

降水和人类活动对北洛河径流变化的定量化研究

赫晓慧¹, 郑紫瑞¹, 高亚军²

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 郑州 450001; 2. 黄河水利委员会 水文局, 郑州 450004)

摘要: 径流变化是降水和人类活动综合作用的结果, 如何分离其单独的水文效应是水科学研究中的热点问题。根据北洛河流域 1954—2011 年实测降水、径流资料, 采用 M-K 趋势分析法确定了突变点。在此基础上, 分别利用双累积曲线法和 AWY (annual water yield) 模型法分离出了由降水及人类活动引起的实测径流变化量, 并对其结果进行了分析。结果表明: 北洛河流域实测径流呈减少趋势, 2004 年为突变年份; 人类活动是引起流域径流减少的主要原因, 其中双曲线分析法中, 人类活动的影响量为 6.4 mm, 贡献率为 56%; AWY 模型法表明人类活动的影响量为 7.6 mm, 贡献率为 67%。

关键词: 降水; 人类活动; 径流; 双曲线统计法; AWY 模型法

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)03-0125-05

Quantitative Research of Precipitation and Human Activities on Changes of Runoff in Beiluo River Basin

HE Xiaohui¹, ZHENG Zirui¹, GAO Yajun²

(1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University,

Zhengzhou 450001, China; 2. Hydrological Bureau of YRCC, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: Runoff can be affected by precipitation and human activities, and how to separate their individual hydrological effects of water is a hot issue. We found the change-point of Beiluo River Basin using the method of Mann-Kendall rank correlation, according to the measured data of precipitation and run-off from 1954 to 2011. On this basis, we used hyperbolic statistics and AWY (annual water yield) model methods to separate the measured runoff changes caused by rainfall and human activity, respectively. The results showed that the measured runoff presented the trend of decrease, and there was a mutation in 2004; human activity was the main cause of runoff reduction in the river basin, the influence quantity of human activity was 6.4 mm, the contribution rate was 56% according to hyperbolic statistics; the influence quantity of human activity was 7.6 mm, the contribution rate was 67% based on AWY model method.

Keywords: precipitation; human activity; runoff; hyperbolic statistics; AWY model

20 世纪 90 年代以来, 黄河干流实际来水量较平均来水减少幅度达到 20%~65% 不等^[1]。目前关于径流减少的原因, 大致分为两类: 气候变化和人类活动^[2]。一方面, 降水是水文要素在时空上发生变化的重要影响因子, 另一方面, 人类活动对下垫面的改造也对流域水文过程产生深刻影响。然而, 降水变化和人类活动对径流的影响是综合的, 因此, 定量区分人类活动和降水变化对水文过程的影响是当前水文学的研究热点。

目前, 定量分析的研究方法主要有统计分析法和

水文模型法^[3]。前者相对简单, 但对水文气象观测资料要求较高。如李志等^[4]基于 M-K 和双曲线累积法分离了黑河流域 1972—2000 年气候变化和人类活动对径流的影响, 贡献率分别为 24% 和 76%; 后者水文过程的物理概念清晰, 但模型不确定性问题突出。如林凯荣等^[5]运用改进的 SCS 月模型进行东江河流域 3 个子流域的径流模拟, 土地利用变化对径流影响的贡献率分别为 19.4%, 24.11% 和 29.94%。从以往的研究成果中可以看出, 统计分析与模型相结合的研究较少, 并且降水和人类活动对径流的影响区域差异

性很大,因此,在特定区域开展针对性研究对当地水资源的合理配置具有重要意义。北洛河作为黄河二级支流,地处黄土丘陵沟壑区、黄土高原沟壑区等多种水土流失类型区,且近年来径流量呈明显减小趋势,因此定量分析降水和人类活动对该流域径流变化的影响,对流域水资源的规划具有重要意义。

综上,本文以北洛河流域为研究对象,在确定突变年份的基础上,分别利用双累计曲线法和水文模型(AWY 模型)法,定量分析降水和人类活动对径流变化的影响,以期有效识别引起径流变化的主要因子,为流域水资源管理提供一定的科学依据。

1 研究区概况和数据来源

北洛河流域地处 $107^{\circ}33'—110^{\circ}10'E$, $34^{\circ}39'—37^{\circ}18'N$,研究区(状头以上)总面积 $25\ 154\ km^2$,处于我国东部季风湿润区与内陆干旱区的过渡地带,年平均降水量少且年内时间上分布不均,6—9 月降水量占全年的 $70\%\sim 80\%$,在空间上由南向北递减,属于典型的超渗产流地区,降水量时空分配的差异造成年径流量的不同,且难以度量。

本文所需数据主要包括流域年径流量、年实际蒸散发和潜在蒸散发、降水量和土地利用数据。其中,径流数据以志丹、交口河、黄陵等 7 个水文站相应的径流深为依据,将北洛河流域分为 7 个子流域,分别进行统计计算;流域年降水数据采用定边、吴旗、延安、榆林等 9 个国家气象站数据,利用 ArcGIS 空间克里格插值法计算;年实际蒸散发和潜在蒸散发采用 MODIS 16 产品数据;土地利用数据主要包括 2000 年、2005 年、2011 年 3 期遥感影像数据,将流域土地利用类型划分为耕地、林地、草地、居民与工矿用地、水域和未利用地。

2 研究方法

2.1 降水、径流序列分析及研究阶段划分

采用常用的线性回归方法来研究流域降水和径流的变化趋势,利用 M-K 非参数检验法确定突变点发生的位置,并将发生突变前的年份设为基准期,将突变后的时期作为研究期。线性回归方法和 M-K 检测法比较常见,具体可参考相关文献^[6-7]。

2.2 双累计曲线法分析降水和人类活动对径流影响

双累计曲线法即建立基准期降水—径流年累计值的回归关系^[8],然后按照该回归关系,代入研究期降雨量累计值计算累计径流值,然后再进行分离,具体为:

建立基准期年累计降水量(P)与年累计径流量(Y)的回归方程:

$$\sum Y = k \sum p + b \quad (1)$$

式中: Y 基准期为径流量值; k 为回归方程的相关系数; P 为基准期降雨量值; b 为回归方程截距。

利用所建立的方程模拟研究期的径流累计值,将基准期的回归关系应用到研究期得到研究期内的累计径流量,根据累计径流量反推年径流量 Y_{12} ,则有:

$$c = Y_{12} - Y_1 \quad (2)$$

$$r = Y_2 - Y_{12} \quad (3)$$

式中: c 为降水引起的径流变化部分,为基准期实测径流与研究期模拟径流的差值; r 为人类活动对径流的影响,可以用研究期实测径流与研究期模拟径流的差值来表示,从而实现降水和人类活动对径流影响的分割; Y_{12} 为利用基准期回归关系模拟得到的研究期径流量; Y_1 为基准期实测径流; Y_2 为研究期实测径流值。

2.3 AWY 模型法分析降水和人类活动对径流的影响

利用水文模型进行流域水文要素模拟,然后利用一定的方法分离降水和人类活动对径流量的影响,是目前水文研究中定量分析常用的方法,该方法即为分离评判法,由 Koster 等^[9]提出,具体方法如下。

2.3.1 AWY 模型 AWY(annual water yield)模型,又称流域产水量模型,在水量平衡的基础上,结合流域年降水量、实际蒸散发、潜在蒸散发数据对径流变化过程进行模拟,并且该模型已在世界诸多流域进行了验证^[10]。简单来说,AWY 模型认为产流量可以看做是降水量与实际蒸散发之间的差值。流域年径流(Y)的计算公式如下:

$$Y = P - AET \quad (4)$$

其中实际蒸散发可以根据 Zhang 等^[10]提出的计算公式求得:

$$\frac{AET}{P} = \frac{1 + W \frac{PET}{P}}{1 + W \frac{PET}{P} + \frac{P}{PET}} \quad (5)$$

$$AET = \sum (AET_i \cdot f_i) \quad (6)$$

式中: P 为流域年降水量; AET 为流域实际年蒸散发; PET 为流域潜在年蒸散发; W 为某一种土地利用类型的用水系数; AET_i 为第 i 类土地利用类型的年蒸散发量; f_i 为第 i 类土地利用类型覆盖率。此外,该模型与其他机理模型相比,具有模型参数易获取、操作简单等优点,在国外已得到广泛应用,目前国内应用该模型的研究相对较少^[11-12]。

2.3.2 分离评判法 该方法认为径流的变化量由降水和人类活动两部分原因引起,即研究期实测径流与基准期实测径流的差值为降水和人类活动两部分影响量的总和。首先利用基准期的实测水文气象资料

率定 AWY 模型参数,保持模型参数不变,将研究期的气候资料输入模型,可以得出研究期还原的自然径流量。那么降水变化引起的径流变化部分等于研究期还原径流值与基准期实测径流的差,人类活动影响部分等于研究期实测径流与还原径流的差值。

3 结果与分析

3.1 北洛河流域年降水量变化特征

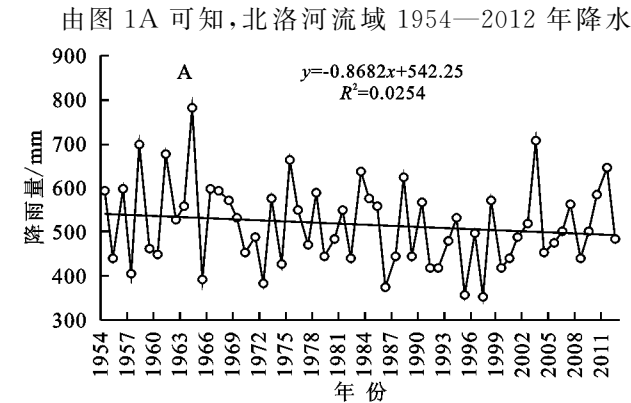


图 1 北洛河流域降水量年际变化趋势及突变点分析

3.2 北洛河流域径流年际变化特征

流域年径流变化结果如图 2A 所示,可以看出流域径流量呈下降趋势,下降斜率为-0.032 3。另外径流量的 M-K 检验统计量曲线(图 2B)表明 1950—1962 年径流量在下降,然后径流量呈现上升趋势,直到 2000 年,而且在此段时间内,UF 曲线超过显

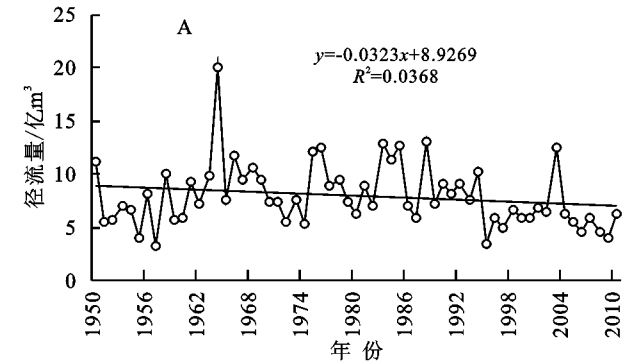


图 2 北洛河流域径流量年际变化趋势及突变点分析

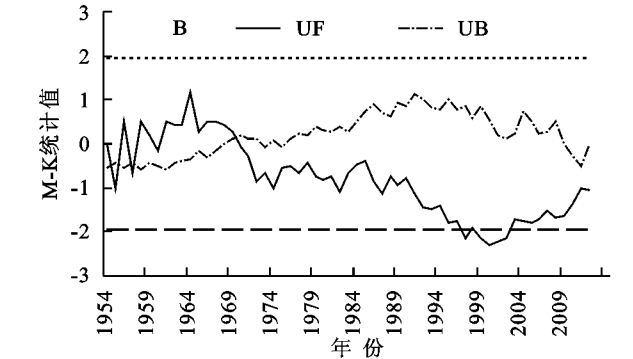
根据降水和径流的变化特征及其趋势分析,将 1954—2004 年作为基准期,将 2005—2011 年作为研究期。

3.3 双累计曲线法及其定量分析

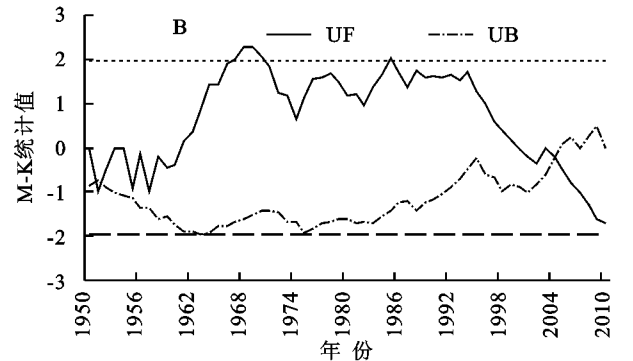
将水文要素分为 1954—2004 年(基准期)和 2005—2011 年(研究期)两段。建立基准期累计降水和累计径流深的回归关系(图 3),相关性很好($R^2=0.9988$)。

通过该回归关系计算基准期和研究期的径流量,结果见表 1。依据该相关关系计算出的基准期径流值为 33.7 mm,与实测值误差仅为 2%,表明该算法的精度较

量呈下降趋势,最大年降水量为 781.3 mm(1964 年),最小年降水量为 352.6 mm(1997 年),可见研究区内最大和最小降水量的变化幅度较大。结合图 1B 年降水量 M-K 非参数检验统计图可以看出,降雨在 1970 年以前变化趋势不明显,UF 曲线均在 0.05 显著性水平区间内;1970—2000 年,UF 曲线持续下降,表明降水在此段时间内下降较明显;2000 年以后,降水量有明显的上升趋势。根据 UF 和 UB 交点的位置,确定北洛河流域年降水量在 1970 年发生突变。



著性水平临界线(1965—1970 年),说明上升趋势明显,对比图 1A 可知,该段时间内降雨量并不高,因此这可能与该段时间内流域水土流失比较严重有关。2000 年以后,径流量呈现下降趋势。根据 UF 和 UB 交点的位置,确定该流域径流量在 2004 年发生突变(图 2B)。



高。研究期计算径流值为 28.1 mm,根据公式(2)和(3)可以计算出:人类活动导致径流减少 6.4 mm,贡献率为 56%,降水导致径流减少 5 mm,贡献率为 44%。

同时,为探讨不同时期人类活动和降水对径流的影响,采取传统的基准期划分方法,即将 20 世纪 70 年代之前的时期作为基准期^[13],因为大批水土保持措施和流域管理项目在 20 世纪 60 年代在黄河中游地区开始实施,到 70 年代开始发挥作用。结果见表 2,可以看出不同时期内降水和人类活动对径流的贡献率并不一致:降水对径流量的影响均为负值,人类

活动对径流的影响较为复杂。在 20 年代末期,径流受降水的影响大于人类活动。进入 21 世纪以来,在水土保持和退耕还林政策下,人类活动成为影响径流的主导因素。

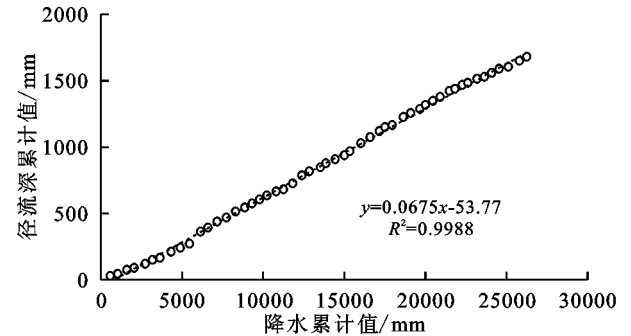


图 3 1954—2004 年降水和径流的累计曲线

表 1 基准期研究期径流分析结果

时期	实测	计算	变化量/	降水影响	人类
	径流/mm	径流/mm	mm	c/mm	影响 r/mm
1954—2004 年	33.1	33.7	—	—	—
2005—2011 年	21.7	28.1	-11.4	-5	-6.4

表 2 不同时期降雨和人类活动对北洛河径流的影响

时期	实测 径流/mm	实测 降雨/mm	降水—径流/ 回归关系	计算 径流/mm	变化量/ mm	降水 影响/mm	人类 影响/mm
1954—1969 年	34.3	556.3	$y=0.1138x-29(R^2=0.65)$	—	—	—	—
1970—1979 年	33.6	506.8	$y=0.00888x-11.4(R^2=0.64)$	28.7	-0.7	-5.6	4.9
1980—1989 年	36.6	512.8	$y=0.1195x-24.7(R^2=0.64)$	29.4	2.3	-4.9	7.2
1990—1999 年	28.3	460.8	$y=0.06x+0.5842(R^2=0.33)$	23.4	-6	-10.9	4.9
2000—2011 年	25.2	526.4	$y=0.081x-17.4(R^2=0.60)$	30.9	-9.1	-3.4	-5.7

注:正值代表径流增加量,负值代表减少量。

表 3 研究期还原径流值与实测径流值

年份	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	均值/mm
实测径流值/mm	21.8	17.7	23.1	18.0	16.1	24.7	30.5	21.7
还原径流值/mm	21.4	23.6	32.7	17.1	23.8	35.3	49.2	29.0

表 1 中,基准期与研究期实际径流值总变化量为 -11.4 mm,表 3 中,研究期还原径流值为 29.0 mm,相比基准期实测值(33.1 mm)减少 4.1 mm,根据分离评判法,该部分即为径流对降水变化的响应,占 36%;同时人类活动致使径流减少 7.3 mm,占总变化量的 67%,可见,相比降水,人类活动是引起北洛河径流变化的主要原因。

可以看出,本文中双曲线累积法和 AWY 模型法所得出的结论稍有差异,显然这与研究方法自身的不确定性有关。另外,AWY 模型法相比统计分析法,人类活动对径流的影响更加显著,这可能是因为统计分析法中,人类活动也包含除降水以外的其他气候因子,而本文中 AWY 模型法中人类活动更多的是下垫面的变化,虽然模型中所用到的蒸散发数据与气温、风速等因子关系甚大,但并未直接考虑这些气候因

3.4 AWY 模型分析法及其定量分析

AWY 模型采用志丹、刘家河等 7 个子流域 2000 年、2005 年、2011 年累计 21 期土地利用、年降水量、年径流深、年蒸散发数据进行建模,其中 2000 年和 2005 年用来参数率定,2011 年用来验证。根据相关文献确定的不同土地利用类型的用水系数范围,采用 C# 语言,利用计算机解译满足各期气象水文条件且误差最小的 W 值。经校准,耕地、林地、草地、居民和工矿用地以及未利用用地的用水系数分别为 1.8, 2.8,1.8,0,0,其中水域实际蒸散发为降水量与潜在蒸发量的较小值,由于流域多年降水量均小于潜在蒸散量,因此水域的实际蒸散发取降水量。根据校准后的 W 值计算各流域的实际蒸散发与 MODIS 16 的实际蒸散发比较,校准期相关系数为 0.84,验证期相关系数为 0.87,说明该模型适用于该研究区。

根据各土地利用类型的用水参数 W 率定结果,保持基准期(2000 年)土地利用不变,输入研究期的气象资料,可以得到研究期的还原径流值(表 3)。

子,如何分离细化各种因子对径流的定量影响将是以后研究的重点。

4 结论

(1) 1954—2011 年北洛河流域实测降水和径流均呈现减少趋势,M-K 检验结果表明存在明显突变,其中降水突变年份发生在 1972 年前后,径流突变年份发生在 2004 年。(2) 以基准期降水径流建立双累计曲线关系,模拟精度较高,结果表明:降水对径流的影响量为 5 mm,贡献率为 44%,人类活动的影响量为 6.4 mm,贡献率为 56%。(3) 建立研究区 AWY 模型,通过对降水和人类活动对径流改变量的分离发现,降水和人类活动均引起流域径流的减小,其中人类活动影响量为 7.3 mm,贡献率为 67%,降水影响量为 4.1 mm,贡献率为 36%。(4) 虽然不同的研究

方法,结果略有差异,但双累计曲线关系和 AWY 模型都显示了人类活动的贡献率较高,人类活动是引起径流变化的主要因子,同时也表明北洛河流域内受到退耕还林等水土保持措施的影响较大。

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[J]. 地理学报,2010,59(3):323-330.
- [2] 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量影响[J]. 水科学进展,2003,14(6):690-695.
- [3] 张利平,李凌程,夏军,等. 气候波动和人类活动对滦河流域径流变化的定量影响分析[J]. 自然资源学报,2015,30(4):664-672.
- [4] 李志,刘文兆,郑粉莉,等. 黄土塬区气候变化和人类活动对径流的影响[J]. 生态学报,2010,30(9):2379-2386.
- [5] 林凯荣,何艳虎,陈晓宏. 气候变化及人类活动对东江流域径流影响的贡献分解研究[J]. 水利学报,2012,43(11):1312-1321.
- [6] 于延胜,陈兴伟. R/S 和 Mann-Kendall 法综合分析水文时间序列未来的趋势特征[J]. 水资源与水工程学报,2008,19(3):41-44.
- [7] 黄峰,夏自强,王远坤. 长江上游枯水期及 10 月径流情势分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(2):129-133.
- [8] 蒋观滔,高鹏,穆兴民,等. 退耕还林(草)对北洛河上游水沙变化的影响[J]. 水土保持研究,2015,22(6):1-6.
- [9] Koster R D, Suarez M J. A simple framework for examining the interannual variability of land surface moisture fluxes[J]. Journal of Climate,1999,12(7):1911-1917.
- [10] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. Water resources Research,2001,37(3):701-708.
- [11] Sun G, McNulty S G, Lu J, et al. Regional annual water yield from forest lands and its response to potential deforestation across the southeastern United States [J]. Journal of Hydrology,2005,308(1):258-268.
- [12] 赵阳,余新晓,郑江坤,等. 气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响[J]. 农业工程学报,2012,28(22):252-260.
- [13] Peng J, Chen S, Dong P. Temporal variation of sediment load in the Yellow River basin, China, and its impacts on the lower reaches and the river delta[J]. Catena, 2010,83(2):135-147.
- ~~~~~
- (上接第 124 页)
- [5] Chen X, Su Z, Ma Y, et al. An improvement of roughness height parameterization of the Surface Energy Balance System (SEBS) over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,2013,52(3):607-622.
- [6] 马耀明,仲雷,田辉,等. 青藏高原非均匀地表区域能量通量的研究[J]. 2006.
- [7] 张海宏,周秉荣,肖宏斌. 高寒草甸和高寒湿地土壤水热特征比较[J]. 干旱气象,2015,33(5):783-789.
- [8] 李艳芳,孙建. 青藏高原 NDVI 时空变化特征研究(1982—2008)[J]. 云南农业大学学报:自然科学,2015,30(5):790-798.
- [9] 石玉立,宋蕾. 1998—2012 年青藏高原 TRMM3B43 降水数据的校准[J]. 干旱区地理,2015(5):900-911.
- [10] 许时光,牛铮,沈艳,等. CMORPH 对青藏高原地区夏季降水的模拟精度研究与修正[J]. 遥感信息,2015(1):71-76.
- [11] 杨秀芹,王国杰,潘欣,等. 基于 GLEAM 遥感模型的中国 1980—2011 年地表蒸散发时空变化[J]. 农业工程学报,2015,31(21):132-141.
- [12] 陈少勇,王劲松,邢晓宾,等. 青藏高原 OLR 异常与中国西北干旱区气温的关系[J]. 干旱气象,2011,29(3):276-282.
- [13] Wang K, Wang P, Li Z, et al. A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2007,112(D15).
- [14] Wang K, Liang S. Estimation of daytime net radiation from shortwave radiation measurements and meteorological observations[J]. Journal of applied Meteorology and Climatology,2009,48(3):634-643.
- [15] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56[J]. FAO, Rome,1998,300(9):D05109.
- [16] 梁顺林,范闻捷. 定量遥感[M]. 北京:科学出版社,2009.