

# 黄河上游径流变化的影响因素分析研究<sup>\*</sup>

赵雪花 黄 强

西安理工大学水利水电学院, 西安 710048

**摘要** 径流的形成、变化规律受诸多因素影响, 可归结为自然因素和人为因素两类. 文中结合黄河上游兰州站年径流资料, 研究了太阳活动、海-气相互作用和下垫面对黄河上游径流变化的影响. 采用灰关联和交叉谱分析了太阳黑子相对数与径流变化的关系, 发现它们存在同位正相关关系; 通过统计规律分析了 El Niño 和 La Niña 现象发生和径流丰枯变化的关系; 并用双累积曲线法对水土保持措施影响径流变化作了定性分析. 这些结论为径流变化的物理成因分析提供了科学依据.

**关键词** 径流变化 灰关联 交叉谱 水土保持 双累积曲线

河川径流受气候、地貌、土壤、植被等自然条件以及人类活动的耦合作用, 其演变过程既表现出确定性的规律, 同时也有强烈的随机性. 径流特征的变化必然影响水资源的开发利用, 并进而影响社会经济的发展. 分析河川径流的演化过程, 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配置. 因此, 对黄河上游地区径流产生和演变规律以及径流的影响因素等进行研究, 具有现实意义. 目前, 分析降水量、温室效应等对径流变化影响等方面已进行了不少研究, 但在太阳活动、海-气相互作用以及下垫面改变对径流变化影响方面的研究还很少. 鉴于此, 本文着重研究气象和人类活动对下垫面改变等因素对径流变化的影响.

## 1 流域概况和水文特性

黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓, 海拔高程 4500 m 的约古宗列渠盆地, 流域包括青海、四川、甘肃、宁夏到内蒙古等 5 省区, 为黄河上游段. 黄河上游穿行于高山峡谷之间, 有白河、黑

河、桃河、大夏河、湟水、大通河等一级支流汇入. 在河源区及其支流黑河、白河流域地势平坦, 多为草原、沼泽、湖泊. 兰州以上是黄河流域的主要产流区, 也是黄河流域水电能源开发的富矿区, 其来水是黄河流域水资源的主要补给成分. 黄河上游兰州以上控制面积 222 551 km<sup>2</sup>, 占全流域 29.6%, 多年平均降水量为 426.2 mm, 径流量为 327.4 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 占全河 56.4%, 年径流深 147.1 mm. 属青藏高原季风区, 为干旱和半干旱地区, 由于风沙影响, 植被稀少, 只有少数耐寒、抗旱、耐盐碱的植物. 该区域地面高程相差悬殊, 致使区域内年平均气温变化复杂, 在 -4.0 (玛多) ~ 9.3 °C (兰州) 之间, 因其平均海拔高程远高于其他地区, 故该区域年平均气温是流域内低值区. 近几年兰州以上被西太平洋副热带高压势力范围所控制, 故盛夏以干旱少雨为主; 1987 年以后, 青藏高原高度场较常年明显偏高, 促使副高进一步西伸北抬, 必然导致兰州以上多干旱少雨天气. 太阳活动异常变化对大气环流影响十分显著, 20 世纪 90 年代开始 ENSO 事件发生周期大为缩短并且持续时间延长, 致使黄河径流偏枯<sup>[1]</sup>.

2003-07-14 收稿, 2003-12-08 收修改稿

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 50079021)和陕西省重点实验室(编号: 02JS37)资助项目

## 2 径流变化分析

本研究采用兰州站 1920 ~ 1998 年径流系列, 包括足够的丰、平、枯水年及其组合, 资料精度较高, 具有很好的代表性.

表 1 兰州站不同年代天然年径流量对比<sup>a)</sup>

(单位:  $\times 10^8 \text{ m}^3$ )

时段 / 年	20~29	30~39	40~49	50~59	60~69	70~79	80~89	90~98	20~87	88~98	20~98
平均值	268.6	319.5	350.2	323.6	369.9	334.9	368.1	279.2	2332.0	298.7	327.4
距平 / %	17.9	-2.4	6.9	-1.2	12.9	2.3	12.4	-14.7	1.4	-8.8	0.0

a) 表中年代省去前两位, 如 20~29 为 1920~1929 年, 下同

由表 1 可以看出, 20 年代和 90 年代为枯水年, 较多年平均值分别偏少了 17.9% 和 14.7%, 60 年代和 80 年代为丰水年, 较多年平均值分别偏多了 12.9% 和 12.4%, 其余年代为平水年, 基本持平. 近 11 a (1988 ~ 1998) 与常年 (1920 ~ 1987) 相比, 平均年径流量减少了  $33.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 相对减少了 10%.

## 3 成因分析

引起径流形成、变化的原因是多方面的, 可归为两类: 一是自然因素, 主要指气候变化; 另一类是人为因素, 主要是人类活动的影响. 由于径流序列变化主要包括周期变化、趋势变化和随机变化, 其中周期变化主要受太阳黑子活动和海-气相互作用的影响, 趋势变化主要受全球变化的影响, 而随机变化则主要受偶然事件的影响. 同时这 3 种变化还受下垫面因素的影响. 所以应考虑黄河上游下垫面变化 (如水土保持等因素) 对径流变化的影响.

### 3.1 全球变化对径流的影响

因为全球变化对径流的影响主要表现在径流趋势变化, 故首先对径流序列的趋势性成分进行检验. 检验方法主要有 Kendall 秩次相关检验法、Spearman 秩次相关检验法、线性趋势的回归检验法、滑动平均检验法等.

本文采用 Kendall 秩次相关检验法<sup>[2]</sup>.  $P$  为  $x_1, x_2, \dots, x_n$  序列中对偶值 ( $x_i, x_j, j > i$ )  $x_i < x_j$  的出现个数,  $n$  为样本容量, 此检验的统计量为:

$$U = \frac{\tau}{[Var(\tau)]^{1/2}}, \quad (1)$$

$$\text{式中 } \tau = \frac{4P}{n(n-1)} - 1; \quad Var(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}.$$

给定显著水平  $\alpha$  (在假设检验中, 小概率  $\alpha$  通常称为显著性水平), 当  $|U| < U_{\alpha/2}$  时, 接受原假设, 趋势不显著; 当  $|U| \geq U_{\alpha/2}$  时, 拒绝原假设, 趋势显著. 从查表, 可得  $U_{0.05/2} = 1.96, U_{0.01/2} = 2.33$ . 由 (1) 式计算得兰州站年径流量的  $U = 1.85$ , 说明其径流趋势成分不显著. 由于径流趋势成分主要受全球变化的影响, 从而说明全球变化对兰州站年径流量影响不太大.

### 3.2 太阳黑子活动对径流的影响

采用文献 [3] 的谱分析方法对太阳黑子相对数和黄河上游径流序列进行功率谱计算, 发现两者均存在周期性变化. 为了明确两者的关系, 首先对兰州站天然年径流与太阳黑子相对数进行灰关联分析<sup>[4]</sup>, 把年径流量作为母序列  $x_0(t)$ , 太阳黑子相对数作为子序列  $x_1(t)$ , 对  $x_0(t)$  和  $x_1(t)$  进行无量纲处理, 并记它们在  $t$  时刻的绝对误差为:

$$\Delta(t) = |x_0(t) - x_1(t)|, \quad t = 1, 2, \dots, n \text{ (下同)}, \quad (2)$$

$$\text{最小差为: } \Delta_{\min} = \min |x_0(t) - x_1(t)|, \quad (3)$$

$$\text{最大差为: } \Delta_{\max} = \max |x_0(t) - x_1(t)|, \quad (4)$$

$$\text{那么关联系数为: } \xi(t) = \frac{\Delta_{\min} + 0.5\Delta_{\max}}{\Delta(t) + 0.5\Delta_{\max}}, \quad (5)$$

$$\text{由此可得灰关联度: } r = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \xi(t). \quad (6)$$

联立 (2) ~ (6) 式计算得兰州站年径流量和太阳黑子相对数的灰关联度  $r = 0.5466$ , 说明两序列相关程度高, 下面利用交叉谱对两序列进行互相关分析, 进一步探讨年径流量和太阳活动在周期性变化方面的联系.

为了消除随机变化和趋势变化的影响, 首先对资料  $x_0(t)$  和  $x_1(t)$  中心化处理, 然后再进行谱分析. 本次计算取最大时延  $m = 10$ , 先对协谱和正交谱粗谱估计:

$$P_{01}(k) = \frac{1}{m} \left\{ r_{01}(0) + \sum_{\tau=1}^m [r_{01}(\tau) + r_{10}(\tau)] \right\}.$$

$$\left. \cos \frac{k\pi}{m} \tau + r_{01}(m) \cos k\pi \right\}, \quad (7)$$

$$Q_{01}(k) = \frac{1}{m} \sum_{\tau=1}^m \left[ r_{01}(\tau) - r_{10}(\tau) \right] \cdot \sin \frac{k\pi}{m} \tau, \quad k = 0, 1, \dots, m. \quad (8)$$

其中  $r_{01}$  和  $r_{10}$  为交叉相关函数, 利用 Hamming 窗平滑分别计算  $P_{01}(k)$  和  $Q_{01}(k)$  的精细估计值  $P_{01}(k)$  和  $Q_{01}(k)$ , 然后分别计算位相谱  $\theta_{01}(k)$ 、波幅谱  $A_{01}(k)$ 、凝聚谱  $R_{01}(k)$  和落后长度谱  $L_{01}(k)$ :

$$\theta_{01}(k) = \arctg \frac{Q_{01}(k)}{P_{01}(k)}, \quad (9)$$

$$A_{01}(k) = \sqrt{P_{01}^2(k) + Q_{01}^2(k)}, \quad (10)$$

$$R_{01}(k) = \frac{\sqrt{P_{01}^2(k) + Q_{01}^2(k)}}{\sqrt{P_{00}(k) \cdot P_{11}(k)}}, \quad (11)$$

$$L_{01}(k) = \frac{\theta_{01}(k) \cdot T(k)}{2\pi}. \quad (12)$$

式中  $P_{00}(k)$  和  $P_{11}(k)$  分别为年径流量和太阳黑子相对数自功率谱的精细估计值。

计算结果表明: 从协谱的表现中可以看出, 年径流量和太阳黑子相对数在绝大部分周期段存在同位正相关关系; 对于不同周期上两序列的密切关系可通过凝聚谱看到, 信度为 95% 的凝聚检验临界值  $R_c=0.22$ , 由图 1 可见 6.7~20 a ( $k=2\sim3$ ) 周期段的凝聚谱大于  $R_c$ , 表明 6.7~20 a 的凝聚是显著的. 最大值出现在 10 a 周期, 从而说明在 10 a 周期有十分密切的关系。

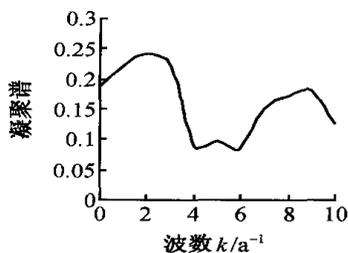


图 1 两序列的凝聚谱

由图 2 可见, 较强信号集中在波数 0~3 的主峰谱段, 其中最大峰值为  $k=2$  (周期  $T=2m/k=10$ ). 在此点落后长度谱  $L(2)=0.328$ , 说明太阳黑子相对数的波动比径流变化的波动落后 0.328 a, 这与太阳活动有 11 a 主周期<sup>[5]</sup> 相吻合; 在 2.85 a 的振动关系中,  $L(7)=-0.118$ , 表明径流变化的波动比太阳黑子相对数的波动落后 0.118 a, 这与兰州站年径流序列有 3 a 周期相应<sup>[1]</sup>.

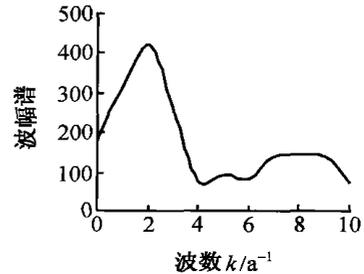


图 2 两序列的波幅谱

### 3.3 ENSO 循环对径流的影响

黄河上游径流的动态变化很大程度上取决于青藏高原气候波动的自然过程, 且这一过程随地气之间、海气之间的能量交换而不断变化. 有关研究表明, 低纬度大气各种尺度的运动都受到海气相互作用过程的影响, 赤道东太平洋区域海温 SST 异常分布通过 Walker 环流和 Hadley 环流的相互消长进一步影响到中纬度的环流与天气<sup>[1]</sup>. 由于 El Niño 的机理很复杂, 直到目前还无法较准确的预报 El Niño 事件发生的时间、强度和持续的时间. 因此, 在分析海洋与大气、海洋与陆地相互作用的同时<sup>[6]</sup>, 利用统计规律来分析黄河上游径流对 ENSO 循环的响应不失为有效方法之一. 首先, 对黄河上游兰州站 1920 年以来的年平均流量序列的丰枯按径流模比系数  $k_p$  分为 5 个等级: 特枯、偏枯、平水、偏丰、特丰. 并将与其对应的 El Niño 事件和 La Niña 事件<sup>[7]</sup> 共同列于表 2, 3.

当 El Niño 事件和 La Niña 事件发生时, 当年和次年径流出现状态(可归纳为丰、平、枯 3 种)概率  $P_{ij}$  为:

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_{j=1}^3 N_{ij}}, \quad (13)$$

式中:  $i=1, 2$  表示 El Niño 和 La Niña 事件发生两种情况,  $j=1, 2, 3$  指事件发生后径流出现的 3 种状态,  $N_{ij}$  为  $i$  事件发生时, 径流出现  $j$  状态的次数, 且  $\sum_{j=1}^3 P_{ij} = 1$ .

表 2 El Niño 现象发生年及次年黄河上游(兰州站)年径流  $k_p$

事件	当年 $k_p$	等级	次年 $k_p$	等级	事件	当年 $k_p$	等级	次年 $k_p$	等级
1923	0.88	偏枯	0.65	特枯	1963	1.16	偏丰	1.39	特丰
1925	0.92	平水	0.70	特枯	1965	0.9	偏枯	1.08	平水
1926	0.70	特枯	0.86	偏枯	1969	0.78	偏枯	0.85	偏枯
1929	0.73	特枯	0.77	偏枯	1972	0.94	平水	0.91	偏枯
1930	0.77	偏枯	0.71	特枯	1976	1.35	特丰	0.87	偏枯
1939	0.96	平水	1.28	偏丰	1982	1.15	偏丰	1.36	特丰
1940	1.28	偏丰	0.77	偏枯	1986	0.998	平水	0.87	偏枯
1941	0.77	偏枯	0.76	偏枯	1991	0.72	特枯	1.01	平水
1944	0.93	平水	1.14	偏丰	1992	1.01	平水	1.03	平水
1945	1.14	偏丰	1.36	特丰	1993	1.03	平水	0.83	偏枯
1948	0.97	平水	1.23	偏丰	1994	0.83	偏枯	0.81	偏枯
1951	1.18	平水	0.96	平水	1995	0.81	偏枯	0.76	偏枯
1953	0.89	偏枯	0.97	平水	1997	0.73	特枯	0.87	偏枯
1957	0.82	偏枯	1.09	偏丰	1998	0.87	偏枯		

表 3 La Niña 现象发生年及次年黄河上游(兰州站)年径流  $k_p$

事件	当年 $k_p$	等级	次年 $k_p$	等级
1921	1.06	平水	0.82	偏枯
1924	0.65	特枯	0.92	平水
1937	1.12	偏丰	1.23	偏丰
1942	0.76	偏枯	1.22	偏丰
1949	1.23	偏丰	0.99	平水
1954	0.97	平水	1.30	偏丰
1955	1.30	偏丰	0.73	特枯
1964	1.39	特丰	0.90	偏枯
1967	1.62	特丰	1.32	特丰
1970	0.85	偏枯	0.92	平水
1973	0.91	偏枯	0.90	偏枯
1975	1.35	特丰	1.35	特丰
1988	0.88	偏枯	1.48	特丰

结合表 2 统计分析可得, 1920~1998 年中有 28 a 发生 El Niño 事件. 在这 28 a 中, 有 14 a 黄河上游(兰州站)径流为特枯年或偏枯年, 出现的概率为 50%; 有 9 a 为平水年, 出现的概率为 32%; 有 5 a 为特丰年或偏丰年, 出现的概率为 18%. 在 El Niño 事件出现的次年, 同样有 15 a 黄河上游(兰州站)径流为特枯年或偏枯年, 出现的概率为 56%;

有 5 a 为平水年, 出现的概率为 18%; 有 7 a 为特丰年或偏丰年, 出现的概率为 26%. 此外, El Niño 持续时间愈长, 径流愈偏枯. 由此可见, 黄河上游在 El Niño 年和 El Niño 年的次年, 出现枯水的概率较大, 占 50% 以上.

通过表 3 由(13)式计算得, 自 1920~1998 年里 有 13 个 La Niña 年, 其中, 有 6 a 黄河上游径流为特丰年或偏丰年, 概率为 46%; 有 2 a 为平水年, 概率为 15%; 有 5 a 为特枯年或偏枯年, 出现的概率为 39%. 在 La Niña 年的次年, 有 6 a 黄河上游(兰州站)径流为特丰年或偏丰年, 概率为 46%; 有 3 a 为平水年, 概率为 23%; 有 4 a 为特枯年或偏枯年, 出现的概率为 31%. 总之, La Niña 事件出现的年份和次年, 黄河上游出现丰水的概率大于枯水和平水的概率. 值得特别一提的是, 自 1950~1998 年以来, La Niña 事件发生时伴随着黄河上游发大水的概率相当高, 8 次比较大的洪水中, 除 1981 年 9 月大水外, 其他 7 次(如 1949, 1955, 1964, 1967, 1975, 1989 和 1998 年)都与 La Niña 事件相关联.

### 3.4 水土保持对径流变化的影响

人类活动对水文过程的影响, 集中表现在对下垫面的改变上. 下垫面条件发生改变, 水文过程各环节也相应发生变化, 如蒸发、入渗、产流的量会加大或减小, 水循环的路径和速率也会发生变化. 而水土保持是一项长期的、十分广泛的人类活动, 其主要效应是蓄水保土, 增加降水的有效利用, 从而改变流域产汇流条件, 使年径流受到影响. 黄河是世界上泥沙最大的一条大河, 水土流失问题严重. 自 60 年代以来, 黄河流域进行了水土保持治理工作. 在生物措施和工程措施结合之下, 产生了明显的保土蓄水效果, 对改善农民生产、生活条件, 发展当地经济, 改变自然生态环境, 都产生了良好的作用. 但是, 水土保持措施在减少流入黄河泥沙的同时, 也产生了显著的藏水效应, 减少了入黄水量.

水保对降水量影响不太大<sup>[1]</sup>, 大部分降水转化为土壤水和地下水, 消耗于无效蒸发, 水土保持利用的水量主要是将土壤水的无效蒸发转换为植物的有效蒸腾. 这部分水不消耗河川径流, 另一部分是小型农

田水利水保措施, 拦减一部分河川径流用于农业灌溉, 已计入农业用水. 第三部分是修建淤地坝、梯田、植树种草等水保措施, 需利用一部分河川径流. 水土保持减少河川径流是指这部分用水, 无法直接测量到. 所以水文法计算水土保持措施对径流的影响有一定局限性, 而水保法是根据径流小区的试验资料进行估算, 从小区到大区存在指标综合和转化的问题, 小区域范围水保措施对径流的影响作用可能比较明显, 在大区域范围内, 水保措施对径流的影响作用却不明显<sup>[8]</sup>. 故本次采用双累积曲线法来分析水保措施对径流变化的影响<sup>[9]</sup>. 根据黄河上游 1954~1997 年降雨和径流资料, 经回归分析求得水土保持前后累积雨量和累积径流量的线性相关方程分别为:

$$\text{治理前: } \Sigma W = 0.8006 \Sigma P - 70.2, \quad (14)$$

$$\text{治理后: } \Sigma W = 0.7506 \Sigma P + 118.02. \quad (15)$$

(14)式的相关系数  $r = 0.9994$ , (15)式的相关系数  $r = 0.9995$ , 由此可见治理前后的曲线斜率发生转折, 说明水保措施影响了流域下垫面的产流水平. 由图 3 可以看出, 从 20 世纪 60 年代开始径流量因采取水土保持措施而减少, 尤其是 70, 80 年代以来两曲线偏离程度逐渐增大, 说明水保措施对径流的影响也逐渐增大, 而实际上在 70, 80 年代对黄河上游进行了大规模的综合治理. 故该结论和流域内水土保持措施实施的情况基本吻合.

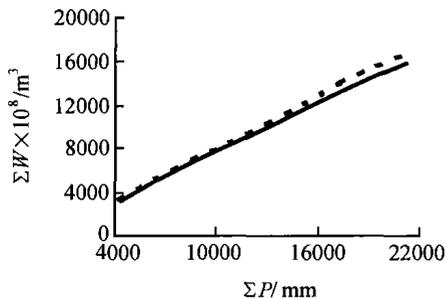


图 3 年降雨量和年径流量双累积曲线图  
——水土保持后; ----水土保持前

## 4 讨论与小结

(1) 利用 Kendall 秩次相关检验法对黄河上游年径流序列进行趋势分析, 发现径流趋势成分不显著, 从而说明全球变化对年径流量影响不太大.

(2) 通过灰关联分析, 表明太阳黑子相对数和径流变化关系密切, 利用交叉谱分析, 得出两者在不同频率上相位关系及落后和超前的波动关系. 结果表明两者存在较好的同位正相关关系, 即相对数偏多, 径流偏丰; 反之亦然. 太阳活动对黄河上游径流的影响是一个十分复杂的物理过程. 本文只是揭示了其中的一些统计事实, 分析了两者联系的一个侧面. 因此, 要真正搞清楚影响过程的物理含义, 还有待于多学科合作, 进一步作深入的研究.

(3) 通过统计分析表明, 海气相互作用对黄河上游径流变化有一定的影响. 当 El Niño 事件发生时, 当年和次年径流枯水概率都在 50% 以上; 当 La Niña 事件发生时, 当年和次年径流丰水概率都在 50% 以上, 并且 La Niña 事件发生时, 黄河上游发大水的概率也相当高, 50 年代以来, 此概率为 7/8.

(4) 由于水文事件的随机性和不确定性、水利水保措施的多样性及地面物质结构的复杂性, 如何分析计算水土保持措施对径流的影响作用目前仍是一个争论较大的问题, 计算方法虽然多种多样, 但比较成熟的方法还没有, 鉴于此, 只能作宏观、定性的分析. 因此寻求合理可信的计算方法仍是目前水文与水土保持合作研究的一个重要课题.

## 参 考 文 献

- 1 朱晓原, 等. 黄河水资源变化研究. 郑州: 黄河水利出版社, 1999. 1~48
- 2 丁 晶, 等. 随机水文学. 成都: 成都科技大学出版社, 1988. 64~92
- 3 黄忠恕. 波谱分析方法及其在水文气象学中的应用. 北京: 气象出版社, 1983. 65~79
- 4 邓聚龙. 灰色系统基本方法. 武昌: 华中理工大学出版社, 1987. 17~31
- 5 张元东, 等. 太阳黑子. 北京: 中国华侨出版公司, 1989. 106~116
- 6 Eugene Z S. et al. Ecosystem evaluation climate change and water resources planning. *Climate Change*, 1997, 37(1): 103
- 7 王绍武, 等. 近百年来 ENSO 事件及其强度. *气象*, 1999, 25(1): 9
- 8 Chiew F H S. et al. Simulation of impacts of climate change on runoff and soil moisture in Australian catchments. *Journal of Hydrology*, 1995, 167(2): 121
- 9 骆向新, 等. 关于水土保持措施减水减沙效益分析方法探讨. *人民黄河*, 1995, 17(11): 34