

1950 年以来汾河水沙演变规律及影响因素分析

原志华, 延军平, 刘宇峰

(陕西师范大学 旅游与环境学院, 西安 710062)

摘 要: 利用汾河河津水文站 1950 年以来的水文资料, 应用多种统计分析方法, 系统分析了汾河水沙的季节及年际变化规律, 并且对人类活动导致的年径流变化影响进行了估算。研究表明, 汾河流域水沙年内分配极不均匀, 年内不均匀系数有明显上升趋势, 且越到近期稳定程度越低。水沙的年际变化剧烈, 且在 20 世纪 80 年代之后年径流基本都是枯水时段。应用累积滤波器对汾河水沙变化趋势进行分析, 结果显示, 汾河流域水沙均呈减少趋势, 且泥沙变化幅度大于径流变化。通过降水—径流双累积曲线及对天然径流的还原分析表明, 径流变化趋势在 1964 年发生明显偏离, 从多年平均值来看, 人类活动导致的径流减少量占径流减少总量的 75.912%, 人类活动是汾河流域径流减少的主要因素。

关 键 词: 汾河河津站; 水沙变化; 趋势分析; 双累积曲线; 人类活动

1 引言

无论是气候系统的自然变化, 还是人类活动影响的结果, 全球气候变暖已是一个不争的事实, 根据政府间气候变化专门委员会 (IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change) 2007 年的气候变化评估报告^[1]显示, 与工业革命之前相比, 全球气温已经增长了 0.74℃, 预测到 2100 年, 全球海平面将比现在上升 0.13~0.58m, 全球气温将上升 2~4.5℃, 有的地区气温甚至有可能上升 6℃, 且人类应对全球变暖负 90% 的责任。在全球变暖的背景下, 我国气候也趋于增温, 并导致日益严重的水资源问题。虽然气温变化具有全球性, 降水变化却存在着区域性和不确定性, 施雅风通过对西北气候的研究^[2]证明西北地区在 20 世纪末出现由暖干向暖湿转型的信号, 而侯玲珍^[3]等人通过对东北及华北研究说明东北地区是由干变湿, 而华北地区则由湿变干。

气候变化和人类活动对河流流域水沙的影响日益明显, 越来越受到人们的关注, 流域实测水沙的时序变化, 是气候条件与人类活动耦合作用的结果, 其演变过程既表现出鲜明的区域特性, 通常还

呈现周期性、模糊性和随机性的特点。分析河流流域水沙的演化过程, 认识演化的规律和动因, 不仅有助于深入了解水资源的特性, 为水资源的合理开发利用提供依据, 同时也有利于开发过程的控制和调整。

2 流域概况

汾河是山西省境内最大河流, 也是黄河第二大支流, 发源于宁武县管涔山的雷鸣寺泉, 即所谓“汾源灵沼”。汾河纵贯山西省境中部, 流经宁武、静乐、娄烦、太原、清徐、交城、祁县、文水、平遥、介休、灵石、霍州、洪洞、临汾、襄汾、曲沃、侯马、新绛、稷山、河津等 20 多个县市, 然后经过河津汇入黄河, 年均径流量 $25.9 \times 10^8 \text{m}^3$ 。汾河干流总长 694km, 流域控制面积 39471km², 占全省国土面积的 25.3%。流域内主要以山地为主, 丘陵山地面积占流域面积的 70% 以上; 气候属暖温带大陆性季风气候, 年均温 6.2~12.8℃, 表现为夏季炎热, 冬季寒冷, 且春温高于秋温, 年平均降水量 434~528mm, 多集中于 6~9 月份。

汾河流域最下游的干流水文站是河津水文站,

收稿日期: 2008-03; 修订日期: 2008-07.

基金项目: 教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目 (04JZD00010); 教育部人文社会科学重点研究基地重大项目 (05jzd770013);

国家自然科学基金项目 (40671133)。

作者简介: 原志华 (1982-), 女, 汉族, 太原人, 硕士生, 主要从事资源开发与环境治理研究。E-mail: beifeng.007@163.com

通讯作者: 延军平 (1956-), 男, 陕西师范大学旅游与环境学院教授, 博士生导师, 主要从事资源开发与环境治理研究。

其控制面积为 38728km², 是汾河的入黄口控制站。本文采用河津水文站 1950~2005 年共 56 年的水沙资料数据, 分析了汾河流域水沙的演变规律以及气候变化和人类活动对该流域水沙情势的影响。

3 汾河流域水沙特点

1960 年以前, 流域上的人类活动对水文要素尚未形成重大影响, 在这个时段内, 流域上的径流、泥沙等水文要素基本上是天然状况下的表现。据河津站实测资料统计, 1950~1959 年平均年径流量 17.5×10⁸m³, 年输沙量为 0.70×10⁴t。1960 年之后, 随着人类活动的影响, 汾河流域上的水利工程大量兴建, 工农业用水迅速增加, 使得流域水沙发生了较

大的变化。河津站 1960~1979 年平均年径流量减为 14.1×10⁸m³, 年输沙量减为 0.25×10⁴t, 较前期分别减少年径流量 19.4%, 年输沙量 64.3%。80 年代以来河津站径流量锐减, 到 21 世纪初期, 河津站的实测年平均径流量仅为 3.554×10⁸m³, 泥沙因为没有载体输送, 致使输沙量大大减少, 仅为多年平均值的 2.3%。

图 1 为河津站年径流量、年输沙量距平图, 从图中可以看出, 河津站近 56 年来的水沙总体上均呈现波动下降趋势, 年径流量从 1967 年之后均低于多年平均值, 而年输沙量从 1967 年起除 1971 年和 1977 年略高于平均值外, 其余年份均低于多年平均值。从趋势方程可以看出, 年径流量的下降趋势明显快于年输沙量的下降趋势。

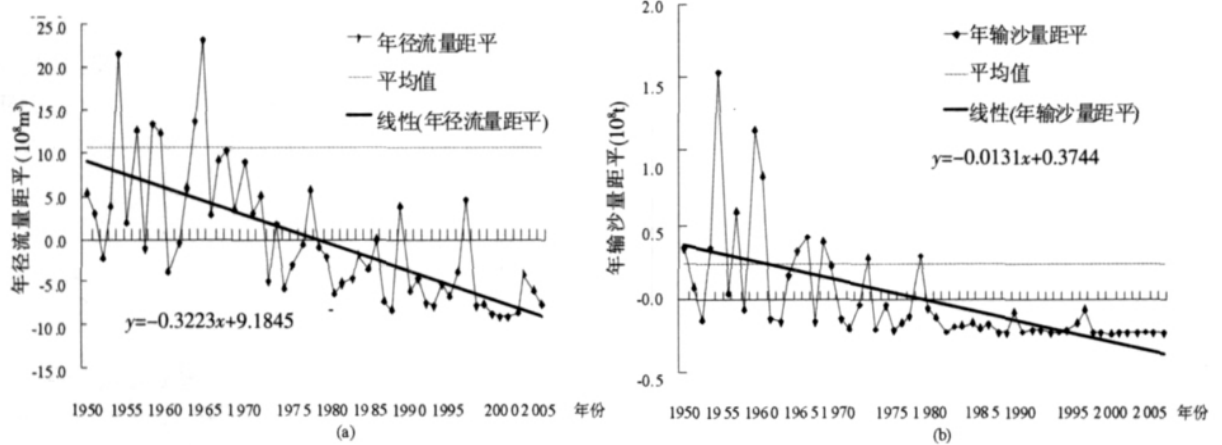


图 1 汾河河津站年径流量(a)、年输沙量距平(b)
Fig.1 Departure of annual runoff and sediment runoff of Fenhe River

3.1 水沙的年内变化 3.1.1 径流的年内分配

汾河只有一次汛期, 即夏汛, 径流的年内分配极不均匀。汛期和枯水期的界限分明, 年头和年尾降水量很少, 7、8、9 三个月降水集中, 受其影响, 月径流量总体上呈现一“塔状”曲线, 径流一般集中于6~9 月份, 在此期间的径流占到年径流总量的 51.3%。最小径流出现在每年的 3~5 月, 占年径流总量的 8.4%(图 2), 主要是因为 3~5 月降水较少, 加之增发损耗, 导致径流量明显偏低。

气候要素的季节性波动, 在一定程度上决定了径流年内分配的不均匀性。径流年内分配不均匀系数是综合反映河川径流年内分配不均匀性的重要指标。年内分配不均匀系数 C_{vy} 的计算方法如下^[4]:

$$C_{vy} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} (K_i/\bar{K} - 1)^2}{12}} \quad (1)$$

式中: C_{vy} 为径流年内分配不均匀系数; K_i 为各月径流量占年径流量的百分比; \bar{K} 为各月平均占全年百分比, 即 $\bar{K}=100\%/12=8.33\%$ 。 C_{vy} 值越大, 表明各月径流量相差越悬殊, 即径流年内分配越不均匀。

根据河津站 20 世纪 80、90 年代各月径流量为代表计算出的 C_{vy} 结果(图 3), 从中可看出, 径流年内不均匀系数 C_{vy} 在 0.42~1.91 之间波动, 波动幅度较大, 80 年代的 C_{vy} 平均值为 0.93, 而 90 年代 C_{vy} 平均值为 1.01, 略呈上升趋势, 这也说明, 90 年代人类生产实践和社会活动对流域下垫面的改造导致了

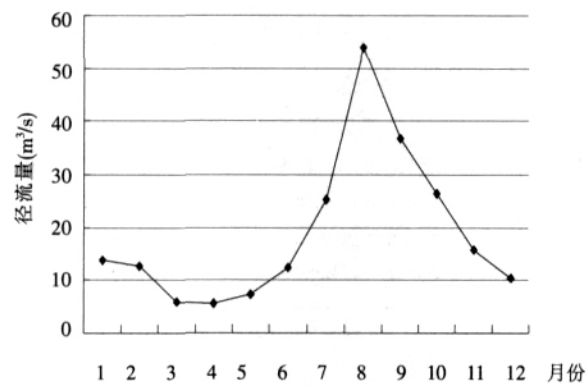


图 2 汾河径流年内分配

Fig.2 Monthly runoff quantity of Fenhe River

径流调蓄功能的退化，径流年内稳定程度降低，反映在径流年内不均匀系数 C_{vy} 上表现为其值增大。

3.1.2 泥沙的年内分配

从收集的资料来看，汾河输沙量的变化比较显著。总体来看，由于泥沙的输送载体是径流，所以泥沙的年内分配曲线类似于径流年内分配，最大输沙量同样出现在 6~9 月份，占到年输沙总量的 88.8%，而从 12 月份到次年的 4 月份由于降水、径流的减少，使得输沙量仅占到年输沙量 1.4%(图 4)。

输沙量的年内均匀程度同样用年内不均匀系数来表示，具体计算如公式(1)，结果如图 5 显示，输沙年内不均匀系数的波动范围在 0.76~3.32 之间，波动幅度明显大于径流年内不均匀系数，最小值出现在 1986 年，而最大值在 1999 年，且输沙量呈现明显上升趋势。相比而言，20 世纪 80 年代的平

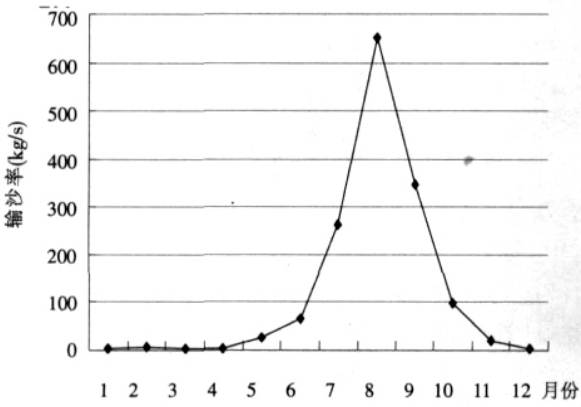


图 4 汾河输沙率年内分配

Fig.4 Monthly sediment discharge of Fenhe River

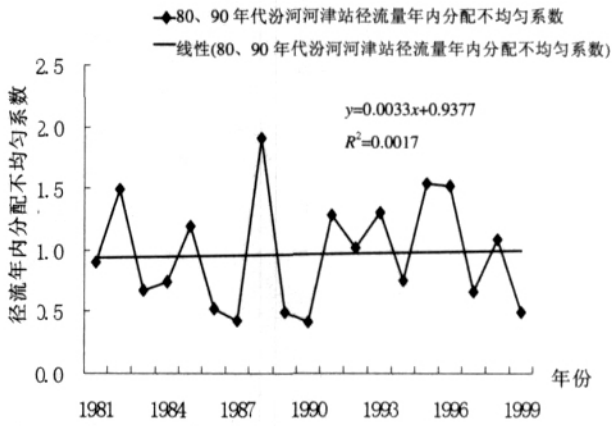


图 3 汾河径流年内不均匀系数

Fig.3 C_{vy} of the runoff of Fenhe River

均值为 1.77，而 90 年代的平均值为 2.46，可见越到近期稳定程度越低，尤其是 90 年代的大多年份，月输沙量大多为零，即使有少量的降水、径流也无法输送泥沙，只有在汛期才有输沙。这一点和径流年内变化趋势一致，证明 90 年代的人类活动、流域内经济建设的加剧，使得水沙都大大减少。

3.2 水沙的年际变化

3.2.1 年际变化的特征值

年际相对变化幅度的特征一般通过变差系数 C_v 、年际变化的绝对比率 K 和年际不均匀系数 A 来表示。

变差系数 C_v 的计算方法为：

$$C_v = \frac{s}{\bar{R}}, \quad s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2}, \quad \bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i \quad (2)$$

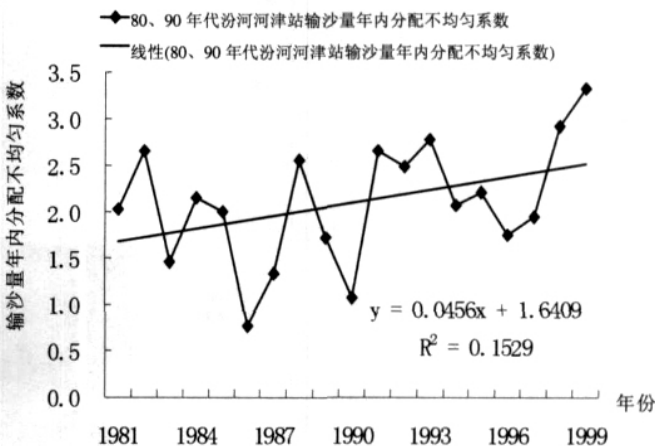


图 5 汾河输沙量年内不均匀系数

Fig.5 C_{vy} of the sediment runoff of Fenhe River

式中： C_v 、 \bar{R} 、 R_i 、 N 分别为分析年限内年径流量/年输沙量的标准差、平均值、各年的径流量/输沙量和系列长度。 C_v 值反映年径流量/年输沙量的总体系列离散程度， C_v 值越大，离散度越大，说明其年际变化越剧烈，这对水利资源的利用不利，而且易发生洪涝灾害； C_v 值越小，则水沙的年际变化小，这有利于水沙资源的利用^[5]。

绝对变化比率用式(3)计算：
$$K=R_{max}/R_{min} \tag{3}$$
 K 值反映了流域内径流、输沙量两个极端值的倍数关系，显示水沙的不均匀程度。 K 越大，表明水沙年际变化越不均匀。

年际不均匀系数 A 由式(4)计算：

$$A=R/R_{max} \tag{4}$$
流域年际不均系数 A 反映了年际水沙的不均匀特征， A 越接近 1 表明年际水沙变化越均匀^[6-10]。

3.2.2 水沙年际变化

计算结果显示(表 1),河津站的年径流量变差系数 C_v 比较大(>0.7)，对应的绝对变化比率 K 也

较大，不均匀系数 A 较小，这都说明了河津站的径流年际波动比较剧烈；相对于径流量，输沙量的年际变化更剧烈，在天然状况下，径流量和输沙量应始终保持一致，但分析表明沙量除随水量的变化而变化之外，人类活动对下垫面的改变也使得泥沙大大减少。

3.2.3 径流年际变化的长持续性

根据水利部信息中心水文预报规范，径流丰枯情况的划分标准为：

按距平百分率 $p(p=\frac{\text{某年径流量}-\text{多年平均值}}{\text{多年平均值}} \times 100\%)$ ^[9]，判定标准为： $p>20\%$ 为丰水； $10\%<p \leq 20\%$ 为偏丰； $-10\%<p \leq 10\%$ 为平水； $-20\%<p \leq -10\%$ 为偏枯； $p<-20\%$ 为枯水^[10-13]。

根据对汾河实测径流的计算分析，汾河径流年际变化的过程中，丰水时段大多出现在 20 世纪 70 年代以前，最长的丰水年份可长达 10 年，主要是在

不受人为影响的情况下，降水多则径流多的缘故。而在 20 世纪 80 年代之后，流域基本处于枯水或者偏枯，即使个别年份出现丰水，也是相应年份降水明显增多所致(图 6)。

表 1 汾河河津水文站 1950~2005 年天然水沙变化特征参数值
Tab.1 The characteristics value of natural runoff and sediment change at Hejin hydrologic station of Fenhe River between 1950 and 2005

项 目	特 征 参 数		
	变差系数 (C_v)	绝对变化比率 (K)	年际不均匀系数 (A)
年径流量	0.72	22.2	0.32
年输沙量	1.56	35129.7	0.13

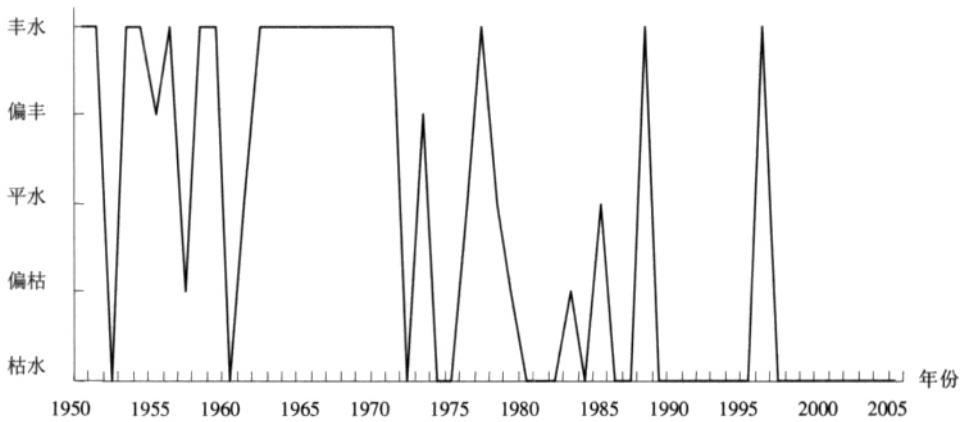


图 6 1950~2005 年汾河年际径流丰枯分析
Fig.6 Low and high flow period distribution of Fenhe River from 1950 to 2005

4 水沙的变化趋势分析

4.1 方法及原理

累积滤波器通过对水文序列的滤波作用，充分反映时间序列定性的变化趋势。对河津站年径流序列和年输沙序列做趋势变化和滤波分析，定性判断水沙过程变化的趋势性。具体方法如下：

$$S=\frac{\sum_{i=1}^n P_i/n}{\bar{P}} \tag{5}$$

式中： S 为累积滤波平均值； P_i 为时间序列； \bar{P} 为时间序列平均值； n 为时间序列长度； $n=1, 2, \dots, n$ 。

4.2 计算结果

根据计算结果，汾河河津站年径流量累积平均曲线和年输沙量累积平均曲线如图 7 所示。

从图 7 中可以看出，年径流量随年份不同呈波

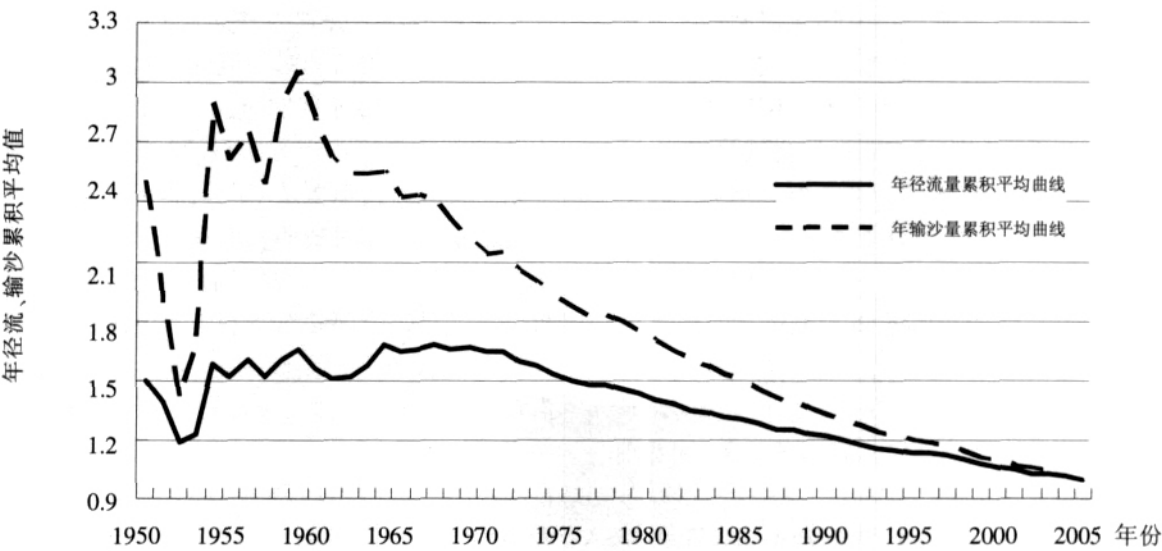


图 7 1950~2005 年汾河年径流、输沙系列累积平均曲线

Fig.7 Accumulative average curves of the annual runoff and sediment runoff of Fenhe River from 1950 to 2005

动性变化,但变化幅度不是很大,而年输沙量在 20 世纪 70 年代之后明显下降,但总体上二者均呈显著下降趋势。

5 降水和人类活动对径流影响估算

双累积曲线法(Double mass analysis)是进行时间序列分析的一种常用方法,它的基本原理是两个变量按同一时间长度逐步累加,一个变量作为横坐标,另一个变量作为纵坐标,降水与径流的双累积曲线是可以揭示径流是否有趋势性变化的一种常用方法。对于正常的水文年份,如果不受外界影响,径流量累积值点虽有波动,但没有系统偏离,降水与径流的双累积曲线应该是一条直线;如果流域下垫面发生了改变,则降水与径流双累积曲线会发生明显的转折^[15-21]。因此,可以根据双累积曲线发生转折的年代确定下垫面受人类活动影响发生显著改变的时间。

从图 8 中可以看出,降水—径流双累积曲线首次发生显著偏离的时间是 1964 年,曲线首次发生明显发生偏离前的时段可以作为未受人类活动干扰的基准期,即天然时段。因此,确定基准期为 1950~1964 年。

根据基准期内累积年降水和累积年径流序列,建立相关方程如下:

$$R=0.0331 \quad P+2.4151, R^2=0.9956$$

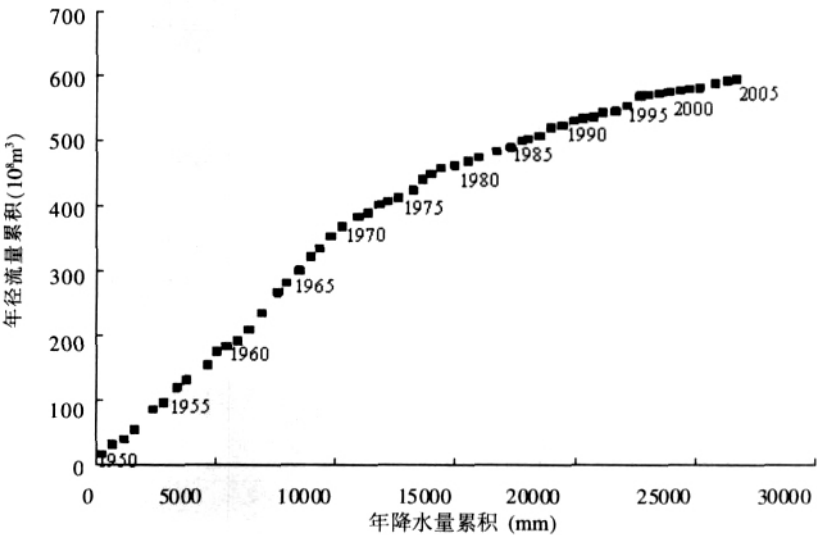


图 8 1950~2005 年汾河河津站降水—径流双累积曲线

Fig.8 Double mass curve of rainfall-runoff of Fenhe River between 1950 and 2005

根据相关方程计算出各年的年径流量,并将其作为各年的天然径流量。以流域‘天然时段’的实测径流值作为基准值,则人类活动影响时期的实测径流值与基准期之间的差值包括两部分: 为人类活动影响部分,该部分可由人类活动影响期间还原的天然径流量与相应时期的实测径流量计算得到; 为气候变化影响部分,该部分为人类活动影响期间还原的天然径流量与基准期之间的差值^[14]。

根据计算结果(表 2)可以看出: 河津站多年来人类活动对径流的影响量占径流减少总量的比率为 75.912%,可见人类活动是汾河流域径流减少的主要因素,其次才是降水变化; 而且汾河流域实测径流量和天然径流量均具有递减趋势,相比而

言,实测径流量的递减率更为明显。其中,21 世纪初期的实测径流量和天然径流量分别为 $3.554 \times 10^8 \text{m}^3$ 和 $15.61 \times 10^8 \text{m}^3$, 分别为基准期的 20.0%和 91.8%;

不同时段人类活动对径流的影响程度也不相同。20 世纪的 60~70 年代期间,由于国民经济各项建设事业尚未达到稳步运行阶段,虽然此时《汾河流域规划报告》出台,但多数工程尚属于起步阶段,所以人类活动影响相对较弱; 而汾河下游河道在 20 世纪 70 年代后,由于受较多枯水年份和所兴建的大批水库、灌区、电灌站等水利设施运行的影响,河道径流被节节拦截和调蓄,致使径流锐减,加之沿河两岸争夺河滩地,设障侵占河道,从而严重影响了河流径流。

表 2 1950~2005 年降水和人类活动对汾河年径流量影响
Tab.2 Annual runoff affected by rainfall and human activities from 1950 to 2005

起止年份	径流量 (10^8m^3)			降水因素		人类活动因素	
	实测值	计算值	总减少量	影响量(10^8m^3)	比率 (%)	影响量 (10^8m^3)	比率 (%)
1950~1964	17.776	17.008					
1965~1980	12.219	15.187	5.557	2.589	46.588	2.968	53.412
1981~1990	6.813	16.554	10.963	1.222	11.144	9.741	88.856
1991~2000	4.639	14.563	13.136	3.213	24.457	9.924	75.543
2001~2005	3.554	15.610	14.222	2.166	15.228	12.056	84.772
1965~2005	7.995	15.420	9.781	2.356	24.008	7.425	75.912

6 结论

(1) 汾河水沙的年内变化差异较大,主要集中在 6~9 月份,且趋势基本一致; 年际变化剧烈,沙量年际变化强于径流年际变化,而径流变化的丰水时段大多出现在 20 世纪 70 年代以前,最长丰水时段达 10 年,在 80 年代之后,流域基本处于枯水或者偏枯。

(2) 通过累积滤波器对水沙进行趋势分析发现,二者总体上呈现减少趋势,且输沙量的变化幅度大于径流量的变化。

(3) 统计分析结果表明人类活动是汾河流域径流减少的主要因素,其次才是降水变化,并且人类活动在不同时段对径流的影响具有一定差异。

汾河是山西省境内的最大河流,也是当地的重要水资源。近年,汾河流域水沙锐减,严重影响当地的经济建设,加之河流的水质不断恶化,对当地的

用水造成严重威胁,使得汾河流域发展受到限制。因此在研究水沙规律及驱动力的同时也应进一步加强气候变化和人类活动对水质的影响研究,为汾河流域合理开发利用水资源提供依据。

参考文献

[1] IPCC 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. The Fourth Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
[2] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土, 2002, 24 (3): 219~226.
[3] 侯依玲, 李栋梁, 施雅风 等. 50a 来我国东北及邻近地区年降水量的年代际异常变化. 冰川冻土, 2005, 27 (6): 838~845.
[4] 栾兆擎, 胡金明, 邓伟 等. 人类活动对挠力河流域径流情势的影响. 资源科学, 2007, 29(2): 46~51.

- [5] 蒋艳,周成虎,程维明. 新疆阿克苏河流域年径流时序特征分析. 地理科学进展, 2005, 24(1): 87-95.
- [6] 董晓辉,姚治君,陈传友. 黄河源区径流变化及其对降水的响应. 资源科学, 2007, 29(3): 67-73.
- [7] 郑红星,刘昌明. 黄河源区径流年内分配变化规律分析. 地理科学进展, 2003, 22(6): 585-591.
- [8] 张士峰,贾绍凤. 降水不均匀性对黄河天然径流量的影响. 地理科学进展, 2001, 12(4): 354-363.
- [9] 许炯心,孙季. 嘉陵江流域年径流量的变化及其原因. 山地学报, 2007, 25(2): 153-159.
- [10] 胡兴林. 甘肃省主要河流径流时空分布规律及其演变趋势分析. 地球科学进展, 2000, 15(5): 516-521.
- [11] 黄锡荃. 水文学. 北京:高等教育出版社,1985.
- [12] 许炯心,孙季. 近 50 年来降水变化和人类活动对黄河入海径流通量的影响. 水科学进展,2003,14(6):690-695.
- [13] 孙宁,李秀彬,冉圣洪 等. 潮河上游降水-径流关系演变及人类活动的影响分析. 地理科学进展, 2007, 26(5): 41-46.
- [14] 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. 水科学进展, 2006, 17(6): 853-858.
- [15] 延军平 等. 秦岭南北环境响应程度比较. 北京: 科学出版社, 2006.
- [16] 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. 地球科学进展, 2005, 20(6): 637-642.
- [17] 张济世,康尔泗,姚尽忠 等. 气候变化对洮河流域水资源的影响. 中国沙漠, 2003, 23(3): 263-267.
- [18] 时兴合,秦宁生,汪青青 等. 黄河上游径流变化特征及其影响因素初步分析. 中国沙漠, 2007, 27(4): 690-696.
- [19] 龚原,袁玉江,何清. 气候转暖及人类活动对北疆中小河流降水—径流关系的影响. 中国沙漠, 2003, 23(5): 569-572.
- [20] 李丽娟,郑红星. 华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析——以潮白河为例. 地理学报, 2000, 55(3): 309-317.
- [21] 夏军,谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战. 资源科学, 2002, 24(3): 1-7.

Analysis of the Runoff and Sediment Development Distribution and Influencing Factor of Fenhe River during the Last 50 Years

YUAN Zhihua, YAN Junping, LIU Yufeng

(Tourism and Environment Department, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: Based on the hydrologic data from the Hejin station of Fenhe River since the 1950s, the seasonal and annual change of runoff and sediment was analyzed, and the influence of human activities on the runoff was estimated. The results show that the seasonal distribution of runoff and sediment was quite uneven, while there was obvious increase in the Cvy and the degree of stability became lower and lower. The annual distribution of runoff and sediment was different in great scope, annual runoff was rainless period since the 1980s. To analysis the trend of runoff and sediment change using the cumulative filter method, the results show that there was obvious decline, and the variation of sediment change was greater runoff change. Analyses of double mass curve of annual runoff and precipitation showed that the decline in the runoff occurred in 1964. On average, 75.912% of total annual runoff reduction was induced by human activities. Human activities were main reasons of runoff reduction in Fenhe River basin.

Key words: Hejin station of Fenhe River; runoff and sediment change; trend analysis; double mass curve; human activities