

黄土塬区气候变化和人类活动对径流的影响

李志^{1,*}, 刘文兆², 郑粉莉², 胡宏昌³

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;
3. 兰州大学资源环境学院, 甘肃兰州 730000)

摘要:以黄土高原沟壑区的黑河流域(泾河支流)为研究区域, 基于 Mann-Kendall 和双累积曲线等方法分离了 1972–2000 年气候变化和人类活动对径流的影响。结果表明, 黑河流域气候趋向暖干而径流减少; 以径流突变年份为界将研究时段分为两段(1972–1992 年和 1993–2000 年), 后段较前段降水减少 75.4 mm、温度升高 0.5 °C, 而径流减少 29 mm。气候变化和人类活动均导致黑河径流减少, 但贡献率不同, 分别为 24% 和 76%。人类活动是导致黑河径流减少的主要驱动力, 但气候变化的影响也不容忽视, 在进行生态建设和水资源管理时应予以充分考虑。

关键词:黄土高原; 气候变化; 人类活动; 水文效应

The impacts of climate change and human activities on river flow in the Loess Tableland of China

LI Zhi^{1,*}, LIU Wenzhao², ZHENG Fenli², HU Hongchang³

1 College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling Shaanxi 712100, China

3 Resource and Environment College, Lanzhou University, Lanzhou Gansu 730000, China

Abstract: This study separated the effects of climate change and human activities on river flow in the Heihe watershed (a tributary of Jinghe river) during 1972–2000 using statistical methods of the Mann-Kendall trend tests and double mass curve. Results showed that climate tended to become warmer and drier while river flow became lower for the period. The whole study period could be divided into two sub-periods (1972–1992 and 1993–2000) by the year when river flow underwent abrupt change. Compared with the former period, precipitation decreased by 75.4 mm and temperature increased by 0.5 °C while river flow decreased by 29 mm in the latter period. Both climate change and human activities caused a decrease in river flow, with contributions being 24% for the former and 76% for the latter. Overall, the results indicated that human activities were the main driving forces for the decrease of river flow. However, the impacts of climate change can not be ignored, and the effects should be taken into account when carrying out ecological construction and water resources management in the Loess Plateau.

Key Words: the Loess Plateau; climate change; human activities; hydrological effects

近年来, 黄土高原入黄径流呈减少趋势^[1-2], 对该区及下游的水资源供给造成了严重威胁。研究表明, 这是气候变化和人类活动综合作用的结果^[3-5], 如气候趋向暖干, 直接减少水源而增加蒸散; 而水土保持、工农业用水增加和水利工程建设等人类活动也大量减少径流。两大因素共同发生作用, 但其单独的水文效应往往难以分离^[6-7], 而这些信息对于区域生态建设和水资源管理等宏观决策都非常重要。

基金项目:中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX2-YW-424 和 KSCX1-YW-09-07); 中国科学院西部行动计划(二期)资助项目(KZCX2-XB2-05-03); 西北农林科技大学人才基金资助项目(01140407)

收稿日期: 2009-02-26; 修订日期: 2009-09-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lizhibox@126.com

评估环境变化的水文效应,研究方法主要分为3类,即流域对比法、水文模型法和时间序列分析法。流域对比法是小流域研究中消除气候变化影响的最佳方法,其基本原理是对于两个条件相似的流域,通过改变一个流域的条件监测其水文变化,并与另外一个流域进行对照,从而量化环境变化的水文效应;然而,该方法难以应用到中大尺度的流域,因为很难发现两个条件相似的中大尺度流域^[8-9]。水文模型特别是分布式水文模型,由于可以较好模拟流域的水文状况,是分析环境变化水文效应的重要工具^[10-12],但由于模型参数众多,模型的校准往往费时费力。时间序列法基于统计方法分析实测的水文气象数据,计算容易、操作简单,可以对环境变化的水文效应进行有效的描述^[8],目前被广泛应用^[13-17],如“水文法”和“水保法”计算水土保持措施的水文效应^[18-19]。

气候和人类活动在不同区域或同一区域的不同变化组合下,对水文的影响程度往往不同。如冉大川发现20世纪80年代泾河流域综合治理的减水、减沙效益分别为7.5%和14.4%,而降水量减少导致减水32%、减沙48%^[16];穆兴民等使用统计分析方法,认为1952—2000年黄河河龙区间降水量变化对径流减少的影响占29%,水土保持措施和其他人类活动的影响占71%^[4];栗晓玲等应用回归分析法发现90年代渭河入黄径流减少了29.04亿m³,其中降雨量变化的贡献率为68.2%,水土保持活动、河川耗水、傍河取水激发地表水对地下水的补给以及雨水集蓄等人类活动的贡献率分别为8.5%、10.1%、9.8%和0.2%^[20];胡宏昌等利用SWAT评估了20世纪80—90年代气候波动和土地利用变化对渭河径流减少的影响,发现两者的贡献率分别为85%和15%^[21];信忠保等基于双累积曲线法分析了1956—2005年黄河中游10条主要支流的水沙变化,发现人类活动对输沙量减少可能起主要作用,贡献率介于61%—93%^[22]。可以看出,气候变化和人类活动对径流、泥沙等的影响,不同区域间的贡献率都有差异,因此,针对具体区域进行研究是非常必要的,可以为区域可持续发展提供更加详尽的信息。

黄土高原沟壑区的黑河流域,是水土流失严重的区域之一,近年来河流径流有所减少,这种变化的主要影响因素是什么以及影响程度如何,目前尚没有进行评估。本研究基于统计分析法,分离气候变化和人类活动对黑河径流的影响,以期能为该区水土保持规划和水资源可持续利用等提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

黑河是泾河的一级支流,流经甘肃省华亭、崇信、灵台和泾川县,于长武县入泾河,位于106°29'—107°47' E, 35°03'—35°19' N。流域面积1506 km²,东西走向,形状狭长,地势西高东低,位置如图1所示。海拔1000—2500 m,地貌属黄土高原沟壑区,包括塬面和沟壑两大单元。属暖温带半湿润大陆性季风气候;多年平均降水量555.7 mm (1972—2000年),7—9月份降水占年降水量的57.5%,南部多于北部,东部多于西部;年均气温9.4℃。

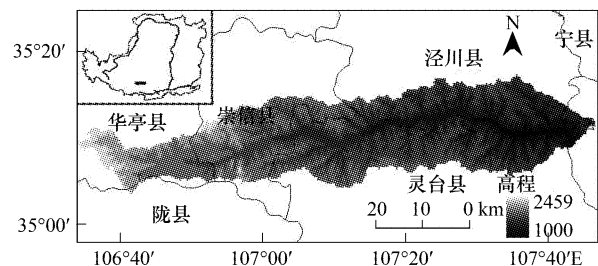


图1 黑河流域地理位置

Fig. 1 Location of the Heihe Watershed

1.2 数据处理与研究方法

1.2.1 数据处理

使用1972—2000年黑河流域张河水文站的年径流数据及华亭县、崇信县、灵台县、泾川县和长武县的年降水量和平均温度数据分析水文气象要素变化,其中降水和温度数据均求取算术平均值作为流域的平均值。

1.2.2 水文气象要素的突变检验方法

使用距平百分比和Mann-Kendall突变检验研究水文气象要素变化特征,距平百分比可以显示水文气象要素的变化趋势并简单分析各要素间的关系,Mann-Kendall检验可以发现水文气象要素的变化趋势和突变年份,为双累积曲线法提供临界年份。Mann-Kendall的突变检验基于Matlab设计程序完成,原理如下^[23-24]:

(1) 对于具有 n 个样本的时间序列 x , 构造变量 s_k :

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

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & f(x_i - x_j) > 0 \\ 0 & \text{if}(x_i - x_j) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

可见, s_k 表示 x 序列中第 i 个数值大于第 j 个数值的累计个数。

(2) 在时间序列随机独立的假定下, 计算统计量:

$$UF_k = [S_k - E(S_k)] / \sqrt{\text{Var}(S_k)} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

其中 $E(s_k)$ 和 $\text{Var}(s_k)$ 分别表示 s_k 的均值和方差。

(3) 按时间序列 x 逆序 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$ 重复①和②过程, 获得统计变量 $UB_k (k=n, n-1, \dots, 1)$, 同时使:

$$UB_k = -UF_k \quad (4)$$

(4) 将 UF_k 和 UB_k 绘制曲线, 如果两条曲线出现交点, 且该点处的 U 值满足 $|U| < 1.96$, 则认为该点为序列的突变点, 检验置信水平 $\alpha = 0.05$ 。

1.2.3 气候变化和人类活动对径流影响的分割方法

基于双累积曲线法, 分析气候变化和人类活动对径流的影响^[4, 25]。以 Mann-Kendall 检验获得的突变年份将实测时段分为两段(简称为前段和后段)。

(1) 对前段的累积降水量 ΣP 和累积径流量 ΣR 进行线性回归得到关系式

$$\Sigma P = k \Sigma R + b \quad (5)$$

(2) 将①的关系式应用到后段, 以后段的累积降水量为 x 计算累积径流量 y 。可以看出, 计算的后段累积径流量 ΣR 是以前段的降水影响方式获得的, 因此, 计算的后段 ΣR 实际上是消除了两段的降水变异影响。

(3) 用后段计算的累积径流量反推年径流量, 然后分别求取两段的实测和计算的年径流(R)均值(mean), 求取两个差值(diff)

$$\text{diff}_1 = \text{mean}(R_{\text{后段实测}}) - \text{mean}(R_{\text{前段实测}}) \quad (6)$$

$$\text{diff}_2 = \text{mean}(R_{\text{后段计算}}) - \text{mean}(R_{\text{后段实测}}) \quad (7)$$

其中, diff_1 是气候变化和人类活动共同作用下导致的径流量变化; 由于②中消除了降水变异的影响, 因此, diff_2 是由非降水要素导致的。计算比值 c

$$c = \text{diff}_2 / \text{diff}_1 \quad (8)$$

c 值就表征了非降水要素变化对径流的影响程度。

(4) 获得了非降水变化要素的影响, 即可以获得降水变异的影响, 前提是要判断出降水和非降水要素的对径流的影响趋势(表1)。将两种要素的综合影响看作1, 非降水要素的影响为 c , 如果两种要素导致径流变化的方向相同, 即同时减少或同时增加, 则降水对径流的影响是 $(1 - |c|)$ 。如果两种要素导致径流的变化方

表1 降水和非降水要素对径流影响程度的分割

Table 1 Separating the impacts of precipitation and non-precipitation elements on river flow

情景 Scenarios	非降水要素的影响趋势 Trend in non-precipitation impact	降水的影响趋势 Trend in precipitation impact	径流变化趋势 Trend in river flow	非降水要素的影响程度 Extent of non-precipitation impact	降水的影响程度 Extent of precipitation impact
1	↑	↑	↑	c	$1 - c $
2	↓	↓	↓	c	$1 - c $
3	↓	↑	↓	c	$ c - 1$
4	↓	↑	↑	c	$1 + c $
5	↑	↓	↓	c	$1 + c $
6	↑	↓	↑	c	$ c - 1$

向相反,则还要看径流的变化方向,当非降水要素对径流的影响趋势与径流变化方向相同时,降水的影响程度为 $(|c| - 1)$;当非降水要素对径流的影响趋势与径流变化方向相反时,降水对径流的影响程度为 $(1 + |c|)$ 。

2 结果与讨论

2.1 水文气象要素变化的基本特征

黑河流域 1972—2000 年平均降水、径流和温度分别为 555.7 mm, 46.4 mm 和 9.4℃;从标准偏差、极值比和变异系数来看(表 2),降水、径流的变异程度较大,温度变化相对缓和。径流的变异程度远大于降水,表明降水变化会被放大并反映在径流上。从年际变化的线性趋势来看(图 2),降水有一个不显著的减少趋势($P = 0.172$)而温度显著升高($P = 0.03$),可见,黑河流域的气候趋向暖干方向发展。降水变化减少了河流水源,而温度升高增加了河流的蒸发状况,因此,黑河流域的这种气候变化导致河流径流显著减少($P = 0.006$)。

表 2 黑河流域 1972—2000 年水文气象要素的年特征值

Table 2 Annual statistical values of hydrological and meteorological factors during 1972—2000 in Heihe watershed

项目 Item	均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	标准偏差 Stand deviation	极值比 Max/Min	变异系数 Coefficient of variation
降水 Precipitation /mm	555.7	815.5	334.9	114.4	2.4	0.21
径流 River flow /mm	46.4	130.3	14.7	26.0	8.9	0.56
温度 Temperature /℃	9.4	10.4	8.4	0.5	1.2	0.05

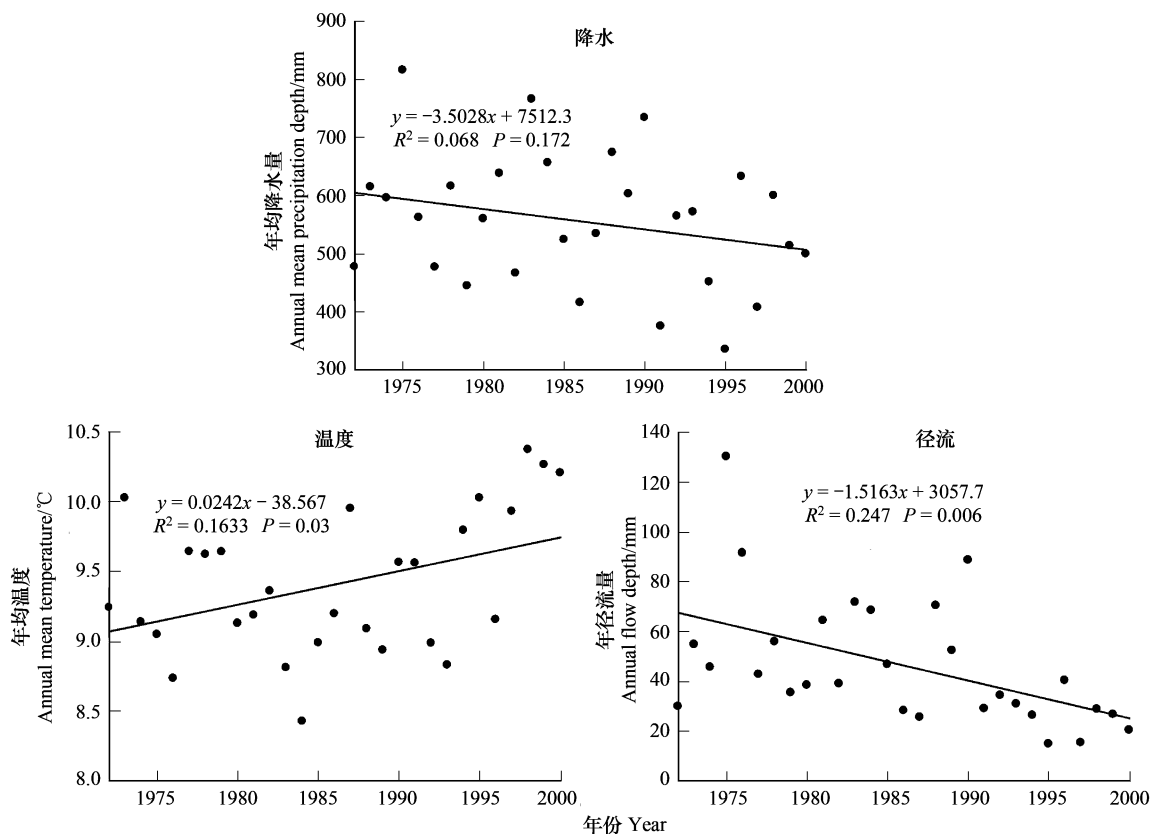


图 2 年降水、温度和径流的线性变化趋势

Fig. 2 The linear trend of annual precipitation, temperature and river flow

2.2 水文气象要素的距平百分比变化

由 1972—2000 年水文气象要素的距平百分率(图 3),黑河流域的温度变化相对平稳,最大变幅仅为多年平均值的 10% 左右;降水变化剧烈,20 世纪 90 年代以前正负距平交替出现,正负距平的极值分别为 181% 和

-68.3%,可见90年代以前旱涝灾害同时威胁该区,而90年代以后旱灾突出;径流变化规律类似于降水,但变幅小于降水,其正负距平的极值分别为46.7%和-39.7%。整体而言,降水和径流具有一致的变化趋势,表明降水对径流具有决定性影响。一般而言降水变化会被放大到径流变化中^[26-28],但黑河流域降水距平百分率的绝对值大于径流,说明非降水要素如水土保持措施和工农业用水等扰动了降水径流关系,且起到了缓和降水径流关系的作用,如部分降水低于平均值的年份(1992、1993、1996和1998年等)径流也高于平均值。

2.3 水文气象要素的突变分析

基于 Mann-Kendall 突变分析结果(图4),黑河流域的降水自1990年以来多次发生减少的突变;而温度自1985年以来一直呈升高趋势,且在1997年发生升高的突变;径流自1990年以来连续减少,并在1993年发生减少的突变。从这3个要素的变化趋势来看,径流减少与降水减少和温度升高的趋势基本同步,说明1972—2000年气候变化必然会对黑河径流的有重要影响。

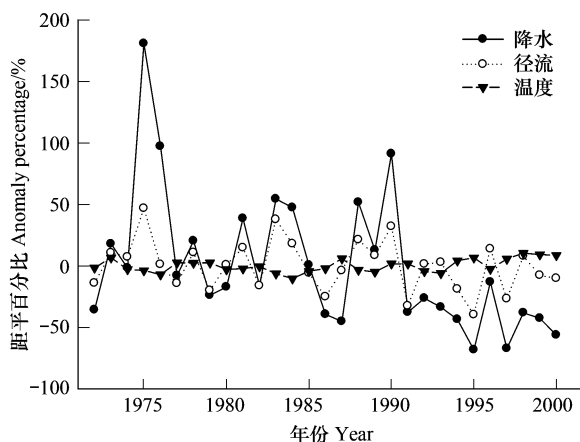


图3 年径流、降水和温度的距平变化

Fig. 3 Anomaly percentage of annual flow, precipitation and temperature in Heihe watershed

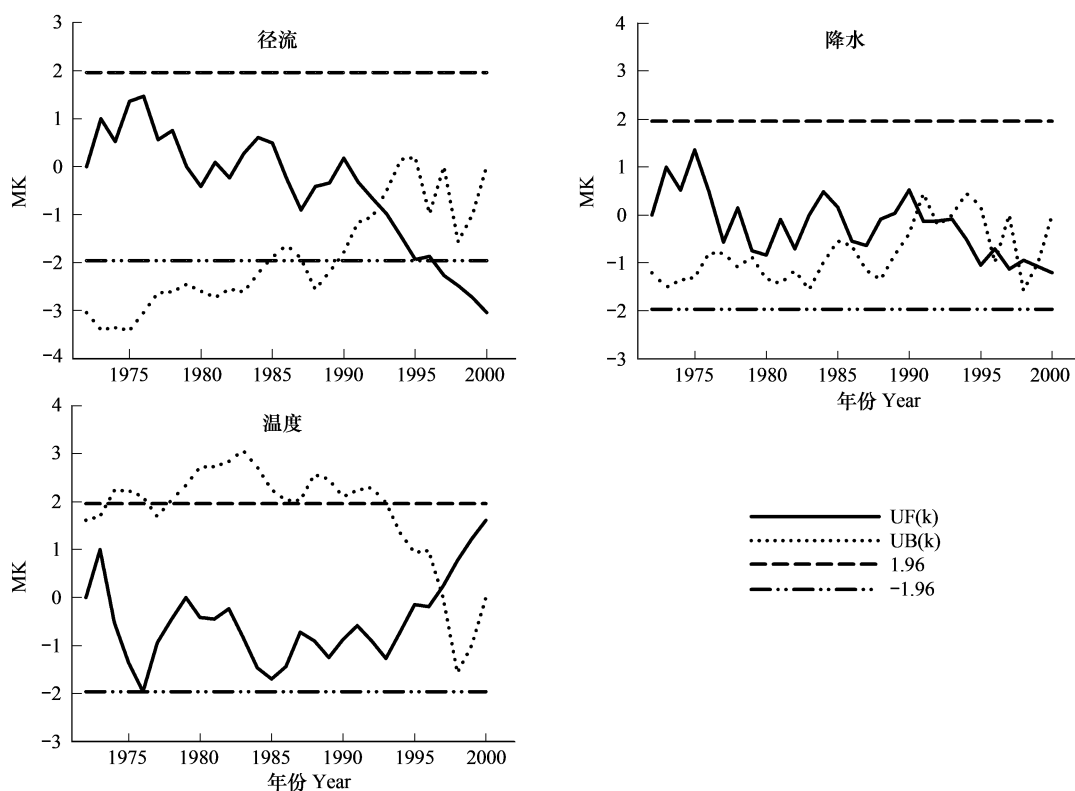


图4 年径流、降水和温度的 Mann-Kendall 突变分析

Fig. 4 The Mann-Kendall abrupt change of annual flow, precipitation and temperature

以1993年为界,对比1972—1992年和1993—2000年两段的水文气象要素,降水、径流和温度分别从576.5 mm,54.4 mm和9.3℃变为501.1 mm,25.4 mm和9.8℃。降水量减少13.1%,而径流量减少53.4%,降水的轻微变化导致径流的剧烈变化,这与相关结论一致^[26-28]。温度升高0.5℃,在一定程度上增

加蒸散减少径流量,但按照相关研究结论,温度升高 1 ℃ 导致空气中水汽容量增加 5%—6%^[29],以该区多年平均降水量 555.7 mm 作为实际蒸散量、温度升高 1 ℃ 来计算,最多可能减少 30 mm 左右用于径流的水量,而降水减幅(75 mm)和径流减幅(29 mm)的差值为 36 mm,可见仅温度变化不可能导致目前的径流变化,人类活动必然在其中扮演重要角色。

2.4 气候变化和人类活动的水文效应评估

使用 Mann-Kendall 分析的突变年份 1993 年为临界年份,将水文要素系列分为 1972—1992 年和 1993—2000 年两段。基于双累积曲线,使用公式(5)建立的 1972—1992 年累积降水与累积径流的回归关系(图 5a)相关性较高($R^2=0.994$, $P=0$),说明可用于将 1993—2000 年径流还原到受人类活动影响较小时期的情况。通过该回归关系计算 1993—2000 年的累积径流量(图 5b),计算值相当于临界年份前受人类活动影响较小时的情况,可以看出,该时段计算的径流量大于实测值(表 3),表明人类活动导致径流减少。然后,按照 2.2.3 部分的方法对后段径流进行反推还原并根据公式(6)和(7)计算两个差值,可以获得表 3 的结果。还原的前段年径流平均值为 55.6 mm,与相应实测值(54.4 mm)的误差仅为 2.2%,表明该方法的精度较高。后段的实测和计算径流均值分别为 25.4 和 47.4 mm,可见人类活动可能导致径流减少 22.0 mm ($diff_2$),而实测的径流减幅为 29.0 mm ($diff_1$),因此,根据公式(8)得人类活动的最大可能贡献率为 76%,同时据表 1 可以得到气候变化的贡献率为 24%。

表 3 气候变化和人类活动对黑河径流的影响
Table 3 The impacts of climate change and human activities on Heihe rive flow

时段 Periods	实测径流 Measured flow /mm	计算径流 Calculated flow /mm	总变化量 Total change /mm	人类活动影响 Impacts of human activities/mm	降雨影响 Impacts of precipitation/mm (%)
1972—1992	54.4	55.6	—	—	—
1993—2000	25.4	47.4	29.0	22.0 (76)	7.0 (24)

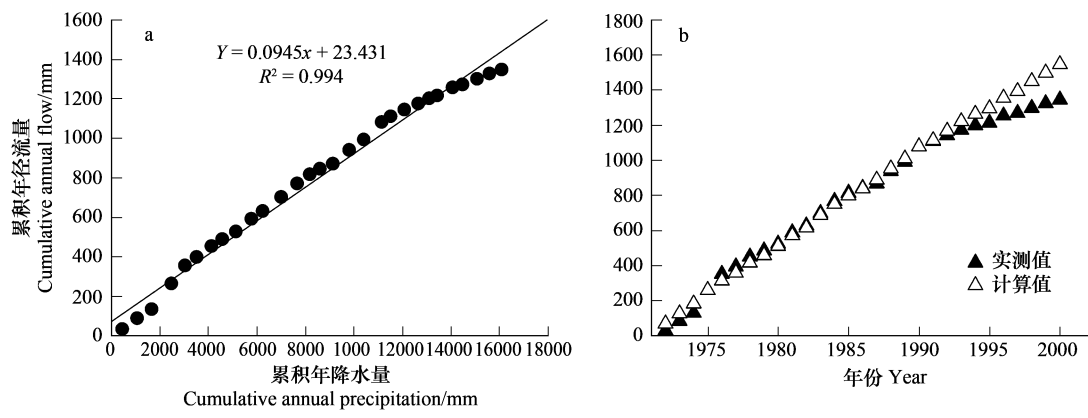


图 5 年降水和径流的累积曲线
Fig. 5 The double mass curve of annual precipitation and flow

3 结论

1972—2000 年气候向暖干方向发展,以 1993 年为界,降水减少 75.4 mm 而温度升高 0.5 ℃;径流在 1993 年开始突变性减少,截至 2000 年平均减少 29 mm。气候变化和人类活动均导致径流减少,但贡献率不同,分别为 24% 和 76%。尽管人类活动对黑河水资源的影响具有主导性,但气候变化是径流减少的重要影响因素,可见,黄土高原地区在进行生态建设时应充分考虑其不利影响。

本文使用双累积曲线法建立受人类活动影响较小时期的降雨产流模型后,将受人类活动影响较大时期的径流还原,进而求出了人类活动和气候变化对径流变化的贡献率。该方法可以分离两大要素的水文效应,但

需要注意的是,最终结果高估了人类活动的贡献率,而低估了气候变化的贡献率。主要是因为该方法分离的是降水与非降水要素的水文效应,降水是影响径流变化的决定性因素,但温度升高将增加蒸散而减少径流,而本方法没有考虑温度升高的可能效应。可见,本研究中人类活动对径流的影响实际上是最大可能贡献率。尽管如此,由于短期内温度变幅一般较小,其对径流的影响远小于降水和其他人类活动,因此,该方法获得的评估结果是基本准确的,具有重要的参考价值。

References:

- [1] Liu C M, Zhang X C. Causal analysis on actual water flow reduction in the mainstream of the Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59 (3): 323-330.
- [2] Xu J X. Recent tendency of sediment reduction in the middle Yellow River and some countermeasures. *Journal of Sediment Research*, 2004, (2): 5-10.
- [3] Li Y S. Relation between control in Loess Plateau and no-flow in the Yellow River. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1997, 17(6): 41-45.
- [4] Mu X M, Basang C L, Zhang L, Gao P, Wang F, Zhang X P. Impact of soil conservation measures on runoff and sediment in Hekou-Longmen region of the Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2007, (2): 36-41.
- [5] Xu J X, Sun J. Influence of precipitation and human activities on water fluxes from the Yellow River into the sea in the past 50 years. *Advances in Water Science*, 2003, 14(6): 690-695.
- [6] Tollan A. Land use change and floods: What do we need most research or management?. *Water, Science and Technology*, 2002, 45: 183-190.
- [7] Chen J F, Li X B, Zhang M. Simulating the impacts of climate variation and land-cover changes on basin hydrology: A case study of the Suomo basin. *Science in China Series D*, 2004, 34(7): 668-674.
- [8] Zhang L N, Li X B. Assessing hydrological effects of human activities by hydrological characteristic parameters: A case study in the Yunzhou Reservoir basin. *Resources Science*, 2004, 26(2): 62-67.
- [9] Lorup J K, Refsgaard J C, Mazvimavi D. Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modelling: Case studies from Zimbabwe. *Journal of Hydrology*. 1998, 205(3/4): 147-163.
- [10] Liu C M, Xia J, Guo S L, Zheng H X, Wang Z G, Wu X F, Hao F H. Advances in distributed hydrological modeling in the Yellow River basin. *Advances in Water Science*, 2004, 15(4): 495-500.
- [11] Li Z, Liu W Z, Zhang X C, Zheng F L. The impacts of future climate change on water resources in the Heihe watershed on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3456-3464.
- [12] Li Z, Liu W Z, Zhang X C, Zheng F L. Impacts of land use and climate changes on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2009, doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.007.
- [13] Li Z J, Li X B, Zhu H Y, Ling F. Impact of precipitation changes and human activities on sediment flux into the Miyun Reservoir of Beijing. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(1): 101-107.
- [14] Huang M B, Zhang L. Hydrological responses to conservation practices in a catchment of the Loess Plateau, China. *Hydrological Processes*, 2004, 18(10): 1885-1898.
- [15] Mu X M, Zhang L, McVicar T R, Chille B, Gau P. Analysis of the impact of conservation measures on stream flow regime in catchments of the Loess Plateau, China. *Hydrological Processes*, 2007, 21(16): 2124-2134.
- [16] Ran D C. Analysis on the benefits of runoff and sediment reduction and their characteristics in Jinghe watershed. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1992, 12(5): 20-28.
- [17] Wang G X, Zhang Y, Liu G M, Chen L. Impact of land-use change on hydrological processes in the Maying River basin, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(10): 1098-1110.
- [18] Xiong G S. Summarization of methods for analyzing the effects of soil and water conservation on flow and sediment reduction. *Yellow River*, 1994, (11): 33-36.
- [19] Yao W Y, Zhang S Y. Discussion of the selection of representative series for analyzing the changes of stream flow and sediment. *Yellow River*, 1995, 17(3): 25-28.
- [20] Li X L, Kang S Z, Wei X M, Xing D W, Cao H X. Impact of climate change and human activity on the runoff of Wei River basin to the Yellow River. *Journal of Northwest A & F University (Nat. Sci. ed.)*, 2007, 35(2): 153-159.
- [21] Hu H C, Wang G X, Li Z, Chen L J, Li T B, Liu G S. Study on the response of stream flow to land use/cover change and climate fluctuation in Weihe River. *Yellow River*, 2008, 30(7): 25-26.

- [22] Xin Z B, Xu J X, Yu X X. Temporal and spatial variability of sediment yield in the chinese loess plateau in the past 50 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1129-1139.
- [23] Fu C B, Wang Q. The definition and detection of the abrupt climatic change. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16(4): 482-493.
- [24] Wei F Y. Statistics technology of diagnose and forecast of modern climate. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 62-73.
- [25] Ran D C, Liu B. Discussion of calculating the effects of soil and water conservation on flow and sediment reduction using double mass curve. *Yellow River*, 1996, 18(6): 24-25.
- [26] Chiew F H S, McMahon T A. Modelling the impacts of climate change on Australian streamflow. *Hydrological Processes*, 2002, 16(6): 1235-1245.
- [27] Minville M, Brissette F, Leconte R. Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. *Journal of Hydrology*, 2008, 358(1/2): 70-83.
- [28] Maurer E. Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios. *Climatic Change*, 2007, 82(3): 309-325.
- [29] Chen Y N, Xu Z X. Plausible impact of global climate change on water resources in the Tarim River Basin. *Science in China Series D*, 2004, 34(11): 1047-1053.

参考文献:

- [1] 刘昌明, 张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析. *地理学报*, 2004, 59(3): 323-330.
- [2] 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区水土保持减沙的近期趋势及其成因. *泥沙研究*, 2004, (2): 5-10.
- [3] 李玉山. 黄土高原治理开发与黄河断流的关系. *水土保持通报*, 1997, 17(6): 41-45.
- [4] 穆兴民, 巴桑赤烈, Zhang Lu, 高鹏, 王飞, 张晓萍. 黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的响应. *泥沙研究*, 2007, (2): 36-41.
- [5] 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. *水科学进展*, 2003, 14(6): 690-695.
- [7] 陈军锋, 李秀彬, 张明. 模型模拟梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对流域水文的影响. *中国科学 D 辑*, 2004, 34(7): 668-674.
- [8] 张蕾娜, 李秀彬. 用水文特征参数变化表征人类活动的水文效应初探——以云州水库流域为例. *资源科学*, 2004, 26(2): 62-67.
- [10] 刘昌明, 夏军, 郭生练, 郑红星, 王中根, 吴险峰, 郝芳华. 黄河流域分布式水文模型初步研究与进展. *水科学进展*, 2004, 15(4): 495-500.
- [11] 李志, 刘文兆, 张勋昌, 郑粉莉. 未来气候变化对黄土高原黑河流域水资源的影响. *生态学报*, 2009, 29(7): 3456-3464.
- [13] 李子君, 李秀彬, 朱会义, 凌峰. 降水变化与人类活动对密云水库入库泥沙量的影响. *北京林业大学学报*, 2008, 30(1): 101-107.
- [16] 冉大川. 泾河流域水沙特性及减水减沙效益分析. *水土保持通报*, 1992, 12(5): 20-28.
- [18] 熊贵枢. 黄河流域水利水保措施减水减沙分析方法简述. *人民黄河*, 1994, (11): 33-36.
- [19] 姚文艺, 张遂业. 对水沙变化分析中代表系列选择问题的讨论. *人民黄河*, 1995, 17(3): 25-28.
- [20] 栗晓玲, 康绍忠, 魏晓妹, 邢大韦, 曹红霞. 气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(2): 153-159.
- [21] 胡宏昌, 王根绪, 李志, 陈腊娇, 李太兵, 刘光生. 渭河径流对 LUCC 和气候波动的响应研究. *人民黄河*, 2008, 30(7): 25-26.
- [22] 信忠保, 许炯心, 余新晓. 近 50 年黄土高原水土流失的时空变化. *生态学报*, 2009, 29(3): 1129-1139.
- [23] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法. *大气科学*, 1992, 16(4): 482-493.
- [24] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999: 62-73.
- [25] 冉大川, 刘斌. 双累积曲线计算水土保持减水减沙效益方法探讨. *人民黄河*, 1996, 18(6): 24-25.
- [29] 陈亚宁, 徐宗学. 全球气候变化对新疆塔里木河流域水资源的可能性影响. *中国科学 D 辑*, 2004, 34(11): 1047-1053.