

文章编号:1001-8166(2005)06-0637-06

无定河年径流量变化特征及人为驱动力分析^{*}

杨新^{1,2},延军平³,刘宝元¹

(1.北京师范大学地理学与遥感科学学院,北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室,北京 100875;
2.陕西省气象科技创新基地,陕西 西安 710015;3.陕西师范大学旅游与环境学院,陕西 西安 710062)

摘要:分析无定河年径流量1956—2000年时间序列变化特征及其对气候因子的敏感程度,以径流突变前的数据建立预测模型,对比分析径流量的实测值与模型输出值,其差值即人为影响程度。结果表明无定河年径流总量显著减少,径流量演变以1971年为突变点分为前后2个阶段;人为因素驱动力占总驱动力的份量显著上升,1997年达到最大值,为56.9%。可以认为在全球变化的气候背景下,人类活动因子是无定河径流演变的主要驱动因子。

关键词:年径流量;多元线性回归模型;驱动力;无定河

中图分类号:P343.1 文献标识码:A

0 前言

河流是在陆地表面上接纳、汇集和输送水流的途径和通道,是地球上水分循环的重要路径,是与人类关系最密切的一种天然水体。流域水文过程是全球气候变化以及地表之响应综合作用的整体,近年来全球气候大幅度变暖,水循环加快,降水和蒸发增强,流域河川径流对于全球变化如何响应还是未知^[1]。Guo Shenglian^[2]认为中国湿润地区如长江流域河流径流量对气候变化不敏感,而半干旱区流域径流对气温的升高和降水的减少相对敏感程度高。据施雅风^[3]研究,新疆天山西部地区在全球气候变暖背景下气候转向暖湿,径流量连续多年增加。而在西北地区,即使未来降水增加20%也不可能改变干旱缺水的状况^[4]。在IPCC(1995)认为的全球将继续变暖的情况下^[5],探索自然变化和人类活动影响的西北干旱区的水资源演变规律是一个新的水科学问题^[6]。在以往其他地区研究^[7-12]的经验基础上,以无定河流域为例探讨西北地区河流径流量的变化特征及人为驱动力作用。

无定河是黄河中游较大的一级支流,发源于陕

西省定边、靖边和吴旗县交界处的白于山,穿越陕西、内蒙两省(区)^[13]个旗县,于清涧县河口附近入黄河。干流全长491 km,全河比降1.97%,流域总面积 $3.026 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。本文无定河年径流量数据来自于川口水文观测站,流域气候资料取自榆林市气象观测站。

1 无定河年径流量演变特征分析

1.1 年径流量显著减少

年径流量的变化受自然和人为等因素的影响,其序列变化表现出一定的趋势性,反映了河流年径流量演变的总体规律。借助于肯德尔(Kendall)秩次相关法来进行检验^[13]。检验结果表明无定河1956—2000年以来年径流量减少趋势明显,且在0.01的水平上显著。

从无定河年径流量变化图(图1)可以看出,径流量从20世纪60年代起一个10年比一个10年少,70年代、80年代、90年代分别比多年平均年径流量值偏少4%、10%、13%,90年代降到最低水平。

1.2 径流量序列的小波分析

小波分析能反映时间序列的局部变化特征,诊

* 收稿日期:2004-02-23,修回日期:2004-10-18。

* 基金项目:国家社会科学基金项目“西部大开发中的生态环境建设战略研究——陕甘宁老区实证分析”(编号:021BJY045)资助。
作者简介:杨新(1976-),女,河北辛集人,博士研究生,主要从事气候变化方面的研究。E-mail: yangxin3@schu.com

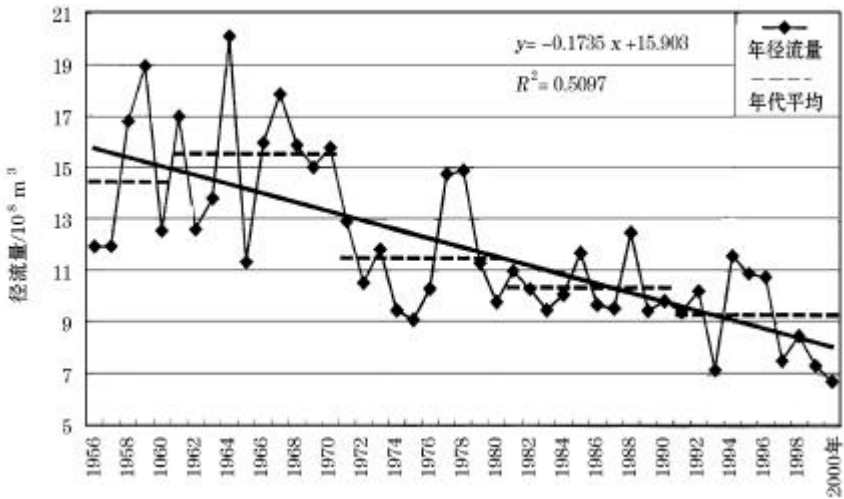


图1 无定河年径流量变化

Fig.1 The annual runoff change of Wudinghe river

断气候、水文等时间序列变化的内在层次结构,分辨时间序列在不同尺度上的演变特征^[14]。对称性小波都可以看成是一个平滑函数的二阶导数。因此,任意函数的对称小波变换是将该函数与平滑函数进行卷积运算,然后对时间求二阶导数。函数二阶导数的过零点在数学中是拐点,而在气候、水文上可以作为可能的突变点。利用这一特性,可以对气候、水文资料序列进行分析,找出气候、水文变化不同层次的突变点的位置,分析气候变化不同层次的冷暖和干湿结构。

从无定河年径流量小波分析(图2中 $a_1 \sim a_5$ 分别是2年、4年、8年、16年、32年尺度的径流量近似值变化曲线, S 为原始数据变化曲线,横坐标为年份)可以看出,在32年尺度上径流量序列的突变点在1987年,在16年尺度上有2个突变点,1971年和1987年。总体来看,16年、8年、4年和2年尺度上1971年均为突变点,而且变化前后的对比情况,1971年比1987年显著(1971年以前比多年平均值偏多30.0%,1971年以后径流量值比多年评价值偏少14.3%,径流量在1987年以前比多年平均值偏多8.58%,在1987年后比多年平均值偏少21.13%)。用肯德尔(Kendall)秩次相关法检验发现,1987年前后两段时间内径流量都有显著减少的趋势,而1956—1971年径流量变化平稳,有弱的增加趋势,1971—2000年径流量变化趋势为显著减少。所以,1971年作为无定河径流的突变点更为合适。

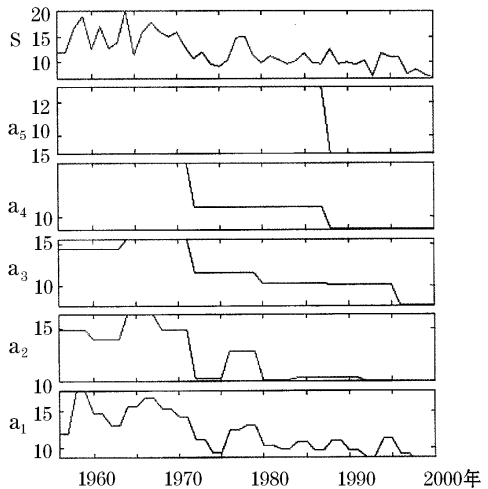


图2 无定河径流量小波分析

Fig.2 Wavelet transform of annual runoff

in Wudinghe river

2 径流量演变的人为驱动力分析

天然状况下,流域内径流量的变化趋势主要受自然因素如气候和下垫面的影响。随着人类改造自然能力的不断增强,人类活动对流域水文的影响愈加显著。正确评估人类活动等因素对水文序列的影响程度,在水文分析计算中具有现实意义。

2.1 径流量对气候因子的敏感程度分析

河流径流量与气候因子之间的关系是已知的,即气候因子对流域的影响是肯定的,但这种关系又是不确定的,是一种灰色关系。本文应用灰色关联分析法来研究河流径流量对气候因子的敏感程度。灰色关联分析法的计算步骤见文献[15]。

应用灰色关联分析法计算无定河年径流量与年降水量、年均气温、年最高温、年最低温、年蒸发量(均源自气象汇编资料,蒸发量为小型蒸发皿测量值)之间的关联度结果为 $r_1 = 0.6716, r_2 = 0.6495, r_3 = 0.3021, r_4 = 0.2567, r_5 = 0.7636$ 。可以看出,与年径流量关系密切程度从大到小顺序为:年蒸发量,年降水量,年均气温,年最高温,年最低温。可以得出结论:无定河年径流量的演变与年蒸发量、年降水量、年均气温关系最为密切。

选择与年径流量关系密切的气候因子即年蒸发量、年降水量、年均气温做突变分析(图3中 $a_1 \sim a_5$ 分别是 2 年、4 年、8 年、16 年、32 年尺度的蒸发、降水和气温近似值变化曲线, S 为原始数据变化曲线,横坐标为年份)结果显示无定河流域年蒸发量的突变时间与径流量较为一致,降水、气温的突变时间与年径流量的突变时间不一致。这说明年径流量的变化并不完全依赖于气候变化,人为影响不可忽视。所以,本文选择年蒸发量、年降水量、年均气温 3 个气候因子建立多元线性径流量回归模型,用以模拟突变以后的径流量以及人类活动对径流变化的影响程度。

2.2 人类活动对径流量的影响程度分析

由上述分析可知,无定河流域年径流量在 1971 年发生突变。对主要气候因子作小波分析,得知径流量的突变并没有受其影响。可以认为在 1971 年以前(包括 1971 年)气候因子还是年径流量变化的主导因素,人类活动对径流量的影响作用不大,这一阶段的径流量变化主要受气候因子的影响,径流量为自然状况下的径流量。而从 1972 年以来,人类活动对流域径流量的变化产生了重大影响,径流量为人为影响后的径流量。因此,利用无定河流域 1956—1971 年的年径流量、年蒸发量、年降水量和年均气温实测记录建立多元线性回归模型,模拟 1972 年以来的天然径流量,对比该阶段实测径流量,其差值就是人为因素影响所造成的。

建立数学结构模型为:

$$Y = \rho_0 + \rho_1 x_{a1} + \rho_2 x_{a2} + \dots + \rho_k x_{ak} + a \quad (1)$$

式中, $\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_k$ 为待定系数, a 为随机变量。

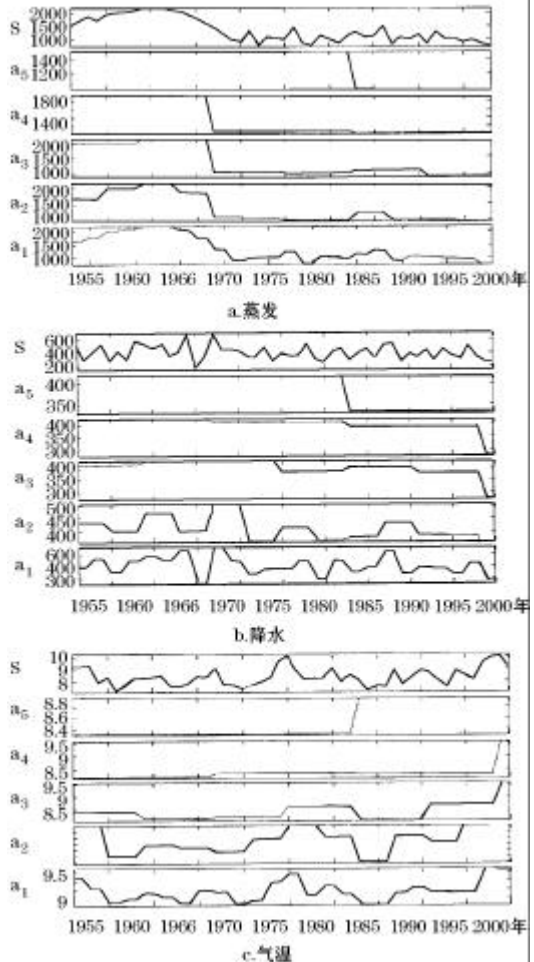


图 3 无定河流域气候因子小波分析

Fig.3 W avelet transform of climate factors

采用最小二乘法估计,得回归模型为:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k \quad (2)$$

式中 b_0 为常数, b_1, b_2, \dots, b_k 为偏回归系数。确定回归模型的系数,得到回归模型。

$$\hat{Y} = 1.6556 - 0.2760x_1 + 0.0154x_2 + 0.8743x_3 \quad (3)$$

用 F 检验法对多元线性回归模型进行检验。计算得 $F = 10.1645$, 远大于在 0.01 水平上的临界值 5.95, 所以,该模型在 0.01 水平上显著。

为了量化人为因素对河川径流的影响程度,对应用回归模型预测的天然径流量值 \hat{Y} 与实测值 Y 比较,用 W_x 来表示各个时期人类活动对河川径流演变的影响:

$$W_r = 100 \times (y^{\wedge} - y) / y \% \quad (4)$$

根据无定河径流量模型对 1972—2000 年以来的径流量进行预测,对比预测值和实测值做出图 4。

可以看出,预测值的波动变化趋势与实测值基本吻合,这从另一方面表现出该模型的实际可行性。其次,预测的天然径流量比实测值的变化要平稳,显示人类活动对径流量的影响在具体年份有着不确定性。第三,在 1972—2000 年的时间段内,除 1976 年外,无

定河径流量预测值一直高于实测值,说明人类活动对无定河径流量的影响一直处于负面的减流状态。

由式(4)计算无定河 1972—2000 年人类活动对径流量影响的程度 W_r 值并做图 5。对 1972—2000 年的 W_r 值序列做肯德尔迭次相关检验分析,在 0.01 水平上有显著上升趋势。表明人类活动对无定河流域河川径流的影响程度在显著上升,最大年份是 1997 年,达到 56.9%。

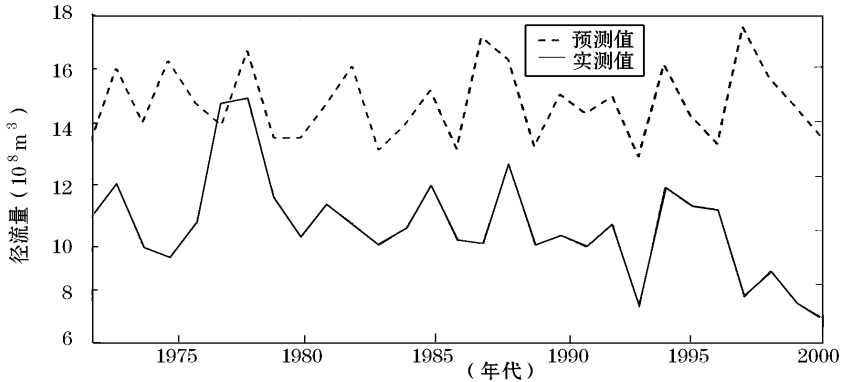


图 4 无定河天然径流量预测

Fig.4 Annual runoff forecast of Wudinghe river

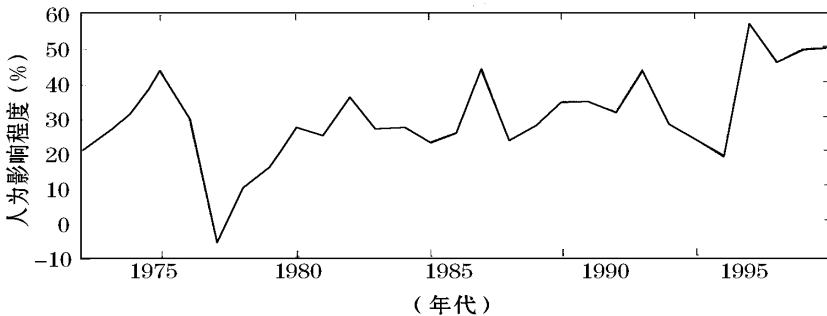


图 5 无定河径流量人为影响程度

Fig.5 Influence degree on annual runoff by human activity

2.3 人类影响径流量的行为分析

流域内影响河川径流量的主要因素有气候因素和人为因素。气候因素中主要是降水的多年变化;人类活动的影响主要有 2 个方面:一是人口增长、人民生活和工农业生产用水量的日益增加,水利工程措施改变了径流的数量;二是由于农业耕作制度的改变、水土保持措施而引起的下垫面条件的改变,从而影响了河川径流量的数量。

无定河流域近年来人口增加,工农业发展很快,

经济发展使得地表水长期过量利用。仅 20 世纪 90 年代末比 90 年代初,榆林市人口就增加了 9.84%^[19];农田有效灌溉面积 1999 年为 $109.09 \times 10^3 \text{ hm}^2$, 1997 年为 $94.46 \times 10^3 \text{ hm}^2$, 2 年的时间就增加了 15.5%^[19]。

无定河流域水利事业历史悠久,数量众多。1997 年流域各种水利工程施工实际供水量为 $6.55 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中机电井供水 $2.26 \times 10^8 \text{ m}^3$,引水工程 $2.46 \times 10^8 \text{ m}^3$,其它工程供水 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[19]。全

流域大小蓄水工程¹万余个,其中地表水引水工程在枯水平均引水量占河道水量的60%,枯月高达80%,加之水量分配不均,造成河道水量日益减少,大部分时间河道几乎断流无水。

除水利工程外,人类活动对下垫面的改造也改变着河道径流量。研究表明,黄河上中游进行梯田化改造后,70%~95%的地表径流被拦蓄,造成入黄径流量减少^[17]。在黄土高原地区,坡耕地改造为梯田后,作物单产可提高3倍^[18],但作物增产的同时也增加了耗水量。在干旱半干旱地区,谷物生长需水与土壤水、地下水有很大关系^[19],作物蒸发蒸腾水量增加,耗水土层加深,使深达1~3 m土层逐渐变干而接近凋萎湿度,形成土壤干层,从而阻断地下水补给,减少总径流量。

3 结论

分析无定河年径流量时间序列的变化特征及其对气候因子的敏感程度,在此基础上根据突变点以前的径流量数据建立多元回归模型,估算突变以后的径流量,对模型的检验表明,该模型在0.01水平上显著,其次对比分析径流量的实测值与模型预测值,其差值即人为影响程度,最后分析了人类活动对无定河径流量的影响。得出以下结论:

(1) 自20世纪50年代末以来,无定河年径流量显著减少,1956—2000年的数据显示,无定河年径流量1971年为突变点分为前后2个阶段。

(2) 1977年以来,人为因素对无定河年径流量的影响程度在不断增大,在1997达到最大值,为56.9%。可以认为,人为因素是全球气候变化背景下无定河径流量演变的主要驱动因子。

参考文献(References):

- [1] Wilby R L. Green house hydrology, progress in physical[J]. *Geography*, 1995, 19(3): 351-369.
- [2] Guo Shengian, Wang Jinxing, Xiong Lihua, et al. A macro-scale and semi-distributed monthly water balance model to predict climate change impacts in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 268: 1-15.
- [3] Shi Yaofeng, Shen Yongping, Hu Ruiji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 219-226. [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[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219-226.]
- [4] Qin Dahe, Ding Yihui, Wang Shaowu, et al. Ecological and environmental change in West China and its response strategy[J]. *Ad-*

- vances in Earth Science, 2002, 17(3): 314-319. [秦大河,丁一汇,王绍武.中国西部生态环境变化与对策建议[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(3): 314-319.]
- [5] Houghton J T, Filho L G M, Calander B A, et al. *Climatic Change 1995. The Science of Climatic Change* [C]. UK: Cambridge University Press, 1996.
- [6] Xia Jun, Sun Xueao, Tan Ge. The progress and prospect of water cycle study in western China[J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(1): 58-67. [夏军,孙雪涛,谈戈.中国西部流域水循环研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 58-67.]
- [7] Li Lijuan, Zheng Hongxing. Characteristics and driving forces of annual runoff changes for rivers in North China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(3): 309-317. [李丽娟,郑红星.华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析——以潮白河为例[J]. *地理学报*, 2000, 55(3): 309-317.]
- [8] Luo Xianxiang, Deng Wei, He Yan, et al. Driving forces of runoff changes for marshy rivers in Sanjiang plain[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(5): 603-610. [罗先香,邓伟,何岩,等.三江平原沼泽性河流径流演变的驱动力分析[J]. *地理学报*, 2002, 57(5): 603-610.]
- [9] You Songcai, Kiyoshi Takahashi, Yuzuru Matsuoka. Climate change impact on surface runoff in China[J]. *Quaternary Sciences*, 2002, 22(2): 148-157. [游松财, Kiyoshi Takahashi, Yuzuru Matsuoka. 全球气候变化对中国未来地表径流的影响[J]. *第四纪研究*, 2002, 22(2): 148-157.]
- [10] Li Xin, Zhou Hongfei. Sustainable utilization of water resources of Tarim River under the influence of human activities[J]. *Geographical Research*, 1998, 17(2): 171-177. [李新,周宏飞.人类活动干预后的塔里木河水资源持续利用问题[J]. *地理研究*, 1998, 17(2): 171-177.]
- [11] Ding Hongwei, Gao Yuzhuo, He Jianghai, et al. Reason of runoff reducing through Zhengyixia Gorge on Heihe River and counter measures[J]. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(1): 62-66. [丁宏伟,高玉卓,何江海.黑河过正义峡河川径流量减少的原因及对策分析[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(1): 62-66.]
- [12] Ran Dachuan. The analysis on the Jinghe River runoff under the influence of human action[J]. *Water Resources & Water Engineering*, 1998, 9(1): 32-36. [冉大川.泾河流域人类活动对地表径流量的影响分析[J]. *西北水资源与水工程*, 1998, 9(1): 32-36.]
- [13] Kottegoda N T. *Stochastic Water Resources Technology* [M]. Jin Guangyan translated. Beijing: The Agricultural Press, 1987. [Kottegoda N T. 随机水资源技术[M]. 金光炎译.北京:农业出版社, 1987.]
- [14] Lin Zhenshan, Deng Ziwan. The Study of Climate Diagnoses Technic by Wavelet Transform [M]. Beijing: Meteorology Press, 1999. 1-25. [林振山,邓自旺.子波气候诊断技术的研究[M].北京:气象出版社, 1999. 1-25.]
- [15] Feng Lihua. Grey clustering forecast of the changing tendency of water resources[J]. *Resources Science*, 1999, 21(3): 11-15. [冯丽华.水资源变化趋势的灰色聚类预测[J]. *资源科学*, 1999, 21(3): 11-15.]

- [16] Statistics Bureau of Shaanxi Province. Statistical Yearbook of Shaanxi[M]. Beijing: China Statistics Press, 2000. 252-298. [陕西省统计局. 陕西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000. 252-298.]
- [17] Wu Jiabing, Pei Tiefan. Effects of sloping fields terraced on runoff and eco-environment in upper reaches of yangtse river and in upper and middle reaches of Yellow river[J]. Territory & Natural Resources Study, 2002, 1: 59-61. [吴家兵, 裴铁. 长江上游、黄河上中游坡改梯对其径流及生态环境的影响[J]. 国土与自然资源研究, 2002, 1: 59-61.]
- [18] Yang Wenzhi, Yu Cunzu. Administration and Evaluation of Loess Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1992. [杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价[M]. 北京: 科学出版社, 1992.]
- [19] Sepaskhah A R, Kanooni A, Ghasemi M. Estimating water table contributions to corn and sorghum water use[J]. Agricultural Water Management, 2003, 58: 67-79.

THE ANALYSIS ON THE CHANGE CHARACTERISTICS AND DRIVING FORCES OF WUDINGHE RIVER RUNOFF

YANG Xin^{1, 2}, YAN Jun-ping³, LIU Bao-yuan¹

(1. College of Geography and Remote Sense Science, Beijing Normal University, Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing 100875, China, 2. Meteorological Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710015, China, 3. Shaanxi Normal University, College of Tourism and Environmental Sciences, Xi'an 710062, China)

Abstract: In this paper, the characteristics of annual runoff data of Wudinghe river in the year of 1956 ~2000 are analyzed. The sensitive degree of influence from climate factors in the drainage area are analyzed. Based on the datum before abrupt change of annual runoff, the plural linear regression model for annual runoff is set up. The difference between the value derived by the function and the true value is the influence resulted by human activity.

The analysis shows that the annual runoff of Wudinghe river decreased evidently, and the runoff changed abruptly in 1971. The influence resulted by human activity is increasing year by year. And in the year of 1997, human influence on river runoff reached maximum, with its value being 56.9%. So the conclusion is reached that in the climate background of global warming the driving force of the change in annual runoff is human activity.

Key words: Annual river runoff; Plural linear regression model; Driving forces; Wudinghe river.