

黄小燕,王圣杰,王小平,2018. 1960—2015年中国西北地区大气可降水量变化特征[J]. 气象, 44(9):1191-1199.

# 1960—2015年中国西北地区大气可降水量变化特征<sup>\*</sup>

黄小燕<sup>1</sup> 王圣杰<sup>2</sup> 王小平<sup>1</sup>

1 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,

中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020

2 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

**提 要:** 采用中国西北地区 1960—2015 年 113 个地面气象站及 24 个探空站气象资料, 建立西北地区大气可降水量与地面水汽压的经验关系式, 计算西北地区各气象站点的大气可降水量, 结合反距离加权插值、Mann-Kendall 检验、小波分析等方法, 对西北地区近 56 年大气降水量的时空分布特征及其与气象要素的关系进行分析。结果表明: 近 56 年中国西北地区大气可降水量总体呈增加趋势, 平均每 10 年增加 0.11 mm, 大气降水量的月变化呈明显单峰型; 空间分布上, 大气可降水量的高值区主要分布在西北东部地区, 低值区主要分布在西北中部地区; 空间变化上, 西北大部分地区大气可降水量呈增加趋势, 以陕西南部、甘肃东南部、青海西北部、新疆等地增加趋势明显; 西北地区年平均大气可降水量存在明显的突变特征和周期性变化特征, 在 1983 年左右发生突变, 主振荡周期为 4 a 左右; 西北地区大气可降水量与平均气温、相对湿度呈正相关性, 与平均风速呈负相关性。

**关键词:** 西北地区, 大气可降水量, 气候变化, 空间分布, 气象要素

**中图分类号:** P468

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.09.007

## Variations of Precipitable Water in Northwest China During 1960—2015

HUANG Xiaoyan<sup>1</sup> WANG Shengjie<sup>2</sup> WANG Xiaoping<sup>1</sup>

1 Institute of Arid Meteorology Lanzhou of CMA, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province,  
Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of CMA, Lanzhou 730020

2 College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070

**Abstract:** Based on the meteorological data from 113 surface and 24 radiosonde stations in Northwest China from 1960 to 2015, the empirical formula was established between precipitable water ( $P_{wv}$ ) and surface vapor pressure, and the  $P_{wv}$  in Northwest China was calculated. With the methods such as inverse distance weighted, Mann-Kendall test and Morlet wavelets, the temporal and spatial distribution of  $P_{wv}$  and its relations with other meteorological elements were analyzed. The results showed that  $P_{wv}$  has increased in last 56 years with the increasing rate of 0.11 mm per decade, and the obviously unimodal types can be examined for the monthly variations. The high  $P_{wv}$  area is mainly in the east of Northwest China, and the middle area of Northwest China usually presents a low value. The  $P_{wv}$  in most parts of Northwest China has increased, which is obvious in southern Shaanxi, southeastern Gansu, northwestern Qinghai and Xinjiang. The annual average  $P_{wv}$  in Northwest China shows an obvious mutation around 1983 and a periodical change with primary period of approximately 4 years.  $P_{wv}$  in Northwest China shows a positive correlation with mean air temperature and relative humidity, and a negative correlation with wind speed.

<sup>\*</sup> 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001-4)、国家自然科学基金项目(41175081, 41201370, 31300376)和甘肃省自然科学基金(1208RJYA025)共同资助

2017年7月13日收稿; 2018年2月27日收修定稿

第一作者: 黄小燕, 主要从事全球气候变化方面的研究工作. Email: 89290228@qq.com

**Key words:** Northwest China, precipitable water, climate change, spatial distribution, meteorological element

## 引言

大气可降水量(precipitable water vapor,  $P_{wv}$ )又称大气水汽含量,是指地面上大气柱的总水汽量,是表征大气水汽含量以及空中水资源的重要指标(李国平等,2006)。大气可降水量直接关系到各地的降水天气及气候(孙建华等,2016;郝丽萍等,2013),其变化深刻影响着全球气候系统和水资源系统的结构和演变,也影响着人类社会的发展和生产活动(姚俊强等,2013;刘晶和杨莲梅,2017;王佳津等,2015;万蓉等,2015;陈丹等,2016)。刘丹等(2013)利用1984—2009年的NCEP资料对我国大气可降水量进行总体分析,发现我国大气可降水量的空间分布总趋势是低纬大于高纬、平原大于高原、沿海地区大于内陆地区。对中国部分典型地区大气可降水量的研究表明:安徽合肥可降水量最大,云南丽江最小(李建玉等,2012);海南岛地区夏半季和冬半季平均大气可降水量距平曲线正负极值所在年份分别与厄尔尼诺和拉尼娜事件年有比较明显的对应关系(李光伟等,2015);江苏地区大气可降水量随时间变化趋势一致,随纬度的增加而减少,随经度的增加而增大(郑加柱和王亮,2013)。近年来对西北地区大气可降水量的研究也逐渐增多(苗运玲等,2016;杨磊等,2016;杨晓春等,2013):1979年以来,青藏高原上空大气可降水量呈微弱增多趋势,空间分布上大体由东南向西北逐渐减少(姚宜斌等,2016;雷祥旭等,2015);2003—2013年,天山地区平均大气可降水量的空间分布格局呈西多东少的变化趋势(程红霞等,2017);1965年以来,新疆巴音郭楞蒙古自治州大气可降水量呈上升趋势,以焉耆盆地最为显著(周成龙等,2016);2010—2011年,西藏改则站大气可降水量存在明显的季节变化特征,其高(低)值出现在6—9月(12—3月)(周顺武等,2016)。

西北地区深居中国内陆腹地,其境内地形、地貌极其复杂,属于温带大陆性气候,以干旱为主,由于西北地区自然环境具有明显的复杂性、多样性,所以区域内很多有关气候与资源环境问题值得深入研究。以往对西北地区大气可降水量的研究区域较为

局限,对整个西北地区大气可降水量的研究甚少。本文通过年代际、年际等时间尺度的大气可降水量的变化,研究了西北地区大气可降水量的空间分布及其变化趋势,由此给出西北地区大气可降水量的变化特征,以期更好地理解西北地区的降水气候。

## 1 资料与方法

本文中西北地区包括:甘肃省、陕西省、青海省、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区。所用资料包括:西北地区113个地面气象站1960—2015年的逐日平均水汽压、降水量、平均气温、日照时数、相对湿度、平均风速等气象观测资料及113个地面气象站的海拔高度;西北地区24个探空站地面以及1000、925、850、700、500、400、300 hPa 7个标准等压面层00和12时(世界时)的各层位势高度和比湿,资料时间尺度为1981—2010年累年旬值。所用资料都来源于国家气象信息中心中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)提供的地面气象资料和高空气象资料,图1给出西北地区地面气象站和探空站分布情况。以12年至翌年2月为冬季、3—5月为春季、6—8月为夏季、9—11月为秋季生成序列,对不同季节大气可降水量变化进行分析。

大气可降水量的理论计算公式为:

$$P_{wv} = -\frac{1}{g} \int_{p_0}^0 q dp \quad (1)$$

实际工作中,一般利用探空观测的各标准等压面上的比湿差分进行求和计算得到大气可降水量,

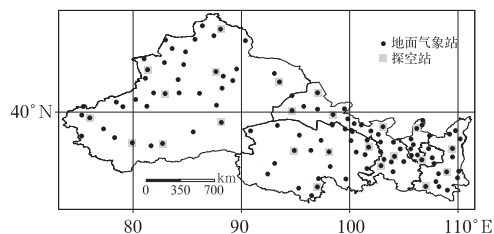


图1 西北地区地面气象站和探空站分布图

Fig. 1 Spatial distribution of surface and radiosonde stations in Northwest China

其公式为:

$$P_{wv} = -\frac{1}{g} \sum_{p_0}^{p_h} q_i \cdot \Delta p_i \quad (2)$$

式(1)和式(2)中,  $P_{wv}$  为大气可降水量(单位: mm),  $g$  为重力加速度(单位:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ ),  $q$  为比湿(单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $q_i$  为各层等压面上的比湿(单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $i$  为等压面的层次,  $p_0$  和  $p_h$  分别为地面气压和大气顶层气压(单位: hPa), 因为水汽主要集中在对流层下半部, 所以选取 300 hPa 为大气顶层, 即  $p_h = 300$  hPa。利用西北地区 24 个探空站一日 2 次的地面至 300 hPa 各层位势高度及比湿, 利用式(2)得到大气可降水量。

西北地区地形复杂, 探空站点稀少, 而再分析资料的时空分辨率低, 在山区的适用性没有经过检验, 分析结果的正确性经常受到质疑, 所以利用探空观测数据计算的大气可降水量与相应地面站的水汽压( $e$ , 单位: hPa)建立  $P_{wv} - e$  模型。研究表明大气可降水量( $P_{wv}$ )与地面水汽压( $e$ )存在良好的线性关系(张学文, 2004; 杨景梅和邱金桓, 1996), 公式为  $P_{wv} = a + be$ , 参数  $a, b$  因站点而异。考虑地面水汽压为 0 时大气可降水量也应该为 0 这一物理意义, 因此定义关系式为  $P_{wv} = be$ , 即一元线性模型, 其中  $b$  为可降水量的变化倾向率。

利用西北地区 24 个探空站 1981—2010 年累年月平均大气可降水量与相应地面站水汽压分季节建立相关关系, 进行  $P_{wv} - e$  一元模型拟合(图 2), 其

中每个季节样本数为 72, 得出四季大气可降水量与地面水汽压的关系式分别为:

$$\begin{cases} P_{wv\text{春季}} = 1.5169e, R^2 = 0.9706 \\ P_{wv\text{夏季}} = 1.6216e, R^2 = 0.9512 \\ P_{wv\text{秋季}} = 1.6074e, R^2 = 0.9619 \\ P_{wv\text{冬季}} = 1.7437e, R^2 = 0.9189 \end{cases} \quad (3)$$

利用西北地区 113 站的 1960—2015 年的月平均水汽压资料, 通过式(3)计算四季大气可降水量, 并与探空实测数据进行对比, 结果表明公式(3)计算结果与探空计算结果非常接近, 平均相对误差为 8.2%, 满足精度要求, 物理意义明确, 可用于西北地区无探空观测站的水汽计算。

多元回归分析是研究多个变量之间关系的回归分析方法, 按因变量和自变量的数量对应关系可划分为一个因变量对多个自变量的回归分析及多个因变量对多个自变量的回归分析, 按回归模型可分为线性回归分析和非线性回归分析。本文利用多元线性回归分析研究西北地区大气可降水量和气象要素之间的关系。

## 2 结果分析

### 2.1 大气可降水量的空间变化

图 3 给出 1960—2015 年中国西北地区大气可降水量空间分布, 可以看出, 近 56 年中国西北地区

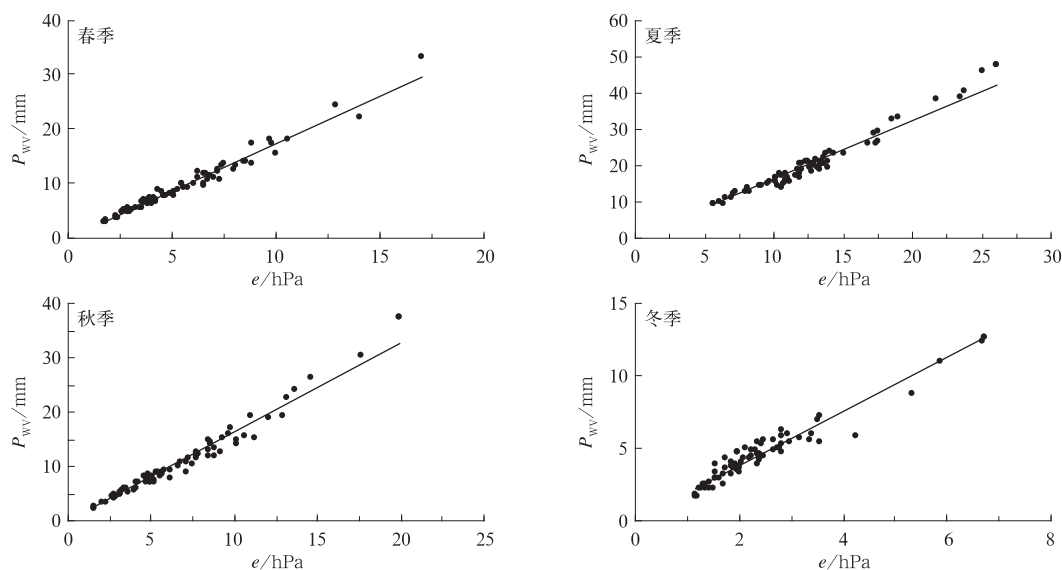


图 2 西北地区地面水汽压  $e$  与大气可降水量  $P_{wv}$  的关系

Fig. 2 Seasonal relationships between  $P_{wv}$  and  $e$  in Northwest China

大气可降水量的高值区主要分布在西北东部地区,低值区主要分布在西北中部地区。陕西省由北向南呈增加趋势,关中平原和秦巴山地的可降水量在 17~24 mm,其中安康和汉中气象站的大气可降水量分别为 23.49、23.42 mm。宁夏大部分地区大气可降水量在 11~13 mm。甘肃东部地区大气可降水量较多,在 11~15 mm,河西走廊及其以西的地区较少,在 7~11 mm。青海大部分地区大气可降水量较小,在 3~7 mm,其中冷湖气象站大气可降水量为 3.96 mm。新疆大部分地区可降水量在 9~11 mm。

表 1 给出大气可降水量的空间分布与海拔高度的关系,可以看出大气可降水量与海拔高度呈明显的负相关性,且所有相关系数都通过 0.01 的显著性水平检验,即大气可降水量随着海拔的增高而降低。

表 1 1960—2015 年西北地区不同海拔高度以上大气可降水量与海拔高度的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between  $P_{wy}$  and altitude for different altitude ranges in Northwest China during 1960—2015

| 海拔/m  | 站点数/个 | 春季        | 夏季        | 秋季        | 冬季        | 全年        |
|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| >0    | 113   | -0.656 ** | -0.690 ** | -0.621 ** | -0.605 ** | -0.667 ** |
| >400  | 110   | -0.656 ** | -0.690 ** | -0.618 ** | -0.614 ** | -0.668 ** |
| >600  | 102   | -0.683 ** | -0.716 ** | -0.646 ** | -0.693 ** | -0.704 ** |
| >800  | 97    | -0.686 ** | -0.723 ** | -0.658 ** | -0.711 ** | -0.713 ** |
| >1000 | 88    | -0.696 ** | -0.739 ** | -0.661 ** | -0.720 ** | -0.725 ** |

注: \*\* 表示通过 0.01 的显著性水平检验。

Note: \*\* has passed the 0.01 significance level test.

疆柯坪站上升幅度最大,为  $0.50 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ;有 18 站大气可降水量呈减少趋势,零散的分布在西北地区,变化趋势在  $-0.20 \sim 0.00 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,占总站点的 16%,其中以宁夏银川下降幅度最大,为  $-0.19 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

图 5 给出 1960—2015 年中国西北地区各季节大气可降水量变化趋势的空间分布,可以看出西北地区大气可降水量的年际变化在不同季节也表现出不同的空间差异。春季有 57 站大气可降水量呈减少趋势(图 5a),主要分布在陕西北部、宁夏大部、甘肃大部及青海东北部地区,减少速率在  $-0.36 \sim 0.00 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,占总站点的 50%,其中青海野牛沟站变化倾向率为  $-0.36 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ;有 56 站大气可降水量呈增加趋势,主要分布在陕西南部、青海西南部、及新疆大部分地区,增加速率在  $0.00 \sim 0.35 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,占总站点的 50%,其中陕西佛坪气象站增加幅度最大为  $0.35 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。夏季西北大部分地区大气可降水量呈上升趋势(图 5b),有 62 个站变化倾向率在  $0.00 \sim 0.30 \text{ mm}$

全年大气可降水量与海拔高度的相关系数为  $-0.667$ ,且海拔越高,两者的相关系数也越高,海拔  $>1000 \text{ m}$  的站点两者的相关系数为  $-0.725$ 。春季、夏季和冬季与全年一样,都是随着海拔高度的增高,两者的相关系数增加,其中夏季海拔  $>1000 \text{ m}$  的站点两者的相关系数为  $-0.739$ ,秋季海拔  $>1000 \text{ m}$  的站点两者的相关系数为  $-0.661$ 。说明海拔高度  $>1000 \text{ m}$  的站点对大气可降水量的影响越明显。

图 4 给出 1960—2015 年中国西北地区年大气可降水量变化趋势的空间分布,可以看出,西北大部分地区大气可降水量呈增加趋势,以陕西南部、甘肃东南部、青海西北部、新疆等地增加趋势明显,增加速率基本在  $0.00 \sim 0.30 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,占总站点的 78%;有 7 站增幅  $>0.30 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,其中新

$\cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,主要分布在新疆、青海和甘肃大部分地区,占总站点的 55%;有 22 个站变化倾向率在  $0.30 \sim 0.80 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,主要分布在陕西南部、新疆北疆、天山山脉东部和昆仑山脉东部,其中新疆于田站变化倾向率为  $0.79 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,占总站点的 19%;天山山脉西部的库车、柯坪和阿拉尔 3 个气象站上升趋势  $>0.80 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,其中阿拉尔站变化倾向率为  $1.03 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。秋季西北地区只有 8 个站大气可降水量呈减少趋势(图 5c),其他大部分地区呈增加趋势,有 91 个站变化倾向率在  $0.00 \sim 0.30 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,占总站点的 81%;有 14 个站变化倾向率  $>0.30 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,主要分布在陕西南部、天山山脉西部及昆仑山脉东部地区,其中新疆柯坪气象站变化倾向率达  $0.65 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。冬季和秋季大致相同(图 5d),除了 4 个气象站点外,其余大部分地区大气可降水量变化倾向率均呈增加趋势,但增加幅度较小,有 102 个站变化倾向率在  $0.00 \sim 0.20 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,占总站点的 90%;有 7 个气象站变化倾向率在  $0.20 \sim$

$0.30 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 其中陕西佛坪气象站变化倾向率为  $0.30 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

## 2.2 大气可降水量的年际变化

将所有站点大气可降水量做算数平均, 得出中国西北地区年和季节大气可降水量的年际变化(图6), 由图6可以看出, 近56年西北地区大气可降水量平均值为  $10.10 \text{ mm}$ (图6a), 最高为  $11.21 \text{ mm}$ (1988年), 最低为  $9.40 \text{ mm}$ (1965年)。总体呈增加趋势(图6a), 平均每10年增加  $0.11 \text{ mm}$ , 1987年之前大部分大气可降水量在平均值以下, 1987年以后大部分大气可降水量大于平均值。从季节变化

来看, 总体上4个季节大气可降水量为夏季最多, 春季和秋季次之, 冬季最小。春季大气可降水量变化趋势不明显(图6b), 夏季、秋季和冬季大气可降水量年际变化趋势都呈增加趋势(图6c, 6d, 6e), 且增加的幅度夏季 > 秋季 > 冬季, 变化倾向率分别为  $0.19, 0.17, 0.10 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。夏季、秋季和冬季大气可降水量变化趋势和全年变化趋势大致相同, 都是在1987年以前大部分大气可降水量小于平均值, 1987年以后大部分大气可降水量大于平均值。

## 2.3 大气降水量的月变化

图7给出1960—2015年中国西北地区和西北

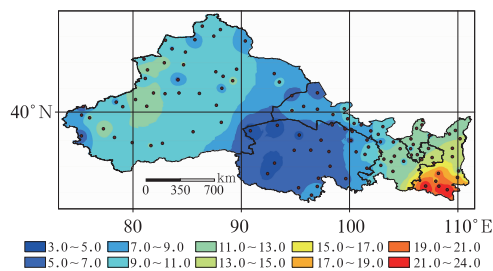


图3 1960—2015年中国西北地区大气可降水量空间分布(单位: mm)

Fig. 3 Spatial distribution of annual  $P_{wv}$  in Northwest China during 1960—2015 (unit: mm)

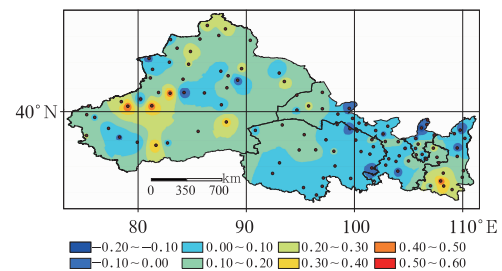


图4 1960—2015年中国西北地区年大气可降水量倾向率的空间变化 [单位:  $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]

Fig. 4 Spatial distribution of trend magnitude of annual  $P_{wv}$  in Northwest China during 1960—2015 [unit:  $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]

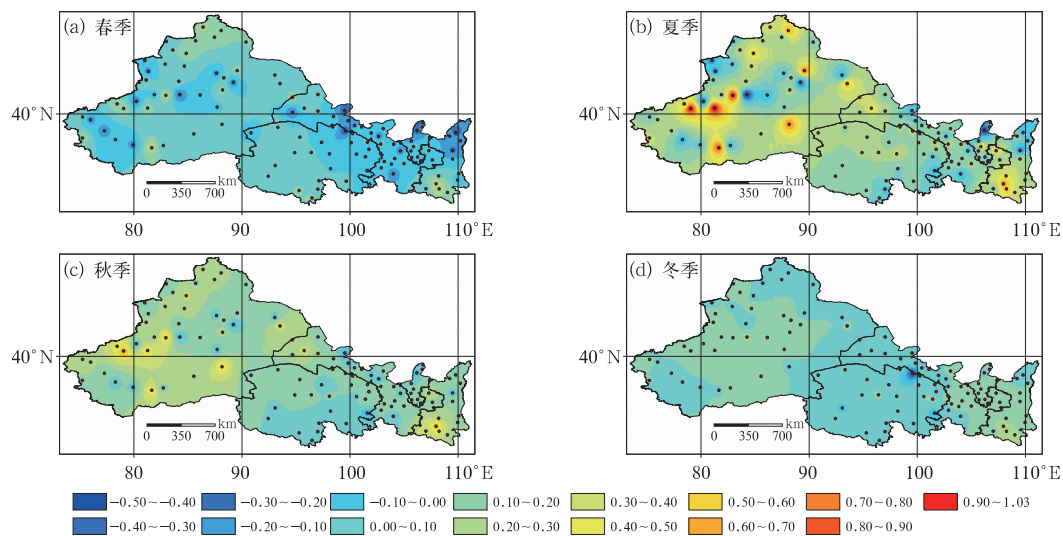


图5 1960—2015年中国西北地区四季大气可降水量倾向率的空间变化 [单位:  $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]

Fig. 5 Spatial distribution of trend magnitude of  $P_{wv}$  in different seasons in Northwest China during 1960—2015 [unit:  $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]



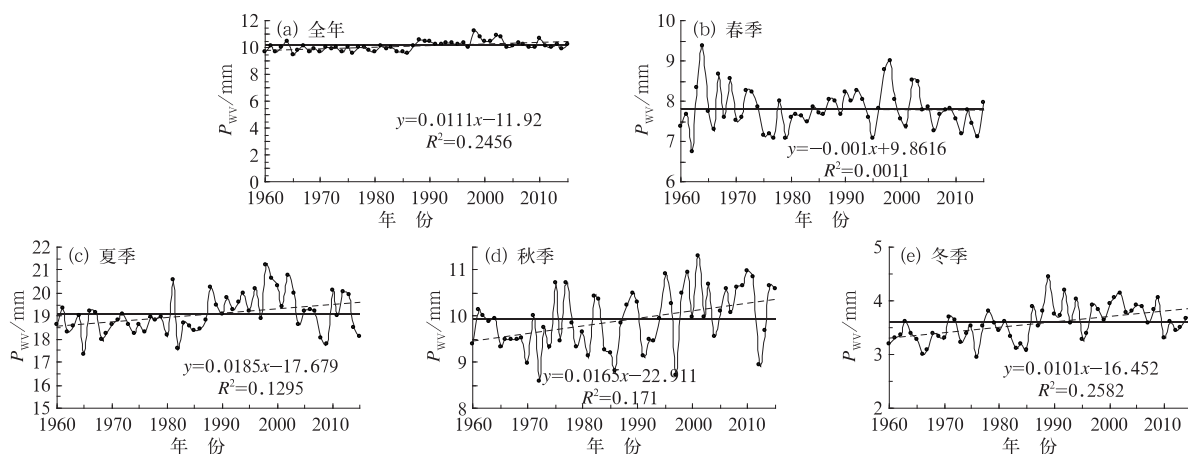
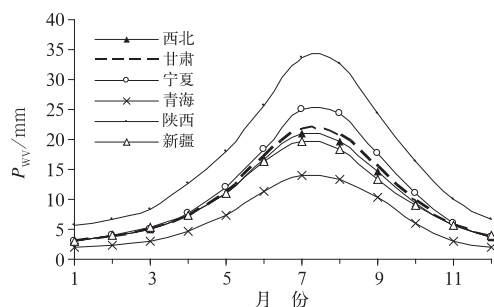


图6 1960—2015年中国西北地区年和季节大气可降水量的年际变化

Fig. 6 Variations of annual and seasonal mean  $P_{wv}$  in Northwest China during 1960—2015图7 1960—2015年中国西北地区  
大气可降水量的月变化Fig. 7 Monthly variation of mean  $P_{wv}$  in  
Northwest China during 1960—2015

5省(区)大气可降水量的月变化,可以看出,西北全区大气可降水量月变化呈单峰型,最大值出现在7月为20.85 mm,最小值出现在1月为3.10 mm。西北5省(区)大气可降水量月变化和西北全区基本一致,都是单峰型,且峰值都出现在7月,最低值都出现在1月,其中陕西、宁夏、甘肃、新疆、青海的最大值分别为33.72、24.89、21.68、19.55、14.09 mm,最小值分别为5.52、3.03、2.97、3.13、1.94 mm。不同省(区)大气可降水量月变化也存在一定差异,总体上陕西>宁夏>甘肃>新疆>青海;甘肃和新疆各月大气可降水量和西北地区最接近;宁夏1—4月和11—12月大气可降水量与西北地区基本相同,其他月份大气可降水量都大于西北地区;陕西各月大气可降水量均大于西北地区;青海各月大气可降水量均小于西北地区。

## 2.4 大气可降水量的突变特征

图8为1960—2015年西北地区年和季节大气

可降水量的 Mann-Kendall 突变检验。 $UF$  代表大气可降水量的顺序统计曲线, $UB$  则为逆序统计曲线,若  $UF$  或  $UB$  值  $>0$ ,表明序列呈上升趋势,反之则呈下降趋势(魏凤英,2007)。给定显著性水平  $\alpha=0.01$ ,临界线  $U=\pm 2.56$ 。当统计曲线超过临界线时,表明上升或下降趋势显著。若  $UF$  和  $UB$  两条统计曲线出现交点,且交点在临界线之间,则交点对应的时刻就是突变开始的时间。

由全年大气可降水量  $UF$  曲线可以看出(图8a),20世纪60—70年代,大气可降水量变化趋势平稳,1986年开始有明显增加趋势,且在1995年超过临界线2.56并呈继续增加趋势,2003年以来又有微弱下降趋势, $UF$  和  $UB$  曲线在1983年左右出现交点,且交点在信度线之间,因此1983年是西北地区全年大气可降水量发生突变的时间。春季大气可降水量  $UF$  和  $UB$  曲线虽然存在交点(图略),但  $UF$  和  $UB$  曲线都没有突破临界线,因此春季大气可降水量变化没有明显的突变点。夏季大气可降水量变化趋势和全年大致相同, $UF$  和  $UB$  曲线在1981和1985年左右出现交点(图8b),且1985年以后大气可降水量有明显增加趋势, $UB$  曲线在1996年超过临界线,因此1985年为夏季大气可降水量的突变时间。秋季大气可降水量  $UF$  和  $UB$  曲线在1995、1996、1997年都存在交点(图8c),且  $UF$  曲线在1997年以后有明显上升趋势,并在2008年突破临界线,因此1997年为西北地区秋季大气可降水量的突变时间,比全年推迟近15 a。冬季大气可降水量  $UF$  和  $UB$  曲线在1977年左右出现交点(图8d),且交点在临界线之间, $UF$  曲线在1992年突破临界

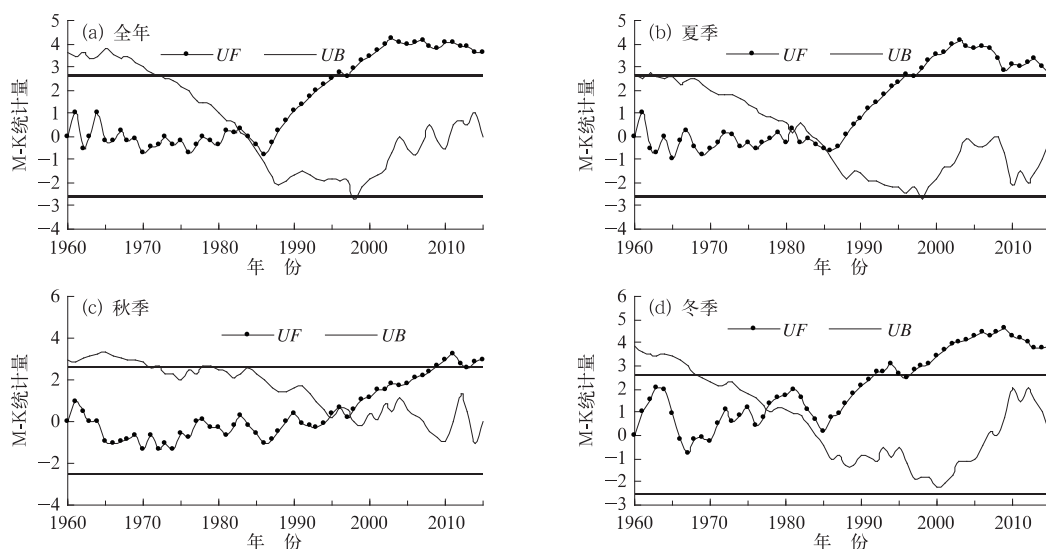


图8 1960—2015年西北地区年和季节大气可降水量的突变检验

Fig. 8 Mann-Kendall tests of annual and seasonal mean  $P_{wv}$  in Northwest China during 1960–2015

线,因此 1977 年为冬季大气可降水量的突变时间,比全年早近 5 a,比夏季早近 20 a。

## 2.5 大气可降水量的周期特征

图 9 给出西北地区年大气可降水量的小波能量谱和小波谱。可以看出,年大气可降水量通过 95% 显著性检验的频域和时间域聚集中有 2 个,其中心坐标分别为:(2, 1965)、(4, 2000),每个坐标为中心的大气可降水量在时域尺度上的强集中影响范围分别是 1960—1970、1994—2010 年。由小波谱图可以看出(图 9),年大气可降水量存在 4 a 和 12 a 左右的周期,且 4 a 左右的振荡周期通过了  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验,即年大气可降水量的主周期为 4 a。表 2 给出不同季节大气可降水量的小波能量谱特征,可以看出,春季大气可降水量存在 2 a、6 a、12 a 左右的振荡周期,但 2 a 和 6 a 通过  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验,且 6 a 振荡周期较强,因此春季大气可降水量的主周期为 6 a 左右;夏季大气可降水量存在 2 a、4 a、12 a 左右的振荡周期,但 2 a 和 4 a 通过  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验,且 4 a 振荡周期略强,因此夏季大气可降水量的主周期为 4 a 左右;秋季大气可降水量存在 2 a 和 6 a 左右的振荡周期,都通过  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验,但 6 a 振荡周期较强,因此秋季大气可降水量的主周期为 6 a 左右;冬季大气可降水量存在 2 a、4 a 和 16 a 左右的振荡周期,但 2 a 和 4 a 通过  $\alpha=0.05$  的显著性水平

检验,且 2 a 振荡周期较强,因此冬季大气可降水量的主周期为 2 a 左右。

## 2.6 大气可降水量与气象要素的关系

西北地区大气可降水量变化与气象要素变化存在一定的内在联系,但是不同的气象要素对年和四季大气可降水量的影响有所差异。本文选取了 5 个气象要素(平均气温、平均风速、相对湿度、降水量、

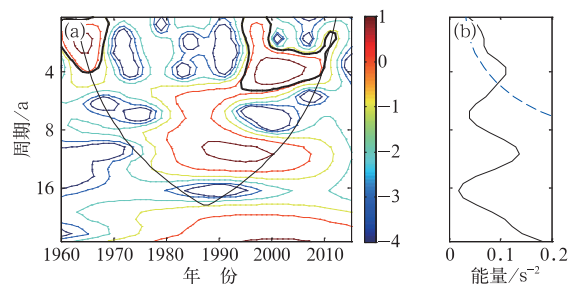


图9 1960—2015年西北地区年大气可降水量的 Morlet 小波功率谱(a)及总体小波功率谱(b)

(黑色细实线为边界效应影响区域,粗实线区域表示通过 0.05 的显著性水平检验)

Fig. 9 Morlet wavelet power spectrum (a) and the global wavelet power spectrum (b) of annual  $P_{wv}$  in Northwest China during 1960–2015

(Black thin lines indicate areas impacted by side effect, and heavy line areas indicate the parts having passed the 0.05 significance level test)

表 2 1960—2015 年西北地区四季大气可降水量的小波能量谱时频特征

Table 2 Time-frequency characteristics of wavelet energy spectrum of time coefficient of

 $P_{WV}$  in different seasons in Northwest China during 1960—2015

| 季节 | 集中影响范围/年份                                  | 尺度中心/a     | 存在周期/a     | 主周期/a |
|----|--|------------|------------|-------|
| 春季 | 1960—1980, 1990—2008                       | 4, 6       | 2*, 6*, 12 | 6     |
| 夏季 | 1960—1970, 1978—1988, 1997—2015            | 2, 2, 4    | 2*, 4*, 12 | 4     |
| 秋季 | 1970—1985, 1993—2008, 1978—2000, 2007—2015 | 2, 2, 6, 5 | 2*, 6*     | 6     |
| 冬季 | 1970—1980, 1982—1997, 1990—2002, 2005—2011 | 2, 2, 4, 2 | 2*, 4*, 16 | 2     |

注: \* 表示通过 0.05 的显著性水平检验。

Note: \* has passed the 0.05 significance level test.

日照时数), 采用多元线性回归分析法来研究近 56 年西北地区年及四季大气可降水量与同期各气象要素的相关性, 对影响大气可降水量变化的气象要素进行了探讨。表 3 给出全年及四季大气可降水量与气象要素多元线性回归分析, 可以看出, 全年平均气

温及相对湿度与大气可降水量呈显著正相关, 这些气象要素的增加会导致大气降水量的增加, 反之减小。春季和冬季平均气温与大气可降水量呈显著正相关。夏、秋季与全年一样, 平均气温和相对湿度与大气可降水量呈显著正相关。

表 3 1960—2015 年西北地区年和季节大气可降水量与各气象要素的多元回归系数

Table 3 Multivariate regression coefficients between  $P_{WV}$  and meteorological

elements of annual and seasons in Northwest China during 1960—2015

|    | 平均气温     | 平均风速   | 相对湿度     | 降水量    | 日照时数  | 复相关系数 |
|----|----------|--------|----------|--------|-------|-------|
| 春季 | 0.370 ** | 0.008  | 0.169    | 0.004  | 0.001 | 0.95  |
| 夏季 | 1.225 ** | 0.186  | 0.438 ** | -0.001 | 0.002 | 0.99  |
| 秋季 | 0.505 ** | -0.179 | 0.193 ** | 0.002  | 0.002 | 0.94  |
| 冬季 | 0.253 ** | -0.002 | 0.070    | 0.007  | 0.000 | 0.98  |
| 全年 | 0.426 ** | -0.182 | 0.178 ** | 0.002  | 0.000 | 0.87  |

注: \*\* 表示通过 0.01 的显著性水平检验。

Note: \*\* has passed the 0.01 significance level test.

表 4 列出 1960—2015 年西北地区各气象要素的年及季节变化倾向率。结合表 3、表 4 可以看出, 不同气象要素的变化趋势及其显著程度有所不同, 进而对大气可降水量变化的影响也不同。全年平均气温增加 1 个单位, 大气可降水量增加 0.426 mm, 相对湿度减少 1 个单位, 大气可降水量减少 0.178 mm, 但全年相对湿度减少趋势并没有通过显著性水平检验, 因此平均气温的增加是导致全年大气可

降水量呈增加的主要因素。春季平均气温增加 1 个单位, 大气可降水量增加 0.370 mm, 平均风速减少 1 个单位, 大气可降水量减少 0.008 mm, 相对湿度减少 1 个单位, 大气可降水量减少 0.169 mm, 因此由于平均气温的显著增加、平均风速及相对湿度的显著减少, 导致春季大气降水量的变化趋势不明显。以此类推, 夏季、秋季、和冬季都是由于平均气温的显著增加, 导致大气可降水量呈增加趋势。

表 4 1960—2015 年西北地区各气象要素的年及季节变化倾向率

Table 4 Annual and seasonal changing trend of meteorological elements

in Northwest China during 1960—2015

|    | 平均气温/<br>$^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ | 平均风速/<br>$\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ | 相对湿度/<br>$\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ | 降水量/<br>$\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ | 日照时数/<br>$\text{h} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ |
|----|---|---|---|---|---|
| 春季 | 0.29 ***  | -0.12 ***   | -0.72 **                                | 0.28  | 5.57  |
| 夏季 | 0.22 ***  | -0.10 ***   | -0.07                                   | 2.46  | -7.39 ***                                     |
| 秋季 | 0.33 ***  | -0.08 ***   | -0.03                                   | -0.56   | -3.04   |
| 冬季 | 0.41 ***  | -0.08 ***   | 0.07                                    | 1.01 ***                                      | -6.51 **                                      |
| 全年 | 0.30 ***  | -0.10 ***   | -0.20                                   | 4.26  | -13.62 **                                     |

注: \*\*, \*\*\* 分别表示通过 0.01、0.001 的显著性水平检验。

Note: \*\*, \*\*\* have passed the 0.01, 0.001 significance level tests, respectively.



### 3 结 论

(1) 近56年中国西北地区大气可降水量总体呈增加趋势,平均每10年增加0.11 mm,1987年之前大部分大气可降水量在平均值以下,1987年以后大部分大气可降水量大于平均值;空间分布上,大气可降水量的高值区主要分布在西北东部地区,低值区主要分布在西北中部地区。

(2) 西北地区大气可降水量月变化呈单峰型,最大值出现在7月为20.85 mm,最小值出现在1月为3.10 mm。空间变化上,西北大部分地区大气可降水量呈增加趋势,以陕西南部、甘肃东南部、青海西北部、新疆等地增加趋势明显。季节变化上,除春季外其他季节大部分站点大气可降水量也呈增加趋势。

(3) 西北地区全年大气可降水量在1983年左右发生突变,春季突变点不明显,夏季、秋季和冬季的突变时间分别发生在1985、1997和1977年左右;西北地区全年大气可降水量的主周期为4 a左右,春季和秋季的主周期为6 a左右,夏季和冬季分别为4 a和2 a。

(4) 西北地区全年大气可降水量与平均气温、相对湿度呈显著正相关性,与平均风速呈负相关性,受近56年来平均气温和降水量的上升、平均风速和日照时数的下降等综合作用的影响,导致西北地区大气可降水量总体呈增加趋势。

### 参考文献

陈丹,周长艳,邓梦雨,2016. 西南地区夏季大气水汽含量及其与南亚高压关系[J]. 应用气象学报,27(4):473-479.  
程红霞,梁凤超,李帅,等,2017. 天山山区大气可降水量的空间聚集特征分析[J]. 国土资源遥感,29(1):116-121.  
郝丽萍,邓佳,李国平,等,2013. 一次西南涡持续暴雨的GPS大气水汽总量特征[J]. 应用气象学报,24(2):230-239.  
雷祥旭,姚宜斌,许超铃,2015. 青藏高原地区大气可降水量变化特征初步分析[J]. 测绘地理信息,40(4):19-22.

李光伟,李春鸾,敖杰,等,2015. 海南岛大气可降水量的时空分布特征研究[J]. 自然灾害学报,24(5):129-138.  
李国平,黄丁发,刘碧全,2006. 成都地区地基GPS观测网遥感大气可降水量的初步试验[J]. 武汉大学学报·信息科学版,31(12):1086-1089.  
李建玉,徐青山,詹杰,等,2012. 中国部分典型地区大气可降水量特性遥感研究[J]. 红外与激光工程,41(11):3055-3060.  
刘丹,邱新法,史岚,等,2013. 基于NCEP资料的我国大气可降水量的计算及其时空分布[J]. 南京信息工程大学学报:自然科学版,5(2):113-119.  
刘晶,杨莲梅,2017. 一次中亚低涡造成的天山北坡暴雨GPS大气水汽总量演变特征[J]. 气象,43(6):724-734.  
苗运玲,李如琦,卓世新,2016. 天山北坡东段GPS反演的大气可降水量变化特征及其与降水的关系[J]. 干旱气象,34(6):989-994.  
孙建华,汪汇洁,卫捷,等,2016. 江淮区域持续性暴雨过程的水汽源地和输送特征[J]. 气象学报,74(4):542-555.  
万蓉,付志康,李武阶,等,2015. 地基GPS斜路径水汽反演技术及资料应用初探[J]. 气象,41(4):447-455.  
王佳津,王春学,陈朝平,等,2015. 基于HYSPLIT4的一次四川盆地夏季暴雨水汽路径和源地分析[J]. 气象,41(11):1315-1327.  
魏凤英,2007. 现代气候统计诊断与预测技术:第2版[M]. 北京:气象出版社:63-64.  
杨景梅,邱金桓,1996. 我国可降水量同地面水汽压关系的经验表达式[J]. 大气科学,20(5):620-626.  
杨磊,蒋大凯,王瀛,等,2016. 辽宁省汛期GPS大气可降水量的特征分析[J]. 干旱气象,34(1):82-87.  
杨晓春,王建鹏,白庆梅,等,2013. 西安不同季节降水过程中大气可降水量变化特征[J]. 干旱气象,31(2):278-282.  
姚俊强,杨青,胡文峰,等,2013. 天山山区空中水汽含量及与气候因子的关系[J]. 地理科学,33(7):859-864.  
姚宜斌,雷祥旭,张良,等,2016. 青藏高原地区1979—2014年大气可降水量和地表温度时空变化特征分析[J]. 科学通报,61(13):1462-1477.  
张学文,2004. 可降水量与地面水汽压力的关系[J]. 气象,30(2):9-11.  
郑加柱,王亮,2013. 江苏地区大气可降水量的时空分布[J]. 东南大学学报(自然科学版),43(增刊II):261-264.  
周成龙,钟昕洁,杨兴华,等,2016. 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,39(6):1204-1211.  
周顺武,王烁,马思琪,等,2016. 地基GPS遥感西藏改则站大气可降水量变化特征及其与夏季降水的关系[J]. 气象科学,36(3):403-410.