

马柱国. 黄河径流量的历史演变规律及成因. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1270 ~ 1275

Ma Z G. Historical regular patterns of the discharge in the Yellow River and the cause of their formation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(6): 1270 ~ 1275

黄河径流量的历史演变规律及成因

马柱国

中国科学院大气物理研究所东亚区域气候 - 环境重点实验室, 中国科学院大气物理研究所东亚中心, 北京 100029

摘 要 基于黄河上、中和下游的径流及气候资料, 对径流的年代际变化规律及与气候变化的关系进行了分析. 结果表明: 黄河流域的径流均存在显著的年代际变化趋势, 径流的显著特征是从 20 世纪 80 年代开始的减少趋势, 但并未达到历史的最低, 径流减少的趋势在下游比上游更显著, 而这种变化趋势与流域的气候变化趋势基本一致, 说明在年代际尺度上, 径流的变化主要受气候的控制; 在不同季节, 这种关系有明显差异, 如在冬季两者的变化趋势有较大差异. 分析还发现, 近年来流域地表的干化是流域径流减少的原因, 气温的升高更加剧了流域地表干化.

关键词 黄河径流, 变化趋势, 湿润指数, 增暖

文章编号 0001 - 5733(2005)06 - 1270 - 06

中图分类号 P467

收稿日期 2004 - 04 - 20, 2005 - 08 - 18 收修定稿

Historical regular patterns of the discharge in the Yellow River and the cause of their formation

MA Zhu-Guo

*Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Chinese Academy of
Sciences, START Regional Center for Temperate East Asia, Beijing 100029, China*

Abstract Based on the data of discharge and climate in the upper reaches, middle reaches and lower reaches of the Yellow River, the interdecade variations of discharge and its relationship with climatic change have been analyzed. The results indicate a notable interdecade trend of discharge, which is consistent with the interdecade variation of climate. It means that the variation of the discharge in Yellow River is basically controlled by climatic change, and the differences of the relationship vary with various seasons. For example, in winter there is a large difference between the discharge and surface water budget. It is noted that there is a notable decreasing trend of discharge since the 1980s, and the decreasing trend in the lower reaches is larger than that in the upper reaches. The results also indicate that the drought of the surface in the basin resulted in the decreasing trend of the discharge, and that the drought of the surface resulted from the increasing temperature and decreasing precipitation.

Keywords Discharge of Yellow River, Trend, Surface humid index, Warming

1 引 言

数值模拟研究表明, 全球增暖背景下中纬度及

干旱和半干旱地区将发生干化^[1~4], 一些诊断事实也揭示了在北半球半干旱区存在的干化现象^[5,6]. 受气候变化和人类活动的影响, 从 20 世纪 70 年代至今, 黄河断流的时间和断流的长度不断增加, 给当地

基金项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX3 - SW - 229)、国家重大基础研究规划项目 (2006CB400504) 和国家自然科学基金项目 (40375028) 共同资助.

作者简介 马柱国, 男, 1963 年生, 研究员, 1999 年于中国科学院大气物理研究所获博士学位, 主要从事全球及区域气候变化研究.

E-mail: mazg@tea.ac.cn

人民的生活和经济发展造成不可估量的损失^[7].引起当前黄河流域径流如此变化的原因大致有三个方面,一是沿黄工农业用水量的增加;二是流域降水的变化,第三是由于区域增暖导致地表温度的上升,从而加强流域的地表蒸发,最终引起流域的径流减少.这是引起黄河流量变化的决定性因素.

随着经济的发展,黄河流域用水量的增加是客观的事实,而流域的地表水文(降水、蒸发、水分收支量和流量等)年代际特征及其相互联系尚不清楚.因此,有必要对流域内的地表水分收支状况、径流的年代际演变规律及相互联系进行详尽的分析.

本文从地表湿润指数入手,研究了流域径流的年代际演变规律及其和地表湿润状况的联系,包括年变化、年代际变化及不同季节变化两者之间的相互关系,并给出了在全球增暖大背景下,区域增暖对黄河流域地表水分收支的可能影响,从资料的诊断分析中揭示了区域增暖和黄河流域地表径流减少相互联系的重要事实.

2 资料和研究方法

径流资料为黄河水利委员会所整编的不同流域的自然径流量资料,气候资料来自于 Tao S Y et al.^[8]整理的历史气候资料,最近的气候资料来自于国家气象局整理的月降水和月平均气温资料.地表湿润指数的定义为

$$w = P - E, \quad (1)$$

其中 w , P , E 分别为地表湿润指数、月降水量和计算的地表实际蒸散,月降水量为实际观测值,用高桥浩一郎的公式计算地表实际蒸散^[9].

3 黄河径流的演变规律

3.1 断流的基本特征

图 1 给出了最近 20 多年的黄河下游利津站断流天数统计.可以看出,20 世纪 90 年代以后,利津站的断流天数急剧增加,其中 1997 年最大断流天数为 226 天,近年来断流天数有急剧增加的趋势,而 90 年代以前,断流天数没有明显的变化趋势.

图 2 给出了不同年份黄河断流开始出现的日期.可以看出,断流日期不断提前^[7],如地处济南市郊的泺口水文站于 1996 年 2 月 14 日就开始断流.从降水量的变化看,黄河下游在该时段没有明显的减弱趋势,而流域的升温却是显著的.从用水量看,

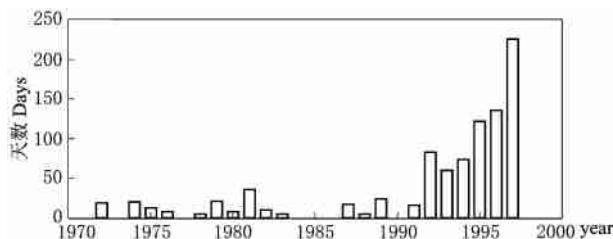


图 1 黄河下游利津站历年断流天数

(根据文献[10]的资料)

Fig. 1 Days of the break-discharge at the Lijin station of the Yellow River's lower reaches (The data is from Ref. [10])

用水量在急剧上升,60 年代以前为 $60 \times 10^8 \text{ m}^3$,70 年代为 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$,80 年代为 $274 \times 10^8 \text{ m}^3$,90 年代为 $298 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[10].应当说,用水量的增加是黄河断流的重要原因,但是,区域增暖的影响所引起的蒸散增加也是不容忽视的,此问题将在第 5 节中讨论.

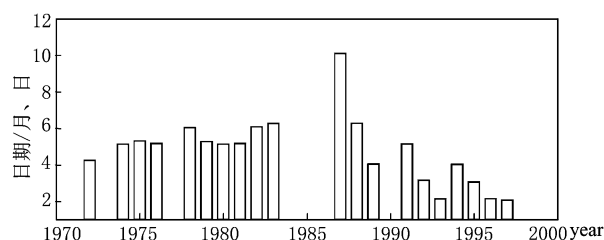


图 2 黄河断流最早出现时间统计(资料来自于文献[7])

Fig. 2 Start times of the break-discharge of the Yellow River

(The data is from Ref. [7])

3.2 径流的年际及年代际演变规律

图 3 为黄河上游和中游的代表站兰州、花园口近 80 年来径流的变化曲线.可以看出,黄河径流存在一个 2~4 年的丰枯交替的周期变化,在 20 世纪 90 年代以前,黄河径流有一个微弱的增加趋势,而 90 年代以后,有一个明显减小的趋势,但还没有达到历史的最低点 1928 年的水平.从图 4 的功率谱分析可以看出,最大功率谱所对应的周期是 2.9 年,其次为 3.1 年,其中兰州站的 2.9 年周期可通过 99% 的信度检验,3.1 年可通过 95% 的信度检验;花园口站 3 年左右周期能通过 95% 的信度检验,所以大约 3 年的周期变化是黄河径流的主周期变化.

4 流域的地表湿润状况和径流的关系

4.1 不同季节的相互联系

为了客观地给出流域径流和地表湿润指数的关系,本文把流域分为 3 个小流域,对不同小流域的湿润指数进行区域平均,然后分析区域平均的湿润指

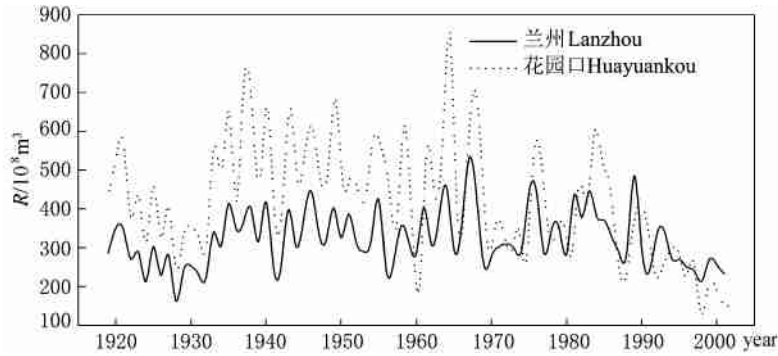
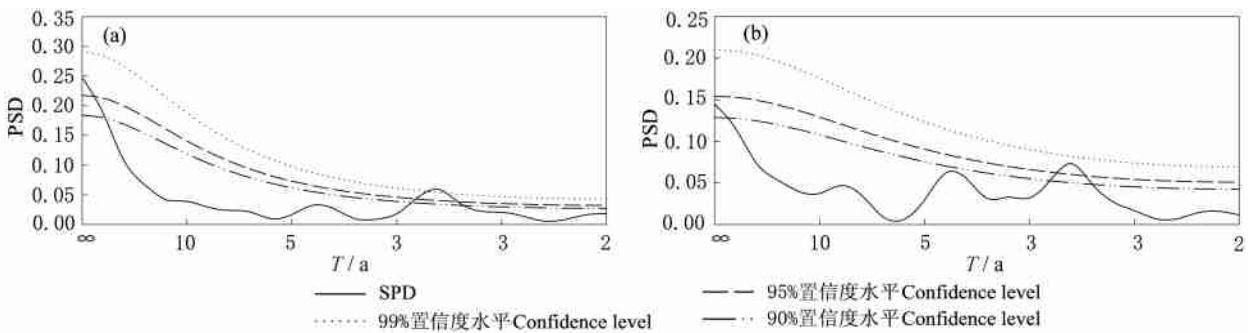


图3 兰州、花园口径流的变化

Fig. 3 Variations of the discharge at the Lanzhou and Huayankou stations of the Yellow River catchment

图4 兰州(a)和花园口(b)径流的功率谱分析(T 为周期)Fig. 4 Power spectrum of the discharge at (a) Lanzhou and (b) Huayankou stations of the Yellow River catchment (T is the period)

数和径流的相互关系。

图5为逐季上游的代表站兰州和中游代表站花园口径流和流域平均湿润指数9年滑动的变化曲线。可以看出,在上游,地表湿润指数和径流的变化关系一致性较差,特别在冬季,湿润指数近80年来有一个微弱的减小趋势,然而,流域的径流却有一个微弱的增加趋势,和地表湿润指数没有明显的对应关系。相关分析表明,兰州站的流量和流域的湿润指数的逐季相关系数分别为:冬季 - 0.25,春季 0.81;夏季 - 0.098;秋季 - 0.025。可以看出,春季径流和湿润指数的相关性最好,这可能与春季的降水变化及温度升高所产生的融冰化雪有关。黄河上游径流的产生极其复杂,既有积雪和冰融化所产生的径流,又有降水变化的直接影响,目前对黄河上游各种产流因子在径流变化中的相对贡献尚不清楚,有待于进一步的深入研究。分析还可发现,两者的极端值有一个滞后的对应关系,一般地表湿润指数的变化超前径流变化2~5年不等。在中游,径流和地表湿润指数的变化有很好的一致性,但各个季节略有不同,冬季的相关系数较小,仅为0.17,春季的相关性最好,相关系数达到0.92,其次为秋季达到0.68,夏季为0.61。为什么上游的地表湿润指数和径流的变化

关系不好而中游的关系好?这个原因可能归结于两个流域不同的气候状况。在上游,径流的来源除依靠降水外,冰雪的融化也是径流的重要来源,所以除地表的湿润状况外,气温的高低也是一个影响因素,它直接关系到融冰化雪的多少,导致径流的变化。而在中游地区,径流除来自于上游外,本流域的产流也非常重要,可以说由降水所产生的径流是该流域径流变化的主要原因,而中游流域的融冰化雪由于量少而对径流变化的相对贡献小于上游,因而径流变化与地表的湿润状况关系相对密切,这就导致了在中游地区,除冬季外,其他季节流域的径流和地表湿润指数的变化一致。

4.2 年代际变化的相互联系

图6为上、中、下游三个次流域平均的年湿润指数和径流的变化曲线,为了清楚地表征它们之间年代际特征的对应关系,本文对原时间序列各自进行9年的滑动平均。由图可见,在上游和中游,地表湿润指数和径流都有着非常一致的对应关系;而在下游,20世纪80年代中期以后,尽管地表湿润指数有一个弱上升(地表变湿)的趋势,但利津站的径流却仍然呈现减小的趋势,原因可能与水的利用增加有关。本文也给出了三个流域代表站的年径流和流域

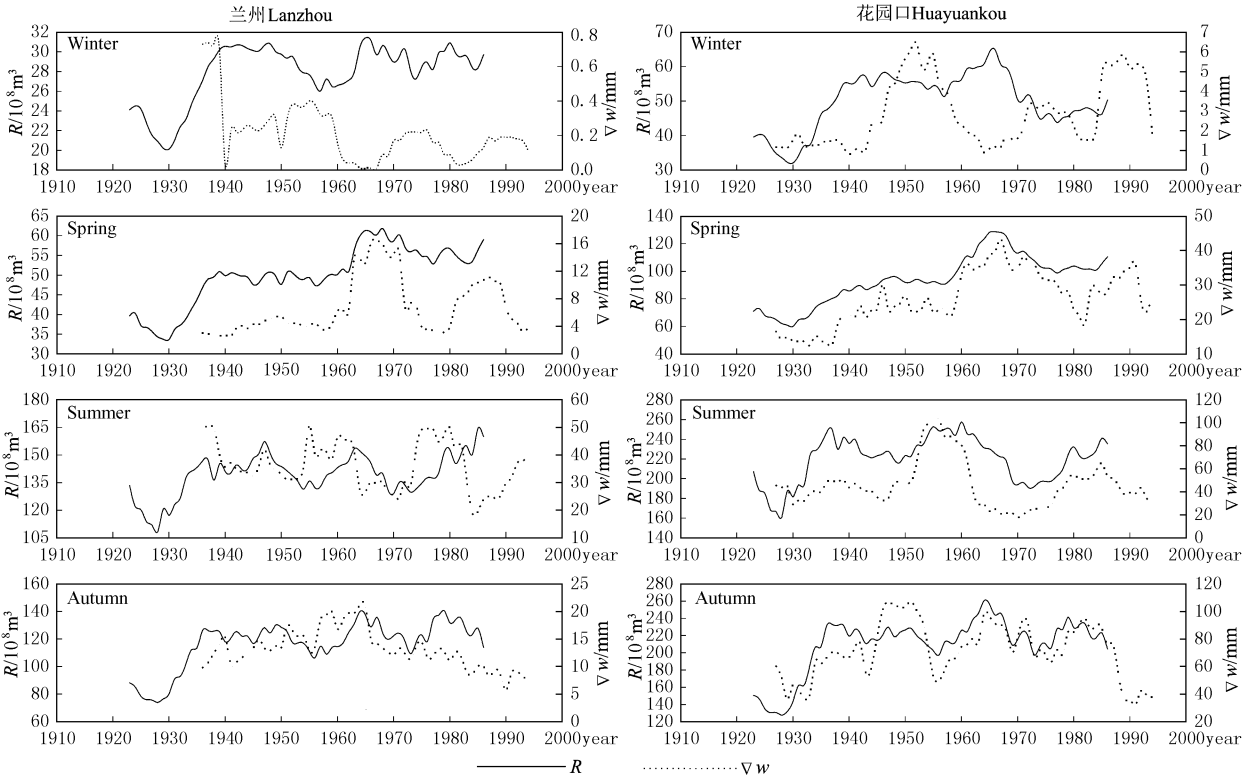


图 5 兰州和花园口径流和流域平均湿润指数 9 年滑动的变化曲线
Fig. 5 Variations of the 9-year running discharge and surface humid index at Lanzhou and Huayankou stations of the Yellow River catchment in different seasons

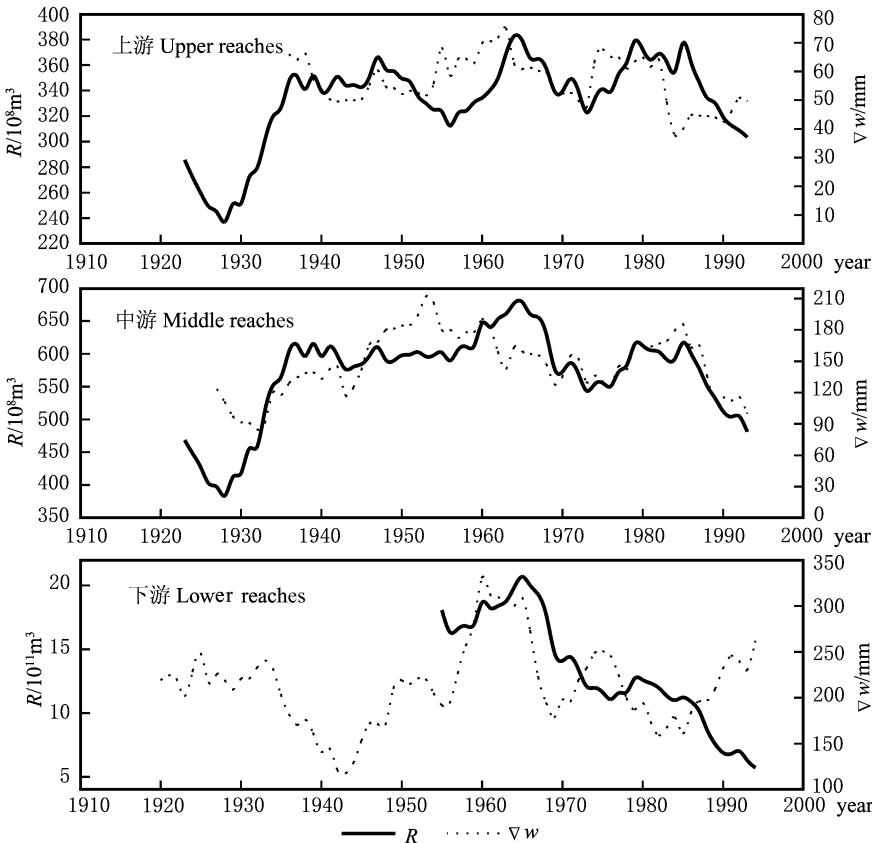


图 6 三个次流域平均的年湿润指数和径流的变化曲线
Fig. 6 Variations of the 9-year running annual discharge and surface humid index (SHI) in the three sub-catchments

年地表湿润指数的相关系数,结果发现:从上游到下游,两者的相关系数依次增大,分别为 $R_{\text{上}} = 0.19$, $R_{\text{中}} = 0.25$, $R_{\text{下}} = 0.63$. 说明在年代际尺度上,黄河的径流量还主要由降水和地表的湿润状况决定.

5 与区域增暖的关系

前面的分析说明,黄河径流和地表湿润指数的变化在年代际尺度上有密切的关系. 从地表湿润指数的定义可知,除降水外,气温是影响地表干湿状况的另一个重要因素. 本文希望通过分析温度和蒸发及降水的关系来试图揭示区域增暖和地表径流年际变化相互联系的事实.

图 7 为三个流域 $P - E$ 和近 50 年来的 9 年滑动变化曲线. 从图 7 可以发现,三个流域湿润指数均呈现减小趋势,按上、中、下游的顺序,减弱的强度依次增大,说明近 50 年来地表的干化也是黄河流域来水量减少的一个原因. 对比降水可以发现,黄河上游的降水并无明显的减小趋势,其余两个流域的降水都从 60 年代以后呈现明显的减小趋势(图略),而三个流域都存在显著的增温趋势,经计算,三个流域的线性增温幅度分别为上游 0.6°C , 中游 1.0°C , 下游 1.4°C , 增温的强度下游最大. 本文也给出了三个流域蒸发的变化趋势,上、下游的蒸发有明显的增加趋势,上游的增加量为 20mm 左右,下游为 40mm 左右,下游蒸发增加的强度大的原因是流域的增温的强度大,所不同的是,中游蒸发的总趋势是减小,原因可能是地表的水分供应不足所致. 可以看出,区域增暖对黄河流域的径流变化有非常重要的影响,流域地表的干化与流域的增温也有密切的联系,在三个流域两者的相关系数分别为:上游 -0.61 , 中游 -0.66 , 下游 -0.73 . 径流变化是大气、土壤、地表水文及人类活动等多种因素的相互作用的结果,对这个问题的深入研究需要多学科的相互渗透及交叉.

6 总结与讨论

控制黄河径流的变化有两个主要因素,一个是由气候变化决定的自然因素,另一个是人类活动(水的利用)的影响. 由于目前的气候变化受人类活动影响已经成为不容怀疑的事实,因此,影响黄河径流量的气候变化也包含有人类活动的因素. 到目前为止,还没有一个可信的方法来客观地区分气候变化的自

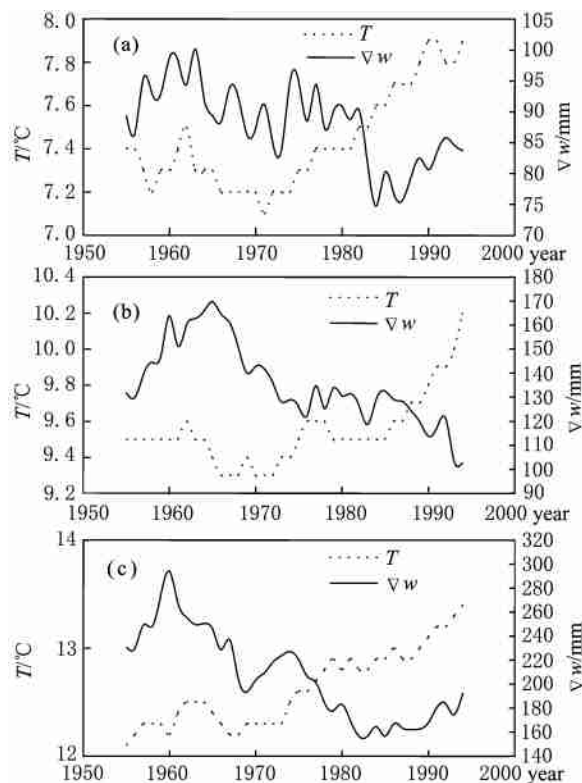


图 7 近 50 年来三个流域湿润指数 ($P - E$) 和气温的变化
(a) 上游; (b) 中游; (c) 下游.

Fig. 7 Variations of 9-year running surface humid index ($P - E$) and surface air temperature in (a) the lower, (b) middle and (c) upper reaches in the last 50 years

然过程和人类影响,所以对黄河径流变化的研究是一个非常复杂的科学问题.

本文是从基本的资料出发,揭示了不同流域地表的湿润状况和流域径流变化的关系,从降水、蒸发、气温变化的角度讨论了区域增暖对径流变化的可能影响. 概括起来可得如下几点结论:

(1) 断流时间提前、断流长度逐年增加、断流时间增长是黄河径流的显著特征,除人类用水量的增加外,黄河流域地表干旱化也是影响黄河径流减少的一个重要原因.

(2) 在黄河上游,除春季外,其他季节地表的湿润状况与径流变化关系不显著;在中游,除冬季外,其他季节两者存在明显的相关关系. 值得注意的是无论在上游或中游,春季两者的相关系数都是全年最大的.

(3) 黄河流域目前正处在一个显著的增暖时段,区域增暖导致流域的蒸发明显增加,这是流域地表干旱化的主要原因之一,另一个原因就是流域降水的普遍减少.

参考文献 (References)

- [1] Manabe S, Wetherald R T, Stouffer R J. Summer dryness due to an increase of atmospheric CO₂ concentration. *Climate Change*, 1981, **3** (4) : 336 ~ 376
- [2] Manabe S, Wetherald R T. Large scale changes of soil wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987, **44** : 1211 ~ 1235
- [3] Wetherald R T, Manabe S. Detectability of summer dryness caused by greenhouse warming. *Climatic Change*, 1999, **43** : 495 ~ 511
- [4] Wetherald R T, Manabe S. Simulation of hydrologic changes associated with global warming. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107** (D19) : 4379 ~ 4702
- [5] Dai A G, Trenberth K T, Qian T T. A global dataset of Palmer drought severity index for 1870 - 2002 : relationship with soil moisture and effects of surface warming. *J. of Hydrometeor.*, 2004, **5** : 1117 ~ 1130
- [6] Ma Z G, Fu C B. Interannual characteristics of the surface hydrological variables over the arid and semi-arid areas of northern China. *Global and Planetary Change*, 2003, **37** : 189 ~ 200
- [7] 程进豪, 王维美, 王 华等. 黄河断流问题分析. *水利学报*, 1998, **5** : 75 ~ 79
- Cheng J H, Wang W M, Wang H, et al. The problem of the discharge interruptions of Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering* (in Chinese), 1998, **5** : 75 ~ 79
- [8] Tao S Y, Fu C B, Zeng Z M, et al. Two long-term instrumental climatic data bases of the People 's Republic of China. In: Kaiser D P Ed. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U. S. A, 1991. 1 ~ 82
- [9] 高桥浩一郎. 从月平均气温、月降水量来推算蒸发量的公式. *天气(日)*, 1979, **26** (12) : 29 ~ 32
- Koichiro T. Estimate of evapotranspiration based on monthly temperature and precipitation. *Weather* (in Japanese), 1979, **26** (12) : 29 ~ 32
- [10] 叶青超. 黄河断流对三角洲环境的恶性影响. *地理学报*, 1998, **53** (5) : 385 ~ 392
- Ye Q C. Flow interruptions and their environmental impact on the Yellow River delta. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1998, **53** (5) : 385 ~ 392