大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

1961～2018年西北地区降水的变化特征

王澄海 张晟宁 李课臣 张飞民 杨凯

Change Characteristics of Precipitation in Northwest China from 1961 to 2018

WANG Chenghai ZHANG Shengning LI Kechen ZHANG Feimin YANG Kai

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2101.20216

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

华北地区夏季降水日变化的时空分布特征

Temporal and Spatial Distributions of the Diurnal Cycle of Summer Precipitation over North China

大气科学. 2017, 41(2): 263 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1610.15312

西北地区气溶胶光学特性及辐射影响

Optical Characteristics and Radiative Effects of Atmospheric Aerosol over Northwest China

大气科学. 2017, 41(2): 409 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1606.15272

年中国地区冰雹持续时间的时空分布特征及影响因子研究

Characteristics of Spatial and Temporal Distribution of Hail Duration in China during 1961-2015 and Its Possible Influence Factors

大气科学. 2019, 43(3): 539 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1808.18123

全球大气能量的时空特征及变化趋势分析

Analysis of the Spatiotemporal Characteristics and Trends of Global Atmospheric Energy

大气科学. 2020, 44(1): 168 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18252

1961～2018年中国生长季变化

Changes in the Growing Season Across China during 19612018

大气科学. 2021, 45(2): 424 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2010.20110

1961～2016年中国春季极端低温事件的时空特征分析

Spatial and Temporal Features of Spring Extreme Low Temperature Events in China during 19612016

大气科学. 2020, 44(6): 1305 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19223

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王澄海, 张晟宁, 李课臣, 等. 2021. 1961～2018 年西北地区降水的变化特征 [J]. 大气科学, 45(4): 713−724. WANG Chenghai, ZHANG Shengning, LI Kechen, et al. 2021. Change Characteristics of Precipitation in Northwest China from 1961 to 2018 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(4): 713−724. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2101.20216

1961～2018 年西北地区降水的变化特征

王澄海 张晟宁 李课臣 张飞民 杨凯

兰州大学大气科学学院/甘肃省气候资源开发及防灾减灾重点实验室/兰州大学地球系统模式研发中心，兰州 730000

摘 要 邻接青藏高原地区的中国西北地区是最大的欧亚干旱区，其降水变化对全球变化的响应和对干旱环境及其青藏高原气候变化都具有特殊的指示意义。基于 1961～2018 年中国西北地区 144 个站的逐日降水、逐月气温观测资料，分析了西北地区的降水变化特征及趋势。结果表明：（1）近 60 年以来，西北地区 92% 站点的年降水量呈现增加的趋势，只有甘肃东南部不到 10% 的站点呈下降趋势；（2）季节尺度上，春、夏、秋季中超过 75% 站点的降水呈现增加的趋势，但最显著的是，几乎所有站点在冬季的降水为增加趋势，秋、冬季降水的增加相对较少，反映了冬季风对西北地区降水影响的特点；（3）进入 21 世纪以来，西北地区夏季和年降水量仍然维持准 3 a 周期特征，春、秋季的周期具有阶段性、冬季降水量具有较稳定的约 3 a 周期，因此，自然周期变化对降水增加的贡献并不大。西北地区降水量在过去 60 年来确实呈现出增加趋势，尤其 21 世纪以来降水量持续增加，但增加的量是有限的，不足以改变其干旱半干旱的气候特征。

关键词 西北地区 降水量 时空特征 周期分析

文章编号 1006-9895(2021)04-0713-12 **中图分类号** P467 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2101.20216

Change Characteristics of Precipitation in Northwest China from 1961 to 2018

WANG Chenghai, ZHANG Shengning, LI Kechen, ZHANG Feimin, and YANG Kai

College of Atmospheric Sciences/Key Laboratory of Climate Resource Development and Disaster Prevention in Gansu Province/Research and Development Center of Earth System Model (*RDCM*), *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000

Abstract The Northwest China, which is adjacent to the Qinghai-Tibet Plateau, is the largest Eurasian arid region. Its precipitation responses to the global climate changes, to the arid environment, and to the climate change in the Qinghai-Tibet Plateau region are special significance. Based on the observational data of the daily precipitations and monthly temperatures at 144 stations in Northwest China from 1961 to 2018, the characteristics and trends of the precipitation change in Northwest China are analyzed. The results showed that: (1) During nearly the last 60 years, 92% of the stations in Northwest China observed an increasing trend of annual precipitations, while less than 10% of the stations in southeastern Gansu observed a decreasing trend. (2) On the seasonal scale, precipitations at more than 75% stations showed an increasing trend in spring, summer, and autumn, however the most significant is that almost all the stations had an increasing trend of precipitations in winter. The increase of precipitations in autumn and winter was relatively small, which reflected the influence of winter wind on the precipitation in Northwest China. (3) Another feature is that since the

收稿日期 2020-10-21；**网络预出版日期** 2021-01-29

作者简介 王澄海，男，1961 年出生，博士、教授，主要从事气候模拟和寒旱区陆面过程。E-mail: wch@lzu.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 91837205、41975111，国家重点研发计划项目 2020YFA0608404，甘肃省重大研究计划项目 20ZD7FA005

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 91837205, 41975111), National Key R&D Program of China (Grant 2020YFA0608404), Key Research Program of Gansu Province (Grant 20ZD7FA005)

beginning of the 21st century, the summer and annual precipitations in Northwest China have maintained a quasi-3 a cycle. The spring and autumn cycles have several stages, while the winter precipitation has a relatively stable cycle of nearly 3 a. Therefore, natural cycle changes do not contribute much to the increase of the precipitation. The precipitation in Northwest China has indeed increased over the past 60 years, especially since the beginning of 21st century when the precipitation has been continuously increasing. However, the increased precipitation amount is limited, which is not enough to change the arid and semi-arid climate characteristics in the region.

Keywords Northwest China, Precipitation, Spatial and temporal characteristics, Periodic analysis

1 引言

西北干旱区地处欧亚腹地，毗邻青藏高原，地形、地貌特殊，地表过程复杂，荒漠、风沙多，干旱缺水、生态环境脆弱。西北地区大部分为干旱和半干旱地区，地理上属于温带大陆性气候和高寒气候，东南部分地区为温带季风气候。

目前，全球正在经历着一次以升温为主的变化（IPCC, 2013），但全球各地的局地响应不尽相同。有研究指出，中国西北地区也正在经历着一次暖干向暖湿的转变，并预计西北地区东部在 21 世纪上半叶会向暖湿转变（施雅风等, 2002, 2003）。20 世纪资料的分析研究表明，西北地区在 1986 年左右发生了一次明显的气候跃变，跃变后西北地区的年降水总量增加了 52%，夏季降水量增加了 68%（于淑秋等, 2003）。Sui et al.（2013）对西北地区 1961～2009 年降水分析后认为，西北地区冬、春季的降水量有增加的趋势。分区域的研究表明，西北东部不同强度的降水都出现了减少，而西部除弱降水外，其他强度的降水都增加（陈冬冬和戴永久, 2009a）；降水量的空间分布差异明显，6～8 月西北西部降水增多、东部降水减少（陈冬冬和戴永久, 2009b）；年降水的变化也有此特征，西北东部干旱化趋势增强（任国玉等, 2005; 魏娜等, 2010; 赵传成等, 2011; 杨瑜峰, 2014）。马柱国和符淙斌（2006）指出，20 世纪 80 年代以后，西北东部地区极端干旱事件发生的频率有明显增加。而西北西部的新疆地区，近几十年增暖和降水增加存在季节上的不对称性（Wang et al., 2020）。

西北地区降水具有显著的周期性。西北地区春季（3～5 月）降水量具有准 3 a、准 5～7 a 等周期的年际变化特征，年代际特征表现为 20 世纪 60 年代雨量偏多，70 年代进入少雨期，一直持续到 80 年代中期，此后又进入多雨期，90 年代中期雨量相对偏少（韦志刚等, 2000; 王澄海等, 2001; 任宏利等, 2004）。降水周期随时间的变化具有显著的区域性，也具有多平衡态和非周期性振荡的特点（王澄海和崔洋, 2006）。在过去 60 年间，西北地区降水的周期性特征在年际和年代际尺度变化上也具有贡献。

徐栋等（2016a, 2016b）研究表明，1956 年以来西北地区各季节降水增加是由于蒸发增大和水汽辐合增强引起。由于西北地区的干旱半干旱特征，降水与蒸发量之间关系紧密，降水再循环率较高（Li and Wang, 2020a）；同样的现象出现在青藏高原东部地区降水中的再循环率增强（Guo and Wang, 2014）。任国玉等（2016）研究也指出，1961～2000 年间西北地区的降水增加是由于西北地区东侧向外输出的水汽减少，但大气可降水量的增加并不显著。Li et al.（2018）、Li and Wang（2020b）研究了北半球干旱区的降水再循环率，认为干旱区的降水中有 10%～15% 来自于干旱区内部的内循环，与降水充沛地区相比，干旱区降水再循环率更高。

研究也表明，未来西北地区降水会持续增加。根据 7 个全球气候系统模式对 21 世纪未来降水进行预测，赵宗慈等（2003）认为未来西北地区降水可能增加 4.8～6.0 mm (10 a)$^{-1}$。温室气体及硫化物气溶胶增加情况下的数值试验表明，未来西北地区降水将增加 1.5～3.9 mm (10 a)$^{-1}$，西北地区西部夏季降水增加明显，而西北地区东部夏季降水呈减少趋势（徐影等, 2003; 张存杰等, 2003）。利用周期叠加外推，对 2006～2026 年降水、温度可能变化的预测表明，西部干旱（半干旱）区的温度将会按照 0.6°C (10 a)$^{-1}$ 上升，西部干旱（半干旱）区的降水有少许增多的趋势，约为 7.7 mm (10 a)$^{-1}$（王澄海等, 2012a, 2012b）。Yin et al.（2020）根据 3 种区域气候模式的预估，在 RCP（Representative Concentration Pathway）4.5、RCP8.5 情景下，西北地区未来（2020～2045 年）年降水量相比 1980～

2005 年平均降水量增加约 9.1 mm (10 a)$^{-1}$、13.6 mm (10 a)$^{-1}$。

上述研究结果表明，在全球变暖的背景下，过去近 60 年来，西北地区的降水出现了增加趋势。但是，西北地区的降水在年、季节尺度上的贡献如何？降水年际变化在空间上存在怎样的特征？本文利用过去近 60 年的观测资料，试图回答上述问题。

2　资料和方法

本文所用资料为 1961～2018 年西北地区（32°～50°N，70°～110°E）的 144 个气象站点的逐日降水量，逐月气温数据。数据（经过了质量控制和均一性检验）由中国气象数据网（http://data.cma.cn/ [2020-09-21]）提供。季节划分采用自然划分季节，即春季（3～5 月）、夏季（6～8 月）、秋季（9～11 月）和冬季（12 月至翌年 2 月）。

为分析西北地区降水的时空分布特征，本文分析中使用了经验正交函数（EOF）。降水的周期变化特征采用 Morlet 小波分析法，并对结果进行了显著性检验。

3　西北地区降水的空间变化特征

西北地区的年平均降水量约为 300 mm，在空间上呈现出东西两头多，中间的河西走廊少。西北地区的东南部最多，新疆乌鲁木齐以西及阿勒泰地区为次多，在 300～500 mm 之间。极端干旱区位于新疆的南疆盆地到甘肃西部，这里年降水量在 100 mm 以下。降水最少的地区位于新疆的吐鲁番，年降水量约为 15 mm，1982 年为降水极端少年，年降水量为 3.8 mm（图略）。

图 1 给出了 1961～2017 年西北地区年、季降水量的变化趋势与标准差。在西北地区 144 个气象站点中，春季（图 1a）有 124 个站（86%）站点降水量呈现出增加趋势。主要分布在新疆北部、内蒙古西部、青海地区以及甘肃大部分地区，其中 55 个站点的线性增加趋势通过了信度为 95% 的显著性检验。而降水量呈下降趋势的站点主要分布在新疆中部、南部地区，以及陕西南部。

夏季（图 1b）为西北地区降水的主要时段，111 个站（77%）的降水量呈现增加趋势，主要分布在新疆北部、西部、青海地区以及甘肃西北部地区，其中 27 个站点的线性增加趋势通过了信度为 95% 的显著性检验，而出现下降趋势的站点主要分布在甘肃东南部与内蒙古中部地区。

秋季（图 1c）112 个站点的降水量呈现出了上升趋势，包括新疆大部分地区、青海、甘肃西北部、内蒙古中西部地区，占比为 78%；其中 53 个站点的线性增加趋势通过了信度为 95% 的显著性检验。而降水量呈下降趋势的区域包括甘肃东南部、陕西南部地区，以及新疆东部地区。秋季降水量变化的区域范围比较集中。

冬季（图 1d）是西北地区降水量最少的季节，99% 的站点冬季降水量呈上升趋势，并且 135 个站点的线性增加趋势通过了信度为 95% 的显著性检验。因此，冬季是西北地区降水量变化最为显著的季节，这与之前的研究（Sui et al., 2013; 刘维成等, 2017）是一致的。但冬季降水量较少，对年降水量变化趋势的影响有限。

近 60 a 来西北地区年降水量（图 1e）的变化总体处于上升的趋势。133 个站点呈上升趋势，占比为 92%，其中新疆北部、西部、青海、甘肃西北部等地区的 81 个站点的线性增加趋势通过了信度为 95% 的显著性检验。这些区域处于亚欧大陆的中心位置，地形多为盆地，如准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地。年降水量呈下降趋势的站点仅为 11 个，主要集中在甘肃东南部的黄河流域。

在年、季节的气温变化中，冬、春季气温增速大于 0.5°C (10 a)$^{-1}$（通过 95% 信度水平的显著性检验）的站点数分别为 55、18 个，明显多于夏、秋季的 5、8 个。而夏、秋季气温呈减小趋势（通过 95% 信度水平的显著性检验）的站点多于冬、春季，分别为 9、4 个，主要分布在塔里木河流域以及西北地区东南部。西北地区各季节气温变化在空间上存在差异，而年降水量与年平均气温的变化基本是一致的增加趋势。

取年降水量标准差较大的区域 A（43°～49°N，80°～91°E）、B（32°～35°N，92°～110°E）两个区域，计算了 1961～2018 年月降水量、标准差和月平均气温（图 2）。由图 2 可见，A、B 区域中月降水量、平均温度的最大值均出现在 7 月，月降水量分别约为 30 mm、130 mm，A 区气温年较差相比 B 区大。A、B 区域月降水量的共同特点是年际变化较大，降水较不稳定，降水时段集中在夏季，春秋两季降水接近，而冬季少雨。西北东部地区的降水量有着明显的月变化，在春、秋季降水变化较

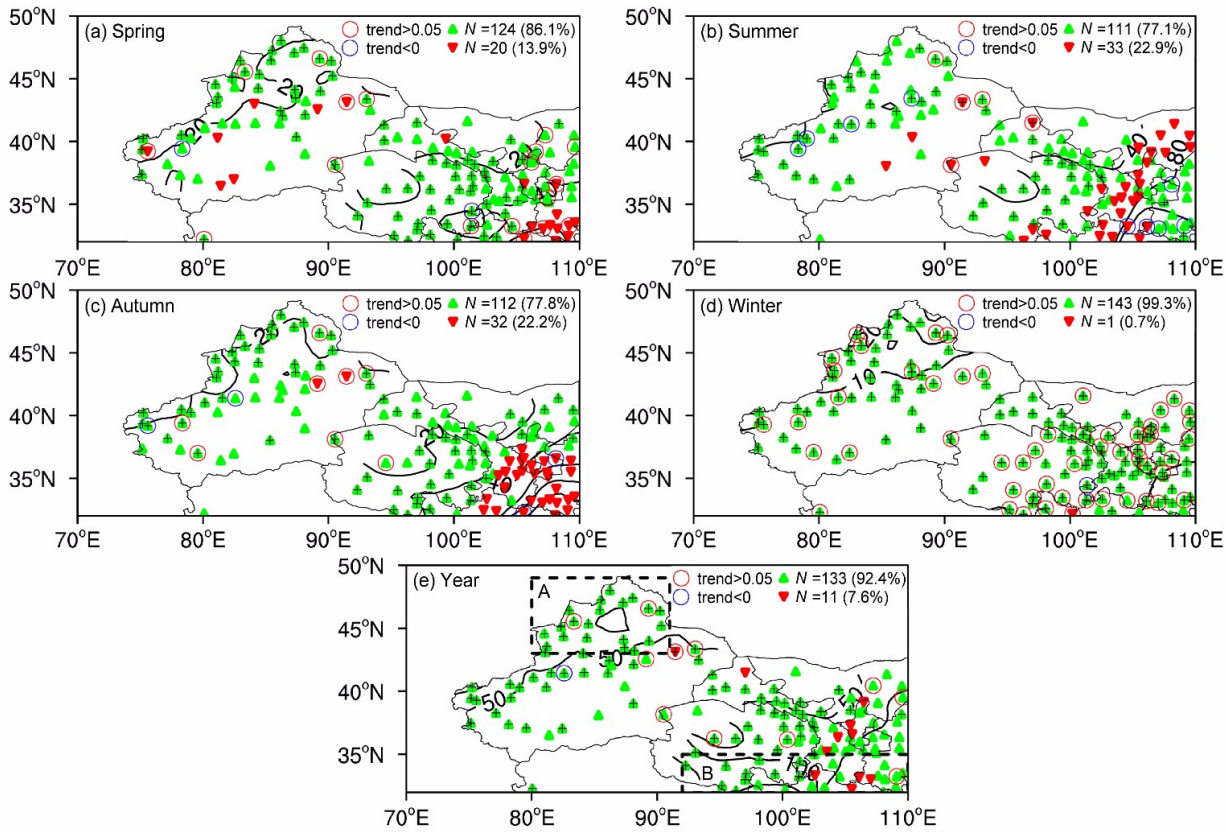

图 1 1961～2017 年西北地区（a）春季、（b）夏季、（c）秋季、（d）冬季、（e）年降水量 [绿（红）色箭头表示降水趋势增加（减少）]、气温（圆圈，单位：°C a^{-1}）的变化趋势和降水量标准差（等值线，单位：mm）。*N* 表示站点数，黑色加号表示降水量趋势通过 95% 信度水平的显著性检验，所有站点的气温变化趋势均通过 95% 信度水平的显著性检验。图 e 中虚线框表示标准差较大的两个区域 A、B

Fig. 1 The change trends of (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, (e) annual precipitation [the green (red) triangles represent the increasing (decreasing)] and temperature (circles, units: °C a^{-1}), and precipitation standard deviation (contour lines, units: mm) in Northwest China from 1961 to 2017. *N* represent station numbers, the black plus signs indicate that the precipitation change trends pass the test at 95% confidence level, temperature change trends at all stations pass 95% confidence level. In Fig. e, the dashed boxes represent areas A and B with large standard deviations

大，而西部地区的降水相对稳定。西部地区的降水开始早（4 月），结束缓慢，这里属于西北干旱区的内陆河流域；东部地区降水增多的时间也为 4 月，但结束突然，9 月后快速减少，更多反映出和中国东部地区的降水同步，具有季风的特征。可见，西北地区西部的降水和东部的降水似乎来自于两个系统。

为进一步分析西北地区降水的空间分布特征，图 3 给出了西北地区年、季节标准化降水量的第一特征向量场（LV1）。西北地区春季（图 3a）、秋季（图 3c）以及年降水量（图 3e）的特征较为一致，方差贡献率分别为 29%、28%、34%。除秋季西北地区东南部的特征向量表现为负值外，其余部分特征向量场基本均为正值，结合第一特征向量场时间系数（PC1）的正负值变化，这反映出了西北地区多雨的特征。年降水量的特征向量场上，正值中心在新疆北部、西部以及青海大部分地区。夏季（图 3b）在蒙古中西部、甘肃东南部地区 LV1 为负值，其余地区表现为正值，正值的中心在新疆西部、青海大部分地区，LV1 的方差贡献率为 18%。冬季（图 3d）西北地区降水量很少，LV1 的方差贡献率为 24%。新疆北部、甘肃西北部、青海南部地区为正值，其余地区表现为负值，在塔里木盆地存在一个负值中心。

图 3 揭示了西北地区的降水除夏季外，年、冬、春、秋季的 LV1 的方差贡献率在 25% 左右，这种异常变化的分布揭示出了西北地区降水的空间变化最基本特征是，西北地区年和季节尺度降水的年际变率基本一致，包括内陆河流域和黄河流域；换句话说，西北地区降水的年际变化具有同相变化的

特征。

为揭示西北地区降水的局地特征，图 4 给出了西北地区年、季节标准化降水量的第二特征向量场（LV2）。春季（图 4a）和秋季（图 4b）降水量的空间模态表明，LV2 的方差贡献率分别为 14%、13%，南北方向呈现出正—负—正的分布。零值线

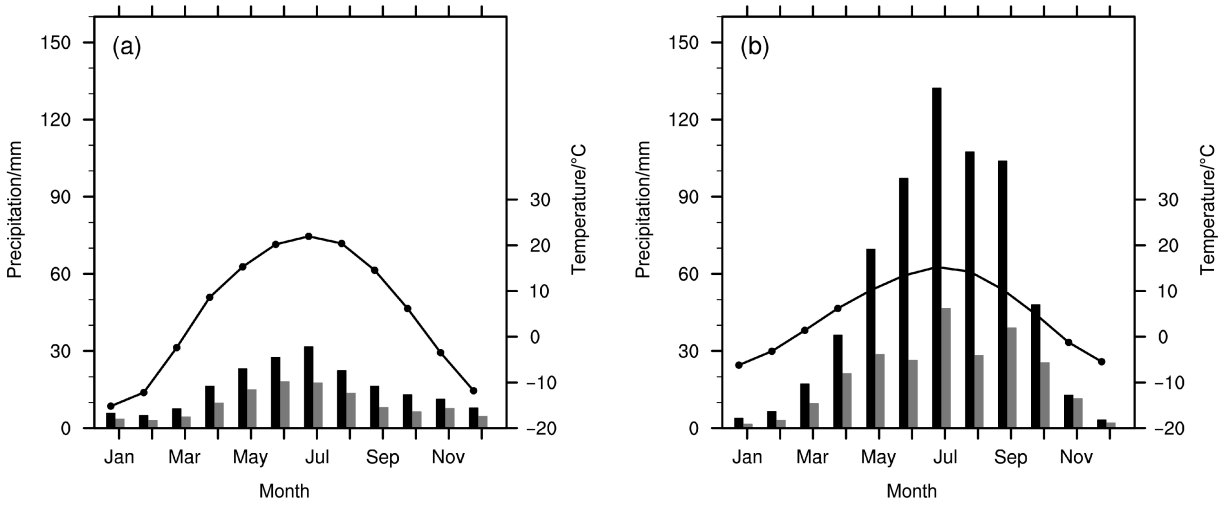

图 2　1961～2018 年区域（a）A、（b）B 月降水量（黑色柱状，单位：mm）、月降水量标准差（灰色柱状，单位：mm）、月平均气温（折线，单位：°C）

Fig. 2　Monthly precipitation (black bars, units: mm), standard deviation (gray bars, units: mm) of monthly precipitation, and monthly mean temperature (fold lines, units: °C) averaged in regions (a) A and (b) B from 1961 to 2018

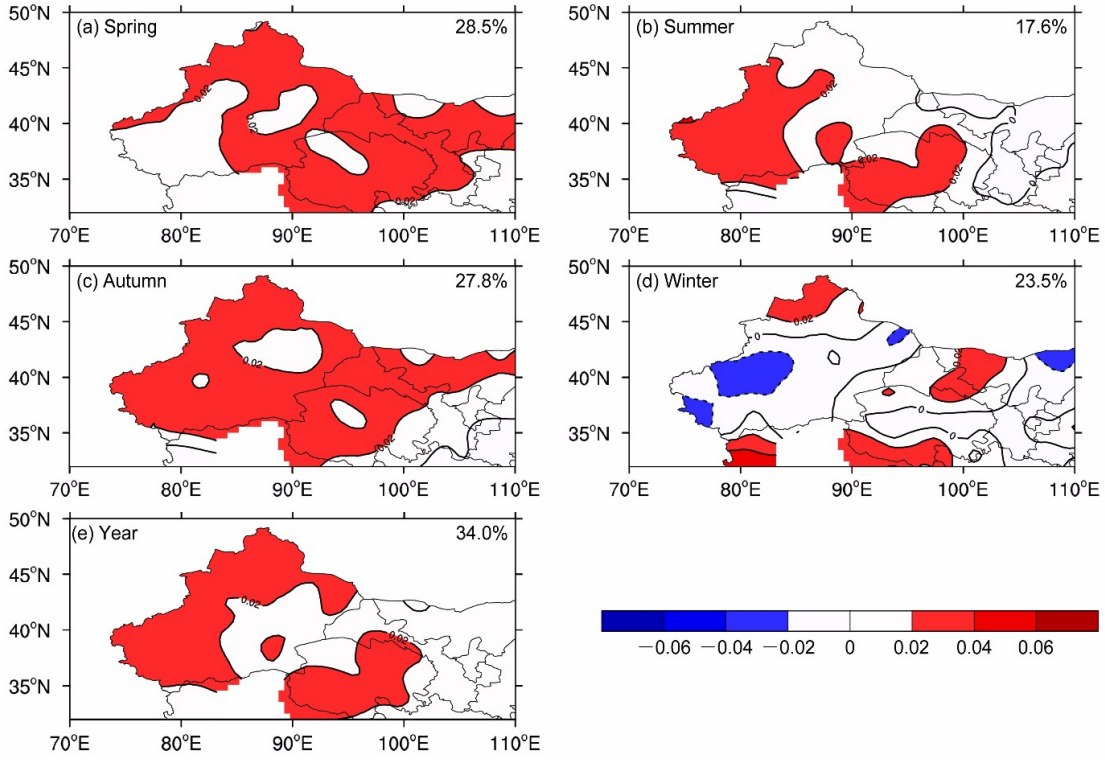

图 3　1961～2017 年西北地区（a）春季、（b）夏季、（c）秋季、（d）冬季、（e）年降水量第一特征向量场（LV1），右上角数值表示 LV1 的方差贡献率

Fig. 3　The first eigenvector fields (LV1) of (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, (e) annual precipitation in Northwest China from 1961 to 2017, numbers at top right corner indicate the variance contribution rate of LV1

基本位于天山山脉、柴达木盆地一带。夏季（图 4a）在新疆西部与青海地区为负值，负值中心在青海地区的高原附近，其余地区为正值，LV2 的方差贡献率为 14%。冬季（图 4d）的正值主要分布在新疆中部、青海大部分地区以及甘肃中部地区等，正值的中心在海拔高度较高的天山山脉、青海高原。年降水量 LV2 的值主要呈东北—西南向增多分布，零值线穿过青海与甘肃的边界和新疆中部，两侧反向变化，绝对值大值中心在青海西南部、LV2 的方差贡献率为 10%。结合第二特征向量场的时间系数（PC2）可知，在局地特征上，内陆河流域和黄河流域的年和春秋两季（图 4a、c、e）的 LV2 表现分明；夏季的降水增加且变率最大的区域仍然位于夏季风北缘地带；冬季降水一般多由西北路冷空气南侵引起，降水变率受西北地区的天山、星星峡、乌鞘岭等地形影响，呈现出东西间隔分布的形态。这些结果和图 1 的结果基本一致。

上述结果表明，西北地区的降水空间变化虽然具有区域特征，但空间差异不大，总体上降水的空间分布较为一致，以干旱少雨为主。

4 过去近 60 年间降水的时间变化特征

为了揭示西北地区过去近 60 年降水量的年际演变特征，图 5、6 分别给出了 EOF 第一、二特征向量场时间系数的演变特征。由图 5 可以看出，除冬季外，PC1 总体上均表现出一致的增加趋势，1980 年左右是一个转折点。1980 年前，年、季节降水量的第一特征向量场时间系数为负值，结合 LV1 的正值区域可知，西北地区降水量整体偏少。1980 年之后，春（图 5a）、夏（图 5b）、秋季（图 5c）时间系数变化基本以正值年份为主，结合 LV1（图 3）的正值可知，1980 年代中期之后，除冬季外西北地区的降水偏多。冬季（图 5d）降水量的变化尤为特殊，表现出一个位相内的正弦形式变化，1980 年代中期前后是位相转换阶段，结合 LV1 的变化可知，1980 年代中期前降水偏少，1980 年代中期后降水偏多，但表现出明显的 60 年左右的周期变化，即冬季降水量变化表现出显著的周期性。PC2 上，春（图 6a）、秋季（图 6c）区域尺度上降水的年际变化和第一模态大体相同，大致在

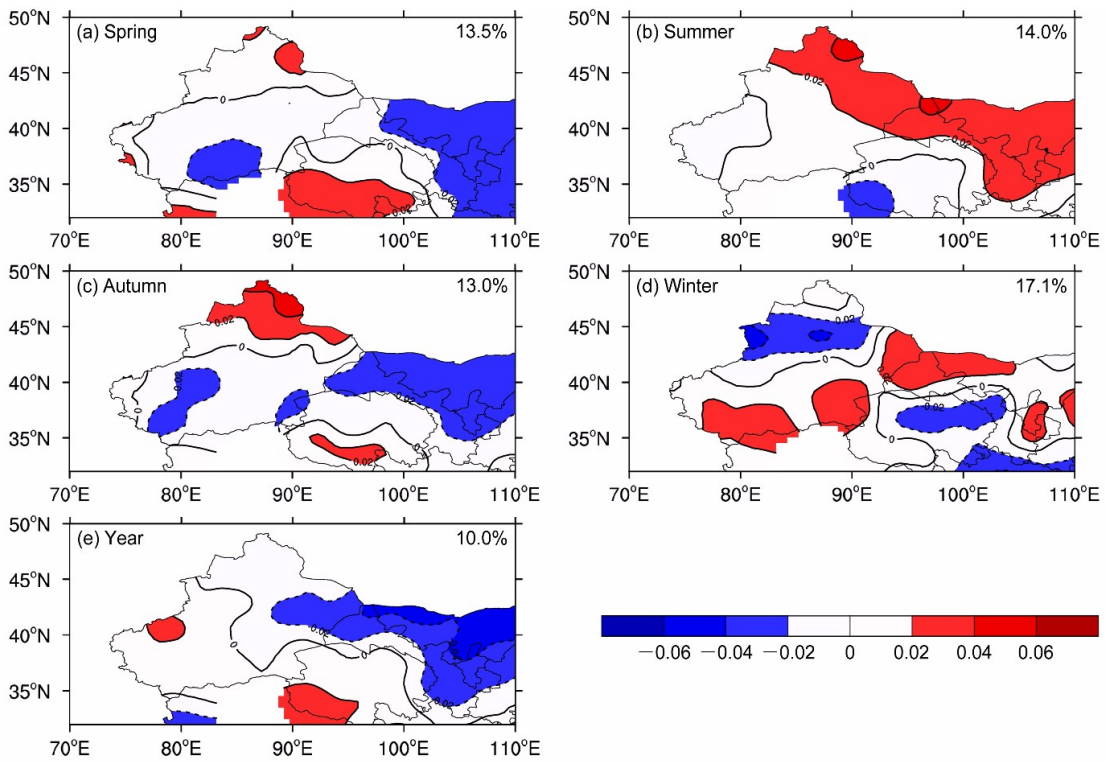

图 4 1961～2017 年西北地区（a）春季、（b）夏季、（c）秋季、（d）冬季、（e）年降水量第二特征向量场（LV2），右上角数值表示 LV2 的方差贡献率

Fig. 4 The second eigenvector fields (LV2) of (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, (e) annual precipitation in Northwest China from 1961 to 2017, numbers at top right corner indicate the variance contribution rate of LV2

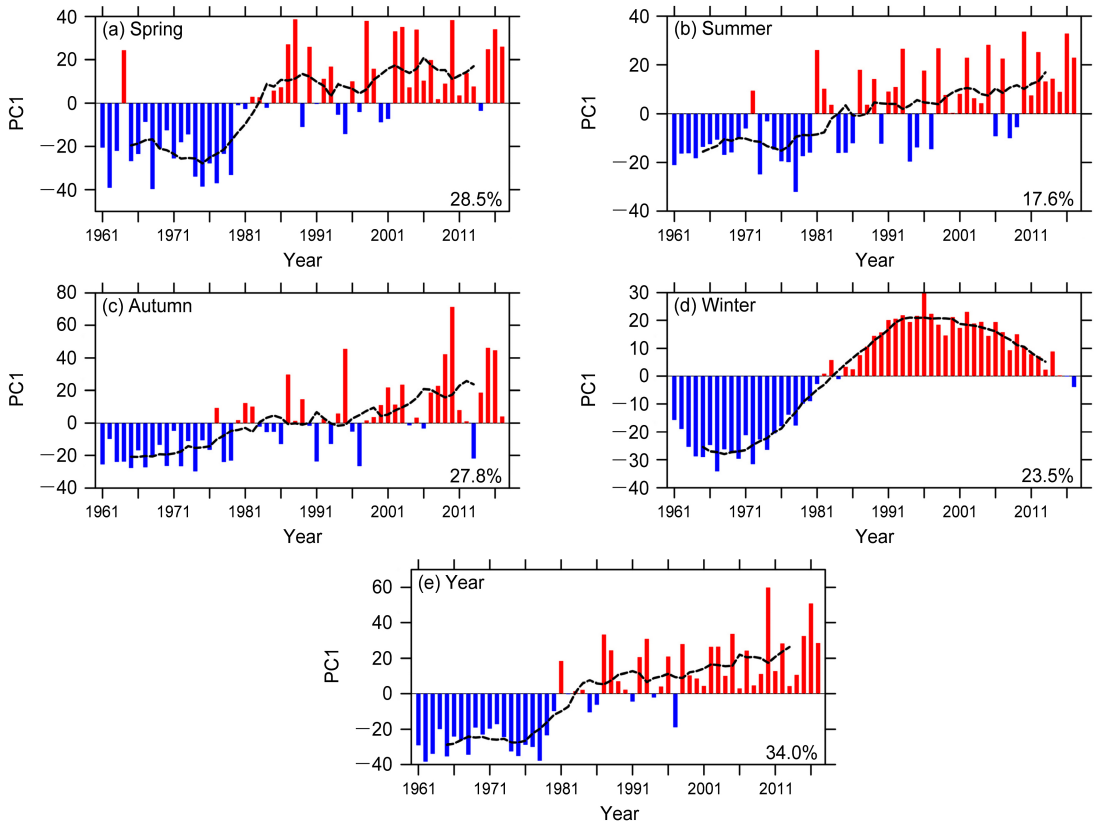

图 5　1961～2017 年西北地区（a）春季、（b）夏季、（c）秋季、（d）冬季、（e）年降水量第一特征向量场的时间系数（PC1），红（蓝）色柱状代表正（负）值，虚线代表 9 年滑动平均，右下角数值表示 LV1 的方差贡献率

Fig. 5　The time coefficients (PC1) of the first eigenvector fields of (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, (e) annual precipitation in Northwest China from 1961 to 2017. The red (blue) bars represent the positive (negative) values of the time coefficient, the dashed lines represent the 9-year moving average, numbers at bottom right corner indicate the variance contribution rate of LV1

1980 年代中期出现转折，1980 年代中期后降水开始增加。值得注意的是，第二模态反映出的冬季降水（图 6d）仍然表现出约 60 年的周期现象。第一模态的相位和第二模态相差近 20 年，即 PC2 滞后 PC1 近 20 年的时间。由于西北冬季降水量小，LV1 和 LV2 二者叠加表现出的河西中部区域的降水多、少变化只是空间上有所差异，但总体特征一致。

上述结果表明，西北地区降水的年际变率较小，相对稳定，但在年际尺度和年代际尺度上，降水的趋势呈现出增加现象。

为了明确西北地区降水变化与气温之间的关系，图 7a–d 给出了 1961～2018 年西北地区四季降水量与最高、最低气温的时间演变。由图可见，西北地区春、夏、秋、冬季降水量均为增加的趋势，但增速存在差异，增速分别为 4.29 mm (10 a)$^{-1}$、4.03 mm (10 a)$^{-1}$、2.69 mm (10 a)$^{-1}$、2.53 mm (10 a)$^{-1}$。西北地区夏季降水量最多且年际变化较大，变化特征与年降水量类似，在 1980 年附近出现降水量显著的增加趋势。春、秋季降水量次之，秋季降水量略多于春季。冬季降水量最少，1978 年为转折点，1978 年以前为降水偏少期，之后降水量出现增长，进入降水偏多期，增速为 1.01 mm (10 a)$^{-1}$。春、夏、秋、冬季平均最高、最低气温均为增加的趋势，增速在 0.1°C (10 a)$^{-1}$～0.6°C (10 a)$^{-1}$a 之间，其中冬季的增速最快。而平均最高、最低气温之间的差减小，春、夏、秋、冬季差值的速率分别为−0.1°C(10a)$^{-1}$、−0.2°C (10 a)$^{-1}$、−0.1°C (10 a)$^{-1}$、−0.2°C (10 a)$^{-1}$，说明最低气温上升的速率相比最高气温较快，日较差变小，年较差也变小。反映出西北地区气候增暖的过程中，会对高山积雪、冰川的消融产生更大的正作用。这和青藏高原地区的日较差变化相类似（Wang, et al., 2012）。

在年尺度上，1961～2018 年间，西北地区的年降水量（图 7e）经历了 3 次转折，20 世纪 70 年

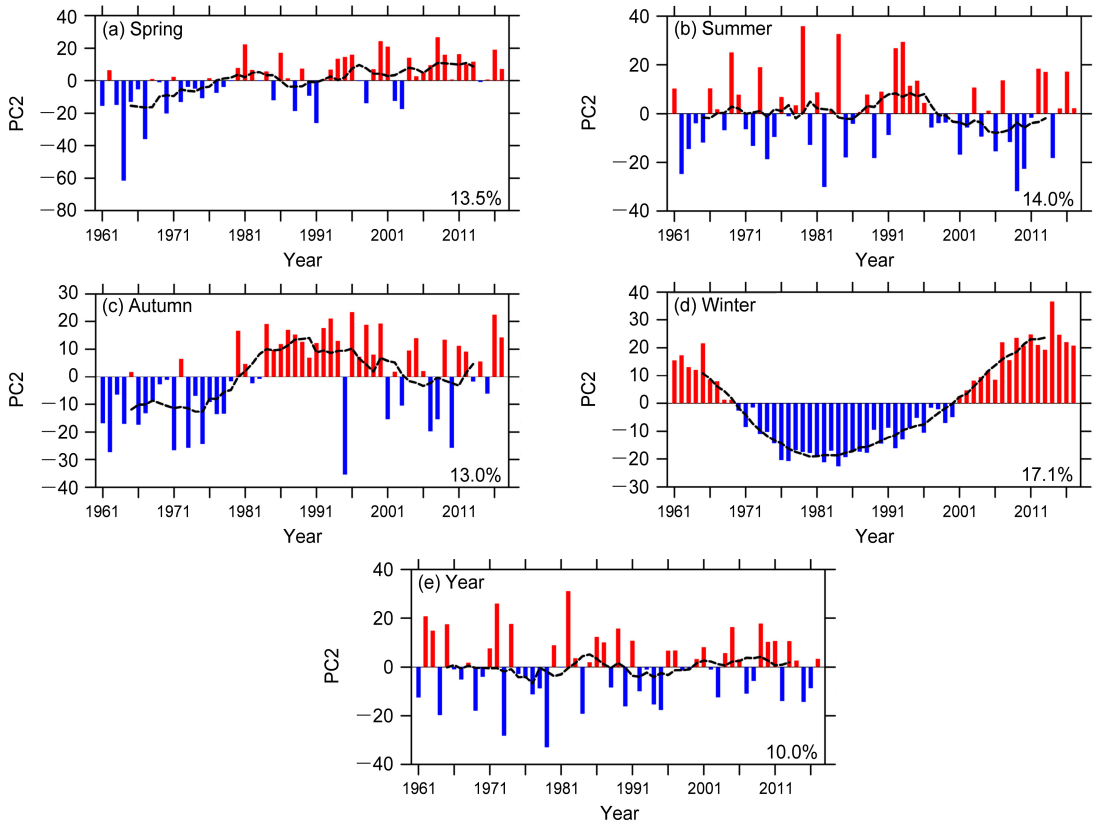

图 6 1961～2017 年西北地区（a）春季、（b）夏季、（c）秋季、（d）冬季、（e）年降水量第二特征向量场的时间系数（PC2），红（蓝）色代表正（负）值，虚线代表 9 年滑动平均，右下角数值表示 LV2 的方差贡献率

Fig. 6 The time coefficients (PC2) of the second eigenvector fields of (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, (e) annual precipitation in Northwest China from 1961 to 2017. The red (blue) bars represents the positive (negative) values of the time coefficient, the dashed lines represent the 9-year moving average, numbers at bottom right corner indicate the variance contribution rate of LV2

代初之后年降水量偏多，为第 1 次转折；20 世纪 80 年代初之后年降水量偏（减）少，为第 2 次转折；20 世纪 90 年代后期年降水量又开始偏多（增加），为第 3 次转折。目前西北地区的降水仍然处于增加的阶段。

徐国昌和董安祥（1982）利用 1951～1978 年的资料研究表明西北地区的降水具有显著的 3 a 周期，然而，这种周期是不稳定的，具有年代际变化特征。进入 21 世纪，西北地区的降水在周期上发生了什么变化也是我们关心的问题。图 8 是利用 Morlet 小波对 1961～2017 年西北地区年、季降水量进行周期分析的结果，图中正、负小波系数分别表示降水处于对应周期中的较多、较少时期。春季（图 8a）降水量在研究时段内存在准 3～5 a 周期，在 1960～1970、1990～2000 年代显著。表现出的准 3～5 a 的周期，可能也具有年代际尺度以上的再现特征。夏季（图 8b）降水存在准 3 a（信度水平 P＞90%）和准 7 a 的周期，准 3 a 周期是基本的周期变化，考虑到西北地区的夏季降水是年降水量的主要贡献阶段，因此，这一结论和以前的研究结论（徐国昌和董安祥, 1982）基本一致。秋季（图 8c）降水量周期特征并不明显，考虑到秋季降水量在年降水量中的贡献并不大，图中出现的短周期现象的实际意义并不大。冬季（图 8d）西北地区降水量的周期特征并不明显，但在 1991 年后出现了近 3 a 的周期现象（信度水平 P＞90%）。需要说明的是，由于本文的资料长度是 58 a，观测降水量的小波分析不能再现出图 5d、6d 表现出的 60 a 左右的周期。

年降水量（图 8e）的多尺度周期特征显著。主要表现为准 3 a 周期，也表现出明显的阶段性，基本特征和夏季降水基本相似，但周期长度短于夏季，这也许是其他季节不同时段上周期叠加的结果，需要进一步的深入分析。因此，可以认为准 3 a 的

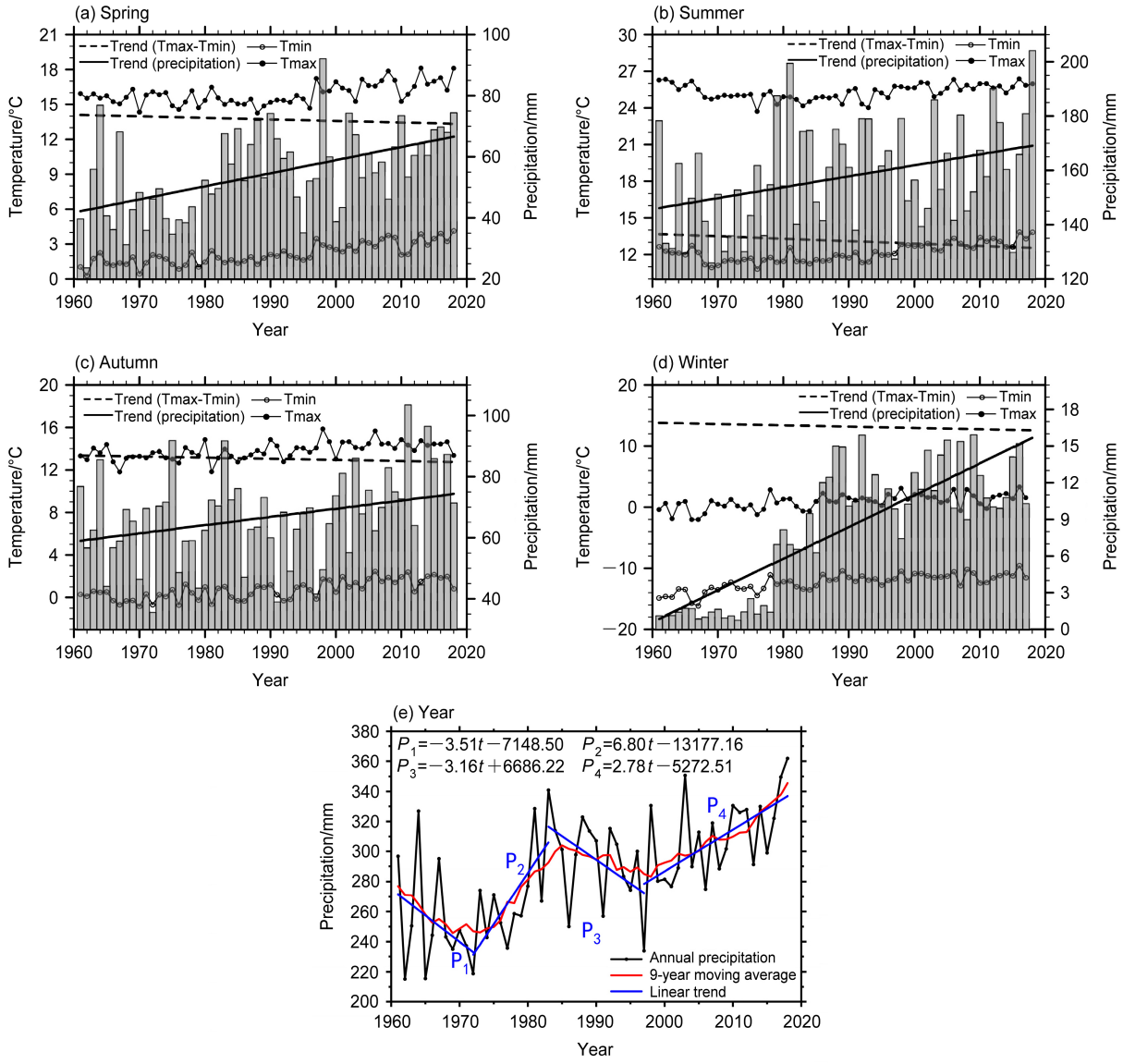

图 7　1961～2018 年西北地区（a）春季、（b）夏季、（c）秋季、（d）冬季降水量变化（柱状）与趋势（实线），季节平均最高（Tmax）、最低气温（Tmin），季节平均最高与最低气温差值的趋势（虚线），（e）年降水量

Fig. 7　(a) Spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter precipitation (bars) and trend (solid line), the highest (Tmax) and lowest (Tmin) average seasonal temperatures, the trend of the average seasonal difference between the highest and lowest temperatures (dashed lines), (e) annual precipitation in Northwest China from 1961 to 2018

周期在研究时段仍然是基本的特征。

上述分析表明，西北地区过去 60 a 来，年、季内降水均呈现出增加趋势，降水的周期性也发生了变化。进入 21 世纪后，年降水量仍然为准 3 a 周期特征；季节降水量的周期特征中，夏季主要为准 3 a、准 7 a 周期，冬季的近 3 a 周期较为显著。

5　小结

本文基于 1961～2018 年近 60 a 的观测资料，分析了在气候变暖的背景下，西北地区的年、季降水量时空变化特征以及降水量的周期变化特征，得到以下初步结论：

（1）1961～2018 年的近 60 a 间，西北地区 92% 的站点年降水量呈现增加的趋势，主要集中在西北内陆河流域，少数呈下降趋势的站点则集中在受季风影响较多的西北地区东南部。各季节中，西北地区春、夏、秋季降水量变化特征为，西北西部增加，减少的站点集中在西北地区东部。

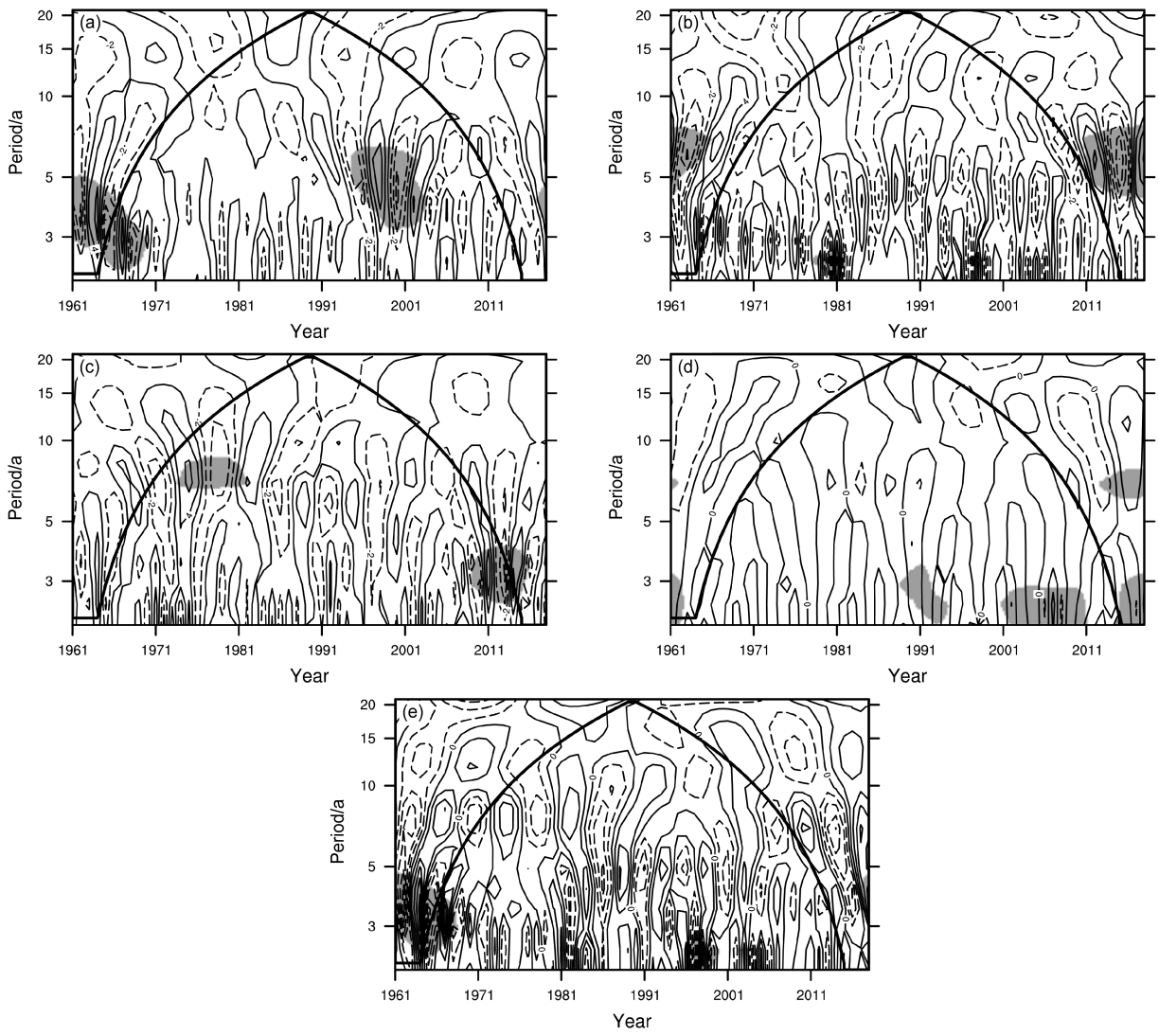

图 8 1961～2017 年西北地区（a）春季、（b）夏季、（c）秋季、（d）冬季、（e）年降水量的小波系数。实（虚）线代表正（负）值，阴影区域表示周期通过 90% 信度水平的显著性检验

Fig. 8 Wavelet coefficients of (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, (e) annual precipitation in Northwest China from 1961 to 2017. The solid (dashed) lines represent positive (negative) values, the shaded areas represent periods pass the test at 90% confidence level

冬季几乎所有观测站的降水量都为增加的趋势，增加较小 [2.53 mm (10 a)$^{-1}$]，春季降水量增加最快 [4.29 mm (10 a)$^{-1}$] 。夏、秋季降水量呈减少趋势的站点出现在夏季风西北部的边缘地带，而降水增加地区出现在受夏季风影响较小的乌鞘岭以西的广大西北地区。年平均气温呈现出增加趋势，尤其是气温的日较差和年较差减小；但各季节增温存在差异性。因此，降水的增加可能更多来自于温度升高、冰雪消融引起的内循环，而西北地区的降水增加和夏季风变化关系应该不大，至少不直接，需要进一步的深入研究。

（2）空间分布上，西北地区春、秋季以及年降水量的年际变化特征较为一致。局地特征上，内陆河流域和黄河流域的年和春、秋两季差别表现分明，夏季降水的变率最大的仍然是夏季风西北边缘地带。冬季降水受冬季风和地形的共同影响。一般地，西北地区的降水（雪）由西北路冷空气南侵引起，降水在空间上受西北地区的天山、星星峡、乌鞘岭等地形影响，具有较明显的区域特点，尤其是青藏高原等高海拔的地形阻滞了西北气流，降水呈现出和山系走向有关的分布形态。

（3）1961～2018 年近 60 a 间，西北地区年降水量经历了 3 次转折，并在 20 世纪 90 年代后期开始持续增多。年降水量仍具有准 3 a 周期；季节尺

度上，春、秋季的周期具有阶段性，冬季降水量在研究资料反映出的周期上相对稳定。夏季和年降水量的准 3 a 周期基本特征仍然存在且相对稳定。因此，降水的自然周期对近期西北地区降水增加的贡献较小，但不排除目前处于 30 a（研究时段可分辨出的时段）以上周期的雨量较多的位相上。各个季节降水量、平均最高、最低气温呈现出一致的增加趋势，而且平均最低气温的增速快于平均最高气温。

本文的分析结果初步表明，西北地区的降水量的确出现了增加的情况，但是，大部分地区的降水特征基本稳定，因此，其干旱半干旱的气候特征也不会改变。

参考文献（References）

陈冬冬, 戴永久. 2009a. 近五十年我国西北地区降水强度变化特征 [J]. 大气科学, 33(5): 923−935. Chen Dongdong, Dai Yongjiu. 2009a. Characteristics of Northwest China rainfall intensity in recent 50 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(5): 923−935. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.05.04

陈冬冬, 戴永久. 2009b. 近五十年中国西北地区夏季降水场变化特征及影响因素分析 [J]. 大气科学, 33(6): 1247−1258. Chen Dongdong, Dai Yongjiu. 2009b. Characteristics and analysis of typical anomalous summer rainfall patterns in Northwest China over the last 50 Years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(6): 1247−1258. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.11

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

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 1535pp.

Li J M, Wang C H. 2020a. An evaporation correction approach and its characteristics [J]. J. Hydrometeorol., 21(3): 519−532. doi:10.1175/JHM-D-18-0211.1

Li R L, Wang C H. 2020b. Precipitation recycling using a new evapotranspiration estimator for Asian–African arid regions [J]. Theor. Appl. Climatol., 140(1−2): 1−13. doi:10.1007/s00704-019-03063-9

Li R L, Wang C H, Wu D. 2018. Changes in precipitation recycling over arid regions in the Northern Hemisphere [J]. Theor. Appl. Climatol., 131(1-2): 489−502. doi:10.1007/s00704-016-1978-4

刘维成, 张强, 傅朝. 2017. 近 55 年来中国西北地区降水变化特征及影响因素分析 [J]. 高原气象, 36(6): 1533−1545. Liu Weicheng, Zhang Qiang, Fu Zhao. 2017. Variation characteristics of precipitation and its affecting factors in Northwest China over the past 55 years [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 36(6): 1533−1545. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00081

马柱国, 符淙斌. 2006. 1951～2004 年中国北方干旱化的基本事实 [J]. 科学通报, 51(23): 2913−2925. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2006. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004 [J]. Chinese Sci. Bull., 51(23): 2913−2925. doi:10.1007/s11434-006-2159-0

任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 2005. 近 50 年中国地面气候变化基本特征 [J]. 气象学报, 63(6): 942−956. Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. 2005. Climate changes of China's mainland over the past half century [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 63(6): 942−956. doi:10.11676/qxxb2005.090

任国玉, 袁玉江, 柳艳菊, 等. 2016. 我国西北干燥区降水变化规律 [J]. 干旱区研究, 33(1): 1−19. Ren Guoyu, Yuan Yujiang, Liu Yanju, et al. 2016. Changes in precipitation over Northwest China [J]. Arid Zone Res. (in Chinese), 33(1): 1−19. doi:10.13866/j.azr.2016.01.01

任宏利, 张培群, 李维京, 等. 2004. 中国西北东部地区春季降水及其水汽输送特征 [J]. 气象学报, 62(3): 365−374. Ren Hongli, Zhang Peiqun, Li Weijing, et al. 2004. Characteristics of precipitation and water vapor transport during springtime in the eastern Northwest China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 62(3): 365−374. doi:10.11676/qxxb2004.037

施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 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, 24(3): 219−226. Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. 2002. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China [J]. J. Glaciol. Geocryol. (in Chinese), 24(3): 219−226. doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2002.03.001

施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨 [J]. 第四纪研究, 23(2): 152−164. Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. 2003. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China [J]. Quat. Sci. (in Chinese), 23(2): 152−164. doi:10.3321/j.issn:1001-7410.2003.02.005

Sui Y, Jiang D B, Tian Z P. 2013. Latest update of the climatology and changes in the seasonal distribution of precipitation over China [J]. Theor. Appl. Climatol., 113(3): 599−610. doi:10.1007/s00704-012-0810-z

王澄海, 崔洋. 2006. 西北地区近 50 年降水周期的稳定性分析 [J]. 地球科学进展, 21(6): 576−584. Wang Chenghai, Cui Yang. 2006. A study of the stability of the precipitation cycle over Northwest China in the past 50 years [J]. Adv. Earth Sci. (in Chinese), 21(6): 576−584. doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2006.06.003

Wang C H, Yu L, Huang B. 2012. The impact of warm pool SST and general circulation on increased temperature over the Tibetan Plateau [J]. Adv. Atmos. Sci., 29(2): 274−284. doi:10.1007/s00376-011-1034-3

王澄海, 王式功, 杨德保, 等. 2001. 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), 37(3): 104−111. Wang Chenghai, Wang Shigong, Yang Debao, et al. 2001. Studies on basic and anomaly features of precipitation during spring in Northwest China [J]. J. Lanzhou Univ. (Nat. Sci.) (in Chinese), 37(3): 104−111.

doi:10.3321/j.issn:0455-2059.2001.03.021

王澄海, 李健, 李小兰, 等. 2012. 近 50a 中国降水变化的准周期性特征及未来的变化趋势 [J]. 干旱区研究, 29(1): 1−10. Wang Chenghai, Li Jian, Li Xiaolan, et al. 2012. Analysis on quasi-periodic characteristics of precipitation in recent 50 years and trend in next 20 years in China [J]. Arid Zone Res. (in Chinese), 29(1): 1−10. doi:10.13866/j.azr.2012.01.022

王澄海, 李健, 许晓光. 2012. 中国近 50 年气温变化准 3 年周期的普遍性及气温未来的可能变化趋势 [J]. 高原气象, 31(1): 126−136. Wang Chenghai, Li Jian, Xu Xiaoguang. 2012. Universality of Quasi-3-year period of temperature in last 50 years and change in next 20 years in China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 31(1): 126−136.

Wang Q, Zhai P M, Qin D H. 2020. New perspectives on ‘warming–wetting’ trend in Xinjiang, China [J]. Adv. Climate Change Res., 11(3): 252−260. doi:10.1016/j.accre.2020.09.004

魏娜, 巩远发, 孙娴, 等. 2010. 西北地区近 50 a 降水变化及水汽输送特征 [J]. 中国沙漠, 30(6): 1450−1457. Wei Na, Gong Yuanfa, Sun Xian, et al. 2010. Variation of precipitation and water vapor transport over the Northwest China from 1959 to 2005 [J]. J. Desert Res. (in Chinese), 30(6): 1450−1457.

韦志刚, 董文杰, 惠小英. 2000. 中国西北地区降水的演变趋势和年际变化 [J]. 气象学报, 58(2): 234−243. Wei Zhigang, Dong Wenjie, Hui Xiaoying. 2000. Evolution of trend and interannual oscilla-tory variabilities of precipitation over Northwest China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 58(2): 234−243. doi:10.11676/qxxb2000.024

徐栋, 孔莹, 王澄海. 2016. 西北干旱区水汽收支变化及其与降水的关系 [J]. 干旱气象, 34(3): 431−439. Xu Dong, Kong Ying, Wang Chenghai. 2016. Changes of water vapor budget in arid area of Northwest China and its relationship with precipitation [J]. J. Arid Meteor. (in Chinese), 34(3): 431−439. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-03-0431

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 Environ. Res. (in Chinese), 21(6): 737−748. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15256

徐国昌, 董安祥. 1982. 我国西部降水量的准三年周期 [J]. 高原气象, 1(2): 11−17. Xu Guochang, Dong Anxiang. 1982. The quasi-three year period of precipitation in the West of China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 1(2): 11−17.

徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 2003. 人类活动引起的我国西北地区 21 世纪温度和降水变化情景分析 [J]. 冰川冻土, 25(3): 327−330. Xu Ying, Ding Yihui, Zhao Zongci. 2003. Scenario of temperature and precipitation changes in Northwest China due to human activity in the 21st century [J]. J. Glaciol. Geocryol. (in Chinese), 25(3): 327−330. doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2003.03.015

杨瑜峰. 2014. 中国西北东部近 50 a 降水异常分布及变化特征 [J]. 干旱气象, 32(5): 701−705, 711. Yang Yufeng. 2014. Characteristics of precipitation anomalies in the last 50 years in eastern part of Northwest China [J]. J. Arid Meteor. (in Chinese), 32(5): 701−705, 711. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-05-0701

Yin Z L, Feng Q, Yang L S, et al. 2020. Projected spatial patterns in precipitation and air temperature for China’s northwest region derived from high-resolution regional climate models [J]. Int. J. Climatol., 40(8): 3922−3941. doi:10.1002/joc.6435

于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 2003. 我国西北地区近 50 年降水和温度的变化 [J]. 气候与环境研究, 8(1): 9−18. Yu Shuqiu, Lin Xuechun, Xu Xiangde. 2003. The climatic change in Northwest China in recent 50 years [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 8(1): 9−18. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2003.01.02

张存杰, 高学杰, 赵红岩. 2003. 全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响 [J]. 冰川冻土, 25(2): 157−164. Zhang Cunjie, Gao Xuejie, Zhao Hongyan. 2003. Impact of global warming on autumn precipitation in Northwest China [J]. J. Glaciol. Geocryol. (in Chinese), 25(2): 157−164. doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2003.02.007

赵传成, 王雁, 丁永建, 等. 2011. 西北地区近 50 年气温及降水的时空变化 [J]. 高原气象, 30(2): 385−390. Zhao Chuancheng, Wang Yan, Ding Yongjian, et al. 2011. Spatial–temporal variations of temperature and precipitation in northern China in recent 50 years [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 30(2): 385−390.

赵宗慈, 丁一汇, 徐影, 等. 2003. 人类活动对 20 世纪中国西北地区气候变化影响检测和 21 世纪预测 [J]. 气候与环境研究, 8(1): 26−34. Zhao Zongci, Ding Yihui, Xu Ying, et al. 2003. Detection and prediction of climate change for the 20th and 21st century due to human activity in Northwest China [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 8(1): 26−34. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2003.01.04