

辽河流域铁岭站径流变化及其影响因素分析

胡海英^{1,2}, 黄国如¹, 黄华茂³

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;

2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640; 3. 华南理工大学 理学院, 广州 510640)

摘 要:采用线性趋势回归、Mann—Kendall 秩次相关检验、小波分析、Spearman 相关分析等多种方法,对 1964—2004 年间辽河流域福德店至铁岭区间降水、径流时间序列的年际变化特征进行了综合分析。结果表明:① 流域降水径流年内分配不均匀,主要集中在 5—9 月份;② 多年年降水量、年径流量和年径流系数总体呈下降趋势,其中年径流量和年径流系数下降趋势明显;③ 年径流量的年际变化较大,年最大与最小径流量的倍比为 11.9 倍,21 世纪 00 年代的径流量平均值仅为 60 年代的 24.3%,减少幅度较大;④ 年降水和年径流量具有明显的阶段性和周期性演变特征,分别存在 7 a 和 15 a 尺度的周期性变化规律。⑤ 降水量减少和下垫面条件变化是造成福德店至铁岭区间流域径流量下降的重要因素。

关键词:径流;变化趋势;影响因素;辽河流域

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)02-0098-05

Variation of Runoff at Tieling Station of Liaohe River Basin and Its Influence Factors

HU Hai-ying^{1,2}, HUANG Guo-ru¹, HUANG Hua-mao³

(1. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. School of Sciences, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Based on the regression analysis, Mann-Kendall rank correlation test, wavelet analysis and Spearman correlation analysis, the time series of precipitation and runoff in the area between Fudedian and Tieling Station in Liaohe River basin from 1964 to 2004 were analyzed. Some conclusions were drawn as follows: ① the distribution of annual precipitation and annual runoff were uneven, and mainly concentrated from May to September; ② the time series of annual precipitation, annual runoff and annual runoff coefficient had downward trends, and the trends of annual runoff and annual runoff coefficient were significant; ③ the distribution of annual runoff changes greatly. According to statistics, the ratio of annual maximum to minimum even reached to 11.9 times, and the average runoff in the first decade of 21 century was 24.3% of that in 1960s; ④ the evolution of annual precipitation and annual runoff had obvious stages and cyclical change, and there was a cycle of about 7 years and 15 years; ⑤ the decrease of precipitation and the change of the underlying surface conditions were the key factors influencing the runoff.

Key words: runoff; variation trend; influence factors; Liaohe River basin

水资源是基础性自然资源,是保障一个国家或地区实现经济、社会和生态可持续发展的重要前提条件。降水和径流是水循环的重要环节,降水为水资源量提供补给,而径流的变化则直接关系到水资源量的多少^[1]。在全球气候变化和人类活动的影响下,区域径流和水资源情势发生了显著的时空变化,需要对其

变化规律和发展趋势进行分析。河川径流是最重要的淡水资源,其变化趋势分析在水资源的合理配置、开发与利用以及流域水利规划等方面都具有十分重要的作用。随着我国水资源供需矛盾的日益加剧,河川径流变化及其影响因素的研究越来越受到关注^[2-10]。

收稿日期:2012-08-31

修回日期:2012-11-02

资助项目:国家自然科学基金项目(51209096);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2011490411);河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室开放研究基金

作者简介:胡海英(1983—),女,湖南临武人,博士,讲师,主要从事水文水资源研究。E-mail:cthyhu@scut.edu.cn

辽河流域是我国七大流域之一,也是我国重要的重工业、能源和商品粮生产基地。近年来,气候变化和人类活动影响频繁,水资源供需矛盾尖锐,水资源短缺已成为制约流域经济社会可持续发展的重要因素。鉴于此,本文采用线性趋势回归、Mann—Kendall 秩次相关检验、小波分析、Spearman 相关分析等多种方法,对辽河流域福德店至铁岭区间降水、径流时间序列的变化趋势与演变规律进行综合分析,以期对区域水利工程建设、环境保护、水资源合理利用以及水资源管理调度等方面提供理论指导和实际参考。

1 研究区域及资料来源

辽河位于我国东北地区西南部,地理位置为东经 $117^{\circ}00'$ — $125^{\circ}30'$ 、北纬 $40^{\circ}30'$ — $45^{\circ}10'$,发源于河北省七老图山脉,流经河北、内蒙、吉林、辽宁4省区,最后注入渤海。辽河流域地势大体自北向南、自东西两侧向中部倾斜,形成中部辽河平原。辽河中游为冲积平原,海拔在200 m以下,下游平原海拔在50 m以下,地势低平易涝。辽河流域属于季风性气候,四季寒暖明显,干湿分明,冬季多西北风,夏季多东南风,年平均气温 $5\sim 11^{\circ}\text{C}$,年内温差较大。受大气环流的影响,流域降水量在时间和空间上的分布极不均匀,年际之间、地区之间、季节之间差异显著。本文以辽河流域的福德店至铁岭区间为研究区域,区间流域面积为 $13\,839\text{ km}^2$,年平均降水量 $400\sim 900\text{ mm}$,降水量主要集中在6—9月,区域内暴雨历时较短,雨量集中,洪水陡涨陡落、峰高量小,造成洪水灾害频繁而严重。本研究选取辽河福德店至铁岭区间流域1964—2004年的降水、径流资料,以降水量、径流量和径流系数作为表征降水和径流变化的参量,其中流域面平均降水量根据泰森多边形法确定各个雨量站权重后利用加权平均法计算,径流系数为径流深与降水量的比值。分别从年内分配、变化趋势、突变分析、周期分析4个方面进行研究,探讨流域年径流量多年变化特征及其影响因素。

2 研究方法

2.1 Mann—Kendall 方法

Mann—Kendall 法(简称 M—K 法)是一种非参数统计检验方法,其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,适用于类型变量和顺序变量,该法已被广泛应用于气候参数和水文序列的分析,具体计算方法参见文献[11]。采用 M—K 法

分析辽河福德店至铁岭区间流域实测年降水量和径流量的变化趋势。

2.2 小波分析法

小波分析作为一种时频分析的重要手段,可以揭示非平稳序列中存在的隐含周期成分。将其应用于水文时间序列的时频结构分析中,不仅可以给出水文时间序列变化的尺度,还可以显现出变化的时间位置^[12]。本文选用 Morlet 小波函数对流域年降水和年径流序列进行周期分析。

2.3 Spearman 相关分析法

Spearman 是一种较常用的相关分析方法,它利用两变量的秩次大小作线性相关分析,属于非参数统计方法,适用范围比较广,本文运用 Spearman 相关分析法研究流域不同时间尺度降水与年径流量的相关关系。

3 结果与分析

3.1 径流的年内分配特征

辽河流域径流的年内分配主要受降水的影响。根据福德店至铁岭区间流域1964—2004年的实测水文资料,对多年月平均降水量和径流量进行统计,结果如图1所示。由图1可以看出,流域全年降水量的81.1%集中在汛期(5—9月),多年月平均降水量最大值出现在7月份,占多年平均降水量的25.8%,其次是6月和8月,分别占多年平均降水量的15.7%和22.5%。降水的年内分配不均导致径流的年内分配不均匀。流域径流主要集中在5—9月份,占多年平均径流量的83.4%,月平均径流量最大值出现在8月,约占多年平均径流量的28.0%,其次为7月,约占多年平均径流量的16.7%;12月、1月、2月径流量很小。

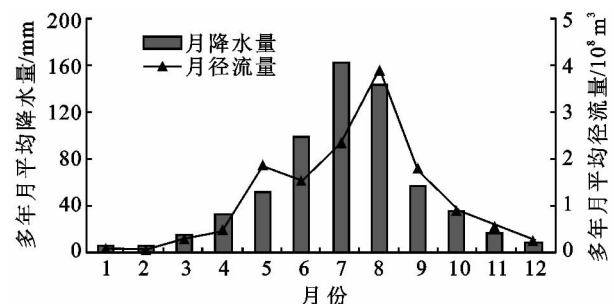


图1 辽河流域福德店至铁岭区间径流年内分配

3.2 年最大一天径流量出现时段频次分析

对福德店至铁岭区间流域年最大一天径流量出现时段的频次进行统计(表1)发现,从年最大一天径流量出现的时间来看,出现在8月的频次最高,为16次,占统计年数的41.0%;其次是7月,出现年最大

一天径流量的频次达到 11 次,占统计年数的28.2%; 11 月至次年 3 月出现年最大一天径流量的频次为 0。因此,7 月和 8 月是该流域的主汛期,是暴雨和洪水的集中暴发期。

表 1 年最大一天径流量出现时段统计表

时间	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	合计
频次	0	0	0	1	6	2	11	16	2	1	0	0	39
百分比/%	0	0	0	2.6	15.4	5.1	28.2	41.0	5.1	2.6	0	0	100

3.3 年降水径流变化趋势分析

利用线性趋势回归分析法,对流域年平均降水和径流序列变化情况进行统计分析(图 2)。从图 2 可以看出,流域年降水、年径流和年径流系数序列均呈不规则的周期波动变化,但总体呈下降趋势。流域年径流多年平均值为 14.52 亿 m³;最大值发生在 1964 年,径流量为 37.78 亿 m³,模比系数为 2.60;最小值发生在 2001 年,径流量仅为 3.18 亿 m³,模比系数为 0.22。年最大径流量与最小径流量的倍比为 11.9 倍,可见福德店至铁岭区间流域年径流序列年际变化

较大,对水资源的开发利用不利。流域年降水多年平均值为 632 mm;最大值发生在 1964 年,降水量为 844 mm,模比系数为 1.34;最小值发生在 2002 年,降水量仅为 452 mm,模比系数为 0.72。年最大降水量与最小降水量的倍比为 1.87 倍,可见年降水序列比年径流序列年际变化略小。流域年平均径流系数在 0.04~0.35 之间变化,多年平均值为 0.16,年平均径流系数系列比较显著的峰值有 3 个,分别出现在 1964 年、1986 年和 1995 年。径流系数表明了降水转变为径流的多少,反映了流域下垫面因素对降水—径流关系的影响。

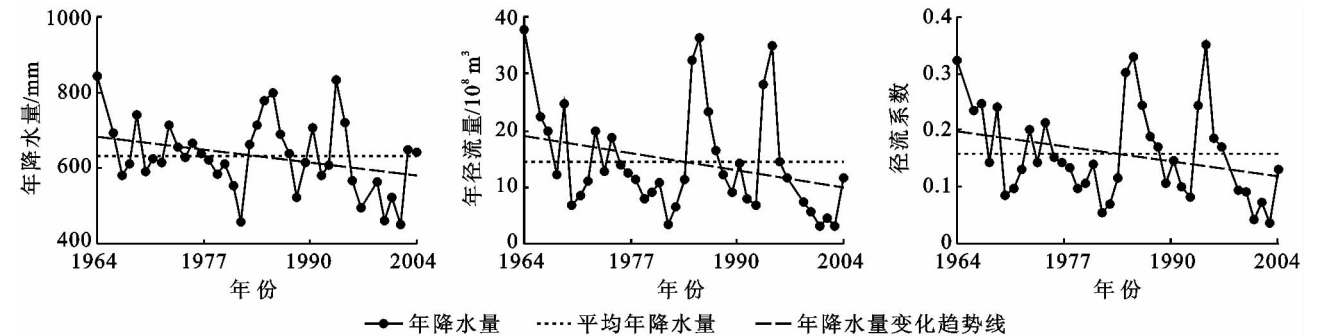


图 2 辽河流域福德店至铁岭区间年降水、径流量、径流系数变化趋势

依据 M—K 秩次相关检验法,对福德店至铁岭区间流域年降水量、年径流量和年径流系数序列进行趋势检验,结果见表 2。流域年降水量、年径流量和年径流系数序列的 M—K 检验值,即 Z_c 值分别为-1.81,-2.42,-2.13,均为负值。表明流域年降水量、年径流量和年径流系数变化呈下降趋势,与线性趋势回归分析法所得到的结果一致,其中年径流量和年径流系数序列通过 0.05 的信度检验,下降趋势明显。

表 2 年降水和径流变化 M—K 法检验结果

项目	年降水量 序列	年径流量 序列	年径流系数 序列
Z _c 值	-1.81	-2.42	-2.13
检验过程	Z < 0.05 = 1.96 Z > 0.05 = 1.96 Z > 0.05 = 1.96		
变化趋势	下降	下降	下降
是否显著	不显著	显著	显著

将流域 1964—2004 年的水文资料划分为 1964—1969 年、1970—1979 年、1980—1989 年、1990—1999 年和 2000—2004 年,基本以 10 a 为一个代际来分析其代际变化规律(表 3)。由表 3 可知,年降水量、年径流量和年径流系数年代际变化趋势一致,都经历了多

→少→多→少→少的变化过程,其中 20 世纪 60 年代和 80 年代是相对丰水期,而 20 世纪 70 年代、90 年代和 21 世纪 00 年代是相对枯水期。3 种水文要素均以 20 世纪 60 年代为最大,以 21 世纪 00 年代为最小,其中 21 世纪 00 年代的流域径流量平均值仅为 60 年代的 24.3%,减少幅度较大,相比之下,年降水系列各年代间变化幅度较小。

表 3 降水和径流各要素的年代际值

时 间	年降水量/mm	年径流量/亿 m ³	年径流系数
20 世纪 60 年代	694	23.4	0.24
20 世纪 70 年代	634	12.4	0.14
20 世纪 80 年代	643	16.2	0.17
20 世纪 90 年代	632	15.0	0.16
21 世纪 00 年代	546	5.7	0.07

3.4 年降水径流变化周期分析

河流年径流的多年变化具有一定的周期性,对流域年降水和年径流序列进行 Morlet 连续小波变换,并将不同时间尺度 a 的所有小波系数的平方在 b 域上积分,即得到小波方差,如图 3 所示。从年降水量

的小波分析方差图可知,年降水量和年径流量序列都存在 7 a 和 15 a 尺度的周期性变化规律。根据小波方差分析结果,绘制年降水和年径流 7 a 和 15 a 时间尺度小波变换系数的实部变化曲线(图 4)。从图 4 中

可以看出流域年降水和年径流序列在 7 a 特征时间尺度上,大约经历了 8 个丰枯转换期;在 15 a 特征时间尺度上,流域年降水和年径流变化经历了大约 4 个丰枯转换期。

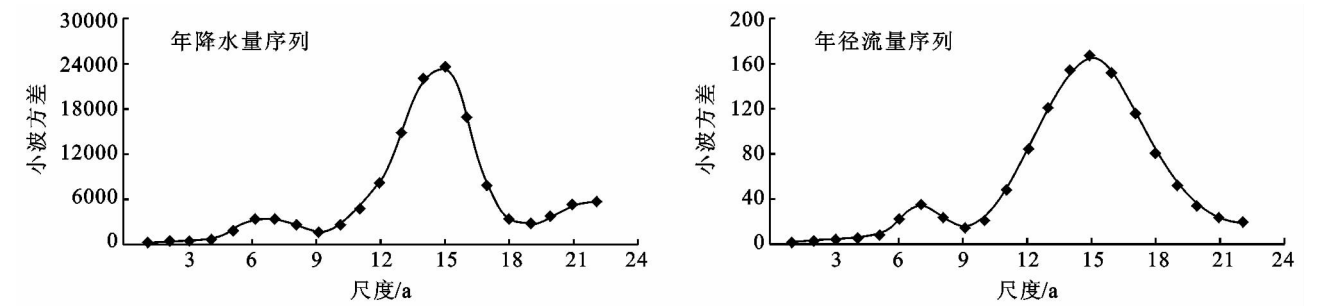


图 3 年降水和年径流序列小波变换方差

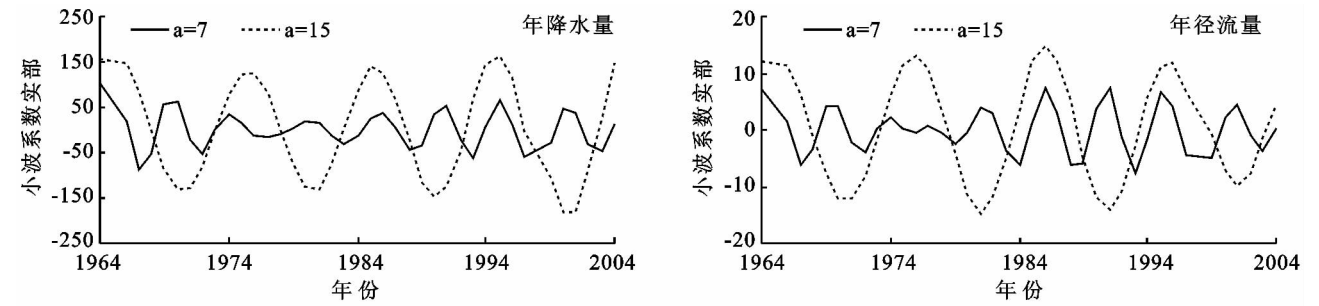


图 4 年降水和年径流序列 7 a 和 15 a 时间尺度小波变换系数的实部变化曲线

3.5 影响因素分析

3.5.1 降水径流相关关系分析 研究区域年径流的主要补给来源是降水。用 Spearman 相关法分析辽河福德店至铁岭区间流域降水与径流的相关性,计算结果见表 4。从表 4 可以看出,年降水量与年径流量的相关系数是 0.701,在 0.01 的显著水平下,进行双侧 T 检验,结果显示:显著性概率为 0,因此两组数据的相关性是显著存在的;年最大一天降水量与年径流量的相关系数是 0.565,检验结果显示:显著性概率是

0,因此两组数据的相关性是显著存在的;汛期(6—8 月)降水量与年径流量的相关系数是 0.608,检验结果显示:显著性概率是 0,因此两组数据的相关性也是显著存在的;非汛期(12 月—翌年 2 月)降水量与年径流量的相关系数是-0.136,检验结果显示:显著性概率是 0.408,因此两组数据的相关性不显著。结果表明,流域年径流量受降水变化的影响较大,尤其是年降水量、汛期降水量和最大一天降水量。

表 4 降水与径流相关分析结果

项目	年降水量	年最大一天降水量	汛期(6—8 月)降水量	非汛期(12 月至翌年 2 月)降水量
Spearman 相关系数	0.701**	0.565**	0.608**	-0.136
显著性概率	0.000	0.000	0.000	0.408

3.5.2 下垫面条件变化的影响 降水—径流双累积曲线法是分析年径流序列趋势性变化的常用方法^[13],即绘制流域径流量与降水量的逐年累积值关系图。若径流只受到降水影响,则双累积曲线基本呈一直线,若双累积曲线发生偏转,说明流域径流量还受到下垫面条件变化的影响。利用该法分析研究区下垫面条件变化对年径流量的影响,如图 5 所示。从图 5 可以看出,双累积曲线在 1984 年和 1994 年左右发生了偏转,说明在 1984—2004 年这个时段,下垫面条件变化对流域径流量有影响。

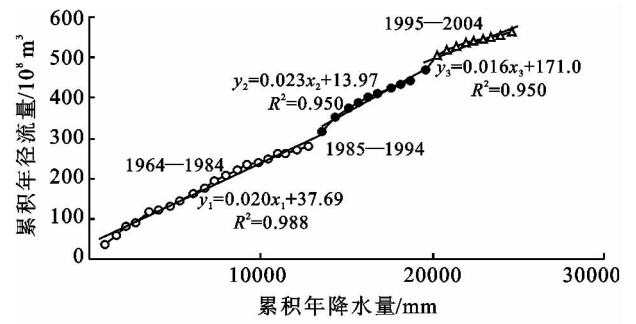


图 5 年径流量与年降水量的双累积曲线
流域的气候环境和产汇流条件是产生径流的决

定性因素,其中气候环境对径流的影响主要表现在降水上,而受人类活动影响较大的下垫面条件变化会造成流域产汇流条件的改变。综合分析区域内径流减少的原因,主要有:①天然降水量的减少;②流域内水利工程拦蓄水;③水资源取用量增加。随着人口的增加和社会经济的发展,人类活动引起的下垫面变化会越来越明显,首先人类从河道外引水量不断增加,直接减少了进入河道的径流量。其次,流域内修建的红山水库、红顶山水库、南城子水库、清河水库和柴河水库等水利工程,使得部分径流被拦蓄于库内,对流域径流量的减少起到了一定作用。此外,水土保持措施和土地利用方式的改变和城市化等,在一定程度上也会引起流域径流特征的变化。

4 结论

(1) 流域降水径流的年内分配极不均匀,全年降水量的 81.1%和径流量的 83.4%集中在汛期(5—9月)。年最大一天径流量出现在7月和8月的频次最高,分别占统计年数的 41.0%和 28.2%,因此,该时段是流域暴雨和洪水的集中暴发期。

(2) 多年年降水量、年径流量和年径流系数序列呈较为明显的不规则周期波动变化,总体上呈下降趋势,其中年径流量和年径流系数序列下降趋势明显。年径流的年际和年代际变化较大,其中年最大径流量与最小径流量的倍比为 11.9 倍,21 世纪 00 年代的径流量平均值仅为 60 年代的 24.3%,减少幅度较大,对水资源的开发利用极为不利。

(3) 研究区年降水和年径流演变具有明显的阶段性和周期性,Morlet 小波分析结果表明,年降水量和年径流量序列都存在 7 a 和 15 a 尺度的周期性变化规律。

(4) 降水量减少和下垫面条件变化是造成福德店至铁岭区间流域径流量下降的重要因素。降水径

流 Spearman 相关分析显示,流域降水、径流变化过程关系密切;随着年代的推移,1984 以后降水—径流双累积曲线发生了偏转,说明径流受降水影响的同时,愈来愈受到人类活动引起的下垫面变化等其它因素的影响。

参考文献:

- [1] 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,2009,37(6):620-624.
- [2] 王国庆,张建新,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.
- [3] 陈亚宁,郝兴明,徐长春.新疆塔里木河流域径流变化趋势分析[J].自然科学进展,2007,17(2):205-210.
- [4] 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):600-606.
- [5] 段文明,穆兴民,高鹏,等.嘉陵江流域近 50 年降水量演变规律分析[J].水土保持研究,2012,19(1):97-101.
- [6] 黄俊雄,徐宗学.太湖流域 1954—2006 年气候变化及其演变趋势[J].长江流域资源与环境,2009,18(1):33-40.
- [7] 刘剑,姚治君,陈传友.雅鲁藏布江径流变化趋势及原因分析[J].自然资源学报,2007,22(3):471-477.
- [8] 李进虎,吴让,赵金忠,等.近 50 年贵德县旱涝灾害变化特征分析[J].水土保持研究,2012,19(4):256-264.
- [9] 冯平,李建柱,徐仙.潘家口水库入库水资源变化趋势及影响因素[J].地理研究,2008,27(1):213-220.
- [10] 蔡道明,鄢铁平,廖伟,等.湖北省 1957—2009 年降水时空变化特征分析[J].水土保持研究,2010,17(6):237-241.
- [11] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007.
- [12] 王文圣,丁晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [13] 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(增刊 2):82-87.