

文章编号: 1000-0690(2002)05-0513-07

全球气候变暖条件下黄河流域降水的可能变化

刘晓东¹, 安芷生¹, 方建刚², 陈广善¹

(1. 中国科学院地球环境研究所, 陕西 西安 710075; 2. 陕西省气象局, 陕西 西安 710015)

摘要: 利用最近 50 年气象站观测的降水量以及根据史料和树轮重建的近 400 年来的降水量, 根据回归分析和合成分析研究了黄河流域降水与全球气温变化的关系及其可能成因。结果表明, 全球平均气温偏高(低)与黄河中游地区年降水量偏少(多)存在一定的对应关系。夏末秋初的 8~9 月是决定全年降水变化的关键时期, 全球气候变暖会引起 8~9 月西太平洋副热带高压增强、扩大, 从而有利于东亚夏季风锋面位置北移, 进而使东亚夏季风北界南侧黄河中游一带的降水减少。

关键词: 黄河流域; 干旱; 全球变暖

中图分类号: P426 文献标识码: A

近年来, 随着全球变暖的日益显著, 以气候变暖为代表的全球性环境问题已越来越受到科学界、社会公众和各国政府的关注。1988 年成立的政府间气候变化委员会(IPCC)已先后编写了三次气候变化科学评估报告。最近出版的第三次评估报告^[1]进一步肯定近百年来全球平均气温已上升了 0.4~0.8℃, 这种增暖幅度是近千年来、甚至近万年来最显著的。从最近 50 年来全球及北半球平均气温距平(相对 1961~1990)的逐年变化看(图 1), 20 世纪 70 年代中期以来的气候变暖尤为显著。最近 10 年是自有气象记录以来的 140 余年中平均温度最高的 10 年, 其中 1998 年是全球最热的年份。中国也和全球一样近年来出现了显著的变暖^[2], 其中高海拔的青藏高原气候变暖尤其令人注目^[3]。据估计 21 世纪全球气候将继续变暖, 预计全球平均气温增加约 2.5℃, 可能的变化范围为 1.5~4.5℃^[1]。值得注意的是, 一些数值模拟研究指出, 随着未来人类活动引起的大气温室气体含量的进一步增加和由此引起的全球气候变暖, 将可能导致北半球中纬地带的干旱化^[4-6], 并可能造成世界上一些地区水资源的短缺^[7,8]。全球变暖对中国区域降水的影响如何? 特别是位于半干旱-半湿润地区的黄河流域旱涝灾害频繁^[9], 这是对全球变化响应的敏感地区^[10], 在未来全球气候进一步变

暖的情况下, 这一地区降水是否存在趋势性变化不仅是具有重要科学意义的课题, 也是制订区域可持续发展战略所需要研究的问题。本文的目的就是研究全球变暖条件下黄河流域降水的可能变化, 并就相关问题进行讨论。

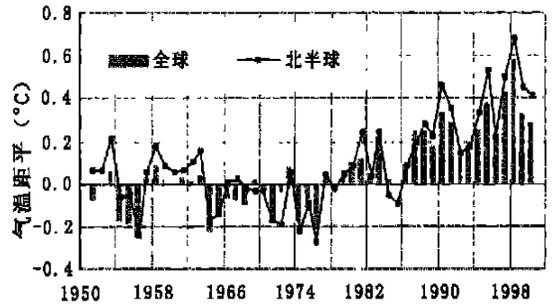


图 1 最近 50 年全球及北半球平均气温距平的逐年变化
资料取自 Jones 等^[11] 最近更新的数据

Fig. 1 Year to year variations of global and northern hemispheric mean air temperature anomalies during the last fifty years

1 黄河流域降水变率及其对全球变暖的响应

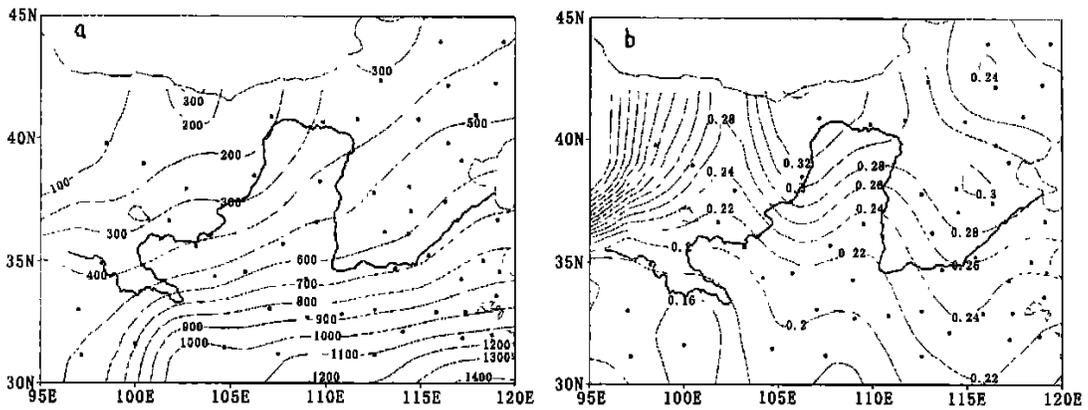
黄河是哺育中华民族的母亲河。黄河流域西起青藏高原, 东至渤海之滨, 南自秦岭, 北抵阴山, 东西横跨约 23 个经度(96~119°E), 南北最远可跨

收稿日期: 2002-08-05; 修订日期: 2002-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(40121303、40023003、90102017)、国家重点基础研究发展规划项目(G1999043401)、中国科学院院长基金。

作者简介: 刘晓东(1963-), 研究员, 主要从事气候变化研究。E-mail: liuxd@loess.llqg.ac.cn

10 个纬度(32~42°N),这一范围面积超过 75 万 km²。由于流域内各地所处位置不同,地形、地势差异较大,致使流域内降水的分布很不均匀。年降水总量地区分布的总趋势是由东南向西北递减(图 2a)。山区的降水量大于平原,并随着纬度、离海洋的距离增加而减少。由于黄河流域位于东亚季风区的北部,所以东亚季风异常往往导致该地区频繁的洪涝灾害。从该地区最近 50 年年降水总量年际变差系数(均方差与平均值之比)分布(图 2b)来看,年际降水变率总体上由南到北加大,其中黄河以北的西北东部和华北地区年际降水变率最高。



图中的圆点指示了分析中所用气象台站的位置

图 2 (a) 黄河流域 1951~2000 年平均年降水量分布(mm); (b) 1951~2000 年降水量年际变差系数分布

Fig. 2 (a) 1951-2000 annual mean precipitation (mm) over the Yellow River valley; (b) 1951-2000 mean inter-annual variability of the annual precipitation. The dots indicate the used weather stations.

1976)(见图 1)做合成分析。结果发现,暖年平均与冷年平均降水量差的分布(图 3b)形式与线性回归分析的结果非常相似,在黄河中游地区 3 个暖年平均比 3 个冷年平均降水量减少 40% 以上。可见,在全球变暖情况下黄河中游地区的降水可能减少,再考虑到气候变暖引起的蒸发增大,因而干旱化和水资源短缺问题不容忽视。

值得一提的是, Hulme 与 Sheard^[12] 曾经综合了在政府间气候变化委员会(IPCC)设计的温室气体排放情景下大气环流模式(GCM)模拟的气候变化情况以及现有的气候观测资料,给出了中国未来的气候变化情景。按照他们的估计,在温室气体增加率不同的 4 种情景下,与 1961~1990 年平均相比,到 20 世纪 80 年代全球平均气温将增加 1.2~3.9℃。图 4a 给出在大气温室气体具有最高排放量(假设到 2100 年大气 CO₂ 含量将增加到 830

为了探讨黄河流域降水对全球变暖的可能响应,我们首先利用中国气象局整理的全国 160 个气象台站 1951~2000 年的降水量资料和 Jones 等^[11] 最近更新的同期全球平均气温资料,进行了最近 50 年年降水总量对全球平均气温的线性回归分析。结果表明(图 3a),在全球平均气温升高 1℃ 的情况下,黄河中游地区(主要在陕西至山西一带)年降水量减少 20% 以上,但中-蒙边境一带年降水量却是增加的。为了更直观地显示全球冷暖与区域旱涝的对应关系,我们选择最近 50 年中最热的 3 年(1998、1997、1995)和最冷的 3 年(1956、1964、

mg/m³)且气候具有较高敏感度(4.5℃)情况下,20 世纪 80 年代前后 30 年平均的夏季(6~8 月)降水距平(相对于 1961~1990 年)百分率变化。有趣的是,按 Hulme 与 Sheard^[12] 的预测,黄河中游一带也为降水减少区。虽然他们的结果仅给出夏季降水变化,但由于中国气候具有季风特征,因此夏季降水与年降水变化趋势通常是一致的。此外还可以看到,在西北西部和东北地区未来降水可能随气候变暖而增加。

如果我们给出全球平均气温升高 1℃ 的情况下全国范围内年降水距平百分率变化的线性回归分析结果(图 4b),则不难发现其分布形式与 Hulme 和 Sheard^[12] 的结果(图 4a)非常相似,即黄河中游地区降水将减少,而西北西部和东北地区降水可能增加。需要说明的是,由于青藏高原上可用的气象台站很少,所以这里无法进行回归分析和对

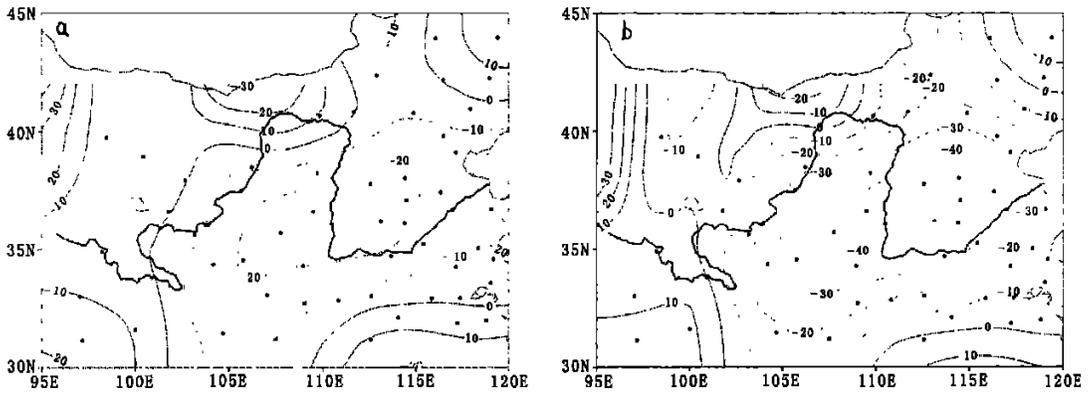


图 3 (a) 全球平均气温升高 1℃ 的情况下黄河流域年降水距平百分率的变化 (%) ;
(b) 最近 50 年中最热的 3 年平均与最冷的 3 年平均年降水距平百分率之差 (%)

Fig. 3 (a) Variation in the percentage of annual precipitation anomaly over the Yellow River valley with an increase of 1℃ in the global mean air temperature (%); (b) difference in the percentages of annual precipitation anomalies between the warmest three years and coldest three years in the past fifty years (%)

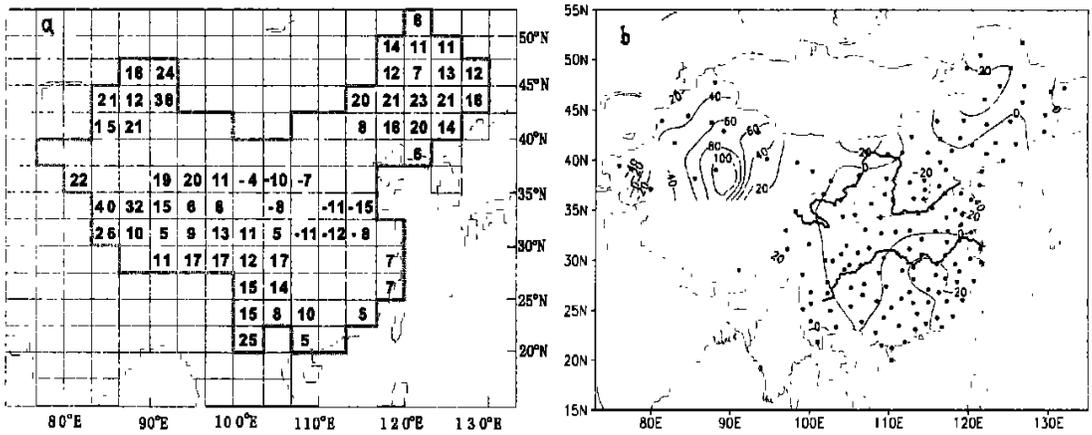


图 4 (a) 温室气体高排放情景下 2071~ 2100 年与 1961~ 1990 年夏季平均降水之差 (%) ;
(b) 全球平均气温升高 1℃ 的情况下中国年降水距平百分率的变化 (%)

Fig. 4 (a) Difference of the summer rainfall between 2071- 2100 and 1961- 1990 (%) (after Hulme and Sheard); (b) variation in the percentage of annual precipitation anomaly over China (%)

比。图 4a 中, 仅中国大陆上降水变化较大的网格中的数值被标出, 它们取自 Hulme 与 Sheard^[12] (有简化)。

2 全球变暖条件下黄河流域降水变化的可能成因

以上分析说明在全球变暖条件下黄河中游地区年降水量存在减少趋势。为了仔细分析各月降水变化在年总降水量变化中的作用, 我们计算了各月降水对年降水年际变率方差的方差贡献。设某站第 y 年 ($y = 1, 2, 3, \dots, 50$ 分别对应于 1951,

1952, 1953, \dots, 2000 年) 第 m 月 ($m = 1, 2, 3, \dots, 12$, 指各月) 月降水量为 R_{ym} , 则年总降水量 $R_y = \sum_{m=1}^{12} R_{ym}$, 年平均降水量 $R_y^* = \sum_{y=1}^{50} R_y / 50$, 月平均降水量 $R_m^* = \sum_{y=1}^{50} R_{ym} / 50$, 于是可以定义第 m 月降水对年降水年际变率方差的方差贡献为:

$$S_m = \frac{\sum_{y=1}^{50} [(R_y - R_y^*)(R_{ym} - R_m^*)]}{\sum_{y=1}^{50} (R_y - R_y^*)^2}$$

按照以上方程计算 1~ 12 月逐月的方差贡献, 结果

发现黄河流域 8、9 两月的方差贡献最大, 这两个月的降水量对年降水量年际变率的方差贡献大多在 40% 以上, 在河套等局部地区甚至超过 50% (图 5)。这一事实表明, 虽然黄河流域全年的降水主要集中在夏季, 但夏末秋初则是决定年降水量年际变化的关键时期。所以以下我们将重点分析这两个月降水年际变化的原因。

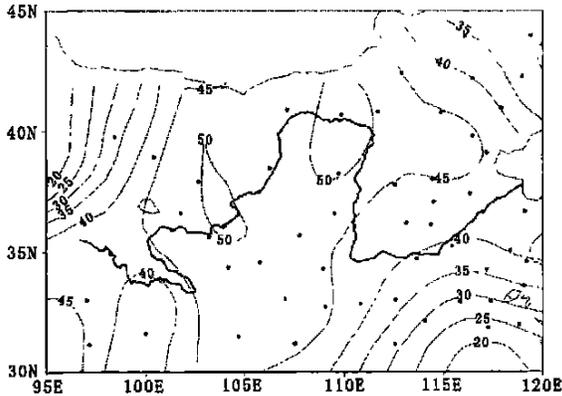


图 5 8~9 月降水量对年降水量年际变率的方差贡献 (%)

Fig. 5 Variance contribution of August-September precipitation variation to the inter-annual variability of annual precipitation (%)

众所周知, 大气环流异常往往是引起降水变化的直接原因。短期气候预测的经验表明^[13], 我国季风降水异常与西太平洋副热带高压(以下简称副高)强度和位置的变化存在着密切的联系。夏末秋初副高强度偏强、脊线位置偏北通常有利于黄河以北地区的降水增多, 而长江流域降水减少。分析前述近半个世纪中全球最热的 3 年(1998、1997、1995)与最冷的 3 年(1956、1964、1976) 8~9 月平均东亚至西太平洋地区 500 hPa 位势高度场(图 6), 不难发现冷、暖年的副热带高压存在着明显的差异。暖年比冷年的副高明显偏强、范围扩大。例如, 在根据 NCEP/NCAR 再分析的全球资料^[14]绘制的 500 hPa 等压图上, 暖年 584 位势什米线已位于黄河流域并向西伸展到南疆盆地(图 6a), 而冷年 584 位势什米线范围仅覆盖了江南地区(图 6b)。从中国气象局计算的西太平洋副热带高压面积指数(500 hPa 等压面上 10°N 以北 110~180°E 范围内大于或等于 588 位势什米的网格点数), 三个暖年的副高面积均比三个冷年的大, 暖年平均和冷年平均的副高面积指数分别为 34 和 14.6(表 1)。从副高脊西界位置(即 500 hPa 等压面上东亚地区 588 位势什米线内至少有两点高度值大于或

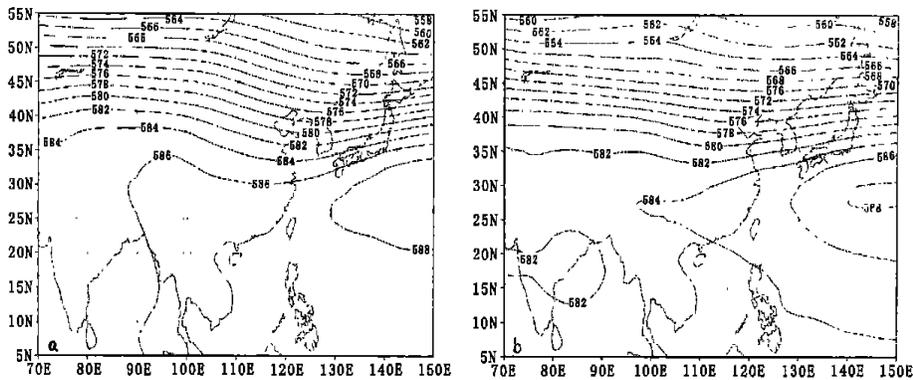


图 6 最近 50 年中最热(a)和最冷(b)的 3 年 8~9 月平均 500 hPa 位势高度分布(10 gpm)

Fig. 6 August-September geopotential heights at 500 hPa averaged for the warmest three years (a) and coldest three years (b) in the recent fifty years

表 1 全球冷、暖年 8~9 月平均西太平洋副热带高压面积指数、西界位置及 8~9 月累计 37°N 附近 105~115°E 范围内的地面锋面活动次数

Table 1 Statistics of characteristics of the subtropical West Pacific High and the surface cold front of central China

	冷 年				暖 年			
	1956	1964	1976	平均	1955	1997	1998	平均
副高面积指数	10	18.5	15.5	14.6	37.5	27	37.5	34
副高西界位置	129.5	107	127.5	121.3	102.5	100	92.5	98.3
地面锋面活动次数	14	9	9	10.7	5	6	6	5.7

等于 588 位势什米区域最西端的经度), 暖年比冷年明显偏西, 暖年平均位于 98.3°E , 而冷年平均位于 121.3°E 。此外, 我们还利用逐日历史天气图统计了冷、暖年 8~9 月黄河中游 37°N 附近 $105^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 范围内的地面锋面活动次数(表 1), 结果表明锋面活动由冷年平均的 10.7 次下降到暖年平均的 5.7 次, 锋面活动次数下降将会导致局地降水减少, 这一变化与前面获得的该地区降水随全球变暖而减少的分析(图 3)相一致。结合全国的降水变化型(图 4b), 我们估计全球变暖将引起西太平洋副热带高压增强、扩大, 从而有利于东亚夏季风锋面北移, 使东亚夏季风边缘南侧黄河中游一带的降水减少, 而东亚夏季风边缘北侧的西北西部和东北地区降水增加。气候变冷条件下的情况相反。这一影响机制以及气候变暖造成副高增强的物理过程等尚待更多的分析和数值模拟研究来验证和探讨。

3 长时间尺度区域降水变率与全球冷暖对应关系的讨论

以上仅对近 50 年有器测气象记录的情况进行了分析。在过去更长时间内黄河流域降水变率与全球冷暖的对应关系如何? 在本节中我们将利用一些重建的历史气候记录就此作简单讨论。首先用两种来源的资料反映近 400 年来黄河中流地区

的降水: 一是通过历史文献记载重建的中原地区 ($32^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$) 年降水量序列^[15], 二是利用华山 ($34^{\circ}29'\text{N}$, $110^{\circ}05'\text{E}$) 地区树木年轮重建 4~7 月降水量序列^[16]。在气温方面采用了 Mann 等^[17] 根据多种气候代用指标和基于主分量分析方法重建的北半球近 400 年来的逐年气温序列(由图 1 可知全球与北半球平均气温变化基本一致)。将这三个序列具有共同时段(1600~1980 年)的资料作标准化和三年滑动平均处理(图 7), 结果发现, 重建的中原地区年降水量与重建的华山 4~7 月降水量之间的相关系数为 0.27, 超过了 0.001 的显著性水平, 这从一个侧面说明重建的降水量具有一定的可靠性。同时, 在这 380 年间中原地区年降水量和华山 4~7 月降水量与北半球平均气温的相关系数分别为 -0.15 和 -0.08, 前者已超过 0.01 的显著性水平。考虑到重建的华山降水仅为一个点上 4~7 月的降水量, 所以基于史料重建的中原区域尺度上年降水量可能更为可靠。此外, 图 7 中 20 世纪的气候变暖趋势非常显著, 但重建的降水却没有明显的趋势性变化。这可能是由于用史料和树轮重建降水方法上的局限性所造成的。例如, 根据历史文献旱涝只能划为若干等级, 在对树轮数据作生长期订证的同时可能也除去了一部分低频变化信息。因此, 我们有理由相信在过去近 400 年中黄河中游地区降水多寡与全球冷暖具有一定程

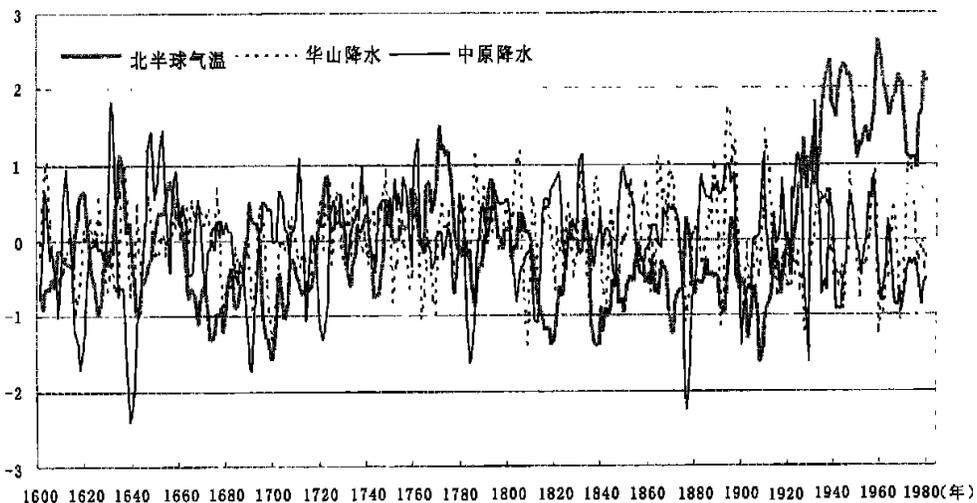


图 7 1600~1980 年中原地区年降水量^[15]、华山 4~7 月降水量^[16]及北半球平均气温变化^[17]

Fig. 7 1600-1980 annual precipitation of the Central Plains^[15], April-July precipitation of Huashan Mountain^[16], and annual mean temperature of Northern Hemisphere^[17]

度的相关关系。换句话说,全球温度偏高与黄河中游地区干旱发生在过去几百年中仍存在着统计上可信的联系。

需要指出的是,本文所指黄河中游地区干旱-全球温暖这种对应关系在冰期-间冰期旋回的时间尺度上是不适用的。例如,根据 An 等^[18]的研究,黄土高原区黄土与古土壤交替分布的风成沉积序列记录了当地冰期旋回尺度上的气候变化。反映过去降水量的黄土与古土壤磁化率指标与反映全球冰量的深海氧同位素记录具有良好的对应关系,即黄土层磁化率低、降水少,而同一时期深海氧同位素值高,对应于寒冷的冰期阶段;相反古土壤层磁化率高、降水多,但同时深海氧同位素值低,对应于温暖的间冰期阶段。为什么在黄土高原地区百年以下与万年尺度上干湿交替与全球冷暖起伏的配置相反?这一问题值得深入研究。目前的工作提醒我们,把冰期-间冰期旋回尺度上的古气候变化规律直接用于百年甚至更短时间的短期气候预测似乎是不可取的。

4 结 语

通过对黄河流域气象站观测的近 50 年年降水量以及利用史料和树轮重建的近 400 年降水量与全球气温变化关系的统计分析表明,该地区年降水偏少与全球气温偏高存在一定的对应关系,反之亦然。初步研究表明,夏末秋初的 8~9 月是决定全年降水年际变化的关键时期,全球气温升高会引起 8~9 月西太平洋副热带高压增强并扩大,从而有利于东亚夏季风锋面北移,进而使东亚夏季风北界南侧黄河中游一带的降水减少。尽管区域性降水变化的原因复杂、影响因子很多,但在未来全球气候进一步变暖的情况下,黄河中游地区的干旱化以及与降水减少和蒸发增大相联系的水资源短缺等问题无疑应当引起我们足够的重视。

参考文献:

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. (Eds.). *Climate Change 2001: The Scientific Basis* [M]. UK: Cambridge University Press, 2001. 944.
- [2] Wang S, Gong D. Enhancement of the warming trend in China

- [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, 27: 2581- 2584.
- [3] Liu Xiaodong, Chen Baode. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades [J]. *Intern. J. Climatol.*, 2000, 20: 1729- 1742.
- [4] Manabe S, Wetherald R T, Stouffer R J. Summer dryness due to an increase of atmospheric CO₂ concentration [J]. *Clim. Change*, 1981, 3: 347- 386.
- [5] Mitchell J F B, Warrilow D A. Summer dryness in northern mid- latitudes due to increased CO₂ [J]. *Nature*, 1987, 330: 238- 240.
- [6] Wetherald R T, Manabe S. Detectability of summer dryness caused by greenhouse warming [J]. *Climatic Change*, 1999, 43: 495- 511.
- [7] Arnell N W. Climate change and global water resources [J]. *Global Environmental Change*, 1999, 9(supps): S31- S49.
- [8] Vorosmarty C J, Green P, Salisbury J, Lammers R B. Global water resources: Vulnerability from climate change acid population growth [J]. *Science*, 2000, (289): 284- 288.
- [9] 吴祥定, 钮仲勋, 王守春, 等. 历史时期黄河流域环境变迁与水沙变化 [M]. 北京: 气象出版社, 1994. 1~ 169.
- [10] 叶笃正(主编). 中国的全球变化预研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1992. 1~ 101.
- [11] Jones P D, Wigley T M L, Wright P B. Global temperature variations between 1861 and 1984 [J]. *Nature*, 1986, (322): 430- 434.
- [12] Hulme M, Sheard N. *Climate Change Scenarios for China* [R]. UK: Climate Research Unit, 1999, 6pp.
- [13] 陈兴芳, 赵振国. 中国汛期降水研究及应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2000. 21~ 64.
- [14] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40- year reanalysis project [J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1996, 77: 437- 472.
- [15] 王 . 中原地区历史旱涝气候研究和预测 [M]. 北京: 气象出版社, 1992. 55~ 92.
- [16] Hughes M K, Wu X D, Shao X M, Garfin G M. A preliminary reconstruction of rainfall in north- central China since A. D. 1600 from tree- ring density and width [J]. *Quaternary Research*, 1994, 42: 88- 99.
- [17] Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Global- scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries [J]. *Nature*, 1998, (392): 779- 787.
- [18] An Z S, Kukla G J, Porter S C, Xiao J L. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of Central China during the last 130,000 years [J]. *Quaternary Research*, 1991, 36: 29- 36.

Possible Variations of Precipitation over the Yellow River Valley under the Global-warming Conditions

LIU Xiaodong¹, AN Zhi sheng¹, FANG Jiar gang², CHEN Guang shan¹

(1. *Institute of Earth Environment, the Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710075;*

2. *Meteorological Bureau of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710015)*

Abstract: Using the recent 50-year precipitation data observed at weather stations and nearly-400 year precipitation data reconstructed with historical documents and tree rings in the Yellow River valley, the relationship between variations of the precipitation and global average temperature was examined by regression and composite analyses. The results show that the higher (lower) global average temperature corresponds to the less (more)-than-normal precipitation in the middle reaches of the Yellow River to a certain degree on different time scales. When the global mean air temperature increases by 1 °C, the annual precipitation is found to decrease more than 20% over the middle reaches of the Yellow River from Shaanxi to Shanxi provinces. The difference between the annual precipitation averaged for the warmest three years and that for the coldest three years can reach 40% in the study area in last 50 years. However, the annual precipitation near the area of China-Mongolia boundary is decreased with the global warming. Our result from the observational study is consistent with that obtained from climate models under conditions of the atmospheric CO₂ doubling and the global climate warming. The present result also shows that August–September, late summer–early autumn, is a key period which determines inter-annual variations of annual precipitation in the middle reaches of the Yellow River. The variation of August–September precipitation contributes more than 50% variance of inter-annual variability of annual precipitation in this area. Moreover, it is found that there is a close relationship between the rainfall anomaly and activity of the subtropical West Pacific High in August and September. A warmer global climate may intensify and enlarge the subtropical West Pacific High, thus induce the front of East Asian summer monsoon to move northwards and to act frequently there, and eventually bring about the decreased rainfall in the south side of north boundary of the East Asian summer monsoon. The situation will be opposite when the global climate becomes colder. This study suggests that we should pay great attention to the dryness induced by the global warming over the Yellow River valley.

Key words: the Yellow River valley; drought; global warming