

渭河流域径流变化趋势及其影响因素分析

魏红义¹, 李靖², 王江¹, 田鹏¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 针对渭河流域华县水文站径流出现断流的现象, 探讨渭河流域径流量的变化和影响因素显得尤为重要。以渭河流域华县站 1956—2000 年径流资料为基础, 运用 R/S 分析法, 对渭河流域径流序列进行了趋势分析。同时, 对渭河流域径流变化的影响因素也进行了分析。结果表明, 华县水文站年径流序列的赫斯特系数为 0.778 4, 表明渭河流域径流具有持续下降的趋势。以 1956—1969 为基准期进行比对, 1970—2000 年渭河径流量年均减少 $3.79 \times 10^9 \text{ m}^3$, 其中气候作用减少 $1.96 \times 10^9 \text{ m}^3$, 占减少量的 51.7%, 人类活动作用减少 $1.83 \times 10^9 \text{ m}^3$, 占减少量的 48.3%。

关键词: 渭河流域; R/S 分析法; 径流趋势

文献标识码: A 文章编号: 1000-288X(2008)01-0076-05 中图分类号: TV 121+.9, S273.29

Analysis on Runoff Trend and Influence Factors in Weihe River Basin

WEI Hong-yi¹, LI Jing², WANG Jiang¹, TIAN Peng¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Aimed at the stream flow cut-off of Weihe river basin at Huaxian station, it is important that the runoff trend and influence factors are analyzed in this area. According to the data of runoff in Weihe river basin from 1956 to 2000, the changing trend of runoff at Huaxian station is analyzed by using the R/S analysis (Rescale Range Analysis). At the same time, the influence factors of runoff are analyzed. Results show that the Hurst coefficient is 0.778 4, showing that the runoff trend is on the persistent decline. The annual average runoff had been reduced by $3.79 \times 10^9 \text{ m}^3$ from 1970 to 2000, compared to the runoff from 1956 to 1969. Among the influence factors, the reduction influenced by climate is $1.96 \times 10^9 \text{ m}^3$ and the reduction influenced by human activities is $1.83 \times 10^9 \text{ m}^3$, amounting for 51.7% and 48.3% of the total reduction, respectively.

Keywords: Weihe river basin; R/S analysis method; runoff trend

渭河是黄河的第一大支流, 发源于甘肃省渭源县乌鼠山, 流经甘肃、陕西两省, 在陕西省潼关县注入黄河。渭河干流全长 818 km, 流域总面积 $134\ 766 \text{ km}^2$ 。地理坐标为东经 $104^\circ 00' - 110^\circ 20'$, 北纬 $33^\circ 50' - 37^\circ 18'$ [1]。

自 20 世纪 50 年代以来, 渭河流域水资源不断减少, 华县水文站径流出现断流。因此, 研究气候及人为因素对地表水资源的影响显得尤为重要。目前, 国内学者对黄河流域的研究十分关注, 作为黄河最大的

支流渭河, 流域水文水资源的变化也越来越引起学者们的关注 [2-4]。国内学者在分析渭河径流的变化时所采用径流序列较短, 不能充分反映 20 世纪 50 年代渭河径流量的变化趋势, 因此有必要对渭河水文进行长系列的分析和研究。

1 数据资料

本文选取 1956—2000 年渭河流域华县站水文径流资料, 运用 R/S 分析法 (rescaled range analysis, 重

标度极差分析法)对水文站径流的历史数据进行了分析,并对其未来的发展趋势做了初步预测。同时对影响渭河流域径流量减少的原因进行了探讨。

为简化分析,本文选取渭河流域控制站华县水文站为代表,对渭河流域径流趋势进行分析。渭河华县站控制面积 106 498 km², 占全流域面积的 97.18%。本文以华县站 1956—2000 年天然、实测径流数据作为分析研究的基本资料。

2 径流趋势分析

2.1 分析方法

R/S 分析法由 Hurst 于 1965 年提出,其后, Mandelbrot 和 Wallis 在理论上对该方法进行了补充和完善,目前在分形研究中得到了较多的应用^[5-6]。该分析方法的基本思想来自于 Mandelbrot 提出的分形布朗运动和 H^d 法则。R/S 分析法能将一个随机序列与一个非随机序列区分开来,而且通过 R/S 分析,还可以进行非线性系统长期记忆过程的探寻。该方法的基本原理是^[7-9]:

对于一个时间序列 $\{\xi(t)\}$, $t = 1, 2, \dots, n$, 对于任意正整数 $\tau \geq 1$, 定义下列量。

(1) 均值序列

$$\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad (\tau = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

(2) 累积离差

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t [\xi(u) - \langle \xi \rangle_{\tau}] \quad (1 \leq t \leq \tau) \quad (2)$$

式中: $\xi(u)$ —— τ 个时间数据中第 u 个数据值。

(3) 极差

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (\tau = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

(4) 标准差

$$S(\tau) = \left(\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [\xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau}]^2 \right)^{1/2} \quad (\tau = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

(5) 引入无量纲比值 R/S, 对 R 进行重新标度即为

$$\frac{R}{S} = \frac{\max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau)}{\left(\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [\xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau}]^2 \right)^{1/2}} \quad (5)$$

Mandelbrot 等人通过对尼罗河最低水位等自然事件的分析^[7], 证实了 Hurst 的研究, 并得出了更广

泛的指数律, 即

$$R/S = (\tau)^H \quad (6)$$

式中: H —— 赫斯特系数。

引入一个反映自然现象本身特性的参数 c , 于是公式(6)可改写为

$$R/S = (c\tau)^H \quad (7)$$

式中: c —— 不依赖于 H 的变量, 为自然现象的固有特性。式(7)即为修正后的赫斯特经验公式。

赫斯特系数 H 的取值范围为 $[0, 1]$, H 的取值不同, 表示的物理意义不同。当 $H = 0.5$, 标志着一个序列是随机的, 事件是随机的和不相关的, 现在不会影响未来; 当 $H > 0.5$, 为一个持续性的状态或趋势增强的序列, 若序列在前一个期间是向上(下)走的, 那么, 它在下一个期间将继续是正(负)的; 当 $0 \leq H < 0.5$, 系统是一逆状态持续性的或遍历性的时间序列, 它经常被称为“均值回复”, 即若系统在前一时期均是向上走的, 那么, 在下一期间均多半向下走, 反之亦然。这种逆状态持续性行为的强度依赖于距离零的远近。 H 愈接近零, 越成负相关性。因此 R/S 分析在时间序列中具有很强的预测预报作用。

由于一维布朗运动样本函数的赫斯特系数 H 与其分维数 D_0 之间有如下关系

$$D_0 = 2 - H \quad (8)$$

运动样本函数随着 H 的减小 D_0 增大, 其运动轨迹的平滑程度越差, 变化越激烈。可见, 赫斯特系数 H 与分布式布朗运动的分维密切相关, 它表示分布式布朗运动的持久性(或反持久性), 这从一个侧面反映了赫斯特系数的意义^[7]。

求任意的一维布朗运动样本函数的分维 D_0 时, 可先对其数据用上述方法进行 R/S 分析, 再用线性回归方法从下式中求得 H 。

$$\ln(R/S) = H \ln \tau + H \ln c \quad (9)$$

令 $\ln(R/S) = Y$, $\ln \tau = X$, 则

$$Y = HX + H \ln c \quad (10)$$

通过对 Y 和 X 进行线性回归分析, 可确定 H 和 $H \ln c$ 值。

2.2 计算结果及分析

将华县站 1956—2000 年实测径流数据, 由公式(1) — (4) 计算。渭河流域华县站实测径流的标准差和极差计算结果如表 1 所示。

表 1 渭河流域华县站实测径流的标准差和极差

τ	$S(\tau)$	$R(\tau)$	τ	$S(\tau)$	$R(\tau)$	τ	$S(\tau)$	$R(\tau)$
1	0	0	16	33.335 8	130.250 0	31	34.592 1	274.535 5
2	15.050 0	15.050 0	17	35.260 0	158.347 1	32	34.394 4	262.281 3
3	17.573 5	23.933 3	18	34.737 8	169.411 1	33	33.887 9	265.066 7
4	21.580 2	26.600 0	19	34.796 1	184.910 5	34	33.465 2	259.452 9
5	23.962 6	47.800 0	20	34.375 4	179.760 0	35	32.984 1	259.040 0
6	23.453 6	55.366 7	21	33.551 4	179.028 6	36	33.016 2	245.583 3
7	21.752 0	54.314 3	22	34.261 1	192.990 9	37	32.648 7	247.662 2
8	20.632 7	56.900 0	23	34.064 2	203.447 8	38	32.327 8	253.394 7
9	37.429 0	96.688 9	24	34.696 6	228.141 7	39	32.553 1	266.966 7
10	35.960 8	92.340 0	25	34.351 2	241.224 0	40	33.440 5	286.165 0
11	34.375 4	93.536 4	26	33.862 5	249.553 8	41	33.516 9	297.863 4
12	33.023 7	92.300 0	27	33.553 9	244.066 7	42	34.252 0	315.628 6
13	32.340 2	96.353 8	28	34.394 8	270.650 0	43	34.193 9	326.444 2
14	33.178 3	106.800 0	29	34.925 3	293.951 7	44	34.171 6	337.893 2
15	32.055 7	107.420 0	30	34.338 6	293.580 0	45	34.199 8	349.833 3

将计算所得的一系列 $\ln(R/S)$, $\ln\tau$ 值绘于直角坐标系中(如图 1 所示), 通过线性回归可得到直线的斜率和截距。

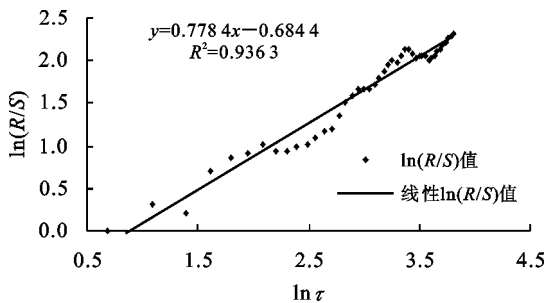


图 1 渭河流域华县站径流序列 R/S 分析结果

由图 1 得到 $\ln(R/S)$ 与 $\ln\tau$ 拟和直线的赫斯特系数 $H = 0.7784 > 0.5$ 。

样本回归方程为: $R/S = 0.4154\tau^{0.7784}$ 。根据赫斯特系数的物理意义可知, 华县水文站径流的未来趋势与过去情况成正相关, 表明渭河流域径流具有持续下降的趋势。

为了进一步分析径流序列的未来趋势, 需要知道序列的历史来水情况, 故将华县水文站实测年径流量过程线及 5 a 滑动平均曲线绘于图 2。

由图 2 实测径流序列可以看出, 在过去的 45 a, 华县站的径流量是逐渐减少的, 从而说明用 R/S 法的预测趋势与径流相关趋势是一致的。

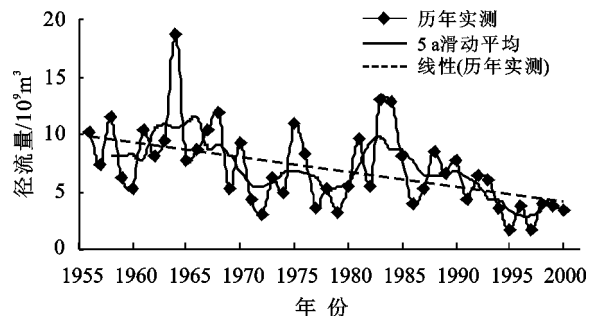


图 2 渭河流域华县实测径流序列趋势变化

3 渭河径流量减少的原因分析

河川径流主要受流域中气候和人类活动引起下垫面的影响。文献[4, 10]研究表明渭河流域径流量的减少主要是由于气候和人为活动(主要为水利水保工程的影响)因素引起的。因此, 本文亦从气候和人类活动两个因素分析其对渭河流域径流量的影响。

3.1 计算方法

采用不同系列对比法分析计算^[11], 天然径流量与同期实测径流量之间的差值即为人类活动对流域地表的影响量, 对比天然径流量与未受人类活动影响时期(作为基准期)天然径流量的差值即为气候的影响量。绘制渭河流域华县实测径流量累积曲线(如图 3 所示), 由累积曲线斜率变化可以看出渭河流域径流量发生转折变化的时间。

由图 3 华县实测径流量累积过程曲线可看出,渭河流域实测径流量在 1970 年发生了明显一致性变化。

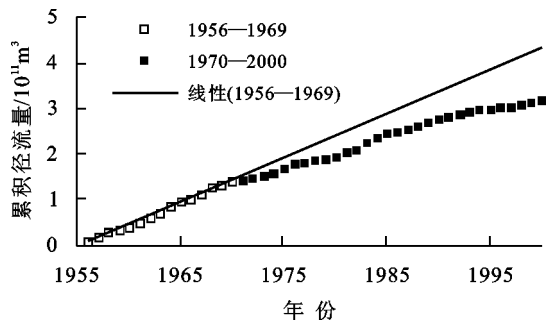


图 3 渭河流域华县站实测径流量累积曲线

因此,以 1970 年作为渭河流域治理与非治理的分界点,将华县站 1956—1969 水文年的序列称为“前期”序列,1970—2000 水文年的序列称为“后期”序列,比对前后两个水文序列,定量分析气候因素和人类活动对渭河流域径流量的影响。

3.2 计算结果分析

以 1956—1969 年径流资料作为基准期,将 1970—2000 年“后期”按照年代进行划分,划分为 20 世纪 70 年代(1970—1979),80 年代(1980—1989),90 年代(1990—2000)3 个时段,分别比较其径流量的变化,计算结果见表 2。

表 2 渭河流域各时段径流量变化的计算结果

时段	天然径流量/ ($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	实测径流量/ ($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	减少量/ ($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	气候影响		人类活动影响	
				减少量/ ($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	比例/ %	减少量/ ($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	比例/ %
1956—1969	98.4	—	—	—	—	—	—
1970—1979	77.4	59.4	39.0	21.0	53.8	18.0	46.2
1980—1989	96.2	79.1	19.3	2.2	11.4	17.1	88.6
1990—2000	62.7	43.0	55.4	35.7	64.4	19.7	35.6
1970—2000	78.8	60.5	37.9	19.6	51.7	18.3	48.3

注:①以 1956—1969 年资料为基准期;②表中华县站水文数据来源于泾渭河流域水沙变化分析(黄河水利委员会黄河水沙变化及预测分析课题组);③通过比对三门峡水文泥沙实验研究中径流数据,表明数据引用合理。

由表 2 可以看出,20 世纪 50—60 年代渭河流域华县站年均天然径流量为 $9.84 \times 10^9 \text{ m}^3$,对比基准期,70,80 和 90 年代年均径流量减少分别为 $3.90 \times 10^9 \text{ m}^3$, $1.93 \times 10^9 \text{ m}^3$, $5.54 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。其中,气候影响使径流量减少分别为 2.10×10^9 , 2.2×10^8 , $3.57 \times 10^9 \text{ m}^3$,占总减少量的 53.8%, 11.4%, 64.4%。人类活动影响使径流量减少分别为 $1.80 \times 10^9 \text{ m}^3$, $1.71 \times 10^9 \text{ m}^3$, $1.97 \times 10^9 \text{ m}^3$,占总减少量的 46.2%, 88.6%, 35.6%。

1970—2000“后期”序列年均径流量比 1956—1969“前期”径流量减少 $3.79 \times 10^9 \text{ m}^3$,1970—2000 年均径流量减少量占“后期”年均实测年均径流量的 62.6%。其中,气候因素影响和人为因素影响分别为 $1.96 \times 10^9 \text{ m}^3$, $1.83 \times 10^9 \text{ m}^3$,分别占减少量的 51.7%, 48.3%,说明以 1956—1969 年为基准期,渭河流域 1970—2000 年气候和人类活动对径流的减少影响基本各占 1/2。

徐宗学等通过对渭河流域气象要素趋势分析表明^[12],渭河流域近 40 a(20 世纪 60—90 年代)温度逐渐增加,而降水量逐渐减少,主要与大气环流的变化有关。流域降水量与径流量具有线性相关关系。由于降水量的减少,渭河流域径流量随之发生了一致性

的变化。特别是表现在 20 世纪 90 年代,气候因素使径流量年均减少 $3.57 \times 10^9 \text{ m}^3$,占总减少量的 64.4%,表明此时段气候因素对渭河流域径流量的减少作用十分明显,大大超过了人类活动对径流量减少的影响。

为了分析人类活动对渭河流域径流量的影响,可以间接从流域还原水量说明其对流域径流量的变化。根据水量平衡原理,河川天然径流量是由实测径流量与还原水量组成。还原水量受人类活动影响使水文循环发生了改变,主要包括农田灌溉、工业、城镇生活、农村生活用水、水库蓄变量等耗水量。华县水文站还原水量变化如图 4 所示。

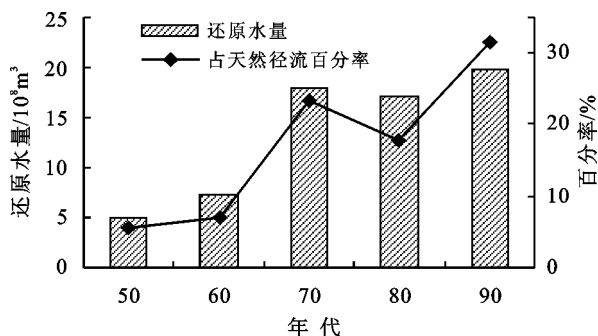


图 4 渭河流域华县站各年代还原水量变化

从图 4 可以看出,渭河流域华县站径流还原水量从 20 世纪 50 年代的 $5.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 90 年代的 $1.97 \times 10^9 \text{ m}^3$,增长了近 4 倍,而还原水量占天然径流量的百分比从 50 年代的 5.4% 增加到 90 年代的 31.5%。由于还原水量及其占天然径流量的百分比不断增加,表明人类活动对渭河流域径流量的比例影响越来越显著。自 1970 年以来,由于流域开展了大规模的水利水保工程建设,如宝鸡峡灌溉工程、交口抽渭灌溉工程、冯家山水库和石头河水库等一批大型灌区和水库的建设,人类对水资源的需求不断加大,工农业耗水量呈上升趋势,是导致渭河干流实际来水不断减少的原因。

4 结语

(1) 渭河流域华县水文站 1956—2000 年径流序列的赫斯特系数 $H = 0.778 4 > 0.5$ 。用 R/S 分析法分析的结果表明,渭河流域径流量将进一步趋向于减少趋势。

(2) 运用不同系列对比法分析渭河流域径流的结果表明,1970—2000 年“后期”渭河流域年均径流量比 1956—1969 年基准期年平均径流量减少了 $3.79 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

(3) 进入 20 世纪 90 年代渭河径流量的减少主要受气候作用的影响;自 20 世纪 70 年代以来,建设水利水保工程等对地表径流的拦蓄利用而使径流量的减少十分显著。但整个序列分析表明,气候因素和人类活动的影响对渭河径流量的影响基本各占 1/2。

(4) 由于气候和人类活动共同作用的影响,1970—2000 年,年均径流减少量占此时间序列实测年均径流量的 62.6%,渭河流域径流量减少非常明显。因此,必须高度重视极为严重的水资源缺乏这一问题,合理利用水资源,缓解渭河流域水资源的压力。

[参 考 文 献]

- [1] 中国科学院地理研究所渭河研究组. 渭河下游流域地貌 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [2] 张艳玲. 陕西省渭河流域水文特性分析 [J]. 西北水资源与水工程, 2002, 13(2): 62—64.
- [3] 刘燕, 胡安焱. 渭河流域近 50 年降水特征变化及其对水资源的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(1): 85—87.
- [4] 粟晓玲, 康绍忠, 魏晓妹, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 154—159.
- [5] 科特戈达著, 金光炎译. 随机水资源技术 [M]. 北京: 农业出版社, 1987.
- [6] Mandelbrot B B, Wallis J R. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of monocydic long term statistical dependence [J]. Water Resources Research, 1969, 5(4): 969—988.
- [7] 王孝礼, 胡宝清, 夏军. 水文时序趋势与变异点的 R/S 分析法 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(2): 10—12.
- [8] 马岚, 魏晓妹. 石羊河下游年径流序列的变异点分析 [J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 174—177.
- [9] 门宝辉, 刘昌明, 夏军, 等. R/S 分析法在南水北调西线一期工程调水河流径流趋势预测中的应用 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 568—573.
- [10] 王宏, 秦百顺, 马勇, 等. 渭河流域水土保持措施减水减沙作用分析 [J]. 人民黄河, 2001, 23(2): 18—20.
- [11] 顾文书. 黄河水沙变化及其影响的综合分析报告 [C] // 汪岗, 范昭. 黄河水沙变化研究(1 卷). 郑州: 黄河水利出版社, 2002: 1—41.
- [12] 徐宗学, 和宛琳, 王会让. 渭河流域气象时空变化特征及趋势分析 [C] // 周孝德, 沈冰主编. 水与社会经济发展的相互影响及作用: 全国第三届水问题研究学术研讨会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 125—133.