

# 陕西省可利用降水资源的气候变化特征及敏感性分析\*

程肖侠<sup>1</sup>, 方建刚<sup>1</sup>, 孙 娴<sup>1</sup>, 刘 敏<sup>2</sup>

(1. 陕西省气候中心, 西安 710015; 2. 江苏省气象局, 南京 210046)

**摘 要:**利用陕西省 74 站 1960 - 2007 年月降水和月气温资料,采用高桥浩一郎公式对陕西近 50 年可利用降水资源的气候变化特征进行分析,并讨论了水资源对气候变化的敏感性。结果表明,陕西可利用降水资源南多北少,且季节分布不均,主要集中在夏秋季;近 50 年来可利用降水资源趋于减少,有明显的年代际变化特征,20 世纪 60 年代和 80 年代明显偏多,90 年代显著偏少,进入 21 世纪有所增加。敏感性分析表明,可利用降水资源对气候变化的敏感性冬季最强,夏季最弱;陕北最强,陕南最弱;对降水的敏感性大于气温;降水不变,对气温的敏感性随气温增加而减小;气温不变,对降水的敏感性随降水增加而更显著;降水增加,对气温的响应更敏感;气温增加,对降水的响应减弱。

**关键词:**蒸发;水资源;气候变化;敏感性

**中图分类号:** P426.614

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2009)05-0045-06

## Analysis on Variation and Sensitivity of Utilizable Precipitation of Shaanxi Province

CHENG Xiao-xia<sup>1</sup>, FANG Jian-gang<sup>1</sup>, SUN Xian<sup>1</sup>, LIU Min<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Climate Center, Xi'an 710015, China; 2. Jiangsu Meteorological Agency, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** By using monthly precipitation and temperature received from 74 observed stations from 1960 to 2007 and employed Takahashi's evaporation equation, we analyze the variability of utilizable precipitation in the past 50 years and discuss the sensitivity of utilizable precipitation to climate change further. The results show as follows: utilizable precipitation is more sufficient in southern regions of Shaanxi than in the north, and more rich in summer and autumn. In the recent 50 years, utilizable precipitation declined with obvious interdecadal variation, for example, utilizable precipitation is higher in 1960s and 1980s, but lower in 1990s. The study of sensitivity indicates that the influence of climate change on utilizable precipitation is the most significant in winter and feeblest in summer; in different regions, the response of utilizable precipitation is more significant in the north than in the south of Shaanxi. Moreover, the change of precipitation leads to more notable utilizable precipitation variation than temperature; the more significantly the temperature or precipitation changes, the more sensitively the utilizable precipitation changes. Also, temperature could have bigger effects on utilizable precipitation when the precipitation is increasing, and the utilizable precipitation is more sensitive to precipitation change with the increase of temperature.

**Key words:** evaporation; water resource; climate change; sensitivity

科学研究表明,近百年来,地球气候正经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化。这种增温对全球生态系统和社会经济已经产生并将继续产生重大而深远的影响。

水文循环是气候系统的重要组成部分,气候变暖,水文循环的过程加剧,水文极端事件发生的概率增强,影响区域水资源的分布,这种变化会进一步严

重制约我国经济社会的发展。因此对区域水资源的评价以及减缓和适应性对策研究,是气候变化领域重要的研究内容,已经引起政府和科学界的高度重视<sup>[1]</sup>。常国刚等<sup>[2]</sup>分析了黄河源区地表水资源、气候及冻土演变规律;霍正文<sup>[3]</sup>等提出了自 20 世纪 90 年代以来黄河产水量持续减少的结论。一般来说,某区域水资源的丰枯取决于降雨、蒸发和径流量等的变

\* 收稿日期:2009-03-08

基金项目:公益性行业(气象)科研专项基金资助项目(GYH Y200706029)

作者简介:程肖侠(1980-),女,陕西韩城人,主要从事气候变化研究分析。E-mail:shuishixiaoyue@hotmail.com

化,但从气象角度考虑,降雨量和陆面蒸发量之差基本能表征水资源的多寡,降雨量反映了一个地方水资源的收入情况,陆面蒸发量则表示一个地方水资源消耗的程度,因此,文敏<sup>[4]</sup>等对珠海市近 50 a 水资源特征进行分析研究,并利用 500 hPa 高度场和海温场的主分量因子对珠海市水资源进行预测;张庆云<sup>[5]</sup>、高歌<sup>[6]</sup>和宋正山<sup>[7]</sup>分别研究了华北地区水资源的变化规律,并详细讨论了高桥浩一郎公式在水资源分析中的可用性和科学性;安刚等<sup>[8]</sup>、李永华等<sup>[9]</sup>亦利用该公式分别对东北、重庆不同地区可利用降水资源进行了分析;蔡新玲等<sup>[10]</sup>利用该公式对陕西近 45 a 可利用降水资源的基本特征进行了分析研究。

降水是水资源的主要补给来源,由于气候变暖的原因,近几十年来我国降水平均以 12.7 mm/10 a 的速度减少<sup>[7]</sup>。陕西地区降水量近几十年也出现明显减少趋势,研究表明 1984 年以前陕西省降水量以正距平为主,1984 年之后以负距平为主<sup>[11]</sup>。陕西北部地处温带半干旱地区,由于干旱半干旱地区地表径流调蓄能力差等因素,决定了陕西大部分地区是水资源极度贫乏区域<sup>[12]</sup>。受高原地形和东亚季风等影响,陕西天气气候复杂多变,降水时空分布极为不均,气候变化趋势差异明显,对全球变化的时空响应也不尽一致,这种区域气候变化,将严重影响本区的水资源和可利用降水资源。该文对陕西近 50 a 可利用降水资源的时空变化特征进行分析,并初步分析陕西省水资源对气候变化的敏感性。

## 1 资料和方法

用于计算流域蒸散能力的很多方法如彭曼公式、彭曼-蒙蒂斯公式等在理论上考虑影响蒸散能力的要素比较全面,但由于资料要求高而在应用中受到一定限制。气候变化影响研究项目中,多采用简洁同时又有一定精度的蒸散能力估算模式,高桥浩一郎公式由于其简洁且适用范围广在估算蒸散能力得到广泛应用<sup>[1]</sup>。采用陕西省 1960 - 2007 年均匀分布的 74 个测站月降水量和月平均气温资料,根据高桥浩一郎的陆面经验模型计算得到各测站的月蒸发量。

高桥浩一郎计算陆面蒸发的公式为

$$E = \frac{3100P}{3100 + 1.8P^2 \exp\left(-\frac{34.4T}{235 + T}\right)}$$

式中:  $E$ ——月蒸发量 (mm);  $P$ ——月降水量 (mm);  $T$ ——月平均气温 (°C)。根据水量平衡关系:  $H = P - E$ ,  $H$ ——月可利用降水量 (mm); 定义  $\alpha = E/P$  为蒸发率,  $\beta = 1 - \alpha$  为可利用降水率。

高桥公式在物理上考虑了影响实际蒸发的最主

要的两个物理因子,并且有实际观测资料做依据,作为经验公式,其广泛适用性已经被很多学者证实并且广泛应用,其结果能较好地反映实际蒸发的变化情况<sup>[5]</sup>,研究表明由此方法计算得到的可利用降水系数与由水文实际观测推算的结果很接近<sup>[6]</sup>。此方法不但计算简便,所得到的结果无论在定性还是定量方面都有参考价值。

基于该方法本文系统分析了陕西省可利用降水资源的气候变化特征。同时,采用假定气候情景方案,初步讨论了陕西可利用降水资源对气候变化的敏感性。在敏感性研究中,相同的气候变化情景下,水文要素响应的程度愈大,其对气候变化愈敏感;反之则不敏感。水文要素对假定的气候变化情景的响应程度并不是对未来气候变化条件下的预测,只是敏感性分析的一种途径<sup>[1]</sup>。

由于气候模式的输出结果还存在较大的不确定性,并且其模拟区域气候变化的水平较低,尤其是对降水的预测,所以采用假定气候情景方案分析区域水资源对气候变化的敏感性在水资源的影响评估、合理规划以及开发利用等方面具有重要意义。本文基于目前的研究现状,选用假定气候情景方案,即假设气温变化 0、±1、±2,降水变化 0、±20%、±40%、±60%、±80%、±100%,共 55 种气候变化情景组合。

## 2 可利用降水资源的空间分布特征

陕西省多年平均实际蒸发量由南到北递减,显示较规律的纬向分布特征。全省平均年蒸发量为 421.4 mm,其中陕南 512.4 mm,关中 406.9 mm,陕北 335.4 mm (图 1a)。可利用降水量也是呈现南多北少的分布特征,南北差异大,陕南水资源丰富,多年平均值为 354.3 mm,大值中心在镇巴地区,相对于蒸发量大值中心偏西,这与降水量的空间分布有关;关中地区多年平均可利用降水资源 189.4 mm,其中关中西部水资源较丰富,为 150 ~ 250 mm,东部大部分地区低于 150 mm,呈西多东少的分布形势;陕北地区平均可利用降水资源为 142.2 mm,其北部地区低于 150 mm,尤其是长城沿线一带甚至低于 100 mm,水资源严重短缺 (图 1b)。可以看出,陕西省可利用降水资源南北差异非常显著,关中和陕北地区水资源短缺。

蒸发率和可利用降水率表示一个地区蒸发能力的大小和可利用降水资源的程度,更能直观反映某个地区蒸发能力和可利用降水能力的大小。陕西省可利用降水率 (图 1c) 的整体空间分布基本呈纬向分布,但由图可以看出,全省蒸发率北部地区高南部地区低,陕北地区虽然蒸发量小,但是由于该地区降

水少,所以导致该地区的蒸发率大于南部地区,蒸发损失大,其中陕北北部长城沿线以北地区蒸发率达到 0.9 以上,相应该地区可利用降水率则最低,可利用的水资源少,陕北南部蒸发率西低东高;关中地区平均蒸发率 0.83,其中关中东部大,西部小,蒸发率

的这种分布使得关中东部地区可利用降水率偏低,可利用降水量偏少;陕南虽然蒸发量大,但是蒸发率却是全省最小的区域,平均蒸发率 0.78,相应地其可利用降水率大,可利用的水资源量丰富。所以陕西省水资源欠缺问题在北部地区显得更为严重。

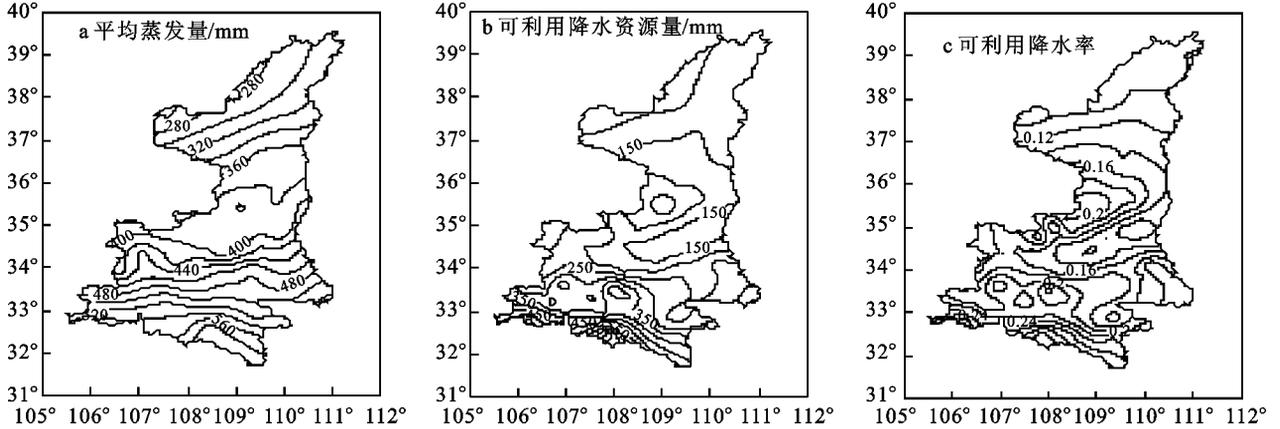


图 1 1960 - 2007 年陕西多年平均蒸发量、可利用降水资源量、可利用降水率空间分布

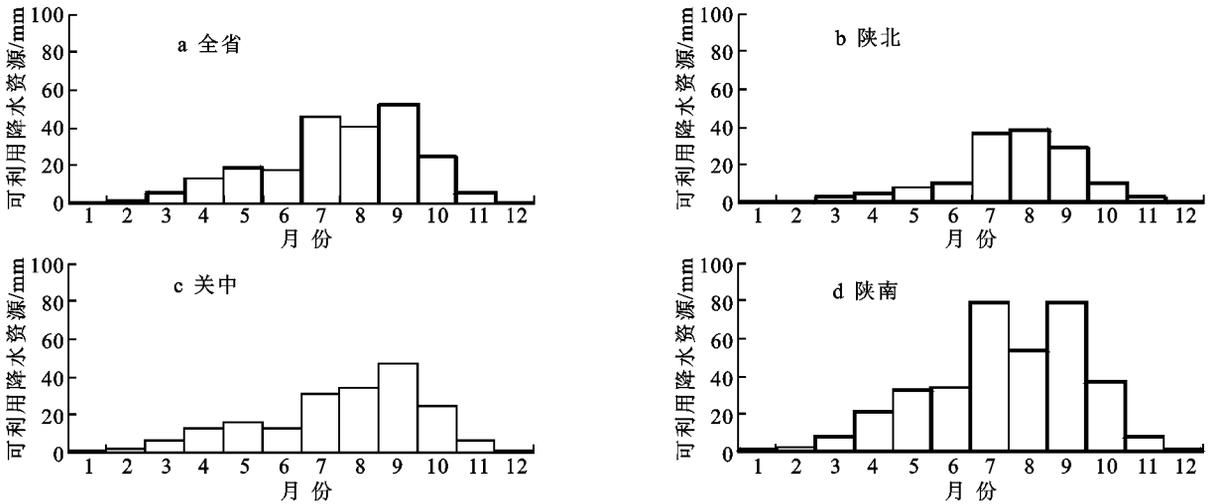


图 2 不同地区可利用降水资源的年内分布特征

图 2 给出可利用降水资源的年内变化分布,可以看出全省平均可利用降水资源呈双峰型变化,9 月水资源最丰富,其次是 7 月和 8 月;陕西水资源主要集中在夏秋两季,夏季可利用降水资源 104.18 mm,占全年降水资源的 46%;其次是秋季和春季,分别是 36%和 17%,冬季最少,仅占全年可利用降水资源的 1%(图 2a)。暖温带半干旱或半湿润气候使得陕北和关中地区水资源量偏少(图 2b,c),陕北水资源集中于夏季,占全年的 59.33%,秋季占 29.11%,全年除 7-9 月三个月水资源量丰富外,其它月份均低于 10 mm;关中水资源 9 月份最多,呈单峰型,秋季水资源丰富,占全年水资源的 40.1%,仅次于夏季的 40.7%。陕南气候湿润,可利用降水资源丰富,主要集中在夏秋季,分别占全年的 47.14%和 35.03%,其中 7 月和 9 月可利用降水资源最多(图 2d)。

### 3 可利用降水资源的气候变化特征

陕西省属大陆季风性气候,南北延伸达 800 km 以上,南北气候差异显著,降水多集中在夏季,占全年的 47%,冬季主要受来自北方的冷空气控制,空气干燥,降水稀少,降水的季节变化明显。随着全球气候变暖,1960 - 2007 年近 50 a 时间,陕西省各地年可利用降水资源不同程度减少,其中陕南的减少幅度最大,达 19.1 mm/10 a(图 3a)。由于陕西降水的季节特性,不同季节降水资源的变化趋势也各有特点,图 3 给出了不同季节可利用水资源几十年来趋势变化系数的空间分布(图 3b,c,d)。可以看出,春季除陕北长城沿线以北地区可利用水资源呈现很小幅度增加趋势以外,其他地区均是负趋势,并且关中和陕南大部分地区趋势变化显著,达到 90%的显著水平,部分地区趋势系数达到 -0.41,超过了 99%

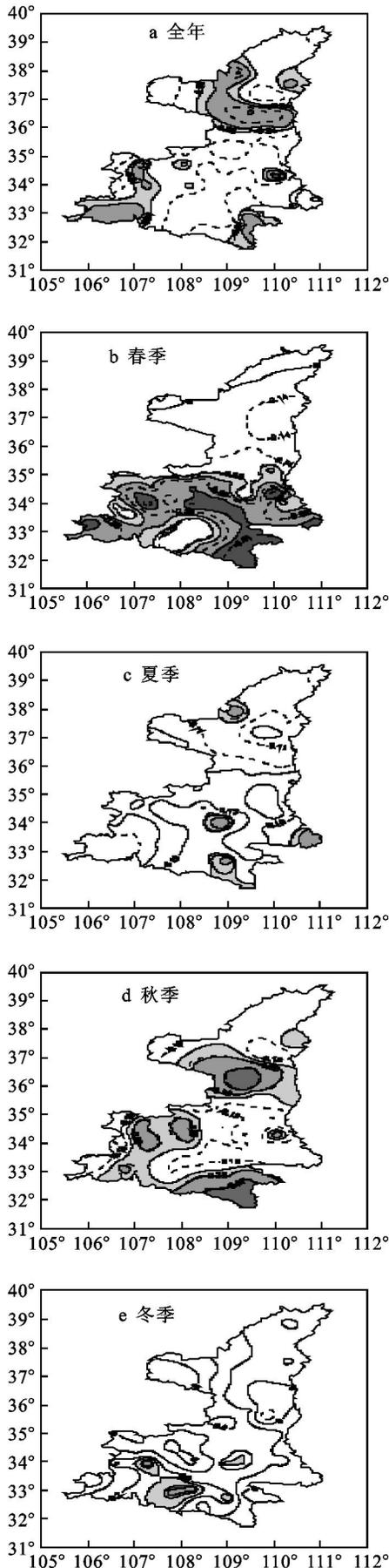


图 3 陕西省 1960 - 2007 年可利用降水水资源趋势系数分布

的显著性检验,水资源严重减少;秋季全省降水资源一致减少,是全省变化幅度最大的季节,趋势检验表明,陕北南部、关中西部以及陕南南部地区水资源显著减少;春秋两季降水资源减少幅度陕南最大,分别达 9.0 mm/10 a 和 16.3 mm/10 a,减少幅度由南向北依次降低;夏季,水资源变化趋势的区域特征显著,关中和陕南地区是正趋势,而在降水稀少的陕北地区水资源变化趋势为负,由该地区降水量减少造成,陕南水资源变化幅度最大,关中地区虽然近几十年降水量增加幅度最大,但是由于该地区蒸发量也发生了显著增加,所以关中水资源增加的幅度低于陕南;冬季全省可利用降水资源增加,并且增加幅度由南到北递减。可以看出,几十年来水资源变化区域特征明显,无论水资源增加还是减少,各个季节降水丰富的陕南地区水资源变化幅度最大,而在降水稀少的陕北地区其变化幅度则最小;春秋两季水资源减少,春季关中陕南大部地区变化通过显著性检验,秋季陕北南部、关中西部及陕南南部通过显著性检验;夏冬两季水资源增加为主,趋势检验不明显。

1960 - 2007 年陕西省降水水资源呈现一定变化趋势的同时,其年代际特征显著。80 年代全省平均水资源最丰富,达 265.8 mm,极大值出现在 1983 年,为 456.5 mm;其次是 60 年代,其中 1964 年达到 447.6 mm;90 年代水资源量最低,10 a 平均仅为 176.6 mm,最大可利用水资源量是 1998 年的 272.1 mm,1991 年水资源量达到近 50 年的最低点,仅为 91.4 mm。

春季,60 年代全省水资源最丰富,为 51.77 mm;其次是 80 年代,陕北和陕南的第二个丰水期均是 80 年代,关中地区 70 年代和 80 年代差别不大,分别为 33.24 mm 和 32.98 mm;90 年代全省降水资源偏少主要集中在 90 年代中后期,但 1998 年异常偏多,尤其陕南达到 142.1 mm,为 1960 - 2007 年第二高;进入 21 世纪,陕西春季降水整体偏少,这也是近年来春旱连连的原因(图 4a)。夏季陕西省第一丰水期是 80 年代,为 135.79 mm,关中和陕南 80 年代水资源丰富,陕北地区 60 年代和 70 年代水资源比 80 年代丰富,但差别不大,分别为 88.32, 91.05, 86.24 mm;60,70 年代全省水资源偏少,尤其是关中地区;90 年代水资源偏少主要体现在陕北和关中地区;21 世纪关中、陕南夏季水资源较丰富,是夏季第二个丰水期,尤其是陕南,年代平均水资源量是 165.28 mm,陕北有偏少趋势(图 4b)。秋季水资源年代际特征基本是 80 年代中期之前偏多,年代际计算表明,60 年代水资源最丰富,全省平均为 107.21 mm;80 年代关中和陕南水资源较丰富,陕北小幅度偏少;80 年代中后期开始,水资源显著减

少,90年代全省水资源仅为49.08 mm,陕北、关中、陕南3个区域90年代水资源平均分别为:19.14, 45.63, 77.98 mm,远低于其他年代平均值,甚至远低于次低值年代;进入21世纪,全省水资源量增加(图4c)。冬季全省平均降水量只有20 mm左右,仅占全年降水的3%,平均降水资源2.4 mm;2000年以前降水资源年代变化差异较小,个别年份异常丰

富,如1975年和1988年分别达到12.87 mm和12.67 mm的高值;21世纪以来,水资源量整体升高(图4d)。总的来说,20世纪60年代和80年代水资源丰富,春秋两季60年代是第一丰水期;夏季80年代是第一丰水期,主要是关中和陕南显著偏多;90年代全省各季水资源均欠缺;21世纪以来水资源增加,但春季减少。

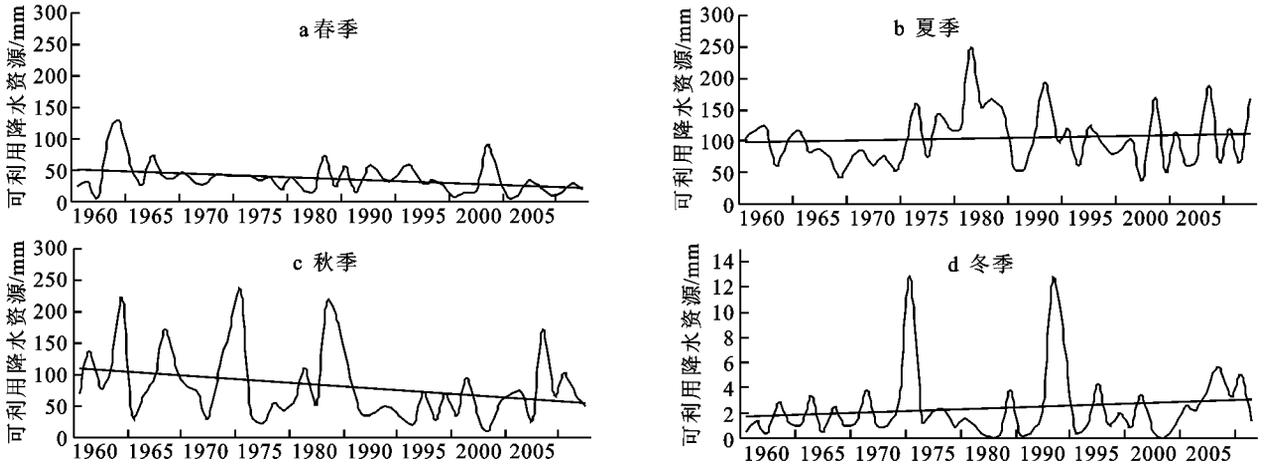


图4 陕西全省平均四季可利用降水资源量时间序列

#### 4 敏感性实验

研究表明,可利用降水资源与降水呈显著正相关,与气温呈负相关。统计发现,陕西省可利用降水资源与降水量也呈显著正相关;与气温相关分析表明,夏季全省大部分地区两者呈显著负相关,春、秋两季关中和陕南东部相关性较好,冬季关中和陕南少部分地区出现了正相关现象,整个冬季两者相关性不高。

基于以上关系以及所依赖的可利用降水资源计算公式,可得如下推论:假设气温不变,降水增加(减少),可利用降水资源将增加(减少);假设降水不变,气温增加(减少),可利用降水资源将减少(增加)。

敏感性试验表明,气温和降水对可利用降水资源的影响从1月到12月大体呈现开口向上抛物线的变化趋势,7月达到最小值,之后开始回升,季节特征显著,冬季水资源对气温、降水的敏感性最强,夏季最弱。

对比分析陕北、关中和陕南三个区域年平均可利用降水资源对气温、降水的敏感性,发现敏感性从北到南依次降低。当然不排除个例,如延安、西安、安康三个站水资源对气候变化的敏感性西安最强,其次是延安,安康最弱。本文研究将气候类型类似的地区归为一类,研究相对较大区域上的平均变化状况,为政府决策提供依据。

图5给出了陕北、关中、陕南三个区域1月和7月气温、降水与可利用降水资源的变化关系,更直观显示实验结果:(1)可利用降水资源对降水的敏感性

大于气温。按照文献[2]中的方法,以延安7月份为例,假设气温增加2(占多年平均值的8.5%),降水不变,可利用降水资源量将减少4.82 mm,如果要维持水资源量平衡,降水量则需要增加8.54 mm(占多年平均值的7.5%),可以看出,水资源对降水变化更敏感,这种现象在冬季更明显。(2)可利用降水资源对气温和降水的响应在冬季最敏感,其次是秋季和春季,夏季最不敏感。由图4看出,1月份可利用降水量随着降水或者气温变化而变化的幅度比7月要明显得多。(3)区域敏感性存在季节差异,如不同月份显著敏感的区域不同,但从年平均看,陕北地区水资源对气候变化最敏感,陕南最不敏感。如假设气温变化情景固定(变化+2),降水量变化从-60%到+60%,陕北地区年降水资源增加258.2%,关中增加254%,陕南增加232%;固定降水变化情景(增加100%),气温从增加-2到增加+2,年可利用降水量陕北增加129.5%,关中增加119.8%,陕南增加72.4%;总的来说,降水量少的地区水资源对气候变化的响应较敏感,而降水量偏多的地区响应则不敏感;(4)假定降水不变,可利用降水资源对气温的敏感性随着气温增加而减小;假定气温情景固定,其对降水的敏感性随降水的增加而更显著。(5)对气温的敏感性随降水增加而增加;对降水的敏感性随气温增加而减弱。

#### 5 结论

(1)特殊的地理气候条件使得陕西省可利用降

水资源南多北少,南北差异大。可利用降水资源与降水关系密切,陕南水资源丰富,多年平均值为 355.4 mm,关中东部和陕北北部地区水资源匮乏。

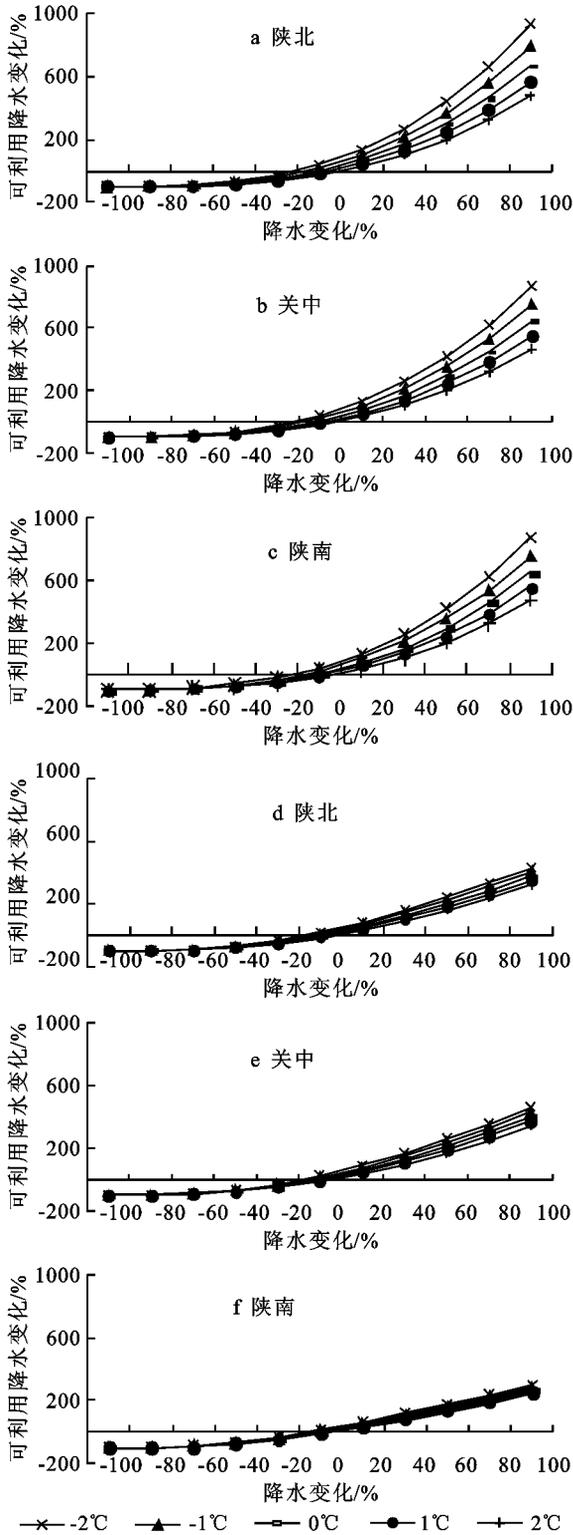


图 5 1 月份(a, b, c)和 7 月份(d, e, f)可利用降水资源的敏感性

(2) 可利用降水资源变化的区域特征明显,降水丰富的陕南地区水资源变化幅度最大,而在降水少的陕北地区其变化幅度则最小;春秋两季水资源减少,春季关中和陕南大部分地区的变化趋势通过显

著性检验,陕北变化趋势不显著,秋季陕北南部、关中西部及陕南南部减少趋势显著;夏季关中和陕南地区降水资源量呈增加趋势,陕北地区则减少,冬季降水资源量也呈现小幅度增加趋势。

(3) 20 世纪 60 年代和 80 年代陕西可利用降水资源丰富,春秋两季 60 年代是第一丰水期;夏季 80 年代是第一丰水期,主要是关中和陕南显著偏多;90 年代全省各季水资源均严重偏少,尤其是秋季;21 世纪以来降水资源整体增加,但春季减少。

(4) 可利用降水资源对气候变化的敏感性在冬季最强,其次是秋季、春季,夏季最弱;降水最少的陕北地区可利用降水资源对气候变化的响应最敏感,而在降水丰富的陕南则最不敏感;其对降水的敏感性大于气温;假定降水不变,可利用降水资源对气温的敏感性随着气温增加而减小,假定气温情景固定,其对降水的敏感性也随降水的增加而更显著;降水增加,气温对可利用降水资源的影响更显著,气温增加,降水对可利用降水资源的影响减弱。

参考文献:

- [1] 张建云,王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究 [M]. 北京:科学出版社,2007:122-128.
- [2] 常国刚,李林,朱西德,等. 黄河源区地表水资源变化及其影响因子[J]. 地理学报,2007,62(3):312-320.
- [3] 霍正文,陈文,笪大为,等. 甘南州黄河产水区水资源及其演变趋势分析[J]. 水资源与水工程学报,2008,19(4):98-102.
- [4] 文敏,陈创买. 珠海市近 50 年水资源变化特征及评估[J]. 中山大学学报:自然科学版,2005,44(增刊 2):272-275.
- [5] 宋正山,杨辉,张庆云. 华北地区水资源各分量的时空变化特征[J]. 高原气象,1999,18(4):552-566.
- [6] 安刚,孙力,廉毅. 东北地区可利用降水资源的初步分析[J]. 气候与环境研究,2005,10(1):132-139.
- [7] 李永华,高阳华,廖良兵. 重庆地区年可利用降水资源的变化分析[J]. 南京气象学院学报,2008,31(3):422-428.
- [8] 蔡新玲,乔秋文,王繁强,等. 近 45 年来陕西省可利用的降水资源特征及变化[J]. 干旱区研究,2008,25(2):282-287.
- [9] 高蓓,栗珂,李艳丽. 陕西近 40 年气候变化特征的分析[J]. 成都信息工程学院学报,2006,21(2):290-295.
- [10] 吴学峰,汪有科,吴普特,等. 陕西省水资源态势及可持续利用策略[J]. 干旱区研究,2005,22(4):448-453.
- [11] 张庆云. 1880 年以来华北降水及水资源的变化[J]. 高原气象,1999,18(4):486-495.
- [12] 高歌,李维京,张强. 华北地区气候变化对水资源的影响及 2003 年水资源预评估[J]. 气象,2003,29(8):26-30.