

文章编号: 1001-8166(2008)04-0382-08

应用流量历时曲线分析黄土高原水利水保措施对河川径流的影响*

穆兴民^{1,2}, 高 鹏^{1,2}, 巴桑赤烈³, 张晓萍^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 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; 3. 西藏自治区水文水资源勘测局, 西藏 拉萨 850000)

摘 要:流量历时曲线(Flow Duration Curve, FDC)是用于分析流域径流特征及其变化的有效方法之一。以长序列日流量为基础,采用 FDC 方法并结合各流域的径流量时间变化趋势分析方法,研究了黄土高原佳芦河、秃尾河、延河和湫水河等 4 条流域流量变化的基本特征;通过临界年份前后两个时段序列及不同年代序列的流量历时曲线变化的比较,分析了流域径流过程对大面积水土保持措施的响应。结果表明:随水土保持措施累积面积的不断增大,佳芦河、湫水河、秃尾河的径流量逐年减少,且水土保持措施对高流量部分径流减少的程度较低流量部分大,尤以工程措施为主的湫水河流量减少最明显。在延河流域,与临界年份前的时段相比,后期的高流量部分的径流量减小,而常水和低流量部分的径流量相对增大。尽管流域水土流失综合治理并未使河川径流量增加,但由于高流量部分流量的减少程度较低流量部分径流量减少程度大,从而使流域年内日径流量变化过程趋于均匀化。

关 键 词:河川径流;流量曲线;水土保持;黄土高原;黄河

中图分类号: P332.4; P941.74 **文献标志码:** A

在 20 世纪 50 年代我国已提出开展水土保持水文效应的研究。1959 年 3 月 12 日原水电部在陕西省西安市召开了黄河中上游水利化及水土保持效果观测研究协作会议,决定在黄河中上游地区开展水利化及水土保持措施对年径流、洪水及泥沙变化影响的观测研究。1960 年 1 月原国家科学技术委员会编制的《1960 年国家科学技术发展计划(草案)重点任务说明书》中提出相类似的问题。河川径流是陆地水循环与水量平衡的重要组成部分并受到气候气象条件、水利水保工程、土地覆盖变化等的影响。在黄土高原,尽管人们已广泛开展了水土保持措施对河川径流总量影响研究^[1,2],而关于河川径流变化过程对水利水保工程响应的研究相对不足。穆兴

民等^[3,4]采用时间对比分析方法分析了水利水保工程对典型流域径流量的年际变化及其年内分配、暴雨洪水的影响。Huang 等^[5]曾分析了水土保持措施对黄河支流佳芦河径流的影响,其中部分采用了 FDC 方法,但应用资料时间仅到 1989 年且仅为单个流域,不能反映黄土高原区域情况。本文尝试用流量历时曲线(FDC)法分析黄土高原 4 条流域水利水保工程对流域径流的影响。

流量历时曲线可以表示某一流量超过所有历史记录的时间比例,它最能充分反映从低流量到洪水的各个流量状态下流域的径流特征。Clemens Herschel 在 1880 年第一次使用 FDC 方法^[6],从 20 世纪上半叶开始,特别是随着计算机技术的发展和应

* 收稿日期:2007-12-15;修回日期:2008-03-04.

* 基金项目:中国科学院西部行动项目“黄土高原水土保持与可持续生态建设试验示范研究”(编号:KZCX2-XB2-05-03);国家重点基础研究发展计划项目“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究”(编号:2007CB407203);中国科学院“西部之光”项目“区域土地利用/覆被变化水文效应研究”资助。

作者简介:穆兴民(1961-),男,陕西华阴人,研究员,博士,主要从事生态水文研究. E-mail: xmmu@ms.iswc.ac.cn

FDC 方法则被广泛的用于水电工程设计、水资源供给、灌溉规划、无资料地区径流、水文模型结果的校验、区域水文特征分析等^[7]。Smakhtin^[8]认为流量历时曲线参数及其图的形状受水资源开发和土地利用类型的影响, Best^[9]指出流量历时曲线是反映不同土地利用规划情景下流量是如何变化的简单方法之一, 因此, 近年来它被广泛用于土地利用变化的水文效应研究。

1 资料与方法

1.1 研究流域概况

根据黄土高原河流的空间分布、地质、地貌、气象等情况, 选择佳芦河、秃尾河、延河和湫水河等4条支流作为研究流域^[4]。尽管佳芦河和秃尾河流域彼此相邻, 但佳芦河流域以黄土丘陵为主, 秃尾河流域以沙地丘陵为主, 故同时选取。4条流域的地理位置及水系、雨量站和水文站分布及其流域概况分别见图1和表1所示。

秃尾河发源于陕西神木县瑶镇乡宫泊海子, 水流由西北向东南于神木县的万镇汇入黄河。流域地貌可分为上中游的沙地丘陵和下游的黄土丘陵区两

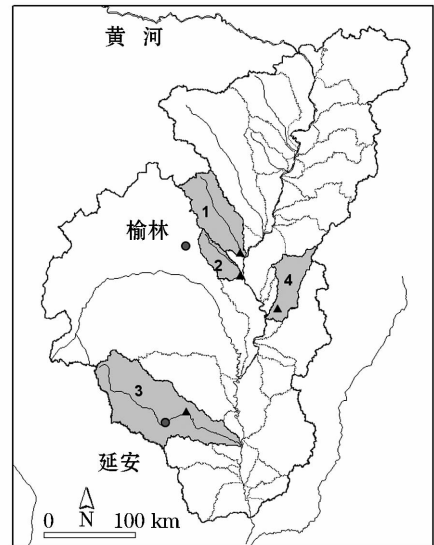


图1 黄河流域河龙区间及其研究流域位置示意图

Fig.1 The main map shows the location of the four study catchments in the Hekou-Longmen region of Yellow River Basin

1. 秃尾河流域; 2. 佳芦河流域; 3. 延河流域; 4. 湫水河流域
1. Tuweihe Catchment; 2. Jialuhe Catchment; 3. Yanhe Catchment;
4. Qiushuihe Catchment

表1 研究流域的基本特征

Table 1 Catchment characteristics and stream flow records

流域	经度(°E)	纬度(°N)	干流长 (km)	比降 (‰)	流域 面积 (km ²)	水文站 控制面 积(km ²)	多年平均实测		
							降水量 (mm)	径流量 (10 ⁴ m ³)	输沙量 (10 ⁴ t)
秃尾河	109°48' ~ 110°32'	38°13' ~ 39°01'	139.6	3.16	3 294	3 253	393	36 549	2 098
佳芦河	109°56' ~ 110°32'	37°58' ~ 38°29'	93.0	6.28	1 134	1 121	395	7 064	1 592
湫水河	110°47' ~ 110°26'	37°36' ~ 38°18'	122.0	6.4	1 989	1 873	509	8 286	1 914
延河	108°45' ~ 110°28'	36°23' ~ 37°17'	286.9	3.3	7 725	5 891	511	22 270	4 936

个类型区, 其面积各占流域总面积的 74.4% 和 25.6%。两岸支流呈羽状分布, 面积大于 100 km² 的支流有 9 条。年降水量的 80% 集中在汛期, 年平均气温 9℃, 年平均日照时数 2 875 h。

佳芦河地处黄土高原毛乌素沙漠南缘, 发源于榆林县双山乡断桥村, 水流由西北向东南于陕西省佳县的佳芦河镇汇入黄河。流域地貌以黄土丘陵为主, 在河口地区有部分石质山区, 基岩裸露, 谷窄沟深。流域内面积大于 500 km² 的支流有 4 条, 面积大于 10 km² 的支流 25 条。多年平均气温 9.6℃, 极端最高气温 38.8℃, 极端最低气温 -32.1℃, ≥10℃ 的活动积温 3 812.6℃, 多年平均无霜期 130 ~ 177 天, 年日照时数 2 790 h。

湫水河发源于山西省兴县黑茶山东北区, 水流

从东向西流于碛口镇汇入黄河。该流域有黄土丘陵沟壑区和土石山区等两种地貌类型, 其面积分别占流域面积的 79.8% 和 20.2%。流域内地形破碎, 沟壑纵横, 面积在 10 km² 以上的支流有 26 条。汛期降水量占年降水量的 81%, 多年平均气温 6.5 ~ 11.3℃, ≥10℃ 的活动积温 3 125℃, 多年平均无霜期 160 天。

延河发源于陕西省靖边县东南天赐湾乡, 由西北向东南流经志丹、安塞、宝塔、延长等 4 县区, 在延长县南河沟乡汇入黄河。流域内黄土丘陵面积占全流域的 90%, 流域出口处为黄土覆盖的石质丘陵沟谷区, 河网密度约为 4.7 km/km², 年侵蚀模数在 15 000 t/km²。主要支流有杏子河、西川、蟠龙川和南川等。流域内年平均气温 8.5 ~ 11.4℃, ≥10℃

的活动积温 2 900 ~ 3 900℃, 无霜期 157 ~ 190 天。年降水量 500 ~ 565 mm, 潜在蒸发量 1 580 mm。

在黄土高原, 流域土地覆盖/利用变化主要表现为水土保持措施面积的变化。区域水土保持主体措施有造林、种草、修梯田和淤地坝。根据冉大川等^[2]资料整理的 4 条流域各项水土保持措施面积及其构成比例如表 2。可以看出, 4 条流域水土流失治理程度较高。流域累计治理面积占流域面积的比例, 佳芦河、湫水河在 20 世纪 70 年代中期而秃尾河

及延河在 20 世纪 80 年代初分别达到 10% 以上。到 1996 年底, 秃尾河、佳芦河、延河和湫水河流域水土保持措施总保存面积分别占水文站以上流域面积的 35.1%、41.8%、28.5% 和 33.4%。在 4 条流域中, 佳芦河及湫水河流域梯田和坝地面积比例较大, 代表了以工程措施为主的治理类型区, 而秃尾河和延河的林草措施面积比例较高, 代表了植被措施为主的治理类型区。

表 2 研究流域水土保持措施累积保存面积及其比例、占流域面积

Table 2 Areas and ratios occupied by the different soil and water conservations measures

流域	年份	梯田		坝地		造林		种草		合计	RPC
		面积(hm ²)	比例(%)	面积(hm ²)	比例(%)	面积(hm ²)	比例(%)	面积(hm ²)	比例(%)		
秃尾河	1959	102	4	21	1	2 542	91	137	5	2 802	0.9
	1969	1 075	11	167	2	7 711	81	612	6	9 565	2.9
	1979	3 127	14	711	3	17 467	76	1 610	7	22 915	7.0
	1989	4 548	5	1 107	1	75 453	90	2 881	3	83 989	25.8
	1996	6 654	6	1 547	1	102 155	90	3 737	3	114 093	35.1
佳芦河	1959	433	26	80	5	920	55	233	14	1666	1.5
	1969	2 727	36	407	5	4 167	56	173	2	7 474	6.7
	1979	6 713	36	973	5	9 753	53	1 020	6	18 459	16.5
	1989	10 427	25	1 293	3	29 393	69	1 280	3	42 393	37.8
	1996	14 140	30	1 626	3	29 533	63	1 553	3	46 852	41.8
延河	1959	413	8	462	9	4 133	82	33	1	5 041	0.9
	1969	4 720	21	1 583	7	16 127	71	373	2	22 803	3.9
	1979	9 753	23	2 873	7	28 693	67	1 747	4	43 066	7.3
	1989	17 433	15	3 780	3	84 073	70	14 520	12	119 806	20.3
	1996	27 560	16	4 167	2	110 020	66	25 987	15	167 734	28.5
湫水河	1959	2 130	50	280	7	1 510	35	340	8	4 260	2.3
	1969	7 240	59	460	4	3 730	30	830	7	12 260	6.5
	1979	14 190	51	1 270	5	11 360	41	1 210	4	28 030	15.0
	1989	16 720	42	1 750	4	20 070	50	1 480	4	40 020	21.4
	1996	26 336	42	2 422	4	31 845	51	1 980	3	62 583	33.4

备注: 比例指各时期流域治理措施面积与同期总治理面积的比(%) ; RPC 指流域治理措施总面积与流域水文站以上控制面积的比(%)

1.2 流域降雨与径流量资料

流域降雨和径流资料来自于黄河水利委员会的“黄河流域水文泥沙整编资料”, 延河流域缺 1994 年和 1995 年资料。4 条流域水文站及其流量序列分别为: 秃尾河的高家川站(1956—2003 年), 佳芦河的申家湾站(1957—2003 年), 湫水河流域的林萍站(1956—2003 年)及延河流域的甘谷驿站(1957—1993 年, 1995—2003 年)。

1.3 降雨量和径流量变化趋势及其临界点分析方法

分析流域径流量时间变化趋势的方法很多, 这里选用 Kendall 和 Spearman 秩相关法和偏相关法来分析径流量时间序列的变化趋势。在降水量、径流量及年序三者中, 降雨量与径流量存在显著的依存

关系, 可以用偏相关法, 把降水量固定, 从而消除降水量对径流量的影响。Kendall 秩相关和 Spearman 秩相关分析法是根据数据系列的秩而不是实际数值来计算两个变量之间的相关性, 它们更适合有序、等间隔数据的分析^[10]。

1.4 流量历时曲线

流量历时曲线表示给定流域某一时段(日、月或年)流量发生频次与流量之间的关系, 其间不必考虑时间的连续性, 它表示了在整个时间序列中, 大于等于某一流量发生的时间百分比。流量历时曲线简单而全面地、图示化地反映了整个研究时段流域径流的变化特征, 是流域日径流累积分布函数的补充^[10]。

2 结果与分析

2.1 流域径流量变化趋势及其临界年份

采用 Kendall 秩相关法、Spearman 秩相关法和偏相关法分析了4条支流径流量的变化态势,其结果见表3。可以看出,不同方法在同一流域反映的趋势基本一致,佳芦河、秃尾河和湫水河流域年径流量有随年序的增加而减少的趋势。而延河流域三者相关系数均为正但尚未达到显著的统计检验水平。

表3 研究流域的径流量年变化趋势相关系数

Table 3 Trend regression coefficients in the selected catchments

流域	偏相关系数	显著性水平	Kendall 系数	显著性水平	Spearman 系数	显著性水平
佳芦河	-0.734	***	-0.546	***	-0.718	***
秃尾河	-0.723	***	-0.587	***	-0.794	***
湫水河	-0.629	***	-0.380	***	-0.543	***
延河	0.262		0.036		0.067	

注:*** 信度达0.001水平

采用 Pettitt 方法分析所选4条流域径流量变化

的临界年份, Pettitt 检验结果如图2所示。可以看出:从1978年以来,佳芦河、秃尾河和湫水河流域年径流量表现出逐年减少的趋势,这与流域水土保持措施面积较之前显著增加相一致,大量研究指出,径流量的趋势性减小因流域水土流失治理所致^[2,4]。而延河流域径流量与其他流域径流量发生显著变化存在显著的不一致性,是有待进一步深入探讨的流域。

2.2 不同流域日径流量过程的基本特征

延河、佳芦河、湫水河及秃尾河多年序列的日径流量的 FDC's 曲线如图3。各流域的 Q50 分别为 0.047, 0.085, 0.031 和 0.252 mm/d, 4个流域中,秃尾河径流量最大,湫水河最小。在10%到90%频率之间, FDCs 曲线近似为水平线特别是沙区的秃尾河更加明显。表明:除高、低流量外,一年中多数情况下各河流日径流量大小相近,变化较小。为反映流域径流量变化差异,采用特征频率下的流量与50%频率下的流量(用Q50表示)比来表示。根据黄土高原河流水文特征,我们选择频率1%和5%代表高流量,80%和95%频率代表低流量,并用Q1、Q5及Q80和Q95代表各频率下的流量值。各流域特征频率下的日平均径流量与Q50之比如表4。表明:

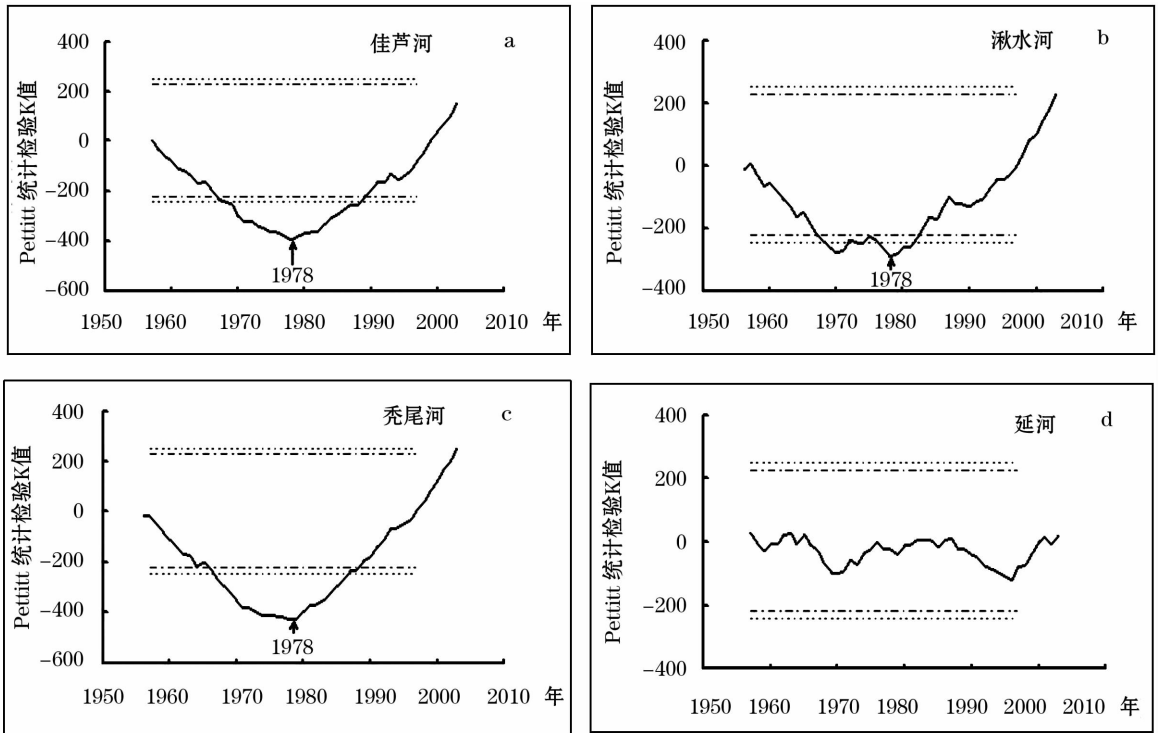


图2 平均流量年际变化趋势的 Pettitt's 检验图

Fig. 2 The Pettitt test for detecting a change in the mean of annual stream flow

两条水平虚线分别表示5%的10%显著性水平

Horizontal lines represent the 5% (dotted) and 10% (solid) significance levels

沙区河流秃尾河的高流量的 Q1、Q5 与 Q50 的比值较小,黄土丘陵区的延河、佳芦河、湫水河等流域的各指标值甚大。而秃尾河的低流量区 Q80 和 Q95 与 Q50 的比值大于黄土丘陵区的河流。表明:沙区河流日流量年内变化相对均匀,而黄土丘陵区则变化幅度较大,且对降雨的响应较为敏感或迅速。

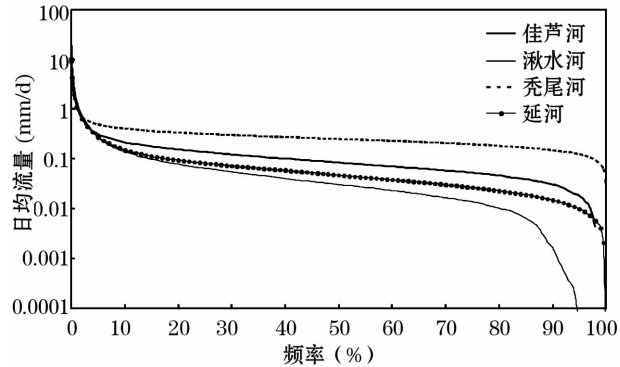


图 3 佳芦河、湫水河、秃尾河及延河流域全系列日均流量历时曲线

Fig. 3 Daily flow duration curves for the whole period of record for the selected catchments of Jialuhe, Qiushuihe, Tuweihe and Yanhe catchments

表 4 不同流域 FDC 的流量特征指标

Table 4 Character index of FDC in the selected catchments

指标		延河	佳芦河	湫水河	秃尾河
常流量	Q50	0.047	0.085	0.031	0.252
高流量	Q1/Q50	23.0	16.1	48.9	4.3
	Q5/Q50	5.8	3.7	9.0	2.0
低流量	Q80/Q50	0.5	0.6	0.3	0.7
	Q95/Q50	0.2	0.2	0.0	0.5

2.3 4 条流域不同年代日径流量频率曲线

4 条流域不同年代标准化日径流量 FDC 曲线如图 4。为尽量消除不同时段因降雨差异引起的径流量变化,我们用对应时段的日平均降雨量除以日径流量,对原径流量序列进行降雨量标准化。可以看出,20 世纪 60~70 年代,佳芦河和秃尾河的日径流量 FDC 曲线基本重合,表明这两个时段流域日径流量过程无明显差异。比较 20 世纪 70、80 和 90 年代的 3 条 FDC 曲线(分别用 FDC70、FDC80 和 FDC90 表示),佳芦河的 FDC80 与 FDC90 差异最大尤以低流量部分最显著,秃尾河的 FDC80 较 FDC70 明显下移。与 60 年代相比,湫水河各年代的 FDC 曲线都具有较明显下移,特别是低流量部分,表明湫水河日径流量随年代的后移而显著减少,且该流域日平均

流量为零主要出现在 90 年代。

比较不同年代延河的 FDC 曲线的上下移动,可以看出,从 20 世纪的 60~80 年代,各年代的 FDC 曲线有逐渐上移的趋势,说明标准化日径流量有逐渐增大的趋势。与 80 年代相比,90 年代的 FDC 曲线整体表现为下移即标准化日径流量有减少的趋势。各年代的 FDC 曲线之间,频率 80% 以上的日径流量 FDC 曲线偏移显著。

各流域不同年代特征频率下的标准化日径流量与 Q50 的比值如表 5。在高流量部分,从 20 世纪 60~80 年代,延河、佳芦河及秃尾河的各特征指标值具有不同程度的显著减小,而到 90 年代则有所增大。湫水河从 60~70 年代有大幅减小后,其后各年代之间指标值则表现出小幅波动性变化。在低流量部分,延河流域表现出明显的逐渐增加趋势,其他流域则具有逐渐降低的趋势。

2.4 临界年份前后各时段的日径流量

根据流域径流量发生显著变化的临界年份,我们将各流域标准化日径流量系列分为前后两个时段(前期和后期),以对比分析各流域日流量的变化特点与规律。因资料序列的差异,延河的前期指 1957—1977 年,而后期指 1978—2003 年,同样,佳芦河的前期和后期分别指 1957—1977 年和 1978—2003 年,秃尾河前期和后期分别指 1957—1977 年和 1978—2003 年,湫水河前后期分别指 1956—1977 年和 1978—2003 年。4 条流域临界年份前后标准化日径流量历时曲线及特征频率下标准化后流量见图 5(a, b, c 和 d)。

与前期相比,在 4 条流域中,湫水河标准化日径流量减小程度最明显。各频率下标准化日径流量降低达 20% 以上,多数情况下在 40% 以上,大于 85% 频率时则达 70% 以上。佳芦河和秃尾河日径流量 FDC 曲线的变化趋势基本相似,各流域标准化日径流量均有不同程度的减小,在高水和低水部分减少程度相对较大。与对照期相比,佳芦河及秃尾河的 Q50 减少 15%~25%,但在频率 5% 及 95% 以上的高水和低水部分,两条流域日径流量相对减少量均在 40% 以上。表明,流域水土保持工程措施的减水效应最显著。

延河日径流量 FDC 曲线变化较为特殊。大约在频率 32% 附近,前后两个时期标准化日径流量近似相等。以频率 32% 为界,与前期相比,在频率 0%~32% 区间,标准化日径流量减少,在频率 33%~100% 区间(常水和低水部分)标准化日径流量减

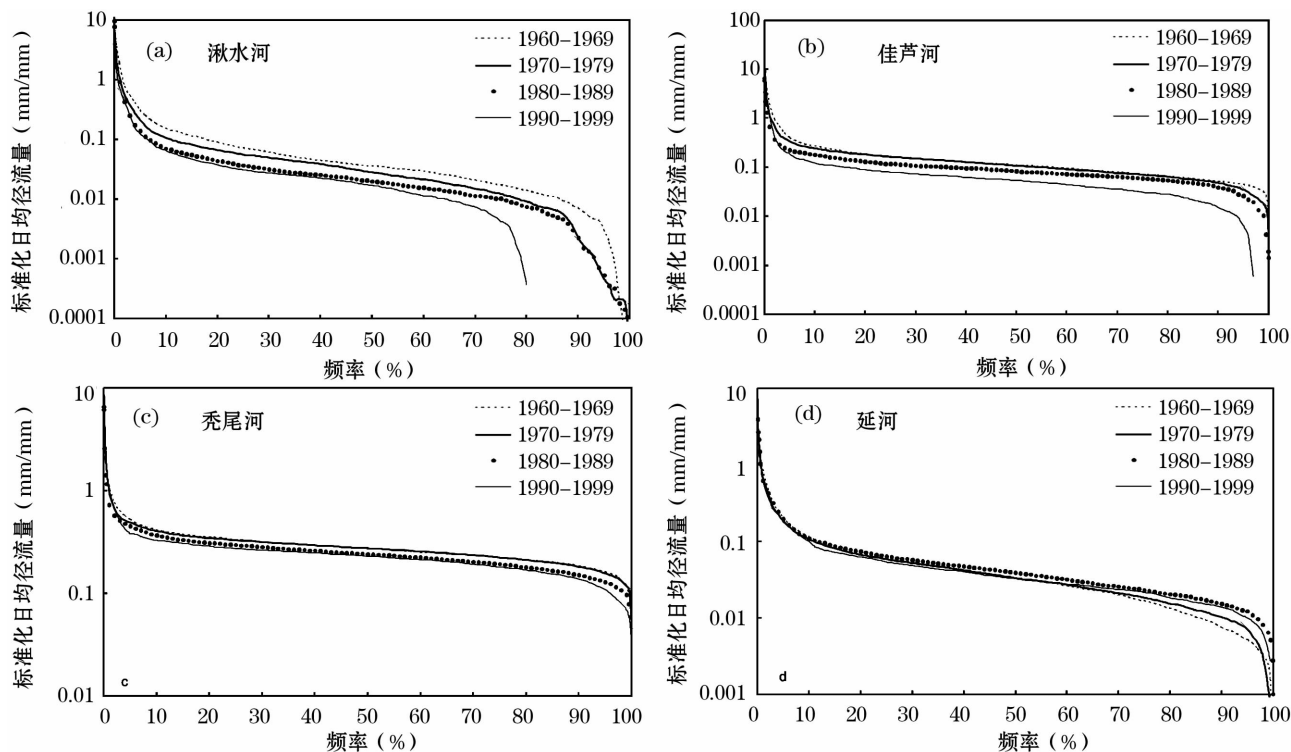


图 4 不同年代日均流量历时曲线

Fig. 4 Catchment's FDCs in each decade year

表 5 不同年代各流域标准化径流量 FDC 曲线特征参数

Table 5 FDC's Character index of the selected catchmens in each decade year

流域		延河				佳芦河			
年代		1960	1970	1980	1990	1960	1970	1980	1990
常流量	Q50	0.034	0.033	0.039	0.033	0.110	0.108	0.083	0.054
高流量	Q1/Q50	26.40	20.41	16.12	22.76	18.16	11.13	8.07	21.77
	Q5/Q50	6.14	5.66	5.08	5.44	3.65	3.13	2.69	3.49
低流量	Q80/Q50	0.40	0.46	0.53	0.55	0.59	0.60	0.66	0.52
	Q95/Q50	0.15	0.22	0.31	0.31	0.40	0.32	0.31	0.12
流域		秃尾河				湫水河			
年代		1960	1970	1980	1990	1960	1970	1980	1990
常流量	Q50	0.270	0.274	0.240	0.229	0.036	0.028	0.020	0.017
高流量	Q1/Q50	4.18	3.76	3.02	4.23	53.23	40.24	46.95	44.48
	Q5/Q50	1.93	1.78	1.87	1.66	8.71	7.65	7.05	7.41
低流量	Q80/Q50	0.78	0.77	0.74	0.73	0.39	0.33	0.38	0.02
	Q95/Q50	0.60	0.57	0.53	0.47	0.09	0.02	0.03	0.00

少。表明,与前期相比,水土流失的大面积治理使黄土高原南部的延河流域高流量部分的径流量减少,而常流量和低流量部分的径流量有增大的趋势。

前后两个时段特征频率下的标准化日流量与 Q50 的比值如表 6。可以看出,与对照期相比,高流量部分各特征频率下标准化日流量与 Q50 的比值均有显著降低,而低流量部分降低程度较小或有小幅增加(佳芦河的 Q80/Q50 指标及延河 Q80/Q50

和 Q95/Q50 指标值)。说明,与前期相比,水土流失治理使各流域的日径流量年内变化趋于均匀。

3 结 论

在黄土高原,造林、种草、修建梯田和淤地坝是治理水土流失的主要措施。从 20 世纪 50 年代以来,研究流域的水土保持措施面积在成倍增加。到 1996 年底,秃尾河、佳芦河、延河和湫水河流域水土

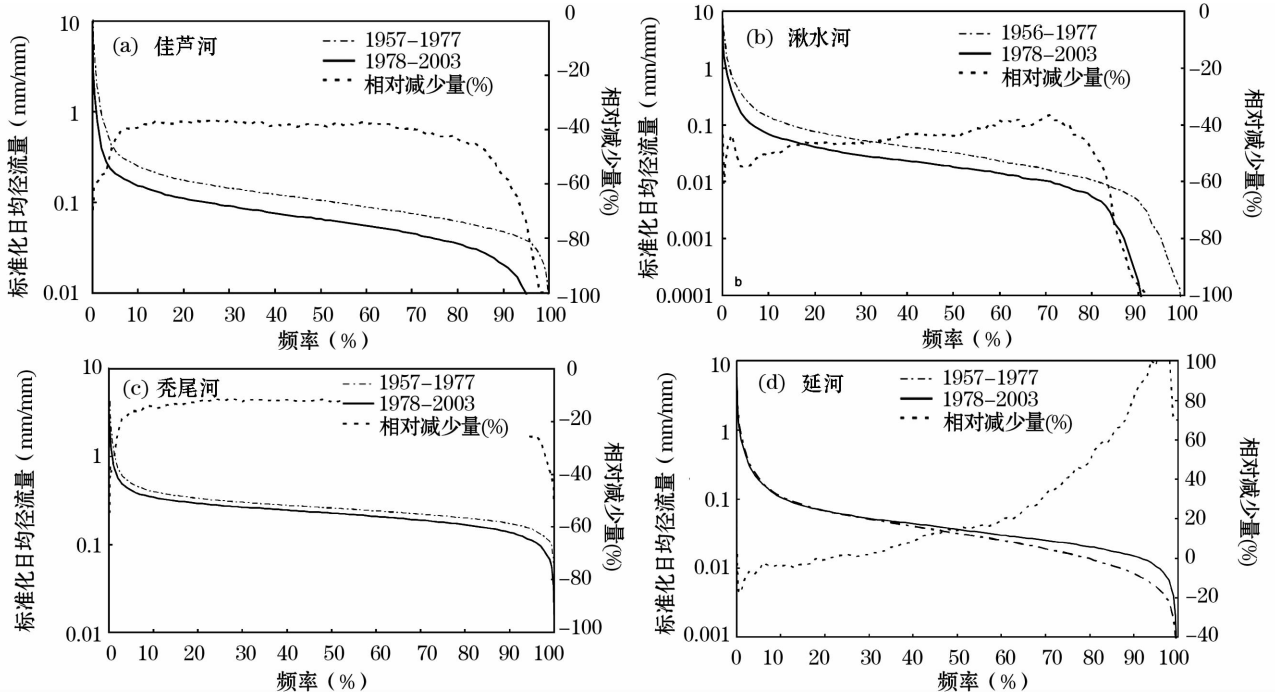


图 5 延河两个典型时段流量历时曲线对比

Fig. 5 FDC difference of the two representative ages in the Yanhe catchment

表 6 流域典型时段日流量 FDC 曲线特征值指标

Table 6 FDC's character index of the selected catchments in the two representative ages

流域 时段	延河		佳芦河		秃尾河		湫水河		
	1957—1977	1978—2003	1957—1977	1978—2003	1957—1977	1978—2003	1956—1977	1978—2003	
常流量 Q50	0.032	0.035	0.105	0.065	0.261	0.228	0.033	0.018	
高流量 Q1/Q50	27.62	19.96	18.26	11.99	4.70	3.47	45.80	41.71	
	Q5/Q50	6.42	5.28	3.52	3.20	1.90	1.83	8.68	7.06
低流量 Q80/Q50	0.43	0.57	0.59	0.53	0.77	0.73	0.33	0.30	
	Q95/Q50	0.17	0.30	0.36	0.15	0.57	0.49	0.03	0.00

保持措施累积总保存面积分别已占流域水文站以上流域面积的 35.1%、41.8%、28.5% 和 33.4%。流域大面积的水土流失治理已经使秃尾河、佳芦河和湫水河的水文情势发生显著变化,特别是从 1978 年以来,流域日均径流量已有明显减少趋势,但延河流域例外。

佳芦河、湫水河秃尾河及延河的日径流量及其年内变化过程存在显著性差异。各流域的 Q50 分别为 0.085、0.031、0.252 和 0.047 mm/d,其中秃尾河日均流量最大,湫水河最小。除高流量和低流量部分外,多数时间内,流域日平均径流量波动甚小,特别是沙区的秃尾河。

通过 4 条流域前后两个时段及不同年代日径流量变化的系列分析,结果表明:随水土保持措施累积面积的不断增大,佳芦河、湫水河及秃尾河的径流量逐年减少,且水土保持措施对高流量部分径流减少

的程度较低流量部分大,使河川日流量年内变化过程趋于均匀。在各流域中,湫水河梯田和淤地坝等工程措施面积较大,日径流量相对减少幅度甚大。因此,黄土高原的工程措施对流域流量影响也最为显著。在延河流域,与前期时段流量相比,后期的高流量部分的径流量减小,而常水和低流量部分的径流量相对增大。尽管流域水土流失综合治理并未使河川径流量增加,但使流域日径流量过程发生显著变化。由于高流量部分径流量的明显减少而低流量部分径流量减少幅度较小,从而使流域年内日径流量变化过程趋于均匀化。

致谢:本文在完成过程中的到澳大利亚 CSIRO Land and Water Division 的 Lu Zhang 博士的指导,并提出了一些重要修改建议,CSIRO Land and Water Division 的 Lingtao Li 为本文制作了部分图件,特表

致谢。

参考文献 (References) :

- [1] Xu Jianhua, Niu Yuguo. Impact of Water and Soil Conservancy Project on Runoff and Sediment in in Coarse and Sandy Region of Middle Reaches of the Yellow River[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Publishing House, 2000; 158-174. [徐建华, 牛玉国. 水利水保工程对黄河中游多沙粗沙区径流泥沙影响的研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000; 158-174.]
- [2] Ran Dachuan, Liu Linwang, Zhao Liyi, et al. Water and Soil Conservation and Runoff and Sediment Change in Hekou-Longmen Region in Middle Reaches of Yellow River [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Publishing House, 2000; 124-137. [冉大川, 柳林旺, 赵力仪, 等. 黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000; 124-137.]
- [3] Mu Xingmin, Xu Xuexuan, Chen Qiwei. Research of Eco-hydrology on the Loess Plateau [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2001. [穆兴民, 徐学选, 陈霁巍, 著. 黄土高原生态水文研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.]
- [4] Mu Xingmin. Impact of soil and water conservation on river flow and soil-hydrology on the Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2002. [穆兴民. 黄土高原水土保持对河川径流及土壤水文的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002.]
- [5] Huang M, Lu Zhang. Hydrological responses to conservation practices in a catchment of the Loess Plateau, China [J]. *Hydrological. Process*, 2004, 18: 1 885-1 898.
- [6] Foster H A. Duration curves [J]. *American Society of Civil Engineers Transactions*, 1934, 99: 1 213-1 267.
- [7] Vogel R M, Fennessey N M. Flow Duration Curves I: A New Interpretation and Confidence Intervals [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1994, 120 (4) : 210-215.
- [8] Smakhtin V U. A Concept of Pragmatic Hydrological Time Series Modeling and Its Application in South African Context [M]. Ninth South African National Hydrology Symposium, 1999; 1-11.
- [9] Best A E, Zhang L. Development of a model for predicting the changes in flow duration curves due to altered land use conditions [J]. *Hydrological Process*, 2004, 18: 1 885-1 898.
- [10] Mu Xingmin, Bashang Chile, Gao Peng, et al. Impact of soil conservation measures on runoff and sediment in Hekou-Longmen region of the Yellow River [J]. *Journal of Sediment Research*, 2007, (2) : 36-41. [穆兴民, 巴桑赤烈, 高鹏, 等. 黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的响应 [J]. 泥沙研究, 2007, (2) : 36-41.]

Estimating the Impact of Conservation Measures on Stream-flow Regime in Catchments of the Loess Plateau, China

MU Xingmin^{1,2}, GAO Peng^{1,2}, Basang Chille³, ZHANG Xiaoping^{1,2}

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Nothwest A&F University, Yangling 712100, China;*
 2. *Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China;*
 3. *The Bureau of Hydrology of Tibet, Lhasa 850000, China*)

Abstract: Catchments in the Loess Plateau have been under the influence of human activities for centuries, especially in the last several decades when soil conservation measures were accelerated and intensified. These measures were designed to reduce soil erosion, improve agricultural productivity, and enhance environmental quality. It is important to evaluate the effects of these measures on hydrology in order to develop sustainable catchments management plans in the region. This study evaluated changes in stream-flow regime for four selected catchments in the Loess Plateau following large scale soil conservation measures. Parametric and non-parametric Mann-Kendall tests were used to identify trends in annual stream-flow and results showed significant downward trends in three out of the four catchments. The Pettitt's test indicated that a change point occurred in 1978 in these three catchments. Comparison of daily flow duration curves for two 20-years periods starting and ending in the mid 1970's (i. e. , mid 1950s to mid 1970s and mid 1970s to mid 1990s) showed significant changes in stream-flow regime. Reduction in most percentile flows varied between 20 to 45 % , while reduction in low flows was much greater. Overall the reductions in daily flow are increasing as a function of time, with significant changes occurred in the 1990's. However, it is not clear if these catchments have seen the full effects of the soil conservation measures.

Key words: Flow duration curve; Flow; Soil and water conservation practices; Loess Plateau.