

Quantity Analysis on the Evolution Characteristics and Driving Factors of Surface Runoff in Liaoning Province

Xiaoge Wang¹, Huichuan Zhang², Hao Zhou³, Yulong Zhang¹, Chunyu Li⁴

¹Shenyang Agriculture University, Shenyang Liaoning

²Liaoning Provincial Flood Control and Drought Control Headquarters Office, Shenyang Liaoning

³Liaoning Hydrology Bureau, Shenyang Liaoning

⁴Shenyang City Water Resources Management Office, Shenyang Liaoning

Email: 13889868618@126.com

Received: Sep. 9th, 2018; accepted: Sep. 21st, 2018; published: Sep. 29th, 2018

Abstract

The long series of measured data of precipitation, runoff and surface water resources at the Tieling (Liaohe river), Fushun (Hunhe river), Tangmazhai (Taizi river) and Dalinghe (Daling river) four major runoff representative stations are used to explore the various parts of evolution trend of surface runoff and provide effective countermeasures for drought situation in Liaoning province. The evolution of precipitation and runoff is analyzed, and the factors of runoff are decomposed for further quantitative analysis. Compared to the base period (1956~1979), the precipitation during 1980~2000 is decreased by 0.2%~1.3% and 5.6%; during 2001~2011 is decreased by 1.0%~6.2% and 9.0% in the semi-humid area (Liaohe, Hunhe, Taizi rivers), and arid and semi-arid area (western Liaoning and Daling rivers), respectively. Quantitative separation studies on driving factors of surface runoff evolution, precipitation, wading activities, and underlying surfaces indicate that: the contributions of the semi-humid zone are about 5%, 50% and 45%, in the arid and semi-arid areas are about 33%, 43% and 24%, respectively.

Keywords

Runoff Evolution, Precipitation, Wade Activities, Underlying Surface, Agricultural Drought

辽宁省地表径流演变特征及驱动因素定量分析

王笑歌¹, 张汇川², 周浩³, 张玉龙¹, 李春雨⁴

¹沈阳农业大学, 辽宁 沈阳

²辽宁省防汛抗旱指挥部办公室, 辽宁 沈阳

³辽宁省水文局, 辽宁 沈阳

作者简介: 王笑歌(1989-), 女, 汉族, 辽宁沈阳人, 在读博士, 主要从事水资源评价与管理研究。

⁴沈阳市城市水资源管理办公室, 辽宁 沈阳
Email: 13889868618@126.com

收稿日期: 2018年9月9日; 录用日期: 2018年9月21日; 发布日期: 2018年9月29日

摘要

为探究辽宁省各部分地区的地表径流演变趋势, 并为辽宁省干旱情况提供有效应对措施, 现利用辽宁省辽河铁岭站、浑河抚顺站、太子河唐马寨站及大凌河凌海站四个主要径流代表站的降水、径流及地表水资源量的长系列实测数据, 对降水及径流进行演变分析, 并将径流因素进行分解, 做进一步定量分析研究。结果表明: 半湿润区(辽宁中北部: 辽河、浑河、太子河, 下同)、干旱半干旱区(辽宁西部: 大凌河, 下同)相比基准期(1956~1979, 下同), 1980~2000年降水分别减少0.2%~1.3%、5.6%, 2001~2011年, 降水分别减少1.0%~6.2%、9.0%。地表径流演变的驱动因子降水、涉水活动、下垫面定量分离研究表明: 半湿润区三者贡献量分别约为5%、50%、45%; 干旱半干旱区三者贡献量分别约为33%、43%、24%。

关键词

径流演变, 降水, 涉水活动, 下垫面, 农业干旱

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

辽宁省是旱灾频繁发生的省份之一, 特别是辽宁中西部地区, 为粮食主产区, 干旱是粮食产量重要影响因素。尤其是进入 2000 年以后旱灾发生的频率明显增加, 仅 2000~2014 年这 15 年间, 就有 8 年发生了旱灾, 其中 2014 年我省遭遇了 60 年来最为严重的旱灾, 作物受旱面积一度达到 195.2 万公顷。辽宁的旱灾防治研究显得尤为重要, 降水与径流量又是影响和评判农业干旱的关键因素, 因此分析干旱发生变化的趋势, 有效应对农业干旱面临的风险, 对降水、径流二者关系及其演变规律进行研究十分必要。

地表径流和降水为影响农业干旱的重要因素, 变化特征必将对地区农业种植和社会经济发展造成重要影响, 诸多学者进行了研究[1]。其中, 涂钢等学者利用松花江、辽河流域内 132 个降水测站的 45 年月降水资料, 以及哈尔滨、江桥、铁岭水文测站资料的 45 年月实测径流量资料, 分析松花江、辽河流域实测径流的变化趋势, 结果表明: 松花江流域的年实测径流量呈现较微弱的下降趋势, 并且辽河流域年实测径流呈现显著的下降趋势; 两流域径流量存在着一致的阶段性丰枯周期变化[2]。姚正学等以 1956~2005 年渭河流域渭源、武山和北道 3 个水文站月径流资料和流域内 78 个雨量站的降水数据为基础, 运用线性趋势法、距平百分率法、Mann-Kendall 非参数统计检验法、双累积曲线法和 Morlet 小波分析法等多种数理统计方法, 研究了近 50 年渭河上游降水与径流的趋势性、阶段性、突变性、周期性规律, 并对径流与降水之间的变化关系以及降水同人类活动影响径流变化的情况进行了分析[3]。结果表明: 流域上游年径流和年降水下降趋势显著, 且下游区降水和径流的下降速率比上中游的快; 降水和径流具有基本一致的长周期变化, 在研究时段内降水量没有发生系统偏差, 而径流的系统偏差明显, 说明径流可能受到了人类活动的干扰并发生了变异。由于降水及径流的演变趋势会对某区域的干旱情况和社会经济发展造成重要影响, 因此研究分析区域内降水及径流的演变特征是抗旱和社会经济发展规划的基础与前提。

本文以辽宁省四条主要河流，分别为辽河、浑河、太子河及大凌河为研究区域，根据相应的四个主要河流径流代表站的资料，分析辽宁省 1960 年~2011 年间降水与径流的演变特征，为相关部门制定科学的抗旱措施提供参考。

2. 研究区域概况

辽河流域位于我国东北地区南部，包括吉林、辽宁、河北省和内蒙古自治区的部分市域。我省流域面积 19.3 万 km²，总河长 1390 km，属于半湿润区。流域由 2 个独立水系所组成：一为东、西辽河，于福德店汇流后为辽河干流，经双台子河由盘山入海；另一为浑河、太子河于三岔河汇合后经大辽河由营口入海，辽河流域是我国东北地区重要的水源来源之一。浑河流域地处辽宁中部，南邻太子河，北接辽河，东与浑江毗邻，为辽河支流。全长 415.4 km，流域面积 11,481 km²。浑河为不对称水系，东侧支流密集，水量丰富，西侧支流很少，水量不大。太子河位于辽宁省东南部，流域呈东西走向。流经本溪市、鞍山市、辽阳市，最后入浑河。太子河流域面积 13,883 km²，全长 413 km。大凌河属于辽宁省辽东湾西部沿渤海河流，全长 397 km，流域面积 23,873 km²，全流域 97% 的面积处于辽西低山丘陵区，属于干旱半干旱区，水土流失严重，河流含沙量大，气候干旱，是省内严重的资源性缺水地区。以上四条河流为辽宁省主要河流，在区域内降水及径流的演变特征具有较强的代表性[4]。

3. 数据来源

本文选取辽宁主要河流代表站，分别为辽河铁岭站，浑河抚顺站，太子河唐马寨站及大凌河凌海站这四个主要径流代表站，利用四个代表站的降水、径流及地表水资源量的长系列实测数据，对降水及径流进行演变分析，通过降水量与径流变化过程对比、各年代对比，分析降水量和径流量演变的差异性，从而可以初步揭示径流演变规律的成因、降水因素和人类活动因素。

4. 地表径流量、降水量及地表水资源量的演变趋势分析

4.1. 地表径流演变趋势分析

选取辽宁主要河流径流代表站资料，采用线性趋势法、10 年滑动平均法分析各代表站年均流量趋势性变化特征，并分析基准期(1980 年代前)、1980~2000、2001~2011 年三个时段的径流统计特征。由于部分实测数据丢失，因此辽河铁岭站的数据起始年份为 1954 年，浑河抚顺站为 1956 年，太子河唐马寨站为 1961 年，大凌河凌海站为 1960 年，具体演变特征结果分析见表 1 和图 1。

由表 1 及图 1 可知：①铁岭站、抚顺站、唐马寨站及凌海站以上年径流深线性倾向值分别为-15.6、-2.38、

Table 1. Evolution of annual runoff of representative stations of major rivers in Liaoning Province

表 1. 辽宁主要河流代表站年均径流量演变分析表

河名	站名	项目	不同年代径流统计		
			基准期(1980 年之前)	1980~2000 年	2001~2011 年
辽河	铁岭	年均流量平均值(m ³ /s)	109.8	91.9	53.1
		比基准期多或少		-16.3%	-51.6%
浑河	抚顺	年均流量平均值(m ³ /s)	56.2	46.3	47.1
		比基准期多或少		-17.6%	-16.1%
太子河	唐马寨	年均流量平均值(m ³ /s)	81.8	77.0	72.1
		比基准期多或少		-5.9%	-11.8%
大凌河	凌海	年均流量平均值(m ³ /s)	59.3	36.8	12.4
		比基准期多或少		-37.9%	-79.2%

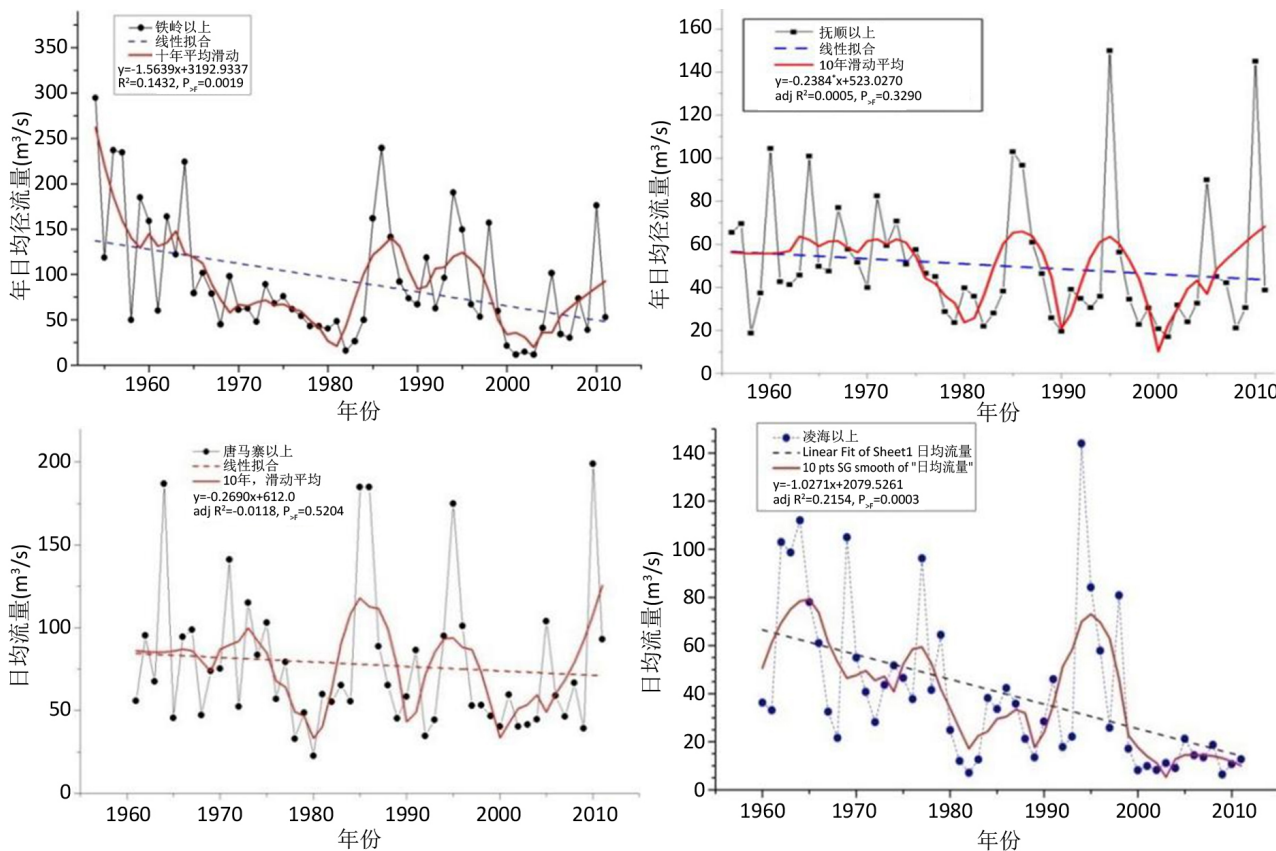


Figure 1. Trend analysis of annual average flow changes in the main rivers of Liaoning province

图 1. 辽宁主要河流各代表站年均流量变化趋势性分析

-2.69、-10.27 mm/10a, 通过比较线性倾向系数值可发现辽河铁岭站、大凌河凌海站年均流量下降幅度相对较大, 分别为 50%、80%以上; ②通过图 1 中滑动平均曲线可发现: 径流深有减少趋势, 辽宁主要河历年均流量系列均呈减少趋势, 特别是 2000 年之后明显小于 2000 年之前。与 1980 年代前相比, 2001~2011 年辽河年均流量降低 50%以上, 浑河年均流量降低 15%以上, 太子河年均流量降低 10%以上, 大凌河年均流量降低 80%以上。统计资料表明: 辽河铁岭站年均流量最大值发生于 1954 年, 为 295 m³/s, 最小值发生于 2003 年, 仅为 11.3 m³/s; 浑河抚顺站年均流量最大值出现于 1995 年, 为 149.9 m³/s, 最小值出现于 2001 年, 为 17.1 m³/s; 太子河唐马寨水文站年均流量最大值发生于 2010 年, 为 199 m³/s; 最小值发生于 1980 年, 为 22.6 m³/s。

4.2. 降水及地表水资源量演变趋势分析

选取辽宁典型河流降水及水资源量进行 1956~1979 年、1980~2000 年、2001~2011 年三个时段的对比统计分析, 分析结果如表 2 所示。由表 2 可知, 各典型河流 1980~2000 年、2001~2011 年水资源量均比 1956~1979 年有所减少。从近 10 年的减小幅度来看, 干旱半干旱(西部)地区河流减少幅度最大, 半湿润区(中北部)辽河资源量减少幅度次之, 半湿润区(中北部)的浑河、太子河近 10 年资源量变化幅度相对较小。

辽河、浑河、太子河、大凌河, 相比 1956~1979 年, 1980~2000 年降水减少幅度分别为 1.3%、0.2%、0.2%、5.6%, 地表水资源量减少幅度分别为 10.1%、12.6%、7.6%、25.2%, 水资源总量减少幅度分别为 6.3%、10.7%、6.9%、23.8%; 2001~2011 年, 降水减少幅度分别为 6.2%、1.2%、1.0%、9.0%, 地表水资源量减少幅度分别为 25.4%、3.4%、7.9%、51.1%, 水资源总量减少幅度分别为 20%、4.6%、7.6%、49.4%。辽宁分区域降水量与地表水资源量变化情况分析结果见表 3。

Table 2. Evolution trend of precipitation and water resources of major rivers in Liaoning Province
表 2. 辽宁主要河流不同时间节点降水及水资源量演变趋势分析表

河流名称	项目(亿 m ³)	1956~1979 年	1980~2000 年		2001~2011 年	
			水资源量	与 56~79 比较%	水资源量	与 56~79 比较%
辽河	降水量	226.0	223.1	-1.3	212.0	-6.2
	地表水资源量	37.8	34.0	-10.1	28.2	-25.4
	水资源总量	61.7	57.7	-6.3	49.3	-20.0
浑河	降水量	97.1	96.9	-0.2	95.9	-1.2
	地表水资源量	29.1	25.4	-12.6	28.1	-3.4
	水资源总量	34.8	31.1	-10.7	33.2	-4.6
太子河	降水量	105.8	105.5	-0.2	104.8	-1.0
	地表水资源量	36.0	33.3	-7.6	33.2	-7.9
	水资源总量	40.4	37.6	-6.9	37.3	-7.6
大凌河	降水量	103.8	98.0	-5.6	94.4	-9.0
	地表水资源量	18.5	13.9	-25.2	9.0	-51.1
	水资源总量	19.4	14.7	-23.8	9.8	-49.4

Table 3. Change analysis of precipitation and surface water resources
表 3. 降水量与地表水资源量变化分析表

因子	全省	西部	中北部	东南部
降水量	-4 %	-7 %	-2%	-6%
地表水资源量	-14 %	-31 %	-5%	-14%

5. 径流演变主要驱动因子定量分解

本文采用王国庆等的方法进行降水和人类活动对径流量影响的分离。该方法原理和步骤如下：1) 根据实测水文过程的变化特性和流域内人类活动的状况，将水文序列分为“天然阶段”和“人类活动影响阶段”，则人类活动影响期实测径流与基准期实测径流平均值差值为径流总变化量；2) 利用天然阶段的水文气象资料率定水文模型的参数，这个模型参数反应天然条件下流域的产流状况；3) 以人类活动影响期的气象数据作为输入，输出则为人类活动影响期的“估算天然径流量”；4) “估算天然径流量”与基准期实测天然径流量差值为气候影响部分；5) 人类活动影响期实测径流量与“估算天然径流量”差值为人类活动影响部分[5]。

该方法可表示为：

$$\Delta W_T = W_{HR} - W_B \quad (1)$$

$$\Delta W_H = W_{HR} - W_{HN} \quad (2)$$

$$\Delta W_C = W_{HN} - W_B \quad (3)$$

$$\eta_H = (\Delta W_H / \Delta W_T) \times 100\% \quad (4)$$

$$\eta_C = (\Delta W_C / \Delta W_T) \times 100\% \quad (5)$$

式中： ΔW_T 为径流变化总量； ΔW_H 为人类活动影响量； ΔW_C 为气候变化影响量； W_{HR} 为人类活动影响期实测径流量； W_B 为基准期实测径流量平均值； W_{HN} 为人类活动影响期计算天然径流量； η_H 、 η_C 分别为人类活动和气候

变化对径流影响的百分比。

气候影响量与径流总变化量的比值为气候影响的贡献率，人类活动影响量与径流总变化量的比值为人类活动的贡献率。本研究以 1979 年及以前为基准期，采用降雨 - 径流统计关系模型来计算人类活动影响期的天然径流量。分析结果见表 4 及图 2。

从表 4 分析可知：大凌河实测径流 1960~1979 年、1990~1999 年为丰水期，1980~1989 年、2000~2011 年为枯水期。丰水期降水因素对径流深的影响较小，1990~1999 年降水因素使径流减少 9.5 mm，枯水期降水对径流深的影响较大，分别减少 26.0 mm 和 22.4 mm。涉水活动对径流深的影响量逐渐增大，从 1980 年代到 2000 年以后，3 个年代分别使径流减少 11.2 mm、17.3 mm、24.5 mm，表明随着水利工程的修建，其对径流的减少量持续增加。对于下垫面因素，从 1980 年代到 1990 年代，对径流深的影响量逐渐减小，从 11 mm 减小到 0.2 mm，说明从 1980 年代起，人类对植被破坏逐渐加大，植被保水作用减小，而 2000 年以后，下垫面对径流的减小作用又陡增至 17.9 mm，说明近十多年来，水土保持、植树造林的保水作用又较为显著，降水受到植被冠层截留、枯枝落叶层滞留下渗，形成地下水库，从而达到河道形成的河川径流减少。浑河实测径流 1980 年代和 2000 年以后减少，分别为 5.3 mm 和 10.7 mm，1990 年代的径流深增加了 6.4 mm，这可能是由于几个丰水年使得 1990 年代平均径流较大。对于降水因素，1980 年代、1990 年代和 2000 年以后对径流的影响量分别为 0.6 mm、16.7 mm 和 -8.7 mm。涉水活动对径流表现为减少作用，从 1980 年代到 2000 年以后，减少量逐渐增加，分别为 37.0、50.7、58.3 mm。下垫面对径流表现为增加作用，从 1980 年代到 2011 年，三个年代分别增加为 31.1、40.4、56.4 mm，这可能是由于浑河流域内有抚顺、沈阳两大城市，人口集中，城镇建设用地、居民用地逐渐增加，导致下垫面径流系数增加，从而使得径流增加。太子河实测径流量逐渐减小，1980、1990、2000 年代径流量比基准期的变化量分别为 2.8、-19.6、-34.7 mm。三个年代降水因素对径流的影响量分别为 24.7、10.7、-9.6 mm。涉水活动

Table 4. Breakdown of main river runoff evolution driving factors

表 4. 主要河流径流演变驱动因子分解表

河流	时期	实测径流深 mm	计算天然径流深 mm	径流量总变化 mm	降水因素		涉水活动		下垫面	
					径流深 mm	百分比	影响量 mm	百分比	影响量 mm	百分比
	基准期	81.2	81.2							
	1980~1989	33.0	55.2	-48.2	-26.0	-54.0	-11.2	-23.2	-11.0	-22.8
大凌河	1990~1999	71.7	89.2	-9.5	8.0	84.3	-17.3	-182.2	-0.2	-2.1
	2000~2011	16.4	58.8	-64.8	-22.4	-34.5	-24.5	-37.9	-17.9	-27.6
	1980~2011	38.9	67.2	-42.3	-14.0	-33.1	-18.1	-42.7	-10.2	-24.1
	基准期	175.8	175.8							
	1980~1989	170.5	176.4	-5.3	0.6	10.9	-37.0	-693.8	31.1	582.9
浑河	1990~1999	182.3	192.5	6.4	16.7	259.3	-50.7	-786.0	40.4	626.6
	2000~2011	165.1	167.1	-10.7	-8.7	-81.4	-58.3	-543.6	56.4	524.9
	1980~2011	172.2	178.0	-3.7	2.1	57.9	-49.3	-1340.1	43.5	1182.2
	基准期	230.3								
	1980~1989	233.1	255.0	2.8	24.7	877.2	-35.3	-1256.4	13.5	479.2
太子河	1990~1999	210.7	241.0	-19.6	10.7	54.5	-52.3	-266.6	22.0	112.1
	2000~2011	195.6	220.7	-34.7	-9.6	-27.6	-60.9	-175.6	35.8	103.3
	1980~2011	212.0	237.8	-18.2	7.5	40.9	-50.2	-275.2	24.5	134.3

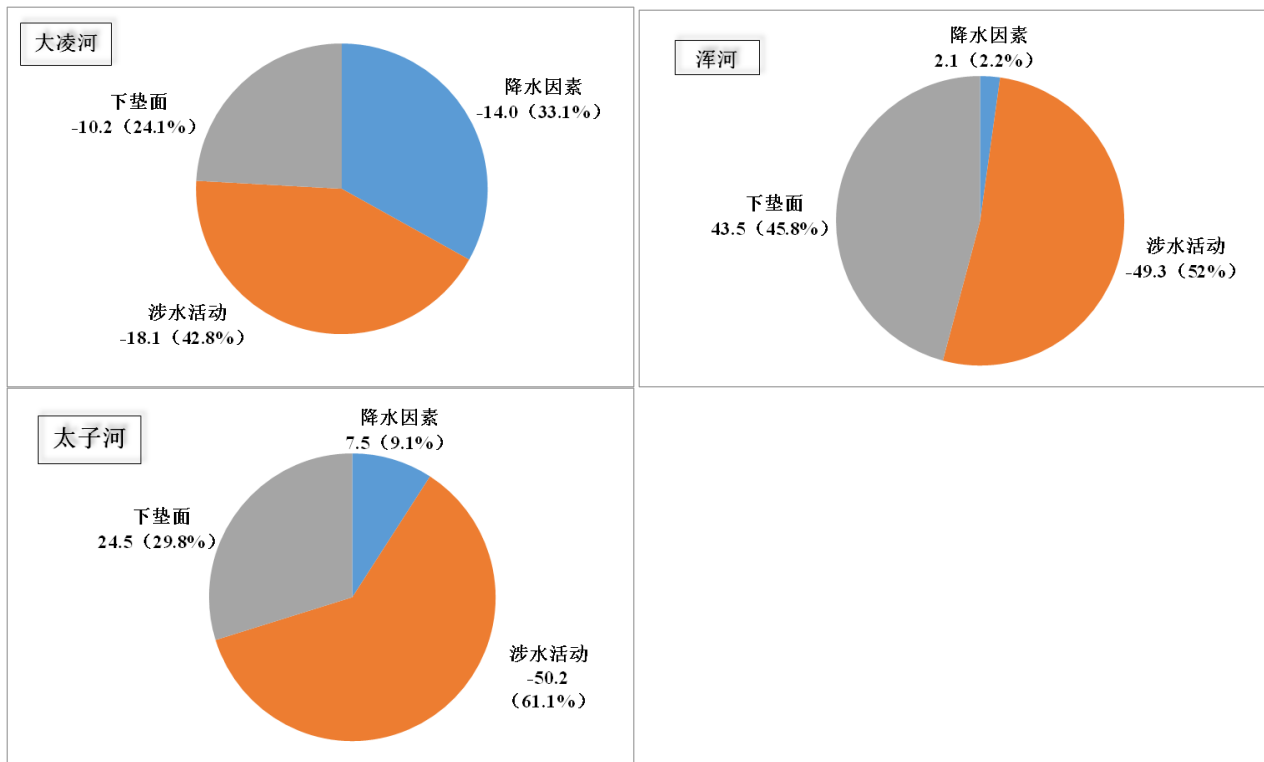


Figure 2. Contribution separation results of driving factors for runoff evolution
图 2. 驱动因子对径流演变的贡献量分离结果

对径流深为减少作用，三个年代分别为 35.3、52.3、60.9 mm，这与流域内观音阁、稷窝、汤河三大水库的建设、人类取用水的增加有关。三个年代下垫面对径流的影响量分别为 13.5、22.0、35.8 mm，这与这一时期城镇建设有关。

从表 4、图 2 分析得知：大凌河、浑河、太子河三个流域，均为涉水活动对径流演变影响最大，均使径流量减小。大凌河下垫面变化使径流量减小，浑河和太子河下垫面使径流增加，可能主要是因为建设用地使径流系数增加，从而增加地表径流。河流自然要素多呈萎缩趋势，经济社会指标呈明显增加趋势。人为因素与河道基本要素负相关且影响程度呈加深趋势。

6. 结论

1) 半湿润区(辽宁中北部：辽河、浑河、太子河，下同)、干旱半干旱区(辽宁西部：大凌河，下同)相比基准期(1956~1979，下同)，1980~2000 年降水分别减少 0.2%~1.3%、5.6%，2001~2011 年，降水分别减少 1.0%~6.2%、9.0%。这表明受气候等因素影响，降水有减少趋势，幅度有增加态势，干旱半干旱区的减少量和降幅明显大于半湿润区。从降水因素看，农业面临的干旱风险有逐渐加大趋势，干旱半干旱区更为明显。

2) 半湿润区、干旱半干旱区河流年均流量系列均呈减少趋势，与基准期相比，2001~2011 年年均流量分别减少 10%~50%、80%以上，最大值与最小值比值为 8~26 倍。地表水资源量分别减少 3.4%~25.4%、51.1%，水资源总量分别减少 4.6%~20%、49.4%。这表明受人类活动等因素影响，河流年平均流量减少幅度为降水减少的 10 倍左右，径流和水资源总量减少的幅度为降水减少的 5 倍左右。从径流因素看，即使降水量不变，由于地表径流量的显著减少，也会造成农业灌溉水源的严重不足，并出现极端干旱情况，从而导致农业干旱风险显著增加，干旱半干旱区更为严重。

3) 地表径流演变的驱动因子降水、涉水活动、下垫面定量分离研究表明：半湿润区三者的贡献量分别约为

5%、50%、45%；干旱半干旱区三者的贡献量分别约为 33%、43%、24%。这表明人类活动(涉水活动、改变下垫面)是影响地表水资源量演变的主要因素，占比达 70%~90%。通过减少人类活动、恢复下垫面植被可有效降低干旱风险的发生，深入研究“还原”和“还现”条件下地表径流重现期分析计算，对确定新建工程修建规模和已有工程径流调节调度具有重要技术经济价值。

参考文献

- [1] 姚治君, 管彦平, 高迎春. 潮白河径流分布规律及人类活动对径流的影响分析[J]. 地理科学进展, 2003, 22(6): 599-606.
YAO Zhijun, GUAN Yanping, and GAO Yingchun. Analysis of distribution regulation of annual runoff and affection to annual runoff by human activity in the Chaobaihe River. Progress in Geography, 2003, 22(6): 599-606. (in Chinese)
- [2] 涂钢, 李尚锋, 孙力, 等. 松花江、辽河流域实测径流的变化趋势及其与降水的关系[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(6): 456-461.
TU Gang, LI Shangfeng, SUN Li, et al. Temporal variation of observed runoff in Songhua River and Liaohe River basins and its relationship with precipitation. Progerssus Inquisittions de Mutatione Climatis, 2012, 8(6): 456-461. (in Chinese)
- [3] 姚正学, 杨军, 刘迪. 1956-2005 年渭河流域降水与径流的变化特征[J]. 人民黄河, 2016, 38(1): 12-18.
YAO Zhengxue, YANG Jun, and LIU Di. Regularity of precipitation and runoff in the Weihe River basin from 1956 to 2005. Yellow River, 2016, 38(1): 12-18. (in Chinese)
- [4] 王殿武, 梁凤国, 等. 河流变迁萎缩与消亡[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2016.
WANG Dianwu, LIANG Fengguo, et al. Change and decline of rivers. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press 2016. (in Chinese)
- [5] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 853-858.
WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, and HE Ruimin. Impacts of environmental change on runoff in Fenhe River basin of the middle Yellow River. Advances in Water Science, 2006, 17(6): 853-858. (in Chinese)