

## 三门峡水库冲淤重心变化及其对潼关高程的影响\*

何娟<sup>1</sup>, 郑珊<sup>1\*\*</sup>, 吴保生<sup>2</sup>

(1: 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

(2: 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 以往关于三门峡水库的研究多关注库区年际间的冲淤变化, 而对汛期和非汛期库区冲淤分布研究较少。本文基于三门峡水库蓄清排浑运用以来 1974—2018 年实测水沙、断面及冲淤数据, 研究汛期和非汛期库区冲淤重心的迁移、冲淤速率及其对潼关高程的影响。结果表明, 蓄清排浑运用以来库区河道基本遵循汛期冲刷、非汛期淤积的演变规律。分别定义汛期最大冲刷速率和非汛期最大淤积速率发生的相邻两断面间的子河段为冲刷重心和淤积重心, 汛期冲刷重心与非汛期淤积重心出现的位置基本对应, 1974—2010 年冲淤重心由距坝约 90 km 逐渐向坝前移动, 平均下移速率约 1~2 km/a; 2010 年后冲淤重心逐渐上移, 2017 年位于坝上游约 60~70 km, 但冲淤强度明显减弱。淤积重心的位置主要受水库回水长度影响, 冲刷重心主要与汛期水流能量相关, 淤积重心位置迁移滞后于影响因子的变化约 5 年, 而冲刷重心滞后时间约 2 年。潼关高程与潼关至太安段(潼太段)比降呈反比关系, 比降越大, 潼关高程越低, 而当冲刷重心迁移至潼太段并影响其下段时, 潼太段比降增大, 利于潼关高程降低。1985 年后回水范围和冲淤重心均位于潼关以下, 潼关高程受冲淤重心影响较小。

**关键词:** 三门峡水库; 冲淤重心; 回水长度; 汛期水流能量; 潼关高程

## Changes of erosion/deposition centers in the Sanmenxia Reservoir and its influence on the riverbed elevation at Tongguan \*

He Juan<sup>1</sup>, Zheng Shan<sup>1\*\*</sup> & Wu Baosheng<sup>2</sup>

(1: *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R. China*)

(2: *State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P.R.China*)

**Abstract:** Previous studies on Sanmenxia Reservoir mostly have been focused on the interannual degradation and aggradation changes, while there were few studies on the erosion and deposition distributions of the reservoir area during flood/non flood seasons. Identifying the erosion/deposition centers (sub-reach with greatest adjustment rates during flood/non flood seasons), the migration of erosion/deposition centers in the reservoir area and their rates and influences to the changes of the riverbed elevations at Tongguan during flood/non flood seasons were analyzed based on the data of water discharges, sediment loads, and erosion/deposition volumes after the controlled releases of “storing the clear water during the non-flood seasons and discharging the turbid water during flood seasons” in the period of 1974–2018. Results showed that the reservoir was generally degraded during the flood seasons and aggraded during the non flood seasons, and the erosion/deposition centers generally migrated correspondingly. The erosion/deposition centers had migrated downstream with an average rate of about 1–2 km/a at 90 km away from the dam before 2010 and then moved upstream at 60–70 km in front of the dam in 2018 with significantly weakened erosion/deposition rates. There is a strong positive correlation between the river kilometer (RKM) of the erosion center from the dam and the 2-year exponential weighted average value of flow energy during the flood seasons. So did the RKM of the deposition center and the backwater length with 5-year exponential weighted average value. The riverbed elevations of Tongguan are negatively correlated with the bed slope of Tongguan-Tai'an Reach which means the greater the gradient, the lower the riverbed elevation of Tongguan. The channel slope of Tongguan-

\* 2022-02-21 收稿; 2022-06-16 收修改稿。

国家自然科学基金项目(U2243218, 52079095)资助。

\*\* 通信作者; E-mail: zhengs@whu.edu.cn。

Tai'an Reach increased easily and the riverbed elevation of Tongguan decreased when the erosion center was located at the downstream of the Tongguan-Tai'an Reach. When Tongguan was out of the backwater area and the erosion/deposition centers were also located below the Tongguan-Tai'an Reach after 1985. During this time, the riverbed elevations of Tongguan had been less affected by the erosion/deposition centers.

**Keywords:** Sanmenxia Reservoir; erosion/deposition centers; backwater length; flow energy during flood seasons; riverbed elevation of Tongguan

为缓解库区泥沙淤积问题,三门峡水库先后采用多种水库运用方式。1960—1961年三门峡水库蓄水拦沙运用,库水位迅速上升约37 m。1961年10月水库改用“滞洪排沙”运用,期间经过两次改建,枢纽泄流排沙能力增大,库水位下降。自1974年以来水库采用“蓄清排浑”运用,非汛期蓄水、汛期特别是洪水期降低水位泄洪排沙<sup>[1-2]</sup>。2003年水库在蓄清排浑的基础上进一步控制非汛期运用水位不超过318 m,汛期水位不超过305 m,当汛期入库流量大于1500 m<sup>3</sup>/s时敞泄排沙,称为“318控制运用”<sup>[3]</sup>。在水库运用方式不断调整的同时,入库水沙条件也发生了较大变化。1974年后潼关站水沙量整体呈减小趋势,“318控制运用”以来水量稍有增加,但沙量持续减少。2003年后入库沙量为1974—1985年来沙量的21%,其中2014—2015年来沙量低至0.62亿t。此外,潼关卡口河段对黄河小北干流和渭河下游起着局部侵蚀基准面的作用<sup>[4]</sup>,潼关高程(潼关断面1000 m<sup>3</sup>/s流量对应的水位)抬升可能引起上游河道发生溯源淤积,进而对上游河道防洪产生不利影响。

受水库运用方式调整、水沙条件变化及库区地形条件影响,三门峡水库冲淤和潼关高程变化十分复杂,以往在大量研究的基础上得到水库冲淤及潼关高程年际间变化及其滞后响应规律<sup>[3,5-10]</sup>。例如,吴保生等<sup>[5]</sup>基于三门峡水库1961—2001年的实测资料,认为在不同时段内水沙条件和水库运用起到的作用不同,蓄清排浑运用以来,水沙条件相对水库运用对降低潼关高程的作用更明显。林秀芝等<sup>[6]</sup>在分析1961—2017年间的库区冲淤变化后得出相似结论;杨五喜等<sup>[7]</sup>认为来水来沙和水库运用是导致1960—2000年潼关高程上升的直接原因,次要因素包括库区泥沙淤积和潼古段冲淤变化;李文文等<sup>[8]</sup>采用神经网络模型和滑动平均方法分析认为,潼关高程的变化与大于2500 m<sup>3</sup>/s流量的持续天数及非汛期水库高水位运用持续的时间关系密切,并且潼关高程的升降滞后于非汛期库水位变化约6年;林秀芝等<sup>[9]</sup>对比蓄清排浑运用后潼关上、下游河段的累计淤积量,发现潼关高程的变化与上游小北干流各河段的累计淤积量具有较好的正相关关系。此外,潼关高程与库区泥沙淤积量具有较好的线性关系<sup>[7,10]</sup>,Wu等<sup>[10]</sup>分析得出1969—2001年间潼关高程的变化滞后库区累计淤积量约2年( $R=0.88$ )以及河床调整滞后水沙条件变化约5~7年的规律。

以往研究多关注三门峡库区及潼关高程的年际变化,对库区季节性冲淤和潼关高程变化及冲淤量的空间分布特征研究不足。侯素珍等<sup>[11]</sup>研究表明三门峡水库蓄清排浑运用后冲淤沿程分布表现为“中间大、两边小”的特点。由于库区冲淤的空间分布与水库不同时段运用方式有关,水沙条件变化对库区季节性冲淤产生的滞后作用仍需深入研究。分析冲淤分布特征对于库区管理及潼关高程的影响,有助于确定满足水库防凌、春灌和发电的运用方案,同时控制潼关高程。因此参考库区季节性冲淤分布特征可以为不同季节水库精细化调控与运用提供建设性方案。

本文基于三门峡水库蓄清排浑运用以来1974—2018年入库水沙、库区冲淤及潼关高程实测数据,分析汛期和非汛期库区冲淤分布。其中库区冲淤数据包括黄淤1至黄淤41共33个断面间的汛期和非汛期冲淤量,断面间距范围为0.91~6.57 km,平均为3.97 km。分别定义汛期最大冲刷速率和非汛期最大淤积速率发生的子河段(相邻两断面间)为冲刷重心和淤积重心,研究冲淤重心的迁移与冲淤强度变化特征,明确季节性冲淤变化对以往水沙和水库运用条件等的滞后响应特点,探讨库区季节性冲淤的空间分布可能对潼关高程产生的影响,为三门峡水库运用方式的优化和精细控制提供科学参考。

### 1 三门峡入库水沙条件与运用水位变化

三门峡水库(图1)是黄河干流上兴建的第一座以防洪为主的大型综合水利枢纽工程,控制黄河流域面积68.84万km<sup>2</sup>,占黄河流域面积的91.5%,控制黄河来水量的89%,来沙量的98%<sup>[6]</sup>。水库上起潼关,下至三门峡大坝,全长113.5 km。

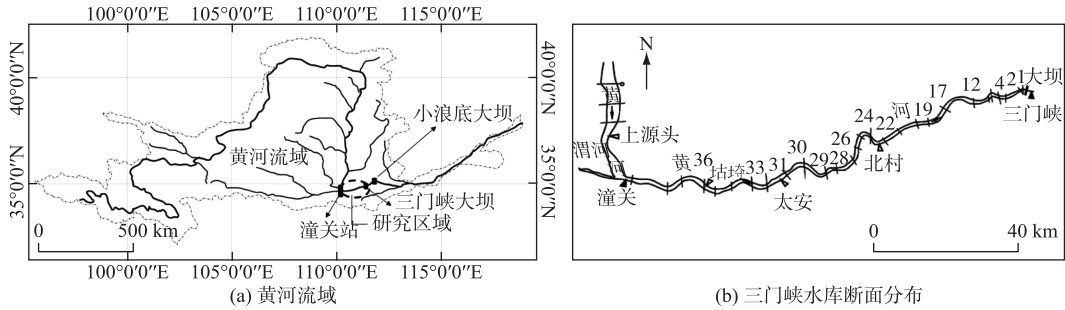


图 1 三门峡水库示意图  
Fig.1 Sanmenxia Reservoir

1974 年水库蓄清排浑运用以来水沙量如图 2a 所示,以龙羊峡、刘家峡水库开始运用和“318 控制运用”为节点,可将 1974—2018 年分为 3 个时段:1974—1985 年水库来水来沙较大,年均含沙量约 16.8 kg/m<sup>3</sup>,汛期入库水量和沙量分别占年来水来沙量的 59% 和 85%;1986—2002 年间来水来沙量比 1974—1985 年分别减少约 38% 和 32%,年均含沙量约 17.8 kg/m<sup>3</sup>,汛期入库水量占年来水量的 45%,出现非汛期入库总水量大于汛期水量的情况;2003—2018 年间来水量随时间有增加趋势,而来沙量持续减少,年均入库含沙量低至 7.1 kg/m<sup>3</sup>,利于潼关高程降低和库区减淤<sup>[11]</sup>。

由图 2b 可知,1974—2002 年间水库年平均水位和汛期平均水位分别在 312 和 304 m 附近波动,最高库水位呈明显的下降趋势。2002 年最高库水位(320.3 m)较 1974 年下降 4.5 m,“318 控制运用”后最高库水位保持在 318 m 左右(除 2012 年较高),但汛期和非汛期平均库水位有增加趋势,例如,2018 年汛期和非汛期库水位比 1974 年分别增加了 3.3 和 2.1 m,汛期增加幅度更大。

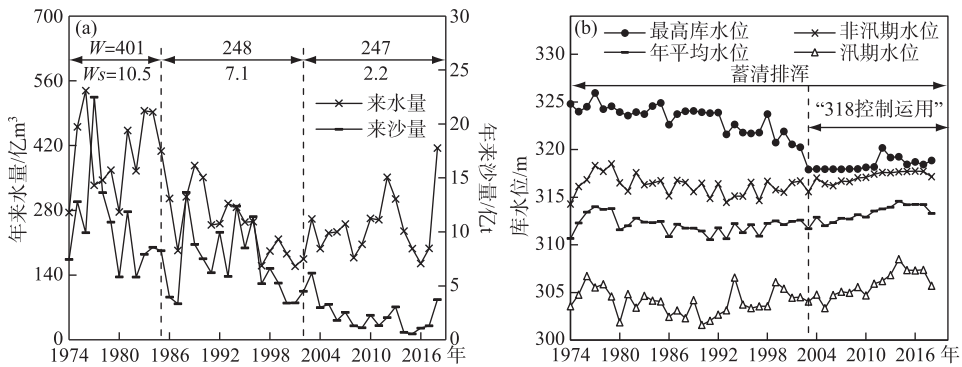


图 2 1974—2018 年潼关站水沙及库水位变化(图 a 中  $W$  和  $W_s$  分别为年均来水量和来沙量)  
Fig.2 Water and sediment conditions at Tongguan and change of pool level in 1974—2018

## 2 冲淤重心的位置与冲淤强度

如图 3 所示,“蓄清排浑”运用以来水库汛期冲刷、非汛期淤积(除 1977 枯水丰沙年<sup>[12]</sup>、2017 年汛期出现少量淤积),2003 年后水库冲淤量明显减小;通过汛前、汛后潼关高程计算得出水文年内汛期和非汛期潼关高程的变化,结果也表现出潼关高程在汛期冲刷降低、非汛期淤积抬升的规律。需要说明的是,本文收集到最近库区断面冲淤资料为 2017 年,因此水库冲淤及以下冲淤重心的分析时段均为 1974—2017 年。

为分析汛期和非汛期库区冲淤的空间分布特点,计算库区每年汛期和非汛期相邻两断面间的单位河长冲淤量,定义汛期单位河长冲刷量最大的相邻两断面间的子河段为冲刷重心,相应地,非汛期单位河长淤积

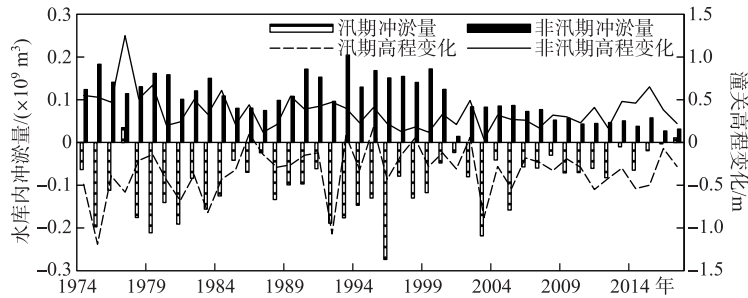


图3 汛期和非汛期水库冲淤和潼关高程变化(正值代表淤积,负值代表冲刷)

Fig.3 Seasonal change in degradation/aggradation volume in the reservoir and Tongguan elevation

量最大的子河段为淤积重心,由此得到1974年以来冲淤重心的位置及相应的冲淤强度,结果如图4所示。需要说明的是,近坝段河床易受水库短期运用产生的库水位波动影响,在分析冲淤重心位置时不考虑坝前30 km的河段。

由图4可知,虽然冲淤重心位置波动较大,但冲淤重心的位置基本对应,冲淤重心距坝里程的相关系数 $R=0.66$ 。1974—1990年冲淤重心具有较明显的下移趋势,1990—2000年冲淤重心在坝前约60 km处上下波动,2004年前后冲淤重心进一步下移,1974—2006年冲淤重心整体下移约50~60 km,平均下移速率约为1~2 km/a,2006年尤其是2010年之后冲淤重心开始上移。淤积重心下移有利于调整库区淤积形态和排沙出库,虽然2006年后冲淤重心上移,但对应的冲淤强度明显减弱,可能与来沙量大幅减少有关。考虑到冲淤重心的位置具有一定的随机性,以下研究均取冲淤重心距坝里程的2年滑动平均值作为冲淤重心的位置。

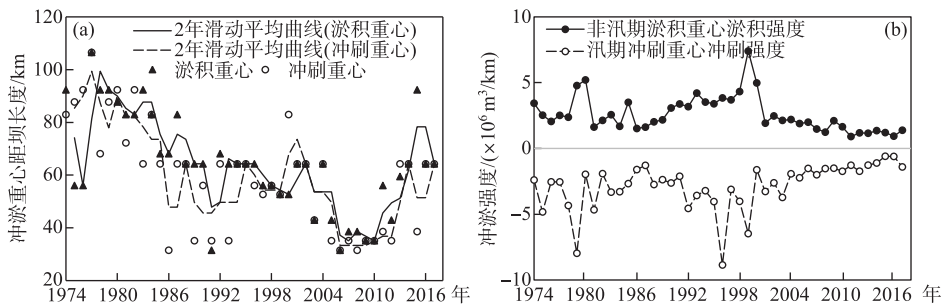


图4 冲淤重心位置及相应的冲淤强度

Fig.4 The location and the change rates at the erosion/deposition centers

根据潼关站来水来沙条件(图2a)将1974—2018年分为4个时间段(10年左右),对比不同时间段汛期和非汛期库区河道的冲淤分布(图5),图中冲淤速率为时段内所有年份汛期或非汛期冲淤速率的平均值。由图5可知,汛期冲刷重心与非汛期淤积重心的位置基本对应,1974—1985年冲淤重心距坝约90 km,1986—1995年冲淤重心下移至距坝约60~70 km,1996—2005年冲刷重心下移至距坝约50~60 km,下移速率减小,2006—2017年冲淤重心上移至距坝60~70 km,但冲淤速率明显减弱,结果与图4基本一致。

冲淤重心位置的累计变化改变库区河道冲淤体的形态,图6对比了不同时段库区河道深泓纵剖面的变化,1974—1985年间淤积主要集中在坝前10~30 km和距坝80~105 km河段,1986—1995年淤积集中在坝前0~10 km和距坝60~100 km处,淤积体具有向坝前移动和向下游延伸的变化趋势,与1984—1995年冲淤重心下移的规律(图4a)一致。1995—2002年间冲淤重心位置变化不大,泥沙淤积在空间分布较为均匀,2002年后库区以冲刷为主,2002—2006年坝前40 km的河段冲刷明显,2006—2018年冲刷河段集中在距坝50~80 km,反映了冲淤重心上移的变化特点。

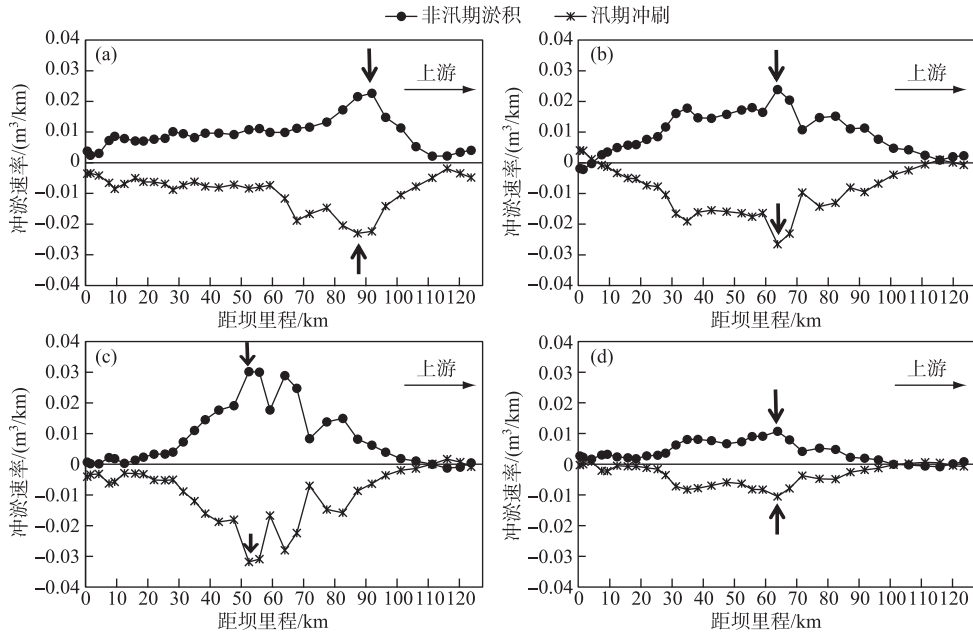


图5 不同时段相邻断面间冲淤速率沿程分布:

1974—1985年(a);1986—1995年(b);1996—2005年(c);2006—2017年(d)

Fig.5 Erosion/deposition rates between adjacent cross-sections in different time periods

### 3 冲淤重心的影响因素

#### 3.1 淤积重心位置与回水长度的关系

水库非汛期易受回水影响发生淤积,侯素珍等<sup>[11]</sup>研究表明1974年以来水库淤积范围与最高蓄水位相关性较强( $R=0.87$ )。回水长度可采用非均匀流一维数学模型<sup>[13]</sup>进行精细计算,或采用水库水深与河床比降的比值进行简化估算<sup>[14-16]</sup>,本文采用后者即式(1)估算回水长度,该方法被应用于估算黄河口河道延伸引起的回水长度<sup>[14]</sup>和波兰一水库蓄水产生的回水长度<sup>[15-16]</sup>:

$$L_b = H/S \quad (1)$$

式中, $L_b$ 为水库回水长度, $S$ 为河道纵比降, $H$ 为坝前水深,可取最高库水位和河底高程之差。根据库区黄淤1至黄淤41断面的汛前和汛后实测资料,对库区河床深泓纵剖面进行线性拟合,各拟合线的决定系数 $R^2$ 除个别年份(2018年汛前、1975年汛后)以外均高于0.9,平均 $R^2=0.95$ ,可见拟合精度较高,因此,采用其斜率代表库区河床纵比降 $S$ 。

河道比降及回水长度计算结果如图7a显示,蓄清排浑初期渭河下游在一定程度上受到水库回水的影响,但1986年后回水长度小于113.5 km,说明水库蓄清排浑运用后对渭河下游河道的影响不大。回水长度在1974—2003年明显下降,与此同时,淤积重心逐渐向坝前移动(图4a),2003—2010年回水末端在坝上游85 km附近波动,淤积重心的位置相应变化不大,2010年后水库回水长度呈增加趋势,淤积重心向坝上游迁移。计算淤积重心距坝里程与回水长度之间的相关系数和显著性值 $P$ ,两组变量间呈较强的正相关( $R=0.65$ ,图7b),且显著性检验满足 $P<0.01$ ,具有统计意义上的显著相关关系。说明回水长度越长,淤积重心距坝越远,反之亦然。

#### 3.2 冲刷重心位置与汛期水流能量的关系

蓄清排浑运用以来水库汛期冲刷,回水作用较小,库区河道受入库水沙条件影响较大。水流能量是表示河道输沙能力和造床作用的重要参数,汛期入库水流能量 $\Omega$ ( $10^5$  W/m)可用下式计算<sup>[5,17]</sup>:

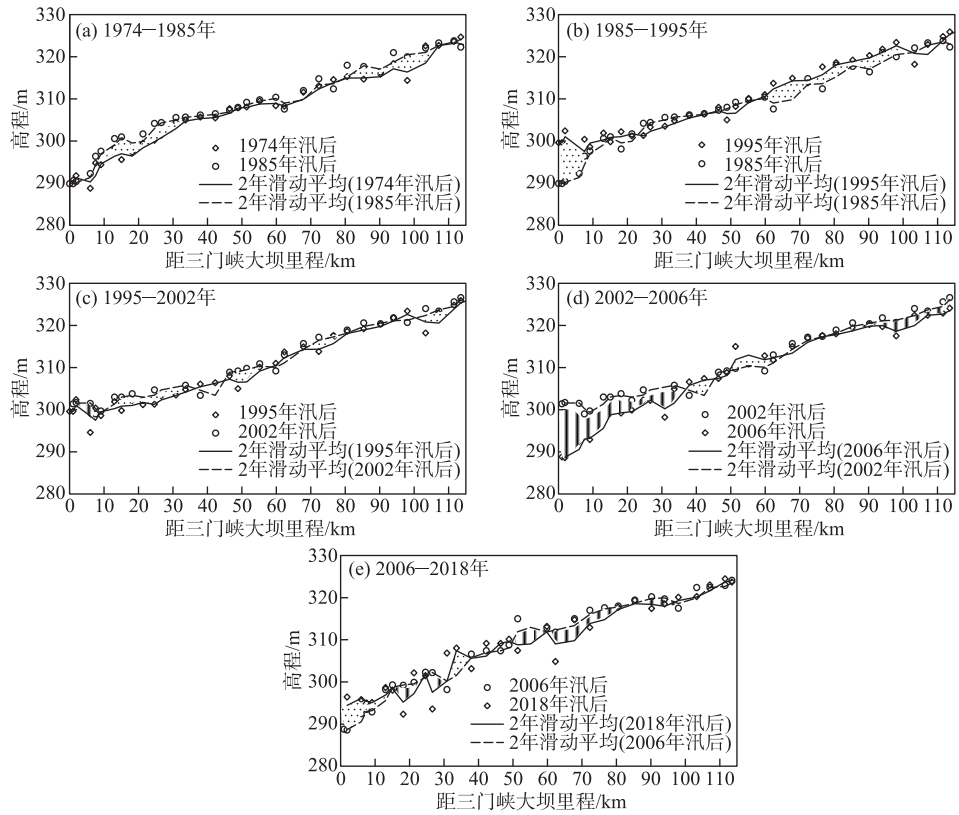


图6 三门峡水库深泓纵剖面冲淤变化(点状填充表示淤积,竖线填充表示冲刷)

Fig.6 Change in the longitudinal profile of thalweg of the Sanmenxia Reservoir

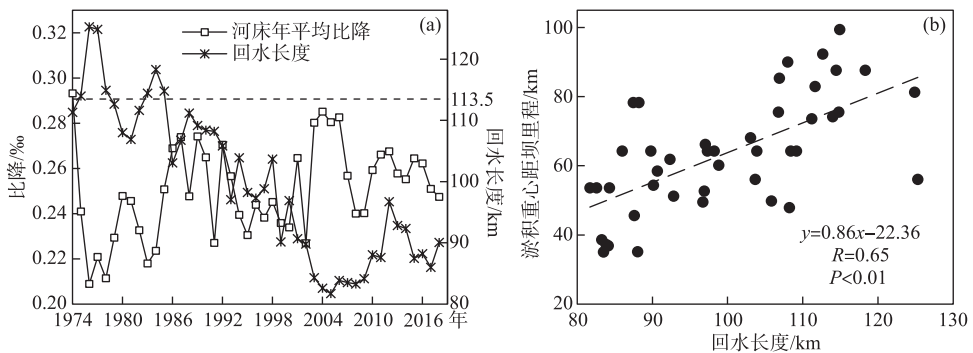


图7 回水长度与河床比降及淤积重心位置的关系

Fig.7 Relationships between backwater length and bed slope and the location of the deposition center

$$\Omega = \sum_{i=1}^N \gamma Q_i J_{t-s_i} \quad (2)$$

式中,  $\gamma$  为水的容重( $\gamma = 9800 \text{ N/m}^3$ );  $Q_i$  为潼关站汛期日流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $J_{t-s_i}$  为汛期潼关至坝前的水面比降( $J_{t-s_i} = (Z_{t_{g_i}} - Z_{s_{j_{t-s_i}}}) / \Delta L$ ,  $Z_{t_{g_i}}$  和  $Z_{s_{j_{t-s_i}}}$  分别为潼关和史家滩的汛期日水位(m),  $\Delta L$  为水库长度 113500 m);  $N$  为每年汛期时间, 7月1日-10月31日共计 123天。

汛期冲刷重心的位置与水流能量的对比及相关关系如图 8 所示,1974—2017 年冲刷重心至大坝的距离与汛期水流能量的相关系数  $R=0.51 (P<0.01)$ ,二者呈正相关,说明汛期水流能量越大,水库上段的冲刷强度相对其它河段越大,冲刷重心距坝越远。虽然汛期水流能量越大,库区河段的冲刷范围更趋向向下游延展,但最强冲刷越可能发生在库区上游。此外,汛期冲刷重心的位置还与非汛期泥沙淤积的重点部位及汛期其它条件相关,但汛期水流能量是其中影响较强的一个因子。

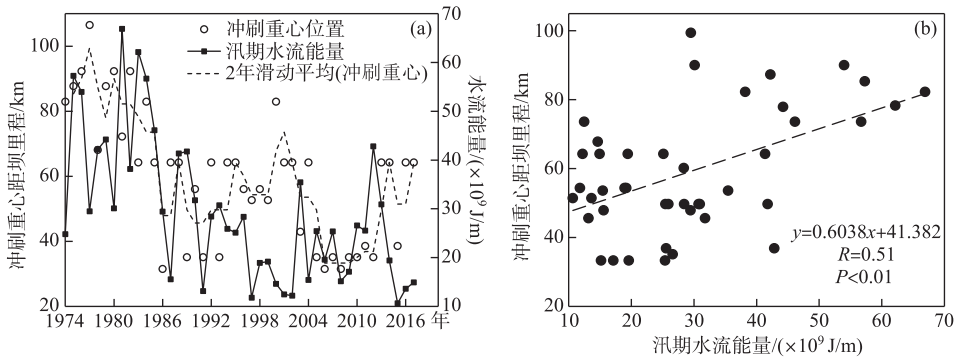


图 8 冲刷重心和汛期水流能量的关系

Fig.8 Relationship between the river kilometer from the dam to the erosion center and the flow energy during flood season

3.3 冲淤重心位置的影响因子及其滞后响应

如图 9a 所示,淤积重心的位置除了与回水长度相关外,还受其它影响因子,如非汛期入库水沙量、非汛期流量加权平均水位、上一年汛后库区河道纵比降等的影响。其中流量加权平均水位计算公式如下<sup>[3]</sup>:

$$Z_{jqt} = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^{1.5} Z_i)}{\sum_{i=1}^N Q_i^{1.5}} \tag{3}$$

式中,  $Q_i$  和  $Z_i$  分别为潼关站非汛期日流量 ( $m^3/s$ ) 和库水位 ( $m$ );  $N$  为非汛期时间,11 月 1 日至次年 6 月 30 日共计 242 或 243 天。

淤积重心距坝里程与回水长度和非汛期来水来沙量呈正相关,说明回水长度和非汛期来水量越大,壅水越严重,淤积重心距大坝距离越远,同时来沙量越大,淤积重心越靠近库区上游;淤积重心距坝里程与汛后库区河道纵比降呈负相关,说明上一年汛后库区河道纵比降越大,非汛期淤积重心越易往下游迁移、距大坝越近。

借鉴河床演变滞后响应模型的权重归一化计算模型(式(4))<sup>[2-3]</sup>计算淤积重心的影响因子的  $n$  年指数加权值:

$$y_n = \sum_{i=0}^n (\lambda_i y_{e,i}), \quad \lambda_i = \frac{1 - e^{-\beta \Delta t}}{1 - e^{-(n+1)\beta \Delta t}} e^{-(n-i)\beta \Delta t} \tag{4}$$

式中,  $y_n$  为河床演变特征量的第  $n$  年值;  $y_{e,i}$  为特征量第  $i$  年对应的平衡值;  $\lambda_i$  为第  $i$  年的影响权重,随时间呈指数衰减且  $\sum_{i=0}^n \lambda_i = 1$ 。  $\beta$  为表征特征量向其平衡值调整快慢的物理量 ( $1/T$ ),  $\beta$  越大,特征量的影响权重  $\lambda_i$  衰减越快。

参考式(4),淤积重心的影响因子考虑前期扰动的指数加权平均值  $y_{指}$  可采用下式计算:

$$y_{指} = \frac{1 - e^{-\beta}}{1 - e^{-(n+1)\beta}} \sum_{i=0}^n e^{-(n-i)\beta} y_i \tag{5}$$

式中,调整参数  $\beta$  随着水沙等条件的变化而变化,吴保生等<sup>[3]</sup>计算三门峡水库累计淤积量时分析得出  $\beta$  的变化范围为 0.15~0.75,平均值 0.38,郑珊等<sup>[2]</sup>根据实测资料通过多元回归分析得出  $\beta=0.255$ 。综合考虑本文计算  $\beta$  取 0.3。

采用式(5)计算回水长度、水位、来水来沙条件、水流能量和河床比降随时间变化对应的指数加权平均值。淤积重心和冲刷重心的位置与特征量之间的关系均体现了河床演变的滞后响应(图9)。

分析淤积重心位置与指数加权平均影响因子的相关关系,发现淤积重心距坝里程与其影响因子的相关系数随加权年数 $n$ 的增加而增加(图9a),当 $n=4\sim 5$ 时淤积重心距坝里程与影响因子的指数加权值的相关性较高,之后有所减小或变化不大,说明淤积重心的位置不仅与当前年影响因子的变化有关,而且还受前期4~5年这些因子的变化影响,反映了冲淤重心位置演变对影响因子变化的滞后响应。这一结果与以往研究认为年际间库区冲淤滞后水沙及库坝前水位变化约4~5年的结论基本一致<sup>[10,18-19]</sup>。

如图9b所示,冲刷重心距坝里程除了与汛期水流能量相关外,还与汛期来水量和汛期流量加权平均水位呈正比,与汛前河床比降呈反比,说明汛期来水量越大,上游河段冲刷强度更大,冲刷重心距离大坝越远;汛前河床比降越大,冲刷重心越靠近坝前。对冲刷重心的影响因子进行指数加权计算并分析其与冲刷重心位置的关系,发现:除汛前河床比降在 $n=5$ 时与冲刷重心距坝里程相关性较强外,其它影响因子均在 $n=2$ 左右取指数加权时与冲刷重心距坝里程的相关性最高,如冲刷重心距坝里程与汛期水流能量的2年指数加权值的相关系数 $R=0.58$ ,稍高于其与汛期水流能量当前年值的相关性。这一结果显示冲刷重心距坝里程的滞后响应时间较淤积重心短,由于水沙或者水库运用条件在短时间尺度内产生影响不同,可能使得二者滞后响应的不一致。后续需持续收集相关资料,更深入地研究三门峡库区冲淤滞后响应规律。

如图10所示,淤积重心距坝里程与5年加权平均非汛期流量加权平均水位的相关系数高于其与非汛期流量加权平均水位当前年的相关关系。此外,淤积重心距坝里程与5年加权平均回水长度的相关系数 $R=0.77$ ,相比其与回水长度当前年值的相关系数 $R=0.65$ (图7b)也有所提高。

汛期冲刷重心与非汛期淤积重心出现的位置基本对应(图4a),反映了河床初始边界条件对冲淤分布的影响。汛期及非汛期的冲淤均受到上一时段段的冲淤影响。具体来说,非汛期淤积较强的子河段存储了更多泥沙,河道局部比降增大,在汛期该子河段淤积的较细泥沙更易起动,河床冲刷较强,表现为冲刷重心,因此汛期冲刷重心和非汛期淤积重心出现的位置基本对应。图9显示淤积重心和冲刷重心分别受到前一年的汛后河床比降以及当前年汛前河床比降的影响,体现了河床初始边界条件的影响。

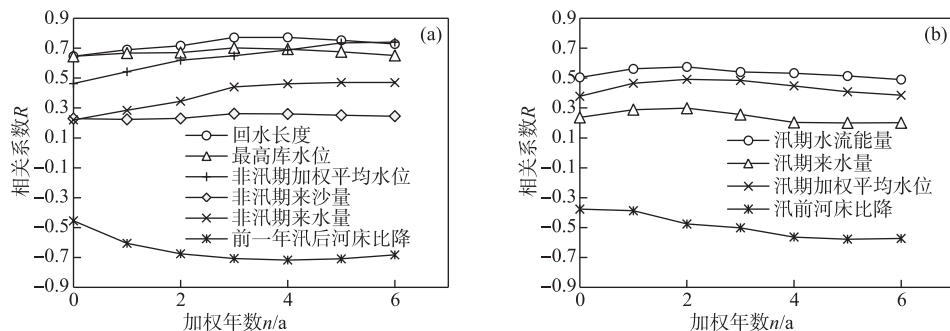


图9 冲淤重心距坝里程与各影响因子 $n$ 年指数加权平均值的相关关系:(a)淤积重心;(b)冲刷重心

Fig.9 Correlation between the river kilometer from the dam to the erosion/deposition center and the  $n$  year exponential weighted average values of impact factors

#### 4 冲刷重心对潼关高程的影响

2002年后由于来水量增大且入库沙量明显减少(图2a),水库以冲刷为主,故淤积重心对潼关至太安段(简称潼太段,长约41.2 km)的影响降低。且1999年后潼关高程下降原因尚未明确,故本文主要分析冲刷重心对近期潼关高程的影响。

如图11所示,潼关高程与潼太段比降呈负相关,说明潼太段比降越大,潼关高程越易冲刷下降,当潼太段汛后比降取2年滑动平均值时,二者的相关系数 $R=-0.65$ ( $P<0.01$ )。

当冲刷重心位于距坝约70~90 km时,冲刷重心位于潼太段的下部段,使得潼太段比降增大。并且随着



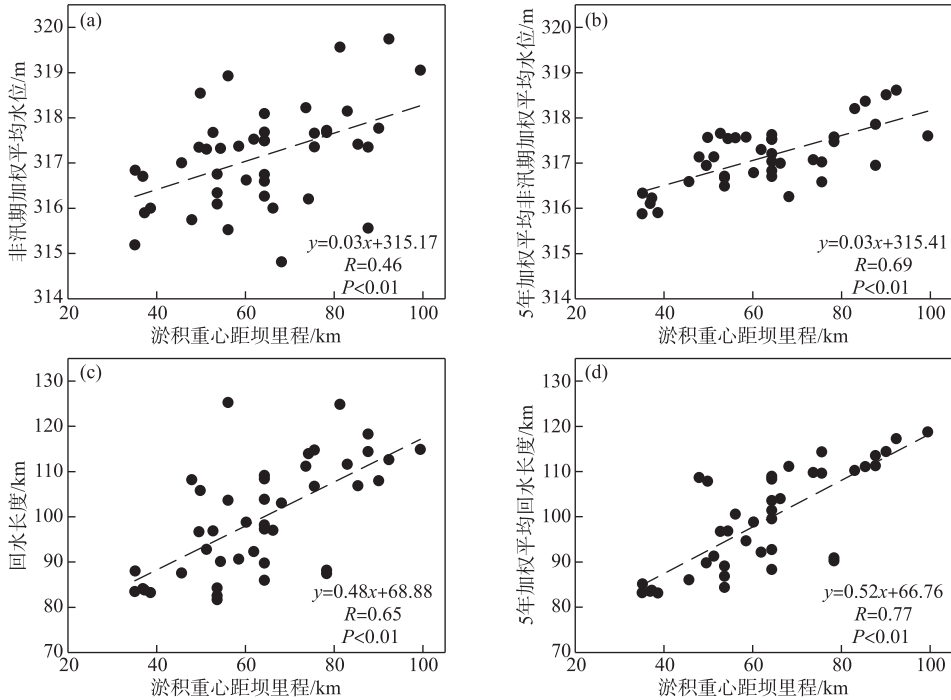


图 10 淤积重心距坝里程与非汛期流量加权平均水位及回水长度的相关关系

Fig.10 Correlation between the river kilometer from the dam to the deposition center and the discharge-weighted average water level during nonflood season and backwater length

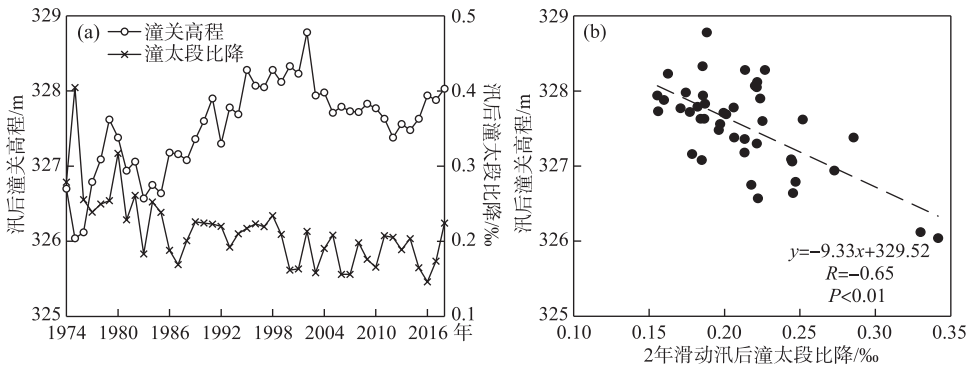


图 11 潼关高程与潼太段汛后河床比降的关系

Fig.11 Correlation between Tongguan elevation and the post-flood-season bed slope between Tongguan and Tai'an

冲刷重心距坝里程增大,潼太段比降越大,二者相关系数  $R=0.82$ (图 12)。结合图 11 可知,潼太段比降增大,会进一步引起潼关高程下降。

如前所述,1985 年后回水长度基本位于潼关以下,水库运用对潼关高程影响较小,而冲淤重心在 1985 年后也下移至距坝约 70 km,位于潼太段以下,因此,蓄清排浑运用早期冲淤重心的迁移对潼关高程的影响较大,而近期尤其是 2000 年后冲淤重心对应的冲淤强度明显减弱后,冲淤重心的迁移对潼关高程的影响可能不大。然而,冲淤重心的多年累积调整也可能会对潼关高程造成影响,这需要后续研究深入分析。

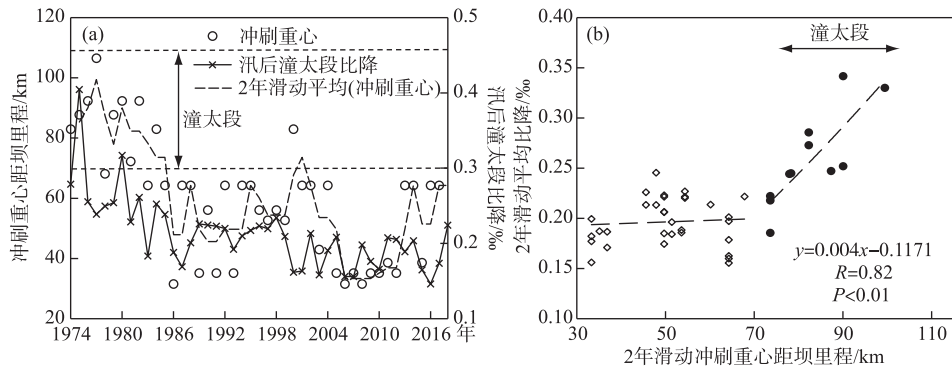


图 12 潼关段汛后河床比降与冲刷重心位置的关系

Fig.12 Correlation between the river kilometer from the dam to the erosion center and the post-flood-season bed slope between Tongguan and Tai'an

## 5 结论

1) 三门峡水库自 1974 年“蓄清排浑”运用以来,库区在汛期冲刷、非汛期淤积,潼关高程汛期降低、非汛期抬升。分别定义汛期最大冲刷速率和非汛期最大淤积速率的相邻两断面间的子河段为冲刷重心和淤积重心,研究发现:汛期冲刷重心与非汛期淤积重心所在子河段位置基本对应,冲淤速率较接近。1974 年后冲淤重心由距坝约 90 km 逐渐向坝前移动,2010 年已移至距坝 30~40 km 处,平均下移速率约 1~2 km/a,2010 年后受回水影响增强及上游来水量增加影响,冲淤重心上移,2017 年距坝约 60~70 km,但冲淤强度明显减弱。

2) 淤积重心的位置主要受水库回水长度、最高库水位、非汛期流量加权平均水位、非汛期水沙量、上一年汛后河床比降等因子的影响,其中回水长度影响最大;冲刷重心主要受汛期水流能量、汛期流量加权平均水位和汛前河床比降等因子影响,其中汛期水流能量影响最大。淤积重心位置迁移滞后于影响因子的变化约 5 年,与以往研究得到库区冲淤滞后年限接近,但冲刷重心滞后时间相对较短,约 2 年。本文结果揭示了库区河道季节性冲淤的滞后响应演变规律,是河床演变滞后响应规律的重要补充。

3) 潼关高程与潼关段比降呈反比关系,比降越大,潼关高程越低,而当冲刷重心迁移至潼关段并影响其下段时,潼关段比降增大,利于潼关高程降低。1985 年后回水范围和冲淤重心均位于潼关以下,潼关高程受冲淤重心影响较小。

## 6 参考文献

- [ 1 ] 王育杰. 三门峡水库“蓄清排浑”运用与潼关高程关系研究. 人民黄河, 2003, 25(7): 16-18.
- [ 2 ] Zheng S, Wu BS, Hou SZ et al. Spatial and temporal erosion and deposition processes and the delayed response of the Sanmenxia reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(12): 1433-1445. [郑珊, 吴保生, 侯素珍等. 三门峡水库时空冲淤与滞后响应. 水利学报, 2019, 50(12): 1433-1445.]
- [ 3 ] Wu BS, Zheng S, Shen Y. Erosion and deposition in Sanmenxia Reservoir and the impacts of “318 Operation”. *Water Resources and Hydro-power Engineering*, 2020, 51(11): 1-12. [吴保生, 郑珊, 沈逸. 三门峡水库冲淤与“318 运用”的影响. 水利水电技术, 2020, 51(11): 1-12.]
- [ 4 ] Yu CZ, Xia JQ, Zhou MR et al. Characteristics of main-channel migration in the Xiaobeiganliu reach of the middle Yellow River during the continuous siltation period. *J Lake Sci*, 2021, 33(3): 893-904. DOI: 10.18307/2021.0323. [余钺峥, 夏军强, 周美蓉等. 黄河中游小北干流段持续淤积期的主槽摆动特点. 湖泊科学, 2021, 33(3): 893-904.]
- [ 5 ] Wu BS, Wang GQ, Wang ZY et al. Influence of water and sediment on Tongguan elevation and its variation regulation. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(14): 1461-1465. [吴保生, 王光谦, 王兆印等. 来水来沙对潼关高程的影响及变化规律. 科学通报, 2004, 49(14): 1461-1465.]

- [ 6 ] Lin XZ, Dong CY, Li DD. Sediment analysis and operational mode of Sanmenxia Reservoir. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition*, 2018, **39**(5): 18-22. [林秀芝, 董晨燕, 李丹丹. 三门峡水库淤积分析和运用方式研究. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2018, **39**(5): 18-22.]
- [ 7 ] Yang WX, Zhang GG. Factors and their function mechanism to the changes of erosion and sediment in Tongguan River bed elevation. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2007, **18**(3): 91-93. [杨五喜, 张根广. 潼关高程冲淤变化的影响因素及其作用机理. 水资源与水工程学报, 2007, **18**(3): 91-93.]
- [ 8 ] 李文文, 吴保生, 夏军强等. 潼关高程与其影响因子的相关分析. 人民黄河, 2010, **32**(7): 6-9.
- [ 9 ] Lin XZ, Dong CY, Su LS *et al.* Influence of sediment deposition in upstream and downstream reaches on surface elevation at Tongguan Station in the Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2018, **43**(6): 35-39. [林秀芝, 董晨燕, 苏林山等. 黄河潼关上下游不同河段淤积量对潼关高程的影响. 泥沙研究, 2018, **43**(6): 35-39.]
- [ 10 ] Wu BS, Wang GQ, Xia JQ. Case study: Delayed sedimentation response to inflow and operations at Sanmenxia Dam. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, **133**(5): 482-494. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(2007)133: 5(482).
- [ 11 ] Hou SZ, Guo XJ, Hu T. Influence of operation water level on deposition distribution in Sanmenxia Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2019, **44**(6): 14-18. [侯素珍, 郭秀吉, 胡恬. 三门峡水库运用水位对库区淤积分布的影响. 泥沙研究, 2019, **44**(6): 14-18.]
- [ 12 ] 丁六逸. 三门峡水库的调度运用. 人民黄河, 1991, **13**(1): 21-25.
- [ 13 ] Phairot C, Michael PL, Jeffrey AN. Backwater controls on the avulsion location of the delta. *Geophysical Research Letters*, 2012, L01402. DOI:10.1029/2011GL050197.
- [ 14 ] Zheng S, Edmonds DA, Wu BS *et al.* Backwater controls on the evolution and avulsion of the Qingshuigou channel on the Yellow River Delta. *Geomorphology*, 2019, **333**: 137-151. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.02.032.
- [ 15 ] Liro M. Gravel-bed channel changes upstream of a reservoir: The case of the Dunajec River upstream of the Czorsztyn Reservoir, southern Poland. *Geomorphology*, 2015, **228**: 694-702. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.10.030.
- [ 16 ] Liro M, Ruiz-Villanueva V, Mikuš P *et al.* Changes in the hydrodynamics of a mountain river induced by dam reservoir backwater. *Science of the Total Environment*, 2020, **744**: 140555. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140555.
- [ 17 ] Knighton AD. Downstream variation in stream power. *Geomorphology*, 1999, **29**(3/4): 293-306. DOI: 10.1016/S0169-555X(99)00015-X.
- [ 18 ] Wu BS, Xia JQ, Wang ZY. Delayed response of Tongguan's elevation to the sedimentation in Sanmenxia Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2006, (1): 9-16. [吴保生, 夏军强, 王兆印. 三门峡水库淤积及潼关高程的滞后响应. 泥沙研究, 2006, (1): 9-16.]
- [ 19 ] Wu BS, Zheng S, Thorne CR. A general framework for using the rate law to simulate morphological response to disturbance in the fluvial system. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2012, **36**(5): 575-597. DOI: 10.1177/0309133312436569.