

西风带与季风对中国西北地区的水汽输送

王可丽¹, 江 灏¹, 赵红岩²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 利用美国国家环境保护委员会/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析气候资料, 分析了西风带与季风对我国西北地区水汽输送的作用。分析表明, 大气水汽输送在西北地区的3个分区特征非常明显: 高原切变线以南, 主要是来自西南季风的水汽输送; 高原切变线以北, 主要是来自西风带的水汽输送; 高原切变线向东北方向的延长部位是一鞍型区, 为西风带与西南季风的共同影响区。青藏高原东部的西南季风气流有绕行和向北翻越青藏高原的水汽输送; 而在青藏高原中西部地区, 主要是由青藏高原周边向主体的水汽输送, 没有明显的翻越青藏高原的水汽输送。在青藏高原以北的大部分地区以对流层中层的水汽输送为主; 在青藏高原南部以低层水汽输送为主。在青藏高原以北的大部分地区, 水汽输送为辐散, 即输入的水汽又被扩散出去了; 在青藏高原主体和我国西北地区东部为水汽输送的辐合区。西风带的水汽输送为我国西北大部分地区提供了基本的水汽来源, 西风变化对其水汽输送通量散度年际变化有直接的作用; 南亚夏季风通过西南季风气流水汽输送直接影响我国西北地区南部和东部, 并且, 其变化通过环流结构调整影响西风带的波动, 进而影响西风带对西北地区的水汽输送。

关 键 词: 大气; 水汽输送; 西风带; 季风; 中国西北地区; 青藏高原; 水资源

中图分类号: P339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2005)03-0432-07

西风带与季风是影响我国气候的两大环流系统。这两大环流系统的影响域和影响强度会随着这两大风系强迫源的变化(全球变化、纬圈经向热力差异变化、海陆热力差异变化等)而变化。在我国西部, 由于青藏高原的叠加强迫作用, 西风带的摆动与季风的进退情况更为复杂。至今, 针对我国西北地区的水汽来源和水汽输送问题的研究, 已取得了一些重要的研究成果^[1~5]。但对西风带与季风对西北地区水汽输送的具体影响域和影响强度的研究鲜见报道。水汽输送是地-气水分循环过程中的重要组成部分。西风带与季风的相互作用影响着中国西北地区的大气水汽输送过程, 而大气水汽输送过程的变化控制着成云降水的水分汇聚条件与大气垂直运动条件, 降水与蒸散发的差额制约着地表和地下水过程。正是由于西北地区水循环过程的复杂性和独特性, 至今对其循环过程、变化规律和机理的认识严重不足, 从而制约着预测的可靠性。本文重点分析了西风带与季风对我国西北地区水汽输送的影响域和垂直分布、影响强度及其年际变化, 以期有助于明晰西风带与季风对西北地区的水汽输送作用, 进而有利于研究我国西北地区的水循环过程。

1 方法与资料

水汽输送通量计算方法:

$$\bar{Q} = \frac{1}{g} \int (\bar{V}q) dp = \frac{1}{g} \int (u, v, w) q dp \quad (1)$$

式中 $\bar{V}$ 为三维风矢量; u 和 v 分别为东西风分量和南北风分量; w 为垂直速度; q 为比湿; p_s 和 p_t 分别为任

收稿日期: 2004-07-05; 修订日期: 2004-08-31

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX1-SW-04; ZKXC2-SW-210)

作者简介: 王可丽(1957-), 女, 河北唐山人, 研究员, 主要从事气候与环境变化方面的研究。E-mail: kllwang@ns.lzb.ac.cn

意厚度气柱的下边界气压和上边界气压; g 为重力加速度。

水汽输送通量散度计算方法:

$$\nabla \cdot \bar{Q} = \frac{1}{g} \int_t \nabla \cdot (\bar{V}_q) dp \quad (2)$$

南亚夏季风指数计算方法^[6]:

$$MI = \sum_N (u_{850hPa} - u_{200hPa}) / N \quad (3)$$

式中 N 为(0°~20°N, 40°~130°E)范围内计算西风风速垂直切变的格点总数。

区域西风指数计算方法:

$$WI = \sum_K u_{500hPa} / K \quad (4)$$

式中 K 为(40°~55°N, 50°~85°E)范围内计算西风风速的格点总数。

本文所用资料为 1958 - 2001 年美国国家环境保护委员会/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析逐月资料^[7], 空间分辨率为水平 2.5°×2.5°网格点、垂直 17 层。

2 西北地区大气水汽输送

2.1 整层大气水汽输送

图 1(a) 为多年平均 6~9 月整层大气水汽输送流场, 由图 1 可看出水汽的输送方向。图中粗虚线为气流辐合线, 即(青藏)高原切变线。就多年平均情况而言, 高原切变线以南地区主要是来自西南季风的水汽输送。高原切变线以北地区, 主要是来自西风带的水汽输送。高原切变线以东地区, 受西南季风影响, 有沿青藏高原东缘绕行或向北翻越的水汽输送流。而在青藏高原中西部地区, 主要是由青藏高原周边向高原主体的水汽输送, 从高层到地面, 各层(图略)均未见明显的向北越过青藏高原的水汽输送。

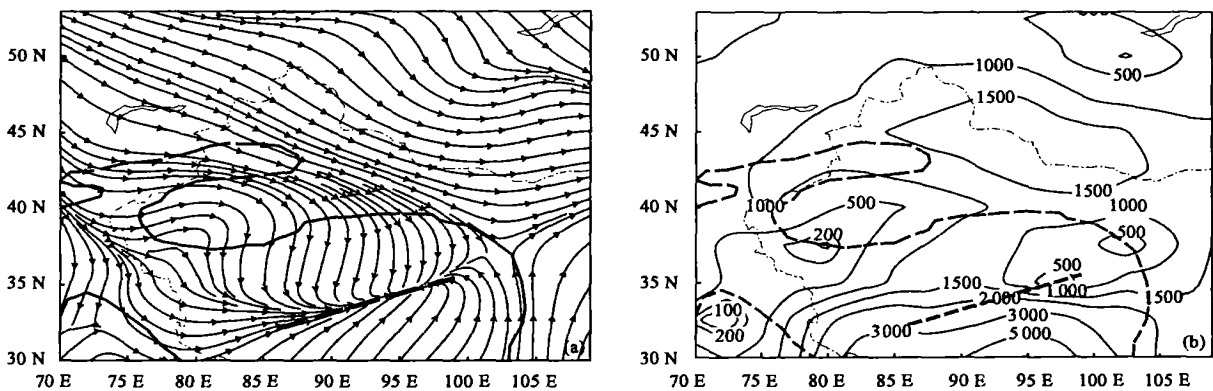


图 1 多年平均 6~9 月整层大气水汽输送流场(a)和水汽输送通量($g/(cm \cdot s)$)场(b)

Fig. 1 Atmospheric water vapor transport stream (a) and flux (b) from June to September in atmospheric column, averaged from 1958 to 2001

高原切变线以南为季风水汽输送区, 季风气流携带有丰富的水汽, 与之相对应, 在图 1(b) 的水汽输送数值场上, 青藏高原南部为大范围的高值区, 其高值中心可达 $6 \text{ kg}/(\text{cm} \cdot \text{s})$ 以上。高原切变线以北为西风带水汽输送区, 即使在青藏高原北部有明显的气流辐合, 但西风带气流所携带的水汽含量较少, 所以在高原切变线以北的广大地区水汽输送量明显偏少。在青藏高原的东北部, 高原辐合线的延长部位是一鞍型区, 为西风带与季风的共同影响区, 因这里气流平缓, 风速很小, 所以水汽输送量也小, 形成一个水汽输送的低值中心区。在青藏高原的

西北部从巴基斯坦到我国南疆有一条水汽输送的低值带, 其中在巴基斯坦和我国南疆地区各有一个低值中心, 中心输送值低于 0.1 kg/cm s , 与之对应的是受青藏高原阻挡形成的大气低层的低风速带。这样, 在青藏高原北部和北侧就连成了大范围的水汽输送的低值带。由此往北, 由于西风带和北方水汽输送, 北疆、内蒙古和蒙古国为相对的水汽输送高值区, 并且向东延伸。

总体来看, 我国西北地区的水汽输送分布形势是“一高一中夹一低”的东西向带状分布。从水汽输送数值对比来看, 西北地区北部的“中”值约为南部“高”值的 $1/3$; 中间“低”值约为南部“高”值的 $1/10$ 。

2.2 水汽输送的垂直分布

图 2 为沿 80°E 、 90°E 和 100°E 的水汽输送垂直剖面图。在沿 80°E 的垂直剖面图上, 高空的水汽输送等值线起伏不大, 表明没有明显的翻越青藏高原地形的水汽输送。在青藏高原以南, 水汽输送的大值在低层。沿青藏高原南坡, 等值线有向上的弯曲, 表明有一定的低层水汽输送, 但未能够翻越青藏高原主体, 25 g cm/s kg 等值线甚至不能达到顶部。在青藏高原以北, 等值线从青藏高原顶部开始分岔。在地面附近, 45°N 以北是水汽输送的相对高值区, 并且向上、向南扩展, 在约 600 hPa 层附近形成一个水汽输送的极大值。这表明有一定的向南水汽输送, 与图 1(a) 中显示的该地区水汽输送的偏南分量一致。

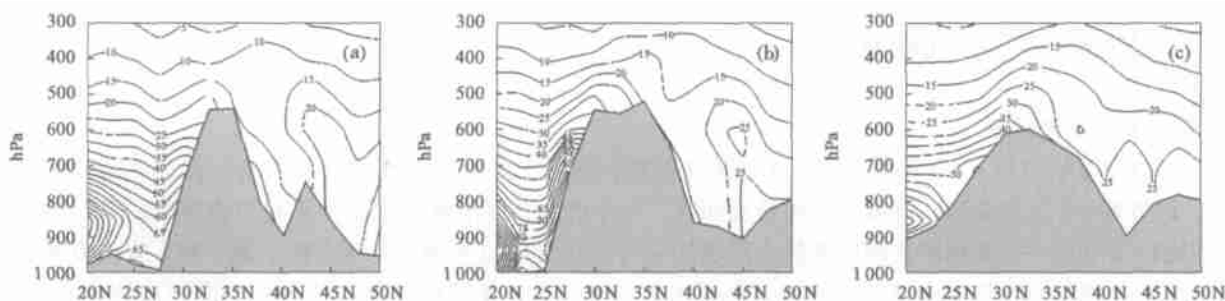


图 2 多年平均 6~9 月沿 80°E (a)、 90°E (b) 和 100°E (c) 的水汽输送垂直剖面 (g cm/s kg)

Fig. 2 Vertical cross-section of atmospheric water vapor transport flux from June to September along 80°E (a), 90°E (b) and 100°E (c) respectively, averaged from 1958 to 2001

在沿 90°E 的垂直剖面图上, 沿青藏高原南坡的等值线密集, 并有急剧的向上弯曲, 表明青藏高原南部爬坡气流的水汽输送非常强烈, 25 g cm/s kg 等值线已经达到顶部, 高空的水汽输送等值线有明显的向北弯曲, 但仍未能翻越青藏高原。青藏高原北部的情形与沿 80°E 的情形类似, 地面 40°N 附近为低值区, 北方有向上、向南的水汽输送, 600 hPa 层附近有极大值。

在沿 100°E 的垂直剖面图上, 青藏高原南坡等值线密集的程度、向上弯曲的急剧程度都不及沿 90°E 的情形, 但高空的水汽输送等值线有明显的向上隆起并向北延伸, 25 g cm/s kg 等值线已经翻越青藏高原顶部, 与北方的高值区连接。这表明有一定的翻越青藏高原的水汽输送, 与流场上显示的水汽输送流一致。北方水汽输送的大值在地面附近, 向上、向南的水汽输送已不明显, 这与图 1(a) 中该地区水汽输送流转为平直是一致的。

2.3 近地面附近的水汽输送

图 3 给出了根据近地面 2 m 比湿和 10 m 风速计算得到的近地面水汽输送流场分布, 以分析水汽输送在近地面附近的情况。在图 3(a) 中显示的近地面水汽输送流场中, 青藏高原北部及其以北地区, 以来自西西伯利亚的偏北气流为主, 蒙古高原有一辐合线。在青藏高原中、东部地区有两个明显的辐合中心, 气流向青藏高原主体辐合, 青藏高原东部以东南气流为主。在青藏高原西部地区, 沿青藏高原轮廓的中心线有一条辐合线, 在向北部弯曲延伸的天山地区也有一个辐合中心。这些表明, 在近地层, 高原地形的热力作用产生的热低压很明显, 其向高原主体的气流辐合是主要的, 不容易产生翻越高原主体地形的跨越式气流。

图 3(b) 给出了地面以上 50 hPa 厚度气层的水汽输送占整层大气水汽输送的比例。由图 3(b) 可见, 在青藏高

原南部以低层输送为主,近地面 50 hPa 厚度气层的水汽输送可占整层大气水汽输送的 60 %以上。在青藏高原东部和西部仍以中、低层为主,但低层所占比例已降至 20 %左右。在青藏高原北部及其以北地区,低层输送所占比例都在 20 %以下。

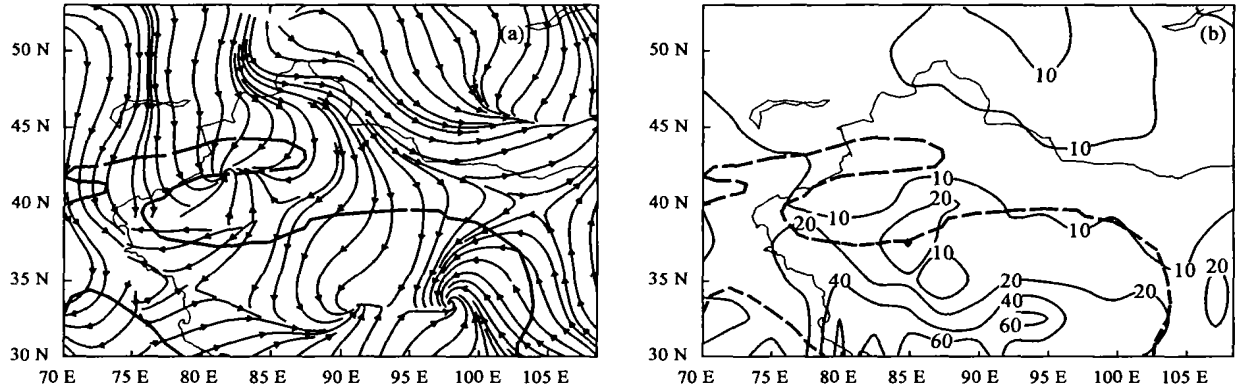


图3 多年平均 6~9 月近地面水汽输送流场 (a) 和近地面水汽输送占整层大气水汽输送的比例 (%) (b)

Fig.3 Atmospheric water vapor transport stream near the ground (a) and ratio of water vapor transport flux near the ground to atmospheric column (%) (b), averaged from 1958 to 2001

3 西北地区大气水汽输送通量散度

3.1 水汽输送通量散度平均场

水汽输送通量散度表征水汽的净收支情况。图 4 为根据图 1(a) 计算得到的多年平均 6~9 月水汽输送通量散度场。在图 1(a) 中显示的来自西风带的水汽输送,越过西部边界进入青藏高原以北的我国西北地区西部,且向东、向南扩散,形成图 4 中覆盖我国西北大部分地区的水汽输送通量正散度区。从大气水汽含量上看,南疆盆地为一相对高值区。从数值上看,中国西北地区比世界上几个著名的副热带干旱区的水汽含量和水汽输送值要高一些。国际卫星云气候学计划(世界研究计划) (ISCCP) 云图(图略) 也显示,我国西北地区的云量明显大于撒哈拉等干旱区。但这些水汽只是过境输送,水汽输送通量正散度区的水汽输出大于输入,水汽净收入为负值,输入的水汽又被扩散出去,没有在当地形成有效降水。这正是形成我国西北干旱区的水汽原因。

图 4 中青藏高原地区为水汽输送通量负散度区,即水汽的净收入区,由于高原辐合带的存在,使该地区有较强的水汽聚集。同时由于西南季风在青藏高原东缘的绕流和翻越输送,在我国西北地区东部也有一定的水汽聚集,在图 1(a) 中的鞍型区附近,由于鞍型区中心流速平缓,后续的水汽输送流有一定的堆积作用,即流速辐合,所以该地虽有明显的流向辐散,但综合的结果仍为弱辐合,图 4 中辐合区也因此向东北方向扩展。由于图 4 是多年平均场,所以随着年际变化的摆动,实际的影响区域还要大一些,甚至可以向西扩大到 100 °E 以西的祁连山-黑河流域一带。这也是河西走廊中东部地区降水的水汽来源之一。

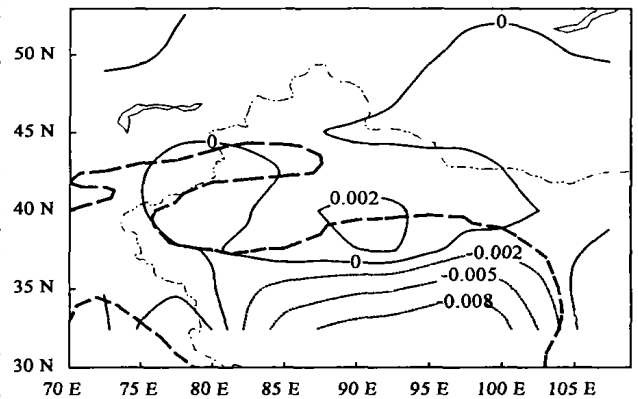


图4 多年平均 6~9 月水汽输送通量散度 ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)

Fig.4 Atmospheric water vapor transport flux divergence averaged from 1958 to 2001

3.2 水汽输送通量散度的时空变化特征

经验正交函数(EOF)分析表明,我国西北地区水汽输送通量散度具有明显的时空变化特征,其特征向量的方差收敛很快,第一、第二和第三特征向量的方差贡献分别为 46.8%、24.5%和 9.6%,前三个特征向量的方差和已达 80%以上。图 5 给出了西北地区水汽输送通量散度的第一和第二特征场分布。

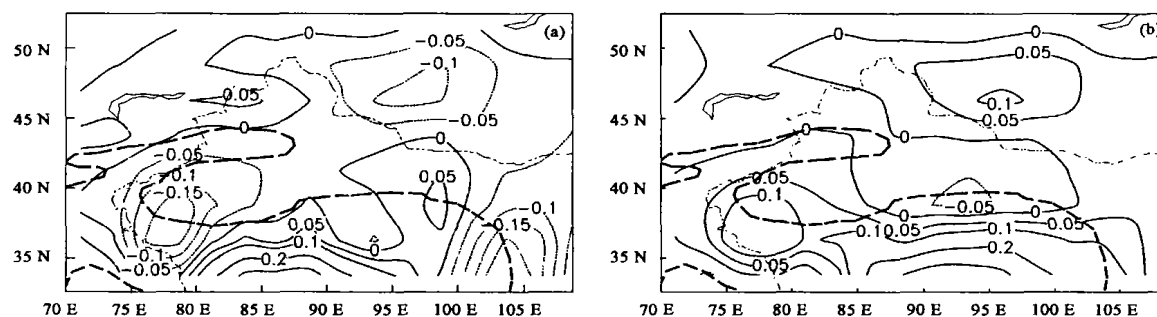


图 5 水汽输送通量散度的 EOF 第一(a)和第二(b)特征场($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)

Fig. 5 Eigenvectors of atmospheric water vapor transport flux divergence ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)

从第一特征场(图 5(a))可看出,水汽输送通量散度的时间变化具有明显的地域特点。西北地区东部,包括青藏高原东部和 100°E 以东的河西走廊中东部等地,为负变化区,根据前面的分析,很明显是受西南季风气流影响的地区。青藏高原中部及其北侧的河西走廊西部主要为正变化区,而其中的柴达木盆地则与南疆盆地、吐鲁番盆地一起成为负变化区。大地形在其中的作用是显而易见的。天山以北的北疆地区,虽然在平均场中与新疆大部分地区一样为辐散区,但在第一特征场上却与青藏高原地区一样以正变化为主。

在第二特征场(图 5(b))上,西北地区的东、南、西部均为正变化区,东部包括了河西走廊的中、东部,南部包括了青藏高原大部,西部包括了青藏高原西部和南疆盆地西部。38°N 以北的青藏高原北缘及其以北地区、新疆西北地区为负变化区,有明显的西风入侵的形态。

对比第一和第二特征场分布可以发现,除了青藏高原中部主体的变化相同以外,其它地区的变化大致相反。在我国西北地区北部的分布形势是 4 块区域大致呈“田”字型分布。而在西北地区的南部,第一特征场上由东向西分为正负相间的 3 块,第二特征场上则变化一致。

特征向量的时间系数表现了特征场的年际变化情况。图 6 为第一和第二特征场的时间系数的年际变化,以及对应的南亚夏季风指数和区域西风指数的年际变化情况。

由图 6(a)可看出,水汽输送通量散度第一特征场的时间系数与南亚夏季风指数的年际变化有较好的一致性。相关分析表明二者的相关系数为 0.42,超过 0.01 的信度水平。比较分析强、弱南亚夏季风年的环流形势(图略)可以发现,在强南亚夏季风年,高原切变线东端北抬,西端南压,斜度加大,使得中国西北地区东部水汽输送加强。而中部辐散增加,出现与东部相反的变化趋势。

图 6(b)显示了中国西北地区水汽输送通量散度第二特征场的时间系数与区域西风指数之间非常一致的年际变化特征,二者的相关系数达 0.75 以上,超过 0.001 的信度水平。对比分析强、弱西风年的流场分布(图略)可以发现,在强西风年,高原切变线受西风挤压南退,最大偏差可达 2 个纬距以上。

上述时空变化特征分析表明,西风带的水汽输送为中国西北大部分地区提供了基本的水汽来源,西风变化对其水汽输送通量散度年际变化有直接的作用。南亚夏季风通过西南季风气流水汽输送直接影响中国西北地区南部和东部,其水汽输送通量散度的年际变化以南亚夏季风的影响为主。并且,南亚夏季风的变化通过环流结构调整影响西风带的波动,进而影响西风带对中国西北地区的水汽输送。

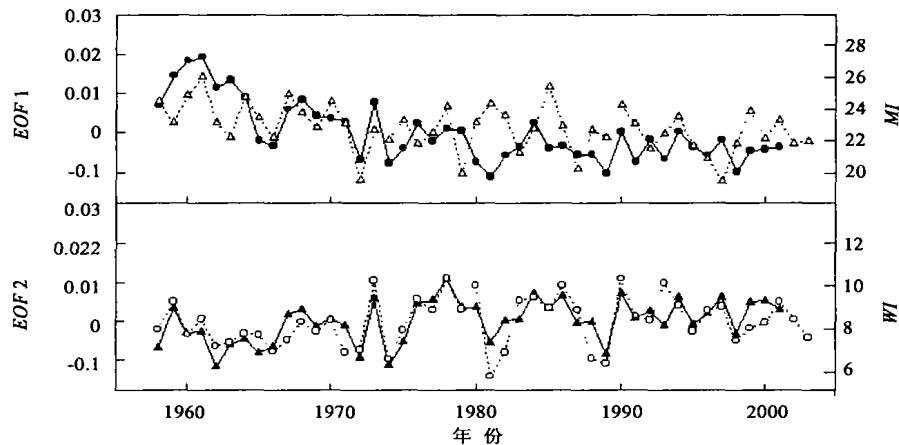


图6 第一和第二特征场的时间系数(实线)与南亚夏季风指数(MI,虚线)和区域西风指数(WI,虚线)的年际变化

Fig.6 Interannual change of time coefficients (solid line) for the eigenvectors of atmospheric water vapor transport flux divergence and indices (dashed line) of the South Asian Summer Monsoon (MI) and the Regional West Wind (WI)

4 结 论

(1) 就多年平均6~9月的情况而言,大气水汽输送在我国西北地区的3个分区特征非常明显:在青藏高原地区其南北分界为高原切变线,高原切变线以南地区主要是来自西南季风的水汽输送;高原切变线以北地区,主要是来自西风带的水汽输送;在西北地区东部大约100°E附近,高原切变线的延长部位是一鞍型区,为西风带与西南季风的共同影响区。当然,随着高原切变线的摆动其分区具有明显的年际变化特征。

(2) 从水汽输送数值分布情况来看,西北地区的水汽输送分布形势是“一高一中夹一低”的东西向带状分布,北疆、内蒙古和蒙古国的“中”值约为青藏高原南部“高”值的1/3,青藏高原北部和北侧的“低”值约为青藏高原南部“高”值的1/10。

(3) 青藏高原东部的西南季风气流有绕行和向北翻越青藏高原的水汽输送,而在青藏高原中西部地区,主要是由青藏高原周边向主体的水汽输送,从高层到地面,没有明显的翻越青藏高原的水汽输送。在青藏高原以北的大部分地区以对流层中层的水汽输送为主,垂直水汽输送中心大致在600 hPa层附近,在青藏高原北部和以北地区近地面50 hPa层的水汽输送只占整层大气水汽输送的20%以下。在青藏高原南部以低层水汽输送为主,近地面50 hPa厚度气层的水汽输送可占整层大气水汽输送的60%以上。

(4) 在青藏高原以北的我国西北大部分地区,大气水汽输送通量散度为正值,即水汽输送为辐散,输入的水汽又被扩散出去了,没有在当地形成有效降水,这正是形成西北干旱区的水汽原因。在我国西北地区的青藏高原主体和西北地区东部为水汽输送的辐合区。

(5) 西风带的水汽输送为我国西北大部分地区提供了基本的水汽来源,西风变化对其水汽输送通量散度年际变化有直接的作用。南亚夏季风通过西南季风气流水汽输送直接影响西北地区南部和东部,其水汽输送通量散度的年际变化以南亚夏季风的影响为主。并且,南亚夏季风的变化通过环流结构调整影响西风带的波动,进而影响西风带对我国西北地区的水汽输送。

参考文献:

- [1] 刘国纬. 水文循环的大气过程[M]. 北京:科学出版社, 1997.
- [2] 崔玉琴. 西北内陆上空水汽输送及其源地[J]. 水利学报, 1994(9): 79 - 87.
- [3] 施永年. 我国西北地区夏季水汽输送的初步计算结果[J]. 南京大学学报(自然科学), 1962(2): 33 - 40.

- [4] 林振耀, 郑 度. 新疆塔里木盆地东缘水汽输送探讨[J]. 干旱区研究, 1992, 9(2): 1 - 7.
- [5] 王可丽, 程国栋, 江 灏, 等. 祁连山-黑河流域水循环中的大气过程[J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 91 - 97.
- [6] 王可丽, 江 灏, 吴 虹, 等. 南亚夏季风年际变化特征分析[J]. 高原气象, 2001, 20(3): 318 - 324.
- [7] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, *et al.* The NCEP/ NCAR 40 year reanalysis project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77: 437 - 471.

Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the Northwest China^{*}

WANG Ke-li¹, JIANG Hao¹, ZHAO Hong-yan²

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou Institute of Arid Meteorology,
China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China)

Abstract : Based on the NCEP/ NCAR re-analysis of the climate data, the effects of westerly and monsoon on atmospheric water vapor transport over the Northwest China are analyzed. Some significant results are showed. There are three obvious sub-regions of the water vapor transport over the Northwest China. The water vapor transport is primary from the southwest monsoon over the region to the south of the (Qinghai-Tibetan) Plateau shear line, and from the westerlies over the region to the north of the Plateau shear line, or from the both above over a saddle region to the northeast of the prolongation along the Plateau shear line. There are some water vapor transport streams from the southwest monsoon span or along the east brink of the Qinghai-Tibetan Plateau. But the water vapor transports are primarily from the peripheral zone to the mainbody over the most of the Qinghai-Tibetan Plateau, and there are no obvious transport stream spans over here. The primary water vapor transport is in the middle troposphere over the region over the north of the Qinghai-Tibetan Plateau and in the low troposphere over the southern part of the Qinghai-Tibetan Plateau. Over the most of the north of the Qinghai-Tibetan Plateau, the water vapor transport is divergent, influent water vapor is again diffused out. The main of the Qinghai-Tibetan Plateau and the eastern parts of the Northwest China are the convergence regions of the water vapor transport. The westerly water vapor transport is the basic water vapor source, and the westerly fluctuation has the direct effect on interannual change of the water vapor transport flux divergence over the most of the Northwest China. The South Asia summer monsoon affects the southern and the eastern parts of the Northwest China by the southwest water vapor transport stream, and the westerly fluctuation by adjusting the circulation, and the westerly water vapor transport for the Northwest China.

Key words : atmosphere; water vapor transport; westerly fluctuation; summer monsoon; Northwest China; Qinghai-Tibetan Plateau; water resource

^{*} The study is financially supported by the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (KZCX1-SW-04; ZKCX2-SW-210).