

兰州大学

硕士学位论文

陕西未来极端气候事件变化情景分析

姓名：李明娟

申请学位级别：硕士

专业：大气科学、气象学

指导教师：戴新刚;许吟隆

20081201

摘 要

陕西是我国气候高度敏感区,气象灾害种类俱全,成因独特,如旱灾、低温阴雨、连阴或连暴雨涝、洪灾、雹灾、低温冻害、大风、沙尘暴、寒潮、霜冻、干热风、大雾、龙卷风、酸雨等,而且各类气象灾害频繁发生,使得陕西地区连年遭受各类气象灾害袭击。在目前全球平均气温、海温升高的气候变化背景下,需要对该地区未来气候变化的情景以及极端气候事件发生频率变化的趋势进行研究,了解增加区域气候变化对自然环境和人类已经产生的影响。

本文利用英国 Hadley 气候预测和研究中心的区域气候模式系统 PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies), 基于 IPCC《排放情景特别报告》(SRES) 的 B2 情景对陕西 2071~2100 年的气候变化进行预估,初步分析陕西未来气候变化的概况和极端气候事件发生的频率以及强度,重点对陕西干旱做了分析。

本文首先通过对 PRECIS 模拟与气候基准时段(1961~1990 年)的资料进行了分析对比,结果表明,PRECIS 模式对陕西温度、极端温度、极端降水等模拟能力较好。

B2 框架和情景系列描述的世界强调区域性的经济、社会 and 环境的可持续发展。但是在温室气体持续增加的全球背景下,该情景下陕西 2071~2100 年逐月平均气温、年平均气温相对气候基准时段有所上升。

未来全省年均气温都将增高,未来全省年平均气温将增大 3°C 以上,未来气温变率为 $0.17^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。高值区主要还是位于陕南和关中地区,且关中地区高值区范围将有所扩大,可能延伸到渭北地区。渭北是陕西的苹果主产区,单从温度升高的角度分析,未来热量条件对苹果果实膨大、着色和收获较为有利。

未来月平均气温变化幅度最大的是冬季(12、1、2 三个月),其中 12 月和 2 月变化幅度超过 100%,1 月的幅度也约在 100%,这说明未来有向暖冬变化的趋势,春末、夏季、秋初的变化幅度不大,在 20%以内。

从全省角度来看,未来降水总体是增加的趋势,年均增加约为 100mm。未来降水变率为 $79\text{mm}/10\text{a}$,仍然为增加的趋势。但是未来年降水量的变化幅度较大,出现异常偏多、偏少年份的可能性增加。

未来陕西冬春季降水较气候基准时段偏多，平均偏多 30%左右，汛期前期的降水偏少，出现伏旱的可能性增大，秋季降水总体偏多，说明未来秋季出现暴雨的可能性较大。

与气候基准时段的模拟值比较，未来多年平均降水日数陕北、关中地区的降水日数有不同幅度的增多，增幅最多的是关中中东部和陕北北部，陕南地区的降水日数有所减少。

未来陕西降水日数大体上是春季增多、夏秋季减少，春季透雨的来临时间将可能有所提前，夏季出现干旱的可能性增加，华西秋雨在陕西关中、陕南等地的发生频率可能会基本持平但略有减少。

未来陕北暴雨日数可能会有所增加，黄河沿线暴雨日数有所增加。由于渭河流域和汉江流域各站暴雨频次均较气候观测基准时段有增加，未来渭河、汉江流域出现致洪暴雨的可能性仍然很大，而且有增加的趋势。

本文按照构造的指数关系计算未来的蒸发量，B2 情景下，未来蒸发量可能偏多，其中关中地区偏多 20%以上，陕北地区可能大于 30%。

与气候基准时段的模拟值相比，陕西区域内有 3 个区域干旱频次较少，分别是陕北榆林南部以南到延安市、关中东部（含渭北）以及陕南西部，幅度最大是黄河沿线；但仍有 3 个区域干旱频次增加，分别是陕北北部、关中西部秦岭地区和商洛地区。

各等级干旱 5~7 月发生频率较高，这与前面分析的陕西未来夏季降水减少有关，秋冬季干旱发生频率减少，这与前面分析的华西秋雨发生的趋势大体不变有关。

虽然总体上干旱发生在秋冬季的频次较少，但是 4—5 级干旱在秋季发生的频率有所增加，这说明降水逐年分布的不均匀性，某些年份秋冬季降水可能会出现异常偏少。

未来即便全省降水会增加，但是由于持续的温度升高，未来出现极端干旱气候事件的可能性仍然增大。

关键词：陕西 极端气候事件 PRECIS 干旱 暴雨

Abstract

Shaanxi province is a climate high-sensitive region of China, enduring various meteorological disasters as drought, low temperature, consecutive cloudy or torrential rains, flooding, hail storm, low-temperature freezing, wind, sand storm, cold wave, frost disaster, dry warm wind, fog, tornado and acid rain etc. Each occurs frequently with a unique cause, which attacks Shaanxi region successive annually. Under the climate change background of global average air temperature and sea surface temperature increase, it is necessary to study future climate change scenario, occurrence frequency change trend of extreme climate events in this region, and investigate existing impacts of increasing regional climate change on natural environment and human.

In this paper, the PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies, an RCM system developed at the UK Met Office Hadley Center for Climate prediction and Research) is used to estimate climate change from 2071 through 2100 in accordance with SRES B2 scenario of IPCC, and further analyze future climate change situation and extreme climate events occurrence frequency and intensity in Shaanxi, emphasizing on drought.

Firstly, compared simulation results of PRECIS with observation data, the results indicate that PRECIS has a good simulating capability of Shaanxi temperature, extreme temperature and extreme precipitation.

In a world under SRES B2 scenario, regional economic, social and environmental sustainable development is emphasized. However, under the global background of transient green house gases increase, in 2071 through 2100, the monthly average air temperature and annual average air temperature of Shaanxi increased according to baseline period under scenario B2.

In future, annual average air temperature would increase more than 3°C throughout the province. The air temperature change rate would be 0.168°C/10a. The high value center would concentrate on Shaannan (south Shaanxi) and Guanzhong (middle of Shaanxi). The Guanzhong high value

center would expand to Weibei (north of Guanzhong), where is a main apple production area. Analyzing only on temperature, the future heat condition would be favorable for apple expansion, coloring and harvest.

The maximum change extent of future monthly average air temperature appears in winter (December, January, and February), in which change extent in December and February exceed 100%, and in January approximately 100%. It shows there is a trend of turning into warm winter in future. In spring, summer and autumn, the change extent is less than 20%.

Provincially, precipitation shows an accelerating trend in total. Annual average increase is approximately 100mm. In future, precipitation change rate is 79mm/10a, still on an increasing trend. But, the change extent is large, which increases probability of abnormal more or less year. Compared to normal year, in an abnormal more year, precipitation would exceed 600mm. While in a less year, it would reduce approximate 500mm.

Precipitation in winter and spring tend to be 30% more than baseline period (1961-1990). Precipitation in early period of flood season is less, raising the drought occurrence probability. Precipitation in autumn is generally more, indicating a big torrential rain occurrence probability in autumn.

Compared with baseline simulation data, average yearly precipitation day numbers of Shaanbei(north Shaanxi) and Guanzhong increase in different extents, the maximum in mid-east of Guanzhong and north of Shaanbei, whereas in Shaannan, it decreases.

Generally, Shaanxi precipitation day numbers presents increase in spring and decrease in summer and autumn. The soaking rain in spring would probably emerge early. Summer drought probability would increase. The occurrence frequency of Huaxi durative rains in autumn in Guanzhong and Shaannan would probably remain equal but slightly less.

Torrential rain day numbers of Shaanbei would probably increase, especially of the regions along the Yellow river. Because the torrential rain occurrence frequency of stations in Weihe valley and Hanjiang valley would

increase compared to climatic observations of baseline period, in these two valleys, there would still exist a high probability of flood-induced torrential rain occurrence, and this trend probably increases.

In this paper, evaporation is calculated under constructed exponential relationship. Under B2 scenario, future evaporation would be probably more, in which 20 % more in Guanzhong, 30% more in Shaanbei.

Compared to baseline period, there are three regions in Shaanxi with lower drought frequency, respectively, south of south Yulin to Yanan, east of Guanzhong and west of Shaannan. The maximum appears along the Yellow river. Nevertheless, there are still three regions with increasing drought frequency, north Shaanbei, west Guanzhong Qingling Trend, and Shangluo region respectively.

Drought of different grades occurs frequently between May and July, which is correlated with the analyzed results, summer precipitation decrease. Drought frequency decreasing in autumn and winter is related to former analyzed trend of Huaxi durative rains in autumn.

Although, Drought frequency decreases in autumn and winter in general, 4-5 grade drought increases in autumn, which indicates that yearly precipitation is distributed unevenly. In certain years, precipitation in autumn and winter would probably be abnormally less.

Even if precipitation throughout the province increases, with continuing temperature increase, there still exists a high probability of extreme climatic drought event occurrence.

Key words: Shaanxi, extreme climate events, PRECIS, drought, torrential rain

原创性声明

本人郑重声明：本人所呈交的学位论文，是在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。学位论文中凡引用他人已经发表或未发表的成果、数据、观点等，均已明确注明出处。除文中已经注明引用的内容外，不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究成果做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 李明珠 日 期： 2008. 11. 10

关于学位论文使用授权的声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属兰州大学。本人完全了解兰州大学有关保存、使用学位论文的规定，同意学校保存或向国家有关部门或机构送交论文的纸质版和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权兰州大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用任何复制手段保存和汇编本学位论文。本人离校后发表、使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，第一署名单位仍然为兰州大学。

保密论文在解密后应遵守此规定。

论文作者签名： 李明娟 导师签名： 张明 日期： 2008.11.20

第一章 前言

陕西是我国气候高度敏感区,气象灾害种类俱全,成因独特,如旱灾、低温阴雨、连阴或连暴雨涝、洪灾、雹灾、低温冻害、大风、沙尘暴、寒潮、霜冻、干热风、大雾、龙卷风、酸雨等,而且各类气象灾害频繁发生,使得陕西地区连年遭受各类气象灾害袭击。在目前全球平均气温、海温升高的气候变化背景下,需要对该地区未来气候变化的情景以及极端气候事件发生频率变化的趋势进行研究,了解增加区域气候变化对自然环境和人类已经产生的影响。

1.1 陕西省气候概况

陕西地处祖国西北内陆的中纬度地区,具有明显的大陆性季风气候特点。气候以秦岭为界,南北差异显著:从北到南纵跨温带、暖温带、北亚热带三个气候带,即陕北北部温带,陕北南部、关中和秦岭南坡(海拔 1000 米以上)暖温带,陕南北亚热带。特点是:春暖多风、气温回升快而不稳,降水少,陕北多大风沙尘天气;夏季炎热多雨,降水集中在 7~9 月,多雷阵雨、暴雨,渭北多冰雹、阵性大风天气,间有“伏旱”;秋凉较湿润、气温下降快,关中、陕南多阴雨天气;冬季寒冷干燥,气温低,雨雪稀少。

陕西温度的分布,基本上是由南向北、自西向东逐渐降低,全省平均气温 5.6~15.7℃。汉江河谷地区 14.0~15.7℃,关中平原 12.0~13.6℃,是全省热量资源最好的地方,陕北地区 8.5~12.0℃,长城沿线地区只有 7.8~8.5℃,秦岭和巴山中高山地区气温比较低,为 5.0~7.8℃。关中中东部和陕南安康东部是两个高温中心,极端最高气温达 41.0~43.4℃。

陕西年降水量的分布是南多北少,由南向北递减,受山地地形影响比较显著。全省年降水量 320~1258 毫米,陕南巴山地区年降水量达 900~1258 毫米,是陕西降水量最多的地区,陕北长城沿线年降水量只有 320~460 毫米,是我省降水量最少的地区。关中地区年降水量在 514~679 毫米之间,分布规律从东到西逐渐增多。全年降水高峰,陕北在 8 月,关中、陕南有两个,分别出现在 7 月上旬和 9 月上旬前后。7 月下旬至 8 月上旬,则为明显的少雨时段,形成了陕西有名的初夏旱和伏旱。

陕西各地降水量的季节变化明显，夏季降水最多，占全年的 39%~64%，秋季、春季、冬季。暴雨始于 4 月，于 11 月结束，主要集中在 7~8 月。关中、陕南春季第一场 ≥ 20.0 毫米的降水过程一般出现在 4 月上旬末到中旬。初夏汛期出现在 6 月下旬后期到 7 月上旬前期，此期间，暴雨相对集中，关中、陕南出现洪涝较多。秋季，我省关中、陕南又出现相对多雨时段，称为秋淋，即华西秋雨，一般出现在 9 月上旬末至中旬初。

对陕西威胁最大气象灾害包括干旱、暴雨、冰雹、大风、连阴雨、寒潮、沙尘暴等几种，其中旱涝是陕西普遍而重大的气象灾害，而干旱危害严重，范围更大。（杜继稳等，2006）

1.2 陕西对全球气候变化背景下的响应

气候系统的变暖是不争的事实。目前全球平均气温、海温的升高，大范围冰雪的融化以及海平面上升的观测事实都支持了这一观点。来自所有的大陆和多数海洋的观测证据表明，许多自然系统正在受到区域气候变化，特别是受到温度升高的影响。虽然由于自然的适应性以及非气候驱动因子的作用，许多影响还难以辨别，但仍有中等程度的可信度表明，区域气候变化对自然环境和人类已经产生了影响（IPCC，2007）。

温室气体浓度明显。增加主要受1750年以来的人类活动影响，全球大气CO₂、CH₄和N₂O浓度明显增加，目前已远远超出了根据冰芯记录得到的工业化前几千年的浓度值，1970—2004年期间全球温室气体（GHG）浓度增加了70%。

表1.1 IPCC报告提供的观测的全球近百年气温变化趋势（赵宗慈等，2007）

IPCC评估报告	温度变化/（℃/100a）		观测时段
	平均	范围	
第一次	0.45	0.3-0.6	1891-1989
第二次	0.45	0.3-0.6	1861-1994
第三次	0.60	0.4-0.8	1861-2000 1901-2000
第四次	0.74	0.56-0.92	1906-2005

注：除第一次报告的基准时段为1951-1980年外，其他次报告均为1961-1990年

人类活动是全球变暖的主要原因。在发布的《气候变化2007：自然科学基础》

的决策者摘要中指出：1750年以来，由于人类活动的影响，全球大气中 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 浓度显著增加，其中， CO_2 浓度已从工业化前约280ppm 增加到了2005年的379ppm；最近100年(1906~2005年)全球平均地表温度上升了 $0.56^{\circ}C\sim 0.92^{\circ}C$ ，比2001年第三次评估报告给出的100年(1901~2000 年)上升 $0.4^{\circ}C\sim 0.8^{\circ}C$ 有所提高；1961 年以来的观测结果表明，全球海洋温度的增加已延伸到至少3000m 深度，20世纪全球海平面上升约0.17m (IPCC，2007)。

极端气候事件发生频率增加。在《气候变化2007：影响、适应性、脆弱性》的决策者摘要中指出：21世纪中叶，在高纬度地区和湿热地区年径流量将增加10%~40%；在中纬度地区的干旱区年径流量将减少10%~30%，这些干热区将面临着严重的用水压力；干旱影响区的范围将进一步扩大，同时，暴雨发生频率增加，洪涝风险增大；冰川和雪盖，储水量减少 (IPCC，2007)。

陕西气候变化的响应。陕西省近 50 年来气候发生了明显的变化，年平均气温明显增高。1980s 全省年平均气温为 $11.5^{\circ}C$ ，1990s 为 $12.1^{\circ}C$ ，较 1980s 升高

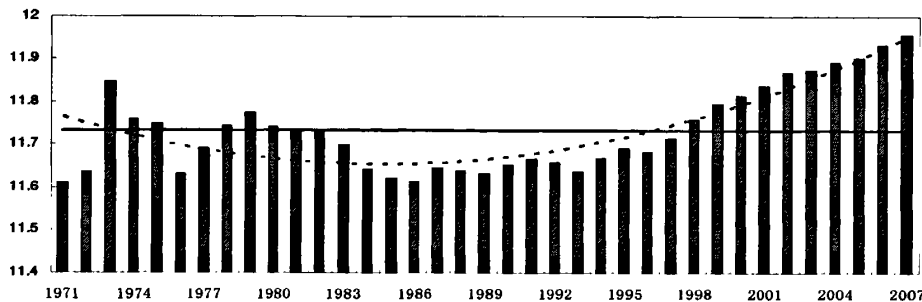


图 1.1 陕西省 1971—2007 年年平均气温变化图
(柱状图为年平均气温，实线为多年年平均气温，虚线为趋势线)

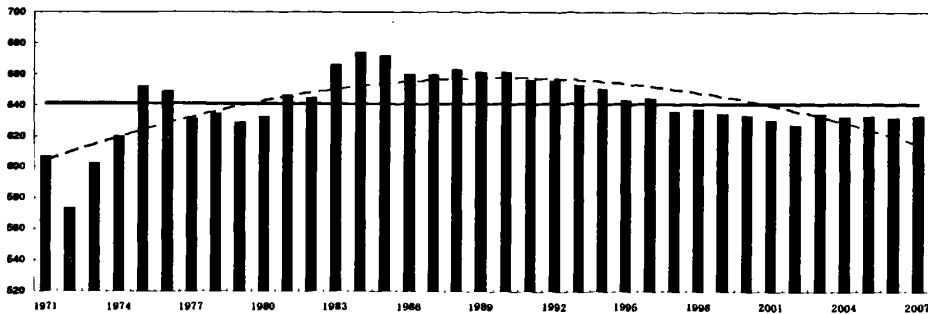


图 1.2 陕西省 1971—2007 年年平均降水变化图
(柱状图为年平均降水，实线为多年年平均降水，虚线为趋势线)

0.6℃；2000~2006 年年平均气温为 12.5℃，较 90 年代又升高 0.4℃。降水有明显减少的趋势。1991~1999 年平均降水量比 1961~1990 年平均值减少了 10%~20%（杨文峰等，2002；田武文等，2007）。气候变化表现在 3 个方面：一是极端降水频次增加，强度明显增强。过去的 50 年中，陕西省大部分地极端降水事件发生表现出明显的地域特征，陕北南部、关中大部、陕南大部地区年极端降水量呈明显的增加趋势，但年极端降水日数除关中部分地区、陕南中南部呈明显的增加趋势，我省其它地区年极端降水日数多呈正常略有减少的趋势，表明在年降水有明显减少的趋势下，我省一部分地区极端降水的频次减少，总量增加，其降水强度应有明显增强趋势。二是冬季寒冷日数减少。冬季寒冷日的确定采用在陕西省最寒冷的一月的月平均气温减去最低温度变差的平均临界值（3.5℃），冬季寒冷日平均最低温在过去的 50 年中呈上升趋势，全省大部上升趋势大约为 0.1~0.35℃/10a，但冬季寒冷日发生频率变化率全部为负，表明我省冬季寒冷日数有减少的趋势，冬季寒冷日的平均最低温度有上升趋势。三是夏季酷热日数增加。夏季酷热日的确定采用在我省最热的七月的月平均气温加上最高温度变差的平均临界值（3.5℃），夏季酷热日平均最高气温在过去的 50 年中呈上升趋势，全省大部上升趋势大约为 0.1~0.5℃/10a，其中陕北黄河沿线上升趋势大约为 0.35~0.5℃/10a，夏季酷热日发生频率变化率全部为正，陕北陕南夏季酷热日发生频率变化率的增加趋势在 4~10 天/10a，表明在全球气候变暖背景下不仅我省夏季酷热日数有增加的趋势，夏季酷热日的平均最高温度也有上升趋势（田武文等，2007；李平华等，2002；郑小华，2005；王川等，2005）。

1.3 关于气候变化情景

为了研究和评估气候变化对未来气候变化对社会、经济、生态系统可能产生的影响，科学家提出了“情景”（scenario）这一概念，它是“一种表达清楚、内部一致、有一定可信度的对未来社会或世界各种条件和发展状况的描述”。在不同气候变化情景下，推测在气候条件不变情况下未来社会经济及其他环境条件变化的影响。为了制定全球和区域气候变化的预测，还必须知道未来温室气体和硫化物气溶胶的排放情况，这被称为排放情景。这种排放情景是根据关于驱动因子的一套假设得出的。它包括人口增长率、经济发展速度、技术进步水平、环境

条件、全球变化情况、公平原则等。上述6个条件基本上决定着未来排放的数量和排放途径。IPCC共发展了两套排放情景，早先的是1992年的排放情景，主要用于第二次评估报告中气候模式的预测，称为IS92情景。第二套排放情景是2000年提出的，称作SRES（排放情景特别报告）情景（Nakicenovic et al., 2000），已用来代替IS92用于第三次评估报告中的气候预测中。SRES排放情景由A1、B1、A2、B2四种不同的情景族组成。SRES设定社会经济情景条件主要是基于定性地、整体地、历史地对未来可能出现的社会经济前景的描述。它们的含义如下：

A1 框架和情景系列描述的是一个这样的未来世界，即经济快速增长，全球人口峰值出现在 21 世纪中叶、随后开始减少，新的和更高效的技术迅速出现。其基本内容是强调地区间的趋同发展、能力建设、不断增强的文化和社会的相互作用、地区间人均收入差距的持续减少。

A2 框架和情景系列描述的是一个极其非均衡发展的世界。其基本点是自给自足和地方保护主义，地区间的人口出生率很不协调，导致持续的人口增长，经济发展主要以区域经济为主，人均经济增长与技术变化越来越分离，低于其它框架的发展速度。

B1 框架和情景系列描述的是一个均衡发展的世界，与 A1 描述具有相同的人口，人口峰值出现在世纪中叶，随后开始减少。不同的是，经济结构向服务和信息经济方向快速调整，材料密度降低，引入清洁、能源效率高的技术。其基本点是在不采取气候行动计划的情况下，更加公平地在全球范围实现经济、社会和环境的可持续发展。

B2 框架和情景系列描述的世界强调区域性的经济、社会和环境的可持续发展。全球人口以低于 A2 的增长率持续增长，经济发展处于中等水平，技术变化速率与 A1、B1 相比趋缓、发展方向多样。同时，该情景所描述的世界也朝着环境保护和社会公平的方向发展，但所考虑的重点仅仅局限于地方和区域一级。

可见，上述四种情景描述的是高经济发展情景、区域资源情景、全球可持续发展情景、区域可持续发展情景。

在研究气候变化影响和适应对策评估中设定未来社会经济情景时，可以把 SRES 的情景组合作为基础，然后在这一基础上进行调整，根据实际情况再适当增加一些其它影响未来社会经济发展的因素，以便建立起更适用于气候变化影响

及适应对策评估的未来社会经济情景组合。

本文选用的是第四种 (B2) 排放情景。

1.4 全球气候模式与区域气候模式

预测由于温室气体排放所引起的未来气候变化,全球气候模式(GCM)是一种有效的工具。国际上开发的 GCM 包括:日本的 CCSR/NIES、加拿大的 CGCM1/2、澳大利亚的 CSIRO-Mk2、德国的 ECHAM4/OPYC3、英国的 HadCM2/3 以及中国的 IAP 系列气候系统模式(陈明等,2000;罗勇等,2002;张冬峰,2005;鞠丽霞等,2006;Diffenbaugh et al.,2005;Mizuta et al.,2006;Kusunoki et al.,2006)。

杨侃等利用多个全球气候模式(GCM)的情景模拟结果分析只考虑温室气体效应的 IS92a GG 情景和同时考虑温室气体效应和硫化物气溶胶辐射效应的 IS92aGS 情景以及 SRESA2、B2 情景下宁夏区域 21 世纪地面气温和降水量的可能变化,并进行不确定性分析。结果发现各个 GCM 模拟的宁夏气候变化的总趋势是一致的,但各模式在不同情景下模拟结果的差异很大,存在较大的不确定性。

高学杰等使用 NCAR/CCM3 全球环流模式进行了 5 个集合 19 年(1979~1997)时间长度的观测海温强迫的 AMIP2 试验,对结果的中国区域部分进行了重点分析。首先给出了模式对中国地区基本气候态的模拟表明模式对这些区域的气温有较好的模拟效果,对降水的模拟效果则比较差。随后,考察了模式对历年中国汛期降水和气温的模拟预测,结果表明,模式对中国整体降水的模拟预测能力较差(高学杰,2001;高学杰,2003)。

与全球气候模式相比,区域气候模式(RCM)的分辨率有了很大的提高,模式能够模拟出更为合理的区域性强迫作用,如地形、河流/湖泊、城市建筑等(Dickinson et al.,1989;Giorgi et al.,1994)。目前大部分区域气候模式都采用了数值天气预报模式的动力框架,如美国国家大气研究中心(NCAR)第二代区域气候模式(RegCM2),意大利国际理论物理中心区域气候模式(RegCM-ICTP),中国气象局国家气候中心区域气候模式(RegCM-NCC),西北太平洋国家实验室区域气候模式(PNNL2RCM),中国科学院大气物理研究所区域环境系统集成模式(RIEMS)均采用了滨州大学/美国国家大气研究中心(PSU/NCAR)的中尺度数值天气预报模式 MM4 或 MM5 的动力框架,其动力结构更为准确合理,从而较传统的

统计方法更显其动力连续的特性。此外区域气候模式中的物理过程也更加详细, 包含了陆面和水文过程、边界层、云和降水、云-辐射相互作用, 部分还包含了大气化学过程。模式能够在一定程度上再现出地表温度和降水的平均日变化特征, 这是粗分辨率的全球环流模式无法比拟的。特别是由于选取的空间区域小, 区域气候模拟省时的经济效益尤其突出, 计算量也比全球环流模式有所减少(陈明等, 2000; 马艳等, 2006; 刘鸿波等, 2006; 孙颖, 2005; 鞠丽霞等, 2006; 冯锦明等 2007)。

尽管 RCM 是有效的动力降尺度分析工具, 但由于其模式的复杂性, 在中国利用 RCM 构建气候变化情景的工作较少。高学杰等利用区域气候模式 RegCM2 单向嵌套澳大利亚全球海—气耦合模式 CSIRO R21L9, 检验了 RegCM2 对中国当代气候的模拟能力, 并利用 RegCM2 预估 CO_2 倍增情景下中国区域未来平均地面气温将升高约 $2.5^{\circ}C$ 、平均降水约增加 12% (高学杰, 2003)。

1.5 极端气候事件

极端天气气候事件在气候学中的定义是与其发生的概率分布有关。当天气的状态严重偏离其平均态时就可以认为不易发生的事件, 不容易发生的事件在统计意义上称为极端事件。目前在气候极值变化研究中最多见的是采用 90% 百分位值作为极端值的阈值, 超过这个阈值的值被认为是极值, 该事件可以认为是极端事件; 从定义来看极端事件在通常情况下平均每年发生的频次是比较少的 (Giorgi et al., 2001)。

随着对全球气候变暖研究的深入, 气候变率以及极端天气和气候事件引起了科学工作者的重视。极端天气和气候事件主要包括洪涝、干旱、高温热浪、春寒和风暴等, 多数具有灾害性。极端气候事件潜在的变化对人类活动以及自然环境的影响要远大于气候平均态的变化 (Manabe et al., 1980)。

20 世纪 80 年代以来, 极端天气气候事件频繁发生, 给社会、经济 and 人民生活造成了严重的影响和损失。据估计, 1991~2000 年的十年里, 全球每年受到气象水文灾害影响的平均人数为 2.11 亿, 是因战争冲突受到影响人数的 7 倍。亚洲是遭受自然灾害袭击最频繁的大陆, 在 1990—2000 年间, 此地区自然灾害占全球所有极端气候事件的 43%。

表 1.2 极端天气现象当前的趋势、人类影响对这些趋势的影响及预测

(引自 IPCC 第四次报告)

气候变化现象和趋势方向	在 20 世纪晚期该趋势发生的可能性 (特别是 1960 年以后)	人类活动对观察到趋势影响的可能性	基于利用 SRES 情景对 21 世纪预测的 未来趋势的可能性
在大多数陆地地区气候变暖, 寒冷的白天和黑夜的天数也更少	非常可能 (Very likely)	可能 (Likely)	实际上肯定发生 (Virtually certain)
在大多数陆地地区气候变暖, 很热的白天和黑夜的天数也更多	非常可能 (Very likely)	可能(夜晚)* (Likely)	实际上肯定发生 (Virtually certain)
在大多数陆地地区, 发生更温暖天气/热浪的频率增加	可能 (Likely)	或许 (More likely than not)	非常可能 (Very likely)
在大多数地区, 发生强降水的频率(或大雨降雨量的比例)增加	可能 (Likely)	或许 (More likely than not)	非常可能 (Very likely)
受干旱影响的地区的面积增加	可能 (Likely) (许多地区从 20 世纪 70 年代开始)	或许 (More likely than not)	可能 (Likely)
发生更强热带气旋活动的次数增加	可能 (Likely) (许多地区从 20 世纪 70 年代开始)	或许 (More likely than not)	可能 (Likely)
海平面产生极端高度事件的次数增加(排除海啸)	可能 (Likely)	或许 (More likely than not)	可能 (Likely)

根据最近的统计,全球气候变化及相关的极端气候事件所造成的经济损失在过去 40 年平均上升了 10 倍 (IPCC, 2007)。

全球气候变化与极端事件的变化利用近 50 年全世界比较丰富的逐日地面观测资料,有科学家对 10 个温度和降水有关的极端事件监测指标的变化进行了研究。结果指出,与温度有关的指标在近 50 年中都显示出了显著的变化,如夏季暖夜显著增加,霜冻日数显著减少,年内温度极差显著减少等;但与降水有关的指标却反映出了显著的局地性,但连续 5 天最大降水量和大雨降水事件的频率却显著增加了 (高学杰, 2007; 林而达等, 2007;)。

对未来极端气候事件发生频次的模拟是发展区域气候模式的一个重要目标。尽管这方面的研究已经逐渐引起了科学家的关注 (Manabe et al., 1994; Rotach et al., 1997; Raisanen et al., 2001; Leung et al., 2004; gao et al., 2006; 陈起英等, 1996; 俞永强等, 1996; 宋玉宽等, 1996; 王彰贵等, 1996; Guo et al., 2001; 徐影等, 2002), 但由于受到未来的气候情景、气候系统可变性、全球环流模式以及区域气候模式等方面不确定性的影响,加上前期实验相对比较简单,因此对现有的模拟结果还需审慎分析。针对这种极端天气和气候事件,不能仅采用确定性方法,还需要在模拟过程中结合可预报性理论,应用集合预报和概率预报进行更多的实验,预测其未来的变化,从而为水资源管理、农业、交通、保险等部门提供科学的参考依据 (IPCC, 2007; 秦大河, 2007)。

1.6 主要研究内容

目前大多数的工作是针对陕西近 50 年以来的气候变化事实进行分析,针对陕西省未来气候变化情景的分析较少。本文在分析陕西省未来温度、降水变化的情景时,重点分析了未来干旱、高温、暴雨、连阴雨等天气气候事件发生的趋势,从未来的发生概率、时间演变、空间分布上进行了定量的描述,并结合代表站点,分析了单站的极端气候事件的变化趋势。

1、本文利用以 Hadley 气候中心高分辨率的 GCM 模式 (HadAM3P) 为其提供边界场和初始场的 PRECIS 模式 (水平分辨率为 $50 \times 50 \text{ km}$, 垂直方向分为 19 层, 积分时间步长为 5 min) 模拟陕西省的月平均、年平均气温和降水概况,并与气候基准时段的实况进行对比,评价其对陕西区域内气候状况模拟的效果。

2、利用 PRECIS 模式 SRES B2 情景下的资料分析 2071-2100 年间陕西省逐月、年的气温和降水的变化趋势,主要分析:降水日数、暴雨日数、高温日数的

变化以及月年平均气温、月年降水量的变化。在此基础上，分析未来陕西省暴雨、致洪暴雨、秋淋天气、蒸发量随温度变化的趋势以及未来干旱频次和区域变化的趋势。

3、选用于旱国家标准确定的指标评估 PRECIS 模式模拟干旱的能力，对未来干旱趋势进行模拟，并利用区域干旱动态指数对陕西各区域进行定性的干旱评估。

第二章 资料来源与研究方法

2.1 资料来源

(1) 实况资料

本文采用陕西省气象局档案馆提供的 1961—1990 年整编资料。包括逐日降水、逐日温度、逐月降水、逐月平均温度、逐年降水、逐年平均温度、逐月蒸发量、逐年蒸发量等资料。

在对于旱、高温等极端气候事件的验证中，由于部分站点的历史资料不完整，我们采用的是 1971—1990 年间的资料。

陕西省气象观测站共有 98 站（图 2.1），其中包含华山、太白等 2 个高山站，在温度资料的使用上，将此 2 站资料剔除。

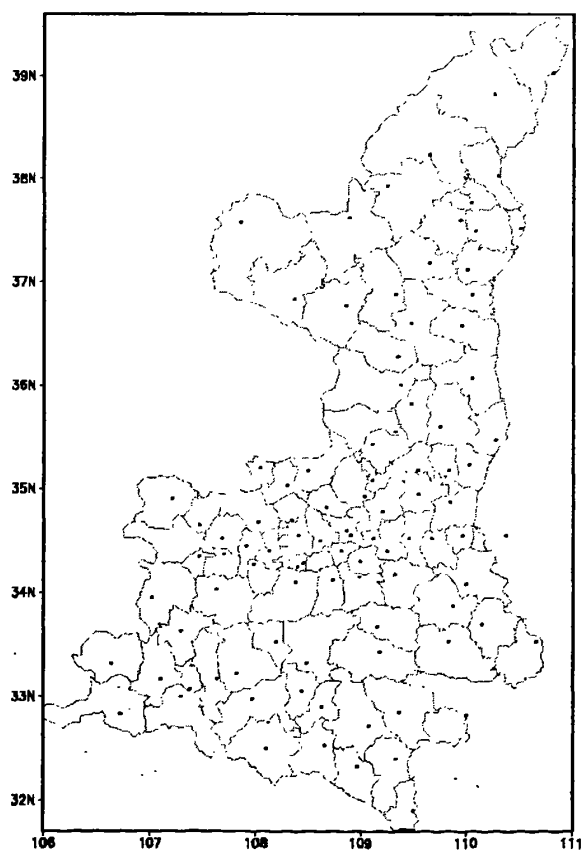


图 2.1 陕西省气象观测站分布图

2.2 模式介绍

2.2.1 PRECIS 模式介绍

区域气候模式系统 PRECIS 在 2003 年由中国农业科学院研究人员引入中国, 发展中国区域高分辨率的 SRES 气候变化情景。

英国气象局 Hadley 气候预测与研究中心发展的 RCM 系统 PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) 是由 HadAM3P 为其提供边界场和初始场, 包含气候基准时段、SRES A2 和 B2 情景下 2071—2100 年 HadAM3P 模拟的全球气候情景数据库、RCM 本身和运行 RCM 所需的其他数据库。HadAM3P 是 Hadley 气候中心海-气耦合全球气候模式 HadCM3 大气部分的最新版本。为给 PRECIS 提供高分辨率的边界场, 在 HadCM3 低水平分辨率(纬度 2.5° $\times$ 经度 3.75°) 网格模拟结果的基础上, 重新运行 HadAM3P 产生高分辨率(与 HadCM3 相比在经纬度方向上的水平分辨率各增加了一倍, 达到纬度 1.25° $\times$ 经度 1.875° 的边界场驱动 PRECIS。该系统包含了政府间气候变化委员会(IPCC) 2000 年设计的《排放情景特别报告》(SRES) 情景下的气候情景数据库、RCM 本身和运行 RCM 所需的数据库(许吟隆, 2005)。PRECIS 的大气部分应用静力平衡方程, 其水平分辨率在旋转坐标下为纬度 0.44° $\times$ 经度 0.44° , 在中纬度地区水平格点间距约为 50 km, 积分时间步长为 5 min。垂直方向采用 σ 坐标, 分为 19 层, 最上层为 0.5hPa。水平方向计算应用 Arakawa B 网格, 应用水平扩散项控制非线性不稳定。PRECIS 包含硫化物气溶胶辐射作用的选项。侧边界采用松弛边界条件, 陆地边界层应用的是 MOSES (Met Office Surface Exchange Scheme) 方案。PRECIS 对海洋下垫面的处理为: 对气候基准时段的模拟应用观测的 1° 网格的海表面温度(SST)和海冰数据, 对未来的情景模拟则是将海-气耦合模式 HadCM3 模拟的 SST 和海冰在相应情景下相应时段相对于气候基准时段模拟结果的变化值叠加到 SST 和海冰的观测值上 (Hadson et al., 2002)。

2.2.2 PRECIS 模式在国内的应用情况

许吟隆等利用 Hadley 气候预测与研究中心的区域气候模式系统 PRECIS 单向嵌套该中心全球海-气耦合气候模式 HadCM3 高分辨率的大气部分 HadAM3P, 分析 PRECIS 对中国区域当代气候的模拟能力和 SRESB2 情景下 2071~2100 时段 (2080s) 相对于气候基准时段 (1961~1990 年) 中国区域的气候变化响应。气候基

准时段的模拟结果与观测资料的对比分析表明:PRECIS 能够很好地模拟中国区域地面气温的局地分布特征;总体上讲,PRECIS 对中国北方地区降水的模拟效果优于南方地区,模拟的冬季降水型态分布较好,而夏季降水对地形比较敏感,东南沿海地区降水的模拟值偏低。对 SRES B2 情景下相对于气候基准时段的气候变化响应分析表明:2080s 中国北方地区增温幅度明显大于南方,西北和东北地区尤为显著,其夏季平均气温增幅可达 5℃以上;中国大部分地区降水量呈增加趋势;冬季华南地区降水量明显减少;夏季东北和华北地区气温增幅大而降水量减少明显,而长江以南地区降水量显著增加(许吟隆等,2004)。

徐宾等选定 4 种大小不同的模拟区域设置 25km 水平分辨率的 PRECIS 系统于宁夏地区,利用欧洲中期天气预报中心(ECWMF)1978 年 12 月~1979 年 9 月的再分析数据作为准观测边界条件驱动 PRECIS,通过模拟的宁夏地区冬夏两季日平均气温和降水与观测资料的对比,分析 25km 水平分辨率气候模拟结果对模式区域选择的敏感性。结果表明:25km 水平分辨率的 PRECIS 在 4 种不同模拟区域下都能较好地模拟宁夏地区典型年的日平均温度和降水量,尤其是对降水的模拟效果更好;总体上,PRECIS 的模拟效果随着模拟区域的缩小而下降,但 PRECIS 在中小模拟区域下仍然能够获得较好的模拟效果(徐宾等,2007)。

张勇等利用 Hadley 气候预测与研究中心的区域气候模式系统 PRECIS 进行中国区域气候基准时段(1961~1990 年)和 SRES B2 情景下 2071~2100 年(2080s)最高、最低气温及日较差变化响应的分析。气候基准时段的模拟结果与观测资料的对比分析表明:PRECIS 具有对中国区域最高、最低气温及日较差的模拟能力,能够模拟出中国区域最高、最低气温及日较差的局地分布特征。对 SRES B2 情景下相对于气候基准时段的最高、最低气温及日较差变化响应分析表明:中国区域 2080s 时段年、冬季和夏季平均最高、最低气温变化均呈一致增加的趋势,北方地区增温幅度普遍大于南方地区。夏季东北地区极端高温事件发生的频率将会增加,而冬季华北地区极端冷害事件发生频率将会减少。未来中国区域年平均日较差将出现北方地区减小而南方地区增加的趋势。冬季长江中下游以南地区日较差呈增加趋势,而夏季华东地区、西北地区及内蒙古中部日较差将呈减小趋势,其中在青藏高原北部地区存在一个较强的低值中心(张勇等,2007)。

图 2.2 给出了本文 PRECIS 模拟的区域范围, 取经度 105~112° E、纬度 30~40° N 内的格点, 共计 22×28。

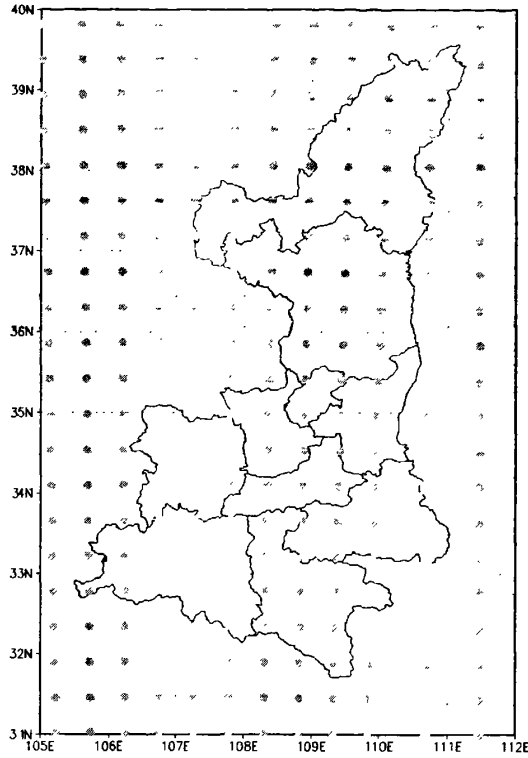


图 2.2 本文使用的 PRECIS 的模拟区域 (圆点为格点)

2.3 资料分析方法

2.3.1 用最小二乘法做线性趋势分析 (变率分析)

用最小二乘法拟合直线处理数据时, 得到的斜率和截距都是唯一的。

最小二乘法就是将一组符合 $Y=a+bx$ 关系的测量数据, 用计算的方法求出最佳的 a 和 b 。显然, 关键是如何求出最佳的 a 和 b 。

设直线方程的表达式为:

$$y = a + bx$$

设: $d_1 = y_1 - a - bx_1$, $d_2 = y_2 - a - bx_2$, ..., $d_n = y_n - a - bx_n$

当 $d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2$ 对 a 和 b 为最小时, $d_1, d_2, \dots, d_n$ 也为最小。取 $(d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2)$

$+d_n^2$) 为最小值, 求 a 和 b 的方法叫最小二乘法。

$$\text{令 } D = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - a - bx_i]^2$$

D 对 a 和 b 分别求一阶偏导数和二阶偏导数, 为满足最小值条件, 令一阶偏导数为零:

$$\sum_{i=1}^n y_i - na - b \sum_{i=1}^n x_i = 0$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i - a \sum_{i=1}^n x_i - b \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0$$

$$\text{引入平均值: } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \quad \overline{x^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2; \quad \overline{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

$$\text{则: } \bar{y} - a - b\bar{x}$$

$$\text{解得: } \begin{cases} a = \bar{y} - b\bar{x} \\ b = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} \end{cases}$$

将 a 、 b 值带入线性方程 $y=a+bx$, 即得到回归直线方程。

2.3.2 气象干旱等级

气象干旱也叫大气干旱, 它是指在某时段内, 由于蒸发量和降水量的收支不平衡, 水分支出大于水分收入而造成的水分短缺现象。造成这种干旱的根本原因是水分短缺, 主要原因有两方面: ①降水不足; ②高温、地面风速等的影响又加剧了地面水分的蒸发所致 (张养才等, 1991; 王密侠等, 1998)。

为了客观地表述气象干旱, 人们从降水、蒸发等方面出发, 提出了若干气象干旱指标 (姚玉璧等, 2007; Karl, 1986; Dai Aiguo et al, 2002; Hayes et al, 1999; William, 1984; 李星敏等, 2007; 杨小利, 2007; 刘庚山等, 2004; 张存杰等, 1998; 鞠笑生等, 1997; 袁文平等, 2004; 张强等, 1998; 樊高峰等, 2006; 刘巍巍等, 2003; 卫捷等, 2003; 朱炳瑗等, 1998; 宫德吉, 1998; 宋连春等, 2003; 谭桂容等, 2002; 袁文平等, 2004; 邹旭恺等, 2005; 杨青等, 1994; 冯利华, 2003)。

本文选用降水量距平百分率指数 (P_a):

降水量距平百分率指数是指某时段的降水量与常年同期气候平均降水量之差与常年同期气候平均降水量相比的百分率,可计算任意时段不同地区的干旱情况,但一般适用于统计月尺度、季尺度和年尺度的干旱情况(引自国家标准《气象干旱等级》(GB/T 20481—2006))。

计算方法:

某时段降水量距平百分率 (P_a), 按式 (1) 计算:

$$P_a = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

P —某时段降水量, 单位为毫米 (mm);

$\bar{P}$ —计算时段同期气候平均降水量, 单位为毫米 (mm)。

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

式中:

n 为 1—30 年, $i=1, 2, \dots, n$ 。

2.4 本章小结

本章主要分 3 方面的内容。

一是介绍了本文采用的资料来源, 实况来自陕西省气象局档案馆的 1961—1990 年气象整编资料, 模式数据由英国 Hadley 中心提供的 PRECIS 模式数据。

二是介绍 PRECIS 模式, 该模式由中国农业科学院引进, 对我国华南、宁夏等地气候变化做了验证, 证明该模式具有良好的模拟的能力。

三是介绍本文所用到的计算方法和引用的国家标准, 在进行变率分析时用到最小二乘法; 在干旱的分析中引用的是《气象干旱等级》国家标准 (GB/T 20481—2006) 以降水距平作为评估干旱指标的方法。

第三章 PRECIS 模式对陕西气候模拟能力的验证

PRECIS模式对宁夏、华南等地以及全国区域内的平均气候状况都进行过验证,总的来看,能够模拟出月平均气温逐渐升高的趋势以及逐日平均、最高和最低气温发生频率的分布特征,还能较好的模拟出年平均和某些季节的降水基本的空间差异和季节分布特征,但对部分月份的平均降水的模拟值整体偏高(许吟隆等, 2005; 徐宾等, 2007; 张勇等, 2007; 陈楠等, 2008)。

本文主要分析该模式对陕西极端气候事件的情景分析,因此,有必要利用该模式对陕西的温度、降水的模拟能力做详细的验证。

验证所用的模式资料是应用由 ECMWF 再分析数据作为准边界条件驱动的 PRECIS 对陕西的地面温度和降水的模拟结果,时间取气候基准时段为 1961—1990 年,实况采用的是同时段的陕西省地面观测资料。

验证的主要内容是:逐月气温和降水,逐年的气温和降水的变化趋势,降水日数、暴雨日数的变化趋势,同时选取了代表站点,验证其变化趋势。

3.1 月平均温度

图 3.1 是陕西省气候基准时段各月平均气温 PRECIS 模式与实况对比图,其中 a-h 为 PRECIS 模式模拟图, i-w 为实况分布图。

从图上可以看出,模拟值与实况值的空间分布具有很好的一致性。关中地区中东部为陕西气温的高值区,这在 PRECIS 模式图上有很好的模拟。但是在秦岭以南的陕南地区模拟温度较低,与实况图中出现的高值区在强度和范围上对应不很一致。

这可能与秦岭地形有关。秦岭是亚洲东部暖温带与亚热带之间的分界线,又是中国大陆中东部海拔最高的东西向山地,其主脊地段和高峰主要分布在陕西省境内,而且主脊南北地区在气候、水文特征及其垂直自然带谱等方面存在明显差异。近 50 年来,随着气候变暖,秦岭山地的气候分界作用明显。陕南与关中两区域内的年均气温的差值变化与中国气温变化呈负相关关系,即当中国气温增高时,陕南与关中年均气温的差值小,即陕南气温变化较小,关中气温升高,秦岭的气温分界作用较强(康慕谊等, 2007; 张新时, 1994; 刘华训等, 1981)。

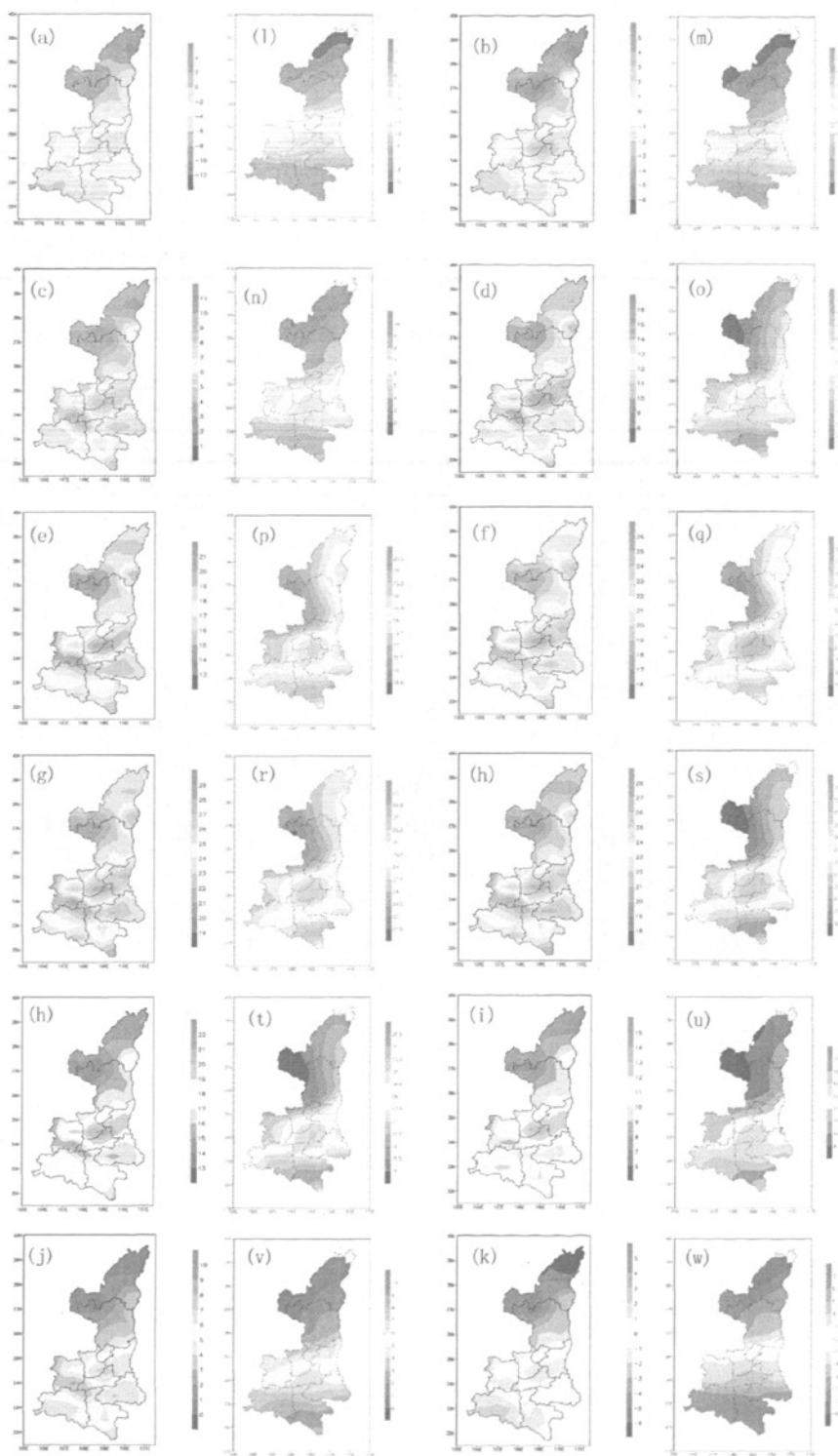


图 3.1 陕西省 1961-1990 年各月平均气温模式与实况对比
(a-h 为 1-12 月模式模拟图, i-w 为 1-12 月平均温度实况图)

由于秦岭山区气象观测站点较为稀疏，加之地形引起的局地的变化，这些变化特征还需要进一步验证。

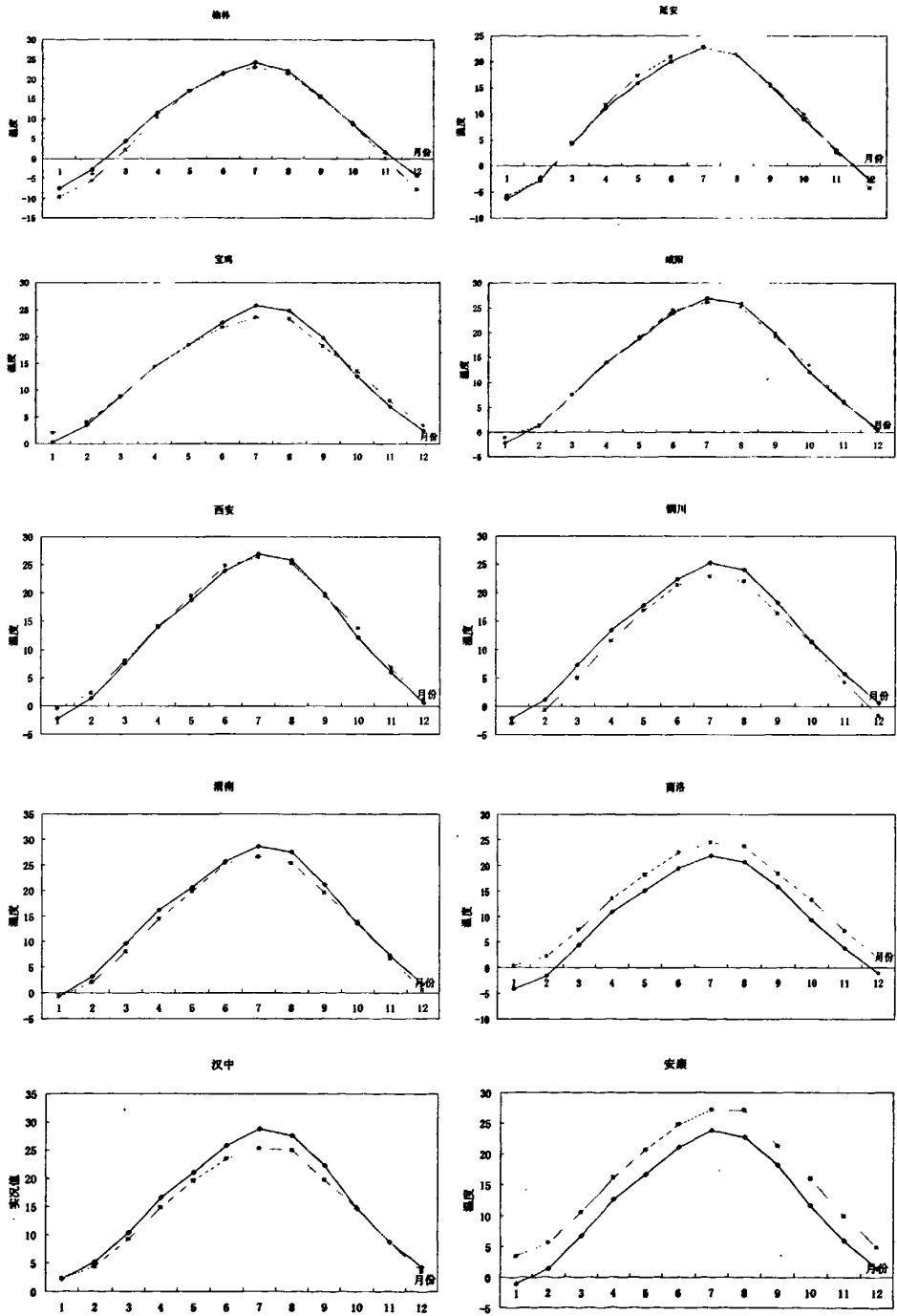


图 3.2 陕西 10 个代表站 1961-1990 年月平均温度数值模拟值与实况观测站对比图
(蓝色线条为数值模拟值，红色为实况值)

图 3.2 是选取陕西的 10 个代表站点，验证其模拟效果，进一步说明，模式对陕北和关中地区的模拟能力要好于对陕南地区，陕南地区明显较实况偏小。

3.2 年平均气温

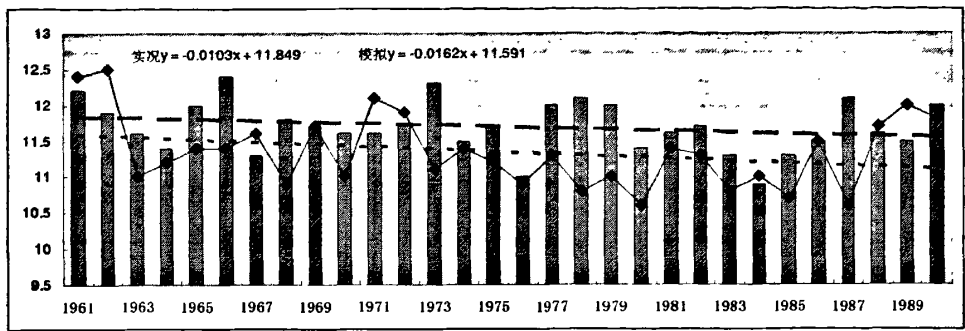


图 3.3 陕西省气候基准时段实况与模拟年平均气温变化图（℃）
（柱图为实况值，折线为模拟值，虚线为趋势线）

图 3.3 是陕西省气候基准时段实况与模拟年平均气温变化图。从全省平均水平来看，实况平均值为 11.69℃，模拟值平均值为 11.34℃，模式模拟值较实况值偏低 0.35℃，但模拟值趋势线与实况值线性趋势线一致，其中实况值温度变率为-0.1℃/10a，模拟值温度变率为-0.16℃/10a，均为线性降低的趋势，一致性较好。

模拟对应较好的时段为 1960S 年代以及 1980S 年代，均值和高低年份较为吻合，1970S 模拟值较实况值偏低。

图 3.4 给出了陕西省气候基准时段实况与模拟多年平均气温分布图，从温度分布的角度来看，最大值区为 2 个，即陕南西部和关中中东部，实况陕南南部应为温度最高区域、关中中东部为次最高区域，两者比较，陕南的温度最大值区缩小到陕南西部；低温区模拟结果与陕北较为吻合，只是模拟值低温区较小，没有延伸到陕北南部地区。

从温度量级来看，年平均温度仅陕南东南部偏低幅度较大，偏低约 3—4℃，其他地区温度为略偏低、持平或略偏高，最大幅度不超过 1.5℃；从百分率来看，陕北陕南偏低较为明显，关中、渭北地区偏高较为明显，偏低区域略大于偏高的区域。

从总体上来说，模拟与实况的 30 年全省平均温度、30 年温度变化趋势、逐站逐年温度、温度量级等偏差不大，模拟效果良好。

这说明模式对多年平均气温变化的模拟能力较强。

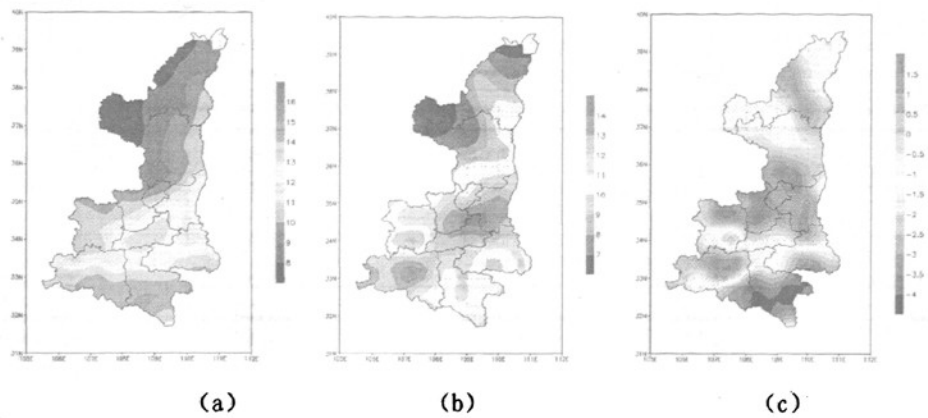


图 3.4 陕西省气候基准时段多年平均气温实况与模拟图

(a) 实况 (°C) (b) 模拟 (°C) (c) 年平均温度模拟与实况的差值 (°C)

为了更好的说明模式对陕西年平均温度的模拟能力，本文选择陕西十个地市台站作为代表站来说明模式陕西不同区域温度的模拟能力（见表 3.1）。

表 3.1 陕西代表站点多年平均温度实况与模拟值比较

站点名称	实况 (°C)	模拟 (°C)	单站比较		区域比较	
			差值(°C)	百分率(%)	差值(°C)	百分率(%)
陕北	榆林	8.0	9.3	1.3	16.3	
	延安	9.5	9.5	0.0	0.0	
关中	宝鸡	12.9	13.7	0.8	6.2	
	咸阳	12.9	15.2	2.3	17.8	
	西安	13.4	13.3	-0.1	-0.7	
	渭南	13.4	14.5	1.1	8.2	
	铜川	10.5	9.7	-0.8	-7.6	
陕南	汉中	14.2	15.6	1.4	9.9	
	安康	15.6	13.9	-1.7	-10.9	
	商洛	12.8	10.7	-2.1	-16.4	

结果表明：年平均温度的差值在 3℃ 以内，误差百分率大于 10% 的有 4 站，依次为咸阳、商洛、安康和榆林，其余各站误差均小于 10%，其中误差较小的为延安、西安，误差百分率小于 1%。从区域模拟的效果来看，陕北、关中和陕南的区域平均误差均小于 10%，关中最小。结合单站模拟的效果，说明模式对陕西南部（即延安及以南）以及关中地区的多年平均温度的模拟效果较好。

3.3 高温热浪

以日极端最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 为一高温日，连续 3d $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 为一次高温天气过程，将日最高气温 $\geq 38^{\circ}\text{C}$ 称为酷热日。陕西高温常出现于 6、7、8 月，持续天数可长达十余天之久。

因 1971 年前部分站点数据不完整，这里选取 1971—1990 年的日最高气温的实况和模式数据，来分析高温热浪的模拟效果。

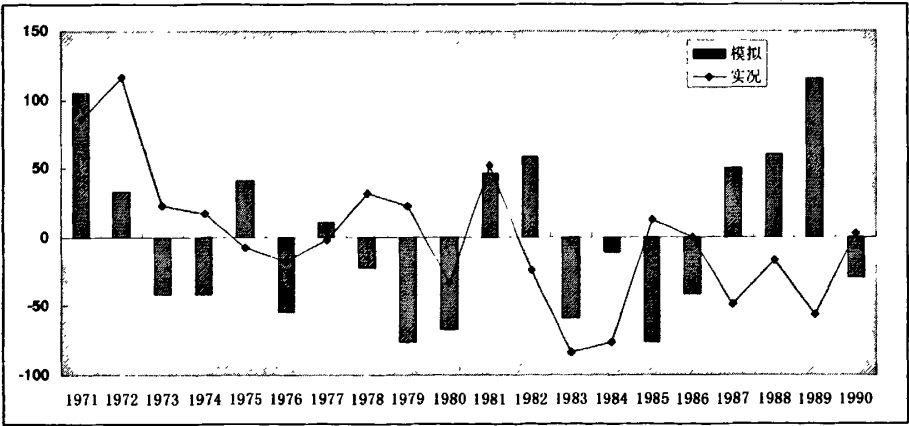


图 3.5 陕西 1971—1990 年高温日数变化距平百分率（柱状图为模式模拟值，折线图为实况值）

从陕西 1971—1990 年高温日数变化距平百分率（如图 3.5）中可见，陕西高温实况日数在 1970s 初有一个高峰，然后进入稳定减少的时期，模式对 1970s—1980s 前期的高温变化有较好的模拟，对 1980s 后期的减少（主要是 1987—1989 年）趋势模拟较弱，但总体对高温日数变化趋势的模拟还是较为一致的，在 1971—1986 年还较为一致，尤其是对 1970s 初和 1980s 初中期的模拟。

图 3.6 给出了 1971—1990 年陕西省年均高温发生的频次，实况图 3.6 (a) 在关中中东部以及渭南的黄河沿线出现了高温频次极大值区域，其中高值中心在

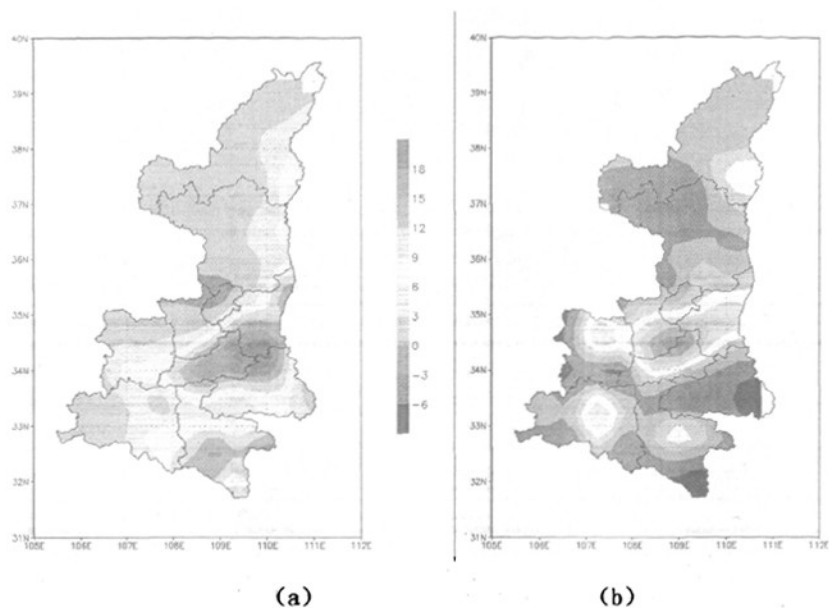


图 3.6 1971-1990 年实况 (a) 与模拟 (b) 年均高温频次 (单位: d)

西安和渭南市, 陕南安康地区中南部也市高值区域, 其中渭南、长安、临潼、华阴、安康等地的年均高温日数超过 20 天, 又以华阴的 23 次为最多。模式较为准确的模拟出陕西关中地区这个高值中心, 位置较为吻合, 但未能模拟出陕南安康地区的高值中心, 其他地区的模拟效果也较好, 只是总体值偏大 (图 3.6b)。这说明, 模式能较好的分析出关中平原地区的高温变化趋势, 但对山地地区的高温变化趋势模拟较为薄弱。

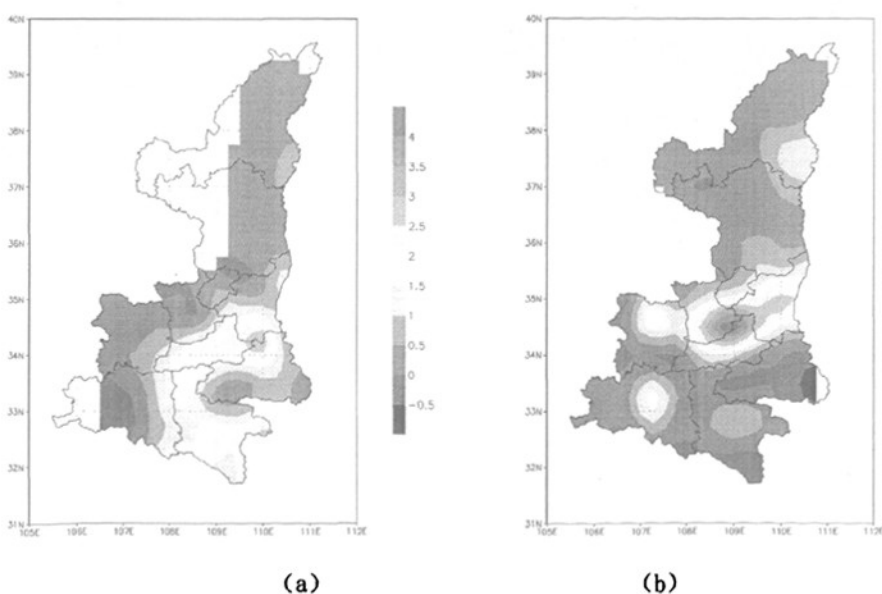


图 3.7 1971-1990 年实况 (a) 与模拟 (b) 年均热浪频次 (单位: d)

图 3.7 给出了 1971-1990 年陕西省年均热浪发生的频次。实况（图 3.7a）显示，关中中东部和安康南部为热浪的高发区，约为 5 次/a，其余各地在 0—3 次/a。模拟（图 3.7b）显示，关中大部和汉中局部为热浪高发区，与实况相比较，显然汉中局部的高值区存在一定的误差。从数值上看，除高值区的值偏大外，其余各地发生频次也在 0—4 次/a，与实况值相比误差不大。

3.4 降水日数

图 3.8 是 1971-1990 年多年年均降水频次模拟与实况对比图，实况图频次较高区域为秦岭沿线以及秦岭以南的陕南地区，陕北西北部为沙漠地带，降水频次最小；模拟结果显示，汉中地区、关中中部存在 2 个较为显著的降水频次低值区，陕北榆林存在一个低值带，其他地区实况与模拟的分布效果较好。

从量级来看，模拟值对陕西降水频次的模拟偏大区域大于偏低区域，陕北沙漠地区、陕北东北部模拟值偏大幅度较大，大部分区域的偏差小于 10%。这说明，模式对年降水日数的模拟与实况值之间的存在较好的一致性。

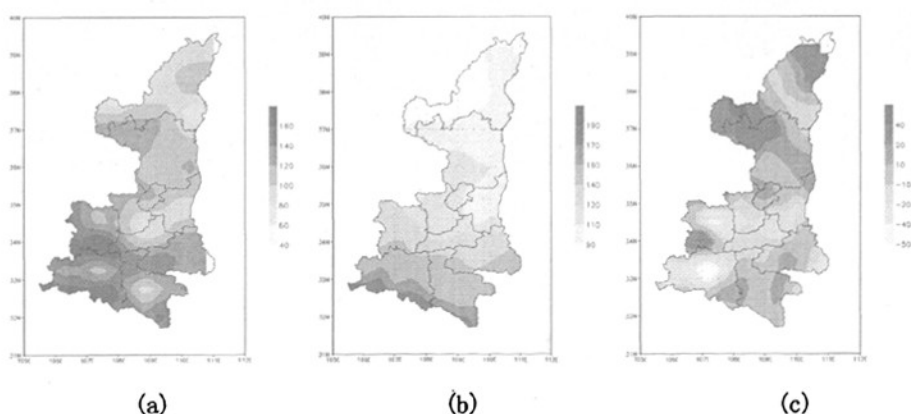
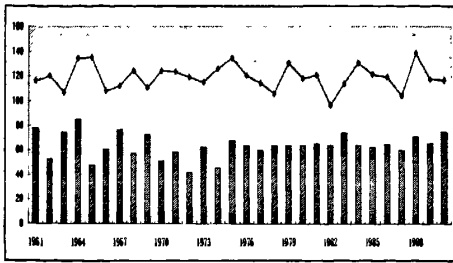


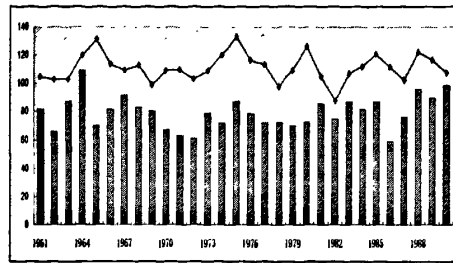
图 3.8 1971-1990 年年均降水频次
(a) 模拟 (单位: d) (b) 实况 (单位: d) (c) 差值 (%)

为了了解降水日数逐年的模拟情况，本文选取了陕西的代表站点（代表陕北）、（代表关中地区）、（代表陕南地区），并绘制了各站逐年的降水日数变化曲线（模拟值）和柱状图（实况值），可以很明显的看到（图 3.9）：

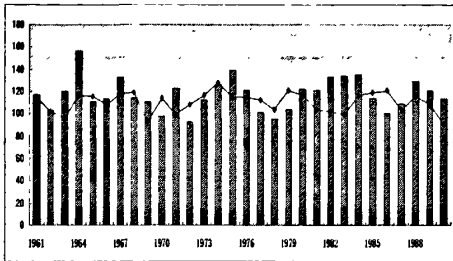
- 1、陕北地区模拟值偏大
- 2、关中四站的模拟值与实况值较为一致，模拟效果最好



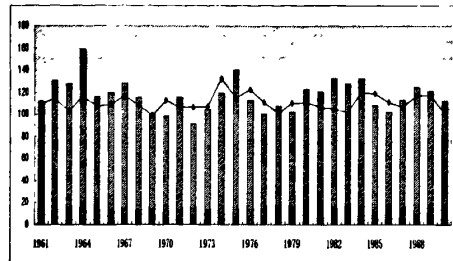
榆林



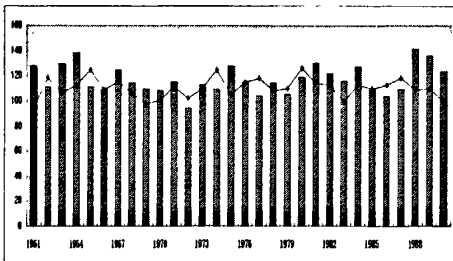
延安



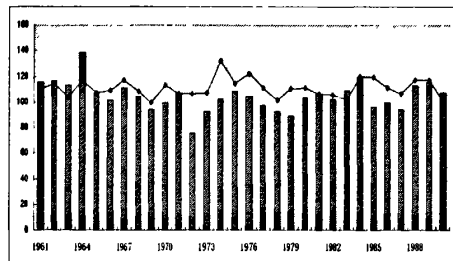
渭南



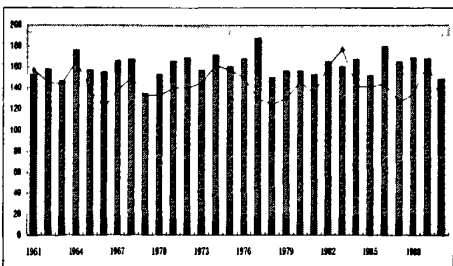
咸阳



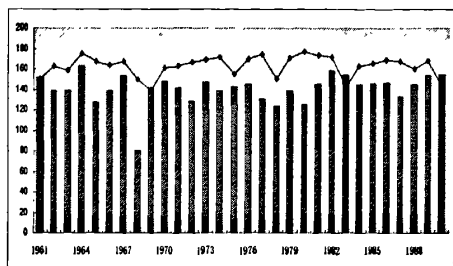
宝鸡



西安



安康



汉中

图 3.9 陕西省主要代表站点降水日数年均频次图
(柱状图为实况, 折线为模拟值)

3、陕南安康市模拟效果好于汉中的模拟效果, 说明对陕南东部地区的模拟效果要好于对陕南西部的模拟效果。

4、从总体效果来看, 虽然陕北的模拟量级差别较大, 但是从趋势上分析,

降水日数偏多偏少年份的变化上模拟效果较好, 如延安站, 1964、1975、1981、1985、1988 这 5 个降水日数偏多的年份模拟效果一致性较好。

3.5 年暴雨日数

由图 3.10 可以分析出, 暴雨发生频率最高的区域是陕南中西部, 模式较好的反映了这一趋势, 但模式对陕北南部暴雨发生的频率模拟较大。另外模式还在秦岭西部模拟出一个高值中心, 但在实况图上并未出现这个高频中心。从量级上分析, 除模拟的高值中心量级较大外, 全省其他地区的值均在 6 次/a 以下, 与实况值较为接近。

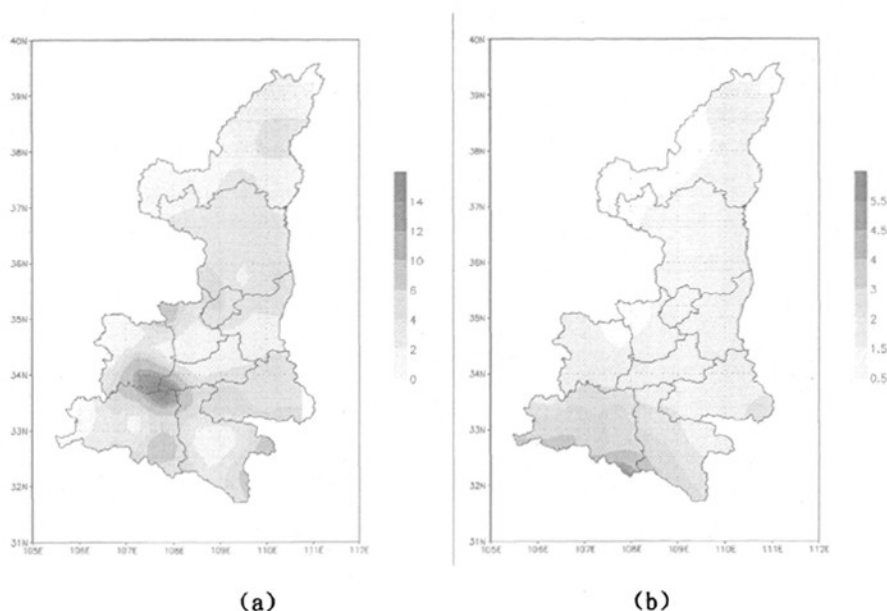


图 3.10 年均暴雨日数模拟 (a) 与实况 (b) 对比

3.6 本章小结

本章利用气候观测基准资料 (逐日降水、逐日温度、最高温度) 和 PRECIS 模式模拟的逐日降水和温度资料, 分析了月年平均气温的演变特征的模拟能力以及高温热浪的发生频率的模拟能力, 并分析降水日数以及暴雨日数特征的模拟能力, 得出以下结论:

(1) 月平均气温: 从空间分布对比上来比较, 模拟值与实况值的分布具有很好的一致性, PRECIS 模式图上很好的模拟出关中地区中东部这个区域为陕西

月平均气温的高值区。只是秦岭以南的陕南地区模拟温度较低。

(2) 年平均温度: 全省年实况温度平均值为 11.69°C , 模拟值平均值为 11.34°C , 模式模拟值较实况值偏低 0.35°C , 误差小于 3%。模拟值趋势线与实况值线性趋势线一致, 其中实况值温度变率为 $-0.1^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 模拟值温度变率为 $-0.16^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 均为线性降低的趋势, 一致性较好。

模式对陕北南部(即延安地区)以及关中地区的多年平均气温模拟较好, 从代表站的分析上可见, 其误差在 5% 左右。

从总体上来说, 模拟与实况的 30 年全省平均温度、30 年温度变化趋势、逐站逐年温度、温度量级等偏差不大, 模拟效果良好。这说明 PRECIS 模式对多年气温的变化具有很好的模拟能力。

(3) 高温热浪: 模式较为准确的模拟出陕西关中地区这个高温 ($\geq 35^{\circ}\text{C}$) 的高值中心, 位置较为吻合, 但未能模拟出陕南安康地区的高值中心, 其他地区的模拟效果也较好。

模式模拟的年均热浪 ($\geq 38^{\circ}\text{C}$) 发生频次与实况在分布上均显示关中地区为高值区域, 除数值上偏大之外, 其余各地发生频次也在 0—4 次, 与实况值相比误差并不大。

(4) 降水日数: 是 1971—1990 年多年年均降水频次模拟与实况对比图, 实况图频次较高区域为秦岭沿线以及秦岭以南的陕南地区, 陕北西北部为沙漠地带, 降水频次最小; 模拟结果显示, 汉中地区、关中中不存在 2 个较为显著的降水频次低值区, 陕北榆林存在一个低值带, 其他地区实况与模拟的分布效果较好。

从量级来看, 模拟值对陕西降水频次的模拟偏大区域大于偏低区域, 陕北沙漠地区、陕北东北部模拟值偏大幅度较大, 大部分区域的偏差不大于 10%。这说明, 模式对年降水日数的模拟与实况值之间的存在较好的一致性。

(5) 暴雨日数: 暴雨发生频率最高的区域是陕南中西部, 模拟值较好的反映了这一趋势, 但对陕北暴雨发生的频率模拟较大。

第四章 陕西省未来气候变化情景分析

本章将利用 PRECIS 模式提供的 2071—2100 年的温度和降水资料，对陕西省未来的气温、降水的演变特征加以分析，试图描述温度、降水的变化特征，并对陕西极易发生的暴雨、秋季连阴雨、伏旱、高温热浪、极端气温等极端气候事件发生的概率进行分析。

4.1 年平均温度

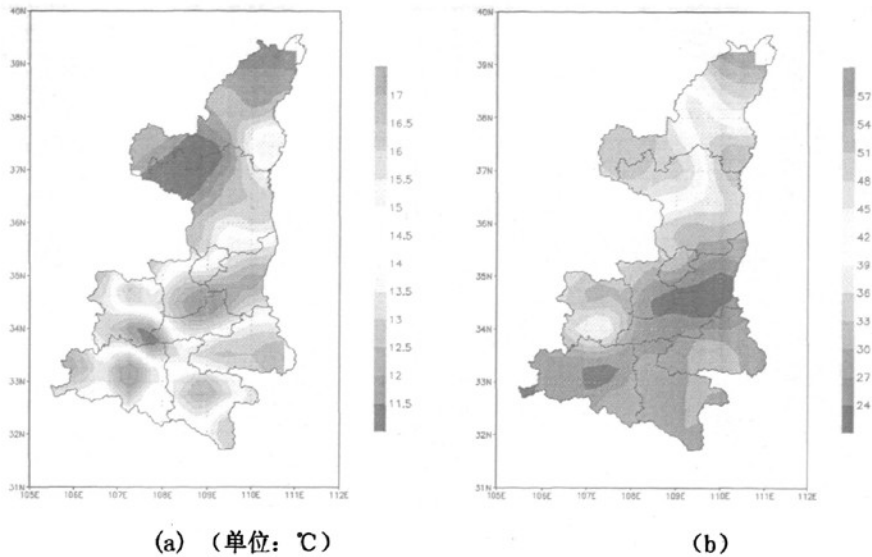


图 4.1 2071-2100 模拟气温年平均值 (a) 较气候基准时段变化百分率 (b)

从图 4.1 (a) 2071-2100 年模式模拟气温年平均值分析，未来陕西温度的高值区主要还是位于陕南和关中地区，且关中地区高值区范围将有所扩大，可能延伸到渭北地区。渭北是陕西的苹果主产区，单从温度升高的角度分析，未来热量条件对苹果果实膨大、着色和收获较为有利（郑小华，2005）。

从量级来看，全省未来年均气温都将增高，只是增温幅度不同。未来增温较快的是陕北地区，陕北地区大部分（延安市以北）地区增温幅度在 40% 以上。其他地区增温幅度在 30% 左右，年平均温度较高的陕南和关中中东部的增幅幅度较小，在 20% 左右。

总体来看，未来陕西的增温趋势是北部增幅大、中部以及南部增幅较小。对于陕北黄土高原和沙漠地区来说，单从气温变化的角度来看，未来气温的升高可能会加剧该地区的干旱化的趋势。

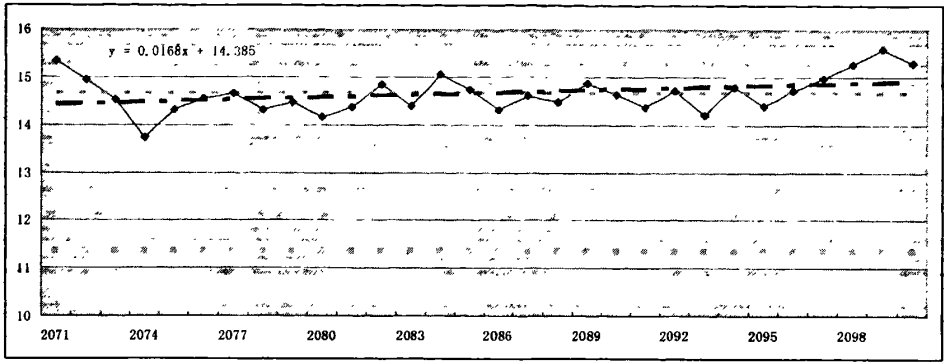


图 4.2 未来 2071—2100 年气温逐年变化趋势图（℃）
（点划线为趋势线，绿色虚线为 2071—2100 年多年平均值，红色线为气候基准时段多年平均值）

图 4.2 是未来逐年气温变化的趋势图，2070S 初期和 2090S 末期是年平均温度的较高时期，其他时段年平均温度变化幅度不大，模拟值显示，B2 情景下，未来全省年平均气温将增大 3℃ 以上，未来气温变率为 0.17℃/10a，仍然呈现增温的趋势，只是增温的幅度放缓。

4.2 月平均温度

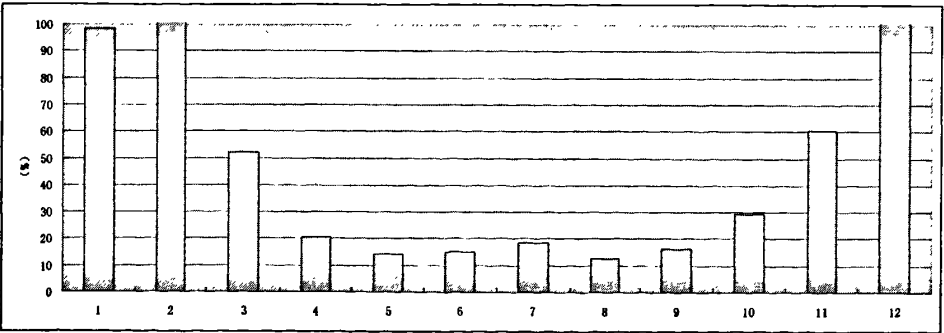


图 4.3 2071—2100 年 1—12 月月平均气温模拟值较气候基准时段年变化百分率

图 4.3 给出的是 2071—2100 年月平均气温模拟值较气候基准时段变化百分率图，未来气温变化幅度最大的是冬季（12、1、2 三个月），其中 12 月和 2 月

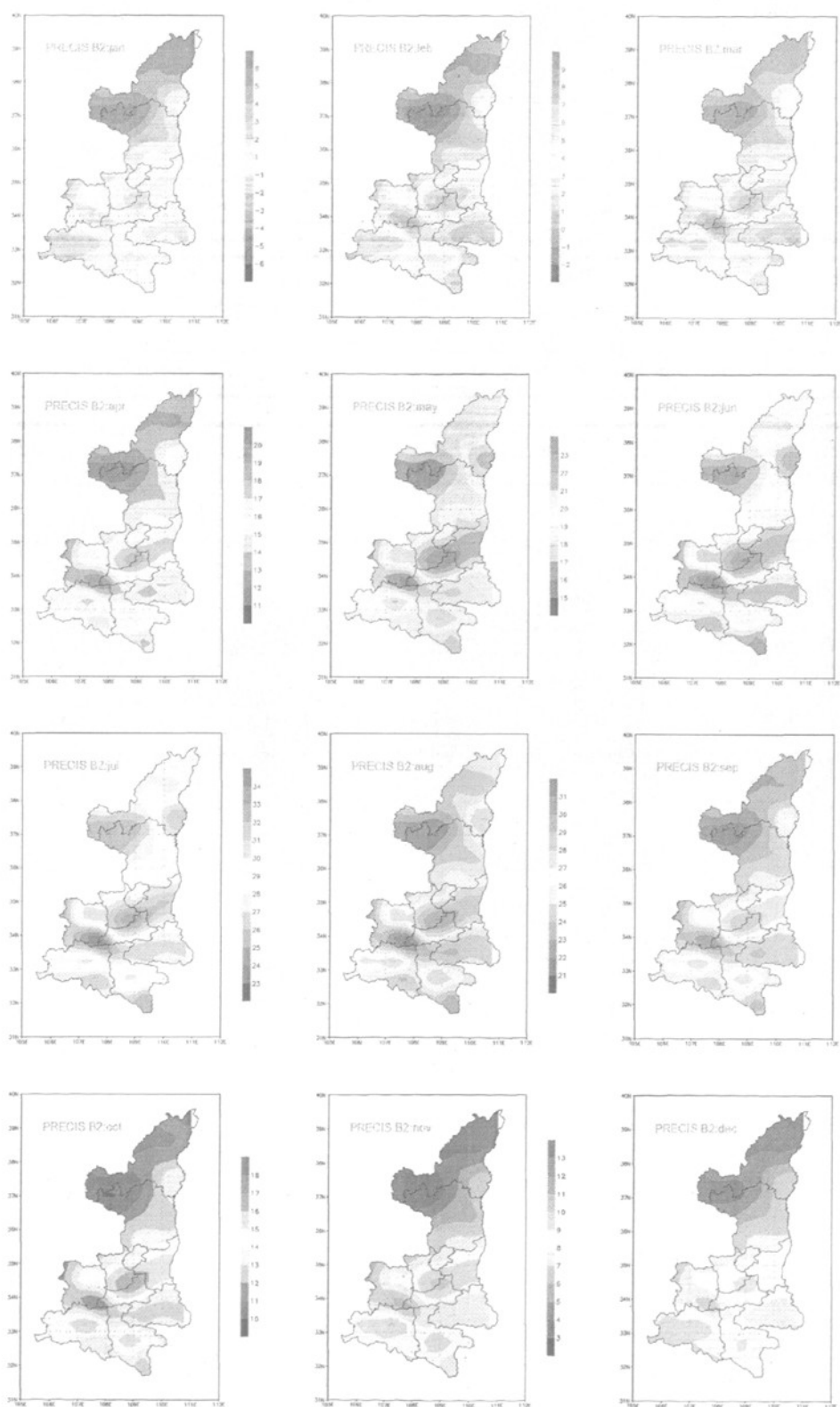


图 4.4 2071—2100 年 1—12 月月平均气温分布图

变化幅度超过 100%，1 月的幅度也约在 100%，这说明未来有向暖冬变化的趋势，春末、夏季、秋初的变化幅度不大，在 20%以内。

图 4.4 是未来 1—12 月月平均气温分布图，陕南和关中中东部是各月温度的最大值区，陕北和秦岭一线是温度低值区。

4.3 年平均降水

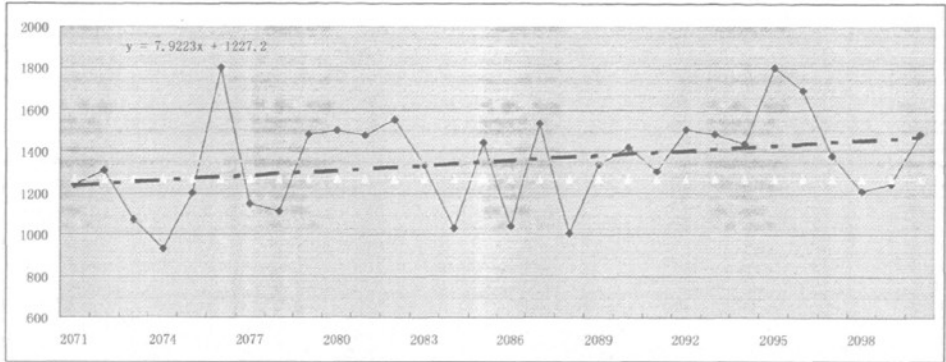


图 4.5 未来 2071—2100 年降水逐年变化趋势图 (mm)

(点划线为趋势线，星号线为 2071—2100 年多年平均值，三角线为气候基准时段多年平均值)

未来年降水量的变化幅度较大，偏多的年份集中在 2070S 中期、2080S 初期和 2090S 中期，其中 2070S 中期和 2090S 中期是降水偏多幅度较大，约较常年偏多 600mm 左右，前期、2080S 中后期、后期是年降水偏少的时段，其中前期和 2080S 中后期偏少的幅度较大，较常年偏少 500mm 左右 (图 4.5)。

降水最多的年份较最低年份偏多在 1 倍左右 (约 900mm)，从全省角度来看，未来降水总体是增加的趋势，年均增加约为 100mm。未来降水变率为 79mm/10a，仍然为增加的趋势。

图 4.6 是 2071-2100 年较气候基准时段模式模拟值多年平均降水变化图，高值区位于陕南南部，关中西部的高值区应该是插值导致的偏差。

低值区位于榆林市附近和关中地区中部，汉中市附近仍然为低值区。

从降水量级变化来看，全省雨量变化较气候基准时段变化都在 15%以内，增加幅度较大的区域是陕北和关中地区的中东部，这与二者同为模拟的低值区有关。陕南西南部是降水增加幅度较小的区域，延安、安康、商洛等地的增幅小于 10%。

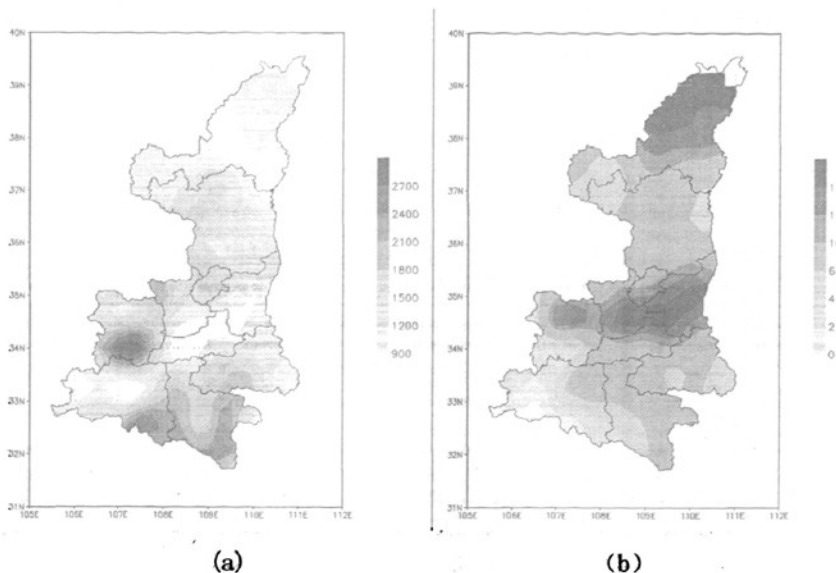


图 4.6 2071—2100 模拟降水 30 年平均值 (a) 较气候基准时段变化百分率 (b)

从总体上看, 未来陕西各地的降水是增加的趋势, 增加幅度不同, 降水量较少的陕北北部等区域增幅较大。

4.4 月平均降水

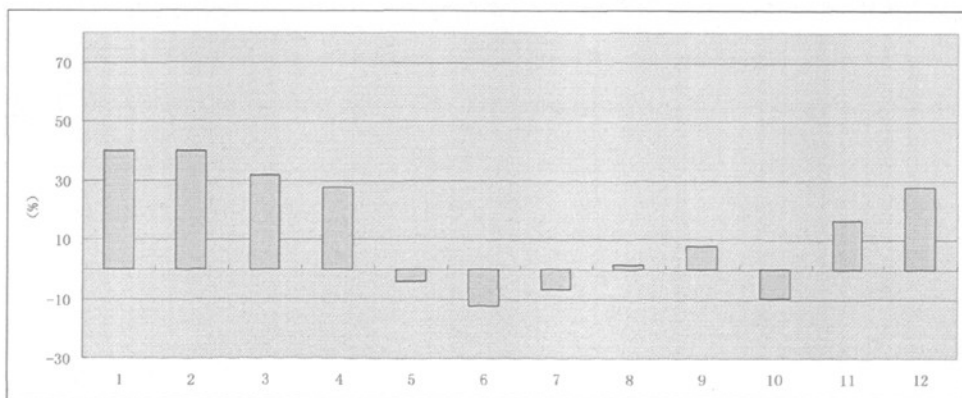


图 4.7 2071—2100 年 1—12 月月平均降水模拟值较气候基准时段年变化百分率

未来陕西全省冬春季降水较气候基准时段偏多, 平均偏多 30%左右, 汛期前期的降水偏少, 出现伏旱的可能性增大, 秋季降水总体偏多 (图 4.7), 说明未来秋季出现暴雨的可能性较大。

总体来看, 未来各月降水仍以增多为主, 未来夏季出现干旱的可能性较大。

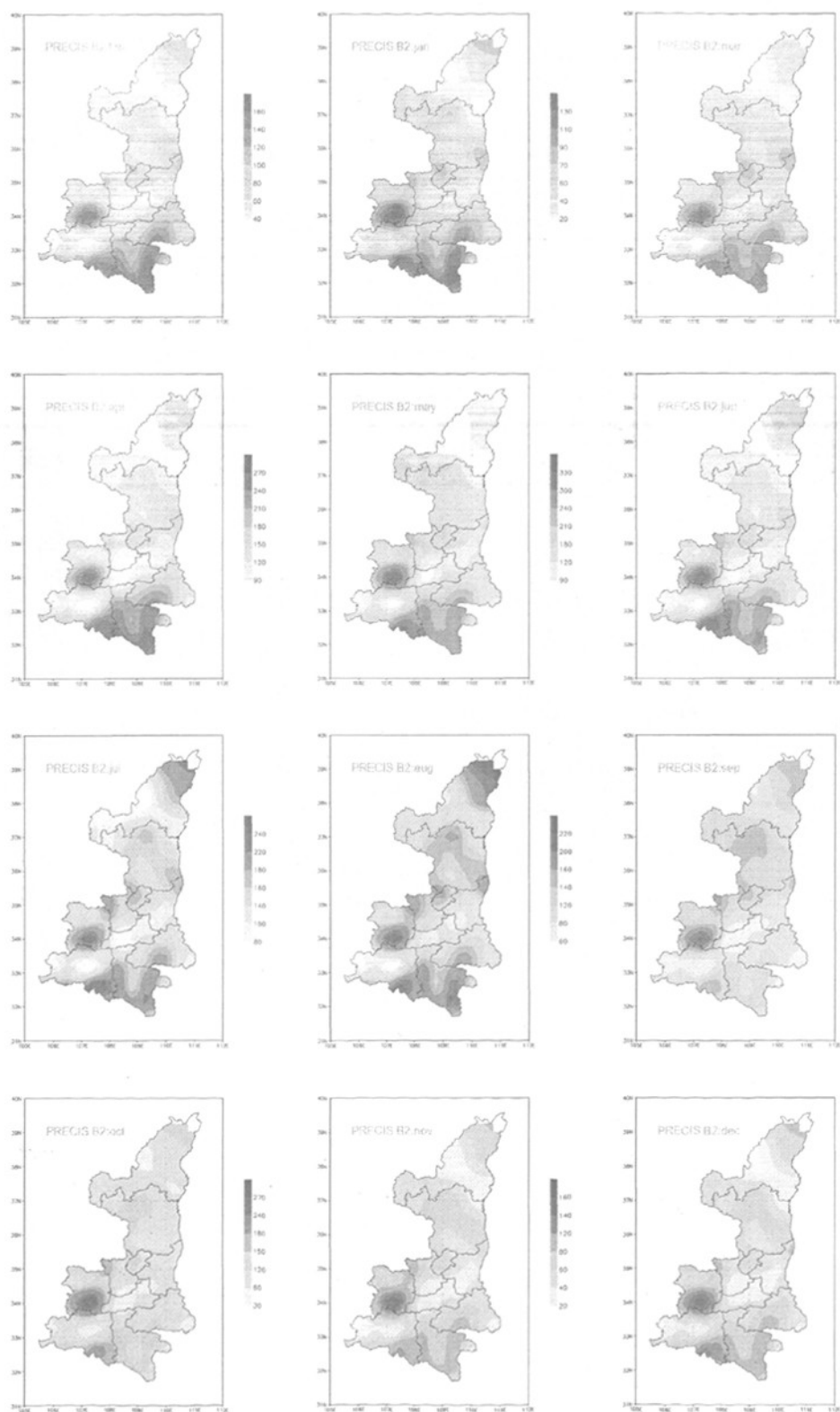


图 4.8 2071—2100 年 1—12 月月平均降水分布图

图 4.8 是未来各月的降水分布图,按照模拟结果,陕南的安康和商洛地区为各月的降水最大值区,低值区位于榆林和西安市附近。

4.5 降水日数

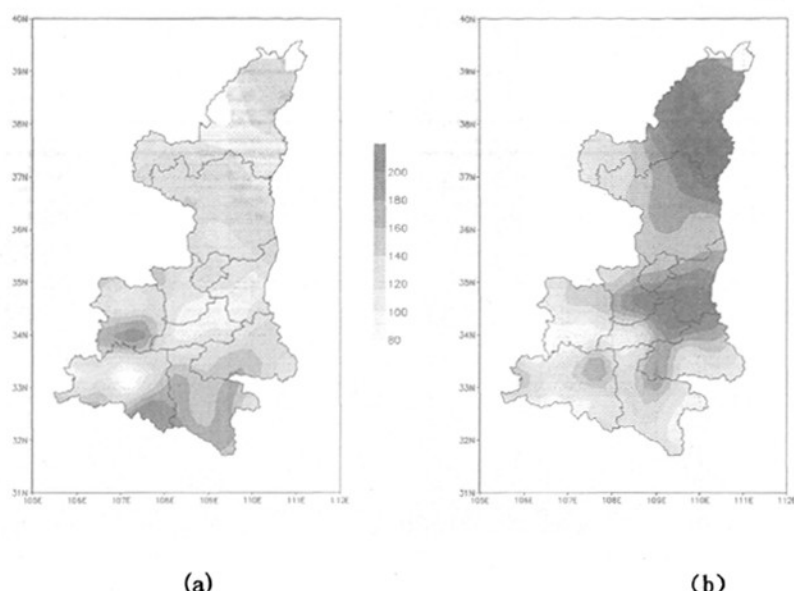


图 4.9 2071-2100 模拟年降水日数频次 (a) 较气候基准时段模拟值变化百分率 (b)

图 4.9 是陕西 2071-2100 较气候基准时段模式多年平均降水日数分布图,降水日数高值区位于陕南地区,大部分地区在 160d/a,低值区较气候基准时段范围有所减小,仍然位于榆林和西安市附近,小于 120d/a,全省其他地区介于 100—140d/a 之间。

从频次上与气候基准时段模式模拟值比较,陕北、关中地区的降水日数有不同幅度的增多,增幅最多的是关中中东部和陕北北部,在 5%以上,陕南地区的降水日数有所减少,在 3%以内,减少较多的是陕南西部,降水日数减少,但是降水量有所增加(图 4.7),这说明该地区出现暴雨的几率增加。

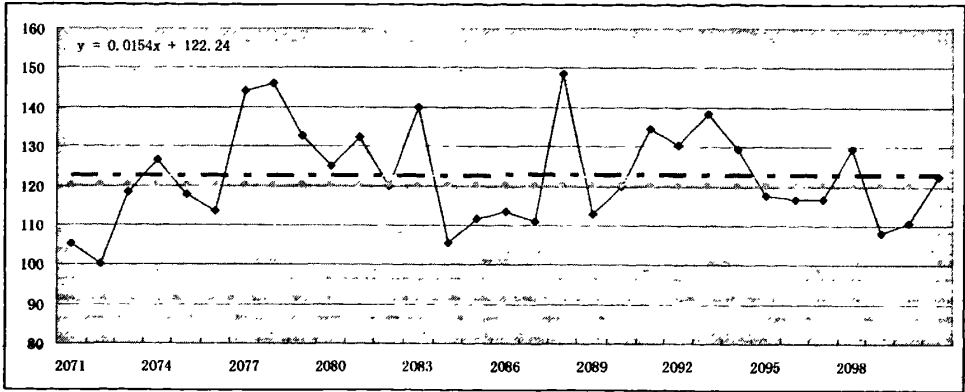


图 4.10 未来 2071—2100 年降水日数逐年变化趋势图 (单位: d)
(点划线为趋势线, 三角线为 2071-2100 年多年平均值, 星号线为气候基准时段多年平均值)

图 4.10 是未来 2071—2100 年降水日数逐年变化趋势图, 2070S 后期—2080S 前期和 2090S 前期是降水日数偏多的时期, 2080S 中期和 2090S 后期是降水日数偏少的时期。

从多年平均来看, 总体上, 陕西降水日数较气候基准时段有所增加, 但增幅较小, 仅为 2—3d/a。从未来趋势线来看, 未来降水日数还将是增加的趋势, 变率为 0.15d/10a。

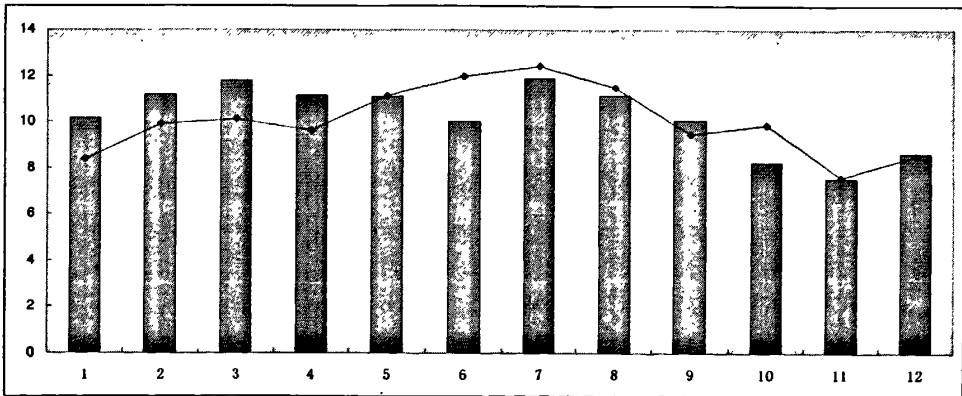


图 4.11 2071—2100 年 1—12 月月平均降水日数模拟值 (单位: d)

从图 4.11 可以看到, 陕西未来月降水日数约在 10d 左右, 秋季较少, 小于 8d。

未来陕西春季降水日数增多, 由于未来冬春季陕西降水较气候基准时段有所增加 (图 4.8), 未来陕西春季透雨的来临时间将可能有所提前。

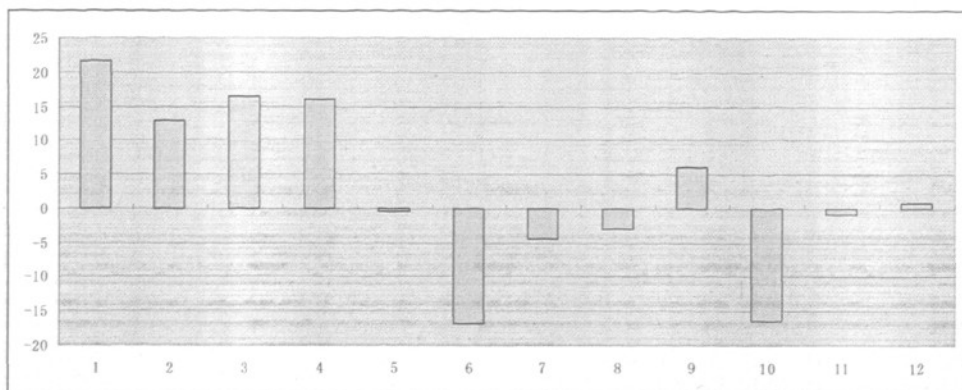


图 4.12 2071—2100 年 1—12 月月平均降水日数模拟值较气候基准时段变化百分率分布图

图 4.12 反映了未来各月降水日数变化的趋势，大体上是春季增多、夏秋季减少，由于未来夏季降水有所减少（图 4.8），夏季出现干旱的可能性增加。

秋淋是陕西关中、陕南地区秋季气候的一个主要特点，也是该地区主要气象灾害之一，常常给陕西的工农业生产带来诸多不利影响，严重时还可造成重大损失（杜继稳等，2006；温克刚等，2005）。为了能大体上了解秋淋天气的情况，这里选取陕西关中（宝鸡、咸阳、西安、渭南等市以及所辖区县）和陕南（汉中、安康以及所辖区县）8—10 月降水日数，计算其降水日数的演变：

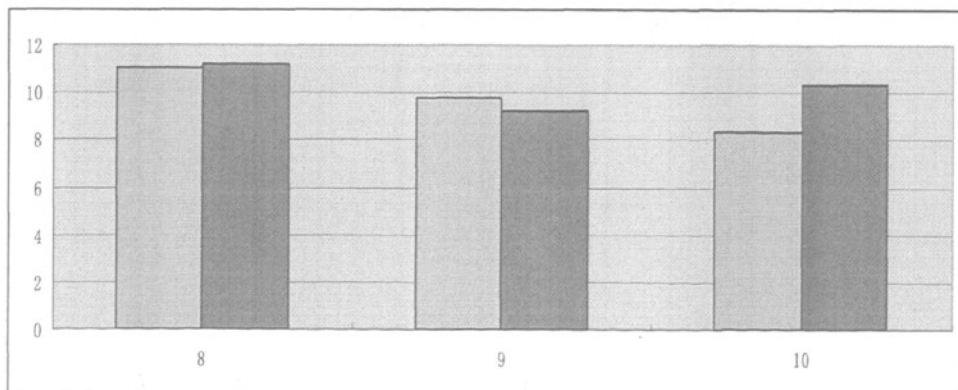


图 4.13 2071—2100 年（蓝色）8—10 月月平均降水日数与气候基准时段（红色）对比

预计未来华西秋雨在陕西关中、陕南等地的发生频次可能会基本持平但略有减少，减少不足 5%。

4.6 暴雨日数

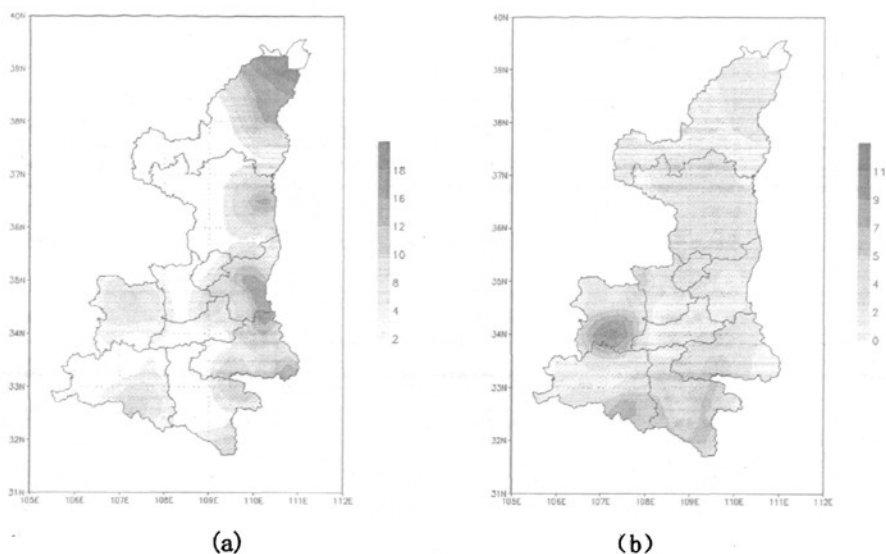


图 4.14 2071—2100 年暴雨日数模拟值 (a) 与气候基准时段 (b) 比较

从图 4.14 可见，暴雨中心可能会有所偏移，从西部向东部偏移，陕北暴雨日数可能会有所增加，黄河沿线暴雨日数有所增加。

洪涝灾害是渭河、汉江流域最严重的自然灾害之一。随着社会经济的发展，致洪暴雨所造成的洪涝灾害损失越来越大（杜继稳等，2007；许新田，1996；汤克靖等，1995；刘志玉，1998）。

为了能大体了解未来渭河、汉江流域的致洪暴雨的发生趋势，选择宝鸡、咸阳、西安、渭南 4 站作为渭河流域代表站，选择汉中、安康站作为汉江流域代表站：

表 4.1 渭河、汉江流域年暴雨频次表

流域	站点	气候基准时段	B2 情景	变化频次	流域平均	
					气候基准时段	B2
渭河	宝鸡	1.33	1.90	0.67	1.07	1.38
	西安	1.07	1.20	0.13		
	渭南	0.80	1.20	0.40		
	咸阳	1.07	1.20	0.13		
汉江	汉中	1.1	1.47	0.37	1.04	1.22
	安康	0.97	0.97	0.00		

渭河流域宝鸡、西安、渭南、咸阳四站 B2 情景下暴雨频次均较气候观测基准时段有增加，增加最多的是宝鸡，其次是渭南、西安和咸阳。整个流域平均值由 1.07d/a 增加到 1.38d/a，增加 0.31d/a。

汉江流域汉中站暴雨次数从 1.1d/a 增加到 1.47d/a，增加 0.37d/a；安康为 0.97d/a，与气候基准时段持平。但从整个流域来看平均值由 1.04d/a 增加到 1.22d/a，也是增加的趋势。

从以上分析，可见，未来渭河、汉江流域出现致洪暴雨的可能性仍然很大，而且有增加的趋势。

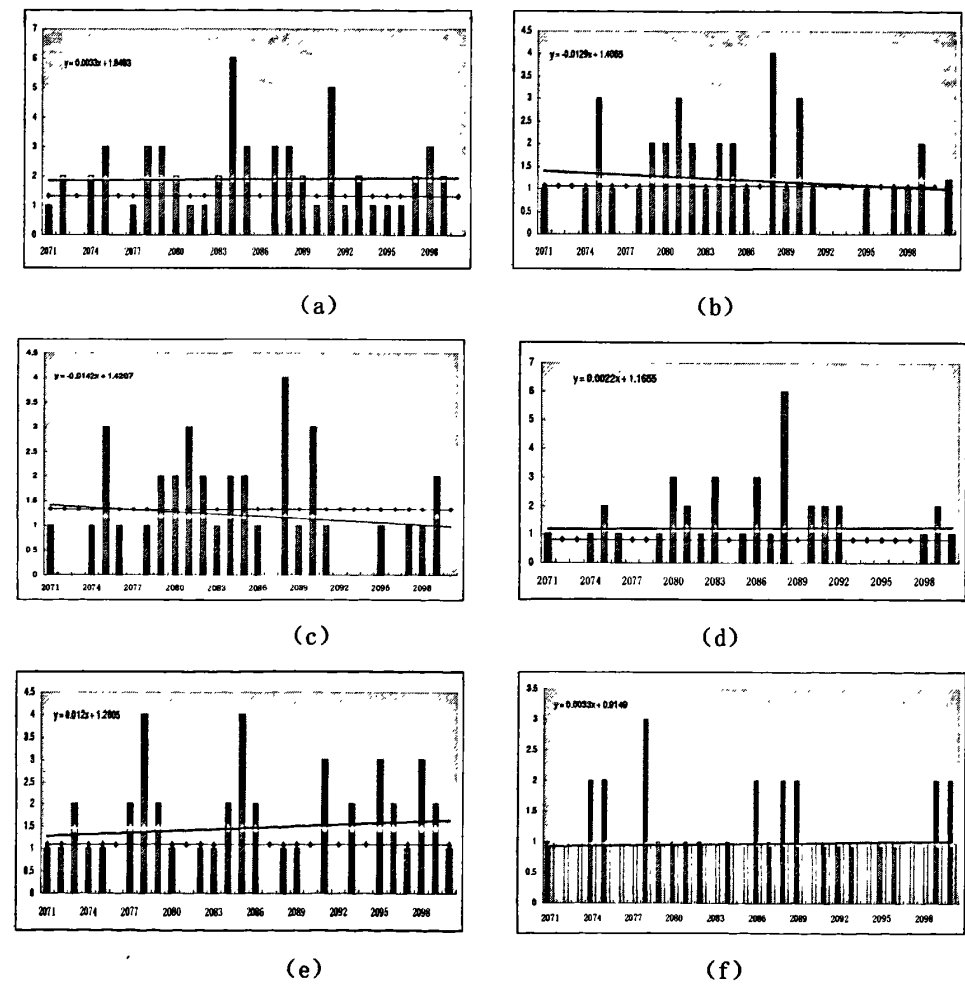


图 4.15 宝鸡 (a) 咸阳 (b) 西安 (c) 渭南 (d) 汉中 (e) 安康 (f) 站暴雨逐年演变情况

图 4.15 是陕西省渭河、汉江流域的代表站点的逐年暴雨次数演变情况。

渭河上游的宝鸡咸阳两站暴雨频发时段主要是 2080S，中游西安站从 2070S

后期—2080S 前期出现暴雨的概率大,下游的渭南站暴雨频发时段是 2080S 前期。

从以上分析可以看出,2080S 前期是四个代表站共同的暴雨频发时段,该时段可能出现全流域性的致洪暴雨。

从四个代表站演变图上还可以看到,2090 年前后四站均出现暴雨频次极大值。

汉江流域汉中、安康 2 站的暴雨频发时段出现在 2070S 后期、2080S 后期和 2090S 后期。

从这 6 个代表站点的暴雨次数趋势线看,除西安、咸阳有减少趋势外,其余各站均有暴雨增加趋势。

通过以上分析可以看出,陕西未来极端降水频次增加和强度增强,可能使洪涝、滑坡、泥石流等自然灾害发生的频次增加,灾害造成的损失将成倍增加,因极端降水造成的洪涝、滑坡、泥石流等自然灾害的概率也会增大,将对国民经济和人民的生命财产造成重大损失。

4.7 极端气温

4.7.1 极端最高气温

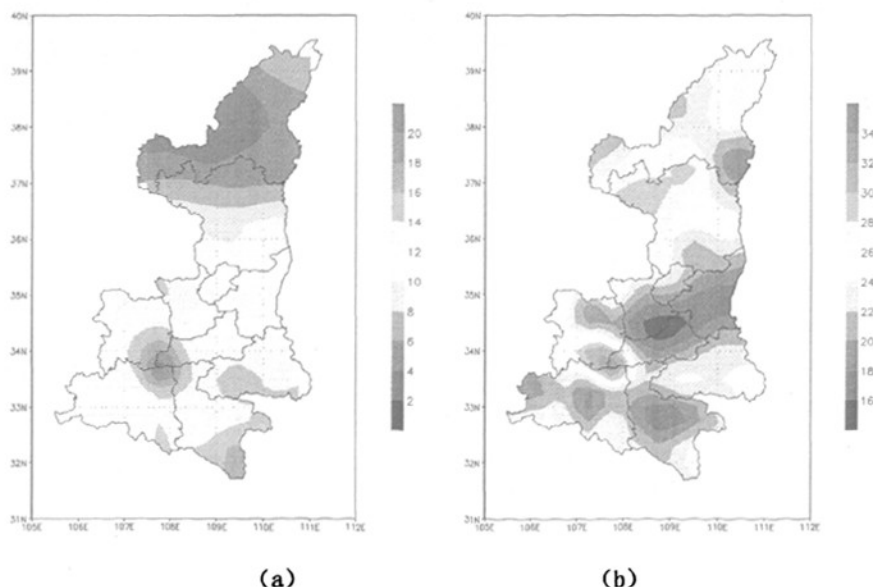


图 4.16 2071-2100 年与气候基准时段极端最高温度比较 (%)
(a) 日极端最高气温 (b) 年平均极端最高气温

图4.16给出的是2071-2100极端最高温度的变化分布图,图4.16(a)是日极端最高气温变化百分率,全省自北向南增高幅度加大,未来陕南出现日极端最高气温的概率较大,很可能刷新历史极值。图4.16(b)是年平均极端最高气温的变化图,未来全省年平均极端最高气温陕北黄土高原地区的增高幅度较大,其余地区增幅较小,极端最高气温增高意味着高温酷热日数和高温期间的平均温度的上升,从而使得干旱发生的频率增加,对局部地区作物的生长发育有抑制作用。高温条件下作物生育期缩短,生长量减少,可能会抵消全年生长期延长的效果。温度升高,高温热害、伏旱将更加严重,对西北干旱区的农业生产造成不利影响,高温胁迫的热害会限制作物生产,影响玉米、大豆等的种植和产量,水稻、棉花的生育也会受到强烈抑制。气候变暖也会使土壤蒸发量加大,土壤耗水量也会加大,必然导致了干旱的加重,旱灾频频出现给干旱区农业带来诸多不利影响(郑小华, 2005)。

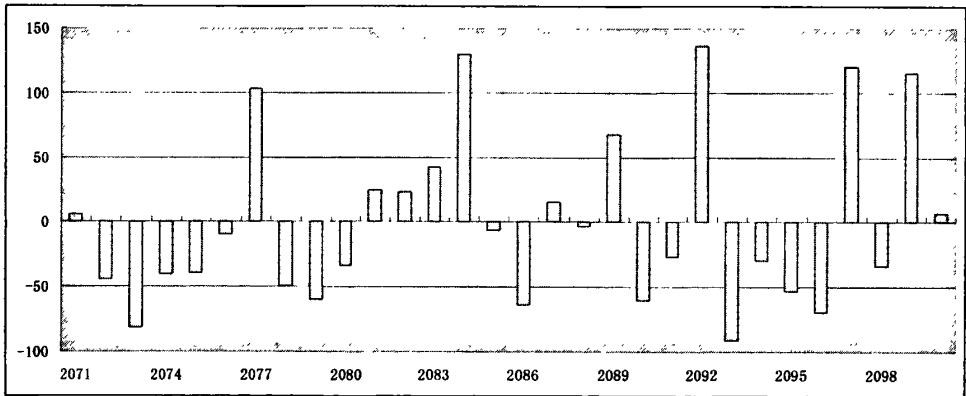


图 4.17 2071-2100 年年均高温 ($\geq 35^{\circ}\text{C}$) 日数变化百分率 (%)

根据图 4.17 分析,多数年份的高温日数小于平均值,其中 2070S-2080S 初期、2090S 中期为高温日数的较少时段 2080S 中期为高温日数较多时段。

4.7.2 极端最低气温

图4.18是2071—2100年冬季最低气温的变化曲线,冬季最低气温的变率为 $0.17^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,为继续升高的趋势。通过计算气候基准时段的模拟冬季最低气温多年平均为 -9.3°C ,计算b2情景下冬季最低气温多年平均为 -3°C ,升温的趋势明显。

冬季平均最低温度的上升,使得暖冬的发生机率增大。小麦、油菜等作物越冬率增加,作物生长发育较充分,使冬小麦返青期提早,有利于冬小麦早发快长,

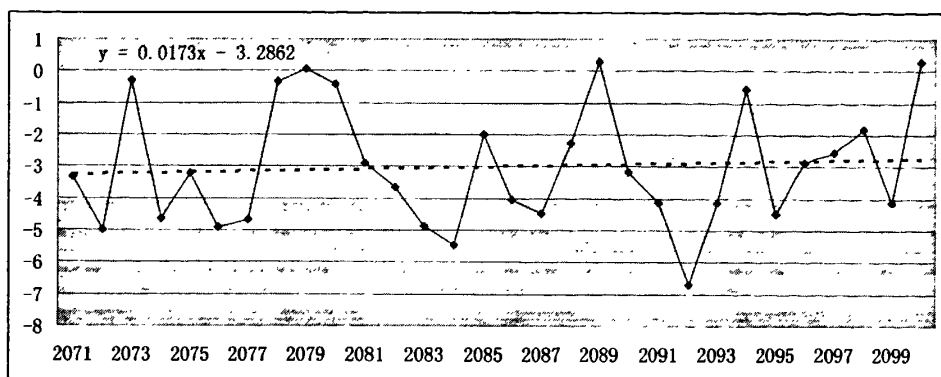


图4.18 2071—2100年冬季最低气温的变化曲线

对晚播麦和冬前弱苗的转化升级十分有利,但是在暖冬条件下,越冬小麦会提前返青,由于抗寒能力弱,提前返青的小麦在突来的寒潮中易受冻害,从而影响小麦产量。另外冬季由于气温偏高,使得冬小麦越冬期变短,易造成麦田失墒快,出现麦苗旺长现象。暖冬造成油菜先期抽苔、小麦提前拔节等,农作物生育进程加快,抗冻性下降,易遭冻害,病虫害越冬死亡少,基数大,对农作物正常生长产生威胁。气候变暖还造成土壤有机质分解加快,地力下降,农作物生长中后期出现脱肥现象,造成减产。同时生育期提前容易导致病虫害早发生、发展,使一些受温度限制的害虫活动地理范围扩大,导致生长季内害虫危害时间提前,有可能加重小麦病虫害的发生。随着气候变暖,作物生长季延长,昆虫在春、夏、秋三季繁衍的代数将增加,而冬温较高也有利于幼虫安全越冬。温度高还为各种杂草的生长提供了优越的条件。因此,可能会加剧病虫害的流行和杂草蔓延。

4.8 本章小结

1、全省未来年均气温都将增高,只是增幅不同,增幅自北向南增幅减小。未来陕西年平均气温的高值区仍将位于陕南和关中地区,且关中地区高值区范围将有所扩大,可能延伸到渭北地区。渭北是陕西的苹果主产区,单从温度升高的角度分析,未来热量条件对苹果果实膨大、着色和收获较为有利。

2、未来月平均气温变化幅度最大的是冬季(12、1、2三个月),其中12月和2月变化幅度超过100%,1月的幅度也约在100%,这说明未来有向暖冬变化的趋势。

3、从总体上看,未来 2071—2100 年陕西各地的年降水是增加的趋势,降水变率为 79mm/10a,但各地增加幅度不同,降水量较少的陕北北部等区域增幅较大。

4、未来陕西各月降水仍以增多为主,冬春季降水较气候基准时段偏多,平均偏多 30%左右,汛期前期的降水偏少,出现伏旱的可能性增大,秋季降水总体偏多,说明未来秋季出现暴雨的可能性较大。按照模拟结果,陕南的安康和商洛地区为各月的降水最大值区,低值区位于榆林和西安市附近。

5、未来陕西降水日数较气候基准时段有所增加,但增幅较小,仅为 2—3d/a。从未来趋势线来看,未来降水日数还将是增加的趋势,变率为 0.2d/10a。未来降水日数高值区位于陕南地区,低值区位于榆林和西安市附近。从频次上分析,陕北、关中地区的降水日数有不同幅度的增多,增幅最多的是关中中东部和陕北北部。

未来陕西春季降水日数增多,由于未来冬春季陕西降水较气候基准时段有所增加,未来陕西春季透雨的来临时间将可能有所提前。

秋季降水日数较气候基准时段基本持平,预计未来华西秋雨在陕西关中、陕南等地的发生频率可能会基本持平但略有减少,减少的百分率仅不到 5%。

6、未来渭河流域宝鸡、西安、渭南、咸阳四站 B2 情景下暴雨频次均较气候观测基准时段有增加,增加最多的是宝鸡,其次是渭南、西安和咸阳。汉江流域也是增加的趋势。未来渭河、汉江流域出现致洪暴雨的可能性仍然很大,而且有增加的趋势。

7、未来陕南出现日极端最高气温的概率较大,很可能刷新历史极值。未来全省年平均极端最高气温陕北黄土高原地区的增高幅度较大,其余地区增幅较小,极端最高气温增高意味着高温酷热日数和高温期间的平均温度的上升,从而使得干旱发生的频率增加。而冬季平均最低温度的上升,使得暖冬的发生机率增大,可能会加剧病虫害的流行和杂草蔓延。

8、对策:未来应加强极端气候事件的应急气象预报服务,加大气候变化规律研究、气候变化趋势预测、气候变化影响分析、和气候变化应对措施制定等方面的科学研究,增强极端气候事件的分析、预报、预测、影响评估的研究和实用新技术性方法的研究。加强对农业生产影响较大的干旱、洪涝、风雹和低温等极

端天气气候事件的监测、预测和防御技术研究，加强长期天气预报和极端气候事件预测能力的研究开发工作，开展极端气候事件对农业生产影响评估研究，加强农业病虫害和主要农作物病虫害发生流行的气象条件预测研究。为适应气候变化对农业的可能影响提供科技支撑。

第五章 陕西省未来干旱变化趋势

干旱灾害是指由于长时间降水偏少，出现空气干燥，土壤缺水，使农作物体内水分发生亏缺，影响正常生长发育，造成农业减产、人畜饮水困难以及生态环境恶化的现象。干旱是大气环流、地形、耕作制度共同作用的产物。

5.1 干旱是陕西最重大的自然灾害之一

陕西地处中国中部内陆腹地，地域南北狭长，跨越3个气候带，耕作制度差异较大，干旱分布极不均匀，几乎每年都有不同程度的旱灾发生。陕西干旱总的特点是，冬、春旱陕北最多，关中次之，陕南较少；夏、秋旱关中最多，陕北次之，陕南较少。从全省干旱发生的频次看，关中干旱频次最多，时段最长，是灾害程度最重的地区；其次是陕北；陕南干旱频次最少，是旱灾程度较轻的地区。

陕西冬季和春季、夏初的干旱，主要是受干冷冬季风的影响，蒙古冷高压以及极地冷气团不断分裂冷空气南下，东亚大低槽的槽线在 120°E 以东的海上，槽后西北气流控制陕西，雨雪稀少，造成干旱发生。夏季干旱主要是西太平洋副热带高压边缘雨带偏离陕西所造成。在“伏天”，当西太平洋副热带高压持续控制陕西的某一地区，该地区就会产生严重的伏旱天气（杜继稳，2008）。

近年来，陕西的温度呈现增高趋势，而降水则是减少的趋势（见第一章）。干旱是陕西省对国民经济尤其是对农业危害最大的气象灾害。图 5.1 是陕西省生态农业干旱区划。

据近50年的干旱记录资料分析，陕西历年都有不同程度旱灾发生，即

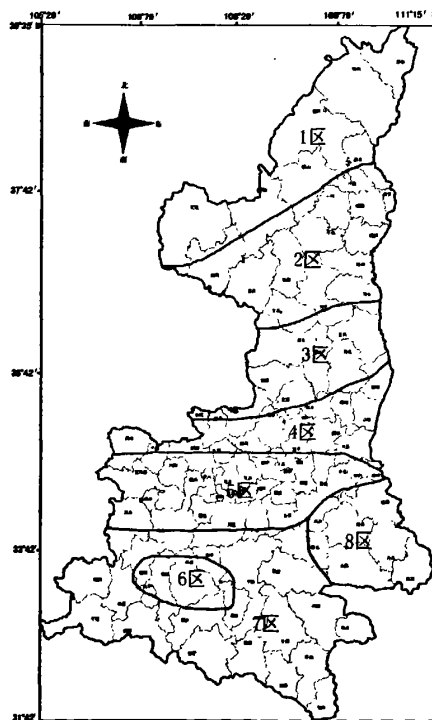


图 5.1 陕西省生态农业干旱区划
引自《陕西省干旱监测预警评估与风险管理》
（杜继稳，2008）

使雨水丰沛的 1958 年、1964 年和 1983 年，也有局地旱灾（杜继稳，2008）。按照旱灾出现的频次论，地区特征是陕北北部旱灾多，其次是陕北南部、渭北、关中东部和关中西部，再次是安康地区和商洛地区，汉中盆地相对较少；从季节分布看，夏旱最多，其次是春旱，秋冬旱较少。夏旱中，伏旱危害最大，常使秋料作物严重减产，甚至失收。陕西称伏旱为“卡脖子旱”。据统计陕西省平均每年大约 96.038 万 h m^2 农作物面积受旱，48.4985 万 h m^2 农作物面积成灾，因此研究陕西干旱灾害的特征，对防御、减轻干旱灾害具有重要的现实意义（温克刚等，2005）。

5.2 未来蒸发能力情景

蒸发能力与干旱发生关系密切。气象学中常用干旱指数来反映气候干湿程度的指标，以年蒸发能力和年降水量的比值来表示。干旱指数 $\gamma > 1.0$ ，说明年蒸发能力大于年降水量，表明该地区的气候偏于干旱， γ 值越大，干旱程度就越严重；干旱指数 $\gamma < 1.0$ ，说明年蒸发能力小于年降水量，表明该地区气候偏于湿润， γ 越小，气候越湿润（张辉等，2006）。

气温是对大气中温室气体增加最敏感的因子之一，并且通过对蒸发的影响进而可影响到水循环。蒸发能力受气温、日照、风速、空气湿度等众多因素的影响，但气温最为重要（鞠笑生等，1998；马柱国等，2001）。在水面蒸发过程中，太阳辐射是水汽化的主要能源，并通过气温和水温的增高来影响水面蒸发。气温的高低决定着水汽扩散的快慢和接纳水汽多少的能力，气温的层结作用直接影响着湿度梯度，进而影响水面蒸发。气温高时，水面上的饱和水汽压大，饱和差大，易于蒸发（胡顺军，2003）。

PRECIS 模式对气温的模拟能力较强（见第四章），应用 PRECIS 模式输出的气温值可以定量的对未来陕西气温与蒸发量的关系作出描述。

陕西省陕北、关中地区是干旱的频发地区，本文选择榆林、延安、铜川、西安等 4 个站点作为陕北北部、陕北南部和关中北部、关中南部的代表站。因 1978 年前观测数据不完整，故实况蒸发量实况采用 1978—1990 年观测数据，实况降水、温度采用同时段观测数据，研究气温与蒸发能力之间的关系。为了给出蒸发

能力与气温变化的关系，点绘出上述各站月蒸发能力与月平均气温的相关图（图 5.2）：

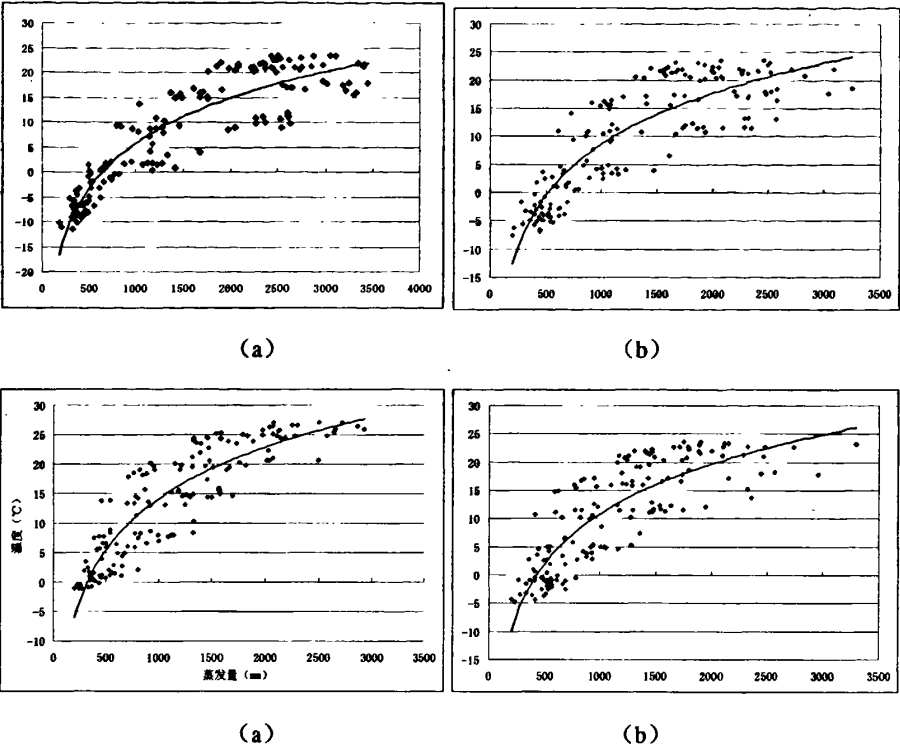


图 5.2 蒸发能力与气温之间的关系
(a) 西安 (b) 铜川 (c) 榆林 (d) 延安

月蒸发能力与月平均气温二者具有较好的指数型关系，并据此构建气温与蒸发能力之间的关系式：

$$E_w = e^{(A+BT)}$$

式中： E_w 为实测月蒸发量， T 为月气温， A 、 B 为经验参数。

基于数理统计方法，回归分析上述 4 站月蒸发能力和月平均气温的相关性并估算相应参数，各站的计算结果见表 5.1。

由表 5.1 可以看出：各站蒸发能力和气温关系密切，相关系数都在 0.8 以上，蒸发能力实测值与计算值非常接近。因此，可以根据构建的气温与蒸发能力的关系式进一步分析气温变化对蒸发能力的影响。

表 5.1 各代表站蒸发能力及相关参数估算结果

站名	榆林	延安	西安	铜川
年平均气温(℃)	8	9.5	13.4	10.5
实测年蒸发量(mm)	1863.8	1577.6	1377.7	1370.6
系数	A	4.251	4.113	3.684
	B	0.065	0.059	0.064
实况温度计算年蒸发量(mm)	1560	1352	1222	1317
相关系数	0.89	0.83	0.87	0.80
气候基准时段蒸发量(mm)	1656	1317	1203	1444
B2 温度未来蒸发量(mm)	2410	1812	1616	1740
模拟值距平(%)	46	38	34	20

表 5.1 中所示,按照构造的指数关系计算所得的蒸发量与按实况计算所得蒸发量大体相当,这证明 PRECIS 模式对气候基准时段蒸发量模拟基本可靠。B2 情景下,未来蒸发量可能偏多,其中关中地区偏多 2 成以上,陕北地区可能大于 3 成,有可能将进一步加剧陕北、关中地区的水资源供需矛盾。

5.3 干旱诊断指标以及选用

干旱是一种复杂的气象现象,干旱的出现、持续与下垫面的状况关系非常密切,其定义和强度目前还没有一个统一的标准。据世界气象组织 1980 年统计,各种应用的干旱指数有 55 种之多。干旱指标是干旱监测的基础与核心,它吸收了降水量、积雪、径流和水分供缺等大量的信息,形成易于理解的指标数值来反映干旱程度或范围、持续时间等,对于决策者、公众乃至科研人员来说,更加实用和直观。定义一个客观的干旱指数并能较好地反映干旱程度是干旱研究的一个基本问题。由于干旱成因及其影响的复杂性,很难找到一种普遍适用各种用途的干旱指数,因此,应用于不同需求的各种干旱指数得到了发展(杜继稳,2008)。

常用干旱诊断指标包括气象干旱指标、农业干旱指标、水文干旱指标和社会经济干旱指标。2006 年国家颁布了《气象干旱等级》国家标准(GB/T 20481—2006),规定了 5 种单项气象干旱指数(包括:降水量距平百分率,相对湿润度指数,标准化降水指数,土壤相对湿度干旱指数和帕默尔干旱指数)和 1 种综合气象干旱指数。农业干旱常用指标包括土壤湿度、土壤有效水分存储量、供需水

比例指标、农作物水分指标、温度指标等，还有直接以农作物生长期供水量与同期需水量的比例关系或农作物根系层实际土壤含水量与农作物适宜生长含水量的关系作为干旱指标。由于陕西省南北跨度大，气候、土壤、水文、植被等差异较大，因而某一个指标不一定能适用于全省，这就需要根据各生态农业干旱区的特点来选取其所适用的最佳干旱指标；同一个生态农业干旱区，在不同季节生态农业环境变化较大，为此要进一步对各指标在不同生态农业干旱区针对不同季节进行适用性分析，才能得到适合于陕西省实际情况的分区域、分季节的气象干旱监测、评价指标。杜继稳对各气象干旱指标的使用条件进行了分析，并对各其适用性对比分析（杜继稳，2008）。这些干旱指标的计算分别用到不同的变量，如相对湿度指数需要某时段的降水、可能蒸散量，土壤相对湿度干旱指数需要土壤重量含水量、土壤田间持水量，帕莫尔干旱指数的计算需要气候适宜蒸散量、气候适宜降水量、气候适宜补水量、气候适宜失水量、气候适宜径流量等变量。降水是 PRECIS 模式经过验证模拟能力较强的变量之一（张勇等，2007），而通过降水量距平评价区域干旱是气象业务常用的方法。用降水量距平百分率划分干旱等级，只用到降水量，计算简便，因此本文选择降水量距平百分率指数作为评价未来干旱趋势的指标。

降水量距平百分率指数是指某时段的降水量与常年同期气候平均降水量之差与常年同期气候平均降水量相比的百分率，可计算任意时段不同地区的干旱情况，但一般适用于统计月尺度、季尺度和年尺度的干旱情况。表 5.2 给出的是用降水量距平百分率划分的干旱等级。

表 5.2 降水量距平百分率干旱等级划分

等级	类型	月尺度降水量距平 百分率 (P_a) / %	季尺度降水量距平 百分率 (P_a) / %	年尺度降水量距平 百分率 (P_a) / %
1	无旱	$-40 < P_a$	$-25 < P_a$	$-15 < P_a$
2	轻旱	$-60 < P_a \leq -40$	$-50 < P_a \leq -25$	$-30 < P_a \leq -15$
3	中旱	$-80 < P_a \leq -60$	$-70 < P_a \leq -50$	$-40 < P_a \leq -30$
4	重旱	$-95 < P_a \leq -80$	$-80 < P_a \leq -70$	$-45 < P_a \leq -40$
5	特旱	$P_a \leq -95$	$P_a \leq -80$	$P_a \leq -45$

5.4 1971—1990 年干旱发生频率

根据降水量距平百分率指数划分的干旱等级，陕西省年均出现干旱的月数按

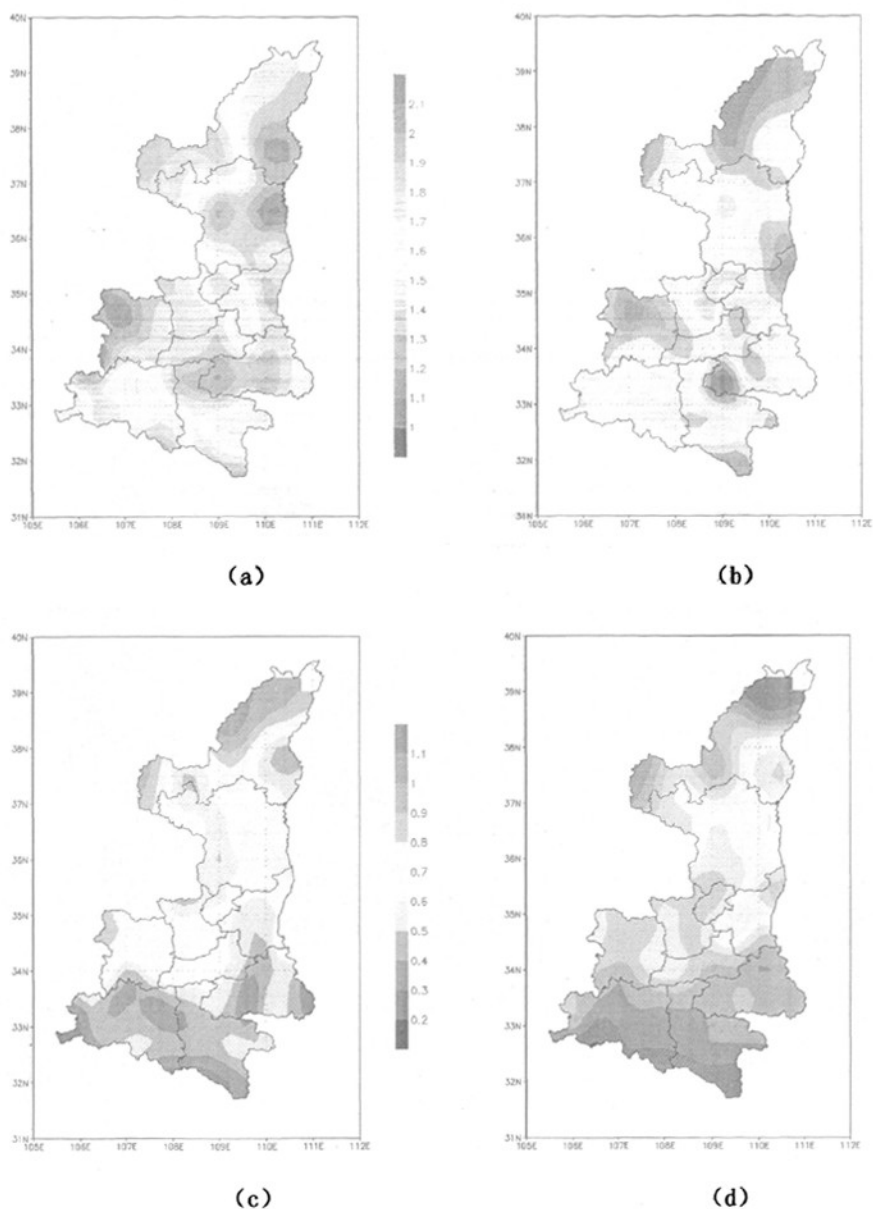


图 5.3 陕西省实况年均干旱发生频次
(a) 2 级 (b) 3 级 (c) 4 级 (d) 5 级

等级划分如图 5.3 所示，其中 2 级最多。从分布来看，4 级以上干旱陕南最少，陕北各级干旱均最多。

全省分布格局是北多南少。陕西各地干旱的频次以陕北北部最多，年均达 2.33 次；其次是关中东部；再其次是渭北；其后依次为关中西部、陕北南部、安康、商洛，汉中最少。可见就陕西而言，陕北北部、关中东部及渭北旱灾最为频繁。这与自然环境的差异，虽然是在同一个气候背景下，但由于植被生态、水文环境不同，使得干旱呈现明显的差异。陕北南部、关中西部和陕南大部，年均

降水相对较多，如陕北南部的黄龙山一带是我省的多雨区，年降水量为 600~700mm，高于关中地区，加上该地区植被生态较好，多为山塬，气温偏低，不易受高温干旱的影响；又如关中西部、汉中地区，历来水源和水利条件较好，抗御旱灾的能力较强；相反，陕北北部，渭北和关中东部的旱灾相对频繁，陕南东部相对于西部季节旱灾要多。

5.5 模拟气候基准时段干旱发生频率

与实况（图 5.4）相比，图 5.5 很好的模拟出了干旱分布北多南少的格局，

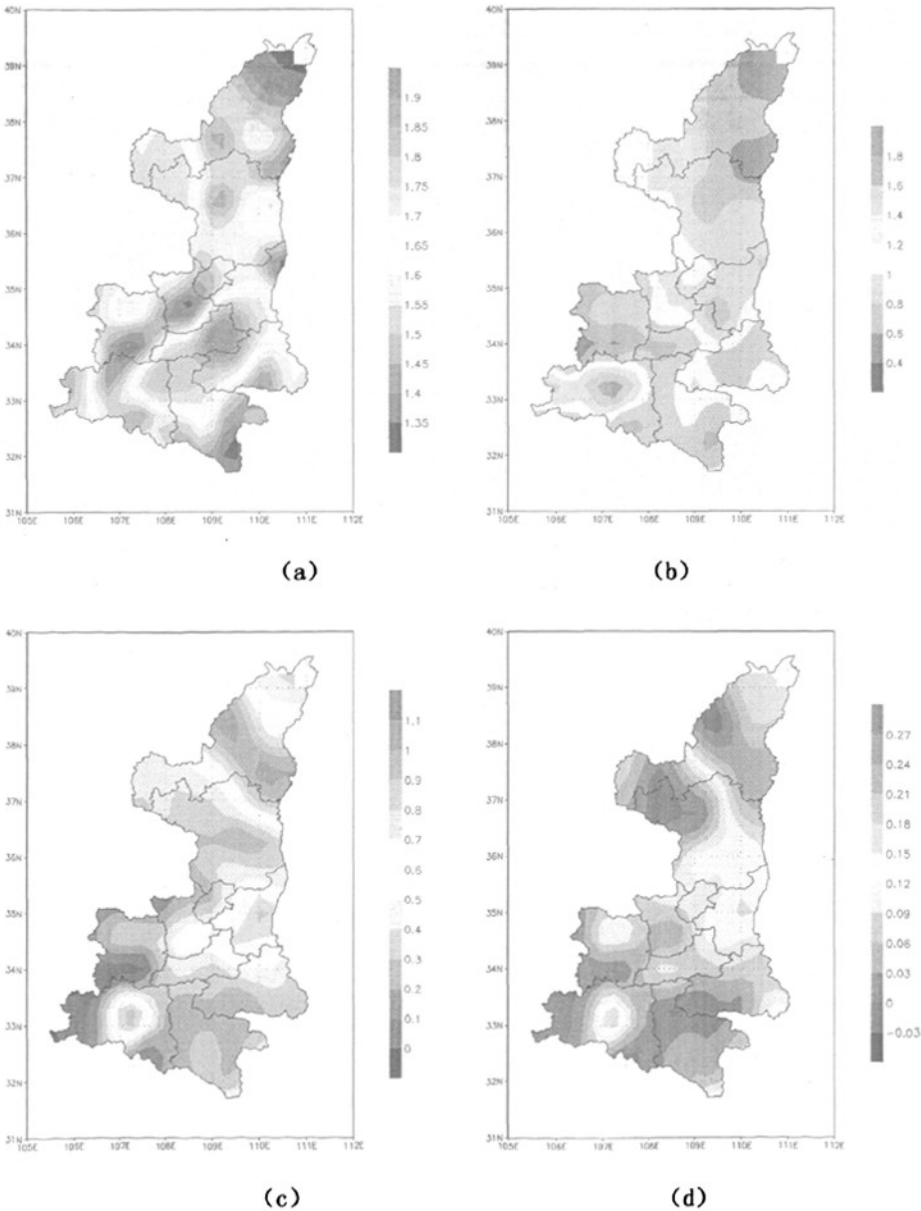


图 5.4 陕西省不同等级（a-d 依次为 2-5 级）的年均干旱发生频次模拟值

只是模式将陕北黄河沿线干旱模拟的较实况较为严重一些。

从量级上看，模拟的 2—4 级的干旱结果与实况大体相当，偏差不大，但 5 级干旱偏少。

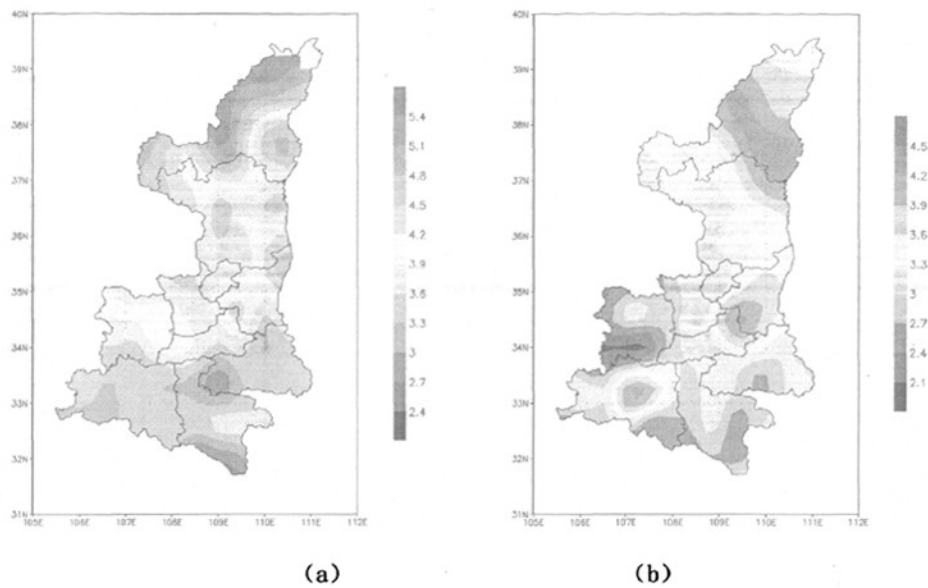


图 5.5 气候基准时段实况 (a) 与模拟 (b) 干旱发生频次对比图

图 5.5 是气候基准时段实况与模拟干旱发生频次对比图，包含 2 级以上所有干旱，可以看出，总的干旱频次较为一致，模拟出了陕北北部这个干旱高值区以及关中东部干旱频次次高值区，但是对陕北南部和黄河沿线的模拟值要大于实况值。

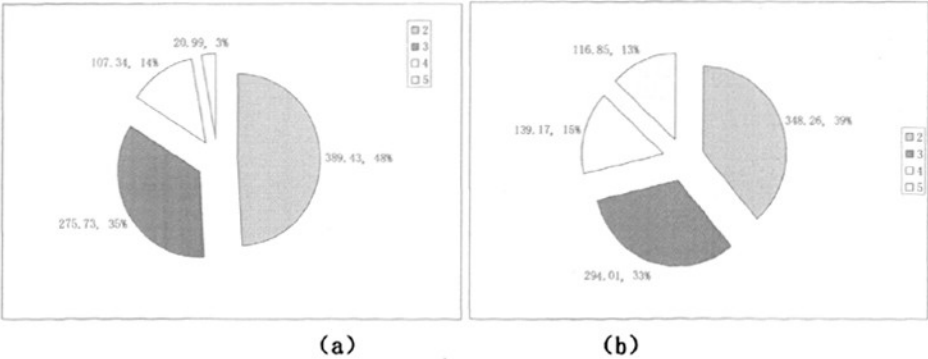


图 5.6 不同等级干旱所占比例
(a) 气候基准时段模拟值 (b) 实况值

从不同级别所占的比例模拟上看, 2 级干旱所占比例最大, 占到 40%左右, 其次是 3 级 (30%左右)、4 级 (10%左右), 5 级的模拟能力较差, 模拟的 5 级干旱仅占到 3%, 较实况值偏小。

5.6 未来干旱发生频次

5.6.1 年均发生频次

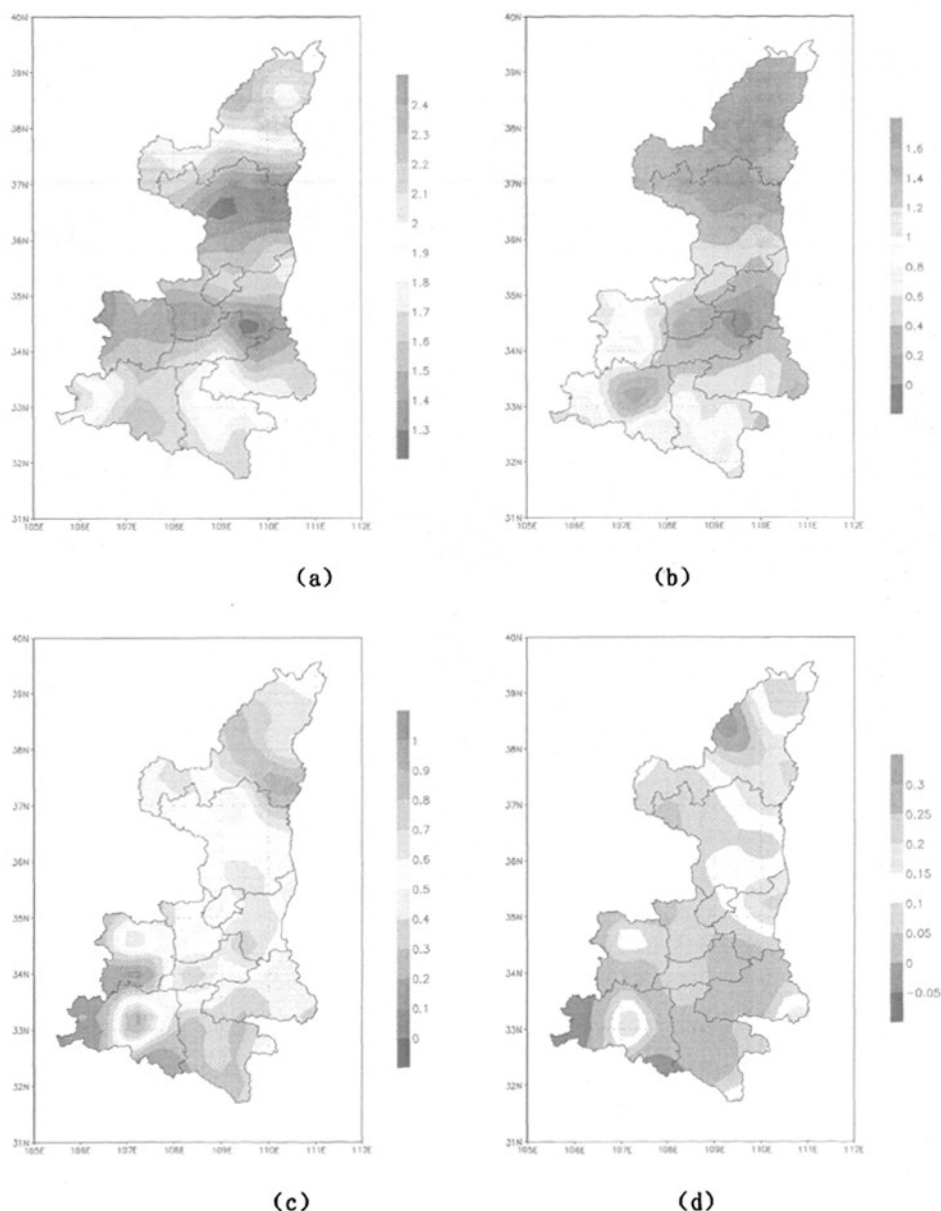


图 5.7 陕西省 2071-2100 年年均干旱发生频次 (a-d 依次为 2-5 级干旱)

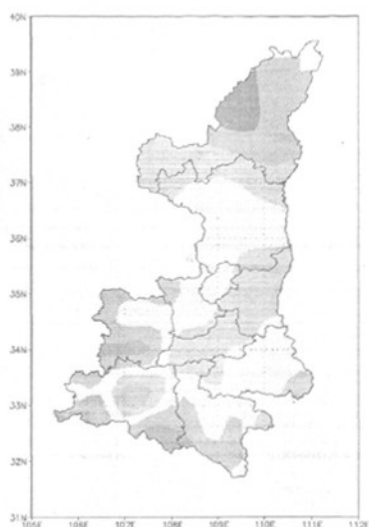


图 5.8 2071—2100 年均干旱频次图

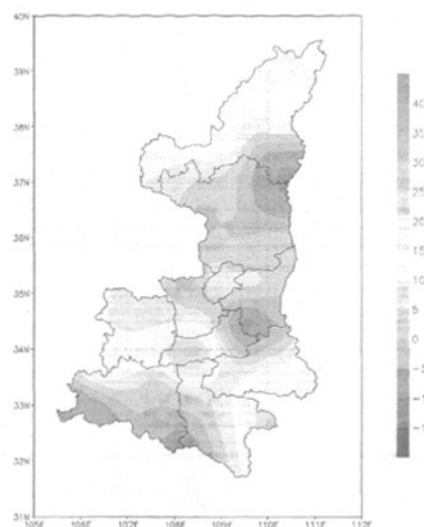


图 5.9 2071—2100 年与 1961—1990 年模拟值变化图(%)

未来陕西干旱发生频率 3 级发生频率全省各站基本相同, 其他等级干旱仍然呈现北多南少的分布格局。4 级干旱在关中发生频次较高的范围有所减小。

未来陕西全省年均干旱发生频次(含 2 级以上所有干旱级别)为自北向南逐渐减少, 陕北北部最多, 年均大于 4 次, 陕南南部最少小于 2.5 次。

与气候基准时段的模拟值相比, 陕西区域内有 3 个区域干旱频次较少, 分别是陕北榆林南部以南到延安市、关中东部(含渭北)以及陕南西部, 幅度最大是黄河沿线, 约减少 15% 左右。

但与气候基准时段的模拟值相比, 陕西区域内仍有 3 个区域干旱频次增加, 分别是陕北北部、关中西部秦岭地区和商洛地区。其中后两个区域部分地方增加的幅度在 30—40%。

5.6.2 月均发生频次

各等级干旱 5—7 月发生频率较高, 这与前面分析的陕西未来夏季降水减少有关, 秋冬季干旱发生频率减少(图 5.10), 这与前面分析的华西秋雨发生的趋势大体不变有关。

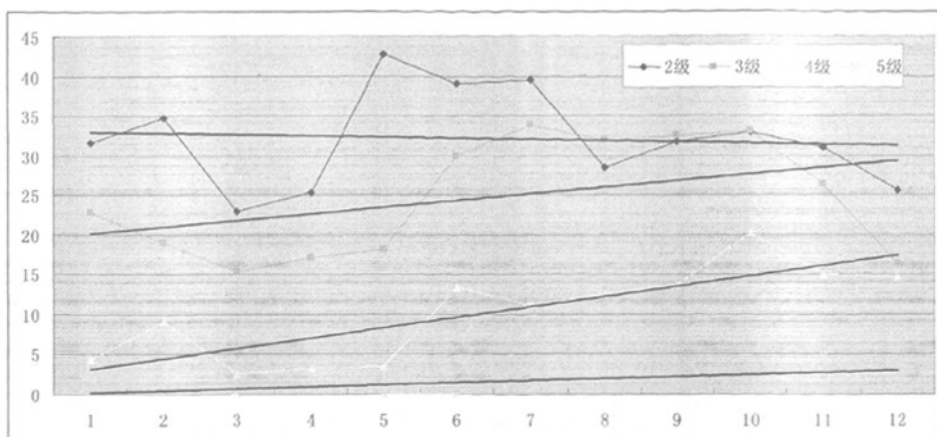


图 5.10 各等级干旱逐月变化规律

虽然总体上干旱发生在秋冬季的频次较少，但是 4—5 级干旱在秋季发生的频率有所增加，这说明降水逐年分布的不均匀性，某些年份秋冬季降水可能会出现异常偏少。

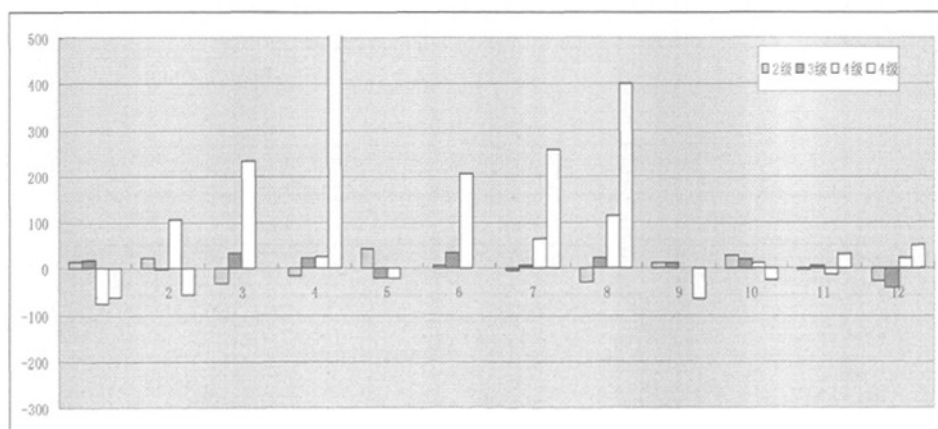


图 5.11 各等级干旱较气候基准时段频次变化百分率

图 5.11 给出的是各等级干旱较气候基准时段频次变化比较，春季 3、4 月，夏季 6、7、8 月份出现 4—5 级干旱级别的概率较气候基准时段有大幅的增加。

这说明，即便在未来全省降水会增加，但是由于持续的温度升高，未来出现极端干旱气候事件的可能性仍然增大。

图 5.12 所示,未来干旱总次数偏多的月份较多,有 8 个月份偏多,5—7 月偏多 10%以上,这个期间出现伏旱的可能性较大。

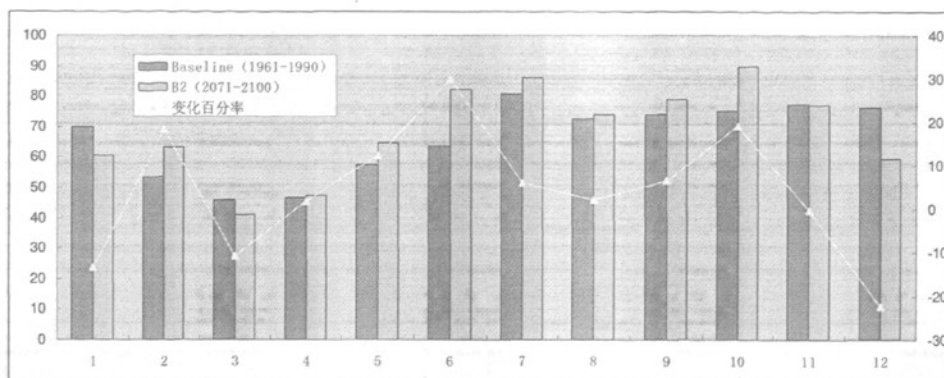


图 5.12 干旱频次较气候基准时段变化百分率

5.7 未来干旱评估

5.7.1 干旱评估的意义

根据《联合国关于在发生严重干旱或沙漠化的国家特别是在非洲防治沙漠化的公约》，将干旱定义为降水量大大低于正常记录水平时发生的自然现象，引起严重水文失衡，对土地资源生产系统造成有害影响。旱灾则是一种缓慢而持续的、渐进的、难以准确把握的、影响范围广的灾害。它不是一件简单的物理现象或自然事件，它是干旱现象与其发生发展时当地的社会、经济、文化和人口等综合影响的结果。旱灾具有多发性、渐进性、持续性、累积性等特征，能造成十分严重的损失，影响人类社会经济生活的各个方面。严重干旱可导致农业减产，而引发食物短缺、营养不良和饥荒灾害，可能破坏与农业有关的社会生产链，影响社会安定。干旱持续累积将对资源 and 环境造成难以逆转的影响，如地下水耗竭、地面沉降、地裂缝、土地退化等，其损失很难用单纯的经济指标来衡量。因此，所谓干旱评估也叫干旱影响评估，是指评估干旱对农业、水资源、能源以及城市供水、人类健康、生态环境等方面的利弊影响干旱评估是根据评估区域内对水的供需关系确定某一指标用以反映该区域或流域在某一时期内的缺水程度，以此确定该区域或流域的受旱程度，以便及时采取相应的应对策略，是制定灾区救助方案和采取防灾减灾策略的基础（杨帅英等，2004；周飞，2005；郭韧等，2005，赵传军，

1985; 风险管理编写组, 1994; 桑国庆, 2006; 顾颖, 2006)。

为了大体上描述未来陕西干旱的情况, 本文根据现有模式资料对未来发生干旱的可能性进行简单分析:

由图 5.13 可见, 未来发生 2 级的干旱的频率较大 (44%), 较气候基准时段增加, 而发生 5 级的频率较小 (2%), 较气候基准时段偏小。

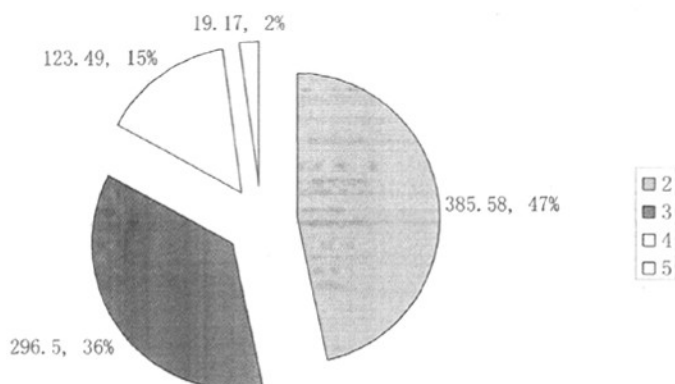


图 5.13 未来干旱发生的频率分析

5.7.2 区域综合旱情评估

区域综合旱情是指县级和县级以上行政区域农业综合受旱情况。

实际工作中, 习惯将陕西省划为陕北、关中、陕南三部分进行干旱评估, 应用以下区域干旱动态指数:

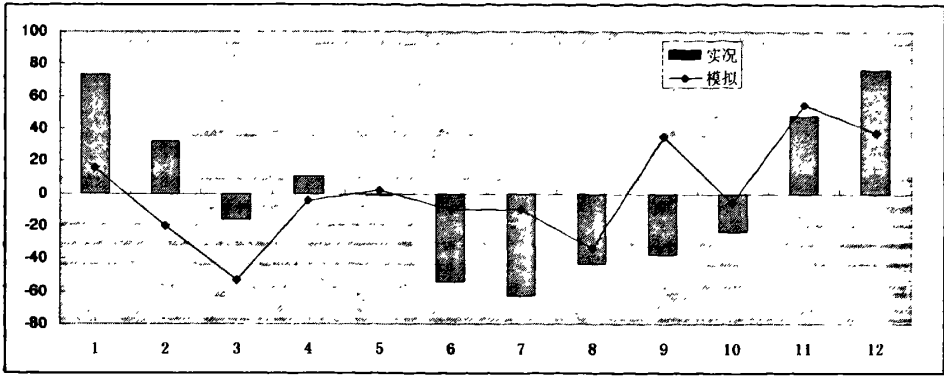
$$QWN = \frac{N1 + 2N2 + 3N3 + 4N4}{N}$$

式中, N 为区域总站数。 N_1 , N_2 , N_3 和 N_4 分别为轻旱、中旱、重旱和特旱站数。区域干旱动态指数不仅能够反映干旱范围的变化, 同时强调了各级干旱所占的权重, 干旱范围越大, 强度越强, 则 QWN 值越大 (杜继稳, 2008)。

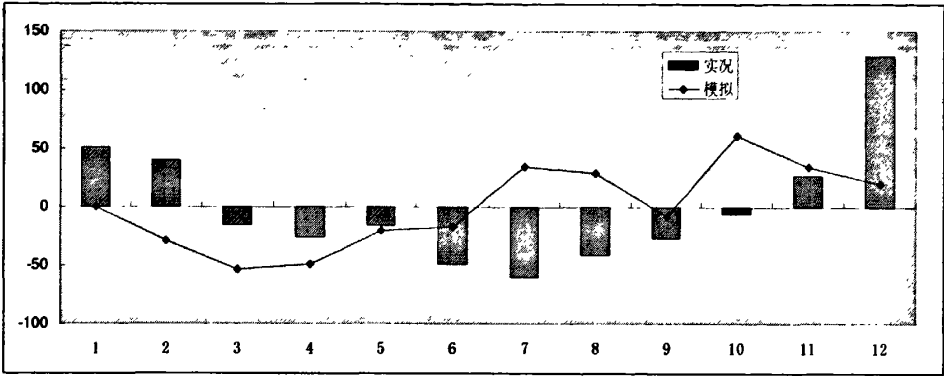
(1) 模式模拟区域干旱动态指数能力的验证

下面先验证模式对各区域综合旱情的评估能力:

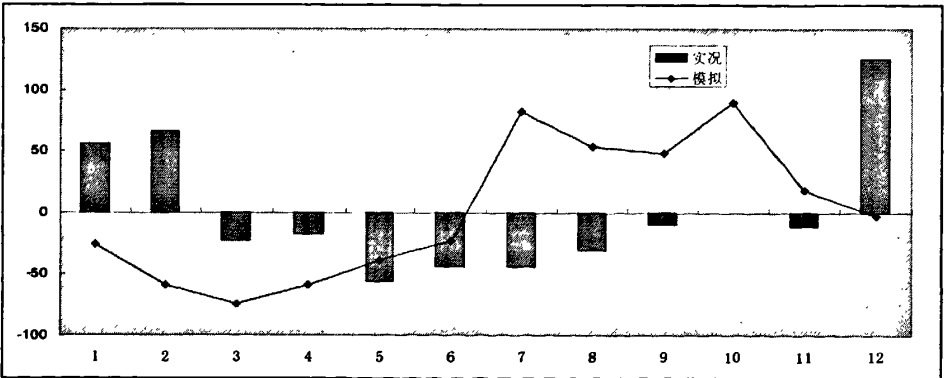
选取 1971—1990 年实况和模式气候基准时段计算得出的干旱数据, 验证 1—12 月多年平均区域干旱动态指数的模拟能力。



(a)



(b)



(c)

图 5.14 1971—1990 年 1—12 月多年平均区域干旱动态指数实况与模拟距平对比图

(a)陕北(b)关中(c)陕南

分析图 5.14, 可见 PRECIS 模式对上述三个地区的区域干旱动态指数能力不完全相同, 模式对陕北的各月干旱变化特征模拟基本吻合; 对关中和陕南 3-6 月

的模拟较好,其余时段模拟能力较差。总体来说,对图 5.1 中 1-4 区的模拟能力较强。而 1-4 区也恰好是陕西省干旱易发区(杜继稳,2008)。这四区是:

① 长城沿线风沙干旱区

本区地处陕北长城沿线附近,毛乌素沙漠南缘,主要包括定边、府谷、横山、靖边、佳县、神木、榆林 7 个站点。该区土壤类型主要为风沙土,土壤储持水能力差;植被覆盖率很小,绿度指数均 <4 ;该区常年降水偏少,年降水量 $<410\text{ mm}$;该区是全省蒸发量最大的区域。因此,该区是严重旱灾风险区。

② 黄土高原丘陵沟壑干旱区

该区地处榆林南部与延安北部地区,主要包括安塞、甘泉、吴旗、延川、志丹、米脂、清涧、绥德、吴堡、延安、延长、子长、子洲 13 个站点。这里是生态农业最脆弱的地区,植被稀疏,大量的黄土丘陵几乎没有森林植被,少量有植被的地方多以草木为主。该区水资源短缺,土地贫瘠,日照充分,也是严重旱灾风险区。

③ 黄土高原丘陵梁塬干旱区

黄土高原丘陵梁塬干旱区地处延安南部和渭北高原北部地区,主要包括彬县、长武、富县、黄龙、洛川、旬邑、宜川、宜君 8 个站点。该区是陕北地区植被覆盖最好的区域,且植被以乔木为主,也是降水资源最丰富(年降水量在 $520\sim 680\text{ mm}$)、降水量变化率最小的地区。该区日照充足,自然地理及气候条件最适合苹果生长,已成为陕西的苹果种植基地。

④ 渭北高原旱塬区

渭北高原旱塬区位于陕北丘陵沟壑区南部和渭北黄土台塬地带,属黄土高原的一部分,主要包括白水、澄城、大荔、韩城、合阳、蒲城、铜川、富平、陇县、麟游、千阳、永寿、淳化、耀县 14 个站点。该区海拔为 $350\sim 1030\text{ m}$,地势由南向北、由东向西逐渐升高。该区热量资源较丰富,年降水量为 $500\sim 700\text{ mm}$,属暖温带、半干旱、半湿润季风气候区。该区塬面开阔平坦,耕地相对集中连片,土层深厚,土壤类型以黑垆土、黄绵土为主,质地优良,适宜苹果生长,是中国的苹果主产区。

(2) 模式对未来陕西区域干旱趋势的模拟

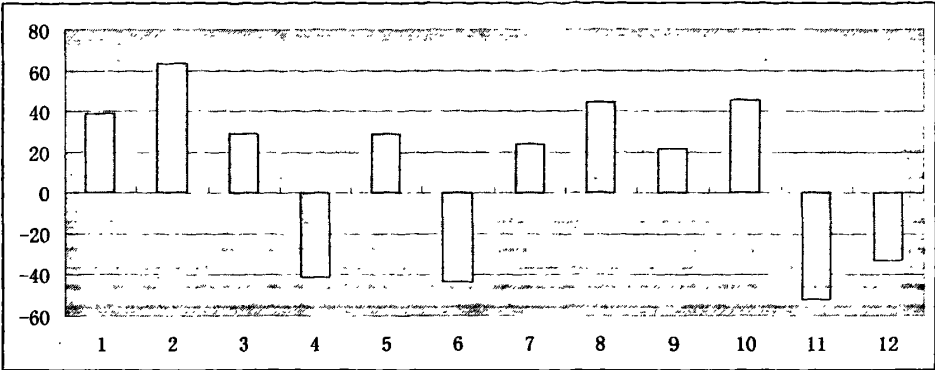


图 5.15 未来 2071—2100 年陕北逐月区域干旱动态指数较气候基准时段变化 (%)

图 5.15 是未来陕北区域干旱动态指数较气候基准时段变化百分率，除 4、6、11、12 四个月偏小外，其余各月均较气候基准时段偏大，说明未来陕北区域冬末春初、夏末秋初的干旱程度有所加强。对于上面提到的 4 个区域而言，旱情的加剧会进一步导致环境的脆弱性。

5.8 本章小结

1、本章介绍了陕西的基本气候特征，表明陕西近 50 年来在全球气候变化的背景下的一些响应情况。

2、按照构造的指数关系计算所得的蒸发量与按实况计算所得蒸发量大体相当，这证明 PRECIS 模式对气候基准时段蒸发能力模拟基本可靠。B2 情景下，未来蒸发量可能偏多，其中关中地区偏多 2 成以上，陕北地区可能大于 3 成。

3、气候基准时段模拟值很好的模拟出了干旱分布北多南少的格局，模拟出了陕北北部这个干旱高值区以及关中东部干旱频次高值区，不同级别所占的比例模拟值与实况值大体相当。

4、未来陕西全省年均干旱发生频次（含 2 级以上所有干旱级别）为自北向南逐渐减少，陕北北部最多，年均大于 4 次，陕南南部最少小于 2.5 次。

与气候基准时段的模拟值相比，陕西区域内有 3 个区域干旱频次较少，分别是陕北榆林南部以南到延安市、关中东部（含渭北）以及陕南西部，幅度最大是黄河沿线，约减少 15% 左右。但陕西区域内仍有 3 个区域干旱频次增加，分别是陕北北部、关中西部秦岭地区和商洛地区。其中后两个区域部分地方增加的幅度在 30—40%。

各等级干旱 5—7 月发生频率较高，发生在秋冬季频次较少，但是 4—5 级干旱在秋季发生的频率有所增加，这说明降水逐年分布的不均匀性，某些年份秋冬季降水可能会出现异常偏少。

各等级干旱较气候基准时段变化比较，春季 4 月、夏季 7、8 月份出现 5 级特旱的级别的概率较气候基准时段有大幅的增加。

5、PRECIS 模式对陕北的各月干旱变化特征模拟基本吻合；对关中和陕南 3—6 月的模拟较好，其余时段模拟能力较差。模拟能力较强的区域也恰好是陕西省干旱易发区。

6、干旱趋势：未来陕北区域干旱动态指数较气候基准时段变化百分率，除 4、6、11、12 四个月偏小外，其余各月均较气候基准时段偏大，说明未来陕北区域冬末春初、夏末秋初的干旱程度有所加强。对于上面提到的 4 个区域而言，旱情的加剧会进一步导致环境的脆弱性。

第六章 总结

6.1 总结

本文使用英国气象局 Hadley 气候预测与研究中心发展的 RCM 系统 PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) 和政府间气候变化委员会 (IPCC) 2000 年设计的《排放情景特别报告》(SRES) 情景对未来该情景下陕西 2071—2100 年极端气候事件进行分析, 得出以下结论:

1、未来全省年均气温都将增高, 未来全省年平均气温将增大 3°C 以上, 未来气温变率为 $0.17^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。高值区主要还是位于陕南和关中地区, 且关中地区高值区范围将有所扩大, 可能延伸到渭北地区。渭北是陕西的苹果主产区, 单从温度升高的角度分析, 未来热量条件对苹果果实膨大、着色和收获较为有利。

2、未来月平均气温变化幅度最大的是冬季 (12、1、2 三个月), 其中 12 月和 2 月变化幅度超过 100%, 1 月的幅度也约在 100%, 这说明未来有向暖冬变化的趋势, 春末、夏季、秋初的变化幅度不大, 在 20% 以内。

3、从全省角度来看, 未来降水总体是增加的趋势, 年均增加约为 100mm。未来降水变率为 $79\text{mm}/10\text{a}$, 仍然为增加的趋势。但是未来年降水量的变化幅度较大, 出现异常偏多、偏少年份的可能性增加。

4、未来多年平均降水日数与气候基准时段模式模拟值比较, 陕北、关中地区的降水日数有不同幅度的增多, 增幅最多的是关中中东部和陕北北部, 陕南地区的降水日数有所减少。

5、关于极端气候事件:

暴雨: 未来陕西全省冬春季降水较气候基准时段偏多, 平均偏多 30% 左右, 汛期前期的降水偏少, 出现伏旱的可能性增大, 秋季降水总体偏多, 说明未来秋季出现暴雨的可能性较大。

华西秋雨: 未来陕西降水日数大体上是春季增多、夏秋季减少, 春季透雨的来临时间将可能有所提前, 夏季出现干旱的可能性增加, 华西秋雨在陕西关中、陕南等地的发生频率可能会基本持平但略有减少。

流域性暴雨: 未来陕北暴雨日数可能会有所增加, 黄河沿线暴雨日数有所增加。由于渭河流域和汉江流域各站暴雨频次均较气候观测基准时段有增加, 未来渭河、汉江流域出现致洪暴雨的可能性仍然很大, 而且有增加的趋势。

干旱：与气候基准时段相比，陕西区域内有 3 个区域干旱频次较少，分别是陕北榆林南部以南到延安市、关中东部（含渭北）以及陕南西部，幅度最大是黄河沿线；但仍有 3 个区域干旱频次增加，分别是陕北北部、关中西部秦岭地区和商洛地区。各等级干旱 5-7 月发生频率较高，这与前面分析的陕西未来夏季降水减少有关，秋冬季干旱发生频率减少，这与前面分析的华西秋雨发生的趋势大体不变有关。虽然总体上干旱发生在秋冬季的频次较少，但是 4—5 级干旱在秋季发生的频率有所增加，这说明降水逐年分布的不均匀性，某些年份秋冬季降水可能会出现异常偏少。

即便在未来全省降水会增加，但是由于持续的温度升高，未来出现极端干旱气候事件的可能性仍然增大。

使用干旱动态指数对未来陕北区域进行评估，未来干旱动态指数较气候基准时段，除 4、6、11、12 四个月偏小外，其余各月均较气候基准时段偏大，说明未来陕北区域冬末春初、夏末秋初的干旱程度有所加强，旱情的加剧会进一步导致环境的脆弱性。

6.2 不足以及展望

由于气候变化带有很多的不确定性，本文对资料的研究和应用还是初步的，还有很多工作要做：

- 1、由于降水的离散性，模拟降水的能力有待气候模式的提高，如何客观的订正降水数据还需要进一步的工作。

- 2、陕西地形复杂，横跨不同气候带和地貌特征，其中的秦岭山区是南北的分界线，在 PRECIS 模式对气候基准时段的降水和温度模拟中，秦岭山区均与实况存在一定的差异。秦岭对未来气候变化究竟有何影响？随着区域加密站点在这一地区的布设以及观测资料的积累，将来可以更进一步的研究。

- 3、对于干旱等级指标的选择，本文只是单一的选择了降水距平法，由于陕西省南北跨度大，气候、土壤、水文、植被等差异较大，因而某一个指标不一定能适用于全省，这就需要根据各生态农业干旱区的特点来选取其所适用的最佳干旱指标；同一个生态农业干旱区，在不同季节生态农业环境变化较大，为此要进一步对各指标在不同生态农业干旱区针对不同季节进行适用性分析，才能得到适合于陕西省实际情况的分区域、分季节的气象干旱监测、评价指标，这样才能做

到对未来干旱趋势客观的描述和评估。

4、本文在对蒸发量与温度关系的验证上只是验证了几个代表站，由于温度和蒸发能力拟合关系较好，可以适当选择更多的站点参与验证，以期得到更好的描述效果。

参考文献

- 1、IPCC. 2007, Summary for Policymakers, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge : Cambridge University Press.
- 2、秦大河, 陈振林, 罗勇等. 2007, 气候变化科学的最新认知. 气候变化研究进展, 3 (1): 63~73.
- 3、秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 等. 中国气候与环境演变评估():中国气候与环境变化及未来趋势. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 4-9.
- 4、Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, de Vries B, et al. Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, USA, 2000. 599pp.
- 5、赵宗慈, 王绍武, 罗勇, 等. 2007, IPCC 成立以来对温度升高的评估与预估, 气候变化研究进展, 3 (3): 183~184.
- 6、气候变化国家评估报告. 2007, 气候变化国家评估报告编写委员会, 科学出版社, 北京, 422pp.
- 7、陈明, 符淙斌. 2000, 区域和全球模式的嵌套技术及其长期积分试验. 大气科学, 24(2): 253 ~ 262.
- 8、马艳, 刘洪芝, 靳立亚, 等. 2006, 区域气候模式的发展及研究进展, 甘肃科技, 22(12): 137~139.
- 9、刘鸿波, 张大林, 王斌. 2006, 区域气候模拟研究及其应用进展, 气候与环境研究, 11(5): 649~668.
- 10、孙颖. 2005, 用于 IPCC 第四次评估报告的气候模式比较研究简介, 气候变化研究进展, 1(4): 61~163.
- 11、鞠丽霞, 王会军. 2006, 用全球大气环流模式嵌套区域气候模式模拟东亚现代气候, 地球物理学报, 49 (1) : 52-60
- 12、冯锦明, 符淙斌. 2007, 不同区域气候模式对中国地区温度和降水的长期模拟比较, 大气科学, 31 (5): 805~814.
- 13、高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 等. 2001, 区域气候模式对温室效应引起的中国地区气候变化的数值模拟, 大气科学进展 (英文版), 18 (6) : 1224~1230.
- 14、张冬峰, 高学杰, 赵宗慈, 等. 2005, RegCM3 区域气候模式对中国气候的模拟. 气候变化研究进展, 1 (3): 119~121.
- 15、高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 等. 2003, 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 I : 模式对中国气候模拟能力的检验. 气象学报, 2003, 61 (1) : 20~28.
- 16、高学杰, 赵宗慈, 丁一汇. 2003, 区域气候模式对温室效应引起的中国西北地区气候变化的数值模拟, 冰川冻土, 25 (2) : 165~16
- 17、高学杰. 2007, 中国地区极端事件预估研究, 气候变化研究进展, 3 (3): 162—164
- 18、林而达, 吴绍洪, 戴晓苏, 等. 2007, 气候变化影响的最新认知, 气候变化研究进展, 3 (3): 125~131.
- 19、Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Climate Change 2007:Impacts, Adaptation and Vulnerability[EB/OL]. [2007-04-23]. <http://www.ipcc.ch/SPM13apr07.pdf>.
- 20、许吟隆, Richard Jones. 2004, 利用 ECMWF 再分析数据验证 PRECIS 对中国区域气候的

模拟能力. 中国农业气象, 25 (1) : 5~9.

21、Jones R G, Noguer M, Hassell D C, et al. . Generating high resolution climate change scenations using PRECIS. Uk, Exeter:Met.office Hadley Centre, 2004: 1~35.

22、陈楠, 许吟隆, 陈晓光, 等. 2007, PRECIS 模式对宁夏气候变化情景的模拟分析, 第四纪研究, 27 (5): 332~338.

23、许吟隆, 黄晓莹, 张勇等. 2005, 中国 21 世纪气候变化情景的统计分析. 气候变化研究进展, 1(2): 80~83.

24、许吟隆. 2005, 中国 21 世纪气候变化的情景模拟分析. 南京气象学院学报, 28 (3) : 323~329.

25、许吟隆, 张勇, 林一骅, 等. 2006, 利用 PRECIS 分析 SRES B2 情景下中国区域的气候变化响应. 科学通报, 51 (7): 2068~2074.

26、Hadson D A, Jones R G. Regional climate model simulations of present-day and future climates of southern Africa. Hadley Centre Technical Note 39, Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, Bracknell U K, 2002.

27、罗勇, 王绍武. 近 20 年来气候模式的发展与模式比较计划. 地球科学进展, 2002, 17 (3) : 372~377.

28、Giorgi F, Hewitson B, Christensen J, et al. 2001, Regional Climate Information - Evaluation and Projections. Chapter 10 of Climate Change 2001; The Scientific Basis, Contribution of WGI to the Third Assessment Report of IPCC, Edited by J T Houghton, et al. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

29、Manabe S, Wetherald R T. 1980, On the distribution of climate change resulting from an increase of CO₂-content of the atmosphere. J. Atmos. Sci., 37 : 99~118.

30、Manabe S, Stouffer R J. 1994, Multiple-Century response of a coupled ocean-atmosphere model to an increase of atmospheric carbon dioxide. J. Climate, 7 : 5~23

30、Giorgi F, Bates G T. 1989, The climatological skill of a regional model complex terrain. Mon. Wea. Rev., 117 : 2325~2347.

31、Dickinson R E, Kennedy P J, Giorgi F, et al. 1989, A regional climate model for the western United States. Clim. Change, 15 : 383~422.

32、Giorgi F, Christine S B, Gary T B. 1994, Regional climate change scenarios over the United States produced with a nested regional climate model. Am. Meteorol. Soc., 3 : 375~399.

33、Rotach M W, Marinucci M R, Wild M, et al. 1997, Nested regional simulation of climate change over the Alps for the scenario of a doubled greenhouse forcing. Theor. Appl. Climatol., 57 : 209~227.

34、Raisanen J, Rummukainen M, Ullerstig A. Downscaling of greenhouse gas induced climate change in two GCMs with the Rossby Centre regional climate model for Northern Europe. Tellus A, 2001, 53 : 168~191.

35、Leung L R, Qian Y, Bian X, et al. 2004, Mid-century ensemble regional climate change scenarios for the western United States. Clim. Change, 62 : 75~113.

36、Christensen O B, Christensen J H. 2004, Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate. Global Planet. Change, 44 : 107~117.

37、Gao X J, Pal J S, Giorgi F. 2006, Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution double nested

- RCM simulation. *Geophys. Res. Lett.*, 2006a, 33 : L03706, doi:10.1029/2005GL024954.
- 38、Diffenbaugh N S, Pal J S, Trapp R J, et al. Fine-scale processes regulate the response of extreme events to global climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2005, 102 (44) : 15774~15778, doi:10.1073/pnas.0506042102
- 39、Mizuta R, Oouchi K, Yoshimura H, et al. 2006, 20 km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model. - Mean climate states. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 84 : 165~185.
- 40、Kusunoki S, Yoshimura J, Yoshimura H, et al. 2006, Change of Baiu rain band in global warming projection by an atmospheric general circulation model with a 20-km grid size. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 84 : 581~611.
- 41、陈起英, 俞永强, 郭裕福, 等. 1996, 温室效应引起的东亚区域气候变化, 气候与环境研究, 1(2) : 113~123.
- 42、俞永强, 陈克明, 金向泽, 等. 1996, 温室效应引起的全球气候变化. 气候变化规律及其数值模拟研究论文(二), 气象出版社, 北京, 123~137.
- 43、宋玉宽, 陈隆勋. 1996, 二氧化碳稳态倍增情况下的气候变化数值模拟. 气候变化规律及其数值模拟研究论文(二), 气象出版社, 北京, 228~240.
- 44、王彰贵, 巢纪平, 陈英仪, 等. 1996, 全球海气耦合模式对大气中 CO₂ 含量变化的响应. 气候变化规律及其数值模拟研究论文(二), 气象出版社, 北京, 289~307.
- 45、Guo Yufu, Yu Yongqiang, Liu Xiyang, et al. 2001, Simulation of Climate Change Induced by CO₂ Increasing for East Asia with IAP/LASG GOALS Model. *Adv. Atmos. Sci.*, 18 (1) : 53~66.
- 46、徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 2002, 近 30 年人类活动对东亚地区气候变化影响的检测与评估. *应用气象学报*, 13 (5) : 513~525.
- 47、许吟隆, 薛峰, 林一骅. 2003, 不同温室气体排放情景下中国 21 世纪地面气温和降水变化的模拟分析. *气候与环境研究*, 8 (2) : 209~217.
- 48、徐影. 2002, 人类活动对气候变化影响的数值模拟研究. 博士学位论文, 中国气象局.
- 49、李维亮, 龚威. 1996, 中国区域气候模式对中国地区的区域性气候变化情景的模拟. 气候变化规律及其数值模拟研究论文(二), 气象出版社, 北京, 255~272.
- 50、罗勇, 赵宗慈. 1997, NCAR RegCM2 对东亚区域气候的模拟试验, *应用气象学报*, 增刊, 124~133.
- 51、徐宾, 许吟隆, 张勇, 等. 2007, PRECIS 模拟区域的选择对宁夏区域气候模拟效果的敏感性分析, *中国农业气象*, 28 (2): 118~123.
- 52、张勇, 许吟隆, 董文杰, 等. 2007, SRES B2 情景下中国区域最高、最低气温及日较差变化分布特征初步分析, *地球物理学报*, 50 (3): 714~723.
- 53、许吟隆. 应用 Hadley 中心 RCM 发展中国高分辨率区域气候情景. *气候变化通讯*, 2004, 3(5) : 6~7.
- 54、姚玉璧, 张存杰, 邓振镛, 等. 2007, 气象、农业干旱指标综述. *干旱地区农业研究*, 25 (1): 185~189.
- 55、冯平, 李绍飞, 王仲钰, 等. 2002, 干旱识别与分析指标综述. *中国农村水利水电*, (7): 13~15.
- 56、Karl T R. 1986, The sensitivity of the Palmer drought severity index and Palmer's Z. index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25(1):77~86.
- 57、Dai Aiguo, Trenberth Kevin E, Taotao Qian. 2002, A global dataset of Palmer

Drought Severity index for 1870 . relationship with soil moisture and effects of surface warming. Journal of Hydrometeorology ,2004,5(6):1117~1130.

58、 Hayes M J ,Svoboda M D ,Wilhite D A ,et al. 1999, Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. Bulletin of the American Meteorological Society , 80:429~438.

[6]William M A. 1984, The Palmer drought severity index: Limitations and assumptions. Journal of Climate and Applied Meteorology, 23(7):1100~1109.

59、李星敏,杨文峰,高蓓,等. 2007,气象与农业业务化干旱指标的研究与应用现状. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 35(7): 111~116.

60、杨小利. 2007,西北地区气象干旱监测指标的研究和应用. 气象, 33(8): 90~96.

61、刘庚山,郭安红,安顺清,等. 2004,帕默尔干旱指标及其应用研究进展. 自然灾害学报, 13(4): 21~27.

62、张存杰,王宝灵,刘德祥,等. 1998,西北地区旱涝指标的研究. 高原气象, 17(4): 381~389.

[11]鞠笑生,杨贤为,等. 1997,我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究. 应用气象学报, 8(1): 26~32.

63、张尚印,姚佩珍,吴虹,等. 1998,我国北方旱涝指标的确定及旱涝分布状况. 自然灾害学报, 7(2): 22~28.

64、袁文平,周广胜. 2004,标准化降水指标与 Z 指标在我国应用的对比分析. 植物生态学报, 28(4): 523~529.

65、张强,鞠笑生,李淑华. 1998,三种干旱指标的比较和新指标的确定. 气象科技, 1998(2): 48~52.

66、樊高峰,苗长明,毛裕定. 2006,干旱指标及其在浙江省干旱监测分析中的应用. 32(2): 70~74.

67、刘巍巍,安顺清,刘庚山,等. 2003,以气候适宜降水量为基础的水分距平的计算方法. 气象, 29(4): 14~23.

68、卫捷,马柱国. 2003,Palmer 干旱指标、地表湿润指标与降水距平的比较. 地理学报, 58(增刊): 117~124.

69、朱炳瑗,谢金南,邓振镛. 1998,西北干旱指标研究的综合评述. 甘肃气象, 16(1): 35~36.

70、宫德吉. 1998,干旱监测预警指标研究. 气象, 24(8): 14~17.

71、宋连春,邓振镛,董安祥,等. 2003,干旱. 北京: 气象出版社, 54~55.

72、谭桂容,孙照渤,陈海山. 2002,旱涝指标的研究. 南京气象学院学报, 25(2): 153~158.

73、袁文平,周广胜. 2004,干旱指标的理论分析与研究展望. 地球科学进展, 19(6): 982~991.

74、邹旭恺,张强,王有民,等. 2005,干旱指标研究进展及中美两国国家级干旱监测. 气象, 31(7): 6~9.

75、杨青,李兆元. 1994,干旱半干旱地区的干旱指标分析. 灾害学, 9(2): 12~16.

76、冯利华. 2003,干旱等级和旱灾程度的定量表示法. 农业系统科学与综合研究, 19(3): 230~231.

77、张养才,何维勋,李世奎. 1991,中国农业气象灾害概论[M]. 北京: 气象出版社, 262~281.

78、王密侠,马成军,蔡焕杰. 1998,农业干旱指标研究与进展[J]. 干旱地区农业研究, 16

- (3):119~124.
- 79、康慕谊、朱源. 2007, 秦岭山地生态分界线的论证, 生态学报, 27 (7): 2774~2784
- 80、张新时. 1994, 中国山地植被垂直带基本生态地理类型, 植被生态学研究. 北京: 科学出版社, 7~92.
- 81、刘华训. 1981, 我国山地植被的垂直分布规律. 地理学报, 36 (3): 267~279.
- 82、杜继稳. 2006, 陕西省短期天气预报指导手册, 气象出版社.
- 83、温克刚, 翟佑安. 2005, 中国气象灾害大典. 北京: 气象出版社, 陕西卷.
- 82、杨文峰, 李星敏, 鲁渊平. 2002, 陕西省近50年气候变化及其对水资源的影响, 陕西气象, 2002 (6): 1~3.
- 85、田武文、雷向杰、黄祖英. 2007, 陕西省 2006 年气候影响评价, 陕西气象, 2007 (3): 261~29.
- 86、李平华、胡小晖、程燕. 2002, 陕西关中地区水文气候状况对全球变暖的响应问题探讨, 灾害学, 2002 (2): 37~41.
- 87、郑小华. 2005, 气候变暖对陕西农业生产的影响, 陕西气象, 2005 (6): 15~18.
- 88、王川、杜继稳、杜川利, 等. 2005, 陕西及我国东部区域气候变化研究, 气象, 31 (4): 22~26.
- 89、徐宾. 2007, 构建宁夏地区高分辨率气候变化情景的方法论探讨, 中国农业科学院硕士学位论文, 2pp.
- 90、杜继稳, 李社宏. 2007, 渭河流域致洪暴雨分析研究与应用. 北京: 气象出版社.
- 91、许新田. 1996, 渭河流域致洪暴雨分析及其预报. 空军气象学院学报, 17 (1).
- 92、汤克靖, 杨贤为. 1995, 黄河中游致洪暴雨的特征分析. 灾害学, 10 (3).
- 93、刘志玉. 1998, 陕西省灾害性洪水实例选编. 陕西省防汛抗旱总指挥部办公室, 内部发行.
- 94、刘晓东, 江志红, 罗树如等. 2005, RegCM3 模式对中国东部夏季降水的模拟试验. 南京气象学院学报, 28 (3): 351~359.
- 95、杜继稳. 2008, 陕西省干旱监测预警评估于风险管理, 气象出版社.
- 96、李新周, 刘晓东, 马柱国. 2004, 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析. 干旱区研究, 21 (2), 97~103.
- 97、鞠笑生, 杨贤为, 陈丽娟, 等. 1997, 我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究. 应用气象学报, 8 (1), 26~33.
- 98、鞠笑生, 周旭恺, 张强. 1998, 气候旱涝指标方法及其分析. 自然灾害学报, 7 (3), 51~57.
- 99、马柱国, 符淙斌. 2001, 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析. 气象学报, 59 (6), 737~746.
- 100、马柱国, 华丽娟, 任小波. 2003, 中国近代北方极端干湿事件的演变规律. 地理学报. 58 (增刊), 068~074.
- 101、马柱国, 符淙斌. 2005, 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征. 地球物理学报, 48 (3), 519~525.
- 102、杨帅英, 郝芳华, 宁大同. 2004, 干旱灾害风险评估的研究进展. 安全与环境学报, 4 (2): 79~82.
- 103、周飞. 2005, 区域干旱评价指标体系及抗旱对策研究. 山东大学硕士学位论文.
- 104、郭韧, 曹光源. 2005, 区域旱情评估模型. 运筹与管理, 14 (4): 111~114.
- 105、赵传军. 1985, 风险经济学. 哈尔滨: 黑龙江教育出版社.
- 106、风险管理编写组. 1994, 风险管理. 成都: 西南财经大学出版社.
- 107、桑国庆. 2006, 区域干旱风险管理研究. 山东大学硕士学位论文.

- 108、顾颖. 2006, 风险管理是干旱管理的发展趋势. 水科学进展, 17 (2) :295~298.
- 109、秦大河, 罗 勇, 陈振林等. 2007, 气候变化科学的最新进展: IPCC 第四次评估综合报告解析, 气候变化研究进展, 3 (6): 311-314
- 110、胡顺军. 塔里木盆地水面蒸发量的实验研究. 干旱区资源与环境, 2003, 17 (6) :95
- 111、张辉, 万淑燕. 江西省蒸发能力与干旱指数特性分析. 黑龙江水利科技, 2006, 34 (6): 53~54

致 谢

本论文是在导师戴新刚教授、许吟隆研究员的悉心指导下完成的。

导师们博学多识，治学严谨，虽有百忙，仍孜孜不倦，无所保留的教授知识，尤其是他们对科学问题充满研究的热情，以敏锐的洞察力不断探索科学领域的学者风范给我留下了深刻的印象，并深深的影响着我。自论文开题始，导师们对选题、研究思路方法都给予了悉心指导和极大关心，论文写作过程中，不断解惑答疑，指点迷津，使论文得以顺利完成。这一过程中，我也体会到科研工作的艰辛和乐趣。在论文完成之际，对导师们给予我的悉心指导和热情帮助表示衷心的感谢！

在此还要特别感谢张颖娴同学，谢谢她在模式资料整理以及调试程序过程中给予的大力协助，帮助我解决一些模式方面的困难和问题，并对我的部分工作做了验证。感谢在京访问期间徐宾、张勇等同学给予的热情指导和帮助，在此向他们致以诚挚的谢意。

感谢陕西省气象局的杜继稳研究员在干旱研究过程中给予的指导和帮助，正是他给出了陕西干旱研究的最新的进展，开拓了我对干旱工作的认知。

感谢中科院大气所的王秀成同学在科学绘图方面给予的帮助，帮助我改进了绘图程序。

感谢陕西省气象局档案馆的王小宁、汤浪、李素玲等同事，他们不厌其烦的帮助我整理了若干所需的历史资料；感谢郑小华和鲁渊平在资料分析当中提供的建议和思路。

最后，向我的家人表示深深的谢意，感谢他们默默给予的关心、支持和鼓励；感谢我1岁的儿子，他带来的欢乐陪伴着我写完这篇论文！

李明娟

2008年10月