

【水文·泥沙】

# 黄河龙羊峡水库进出库水沙输移特性

赵玉<sup>1</sup>, 穆兴民<sup>1,2</sup>, 何毅<sup>3</sup>

(1. 中国科学院水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100;  
水利部  
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:**根据龙羊峡水库进出库控制站的水沙实测资料,借助变差系数、偏态系数、Pearson 相关分析和回归分析等方法,分析了进出库水沙的输移特性。结果表明:水库建设期年际径流量差和输沙量差波动明显,差异显著,出库水沙量大于进库的;水库蓄水运用对进出库水沙量的影响显著,进出库年均标准化径流量、标准化输沙量均呈下降趋势;龙羊峡水库蓄水运用后出库径流量的年内分配趋于均匀化,汛期径流量减小,非汛期径流量增大;进出库径流量和输沙量具有明显的正相关性,单位径流条件下出库的产沙动力高于进库的,相同径流条件下进库输沙量在水库蓄水运用后呈增大趋势。

**关键词:**相关分析; 回归分析; 输移特性; 径流; 泥沙; 龙羊峡水库

**中图分类号:** P333; TV882.1      **文献标志码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.1000-1379.2014.02.006

## Characteristics of Runoff and Sediment Discharge of Inflow and Outflow of Longyangxia Reservoir

ZHAO Yu<sup>1</sup>, MU Xing-min<sup>1,2</sup>, HE Yi<sup>3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;  
2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;  
3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** We made use of vast methods to display the runoff and sediment discharge transport characteristics of inflow and outflow of Longyangxia Reservoir, such as coefficient of variation, skewness coefficient, Pearson correlation analysis and regression analysis. The results are as follows: the difference is significant to annual runoff gap and sediment discharge gap between outflow and inflow during the construction period. The reservoir's impounding produces a significant effect on the standard runoff and sediment discharge of inflow and outflow, which trends to decline after the Longyangxia Reservoir's impounding. The distribution of runoff of outflow homogenizes during the year, which presents by the decreases during flood season and increase during the non-flood season. There is a positive correlation between runoff and sediment discharge of Longyangxia Reservoir's inflow and outflow. The sediment yield of outflow is higher than the inflow upon unit runoff. The sediment discharge of inflow after the impounding of Longyangxia Reservoir is higher than that of before.

**Key words:** correlation analysis; regression analysis; transportation characteristics; runoff; sediment discharge; Longyangxia Reservoir

我国水资源时空分布严重不均,同时存在着资源性缺水、工程性缺水、污染性缺水和行政性缺水等问题,水库、跨流域调水工程等水利基础设施成为改变工程性缺水的重要措施<sup>[1]</sup>。随着社会经济发展和人民生活水平的逐步提高,全社会对防洪安全、水资源供给安全、水生态环境安全和粮食安全的要求越来越高,水资源短缺进一步加剧,供需矛盾更加突出<sup>[3]</sup>。河流水库的修建改变了水库下游水沙过程,破坏了原有的水文平衡,必然会引起水沙输移特性的改变<sup>[4-5]</sup>。

黄河是世界上著名的多沙河流,在黄河治理和开发中,大型水利枢纽在一定时期内见效快、发挥作用大,同时对黄河流域天然水沙运行规律的改变程度也较大。因此,研究水库进出库水沙输移特征,可为水库科学调度提供依据。笔者以龙羊峡水库为例,对进出库水沙输移特性进行了研究。

## 1 研究区概况

龙羊峡水库是黄河上游多年调节的大(1)型水库<sup>[6-7]</sup>,上距黄河源头 1 686 km,1979 年 10 月 31 日—1986 年 10 月 14 日为龙羊峡水库的建设期。水库正常蓄水位为 2 600 m,相应库容为 247 亿 m<sup>3</sup>,极限死水位为 2 530 m,死库容为 53.4 亿 m<sup>3</sup>,调节库容为 193.6 亿 m<sup>3</sup><sup>[8]</sup>。龙羊峡水库坝址以上控制流

收稿日期:2013-08-06

基金项目:中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-04-03)。

作者简介:赵玉(1987—),女,甘肃金昌人,硕士研究生,研究方向为水土保持与环境效应。

通信作者:穆兴民(1961—),男,陕西华阴人,研究员,主要从事水土保持、生态水文效应方面的研究工作。

E-mail: zhaoyu737@163.com

域面积为 131 420 km<sup>2</sup>,占黄河全流域面积的 17.5%。唐乃亥、贵德两水文站分别为龙羊峡水库进、出库控制站。唐乃亥水文站位于龙羊峡坝址以上 137.8 km 处,测站控制面积为 121 972 km<sup>2</sup>,占龙羊峡水库控制面积的 92.8%,至坝址区间集水面积为 9 448 km<sup>2</sup>。贵德水文站位于龙羊峡大坝下游 54.8 km 处,测站控制面积为 133 650 km<sup>2</sup>,至坝址区间集水面积为 2 230 km<sup>2</sup>。统计分析 1956—1985 年进出库水沙资料可知,进库多年平均径流量为 213.1 亿 m<sup>3</sup>,多年平均输沙量为 0.129 9 亿 t;出库多年平均径流量为 220.4 亿 m<sup>3</sup>,多年平均输沙量为 0.257 4 亿 t。进库年径流量占出库年径流量的 96.7%,进库年输沙量占出库年输沙量的 50.5%。出库年径流量主要来源于唐乃亥水文站以上。进出库区间产沙量为 0.127 5 亿 t,占出库输沙量的 49.5%,唐乃亥—贵德区间是青海省境内黄河上游区的主要产沙区之一<sup>[9-10]</sup>。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料情况及处理

选取唐乃亥水文站 1956—2011 年、贵德水文站 1954—1990 年的径流量、输沙量实测值,以及 1954—2011 年逐月降水量数据。降水量采用中国气象科学数据共享服务网提供的玛多、达日、久治等 13 个气象站的资料。黄河青海段面平均降水量采用 13 站的算术平均法求得。

为了降低降水对流域水文要素的影响程度,将径流量和输沙量的年值用黄河青海段面平均降水量进行标准化处理,得到标准化径流量  $R_s$  (亿 m<sup>3</sup>/mm) 和标准化输沙量  $S_s$  (亿 t/mm):

$$R_s = R/P \quad (1)$$

$$S_s = S/P \quad (2)$$

式中: $R$  为径流量,亿 m<sup>3</sup>;  $P$  为流域内面平均降水量,mm;  $S$  为输沙量,亿 t。 $R_s$ 、 $S_s$  实际上反映了单位降水量条件下流域的产流、产沙量<sup>[11-12]</sup>。

### 2.2 研究方法

Pearson 相关分析也称为极差相关(或积距相关)分析,是一种计算直线相关的方法,适用于两个连续水文变量线性关联情形的描述。相关系数的绝对值越接近于 1,其相关性越强<sup>[13]</sup>。

变差系数  $C_v$  用来说明水文变量长期变化的稳定程度<sup>[14-15]</sup>,只能反映水文序列的平均情况和离散程度,而不能反映其对称(即偏态)情况。偏态系数  $C_s$  是描述水文序列分布不对称性的统计参数<sup>[16]</sup>,当  $C_s > 0$  时,分布为正偏或右偏;当  $C_s < 0$  时,分布为负偏或左偏。

## 3 结果与分析

### 3.1 建设期进出库水沙变化

水库建设期进出库水量的增减同泥沙的冲淤相对应。为描述龙羊峡水库进出库径流量差值和输沙量差值的变化特征,用出库径流量(或输沙量)与进库径流量(或输沙量)之差来表征进出库水(沙)量变化状况。建库前不同时段进出库平均月径流量差、输沙量差的变化情况见表 1。图 1 中年际径流量差

和输沙量差是对应年份各月径流量差和输沙量差的累计值。由图 1 可知,在水库建设期,年际径流量差和输沙量差均为正值,且随着水库的修建表现为先减小后增大的趋势。建设期出库水量和沙量显著高于进库水量和沙量。说明水量和沙量受水库建设的影响较小。

表 1 不同时段月平均径流量差、输沙量差

月份	径流量差				输沙量差			
	1956—1978年/亿 m <sup>3</sup>	1979—1986年/亿 m <sup>3</sup>	变化量/亿 m <sup>3</sup>	变化率/%	1956—1978年/万 t	1979—1986年/万 t	变化量/万 t	变化率/%
1	0.276	0.672	0.396	143.7	3.94	7.57	3.63	92.2
2	0.302	0.499	0.197	65.4	5.34	10.52	5.18	96.9
3	0.281	0.556	0.275	97.6	14.99	31.71	16.72	111.6
4	0.038	0.363	0.325	854.8	30.71	60.06	29.34	95.5
5	0.292	0.167	-0.125	-42.6	83.73	93.05	9.31	11.1
6	0.777	-0.089	-0.866	-111.4	119.08	83.29	-35.79	-30.1
7	0.981	-0.268	-1.249	-127.3	253.85	37.25	-216.60	-85.3
8	1.217	0.883	-0.334	-27.5	383.27	1 707.23	1 323.96	345.4
9	0.731	-0.344	-1.075	-147.0	192.51	-18.94	-211.45	-109.8
10	1.263	-0.131	-1.394	-110.4	133.05	252.93	119.88	90.1
11	0.686	-0.089	-0.775	-113.0	69.69	112.63	42.94	61.6
12	0.664	0.108	-0.556	-83.8	8.35	20.57	12.22	146.4

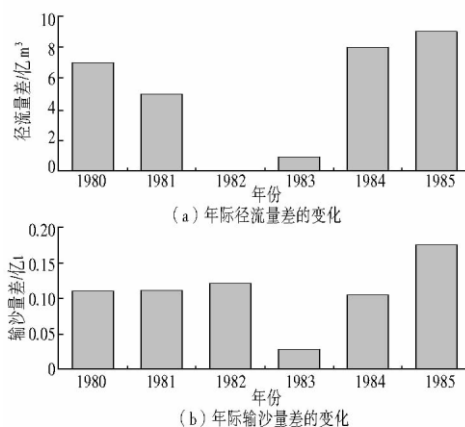


图 1 建设期年际径流量差和输沙量差的变化

龙羊峡水库修建前,对贵德水文站以上的黄河流域开发程度较低,对径流量和输沙量的影响较小,故可将龙羊峡水库修建前的 1956—1978 年作为基准期。由表 1 可知,基准期径流量差和输沙量差的年内分配基本一致,较大值均出现在 6—10 月,且各月径流量差和输沙量差均为正值,说明基准期出库水沙量大于进库水沙量。建设期径流量差和输沙量同基准期相比发生了较大改变,汛期各月的径流量差和输沙量差均小于基准期的,且以负值为主,说明建设期汛期各月出库水沙量小于进库水沙量。两个时段出库站与进库站径流量差的绝对减少量的较大值均出现在 6—10 月,变化率的最大值出现在 4 月;两个时段出库站与进库站输沙量差的绝对减少量的较大值均出现在 7—11 月,变化率的最大值出现在 8 月。

### 3.2 龙羊峡水库蓄水运用前后进出库水沙变化

#### 3.2.1 水沙年际变化

龙羊峡水库蓄水运用后进出库水沙有较大变化,见表 2。

表2 龙羊峡水库进库标准化径流量、标准化输沙量统计参数

水文站	项目	时段	均值 $\bar{x}$	均方差 $\sigma$	离差系数 $C_V$	偏态系数 $C_S$
唐乃亥	标准化径流量	1986年前	0.637 3	0.815 55	1.28	5.398
		1986年后	0.428 9	0.089 63	0.21	0.983
	标准化输沙量	1986年前	0.000 3	0.000 14	0.47	1.157
		1986年后	0.000 2	0.000 15	0.08	1.845
贵德	标准化径流量	1986年前	0.517 7	0.084 32	0.16	0.409
		1986年后	0.436 6	0.104 01	0.24	0.572
	标准化输沙量	1986年前	0.006 0	0.000 16	0.03	0.248
		1986年后	0.001 0	0.000 10	0.10	1.337

注:标准化径流量、输沙量的单位分别为亿  $m^3/mm$ 、亿  $t/mm$ 。

龙羊峡水库蓄水运用对出库标准化输沙量的改变幅度较大。龙羊峡水库蓄水运用后进库平均标准化径流量、标准化输沙量同水库蓄水运用前相比分别减小0.208 4亿、0.000 1亿  $m^3/mm$ ,减幅分别为32.7%、33.3%。水库蓄水运用后出库平均标准化径流量、标准化输沙量同水库蓄水运用前相比分别减小0.081 1亿、0.005 0亿  $t/mm$ ,减幅分别为15.7%、83.3%。

龙羊峡水库蓄水运用后进库标准化径流量、标准化输沙量的  $C_V$  同水库蓄水运用前相比均呈下降趋势,说明水库蓄水运用后进库标准化径流量、标准化输沙量的离散程度降低、频率分布集中化。水库蓄水运用后出库标准化径流量、标准化输沙量的  $C_V$  同蓄水运用前相比均呈增大趋势,说明水库蓄水运用后出库标准化径流量、标准化输沙量的离散程度提高、频率分布分散化。

水库蓄水运用后进库标准化径流量的  $C_S$  小于水库蓄水运用的,年内说明水库蓄水运用后进库标准化径流量分布趋于对称;蓄水运用后进库标准化输沙量的  $C_S$  大于蓄水运用前的,说明水库蓄水运用后进库标准化输沙量分布的不对称性加剧。出库标准化径流量、标准化输沙量的  $C_S$  在水库蓄水运用后均变大,说明水库蓄水运用后出库标准化径流量、标准化输沙量分布的不对称性加剧。

### 3.2.2 水沙年内变化

龙羊峡水库蓄水运用前后,进出库水沙过程均发生了不同程度的改变,见图2。

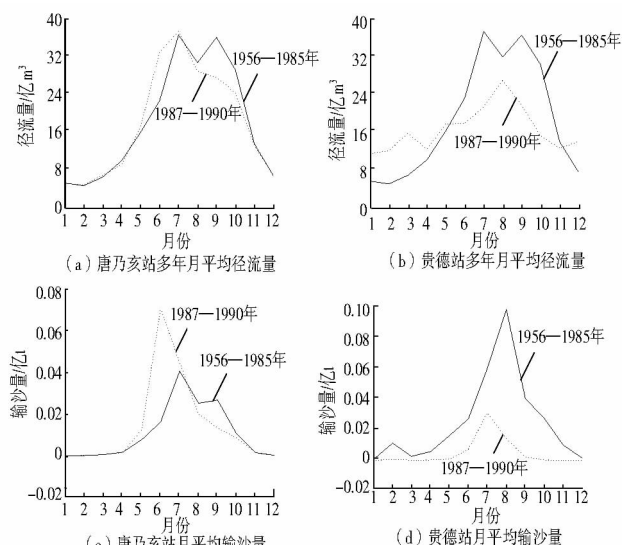


图2 龙羊峡水库不同时段多年月平均径流量、输沙量

龙羊峡水库蓄水运用前,进出库径流的年内变化过程相似,均为双峰型,且峰值均出现于7月和9月,进出库径流量年内分配不均匀,月际差异大,阶段性变化明显,表现为1—5月缓慢上升、6—7月急剧上升、9—10月急剧下降和11—12月缓慢下降。总体来看,进出库径流量集中分布于6—9月。蓄水运用后,进库径流年内分配特征曲线由双峰型变为单峰型,峰值出现于7月,阶段性变化特征无较大差异,只是急剧下降阶段出现在8—10月。水库蓄水运用后出库径流变化特征同蓄水运用前相比有较大改变,径流变化过程线由双峰型变为单峰型,峰值出现于8月,且径流年内分配趋于均匀化,汛期径流量减小,非汛期径流量增大。

水库蓄水运用后进库输沙量年内变化过程线同蓄水运用前相比由双峰型变为单峰型,峰值由7月提前到6月。水库蓄水运用后出库输沙量年内变化过程同蓄水运用前相比有较大变化,输沙量下降幅度较大,且集中分布于汛期,非汛期输沙量基本为0。在水库蓄水运用后,4—7月进库输沙量明显大于蓄水运用前的,但4—7月出库输沙量显著低于蓄水运用前的,说明龙羊峡水库蓄水运用对出库输沙量的影响较大。

图3和图4分别为龙羊峡水库蓄水运用前后相同时段进出库径流量和输沙量过程线。对比分析水库下闸蓄水前1a(1985年10月15日—1986年10月14日)和下闸蓄水后1a(1986年10月16日—1987年10月15日)的逐日水沙过程。

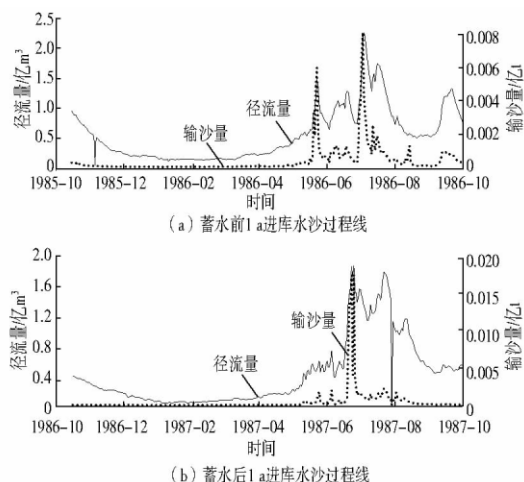


图3 龙羊峡水库下闸蓄水前、后各1a进库的逐日水沙过程线

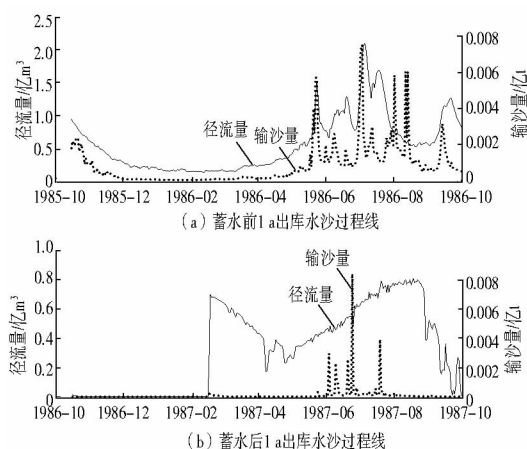


图4 龙羊峡水库下闸蓄水前、后各1a出库的逐日水沙过程线  
进库日径流量、日输沙量在龙羊峡水库下闸蓄水前后1a

内无较大改变,汛期和非汛期来水来沙量及逐日水沙输移差异明显。洪峰和沙峰集中于6—8月,逐日水沙量波动幅度大。洪峰和沙峰出现的时间基本对应,洪峰输沙占很大比例。

出库日径流量和日输沙量在龙羊峡水库下闸蓄水前后1a内发生了较大改变。下闸蓄水前1a内,洪峰和沙峰集中于6—10月,出现多个高量级洪峰、沙峰,最大洪峰、逐日水沙量波动幅度大。水库下闸蓄水后1a内(水库于1986年10月15日下闸蓄水,1987年2月15日开闸放水),非汛期水量增大,洪峰持续时间延长,汛期逐日径流量波动变缓,洪峰、沙峰的数量和峰值均大幅减小,输沙量相对集中,水、沙高峰出现的时间不完全对应。

### 3.3 龙羊峡水库进出库水沙关系分析

笔者采用一次函数简化水沙关系,其中一次项系数可近似反映产沙动力,常数项则表示了在地表环境演变引起的水文效应还未达到使水文趋势发生统计上显著变化时的泥沙存储状态<sup>[12]</sup>。龙羊峡水库蓄水运用前后进出库径流量与输沙量的关系见表3。从进出库水沙关系线性拟合的一次项系数可知,单位径流条件下出库的产沙动力绝大部分高于进库的。龙羊峡水库蓄水运用后出库泥沙存储量(水沙关系函数中常数项的绝对值)同蓄水运用前相比,表现为下降趋势。根据水沙量的关系模型,较为理想的水沙状态是“大水带大沙,小水带小沙,含沙量保持在一个较为稳定的数值”<sup>[17]</sup>。由回归方程知,相同径流条件下,龙羊峡水库蓄水运用后进库输沙量表现为增大趋势,水沙关系得到改善。

表3 龙羊峡水库蓄水运用前后进出库径流量与输沙量关系特征

水文站	时段	相关系数	概率P	F值	显著性水平	回归方程
唐乃亥	1956—2011	0.801	0.000 1	96.998	0.01	$S = -0.001R - 0.111$
	1956—1985	0.947	0.000 1	241.646	0.01	$S = 0.001R - 0.173$
	1987—2011	0.627	0.001 0	15.649	0.05	$S = 0.001R - 0.059$
贵德	1954—1990	0.744	0.000 1	43.319	0.01	$S = 0.002R - 0.167$
	1984—1985	0.806	0.000 1	55.665	0.01	$S = 0.002R - 0.146$
	1987—1990	0.584	0.416 0	0.072		

注:P为对Pearson相关系数R进行假设检验的概率值;F为F检验的统计值,若F值大于临界值 $F_{\alpha}$ ,表明在给定显著性水平 $\alpha$ 下,回归方程相关性显著。

## 4 结论

(1)水库建设期年际径流量差和输沙量差波动明显,差异显著,出库水沙量明显高于进库的。建设期逐月平均径流量差和输沙量差的变化特征同基准期相比发生了较大改变,汛期各月平均径流量差和输沙量差均小于基准期的,且以负值为主。总体来看,建设期出库水沙量高于进库水沙量,说明龙羊峡水

库建设期对水沙量的影响较小。

(2)水库蓄水运用对出库水沙量的影响显著,进出库年均标准化径流量、标准化输沙量均呈下降趋势。龙羊峡水库蓄水运用使得出库标准化径流量、标准化输沙量的离散程度加大、频率分布分散化,出库径流量的年内分配趋于均匀化,汛期径流量减小,非汛期径流量增大。

(3)龙羊峡水库进出库径流量和输沙量具有明显的正相关关系。单位径流条件下出库产沙动力高于进库的;在相同径流条件下,进库输沙量在水库蓄水运用后呈增大趋势,水沙关系得到改善。

### 参考文献:

- [1] 穆兴民,王飞,刘国彬,等.水利现代化的历史演进过程—兼谈水土保持在现代水利中的作用[G]//翟浩辉.中国水利现代化论文集.北京:中国水利水电出版社,2007:98-103.
- [2] 李辉.水沙过程预测及水库多目标优化调度研究[D].天津:天津大学,2008.
- [3] 娄岳.水库调度与运用[M].北京:中国水利水电出版社,1996.
- [4] 张为.水库下游水沙调整及对河流生态系统影响初步研究[D].武汉:武汉大学,2006.
- [5] Benn P C, Erskine W D. Complex Channel Response to Flow Regulation: Cudgong River Windamere Dam, Australia[J]. Applied Geography, 1994, 14(2): 153-168.
- [6] 张晓华,尚红霞,郑艳爽,等.黄河干流大型水库修建后上下游再造床过程[M].郑州:黄河水利出版社,2008.
- [7] 蓝永超,康尔泗,马全杰,等.龙羊峡水库入库径流变化特征及趋势预测[J].冰川冻土,1999,21(3):281-285.
- [8] 黄河水利委员会水文局.黄河水文学志[M].郑州:河南人民出版社,1996.
- [9] 高学军,冯玲.龙羊峡水库泥沙淤积量估算[J].泥沙研究,2002(1):78-80.
- [10] 李万寿,吴国祥.青海省境内黄河上游区水沙来源及组成分析[J].水土保持通报,1999,19(6):6-10.
- [11] 穆兴民,巴桑赤烈,张槽,等.黄河河口镇至龙门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.
- [12] 高照良,付艳玲,张建军,等.近50年黄河中游流域水沙过程及对退耕的响应[J].农业工程学报,2013,29(6):99-105.
- [13] 邱浩正.量化研究与统计分析[M].重庆:重庆大学出版社,2009.
- [14] 孔兰,陈俊贤,陈晓宏.南方多沙河流水沙演变特征及水库的影响分析[J].水文,2012,32(4):49-53.
- [15] 汤奇成,曲耀光.中国干旱区水文及水资源利用[M].北京:科学出版社,1992.
- [16] 黄振平,陈元芳.水文统计学[M].北京:中国水利水电出版社,2011.
- [17] 刘勇胜,陈沈良,李九发.黄河入海水沙通量变化规律[J].海洋通报,2005,24(6):1-8.

【责任编辑 翟戎亮】

(上接第12页)

- [10] Wu Zhongru, Su Huaizhi, Guo Haiqing. Risk Assessment Method of Major Unsafe Hydroelectric Project[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, 51(9): 1345-1352.
- [11] Voortman H G. Risk-Based Design of Large-Scale Flood Defense Systems [D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2003.
- [12] Vrijling J K. Probabilistic Design of Water Defense Systems in the Netherlands [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 74(5): 337-344.
- [13] Duncan J M. Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering [J]. Journal of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering, 2000, 126

- (4): 307-316.
- [14] 牛贺道,胡建华.堤防安全评价探讨[J].水利建设与管理,2006(2):72-74.
- [15] 刘纯义,陈诚,孙小艺.黄河下游堤防安全评价指标的系统研究[J].人民黄河,2006,28(8):11-12.
- [16] 魏强,鲁宁,柴润水.堤防工程安全性评价模型研究[J].科协论坛,2012(4):25-26.
- [17] 介玉新,胡朝,李青云,等.层次分析法在长江堤防安全评价系统中的应用[J].清华大学学报:自然科学版,2004,44(12):1634-1637.

【责任编辑 吕艳梅】