

大型水库群对流域洪水过程影响分析

万新宇,管秀峰,钟平安,汪曼琳,梅杰

(淮海大学水文水资源学院,江苏南京 210098)

摘要:以淮河流域鲁台子上游大型水库群为例,比较水库修建前后下游断面洪水过程变化情况,分析水库群对洪水过程的总影响,提出逐库添加法划分各水库在洪水过程变化中的贡献,明确各水库的影响程度,采用分级聚类法对水库影响程度进行划分,甄别重要水库。结果显示淮河流域大型水库群显著削减了鲁台子断面洪水总量与洪峰流量,峰现时间也有所变化,各库贡献差异较大,其中梅山、响洪甸、宿鸭湖、南湾、鲇鱼山和佛子岭等6座水库对鲁台子断面洪水过程影响显著,是流域防洪调度的重点水库。

关键词:水库群;洪水过程;聚类分析;防洪决策;淮河流域

中图分类号:TV697

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2017)03-0066-06

Impact of large-scale multiple reservoirs on basin flood hydrograph//WAN Xinyu, GUAN Xiufeng, ZHONG Ping'an, WANG Manlin, Mei Jie (*College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Using the large-scale multiple reservoirs upstream of the Lutaizi section in the Huaihe River Basin as an example, the flood hydrographs of downstream sections before and after construction of reservoirs were compared, and the total impact of multiple reservoirs on the flood hydrograph was analyzed. An approach that adds reservoirs one by one was used to determine the contribution of each reservoir to the change in the flood hydrograph, and the degree of influence of each reservoir was determined. The hierarchical clustering method was used to determine the degree of influence of reservoirs, and the highly important reservoirs were picked out. The results show that large-scale multiple reservoirs in the Huaihe River Basin significantly reduces the flood volume and flood peak of the Lutaizi section, and the time of the peak is changed. The impacts of each of the reservoirs on the flood hydrograph are different. The Meishan, Xianghongdian, Suyahu, Nanwan, Nianyushan, and Foziling reservoirs have significant influences on the flood hydrograph of the Lutaizi section, and are important to flood control decisions in the Huaihe River Basin.

Key words: multiple reservoirs; flood hydrograph; clustering analysis; flood control decision; Huaihe River Basin

气候变化与人类活动是影响流域水文循环的两大因素,其中人类活动对流域水文特性的影响程度日趋加深^[1]。在流域内修建水库是人类活动的主要形式,但随着流域内水库数量的不断增多,导致流域下垫面特征发生显著变化,从而影响了流域径流形成过程,给流域水文预报、水资源规划以及水文分析计算等研究带来诸多困难。为了弄清流域水库(群)对径流形成过程的影响,国内外不少学者就此展开了深入研究。

在水文预报方面,为了提高流域洪水预报精度,熊金和等^[2]通过定性分析乌江主要水电站对乌江流域水文特性的影响,对其洪水预报方案做了相应

的调整;李成林等^[3-4]研究了流域小水库塘坝对径流变化的影响,通过对不同场次洪水小水库塘坝蓄放比的计算,分析了小水库塘坝蓄放比在汛期不同阶段的变化规律,合理设置水利工程拦蓄比,校正了洪水预报值,又通过改进新安江模型流域蓄水能力参数,使模型能够考虑水利工程对洪水的影响,以考虑影响后的模拟径流值作为真实值,与原始模拟径流值比较,分析水利工程对洪水的影响程度,并按一般洪水、较大洪水和大洪水,分别研究了水利工程影响程度随时间的变化趋势;魏子钧等^[5]在水文模型中引入产流面积比例系数来考虑小水库的截留变化过程;孙新国等^[6]通过建立土壤非饱和区干旱湿润程

基金项目:国家自然科学基金(51379055);国家重点研发计划(2016YFC0400909)

作者简介:万新宇(1976—),男,副教授,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:waxinyu@hhu.edu.cn

通信作者:钟平安(1962—),男,教授,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:zhongpa@yahoo.cn

度与水利工程蓄放作用之间的关系来改进 TOPMODEL 模型,使得模拟结果能够反映水利工程的影响。在水资源规划方面,为了摸清流域尺度上水资源时空变异特征,张正浩等^[7]分别采用多元线性回归、人工神经网络和支持向量机等 3 种方法对水利工程建成前的流域月径流过程进行了模拟,并选用神经网络模型模拟水库建成后的月径流过程,比较水库建成后实测月径流与模拟月径流,分析了水库对月径流的时空影响;Biemans 等^[8]分别从全球、大洲及流域 3 个尺度定量分析了 20 世纪水库对河流流量及灌溉供水的影响。在水文分析计算方面,为了提高水库大坝设计的合理性,Yigzaw 等^[9]研究了水库规模对流域可能最大降雨和可能最大洪水的影响,陈甜等^[10]分析了不同典型年梯级水库群防洪调度对下游水电站设计洪水的影响。

在目前的研究中鲜有从水库调度角度去研究流域水库(群)对径流过程的影响。事实上,流域内水库数目增多,必然加大调度决策的难度,就非常有必要根据各水库对径流过程的影响程度筛选出重要水库进行联合调度,以降低调度决策难度。另外,上述研究均是从整体上分析水库群对流域径流的影响,未曾就单个水库对径流的影响进行分析,难以区分各水库的影响程度。为此,本文以淮河流域鲁台子断面上游为研究区域,分析区域内大型水库群对鲁台子断面洪水过程的影响,明确各水库对断面洪水过程影响的贡献,评价各水库的影响程度,筛选重要水库,为淮河流域大型水库群联合防洪调度提供决策支持。

1 分析方法

首先利用水量平衡原理以及马斯京根法,分别进行水库入库洪水还原计算、无水库条件下区间洪水还原计算以及无水库条件下断面洪水还原计算,再以无水库条件下流域洪水过程为背景,比较水库修建前后流域断面洪水过程变化情况,分析水库群对洪水过程的总体影响,明确各水库对断面洪水过程变化的贡献,划分水库影响强度。

1.1 库群影响分析

假设流域内建有 n 座水库,比较流域出口断面实测洪水过程与无水库条件下洪水过程,分析断面洪量、洪峰流量以及峰现时间的变化,可得库群影响效果。

洪量变化的计算公式为

$$\Delta W = W_n - W_r \quad (1)$$

式中: ΔW 为断面洪量变化, m^3 ; W_n 为无水库条件下断面洪量, m^3 ; W_r 为断面实际洪量, m^3 。

洪峰流量变化可用断面洪水过程削峰率表示:

$$\eta = \frac{\Delta Q_m}{Q_{mn}} \times 100\% = \frac{Q_m - Q_{mr}}{Q_{mn}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: η 为断面洪水过程削峰率; ΔQ_m 为断面洪峰流量变化值, m^3/s ; Q_{mn} 为无水库条件下断面洪峰流量, m^3/s ; Q_m 为实际洪峰流量, m^3/s 。

峰现时间变化的计算公式为

$$\Delta T_m = T_{mr} - T_{mn} \quad (3)$$

式中: ΔT_m 为洪峰出现的时间差, h; ΔT_{mr} 为实际峰现时间; ΔT_{mn} 为无水库条件下峰现时间。

1.2 单库影响分析

流域内各水库的库容、泄流能力以及地理位置不尽相同,对流域出口断面洪水过程的影响亦有强有弱,明确各水库对出口断面洪水过程影响的程度,有利于提高流域水库群联合防洪调度的效率。本文提出逐库添加法来分析各单库对出口断面洪水过程的影响,即假定初始时刻流域内无任何水库,以无水库条件下洪水过程为初始过程,按照一定顺序逐次添加水库,每次添加一座水库并按其现行调度规则从实际起调水位进行运用,分析流域出口断面洪水过程相对于添加前过程的变化情况,直至所有水库添加完毕。对于 n 座水库,可得 n 条洪水过程线,如图 1 所示。

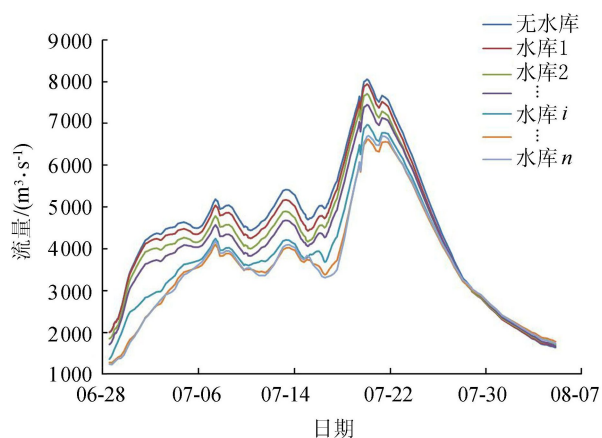


图 1 逐次添加水库后流域断面洪水过程线簇

不同的水库添加顺序,产生不同的断面洪水过程线簇。为了降低水库添加顺序对分析结果的影响,这里仅分析指标值相对稳定且决策者更为关心的洪水总量和洪峰流量两个指标。比较前后两次洪水过程变化,得水库的洪量变化 ΔW_j 和洪峰流量变化 $\Delta Q_{mj} (j=1, 2, \dots, n)$, 且满足

$$\Delta W = \sum_{j=1}^n \Delta W_j \quad \Delta Q_m = \sum_{j=1}^n \Delta Q_{mj} \quad (4)$$

根据变化系列,计算各水库对流域断面洪水过程影响的贡献率,即洪量影响贡献率和洪峰影响贡献率:

表 1 淮河流域大型水库群对鲁台子断面洪水过程的总体影响

洪水编号	洪水总量/亿 m ³			洪峰流量/(m ³ · s ⁻¹)			峰现时间		
	无水库	实际	差值	无水库	实际	削峰率/%	无水库	实际	差值/h
19680717	133.59	124.28	9.31	16440	15279	7.06	07-22T20:00	07-22T21:00	1
19690708	99.71	85.26	14.45	8207	6940	15.44	07-18T15:00	07-18T22:00	7
19830722	53.87	44.82	9.05	8215	6960	15.28	07-27T20:00	07-27T20:00	0
19910611	69.17	63.27	5.90	7367	6180	16.11	06-18T02:00	06-18T02:00	0
19910701	114.04	101.46	12.58	10847	7480	31.04	07-11T21:00	07-11T20:00	-1
19960628	145.55	116.44	29.11	8064	6710	16.79	07-20T02:00	07-20T05:00	3
20030629	121.51	108.25	13.26	9768	7890	19.23	07-12T14:00	07-5T14:00	-168
20050709	58.08	50.83	7.25	6828	5980	12.42	07-15T05:00	07-15T08:00	3
20050822	102.89	87.70	15.19	9255	6680	27.82	09-05T12:00	09-05T12:00	0
20070701	186.85	172.54	14.31	9219	7970	13.55	07-11T16:00	07-11T16:00	0

3.2 单库影响

根据逐库添加法,按照从上游到下游、从左岸到右岸的顺序添加水库,计算淮河流域各大型水库对鲁台子断面洪水过程的影响,结果见表 2。表 2 列出了各水库在 10 场历史典型大洪水中的平均影响和最大影响。从表 2 可以看出,各水库对鲁台子断面洪水过程的影响程度不一。就平均影响而言,梅山水库对鲁台子断面洪水的影响最大,平均削减断面洪量 4.29 亿 m³,削减洪峰 575 m³/s,两个指标的贡献率均超过 30%;相反,白沙水库对鲁台子断面洪水的影响最小,平均削减洪量仅 0.0545 亿 m³,削减洪峰仅有 2.00 m³/s,两个指标的贡献率均不及 0.5%。

然而,每场洪水所对应的降水时空分布不同,水库在每场洪水中发挥的作用也有所差异,若只考虑各水库的平均情况,易弱化各水库的实际影响,因此有必要考察各水库对鲁台子断面洪水过程的最大影响。在 10 场洪水中,梅山水库最大削减洪量 9.72 亿 m³,最大削减洪量贡献率 46.5%,最大削减洪峰 1190 m³/s,最大削减洪峰贡献率 56.0%;而宿鸭湖水水库最大削减洪量 5.47 亿 m³,最大削减洪量贡献

率却达到 61.9%,最大削减洪峰 537 m³/s,最大削减洪峰贡献率亦达到 63.3%。可见,水库对每场洪水的影响不尽相同,贡献率仅反映水库在某场洪水中发挥的作用,而不能正确反映水库对断面洪水过程影响的程度。因此,削减洪量绝对值和削减洪峰绝对值更能合理反映水库对断面洪水的影响,而且相对于平均影响,最大影响更能真实地反映水库在流域防洪中发挥的作用。

需要指出的是,水库添加顺序对单库洪峰削减量计算可能产生一定的影响,且不同场次洪水,影响程度也不同。比如在 10 场洪水中,水库添加顺序对 20030629 号洪水计算结果影响最大,宿鸭湖水水库均方差达 187 m³/s,而对 20070701 号洪水计算结果无影响。究其原因,20030629 号洪水属于双峰洪水,主次峰变换导致计算结果差异较大,而其他洪水均为单峰洪水。本研究采用水库在所有洪水中的最大削减洪量和最大削减洪峰来反映水库对断面洪水的影响程度,可以弱化水库添加顺序对后续计算结果的影响。

3.3 水库影响强度

以表 2 中淮河流域各大型水库对鲁台子断面洪

表 2 淮河流域大型水库对鲁台子断面洪水过程的单库影响结果

水 库	平均影响				最大影响			
	洪量/亿 m ³	洪量贡献率/%	洪峰/(m ³ · s ⁻¹)	洪峰贡献率/%	洪量/亿 m ³	洪量贡献率/%	洪峰/(m ³ · s ⁻¹)	洪峰贡献率/%
南 湾	1.91	14.8	164.2	12.2	4.29	34.8	467	40.2
石山口	0.546	3.79	34.6	2.40	1.14	7.94	76.0	6.08
五 岳	0.110	0.696	11.9	0.860	0.387	2.13	40.0	2.95
泼 河	0.265	2.04	30.1	2.07	0.718	3.79	67.0	4.95
宿鸭湖	2.04	21.0	227	19.0	5.47	61.9	537	63.3
石漫滩	0.0702	0.570	4.00	0.327	0.216	1.50	14.0	1.21
孤石滩	0.132	1.31	6.57	0.610	0.178	3.00	23.0	2.71
白龟山	0.311	2.51	13.6	0.862	1.38	9.10	65.0	2.52
白 沙	0.0545	0.408	2.00	0.148	0.102	1.14	4.00	0.340
鲇鱼山	1.26	7.60	140	8.28	3.95	13.6	262	19.4
梅 山	4.29	31.7	575	34.7	9.72	46.5	1190	56.0
响洪甸	2.74	20.1	509	27.6	6.89	47.7	1330	60.2
佛子岭	0.666	6.47	131	7.88	1.67	18.6	423	33.4

水过程影响的最大削减洪量和最大削减洪峰为指标,通过聚类分析法对水库群进行分类,聚类结果如图3所示,图中线段长度表示类间距离,比如泼河水库与白龟山水库之间线段长度最短,表示该两座水库间距离最短,对鲁台子断面洪水过程影响强度最接近。

从图3可以明显看出,淮河流域梅山、响洪甸和宿鸭湖等13座大型水库可分为3类,其中梅山和响洪甸水库归为一类,最大削减鲁台子断面洪量分别达到9.72亿 m^3 和6.89亿 m^3 ,最大削减断面洪峰分别达到1190 m^3/s 和1330 m^3/s ,对断面洪水过程影响强烈;鲇鱼山、宿鸭湖、南湾和佛子岭水库划为一类,最大削减鲁台子断面洪量分别为5.47亿 m^3 、4.29亿 m^3 、3.95亿 m^3 和1.67亿 m^3 ,最大削减断面洪峰分别为537 m^3/s 、467 m^3/s 、262 m^3/s 和423 m^3/s ,对断面洪水过程影响较强烈;剩余水库可归于一类,对断面洪水过程影响较弱。因此,在淮河流域防洪决策中,可以根据各水库对鲁台子断面洪水过程的影响强度,选取梅山、响洪甸、鲇鱼山、宿鸭湖、南湾和佛子岭等6座水库为流域防洪调度重点水库,通过该6座水库的优化调度来控制鲁台子断面洪水过程,可以有效缓解下游防洪压力。

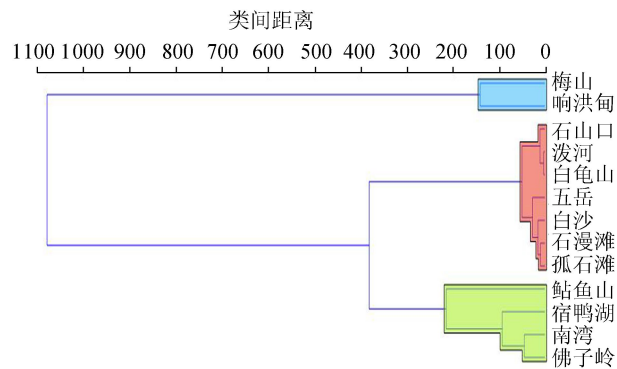


图3 淮河流域13座大型水库分级聚类树

4 结论

a. 在分析水库群对流域洪水过程影响的基础上,提出的逐库添加法能够明晰各水库的贡献,考虑水库添加顺序对计算结果的可能影响,以水库对断面洪水的最大影响来确定各水库对下游断面的影响程度,利用分级聚类方法划分各水库影响程度,结果合理。

b. 在历史典型大洪水中,淮河流域大型水库群对下游鲁台子断面洪水过程影响显著,平均减少断面洪量13.04亿 m^3 ,平均削减断面洪峰17.47%。各水库对鲁台子断面洪水过程影响程度各有差异,且在不同洪水中对断面洪水过程的影响程度也有所变化。

c. 相对于水库对流域断面洪水过程的平均影响指标而言,最大影响指标更能真实反映水库对其下游断面洪水过程的影响程度。梅山和响洪甸水库对鲁台子断面洪水过程影响强烈,鲇鱼山、宿鸭湖、南湾和佛子岭水库影响较强烈,加强该6座水库的联合防洪调度,能有效削减鲁台子断面洪量及洪峰流量。

参考文献:

- [1] PENG D, QIU L, FANG J, et al. Quantification of climate changes and human activities that impact runoff in the Taihu Lake Basin, China [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016: e2194196.
- [2] 熊金和, 郭丽娟, 同斌, 等. 受水利工程影响的乌江流域洪水预报方法浅析 [J]. 人民长江, 2011, 42(6): 35-37. (XIONG Jinhe, GUO Lijuan, TONG Bin, et al. Analysis on flood forecasting method of Wujiang River Basin affected by hydropower projects [J]. Yangtze River, 2011, 42(6): 35-37. (in Chinese))
- [3] 李成林, 孙新国, 彭勇, 等. 丰满流域水利工程对径流变化规律的影响研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 79-83. (LI Chenglin, SUN Xinguo, PENG Yong, et al. Research of runoff variation impacted by hydraulic projects in Fengman Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 79-83. (in Chinese))
- [4] 李成林, 薛志春, 彭勇, 等. 水利工程对洪水的影响研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 21-25. (LI Chenglin, XUE Zhichun, PENG Yong, et al. Impacts of hydraulic engineering on flood [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 21-25. (in Chinese))
- [5] 魏子钧, 梁国华, 葛于晋, 等. 考虑上游水利工程影响的产流预报方法研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6): 49-52. (WEI Zijun, LIANG Guohua, GE Yujin, et al. Study on runoff prediction in consideration of the impact of water conservancy project in upstream basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(6): 49-52. (in Chinese))
- [6] 孙新国, 周惠成, 武剑. 水利工程影响下的历史洪水重现 [J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5): 832-836. (SUN Xinguo, ZHOU Huicheng, WU Jian. Historical flood recurrence under the impact of hydraulic engineering [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(5): 832-836. (in Chinese))
- [7] 张正浩, 张强, 邓晓宇, 等. 东江流域水利工程对流域地表水文过程影响模拟研究 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(4): 684-695. (ZHANG Zhenghao, ZHANG Qiang, DENG Xiaoyu, et al. Hydrological effects of water

reservoirs on fluvial hydrological processes for the East River Basin using statistical modeling technique [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(4): 684-695. (in Chinese))

[8] BIEMANS H, HADDELAND I, KABAT P, et al. Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(3): W03509.

[9] YIGZAW W, HOSSAIN F, KALYANAPU A. Impact of artificial reservoir size and land use/land cover patterns on probable maximum precipitation and flood: case of Folsom Dam on the American River [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 18(9): 1180-1190.

[10] 陈甜,董增川,贾本有,等. 考虑上游梯级水库群调度的小南海水电站坝址设计洪水分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(6): 476-480. (CHEN Tian, DONG Zengchuan, JIA Benyou, et al. Analysis of design flood of dam site of Xiaonanhai Hydropower Station considering flood control operation of upstream cascade reservoir group [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(6): 476-480. (in Chinese))

[11] 包为民,万新宇,荆艳东,等. 基于主成分分析的河流洪水系统聚类法[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(1): 1-5. (BAO Weimin, WAN Xinyu, JING Yandong, et al. Flood clustering method based on principal component analysis [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2008, 36(1): 1-5. (in Chinese))

[12] WAN X Y, ZHONG P A, CHEN X, et al. Computer simulation of flood scheduling in large scale flood control systems [C]//GUO H. 2012 International Workshop on Information and Electronics Engineering. Harbin: Elsevier Ltd., 2012: 3267-3275.
(收稿日期:2016-03-27 编辑:郑孝宇)

(上接第 65 页)

[7] GIROUD J P, BONAPARTE R. Leakage through liners constructed with geomembranes: part II [J]. *Geomembrane Liners, Geotextiles and Geomembranes*, 1989, 8(2): 71-111.

[8] GIROUD J P, KHIRE M V, Mc KELVEY J A. Rate of leachate migration through a defect in a geomembrane underlain by a saturated permeable medium [J]. *Geosynthetics International*, 1997, 4(3/4): 323-334.

[9] ELOY-GIORNI C, PELTE T, PIERSON P. Water diffusion through geomembranes under hydraulic pressure [J]. *Geosynthetics International*, 1996, 3(6): 741-769.

[10] JAYAWICKRAMA P, BROWN K W, THOMAS J C, et al. Leakage rate through flaws in geomembrane liners [J].

Journal of environmental engineering, ASCE, 1988, 114(6): 1401-1420.

[11] 介玉新,李广信. 有限元计算中土工合成材料渗流问题的处理[J]. *水利水电科技进展*, 2009, 29(6): 42-43. (JIE Yuxin, LI Guangxin. FEM calculation of seepage through geosynthetics [J]. *Advances in Science and Technology and Water Resources*, 2009, 29(6): 42-43. (in Chinese))

[12] 孙丹,沈振中,崔健健. 土工膜缺陷引起的土工膜防渗砂砾石坝渗漏数值模拟[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(4): 69-73. (SUN Dan, SHEN Zhenzhong, CUI Jianjian. Seepage numerical simulation of geomembrane gravel dam caused by geomembrane defect [J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(4): 69-73. (in Chinese))

[13] 岑威钧,王蒙,杨志祥. (复合)土工膜防渗土石坝饱和-非饱和渗流特性[J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(3): 6-9. (CEN Weijun, WANG Meng, YANG Zhixiang. Partial saturated seepage properties of (composite) geomembrane earth-rock dams [J]. *Advances in Science and Technology and Water Resources*, 2012, 32(3): 6-9. (in Chinese))

[14] 岑威钧,王蒙. 土石坝防渗土工膜缺陷成因及渗漏特性探析[C]//第八届中国土工合成材料学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2012: 340-344.
(收稿日期:2016-06-07 编辑:骆超)

· 简讯 ·

第 1 届中国水工程安全交流大会将于
2017 年 5 月 26—28 日在南京召开

第 1 届中国水工程安全交流大会将于 2017 年 5 月 26—28 日在南京河海大学召开。会议由河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心主办。

会议主要议题包括:中国水工程安全战略,安全监测、预警、防灾减灾技术,安全分析评价和反馈理论及实验,水工程高新监测设备研制和应用,水利水电工程数字化技术,结构损伤病变仿真和检测技术,水利水电工程健康诊断和寿命评估、风险评价、信息管理技术,补强加固高新材料、新技术在设计、施工和安全管理方面的应用,安全监测系统设计及更新改造设计技术,安全监测仪器设备及自动化系统的研发和应用,安全监测施工管理,监测仪器设备的埋设、安装、维护和观测的技术和经验,水工程安全运行、维护与管理经验等。

(本刊编辑部供稿)