

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.06.01

降水和下垫面对流域径流量影响的定量研究

王少丽¹, 臧敏², 王亚娟², 王材源², 管孝艳¹

(1. 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100048; 2. 北京市水文总站, 北京 100089)

摘要: 定量分析降水和下垫面变化对径流的影响,对流域水资源规划管理具有重要的意义。以北京市漫水河流域为研究对象,对漫水河 1956-2016 年年降水量、天然径流量的变化趋势及突变性进行了分析,以径流变异前 1956-1979 时间段为基准期,建立降水径流双累积曲线关系,识别与基准期相比不同时期降水和下垫面条件变化对天然径流的贡献率。结果表明:2000 年以后流域内耗水、水利工程调蓄水等人类活动的直接影响有所减少,与 1956-1979 年基准期相比,1990-1999 年降水量的影响程度大于下垫面,为 63.9%;1980-1989、2000-2009、2010-2016 年 3 个时期下垫面对径流量减少的影响程度均大于降水,降水量和下垫面对径流量减少的贡献率分别为 44.9% 和 55.1%、47.9% 和 52.1%、44.5% 和 55.5%。

关键词: 降水量; 下垫面; 径流量; 人类活动; 漫水河流域

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)06-0001-05

Quantitative study of precipitation and underlying surface effect on watershed runoff

WANG Shaoli¹, ZANG Min², WANG Yajuan², WANG Caiyuan², GUAN Xiaoyan¹

(1. Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. Beijing Hydrological General Station, Beijing 100089, China)

Abstract: Quantitative analysis of the impact of precipitation and underlying surface changes on runoff is of great significance to water resources planning and management in river basins. Taking Manshuihe watershed, Beijing as the research object, the trend and abrupt change point of the annual precipitation and natural runoff series from 1956 to 2016 were analyzed, the relationship of double cumulative curve between annual precipitation and natural runoff was established based on data in the period of 1956-1979 which was before the runoff abrupt change, and the contribution rates of precipitation and underlying surface changes on natural runoff were identified for different period compared with the base period 1956-1979. The results showed that the direct effect of human activities such as water consumption, regulation and storage of water conservancy project after 2000 year decreased. The effect of precipitation on runoff reduction for 1990-1999 period was 63.9%, greater than that of underlying surface change. The effect of underlying surface change on runoff reduction for 1980-1989, 2000-2009 and 2010-2016 periods was greater than that of precipitation, the contribution rates of precipitation and underlying surface changes on runoff reduction were respectively 44.9% and 55.1% for 1980-1989, 47.9% and 52.1% for 2000-2009, 44.5% and 55.5% for 2010-2016.

Key words: precipitation; underlying surface; runoff; human activities; Manshuihe watershed

1 研究背景

气候变化和人类活动是影响流域水文循环过程

和水资源演变规律的驱动因素,其带来的水文效应受到各国学者的广泛关注^[1-4]。气候变化导致降水、气温等气象因子发生变化,统计分析表明,1965

收稿日期:2019-06-10; 修回日期:2019-08-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1508301);国家自然科学基金项目(51779274);青海省科技计划项目(2017-NK-155);宁夏重点研发计划重大项目(2018BBF02022)

作者简介:王少丽(1963-),女,江苏无锡人,博士,教授级高级工程师,主要从事农田灌排理论与技术、农田水环境保护等方面的研究。

-2014年华东地区降水明显增多,西南、华北地区降水减少^[5]。同时,人类活动影响的加剧,使流域下垫面条件发生明显变化,土地利用方式的变化,改变了流域下渗、蒸散发、径流等水文过程的特征^[6-8]。流域地表径流是水文循环的重要环节和水均衡的基本要素,是人类可利用水资源的重要组成部分,研究表明地表径流是气候条件与人类活动综合作用的产物^[9-10]。在气候较为干燥的地区,径流对气候和下垫面变化均较为敏感,在气候较为湿润的地区,径流对气候和下垫面变化均不敏感^[11],量化气候变化与人类活动对径流变化的贡献率对水资源管理具有重大意义^[12]。

近年来,围绕地表径流演变特征及驱动因素、气候变化和人类活动对地表径流的影响开展了较多的工作,莫崇勋等^[13]根据永定河流域1957-2010年降水径流资料,基于弹性系数法分析得出该流域降水量和径流量呈现递减趋势,气候变化和人类活动引起的径流量变化率分别为28%和72%。夏伟等^[14]以泃河流域为研究对象,采用累积量斜率变化率比较法分析表明,以1965-1987年为基准期,1988-1996和1997-2016年两个时期降水量和人类活动对径流量减小的相对贡献率为37.69%和62.31%及-11.92%和111.92%。Ashofteh等^[15]采用IHACRES模型模拟气候变化和人类活动对伊朗Aidoghmoush流域径流的影响表明,气候变化和人类活动对该流域径流量减少的贡献率分别为79%和21%。李彤等^[16]采用双累积曲线法对资水流域降水量及人类活动对径流量的影响分析表明,人类活动的贡献率大幅增加并逐步成为径流量变化的主要驱动因素。

基于1956-2000年系列北京市开展了第二次水资源调查评价^[17],之后的十几年间北京市的水资源状况较之前发生了很大的变化,如连年干旱、人口快速增长、城市规模扩大、极端天气等,均在很大程度上影响了北京市水资源的时空分布格局。北京市山区面积大,占全市国土面积的62%^[18],近年来山区集水区来水量的急剧减少,造成下游水资源日趋紧张,本文以北京市漫水河流域为研究对象,基于1956-2016降水径流长系列数据,定量分析降水量和下垫面对径流量的影响,可为北京地区的水资源可持续利用和管理提供依据。

2 研究区概况

研究区漫水河流域面积653 km²,主河道长77

km,纵坡1.4‰,流域自西向东倾斜成树叶状,为封闭小流域,控制站为漫水河水文站,始建于1951年,位于北京市房山区河北镇磁家务村^[19],东经115°59',北纬39°48',漫水河水文站控制流域图见图1。漫水河水文站是大石河上游控制站,大石河是海河流域大清河水系北支的一条支流,发源于北京市房山区境内,东部和北部与永定河相邻,西部和南部与拒马河相邻,属拒马河支流。漫水河站以上流域全部为山区,上游森林密布,水土保持较好,中下游植被较差,个别地区水土流失严重。流域上游虽然建成几座小型水库和拦河坝,但尚无控制性水利工程。



图1 漫水河水文站控制流域图(单位:cm)

该流域属于温带大陆性季风气候区,季节性差别较大,冬夏两季气温变化大,冷暖气团交汇频繁,夏季时有暴雨发生,是北京市暴雨频发地之一。1956-2016年年平均降水量为590.8 mm,降水量年内变化极不均匀,全年80%以上降水量集中在6-9月份。

3 数据来源与研究方法

漫水河流域1956-2016年年降水量、实测径流量、天然径流量系列来源于全国第三次水资源调查评价结果。天然径流是降水和下垫面条件(人类活动间接影响)共同作用的产物,人类活动间接影响主要表现为水土保持工程、城市化、道路硬化、森林砍伐、土地垦殖等改变流域产汇流条件的下垫面变化;而实测径流还受人类活动的直接影响,主要表现为人为从河道内取水或引水到河道外减少下游断面的径流量,或跨流域调水增加下断面径流量,利用水利工程调蓄改变下断面径流过程。因此,将人类活动中的耗水量进行还原,即由实测径流量加上耗水量,还原后的径流量认为是天然径流量。径流还原量考虑了漫水河站上游农业灌溉用水量、工业及生活用水量、鸽子台水库蓄水变量、万佛堂泉水量。农

业灌溉和工业、生活用水量来源于统计月报,2001 年以后无泉水量,计算不再还原。

采用 Mann - Kendall (MK) 方法对降水量、天然径流进行趋势变化和突变性检验分析,识别降水和径流量时间序列的突变点,以径流量变异点前作为受人类活动影响较小的基础期,采用双累积曲线建立径流量变异前累积天然径流深与累积降水量关系式,并用人类活动影响显著时期(变异期)累积降水量计算得到变异期的模拟累积天然径流深,认为模拟径流深与基准期下垫面条件近似相同,对比人类活动影响显著时期与基础期的实测径流量、天然径流量、模拟计算径流量等变化,分析不同时期降水量和下垫面对径流量影响的贡献率。

4 年降水量和天然径流量变化特征

漫水河流域 1956 - 2016 年降水量、天然径流深年际变化趋势如图 2 所示。由图 2 可以看出,降水量和径流深随时间变化均呈递减趋势,且径流深的减小趋势更为显著,特别是 2000 年以来径流深减小明显。流域降水量年际间变化大,存在丰水年与枯水年交替现象, M - K 统计量 Z 为 -1.81 ,其绝对值小于显著水平 0.05 的正态分布临界值 1.96,说明

降水量序列呈下降趋势但不显著。随降水量的年际波动,径流量也呈现波动变化, M - K 统计量 Z 为 -3.94 ,其绝对值大于显著水平 0.01 的正态分布临界值 2.32,表明径流量在过去的 1956 - 2016 年间呈极显著下降趋势。

受气候变化和人类活动显著影响后,水文序列的天然平稳性会受到干扰或破坏,某种程度上水文序列不同于天然序列而呈现出阶段性或趋势性变化,据此估计水文序列的显著转折点。采用 M - K 方法对年降水量和径流量的突变检验结果见图 3。图 3 表明,从 1956 年至今,降水量 UF 统计量均小于 0,表明降水量总体呈下降趋势, UF 曲线在 20 世纪 70 年代中后期到 80 年代末、2000 年左右至今有两个急剧的下降趋势,表明在这两个时期内降水量处于由多到少的变化趋势。20 世纪 90 年代 UF 曲线有较明显的上升趋势,表明该期间降水量处于由少到多的变化趋势,并且近 10 年 UF 统计量接近 0.05 显著水平下限,说明近期降水量下降趋势显著。降水量的两条时间序列线在 20 世纪 60 年代存在一个突变点、70 年代存在 5 个突变点,分别是 1965、1970、1971、1972、1974 和 1976 年,20 世纪 70 年代降水情况处于波动频繁状态。

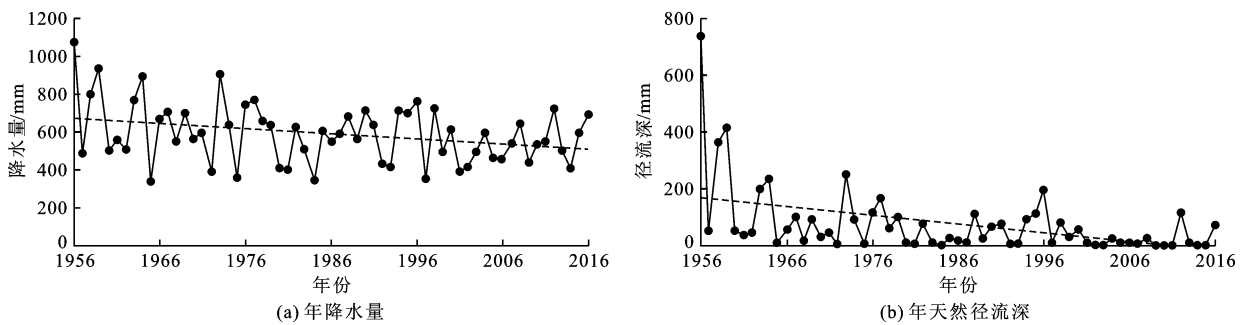


图 2 1956 - 2016 年漫水河流域年降水深和天然径流深年际变化

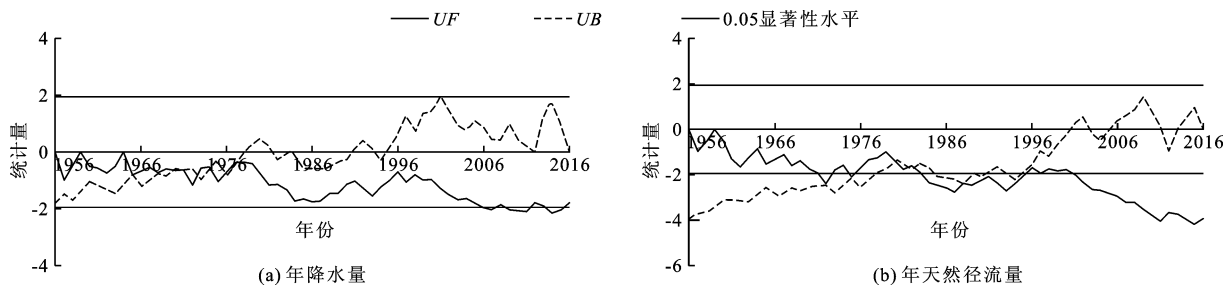


图 3 1956 - 2016 年漫水河流域年降水量和径流量 M - K 突变检验

径流量 M - K 检验中的 UF 曲线走势表明,与降水量一样,从 1956 年至今 UF 统计量均小于 0,表明径流量总体呈下降趋势,从 1956 年到 20 世纪 70 年代初期,径流量下降趋势明显。20 世纪 70 年代

UF 曲线有较明显的上升趋势,这期间也是降水波动频繁时期,1979 年开始 UF 曲线急剧下降,这期间也是降水量减小时期,之后变化较为平稳,但 UF 统计量均超出 0.05 显著水平下限,2000 年以后 UF 曲线

下降趋势显著, UF 统计量远超出 0.05 显著水平下限, 表明径流量下降趋势显著。径流量的两条时间序列线, 在信度线范围内的 1980 年有一个突变点。

5 降水量和下垫面对径流量影响的定量表征

国内许多学者经研究发现, 人类活动导致下垫面的变化一般发生在 20 世纪 80 年代以后, 根据突变检验分析也可看到, 漫水河流域径流量在 1980 年有 1 个突变点, 因此, 近似假定 1956 - 1979 年间为受人类活动影响相对较小的基准期, 建立这一时期的降水量 - 天然径流量双累积曲线关系, 定量分析降水量和下垫面条件变化对径流量的影响。图 4 (a) 为漫水河流域 1956 - 1979 年降水量和天然径流深双累积曲线关系, 相关系数达 0.98, 相关程度较高。将 1980 - 2016 年累积降水量数据代入双累积曲线关系式, 计算该时段在假设下垫面条件与

1956 - 1979 相近条件下的累积径流深, 记为 $R_{拟合}$, $R_{拟合}$ 与 $R_{天然}$ 径流深对比如图 4 (b) 所示。

人类活动对地表径流的影响可划分为水资源开发利用活动的直接影响和下垫面渐变累积的间接影响。以 1956 - 1979 年为基础期, 对比 1980 - 1989、1990 - 1999、2000 - 2009、2010 - 2016 年不同时期模拟径流深与 1956 - 1979 年天然径流深、不同时期模拟径流深与同期天然径流深的变化, 统计降水 and 下垫面条件变化对天然径流深的影响, 结果如表 1 所示。人类活动对流域径流量的直接影响可表示为 1979 年后实测径流量 $R_{实测}$ 与天然径流量 $R_{天然}$ 的差值, 即对应表 1 中的耗水量一列; 人类活动对流域径流量的间接影响可表示为 1979 年后天然径流量 $R_{天然}$ 与 $R_{拟合}$ 差值, 即下垫面的影响, 对应表 1 中的下垫面影响一列; 人类活动对流域径流量的综合影响为 1979 年后实测径流量 $R_{实测}$ 与 $R_{拟合}$ 的差值, 即表 1 中耗水量与下垫面影响量之和。

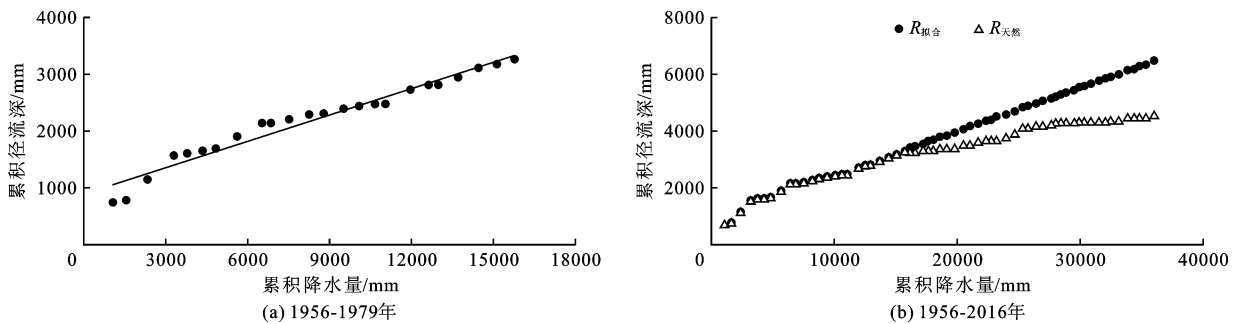


图 4 1956 - 2016 年不同时期降水量和天然径流深双累积曲线

表 1 与 1956 - 1979 年相比不同时期降水量和下垫面对天然径流深的影响

时期(年份)	径流深/mm			耗水量/ mm	径流深影响/mm		贡献率/%	
	$R_{实测}$	$R_{天然}$	$R_{拟合}$		降水影响量	下垫面影响量	降水	下垫面
1956 - 1979	115.5	136.1		20.6				
1980 - 1989	15.6	29.6	88.2	14.0	47.9	58.7	44.9	55.1
1990 - 1999	46.3	66.9	91.9	20.6	44.3	25.0	63.9	36.1
2000 - 2009	11.8	15.0	78.1	3.2	58.0	63.1	47.9	52.1
2010 - 2016	26.3	28.8	88.3	2.5	47.8	59.6	44.5	55.5

由表 1 可以看出, 2000 年以前流域耗水量为 14.0 ~ 20.6 mm, 2000 年以后流域耗水量降到 2.5 ~ 3.2 mm。与 1956 - 1979 年相比, 除 1990 - 1999 外, 其他时期下垫面对径流减少的影响程度均大于降水量, 并且降水量和下垫面对径流深减少的影响程度相近, 分别为 44.9%、55.1%, 47.9%、52.1% 和 44.5%、55.5%, 而 1990 - 1999 年降水影响程度

大于其他时期, 为 63.9%。

人类活动直接影响和间接影响都促使径流量减小, 人类活动的直接影响在 20 世纪 90 年代有所增加, 2000 - 2016 年趋于减小; 人类活动的间接影响在 1980 - 2016 年期间呈现增大 - 减小 - 增大 - 稳定趋势; 人类活动的综合影响在 1990 - 1999 年最小, 2000 年以后略有增加。

6 结 论

采用 M-K 方法对北京市漫水河流域降水量、天然径流量进行趋势变化和突变性检验分析,采用双累积曲线分析降水量和径流深关系,识别降水和下垫面对流域径流的影响程度,主要结论如下:

(1)漫水河流域 1956-2016 年降水量和径流量随时间变化均呈递减趋势,且径流量的下降趋势更为显著,特别是 2000 年以来径流量减小明显,径流量在 1980 年有 1 个突变点。

(2)以 1956-1979 年为基准期,划分 1980-1989、1990-1999、2000-2009、2010-2016 年 4 个时期,与 1956-1979 年相比,除 1990-1999 年外,其他时期下垫面对径流量减少的影响程度均大于降水量,分别为 44.9% 和 55.1%、47.9% 和 52.1%、44.5% 和 55.5%,而 1990-1999 年降水量影响程度最大,为 63.9%。1980-2016 年降水量和下垫面对径流影响的平均贡献率为 49.3% 和 50.7%。

(3)人类活动的直接影响和间接影响都促使径流量减小,流域内耗水、水利工程调蓄水等人类活动的直接影响在 2000 年以后趋于减小,人类活动的间接影响即下垫面变化在 1980-2016 年期间呈现增大-减小-增大-稳定趋势。

参考文献:

- [1] AHN K H, MERWADE V. Quantifying the relative impact of climate and human activities on streamflow[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,515:257-266.
- [2] PIAO Shilong, Ciais P, HUANG Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. *Nature*, 2010,467(7311):43-51.
- [3] 王玉洁,秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13(5):483-493.
- [4] 李紫妍. 汉江上游水文气象时空变异和水文模拟的不确定性评估[D]. 西安:西安理工大学, 2019.
- [5] 佟金鹤. 1965-2014 年我国温度和降水变化趋势分析[J]. *安徽农业科学*, 2016,44(12):229-235+259.
- [6] 董国强,杨志勇,于赢东. 下垫面变化对流域产汇流影响研究进展[J]. *南水北调与水利科技*, 2013,11(3):111-

117+126.

- [7] 宫兴龙,付强,王斌,等. 土地利用方式变化对水循环过程响应机制研究[J]. *农业机械学报*, 2018,49(2):252-259.
- [8] 王莺,王劲松,武明,等. 土地利用和气候变化对嘉陵江流域水文特征的影响[J]. *水土保持研究*, 2019,26(1):135-142.
- [9] 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.
- [10] WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, PAGANO T C, et al. Identifying contributions of climate change and human activity to changes in runoff using epoch detection and hydrologic simulation[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013,18(11):1385-1392.
- [11] 张树磊,杨大文,杨汉波,等. 1960-2010 年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. *水科学进展*, 2015,26(5):605-613.
- [12] 黄斌斌,郝成元,李若男,等. 气候变化及人类活动对地表径流改变的贡献率及其量化方法研究进展[J]. *自然资源学报*, 2018,33(5):899-910.
- [13] 莫崇勋,阮俞理,莫桂燕,等. 基于弹性系数法的径流对气候变化与人类活动响应研究[J]. *水文*, 2018,38(2):41-45.
- [14] 夏伟,周维博,李文溢,等. 气候变化和人类活动对洋河流域径流量影响的定量评估[J]. *水资源与水工程学报*, 2018,29(6):47-52.
- [15] ASHOFTEH P S, BOZORG-HADDAD O, LOÁICIGA, H A, et al. Evaluation of the impacts of climate variability and human activity on streamflow at the basin scale[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2016,142(8):1-9.
- [16] 李彤,胡国华,顾庆福,等. 近 55 年来降水及人类活动对资水流域径流的影响[J]. *水文*, 2018,38(6):54-58+88.
- [17] 张士锋,孟秀敬,廖强. 北京市水资源与水量平衡研究[J]. *地理研究*, 2012,31(11):1991-1997.
- [18] 路炳军,王志强. 北京西部山区径流小区产流产沙和土壤养分流失特征[J]. *中国水土保持科学*, 2015,13(6):33-39.
- [19] 杨凌,崔恩瑞,董志东,等. 大石河漫水河站“7.21”与“7.20”暴雨洪水对比分析[J]. *北京水务*, 2017(S1):69-72.