

DOI: 10.5846/stxb201305101013

黄小燕, 李耀辉, 冯建英, 王劲松, 王芝兰, 王圣杰, 张宇. 中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征. 生态学报, 2015, 35(5): 1359-1370.

Huang X Y, Li Y H, Feng J Y, Wang J S, Wang Z L, Wang S J, Zhang Y. Climate characteristics of precipitation and extreme drought events in Northwest China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1359-1370.

中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征

黄小燕^{1,*}, 李耀辉¹, 冯建英¹, 王劲松¹, 王芝兰¹, 王圣杰², 张宇¹

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

摘要: 采用 1960—2011 年西北地区 111 个观测站逐日气象资料, 利用 FAO Penman-Monteith 模型, 计算出各气象站的潜在蒸散量, 由此计算出各站的湿润指数, 并对其进行标准化, 统计极端干旱发生频率。对西北全区和不同自然区的降水量及极端干旱发生频率的时空变化特征进行了探讨分析。结果表明: 近 52 年来西北全区年降水量变化倾向率表现出微弱的上升趋势, 平均每年上升 0.17 mm。由该区年降水量变化的空间差异, 可将研究区划分为 3 个部分: 明显增加区、轻度增加区、减少区。西北全区极端干旱发生频率的平均值为 3.8 月/a, 气候变化倾向率总体上表现出明显的下降趋势, 平均每年下降 0.011 月。根据西北地区极端干旱发生频率变化的空间差异, 也可将研究区划分为 3 个部分: 明显减少区、轻度减少区、增加区。极端干旱发生频率与降水量和平均气温表现为显著的负相关性, 与无雨总日数呈现出显著的正相关性。

关键词: 西北地区; 降水量; 湿润指数; 极端干旱; 时空特征

Climate characteristics of precipitation and extreme drought events in Northwest China

HUANG Xiaoyan^{1,*}, LI Yaohui¹, FENG Jianying¹, WANG Jinsong¹, WANG Zhilan¹, WANG Shengjie², ZHANG Yu¹

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

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

Abstract: Based on the daily data observed at 111 meteorological stations in Northwest China from 1960 to 2011, the potential evaporation was calculated using the FAO Penman-Monteith model, and then the humid index was derived, as well as the extreme drought frequency. The temporal and spatial variations of the precipitation and extreme drought frequency were discussed in this paper. The results indicated that the precipitation in Northwest China has increased by 0.17 mm per year in the last 52 years. According to the spatial variation of precipitation, the study area could be divided into three subregions including obvious increasing, light increasing and decreasing. The mean extreme drought frequency was 3.8 months per year during 1960—2011, at a decreasing rate of 0.011 months per year. The variation of the extreme drought frequency also showed a spatial diversity and could be divided into three subregions including obvious decreasing, light decreasing and increasing. The extreme drought frequency showed a negative correlation with precipitation and average temperature, and a positive correlation with rainless days.

基金项目: 2010 年公益性行业 (气象) 科研专项经费 (GYHY201006023); 国家自然科学基金资助项目 (41175081, 41201370); 硕士科研启动项目 (KYS2012SSKY06)

收稿日期: 2013-05-10; **网络出版日期:** 2014-04-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xyhuang0529@sina.cn

Key Words: Northwest China; precipitation; humid index; extreme drought; temporal and spatial characteristics

在全球气候变化的背景下^[1-2],近年来极端天气、气候事件的发生频率和发展强度都在急剧增加,严重威胁人类的生存和社会的可持续发展,引起了国内外学者的广泛关注^[3-9]。严中伟等^[10]对中国极端气候变化格局进行分析,揭示了中国区域气候要素极值的变化格局。江志红等^[11]从观测、理论及模拟预估等方面对近十多年来国内外极端降水气候事件的研究作了综述,并给出 IPCC 第四次评估报告对我国 21 世纪极端降水指数变化的预估结果。王冀等^[12]研究发现中国区域极端气温指数的变化是一致增加(减少)趋势。翟盘茂等^[13]研究发现中国北方夜间温度极端偏低的日数显著趋于减少,白天温度偏高的日数则趋于增多,华北地区强降水事件趋于减少,西北地区强降水事件趋于增多。对西北地区极端高温^[14]和极端低温^[15]事件的研究表明西北地区极端高温的高值区在新疆大部分地区、河西走廊西部、陇东南、宁夏北部和陕西,这些地方的高温阈值在 30℃ 以上;极端低温的低值主要出现在北疆和青海高原,这些地方的阈值在 -20℃ 以下。

我国早期关于极端气候的研究多开展于极端气温和降水方面,近年来关于极端干旱的研究也逐渐开展起来:侯威等^[16]研究了河北、山西、黄河中下游、江淮和西北东部地区年极端干旱事件的概率,发现 4 个地区近 500 年来极端干旱事件概率的变化与古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 含量的变化相反。马柱国等^[17]利用地表湿润指数对我国北方极端干旱的分布特征进行了研究,发现在东北和华北地区,近 10 年极端干旱频率显著增加,是近百年少有的大范围高强度的极端干旱频发期。对我国西南地区^[18]的研究发现,四川盆地西南部、横断山区南端、广西南部沿海和贵州北部是近 50 年来年极端干旱发生频率明显增加的地区。对石羊河流域^[19]极端干旱事件的研究发现 1960—2009 年石羊河流域极端干旱事件频率在波动中呈减少趋势,极端湿润事件频率却在波动中呈增加趋势,20 世纪 60 年代和 70 年代是石羊河流域极端干旱事件持续频发年代。鲍艳等^[20]通过 RegCM3 模式,对 2001 年夏季西北地区极端干旱事件进行了模拟。还有学者利用气候变化检测监测与指数专家组(Expert Team on Climate Change Detection and Indices,简称 ETCCDI)^[21]推荐的极端气温和降水指标开展研究:You 等^[22]对中国 12 个极端气温指数和 6 个极端降水指数进行研究,发现极端气温指数和平均气温有较好的相关性;黄小燕等^[23]研究发现我国大陆 CDD(Consecutive dry days)在春季和冬季呈下降趋势,秋季呈上升趋势;Wang 等^[24-25]发现 SDII(Simple daily intensity index)在西北大部分地区表现为上升趋势;Wang 等^[26]研究表明 CWD(Consecutive wet days)在新疆大部分地区呈上升趋势;杨志刚等^[27]对西藏色林错流域极端气温事件变化也进行研究。

所谓气象干旱,就是一个地区在长期无降水或降水异常偏少的气候背景下,由于降水与蒸散收支不平衡造成的水分异常短缺现象^[28],也是极端气候的一种表现,因此干旱问题就归结为研究降水(入)和蒸发(出)两个方面^[17]。之前一些研究受研究区域或干旱指标的限制,对整个西北地区极端干旱气候变化研究甚少,对该区降水量与极端干旱气候的关系的研究更少。本文综合考虑蒸发和降水两个方面,通过年代际、年际等时间尺度的降水量及极端干旱气候变化,分析了西北地区及西北不同自然区降水量及极端干旱气候的空间分布、预测其变化趋势,对西北地区气候转型问题形成更加深刻的认识,同时对未来西北地区生态环境和国民经济建设等提供可靠的科学依据。

1 数据来源与研究方法

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。所用资料是国家气象信息中心提供,根据(1)各站缺测数不超过 20d;(2)资料连续长度在 50a 以上这两个条件,筛选出符合条件的域内 111 个气象站(图 1)1960—2011 年逐日降水量、日平均气温、日最高气温、日最低气温、日照时数、日平均相对湿度、日平均风速等资料。计算出各气象站日潜在蒸散量,由此再利用月潜在蒸散量、月降水量资料,计算出月地表湿润指数。

湿润指数是一个理想的能够表征地表干湿状况的物理量^[29],其计算方法有很多种^[30,31],本文采用联合

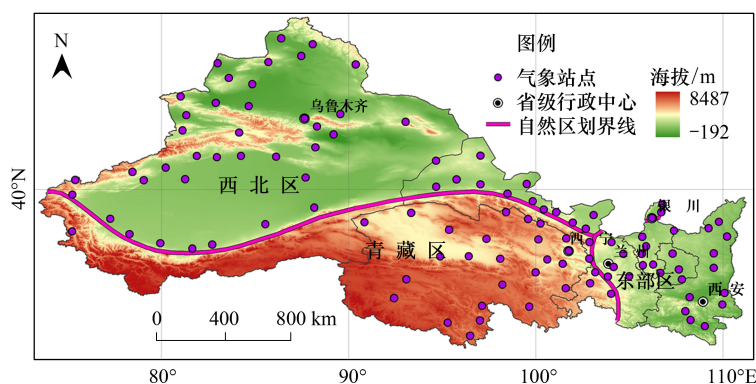


图1 西北地区气象站点分布图

Fig.1 Distribution of meteorological stations in Northwest China

国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations,简称FAO)1998年修正的Penman-Monteith模型^[32]。此方法也是目前认为较好的计算方法^[33],其计算公式如下:

$$K = \frac{R}{ET_0} \quad (1)$$

式中, K 为地表湿润指数, R 为降水量(mm/d); ET_0 为潜在蒸散量(mm/d)。

潜在蒸散量 ET_0 的计算采用下式:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

式中, ET_0 为潜在蒸散量(mm/d); R_n 为净辐射($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); γ 为干湿常数($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); Δ 为饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); U_2 为2m高处的风速(m/s); e_s 为平均饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); T 为平均气温($^\circ\text{C}$)。具体计算方法参阅文献^[34]。

反距离加权(IDW)插值法;它是一种常见而简便的空间插值方法,属于精确性插值。它是基于相近相似的原理:即两个物体离得近,它们的性质就越相似,反之,离得越远则相似性越小^[35]。本文在ArcGIS9.3环境下通过IDW插值法绘制西北地区降水量及极端干旱倾向率的空间分布图,进行降水量及极端干旱变化的空间差异分析。采用经验正交函数分析方法(EOF)分析西北地区不同空间模态降水量的长期变化趋势^[36]。

赵松乔^[37]根据我国自然地理环境中最主要的地域差异,将我国划分为三大自然区,即东部季风区、西北干旱区、青藏高寒区。西北地区气候类型复杂,涵盖以上3种自然区,本文把以上3种自然区简称为东部区、西北区、青藏区(图1),并对3种自然区的降水量和极端干旱发生频率变化进行了分区讨论。将 K 的标准化变量小于等于-0.5的定义为极端干旱^[17]。

为了验证数据的可靠性,本文选取西北地区1960—2000年干旱等级数据集(数据由国家气象信息中心提供),筛选出属于西北地区与降水量等气象要素站对应的气象站10个。图2中列出其中4个站(伊宁、乌鲁木齐、西宁和格尔木),其他站图略,图中红色五角星曲线表示旱涝等级,采用3个等级表示各地降水情况,即0级正常、1级偏旱、2级旱,黑色圆点曲线表示极端干旱发生频率。从图2中可以看出,干旱发生年份与极端干旱发生频率较高年份基本对应。

2 降水量变化

2.1 降水量年际变化

图3是1960—2011年西北全区与不同自然区年降水量年际变化趋势。1960年以来西北全区年降水量平均值为276.1 mm(图3),降水量变化倾向率表现出微弱上升趋势,平均每年上升0.17 mm。不同年代年降水

量变化存在一定差异:20 世纪 60 年代到 90 年代初期,年降水量变化趋势比较平稳,大部分都在平均值附近波动变化;90 年代中期以来,年降水量呈现出显著攀升趋势,说明了西北地区 90 年代中期以来降水量有明显增加趋势。

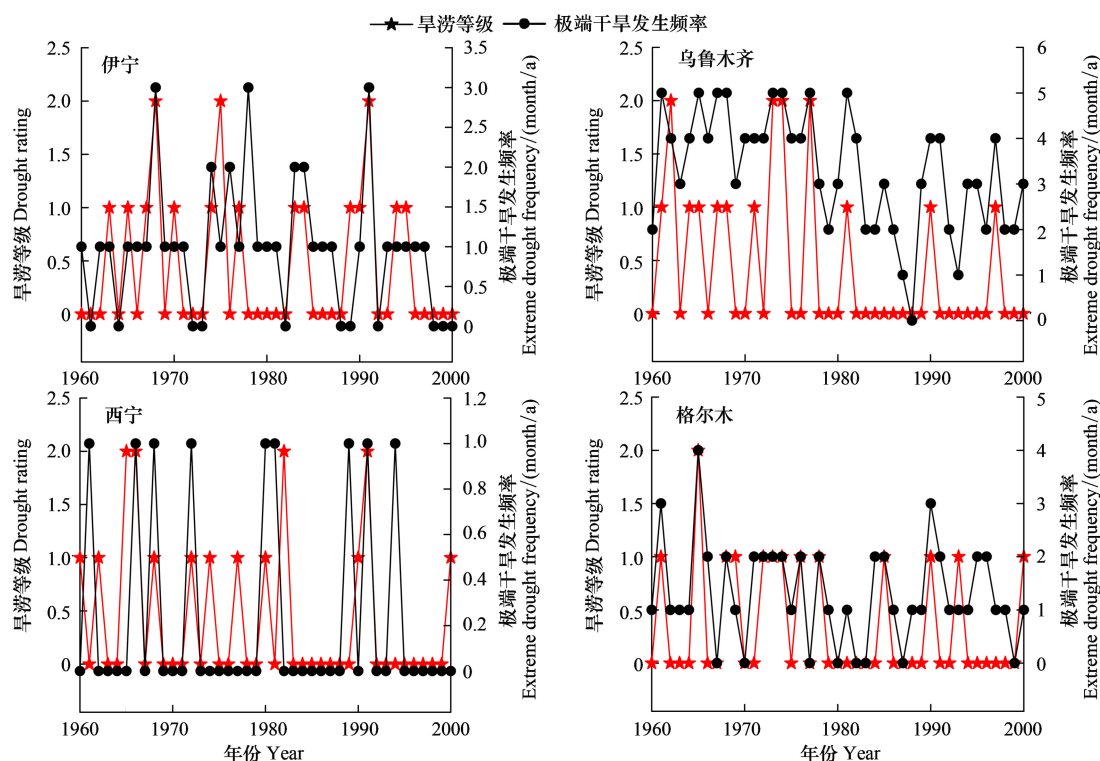


图 2 1960—2000 年旱涝等级与极端干旱发生频率年际变化

Fig.2 Annual variation of the extreme drought frequency and drought level during 1960—2000

西北不同自然区年降水量年际变化趋势差异也较大,东部区年降水量平均值为 497.2 mm(图 3),属 3 个不同自然区中最高值,降水量变化倾向率表现出明显下降趋势,平均每年下降 1.22 mm。该区 20 世纪 60 年代到 70 年代表现出先上升后下降的趋势,且大部分以正距平为主,说明在此期间东部区降水量相对较大;70 年代到 80 年代中期表现出缓慢上升趋势;80 年代中期以来表现出先下降后上升的趋势,且 2000 年以后上升趋势显著,说明 2000 年以来东部区降水量变化略有改善。

1960 年以来,西北区年降水量平均值为 133.8 mm(图 3),为 3 个不同自然区中最低值,降水变化倾向率呈现出显著上升趋势,平均每年上升 0.65 mm。该区 60 年代到 70 年代降水量变化呈上升趋势;70 年代到 80 年代初期变化趋势平稳;80 年代初期以来有明显的波动上升趋势。该区降水量变化大致可以分为两个阶段:80 年代末期以前大部分值都在平均值之下,也就是说该阶段降水量相对较少,但也表现出明显的上升趋势;80 年代末期以来大部分值都在平均值之上,即表现为正距平,说明该阶段降水量相对较多,且到目前为止上升趋势比较显著。

青藏区年降水量平均值为 338.6 mm(图 3),最低值为 288.7 mm(1962 年),最高值为 419.9 mm(1967 年),极差达到 131.2 mm,说明年降水量变幅较大。降水量变化倾向率呈明显上升趋势,平均每年上升 0.51 mm。降水量变化大致可以分为 3 个阶段:20 世纪 60 年代到 80 年代中期为第 1 阶段,表现出微弱波动上升趋势;80 年代中期到 90 年代末期为第 2 阶段,为明显下降趋势;2000 年以来则为第 3 个阶段,为急剧的攀升趋势。即近 52 年来表现出“上升—下降—上升”趋势,且以 2000 年以来上升趋势突出,说明近 12 年来青藏区降水量变化大有改善。

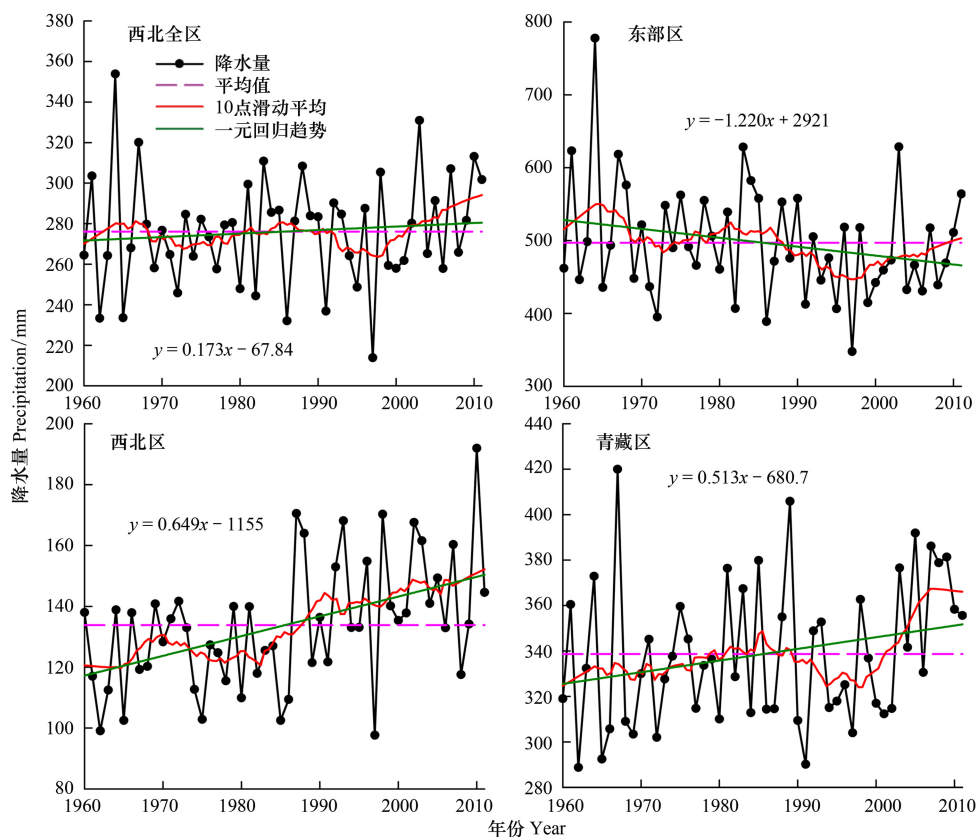


图3 1960—2011年西北地区年降水量年际变化趋势

Fig.3 Annual variation of the annual precipitation in Northwest China during 1960—2011

2.2 降水量空间变化

近 52 年来,西北地区年降水量年际变化表现出了不同的空间差异(图 4),总体上西北大部分地区降水量年际变化趋势呈增加趋势。根据西北地区年降水量变化的空间差异,可将研究区划分为 3 个部分:(1)明显增加区,即降水量增加趋势最为明显地区。该区主要包括天山山脉以北的北疆地区、阿尔泰山附近、昆仑山脉东南部、巴颜喀拉山脉附近、唐古拉山北部以及河西走廊等地区。降水量变化倾向率在 0.5—2.9 mm/a 之间,其中新疆乌鲁木齐气象站点降水量增加趋势最显著,变化倾向率达到 2.9 mm/a。这与施雅风等^[38]划分的西

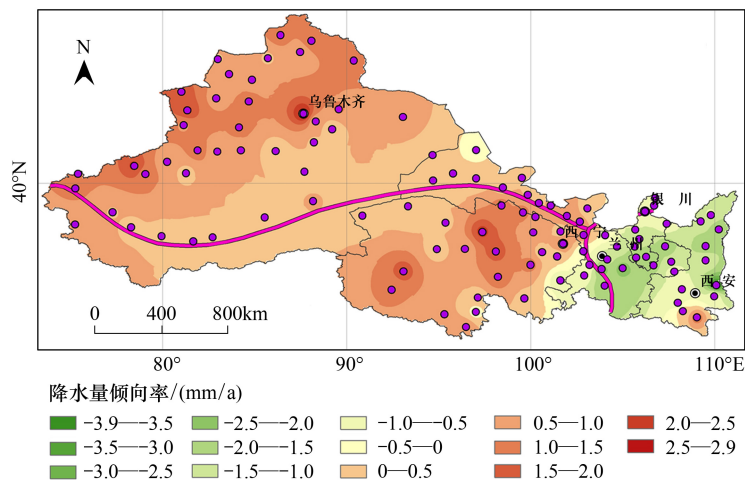


图4 1960—2011年西北地区年降水量倾向率的空间变化

Fig.4 Spatial distribution of change trends of the annual precipitation in Northwest China during 1960—2011

北气候由暖干向暖湿转型的 3 个气候区中显著转型区基本一致。(2)轻度增加区,即降水量增加趋势缓慢的地区。该区域主要包括天山山脉以南的南疆地区和甘肃酒泉地区,降水量变化倾向率在 0.0—0.5 mm/a 之间。(3)减少区,即降水量依然减少的区域。该区域主要在西北东部区,降水量变化倾向率在 -3.9—0.0 mm/a 之间。以甘肃南部的定西、宁夏南部以及秦岭山脉以北的黄河流域附近减少最为显著,其中华山气象站降水量减少趋势最大,气候变化倾向率为 -3.9 mm/a。

2.3 EOF 分析

为分析不同空间模态降水量的长期变化趋势,对西北地区降水量进行 EOF 分解。表 1 列出了前 10 个特征向量的方差贡献率和累计方差贡献率,由表可知,前 10 个特征向量占总方差的 66.98%。对特征向量的收敛性进行分析,并用公式 (3) [39-40] 对特征向量进行显著性检验,结果表明前 6 个特征值有意义:

$$\lambda_i - \lambda_{i+1} \geq \lambda_i \left(\frac{2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

表 1 前 10 个特征向量占总方差的百分比

Table 1 The first-ten eigenvalues and their contributions for the total variance

特征向量 Eigenvalues	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
方差贡献率 Variance contribution rate/%	16.8	15.08	7.71	6.15	5.1	4.52	3.48	3.24	2.57	2.33
累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate	16.8	31.88	39.59	45.74	50.84	55.36	58.84	62.08	64.65	66.98

图 5 给出前 3 个特征向量场,用以解释降水量的整体空间异常结构,图中红色曲线表示正值,黑色曲线表示特征值零线,蓝色虚线表示负值。由第一特征向量场(图 5)可以看出,特征值零线穿越新疆中部至青海西部,新疆东部、青海东部、甘肃、宁夏以及陕西地区表现为同一符号的正值分布,与新疆西部和青海西部呈反相变化特征,这种特征值占总体方差的 16.8%。第二特征向量(图 5)除甘肃东南部、宁夏、陕西北部外,其他地区表现为同一符号的负值,即表现出西北地区少雨的气候特征,这种全区一致的特征值占总体方差的 15.08%。第三特征向量(图 5)表现出了西北地区年降水量场南北相反的变化趋势,这种特征占总体方差的 7.71%。特征值零线从西到东基本穿越南北疆分界—祁连山河西走廊地区—甘肃东部—陕西北部,青海、甘肃河西走廊以及陕西南部为正值区。

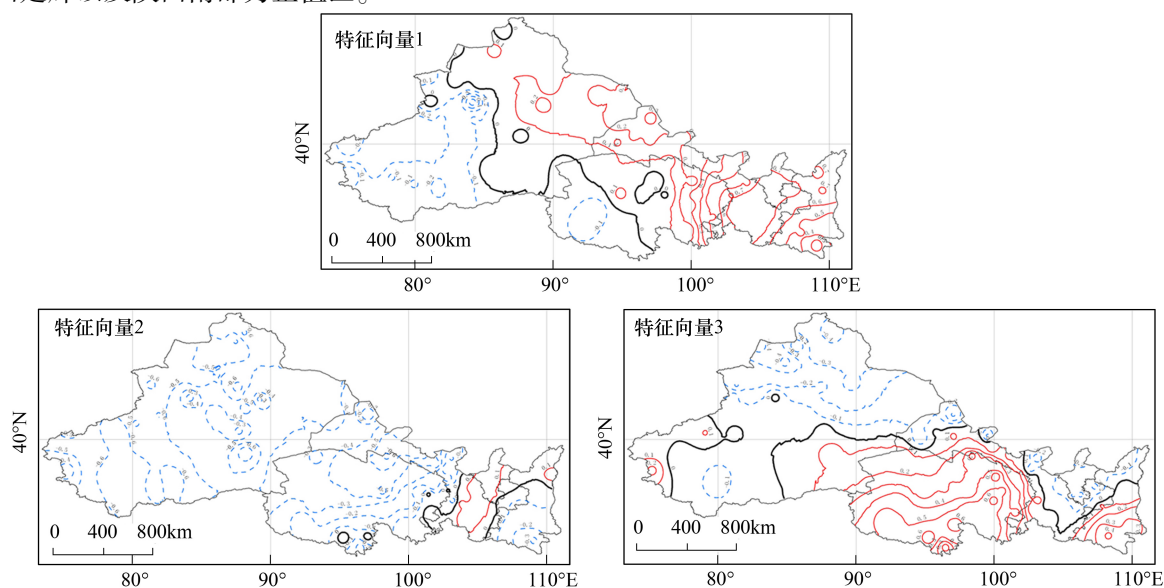


图 5 西北地区年降水量的前 3 个特征向量场

Fig.5 The first-three eigenvalues of annual precipitation in Northwest China

与文献^[36]对比发现,西北地区 1960—2011 年年降水量的第一特征向量大值区与 1961—2000 年年降水量一致。第二、第三个特征向量与 1961—2000 年年降水量相比大致相同,但也存在差异,说明经过 10a 的气候演变,年降水量的总体空间异常结构没有发生变化。参考以上分析得到西北地区年降水量的 5 个主要气候区(图 6):第 I 区,陕西中南部。主要包括陕西中部和南部地区,有 10 个测站;第 II 区,黄土高原西部区。主要包括甘肃东部、宁夏及陕西北部地区,有 23 个测站;第 III 区,青藏高原东北区。主要包括新疆东南部、青海及甘肃河西走廊地区,有 36 个测站;第 IV 区,新疆东北区。主要包括新疆东北部地区,有 20 个测站;第 V 区,新疆西部区。主要包括新疆西部地区,有 20 个测站。此气候区划分与黄玉霞等^[36]将西北地区划分为 6 个主要气候区有所差异。图 6 列出了以上 5 个气候区的年平均降水量的年际变化,总体上第 I、II 区近 52 年来降水量表现出明显的下降趋势,其中第 II 区每 10 年下降约 11 mm;第 III、IV、V 区表现出明显的上升趋势,以新疆地区上升趋势最为显著,第 V 区平均每 10a 上升 9 mm。

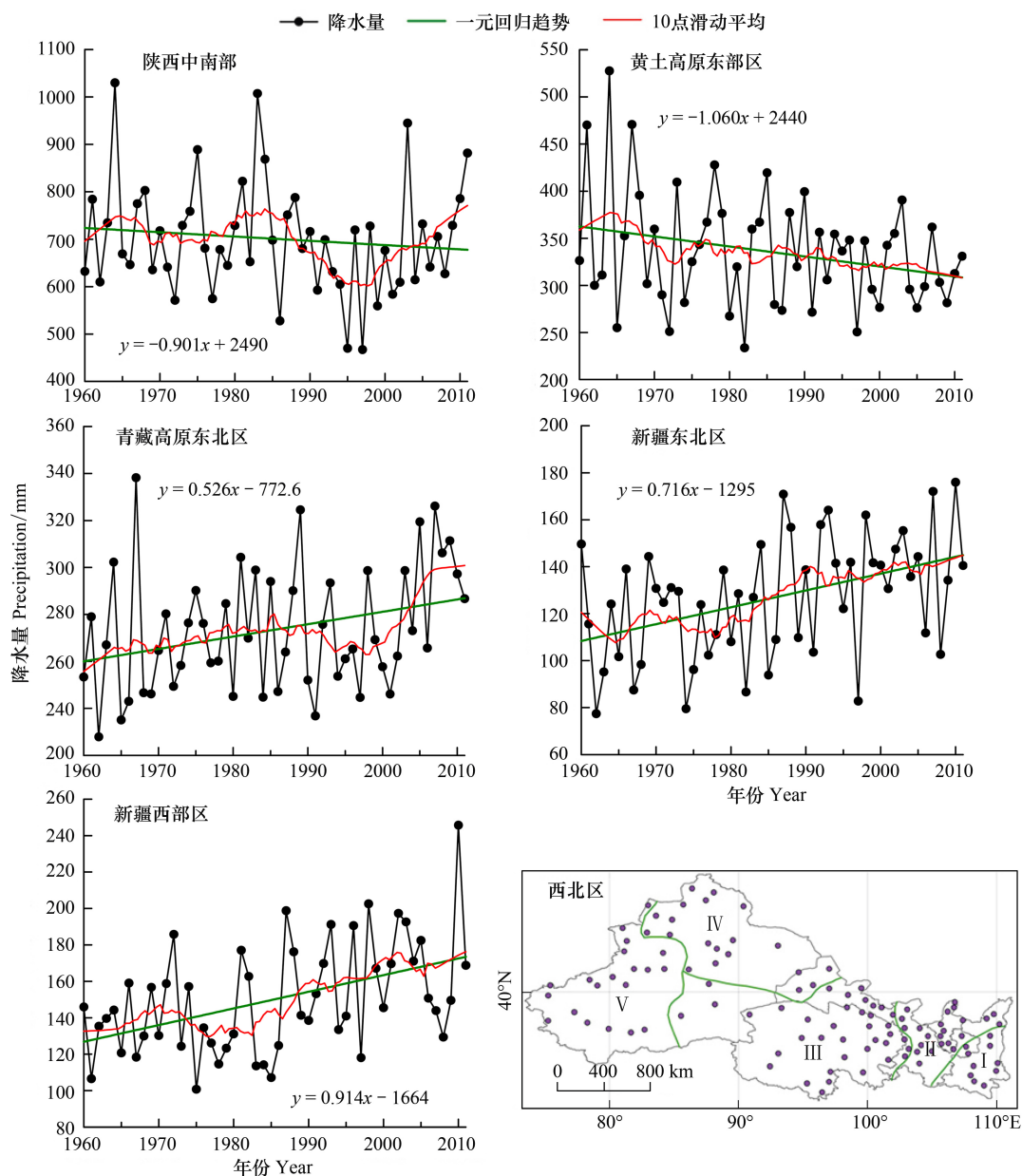


图 6 1960—2011 年西北不同气候区降水量年际变化及分区

Fig.6 Annual variation of the annual precipitation for different climatic zones and subareas in Northwest China during 1960—2011

3 极端干旱变化

3.1 极端干旱年际变化

极端干旱的年际变化统计方法是:计算逐月份地表湿润指数的标准化变量,然后分别计算每一年月地表湿润指数的标准化变量小于等于-0.5的月数,作为该年极端干旱发生的频率^[17]。图7是1960—2011年西北全区与不同自然区极端干旱年际变化趋势。由图7可见,1960—2011年,西北全区极端干旱发生频率的平均值为3.8月/a,气候变化倾向率总体上表现出明显的下降趋势,平均年下降0.011月。不同年代也存在一定差异:20世纪60年代到80年代中期变化趋势比较平稳,且大部分都在平均值之上,说明80年代中期以前极端干旱发生频率以正距平为主;80年代中期到90年代表现出明显下降趋势;90年代到90年代末期又表现出明显攀升趋势;2000年以来又表现出显著下降趋势。虽然20世纪80年代中期以来极端干旱发生频率波动较大,即表现出了“下降—上升—下降”趋势,但总体上都在平均值之下波动变化,说明了西北全区80年代中期以来极端干旱发生频率有所下降。

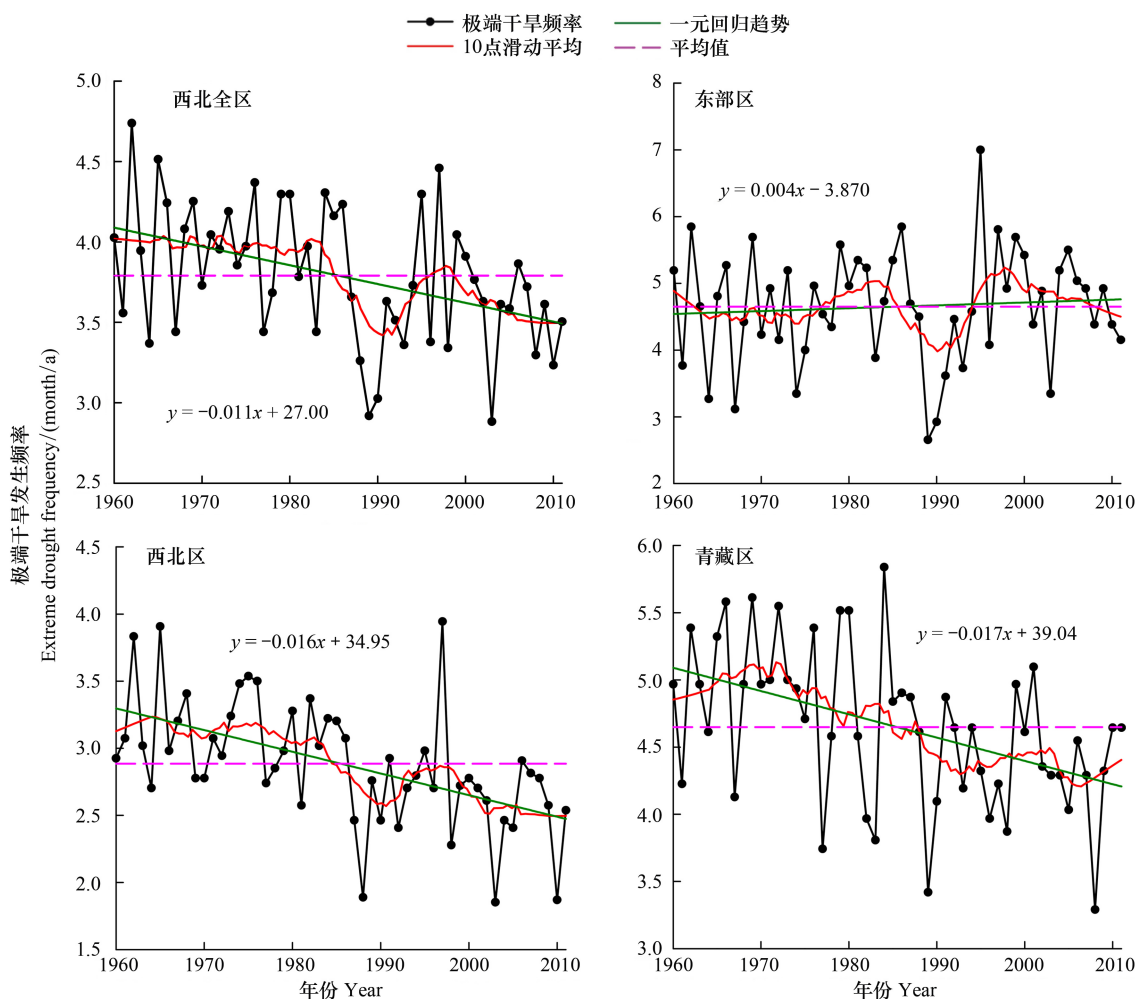


图7 1960—2011年西北地区极端干旱发生频率年际变化趋势

Fig.7 Annual variation of the extreme drought frequency in Northwest China during 1960—2011

不同自然区极端干旱发生频率也有一定的差异,东部区极端干旱发生频率平均值为4.7月/a(图7),气候变化倾向率总体上表现出微弱上升趋势,平均每年上升0.004月。20世纪70年代中期以前变化趋势较为平稳;70年代中期到80年代初期表现出明显上升趋势;80年代初期到90年代末期变化幅度较大即表现出显著地先下降后上升趋势;2000年以来又呈下降趋势。可以看出虽然总体上东部区极端干旱发生频率表现出

上升趋势,但 2000 年以来该区极端干旱发生频率还是有所缓解。

1960 年以来,西北区极端干旱发生频率平均值为 2.9 月/a(图 7),气候变化倾向率呈显著下降趋势,平均每年下降 0.016 月,下降幅度大于西北全区。20 世纪 80 年代中期以前变化趋势较为平稳,但大部分都在平均值之上,说明在此之前极端干旱发生频率较大;80 年代初期到 90 年代末期表现出明显的先下降后上升趋势;2000 年以来则为显著下降趋势。总体上 80 年代中期以来极端干旱发生频率大部分都在平均值以下,尤其是 90 年代末期以来下降趋势较为显著,说明了西北区 90 年代末期以来极端干旱发生频率大有改善。

青藏区近 52 年来极端干旱发生频率平均值为 4.6 月/a(图 7),气候变化倾向率呈明显下降趋势,平均每年下降 0.017 月,在 3 个自然区中下降幅度最大。不同的年代依然有差异:20 世纪 60 年代到 70 年代极端干旱发生频率表现出微弱上升趋势;70 年代到 2005 年左右表现出波动下降趋势;2005 年以来该区极端干旱发生频率略有回升趋势。

3.2 极端干旱空间变化

1960 年来,西北全区极端干旱年际变化也表现出不同的空间差异(图 8),总体上该区大部分地区极端干旱发生频率呈减少趋势。根据西北地区极端干旱发生频率变化的空间差异,也可将研究区划分为 3 个部分:(1)明显减少区,即极端干旱发生频率减少最明显的区域。该区主要包括天山山脉以北的北疆地区、阿尔泰山西侧、昆仑山脉东南部、巴颜喀拉山脉附近、唐古拉山北部以及河西走廊等地区。极端干旱变化倾向率在 -0.7 — -0.2 月/10a 之间,其中天山山脉北部的奇台气象站变化倾向率最大,达到 -0.7 月/10a。(2)轻度减少区,即极端干旱发生频率缓慢减少的区域。该区主要包括天山山脉以南的南疆地区、祁连山脉以西巴颜喀拉山脉以东的地区以及黄土高原以南秦岭山脉以北的陕西中部地区。极端干旱变化倾向率在 -0.2 — 0.0 月/10a 之间。(3)增加区,即极端干旱发生频率继续增加的区域。该区主要包括甘肃东南部大部分地区、宁夏全部、秦岭山脉以南以及黄土高原以北地区。极端干旱变化倾向率在 0.00 — 0.42 月/10a 之间,其中甘肃东南部榆中气象站变化倾向率最大,达到 0.42 月/10a。说明西北东部区大部分地区极端干旱发生频率是呈增加趋势,而其他两个自然区呈减少趋势。极端干旱变化的 3 个部分与以上将西北地区降水量变化划分的 3 个部分基本相对应,也进一步说明降水量的变化对极端干旱发生频率的变化有非常好的应对关系。

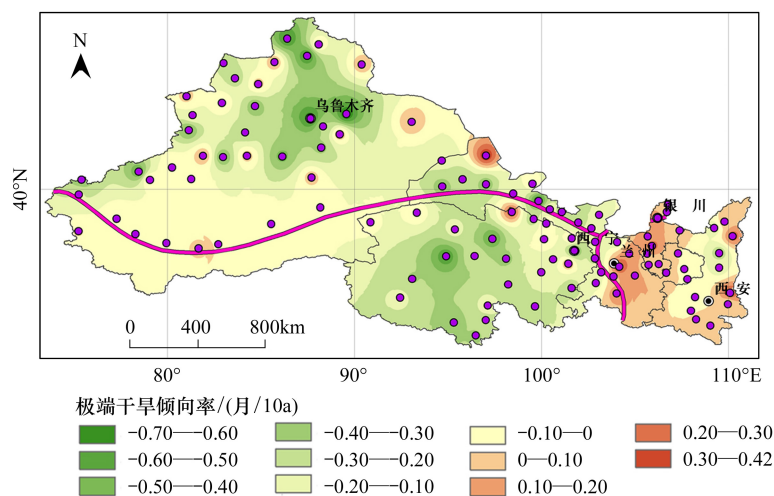


图 8 1960—2011 年西北地区极端干旱倾向率的空间变化

Fig.8 Spatial distribution of change trends of the extreme drought frequency in Northwest China during 1960—2011

4 极端干旱发生频率的影响因素分析

极端干旱变化在很大程度上取决于降水的变化,而降水又受到各种要素综合作用的影响,首先大气环流对局地的降水起到了基础性的作用,其次地理位置及水汽输送对降水的影响比较显著,此外下垫面如地形等

对降水量的空间分布又有一定调节作用。本文选取了降水量、无雨总日数及平均气温,采用多元回归分析方法来研究极端干旱发生频率与影响因子之间的相关性,以及影响其变化的主导因素。从极端干旱发生频率与气候因子的偏相关系数(表2)看,降水量和平均气温与极端干旱发生频率负相关,这些气候因素的增加会对极端干旱发生频率的减少起着非常重要的作用,而总无雨日数与极端干旱发生频率正相关,即总无雨日数的增加会导致极端干旱发生频率的增加,反之减少。

从气候因子的变化趋势(表3)看,不同气候因子变化趋势及其显著程度不同,进而对极端干旱发生频率的影响也不同。西北全区,降水量和平均气温增加1个单位,极端干旱发生频率分别减少0.005、0.189月/a,总无雨日数增加一个单位,极端干旱发生频率减少0.032月/a,但降水量和总无雨日数的变化趋势都没有通过显著性检验,而平均气温的增加趋势显著,因此平均气温是影响西北全区极端干旱发生频率减少的主要因素。东部区,降水量和平均气温增加1个单位,极端干旱发生频率分别减少0.002、0.033月/a,总无雨日数增加一个单位,极端干旱发生频率增加0.036月/a,且总无雨日数增加趋势的显著性最强,因此总无雨日数的增加也是影响该区极端干旱发生频率增加的主要因素。西北区,降水量和平均气温增加1个单位,极端干旱发生频率分别减少0.010、0.067月/a,总无雨日数减少一个单位,极端干旱发生频率减少0.034月/a,极端干旱发生频率与降水量的相关系数、降水量变化趋势都通过了0.01的显著性检验,因此降水量增加是影响该区极端干旱发生频率减少的主要因素。青藏区,降水量和平均气温增加1个单位,极端干旱发生频率分别减少0.0、0.182月/a,而总无雨日数减少1个单位,极端干旱发生频率减少0.054月/a,且平均气温的增加趋势通过了0.001的显著性检验,因此平均气温的增加是影响该区极端干旱发生频率减少的主要因素。

表2 极端干旱发生频率与气象要素的多元回归系数

Table 2 Multivariate regression coefficients between meteorological elements and the extreme drought frequency in Northwest China

自然区 Natural region	降水量 Precipitation	平均气温 Average temperature	总无雨日数 Rainless days	复相关系数 Multiple correlation coefficient
西北全区 Northwest China	-0.005	-0.189 **	0.032 *	0.711
东部区 Eastern region	-0.002	-0.033	0.036 *	0.592
西北区 Northwestern region	-0.010 **	-0.067	0.034 **	0.848
青藏区 Qinghai-Tibet region	0.000	-0.182	0.054 **	0.657

*、**分别表示通过0.05、0.01的置信度检验

表3 气象要素的变化倾向率

Table 3 Change trends of the meteorological elements

自然区 Natural region	降水量 Precipitation/(mm/a)	平均气温 Average temperature/(°C/a)	总无雨日数 Rainless days(d/a)
西北全区 Northwest China	0.330	0.023 ***	0.022
东部区 Eastern region	-0.874	0.018 **	0.346 ***
西北区 Northwestern region	0.593 **	0.025 ***	-0.107
青藏区 Qinghai-Tibet region	0.577 *	0.031 ***	0.000

*、**、***分别表示通过0.05、0.01、0.001的置信度检验

5 结论

(1) 1960年以来西北全区年降水量平均值为276.1 mm,其变化倾向率呈微弱上升趋势,平均每年上升0.17 mm;西北东部区降水量表现出明显下降趋势,而西北区和青藏区则表现为显著上升趋势。

(2) 根据西北地区年降水量变化的空间差异,可将研究区划分为3个部分:①明显增加区,降水量变化倾向率在0.5—2.9 mm/a之间。②轻度增加区,降水量变化倾向率在0.0—0.5 mm/a之间。③减少区,降水量变化倾向率在-3.9—0.0 mm/a之间。

(3) 近52年来西北全区极端干旱发生频率的平均值为3.8月/a,气候变化倾向率总体上表现出明显的下

降趋势,平均年下降 0.011 月;西北不同自然区除东部区外其他两个自然区极端干旱发生频率也表现出显著地下降趋势。

(4)根据西北地区极端干旱发生频率变化的空间差异,也可将研究区划分为 3 个部分:①明显减少区,极端干旱变化倾向率在 -0.2 — -0.7 月/10a 之间。②轻度减少区,极端干旱变化倾向率在 -0.2 — 0.0 月/10a 之间。③增加区,极端干旱变化倾向率在 0.00 — 0.42 月/10a 之间。

(5)极端干旱发生频率与降水量和平均气温表现出负相关性,与无雨总日数呈显著的正相关性。

参考文献 (References):

- [1] Haeberli W, Hoelzle M, Paul F, Zemp M. Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps. *Annals of Glaciology*, 2007, 46(1): 150-160.
- [2] IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis; Summary for Policymakers. Geneva, Switzerland: IPCC, 2013:1-27.
- [3] Changnon S A, Pielke Jr R A, Changnon D, Sylves R T, Pulwarty R. Human factors explain the increased losses from weather and climate extremes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(3): 437-442.
- [4] Mantou M J, Della-Marta P M, Haylock M R, Hennessy K J, Nicholls N, Chambers L E, Collins D A, Daw G, Finet A, Gunawan D, Inape K, Isobe H, Kestin T S, Lefale P, Leyu C H, Lwin T, Maitrepierre L, Ouprasitwong N, Page C M, Pahalad J, Plummer N, Salinger M J, Suppiah R, Tran V L, Trewin B, Tibig I, Yee D. Trend in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998. *International Journal of Climatology*, 2001, (1): 269-284.
- [5] Easterling D R, Evans J L, Groisman P Ya, Karl T R, Kunkel K E, Ambenje P. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(3): 417-425.
- [6] 马柱国,符淙斌,任小波,杨赤. 中国北方年极端温度的变化趋势与区域增暖的联系. *地理学报*, 2003, 58(增刊): 11-20.
- [7] 王素萍,段海霞,冯建英. 2014 年春季全国干旱状况及其影响与成因. *干旱气象*, 2014, 32(3): 491-496.
- [8] 汪宝龙,张明军,魏军林,王圣杰,马潜,李小飞. 近 50a 气温和降水极端事件的变化特征. *自然资源学报*, 2012, 27(10): 1720-1733.
- [9] 程肖侠,方建刚,雷向杰. 陕西盛夏极端降水频次及其与全球海温的遥相关研究. *干旱气象*, 2014, 32(1): 38-45.
- [10] 严中伟,杨赤. 近几十年中国极端气候变化格局. *气候与环境研究*, 2000, 5(3): 267-272.
- [11] 江志红,丁裕国,陈威霖. 21 世纪中国极端降水事件预估. *气候变化研究进展*, 2007, 3(4): 202-207.
- [12] 王冀,江志红,丁裕国,张金玲,张霞. 21 世纪中国极端气温指数变化情况预估. *资源科学*, 2007, 1084-1092.
- [13] 翟盘茂,潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化. *地理学报*, 2003, 58(增刊): 1-10.
- [14] 陈少勇,王劲松,郭俊庭,芦旭东. 中国西北地区 1961—2009 年极端高温事件的演变特征. *自然资源学报*, 2012, 27(5): 832-844.
- [15] 陈少勇,王劲松,任燕,乔立. 近 49 年中国西北地区极端低温事件的演变特征. *高原气象*, 2011, 30(5): 1266-1273.
- [16] 侯威,杨萍,封国林. 中国极端干旱事件的年代际变化及其成因. *物理学报*, 2008, 57(6): 3932-3940.
- [17] 马柱国,华丽娟,任小波. 中国近代北方极端干旱事件的演变规律. *地理学报*, 2003, 58(增刊): 69-74.
- [18] 贺晋云,张明军,王鹏,王圣杰,王兴梅. 近 50 年西南地区极端干旱气候变化特征. *地理学报*, 2011, 66(9): 1179-1190.
- [19] 周俊菊,石培基,师玮. 1960—2009 年石羊河流域气候变化及极端干旱事件演变特征. *自然资源学报*, 2012, 27(1): 143-153.
- [20] 鲍艳,吕世华,陆登荣,侯瑞卿. RegCM3 模式在西北地区的应用研究 I:对极端干旱事件的模拟. *冰川冻土*, 2006, 28(2): 164-174.
- [21] New M, Hewitson B, Stephenson D B, Tsiga A, Kruger A, Manhique A, Gomez B, Coelho C A S, Masisi D N, Kululanga E, Mbambalala E, Adesina F, Saleh H, Kanyanga J, Adosi J, Bulane L, Fortunata L, Mdoka M L, Lajoie R. Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa. *Journal of geophysical Research*, 2006, 111, D14102, doi: 10.1029/2005JD006289.
- [22] You Q, Kang S, Aguilar E, Pepin N, Flügel W A, Yan Y, Xu Y, Zhang Y, Huang J. Changes in daily climate extremes in China and its connection to the large scale atmospheric circulation during 1961-2003. *Climate Dynamics*, 2010, 36: 2399-2417.
- [23] 黄小燕,王小平,王劲松,王圣杰. 中国大陆 1960—2012 年持续干旱日数的时空变化特征. *干旱气象*, 2014, 32(3): 326-333.
- [24] Wang H, Chen Y, Chen Z. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the arid region, northwest of China, during 1960 - 2010. *Hydrological Processes*, 2012, doi: 10.1002/hyp.9339.
- [25] Wang H, Chen Y, Xun S, Lai Y, Fan Y, Li Z. Changes in daily climate extremes in the arid area of northwestern China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, doi: 10.1007/s00704-012-0698-7.
- [26] Wang B, Zhang M, Wei J, Wang S, Li S, Ma Q, Li X, Pan S. Changes in extreme events of temperature and precipitation over Xinjiang, northwest China, during 1960- 2009. *Quaternary International*, 2013, 298: 141-151.

- [27] 杨志刚, 杜军, 林志强. 1961—2012 年西藏色林错流域极端气温事件变化趋势分析. 生态学报, 2015, 35(3): 1-10.
- [28] Dai A, Trenberth K E, Qian T. A global data set of palmer drought severity index for 1870—2002: Relations hip with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5: 1117- 1130.
- [29] 邢文渊, 马雷凯, 肖继东, 杨志华, 张旭. 北疆地区地表湿润指数变化分析. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(4): 9-12.
- [30] 刘波, 马柱国. 过去 45 年中国干湿气候区域变化特征. 干旱区地理, 2007, 30(1): 7-15.
- [31] 马柱国, 邵丽娟. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系. 大气科学, 2006, 30(3): 464-474.
- [32] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 杨勤业. 青藏高原近 30 年气候变化趋势. 地理学报, 2005, 60(1): 3-11.
- [33] Gavilán P, Castillo-Llanque F. Estimating reference evapotranspiration with atmometers in a semiarid environment. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(3): 465-472.
- [34] 贾文雄, 何元庆, 王旭峰, 李宗省. 祁连山及河西走廊潜在蒸发量的时空变化. 水科学进展, 2009, 20(2): 159-167.
- [35] 张明军, 李瑞雪, 贾文雄, 王旭峰. 中国天山山区潜在蒸发量的时空变化. 地理学报, 2009, 64(7): 798-806.
- [36] 黄玉霞, 李栋梁, 王宝鉴, 何金梅. 西北地区近 40 年年降水异常的时空特征分析. 高原气象, 2004, 23(2): 245-252.
- [37] 赵松乔. 中国综合自然地理区划的一个新方案. 地理学报, 1983, 38(1): 1-10.
- [38] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 张国威, 丁永健, 胡汝冀 康尔泗. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164.
- [39] North G R, Bell T L, Cahalan R F. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(7): 699-706.
- [40] 王澄海, 王芝兰, 崔洋. 40 余年来中国地区季节性积雪的空间分布及年际变化特征. 冰川冻土, 2009, 31(2): 301-310.