

4 p. 18

93.5(2)
99-107

太湖流域水文数学模型

梁瑞驹 程文辉 蔡文祥 马燮铤

p 334.92

(河海大学水资源水文系, 南京 210024)

摘要 本文针对太湖流域研制了全流域水文数学模型, 该模型包括河流、湖泊模拟、边界条件模拟、降雨径流模拟、工程情况及控制运行方式模拟以及骨干河网中水流运动模拟五个方面。模型经 1984、1985 两年资料进行了上述五个方面的全面率定和检验, 模拟结果与实测基本吻合。本模型全面通用, 因此可以用来研究太湖流域洪水、枯水及调度等诸方面课题, 本文简要地介绍应用该模型研究围垦的影响、规划工程的防洪效果及设计典型年选择三方面问题。

关键词 太湖流域, 水文数学模型, 规划工程防洪效果, 围垦影响, 典型年选择

湖流
洪水

太湖流域三面滨江临海, 西部为山丘区。流域面积 36500km², 其中丘陵山地及湖泊水网面积各占 1/6, 其余 2/3 为平原洼地^①。太湖基本上位于流域中心, 一般情况下, 水流从太湖西、北方向流入, 东、南方向流出, 最后排入长江及杭州湾。沿江外排河道, 除黄浦江外, 均已建闸控制, 但由于闸门启闭受潮汐影响, 因此沿江河道水流也感受潮汐影响。

太湖流域与水有关的灾害有洪涝、干旱和水质三方面。随着社会经济的发展, 这三方面的灾害日趋频繁和严重。因此治理太湖成为促进该地区经济发展的制约因素。

太湖流域是水网地区, 水流十分复杂。一个工程措施, 其利弊得失、影响范围等定量关系, 不是用简单方法能解决的。为此需要建立尽可能全面、详细、具有相当精度的通用系列模拟(数学模型), 才能科学地、全面地给出各项工程措施或调度措施的定量影响。

一、数学模型

数学模拟包括流域河网、湖泊模拟, 边界条件模拟, 降雨径流模拟, 工程情况及控制运行方式模拟, 骨干河网水流运动模拟等五个方面。

1. **数学模拟范围** 包括整个太湖流域, 但可以不包括各自排区。为了减少计算工作量, 针对不同目标, 模拟范围可以作相应调整。对研究太湖流域防洪问题时, 可以忽略上海市及浦东、浦西区。

2. **流域河网、湖泊模拟** 模拟计算中的河网、湖泊是在天然河网湖泊的基础上进行合并、概化。概化是根据等效原理, 即不论是断面变化的单一天然河道, 或若干条大致平行的天然河道合并成一条概化河道时, 要求概化河道的过水能力等于被概化的天然河道。概化河网

① 水利部太湖流域管理局, 太湖水利文集(第一册), 1989。

本文于 1991 年 10 月 21 日收到, 1992 年 6 月 8 日改回。

如图 1 所示,共有湖泊 40 个,节点 340 个,652 条河道,其中具有边界条件的外河道 43 条。

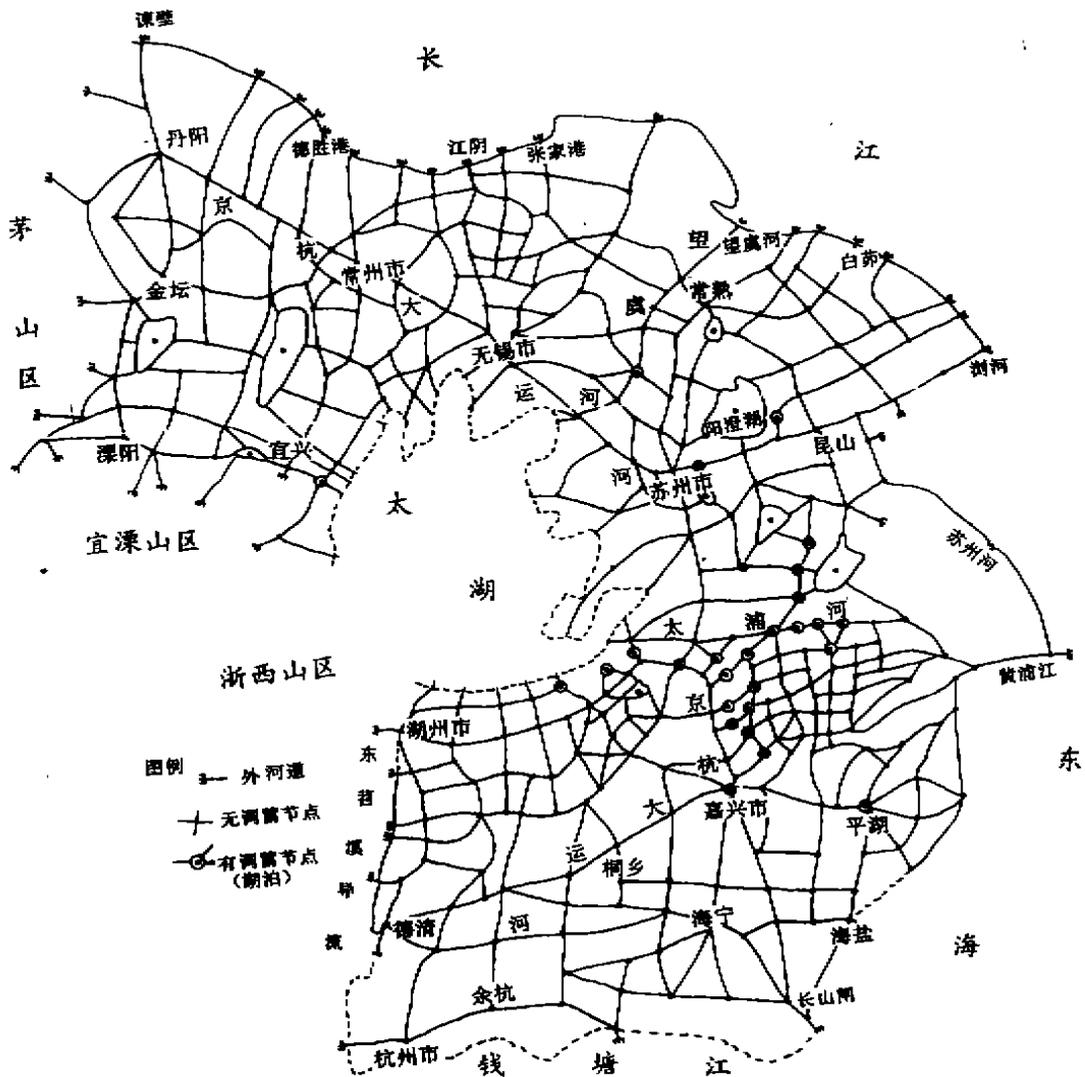


图 1 太湖流域河网概化图

Fig. 1 Simplified network of rivers for Taihu Lake drainage basin

概化河网可以模拟水流的输运。但由于概化河网的容积远远小于流域内各区的圩外调蓄容积,这是由于一部分小河、叉道、塘堰、湖泊、洼地的调蓄容积没有包括在概化河网中。虽然它们对输水作用不大,但其调蓄作用不可忽视。为了模拟概化河网以外的调蓄作用及模拟概化河道沿程汇入或取引的水量,引入了陆域宽度概念。

3. 边界条件模拟 影响流域水情变化而又不受流域内人类活动影响的边界条件有二

类,即流域降雨、蒸发及沿长江、杭州湾潮位。

根据行政区划、地形及水系等情况将整个流域的平原地区划分成 11 个雨区,山丘区划分成 7 个雨区。用各雨区日雨量及蒸发量过程来模拟流域降雨、蒸发的时空变化。

各外排河道出口处的潮位过程可根据长江口及杭州湾实测资料推求得。

4. 降雨径流模拟 降雨径流模拟分成产流与汇流两部分,产流过程是指降雨经过扣损后变成净雨,汇流过程是指各分区的净雨如何汇流到出口控制断面或排入圩外骨干河网。

1) 降雨产流模拟 不同下垫面具有不同的产流规律,根据本地区资料下垫面主要有三类:水面、水田、旱地及非耕地。

水面产流模拟:逐日水面产流(净雨深)为日降雨量与日蒸发量之差。

水田逐日产流:根据作物生长期的需水过程及水稻田适宜水深上、下限,耐淹水深等因素逐日进行水量平衡调节计算求得。

平原水网地区地下水位较高,土壤含水量易于得到补充,故采用一层蒸发模型的蓄满产流公式计算旱地产流过程。

对上述三种下垫面采用相应的产流模型,分别计算各自的产流过程,以该区的水面、水田和旱地的比例作权重,求出各雨区的产流过程。

2) 汇流模拟 由于山区与平原区的汇流条件不同,故分山丘区与平原区两种不同地形分别来模拟其汇流过程。

山丘区分江苏境内的茅山宜溧山区及浙西山区。按进入平原区的河流位置,茅山宜溧山区划分成相互独立的 12 个子流域分别模拟。山丘区面上分布着众多塘坝和中小型水库,这些塘坝、中小型水库控制着部分面积,在汇流过程中起着调蓄水量的作用。水量调节可分成兴利调节和洪水调节,蓄在兴利库容中的水量,根据兴利要求,如灌溉、给水或发电来泄放。防洪库容只能起到滞洪调蓄。水库和塘坝拦蓄时,先使用兴利库容进行调节,只有当兴利库容蓄满后,多余的净雨深才能作滞洪调蓄。水库、塘坝的调蓄作用,在于将产流计算的净雨深在时间上重新分配。将分配后的净雨过程,用瞬时单位线推求得山区出口断面处的流量过程,作为平原河网相应外河道的边界条件。瞬时单位线的参数,可根据流域特征^①求得。

平原区的汇流计算,目前尚无成熟的理论和计算方法。本次模拟计算采用经验汇流曲线,日净雨量按 40%,30%,30% 的比例在相继三天内汇入河网。汇流曲线是否正确,由率定结果来评估和判断。对于平原圩区,还应考虑排涝模数的限制,江苏省和浙江省的排涝模数均采用 $0.5\text{m}^3/\text{s km}^2$,将超过排涝模数的那部分水量被迫蓄在圩内,并一有机会立即排出,图 2 表示非圩区与圩区的汇流过程。

平原区的汇流过程作为圩外河网的旁侧入流过程,它等于河道陆域宽与径流深之乘积。

5. 工程情况及运行方式模拟 工程情况包括:河道的开挖、控制建筑物(如节制闸、套闸)及泵站等。在数学模拟中不仅要正确地模拟这些工程措施的规模、位置,而且还要模拟这些工程措施的控制运行方式。

^① 江苏省水文总站,江苏省水文手册。

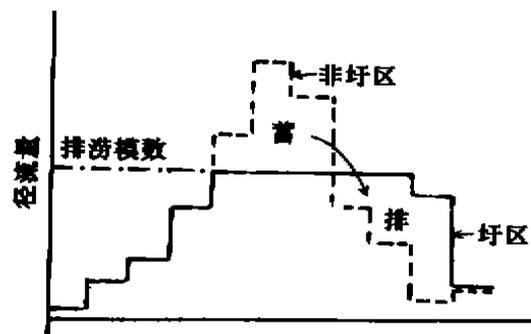


图2 圩区与非圩区汇流过程示意图

Fig. 2 Schematic concentration of enclosed and non-enclosed region

6. 河网水流运动模拟 山区径流、平原区径流汇入河网后,水流在河网中如何运动?这本身是汇流模拟的一部分,但由于这部分汇流可以用水力学方法——河网非恒定流计算来模拟^①。

7. 分块处理 沿长江及杭州湾建闸控制,闸下为潮位过程,变化剧烈。闸门的启闭受控于潮位,因此要求计算时步长不能太长,否则无法正确地模拟闸门的启闭。故对沿江及杭州湾因闸门启闭而感潮影响地区的计算时步长采用 15min。为了减少计算工作量,流域内其它地区均采用时步长为 1h。

两种不同时间步长的计算分区之间的衔接采用显式联接。显式联接应选择适当位置,否则容易引起计算上的不稳定。

二、模型率定

通过模型率定可以全面地检验模型的结构是否合理,模型中的参数选用是否正确。对于大水年份圩区蓄水情况不清楚,对于枯水年份灌溉需水短缺情况不清楚,故这两种年份不宜作为率定的依据。为此选择没有水旱灾害的 1984、1985 二年作为模型率定的依据。

模型率定时的工程情况,沿江各闸的运行方式是已知的,即各个挡潮闸门是关闭的抑开闸引水或排水的记录可用一系列信息来模拟。

要率定的主要参数有水面蒸发系数、蒸发折算系数、蓄水容积曲线指数、流域平均蓄水容积、水稻生长期需水系数及适宜、耐淹水深、河道糙率等。这些参数参考了各项单独研究成果^{②③}并作一些修改补充。

表1 计算与实测沿江各闸5—9月引排水量比较(引水为正、排水为负)

单位:10⁶m³

Tab. 1 Comparison between simulated and observed diversion and drain water for sluice gates along the Changjiang River from May to Sept.

河名	谏壁	九曲河	新孟河	德胜港	江阴	张家港	十一圩	望虞河	浒浦	白茆	七浦	杨林	浏河	合计	
1984	实测	0.04	0.59	1.77	1.94	-0.76	-0.99	-0.30	-4.11	-1.87	-3.28	-1.28	-1.16	-10.73	-20.14
	计算	0.06	0.76	1.89	2.17	-0.74	-0.99	-0.13	-3.83	-1.98	-3.41	-1.63	-1.11	-8.23	-17.15
1985	实测	1.37	1.72	3.23	3.14	-0.01	-0.18	-0.18	-4.62	-2.31	-3.68	-0.62	-0.74	-8.21	-11.09
	计算	1.47	1.35	2.96	3.10	-0.05	-0.02	-0.11	-4.47	-2.40	-4.27	-0.58	-0.54	-7.18	-10.74

① 程文辉。明渠非恒定流计算。1985。

② 河海大学水资源水文系等。江苏省太湖流域水文分析报告,1990。

③ 河海大学水资源水文系等。太湖流域江苏地区产汇流计算,1989。

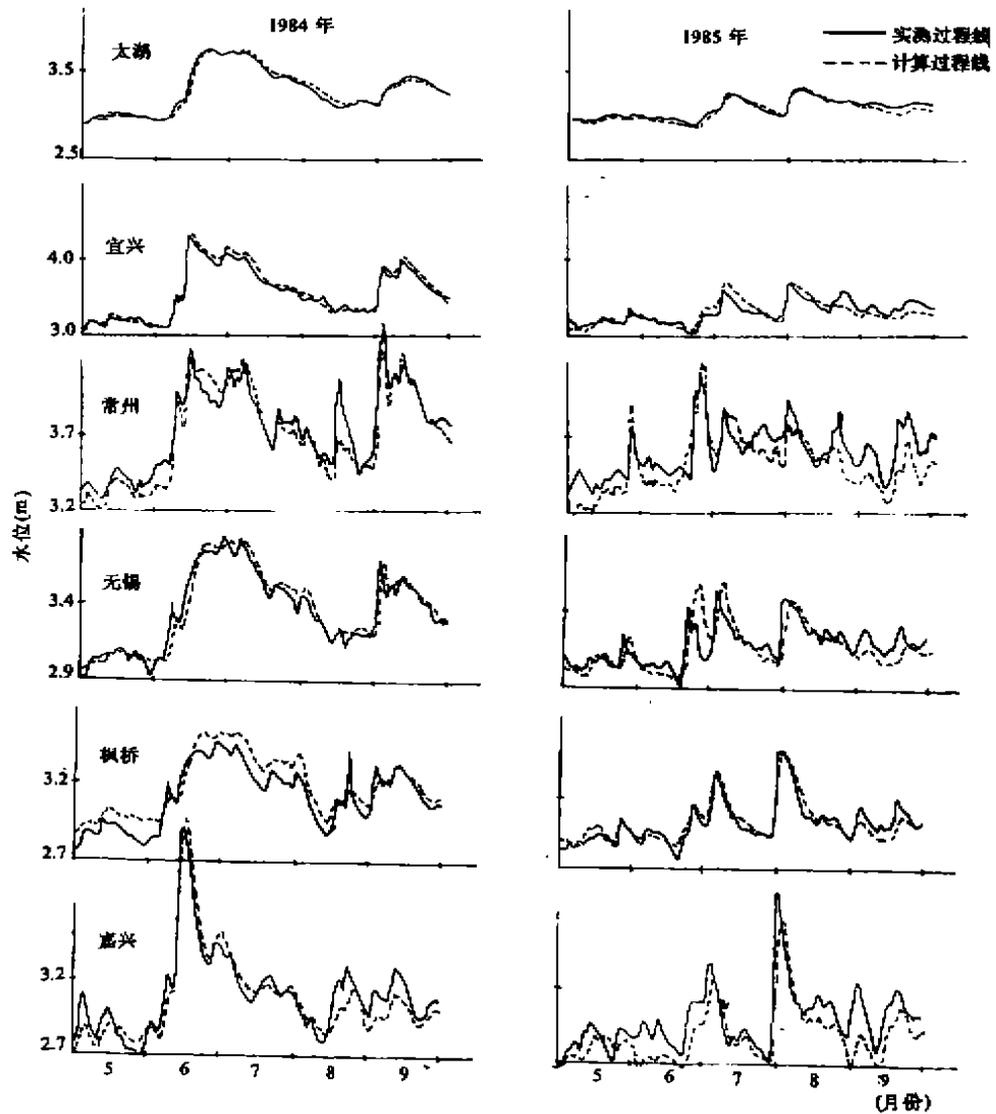


图 3 主要断面计算与实测水位过程

Fig. 3 Comparison between observed and simulated water level for main cross-sections

计算与实测各主要断面水位、流量、沿江引排水量及巡测线交换水量如图 3 及表 1, 2, 3 所示。

由图及表可见, 整个流域内各区代表站水位过程拟合得满意, 最高水位误差小于 10cm 占 77%。沿江各闸引排水量也基本吻合。由于浦西片的嘉定县部分涝水排入浏河, 而模拟计算中忽略了此部分水量, 因此浏河的计算排水量比实测小(约 20%)亦是合理的。流量和巡测线交换水量拟合得亦满意。

表 2 计算与实测流域各断面最高日平均水位比较
单位:m

Tab. 2 Comparison between simulated and observed max. daily average water level

地 名	1984		1985	
	实 测	计 算	实 测	计 算
太 湖	3.96	3.94	3.46	3.49
宜 兴	4.33	4.35	3.71	3.73
常 州	4.46	4.47	4.11	4.20
无 锡	3.86	3.82	3.56	3.61
枫 桥	3.50	3.55	3.49	3.40
平 望	3.77	3.91	3.62	3.57
嘉 兴	4.20	4.27	3.84	3.65
海 宁	4.41	4.51	3.91	3.71

表 3 主要流量站及巡测线 5—9 月计算与实测水量比较
单位:10⁶m³

Tab. 3 Comparison between simulated and observed discharge from May to Sept.

地 名	1984		1985	
	实 测	计 算	实 测	计 算
洛 社	2.75	2.68	2.30	2.39
蠡 桥	1.69	1.51	-0.11	0.51
埭 亭	2.60	2.55	1.71	1.64
枫 桥	2.81	2.84	2.09	2.26
瓜 泾口	2.84	2.28	1.40	1.59
平 望	14.44	15.00	9.02	10.88
望虞河东侧巡测线	17.22	14.77	10.56	11.45
杭嘉湖入浦巡测线	26.22	25.70		

三、应 用

由于本模型是全面的、系统的模拟,因此具有较强的通用性。我们曾用此模型研究过:1)太湖流域防洪规划;2)太湖流域供水规划;3)太湖流域洪水及枯水调度运行方式研究;4)浦东地区纳潮对上海市区防汛的作用及最优纳潮运行方式;5)太湖流域水资源保护;6)黄浦江污水回荡等几方面研究工作。

本文仅以太湖流域防洪规划方面的某些问题的探讨来说明本模型应用的一个例子。分别计算三种情况:现状工情、恢复解放以来围垦的水面及规划工情。

解放以来,特别是 60 年代后期大量围湖造田,全流域围垦面积达 528.60km²^①,如表 4 所示。

表 4 解放以来太湖流域围垦面积

Tab. 4 Enclosed area of Taihu Lake drainage basin since 1950

地 区	太 湖	洮 滬片	阳 澄片	淀 泖片	杭 嘉 湖	嘉 平
围垦面积(km ²)	160.22	182.14	48.37	78.49	38.83	20.55

围垦面积约占原来水面的 1/10。由于调蓄容积的减小,给洪涝灾害增加了多少危害?

太湖流域规划中 10 大骨干工程^{②③},其效果如何?亦是人们关心的一个大问题。太湖流域按 1954 年典型作为防洪规划的依据,1991 年发生了一场特大洪水以后,设计典型年是否应改变?由于 1991 年暴雨时空分布非常不均匀,而 1954 年暴雨时空分布相当均匀。30 天、60 天全流域平均面雨量 1991 年大于 1954 年,而 90 天流域面雨量 1991 年小于 1954 年。这两种典型对太湖流域何者更为不利?

① 中国科学院南京地理与湖泊研究所滩地组。太湖流域围湖利用统计表。1985。

② 水利电力部太湖流域管理局。太湖流域综合治理总体规划方案。1987。

③ 长江水利委员会。太湖流域综合治理骨干工程可行性研究报告。1985。

针对三种情况进行模拟计算。第一种为现状工情,凡目前已建闸控制的环湖口门只能向太湖泄洪不能泄太湖洪水,其它环湖口门敞开,大浦闸不泄洪。第二种为现状工情,但按表 4 修改太湖、隔湖及各片圩外调蓄容积,即将解放以来围垦的水面还原,其运行方式同上。第三种为规划完全实施后,并按原规划意图运行。由于环湖控制线的建立,除了太浦河、望虞河两条排洪河道外,其余有闸控制的口门,只准向太湖排泄涝水而不能泄太湖洪水。

模拟计算时间 1954 年 5 月 1 日至 7 月 31 日共 92 天,1991 年 6 月 11 日至 7 月 15 日共 35 天。

模拟计算成果如表 5 及表 6。

表 5 各种工况日平均最高水位*

单位:m

Tab. 5 Maximum water level for various situations

地 名	警戒水位	1954				1991			
		实 测	现状工情	围垦前	规 划	实 测	现状工情	围垦前	规 划
太 湖	3.60	4.65	4.79	4.70	4.48	4.79	4.93	4.79	4.72
太 宜	4.20	5.13	5.05	4.93	4.70	5.29	5.78	5.58	5.54
金 坛	5.00		5.55	5.42	5.12	6.37	6.86	6.64	6.35
无 锡	3.59	4.73	4.67	4.60	3.89	4.88	5.04	4.99	4.78
枫 桥	3.50	4.37	4.27	4.19	3.42	4.31	4.50	4.40	4.10
常 熟	3.58	4.26	3.76	3.71	3.18	4.20	4.28	4.21	3.82
平 望	3.50	4.35	4.00	3.92	3.43	4.16	3.89	3.82	3.46
嘉 兴	3.50	4.38	4.03	3.98	3.70	4.04	3.74	3.68	3.45

* 实测为瞬时最高水位;1991 年所使用主要是报讯资料,少数残缺部分依靠相关推算。

表 6a 全流域水量平衡 单位:10⁸m³

Tab. 6a Water balance for whole basin

项 目	1991			1954	
	实测*	现状	规划	现状	规划
全流域产水量	125.2	125.95	125.95	190.42	190.42
望虞河西排江		20.83	24.08	14.48	23.34
望虞河排江	26.4	4.62	11.24	6.67	23.05
望虞河东排江	17.3	18.20	12.10	31.49	18.93
南排	4.8	5.39	5.81	15.09	21.92
东排(入黄浦江)	25.8	22.12	22.76	53.34	48.45
全流域蓄水及其它	50.9	53.73	49.96	69.35	54.73

* 管惟庆,太湖流域 1991 年洪水水情分析,中国水利,1992 年 2 月。

表 6b 湖区水量平衡 单位:10⁸m³

Tab. 6b Water balance for Taihu Lake

项 目	1991			1954	
	实测	现状	规划	现状	规划
浙西山区入湖	11.9	11.12	12.77	36.37	41.01
湖西入湖	19.5	19.75	22.23	19.68	19.61
湖东出湖		9.64	-0.23	33.31	0.00
望虞河排洪	11.4	-0.50	6.62	0.21	21.45
太浦河排洪		0.0	7.48	0.0	22.37
湖南入湖	0.6	1.00	0.54	6.33	3.67
湖区产水量	12.0	12.99	12.99	17.40	19.00
太湖蓄水量	32.6	35.72	34.66	46.26	39.47
起调水位(m)	3.46	3.41	3.25	2.80	2.80
最高水平(m)	4.79	4.93	4.72	4.79	4.48

1. 1991 年洪水

现状工情:太湖最高水位比 1991 年实测高出 14cm,湖西区高 60cm 左右,武阴区高

35cm 左右,澄锡虞区及淀泖区高 20cm 左右,阳澄区高 10cm 左右。这是因为 1991 年实际情况,流域面上有大量沉圩及破圩,因此有很大一部分水量蓄在流域面上,而模拟计算是假定不破圩,涝水按排涝模数全部排入河网。故模拟计算的 1991 年最高水位比实测值高是合理的。因为 1991 年暴雨中心在湖西,故计算最高水位与实测最高水位之间差值自北向南逐渐减小。而杭嘉湖区由于太浦闸泄洪,故实测水位反而比计算水位高 20—30cm 左右。计算与实测最高水位之间误差是有其成因的。

从太湖最高水位来看,规划实施后,1991 年比 1954 年高 24cm,因此 1991 年比 1954 年更为不利。

2.10 大骨干工程的作用

虽然开挖了望虞河与太浦河两条骨干的排洪河道,但沿湖其它出湖口门均建闸控制,不允许排太湖洪水。望虞河与太浦河泄洪时也受望亭及平望水位控制,泄洪量受限制。10 大骨干工程实施后,太湖洪水位比现状工情降低 20—30cm。

对于地区防洪效果,则取决于雨情,遇 1954 年型洪水,工程实施后,基本上解除了流域洪水威胁,但遇 1991 年型洪水,江苏省绝大部分地区,受当地暴雨影响,洪涝灾害仍然十分严重。

规划后排江水量的分配有很大改变,阳澄区自排水量大幅度减小,湖西区抽排水量大幅度增加。

3. 围垦对洪水的影响

水面围垦对不同雨情影响不一样。对于像 1991 年型集中暴雨影响大些,而对于像 1954 年连续降雨则影响较小。一般说,解放以来围垦的 528.6km² 水面导致太湖水位抬高 9—14cm,湖西区抬高 12—20cm;澄锡虞、阳澄淀泖区、杭嘉湖区抬高 5—10cm 左右。

鉴于工程调度方案需根据实际情况而定,有多种可能的选择;模型中的若干参数有时空变化,上述讨论是概化性的。本模型的运用需结合具体情况进行。

HYDROLOGICAL SYSTEM MODEL FOR TAIHU LAKE DRAINAGE BASIN

Liang Ruiju Cheng Wenhui Cai Wenxiang Ma Xieyao

(*Hydrological Department, Hehai University, Nanjing 210024*)

Abstract

This hydrological system model for Taihu Lake Drainage Basin consists of five sub-models, namely: model for network channels and lakes, model for boundary conditions; model for rainfall and runoff; model for hydraulic projects and their management; model for unsteady flow in network channels. The model was calibrated and tested comprehensively using the observed data in 1984 and 1985. The results are consistent with those observed. The model has been applied for studying flood, drought and management of Taihu Lake Drainage Basin. As an example of applying, the influence of land reclamation from lake on flood damage, the flood damage reduction after all projects completed and the choice of design flood year were introduced briefly in this paper.

Key words Taihu Lake Drainage Basin, hydrological system model, flood damage reduction, effect of reclamation, design flood year