

黄河上游和源区气候、水文的年代际变化及其对华北水资源的影响

黄荣辉¹ 韦志刚² 李锁锁² 周连童¹

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100080

2 中国科学院兰州寒区旱区环境和工程研究所, 兰州 730000

摘 要 利用我国气象观测站 1951~2000 年降水、气温资料以及黄河上游有关水文测站 1960~2003 年的径流资料, 分析了黄河上游和源区气候的年代际变化及其对径流变化的影响, 并分析了黄河上游径流变化对华北水资源的影响。分析结果表明: 黄河上游和源区降水从 20 世纪 90 年代有所减少, 气温明显上升, 导致了黄河源区和上游径流量锐减。黄河上游径流的减少是 90 年代黄河下游流量锐减、黄河断流天数增多的重要原因, 并表明了黄河上游来水量的多少是影响华北地区水资源的重要原因。

关键词 黄河 气候 水文 水资源

文章编号 1006-9585 (2006) 03-0245-14 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

The Interdecadal Variations of Climate and Hydrology in the Upper Reach and Source Area of the Yellow River and Their Impact on Water Resources in North China

HUANG Rong-Hui¹, WEI Zhi-Gang², LI Suo-Suo², and ZHOU Lian-Tong¹

1 *Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*

2 *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*

Abstract The interdecadal variations of climate and their impact on the variations of runoff amount in the upper reach and source area of the Yellow River, and the impact of runoff amount variability in the upper reach of the Yellow River on water resources in North China are analyzed by using the observed data of precipitation and surface air-temperature in meteorological observational stations in China during 1951–2000 and the observed data of runoff amount in hydrological observational stations in the upper reach of the Yellow River during 1960–2003. The analyzed results show that from the 1990s, rainfall slightly decreased and surface air-temperature obviously increased in the upper reach and source area of the Yellow River, which have led to the significant decrease of runoff amount in the upper reach of the Yellow River. Moreover, the decrease of runoff amount in the upper reach of the Yellow River may be an important season of the significant decrease of runoff amount in the lower reach of the Yellow River and the increase of drying-up days of the Yellow River. This can show that the inputting water amount from the upper

收稿日期 2006-02-20 收到, 2006-03-16 收到修定稿

资助项目 中国科学院重要创新项目 KZCX3-SW-218 和国家自然科学基金委员会重大研究计划重点项目 40231005

作者简介 黄荣辉, 男, 1942 年出生, 中国科学院院士, 中国气象学会副理事长, 主要从事行星波动力学、大气环流和气候动力学的研究。E-mail: hrh@lasg.iap.ac.cn

reach of the Yellow River is an important cause affecting the water resources in North China.

Key words the Yellow River, climate, hydrology, water resources

1 引言

黄河流域是中华民族的摇篮地,黄河是中华民族的母亲河。黄河流经青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、河北和山东等 9 省,灌溉这 9 省的农田,并且供给这 9 省和北京、天津两市部分城乡居民的用水。虽然黄河年总径流量不大,约只有 $580 \times 10^8 \text{ m}^3$,但它的流程却很长,达 5 486 km;并且由于黄河流经黄土高原,故它的含沙量很大。由于黄河长且水流细,故受降水的影响很大。

根据刘昌明等^[1]的研究,黄河源区(一般指河源到唐乃亥之间)年平均流量大约为 $204.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,可占到黄河多年平均径流量的 35.3%,因此,黄河源区是黄河重要的产流源区,并为黄河中下游提供了较稳定的径流量。然而,由于气候的年代际变化,从 20 世纪 90 年代起黄河源区和上游的径流量发生很大变化^[2],严重影响了黄河中下游的径流量,从而严重影响了华北地区的水资源。黄荣辉等^[3,4]和周连童等^[5,6]的研究表明:我国西北自 20 世纪 70 年代后期迄今夏季降水增加,气温升高;而华北地区降水减少,气温升高。施雅风等^[7]的研究表明 80 年代迄今我国西北气候从暖干变暖湿。由于气候的年代际变化,华北夏季降水减少,致使华北从 70 年代中后期迄今发生了年代际的持续干旱现象。干旱导致的水资源缺乏不仅严重影响此地区的工农业生产,而且严重影响此地区的城乡人民用水。为此,国家决定实施南水北调工程,从长江调水到华北地区,并且,在南水北调工程完成之前,国家先实施引黄入京、津工程,以便暂时缓和这两城市的居民用水的紧张状况。但是,从 90 年代起黄河下游经常断流,这就使华北地区的水资源缺乏变得更加严重^[8]。

因此,以下几个问题值得我们进一步去研究:第一,我国西北从 20 世纪 70 年代中后期起到现在,夏季降水增加,气温升高,那么黄河源区和上游的降水和气温是如何变化的?是否与西北气候的年代际变化相似?第二,黄河源区和上游流

域夏季降水和气温的变化如何影响此河段黄河的径流?第三,黄河源区和上游径流的变化如何影响黄河下游的径流量和华北地区的水资源。为此,本研究利用我国测站 1951~2000 年降水和气温的观测资料,特别是黄河上游和源区的红原、若尔盖、玛多、达日、兴海、贵德和兰州等的气象资料,以及唐乃亥和兰州水文站的 1960~2003 年黄河径流资料,来分析我国黄河源区和上游流域的降水和气温以及黄河径流的年代际变化特征及其它们之间的关系;并且,还分析了黄河源区的和上游径流量的年代际变化对黄河下游径流量的影响。

2 我国西北地区降水和气温的年代际变化特征及其与华北地区降水和气温变化的关系

为了研究我国各区域气候的年代际变化,我们利用中国各测站 1951~2000 年降水和气温的月平均资料,分析了全国各区域年和春、夏、秋、冬四季降水和气温各年代的变化特征。由于本文主要研究黄河上游和源区气候和水文的年代际变化及其对华北水资源的影响,因此,主要讨论与之有关的西北、华北地区及长江、淮河流域降水和气温的年代际变化。

2.1 降水的年代际变化特征

图 1 分别是我国 20 世纪 50、60、70、80 和 90 年代平均的年降水距平百分率分布。从图 1 可以看到,我国各区域年降水量有很大的年代际变化,且变化很不一样。西北地区经历了 60~70 年代降水偏少期之后,从 80 年代起迄今降水量增加;而华北地区降水经历 50~60 年代降水偏多期之后于 60 年代中期到 70 年代开始减少,从 80 年代起迄今,年降水量明显减少,发生持续严重干旱,造成了华北地区水资源缺乏。此外,长江和淮河流域降水经历了 60~70 年代偏少后,从 80 年代起迄今变成偏多,洪涝灾害时常发生。因此,我国西北地区年降水异常与华北地区降水异常存在着相反的变化趋势。

上述各年代平均的降水距平的年代际变化在各季节表现更为明显，为此，我们分别分析了各年代春、夏、秋、冬四季我国降水距平百分率的分布。我国西北和华北地区经历了 20 世纪 60~70 年代降水的偏少期之后，从 80 年代起迄今春季降水增加，而长江、淮河流域却从偏多转变为减少（图略）。由图 2 可见，我国西北地区夏季降水 20 世纪 60~70 年代降水偏少期之后，从 80 年代起迄今，夏季降水量明显增加，特别在南疆地区降

水增加趋势更加明显；华北地区夏季降水在 50~60 年代偏多之后于 70 年代从华北地区西部开始减少，80~90 年代整个华北夏季降水明显偏少，持续干旱发生；此外，长江、淮河流域夏季降水经历了 60~70 年代的偏少期，从 80 年代起迄今由偏少变成明显偏多，夏季洪涝灾害经常发生。因此，夏季我国各区域降水的年代际变化趋势基本上与年降水量的年代际变化相似。这是由于我国处于东亚季风区，降水的年代际变化主要受东亚

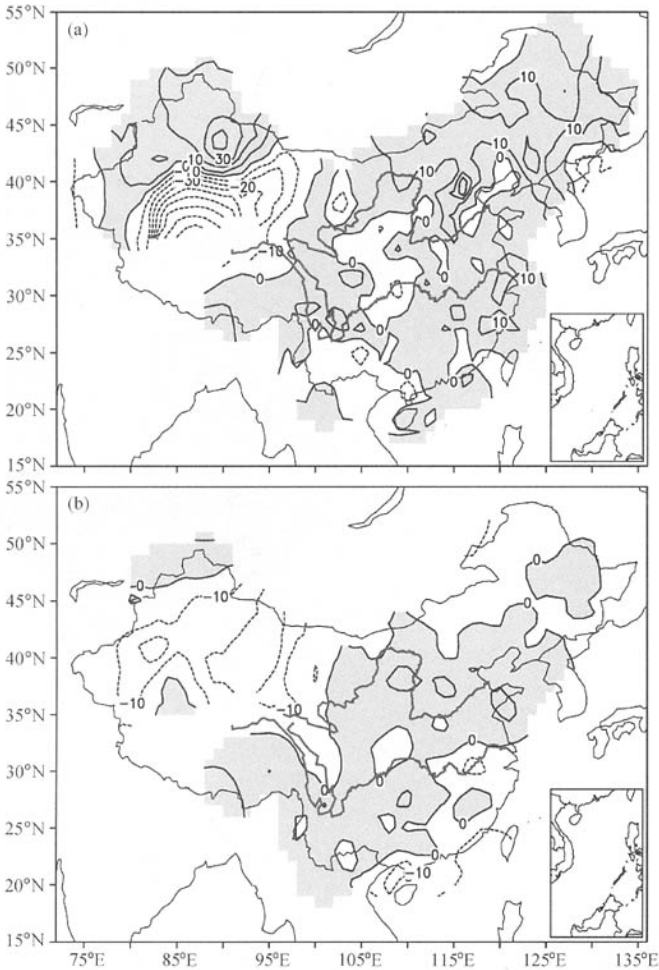


图 1 我国 20 世纪 50~90 年代各年代平均的年降水距平百分率的分布（单位：%）：（a）50 年代；（b）60 年代；（c）70 年代；（d）80 年代；（e）90 年代。实线与虚线分别表示正和负距平，阴影区表示正距平。取 1961~1990 年各月降水的气候平均值为正常值
Fig. 1 Decadal-mean distributions of annual rainfall anomalies percentage (%) over China from the 1950s to the 1990s, (a) the 1950s, (b) the 1960s, (c) the 1970s, (d) the 1980s, and (e) the 1990s. The solid and dashed contours indicate positive and negative rainfall anomalies, respectively, and positive anomalies are shaded. The climatological mean annual rainfall amounts in various observational stations of China for 1961–1990 are taken as the respective normals

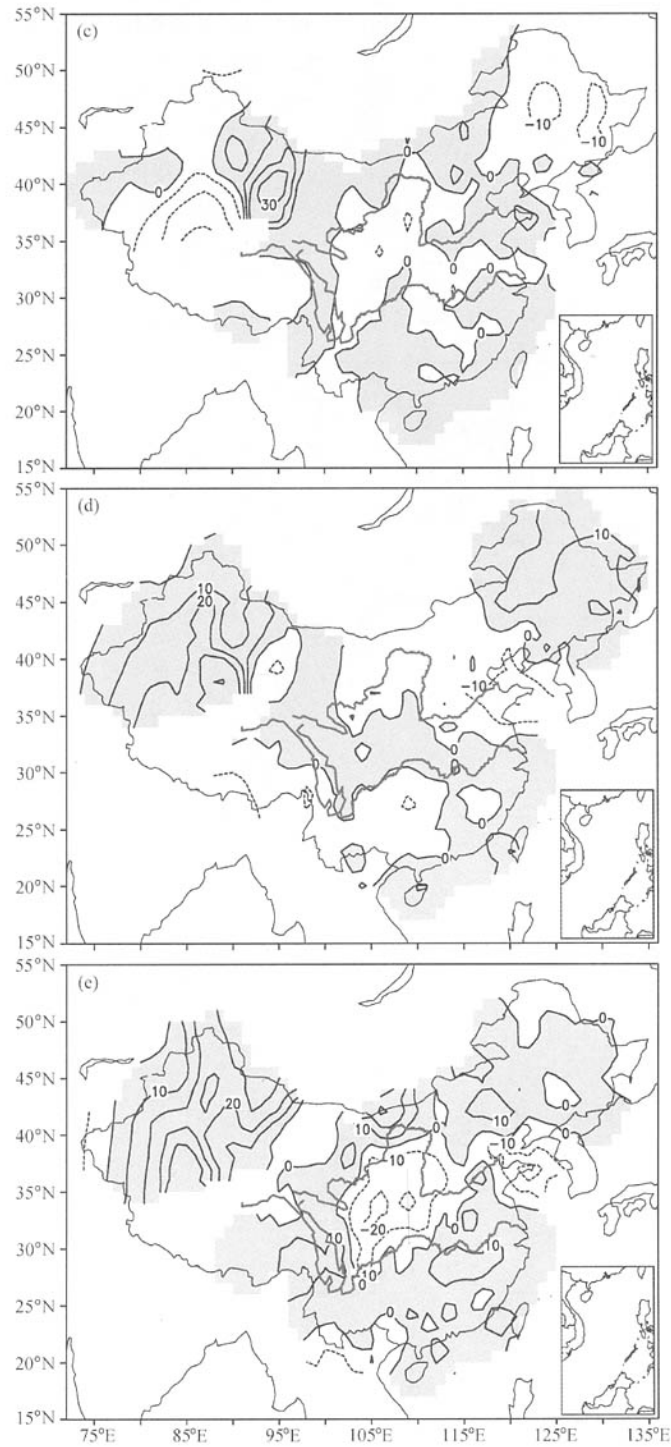


图 1 (续)

夏季风所影响，故年降水大部分集中在夏季。我国秋季各区域秋季降水的年代际变化不如春、夏季明显（图略）。我国西北和华北地区冬季降水在 50~60 年代偏多，而从 70 年代起冬季降水开始减少，尤其从 80 年代起迄今这两地区冬季降水有一定减少，但长江、淮河流域冬季降水却增加（图略）。

以上分析结果可以看到：我国西北地区年降

水量有很明显的年代际变化，在经历了 20 世纪 60~70 年代的降水偏少期之后，从 80 年代起迄今年降水量增加，这种变化在春、夏季表现尤其明显，但冬季降水从 80 年代起有所减少。

2.2 气温的年代际变化特征

由于我国气温有很大的季节变化，而年平均温度变化不太明显，因此，各季节平均气温的年代际变化可能会更加明显。本文分析了我国春、

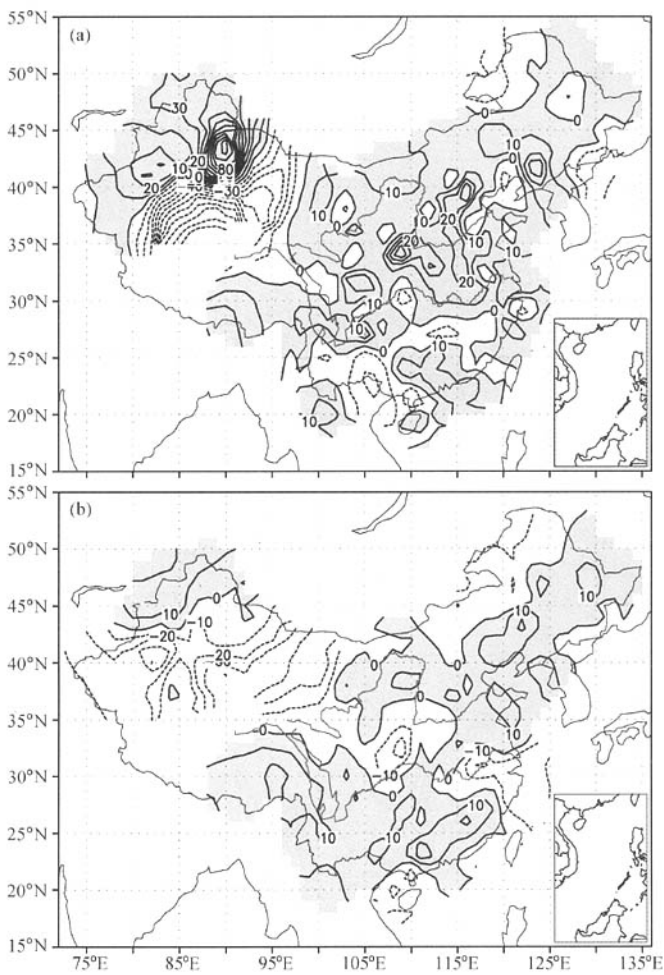


图 2 我国 20 世纪 50~90 年代各年代平均的夏季（6~8 月）降水距平百分率的分布（单位：%）：（a）50 年代；（b）60 年代；（c）70 年代；（d）80 年代；（e）90 年代。实线与虚线分别表示正和负距平，阴影区表示正距平。取 1961~1990 年夏季各月降水的气候平均值为正常值

Fig. 2 Decadal mean distributions of summer (June-August) rainfall anomalies percentage (%) over China from the 1950s to the 1990s, (a) the 1950s, (b) the 1960s, (c) the 1970s, (d) the 1980s, and (e) the 1990s. The solid and dashed contours indicate positive and negative rainfall anomalies, respectively, and positive rainfall anomalies are shaded. The distributions of climatological mean monthly rainfall amount in June, July and August for 1961—1990 are taken as the respective normals

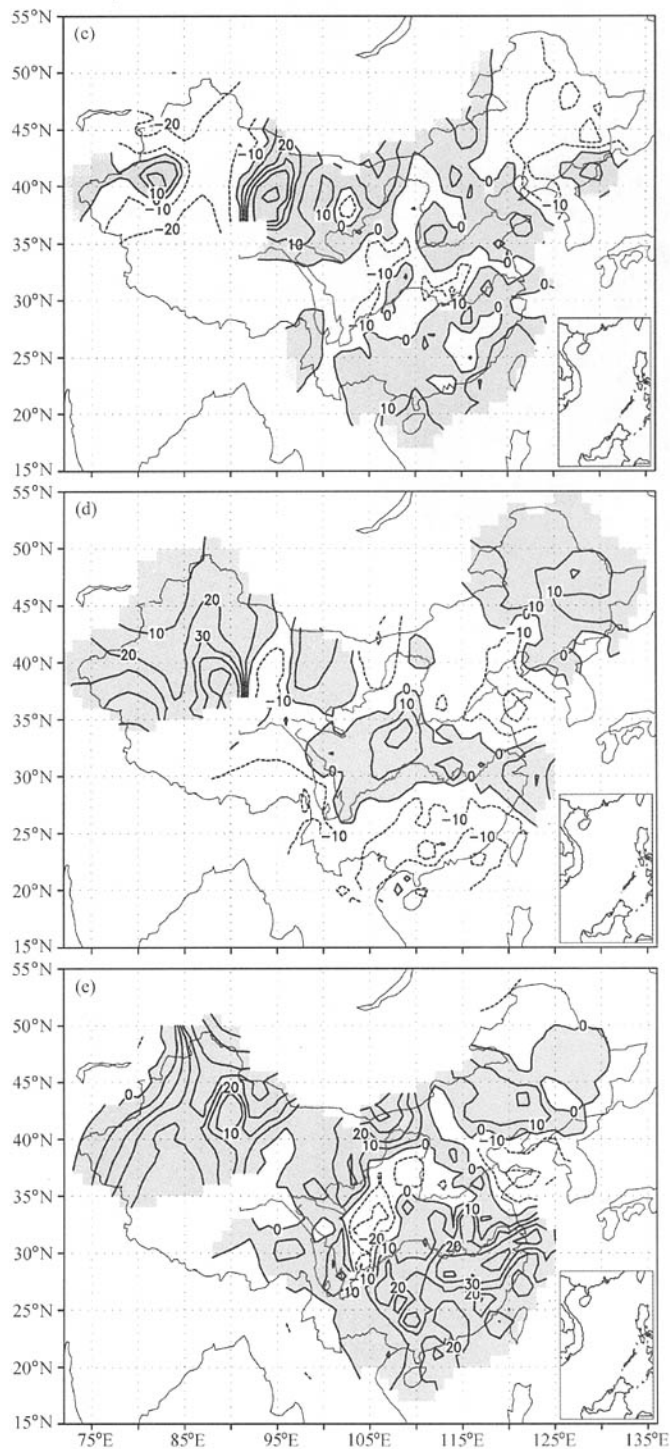


图 2 (续)

夏、秋、冬各季节平均气温的年代际变化。分析结果表明，我国冬季气温除长江中上游地区外，其他地区均有不同程度的增温；夏季气温的年代际变化不如降水变化明显。如图 3 所示，20 世纪 80 年代开始，我国北方（包括华北、东北、西北）和华南的夏季气温从 60~70 年代的偏低转变成偏高，而长江流域夏季气温从 50~60 年代的偏高转变成明显偏低，并且此变化由北向南延伸。

80 年代只有东北和华北、西北部分地区以及华南地区气候偏暖，而江淮流域偏冷；到了 90 年代整个北方（包括东北、华北和西北地区）明显偏暖，并且，淮河流域气温也偏高，而长江流域继续偏冷，华南北部由偏暖变成偏冷。因此，西北和华北地区从 80 年代迄今气温呈明显的上升趋势，气温的升高将使此两地区的蒸发量加大。

从上述夏季气温与降水年代际的变化特征看，

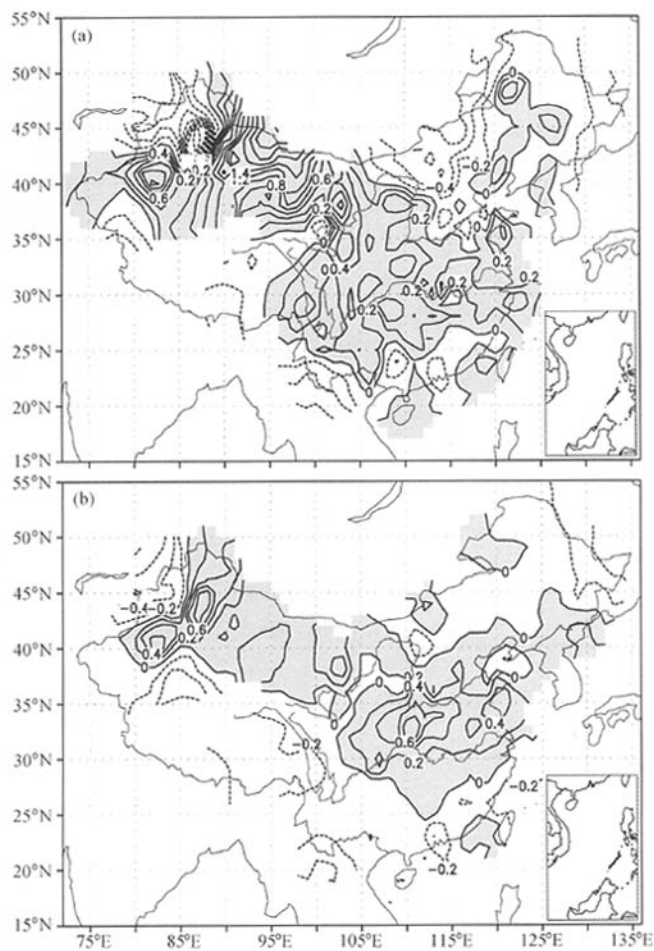


图 3 我国 20 世纪 50~90 年代各年代平均的夏季（6~8 月）气温距平分布（单位：℃）：（a）50 年代；（b）60 年代；（c）70 年代；（d）80 年代；（e）90 年代。实线与虚线分别表示正和负距平，且阴影区表示正距平。取 1961~1990 年夏季各月气温的气候平均值为正常值

Fig. 3 Decadal mean distributions of summer (June–August) surface air-temperature anomalies over China from the 1950s to the 1990s (units: $^{\circ}\text{C}$), (a) the 1950s, (b) the 1960s, (c) the 1970s, (d) the 1980s, and (e) the 1990s. The solid and dashed contours indicate positive and negative rainfall anomalies, respectively, and positive anomalies are shaded. The distributions of climatological mean monthly surface air temperature in June, July and August for 1961–1990 are taken as the respective normals

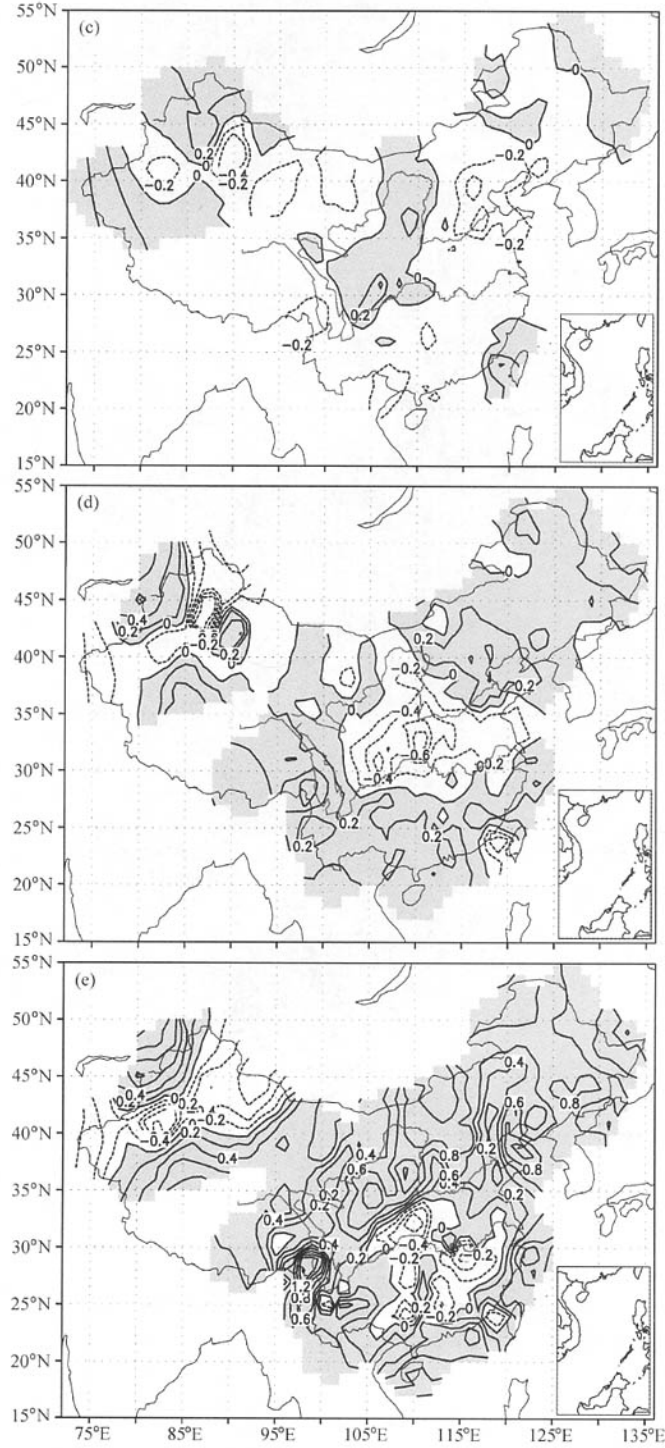


图3 (续)

我国东部强季风区夏季气候的年代际变化一般是降水偏多, 气温偏低; 而降水偏少, 气温偏高。但西北地区夏季气候的年代际变化特征则是气温升高, 降水增多, 这与施雅风等^[7]从水文观测资料所得结论一样。

3 黄河上游地区降水和气温的年代际变化特征

黄河上游地区系指兰州以上的黄河流域, 此地区海拔高涉及范围广, 包括了半干旱区和高原的高寒半湿润地区, 年均降水量 200~600 mm, 并且, 气温偏低 (年平均气温只有 2.6 °C), 蒸发量不大, 因此为黄河提供了比较稳定的径流。本节不仅从全国年降水量和气温距平的分布来分析黄河上游地区气候的年代际变化, 而且还从黄河上游气象观测站的数据更详细地分析黄河上游地区气候的年代际变化。

3.1 降水的年代际变化特征

从图 1 可以看到, 黄河上游和源区虽处于我国西北地区, 但此地区降水的年代际变化特征与西北地区降水变化有很大不同。此地区降水从 20 世纪 60 年代迄今降水量虽有所变化, 但不太明显, 60~70 年代降水相对偏少, 80 年代偏多, 而 90 年代又变成偏少。这种降水的年代际变化也反映在图 2 所示的夏季降水年代际变化上。

本研究选取红原、若尔盖、玛多、达日、兴海、贵德和兰州等测站的降水资料, 更详细地分析了黄河上游地区降水的年代际变化特征。图 4 是上述测站平均的年降水量距平的年际变化和年代际的变化趋势 (年代际变化趋势是由 4 次多项式拟合而成, 下同)。从图 4 可以看到, 黄河上游地区平均的年降水量气候平均值可达 529 mm, 且年际变化较明显, 最大可达 ±80 mm, 大约为年降水量的 ±15% 左右, 比我国东部年降水量变率小; 并且, 从图 4 还可以看到, 黄河上游 1960~2000 年期间降水经历了 3 个年代际变化阶段: 20 世纪 60 年代初到 70 年代初为相对降水偏少期; 70 年代中期到 80 年代后期是降水相对偏多期; 90 年代初到现在此地区的降水又变为相对偏少。因此, 黄河上游地区降水的年代际变化既不同于西北地区, 又不同于华北地区。另外, 从图 4 虚线

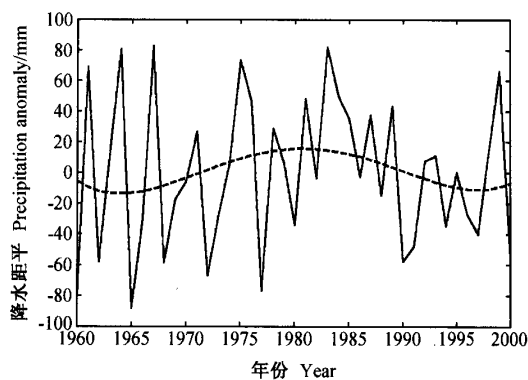


图 4 黄河上游地区 7 个测站平均的年降水距平 1960~2000 年的年际变化 (实线) 和年代际变化趋势 (虚线)

Fig. 4 Interannual variations (solid line) of annual rainfall anomaly averaged for 7 observational stations in the upper reach of the Yellow River during the period of 1960–2000 and its interdecadal variation trend (dashed line)

中还可以看到, 黄河上游地区降水的年代际变化不是很明显, 大约为 ±20 mm 左右, 相对于华北地区降水的年代际变率小得多。图 4 表明黄河上游地区 20 世纪 90 年代平均的年降水量相对于 80 年代平均的降水量大约减少了 40 多 mm, 仅减少了 10% 左右。

3.2 气温的年代际变化特征

由于黄河上游处于高原的高寒地区, 这里气温终年很低, 且有年际和年代际变化。从分析结果可以看到, 黄河上游气温无论春、夏、秋、冬, 从 20 世纪 80 年代起迄今气温偏高, 特别是夏季。如图 3 所示, 黄河上游地区的气温在 50~70 年代相对偏低, 但在 80~90 年代气温偏高, 气温上升很明显, 相对于 60 年代, 约上升了 1.0 °C 以上。

黄河上游地区气温的年代际变化, 可以从红原、若尔盖、玛多、达日、兴海、贵德和兰州等 7 个测站的平均气温变化看到。图 5 是 7 个测站平均的年平均气温的年际变化和夏季气温的年代际变化趋势。从图 5 可以看到黄河上游地区年平均温度不仅有较明显的年际变化, 而且有很明显的年代际变化, 在 1960~2000 年期间, 黄河上游经历了 20 世纪 60~70 年代的相对偏冷期, 70 年代末到 80 年代后期的正常期, 以及 80 年代后期到 90 年代后期的相对偏暖期。此地区的气温从 80 年代后期上升非常明显, 相对于 60 年代上升了

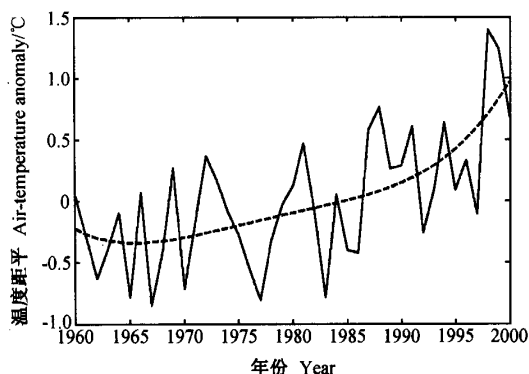


图5 黄河上游地区7个测站平均的年平均气温距平1960~2000年的年际变化(实线)和年代际变化趋势(虚线)

Fig. 5 Interannual variations (solid line) of annual mean surface air-temperature anomaly averaged for 7 observational stations in the upper reach of the Yellow River during the period of 1960–2000 and its interdecadal variation trend (dashed line)

1.0 °C以上。气温明显上升有可能使此地区的蒸发量加大,不利于径流的产生。

4 黄河源区降水和气温的年代际变化特征

黄河源区处于高寒的半湿润区,这里海拔高、降水较多、气温低。本研究取代表黄河源区气候变化的红原、若尔盖、玛多、达日和兴海5个测站的月降水和气温资料,计算了黄河源区年降水和气温距平的年际变化,以及应用4次多项式拟合方法计算了此地区年降水和气温距平的年代际变化趋势。

4.1 降水的年代际变化特征

图6是黄河源区5个测站平均而得的年降水距平1960~2000年的年际变化。从图6可以看到黄河源区年降水的年际变率较明显,最大可达 ± 100 mm,为年降水量的20%;并且,从图6中的虚线可以看到,此地区降水也有一定的年代际变化,它经历了3个变化阶段:20世纪60年代初到70年代初的相对偏少期,70年代中期到90年代初的相对偏多期,从90年代初迄今到现在的相对偏少期。但从图6中虚线可以看到黄河源区降水的年代际变化同样不很明显,年代际变率不到 $\pm 10\%$ 。因此,黄河源区降水的年代际变化与黄河上游地区降水的变化趋势大体上是一样的,降

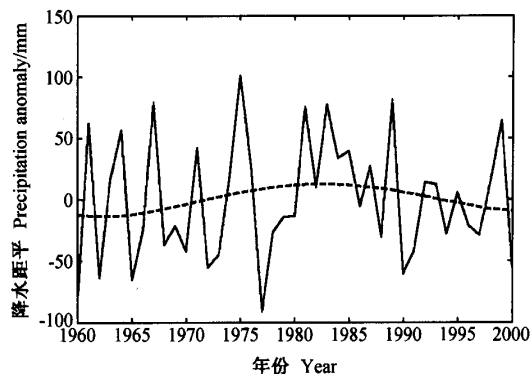


图6 黄河源区5个测站平均的年降水距平1960~2000年的年际变化(实线)和年代际变化趋势(虚线)

Fig. 6 Interannual variations (solid line) of annual rainfall anomaly averaged for 5 observational stations in the source area of the Yellow River during the period of 1960–2000 and its interdecadal variation trend (dashed line)

水的年代际变化也不明显,这与我国东部地区降水的年代际变率有所不同。

4.2 气温的年代际变化特征

黄河源区由于海拔高,终年温度很低,年平均温度为 -1.25 °C。图7是由上述5个测站平均的年平均气温距平的年际变化和由4次多项式拟合而成的气温年代际变化趋势。从图7可以看到,年平均气温有较明显的年际变率,可达 ± 1.0 °C以上;并且,与黄河上游地区气温的年代际变化趋势一样,黄河源区气温的年代际变化很明显,

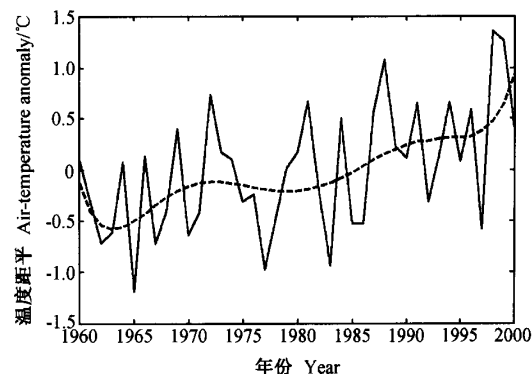


图7 黄河源区5个测站平均的年平均气温距平1960~2000年的年际变化(实线)和年代际变化趋势(虚线)

Fig. 7 Interannual variations (solid line) of annual mean surface air-temperature anomaly averaged for 5 observational stations in the source area of the Yellow River during the period of 1960–2000 and its interdecadal variation trend (dashed line)

它经历了 20 世纪 60~70 年代相对偏冷到 80~90 年代气温偏高的两个阶段, 气温的总体变化为明显的上升趋势。相对于 20 世纪 60 年代, 到 90 年代末, 黄河源区年平均气温大约上升了 1.0°C 以上, 这表明黄河源区大气变暖的趋势是很明显的。黄河源区的气温上升, 不仅会带来蒸发量的增大, 而且会导致冻土层的融化, 水分下渗增加。这些都会影响黄河源区的径流量。

从上述的分析结果可以看到, 黄河源区的年降水量和气温的年代际变化趋势大体上与青藏高原气温和降水的年代际变化^[9]一致。

5 黄河源区和上游径流量的年代际变化特征及其与降水的关系

本研究选取唐乃亥站和兰州站的黄河径流资料分析了黄河源区和上游径流量的变化。

5.1 黄河源区径流量的变化及其与降水和气温变化的关系

张士锋等^[10]的研究表明, 黄河源区水循环的变化与此区域的气候密切相关, 并对黄河源区径流有直接的影响。为此, 本研究进一步分析黄河源区径流与降水和气温的关系。图 8 是表征黄河源区径流量的唐乃亥水文站年径流标准化距平在 1960~2003 年期间的年际变化和年代际变化趋势。从图 8 可以看到, 黄河源区的径流量有很大的年际变化, 最大变化幅度可达 ± 0.5 方差。若把图 8 与图 6 中此地区年平均降水距平的变化相比较, 可以看到黄河源区的径流变化与降水的年际变化有较好的关系, 它们之间的相关可达 0.75, 通过 99% 的显著性检验。然而, 若与图 7 中年平均气温距平的变化相比较, 则可以看到黄河源区的径流变化与年平均气温的年际变化没有显著的相关, 它们之间的相关系数仅为 -0.16。因此, 黄河源区的径流受降水变化的影响要比受温度变化的影响更为显著。并且, 从图 8 的虚线可以看到, 黄河源区径流量的年代际变化也经历了两个阶段: 20 世纪 60 年代中期到 80 年代后期的相对偏丰期; 90 年代初期到 2003 年的相对偏枯期。从图 8 可以看到, 90 年代初一直到现在黄河源区的径流有显著的减少, 相对于 80 年代径流偏丰期, 在新世纪初黄河源区的径流大约减少了 30% 多。

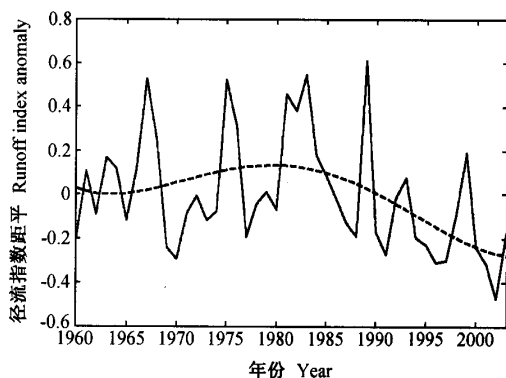


图 8 唐乃亥水文观测站 1960~2003 年黄河年径流标准化距平的年际变化(实线)和年代际变化趋势(虚线)

Fig. 8 Interannual variations (solid line) of normalized annual runoff anomaly of the Yellow River in Tangnag hydrological observational station and its interdecadal variation trend (dashed line). Data are from the Water Resources Committee of the Yellow River

然而, 如图 6 所示, 相对于 80 年代的年降水量, 90 年代末黄河源区并没有太大的变化, 只减少了 10% 左右。这表明在 20 世纪 90 年代到新世纪初, 黄河源区径流与降水的关系产生了一定的变化。

5.2 黄河上游地区径流的变化及其与降水和气温变化的关系

图 9 是表征黄河上游径流量的兰州水文站年径流量标准化距平 1960~2003 年的年际变化和年

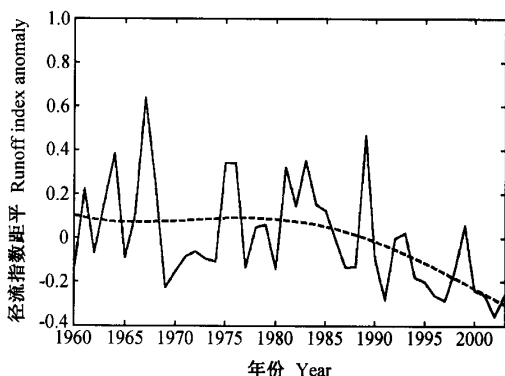


图 9 兰州水文观测站 1960~2003 年黄河年径流标准化距平的年际变化(实线)和年代际变化趋势(虚线)

Fig. 9 Interdecadal variations (solid line) of normalized annual runoff anomaly of the Yellow River in Lanzhou hydrological observational station and its interdecadal variation trend (dashed line). Data are from the Water Resources Committee of the Yellow River

代际变化趋势。从图中可以看到,黄河上游年径流量也有显著的年际变化,变化幅度可达 ± 0.4 方差。并且,与源区径流和降水之间的关系一样,黄河上游地区的径流变化与降水有显著的相关,它们之间的相关系数可达 0.69,通过 99% 显著性检验。然而,黄河上游地区径流与气温年际变化的相关系数只有 -0.38,比径流与降水年际变化的相关系数小得多,但与源区相比,黄河上游径流与温度年际变化相关系数要大得多。这说明从唐乃亥到兰州段黄河径流的年际变化与气温的相关显著。本研究详细计算了唐乃亥到兰州站径流与年平均气温变化之间的相关系数可达 -0.58,这表明,从唐乃亥到兰州站之间的地区处于海拔高度比源区低的半干旱区,径流与气温变化有很大关系。另外,从图中虚线可以看到黄河上游径流的年代际变化也经历了两个时期,20 世纪 60 年代初到 80 年代后期的相对偏丰期以及从 90 年代初到现在的偏枯期,这与黄河源区径流的年代际变化趋势一致,也与蓝永超等^[2]所研究结果相一致。因此,从 90 年代初迄今黄河上游径流锐减,一方面是由于源区径流变少,即从源区的来水量减少,另一方面也是由于从唐乃亥到兰州地区降水减少和气温显著上升所造成。

6 黄河上游径流变化对华北水资源的影响

黄河流经甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西等省,从花园口径河南、河北、山东流到渤海,是华北地区重要的水资源来源。它不仅是位于华北地区的内蒙古、山西、河北、河南和山东等省部分地区的工农业生产和生态用水的主要来源,也是上述地区部分城乡居民日常生活用水的来源;并且,由于最近天津和北京两市水资源缺乏,也从黄河调水。因此,黄河上游来水量的变化直接影响到华北地区水资源的变化。图 10 是表征黄河中游流量的郑州花园口水文站实测的各年代平均径流量的变化。从图中可以看到,20 世纪 50 年代花园口平均天然径流量大约是 $484 \times 10^8 \text{ m}^3$,而 60 年代上升到 $506.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,70 年代又下降到 $380 \times 10^8 \text{ m}^3$,80 年代又上升到 $425.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[11]。然而,根据花园口 1990~1996 年平均的年均实测

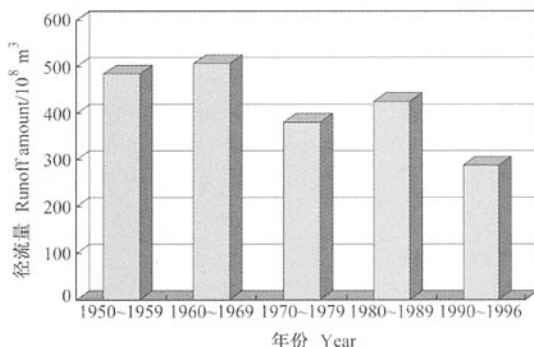


图 10 花园口水文站黄河年径流量的年代际变化(资料来源于李桂忱和马振骅^[11]以及黄河水利委员会)

Fig. 10 Interdecadal variations of decadal mean annual runoff amount of the Yellow River in Huayankou station. Data are from Li Guichen and Ma Zhenhua^[11] and the Water Resources Committee of the Yellow River

黄河径流量只有 $287.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,比起 80 年代黄河径流量大约减少了 32.4%。

黄河下游径流量在 20 世纪 90 年代锐减是与上游来水量的锐减有密切关系。如图 9 所示,下游兰州水文站 90 年代的年均径流量比 80 年代黄河年平均实测径流量约减少了 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据李桂忱和马振骅^[11]的研究结果,80 年代黄河年平均径流量达 $365.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,但根据 1990~1996 年所测结果,黄河平均年径流只有 $266.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,大约减少了 27.3%。

从以上分析可以看到,黄河源区和上游径流量的变化对于下游径流量的变化有直接影响,进而对华北地区水资源的变化有着重要影响。黄河断流一方面是由于花园口以下的黄河下游地区工农业用水量增加所致,另一方面也是由于上游来水量减少所致。

黄河下游在 90 年代流量的锐减已引起黄河下游断流的天数增多,最多在 1997 年达 226 天,而且断流河段变长,可达 700 km。黄河下游径流量的锐减以及黄河断流不仅严重影响了华北地区工农业生产和生态用水,而且严重影响华北地区部分城乡居民的用水。因此,缓解京津唐地区水资源供需矛盾,不仅要开展工农业生产节水活动和城乡居民的日常生活的节水活动^[12],而且要实施南水北调工程的科学调水方案。

7 结论和讨论

本研究利用我国气象测站 1951~2000 年降水、气温的观测资料以及黄河源区和上游有关水文测站 1960~2003 年的径流资料, 分析了黄河上游和源区的气候与径流的时代际变化的关系。从全国年和春、夏、秋、冬四季降水距平的年代际变化分析结果可以看到: 我国西北地区降水量有明显的年代际变化, 西北地区经历了 20 世纪 60~70 年代的降水偏少期之后, 从 80 年代开始迄今降水量增加, 这种变化在春、夏、冬季表现尤其明显。在黄河上游地区, 无论年降水量距平或各季节的降水距平的年代际变化均与西北地区降水量距平的年代际变化有明显的不同, 这个地区的年降水量没有明显的年代际变化, 相对而言, 此地区降水从 60~70 年代有所减少, 80 年代偏多, 90 年代又有所减少。并且, 从全国年和春、夏、秋、冬四季气温的分析结果表明: 在 20 世纪 80~90 年代全国冬季气温明显升高, 夏季除长江中上游地区外, 其他地区也有不同程度的升温, 气温的升高, 使得蒸发增加, 从而使得径流减少。

本研究还利用唐乃亥以上黄河源区(包括红原、若尔盖、玛多、达日、兴海等站)及兰州以上的黄河上游(包括源区 5 个站和贵德、兰州两站)1960~2000 年的降水和气温观测资料, 以及唐乃亥站和兰州站的 1960~2003 年径流资料, 详细地分析了黄河源区和上游流域的降水、气温的年际和年代际变化特征及其对黄河源区和上游径流量年际和年代际变化的影响。分析结果表明: 黄河源区和上游流域年降水量虽有年际和年代际变化, 但年代际变化不太明显, 相对而言, 20 世纪 60 年代初到 70 年代初降水相对偏少, 70 年代中期到 80 年代末降水相对偏多, 90 年代初迄今降水又相对偏少。分析结果还表明: 此流域的气温上升明显, 在 60~70 年代相对偏冷, 80~90 年代偏暖, 相对于 60 年代, 90 年代末气温上升约 1.0℃以上。此外, 从唐乃亥和兰州水文站的黄河年径流量资料的分析结果可以看到, 无论黄河源区或是黄河上游径流, 在 60 年代中期到 80 年代后期相对偏多, 90 年代初迄今锐减。分析结果还表明, 黄河源区和上游的径流量与该流域降水

有很大相关, 相关系数分别可达 0.75 和 0.68, 这说明黄河源区和上游的径流量主要依赖于降水。本文还分析了黄河源区和上游径流量变化对华北水资源变化的影响, 结果表明, 20 世纪 90 年代黄河源区和上游径流量锐减是造成黄河下游的径流锐减的重要原因。这说明黄河源区和上游径流量的变化对华北水资源有重要影响。

综上所述, 黄河源区和上游流域降水从 20 世纪 90 年代初迄今虽有一定减少, 但不太明显, 相对于 80 年代降水偏多期减少了约 10%左右, 然而, 径流却减少了约 30%左右, 这是一个值得深入探讨的问题。降水减少无疑是黄河源区径流锐减的一个很重要原因, 但从本文分析结果看, 它只能说明部分原因; 另外, 虽然黄河源区和上游从 80 年代迄今气温明显上升, 但由于黄河源区处于高寒地区, 蒸发量不大, 气温的上升并不能导致蒸发量太大的改变。因此, 还必须分析其他因子对黄河源区和上游流域径流量减少的影响。最近我们已从此地区降水强度、生态和气温对冻土的影响以及冻土的融化对水分下渗的影响来进一步分析黄河源区和上游流域径流锐减的原因, 研究结果将另文发表。

参考文献 (References)

- [1] 刘昌明, 陈利群, 郝芳华, 等. 黄河源区径流与基流变化分析. 见: 黄河研究会编, 黄河源区径流及生态变化研讨会交流材料汇编. 2004. 6~15
Liu Changming, Chen Liqun, Hao Fanghua, et al. Analysis of runoff and basic flow in the source area of the Yellow River. In: *Collected Papers in the Symposium on Runoff and Ecological Changes in the Source Area of the Yellow River* (in Chinese), the Committee of the Yellow River Research, Ed. 2004. 6~15
- [2] 蓝永超, 康尔泗, 金会军, 等. 黄河上游径流特征及变化趋势的分析. 地球科学进展, 1998, 13: 112~120
Lan Yongchao, Kang Ersi, Jin Huijun, et al. Study on variation characteristics and trend of runoff in the upper reach of the Yellow River. *Advances in Earth Science*. (in Chinese), 1998, 13: 112~120
- [3] 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势. 高原气象, 1999, 18: 465~476
Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. Interdecadal variations of summer precipitation in China and drought trend in North China. *Plateau Meteorology* (in Chinese),

- 1999, **18** : 465~476
- [4] 黄荣辉, 周连童. 我国重大气候灾害特征、形成机理和预测研究. 自然灾害学报, 2002, **11** (1) : 1~9
Huang Ronghui, Zhou Liantong. Research on the characteristics, formation mechanism and prediction of severe climatic disasters. *Journal of Natural Disasters* (in Chinese), 2002, **11** (1) : 1~9
- [5] 周连童, 黄荣辉. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究. 气候与环境研究, 2003, **8** : 274~290
Zhou Liantong, Huang Ronghui. Research on the characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** : 274~290
- [6] 周连童, 黄荣辉. 中国西北干旱、半干旱区春季气温差的年代际变化特征及其对华北夏季降水年代际变化的影响. 气候与环境研究, 2006, **11** (1) : 1~13
Zhou Liantong, Huang Ronghui. Characteristics of the interdecadal variability of difference between the ground surface temperature and the surface air-temperature in spring in the arid and semi-arid areas of Northwest China and its impact on the interdecadal variability of summer rainfall in North China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (1) : 1~13
- [7] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土, 2002, **24** : 219~226
Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary exploration of the impact and prospect of climate change from warm and dry pattern to warm and wet pattern in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocrology* (in Chinese), 2002, **24** : 219~226
- [8] 黄荣辉, 张庆云, 阮水根, 等. 我国气象灾害的预测预警与科学防灾减灾对策. 北京: 气象出版社, 2004. 148pp
Huang Ronghui, Zhang Qingyun, Ruan Shuigen, et al. *Prediction and Warning of Meteorological Disasters in China and Scientific Decision for the Prevention and Mitigation of These Disasters* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 148pp
- [9] 韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化. 大气科学, 2003, **27** : 157~170
Wei Zhigang, Huang Ronghui, Dong Wenjie. Interannual and interdecadal variabilities of surface air-temperature and rainfall in the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** : 157~170
- [10] 张士锋, 贾绍风, 刘昌明, 等. 黄河源区水循环变化规律及其影响. 中国科学 (E 辑), 2004, **34** (增刊): 117~125
Zhang Shifeng, Jia Shaofeng, Liu Changming, et al. The variation regularity of water cycle and its impact in the upper reach of the Yellow River. *Science in China* (Ser. E) (in Chinese), 2004, **34** (Suppl.) : 117~125
- [11] 李桂忱, 马振骅. 从实测径流看华北地区水资源. 高原气象, 1999, **18** : 613~617
Li Guichen, Ma zhenhua. Water resources in North China deduced from measured runoff. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18** : 613~617
- [12] 吴玉成. 缓解和解决京津唐地区水资源供需矛盾探讨. 高原气象, 1999, **18** : 625~631
Wu Yucheng. The ways to mitigate and resolve the problem of water resources in Beijing-Tianjin-Tangshan region. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18** : 625~631