

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2010.06.001

气候变化和人类活动对老哈河流域径流的影响

江善虎¹, 任立良¹, 雍 斌¹, 杨肖丽¹, 刘晓帆²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 四川省交通厅交通勘察设计研究院, 四川 成都 610017)

摘要 通过趋势及突变检验将径流序列划分为“天然基准期”和“人类活动影响期”, 依据径流对降水及潜在蒸发的敏感性, 定量分析了我国北方老哈河流域气候变化和人类活动对径流的影响。结果表明: 1964 年以来, 老哈河流域径流呈显著减少趋势, 其变化倾向率为 -0.47 mm/a , 流域径流受气候变化和人类活动双重影响, 其中人类活动对径流起减少作用, 在 20 世纪八九十年代及 2000—2008 年人类活动对径流深的减少量分别为 10.9 mm、6.3 mm 及 17.9 mm, 气候变化对径流在 80 年代和 2000—2008 年起减少作用, 减少量分别为 10.0 mm 和 8.5 mm, 而 90 年代气候变化对径流起增加作用, 增加量为 12.4 mm。

关键词 气候变化; 人类活动; 径流变化; 老哈河流域

中图分类号: P339 文献标识码: A 文章编号: 1004-6933(2010)06-0001-04

The effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe River Basin in Northern China

JIANG Shan-hu¹, REN Li-liang¹, YONG Bin¹, YANG Xiao-li¹, LIU Xiao-fan²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Communication Survey and Design Institute, Communication Department of Sichuan Province, Chengdu 610017, China)

Abstract: The runoff series was divided into a “natural period” and a “human-induced period” according to the trend and mutation test. Based on the sensitivity of runoff to precipitation and potential evapotranspiration, the effects of climate variability and human activities on runoff were analyzed quantitatively for the Laohahe River Basin in the northern part of China. The results showed that the runoff in the Laohahe River Basin has had a significant decreasing tendency since 1964, and the tendency rate was $-0.47 \text{ mm per year}$. Human activities were the main cause of the runoff reduction. The reductions due to human activities for the periods of 1980-1989, 1990-1999, and 2000-2008 were 10.9 mm, 6.3 mm, and 17.9 mm, respectively. The reductions due to climate variation for the periods of 1980-1989 and 2000-2008 were 10.0 mm, and 8.5 mm respectively, while the runoff increased 12.4 mm during the period of 1990-1999.

Key words: climate change; human activities; runoff change; Laohahe River Basin

流域径流变化受气候变化和人类活动双重影响。20 世纪 70 年代以来, 由于人类活动对流域水循环干预越来越强以及全球气温的不断增暖, 我国的水资源短缺问题日益突出, 出现了大量河流断流现象^[1-2], 尤其在北方干旱半干旱地区, 径流对气候

变化及人类活动更为敏感, 20 世纪 50 年代以来我国北方河川径流都存在一定的减小趋势^[3]。水资源短缺不仅影响国民经济的发展, 而且导致流域一系列严重的生态环境问题^[4]。定量研究变化情景下气候变化和人类活动对径流的影响, 对于流域水资源

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973 计划)(2006CB400502); 国家青年基金(40901017); 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室学术创新团队项目(2009585412); 中央高校基本科研业务费专项(2010B13614, 2009B11614)

作者简介: 江善虎(1983—), 男, 安徽安庆人, 博士研究生, 主要研究方向为流域水文过程模拟。E-mail: hsk0216@yahoo.cn

管理以及环境综合治理具有重要的实际意义。笔者通过趋势及突变检验将流域径流序列划分为“天然基准期”和“人类活动影响期”^[5]。根据流域径流对降水及潜在蒸发的敏感性,定量区分了我国北方老哈河流域气候变化和人类活动对径流的影响。

1 研究区概况

如图 1 所示,老哈河流域位于东北、华北地区,属西辽河支流,流域地跨河北、辽宁两省和内蒙古自治区,位于北纬 41.0°~42.5°,东经 117.0°~119.5°,海拔 405~1935 m,兴隆坡水文站控制的集水面积为 18 112 km²。流域属中温带半干旱大陆性季风气候,其中下游干燥少雨多风沙,1964—2008 年多年平均降水量约为 425 mm^[6]。

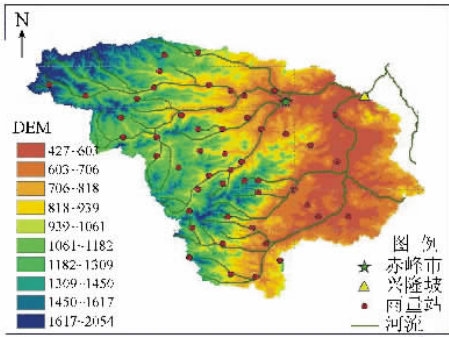


图 1 老哈河流域地理位置及雨量站、水文站空间分布

2 研究资料与方法

2.1 资料

选用老哈河流域兴隆坡水文站 1964—2008 年逐日径流资料以及流域 52 个雨量站逐日降水资料,采用反距离加权法(IDW)将点雨量插值到流域面上分布,进而计算得流域逐日降雨量,流域潜在蒸发采用世界粮农组织(FAO)1998 年修订的 Penman-Monteith 模型计算^[7],模型所需要的日平均气温、日最高气温、日最低气温、日照时数等气象观测资料来源于老哈河流域及临近的 4 个气象站点(赤峰、围场、建平和承德)。

土地覆被资料采用美国马里兰大学全球 1 km 土地覆被资料(University of Maryland's 1 km global land cover data),空间分辨率为 30"。统计得老哈河流域主要植被:草原占 39.5%,耕地占 35.6%,林地草原占 12.8%。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势及突变检验

Mann-Kendall 秩次相关检验(以下简称 MK 趋势检验)是一种非参数统计检验,能够准确检验序列的

变化趋势情况^[8]。样本序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 当样本长度 $n > 10$ 时,正态 Z 检验统计量计算如下:

$$Z = \begin{cases} (S - 1) / \sqrt{\text{Var}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S + 1) / \sqrt{\text{Var}(S)} & S < 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} +1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Var}(S) = [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)] / 18 \quad (4)$$

式中 x_i, x_j 分别为第 i, j 年对应的样本值; S 为检验统计量; $\text{Var}(S)$ 为 S 的方差; q 为约束组的数量; t_p 为第 p 个约束组内数据个数。

当 $|Z| > Z_{(1-\alpha/2)}$ 时,即数据序列存在 α 显著水平下的变化趋势,其中 $Z_{(1-\alpha/2)}$ 是标准正态分布中值为 $1 - \alpha/2$ 时对应的统计值; $Z > 0$ 表示序列存在上升趋势, $Z < 0$ 表示序列存在下降趋势。

有序聚类(OC)方法通过同类之间的离差平方和最小,类与类之间的离差平方和相对较大,推求最优分割点,能寻找水文序列可能的显著干扰点 τ_0 ^[9]。对序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 设可能分割点为 τ , 则分割前后样本离差平方和及总离差平方和表示为:

$$\begin{cases} V_\tau = \sum_{t=1}^{\tau} (x_t - \bar{x}_\tau)^2 \\ V_{n-\tau} = \sum_{t=\tau+1}^n (x_t - \bar{x}_{n-\tau})^2 \end{cases} \quad (5)$$

$$S_n(\tau) = V_\tau + V_{n-\tau} \quad (6)$$

式中 $\bar{x}_\tau, \bar{x}_{n-\tau}$ 分别为干扰点分割前后样本的均值; $V_\tau, V_{n-\tau}$ 分别为干扰点分割前后样本的离差平方和; $S_n(\tau)$ 为总离差平方和。

τ_0 通过(7)式计算获得:

$$S_n(\tau_0) = \min_{2 \leq \tau \leq n-1} \{S_n(\tau)\} \quad (7)$$

降雨-径流双累计曲线能够直观表示流域降雨、径流变化的一致性情况,通常为一条直线,当曲线发生偏移,则表示流域的降雨径流特性发生了变化^[10]。笔者将其用来辅助分析流域径流的变化情况。

2.2.2 定量计算

将流域径流变化分割为气候变化和人类活动影响两部分,且流域径流变化可通过受人类活动影响时期实测径流量与流域天然基准期实测流量的差值

计算^[11]：

$$\Delta Q_t = \Delta Q_c + \Delta Q_h \quad (8)$$

$$\Delta Q_t = Q_v - Q_b \quad (9)$$

式中： ΔQ_t 为流域径流变化量； ΔQ_c 、 ΔQ_h 分别为气候变化和人类活动的影响量； Q_v 、 Q_b 分别为流域受人类活动影响时期及天然基准期实测流量。

气候变化对径流的影响主要表现在降水及潜在蒸发变化对径流的影响，通过分析径流对降水及潜在蒸发的敏感性，可定量计算出气候变化对径流的影响，计算过程如下^[12]：

水量平衡是水文循环遵循的基本定律，流域水量平衡可表示为：

$$P = E + Q + \Delta S \quad (10)$$

式中： P 为流域降水量； E 为实际蒸发量； Q 为径流深； ΔS 为流域蓄水容量变化，对于长时间序列来讲 $\Delta S = 0$ 。

年实际蒸发可根据降水及潜在蒸发通过式(11)计算^[13]：

$$\frac{E}{P} = \frac{1 + wx}{1 + wx + x^{-1}} \quad (11)$$

其中

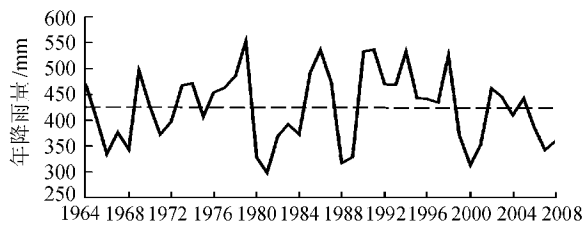
$$x = \frac{E_0}{P}$$

式中： E_0 为潜在蒸发量； w 为待定参数，依据老哈河流域土地覆被情况，参照文献[12-13]，取 $w = 0.5$ ； x 为干旱指数。

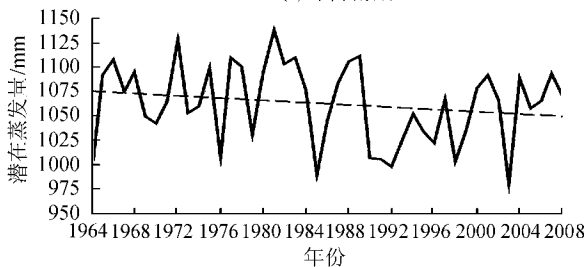
根据径流对降水及潜在蒸发的敏感性，可计算气候变化对径流的影响为^[13-15]：

$$\Delta Q_c = \frac{\partial Q}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial Q}{\partial E_0} \Delta E_0 \quad (12)$$

式中： ΔP 、 ΔE_0 分别为降水、潜在蒸发较基准期的变



(a) 年降雨量



(c) 潜在蒸发量

化值 $\frac{\partial Q}{\partial P}$ 、 $\frac{\partial Q}{\partial E_0}$ 分别为径流对降水及潜在蒸发的敏感性系数，计算公式为：

$$\frac{\partial Q}{\partial P} = \frac{1 + 2x + 3wx}{(1 + x + wx^2)^2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial E_0} = -\frac{1 + 2wx}{(1 + x + wx^2)^2} \quad (14)$$

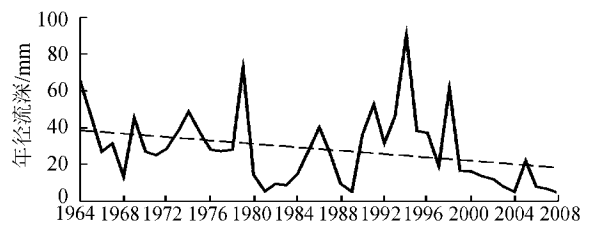
3 降水及径流的趋势及突变分析

流域多年降水、潜在蒸发、径流过程线以及降雨-径流双累计曲线如图2所示，表1为流域多年降水量、潜在蒸发量、径流深的趋势及突变检验结果。从图2和表1中可以看出：老哈河流域降水量变化较为平缓，呈现较小的下降趋势，没有明显的突变现象，其变化率为 0.05 mm/a ；流域径流深有较明显的减小趋势，其变化率为 -0.47 m/a ，尤其是20世纪80年代和进入21世纪后流域径流深偏小；潜在蒸发量也呈现一定的下降趋势，其变化率为 -0.58 mm/a ，变化不明显。由OC突变检验可知流域径流在1979、1998年发生突变。

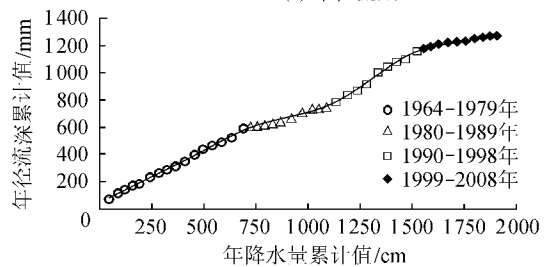
表1 年降雨、径流和潜在蒸发趋势及突变检验

要素	多年均值/mm	变化率/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	MK 趋势检验		OC 突变点 (年份)
			Z	显著性	
降水量	424.0	-0.05	-0.42		
潜在蒸发量	1062.3	-0.58	-0.99		
径流深	28.3	-0.47	-2.89	0.004	1979, 1998

从图2(d)中可以看出1964—1979年流域降雨、径流变化趋势较为一致，1980年发生了第一次偏移，其后1989、1998年又分别发生了偏移，与OC检验的结果较为一致。根据流域降雨-径流双累计曲线以及OC突变检验，确定1964—1979年为流域的



(b) 年径流量



(d) 降雨-径流深双累计曲线

图2 流域1964—2008年降雨、径流、潜在蒸发过程线及降雨-径流双累计曲线

“天然基准期”,而 1980—1989、1990—1999、2000—2008 年为“人类活动影响阶段”。“天然基准期”及“人类活动影响阶段”的划分使定量分析气候变化和人类活动对径流的影响成为可能。

4 气候变化和人类活动对径流的影响分析

表 2 为老哈河流域气候变化和人类活动对径流的影响定量分析结果,从表 2 可以看出:20 世纪 80 年代老哈河流域径流处在一个枯水期,径流较基准期减少了 20.9 mm,其中气候变化导致径流深减少量为 10.0 mm,人类活动对径流深的减少量为 10.9 mm;90 年代流域降水较为丰沛,较基准期增加了 43.1 mm,潜在蒸发量较基准期减少了 44.5 mm,流域径流较基准期增加了 6.1 mm,期间气候变化对径流深增加量为 12.4 mm,人类活动对径流深的减少量为 6.3 mm;进入 21 世纪,老哈河流域径流处在一个严重的枯水期,人类活动对流域径流深的影响不断加剧,导致 2000—2008 年流域平均径流深较基准期减少了 26.3 mm,其中人类活动对径流深的减少量达到 17.9 mm,气候变化作用对径流深的减少量为 8.5 mm。从表 2 可以看出,20 世纪 80 年代以来,老哈河流域人类活动对径流的影响都较为剧烈,1980—2008 年人类活动对径流深的减少量为 11.5 mm,尤其在进入 21 世纪后,由于人类活动所引起的流域径流减少、水资源短缺问题更加突出。

表 2 气候变化及人类活动对径流影响的定量分析结果

时段	P	E_0	Q	Q_t	Q_c	Q_h
1964—1979 年	432.3	1069.3	36.9			
1980—1989 年	390.6	1085.7	16.0	-20.9	-10.0	-10.9
1990—1999 年	475.4	1024.8	43.0	6.1	12.4	-6.3
2000—2008 年	390.2	1065.6	10.5	-26.3	-8.5	-17.9
1980—2008 年	419.7	1058.5	23.6	-13.3	-1.8	-11.5

老哈河流域属资源型缺水地区,20 世纪 80 年代以来随着流域内赤峰等城市及地区经济的发展,农业生产规模的不断扩大和人口的不断增加,人类生产生活耗水不断加大,人类活动对流域径流的影响不断加剧。

5 结 论

利用 MK 趋势检验、OC 方法及流域降雨-径流双累计曲线,分析老哈河流域年降水、潜在蒸发及径流的变化趋势及突变情况,将流域径流划分为 1964—1979 年“天然基准期”以及 1980—1989、1990—1999、2000—2008 年 3 个“人类活动影响期”,根据流域径流对降水及潜在蒸发的敏感性,通过式(8)~(14)定量计算了老哈河流域气候变化和人类

活动对径流的影响,主要结论如下:

a. 老哈河流域年径流呈现逐年显著减小趋势,其变化率为 -0.47 mm/a ,1979、1998 年流域径流存在突变现象;1980—1989 年及 2000—2008 年流域径流处在一个枯水期,径流较基准期减少量分别为 20.9 mm 及 26.3 mm。

b. 老哈河流域径流变化受气候变化和人类活动双重影响,其中人类活动作用占主导地位,1980—1989 年、1990—1999 年及 2000—2008 年 3 个阶段人类活动导致径流深减少量分别为 10.9 mm、6.3 mm 和 17.9 mm。该流域在 2000 年之后人类活动对径流的影响最为剧烈;气候变化在 1980—1989 年及 2000—2008 年对径流深的减少量分别为 10.0 mm 和 8.5 mm,而在 1990—1999 年对径流深的增加量为 12.4 mm。

c. 老哈河流域的人类活动较大程度上决定了流域径流的变化趋势。流域地处半干旱资源型缺水地区,水资源成为制约该地区发展的战略资源。针对流域径流的变化情势及影响因素制定合理的水资源管理政策,防止河道断流发生,成为当前亟待解决的问题。

参考文献:

- [1] 许炯心,孙季.近 50 年来降水变化和人类活动对黄河入海径流通量的影响[J].水科学进展,2003,14(6):690-695.
- [2] 张建云,章四龙,王金星,等.近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J].水科学进展,2007,18(2):230-234.
- [3] 袁飞,谢正辉,任立良,等.气候变化对海河流域水文特性的影响[J].水利学报,2005,36(3):274-279.
- [4] REN Li-liang, WANG Mei-rong, LI Chun-hong, et al. Impacts of human activity on river runoff in the northern area of China[J]. Journal of Hydrology, 2002, 261: 204-217.
- [5] 王国庆.气候变化对黄河中游水文水资源影响关键问题研究[D].南京:河海大学,2006.
- [6] 江善虎,任立良,雍斌,等.老哈河流域降水变化特征分析[J].水电能源科学,2009,27(1):1-4.
- [7] Food and Agriculture Organization of the United Nation. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements [M]. Rome: Food & Agriculture Org, 1998.
- [8] ZHANG Qiang, XU Cong-yu, YANG Tao. Variability of water resource in the Yellow River Basin of past 50 years, China[J]. Water Resour Manage, 2009, 23: 1157-1170.
- [9] WANG Guo-sheng, XIA Jun, CHEN Ji. Quantification of effects of climate variations and human activities on runoff by a monthly water balance model: a case study of the Chaobai River basin in northern China[J]. Water Resources Research, 2009, 45, W00A11, doi: 10.1029/2007WR006768.

(下转第 15 页)

- 2009-2-19(1).
- [2] 白利平,王业耀.地下水脆弱性评价研究综述[J].工程勘察 2009(4) :43-48.
- [3] BAKALOWICZ M. Karst groundwater : a challenge for new resources[J]. Hydrogeol J 2005 ,13(1) :148-160.
- [4] 章程,蒋勇军, MICHÈLE L,等.岩溶地下水脆弱性评价“二元法”及其在重庆金佛山的应用[J].中国岩溶 2007 ,26(4) :334-340.
- [5] 邹胜章,张文慧,梁彬,等.西南岩溶区表层岩溶带水脆弱性评价指标体系的探讨[J].地学前缘 2005 ,12(特刊) :152-158.
- [6] US Environmental Protection Agency. DRASTIC : a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting[R]. Oklahoma : EPA ,1985.
- [7] International Association of Hydrogeologists. Guidebook on mapping groundwater vulnerability[R]. Hannover :IAH ,1994.
- [8] USNRC. Groundwater Vulnerability Assessment [M]. Washington D C : National Academy Press ,1993.
- [9] 李大秋,邓春凯,刘新华,等.地下水脆弱性评价方法研究[J].环境保护科学 2007 33(5) :64-67.
- [10] European Commission. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate aquifers : final report COST action 620 [R]. Brussels :EC 2004.
- [11] WHITE W B. Geomorphology and hydrology of karst terrains [M]. New York : Oxford University Press ,1988 464-465.
- [12] 袁道先,中国岩溶学[M].北京 :地质出版社 ,1993 :1.
- [13] FORD D C ,WILLIAMS P W. Karst geomorphology and hydrology[M]. London :Chapman and Hall ,1989 601.
- [14] WILLIAMS P W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology[J]. Journal of hydrology ,1983 61 :45-67.
- [15] BENISCHKE R ,GOLDSCHIEDER N ,SMART C. Methods in karst hydrogeology[M]. London :International Contributions to Hydrogeology 2007.
- [16] 章程,袁道先,李强,等.典型表层岩溶动力系统的环 境敏感性研究[J].水文地质工程地质 2005(1) :78-80.
- [17] CUCCHI F ,FORTI P ,ZINI L. The vulnerability of complex karst hydrostructures : problems and perspectives[J]. Geofisica International 2004 43(4) :533-540.
- [18] GOGU R C ,HALLET V ,DASSARGUES A. Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques ,application to the Ne 'blon river basin (Belgium) [J]. Environ Geol ,2003 ,44 (8) 881-892.
- [19] DOERFLIGER N ,JEANNIN P Y ,ZWAHLEN F. Water vulnerability assessment in karst environments : a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools(EPIK method) [J]. Environ Geol 1999 ,33(2) :165-176.
- [20] DALY D ,DASSARGUES A ,DREW D ,et al. Main concepts of the European approach for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping[J]. Hydrogeol J 2002 ,10 :340-345.
- [21] GOLDSCHIEDER N ,KLUTE M ,STURM S ,et al. The PI method : a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers[J]. Angew Geol 2000 46(3) :157-166.
- [22] RAVBAR N ,GOLDSCHIEDER N. Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment[J]. Hydrogeol J 2009 ,17 :725-733.
- [23] NGUYET V T M ,GOLDSCHIEDER N. A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk ,and its first application in a tropical karst area ,Vietnam[J]. Hydrogeol J 2006 ,14 :1666-1675.
- [24] RAVBAR N. Vulnerability and risk mapping for the protection of karst waters in Slovenia : application to the catchment of the Podstenjšek springs[D]. Slovenia : University of Nova Gorica , 2007.
- [25] GOGU R C ,DASSARGUES A. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods[J]. Environ Geol ,2000 ,39(6) :549-559.
- [26] NEUKUM C ,HÖTZL H ,HIMMELSBACH T. Validation of vulnerability mapping methods by field investigations and numerical modeling[J]. Hydrogeol J 2008 ,16(4) 641-658.
- [27] KRALIK M ,KEIMEL T. Time-input ,an innovative groundwater vulnerability assessment scheme : application to an alpine test site[J]. Environ Geol 2003 44(6) 679-686.
- (收稿日期 2009-12-15 编辑 徐 娟)
- +++++
- (上接第 4 页)
- [10] 粟晓玲,康绍忠,魏晓妹,等.气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响[J].西北农林科技大学学报 ,2007 35(2) :153-159.
- [11] 王国庆,张建云,贺瑞敏.环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J].水科学进展 ,2006 ,17(6) :853-858.
- [12] ZHANG Lu ,DAWES W R ,WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. Water Resources Research 2001 37 :701-708.
- [13] VIVEK K A. The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff[J]. Journal of Hydrology , 2002 265 :164-177.
- [14] LI Li-juan ,ZHANG Lu ,WANG Hao ,et al. Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding river basin in China[J]. Hydrological Processes , 2007 21 :3485-3491.
- [15] MA Zhen-ma ,KANG Shao-zhong ,ZHANG Lu ,et al. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China [J]. Journal of Hydrology 2008 352 :239-249.
- (收稿日期 2010-03-10 编辑 徐 娟)