

华北地区降水、蒸发和降水蒸发差的时空变化特征

周连童 黄荣辉

中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100080

摘要 利用华北地区1951~2000年80个观测台站的降水、气温的逐日观测资料分析京津唐地区、华北西部、华北中南部和胶东半岛地区降水、蒸发和降水蒸发差在1951~1965年、1966~1976年和1977~2000年3个时期年代际变化特征。京津唐地区和华北西部地区夏季降水和降水蒸发差从1977年开始减少得比较明显;而胶东地区和华北中南部地区从1965年开始减少,1977年之后减少的更加严重,但4个区域5、6月的降水和降水蒸发差却出现明显的增加。分析还指出,胶东地区和京津唐地区可利用水资源量减少最多。另外还利用欧洲中心(ECMWF)1958~2000年的700 hPa风场资料分析了华北地区夏季降水异常的可能成因,分析结果表明:东亚夏季风在1977年之后明显减弱,造成我国华北地区夏季降水偏少。

关键词 降水 蒸发 降水蒸发差 夏季风

文章编号 1006-9585 (2006) 03-0280-16 **中图分类号** P463 **文献标识码** A

Characteristics of Temporal and Spatial Variation of Precipitation, Evaporation and Difference between Precipitation and Evaporation in North China

ZHOU Lian-Tong and HUANG Rong-Hui

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

Abstract The characteristics of temporal and spatial variation of precipitation, evaporation and difference between precipitation and evaporation in four regions of North China are analyzed by using the daily observed precipitation and temperature data at 80 observational stations in North China during 1951–2000. The analyzed results show that the summer rainfall and difference between precipitation and evaporation decreased after 1977 in the regions of Jingjintang and the western part of North China, but the summer rainfall and difference between precipitation and evaporation decreased after 1965 in the regions of Jiaodong and the middle and southern part of North China, however, the precipitation of May and June increased in the four regions of North China. The analyzed results also show the water resource decreased most seriously in Jiaodong and Jingjintang regions of North China.

In order to explain the cause of the interdecadal variability of summer rainfall in North China, the interdecadal variability of the East Asian summer monsoon are analyzed by using the monthly mean wind field at 700 hPa of ERA-40 data set from ECMWF. The analyzed results show that there was an obvious northerly wind anomaly distribution over North China after 1977, which caused below normal of rainfall in summer in this region.

Key words precipitation, evaporation, difference between precipitation and evaporation, summer monsoon

1 引言

由于华北地区发生持续性干旱,致使此地区

水资源严重缺乏,许多河流断流干涸,特别是黄河断流不仅时间延长,而且干涸河段增长。水资

收稿日期 2006-02-20 收到,2006-04-01 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-218 与国家自然科学基金资助项目 40231005

作者简介 周连童,男,1974年出生,在职博士生,主要从事气候年代际变化及机理研究。E-mail: zlt@mail.iap.ac.cn

源的严重缺乏已经妨碍华北地区工农业的进一步发展,也严重影响着华北地区城乡人民的生活。为此,国家实施南水北调工程,用以解决华北地区水资源严重短缺的问题。

南水北调工程已经开工,从长江调水到华北,以补充华北地区水资源之不足。如何有效发挥南水北调工程的最佳效益,这是当前急需研究的课题。要发挥此工程的最佳效益就必须了解华北地区水资源最缺乏的区域,为此,本研究把华北地区分成4个区域,即华北西部的黄土高原、华北平原的中南部、华北北部(主要是京津唐地区)和胶东半岛。

根据各省区2004年《政府工作报告》显示的GDP值:北京:4 283.3亿元,天津:2 931.88亿元,河北:8 836.9亿元,山西:3 020亿元,山东:15 000亿元,河南:8 815亿元。从以上数值可以看出,在华北地区,山东的产值最大,而山东省的GDP中以胶东地区的产值占很大比重,因此,可以说,京津唐和胶东地区是华北地区工农业产值最大的地区。然而,由于气候变化,这些地区又是水资源最缺乏的区域。为此,详细分析这些地区的降水、蒸发和降水蒸发差的年代际变化特征对于发挥南水北调工程的经济效益具有重要意义。

对于华北地区气候的年代际变化特征,已有很多研究^[1~4],并且对华北地区水资源也进行了一些研究。陈烈庭^[5]分析了华北8个区域的降水年代际变化特征,指出了华北地区各个区域的降水有很大差别,并且也指出了在60年代和70年代后期出现两次气候变干的过程。张庆云^[6]分析了华北地区水资源的变化特征。宋正山等^[7]也分析了华北地区水资源的在各个区域的变化特征。但是他们主要分析的是夏季降水的变化特征,对于春季气候的变化特征,目前研究的还不多。周连童和黄荣辉^[8]分析了华北地区春季降水的年代际变化特征及可能成因。鉴于以前使用的资料有限,本文采用更详细、更长的降水、气温观测资料,来分析华北地区春季和夏季的降水、蒸发和降水蒸发差年际和年代际变化特征。

2 华北地区气候的年代际变化特征

某区域陆面水量平衡公式如下^[7]:

$$P + R_1 + W_g - E - R_0 = \Delta W_s, \quad (1)$$

若不考虑流入该区域的径流量 R_1 以及地下水的开采 W_g ,则土壤蓄水量的变化 W_s 和该区域流出的径流量 R_0 主要由 $P - E$ (即降水蒸发差)来决定,因此,本研究把降水蒸发差定义为可利用水资源量。

蒸发测量在大气科学中至今还是一个难题,目前大部分测站测出的蒸发都是水面蒸发,它只能表征某测站的蒸发能力,而不代表实际蒸发。为此,宋正山等^[7]详细分析了高桥浩一郎^[9]所提出蒸发公式,在半湿润半干旱的华北地区的可实用性。他们认为高桥浩一郎所提出的蒸发公式是适用于华北地区的。为此,本研究利用华北地区80个测站1951~2000年温度、降水的逐日观测资料,先计算出月总量降水和月平均温度值,并利用高桥浩一郎所提出的蒸发公式计算了华北各区域测站的蒸发量,从而得到各区域的降水蒸发差值。高桥浩一郎根据一定的理论和观测结果提供了如下的陆面实际蒸散发的计算公式:

$$E = \frac{3100 \times P}{3100 + 1.8 \times P^2 \times e^{-\frac{34.4T}{235+T}}}, \quad (2)$$

其中, E 为月地面实际蒸发量(单位:mm), P 为月总量降水(单位:mm), T 为月平均气温(单位:℃)。

2.1 华北地区夏季降水、蒸发和降水蒸发差的年代际变化特征

本文所研究的华北地区包括80个观测台站,其中包括北京、天津、河北、山西、山东、河南北部、内蒙古和辽宁个别台站,台站位置分布如图1所示。

图2a为华北地区夏季(6~8月)降水、蒸发和降水蒸发差的年际变化曲线。从图2a中可以看到,华北地区夏季降水距平在20世纪50年代基本高于平均值,但是从1965年开始,降水距平开始减少,特别是1977年后,华北地区夏季降水距平进一步减少。从图2a还可以看到,华北地区夏季蒸发距平与降水距平的变化趋势相类似。所以,降水蒸发差的距平和降水距平的变化趋势基本重合(见图2a虚线),降水蒸发差在1977年之后明显减少。

综上所述,华北地区夏季降水从1965年,特

别是 1977 年之后, 明显减少, 且在这个时期华北出现严重干旱。由于降水的大幅度减少, 造成华

北地区 1977 年后降水蒸发差减少, 即可利用水资源的严重缺乏, 给华北地区工农业生产和人民生活用水带来很大的困难。

2.2 华北地区春季降水、蒸发和降水蒸发差的年际变化特征

图 2b 为华北地区春季 (3~5 月) 降水、蒸发和降水蒸发差的年际变化曲线。从图 2b 中可以看到, 华北地区春季降水距平在 20 世纪 50 年代基本低于平均值, 但是 1963 和 1964 年有很大的正距平, 70 年代降水距平继续减少, 但是从 70 年代后期, 华北地区春季降水距平开始增加。从图 2b 还可以看到, 华北地区春季蒸发距平与降水距平的变化趋势相类似。所以, 降水蒸发差的距平和降水距平的变化趋势基本重合, 即降水蒸发差在 70 年代后期明显增加。

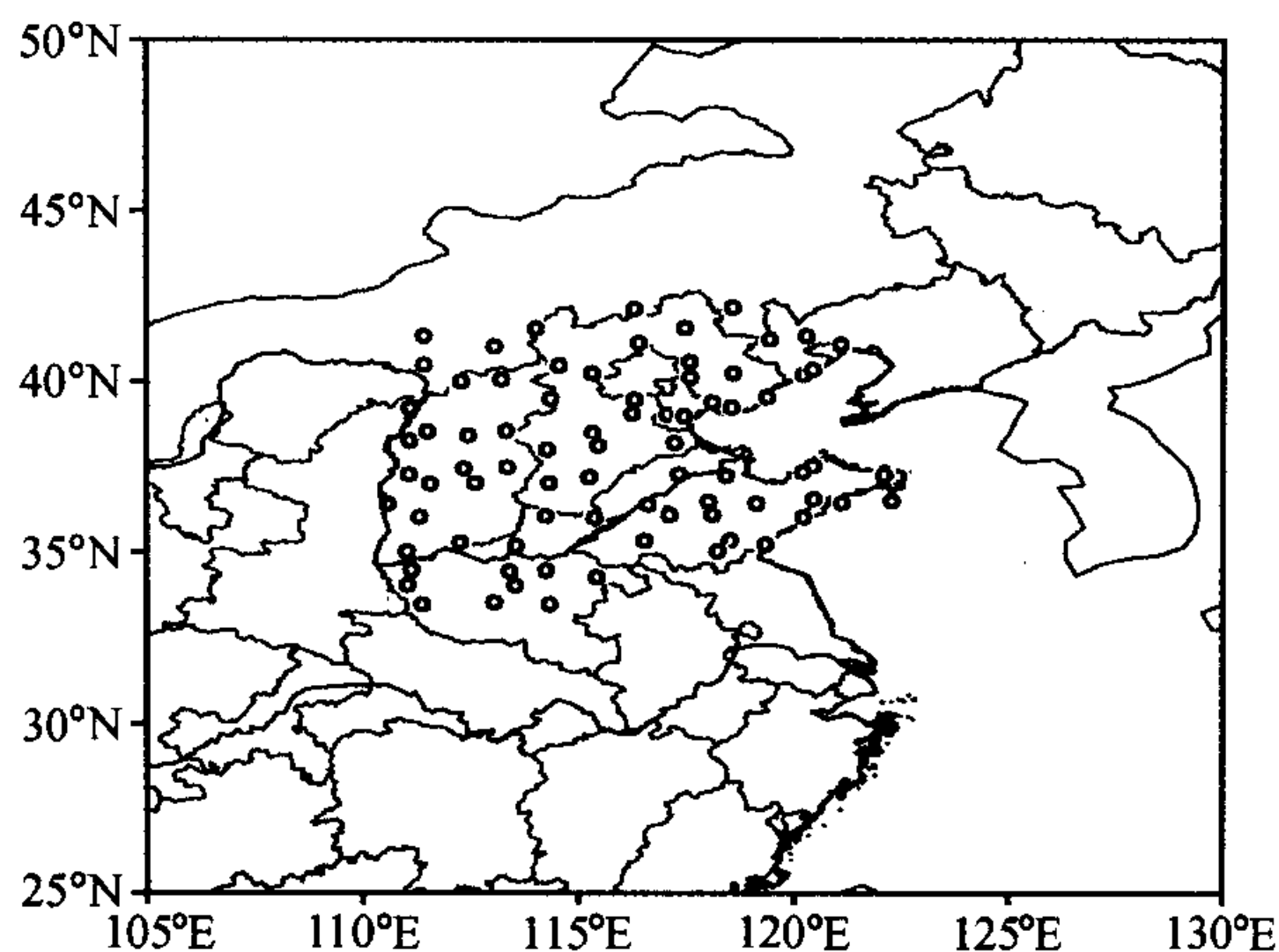


图 1 华北地区 80 个观测台站的位置分布

Fig. 1 Location of 80 observation stations in North China

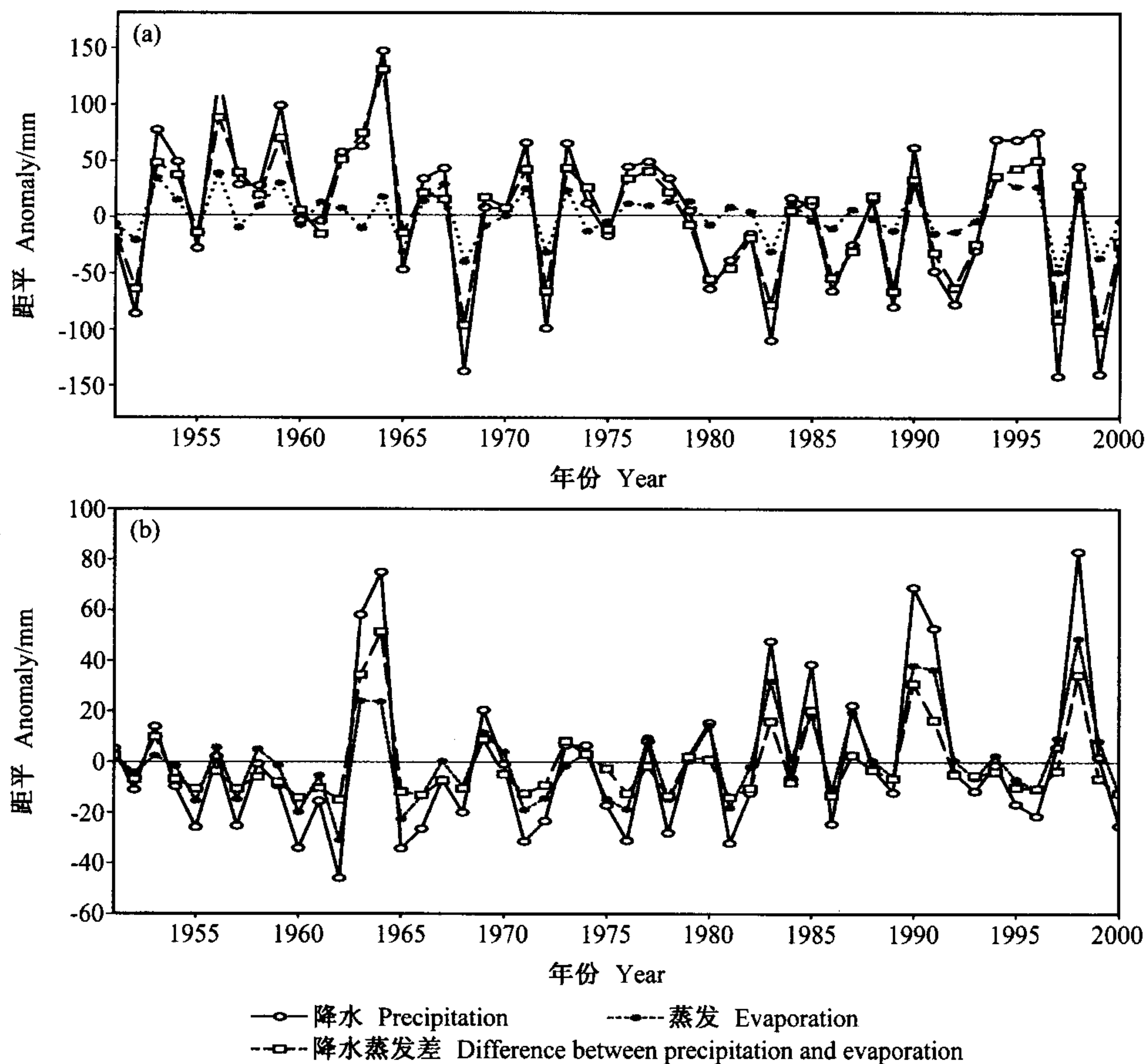


图 2 华北地区 (a) 夏季 (6~8 月) 和 (b) 春季 (3~5 月) 降水、蒸发和降水蒸发差距平的年际变化 (取 1961~1990 年 30 年各月气候平均值作为气候值)

Fig. 2 Interannual variability of (a) summer (JJA) and (b) spring (MMA) precipitation anomaly, evaporation anomaly and difference between precipitation and evaporation anomaly in North China, the climatological mean of monthly precipitation averaged for 1961—1990 is taken as normal

综上所述, 华北地区春季降水除了 1963 和 1964 年明显偏多外, 在 50、60 和 70 年代初期都偏少, 但从 70 年代末开始, 降水开始增加, 降水蒸发也增加了, 即春季可利用水资源从 70 年代末开始增加了。

2.3 华北地区降水、蒸发和降水蒸发差的年代际变化特征

为了研究华北地区 1965 和 1977 年的两次气候跃变, 下面将分别分析 1951~1965 年、1966~1976 年和 1977~2000 年平均的各月降水、蒸发和降水蒸发差的年代际变化。图 3 为华北地区降水、蒸发和降水蒸发差距平在 1951~1965 年、1966~1976 年和 1977~2000 年平均的变化特征。

(1) 1951~1965 年 (图 3a): 华北地区 4、6、7、8、9 和 11 月降水距平高于平均值, 7 月距平值最大; 而 1、2、3、5 和 12 月的降水距平却低于平均值, 5 月距平值最小。也就是说在 1951~1965 年, 华北地区夏、秋季降水偏多, 而春季降水略偏少, 由于夏季降水偏多, 全年总降水是偏多的。蒸发距平在 7、8 和 11 月高于平均值, 且最大的蒸发距平在 8 月; 而 1、2、3、5 和 6 月低于平均值, 最小在 5 月。华北地区降水蒸发差距平在 4、6、7、8、9 和 11 月高于平均值, 最大值出现在 7 月; 而其余月略低于平均值。降水蒸发差和降水量变化趋势基本相同。这说明, 1951~1965 年华北地区在夏季和秋季的可利用水资源量是偏多的, 冬季和春季略偏少。由于汛期可利用水资源量偏多, 所以全年的可利用水资源量在 1951~1965 年还是偏多的。

(2) 1966~1976 年 (图 3b): 华北地区 4、8 和 9 月降水距平高于平均值, 且 8 月的距平值最大; 而其余月降水距平均低于平均值, 且最小的距平值出现在 5 月。这说明, 1966~1976 年华北地区春季降水继续偏少, 夏季降水也开始减少。蒸发距平在 7、8、9 和 10 月高于平均值, 最大距平值出现在 9 月; 而其余月基本低于平均值, 且最小值在 5 月。华北地区降水蒸发差距平在 8 和 9 月高于平均值, 最大值也出现在 8 月; 而其余月均低于平均值, 且最小值也在 5 月。降水蒸发差和降水距平变化趋势基本相似。这说明可利用水资源量在 1966~1976 年期间春、夏季明显减少。

(3) 1977~2000 年 (图 3c): 华北地区降水

距平值在 1、2、3、5、6、11 和 12 月高于平均值, 且最大距平出现在 5 月; 而 4、7、8 和 9 月均低于平均值, 最小值出现在 7 月。这说明, 1977~2000 年华北地区的降水冬、春季明显增加, 而夏、秋季严重减少, 特别是汛期 7 和 8 月降水减少的最多, 也就是说华北地区降水在该时段发生了一次明显的跃变。华北地区蒸发距平值在 1、2、3、5、6、11 和 12 月高于平均值, 且最大距平出现在 5 月; 而 4、7、8 和 9 月均低于平均值, 最小值出现在 9 月。华北地区降水蒸发差距平与降水距平变化趋势基本相似。这说明华北地区可利用水资源量在夏季主汛期 (7、8 月) 明显减少, 但是在冬季和春季的可利用水资源量却有所增加, 特别是 3、5 和 6 月的可利用水资源量比 1977 年之前有明显增加。

综上所述, 华北地区 1951~1965 年可利用水资源量夏季偏多, 春季偏少, 全年总体的可利用水资源量偏多; 1966~1976 年春季可利用水资源量进一步减少, 夏季也开始减少; 1977~2000 年夏季水资源量明显减少, 已经低于平均值, 特别是主汛期 (7、8 月) 减少的最多, 但是春季和初夏降水却明显偏多, 已高于平均值, 特别是 3、5 和 6 月明显增加。但由于主汛 (7、8 月) 水资源量明显减少, 所以华北地区水资源量从 1977 年之后明显减少。

2.4 华北地区气温的年代际变化特征

下面分析 1951~1965 年、1966~1976 年和 1977~2000 年平均的各月气温年代际变化特征。图 4 为 1951~1965 年、1966~1976 年和 1977~2000 年平均的气温年代际变化。如图 4 所示, 1951~1965 华北地区的平均气温距平在 2、7 和 9 月高于平均值, 最大值出现在 7 月; 其余月的气温距平低于距平值, 最低值出现在 4 月。1966~1976 年 5 月和 8 月的气温距平高于平均值; 而其余月的气温距平低于平均值, 最低值出现在 12 月。然而 1977~2000 年所有月的气温距平都高于平均值, 最大的值出现在冬季的 2 月。

以上分析可以看出, 从 1951~1965 年到 1966~1976 年再到 1977~2000 年, 华北地区气温在夏季经历了偏高—偏低—再偏高的过程; 而春、秋和冬季的气温是偏低—偏低—偏高的过程, 特别是冬季, 1977~2000 年的升温幅度最大。

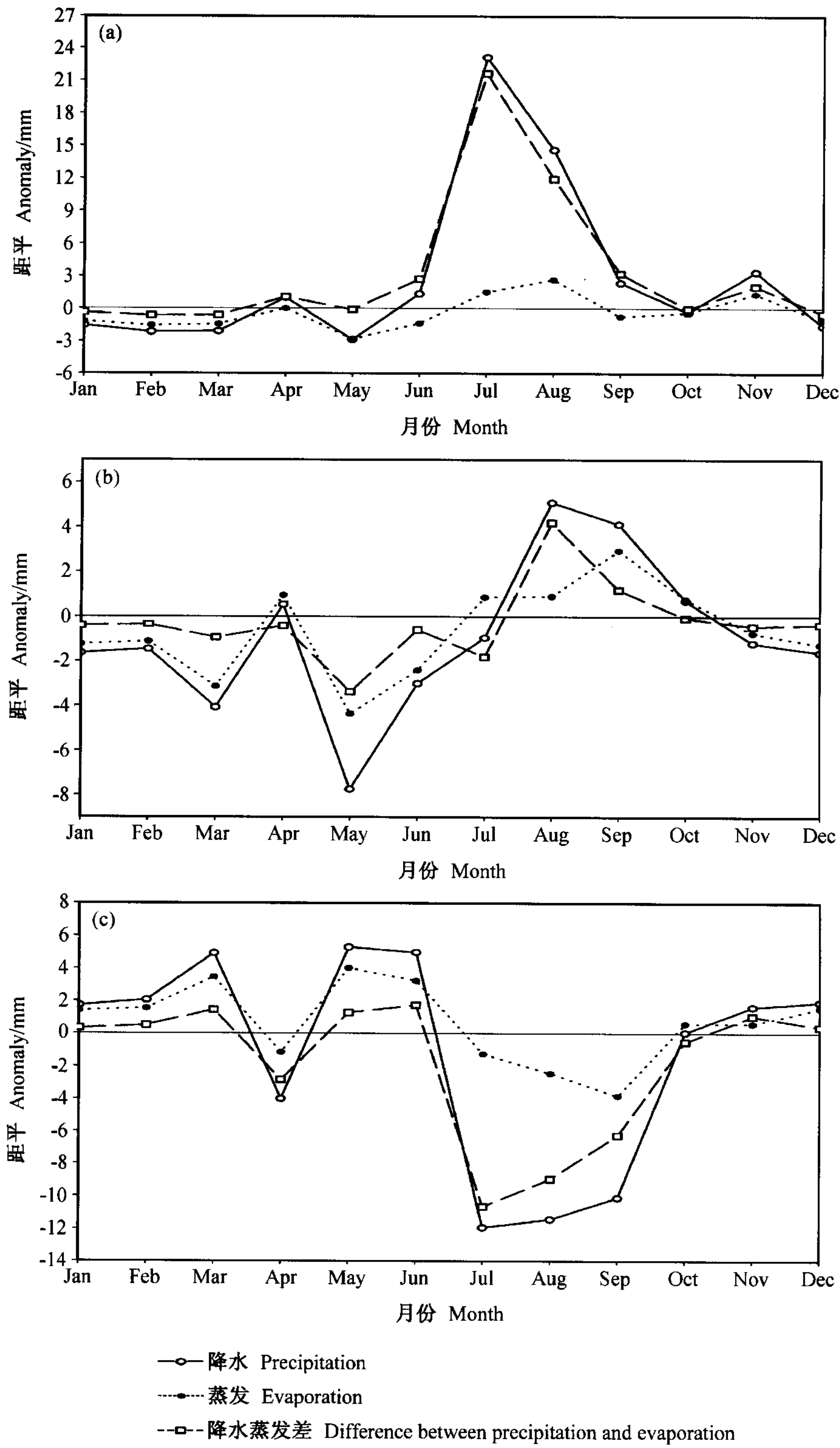


图3 华北地区降水、蒸发和降水蒸发差距平 (a) 1951~1965 年、(b) 1966~1976 年和 (c) 1977~2000 年平均的月变化 (取 1961~1990 年 30 年各月平均值作为气候值)

Fig. 3 Monthly variations of precipitation anomaly, evaporation anomaly and difference between precipitation and evaporation anomaly in North China averaged for (a) 1951-1965, (b) 1966-1976 and (c) 1977-2000, respectively. The climatological mean of monthly precipitation averaged for 1961-1990 is taken as normal

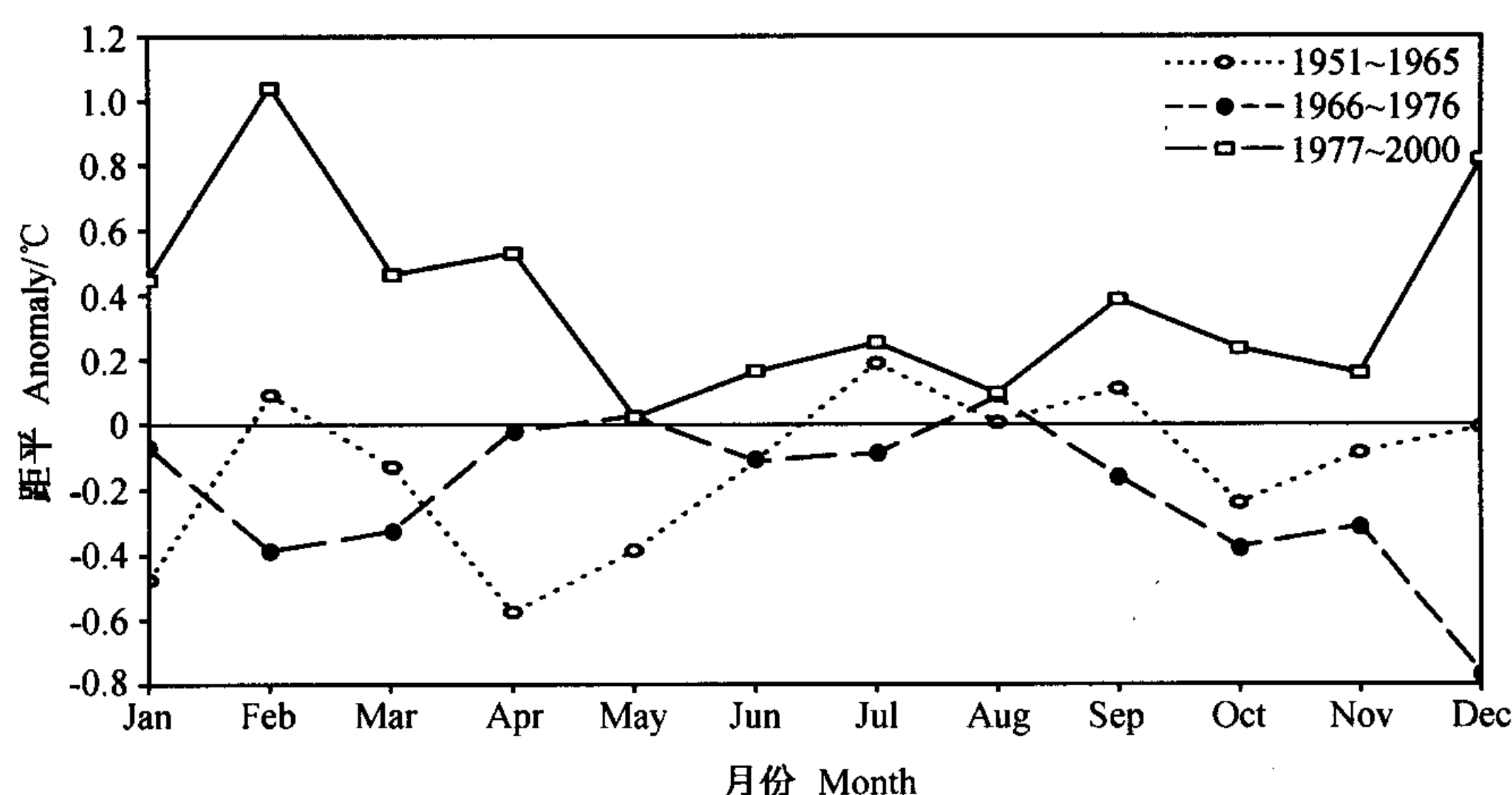


图4 华北地区气温距平 1951~1965 年、1966~1976 年和 1977~2000 年平均的月变化 (取 1961~1990 年 30 年各月平均值作为气候值)

Fig. 4 Monthly variations of temperature anomaly in North China averaged for 1951—1965, 1966—1976 and 1977—2000, respectively. The climatological mean of monthly temperature averaged for 1961—1990 is taken as normal

3 华北地区各个区域降水、蒸发和降水蒸发差年代际变化特征

华北地区面积广阔, 不仅地形在各个区域不同, 而且经济发展的速度在各个区域也不同。南水北调工程耗资巨大, 如何发挥它的最佳经济效益, 这是值得进一步研究的问题, 为此, 本文把华北地区再分成 4 个区域, 分别是华北西部的黄土高原、华北平原的中南部、华北北部 (主要是京津唐地区) 和胶东半岛。下面就这 4 个区域分别计算它们的降水、蒸发和降水蒸发差 (即可利用水资源量) 的年代际变化特征, 以便搞清楚哪个区域更缺水, 然后再结合各个区域的经济发展情况, 得出最需要优先解决水资源问题的地区, 这样可以发挥南水北调工程的最大经济效益。

3.1 京津唐地区降水、蒸发和降水蒸发差的年代际变化特征

本文研究的京津唐地区并不仅限于北京、天津和唐山, 而是包括了华北北部 (其中包括北京、天津、唐山、河北北部)、内蒙古个别地区和辽宁个别地区, 总共 22 个观测台站。

图 5 为京津唐地区降水、蒸发和降水蒸发差距平在 1951~1965 年、1966~1976 年和 1977~2000 年平均的变化特征。

(1) 1951~1965 年 (图 5a): 京津唐地区 7、8、9、10 月降水距平高于平均值, 7 月距平值最

大; 而 3、4、5 和 6 月的降水距平却低于平均值, 5 月距平值最小。也就是说, 1951~1965 年京津唐地区夏、秋季降水偏多, 而春季降水偏少, 但全年总的降水仍是偏多的。蒸发距平在 7、8、9 和 10 月高于平均值, 其余月低于平均值, 且最大的蒸发距平值在 9 月, 最小值在 5 月。从图 5a 还可以看出, 京津唐地区降水蒸发差距平在 6、7、9 和 10 月高于平均值, 7 月降水蒸发差最大; 而 3、5 月低于平均值, 5 月降水蒸发差距平值最小, 其余月则接近于平均值。这说明, 1951~1965 年京津唐地区可利用水资源量在夏、秋季还是偏多的, 但是春季偏少, 总体的水资源量还是偏多的。

(2) 1966~1976 年 (图 5b): 京津唐地区 7、8 和 10 月降水距平高于平均值, 且 8 月的距平值最大; 而 2、3、4、5、6 和 9 月降水距平低于平均值, 且最小的距平值出现在 4 月。这说明 1951~1965 年华北地区夏季降水仍然偏多。蒸发距平只有在 7 和 10 月高于平均值; 而其余月基本低于平均值, 且最小值在 3 月。降水蒸发差距平值在 6、7、8 和 10 月高于平均值, 最大值也出现在 8 月; 而 3、4、5 和 9 月低于平均值, 且最小值也在 5 月。这说明, 京津唐地区可利用水资源量 1966~1976 年和 1951~1965 年相比变化不大, 只有 9 月的距平值从高于距平值转变为低于距平值。

(3) 1977~2000 年 (图 5c): 京津唐地区降水距平值在 7、8 和 9 月低于平均值, 且最小值出

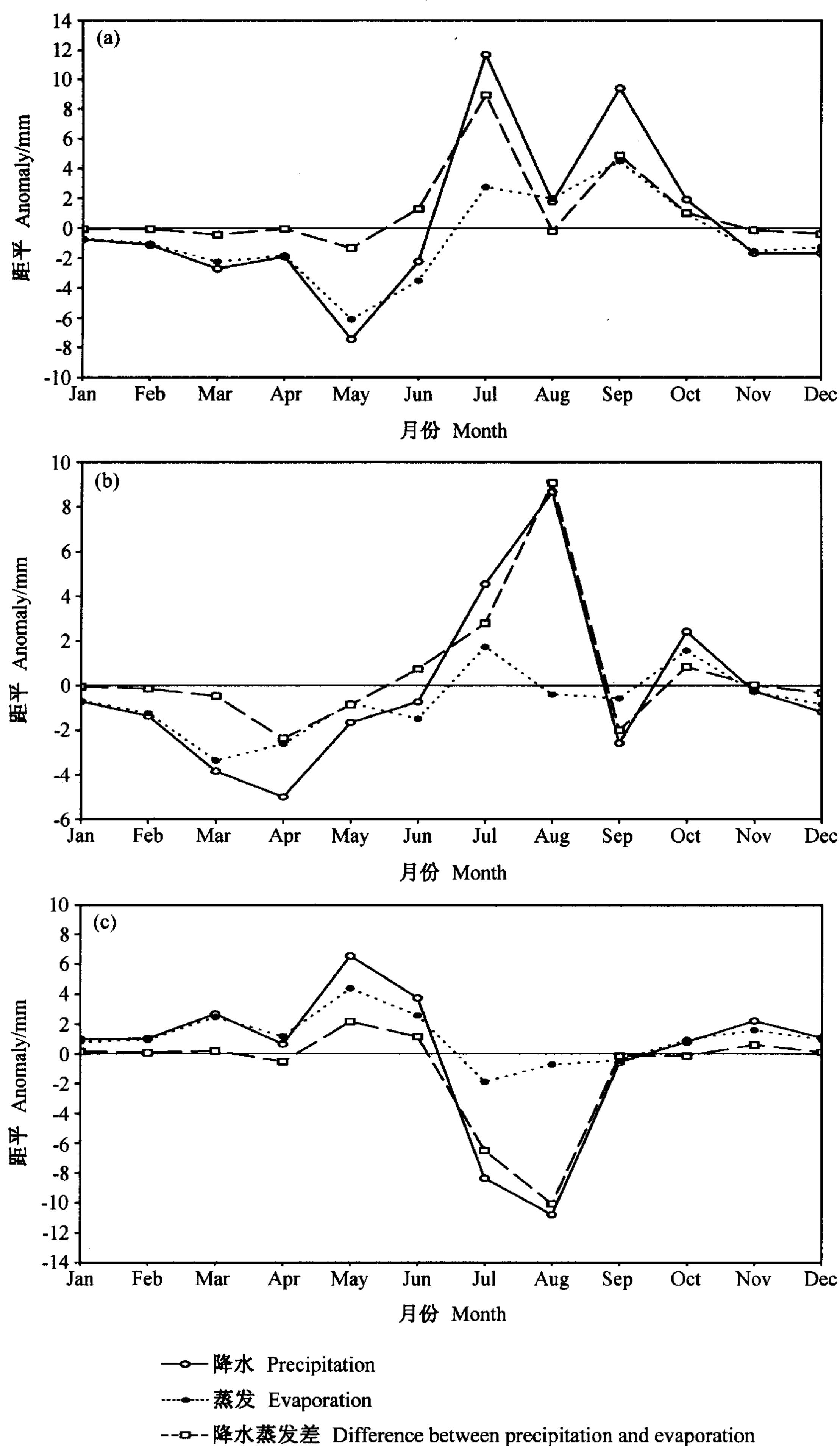


图5 京津唐地区降水、蒸发和降水蒸发差距平 (a) 1951~1965 年、(b) 1966~1976 年和 (c) 1977~2000 年平均的月变化 (取 1961~1990 年 30 年各月平均值作为气候值)

Fig. 5 Monthly variations of precipitation anomaly, evaporation anomaly and difference from precipitation and evaporation anomaly in the region of Jingjintang averaged for (a) 1951—1965, (b) 1966—1976 and (c) 1977—2000, respectively. The climatological mean of monthly precipitation averaged for 1961—1990 is taken as normal

现在 8 月; 而其他月均高于平均值, 最大值出现在 5 月。由此可见京津唐地区的降水发生了转变, 春季降水明显增加, 而夏季降水严重减少, 特别是汛期 7、8 月降水减少显著。蒸发距平除了 7 和 8 月低于平均值外, 其他月均高于平均值。降水蒸发差距平在 5 和 6 月高于平均值, 而在 7 和 8 月明显低于平均值, 与降水的变化趋势基本相似。这说明, 京津唐地区可利用水资源量在夏季主汛期明显减少, 但是在春、秋和冬季的可利用水资源量却有所增加, 特别是 5、6 月的可利用水资源增加最多。

综上所述, 京津唐地区可利用水资源量 1951~1965 年夏、秋季明显偏多, 冬、春季明显偏少, 但全年总的可利用水资源量还是偏多的; 1966~1976 年可利用水资源量基本保持不变; 1977~2000 年夏季可利用水资源量明显减少, 但是春季有明显增加, 特别是 5、6 月增加的最多, 然而由于主汛期的可利用水资源量的减少, 所以, 这不能改变京津唐地区总体水资源减少的现实。

3.2 胶东地区降水、蒸发和降水蒸发差的年代际变化特征

胶东半岛位于华北地区的东部, 其中包括山东东部, 共 18 个观测台站。下面我们利用相同的方法计算胶东地区降水、蒸发和降水蒸发差。图 6 为胶东地区降水、蒸发和降水蒸发差距平在 1951~1965 年、1966~1976 年和 1977~2000 年平均的变化特征。

(1) 1951~1965 年 (图 6a): 胶东地区 6、7、8、9、11 月降水距平高于平均值, 7 月距平值最大; 而只有 5 月的降水距平低于平均值。也就是说, 1951~1965 年胶东地区夏、秋季降水偏多, 而春季降水基本保持正常, 全年总的降水是偏多的。蒸发距平在 8 和 11 月高于平均值, 其余月接近于平均值。从图 6a 还可以看出, 胶东地区降水蒸发差距平和降水距平变化趋势基本相似。这说明, 胶东地区 1951~1965 年可利用水资源量在夏季、秋季偏多, 春季在正常值, 全年总的可利用水资源量是偏多的。

(2) 1966~1976 年 (图 6b): 胶东地区 4、8、9 和 10 月降水距平高于平均值, 且 8 月的距平值最大; 而 3、5、6 和 7 月降水距平低于平均值, 且最小的距平值出现在 7 月。这说明, 胶东地区

从 1966~1976 年夏季降水开始减少, 特别是 7 月减少得最多。蒸发距平在 4、8、9 和 10 月高于平均值, 而其余月基本低于平均值, 且最小值在 5 月。降水蒸发差距平在 8 和 9 月高于平均值, 最大值也出现在 8 月; 而 5、6 和 7 月低于平均值, 且最小值也在 7 月。这说明, 胶东地区可利用水资源量从 1966~1976 年开始减少, 主要是因为夏季降水明显减少造成的。

(3) 1977~2000 年 (图 6c): 胶东地区降水距平在 3、5 和 6 月高于平均值, 且最大值出现在 6 月; 而 4、7、8 和 9 月均低于平均值, 最小值出现在 7 月。这说明胶东地区的降水自 1977 年之后也发生了明显的转变, 春季降水略增加, 特别是 5、6 月明显增加; 而夏季降水严重减少, 特别是汛期 7 和 8 月降水明显减少, 也就是说胶东地区自 1977 年以来夏季降水明显减少。蒸发距平在 4、7、8 和 9 月低于平均值, 5、6 月略高于平均值。胶东地区降水蒸发差距平与降水距平的变化趋势基本相似。这说明, 胶东地区可利用水资源量在夏季主汛期 (7、8 月) 明显减少, 6 月的可利用水资源量却有所增加, 但由于主汛期的可利用水资源量的减少, 所以, 胶东地区总体水资源也是减少的。

综上所述, 胶东地区可利用水资源量 1951~1965 年是偏多的; 但 1966~1976 年夏季的可利用水资源量明显减少; 1977~2000 年夏、秋季的可利用水资源量进一步减少, 特别是 8、9 月减少的最多, 但是春、冬季却略有增加, 特别是 6 月增加的最多, 然而总体可利用水资源量仍是偏少的。

3.3 华北中南部地区降水、蒸发和降水蒸发差的年代际变化特征

华北中南部地区包括河北南部、山东西部和河南北部, 共 20 个观测台站。下面我们利用相同的方法计算华北中南部地区降水、蒸发和降水蒸发差。图 7 为华北中南部地区降水、蒸发和降水蒸发差距平在 1951~1965 年、1966~1976 年和 1977~2000 年平均的变化特征。

(1) 1951~1965 年 (图 7a): 华北中南部地区 4、5、6、7、8、11 月降水距平高于平均值, 8 月距平值最大; 而只有 9 月的降水距平低于平均值。也就是说, 1951~1965 年华北中南部地区全年降水偏多。蒸发距平在 6、7、8 和 11 月高于平

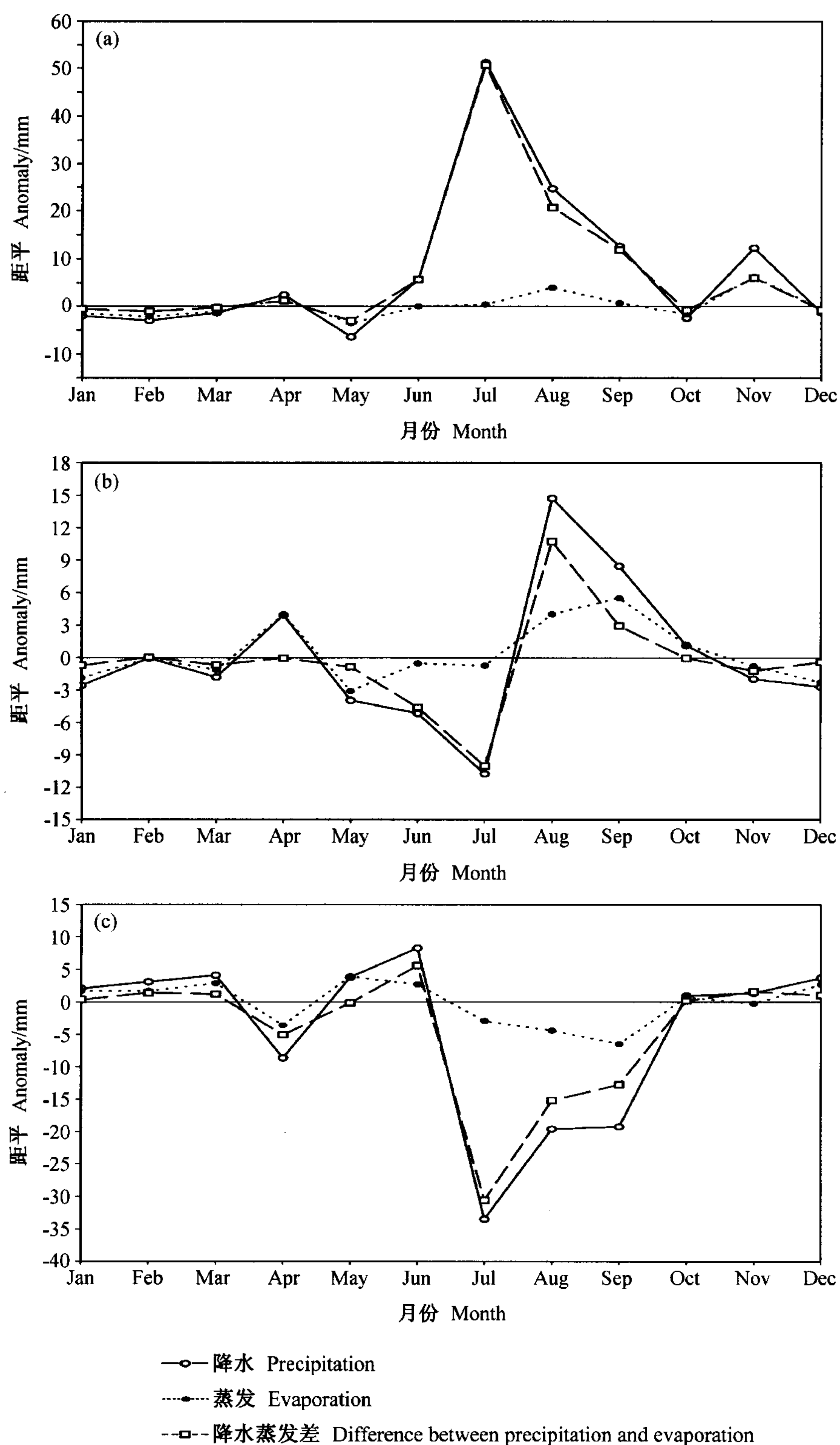


图6 胶东地区降水、蒸发和降水蒸发差距平 (a) 1951~1965年、(b) 1966~1976年和 (c) 1977~2000年平均的月变化 (取1961~1990年30年各月平均值作为气候值)

Fig. 6 Monthly variations of precipitation anomaly, evaporation anomaly and difference from precipitation and evaporation anomaly in the region of Jiaodong averaged for (a) 1951-1965, (b) 1966-1976 and (c) 1977-2000, respectively. The climatological mean of monthly precipitation averaged for 1961-1990 is taken as normal

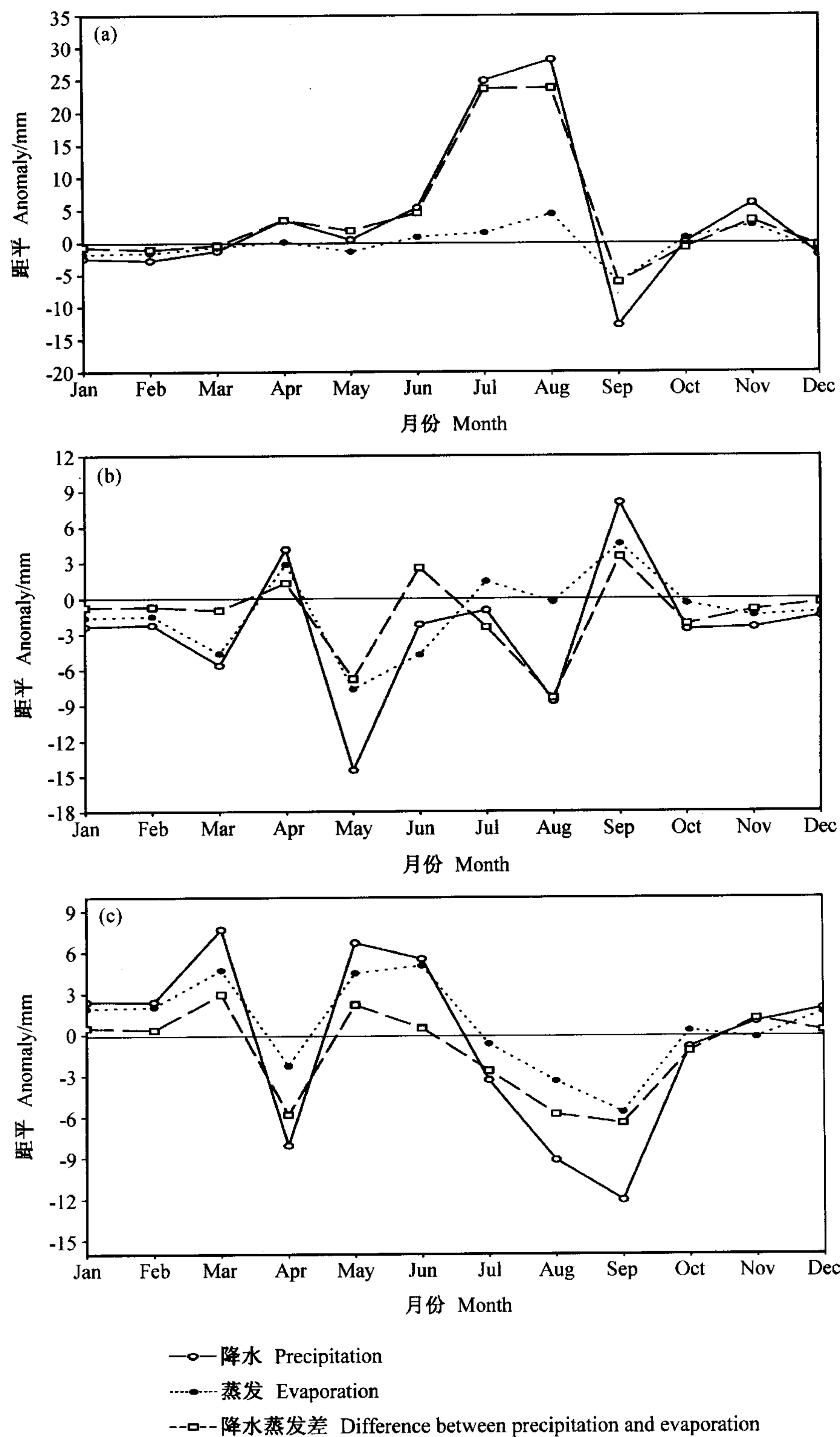


图 7 华北中南部地区降水、蒸发和降水蒸发差距平 (a) 1951~1965 年、(b) 1966~1976 年和 (c) 1977~2000 年平均的月变化 (取 1961~1990 年 30 年各月平均值作为气候值)

Fig. 7 Monthly variations of precipitation anomaly, evaporation anomaly and difference from precipitation and evaporation anomaly in the middle and southern part of North China averaged for (a) 1951—1965, (b) 1966—1976 and (c) 1977—2000, respectively. The climatological mean of monthly precipitation averaged for 1961—1990 is taken as normal

均值,其余月接近于平均值。从图 7a 还可以看出,华北中南部地区降水蒸发差距平和降水距平变化趋势基本相似,也就是说降水蒸发差和降水基本相同。这说明,华北中南部地区的可利用水资源量在 1951~1965 年全年偏多。

(2) 1966~1976 年(图 7b):华北中南部地区 4、9 月降水距平高于平均值,且 9 月的距平值最大;而其余月降水距平低于平均值,且最小的距平值出现在 5 月。也就是说,华北中南部地区 1966~1976 年降水明显减少。蒸发距平只有在 4、7、9 月高于平均值,最大值出现在 9 月;而其余月基本低于平均值,且最小值在 5 月。降水蒸发差距平在 4、6 和 9 月高于平均值,最大值也出现在 9 月;而其余月低于平均值,且最小值也在 8 月。这说明,华北中南部地区可利用水资源量从 1966~1976 年开始减少,特别是春、夏季的可利用水资源量明显减少。

(3) 1977~2000 年(图 7c):华北中南部地区降水距平在 1、2、3、5 和 6 月高于平均值,且最大值出现在 3 月;而 4、7、8、9 和 10 月均低于平均值,最小值出现在 9 月。这说明,华北中南部地区的降水自 1977 年之后也发生了明显的转变,春季降水略增加,特别是 5、6 月明显增加,而夏季降水进一步减少。蒸发距平在 1、2、3、5 和 6 月高于平均值,最大值出现在 6 月,而其余月低于平均值。降水蒸发差距平在 3、5 和 11 月高于平均值,最大值在 3 月;而 4、7、8、9 和 10 月低于平均值,最小值出现在 9 月,基本上与降水距平变化趋势相类似。这说明,华北中南部地区可利用水资源量在夏季进一步减少,特别是 8 和 9 月有明显减少;而冬、春的可利用水资源量有明显增加,特别是而 5、6 月有明显增加。但是必须看到,由于此地区降水主要是夏季,因此夏季降水的减少造成此地区全年总的可利用水资源量是减少的。

综上所述,华北中南部地区的可利用水资源量在 1951~1965 年偏多;1966~1976 年夏、春季明显偏少,特别是 3、5 和 6 月减少的最多;1977~2000 年夏、秋季进一步减少,特别是 8、9 月减少的最多,但是春、冬季明显增加,特别是 3、5 和 6 月增加的最多,然而由于主汛期降水的减少,所以全年总的可利用水资源量是减少的。

3.4 华北西部地区降水、蒸发和降水蒸发差的年代际变化特征

华北西部地区包括山西全省和内蒙古个别地区,共 20 个观测台站。下面我们利用相同的方法计算华北西部地区降水、蒸发和降水蒸发差。图 8 为华北西部地区降水、蒸发和降水蒸发差距平在 1951~1965 年、1966~1976 年和 1977~2000 年平均的变化特征。

(1) 1951~1965 年(图 8a):华北西部地区 4、5、7、8 和 9 月降水距平高于平均值,7 月距平值最大;而 1、2、3、6、10、11 和 12 月的降水距平低于平均值,最小值出现在 3 月。也就是说,1951~1965 年华北西部地区春、夏季降水偏多。蒸发距平在 4、7 和 8 月高于平均值,其余月低于平均值,最小值出现在 6 月。降水蒸发差距平 5、7、8、9 和 10 月高于平均值,最大值出现在 7 月;其余月均略小于平均值,最小出现在 3 月,基本上与降水距平变化趋势相类似。可以看出,1951~1965 年华北西部地区的可利用水资源量偏多,特别是春、夏季明显偏多,但是我们注意到,它的整体可利用水资源量比其他 3 个区却是偏少的。

(2) 1966~1976 年(图 8b):华北西部地区 7、8、9 和 10 月降水距平高于平均值,且 8 月的距平值最大;而其余月降水距平低于平均值,且最小的距平值出现在 5 月。也就是说,华北西部地区 1966~1976 年降水开始减少,特别是春季降水明显减少,秋季降水有明显增加,夏季降水也有所减少。蒸发距平只有在 7、8、9 和 10 月高于平均值,最大值出现在 9 月;而其余月基本低于平均值,且最小值在 5 月。降水蒸发差距平在 7、8、9 和 10 月高于平均值,最大值也出现在 8 月;而其余月低于平均值,且最小值也在 5 月。这说明,华北西部地区可利用水资源量 1966~1976 年春季明显减少,夏季变化不大,所以总的可利用水资源量变化不大。

(3) 1977~2000 年(图 8c):华北西部地区降水距平在 1、2、3、5、6、11 和 12 月高于平均值,且最大值出现在 3 月;而 7、8、9 和 10 月均低于平均值,最小值出现在 9 月。这说明,春季降水 1977~2000 年比 1966~1976 年前有明显增加,而夏季降水明显减少。蒸发距平在 1、2、3、5 和 6 月高于平均值,最大值出现在 3 月;而其余

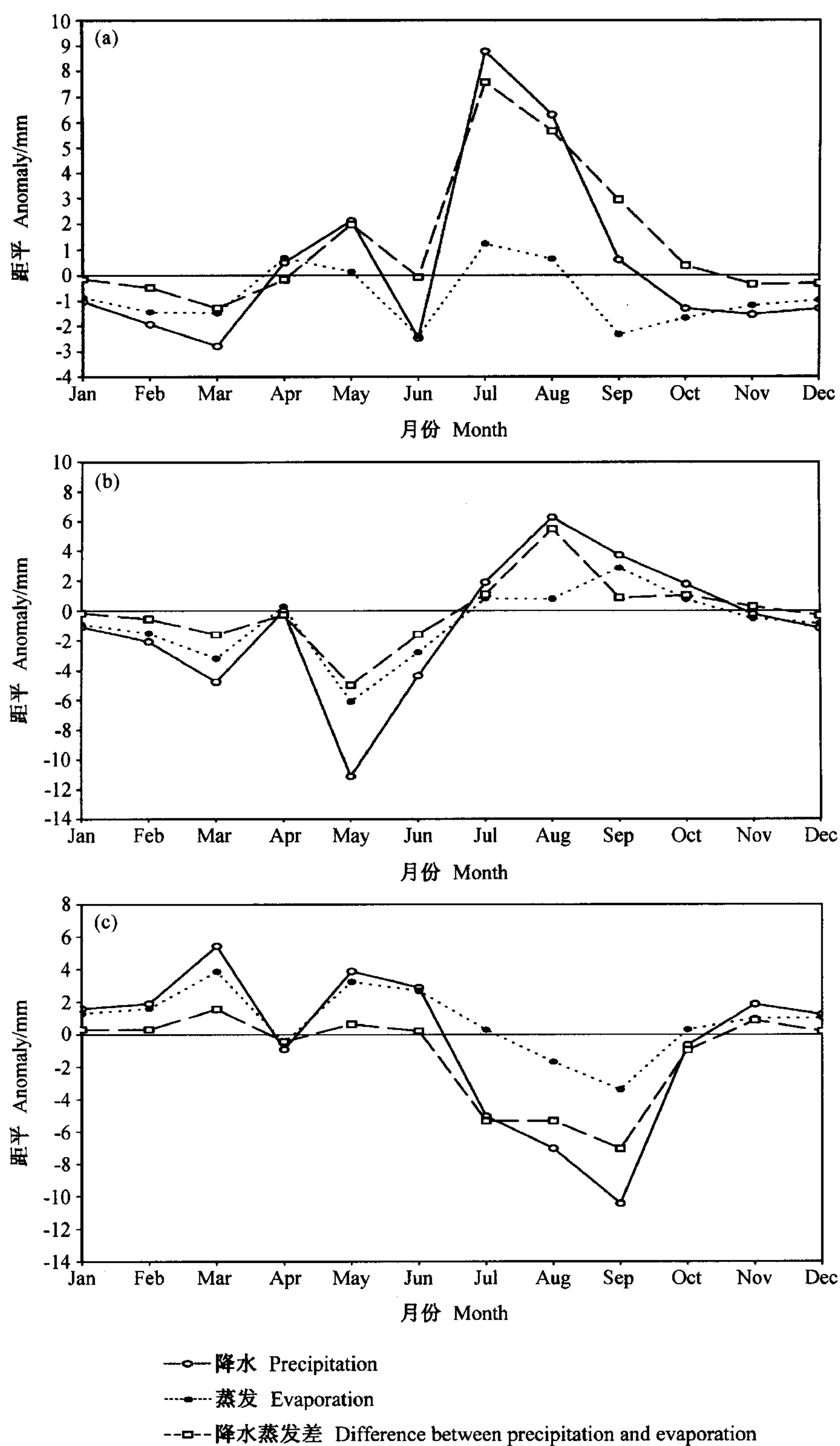


图 8 华北西部地区降水、蒸发和降水蒸发差距平 (a) 1951~1965 年、(b) 1966~1976 年和 (c) 1977~2000 年平均的月变化 (取 1961~1990 年 30 年各月平均值作为气候值)

Fig. 8 Monthly variations of precipitation anomaly, evaporation anomaly and difference from precipitation and evaporation anomaly in the western part of North China averaged for (a) 1951-1965, (b) 1966-1976 and (c) 1977-2000, respectively. The climatological mean of monthly precipitation averaged for 1961-1990 is taken as normal

月低于平均值,最小的月出现在9月。降水蒸发差距平在3、5和11月略高于平均值,最大值在3月;而7、8、9和10月低于平均值,最小值出现在9月,基本上与降水距平变化相类似。这说明,华北西部地区的可利用水资源1977~2000年冬、春季有明显增加,夏、秋季明显减少。由于主汛期降水的减少,总的水资源量减少了。

综上所述,华北西部地区可利用水资源量1951~1965年偏多,但比其他3个区域偏少;1966~1976年春季明显减少,夏季基本不变;然而1977~2000年春季反而增加,特别是3、5月有明显增加,但夏季开始减少,特别是8、9月减少的最多,造成可利用水资源量的总体减少。

4 华北地区各区域降水、蒸发、降水蒸发差和气温的异同

4.1 各区域降水、蒸发和降水蒸发差变化的异同

以上的分析结果表明,华北各区域降水和降水蒸发量年代际变化有一定的相似性。其区域的降水、蒸发和降水蒸发差距平在1951~1965年、1966~1976年和1977~2000年3个时期的年代际变化趋势有相似之处。1951~1965年这4个区域夏季降水均偏多,降水蒸发差也偏多,即在此时期这4个区域河流流出径流量与土壤含水量较多,为相对湿润期;而1966~1976年无论降水或是降水蒸发差相比于1951~1966年开始减少,这说明从1966年起这4个区域河流流出径流量与土壤含水量已开始减少,为从相对湿润期到相对干旱期的过渡期;1977~2000年无论降水或是降水蒸发差相比于1966~1976年严重偏少,比气候平均值偏少很多,这表明这4个区域河流的径流量与土壤含水量比气候平均值偏少,为相对干旱期。但是必须看到,这些地区在1977~2000年5~6月的降水或降水蒸发差比前两时期均有所增加。

比较这4个区域降水和降水蒸发差的年代际变化,可以发现也有一定差异。华北西部1966~1976年的降水和降水蒸发差距平与1951~1965年期间相比,春季减少,主要是5月减少的最多,夏季基本不变;此地区在1977~2000年7~8月主汛期和9月的降水与降水蒸发差距平比1966~1976年减少很多,比气候平均值偏少,但3、5和

6月的降水与降水蒸发差却比1966~1976年有一定增加。华北中南部夏季的降水和降水蒸发差1965~1966年与1951~1965年相比,春、夏季均减少,特别是5和8月减少的最多;此地区1977~2000年7~8月主汛期和9月的降水与降水蒸发差距平比1966~1976年减少很多,比气候平均值偏少,但3、5和6月降水与降水蒸发差却比1966~1976年有一定增加。胶东半岛1966~1976年降水和降水蒸发差距平与1951~1965年相比,夏季明显减少,特别是6和7月明显减少;1977~2000年7~8月主汛期的降水与降水蒸发差距平比1966~1976年减少很多,比气候平均值偏少,但5~6月降水和降水蒸发差距平却比1966~1976年有所增加。华北北部京津唐地区1966~1976年降水和降水蒸发差距平与1951~1965年相比,春、夏季基本保持不变;1977~2000年7~8月主汛期的降水与降水蒸发差距平比1966~1976年减少很多,比气候平均值偏少,但5~6月却比1966~1976年有所增加。因此可以说,华北中南部地区和胶东半岛地区无论夏季降水或是夏季降水蒸发差从1965年左右开始减少,1977年起进一步明显减少,这和华北地区的总降水和降水蒸发差的变化趋势相似;而华北西部和京津唐地区夏季降水和夏季降水蒸发差的减少从1977年开始才变得比较明显。比较这4个区域1977~2000年与前两时期的降水和降水蒸发差距平的变化幅度,可以发现:京津唐地区和胶东半岛地区降水最少出现在7、8月,而华北中南部和华北西部出现在8、9月;华北中南部和华北西部地区是3、5和6月增加的最多,而京津唐地区和胶东半岛地区是5和6月增加的最多;胶东半岛地区的夏季降水和降水蒸发差距平1977~2000年平均比气候平均值偏少幅度最大可达35 mm之多,并且,降水蒸发差与降水之比 $((P-E)/P)^{[7]}$,即可变为水资源系数(或可利用降水系数)减少也最为明显,汛期7、8月的可变为水资源系数之和从1951~1965年到1966~1976年再到1977~2000年的变化为0.87、0.80和0.76(其他3个区域的年代际变化为:京津塘地区0.67、0.72和0.63;华北中南部0.65、0.55和0.54;华北西部0.61、0.62和0.57)。可见胶东地区干旱灾害较严重,水资源减少也较严重。从以上分析还可以看到,京津唐地区可变为

水资源系数的减少也比较大, 因此该地区水资源减少得也比较严重。从上面的数字也可以说明, 夏季降水(特别是7、8月汛期)京津塘地区和华北西部地区从1977年之后明显减少, 而胶东地区和华北中南部地区从1965年就开始明显减少, 1977年之后进一步的减少。

4.2 各区域气温变化的异同

由于气温影响蒸发, 我们也详细分析了华北各区域各年代气温的变化特征(图略)。从分析结果可以看到, 4个区域的气温变化也有异同。1951~1965年4个区域夏季气温均高于平均值, 但京津唐地区的春、秋和冬季气温低于平均值; 胶东地区、华北中南部地区和华北西部地区的气温变化相似, 春季气温低于平均值, 秋冬季接近于平均值。1966~1976年京津唐地区和胶东地区的气温变化相类似, 它们的气温基本全年低于平均值; 华北中南部地区和华北西部地区相类似, 夏季高于平均值, 其他季节低于平均值。1977~2000年京津唐地区、胶东地区和华北西部地区的温度变化相类似, 全年高于平均值, 且最大增温在冬季, 最小则在夏季; 而华北中南部地区则夏季低于平均值, 其他季节高于平均值, 最大增温也在冬季。

5 华北地区降水年代际变化与东亚夏季风年代际变化的关系

综上所述, 由于华北地区的可利用水资源量变为主要受降水的影响, 降水多, 则可利用水资源量就多。然而, 华北地区降水主要受东亚季风的影响, 为此, 我们利用欧洲中心(ECMWF)1958~2000年再分析资料来分析东亚上空700 hPa风场的年代际变化特征。图9为1958~1965年、1966~1976年和1977~2000年3个时期平均的夏季(6~8月)700 hPa风场距平的分布。1958~1965年(图9a)我国东部沿海一带到中国南海上空有明显的东南风距平, 孟加拉湾上空有明显的西南风距平, 由此造成华北地区上空有明显的偏南风距平; 1966~1976年(图9b)华北地区上空仍然是偏南风距平, 但在我国东部沿海上空出现偏北风距平, 造成南风距平开始减弱; 1977~2000年(图9c)华北出现了明显的偏北风

距平, 我国东部沿海地区出现明显的西风距平, 孟加拉湾上空出现了明显的东北风距平。

上面的分析结果表明: 1965年以前的夏季在华北上空有强偏南风, 将南方及沿海地区大量的暖湿气流输送到华北地区, 这使得华北地区在1965年以前夏季降水偏多; 1966~1976年夏季, 华北地区上空仍然受偏南风控制, 但在我国东部沿海上空出现偏北风, 造成华北地区夏季降水有所减少; 1977~2000年华北地区夏季偏北风明显增强, 这就意味着夏季风减弱了, 使得暖湿气流不容易输送到我国北方, 从而引起华北地区夏季降水减少, 并出现持续性干旱。周连童和黄荣辉^[8]分析了华北地区春季降水在1977~2000年期间偏多是由于夏季风提前到达而造成的。

6 结论和讨论

本研究利用我国测站的降水和气温资料以及ERA-40再分析资料, 分析了华北地区降水、蒸发和降水蒸发差及气温的时空变化特征。分析结果表明: 华北4个区域降水、蒸发和降水蒸发差年代际变化有一定的相似性, 并与华北地区总的变化趋势相同。这4个区域的夏季降水和降水蒸发差1951~1965年偏多; 而1966~1976年相比于1951~1966年开始减少; 1977~2000年相比于1966~1976年严重偏少, 比气候平均值偏少很多。但在1977~2000年5~6月降水或降水蒸发差比前两时期均有所增加, 这与华北地区总的降水、蒸发和降水蒸发差的变化趋势相类似。

4个区域也有一定差异。在华北中南部和胶东半岛, 无论夏季降水或是夏季降水蒸发差均从1965年左右开始减少, 从1977年起进一步明显减少, 而华北西部和京津唐地区降水和降水蒸发差的减少从1977年开始才比较明显; 比较这4个区域1977~2000年与前两时期的降水和降水蒸发差距平的减少幅度, 可以发现, 胶东半岛地区和京津唐地区的夏季降水和降水蒸发差距平在1977~2000年比气候平均偏少的幅度最大。

4个区域的气温变化也有异同点。1951~1965年4个区域夏季气温均高于平均值, 但京津唐地区的春、秋和冬季气温低于平均值; 胶东地区、华北中南部地区和华北西部地区的气温变化相似, 春季气温低于平均值, 秋、冬季接近于平均值。

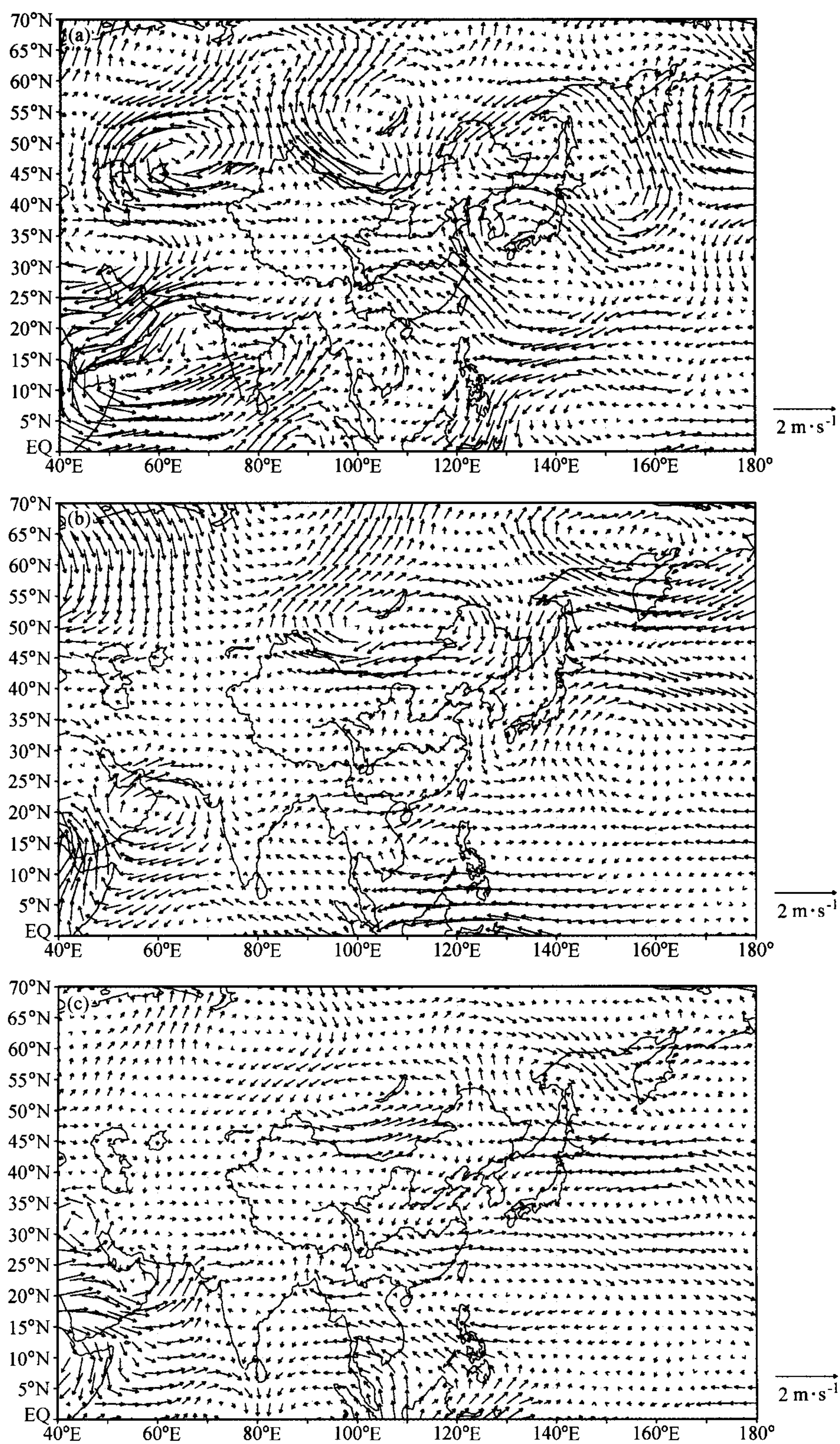


图9 (a) 1958~1965年、(b) 1966~1976年和(c) 1977~2000年平均的夏季(6~8月)700 hPa风场距平分布(取1961~1990年30年各月气候平均值作为正常值)

Fig. 9 Distributions of anomalous wind field at 700 hPa in summer (JJA) averaged for (a) 1958-1965, (b) 1966-1976 and (c) 1977-2000, respectively. The climatological mean of monthly wind field at 700 hPa averaged for 1961-1990 is taken as their normal

1967~1976 年京津唐地区和胶东地区的气温变化相类似,基本全年低于平均值;华北中南部地区和华北西部地区相类似,夏季高于平均值,其他季节低于平均值。1977~2000 年京津唐地区、胶东地区和华北西部地区的温度变化相类似,全年高于平均值,且最大增温在冬季,最小在夏季;而华北中南部地区则夏季低于平均值,其他季节高于平均值,最大增温也在冬季。

本文还从东亚夏季风的年代际变化来探讨华北地区降水和降水蒸发差的时空变化之成因。从夏季环流异常可以发现,1965 年以前的夏季在华北上空有强偏南风,这使得我国华北地区夏季降水偏多;1966~1976 年春季华北地区上空仍然受偏南风控制,但在我国东部沿海上空出现偏北风,造成华北地区夏季降水有所减少;然而到了 1977~2000 年,我国华北地区夏季偏北风明显增强,这意味着夏季风减弱,使得暖湿气流不容易输送到我国北方,从而引起我国华北地区夏季降水减少,也由此造成我国华北地区水资源自 1977 年之后明显减少。

从以上分析可以看到,1977~2000 年由于东亚夏季风的年代际变化,使得华北地区从 1977 年夏季降水发生了年代际的减少,造成了持续性干旱,尤其在胶东地区和京津唐地区夏季降水减少的更为严重,造成华北地区水资源严重缺乏。然而,这两地区又是经济发达地区,工业产值很高,因此,南水北调应优先满足这两个地区的工农业用水,这样可以发挥其工程的最大经济效益。

参考文献 (References)

- [1] 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,1999,18:465~475
Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. The interdecadal variation of summer precipitation in China and the drought trend in North China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, 18: 465~475
- [2] 周连童,黄荣辉.关于中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
- [3] Huang Ronghui, Zhou Liantong, Chen Wen. The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20: 55~69
- [4] 周连童,黄荣辉.中国西北干旱、半干旱区春季地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,2006,11:1~13
Zhou Liantong, Huang Ronghui. Characteristics of interdecadal variability of the difference between surface temperature and surface air-temperature ($T_s - T_a$) in spring in arid and semi-arid region of Northwest China and Its impact on summer precipitation in North China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, 11: 1~13
- [5] 陈烈庭.华北各区夏季降水年代际变化的地域性特征.高原气象,1999,18:477~485
Chen Lieting. Regional features of interannual and interdecadal variations in summer precipitation anomalies over North China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, 18: 477~485
- [6] 张庆云.1880 年以来,华北降水及水资源的变化.高原气象,1999,18:486~495
Zhang Qinyun. The variations of the precipitation and water resources in North China since 1880. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, 18: 486~495
- [7] 宋正山,杨辉,张庆云.华北地区水资源各分量的时空变化特征.高原气象,1999,18:552~566
Song Zhengshan, Yang Hui, Zhang Qingyun. The characteristics of temporal and spatial variation of water resource components over North China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, 18: 552~566
- [8] 周连童,黄荣辉.我国华北地区春季降水的年代际变化特征及其可能成因的探讨.气候与环境研究,2006,11(4)
Zhou Liantong, Huang Ronghui. Research on the characteristics of interdecadal variability of spring climate in China and its possible cause. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, 11 (4)
- [9] Takahashi Koichiro. The estimation mode of evapotranspiration base on monthly temperature and precipitation, *Weather* (in Japanese), 1979, 26: 29~32