

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.01.008

西辽河源头流域径流变化趋势及影响因素分析

杨肖丽,任立良,江善虎,袁山水,石琳

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210098)

摘要:利用 1977—2008 年老哈河流域与沙拉沐沦河流域水文数据,采用 Mann-Kendall 检验法、有序聚类分析和线性回归方法分析其降水量、径流量近 32 a 的年内和年际变化规律及其影响因素。结果表明:1977—2008 年 2 个流域年降水量和径流量均呈现下降的趋势,径流量下降幅度明显高于降水量,沙拉沐沦河流域降水量下降趋势不明显,稳定的泉水补给使得径流量受降水量减少和土地利用/覆被变化影响较小,老哈河流域径流量减少幅度远远高于降水量,在雨季下游有断流现象,该流域 1977—1998 年降水量是径流量变化的主要影响因素,1999—2008 年流域内土地利用/覆被变化和水库水坝修建、河道外取水等人类活动共同作用使得该流域径流量减少了 70.3%。

关键词: Mann-Kendall 检验法;有序聚类分析;回归分析;降水;径流量;西辽河源头流域

中图分类号: P333.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2012)01-0037-05

Analysis of trend and influencing factors of runoff variation in headwater basin of West Liaohe River

YANG Xiao-li, REN Li-liang, JIANG Shan-hu, YUAN Shan-shui, SHI Lin

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on hydrological data from the Laohahe Basin and Shalamulunhe Basin from 1977 to 2008, the Mann-Kendall test method, the sequential cluster analysis method, and the linear regression method were used to analyze the intra-annual and inter-annual variations and influencing factors of precipitation and runoff over 32 years in the basins. The results show the following: There was an obvious decreasing trend of annual precipitation and runoff in the two basins from 1977 to 2008, and the runoff decreased more significantly than precipitation. The decreasing trend of precipitation was not significant in the Shalamulunhe Basin, and the runoff was slightly influenced by the decrease of precipitation and the variation of land use/cover due to the constant spring feed. In the Laohahe Basin, the runoff decreased much more significantly than precipitation, and the breaking flow occurred in rainy seasons. Precipitation was the main factor influencing the runoff from 1977 to 1998 in the basin. The runoff decreased by 70.3% from 1999 to 2008 due to the effects of human activities, including the variation of land use/cover, construction of reservoirs and dams, and water collection from outside of the river courses in the basin.

Key words: Mann-Kendall test method; sequential cluster analysis; regression analysis; precipitation; runoff; headwater basin of West Liaohe River

随着人类对大自然干预能力的加强以及全球气候的变化,流域水资源发生很大变化,原有的水循环模式受到严重的挑战^[1]。由于气候变化和人类活动的影响,我国北方半干旱区持续发生干旱,干旱范围和强度均呈增加趋势^[2]。因此,分析变化环境下区域水文过程各个分量的变化规律,探讨其与气候变化和人类活动的

收稿日期:2011-01-11

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)(2006AA12Z221);中央高校基本科研业务青年教师项目(2011B01914);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室学术创新团队项目(009585412);科技部科技基础性专项(2009IM020104);水利部公益性行业科研专项(2008001);教育部、国家外国专家局高等学校学科创新引智计划(111计划)项目(B08048)

作者简介:杨肖丽(1976—),女,河北邯郸人,讲师,博士,主要从事数字水文及 RS/GIS 与水文模型耦合研究。E-mail: yangxl@hhu.edu.cn

关系,成为目前全球变化研究的热点之一.在众多研究方法中,基于水文过程长期观测数据和土地利用数据,利用统计分析中的多种趋势分析方法和回归拟合方法进行土地利用对水文过程的影响研究,仍是目前进行气候和土地利用/覆盖变化对水文过程影响问题研究中采用最多的研究手段^[3-6].位于我国半干旱区的老哈河流域和沙拉沐沦河流域是西辽河的2个主要源头流域,近20年来,其土地利用/覆被发生了剧烈的变化,径流量显著下降,夏季老哈河流域下游出现经常性的断流^[7-8],严重影响该流域中下游的正常生活和工农业用水.基于以上背景,本研究采用统计学方法分析西辽河源头流域降水量、径流量和径流系数的变化规律,揭示土地利用/覆被变化对径流量的影响,不仅对于区域变化环境下人类活动的响应研究具有理论和科学意义,还可为保护和合理利用流域内的水资源源头,进行中下游社会生活用水和工农业用水的优化配置提供科学依据.

1 研究区概况

老哈河流域和沙拉沐沦河流域是西辽河的2个主要源头流域之一,中温带大陆性季风气候.老哈河发源于河北省平泉县柳西川,介于 $41^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$, $117^{\circ}\sim 119^{\circ}\text{E}$ 之间,海拔 $470\sim 2\,100\text{ m}$,兴隆坡水文站以上集水区域,面积 $18\,599\text{ km}^2$.流域内平均气温为 $2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,7月最热,平均气温 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$,1月平均气温 $-28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量在 $300\sim 400\text{ mm}$ 之间,集中在6—8月,年蒸发量 $1\,600\sim 2\,600\text{ mm}$ ^[9].沙拉沐沦河发源于地处内蒙古高原的赤峰克什克腾旗百岔山,介于 $42^{\circ}30'\sim 43^{\circ}15'\text{ N}$, $116^{\circ}40'\sim 117^{\circ}35'\text{ E}$ 之间,河南营子水文站以上集水区域面积 $2\,453\text{ km}^2$,年均气温 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$,1月平均气温 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$,7月平均气温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水 400 mm 左右,6—8月的降雨量占全年的70%以上,全年大于8级以上大风时间 $20\sim 60\text{ d}$,年平均风速 $3.0\sim 4.7\text{ m/s}$.

2 数据与研究方法

本研究所用资料包括老哈河流域内兴隆坡水文站和沙拉沐沦河流域内的河南营子水文站1977—2008年的逐日实测径流量和流域内56个雨量站1977—2008年的逐日降水资料.首先利用Mann-Kendall检验法^[10]、绝对平均统计和趋势线计算分析老哈河流域和沙拉沐沦河流域的降水量和径流量的年内和年代际变化,然后基于有序聚类分析,将每个流域径流数据划分为“发展前期”和“发展后期”,其中发展前期(年前突然径流变化的时期)数据作为与发展后期比较的基础(即突然径流变化后的时期)^[11],最后对2个流域突变点的前后阶段进行年降水量与年径流量的回归模拟,分析揭示研究区径流变化的影响因素.

3 结果分析

3.1 降水量和径流量年内变化

采用Mann-Kendall检验法分析老哈河流域和沙拉沐沦河流域1977—2008年多年各月平均降水量和径流量的变化趋势(图1).从图1(a)可以看出,老哈河流域全年3个月份的降水量呈现上升趋势,其中1月的降水量上升极为显著,达到0.05显著性水平,除12月外,其余8个月的降水量呈现下降趋势,其中有5个月份的下降趋势显著.沙拉沐沦河流域全年有6个月的降水量呈现上升趋势,1月、3月和12月的降水量上升显著,达到0.05显著性水平,其余6个月的降水量呈现下降趋势,其中6—8月的下降趋势显著.从图1(b)可以看

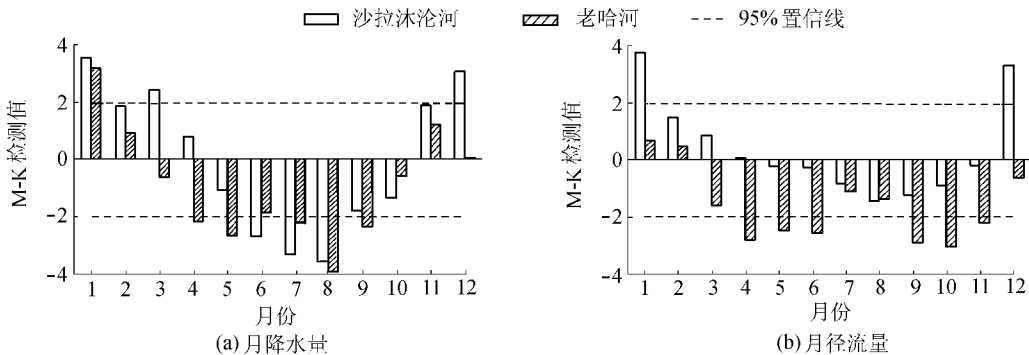


图1 老哈河流域和沙拉沐沦河流域月降水量和月径流量M-K趋势

Fig. 1 Mann-Kendall trends of monthly precipitation and monthly runoff in Laohahe Basin and Shalamulunhe Basin

出,老哈河流域多年月平均径流量全年有 10 个月(3—12 月)呈现下降趋势,仅 1 月和 2 月略有上升,春季和秋季下降趋势显著。毗邻的沙拉沐沦河流域月平均径流量全年有 7 个月呈略微下降趋势,其中 1 月和 12 月上升趋势显著。2 个流域径流量的变化和降雨量的变化并不完全一致,表明除了降水影响外,其他因素对研究区的径流量变化有强烈的影响作用。

3.2 降水量和径流量的年际变化

3.2.1 降水量的年际变化

利用年降水量的 10 a 绝对平均统计和趋势线计算,获得老哈河流域和沙拉沐沦河流域年降水量的年代际变化,见图 2。计算结果表明,老哈河流域降水量从 20 世纪 80 年代到 90 年代呈上升趋势,而 2001—2008 年降雨量明显减少,比上个年代减少了约 12%。沙拉沐沦河流域 20 世纪 80—90 年代降水量呈明显增加趋势,其中 90 年代的降水量增幅最大,增加了 9.5%,进入 21 世纪以来,年降水量明显减少,比 20 世纪 90 年代减少了近 17.5%。从图 2 可知,老哈河流域年代际间降水量的变化幅度明显高于毗邻的沙拉沐沦河流域。

3.2.2 径流量的年际变化

基于有序聚类分析获得研究区 2 个流域年降水量和径流量的突变点(图 3),将老哈河流域和沙拉沐沦河流域水文要素的变化分为 2 个时期(老哈河流域以 1998 年为界,沙拉沐沦河流域以 1994 年为界),分别比较 2 个流域前后 2 个时期的多年平均日降水量、日径流量、日蒸散发量和日径流系数(表 1)。从表 1 可以看出,2 个流域的日平均降水量和日径流量均呈现下降的趋势,老哈河流域的日径流系数的变化量明显大于沙拉沐沦河流域。老哈河流域和沙拉沐沦河流域日均降水量从第 1 阶段到第 2 阶段分别减少 12.7% 和 6.6%,而同期日径流量分别减少了 65.5% 和 36.6%。其中,老哈河流域日径流系数减少了 57.14%,而沙拉沐沦河流域日径流系数下降约 32.08%。这表明,相对于沙拉沐沦河流域,老哈河流域的日径流系数与径流量的下减幅度明显大于降水的下减幅度。资料显示,老哈河流域人类活动的干扰明显大于沙拉沐沦河流域^[8],表明除了降水量的减少能直接导致径流量减少外,其他因素如土地利用/覆被变化、水库拦水、人工取水等因素对该流域径流量的减少影响显著。

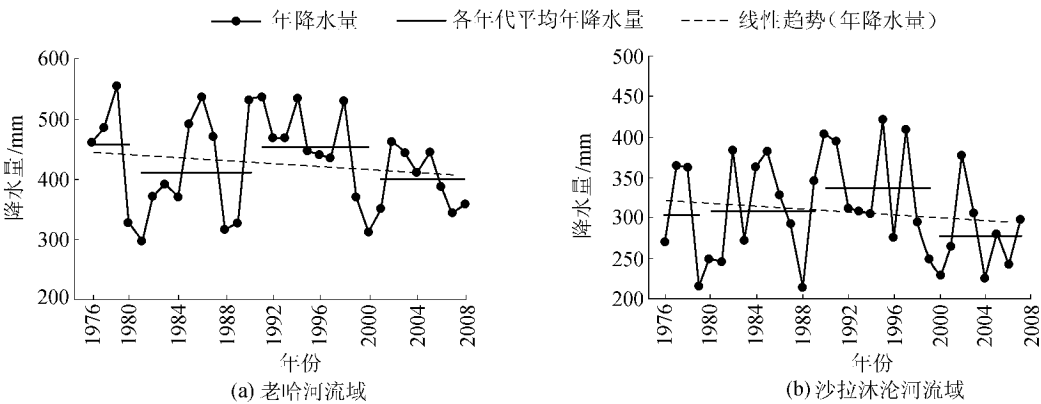


图 2 老哈河流域和沙拉沐沦河流域 1977—2008 年降水量变化曲线

Fig. 2 Precipitation variation curves in Laohahe Basin and Shalamulunhe Basin from 1977 to 2008

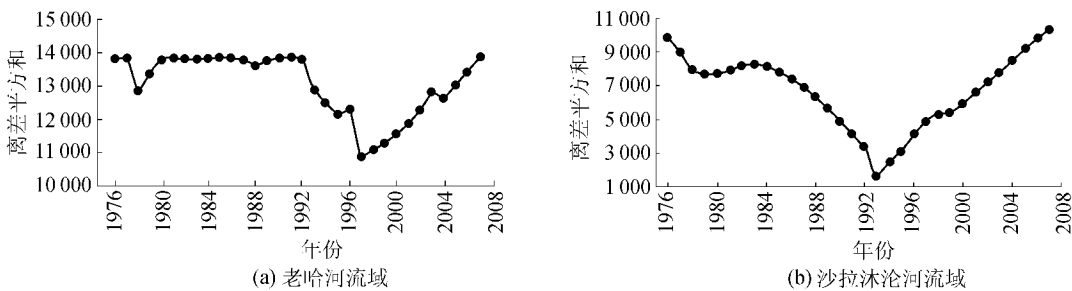


图 3 老哈河流域和沙拉沐沦河流域年径流序列离差平方和历时过程(1977—2008 年)

Fig. 3 Time histories of sum of square error of annual runoff series in Laohahe Basin and Shalamulunhe Basin from 1977 to 2008

表1 老哈河流域和沙拉沐沦河流域 1977—2008 年水文参数日平均值变化

流域	年份	P (mm·d ⁻¹)	P 的变化 幅度/%	Q (mm·d ⁻¹)	Q 的变化 幅度/%	E_T (mm·d ⁻¹)	E_T 的变化 幅度/%	α Q/P	C 的变化 幅度/%
老哈河 流域	1977—1998	1.218	12.73	0.087	65.52	1.131	8.66	0.070	57.14
	1999—2008	1.063		0.030		1.033		0.030	
沙拉沐沦河 流域	1977—1994	0.867	6.57	0.249	36.55	0.618	5.50	0.287	32.08
	1995—2008	0.810		0.158		0.652		0.195	

注： P 表示日降水量； Q 表示日径流深； E_T 表示日蒸发量($P-Q$)； α Q/P 表示日径流系数。

3.3 土地利用/覆被变化对径流量的影响

研究表明,在较长时间尺度上,气候变化对水文水资源的影响更加明显,但短期内,土地利用/覆被变化是水文变化的主要驱动要素之一^[12]。基于2个流域的突变点前后阶段,进行了年降水量和年径流量的回归分析,结果见图4。从图4(a)可以看出,老哈河流域前期降雨-径流相关性较大($R=0.82$),而后期相关性较小。利用前期降雨-径流的拟合关系式推算得到该流域突变后期的年径流量,见表2。表2表明,该流域计算所得的后期年径流深平均值为18.9 mm,而实测的平均径流深只有11.1 mm,该流域后期的产流量减少约70.3%。由于工农业发展、人口的增加等使得河道外引用消耗的水量不断增加,水文站的径流过程不能反映其自然状态。统计资料显示,老哈河流域自1989年以来,耕地和建设用地分别增加了3%和1.33%,草地减少15.81%,土地利用变化剧烈。流域内兴隆坡以上集水面积内2002年和2006年人工取水为19 020万m³和14 027.85万m³,而实测2002年和2006年的年径流量为24 056.8万m³和14 034.3万m³^[8]。这表明,除降水量减少会产生影响外,人类活动等因素对该流域径流量的减少也会产生显著的影响。

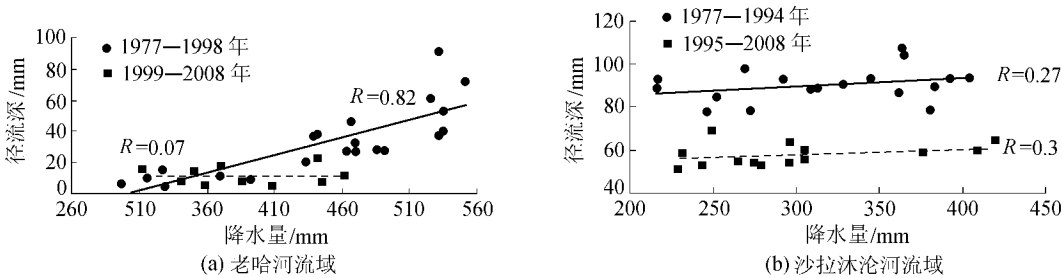


图4 老哈河流域和沙拉沐沦河流域2个时期降水-径流回归关系

Fig. 4 Regression relationships between precipitation and runoff in Laohahe Basin and Shalamulunhe Basin during two different periods

沙拉沐沦河流域1995—2008年的降水产流量与1977—1994年相比,减少的趋势明显弱于老哈河流域。该流域近20年来土地利用变化与老哈河流域有较大差异^[8]。该流域为冷凉雨养农业和牧业区,无工业用水和水利工程措施,其径流量变化主要受土地利用变化和气候变化的影响。流域内土地利用类型以草地为主(65%),自1987年以来林地减少约23.9%,耕地和建设用地分别增加了304.1%和490.7%,变化幅度明显高于老哈河流域,但由于其在流域内所占的比例(耕地4.85%,建设用地1.24%)较小,对径流量的影响并不显著。此外,流域内水源补给以雨水和稳定的泉水为主,流域内没有大型的水库、水坝,河道外引水较小,使得径流量受人类活动和气候变化的干扰明显小于老哈河流域。

表2 老哈河流域各土地利用时期预测降水径流深

Table 2 Observed and simulated runoff depths in Laohahe Basin during periods of land use			
年份	实测径流 深/mm	模拟径流 深/mm	差值/mm
1999	16.48	14.91	-1.57
2000	15.97	1.80	-14.17
2001	13.47	10.58	-2.89
2002	11.89	35.63	23.73
2003	7.77	31.85	24.09
2004	4.81	23.71	18.90
2005	21.86	31.12	9.25
2006	7.75	18.71	10.96
2007	6.52	8.36	1.84
2008	4.49	12.38	7.89

4 结 论

本文以老哈河流域和沙拉沐沦河流域近 32 a 来的水文资料为基础,分析了降水量、径流量和径流系数的年内及年际变化的趋势性、阶段性和突变性,并采用统计回归方法对比分析了这 2 个流域径流量变化的影响因素。结果表明:(a)1977—2008 年 2 个流域的年降水量和径流量均呈现下降的趋势,径流量的下降幅度明显大于降水量的下降幅度,老哈河流域径流量的下降幅度远远大于降水量的下降幅度,雨季下游有断流现象,而毗邻的沙拉沐沦河流域降水量和径流量下降趋势不明显。(b)由于土地利用/覆被变化、水库水坝修建、工农业用水等人类活动的影响,老哈河流域 1999—2008 年径流量的下降幅度远远大于降水量的下降幅度。后期由于人类活动的影响导致该流域径流量减少 70.3%。沙拉沐沦河流域由于有稳定的泉水补给,径流量受人类活动和气候变化影响相对较小。

参考文献:

- [1] 张建云,王国庆. 气候变化与中国水资源可持续利用[J]. 水利水运工程学报, 2009(4): 17-21. (ZHANG Jian-yun, WANG Guo-qing. Climate change and sustainable utilization of water resources in China[J]. Hydro-science and Engineering, 2009(4): 17-21. (in Chinese))
- [2] REN Li-liang WANG Mei-rong, LI Chun-hong, et al. Impacts of human activity on river runoff in the northern area of China[J]. Journal of Hydrology, 2002, 261: 204-217.
- [3] 李子君,李秀彬. 潮白河上游 1961—2005 年径流变化趋势及原因分析[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 82-86. (LI Zi-jun, LI Xiu-bin. Trend and causation analysis of runoff variation in the upper reach of Chaobaihe River Basin in Northern China during 1961-2005[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(2): 82-86. (in Chinese))
- [4] 张晓萍,张鲁,王勇,等. 黄河中游地区年径流对土地利用变化时空响应分析[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 19-26. (ZHANG Xiao-ping, ZHANG Lu, WANG Yong, et al. Tempo-spatially responses of the annual streamflow to LUCC in the middle reaches of Yellow River, China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(1): 19-26. (in Chinese))
- [5] YANG Yong-hui, TIAN Fei. Abrupt change of runoff and its major driving factors in Haihe River Catchment, China[J]. Journal of Hydrology, 2009, 374: 373-383.
- [6] 王兆礼. 气候与土地利用变化的流域水文系统响应: 以东江流域为例[D]. 广州: 中山大学, 2007.
- [7] 方秀琴,任立良,李琼芳. 老哈河流域水文要素变化研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6): 620-624. (FANG Xiu-qin, REN Li-liang, LI Qiong-fang. Variations of hydrological elements in Laohahe River Basin[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37(6): 620-624. (in Chinese))
- [8] 杨肖丽. 半干旱区土地利用/覆被变化对水文过程影响研究: 以西辽河源头流域为例[D]. 南京: 河海大学, 2010.
- [9] 江善虎,任立良,雍斌,等. 老哈河流域降水变化特征分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 27(1): 1-4. (JIANG Shan-hu, REN Li-liang, YONG Bin, et al. Analysis of precipitation change in characteristic Laoha River Basin[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 27(1): 1-4. (in Chinese))
- [10] 杜富慧,郝振纯,陈新美,等. 邯郸地区年降水量统计特性[J]. 水资源保护, 2009, 25(6): 16-20. (DU Fu-hui, HAO Zhen-chun, CHEN Xin-mei, et al. Statistical characteristics of annual precipitation in Handan region[J]. Water Resources Protection, 2009, 25(6): 16-20. (in Chinese))
- [11] 丁晶,邓育仁. 随机水文学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988.
- [12] 李昌峰,高俊峰,曹慧. 土地利用变化对水资源影响研究的现状和趋势[J]. 土壤, 2009(4): 191-205. (LI Chang-feng, GAO Jun-feng, CAO Hui. Current situation and tendency of research on impacts of land use changes on water resource[J]. Soils, 2009(4): 191-205. (in Chinese))