

刘珂, 姜大膀. 2014. 中国夏季和冬季极端干旱年代际变化及成因分析 [J]. 大气科学, 38 (2): 309–321, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12219. Liu Ke, Jian Dabang. 2014. Interdecadal change and cause analysis of extreme summer and winter droughts over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 309–321.

中国夏季和冬季极端干旱年代际变化及成因分析

刘珂^{1,2} 姜大膀^{1,3}

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029

摘 要 依据 1961~2009 年中国区域 540 个气象站的夏、冬季气温和降水数据, 首先采用气候变化趋势转折判别模型 (简称 PLFIM) 分析了中国区域 8 个分区夏、冬季气温和降水的年代际变化, 而后利用 PDSI 干旱指数研究了夏、冬季极端干旱在年代际尺度上的时空变化特征及其成因。结果表明: 1961~2009 年中国夏季极端干旱发生率北方大于南方, 冬季则为在东部多而在西部少。夏季和冬季极端干旱发生概率在最后一次年代际转折后都呈增加趋势。在区域尺度上, 夏季东北、华北和西北地区增加明显, 冬季东北、华北、华南、西南地区增加显著。其中, 降水在 20 世纪 90 年代以前的极端干旱变化中起主导作用, 而后由于气候变暖所引起的极端干旱增加趋势逐渐增大, 与降水变化的作用相互叠加。

关键词 PDSI 干旱指数 极端干旱 年代际变化

文章编号 1006-9895(2014)02-0309-13

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12219

Interdecadal Change and Cause Analysis of Extreme Summer and Winter Droughts over China

LIU Ke^{1,2} and JIANG Dabang^{1,3}

1 Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Climate Change Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Temperature and precipitation data from 540 meteorological stations in China from 1961 to 2009, and the piecewise-linear fitting model (PLFIM) was used to analyze the changes in summer and winter temperature and precipitation at the interdecadal timescale. The Palmer drought severity index (PDSI) was chosen to examine the frequency of extreme droughts. Consequently, the interdecadal changes and spatial distribution characteristics of extreme droughts were analyzed for summer and winter. Furthermore, we considered the effect of temperature and precipitation on the occurrence probability of extreme droughts. The results suggest that from 1961 to 2009, extreme droughts were more frequent in northern China than in southern China during summer, whereas they were more frequent in eastern China than in western China during winter. After the last trend change, the occurrence probabilities of extreme summer and winter droughts increased. At the regional scale, the probability of extreme summer droughts increased in Northeast China, North China, and Northwest China, whereas the probability of extreme winter droughts significantly increased in Northeast China, North China, South China, and Southwest China. The analysis of the causes of the variations in the

收稿日期 2012-12-16, 2013-05-22 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2012CB955401, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201006022, 国家自然科学基金项目 41175072

作者简介 刘珂, 女, 1984 年出生, 博士研究生, 主要从事干旱监测和预估方面研究。E-mail: liuke@mail.iap.ac.cn

occurrence probabilities of extreme droughts showed that the precipitation change controlled the trend in the occurrence probability of extreme droughts before the 1990s. Subsequently, climate warming led to an increasing trend in the occurrence probability of extreme droughts, whereas the temperature and precipitation changes controlled the occurrence probability of extreme droughts over China.

Keywords PDSI (Palmer drought severity index), Extreme drought, Interdecadal change

1 引言

自工业化革命以来,全球气温呈上升趋势,20世纪80年代以来的增温尤为显著(Trenberth et al., 2007),虽然降水变化相对于气温而言不具有显著的趋势性变化特征,但在不同地区,同样也在经历了深刻变化(任国玉等, 2005; Zhai et al., 2005; Ding et al., 2007; Trenberth et al., 2007; 陈发虎等, 2011)。伴随着气温和降水变化,干湿状况的时空格局也在改变,同时极端干旱和极端湿润等各种极端天气和气候事件也随之发生了明显变化。在各类极端气候灾害中,干旱通常是造成经济损失最多的(Wilhite, 2000)。在中国,据统计每年平均受旱面积为 $0.2 \times 10^8 \text{ hm}^2$ (约3亿亩)(黄荣辉和周连童, 2002),而旱灾面积约占各种气象灾害总面积的60%(袁文平和周广胜, 2004)。自1950年以来,我国不同程度干旱的发生面积在气候变暖背景下总体上都呈现出增加趋势,特别是在东北和华北等北方地区(翟盘茂和邹旭恺, 2005; Zou et al., 2005; 马柱国和符淙斌, 2006),相对于一般干旱而言,极端干旱所造成的影响和损失更为严重。鉴于极端干旱的极大危害性,对极端干旱进行专门研究有重要意义。

干旱的本质是降水和蒸发相互平衡的问题。其中,气温和降水变化都会对干旱产生影响,前者主要是通过影响蒸散发过程来实现,而后者则是直接改变地表的可用水量。近几十年来,中国气候在整体上表现为气温呈增加趋势,降水变化趋势不明显(任国玉等, 2005),干旱变化则表现出区域性,如在干旱区有变湿趋势,在半干旱区有干旱化趋势(李新周等, 2006)。这说明气温和降水变化对中国各区域干旱的影响并不一致。因此,有必要对各区域干旱变化中气温和降水的影响进行分析,以识别两者的作用。

针对以上提出的问题,同时考虑东亚地区季风气候特征明显,夏季(6、7、8月)高温多雨,冬季(12、1、2月)寒冷少降水,因此本文对夏、冬两季的气温、降水及极端干旱变化进行了研究。文

章首先对中国各区域气温和降水进行趋势分析;在此基础上,利用综合考虑气温和降水作用的Palmer干旱指数(Palmer Drought Severity Index, 简称PDSI)定义极端干旱,并依此对中国区域夏、冬两季极端干旱发生的时空变化特征进行分析;最后,对各区域极端干旱变化趋势中的气温和降水作用进行成因分析,以期评估气温和降水变化对极端干旱的影响,为未来气候变暖下的极端干旱的可能变化提供参考依据。

2 资料、极端干旱指标定义、分析方法

2.1 资料

本文所使用的数据包括:中国气象局国家气候中心提供的中国区域540个气象观测站的1961~2009年逐日气温和降水数据,这些站点的缺测记录均小于5%,研究时段内个别站点的少量缺测记录采用相邻5日的平均值来代替。为方便描述区域尺度上的差异,兼顾季风气候特征,参照施晓辉和徐祥德(2006)的分区标准将中国大陆划分为8个自然地理区域,它们分别是(1)东北、(2)华北、(3)长江中下游及淮河流域(简称江淮)、(4)华南、(5)西南、(6)高原东部、(7)西北西部、(8)西北东部,540个站点以及8个分区的具体分布情况详见图1。

2.2 极端干旱指标定义

PDSI是在20世纪60年代提出的一种衡量干旱状况的干旱指数(Palmer, 1965),它所定义的干旱为在数月或数年内,水分供应持续低于气候上所期望的水分供给。目前PDSI已被广泛地应用在中国区域干旱的评估和预估工作中(安顺清和邢久星, 1985; 卫捷和马柱国, 2003; 卫捷等, 2003; 李新周等, 2006; 苏明峰和王会军, 2006; 王劲松等, 2007; 姜大膀等, 2009)。本文中使用的PDSI指数是由安顺清和邢久星(1985)利用中国各地区的历史资料,分别计算不同持续期的最早时段的距平累计值,划分干旱等级,并确定干旱等级与水分距平累积量及其持续时间之间的关系,最终得到适合我

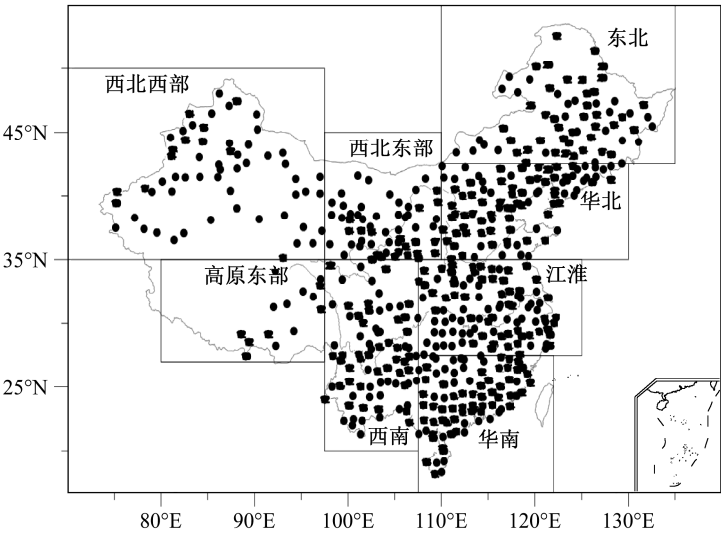


图 1 中国区域 540 个地面气象站分布及分区
Fig. 1 Spatial distribution of 540 stations in China and the domains of eight regions

国实际情况的 PDSI 计算公式。修正后的 PDSI 在中国干旱监测中已得到应用（卫捷和马柱国，2003；卫捷等，2003；王劲松等，2007），有关 PDSI 数值所表示的干湿等级如表 1 所示。当 $PDSI \leq -3.0$ 时，被视为严重或极端干旱，这里我们只计算了 $PDSI \leq -3.0$ 时的干旱状况，下文为叙述方便把 $PDSI \leq -3.0$ 统称为极端干旱。

表 1 PDSI 指数干湿等级

Table 1 Palmer index vs. dryness/wetness grads			
指数值	等级	指数值	等级
≥ 4.00	极端湿润	$-1.00 \sim -1.99$	轻微干旱
$3.00 \sim 3.99$	严重湿润	$-2.00 \sim -2.99$	中等干旱
$2.00 \sim 2.99$	中等湿润	$-3.00 \sim -3.99$	严重干旱
$1.00 \sim 1.99$	轻微湿润	≤ -4.00	极端干旱
$0.99 \sim 0.99$	正常		

2.3 分析方法

气象要素序列整体上的线性趋势往往并不能描述出其年代际变化特征。Tomé and Miranda（2004）提出的气候变化趋势转折判别模型（Piecewise Linear Fitting Model，简称 PLFIM），是给定趋势转折点的最小间隔（文中使用的是 11 年），然后判断前后两个连续分段的线性趋势是否达到或满足趋势转折判别条件，最后用统计分析原则来确定满足趋势转折条件的最佳分段组合，从而得到各时间段上的线性变化趋势。本文利用 PLFIM 模型对气温、降水和极端干旱发生概率的年代际变化进行了分析。

文中利用 PLFIM 模型计算了 1961~2009 年中

国大陆 8 个区域夏、冬季平均气温、降水和极端干旱发生概率变化的趋势转折点，以及每个区域在每个转折时段内的变化趋势；同时也计算了各站点 1961~2009 年极端干旱的发生率。其中，各区域极端干旱发生概率为各区域内发生极端干旱站点的加权面积占该区域总面积的百分比。各区域夏季或冬季平均的气温、降水和极端干旱发生概率的具体计算方法为：将中国区域划分为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ （纬度 $\times$ 经度）的网格矩阵，对每个网格内各站点的气温、降水量和 $PDSI \leq -3.0$ 的站点数求算数平均，最后对 8 个区域内的每个网格进行面积加权求得各区域的气温、降水以及极端干旱发生概率，而极端干旱发生率为各站点发生极端干旱的年数占总年数的百分比。在对极端干旱发生概率进行成因分析时，共计算了三种情形下的夏、冬季极端干旱发生概率变化序列，分别为：（1）原始的夏、冬季平均降水和气温观测序列（情形 1）；（2）原始的夏、冬季平均降水序列和去掉年代际趋势的夏、冬季气温变化序列（情形 2）；（3）原始的夏、冬季平均气温序列和去掉年代际趋势的夏、冬季降水变化序列（情形 3）。其中，气温和降水年代际趋势为该要素的 11 年滑动平均，去除气温和降水年代际趋势旨在检测气温和降水年代际变化对极端干旱发生概率的影响。

3 中国夏、冬季气温和降水年代际变化

3.1 夏季气温和降水年代际变化

图 2 是 8 个区域夏季气温和降水不同转折时段

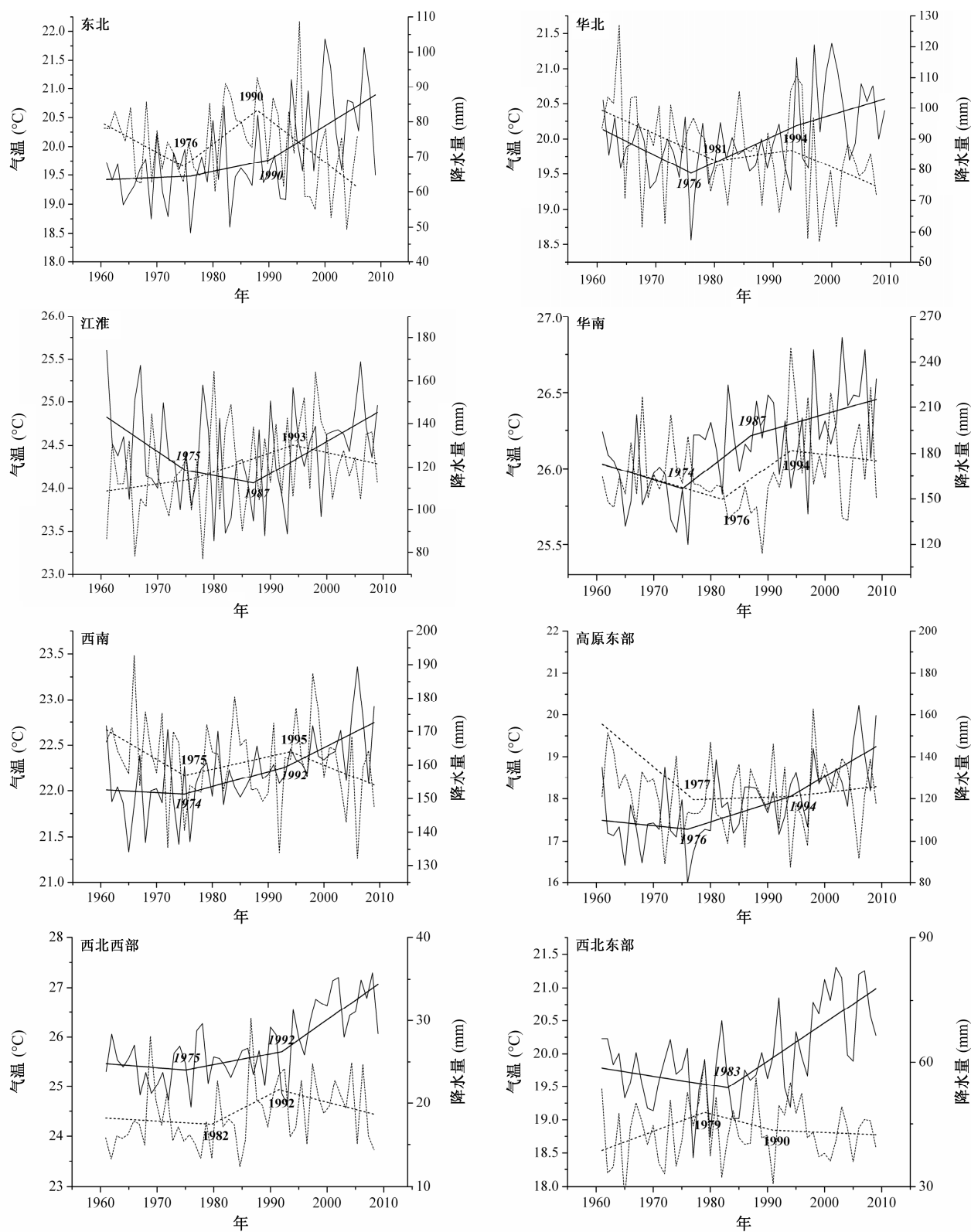


图2 1961~2009年8个区域夏季气温(实线)和降水(虚线)变化及其各转折时段的降水线性变化趋势

Fig. 2 Changes of summer temperature (solid lines) and precipitation (dashed lines) during 1961–2009 in eight regions of China and their linear trends in different variation phases

的变化趋势,具体转折年份已在图中标出。在年代际尺度上,在包括东北、华北、江淮、西北西部和西北东部的中国北方地区,除东北之外的夏季气温均经历了 2 次明显的变化过程,即:前期降温后期增温,且增温幅度明显大于降温幅度。就整个时段而言,东北和西北东部的增温幅度最大($>1.5^{\circ}\text{C}$),其他地区由于前后变化阶段不同的气温变化趋势,总体增温幅度为 0.5°C 。相对而言,北方夏季降水变化较为复杂,大部分地区都存在先减少再增加再减少 3 个变化阶段,其中西北西部、西北东部和江淮 3 个地区前期减少阶段不明显。总体上,东北和华北夏季降水呈减小趋势,以华北降水减少趋势最为明显,而江淮降水则为明显的增加趋势。

在包括华南、西南和高原东部的南方地区,夏季气温在 1961~2009 年间主要存在 2 个阶段,前期变化不明显或略呈减小阶段和后期增加阶段。整个时段最大增温幅度为 0.5°C (位于高原东部地区),其中华南增温最不明显。同时南方夏季降水的变化与其气温变化具有类似的变化特征,且前期降水的减小趋势大于后期增加趋势(不包括华南地区)。华南降水变化整体上呈增加趋势,其他地区则呈减少趋势。

综合各区域夏季气温和降水的年代际变化,可以发现 8 个区域都在 20 世纪 90 年代前后发生了明显的趋势转折。许多地区在此次转折后表现出不同程度的暖干化趋势,其中以中国北方地区的暖干化趋势最为显著。将结果与其他突变检验研究结果相比较,发现东北地区的趋势转折点与丁一汇和张莉(2008)的检测结果一致,东北夏季气温转折点位于 20 世纪 90 年代,降水则都经历了减少至增加再到减少 3 个阶段,再如江淮地区夏季降水在 2000 年前后的趋势转折点与 Zhu et al. (2011) 的突变检测结果较为一致。需要说明的是,由于 PLFIM 检验方法是针对变化趋势进行突变检验,因此检验到的突变点是趋势转折点,但该突变点与均值突变点存在一定的差别,造成这种差异的原因是由检测方法的原理不同所致。如在东北和江淮地区检测到的突变点既是趋势突变点又是均值突变点,而在华北地区 20 世纪 70 年代中期的突变点就是一个趋势突变点,并不是均值突变点。

3.2 冬季气温和降水年代际转折的区域性特征

相对于夏季,冬季气温的增幅更大。图 3 是中国 8 个区域冬季平均气温和降水的变化趋势,1961

至 2009 年,各区域的整体增温幅度均大于 1.5°C ,而东北、华北和高原东部 3 个地区的最大增温幅度更是超过了 2.0°C 。在除江淮外的北方地区,气温年代际变化的总体特征为:前期降温,后期增温,其中 20 世纪 70 年代后期到 90 年代中后期为显著增温阶段,这一阶段的增温幅度与整个时段增温幅度相当。相对于气温,北方地区降水变化的一致性较差,但 20 世纪 90 年代后,北方各区域的降水都为增加趋势。

南方地区冬季气温的变化分为前期不显著降温阶段和后期显著增温阶段,华南和西南地区的趋势转折发生在 20 世纪 80 年代中期,高原东部的转折点位于 20 世纪 90 年代中期。华南和西南地区冬季总体增温幅度为 $0.5\sim 1.5^{\circ}\text{C}$,高原东部地区为 2.0°C 。相对于气温明显的增加趋势,整个时段上华南和高原东部地区的降水在 20 世纪 90 年代以前呈增加趋势,之后呈减小趋势,西南地区则呈持续减少趋势。

综合各区域冬季气温和降水的年代际变化特征,我们可以看到 20 世纪 90 年代之后,北方地区的气温和降水都为增加趋势,南方地区的气温和降水则分别为增加和减少趋势,即北方冬季表现为暖湿趋势,南方冬季为暖干趋势,这种变化趋势与任国玉等(2005)的研究结果较为相似。

4 中国夏、冬季极端干旱变化及成因

在夏季暖干化趋势和冬季北方暖湿化、南方暖干化的大背景下,下面将着重分析中国各区域极端干旱发生的时空变化特征以及气温和降水变化对极端干旱发生的影响。

4.1 中国夏、冬季极端干旱发生率的分布

图 4 是夏、冬季中国极端干旱发生率的分布。夏季, 35°N 以南地区极端干旱发生率较以北地区要低,其中北方的西北中部以及东北地区西部是极端干旱的高发区域;冬季,西北地区极端干旱发生率较低,东北地区极端干旱发生率则最高。总体上,中国夏季极端干旱发生率空间分布呈南北型,冬季呈东西型。

图 5 是情形 2 和 3 下的夏、冬季极端干旱发生率的分布。就季节而言,冬季情形 2 和 3 对应的极端干旱发生率与图 4 所示的实测(系指情形 1,下同)之间的差异要小于夏季;就空间分布而言,两种情形(情形 2 和 3)对应的极端干旱发生率与实

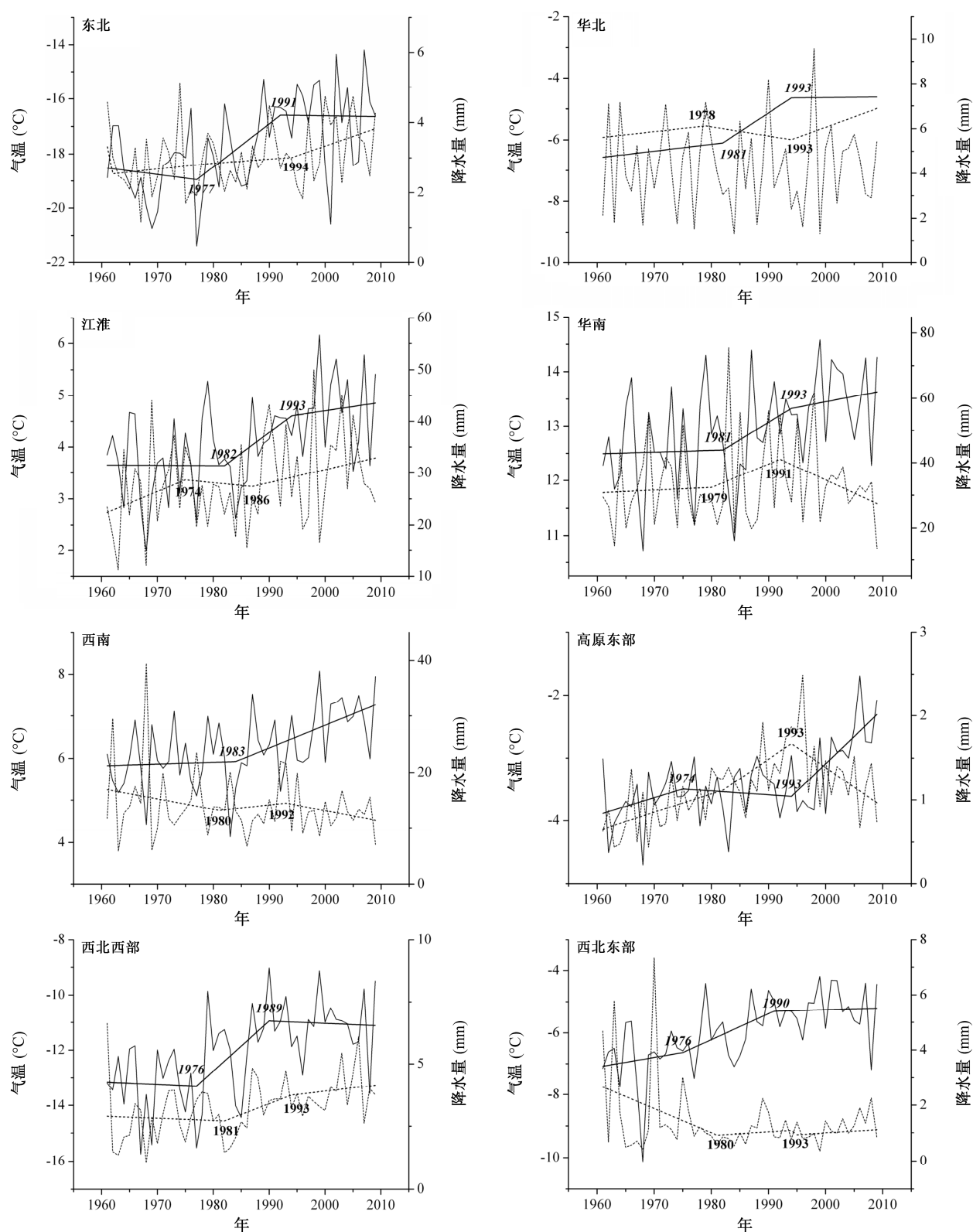


图3 1961~2009年8个区域冬季气温(实线)和降水(虚线)变化及其各转折时段的降水线性变化趋势

Fig. 3 Changes of winter temperature (solid lines) and precipitation (dashed lines) during 1961–2009 in eight regions of China and their linear trends in different variation phases

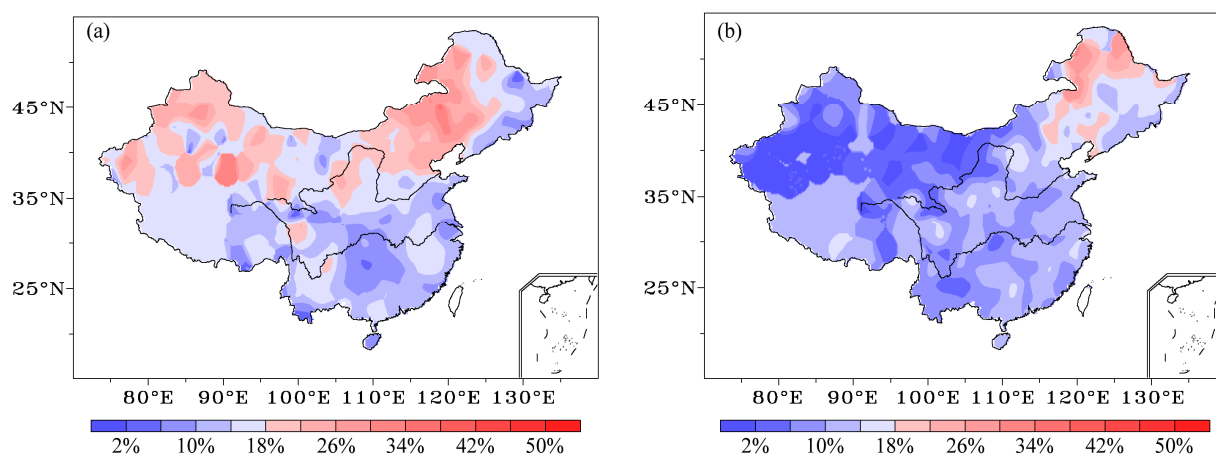


图4 根据1961~2009年观测气温和降水计算的夏(a)、冬(b)季极端干旱发生率

Fig. 4 Spatial distribution of (a) summer and (b) winter extreme drought occurrence probability in China as derived from observed temperature and precipitation during 1961–2009

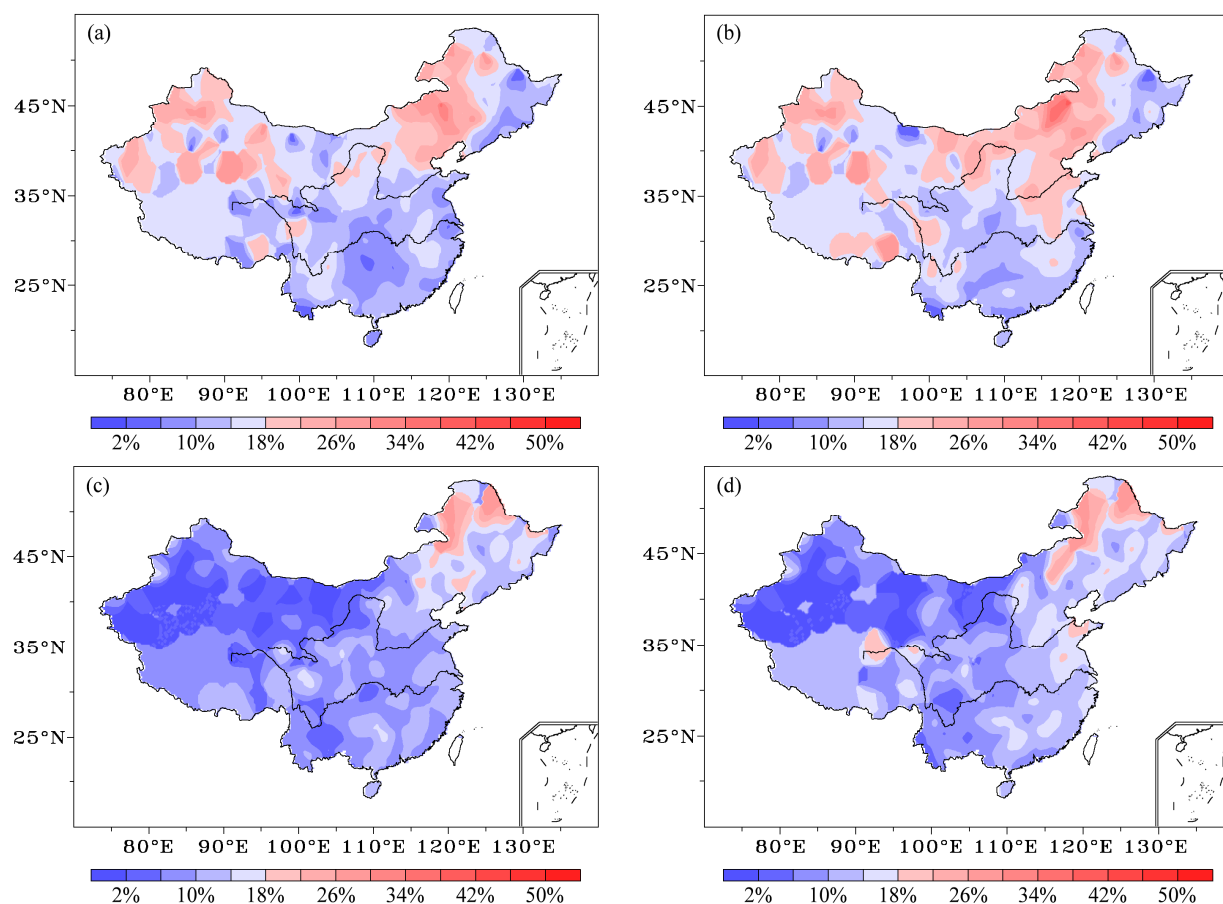


图5 情形2(a, c)和3(b, d)所对应的中国1961~2009年夏(a, b)、冬季(c, d)极端干旱发生率 (情形2: 实际降水变化和去掉年代际变化趋势的气温变化下的极端干旱; 情形3: 实际气温变化和去掉年代际变化趋势的降水变化下的极端干旱)

Fig. 5 Spatial distribution of (a, b) summer and (c, d) winter extreme drought occurrence probability in China under scenarios (a, c) 2 and (b, d) 3 during 1961–2009 (Scenario 2: observed precipitation plus the change of temperature which the decadal trend for the period 1961–2009 was detrended; scenario 3: observed temperature plus the change of precipitation which the decadal trend for the period 1961–2009 was detrended)

测之间的差异在北方地区较大;就两种情形而言,相对于情形 3,情形 2 对应的极端干旱发生率与实测场间差异较小,即气温变化对极端干旱发生率的影响总体上不及降水的影响。

4.2 夏季极端干旱发生概率变化及其成因

从 1961 年到 2009 年,中国 8 个区域夏季极端干旱发生概率均在 1990 年前后发生了明显的趋势性转折,除高原东部地区转为下降趋势外,其他地区的极端干旱发生概率都转变为增加趋势,其中以东北和华北地区的增加趋势最为明显(图 6 折线图)。就整个时段而言,东北、华北、江淮和西北东部地区的极端干旱发生概率呈明显增加趋势,西北西部地区整体呈显著的下降趋势,南方 3 个区域极端干旱发生概率变化呈波动型。

从情形 2 和 3 对应的 8 个区域夏季极端干旱发生概率与实测场之间的差异(图 6 柱状图)可以看出,情形 2 对应的夏季极端干旱发生概率与实测之间差异较小,即气温变化对极端干旱发生率的影响相对较小,极端干旱发生概率主要由降水变化主导。但在 2000 年后,在高原东部以外地区,降水主导的极端干旱发生概率与现实之间的差异(偏少)增大,气温主导的极端干旱发生概率(情形 3)与实测之间差异的数值变得和降水接近,即在 2000 年前降水变化主导各区域极端干旱发生概率;之后,气温变化对夏季极端干旱发生率的影响已不能忽视。具体到区域,2000 年后情形 2 和 3 对应的极端干旱发生概率在东北、华北和西北东部地区较实测都偏少;在江淮、华南、西南和西北西部地区,情形 2 较实测偏少,而情形 3 较实测则偏多。结合 1961 至 2009 年 8 个区域的夏季气温和降水变化趋势,发现东北、华北和西北东部在气温增加、降水减少的大趋势背景下,气温与降水变化的反位相(降水多对应气温低,或者降水少对应气温高)特征使这些区域极端干旱发生概率的增加趋势更加突出,从而导致由单一气温(情形 3)和降水(情形 2)主导的极端干旱发生概率较实测都偏少。在江淮、华南和西北西部地区,降水变化表现为趋势不明显或为增加趋势,气温为升温趋势,即在 these 地区 2000 年后降水的增加趋势在一定程度上掩盖了气温增加导致的极端干旱增加趋势。高原东部地区的极端干旱发生概率则始终由降水主导。

4.3 冬季极端干旱发生概率变化及其成因

1961 到 2009 年,各区域冬季极端干旱发生概

率也在 20 世纪 90 年代发生了线性趋势转折(图 7 折线图)。转折后,位于东部季风区的东北、华北、华南和西南的极端干旱发生概率转变为明显的增加趋势,而位于内陆的西北西部和高原东部地区则转变为明显的减小趋势。在整个时段上,东部的东北、华北、华南和西南四个地区,极端干旱发生概率为增加趋势,西北西部为明显的减少趋势,其他地区变化趋势则不明显。

图 7 的柱状图是情形 2 和 3 下的 8 个区域极端干旱发生概率与实测之间的差异。总体而言,情形 2 和 3 对应的冬季极端干旱发生概率与实测之间的差异都较夏季小,但降水仍然是冬季极端干旱发生概率变化的主导因子,特别是在 2000 年之前。2000 年后,在西北西部和高原东部外的地区,情形 2 对应的极端干旱发生概率与实测之间的差异显著增大,即降水对极端干旱发生概率的主导作用减弱。将各地区极端干旱发生概率变化对应 1961 至 2009 年气温和降水的变化趋势,可以发现 2000 年后降水主导的极端干旱发生概率与实际间的差异增大与冬季的剧烈增温相对应。其中,在东北和华北地区,2000 年后气温的不明显降低和降水的增加虽然有利于极端干旱发生概率减小,但二者的反位相波动变化使极端干旱发生概率增加;而在西南和西北东部地区,冬季气温升高和降水减少有利于极端干旱发生概率增加;华南地区 2000 年后极端干旱发生概率的增加趋势对应着气温的整体升高和降水的整体减少,气温和降水的这种变化特征都有利于极端干旱发生概率增加,但气温主导的极端干旱发生概率(情形 3)比实测偏多,这可能源于该地区各站点之间气温和降水变化较大的差异性。

5 结论

1961~2009 年,中国北方夏季极端干旱发生率要大于南方。在变暖的气候背景下,各区域夏季极端干旱发生概率的年代际变化大都经历了 2 次或者以上的趋势转折,其中距今最近的一次转折发生在 1990 年前后,转折后在除高原东部以外的地区,极端干旱发生概率呈增加趋势,增加趋势显著的有东北、华北和西北地区。在气温和降水两个因子中,降水与夏季极端干旱发生概率之间的对应关系较好,即降水增加,极端干旱发生概率减小,反之增加。在 8 个区域中,高原东部的极端干旱发生概率始终由降水变化主导,在其他区域,20 世纪 90 年

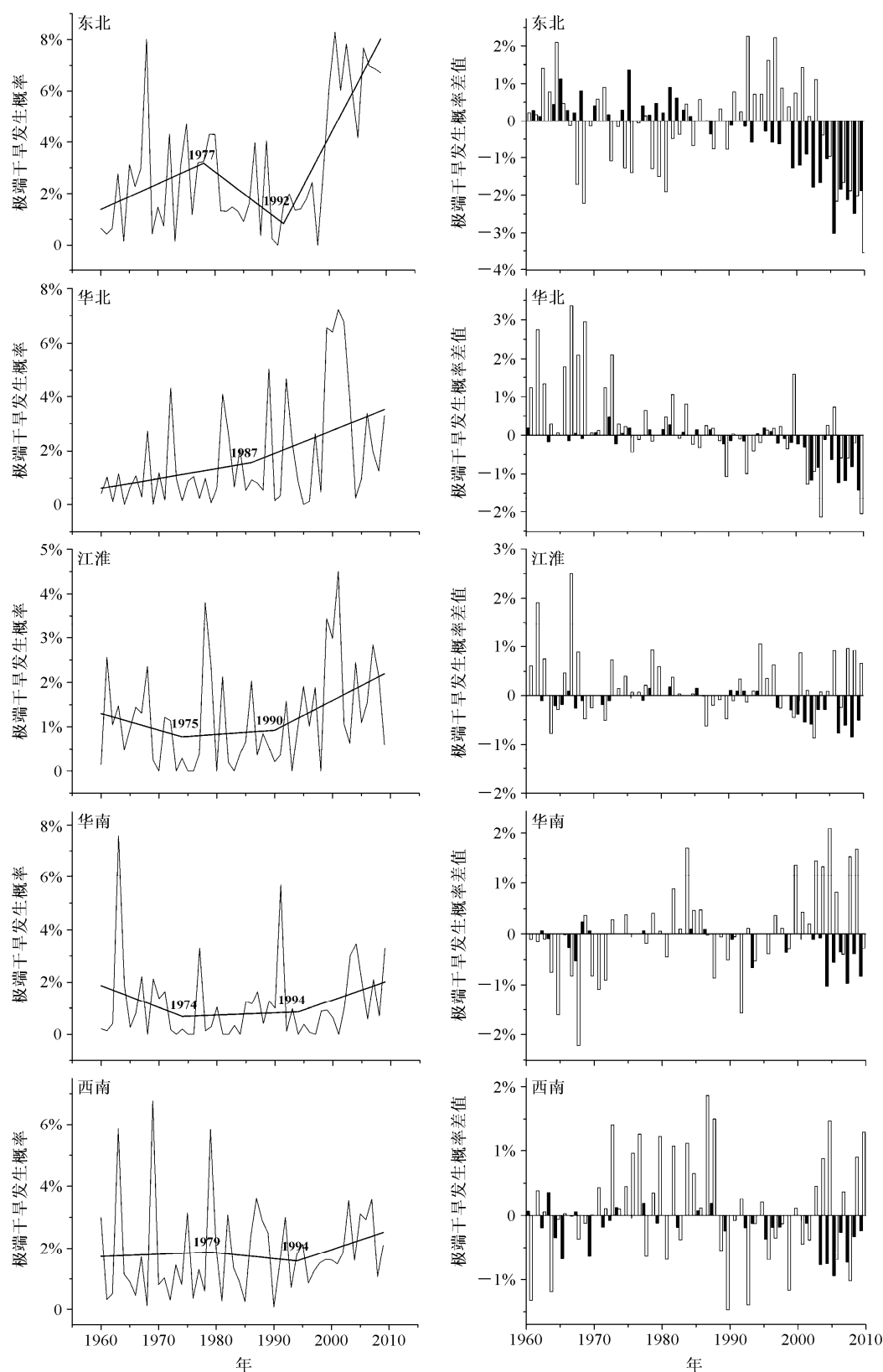


图6 1961~2009年8个区域夏季极端干旱发生概率的变化(左列)和情形2和3下极端干旱发生概率与情形1的差异(右列)及其夏季极端干旱发生概率

Fig. 6 Changes of summer extreme drought occurrence probability in eight regions of China during 1961–2009 as derived from observed temperature and precipitation (left) and the summer extreme drought occurrence probability differences between scenarios 1 and 2 or 3 (right) and their summer extreme drought occurrence probability

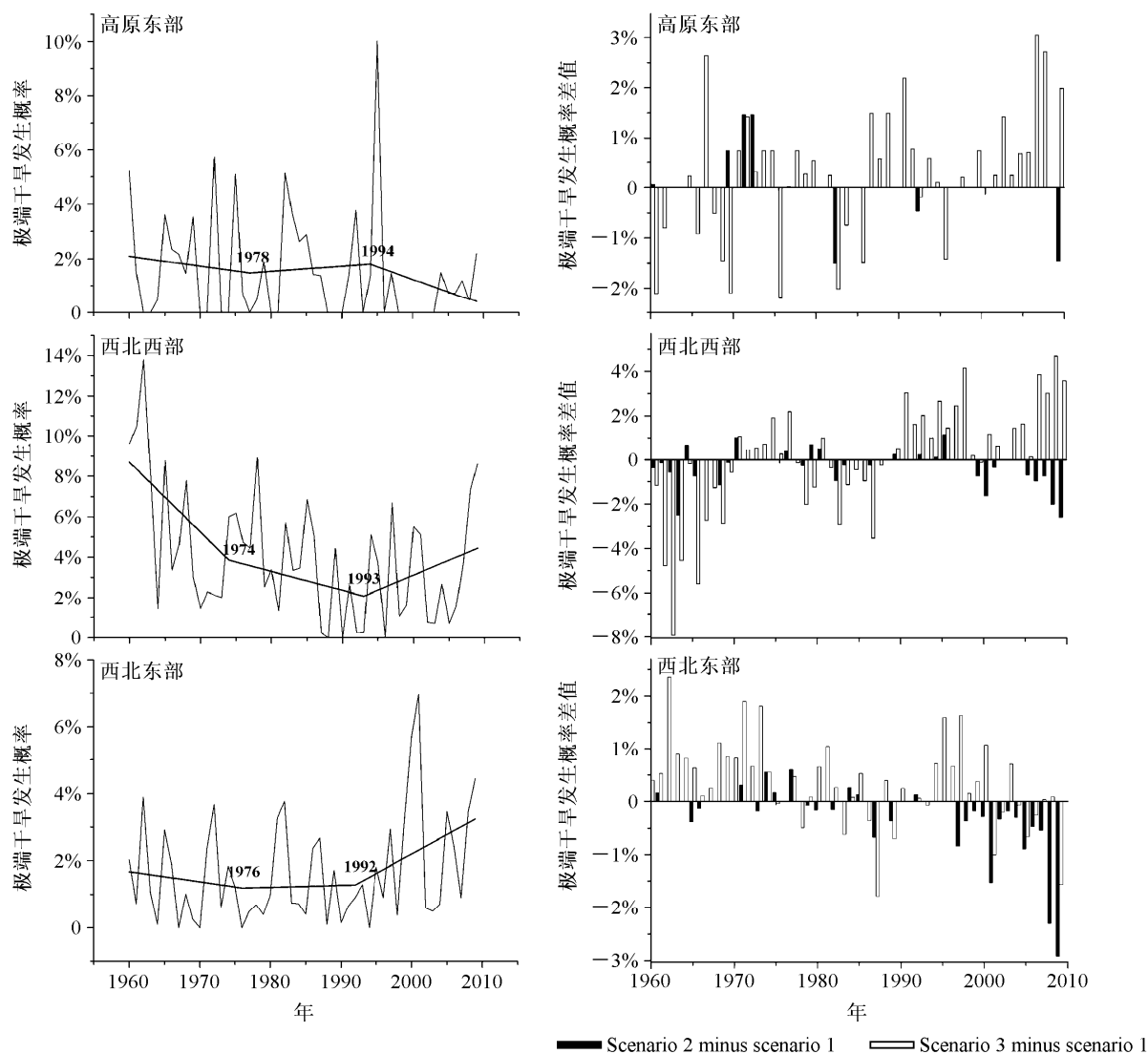


图6 (续)

Fig. 6 (Continued)

代以前降水变化引起的极端干旱发生概率很大程度上掩盖了气温引起的极端干旱发生概率的变化趋势,并主导着实际极端干旱发生概率的变化;20世纪90年代后期以来,夏季增暖引起极端干旱发生概率的增加趋势一方面加剧了由于降水减少带来的极端干旱发生概率的增加趋势,如在华北和东北等地区,同时夏季增暖引起的极端干旱发生概率增加趋势另一方面也削弱了由于降水增加带来的极端干旱发生概率的减小趋势,如在江淮和华南等地区;总的来说,就是单一降水变化引起的极端干旱发生概率与实际之间的差异逐渐增大,降水的主导作用被气温变化所削弱。

中国区域冬季极端干旱发生率的分布特

征为东北和东部沿海地区多于西部内陆地区,呈东西型分布特征。冬季极端干旱发生概率的年代际趋势相对于夏季要较为简单。1961~2009年,全国大部分地区(除东北地区外)冬季极端干旱发生概率明显的趋势转折次数小于等于2次,变化幅度较小;同时8个地区距今最近的趋势转折点位置差异也较大,但转折后,大部分地区极端干旱发生概率都呈现增加趋势,增加趋势明显的地区有东北、华北、华南和西南地区。与夏季类似,降水也是冬季极端干旱发生概率的主导因子。但是,随着冬季气温的明显升高,特别是20世纪90年代后期以来,气温升高加剧了因降水减少造成的极端干旱发生概率的增加趋势,降水对极端干旱的主导作用被显著削

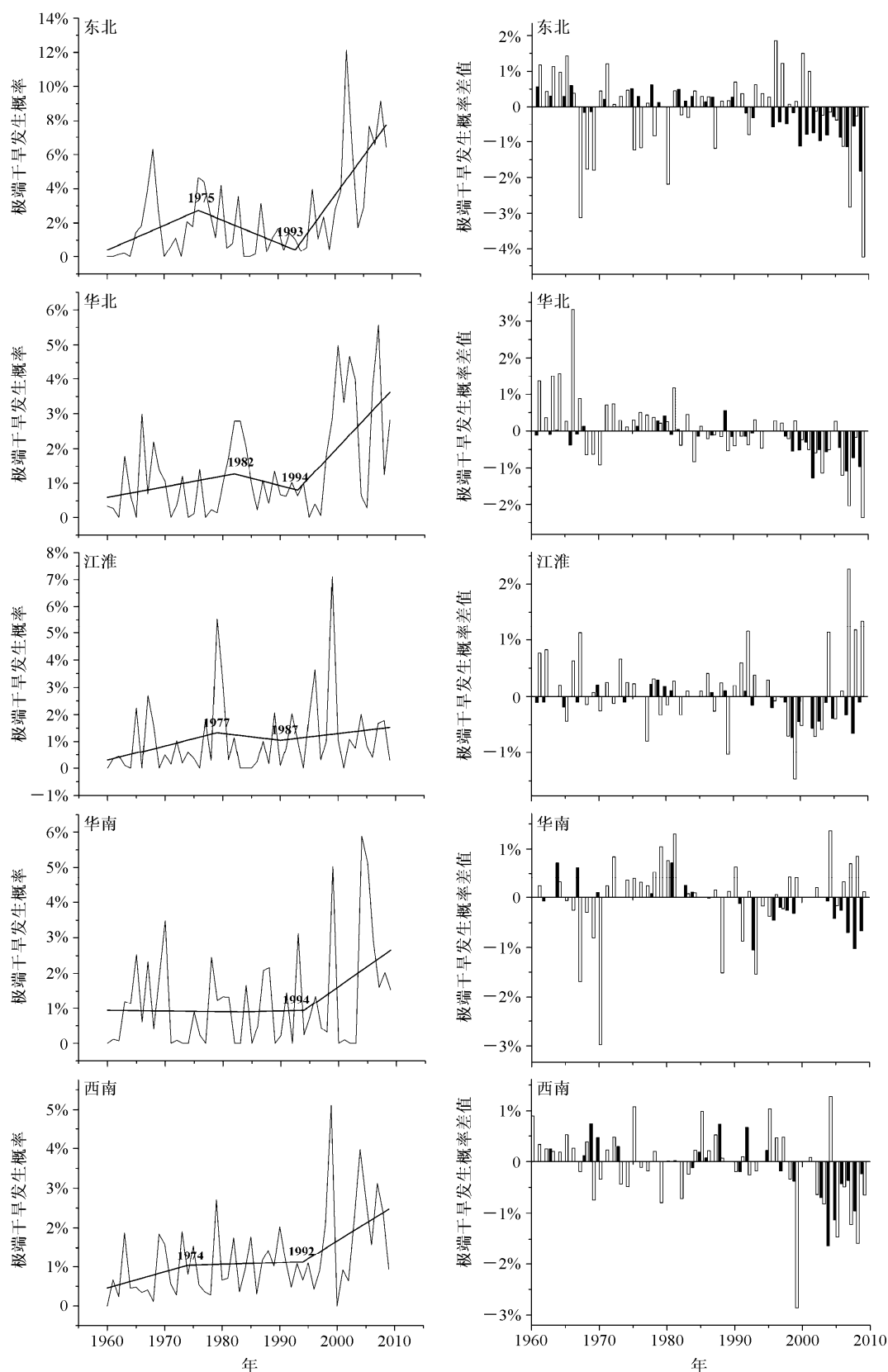


图7 1961~2009年8个区域冬季极端干旱发生概率的变化(左列)和情形2和3下极端干旱发生概率与情形1的差异图(右列)及其冬季极端干旱发生概率

Fig. 7 Changes of winter extreme drought occurrence probability in eight regions of China during 1961–2009 as derived from observed temperature and precipitation (left) and the winter extreme drought occurrence probability differences between scenarios 1 and 2 or 3 (right) and their winter extreme drought occurrence probability

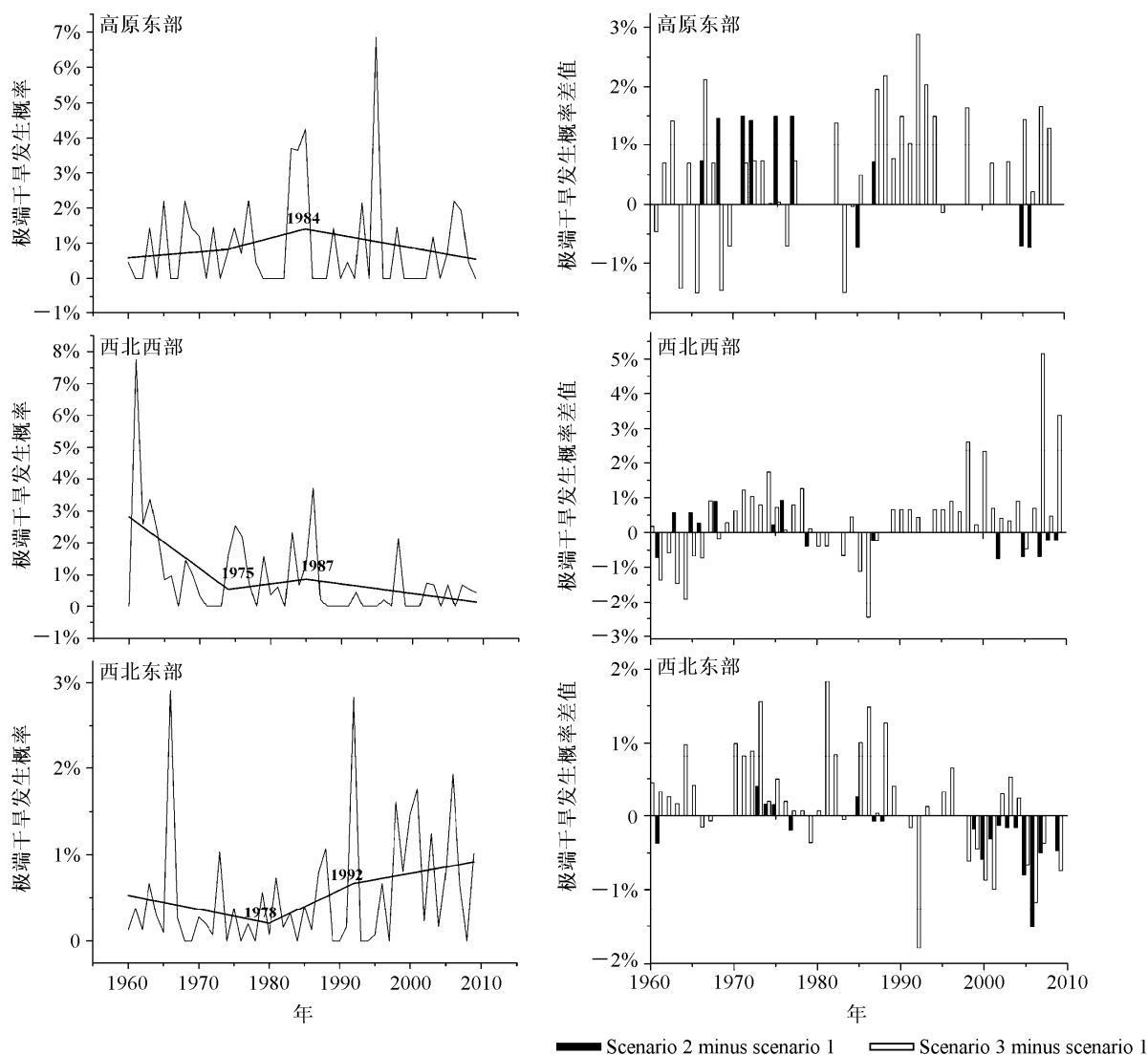


图7 (续)

Fig. 7 (Continued)

弱, 如在华南、西南等地区。此外, 气温和降水波动变化的反位相叠加也在一定程度上加剧了极端干旱发生概率的增加趋势, 例如在东北和华北地区, 这说明除了年代际变化外, 气温和降水年际变率也能对极端干旱发生概率产生影响。

最后应该说明, 研究中所用的 540 个台站观测数据截止于 2009 年, 随着有效站点增加及资料更新, 特别是使用经过严格质量控制的水平格点化观测数据 (Xu et al., 2009; 吴佳和高学杰, 2013), 今后有必要进行更为深入的研究, 以加深对中国区域极端干旱事件时空分布规律及其成因的认识, 为气候变化的评估和预估工作提供参考。

致谢 感谢两位审稿人的宝贵评审意见。

参考文献 (References)

- 安顺清, 邢久星. 1985. 修正的帕默尔干旱指数及其应用 [J]. 气象, 11: 17-19. An Shunqing, Xing Jiuxing. 1985. Revised Palmer drought severity index and its application [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 11: 17-19.
- 陈发虎, 黄伟, 靳立亚, 等. 2011. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异 [J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 41: 1647-1657. Chen Fahu, Huang Wei, Jin Liya, et al. 2011. Spatiotemporal precipitation variations in the arid Central Asia in the context of global warming [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 54: 1812-1821.
- 丁一汇, 张莉. 2008. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较 [J]. 大气科学, 32: 794-805. Ding Yihui, Zhang Li. 2008. Intercomparison of the time for climate abrupt change between the Tibetan Plateau and other regions in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in

- Chinese), 32: 794–805.
- Ding Y H, Ren G Y, Zhao Z C, et al. 2007. Detection, causes and projection of climate change over China: An overview of recent progress [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24: 954–971.
- 黄荣辉, 周连童. 2002. 我国重大气候灾害特征、形成机理和预测研究 [J]. *自然灾害学报*, 11: 1–9. Huang Ronghui, Zhou Liantong. 2002. Progresses in research on the formation mechanism and prediction theory of server climate disasters in China [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 11: 1–9.
- 姜大膀, 苏明峰, 魏荣庆, 等. 2009. 新疆气候的干湿变化及其趋势预估 [J]. *大气科学*, 33: 90–98. Jiang Dabang, Su Mingfeng, Wei Rongqing, et al. 2009. Variation and projection of drought and wet conditions in Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33: 90–98.
- 李新周, 马柱国, 刘晓东. 2006. 中国北方干旱化年代际特征与大气环流的关系 [J]. *大气科学*, 30: 277–284. Li Xinzhou, Ma Zhuguo, Liu Xiaodong. 2006. Inter-decadal characteristics of aridification over northern China associated with the variation of atmospheric circulation during the past 50 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30: 277–284.
- 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: 2429–2439. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2006. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51: 2913–2925.
- Palmer. W C. 1965. Meteorological drought [R]. Office of Climatology Research Paper 45. Weather Bureau, Washington D C, 1–58.
- 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: 943–956. Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. 2005. Climate changes of China's mainland over the past half century [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 63: 943–956.
- 施晓晖, 徐祥德. 2006. 中国大陆冬夏季气候型年代际转折的区域结构特征 [J]. *科学通报*, 51: 2075–2084. Shi Xiaohui, Xu Xiangde. 2007. Regional characteristics of the interdecadal turning of winter/summer climate modes in Chinese mainland [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52: 101–112.
- 苏明峰, 王会军. 2006. 中国气候干湿变率与 ENSO 的关系及其稳定性 [J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 36: 951–958. Su Mingfeng, Wang Huijun. 2007. Relationship and its instability of ENSO–Chinese variations in droughts and wet spells [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 50: 145–152.
- Tomé A R, Miranda P M A. 2004. Piecewise linear fitting and trend changing points of climate parameters [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31: L02207, doi:10.1029/2003GL019100.
- Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P, et al. 2007. Observations: Surface and atmospheric climate change [M] // *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S, Qin D, Manning M, et al, Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 236–336.
- 王劲松, 郭江勇, 倾继祖. 2007. 一种 K 干旱指数在西北地区春旱分析中的应用 [J]. *自然资源学报*, 22: 709–717. Wang Jinsong, Guo Jiangyong, Qing Jizu. 2007. Application of a kind of K drought index in the spring drought analysis in Northwest China [J]. *Journal of Natural Resources (in Chinese)*, 22: 709–717.
- 卫捷, 马柱国. 2003. Palmer 干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较 [J]. *地理学报*, 58 (增): 117–124. Wei Jie, Ma Zhuguo. 2003. Comparison of Palmer drought severity index, percentage of precipitation anomaly and surface humid index [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 58 (supplement): 117–124.
- 卫捷, 陶诗言, 张庆云. 2003. Palmer 干旱指数在华北干旱分析中的应用 [J]. *地理学报*, 58 (增): 91–99. Wei Jie, Tao Shiyun, Zhang Qingyun. 2003. Analysis of drought in northern China based on the Palmer severity drought index [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 58(supplement): 91–99.
- Wilhite D A. 2000. Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions [M] // Wilhite D A. *Drought: A Global Assessment*. London: Routledge, 3–18.
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. *地球物理学报*, 56: 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 56: 1102–1111.
- Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. 2009. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26: 763–772.
- 袁文平, 周广胜. 2004. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析 [J]. *植物生态学报*, 28: 523–529. Yuan Wenping, Zhou Guangsheng. 2004. Comparison between standardized precipitation index and Z-index in China [J]. *Acta Phytocologica Sinica (in Chinese)*, 28: 523–529.
- 翟盘茂, 邹旭恺. 2005. 1951–2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响 [J]. *气候变化研究进展*, 1: 16–18. Zhai Panmao, Zou Xukai. 2005. Changes in temperature and precipitation and their impacts on drought in China during 1951–2003 [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 1: 16–18.
- Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. *J. Climate*, 18: 1096–1108.
- Zhu Yali, Wang Huijun, Zhou Wen, et al. 2011. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation [J]. *Climate Dyn.*, 36: 1463–1473.
- Zou X K, Zhai P M, Zhang Q. 2005. Variations in droughts over China: 1951–2003 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L04707, doi:10.1029/2004GL021853.