

# 嫩江江桥站水沙变化特征及驱动因素分析

简金世<sup>1</sup>, 焦菊英<sup>1,2</sup>, 杜璇<sup>1</sup>, 马丽梅<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 采用线性关系外推法、小波分析和 Mann—Kendall 检验法对嫩江江桥站控制区 1955—2006 年期间年降水、径流和输沙序列变化特征进行了分析。结果表明, 受人类活动影响之前, 输沙序列震荡不明显, 输沙和降水量不具相关性, 受人类活动影响之后, 输沙序列出现震荡特征, 输沙和降水量之间的相关性达显著水平。采用线性关系外推法计算了人类活动和降水对径流、输沙量的影响, 与基准期相比, 研究区年均径流量减少了  $7.900 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 其中, 降水减少占  $4.130 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 人类活动影响占  $3.770 \times 10^9 \text{ m}^3$ ; 同时, 受降水影响减沙  $3.329 \times 10^5 \text{ t}$ , 受人类活动影响增沙  $3.899 \times 10^5 \text{ t}$ , 年均总输沙量增加了  $5.700 \times 10^4 \text{ t}$ 。总之, 人类活动是研究区径流减少量和输沙量增多的重要驱动因素。

**关键词:** 降水序列; 径流序列; 输沙序列; 小波分析; Mann—Kendall 检验

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)02-0015-07

中图分类号: P343.1

## Runoff and Sediment Dynamics and Driving Factors in Jiangqiao Hydrological Station of Nunkiang River

JIAN Jin-shi<sup>1</sup>, JIAO Ju-ying<sup>1,2</sup>, DU Xuan<sup>1</sup>, MA Li-mei<sup>1</sup>

(1. Resource and Environment College, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Linear regression method, wavelet analysis and sequential Mann—Kendall test analysis were applied to characterize runoff and sediment time series collected at Jiangqiao hydrological station of Nunkiang River from 1955—2006. The results show that during 1955—1966, a period with little human activities, sediment yields remained relatively stable and no correlation between sediment and rainfall was found significant. In contrast, strong sediment fluctuations and a close correlation between sediment and rainfall were identified in 1967—2006, mainly owing to reinforced human disturbances. Linear regression method was adopted quantify the effects of rainfall and human activity on runoff and sediment. Comparing with base period, total runoff volume of the research area reduced by  $7.90 \times 10^9 \text{ m}^3$  per year, within which  $3.770 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,  $4.130 \times 10^9 \text{ m}^3$  were affected by human activity and rainfall, respectively. During 1967—2006, the sediment reduced at a rate of  $3.329 \times 10^5 \text{ t}$  per year given the decreased rainfall; however, human activity resulted in a sediment increase of  $3.899 \times 10^5 \text{ t}$  per year. In summary, human disturbance, rather than rainfall variations, was the driving factor for the decline of runoff and the increment of sediment in the research area during the study period.

**Keywords:** rainfall time series; runoff time series; sediment time series; wavelet analysis; sequential Mann—Kendall test

河流径流和输沙变化是流域水土流失强弱的重要表现<sup>[1-2]</sup>, 水沙变化是人类活动和自然因素综合影响下的结果<sup>[3-5]</sup>。20 世纪以来, 受气候变化和人类活双重影响, 河流径流量减少和输沙量增加成为全球绝

大多数河流所面临的问题<sup>[6-9]</sup>, 人类活动影响下河流径流和输沙变化也成为国内外研究的重要内容。在我国, 相关研究主要集中在黄河流域和长江流域, 并取得了许多成果<sup>[4-5, 10-11]</sup>。但是在其它流域, 研究相

收稿日期: 2010-08-09

修回日期: 2010-08-26

资助项目: 国家重点基础(973)研究发展计划项目“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究”专题“基于水文观测的区域土壤流失量推演”(2007CB407203)

作者简介: 简金世(1985—), 男(汉族), 湖南省邵阳市人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: jianjinshi734@163.com。

通信作者: 焦菊英(1965—), 女(汉族), 陕西省宝鸡市人, 研究员, 博士生导师, 主要从事植被恢复与水土保持环境效益评价研究。E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn。

对较少。嫩江为我国北方重要河流,拥有丰富的水资源,同时也是我国重要工业基地、农业基地和生态保护屏障。但是,随着人类活动加剧,近来相继出现了一系列水和生态环境问题,如水资源短缺、河流断流、洪水暴发以及湿地退化等<sup>[3,12-13]</sup>。面对这些问题,中共中央 2003[11]号文件提出了“保护好东北地区较好的生态环境,继续组织实施天然林保护工程,保护好森林资源和湿地……”等一系列要求。因此,对该区河流径流和输沙序列变化特征进行分析,有助于揭示该区河流径流和输沙量变化的主要驱动力,对该区的水资源、森林资源保护和合理利用提供科学依据。

## 1 研究区概况

江桥站位于嫩江,控制面积  $1.63 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占嫩江流域总面积的 54.75%,地跨黑龙江省和内蒙古自治区两地。区内大部分为大兴安岭山地林区和山地到平原过渡的低山丘陵区,部分为松嫩平原区,海拔 89~1 514 m。属寒温带半湿润大陆性气候,冬季长而寒冷,夏季短而多雨,年平均气温  $2 \sim 4 \text{ }^\circ\text{C}$ ,冬季冰封期约 150 d。年均降水量约 480 mm,年内、年际降水差异大,最大年降水达 937.4 mm,最小年仅 152.5 mm,年降水主要集中在 6—9 月,约占全年降水量的 82%。东面主要有科洛河、讷谟尔河和乌裕尔河,西边主要有多布库尔河、甘河、诺敏河、阿伦河、雅鲁河、绰尔河,水资源极其丰富,据松辽委统计资料显示(1955—2006 年),研究区年均径流量  $2.09 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,占嫩江流域总径流量(大赉站)的 98.4%,多年平均输沙量  $1.93 \times 10^6 \text{ t}$ ,大于嫩江流域(大赉站)多年平均输沙量。

## 2 研究方法

### 2.1 数据及处理

年径流量和输沙量资料来自水利部松辽水利委员会编制的《松辽流域泥沙公报》1955—2006 年统计数据;雨量站统计数据来自国家气象局统计数据,选取 8 个雨量站,计算出各站年降雨量。考虑到雨量站在研究区内分布并不是十分密集和均匀,采用泰森多边形法计算得到水文站控制区面降雨量<sup>[14]</sup>。另外,在利用小波分析进行信息分析时,小波分析边缘效应会影响末点趋势,因此,必须有效地消除边缘效应,本研究借用 MATLAB 软件 Wavemenu 工具箱中自动延伸功能将数据前后各延长 1 倍,得到 3 倍于原数据的延长数据,对延长的数据进行 Mallat 小波快速算法,得到小波系数后去掉前后延长数据,消除边缘效应影响<sup>[15-16]</sup>。

### 2.2 小波分析

水文学上常用的小波函数有 Mexican hat 小波, Haar 小波, Daubechis 小波, Morlet 小波和 Meyer 小波等<sup>[17]</sup>。根据王红瑞<sup>[18]</sup>等人的研究结果,相比于 Morlet 小波函数,在存在奇异点的水文时间序列周期分析中, Mexican hat 小波函数能很好地剔除短时间尺度下的“伪周期”。因此,选用 Mexican hat 小波函数对年降水、径流和输沙序列多时间尺度、主周期、震荡特征和突变特征进行分析,对原始序列和进行距平处理后的数据进行小波分析,对照结果发现处理前后结果一致,因此不进行距平处理。对时间序列进行突变分析时,采用丁晶<sup>[17]</sup>介绍的达比奇 3 小波函数,该小波函数不仅能用于突变判断,还能展现时间序列的震荡特征和变化趋势。

### 2.3 Mann-Kendall 非参数秩次相关(M-K)检验

Mann-Kendall 非参数秩次相关检验(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。近 10 a 来, M-K 检验在国内外已被广泛应用到气候、水质、气温、径流等研究领域,取得了一系列成果<sup>[6,19-21]</sup>。与传统的参数统计检验法相比, M-K 非参数检验更适用于非正态分布、不完整或有少数异常值的资料,更适用于时间序列分析的应用,结果更为精确、可靠<sup>[19, 22]</sup>。

值得注意的是,突变理论到目前为止还十分不完善,尚没有一种十分准确、并能广泛应用的突变检验方法。因此,实际应用中,方法选择不当,往往得出错误结论。最常用的解决方法就是利用多种方法,综合判断,提高结论的准确性。鉴于此,本研究选用 M-K 检验和小波分析两种方法对研究区降水、径流和输沙序列的突变进行对比判断,分析降水、径流和输沙的突变特征。

## 3 结果分析

### 3.1 序列主周期和震荡特征分析

采用 Mexican hat 小波对年降水、径流和输沙序列进行小波分解,得到不同时间尺度下的小波系数,在 Suffer 软件下绘制降水、径流和输沙时间序列小波分析系数时频图(图 1)。图 1 中横坐标为时间,纵坐标为时间尺度;虚线表示年降水、径流或输沙量偏少,值越小表示偏少程度越大,小波系数最小值则为降水、径流和输沙量的偏少中心(对应图中的暗域中心);实线表示偏多,值越大表示偏多程度越大,小波系数最大值则为降水、径流和输沙量的偏多中心(对应图中的亮域中心);为 0 时则表示降水、径流或输沙量可能存在突变。实线和虚线交替变化则反应了降水、径流和输沙量丰枯交替的震荡特征。

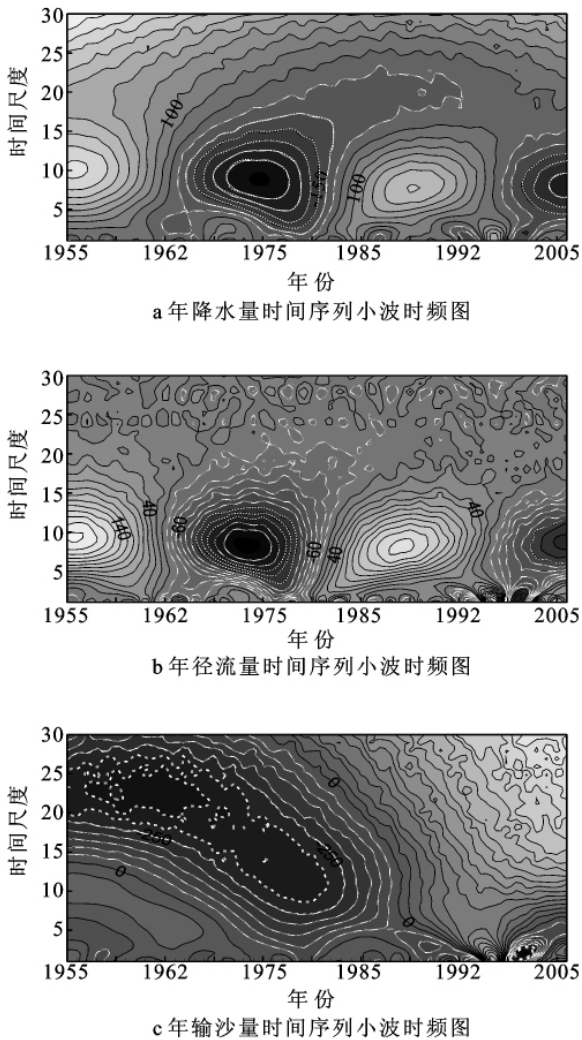


图 1 江桥站控制区年降水量(a)、径流量(b)和输沙量(c)时间序列小波分析时频图

通过图 1 对比分析可知,年降水和径流序列震荡特性十分相似,降水和径流偏多和偏少期交替出现且偏多、偏少中心对应良好。整个研究时段内,振荡周期大约为 34 a。具体表现为 1955—1965 年为丰水期,1956 年为丰水中心;1966—1982 年为枯水期,1974 年为枯水中心;1983—1998 年为丰水期,1990 年为丰水中心;1999—2006 年为枯水期,2005 年为枯水中心,且研究区枯水期并未结束,还将持续一段时间。输沙序列的震荡特征与降水和径流震荡特征存在明显差异,具体表现在输沙序列震荡周期  $> 50$  a (要确定这个主周期需要对更长输沙时间序列进行小波分析来确定)1955—1990 年为枯沙期,枯沙中心为 1963 年左右;1991—2006 年为多沙期,多沙中心还未出现,说明 2006 年之后,研究区内的年输沙量还将继续增多。

### 3.2 突变和趋势分析

采用 M—K 对年降水、径流和输沙序列进行分

析时,取置信水平  $\alpha = 0.05$ ,查表得临界值  $U_{0.05/2} = 1.96$ ,结果如图 2(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>) 所示,图中实线为降水、径流或输沙正向序列,虚线为逆向序列,若正向序列  $U$  值大于 0 表明序列有上升趋势, $U$  值小于 0 表明序列有下降趋势, $U$  值超过临界值,表明上升或下降趋势显著,如果正向序列和逆向序列出现交点,并且交点在临界线之间,则交点对应的时间便是突变开始时间<sup>[3, 6, 19, 22]</sup>。同时,选择达比奇 3 小波函数对研究区降水、径流和输沙时间序列进行 Mallat 算法快速分解,得到不同时间尺度下的系数,进行重构,得到不同尺度下的变化曲线,如图 2(a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>) 所示,图中小波系数大于 0 表示降水、径流或输沙量偏多,小于 0 表示偏少,为 0 则为偏多向偏少或偏少向偏多的突变。 $d_1—d_5$  分别为年降水、径流和输沙时间序列小波分析小时间尺度到大时间尺度下的变化曲线,时间尺度越小,变化曲线越接近原始序列,便于展现序列的细节变化,大时间尺度下,序列的细节被隐藏,表现出序列的趋势特征。对不同时间尺度下的变化曲线进行综合判断对比,可以揭示时间序列的突变和趋势特征<sup>[16-17]</sup>。

从图 2 可见,降水、径流和输沙序列 M—K 检验正向序列都有超过临界值的区间,并且正向和逆向序列都有交点位于临界值线之间,表明降水、径流和输沙序列都存在显著变化。年降水序列有 1960, 1963, 1994, 1996 和 1998 年 5 个由多到少的“突变”点,1980, 1982, 1983 年 3 个由少到多“突变”点,对照图 3a<sub>2</sub> 大时间尺度下的小波变化曲线进行突变判断可知,1963, 1983 和 2000 年为突变点。对照 M—K 法判断所得结果,1963 和 1983 年为两种方法共同突变点,另外 M—K 检验中 1998 年这个突变点在小波分析中为 2000 年,这里选 1998 年为突变点,而其它 5 个则作为“伪突变”点排除。同样的方法判断出径流序列突变点为 1963 和 1998 年由多到少的突变;输沙序列在 1966 年发生了减少的突变,在 1986 年发生了增多的突变。

同时,对图 2(b<sub>1</sub>—b<sub>3</sub>) 中小波分析小时间尺度下变化曲线对比可知,降水和径流时间序列在整个研究时段内都表现出震荡特征,但是输沙序列在 1990 年之前几乎不表现出震荡性,1990 年之后震荡特征和降水,径流序列趋于一致。

以上降水、径流和输沙序列震荡特征分析结果显示,输沙序列震荡特征和降水径流震荡差异性非常大,且在 20 世纪 80 年代末由少沙进入多沙期,并且出现明显的震荡性;突变分析表明年降水、径流和输沙序列之间的突变点并不十分对应,如流域降水量在

1983 年发生了增多的突变,径流量虽有增多的趋势,但是增多未达到突变水平;降水量在 1998 年出现减少突变,而输沙量并未表现出减少的突变。这说明存在降水之外的驱动力导致研究区径流量减少和输沙量增加。有研究表明<sup>[3]</sup>,在嫩江江桥站控制区,降水量是影响径流和输沙量最主要的自然因素,其它因素(年均温、蒸发等)与径流量的相关性都未达到显著水

平,而人类活动是导致本地区土壤流失加剧和生态破坏的重要原因之一<sup>[3, 12-13, 23-27]</sup>。因此,认为人类活动是以上变化的主要驱动力之一。为了定量分析人类活动和降水对径流和输沙量影响程度,把输沙序列首次出现突变的时间 1966 年作为人类活动的临界点,采用线性关系外推法(又称统计法、水文法)<sup>[3-5]</sup>对人类活动的影响进行计算。

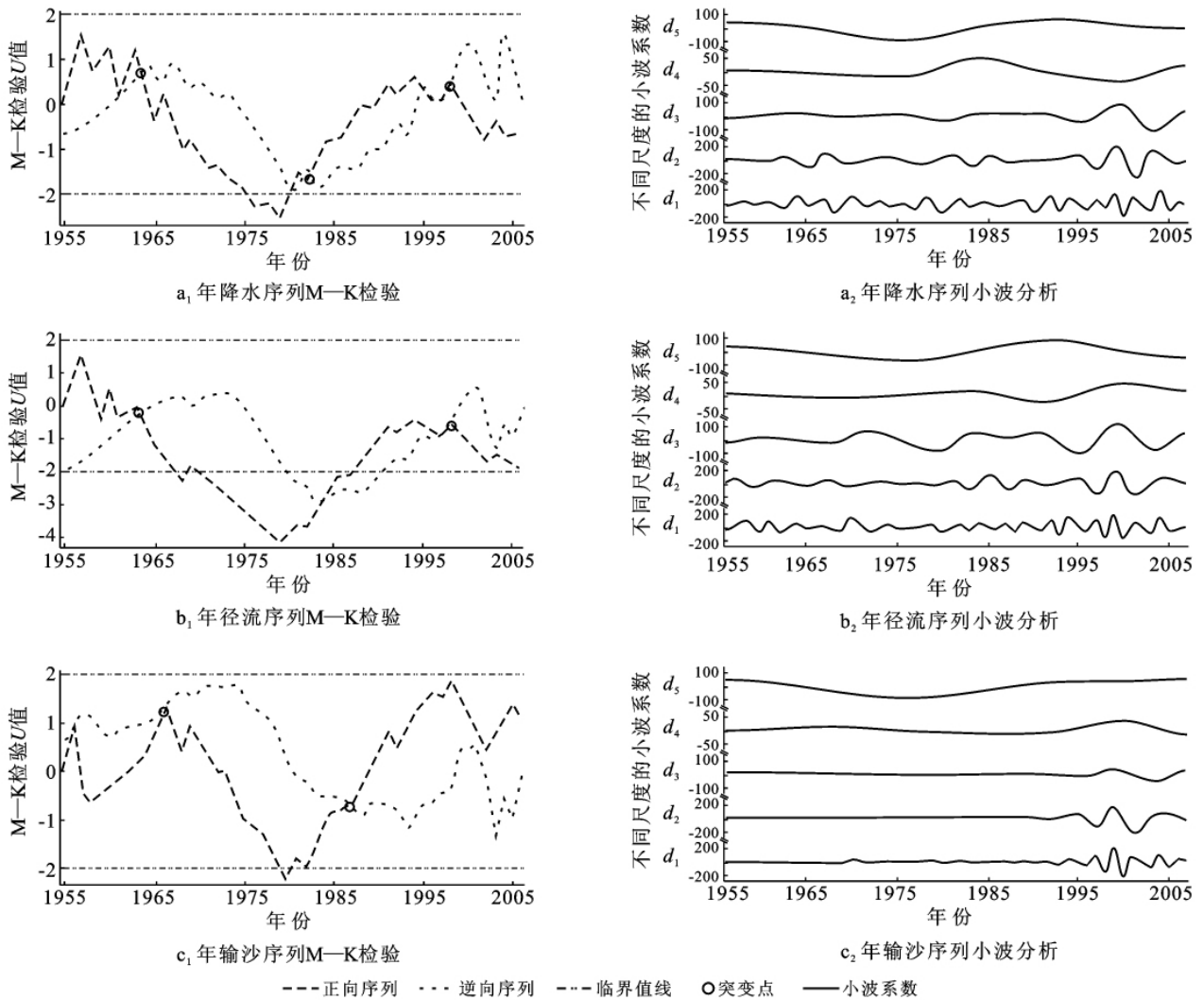


图 2 嫩江江桥站控制区年降水、径流和输沙序列 M—K 检验结果和小波系数变化

### 3.3 人类活动对输沙影响的估算

3.3.1 分段相关分析和线性回归模型构建 把 1955—1966 年做为人类活动干扰相对较少的时段,

作为基准,1967—2006 年做为人类活动强烈的时段,进行分段降水—径流量,降水—输沙量相关性分析和线性相关回归模型构建,结果见表 1。

表 1 嫩江江桥站控制区年降水、径流和输沙序列分段相关分析结果

时段	年均降水量/mm	年均径流量/ $10^8 \text{ m}^3$	年均输沙量/ $10^4 \text{ t}$	$R(\text{降水—径流})$	$R(\text{降水—输沙})$	$R(\text{径流—输沙})$
1955—1966 年	514.5	262.8	167.2	0.662**	-0.078	-0.14
1967—2006 年	465.3	183.8	172.9	0.742**	0.55**	0.628**

注:\*\*表示通过 0.01 极显著水平的检验。

相关性分析结果显示,1955—1966 年间,降水—径流通过了 0.01 显著水平检验,而降水—输沙和径流—输沙均未通过 0.01 显著水平检验,说明在人类活动影响之前,输沙量和降水量、径流量之间没有相关性,而在 1967—2006 年间,降水—输沙和径流—输沙之间的相关性均通过 0.01 极显著水平,说明人类活动的干扰导致了输沙量随降水和径流的变化而变化。

3.3.2 降水和人类活动对径流量和输沙量影响 为了定量表征人类活动和降水对研究区径流和输沙量的影响,采用线性关系外推法计算降水和人类活动对研究区径流和输沙的影响<sup>[3-5]</sup>。建立 1967—2006 年间降水—径流和降水—输沙线性回归方程为:

1967—2006 年间降水—径流序列线性回归方程:

$$y_1 = 0.77x_1 - 174.67 \quad (1)$$

1967—2006 年间降水—输沙序列线性回归方程:

$$y_2 = 0.69x_1 - 148.82 \quad (2)$$

式中: $y_1$ ——年径流量; $x_1$ ——年降水量; $y_2$ ——年输沙量。

将 1955—1966 年间降水量代入公式(1),得到 1955—1966 年间假如受到人类活动的情况下的径流量。把 1955—1966 年间降水量代入公式(2)得到 1955—1966 年间假如受到人类活动的情况下应该得到的产沙量,人类活动影响量=计算径流量/输沙量(1955—1966)—实测径流量/输沙量(1955—1966);总影响量=实测径流量/输沙量(1967—2006)—实测径流量/输沙量(1955—1966);计算结果见表 2。

表 2 人类活动和降水对嫩江江桥站控制区年径流量和输沙量的影响

项目	时段/年	年均实测径流量	计算值	总影响量	人类活动影响量	降水影响量
径流量/ $10^8 \text{ m}^3$	1955—1966	262.80	221.50	—	—	—
	1967—2006	183.80	—	-79.00	-37.70	-41.30
输沙量/ $10^4 \text{ t}$	1955—1966	167.20	206.19	—	—	—
	1967—2006	172.90	—	5.70	38.99	-33.29

计算结果表明,人类活动年均减流  $3.770 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 占总减流量  $7.900 \times 10^9 \text{ m}^3$  的 47.7%, 略小于降水减流量;人类活动导致流域输沙量增加,增沙量为年均  $3.899 \times 10^5 \text{ t}$ , 降水减少导致的减沙量为  $3.329 \times 10^5 \text{ t}$ , 流域总增沙量为年均  $5.70 \times 10^4 \text{ t}$ 。

## 4 水沙变化对人类活动的响应

人类活动导致了江桥站控制区径流量减少和输沙量增加。而人类活动的影响主要通过土地利用/覆被变化(LUCC)、水利工程和工农业用水<sup>[3-4, 12, 25-26, 28-30]</sup>等来反应。因此,总结了相关研究成果对嫩江江桥站控制区水沙变化与人类活动的响应进行分析。

### 4.1 植被变化

在嫩江流域的相关研究说明,嫩江流域径的土地利用/覆被变化在 1965 年之前相对较弱,尚未开始大规模的破坏活动,1966—1977 年间受“文化大革命”影响,森林和草地等自然资源遭到严重破坏,这与 1966 年发生输沙量增多突变的时间相吻合,也和相关分析结果一致(1966 年之前的降水和输沙量之间没有相关性,而 1966 年之后,输沙与降水、径流呈显著相关)。

表 3 为嫩江流域各时段的土地利用/覆被变化情况。从表 3 中可以看出,1981 年之后,开始重视森林、草地等自然资源的保护,破坏程度开始减弱(表 3)。

表 3 嫩江流域土地利用/覆被变化<sup>[3, 23-24, 25, 27]</sup>

区域	时段	变化状况					
		土地利用类型变化量/ $\text{hm}^2$					
	时段	林地	草地	水体	沼泽	居民地	未利用地
大小兴安岭	新中国成立至 1965 年	开发建设速度较快,耕地面积大量增加,森林和草原遭到一定程度的破坏。					
	1966—1980 年	森林大火、陡坡耕作、森林开发等使森林草地大规模被破坏。					
	1981—1995 年	破坏与治理同时进行,但是治理速度落后于破坏速度。					
嫩江流域	1986—1995 年	22.84	-59.55	-3.97	5.35	0.29	-21.06
	1995—2000 年	-52.83	-27.05	-2.15	-20.50	0.16	6.03
	1986—2000 年	-29.99	-86.60	-6.12	-15.15	0.45	-15.03
大兴安岭林区	采伐后迹地的侵蚀模数最高为采伐前的 36.4 倍,侵蚀量达到采伐前的 29 倍。						
嫩江流域	总体上嫩江径流减少是多种植被覆被变化耦合作用的结果,其中沼泽和林地对径流影响所占比重最重。						

## 4.2 大型水利工程的影响

新中国成立以来,党和国家非常重视兴水利、除水害。过去的 50 a 里,研究区走过了“农业水利”和“水利工程”两个阶段,主要经历了建国后、20 世纪 80 年代后和 1998 年嫩江洪水以来 3 个建设高潮阶段,建成了一批水利工程,其中大型水利工程在农田灌溉和提供工业、城乡生活用水上起有重大作用,因此,对研究区大型水利工程进行了统计,结果见表 4。

据黑龙江省和内蒙古自治区水资源调查与评价结果,黑龙江省 1980, 1990, 2000 和 2004 年总用水量分别为  $1.352 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,  $1.895 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,  $2.713 \times 10^{10} \text{ m}^3$  和  $2.773 \times 10^{10} \text{ m}^3$ , 人均用水量分别为 422,

543, 726, 748  $\text{m}^3$ , 总用水量和人均用水量均呈增长趋势。据内蒙古自治区水资源调查与评价结果,呼伦贝尔市水资源总量达年均  $3.162 \times 10^{10} \text{ m}^3$ , 占内蒙东部 4 盟市的 71.51%, 供水量为  $7.820 \times 10^8 \text{ m}^3$  (2004 年), 占水资源总量的 2.47%<sup>[30]</sup>。随着大型工程的建设, 该区水资源开发量将会增大。如 2005 年建成的尼尔基大型水利工程每年将为本流域工业和城镇生活供水  $2.756 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 为农业供水  $3.741 \times 10^9 \text{ m}^3$ <sup>[28]</sup>。另外, 绰尔河引水工程、毕拉河口水利枢纽工程、晓奇水利枢纽工程等大型水利工程已处于项目建议或拟建状态, 随着区内水资源开发力度加大, 预计该区未来的径流量将会进一步减少。

表 4 研究区大型水利工程统计

名称	时间	位置	控制面积/ $10^4 \text{ km}^2$	重要参数	用途
尼尔基大型水利枢纽	2005 年建成	嫩江干流	6.64	正常蓄水位: 216 m 总库容: $8.611 \times 10^9 \text{ m}^3$	防洪、工农业供水、发电、航运以及水资源保护等综合用途
山口水电站	—	讷谟尔河	—	总库容: $9.95 \times 10^8 \text{ m}^3$ 电站装机: 25.5 MW	发电、供水、灌溉、兼顾防洪、养殖
音河水库	始建于 1958 年	音河	0.37	总库容: $2.56 \times 10^8 \text{ m}^3$	防洪、供水、旅游
绰勒水库	始建于 2001 年 总工期 3 a	绰尔河	1.50	正常蓄水位 230.5 m 总库容: $2.600 \times 10^8 \text{ m}^3$ 电站装机: 10.5 MW	供水、防洪、发电

## 5 结论

(1) 统计分析表明, 1966 年之前的降水—输沙序列不存在相关性, 而之后的降水—输沙序列表现出极显著相关, 这说明, 受人类活动破坏之前, 研究区的输沙量不随降水量的变化而变化。相关研究也表明<sup>[23]</sup>, 破坏后的林区土壤侵蚀模数为破坏之前的 36.4 倍, 说明人类活动导致了环境抗侵蚀能力减弱, 输沙量开始随降水量的变化而变化。但是, 受资料所限, 受人类活动之前的降水—输沙序列相关性分析的年限只有 12 a, 要进一步证明这个结论, 需要更长 1966 年之前的水文泥沙资料来证实。

(2) 突变分析显示, 研究区年降水序列存在 3 次突变, 即 1963 年由多到少的突变、1983 年由少到多的突变和 1998 年由多到少的突变; 年径流量发生了 2 次突变, 分别为 1963 年由多到少的突变和 1998 年由多到少的突变, 在 1983 年左右虽然趋势为由少到多, 但是未达到突变水平, 应该是人类活动导致了径流量的减少; 年输沙量有 2 次突变, 分别为 1966 年由多到少的突变和 1986 年的由少到多的突变。输沙序列在 1998 年降水出现由多到少突变的情况下, 未出现相应突变, 可能是人类活动导致了研究区输沙量的增多。

(3) 将 1966 年作为人类活动影响的临界点, 对降水和人类活动对河流径流量和输沙量的影响进行统计计算。结果表明, 人类活动导致年均减流  $3.770 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 年均增沙  $3.899 \times 10^5 \text{ t}$ ; 降水减小因素导致年均减流  $4.130 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 年均减沙  $3.329 \times 10^5 \text{ t}$ 。江桥站控制区径流量减少是人类活动干扰和降水减少共同作用的结果, 而输沙量则在降水减少的情况下有所增加, 年均增沙  $5.700 \times 10^4 \text{ t}$ 。

(4) 人类活动对和河流径流和输沙量的影响主要通过土地利用/覆被变化, 大型水利工程和区域用水情况等表现出来, 但是人类活动与河流径流和输沙量的关系十分复杂, 本研究仅对它们之间的关系做了定性总结, 不同人类活动类型对河流径流减少和输沙增加的贡献率以及分布式水文输沙模型的建立还有待于更深一步的研究。

### [参 考 文 献]

- [1] Zhou W F, Wu B F. Assessment of soil erosion and sediment delivery ratio using remote sensing and GIS: A case study of upstream Chaobaihe River catchment, north China[J]. International Journal of Sediment Research, 2008, 23(2): 167-173.
- [2] Reid S C, Lane S N, David R, et al. Does hydrological

- connectivity improve modelling of coarse sediment delivery in upland environment[J]. *Geomorphology*, 2007, 90: 263-282.
- [3] 徐东霞, 章光新, 尹雄锐. 近50年嫩江流域径流变化及影响因素分析[J]. *水科学进展*, 2009, 20(3): 416-421.
- [4] 杨新, 延军平, 刘宝元. 无定河年径流量变化特征及人为驱动力分析[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(6): 637-642.
- [5] 信忠保, 许炯心, 余新晓. 近50年黄土高原水土流失的时空变化[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1129-1139.
- [6] Yang Y H, Tian F. Abrupt change of runoff and its major driving factors in Haihe River Catchment, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 374(3/4): 373-383.
- [7] Fiener P, Auerswald K. Seasonal variation of grassed waterway effectiveness in reducing runoff and sediment delivery from agricultural watersheds in temperate Europe[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 87(1): 48-58.
- [8] Braud I, Vich A I J, Zuluaga J, et al. Vegetation influence on runoff and sediment yield in the Andes region: Observation and modelling[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 254(1/4): 124-144.
- [9] Syvitski, Vorosmarty, Kettner. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean[J]. *Science*, 2005, 308: 376-380.
- [10] 许炯心. 长江上游干支流近期水沙变化及其与水库修建的关系[J]. *山地学报*, 2009, 27(4): 385-393.
- [11] 许炯心, 孙季. 长江上游干支流悬移质含沙量的变化及其原因[J]. *地理研究*, 2008, 27(2): 332-341.
- [12] 穆兴民, 高鹏, 王双银, 等. 东北3省人类活动与水土流失关系的演进[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(5): 37-42.
- [13] 郭跃东, 何艳芬. 松嫩平原湿地动态变化及其驱动力研究[J]. *湿地科学*, 2005, 3(1): 54-59.
- [14] Bayraktar H, Turalioglu F S, Sen Z. The estimation of average areal rainfall by percentage weighting polygon method in Southeastern Anatolia Region, Turkey[J]. *Atmospheric Research*, 2005, 73(1/2): 149-160.
- [15] Ding W R, Zhou Y, Lu X X. Suspended sediment flux of river: Wavelet analysis in the Panlong basin of the Upper Red River (Honghe River), China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(S2): 172-179.
- [16] 飞思科技产品研发中心. MATLAB 6.5 辅助小波分析与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [17] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [18] 王红瑞, 叶乐天, 刘昌明, 等. 水文序列小波周期分析中存在的问题及改进方式[J]. *自然科学进展*, 2006, 16(8): 1002-1008.
- [19] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 259(1/4): 254-271.
- [20] Kumar S, Merwade V, Kam J. Streamflow trends in Indiana: Effects of long term persistence, precipitation and subsurface drains[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 374(1/2): 171-183.
- [21] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(3/4): 350-363.
- [22] Partal T, Küc Murat. Long-term trend analysis using discrete wavelet components of annual precipitations measurements in Marmara region(Turkey)[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2006, 31(18): 1189-1200.
- [23] 杨晓晖, 吴波. 大兴安岭东部林区森林水土保持功能初步评价[J]. *中国水土保持科学*, 2004, 2(4): 11-16.
- [24] 石长金, 吕志学. 大小兴安岭山区的水土流失特点[J]. *中国水土保持*, 1995, 154(1): 13-23.
- [25] 叶宝莹, 张养贞, 张树文, 等. 嫩江流域土地覆被变化对径流量的影响分析[J]. *水土保持通报*, 2003, 23(2): 15-18.
- [26] 王慧杰. 建国以来东北地区耕地演化及其生态环境后效[D]. 长春: 东北师范大学, 2006.
- [27] 张树文, 李颖. 东北地区土地利用/覆被时空特征分析[J]. 北京: 北京科学出版社, 2006.
- [28] 刘权, 王忠静, 马铁民. 尼尔基水利枢纽在嫩江流域水资源调控中作用[J]. *水力发电学报*, 2005, 24(4): 1-4.
- [29] 衣保中. 近代以来东北平原黑土开发的生态环境代价[J]. *吉林大学社会科学学报*, 2003(5): 62-68.
- [30] 潘家铮, 宁远, 刘宁. 东北地区有关水土资源配置、生态与环境保护和可持续发展的若干战略问题研究: 重大工程卷[M]. 北京: 科学出版社, 2007.