

海河流域径流变异特征及其影响因素研究

韩雁^{1,2}, 张士锋^{1,2}

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

摘要: 径流变异是导致流域水资源可利用量变化和生态环境恶化的重要原因。将分离变量方法与 Mann-Kendall 法相结合对海河流域 1956-2016 年不同阶段径流变异特征进行分析, 定量解析了导致径流变异的各因素贡献。研究表明: 1956-2000 年期间海河流域气候变化的降水量是径流变异的主导因子, 贡献率占 80.8%; 2001-2016 年期间径流变异主导因子由降水量转变为人类活动, 导致了土地利用的变化, 使气候因子的贡献率下降至 29.0%, 下垫面的贡献率上升至 71.0%。从空间分布上, 海河北系、海河南系、徒骇马颊河流域的径流变异受降水量影响十分剧烈, 其贡献率均超过 85%; 相对其他流域径流变异, 滦河水系受下垫面的变化影响相对较大, 其贡献率为 30.2%。海河流域径流变异特征及影响研究对于流域生态环境保护与水资源可持续利用具有重要指导意义。

关键词: 径流变异; Mann-Kendall 检验; 分离变量; 海河流域

中图分类号: TV121; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)01-0007-07

Characteristics of runoff variations and their influencing factor in Haihe River Basin

HAN Yan^{1,2}, ZHANG Shifeng^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Runoff variations contribute greatly to the scarcity of available water resources and the deterioration of eco-environment system. In this paper, we analyzed the characteristics of runoff variations in Haihe River Basin during different periods using the combination of variable separation and Mann-Kendall test method, and discussed the contribution of each influencing factor quantitatively. The results indicate that the precipitation was the dominant factor of runoff variations in Haihe River Basin from 1956 to 2000, with the contribution rate of 80.8%. However, the dominant factor transformed from precipitation to land use change caused by human activities from 2001 to 2016. The contribution rate of climate change decreased to 29.0%, and that of the underlying surface rose to 71.0%. From the spatial distribution pattern, it showed that precipitation significantly affected the runoff variations of north Haihe River sub-basin, south Haihe River sub-basin and Tuhai-Majia River sub-basin, and the individual contribution rate all exceeded 85%. Compared with other sub-basins, Luan River sub-basin was affected more severely by the underlying surface, with the contribution rate of 30.2%. The study of the runoff variations and their influences can provide valuable guidance for the protection of eco-environment and the sustainable utilization of water resources in this area.

Key words: runoff variation; Mann-Kendall test; variable separation; Haihe River Basin

1 研究背景

径流变异特征及其趋势分析是进行流域水资源安全评估、水资源管理的基础。当前在气候变化和

人类活动的共同作用下, 地区径流显著减少引发的径流变异现象逐渐引起关注^[1-2], 也演变为变化环境下的水文学理论研究方向^[3-6]。20 世纪 90 年代以来, 中国北方地区各流域水循环规律发生了显著

收稿日期: 2020-04-29; 修回日期: 2020-11-10

基金项目: “十三五”国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101001); “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0401307)

作者简介: 韩雁(1978-), 男, 山西大同人, 博士, 助理研究员, 研究方向为水文水资源。

通讯作者: 张士锋(1965-), 男, 湖北荆州人, 博士, 副研究员, 研究方向为水文水资源。

变化,其基本特征为降水量小幅减少的情况下,径流量减少却十分剧烈,由此引发的水资源危机对社会经济发展产生了十分严重的影响。

气候分区上属于半湿润的中国海河流域是中国重要的经济发展区域,在近十多年以来径流变异现象十分突出。产水量的减少也必然导致入海水量的锐减和生态环境恶化等问题。自 2006 年我国发布第一次《气候变化国家评估报告》以来,很多学者都把流域的径流变异归因于气候变化的作用^[7-8],后来发现仅靠气候因素的作用无法解释水文变异,因此出现了对人类活动共同作用的综合分析。从所掌握的文献来看,径流变异的研究方法均集中在水循环要素的变化机理和规律方面^[9-10],且我国各个重点流域的水文变异是学术界关注的重点,如对黄河流域水循环变异与生态需水变化特征^[11]、渭河流域水文突变及其对气候变化的响应^[12-14]、石羊河流域水文响应^[15]、黑河流域径流变化^[16]等水文变异研究。以上研究主要是定性地分析径流变化的规律和归因,缺乏具体的量化研究,尤其缺少对径流变异在空间上的差异分析。关于气候变化与人类活动对径流变异影响的贡献率各占多少、这些贡献率如何随着空间或子流域发生变化等等都是亟待研究的问题。

海河流域的径流变化和径流变异引起了有关学者们的关注^[17-19]。根据中国水利部第二次水资源评价结果^[20],海河流域 1980 - 2000 年系列比 1956 - 1979 年系列降水量减少 11.5%,径流量减少 30.1%,这是属于正常的降水 - 径流的非线性关系,还是下垫面产流机制发生了变化?为了探索这一问题,一些学者对海河流域的水文变异特征开展了有意义的研究,如土地利用对水循环变异的影响等,但是无法定量回答气候变化和土地利用的贡献大小及其在不同时间段的变化态势。流域的产流、汇流是水循环研究的核心内容,也是国内外水科学研究的重点,径流变异直接影响了流域的产汇流过程。径流变异的内在机理如何以及在不同时期是否发生变化,基于这些问题,本文提出分离变量法,并与 Mann - Kendall 法相结合,对海河流域的降水径流演变趋势与特征进行分析,首次定量解析了研究期不同阶段气候变化与人类活动对海河流域径流变异的贡献率,识别出各子流域不同阶段径流变异的主要影响因素,并延伸探索海河流域二级区的变异特征及其对全流域的贡献,为海河流域生态环境保护与水资源的可持续利用提供了科学支撑,对于实现海河流域经济社会的可持续发展具有重要意义。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究区概况

海河流域位于东经 $112^{\circ}0' \sim 119^{\circ}48'$,北纬 $35^{\circ}0' \sim 42^{\circ}42'$,东临渤海,西倚太行,南接黄河,北接内蒙古高原,包括北京、天津、河北大部、山西东部、山东和河南的北部以及内蒙古和辽宁的部分地区,流域集水面积为 $32.0 \times 10^4 \text{ km}^2$,在我国经济社会的发展格局中占有十分重要的战略地位。海河流域水系图见图 1。

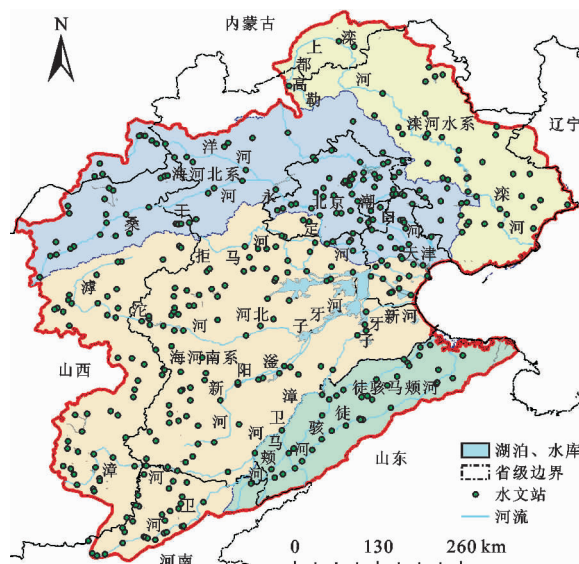


图1 海河流域水系图

海河流域多年平均降水量为 534.5 mm,河川径流量为 $214.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。20 世纪 70 年代以前,海河流域水资源问题并不十分突出,进入 20 世纪 80 年代以来,由于社会经济的发展,人类社会取水量不断增加,缺水问题逐渐显现。目前,海河流域人均水资源占有量仅为 250 m^3 ,约相当于世界人均水资源占有量的 3%,缺水问题十分突出。在近年来水资源开发利用量相对稳定的情况下,水资源短缺的主要原因是区域内水资源产水量减少,主要包括两个方面:一是气候变化原因,近年来气温升高,降水量比常年偏少;二是人类活动导致下垫面发生变化,在降水量小幅减少的情况下,河川径流量的减少却十分剧烈,即发生了径流变异现象。

2.2 研究方法

2.2.1 径流变异分析方法 产流过程是流域径流的形成过程,一个流域径流量既与地区降水量大小有关,也与下垫面的特征有关。通常情况下地区的地表径流量与降水量之间存在非线性关系,即降水

-径流关系。由于受到人类活动与气候变化的影响,降水量和下垫面均会发生改变,由此造成下垫面对地表水的阻水性、吸水性、持水性和输水性等特征均产生了变化,进而导致径流量发生变异。由于下垫面和气候因子对流域径流变异的影响是相互独立的,因此本文构建分离变量法对径流变异进行定量分析。

径流量变化可由时段初的径流量减去时段末的径流量来表述,设时段初、时段末的径流量分别为 R_0 和 R_n ,则径流量的变化量为:

$$\begin{aligned}\Delta R &= R_0 - R_n \\ &= R(P_0, G_0) - R(P_n, G_n) \\ &= R(P_0, G_0) - R(P_0, G_n) + R(P_0, G_n) - R(P_n, G_n) \\ &= \Delta R_G + \Delta R_P\end{aligned}\quad (1)$$

式中: P_0 和 P_n 分别为时段初和时段末的降水量, mm; G_0 和 G_n 分别为时段初和时段末的下垫面特征; ΔR_P 和 ΔR_G 分别为降水因子和下垫面因子对径流变化的贡献, mm。

公式(1)表明,可采用分离变量的方法将径流变化量分解为两个部分,即由降水量变化和由下垫面变化而导致的径流变化量。

2.2.2 趋势分析方法 采用普通线性回归模型估计时间序列变化趋势,将年际水文变量因子和气候因子设为因变量,时间序列设为自变量,拟合公式为:

$$y = at + b \quad (2)$$

式中: y 、 a 、 b 、 t 分别为拟合值、斜率、截距和时间(a), $a \times 10$ 为 10 a 期气候倾向率, a 为正表示变量 y 具有增大趋势, a 为负表示具有减小趋势。

非参数 Mann - Kendall (M - K) 检验是评估变量趋势显著性的有效方法,在气象和水文的时间序列突变检测中被广泛应用^[21]。对于给定的时间序列 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, 将 M - K 秩累积量序列 (S_k) 定义为:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

其中 r_i 可表示为:

$$r_i = \begin{cases} 1 & (x_j > x_i) \\ 0 & (x_j \leq x_i) \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \quad (4)$$

S_k 的均值 $E(S_k)$ 和方差 $Var(S_k)$ 分别为:

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (5)$$

$$Var(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (6)$$

将正时间序列统计量 UF_k 定义为:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{Var(S_k)} \quad (7)$$

将时间序列逆转得到逆时间序列统计量 UB_k :

$$UB_k = -UF_k \quad (k = n, n-1, \dots, 1) \quad (8)$$

由统计量 UF_k 和 UB_k 分别构成 UF 和 UB 曲线, 当 UF 和 UB 两条曲线在置信区间内相交, 若统计量超出置信区间, 则其交点为突变点。

2.3 数据来源

本研究中海河流域 1956 - 2000 年水文资料来源于全国第二次水资源评价^[22], 2001 - 2016 年水文资料来源于《中国水资源公报》(1997 - 2016)^[23], 相关气象站点的气候资料来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>)。

3 结果与分析

3.1 海河流域径流变异

3.1.1 1956 - 2000 年降水 - 径流关系变化结果与分析 本研究首先选取全国第二次水资源评价的 1956 - 2000 年的降水 - 径流关系作为研究对象, 对其水文变异规律进行分析, 同时根据公式(1)进行径流变异的分离变量分析, 可以得到降水因子和下垫面因子对水文变异的贡献率。

由于我国第一次水资源评价的降水系列为 1956 - 1979 年系列, 因此可将 1956 - 2000 年系列拆分为发生水文变异前、后的 1956 - 1979 年系列和 1980 - 2000 年系列。表 1 为 1956 - 2000 年海河流域不同时段年均降水量、径流量、入海水量以及径流系数数据。

表 1 1956 - 2000 年海河流域不同时段年均降水径流数据

时间系列(年份)	降水量/ mm	径流量/ 10^8 m^3	入海水量/ 10^8 m^3	径流系数	备注
1956 - 1979	564.8	250.1	155.6	0.138	前 24 a, 降水偏丰 4.7%
1980 - 2000	499.9	174.8	39.4	0.106	后 21 a, 降水偏枯 6.4%
1956 - 2000	534.5	214.9	101.3	0.126	第二次全国水资源评价结果

1956–2000 年期间海河流域降水–径流关系如下:

$$R = 0.9375P - 286.16 \quad (r^2 = 0.8464) \quad (9)$$

式中: R 为流域天然年径流量, 10^8 m^3 ; P 为年降水量, mm 。

由表 1 可知, 1956–2000 年的多年平均降水量为 534.5 mm , 径流量为 $214.9 \times 10^8 \text{ m}^3$, 径流系数为 0.126 。对发生径流变异的 1980–2000 年系列进行对比分析, 得到这一系列的年平均降水量为 499.9 mm , 径流量为 $174.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 降水量比 1956–2000 年多年平均值减少了 34.6 mm , 径流量减少了 $40.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。将 1980–2000 年系列的年平均降水量代入公式(9), 得到相同产流条件下的年平均径流量应为 $182.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 所以由于降水量减少导致的径流减少量为 $32.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 由于下垫面变化导致的径流减少量为 $7.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。按照分离变量

法计算, 得到气候变化和下垫面改变对径流量减少的贡献率分别为 80.8% 和 19.2% 。

3.1.2 二级区径流变异结果与分析 海河流域从北到南可以划分为 4 个二级区, 分别是滦河水系、海河北系、海河南系和徒骇马颊河水系(图 1)。分别对这 4 个二级区 1956–2000 年标准系列进行降水–径流相关分析, 得到以下拟合关系式:

$$R = 0.2542P - 86.834 \quad (r^2 = 0.7946) \quad (10)$$

$$R = 0.2202P - 55.755 \quad (r^2 = 0.8812) \quad (11)$$

$$R = 0.4574P - 154.320 \quad (r^2 = 0.8099) \quad (12)$$

$$R = 0.0916P - 37.867 \quad (r^2 = 0.7755) \quad (13)$$

采取分离变量法分析, 将 1980–2000 年的降水量分别代入公式(10)~(13), 计算得到各二级区在没有变异条件下的产水量, 进而获得各二级区导致径流量减少的降水因子和下垫面因子的贡献率, 结果见表 2。

表 2 研究时段海河流域各二级区径流量变异计算结果

二级区	1956–2000 年 降水/ mm	1956–2000 年 径流量/ 10^8 m^3	1980–2000 年 降水量/ mm	1980–2000 年 径流量/ 10^8 m^3	径流量变 化/ 10^8 m^3	降水因子 贡献率/%	下垫面贡 献率/%
滦河	549.0	52.7	522.0	42.9	-9.8	69.8	30.2
海河北系	488.4	51.8	456.1	44.6	-7.2	98.9	1.1
海河南系	548.0	96.3	508.9	75.8	-20.5	87.1	12.9
徒骇马颊河	567.1	14.1	533.9	11.5	-2.6	117.7	-17.7

表 2 结果表明, 1980–2000 年海河流域 4 个二级区的径流量均有所减少, 减少量为 $(2.6 \sim 20.5) \times 10^8 \text{ m}^3$ 。径流量减少百分比最大的为海河南系, 减少了 21.3% ; 减少百分比最小的为海河北系, 减少了 13.9% 。从贡献率方面分析, 降水是径流量减少的主要因素, 尤其是徒骇马颊河降水因子贡献率达到 117.7% 。主要因为徒骇马颊河流域土壤包气带厚度较小, 径流量受降水量变化的敏感性较强, 降水量的减少直接导致该区的地表径流量减小。下垫面对徒骇马颊河流域径流量减少的贡献率为 -17.7% , 即下垫面变化增加了该流域的径流量。同时根据有关研究成果^[24], 1980–2010 年海河流域三级区中除了滦河山区, 徒骇马颊河流域建设用地面积增长最快, 增加了 12.21% , 且水域面积也增加了 4.32% , 即人类活动使不透水面积增加, 提高了对流域径流量的贡献, 即下垫面变化对径流量增加起到了促进作用。

3.1.3 21 世纪初期降雨–径流关系演变趋势 到了 21 世纪初期, 海河流域的径流减少更趋明显。2001–2016 年期间, 年平均降水量为 508.4 mm , 平

均径流量为 $130.7 \times 10^8 \text{ m}^3$, 比多年平均径流量减少了 $84.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。将 2001–2016 年期间年平均降水量数据代入公式(9), 如果下垫面条件没有改变, 径流量应为 $190.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 说明由于气候变化的影响径流量减少 $24.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占径流减少量的 29.0% ; 同时可以求得这一时期由于下垫面的变化导致径流量减少 $59.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占 71.0% 。

比较两个时段水文变异的特征发现, 1980–2000 年期间和 2001–2016 年期间的降雨–径流关系均发生了明显变化, 两个时期的降水量和径流量均小于多年平均水平, 但是降水和下垫面的影响程度却有明显区别, 前一时期主导因子为降水, 到了 21 世纪初期, 由于下垫面产流环境的变化, 人类活动影响对径流量减少的贡献率明显增大。

3.1.4 径流变异对生态环境的影响 海河流域由于径流量减少, 直接影响了该地区的水资源供需平衡, 对生态环境也产生了直接的影响。包括以下几个方面:

(1) 径流变异对入海水量具有显著影响。近年

来海河流域入海水量急剧减少,已经从多年平均的 $101.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 下降到 2016 年的 $37.1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 个别年份几乎没有水量入海。海河流域河川径流量和入海水量的变化态势及突变分析结果见图 2。由图 2 可看出,由于降水 and 下垫面的改变,流域的入海水量在 1956–2016 年呈下降趋势。采用 M–K 突变检验分析,得到 1956–2016 年海河流域入海水量均值为 $85.7 \times 10^8 \text{ m}^3$, 突变发生在 1970 年(图 2(b))。与河川径流量突变发生的 1981 年相比(图 2(a)), 提前了 11 a。

(2) 径流变异对海河流域地下水的影响。由于水文变异,产水量减少,在近 20 年海河流域取用水量没有增加的情况下,流域历年地下水位连年下降。在南水北调中线工程通水以前,地下水位平均下降了 20 m,导致河流干涸、水质退化,乃至对于华北平原的生态环境造成了极大的破坏。

3.2 海河流域径流变异影响因素分析

3.2.1 气候变化对径流变异的影响 气候变化导致海河流域的径流变异是相关研究学者的普遍认识^[25]。但海河流域气候变化的事实及其对径流的影响程度还需要进一步验证。气候变化一般用气温和降水两个因子来表征。海河流域降水量可以用多年平均降水量进行分析,而气温则分别选用北京市

和石家庄市两个城市的气温来表示。

1956–2016 年海河流域各年代年均降水量和代表城市气温的变化趋势见图 3。由图 3 可见,1956–2010 年海河流域的降水量一直处于减少态势,由 1956 年的 585 mm 减少至 2010 年的 491 mm, 55 a 内累计减少了 94 mm, 减少百分比为 16.1%。但是从 2010 年开始降水量有所增多,最近的降水量甚至超过了多年平均降水量。

1956–2016 年海河流域年降水量的变化态势和突变分析结果见图 4。由图 4 可见,海河流域降水量在 1956–2016 年的 61 年中整体呈减少趋势,降水量气候倾向率为 $-13.3 \text{ mm}/10\text{a}$, 利用 Mann–Kendall 趋势检验法对 1956–2016 年降水量的变化趋势进行检验,在可信度 95% 的显著性检验下,降水量减少趋势显著且突变发生在 1967–1970 年。相比径流量变化,降水突变的时间提前了大约 10 a, 表明径流量变化受到降水量变化的影响,但二者变化过程并不完全同步,受水利工程调蓄作用的影响,径流量发生突变的时间滞后于降水量突变时间。

对海河流域的典型站点气温计算结果表明,北京市和石家庄市的多年气温均值分别为 12.25°C 和 13.47°C 。研究时段内北京市和石家庄市年均气温变化态势及突变分析结果见图 5。

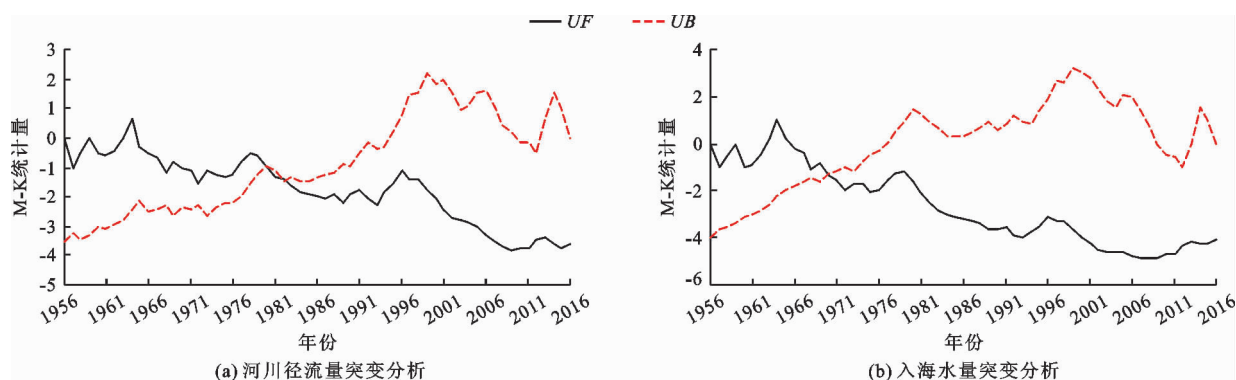


图 2 1956–2016 年海河流域径流量和入海水量变化态势及突变分析

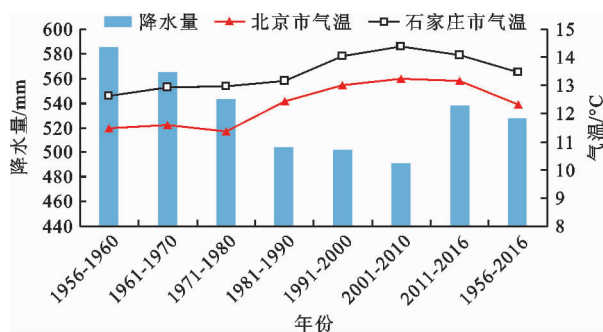


图 3 1956–2016 年海河流域各年代年均降水量和代表城市气温的变化趋势

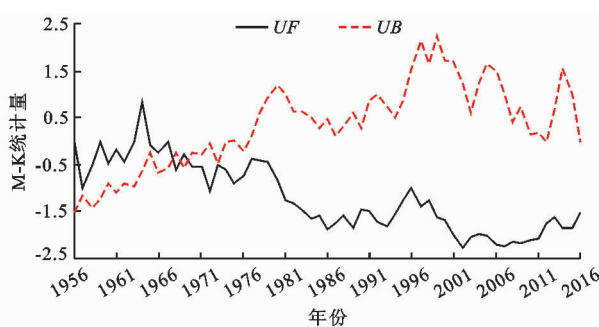


图 4 1956–2016 年海河流域年降水量变化态势及突变分析

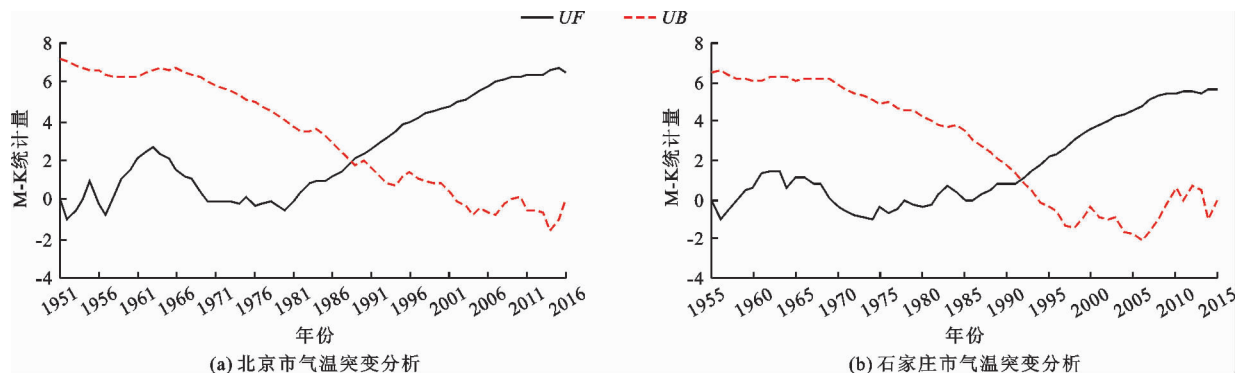


图5 研究时段内北京市和石家庄市年均气温变化态势及突变分析

分析图5可知,1951–2016年期间北京市气温呈逐年升高趋势,气温的倾向率为 $0.39\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;石家庄市1955–2015年年均气温变化与北京市类似,也有逐年升高的趋势,气温倾向率为 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;北京市和石家庄市两个站点的气温升高均通过了可信度为95%的显著性检验,北京市气温突变发生在1987年,而石家庄气温突变发生在1989年,均晚于海河流域径流量突变发生的时间,可以认为气温对径流变异没有影响。

3.2.2 人类活动对径流变异的影响 人类活动往往会造成地表植被覆盖和土地利用发生改变,影响了地表水循环与水文过程,导致水文径流发生变异。通过对1982–2013年海河流域NDVI指数与径流量变化过程的分析(图6),发现NDVI指数在逐渐增大,尤其是林地面积增加,草地面积减少^[25],其中流域东南部林地面积增加最多,使得径流量减少。表2中海河流域二级区径流变异结果也表明,1980年后海河南系的径流量减少显著,这一结果也验证了随着NDVI指数的增加,尤其是林地面积的增加,使得区域水源涵养能力增强,植被的耗水量也增大,在降水量未增加的情况下地表径流量减少,使流域径流量呈减小趋势。

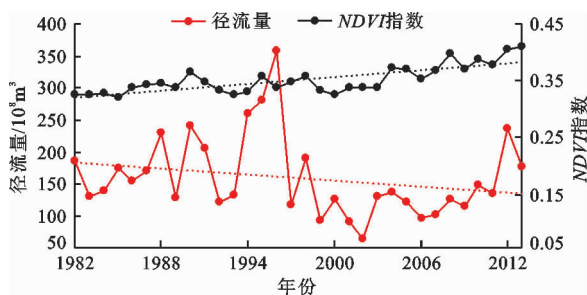


图6 1982–2013年海河流域NDVI指数与径流量变化过程

人类活动除了影响植被覆盖外,同时也使得区域耕地面积减少,工业、住宅、交通等用地面积在不

同程度的增加。京津冀地区建成区面积由1985年 $1\,081\text{ km}^2$ 增加到2012年 $3\,348\text{ km}^2$,增加了2倍多。建成区面积增加虽然对径流量增加起到一定促进作用,但相对于整个区域而言所占的面积比例较小,且植被覆盖中的林地面积比例增加对径流的增加起到抑制作用。此外,人类活动对径流的影响还直接表现为水库对径流量的调节,水库的调蓄作用使得河川径流在时间分配上发生改变,尤其是在汛期的调节作用较非汛期要明显。因此,人类活动既有促进径流增加的方面,如不透水面积增加,也有抑制径流增加的方面,如林地面积比例增加。

4 结 论

(1)海河流域水文变异受到气候变化和人类活动共同作用,本文提出分离变量方法与Mann–Kendall法相结合,定量解析了1956–2016年不同阶段气候变化和人类活动对海河流域径流变异的贡献率,为流域生态环境保护与水资源的可持续利用提供了科学支撑。

(2)20世纪下半叶海河流域径流变异的主导因子是气候变化中的降水量,相比1956–2000年系列,在1980–2000年期间气候因子和下垫面因子的贡献率分别为80.8%和19.2%;21世纪初期水文变异仍然十分剧烈,但是径流变异主导因子已转变为由人类活动导致的土地利用变化,在2001–2016年期间气候因子的贡献率下降至29.0%,而下垫面因子的贡献率上升至71.0%。

(3)对1956–2000年海河流域4个二级区开展径流变异研究发现,在1980–2000年期间径流量变异百分比最大的为海河南系,减少了21.3%,最小的为海河北系,减少了13.9%。从贡献率方面来看,降水量减少是径流变异的主导因子,海河北系、海河南系、徒骇马颊河流域降水对径流变异的贡献

率分别为98.9%、87.1%和117.7%;相比其他流域的径流变异,滦河水系受下垫面变化影响相对较大,达到30.2%。

(4)海河流域的径流变异对生态环境产生了不良影响,主要表现为入海水量显著减少,地下水水位埋深下降等。

参考文献:

- [1] HAO Zengchao, SINGH V P, XIA Youlong. Seasonal drought prediction: Advances, challenges, and future prospects[J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(1):108–141.
- [2] 杨大文,徐宗学,李哲,等. 水文学研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(1):36–45.
- [3] ABERA W, TAMENE L, ABEGAZ A, et al. Understanding climate and land surface changes impact on water resources using Budyko framework and remote sensing data in Ethiopia[J]. *Journal of Arid Environments*, 2019, 167:56–64.
- [4] ZHANG Xu, DONG Qianjin, COSTA V, et al. A hierarchical Bayesian model for decomposing the impacts of human activities and climate change on water resources in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 665:836–847.
- [5] WU Liyu, ZHANG Xuan, HAO Fanghua, et al. Evaluating the contributions of climate change and human activities to runoff in typical semi-arid area, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590:125555.
- [6] 夏军,石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望[J]. *水利学报*, 2016, 47(3):292–301.
- [7] LI Zhanling, LI Qiuju, WANG Jie, et al. Impacts of projected climate change on runoff in upper reach of Heihe River Basin using climate elasticity method and GCMs[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 716:137072.
- [8] 李鹤,张平宇. 全球变化背景下脆弱性研究进展与应用展望[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(7):920–929.
- [9] 谢平,陈广才,雷红富,等. 水文变异诊断系统[J], *水力发电学报*, 2010, 29(1):85–91.
- [10] 黄强,孔波,樊晶晶. 水文要素变异综合诊断[J]. *人民黄河*, 2016, 38(10):18–23.
- [11] 张强,李剑锋,陈晓宏,等. 水文变异下的黄河流域生态流量[J]. *生态学报*, 2011, 31(17):4826–4834.
- [12] ZUO Depeng, XU Zengxue, YANG Hong, et al. Spatio-temporal variation and abrupt changes of potential evapotranspiration and its sensitivity to key meteorological variables in the Wei River Basin, China[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(8):1149–1160.
- [13] 孙悦,李栋梁,朱拥军. 渭河径流变化及其对气候变化与人类活动的响应研究进展[J]. *干旱气象*, 2013, 31(2):396–405.
- [14] 朱悦璐,畅建霞,刘宸岩. 渭河流域水文变异诊断研究[J]. *西安理工大学学报*, 2014, 30(2):170–174.
- [15] 郭静,王宁,栗晓玲. 气候变化下石羊河流域上流产流区的径流响应研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(12):211–218.
- [16] 何睿,庞博,张兰影. 基于水文变异诊断系统的黑河流域上中游径流序列变异[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(7):1937–1942.
- [17] BIN Lingling, XU Kui, XU Xinyi, et al. Development of a landscape indicator to evaluate the effect of landscape pattern on surface runoff in the Haihe River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 566:546–557.
- [18] XU Xiangyu, YANG Dawen, YANG Hanbo, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 510:530–540.
- [19] 王庆平,季志恒,王喜诚. 变化环境下海河流域水文循环及时空演化规律分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2010, 8(3):92–96.
- [20] 任宪韶,户作亮,曹寅白,等. 海河流域水资源评价[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.
- [21] ANGHILERI D, PIANOSI F, SONCINI – SESSA R. Trend detection in seasonal data: From hydrology to water resources[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511:171–179.
- [22] 水利部水利水电规划设计总院. 全国水资源综合规划(2010–2030年)[R]. 北京:水利部水利水电规划设计总院, 2010.
- [23] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报(1997–2016)[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2017.
- [24] 肖高怀. 基于遥感的海河流域下垫面变化研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2014.
- [25] CHEN Junxu, XIA Jun, ZHAO Changsen, et al. The mechanism and scenarios of how mean annual runoff varies with climate change in Asian monsoon areas[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 517:595–606.