

西北地区大气水汽含量时空分布及其输送研究^①

王凯^{1,2}, 孙美平^{1,3}, 巩宁刚¹

(1 西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070; 2 北京师范大学地理科学学部,北京 100875;
3 中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用 ECMWF 和 NCEP/NCAR 1979—2016 年逐月再分析资料,分析了我国西北地区大气水汽含量的时空分布及其输送特征。结果表明:(1)西北地区水汽含量在 20 世纪 80 年代中期至 90 年代末呈增多趋势,从 90 年代开始至 21 世纪初呈减少趋势。就季节而言,西北地区夏季水汽含量最多,占年平均水汽含量的 46.6%。(2)西北地区水汽分布与降水分布具有一致性,水汽含量主要集中在西北地区东部及其西部的天山山脉、塔里木盆地东部一带,达 12~30 mm,中部水汽含量较少,不足 10 mm,水汽含量的空间分布呈现出“两边高中间低”的分布形式。(3)西北地区水汽输送以西风和季风两大环流系统为主,纬向西风水汽输送可达 $100 \sim 500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,在全年水汽输送中占主要地位,夏季从印度洋来的强度可达 $100 \sim 200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南季风水汽输送对西北地区东部影响较显著。(4)西北地区水汽源主要位于新疆天山山脉、青海中东部、甘肃河西走廊中段、宁夏和陕西北部等地区,而水汽汇则位于甘肃南部、陕西南部一带。

关键词: 水汽含量; 时空分布; 水汽输送; 西北地区

中图分类号: P426 文献标识码: A 文章编号: 1000-6060(2018)02-0290-08(0290~0297)

DOI:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2018.02.009

水汽是降水的物质基础,它不仅在水文循环的过程中扮演着重要的角色,而且在整个地球气候系统中也起着十分重要的作用^[1-4]。据 IPCC 第五次评估报告指出^[5],气候系统的变暖是毋庸置疑的。全球气温的升高对不同地区的水分变化和人文循环产生了深刻影响,从而影响区域气候变化。我国西北地区深居内陆,是全球同纬度最干旱的地区之一^[6],水资源的严重匮乏制约着西北地区经济的发展和一带一路战略的实施。对大气中水汽含量和水汽输送机理的科学研究,不仅能对大气环流的形成、演变与发展有深入的了解,而且有利于区域水资源的合理配置,实现区域协调可持续发展。

自 20 世纪 90 年代特别是进入 21 世纪以来,我国学者开始关注这一问题并利用多种方法对大气水汽含量及其输送问题开展了诸多研究。李照荣等^[7]、马新平等^[8]的研究发现,西北中东部地区的水汽含量分布具有东南多西北少的特征;何海等^[9]研究了西北地区近地面的水汽分布,在近地面塔里木盆地是水汽的高值中心,新疆、青海、西藏的交界

地带是水汽的低值中心。杨金虎等^[10]在研究西北空中可降水量年内非均匀性特征时发现,西北空中可降水量集中度存在 2~4 a、6~8 a 的高频振荡;王可丽等^[11-12]的研究认为西风和季风共同对西北地区水汽输送起作用,西风带主要影响平流输送,南亚夏季风主要影响辐合输送;王宝鉴等^[13-14]在研究东亚夏季风期间水汽输送与西北干旱的关系时指出,西北地区存在沿纬向分布的西风水汽输送带和沿经向分布的西南风水汽输送带且夏季风的强弱与西北地区水汽含量呈正相关关系;周成龙等^[15]在研究新疆巴州地区大气可降水量与降水转化率关系时指出,二者具有正相关关系。除此之外,也有不少学者针对西北地区的局部地貌单元,如天山^[16]、祁连山^[17-18]、塔里木盆地^[19]、河西走廊^[20]、黑河流域^[21]、艾比湖流域^[22]等开展了水汽研究。本文在此基础上将西北地区划分为三个区域,研究了西北地区水汽含量的时空分布,并结合水汽通量和水汽通量散度,对西北地区的水汽“源”与水汽“汇”进行了初步分析,以期对西北地区大气水汽含量分布及

① 收稿日期: 2017-11-24; 修订日期: 2018-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561016); 中国博士后第 57 批面上资助项目(2015M572619)

作者简介: 王凯(1995-),男,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为气候与环境变化。E-mail: wangkai1578@163.com

通讯作者: 孙美平(1982-),女,辽宁沈阳人,副教授,博士,研究方向为寒区水文过程与气候变化影响评估。

E-mail: sunmeiping1982@163.com

其输送机理有更为深入的认识。

1 研究区概况

西北地区位于 $31^{\circ} \sim 50^{\circ} \text{N}$, $73^{\circ} \sim 112^{\circ} \text{E}$ 之间, 按行政区划主要包括新疆维吾尔自治区、青海省、甘肃省、宁夏回族自治区和陕西省。该区域地处亚欧大陆腹地, 地形以高原、山地、盆地为主, 在本区西部形成了典型的温带大陆性气候, 而东部则以温带季风气候为主。河流主要以内流河为主, 大多数河流发源于周围的山地, 向盆地内部汇集, 构成向心状水系。植被基本上由旱生的、叶退化的小乔木、灌木和半灌木构成, 土壤多以灰漠土、灰棕漠土和棕漠土为代表^[23]。根据宋连春等^[24]的研究, 本文将西北地区划分为西风区(新疆、甘肃河西走廊中西段)、高原区(青海、祁连山区和甘肃甘南地区)、季风区(陕西、宁夏、甘肃河西走廊东段及其以东地区)三个区域(图 1), 以便讨论西北地区水汽含量的时空分布特征。在本文中, 季节的划分标准是 3、4、5 月为春季, 6、7、8 月为夏季, 9、10、11 月为秋季, 12 月至次年 1、2 月为冬季。

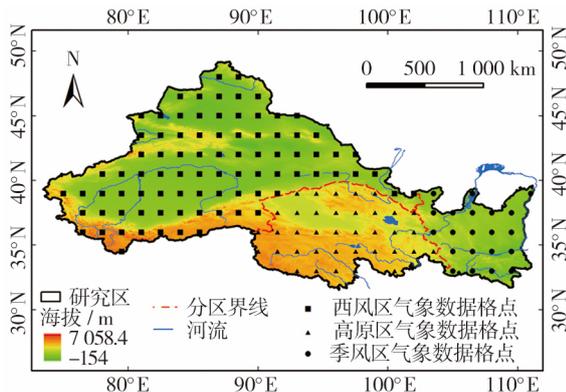


图 1 西北地区概况及其区域划分(气象数据格距为 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$)

Fig. 1 General situation of northwestern China and its region division (Meteorological data resolution is $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$)

2 研究方法

2.1 数据来源

研究使用的资料包括: 欧洲中期天气预报中心 (ECMWF, <http://www.ecmwf.int>) 提供的 1979—2016 年分辨率为 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 的逐月平均比湿资料和美国国家环境预报中心/国家大气研究中心 (NCEP/NCAR, <http://www.esrl.noaa.gov>) 提供的

1979—2016 年分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的逐月平均经向风分量、纬向风分量、比湿资料以及地面气压资料。

2.2 研究方法

大气水汽含量的计算方法为:

$$W = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q dp \quad (1)$$

大气水汽通量的计算方法为:

$$\vec{Q} = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} (\vec{V}q) dp = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} (u, v) q dp \quad (2)$$

大气水汽通量散度的计算方法为:

$$\nabla \cdot \vec{Q} = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} \nabla \cdot (\vec{V}q) dp \quad (3)$$

式中: W 为水汽含量 (mm); \vec{Q} 为水汽通量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); $\nabla \cdot \vec{Q}$ 为水汽通量散度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); q 为比湿 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); p_s 为地面气压; p_t 为大气顶气压, 取 300 hPa; u, v 分别是纬向风分量和经向风分量 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); g 为重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)^[25]。

3 西北地区大气水汽含量的时空分布特征

3.1 大气水汽含量的时间变化

3.1.1 大气水汽含量的年际变化 西北地区(图 2a) 大气水汽含量在 20 世纪 80 年代中期至 90 年代末呈增多趋势, 从 90 年代开始至 21 世纪初呈减少趋势。这一结论与俞亚勋等^[26]、靳立亚等^[27]、李江林等^[28] 研究的结果相一致。以 2000 年为界, 西北地区在 20 世纪 80 年代中后期水汽含量呈现增多趋势, 这在一定程度上从水汽含量变化的角度证实了施雅风^[29] 通过分析气温、降水、冰川消融量、湖泊水位和植被覆盖等的变化, 提出自 20 世纪 80 年代开始西北地区气候出现由暖干向暖湿转型的强劲信号的结论。

西风区大气水汽含量年际变化(图 2b) 趋势与西北地区基本一致, 从 20 世纪 80 年代中后期开始至 90 年代末期, 水汽含量在波动中呈增多态势。21 世纪初期水汽含量开始减少, 后期又有增多趋势。高原区(图 2c) 大气水汽含量在经历了 20 世纪 80 年代初期的减少趋势之后, 从 20 世纪 80 年中期开始水汽含量一直呈增多趋势。季风区(图 2d) 大气水汽含量自 20 世纪 80 年代至 90 年代末期在波动

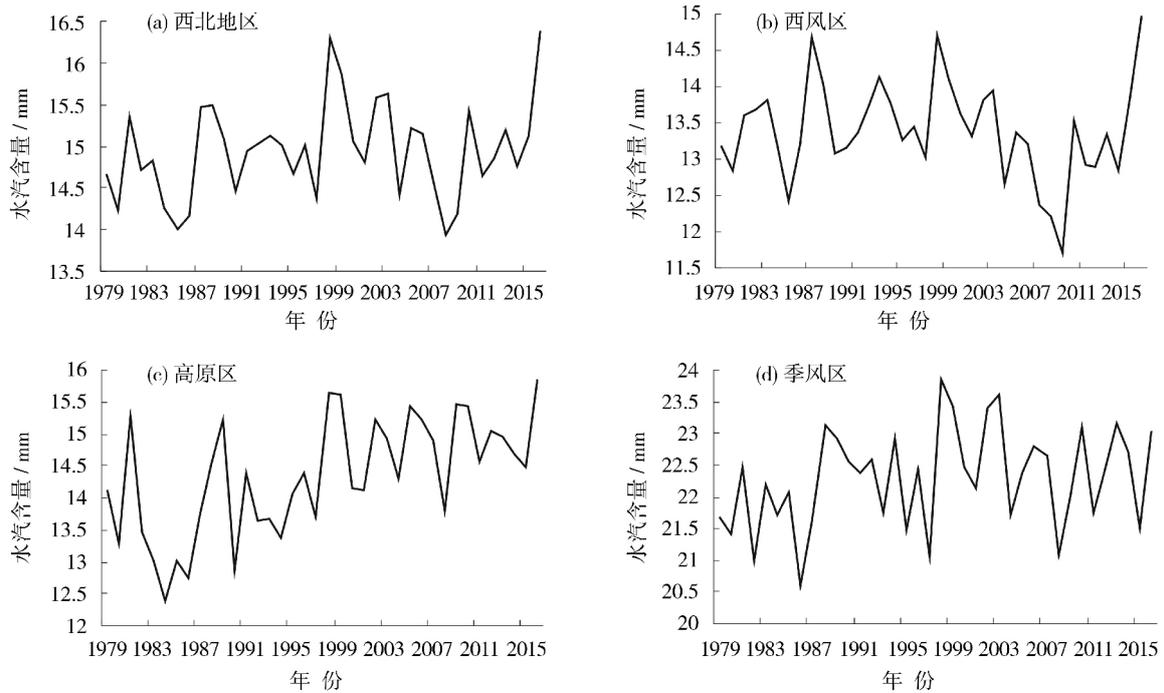


图2 西北地区及其分区平均水汽含量年际变化

Fig. 2 Annual variation of average water vapor content in northwestern China and sub-regions

表1 西北地区各月平均水汽含量 / mm

Tab. 1 Monthly average water vapor content in northwestern China / mm

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年平均
西北地区	5.0	6.1	8.2	11.6	16.9	24.5	30.7	28.6	21.1	13.2	7.9	5.6	15.0
西风区	5.0	6.0	7.9	11.0	15.3	21.9	26.7	24.4	17.4	11.6	7.8	5.7	13.4
高原区	3.8	4.7	6.5	10.1	16.6	25.1	31.5	29.4	22.5	11.9	5.4	4.0	14.3
季风区	7.0	9.0	12.1	16.8	23.8	33.9	45.4	44.3	33.2	21.5	12.6	8.0	22.3

中呈增多趋势,进入 21 世纪以来水汽含量略有减少,其中在 20 世纪 80 年代和 21 世纪初期为偏少期,20 世纪 90 年代为偏多期。

3.1.2 大气水汽含量的年内变化 通过计算西北地区 1979—2016 年 38 a 各月水汽含量平均值,分析了西北地区大气水汽含量的年内变化,得出 1 月是西北地区水汽含量最小的月份,月平均值为 5.0 mm,7 月是西北地区水汽含量最大的月份,月平均值为 30.7 mm。不管是西北地区还是各分区,从 1~7 月水汽含量逐月增加,变幅增大,到 7 月达到最高值,8~12 月水汽含量迅速减小。就变幅而言,1~2 月增幅最小,5~7 月增幅最大,8~11 月减幅最为明显。就季节而言,西北地区夏季平均水汽含量最多,达 27.9 mm,占全年比重的 46.6%,冬季平均水汽含量最少,仅有 5.6 mm,占全年比重的 9.4%。

3.2 大气水汽含量的空间变化

西北地区大部分地区水汽含量为 12~30 mm

(图 3)。水汽含量最大值位于陕西南部地区,达 27~30 mm,而水汽含量最少的地方位于南疆东部及新疆、青海和甘肃交界地带,年平均水汽含量仅有 9~12 mm。西北地区年平均水汽含量的空间分布与年平均降水量的空间分布特征基本一致,水汽含量较多的地区即对应降水的高值区,水汽含量较低

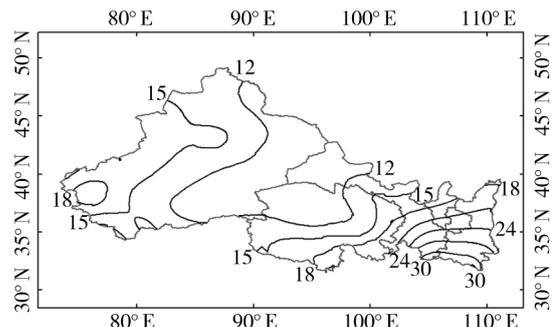


图3 西北地区年平均大气水汽含量空间分布 / mm

Fig. 3 Annual spatial distribution of average water vapor content in northwestern China / mm

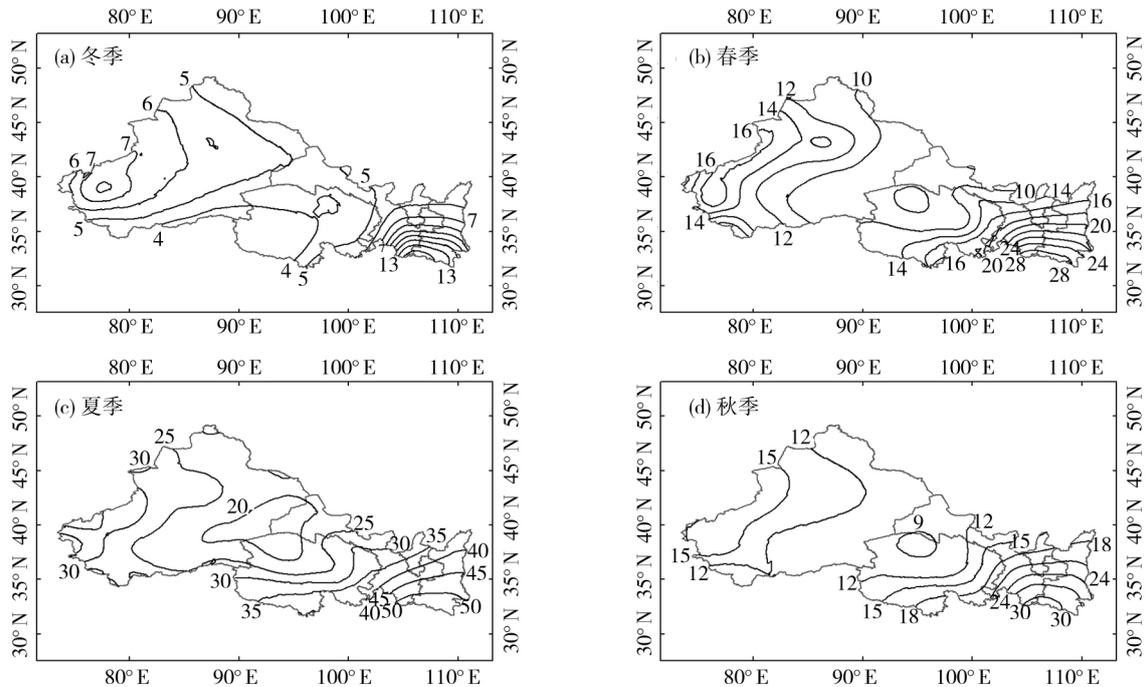


图 4 西北地区各季大气水汽含量空间分布 / mm

Fig. 4 Seasonal spatial distribution of water vapor content in northwestern China / mm

的地区对应降水的低值区^[30]。

冬季(图 4a)受蒙古—西伯利亚高压影响,水汽含量为全年最低值,大部分地区仅有 5~7 mm。其中塔里木盆地以西、陕西南部及甘肃东南部地区为冬季水汽含量高值区,水汽含量可达 8~13 mm,青海大部分地区及甘肃河西走廊及其以西地区为冬季水汽含量低值区,其值尚不足 5 mm。春季(图 4b)气温回暖,水汽含量较冬季有所增加,在西北地区东部水汽含量达 14~28 mm,新疆天山山脉和塔里木盆地西缘出现了 14~16 mm 左右的次高值中心。夏季(图 4c)西北地区气温达到最高,受东亚季风和西风的影响,大气容纳水汽的能力增加,西北地区夏季水汽含量在 20~30 mm 之间,陕西、宁夏和甘肃东南部为水汽含量的高值区,达 40~50 mm,新疆天山山脉和塔里木盆地西部较春季而言仍然为水汽次高值中心,其水汽含量有所增加,达到 25~30 mm 左右,水汽含量低值区位于甘青新三省交界一带,仅为 20 mm。秋季(图 4d)水汽含量的空间分布与春季类似,陕西南部和甘肃东南部为水汽高值区,塔里木盆地东部、青海西北部和甘肃河西走廊以西地区为水汽低值区。

海拔、纬度和大气环流的季节性调整是影响水汽含量空间分布的主要因素^[8]。海拔影响大气气柱厚度和含湿能力;纬度决定了一地的温度高低,进

而影响空气含湿能力;西北地区伴随季节的变化引起大气环流季节性的调整,冬季在蒙古西伯利亚高压影响下多盛行干冷的西北风,从而水汽含量较低。但在新疆西部地区及天山山脉附近,由于冬季受到盛行西风的影响,因而在该区域水汽含量呈现高值,夏季伴随季风的出现,在陕西南部和甘肃东南部等受季风影响较明显的区域水汽含量呈现高值,因而大气环流也是影响水汽含量变化与分布的一个重要因素。

4 西北地区大气水汽输送特征分析

4.1 大气水汽通量特征

就纬向水汽输送而言(图 5a),西北地区受西风水汽通量影响较显著,年平均西风水汽通量在 100~500 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,西风水汽通量由塔里木盆地南部和青海西部低值区向西北地区北部和东部逐渐增加。就经向水汽输送而言(图 5b),在新疆北部及东部、青海北部及中部、甘肃河西走廊中西段、宁夏北部和陕西北部等地主要受强度为 100 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的北风水汽通量影响,而塔里木盆地西部、甘肃东南部和陕西南部则受南风水汽通量影响,强度可达 100~200 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。就多年平均合成水汽通量的分布而言(图 5c),西北地区中西部

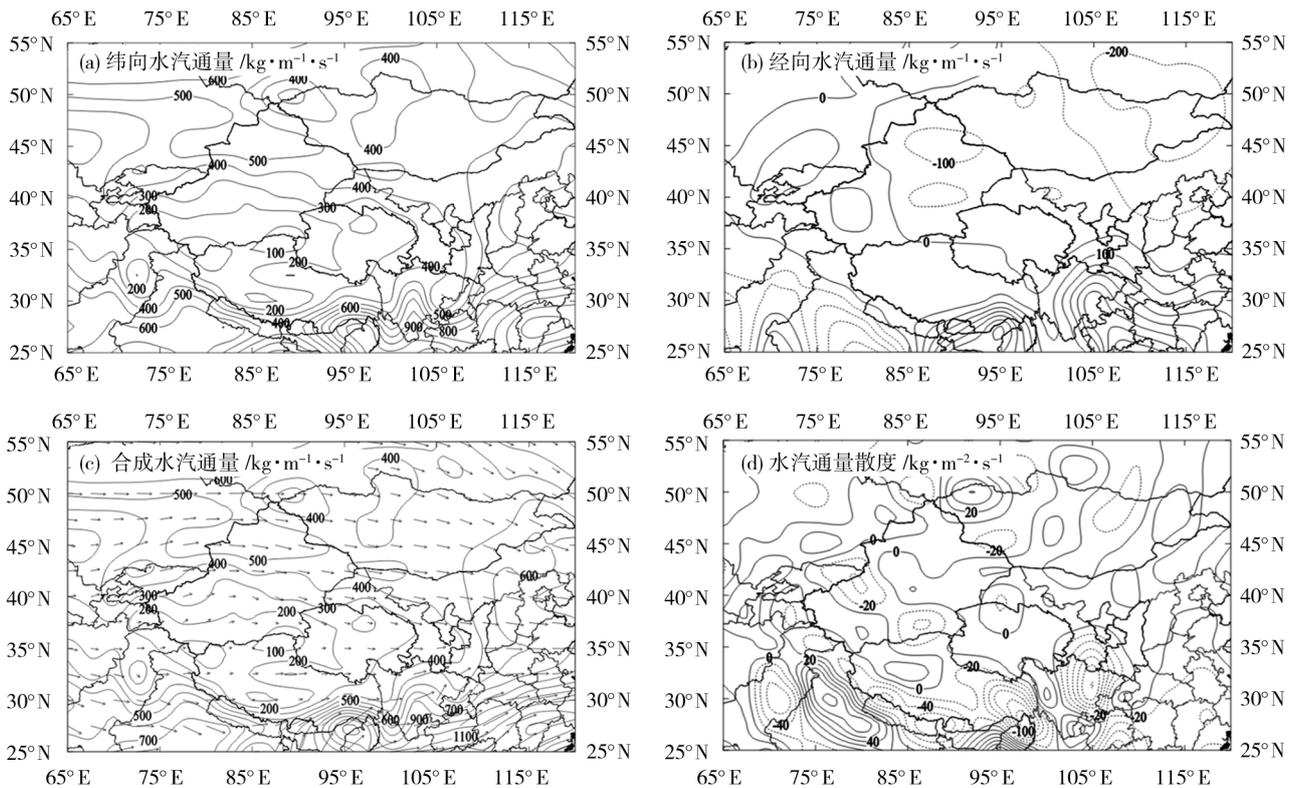


图5 西北地区年平均纬向、经向、合成水汽通量及水汽通量散度分布

Fig. 5 Annual spatial distribution of zonal meridional synthetic water vapor flux and water vapor flux divergence in northwestern China

主要受西风和西北风水汽通量影响,西北地区东部主要受西风和西南风水汽通量影响。在新疆北部和甘肃西部,水汽主要来自于西伯利亚和蒙古地区,输送强度可达到 $400 \sim 500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;在陕西南部和甘肃东南部,水汽主要来自于孟加拉湾一带的西南季风,输送强度也可达到 $400 \sim 500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,其余地区的水汽则主要来自于大西洋的西风水汽输送,输送强度为 $100 \sim 300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可以看出,西北地区的水汽输送主要有西向、西北向和西南向三大输送方向且主要以西风和季风两大环流系统为主,这与王可丽^[11-12]、林振耀^[31]、黄荣辉^[32]、赵光平^[33]等人的研究结果一致。

综上所述,西北地区全年水汽以西风输送为主,夏季西南季风对西北地区东部的水汽输送产生重要影响^[34]。受西北风水汽输送影响的区域主要是北疆、河西走廊中西段和宁夏一带,受西风水汽输送影响的区域主要是南疆、青海中西部,受西南风水汽输送影响的区域则位于青海南部、甘肃东南部和陕西南部地区。就季节而言,冬季西北地区以西风输送为主,春夏秋三季均有西风、西北风和西南风水汽输送参与,但输送强度不同,夏季由于在

西南季风和西风的双重影响下,水汽输送的强度达到最大。

4.2 大气水汽通量散度特征

大气水汽通量散度在甘肃南部和陕西南部地区有强度达 $30 \sim 90 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽辐合中心。在北疆北部存在一条近东西向的水汽辐合带,南疆中部存在一条西北-东南走向的水汽辐合带。在甘肃酒泉以南和青海柴达木盆地以北地区存在一个强度较小的水汽辐合中心,其余地区水汽呈辐散状态。

4.3 水汽“源”与水汽“汇”分析

在对西北地区大气水汽通量和水汽通量散度分析的基础上,本文给出了西北地区的水汽“源”与水汽“汇”的分布区域。西北地区的水汽“源”主要位于新疆天山山脉、青海中东部、甘肃河西走廊中西段、宁夏和陕西北部。这些区域水汽以西北风和西风输送为主,水汽通量散度多为正散度,水汽呈现向外辐散状态。西北地区水汽“汇”则主要位于甘肃南部、陕西南部,这些区域水汽以西南风和西风输送为主,水汽常年呈现辐合状态,这也印证了王可丽的研究^[11],南亚夏季风主要影响辐合输送。

5 结 论

根据上述对西北地区水汽含量、水汽通量和水汽通量散度三个方面的分析,得到以下几点结论:

(1) 西北地区水汽含量在 20 世纪 80 年代中期至 90 年代末呈现增多趋势,从 90 年代开始至 21 世纪初呈减少趋势。西北地区水汽含量夏季最多,达 27.9 mm,占年平均水汽含量的 46.6%;冬季最少,仅有 5.6 mm,只占年平均水汽含量的 9.4%。

(2) 西北地区水汽含量的空间分布与降水分布具有一致性,西北地区西部和东部水汽含量较多,其中西部地区以塔里木盆地西部和天山山脉地区水汽含量较多,东部则主要集中在甘肃南部和陕西南部一带,水汽含量达 12~30 mm。西北地区的中部水汽含量较少,主要在甘青新三省交界一带表现最为明显,水汽含量不足 10 mm,水汽含量的分布呈现出“两边高中间低”的分布形式。

(3) 西北地区纬向水汽通量以西风水汽通量影响为主,年平均输送 $100 \sim 500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,就经向水汽通量而言,在甘肃东南部和陕西南部受强度为 $100 \sim 200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的季风水汽通量影响,其余地区则为北风水汽通量影响。西北地区的水汽输送主要有西向、西北向和西南向三大输送方向且主要以西风和季风两大环流系统为主。

(4) 在新疆天山山脉、青海中东部、甘肃河西走廊中西段、宁夏和陕西北部地区由于水汽通量散度为正散度,水汽多向外输送,形成西北地区的水汽“源”区域,而在甘肃南部、陕西南部地区水汽通量散度为负散度,水汽在这些区域多呈辐合状态,形成西北地区的水汽“汇”区域。

参考文献(References)

- [1] 刘国纬. 水文循环的大气过程[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 25 - 56. [LIU Guowei. Atmosphere process in hydrologic cycle [M]. Beijing: Science Press, 1997: 25 - 56.]
- [2] 张强, 张杰, 孙国武, 等. 祁连山山区空中水汽分布特征研究[J]. 气象学报, 2007, 65(4): 633 - 643. [ZHANG Qiang, ZHANG Jie, SUN Guowu, et al. Research on atmospheric water-vapor distribution over Qilianshan Mountains[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65(4): 633 - 643.]
- [3] 杨青, 姚俊强, 赵勇, 等. 伊犁河流域水汽含量时空变化及其和降水量的关系[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1174 - 1183. [YANG Qing, YAO Junqiang, ZHAO Yong, et al. Spatial-temporal variation of water vapor and its relationship with the precipitation in the Ili River Basin[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(4): 1174 - 1183.]
- [4] 杨青, 魏文寿, 李军. 塔克拉玛干沙漠及周边地区大气水汽量的时空分布[J]. 科学通报, 2008, 53(S): 62 - 68. [YANG Qing, WEI Wenshou, LI Jun. Spatial-temporal distribution of water vapor in the Taklamakan Desert and surrounding areas[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(S): 62 - 68.]
- [5] ALLEN S K, PLATTNER G K, NAUELS A, et al. Climate Change 2013: The physical science basis. An overview of the working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) [J]. Contribution of Working, 2013, 43(22): 143 - 151.
- [6] 魏娜, 巩远发, 孙娴, 等. 西北地区近 50 年降水变化及水汽输送特征[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1450 - 1457. [WEI Na, GONG Yuanfa, SUN Xian, et al. Variation of precipitation and water vapor transport over the northwest China from 1959—2005[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(6): 1450 - 1457.]
- [7] 李照荣, 陈添宇, 陈乾. 2001—2005 年西北中东部水汽及其输送特征[J]. 冰川冻土, 2008, 30(4): 668 - 674. [LI Zhaorong, CHEN Tianyu, CHEN Qian. Features of vapor and its transport over east and central regions of northwest China in 2001—2005[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(4): 668 - 674.]
- [8] 马新平, 尚可政, 李佳耘, 等. 1981—2010 年中国西北地区东部大气可降水量的时空变化特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 448 - 455. [MA Xinping, SHANG Kezheng, LI Jiayun, et al. Spatial and temporal changes of atmospheric precipitable water in the eastern part of northwest China from 1981—2010[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(2): 448 - 455.]
- [9] 何海, 陆桂华, 王小锋, 等. 西北地区近地面水汽特征及其与区域蒸发关系[J]. 水电能源科学, 2012, 30(12): 1 - 5. [HE Hai, LU Guihua, WANG Xiaofeng, et al. Water vapor content near the surface and its responses to regional evaporation in northwest China[J]. Water Resource and Power, 2012, 30(12): 1 - 5.]
- [10] 杨金虎, 王鹏祥, 白虎志, 等. 西北空中可降水量的年内非均匀性特征[J]. 干旱区地理, 2008, 31(2): 182 - 188. [YANG Jinhui, WANG Pengxiang, BAI Huzhi, et al. Intra-annual in homogeneity characteristic of atmosphere precipitable water over the northwest China[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(2): 182 - 188.]
- [11] 王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 432 - 438. [WANG Keli, JIANG Hao, ZHAO Hongyan. Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the northwest China[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 432 - 438.]
- [12] 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. [WANG Keli, JIANG Hao, ZHAO Hongyan. Advection and convergence of water vapor transport over the northwest China[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(2): 164 - 169.]
- [13] 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. [WANG Baojian, HUANG Yuxia, HE Jinhai, et al. Relation between vapour transportation in the period of East Asian summer monsoon and drought in northwest China[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(6): 912 - 918.]
- [14] 王宝鉴, 黄玉霞, 陶健红, 等. 西北地区大气水汽的区域分布特

- 征及其变化[J]. 冰川冻土 2006, 28(1): 15-21. [WANG Baojian, HUANG Yuxia, TAO Jianhong, et al. Regional features and variations of water vapor in northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2006, 28(1): 15-21.]
- [15] 周成龙, 钟昕洁, 杨兴华, 等. 新疆巴州地区降水量、可降水量及降水转化率计算解析[J]. 干旱区地理 2016, 39(6): 1204-1211. [ZHOU Chenglong, ZHONG Xinjie, YANG Xinghua, et al. Calculation of precipitation, precipitable water and precipitation conversion efficiency of Bayingolin Prefecture in Xinjiang[J]. Arid Land Geography 2016, 39(6): 1204-1211.]
- [16] 姚俊强. 天山山区水汽含量时空分布及强降水过程的水汽演变特征[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2012. [YAO Junqiang. Temporal-spatial distribution of the water vapor content and evolution character of water vapor during heavy rain in Tianshan Mountains[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University 2012.]
- [17] 张良, 王式功, 尚可政, 等. 祁连山区空中水资源研究[J]. 干旱气象 2007, 25(1): 14-20. [ZAHNG Liang, WANG Shigong, SHANG Kezheng, et al. Research on vapor and precipitation resources over the Qilian Mountain Area[J]. Arid Meteorology, 2007, 25(1): 14-20.]
- [18] 巩宁刚, 孙美平, 闫露霞, 等. 1979—2016年祁连山地区大气水汽含量时空特征及其与降水的关系[J]. 干旱区地理 2017, 40(4): 762-771. [GONG Ninggang, SUN Meiping, YAN Luxia, et al. Temporal and spatial characteristics of atmospheric water vapor and its relationship with precipitation in Qilian Mountains during 1979—2016[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(4): 762-771.]
- [19] 李红军, 毛炜峰, 赵勇, 等. 近47 a塔里木盆地近地面水汽含量的趋势和突变研究[J]. 干旱区地理 2010, 33(6): 861-867. [LI Hongjun, MAO Weifeng, ZHAO Yong, et al. Trend and abrupt change of surface vapor over Tarim Basin in recent 47 a[J]. Arid Land Geography 2010, 33(6): 861-867.]
- [20] 王伏村, 付双喜, 王旭东, 等. 河西走廊春末夏初降水异常与大气环流及海温场关系[J]. 干旱区地理 2014, 37(2): 281-289. [WANG Fucun, FU Shuangxi, WANG Xudong, et al. Relations between precipitation anomaly in late spring and early summer in Hexi Corridor and atmospheric circulation and sea surface temperature[J]. Arid Land Geography 2014, 37(2): 281-289.]
- [21] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域大气降水水汽来源分析[J]. 干旱区地理 2008, 31(3): 403-408. [ZHANG Yinghua, WU Yanqing. Precipitation from different water vapor sources in the Heihe River Basin, China[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(3): 403-408.]
- [22] 于恩涛, 向伟玲, 师庆东, 等. 艾比湖流域大气水汽时空分布特征及收支[J]. 干旱区地理 2009, 32(2): 218-225. [YU Entao, XIANG Weiling, SHI Qingdong, et al. Spatial-temporal characteristics of vapor and vapor budgets in Lake Ebinur Basin[J]. Arid Land Geography 2009, 32(2): 218-225.]
- [23] 赵济. 中国自然地理[M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 1995: 283-290. [ZHAO Ji. Physical geography of China[M]. Third Ed. Beijing: Higher Education Press, 1995: 283-290.]
- [24] 宋连春, 张存杰. 20世纪西北地区降水量变化特征[J]. 冰川冻土 2003, 25(2): 143-148. [SONG Lianchun, ZHANG Cunjie. Changing features of precipitation over northwest China during the 20th century[J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2003, 25(2): 143-148.]
- [25] 朱乾根, 林锦瑞, 寿邵文, 等. 天气学原理和方法[M]. 第四版. 北京: 气象出版社, 2007: 636-637. [ZHU Qiangen, LIN Jinrui, SHOU Shaowen, et al. Theory and method of synoptic meteorology[M]. Fourth Ed. Beijing: Meteorological Press 2007: 636-637.]
- [26] 俞亚勋, 王劲松, 李青艳. 西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析[J]. 冰川冻土 2003, 25(2): 149-156. [YU Yaxun, WANG Jingsong, LI Qingyan. Spatial and temporal distribution of water vapor and its variation trend in atmosphere over northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2003, 25(2): 149-156.]
- [27] 靳立亚, 符娇兰, 陈发虎. 西北地区空中水汽输送时变特征及其与降水的关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版) 2006, 42(1): 1-6. [JIN Liya, FU Jiaolan, CHEN Fahu. Spatial and temporal distribution of water vapor and its relationship with precipitation over northwest China[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences) 2006, 42(1): 1-6.]
- [28] 李江林, 李照荣, 杨建才, 等. 近10年夏季西北地区水汽空间分布和时间变化分析[J]. 高原气象 2012, 31(6): 1574-1581. [LI Jianglin, LI Zhaorong, YANG Jiancai, et al. Analyses on spatial distribution and temporal variation of atmosphere water vapor over northwest China in summer of later 10 years[J]. Plateau Meteorology 2012, 31(6): 1574-1581.]
- [29] 施雅风. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 4-6. [SHI Yafeng. Assessment of the issues on climate shift from warm-dry to warm-wet in northwest China[M]. Beijing: Meteorological Press 2003: 4-6.]
- [30] 黄玉霞. 西北地区大气水汽输送特征及气候转型研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005. [HUANG Yuxia. The research about atmosphere vapor transportation and changing of climate in northwest of China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology 2005.]
- [31] 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. [LIN Zhenyao, ZHEN Du. The tracks of moisture transportation and its vapour geocological characteristics on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Arid Zones Research, 1992, 9(2): 1-7.]
- [32] 黄荣辉, 陈际龙. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异[J]. 大气科学 2010, 34(6): 1036-1045. [HUANG Ronghui, CHEN Jilong. Characteristics of the summertime water vapor transports over the eastern part of China and those over the western part of China and their difference[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences 2010, 34(6): 1036-1045.]
- [33] 赵光平, 姜兵, 王勇, 等. 西北地区东部夏季水汽输送特征及其与降水的关系[J]. 干旱区地理 2017, 40(2): 239-247. [ZHAO Guangping, JIANG Bing, WANG Yong, et al. Characteristics of summer water vapor transport in the eastern northwest China and their relationships with precipitation[J]. Arid Land Geography 2017, 40(2): 239-247.]
- [34] 丁斌. 中国西部水汽输送与旱涝关系的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006. [DING Bin. The study to the relation of west China vapor transportation and flood/drought[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology 2006.]

Spatial and temporal distribution and transportation of the water vapor in the northwestern China

WANG Kai^{1,2}, SUN Mei-ping^{1,3}, GONG Ning-gang¹

(1) *College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China;*

2 *Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

3 *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, Gansu, China)*

Abstract: Based on the ECMWF and NCEP / NCAR re-analysis of the climate data during the 38 years (from 1979 to 2016), the spatial and temporal distribution and the transportation of the water vapor in the northwestern China were analyzed. The results show as follows: (1) The water vapor content in northwestern China was increased from the middle 1980s to the late 1990s, but it was decreased after that. In terms of seasonal disparity, the water vapor content reached its maximum value in summer, accounting for 46.6% of the annual average water vapor content. (2) The spatial distribution of the water vapor in the northwestern China is in accordance with that of the precipitation in the form of “lower value in the middle and high values on both east side and west side” which meant that the water vapor was accumulated mainly in the east part of the region and in the Tianshan Mountains and east Tarim Basin in the west part of the region with its content being 12–30 mm, and there was less water vapor in the middle of the region with the content less than 10 mm. (3) The west wind and monsoon were the main carriers for the water vapor circulation in the northwestern China. The zonal westerly wind transferred the water vapor at $100 - 500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ which dominated the transportation of water vapor in a year. The southwest monsoon from the Indian Ocean in summer had a great effect on the water vapor transportation in the east of the region with a transport intensity being $100 - 500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. (4) The water vapor sources were primarily distributed in the Tianshan Mountains, the middle and east part of Qinghai Province, the middle and west part of Hexi Corridor, Ningxia Province and the north part of Shaanxi Province while the water vapor sinks were located in the south part of Gansu Province and the south part of Shaanxi.

Key words: water vapor content; spatial and temporal distribution; water vapor transportation; northwestern China