

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0037

程娅姗,王中根,刘丽芳,等.近50年潮河流域降雨-径流关系演变及驱动力分析[J].南水北调与水利科技,2018,16(2):45-50.
CHENG Y S, WANG Z G, LIU L F, et al. Analysis of rainfall runoff variations and the driving factors identification over the past 50 years in Chaohe River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 45-50. (in Chinese)

近50年潮河流域降雨-径流关系演变及驱动力分析

程娅姗^{1,2}, 王中根¹, 刘丽芳¹, 刘晓聪^{1,2}, 郭禹含^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 潮河流域是北京市城市供水的重要水源地。受环境变化影响, 潮河流域降雨-径流关系发生了显著性变化, 严重影响到北京城市供水安全。利用水文气象长系列数据(1961-2014年)分析了潮河流域降雨-径流关系的变化, 采用经验统计分析法定量分析气候变化和人类活动对其径流变化的影响, 研究发现: 近50年来在降雨波动且微弱下降趋势下, 其径流呈现出较大幅度变化且具有显著下降趋势, 尤其是2000年以后; 潮河流域降雨-径流关系发生突变的年份为1979年、1998年。1979年以后径流系数显著减少, 其中1979-1998年人类活动对径流减少占主导地位, 其影响贡献率为-109.75%, 气候变化对径流影响为正效应, 影响贡献率为9.75%; 1999-2014年人类活动对径流减少影响贡献率为-88.97%, 气候变化影响贡献率为-11.03%。

关键词: 潮河流域; 降雨-径流; 趋势变化; 突变点; 影响因素

中图分类号: TV 122 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2018)02-0045-06

Analysis of rainfall runoff variations and the driving factors identification over the past 50 years in Chaohe River Basin

CHENG Yashan^{1,2}, WANG Zhonggen¹, LIU Lifang¹, LIU Xiaocong^{1,2}, GUO Yuhan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Chaohe River Basin is an important water source of Beijing. Due to the environmental change, a significant variation occurred to the rainfall runoff relationship of Chaohe River Basin, and this change affected the regional water supply seriously. We analyzed the variation of rainfall runoff relationship with the long-term hydro-meteorological data (from 1961 to 2014) of Chaohe River Basin, and established an empirical statistical analysis model to analyze quantitatively the impact of climate change and human activity on the runoff condition. The results showed that (1) the runoff changed drastically, and presented a marked dropping trend after 2000, whereas the precipitation showed an insignificant declining trend. (2) The relationship between rainfall and runoff changed abruptly in 1979 and 1998. (3) The runoff coefficient decreased significantly after 1979, and human activity kept a negative effect on runoff, and was always the more dominant factor as compared to climate change. (4) The contribution rate of human activity was -109.75% during 1979 to 1998 and -88.97% during 1999 to 2014, while the contribution rate of climate change was 9.75% during 1979 to 1998 and -11.03% during 1999 to 2014.

Key words: Chaohe River Basin; rainfall runoff; trend change; abrupt change; influence factors

收稿日期: 2017-09-15 修回日期: 2017-12-25 网络出版时间: 2018-01-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180129.0850.002.html>

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFB0203101); 国家自然科学基金重点基金(41330529)

Funds: National Key Research & Development Program of China during the Thirteenth Five year Plan Period(2017YFB0203101); State Key Program of National Natural Science Foundation of China(41330529)

作者简介: 程娅姗(1993-), 女, 河南驻马店人, 博士研究生, 主要从事水循环模拟方面研究。E-mail: chengyashan77@163.com

通讯作者: 王中根(1973-), 男, 河南信阳人, 研究员, 博士, 主要从事水循环模拟和水资源管理方面研究。E-mail: wangzg@igsnr.ac.cn

受气候变化和人类活动的双重影响,我国许多流域的降雨-径流关系发生了显著的变化,严重影响区域防洪与供水安全,尤其是北方缺水地区^[1,3]。潮河流域是北京城市供水的重要水源地,其径流演变关系到密云水库来水量变化。近年来,密云水库来水量不断减少,特别是1999年以来,蓄水量逐年减少,供水压力不断增加,北京水资源短缺问题日益突出^[4]。研究变化环境下潮河流域降雨-径流关系,对北京市水资源管理具有重要意义。

流域降雨-径流关系演变分析是当前国际水文水资源领域研究的前沿与热点之一。国内外的学者们对世界不同地区流域的降雨-径流关系展开了广泛研究,认为气候变化和人类活动是导致降雨-径流关系改变的主要原因^[5,12]。潮河流域降雨-径流关系变化一直是学者们研究的热点^[13-17]。李子君^[13]等分析1961-2005年潮河流域降雨和人类活动对径流的影响发现,降水量下降的趋势不明显,但径流量下降的趋势相当明显;进一步计算发现,人类活动(修建蓄水工程、取用水、退耕还林、荒山造林和坡改梯等土地利用活动)和降雨变化对径流的影响都是负效应,且人类活动对径流减少的影响远大于降水因素;郭军庭^[14]等人用SWAT模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响发现,相对1981-1990年,1991-2000年气候变化对径流的影响为正效应,土地利用变化为负效应。杨默远^[15]等分析1973-2010年潮河流域降雨年内分配对降雨-径流关系的影响发现,1973-2010年降水集中度下降会引起产流减少,且径流的变化与大雨日降水总和($P \geq 20$)的变化有关。通过这些研究可知降水年际年内变化以及人类活动都会对径流的变化产生影响,然而随着降雨-径流分析数据时间序列长度的变化,气候变化对径流的影响结论并不统一。

本文选用潮河流域1961-2014年长系列逐日降雨、径流数据,通过Mann-Kendall方法和降雨-径流双累积曲线分析潮河流域降雨-径流关系的演变规律,从降雨的年际年内变化以及人类活动等几个方面进一步探究降雨-径流关系变化的原因并定量计算它们的影响。研究成果可为区域水资源管理提供科学依据。

1 研究区概况

潮河位于北京东北(116°10'E-117°35'E, 40°35'N-41°37'N),源于河北省丰宁县曹碾沟南山,经滦平县到古北口入北京市密云县境,在密云县城西南河漕村东与白河汇流后,称潮白河,流域具体

位置见图1,流域总面积4835 km²。潮河流域处于半干旱半湿润地区,属于中纬度温带大陆性季风气候,四季分明,干旱冷暖变化显著。流域年均气温11.14℃,年平均降雨量为487 mm,降雨量时空差异较大,降雨分布一般是从东南向西北递减,从时间分布上来看,降雨多集中在6月-9四个月份,占全年降水量的79.8%。流域内以耕地、草地和林地为主,占总面积的95%以上。

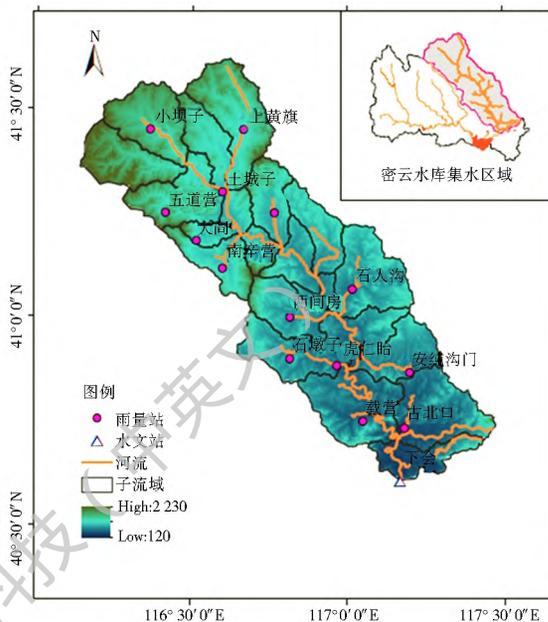


图1 潮河流域地理位置与水文站点分布

Fig. 1 Location of Chaohai River Basin and distribution of the hydrological stations

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

收集整理了1961-2014年流域内15个雨量站逐日实测降水数据和潮河流域出口下会水文站54年的逐日实测径流数据,降水数据和径流数据都来自海河流域水文年鉴。水文气象站点的空间分布如图1所示。以流域内15个站点的实测逐日降雨量为基础,采用泰森多边形法得到流域面平均降雨量。

2.2 研究方法

采用Mann-Kendall(MK)方法^[18,19]分别对气温、降水和径流数据进行趋势分析和突变点检验,用降雨-径流双累积曲线判断降雨-径流关系的突变点。采用经验统计分析方法^[13,20,23]定量分析气候变化和人类活动对径流量的影响。

通过建立累积年径流与累积年降雨量的经验统计模型,分析不同时期的降雨-径流响应关系的变化,进而计算得到人类活动和气候变化对径流变化

的影响程度。经验统计模型的公式为:

$$\Sigma R = a \Sigma P + b \quad (1)$$

式中: ΣR 为多年累积径流深(mm); ΣP 为多年累积降雨深(mm); a 、 b 为常数。

将降雨-径流关系突变前的时间称为天然期, 突变后的时间称为变化期。将天然期的线性回归方程代入变化期, 以变化期的累计降水量 $\Sigma P_{2,m}$ 得到计算的累计径流深 $\Sigma P_{2,c}$, 此时得到的计算累计径流深的下垫面条件和天然期一致。则变化期的实测平均径流深 $R_{2,m}$ 与计算平均径流深 $R_{2,c}$ 的差值由人类活动引起, 变化期的计算平均径流深 $R_{2,c}$ 与天然期的实测平均径流深 $R_{1,m}$ 之差表示了气候变化对径流的影响。定义影响贡献率为气候因素或人类活动影响量与二者之和的比值。即

$$\Delta R_{hum} = R_{2,m} - R_{2,c} \quad (2)$$

$$\Delta R_{di} = R_{2,c} - R_{1,m} \quad (3)$$

$$\text{影响贡献率} = \frac{\Delta R_{hum} \text{ 或 } \Delta R_{di}}{\Delta R_{hum} + \Delta R_{di}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: ΔR_{hum} 和 ΔR_{di} 分别表示在人类活动和气候因素影响下的径流深变化量(mm)。

3 结果与分析

3.1 潮河流域降雨、径流变化

流域年降雨量和径流量随时间的变化及其 MK 检验结果如图 2 所示, 从图中可知: (1) 1961-2014 年潮河流域年降水量呈不显著下降趋势 ($Z = -0.15$); (2) 1961-2014 年流域径流深呈现显著下降趋势 ($Z = -4.03$), 突变点发生在 1998 年; (3) 1961-2014 年间该流域径流较降水存在明显的下降趋势, 特别是 1998 年之后径流一直处于较低水平。

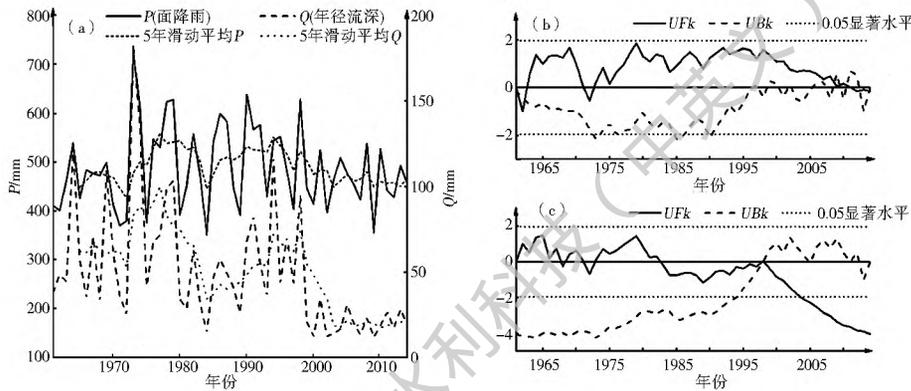


图 2 流域降雨、径流随时间的变化(a)、流域面降雨 MK 检验结果(b)和流域径流深 MK 研究结果(c)

Fig. 2 The variations of average annual rainfall and runoff in Chaohe River Basin during 1961 to 2014 (a), MK test results of average annual rainfall (b) and MK test results of runoff (c)

为进一步分析流域降雨-径流关系的变化, 点绘了潮河流域 1961-2014 年的累积降水深和累积径流深的关系以及潮河流域径流系数随时间的变化(如图 3)。从图 3(a)中可知, 潮河流域的降雨-径流关系在 1979 年和 1998 年发生突变, 并且双累积曲

线逐渐向右偏转; 从图 3(b)中可知, 潮河流域 1961-1979 年、1980-1998 年、1999-2014 年多年平均径流系数分别为 0.14, 0.10, 0.04, 径流系数整体呈明显下降趋势。降雨-径流双累积曲线和径流系数的变化都表明降雨对径流的影响在逐渐减弱。

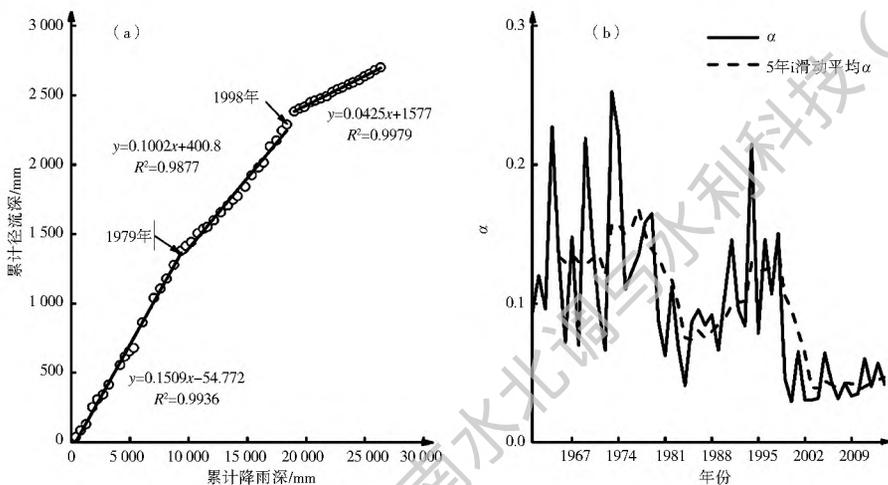


图 3 降雨-径流双累积曲线(a)和径流系数 α 变化(b)

Fig. 3 The double mass curve of rainfall and runoff (a) and variation of runoff coefficient (b)

3.2 降雨-径流关系变化影响因素分析

3.2.1 气象因素

流域产流与降水的总量、年内分配和降水强度等有关。径流量随着降水总量的增减而增减。潮河流域 1961-1979 年、1980-1998 年、1999-2014 年多年平均降水量分别为 493.65 mm, 505.83 mm, 459.41 mm, 流域多年平均径流深分别为 72.71 mm, 52.74 mm, 19.85 mm; 1980-1998 年流域多年平均降水量相比 1961-1979 年增加 2.47%, 径流深减少 27.47%; 1999-2014 年流域多年平均降水量相比 1961-1979 年减少 6.94%, 径流深减少 72.70%。1980-1998 年降水量的增加能够引起径流的增加, 而 1999-2014 年流域径流深的减少与此时段降水量的减少有关, 此外, 连续的枯水年也引起了地下水位的连年下降, 有效降雨大多补给地下水, 这也导致了产流减少。

降水量的年内分配也会影响流域产流。1964-2014 年潮河流域汛期降水所占比例的 MK 检验结果 Z 值为 -2.95, 这说明 54 年来流域内降水的年内分配有坦化趋势。1961-1979 年、1980-1998 年和 1999-2014 年多年平均汛期降水占比分别为 82.43%、80.40%、75.59%, 随着汛期降水占比的减少, 流域径流也会有所减少。

不同强度降雨的产流能力不同, 随着降雨强度的增加, 流域产流能力增加, 因此汛期内降水在不同等级的分配也会对径流产生影响。杨默远等的研究表明, 潮河流域的径流与 20 mm 以上降水有关, 因此本文在考虑不同等级降雨对径流影响时, 将中雨进一步分为大于等于 20 mm 和小于 20 mm 两类。潮河流域汛期不同等级降雨量所占的比例见表 1。从表 1 可知: (1) 与 1961-1979 年相比, 1980-1998 年的小雨和大雨有所减少, 中雨和暴雨有所增加, 总体说来大于等于 20 mm 降水量有所增加, 这有利于产流; (2) 与 1961-1979 年相比, 1999-2014

年小雨和中雨增加, 大雨和暴雨有所减少, 总体说来大于等于 20 mm 降水量有所减少, 降雨的年内分配有向小雨集中的趋势, 这不利于产流。

表 1 汛期不同等级雨量所占比例分布

Tab. 1 Proportions of different rainfall levels in flood season (%)

| 24 h 雨量/mm | 1961-1979 年 | 1980-1998 年 | 1999-2014 年 |
|----------------|-------------|-------------|-------------|
| < 10(小雨) | 53.11 | 44.78 | 53.51 |
| 10~ < 20(中雨 1) | 21.22 | 27.91 | 26.35 |
| 20~ < 25(中雨 2) | 6.95 | 9.70 | 7.16 |
| 25~ < 50(大雨) | 14.54 | 13.06 | 12.12 |
| ≥50(暴雨) | 4.18 | 4.55 | 0.91 |

通过对潮河流域 1961-1979 年、1980-1998 年、1999-2014 年降水总量、年内分配和降水强度分析发现: 相比于 1961-1979 年, 1980-1998 年潮河流域年降水总量增加 2.47%, 汛期大于 20 mm 的降水量增加 1.64%, 但汛期降雨所占比例减少 2.03%, 径流深减少 27.47%; 1999-2014 年流域降水总量减少 6.94%, 汛期降雨占比减少 6.84%, 大于 20 mm 的降雨减少 5.48%, 而径流深减少 72.70%。径流深减少的速度远大于降水减少的速度。

与 1961-1979 年相比, 1980-1998 年在汛期降雨占比略微减少的情况下大于等于 20 mm 降水量有所增加, 降雨的集中度增高, 有利于产流, 但是流域的径流深却大幅减少, 这说明气候因素并不是潮河流域降雨-径流关系在 1979 年产生突变的主要原因。

3.2.2 人类活动

降水、径流变化趋势的不一致性表明, 潮河流域径流的变化还受人类活动的影响。将 1961-1979 年这一阶段看作是天然状态, 称为天然期(序列 1), 而将 1980-2014 年称为变化期(序列 2), 其中 1980-1998 年称作变化期的第一阶段, 1999-2014 年称作变化期的第二阶段。人类活动和气候因素对潮河流域的径流影响计算结果如表 2。

表 2 人类活动和气候因素对潮河流域的径流影响计算结果

Tab. 2 The quantitative impact of human activity and climate change on runoff of Chaohu River Basin

| 时间 | 实测平均径流深 /mm | 计算平均径流深 /mm | 气候因素影响量 | | 人类活动影响量 | |
|-----------|----------------|----------------|---------|----------|---------|----------|
| | | | 径流深/mm | 影响贡献率(%) | 径流深/mm | 影响贡献率(%) |
| 1961-1979 | 72.71 | 71.61 | | | | |
| 1980-1998 | 52.74 | 73.45 | 1.84 | 9.75 | -20.71 | -109.75 |
| 1999-2014 | 19.85 | 65.90 | -5.71 | -11.03 | -46.05 | -88.97 |

表 2 表明, 人类活动的对潮河流域降雨-径流关系的影响在第一阶段和第二阶段都远大于气候因素对潮河流域降雨-径流关系的影响, 在变化期的第一阶段和第二阶段人类活动对径流的影响都呈负效应, 其

影响贡献率分别为 -109.75% 和 -88.97%, 而气象因素的变化使径流在第一阶段微上升而在第二阶段略微下降, 其影响贡献率分别为 9.75% 和 -11.03%。因此可以略说人类活动是潮河流域降雨-径流关系

在1979年和1998年发生突变的主要原因。

人类活动的影响主要体现在通过生产生活取用水直接改变径流状况和改变流域下垫面条件两个方面。

20世纪70年代末期流域修建了一些塘坝和小水库,总库容约1 031万 m^3 ,占流域多年平均径流量的4.26%。除了汛期蓄水枯水期排水作用之外,水库和塘坝还提供了部分人类生产生活用水,这也是造成流域径流系数减少的原因之一。但是由于设计不合理又缺乏经费支持,很多水库在80年代中后期逐渐废弃。水库和塘坝的废弃会导致径流系数的回升,但是其作用大小尚待考察。

20世纪60年代以后,随着社会的发展,人们对水资源的需求越来越大,对地表水的引用呈现出明显增大趋势。1961-1979年,1980-1998年,1999-2010年,各时段人类多年平均取用水量分别为0.21亿 m^3 ,0.32亿 m^3 ,0.55亿 m^3 ^[13],换算成径流深分别为4.34 mm,6.62 mm和11.38 mm。结合表2的结果计算可知,人类活动对径流的影响中,人类取用水的影响在1980-1998年占31.97%,在1999-2014年占24.71%。

人类取用水的影响所占比例约30%,因此认为流域下垫面条件的改变为造成流域径流明显减少的主要因素。根据郭军庭^[24]的研究,耕地、草地和林地占潮河流域总面积的95%以上。由于“退耕还林”政策的实施,1979-2009年潮河流域的土地利用情况发生了明显变化。1979-1987年,潮河流域有292.41 km^2 耕地转化为草地,339.52 km^2 草地转化为林地;1987-1999年,潮河流域耕地转化为草地和林地的面积分别为58.63 km^2 和48.11 km^2 ,500.88 km^2 草地转化为林地;1999-2009年,潮河流域耕地转化为草地和林地的面积分别为59.05 km^2 和106.49 km^2 ,763.51 km^2 草地转化为林地。以上数据表明,林地占地面积迅速增加。根据已有的研究^[25-26],在半湿润半干旱及干旱地区,林地的蒸发和耗水量远高于其他土地利用类型,加上林地的调蓄作用,导致径流明显减少。

4 结论

潮河流域是北京城市供水最重要水源地,本文基于近50年来逐日的降雨、径流数据,分析其降雨-径流关系的变化及原因,结论如下。

(1) 1961-2014年潮河流域年降水量呈不显著下降趋势,径流呈现显著下降趋势且在1998年发生突变。

(2) 潮河流域的降雨-径流关系在1979年和

1998年发生突变。相比于1961-1979年,1980-1998年潮河流域年降水总量增加2.47%,汛期大于20 mm的降水量增加1.64%,但汛期降雨所占比例减少2.03%,径流深减少27.47%;1999-2014年流域降水总量减少6.94%,汛期降雨占比减少6.84%,大于20 mm的降雨减少5.48%,而径流深减少72.70%。径流深既受到降雨总量减少的影响,也受到年内降雨坦化的影响,其减少的速度远大于降水减少的速度。

(3) 人类活动对径流变化的影响远大于气候因素对径流变化的影响,且是潮河流域降雨-径流关系在1979年和1998年发生突变的主要原因。在1980-1998年和1999-2014年人类活动对径流的影响都呈负效应,其影响贡献率分别为-109.75%和-88.97%,而气候因素变化使径流在第一阶段略微上升而在第二阶段略微下降,其影响贡献率分别为9.75%和-11.03%。

(4) 人类活动中,生产生活取用水对径流减少的影响所占比例约为30%,这说明下垫面改变对径流的影响约占70%,因此认为下垫面改变是人类互动中对降雨-径流关系产生影响的主要因素。但土地利用类型的变化和水库塘坝的调蓄作用哪个因素对流域降雨-径流关系的影响更大尚待进一步计算。

参考文献(References):

- [1] 罗亚,杨胜天,刘晓燕,等.黄土高原次降雨径流产沙变化及其与雨强和植被盖度变化的相关性[J].干旱区研究,2015,32(4):698-709. (LUO Y, YANG S T, LIU X Y, et al. Changes in event based rainfall runoff sediment and the relationships between these changes and rainfall intensity and vegetation coverage variations in Loess Plateau of China[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(4): 698-709. (in Chinese) DOI: 10.13866/j.azr.2015.04.10.
- [2] 郭爱军,畅建霞,王义民,等.近50年泾河流域降雨-径流关系变化及驱动因素定量分析[J].农业工程学报,2015,31(14):165-171. (GUO A J, CHANG J X, WANG Y M, et al. Variation characteristics of rainfall runoff relationship and driving factors analysis in Jinghe river basin in nearly 50 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 165-171. (in Chinese) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.14.023.
- [3] 张晓红,陈兴,罗连升,等.1960-2008年淮河流域面雨量时空变化及径流响应[J].资源科学,2015,37(10):2051-2058. (ZHANG X H, CHEN X, LUO L S, et al. Temporal and spatial distributions of area rainfall and the relationship with observed runoff in the Huaihe River Basin from 1960 to 2008[J]. Resources Science, 2015, 37(10): 2051-2058. (in Chinese))
- [4] 王泽勇,王艳玲.近年来密云水库水资源变化状况及其原因分析[C].2012北京水文科学技术研讨会.2012. (WANG Z Y,

- WANG Y L. Analysis of water resource variation in Miyun reservoir in recent years [C]. 2012 Beijing hydrological science and technology seminar, 2012. (in Chinese)
- [5] MORAES J M, PELLEGRINO G Q, BALLESTER M V, et al. Trends in hydrological parameters of a southern Brazilian watershed and its relation to human induced changes [J]. *Water Resources Management*, 1998, 12(4): 295-311.
- [6] BURN D H, ELNUR M A H. Detection of hydrologic trends and variability [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 255(1-4): 107-122.
- [7] BIRSAN M V, MOLNAR P, BURILANDO P, et al. Streamflow trends in Switzerland [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 314(1): 312-329. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.06.008.
- [8] KAHYA E, KALAYCI S. Trend analysis of streamflow in Turkey [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 289(1-4): 128-144. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2003.11.006.
- [9] 吕乐婷, 彭秋志, 廖剑宇, 等. 近 50 年东江流域降雨径流变化趋势研究 [J]. *资源科学*, 2013, 35(3): 514-520. (LV L T, PENG Q Z, LIAO J Y, et al. Fluctuation and Trends in precipitation and runoff in the Dongjiang River Basin over 50 years [J]. *Resources Science*, 2013, 35(3): 514-520. (in Chinese))
- [10] 刘士余, 章俊霞, 罗志军, 等. 近 50 年赣西北大坑小流域径流对降雨的响应 [J]. *水土保持研究*, 2012, 19(1): 19-22. (LIU S Y, ZHANG J X, LUO Z J, et al. Response of runoff to rainfall in dakeng small watershed in Northwestern Jiangxi Province over the last 50 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(1): 19-22. (in Chinese))
- [11] 刘正茂. 近 50 年来挠力河流域径流演变及驱动机制研究 [D]. 东北师范大学, 2012. (LIU Z M. Study on runoff evolution and its driving mechanism of Naoli River basin in recent 50 years [D]. Northeast Normal University, 2012. (in Chinese))
- [12] 宋爱英. 近 60 年石羊河流域降水径流演变趋势分析 [J]. *中国水利*, 2014, (11): 47-49. (SONG A Y. Analysis on evolution trend of precipitation runoff of Shiyanghe River Basin in recent 60 years [J]. *China water resource*, 2014, (11): 47-49. (in Chinese))
- [13] 李子君, 李秀彬. 近 45 年来降水变化和人类活动对潮河流域年径流量的影响 [J]. *地理科学*, 2008, 28(6): 809-813. (LI Z J, LI X B. Impacts of precipitation changes and human activities on annual runoff of Chao River basin during past 45 years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(6): 809-813. (in Chinese)) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2008.06.005.
- [14] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响 [J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1559-1567. (GUO J T, ZHANG Z Q, WANG S P, et al. Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 1559-1567. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201304190746.
- [15] 杨默远, 桑燕芳, 王中根, 等. 潮河流域降水—径流关系变化及驱动因子识别 [J]. *地理研究*, 2014, (9): 1658-1667. (YANG M Y, SANG Y F, WANG Z G, et al. Variation of rainfall runoff relationship and the driving factors identification in the Chaohe River Basin [J]. *Geographical Research*, 2014, (9): 1658-1667. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlyj2014090007.
- [16] 卢丽, 潘兴瑶, 李薇, 等. 潮河流域降雨径流变化趋势分析 [J]. *北京水务*, 2017, (1): 9-14. (LU L, PAN X Y, LI W, et al. Variation analysis of annual rainfall and runoff in Chao river basin [J]. *Beijing Water*, 2017, (1): 9-14. (in Chinese))
- [17] 李继清, 朱一鸣, 李建昌, 等. 变化环境对潮河下游径流一致性的影响 [J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(3): 5-12. (LI J Q, ZHU Y M, LI J C, et al. Impacts of changing environment on runoff consistency in the lower reaches of the Chao River [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(3): 5-12. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.03.002.
- [18] MERRIAM C F. A comprehensive study of the rainfall on the Susquehanna Valley [J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 1937, 18(2): 471-476.
- [19] 刘佳凯, 张振明, 鄢郭馨, 等. 潮白河流域径流对降雨的多尺度响应 [J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(4): 50-59. (LIU J K, ZHANG Z M, YAN G X, et al. Multi scale analysis on precipitation runoff relationship in Chaobaihe Basin [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(4): 50-59. (in Chinese)) DOI: 10.16843/j.sswc.2016.04.007.
- [20] 许炳心, 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. (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 [J]. *Advances in Water Science*, 2003, 14(6): 690-695. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2003.06.003.
- [21] 李二辉, 穆兴民, 赵广举. 1919-2010 年黄河上中游区径流量变化分析 [J]. *水科学进展*, 2014, 25(2): 155-163. (LI E H, MU X M, ZHAO G J. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919-2010. *Advances in Water Science*, 2014, (2): 155-163. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2014.02.004.
- [22] 许炳心. 人类活动和降水变化对嘉陵江流域侵蚀产沙的影响 [J]. *地理科学*, 2006, 26(4): 432-437. (XU J X. Effect of human activities and precipitation on sediment yield of the Jialingjiang River [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, (4): 432-437. (in Chinese)) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2006.04.008.
- [23] 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. (ZHAO Y, YU X X, ZHENG J K, et al. Quantitative effects of climate variations and land use changes on annual streamflow in Chaobai river basin [J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(22): 252-260. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.22.035.
- [24] 郭军庭. 潮河流域土地利用/气候变化的水文响应研究 [D]. 北京. 北京林业大学. 2012. (GUO J T. Hydrological responses to land use change and climate variability in the Chaohe Watershed, Beijing, China [D]. Beijing. Beijing Forest University. 2012. (in Chinese))
- [25] 王幼奇. 陕北小流域植被耗水过程及环境因素影响研究 [D]. 陕西. 西北农林科技大学. 2011. (WANG Y Q. The processes of vegetation water consumption and its influencing factors in small watershed in the Northern Loess Plateau of China [D]. Shanxi. Northwest A & F University. 2011. (in Chinese))
- [26] 唐婷, 冉圣洪, 谈明洪. 京津唐地区城市扩张对地表蒸散发的影响 [J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(2): 233-240. (TANG T, RAN S H, TAN M H. Urbanization and its impact on the evapotranspiration in Beijing Tianjin Tangshan Area [J]. *Journal of Geoinformation Science*, 2013, 15(2): 233-240. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00233.