响应更明显。与此同时，年气温上升，降水增加，根据温度和降水变化速率，年气温上升主要来自于

冬季升温，而降水增加则是由于夏季（降水主要季节）和冬季降水增加共同作用引起。

同样，中亚干旱区冬季气温上升，降水增加，温度上升速率和降水增加速率分别为每 10 年增加 10.76% 和 1.72%；夏季气温和降水的上升速率与增加速率分别为每 10 年 1.08% 和 0.58%。冬、夏气温上升速率快于降水上升的速率。相比而言，夏季降水增加对温度上升的响应更加显著。对全年变化，该干旱区气温上升，降水减少。降水减少主要由于春、秋季降水减少引起。

北非干旱区冬季气温上升，上升速率为每十年分别增加 0.89%，降水变化不大；夏季气温上升，降水增加，温度上升速率与降水增加速率分别为每 10 年增加 0.86% 和 0.35%。冬夏气温上升速率快于降水上升的速率。同样，北非夏季降水变化对温度升高响应显著。同时，年气温上升，降水增加，降水增加主要由于夏季（降水主要季节）降水增加引起。

综上所述可见，三个干旱区的气温在过去几十年均呈现上升趋势，且均大于全球平均增温速率。但各区域降水变化各异，夏季各干旱区降水均增

加,且中蒙干旱区增加趋势最明显。冬季中亚、中蒙干旱区降水增加、北非降水变化无明显趋势。总体而言,中亚干旱区降水减少,中蒙及北非干旱区降水增加,其中中蒙干旱区降水增加趋势最显著。

图 3 也表明,中蒙干旱区 1986 年前后气温存在一个转折点。尤其在冬季,降水和气温增加明显;而夏季,气温上升更为明显,但降水的增加趋势不明显;中亚干旱区气温上升趋势明显,在 1971 年前后是年气温和冬季气温的转折点,1971 年后增温速率更加明显。冬、夏和年平均气温增加速率基本一样,冬季降水增加速率明显,夏季降水的增加速率不明显,年降水甚至呈现减少趋势;北非干旱区气温明显升高,在 1980 年前后年气温和降水变率发生转折,在 1988 年前后冬季气温和降水变率发生转折,夏季气温和降水持续增加。也就是说,上述三个干旱区的气温都是增加,尤其冬季的气温上升最为明显,与之相对应,冬季降水上升明显。三个干旱区气温和降水变率的转折变化说明,干旱区的降水可能存在年代际的变化。研究也指出,亚洲夏季风在 1983 年前后出现减弱 (Hung and Kao, 2010),恰好和干旱区降水的可能突变时间对应,而冬季风则也是在 1986 年前后出现减弱 (Jhun and Lee, 2004)。中蒙干旱区受到亚洲季风影响 (Wang et al., 2012),因此,中蒙干旱区降水的可能突变也许与亚洲季风的年际变化有关 (Li and Yang, 2010; Huang et al., 2002; Wei and Wang, 2013),我们将在下一步的工作中专门分析。

4 亚非干旱区的水汽输送变化特征

降水变化必然有水汽输送变化。为了分析干旱区的水汽来源及其变化,我们计算了三个干旱区冬季和夏季经向、纬向、总的水汽输送量和降水。一般而言,水汽主要集中在 500 hPa 以下,因此,本文计算的整层水汽是指从 1000 hPa 到 300 hPa 的水汽通量的垂直积分。纬向水汽输送量定义为干旱区整层纬向水汽通量东—西界的差 (公式 1),反映了水汽在该区域内的剩余 (辐合),因此,纬向输送量正值表示外界向该区域有净的输入水汽,负值则表示纬向上该区域有净的输出水汽,该区域水汽亏损;同理,经向水汽输送量为整层经向水汽通量南—北界之差,正值表示该区域有净的经向水汽输入,负值表示该区域有净的经向水汽输出。总水汽

输送量为经向和纬向水汽输送量之和。

图 4 为按照上述定义和公式 (1) 计算的干旱区经向、纬向、总的水汽输送。各个干旱区的经向与纬向的水汽输送量量级相当,冬季为 10^4 kg/s,夏季为 10^4 kg/s。图 4a、4c、4e 分别为冬季亚非三个干旱区的结果,冬季中蒙干旱区经向水汽输送为正值,纬向输送为负值,即经向水汽为净输入,而纬向上水汽主要是输出,因而经向水汽输送是中蒙干旱区水汽来源。冬季中亚干旱区经向水汽输送量为负值表示净输出,纬向水汽输送为正值表示净输入,也即纬向水汽输送是冬季中亚干旱区水汽来源。冬季北非干旱区纬向和经向水汽输送均为负值,这说明经纬向水汽输送均为水汽输出,经纬向水汽输送是冬季北非干旱区降水少的主要原因。

图 4b、4d、4f 为夏季亚非三个干旱区水汽输送的变化。由图可见,夏季中蒙干旱区经向和纬向输送量均为净的输出,这是该地区干旱的一个主要原因,这也说明了中蒙干旱区夏季降水和大尺度环流辐合辐散密切相关,干旱区没有形成水汽辐合的有利环流。同样,中亚干旱区夏季总水汽输送量为净的输出,同样是夏季中亚地区干旱形成的主要原因。北非干旱区的夏季,存在经向的水汽净输入,纬向输送量为净输出,总水汽输送值较小,因此北非夏季降水较其他季节多,但仍然干旱。总体而言,虽然各干旱区的水汽输送在经纬度上存在差异,但总量较少 (蒋贤玲等, 2015),是这些干旱区形成的主要原因之一。

表 2 给出了冬季和夏季经向、纬向、总的水汽输送量和降水的变化趋势及显著性。可以看出,1961~2010 年冬季,中蒙干旱区经向水汽输送减少,速率为 -0.09×10^4 (kg/s)/10 a,而纬向输送增加甚至由原输出项转换成输入项 (图 4a),增加速率为 0.69×10^4 (kg/s)/10 a,纬向输送增加趋势大于经向输送减少趋势,使得总体输送增加,因而输入中蒙干旱区水汽增加;中亚干旱区纬向水汽输送量减少,减少速率为 -0.94×10^4 (kg/s)/10 a,经向水汽输送量以 0.32×10^4 (kg/s)/10 a 增加,纬向输送量减小趋势大于经向输送量增加趋势,使得总体输送量减小,输入中亚干旱区水汽减少 (图 4c);北非干旱区纬向水汽输送量以 0.51×10^4 (kg/s)/10 a 增加,经向水汽输送量变化很小,总体水汽输送量增加,北非干旱区向外输送水汽减少 (图 4e)。

对比表 2 中冬季降水趋势,中蒙干旱区总水汽

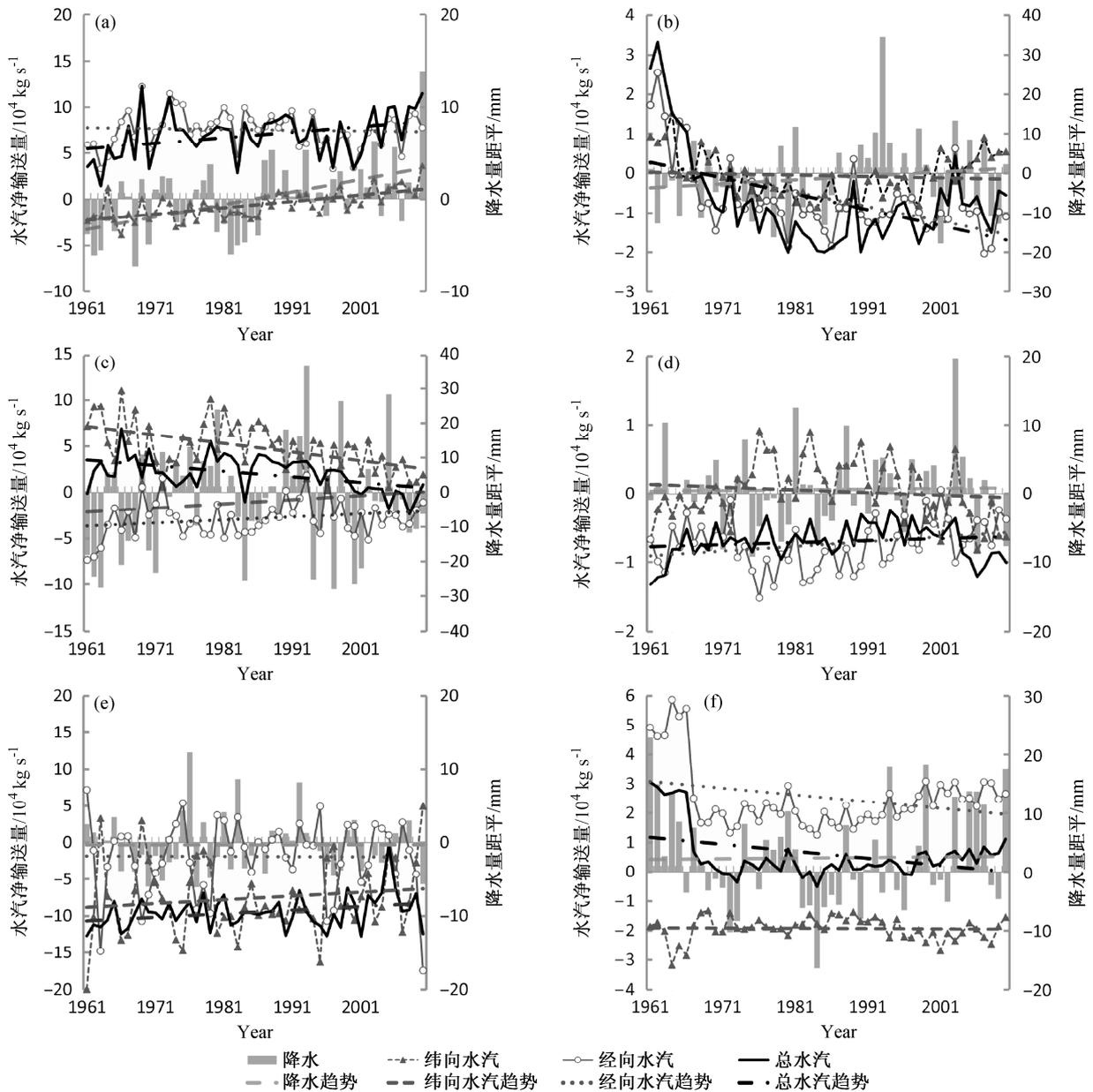


图4 中蒙(第一行)、中亚(第二行)、北非(第三行)干旱区整层纬向水汽、经向水汽、经纬向总水汽输送量和降水量变化:(a、c、e)冬季,(b、d、f)夏季
Fig. 4 Interannual variations of zonal, meridional, and total integrated water vapor fluxes and precipitation in CM (the first line), CA (the second line), and NA (the third line): (a, c, e) DJF; (b, d, f) JJA

输送量显著增加,降水也显著增加,说明经、纬向水汽输送变化是中蒙干旱区降水变化的主要原因;中亚干旱区总水汽输送量显著减少,但降水量却增加,这表明,该区域的降水除经、纬向水汽输送外,一个可能是降水的转化率增加(Wang and Guo, 2012),或者是降水的再循环率(Guo and Wang, 2014)增加了,这是需要进一步研究的问题;北非干旱区总水汽输送量增加显著,但降水变化不显著,同样也说明北非干旱区除经、纬向水汽输送外,

转化率和再循环率也影响了降水。

夏季水汽输送量在中蒙和北非干旱区变化显著,但夏季降水却变化不显著,表明随着温度增加,大气的持水量也许增加,即将水循环转化率和再循环率发生了变化。夏季中亚干旱区水汽输送和降水趋势均不显著。

经、纬向水汽输送是干旱区重要水汽来源,通过外界对亚非三大干旱区的水汽输送情况来看,中蒙干旱区冬季水汽从经向输入而从纬向输出,夏季

表 2 亚非干旱区纬向、经向和总水汽输送量平均值及趋势，降水平均值及降水量距平百分率趋势

Table 2 Averages and trends of zonal, meridional, and total water vapor fluxes and precipitation anomalies in Afro-Asian arid regions

		纬向水汽输送		经向水汽输送		总水汽输送		降水量	
		平均值/ 10 ⁴ kg s ⁻¹	趋势/ 10 ⁴ (kg s ⁻¹) (10 a) ⁻¹	平均值/ 10 ⁴ kg s ⁻¹	趋势/ 10 ⁴ (kg s ⁻¹) (10 a) ⁻¹	平均值/ 10 ⁴ kg s ⁻¹	趋势/ 10 ⁴ (kg s ⁻¹) (10 a) ⁻¹	平均/ mm	距平百分率趋势/ 10 a ⁻¹
		中蒙干旱区	冬季	7.54	0.69*	-0.58	-0.09	6.96	0.60*
	夏季	-0.64	-0.03	-0.06	-0.36*	-0.70	-0.40*	80.7	1.25%
中亚干旱区	冬季	-2.85	-0.94*	4.86	0.32	2.01	-0.62*	69.8	1.72%
	夏季	-0.74	-0.03	0.04	0.06*	-0.70	0.03	17.1	0.58%
北非干旱区	冬季	-1.90	0.51	-7.58	-0.03	-7.58	-0.03	9.0	0.00%
	夏季	2.52	-0.01	-1.93	-0.22*	-1.93	-0.22*	29.0	0.34%

*表示通过 95%显著性 MK 检验。

经纬向均为水汽输出；中亚干旱区冬季水汽从纬向输入而从经向输出，夏季同样经纬向均为水汽输出；北非干旱区冬季经纬向水汽均为输出，夏季水汽从经向输入从纬向输出。对比降水趋势来看，除去冬季中蒙干旱区降水随着水汽输送量增加而显著增加，其他季节和地区降水随着水汽变化的关系不显著，说明了干旱区降水变化除经纬水汽输送变化外，局地的再循环和转化率起着重要的调节作用，也即干旱区降水受例如蒸发、水汽局地辐合上升、水汽的局地循环等更多因素影响。

5 亚非干旱区降水变化与大气环流及其海温的关系

海温是调整全球气候的主要因子之一。研究表明，西北干旱区降水与太平洋、印度洋海温有关(晏红明等, 2001; 王澄海等, 2002; 白庆梅等, 2010; 杨建玲等, 2015)。为了分析干旱区降水和海温之间的关系，图 5 给出了中蒙、中亚和北非干旱区冬季和夏季降水与全球海温的相关。结果表明，中蒙干旱区冬季降水和冬季太平洋西海岸海温显著相关，夏季与海温相关不显著；中亚干旱区与地中海和阿拉伯海海温相关，冬季与阿拉伯海呈反相关，夏季呈正相关；北非干旱区降水与地中海和大西洋西部海温相关。海洋作为全球水汽最终来源，海温主要影响海洋向大气输送的水汽，进而影响到干旱区降水。

此外，降水变化也是大气环流变化的结果。为了分析干旱区降水变化和大气环流异常之间的关系。图 6 给出了冬季和夏季中蒙、中亚和北非干旱区降水与全球 200 hPa 纬向风的相关。由图可见，

中蒙干旱区冬季降水的异常和全球 200 hPa 纬向风在太平洋暖池到西伯利亚北部呈现出“正一负一正一负”的波列有关；中亚干旱区冬季降水异常则和太平洋暖池到西伯利亚北部且与中蒙干旱区呈现相同的“正一负一正一负”的波列有关，同时也和阿拉伯海到北大西洋也呈现出“正一负一正”的波列有关，并且可以看到由低纬到高纬波的扰动范围变小。北非干旱区冬季在北大西洋到非洲赤道地区也呈现出“正一负一正”波列，并且由高纬到低纬的扰动范围变小，由于冬季的定常波主要是高纬度强迫低纬度，因此，这些波列都反映了高纬度冷空气扰动向南传递的结果。夏季中蒙和中亚干旱区降水与 200 hPa 纬向风相关系数范围相对较小，且局限于干旱区上空；北非干旱区夏季降水主要与南部大西洋纬向风相关。因而，中蒙和中亚干旱区冬季降水受到来自高度的系统影响，夏季降水与局地环流有关；北非干旱区冬季降水与大西洋环流有关，夏季降水与南部大西洋上空大气环流有关。

为进一步验证南北向波列的性质，分别选择太平洋暖池区以(0°, 120°E)和北大西洋(60°N, 30°W)为基点，计算冬、夏季 200 hPa 纬向风与全球纬向风的相关(图 7)。对比图 6 可以看出，冬季太平洋暖池上空 200 hPa 纬向风与全球纬向风相关波列和中蒙、中亚的波列的位置基本相同，只是强度有所变化，同样，北大西洋 200 hPa 纬向风与全球纬向风相关波列同样与北非干旱区降水波列的位置也基本相同，同样强度有所差异。说明冬季西太平洋 200 hPa 由南向北的波列和北大西洋由北到南的波列是准定常波。也即中蒙和中亚干旱区冬季降水受到冬季 200 hPa 西太平洋定常波影响，同样北非干旱区冬季降水受到北大西洋高纬度定常波

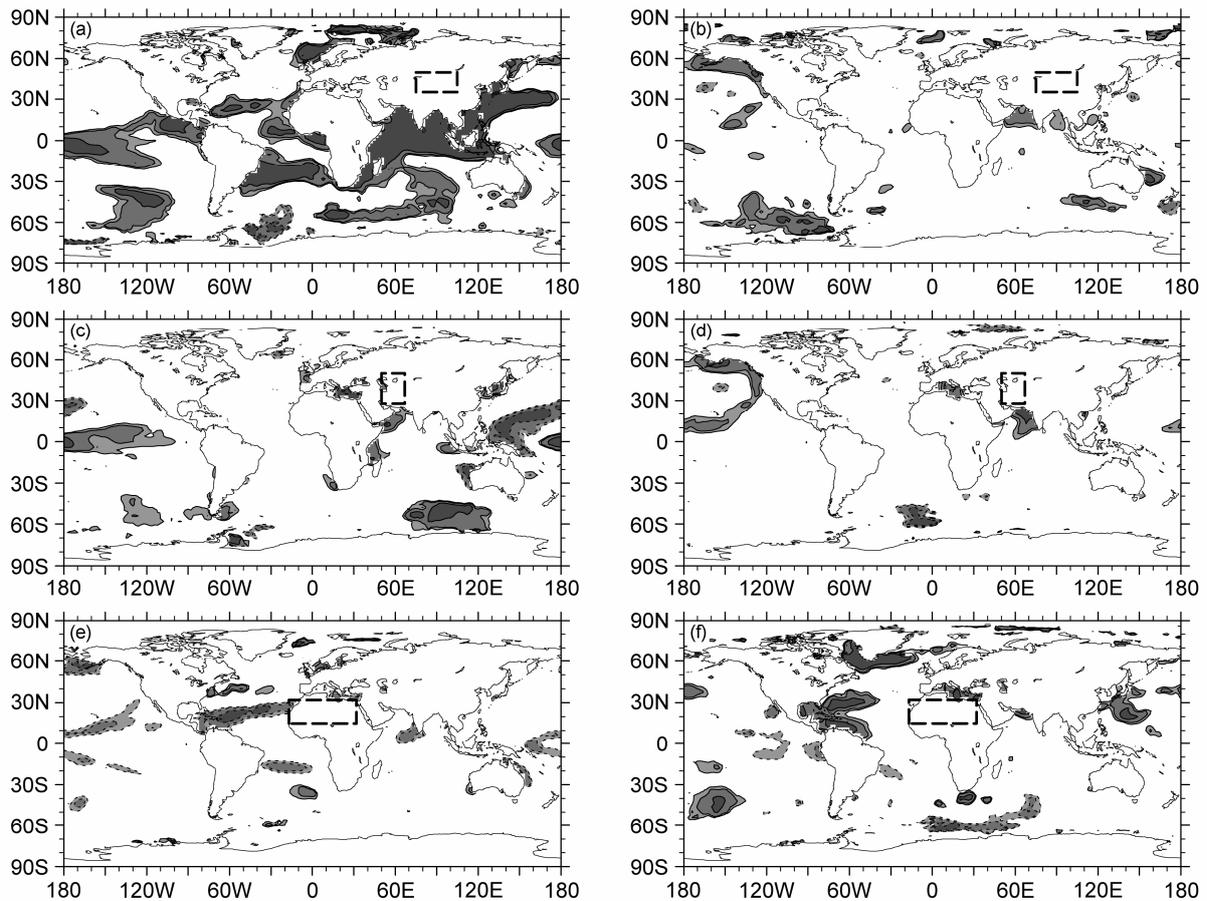


图5 亚非典型干旱区中蒙(第一行)、中亚(第二行)、北非(第三行)降水量与全球海温(SST)的相关系数(颜色由浅到深依次为通过90%、95%和99%信度检验的区域): (a、c、e)冬季; (b、d、f)夏季。

Fig. 5 Correlations between precipitation in CM (the first line), CA (the second line), and NA (the third line) and global sea surface temperature: (a, c, e) DJF; (b, d, f) JJA

影响。另外，冬季北非干旱区降水还受到冬季西太平洋定常波影响。冬季西太平洋作为中蒙和中亚干旱区波列的起源地和水汽的来源地(蔡英等, 2015)，西太平洋 200 hPa 纬向风强弱一方面会影响直接到中亚和中蒙干旱区的水汽输送，另一方面西太平洋 200 hPa 纬向风还能通过波流相互作用影响到中亚干旱区东北部和中蒙干旱区西北部的西风强弱，从而影响中亚干旱区水汽输出和中蒙干旱区水汽输入，从而影响降水。冬季北大西洋纬向风增强一方面使得北非干旱区北部急流减弱，从而减弱了急流对于水汽从高纬向低纬的纬向输送的阻碍；另一方面通过波流相互作用使得北非干旱区东南部东风减弱，水汽输出减少，最终影响降水。

上述分析表明，海温和大气环流异常对干旱区的降水也有着影响。冬季西太平洋上空的定常波通过经向定常波的传播影响冬季环流，从而影响到中

蒙、中亚和北非干旱区的冬季降水；同样，冬季北大西洋上空的定常波也影响着北非干旱区冬季降水。与大气环流背景相比，干旱区降水的年际变化与海温的相关复杂、相关显著的范围小；中蒙干旱区冬季降水和冬季太平洋西海岸海温显著相关，夏季与海温相关不显著，表明冬季海温通过海气相互作用，对水汽输送起着显著作用，而夏季的情况则较为复杂；中亚干旱区与地中海和阿拉伯海海温相关，但是冬季与阿拉伯海呈反相关，夏季呈正相关；北非干旱区降水则与地中海和大西洋西部海温相关。即干旱区和邻近的海洋温度相关高于其他较远的海区，也表明水汽来源于邻近海洋。

6 结论

随着全球变暖，干旱区作为全球气候的脆弱区

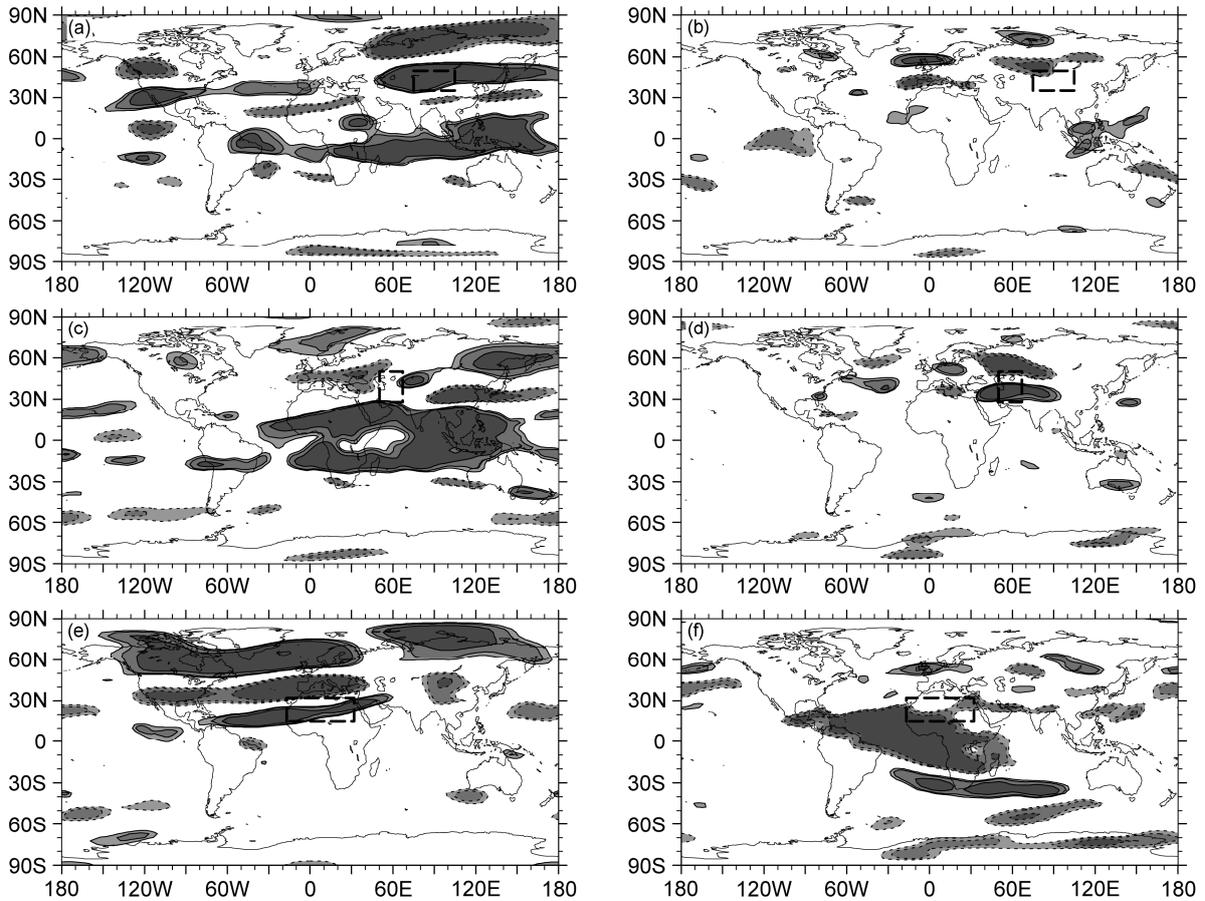


图6 同图5, 但为亚非典型干旱区降水量与200 hPa 纬向风相关

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for correlations between precipitation in Afro-Asian arid regions and 200-hPa zonal wind

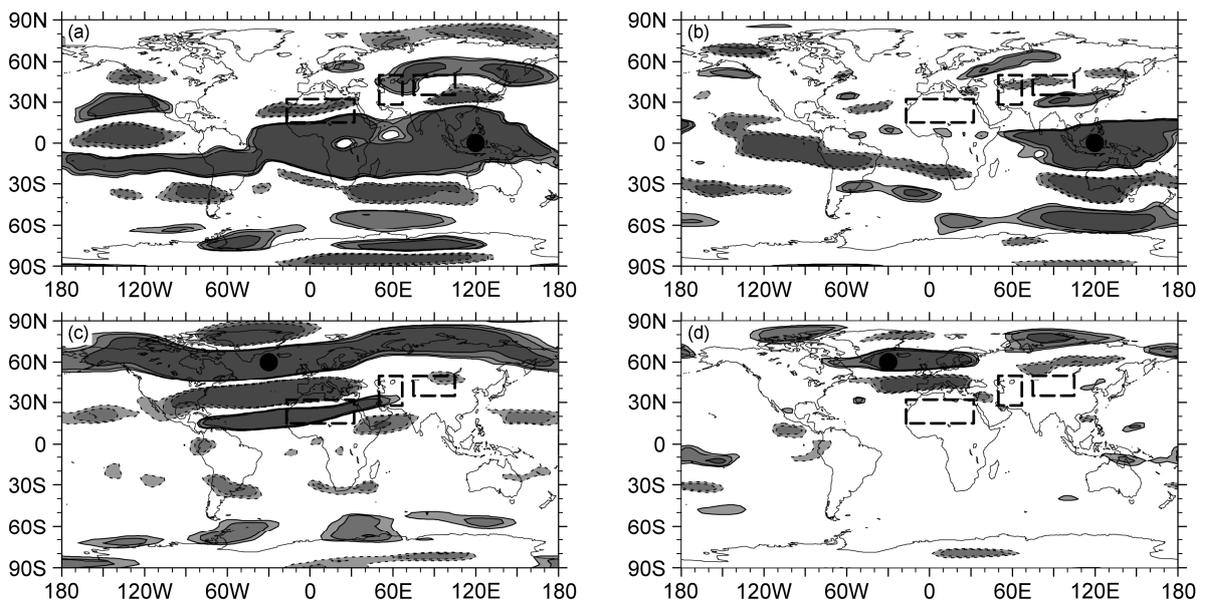


图7 基点分别位于 (a、b) 太平洋暖池区 (0°, 120°E) 和 (c、d) 北大西洋 (60°N, 30°W) 200 hPa 纬向风与全球 200 hPa 纬向风的点相关系数 (黑色圆点代表 200 hPa 纬向风基点, 颜色由浅到深依次为通过 90%、95%和 99%显著性检验的区域): (a、c) 冬季; (b、d) 夏季

Fig. 7 Correlations between global zonal winds and zonal winds in (a, b) the warm pool region of the Pacific and (c, d) the North Atlantic at 200 hPa (black dots denote the base points in the warm pool of the Pacific and in the North Atlantic, shading from light to heavy colors indicate the values pass the significance test at the 90%, 95% and 99% confidence levels, respectively): (a, c) DJF; (b, d) JJA

和敏感区, 其降水也发生了变化。本文分析了北半球典型三大干旱区即中蒙干旱区、中亚干旱区和北非干旱区的降水变化特征及其之间的差异, 分析了降水与海温和环流之间的关系, 分析了三个干旱区水汽输送特点与差异。得到以下初步结论:

(1) 中蒙干旱区、中亚干旱区和北非干旱区年降水均呈现出较强的季节变化特征, 其中, 中蒙干旱区的季风特点最为明显。中蒙和北非干旱区夏季降水多, 而中亚干旱区降水主要集中在冬、春季。此外在全球变暖背景下, 本文研究的三个干旱区气温上升的速率均大于全球平均升温率, 也大于相邻或者同纬度的升温速率, 这导致研究区域降水响应明显。

(2) 不同干旱区的水汽输送在经纬向上有着差异。中蒙干旱区冬季水汽主要以经向水汽输送为主, 夏季经纬向上均为水汽输出; 中亚干旱区冬季水汽纬向输送, 夏季同样经纬向均为净的水汽输出; 北非干旱区冬季经纬向水汽均为输出, 夏季水汽来源来自经向水汽输送。对比降水变化趋势来看, 除去冬季中蒙干旱区降水随着水汽输送量增加而显著增加, 其他地区在不同的季节降水随着水汽变化的关系不显著, 说明经纬水汽输送变化并非是干旱区降水变化的唯一原因, 干旱区降水可能受诸如局地环流和水汽变化等其他因素的影响。随着气温增加, 降水偏少的季节, 降水可能逐渐增加。

(3) 低纬度和高纬度环流通过准定常波影响干旱区降水。冬季中蒙和中亚干旱区降水与西太平洋到印度洋 200 hPa 向高纬度传播的定常波活动有关; 北非干旱区冬季降水与北大西洋上空 200 hPa 向低纬传播的定常波活动有关。中蒙和中亚干旱区冬季降水主要受源于西太平洋的向北波列的影响, 而北非干旱区冬季降水主要受到源于北大西洋向南波列的影响。此外, 中蒙和中亚干旱区冬季降水还与西风急流强度呈负相关, 北非干旱区冬季降水与西太平洋上空纬向风呈负相关。

(4) 中蒙干旱区冬季降水和冬季太平洋西海岸海温显著相关, 夏季降水则与海温之间的关系不显著; 中亚干旱区与地中海和阿拉伯海海温相关显著, 但冬季降水与阿拉伯海海温呈反相关, 夏季降水与阿拉伯海海温呈正相关; 北非干旱区降水与地中海和大西洋西部海温相关。

参考文献 (References)

白庆梅, 田文寿, 冯兆东, 等. 2010. 亚洲干旱/半干旱区降水与大洋暖

池气候的相关特征研究 [J]. 冰川冻土, 32 (2): 295–308. Bai Qingmei, Tian Wenshou, Feng Zhaodong, et al. 2010. Correlations between the precipitation of regions and the ocean warm pool climate [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 32 (2): 295–308.

Barry R G. 1985. The past and present of drought climate[C]//World Desert Studies. Chongqing: Chongqing Branch of Scientific and Technique Press, 16–19.

Becker A, P Finger, Meyer-Christoffer A, et al. 2013. A description of the global land-surface precipitation data products of the global precipitation climatology centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901-present [J]. Earth System Science Data Discussions, 5 (2): 71–99, doi: 10.5194/essd-5-71-2013.

Bento G S, Estoque M A. 1954. Water-vapor transfer over the North American continent[J]. J. Meteor., 11 (6): 462–477, doi: 10.1175/1520-0469(1954)011<0462:WVTOTN>2.0.CO;2.

蔡英, 宋敏红, 钱正安, 等. 2015. 西北干旱区夏季强干、湿事件降水环流及水汽输送的再分析 [J]. 高原气象, 34 (3): 597–610. Cai Ying, Song Minhong, Qian Zheng'an, et al. 2015. Reanalyses of precipitation circulation and vapor transportation of severe dry and wet events in summer in arid region of Northwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34 (3): 597–610, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00049.

Charney J G. 1975. Dynamics of deserts and drought in the Sahel [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 101 (428): 193–202, doi: 10.1002/qj.49710142802.

Dai A G, Lamb P J, Trenberth K E, et al. 2004. The recent Sahel drought is real [J]. International Journal of Climatic, 24 (11): 1323–1331, doi: 10.1002/joc.1083.

Druryan L M. 1989. Progress in South Sahara drought research [J]. International Journal of Climatic, 9 (1): 131–142.

Guo Y P, Wang C H. 2014. Trends in precipitation recycling over the Qinghai-Xizang Plateau in last decades [J]. J. Hydrol., 517: 826–835, doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.06.006.

Hartmann D L, Klein Tank A M G, Rusticucci M, et al. 2013. Observations: Atmosphere and surface [M]//Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Huang B H, Kinter III J L. 2002. Interannual variability in the tropical Indian Ocean [J]. J. Geophys. Res., 107 (C11): 20-1–20-26, doi: 10.1029/2001JC001278.

Hulme, M. and Marsh, R. 1990. Global Mean Monthly Humidity Surfaces, for 1930–59, 1960–89 and Projected for 2030 [R]. Norwich: Report prepared for UNEP/GEMS/GRID, Climatic Research Unit, University of East Anglia.

Hulme M. 1996. Recent climatic change in the world's drylands [J]. Geophys. Res. Lett., 23 (1): 61–64, doi: 10.1029/95GL03586.

Hung C W, Kao P K. 2010. Weakening of the winter monsoon and abrupt increase of winter rainfalls over northern Taiwan and southern China in the early 1980s [J]. J. Climate, 23 (9): 2357–2367, doi: 10.1175/2009JCLI3182.1.

Jhun J G, Lee E J. 2004. A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon [J]. J. Climate, 17 (4): 711–726, doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<0711:ANEAWM>2.0.CO;2.

- 蒋贤玲, 马柱国, 巩远发. 2015. 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, 34 (5): 1279–1291. Jiang Xianling, Ma Zhuguo, Gong Yuanfa. 2015. Comparative analysis of relationship between moisture budget and precipitation changes among global significantly wetting/drying regions [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34 (5): 1279–1291, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00109.
- Li Y Q, Yang S. 2010. A dynamical index for the East Asian winter monsoon [J]. J. Climate, 23 (15): 4255–4262, doi: 10.1175/2010JCLI3375.1.
- 马柱国, 符淙斌. 2007. 20 世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37 (2): 222–233. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2007. Global aridity facts and its links to large scale background in the second half of the twentieth century [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 37 (2): 222–233, doi: 10.3321/j.issn:1006-9267.2007.02.010.
- Mariotti A, Struglia M V, Zeng N, et al. 2002. The hydrological cycle in the Mediterranean region and implications for the water budget of the Mediterranean Sea [J]. J. Climate, 15 (13): 1674–1690, doi: 10.1175/1520-0442(2002)015<1674:THCITM>2.0.CO;2.
- Mitchell T D, Jones P D. 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids[J]. International Journal of Climatology, 25 (6): 693–712, doi: 10.1002/joc.1181.
- Mortimore M. 2009. Dryland Opportunities: A New Paradigm for People, Ecosystems, and Development [M]. Gland: IUCN.
- Nicholson S E. 2001. Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries[J]. Climate Research, 17 (2): 123–144, doi: 10.3354/cr017123.
- Nicholson S E, Tucker C J, Ba M B. 1998. Desertification, drought, and surface vegetation: An example from the West African Sahel [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 79 (5): 815–829, doi: 10.1175/1520-0477(1998)079<0815:DDASVA>2.0.CO;2.
- Narisma G T, Foley J A, Licker R, et al. 2007. Abrupt changes in rainfall during the twentieth century[J]. Geophys. Res. Lett., 34 (6), doi: 10.1029/2006GL028628.
- Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, et al. 2007. Global desertification: Building a science for dryland development [J]. Science, 316 (5826): 847–851, doi: 10.1126/science.1131634.
- Rosen R D, Salstein D A, Peixoto J P. 1979. Variability in the annual fields of large-scale atmospheric water vapor transport [J]. Mon. Wea. Rev., 107 (1): 26–37, doi: 10.1175/1520-0493(1979)107<0026:VITAF0>2.0.CO;2.
- Schmitz J T, Mullen S L. 1996. Water vapor transport associated with the summertime North American monsoon as depicted by ECMWF analyses [J]. J. Climate, 9 (7): 1621–1634, doi: 10.1175/1520-0442(1996)009<1621:WVTAWT>2.0.CO;2.
- Tannehill I. R. 1947. Drought-its causes and effects [J]. Soil Science, 64 (1): 83–84. <http://dx.doi.org/10.1080/03759873.1949.9630655>
- Wang B, J Liu, Kim H J, et al. 2012. Recent change of the global monsoon precipitation (1979-2008)[J]. Climate Dyn., 39 (5): 1123–1135, doi: 10.1007/s00382-011-1266-z.
- Wang C H, Guo Y P. 2012. Precipitable water conversion rates over the Qinghai–Xizang (Tibet) Plateau: Changing characteristics with global warming [J]. Hydrology Processes, 26 (10): 1509–1516, doi: 10.1002/hyp.8246.
- 王澄海, 王式功, 杨德保, 等. 2002. 中国西北春季降水与太平洋海温相关特征的研究 [J]. 热带气象学报, 18 (4): 374–382. Wang Chenghai, Wang Shigong, Yang Debao, et al. 2002. The correlation between the Pacific sea surface temperature (SST) and precipitation over Northwest China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 18 (4): 374–382, doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2002.04.011.
- Wei K, Wang L. 2013. Reexamination of the aridity conditions in arid northwestern China for the last decade [J]. J. Climate, 26 (23): 9594–9602, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00605.1
- 晏红明, 严华生, 谢应齐. 2001. 中国汛期降水的印度洋 SSTA 信号特征分析 [J]. 热带气象学报, 17 (2): 109–116. Yan Hongming, Yan Huasheng, Xie Yingqi. 2001. The SSTA signal characteristic analysis over India Ocean during flood season in China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 17 (2): 109–116, doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2001.02.002.
- 杨建玲, 李艳春, 穆建华, 等. 2015. 热带印度洋海温与西北地区东部降水关系研究 [J]. 高原气象, 34 (3): 690–699. Yang Jianling, Li Yanchun, Mu Jianhua, et al. 2015. Analysis of relationship between sea surface temperature in tropical Indian Ocean and precipitation in east of Northwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34 (3): 690–699, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00010.