

近 50 年嫩江流域径流变化及影响因素分析

徐东霞^{1,2}, 章光新¹, 尹雄锐¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 根据嫩江主要代表水文站石灰窑、同盟、江桥、大赉 1956 - 2006 年 51 年的径流资料, 应用数理统计、累积滤波器、Mann-Kendall 秩相关法及小波分析法等多种方法, 分析了嫩江径流年内、年际变化特征及其影响因素。结果表明: 嫩江径流年内分配不均匀, 主要集中在 7、8、9 月份。嫩江年径流量在 1963 年左右发生了一次全流域的减少突变, 80 年代径流有所增加, 90 年代中后期又发生了一次减少突变。嫩江径流主要存在 8 年的年际周期, 20 年及大于 40 年的年代际周期。径流变化的主要气候影响因素是降水, 人类活动通过土地覆被变化及水利工程等对径流也有重大影响。

关键词: 嫩江流域; 径流变化; 影响因素

中图分类号: TV122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2009)03-0416-06

中国学者对长江、黄河等一些重要河流的径流变化特征、演变规律及其驱动因素开展了大量的研究工作^[1-3], 对嫩江流域降水也开展了相关研究^[4], 但对嫩江径流演变过程的研究较少。近 50 年来, 变化环境下的嫩江流域径流过程发生了巨大变化, 加剧了水资源的短缺和时空变异性, 相继带来了一系列突出的水与生态环境问题(如支流河道断流、洪水灾害、湿地退化、地下水劣变与水土流失等)。而且旱涝灾害发生的频次明显加大, 1970 - 1990 年的 20 年间, 旱灾和涝灾的发生频率分别达到了 33.3% 和 47.6%^[5], 已严重威胁到流域经济社会可持续发展和生态安全。因此, 开展嫩江径流变化特征、趋势、规律及其影响因素研究, 为流域水利工程建设、生态环境保护和水资源合理利用提供科学依据, 具有重要的理论意义和现实意义。

1 流域概况

嫩江发源于北部的大兴安岭伊勒呼里山, 在吉林松原市三岔河汇入松花江, 河长 1370 km, 流域面积 29.7 万 km², 多年平均径流深 76.5 mm, 天然年径流总量 227.3 亿 m³。上游属于山丘区, 多为森林覆盖, 河流比降平水时为 1‰。中、下游由丘陵过渡到平原, 地势转平缓, 河流比降逐渐降低。嫩江流域位于温带大陆性季风气候区, 多年平均降水量 400 ~ 500 mm, 夏季降雨量占全年降水量的 70% ~ 80%, 因此夏季易发生洪涝灾害。

嫩江流域由于近代短时间、高强度的农业开发, 土地利用和地表覆被发生了显著变化, 嫩江干流的调水工程、尼尔基水库和支流的众多水库的修建等人为因素极大地改变了嫩江径流特征和形成规律, 进而影响流域水生态安全。根据卫星遥感影像解译数据, 1986 年到 2000 年 15 年期间, 湖泊、沼泽减少明显, 分别减少了 21.4% 和 9.3%; 草地减少了 13.8%; 旱田在 1996 - 2000 年 5 年期间增加了 24.6%。

嫩江水系主要代表水文站有上游石灰窑、中游同盟、下游江桥和大赉 4 个水文站, 资料为 1956 - 2006 年月径流资料。气象站有嫩江、齐齐哈尔、依安、洮南、大安、白城 6 个气象站, 资料为 1956 - 2002 年的月平均气温, 蒸发, 降水。

收稿日期: 2008-07-26

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-YW-126)

作者简介: 徐东霞(1983 -), 女, 黑龙江佳木斯人, 硕士研究生, 主要从事水资源与水环境研究。

E-mail: xiaoxu831216@163.com

通讯作者: 章光新, E-mail: zhgx@neigae.ac.cn

2 径流变化特征

2.1 径流的年际变化与年内分配特征

对嫩江各水文站 1956 - 2006 年径流量进行统计分析得出, 1956 - 1960 年、1981 - 1990 年径流量偏丰, 1971 - 1980 年、2001 - 2006 年偏枯, 偏丰时期径流量与偏枯时期相差近一倍。如表 1 所示。

表 1 嫩江径流年代际平均径流量分配统计

Table 1 Decade distribution of the runoff in Nenjiang River 亿 m³

站名	1956 - 1960 年	1961 - 1970 年	1971 - 1980 年	1981 - 1990 年	1991 - 2000 年	2001 - 2006 年
石灰	44.2	29.0	20.1	36.4	29.2	23.4
同盟	223.8	150.0	107.4	196.1	181.1	111.8
江桥	312.9	209.3	132.2	246.9	233.8	138.0
大赉	362.9	212.4	134.8	249.5	243.3	118.8

1980 年、2001 - 2006 年偏枯, 偏丰时期径流量与偏枯时期相差近一倍。如表 1 所示。

径流年内变化特征主要受降水、地表覆被和湿地调节等的影响。嫩江代表水文站各月径流分配如表 2 所示, 由表 2 可看出, 全年径流主要集中在 7、8、9 月份, 占全年径流量的 50% 左右。

表 2 嫩江径流年内分配统计

Table 2 Monthly distribution of the runoff in Nenjiang River

站名	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
石灰	0.1	0.1	0.1	8.4	14.8	14.7	17.2	20.2	15.2	7.6	1.5	0.3
同盟	0.4	0.2	0.3	5.3	9.8	10.7	18.3	24.1	16.9	9.9	3.0	1.0
江桥	0.6	0.4	0.5	3.7	8.1	8.6	16.9	26.8	18.5	11.1	3.6	1.3
大赉	0.7	0.5	0.7	3.0	7.4	7.6	12.6	25.0	20.8	13.9	5.8	2.0

2.2 径流周期性分析

根据各测站年径流序列的复值 Morlet 连续小波变换的小波系数, 将时间域上的关于 a 的所有小波系数的平方进行积分, 即为小波方差^[6]:

$$D(a) = \int |W_f(a, b)|^2 db \quad (1)$$

式中 a 为尺度因子; b 为时间因子; $W_f(a, b)$ 为小波变换系数。小波方差随尺度 a 变化过程称小波方差图, 它反映了波动的能量随尺度的分布, 可以确定一个时间序列中存在的主要时间尺度, 即主周期。

由图 1 可以看出, 嫩江上游石灰窑站主要存在 8 年, 20 年, 及 40 年以上的周期, 年际变化以 8 年尺度周期最为显著, 年代际周期变化以大于 40 年周期为主, 但这种周期变化还需要更长时间序列的资料进行验证。中、下游径流主要存在 4~5 年不明显周期和 8~10 年明显周期, 年代际周期变化也以大于 40 年周期为主。

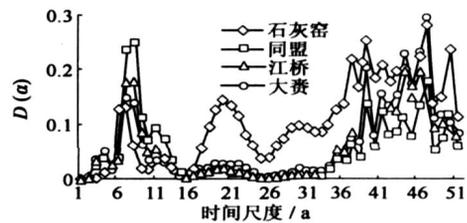


图 1 嫩江 4 个水文站年径流小波变换方差
Fig. 1 Wavelet variance of the annual runoff in Nenjiang River

2.3 径流趋势分析

对嫩江年径流的趋势变化分析, 可以采用累积滤波器法^[7], 能充分反映时间系列定性的变化趋势, 原理如下:

$$S = \left(\sum_{i=1}^k \frac{R_i}{k} \right) / \bar{R} \quad (2)$$

式中 S 为累积平均值; R_i 为水文时间系列值; \bar{R} 为水文时间系列的平均值; $k = 1, 2, 3, \dots, n$ (n 为系列长度), $i = 1, 2, \dots, k$ 。

Mann-Kendall (M-K) 的秩相关法对系列趋势变化的定量说明效果较好, 故本文采用 M-K 的秩相关法定量分析嫩江流域年径流的变化趋势。原理如下:

$$Z_c = \frac{4p}{N(N-1)} - 1 \quad r = \frac{2(2N+5)}{9N(N-1)} \quad Z_c = / t \quad (3)$$

式中 Z_c 为秩次相关系数; p 为径流、降水系列所有对偶观测值 ($R_j, R_i, j < i$) 中 $R_j < R_i$ 出现的次数; N 为系

列长度。

在M-K秩次检验中,若统计量 $Z_c = Z(1 - \alpha/2)$, 则认为序列没有显著的趋势; $Z_c < -Z(1 - \alpha/2)$ 表明序列有显著下降趋势, $Z_c > Z(1 - \alpha/2)$ 表明序列有显著上升趋势。是显著性水平, 当 $\alpha = 0.05$ 时, $Z(1 - \alpha/2) = 1.96$ 。两种方法计算结果如图2和表3。

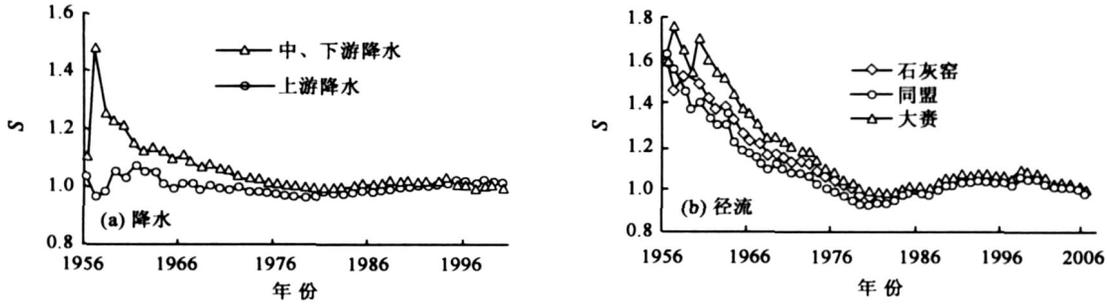


图2 嫩江流域降水及年径流累积平均曲线

Fig. 3 Accumulative average curves of the annual precipitation and the annual runoff of chosen stations

图2可见,累积滤波器法显示:嫩江各水文站径流量,总体上均呈现减少趋势。从细节上看,1956-1980年呈明显的下降趋势,1980-1998年略有增加,1998年后开始又呈下降趋势,但下降不显著。降水曲线显示,嫩江上游降水量近50年基本保持不变,中下游降水略减少,但减少趋势没有径流显著。

表3 嫩江年径流降水变化趋势

Table 3 Trend in the annual runoff and precipitation in Nenjiang River				
项目	站点	秩次相关法		累积滤波器法
		Z_c	趋势	
径流	石灰窑	-1.78	减少	不显著
	同盟	-1.54	减少	不显著
	大赉	-2.46	减少	显著
降水	上游	-0.10	减少	基本不变
	中、下游	-0.56	减少	1960年后较稳定

表3秩相关法分析显示,累积滤波器法所反映的径流系列变化趋势同M-K秩次相关法所得的结果相一致,嫩江各水文站的 Z_c 值均为负,说明各站的径流、降水均有减少的趋势,其中:石灰窑、同盟水文站 $Z_c > -Z(1 - \alpha/2)$ 表明减少趋势不显著,大赉水文站 $Z_c < -Z(1 - \alpha/2)$ 表明减少趋势显著。嫩江气象站降水 Z_c 值接近于0,表明嫩江上游降水基本不变,嫩江中、下游平均降水略减少,但不显著。在上游来水条件、下游降水变化不显著的情况下,嫩江下游的大赉站径流显著减少,说明下游人类活动导致了径流的减少。

2.4 突变分析

Manr-Kendall (M-K) 法可以较有效地检测序列的变化趋势,并能大体确定突变发生的位置, M-K法以气候序列平稳为前提,定义了统一计量,公式如下:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (2 \leq k \leq N) \quad E[d_k] = k(k-1)/4$$

$$D[d_k] = k(k-1)(2k+5)/72 \quad U(d_k) = (d_k - E[d_k]) / \sqrt{D[d_k]} \quad (4)$$

式中 m_i 为第 i 个样本 x_i 大于 $x_j (2 \leq j < i)$ 的累计数。在原序列随机独立前提下,对 d_k 标准化后得到 $u(d_k)$, 给定一显著性水平 α , 当 $|u(d_k)| > \alpha$ 时, 拒绝原假设, 表示序列将存在一个强的增长或减少趋势。所有 $u(d_k) (1 \leq k \leq N)$ 将组成一条曲线 C_1 , 把此法引用到反序列中, 得到另一条曲线 C_2 , 当曲线 C_1 超过信度线(图中两条实线 $y = 1.96, -1.96$ 所示), 即表示存在明显的变化趋势, 如果曲线 C_1 和 C_2 的交叉点位于信度线之间, 这点便是突变点的开始。

由图3可以看出, C_1 都超过信度线, 且 C_1 与 C_2 曲线都有交点位于信度线之间, 表明流域各测站年径流序列都存在显著的变化趋势。具体表现在, 1963年左右, 发生了一次全流域的减少突变, 1985年后均呈现增

长的趋势,但 C_1 与 C_2 曲线的交点位于置信曲线之外,因此推断不是突变点,说明该增长趋势并没有达到突变的水平。各测站 1998 年左右发生了一次减少突变,不同测站发生的时间有所差异。上游石灰窑站发生在 1995 年左右,中游同盟站、下游大赉站发生在 2000 年左右。

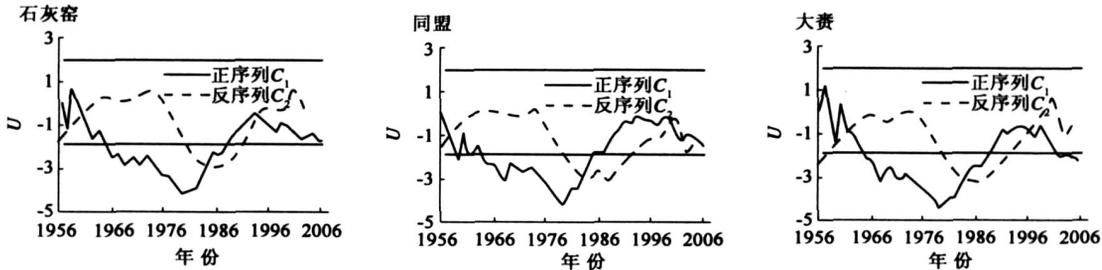


图3 嫩江流域年径流序列 M-K法计算

Fig. 3 M-K analysis of the annual runoff in Nenjiang River

3 径流的影响因素分析

径流形成过程是多种因素相互作用、复杂的自然现象。下面从气候和人类活动两个方面来分析嫩江干流径流的影响因子。

3.1 气候因素

上游取嫩江气象站,中、下游取依安、齐齐哈尔、白城、洮南、大安气象站的平均值(资料为:年降水量、年均温、月最高温、年蒸发量数据)采用 Kendall 相关分析法,分别分析其与石灰窑、同盟、江桥、大赉水文站径流的相关性。进而分析径流的气象影响因子。结果见表 4。由表 4 可知,嫩江各河段径流和降水有着很好的相关性,都通过了 0.01 显著水平的检验,呈显著正相关。由图 4 可见降水变化不如径流变化剧烈,可能是其它气候因素及人类活动扩大了变化趋势。上游蒸发与径流无明显的相关性,中游和下游通过了 0.01 显著水平的检验,径流与蒸发呈显著负相关,且下游相关系数大于中游。1956 - 1963 年中、下游平均年蒸发量为 1496 mm,1964 - 1985 年为 1836 mm,而由 M-K 法得出 1963 年左右嫩江径流发生了一次减少突变,可见该阶段的年均蒸发量的增加加剧了径流的减少。1986 - 1998 年年均蒸发量又减少至 1659 mm,该阶段径流呈增加的趋势。1998 - 2000 年又增加至 1774 mm,径流减少。年均温度和月最高温度都没有通过显著水平检验,对径流基本没有直接影响,但可以通过影响蒸发等间接影响径流。综上所述:影响径流的主要气象因素是降水,降水越多,径流越大,其次是蒸发,流域蒸发越强烈,径流量越小。

表 4 嫩江径流与各因子的相关系数

Table 4 Coefficients of correlation of runoff and other effects in Nenjiang River

	降水	年均温	最高温	蒸发
上游径流	0.492 **	- 0.012	- 0.253	0.060
中游径流	0.599 **	- 0.051	- 0.229	- 0.447 **
下游径流	0.696 **	- 0.002	- 0.290	- 0.513 **

3.2 土地利用覆被变化

近几十年来,嫩江流域土地利用活动强烈地改变了地表的性质,进而改变了流域水文过程,是流域洪水更加频繁发生的重要原因。为研究土地利用变化对径流的影响,选择各个时期变化比较明显且对径流影响作用大的沼泽、湖泊、林地和草地面积与流域的年降水量、年径流量等几个变量,来研究土地利用变化对流域水量的影响。由于土地覆被面积和水量指标的单位并不统一,先进行数据标准化,以 1986 年的数据为 1,而 1996 年和 2000 年的则与之相比,该比值反映了各期间的变化,是量纲一参数,因而可以进行趋势比较。(降水资料采用依安、齐齐哈尔、白城、洮南、大安站的平均值,径流资料采用同盟、江桥、大赉水文站的平均值)。

由图 5 可见,降水与径流的变化并不完全一致,可见径流在很大程度上受外在因素的影响。径流与沼泽面积的关系最为密切,其次为林地。主要表现在 1986 - 1996 年沼泽、林地面积略有增加,径流量减少;1996 -

2000年沼泽、林地面积大幅度减少,径流量增加明显。湖泊和草地与径流关系不是十分密切,但总体来讲,湖泊及草地面积减少,径流量会增加。

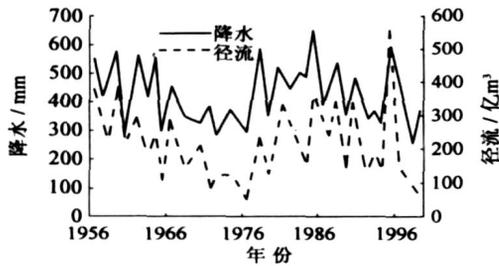


图4 嫩江中游降水径流序列

Fig.4 Precipitation and runoff of Nenjiang River

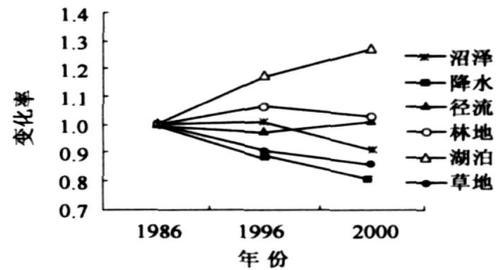


图5 嫩江流域植被变化与径流变化趋势

Fig.5 Vegetation variety and the trend of runoff of Nenjiang River

通过对1986、1996和2000年三时期的土地利用数据统计分析,沼泽地1986年至1996年期间由194.8万 hm^2 增加到197.0万 hm^2 ,到2000年减少到177.0万 hm^2 ,林地1986年至1996年期间由926.0万 hm^2 增加到987.0万 hm^2 ,到2000年减少到951.0万 hm^2 ,1986-1996年期间,径流减少,1996-2000年期间降水是减少的,而径流却大幅度增加,可见这与沼泽和林地面积的大量减少有直接关系。沼泽是水源的良好储存地,增加对地下水的补给,减少河流的径流量,还可以延缓洪峰;林地通过滞流、蒸腾、下渗也可以减少河流的径流量。

1986-1996年期间,湖泊与草地的面积都减少,而径流没有增加,可能的原因是湖泊及草地转变为与其蓄水能力相当的覆被类型,且流域内湖泊、草地所占的比重不大,所以影响不明显。1996-2000年,湖泊与草地面积减少,径流增加。整体来讲,湖泊及草地面积减少,导致径流量增加。

综上所述,嫩江流域总降水减少的同时,地表径流有增加的阶段,主要是受土地覆被各类型面积变化的影响。是各种土地覆被之间变化耦合作用的结果,其中沼泽和林地对径流影响占重要比重。

3.3 水利工程的影响

在1970-1991年间,嫩江建成了大型水库5座,诺敏河支流的“太平湖水库”,音河支流上游的“音河水库”,洮儿河支流上的“察尔森水库”,“月亮泡水库”,引洮儿河水的“向海水库”。为解决嫩江下游地区工农业及居民生活用水需要,从20世纪50年代起先后建成了“八一运河”、“北引”、“中引”和“南引”等较大的引水工程。这些水利工程的修建减少了嫩江干流下游的河道径流。嫩江干流上唯一的一座控制性工程是位于中游的尼尔基水利枢纽。水库控制流域面积6.64万 km^2 (占干流面积的22.4%),总库容86.1亿 m^3 。尼尔基水利枢纽由于2005年才正式投入使用,其对径流的影响有待今后研究。

4 结 论

近50年来,在气候变化和人类高强度的干扰下,嫩江干流径流年内和年际都发生了较大变化。

- (1) 嫩江径流年内分配不均匀,主要集中在7、8、9月份,占全年径流量的50%左右。
- (2) 径流年际分析表明,整体来讲,径流呈下降的趋势。具体表现在,20世纪60年代初期发生了一次全流域的减少突变,在80年代中后期发生了一次全流域径流呈增长趋势,90年代中后期发生了一次全流域的减少突变。这与嫩江径流的周期性有一定的关系,但更主要的受降水、人类活动等其它影响因素的影响。
- (3) 嫩江径流主要存在8年的年际周期,20年及大于40年的年代际周期。
- (4) 影响径流的主要气象因素是降水,其次是蒸发。沼泽和林地的变化对径流变化影响比较明显,尤其是1996年后,沼泽和林地大面积减少,导致径流增加。

参考文献:

- [1] 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 Guo-qing, ZHANG Jian-yun, HE Rui-min. Impacts of environmental change on runoff in Fenhe River basin of middle Yellow River[J]. Advance in Water Science, 2006, 17(6):853 - 858. (in Chinese))
- [2] 曹建延, 秦大河, 罗勇, 等. 长江源区1956 - 2000年径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2007, 18(1):29 - 33. (CAO Jian-ting, QIN Da-he, LUO Yong, et al. Discharge changes of the Yangtze River in source area during 1956 - 2000[J]. Advance in Water Science, 2007, 18(1):29 - 33. (in Chinese))
- [3] 蒋晓辉, 刘昌明, 黄强. 黄河上中游天然径流多时间尺度变化及动因分析[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2):142 - 147. (JIANG Xiao-hui, LIU Chang-ming, HUANG Qiang. Multiple time scales analysis and cause of runoff changes of the upper and middle reaches of the Yellow River[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2):142 - 147. (in Chinese))
- [4] 缪驰远, 魏欣, 孙雷, 等. 嫩江、哈尔滨两地48年来夏季降水特征分析[J]. 资源科学, 2007, 29(6):25 - 31. (MIAO Chi-yuan, WEN xin, SUN Lei, et al. Characteristics of precipitation in summer seasons in Nenjiang and Harbin over the past 48 years[J]. Resources Science, 2007, 29(6):25 - 31. (in Chinese))
- [5] 水利部松辽委员会. 松花江志[M]. 长春:吉林人民出版社, 2002. (Songliao Water Resources Committee. Songhuajiang chronicles[M]. Changchun:Jilin People's Press, 2002. (in Chinese))
- [6] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 化学工业出版社, 2005. (WANG Wen-sheng, DING Jing, LI Yue-qing. Hydrology wavelet analysis[M]. Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [7] 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. (YAO Zhi-jun, GUAN Yan-ping, GAO Ying-chun. Analysis of distribution regulation of annual runoff and affection to annual runoff by human activity in the Chaobaihe River[J]. Progress in Geography, 2003, 22(6):600 - 606. (in Chinese))

Runoff variation and its impacting factor in Nenjiang River during 1956 - 2006^{*}

XU Dong-xia^{1,2}, ZHANG Guang-xin¹, YIN Xiong-rui¹

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on the runoff data of Nenjiang River in 1956 - 2006, the Mann-Kendall, the wavelet wave analysis and the cumulative filter methods are used to find out the variation law and its impacting factor of runoff amount in Nenjiang River. The result shows that the runoff annual distribution in Nenjiang River is not uniform and occurs mainly in July, August and September. The result also shows that the runoff amount decreases in the recent 50 years, and more significant in the early of 1960s, while in the 1980s there is a trend of increase, but it isn't significant. In the middle and late of 1990s the runoff amount decreases again. The runoff changes from year to year with a change periodicity of 8 years. And other change periodicities are of 20 years and 40 years or longer. The most important climate factor is precipitation and evaporation. The human activity is also an important factor.

Key words: Nenjiang River; runoff variation; impacting factor

* The study is financially supported by the Key Programs of the Chinese Academy of Sciences(No. KZCX2-YW-126).