

长江防洪堤南京段设计洪水水位风险分析

李国芳 黄振平 章志强 叶 松

(河海大学水文水资源及环境学院 南京 210098) (南京长江河道管理处 南京 210011)

摘 要 长江南京段洪水水位存在明显上升的趋势 , 为确保新水情下防洪堤的安全 , 首先分析了引起该河段水位上升的原因 , 然后按 3 种方案研究了今后长江南京段出现不同水位的风险度 . 研究结果表明 , 长江南京段水位突破历史最高值 10.22 m 的重现期为 27 年 , 100 年一遇的设计洪水水位达 10.8 m 左右 .

关键词 水位 ; 设计洪水水位 ; 风险

中图号 TV214

受地理位置、自然条件及气候等因素的影响 , 长江下游地区洪涝频繁 , 且近数十年来长江水位有逐渐抬高的趋势 . 南京和长江大多数沿岸城市一样 , 其防洪安全受到长江汛期高水位的严重威胁 .

本文首先分析了长江南京段水位的变化趋势 , 然后分析了引起水位变化的原因 , 最后按 3 种方案求得在现行条件下 , 对应不同设计频率南京下关站的设计洪水水位 , 以及出现不同水位的风险度 .

1 长江南京段水位的变化趋势

据 1912 ~ 1996 年(其间 1938 ~ 1946 年缺测) 共 76 年南京下关站年最高潮水位资料统计结果 : 水位超过 9.00 m 的共 14 次 , 其中前 25 年 1 次 , 中间 25 年 3 次 , 最近 26 年 10 次 ; 水位超过 9.50 m 的共 5 次 , 其中前 25 年 0 次 , 中间 25 年 1 次 , 最近 26 年 4 次 . 这说明 , 大洪水的出现越来越频繁 . 表 1 列出了不同年段内水位超过指定值的次数 .

另外 , 对年最高水位序列采用 15 年滑动平均 , 并根据计算结果绘出 $\bar{H}_{15} \sim t$ 过程 (图 1) . 由图 1 可见 , 前期虽有波动却基本平稳 , 但大约从 70 年代开始水位持续上升 .

表 1 下关站年最高水位超过指定值的次数
Table 1 Times of annal highest stage over certain value at Xiaguan gauge station

分段	起讫年份	年数	$H > 9.00\text{ m}$		$H > 9.50\text{ m}$	
			出现次数	平均重现期/a	出现次数	平均重现期/a
1	1912 ~ 1936	25	1	25.0	0	
2	1937 ~ 1970	25	3	8.3	1	25
3	1971 ~ 1996	26	10	2.6	4	6
4	1912 ~ 1996	76	14	5.4	5	15

注 实际分析的是表中所列起讫年份扣除缺测年份的资料 . 下同 .

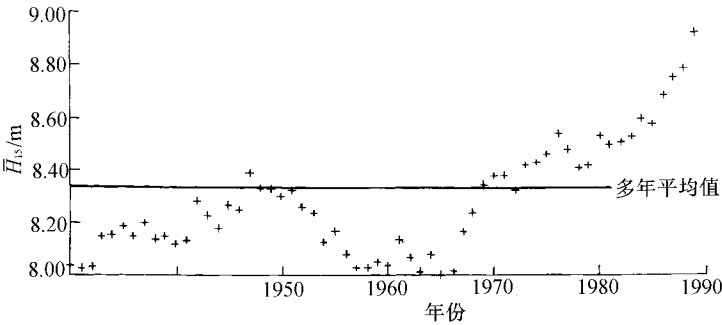


图 1 下关站年最高水位 15 年滑动平均过程

Fig.1 Course of 15-year move average annal highest stage at Xiaguan gauge station

根据水位抬高趋势,分 1912~1954 年,1912~1996 年,1954~1996 年,1970~1996 年 4 个年段分别对年最高水位系列进行频率分析.频率曲线如图 2 所示,频率分析的结果列于表 2.

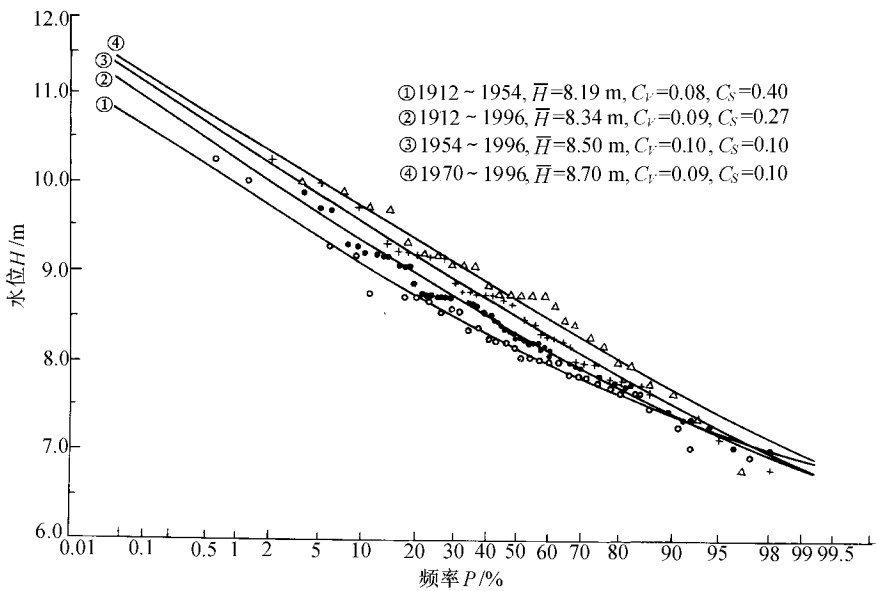


图 2 各年段下关站年最高水位频率曲线

Fig.2 Frequency curves of annual highest stage in different periods at Xiaguan gauge station

表 2 下关站年最高水位频率分析结果

Table 2 Frequency analysis result of annual highest stage at Xiaguan gauge station									
年段	起讫年份	年数	$\bar{H}/\text{m}$	C_V	C_S	$H_{1\%}/\text{m}$	$H_{2\%}/\text{m}$	$H_{5\%}/\text{m}$	1954 年洪水位重现期/a
1	1912~1954	34	8.19	0.08	0.40	9.90	9.68	9.35	250
2	1912~1996	76	8.34	0.09	0.27	10.22	9.99	9.60	100
3	1954~1996	43	8.50	0.10	0.10	10.50	10.28	9.90	45
4	1970~1996	27	8.70	0.09	0.10	10.58	10.35	10.00	35

由图 2 可见 4 条频率曲线的差异十分明显.表 2 也说明 4 个年段内年最高水位的均值依次抬高,相同风险度的洪水位逐渐增高.据 1912~1954 年的资料分析,1954 年最高洪水位的重现期约为 250 年.因此,当时选定该水位作为南京河段防洪设计水位是比较安全的.但据最近 27 年的资料分析,该水位的重现期仅为 35 年一遇.如果仍以此作为长江南京段的设计洪水位,显然不够安全.

自 1980 年以来,下关水位突破 9.50 m 的有 4 次,分别是 1983 年的 9.99 m、1991 年的 9.70 m、1995 年的 9.66 m 和 1996 年的 9.89 m.而这些年份长江南京段入口断面大通站年最大流量分别为 72 600 m³/s, 63 800 m³/s, 74 600 m³/s, 74 400 m³/s, 分别只占 1954 年最大流量 92 600 m³/s 的 78%、68%、80%、80% 左右.

长江流域 1954 年洪水属于百年以来罕见的特大洪水,其汛期降雨量、持续时间和笼罩面积都是空前的,在全江上下形成了特大洪水,南京下关站出现了创记录的 10.22 m 的最高洪水位.但是从以上 4 次洪水所达到的水位来看,如果重现 1954 年的雨情,南京下关站的水位将突破 10.22 m 很多.由此可见,重新分析长江南京段的防洪风险,合理确定其设计洪水位,是非常必要的.

2 长江南京段年最高水位抬升原因

长江南京河段是感潮河段,南京段洪水水位变化过程反映了洪水波自上游向下游的传播过程和潮波自下游向上游的传播过程.南京下关站水位受其上游来水量、区间来水量、下游潮水位及本河段水流特性的综合影响,它们之间的关系如图 3 所示.

造成长江南京段水位抬升的原因可能有 (a) 近期上游来水量增大 (b) 区间来水量增加 (c) 水流特性发生变化 (d) 下游潮位发生变化.

2.1 近期上游来水量增大

为分析上游入流量的变化,选取南京河段入口断面大通站 1922~1994 年(其中 1926~1928 年、1938~

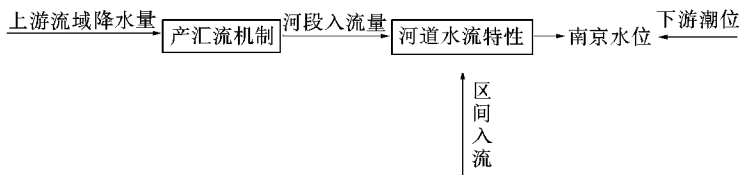


图3 下关站水位的影响因素

Fig.3 Influence factors of stage at Xiaguan gauge station

1946年缺测)的年最大流量系列,并以1970年为界分段作显著性检验和频率分析.计算结果分别列于表3和表4.

表3 大通站年最大流量系列假设检验结果($\alpha = 20\%$)

Table 3 Hypothesis test result of annal maximum discharge series at Datong gauge station

分段	起讫年份	年数	均值 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	均方差 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	变量 t	$t_{\alpha/2}$	变量 f	$f_{\alpha/2}$
1	1922 ~ 1969	34	55 571	10 711				
2	1970 ~ 1994	25	59 096	8 088	1.358	1.290	1.753	1.662

注: α ——置信水平; t 、 f —— t 检验、 f 检验的样本统计量; $t_{\alpha/2}$ 、 $f_{\alpha/2}$ —— t 检验、 f 检验的置信限.因为 $t > t_{\alpha/2}$ 、 $f > f_{\alpha/2}$,所以均值和方差检验都未通过.

表4 大通站年最大流量系列频率分析结果

Table 4 Frequency analysis result of annal maximum discharge series at Datong gauge station

分段	起讫年份	年数	统计参数			设计流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		
			$\bar{Q}$ /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	C_V	C_S	$Q_{1\%}$	$Q_{2\%}$	$Q_{5\%}$
1	1922 ~ 1969	34	55 571	0.17	0.00	77 000	74 600	70 800
2	1970 ~ 1994	25	59 096	0.14	0.00	78 300	76 000	72 600

由表4可知,最近20多年来,大通站年最大流量的均值以及相同频率 $P = 1\%$ 、 2% 、 5% 的设计流量都有所增大,前后两段样本存在显著的差异,不能看作为取自同一总体.因此,大水期上游来水量增加,是造成长江南京段年最高水位上升的原因之一.

2.2 区间来水量增加

大通站以上的流域面积占南京下关站以上流域面积的96.8%,区间面积仅占3%左右,因此在一般情况下,区间来水对南京河段水位的影响不大;但当较大的区间来水

正好与长江洪峰相遇时,两峰叠加,这时区间来水对南京段洪水位的影响也是不可低估的.要定量分析区间来水量的变化对南京段水位抬升的影响,一要分析近期区间来水量的变化,二要分析两峰遭遇的概率.考虑到一方面缺乏区间来水资料,另一方面两峰遭遇的可能性较小,本次研究未分析区间来水量的变化对下关水位的影响.

2.3 水流特性发生变化

为分析河道水流特性的变化规律,选1952~1956年、1983~1987年高水期大通站逐月最大流量及下关站相应逐月最高水位,分别作线性回归并点绘水位~流量关系曲线.结果表明,两个时期水位和流量的关系都很密切,相关系数各为0.915和0.953.但两个年段的回归方程却明显不同,以 H 代表下关站水位, Q 代表大通站流量,前后两年段的回归方程分别为 $H = 4.801 + 0.5926Q$ 和 $H = 3.956 + 0.8186Q$ (Q 的单位为 $\text{万m}^3/\text{s}$).80年代的水位~流量关系曲线明显比50年代的要高(图4),且水位越高离差越大.在上游洪水来量完全相同的情况下,下关站的水位明显抬高.例如:1988~1994的7年中,逐年的年最大流量均不超过7 $\text{万m}^3/\text{s}$,按50年代的水位~流量关系,水位不可能突破9.00m,而实际7年中超过9.00m的达4次之多;1954年的流量92600 m^3/s 时水位为10.22m,但在目前情况下,水位将达到11.50m左右.

若对同样的大通站1960~1994年的年最大流量系列分别用50年代和80年代的水位~流量关系映射,可得到两个不同的下关年最高水位样本.笔者分别对这两个样本进行了频率分析,结果见表5.

根据表5,同一流量样本采用不同时期的水位~流量关系推求出的水位样本均值相差0.48m,相应频率 $P = 1\%$ 、 2% 、 5% 的设计洪水位的离差达0.81~0.94m.由此可见,河道水流特性的变化是引起长江南京段水位抬升的主要原因.

2.4 下游潮位发生变化

许多科学家认为,由于 CO_2 及其它微量气体的大量排放,温室效应明显加剧.过去100年中,地表平均气温上升了0.5 $^{\circ}\text{C}$,导致海洋表层水体热膨胀和南极部分冰盖及大陆冰川的融化,使海平面有所上升.据有关

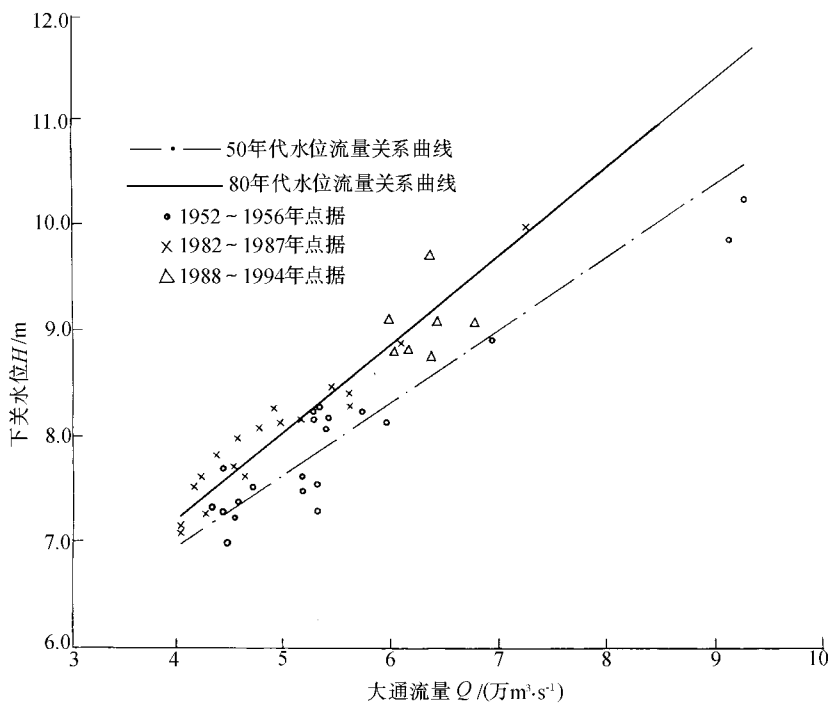


图 4 不同时期下关水位与大通流量的关系

Fig.4 Relationship between the stage of Xiaguan and discharge of Datong in different periods of time

人士分析,近 80 年中,吴淞口海平面上升约 10 cm.海平面上升对长江下游河道的顶托作用,也可能造成下游河段水位抬升.但据分析,下关年最高水位与吴淞年最高潮位的相关关系很微弱,其相关系数只有 0.2.因此,可认为海平面上升不是引起长江南京段年最高水位上升的主要因素.本次研究中未分析海平面改变对下关水位的影响.

综合以上分析可知:由于人类活动的影响,一方面干支流堤防防洪标准提高,围垦湖泊致使湖泊调节洪水的能力降低,治理沿江洼地圩区增加排江能力,使得洪水期上游来水量增加;另一方面沿江兴建码头、围垦江滩、在河道中新建阻水建筑物,造成河道行洪能力降低,水流特性明显改变.两者是抬高南京下关站水位的主要原因.

3 设计洪水位风险分析

工程风险主要是指,在规定的工作年限内工程失效或遭破坏的概率.但完整地说,工程风险应包括 3 个方面:(a)在工程的使用过程中可能出现的事故类型;(b)事故发生的可能性;(c)事故造成的损失.因此,风险分析也应包括这 3 个方面的分析.

3.1 事故类型分析

对于一项具体工程,不同类型事故的风险可能有很大差别,而且与时间和地点也有较大关系.造成堤防工程失效或破坏,危及城市安全的防洪事故有多种形态,如漫溢、滑坡、管涌、风浪淘刷、水流冲蚀、战争以及人为破坏等.虽然人们无法穷举所有的事故类型,但通过对主要事故类型的风险分析,便有助于改进或完善工程的设计.

3.2 事故发生可能性的分析

某类事故是否发生,取决于工程的荷载效应 L 和承载能力 R .当 $L < R$,工程能保持正常工作;当 $L > R$,

表 5 根据不同水位~流量关系推求的下关年最高水位频率分析结果

Table 5 Frequency analysis result of annual highest stage deduced from different stage-discharge relationships at Xiaguan gauge station

选用资料 起迄年份	采用的水位 流量曲线	统计参数			设计水位/m		
		$\bar{H}/\text{m}$	C_V	C_S	$H_{1\%}$	$H_{2\%}$	$H_{5\%}$
1960~1994	50 年代	8.264	0.06	0.00	9.42	9.28	9.08
1960~1994	80 年代	8.739	0.08	0.00	10.36	10.17	9.89

工程整体或局部失效.受众多不确定因素影响,荷载效应 L 和承载能力 R 都是随机变量,因此,堤防工程失效 $\{R < L\}$ 是随机事件,其风险率 P 可下式计算:

$$P = P\{R < L\} = \int_r^\infty \int_0^r f_{RL}(r,l) dl dr \tag{1}$$

式中: $f_{RL}(r,l)$ 是工程荷载 L 和承载能力 R 的联合分布密度函数.由成因分析可知,荷载效应 L 和承载能力 R 两者一般是互相独立的,因此上述算式可改写为

$$P = P\{R < L\} = \int_r^\infty \int_0^r f_L(l) f_R(r) dl dr \tag{2}$$

这里荷载的随机性包括水文和水流风险因素.其中:水文风险因素是指可能造成河段设计流量和水位等水文数据出现偏差的各种不确定性因素;水流风险因素是指可能造成河段水流及渗流形态演变的各项不确定性因素.承载的随机性为工程风险因素,是指工程建筑设计、施工和管理养护过程中存在的各种危及堤防工程安全的不确定性因素^[1].

3.3 事故造成的损失分析

事故造成的损失包括经济损失和非经济损失,损失大小与事故的类型、强度、历时及当地的社会经济条件密切相关.开展这方面分析的难度往往不在于理论计算,而在于细致的资料调查和整理.只有掌握了事故损失的状况,才可能进一步作投资-风险-效益分析,从而确定合理的设计标准.

本文未考虑工程风险因素(本项研究为“南京长江防洪风险与措施研究”的子课题之一,工程风险在另一子课题中有专门的研究),只分析南京河段洪水位超过设计水位 H_d 的风险.因此,本文风险分析的核心是考虑水文和水流风险因素的作用,确定洪水位 H 的概率密度分布 $f_H(h)$.堤防工程的风险率 P 可简化为下式:

$$P = P\{H \geq H_d\} = \int_{H_d}^\infty f_H(h) dh \tag{3}$$

使长江南京段水位抬高的因素是客观存在的,而且随着国家经济建设的发展,人类对自然界的开发利用在广度和深度上的加大,水位抬高的趋势还将会继续发展.那么在现形势下,长江南京段不同设计频率对应的设计水位究竟是多少,或者长江南京段水位超过某指定值的风险到底有多大,自然就成为人们关注的问题.

为回答这个问题,本文提出了3种方案.

a. 流域条件和河段工情的改变是具有“阶段性”的,在一个相对稳定的时期内水位变化可以看作是“准平稳过程”.由于对1970年以前的水位资料又很难通过一致性修正反映水文水流因素的现状,因此我们认为,只取近期资料作风险分析的依据比把明显不一致的样本强加在一起作为分析依据来得合理.故在第1种方案中,直接选取1970~1996年下关站年最高水位资料进行频率分析,得出其 $\bar{H} = 8.70\text{ m}$, $C_V = 0.09$, $C_S = 0.10$.相应不同设计频率南京下关站的设计水位见表6.

1970~1996年的年最高水位资料被认为是可以反映“现状”的,但不到30年的样本容量不能不令人担心其代表性.为此我们又提出了如下2种方案.

b. 改年最大法取样为超定量法取样,选取1970~1996年中大于8.00 m的逐月最高洪水位共53次进行频率分析,得出其 $\bar{H} =$

8.64 m, $C_V = 0.065$, $C_S = 1.20$,然后将待求设计值的年频率转换成次频率,查频率曲线得到相应的设计值.

由于样本取自不同月份,可以认为基本独立,且相当于平均1年2次,所以年频率 P_n 和次频率 P_c 可近似地通过下式转换:

$$P_n = 1 - (1 - P_c)^2 \tag{4}$$

所得相应不同设计频率南京下关站的设计水位列于表6.

c. 虽然1970年前和1970后大通站年最大流量系列取置信水平 $\alpha = 20\%$ 检验时表明前后两段是存在显著差异的,但取置信水平 $\alpha = 10\%$ 检验时,因为 $t_{\alpha/2} = 1.672 > t = 1.358$, $f_{\alpha/2} = 1.925 > f = 1.753$,均值检验和方差检验均通过,表明前后两段样本并没有显著差异,仍可以认为是出自同一总体.因此,利用1922~1994年

表6 各方案不同设计频率南京下关站设计洪水位
Table 6 The design flood stages of Xiaguan gauge station
corresponding to different design frequencies

设计 标准	重现期/a 频率/%	5	10	20	50	100	200
		20	10	5	2	1	0.5
南京下关 站设计水 位/m	方案1	9.34	9.70	10.00	10.35	10.58	10.79
	方案2	9.35	9.70	10.10	10.40	10.70	10.98
	方案3	9.32	9.73	10.10	10.50	10.81	11.08

大通站年最大流量系列进行频率分析,得出不同设计频率大通站的设计流量,再根据 80 年代的下关水位和大通流量相关关系式,求出不同设计频率下下关站的设计水位,结果见表 6.

3 种方案的计算结果差别不大.考虑到随着经济建设的发展,长江南京段水位抬高的趋势还将会继续发展,在此推荐采用 3 种方案中所得设计水位较大者,即第 3 种方案的结果.

同样,根据 80 年代下关水位和大通流量的相关关系式及 1922 ~ 1994 年大通站年最大流量系列频率分析的结果,得出在目前条件下南京下关站水位超过某指定值的风险度,结果见表 7.

表 7 南京下关站出现不同水位的风险度

Table 7 The risk of different flood stages of Xiaguan gauge station							
下关站最高水位/m	9.00	9.50	10.00	10.22	10.50	11.00	11.50
相应重现期/a	3	7	18	27	50	167	588
超过该水位的风险度/%	31.00	14.50	5.70	3.70	2.00	0.60	0.17

应当指出,由于上述风险分析并未考虑其中的工程风险因素,因此只能说明在现行条件下,南京下关站最高水位超过设计水位的风险度,并不能说明堤防工程防洪安全的风险度.虽然洪水风险分析是防洪风险分析的基础,但在城市防洪中仅仅考虑水文、气象等不确定性而引起的风险是不够的,还必须考虑防洪堤失稳、防洪闸失稳、河床冲刷进而危及防洪堤的安全等不确定性引起的风险.

本文得到朱元生教授和华家鹏副教授的指导,特致谢意!

参 考 文 献

1 朱元生.长江南京段设计洪水位的风险分析.水文,1989(5):8~15

Risk Analysis of Design Flood Stage of Nanjing Section
of Yangtze River Flood-Protecting Embankment

Li Guofang Huang Zhenping

(College of Water Resources and Environment ,Hohai Univ. ,Nanjing 210098)

Zhang Zhiqiang Ye Song

(Nanjing Yangtze River Manag. Bureau ,Nanjing ,210011)

Abstract The flood stage of the Yangtze River at Nanjing tends to rise in the past decades. For the safety of the flood-protecting embankment, it is necessary to recalculate its design flood stage. The causes of flood stage rise are analysed, and the risk for different stages is calculated with three schemes. Results show that the return period of the highest stage of 10.22 metres observed at the Xiaguan gauge station is 27 years, and the design flood stage corresponding to the return period of 100 years is about 10.8 metres.

Key words stage; design flood stage; risk