来水来沙对潼关高程的影响及变化规律

吴保生　王光谦　王兆印　夏军强

(清华大学水利系，北京 100084. E-mail: baosheng@tsinghua.edu.cn)

摘要　研究了来水来沙变化对潼关高程的影响和变化规律. 结果发现，潼关高程的升降取决于库区水流能量的大小，汛末潼关高程与考虑前期水流和运用条件的线性叠加水流能量之间具有较好的相关关系. 在入库水量变化小、坝前水位变化大时，水位对库区冲淤和潼关高程变化起主要作用；相反，如果坝前水位变化不大，而来水量变幅较大，则潼关高程变化和库区的泥沙冲淤主要受入库水沙条件的影响.

关键词　三门峡水库　潼关高程　渭河下游　水沙变化

渭河是黄河的第一大支流，在潼关附近入黄河. 三门峡水库修建后，潼关和渭河下游都处于水库回水范围. 水库自 1960 年蓄水运用后，导致潼关和渭河下游河道迅速淤积抬高. 20 世纪 60 年代大坝经过两次改建，1974 年以来水库又采用了蓄清排浑运用方式，但由于近年来入库水沙条件发生了很大变化，使得作为渭河下游侵蚀基准面的潼关高程(相应 1000 m^3/s水位)1995 年以来一直维持在 328 m以上，居高不下，对渭河下游的防洪排涝带来不利的影响，成为人们关注的焦点问题 [1~3)]. 关于影响潼关高程的因素过去已有大量研究[1~9]，但由于潼关河段受来水来沙、水库运用及其上下游河段冲淤的影响，河床演变规律十分复杂，很难区分各个因素对潼关高程的影响程度.

为了降低和控制潼关高程，消除水库运用对渭河下游的不利影响，适当调整水库运行方式势在必行. 但改变水库存的运行方式，涉及社会、经济以及生态环境诸多方面的因素，必须采取慎重的态度，全面考虑. 一种观点认为，潼关高程抬升的原因主要是水库高水位运用造成的，水沙变化是次要矛盾，只要改变水库运用方式，降低坝前水位，潼关高程就能够降下来. 另一种观点则认为，目前潼关高程居高不下的原因主要是水沙变化造成的，近年来的水库运用对潼关高程没有影响. 总的来说，三门峡水库目前遇到的问题，即有自然的因素，又有管理方面的原因. 从技术层面上讲，必须分析潼关高程变化的基本规律，研究入库水沙条件变化和水库运用方式对潼关高程的升降变化各有多大影响，必须回答通过改变水库运用方式能否达到降低潼关高程的目的.

根据河床演变学的基本原理，河流特性取决于流域的来水来沙条件. 但对于水库而言则有所不同，由于水库对坝前水位和下泄流量的控制，使得在一定的时期和范围内，水沙对库区河床演变的作用大大减弱，特别是在水库运用初期，坝前水位的控制作用处于主导地位. 但随着淤积发展，库区的泥沙冲淤逐渐达到平衡，库区表现出一定的河道特性，此时，入库水沙条件又成为影响河道冲淤演变的主要因素之一. 因此，本文将从河床演变学的基本原理出发，通过大量实测资料的分析，研究水沙变化变化对潼关高程的作用，特别是水库蓄清排浑运用以来，潼关高程随水沙条件的变化规律，为制定合理的水库运用方式，降低和控制潼关高程提供科学的参考依据.

1　水库不同运用时期的潼关高程变化

三门峡水库自投入运用以来，随着大坝的改建和增建，水库运用方式不断调整，按运用特点可以分为 3 个时期，即蓄水拦沙期、滞洪排沙期和蓄清排浑运用期[1,2]. 采用坝前平均运用水位 $\bar{Z}_d$ 来表示水库的总体运用情况，即

$$\bar{Z}_d = \sum Z_d / N, \tag{1}$$

式中 Z_d 为坝前(史家滩水位站)日平均水位(m); N 为统计时段天数. 由此得到各年非汛期、汛期及全年的水库平均运用水位，见图 1. 蓄水拦沙期水位最高；滞洪排沙期运用水位较低，至 1973 年降到了最低水位；

1) 陕西省水利厅. 三门峡水库给陕西带来的灾害及治理对策建议. 2001

2) 黄河水利委员会. 三门峡库区有关问题初步研究. 2001

3) 降低潼关高程可行性研究课题组. 关于降低潼关高程可行性的研究和建议. 2002

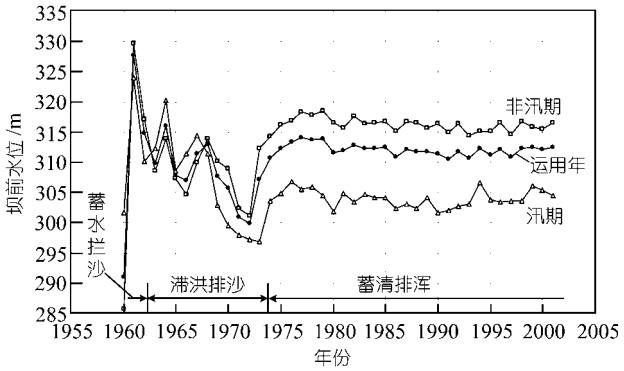

图 1 三门峡水库坝前(史家滩)特征水位历年变化过程

蓄清排浑运用期间, 1976~1979 年水位最高, 之后非汛期、汛期及运用年的平均水位略有降低, 但变化不大.

潼关距三门峡大坝 113.5 km, 位于黄河、渭河汇流区宽浅河道突然收缩进入三门峡峡谷河道的衔接处, 对上游河道具有侵蚀基准面的作用, 是衡量水库回水淤积程度的重要指标. 潼关高程的变化见图 2, 可以分为三升两降一维持共 6 个阶段.

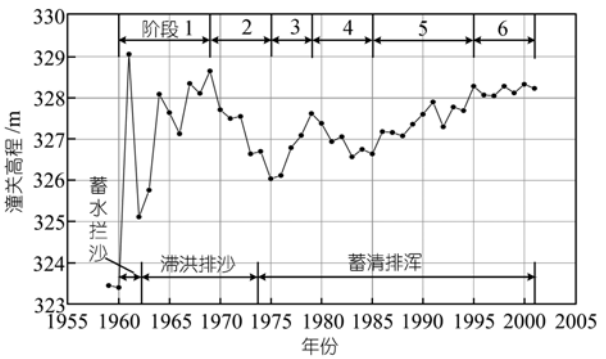

图 2 水库历年汛后潼关高程变化过程

(1) 三门峡水库 1960 年 9 月 15 日至 1962 年 3 月 19 日为蓄水拦沙期. 该时期潼关高程由 1960 年 3 月的 323.66 m 上升为 1962 年 3 月的 328.07 m, 上升 4.41 m. 这一时期潼关高程上升的主要原因是水库运用, 特别是高水位运用造成的.

(2) 1962 年 3 月至 1973 年 10 月为滞洪排沙期, 该阶段大坝经历了两期改建. 在原建规模阶段以及第一次改建阶段, 由于泄流能力不足, 当来水来沙较丰时, 尽管水库敞泄, 仍然出现严重壅水, 库区淤积严重; 当来水来沙偏枯时, 水库壅水减弱, 库区淤积减少. 在第二次改建阶段, 由于泄流能力的进一步增大, 一般洪水可以敞泄, 水库运用水位大幅度降低, 库区普遍发生冲刷, 潼关高程下降, 至 1973 年汛后, 潼关高程降为 326.64 m. 滞洪排沙时期影响潼关高程前期上升与后期下降的主要因素是水库泄流规模和来水来沙的丰枯变化.

(3) 1973 年 11 月起至今为蓄清排浑期. 水库采用蓄清排浑运用方式, 非汛期水库蓄水, 承担防凌、发电、灌溉、供水等任务; 汛期平水期控制水位 305 m 发电, 洪水期降低水位泄洪排沙. 蓄清排浑运用以来潼关高程变化的特点, 是非汛期淤积升高、汛期冲刷下降; 由于受水沙条件和水库运用条件变化的影响, 常出现连续数年的不断升高或持续下降过程; 其总的变化趋势是淤积升高的.

水库蓄清排浑运用以来, 特别是 1986 年以来, 水库运用水位并没有抬高, 但 1986 年以后潼关高程却持续抬升并居高不下. 这一结果表明, 水沙变化是造成当前潼关高程居高不下的主要原因; 同时也说明, 现有的水库运用方式难以适应新的水沙条件变化, 需要进行适当调整.

2 来水来沙条件的变化特点

随着黄河中、上游地区水资源开发利用的逐步提高, 包括流域内工农业和城市生活用水量的增加、水土保持措施减水作用的增强、干流大型水库的调节作用、以及上中游地区汛期降雨量的减少, 特别是 1986 年后龙羊峡、刘家峡水库的联合运用, 使得进入三门峡水库的水沙条件发生了很大变化. 水沙变化的特点主要表现在:

(1) 年水沙量呈减少趋势, 如图 3 所示. 据 1919~1960 年资料统计, 潼关站长期年平均来水量为 $423.29\times10^8 m^3$, 1986 年开始出现持续性的减少趋势. 1961~1985 年潼关站年平均来水量为 $406.31\times10^8 m^3$, 1986~1995 年减少为 $287.12\times10^8 m^3$, 1996~2001 年进一步减少为 $195.17\times10^8 m^3$. 潼关站 1919~1960 年的长期年平均来沙量为 $15.70\times10^{11} kg$, 持续性减少开始于 20 世纪 70 年代. 1961~1985 年潼关站年平均来沙量为 $12.41\times10^{11} kg$, 1986~1995 年减少为 $8.0\times10^{11} kg$, 1996~2001 年进一步减少为 $5.94\times10^{11} kg$.

(2) 1986 年以来汛期水量所占比例明显减小. 1961~1985 年潼关站汛期水量占年来水量的比例历年变化不大, 平均为 57.6%, 而由于龙、刘两库运用的影响, 1986~1995 年减小为 46.0%, 1996~2001 年进一步减小为 42.8%. 汛期来沙量与年来沙量的比例也有类似的减小趋势, 但减小的幅度要小于水量所占比例的减小幅度.

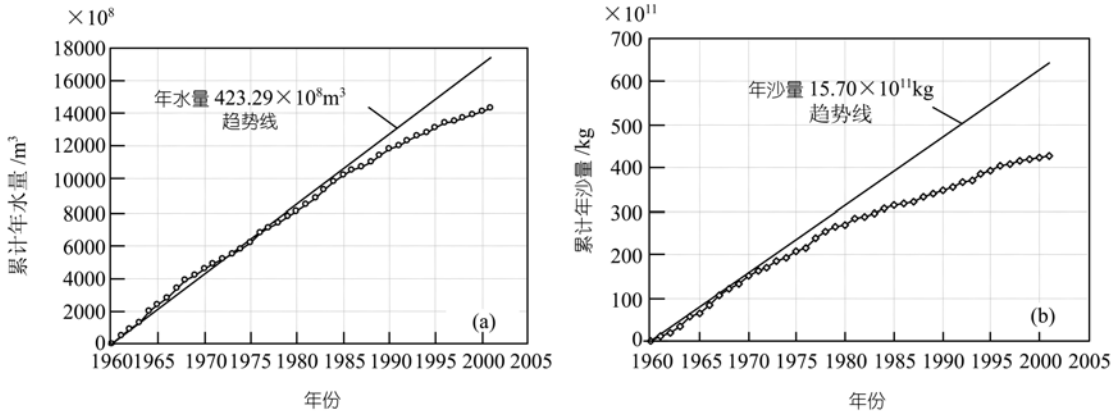

图 3 潼关站来水来沙量变化过程

(a)累计水量, (b)累计沙量

(3) 洪水发生次数、洪峰流量及洪峰水量减少. 各级洪水流量出现的天数随时间具有明显减少的趋势, 以 $Q_{tg}\geq 3000$ m^3/s 洪水为例, 1961~1973 年平均每年出现 35.8 d, 1974~1985 年减少为 30.9 d, 而到了 1986~2001 年急剧减少为 3.9 d. 各级洪水的水量与出现天数的减少基本相同, 对于 $Q_{tg}\geq 3000$ m^3/s 的洪水, 1961~1973 年年平均水量 123.57×10^8m^3, 1974~1985 年减少为 107.38×10^8m^3, 1986~2001 年则急剧减少为 12.57×10^8m^3. 洪峰流量和洪峰期平均流量均具有明显减少的趋势, 而平均含沙量则具有增加的趋势, 1961~1973、1974~1985、1986~2000 年不同时期的平均洪峰流量分别为 7339, 5267, 4764 m^3/s, 平均流量分别为 2849, 2149, 1782 m^3/s, 平均含沙量分别为 42.0, 68.0, 114.7 kg/m^3.

3 来水量变化对潼关高程的影响

图 4 为历年汛末潼关高程与年来水量的关系. 由图 4(a)可以看到, 自 1974 年蓄清排浑运用以来, 汛末潼关高程随水量的增加而下降, 随水量的减少而上升, 两者之间具有良好的镜像映射关系. 仔细观察 1976~1979 年的上升、1980~1985 年的下降、1986~1995 年的上升以及 1996~2001 年的居高不下, 不难发现, 所有上升时段均与相应时段年来水量的减少趋势相对应; 同样, 所有下降时段均与相应时段年来水量的增加相对应. 图 4(b)表明, 汛末潼关高程与年来水量之间具有较好的相关关系, 可表示为

$$Z_{tg}=-0.005W_{年}+328.95,\ (R^2=0.65) \qquad (2)$$

式中, Z_{tg} 为汛末潼关高程(m), $W_{年}$ 为潼关站年来水量($\times10^8$m^3).

一般来讲, 洪水的造床作用最大, 河流的河床形态主要是由洪水所塑造. 所以, 汛末潼关高程与汛期水量之间也必然具有较好的相关关系, 可表示为

$$Z_{tg}=-0.006W_{汛}+328.37,(R^2=0.62) \qquad (3)$$

式中, $W_{汛}$ 为潼关站汛期来水量($\times10^8$m^3). (2)和(3)式说明, 在目前采用的蓄清排浑运用条件下, 年来水量每增加 100×10^8m^3, 潼关高程可以降低约 0.5 m; 或者汛期来水量每增加 100×10^8m^3, 潼关高程可以降低约 0.6 m.

1973 年以前, 由于库水位变幅较大, 潼关高程与库水位具有类似的下降趋势. 1969~1973 年潼关平均年来水量 306.74 亿 m^3, 历年变化不大(见图 4(a)); 但年平均坝前水位逐年下降, 由 1969 年的 307.72 m 降为 1972 年的 299.81 m, 虽然 1973 年库水位有所回升, 但仍属较低坝前水位(见图 1). 结果, 潼关高程由 1969 年汛后的 328.65 m 降到 1973 年汛后的 326.64 m. 所以, 1969~1973 年潼关高程的降低, 与坝前水位的大幅度降低有直接关系, 而来水条件的影响处于相对次要的地位. 图 5 点绘了 1969~1973 年潼关高程的冲刷下降与汛期平均坝前水位的关系, 可以看到两者之间的关系密切.

与 1973 年以前不同, 自 1974 年蓄清排浑运用以来, 历年平均坝前水位在 310.6~314.0 m 之间变化, 多年平均为 312.09 m, 各年之间虽有变化, 但总的来说变化幅度不大. 与此同时, 年来水量的变幅较大, 最小为 158.03 亿 m^3, 最大达 538.76 亿 m^3. 结果使得库区的泥沙冲淤和潼关高程升降变化主要受入库水沙条件的影响, 而与水库运用水位的关系不大. 特别是潼关高程在阶段 5(1986.11~1995.10)的持续抬升和

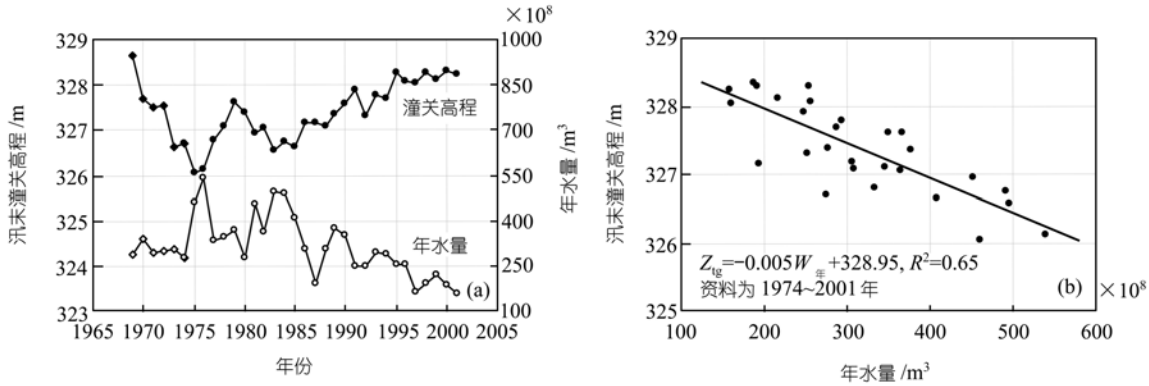

图 4 水库历年汛末潼关高程与年水量(水文年)关系

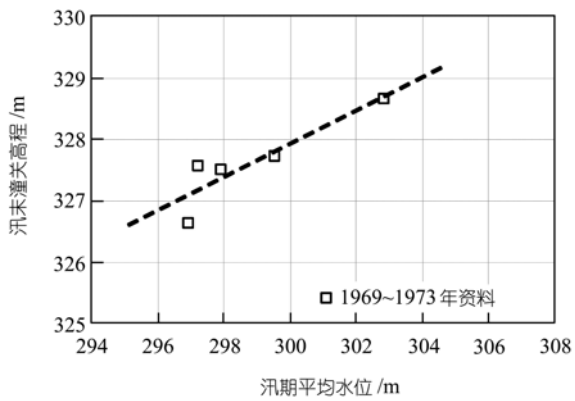

图 5 汛末潼关高程与汛期平均坝前水位关系

阶段 6(1995.11~2001.10)的居高不下，主要是由于 1986 年以来年来水量和汛期来水量急剧减少造成的.

4 潼关高程与水流能量的关系

来水来沙条件和水库运用方式是影响潼关高程的两种主要因素，共同对潼关高程的升降起着控制作用. 将根据日平均流量和日平均水位计算得到的水流功率叠加，得到如下单位河长的年水流能量计算公式:

$$E = 10^{-9}\sum \gamma \bar{Q} J_{t-s} \Delta T \tag{4}$$

式中, E 的单位为 10^9J/m, γ 为水的容重(=9800 N/m^3); $\bar{Q}$ 为日平均流量[=0.5(Q_{tg}+Q_{smx}), m^3/s]; J_{t-s} 为潼关至坝前的日平均比降[=(Z_{tg}−Z_{sjt})/ΔL, Z 的单位为 m, ΔL=113500 m]; ΔT 为时间(86400 s).

非汛期和汛期的来水来沙和水库运用条件具有明显的不同，可以分别用水流能量 $E_{非汛期}$、$E_{汛期}$表示. 非汛期和汛期 $E_{非汛期}$, $E_{汛期}$的不同，决定了非汛期末、汛期末河床边界及潼关高程的不同. 当年汛期与之前的非汛期相比，由于水流能量增加，河床冲刷，潼关高程下降；同样，当年非汛期与头年的汛期相比，由于水流能量减少，河床淤积，潼关高程上升. 非汛期、汛期水流能量的增减值可以用下式计算

$$\begin{cases} \Delta E_{非汛期} = E(当年非汛期) - E(头年汛期), \\ \Delta E_{汛期} = E(当年汛期) - E(当年非汛期), \end{cases} \tag{5}$$

图 6 点绘了潼关高程升降值与单位河长水流能量增减值的关系. 可以看到，潼关高程升降值与单位河长水流能量增减值之间具有较好的相关关系，相关系数 R^2 达 0.72，具体表达式为如下二次方程:

$$\Delta Z_{tg} = 0.049 - 0.016\Delta E - 5\times10^{-5}\Delta E^2, (R^2 = 0.72) \tag{6}$$

式中, ΔZ_{tg} 的单位为 m; ΔE 的单位为 10^9J/m.

为了反应前期水库运用水位和来水来沙条件对潼关高程的共同影响，采用如下线性叠加水流能量:

$$\tilde{E}_i = \sum_{k=1}^{i} a_k E_k, \tag{7}$$

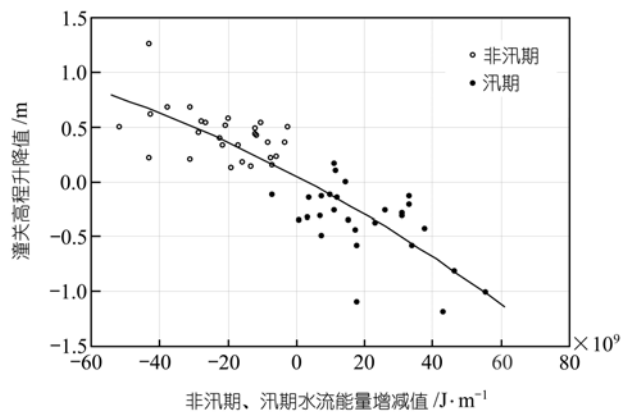

图 6 潼关高程升降值与水流能量增减值的关系 (1974~2001 年资料)

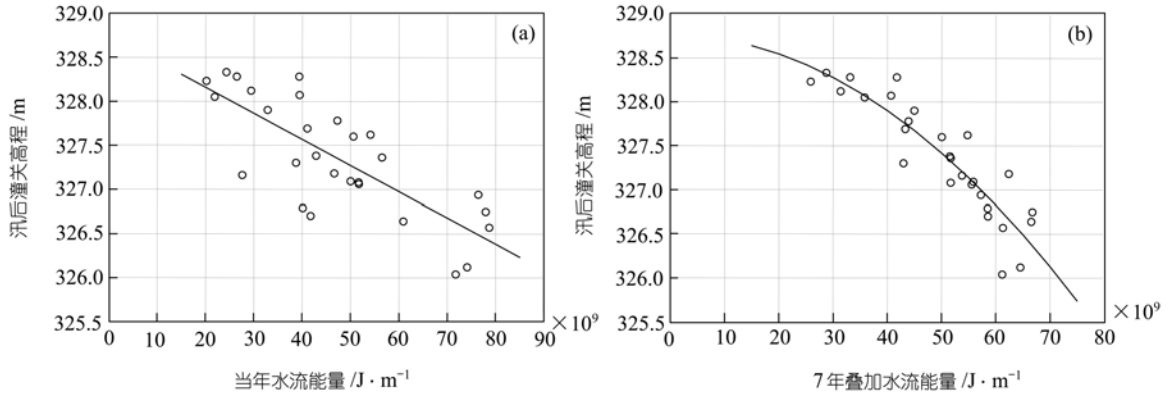

图 7　汛后潼关高程与线性叠加单位河长水流能量的关系(1974~2001 年资料)

式中, i 为总共叠加的年数; k 为从当年算起的年数,例如当年 k 为 1, 前一年 k 为 2, 前二年 k 为 3, 等等; a_k 为前期第 k 年的权重. 权重 a_k 的确定原则是, 距离当年愈远, 权重就愈小; 所有权重的合计为单位 1. 根据这一原则, 本文按如下公式确定不同年份的权重:

$$a_k = \frac{i-k+1}{N_i},\quad N_i = \sum_{j=1}^{i} j. \tag{8}$$

图 7(a)为汛后潼关高程 Z_{tg} 与当年水流能量 $\tilde{E}_1$ 的关系, 相关程度不错(R^2=0.60). 但进一步分析 1~9 年叠加水流能量发现, 采用 6~7 年的相关程度最好. 如图 7(b)所示, 采用 7 年线性叠加水流能量较仅采用当年水流能量的相关程度大幅度提高, 且 Z_{tg} 与 $\tilde{E}_7$ 的关系可以表示为:

$$Z_{tg} = 328.76 - 0.000536\tilde{E}_7^2, (R^2 = 0.82) \tag{9}$$

式中, Z_{tg} 的单位为 m; $\tilde{E}_7$ 的单位为 10^9J/m.

5　结论

本文通过对三门峡建库 40 多年来大量实测资料的分析, 研究了来水来沙条件变化对潼关的高程影响及其变化规律, 主要结论如下:

(1) 潼关高程的升降变化与能够同时反映来水条件和坝前水位的水流能量之间具有较好的相关关系, 而汛末潼关高程与能够反应前期影响的线性叠加水流能量之间具有较好的相关关系, 并且相关程度随着叠加年数的增加而增加, 当采用 7 年线性叠加水流能量时相关关系最好. 所以, 潼关高程的变化取决于库区当年水流能量的大小, 同时还与前期约 6 年左右来水和坝前水位条件有关.

(2) 在入库水量变化小, 坝前水位变化大时, 水位对库区冲淤和潼关高程起主要作用, 所以, 1969~1973 年潼关高程的持续下降主要与坝前水位不断降低有关. 在入库水量变化大, 坝前水位变化小时, 水量变化对库区冲淤和潼关高程起主要作用, 所以, 1974 年以来库区的泥沙冲淤和潼关高程变化主要受入库水沙条件的影响, 而与水库运用水位的关系不大. 特别是 1986 年以来潼关高程的持续抬升和居高不下, 主要是年来水量和汛期来水量急剧减少造成的, 说明现有的水库运用方式不能够适应新的来水来沙条件, 需要进行适当的调整, 以便满足降低和控制潼关高程的要求.

致谢　本工作为国家自然科学创新研究群体科学基金项目(批准号: 50221903)和水利部潼关高程控制及三门峡水库运用方式研究项目.

参　考　文　献

1　杨庆安, 龙毓骞, 缪凤举, 主编. 黄河三门峡水利枢纽运用与研究. 郑州: 河南人民出版社, 1995
2　程龙渊, 刘栓明, 肖俊法, 等. 三门峡库区水文泥沙试验研究. 郑州: 黄河水利出版社, 1999
3　三门峡水库运用经验总结项目组. 黄河三门峡水利枢纽运用研究论文集. 郑州: 河南人民出版社, 1994
4　黄河水利委员会科技外事局, 三门峡水利枢纽管理局. 三门峡水利枢纽运用四十周年论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2001
5　陕西省三门峡库区管理局, 陕西省水利学会三管局分会. 陕西三门峡库区防洪暨治理学术研讨会论文选编. 郑州: 黄河水利出版社, 2000
6　胡春宏, 郭庆超, 陈建国. 降低潼关高程途径的研究. 中国水利水电科学研究院报, 2003, 1(1): 30~35
7　周建军, 林秉南. 从三门峡水库的运行看潼关高程的变化. 水力发电学报, 2003(3): 59~67
8　李文学, 张翠萍, 姜乃迁, 等. 潼关高程变化及其对渭河下游淤积的影响. 泥沙研究, 2003(3): 25~290

(2004-03-05 收稿, 2004-05-31 收修改稿)